

BelleII 実験に使用する粒子識別用光検出器 HAPD の 放射線耐性評価

東邦大学大学院理学研究科 物理学専攻
博士前期課程 基礎物理学研究室 6412014 浜田尚

2014年 1月 31日

目次

第 1 章	物理学的背景	3
1.1	BelleII で目指す物理	3
1.1.1	Unitarity Triangle の精密測定	3
1.1.2	新物理の関与する稀崩壊モードでの CP 対称度測定	4
1.1.3	新ハドロンの探索	5
1.1.4	$B \rightarrow \tau$ 遷移による荷電ヒッグス粒子探索	6
1.1.5	タウ・レプトン物理	6
第 2 章	BelleII 実験	8
2.1	SuperKEKB	8
2.2	BelleII 検出器	8
2.2.1	PXD/SVD	10
2.2.2	CDC	10
2.2.3	TOP	11
2.2.4	A-RICH	13
2.2.5	ECL	14
2.2.6	KLM	16
第 3 章	A-RICH 検出器	18
3.1	endcap 部 PID のアップグレード	18
3.2	A-RICH の粒子識別原理	19
3.3	A-RICH の要求と構成	22
3.4	輻射体～エアロゲル～	24
3.5	光検出器～HAPD～	26
3.6	読み出し回路～ASIC&FPGA～	28

第 4 章	HAPD の放射線影響	30
4.1	BelleII 実験におけるバックグラウンド	30
4.2	中性子線による半導体への影響	31
4.3	中性子線耐性向上のための対策	31
4.4	ガンマ線耐性の向上	33
4.4.1	ガンマ線量の見積もり	33
4.4.2	APD 構造の各種名称と役割	34
4.4.3	ガンマ線による半導体への影響	35
第 5 章	最終仕様 HAPD の放射線耐性試験	36
5.1	HAPD の仕様決定	36
5.2	最終仕様確定のための照射試験	40
5.3	中性子照射試験	40
5.4	ガンマ線照射試験	43
第 6 章	まとめ	46
第 7 章	謝辞	49
	参考文献	50

目次

1.1	$b \rightarrow sss$ 遷移におけるループを含む崩壊	4
1.2	ルミノシティと ΔS の関係	5
1.3	標準模型によるループダイアグラム	5
1.4	新物理を含むループダイアグラム	5
1.5	$B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊と Higgs の寄与	6
1.6	$B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊分岐比の CKMfit による結果と世界平均値	7
2.1	世界の各地の加速器性能	8
2.2	BelleII 検出器	9
2.3	Belle 検出器と BelleII 検出器の構造	9
2.4	SVD, PXD 完成イメージ	10
2.5	SVD 用 DSSD の構造	11
2.6	PXD 用 DEPFET の構造	11
2.7	CDC による荷電粒子のエネルギー損失	12
2.8	CDC のアップグレード	12
2.9	TOP の粒子検出イメージと全体像	13
2.10	TOP 全体像	13
2.11	TOP 用光学輻射体クォーツ	14
2.12	TOP 用光検出器 MCP-PMT	14
2.13	A-RICH の設計図	14
2.14	ECL 用クリスタル	15
2.15	ECL の 1 ユニットの構成	15
2.16	ECL の設計図	16
2.17	KLM の設計図	17
2.18	エンドキャップ部シンチレータストリップの 1 レイヤー	17
2.19	1 ストリップの構造	17

3.1 Belle 実験における各検出器の粒子識別可能領域	19
3.2 Cherenkov 光の放射	20
3.3 ミラー焦点型	21
3.4 近接焦点型	21
3.5 単層	21
3.6 複層	21
3.7 A-RICH によるリングイメージ検出	22
3.8 A-RICH の全体像と粒子検出イメージ	23
3.9 粒子の運動量と輻射体屈折率の関係	24
3.10 エアロゲルの微細構造	24
3.11 エアロゲルタイル	25
3.12 HAPD の外観	26
3.13 HAPD の外寸	26
3.14 HAPD の動作原理	27
3.15 HAPD の 1 光子検出能力。LED を照射し、MCA で波高分布を測定	27
3.16 メインボード (HAPD 接続面) ASIC が取り付けられている	29
4.1 Radiative Bhabha 散乱のダイアグラム	31
4.2 Frenkel 欠陥の概略	32
4.3 半導体 Si のバンドギャップ	32
4.4 格子欠陥による中間準位の生成	32
4.5 shaping time を変化させたときの 1 チャンネルあたりのノイズ量の見積もり	33
4.6 HAPD 用 APD 断面	34
5.1 照射後の漏れ電流値	37
5.2 KA058 の照射中電流モニタ	37
5.3 KA063 の照射中電流モニタ	37
5.4 照射中 Charge Up Breakdown 電圧開始ゲインの様子	38
5.5 照射中 Charge Up Breakdown 電圧開始ゲイン回復の様子	38
5.6 照射前後の 1 チャンネルのノイズ量変化	38
5.7 照射前後の 1 チャンネルのノイズ量変化	38
5.8 ビームライン 10 (NOBORU) の概略	41
5.9 中性子照射試験の HAPD セットアップ	41

5.10	中性子照射量	41
5.11	中性子線量に対するリーク電流増加量の比較	42
5.12	KA067 のリーク電流からの見積もりノイズ	42
5.13	KA067 の中性子照射前のスレッシュホールドスキャン	42
5.14	KA067 の中性子照射後のスレッシュホールドスキャン	42
5.15	ガンマ線照射試験のセットアップ	43
5.16	KA067 の電流モニタ	44
5.17	KA075 の電流モニタ	44
5.18	KA079 の電流モニタ	44
5.19	KA082 の電流モニタ	44
5.20	中性子線・ガンマ線照射後の時間経過に対するノイズ量	45

序論

今日、素粒子物理学では物理学の本となる枠組み（標準模型）の詳細な検証および、それを超える新しい物理の検証をするために世界各国で実験がおこなわれている。そのひとつである Belle 実験は小林・益川理論の検証を目指し、その理論の予言する CP 対称性の破れを証明するため、1998 年に茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構で開始された。CP 対称性の破れとは C(Charge) 変換と P(Parity) 変換を行った際、その前後で物理法則が変わることを示す。この CP 対称性の破れが初めて実験的に観測されたのは 1964 年 J.W.Cronin, V.L.Fitch らによる K 中間子の弱い相互作用による崩壊過程の実験であった。これを標準理論の範囲で説明したのが小林・益川理論であり、B 中間子の崩壊過程では K 中間子より大きく CP 対称性が破れることが予想され、Belle 実験が行われた。この実験は電子・陽電子非対称衝突型エネルギー衝突型円形加速器 KEKB で大量の B 中間子・反 B 中間子を生成し、その崩壊過程を Belle 検出器で観測するものであった。2001 年の夏、 $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ 崩壊過程において測定された CP 非対称性度は標準模型で予測される値と極めてよく一致し、CP 対称性の破れが小林・益川理論により説明できることが証明された。新物理に関する稀崩壊や興味深い現象も発見されたが、統計制度が不十分であり、新物理や新現象発見に決着をつけることは困難であった。そこで一桁以上の統計向上を目的とした BelleII 実験が 2015 年より開始される。現在、測定精度もより向上させるために、加速器・検出器ともにアップグレードが行われている。

B 中間子の稀崩壊事象や崩壊前の B 中間子のフレーバー同定のためには、その崩壊粒子である K 中間子・ π 中間子の識別が必要であり、非常に重要である。Belle 実験ではこの識別のために閾値型チェレンコフ光検出器 ACC(Aerogel Cherenkov Counter) が開発された。Belle 測定器前方に取り付けられた ACC は B 中間子フレーバー特定に特化されており、その運動量識別範囲は $0.5 \sim 2.0 \text{ GeV}/c$ であった。BelleII 実験ではこの識別可能範囲を $4.0 \text{ GeV}/c$ まで広げるために ACC に代わる新しい検出器である A-RICH(Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter) の開発が進められている。A-RICH 検出器は粒子が輻射体を通じた時に発生するチェレンコフ光をリングイメージで検出し、そのリング半径から輻射角度を測定する。輻射体には Aerogel、リングイメージ観測のための光検出器には、Hybrid Avalanche

Photo Detector(HAPD)、読み出し回路には ASIC と FPGA を用いる。HAPD は新型のマルチアノード型光検出器で、2002 年より浜松ホトニクス（株）と共同開発を行っている。 $4.9 \times 4.9\text{mm}$ の APD が 144ch 内蔵された真空管で、2 段増幅型の検出器である。「十分な有効面積」「 $5 \times 5\text{mm}$ 以下の位置分解能」「単光子検出が可能」1.5T の磁場中での動作」「十分な放射線耐性」が要求として求められる。現在は特に放射線耐性が問題となっており、BelleII 実験 10 年間の稼働でガンマ線は 1000Gy、中性子線は $1.0 \times 10^{12}n/cm^2$ の積算線量が予測されているため、HAPD がこの線量に対して耐性を持つように開発することが必要となる。これまでの研究で中性子線に対しては APD 内の P 層を薄くすること、また読み出し回路の波形整形時間を短くすることによって耐性向上につながることがわかっている。ガンマ線に関しては、照射されると強い影響を受け、通常では考えられない急激な電流増加おきるが、APD 表面膜の帯電の影響により引き起こされていることがわかっている。本研究ではこれまでの放射線耐性試験の総まとめとして中性子線・ガンマ線を複合的に照射し、その影響を調べる試験を行った。APD への影響はそれぞれ独立であることが確認できた。また、HAPD 表面の光電面や APD 内の複数の表面膜でガンマ線・中性子線の単光子検出に影響を与えているものはないか、またそれぞれの膜の厚さによる影響の違いを調べ、より高い利得が得られるように改良を行い、BelleII 実験 10 年間の稼働でも放射線耐性を持つ HAPD の開発に成功した。

第1章 物理学背景

1964年に初めてK中間子におけるCP対称性の破れがJ.W.Cronin,Fitchによって発見された。CP対称性の破れとはC(Charge)変換とP(Parity)変換を行った際、その前後で物理法則が変わることを示す。これを標準理論の範囲で説明したのが小林・益川理論であり、三田一郎らによってB中間子の崩壊過程ではK中間子より大きくCP対称性が破れることが予想されるため、B中間子を大量に生成し、その崩壊過程を調べるのが提案された。これによって茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構でBelle実験が行われた。この実験では電子・陽電子非対称衝突型エネルギー衝突型円形加速器KEKBで大量のB・反B中間子を生成し、その崩壊過程をBelle検出器で観測するものであった。その結果2001年の夏、 $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ 崩壊過程においてCP非対称性度は標準模型で予測される値と極めてよく一致し、CP対称性の破れが小林・益川理論により数学的に矛盾なく記述できることが証明されBelle実験は2010年に終了した。この実験では同時に新物理に關与する稀崩壊や興味深い現象も発見されたが、統計制度が不十分であり、詳細に測定することは困難であった。そこでこれらを目的としたBelleII実験が2015年より開始される。本章ではBelleII実験において測定する観測量として代表的なものを解説し、どのような理論に有効かをまとめる。

1.1 BelleIIで目指す物理

1.1.1 Unitarity Triangleの精密測定

Belle実験によりCP対称性の破れが観測され、小林・益川理論が正しいことが証明された。BelleII実験ではさらに精密測定を行い、理論を検証するためにUnitarity Triangleの各辺と角度を詳細に測定する。角度の測定に關するモードはloopを含まないtree diagramが支配的であるため、新物理の關与が少ないと予想されている。このため、標準模型の範囲内で観測できると予想されている。

1.1.2 新物理の関与する稀崩壊モードでの CP 対称度測定

$b \rightarrow sss$ の物理

BelleII 実験で新物理の兆候を見るために重要な測定の一つとして、時間依存の CP 対称性の破れの測定があげられる。ペンギンダイアグラムによって起こる $b \rightarrow sss$ 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 $b \rightarrow cc\bar{s}$ 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 $B^0 \rightarrow \phi K_s^0, B^0 \rightarrow \eta' K_s^0, B^0 \rightarrow K_s^0 K_s^0 K_s^0$ 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 $\sin 2\phi_{1SM} = 0.679 \pm 0.020$ であるのに対し Belle 実験での測定値はそれぞれ以下の値である。

$$\sin 2\phi_1 = 0.74 \pm 0.11 - 0.13 (B^0 \rightarrow \phi K_s^0)$$

$$\sin 2\phi_2 = 0.59 \pm 0.07 (B^0 \rightarrow \eta' K_s^0)$$

$$\sin 2\phi_1 = 0.72 \pm 0.19 (B^0 \rightarrow K_s^0 K_s^0 K_s^0)$$

BelleII 実験では、これらの CP 非対称度の差 ΔS を 0.02~0.04 の精度で測定する。

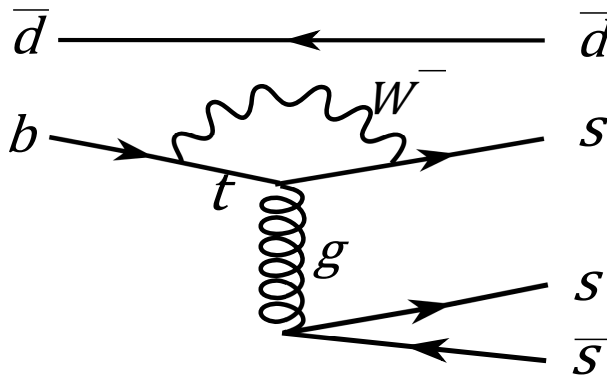


図 1.1: $b \rightarrow sss$ 遷移におけるループを含む崩壊

$b \rightarrow s\gamma$ の物理

B 中間子の崩壊のうち、 $b \rightarrow s\gamma, b \rightarrow d\gamma$ 崩壊など光子を放出する崩壊において、標準模型の範囲内では tree diagram で禁止されているため、崩壊中にループを介して観測される。新

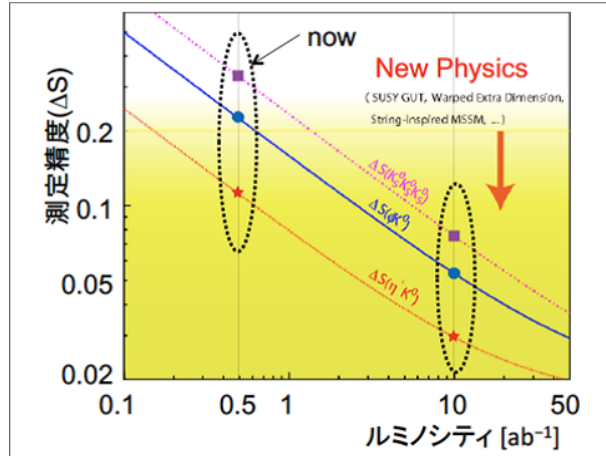


図 1.2: ルミノシティと ΔS の関係

物理で示唆されている粒子はこのループの中に表れる可能性があるため、この遷移を含む崩壊モードの崩壊分岐比や非対称度を調べ、標準模型と比較することが有効とされている。

標準模型で放出される光子はほとんどが左巻きであるが、新物理では右巻きも存在し、時間依存の CP 対称性の破れが大きくなるということが予想されている。この遷移は $X \rightarrow X_s \gamma$ 崩壊中に表れるため、BelleII 実験ではこれらの崩壊モードを精度よく測定する。

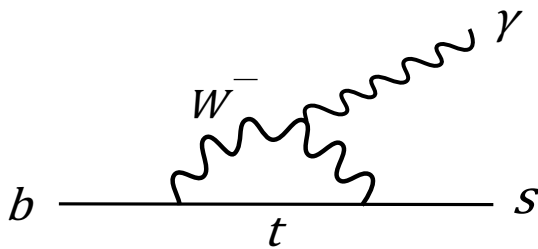


図 1.3: 標準模型によるループダイアグラム

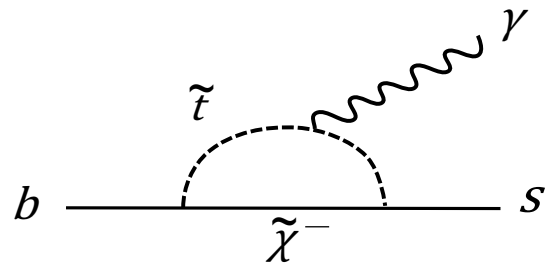


図 1.4: 新物理を含むループダイアグラム

1.1.3 新ハドロンの探索

Belle 実験では、CP 対称性の破れの測定で成果を上げるとともに $D^{(*)}D^{(*)}$ の質量領域に $X(3872), Y(4260), Z(4430)^+$ などの新種の新種ハドロンの共鳴 (エキゾチックハドロンの) が発見された。特に $Psi' \rightarrow pi^+$ への崩壊で見つかった $Z(4330)^+$ は、少なくとも 4 つの構成クォークを必要とし、通常メソンとして記述できなく、現在は $D\bar{D}$ 中間子対が結合した分子共鳴状態、di-quark 対が色相互作用で結合したテトラクォーク ($[cq][\bar{c}q']$) などの可能性が指摘され

ている。また、Belle実験は、チャーム・クォークをボトム・クォークに置き換えた Y_b と呼ばれるエキゾチックハドロンの候補も見つけている。BelleII 実験では、新しいエキゾチックハドロンも見つかりと予想されているが、これらの粒子について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ていく。

1.1.4 $B \rightarrow \tau$ 遷移による荷電ヒッグス粒子探索

標準理論でヒッグス粒子があるのに対し、超対称性理論ではこの他に荷電ヒッグス粒子 H^\pm の存在が予言されており、 $B \rightarrow \tau\nu$ や $B \rightarrow D\tau\nu$ といった崩壊に強く現れる。これらは W^\pm の交換により起こる。もし、荷電ヒッグスが存在するならば W^\pm 交換部分に寄与し崩壊分岐比が大きく変化すると考えられている。

Belle 実験及び BaBar 実験で測定された $B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊分岐比の世界平均は、標準模型からの予想値より 2.6σ ほど高くなっている。この差が標準模型を超える新しい物理によるものであるのかを検証するために BelleII 実験では $B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊の測定精度と、標準模型予想値に重要な $|V_{ud}|$ の測定精度を高めていく。

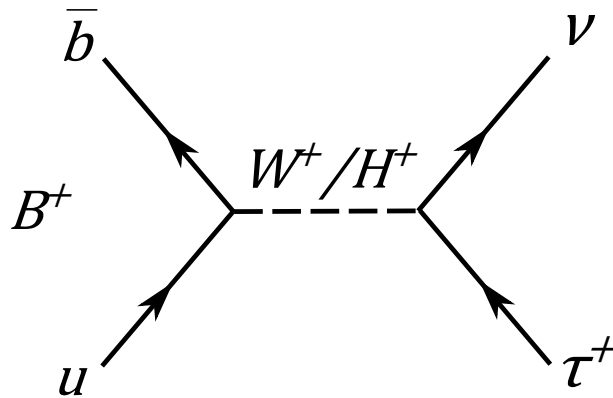


図 1.5: $B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊と Higgs の寄与

1.1.5 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、例えば $\mu \rightarrow e\gamma$, $\tau \rightarrow e\gamma$, $\tau \rightarrow \mu\gamma$ など世代の異なる粒子に崩壊することは、標準理論では起こり得ない。しかし、超対称性理論など

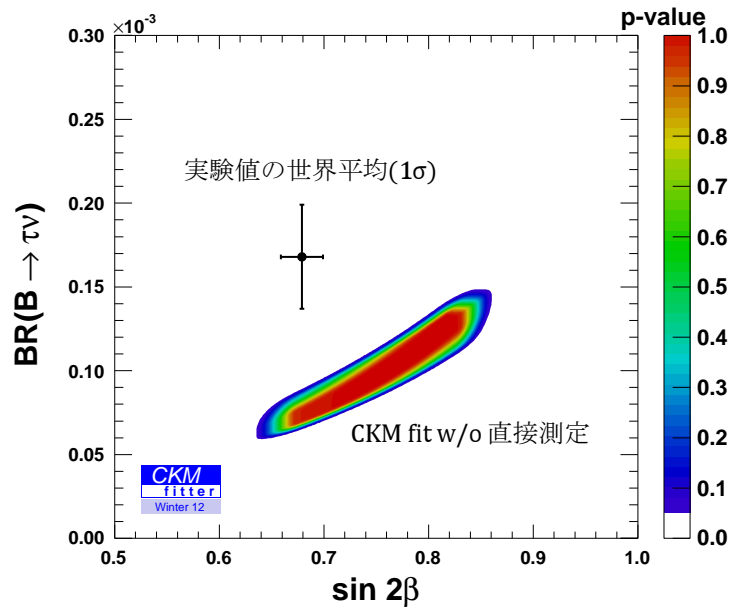


図 1.6: $B \rightarrow \tau \nu$ 崩壊分岐比の CKMfit による結果と世界平均値

の新物理では、こうした現象は Lepton Flavor Violation (LFV) と呼ばれ、起こりえるとされている。この稀な崩壊を詳細に測定することによって新物理の寄与を調べることができれば、新物理のフレーバー構造の解明の手掛かりにもなり得る。

第2章 BelleII実験

2.1 SuperKEKB

SuperKEKBは電子・陽電子をそれぞれ8.0GeV/c、3.5GeV/cまでリングで加速し衝突させる。世界の各地の加速器性能を2.1に示す。アップグレードし、ルミノシティをBelle実験の40倍にすることで、SuperKEKBは世界最高のルミノシティの加速器になる。

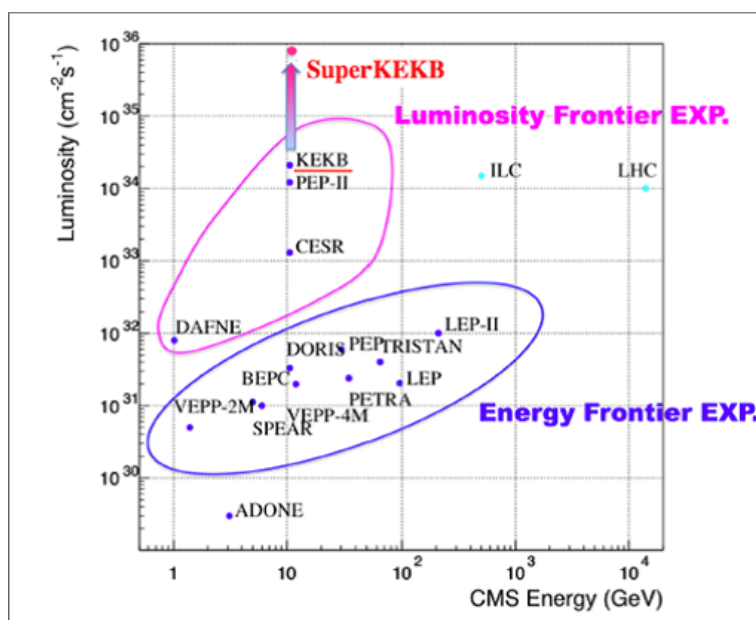


図 2.1: 世界の各地の加速器性能

2.2 BelleII 検出器

ここでは Belle 検出器からのアップグレードが進められている BelleII 検出器について解説する。BelleII 検出器は7種類の検出器から構成され、各配置は図のようになる。特にPXD, TOP, A-RICHはBelleII実験から採用された新型検出器である。また、Belle検出器とBelleII検出器の構造を比較したものを図に示した。BelleII検出器の構造はbarrel部とendcap

部の二つに分けられる。barrel 部はビーム軸同心円状に相当する領域で, endcap 部は円筒の底面に相当する領域を指す。 Belle・ BelleII 実験は非対称エネルギー衝突実験であり陽電子入射側にローレンツが起きるため, endcap 部は陽電子入射側 (Forward-endcap), 電子入射側を Backward-endcap と区別している。 ECL, KLM は両方の endcap に設置されるが, A-RICH は Forward 側のみに設置される。 以下, 各検出器の役割と動作原理を簡潔に述べる。

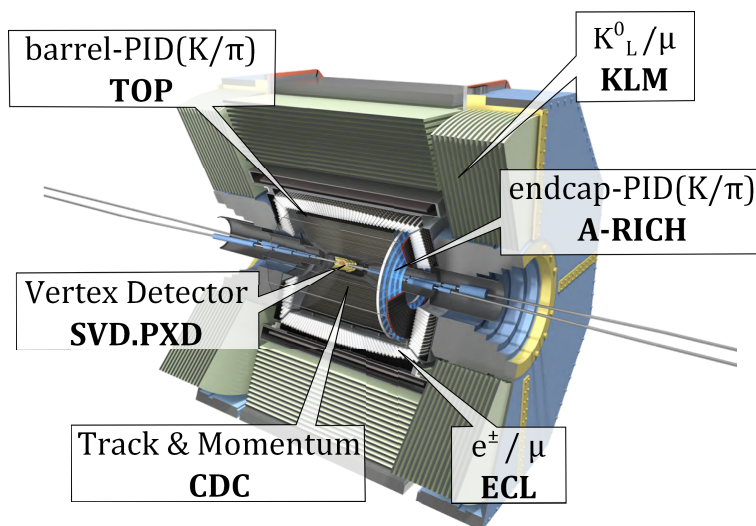


図 2.2: BelleII 検出器

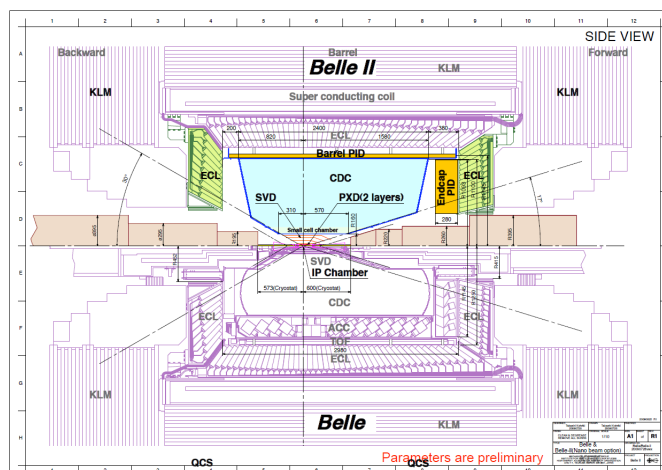


図 2.3: Belle 検出器と BelleII 検出器の構造

2.2.1 PXD/SVD

Belle, BelleII 実験で崩壊点検出を担うのがSVD(Silicon Vertex Detector)である。この検出器ではB中間子の崩壊後にできる荷電粒子の飛跡を $10\mu\text{m}$ の精度で検出し、 B^0, \bar{B}^0 の崩壊点を再構成することを目的とする。Belle 実験では崩壊点の差を測定するために $70\mu\text{m}$ 以下の崩壊点位置分解能が要求されていたが、BelleII 実験では $20\mu\text{m}$ まで性能が向上される予定である。そのためのアップグレードとしてSVDよりさらに内層に2層のPXDが設置される。SVDはDSSD(Double sided Silicon Strip Detector)というシリコン検出器を各層の両面にストリップ上に貼り付け、円筒状に4層重ねた構成をしている。両面のシリコン検出器はP+層とN+層が直行しているためストリップ間隔が飛跡の位置分解能に相当する。PXDはFET(Field Effect Transistor 電界効果トランジスタ)を応用したDEPFET(DEPlated FET)と呼ばれるシリコン検出器を2次元ピクセル型に配置した構成をしており、飛跡の位置分解能はピクセルサイズ($50\mu\text{m}$)に相当する。

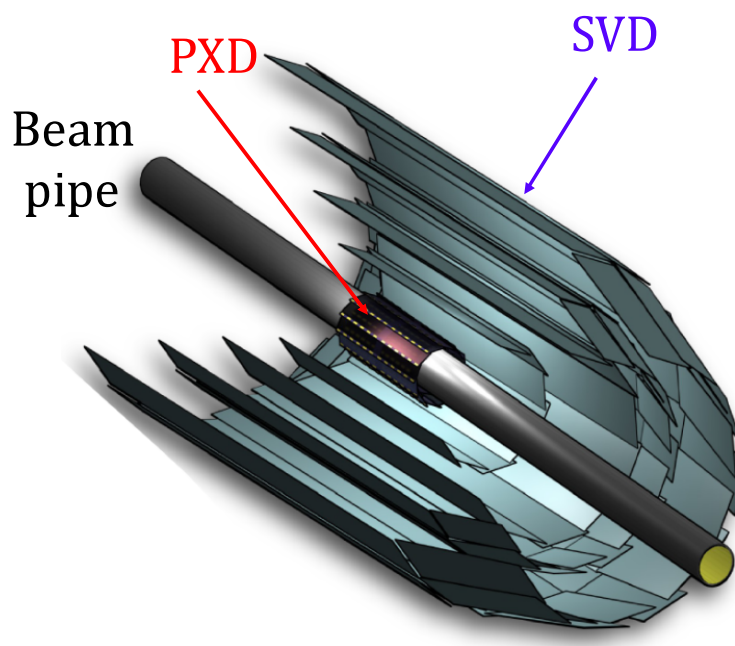


図 2.4: SVD,PXD 完成イメージ

2.2.2 CDC

CDC(Central Drift Chamber)は荷電粒子の飛跡測定、運動量測定、エネルギー損失測定に使用するワイヤーチェンバーである。ワイヤーチェンバー内では充填されたガス分子(He,

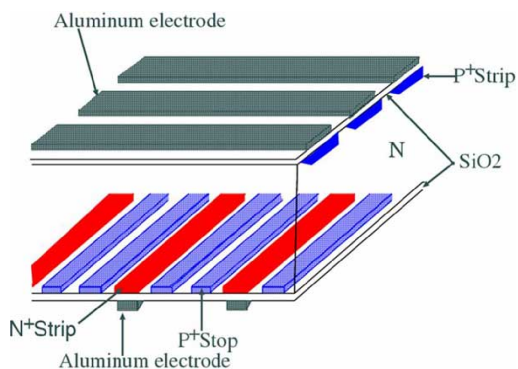


図 2.5: SVD 用 DSSD の構造

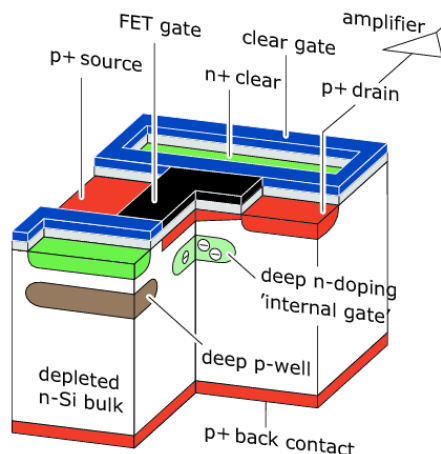


図 2.6: PXD 用 DEP-FET の構造

C_2H_2) が荷電粒子の通過でイオン化された電子が生じる。発生した電子は電場によりワイヤーに部下って移動（ドリフト）し検出される。このドリフト時間から電子の発生場所とワイヤーの距離がわかるため荷電粒子の飛跡を再構成できる。また、 Belle, BelleII 実験ではビーム軸方向に 1.5T の磁場がかけられるため、荷電粒子は以下の式に従って運動する。

$$p = 0.3\rho B$$

ここで $p[\text{GeV}/c]$ は運動量, $\rho[\text{m}]$ は曲率半径, $B[\text{T}]$ は磁場である。上記で測定した飛跡から曲率半径 ρ を求め、磁場を代入することで運動量 p が求められる。また、ワイヤーに検出される信号電圧から荷電粒子のエネルギー損失 dE/dx が求められる。これらの測定により各荷電粒子別に図に示したような関係が得られる。この結果をみると CDC のみでも $1\text{GeV}/c$ 以下での粒子識別が可能であるが、更に高運動領域では後述の粒子識別と組み合わせて行う。 Belle 実験では CDC に 8,400 本のワイヤーが張られたが、 BelleII 実験では 14,336 本に増加され、内側の層は small cell 化することで飛跡位置分解能の向上を目指す。

2.2.3 TOP

Belle 実験では Barrel 部の K 中間子, π 中間子の粒子識別に Aerogel Cherenkov Counter (ACC) と Time Of Flight (TOF) を用いており、これらによる粒子識別範囲は $3\text{GeV}/c$ 程度までであった。 BelleII 実験ではさらに高運動領域 ($0.5\sim 0.4\text{GeV}/c$) での識別性能が要求されているため、新たに barrel 部の粒子識別を担う TOP (Time of Propagation counter) が開発中である。

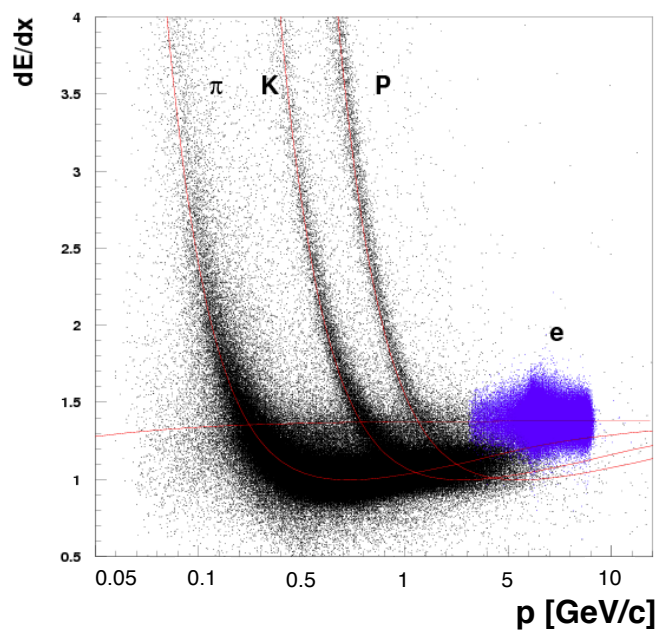


図 2.7: CDC による荷電粒子のエネルギー損失

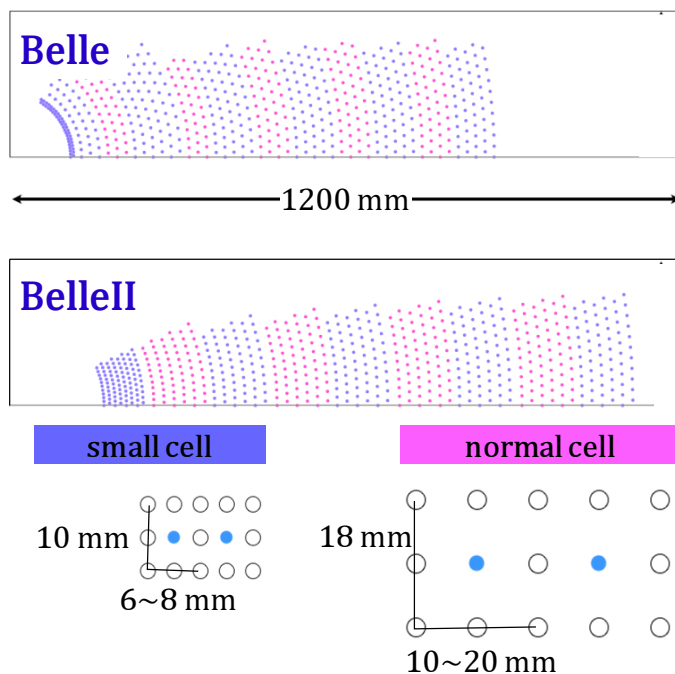


図 2.8: CDC のアップグレード

TOP は荷電粒子が光学輻射体中を通過する際に発生させる Cherenkov 光を検出することで粒子識別を行う装置である。図はその検出イメージを示したものであり、このような Cherenkov 光検出器を DIRC(Detection of Internally Cherenkov light) と呼ぶ。荷電粒子により発生した Cherenkov 光が光学輻射体内で全反射し、位置検出器で検出される。また、TOP は TOF 同様に時間分解能を有しており、Cherenkov 光伝搬の時間の差を測定することで K/π 識別される。

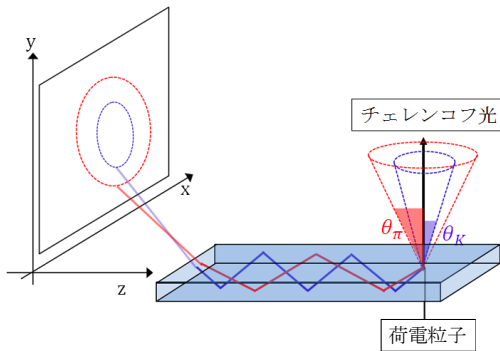


図 2.9: TOP の粒子検出イメージと全体像

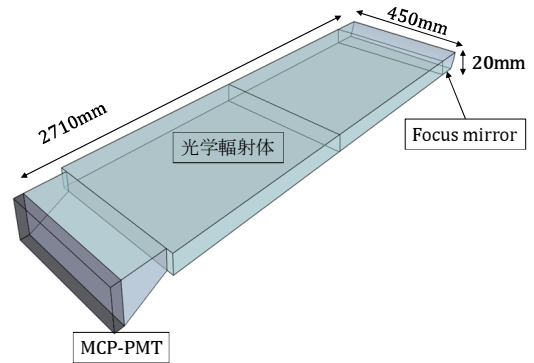


図 2.10: TOP 全体像

光学輻射体には石英ガラスでできたコーツバーを採用する。屈折率は ~ 1.47 となる予定で、位置検出器の直前部分のガイドで像を拡大し分解能を向上させる。BelleII 実験では 16 組のコーツをビーム軸に平行な筒状に構成する予定です。

また、Cherenkov 光検出器として MCP-PMT(Micro Channel Plate PMT) を採用する。MCP-PMT は 4×4 ch のアノードプレートの内蔵し、40ps 以下の時間分解能を有している。

2.2.4 A-RICH

BelleII 実験で endcap 部の PID を担うのが A-RICH(Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter) である。Belle 実験では Barrel 部同様に ACC を用いていた粒子識別可能運動量範囲 $0.5 \sim 4.0 \text{ GeV}/c$ と広げるために、新たに A-RICH が導入される。A-RICH では TOP と同じく Cherenkov 光のリングイメージ検出により Cherenkov 光放射角を測定し、CDC で測定した運動量から粒子を識別する。ただし、A-RICH は TOP のような DIRC ではなく、その名の通り RICH(Ring Imaging Cherenkov counter) 型検出器であり、直接リングイメージを検出器に投影して Cherenkov 光放射角を測定する。輻射体には屈折率 1.05 のエアロゲルを



図 2.11: TOP 用光学輻射体クォーツ

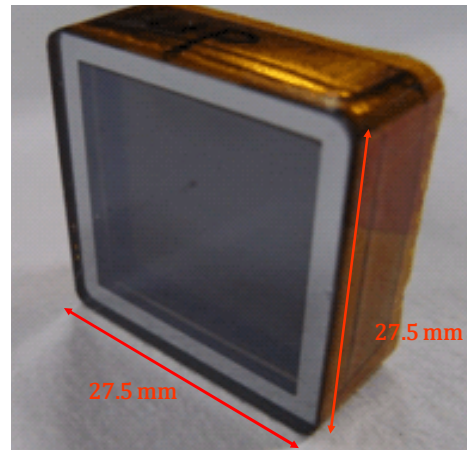


図 2.12: TOP 用光検出器 MCP-PMT

使用し, 検出器には 144ch マルチアノード型 HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) を 420 本設置する予定である。

A-RICH の詳しいアップグレードの目的, 動作原理, 構成要素の説明は次章で詳しく述べる。

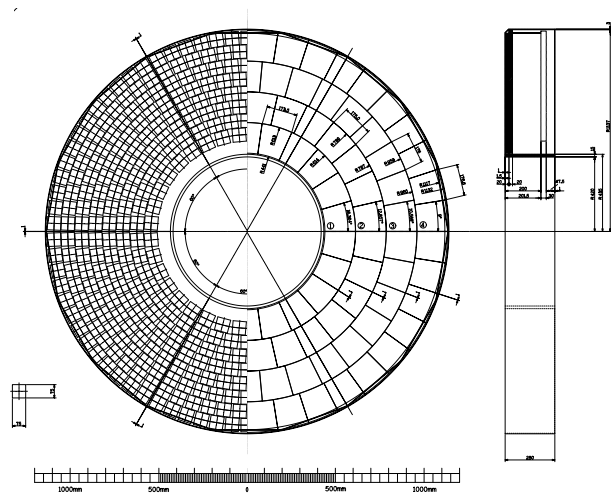


図 2.13: A-RICH の設計図

2.2.5 ECL

電子や光子のエネルギーの測定を担うのが ECL(Electromagnetic Calorimeter) であり, barrel 部, endcap 部に設置される。ECL には CsI(Tl) クリスタルシンチレータが取り付け

られており、入射した電子、光子は電磁シャワーを起こし全エネルギーを落とす。最終的なシンチレーション光の光量は落した全エネルギーに比例しているため、光量を測定することによって元の粒子がもつ全エネルギーを求めることができる。また、電子・陽電子散乱である Bhaba 散乱の反応断面積からルミノシティを測定する役割も持つ。

BelleII 実験へのアップグレードに伴う問題点は CsI(Tl) のシンチレーション光の時定数が長く ($\sim 1\mu\text{s}$)、高レート化により信号が重なってしまうことである。そこで ECL では読み出し回路のアップグレードを行い、この問題を解決する。さらに、endcap 部に使用されるクリスタルは放射化によるバックグラウンドが Belle 実験より増加することを踏まえ、Tl ドープの他に pureCsI も使用する予定である。これによりシンチレーション光時定数を 30ns まで短縮し Belle 実験の 100 倍程度のバックグラウンド分離を目指す。



図 2.14: ECL 用クリスタル

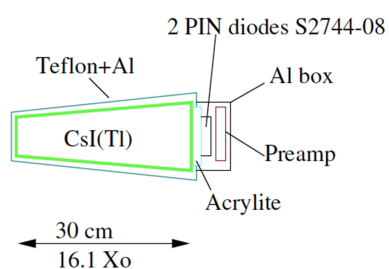


図 2.15: ECL の 1 ユニットの構成

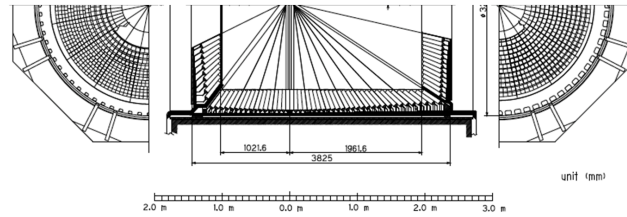


図 2.16: ECL の設計図

2.2.6 KLM

KLM($K_L^0\mu$ Detector) は Belle・BelleII 検出器の最外層に設置され、比較的寿命の長い K_L^0 と μ の識別を行う検出器である。KLM は RPC(Resistive Plate Chambers) というガスチェンバーと鉄のサンドイッチ構造になっており、 K_L^0 と μ の相互作用の違いで粒子識別を行う。 K_L^0 は鉄と強い相互作用を起こし KLM を通過することなく崩壊するが、それに対して μ は KLM を通過できるため CDC 等の飛跡検出器と合わせることで識別が可能になる。RPC は高電圧を印加して帯電させた絶縁性ガラスでガスチェンバーを挟んだ構造をしており、荷電粒子が通過した近傍 ($\sim 0.1\text{cm}^2$) でストリーム放電が起きるため、その信号電圧を測定することで位置情報を読み出す。ただし、RPC では一度放電が起きると再充電までの dead time が 2s ほどかかってしまっていた。BelleII 実験では高レート化による影響で endcap 部のバックグラウンドが特に上昇するため、更に短い dead time が要求される。そこで endcap 部には RPC の代わりにプラスチックシンチレーションカウンターを導入することでこの問題を解決する。この検出器には 1 層あたり 75 本のシンチレータが導入され、荷電粒子の通過の際に放射されるシンチレーション光をシンチレータ中心に設置されたファイバーによって捉える。これを MPPC(Multi Pixel Photon Counter) というマルチピクセル型の光検出器で検出する。この改良に endcap 部のバックグラウンドは 2 桁ほど低減できる見込みである。

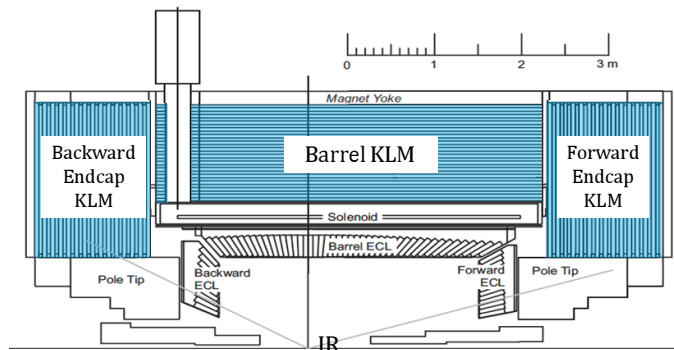


図 2.17: KLM の設計図

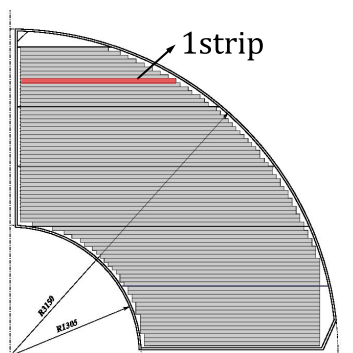


図 2.18: エンドキャップ部シンチレータストリップの1レイヤー

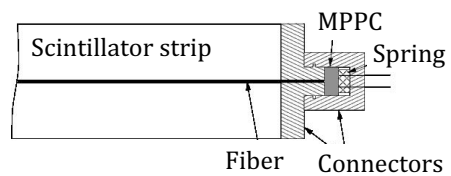


図 2.19: 1 ストリップの構造

第3章 A-RICH 検出器

BelleII 実験での endcap 部における K 中間子と π 中間子の粒子識別精度向上のため、我々は A-RICH という検出器を開発している。A-RICH は Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter の略であり、荷電 K/ π 中間子が輻射体通過時に放出する Cherenkov 光をリングイメージとして検出することでこれらを識別する。本章では、A-RICH に要求される粒子識別能力、検出原理、及びその開発状況について説明する。

3.1 endcap 部 PID のアップグレード

B 中間子の崩壊モードでは K 中間子、 π 中間子はその終状態に含まれるため、これらの識別が重要である。しかしこれらは質量が非常に近く同じハドロンであるため識別が難しいとされる。2010 年まで行われていた Belle 実験では K 中間子、 π 中間子の粒子識別を CDC, TOF, ACC により行い、それぞれ図のような運動量領域での識別を担っていた。これらの検出器による粒子識別では 10% の K 中間子が誤って π 中間子と同定されていた (fake rate)。それに対して A-RICH ではさらに高精度測定を目指し、fake rate を 1% に抑えて 95% 以上の効率で K/ π 中間子の粒子識別を行おうとしている。

また、Belle 実験で endcap 部に設置されていた ACC のになった運動量領域は $0.5 \sim 2.0 \text{ GeV}/c$ に特化していた。Belle 実験でも endcap 部の高運動領域識別は必要だったが TOF が設置できなかったため、フレーバータグのみを担っていた。図は Belle 実験における各検出器の粒子識別可能範囲を示したものである。青はフレーバータグに必要な運動量の範囲と B 中間子の 2 体崩壊が起きる範囲、赤は各検出器の粒子識別可能範囲を表す。これに対して、BelleII 実験では 2 体崩壊 ($B \rightarrow KK/K\pi/\pi\pi$ や $B \rightarrow D\pi/DK$) により生成される高運動量 K 中間子、 π 中間子の識別が必要となる。そのため、A-RICH では $0.5 \sim 4.0 \text{ GeV}/c$ での粒子識別ができるように開発を進めている。

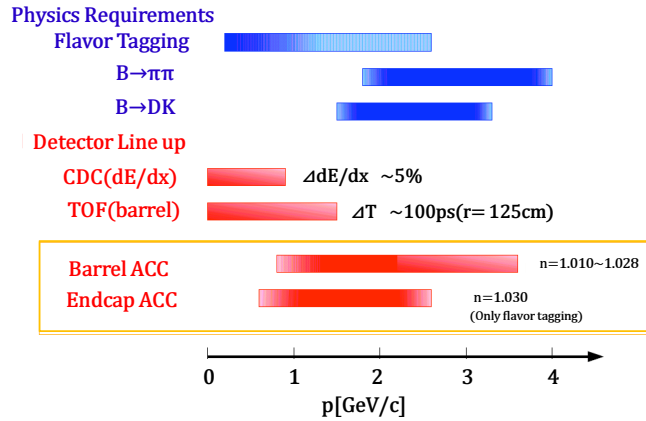


図 3.1: Belle 実験における各検出器の粒子識別可能領域

3.2 A-RICH の粒子識別原理

まず, Cherenkov 光検出器の根本となる Cherenkov 光発生原理について説明していく。荷電粒子が物質中を通過すると物質内で局所的に電磁場が乱され, 物質中の電子は通過する荷電粒子により動かされ偏極する。この電子が平衡状態に戻る際に, 放出された光子を Cherenkov 光という。通過する荷電粒子の速度が物質中の荷電粒子より遅ければ光子は互いに打ち消すように干渉するが, 通過する荷電粒子のほうが速い場合には強める方向に干渉し光子が放射される。屈折率 n の物質中での光の見かけの速度は c/n となるので, 光子が物質を t 秒間に進む距離は ct/n となる。ここで荷電粒子の速度を v , $\beta = v/c$ とすると t 秒間に βct 進むので荷電粒子からみた Cherenkov 光の放射角度 θ は

$$\cos\theta = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{n\beta} \quad (3.1)$$

である。 $0 < \cos\theta < 1$ であるから, Cherenkov 光発生の閾値は $1/n < \beta$ となる。

粒子の質量 m , 運動量 p , とすると相対論的運動量は

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (3.2)$$

であるから, これに式を代入すると

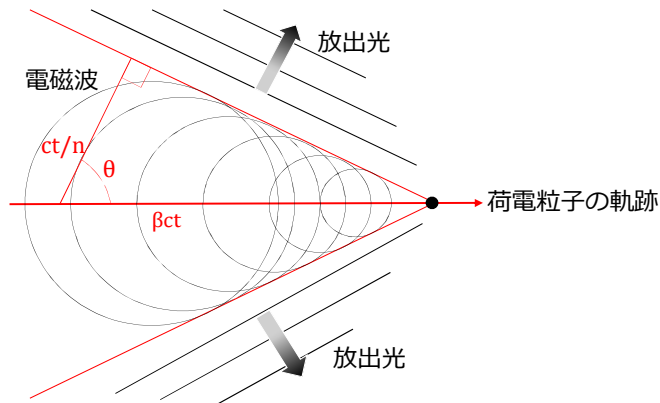


図 3.2: Cherenkov 光の放射

$$m = \frac{p}{c} \sqrt{n^2 \cos^2 \theta - 1} \quad (3.3)$$

となる。したがって式より、運動量 p を CDC で、Cherenkov 角度を A-RICH で測定することにより粒子の質量 m を知ることができる。

また、一般的な RICH (Ring Imaging Cherenkov counter) の構成は焦点方式により 2 種類に分けられる。1 つはミラー焦点型といい、図で示したように、発生した Cherenkov 光を鏡で反射させその焦点に検出器を置く構成をしている。RICH では輻射体を厚くすることで発生光子数を増やすことが可能であるが、チェレンコフ光の発生位置の不定性が大きくなるためにリングイメージが肥り角度分解能が落ちる。この問題を解決するのがミラー焦点型の構成であり、ミラーの曲率を適切に設定し光を絞ることで角度分解能を落とさずに光子検出が可能となる。もう一つが図に示した近接焦点型の構成である。これは輻射体正面に検出器を設置しリングイメージを直接検出する構成になっている。近接焦点型はミラー焦点型と比較すると設置スペースを抑えることができるが、集光しないため角度分解能は悪くなる。ただし、この問題は図に示したような複層の輻射体を用いることで改善できる。ここで示した輻射体の総厚さは両者とも同じとする。屈折率の異なる輻射体を二枚重ね、ビーム上流の輻射体屈折率を n_1 、下流を n_2 としたとき $n_1 < n_2$ であれば Cherenkov 光の集光が可能となり、設置スペースを抑えて角度分解能をあげることが可能となる。BelleII 検出器で A-RICH に許されるスペースはビーム方向軸に最大 280mm しかないため、我々は複層輻射体を用いた近接焦点型 RICH を採用した。近接焦点型の Cherenkov 光は図のように円錐状に放出され光検出器に直接リングイメージとして映しだされる。したがって A-RICH では

リング半径を測定し幾何学的に Cherenkov 角度を求めることになる。このとき, Cherenkov 角度 θ はリング半径 r と拡張距離 L を用いて次のように書かれる。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{r}{L}\right) \quad (3.4)$$

拡張距離 L は発光点からリング中心点までの距離である。また, 図は A-RICH の全体像と粒子検出のイメージである。

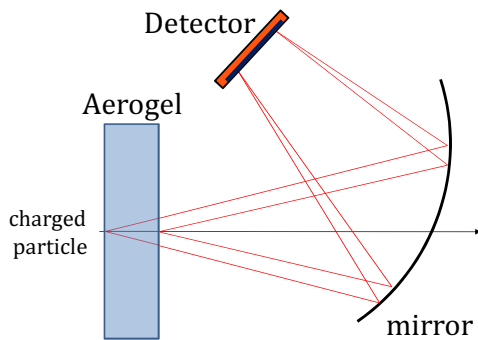


図 3.3: ミラー焦点型

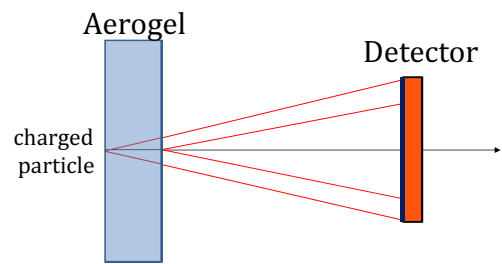


図 3.4: 近接焦点型

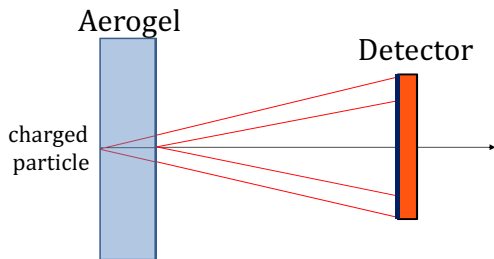


図 3.5: 単層

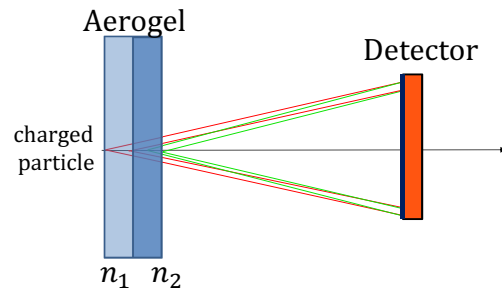


図 3.6: 複層

3.3 A-RICH の要求と構成

拡張領域

発生した Cherenkov 光を十分な大きさのリングイメージとして検出器面に投影させるために拡張領域を設ける。拡張領域はエアロゲルの Cherenkov 光放出側の面から光検出面まで

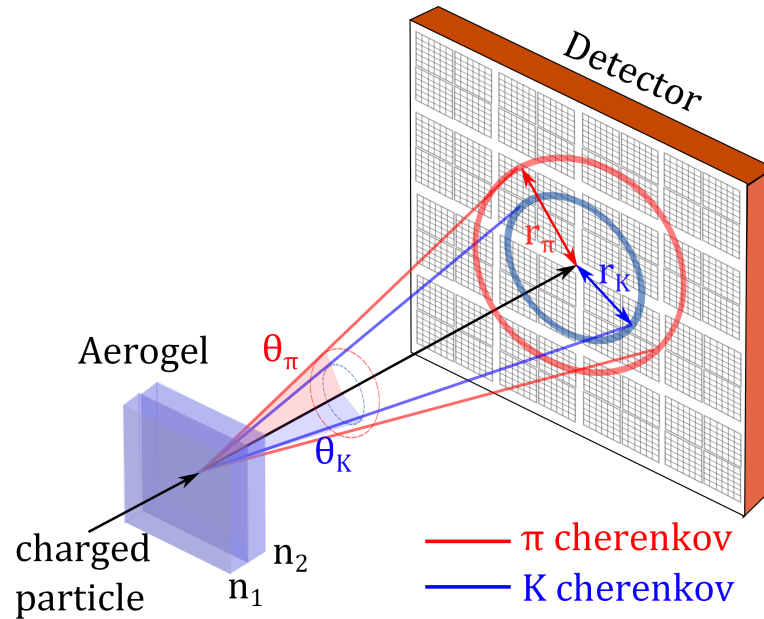


図 3.7: A-RICH によるリングイメージ検出

を 160mm とする。

放射線耐性

BelleII 実験での 10 年間で運用される A-RICH への積算線量が Belle 実験時の測定から見積もられている。中性子線は $10 \times 10^{11} \text{neutrons/cm}^2$, ガンマ線は最大 1000Gy とされているため, これらの放射線照射に対しても目標となる S/N の維持が要求される。

輻射体 0.5~4.0GeV の運動領域で Cherenkov 光を発生させるために 1.05 以上の屈折率を持ち, 検出光子数を増やすために透過長ができるだけ長い物質であること。

光検出器エアロゲルの屈折率 1.05, 荷電粒子の運動量を 4GeV と仮定すると K 中間子と π 中間子による Cherenkov 光放射角度差は約 23mrad となり, リング半径差は 5mm 程度となる。したがって, 位置分解能が 5mm 以下の検出器であること。1.5T 以上の磁場中で問題なく動作すること。

読み出し回路高利得, 低雑音の増幅機能を持つこと。設置空間が非常に限られているためコンパクトな設計であること。多チャンネル同時読み出しが可能であること。BelleII のデータ収集システム (DAQ) やトリガーシステムに対応できること。これらの要求性能をもとに, 各構成要素毎の性能と現在の開発状況などを説明する。

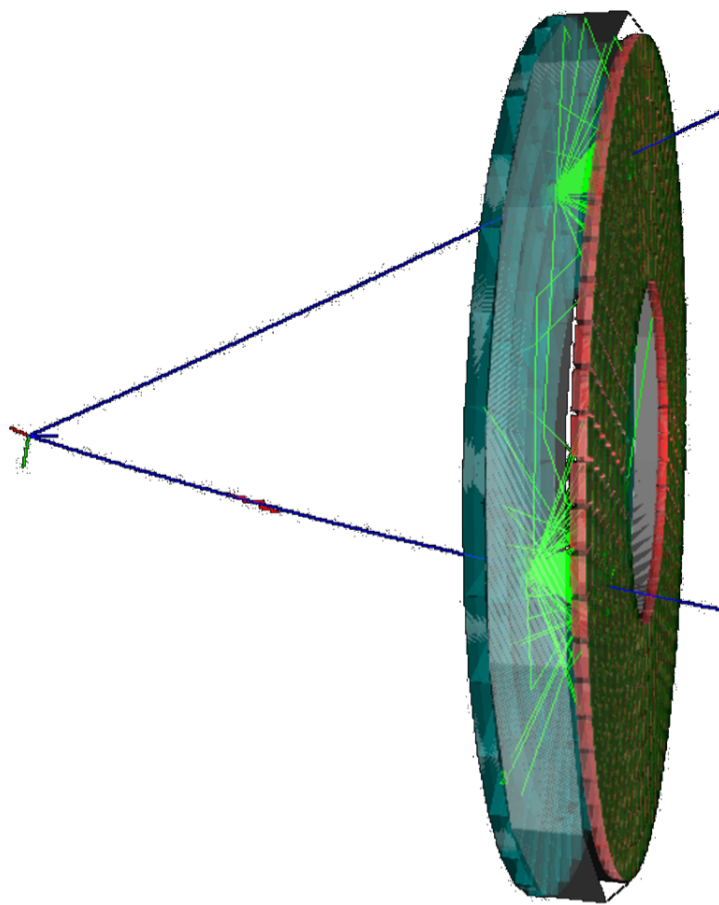


図 3.8: A-RICH の全体像と粒子検出イメージ

3.4 輻射体～エアロゲル～

要求性能

運動量 0.5GeV 以上の荷電粒子で Cherenkov 光を発生させるために、輻射体の屈折率は 1.05 以上であることが要求される。この輻射体を用いることで 0.5～1.5GeV までの領域では Cherenkov 光発生の有無, 1.5GeV 以上の領域では Cherenkov 角の測定により粒子識別が可能となる。

この要求を満たすために用いられるのがエアロゲルという物質である。エアロゲルは SiO_2 を 3 次元的に配列した多孔構造を持ち, 典型的には体積の約 90% が空気で占められている。粒子径は約 10nm と可視光波長 (400～700nm) に比べ小さく光透過性を持つ。個体でありながら低屈折率, 高透明度, 低密度であるというよく主な配列ゆえに生み出され, その製造過程で屈折率を任意に調整できるのも一つの特徴である。また光学的性質に加え低密度ながら荷重特性を持ち, 細かい構造ゆえに空気の対流が抑えられ高い断熱性を持つといった性質も挙げられる。

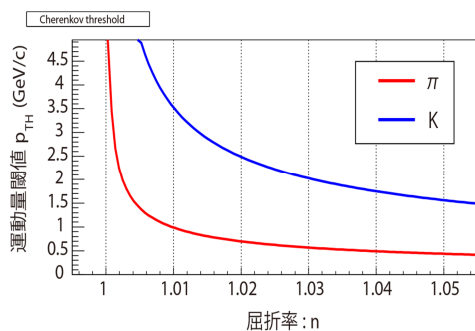


図 3.9: 粒子の運動量と輻射体屈折率の関係

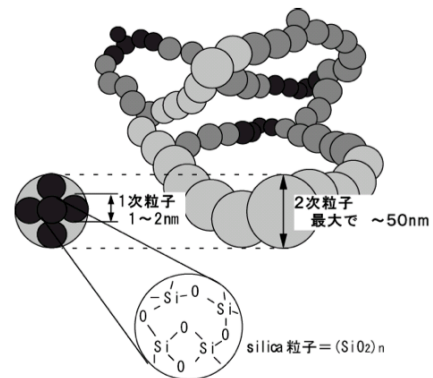


図 3.10: エアロゲルの微細構造

要求性能

エアロゲルは現在, 千葉大学を中心に高屈折率化, 密度の一様性向上, タイルの大型化といった研究が行われている。屈折率は 1.003～1.25 の範囲での生成が可能となり, 特に 1.10 以上の領域では初めて実用的な透明度のエアロゲルが得られたと報告されている。タイルの大きさに関しても屈折率 1.05 以上の領域では 2005 年には $11 \times 11 \times 2 \text{ cm}^3$ であったのに対

し, 2011 年には $18 \times 18 \times 2 \text{ cm}^3$ の製作に成功している。実際のエアロゲルの性質をその他の物質と比較したものを 3.1 示す。

物質	屈折率	密度 [g/cm^3]	その他
エアロゲル	1.003~1.25	0.01~	
空気	1.00028	0.001293	25 °C, 1atm
水	1.3428	0.99984	20 °C
ガラス	1.48~2.00	2.4~2.6	光学ガラス等

表 3.1: エアロゲルの性質とその他の物質の比較



図 3.11: エアロゲルタイル

3.5 光検出器～HAPD～

我々は 2002 年から浜松ホトニクスと共同で前述の A-RICH への要求を満たす光検出器として HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector) を開発している。

要求性能と動作原理

HAPDは高電圧印加可能な光電面を持ち、6×6チャンネルピクセル化されたAPDチップが4つ配置され計144チャンネルのマルチアノード型検出器であり、その内部は真空となっている。各チャンネルを $4.9\times 4.9\text{mm}^2$ で設計しているため位置分解能5mm以下という要求を満たす。また、HAPDは増幅過程の異なる方式で二段増幅するハイブリッド型光検出器である。一段目の増幅では光電効果により放出された電子を、真空管中に電場をかけることで加速させる。この加速により1,500～2,000倍のゲインを得ることができる（打ち込みゲイン）。光電面のQEは25～30%程度である。二段目はAPDによるアバランシェ増幅であり次のような過程で増幅される。入射した光子によりでんし正孔対が生成されPN接合間の電解により電子正孔対が加速される。これらが材質内の原子を電離させる。この増幅では～50倍のゲインを得ることができる。（アバランシェゲイン）。以降、アバランシェゲインを単にゲインと記述する。また初段の増幅率が次段の増幅率より十分大きいことから、光電子数の不定性を抑えられるため1光子検出可能となる。

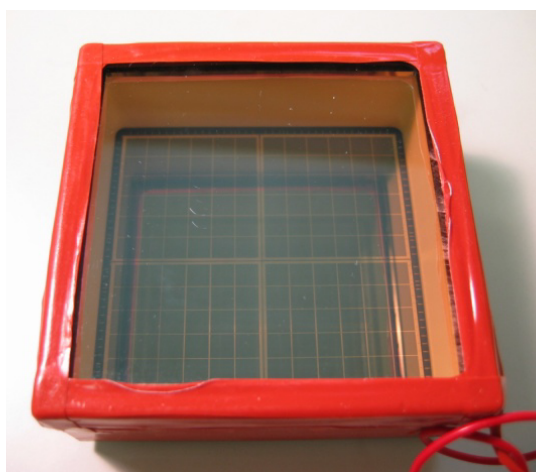


図 3.12: HAPD の外観

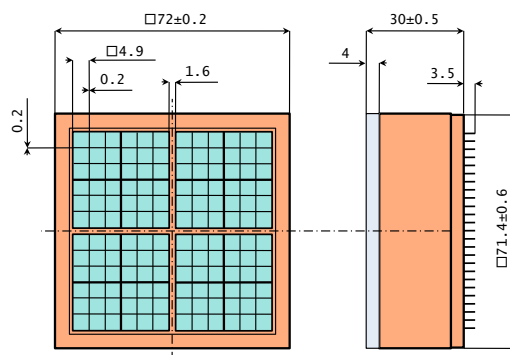


図 3.13: HAPD の外寸

開発状況

BelleII10年間の使用を見込み、要求性能を満たす仕様を確定することができ、2013年の夏から大量生産が開始されている。量産品HAPDについては、暗電流測定、ノイズ・S/N測定、QE測定、1光子相当のレーザー光を当てた時の全面スキャンを行っており、それぞ

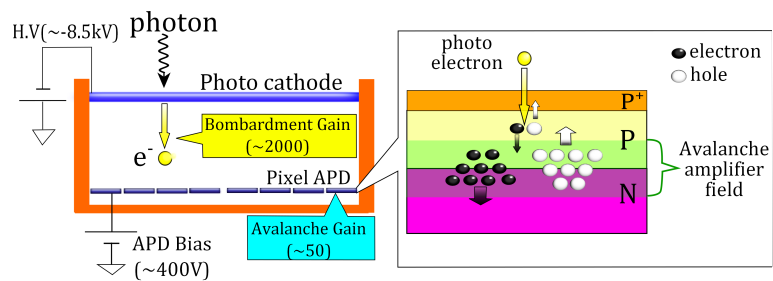


図 3.14: HAPD の動作原理

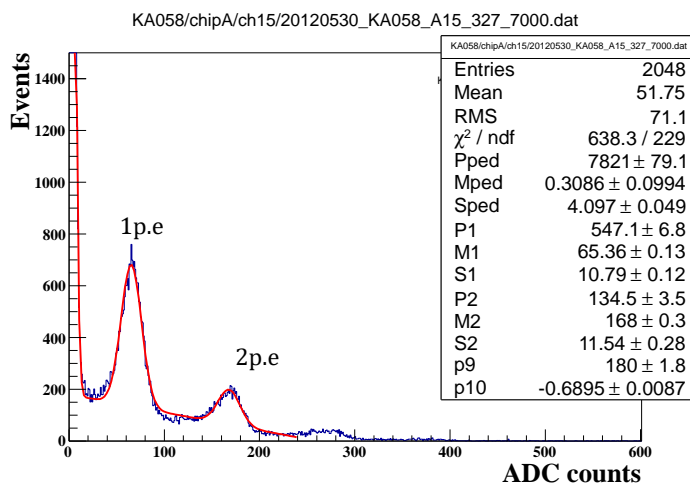


図 3.15: HAPD の 1 光子検出能力。LED を照射し、MCA で波高分布を測定

れ要求を満たすものかどうかの確認が行われている。ここで HAPD の各種パラメータをまとめると。

表 3.2: HAPD の各種パラメータ値

外寸	75 × 75mm ²	
入射面	合成石英	
光電面	材料	バイアルカリ→スーパーバイアルカリ
	感度波長領域	160~650nm
	最大感度波長	400nm
	有効面積	63 × 63mm ²
	印加電圧	~8500v
	Bombardment Gain	~2000
	QE	~30%
APD	寸法	4.9 × 4.9mm ²
	静電容量	100pF(P 薄)
	耐電圧	250~500V
	AvalancheGain	~50
	チップ数	4
	チャンネル数	36ch/chip
	総チャンネル数	144ch
Total Gain	~10 ⁵	
S/N 比	~15	

3.6 読み出し回路~ASIC&FPGA~

要求性能と動作原理

読み出し回路にはまず高利得, 低雑音の増幅機能を有していることが要求される。PMT などの一般的な光検出器に比べ, HAPD の Total Gain は $10^4 \sim 10^5$ と低いため, 低雑音, 高利得の読み出しシステムで補うことで 1 光子検出性能を達成する。

次に, 読み出しシステムのコンパクト化が要求される。A-RICH に許された領域は設計上ビーム方向に 280mm であり, エアロゲル厚さが 20mm×2 枚の 40mm, 拡張領域 160mm, HAPD の厚さ 30mm とするため残りが 50mm であり, これが読み出しシステムに許される領域である。この領域にケーブル等も含めたすべての読み出しシステムを設置する必要がある。

そして HAPD の多チャンネル読み出しが可能であることが求められる。A-RICH では 420 台の HAPD を設置するため総チャンネルは約 60,000 となり、これらを同時に読み出す必要がある。

これらの要求を満たすために我々は ASIC と FPGA を採用した専用の読み出し電子回路を開発した。ASIC は汎用 IC を組み合わせた回路とは異なり、個別に設計を行い、1 つの IC とすることで高集積化、高速動作が可能であることが特徴である。我々は A-RICH 用の ASIC、「SA シリーズ」の開発を 2007 年より進めている。また、FPGA はプログラムによる回路設計が行えるため、柔軟に設計の変更が可能である。この特徴により BelleII DAQ に対応させることができる。

読み出し回路では 1 光子識別のため、1 光子以上の信号の有無（ヒット情報）を記録する。このヒット情報の識別のために適切な式位置電圧を設定し、検出した信号の波高が閾値を超えたものを 1 光子以上の信号として記録する。また、閾値を徐々に変えていき各閾値電圧でのヒット数をプロットすることで波高分布測定が可能である。この測定をスレシヨルドスキャンと呼ぶ。

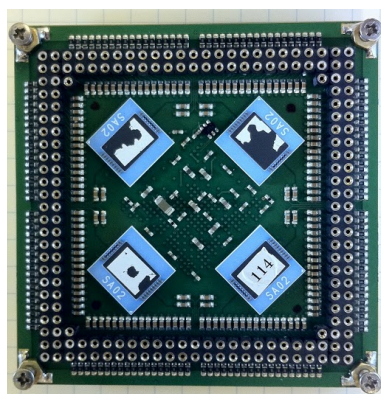


図 3.16: メインボード（HAPD 接続面）ASIC が取り付けられている

第4章 HAPDの放射線影響

本章、および次章では A-RICH の課題の一つである HAPD の放射線耐性に関して述べる。BelleII 実験では電子・陽電子ビームの衝突により高エネルギーの粒子を発生させるが、同時にビーム衝突以外の過程でガンマ線や中性子線も発生する。これらの放射線はバックグラウンドとして検出器の検出効率に影響を与えるに限らず、破壊的なダメージを及ぼす可能性もある。したがって BelleII 実験で使用する検出器には十分な放射線耐性が泣かれなければならない。

我々が開発を進めている A-RICH では光検出部分である HAPD に実装されている APD が特に大きな影響を受ける。そこで私は HAPD の放射線耐性を調査・向上するために中性子線とガンマ線の照射試験を実施し、評価した。

本章では、まず BelleII 実験での中性子線とガンマ線発生由来について解説し、中性子線・ガンマ線耐性向上のために実施した照射試験の結果と対策案に関して報告する。

また次章では、本章で述べる放射線対策を施した最終仕様候補 HAPD に対する中性子線・ガンマ線照射試験結果を報告する。

4.1 BelleII 実験におけるバックグラウンド

BelleII 実験で考慮すべきバックグラウンドの由来を解説していく。Belle 実験、および BelleII 実験では電子・陽電子ビームの衝突点で radiative Bhabha 散乱が起き、ガンマ線が放出される。放出されたガンマ線は検出器外部にあるビームパイプや磁石に衝突することで中性子をたたき出す。これが endcap まで飛来すると検出器にとってバックグラウンドとなる。

また、検出器付近では Touschek 効果が発生し、軌道を外れた粒子がビームパイプなどに衝突するとシャワーが発生しバックグラウンドとなる。

BelleII 実験でこれらの効果により発生する中性子線・ガンマ線量の見積もりは Belle 実験時の値をもとに行われた。

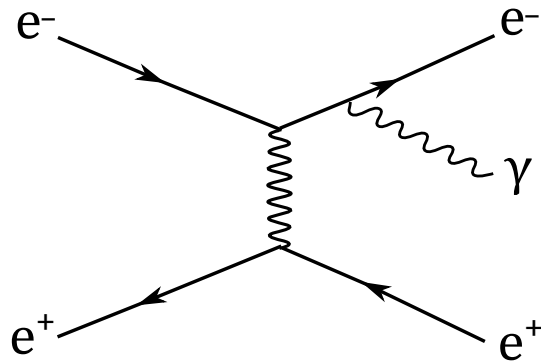


図 4.1: Radiative Bhabha 散乱のダイアグラム

4.2 中性子線による半導体への影響

中性子線は電荷をもたないため、半導体に与えるダメージは非電離的エネルギー損失によるものである。中性子線が入射する時にそのエネルギーが十分に大きいと半導体結晶を構成する原子が弾性衝突によりはじき飛ばされ、格子欠陥が生じる。この格子欠陥をバルク損傷と呼び、このようなはじきだし効果を DDD (Displacement Damage Dose effect) という。はじき出された原子はその周辺の隙間に入り込み格子間原子となる。このような格子欠陥と格子間原子の対を Frenkel 欠陥という。多くの格子欠陥と格子間原子は再結合を起こして消滅するが、一部は安定な欠陥となり半導体のギャップに新たなエネルギー順にを形成する。通常は高いバンドギャップのために伝導帯へ冷気できなかった束縛電子が、この欠陥順位を解すことで熱励起しやすくなってしまふ。その結果、熱励起される電子が増加し、漏れ電流として検出される。

4.3 中性子線耐性向上のための対策

中性子線によるダメージは前節に述べたとおり、漏れ電流の増加がノイズの増加につながるため、1光子検出における S/N 比が悪化する。そのため、いかにしてこのノイズ量を抑えるかが重要である。そのためにとられた中性子線対策は2種類に分けられる。ひとつが読み出し回路の最適化であり、もうひとつが HAPD 用 APD 構造の最適化である。

読み出し回路の最適化

まず中性子線対策としてノイズ量を抑えるために読み出し回路の最適化が必要であった。出力されるノイズにはキャリアの熱運動速度の揺らぎによるサーマルノイズと、キャリア数の揺らぎによるショットノイズの2つがある。全ノイズ量は shaping time(τ) の関数とな

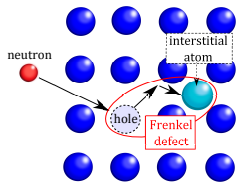


図 4.2: Frenkel 欠陥の概略

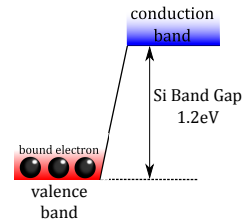


図 4.3: 半導体 Si のバンドギャップ

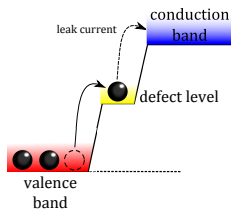


図 4.4: 格子欠陥による中間準位の生成

り、 σ_{total} が最小となるような最適な τ 値が求められる。中性子照射後のノイズ増加量はこの式による理想的な見積もりと測定値が良く一致しており、バルク電流の増加による効果として理解された。その結果として、1チャンネル当たりのノイズ量は下のように見積もられた。ここでアンプ定数 A は ASIC(sa02) が想定されており、 $A = 15e^{-} \cdot s^{(1/2)}/pF$, P薄タイプの静電容量は $C_{det} = 100pF$, $G=40$, I_b には 4×10^{11} neutrons/cm² の中性子線照射後の1チャンネルあたりの漏れ電流測定量をすべてバルク電流とみなして代入している。この見積もりによりP薄タイプにおいてはshapingtimeを100~200nsに設定するとノイズ量は最少になる事が報告されたため、この範囲内でshaping timeを調整できるように読み出し回路 (ASIC) の開発が進められている。

4.4 ガンマ線耐性の向上

4.4.1 ガンマ線量の見積もり

A-RICH へのガンマ線量の見積もりは Belle 実験時の ECL と SVD Dock に取り付けられたアミノグレイにより行われた。これは、A-RICH の設置予定場所が Belle 実験時の ECL と SVD に近いためである。ECL で使用している CsI(Tl) への蓄積エネルギーから求めた ECL 内部へのガンマ線線量は 2.36Gy であった。これは積分ルミノシティが $766fb^{-1}$ のと

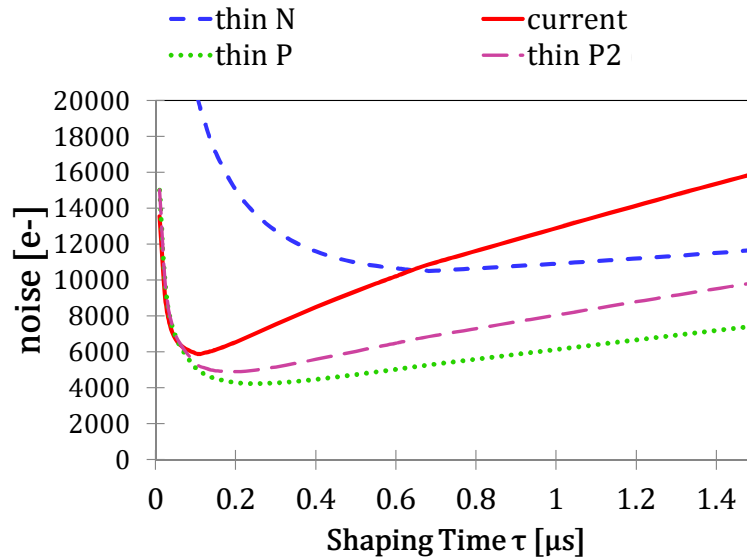


図 4.5: shaping time を変化させたときの 1 チャンネルあたりのノイズ量の見積もり

きの線量であるため、BelleII 実験では 10 年間で $50ab^{-1}$ であることを考慮すると 150Gy 程度と見積もられる。また、衝突点付近の SVD に取り付けられたアミノグレイにより測定された線量は $70fb^{-1}$ で 3.6Gy 程度であった。したがって BelleII 実験では衝突点付近のガンマ線量は 10 年間で 2500Gy 程度と見積もられる。これらの値より A-ROCH へ飛来するガンマ線量は 1000Gy と見積もられ、この値を耐性の目標に HAPD の開発を進めてきた。

4.4.2 APD 構造の各種名称と役割

APD の構造を図 4.6 に示し、その役割を説明する。(括弧内は選択肢)

N 層/P 層

アバランシェ増幅領域を作る。中性子線耐性として P 薄を採用。

P + 層 (普通/薄)

高濃度ドーピングされた P+層が入ると PIN 構造となる。PN 構造より空乏層が広がり高速応答が得られる。

薄いほうが光電子のエネルギー損失が小さいため打ち込みゲインが高い。

受光面保護膜 (A/B/C)

熱処理工程により APD の受光面に形成される。工程を変えることで3種類選択可能

アルカリ保護膜（有/無）

光電面蒸着の際にアルカリ物質から APD を保護する。

アルカリコーティング（無/サイクル数 50/100/200/400）

アルカリ保護膜と同様だが膜質が異なる。蒸着のサイクル数を変える事で厚さを調整可能。

層間絶縁膜（有/無）

電極間の絶縁。ガード電極を導入する際に必要。

ガード電極（有/無）

電場を形成し、受光面以外への電子線入射を遮蔽する。

中間電極（有/無）

中間電位を形成し層間絶縁膜内の電場勾配を和らげチャージアップを防ぐ。ガード電極と等電位。

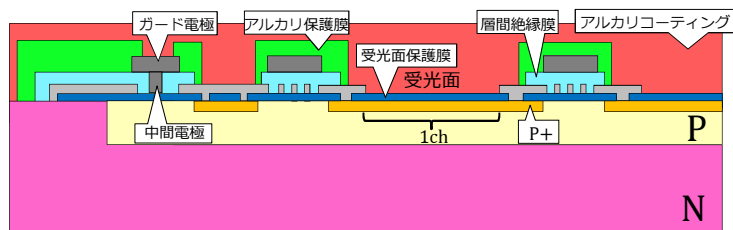


図 4.6: HAPD 用 APD 断面

4.4.3 ガンマ線による半導体への影響

ガンマ線の場合、積算線量に依存する効果は電離的エネルギーによるものである。これにより APD 内で生じる現象と、その影響について解説する。ガンマ線は主にシリコン基板と酸化膜 SiO_2 の接触面（界面）に影響を及ぼすことが知られている。ガンマ線が入射すると SiO_2 中の電子がはじき出され、電子-正孔対を生じるが、正孔は電子に比べて移動

速度が遅いために取り残され、酸化膜中の構造欠損に捕獲されて移動しなくなる（正電荷捕獲）。正電荷捕獲により APD 内部の電場が変化するため、印加電圧に対するゲイン低下がますます懸念された。また、このように正電荷捕獲が生じると、 Si/SiO_2 海面にエネルギー準位（界面準位）が生じる。これにより、Si 表面では表面電流が増加し、ノイズ量増加につながると考えられた。表面電流により増加するノイズ量は下のよう書かれる。

ブレイクダウン仮説

1. ガンマ線が APD に入射すると表面の HAPD 用保護膜に電離作用を及ぼし絶縁薄膜上部が正に帯電する。
2. P 層上部に負電荷が引き寄せられ、P 層上部が N 層化する。
3. N 層化した P 層と P+層との距離が短くなり、耐圧が低下。
4. N 層化した P 層と P+層間がショートし、放電しながら電流が流れる。

以降この現象をアバランシェ降伏による Breakdown と区別するため、Charge Up Breakdown と呼ぶ。

第5章 最終仕様HAPDの放射線耐性試験

5.1 HAPDの仕様決定

これまでに、APD内部の構造決定や、放射線照射の影響を解明するために、何度も照射試験が行われてきた。ここでは仕様決定のために行われた2012年6月から8月にかけて行ったガンマ線・中性子線複合照射試験についての結果をまとめる。今後の記述のため、この試験を第一回放射線複合試験と記す。

主な目的としてこの照射試験では、初めて中性子線とガンマ線を複合的に照射したため、それぞれ独立に照射したときの影響の他に、別の影響はないか確認することであった。更に受光面による違い、またオプションとして中間電極の有無についても比較を行った。以下のサンプルについて照射を行った。

結果は以下のとおりである。

中性子線耐性

中性子照射では、ビーム軸に対して垂直にサンプルを配置するため、照射量が異なる。エルマダイオードをサンプルに取り付け、見積もった照射量が5.1である。

No.	KA058	KA060	KA062	KA063
hline 照射量 [$\times 10^{11}$ neutrons/cm ²]	8.6	7.3	6.0	4.8
hline				

表 5.1: ELMA ダイオードからの見積もり照射量

5.1 に、中性子線照射後の漏れ電流値を示す。

照射量と漏れ電流は比例すると仮定され、1次関数でフィッティングした結果である。この結果から、必要耐性量である 1.0×10^{12} neutron/cm² 照射時の予想漏れ電流を用い、膜 A

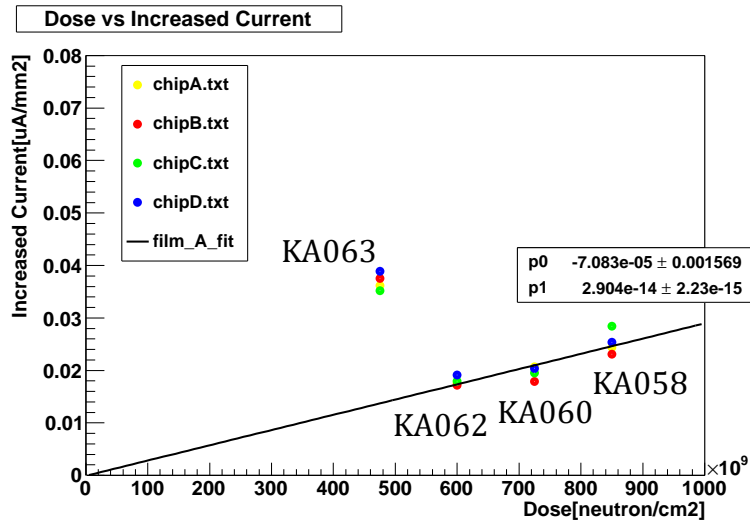


図 5.1: 照射後の漏れ電流値

ではS/N~7、膜CではS/N~5程度になると計算されている。

ガンマ線耐性

受光面保護膜 A のサンプル代表として KA058、受光面保護膜 C のサンプル代表として KA063 の照射中の電流増加量の様子を 5.2 と 5.3 に示す。これまでの照射試験から受光面保護膜 A のサンプルでは Charge Up Breakdown が起こらないと予想していたが、実際には約半数のチップで Charge Up Breakdown が起こった。一方で、膜 C のサンプルはすべてのチップで動作電圧において動作可能であった。

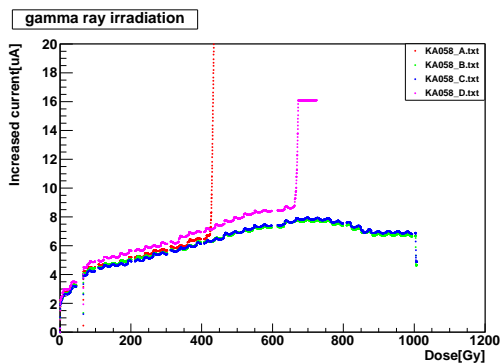


図 5.2: KA058 の照射中電流モニタ

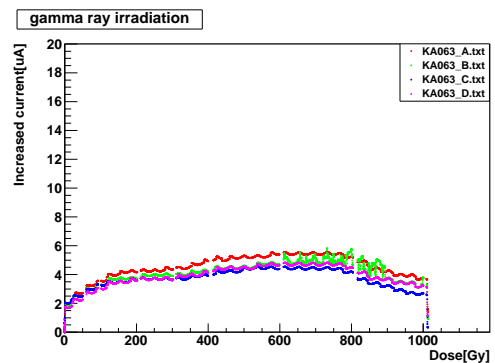


図 5.3: KA063 の照射中電流モニタ

<中性子照射によるガンマ線ブレイクダウンの有無>

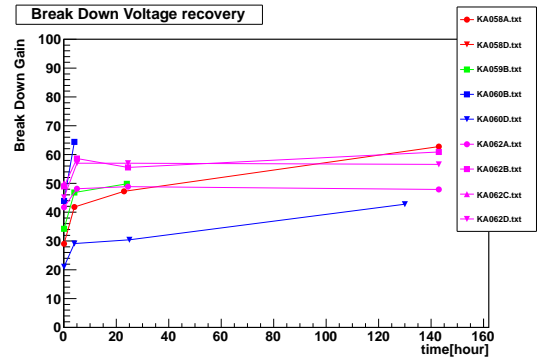
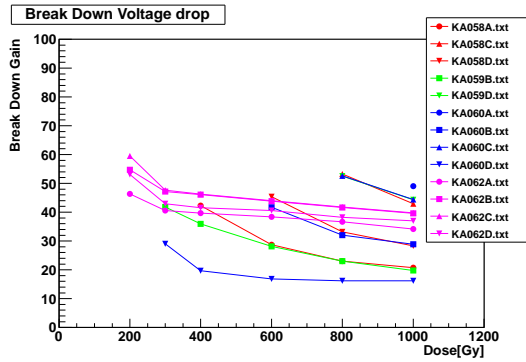


図 5.4: 照射中 Charge Up Breakdown 電圧開始ゲインの様子

図 5.5: 照射中 Charge Up Breakdown 電圧開始ゲイン回復の様子

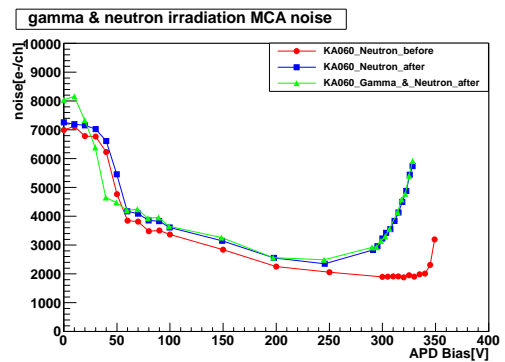
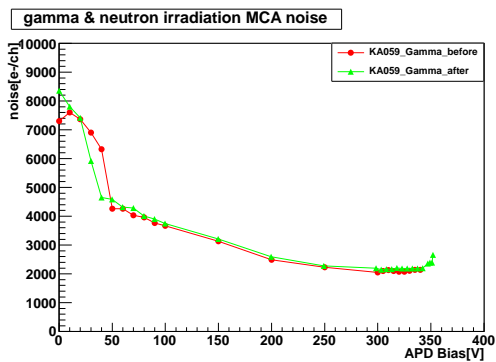


図 5.6: 照射前後の 1 チャンネルのノイズ量変化

図 5.7: 照射前後の 1 チャンネルのノイズ量変化

第一回放射線複合照射試験のまとめ

第一回放射線複合照射試験を終えて次の結論が導かれた。

中性子線耐性

受光面保護膜 A の場合、仕様予定の ASIC を用いることで要求性能を満たす。

受光面保護膜 C の場合、P 普通タイプ APD と同程度のバルク電流、ノイズの増加によりこのままでは要求性能を満たせない

ガンマ線耐性

Charge Up Breakdown の主原因はアルカリ保護膜であった

144 チャンネルピクセル化には層間絶縁膜とガード電極が必要である。

受光面保護膜 A の場合、照射中に Charge Up Breakdown 発生ゲインの低下がおきるものの、アニールも含めればゲイン 40 以上で動作可能となり要求性能を満たす。

受光面保護膜 C の場合、照射中に Charge Up Breakdown 発生ゲインの低下は見られず、ゲイン 40 以上で動作可能であり、要求性能を満たす。

第一回放射線複合試験のまとめ

受光面保護膜 C に関しては中性子線耐性の向上のために中性子線照射追試験が必要である。

受光面保護膜 A と C の APD 構造の違いは P+層の厚さであることから、P+層・P 層の厚さを更に薄くすることで改善できると予想される。受光面保護膜 C との違いは何かを理解するためにガンマ線照射追試験が必要である。特に、受光面保護膜 C はガンマ線耐性が良く、Charge Up Breakdown が全く発生していなかったため、中性子線耐性の改善が可能であれば仕様を切り替える可能性がある。

また、第一回放射線複合照射試験を終えて絞られた仕様は以下の 4 タイプである。

なお、受光面保護膜、P + 層以外の仕様は、P 層：薄、相関絶縁膜：有、ガード電極：有、中間電極：有、アルカリ保護膜：無、アルカリコーティング：無、の仕様である。

- 1：受光面保護膜:A / P + 層:普通
- 2：受光面保護膜:A / P + 層:薄
- 3：受光面保護膜:C / P + 層:普通
- 4：受光面保護膜:C / P + 層:薄

5.2 最終仕様確定のための照射試験

目的

最終仕様となった HAPD は、アルカリ保護膜を排除したことでブレイクダウンの発生は抑制されたことが確認できたが、2012 年 8 月のガンマ線照射試験ではブレイクダウン発生が起こらないわけではなかった。これは 2012 年 2 月の試験と矛盾しており、違いは APD から HAPD になったことである。最終仕様の HAPD の放射線耐性を再確認するとともに、そのブレイクダウンのメカニズムを解明、また今後の対策を決めるために照射試験を行った。

5.3 中性子照射試験

茨城県東海村の J-PARK にある物質・生命科学実験施設のビームライン 10 (NOBORU) で最終仕様 HAPD の中性子照射試験を行った。5.8 に概略図を示す。期間は 2013 年 2 月 16 日 17 時 17 分～2 月 19 日 8 時 31 分、3 月 9 日 21 時 00 分～3 月 11 日 9 時 00 分の 2 回に分けて行い、計 96 時間の照射を行った。中性子線発生方法は次のとおりである。まず、大強度の陽子ビームを水銀ターゲットに照射し、核破砕反応で水銀の原子核を構成する中性子が飛び出す。飛び散る中性子を反射体で反射させ、モデレーターに集める。中性子はモデレーター内の水素と衝突を繰り返し次第に速度が下がり、研究に最適な速度の中性子ビームとなり、実験装置に導出される。照射サンプルは 5.2 のとおりである。また、中性子照射のセットアップの様子を 5.2 に、エルマダイオードの照射量を 5.10 に示す。

サンプル番号	受講面膜質	P + 層厚み
KA067	A	薄
KA079	A	更薄
KA086	C	薄
KA082	C	更薄

表 5.2: 第二回放射線照射試験：中性子照射を行ったサンプル

中性子照射試験結果

中性子線照射量に対するリーク電流増加量を 5.11 に示す。2012 年の照射と 2013 年の照射結果を比較すると、受光面膜 A と C の間でリーク電流増加量に明らかな差が見られる。同じ膜間で 2012 年照射サンプルと 2013 年照射サンプルを比較すると、線形性は見られな

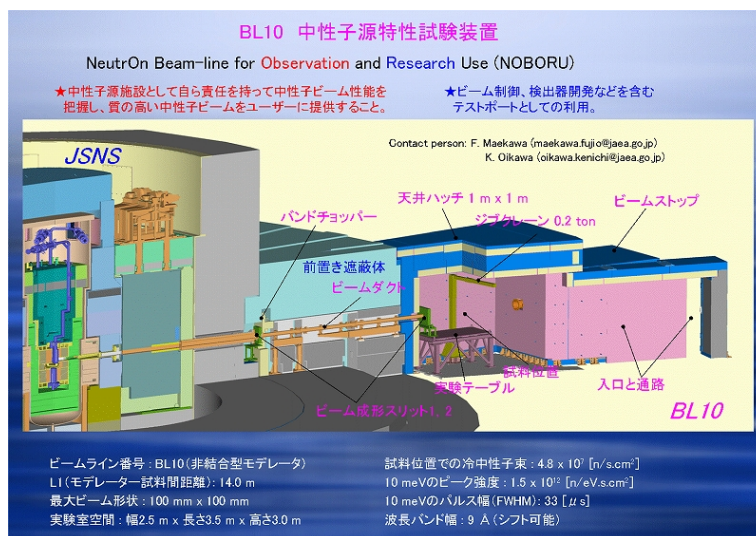


図 5.8: ビームライン 10 (NOBORU) の概略

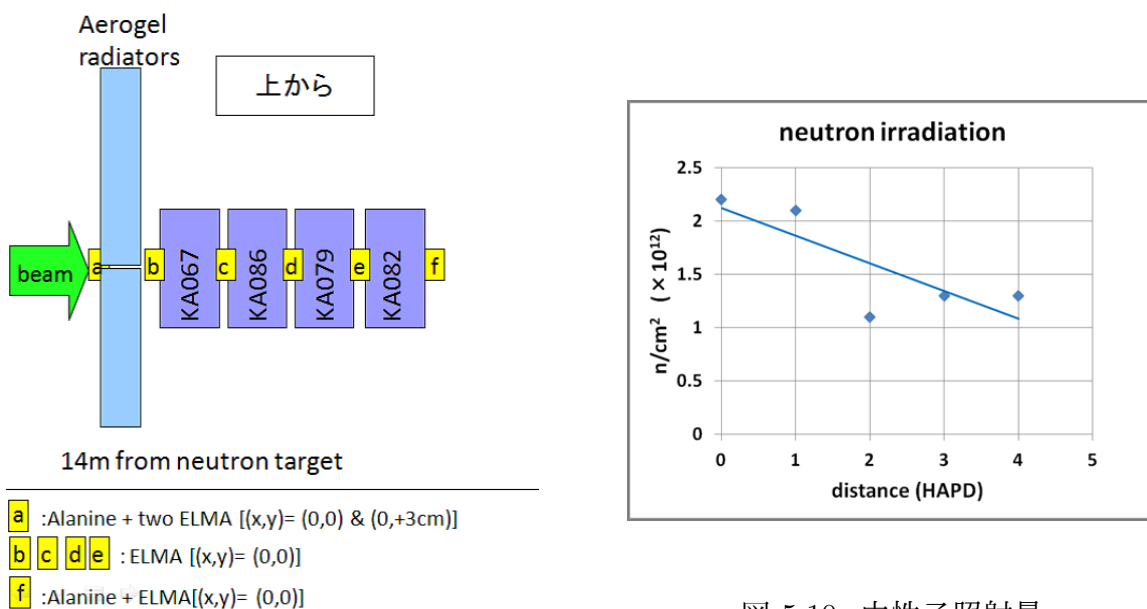


図 5.10: 中性子照射量

図 5.9: 中性子照射試験の HAPD セットアップ

く、リーク電流の増加は個体差に依存する可能性がある。

KA067のリーク電流からの見積もりノイズを5.12に示す。この結果から、動作電圧であるAPDゲイン40では、ノイズ量が $8000e^-$ 程度と推測でき、この値は1photonが $60000e^-$ 程度であることから十分許容範囲内であるといえる。一方膜Cのサンプルでは、照射終了後も暗電流値が増加し続ける結果となった。

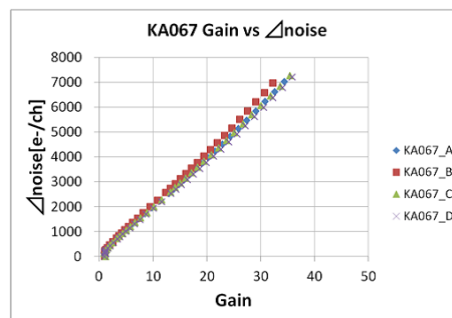
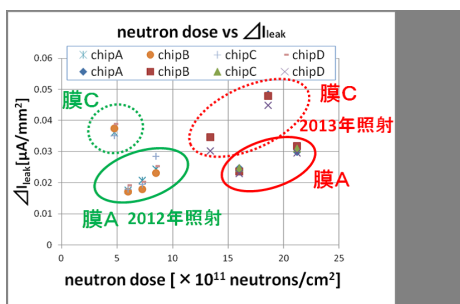


図 5.11: 中性子線量に対するリーク電流増加量の見積もりノイズの比較

また、中性子照射前後のスレッシュホールドスキャンの結果を、代表として受光面膜A・P薄のKA067を示す。このサンプルは中性子が 2.0×10^{12} と必要耐性量の2倍以上照射されているもので、照射前が5.13照射後が5.14でこのように変化する。このスレッシュホールドスキャンより、中性子照射前から照射後に、ノイズは $4000e^-$ から $9200e^-$ 、ゲインが60700から39000、S/Nが15から4に変化している。一方で膜Cのサンプルは、ノイズが多く、波高の分離ができないため、ゲインが見積もれない。

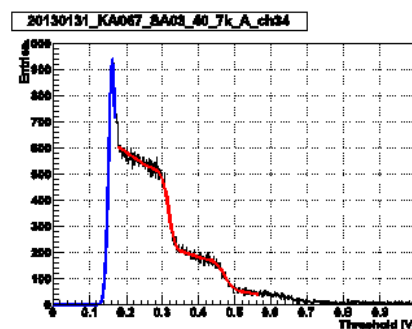
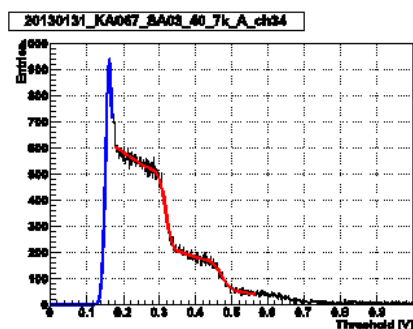


図 5.13: KA067の中性子照射前のスレッシュホールドスキャン

図 5.14: KA067の中性子照射後のスレッシュホールドスキャン

中性子照射試験のまとめ

第一回放射線照射試験の結果と同様に照射後のリーク電流増加量は、受光面膜質 C に比べ A の方が小さいことを確認した。

受光面膜 A のノイズ量は許容範囲内であり、 $2.1 \times 10^{12} \text{neutron/cm}^2$ の照射量でも S/N~4 程度を保つ。

5.4 ガンマ線照射試験

名古屋大学工学部 Co60 照射室にてガンマ線照射試験を行った。期間は 2013 年 7 月 24 日 16 時 30 分~7 月 25 日 12 時 30 分の計 20 時間、1000Gy の照射を行った。照射したサンプルは 5.3 のとおり 4 つである。最終仕様のサンプルと膜厚を更薄に切り替える可能性も考慮しサンプルを選んだ。セットアップの様子を 5.15 に示す。

サンプル番号	受光面膜質	P + 層厚み	中性子照射 ($\times 10^{12}$)
KA067	A	薄	有
KA075	A	更薄	なし
KA079	A	更薄	有
KA082	C	薄	有

表 5.3: 第二回放射線複合試験ガンマ線照射サンプル



図 5.15: ガンマ線照射試験のセットアップ

ガンマ線照射試験結果

照射中の電流モニターの結果を 5.16 から 5.19 に示す。第二回放射線複合試験のガンマ線照射では、電流モニターの結果からわかるように、膜質や中性子線量に関わらず、ブレイクダウンが起きなかった。膜 A のサンプルに関しては第一回放射線複合試験の結果と異なる結果となったが、これまでのガンマ線照射試験の結果から、膜 A のサンプルでは数 100Gy から 1000Gy の間でブレイクダウンが起こる可能性があることが明らかになった。また、膜 C のサンプルに関しては、これまでと同様、中性子照射を行ってもブレイクダウンは全く起きない結果となった。

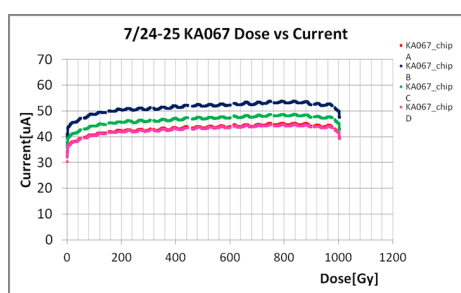


図 5.16: KA067 の電流モニタ

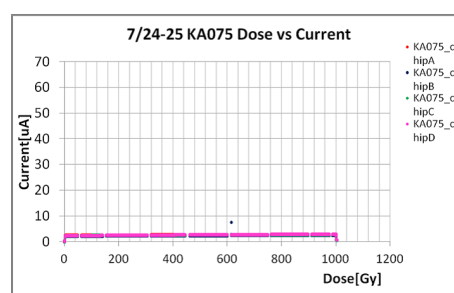


図 5.17: KA075 の電流モニタ

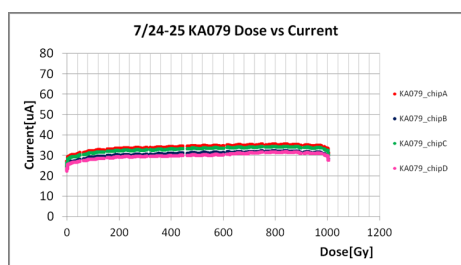


図 5.18: KA079 の電流モニタ

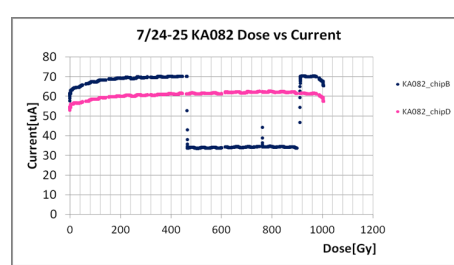


図 5.19: KA082 の電流モニタ

KA067 の中性子線、ガンマ線照射後の時間経過に対するノイズ量を 5.20 に示す。この結果から、中性子照射によるノイズ増加に比べ、ガンマ線照射によるノイズ増加は十分無視できるということが前回と同様に確認できた。

ガンマ線照射試験のまとめ

第二回放射線照射試験のガンマ線照射では受光面膜質、中性子照射量に関わらずブレイクダウンを起こさなかった。また、ガンマ線照射によるノイズ増加の影響は十分小さい。

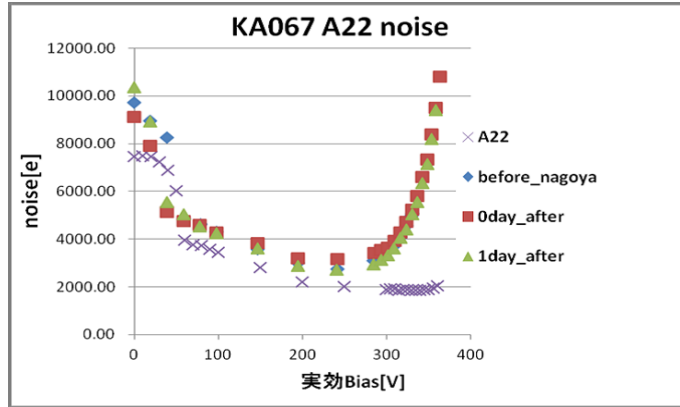


図 5.20: 中性子線・ガンマ線照射後の時間経過に対するノイズ量

これまでの照射試験でブレイクダウンが起こっても照射終了後に回復することから仕様として採用している膜 A で十分な耐性を持つことがわかった。

第6章 まとめ

高エネルギー研究機構で行われた Belle 実験は電子・陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器 KEKB により大量に B・反 B 中間子を生成し、その崩壊事象を Belle 検出器により観測するという実験であった。その結果として 2001 年の夏、 $B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ の崩壊過程で測定された CP 非対称度が標準模型から予測される値と極めてよく一致し、小林・益川理論の正しさを示し 2010 年 6 月に終了を迎えた。Belle 実験では新物理への感度が期待される稀崩壊も発見されたが精密測定が困難であった。そこで小林・益川理論の詳細検証や、稀崩壊の精密測定をおこない、標準模型を超える新物理探索を目指す BelleII 実験が 2015 年より開始される予定である。

Belle 実験の K/ π 識別検出器 ACC は、エンドキャップ部では 2GeV/c までのフレーバータギング線用として運用された。BelleII 実験でエンドキャップ部に到達する高運動粒子は、新物理の探索に欠かせない崩壊モードに関与していると期待されている。そのため BelleII 実験ではこのような崩壊モードも精度よく観測するため、エンドキャップ部で 4GeV/c までの高運動領域で K/ π 分離が可能な粒子識別装置として新型粒子識別装置 A-RICH の開発を進めている。A-RICH では荷電粒子が輻射体を通過する際に発生させる Cherenkov 光をリングイメージとして検出し、そのリング半径から輻射角度を測定する Ring Imaging 型 Cherenkov 光検出器である。輻射体の屈折率が分かれば別の検出器で測定した運動量と A-RICH で測定した輻射角度を用いて粒子質量の決定、すなわち粒子識別が可能となる。

A-RICH で使用する光検出器への要求を満たす検出器として我々は浜松ホトニクス社と共同で HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) の開発を進めている。HAPD は 5mm 以下の位置分解能をもち、1.5T の磁場中でも動作可能、単光子検出性能が高い、といった A-RICH への要求を満たすマルチアノード型の光検出器である。BelleII 実験で HAPD を使用するにあたって問題となるのが中性子線・ガンマ線耐性である。BelleII 実験では 10 年間でガンマ線が 1000Gy、中性子線が 1MeV 相当で $10 \times 10^{11} \text{neutrons/cm}^2$ 飛来すると予想されているため、HAPD にこれらの照射量耐性があるかを調査し改良した。その結果、放射線耐性を持った HAPD の開発に至った。

ガンマ線に関しては本来 APD が受ける影響は表面的なものでありアバランシェ増幅領域をとおらないため、増幅利得の低下やノイズ増加といった S/N に関わる部分には大き k 作用しないと考えられてきた。しかしこの研究でガンマ線照射試験を行うと通常の APD による研究では理解できない急激な電流増加が起こると報告された。また、その後の照射試験ではこの原因が半導体部分ではなく、HAPD 製造に必要とされる APD 表面の絶縁膜 (HAPD 用保護) が帯電し、APD アルミエッジ下部の放電によるものであることが報告された。Charge Up Breakdown の発生電圧は照射量の増加とともに低下していくため、得られるゲインも間接的に低下する。したがってガンマ線耐性としては 1000Gy 照射後アニールも含めて動作ゲインである 40 以上が得られることが使用可能条件となる。

そこで私は、原因となるアルカリ保護膜を排した APD 構造のサンプルについて、中性子線・ガンマ線複合照射試験を行った。2012 年の照射試験において、アルカリ保護膜を排した構造では、ブレイクダウンの発生が抑制されることが確認できた。また、中性子線・ガンマ線の影響はそれぞれ独立であり、お互いに影響を及ぼさないことも確認した。一方、受光面膜質の違いについて注目すると、中性子照射では、照射量に対するリーク電流量で膜 A と膜 C のサンプルで違った振る舞いが見られた。また、ガンマ線照射では、膜 C のサンプルはブレイクダウンせず、膜 A のサンプルでは約半数のチップでブレイクダウンする結果となった。しかし、アルカリ保護膜があるものに比べ回復が早いこともわかっている。膜 A のブレイクダウン発生に対しては、2012 年 2 月のガンマ線照射試験と異なる結果となった。考えられることとして、APD から HAPD 化したことによる何らかの原因、またはロット依存性があることが指摘されていた。これらの結果を踏まえ、受光面膜質を選択し、仕様を確定するために、2013 年に再度複合照射試験が行った。中性子線照射に関しては、2012 年の照射と同じく、膜 C よりも膜 A のサンプルのほうが、リーク電流も少なく、膜 A に関しては、必要耐性量の 2 倍の照射でも S/N 4 程度を保つことができるということがわかった。一方膜 C では、リーク電流が大きく、電圧降下が起こるため、動作電圧をかけることが難しい。ガンマ線照射においては、膜 A、膜 C のサンプルともにブレイクダウン発生が起きない結果となった。

これまでの結果を踏まえ、膜 C では中性子耐性が十分でないが、膜 A の HAPD ではブレイクダウン発生は、数百 Gy~1000Gy の範囲で起こること、また、実際に使用する実験環境下では、ガンマ線の照射レートが低く、ブレイクダウンが発生してもすぐに回復することから、膜 A の仕様を選択した。

以上により、私は BelleII 実験に使用する HAPD の放射線耐性について研究し、仕様を確定するに至った。今後は、HAPD の納入が行われ、性能検査が行われる。ブレイクダウン

の発生について、現在考えられることはロット依存性であり、性能検査、またはサンプルを取り出して照射試験を行うことで、ブレイクダウン発生のメカニズムを解明することが考えられている。

第7章 謝辞

この論文を書くことができたことに、まず私の所属する研究室の小川了教授、渋谷寛教授に感謝致します。特に小川教授は、研究するにあたり、多方面から物事が見られるように、セミナーに参加させていただいたり、多くの機会を与えて下さいました。また、研究に限らず、就職活動や私生活でも困った時には相談に乗ってくださり、とても感謝しています。ありがとうございました。そして、高エネルギー加速器研究機構の足立一郎教授、西田昌平準教授にも A-RICH グループの一員として大変お世話になりました。研究に関してはもちろん、発表資料なども、いつも丁寧にアドバイスを下さいました。HAPD の開発では浜松ホトニクスの方の深澤宏仁さん、影山明広さんにお世話になりました。また、この研究では多くの共同実験者の方に助けていただきました。首都大学東京の角野秀一準教授、岩田修一さん、坂下嘉徳さん、吉田圭佑君、山見仁美さん、東京理科大学の樋口雅弘さん、ありがとうございました。角野準教授には照射試験のセッティングなどもしていただき、研究に関する細かいアドバイスもして下さいました。岩田さん、坂下さん、樋口さんには、測定方法やデータの扱い方を教えていただきました。特に岩田さんは発表資料なども細かくご指導して下さいました。また、先輩方から研究に対する姿勢も学びました。Belle II 実験グループに所属するにあたり、Belle II Japan Student のメンバーの皆にもお世話になりました。定期的に勉強会などで集まり、学生同士で議論をしたり発表したりしたことがとても良い刺激になりました。2年間、KEK で過ごす時間も多かったですが、皆さんと会うことでとても濃い時間を過ごすことができました。研究室でも多くの方に支えられてきましたが、特に鹿子畑千也子さん、安彦ちほさん、牧野隆起君、高田巧磨君、福永匠吾君には、4年生のときから同期と一緒に頑張ってきた仲として、とてもお世話になりました。辛い時も研究室で楽しく過ごせたのは皆さんのおかげです。本当にありがとうございます。最後に、大学院まで進学させてくれ、研究生活を支えてくれた家族に感謝したいと思います。ありがとうございました。

参考文献

- [1] HFAG(Heavy Flavor Averaging Group)homepage;<http://www.slac.stanford.edu/xorg/hfag>.
- [2] T.Abe et al."Belle2 Technical Design Report", arXiv:1011.0352v1physics.ins-det.
- [3] S.-K. Choi et al.(Belle Collaboration),Phys.Rev.Lett.91 262001(2003).
- [4] J.Charles et al.(CKMfitter Group), Eur.Phys.J.C,1(2005);Preliminary results as of winter 2012
- [5] K.Tamai et al.Belle Note1137
- [6] M.Friedle,presentation at 4th BelleII General Meeting
- [7] 樋口雅弘 東京理科大学大学院理工学研究科物理学専攻 修士論文 (2012)