



中国散裂中子源  
Chinese Spallation Neutron Source

# 高能质子实验终端 触发逻辑方案与接口设计进展

报告人：郭宇航

参与人：郭宇航、樊瑞睿、敬罕涛等

报告日期：2023/10/19

# 目 录

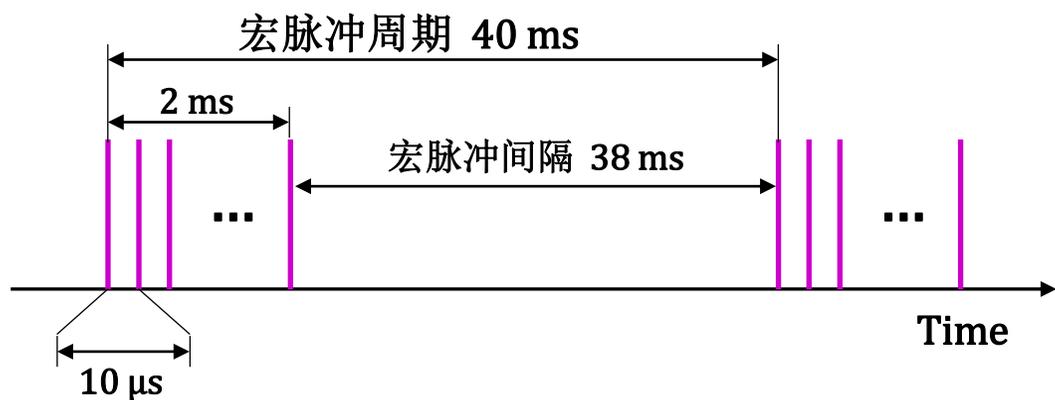
CONTENT

1. 背景介绍
2. HPES触发逻辑设计
3. 用户访谈
4. 总结

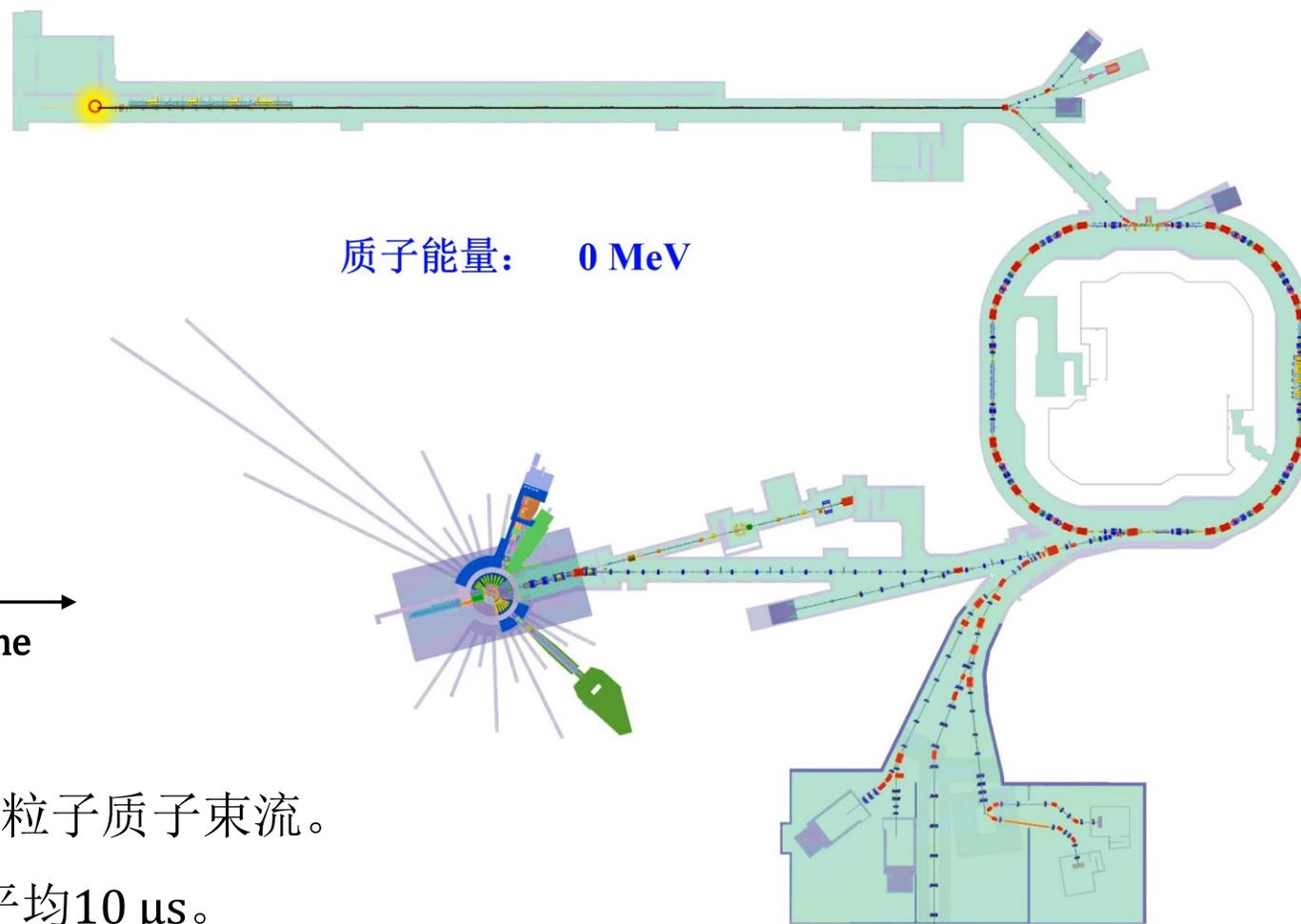
# 1.1 CSNS-高能质子束流



性能	参数
宏脉冲频率	25 Hz
宏脉冲时间	1.5 ~ 2 ms
质子平均间隔	10 $\mu$ s
质子最小间隔	410 ns

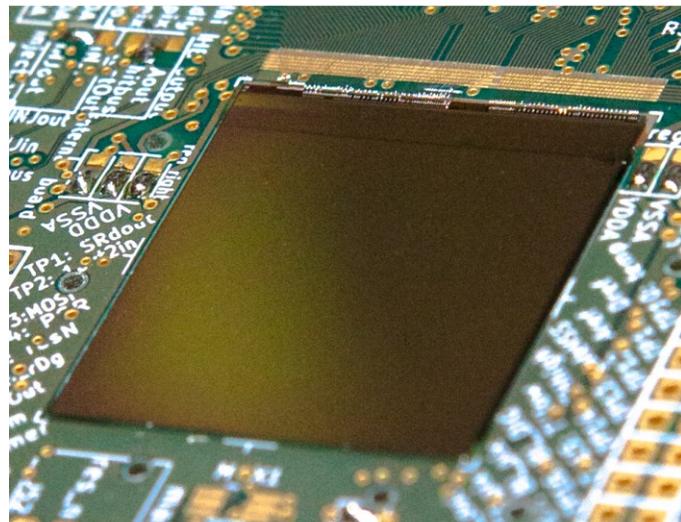
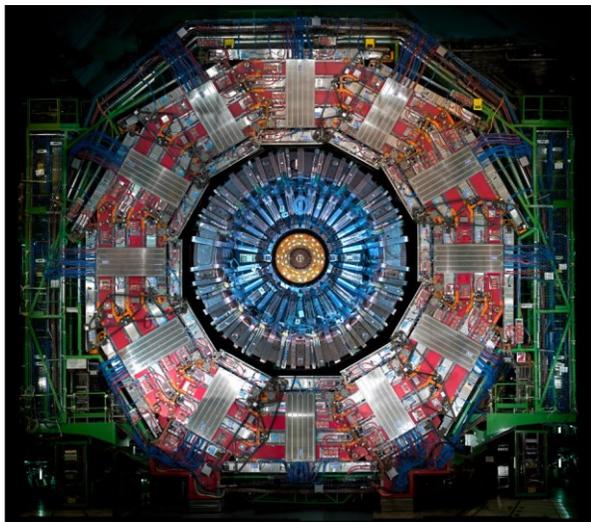


质子能量: 0 MeV



- CSNS高能质子束能提供 1.6 GeV 的单粒子质子束流。
- 质子间隔在 410 ns ~ 400  $\mu$ s 之间，平均10  $\mu$ s。

# 1.2.1 高能质子实验终端的服务对象



## 量能器标定

- ▣ 提供800~1600 MeV质子
- ▣ 大型强子对撞机的量能器标定

## 探测器位置标定

- ▣ 1.6 GeV质子最小电离，穿透性好
- ▣ 为位置探测器提供10  $\mu\text{m}$  位置标定

## 航空航天

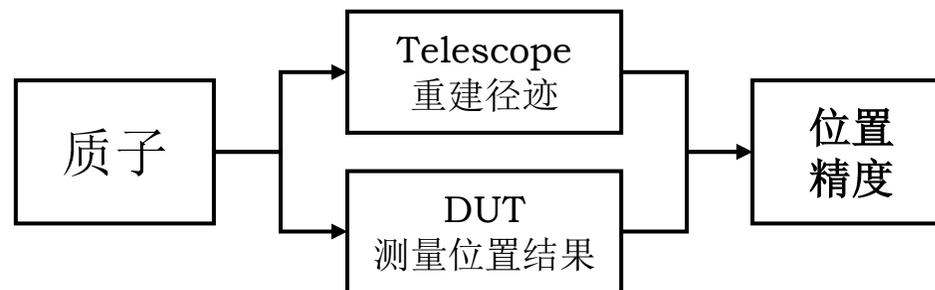
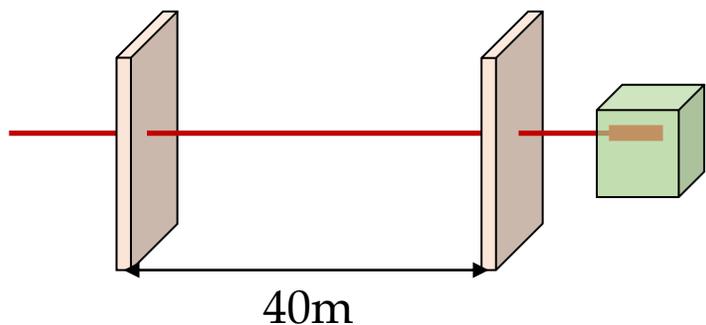
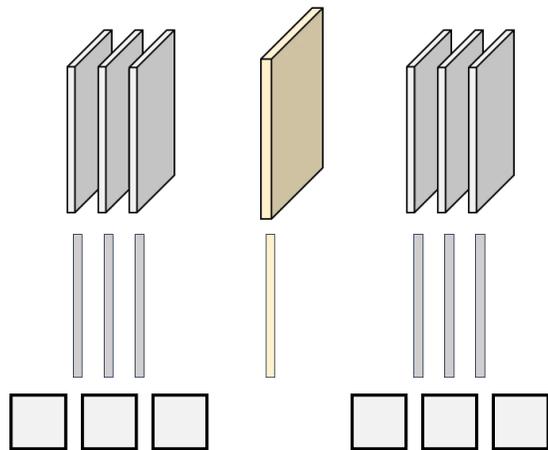
- ▣ 1.6 GeV质子能量与宇宙线类似
- ▣ 可用于航天仪器的抗辐照性能测试

**对撞机谱仪探测器是主要服务对象**

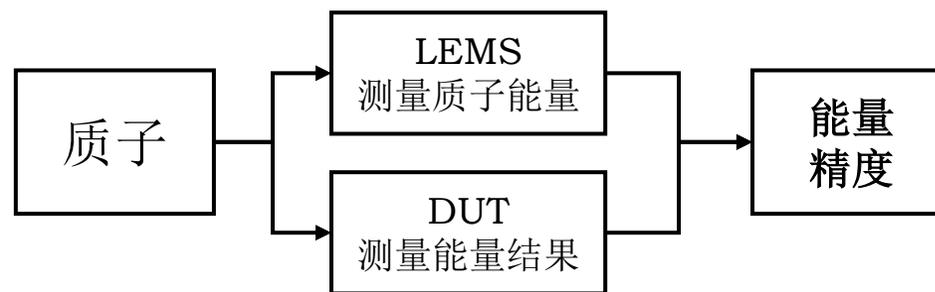
# 1.2.2 实验终端的主要测量场景



主要测试场景



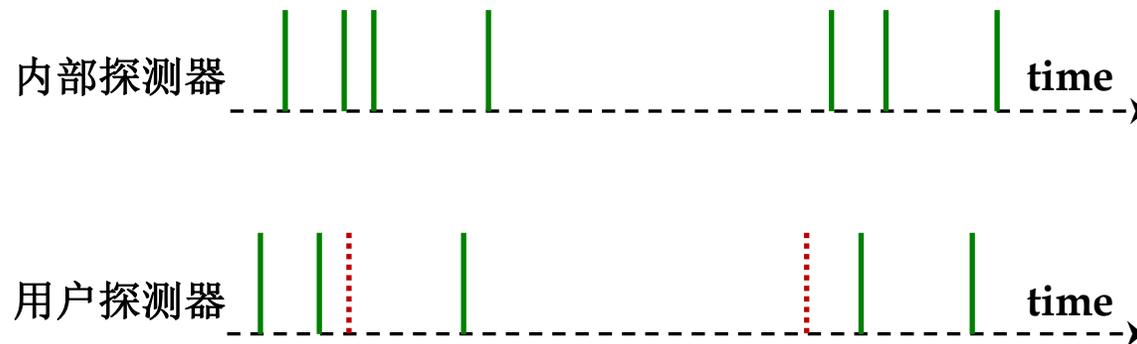
- 位置探测器标定, 10 $\mu$ m位置精确度。
- 需要按事例对齐质子数据。



- 量能器标定, 1%能量分辨率。
- 需要按事例对齐质子数据。

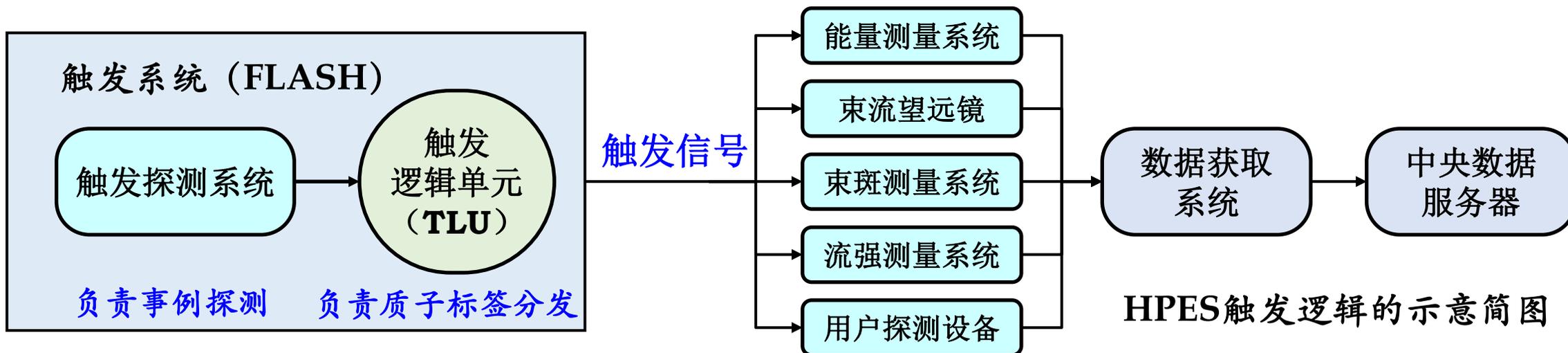
# 1.3 触发系统与触发逻辑单元

- ◆ 多数测量场景需要探测器间事例对齐。
- ◆ 然而各探测器事例序列无法自然对齐。
- ◆ 因此要为每个质子打标签，并传递给探测器。



触发系统为每个质子打标签  
并分发给各探测系统

- 将质子标签与数据打包
- 在线下通过触发号对齐事例



HPES触发逻辑的示意简图

# 1.3.1 各种对齐方案的对比

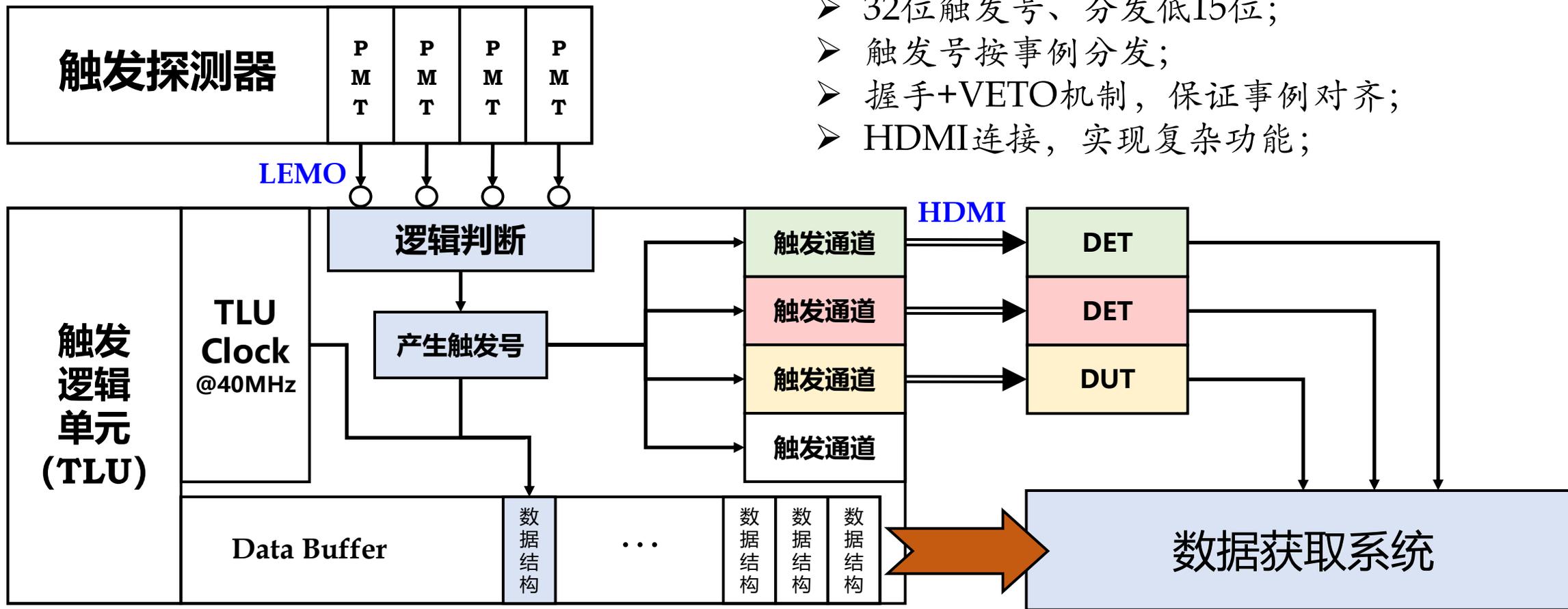


方案	优势	劣势
按事例输出脉冲信号	<ul style="list-style-type: none"><li>• 简单直接</li><li>• 没有复杂信息需要传递</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• DUT自己打标签，存在漂移</li><li>• 无法实现事例对齐</li></ul>
按事例分发时间戳	<ul style="list-style-type: none"><li>• 能够实现事例对齐</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 时间戳是一段很长的数据</li><li>• 时间戳内的信息对探测器是无用的信息。</li></ul>
按事例分发触发号	<ul style="list-style-type: none"><li>• 能够实现事例对齐</li><li>• 触发号位数较短；</li><li>• 触发号发送不需要公共时间起始；</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 要在下一个质子到来前完成传递 否则就要丢事例</li></ul>

按事例传递触发号是一个相比之下合理的选择

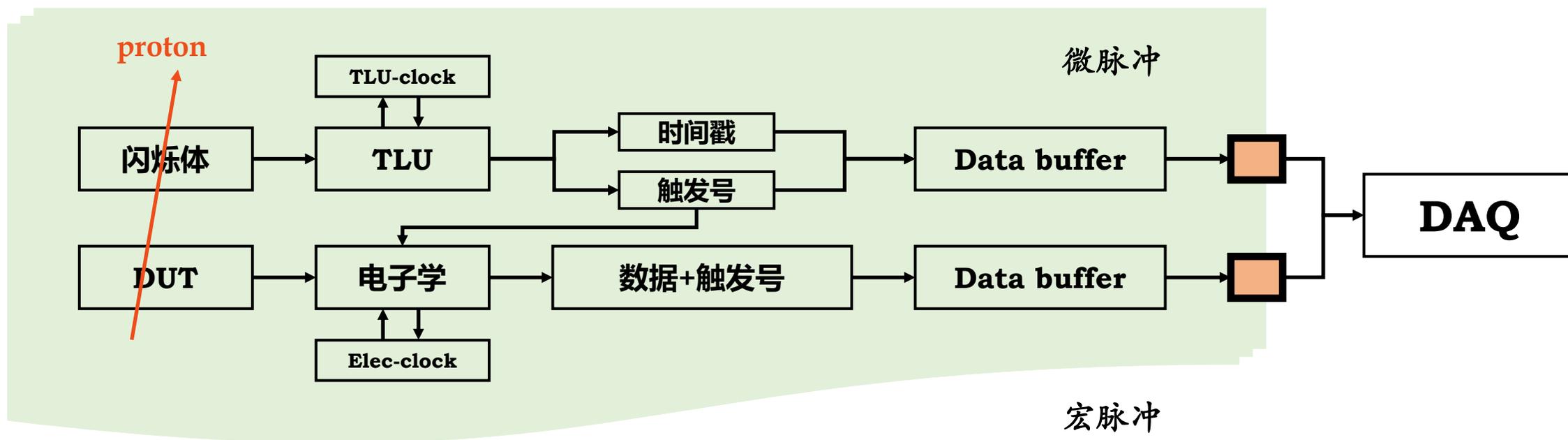
## 国际应用广泛的触发逻辑单元

- AIDA-TLU是一个“触发号分发设备”：
  - 32位触发号、分发低15位；
  - 触发号按事例分发；
  - 握手+VETO机制，保证事例对齐；
  - HDMI连接，实现复杂功能；



# 1.3.3 AIDA标准的优势

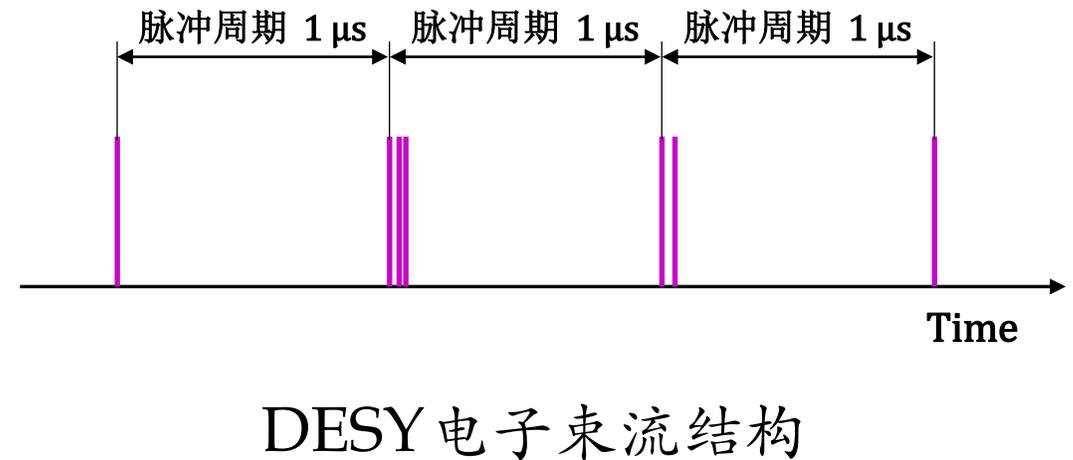
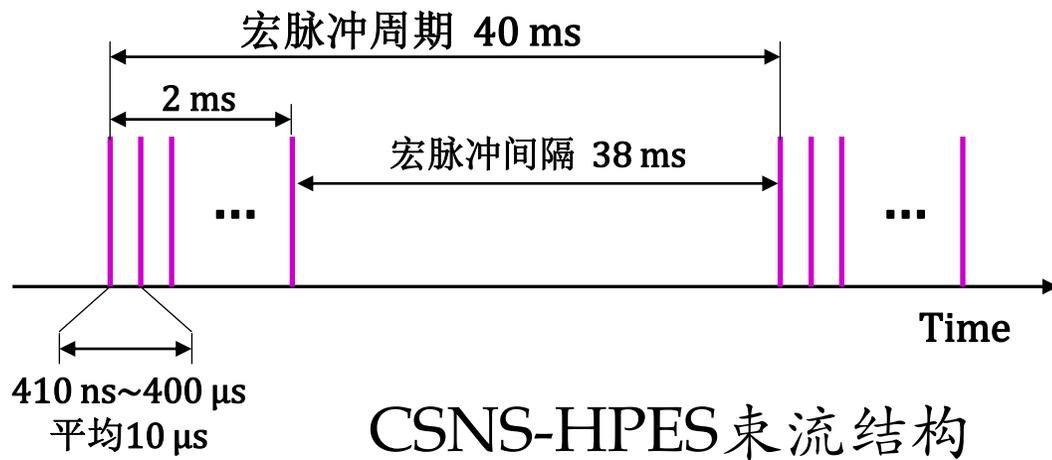
- 保证所有探测器的数据能够根据触发号“按事例对齐”。
- 通过分发触发号，确保所有探测器“步调一致”。
- 分发触发号简单直接。



# 1.3.4 直接在HPES上使用AIDA



- AIDA-TLU主要应用在DESY、CERN上，束团结构与HPES差别很大。
  1. DESY束流没有宏脉冲、微脉冲双层结构。
  2. AIDA-TLU一个事例处理完需要450 ns，直接使用会导致1%的事例损失掉。
- 因此需要对AIDA的方案进行优化、修正。



## 设计需求

### 1. 信号长度

- 单次测试期间，质子序号不能重复
- 需要至少**32**位的触发号

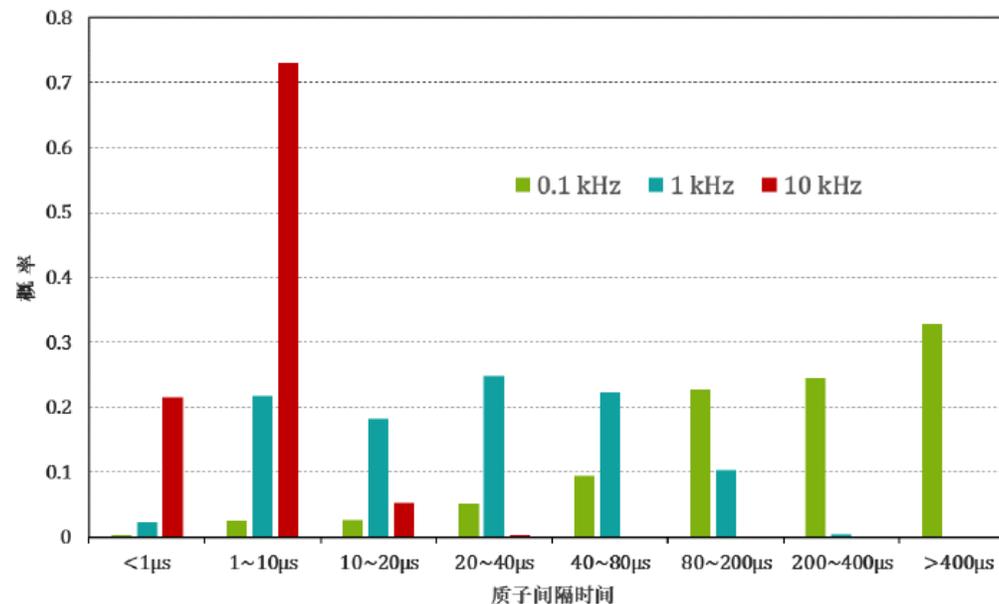
### 2. 单组信号传递时间

- 触发信号传递时间**450ns**→**410ns**

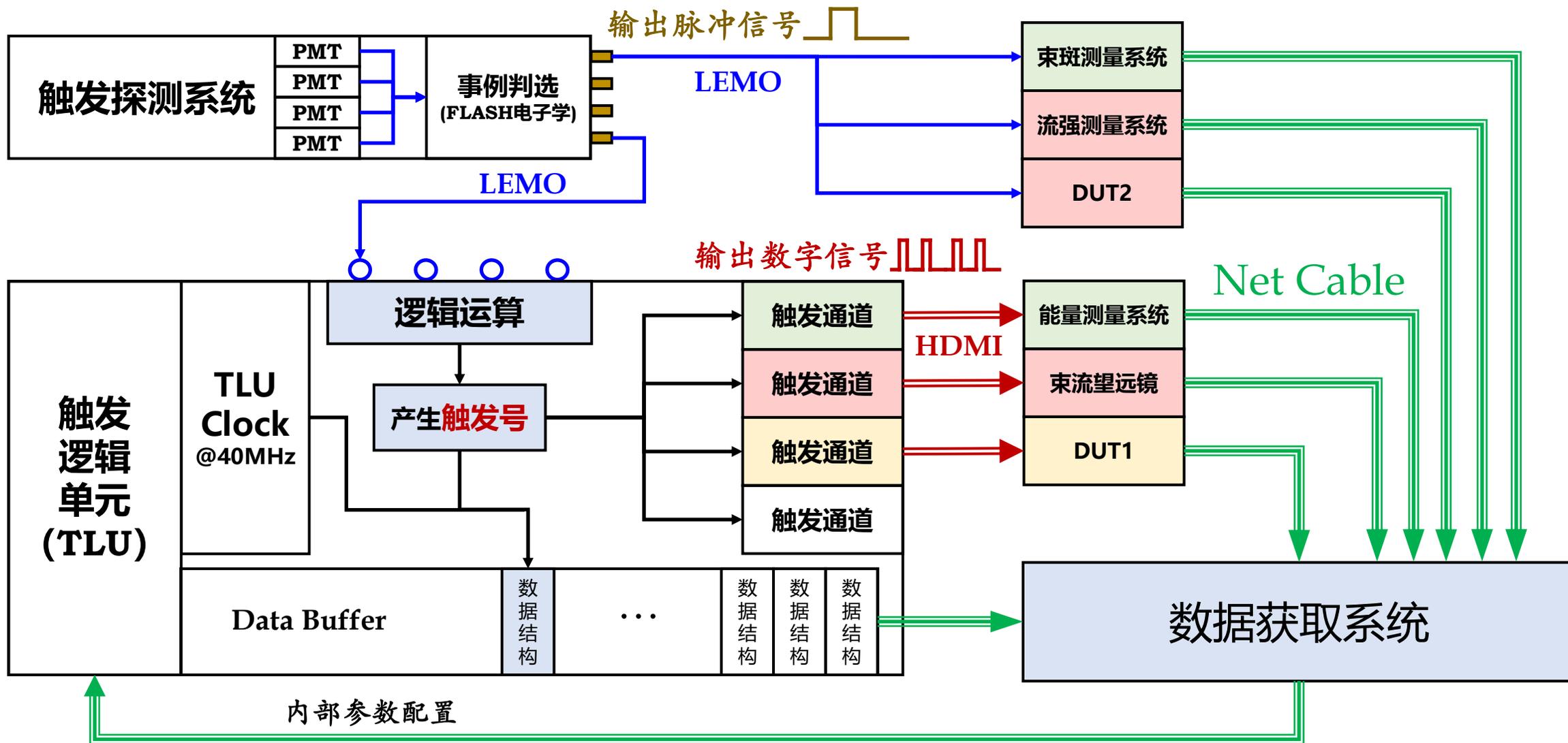
束流频率	25 Hz
平均质子时间间隔	10 $\mu$ s
最短质子时间间隔	410 ns
质子平均流强	5000 Hz

表. 单触发号的长度与能实现最长测量时间对应关系

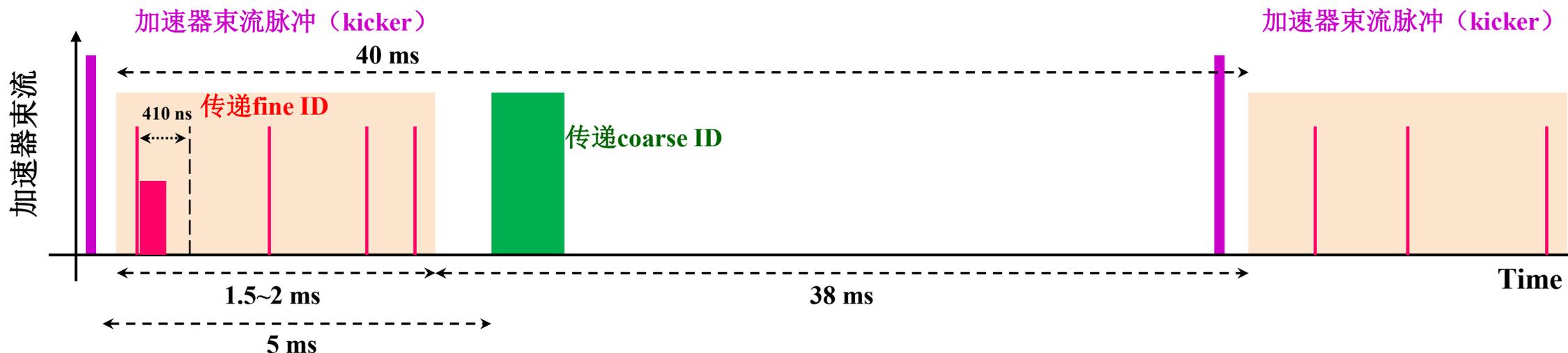
Proton/宏脉冲	24bit	32bit	40bit	48bit
200	0.9h	9.9 d	1.7 Y	1785Y



# 2.1 HPES-TLU的触发逻辑



## 2.2 触发号双节设计



- ◆ 触发号分两部分：coarse ID (cID) 和 fine ID (fID)
  - cID记录宏脉冲号，32 bit，宏脉冲间隙传给DET
  - fID记录微脉冲号，10 bit，实时传给det
- ◆ 单次测试时间最大可达5年。
- ◆ 需要用到加速器kicker脉冲提供时钟参考。

触发号设计思路：

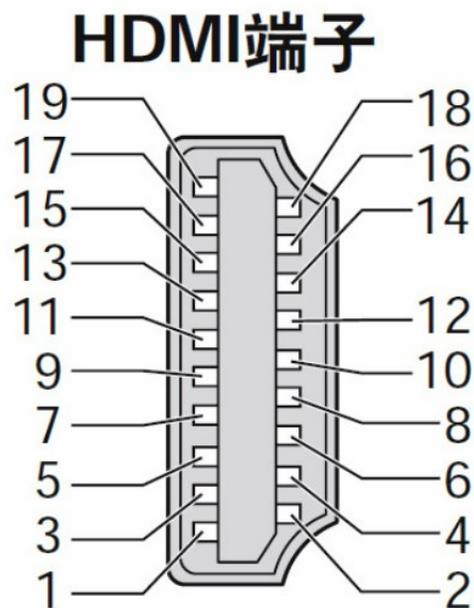
结合CSNS束流特色

充分利用宏脉冲间隔

## 2.3 HDMI传输协议

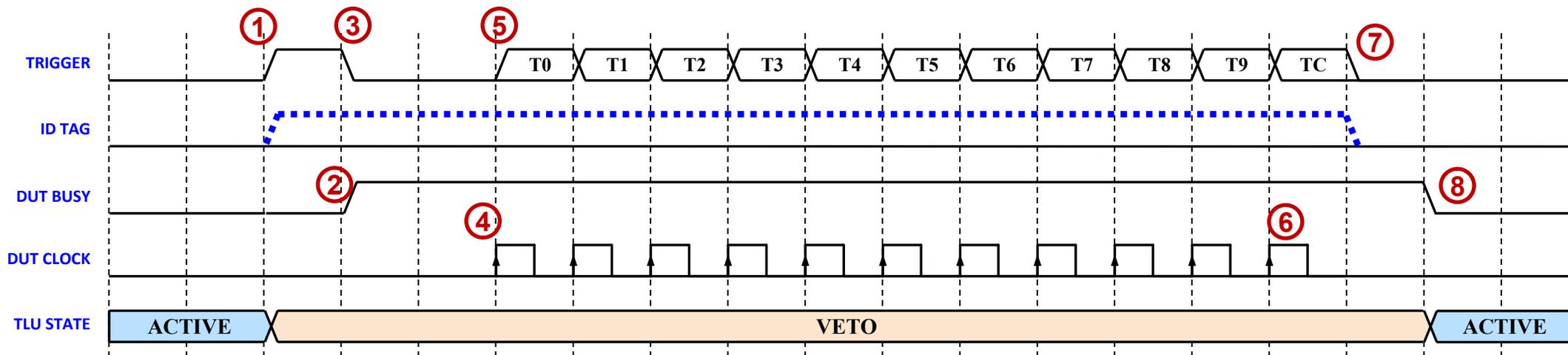
- 采用**HDMI接口+LVDS电平标准**传输触发信号。
- 3端×5组，配合实现握手、初始化等复杂功能。

单通道数据量高达**1Gb/s**



HDMI PIN	TLU SIGNAL	HDMI PIN	TLU SIGNAL
1	<i>CLK</i>	10	<i>TAG</i>
2	<i>GND</i>	11	<i>GND</i>
3	$\overline{CLK}$	12	$\overline{TAG}$
4	<i>CTL</i>	13	<i>n.c.</i>
5	<i>GND</i>	14	<i>+3.3V DC</i>
6	$\overline{CTL}$	15	<i>TRIG</i>
7	<i>BUSY</i>	16	$\overline{TRIG}$
8	<i>GND</i>	17	<i>GND</i>
9	$\overline{BUSY}$	18	<i>n.c.</i>
		19	<i>n.c.</i>

## 2.4 握手机制



- ① TLU判断有触发，TRIG给出高电平，TAG给出低电平
- ② DUT通过BUSY给出高电平
- ③ TLU恢复TRIG至低电平，并准备转发fID，共计10位
- ④ DUT通过CLK给出clock pulses
- ⑤ TLU按CLK的上升沿通过TRIG转发触发号
- ⑥ DUT共计输出11个clock pulse，前10个用于fID转发，11<sup>th</sup>用于清零
- ⑦ DUT输出第11个clock pulse时，TLU强制将TRIG/TAG调至低电平
- ⑧ DUT在全部结束后一个clock，恢复BUSY至低电平。

**fID:**

- 15个clock周期
- 375 ns @ 40 MHz

**cID:**

- 37个clock周期
- 925 ns @ 40 MHz

## 2.5 VETO机制



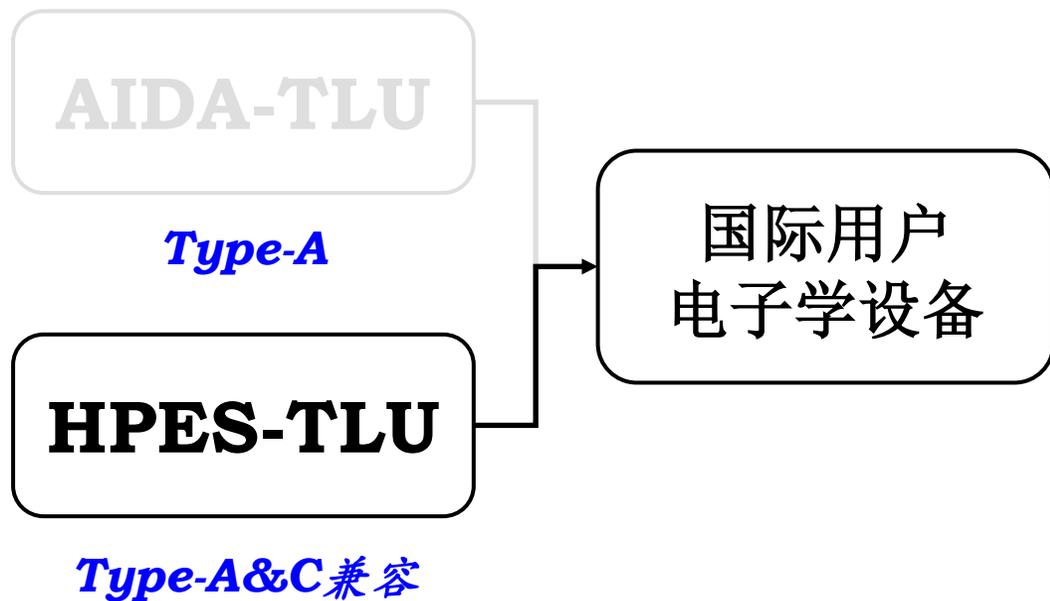
- 在事例对齐工况下，需要事例对齐的探测器+触发系统，将工作在VETO状态下：
  - 在DUT未完成触发信号接收时，DUT发布BUSY状态。
  - 当任意DUT处于BUSY状态时，TLU均处于VETO状态。
  - 当TLU处于VETO状态时，不再为新的事例扇出触发号。



- VETO+握手，使所有探测器步调一致。**
- 确保触发号分发的有效性，保证事例对齐。**
- VETO机制可在后台关掉，按需使用。**

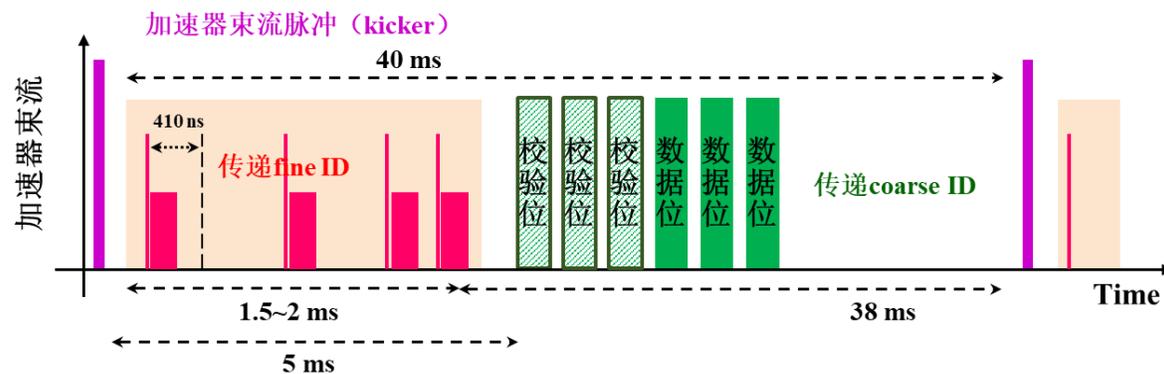
# 2.6 兼容AIDA设备

- 国际用户已适应AIDA标准。
- HPES-TLU可直接兼容AIDA-TLU，国际用户的电子学可直接接收触发信号。
- 有利于CSNS-HPES扩大国际影响力。



- ✓ HDMI接口兼容
- ✓ 内部固件逻辑兼容
- ✓ 时钟频率兼容
- ✓ 信号格式兼容

数据只需要简单转化一下  
即与AIDA标准的数据一致





姓名：刘义

职称：郑州大学特聘教授

研究方向：粒子和辐照探测器的研发，触发及数据获取系统研发，面向未来高能对撞机实验的谱仪探测器设计和建设。

访谈理由：主持完成DESY束流单粒子径迹望远镜的研制；熟悉束流望远镜与位置探测器标定的具体需求和技术细节。

## 主要建议和意见：

- 支持HPES仿照AIDA标准研发自己的触发逻辑方案。
- 建议HPES-TLU研发IP核，有利于用户开源研发电子学内部逻辑的接口。
- HDMI有两种类型，分别支持4组和5组高速差分信号传递，要注意识别。



姓名：刘勇

职称：高能所特聘青年研究员

研究方向：未来高能正负电子对撞机上的量能器预研项目；

CEPC高颗粒度电磁量能器及强子量能器样机的研制和束流实验。

访谈理由：HPES未来开展量能器测试的主要用户之一；

熟悉量能器测试的具体需求和技术细节。

### 主要建议和意见：

- 量能器测试的电子学按AIDA-TLU的协议接收触发信号，支持HPES采用AIDA风格的触发逻辑方案
- 建议触发探测器接口除LEMO，还有SMA。
- 量能器测试样机过几年会成熟，届时可与HPES-TLU一起在束流上做测试。



姓 名：李超

职 称：中科大先研院副研究员、中科采象有限公司市场总监

访谈理由：back-n与LEMS电子学研发团队研发经理；  
对电子学前沿技术和研发细节十分了解。

### 主要建议和意见：

- 从电子学研制的角度看：
  1. HPES-TLU设备的研制没有技术难题，现有FPGA技术可以实现。
  2. HPES-LEMS的FROS电子学按HPES-TLU的协议接收触发逻辑信号是可行的，只是需要在固件和接口上进行改造。

- CSNS-HPES未来会开展的实验任务以对撞机谱仪探测器标定为主：
  1. 多种内部探测器合作
  2. 待测探测器多种多样
  3. 需要严格的数据对齐
- 要完成上述任务，需要一个TLU为各个探测系统扇出“事例标签”。
- 国际上代表性的触发逻辑单元是AIDA-2020，广泛应用于DESY/CERN上。
- 经过对比，采用AIDA的触发逻辑思路是合理的。
- 结合散裂束流的实际情况，对AIDA标准进行优化，提出了HPES触发逻辑方案：
  1. 按事例扇出触发号作为事例标签
  2. 双节触发号，分别标记宏脉冲与微脉冲，降低了触发号传递用时
  3. HDMI连接+握手+VETO机制
  4. 内部逻辑+外部接口，均兼容AIDA标准设备
- 未来会进一步深化技术细节，并开展相关验证性测试和实验。

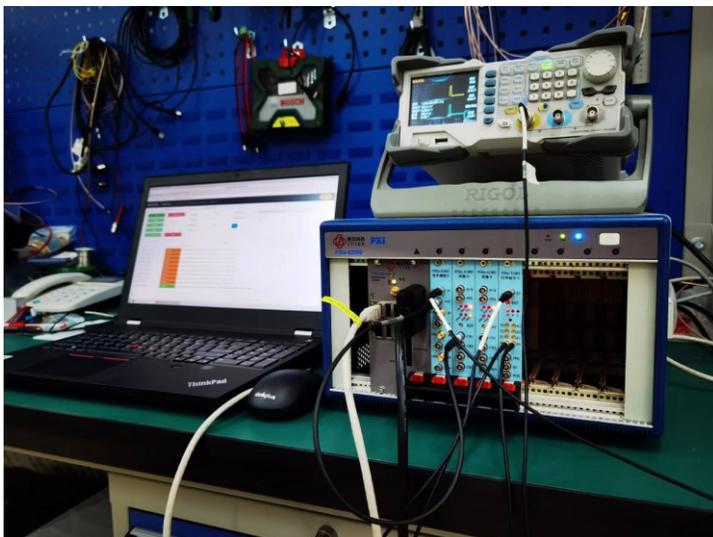
# 致谢



承蒙厚爱  
感谢倾听  
**Thanks!**

- 用户对触发接口的需求五花八门，对触发系统设计提出挑战。
- 根据用户特点分类，并设计对应的接口方案。

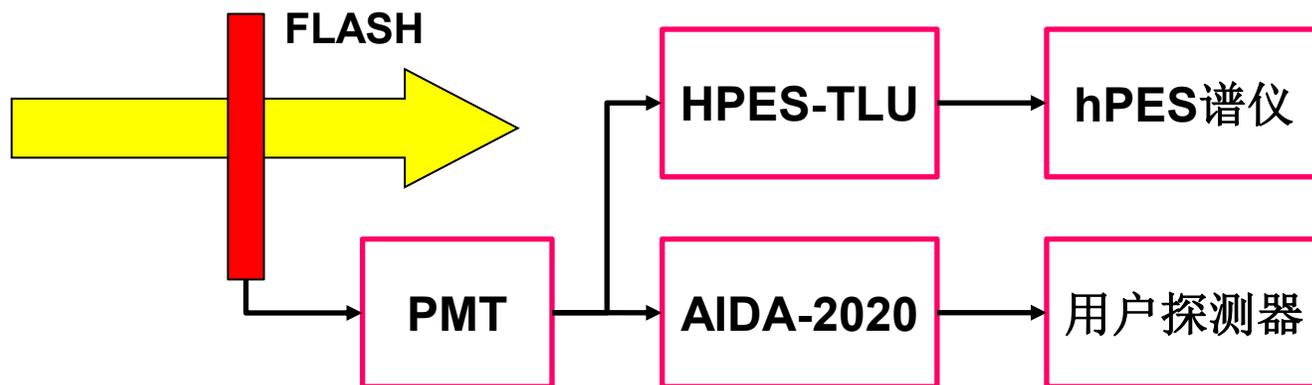
用户类型	特点	用户接口方案
高级用户	有电子学设计能力	为其提供多种标准触发信号 <ul style="list-style-type: none"><li>• 不需要触发号：LEMO</li><li>• 需要触发号：HDMI</li></ul>
普通用户	无电子学设计能力	提供用户公共电子学
国际用户	习惯使用AIDA标准；	hPES标准部分兼容AIDA标准； 用户按能力和需求选择具体方案；



- 多用途数据采集电子学，满足不同用户的数据采集需求
- 已完成样机搭建，可以满足初步的使用需求

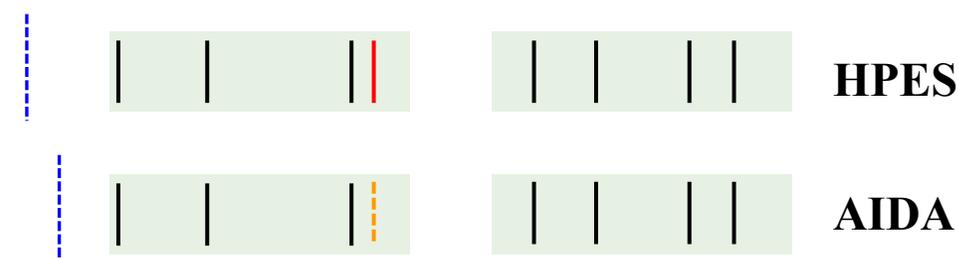
类别	样机性能	完全体性能
采样率	1 Gsps	1 Gsps
采样带宽	140 MHz	140 MHz
电压范围	-400mV~400mV	0~5V
采数模式	电压模式	电压模式/电流模式
DAQ接口	预留未开发	能将数据上传

- 直接并行使用AIDA的问题：
  1. HPES周期410ns，AIDA标准一个周期450ns，会损失1%左右的质子；
  2. 两个TLU不能同时启动，同一事例的时间戳也无法对齐；触发号格式也不一致，无法对齐；
  3. AIDA标准中没有CID的概念，只用fID则会导致触发号每40 ms循环一次。
- 直接并行使用AIDA，事例无法对齐。

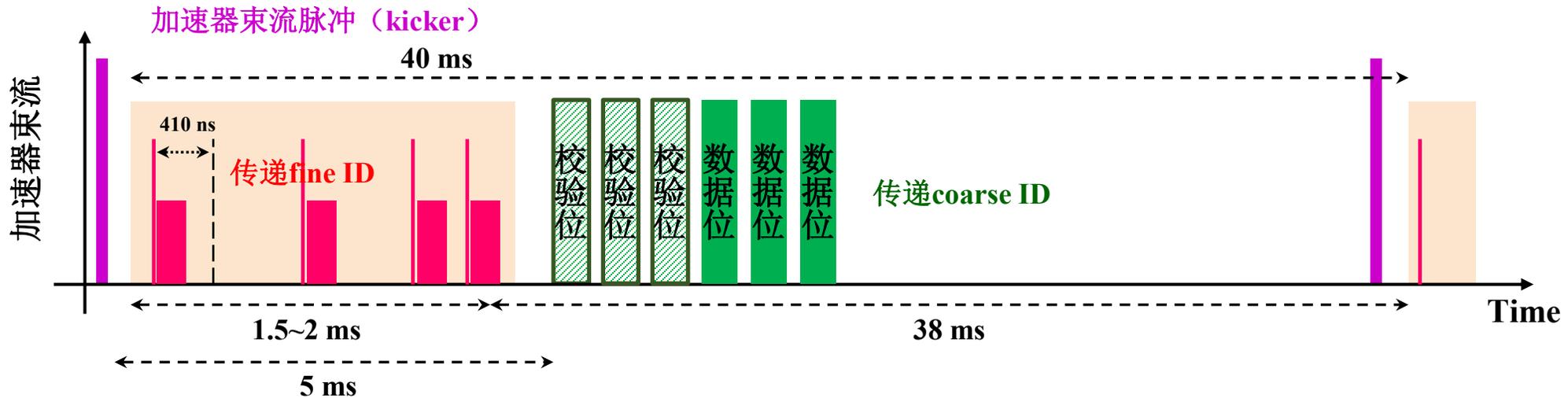


## 事例对齐无法实现

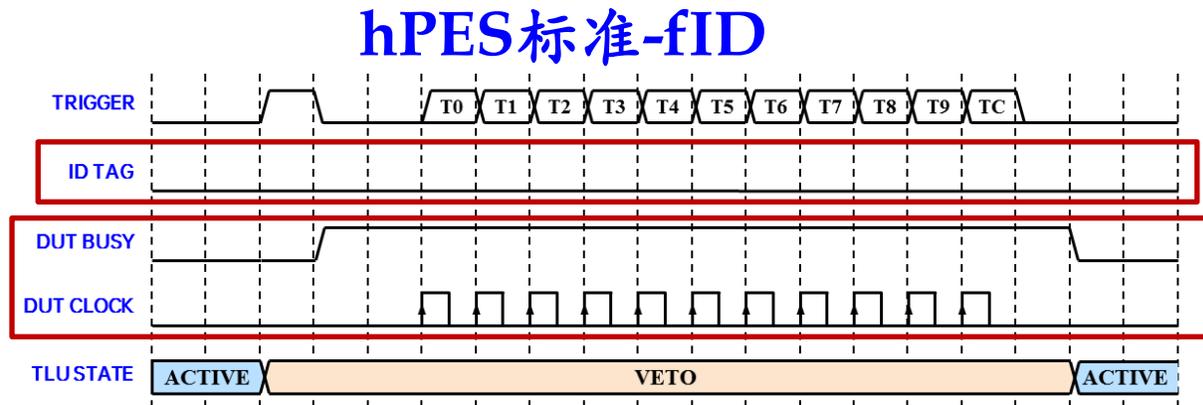
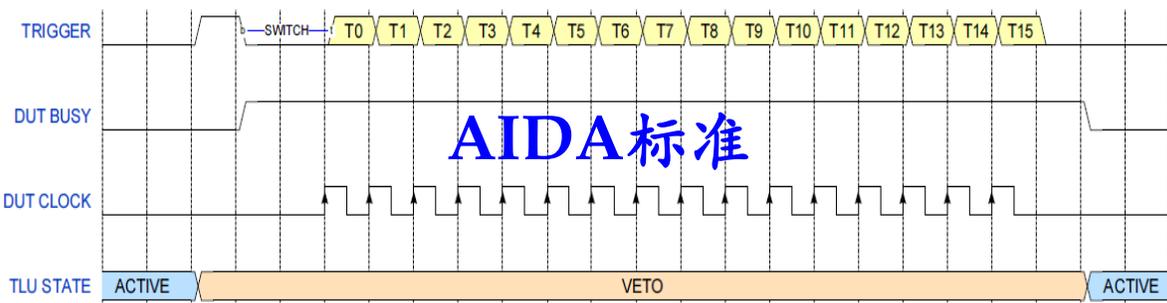
起始时间不同步，同一事例时间戳不同



损失1%事例，触发号也不同

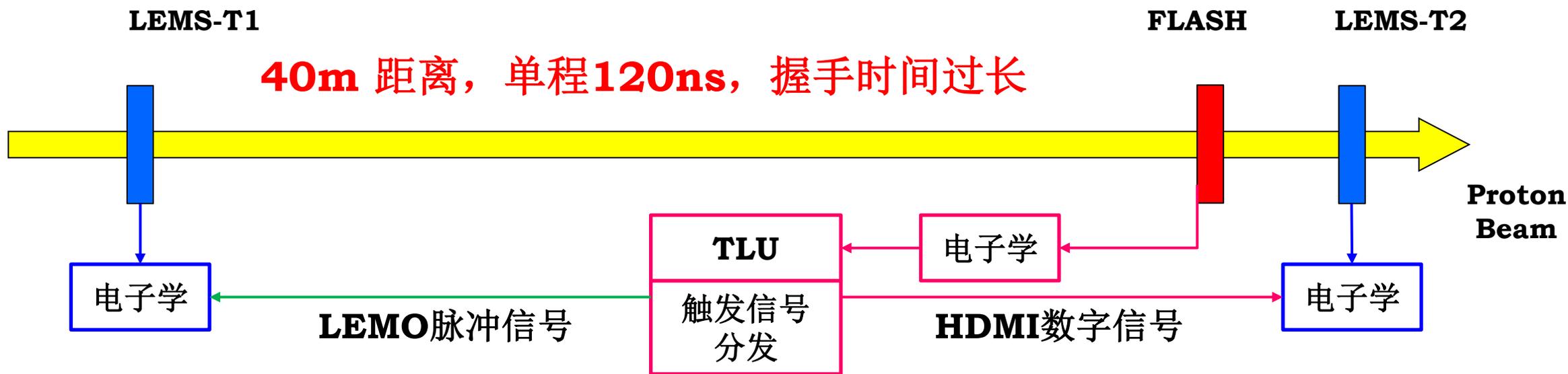


- hPES的TLU的一路为AIDA标准探测器专用。
- fineID的传输照旧，但coarseID的传输分成校验位+数据位。
- 在传输coarseID前，先传输三次所有数为0的校验位。
- coarseID的低30位分成 $3 \times 10$ 位的子ID分次传输（数据位）。
- 该方法的触发号能一一对应。



解决方案	优缺点分析
用户直接用AIDA作为TLU	<ul style="list-style-type: none"> <li>时间戳和触发号均不对齐，事例对齐无法实现</li> </ul>
HPES-TLU的一路为AIDA设备输出专用信号	<ul style="list-style-type: none"> <li>损失1%质子。</li> <li>事例对齐可以实现，但需要额外的数据处理。</li> </ul>
用户直接接收HPES标准的触发信号，但DUT的电子学能做三点修改： <ul style="list-style-type: none"> <li>DUT-BUSY持续11个脉冲</li> <li>DUT-CLK只发11个脉冲</li> <li>增加接收cID的功能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>无质子损失</li> <li>事例号永远不重复</li> <li>事例对齐直接实现</li> </ul>

用户根据自己的能力和需求  
选择对应的方案



**40m 距离，单程120ns，握手时间过长**

- LEMS电子学接收触发信号时，生成一个localID [32位](连续10天不重复)
- 远端电子学将localID与数据打包，并上传。
- 近端电子学将localID、c&fID、数据打包，并上传。
- Offline分析时，根据localID将远端、近端探测器数据对齐。

Bit	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	TYPE [4 bits]				TRIGGER DATA [12 bits]												RESERVED [6 bits]						FINE TRIGGER ID [10 bits]									
1	COARSE TRIGGER ID [32 bits]																															
2	COARSE TIME STAMP [Lower 32 bits]																															
3	COARSE TIME STAMP [Upper 16 bits]																FINE TIME STAMP 0 [8 bits]								FINE TIME STAMP 1 [8 bits]							
4	FINE TIME STAMP 2 [8 bits]								FINE TIME STAMP 3 [8 bits]								FINE TIME STAMP 4 [8 bits]								FINE TIME STAMP 5 [8 bits]							
5	EVENT NUMBER [32 bits]																															
6	RESERVED [8 bits]																															

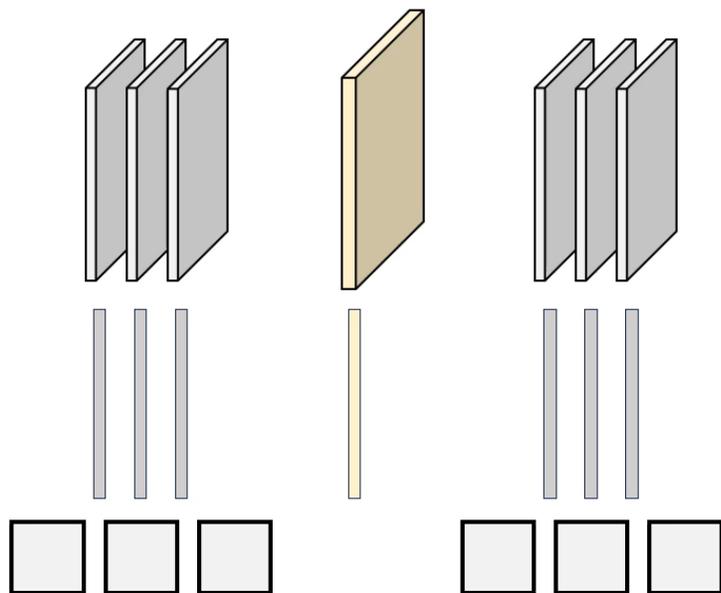
- **TYPE&TRIGGER DATA:** 用于标记事例信息
- **FINE & COARSE TRIGGER ID:** 用于记录事例触发号
- **COARSE TIME STAMP:** 48位，记录事例自开始实验时的时间戳，单位25ns，连续工作81天不重复。
- **FINE TIME STAMP:** 记录6个触发探测器在25ns内的触发时间，单位1.56ns
- **EVENT NUMBER:** 用于兼容AIDA2020标准，当TLU接入AIDA标准DUT时，发送低15位到DUT。



# B4.2 束流望远镜 (Telescope)

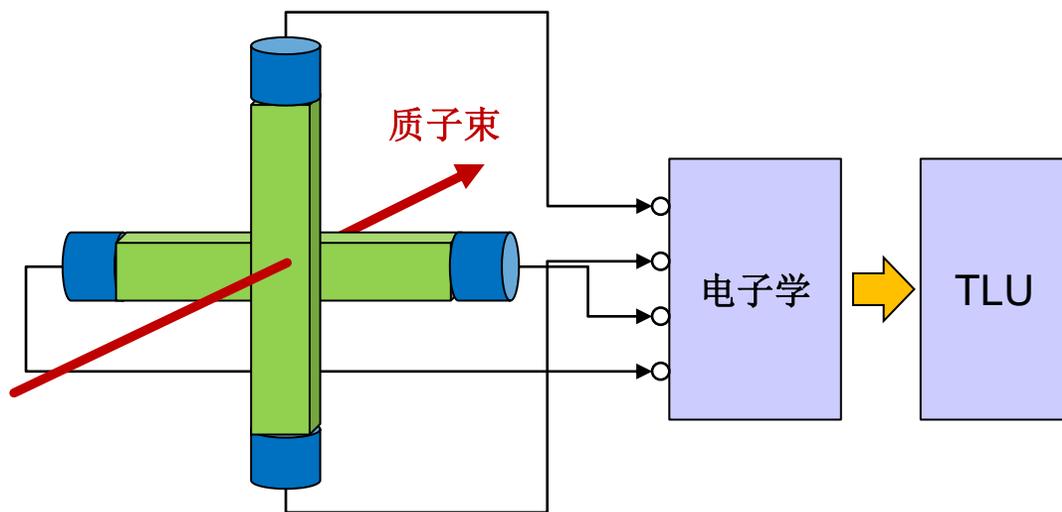
- 测量质子径迹，为位置探测器提供  $10\ \mu\text{m}$  精度的位置标定。
- 采用4~6片高精度位置探测器搭建束流望远镜，实现质子径迹高精度重建。

参数	需求
定位精度	$< 10\ \mu\text{m}$
探测器位置精度	$< 10\ \mu\text{m}$
总芯片数	4~6片



- γ 硅像素探测器 × 6
- γ 塑闪 × 4
- γ 数据采集系统
- γ 机箱与机械台架
- γ 温度、湿度监控系统
- γ 冷却系统

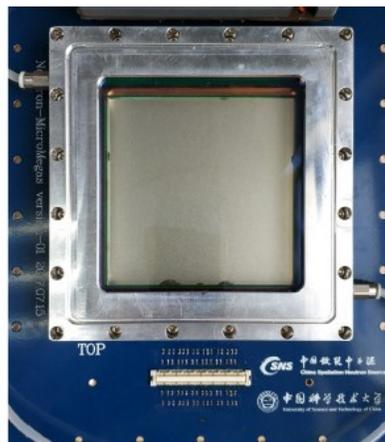
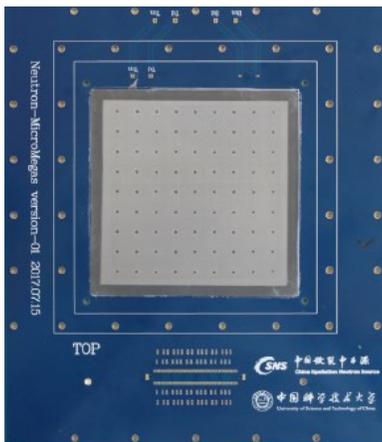
- 触发系统的作用：
  1. 为探测器测量提供时间窗口
  2. 提供触发号，将各探测谱仪的数据对齐，确保来自同一个质子事例。
- 探测器采用快响应闪烁体，时间分辨率好于 1 ns。
- 电子学采用高能所自研的FADC数据采集板卡。同时采集4路信号，采样率1Gsp/s。



# B4.4 束斑测量系统 (PALET)



- 束斑测量系统的作用：
  - 提供原始束斑分布
  - 为大面积、低精度位置探测器标定提供参考束流坐标参数
- 基于白光团队研究基础，采用本团队研发的微结构气体探测器(Macromegas)
- 电子学和数据获取系统开发已基本完备。



参数名称	参数值
计数率	10kHz
灵敏区面积	10cm*10cm
位置分辨率	150um
质子能量测量区间	0.8~1.6GeV

# B4.5 流强刻度系统 (PROUD)



- 质子流强刻度系统
- 作用：
  1. 调束，质子散射器工作状态调试，确保提供单粒子束流。
  2. 直接测量质子束流强度，为日常监测提供绝对流强数值。
- 要求：动态范围大 ( $10^3 \sim 10^{10}$  p/s)

