Belle II 検出器と Level 1 Trigger

20181030 Flavor Physics Workshop at IPMU 中澤秀介(台湾大学)

1

Bファクトリー実験



•エキゾチック粒子

Bファクトリー実験



次の目的は新物理探索

スケジュール

- Phase 1 (2016/02 2016/06)
 - ・ 衝突なし。Belle II なし。
 - ビームチューニングと真空焼きだし。
- Phase 2 (2018/03 2018/07)
 - LuminosityをKEKB程度まであげる。
 - ・バックグラウンド検証用に入れ、VXD(崩壊点検出器)は1層当たり**φ**方向に一つだ け。
- Phase 3
 - 全部入れて8x10³⁵cm⁻²s⁻¹を目指す
 - 2019年春開始

Belle から Belle II へ



Belle から Belle II へ

方法

動機・要請

- ・20年たったので検出器の性能向上
- ・加速器の改良に伴う
 - バックグラウンドの増加に耐
 えるための性能向上
 - イベント頻度の増加に対応するための性能向上
 500Hz -> 30 kHz
 - 放射能耐性の強化

- ・ 位置分解能の向上。
 - ・ 検出単位(ワイヤー、ピクセル

等)の細分化。ピクセル化。

- ヒットのある検出単位の割
 合が下がる。
- 2次元から3次元へ。
- 時間分解能の向上
 - ・処理クロックを上げる。
 - 反応の速い検出器/読出しに入れ替え。
 - サンプリング点を増やす。
- ・送る前に増幅/デジタル化する

Belle II 検出器

		積算放射長 (ECP)	
IR	10 mm	0.01- 0.03 (0.03 - 0.25)	
PXD	14 mm	0.015 - 0.045 (0.045 - 1)	荷雪特スの品体 5 稔毛 (1/20)
SVD	38 mm	0.03 - 0.08 (0.05 - 1)	19 电位于の朋场总快山(VAD)
CDC	16 cm	0.06 - 0.1 (0.2 - 0.4)	荷電粒子の飛跡検出
TOP	120 cm	0.25 - 0.7	赤 と 回 ウ (DID)
ARICH	ECP	(0.4 - 1)	松丁问足 (PID)
ECL	125 cm	20 (20)	カロリーメータ
Solenoid		20 (20 - 120)	
KLM		80 - 100 (60 - 120)	K∟とmuon

Belle II Detector, Nakazawa

Belle II 検出器



検出したい(できる)粒子

	相互作用		
e+/-	電磁	∝ 1/me ⁴	Belle II パンフレットより
μ+/-	電磁	∝ 1/m _e 4/40000	ミュー粒子 K ⁰ 検出器
$\pi^{+/-}$	電磁、強い		電磁 光子 カロリメータ ソナレ
K+/-	電磁、強い		RICH 検出器
p/pbar	電磁、強い		
KL	強い		検出器 電子
γ	電磁		反応で生じた粒子が検出器内でどのように検出されるかを示す模式図

- エネルギーが低いのでジェットなし。
- n, d, ν, Ksも検出器に入ります。χ, Z', ...も?



FlavorWorkshop20181030

Belle II Detector, Nakazawa

何をどれで測るか

	位置	運動量	エネルギー	粒子識別
e+/-	CDC/VXD	CDC/ECL	ECL	CDC/ECL
μ+/-	CDC/VXD	CDC	CDC/PID	CDC/KLM
π+/-	CDC/VXD	CDC	CDC/PID	CDC/PID
K+/-	CDC/VXD	CDC	CDC/PID	CDC/PID
p/p	CDC/VXD	CDC	CDC/PID	CDC/PID
KL	ECL/KLM			CDC/ECL/KLM
γ	ECL	ECL	ECL	CDC/ECL

VXD (VerteX Detector)

- 崩壞点検出器
 - ・時間依存性CP非対称測定に重要
- ・ 崩壊点に限らず飛跡を精度よく測る
- PXD (PiXel Detector) + SVD (Silicon Vertex Detector)



- Belle のときはSVD 4層のみ。
- ・半導体検出器。荷電粒子が電子-正孔対を生成し、その電子を取り出す。
- 高精度の位置分解能。
- 高価なので小さめ。
- ・ 低エネルギー粒子にも対応。

PXD (PiXel Detector)

• DEPFET (Depleted P-channel Field Effect Transistor)



	レイヤー1	レイヤー2
モジュール数	8	12
ビーム軸からの距離	14mm	22mm
ピクセルサイズ	$55x50\mu$ m2	70x50µm2
厚さ	75μ m	$75 \mu m$
ピクセル数	3.1M	4.6M

Belle II Detector, Nakazawa

PXD



- ・1ピクセルのサンプリング時間は100nsec
- 4列(800ピクセル)同時に読み出す
- 全ピクセル読出しに200サイクル=20usec



ONSEN(Online Selection Nodes)

PXDの出力はデータ量が大きくすぎて読み出せない。
 しかもほとんどがゴミなので、PXDの外側の飛跡検出器(SVDとCDC)で
 再構成された飛跡情報を使って、荷電粒子が通った辺りの(Rol=Region of Interest)のデータのみ読み出す



SVD

- 多重散乱を減らすため、物質量が少なくてすむ
 Double-Sided構造。
- 物質量を少なくするために、裏面の読み出しも表面
 に置き、冷却配管を一本にする

荷電粒子によって対生成された電子はn側のr-ø方向ストリップに、 ホールはp側のz方向ストリップ移動し、信号になる



Belle II Detector, Nakazawa

SVDの構造



	ラダー	半径(mm)
レイヤー6	16	135
レイヤー5	12	104
レイヤー4	10	80
レイヤー 3	7	38

Belle II Detector, Nakazawa

Origami (chip-on-sensor)







Belle II Detector, Nakazawa

CDC (Central Drift Chamber)



Belle II Detector, Nakazawa

CDC (Central Drift Chamber)

- T₀(ビーム衝突時間)とワイヤー ヒットの時間差によって、飛跡 がえられる
- 円上のどこかを通った 円の中心がセンスワイヤ 共通の接線が飛跡

 磁場中で曲げられる量から運動 量を測定する。

エネルギー損失から粒子同定す

 $p_t[\text{GeV}/c] = 0.3B[\text{T}]\rho[\text{m}]$



Belle II Detector, Nakazawa

トリガー情報生成

る(p<1GeV)

CDC

- Axialワイヤー(ビーム軸に 平行)5層の間に、3次元測 定用に傾けられた層が4層 (stereoワイヤー)
- 最内層はoccupancyを下げ

るためsmall-cell構造



superlayer	No. of	Signal cells	radius	Stereo angle
type and No.	layers	per layer	(mm)	(mrad)
Axial 1	8	160	168.0 - 238.0	0.
Stereo U 2	6	160	257.0 - 348.0	45.4 - 45.8
Axial 3	6	192	365.2 - 455.7	0.
Stereo V 4	6	224	476.9 - 566.9	-55.364.3
Axial 5	6	256	584.1 - 674.1	0.
Stereo U 6	6	288	695.3 - 785.3	63.1 - 70.0
Axial 7	6	320	802.5 - 892.5	0.
Stereo V 8	6	352	913.7 - 1003.7	-68.574.0
Axial 9	6	384	1020.9 - 1111.4	0.

Belle II Detector, Nakazawa

PID

- ・ BelleのPIDはエンドキャップ部で高いエネルギーのK/πを選 別できない
 - -> TOP(バレル部)とARICH(エンドキャップ部)に総入れ替え
- ともにチェレンコフ光をもとにした粒子識別

チェレンコフ光

- ・ 屈折率nの物質中で、光の速度はc/nになる。
- ・粒子が屈折率nの物質に入射してもその速度は変わらないので、その物質中での光速c/nよりも粒子の方が速くなることがある。このとき粒子は0方向電磁放射してエネルギーを失う。
 ・角度0は速度vに依存するので角度を測るとvが分か
 - り、CDCで求めた運動量と合わせると粒子識別でき



る。

TOP/ARICH



380 nm

FlavorWorkshop20181030

Belle II Detector, Nakazawa

27.6 mm

TOP/ARICH



Typical QE~28% at 380 nm

FlavorWorkshop20181030

Belle II Detector, Nakazawa

27.6 mm

ECL

- ・ 電磁カロリメータ
- ・密度の高い素材でe^{+/-}, γを完全に止めることで高いエ ネルギー分解能をえる
- Bhabha 散乱でLuminosityを計算する







Superlayer for KLM



- 混合ガス中で荷電粒子が通過し発生する電場の変化がスト に誘発する静電誘導で電位変化を読み出す。
- 一旦放電すると不感時間が2秒ほどある
 - エンドキャップ部のRPCをシンチ レータを用いたシステムに変更



BELLE

. ⊒....

FlavorWorkshop20181030

Dielectric foam

Ground plane

+HV

-HV

+HV

-HV

Level 1 トリガー

イベント頻度

- SuperKEKB 目標値
 - ・電子陽電子ともに2500ビームバンチ
 - ・電子バンチ(650億個の電子)
 - ・陽電子のバンチ(900億個の陽電子)
 - ・ビーム交差頻度は2.5億回/秒 (4 nsecに1回)









~ 10 kHz。ほとんどほしい。

取りたいイベントは全部で~15kHz。

Belle II Detector, Nakazawa

L1 トリガーの役割り

[、]リフト時間があるので長い

バックグラウンド

込みのターゲット

CDC raw hit

- 検出器の各読み出しチャンネルは担当箇所の情報しか知らず、物理イベントがなくても独立に読み出し続ける。全部記録すればよい。
- 記録したいデータが発生する時間頻度を見てみると
 - ・ Raw data の時間幅 ~1 usec (CDC)。
 - ・ SVDは100 nsec。



方法 すべてのデータは一時的にバッファ(FIFO)に(最短)4.4usec間格納され

る。そのデータが捨てられないうちに、いろいろな検出器の読み出 しから(トリガー専用信号線を通じて)早く利用できるデータを集めて 解析し、<mark>物理イベントを感知する。また、物理過程を選別し、それ</mark>

ぞれの過程を記録する割合いを調節する。 Belle II Detector, Nakazawa 32

FlavorWorkshop20181030

Entries 428456

Mean

Std De

4736

175.8

Belle II での物理過程

e+e>	Xsec [nb]	Hz @8e35/cm2s	用途
Ƴ(4S)->BBbar	1.1	880	Physics (Hadron)
qqbar(udsc)	3.4	2700	Physics (Hadron)
$ au^+ au^-$	0.9	720	Physics (LowMult)
$\mu^+\mu^-$	1.1	880	Physics/Calibration
γγ	2.4	19 (1/100)	Calibration
e+e-	44	350(1/100)	Calibration
e+e-X	13	10000	Physics (LowMult)
Total	66	15000	

L1 トリガーへの要求

- ・Hadron過程のefficiency 100%
 - Hadron過程は荷電粒子数が多い(>~3)ので比較的ト リガーしやすい
 - ・Belle IIの大きなテーマのひとつであるダークセク ター物理は、荷電粒子が少なくエネルギーも低いの でトリガーが大変。
- •最高許容頻度30kHz
- ・4.4 usec レイテンシー
 - 短いレイテンシーに対応するため、細分化とは逆の 戦略
 - ・ECLトリガーセル(TC) = 4x4クリスタル
 - ・CDCワイヤー ➡ TSF(ワイヤー群)



L1 全体像



35

GDL (Global Decision Logic)

***** Implemented on UT3 in Ehut



Flavo, ...

Belle II Detector, Nakazawa

GRL (Global Reconstruction Logic)

- ・粒子レベルでマッチングを取る
- ・Belleにはなかった
- CDCトラックとECLクラスタ
 →光子でないECLヒット
- CDCトラックなしとECLクラスタ
 →中性ECLヒット
- ・ ほかにもCDCとKLM、CDCとTOP
- ・レイテンシーの制約がきびしい





CDC トリガー



CDC トリガ

विषय विषय विषय विषय

3463 F3463 (3463 F3463 F3463 F3463

समय समय हाम

Energ Energ Energ Energ Energ Energy Energy Energy

हिम्बही हिम्बही हिम्बही हिम्बही हिम्बही हिम्बही हिम्बही

Bad Bad Bad Bad Bad Bad Bad Bad

BAR BAR BAR BAR BAR BAR BAR

BALL BALL BALL BALL BALL BALL BALL

TrackSegmentFinder



- ワイヤーの集合でTSF(Track Segment finder) =トリガーレベルの検 出単位を作る。
- TSFのヒットを定義するパターンを事前にシミュレーションで決めて おき、firmware のテーブルに入れておく。
- 個々のTSFについて、それを構成するワイヤーのヒットパターンが定 義に含まれていればそのTSFをヒットとする。
- TSFのヒット分布をもとに、Hough変換を使ってトラック(2次元ト ラック)を見つける。
- ステレオワイヤーのTSFヒット情報と合わせて3次元トラックを見つ ける。

the property and property

A while while speed

THE REAL PART PART PART PART PART

BARE BARE BARE BARE BARE BARE BARE BARE

BARE BARE BARE BARE BARE BARE BARE BARE

and and and and and and and and

and they don't they they don't they

and find find find find find find

ECL トリガー

- Bhabhaトリガー
 - Phase2 ではBelle で使われた方法を使った
 - 断面積が大きいのでベト信号としても重要
 - **φ**方向は考えず、**θ**方向の組み合わせで決める。
 - 1-18のいずれかを満たせばBhabhaとする。
 - efficiencyはよいが、Lowマルチイベント(荷 電粒子数の少ないイベント)のフェイク率が 問題になることが知られている。
 - **φ**方向まで考えた3D bhabha
 - 重心系で見て**φ**方向、**θ**方向に逆向きか
 - それぞれのエネルギーは十分高いか

• •	trgbit	Combination(θ ID)	Energy cut(GeV)
	1	F1+F2+F3+B1+B2	5.0
	2	F3+C12	3.0
	3	F2+F3(+backward gap)	5.0
	4	C1(+backward gap)	4.0
	5	C1+C11+C12	5.0
	6	C2+C11+C12	5.0
	7	C1+C2+C11	5.0
	8	C2+C10+C11	5.0
	9	C2+C9+C10	5.0
	10	C2+C3+C10	5.0
	11	C2+C3+C9	5.0
	12	C3+C4+C9	5.0
	13	C3+C4+C8	5.0
	14	C4+C5+C8	5.0
	15	C5+C7+C8	5.0
	16	C5+C6+C7	5.0
	17	C11+C12(+forward gap)	3.0
ΤC θ ID	18	B1(+forward gap)	3.0



ECL トリガー

タイミング信号生成



Belle II Detector, Nakazawa

入力トリガー

	nbits	name	
	4	n_t3	#of 3D tracks
	4	n_t2	#of 2D tracks
CDC	1	cdc_bb	back-to-back
	1	cdc_open45	45 deg opening
	1	cdc_timing	timing signal
	1	e_high	1 GeV or more
	1	e_low	0.5 GeV or more
	1	e_lum	3 GeV or more
ECL	1	ecl_bha	Bhabha event
	11	bha_type	Identified as
	4	n_clus	# of cluster
	1	ecl_timing	timing signal

Belle II Detector, Nakazawa

入力トリガー

	nbits	name		
TOP	3	n_hits	# of top hits	
	1	top_bb	back-to-back topology	
	1	top_active	Top Timing active	
	1	top_timing	Top Timing	
KLM	3	n_klm	# of klm hits	
	1	revo		
Random	2	rand		
	3	bhabha_delay		

ほかにもGRLで作られるビットなど、全110ビット。

Belle II Detector, Nakazawa

L1 トリガーメニュー

(出力ビットを作る論理演算)

Output bit		PS	Logic = algorithm		
ZZZ	hadron	1	n_t3 > 2	3D トラックが3本以上なら取る	
fff	hadron	1	n t2 > 2	2D トラックが3本以上なら取る	
ffo	2 2D tracks	1	n_t2 > 1 & cdc_open45 & ! ecl_bh	a	
ZZ	2 3D tracks	1	n_t2 > 0 & cdc_open45 & ! ecl_bh	a	
hie	1 GeV	1	e_high & ! ecl_bha	•	
c4	4 clusters	1	n_clus > 3		
ZZ		1	n_t3 > 0 & ! ecl_bha		
ff	Lowiviuit	1	n_t2 > 0 & ! ecl_bha		
bha	Bhabha	50	ecl_bha	Bhabhaなら50回に1回取る	
bhatrk	Бпарпа	50	ecl_bha & n_t2 > 1 & cdc_bb		
g g	ee $ ightarrow$ γ γ	10	e_high & n_t2 == 0 & n_t3 == 0		
mupair	mu pair	1	n_t2 > 1 & n_klm > 0	•	
revolution		1	revo		
random	random	1	rand		
bg		1	bhabha_delay		
	PS後、すべてのoutput bit のORをとりイベント発生を決定。 イベントが感知されたら、対応するタイミング信号を 近くで探し、衝突から一定のタイミングでL1信号をDAOに送る				
Belle II Det	Belle II Detector, Nakazawa 44 Flavor worksnobzu joju 30				

Bhabhaイベントでのトリガーefficiency



- ・ 2D Bhabhaトリガー ~70-80%
- 3D Bhabhaトリガー ~60-70%
- こんなはずではないので調査中。

hadronイベントでのトリガーefficiency



- ・ECLトリガーとCDCトリガーは独立であると仮定する
- ECLトリガーのefficiency (hie || c4) ~98%
- ・ CDCトリガーのefficiency (fff) ~90%
- inefficiecyは1-0.02x0.1=~0.2%

Phase 2

First Collision

• 4月26日0時38分



Phase 2 observation



Phase 2 observation



PXD+SVD組み立て











Belle II Detector, Nakazawa

Backup

	#ch	000	#link	/link	#CPR	ev sz	total	/CPR
		[%]		[MB/s]		[kB]	[MB/s]	[MB/s]
PXD	8	2	40	455	—	800	1820	
SVD	223744	1.7(5.5)	48	8.9(33.8)	48	14.9	428	8.9(33.8)
CDC	14336	10	302	0.6	76	6	175	2.3
BPID	8192	2.5	64	1.5	16	3.2	96	8
EPID	65664	1.5	-90-	72 1.1	-23-	18 2.8	84	4.2
ECL	8736	33	52	7.7	26	12	360	15
BKLM	19008	1	-24-	16 9.7	-6-	-4 2	60	10
EKLM	16800	2	16	35.8	-9-	4 1.4	42	4.7
TRG			19		10	~3GE	3/s@3	OkHz

Damage of collimator (LER DO2V1)



Comparison of machine parameters between design and Phase2

parameters	Design	Phase 2	units	factor
I _{beam} (LER/HER)	3.6/2.6	0.8/0.78 (0.27/0.225)	A	4.5/3.3
ξ _y (LER/HER)	0.0881/0.0807	0.03/0.02		2.9/4.0
β_y^*	0.27/0.30	3/3 (2/2)	mm	11/10
# of bunches	2500	1576 (394)		1.6(6.3)
I _{bunch} (LER/HER)	1.44/1.04	0.508/0.495 (0.685/0.571)	mA	2.8/2.1 2.1/1.8
Luminosity	8 x 10 ³⁵	5.55 x 10 ³³	cm ⁻² s ⁻¹	145



Belle II Detector, Nakazawa

IR

- 最終収束磁石がより衝突点に近くなり、調整しやすくなった
- 最終収束電磁石がHER, LER別々に
 - ビームを磁石の中心に通せる
 - 後方のQCS bendingがなくなった
 - 検出器周辺のスペースの取り方が問題に
 - Belle検出器全体を回転させた



Belle II Detector, Nakazawa