

## 測定器入門およびBelle II測定器 ~動作原理、検出器のレイアウトなど~

田中秀治 (KEK)



## Belle II 実験の主題: B中間子

- 質量~5.28GeV
- B(u)クオークとdクオークで構成される 反dクオークとbクオークの場合、反B中間子 dの代わりにsで構成するものをBs中間子と 呼ぶ

BOTTOM MESONS  $(B = \pm 1)$  $B^+ = u\overline{b}, B^0 = d\overline{b}, \overline{B}^0 = \overline{d}b, B^- = \overline{u}b, \text{ similarly for } B^*\text{'s}$ 

・ 寿命~1.6ps		B <sup>+</sup> DECAY MODES	Scal Fraction (Γ <sub>i</sub> /Γ) Confide
$\Upsilon(4S)$ or $\Upsilon(10580)$ Mass $m = 10.5794 \pm 0.00$ Full width $\Gamma = 20.5 \pm 2.5$ $\Gamma_{ee} = 0.272 \pm 0.029$ keV	$I^{G}(J^{PC}) = 0^{-}(1^{-})$ 012 GeV 6 MeV (S = 1.5)	$\begin{array}{c} \ell^+ \nu_\ell \text{ anything} \\ e^+ \nu_e X_c \\ D \ell^+ \nu_\ell \text{ anything} \\ \overline{D}{}^0 \ell^+ \nu_\ell \\ \overline{D}{}^0 \tau^+ \nu_\tau \end{array}$	Semileptonic and leptonic modes [a] $(10.99 \pm 0.28)\%$ $(10.8 \pm 0.4)\%$ $(9.8 \pm 0.7)\%$ [a] $(2.23 \pm 0.11)\%$ $(7.7 \pm 2.5) \times 10^{-3}$
T(45) DECAY MODES	Fraction $(\Gamma_i/\Gamma)$	B <sup>0</sup> DECAY MODES	Fraction $(\Gamma_i/\Gamma)$ Confiden
$B\overline{B}$ $B^{+}B^{-}$ $D_{s}^{+} \text{ anything } + \text{ c.c.}$ $B^{0}\overline{B}^{0}$	> 96 % (51.6 $\pm$ 0.6 ) % (17.8 $\pm$ 2.6 ) % (48.4 $\pm$ 0.6 ) %	$\ell^{+} \nu_{\ell} \text{ anything}$ $e^{+} \nu_{e} X_{c}$ $D \ell^{+} \nu_{\ell} \text{ anything}$ $D^{-} \ell^{+} \nu_{\ell}$ $D^{-} \tau^{+} \nu_{\tau}$ $D^{*} (2010) = \ell^{+} \nu_{\tau}$	$[a] (10.33 \pm 0.28) \% \\ (10.1 \pm 0.4) \% \\ (9.4 \pm 0.9) \% \\ [a] (2.17 \pm 0.12) \% \\ (1.1 \pm 0.4) \% \\ [a] (5.05 \pm 0.12) \% \\ (5$
		$D^*(2010)^- \ell^+ \nu_\ell$ $D^*(2010)^- \tau^+ \nu_\tau$	[a] ( 5.05± 0.12)% ( 1.5± 0.5)%



## Bファクトリー実験の目的

B中間子におけるCP対称性の破れの観測
 CP対称性を作る小林・益川機構の検証
 標準理論を超える物理現象の探索





Figure 3.1: Typical CDF event (left) compared to typical Belle event (right).



Asymmetric energy e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> collider! (P. Oddone/F. Takasaki 1987)



### B factory 実験での加速器



-									
-				KEKB		SuperKEKB		unita	
B		parameters	LER	HER	LER	HER	units		
	Bea	am energy	Eb	3.5	8	4	7.007	GeV	
	Half ci	rossing angle	φ	11		41.5		mrad	がちつっつ
	# of Bunches		N	1584		2500			制制の
	Horizo	ntal emittance	٤x	18	24	3.2	5.3	nm	公差
	Emi	ttance ratio	к	0.88	0.66	0.27	0.24	%	
	Beta fi	unctions at IP	βx <sup>*</sup> /βy <sup>*</sup>	1200	/5.9	3.2 <b>/0.27</b>	2.5/ <mark>0.30</mark>	mm	20倍
	Bea	m currents	lb	1.64	1.19	3.6	2.6	Α	2倍
	beam-	beam param.	ξ <sub>y</sub>	0.129	0.090	0.0886	0.081		
	Bur	nch Length	Sz	6.0	6.0	6.0	5.0	mm	
	Horizor	ntal Beam Size	S× <sup>*</sup>	150	150	10	11	um	
	Vertic	al Beam Size	Sy <sup>*</sup>	0.9	)4	0.048	0.062	um	
	L	uminosity	L	2.1 x	10 <sup>34</sup>	8 x 1	0 <sup>35</sup>	cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	

現在目標数値の再評価を行っている

1秒間に800個B中間子生成

6

### ナノビーム設計による検出器への影響

#### Large Piwinski angle

Belle II



SuperKEKBナノビーム設計を成立させるためブーストファクターが約2/3に



## B中間子を捕えるには?

#### 寿命~1.6ps

ビームパイプ内ですぐに崩壊



#### 粒子の種類によって 測定器との反応が異なる

- How to measure the Pt for each track of charged particles
  - Magnets

• Trackers 荷電粒子は磁場で曲げた飛跡を測定

- How to optimize the parameters of sub-detectors
  - Hit rate:動作頻度
  - Efficiency: 検出効率
  - Position (energy) resolution:位置(エネルギー)分解能
  - Radiation hardness:放射線耐性
  - Long term stability:長期安定性
  - Costs: 価格



解析例(B<sup>0</sup>→J/ψK<sub>s</sub>)





- 質量:エネルギーと運動量から測定  $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$
- スピン:生成された粒子の角度分布の歪みなど
- 電荷:磁場中での曲がりの向き
- 寿命:崩壊点の飛跡より測定
- 他にもさまざまな量子数
  - 荷電対称性
  - レプトン数
  - バリオン数
  - フレーバー
  - カラー

Ks->  $\pi\pi$   $M^2 = (E_1 + E_2)^2 - \|\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2\|^2$  $= m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1E_2 - \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2)$ 

- .....

R	Bellel	で実際	に観測し	ているもの
Belle II	Particle	Mass	Life Time(ns)	検出法
	Electron	0.51 MeV	>4.6 × 10 <sup>26</sup> year	飛跡、エネルギー
2	Muon	105 MeV	2.19 us	飛跡
Ц Т	Tau	1777MeV	0.29ps	間接観測
L	Neutrino	< 2eV	stable	非検出(Missing E)
いドロン	π±中間子	139.5MeV	26 ns	飛跡、 <u>PID</u>
	π0中間子	134.9 MeV	8.5×10 <sup>-17 s</sup>	間接観測(2γ)
	K±中間子	493.7 MeV	12.3ns	飛跡、 <u>PID</u>
	Ks中間子	497.6 MeV	89.5ps	間接観測 (ππ)
	K <sub>L</sub> 中間子	497.6 MeV	52 ns	間接観測 (πππ)
	D±中間子	1869.6MeV	1.0ps	間接観測,崩壊点
	B±中間子	5279MeV	1.6 ps	間接観測,崩壊点
	Photons	<1 × 10 <sup>-18</sup> eV	stable Tracking Electromagnetic Har	エネルギー,飛跡なし

ビームパイプ半径 10mm ピクセルセンサーの位置:半径14mm 光が1m進むのにかかる時間:約3.3ns



## Bellell 検出器の特徴





K<sub>L</sub>はKLMでまたK<sub>s</sub>→ππは飛跡検出器により再構成して同定する

14





#### B中間子はビームパイプの内部で崩壊している 衝突点周辺の飛跡測定精度が肝となる (PXD, SVD検出器)



## 物質と放射線の反応



放射線と物質の反応

 物質(Z/A)に依存する ・粒子の速度βγに依存する ・粒子の質量に依らない





## 放射線と物質の反応 Energy loss of charged particle

#### **Bethe-Bloch formula (ionizing particle):**

$$\frac{dE}{dx} = -KZ^2 \frac{z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \frac{1}{2} \ln \frac{2m$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.3 [MeV \cdot g^{-1} cm^2]$$
$$T_{\text{max}} = 2mc^2 \beta^2 \gamma^2$$

(Max kinetic energy, which can transferred to electron)

- A: mass number [g/mol] of the material
- z: Charge of incident particle
- Z: Atomic number of material
- $\delta$ : Density correction
- I : Mean excitation energy of material

I=I<sub>0</sub>Z



運動量とdE/dxが測定できれば粒子を弁別できる領域がある

 $m_{\mu} = ~105 MeV, m_{\pi} = ~139 MeV, m_{p} = ~938 MeV$ 

放射線の検出はEnergy loss に起因する電子、イオンの電荷情報や発光現象を利用する。



- Multiple scattering (Moliere formula)
  - Approximates the projected scattering angle of multiple scattering by a Gaussian, with a width

$$\theta^{2} = \left(\frac{0.015}{\beta P}\right)^{2} \frac{x^{2}L}{X_{0}} [1 + 0.12 \log_{10}(x/X_{0})]^{2}$$



• Approximation

$$\theta \propto \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

高い運動量では散乱の影響が小さくなる

X<sub>0</sub>: Radiation length X<sub>0</sub>=荷電粒子のエネルギーが1/eになる平均厚み

X: charge

(Mean distance over which a high energy electron loses all but 1/e of its energy by bremsstrahlung, and 7/9 of the mean free path for pair production by a highenergy photon.)

$$\frac{1}{X_0} = \frac{4\alpha N_A Z(Z+1) r_e^2 \log(183Z^{-1/3})}{A}$$



低

物質量

物理領域外)

硘

物質量

物質ごとの反応のしやすさ

 $\frac{1}{X_0} = \frac{4\alpha N_A Z(Z+1) r_e^2 \log(183Z^{-1/3})}{A}$ 

X<sub>0</sub>=荷電粒子のエネルギーが1/eになる平均厚み

		Z	X₀[g∕cm2]	Density (g/cm3)	X <sub>0</sub> {mm}	用途
Ŕ	He	2	94.32	0.125	7545.60	CDCガス
通域	Be	4	65.19	1.848	352.76	IPパイプ
(物理(	С	6	42.7	3.52	121.31	CDC、VXD (CFRP構造体)
	Si	14	21.82	2.329	93.69	PXD/SVDセンサー
	Fe	26	13.84	7.874	17.58	Belle構造体
或外)	Cu	29	12.86	8.96	14.35	冷却パイプ
	W	74	6.76	19.3	3.50	シールド
勿理領1	Au	79	6.46	19.32	3.34	IPパイプ衝突部内部 (放射光x線吸収)

他にはAL, SUSも構造体に使用。



## 飛跡測定

#### 運動量を見積もる 磁場で曲げられる大きさを測定

# Ptの測定(サジッタによる計測例)





### エネルギーの測定

#### 物質と反応して検出器で測定される信号の大きさ Electro-magnetic shower





## 物質内での相互作用



T(X0)通過後  $N(t) = 2^{t}$   $E(t) / particle = E_{0}2^{-t}$ プロセスは  $E(t) < E_{C}$  まで続く Ionization, compton, ... Shower maximum  $t_{max} = \frac{\ln \left[ E_{0} / E_{C} \right]}{\ln 2}$   $N_{max} = \exp(t_{max} \ln 2) = \frac{E_{0}}{E_{C}}$   $p - \mu \nabla \hbar \pi L$ による横方向の広がり  $R_{M} \simeq 21 MeV \frac{X_{0}}{E_{C}}$ ¥径R\_M内に全シャワーエネルギーの90%が集中



 $(\mathbf{fb}^{-1})$ 

1200

1000

800

600

400

200

## Belle II 検出器

Beam Pipe and Vertex Detector extraction: on Nov. 10, 2010 Belle Detector Roll-out: Dec. 9, 2010 End-caps, CDC, B-ACC, TOF extraction: in Jan. 2011



1998/1 2000/1 2002/1 2004/1 2006/1 2008/1 2010/1 2012/1



## Belle II で何が変わる?

t,c,u

s(d)

- 0, KEKBに対し40倍のLuminosity
- 1. バックグラウンド

-10~20 times higher than that of Belle  $\rightarrow$  fake hits, pile up, radiation damage

- 2. データ取得頻度
  - -Typical Level1 trigger rate: 20kHz -Data size also increase
  - $\rightarrow$  require high performance DAQ
- 3. 物理の感度
  - -good hermeticity for events having v s -good background rejection for ultra rare B and  $\tau$  decays  $\tau \rightarrow \mu \gamma$







## Belle II 上から見た図



現場ではどこにケーブル、冷却配管通すかという議論やどうやって組み上げるか?
 といったことが今でもメインテーマ。



## **New detectors at Bellell**

Componen	t Type		Co	nfiguration			
Beam pipe	e Berylliur	n	Cylindrical, inner radius 10 mm,				
	double-wa	all	$10~\mu{ m m}$ .	Au, 0.6 mm Be,			
			$1 \mathrm{~mm}$ coolant	(paraffin), 0.4 m	m Be		
PXD	Silicon piz	xel	Sensor size:	$15 \times 100 (120) \text{ m}$	$m^2$	rformance	
	(DEPFE'	Т)	pixel size	$: 50 \times 50 (75) \ \mu m^2$	2	1 Ion Indiana	
			2 layers	: 8 (12)  sensors			
SVD	Double sid	led	Sensors: recta	ngular and trape	断面	積とEv	ent Rate
	Silicon sti	rip	Strip pitch: 50(p)	/160(n) - 75(p)/2	171 144	ра с <b>2</b> т	
			4 layers: 1	6/30/56/85 sense	Process	$\sigma(nb)$	Rate (kHz)
CDC	Small ce	11	56 layers,	32 axial, 24 ster€	$\Upsilon(4S)$	1.2	1
	drift cham	ber	r =	16 - 112 cm	- ()		-
			- 83	$\leq z \leq 159 \text{ cm}$	qq	2.8	2.2
100.0	DICU	10	munte la citat a 100 mi	0.1-	$\mu^+\mu^-$	0.8	0.6
10P	quartz radiator	275 cm	gments in $\phi$ at $r \sim 120$ cm long, 2 cm thick quartz bars	8 K	$\tau^+\tau^-$	0.8	0.6
		with	4x4 channel MCP PMTs		a+a-	4.4	25
ARICH	RICH with	4 c	m thick focusing radiator	78 k	ere	44	35
	aerogel radiator	an £	d HAPD photodetectors or the forward end-cap		$\gamma$ -Pair	2.4	2
ECL	CsI(Tl)	В	arrel: $r = 125 - 162$ cm	6624	Two-v	80	64
	(Towered structure)		End-cap: $z =$	1152 (F)	1	00	01
KLM	barrel: RPCs	14 la	-102 cm and +196 cm vers (5 cm Fe + 4 cm gap)	960 (B) θ: 16 k, φ: 16 k	Total	132	~100
			2 RPCs in each gap		<b>.</b> .		
	end-caps: scintillator strips	14 layer read o	s of $(7 - 10) \times 40 \text{ mm}^2$ strips out with WLS and G-APDs	17 k	Irigger rat	e IJ 菆.	人30KHz 30



## 崩壊点測定 シリコン検出器

#### 崩壊点測定 (DEPFETセンサー:PXD, DSSDセンサー:SVD)





(ALICE) 最先端の世界 センサーも読み出しFEもとことん薄く して曲げちゃう。 開発→量産→運用(どうしてもライムラグ)





- p型とn型半導体を接合したものをダイオードという(ご存知)
- 接合すると半導体に含まれる伝導電子、正孔が拡散し、接合部付近で互いに結びつく(拡散電流が生成)。
  - 結果、p型半導体中のアクセプターは負に帯電しn型半導体では正に帯 電する。
  - ドナーやアクセプターは結晶格子に固定されているため、それぞれの半 導体内で電荷の偏りが生じ、pn接合を横切る電場が形成される。
  - - 接合部付近では自由な電子が存在せず、空乏層領域(deplated region)
     という(接合だけだと数µm)
  - 空乏層領域に放射線を当てて、電離(シリコンの場合:3.6eV/pair)させる と電子、正孔はそれぞれ電場によってn型、p型半導体にそれぞれひきよ せられ電気信号(パルス)として検出できる。
- 実際には空乏層(有感領域)をひろげるためにn側の電位を高く(逆バイア ス)なるように電圧を印加して使用する。



## シリコンストリップ検出器



空乏層とストリップ間にSiO2層(絶縁)があるのでACカップルでストリップ読み出し FEアンプで読みだした電荷信号を増幅して読みだす 構造がシンプルなため動作信頼性大、製造安定性大(大面積化には結構大事な部分です)





### Inner Tracker Upgrade SVD1->SVD2 (Belle 実験)

Beam pipe :  $R_{in} = 2.0$  cm SVD1 : R = 3.0, 4.5, 6.0 cm CDC : 3 layers of Cathode part

Beam pipe :  $R_{in} = 1.5 \text{ cm}$ SVD2 : R = 2.0, 4.35, 7.0, 8.8 cmCDC : 2 layers of small cell chamber





## Belle II VXD design (top view)



SuperKEKB: Nano-beam scheme →大公差角度(22->73mrad) ->ビームパイプとシールドのスペースが大きくなる->センサー設置場所、 ケーブルを通すスペースが狭くなる。 SVDは収まり切れないので一部スラント(折り曲げる)形状にせざる得な いことに・・・・・




DSSD

## Vertex Detector (Phase 3)

Pipe F	r = 10mm
Layer 1	r = 14mm
Layer 2	r = 22mm
Layer 3	r = 39mm
Layer 4	r = 80mm
Layer 5	r = 115mm
Layer 6	r = 140mm



IP Beam pipe



Phase 3 PXD 1<sup>st</sup> layer at phase 3 start



VXD can provide factor 2 or more better impact parameter resolution in spite of lowered Lorenz boost.





Switcher - row control chip with high voltage line drivers 0.35 µm technology DCD - DEPFET current receiver and digitizer chip 0.18 µm technology DHP - Digital data handling and readout control chip 0.09 µm technology 内部ゲートに電離電子が 集められて外部ゲートを ONにすると収集された電 子数に比例した電流を読

み出せる。

#### **Depleted p-channel FET** ピクセル検出器

PXD





# **DEPFET** for Belle II (PXD)





Figure 5.4: Schematic configuration showing the three different sensor geometries and the number of APV25 readout chips for each detector. 41



# **SVD (Silicon Vertex Detector)**



#### Material budget 0.7%X<sub>0</sub> per layer

#### Table 1

Main parameters of the used DSSDs. A floating strip between two readout strips is present on both sides.

Front-end FE: APV25 -> FADC 読み出しFEのチップをとことん薄く削って

センサー背面に設置

able 2 verage hit efficiencies for SVD sensors in each layer and side. Trapezoidal Small Large Efficiency n-side (z) p-side  $(r\phi)$ # of readout p-strips 768 768 768 # of readout n-strips 512 512 768 Layer 3  $(99.72 \pm 0.01)\%$  $(99.79 \pm 0.01)\%$ Readout pitch (p-side) [µm] 50 75 50-75 Layer 4  $(99.71 \pm 0.01)\%$  $(99.76 \pm 0.01)\%$ Readout pitch (n-side) [µm] 160240240Layer 5  $(99.73 \pm 0.01)\%$  $(99.88 \pm 0.01)\%$ Active area [mm<sup>2</sup>] 5890 4738 7030 Layer 6  $(99.50 \pm 0.01)\%$  $(99.81 \pm 0.01)\%$ Thickness [µm] 320320300



# 飛跡を観測する Gas detector

ワイヤーチェンバーの応用範囲が減ってきてますが 自分で作れることが魅力 (ここはちょっと詳しく紹介。説明は磁場なしを前提)

> Tracking(Pt), PID (using CDC, RPC on Bellell)



# How to read the signal?





国へ電離 光電離 接触電離 熱電離などがある

Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers / F. Sauli Geneva : European Organization for Nuclear Research, 1977. vi, 92 45

# Property of noble and molecular gas

Table 1: Properties of noble and molecular gases at normal temperature and pressure (NTP: 20° C, one atm).  $E_X$ ,  $E_I$ : first excitation, ionization energy;  $W_I$ : average energy per ion pair;  $dE/dx|_{\min}$ ,  $N_P$ ,  $N_T$ : differential energy loss, primary and total number of electron-ion pairs per cm, for unit charge minimum ionizing particles.

Gas	Density	$E_x$	$E_I$	$W_I$	$dE/dx _{min}$	$N_P$	$N_T$
	${ m mg~cm^{-3}}$	eV	eV	eV	${\rm keV}~{\rm cm}^{-1}$	${\rm cm}^{-1}$	${\rm cm}^{-1}$
He	0.179	19.8	24.6	41.3	0.32	3.5	8
Ne	0.839	16.7	21.6	37	1.45	13	40
Ar	1.66	11.6	15.7	26	2.53	25	97
Xe	5.495	8.4	12.1	22	6.87	41	312
$CH_4$	0.667	8.8	12.6	30	1.61	28	54
$C_2H_6$	1.26	8.2	11.5	26	2.91	48	112
$iC_4H_{10}$	2.49	6.5	10.6	26	5.67	90	220
$CO_2$	1.84	7.0	13.8	34	3.35	35	100
$CF_4$	3.78	10.0	16.0	54	6.38	63	120

第 励

H ネ

希ガスは多くの励起準位をもつので 混合ガスにすることで励起希ガスが 基底準位に遷移するときに出る光子 によりイオン化を促進できる (ペニング効果:蛍光灯のAr+Hg)

arXiv: 1008.3736 [physics.ins-det] 26 April 2010

Gaseous Detectors: recent developments and applications

長イ

王

成頻度

N

初期

刪

+



# Gas amplification

Townsend avalanche:

α: first townsend coefficientE/p > 10<sup>4</sup> V/cm /atm

 $\Rightarrow n(x) = n(0)e^{\alpha x}$ 

If we neglect the space-charge effect and photoelectric effect by de-excitation of molecule, total charge (Q) =  $n_0 eM$ 

 $\frac{dn}{dt} = \alpha \cdot dx$ 

電場で加速された 電子が電離させる





# **Operation mode**



20-30um程度のタングステンワイヤーに高電圧を印可すると円筒電場でガス増幅 領域をワイヤー周辺に制限できる(放電の阻止)

# HV dependence of Output charge (ex.RPC)





#### **Difference between G.M and Streamer**

電子なだれの中間部では電場が打ち消され再結合が発生する。この時にphotonが発生し 電離を起こす。G.Mとストリーマの違いはphotonのmean free path (ガス圧力の違いでもG.Mとストリーマ間で相転移が起こる)



で打ち消され増幅が止まる G.M mode Large output signal Long dead time Long term stability



Streamer mode Large output signal Short dead time Large discharge sometime occur Limited mean free path of photon かみなりもストリーマ放電の一種 2次生成したphotonによる増 幅が発展する場合としない場 合が混ざる。50

ш

身近な例: 蛍光灯は減圧したガス(Ar+Hg)中でAC100Vを 印可することでフィラメントから出た熱電子により電離と再 結合を繰り返している。再結合で生成した励起分子が基底 状態に遷移するときに出る紫外線(この光はランダムの方 向に出る: 陰極線との違い)をガラス内部に塗った波長変 換素材で可視光にしている。





# **MWPCとDrift Chamber**











(ガス分子によって散乱)

 $N_P$ 

 ${\rm cm}^{-1}$ 

3.5

 $N_T$ 

 ${\rm cm}^{-1}$ 

arXiv: 1008.3736 [physics.ins-det] 26 April 2010



# ステップ2

- 1. 各クラスタの位置での電場を求める。
- 2. 電子のドリフト速度を求める(ドリフト速度 の電場依存の基礎データ)
- 3. ドリフト速度x設定した時間ステップ(今回 は0.1ns)分だけ電場方向に移動する。
- 4. (必要ならdiffusion効果はここで加算)
- 5. 1、2、3を各クラスタに対して計算
- 移動先のクラスタ位置がワイヤー表面に 達すれば三角波をオシロに描画する(信 号が重なったらその分加算)。

最初に到達したクラスタの移動時間をドリフト 時間としている。





# オシロ波形について

#### <mark>デジタ</mark>ルオシロで見たMPWC生信号 がなぜ凸凹しているのか?





- dE/dx測定精度を良くするには
  - 通過距離(トラッキングフィット)、
  - · 信号のチャージ量(ADC)
  - をできるだけ精度よく測定する必要がある。
  - 信号チャージを測定するため にFEアンプはチャージアンプ を使用するのが普通
    - アンプの時定数により時間測定
       泥土は少し落ちるが



fc=1/( $2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C$ )



# その他:検出器導入に必要な検証

- Aging
  - ガス増幅により電極に不純物が析出し実効電場が変化
    - Pulse response の Uniformityが崩れる
    - ・ dE/dx測定に影響
- Rate dependence
  - ワイヤ長さ当たりの 信号Rate に対する実効電場の減少
    - ガス増幅で生成した正イオンがカソードで吸収されるまで
       電気力線に沿って滞留し実効電場を下げる。





車だと: ススが溜まると火花が 出にくくなる

CDCの場合、rate dependence には角度依存がある。 (IPから垂直方向がもっとも深刻)



# Rate dependenceの影響の出やすいパターン



- 電気力線と同じpathに荷電粒子 が入射した場合
- ワイヤー周辺でできたプラスイオ ンがグランド電極で中性になるま で電場を打ち消す効果を出す。
  - ドリフト速度







# 飛跡検出で使う装置比較

- CDC(ガスチェンバー)
  - プライマリー電子数:小
  - ガス増幅10^5程度
  - チャンネル当たりの静電容量大 (S/Nが下がる)
  - 通過長さ当たりのMultiple scattering 小(低物質ガス)
  - 信号線間隔に限界(放電がある

- SVD(シリコンストリップ)
  - プライマリー電子数大
  - センサー内部増幅無し
  - チャンネル当たりの静電容量小
    - FEアンプの位置にもよる
  - Multiple scattering 大
    - (シリコンなんで薄くする努力次第で もあるが)
  - 最近では薄型+内部増幅のシ
     リコンセンサー開発が主流

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{dQ}{\varepsilon S}$$
$$\frac{d}{dt}V = \frac{d}{dt}\frac{dQ}{\varepsilon S}$$

$$\theta \propto \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

Multiple scatteringは低い 運動量の粒子に影響する 一方LHC,ILCなどではシリコン優位

Central Drift Chamber ACC+T improve Jelle T			amber ACC impr x)	TOF->TOPの変更によりレバーアームが伸びた re resolution of momentum and dE/dx $\sigma_{P_t}/P_t = 0.19P_t \oplus 0.30/\beta$ Belle II $\sigma_{P_t}/P_t = 0.11P_t \oplus 0.30/\beta$ new readout system dead time 1-2µs → 200ns				
		Belle	Belle II	Axial wire E				
	inner most sense wire	r=88mm	r=168mm	new readout system				
	outer most sense wire	r=863mm	r=1111.4mm	dead time 1-2 $\mu$ s $\rightarrow$ 200ns				
	Number of layers	50	56	small cell normal cell				
	Total sense wires	8400	14336	$10 \text{ mm} \stackrel{\circ}{\bullet} \stackrel{\circ}{\bullet} \stackrel{\circ}{\bullet} \stackrel{\circ}{\circ} \stackrel{\circ}{\bullet} \stackrel{\circ}{\circ} $				
	Gas	He:C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	He:C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6~8 mm				
	sense wire	W(Φ30μm)	W(Φ30μm)	u → → ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔ ↔				
	field wire	Al(Φ120μm)	Al(Φ120μm)	59				



# **Central Drift Chamber**







5 layer test chamber





#### **Position measurement with Drift chamber**





## ミューオン飛跡検出



# KLM (K<sub>L</sub>&Muon detector)



HFC-134aは電気陰性度の高い フッ素が含まれている。電子を吸着 してマイナスイオンとなり増幅を抑える

- Ground plane Dielectric foam -strips Insulator +HV Glass Single Gas gap **RPC-layer** Glass -HV Insulator +HV Glass Single Gas gap **RPC**-layer Glass -HV Insulator ~strips Dielectric foam Ground plane
- ・ RPC(15層)と鉄のサンドウィッチ
- ・ ガス:Ar(30)+Butane(8)+HFC-134a(62)
- 10^12Ωcmの高抵抗電極
- ガスギャップ2mm, E> 4kV/mm



Fig. 3. RPC detection efficiency dependence upon HV supply.



#### KLM: K<sub>L</sub>&Muon detector (RPC → Scintillator)



**GENERAL LAYOUT One layer: 75 strips (4** cm width)/sector **5** segments 1 segment = 15strips Two orthogonal layer = superlayer F&B endcap KLM: Total area ~1400 m<sup>2</sup> **16800 strips** the longest strip 2.8 m; the shortest 0.6 m WLS fiber in each strip Hamamatsu MPPC at one fiber end

mirrored far fiber end





# エネルギーを測る



シンチレータ

	PureCsI	BSO	BGO	CsI(T1)
密度(g/cm3) 輻射長(cm)	4.53 1.86	6.80 1.15	7.13 1.12	4. 53 1. 86
モリエール半径(cm)	3.57	2.63	3.10	3.57
発光波長(nm)	300	480	480	560
光量(NaI(T1)=100)	3.7	2~3	10	165
減衰時間(ns) 潮解性	~10 若干有	100 無	300 無	1300 若干有

CsIのPion interaction length(π粒子が非弾性散乱する平均距離): 199 g cm<sup>-2</sup>->44.12 cm 電子や光子に比べてハドロンはそれだけ反応しにくい(大きなスペースが必要)



# PMT(光電子増倍管)の構造

電子の放出は、ある一定以上大きな振動数の光でなければ起こらず、それ以下 の振動数の光をいくら当てても電子は飛び出してこない。 振動数の大きい光を当てると光電子の運動エネルギーは変わるが飛び出す電 子の数に変化はない強い光を当てるとたくさんの電子が飛び出すが、電子1個 あたりの運動エネルギーに変化はないなどの事実が実験により明らかにされた。



入射光×光電面での収集効率×電子への変換効率×増幅率×e=信号の大きさ69



0.1

## 量子効率の波長依存





## ECL (Electromagnetic Calorimeter)

Denie H				PureCsl	BSO	BGO	CsI(TI)
PINフォトダイオードを用い、	電磁シャワー	を検出。					
エラルギ 八級化け 4.2			°密度(g/cm3	) 4.53	6.80	7.13	4.53
エイルイーカ解胞は、~1.3	<b>70/</b> \\ <b>L</b> _0		輻射長(cm)	1.86	1.15	1.12	1.86
位置分解能は~0.5 cm/√E。(E in GeV) シンチレータとしてCsl(Taドープ)結晶を使用		モリエール <sup>当</sup> 径(cm)	<mark>⊭</mark> 3.57	2.63	3.10	3.57	
BELLE CSI ELECTROMAGNETIC CALORI	METER		発光波長 (nm)	300	480	480	560
Backward Erdcap Catorimeter			光量 (Nal(Tl)=100	) 3.7	2~3	10	165
			減衰時間(n	s) ~10	100	300	1300
			潮解性	若干	<b>無</b>	無	若干 有
		Casing	g OS 入射光	正電極 A:アノード ・・ 豆波長 受 受 長波長	<ul> <li>○</li> <li>○</li> <li>-•</li> <li>○</li> <li>○</li> <li>N</li> <li>N+</li> </ul>	負電極 K:カソ∽	Ŕ
2.0 m l.0 m 0.0 m l.0 m				P層 。	」 N層		
8736本のCslを使用	30cm long	2 PIN-P	Ds	A		T.	
	$=16.1X_0$	Gore-Tex a Aluminum- myler wran	and coated coated こと	← が励起(電 )され 自由間	- <sup>東主電流方面</sup> 子が原- 電子と自	子を離れ 由正孔	いる が 71



# 粒子弁別

#### Belleでは測定されるハドロン粒子のエネルギーが低いためLHC 実験のようなハドロンカロリメータでは測定できない

π、K中間子を弁別する専用の検出器TOP, ARICH


### K/π 粒子識別

3種類の合わせ技 •TOF: 飛行時間測定 - 粒子速度=飛行距離/TOF •飛跡検出器で落とすエネルギー - dE/dx (CDC)

・チェレンコフ光測定 
$$\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n}$$





物質中の光速 c/n よりも、粒子速度が速い時、角度の方向に、衝撃波のように光が出る。

チェレンコフ光閾値の利用 (Belleで利用)
 nを調整 π光らせる K光らせない →粒子識別

チェレンコフ角度θ<sub>c</sub>測定 (Belle IIで利用)
 θ<sub>c</sub> → βを直接測定。閾値型より性能が向上する。



### **TOF (Time-of-Flight Counter)**

0.25

#### Belle検出器でのTOFカウンター(例)

- r from beam axis = 120 cm
- Length = 3-m long, N<sub>scintillators</sub> = 128
- **σ<sub>τ</sub> = 100 psec**
- K/ $\pi$  separation up to 1.2 GeV



飛行時間分解能

 $\sigma(\text{ToF})$  vs. Zhit

The weighted average of both ends



# Time of Propagation Counter (TOP)



Belle II

- Quartz radiator
  - 2.6m<sup>L</sup> x 45cm<sup>W</sup> x 2cm<sup>T</sup>
  - Excellent surface accuracy

MCP-PMT

- Hamamatsu 16ch MCP-PMT
  - Good TTS (<35ps) & enough lifetime
  - Multialkali photo-cathode  $\rightarrow$  SBA

π/K識別においてBelleではP<3GeV/cで3σの識別能力だったものを</p>
<u>P < 4GeV/c 領域において4σのπ/K識別能力</u>へ



# Time of Propagation counter (TOP)





# **ARICH(End-cap Particle ID)**

- Ring imaging Cherenkov counter based on silica aerogel radiator
  - Space limited -> proximity focusing with expansion distance of 20 cm
  - Requirements
    - Transparent silica aerogel
    - Photo-detector
      - Single-photon sensitivity
      - Pixel 5x5mm<sup>2</sup>
      - Operational in 1.5T
      - Compact
    - Readout electronics
      - ~70K channels



Target: More than 4  $\sigma \pi/K$  separation at 4 GeV/c

 $m = p \sqrt{n^2 \cos \theta^2} - 1$ m:粒子の質量、p:運動量  $\theta$ c:チェレンコフ角度 n:屈折率

# Novel "focusing" radiator

Simple accumulation of radiator layer gives more photons, but degrades PID performance

Belle II



### ARICH





## DAQ

30kHzのトリガーrateに対応 (ATLASでは100Hz程度)





Bellellで扱うデータ量

実 験	Event Size[kB]	記録 rate[Hz]	記録 rate[MB/s]
Belle II	300	6,000	1,800
ALICE(HI)	12,500	100	1,250
ALICE(pp)	1,000	100	100
ATLAS	1,600	200	320
CMS	1,500	150	225
LHCb	25	2,000	50

・ LHCに負けない量(勝ち負けではないが)



さいごに

- Bellell 検出器の運転は続いてますがさまざまな課題・問題が今後も起こると思います。
- 検出器の高度化に対応するには何を考えるべきかヒントになればと思います。



バックアップ







- ・ 独立の電磁石
- 大交差角のために組み立ての手間が大きい
- ・ 放射光の影響が相対的に少 ない
  - Bend近くにがないため



### **Tracking resolution**

#### 2020 BPAC





-3 -2

-1 0

1 2 3 4

5

Z [cm]

-11

-2.

-1

0 1 2 3

4 5

Z [cm]



#### Significant improvement in IP resolution!



87



### PID:区別したいのは

目的	崩壊モード	運動量 [GeV/c]	Rejection mode
Flavor tagging	b->c->s	0.2 <p<1.5< th=""><th>-</th></p<1.5<>	-
Unitarity triangle Ø 1	$B \rightarrow J/\psi K_s$	-	-
Unitarity triangle ¢ <sub>2</sub>	<b>Β</b> ->ππ	1.8 <p<3.8< th=""><th><b>Β-&gt;Κ</b>π</th></p<3.8<>	<b>Β-&gt;Κ</b> π
Unitarity triangle ¢ 3	B->DK	1.5 <p<3.3< th=""><th>Β-&gt;Dπ</th></p<3.3<>	Β->Dπ

$$\begin{array}{l} m_{\pi} \sim 139.7 \, MeV \\ m_{K} \sim 493.7 \, MeV \end{array}$$



### B 中間子 実験を狙った加速器

- CESR(CLEO) and DORISII (ARGUS) up to
  - $L \approx 10^{32} \text{ cm}^{-2}/\text{s}$

Symmetric E beam collision (almost stationary B)

Discovery of B<sup>0</sup>-B<sup>0</sup> bar oscillations and  $b \rightarrow u+W$  decays (1987) (ARGUS)

- KEK-B (KEK) and PEP-II (SLAC) with  $L > 10^{34} \text{ cm}^{-2}/\text{s}$ Asymmetric E beam collision (boosted B) **Discovery of CP violation in B decays (2001)**
- SuperKEK-B
  - L > 10<sup>35</sup> cm<sup>-2</sup>/s
- **LHCB**







 $m = p \sqrt{n^2 \cos^2{\theta_o^2}} - 1$ m:粒子の質量、p:運動量

θc:チェレンコフ角度 n:屈折率



荷電子が物質中を"その物質の 光速を超える速度"で通過するとき 放出する微弱な光



物質中での 分極の様子



Aerogel counter(ACC) ではπのみ 光るように屈折率を設定



#### DEpleted P-channel FET





Fully depleted sensitive volume, charge collection by drift.

Internal amplification ->q-I conversion: 0.5 nA/e, scales with gate length and bias current( S/N will be ~100). Charge collection in "off" state, read out on demand -> Rolling shutter mode (20us/frame: 8Mピクセルのカメラを1秒 間に5千万回連続でシャッタを切る感じ)



### **Readout Scheme : DAC subtraction**





### PXD on board Electronics (schematic view of front-end)





粒子弁別は何でやる?

v

p

わかりやすいのは質量を測ること

$$\beta = \frac{1}{c} = \frac{1}{E} \qquad p = \beta E = \beta m \gamma$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{p^2}{E^2}}} = \frac{E}{\sqrt{E^2 - p^2}} = \frac{1}{\sqrt{E^2 - p^2}} =$$

10

つまり運動量と速度を測る

- 運動量は $Pt = qBR \Rightarrow Pt[GeV] = 0.3BR[Tm]$ 

 $\frac{P}{\gamma\beta}$ 

- 速度は
  - ・飛行時間差(Time Of Flight)

m =

- エネルギー損失(dE/dx)測定
- チェレンコフ光

など

$$m=\sqrt{((\frac{cT}{L})^2-1)p^2}$$



0

n

E

m



# **Test beam result**





#### Clear Cherenkov image observed

#### Cherenkov angle distribution



**<u>6.6 σ π/K at 4GeV/c !</u>96**