



BESIII缪子探测器

谢宇广 中国科学院高能物理研究所



超级陶粲装置研讨会

2025-07-04

内 容

- ▶ BEPCII和BESIII概况
- ▶ BESIII-µ子探测器方案
- ▶ BESIII-µ子探测器研制
- ▶ BESIII-µ子探测器粒子分辨性能
- ▶ RPC在中国的应用推广
- ▶ 总结

申明:本报告内容来源本人及BESIII u探测器组的工作,部分来源于高能所相关项目资料及公开网络,一并致谢! BESIII u探测器组:张家文、谢宇广、刘倩、韩纪锋、钱森、张清民等。

一、BEPCII和BESIII 概况

北京正负电子对撞机(The Beijing Electron Positron Collider, BEPC) 是中国高能物理事业的根基, 1988年建设完成第一代, 2005年建设成功第二代(BEPCII)包括有注放器、储存环、传输线、北京谱仪III(BESIII)和北京同步辐射装置(BSRF)。BEPCII开启中国高能物理新时代。



▶ 北京谱仪III(BESIII)





2008年开始运行,至今BESIII合作组共发表600多篇SCI学术论文,在Tao-Charm物理领域取得大量 世界领先成果!

BESIII-µ子探测器方案 -,

▶ µ子探测器分类

	柱建西北	能量范围	探测信息	探测结构	探测面积	实现成本
探测方	行外安水	MeV~PeV	精确击中位 置或径迹	多层结构 大立体角	大面积> 500m ²	高性价比
	正比管 PT	\checkmark	\checkmark	\checkmark	×	低
与	塑料流光管 PST	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	低
体	漂移管 DT/MDT	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	较高
探	小间隙室 TGC	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	较高
测	阴极条室 CSC	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	较高
	阻性板室 RPC	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	低
固体	闪烁计数器 SC	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	较高
探测	半导体探测器 SD	\checkmark	\checkmark	\checkmark	×	很高
液体 探测	液闪(LS)或水	\checkmark	×	×	\checkmark	较高
组合	DT+ CSC+ RPC (CMS)	\checkmark	精确位 置、 径迹和动量	\checkmark	\checkmark	较高
探测	MDT+CSC+RPC+ TGC (ATLAS)	\checkmark	精确位 置、 径迹和动量	\checkmark	\checkmark	较高

5

- ➢ BESⅢµ子探测器需求
 - ◆ 满足BESⅢ物理目的要求
 - •尽量大的覆盖立体角(结构设计)
 - ◆ 较高的探测效率 (≥95%)
 - ◆ 较低的截止动量 (μ子: 0.1~2GeV/c)
 - ◆ 较好的位置分辨 (30mm左右)
 - 较优的μ/π分辨 (dE/dx 难分辨)
 - 较长的使用寿命 (~10年)
 - 合理的制造成本(主要考量之一)



					-
物理目标	描述	衰变道	测量物理量和态	32 RESU	BESIII
	粲物理-纯轻子衰变	$\int D^+ \rightarrow \mu^+ v_{\mu}$	f_D		PDC
弱相互作用		$D_{s}^{+} \rightarrow \mu^{+} \nu_{\mu}$	J_{D_s}	Active Type F1	KPC .
	CKM 矩阵元精确测量	$D^0 \rightarrow K^- e^+ v_e$	V_{cs}	2^{28} Layers 3	9
	(粲物理-半轻子衰变)	$D^0 \rightarrow \pi e^+ v_e$	V_{cd}	$ = \mu \lambda \pi K p D $	1.0
	轻子普适性精确测量	τ→X	m_r , m_{ν_r}		1.0
	<i>肉曲</i> 四 北松了京亦	$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$	BR	\downarrow 24 \square Solid angle (4 π) 0.67	0.9
	采初理一非程于衰变	$D_{5}^{+} \rightarrow \phi \pi^{+} \dots$	BR		> 05
	介子谱	$J/\psi \rightarrow M$	0** , 2**		295
强相互作用	重子谱	$J/ \psi \rightarrow B$	N^* , Λ^* , Σ^* , Ξ^*	$\overline{\overline{\mathbf{J}}}^{20}$ (mrad) 30	< 50
	胶子球	J/ψ→ΥG	f ⁰ , E		-50
	混杂态	J/ ₩ → H	0, 1-+, 3-+,	$\frac{8}{16}$ σ (mm) 68	< 30
	OCD 测量及检验	T/ ur → X	α , R , $\alpha(s)$, f		-50
		$D^0 \rightarrow k^- \pi^+$		$P(\pi \rightarrow \mu) @ 1.0 GeV (\%)$ 15	<5
	レールではロ		'D PP	\square 12 \square Parlament at $(\square - n^2)$ >0.19	>10
新物理寻找	轻丁 <u>奴</u> 做小衰变	$\tau \rightarrow i X$	DK	Dackground rate (H2/Chi) >0.1	/10
	CP/T 破坏	$\tau \tau \rightarrow \mu \nu_{\mu} \nu_{\tau} + e \nu_{e} \nu_{\tau}$	А	Longevity (a) 5~10	5~10
	<u></u> 味道改变甲性流	$D \rightarrow \pi \mu \mu$, $D \rightarrow \rho \mu \mu$,	BR		
注: M-介子态,	B-重子态,G-胶子球态,	H—混杂态, X—相关末态, $l=e, \mu$			
				Momentum (GeV/C)	U

几种µ子探测技术比较

	CSC	MDT/DT	MRPC	TGC	SRPC
空间分辨[μm]	100	150	15mm	1mm	15mm
时间分辨[ns]	25	40	0.075	25	2
平均效率[%]	98	98	95	99	95
计数性能[Hz/cm ²]	200	500	500	1000	100
电子学依赖	А	А	А	В	С
软件依赖	А	В	С	В	С
工艺要求	А	А	В	В	С
单道成本	Н	Н	М	М	L



流光模式RPC宇宙线信号波形 (无前放)

在20年前,闪烁体作为μ探测器方案成本很高,气体探测器是唯一选择。 RPC工艺要求不高,成本较低,其性能可满足物理要求,是最容易实现国产化的合理的技术方案。 BESIII μ子探测器,最终采用了国产无油酚醛树脂RPC方案。玻璃因为密度较大,易碎,没有采用。

7



三、BESIII µ探测器研制

▶ 国产RPC的创新

	RPC主要问题	解决方案
1	噪声高	采用酚醛树脂(电木),提高内表面光洁度,减少毛刺,RPC室老练
2	老化, 效率下降	不涂油,内表面压膜、PRC室老练
3	工作电压高	降低体电阻,平衡暗计数
4	生产工艺	改进电木压板,采用洁净间制作

BESIII µ探测器是首个完全国产化的探测器子系统!



淋油RPC老化问题

国产无油电木表面光 洁度提高明显: BESIII: 264~528nm BaBar: 783~996nm







▶ 概念设计

基于物理目标、模拟和估算,考虑造价和技术实现,提出 合理技术方案和性能指标要求。例如:



P(π → μ): 根据D/Ds 产生μ子动量分布及模拟给出μ子效率与 π误判率,确定P(π → μ)<5%@1GeV的合理指标。



性能研究

实验分类	实验名称	实验目的	实验结果
	气体比分	确定适当工作气体比分	Ar:F134a:Iso-B=50: 42: 8
	甄别阈值	确定合理电子学甄别阈	100mV
分粉	信号幅度	信号特征及幅度分布	200ns, >200mV,"Gaus"+"Landau"
参 <u>级</u> 优化		电阻率对性能的影响及	对温度敏感,指数下降,低阻对效率
实验	电阻率	合理电阳率范围	坪有利,高阻对减小噪声和暗电流有
~~			利: $2.0 \times 10^{11} \Omega$ ·cm to $2.0 \times 10^{12} \Omega$ ·cm
	湿气	气体湿气成分的影响	效率下降, 计数增加, 需避免
	温度	温度对性能影响	影响显著,温度较高有利,需控制
	中子辐照	山子垣昭影响	最高 1.0×10 ⁵ rad 剂量,10 年 BESIII
辐照		中丁福照影响	照射总和;性能略有降低,可恢复
损伤	中又行四	中乙痘照得炸	计数增加, 3.2×10 ¹⁰ 个电子辐照的剂
实验	电丁油照	电于抽照预切	量,以 0.052 Hz/cm ² 连续照射 10 年
	光子辐照	光子辐照影响	效率变化小,计数增加,信号被压制
	信号幅度	背景辐照下幅度谱	"Gaus"+"Landau",信号被压制
束流	计数性能	流光计数率性能	100Hz/cm ² ,低阻板室有利
测试	主会影响	强业之痘腐影响	总照射量约 1.38×10 ⁹ 光子/cm ² ,
	万 叩 彩 响	5里7日丁 祖照泉》明	142Hz/cm ² 照射 10 个 BESIII 运行年
长期稳定	匕曲杆始	帮你的时间的亦作	趋于稳定,效率保持高水平,
性实验 长期性能 性能随时间的变		工化随时间的变化	计数率和暗电流处于低水平

+ templet 1

• templet 2

+ templet 3

去 templet 4

+ templet 5

- templet 6

1.1.1

28

26





12





光子使暗电流先抑制后增长, 说明随强度增加Iso-B吸收光子的作用 被抵消,达到饱和后暗电流开始增加



E3实验束 束流: e+, e-, p, π 800MeV 束流的事例率约2Hz, 单点测试时间约40分钟 离线挑选出π和质子

RPC室1#3#5#8#电阻率[Ω ·cm]2.45×10¹⁰2.41×10¹¹3.91×10¹²1.36×10¹³辐照点:0、50、200、500和1000Hz/cm²



光子的抑制效应与已有实验相符 电离电荷的减少是暗电流降低的直接原因





电子辐照影响

长期稳定性

暗计数受抑制 (Training效果), 效率基本无影响



中子辐照影响 (10天左右可恢复)









延续约2年测试。影响因素:工艺,湿度、辐照等。

15

▶ RPC生产工艺

关键点:

- 原材料:阻性板、石墨、 胶粘固化剂、垫片、气嘴、 边条。重点优化阻性板配 比和压制工艺。
- 洁净和湿度控制:减少灰 尘,减少水份吸附,降低 暗计数。
- 加压固化:保证平面度, 垫片粘接牢固均匀,避免 脱胶流胶。

共制作近1000个RPC室,1300 平米,工艺合格率>97%









▶ 质量控制

裸室性能

900多块

检测分类	检测内容	检测方法
	阻性板电阻率、石墨面电阻	多点伏安法测量
国针科校卿	铜铂、气嘴和垫片外观尺寸	目测、直尺
原机杆位规	石墨成分, 胶成分	天平
	铝板厚度、缺陷	目测、直尺、
ppc 安佑经测	通气和气密性	15mm 水柱负压法(变化<5mm)
KPC 主的徑例	效率、计数率和暗电流	RPC 测 RPC 符合系统
	高压系统及联接	试加载法 (看暗电流)
措地氏是的检测	气体系统及联接	5mm 水柱负压法(变化<2mm)
医状则里的恒测	电子学系统及联接	测电阻法
	效率、暗电流、空间分辨	大型流光管或 RPC 符合宇宙线测试系统
· 注于145-13ml	系统联接	测噪声谱
女教位测	系统性能	利用触发系统进行宇宙线测试



体电阻和表面电阻



质量查询数据库

批量生产的质量控制和测试数据, 为了便于数据的查询和维护,建 立了一个质量控制数据库。 数据库: MySQL 查询界面: PHP http服务器: Apache 功能: 查询、添加

ERESTED BOR DETABLES	- 99 (Aurthon)		BREETER BOOR CATABASE	- 09 (Earthon)	
THU WILL BED	MAG HERDE BUL INC HOE AND		272 460 360	MAN MENEO BAU IAU SAU ARU	
the state theory of the st					
HILL HES			HELL NUS		
Itema	¹⁰ Phone agent the RPN name		Items	Plant Quines the DeputModelmane	10 14
EndCap	SM Postine C Bart @ Went	RPC	EndCap	Pontion GEast O West	252 IT
Inter Bare RPC	SM Seriou 010 020 030 040 SM Jame 01 02 03 04 05 04 07 08	* 16	Endow Bare RPC	Section @10 020 030 040	香韵
Batcap FBC	Inter EPC 0101 0102 0103 0201 0202 0203	重间	Todam PD2	5.001 01 01 03 04 05 06 01 08	2.14
Terinen Strankfulste	Tas		The Real Annual	Ho Stripe 64 Stripe Workthows 35 Off Minute 0	Off Yingai 10
Francisco RDC Techorogen	Marrol of EFC 034(6203-2		The phone of	Na. BDC 6	
5 L	FPC_ED 00408203-2 EPC_ED_Ked 00208203-3		inkao se o Petomanos	Tener BPC 02101101-1 02101102-1 02101103-1 02101201-1 021012 Ten 8000 0.955682 0.965822 0.985459 0.944355 0.94485	02-1 00101203-1 53 0.00450
Indiac Site Performance	Balvice_Op_Name 40013270 Balvice_Down_Name		Endrage SM Performance	Cra_8000(Eustra2) 0.439543 0.331071 0.577777 0.5822334 0.0512	543 0.827049
DATA	Graphic_Res(ECho) 2625 Up 420 Date 105		Barrel	Our_3000(jmmAilm2) 11.4849 6 45661 7 77608 7 23003 2.7052	8 10.8664
Barri Jare KPG	Performance of RFC 00418201-2		Berni Bars 3DC	The Counter may test Receil of The Separat child after Installation	
Extel FBC	and a set of the set o	nomicipe	BarriFEC	Hurs EE1L1 Tert_Tens 2007.3.5	
Barri Sarendoriak			Barril SuperModula	Tera(sC) 15-20 Hara(%) NULL	
Earth RPC Federater			Barrel BPC Performance	Christian S. Chr. N(1946) 7 Christian (2) 035091183425200 Planets: 0.933306 Resultances) 36 6554	
Banni SM Pottemaner			Barrel SM Performance	International In	ATTE CARGE
Others			Others		
Chanker Rentry			Charden Terretaine		
			CALIFORNIA AND AND AND AND AND AND AND AND AND AN		
STESTED BOT DATABASE	- 12 (Insta)	1.16	B HISTON HORE DATABASE	r 49 Bushas)	
214-20 405 20 25 20	- 12 (Instan) - May Albay ally illy any Albay	10	240 0010 250	vic - 92 Brashes) - 98cy Milling Bolly IIC NDA Alka	
1990 1991 1991 1994 1995 1990 1991 1993 1995 1990 1990 1995 1995 1990 1990 1995 1995 1995 1995 1995 1995	- 22 (Inches) ≪ay amage bity IAC woop Neg - ■ - 2 - 12 - 12 - 12 - 12 - 12 - 12 -	<u> </u>	2140 ente 220 	v (- 12 Instan) - Meg Annag Anty ILC NDG Ang 3 • R • 2 • 12 • 12 • 12 • 12 • 10 • 11 • 11	
Entrance The set of the set of The set of the set of the set of the set of the set the set of the set of the set the set of the set of th	- 32 (Inclus) energi antig IIO NOV Nev - a · 2 · 0 ☆ ☆ 4 - 7 10 · 10 - 10 0 - 5 withing into ted · 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0	513		× [• 12 [Testion] • Noφ Ministry Billy II() NOφ Mings ↑ • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	L 1 8
Erzett per offange zieg est g szeg . O . O . O ht they we find the se term ses Ender SurrModel	- 22 (Techen) - 28 () 28 () 28 () 28 () 80 () 80 () - 28 ()	در اور در ک	Items	× 2 • 20 (Instant) • 80 (Instant) • 8 (Instant) • 8 (Instant) • 8 (Instant) • 8 (Instant) • 10 (Instan	i
EREAL OF ALL AND ALL A		恩体性	THE STATE OF A STATE	V Contraction) May share and a fill fill when Many S a Contraction into Contraction into Contra	د <u>م</u> ر م
Extent over beträuter ZH (2) • • • • • • • Att (•) Kup (*konske dars over Barken Förerådeligk Barken Förerådeligk Barken Förerådeligk Barken Förerådeligk Barken Förerådeligk Barken Förerådeligk	- 12 [Technol) - Mag Alberg Bally III() ND() ND() - Mag Alberg Bally III() ND() ND() - Mag Alberg Bally III() ND() - Mag Alberg Bally III() -	总体性能公布	Internet and a second s	A Destant) All () Instant) All () Instant () Instant () All () All () All () All () All () All () All () All () All () All () All () All () All () All ()	电子学
Ender Sie Gescher und Staten und	Constant)	总体性能分布	Internet and a second s	Alexandro and a till the second and	电子学
Electric role on role of the set Z H Q ell Q Z Z Q 	• Direction) • Direction) • Direction) • Direction • Direction • Direction	恩体性能分布	Institut production of the second sec	Interface and a state stat	电子学 查询
Electric role on role of role of the role	Office (1990) Interface (1990) Office (1990) Interface (1990) Solect (1990) Interface (1990) Rare: RPC Performance Doministees at 9000000	恩体性能分布	International Control of the Control	Instantion Note that is a set of the set o	电子学查询
STRATE OF STRATE THOU OF UNDER ANY OF THOU OF UNDER ANY OF HE SAME SAME ANY OF HE SAME SAME ANY OF HE SAME SAME ANY OF HE SAME SAME ANY OF HE SAME ANY	• Direction) • Direction)	急体性 能分布 mbaa	Internet of the second secon	★ Treatment • Notion Balancia, Ballion, T.R.(*), Within Million • Notion Balancia Balancia • Notion FRC for Tex Hander Sector FRC Maller FRC Maller FRC Maller FRC Total FRC: 2056 Total FRC: 2056 T	电子学查询
Cherri and arrents TH Q: out q: The arrents TH Q: out q: The arrents Her e) has fire Maint Entre Fire Maint Entre Fire Performance Entre SA Defensions Entre SA Defensions	• Direction) • Direction) • Direction)	思体性 能分布 underate	Extract For Contractor The Contrecontractor The Contractor The Contractor The Contracto	★ 1 Treatment) → Normal Section (Section of the Construction of the Section	电子学查询
CHERTER FOR STRATE TH QU ONLY TRACK TH QU ONLY TRACK HAVE TH QU ONLY TRACK HAVE THE QUART STRATEGY OF HETER WAS FALSE STATEMENTS Barrel Barrel State FEC Barrel State FEC Barrel State FEC Barrel State FEC Barrel State Fectoresan Barrel State Fectoresan	Direction) Operation -Direction) -Direction -Direction) -Direction -Direction -Direction -Direction </td <td>急体性 能分布 utbeater utbeater utbeater Defense PRF Marganetic Defense Pr Marganetic Defense PRF Marganetic Defense PRF Marganetic De</td> <td>Ender Statement 200 Difference Statement 200 Difference Statement 200 Difference Statement 200 Difference Statement Enders Statement Enders Statement Enders Statements Enders S</td> <td>V Territory May Balling Bill (120 Wing King) No. (10) (10) (120 Wing King) No. (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10)</td> <td>电子学查询</td>	急体性 能分布 utbeater utbeater utbeater Defense PRF Marganetic Defense Pr Marganetic Defense PRF Marganetic Defense PRF Marganetic De	Ender Statement 200 Difference Statement 200 Difference Statement 200 Difference Statement 200 Difference Statement Enders Statement Enders Statement Enders Statements Enders S	V Territory May Balling Bill (120 Wing King) No. (10) (10) (120 Wing King) No. (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10)	电子学查询
Cherri and Strategies Th Question and Question Th Question and Question International Intern	Differention) Differention) office allowing that is I all to the point of the	尾体性 能分布 tablease	Addition of the second se	V V V V V V V V V V V V V V V V V V V	电子学查询
Charter For Stretcher TH Q) est Q TS Q TH Q) est Q TS Q HT C) est Q TS Q HT C) est Q HT C)	Difference Constant rest Select EV Select EV Select EV </td <td>尾体性 能分布 tablease</td> <td>Ender Frei eine Ender Frei eine Ende</td> <td>V Treatment • Mary Marking, Marky T.L.C. WDrigh Allery • Mark Carlos Series • Mark</td> <td>电子学查询</td>	尾体性 能分布 tablease	Ender Frei eine Ende	V Treatment • Mary Marking, Marky T.L.C. WDrigh Allery • Mark Carlos Series • Mark	电子学查询
Charter and any officients TH Q) will Q TE Q TH Q) will Q TE Q TH Q) will Q TE Q This and the set of the set This and the set of the set of the set This and the set of the set of the set This and the set of the set	Difference Difference Office Image: State of the st	息体性 能分布 Miles market	Ender Freiderich Ende	• •	电子学查询
Charter For Strengt TH Q: est q: TS Q: TH Q: est q: TS Q: Th Q: est q: TS Q: Th C:	Contraction Contraction <t< td=""><td>思休性 能分布 mathematical mathemat</td><td>Ender Freihenster Einige Fielenster Ender Fielenster En</td><td>• •</td><td>电子学查询</td></t<>	思休性 能分布 mathematical mathemat	Ender Freihenster Einige Fielenster Ender Fielenster En	• •	电子学查询
Charles Part of Partners TH Q: est q: TS Q: TH D: est q: TS Q: TS Q: est q: TS Q: es	Difference D	思休性 能分布 methodase until datase methodase	Entrance Processing The set of the	Image Image <th< td=""><td>电子学查询</td></th<>	电子学查询
Charles Part Control of Control o	Office (197) State (197) Office (197) State (197) Schert (197) State (197) <td>思休性 能分布 metrate</td> <td>Construction Construction Construction</td> <td>Image: Section 3 Image: Section 3 <t< td=""><td>电子学查询</td></t<></td>	思休性 能分布 metrate	Construction	Image: Section 3 Image: Section 3 <t< td=""><td>电子学查询</td></t<>	电子学查询
Cherton Part Derivation The Quest of Question Part of Question The Question Part of Question International Part of Question International Part Part of Question International Part of Question Part of Question International Part of Question Part of Question International Part of Question Part	Office (197) State (197) Office (197) State (197) Schert (197) State (197) Description Schert (197) <td>思保性 能分布 meterate meterate meterate meterate meterate meterate meterate meterate meterate meterate</td> <td>Construction Construction Construction</td> <td>• * * * * * * * * * * * * * * * * * * *</td> <td>电子学查询</td>	思保性 能分布 meterate meterate meterate meterate meterate meterate meterate meterate meterate meterate	Construction	• * * * * * * * * * * * * * * * * * * *	电子学查询

数据库查询页面

模块性能





探测器安装

安装进程:

2005年7月22日开始正式安装 8月28日完成了端盖的安装 9月24日开始桶部的安装 10月14日安装顺利完成 桶部40/50/60区2006年8月完成 检测内容: 气路畅通 高压加载 电子学信号读出 位置偏移 检测表明安装状况良好

μ子探测器是BESIII第一个完 成安装的子探测器!





SBE6C

50



东端盖

右

SEE1S

SEE1F

SEE2F

SEE2S

▶ 运行调试

运行调试是探测器安装后正式运行前非常重要的阶段,通常利用本底噪声、宇宙线、 或物理事例,优化探测器 工作参数(电压、阀值等),发现探测器软硬件各方面问题或偏差,进而修正到完全正常的状态。













0.6

0.5

0 2

0.7

0.6

0.5

0.3

0.2

1500

1500 2000

2000

调试完成性能指标表2-4 BESIIIµ探测器性能指标

性能参数		边计比标	实际指标				
		以 1 1 1 1 小	宇宙线	\mathbf{X} μ	$\pi\pi J/\psi(\mu\mu)$	所有	
平均效率		95	94.7	95.11	95.17	93.6	
计数率		$< 0.1 Hz/cm^2$	0.04 (随机触发)				
灾间众举	$\sigma_{R\Phi}$	< 20mm	19	18	19	17.6	
至內分析	σ_Z	< 30mm	23	21	22	22.5	
$P(\pi \to \mu)$ @	1GeV/c	< 5%	5.5% (蒙卡)				





蒙卡和数据对比

离线刻度

离线刻度是利用真实数据(宇宙线或对撞束流)对探测器单元信号、效率、噪声或测量量关系进行标定和校准的过程, 得到的刻度参数要放到模拟中以给出探测器实际的响应,才能将模拟与数据结果在误差范围内符合。



图 3-2 几何交叠修复例子.





3-3 RPC模块几何位置的校准

位置校准

Entries

Entries



表 3-1 不同水平的刻度参数

Level&Unit		Eff Cnt/NosRatio		Nucl
		$\%$ $(Hz/cm^2)/$		- Number
0	layer	$0\sim 100$	$0\sim 2/1$	9
1	module	$0\sim 100$	$0\sim 2/1$	136
2	strip	$0\sim 100$	$0\sim 2/1$	9152
3	pad	$0\sim 100$	_	559910

刻度参数



四、µ子探测器粒子分辨性能

MUC_Barrel_Layer_4

RPC-MUC running status(Jun. 2025), 17 years since 2008!







Barrel, loss rate: 2.94%

MUC EastEnd Seg 2(8/6/25 08:00:55) MUC EastEnd Layer 4(8/6/25 08:01:26) Entries 11689 Mean 227 RMS 139









MUC WestEnd Laver 1(8/6/25 08:00:56)

Endcap, loss rate: 1.6%

Major reasons: HV breakdown, and chamber leakage

Reference:red Current:black

Layer_4 64960 125.2 70.88

Entries Mean

BMS

Entries Mean RMS

77207 121.7 73.28

> MUC parameters for μ/π separation

 μ 的MUC击中深度随动量的变化

 μ 的MUC击中层数分布



\succ µ identification efficiency

 $e^+e^- \rightarrow \gamma \mu^+ \mu^ D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$



Tab. 24: μ^+ id	dentification	efficiencies in	various momentur	n and	d $\cos \theta$ bins for data.

c(0/)		Momentum (GeV/c)						
8(70)		(0.6,0.8)	(0.8, 1.0)	(1.0, 1.2)	(1.2, 1.4)			
	(-0.93, -0.8)	29.26 ± 1.58	60.49 ± 1.62	69.87 ± 1.41	76.01 ± 1.17			
	(-0.80, -0.60)	7.47 ± 0.61	47.30 ± 1.04	76.61 ± 0.74	83.57 ± 0.53			
	(-0.60, -0.40)	25.48 ± 1.09	77.53 ± 0.92	76.92 ± 0.79	80.23 ± 0.63			
	(-0.40, -0.20)	38.43 ± 1.30	80.06 ± 0.95	79.64 ± 0.81	84.16 ± 0.62			
225.0	(-0.20, 0.00)	45.11 ± 1.35	80.80 ± 0.98	81.29 ± 0.83	83.10 ± 0.67			
0080	(0.00, 0.20)	45.80 ± 1.32	78.74 ± 1.03	79.26 ± 0.84	84.21 ± 0.66			
	(0.20, 0.40)	41.58 ± 1.26	80.06 ± 0.94	81.55 ± 0.77	82.88 ± 0.62			
	(0.40, 0.60)	26.03 ± 1.19	75.08 ± 0.97	73.82 ± 0.83	76.61 ± 0.68			
	(0.60, 0.80)	6.86 ± 0.82	44.17 ± 1.42	68.74 ± 1.04	75.85 ± 0.79			
	(0.80, 0.93)	34.42 ± 3.83	66.88 ± 3.76	71.64 ± 3.18	74.21 ± 3.17			



Tab. 27: μ^- identification efficiencies in various momentum and $\cos\theta$ bins for data.

c(07-)	-	Momentum (GeV/c)					
8(%)		(0.6,0.8)	(0.8, 1.0)	(1.0, 1.2)	(1.2,1.4)		
	(-0.93, -0.8)	29.03 ± 3.65	60.74 ± 4.20	75.47 ± 2.96	78.10 ± 2.66		
	(-0.80, -0.60)	8.85 ± 0.91	42.93 ± 1.40	69.99 ± 1.01	77.28 ± 0.77		
	(-0.60, -0.40)	29.20 ± 1.20	76.86 ± 0.94	76.28 ± 0.81	80.15 ± 0.65		
	(-0.40, -0.20)	36.48 ± 1.24	77.92 ± 0.96	80.15 ± 0.80	82.49 ± 0.64		
225.0	(-0.20, 0.00)	42.58 ± 1.34	78.80 ± 1.00	79.52 ± 0.85	85.86 ± 0.62		
0080	(0.00, 0.20)	49.54 ± 1.45	78.58 ± 1.01	79.92 ± 0.86	82.86 ± 0.66		
	(0.20, 0.40)	40.60 ± 1.30	77.99 ± 1.01	79.13 ± 0.85	82.69 ± 0.65		
	(0.40, 0.60)	27.21 ± 1.10	74.02 ± 0.98	73.91 ± 0.82	78.42 ± 0.63		
	(0.60, 0.80)	6.85 ± 0.61	45.97 ± 1.02	73.34 ± 0.77	78.85 ± 0.58		
	(0.80, 0.93)	34.11 ± 1.62	58.58 ± 1.59	65.75 ± 1.46	71.51 ± 1.23		

26

\succ π mis-identification ratio

$$efficiency = \frac{N(total \rightarrow \mu) - N(\pi \rightarrow \mu)}{N(total) - N(\pi)}$$



通过物理道得到π误判为μ的概率<5%@1GeV

Fig. 23: The rates of misidentifying π^+ as μ^+ and data-MC differences in each momentum bin.

表 5.9: $\mu^+\mu^-$ 样本中 $\pi^+\pi^-$ 本底的来源

state	Br	$N(\psi') \times Br$
$\psi' \to \gamma f_2(1270) \to \gamma \pi^+ \pi^-$	$2.2 \pm 0.1 \pm 0.2 \times 10^{-4}$	23320
$\psi' \to \gamma f_0(1500) \to \gamma \pi^+ \pi^-$	$1.5\pm0.7^{+0.9}_{-0.4}\times10^{-5}$	1590
$\psi' \to \gamma f_0(1710) \to \gamma \pi^+ \pi^-$	$2.4\pm0.6^{+0.8}_{-1.1}\times10^{-5}$	2544
$\psi' \to \gamma f_4(2050) \to \gamma \pi^+ \pi^-$	$2.8\pm0.9^{+0.8}_{-0.6}\times10^{-5}$	2968
$\psi' \to \gamma f_0(2200) \to \gamma \pi^+ \pi^-$	$4.6\pm1.0^{+4.5}_{-0.9}\times10^{-5}$	4876
$\psi' \to \rho \pi \to \pi^+ \pi^- \pi^0$	$1.68 \pm 0.26 \times 10^{-4}$	17808



Physics results

0 100 200 f _{D+} (MeV)		
BESIII Combine BESIII Combine	$\frac{d}{d\tau} \tau v + \mu v$	253.93±1.54±1.82 252.08±1.34±1.82
BESIII 3.19 fb ⁻¹	PRL122(2019)071802, μν	253.0±3.7±3.6 +++
BESIII 6.32 fb ⁻¹	PRD104(2021)052009, μν	249.8±3.0±3.9 +++
BESIII 7.33 fb ⁻¹	PRD108(2023)112001, μν	248.4±2.5±2.2 ++
BESIII 10.6 fb ⁻¹	PRD110,052002, μν, D _s ⁺⁺ D _s	253.2±6.1±3.7 +++
BESIII 0.482 fb ⁻	¹ PRD94(2016)072004, μν	245.5±17.8±5. f 1
CLEO	PRD79(2009)052001, μν	256.7±10.2±4.0 1
BaBar	PRD82(2010)091103, μν	264.9±8.4±7.6 1
Belle	JHEP09(2013)139, μν	248.8±6.6±4.8 1
BaBar Belle BESIII 6.32 fb ⁻¹ BESIII 6.32 fb ⁻¹ BESIII 6.32 fb ⁻¹ BESIII 7.33 fb ⁻¹ BESIII 7.33 fb ⁻¹ BESIII 10.6 fb ⁻¹	PRD82(2010)091103, $\tau_{e,\mu}v$ JHEP09(2013)139, $\tau_{e,\mu,\pi}v$ PRD104(2021)052009, $\tau_{\pi}v$ PRD104(2021)032001, $\tau_{\rho}v$ PRL127(2021)171801, $\tau_{e}v$ PRD108(2023)092014, $\tau_{\pi}v$ JHEP09(2023)124, $\tau_{\mu}v$ PRD110,052002, τv , $D_{s}^{*+}D_{s}^{*-}$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
HFLAV21	PRD107(2023)052008	252.2±2.5 [▶]
CLEO	PRD79(2009)052002, $\tau_{e}v$	251.8±11.2±5.3 [₩] → [₩]
CLEO	PRD80(2009)112004, $\tau_{p}v$	257.0±13.3±5.0 [↓] → [●]
ETM(2+1+1) [']	PRD91(2015)054507	247.2±4.1 ►
FMILC(2+1+1)	PRD98(2018)074512	249.9±0.4 ±
FLAG21(2+1+1)EPJC82(2022)869	249.9±0.5

五、RPC在中国的应用推广

► BESIII MRPC-TOF (USTC)

80

70

60

50

40

30

20

10

0

±5.5

High Voltage (kV)

Time Resolution (ps)

每叠层: 6gap*220µm, 双叠层/模块 RPC:8 35.2cm 25mm 4mm RPC: 9 Electro Magnetic avers layers Calorimeter SC 55mm 0.4mm Solenoid~ 19.27mm 2.4cm Barrel āmm ToF Endcap 0.07mn ToF SC 3mm Quadrupole readoutstrip PCB Mylar honevcomb glass electrode 100 2400 🛛 Hit position: Cell 3 90 2000 104 2200 FEE's threshold: 150mV 1800 E 102 2000 80 1600 100 Efficiency (%) 1800 Efficiency(%) 1400 1400 1200 1000 1400 98 70 800 Entries 96 60 94 Ieft 800 **92** $\sigma = 69 \text{ ps}$ $\sigma = 60 \text{ ps}$ 800 right ---- Single-end's efficiency for p 50 ٢ 600 90 - Single-end's efficiency for π 600 • combine ---- Single-end's time resolution for p 400 400 88 40 ---- Double-end's efficiency for p 200 200 86 $-\Delta$ Double-end's efficiency for π ---- Double-end's time resolution for p -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 30 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 0 2 6 8 10 12 Λ Strip ID ∆t(ns) ∆t(ns) ±6.0 ±7.0 ±7.5 ± 6.5

采用MRPC升级端盖TOF,时间分辨得到显著提高!

31

玻璃RPC

- ▶ RPC 用于STCF µ子探测器
 - STCF: 2~7 GeV, 峰值亮度大于0.5*10³⁵ cm⁻²s⁻¹。
 - MUD要求: 突出的u和π鉴别效率
 - 未态粒子动量 (e/u/pi/k/p): 0.4~2GeV/c
 - 前端已有基于RICH的PID探测器
 - 计数率要求:~10Hz/cm^2
 - 目前方案: 内3层RPC (2D读出) +外7层闪烁条 (2D)
 - 铅 (10cm)+含硼PE(5cm)用于端盖内外层屏蔽中子

▶ 参考建议

- 1. 可考虑桶部和端盖最内层加中子屏蔽层, 全采用闪烁体方案。
- 2. 若考虑全RPC方案,内层条宽可适当减小,外层条宽可适当增大,并优化工作气体。
- 3. RPC方案建议用大尺寸裸室减小死区。模块采用抗弯结构增加强度减少弯曲变形。
- 4. 对比BESIII的单一维读出,STCF的单层二维读出模拟中没有看到明显作用,建议结合重建进一步验证模拟结果。

总 结

- ➢ BESIIIµ子探测器采用了完全国产化的无油酚醛树脂RPC,实现了 大面积的成功应用,性能良好,一直运行到现在,已经17年。
- ▶ RPC技术仍然有新的发展,是STCF项目中的µ子探测器很有吸引力的技术方案之一。

