

# Belle II 実験

名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構 現象解析研究センター / 大学院理学研究科

飯嶋 徹

ijijima@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

KEK 素粒子原子核研究所

中山 浩幸

後田 裕

hiroyuki.nakayama@kek.jp

yutaka.ushiroda@kek.jp

2011年2月12日

## 1 はじめに

小林・益川理論の検証に代表される数々の成果を上げた KEK B-factory[1]は、2010年6月30日午前9時に最後のビームを捨て、1999年6月以来11年にわたる運転を終了した。以降、最先端研究基盤事業(3年間総額100億円)により補助されるKEKBの高度化のための作業が実際に始まっている。12月には Belle はビームラインからロール・アウトされ、本稿を執筆中の2011年1月までに、Belle 測定器の交換予定の検出器のほとんど(シリコン崩壊点位置検出器(SVD), 中央ドリフトチェンバー(CDC), エアロジェル・チェレンコフカウンタと、time-of-flight カウンタ)が取り外された(図1)。加速器の高度化(SuperKEKB)の準備状況については、過去の高エネルギーニュースでも報告されている[2]ので、本稿では、主に測定器の高度化(Belle II)と目指す物理について取り上げる。



図1 ロール・アウトされ、内部検出器の取り外された Belle

Belle II コラボレーション[3]は、2008年12月に正式に発足、2009年11月までに spokesperson (P. Krizan, J. Stefan Institute)や各種 board を形成し、自身の名前やロゴ(図2)に至るまでを決定した。2010年12月現在、13の国や地域の55の大学・研究機関から約400人の研究者が参加している(図3)。



図2 Belle II ロゴマーク

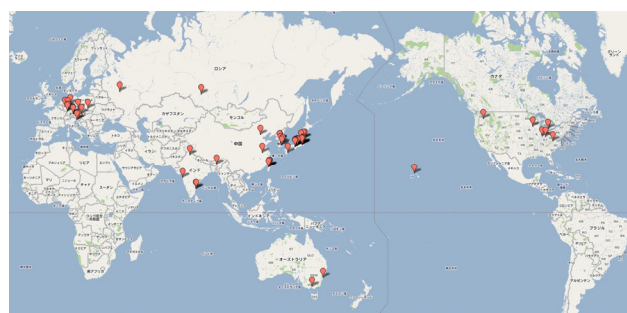


図3 Belle II コラボレーションへの参加状況

2010年12月現在、13の国や地域から57の大学・研究機関が参加している。

ところで、Belleのよき競争相手である BaBar 実験のグループが中心となり、イタリアにもう一つの次世代 B ファクトリー実験(SuperB)を立ち上げようという活動がある[4]。Technical design を続けているなか、いくらかの予算が認められたという話もあり、再び二つのBファクトリーが競い、検証しあうことができるかもしれないと期待されている。

## 2 Belle II の目指す物理

現在の素粒子物理学においては、標準理論が、ニュートリノの振動現象を除いて、これまでに観測されたあらゆる実験結果を説明することに成功している。しかしながら、標準理論は階層性の問題、相互作用が統一されておらず、重力も含まれていない、暗黒物質を説明できない、などの不十分な側面がある。これらの問題を解決するために標準理論を超える新しい理論として、超対称性や余剰次元など

の様々な理論が提案されているが、そのいずれにおいても TeV のエネルギー領域に新しい物理法則があると考えられている。

この TeV 領域にある物理の開拓が今後の素粒子物理学の最重要課題であり、そのためには、(1) TeV 領域のエネルギーフロンティア実験によって新粒子群を直接生成しその性質を詳細に調べると同時に、(2) 高輝度フロンティア実験により新しい物理のフレーバー構造を明らかにすることが必要である。こうした二つの相補的なアプローチが重要であることは、標準理論が構築・確立された歴史を振り返っても明らかである(たとえば、K 中間子のデータからチャームや第 3 世代のボトム、トップ・クォークが予言され後に高エネルギー加速器で発見された)。2010 年にいよいよ始動した LHC 実験は前者の先鞭をつけるものであり、新物理の最初の証拠が発見される可能性が高い。本稿で解説する Super-KEKB/Belle II 実験は後者の代表格である。

LHC が目指す TeV 領域に新しい物理があれば、それは B 中間子の崩壊にも影響する。この場合には、ペンギンダイアグラムなどの量子補正(ループ)に新粒子が現れ、観測量に標準理論からのズレが生じる。これまでの B ファクトリー実験の測定結果の中にもその手がかりがいくつかあるが、ほとんどの測定は統計精度がリミットしている。Belle II 実験では、TeV 領域の新物理に感度が高い B 中間子の稀崩壊モードにおける CP 非対称度や崩壊分岐比などを数パーセントの究極精度で測定する。また、スーパー B ファクトリーは、スーパー  $\tau$  / charm ファクトリーでもあり、B 中間子とほぼ同数できるタウ・レプトンやチャーム中間子も駆使して、新物理に感度が高い多様な測定が可能となる。こうした間接探索では原理的にエネルギー(質量)の上限値がない。従って、LHC が目指すエネルギー領域に新物理がない場合には、Belle II 実験での heavy flavor の豊富かつ精密な測定が、高いエネルギースケールを探索する有効な手法となる。以下では、Belle II 実験における代表的な測定を紹介する。Belle II の物理のより詳しいことを知りたい読者は文献[5]を、また以下でいくつか触れる現在の測定結果については Belle HP[1]にある論文リストを参照いただきたい。

2.1 新物理起源の CP 非保存やクォーク混合の探索

Belle II 実験でまず重要なのは、B 中間子の稀崩壊モードにおける CP 対称性の破れを測定し、系統的に標準模型の予言と比較することによって新物理の関与を調べることである。

たとえば、図 4 に示すペンギンダイアグラムによって起こる  $b \rightarrow s\bar{s}$  型の遷移における CP 非対称性度は、標準理論ではツリーダイアグラムで起こる  $b \rightarrow c\bar{c}s$  型の遷移 ( $B \rightarrow J/\psi K_s$ ) のそれとほぼ等しくなる。一方、新粒子があ

れば、それがペンギンループにのみ寄与し、CP 非対称度が変化する。特に  $B \rightarrow \phi K_s, \eta' K_s, K_s K_s K_s$  崩壊は、強い相互作用などによる理論的な不定性が数%と小さく、もっともクリアな崩壊モードである。現在の CP 非対称度の測定値は、標準理論値  $\sin 2\phi_1 = 0.67 \pm 0.02$  に対して、 $\sin 2\phi_1^{\text{eff}} = 0.56 + 0.16 - 0.18(\phi K_s), 0.59 \pm 0.07(\eta' K_s), 0.74 \pm 0.17(K_s K_s K_s)$  であり[6]、誤差が大きく判然としない。Belle II 実験では、これらの CP 非対称度の差  $\Delta S = \sin 2\phi_1^{\text{eff}} - \sin 2\phi_1$  を 0.02 ~ 0.04 の究極の精度で測る。このズレが確定すれば、新物理の証拠となるばかりでなく、新物理による CP 非保存が見えたことになる。

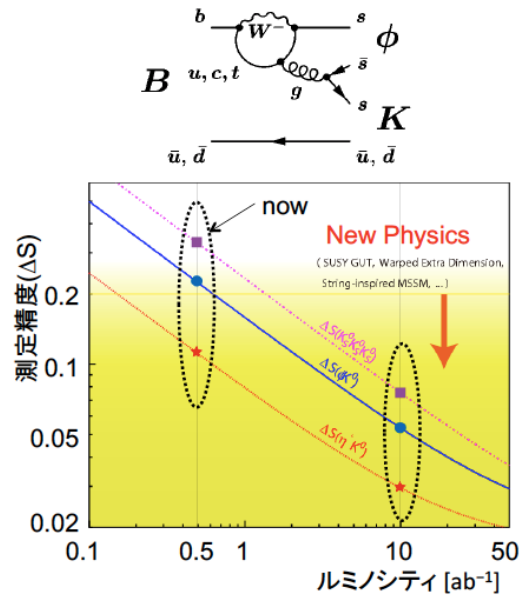


図4 ペンギン崩壊のファインマン図と  $B \rightarrow \phi K_s, \eta' K_s, K_s K_s K_s$  崩壊における CP 対称性の破れの測定精度の予想

また、電磁ペンギン崩壊  $B \rightarrow X_s \gamma$  は、これまでもその分岐比の測定結果が新物理のモデル構築に強い制限を与えてきた。Belle II 実験では、 $B \rightarrow X_s \gamma$  および  $X_d \gamma$  崩壊における CP 非対称度の数%での高精度測定が可能となる(図5)。この崩壊で出る光子 ( $\gamma$ ) に注目すると、標準理論では  $b \rightarrow s(d)\gamma$  過程からの光子はほぼ左巻きとなり、CP 非対称度は  $< 0.02$  と予想されている。一方、新物理による右巻きカレントがあれば、 $B \rightarrow X_{s(d)} \gamma$  と  $B \rightarrow \bar{B} \rightarrow X_{s(d)} \gamma$  の干渉による時間に依存した CP 非対称度が現れ、SUSY のモデルは 10% 程度の CP 非対称度を予言している。

さらに、ペンギンダイアグラムで発生した  $\gamma$  (または  $Z^0$ ) がレプトン対に結合して起こる電弱崩壊  $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$  では、この三体崩壊の様々な分布を調べ、新粒子の性質を見る。たとえば、標準理論は、レプトン対 ( $\ell^+ \ell^-$ ) の前後方非対称度 ( $A_{FB}$ ) が、 $\ell^+ \ell^-$  の不変質量の関数として図 6 の“SM”のようになると予言する。が、新物理があるとその振る舞いが大きく変化する。図 6 に示した現在の Belle の測定結果は、SM よりもやや大きな値を示しており、Belle II での精密測

定が待たれる。 $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$ では、これ以外にもCP非対称性やレプトン普遍性( $K^* e^+ e^-$ と $K^* \mu^+ \mu^-$ )などの様々な測定可能量があり、その結果からペンギンループに関与する新粒子の性質を探る。

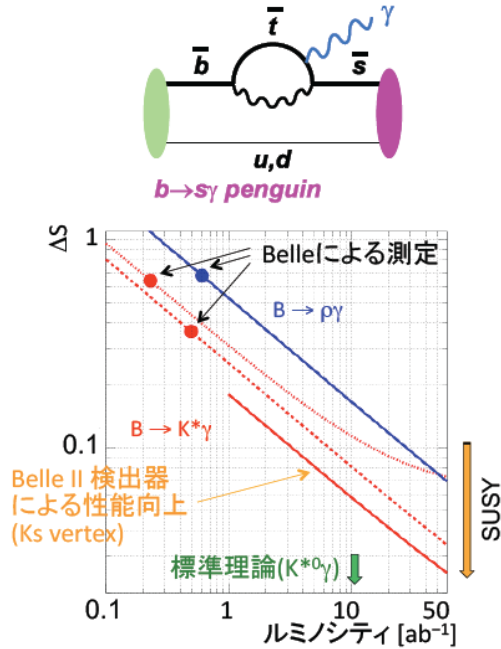


図5  $B \rightarrow X_{s(d)} \gamma$  崩壊のファインマン図(上)とCP非対称性の測定精度の予想(下)

$K_s \rightarrow \pi \pi$  崩壊バーテックスの検出効率の改善による精度向上が期待される。

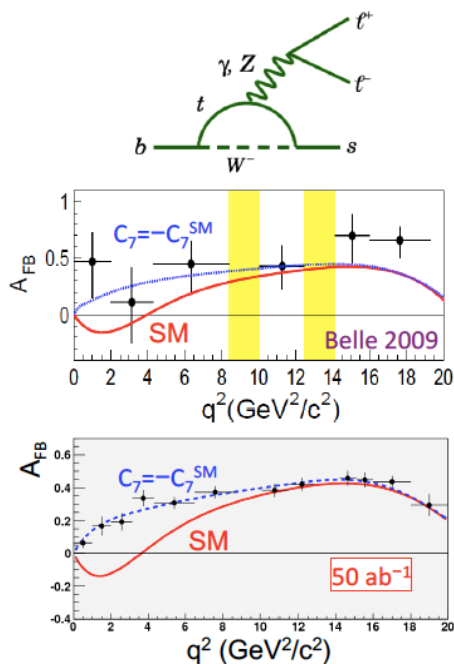


図6  $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$  崩壊のファインマン図(上)と前後方対称性度: Belleでの測定結果(中)とBelle IIでの精度予想(下)

## 2.2 $B \rightarrow \tau$ 遷移による荷電ヒッグス粒子探索

標準理論を超える新物理の多くは、複数のヒッグス粒子を予言しており、たとえば超対称性理論では、標準理論が予言するヒッグス粒子以外に、別の中性のヒッグス粒子と電荷を持った荷電ヒッグス粒子( $H^\pm$ )が現れる。この観点で最重視されるのが、 $B \rightarrow \tau \nu$  崩壊と  $B \rightarrow D \tau \nu$  崩壊である。これらは、標準理論では荷電ウィークボゾン( $W^\pm$ )の交換で起こるが、荷電ヒッグス粒子が存在するとツリーレベルで影響し、崩壊分岐比が標準理論の値から大きく変化する(図7)。その変化は、 $\tan \beta / M_H$ の関数として計算され、2HDM (Two Higgs Doublet Model) では、 $B \rightarrow \tau \nu$  の分岐比が  $(1 - M_B^2 \tan \beta^2 / M_H^2)^2$  倍になる。

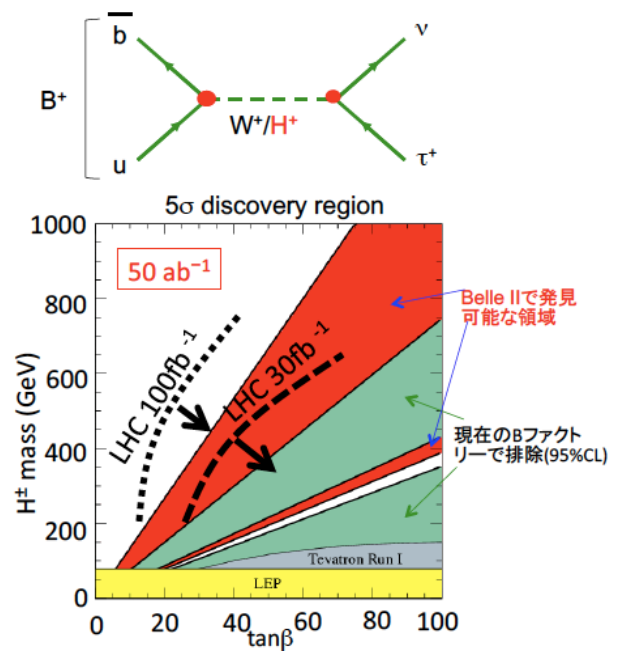


図7  $B \rightarrow \tau \nu$  崩壊のファインマン図(上)と分岐比測定(下)

$B \rightarrow \tau \nu$  崩壊は、現在の Belle 実験ではじめて発見され、崩壊分岐比の世界平均値は現在  $(1.73 \pm 0.35) \times 10^{-4}$  である。この値は、標準理論の予言値  $(0.786 + 0.179 - 0.083) \times 10^{-4}$  よりも2.4σ高いが、測定精度が統計でリミットされており、Belle II 実験での精密測定を切望している。図2.4の緑色(淡灰色)の領域は、現在の測定結果から棄却された領域(95% C.L., 2HDM)であるが、Belle IIでは、赤色(濃灰色)の領域にあれば、5σの有為さで信号を捉えることができる( $50 ab^{-1}$ )。同様の探索は  $B \rightarrow D \tau \nu$  崩壊でも可能であり、この三体崩壊の場合にはタウの偏極度の情報を使って、新物理の性質を見る。Belle IIでの探索感度は、LHCでの直接探索と同程度であり、さらに、荷電ヒッグスの証拠発見だけでなく、その  $b, c$  クォークや  $\tau$  レプトンへの結合を理論予想と比較することができる。

### 2.3 タウ・レプトン物理

クォークセクターの混合現象が数多く測定されCP位相を含む混合行列の精密測定が進んでいる一方で、荷電レプトンのセクターでは、たとえば  $\mu \rightarrow e\gamma, \tau \rightarrow e\gamma, \tau \rightarrow \mu\gamma$  などの混合現象は未観測である。ニュートリノ振動が確立し、レプトン・フレーバー数が保存しないことはわかっているが(LFV)、ニュートリノの混合によって引き起こされる荷電レプトンのLFV崩壊は極めて起こりにくいと計算されている(分岐比で $10^{-54}$ 程度)。従って、荷電レプトンのLFV発見は、即座に新物理の発見となる。実際に、超対称性理論の多くは、これらの崩壊が近未来の実験で測定可能なレンジにあることを予言する。仮にミューオンやタウのLFV過程が発見されれば、素粒子物理学におけるブレークスルーとなり、新しい研究のパラダイムとなる。

最近始まったPSIのMEG実験では、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の探索が $O(10^{-13})$ の分岐比感度を目指して進んでおり、その結果が注目されている。仮に、この探索領域で $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊が起こると、同じ新物理モデルでは、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 崩壊が $O(10^{-9})$ で起こりうる。タウ・レプトンのLFV崩壊には、 $\tau \rightarrow e\gamma, \tau \rightarrow \mu\gamma$ 以外にも、 $\tau \rightarrow \ell\ell\ell$ や $\tau \rightarrow \ell hh'$ ( $hh' = \pi, K$ )など50種類もの可能な崩壊モードがある。その中には、それぞれ違った物理モデルに感度を持つものがあり、モデルの選別に有用な情報を与える。

タウのLFV崩壊探索は、現在のBelle実験でもっとも厳しい上限値として $O(10^{-8})$ の値が得られているが(図8)、この測定感度はデータ量で決まっている。Belle II実験では、 $O(10^{-9})$ での探索によってLFVの証拠発見に期待している(発見がなくとも新物理に強い制限を与える)。

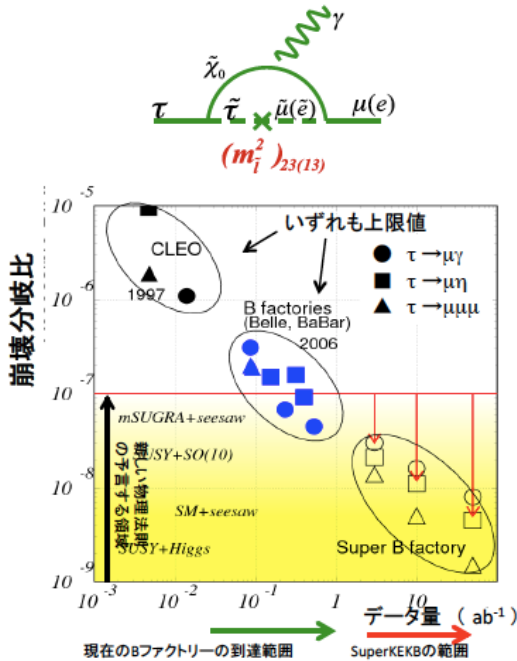


図8 タウ・レプトンのLFV崩壊の探索感度

$\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊が第2-1世代の遷移であるのに対し、 $\tau \rightarrow \mu\gamma, \tau \rightarrow e\gamma$ はそれぞれ第3-2,3-1世代の遷移であり、新物理のフレーバー構造を反映するデータとして極めて興味深い。

### 2.4 ハドロンの物理

Bファクトリー実験では、CP対称性の破れを始めとする電弱標準理論の検証結果だけでなく、 $D^{(*)}D^{(*)}$ の質量領域に $X(3872), Y(4260), Z(4430)^+$ などの新種のハドロン共鳴(エキゾチック・ハドロン)が相次いで発見された(図9)。高ルミノシティ電子・陽電子衝突実験の潜在能力の高さを示す発見といえる。特に $\psi'\pi^+$ への崩壊で見つかった $Z(4430)^+$ は、少なくとも4つの構成クォークを必要とし、通常のスピン・パリティなどの量子数を決定し、エキゾチックハドロンの候補も見つけている。Belle II実験では、より多くの新粒子群が見つかる可能性が高いが、それだけでなく、崩壊分布などの詳細測定からスピン・パリティなどの量子数を決定し、エキゾチックハドロンの本性の理解を進めたい。クォーク模型の確立以降、ハドロンはメソン( $q\bar{q}$ )とバリオン( $qqq$ )に分類され理解されてきた。こうした研究は、Spring-8のLEPS実験で報告され、J-PARCでも進みつつあるペンタクォーク状態の探求とともに新しい学際領域となりうる。

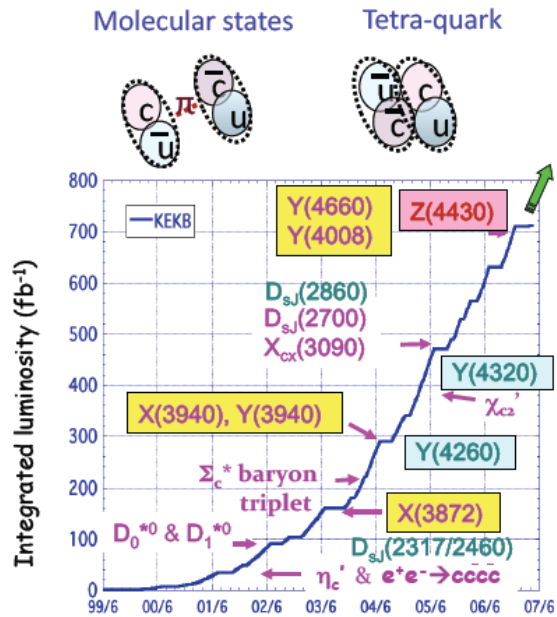


図9 Belle実験での新しいハドロン共鳴の相次ぐ発見

Belle IIでは、スピン・パリティの決定などより詳細な測定からその本性を探る。

## 2.5 物理のまとめ

以上で述べた以外にも、CKM 行列の精密決定による新物理探索、 $B \rightarrow K\pi$  崩壊の直接的 CP 対称性の破れ[7]、D 中間子混合における CP 対称性の破れなど、他にも多くの研究テーマがある。そのすべてをここで紹介することはできないので、興味ある読者は文献[5]とそこで引用されている文献を見て欲しい。

LHC で B 崩壊にターゲットを絞って開始された LHCb 実験との比較について言及しておく。LHCb 実験の有利な点は、陽子-陽子衝突による B 生成断面積の大きさにある。また、 $B_s$  中間子も大量に生成されるため、 $B_s$  を使った新物理探索に有利である。その一方で、 $\pi^0$  や  $\gamma$  の検出、終状態にニュートリノを含む崩壊の測定には難がある。従って、上述した多くの興味ある深い崩壊モードの多くの測定では、 $e^+e^-$  衝突による Belle II 実験の方が有利だと考えられる。

表 1 は、理論研究者の考察に基づいて、ある超対称性モデルを仮定したときに、それが B 稀崩壊などの測定量にどのように反映されるかをまとめたものである[7][8]。ズレがどのような測定で見られるかを系統的に測定することによって、超対称性が破れた起源に迫れることを示している。こうした新物理の“elucidation”が、Belle II が究極的に目指すところであるが、そのためには、さらに大量のデータを必要とする。そして、理論研究者との連携も重要である。

表 1 Belle II で行う測定の新物理のモデルへの感度  
多様な測定によって新物理のモデル選別が可能となる。

Pattern of deviations from the Standard Model

Y.Okada

Observables SUSY models	Unitarity triangle	$B-\phi K_S$	$b \rightarrow s\gamma$ Indirect CPV	$b \rightarrow s\gamma$ Direct CPV	$\tau \rightarrow \mu \gamma$
mSUGRA	-	-	-	-	-
SU(5) SUSY GUT + $\nu_R$ (degenerate)	-	-	+	-	-
SU(5) SUSY GUT + $\nu_R$ (non-degenerate)	+	+	++	-	++
U(2) Flavor symmetry	+	+	++	+	/

++: large +: sizable -: small

## 3 加速器・衝突点とビーム・バックグラウンド

### 3.1 SuperKEKB 加速器

我々は、現行の KEKB 加速器をアップグレードし、低エミッタンスビームを用いて約 40 倍の高ルミノシティを目指し SuperKEKB 加速器の建設準備を進めている。SuperKEKB 加速器の詳細については、過去の高エネルギーニューズ記事[2]があるので、そちらを参照されたい。

### 3.2 衝突点付近の設計

SuperKEKB のビーム交差角は KEKB の 22 mrad より大幅に大きい 83 mrad となった(図 10)。KEKB では最終収束磁石を電子リング・陽電子リングで共有していたが、SuperKEKB では交差角を大きくしたことで各リング専用の最終収束磁石を置くことができ、光学調整の自由度が増した。また、KEKB では衝突点を通り抜けたビームが下流側の最終収束電磁石の中心から離れた点を通り、そこで軌道が曲げられていた。これによってディスパージョンが発生し、それを抑えられなければエミッタンスの増大につながる。SuperKEKB では各リング専用の最終収束磁石を持つことで、こういった無用なバンドを回避している。また、後述するバックグラウンドの抑制にもつながっている。

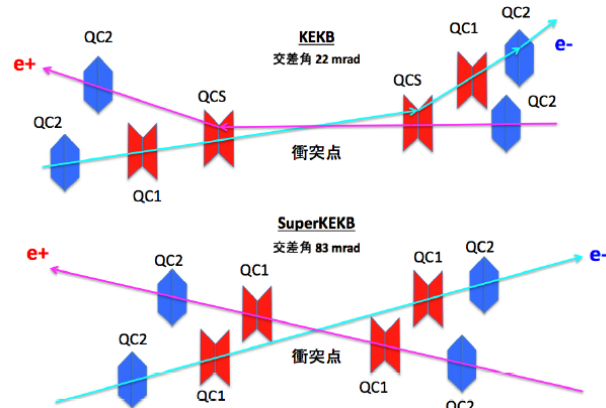


図 10 KEKB と SuperKEKB の最終収束電磁石

大きな交差角への変更に従い、衝突点付近の設計は KEKB と比べて大きく様変わりした。まず、最終収束電磁石よりも内側でビームパイプが二股に分かれるため、ビームパイプ径は 20 mm よりも小さくしなければ、他方のビームがコイルの外を通るような電磁石の設計が成り立たない。また、水平方向に交差するため、ビームパイプが占める容積が大きくなり、検出器とビームパイプの間の隙間が減って、ケーブル配線や冷却配管のスペースの取り合いが厳しくなっている。さらに、その狭いスペースの中で、増大するバックグラウンドに備えて、バックグラウンドを止めるシールドを置く場所も確保する必要がある。また、細い径で十分な強度を実現するため、サポート機構についても注意深く設計する必要がある。

図 11 に、SuperKEKB の衝突点ビームパイプの現在のデザインを示す。衝突点の前方 5 cm から後方 3 cm の部分は、測定器のアクセプタンスの内側なので、衝突点から出てくる粒子を止めないように軽い物質の素材(ベリリウム)を用いる。直線部分に落ちる熱エネルギーは主に壁電流によるもので、80 W 程度であり、これをベリリウムの 2 重管の間にパラフィン( $C_{10}H_{22}$ )を流して冷却する。パラフィンによる冷却能力は、毎分 1 リットル・10 度の温度上昇で約 270 W

であり、発生する熱を十分に冷却できる。KEKB の衝突点ビームパイプの直線部分はすべてベリリウムで作ったが、今回は直線部のアクセプタンス外の部分にはSUSを用いる。ビーム交差角が大きくなったことで二股部分が直線部からすぐに始まるため、接合部分の形状が複雑になり、直線部分をすべてベリリウムで工作することは難しい。溶接線の両側に冷却剤と真空が接することを許したことで、ベリリウム部分の形状が簡単なチューブ構造になり、加工費用を大幅に抑えられる見込みである。ベリリウムとSUSの接合はロー付けで行う。シンクロトロン放射光を吸収するため、パイプの内壁には10 $\mu\text{m}$ の金メッキを行う。

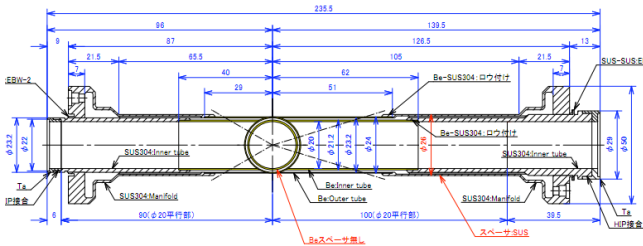


図11 SuperKEKBの衝突点ビームパイプ(直線部分)

直線部に続く二股部分(図12)は、なるべくシャワー粒子を通さない重い素材(タンタル)を用いて、バックグラウンドから検出器を守ってやる必要がある。シンクロトロン放射が直線部に入り込まないようにするため、ビームが衝突点に入るほうだけビームパイプの内径が直径20mmから9mmまで絞られており、非対称な形状となっている。径を絞っているのは入り口側だけなので、ほとんどのHOMエネルギーは下流側に逃げるのができ、衝突点付近にトラップされるのはわずかである。また、ビームパイプに当たった放射光が反射して直線部に入り込まないように、二股部分の内壁にはギザギザの“ridge構造”が付けられている。直線部分の端(SUS)とタンタルの接合はHIP接合で行う。細いベリリウムの両端に重いタンタルがつくため、タンタルの重心近くを保持するサポート構造を設計している。

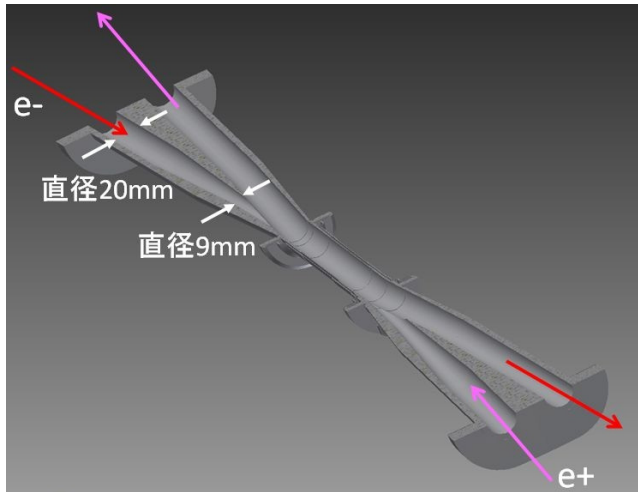


図12 SuperKEKBのビームパイプ(二股部分)

二股部分パイプの外側の検出器との隙間には、厚さ1cm以上のタングステン層を配置し、バックグラウンドが作るシャワーから内層の検出器を守る(図13)。この隙間には読み出しケーブルや冷却配管も通るので、最適な形状を検討中である。

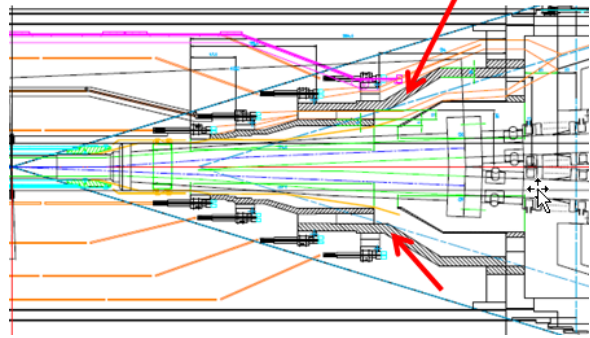


図13 タングステンマスクの形状(案)

### 3.3 検出器バックグラウンド

SuperKEKBでは、ルミノシティの向上に伴い検出器バックグラウンドも大幅に増える。衝突点付近の設計の際には、これらのバックグラウンドの詳細を理解し、検出器の性能を著しく損ねない程度に抑える必要がある。

SuperKEKBで想定されるバックグラウンド源には以下のようなものがある。

- (1) **タウシェック散乱**：同一バンチ内のビーム粒子が衝突して運動量が増加または減少する。軌道を外れた粒子が衝突点付近でビームパイプに当たってシャワーを生成し、検出器へ届くとバックグラウンドとなる。散乱確率はビームサイズに反比例するため、KEKBに比べてタウシェック散乱によるバックグラウンドは激増する。対策としては、軌道を外れた粒子をアーク部の可動マスクで可能な限り落とし、衝突点付近まで到達させないことが鍵になる。KEKBでは水平方向の可動マスクは内側のみであったが、SuperKEKBでは外側にも水平マスクを置くことが必須であり、その設計が進められている。
- (2) **ビームガス散乱**：ビーム粒子が残留ガスに衝突し、クーロン散乱により角度が変わるか、制動放射によってエネルギーが減少する。ビーム電流と真空度に比例するので、KEKBと同等の真空度を達成できればそれほど深刻なバックグラウンドではない。衝突点付近のみ、真空ポンプを近くに置けない上にビームパイプの径が細くなるため、真空度がKEKBの百～千倍悪くなる可能性があるが、衝突点付近で散乱された粒子はもっと下流でビームパイプに当たるため、この寄与は少ない。
- (3) **シンクロトロン放射**：ビームが磁場によって曲げられる際に放射光を出す。衝突点手前の最終収束電磁石で発生

した放射光(数～数十 keV)が、ビームパイプのベリリウムの部分を貫通して内層の検出器(PXD/SVD)に当たるとバックグラウンドとなる。

- (4) **シンクロトロン放射(後方散乱)**: 衝突点を通り過ぎたビームが反対側の最終収束電磁石で曲げられる際に発生する放射が、散乱されて衝突点側に戻ってくるとバックグラウンドとなる。KEKB では最終収束電磁石が両リングで共有だったため、反対側の最終収束電磁石の中心から離れた所を通過して大きく曲げられ、強い放射光が出ていた。SuperKEKB では各リングが専用の最終収束電磁石を持っているので、この寄与は少ない。
- (5) **Radiative Bhabha 散乱**: ルミノシティに比例する。衝突点で電子と陽電子が Radiative Bhabha 散乱すると、ビーム軸方向に光子が出る。この光子がずっと下流の偏極電磁石の鉄に当たって巨大双極子共鳴反応によって中性子が発生し、検出器付近まで戻って来たものが KLM のバックグラウンドとなる。また、光子を出してエネルギーを失った電子・陽電子は軌道を外れるが、各リングが専用の最終収束電磁石を持つおかげでビームパイプに当たるのはもっと下流の場所となり、この寄与は少ない。
- (6) **二光子過程**: 同じくルミノシティに比例する。 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$  過程で生成した電子・陽電子対が PXD に当たるとバックグラウンドとなる。シミュレーションと KEBK でのマシンスタディから、問題ないレベルであることが確認されている。
- (7) **ビーム・ビーム相互作用**: ビームが相手のビームと衝突する際に、相手側のビームから受ける電磁力によって散乱される。

### 3.4 バックグラウンドの見積もり

上述した各バックグラウンドのうち、特に問題になるのはタウシェック散乱とシンクロトロン放射である。KEKB での測定からの外挿および SuperKEKB のシミュレーションを用いて、許容できる範囲かどうかのチェックを進めている。

#### (1) KEBK でのマシンスタディからの見積もり

2010 年 6 月、衝突を起こさない状態(電子リングのみ・陽電子リングのみ)の KEBK で検出器バックグラウンドを測定した。このとき観測されるバックグラウンドは主にタウシェック散乱とビームガス散乱によるものである。前者のみビームサイズに依存するので、ビームサイズを変化させながら測定することで、両者を切り分けることができる。

測定の結果、約 7 割(検出器によって異なる)のバックグラウンドがタウシェック散乱に起因するものであることが分かった。また、陽電子リングのビーム寿命は、タウシェッ

ク: 130 分・ビームガス: 800 分と測定された。ここで SuperKEKB の真空度が KEBK と同等と仮定すると、ビームガス寿命は KEBK と同程度と考えられるので、ビームガスバックグラウンドはビーム電流の比で増える。また、SuperKEKB でのタウシェック寿命の設計値は両リングで 10 分であるから、陽電子・電子リングのタウシェックバックグラウンドは、ビーム電流の比に加えて、寿命の比で増える。このような外挿を行い、さらに各検出器の向上(SVD の積分時間の短縮・CDC のセルの小型化・ECL の読み出しに波形サンプリングによる time window を導入するなど)による効果を加味した結果、SVD, CDC, TOP, ECL について、外挿された結果は検出器からの要求を満たすものであった。この外挿においては、散乱粒子がリングのアーク部のマスクで止められる(=衝突点付近まで到達しない)割合や、衝突点付近に置くことのできるシャワーを止めるシールドの厚みが、KEKB と同等程度であることを仮定していることに注意が必要である。SuperKEKB においては、この仮定を満たす条件下で衝突点付近の設計を進めている。

#### (2) シミュレーションによる見積もり

タウシェック散乱について調べたシミュレーションでは、シミュレーションの信頼性を確かめるため、KEKB のシミュレーションを行い、前述のマシンスタディ測定結果と比較したところ、両者は誤差の範囲で一致した。これを受けて、SuperKEKB でのシミュレーションも始まっている。最近のシミュレーションでは、リングのアーク部 4 ヶ所に水平方向のマスクを内側と外側に置いて、衝突点付近に到達する散乱粒子の数を調べた。KEKB でのタウシェックバックグラウンドは、全ビームロスのうち 1% 程度(60mW)が衝突点付近に到達し、衝突点から 6～10m の位置でビームパイプの壁に当たっていた。また、今回のシミュレーションによると、全ビームロスのうち約 2% が、衝突点から 200m の場所に置いた最後のマスクより衝突点付近に近い位置で散乱されて、検出器バックグラウンドとなっていることがわかった。今回置いた 4 ヶ所のマスクをどれだけ閉めてもこの 2% は残る。従って、1% 程度まで減らすためには、もっと衝突点に近い場所に追加のマスクを置くことが必要であり、設置場所の検討を始めている。

シンクロトロン放射について調べたシミュレーションでは、入り口のビームパイプの二股部分の半径を 20mm から 9mm に絞る形状のおかげで、直線部分に入り込む放射光を大幅に減らせていることが確認できた。放射光が 5mrad 以下の小さい角度でビームパイプに当たると、パイプ壁をつき抜けて PXD に当たる放射光は検出器の要求より十分に少ない。ただし、高いエネルギーの放射光がビームパイプ内壁で後方散乱される効果や、衝突点付近の磁石の漏れ磁場によってビーム軌道が曲げられる際に発生する

放射光など、より詳細な見積もりを行う予定である。また、ridge 構造のギザギザの先端部でティップ散乱された放射光が直線部分に入ってしまう効果は、シミュレーションでの見積もりが難しい。そのため、ridge 構造を付けた試験片に放射光を当て、反射光の角度分布を測定するビームテストを予定している。

その他のバックグラウンド源についても、各種ジェネレーターによるイベント生成を行い、GEANT4による検出器フルシミュレーションで影響を見積もる予定である。

## 4 Belle II 検出器

図 14 に、Belle II 検出器の概要を、現行 Belle 検出器と比較する形で示す。ソレノイド磁石やリターンヨークなどの大きな構造体は改造せず再利用する一方で、粒子識別装置より内側の各測定器は、完全に新しく入れ替える。長年 Belle のデータを解析していると、検出器がもう少し高性能ならばよかったのという部分は少なからず出てくる。今回のアップグレードでは、当然そういった検出器性能の向上を図るが、前述したビーム・バックグラウンドの増加のために、実際には容易ではない。新しい技術の導入により基礎性能に飛躍的な改善の見込める測定器はまだしも、比較的完成された技術に基づく測定器は、現行性能を維持することすら挑戦的である。以下にそれぞれの測定器の準備状況と期待される性能、および全体の建設計画を述べる。本稿で記す以上の詳細は、Belle II Technical Design Report [9] を参照されたい。

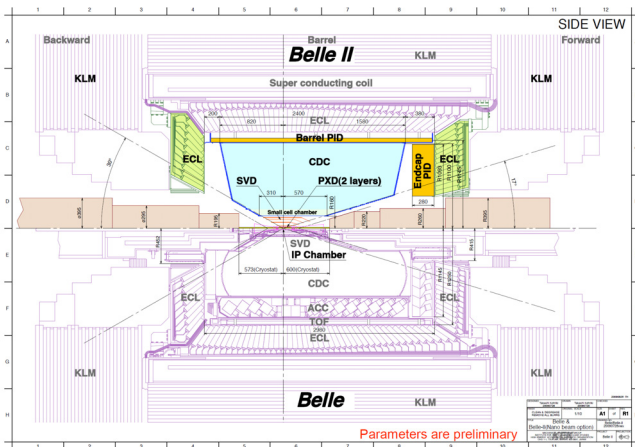


図 14 検出器の断面図(概略)

上半分が Belle II, 下半分が Belle を示す。

### 4.1 崩壊点位置検出器

これまでの B ファクトリー実験と同様、非対称エネルギーの電子・陽電子衝突と B 中間子の崩壊点位置の精密測定による崩壊時間差  $\Delta t$  の決定は実験の重要な鍵である。3.5 GeV だった Low Energy Ring (LER) のビームエネルギーが SuperKEKB では 4 GeV に、8 GeV だった High Energy

Ring (HER) が 7 GeV になり<sup>1</sup>、ブースト・ファクターが小さくなる一方で、衝突点でのビームパイプの内径は 30 mm から 20 mm へと細くなる<sup>2</sup>ので、そのすぐ外に崩壊点位置検出器を設置することにより、 $\Delta z$  の測定精度向上を図る。衝突点近傍ではバックグラウンドレベルが高いと予想されるため、シリコンストリップ検出器 (SVD) の内側に、2 層のピクセル型シリコン検出器 (PXD) を導入する (図 15)。B ファクトリー程度の (低い) エネルギーの実験での使用に耐えうる低物質量のピクセルセンサーはこれまでに例がなく、Belle II では、ドイツの Max-Planck Institute が中心となって ILC にむけて開発進めてきた DEPFET (DEpleted P-channel Field Effect Transistor) [10] を完成させて使用する予定である。

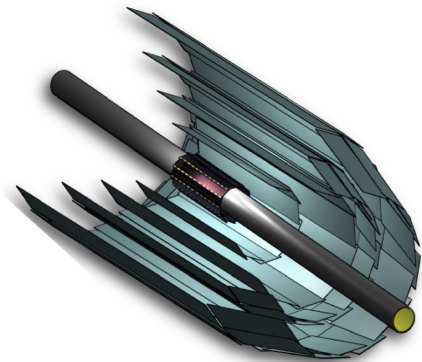


図 15 PXD(2層)とSVD(4層)の配置図

DEPFET の概念図を図 16 に示す。空乏層で生じた電子は、internal gate に集まって gate を開き、(clear gate を開いてそれを除去するまでの任意のタイミングで) external gate を開けば、電荷量に比例する電流が source から drain へと

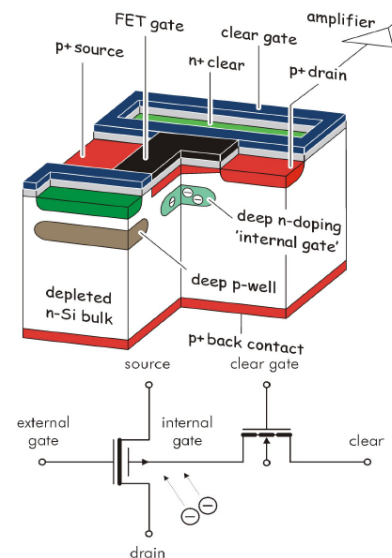


図 16 DEPFET 概念図

<sup>1</sup> LER では特に厳しい Touschek 散乱によるビーム寿命の低下を緩和するために、ビームエネルギーを高くした。

<sup>2</sup> LER/HER の各リング専用の二つの最終収束電磁石を衝突点に近づけた場合にとりうる最大のビームパイプ内径が約 20 mm であったため、高次モードの励起を避けるためには最終収束電磁石の内側のビームパイプはそれより太くできない。



流れ、専用線から読み出される。Belle II では、1 フレームを  $20\mu\text{s}$  ( $5\mu\text{s}$  に切り替え可能) かけて連続的に読み出し続け、直後の ASIC で level 1 トリガーとの対応付けを行う。読み出すセルにだけ電力を消費するため、有感領域の電力消費は高々  $0.1\text{W}/\text{cm}^2$  であり、空冷で十分であることも大きな魅力である。11 月には小型の試作センサー6枚を並べて、ビームテストを行い、動作・性能を確認した。実機と同じ面積のセンサーを用いての統合試験には、もうしばらく時間を要する。

一方で、SVD は半径方向に大きくして、その外側の中央飛跡検出器(CDC)にとってバックグラウンドが厳しい領域をカバーする。同時にこれは  $K_s$  の軌跡を利用して B 中間子の崩壊点位置を決定する  $B \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$  の時間に依存する CP 非対称度測定などの重要な物理解析の感度を向上するためでもある。大きな領域をカバーするための大面積の両面シリコンストリップセンサーは、浜松ホトニクスで開発を進めている。高いバックグラウンドに対応するため、読み出しには shaping time の短い ( $\sim 50\text{ns}$ ) APV25[11] を使用する。最大の問題は、大面積センサーから読み出す場合の S/N が悪すぎることである。これを解決するために、従来のように読み出しハイブリッドをラダーの両端に置く形ではなく、センサー表面に置いて strip capacitance を抑えるという苦渋の決断をした。Flexible Printed Circuit (FPC) により裏面用の APV25 も表面に配置することで冷却経路を半分で済ますなどの工夫をし、また幸いにして APV25 の thinning ( $300\mu\text{m} \rightarrow 100\mu\text{m}$ ) が非常にうまく行えたため、センサー・支持構造・APV25・冷却配管・FPC を合わせて1層あたり平均  $0.55\% X_0$  という低物質質量におさえることができた。現在までにプロトタイプ・ラダーを二つ組み立てて性能評価を行っている。また、読み出しエレクトロニクスの開発も順調に進んでいる。

図 17 にシミュレーションにより予想される impact parameter resolution を示す。薄い PXD を崩壊点近くに配置できることにより、Belle と比べて大幅に改善すると期待される。

## 4.2 中央飛跡検出器(CDC)

粒子の飛跡測定と運動量決定、 $dE/dx$  測定による粒子識別、更には飛跡情報による level 1 トリガーを生成するためにドリフトチェンバーを用いる。ガスは  $\text{He}(50\%) + \text{C}_2\text{H}_6(50\%)$ 、センスワイヤーは  $\text{W}(30\mu\text{m}\phi)$ 、フィールドワイヤーは  $\text{Al}(120\mu\text{m}\phi)$  で、いずれも Belle と同じである。すなわち、技術的にはほぼ完成された測定器であり、低価格・低物質質量で、トリガー出力も可能な飛跡検出器としては、これ以上の解はない。図 18 にセンスワイヤーの配置図を示す。

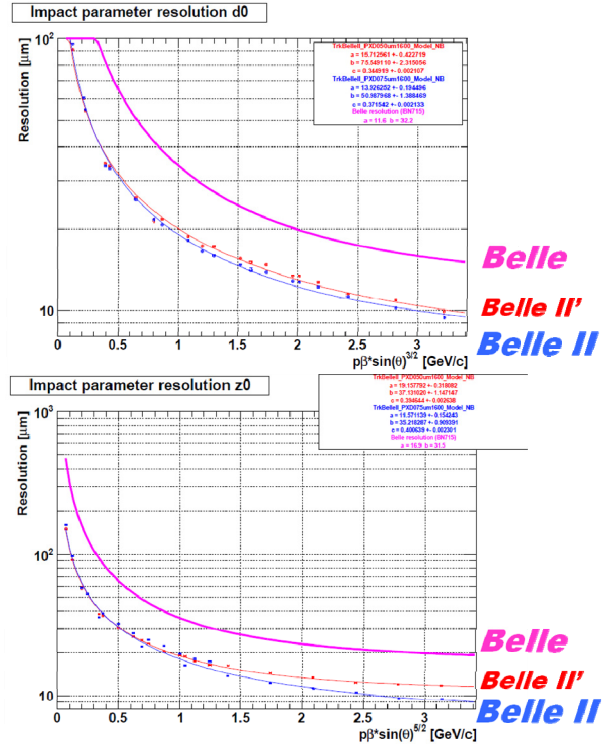


図 17 Pseudo-momentum に対する impact parameter resolution (上:  $r$ , 下:  $z$ )

Belle の場合と比較して全領域で改善がみられる。Belle II の 2 本の線は、PXD のセンサー厚の違うバージョンに対応する。

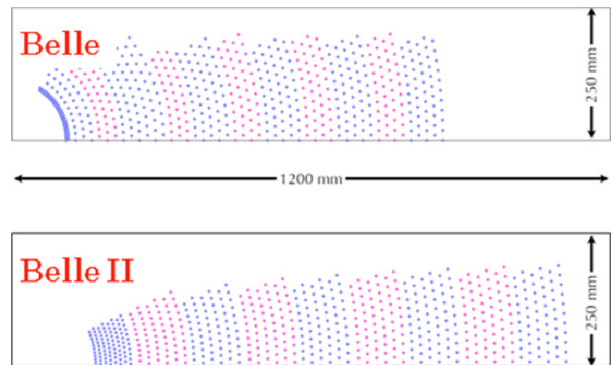


図 18 CDC のセンスワイヤーの配置の比較

バックグラウンドレート増大に備えるため、セルをなるべく小さくすることで、セルあたりのヒットレートを抑え、同時に電子のドリフト時間を短く抑える。構造上の変更点は、以下のとおりである：

- (1) 先述の通り、SVD の拡大に伴い、内半径が大きくなる (もともと内側のセンスワイヤーの位置  $r = 88\text{mm} \rightarrow 168\text{mm}$ )。
- (2) 外側の粒子識別装置(PID)の薄型化により外半径が大きくなる (もともと外側のセンスワイヤーの位置  $r = 863\text{mm} \rightarrow 1111.4\text{mm}$ )。

- (3) それに伴い、レバーアームが伸び、総レイヤー数が 50 から 56 に増加。特に小セル(10mm×6～8mm)レイヤーが最内 2 層から 8 層に増加。
- (4) 結果としてセンスワイヤーの総数が 8400 本から 14336 本に増加。

長いレバーアームのおかげで運動量分解能は、 $\sigma_{pt}/p_t = 0.19p_t \oplus 0.30/\beta$  から  $\sigma_{pt}/p_t = 0.11p_t \oplus 0.30/\beta$  へと向上する(バックグラウンドの効果含まず)。ワイヤー総数の増加に伴う張力の増大が大きな問題となるため、測定器性能に影響のない範囲内でワイヤー1本あたりの張力を減らし、かつエンドプレートの形状を変更し(図 14 参照)、合計 4 トン超の張力に耐えられるようにする。

バックグラウンドレートの増大に対抗するために、読み出しエレクトロニクスもまた刷新する。Belle では波形整形後に Q/T 変換をして、波高を時間幅の情報として記録したために、ワイヤーごとに 1 ヒットあたり 1 $\mu$ s 程度の不感時間を生じていた。Belle II では、波形整形の後に 32MHz10bit FADC により読み出すことで、不感時間をドリフト時間のために避けられないレベル(< 200ns)にまで短縮する。また、検出器内部からエレクトロニクスハットまでの信号線を現実的な量におさえるため、エンドプレートのすぐ後ろに置かれた電子基板でデジタル化を行うことも大きな変更点である。不具合の修正の際アクセスのしやすさが犠牲になるが、やむを得ないところである。

現在、プロトタイプ・チェンバーを用いて最終版と期待されているエレクトロニクスの試験を行っている。また、チェンバー実機のデザインをほぼ終了し、端板の製作が始まっている。

### 4.3 粒子識別装置(TOP, A-RICH)

Belle 検出器と BABAR 検出器には様々な違いがあったが、中でも粒子識別(Particle IDentification; PID)の測定器には大きな違いがみられた。Belle は aerogel を放射体とする閾値型の Cherenkov 検出器(Aerogel Cherenkov Counter; ACC)とシンチレータを用いた Time-Of-Flight counter (TOF)を採用したのに対し、BABAR は、quartz 放射体からの Cherenkov 光の ring image を再構成する DIRC(Direction of Internally Reflected Cherenkov light)を採用した。当時の一刻を争う建設競争や開発状況、実際に遅延した BABAR の quartz bar の納品実績などを考えると、Belle の選択は正しかったといえるが、長期の運転の後に辿り着いた総合性能は、BABAR の方が高かったと認めざるを得ない。この違いを一言で説明するならば、使用する情報が多い方が高い性能を得られるということである。そこで Belle II では閾値型をやめて ring image を再構成する Cherenkov 測定器を導入する。シンチレー

タを使用した TOF は、バックグラウンドに対する感受性が高いため導入しない。

図 19 に Belle II の PID の概念図を示す[12]。バレル部には石英放射体からの Cherenkov 光を内部全反射させ、端部に置いた Micro-Channel-Plate Photo-Multiplier Tube (MCP-PMT) により検出して粒子識別を行う Time-Of-Propagation(TOP) counter を導入、エンドキャップ部には aerogel 放射体からの ring image を 20cm 程離れた場所に置かれた Hybrid Avalanche Photo Detector(HAPD)により再構成する Aerogel Ring Imaging Cherenkov detector(A-RICH)を導入する。いずれも Belle II への導入を目指し開発されてきた測定器で、目標は 4GeV の  $K/\pi$  を  $4\sigma$  以上で分離することである。

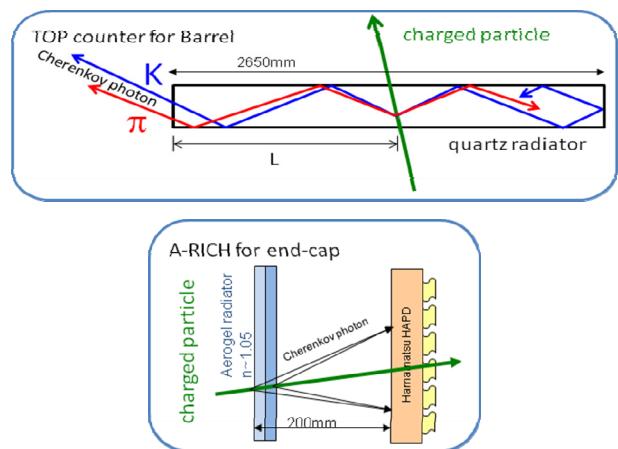


図 19 PID 概念図(上: TOP, 下: A-RICH)

TOP counter の粒子識別原理は以下の通りである。運動量の同じ荷電粒子からの Cherenkov 光は、質量が大きな粒子ほど小さな角度(粒子入射方向に対して)に放射されるため、端面までの経路長が長くなり光の伝搬時間が長くなる。この伝搬時間の違いが主な判定量だが、それに加えて反射により折り重ねられた ring の 2 次元位置情報を測定し、ring image を 3 次元的に再構成することで粒子識別を行う。一方、崩壊点から放射体に荷電粒子がヒットするまでの飛行時間も、質量の大きな粒子ほど長くなるので、伝搬時間と飛行時間は相加的な粒子識別情報を与える。識別の最大の鍵となるのは検出器の時間分解能であり、MCP-PMT の transit time spread が 35ps 未満であることが求められる。また、発生する Cherenkov 光の波長の広がりにより放射体中の伝播速度に広がりを生じる。それによって悪化する時間分解能を改善するために、波長に依存した Cherenkov 角の違いを利用できる色分解集光ミラーを導入している。そのほかにも、ring image を保存したまま伝播させるための大面積石英板の高精度研磨、光陰極の量子効率や寿命の改良など様々な要素の挑戦的な開発目標を達成し、Belle II の十年以上の使用に耐え、かつ概ね目標に迫る性能を持つ試作機が完成

している。また, superbiakali 光陰極の開発による量子効率のさらなる改善も視野にとらえている。

A-RICH 検出器の鍵は, 透明度の高い大面積エアロゲル, 磁場中で動作する 1 光子検出可能な光位置分解能光検出器と, 20cm の expansion gap を可能にするコンパクトな読み出し電子回路である。チェレンコフ光の検出数を増やすためには, エアロゲルは透明で厚く, 屈折率が高い方が有利である。エアロゲルは屈折率の異なるものを 2 層に配置して光検出器上で収束させ, チェレンコフ光子発生点の違いによる角度分解能の悪化を防止しながら, 厚みを 4cm まで増している。また, 一般に屈折率が高くなるとエアロゲルの透明度は悪化するが, 新たに開発したピンドライ法を用い, 目標とする屈折率 1.06 程度のゲルでも透過長 55mm を達成している。ドーナツ状に 456 個配置される HAPD は, 光陰極で生成された光電子を高電圧で加速して photo diode に打ち込んで検出する構造をしており, 75mm 角 144 チャンネルのものを浜松ホトニクスと共同開発してきた。Belle II で用いる上での懸案事項として, 中性子による性能劣化があるが, 利得や量子効率の向上, photo diode の構造変更や, 読み出しの整形時定数の短縮などで, 必要な放射線耐性を備える目途がたった。読み出し回路では, HAPD の全 7 万チャンネル読み出し専用の ASIC の開発が最終段階にきており, これを含む読み出し回路を HAPD 後ろの 5cm の空間に収めるように開発を継続中である。

#### 4.4 電磁カロリメータ (ECL)

Belle の電磁カロリメータは, バレル部と前・後方のエンドキャップ合わせて約 9 千本の結晶シンチレータにより,  $12^\circ < \theta < 157^\circ, 0^\circ < \phi < 360^\circ$  の大立体角をカバーしている。シンチレータにタリウムをドーブしたヨウ化セシウムを選んだことで, 光量が多くエネルギー分解能の高い ( $\sigma_E/E = 0.066\% / E \oplus 0.81\% / E^{1/4} \oplus 1.34\%$ ) カロリメータを実現できた。これは Belle の用途には合致しているが, 発光の時定数が長い ( $\tau \sim 1\mu\text{s}$ ) ために, Belle II の高バックグラウンド環境下での使用には不向きである。そこで, バックグラウンドの特に高いエンドキャップの結晶シンチレータを時定数の短いものと置き換えたい。バレル部に関しては, 既存の結晶シンチレータからの信号をこれまでのように peak hold するのではなく FADC により波形取得してフィットすることでバックグラウンドの重なりを解く。シミュレーションによると waveform fitting はバックグラウンドを 1/7 に抑制する効果があることが分かっている。10 MeV 程度以下の低エネルギーの photon が断続的に重なることによる pile-up noise はそれほど効果的には除去できないため, noise は多少悪化する。Shaping time はこの pile-up noise を想定して短め (0.5 $\mu\text{s}$ ) に設定してあり, ENE は 400 keV – 600 keV となる。現在までに waveform fitting のためのエレクトロニクスの開

発を概ね終了しており, 2011 年度以降, 量産を始められる状況にある。

一方, エンドキャップに新しい結晶シンチレータを導入したいという希望には, 残念ながら現在までに確定的な予算の裏付けがなく, 2015 年の実験開始時に CsI(Tl) をそのまま使うことになるのもやむを得ないというのが実情である。加速器のビーム電流やルミノシティの向上によりバックグラウンドが Belle の 7 倍程度に達するまでは, バレルと同じエレクトロニクスを導入して waveform fitting をすることにより Belle と同程度の性能を発揮できるので, 実験開始から数年間をエレクトロニクスのみでのアップグレードでしのぎ, その後結晶シンチレータのアップグレードを行いたいと考えている。Baseline としては技術的に確立した pure CsI を導入するつもりであるが, 実際にエンドキャップの建設を開始するまでに技術開発が間に合うなら, ほかのまったく新しい結晶シンチレータの可能性も現時点では排除されていない。

#### 4.5 $K_L^0$ muon 検出器 (KLM)

Belle の KLM には Resistive Plate Counter (RPC) が使われてきた。荷電粒子が通過すると resistive なガラス電極の間に蓄えられた電荷が streamer 放電し, 通過位置を測定することができる。ところが, いったん放電した粒子通過点近傍 ( $\sim 0.1\text{cm}^2$ ) を再び完全に帯電させるには 2 秒ほどを要する。この不感時間は, Belle II の特にエンドキャップ部のバックグラウンド環境下においては許容されるレベルではなく, 信号粒子検出効率がほぼ 0% になってしまう。そこで, もっと速い検出器として, シンチレータからの光を波長変換ファイバに通して, 一端に設置された Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) [13] で読み出すシステムを導入する。当初は, 正方形のタイル状のシンチレータを検討していたが, MPPC の放射線 (中性子) 耐性が低いことからそれをコンクリートシールド (通称門型シールド) の外に配置したいため, ストリップ状のシンチレータが採用された。懸念された放射線耐性も, Belle II 環境下で少なくとも 10 年程度は使用可能であることが示されている。

#### 4.6 トリガーと DAQ

トリガーとデータ収集の基本思想は Belle と同様である。KEKB の性能向上とともに Belle のトリガー・DAQ は細かなアップグレードを続けてきており, Belle II においても基本的には同様の概念でのスケールアップで対応できると考えている。

レベル 1 トリガーは, ハドロニック反応事象を 100% 近い効率で取得するために, CDC の飛跡の本数と ECL のエネルギー並びに独立したクラスタ数という独立したトリガーの OR を基本条件とするという意味において Belle と同様で

ある。Belle ではトリガー信号はすべてパラレルに送られていたが、転送技術の高度化により Belle II では高速シリアル転送が採用され、合計約 9000 ビットのトリガー入力を集めることが可能となった。これにより各測定器からのトリガー信号のサマリーだけではなく詳細情報を中央トリガーに集め、約 5 $\mu$  秒の時間をかけてより賢いトリガー決定をすることが可能となった。実験開始時のトリガーレートは予想が困難であるが、デザインルミノシティ ( $8 \times 10^{35} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) で KEKB と同程度に安定して運転されたときには平均 15 kHz 程度が想定されており、DAQ は平均 30 kHz のレベル 1 トリガーを問題なくこなすよう設計されている。トリガーの調整幅は広く確保されるので、ビーム状況に応じて適切なトリガー条件を選択し、レートを調整できると考えている。

Belle 初期の DAQ の成功の要因の一つとして、測定器間で可能な限り統一されたハードウェア (FASTBUS TDC) を使って読み出したことが挙げられる<sup>3</sup>。Belle II でもこの思想に基づき、可能な限りフロントエンドからのデータは共通の転送器 (Belle2Link) を用いて共通のバックエンド (COPPER-III [14]) に送ることで、開発と問題解決、維持の手間を削減する。読み出しの不感時間を 30 kHz の時に 3% 程度に抑えるために、トリガーとトリガーアクノレッジのやり取りをパイプライン化し、切れ目ない高速読み出しを実現する。PXD の導入に伴い、イベントあたりのデータサイズが格段に大きくなる。PXD のオキュパンシ 2%、トリガーレート 30 kHz を仮定した場合、ゼロ・サブレス後のデータレートは 14.5 GB/s となるため、SVD のヒット情報を使いトラックを再構成し PXD センサー上の region-of-interest を決定することでデータ削減 (1/10) を行う。驚くべきは、それでようやくほかのすべての検出器のデータの総和と同程度だということである。この大量のデータを記録するために、事象再構成とソフトウェアトリガーのためのオンライン・ファームおよびストレージのユニットは 150 cores  $\times$  10 unites に増強される。ネットワークスイッチの性能向上のお蔭で、多数のノードを高速に繋ぐことができるようになったこともこのソリューションの鍵である。なお、ソフトウェアトリガーにより、記録されるイベントレートは 1/5 に削減されると期待されている。すなわち、典型的には Belle II 全体で約 600 MB/s のレートでデータが記録される。オンライン・ファームは、その 2 倍のデータに対応しうるよう設計されている。万一、データがそれを越える場合にはファームのユニット数を増やして対応することになる。

<sup>3</sup> 古いハードウェアであったことが後々維持上の制約となったことも記憶しておくべき教訓である。

## 4.7 計算機とソフトウェア

記録するデータサイズの大きさは、オフライン計算機の計画に直接影響する。オフライン計算機は、先述の典型的なデータ量の 3 倍に対応できるように備えつつ、ルミノシティの増加に従い増強していく予定である。表 2 に示されるように、1800 MB/s は、LHC の諸実験のデータ記録量[15]と比べても多い。

表 2 記録データサイズの比較

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

GRID の導入を念頭に計算機モデルを構築中であるが、そのためにはかなりの計算機資源と人的資源が要求されるため、現在のコラボレーションの規模とのマッチングがあまりよくないのが悩みである。デザインルミノシティにおいてハドロニック・イベントと  $\tau\tau$  をあわせると約 4 kHz になり、それに加え  $\mu\mu$ ,  $\gamma\gamma$  や Bhabha 散乱などの較正用データを pre-scale しながら取ることを考えると、ソフトウェアトリガーで記録レートを 6 kHz よりさらに減らすことは難しい。計算機資源の不足は即ち何かを諦めなければならないことを意味するので熟慮が必要である。

ソフトウェアは、Geant4 をベースとしたシミュレーション環境を準備中である。2 月上旬には初版がコラボレーションにリリースされる。解析のフレームワークは、Belle で使用した BASF (Belle Analysis Framework)[16] のよいところを受け継ぎながら短所を徹底的に改善した BASF2 を開発、既に広く使用されている。Belle の時と同様に、オフライン用に開発されたソフトウェアは基本的にオンラインでもそのまま動作することも特筆に値する。

## 5 まとめ

本稿では、特に大学院生・研究員など若手研究者を想定して、Super-KEKB/Belle II 実験の物理の魅力と実験(衝突点と測定器)のチャンレンジな側面の解説・紹介を行った。TeV 領域の物理の開拓が、これからの素粒子物理の方向性であり、2010 年代はその幕開けである。エネルギーフロンティアである LHC 実験とともに、ルミノシティフロンティアである Super-KEKB/Belle II 実験の果たす役割は大きい。ただ、50 倍のルミノシティでの実験を成功させるのは決して容易なことではない。実験屋の腕の見せどころであろう。2014 年の実験開始に向けて、測定器の建設が始まっ

た。測定器を建設し、実験を立ち上げ、データ解析から物理成果を出す、という一連の作業を味わうチャンスが目の前にある。是非、多くの方がこのチャレンジに参加してくれることを期待しています。

なお、本稿で紹介した物理、実験に関するスタディは多くの Belle II 共同研究者、加速器研究者、理論研究者の貢献による。ご協力に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Belle home page : <http://belle.kek.jp>;  
KEKB home page : <http://www-acc.kek.jp/KEKB>
- [2] 飯田直子, 高エネルギーニューズ, **29-1**, 20 (2010);  
飛山真理, 高エネルギーニューズ, **27-4**, 236 (2009).
- [3] Belle II home page : <http://belle2.kek.jp/>
- [4] SuperB home page : <http://www.pi.infn.it/SuperB/>
- [5] “Physics at Super B Factory”, KEK Report 2009-12,  
arXiv:1002.5012.
- [6] HFAG(Heavy Flavor Averaging Group) home page :  
<http://www.slac.stanford.edu/xorg/hfag/>
- [7] 飯嶋 徹, 日本物理学会誌, **64-9**, 682 (2009).
- [8] T. Goto *et al.*, Phys. Rev., D **70**, 035012 (2004).
- [9] Belle II Technical Design Report, KEK Report 2010-1  
(2010), arXiv:1011.0352.
- [10] S. Rummel, L. Andricek, Nucl. Instr. Meth., A **623**, 189  
(2010).
- [11] M. French *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., A **466**, 359  
(2001).
- [12] S. Nishida *et al.*, Nucl. Instr. Meth., A **595**, 150 (2008),  
K. Inami, Nucl. Instr. Meth., A **595**, 96 (2008),  
T. Iijima, Nucl. Instr. Meth., A **623**, 48 (2010).
- [13] 生出秀行, 音野瑛俊, 山下了, 日本物理学会誌, **66-1**, 20  
(2011).
- [14] T. Higuchi *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., **52**, 1912  
(2005).
- [15] LHC Computing Grid Technical Design Report,  
ISBN 92-9083-253-3 (2005),  
<http://lcg.web.cern.ch/LCG/TDR/>
- [16] I. Adachi *et al.*, arXiv:physics/0306120v1