分类号：O572　　单位代码：10422
密　级：　　学　　号：201011235

山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

博士学位论文

Dissertation for Doctoral Degree

论文题目：PandaX地下暗物质实验电子学与数据获取系统的研制
Design and Realization of Electronics and Data acquisition system for the PandaX Experiment

作者姓名　仇祥祥
培养单位　物理学院
专业名称　粒子物理与原子核物理
指导教师　王萌　教授
合作导师

2015年　05月　20日

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，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：仕祥祥　　日　期：2015.05.29

关于学位论文使用授权的声明

本人同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的印刷件和电子版，允许论文被查阅和借阅：本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：仕祥祥　导师签名：　日　期：2015.05.29

目录

第一章 引言 1

1.1 暗物质证据 1

1.1.1 星系旋转曲线 1

1.1.2 星系团 2

1.1.3 宇宙微波背景辐射 5

1.2 暗物质 6

1.2.1 暗物质动力学分类 7

1.2.2 暗物质粒子分类 8

1.3 大质量弱相互作用粒子—WIMPs 10

1.4 选题背景 12

1.5 论文结构 13

第二章 暗物质探测 15

2.1 WIMPs 暗物质探测方法简介 15

2.2 地下暗物质实验室 15

2.3 暗物质直接探测实验 18

2.3.1 暗物质直接探测实验：DAMA/LIBRA 18

2.3.2 暗物质直接探测实验：CDMS-II 20

2.3.3 暗物质直接探测实验：CoGeNT 21

2.3.4 暗物质直接探测实验：CRESST 21

2.3.5 暗物质直接探测实验：XENON 100 22

2.4 暗物质间接探测实验 22

2.4.1 暗物质非直接探测：带电粒子 22

2.4.2 暗物质非直接探测：光子 25

2.4.3 暗物质非直接探测：中微子 26

第三章 WIMPs 信号及氙闪烁体 29

3.1 WIMPs 信号 29

3.2 WIMPs 探测材料：氙 31

3.2.1 氙的物理特性 31

3.2.2 氙的闪烁信号特性 32
3.2.3 氙的电离信号特性 35
第四章 PandaX 地下暗物质探测器 37
4.1 制冷及气体处理系统 38
4.2 时间投影室（TPC） 39
4.3 屏蔽体系统 40
第五章 PandaX 电子学与数据获取系统—EnDAQ 43
5.1 EnDAQ：硬件 44
5.1.1 EnDAQ：VME 机箱 44
5.1.2 EnDAQ：NIM 机箱 48
5.1.3 EnDAQ：插件简介 50
5.2 EnDAQ：硬件设计 59
5.2.1 时钟逻辑 63
5.2.2 数据零压缩技术 65
5.3 EnDAQ：触发模式设计 67
5.4 EnDAQ：软件设计 69
5.4.1 数据格式 71
第六章 PandaX 电子学与数据获取系统升级 75
6.1 EnDAQ：硬件升级 76
6.1.1 多数逻辑 76
6.1.2 波形放大器 78
6.1.3 触发时间同步 78
6.2 EnDAQ：软件升级 79
6.3 EnDAQ：触发升级 81
第七章 PandaX 电子学与数据获取系统：数据获取模式和效率统计 85
7.1 EnDAQ：数据获取模式 85
7.1.1 基于 LED 光源的光电倍增管阵列增益刻度 85
7.1.2 基于 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 放射源的 PandaX 探测器检测 86
7.1.3 基于 ^{252}Cf 放射源的 PandaX 探测器模拟 WIMP 粒子信号 89
7.2 EnDAQ：系统效率统计 91
7.2.1 数据获取事例平均大小 92
7.2.2 数据获取传输速度 94
7.2.3 数据获取触发效率 100

第八章　总结与展望 101

Contents

Chapter 1 Introduction 1
1.1 Dark matter evidence 1
1.1.1 Galaxy rotation curve 1
1.1.2 Galaxy clusters 2
1.1.3 Cosmic microwave background 5
1.2 Dark matter 6
1.2.1 Dark matter-kinematic types 7
1.2 Dark matter-particle types 8
1.3 Weakly interacting massive particles (WMIPs) 10
1.4 Background and introduction 12
1.5 Background and introduction 13
Chapter 2 Dark matter searchs 15
2.1 Dark matter search method 15
2.2 Underground Dark Matter laboratory 15
2.3 Dark Matter Direct search 18
2.3.1 Direct search: DAMA/LIBRA 18
2.3.2 Direct search: CDMS-II 20
2.3.3 Direct search: CoGeNT 21
2.3.4 Direct search: CRESST 21
2.3.5 Direct search: XENON 100 22
2.4 Dark Matter Indirect searchs 22
2.4.1 Indirect search: charged particles 22
2.4.2 Indirect search: Photons 25
2.4.3 Indirect search: neutrinos 26
Chapter 3 WIMPs Signals and Xenon 29
3.1 WIMPs Signals 29
3.2 WIMPs detector material: Xenon 31
3.2.1 Xenon physical character 31

3.2.2 Xenon scintillation character 32
3.2.3 Xenon explosion character 35
Chapter 4 PandaX underground dark matter detector 37
4.1 Cryogenic and gas-handling system 38
4.2 Time Projection Chamber（TPC） 39
4.3 Passive shield 40
Chapter 5 PandaX electronics and data acquisition system(EnDAQ) 43
5.1 EnDAQ：Hardware 44
5.1.1 EnDAQ：VME Crates 44
5.1.2 EnDAQ：NIM Crates 48
5.1.3 EnDAQ：Modules Introduction 50
5.2 EnDAQ：Hardware Design 59
5.2.1 Clock Logic 63
5.2.2 Data Zero Suppression 65
5.3 EnDAQ: Trigger Mode Design 67
5.4 EnDAQ: Software Design 69
5.4.1 Data Format 71
Chapter 6 PandaX electronics and data acquisition system: Hardware Design 75
6.1 EnDAQ：Hardware Upgrade 76
6.1.1 Majority Logic 76
6.1.2 Spectro-amplifier 78
6.1.3 Trigger Time Tag synchronization 78
6.2 EnDAQ：Software Upgrade 79
6.3 EnDAQ：Trigger Upgrade 81
Chapter 7 PandaX electronics and data acquisition system: Data Acquisition Mode and Efficiency 85
7.1 EnDAQ: Data Acquisition Mode 85
7.1.1 Gain calibration of photomultiplier with LED 85
7.1.2 PandaX detector status calibration with ^{137}Cs and ^{60}Co 86
7.1.3 WIMPs signals simulation of PandaX detector with ^{252}Cf 89

7.2 EnDAQ: System efficiency 91
7.2.1 Mean value of Events 92
7.2.2 Data transfer rate 94
7.2.3 Trigger efficiency 100
Chapter 8 Summary and outlook 101

插图

1.1 左图表征 NGC6503 螺旋星系质量分布的旋转速度与半径关系，虚线代表的是可见物质质量分布贡献，点线是星系气体质量分布贡献，点画线是黑洞质量分布贡献 (Begeman et al. 1991)。右图是 NGC6503 天文观测照片 2

1.2 左图形象的解释了引力透镜的原理和现象，右图是 NASA 哈勃深空望远镜观测到的 CL0024+1654 星系团 3

1.3 左图：哈勃望远镜观测到的 CL0024+17 星系团。右图：在哈勃望远镜观测图像的基础上添加引力分布，引力分布说明暗物质分布在星系团中心和外围环带 4

1.4 左图：发生星系碰撞后形成的子弹星云的质量分布图，粉红色是重子物质，蓝色是暗物质。右图：NASA X 射线图 4

1.5 宇宙微波背景辐射的各向异性能谱，数据来源于 WMAP 实验 6

1.6 宇宙大尺度结构 7

1.7 WIMPs 粒子脱耦过程：实线和虚线分别代表粒子从早期宇宙脱耦后，处于热平衡态和被冻结的粒子丰度的变化。曲线描述了具有不同湮灭截面的粒子的丰度变化，说明 WIMPs 粒子的遗迹丰度和质量无关与散射截面有关。 12

1.8 图中蓝线是热产生 WIMP 在宇宙膨胀影响下遗迹和温度的关系，粉色曲线是非热产生 WIMP 遗迹曲线，起初非热产生暗物质丰度为零。 13

2.1 世界范围内地下实验室分布图 16

2.2 左图：地下实验室宇宙线 μ 子流强对比：顶部坐标标志岩石覆盖，底部坐标标志屏蔽层等水深，纵坐标标志宇宙线 μ 子流强。右图：CDEX 实验测量锦屏地下暗物质实验宇宙线 μ 子流强和其他地下实验室的对比。 16

2.3 已经应用的 WIMP 直接探测技术和相应的直接探测实验 17

2.4 WIMPs 粒子信号随地球公转的年调制现象 19

2.5 DAMA 实验年调制数据分析结果，疑似 WIMPs 粒子能量在 2-6keV 之间 19

2.6 CDMS-II 实验结果：左图红色实线是电离信号能区，垂直虚线是反冲能量的阈值，洋红色虚线是电离信号阈值。两个疑似事例落在红线区域以内。右图是对疑似信号的归一化分析，红色矩形框内的是疑似事例。 20
2.7 CoGeNT 实验年调试结果: 点线是数据的拟合曲线，实线是 7 GeV/c^2 WIMP 粒子的年调制理论曲线，没有看到高置信度的 WIMP 年调制信号。 21
2.8 CRESST-II 实验结果和 CDMS-II, XENON100, 和 EDELWEISS-II 等实验对比 22
2.9 XENON100 探测器结构框架图 23
2.10 XENON100 实验结果： 24
2.11 左图：不同实验对正电子超出的测量，红色和紫色源于 PAMELA2008 年和 2010 年实验结果，黑色源于 FermiLAT2011 年实验结果。中图：PAMELA 对反质子流量的测量。右图：正负电子能谱在几百个 GeV 能谱趋于平缓，浅灰色是天文物理学本底，红色区域是异常区域。 . . 24
2.12 AMS-02, PAMELA, 和 Fermi 实验给出的正电子超出实验结果 25
2.13 FermiLAT 对 10 个 dSphs 观测结果经过分析后给出的下限 26
2.14 部分直接探测和间接探测实验给出的自旋独立 WIMP 粒子与质子的散射截面关于 WIMP 粒子的质量分布 27
2.15 直接探测实验和间接探测实验结果的对比，DAMA, CoGeNT, 和 CDMS 是直接探测实验，图中相应的是这些实验非直接探测的结果。Super_Kamiokande 的实验数据来自 $\nu\bar{\nu}$ 道 28

3.1 锗，氙和氩自旋独立核反冲能谱 31
3.2 液氙的闪烁光和电离电子产生原理 33
3.3 液氙的闪烁光和电离电子随外加电场的变化, 蓝点是闪烁光产额，红点是漂移电子电离光产额 34
3.4 逃逸电子在液氙中的漂移速度与外加电场之间的关系 35

4.1 PandaX 探测器 37
4.2 PandaX 地下暗物质探测器结果 38
4.3 PandaX 地下暗物质探测器: 制冷系统 38
4.4 PandaX 地下暗物质探测器: 时间投影室（TPC） 39
4.5 PandaX 地下暗物质探测器: 屏蔽体 40

5.1 PandaX 电子学与数据获取系统 43

5.2 VME8100 机箱 . . . 45
5.3 VME8100 控制界面 . . . 45
5.4 VME 机箱 3U 和 9U 混合结构 . . . 46
5.5 VME 总线功能框架图 . . . 48
5.6 NIM8301 机箱 . . . 49
5.7 NIM8301 控制界面 . . . 49
5.8 左图：A3818 连接插件示意图。右图：A2818 连接插件示意图。 . . . 51
5.9 CAEN V2718 功能框架图和实物图 . . . 51
5.10 CAEN V1724 功能框架图和实物图 . . . 52
5.11 CAEN V814 功能框架图和实物图 . . . 53
5.12 CAEN V830 功能框架图和实物图 . . . 54
5.13 CAEN V1495 功能框架图和实物图 . . . 55
5.14 CAEN N638 逻辑框架图和实物图 . . . 56
5.15 左一：Phi.779 左二：Phi.794 中图：Phi.740 右一和右二：ORTEC 575A 前面板和后面板图 . . . 57
5.16 Phi.794 逻辑框架图 . . . 58
5.17 PandaX 一期电子学与数据获取系统 . . . 60
5.18 PandaX 高压、信号耦合电路 . . . 60
5.19 V1724 数据获取逻辑 . . . 61
5.20 模拟和信号产生逻辑 . . . 61
5.21 模拟和信号测试 . . . 61
5.22 V1724 触发逻辑 . . . 62
5.23 V1724 事例组装 . . . 63
5.24 V1724 时钟逻辑 . . . 64
5.25 V1724 菊花链时钟逻辑示意图 . . . 65
5.26 V1724 菊花链时钟逻辑测试 . . . 65
5.27 V1724 菊花链时钟逻辑测试结果 . . . 66
5.28 V1724 零压缩模式 . . . 67
5.29 V1724 零压缩模式事例 . . . 67
5.30 CAEN V1495 默认用户 FPGA 逻辑框架 . . . 68
5.31 左图：试运行期间原始触发信号生成逻辑。右图：升级后原始触发信号生成逻辑。 . . . 69
5.32 PandaX 电子学与数据获取系统软件框架图 . . . 70
5.33 PandaX 电子学与数据获取系统软件流程图 . . . 71

6.1 200KHz 高压电源噪声 75
6.2 模拟和触发源 S2 触发效率 76
6.3 V1724 多数逻辑 77
6.4 V1724 多数逻辑测试 77
6.5 V1724 测试波形 78
6.6 PandaX 一期电子学与数据获取系统改进 79
6.7 PandaX 电子学与数据获取系统升级软件框架图 80
6.8 上图：试运行期间的触发信号逻辑。下图：正式运行期间的触发信号逻辑。 82
6.9 系统触发逻辑：门信号产生 83

7.1 上图：LED-6V 电压刻度光电倍增管时 V1724 的波形。下图：经过拟合后的光电倍增管单光峰。 87
7.2 左图：^{137}Cs 放射源 S1 能谱图。右图：^{60}Co 放射源 S1 能谱图。 . . . 88
7.3 PandaX 放射源位置分布图，P0 位于探测器外部 88
7.4 ^{60}Co 放射源模式电子漂移时间 89
7.5 上图：^{60}Co 放射源 S2 信号能谱。下图：^{252}Cf 放射源 S2 信号能谱。 . 90
7.6 PandaX 一期四种运行模式事例大小统计 92
7.7 ^{60}Co 源事例大小统计，由左上顺时针依次是：所有事例，有信号事例，只包含 S1 信号事例，含 S2 信号事例 93
7.8 ^{252}Cf 源事例大小统计，由左上顺时针依次是：所有事例，有信号事例，只包含 S1 信号事例，含 S2 信号事例 94
7.9 ^{252}Cf 源含 S2 事例大小统计，由左到右每排是：所有 S2 事例，只有一个 S2 信号事例；S2 电荷小于 10000pe 事例，S2 电荷大于 10000pe 事例；原子核反冲均值下方事例，电子和反冲均值上方事例 95
7.10 ^{60}Co 源数据传输相关参量统计，由左上顺时针依次是：数据传输事例大小，5 个事例块之间的时间差，理想数据传输速率，新的传输循环开始前缓存事例数 96
7.11 ^{137}Cs 源数据传输相关参量统计，由左上顺时针依次是：数据传输事例大小，5 个事例块之间的时间差，理想数据传输速率，新的传输循环开始前缓存事例数 97
7.12 ^{252}Cf 源数据传输相关参量统计，由左上顺时针依次是：数据传输事例大小，5 个事例块之间的时间差，理想数据传输速率，新的传输循环开始前缓存事例数 98

7.13 无放射源物理运行数据传输相关参量统计，由左上顺时针依次是：数据传输事例大小，5 个事例块之间的时间差，理想数据传输速率，新的传输循环开始前缓存事例数 99
7.14 左图：ESum 模拟和模式 S2 信号的能谱及触发效率。右图：Majority 多数逻辑模式 S2 信号的能谱及触发效率 100

表格

2.1 暗物质直接探测和间接探测实验列表 18

3.1 氙物理特性以及与粒子探测相关的特性。a∼k:[1]，[2]，[3]，[4]，[5]，[6]，[7]，[8]，[9]，[10]，[11]。 32

5.1 V1724 buffer 设置 63
5.2 PandaX 电子学与数据获取系统文件格式 72
5.3 PandaX 电子学与数据获取系统标识符格式 73
5.4 快速模数转换器事例格式 74

7.1 电子学与数据获取系统性能统计 91

符号和缩略词

Bq 辐射剂量单位

E 能量

$FPGA$ 现场可编程门阵列 Field — Programmable Gate Array

$keVee$ 电子反冲能量单位

$MBytes$ 数据存储单位 10^6byte

MS/s ADC 采样单位 10^6 个点每秒

NIM Nuclear Instrumentation Module

pb 散射截面单位 $10^{-37}\mathrm{cm}^2$

PE 等效光电子单位

PLL 锁相环

PMT 光电倍增管

$SLPM$ 流量单位

TeV GeV 能量单位，$10^12(10^9)$ 电子伏

TPC 时间投影室

$VHDL$ 标准硬件描述语言 Very-High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language

VME 通用计算机总线 Versa Module Eurocard

Vpp 峰峰值电压

摘要

20 世纪 30 年代兹威基测量后发座星系团质量时，最早预言了暗物质的存在。之后，Vera Rubin 利用测量电磁波谱的影像管摄谱仪对仙女座星云（M31）进行观测并绘制了旋转曲线，测量发现仙女座星云中的大部分恒星绕星系团中心以相同的速度运动，可能的解释是漩涡星系中存在大量的有质量但是看不见的暗物质。之后对星系团引力透镜、宇宙微波背景辐射的观测和研究从天文学角度肯定了暗物质的存在。天文物理学家通过研究普朗克卫星探测的数据，根据 ΛCDM 模型（Λ——冷暗物质模型），计算得到宇宙的结构构成：宇宙中普通物质占 4.9%，暗物质占 26.8%，68.3% 是暗能量。

暗物质存在的天文观测证据被确认后，理论物理学家提出众多的暗物质候选者。暗物质候选者中，包括热暗物质、冷暗物质和温暗物质。热暗物质可以很好地解释宇宙中超星系团这类特大尺度的结构，而冷暗物质能更好的解释星系、星系团等等的结构。温暗物质理论是近期形成的理论，兼顾热暗物质和冷暗物质的特点。根据 ΛCDM 模型，理论估计宇宙中 83% 的物质以冷的、不发光的、低碰撞界面的非重子暗物质构成。而旨在解决级列问题的几种理论预言了稳态大质量弱相互作用粒子（WIMPs）是宇宙暗物质的主要构成。WIMPs 与普通物质的相互作用非常微弱，只参与弱相互作用和引力相互作用，理论根据模型已经计算出粒子和已知标准模型中粒子的相互作用截面。

自 20 世纪起，粒子物理学家积极地通过实验去探测、寻找暗物质。除天文观测可以间接验证暗物质存在，寻找 WIMPs 粒子的方法有三种：地下暗物质低本底直接探测实验，非直接探测实验，大型加速器暗物质产生实验。直接探测实验是通过测量暗物质粒子与普通物质原子核的碰撞散射信号寻找暗物质。非直接探测是测量暗物质湮灭信号验证暗物质存在性。直接探测暗物质实验以低温晶体探测器和低温惰性气体探测器为代表。非直接探测实验以卫星实验为代表。加速器实验的代表是欧洲大型强子对撞机（LHC）实验。

2013 年，LUX（The Large Underground Xenon Experiment）实验在暗物质直接探测领域取得了相当高灵敏度的实验结果，实验基于 85.3 天的 118 公斤核心靶区液氙的探测数据，没有找到可信的暗物质信号。LUX 实验在 90% 置信度基础上，对与自旋无关的 WIMP 与氙原子核相互作用截面给出上限：对于质量为 33GeV/c^2WIMP 粒子，相互作用截面上限为 $7.6 \times 10^{-46} cm^2$。

2013 年，AMS-02（Alpha Magnetic Spectrometer）卫星实验对宇宙线正电子谱进行测量，发现正电子比（宇宙线中正电子数与正负电子总数的比例）在 0.5-10GeV 范围内随能量增长而减小，在 10GeV-250GeV 范围内随能量增长而增大。然而正电子比分在 20GeV-250GeV 能量范围内，增速在不断下降，有迹象表明谱型在高于 250GeV 的能量区间内会变得平坦，但是实验在 250GeV 以上的能谱需要更大的统计量和实验精度。

2014 年，Super-CDMS（Super Cryogenic Dark Matter Search）实验在暗物质非直接探测模式中找到了 11 个疑似事例。实验的数据量达到 577kg-days，找到 11 个 WIMPs 粒子疑似事例。实验在 90% 置信度基础上，对与自旋无关的 WIMP 与氙原子核相互作用截面给出上限：对于质量为 8GeV/c^2WIMP 粒子，相互作用截面上限为 $1.2 \times 10^{-42} cm^2$。Super-CDMS 的疑似事例已经被 LUX 新的实验结果所否

定。

低温惰性气体探测器是目前最受关注的直接探测技术。而液氙，在稀有气体中是一种典型的 WIMPs 直接探测的材料。液氙作为直接探测实验材料具有以下特性：可以方便有效地的增大靶质量，可以有效地甄别原子核反冲和电子反冲，具有有效地对环境本底的自屏蔽效应。

鉴于 XENON100 实验以及 LUX 实验在暗物质探测领域的突破性进展，PandaX 合作组（The Particle and Astrophysical Xenon collaboration）于 2010 年开始设计并搭建中国第一座低本底二相氙型时间投影室用于暗物质探测。PandaX 地下暗物质实验一期液氙靶质量为 120kg。PandaX 二期时靶质量会提高到 0.5 吨，PandaX 三期探测器靶质量会高于 1 吨。2012 年，PandaX 探测器运往中国四川锦屏地下暗物质实验室 CJPL（China Jinping Deep-Underground Laboratory）。2013 年探测器在 CJPL 实验室搭建完毕并完成两次试运行以检测和改进探测器。2014 年 PandaX 实验开始物理取数，并于 2014 年 9 月发表实验结果。PandaX 一期基于 17.4 天的 37 公斤核心靶区液氙的探测数据，没有找到可信的暗物质信号。PandaX 实验在 90% 置信度基础上，对与自旋无关的 WIMP 与氙原子核相互作用截面给出上限：对于质量为 49GeV/c^{2}WIMP 粒子，相互作用截面上限为 $3.7\times10^{-44}cm^2$。

PandaX 暗物质探测实验是当前世界上环境本底最低的实验。作为实验信号处理和数据获取的必要部分，电子学与数据获取系统需要在实验物理取数之前完成设计和搭建。2010 年 PandaX 实验电子学与数据获取系统在山东大学开始设计和搭建。系统的硬件系统主要基于商业插件，根据插件特性完成软件框架、触发框架等的设计。电子学系统收集来自探测器时间投影室光电倍增管阵列的光电子信号。然后，系统根据不同粒子反冲信号的特征设定触发条件，以触发物理信号。系统软件对系统硬件初始化、配置，在数据获取开始后对系统状态进行判定并读取数据，对数据格式校验后组装事例，最后将数据读出并存储到磁盘阵列中。

电子学与数据获取系统设计的物理目标是：以尽可能高的触发效率对尽可能低能量的信号进行测量。为了实现这个目标，系统的触发逻辑经过两次设计。第一次设计应用于 PandaX 试运行过程中，实现了对系统功能的检验。在 PandaX 探测器正式运行中，由于第一版触发系统的设计触发阈值过高，因此进行了第二次升级。升级后，显著地降低了系统的触发阈值，并显著地提高了触发效率。

本文主要描述了为 PandaX 暗物质实验一期的电子学与数据获取系统的背景、设计、搭建、测试以及运行结果。

关键字： PandaX, 暗物质, 电子学, 数据获取

Abstract

The first evidence for dark matter came in 1933 when Zwicky measured masses of Nebulae. The early 1970s, Vera Rubin used imaging spectrograph which was used to measure the electromagnetic spectrum to observe the Andromeda Nebula (M31) and calculated its rotation curve. Observation from Andromeda nebula found that most of the stars around the center of galaxies rotated with the same velocity. The most possible explanation of this phenomenon is present lot of quality but invisible dark matter in spiral galaxies. Studies of gravitational lensing of galaxy clusters and cosmic microwave background affirm the existence of dark matter in astronomy.Astrophysicist analysis data from Planck satellite to calculate structure of the universe with the ΛCDM model. The universe consists of about 4.9% baryons which constitute the ordinary matter, about 26.8% non-baryonic dark matter, and about 68.3% dark energy.

As the existence of dark matter be confirmed by astrophysicist, theoretical physicists propose several dark matter candidates: hot dark matter, cold dark matter and warm dark matter. Hot dark matter mode can explain large-scale structure of universe, but the cold dark matter can explain structure of galaxies, clusters of galaxies. Warm dark matter theory who is recently formated has characteristics of hot dark matter and cold dark matter.According to ΛCDM mode, 83% of the matter in the universe is in a form of non-luminous, cold, collisionless, non-baryonic dark matter with low cross-section. Several theories which aim at solving the hierarchy problem predict stable weakly interacting massive particles (WIMPs) that could compose most of the dark matter. Their interactions with normal matter are on the order of a weak scale cross section. These theories predict the cross-section of WIMPs with particles of the Standard Model.

From end of the 20th, particle physicists have been actively look for dark matter with experimental methods. In addition to the evidence from astronomical indirect observations which verify the existence of dark matter, particle physicists search for WIMPs particles in three ways: the underground low background direct dark matter experiments, indirect dark matter experiments, large accelerator. Direct dark matter experiments are designed to collect nuclear recoils signals from scattering of WIMPs with nucleus. Indirect dark matter experiments look for signatures of WIMPs annihilating to normal particles.

The cryogenic crystal detector and cryogenic noble gas detectors are representatives of direct dark matter experiments. The representatives of indirect dark matter experiments are satellite experiments. LHC(Large Hadron Collider) is a representative of large accelerator.

In 2013, LUX（The Large Underground Xenon Experiment）obtained very high sensitivity result in dark matter detection. They reported results of the WIMP search data of 85.3 live days of data with a fiducial volume of 118 kg and haven't found WIMP signals. They gave 90% confidence limits to be set on spin-independent WIMP-

nucleon elastic scattering with a minimum upper limit on the cross section of $7.6 \times 10^{-46} cm^2$ at WIMP mass of 33GeV/c^2.

In 2013, AMS-02（Alpha Magnetic Spectrometer）has measured the positron fraction (ratio of the positron flux to the combined flux of positrons and electrons). They have observed that from 0.5 to 10 GeV, the fraction decreases with increasing energy. The fraction then increases steadily between 10 GeV to 250 GeV. Yet the slope (rate of growth) of the positron fraction decreases by an order of magnitude from 20 to 250 GeV. At energies above 250 GeV, the spectrum appears to flatten but to study the behavior above 250 GeV requires more statistics.

In 2014, Super-CDMS（Super Cryogenic Dark Matter Search）detected 11 suspected events of WIMPs with indirect dark matter detect mode. Data of 577 kg-days was analyzed for WIMPs with mass 5, 7, 10 and 15 GeV/c^2 and detected 11 suspected events of WIMPs with 95% confidence. They gave 90% confidence limits to be set on spin-independent WIMP-nucleon elastic scattering with a minimum upper limit on the cross section of $1.2 \times 10^{-42} cm^2$ at WIMP mass of 8GeV/c^2. Suspected events have been negated by the results of LUX.

Liquid noble gas detectors are currently the most talked about direct detection technology. The liquid xenon is a typical suitable material for direct WIMP detection. Xenon has a very good characteristics as the direct detection material: allows detector target masses to reach ton-scale within reasonable cost, allows discrimination between nuclear and electron recoils and allows self-shielding from external gamma rays.

Given the breakthrough of XENON100 and LUX in the direct dark matter detection, PandaX（The Particle and Astrophysical Xenon collaboration）designed first low background duel-phase xenon TPC of China in 2010. Target volume of PandaX increases from initially 120 kg (stage I) to 0.5 t (stageII) and eventually to a multi-ton scale. Most sub-systems and the stage I TPC were transported to the China Jinping Deep-Underground Laboratory (CJPL) in August 2012. After successful installation, two engineering runs were carried out in 2013. The system has been collecting science data since late March 2014 and published results in 2014.9. PandaX reported results of the WIMP search data of 17.4 live days of data with a fiducial volume of 37 kg and haven't found WIMP signals. We gave 90% confidence limits to be set on spin-independent WIMP-nucleon elastic scattering with a minimum upper limit on the cross section of $3.7 \times 10^{-44} cm^2$ at WIMP mass of 49GeV/c^2.

PandaX dark matter detector is the lowest background detector in the world. As signals transfer and data acquisition part of PandaX, Electronic and Data acquisition system (EnDAQ) has to be designed and tested before physical run. System was designed with commercial module after 2010 in high energy physics group of Shandong university. After finishing software and trigger logic design, system collect photoelectron signals from PMT array. Then，system sets trigger threshold according to feature of recoil signals. EnDAQ starts initialization and setting of hardware. After start data acquisition, software holds data ready signal. When data is ready, system

start verify event, build event, readout event and save data into disk array.

The physical goal of EnDAQ is to achieve higher trigger efficiency on low energy signals. In order to achieve this goal, we designed two version of trigger logic. 1st version was used in test run of PandaX to test detector function. Due to high trigger threshold of 1st version, system was upgraded for physical run. 2nd version has significantly reduced the trigger threshold and significantly improve the trigger efficiency.

In this paper a detailed description of design, installation and test of EnDAQ is presented.

Keywords: PandaX, dark matter, electronics, data acquisition

1 引言

20 世纪，经过理论和实验的相互验证，现代物理学确立了粒子物理标准模型。标准模型包含三种粒子：参与强相互作用的强子，不参与强相互作用的轻子以及传递相互作用的玻色子。虽然标准模型成功的描述了我们宇宙结构组成的基本要素，但是还是有很多悬而未决的问题。比如，为什么宇宙的构成需要这么多种粒子，为什么存在四种力，而这些问题促使着当代物理学家去寻找答案。

在 20 世纪末和 21 世纪初，粒子物理理论和实验技术急速发展，得益于理论和实验技术水平的提高，物理学家和天文学家得以在天文学尺度上对宇宙的结构加以研究。关于宇宙微波背景辐射（CMB）、宇宙大尺度结构（LSS）和 Ia 型超新星的研究指出存在天文学标准模型之外的理论模型。现在越来越多的物理学和天文学证据表明，宇宙的组成部分，不仅仅是已经观测到的物质，还包括两部分我们不了解的结构。这两部分根据已有的模型解释，一部分是与标准模型框架内的粒子几乎不发生相互作用的物质，称之为暗物质，在宇宙中占据 26.8%。暗物质与普通物质的相互作用只局限在弱相互作用和引力相互作用上。另一种是到现在也没有确切描述的暗能量，暗能量源于宇宙加速膨胀理论模型，在宇宙中占据 68.3%。暗物质和暗能量组合占据了宇宙 95% 的组成，然而我们通常意义上的物质只占据宇宙的 4% 左右。继 20 世纪初的现代物理学革命后，这两种未知的组成部分预示又一次革命。解释“什么是暗能量”和“什么是暗物质”是 21 世纪物理学家的挑战。

近几年，寻找暗物质的实验取得了极大的成功，PandaX 地下暗物质实验所代表的暗物质探测是天体物理学实验的新兴领域，其目的是在能量尺度上取得比已有实验结果更高精度的研究成果。暗物质探测既是对天体物理实验和理论的支持，其存在性也是标准模型以外新物理强有力的证据。

本节中会介绍宇宙质量缺失的问题和天文物理学实验观测到的大量暗物质在宇宙中存在的证据。

1.1 暗物质证据

1.1.1 星系旋转曲线

螺旋星系的星系旋转曲线可能是最有说服力的证明宇宙星系尺度上暗物质存在的证据 (Sofue and Rubin, 2001)[12]。在天文物理学中，星系的旋转曲线是指星系中恒星围绕星系中心的旋转速度 v 与恒星到星系中心的距离 r 之间的函数关系曲

线。相比于螺旋星系中的恒星，测量位于星系外围中性氢原子云团的轨道旋转速度更容易。根据中性氢原子发射出的 21cm 谱的红移计算出螺旋星系的半径和旋转速度的函数关系 (et al.,Begeman 1991)[13]。通过测量恒星和云团的轨道旋转速度和轨道半径，从而得到质量 M(r)。根据牛顿引力定律 $v(r) = \sqrt{GM(r)/r}$，在远离螺旋星系恒星盘的位置，半径 r 和旋转速度的函数关系是 $v(r) \propto r^{-1/2}$。然而天文观测表明，星系旋转曲线在远离星系恒星盘的地方是平滑的。1991 年发表的对螺旋星系 NGC6503 的观测结果如图 1.1，NGC6503 的旋转曲线 (左图)[13] 和 NGC6503 的照片（右图）。根据可见的发光物质计算的旋转速度和星云气体的贡献不能解释实际观测到的旋转曲线，即使考虑到星系中心黑洞的存在，仍然与实际观测不相符。

暗物质实验需要通过对银河系的旋转曲线进行测量，从而估计出银河系的暗物质密度，以方便模拟计算直接探测暗物质实验的事例频率。

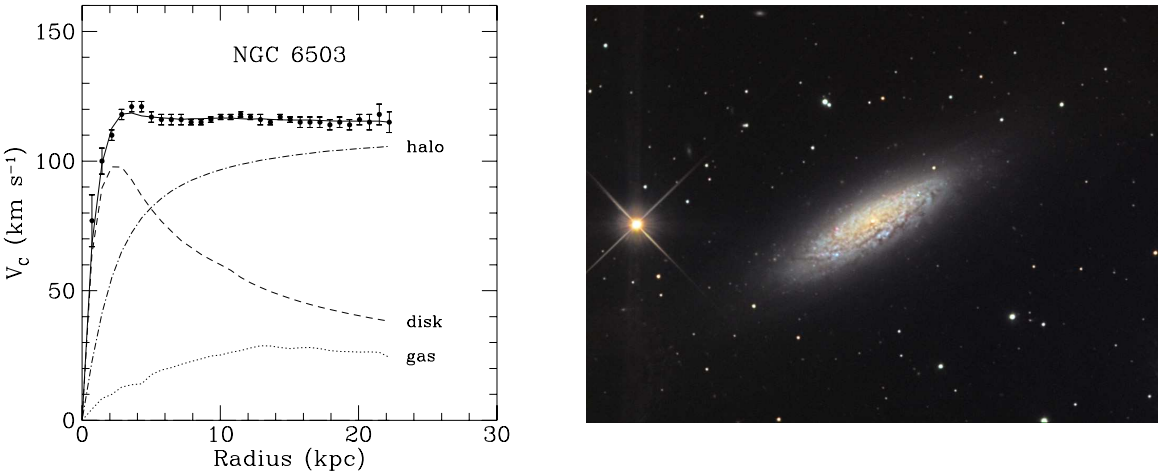


图 1.1: 左图表征 NGC6503 螺旋星系质量分布的旋转速度与半径关系，虚线代表的是可见物质质量分布贡献，点线是星系气体质量分布贡献，点画线是黑洞质量分布贡献 (Begeman et al. 1991)。右图是 NGC6503 天文观测照片

1.1.2 星系团

在 1933 年兹威基研究后发座星系团时，通过研究星系团的速度色散推算星系质量发现计算数值 160 倍于从光度所计算得到的质量，他提出绝大部份的物质都是漆黑看不见的，并最早预言了暗物质的存在 [14]。后来科学家发现大质量宇宙结构含有大量的高能 X 射线等离子体，这些等离子体被引力场加热到极高的温度而发生韧致辐射形成 X 射线喷柱。X 射线喷柱和等离子体密度的平方成正比，因此可以通过 Chandra X 射线天文台的 X 射线卫星的测量以实现对等离子体质量的估算。然而通过动力学计算出的星系团所需的总质量仍然远大于星系团、恒星和等离子体的引力效应的总量。因此星系团总质量部分主要构成被归因于暗物质。

当宇宙深处的背景光源发出的光经过前景天体时，根据爱因斯坦广义相对论，光在前景天体附近发生弯曲。如果前景天体的质量足够大，就能在前景天体周围观察到一系列和背景光源结构相似的影像，被称为引力透镜效应。效应的强度取决于前景天体质量，以及在观察点、背景光源和前景天体相互之间的距离。图 1.2左图是一个星系背景光源相对于星系团的引力透镜效应的示意图。包含暗物质在内的超大星系团可以相当显著地扭曲背景光源的光，从而制造了图中所示的影像。示意图展示的引力透镜效应制造的蓝色圆环也被称为爱因斯坦圆环 [15]。

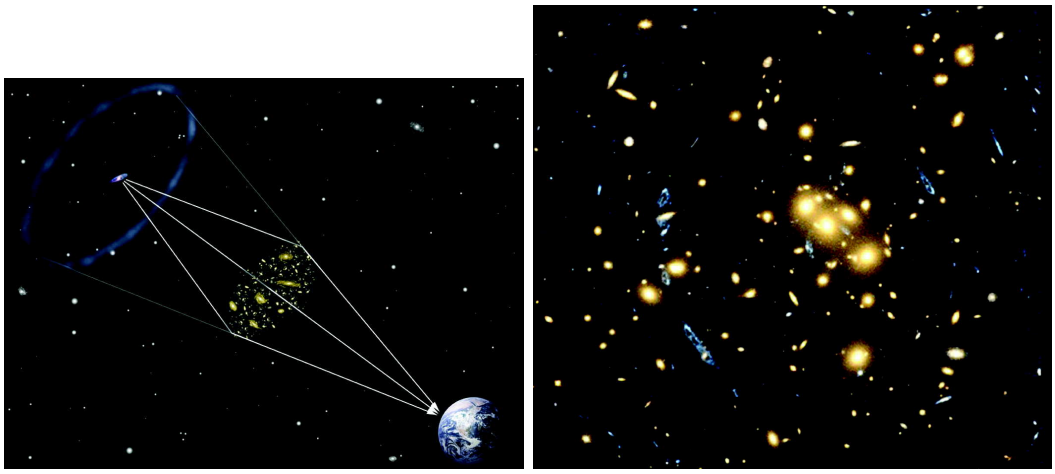


图 1.2: 左图形象的解释了引力透镜的原理和现象，右图是 NASA 哈勃深空望远镜观测到的 CL0024+1654 星系团

图 1.2右图是哈勃深空望远镜所观测到的一幅典型的引力透镜效应的照片。照片中黄色亮斑是前景天体 CL0024+1654 星系团，距地球 40 亿光年。蓝色亮斑是一个背景星系的多重影像。超大质量的前景暗物质天体扭曲了背景星系的光，以至于形成了 5 个背景星系的影像，一个在中间，4 个形成爱因斯坦圆环。

迄今为止暗物质最有力的证据是 2007 年发表的哈勃深空望远镜对星系团 CL0024+17 的观测结果。如图 1.3左图所示 [16]，左图展示了前景星系团和引力透镜效应，棕色的部分是前景星系团，中间结构相似的蓝色多重影像是背景星系。根据引力透镜效应估算出的暗物质在前景星系团中的分布图和哈勃望远镜的照片组成了右图，暗物质（蓝色）环绕中心区域形成一个环带。一般情况下，宇宙中的暗物质分布和可见物质分布是相近的，但是在 CL0024+17 星系团中暗物质在在星系团 260 万光年的周围形成了暗物质环。这也成了暗物质存在性的最有力的证据。

另一个关于暗物质存在的有力证据源于哈勃深空望远镜对子弹星系团 1E 0657-56（星系团包含两个曾经发生碰撞，现在正在互相远离的星系）的观测。根据子弹星系团的质量分布图可以推算出星系团的重子物质和暗物质的分布有差异。差异性可以这么解释，星系团以 1600 万千米/小时的速度发生碰撞时，重子物质部

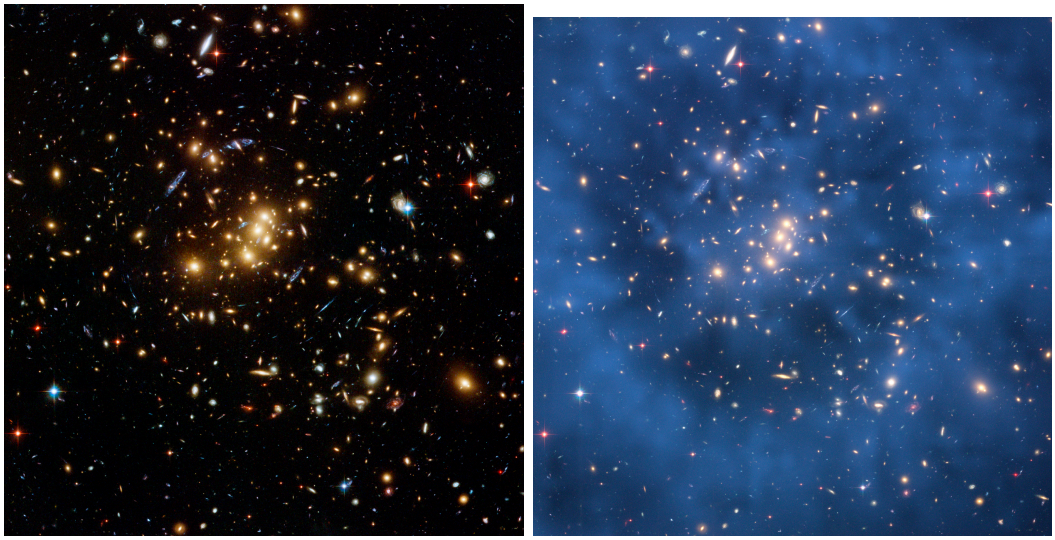


图 1.3: 左图：哈勃望远镜观测到的 CL0024+17 星系团。右图：在哈勃望远镜观测图像的基础上添加引力分布，引力分布说明暗物质分布在星系团中心和外围环带

分相互作用并减速。然而暗物质并没有显著地相互作用发生，因此并没有发生明显的减速。造成了每一个星系团的发光部分和暗物质部分的分离。

X 射线望远镜对子弹星系团的观测发现，大部分重子物质分布在星系团可见部分的中心。然而，根据微弱引力透镜效应的观测表明，单一星系团的大部分质量分布在重子物质核心的外围。如图 1.4左图所示，大部分重子物质（粉红色）分布在高温气体中，在引力相互作用中起主导地位的暗物质（蓝色）与重子物质分离。右图给出了子弹星系团碰撞的详细分布图 [17]。对子弹星系团 1E 0657-56 的观测发表在 2006 年，是迄今为止最有力的暗物质证据之一。

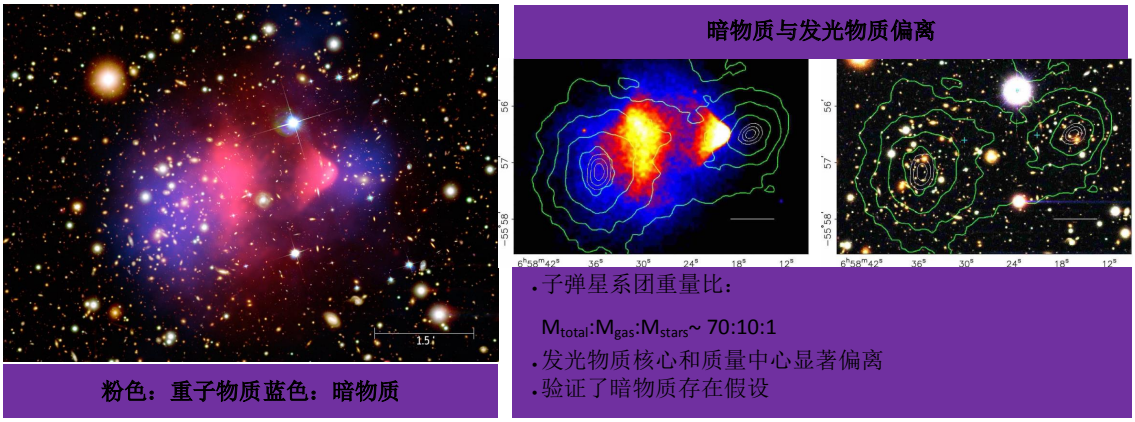


图 1.4: 左图：发生星系碰撞后形成的子弹星云的质量分布图，粉红色是重子物质，蓝色是暗物质。右图：NASA X 射线图

1.1.3 宇宙微波背景辐射

宇宙微波背景辐射来自于宇宙大爆炸 38 万年后留下的放射性遗迹，是物质在脱耦过程中发出的辐射。由于宇宙在过去的 137.5 亿年一直在膨胀，早期辐射由于红移已经到了微波频率。现在的宇宙，温度分布整体上来讲是均匀的，但并不是保持绝对的均匀性和各向同性，仍然存在着涨落，是由于大爆炸早期光子脱耦时存在温度涨落。涨落在现在宇宙中显示为在一定范围内的宇宙微波背景辐射的各向异性。因此，宇宙微波背景辐射局部的不均匀性为研究宇宙早期的扰动提供了依据。理论上宇宙微波背景辐射的各向异性可以看成是早期宇宙中光子－重子等离子由于重力的作用相互碰撞产生的声学振荡 [18]。虽然重子物质和光子发生剧烈的相互作用，然而暗物质与光子发生相互作用的几率很低。而且重子物质和暗物质都通过引力相互作用影响震荡又对宇宙微波背景辐射的各向异性有着不同程度的作用。图 1.5是 WMAP 实验通过 7 年的观测得到的宇宙微波背景辐射的能量谱 [19]。

第一个峰值位于 ι=200，表征的是宇宙中的总能量：暗能量、普通物质、暗物质、光子、中微子以及其他还没有被发现的疑似贡献。第一个峰值的大小和位置表征了宇宙的几何结构，说明了宇宙温度的均匀性。峰值覆盖的横轴范围达到 $\Delta\iota \approx 250$，相当于 1 度的天顶角 (太阳的天顶角是 $0.5\check{r}$)。这个值远大于所观测到的宇宙温度波动的尺度，因此，第一个峰的来源不是早期宇宙的声学震荡。早期宇宙总的能量密度决定了宇宙的膨胀与否。

第二个峰位于 ι=500，对应的天顶角 $\theta_{res} \approx 0.36°$，产生的原因是早期宇宙的声学震荡，表征了相应位置含有多少普通物质。

第三个峰位于 ι=700，对应的天顶角 $\theta_{res} \approx 0.24°$。这个峰和暗物质以及普通物质都有关系，因此通过对第二个和第三个峰的分析，可以得出早期宇宙中的暗物质密度。

如图所示，包含暗物质的模型非常精确的描述了能量谱。

宇宙中星系通过引力相互作用聚集在一起，形成宇宙学的大尺度结构，称之为星系团。星系团中，每一个星系都以一定的速度相对其它星系运动。根据对星系团中星系的动能计算，发现星系团的可见物质的总质量并不足以保证星系的逃逸速度大于星系实际速度。在不考虑相对论效应的情况下，对星系团仍然稳定存在的直观解释就是大量的不发光的物质补足了普通物质的缺口。现在的天文物理学观测表明，宇宙中绝大部分质量是由冷的、非相对论的暗物质构成。

暗物质假设同样存在于宇宙大尺度结构的模拟中。天文学观测对宇宙结构进行了分类：从最小的天体结构恒星，红巨星到星系和星系团。这种由简而繁的天体构成模式，需要冷暗物质去维持存在。宇宙大爆炸遗留下来的重子物质由于超高的温度和压强，塌缩成最小的结构。应用超级计算机引入暗物质粒子对宇宙结构演化进

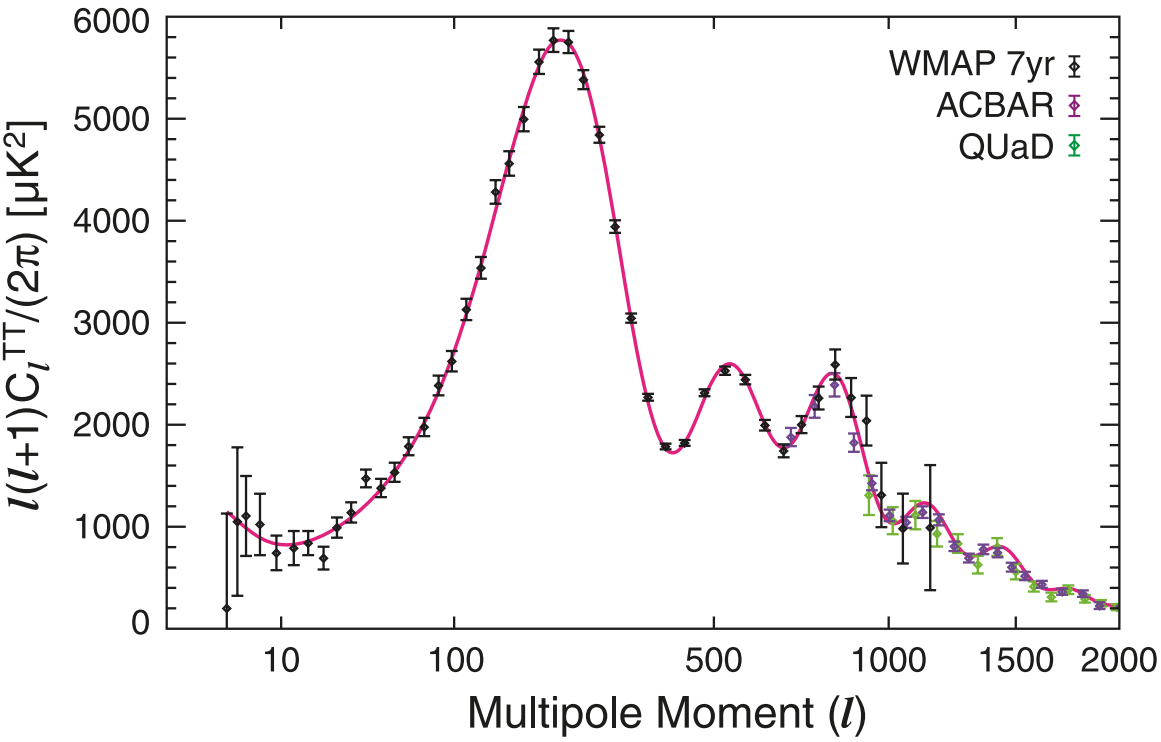


图 1.5: 宇宙微波背景辐射的各向异性能谱，数据来源于 WMAP 实验

行模拟 [20]，结果与 Sloan Digital Sky Survey, 2dF Galaxy Redshift Survey, 和 the Lyman-alpha forest 实验结果吻合。这些研究结果在很大程度上推动了 ΛCDM 模型的建立。图 1.6是对宇宙大尺度结构的模拟。

1.2 暗物质

首先简要描述一下暗物质的特性：

• 暗物质肯定不携带任何极性的电荷。如果暗物质是由任何已知的基本粒子构成，那么暗物质必须由中性粒子构成才可以解释暗物质和普通物质间极弱的相互作用。

• 暗物质必须是宇宙早期通过热产生或者粒子衰变产生，并保持很丰富的遗迹，而且时间要比物质辐射开始自由传播的时刻早。

• 暗物质必须在宇宙时间尺度上保持稳定以保证今天仍然参与宇宙结构形成。

• 暗物质的聚集结构必须在大尺度和微尺度上能够解释。这点可以通过天文学的 N 体模型模拟。

自 Zwicky 提出暗物质存在假设以来，已经提出很多暗物质可能的候选者。很多暗物质候选者的理论框架都是标准模型之外的或者是还没有被确切观测到的天体：中微子天体，晕内大质量致密天体（Massive Astrophysical Compact Halo

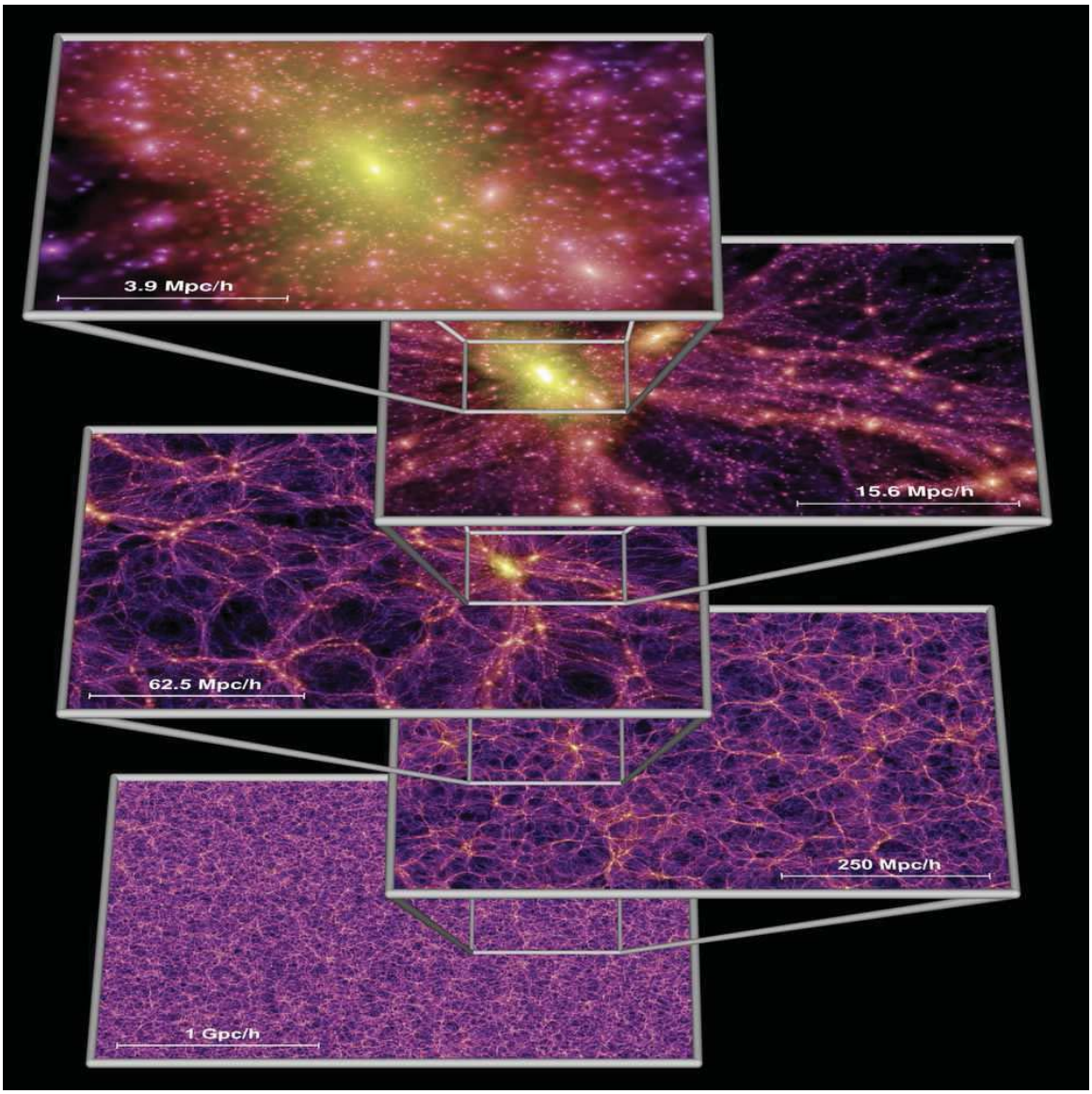


图 1.6: 宇宙大尺度结构

Objects，MACHOs），黑洞，大质量弱相互作用粒子（weakly interacting massive particles —WIMPs），轴子。暗物质可以是重子也可以是非重子。MACHOs 就是典型的重子暗物质。中微子天体，WIMPs，轴子是非重子类型暗物质。根据不同的理论预言特性，不同的候选者有不同的特征。

1.2.1 暗物质动力学分类

暗物质的动力学特性是宇宙微波背景辐射能谱的各向异性和宇宙大尺度结构形成的主要原因之一。不同速度的暗物质对不同尺度的宇宙结构有不同程度的贡献。根据暗物质的动力学特征可以分为三类 [21]：

热暗物质（HDM）：热暗物质粒子运动速度接近光速，最经典的候选是轻中微子。热暗物质的质量通常小于 1eV $m_{HDM} \leq$1eV。HDM 在早期宇宙脱耦后速度一直保持相对论速度。但是高速运动的暗物质粒子不可能在宇宙初期平滑的小尺度下聚集在一起，会干扰宇宙微观结构组成星系的形成和演化。所以，热暗物质只能是暗物质中的一部分。

冷暗物质（CDM）：冷暗物质在宇宙早期脱耦形成后以非相对论性速度参与宇宙演化，其质量可以大于 1GeV。已有的理论模型预言的冷暗物质包括：超中性子（neutralinos），弱作用巨兽粒子（WIMPZILLAs），孤立子（solitons）等。由于冷暗物质以非相对论性速度传播，所以可以在宇宙小尺度上形成稳定结构。冷暗物质成功的解释了如何从平滑的早期宇宙演化出现在宇宙的大尺度结构。然而，冷暗物质预言的为数众多的质量约千分之一银河系的小矮星系，在观测上没有见到。

温暗物质 (WDM): 温暗物质粒子运动速度在热暗物质和冷暗物质之间，质量大于 1eV，经典的候选者是惰性中微子。在宇宙早期脱耦时具有相对论性速度，但随着宇宙的演化速度已经降低到非相对论性速度。温暗物质在模拟中展现了更加平滑的暗物质特性，相比于冷暗物质在演化中形成了很少的矮星系。天文物理学家正在积极研究温暗物质，并期待在银河系的微尺度结构中找到相关证据。

对宇宙微波背景的大尺度结构研究表明：宇宙结构演化依层级增长，在演化的过程中，物质在小尺度上先塌缩和合并形成微结构，然后逐渐形成大尺度结构。冷暗物质可以解释大尺度结构的形成，但是模型中包含的矮星系的存在需要重新解释。以惰性中微子为代表的温暗物质相当具有吸引力。近几年对银河系的观测，发现了矮星系的存在，支持了温暗物质和冷暗物质模型的发展。

1.2.2 暗物质粒子分类

依照粒子种类对暗物质分类更精确也更具有代表性。理论为了解决暗物质相关的各种问题，提出了不同类型的粒子，中微子是已知的暗物质粒子。作为暗物质粒子的候选，必须满足以下几个条件：

- 暗物质粒子必须在宇宙学时间尺度上保持稳定，以描述现代宇宙的暗物质分布。
- 暗物质粒子不参加强相互作用和电磁相互作用。
- 暗物质候选者必须能解释遗迹分布。
- 根据已有的研究表明，重子粒子不可能组成暗物质。

符合条件的非重子暗物质都来源于标准模型以外的理论模型，包含多种大质量弱相互作用粒子—中微子、超中性子、轴子等。还有一类暗物质粒子—极微弱相互作用大质量粒子（Superweakly interacting massive particles—superWIMPs），它们

的碰撞界面远小于弱相互作用碰撞截面，这类粒子以右手征的惰性中微子和引力中微子为代表。

中性伴随子（$\widetilde{\chi}$）：在最小超对称模型中，R 宇称守恒的中性超对称粒子有四种：超 Z 子 $\widetilde{Z}$，超光子（$\widetilde{\gamma}$），超希格斯粒子（$\widetilde{H}_1^0$ 和 $\widetilde{H}_2^0$）. 它们的混合可以构成 4 种马约拉纳费米子质量本征态，也就是超中性粒子。在超对称模型中，超中性子的质量和相互作用强度可以很好地解释早期热宇宙残留丰度。在已有的 WIMP 直接探测实验和间接探测实验中，超中性粒子和实验结果吻合。理论对超中性粒子的物理特性预期：质量 $m_{\widetilde{\chi}}$ ~0.1 - 1 TeV, 弱相互作用强度 σ_{weak} $\sim 10^{-4}$。

普通中微子（ν）：中微子是标准模型内的粒子，物理学家很早就提出中微子是暗物质的一种。由于中微子的速度接近光速，所以它是热暗物质，也就不能解释宇宙的大尺度结构和宇宙微波背景辐射的各向异性。而且现在的加速器实验和天文观测表明，中微子的质量非常小。根据对中微子丰度的测量，传统的中微子总质量在暗物质中的占比小于 1%。现代天文观测给出的轻中微子比例为：$0.001< \Omega_\nu <0.048$ [22]。

S 中微子：S 中微子的散射截面和湮灭截面都很大，所以能量足够高的强子加速器应该可以产生 S 中微子。然而，迄今为止的加速器还没有找到 S 中微子，也就是说它们的质量大于几百个 GeV，也就不符合最轻的超对称粒子的预测。目前 LHC 还没有关于 S 中微子的消息。

惰性中微子：理论上为了解释中微子质量项的存在，物理学家在标准模型中引入了右手征中微子。在所有标准模型对称群中，右手征中微子都是单态的，所有它们和标准模型中的粒子不能发生直接相互作用，也就是说这些中微子是惰性的。右手征中微子可以是马约拉纳粒子也可以是狄拉克粒子。如果是马约拉纳粒子，中微子的反粒子就是它自己。根据翘翘板机制，理论可以解释为什么左手征中微子的质量这么小而右手征中微子的质量远大于左手征中微子。惰性中微子被认为是温暗物质的一种。现在还缺乏惰性中微子存在的有力证据。由于冷暗物质理论在小尺度结构缺乏验证，最近以惰性中微子为代表的温暗物质引发研究者的兴趣。

轴子：轴子是 1977 年皮塞 -奎恩理论为了简洁的解决 CP 守恒问题，而提出的假设粒子。轴子可以通过早期热宇宙的量子色动力学相变过程产生。由轴子组成的结构被看做冷暗物质。参考 [23] 和 [24]

宇宙的额外维度（UED）：作为标准模型以外的理论之一，UED 通过增加空间的维度来解释物理问题。UED 理论中，更高维空间的动量守恒能解释暗物质的存在，而这种动量守恒可以导致 KK 量子数守恒，或者称为 KK 宇称守恒。理论给出最轻的 KK 粒子，即 LKP，是稳定的，可以作为暗物质的候选者。LKP 的质量在 400Gev∼1.2TeV 之间，和中性伴随子相当。

超重暗物质（WIMPZILLA）：假设暗物质是早期宇宙演化过程中热平衡的遗迹，就可以通过计算暗物质的残留密度和湮灭的散射截面关系得到暗物质粒子质量上限 340TeV[25]。然而，暗物质还可能是早期宇宙中通过非热产生构成的超大质量态，称之为超重暗物质。超重暗物质的质量可以超过标准模型范围几个量级 [26]，达到 10^{12} GeV to 10^{16} GeV。超重暗物质可以在早期宇宙中通过多种途径产生，并遗留在恒星内部，因此可以通过观测超重暗物质湮灭产生的中微子研究它们。

除了粒子，还有一部分巨大的天体也被认为是暗物质的候选者，由重子构成，自身不发光的暗物质天体。比如晕族大质量致密天体（Massive Compact Halo Objects，MACHOs）：可能是黑洞、中子星、褐矮星（质量只有太阳的 10%）和非常微弱的红矮星等。物理学家研究宇宙大爆炸核聚变过程发现，早期宇宙只能产生少量的晕族大质量致密天体。引力透镜的数据已经否定了星系的黑洞是暗物质的可能性。如果黑洞产生时间早于宇宙中核聚变开始的时间，那么早期黑洞就会被看成是暗物质。

超对称模型的中性伴随子、超弦理论中最轻的 kk 粒子，额外维度理论以及其他标准模型以外的粒子都具有大质量并只参与弱相互作用，所以他们被统称为大质量弱相互作用粒子。这些粒子都具有严谨的理论基础，并且可以通过实验严格验证。暗物质粒子的质量估计在 10GeV 到 1TeV 之间。当然不是所有的暗物质粒子都是 WIMPs，比如轴子。

1.3 大质量弱相互作用粒子—WIMPs

在已有的粒子物理理论模型中，WIMPs 是最具吸引力的暗物质候选者。首先，重子物质和暗物质的丰度是相近的 Ω_{DM}/Ω_B=5.65±0.58, 这意味着重子物质和暗物质之间存在联系。其次，作为标准模型以外的理论主要结论，WIMPs 为粒子物理很多悬而未决的基本问题提出了思路。以 WIMPs 暗物质为理论起点，物理学家可以更深入的研究宇宙微波背景辐射和宇宙大尺度结构的关系 [27]。

在早期宇宙中，暗物质粒子（χ）和普通物质粒子（φ）通过与反粒子的湮灭和

产生过程维持热平衡态。

$$\chi + \widetilde{\chi} = \varphi + \widetilde{\varphi} \tag{1.1}$$

早期热平衡中，宇宙的温度 T 远大于暗物质粒子的质量 m_χ，这意味着暗物质粒子的丰度和温度的三次方成正比 $n_\chi \propto T^3$。但随着宇宙的加速膨胀，热平衡的温度逐渐降低，当宇宙的温度小于暗物质粒子的质量 $T<m_\chi$ 时，暗物质粒子的热产生过程结束。如果宇宙膨胀速度很低还可以保持热平衡态，那么暗物质粒子的丰度因为湮灭过程会以指数式下降 [28]。

$$n_\chi \propto (m_\chi T)^{3/2} e^{-m_\chi/T} \tag{1.2}$$

暗物质湮灭用以下公式来表示：

$$\Gamma_A = n_\chi < \sigma_A \nu > \tag{1.3}$$

Γ_A 是暗物质粒子湮灭速率，σ_A 是 χ 的湮灭散射截面，ν 是暗物质粒子的相对运动速度。

随着宇宙的膨胀，温度下降，当湮灭速度与宇宙膨胀速度相当时 $\Gamma_A = n_\chi < \sigma_A \nu > \approx H$，粒子解耦，随后暗物质粒子的湮灭和产生过程被冻结，粒子的丰度不再变化。如果暗物质粒子的湮灭速率过高或者宇宙膨胀速度低到可以保持暗物质粒子的热平衡态，那么随着时间的演化，暗物质粒子的丰度将降为 0。图 1.7展示了不同散射截面的粒子丰度对时间的演化 [28]。

WIMPs 粒子参与弱相互作用，理论估算它们的冻结温度 $T_f \approx m_\chi/20$。所以可以得到粒子的丰度：

$$\Omega_\chi h^2 = \frac{n_\chi m_\chi}{\rho_c} h^2 \approx \frac{10^{-27} c m^3 s^{-1}}{\sigma_A \nu} \tag{1.4}$$

根据理论计算弱相互作用粒子的散射截面，得到 $< \sigma_A \nu > \sim 10^{-36} c m^3 s^{-1}$，对应的遗迹丰度 $\Omega_\chi h^2 = 0.1$。这和天文观测到的非重子暗物质的丰度（$\Omega_\chi h^2 = 0.113$）接近。

宇宙中大部分暗物质的候选者都是在早期热遗迹中的热产生过程中脱耦。非热产生过程同样对暗物质的结构有贡献——轴子，超重暗物质等。非热产生暗物质源于其父粒子的衰变，父粒子一般存在于早期宇宙。非热产生暗物质在早期宇宙中的比例很小，甚至没有，但随着越来越多的父粒子衰变，暗物质的丰度增加，直到达到现在的丰度。如此一来，暗物质在宇宙中的分布就是不均匀的。图 1.8描述了热产生和非热产生暗物质的丰度演化 [29]。

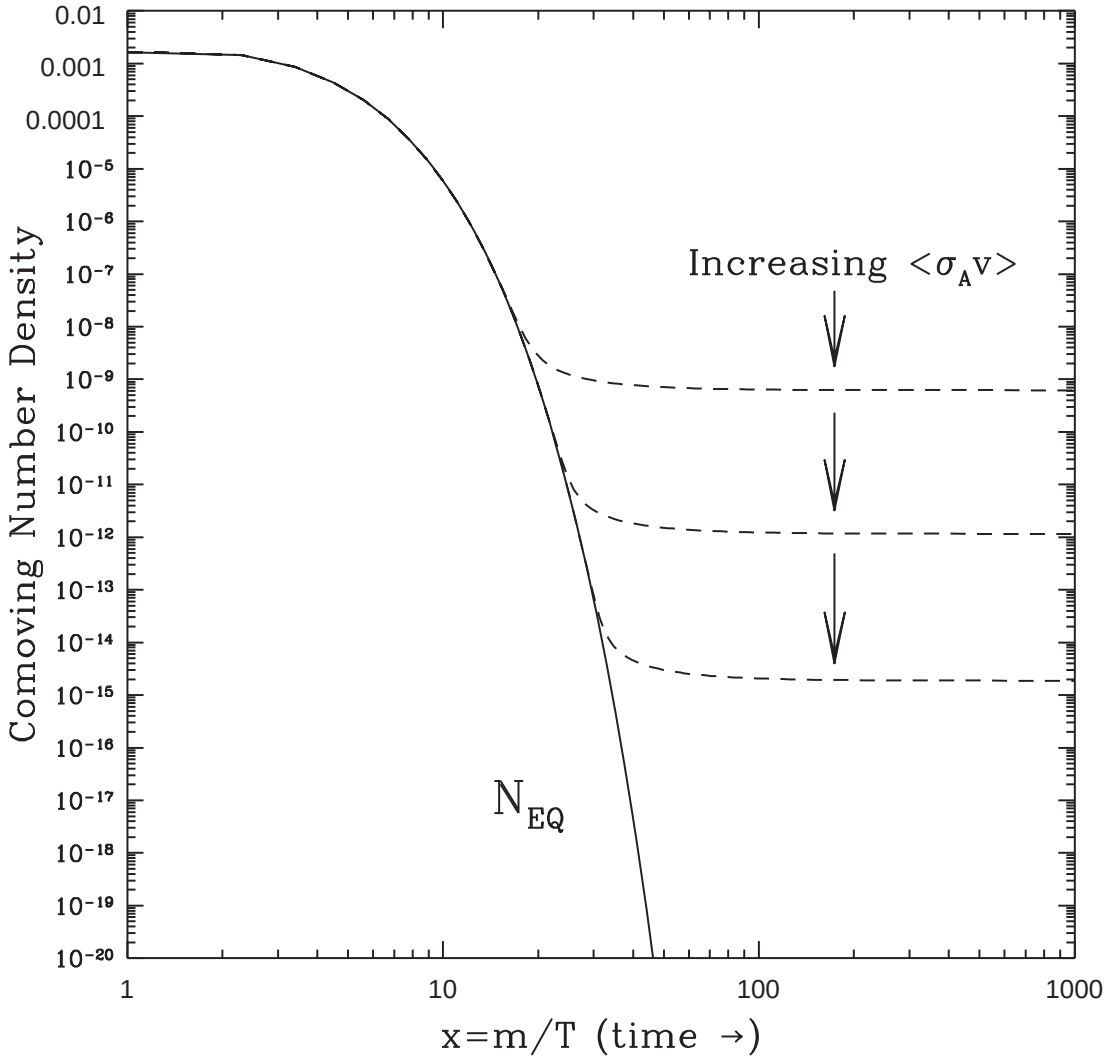


图 1.7: WIMPs 粒子脱耦过程：实线和虚线分别代表粒子从早期宇宙脱耦后，处于热平衡态和被冻结的粒子丰度的变化。曲线描述了具有不同湮灭截面的粒子的丰度变化，说明 WIMPs 粒子的遗迹丰度和质量无关与散射截面有关。

1.4 选题背景

粒子物理学家已经在积极地通过实验方法去探测暗物质。其中一种 WIMP 暗物质探测实验是通过测量暗物质与原子核的碰撞寻找暗物质。2012 年，LUX 实验在暗物质直接探测领域取得了相当高灵敏度的实验结果。2010 年，PandaX 合作组设计并搭建了中国第一座低本底二相氙型时间投影室用于暗物质探测。PandaX 暗物质探测实验是当前世界上环境本底最低的暗物质直接探测实验。作为实验信号处理和数据获取的必要部分，电子学与数据获取系统需要在实验物理取数之前完成设计、搭建与测试。

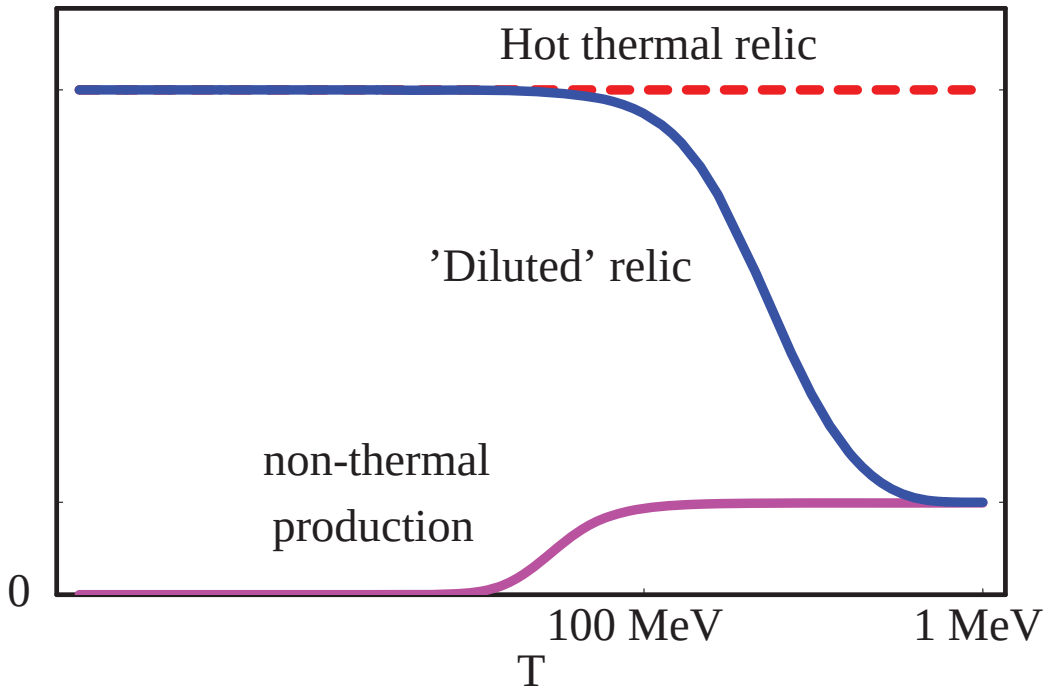


图 1.8: 图中蓝线是热产生 WIMP 在宇宙膨胀影响下遗迹和温度的关系，粉色曲线是非热产生 WIMP 遗迹曲线，起初非热产生暗物质丰度为零。

1.5 论文结构

本论文的主要工作包括两部分 PandaX 试运行的电子学与数据获取系统设计、搭建与测试以及电子学与数据获取系统升级。结构安排为：

- 第一章对课题研究背景进行简要介绍。
- 第二章介绍暗物质探测方法。
- 第三章介绍 WIMPs 信号和氙作为暗物质探测材料的特性。
- 第四章介绍 PandaX 暗物质探测器。
- 第五章介绍 PandaX 试运行的电子学与数据获取系统设计、搭建与测试。
- 第六章介绍改进后的的电子学与数据获取系统设计、搭建与测试。
- 第七章介绍 PandaX 电子学与数据获取系统的数据获取模式和相应的效率统计。
- 第八章为总结和展望。

2 暗物质探测

2.1 WIMPs 暗物质探测方法简介

根据天文学家对河外星系暗晕的观测推测，银河系也存在由暗物质构成的暗晕，估算能量密度 0.3GeV/cm^3。假设银河系的暗晕存在，实验就可以通过探测暗物质散射信号和湮灭信号来验证假设。还可以通过大型加速器探测物质产生暗物质粒子对。在暗物质实验设计过程中，要充分考虑到已有的理论对暗物质粒子性质的估算，以尽量压低实验本底和实验的不确定性。当前除了天文观测，比较流行的 WIMPs 寻找方法有三种：

- 地下暗物质直接探测实验。
- 地下暗物质非直接探测实验：大型天文望远镜、水下实验、卫星实验。
- 大型加速器暗物质粒子产生实验

直接探测实验是通过测量暗物质粒子与普通物质原子核的碰撞散射信号。非直接探测是测量暗物质湮灭成普通物质的信号。这些实验主要是验证暗物质粒子的存在性和它们与哪种粒子发生相互作用。加速器实验主要是在人为设定的实验条件下，研究粒子的物理特性，以便确定哪种理论框架是最佳的。

不论是直接探测还是非直接探测实验，都是基于对暗物质粒子性质的假设，实验也就具有一定的不确定性。通过以下几个问题可以验证实验的有效性：

- 冷暗物质的平均丰度是多少？
- 太阳系周围的暗物质粒子丰度分布和运动速度分布是什么？
- 在银河系暗晕形成过程中是否有遗迹存在？

除了周期很长的加速器实验，现在世界上还有大量的在建的、运行中的、设计中的暗物质探测实验，这些实验通常以一种或几种暗物质粒子作为寻找目标，实验都具有很低的环境本底。因此，事实上大部分暗物质探测实验都是通过寻找能量谱中一个新的峰来验证暗物质粒子的存在性。

2.2 地下暗物质实验室

在暗物质直接探测实验中，大气中的 μ 子宇宙线能与探测器中的靶物质相互作用产生中子，而中子很难和暗物质粒子区分。所以，地面直接探测暗物质实验中，通常竭尽所能的压低宇宙线本底，比如把实验室建在岩石覆盖中或水中。图

2.1展示了世界上已有的地下低本底实验室。图 2.2描述了各个实验室屏蔽层等水深（meters of water equivalent—MWE）和 μ 子宇宙线流强 [30]。

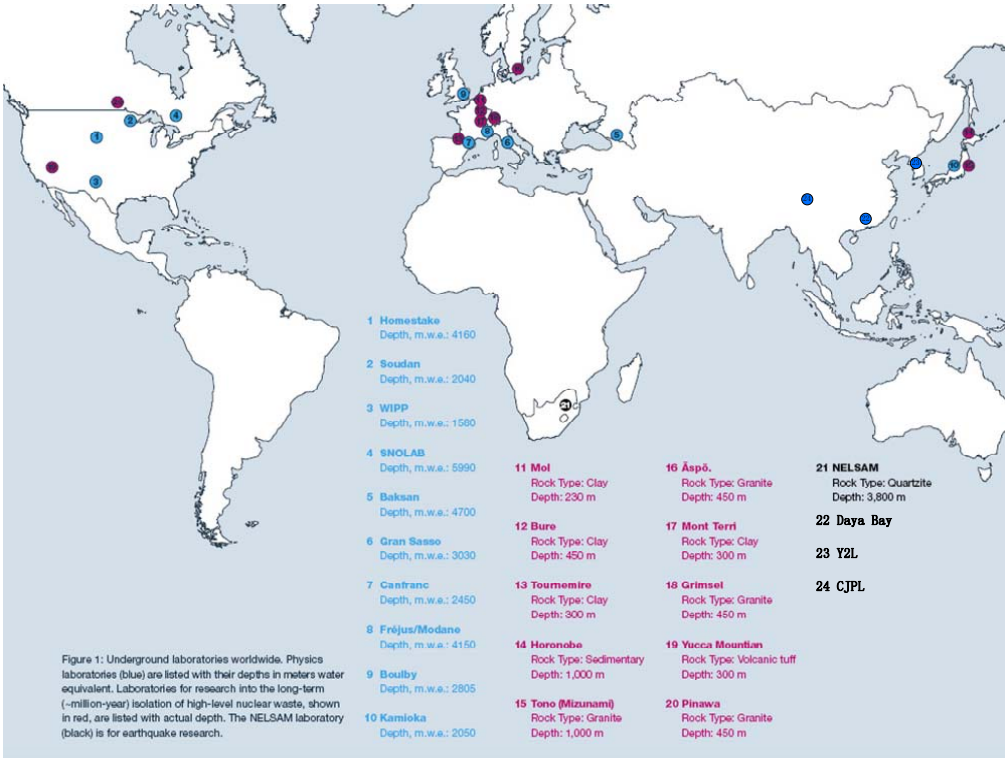


图 2.1: 世界范围内地下实验室分布图

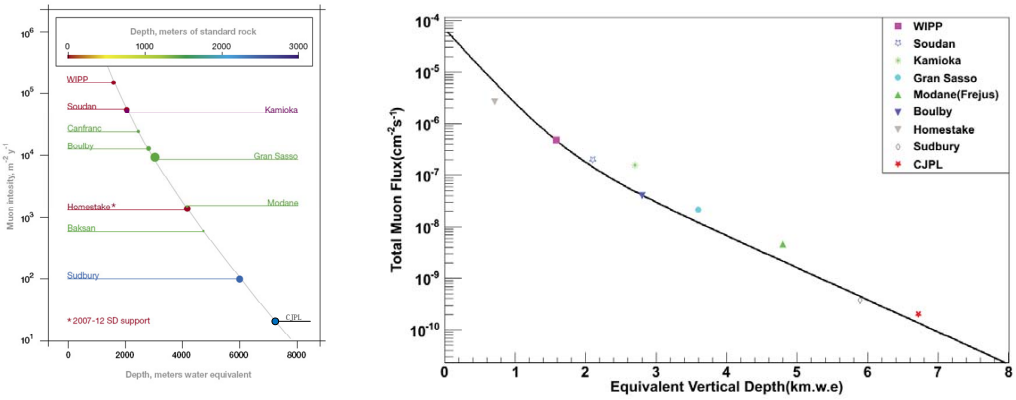


图 2.2: 左图：地下实验室宇宙线 μ 子流强对比：顶部坐标标志岩石覆盖，底部坐标标志屏蔽层等水深，纵坐标标志宇宙线 μ 子流强。右图：CDEX 实验测量锦屏地下暗物质实验宇宙线 μ 子流强和其他地下实验室的对比。

按照宇宙结构演化模型，星系中的发光物质通常被质量更大的暗物质云包裹。也就是说太阳系包括地球都在银河系的暗物质云中运动。如果暗物质粒子和普通

物质发生相互作用，原子核发生位移，从而产生标志暗物质粒子存在的信号。以中性伴随子为例，中性伴随子和普通物质相互作用在探测器中沉积的能量一般在1-100KeV 之间，在现今的高能敏探测器中是可以找到信号的。沉积能量的信号通常包括热信号、光信号和电离信号。暗物质相互作用的频率可以通过以下公式推算，$\bar{\omega}$ 是数学常量，n_χ 是 WIMP 的丰度，υ_χ 是 WIMP 相对探测器靶粒子的相对速度，σ_{ela} 是弹性散射截面：

$$R = \bar{\omega} n_\chi < \upsilon_\chi \sigma_{ela} > \tag{2.1}$$

如图 2.3已有的地面直接探测暗物质实验通常以下三种技术中的一种或几种：低温热信号探测，低温电离信号探测和闪烁光信号探测 [31]。当然还有其他探测技术可以测量 $10^{-8} \sim 10^{-10}$pb 的粒子碰撞截面.

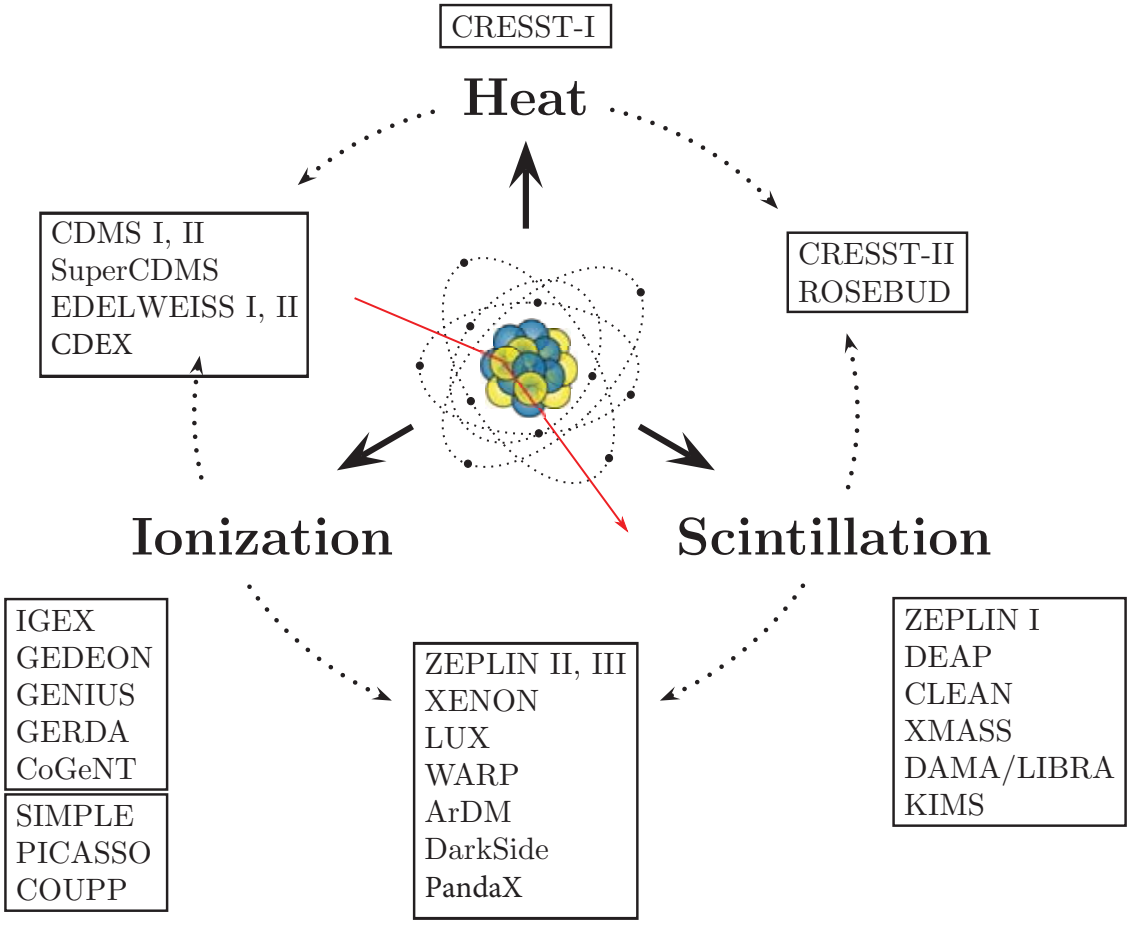


图 2.3: 已经应用的 WIMP 直接探测技术和相应的直接探测实验

表 2.1展示了世界上已有的地面直接探测和间接探测暗物质实验，其中直接探测实验最后三个在寻找轴子暗物质 [32]。现有的实验结果中，仍然没有找到暗物质

相关的信号，所以实验需要新的探测方法或者新的探测技术。很多下一代实验采取扩大探测器的规模以添加更多种类的探测器的方法提高实验的灵敏度。例如 MAX

Direct Dark Matter Search			
ADMX	ArDM	CDMS	COUPP
DAMA	DAMIC	DarkSide	DEAP/CLEAN
Edelweiss	Eureca	IGEX	LIBRA
NEWAGE	ORPHEUS	PandaX	Picasso
UKDMC	XENON	XMASS	WARP
Cogent	CRESST	CUORE	ROSEBUD
DM-TPC	DM ice	Drift	Zeplin
LUX	MIMAC	NAIAD	SIMPLE
TEXONO	ADMX	CAST	IAXO

Indirect Dark Matter search			
AMANDA	AMS	ANTARES	BAIKAL
CAPRICE	CTA	Fermi	GAPS
HESS	IceCube	IMAX	MACRO
NINA	Pamela	Super-K	Nestor
HEAT	BESS		

表 2.1: 暗物质直接探测和间接探测实验列表

探测器 (包括 XENON 合作组和 DarkSide 合作组) 计划用 10 吨的氙和 30-50 吨的氩把实验灵敏度提高到 WIMP 散射截面的级别或者进一步压低 WIMP 散射截面的上限 [33]。LZ 合作组（由 LUX 和 ZEPLIN 组成）计划在已有的 WIMP 探测灵敏度的基础上提高 3 个量级。还有欧洲的吨级低温暗物质探测实验 EURECA(European Underground Rare Event Calorimeter Array)。

2.3 暗物质直接探测实验

2.3.1 暗物质直接探测实验：DAMA/LIBRA

DAMA 暗物质实验是最早的直接探测暗物质实验。实验位于意大利 Gran Sasso 国家实验室，实验室被 1400m 的岩石覆盖相当于 3000m 等水深。第一代的 DAMA 探测器的靶材料是高纯度的 NaI 晶体，第二代 DAMA 探测器的靶材料是铊激活的碘化钠 (NaI(Tl)) 晶体。1997 年，第一代 DAMA 探测器 DAMA/NaI 声

称首次发现暗物质直接探测的信号。如图 2.4所示由于地球的公转，银河系暗晕和 DAMA 探测器之间的相对速度存在年调制现象，而暗物质信号的频率和相对运动速度成正比，所以探测器的信号频率也应该有一个年调制现象。DAMA 实验收集了 13 年总共 1.17 ton-year 的实验数据 [34]，验证了探测器计数率的年调制效应。图 2.5是 DAMA5300 天的实验数据和实验结论。年调制现象被认为是以地球为参考系 WIMP 运动速度的性质。

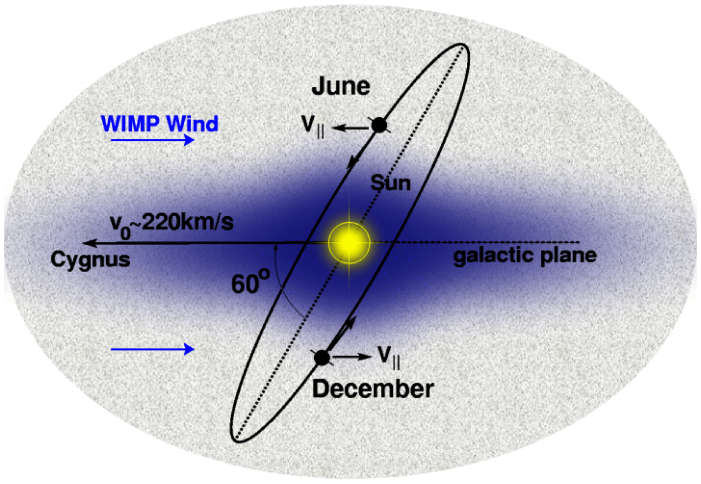


图 2.4: WIMPs 粒子信号随地球公转的年调制现象

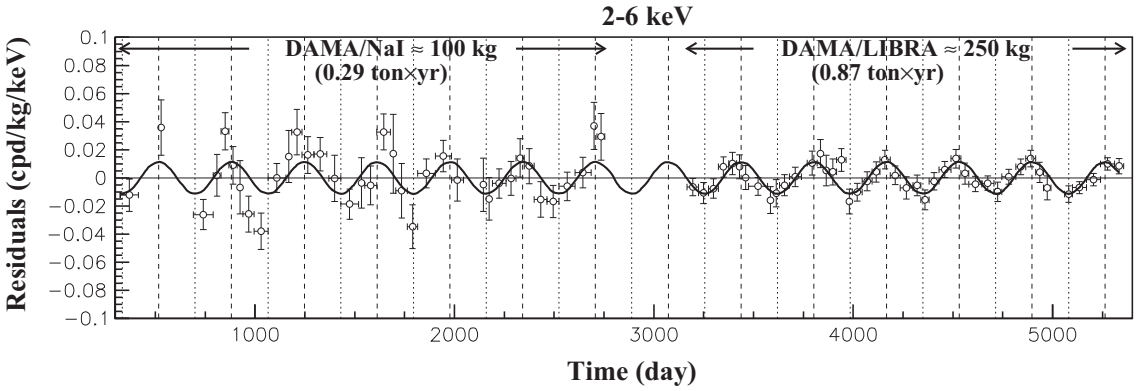


图 2.5: DAMA 实验年调制数据分析结果，疑似 WIMPs 粒子能量在 2-6keV 之间

DAMA 合作组在对 WIMP 年调制分析时，充分考虑到各种系统误差后，发现实验结果以 8.2 倍标准偏差的显著性给出结论：存在 WIMP 与模型无关的年调制。因此合作组认为他们发现了暗物质存在于银河系暗晕之中。DAMA 合作组会在 DAMA/LIBRA 一期结束后给出新的年调制分析结果。

DAMA 合作组的实验结果和 MSSM 模型中预言的 WIMP-原子核散射截面是

一致的。经过计算后得出，DAMA 实验看到的暗物质的质量为 m_χ=50Gev(散射截面 $\sigma_{\chi p} \approx 7 \times 10^{-6}$pb) 或者 6-10GeV （$\sigma_{\chi p} \approx 7 \times 10^{-3}$pb）。但是 DAMA 的实验结果和其灵敏度更高的直接探测实验的结果不符。有研究人员声称这个调制与 μ 子的调制及中子的调制有关联，但还没有得到广泛的承认。目前，这种争论还在持续，尚无明确定论，新的相似的年调制探测实验还在进行中。

2.3.2 暗物质直接探测实验：CDMS-II

低温暗物质探测技术是利用锗和硅半导体作为靶材料，通过测量核反冲信号来寻找暗物质。CDMS 一期的探测器位于斯坦福大学校园隧道之中，CDMS 二期放

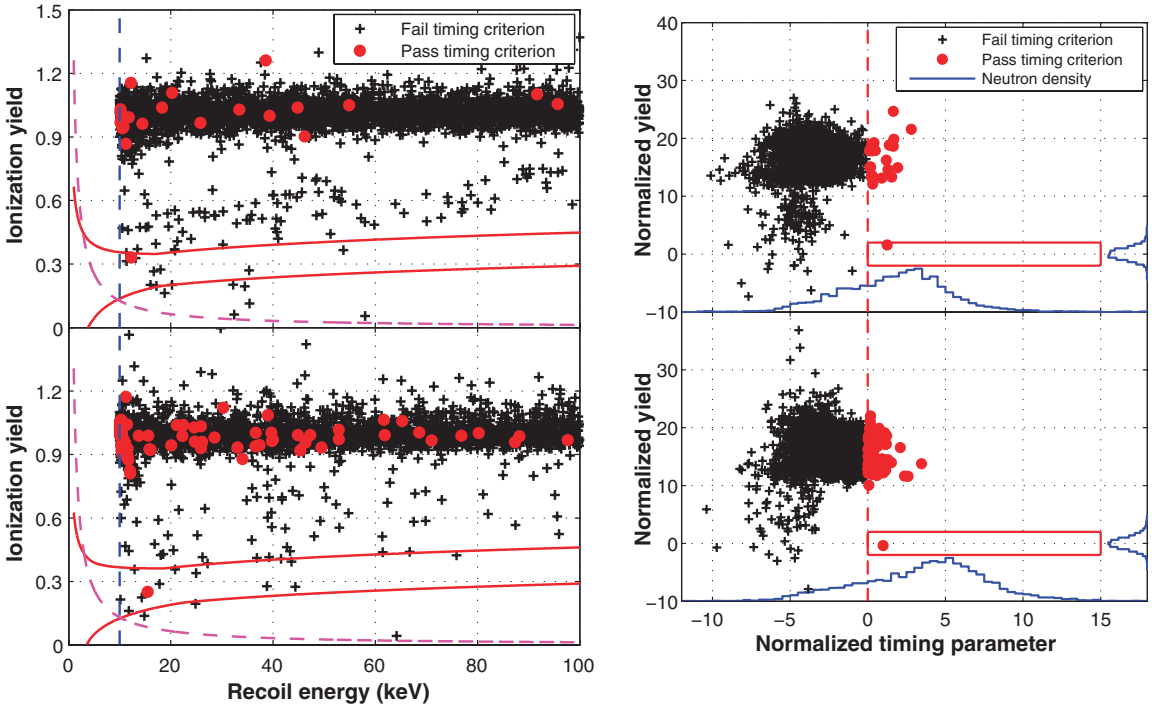


图 2.6: CDMS-II 实验结果：左图红色实线是电离信号能区，垂直虚线是反冲能量的阈值，洋红色虚线是电离信号阈值。两个疑似事例落在红线区域以内。右图是对疑似信号的归一化分析，红色矩形框内的是疑似事例。

置于美国明尼苏达州的 soudan 矿山 780 米深地下实验室中，以实现对宇宙线 μ 子更好的屏蔽。二期探测器通过测量一个晶体内 WIMP 与原子核的弹性碰撞所产生的声子来寻找暗物质，实验的精度可以达到几十个 keV。探测器工作在极地的温度下，以尽可能的避免探测器本身的原子核热运动产生的声子，CDMS 已经用冷却技术把主探测器的温度降到 10mK。CDMS-II 合作组在 2010 年发表了实验的分析结果，声称他们找到两个暗物质疑似事例，但是这两个事例的的信号显著性并不高[35]。图 2.6是的实验结果以及两个疑似事例。

CDMS 三期计划建造更大的探测器 SuperCDMS，探测器将具有更灵敏的声子探测单元，并将放在放在地下 2000m 的 SNO 实验室中。SuperCDMS 的宇宙线本底会比 CDMS 二期低 100 倍，实验预期对质量为 30GeV-100GeV 的 WIMPs 的散射截面精度提高到 10^{-10}pb。另一个低温探测器 EURECA (European Underground Rare Event Calorimeter Array) 将达到 1 吨，探测灵敏度预计为 10^{-11}pb。

2.3.3 暗物质直接探测实验：CoGeNT

CoGeNT (Germanium Neutrino Technology) 合作组利用高纯度低放射性的锗探测电离信号来寻找暗物质，致力于在更低质量范围内寻找暗物质信号 [36]。2009 年开始物理取数，接连找到几百个轻暗物质（$m_\chi \approx$ 7-11GeV，$\sigma_{\chi p} \approx 10^{-4}$pb）的疑似事例 [37]。但是大多数事例经过分析后，认为是探测器表面的本底，这大大打击了 CoGeNT 合作组寻找暗物质的积极性。利用 CoGeNT 实验的数据研究年调制效应，在 0.5-3.0KeVee 范围内看到了调制现象 [38]，但是在相同的置信度上也可认为没有震荡。图 2.7是 CoGeNT 实验年调试结果。最近，有研究者对 CoGeNT 的数

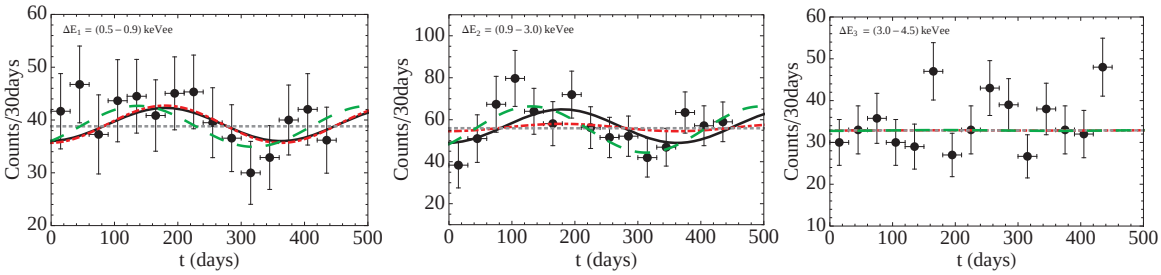


图 2.7: CoGeNT 实验年调试结果: 点线是数据的拟合曲线，实线是 7 GeV/c^2 WIMP 粒子的年调制理论曲线，没有看到高置信度的 WIMP 年调制信号。

据独立分析后声称 CoGeNT 实验存在年调制。CDMS II 和 XENON100 的实验结果已经排除了 CoGeNT 和 DAMA 的实验结果。

2.3.4 暗物质直接探测实验：CRESST

CRESST-II (Cryogenic Rare Event Search with Superconduction Themometers) 实验通过测量 WIMP 和原子核子在 $CaWO_4$ 晶体中散射产生的声子和闪烁光信号寻找暗物质 [39]。测量声子得到相互作用在探测器中沉积的能量，根据闪烁光能量的不同甄别不同的粒子和本底。实验总共取得了 730kg-day 的数据，找到了 67 个疑似事例 [40]。研究人员无法用本底信号解释这些事例，所以他们发表了置信度为 4σ 的 WIMP 疑似结果。图 2.8中 CRESST-II 合作组把他们的结果和已有的实验结果进行了对比。

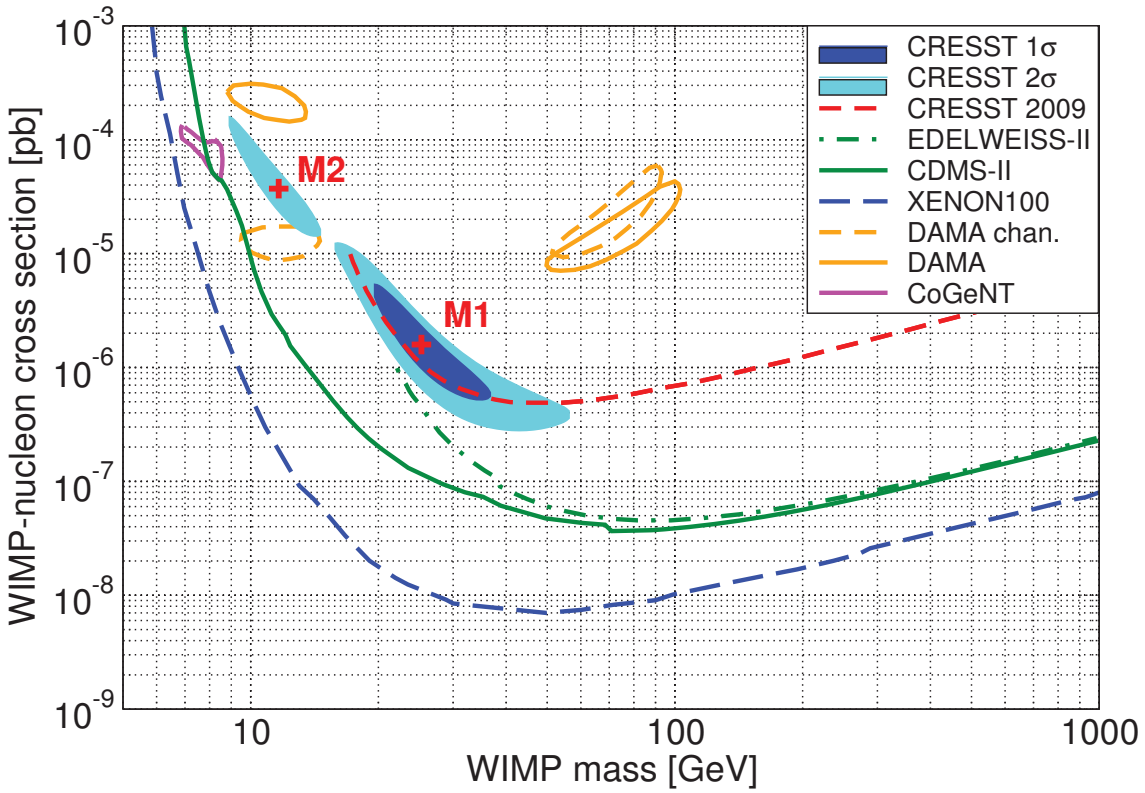


图 2.8: CRESST-II 实验结果和 CDMS-II, XENON100, 和 EDELWEISS-II 等实验对比

2.3.5 暗物质直接探测实验：XENON 100

XENON 100 合作组利用二相氙型时间投影室（TPC）测量 WIMPs 与氙核反冲产生的闪烁光信号和电子电离信号来探测暗物质 [41]。二相氙型 TPC 可以对原子核反冲和电子反冲信号进行甄别，能够计算得到探测器中事例的三维位置。图 2.9是 XENON100 的实验原理图。实验探测器靶材料总重约 170 kg, 其中最大有效质量为 62 kg. 实验已经发表的数据使用了 48kg 有效质量和 100 天有效时间的数据, 给出了暗物质与靶核碰撞截面的上限达到了 $7.0 \times 10^{-45} cm^2 (50 GeV/c^2)$ 和 $1.0 \times 10^{-44} cm^2 (100 GeV/c^2)$ [42]。实验结果对低质量 (10 GeV/c2) 暗物质区域 CoGeNT 实验探测到的可能信号提出了质疑。图 2.10 是 XENON100 的实验结果。

2.4 暗物质间接探测实验

2.4.1 暗物质非直接探测：带电粒子

研究人员可以寻找暗物质湮灭信号相关的正电子、反质子、反氘核一类的带电粒子间接探测暗物质。目前已经有实验在测量正电子超出能谱：

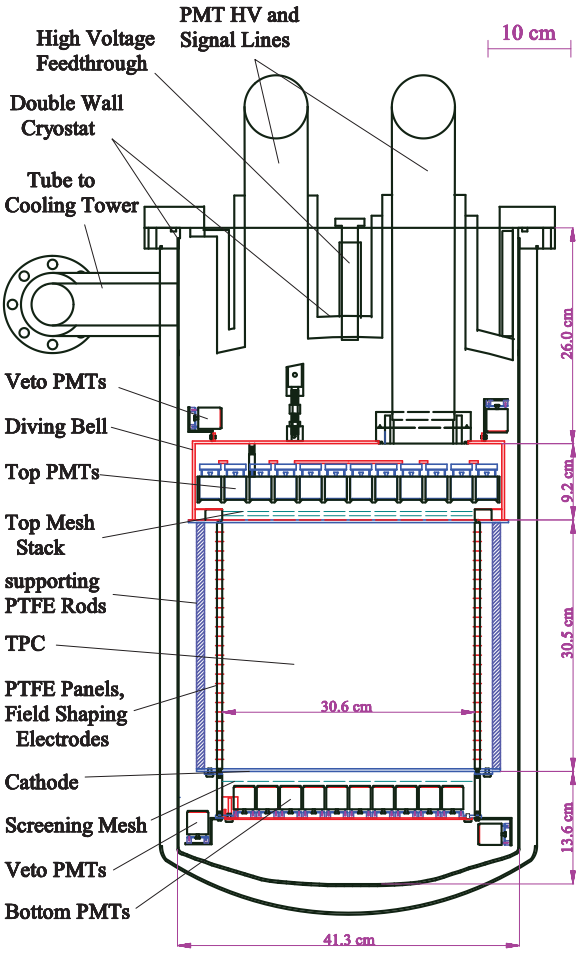


图 2.9: XENON100 探测器结构框架图

1、PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-Nuclei Astrophysics) 卫星实验在 10GeV-100GeV 能区范围内发现正电子在正负电子总能谱中所占的比例有一个明显的峰，远高于宇宙线理论所预言的结果 [43]，但是实验在并没有观测到反质子和质子比例异常 [44]。

2、FermiLAT (Fermi Large Area Telescope) 卫星实验确认了 PAMELA 卫星实验的结论，并且进一步确认正电子超常的能区上限到 200GeV。

3、FermiLAT 和 PAMELA 卫星实验都认为正负电子的能谱 $E^3 < \upsilon\sigma >$ 在 1000GeV 左右趋于平滑。

4、图 2.11是 FermiLAT 和 PAMELA 卫星实验实验结果 [45]。左图清晰地显示正电子在 10GeV-200GeV 能区与电子的比例明显异常。中图显示反质子流量相对于天文物理学本底没有明显的异常。右图是正负电子的总能谱 $E^3 < \upsilon\sigma >$，正电子异常的部分不能用电子的修正能谱解释。

正电子数异常或许可以用天文物理起源理论或者暗物质理论解释。天体物理

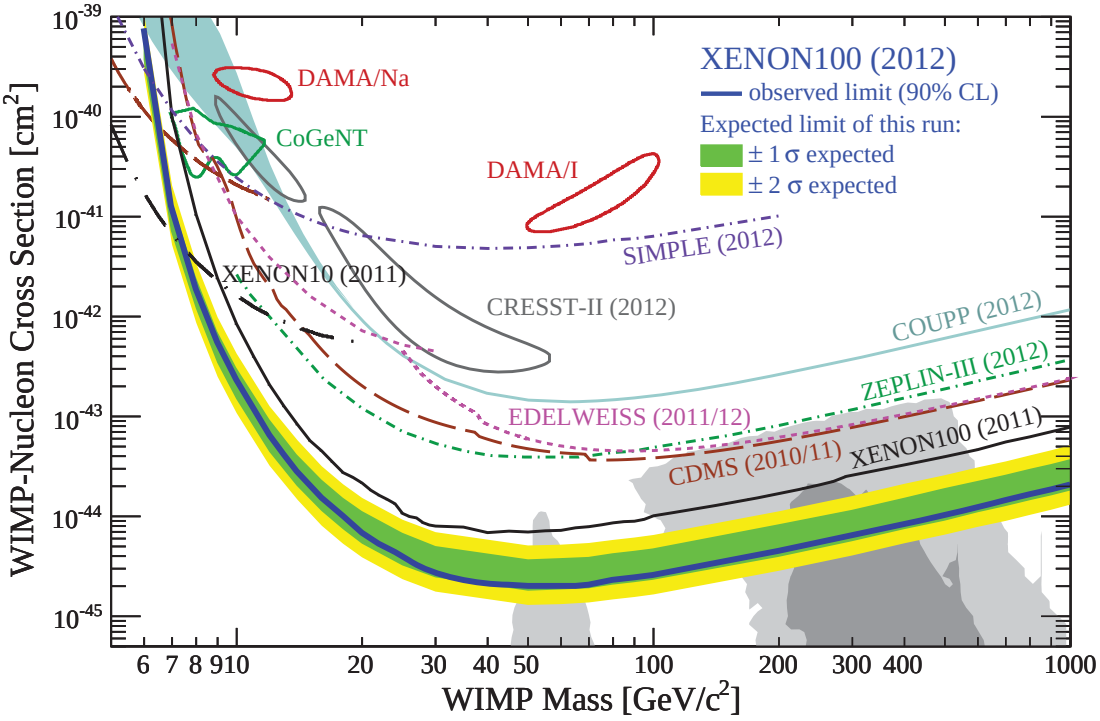


图 2.10: XENON100 实验结果：

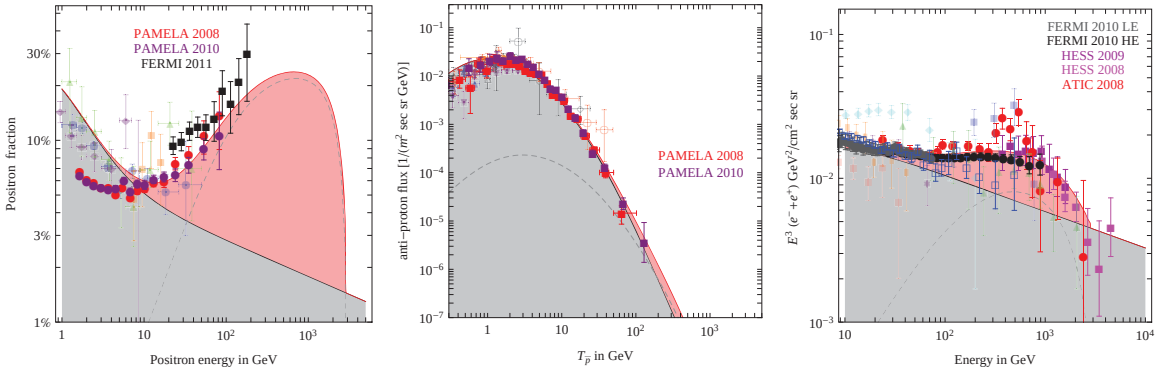


图 2.11: 左图：不同实验对正电子超出的测量，红色和紫色源于 PAMELA2008 年和 2010 年实验结果，黑色源于 FermiLAT2011 年实验结果。中图：PAMELA 对反质子流量的测量。右图：正负电子能谱在几百个 GeV 能谱趋于平缓，浅灰色是天文物理学本底，红色区域是异常区域。

中, 认为是太阳系附近的超新星遗迹、脉冲星等引起正电子数超出, 或者是宇宙线传播过程中所造成的. 而如果通过暗物质理论解释需要满足以下条件：

1、暗物质粒子的质量足够大，因为正负电子能谱在几个 TeV 附近。

2、暗物质粒子主要和轻子相互作用, 湮灭后容易产生轻子，而不是夸克，因为实验并没有观测到反质子超出。

3、为了解释正电子超出，要求暗物质的速度达到 0.1c 的湮灭截面要达到 $3 \times 10^{-26} cm^3/s(1\text{pb})$。

然而 CDMS, XENON 等暗物质直接探测实验给出的暗物质散射截面远小于理论参照 PAMELA 实验数据的计算值。现在研究人员需要国际空间站上的 Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02) 能给出比现在的结果更加精确且能量范围更广的实验数据。2013 年，AMS-02 实验进一步确认了之前的卫星实验正电子超出的结论，并进一步提高正电子超出能量范围 [46]。图 2.12展示了 AMS-02，FermiLAT 和 PAMELA 实验的数据对比：

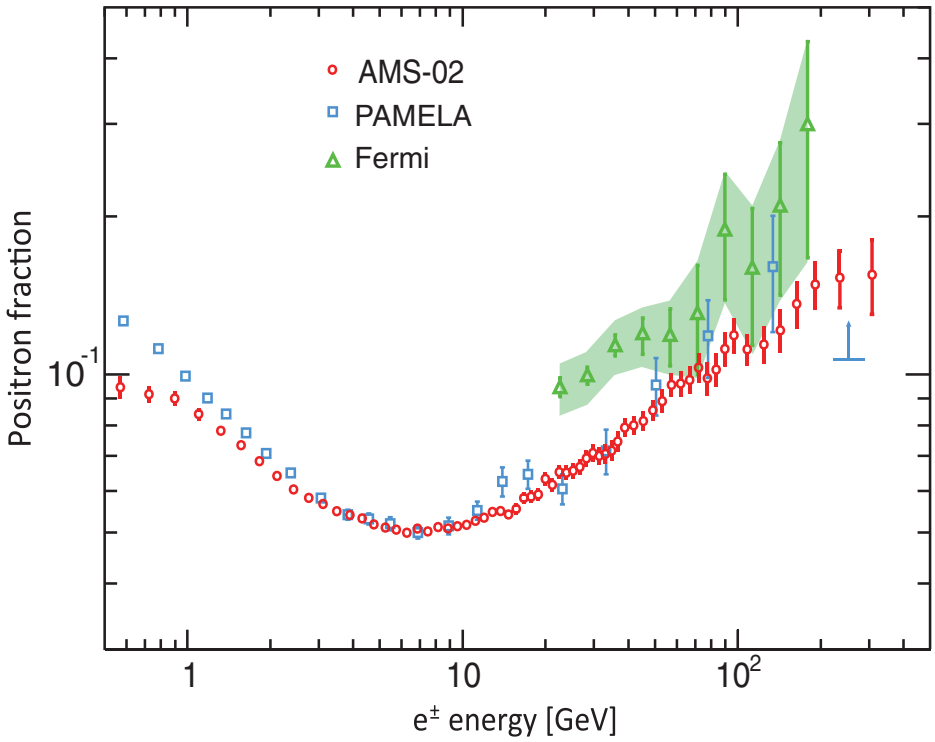


图 2.12: AMS-02, PAMELA, 和 Fermi 实验给出的正电子超出实验结果

1、AMS-02 和 PAMEL 实验在正电子低于 2GeV 能区的数据不一致。

2、AMS-02 和 FermiLAT 实验在 100GeV 能区具有相同的结构，FermiLAT 实验之前的数据在这个能区误差过大。

3、AMS-02 提高正电子超出能量范围到 350GeV，研究在高于 350GeV 能区需要更多的数据统计量确认能谱的走向。

2.4.2 暗物质非直接探测：光子

暗物质湮灭过程中会产生两种伽马射线，一种是直接湮灭成一对光子形成线性光谱，另一种是湮灭的次级产物 [47][48]。当暗物质湮灭产生一对高能带电粒子后，

粒子衰变成一对高能光子，或者带电粒子通过韧致辐射产生光子。由于暗物质粒子的运动速度很低，所以直接湮灭产生的光子总能量就是暗物质粒子质量，研究期待在星系中心或者矮星系这种暗物质丰度比较高的地方观测到线性谱形的伽马射线信号。已经有 FermiLAT, Hess 天文望远镜和 VERITAS 天文望远镜通过观测来自 dSphs[49][50]、星系团 [51][52]、星系黑洞 [53] 的 GeV 能区以上伽马射线来寻找暗物质。迄今为止，还没有实验宣称找到暗物质信号。目前 FermiLAT 实验通过观测银河系的卫星星系增加伽马射线的统计量 [49]，图 2.13是实验对 10 个矮星系的分析结果。最近对 FermiLAT 实验数据研究表明存在暗物质湮灭到光子的可能性。

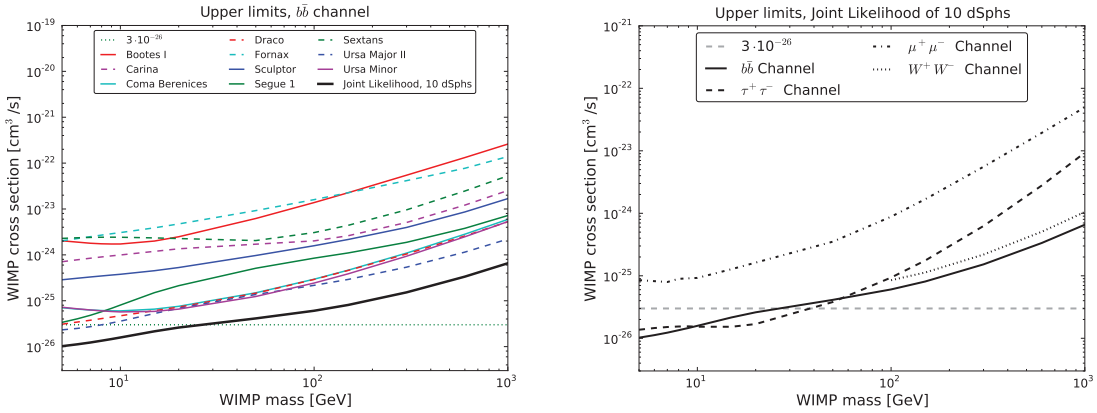


图 2.13: FermiLAT 对 10 个 dSphs 观测结果经过分析后给出的下限

2.4.3 暗物质非直接探测：中微子

暗物质湮灭过程中产生的中微子和反中微子可以很好地描述暗物质的性质。由于中微子只参与弱相互作用，所以具有超长的平均自由程，因此对于来自银河系中心高能中微子，探测器可以放置在地下实验室中以提高对本底的屏蔽效率。世界上已有的中微子探测器都可以用于暗物质探测，虽然还没有中微子探测器发现暗物质证据，但是探测器的实验结果可以用于对暗物质粒子质量和散射截面的约束。图 2.14是中微子探测器给出的实验结果和直接探测实验的结果对比 [54]。

图 2.15给出 Super-K 在小于 20GeV 低能区的数据分析结果与 DAMA 和 CoGeNT 实验结果对比 [55]。图的上半部分描述了自旋独立的散射截面，下半部分描述自旋相关的散射截面。DAMA 和 CoGeNT 声明的暗物质能区被 CDMS 实验和 Super-K 实验 $\nu\bar{\nu}$ 道否定。

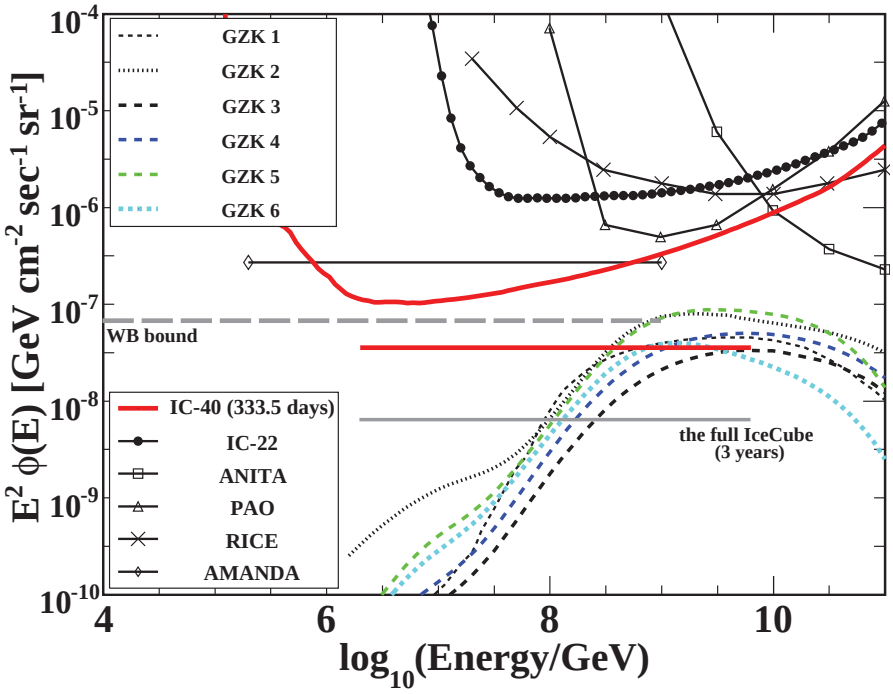


图 2.14: 部分直接探测和间接探测实验给出的自旋独立 WIMP 粒子与质子的散射截面关于 WIMP 粒子的质量分布

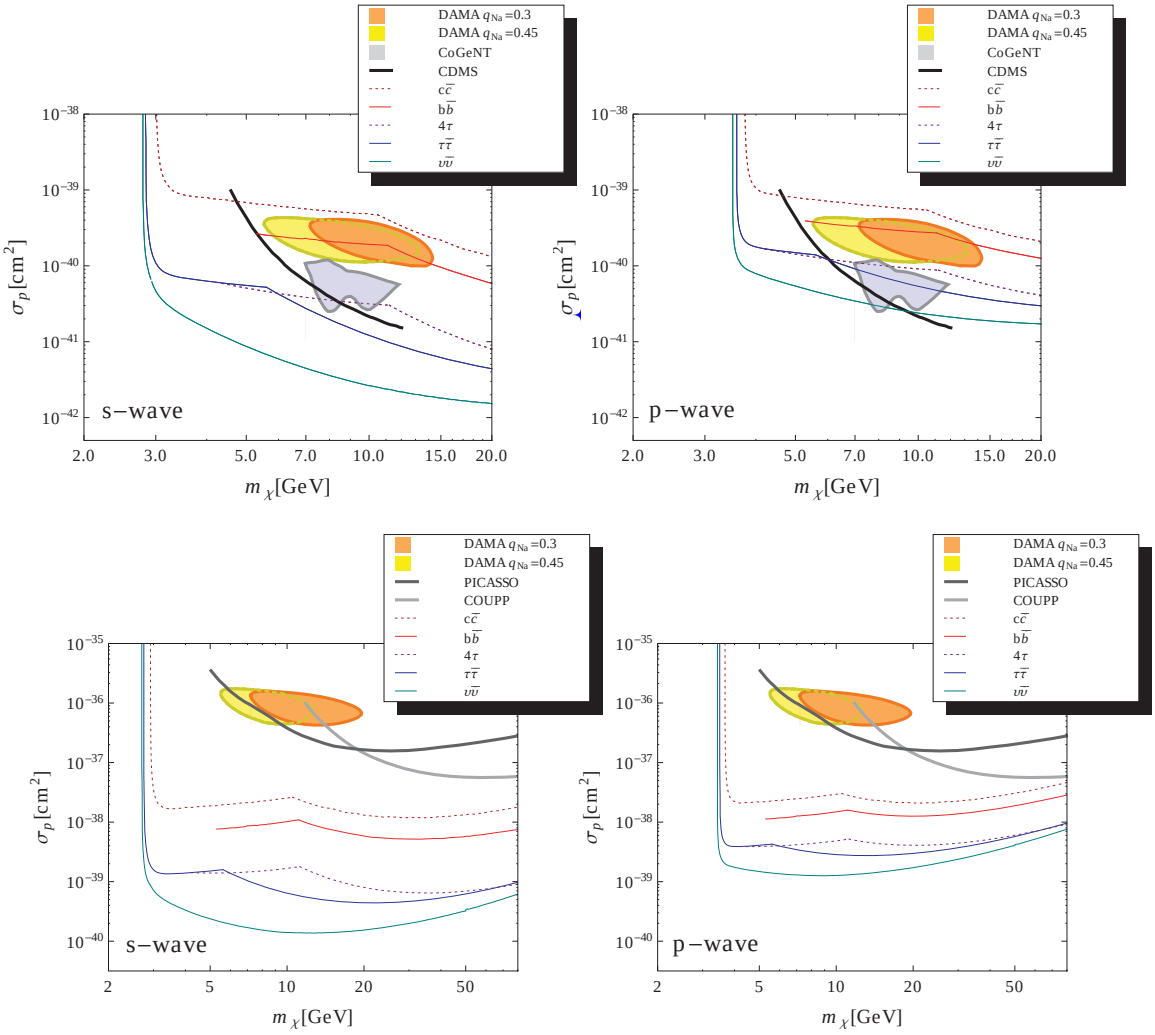


图 2.15: 直接探测实验和间接探测实验结果的对比，DAMA, CoGeNT, 和 CDMS 是直接探测实验，图中相应的是这些实验非直接探测的结果。Super_Kamiokande 的实验数据来自 $\nu\bar{\nu}$ 道

3 WIMPs 信号及氩闪烁体

3.1 WIMPs 信号

这里我们将按照 Lewin and Smith 的方法研究 WIMPs 的反冲能谱 [56]。WIMPs 反冲能谱是由 WIMPs 的质量 M_χ，靶核质量 M_T，归一化参数 F，WIMPs 与靶核相对速度描述：

$$dn = \frac{n_0}{k} f(\upsilon, \upsilon_E) d^3\upsilon \tag{3.1}$$

n_0 是 WIMPs 的数密度，k 是归一化常数，υ 是 WIMPs 和靶核的相对速度，υ_E 是靶核相对于银河系的速度。当 υ_E=0 时，υ 服从麦克斯韦 -玻尔兹曼分布，

$$f(\upsilon, 0) = e^{-\frac{\upsilon^2}{\upsilon_0^2}} \tag{3.2}$$

上限是银河系逃逸速度 υ_{esc}。如果 υ_E 不为零，那么 υ 期望值就是 -υ_E。所以，

$$k = (\pi\upsilon_0^2)^{\frac{3}{2}} [erf(\frac{\upsilon_{esc}}{\upsilon_0}) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\upsilon_{esc}}{\upsilon_0} e^{-\frac{\upsilon_{esc}^2}{\upsilon_0^2}}] \tag{3.3}$$

靶物质单位质量相互作用的频率取决于单位质量靶核数 M_T^{-1}，靶核散射截面 σ_T，WIMPs 流强 υdn，

$$dR = \frac{1}{M_T} \sigma^T \upsilon dn \tag{3.4}$$

对上式积分就可以得到总的 WIMPs 散射频率。为了观察不同的能量谱，我们首先假设质心系中散射是各向同性的。引入质心系中的散射角度 θ_{cm}，核反冲能量为，

$$E_r = M_\chi \upsilon^2 (1 - cos\theta_{cm}) \frac{M_T M_\chi}{(M_T + M_\chi)^2} \tag{3.5}$$

$cos\theta$ 角分布在各向同性的散射中是归一化的，对于给定的 WIMPs 速度，在 0 到 $\frac{1}{2} M_\chi \upsilon^2 \frac{4 M_T M_\chi}{(M_T + M_\chi)^2}$ 能看到平滑的反冲能谱。然后我们得到新的核反冲能谱，

$$\frac{dR}{dE_r} = \frac{(M_T + M_\chi)^2)}{2 M_T^2 M_\chi^2} \frac{\rho_0}{M_\chi} \frac{\sigma_T}{k} \int d^3\upsilon \frac{\Theta(\upsilon_{esc} - |\upsilon + \upsilon_E|) \Theta(E_{r.max} - E_r)}{|\upsilon|} e^{-\frac{|\upsilon + \upsilon_E|^2}{\upsilon_0^2}} \tag{3.6}$$

其中 Θ 函数限制了 WIMP 晕的速度和核反冲能量。假设取 υ_E=0,$\upsilon_{esc}=\infty$，函数就简化为，

$$\frac{dR(\upsilon_E=0,\upsilon_{esc}=\infty)}{dE_r}=\frac{1}{M_T}\frac{\rho_0}{M_\chi}\frac{2\upsilon_0\sigma_T}{\sqrt{\pi}}\frac{1}{E_0 r}e^{-\frac{E_r}{E_{0r}}} \tag{3.7}$$

其中 $E_0=\frac{1}{2}M_\chi\upsilon_0^2$ 是 WIMP 的能量均值，$r=\frac{4M_TM_\chi}{(M_T+M_\chi)^2}$。在不考虑 υ_E，υ_{esc} 核输入项的情况下，核反冲能量谱只是呈下降趋势的指数分布，平均值是 E_0r，在 $M_T=M_\chi$ 达到最大。Lewin 和 Smith 取 $\rho_0=0.4GeV/c^2cm^3,\upsilon_0=230km/s,\upsilon_{esc}=600km/s,\upsilon_E=(244+15sin(2\pi y))km/s$，其中 y 是自开始的时间。

我们还需要确定 σ_T 的值，σ_T 代表方程中的相干项和核输入项。当相互作用动量 $q=\sqrt{2M_TE_r}$ 传递很少时，$\frac{h}{q}$ 项远大于靶核的大小，散射在整个原子核中是一致的。在自旋独立的相互作用中，所有的靶核对散射的贡献是相同的，所以散射截面与靶核数 A 的平方有关。而且散射截面和减少质量的平方相关。因此，

$$\sigma_T(q=0)=A^4\frac{(M_n+M_\chi)^2}{(AM_n+M_\chi)^2}\sigma_n \tag{3.8}$$

M_n 是原子核的质量，σ_nWIMP 与一个原子核的散射截面，取 $M_T=AM_n$，q=0 限制了相干项。

对于更高能量的核反冲，原子核内的散射分布开始起作用，也就否定了自旋独立散射里的相干项 A^2。因此，把散射截面写成一个参量的函数，

$$\sigma_T(q)=\sigma_T(q=0)F^2(q) \tag{3.9}$$

其中，对于自旋独立的散射，F(q) 是原子核质量分布的傅里叶变换。Helm 对质量分布在半径 R_0 内是常量的情况下给出了形状因子的解析解，高斯宽度为 s，

$$F(q)=\frac{3j_1(qR_0)}{qR_0}e^{-\frac{(qs)^2}{0}} \tag{3.10}$$

其中 j_1 是球形贝塞尔方程，Lewin 和 Smith 建议 s=0.9fm。

综合以上方程，可以计算得出三种不同材料（锗 (A=73), 氙 (A=131), 和氩 (A=40)）的自旋独立核反冲能谱。图 3.1是这三种材料的核反冲能谱，都呈指数下降，低能区核反冲截面最大的是氩，但在高能区由于较大的核子数干扰散射的相干性而急剧下降。

假设 WIMP 质量是 100GeV，那么 WIMP 和氙原子核的散射截面就是 $\sigma_p=5\times10^{-7}pb(5\times10^{-43}cm^2)$。在核反冲能量大于 15 keVr 时，散射截面换算成散射频率是 0.1 event/kg/day。

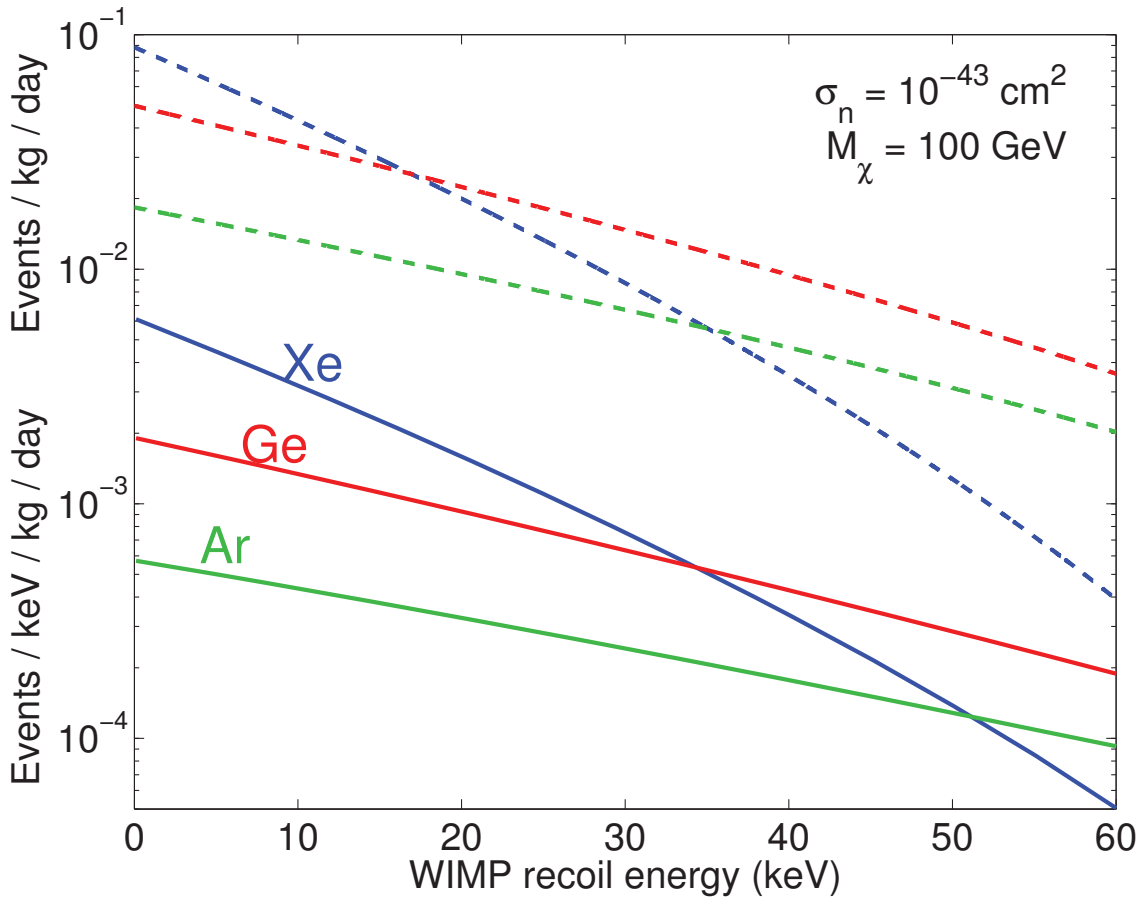


图 3.1: 锗，氙和氩自旋独立核反冲能谱

3.2 WIMPs 探测材料：氙

本节会详细介绍氙作为二相型暗物质探测器靶材料的相关性质。如氙把相互作用沉积能量转化为光信号和电信号的能力，二相氙在 TPC 中对不同粒子的甄别能力，氙的放射性本底等。

3.2.1 氙的物理特性

氙是自然界中存在的核子数最大的无放射性惰性气体，大气中的含量约为 0.1ppm。液氙是工业技术上液化气体分离氧气和氮气过程中的副产物，一般通过精馏技术把液氙从液氧中分离出来。但一般液氧中分离出来的氙还包括氪，需要进一步的精馏提纯。

氙是自然界中同位素种类最多的元素之一，有 9 种同位素。但是，氙没有半衰周期很长的同位素，衰变周期最长的是 ^{127}Xe，其半衰期也只有 36.3 天。由于氙在自然界条件下的低放射性，使得它在稀有探测实验中得到广泛的应用。^{129}Xe 和 ^{131}Xe 的自旋不为零，可以通过实验验证与暗物质自旋相关的相互作用。

不考虑实验探测器靶材料放射性的情况下，把沉积能量转换成可探测的物理信号是靶材料最重要的性质。液氙就是一种在电离过程中闪烁光和电离电子都很多的靶材料。根据理论计算，液氙对于相对论速度的电子，闪烁效率约为 45×10^3photons/MeV, 是一种比较理想的闪烁体材料，而且氙对自身的闪烁光是透明的。而且氙的电子迁移率很高，其中的自由电子可以在外加电场中漂移。表3.1是氙的物理特性以及与粒子探测相关的特性。

Property	Value
Atomic Number (Z)	54 [a]
Atomic Weight (A)	131.29 [a]
Boiling Point at 1 atm (T_b)	165.0 K [b]
Melting Point at 1 atm (T_m)	161.4 K [a]
Liquid Density at Boiling Point (ρ_L)	$2.94\,\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-3}$
Refractive Index n	1.56 [b], 1.69 [c]
Liquid Dielectric Constant (ϵ)	2.85 [d]
Liquid Relative Permittivity ($\epsilon_{r,liq}$)	1.88 (at triple point)[e], 1.96 [f]
Dielectric Strength	$40\,\mathrm{kV/mm}$ [g]
Scintillation Wavelength (λ_s)	178 nm [h]
Energy / scintillation photon (W_{ph})	21.6 eV [i]
Energy / ionization electron (W)	15.6 eV[j]
$Xe_2^\star$ singlet lifetime (τ)	2.2 ns [k]
$Xe_2^\star$ triplet lifetime (τ)	27 ns[k]
XENON10 Temperature	177 K
XENON10 Pressure	2.11 atm
XENON10 Drift Field $\mathcal{E}_d$	$0.73\,\mathrm{kV}\cdot\mathrm{cm}^{-1}$
XENON10 Extraction Field $\mathcal{E}_d$	$\sim 12\,\mathrm{kV}\cdot\mathrm{cm}^{-1}$
XENON10 Total Xe mass	$\sim 23\,\mathrm{kg}$
XENON10 Active Xe mass	$\sim 15\,\mathrm{kg}$
XENON10 Fiducial Xe mass	$\sim 5.4\,\mathrm{kg}$
XENON10 Active Xe volume dimensions	$h = 15\,cm$, $d = 20.3\,cm$
XENON10 Fiducial Xe volume dimensions	$h = 9.4\,cm$, $d = 16\,cm$

表 3.1: 氙物理特性以及与粒子探测相关的特性。a∼k:[1]，[2]，[3]，[4]，[5]，[6]，[7]，[8]，[9]，[10]，[11]。

3.2.2 氙的闪烁信号特性

如图 3.2所示，粒子与氙发生相互作用，并把能量传递给氙原子，氙原子再以电离电子或闪烁光子的形式释放出来。粒子和氙原子核或者原子核外围电子发生相互作用产生闪烁光的机制是相同的。反冲核或者电离电子在氙中的沉积能量，导致氙原子被激发或者电离。如果氙原子处于激发态，会在 $10^{-11} - 10^{-12}$s[57] 内和基态氙原子组成激发态的 Xe_2^*。

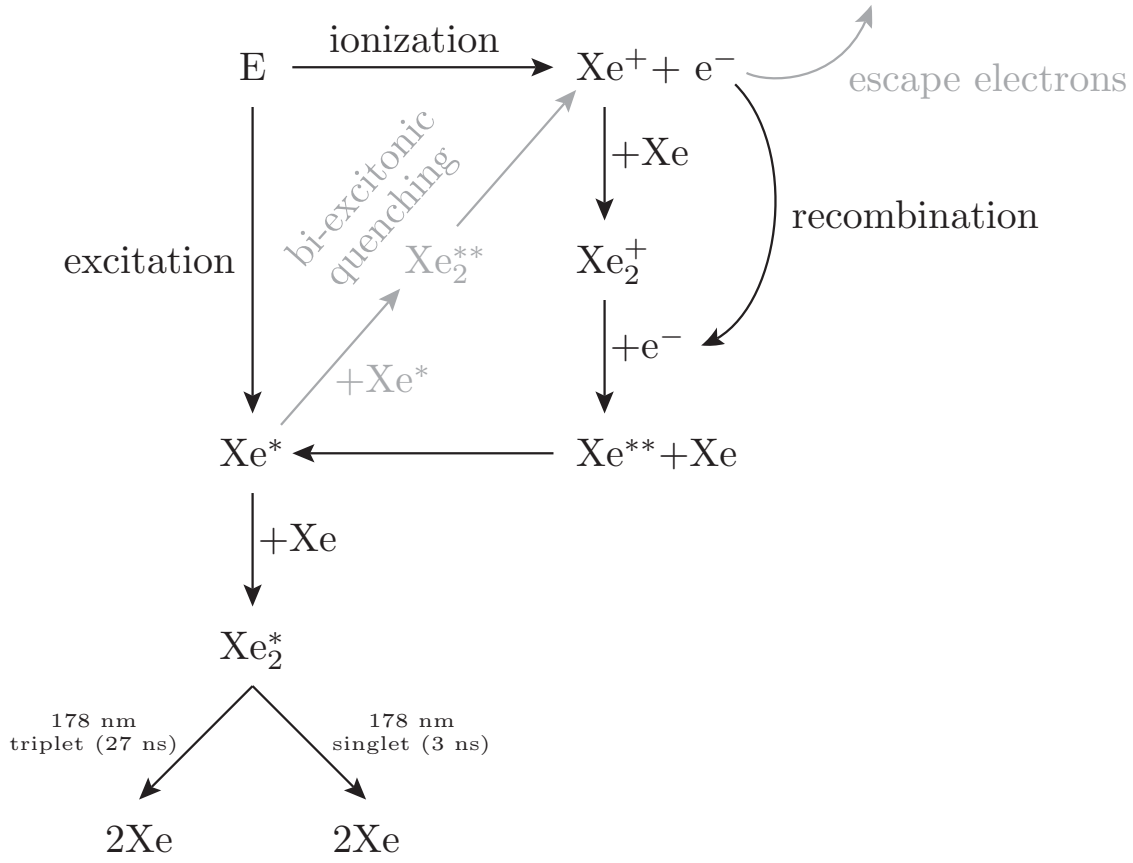


图 3.2: 液氙的闪烁光和电离电子产生原理

$$Xe^* + Xe \rightarrow Xe_2^* \tag{3.11}$$

然后会退激发到氙原子并释放紫外光，

$$Xe_2^* \rightarrow 2Xe + h\nu \tag{3.12}$$

其波长分布的峰值是 178nm，半高全宽 FWHM=14nm。[9] 如果氙原子被电离，也会在 $10^{-11} - 10^{-12}$s 内和基态氙原子组成电离的 Xe_2^+，

$$Xe^+ + Xe \rightarrow Xe_2^+ \tag{3.13}$$

电离的分子态可以吸收一个电子，形成一个二重激发态的氙原子，

$$Xe_2^+ + e \rightarrow Xe^{**} + Xe \tag{3.14}$$

$$Xe^{**} \rightarrow Xe^* + heat \tag{3.15}$$

这个过程的特征时间是 $\tau_R = 45ns$[11]。过程产生的激发态氙原子会继续和基态氙原子结合，并最终释放出光子。在液氙探测器中，闪烁光信号被光电倍增管接收、等比例放大，这个信号被称为 S1 信号。氙分子的单重态和三重态的衰变时间常数分别为 $\tau = 2.2ns$ 和 $\tau = 27ns$[58]，衰变产生的闪烁光波长都是 178nm。

然而当给探测器加上外加电场 ε_d 后，电离氙原子产生闪烁光的过程就被压制了，导致 S1 信号幅度减小。氙原子被电离的过程中，自由电子云围绕在相互作用的位置上。当有外加电场 ε_d 给探测器后，一部分电子就会从电子云中逃逸，从而降低参与复合的自由电子。外加电场越高，逃逸自由电子越多，闪烁光产额越低，这种效应被称为淬灭过程。图 3.3是电子在外加电场中闪烁光的淬灭效应 [59]。

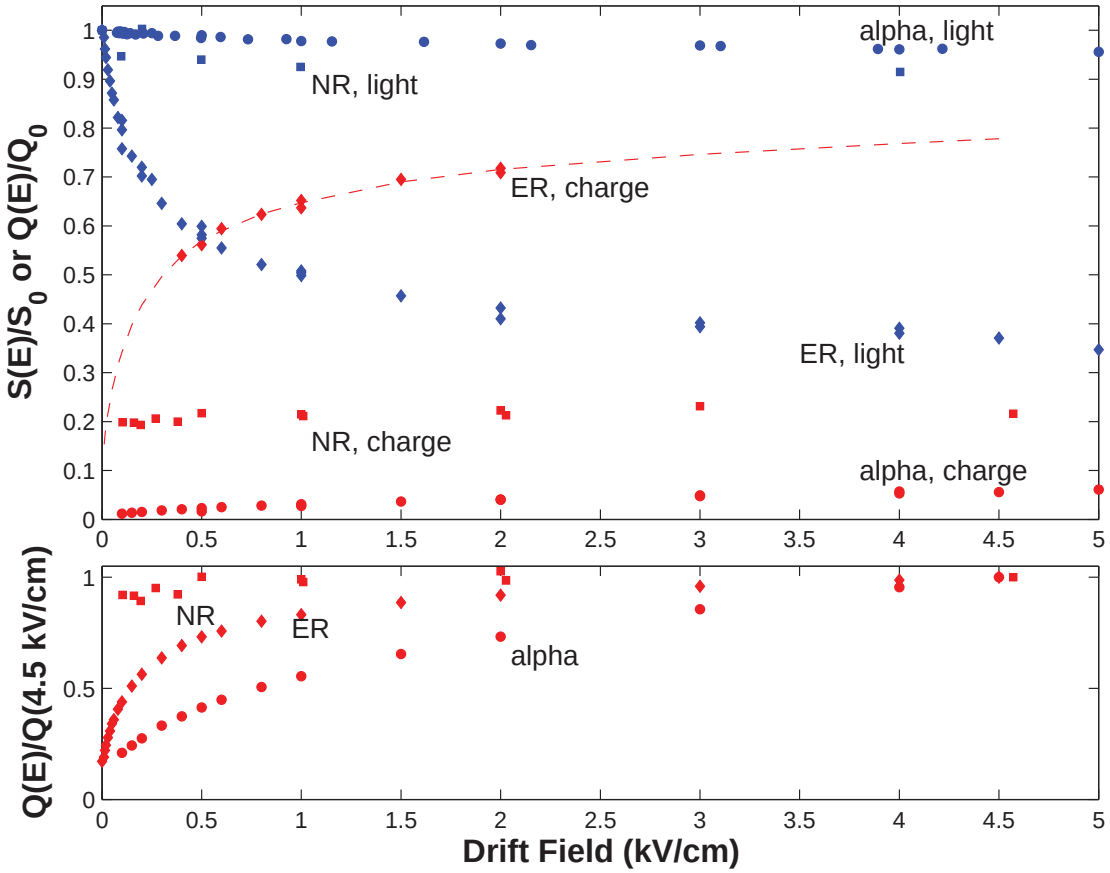


图 3.3: 液氙的闪烁光和电离电子随外加电场的变化, 蓝点是闪烁光产额，红点是漂移电子电离光产额

不同的相互作用（电子反冲和核反冲）的复合效率也不一样。S1 信号的形状与外加电场有关，没有外加电场时，信号的衰减时间和自由电子复合的时间也就是 45ns，当加上外加电场时，自由电子的复合被压制，如果电压足够高，S1 信号的衰减时间就越接近三重态的衰减时间 27ns。

3.2.3 氙的电离信号特性

在液氙探测器中加入外加电场 ε_d，会对闪烁光信号 S1 造成压制，但同时电场也把相互作用产生的电信号剥离出来，形成液氙探测器中的电离信号。逃逸电子沿电场相反方向运动，在气液二相氙探测器中，电子漂移到气液二相界面后，气氙中有更高的外加电场 ε_e，电子在气氙中被进一步加速，并在气氙中产生电离信号。电子电离的信号正比于逃逸电子数，被称为等比例闪烁光信号 S2。

电子在液氙中的漂移速度 v_d 和漂移电场 ε_d 的关系 [60]，如图 3.4所示。S1 信号和 S2 信号之间的时间差取决于逃逸电子的漂移时间，漂移时间的值取决于漂移速度、相互作用发生的纵向位置。

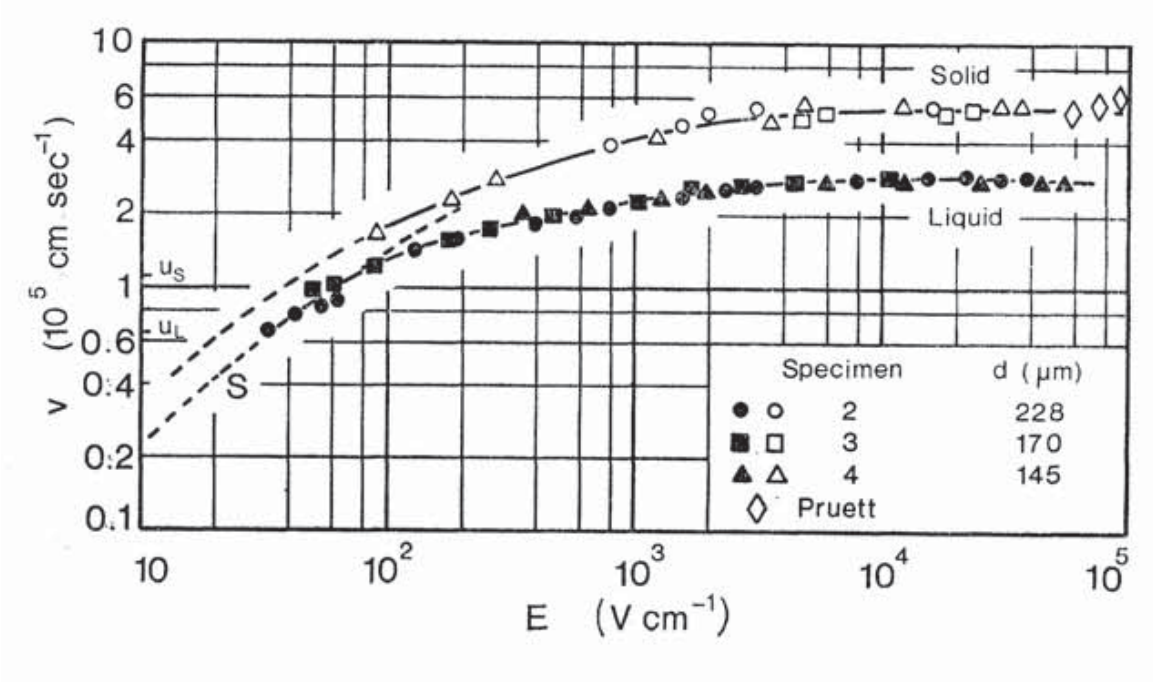


图 3.4: 逃逸电子在液氙中的漂移速度与外加电场之间的关系

逃逸电子数是外加电场的函数，一般用逃逸电子数和最大逃逸电子数 ($\varepsilon_d \to \infty$) 的比来表征。相对电离效率

$$Q(\varepsilon_d \to \infty) = E/W \tag{3.16}$$

其中 E 是相互作用沉积的能量，W 参数（液氙中 W=15.6eV）。图 3.3展示了相对电离效率和外加电场的关系。相互作用产生的闪烁光和电子存在联系，所以理论计算闪烁效率和电离效率用下式描述 [61]，

$$\frac{S(\varepsilon_d)}{S(0)} = a \cdot (1 - \frac{Q(\varepsilon_d)}{Q(\varepsilon_d \to \infty)}) + b \tag{3.17}$$

其中 a 和 b 是激发态和电离态相关的参数。总的来看，闪烁效率和电离效率呈反相关. 逃逸电子在气液二相界面上，被更高的外加电场以接近 100% 的的效率加速到气体中，形成场致发光。每一个逃逸电子在气氙中产生的光子数由气室深度 x，外加电场 ε_e 决定 [62],

$$N_{ph} = 70 \cdot (\frac{\varepsilon_e}{p} - 1) \cdot x \cdot p \tag{3.18}$$

其中 p 是气氙的压强。计算发现 S2 的信号远大于 S1 信号，所以通过 S2 可以更好的触发沉积能量很少的事例。

S2 信号的时间宽度由气室的深度 x 决定，信号的形状在实验中呈高斯谱型，平均半高全宽 FWHM 约为 600ns。由于电子云在液氙中运动时的扩散效应，S2 时间宽度还与相互作用的位置 z 有关。

4 PandaX 地下暗物质探测器

PandaX 地下暗物质探测器致力于直接探测暗物质和 ^{136}Xe 双贝塔衰变 [63]。探测器设计与意大利 XENON 合作组和美国 LUX 合作组类似，PandaX 探测器也是二相氙型 TPC 探测器。探测器可以同时探测闪烁光信号和电信号。PandaX 一期 TPC 的靶质量与 XENON100 一样是 125kg，PandaX 二期时靶质量会提高到 0.5 吨，PandaX 三期探测器靶质量会高于 1 吨。2012 年 8 月之前，PandaX 实验一期所有的子系统调试完毕并运往四川锦屏地下暗物质实验室。2013 年系统开始试运行，2014 年开始物理取数。图 4.1是 PandaX 探测器在锦屏地下实验室安装结束的照片。图 4.2是 PandaX 实验结果和其他暗物质探测实验的对比。一期实验结果基于 17.4 天的 37 公斤核心靶区液氙的探测数据，没有找到可信的暗物质信号。PandaX 实验在 90% 置信度基础上，对与自旋无关的 WIMP 与氙原子核相互作用截面给出上限：对于质量为 49GeV/c^{2}WIMP 粒子，相互作用截面上限为 $3.7\times10^{-44}cm^2$。

PandaX 暗物质探测器主要包括制冷及气体处理系统，时间投影室，屏蔽体系统以及电子学与数据获取系统。



图 4.1: PandaX 探测器

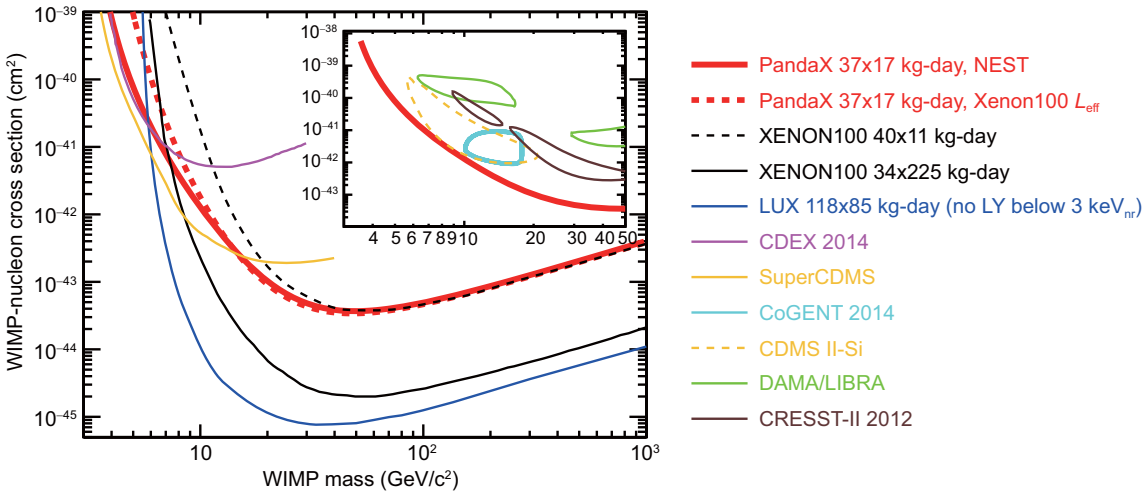


图 4.2: PandaX 地下暗物质探测器结果

4.1 制冷及气体处理系统

液体探测器一般需要一个可靠的制冷和气体处理系统。对于可升级的液体探测器，随着探测器的增大，低温稳定性、安全性以及气体处理和提纯效率变得越来越复杂。PandaX 实验的目标是建立一个能够存储、循环冷却 2-3 T 氙气的系统。

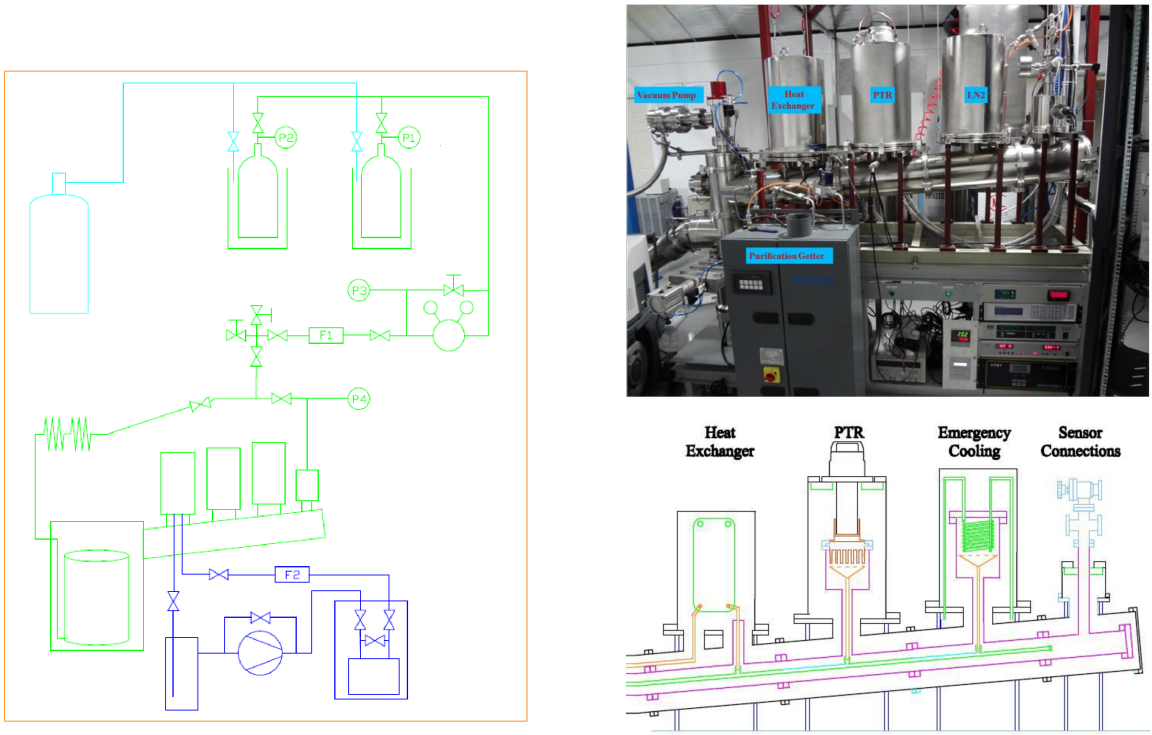


图 4.3: PandaX 地下暗物质探测器: 制冷系统

截止 PandaX 一期，系统已经实现对 500 公斤氙的存储、提纯、循环冷却。如图

4.3制冷系统和气体控制系统安装在屏蔽体外面，用于在 2 atm 大气压下维持探测器内部液氙的温度为 179.5K。在实际物理取数过程中，要求制冷系统能够保证探测器的温度和压强的稳定性在 1% 以内。探测器内部的液氙以 30 SLPM 的速率不断地循环提纯液氙，以保证自由电子在液氙中的存在时间大于 160μs。

4.2 时间投影室（TPC）

PandaX 实验的 TPC 探测器为了寻找低能暗物质粒子，其设计具有很高的光产额和很低的阈值，一期 TPC 的设计目标是对质量在 10GeV/c^2 左右的轻暗物质实现最高的光收集效率。如图 4.4所示，PandaX 的 TPC 探测器直径为 60cm，漂移长度为 15cm。TPC 被固定在一个直径 75cm，高 103cm 的不锈钢罐中。一期在不锈钢罐中灌注了 450kg 的液氙，其中靶质量为 125kg。

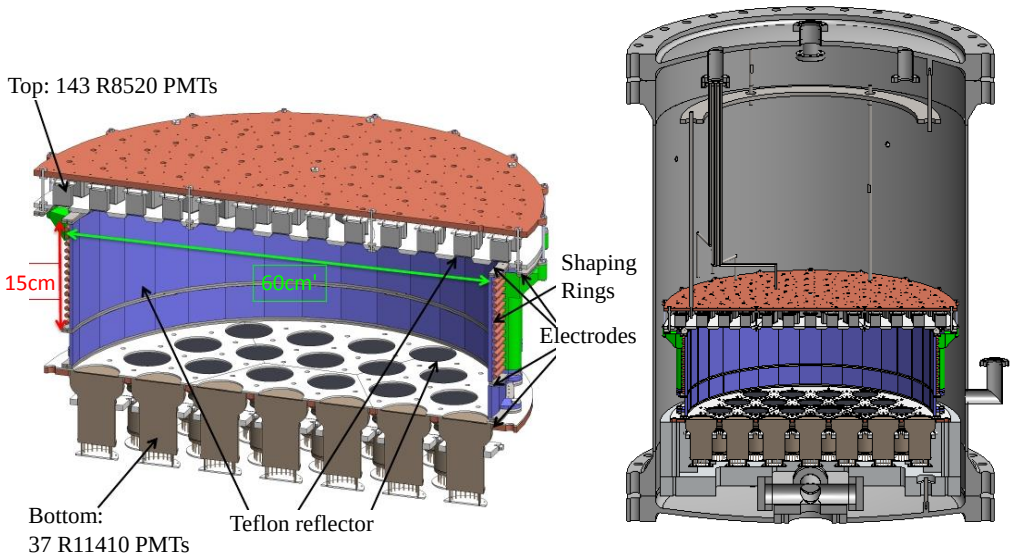


图 4.4: PandaX 地下暗物质探测器: 时间投影室（TPC）

二相氙时间投影室技术允许探测器测量在液氙中的闪烁光信号和在气氙中的逃逸电子电离信号。通过对 S1 信号和 S2 信号比值的分析，可以用于甄别核反冲信号和电子反冲信号。二相氙时间投影室还能获得粒子相互作用的三维位置，从而利用液氙的自屏蔽效应更好的降低实验的本底。

PandaX 一期的时间投影室的高压系统包括阴极、门、阳极，电压分别为 -15kV，-5kV 和地。一期的高压设计可以保证液氙中外加漂移电场达到 667V/cm，从而实现 1.7mm/μs 的电子漂移速度。液氙的页面位于门和阳极中间，宽度为 8mm，这样可以保证探测器液位调节的空间。液位调节通过外部机械结构完成，精度为 1mm。

探测器相互作用产生的闪烁光被两个水平对立的光电倍增管阵列收集。底部光电倍增管包括 37 个 3 英寸的滨松 R11410-MOD 光电倍增管，安装在阴极高压下方 5cm。顶部光电倍增管包括 143 个 1 英寸的滨松 R8520-406 光电倍增管，安装在阳极高压上方的气氙中。光电倍增管输出的原始信号进入电子学与数据获取系统。一个相互作用事例的水平位置由顶部光电倍增管接收到的 S2 信号重建出来，事例垂直方向的位置由 S1 信号和 S2 信号的时间差决定。

所有光电倍增管的增益每一个星期通过低亮度的 LED 光源校准一次，以保证增益随时间以 2×10^6 为均值在 10% 以内浮动。数据中随机打火事例被用于对光电倍增管暗噪声和增益的校准。在 PandaX 一期物理取数过程中，顶部和底部光电倍增管的暗噪声频率分别为 50Hz 和 1kHz。经过研究，暗噪声与制冷系统、时间投影室高压系统以及环境温度有关。物理取数过程中暗噪声异常的事例没有用于数据分析。

4.3 屏蔽体系统

PandaX 被动屏蔽系统是以隧道墙壁岩石和混凝土等环保材料实现降低中子本底和 γ 射线本底。屏蔽体外围是一个八角形结构，宽 316 厘米，高 368 厘米。内部

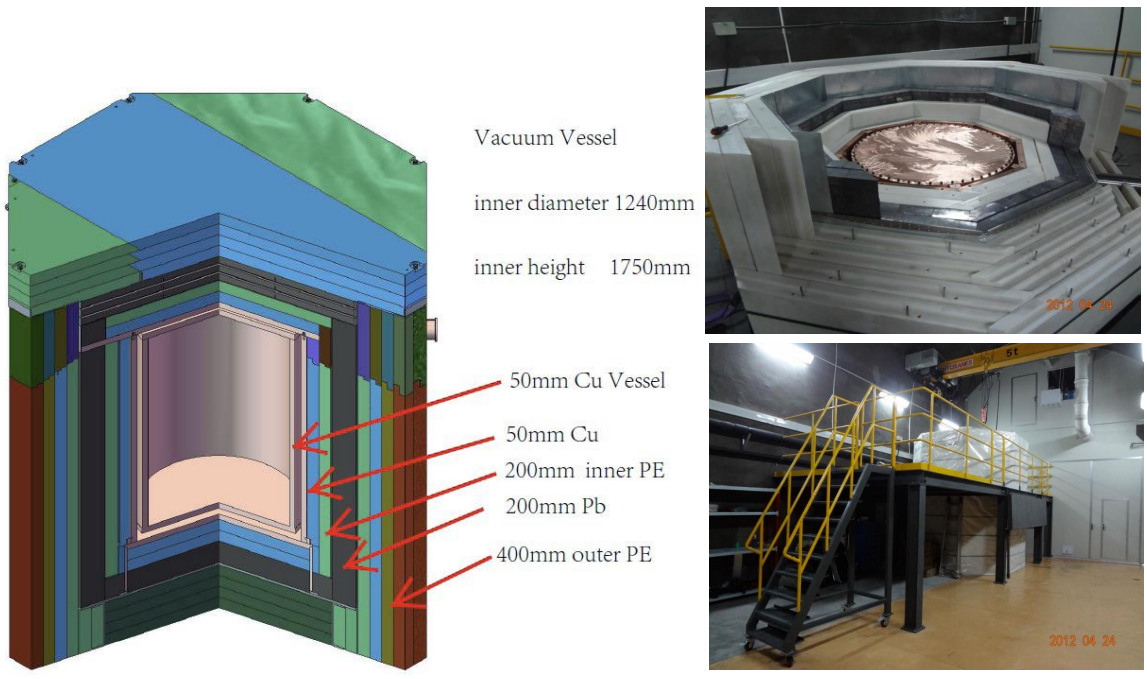


图 4.5: PandaX 地下暗物质探测器: 屏蔽体

是圆柱体结构，直径 124 厘米，高 175 厘米。屏蔽体的最内层是圆柱形的 OFHC 铜罐，也是 PandaX 的真空容器。屏蔽体系统主体部分位于低温系统和数据采集系统平台的下方。屏蔽体系统总重量 93T，包括 12 吨铜，58 吨铅，20 吨聚乙烯和 3

吨钢组成。

屏蔽体的设计有以下两个要求：

- 要求中子本底和 γ 射线本底在暗物质探测器核心靶区的事例率小于 1 个/年。
- 充分利用 CJPL 地下实验室的空间（隧道长 10m，宽 3.5m）。

如图 4.5所示屏蔽体结构。在铜屏蔽和内铜罐之间不断地吹入氮气，以保证其中氡气的含量低于 10Bq/m^3。

5 PandaX 电子学与数据获取系统—EnDAQ

PandaX 电子学与数据获取系统（EnDAQ）设计的目的之一是收集来自时间投影室顶部光电倍增管和底部光电倍增管阵列的原始信号。然后，系统根据粒子反冲信号的特征设定触发条件，以触发真正的物理信号。设计的物理目标是对探测器 180 道光电倍增管实现无死时间的数据获取，并要求能够触发包含几个漂移电子产生的电离信号的事例。图 5.1 是 PandaX 一期电子学与数据获取系统的实物图和框架图。

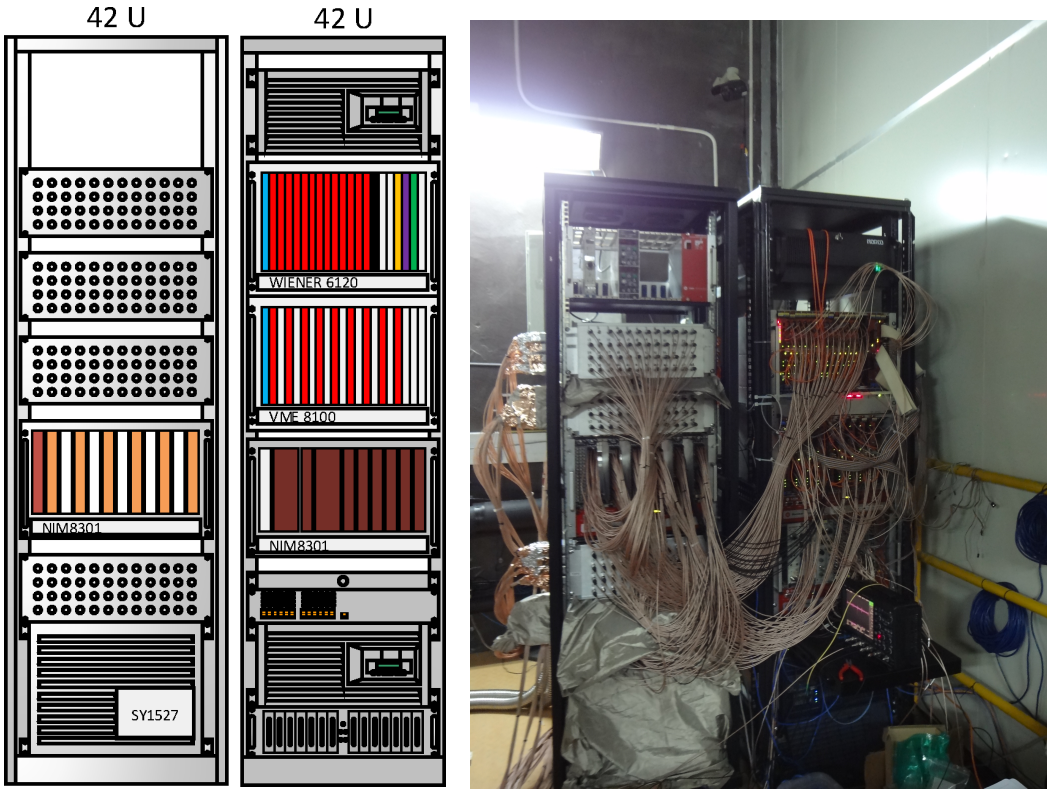


图 5.1: PandaX 电子学与数据获取系统

EnDAQ 把收集到的原始信号由模拟信号转换为数字信号，并在触发条件满足后，将信号组建成事例并存储到缓存中。最后，根据设定的数据读出条件将数据读出并存储到服务器的磁盘阵列中。EnDAQ 系统设计的物理目标是：以尽可能高的触发效率对尽可能低能量的信号进行收集。

EnDAQ 系统的核心是 184 道商业生产的快速数模转换器。系统的包括 VME

标准插件和 NIM 标准插件。EnDAQ 系统利用 C++、XML、MySQL、VHDL 完成软件和 FPGA 的设计。系统的设计要求如下：

- 能够触发并收集几个漂移电子所产生的信号。
- 能够在没有死时间的条件下在 PMT 增益刻度 (100Hz)、电子源刻度 (30Hz)，中子源刻度 (20Hz) 以及物理取数 (1keVee 为阈值的频率是 3Hz) 模式中运行。

2010 年开始，PandaX 一期的电子学与数据获取系统在山东大学粒子物理与原子核物理研究所开始设计。经过一年的设计、搭建和测试，2012 年，系统运到上海交通大学与 PandaX 一期的时间投影室合并试运行。2012 年 10 月系统被运到中国四川锦屏地下实验室（CJPL）进行测试运行。2014 年 5 月开始物理取数。

5.1 EnDAQ：硬件

PandaX 一期的电子学与数据获取系统是在商业插件的基础上设计与搭建的。系统机箱包括 VME 机箱和 NIM 机箱，插件购买自 phillips scientifics(Phi.) and Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari (CAEN)。

5.1.1 EnDAQ：VME 机箱

PandaX 一期电子学与数据获取系统使用的是 CANE 公司生产的商业 VME 机箱，根据不同的需要，分别有 2500W 和 1200W 两种规格的机箱。2500W 机箱在保证散热的基础上，满负荷运行系统所需要的 VME 插件（快速模数转换器、甄别器、主控制器等），1200W 机箱用于剩余 VME 插件（快速模数转换器、主控制器）的运行。如图 5.2所示，左图是 NIM 标准机箱的的框架图，右图是实验使用的 VME8100 机箱实物图 [64]。

VME8100 机箱可以通过前面板控制，远程可视化界面控制，命令行控制。图 5.3是通过 IP 地址访问机箱，并由可视化界面控制。

VME 总线简介 ：1981 年，摩托罗拉公司、西格尼蒂克公司等联合开发了一种工业标准——VME 总线 [65][66]。总线技术标准基于 VERSA 欧洲标准电路板总线发展而来，包括 VERSA 欧洲标准电路板总线和欧洲标准电路板机械规格，直到今天 VME 总线已经发展出来 B、C、C. 1、IEC 821、IEEE 1014 - 1987、VME64、VME64X、VME320 等一系列版本。VME 总线没有专利限制，因此很快被广泛应用，至今已经在军事、航天、模拟器等方便广泛应用。VME 总线是一种异步总线，也就意味着总线上的数据传输并没有一个时钟信号去同步。总线通过总线上插件的握手信号完成传输，因此总线的速度受限于连接在总线上的最慢的插件。为了方便总线的控制，VME 总线还有一种主

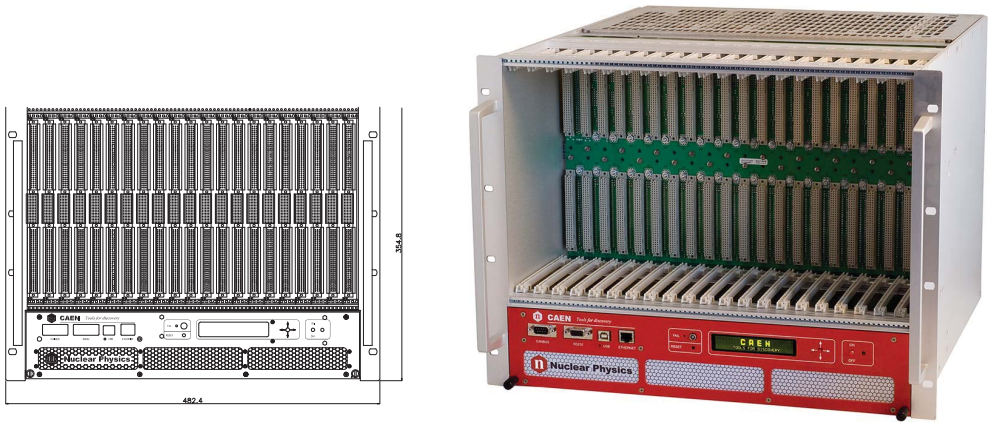


图 5.2: VME8100 机箱

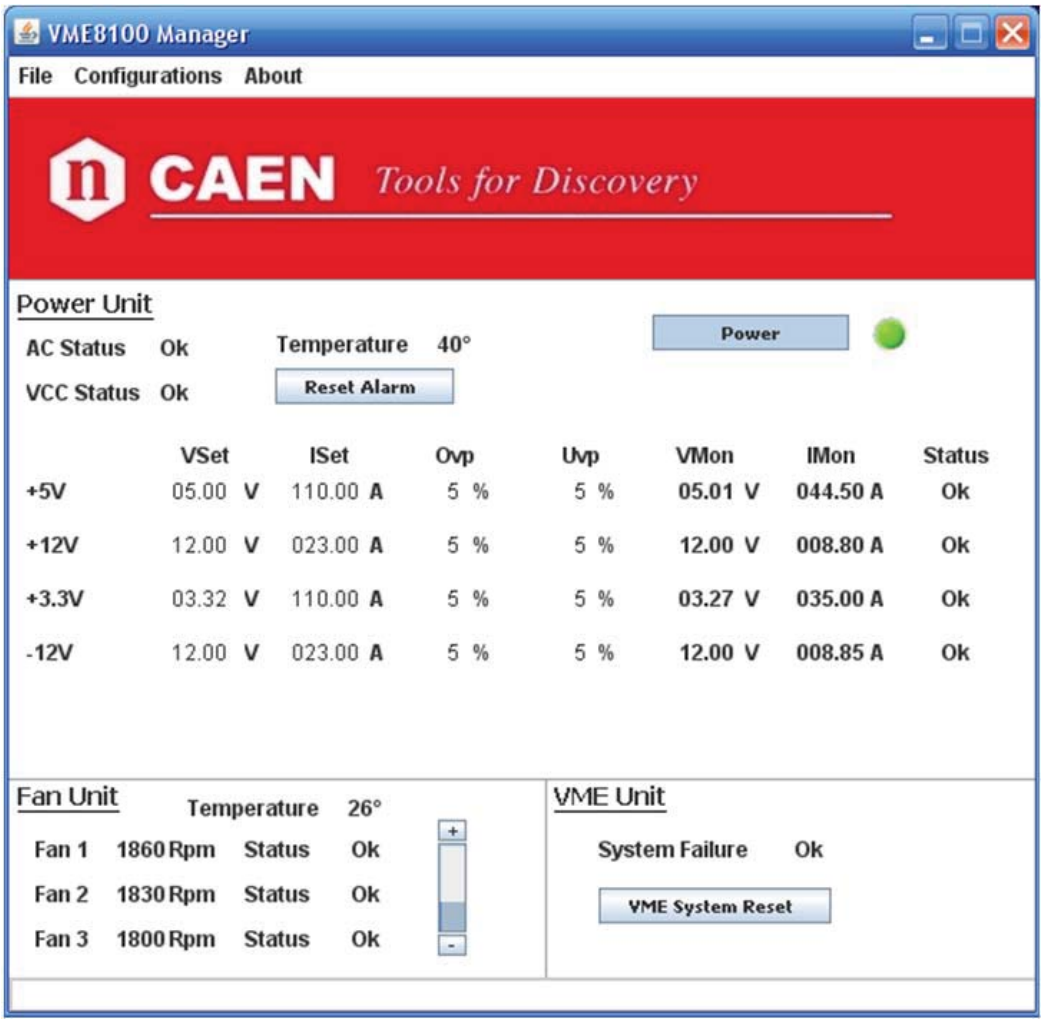


图 5.3: VME8100 控制界面

从逻辑的架构，该架构允许连接在总线上的主插件管理和控制所有其他主插件和从属插件的信号及数据传输。这种起对所有传输过程监控作用的特殊插

件被称为系统控制器。VME 总线也是一种多线程总线，因此允许多个主插件在同一条总线上工作。VME 总线的地址总线和数据总线最高可以是 64bit 位宽，最高数据传输速度为 320MB/s。

欧洲标准电路板机械规格和 VERSA 欧洲标准电路板总线为别定义了 VME 总线的机械标准和总线标准。机械标准包括 VME 总线系统背板、系统前面板以及 VME 总线插件的机械标准。VME 总线系统总共有 4 种总线：数据传输总线 (Data Transfer Bus，DTB)、优先中断总线 (Priority Interrupt Bus)、数据传输仲裁总线 (DTB Arbitration Bus)、通用总线 (Utility Bus)。VME 插件在总线系统的辅助下，完成信号传输、数据读写以及中断信号处理等。

VME 总线机械标准 ：VME 总线的机械标准是国际电气委员会 (IEC) 指定的欧洲标准电路板机械标准。标准插件采用 DlN 41494 和 IEC 297—3 机箱标准及

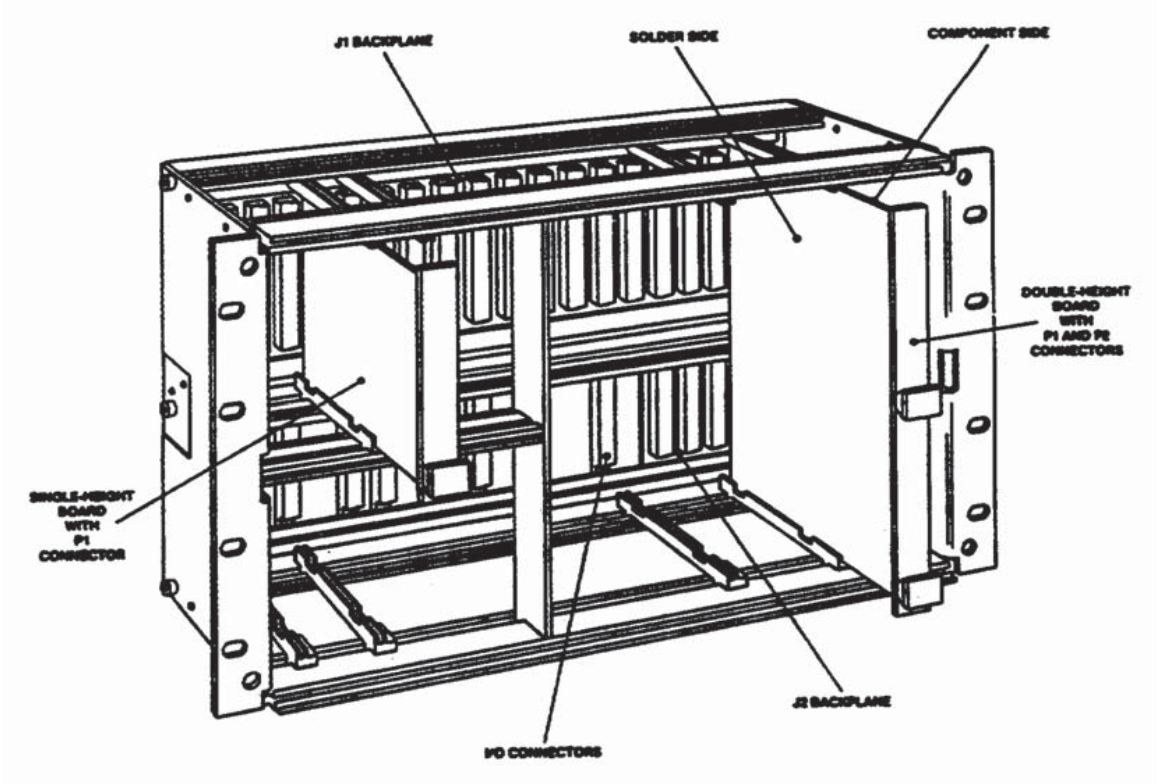


图 5.4: VME 机箱 3U 和 9U 混合结构

DIN 41612 和 IEC 603—2 连接器标准。VME 总线的机械结构由机箱、背板、连接器插槽和标准插件组成。VME 机箱的尺寸标准规定了 VME 插件之间的固定间距和插件与背板连接器之间的机械结构。从而保证插件之间相互隔离，既避免了插件之间的接触短路，也保证了插件的散热效率。而插件和背板之间的机械结构降低了 VME 总线系统对环境的要求，允许适当的机械振动。

VME 总线背板是一块印刷电路板，最多可以支持 21 个插槽底板。总线背板通过标准连接器与插件连接，并为插件之间的通信提供相应的总线标准。最基本的总线背板是 J_1 背板总线，为插件提供 24bit 位宽的地址总线和 16bit 位宽的数据传输总线。在包含 J_1 和 J_2 总线背板的 VME 系统中，支持最高 32bit 位宽的地址总线和 32bit 位宽的数据传输总线。在 VME64x 总线标准中，最高可以支持 64bit 位宽的地址总线和 64bit 位宽的数据传输总线，实现 160MB/s 的数据传输速度。VME 总线标准背板根据机箱的机械机构分为三种：3U(160mm×100mm)、6U(160mm×233 mm) 和 9U(367mm×400 mm)。图 5.4是 VME 机箱结构图。

数据传输总线：VME 数据传输总线用于 VME 总线系统的主控制插件 (Master) 与具有缓存的插件以及总线从属插件 (slave) 之间的数据传输、地址修改及传递相关控制信号，由主控制插件启动并控制数据传输总线。数据传输总线还参与中断器和中断管理器之间的状态信号和识别码的传递。数据传输总线按其功能可分为地址总线、数据总线和控制总线。当 VME 总线系统中主控制插件和从属插件之间发生数据传输时，主控制插件控制地址总线、数据传输选通信号、长字节选通信号，实现不同的数据传输类型（单字节传输、双字节传输、块传输等）。数据传输总线的数据传输是异步进行的，主控制插件用地址选通信号和数据选通信号向从属插件发出控制请求，从属插件通过数据传输应答信号来响应。VME 总线通过读写信号确定数据传输的方向。VME 总线支持多种数据传输模式，3U VME 机箱只用 J_1 接口的情况下可以实现 8bit 和 16bit 的数据传输，6U VME 机箱使用 J_1 和 J_2 接口的情况下可以实现 8bit、16bit、24bit、32bit 的数据传输。在一个数据传输周期内对于一个起始地址很多情况下需要传输多余 4 个字节的数据，为了实现大量的数据传输，VME 总线允许插件先寻址一个起始地址，然后从该地址开始顺序写入或读取数据。这种大数据量的块输模式（Block Transfer mode——BLT）。为了提供更高的数据传输带块，VME 数据传输总线还可以通过复用块传输技术实现 80MB/s 的传输速度。图 5.5是 VME 总线工作框架图。

数据传输仲裁总线：VME 总线可以支持不止一块主控制插件在同一条 VME 总线上工作，为了防止两块以上主控制插件同时数据传输总线，VME 总线系统提供数据传输仲裁总线调节传输过程。当插件有数据传输需求时，插件的仲裁模块 (Requester) 和主控制插件的中断控制器交互，判定是否授予插件数据传输总线的使用权。通过多级的仲裁控制系统，主控制插件根据不同总线请求信号的优先级算法来分配下一次的 DTB 控制权。

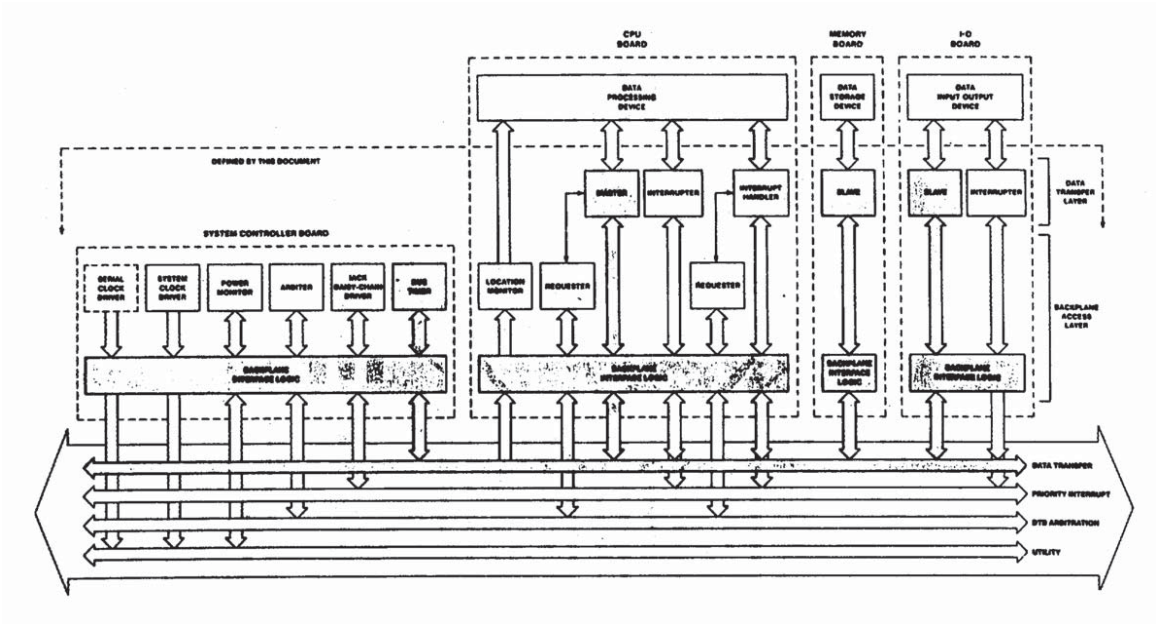


图 5.5: VME 总线功能框架图

优先中断总线：优先中断总线通过 VME 总线系统中的中断器 (Interrupter) 和中断管理器 (Interrupt Handler) 进行中断请求和中断认可操作。VME 总线系统最多有 7 级中断，系统中的 VME 插件根据不同的需要发出不同级别的中断请求信号。在只有一块主控制插件的 VME 总线系统里，主控制器监控所有级别的中断请求并和系统一起做出应答，而对于有多块主控制插件的系统，每一块主控制插件只监视分配给它的中断请求线。当中断控制器检测到中断控制信号后，申请数据传输仲裁总线，得到控制权后，通过总线发出中断应答信号可许可中断等级，中断申请插件检测到中断被响应后，通过总线发出中断字声明中断原因，最后中断控制器根据中断字处理插件请求。

应用总线：应用总线主要为系统提供系统时钟，以及对系统初始化和故障监测等功能。

5.1.2 EnDAQ：NIM 机箱

NIM（Nuclear Instrumentation Module——NIM）标准是一种用于粒子物理与原子核物理实验电子学插件的机械标准和电气标准 [67]。NIM 电子学标准的提出使得核电子学设计有了巨大的灵活性，通用性，减少设计工作量，使得电子学设备的维护和更新更容易。NIM 标准是核电子学唯一的电子学标准也是最简单的电子学标准，标准由美国原子能委员会在 1968 年提出，1990 年对标 准做了修正。NIM 标准为电子学插件（如放大器、模数转换器、数模转换器、甄别器等）提供了统一

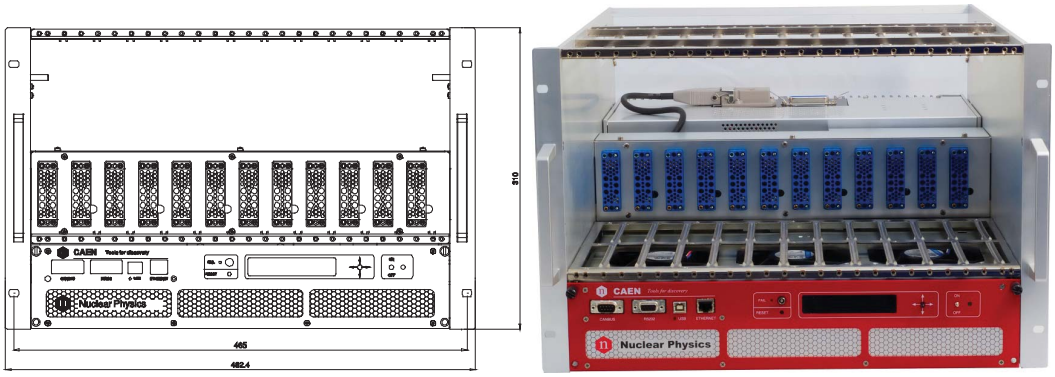


图 5.6: NIM8301 机箱

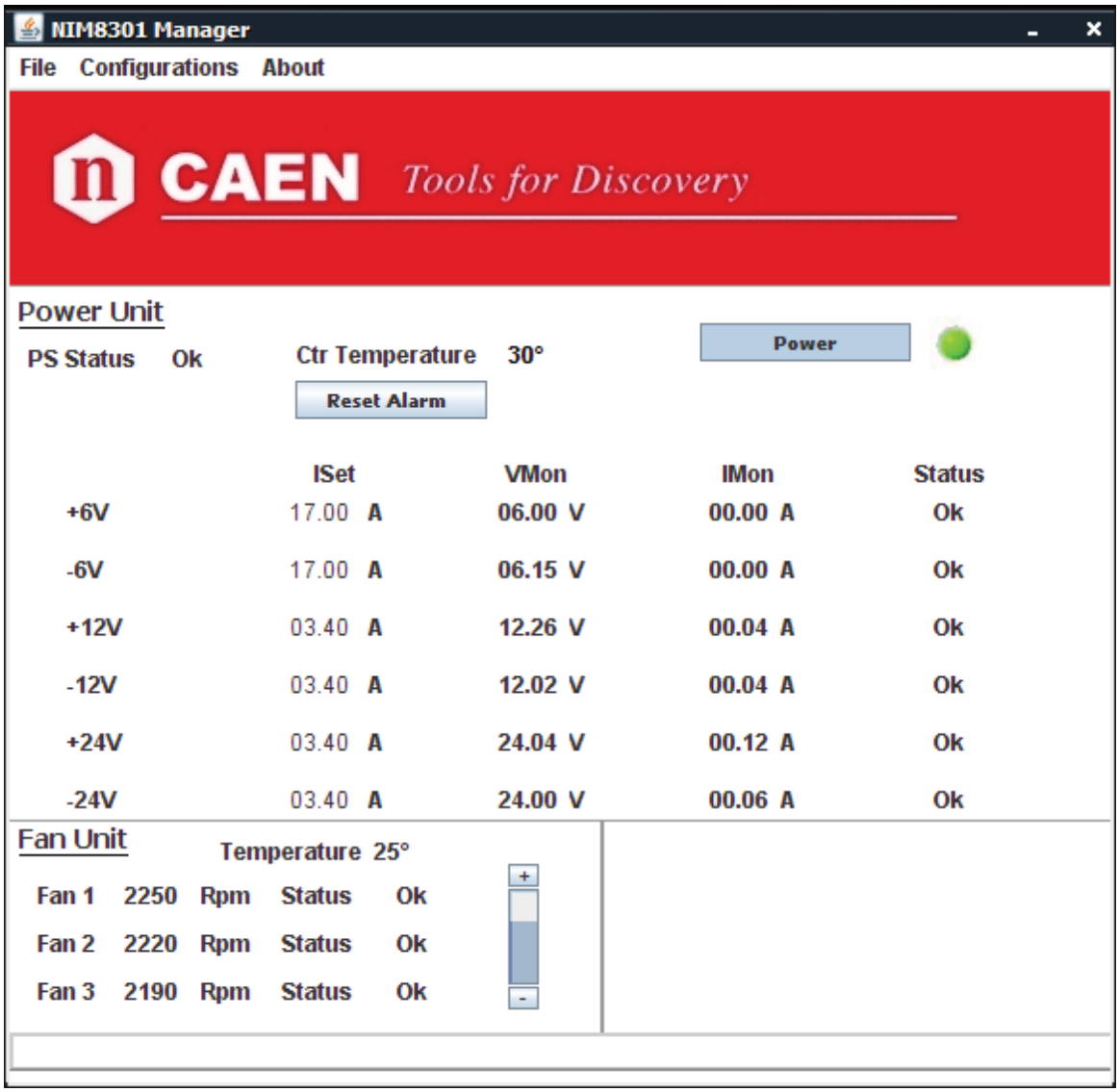


图 5.7: NIM8301 控制界面

的电路板设计规格以及插件机箱和连接器的设计规格。NIM 标准的机箱要求能够从背板支持 ±12V 和 ±24V 的直流电压，有些机箱还支持 ±6V 直流电压和市电交流电。NIM 标准规定电子学插件最小宽度为 1.35 英寸（34mm），最大高度为 8.7 英寸（221mm）插件深度为 9.7 英寸（246mm），插件的宽度可以是最小宽度的倍数。NIM 标准还规定了电子学插件的线缆标准、连接器标准、阻抗匹配标准、逻辑电平标准。但是 NIM 标准的插件不能通过 NIM 机箱背板实现总线通信，总线通信主要是通过 VME 总线标准实现。

PandaX 一期电子学与数据获取系统使用的是 CANE 公司生产的商业 NIM 机箱，根据不同的需要，分别有 300W 和 600W 两种规格的机箱。600W 机箱主要用于光电倍增管信号的前置放大器插件，300W 机箱用于系统模拟信号的扇入扇出插件。如图 5.6所示，左图是 NIM 标准机箱的的框架图，右图是实验使用的 NIM8301 机箱实物图 [68]。

NIM8301 机箱可以通过前面板控制，远程可视化界面控制，命令行控制。图 5.7是通过 IP 地址访问机箱，并由可视化界面控制。

5.1.3 EnDAQ：插件简介

CAEN V2718 ：CAEN V2718 是单宽 6U（1U=4.445cm）高的 VME 主控制插件 [69]。插件由光纤连接 CONET (Chainable Optical NETwork) 接口和 PCI 卡（CAEN A2818）或者 PCIe 卡（CAEN A3818），通过 PCI 总线由服务器控制插件。A2818 是 32-bit 33 MHz PCI 卡，最多可以控制 8 块配有 CONET 接口的插件。A3818 是 PCI8 的扩展卡，最多可以控制 32 块配有 CONET 接口的插件。图 5.8分别是 A2818 和 A3818 光纤连接插件的示意图。CAEN V2718 通过 CONET 接口的数据传输速率最高可达 80MBytes/s。当系统中有不止一块 V2718 插件时，得益于 V2718 128kB 的缓存，VME 总线可以高速的通过 CONET 进行数据传输。V2718 框架图和实物图如图 5.9 所示。

CAEN V2724 ：CAEN V1724 是单宽 6U 高基于 VME 总线的快速模数转换器 [70]。V1724 框架图和实物图如图 5.10 所示。每一块 V1724 有 8 道相同的位宽 14bit 采样率为 100MS/s 模数转换器。每一道的输入信号要求是动态范围小于 2.25Vpp 的单端模拟信号，通过 MCX 同轴接头输入信号。每一道的动态范围由位宽为 16bit 的数模转换器设定，设定范围是 ±1.125 V。每一块快速数模转换器在前面板有时钟输入/输出接口，并通过 PLL 锁相环控制插件内同步时钟信号的参考信号是内部时钟还是外部时钟。插件上的模数转换器不间断的将输入信号转换为数据流并存储在每一道的数据循环缓存区里。而当插件的触发逻辑接到内部触发信号或外部触发信号时，插件把触发信号前

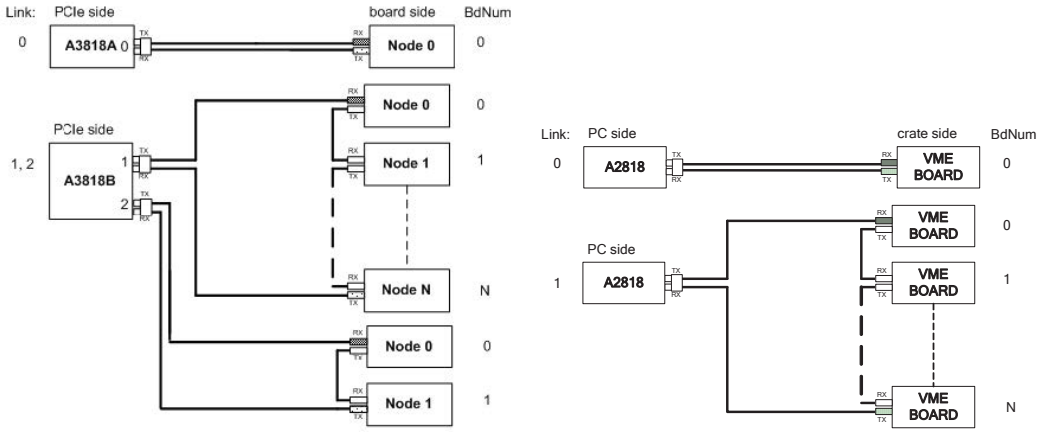


图 5.8: 左图：A3818 连接插件示意图。右图：A2818 连接插件示意图。

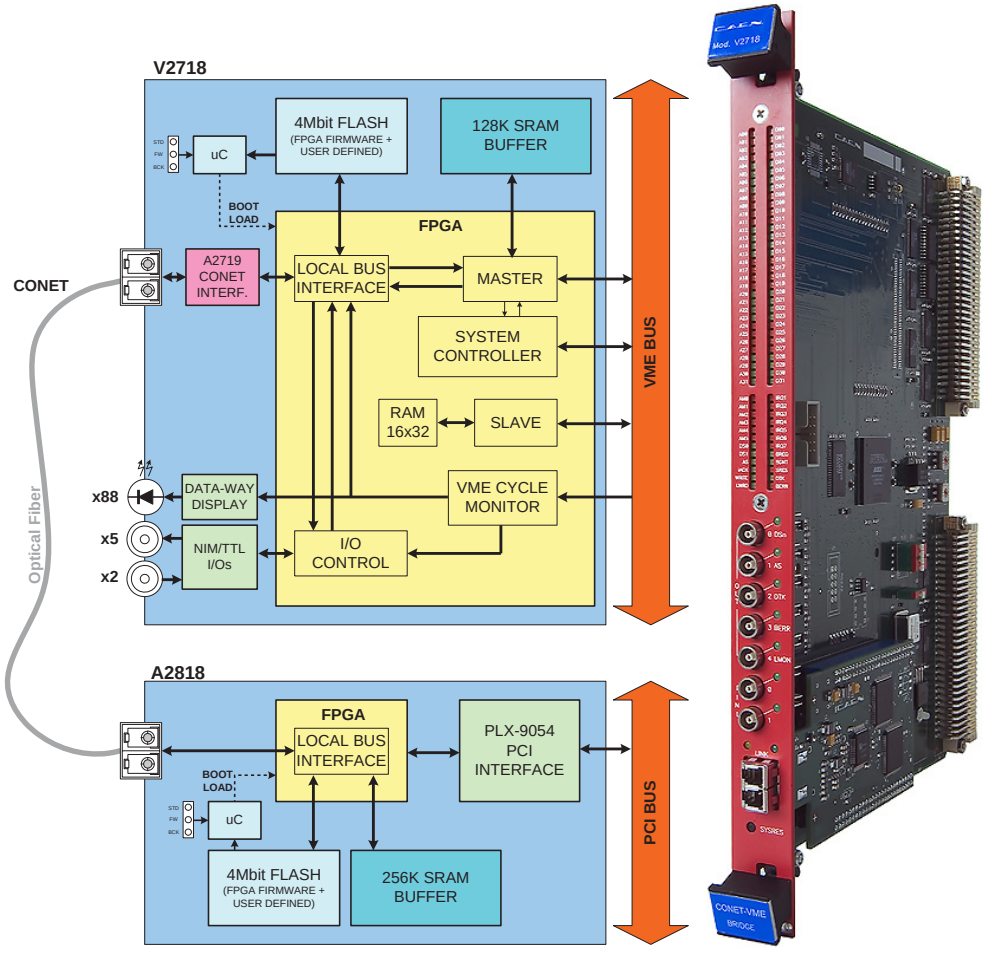


图 5.9: CAEN V2718 功能框架图和实物图

N 个采样点 (N 通过寄存器设定) 存入缓存中，并且冻结这部分数据，到触发信号之后时间窗口内的采样点写入缓存后，组成一个事例等待数据被 VME 总线或者光纤读出，才释放被冻结的缓存。如此一来，数据获取可以不间断

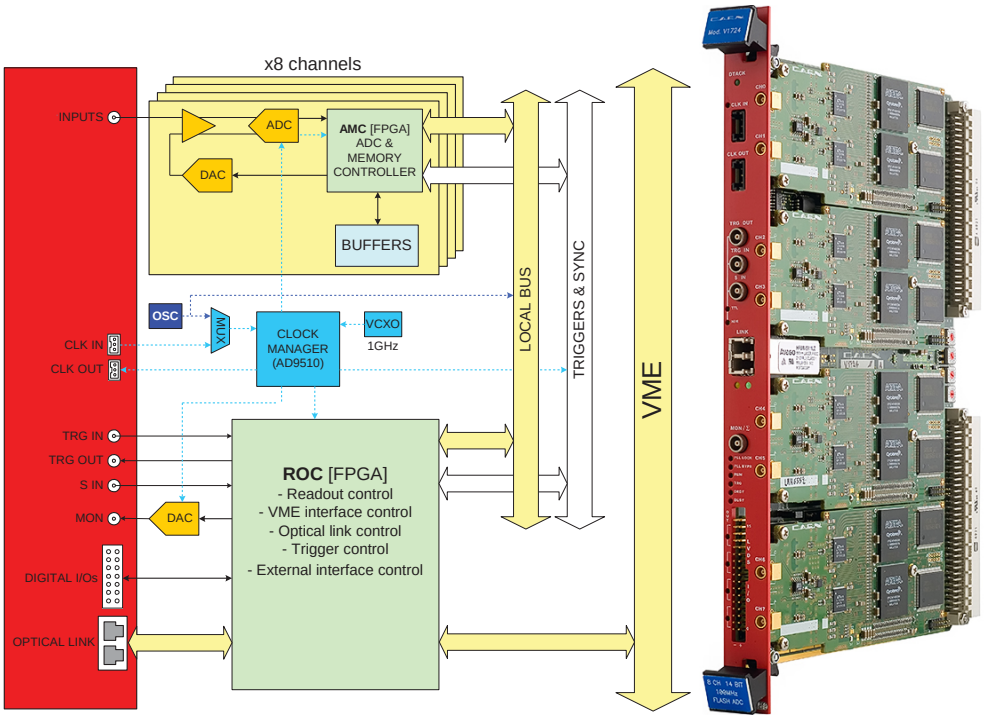


图 5.10: CAEN V1724 功能框架图和实物图

的进行下去。

每一道模数转换器都有自己的静态随机存取存储器（SRAM），静态随机存取存储器根据寄存器设置被分割为确定大小的块。数据从被冻结的缓存里由 VME 总线或者光纤读出和另一个事例被写入缓存的逻辑是相互独立的。

V1724 的设计支持通过时钟同步，把多块插件的模数转换器的时钟和同一个时钟源同步，并保证所有的的触发时间同步的。如此，系统内所有的 V1724 的数据具有相同的时间参考点。

V1724 的板载控制器通过相互独立的总线控制光纤接口和 VME 总线访问插件，因此当通过光纤访问插件时还可以通过 VME 机箱在外部操纵插件。

快速模数转换器的触发信号源可以是前面板的外部输入信号，也可以是软件产生触发信号，还可以通过对每一道模数转换器设置阈值，根据寄存器里设置的逻辑自动产生内部触发信号。每一块 V1724 的触发信号都可以通过前面板的触发信号输出到其他的插件用于触发、逻辑控制或者计数统计。

V1724 前面板有一个模拟信号输出接口，允许通过寄存器对模拟信号的输出进行编程。接口可以输出信号、测试信号、基于缓存占空比的信号、模拟信号测试信号、可编程电压信号。

V1724 的 VME 总线交互模式是 VME64X 标准。插件允许的数据读出模

式有：单字数据传输（D32），位宽为 32/64bit 的块传输（BLT, MBLT, 2eVME,2eSST）和位宽为 32/64bit 的菊花链式块传输（CBLT）。

V1724 可以通过光纤以菊花链的形式组合起来，并保证数据传输速度达到 80MB/s。通过光纤连接 A2818 或者 A3818，允许最多 8 块 V1724（64 模数转换器）或者 32 块 V1724（256 道模数转换器）。

CAEN V814 :V814 是单宽 6U 高基于 VME 总线的定阈甄别器 [71]。甄别器的输入信号要求是：16 道负向的模拟信号。甄别之后的输出信号是：16 道 ECL 差分信号，每到输出信号都被扇出为两道，通过前面板的扁平线缆接口输出。定阈甄别器的每一道的输入和输出都是相互独立的，都可以通过 VME 总线访问和修改寄存器以实现每一道的开关。甄别器输出的 ECL 差分信号的时间宽度也是可以通过寄存器设定的，根据 16 位寄存器的值设定时间宽度从 6ns 到 95ns。V814 框架图和实物图如图 5.11 所示。

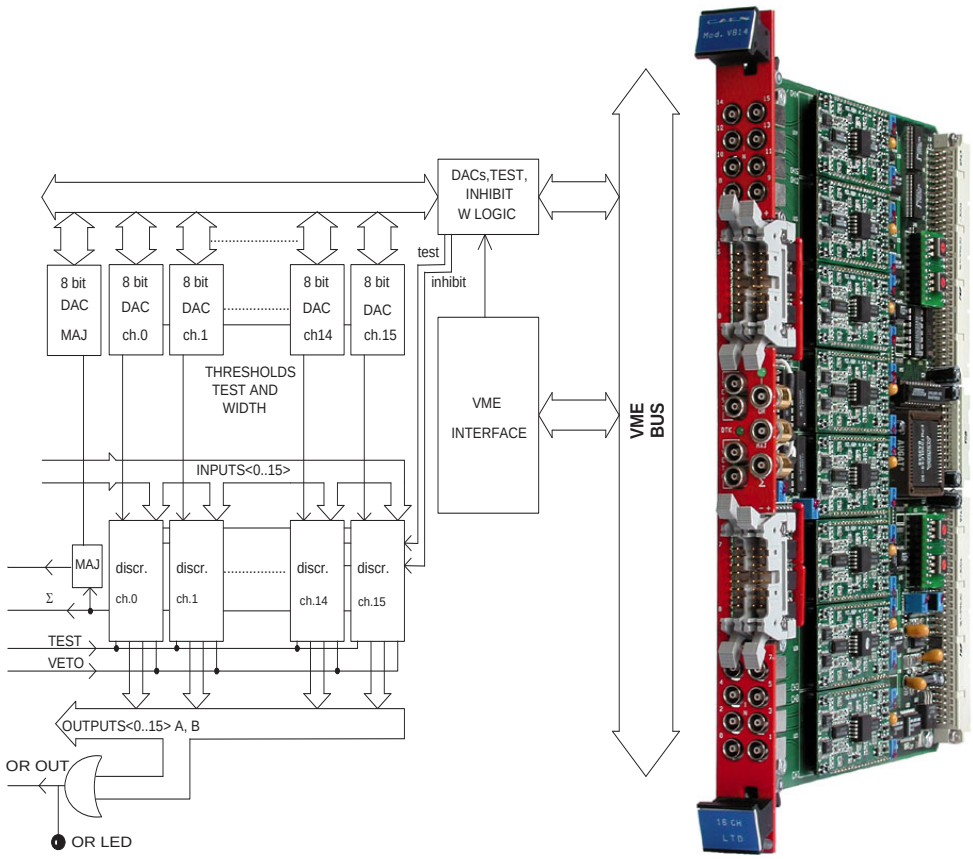


图 5.11: CAEN V814 功能框架图和实物图

定阈甄别器每一道的甄别阈值都是单独通过寄存器设置，根据 8 位的寄存器设定阈值大小从从 -1mv 到 -255mv。甄别器插件前面板还有 VETO 和 TEST

信号输入。插件可以根据甄别器过阈道的数量利用数模转换器产生等比于数值的加和信号，每过阈一道，模拟信号的幅度增加 50mv。

插件通过寄存器设定一个数值，当过阈的道数大于这个值时，由前面板的 MAJORITY 输出一个 NIM 电平信号。甄别器还提供对插件上所有过阈信号的或逻辑信号，由前面板 OR 连接器输出 NIM 电平信号。

CAEN V830 :V830 是单宽 6U 高基于 VME 总线的多道自锁式计数器 [72]。V830 框架图和实物图如图 5.12 所示。计数器共有 32 道独立的计数器，每一道计

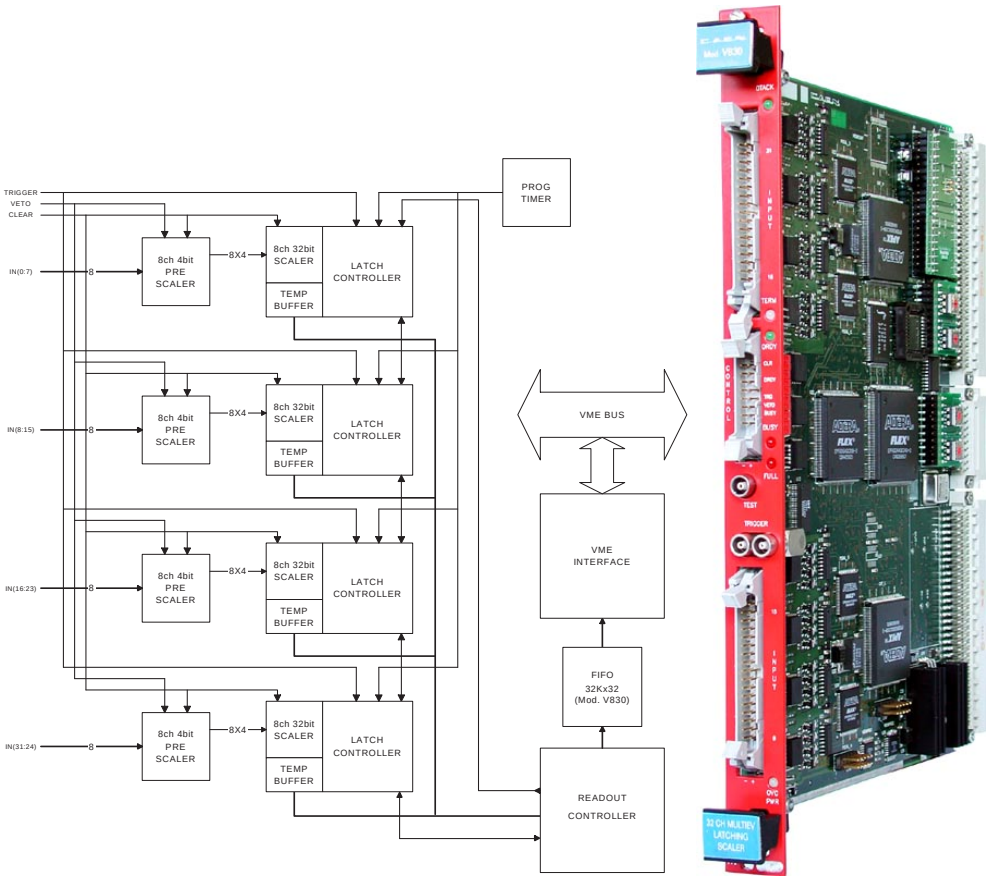


图 5.12: CAEN V830 功能框架图和实物图

数器的位宽是 32bit，输入信号是 ECL 差分电平或者 LVDS 差分电平，每道的最大计数频率是 250MHz。所有的计数器的数值都可以通过 VME 总线直接读出，读出过程与数据获取过程互不干扰。

计数器有 32k 字节深度的缓存（MEB）用于存储每一道的计数，组成事例方便读出。计数器把每道计数写入缓存的触发信号可以是外部 NIM/ECL 电平或者 VME 请求，还可以是插件内部的可编辑时钟产生的触发信号。插件的

前面板允许 VETO 信号、CLEAR 信号和 TESR 信号的输入。TEST 信号会被扇出 32 道道每一个计数器中。

V830 的寄存器地址可以是 A24/A32 模式，数据传输格式可以是 D32, BLT32 或 MBLT64 模式。插件也可以通过 VME 总线支持菊花链式块传输模式 (CBLT32/CBLT64)。

CAEN V1495 :V1495 是单宽 6U 高基于 VME 总线的应用于各种数字信号的逻辑编程插件 [73]。V1495 框架图和实物图如图 5.13 所示。V1495 可以对门逻

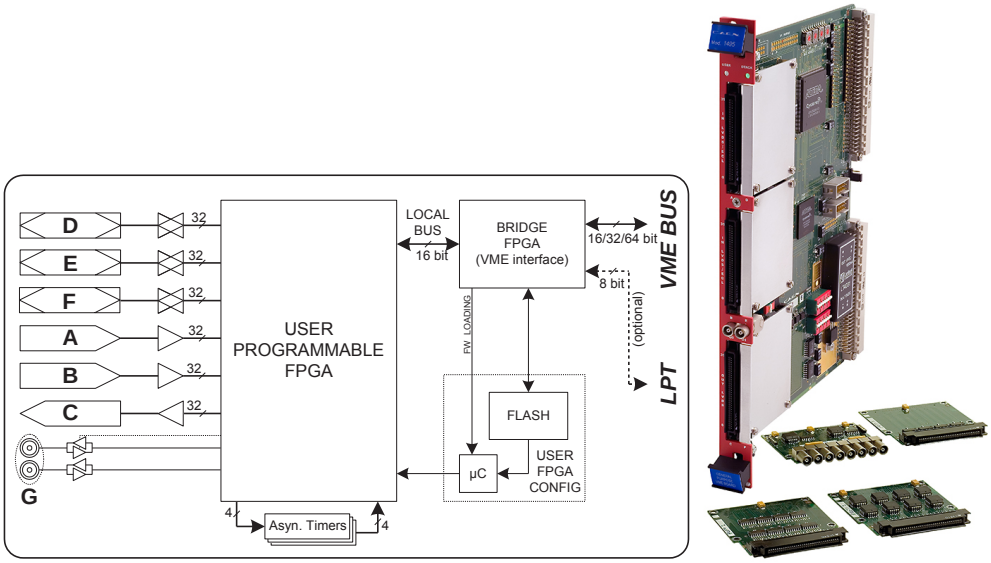


图 5.13: CAEN V1495 功能框架图和实物图

辑、触发逻辑、信号转换、缓存以及测试信号进行编程实现设计功能。插件由两片 FPGA（Field — Programmable Gate Array）控制：

FPGA 桥：参与插件与 VME 总线的交互，并作为连接，通过本地总线连接 VME 总线和用户。FPGA 桥还控制插件的接口寄存器和异步时钟编程。

用户 FPGA：控制前面板的借口逻辑，通过用户编程实现对逻辑阵列、接口寄存器和异步时钟的控制。用户 FPGA 是 FPGA 桥的从属控制器，通过 CAEN 本地总线连接 VME 总线。

插件前面板已有的输入输出接口有四部分（A, B, C, G），还包括三部分扩展接口（D, E, F）。其中扩展接口可以自由选择，接口功能覆盖输入输出逻辑、ECL 电平、PECL 电平, LVDS 电平, NIM 电平, TTL 电平和位宽为 16bit 的数模转换器。插件最多可以扩充到 194 道接口。用户 FPGA 具有以下几个特征：不需要特殊的硬件工具、设置不需要插拔插件、在设计 FPGA 逻辑时不

用重启或关闭 VME 机箱。这几个有点使得设计人员可以通过 VME 总线远程编辑用户 FPGA。插件有两个缓存用于存储不同的用户 FPGA 程序，有 4 个独立的可编程异步时钟。

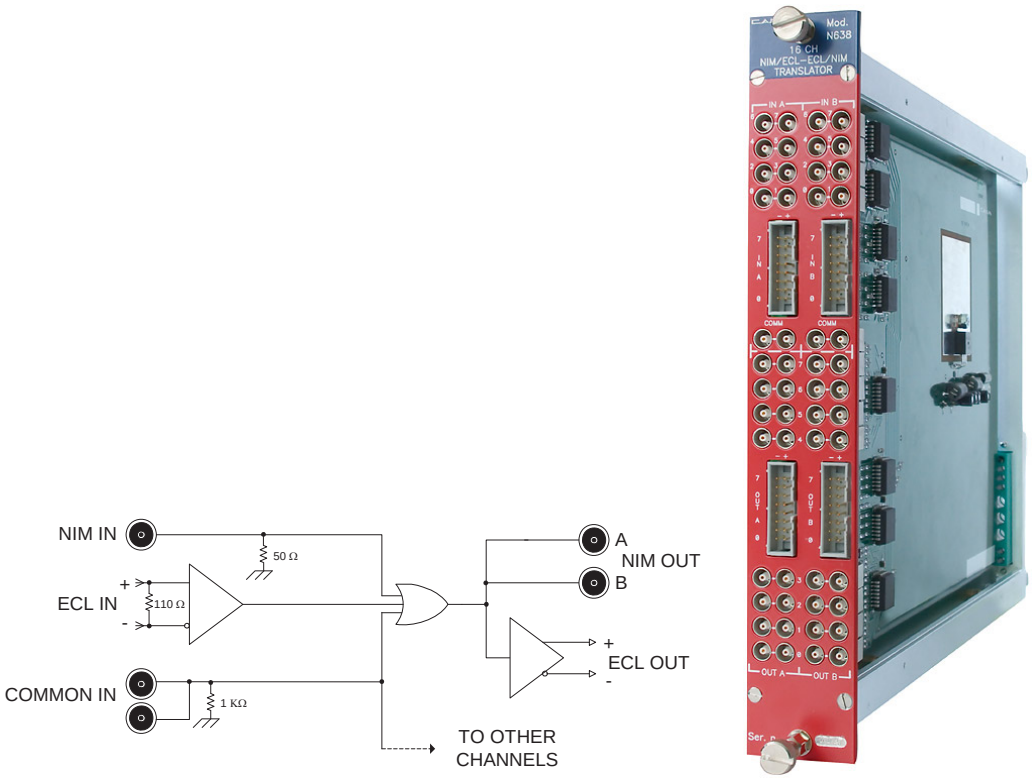


图 5.14: CAEN N638 逻辑框架图和实物图

CAEN N638 :N638 是单宽基于 NIM 标准的 16 道扇出 NIM-ECL/ECL-NIM 转换器 [74]。插件可以通过把信号转换为 NIM 电平通过同轴线缆传输，实现更好的时间特性。每道输入 NIM 电平信号或者 ECL 电平信号经过电平转换可以输出 2 道 NIM 电平输出和 1 道 ECl 电平输出，输入输出频率特性上限是 300MHz。插件还可以在 COMM 口输入 NIM 电平，输出相同逻辑的 16 道 NIM 电平和 8 道 ECL 电平。图 5.14是 N638 工作的逻辑图和实物图。

Philips scientific 779 : Phi.779 是单宽基于 NIM 标准的前置放大器 [75]。放大器总共有 32 道，每一道的电压增益都被固定为 10 倍，信号的输入频率范围由 0Hz 到 275MHz，每道有对应的输出阻抗 50ohm 的模拟输出。插件主要应用于光电倍增管探测器信号放大。输入和输出都有保护措施确保输入输出信号稳定。Phi.779 前置放大器在直流到高频信号中具有很好的稳定性。实验可以通过串联两道实现 100 倍的放大，同时保证信号不失真，没有明显的信号反冲和基线漂移。插件每一道都有直流偏置调节，以防止输入阻抗不匹配和接

地等原因不良产生的基线漂移。输出接口是低输出阻抗的电压源，因此配有短路保护电路，以避免过载与信号和地短路。虽然由于前面板空间的局限性，只有一道输出信号，但实际上输出可以驱动 2 个 50ohm 的负载。

图 5.15是 Phi.779、Phi.794、Phi.740 插件前面板图。

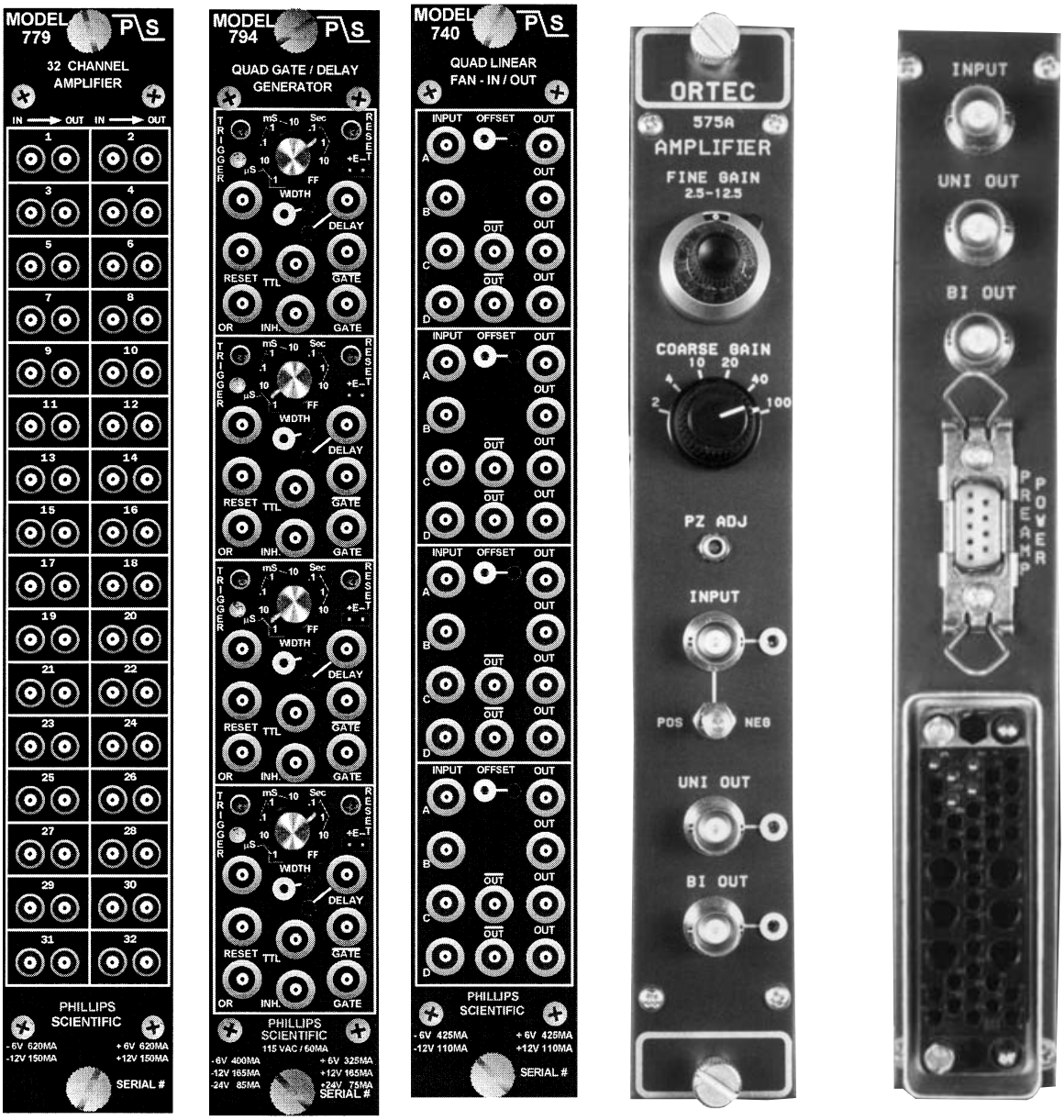


图 5.15: 左一：Phi.779 左二：Phi.794 中图：Phi.740 右一和右二：ORTEC 575A 前面板和后面板图

Philips scientific 794 ：Phi.794 是单宽基于 NIM 标准的延迟/门逻辑发生器 [76]。

逻辑发生器可以产生 50ns∼10s 的宽的门信号或者数字信号延迟，时间宽度

的选择通过旋钮实现。Phi.794 的输入输出连接器采用通用的 LEMO 连接器，可以通用 NIM 电平、ECL 电平、TTL 电平。在触发输入上升沿门信号输出高电平，高电平保持时间等于旋钮设置，输出门信号。延迟信号输出模式中，输出信号保持低电平，在输出门信号的上升沿输出高电平，高电平保持时间等于宽度设置，宽度设置也是通过旋钮设置，可以通过万用表测量电压得到等比例时间宽度。插件内部的延迟线是通过模拟技术实现，所以基本不存在死时间。图 5.16是 Phi.794 逻辑框架图。

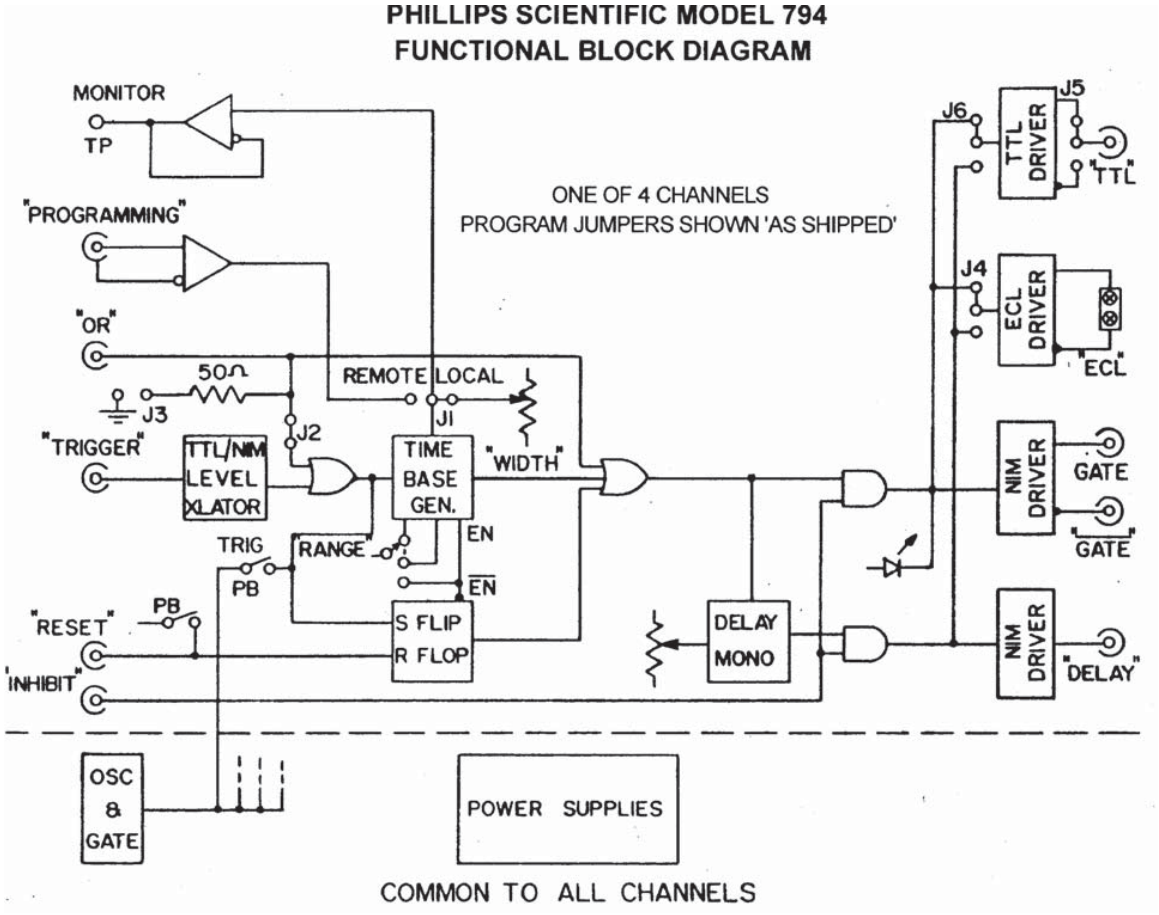


图 5.16: Phi.794 逻辑框架图

Philips scientific 740 ：Phi.740 是单宽基于 NIM 标准的单倍增益线性扇入扇出加和器 [77]。插件可以实现 4 道输入信号的线性加和，同时提供增益为 1 和增益为 -1 的输出信号，使得复杂的触发逻辑称为可能。插件应用对输入和输出的耦合消除由于周期性信号造成的基线漂移。输入信号可以是单极信号也可以是双极信号，输入阻抗为 50ohm。输入端由钳位二极管保护，能够保证 ±100V 信号在低于 1μs 时间内插件不损坏。对于上升时间为 1ns 的信号，信号反射低于 ±4%。对于 ±10V 信号输入，插件过载恢复时间小于 20ns。输出

端可以在信号接地的情况下不损坏，输出范围 ±2V(50ohm)。插件前面板每一组都有独立的基线调节旋钮，旋钮可以提供 ±500mV 的偏置。

ORTEC 575A ：ORTEC 575A 是单宽基于 NIM 标准的波形放大器 [78]。放大器在高分辨率的波形放大中，具有极低的噪声、很好的过载响应、增益范围宽等优点。插件输入阻抗为 1000 ohm，输入信号要求上升时间小于 650ns 的正信号或负信号。插件有三个积分和微分时间常数可以用旋钮调节，以获得最佳的整形效果。其中应用的极灵相消技术很好的削弱了微分电路的负脉冲信号。放大器还应用了滤波电路改善输出信噪比和降低整形时间。放大器同时输出到单极信号和双极信号，并在单极信号中尽可能的改善信号基线，以方便直接用于分析。放大器的输出信号上升时间最大为 0.25μs，输出阻抗 93ohm。

5.2 EnDAQ：硬件设计

PandaX 一期电子学与数据获取系统包括光电倍增管原始信号放大，信号模数转换，触发源信号甄别，触发逻辑，触发效率统计和数据存储。图 5.17是 PandaX 一期电子学与数据获取系统的设计图。

为了减少进入探测器内部的线缆的数量（线缆会增加放射性本底，损害探测器气密性），PandaX 一期时间投影室的光电倍增管阵列采用正高压供电。因此，光电倍增管输出端的信号是光电子倍增后的信号和高压的叠加，也就是说信号在进入 EnDAQ 系统前必须滤掉直流高压。如图 5.18所示，是光电倍增管高压供电和输出滤波电路 [63]。

经过耦合电路分离直流高压后的信号传递到 Phi.779 放大 10 倍，然后送到快速模数转换器（V1724）中转换为数字信号。图 5.19是 V1724 的数据获取逻辑。在门信号取数模式下，当取数控制信号（S_IN）处于高电平时，在取数参考时钟的上升沿把模拟信号转换为数据并存储在缓存中。实际 PandaX 取数过程中没有用门信号去控制取数过程。

然后，V1724 根据寄存器中的设置产生触发源信号并在前面板模拟输出接口输出，输出信号幅度与一块 V1724 中所有到的信号加和成正比，称为模拟和信号。图 5.20是模拟和信号产生逻辑。

首先，自模数转换器得到的数据被传递到 FPGA 逻辑控制器中，根据寄存器里的设置允许或否决每一道是否参与加和。之后由控制器根据寄存器设置在 14bit 的数据中选取连续不超过 8bit 的数据参与加和。当所有参与加和的数据相加后，数据的位宽是 11bit，根据寄存器设置决定是否对信号进行反转。最后根据设置对输出信号进行基线偏置和放大。数据会在数模转换器中以 1V 的参考电压转换成模

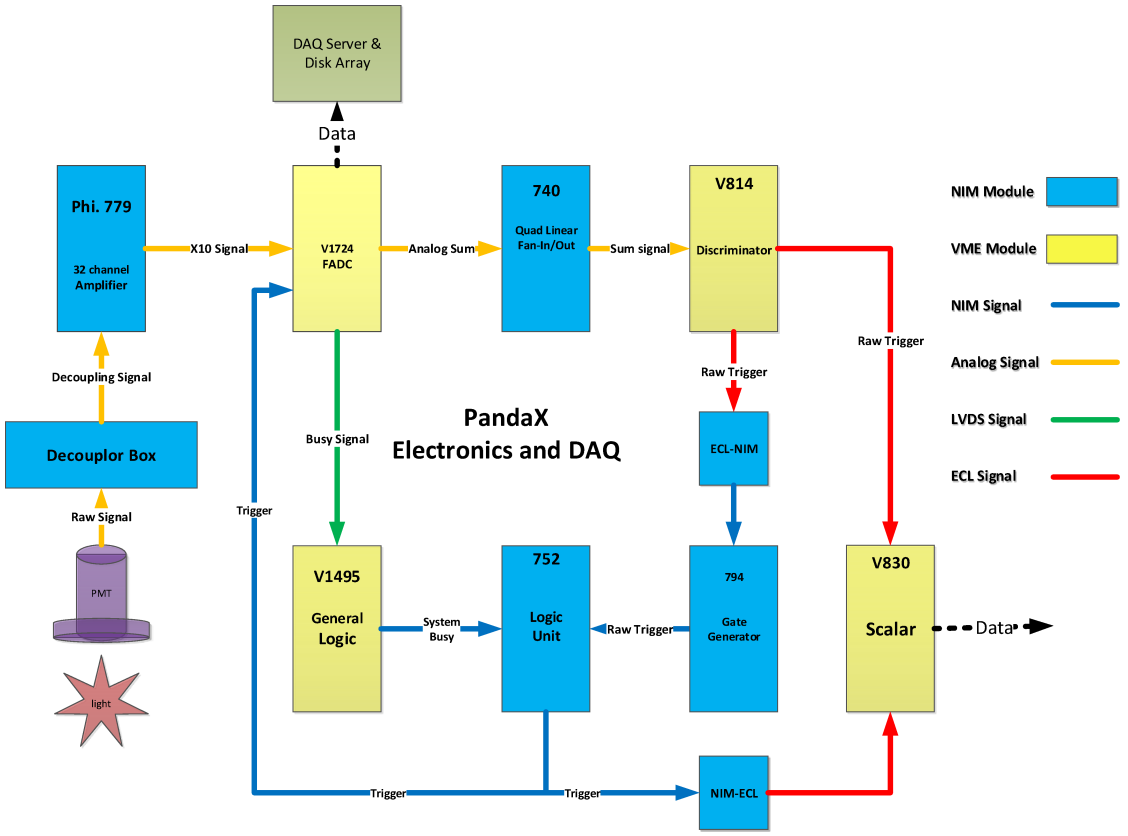


图 5.17: PandaX 一期电子学与数据获取系统

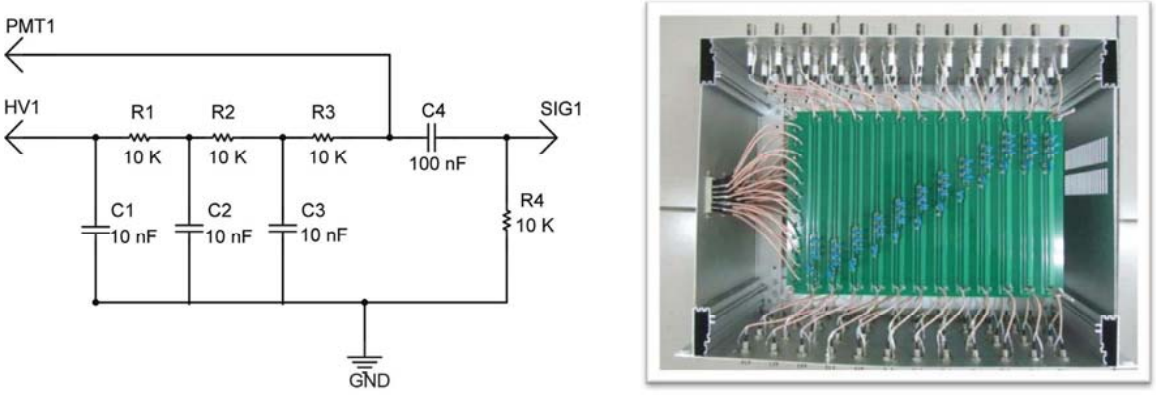


图 5.18: PandaX 高压、信号耦合电路

拟信号并输出。图 5.21是模拟和信号的测试图，分别是一块插件一道的模拟和信号与两道的模拟和信号。

系统产生正比于输入信号的模拟和信号之后，由 Phi.740 以级联的方式把所有的模拟和信号加起来，得到正比于系统光电倍增管信号幅度总和的信号，这个信号是 EnDAQ 系统的触发源。触发源信号由定阈甄别器 V814 甄别产生原始触发信

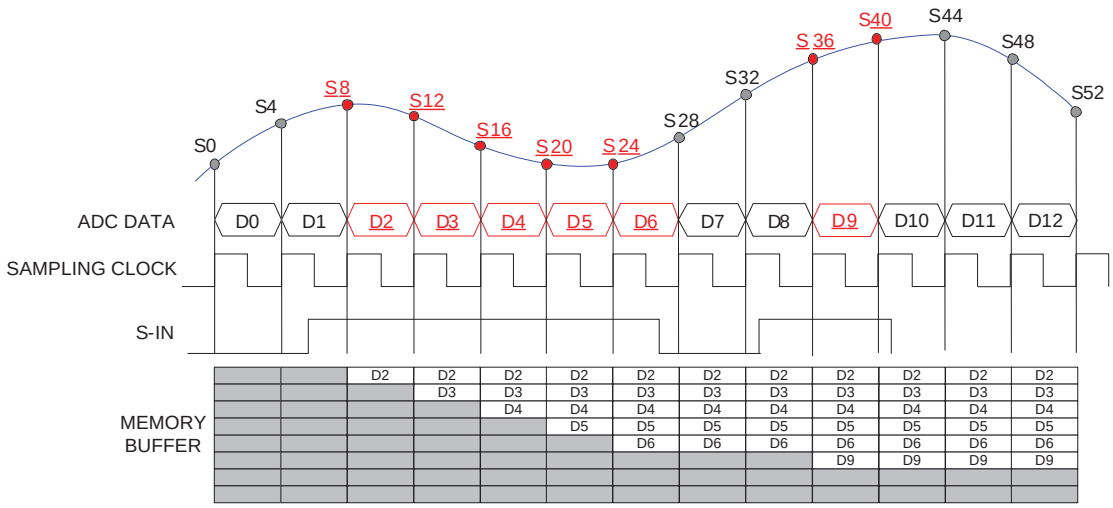


图 5.19: V1724 数据获取逻辑

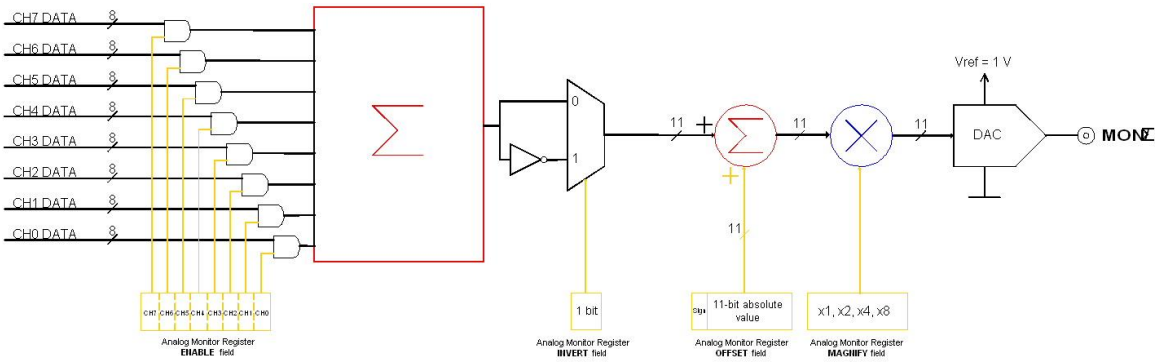


图 5.20: 模拟和信号产生逻辑



图 5.21: 模拟和信号测试

号。原始触发信号和 V1724 产生的忙信号在 V1495 的编程逻辑中产生最终的触发信号。触发逻辑会在触发设计中会详细讲述。V1495 产生的触发信号被 V1724 和 V830 接收。V830 将计数其中的数据存储到缓存中等带读取。而 V1724 由于触发

信号的到来开始将数据组成事例并存储。图 5.22是 V1724 在触发逻辑。

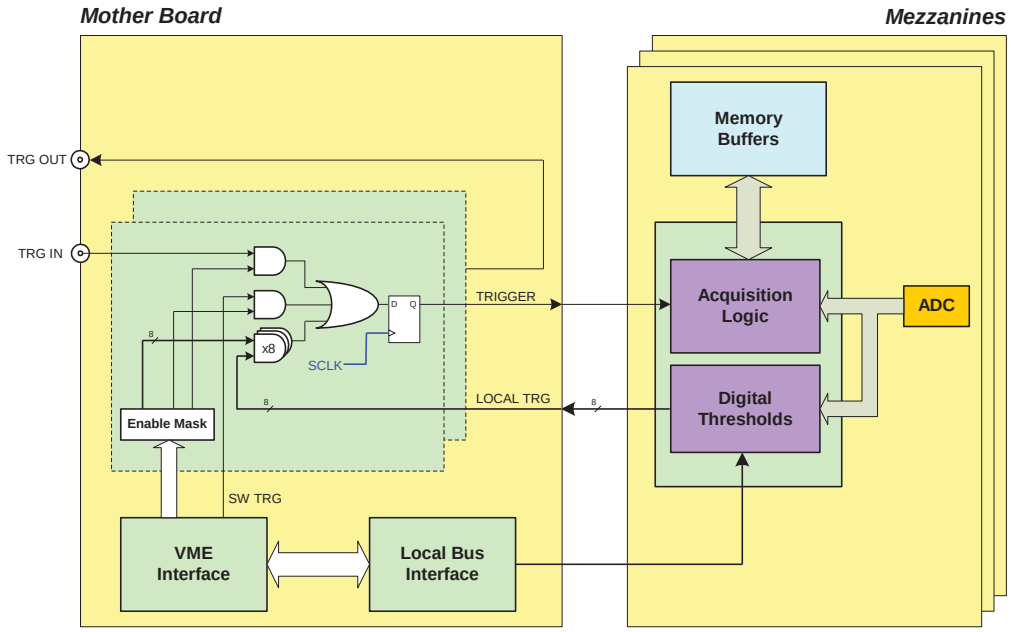


图 5.22: V1724 触发逻辑

V1724 有三种触发逻辑模式：内部触发、软件触发、外部触发。内部触发是由寄存器设定每一道的阈值，并在过阈后根据触发条件产生内部触发信号。软件触发时在软件访问寄存器是产生触发信号。V1724 首先通过硬件的拨盘选择是内部触发还是外部触发。触发模式确定后，插件在触发信号到来时开始事例组装。

在快速模数转换器开始工作之前，对插件的配置过程中，设定了和事例组装相关的寄存器，主要是取数时间窗口和触发信号在取数窗口的位置。V1724 插件每一道模数转换器有 1MBytes 的缓存，根据寄存器设置，可以把缓存均匀的分成若干份用于数据存储，而每一份的大小标志着一个事例最大的时间窗口宽度。表 5.1是 V1724 的寄存器设置、事例数和缓存块大小的表格。

V1724 最多可以存储 512 个事例，事例的取数窗口最大为 5.12ms。实际取数过程中，可以在对缓存分割完毕的情况下，通过寄存器设置规定取数窗口小于设定值。如此，实验可以更高效的取数，防止由于庸余数据的存在降低实验的最大取数频率。在确定了取数窗口的大小后，根据寄存器设置，可以设置在触发信号之后的采样数是多少。图 5.23是触发信号和事例组装。

如图所示，红色部分的信号被转换成数据并存储，蓝色的数据被丢弃。当两个事例的时间窗口发生重叠时，可以设置寄存器允许把重叠事例组成一个事例。但在 PandaX 取数过程中，为了保证数据格式的统一性，方便后期的数据分析，我们把重叠事例作为两个事例存储下来。事例的存储格式会在软件框架章节讲述。

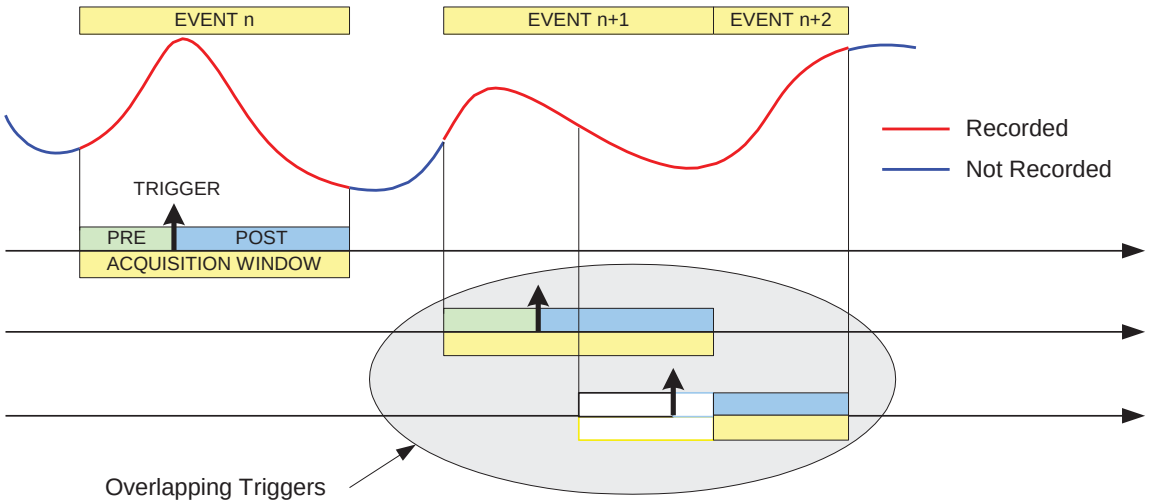


图 5.23: V1724 事例组装

5.2.1 时钟逻辑

PandaX 一期时间投影室的光电倍增管阵列总共 180 道，因此实际硬件设计中应用了 23 块快速模数转换器插件（每块有 8 道），实现 184 道模拟信号的数据采样。对于一块插件的数据获取系统，V1724 可以采用内部时钟驱动系统运行和模拟信号采样。如图 5.24所示 V1724 时钟逻辑框架图。

V1724 插件的时钟分为两部分，一部分是由板载 50MHz 石英晶振（OSC-CLK）提供，一部分是参考时钟（REF-CLK）。板载石英晶振为插件和 VME 总线通信以及插件主控制器和模数转换器子板的本底总线通信提供时钟参考。参考时钟通过时钟链控制模数转换器采样、触发逻辑、数据获取逻辑（逻辑包括采样点组成事例存入缓存、触发信号到来时冻结相应缓存）。参考时钟可以通过板载的开关选择前面板的输入时钟信号或内部石英晶振的时钟信号。参考时钟通过德州仪器

REGISTER	BUFFER NUMBER	SIZE of one BUFFER (samples)	
		SRAM 1MB/ch (512KS)	SRAM 8MB/ch (4MS)
0x00	1	512K	4M
0x01	2	256K	2M
0x02	4	128K	1M
0x03	8	64K	512K
0x04	16	32K	256K
0x05	32	16K	128K
0x06	64	8K	64K
0x07	128	4K	32K
0x08	256	2K	16K
0x09	512	1K	8K
0x0A	1024	512	4K

表 5.1: V1724 buffer 设置

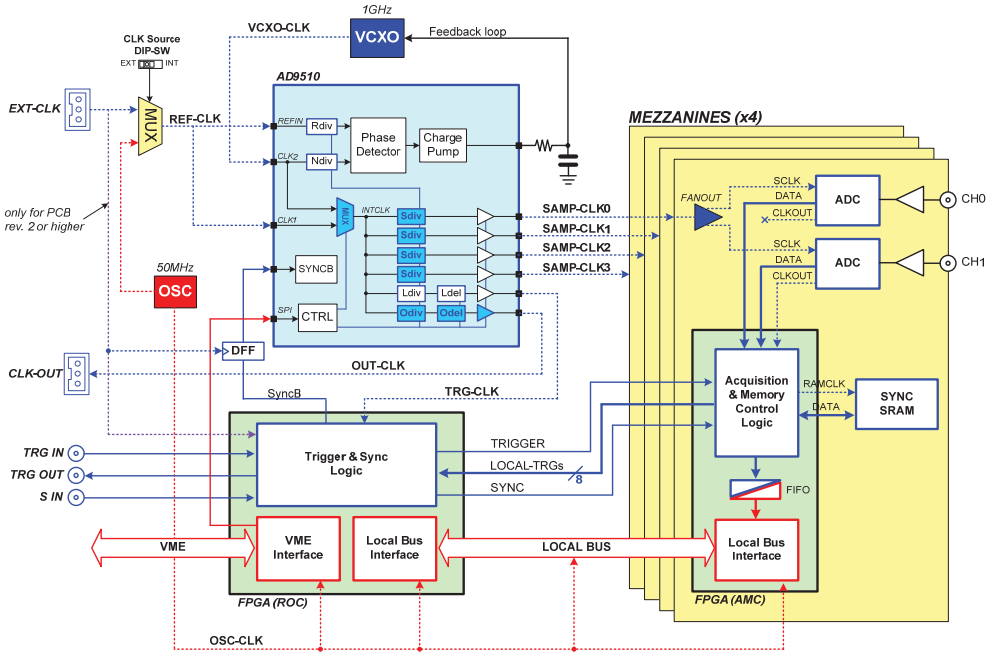


图 5.24: V1724 时钟逻辑

的 AD9510 芯片编程，并扇出 6 道输出时钟信号：4 道作为模数转换器子板的参考时钟，一道用作触发信号的时钟参考，一道用作时钟输出信号。AD9510 首先通过 PLL 锁相环对参考时钟获得频率和相位更加稳定的时钟源，然后时钟信号根据不同的目的做分频或者倍频。

然而，PandaX 一期需要对 23 块插件进行时钟同步。利用 V1724 的时钟输入和时钟输出，系统实现对所有插件的采样时钟信号的同步并以同一个参考时钟运行。理论上可以通过一个时钟源扇出 23 道时钟信号给所有的插件或者通过菊花链的模式把所有插件的时钟串联起来。如图 5.25是菊花链时钟逻辑示意图。

如图 5.26所示，在菊花链模式中，一块 V1724 插件以内部时钟作为插件的数据获取和通信参考时钟，并根据设置在时钟输出接口输出同步的时钟。这块插件被看做是系统时钟的主插件，其余插件以从属插件的形式从时钟源以菊花链获得同步时钟信号。然后，利用 AD9510 的锁相环稳定时钟的频率和相位，再通过微调时钟延迟，从而在很高的精度上同步系统的时钟。

根据寄存器设置，可以在 TRG_OUT 输出和 CLK_OUT 同步的信号作为时钟同步的参考信号。首先将主插件的信号源选择为内部时钟，并允许时钟输出。然后，在从属插件板载开关选择外部时钟，并允许时钟信号输出。图 5.27的左图是时钟信号的示波器采样图，可以看到两块插件的时钟信号存在延迟。在经过软件修改主时钟源时钟信号延迟后，右图显示时钟信号已经同步。

如此一来，PandaX 一期电子学与数据获取系统的取数环节有的稳定的时钟

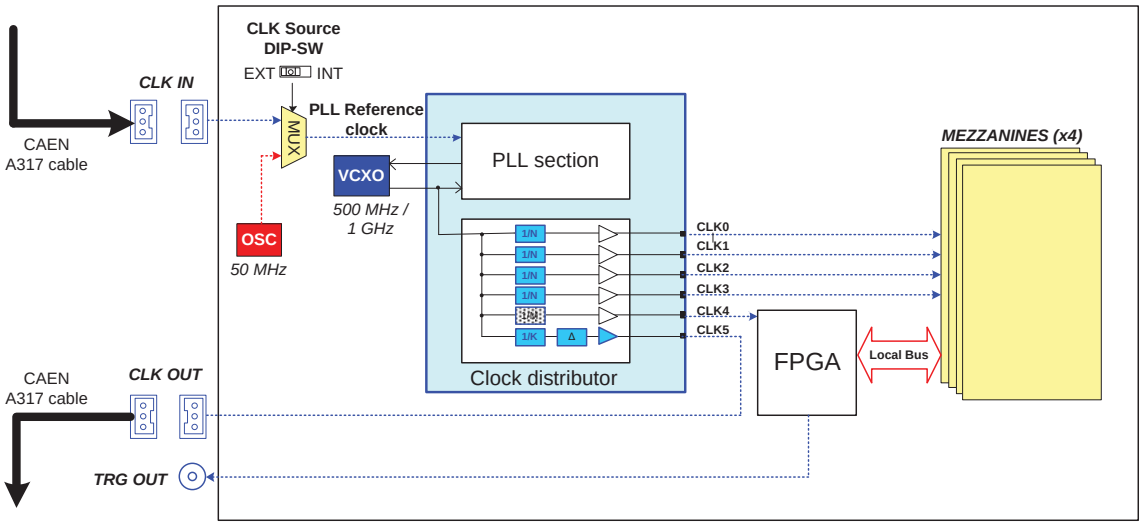


图 5.25: V1724 菊花链时钟逻辑示意图

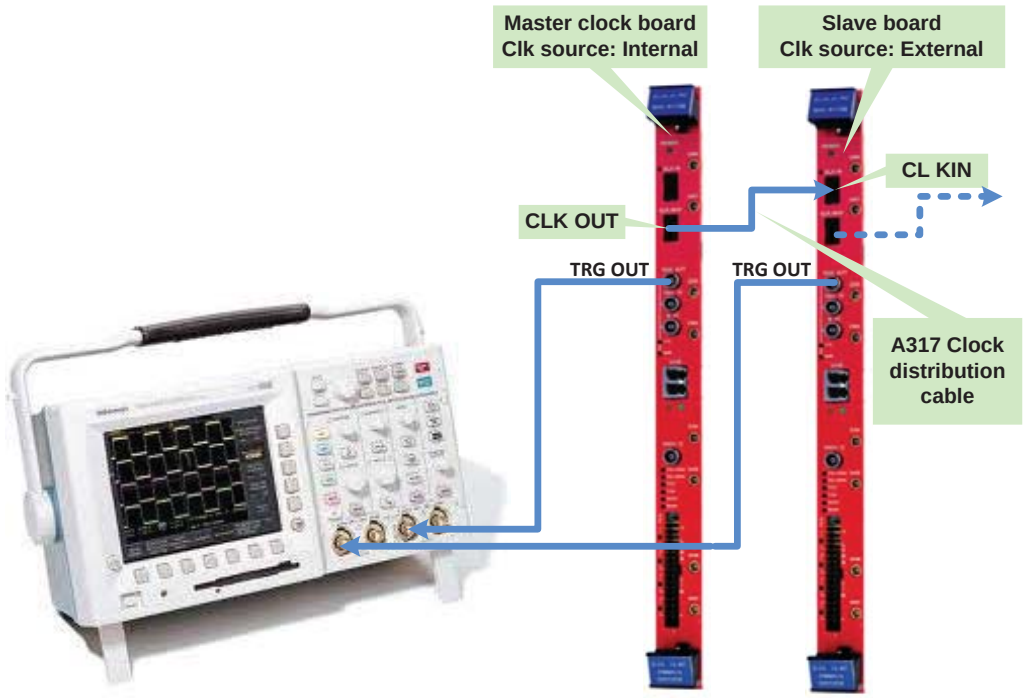


图 5.26: V1724 菊花链时钟逻辑测试

源。

5.2.2 数据零压缩技术

PandaX 电子学与数据获取系统实际运行中，总共有 184 道模数转换器，对于 PandaX 一期要求的 200μs 取数时间窗口，一个事例总数据量大于 7.02MBytes，即便是在光纤传输数据的条件下，理论极限触发频率也只有 11Hz 左右。所以

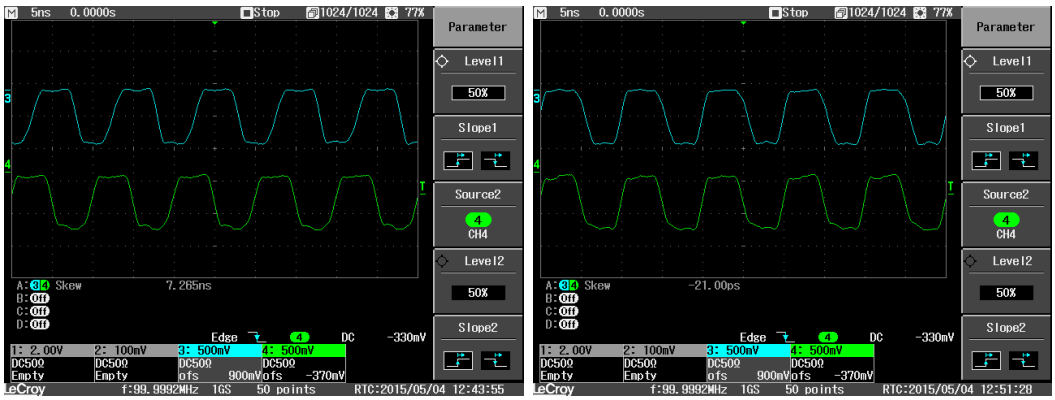


图 5.27: V1724 菊花链时钟逻辑测试结果

PandaX 电子学与数据获取系统引入零压缩技术来大幅削减数据量。零压缩技术是 V1724 内置的重要功能，通过对寄存器的配置实现数据压缩。

零压缩技术通过判定输入信号是否过阈以及过阈采样数是否大于寄存器设定的值来确定数据是写入缓存还是舍弃掉。当一段数据符合条件确定被保存时，插件将保存信号前后过阈位置一定数量（由寄存器确定）的采样点。零压缩的数据格式如下：

- 事例的总大小（一个事例所有的需要被传输的字节数）
- 控制字符
- 采样点（如果数据符合过阈条件）
- 控制字符
- 采样点（如果数据符合过阈条件）
- ···

零压缩逻辑的控制字符格式如下：

Bit	Function
[31]	0: skip 1: good
[30:21]	0
[20:0]	stored/skipped words

实际数据文件中，一个“good”的控制字符后面一定有一个“skip”的控制字符，相反一个“skip”的控制字符后面也一定有一个“good”的控制字符。图 5.28是一个零压缩事例，事例要求好的数据要高于阈值。事例开启了 CH0∼ CH03 四道输入用于数据获取。事例中只有 CH0 和 CH2 有数据，CH1 和 CH3 两道没有没有信号过阈。图 5.29是实际的物理取数过程中的零压缩事例。

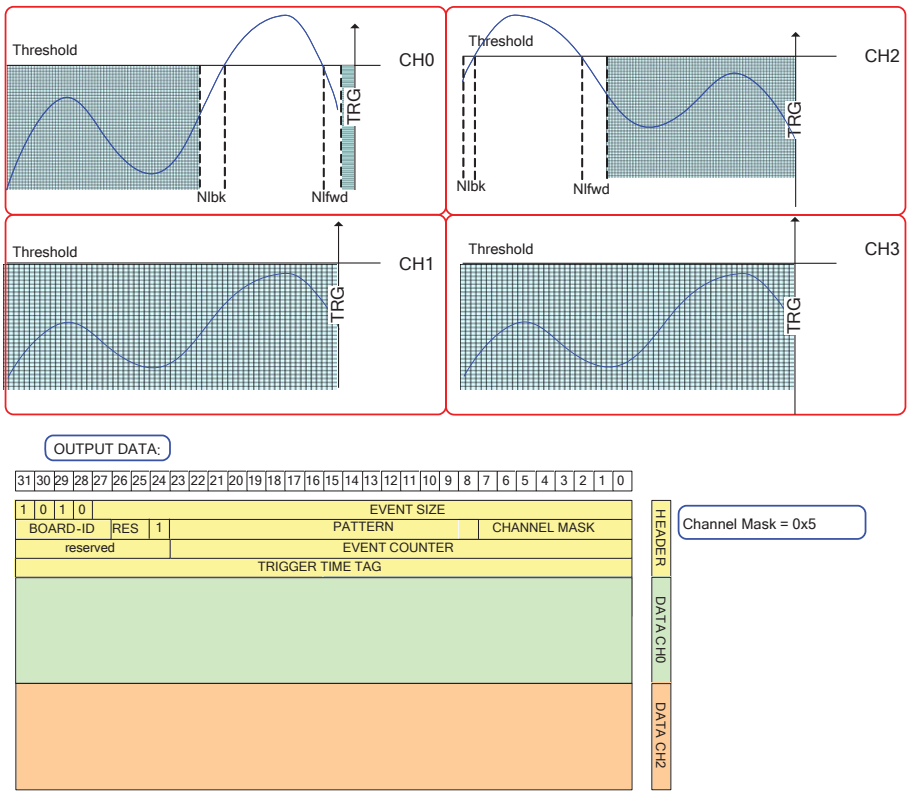


图 5.28: V1724 零压缩模式

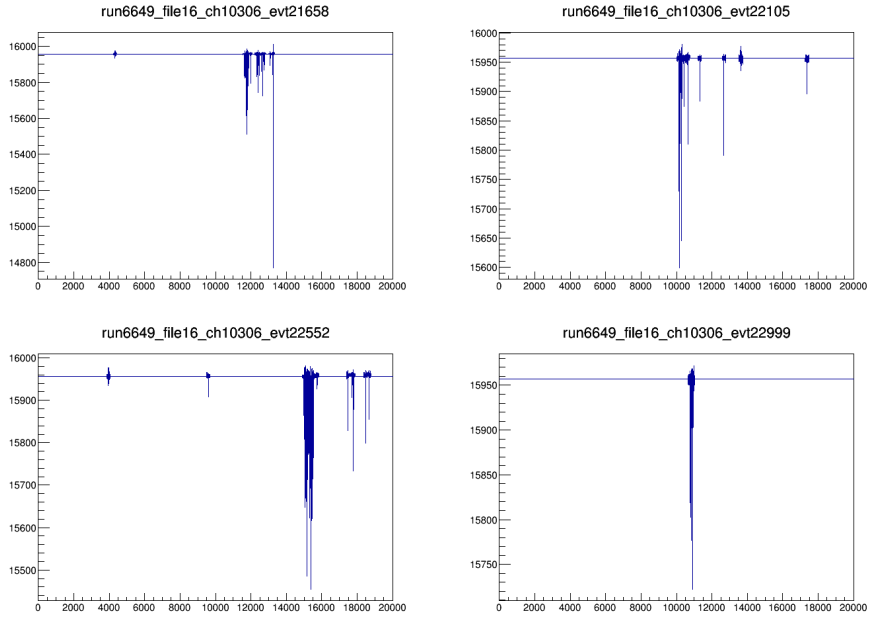


图 5.29: V1724 零压缩模式事例

5.3 EnDAQ：触发模式设计

图 5.31左图是试运行期间应用的触发模式。原始信号在快速模数转换器中根据 100MHz 参考时钟做模数转换，形成 14bit 数据流。数字信号经过 FPGA 编程后，

形成加和后的 11bit 数据流。以 1V 的基准电压为参考电压，以 25MHz 时钟为参考时钟，由数模转换器声称模拟和信号。模拟和信号由 V814 定阈甄别器甄别生成原始触发信号。

图 5.30是试运行期间 V1495 的 FPGA 逻辑设计框架图。如硬件框架图所示，

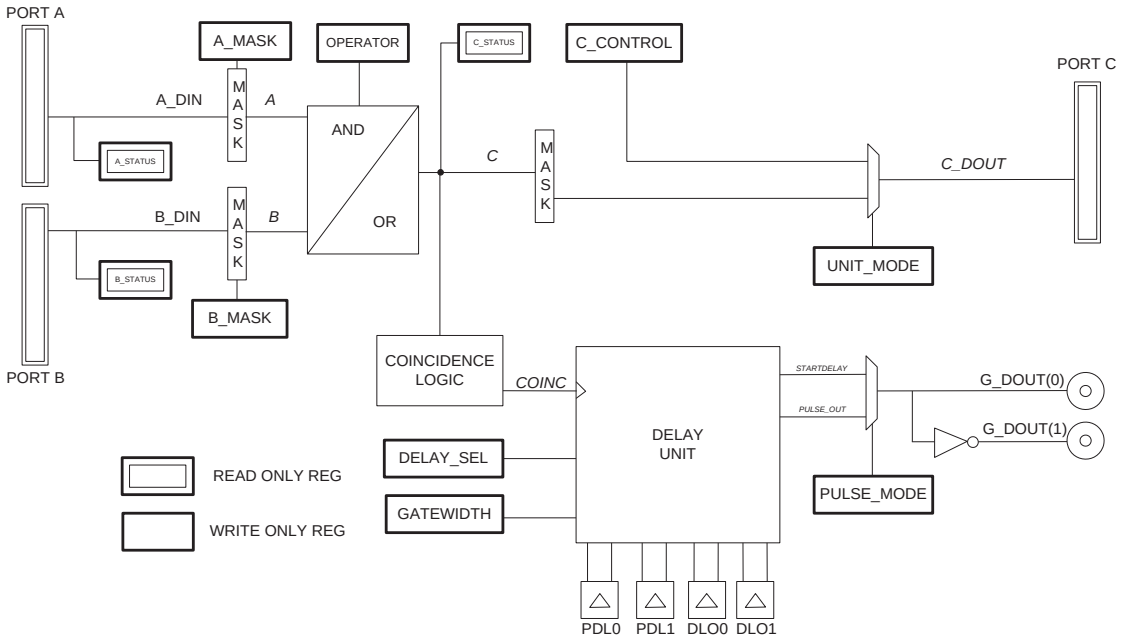


图 5.30: CAEN V1495 默认用户 FPGA 逻辑框架

快速模数转换器通过 A、B 输入数字电平信号，信号的值实时反应在寄存器中。每一个连接器输入接口都有相应的寄存器选通掩码，根据选通掩码确定参与逻辑的信号道。两个连接器分别有 32 道输入信号，经过选通过后，每一道信号都可以和另一个连接器的相应信号做与/或逻辑，并准备输出到 C 连接器。输出到 C 连接器的信号有相应的寄存器做选通输出。试运行中设定 A 和 B 的逻辑为或，FPGA 会在任何一道或逻辑产生的信号的上升沿产生一个门信号用于触发逻辑，在 G 连接器输出。

试运行中 V814 产生的原始触发信号在 N638 电平转换器转换为 NIM 电平。V1495 对所有忙信号取或，得到系统忙信号，并由 G 连接器输出 NIM 电平信号。原始触发信号和忙逻辑信号分别由 Phi.794 产生一定宽度和延迟的门信号，最后由 N625 逻辑与插件完成触发信号和忙信号与逻辑得到系统触发信号并送到第一块快速数模转换器，然后以菊花链的形式传递下去直到最后一块插件。图 6.8上图描述试运行期间的触发信号逻辑。

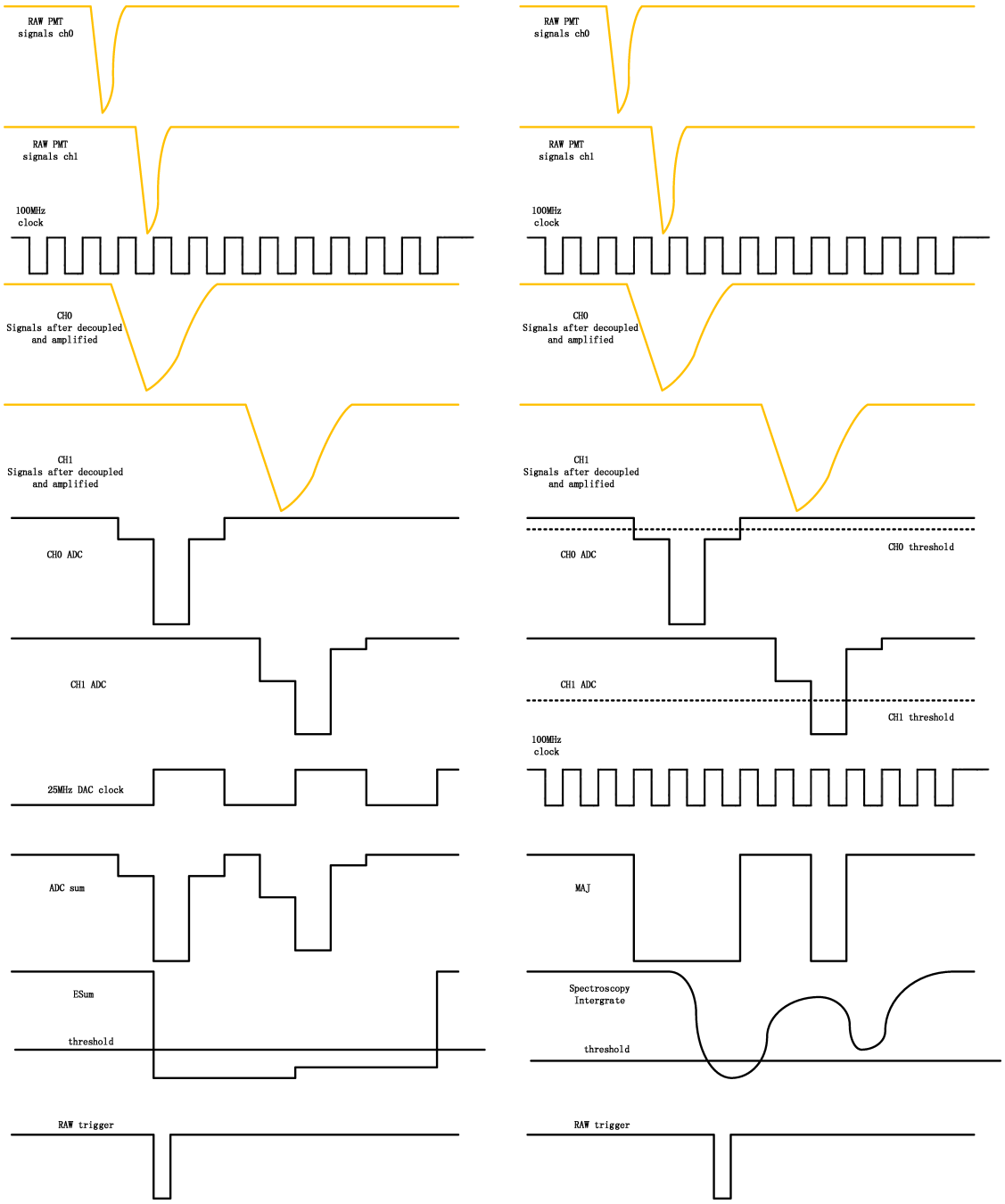


图 5.31: 左图：试运行期间原始触发信号生成逻辑。右图：升级后原始触发信号生成逻辑。

5.4 EnDAQ：软件设计

PandaX 电子学与数据获取系统是在 C++ 的基础上设计的，包括 VME 插件控制、系统配置以及系统状态和配置存储。由于 PandaX 一期电子学与数据获取系

统的硬件是商业插件，VME 插件控制软件是在 CAEN 库文件的基础上设计的。系统配置是在 XML 库的基础上设计的。系统状态和配置存储是在 MySQL 库的基础上设计的。图 5.32是系统的软件框架图。图 5.33是系统的软件流程图。

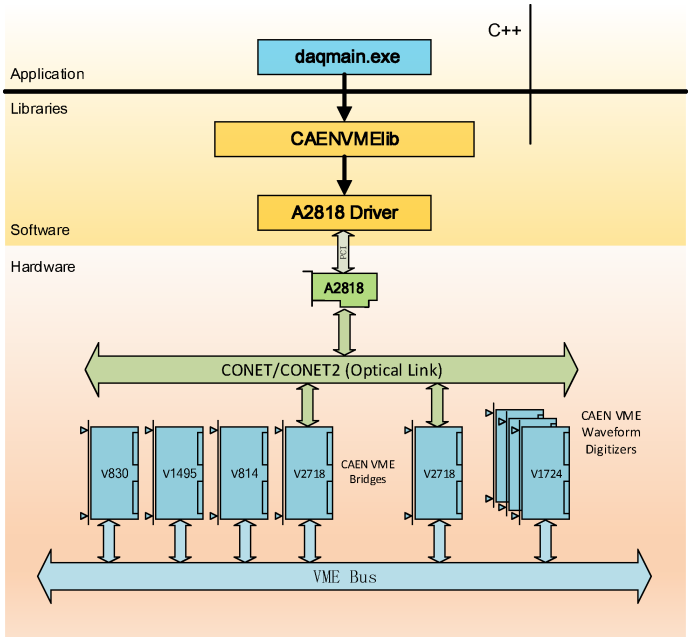


图 5.32: PandaX 电子学与数据获取系统软件框架图

系统首先初始化所有的 VME 插件的设置、缓存以及数字信号的状态。然后对所有的插件初始化，初始化分三部分：首先对所有寄存器写入 XML 配置文件中的值，由于系统包含 23 块快速模数转换器，其部分寄存器配置要根据信号特征来设定，所以然后对需要特殊配置的插件重新写入配置，最后由于一些配置的之间存在数学逻辑关系，所以需要读出与之相关的寄存器值，经过数学运算后写入相应寄存器。在系统开始数据获取之前，将所有的获取电子学与数据获取系统的配置、状态以及开始时间等信息写入 MySQL。之后系统通过软件读写 V1495 取数时间重置寄存器重置系统数据获取时间，然后开始数据获取。

数据获取开始后，软件开始查询快速模数转换器中的数据存储状态，当缓存中的事例数大于 XML 配置中的设定值时，开始把数据从插件读取到服务器。一个读取循环结束后，会对读取的数据格式进行格式校验，如果校验通过则开始组装事例，如果没有，则可能 V1724 缓存存在问题，在重置 V1724 缓存后，重新开始等待数据。一旦数据通过格式校验，需要对数据的时钟信息进行比对，如果同一个事例的块插件的时钟信息差别太大，则放弃事例并格式化 V1724 缓存，重新开始数据获取。时钟信息比对通过后，软件把快速模数转换器的数据、XML 配置信息以

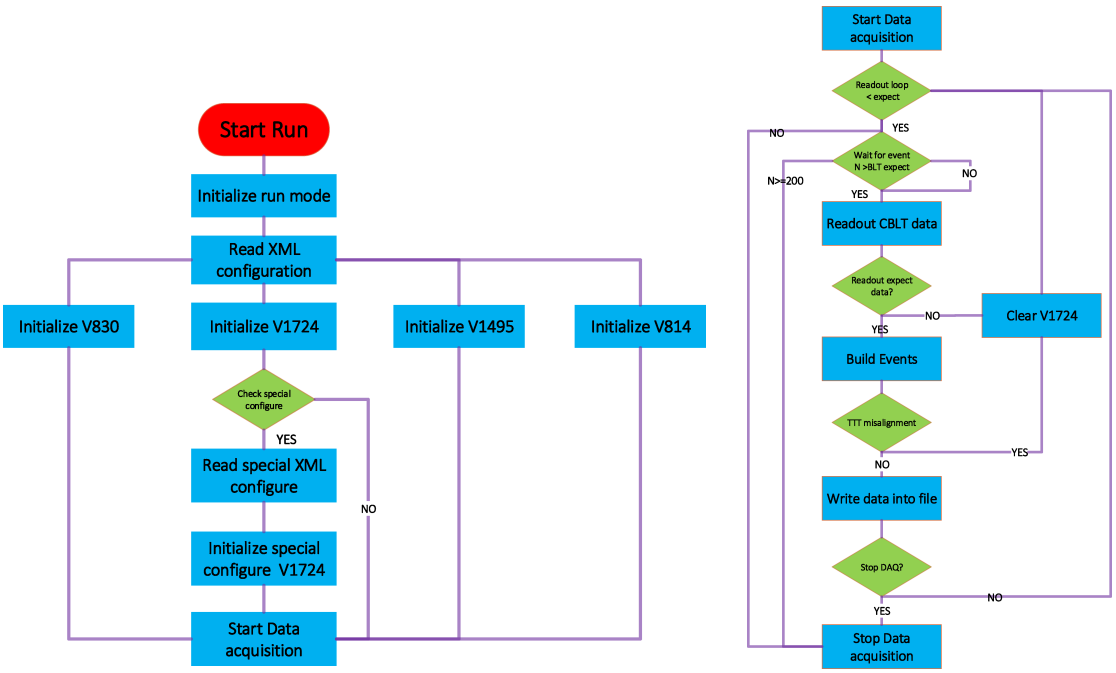


图 5.33: PandaX 电子学与数据获取系统软件流程图

及事例的时间、文件等信息被写入数据文件。数据文件大小限制在 1G，如果文件大于 1G 在文件尾写入文件信息并重新打开一个文件继续写入数据。在数据获取结束后，在文件尾写入文件信息以及此次运行的相关信息。

5.4.1 数据格式

PandaX 电子学与数据获取系统的数据格式分为三部分：文件格式、标识符格式、事例格式。一个数据文件大小约为 1G，每个文件由文件头、数据和文件尾组成。表 5.2是文件格式表格。文件名有运行模式、运行数字代码、文件开始时间、同一次运行文件位置组成。

如表 5.3, 对于文件中不同的数据分别设置的标识符，以方便物理分析查找调用数据。每一个标识符有 32 个 bit，高 4 位 bit 对应于不同的数据类型。每个文件的文件头包括运行数字代码、取数开始时间、文件位置代码、文件创立时间、数据获取参数（V1724 数目、时间窗口长度、是否开启零压缩、零压缩阈值等）。每个文件尾包括文件关闭时间、文件位置代码、本文件事例存储数、总数据量大小、取数截止时间、截止本文件运行时间、截止本文件事例数、截止本文件数据总量、本次运行总数据量（只在每次运行的最后一个文件有效）。每个事例包括事例编号、事例触发时间、VME 机箱识别码、V1724 识别码（对应于一个机箱内的插槽）。

快速模数转换器事例的格式有两种：一种是没有零压缩的数据格式，一种是零

压缩的数据格式。事例头包含以下信息：事例大小、插件编号、零压缩标志位、前面板接口标志位、板载信号道标志位、事例编号、板载事例触发时间。无零压缩的情况下，每一道的总数据量是相同的。但在零压缩模式中，每一道的数据包含当前信号的总数据量，还包括零压缩模式的标识符。表 5.4是 V1724 的事例数据格式。

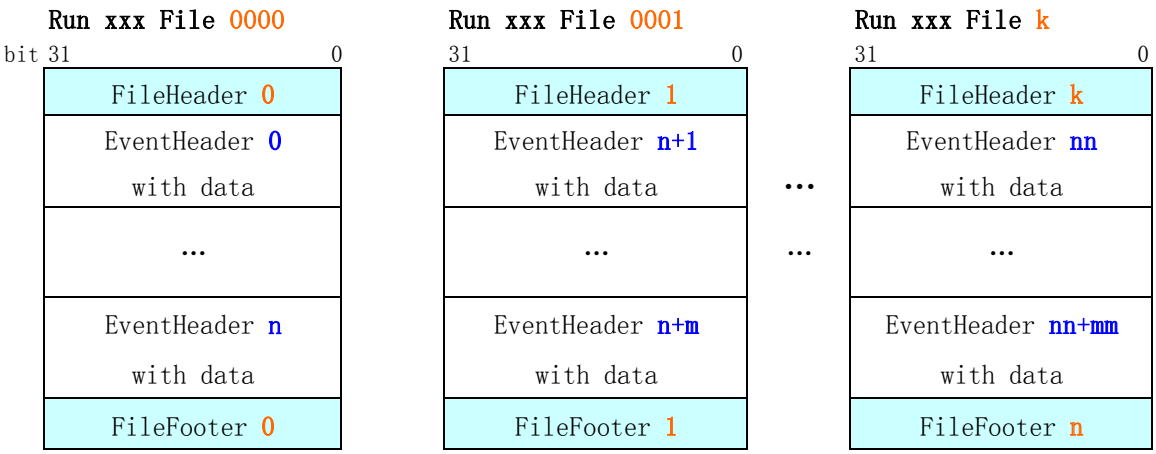


表 5.2: PandaX 电子学与数据获取系统文件格式

header format

bit	31	27	23	19	15	11	7	3	0	Note
	HeaderId	header size in 32-bit words								**header word**
	...									
	...									

FileHeader

bit	31	27	23	19	15	11	7	3	0	Note
0	1 1 0 0	header size in 32-bit words								
1	run number									
2	run start time (Unix seconds)									
3	file number									
4	file open time (Unix seconds)									
5	# of V1724s	# of channels			# of samples/channel					DAQ info
6	ZS code				input DAC					
7	ZS threshold									
8	ZS Nsamp									
9				buffer code	post trigger					
10					threshold 1	threshold 0				

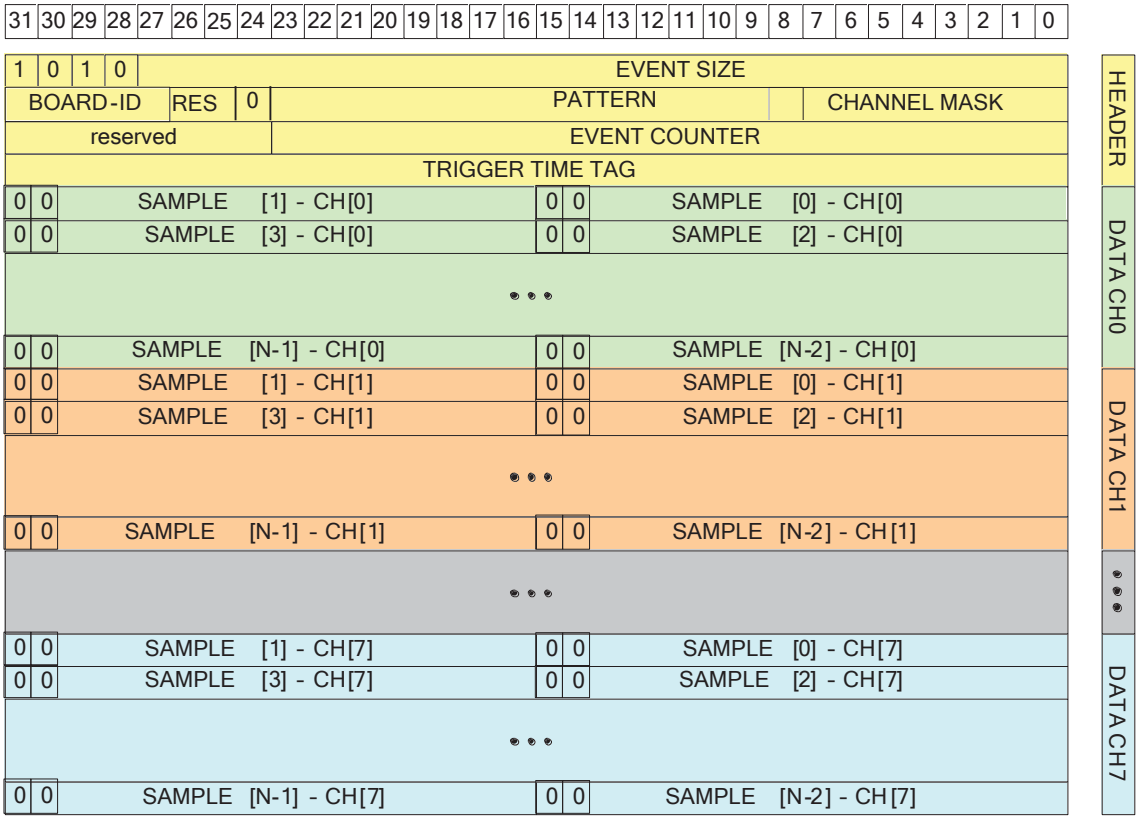
FileFooter

bit	31	27	23	19	15	11	7	3	0	Note
0	1 1 0 1	header size in 32-bit words								
1	file close time (Unix seconds)									
2	running time for this file									
3	number of events in this file									
4	data size in this file (bytes)									
5	run stop time (Unix seconds)									
6	accumulated running time for this run									
7	accumulated number of events in this run									
8	accumulated data size in this run (GBytes)									
9	F	accumulated data size in this run (residual bytes)								F: last file flag

EventHeader with data

bit	31	27	23	19	15	11	7	3	0	Note
0	1 0 0 0	header size in 32-bit words								
1	event number									
2	event trigger time									
3									CM	CM: crate mask
. . .	CrateHeader 0									
	FadcHeader 0									
	.....									
	FadcHeader N									
	CrateHeader 1									
	FadcHeader 0									
	.....									
. . .	FadcHeader M									

表 5.3: PandaX 电子学与数据获取系统标识符格式



ZERO LENGHT ENCODING enabled

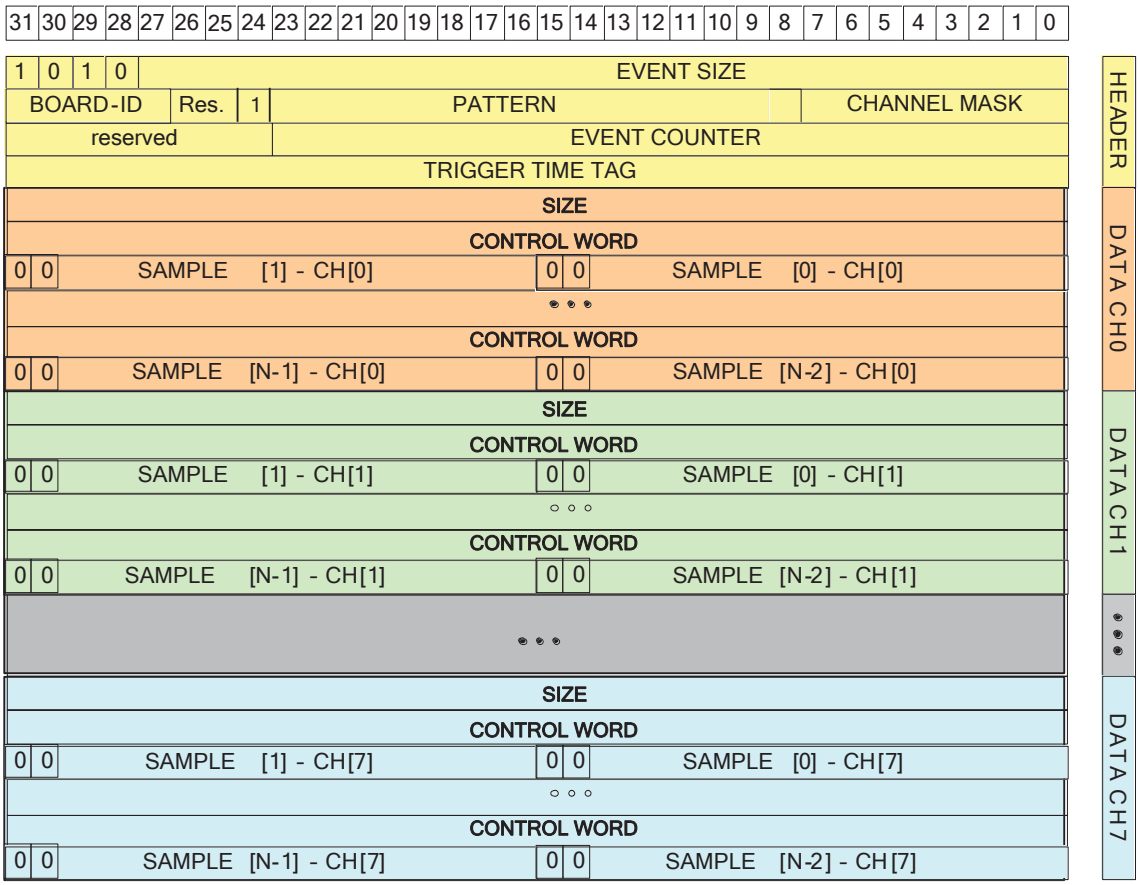


表 5.4: 快速模数转换器事例格式

6 PandaX 电子学与数据获取系统升级

在第一版的 PandaX 电子学与数据获取系统采用的触发信号源是正比于光电倍增管信号总幅度的模拟和信号。根据 PandaX 在试运行过程中的分析结果表明：

1、光电倍增管原始信号中叠加了和周期性噪声。噪声来源于制冷系统、气温波动以及光电倍增管阵列高压系统等。经过分析后噪声的主要来源于光电倍增管阵列高压系统。实验高压电源是一种开关电源。开关电源的工作原理如下：开关电源将用电网络输送过来的 220V 市电或者 380V 工业用电经过整流滤波后转换为直流高压，再经过逆变器转换为电压比较低的高频交流电，最后经过二次整流滤波成实验要求的直流电压。开关电源产生的电磁干扰主要来源于其应用的开关管、高频变压器、二极管的电流或电压变化速率高的器件，可以总结为整流电路产生的干扰、开关电路产生的电磁干扰以及高频变压器形成的辐射干扰，最主要的是开关电路的电磁干扰。开关电路由开关管和高频变压器组成，工作在高电压大电流的切换状态。在开关管由断开转变为导通状态时，负载上的变压器初级线圈上形成浪涌尖峰电压; 由导通转变为断开状态时，则会形成浪涌电流，构成传导干扰，因此导致了开关电源产生明显的电磁干扰 (EMI)。图 6.1是系统运行过程中数据采样得到的噪声波形图和示波器采样的到的波形图。

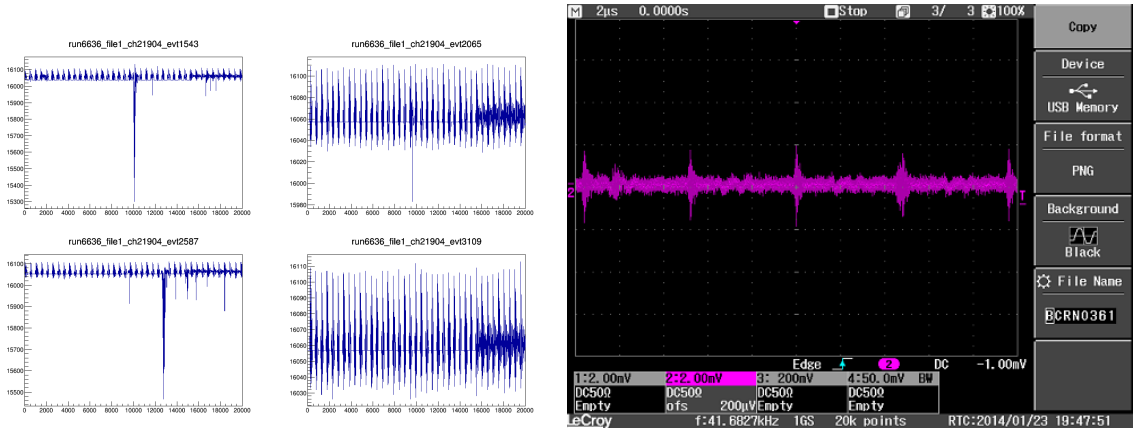


图 6.1: 200KHz 高压电源噪声

2、由第一版的 PandaX 电子学与数据获取系统的数据分析结果表明，系统的触发阈值过高。图 6.2 是分析结果。

由于理论上 WIMP 核反冲事例的 S2 信号比 S1 信号的电荷量大，所以我们以 S2 的触发效率作为系统触发效率的标准。根据计算在 S2 触发效率为 50% 时 S2 的

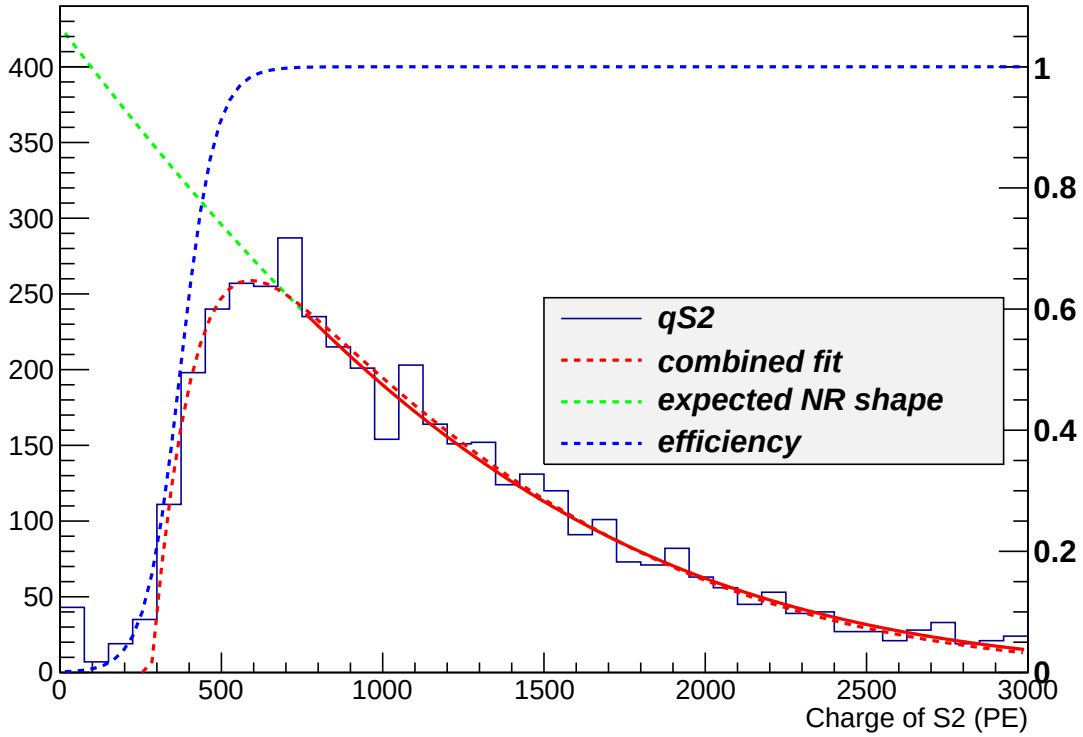


图 6.2: 模拟和触发源 S2 触发效率

阈值为 372.77PE。所以系统的触发阈值太高，需要新的触发模式，然而由于高压电源开关噪声的存在，模拟和信号的触发源噪声水平太高，不可能将阈值继续降下去。

因此，设计了第二版的 PandaX 电子学与数据获取系统，重点对触发系统做了重新设计。设计应用了快速数模转换器的多数逻辑输出和波形放大器实现对系统信噪比的提升。

6.1 EnDAQ：硬件升级

6.1.1 多数逻辑

V1724 的模拟信号输出是可编程模拟信号输出。如图 6.3所示，在多数逻辑模式中，可以对每一道模数转换器设定阈值，当其中一道过阈时，输出幅度为 125mV 的模拟信号，也就是信号的幅度与一块插件中过阈信号的数目成正比。

图 6.4是多数逻辑测试的示波器采样。对 4 道输入信号分别设定阈值，紫色的波形是由扇入扇出插件扇出的 4 道相同的信号源，绿色的波形是 V1724 模拟信号接口输出的多数逻辑信号，淡蓝色的是对多数逻辑信号的甄别信号。由于每一道阈值的不同，可以很明显看到在多数逻辑信号的阶跃特征。

虽然高压电源 200KHz 的开关噪声广泛存在于信号中，但是每一道信号中的开

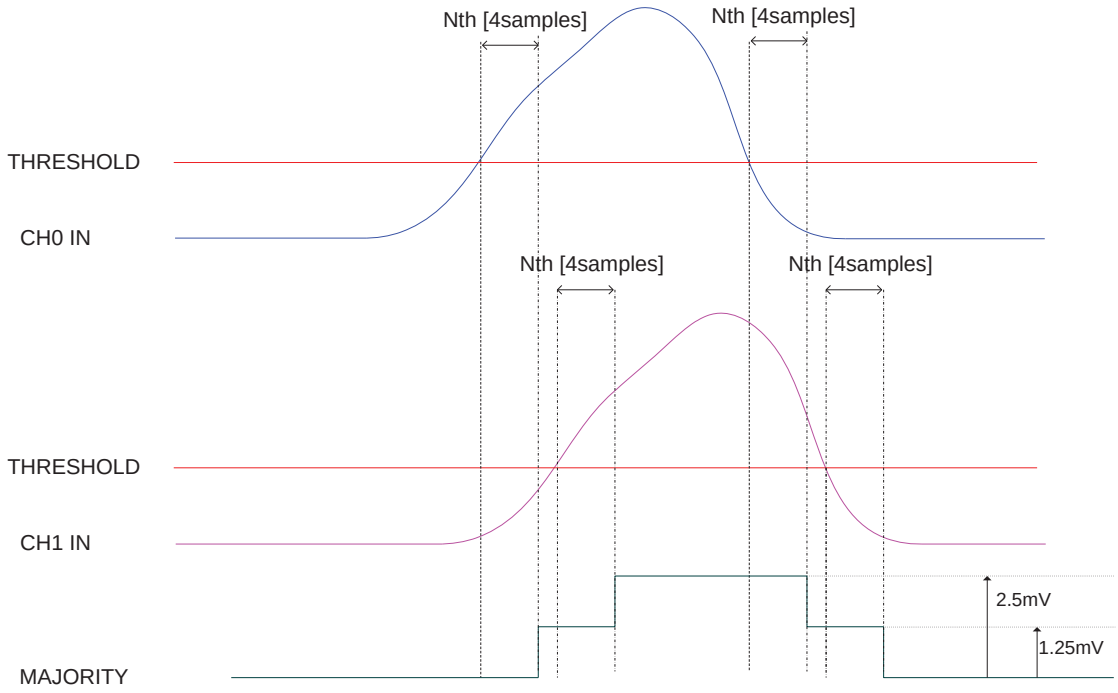


图 6.3: V1724 多数逻辑

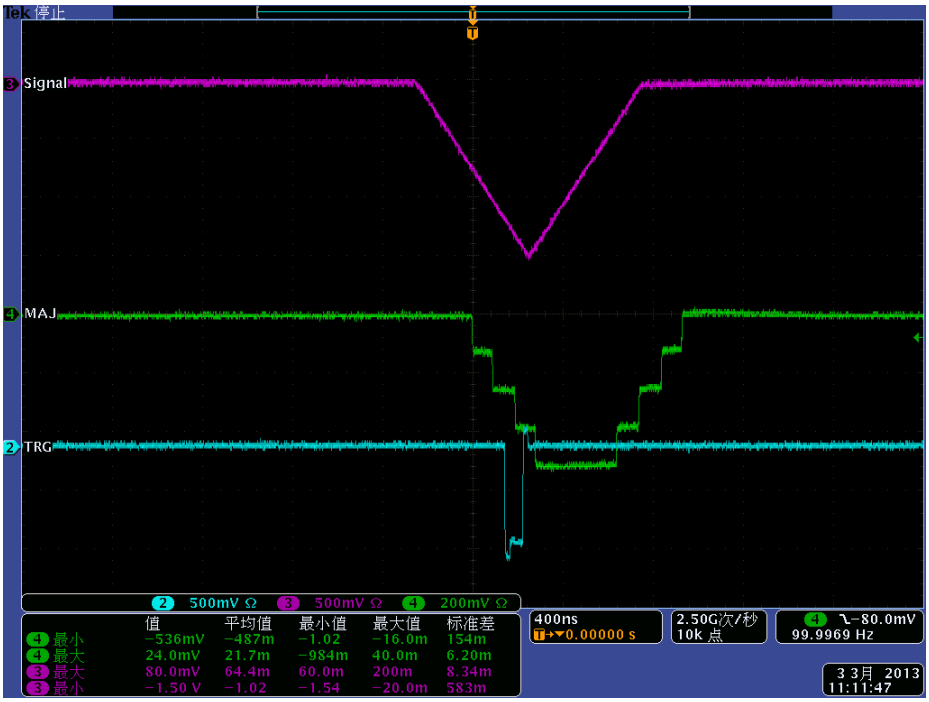


图 6.4: V1724 多数逻辑测试

关噪声在绝大多数情况下是低于光电倍增管单光电子产生的信号幅度的。因此可已通过对每一道信号设定阈值产生正比于光电倍增管阵列中过阈道数的多数逻辑信号。而且即使在对触发源模拟信号加和的过程中应用了衰减器（防止在扇入扇出插

件 Phi.740 中信号饱和而丢失信息），由于每一道信号过阈后的幅度高达 125mV，也不会影响触发源的信噪比。这会大大改善触发源信号的信噪比。

6.1.2 波形放大器

虽然多数逻辑信号可以很好地改善触发源信号的信噪比，但是仍然具有较高的 S2 信号触发阈值。这是因为部分噪声在所有的信号道中是同步的，当噪声水平比较高时，超过了单光电子信号的幅度，多数逻辑信号仍然会把噪声记录在触发源中。对于低能的 S2 信号，总电荷量通常为几十个光电子，而且会分散在 500ns 到 2μs 的时间范围内，而 WIMP 核反冲信号的 S1 电荷量比 S2 还要小，所以很难对低能的核反冲信号触发。经过观察同步的噪声信号通常集中在 100ns 范围内，所以引入对多数逻辑信号的积分可以很好地压低噪声被触发的几率。因此为了改善触发效率并尽可能的触发 S2 信号，设计引入波形放大器 ORTEC 575A 对信号进行积分。改进的后触发效率明显提高，详细结果会在系统性能章节介绍，详细的信号处理逻辑会在触发章节介绍。

6.1.3 触发时间同步

在 PandaX 电子学与数据获取系统试运行的数据中，发现数据的时间起点不同，并且随着时间的推移，有时会越来越大，从而严重影响对数据的分析。因此在升级的过程中，引入了对系统触发时间的重置信号。V1724 在前面板有扁平线缆接口可以通过输入 LVDS 差分信号对插件的数据获取时间重置为零。在系统配置初始化完毕之后，在开始数据获取之前，通过软件读写 V1495 的寄存器，允许 V1495 在扁平线缆接口输出 23 道高电平脉冲对所有的快速模数转换器的数据获取时间重置。如图 6.5所示，左图是数据获取时间没有重置时的波形，右图是重置过后的波形。重置后除了由于 V1724 触发逻辑时钟和数据获取时钟不一致造成的 20ns 晃动，没有其他的信号晃动。详细的重置逻辑会在触发逻辑章节介绍。

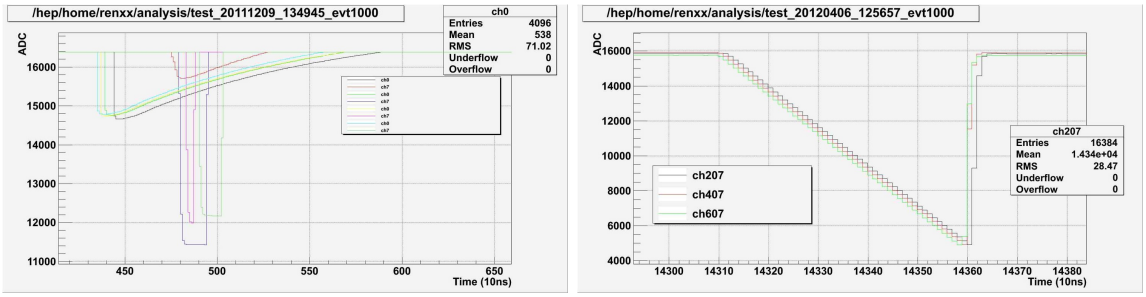


图 6.5: V1724 测试波形

经过两次对 PandaX 电子学与数据获取系统硬件设计的改动，系统能够很好的

触发低能的核反冲事例，事例能够保证时间轴的同步性，系统的稳定性也大幅提高。图 6.6是硬件设计完成后新的硬件逻辑框架图。

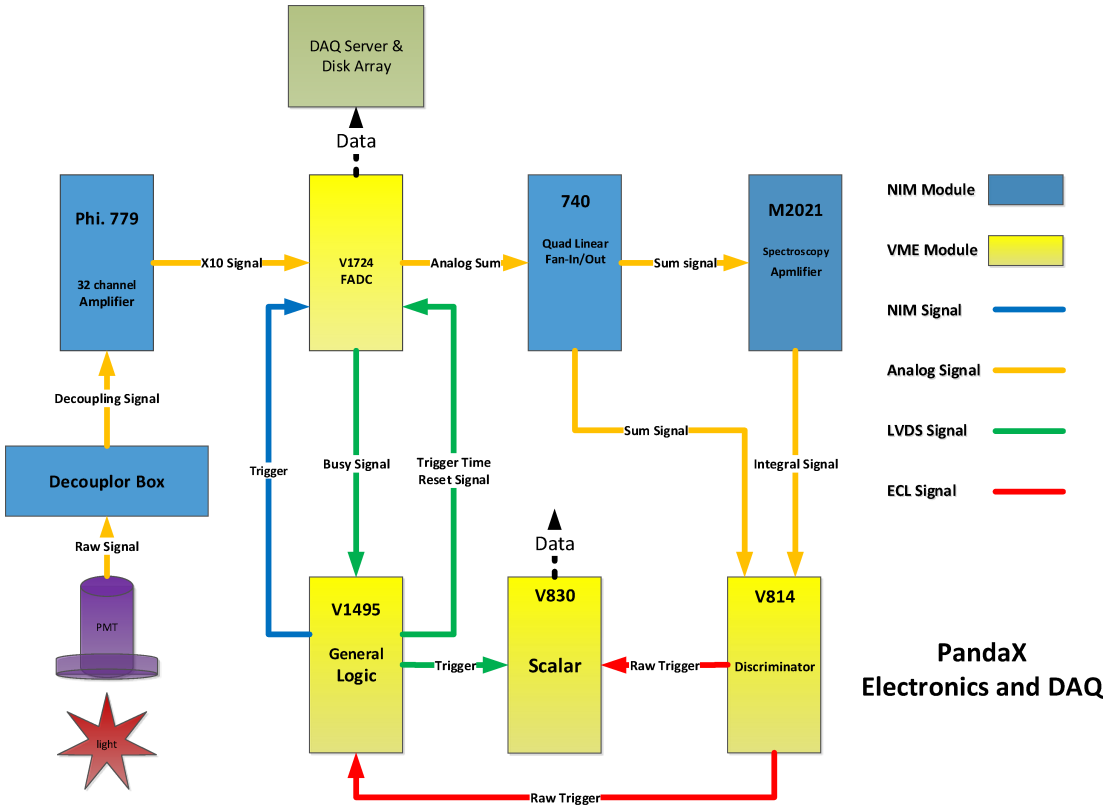


图 6.6: PandaX 一期电子学与数据获取系统改进

6.2 EnDAQ：软件升级

在 PandaX 一期试运行过程中，实验只开启漂移电场，并没有开启气氙中的外加电场，因此很少有 S2 信号产生，所以事例的取数窗口为 80μs。试运行期间的数据读出由服务器通过光纤访问 V2718 系统控制插件由 VME 总线读出数据。受限于 VME8100 机箱 VME 总线带宽的限制，数据的传输速率被限制在 40MB/s 以下。在试运行过程中只点亮了底部 37 个光电倍增管，也就是 5 块快速模数转换器，所以即使在数据传输速度比较低甚至没有引入零压缩模式的前提下，仍然不影响试运行的数据分析。但是在实际物理运行中，VME 总线的限制严重降低了实验的取数效率。

另一个升级数据读取模式的原因是，由于 CAEN 插件固件的不完善，当 V1724 的取数窗口大于 100μs 时，数据获取系统崩溃，无法一次性将数据从快速模数转换器的缓存中由 VME 总线读出。经典的特征是，无论是只读取一块快速模数转换器

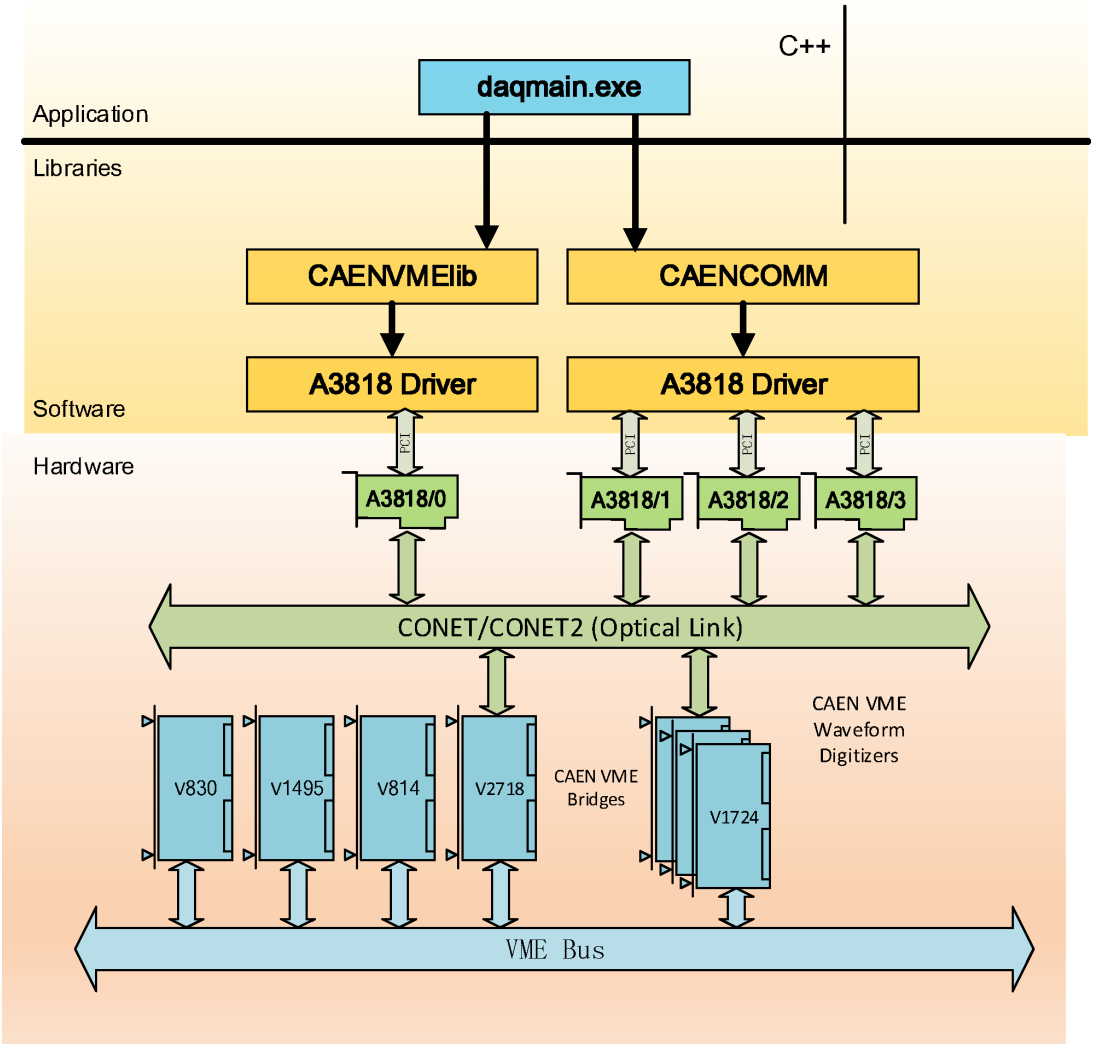


图 6.7: PandaX 电子学与数据获取系统升级软件框架图

插件还是在 CBLT 模式下以菊花链读取整个机箱所有的快速模数转换器，都在第一块插件停止读取，并且第一块插件数据缺失最后 32bit，重新读取后是新的事例，仍然没有最后 32bit。出于对数据不确定性的考虑，实验寻求新的数据读取模式。

根据 CAEN 提供的数据读取模式，还可以由快速模数转换器的前面板光纤接口直接读取数据，并且数据由板载本地总线管理，不经过 VME 总线。图 6.7是升级后的软件框架图。

升级后数据读取速率上限为 80MB/s，实际运行过程中可以超过 70MB/s。然而光纤读出只能按插件顺序读出数据，无法实现菊花链式数据读出，时间会损失在软件指令交互过程中，不过数据读取速率的提升弥补了这个缺点。

6.3 EnDAQ：触发升级

如之前在硬件章节描述的，由于模拟和信号触发阈值过高升级了多数逻辑触发模式。图 5.31右图是升级后的触发信号源的逻辑框架图。快速模数转换器生成 14bit 数据流后，和寄存器中设定的阈值做比对，如果过阈则由 FPGA 在模拟信号输出接口输出 125mV 阶跃信号。多数逻辑信号再经过 ORTEC 575A 波形放大器积分后生成触发信号源。积分后的多数逻辑信号由 V814 定阈甄别器甄别生成原始触发信号。

原始触发信号进入逻辑控制器后首先在每个触发信号的上升沿产生一个 100μs 左右的高电平有效信号，目的是覆盖掉所有由于光电倍增管多次发光产生的触发信号。频繁的触发信号不仅会降低系统的稳定性还会在同一段数据上发生重合，而浪费存储空间和数据传输带宽。产生门信号后，在门信号结束的位置生成设定时间宽度的的门信号。升级后的逻辑控制器还包括反符合信号的处理，控制器灵活规定了反符合信号的位置和宽度，以方便触发逻辑中应用。最后触发信号、反符合信号、系统忙信号经过逻辑运算生成系统触发信号。逻辑控制器允许触发源信号和反符合源信号在 64 道 A、B 扁平线缆接口任意一道输入，方便现场操作。控制器还充分利用 V1495 的扩展性，在 D、E、F 扩展口输出 NIM 电平，将系统触发信号通过扩展口扇出 23 道给快速模数转换器，从而杜绝了触发信号在菊花链模式中的延迟问题。图 6.8下图描述正式运行期间的触发信号逻辑。

在逻辑控制器中还设置了周期性测试信号，以方便在没有触发源的情况下对系统进行调试。

V1495 触发逻辑部分的设计使用 VHDL（Very-High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language）硬件描述语言实现功能设计，在 Quartus9.1 的基础上编译并仿真。设计包括时钟信号产生、门信号产生、寄存器读写、触发逻辑四部分。

时钟信号由 VHDL 编程利用板载 PLL 时钟产生，时钟信号源是板载 25MHz 石英时钟，经过倍频后为 100MHz，以适应快速模数转换器的触发时钟。门信号产生逻辑如图 6.9所示，为了适应设计过程中各种逻辑对门信号的需求，因此对门信号逻辑的输入输出都给与了很大的灵活性。

对门信号的控制说明如下：

gate_clk：门信号产生参考时钟，时钟可以根据需要由 PLL 倍频或者分频实现

gate_nLBRES：系统总线重启信号，在插件重启时同步重启

signal_input：门信号源

signal_select：门信号选通信号，在统计门信号宽度的时候起关键作用

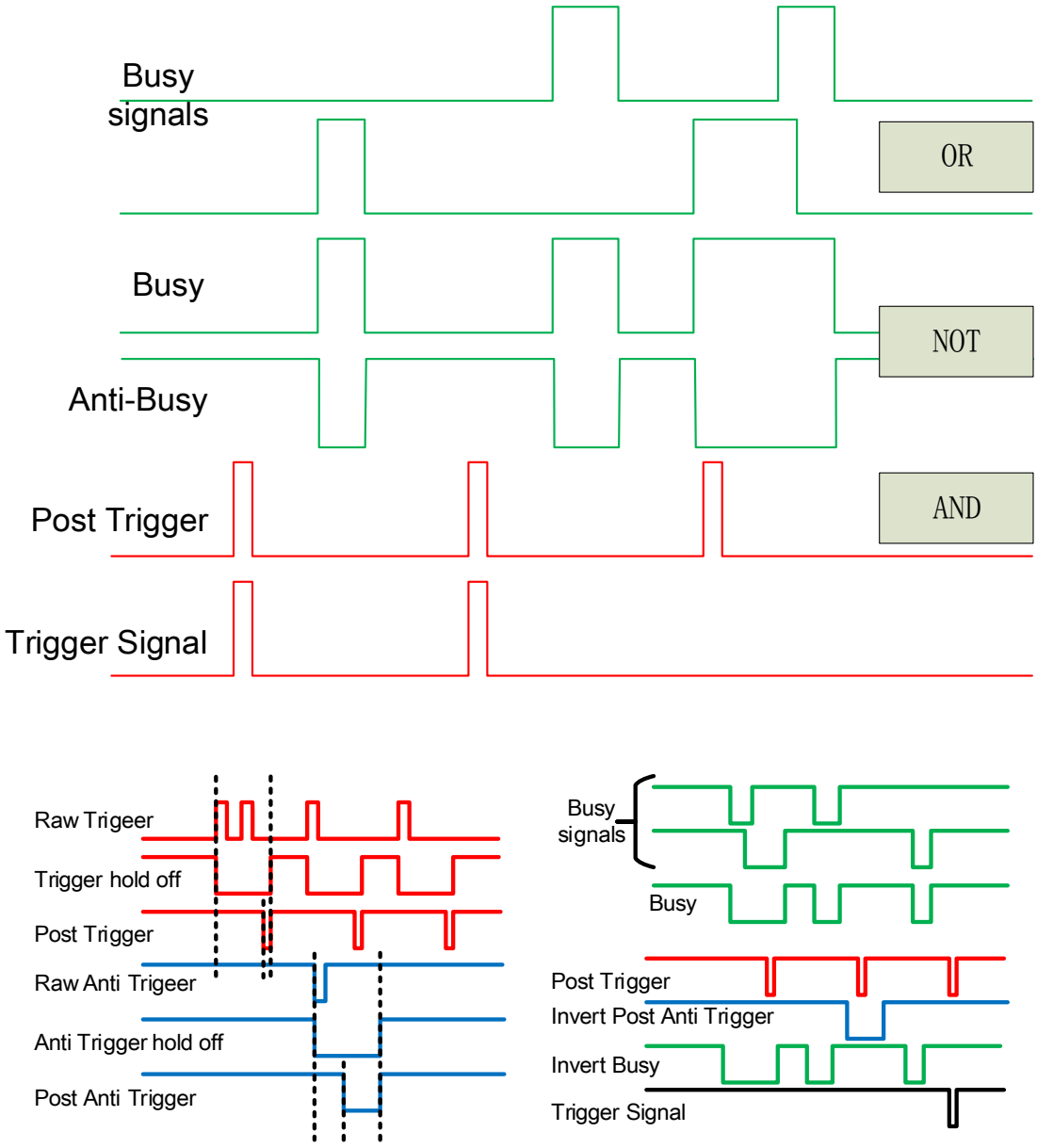


图 6.8: 上图：试运行期间的触发信号逻辑。下图：正式运行期间的触发信号逻辑。

delay_int：门信号相对于门信号源延迟时间

gate_int：门信号宽度，灵活设定门信号宽度，适应信号逻辑的需要以及后续插件输入信号宽度的要求

gate_output：输出门信号

寄存器读写部分从插件通电开始，对插件所有的寄存器初始化。V1495 的内部寄存器地址有 16bit 位宽，和插件地址总共 32bit 位宽，寄存器数据是 32bit 位宽，对于不同位宽数据 16bit、32bit 设定不同的读写模式。对于 16bit 位宽数据，直接

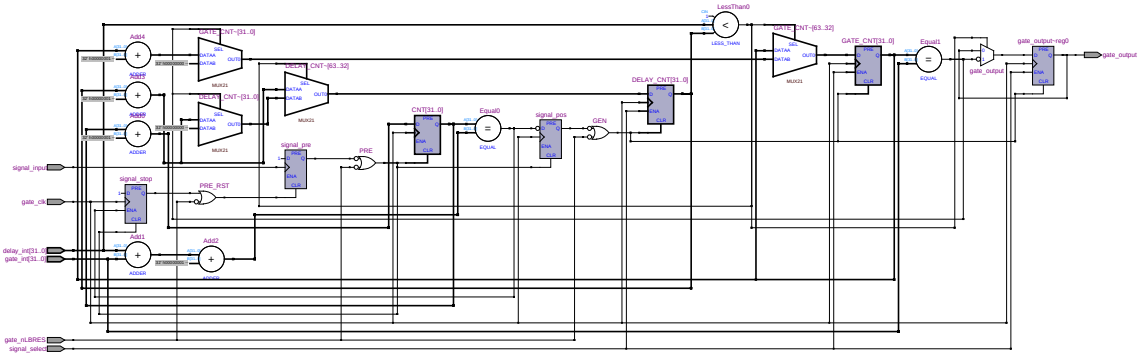


图 6.9: 系统触发逻辑：门信号产生

根据寄存器地址读写数据。对于 32bit 数据，由于本底总线是 16bit，需要分两次对寄存器进行读写。

设计的触发逻辑有：

标准门信号和标准反符合门信号： V1495 有 A、B 两个扁平线缆连接器，每个连接器有 32 道数字信号输入。标准门信号逻辑中，每一道输入信号有自己的寄存器选通掩码。对于所有要参与这种逻辑的信号根据选通掩码，用或逻辑得到总门信号源。标准逻辑门信号的延迟时间取决于探测器光电倍增管的信号离散程度。门信号的宽度为了适应 V1724 的输入要求，设定为 120ns。对用于反符合逻辑的标准门信号，也有寄存器选通掩码，信号的宽度取决于实际的反符合信号的宽度极大值。

输入信号宽度统计： 输入信号宽度统计用于统计信号中的高电平时间，并根据寄存器阈值设定做出判定。受限于 FPGA 逻辑单元的限制，输入信号是否参与宽度统计，通过寄存器的数值直接选定某一道作为信号源。在信号源的上升沿产生一个宽度大于延迟时间和信号宽度总和的门信号。设定门信号选通信号和信号源相同。在这个门信号的驱动下，对其中的高电平参考时钟计数，如果计数大于延迟时间设定的值产生不定宽度的门信号。最后根据这些门信号产生恒定宽度过阈门信号。从而实现对信号源一定时间内的信号宽度做出统计，并给定阈值，做出判定。

NHit 逻辑： NHit 逻辑统计同一时刻内选通的信号道的高电平的道数，并根据设定阈值，在高电平信号达到一定数量后产生 NHit 信号。再根据 NHit 信号产生标准门信号用于下一步的触发逻辑。

TEST 逻辑： 设定门信号的输入信号为高电平，门信号产生的延迟和信号宽度总和为测试信号的周期，门信号宽度为测试信号高电平宽度。周期性测试信号用于系统测试触发信号或者 LED 光源的驱动。

7 PandaX 电子学与数据获取系统：数据获取模式和效率统计

7.1 EnDAQ：数据获取模式

PandaX 电子学与数据获取系统的设计物理目标是对低能区的暗物质（4∼40KeV$_r$）事例实现尽可能高的信噪比，同时在高能区（$\geq 100keV_{ee}$）探测器刻度取数中有很高的刻度效率。对探测器的刻度要求能模拟探测器和 WIMPs 粒子相互作用，准确反应探测器的运行状态。对暗物质物理运行要求在尽可能低的触发阈值下实现尽可能高的触发效率，并且实验能谱能够覆盖所有预期暗物质核反冲能量谱。PandaX 一期电子学与数据获取系统的要求在更低的实验阈值和更宽的能谱范围之间寻求最佳实验配置。PandaX 一期电子学与数据获取系统包括三种探测器刻度模式：

7.1.1 基于 LED 光源的光电倍增管阵列增益刻度

如前文所述，光电倍增管是 PandaX 探测器的唯一一种探测单元，因此实验对光电倍增管的稳定性有较高的要求。PandaX 一期所用的光电倍增管阵列的顶部和底部光电倍增管的尺寸和增益都不一样，在离线分析数据的过程中，如果底部光电倍增管的增益过大或者过小都会有灾难性的影响。如果增益过大，一方面增益过大的光电倍增管会干扰粒子相互作用位置在底部光电倍增管阵列上的重建。因为闪烁光的空间分布是各向同性的，相互作用位置垂直距离上的 PMT 的光通量更大，信号也就更大，如果某个外围光电倍增管的增益过大，而没有精确刻度，那么闪烁光信号在底部光电倍增管阵列上的分布就有两个重心。如此，由于底部光电倍增管只有 37 个，位置分辨的效果减弱，也就不容易和顶部阵列的位置信息相互校准。若果底部光电倍增管增益严重偏小，由于底部每一个光电倍增管的光通量大，在 S2 信号上，相应损失的信号幅度也就更大，容易干扰电子反冲和原子核反冲的区分。顶部光电倍增管阵列增益异常也会有相似的影响。由于 PandaX 一期电子学与数据获取系统的触发源信号来自底部光电倍增管阵列，所以底部光信号的异常会干扰系统的触发效率。

PandaX 一期对光电倍增管阵列刻度的方法:

1、利用信号发生器产生 100Hz 的周期性脉冲信号。之所以用脉冲发生器产生周期性信号而不是直接利用 V1495 产生的周期性 NIM 电平信号去驱动 LED 光源和快速模数转换器触发，有两个原因：其一，主要是为了系统的易用性，利

用脉冲发生器信号相当于是假设了一个系统触发信号源，可以直接接入 V814 甄别器甄别，参与 V1495 的触发逻辑。如此可以简化现场工作人员对电子学与数据获取系统触发模式的理解。其二，LED 光源是利用 TTL 电平驱动，NIM 电平需要转化之后才能使用，实际操作中可以直接利用负脉冲信号输入 Phi.794 产生 TTL 电平信号。而且脉冲信号是独立于电子学与数据获取系统的模拟信号，不收系统忙信号的干扰。

2、周期性脉冲信号经过 Phi.740 扇入扇出插件，一道信号经过衰减后送入 V814 定阈甄别器参与原始触发信号产生，从而进入触发系统，产生系统触发信号；另一道送入 Phi.794 用于产生设定时间宽度的 TTL 门信号驱动 LED 控制器。

3、对 LED 分别加载不同的驱动电压。由于光电倍增管高压系统的高压上限是 1500V，因此部分光电倍增管的增益并不能达到实验要求，为了测量这部分光电倍增管的单光电子峰，需要加大光通量，通过多光子的信号反推增益。得益于 LED 光源是在相对于触发信号确定的时间打开，并且时间窗口很窄，因此多光子的信号还用于模拟系统的 S1 信号，从而检测数据分析软件对 S1 信号的识别效率和软件 S1 阈值的触发效率。

PandaX 一期对光电倍增管阵列刻度的参数如下：LED 光源触发频率 100Hz，LED 工作电压为 -5V、-5.5V、-6V、-7V、-9V，LED 光源打开时间窗口为 120ns，数据获取的时间窗口采取 5.12μs，数据获取模式为非零压缩模式，每次运行事例数 30000 个左右。

PandaX 一期对光电倍增管阵列要求，校准后增益为 2×10^6; 增益随时间稳定性在 10% 以内。图 7.1上图是光电倍增管刻度过程中部分快速模数转换器的波形重建，下图是部分光电倍增管经过物理信号识别后电荷量的统计和拟合单光电子峰。

7.1.2 基于 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 放射源的 PandaX 探测器检测

PandaX 探测器主要探测粒子与氙原子相互作用产生的闪烁光信号 S1 和漂移电子电离信号 S2，这两种光信号的光产额和探测器的能量阈值的下限直接相关。如果液氙的纯度不够高，有氪、氧等杂质，闪烁光信号在液氙内就会被吸收，从而降低液氙的光产额。二相氙型时间投影室探测器探测效率的主要相关物理量：相互作用单位沉积能量所产生的光电子数，也就是 S1 信号的光产额；漂移电子电离单位沉积能量所产生的光电子数，也就是 S2 信号的光产额。而且根据 S2 信号的光产额可以反推出单个漂移电子在气氙中电离产生的电子数。

探测器通过 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 和氙原子相互作用在能量 40keV$_{ee}$ 和 80keV$_{ee}$ 的峰，根据数据分析结果可以准确的给出能量的刻度，从而更容易的分析暗物质运行的实

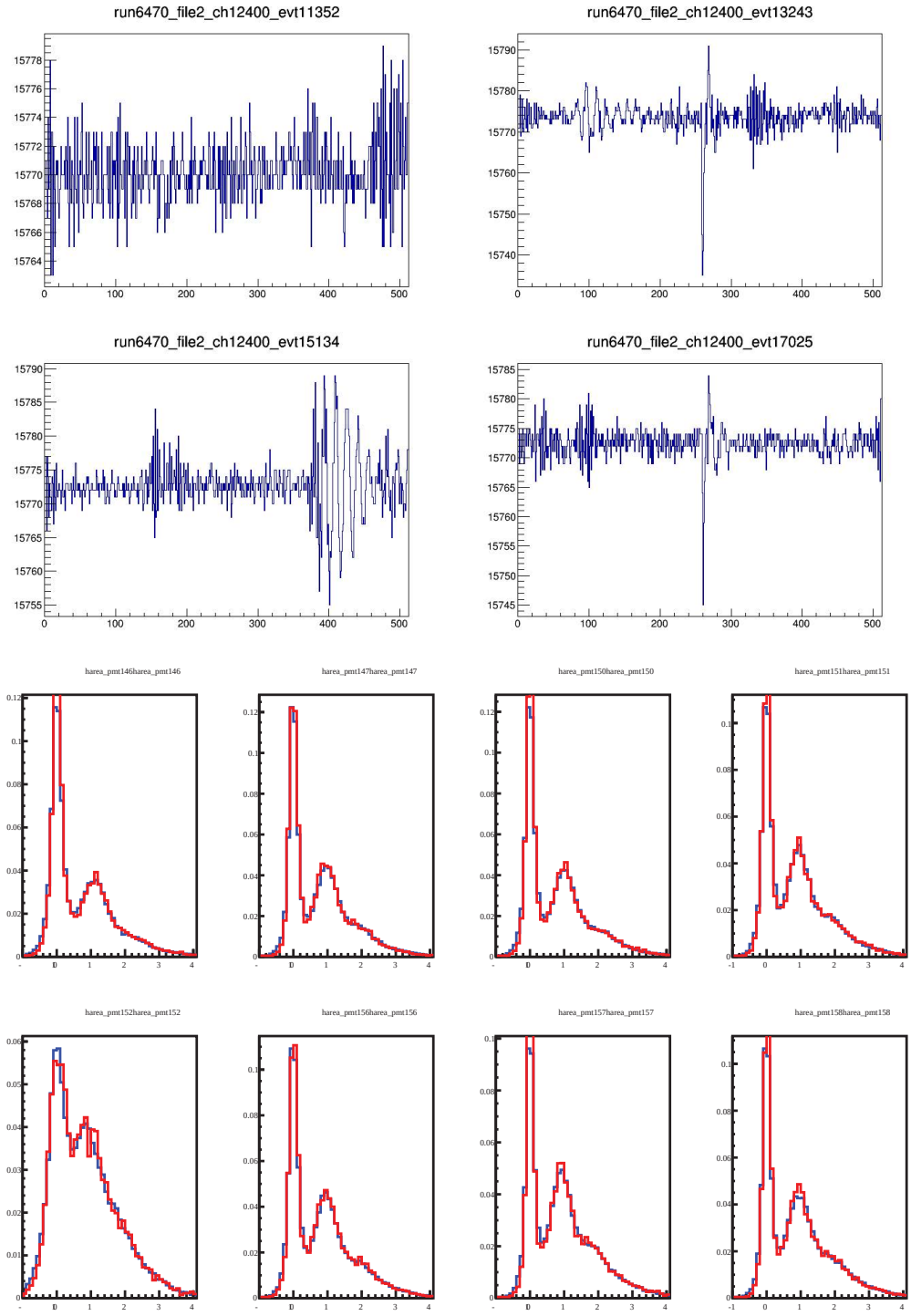


图 7.1: 上图：LED-6V 电压刻度光电倍增管时 V1724 的波形。下图：经过拟合后的光电倍增管单光峰。

验结果。根据 S1 的幅度也可以估算探测器中液氙的纯度。图 7.2是 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 数据获取得到的能谱，^{60}Co 的能量更低，物理信号弱，^{137}Cs 能量高但是有康普顿

效应。

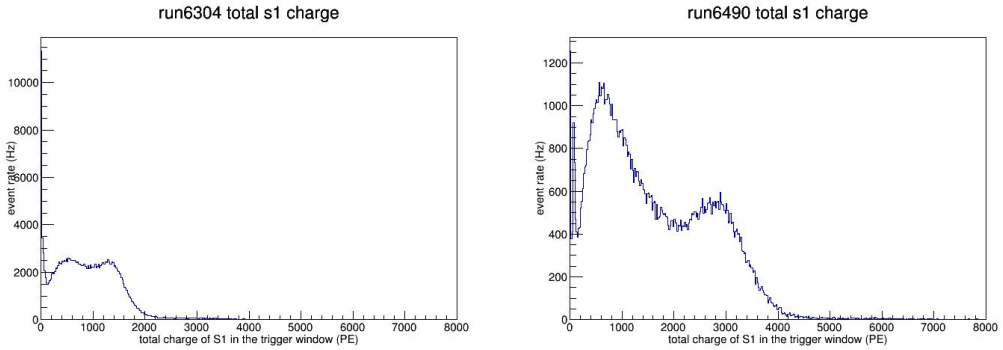


图 7.2: 左图：^{137}Cs 放射源 S1 能谱图。右图：^{60}Co 放射源 S1 能谱图。

惰性气体探测器实验通过外部放射源分析探测器电子生存时间，从而分析液氙中电负性杂质的含量。当电子被探测器媒介吸收剩下 1/e 时所用的时间被称为电子的生存时间，因此可以用 S2 信号的能量随漂移时间的分布描述电子生存时间。如果没有对定期对探测器的电子生存时间进行测量，S2 信号的不确定性会影响数据分析。一般数据分析中可以根据测量的电子生存时间校准 S2 信号得到的相互作用发生的垂直位置（电子漂移长度）。

图 7.3是 PandaX 一期运行期间放射源放置的位置，根据不同的位置可以分别刻度相应扇区的光电倍增管。

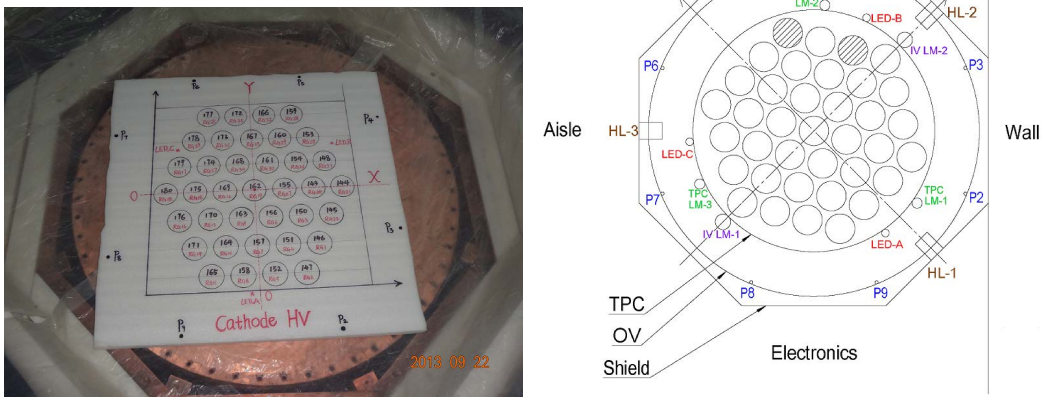


图 7.3: PandaX 放射源位置分布图，P0 位于探测器外部

图 7.4左图是 ^{60}Co 在系统运行情况良好，液氙纯度比较高的时候的核反冲 S2 信号能谱。右图是液氙纯度比较低的时候的反冲 S2 信号能谱，由于停电造成制冷系统停止运行，环境的氡气和氧气等杂质进入液氙当中。

电子放射源刻度方法：

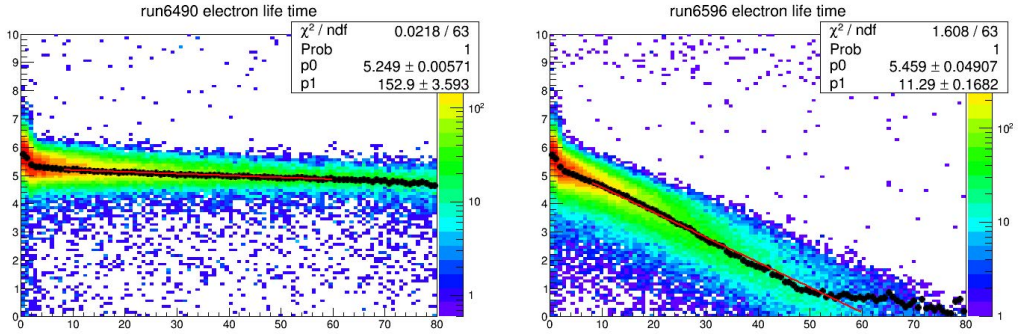


图 7.4: ^{60}Co 放射源模式电子漂移时间

1、把放射源绑定在一根韧性很好的环形线缆上，根据事先标定的位置，调整放射源位置。

2、放射源刻度运行中，PandaX 电子学与数据获取系统的配置和暗物质运行的配置相同。在试运行期间采用的触发源是模拟和信号，曾经加入反符合信号以减少沉积能量较大的事例，主要是怀疑这部分事例的短时间触发频率太高，事例太大，干扰电子学与数据获取系统的运行。而且这些事例的位置信息可能比较模糊，由于多次反射、电离等情况，不容易区分几个事例之间的关系。后来由于这部分事例的事例率比较低，而且更新了触发系统，减少了同一个数据获取时间窗口内的多次触发现象，这部分事例可以由软件处理，没有再引入反符合触发。

PandaX 一期电子放射源刻度要求，电子生存时间在 150μs 以上才可以进行暗物质物理数据获取。数据获取的时间窗口采取 200μs，数据获取模式为零压缩模式，需要详细对探测器性能测试的时候从 P0~P9 每个位置运行 30 分钟，在正常运行过程中，对 P2、P4、P6、P8 进行测量，每天运行 2h。

7.1.3 基于 ^{252}Cf 放射源的 PandaX 探测器模拟 WIMP 粒子信号

PandaX 探测器的主要目的是寻找 WIMPs 粒子和氙原子的相互作用信号，因此实验需要需要通过相似粒子和氙原子的实验结果验证探测器的运行情况。通过 ^{252}Cf 放射源的中子和探测器相互作用的实验结果可以测量电子学与数据获取系统在原子核反冲事例的触发阈值、触发效率，检测软件对暗物质类似事例的筛选效率。PandaX 一期的探测器主体是时间投影室，其一大优势就是可以通过数据分析得到粒子与氙原子发生相互作用的能量信息和位置信息，而且都有很好的能量分辨率和位置的分辨率。然而，外部低能的 γ 射线，由于液氙的高密度，在液氙表面很短的长度内就被吸收了。^{60}Co 的 γ 射线能量为 122keV 在液氙中的只能穿透几个毫

米，高能的 γ 射线，如 ^{137}Cs 的 662keVγ 射线又会产生康普顿散射，丧失精确位置信息。对于高能 γ 射线，由于液氙对不同能量 γ 射线闪烁光效率的不同，光电倍增管对不同能量的光子的量子效率非线性响应大幅增加了系统误差，而且实验预期的 WIMPs 粒子信号的沉积能量在几个 keV 量级，因此惰性气体暗物质实验一般不用 γ 射线刻度探测器的能量分辨率和位置分辨率。测量位置分辨率比较可靠的方法，是利用亚稳态氙原子释放的 γ 射线作源。^{129m}Xe 和 ^{131m}Xe 的半衰期分别为 8.9 天和 11.8 天，衰变产生的 γ 射线能量分别为 236 keV 和 164 keV 。这两个亚稳态可以通过 ^{128}Xe 和 ^{130}Xe 俘获快中子源（^{252}Cf）产生的热中子形成。亚稳态的氙原子会在液氙中趋于均匀分布，因此可以用于对探测器各个位置的闪烁光信号和逃逸电子电离信号测量并重建位置信息。由于亚稳态氙原子的衰变周期短，可以在几个周之内就降低到很低的水平，不影响暗物质探测对低本底的要求。

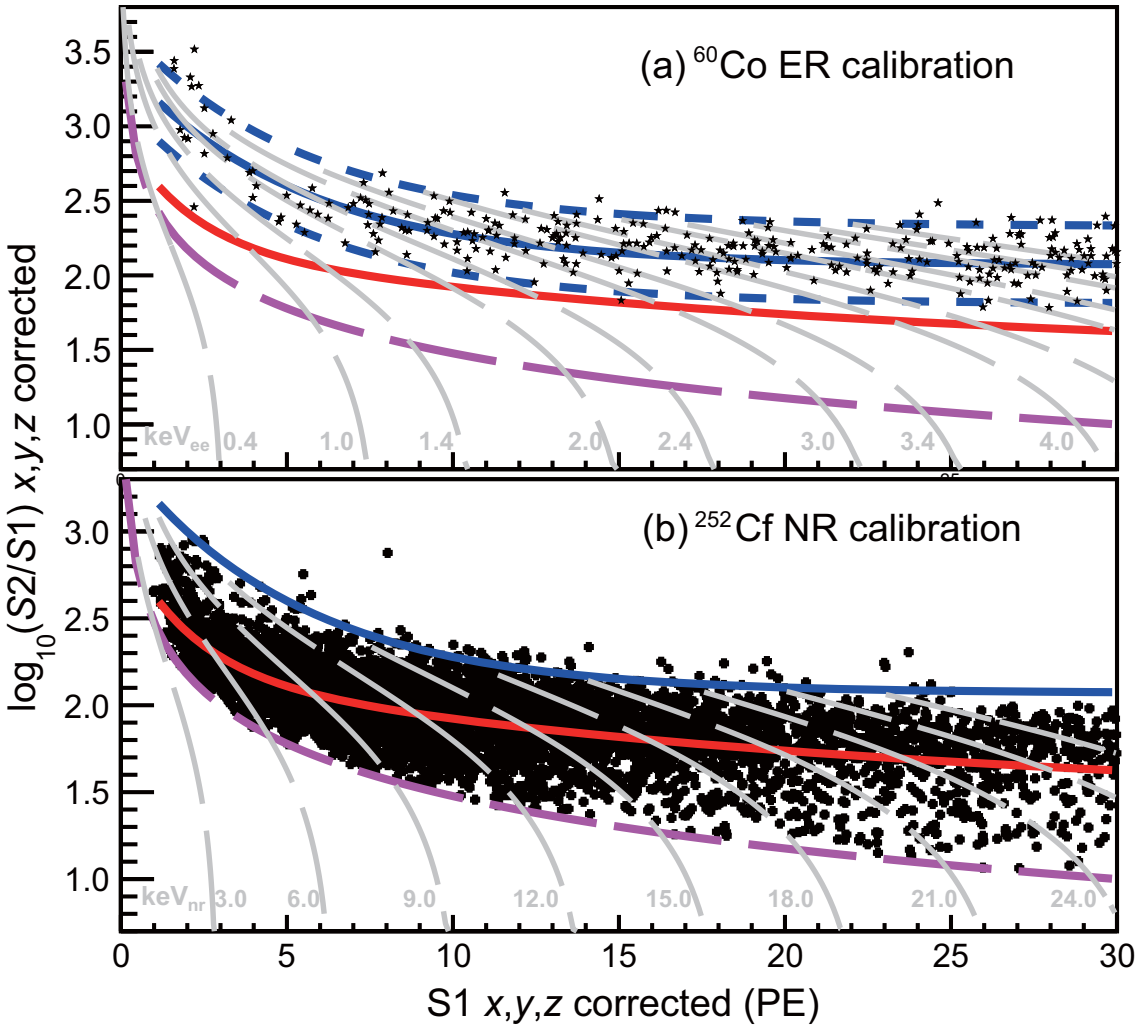


图 7.5: 上图：^{60}Co 放射源 S2 信号能谱。下图：^{252}Cf 放射源 S2 信号能谱。

中子源刻度方法：

1、把放射源绑定在一根韧性很好的环形线缆上，只放置在最外围的 P0 位置，防止液氙产生衰变周期比较长的同位素影响暗物质探测。

2、中子源刻度运行中，PandaX 电子学与数据获取系统的配置和暗物质运行的配置相同。

PandaX 一期中子源刻度要求：数据获取的时间窗口采取 200μs，数据获取模式为零压缩模式，每次刻度运行不超过 30 分钟。图 7.5 是中子源的 S2 信号能谱和 ^{60}Co 的 S2 信号能谱 [79]。

7.2 EnDAQ：系统效率统计

为了对系统的性能进行量化，对 2014 年 PandaX 一期物理取数过程中不同模式进行了统计，如表 7.1所示。表格对 γ 源 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 模式，中子源 ^{252}Cf 模式，LED 刻度模式以及物理取数模式做出统计。

运行模式 / 参数	^{137}Cs	^{60}Co	^{252}Cf	LED	Dark Matter
序列号	6306	6494	6493	6612	6511
时间窗口 (μs)	200	200	200	5.12	200
零压缩模式	YES	YES	YES	NO	YES
事例数	554699	593653	164040	26339	210885
运行时间 (s)	15266.84	23445.02	7270.03	251.14	63816.20
总数据量 (GB)	321.39	459.00	112.43	5.64	134.76
频率 (Hz)	36.33	25.32	22.56	104.88	3.30
平均大小 (KB)	607.53	810.73	718.61	224.58	670.07
平均传输速率 (MB/s)	21.56	20.05	15.83	23.00	2.16

表 7.1: 电子学与数据获取系统性能统计

为了满足统计量的需求，分别取了各个模式运行时间最长的数据。由于 γ 源不会在液氙中产生放射性本底，对于 γ 源和物理取数模式，运行时间可以长达十几个小时，这样可以保证足够的数据统计量。LED 刻度模式，如之前所说，只用于光电倍增管阵列的增益刻度，一般不会运行太长时间，避免占用物理取数时间。中子源 ^{60}Co 可以在液氙中产生放射性本底，因此物理取数过程中，即便出于对原子核反冲事例的模拟需要，运行时间最长也不会超过 3 个小时。实际运行中只有对时

间投影室位置响应刻度时，才会运行比较长的时间。表格中的五种运行模式，只有 LED 刻度模式没有使用零压缩技术，其时间窗口也只有 5.12μs。

根据数据获取实际触发频率来看，触发源模式中 ^{137}Cs 最高，主要是因为 ^{137}Cs 源的强度最高。LED 刻度模式的触发频率，在数据传输带宽允许的情况下，取决于实际的模拟信号产生器的触发频率。暗物质物理运行过程中，触发频率一般在 3.3Hz 左右浮动，当大幅偏离这个数值时，一般原因是光电倍增管或者前端电子学部分打火。

7.2.1 数据获取事例平均大小

根据数据获取过程中一个事例平均大小可以分析不同运行模式的特征。由于 LED 刻度模式的时间窗口是固定的，而且数据没有经过零压缩，所以此模式下的事例大小是固定的，监测其事例大小可以判定运行状态。图 7.6描述了不同运行模式事例大小的统计。

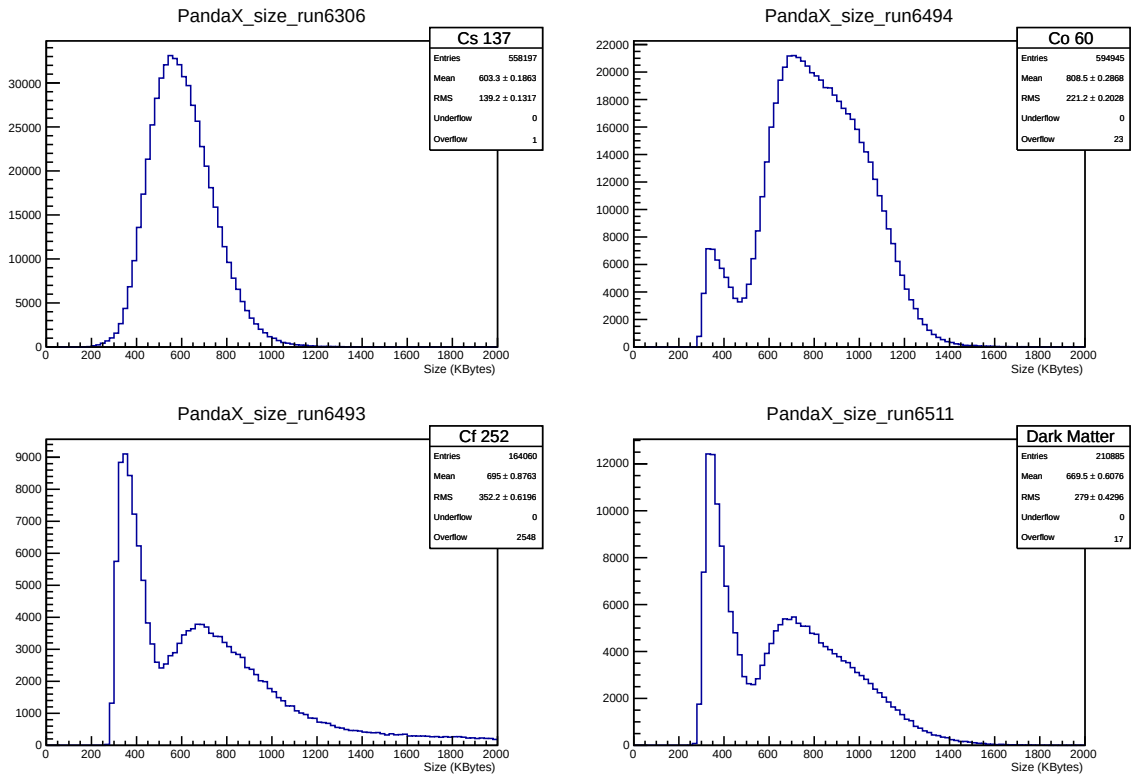


图 7.6: PandaX 一期四种运行模式事例大小统计

图中 ^{137}Cs 的事例显著小于其他运行模式，主要是由于在运行过程中底部光电倍增管阵列的高压只有 1100V，正常数据获取过程中高压为 1500V。^{137}Cs 源的 γ 光子具有显著地康普顿散射，产生大量的光子，其 S1 信号的幅度往往超出快速模

数转换器的动态范围，为了研究探测器高能区信号相应，所以降低了底部光电倍增管的增益。PandaX 一期应用 ^{137}Cs 源可以在初期尽快的找到电子反冲信号，以研究探测器性能。在物理取数过程中，为了保持实验条件的一致性和稳定性，不再降低光电倍增管高压，通过 ^{60}Co 校准探测器性能。之后对各种运行模式的分析中，会解释具体原因。

表 7.1中不同运行模式事例大小均值对比如下：$^{60}Co >^{252}$Cf >Drak Matter。事例分为三种：纯噪声事例、只有 S1 信号事例和反冲信号事例。其中反冲信号事例包含电子反冲事例和原子核反冲事例。S1 信号宽度一般在几百个 ns，S2 信号会弥散在 1μs 左右的时间窗口内。电子反冲的能量一般高于原子核反冲，会显著影响 S2 信号事例贡献。下面各种运行模式的分析将解释事例大小和运行模式的关系。

图 7.7是 ^{60}Co 源不同事例统计对比图。根据统计结果，可以很明显的看出在 ^{60}Co 源运行模式中，事例主要分为两种：仅含 S1 信号事例和含 S2 信号事例。

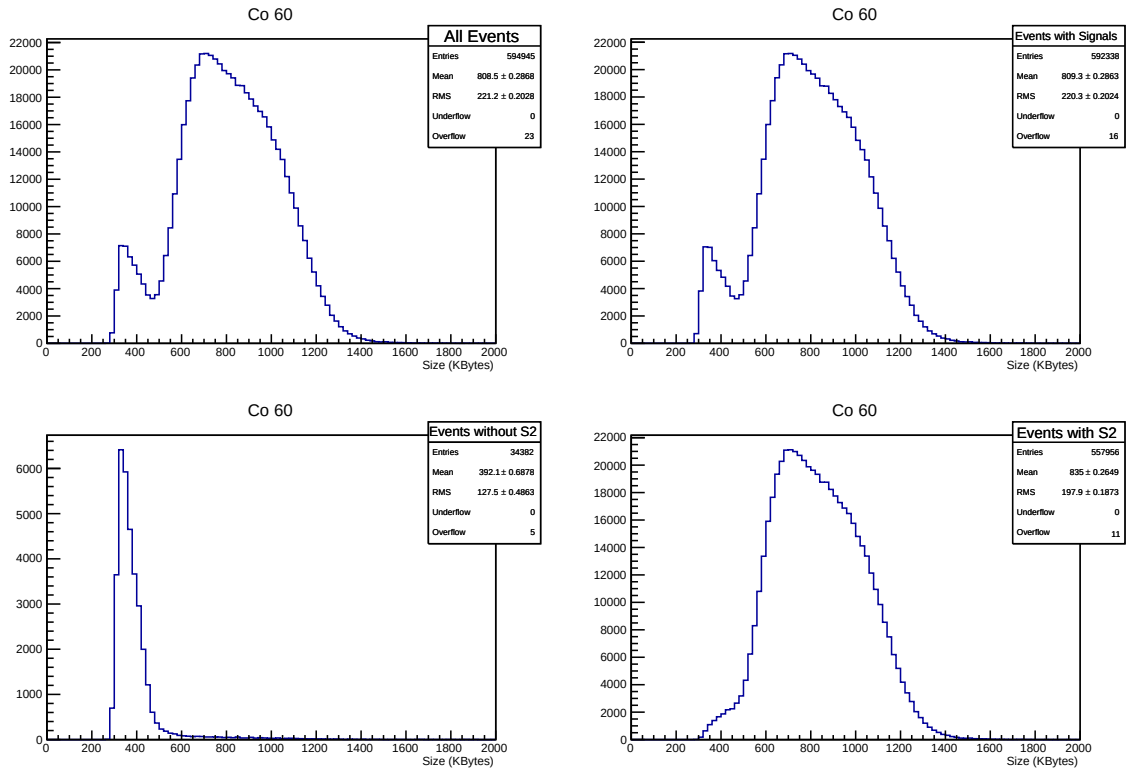


图 7.7: ^{60}Co 源事例大小统计，由左上顺时针依次是：所有事例，有信号事例，只包含 S1 信号事例，含 S2 信号事例

图 7.8是 ^{252}Cf 源不同事例统计对比图，^{252}Cf 源模式仍然由大量 S1 信号事例，但是并不能描述所有较小的事例，S2 信号事例对较小的事例也有贡献。针对 S2 信号事例的两个峰，需要分别对其信号特征做进一步分析。

图 7.9是针对 ^{252}Cf 源 S2 信号事例的分析。在离线分析过程中，出于简化事

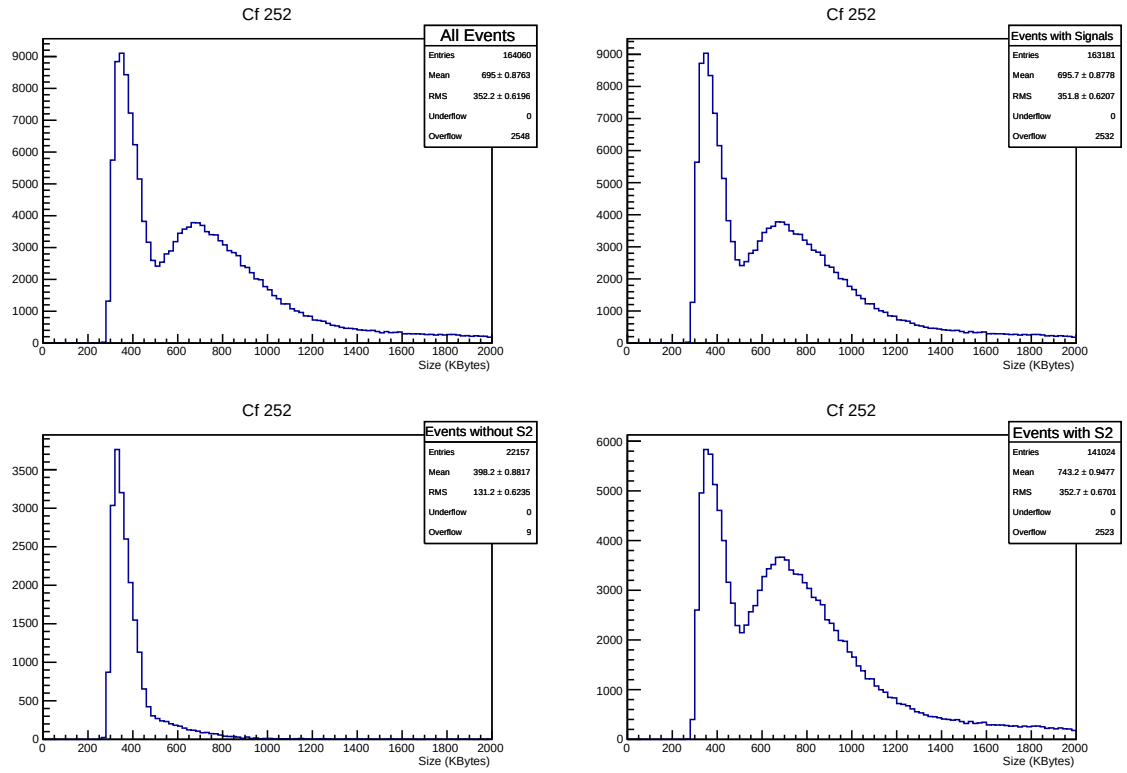


图 7.8: ^{252}Cf 源事例大小统计，由左上顺时针依次是：所有事例，有信号事例，只包含 S1 信号事例，含 S2 信号事例

例筛选的目的，只对单 S2 事例进行分析。以 480KBytes 为阈值，分别对两种事例分析。首先以 10000pe 为阈值，判定 S2 信号电荷量大小。图 7.9 中间两图红色部分是以 480KBytes 为阈值的统计结果，蓝色部分是以 10000pe 为阈值的统计结果。统计结果显示含 S2 信号事例大小与 S2 信号的电荷量是相关的。由于原子核反冲信号一般小于电子核反冲信号，所以图 7.9下部分两图是对单 S2 事例分别作出原子核反冲与电子反冲事例甄别。以图 7.5中 ^{252}Cf 源与 ^{60}Co 源能谱的平均值拟合函数为判定条件，虽然不能 100% 区分原子核反冲与电子反冲事例，但符合判定条件的事例能够说明单 S2 事例的两个峰分别来源于原子核反冲与电子反冲事例。其中原子核反冲事例大部分小于电子反冲事例。

7.2.2 数据获取传输速度

为了分析系统取数效率，针对系统取数模式，分别对不同运行模式数据传输相关的参量做出统计。如表 7.1所示，除了 LED 刻度模式之外，均采用零压缩模式和 200μs 取数窗口，实际运行过程中以 5 个事例作为一块，一起读出。

图 7.10是 ^{60}Co 源数据传输相关的参量。分析过程中没用使用实际的 80MB/s

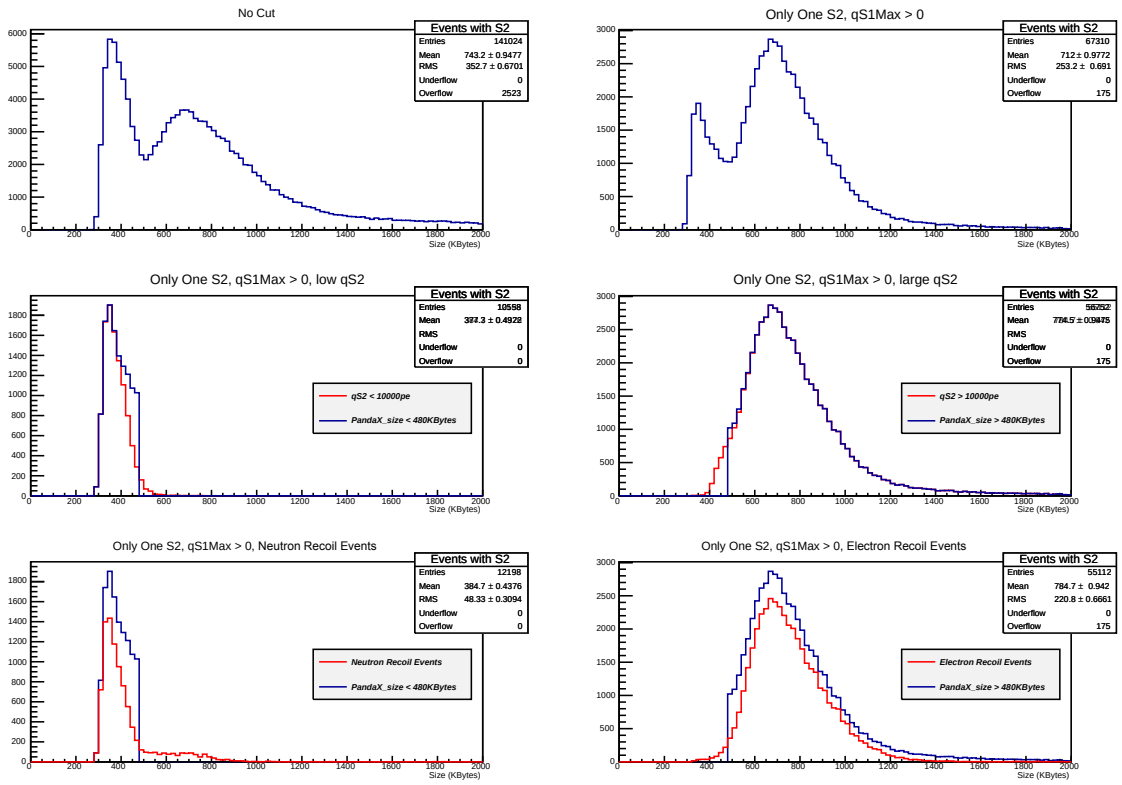


图 7.9: ^{252}Cf 源含 S2 事例大小统计，由左到右每排是：所有 S2 事例，只有一个 S2 信号事例；S2 电荷小于 10000pe 事例，S2 电荷大于 10000pe 事例；原子核反冲均值下方事例，电子和反冲均值上方事例

的数据传输速度上限作参考，而是以 60MB/s 作为数据传输速度参考上限，以更严格的限制条件分析系统取数效率。由右上图可以推算出 ^{60}Co 运行模式的平均触发频率约为 25.38Hz，与实际的统计数据 25.32Hz 有出入，是由于图中统计的是每 5 个事例的时间差，缺少位于相邻两次数据传输衔接处事例的时间差统计。左下图显示，^{60}Co 运行模式数据传输循环中有 2.43% 循环的数据传输速率大于 60MB/s，但由于快速模数转换器的缓存可以存储 16 个事例，允许事例在读取的过程中，继续写入新的事例。右下图是在新的数据读取循环开始之前，缓存中存储的事例数统计，如图所示，最多只有 5 个事例存储在缓存中。因此 ^{60}Co 运行模式中，已有的 80MB/s 的带宽是足够的。

图 7.11是 ^{137}Cs 源数据传输相关的参量。^{137}Cs 运行模式的平均触发频率约为 36.31Hz，有 1.90% 循环的数据传输速率大于 60MB/s。

图 7.12是 ^{252}Cf 源数据传输相关的参量。^{252}Cf 运行模式的平均触发频率约为 22.62Hz，有 1.82% 循环的数据传输速率大于 60MB/s。

图 7.13是无放射源物理运行数据传输相关的参量。无放射源物理运行模式的平

均触发频率约为 3.39Hz，有 0.27% 循环的数据传输速率大于 60MB/s。

对不同运行模式数据传输分析表明，已有的 80MB/s 的带宽是足够的，没有显著影响数据的采集和存储。

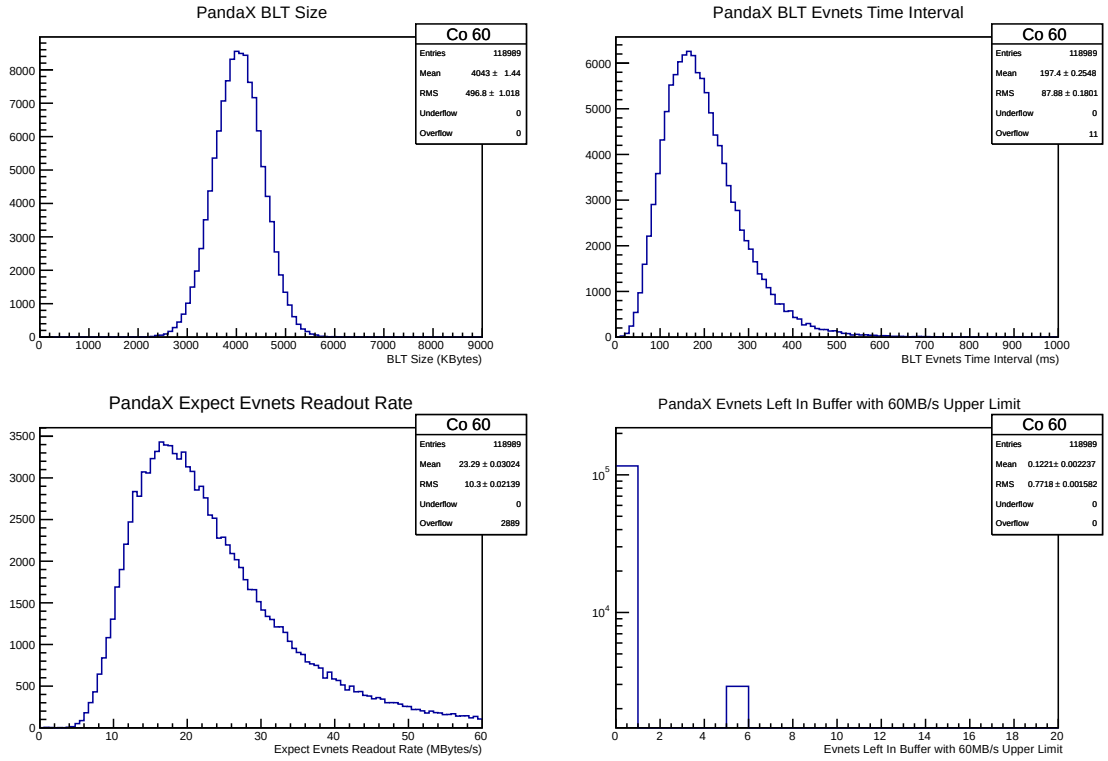


图 7.10: ^{60}Co 源数据传输相关参量统计，由左上顺时针依次是：数据传输事例大小，5 个事例块之间的时间差，理想数据传输速率，新的传输循环开始前缓存事例数

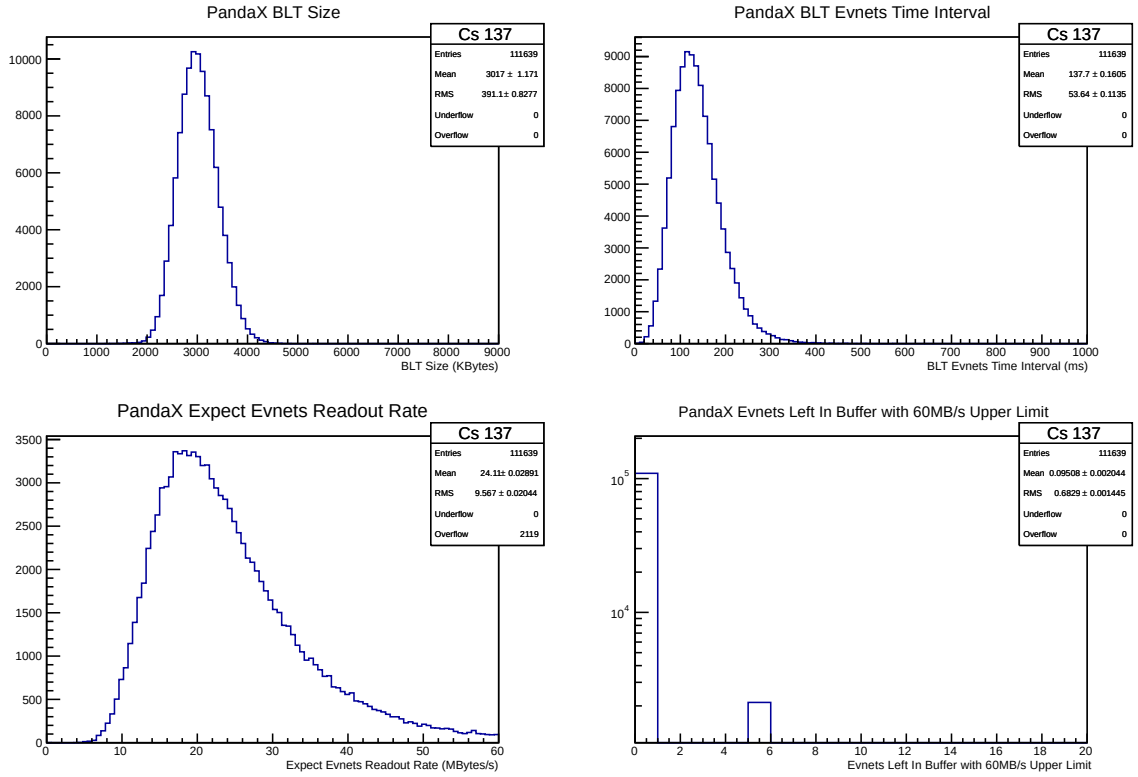


图 7.11: ^{137}Cs 源数据传输相关参量统计，由左上顺时针依次是：数据传输事例大小，5 个事例块之间的时间差，理想数据传输速率，新的传输循环开始前缓存事例数

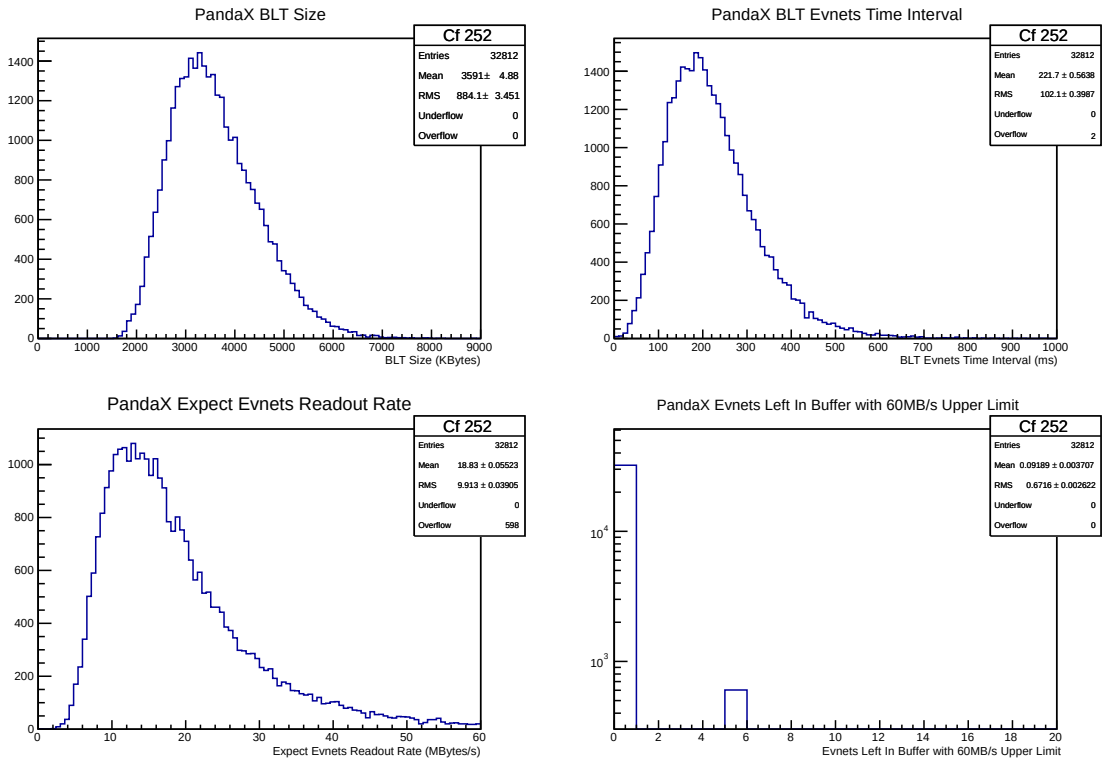


图 7.12: ^{252}Cf 源数据传输相关参量统计，由左上顺时针依次是：数据传输事例大小，5 个事例块之间的时间差，理想数据传输速率，新的传输循环开始前缓存事例数

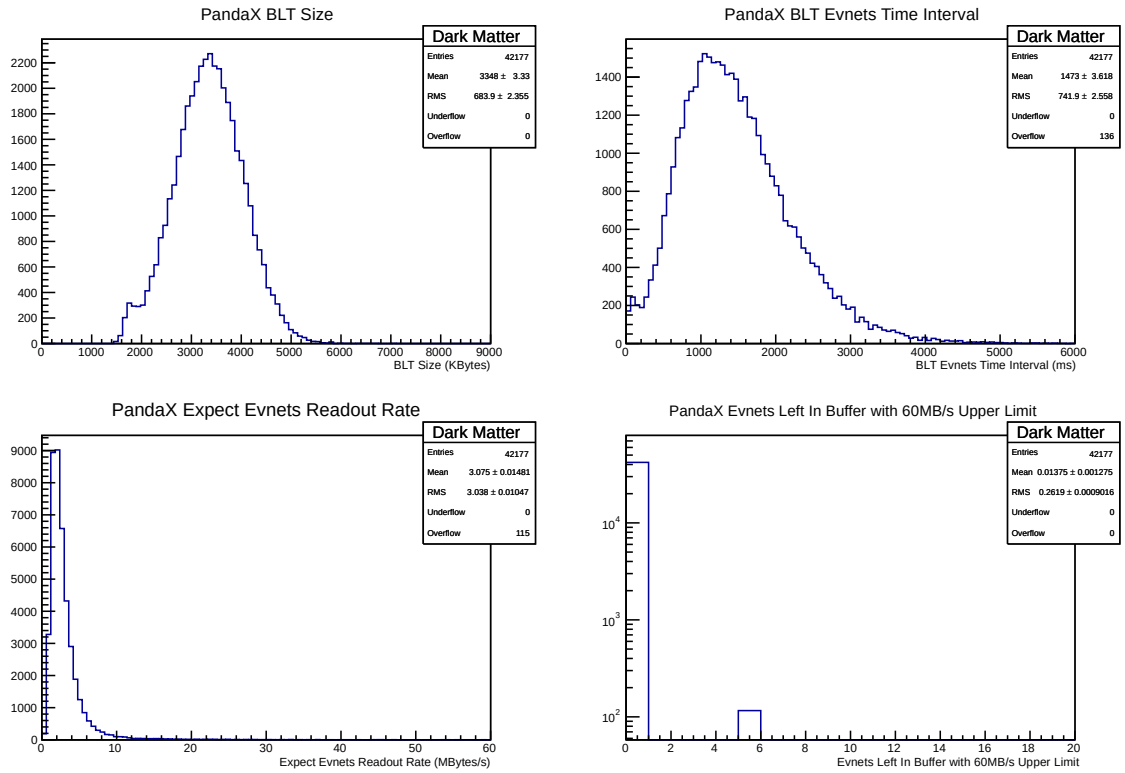


图 7.13: 无放射源物理运行数据传输相关参量统计，由左上顺时针依次是：数据传输事例大小，5 个事例块之间的时间差，理想数据传输速率，新的传输循环开始前缓存事例数

7.2.3 数据获取触发效率

PandaX 一期主要关注低能区事例，由于低能区 S1 闪烁光信号的幅度很小，很难触发，一般依靠 S2 电离信号触发低能区事例。因此 S2 信号的触发效率可以用来衡量系统在低能区的触发效率。图 7.14是 ESum 模拟和信号和 Majority 多数逻辑信号作为触发信号源的能谱图和触发效率图。数据分析过程中，由于漂移电子电离信号的能谱服从指数分布，所以对 ^{252}Cf 中子源的 S2 能谱做了两种处理。其一根据 S2 能谱在高能区的下降趋势，拟合出探测器期望的理想能谱（绿色虚线）。其二，根据 ^{252}Cf 中子源的实际能谱做出拟合曲线（红色虚线）。最后根据 S2 信号期望能谱和实际能谱得到 S2 信号的触发效率（蓝色）。计算得出在触发效率为 50% 时，模拟和信号的阈值为 372.77PE，多数逻辑信号的阈值为 88.28E。Majority 模式极大地提高了低能区 S2 信号的触发效率。

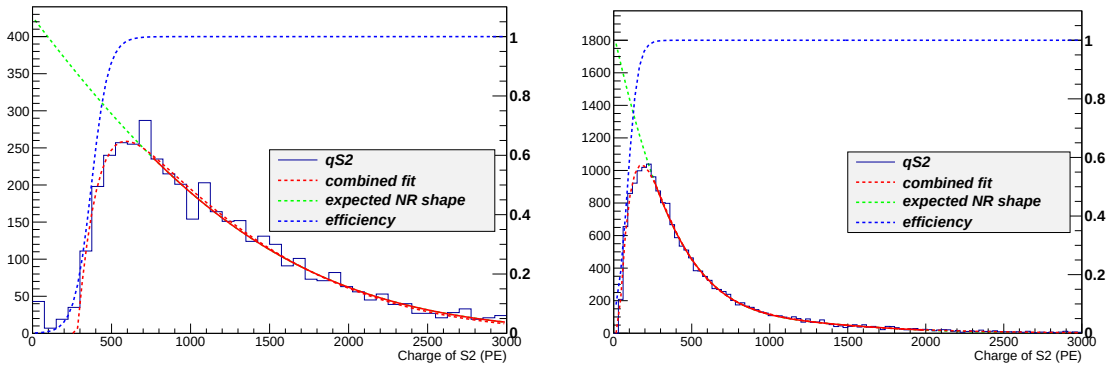


图 7.14: 左图：ESum 模拟和模式 S2 信号的能谱及触发效率。右图：Majority 多数逻辑模式 S2 信号的能谱及触发效率

8 总结与展望

2014 年 5 月，PandaX 一期开始物理取数，9 月发表实验结果，一期基于 17.4 天的 37 公斤核心靶区液氙的探测数据，没有找到可信的暗物质信号。但在 90% 置信度基础上，对与自旋无关的 WIMP 与氙原子核相互作用截面给出上限：对于质量为 49GeV/c^{2}WIMP 粒子，相互作用截面上限为 $3.7\times10^{-44}cm^2$。电子学与数据获取系统高效、稳定的完成实验所赋予的任务。

电子学与数据获取系统在物理取数运行期间，总共存储约 32TB ^{60}Co 放射源原始数据，3TB^{137}Cs 放射源原始数据，15TB 无放射源数据，6TB^{252}Cf 中子源数据，三次 LED 光电倍增管刻度数据。

试运行期间，系统完成整体性能测试，实验数据获取传输速度上限 35MB/s，使用模拟和信号作为系统触发信号源。试运行 PandaX 探测器只对 TPC 漂移电场加外加电场，因此数据获取的时间窗口限制在 80μs。运行过程中，采用非零压缩模式对底部 37 个 PMT 进行数据获取，在系统实验运行成熟后，针对 143 个顶部光电倍增管开启的要求，采取零压缩的取数模式适应实验需求。

正式运行前，升级系统数据传输方案，由 VME 总线读出改为光纤读出，数据传输速率由 35MB/s 提高到接近 80MB/s。通过光纤读出，避免数据读取期间数据损坏的问题。针对物理取数运行中，开启时间投影室气氙外加电场的需求，将数据获取窗口加大到 200μs。使用模拟和信号作为系统触发信号源，S2 漂移电子电离信号触发效率为 90% 时，触发阈值为 395PE。为了满足实验对低能区信号的探测，设计搭建多数逻辑积分信号作为系统触发源，在 S2 漂移电子电离信号触发效率为 50% 时，触发阈值最终达到 88.28PE。为了电子学与数据获取系统的稳定性，将快速模数转换器触发信号源由菊花链模式改为由 V1495 插件直接生成 24 路触发信号，对数据获取系统的时钟通过 V1495 插件在数据获取开始前同时初始化。

正式物理取数结束后，根据不同运行模式的分析结果表明，实际的最大数据传输需求小于 30MB/s，已有的数据传输带宽完全能够实现无死时间的数据获取。对事例的大小的统计结果显示，零压缩模式对实际的数据具有显著地压缩效果，压缩比例高于 90%。对事例大小、事例频率的统计结果也与实际放射源特性相吻合，可以用康普顿效应、反冲信号 S1/S2 比解释统计结果。

本论文说明，PandaX 一期电子学与数据获取系统能够满足 PandaX 一期二相氙型时间投影室探测器的物理需求。系统实现约 80MB/s 的数据传输速度，S2

漂移电子电离信号 90% 触发效率时，阈值为 89PE。电子学与数据获取系统在 PandaX 二期开始之前继续为期间的系统测试服务。为了进一步提高电子学与数据获取系统的性能，我们提出了电子学与数据获取系统的升级计划。计划中，进一步升级触发系统，将触发阈值降低到十几个 PE。升级计划中，设计 24 道扇入扇出插件，代替系统 Phi.740 级联模式对快速模数转换器输出模拟信号处理，设计时钟产生和扇出插件，代替菊花链模式为全部插件提供同步时钟信号。我们期待电子学与数据获取系统在 PandaX 二期中实现更好的性能。

参考文献

[1] Mark Winter. Webelements. 1999.

[2] EW Lemmon, MO McLinden, and DG Friend. Thermophysical properties of fluid systems. *NIST chemistry webbook, NIST standard reference database*, 69, 2005.

[3] LM Barkov, AA Grebenuk, NM Ryskulov, P Yu Stepanov, and SG Zverev. Measurement of the refractive index of liquid xenon for intrinsic scintillation light. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 379(3):482–483, 1996.

[4] VN Solovov, V Chepel, MI Lopes, A Hitachi, R Ferreira Marques, and AJPL Policarpo. Measurement of the refractive index and attenuation length of liquid xenon for its scintillation light. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 516(2):462–474, 2004.

[5] GM Seidel, RE Lanou, and W Yao. Rayleigh scattering in rare-gas liquids. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 489(1):189–194, 2002.

[6] William M Haynes. *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC press, 2013.

[7] R Sawada, J Kikuchi, E Shibamura, M Yamashita, and T Yoshimura. Capacitive level meter for liquid rare gases. *Cryogenics*, 43(8):449–450, 2003.

[8] HM Jones and EE Kunhardt. Development of pulsed dielectric breakdown in liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 28(1):178, 1995.

[9] Joshua Jortner, Lothar Meyer, Stuart A Rice, and EG Wilson. Localized excitations in condensed ne, ar, kr, and xe. *The Journal of chemical physics*, 42(12):4250–4253, 1965.

[10] Tadayoshi Doke, Akira Hitachi, Jun Kikuchi, Kimiaki Masuda, Hiroyuki Okada, and Eido Shibamura. Absolute scintillation yields in liquid argon and xenon for various particles. *Japanese journal of applied physics*, 41(3R):1538, 2002.

[11] Tadayoshi Doke and Kimiaki Masuda. Present status of liquid rare gas scintillation detectors and their new application to gamma-ray calorimeters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 420(1):62–80, 1999.

[12] Yoshiaki Sofue and Vera Rubin. Rotation curves of spiral galaxies. *arXiv preprint astro-ph/0010594*, 2000.

[13] KG Begeman, AH Broeils, and RH Sanders. Extended rotation curves of spiral galaxies: Dark haloes and modified dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 249(3):523–537, 1991.

[14] Fritz Zwicky. Spectral displacement of extra galactic nebulae. *Helv. Phys. Acta*, 6(110-127):15, 1933.

[15] Nasa images from large synoptic survey telescope (lsst). *http://www.lsst.org/lsst/public*.

[16] Richard Massey, Jason Rhodes, Richard Ellis, Nick Scoville, Alexie Leauthaud, Alexis Finoguenov, Peter Capak, David Bacon, Hervé Aussel, Jean-Paul Kneib, et al. Dark matter maps reveal cosmic scaffolding. *Nature*, 445(7125):286–290, 2007.

[17] Douglas Clowe, Maruša Bradač, Anthony H Gonzalez, Maxim Markevitch, Scott W Randall, Christine Jones, and Dennis Zaritsky. A direct empirical proof of the existence of dark matter. *The Astrophysical Journal Letters*, 648(2):L109, 2006.

[18] R Komatsu, J Dunkley, MR Nolta, CL Bennett, B Gold, G Hinshaw, N Jarosik, D Larson, M Limon, L Page, et al. Five-year wilkinson microwave anisotropy probe observations: cosmological interpretation. *The Astrophysical journal. Supplement series*, 180(2):330, 2009.

[19] Eiichiro Komatsu, KM Smith, J Dunkley, CL Bennett, B Gold, G Hinshaw, N Jarosik, D Larson, MR Nolta, L Page, et al. Seven-year wilkinson microwave

anisotropy probe (wmap) observations: cosmological interpretation. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 192(2):18, 2011.

[20] Volker Springel, Simon DM White, Adrian Jenkins, Carlos S Frenk, Naoki Yoshida, Liang Gao, Julio Navarro, Robert Thacker, Darren Croton, John Helly, et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *nature*, 435(7042):629–636, 2005.

[21] J. Silk. The big bang. *Freeman*, 1988.

[22] Juerg Beringer, JF Arguin, RM Barnett, K Copic, O Dahl, DE Groom, CJ Lin, J Lys, H Murayama, CG Wohl, et al. Review of particle physics. *Physical Review D*, 86(1), 2012.

[23] Leanne D Duffy and Karl Van Bibber. Axions as dark matter particles. *New journal of physics*, 11(10):105008, 2009.

[24] P Sikivie. Dark matter axions. *International Journal of Modern Physics A*, 25(0203):554–563, 2010.

[25] Kim Griest and Marc Kamionkowski. Unitarity limits on the mass and radius of dark-matter particles. *Physical Review Letters*, 64(6):615, 1990.

[26] Edward W Kolb, Daniel JH Chung, and Antonio Riotto. Wimpzillas. *arXiv preprint hep-ph/9810361*, 1998.

[27] Molly EC Swanson. Particle physics in the sky and astrophysics underground: connecting the universe's largest and smallest scales. *arXiv preprint arXiv:0808.0002*, 2008.

[28] Gerard Jungman, Marc Kamionkowski, and Kim Griest. Supersymmetric dark matter. *Physics Reports*, 267(5):195–373, 1996.

[29] KN Abazajian, MA Acero, SK Agarwalla, AA Aguilar-Arevalo, CH Albright, S Antusch, CA Arguelles, AB Balantekin, G Barenboim, V Barger, et al. Light sterile neutrinos: a white paper. *arXiv preprint arXiv:1204.5379*, 2012.

[30] Wu Yu-Cheng, Hao Xi-Qing, Yue Qian, Li Yuan-Jing, Cheng Jian-Ping, Kang Ke-Jun, Chen Yun-Hua, Li Jin, Li Jian-Min, Li Yu-Lan, et al. Measurement of

cosmic ray flux in the china jinping underground laboratory. *Chinese Physics C*, 37(8):086001, 2013.

[31] Tarek Saab. An introduction to dark matter direct detection searches & techniques. *arXiv preprint arXiv:1203.2566*, 2012.

[32] http://lpsc.in2p3.fr/mayet/dm.php. Dark matter portal. 2014.

[33] P von Doetinchem. talk at the 9th international conference identification of dark matter, 2012. *Chicago, USA, July*, pages 23–27, 2012.

[34] R Bernabei, P Belli, F Cappella, V Caracciolo, R Cerulli, CJ Dai, A d'Angelo, S d'Angelo, A Di Marco, HL He, et al. Dama/libra results and perspectives of phase 2. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 742:177–180, 2014.

[35] Z Ahmed, DS Akerib, S Arrenberg, CN Bailey, D Balakishiyeva, L Baudis, DA Bauer, PL Brink, T Bruch, R Bunker, et al. Dark matter search results from the cdms ii experiment. *Science (New York, NY)*, 327(5973):1619–1621, 2010.

[36] CE Aalseth, PS Barbeau, J Colaresi, JI Collar, J Diaz Leon, JE Fast, NE Fields, TW Hossbach, A Knecht, MS Kos, et al. Cogent: A search for low-mass dark matter using p-type point contact germanium detectors. *Physical Review D*, 88(1):012002, 2013.

[37] CoGeNT collaboration. A cogent result in the hunt for dark matter. *http://www.nature.com/news/2010/100226/full/news.2010.97.html*, 2010.

[38] Craig E Aalseth, PS Barbeau, J Colaresi, JI Collar, J Diaz Leon, James E Fast, N Fields, Todd W Hossbach, Martin E Keillor, Jeremy D Kephart, et al. Search for an annual modulation in a p-type point contact germanium dark matter detector. *Physical Review Letters*, 107(14):141301, 2011.

[39] F Pröbst, G Angloher, M Bruckmayer, C Bucci, S Cooper, P Di Stefano, F von Feilitzsch, T Frank, D Hauff, Th Jagemann, et al. Results of cresst phase i. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 110:67–69, 2002.

[40] Godehard Angloher, M Bauer, I Bavykina, A Bento, C Bucci, C Ciemniak, G Deuter, F von Feilitzsch, D Hauff, P Huff, et al. Results from 730 kg days of

the cresst-ii dark matter search. *The European Physical Journal C-Particles and Fields*, 72(4):1–22, 2012.

[41] Elena Aprile, K Arisaka, F Arneodo, A Askin, L Baudis, A Behrens, E Brown, JMR Cardoso, B Choi, D Cline, et al. The xenon100 dark matter experiment. *Astroparticle Physics*, 35(9):573–590, 2012.

[42] E Aprile, M Alfonsi, K Arisaka, F Arneodo, C Balan, L Baudis, B Bauermeister, A Behrens, P Beltrame, K Bokeloh, et al. Dark matter results from 225 live days of xenon100 data. *Physical review letters*, 109(18):181301, 2012.

[43] Oscar Adriani, GC Barbarino, GA Bazilevskaya, R Bellotti, Mirko Boezio, EA Bogomolov, L Bonechi, M Bongi, Valter Bonvicini, S Bottai, et al. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 gev. *Nature*, 458(7238):607–609, 2009.

[44] O Adriani, GC Barbarino, GA Bazilevskaya, R Bellotti, M Boezio, EA Bogomolov, L Bonechi, M Bongi, V Bonvicini, S Bottai, et al. New measurement of the antiproton-to-proton flux ratio up to 100 gev in the cosmic radiation. *Physical Review Letters*, 102(5):051101, 2009.

[45] Marco Cirelli. Indirect searches for dark matter. *Pramana*, 79(5):1021–1043, 2012.

[46] M Aguilar, G Alberti, B Alpat, A Alvino, G Ambrosi, K Andeen, H Anderhub, L Arruda, P Azzarello, A Bachlechner, et al. First result from the alpha magnetic spectrometer on the international space station: precision measurement of the positron fraction in primary cosmic rays of 0.5–350 gev. *Physical Review Letters*, 110(14):141102, 2013.

[47] Lars Bergström. Dark matter evidence, particle physics candidates and detection methods. *Annalen der Physik*, 524(9-10):479–496, 2012.

[48] Christoph Weniger. A tentative gamma-ray line from dark matter annihilation at the fermi large area telescope. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2012(08):007, 2012.

[49] M Ackermann, M Ajello, A t Albert, WB Atwood, L Baldini, J Ballet, G Barbiellini, D Bastieri, K Bechtol, R Bellazzini, et al. Constraining dark matter

models from a combined analysis of milky way satellites with the fermi large area telescope. *Physical Review Letters*, 107(24):241302, 2011.

[50] A Geringer-Sameth and SM Koushiappas. Available from. *arXiv preprint arXiv:1108.2914*.

[51] Shin'ichiro Ando and Daisuke Nagai. Fermi-lat constraints on dark matter annihilation cross section from observations of the fornax cluster. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2012(07):017, 2012.

[52] Jiaxin Han, Carlos S Frenk, Vincent R Eke, Liang Gao, Simon DM White, Alexey Boyarsky, Denys Malyshev, and Oleg Ruchayskiy. Constraining extended gamma-ray emission from galaxy clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(2):1651–1665, 2012.

[53] Shin¡¯ichiro Ando and Eiichiro Komatsu. Constraints on the annihilation cross section of dark matter particles from anisotropies in the diffuse gamma-ray background measured with fermi-lat. *Physical Review D*, 87(12):123539, 2013.

[54] K Helbing et al. Icecube as a discovery observatory for physics beyond the standard model. *arXiv preprint arXiv:1107.5227*, 2011.

[55] Rolf Kappl and Martin Wolfgang Winkler. New limits on dark matter from super-kamiokande. *Nuclear Physics B*, 850(3):505–521, 2011.

[56] JD Lewin and PF Smith. Review of mathematics, numerical factors, and corrections for dark matter experiments based on elastic nuclear recoil. *Astroparticle Physics*, 6(1):87–112, 1996.

[57] Elena Aprile, Aleksey E Bolotnikov, Alexander I Bolozdynya, and Tadayoshi Doke. *Noble gas detectors*. John Wiley & Sons, 2007.

[58] Shinzou Kubota, Masahiko Hishida, Masayo Suzuki, and Jian-zhi Ruan Gen. Dynamical behavior of free electrons in the recombination process in liquid argon, krypton, and xenon. *Physical Review B*, 20(8):3486, 1979.

[59] Elena Aprile, CE Dahl, L de Viveiros, RJ Gaitskell, Karl-Ludwig Giboni, J Kwong, P Majewski, K Ni, T Shutt, and M Yamashita. Simultaneous measurement of ionization and scintillation from nuclear recoils in liquid xenon for a dark matter experiment. *Physical review letters*, 97(8):081302, 2006.

[60] LS Miller, S Howe, and WE Spear. Charge transport in solid and liquid ar, kr, and xe. *Physical Review*, 166(3):871, 1968.

[61] A Baldini, C Bemporad, F Cei, T Doke, M Grassi, AA Grebenuk, DN Grigoriev, T Haruyama, K Kasami, J Kikuchi, et al. Absorption of scintillation light in a 100l liquid xenon γ-ray detector and expected detector performance. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 545(3):753–764, 2005.

[62] AI Bolozdynya. Two-phase emission detectors and their applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 422(1):314–320, 1999.

[63] XiGuang Cao, Xun Chen, YunHua Chen, XiangYi Cui, DeQing Fang, ChangBo Fu, Karl L Giboni, HaoWei Gong, GuoDong Guo, Ming He, et al. Pandax: a liquid xenon dark matter experiment at cjpl. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 57(8):1476–1494, 2014.

[64] CAEN. Vme8100 user manual. 2014.

[65] Wade D Peterson. *The VMEbus Handbook*. Vita, 1997.

[66] VME Standard Specification. Ieee std. 1014-1987. *IEC821*, 46, 1987.

[67] US NIM Committee et al. *Standard NIM instrumentation system*. US Department of Energy, Office of Energy Research, Office of Health and Environmental Research, 1990.

[68] CAEN. Nim8301 user manual. 2014.

[69] CAEN. V2718 user manual. 2014.

[70] CAEN. V1724 user manual. 2015.

[71] CAEN. V814 user manual. 2010.

[72] CAEN. V830 user manual. 2007.

[73] CAEN. V1495 user manual. 2014.

[74] CAEN. N638 user manual. 2006.

[75] CAEN. Phi.779 user manual. 2010.

[76] CAEN. Phi.794 user manual. 2010.

[77] CAEN. Phi.740 user manual. 2010.

[78] CAEN. Ortec.575a user manual. 2010.

[79] MengJiao Xiao, Xiang Xiao, Li Zhao, XiGuang Cao, Xun Chen, YunHua Chen, XiangYi Cui, DeQing Fang, ChangBo Fu, Karl L Giboni, et al. First dark matter search results from the pandax-i experiment. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 57(11):2024–2030, 2014.

致谢

五年研究生生涯一晃而过，值此论文完成之际，对所有给予我帮助和建议的人，致以诚挚的谢意！

2009 年，王萌教授指导我完成本科毕业设计论文，之后五年研究生生涯，作为我的研究生指导老师，以严谨的工作态度和科学的研究方法引导我的研究生工作。在博士论文的选题、写作过程中给予了充分的帮助并提出了宝贵的意见。研究生工作中，小到螺丝大到系统框架，王萌教授的严谨和细致为我前进的方向提供了坚实的参考。研究生工作主要集中在 PandaX 实验，上海交通大学刘江来研究员在系统设计和改进过程中提出了宝贵的意见。刘江来老师积极的工作态度和坚定的科研信念给我留下了深刻的印象，感谢他对我的鼓励和帮助。

感谢山东大学高能组的老师，在科研工作和研究生课程中，对我的支持和鼓励。感谢 PandaX 合作组所有的老师和同学，在实验过程中给予我的帮助和鼓励。感谢山东大学高能组的同学，他们为我展现了丰富多彩的生活，并以积极向上的科研态度影响我。

感谢孙延生老师给我工作上的建议和帮助，感谢各位实验室成员：郑文静，陈泉佑，燕斌斌，李慧玲，刘清源，刘剑等对我生活和工作上的支持, 大家共同营造了和谐的实验室环境，让我的工作得以顺利进行。

感谢评审委员会的所有老师，他们在百忙之中抽出时间评阅我的论文，感谢他们的批评指正！

感谢我的父母，他们默默的支持我的工作和生活。在奔三的年纪还不能膝下尽孝，十分愧疚。无论多么宏大的未来，多么瑰丽的山河，都无法与他们的笑容相比。感谢我所有的亲人，感谢他们给我的温暖!

博士期间发表论文

1 : PandaX：a liquid xenon dark matter experiment at CJPL.Science China Physics,Mechanics & Astronomy,2014-06-09,57(8):1476-1494.

2 : First dark matter search results from the PandaX-I experiment.Science China Physics, Mechanics & Astronomy,2014-09-05,57(11):2024-2030.

学位论文评阅及答辩情况表

<table>
<tr><td rowspan="6">论文评阅人</td><td colspan="2">姓　名</td><td>专业技术职　务</td><td>是否博导（硕导）</td><td>所 在 单 位</td><td>总 体 评 价 ※</td></tr>
<tr><td colspan="2">匿名</td><td></td><td></td><td></td><td>B</td></tr>
<tr><td colspan="2">匿名</td><td></td><td></td><td></td><td>B</td></tr>
<tr><td colspan="2">徐庆华</td><td>教授</td><td>博导</td><td>山东大学物理学院</td><td>A</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="11">答辩委员会成员</td><td colspan="2">姓　名</td><td>专业技术职　务</td><td>是否博导（硕导）</td><td colspan="2">所 在 单 位</td></tr>
<tr><td>主席</td><td>张学尧</td><td>教授</td><td>博导</td><td colspan="2">山东大学物理学院</td></tr>
<tr><td rowspan="9">委

员</td><td>徐庆华</td><td>教授</td><td>博导</td><td colspan="2">山东大学物理学院</td></tr>
<tr><td>冯存峰</td><td>教授</td><td>博导</td><td colspan="2">山东大学物理学院</td></tr>
<tr><td>欧阳群</td><td>研究员</td><td>博导</td><td colspan="2">中国科学院高能物理研究所</td></tr>
<tr><td>刘江来</td><td>研究员</td><td>博导</td><td colspan="2">上海交通大学理学院物理系</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="3">答辩委员会对论文的总体评价※</td><td>A</td><td>答辩秘书</td><td>李晓玲</td><td>答辩日期</td><td>2015.05.27</td></tr>
<tr><td colspan="2">备注</td><td colspan="6"></td></tr>
</table>

※优秀为“A”；良好为“B”；合格为“C”；不合格为“D”。