

# 环形正负电子对撞机带电粒子鉴别的 飞行时间探测器\*

牟家连<sup>1)2)</sup> 吕军光<sup>2)3)</sup> 孙希磊<sup>2)3)†</sup> 兰小飞<sup>1)‡</sup> 黄永盛<sup>2)4)</sup>

1) (西华师范大学物理与天文学院, 南充 637001)

2) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

3) (核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

4) (中山大学·深圳理学院, 深圳 518107)

(2022年11月28日收到; 2023年3月28日收到修改稿)

环形正负电子对撞机 (circular electron-positron collider, CEPC) 通过  $dE/dx$  的测量进行长寿命带电粒子的鉴别, 要求对  $dE/dx$  的测量达到约 3% 的精度. 但  $dE/dx$  的测量对带电粒子  $\pi/K$ ,  $\pi/P$  和  $K/P$  各有一个分辨盲区, 对应的横动量分别为 1 GeV/c, 1.6 GeV/c 和 2 GeV/c. 一种解决方案是采用高精度飞行时间 (time of flight, TOF) 探测器填补分辨盲区, 探测器系统的时间分辨要求小于 50 ps. 针对这一要求本文提出一种小颗粒飞行时间探测器, 具体方案为采用小块塑料闪烁体 (1 cm  $\times$  1 cm  $\times$  0.3 cm) 侧面耦合硅光电倍增管读出. 介绍了该探测器的构建以及利用  $^{90}\text{Sr}$  电子准直源和高速波形采集电子学对该探测器的性能标定. 结果显示, 采用恒比定时法, 该探测器的时间分辨约为 48 ps, 可以满足 CEPC 对飞行时间探测器的要求.

**关键词:** 粒子鉴别, 飞行时间探测器, 硅光电倍增管, 飞行时间分辨

**PACS:** 29.30.Aj, 29.30.Ep, 29.20.db, 29.40.Mc

**DOI:** 10.7498/aps.72.20222271

## 1 引言

环形正负电子对撞机 (circular electron-positron collider, CEPC)<sup>[1]</sup> 被称为未来的希格斯粒子 (Higgs) 工厂, Higgs 粒子<sup>[2,3]</sup> 于 2012 年在欧洲核子研究中心 (european organization for nuclear research, CERN) 被发现. 这个发现虽然进一步证明了标准模型<sup>[4]</sup> 的完备性, 但是与之相关的物理问题并没有解决. CEPC 在质心能量为 240 GeV 的条件下运行时, 正负电子对撞的主要过程为  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ ,  $W^+W^-$ ,  $evW$ ,  $e^+e^-Z$ ,  $ZZ$ ,  $ZH$ <sup>[5]</sup>, 其中含有 Higgs 粒子产生的  $ZH$  过程占 2.5%. 高精度

的 Higgs 粒子质量<sup>[6]</sup>、电弱耦合常数、暗物质候选粒子<sup>[7,8]</sup> 等一系列参数以及超出标准模型的新物理都需要新的实验测试和验证. CEPC 的目标之一是将 Higgs 粒子质量的测量误差从 5% 降低到 1%. CEPC 作为 Higgs 工厂, 其多种探测器组成的谱仪, 在实现  $4\pi$  立体角覆盖、高精度的对撞顶点位置分辨、精确的粒子动量分辨以及高效的粒子鉴别能力后, 就能对所有中间矢量玻色子、Higgs、W 和 Z 玻色子的衰变末态进行精确重建<sup>[9,10]</sup>. 在衰变末态的长寿命粒子 (包括  $\gamma$ ,  $e$ ,  $\mu$ ,  $\pi$ ,  $K$ ,  $P$ ,  $n$ ) 进入主径迹室之前, 这些粒子可能已经经历了多重的短寿命共振态衰变. 在对撞能区内包含已知的共振态约有 280 多个, 而中间共振态群则更多. 谱仪通过

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3503600) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sunxl@ihep.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: lan-x-f@163.com

各层不同功能的探测器对末态长寿命粒子进行测量, 根据各种粒子的量子成分和物理守恒量原理对末态长寿命粒子的信息 (中微子除外) 进行分析和组合, 用来寻找未知的中间共振态. 其中一个重要的粒子鉴别功能是通过带电粒子的  $dE/dx$  的测量进行的, 但  $dE/dx$  的测量对  $\pi/K$ ,  $\pi/P$  和  $K/P$  的分辨分别在  $1 \text{ GeV}/c$ ,  $1.6 \text{ GeV}/c$  和  $2 \text{ GeV}/c$  附近各有一个盲区. 针对这一问题, 同时为了实现位置分辨能力, 本文提出了小颗粒高精度飞行时间探测器方案.

## 2 CEPC 带电粒子的鉴别和 TOF 探测器

### 2.1 CEPC 带电粒子鉴别的 $dE/dx$ 和 TOF 要求

CEPC 的基本结构类似圆桶状, 构成 CEPC 的探测器系统环绕着正负电子对撞区的束流管径向扩展排列, 从内向外的布局是顶点探测器 (vertex detector, VXD)<sup>[11]</sup>、径迹探测器 (track detector, Tracker)<sup>[12]</sup>、TOF 探测器、电磁量能器 (electromagnetic calorimeter, ECAL)、强子量能器 (hadron calorimeter, HCAL)、超导磁体和  $\mu$  探测器<sup>[13]</sup>.

径迹探测器涉及到长寿命带电粒子的鉴别 (particle identification, PID)<sup>[14]</sup>, 目前有两个方案: 时间投影室 (time projection chamber, TPC) 方案<sup>[15,16]</sup>; 硅径迹探测器 (Si-tracker) 加上气体漂移室 (gas drift chamber, DC) 的混合方案<sup>[17]</sup>. 这两个方案都给出带电粒子的电荷、在磁场内的径迹探测 (空间点精度  $100 \mu\text{m}$ ) 和动量精度 (0.1%). 第一个方案拟采用 220 层读出信号, 测量  $dE/dx$  的精度大约在 4.2% 的水平, 第二个方案测量  $dE/dx$  的精度可能接近 5% 的水平. 图 1<sup>[18]</sup> 为在  $dE/dx$  测量精度为 4.2% 和  $dE/dx$  测量精度为 3% 的情况下, 两带电粒子在不同动量下的分辨程度. 对于末态带电粒子的鉴别来说, 理想的目标是末态粒子的动量达到  $60 \text{ GeV}/c$  也能进行分辨. 带电粒子鉴别能力的提高, 能帮助我们确定带电粒子的种类, 从而可提高多级共振态组合分析的置信度.

$\pi/K$ ,  $\pi/P$ ,  $K/P$  的分辨各有一个盲区, 对应的横动量分别约为  $1 \text{ GeV}/c$ ,  $1.6 \text{ GeV}/c$  (未标出) 和  $2 \text{ GeV}/c$ , 如图 1 所示. 为了填补分辨盲区, 需要一个有效的 TOF 探测器来提高带电粒子之间的

分辨能力. 结合径迹探测器测得的带电粒子的动量和飞行径迹长度, TOF 探测器可测量带电粒子的飞行时间, 可有效鉴别  $\pi$ ,  $K$ ,  $P$  的种类. 相同横动量下质量不同的两个带电粒子的飞行时间差可表示为

$$t_2 - t_1 = \left(\frac{L}{c}\right) \left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{p^2}\right) \left(\frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_1 + \beta_2}\right), \quad (1)$$

其中,  $L$  为飞行长度,  $c$  为光速,  $p$  为横动量,  $m_i$  为质量,  $\beta_i = p/\sqrt{p^2 + m_i^2}$  为速度.

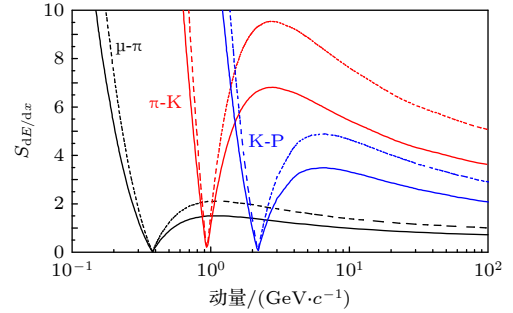


图 1 依据不同带电粒子  $dE/dx$  信息算得两带电粒子间的分辨程度  $S$  和横动量的关系, 实线代表  $dE/dx$  测量精度为 4.2%, 虚线代表  $dE/dx$  测量精度为 3%, 图中曲线依据碳材料的电离能损计算得到

Fig. 1. Based on the  $dE/dx$  information of different charged particles, the relationship between the resolution of  $S$  and the transverse momentum of charged particles is calculated. The solid and dashed line represent the  $dE/dx$  resolution of 4.2% and 3%, respectively. The curve in the figure is calculated based on the ionization energy loss of carbon material.

TOF 探测器的设计直径约为  $180 \text{ cm}$ . 在磁场为  $3 \text{ T}$  时, 带电粒子横动量只有超过约  $800 \text{ MeV}/c$  才可以穿出 Tracker 进入到 TOF 探测器. 对  $\pi/K$ ,  $\pi/P$ ,  $K/P$  的分辨,  $K/P$  对应的横动量要求最高, 需要覆盖到  $3 \text{ GeV}/c$ , TOF 探测器系统的时间分辨要求小于  $50 \text{ ps}$ , 其中包含了时间起点和时间终点, 如图 2 所示. 时间起点由加速器束流提供, 精度约为  $30 \text{ ps}$ . 用  $S$  表示两带电粒子之间的分辨程度, 以  $\pi$ ,  $K$  为例, 以  $dE/dx$  信息鉴别粒子的分辨程度为

$$S_{dE/dx} = \frac{\left| \left(\frac{dE}{dx}\right)_\pi - \left(\frac{dE}{dx}\right)_K \right|}{(\sigma_\pi + \sigma_K)/2}, \quad (2)$$

以飞行时间信息鉴别粒子的分辨程度为

$$S_{\text{TOF}} = \frac{|T_\pi - T_K|}{(\Delta T_\pi + \Delta T_K)/2}, \quad (3)$$

其中  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_\pi$ ,  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_K$  和  $\sigma_\pi$ ,  $\sigma_K$  代表  $\pi$ ,  $K$  的  $dE/dx$

平均测量值和相应的分辨率.  $T_\pi$ ,  $T_K$  和  $\Delta T_\pi$ ,  $\Delta T_K$  代表  $\pi$ ,  $K$  的飞行时间值和相应的时间分辨. 实验要求粒子对应横动量的双带电粒子分辨率接近  $2\sigma$  (准确度为 95.45%), 对应的  $S_{dE/dx} \sim 4\sigma_{dE/dx}$  或  $S_{TOF} \sim 4\sigma_{TOF}$ .

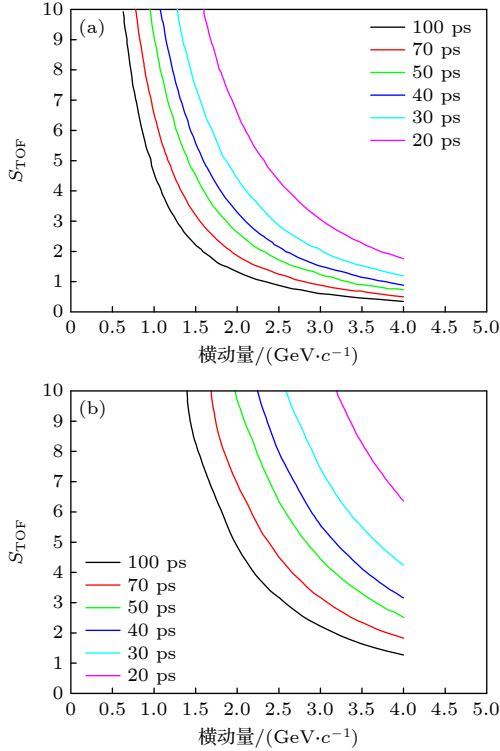


图 2 TOF 探测器分辨能力和带电粒子横动量的关系 (a)  $\pi/K$  分辨; (b)  $K/P$  分辨

Fig. 2. Relationship between TOF detector resolution and transverse momentum of charged particles: (a)  $\pi/K$  resolution; (b)  $K/P$  resolution.

TOF 探测器的设计方案应满足空间 (厚度) 小和尽量不影响 ECAL<sup>[19]</sup> 对  $\gamma$  的测量, 目前没有成熟的 TOF 探测器方案. 一种可能的解决方案是采用低增益雪崩探测器 (low gain avalanche detector, LGAD), 此方案满足时间分辨小于 50 ps 和单元尺寸小 (mm 级) 的要求. 但是 LGAD 方案需要数量巨大的读出通道, 导致电子学的造价昂贵. 本文提出另外一种探测器方案, 具体结构为基于结合硅光电倍增管 (silicon photomultiplier, SiPM) 读出的小颗粒塑料闪烁体, 塑料闪烁体尺寸为  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 0.3\text{ cm}$ , 侧面耦合 SiPM (EQR15 11-3030D-S) 阵列. 在实际的工程化安排中, TOF 探测器采用双层交错结构, 加上大面积灵敏的塑料闪烁体, 探测器之间可以相互覆盖组装的死区间隙, 使得测量的有效面积达到 80%, 提高了实验的探测效率.

## 2.2 实验安排

TOF 探测器模块由两块相同的塑料闪烁体 (BC-408)<sup>[20]</sup> 和两个  $[3 \times 3]$  SiPM 阵列所组成, 单个 SiPM 的有效面积为  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ , 微单元尺寸为  $10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$ , 如图 3 所示.

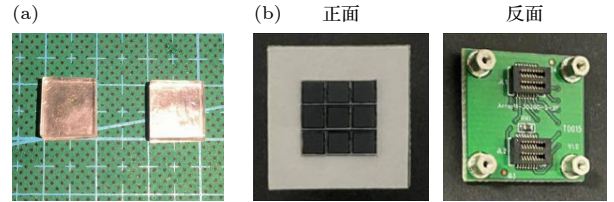


图 3 (a) 塑料闪烁体; (b) NDL SiPM  $3 \times 3$  阵列  
Fig. 3. (a) Plastic scintillator; (b) NDL SiPM  $3 \times 3$  array.

塑料闪烁体包裹的反射膜为镀铝薄膜<sup>[21]</sup>, 塑料闪烁体侧面和 SiPM 之间用硅油耦合. 两个塑料闪烁体平行贴合排列, 单个塑料闪烁体侧面有效耦合 3 个 SiPM, 耦合面积为  $3\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ . 实验方案是在两层塑料闪烁体上方放置  $^{90}\text{Sr}$  电子准直源 (孔径 2 mm), 利用能量大于 1.5 MeV (最大能量 2.28 MeV) 的电子穿过两块闪烁体. 实验示意图如图 4 所示. 实验中, 单个 SiPM 阵列放大倍数为 19 倍, 将 9 个 SiPM 的信号求和, 通过单路 SMA (Sub-Miniature version A) 连接器输出信号. 波形信号收集系统为示波器 (Tektronix DPO 7054 C) 和信号数字化仪 (CAEN DT5751). 高时间精度示波器的采样率为 20 GS/s, 即每隔 50 ps 采样一次. DT5751 采样率为 1 GS/s, 即每隔 1 ns 采样一次.

## 3 实验条件及测量结果

### 3.1 实验条件

实验中, 上层塑料闪烁体波形信号通道为 CH1, 下层塑料闪烁体为 CH2, 只有两路同时有信号才会被采集. 实验通过 DT5751 采集波形数据, 首先测量了宇宙射线在 TOF 探测器上的能量沉积并进行了能量刻度. 塑料闪烁体的宇宙射线最小电离能损为  $2\text{ MeV/cm}$ , 实验中使用的塑料闪烁体的厚度为 3 mm, 计算得到平均峰位对应约 600 keV. 塑料闪烁体信号较快脉冲波形底宽约 100 ns, 所以积分时间窗口为 500 ns. 通过处理波形数据得到了两通道的能谱和幅度谱 (图 5). CH1 通道的能量分辨率为 13.06%, CH2 通道的能量分辨率为 13.08%.

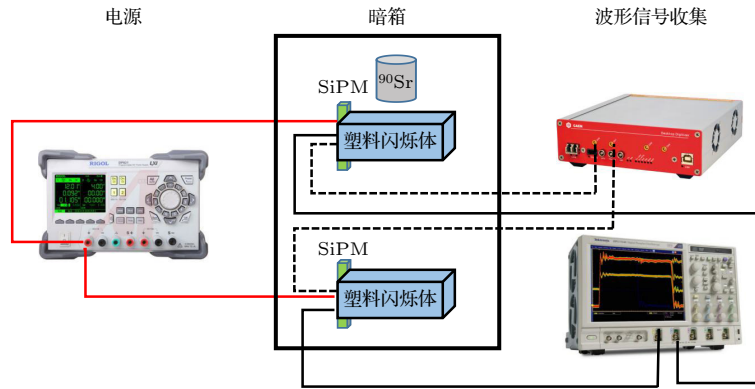


图 4 颗粒状 TOF 探测器测试系统

Fig. 4. Test system of granular TOF detector.

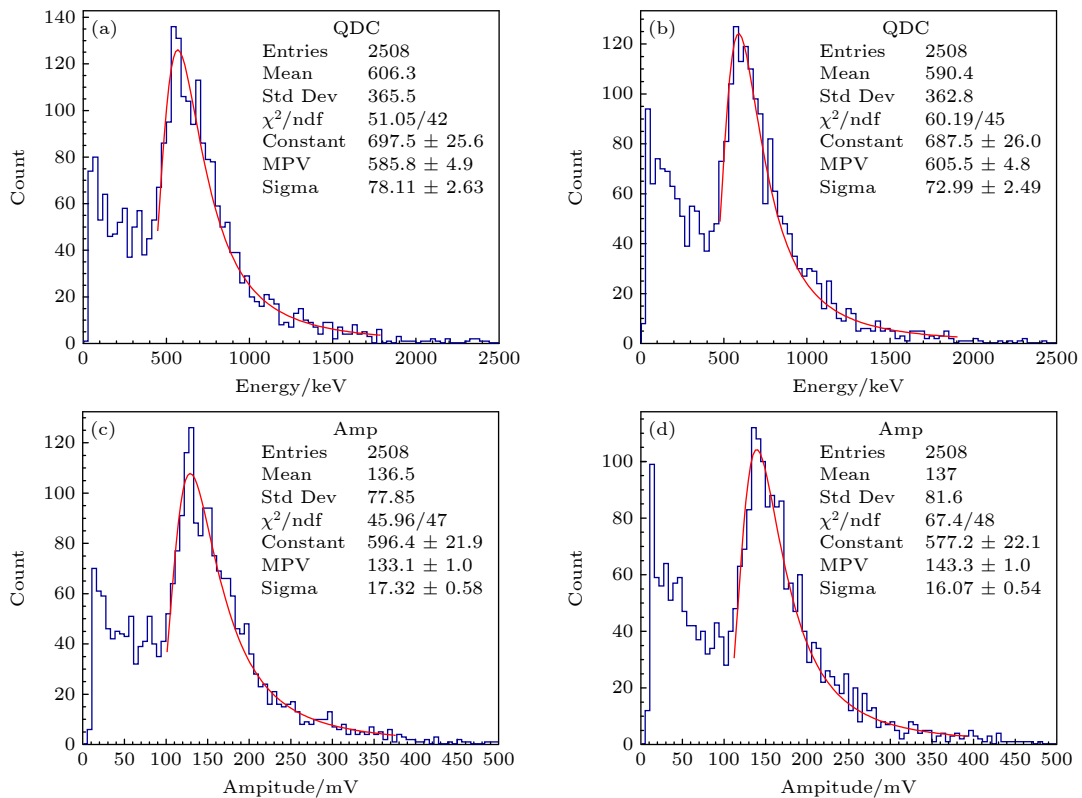


图 5 通过宇宙射线符合测量得到的能谱和幅度谱分布 (a) CH1 通道的能谱; (b) CH2 通道的能谱; (c) CH1 通道的幅度分布谱; (d) CH2 通道的幅度分布谱

Fig. 5. Energy spectrum and amplitude spectrum distribution obtained by cosmic rays coincidence measurement: (a) Energy spectrum of CH1 channel; (b) energy spectrum of CH2 channel; (c) amplitude distribution spectrum of CH1 channel; (d) amplitude distribution spectrum of CH2 channel.

由于宇宙射线穿过塑料闪烁体时有一定的角度, 测量飞行时间需要额外的探测器先进行定位, 这会增加电子学的复杂程度. 本方案没有定位探测器, 不同的宇宙射线事例击中塑料闪烁体后产生的闪烁光传输到侧面的 SiPM 阵列时会产生光程差, TOF 探测器的时间分辨受到影响会变差. 同时因为塑料闪烁体体积小, 收集到的有效波形信号数据极少, 所以接下来使用  $^{90}\text{Sr}$  电子准直源进行实验.

用  $^{90}\text{Sr}$  电子准直源进行测量, 同样得到了两个通道的能谱和幅度谱, 低能电子穿过塑料闪烁体沉积的能量比宇宙射线略高, 如图 6 所示. 宇宙射线的全能峰为朗道分布,  $^{90}\text{Sr}$  电子准直源的全能峰的分布则较为对称, 是因为宇宙射线穿过塑料闪烁体有  $\delta$  电子产生使能谱有拖尾. 对比分析图 5(a)、图 5(c) 和图 6 可以看出, 用  $^{90}\text{Sr}$  电子准直源进行实验得到的 CH1 通道的能谱和幅度谱, 与用宇宙射线进行

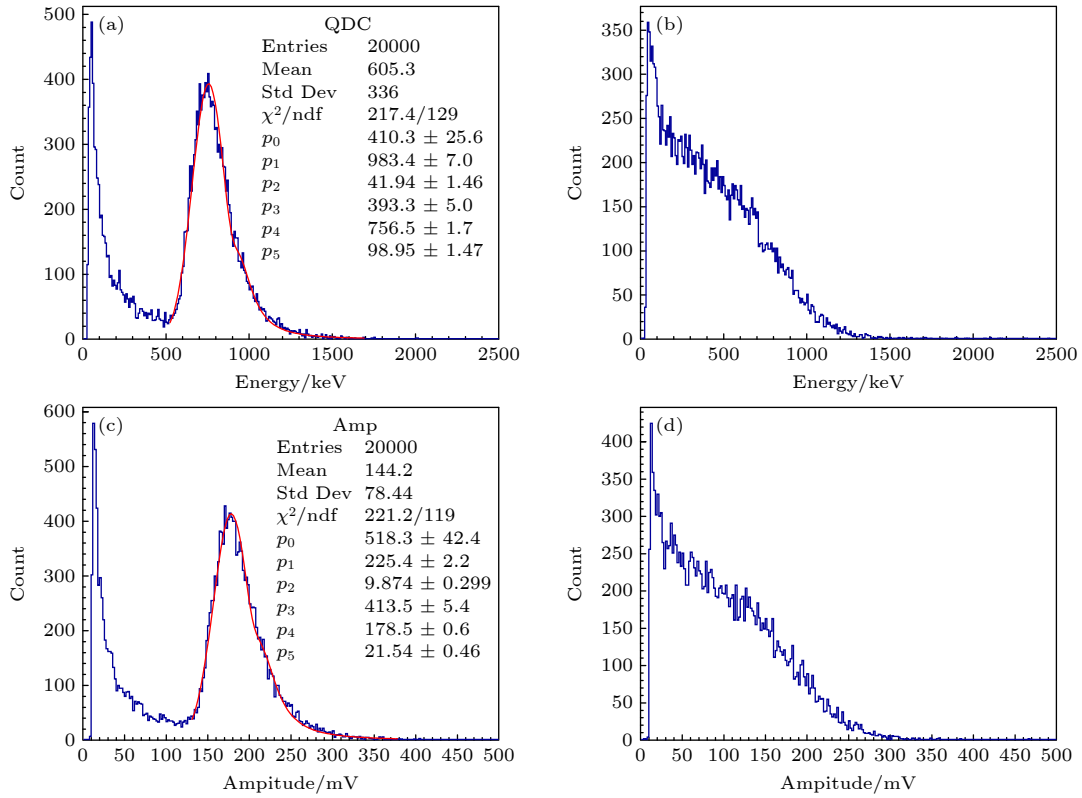


图6 通过 $^{90}\text{Sr}$ 放射源符合测量得到的能谱和幅度谱分布 (a) CH1通道的能谱; (b) CH2通道的能谱; (c) CH1通道的幅度分布谱; (d) CH2通道的幅度分布谱

Fig. 6. Energy spectrum and amplitude spectrum distribution obtained by  $^{90}\text{Sr}$  radiation source coincidence measurement: (a) Energy spectrum of CH1 channel; (b) energy spectrum of CH2 channel; (c) amplitude distribution spectrum of CH1 channel; (d) amplitude distribution spectrum of CH2 channel.

实验得到的两个通道的能谱和幅度谱近似, 可以证明 $^{90}\text{Sr}$ 电子准直源中的电子穿过了上层塑料闪烁体. 分析图6(a)可得, CH1通道的能量分辨率为13.08%. 沉积在下层塑料闪烁体的信号则与沉积在上层塑料闪烁体的信号完全不同, 如图6(b)所示.  $^{90}\text{Sr}$ 电子源中的电子能谱是连续分布的, 放射源中的低能电子没有穿过下层塑料闪烁体, 导致低能电子的能量全部沉积在塑料闪烁体内部, 所以CH2通道的能谱表现为连续分布.

用准直的 $^{90}\text{Sr}$ 电子源进行测量, 有效的波形信号数据多, 可以减小实验的测量误差. 由图5(c)、图5(d)和图6(c)可知, 穿过塑料闪烁体的事例表现为两个塑闪探测器的波形信号幅度都大于100 mV, 因此选取大于100 mV的穿过塑料闪烁体的事例来计算TOF探测器系统的时间分辨.

### 3.2 飞行时间分布

实验使用采样率为20 GS/s的示波器来测量TOF探测器系统的时间分辨, 取数条件为两个通道的波形信号幅度同时超过100 mV, 如图7所示,

由于作用效果的影响, 导致两通道的波形幅度的相对大小发生了变化, 但这两个波形图都是单个事例的有效波形信号. 飞行时间定义为带电粒子击中上下两个塑料闪烁体的时间差, 接下来将对TOF探测器测得的波形信号数据进行处理优化, 得到探测器的时间分辨.

恒比定时法是指在信号波形幅度的一个恒定比例点上产生过阈点. 该方法不仅修正了波形信号幅度, 还减少了时间的晃动. 恒比定时法计算飞行时间, 对应于计算两通道信号前沿达到阈值的时间差. 我们在得到波形信号的幅度后, 取阈值为不同的幅度占比值<sup>[22]</sup>, 计算对应的时间差数据, 用高斯函数拟合时间差数据. 图8(a)给出了阈值为波形信号幅度的10%时的飞行时间分布, 对应的飞行时间分辨为 $(48.79 \pm 0.57)$  ps. 为了得到最好的飞行时间分辨, 需要研究阈值的选择对时间分辨的影响, 于是计算了阈值从波形信号幅度的5%变化到30%这一范围内对应的时间分辨. 分析图8(b)可得, 当取阈值为波形信号幅度的10%时, 探测器的时间分辨性能最好.

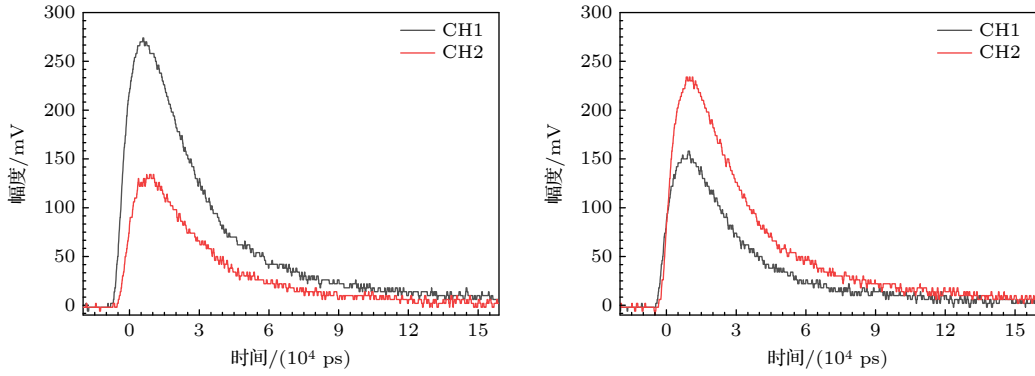


图 7 通过  $^{90}\text{Sr}$  放射源符合测量得到的单个事例的有效波形信号

Fig. 7. Effective waveform signal of a single case obtained by  $^{90}\text{Sr}$  radiation source coincidence measurement.

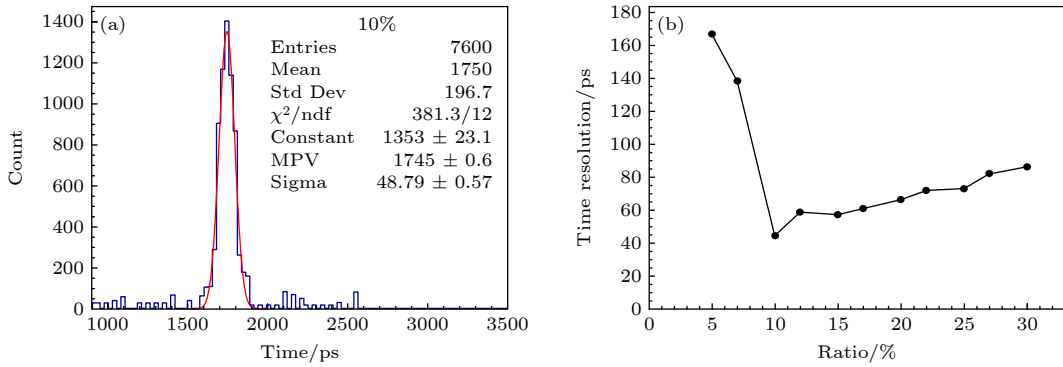


图 8 (a) 阈值为波形信号幅度的 10% 时的飞行时间分布; (b) TOF 探测器的符合时间分辨与波形信号幅度比例的关系

Fig. 8. (a) Flight time distribution when the threshold is 10% of the amplitude of the waveform signal; (b) relationship between coincidence time resolution and the amplitude ratio of the waveform signal for the TOF detector.

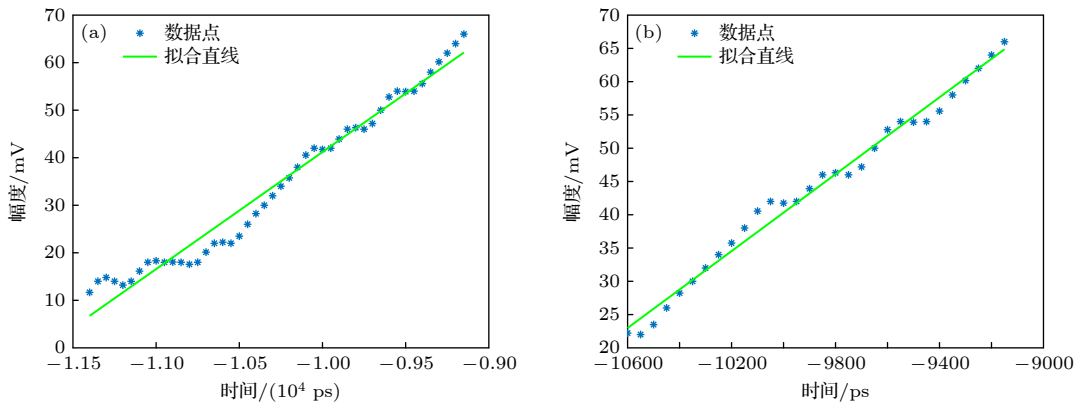


图 9 单个波形信号前沿的两个不同区间内的数据点与线性拟合图 (a) 区间为幅度的 5%—30%; (b) 区间为幅度的 10%—30%

Fig. 9. Graph of data points and linear fitting in two different intervals of the rising front of the waveform signal: (a) Range is 5%–30% of amplitude; (b) range is 10%–30% of amplitude.

使用恒比定时法计算飞行时间的分析, 只是针对波形信号前沿的数据点进行了处理. 为了优化时间分辨, 充分利用数据信息, 我们对波形信号前沿的低阈区间进行线性拟合处理<sup>[23]</sup>, 取波形信号前沿幅值的 5%—30% 和 10%—30% 的两个区间内的数据点进行拟合, 得到与  $x$  (时间) 轴的交点, 如图 9 所示. 将两路波形信号交点的横坐标相减,

计算两个通道的波形信号之间的时间差, 符合时间分辨的结果如图 10 所示. 这种方法大大提高了定时精度还消除了波形前沿数据点的抖动, 是目前最优的分析方法.

分析图 10(a) 可得, 选取前沿波形信号幅度的 5%—30% 区间内的数据点进行线性拟合, 得到两通路时间差, 高斯拟合后飞行时间分辨为  $(54.96 \pm$

0.54) ps. 分析图 10(b) 可得, 选取比值为 10%—30% 区间时, 飞行时间分辨为  $(151.4 \pm 1.7)$  ps. 数据处理结果显示, 当波形的数据点分析靠近波形前沿起始点时分辨要好, 但小信号容易受到基线噪声和光探测器件噪声的影响. 根据闪烁光传递原理分析, 脉冲最前沿的少量光电子信号对应直接传输到光探测器件的光子, 而脉冲前沿后部的光电子信号中包括大量多次反射的光子, 时间分辨受到影响会变差<sup>[24]</sup>.

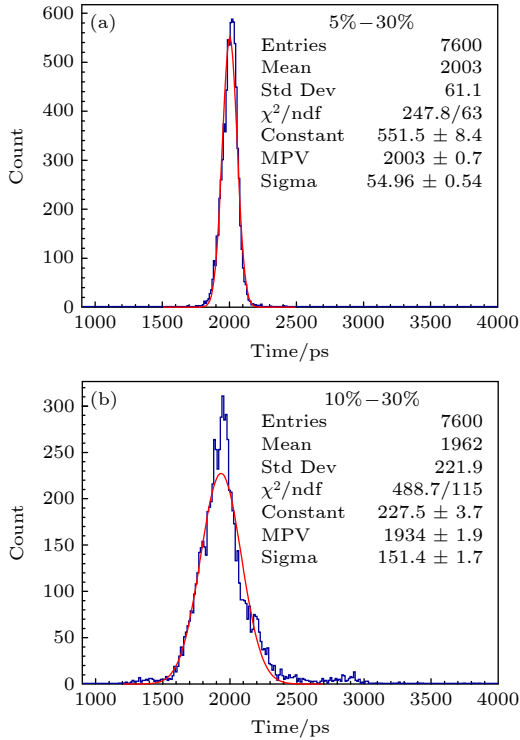


图 10 将有效事例的波形信号前沿的数据点进行线性拟合, 与  $x$  (时间) 轴交点的两个横坐标相减得到了时间差分布图 (a) 区间为幅度的 5%—30%; (b) 区间为幅度的 10%—30%

Fig. 10. Linear fitting of data points at the rising front of the waveform signal of effective cases, and the time difference distribution diagram is obtained by subtracting the two abscissa of the intersection point of the  $x$  (time) axis: (a) Range is 5%–30% of amplitude; (b) range is 10%–30% of amplitude.

#### 4 单路信号的时间分辨

传统的 TOF 探测器系统的时间分辨计算, 需要得到两路信号的波形信息. 通过对前面的数据进行处理, 利用恒定比定时法和低阈区间拟合都可以得到相对较好的符合时间分辨. 结合这两种波形分析方法, 在单路波形信号上取两个时间点, 一个时间点为阈值是幅度的 10% 时对应的横坐标, 另一个时

间点为波形信号上升前沿幅度的 5%—30% 的区间进行线性拟合后与  $x$  (时间) 轴交点的横坐标, 两个时间点相减得到单路信号的时间差, 如图 11 所示.

实验的取数条件为两个通道的波形信号幅度同时超过 100 mV, 由图 6(c) 和图 6(d) 的幅度谱对比可知, 由于实验测量使用的电子源能量低, 使得 CH2 通道中波形幅度小的事例数占比较多, 时间分辨容易受到噪声影响. 对比图 12(a) 和图 12(b)

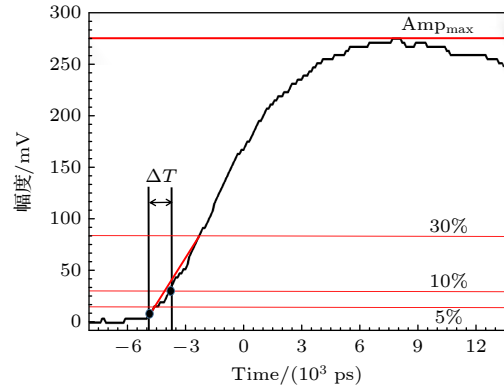


图 11 单路波形信号时间差的计算

Fig. 11. Calculation of time difference of single channel waveform signal.

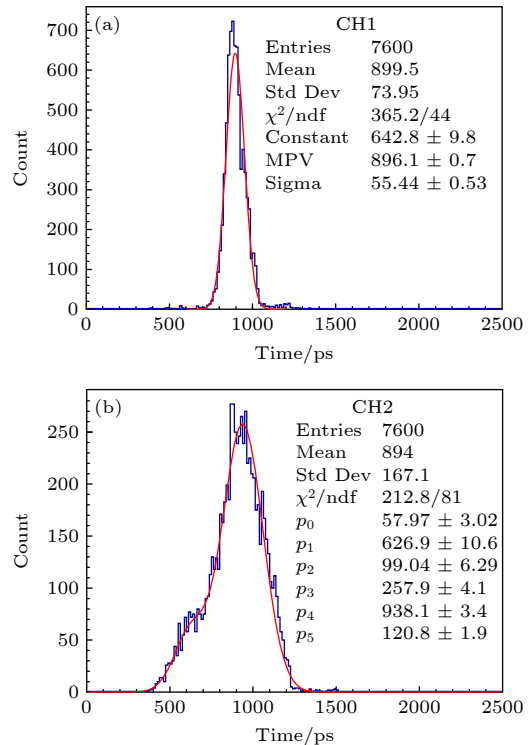


图 12 单路波形信号的时间差分布 (a) CH1 通道; (b) CH2 通道

Fig. 12. Distribution of the time difference of single channel waveform signal: (a) CH1 channel; (b) CH2 channel.

可得, CH2 通道的时间分辨确实比 CH1 通道的差. 于是把 CH1 通道的时间差用高斯函数进行拟合, 得到单路信号的时间分辨为  $(55.44 \pm 0.53)$  ps. 对比前文得到的时间分辨结果, 在测量飞行时间的实验中, 可以用 CH1 通道的时间分辨来预估 TOF 探测器的时间分辨.

## 5 结 论

本文研究了小颗粒塑料闪烁体侧面耦合 SiPM 阵列构成颗粒状 TOF 探测器, 采用恒比定时法, 该探测器的时间分辨达到  $(48.79 \pm 0.57)$  ps. 对波形信号前沿的低阈区间进行直线拟合处理, 该探测器的时间分辨为  $(54.96 \pm 0.54)$  ps. 这两种数据处理方法, 都可以让 TOF 探测器有较好的时间分辨. 组成 TOF 探测器的塑料闪烁体和读出方法仍然有改进的空间: 塑料闪烁体可以采用快发光的型号, 如用 BC404 代替 BC408; 采用塑料闪烁体正面耦合 SiPM 阵列, 耦合面积为  $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ , 增加了 SiPM 阵列的光收集. 如果  $dE/dx$  探测器使用强发光闪烁体, 这个探测器也可以作为高精度 TOF 探测器来使用. 于是在共用一套 SiPM 和混合电子学的情况下, 这个强发光闪烁体探测器能同时测得带电粒子的能量和时间信息.

CEPC-TOF 桶部探测器如果采用此实验的双层小颗粒单元结构, 总通道数会超过 130 万. 由于每次对撞事例末态长寿命粒子小于 300 个, 所以探测单元可以采用专用集成电路 (application specific integrated circuit, ASIC) 器件的编码标记和复用高精度波形电子学 (10 GS/s) 来测量波形信号前沿 (约 30 ns). 当复用程度为  $N = 512$  道/路时, 每路系统平均击中小于 0.25, 对应的高精度波形电子学可以压缩到 2600 路, 此方案正在研究和设计中.

CEPC 末态粒子的鉴别仍然是一个十分有挑战性的课题: 对于小于 800 MeV 的  $\mu/\pi$  的鉴别, 因为  $\mu$  和  $\pi$  无法穿过径迹探测器, 目前只有  $dE/dx$  信息, 所以  $\mu/\pi$  之间的分辨是比较差的, 而专门的  $\mu$  标记探测器在谱仪的最外层, 测量不到如此低的动量区; 对于小于 5 GeV 低能中性  $K_L^0$  的鉴别, 因为部分  $K_L^0$  在电磁量能器中发生作用之前没有留下其他作用痕迹, 在电磁量能器中的作用效果与  $\gamma$  相似, 需要设计一个具有高时间精度并且具有位置分辨能力的电磁量能器来进行分辨.

感谢中国科学院大学司梅雨博士、北京有色金属研究总院王承二博士和西华师范大学李朝阳硕士的讨论.

## 参考文献

- [1] CEPC Study Group 2018 arXiv: 1809.00285[hep-ex]
- [2] An F, Bai Y, Chen C, Chen X, Chen Z, Da Costa J G, Zhou N 2019 *Chin. Phys. C* **43** 043002
- [3] Cai C, Yu Z H, Zhang H H 2017 *Nucl. Phys. B* **921** 181
- [4] Zheng T, Xu J, Cao L, Yu D, Wang W, Prell S, Cheung Y E, Ruan M 2021 *Chin. Phys. C* **45** 023001
- [5] Chen C, Mo X, Selvaggi M, Li Q, Li G, Ruan M, Lou X 2017 arXiv: 1712.09517[hep-ex]
- [6] Chen Z X, Yang Y, Ruan M Q, Wang D Y, Li G, Jin S, Ban Y 2017 *Chin. Phys. C* **41** 023003
- [7] Liu Z, Xu Y H, Zhang Y 2019 *JHEP* **6** 1
- [8] Cao Q H, Li Y, Yan B, Zhang Y, Zhang Z 2016 *Nucl. Phys. B* **909** 197
- [9] Chang W F, Ng J N, White G 2018 *Phys. Rev. D* **97** 115015
- [10] Bai Y, Chen C H, Fang Y Q, Li G, Ruan M Q, Shi J Y, Wang B, Kong P Y, Lan B Y, Liu Z F 2020 *Chin. Phys. C* **44** 013001
- [11] Chen L J, Zhu H B, Ai X C, Fu M, Kiuchi R, Liu Y, Liu Z A, Lou X C, Lu Y P, Ouyang Q, Zhou Y 2019 *RDTM* **3** 1
- [12] Liang H, Zhu Y, Lai P Z, Ruan M 2022 arXiv: 2209.00397[phys.ins-det]
- [13] CEPC Study Group 2018 arXiv: 1811.10545[hep-ex]
- [14] Zhang H 2019 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [张辉 2019 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [15] An F, Prell S, Chen C, Cochran J, Lou X, Ruan M 2018 arXiv: 1803.05134[phys.ins-det]
- [16] An F, Prell S, Chen C, Cochran J, Lou X, Ruan M 2018 *Eur. Phys. J. C* **78** 1
- [17] Xin S 2021 *Bull. Am. Phys. Soc.* **66** 5
- [18] Chiarello G, Corvaglia A, Grancagnolo F, Miccoli A, Panareo M, Tassielli G F 2019 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A* **936** 503
- [19] Dong M Y 2018 *JINST* **13** 030001
- [20] Ackermann U, Egger W, Sperr P, Dollinger G 2015 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A* **786** 5
- [21] Wang F M, Heng Y K, Wu C, Zhao X J, Sun Z J, Wu J J, Zhao L, Zhao Y D, Jiang L L 2006 *High Energy Phys. Nucl. Phys.* **30** 776 (in Chinese) [王凤梅, 衡月昆, 吴冲, 赵小健, 孙志嘉, 吴金杰, 赵力, 赵玉达, 蒋林立 2006 高能物理与核物理 **30** 776]
- [22] Li S L, Heng Y K, Zhao T C, Fu Z W, Liu S L, Qian S, Liu S D, Chen X H, Jia R, Huang G R, Lei X C 2013 *Chin. Phys. C* **37** 016003
- [23] Wiener R I, Surti S, Kyba C C M, Newcomer F M, Van Berg R, Karp J S 2008 *2008 IEEE Nucl. Sci. Conf. R. Dresden, Germany, October 19–25, 2008* p4101
- [24] Qian S, Fu Z W, Ling Z, Wang Y F, Heng Y K, Qi M 2010 *Proceedings of the 15th National Annual Conference on Nuclear Power Sub-science and Nuclear Detection Technology Guiyang, China, August 13, 2010* p225 (in Chinese) [钱森, 付在伟, 宁哲, 王贻芳, 衡月昆, 祁鸣 2010 第十五届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集 中国贵阳, 2010年8月13日, 第225页]

# Time of flight detector for charged particle identification based on circular electron-positron collider\*

Mou Jia-Lian<sup>1)2)</sup> Lü Jun-Guang<sup>2)3)</sup> Sun Xi-Lei<sup>2)3)†</sup>  
 Lan Xiao-Fei<sup>1)‡</sup> Huang Yong-Sheng<sup>2)4)</sup>

1) (*School of Physics and Astronomy, China West Normal University, Nanchong 637001, China*)

2) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China*)

4) (*School of Science, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China*)

( Received 28 November 2022; revised manuscript received 28 March 2023 )

## Abstract

The circular electron-positron collider (CEPC) requires a 3% precision in the measurement of  $dE/dx$  to identify long-lived charged particles. However, the measurement of  $dE/dx$  has a blind area for each of charged particles of  $\pi/K$ ,  $\pi/P$ , and  $K/P$ , having transverse momenta of 1 GeV/ $c$ , 1.6 GeV/ $c$ , and 2 GeV/ $c$  respectively. One potential solution is to use a high-precision time-of-flight (TOF) detector with a time resolution of less than 50 ps to fill in the blind area. To address this, we propose a small particle TOF detector that uses small plastic scintillators (1 cm  $\times$  1 cm  $\times$  0.3 cm) silicon photomultipliers for readout. In this work, we introduce the construction of the detector and calibrate its performance by using  $^{90}\text{Sr}$  electron collimators and high-speed waveform acquisition electronics. Using a constant fraction timing method, we find that the time resolution of the detector is about 48 ps, satisfying the CEPC's requirements for TOF detection.

**Keywords:** particle identification, time of flight detector, silicon photomultiplier, time of flight resolution

**PACS:** 29.30.Aj, 29.30.Ep, 29.20.db, 29.40.Mc

**DOI:** 10.7498/aps.72.20222271

\* Projected supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFB3503600).

† Corresponding author. E-mail: [sunxl@ihep.ac.cn](mailto:sunxl@ihep.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [lan-x-f@163.com](mailto:lan-x-f@163.com)



## 环形正负电子对撞机带电粒子鉴别的飞行时间探测器

牟家连 吕军光 孙希磊 兰小飞 黄永盛

### Time of flight detector for charged particle identification based on circular electron-positron collider

Mou Jia-Lian Lü Jun-Guang Sun Xi-Lei Lan Xiao-Fei Huang Yong-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 122901 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222271

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222271>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 多气隙电阻板室飞行时间谱仪技术

Time of flight technology based on multi-gap resistive plate chamber

物理学报. 2019, 68(10): 102901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182192>

#### 基于微波-电子康普顿背散射的环形正负电子对撞机束流能量测量方案

Circular electron-positron collider beam energy measurement scheme based on microwave-electronic Compton backscattering

物理学报. 2021, 70(13): 131301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202081>

#### 光电倍增管时间测量误差补偿方法研究

Method of compensating for time measurement error of photomultiplier tube

物理学报. 2022, 71(22): 222901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221193>

#### 基于太赫兹脉冲加速及扫描电子束的高时间分辨探测器

High time-resolution detector based on THz pulse accelerating and scanning electron beam

物理学报. 2022, 71(2): 028501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210871>

#### 高时间稳定性的雪崩光电二极管单光子探测器

Avalanche photodiode single-photon detector with high time stability

物理学报. 2020, 69(7): 074204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191875>

#### 光子对撞机产生正负电子对的数值方法

Numerical method of electron-positron pairs generation in photon-photon collider

物理学报. 2020, 69(1): 019501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190729>