卒業論文

PMT Gain 磁場依存性および Buking Coil の研究

東北大学理学部物理学科
千葉　惇

平成 21 年

目 次

第 1 章　序論 **3**
1.1　E05-115 実験 3
1.2　HKS 4
1.3　本稿の目的 6

第 2 章　バッキングコイル原理 **8**
2.1　PMT 原理 8
2.2　バッキングコイル原理 9

第 3 章　実験セットアップ **11**
3.1　PMT 11
3.2　磁場装置 12
3.3　光源 12
3.4　実験方法 13

第 4 章　実験結果及び考察 **15**
4.1　PMT 出力磁場依存性 15
4.1.1　H7195（2”管） 15
4.1.2　H6527（5”管） 18
4.1.3　磁場依存性まとめ 20
4.2　バッキングコイル 21
4.2.1　H7195（2”管） 21
4.2.2　H6527（5”管） 24
4.2.3　バッキングコイルまとめ 26

図 目 次

1.1 E05-115 実験セットアップ 4
1.2 HKS 側検出器群 5
1.3 E01-011 実験で AC5”管に巻かれたバッキングコイル 6
1.4 WC セットアップ 7

2.1 PMT 構造概念図 8
2.2 PMT シールドケース効果及び磁場角度依存性 9
2.3 実際に巻かれたバッキングコイル 10

3.1 テストした PMT の線図、回路図 11
3.2 LED の光入力による PMT の波形 13
3.3 実験セットアップ 13
3.4 φ 定義 14

4.1 ADC 分布変化 15
4.2 H7195 磁場依存性 16
4.3 磁場による OPE 変化 16
4.4 H7195ADC 分布中心値対 σ 17
4.5 HV を変えたときの磁気依存性変化 18
4.6 H6527 磁場依存性 18
4.7 H6527ADC 分布中心値対 σ 19
4.8 H6527 φ 依存性 20
4.9 バッキングコイルによるゲイン回復 21
4.10 バッキングコイルによる H7195 のゲイン回復 22
4.11 カソードから 4cm から巻いたときのバッキング効果 22
4.12 バッキングコイル効果の巻き位置依存性 23
4.13 バッキング効果の角度依存性 24
4.14 バッキング効果の HV 依存性 24
4.15 バッキングコイルによる H6527 のゲイン回復 25
4.16 バッキング効果の巻き領域依存性 26

第1章　序論

1.1　E05-115 実験

E05-115 実験とは、2009 年夏に米国ヴァージニア州のジェファーソン研究所 (以下 JLab) の HollC において行われる、(e,e'K^+) 反応を用いたハイパー核分光実験の第三世代実験である。

(e,e'K^+) 反応とは電子と陽子が電磁相互作用によってハイペロンと K 中間子を生成する、というハイパー核生成法である。われわれは、JLab に設置された CEBAF（連続電子線加速器）からの電子線をターゲットにぶつけ、(e,e'K^+) によって生成された K 中間子および散乱電子の運動量を２つの磁気スペクトロメータと検出器群を用いて測定し、Missing Mass を組むことで生成されたハイパー核の質量スペクトルを求める、という手法で過去二回に渡り実験を行ってきた。この実験方法の特色として以下の点が挙げられる。

- 一次ビームを用いる反応であることから、二次ビームを用いる手法のハイパー核生成実験よりも高いエネルギー分解能を実現できる。
- 運動量移行が大きい (∼400 MeV/c) ので深い束縛状態のハイパー核を生成することができる
- spin-filp、spin-non-flip のハイパー核の生成断面積が同程度であるため、スピンに依存したハイパー核構造をみることができる。
- 陽子をハイペロンに変換するので、(K^-,π^-)、(π^+,K^+) 反応によって得られてきたハイパー核の鏡像核を生成することができる。

この実験手法は CEBAF の兼ね備える高い強度、エミッタンス、duty factor の良質なビームにより実現可能になり、現在においてもこの加速器を用いてしか実験不可能である。われわれは (e,e'K^+) 反応を用いた世界初の実験である第一世代実験（E89-009、2000 年）、高分解 K 中間子スペクトロメータ HKS を新設し Tilt 法を採用した第二世代実験（E01-011、2005 年）において (e,e'K^+) 実験の有用性を示すとともに、測定装置群・実験法について改良を重ねてきた。[1]

そして第三世代実験 E05-115 においてはより広い質量数領域の標的において、高分解能・高統計のデータをとることを目指している。図 1.1 に E05-115 実験セットアップの概略図を示す。

ビームエネルギー	2.344[GeV]
仮想光子エネルギー	1.5[GeV]
散乱電子側中心運動量	0.967[GeV/c]
K^+ 中間子中心運動量	1.2[GeV/c]

表 1.1.1: E05-115 実験ステータス

図の下部から電子線がターゲットに入射し、発生した粒子は Splitter Magnet によって電荷の正負により軌道を分けられる。粒子はそれぞれ HES（高分解能散乱電子スペクトロメータ）及び

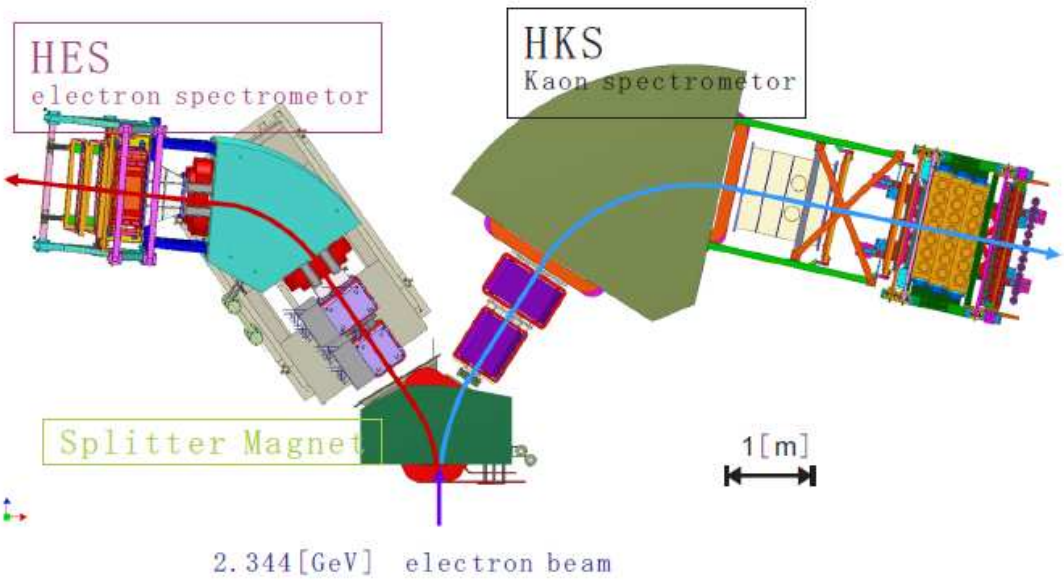


図 1.1: E05-115 実験セットアップ

HKS（高分解 K 中間子スペクトロメータ）に入射し、PID 及び運動量・TOF 測定がなされる。スペクトロメータの Magnet はともに常伝導磁石の Q-Q-D システムである。

K 中間子、散乱電子の位置・角度情報から、標的における運動量の大きさ・角度を導く。その際には、各磁石の光学的性質からそれらの物理量に変換する行列、輸送行列を用いる。求められた運動量ベクトル情報と入射電子運動量・エネルギーにより Missing Mass を以下の式により求め、生成されたハイパー核の質量スペクトルを求める。M_T はターゲット質量である。

$$M_{HY}^2 = (E_e + M_T - E_k - E_{e'})^2 - (\vec{p}_e - \vec{p}_k - \vec{p}_{e'})^2 \tag{1.1}$$

散乱電子側・K 中間子側ともにアクセプタンスの超前方でバックグラウンド粒子が大量に生じる。よって HES、HKS は超前方を避けた角度で配置され、かつ HES は鉛直方向にも全体を傾ける"Tilt 法"を採用してイベント数を減らしている。Tilt 角最適化については [2] に詳しい。この手法は第二世代実験によって用いられ、効果を発揮し、第一世代実験で実現されなかったより高いビーム強度での実験を可能にした。

1.2 HKS

HKS には中心運動量 1.2[GeV] の粒子が飛来する。主なバックグラウンドは e^+、π^+ 及び陽子である。このうち e^+ は特に重い核を標的にした場合超前方に非常に大量に放出されるものの、上記の Tilt 法によりある程度 reject できる。よって K 中間子と π^+・陽子との識別が重要となる。

図 1.2 に HKS 側のセットアップを示す。 ビーム上流（左側）から HDC 1 , 2 、HTOF1 、AC 1 , 2 , 3 、HTOF 2 、WC 1 , 2 、LC を置く。

位置検出器として HDC(HKS Drift Chember)、後段に PID の目的で AC(Aerogel Cherencov)、WC(Water Cherencov)、LC(Lucite Cherenkov)、HTOF(HKS Time of Flight) が置かれる。AC

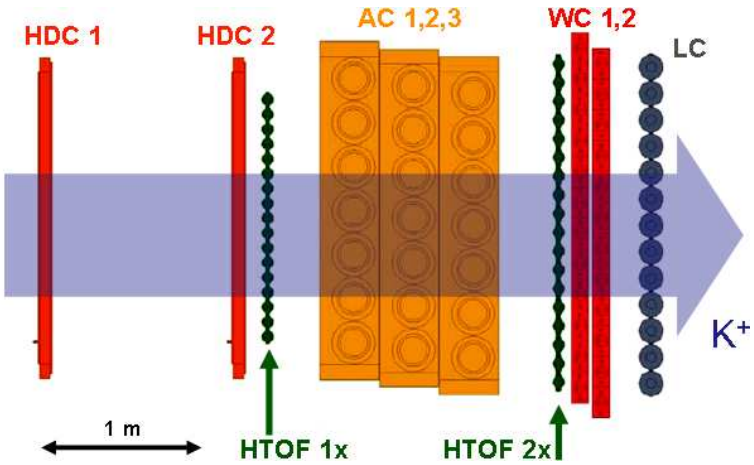


図 1.2: HKS 側検出器群

	sensitive volume[cm^3]	construction
Drift Chamber		
HDC1	120 × 30 × 14	xx',uu'(30[deg]),xx',vv'(-30[deg]),xx'
HDC2	120 × 30 × 14	xx',uu'(30[deg]),xx',vv'(-30[deg]),xx'
TOF counter		PMT Hamamatsu H1949 (2")
HTOF1Y	120 × 30 × 2	3.5^W × 9 segments
HTOF1X	120 × 30 × 2	7.5^W × 17 segments
HTOF2X	170 × 35 × 2	9.5^W × 18 segments
Aerogel Cherenkov counter		Silica Aerogel ,PMT:photonis (5")
AC1	169 × 46 × 31	20^W × 7 segments
AC2	169 × 46 × 31	20^W × 7 segments
AC3	169 × 46 × 31	20^W × 7 segments
Water Cherenkov counter		Water,PMT:Hamamatsu H7195 or H7195-UV (2")
WC1	187.5 × 35 × 8	15.6^W × 12 segments
WC1	187.5 × 35 × 8	15.6^W × 12 segments
Lucite Cherenkov counter		Lucite,PMT:photonics (3")
LC	189 × 35 × 8	13.5^W × 13 segments

表 1.2.2: HKS 側検出器の主な仕様

は (π^+,K^+) 識別、WC・LC は (K^+,p) 識別の目的で置かれている。トリガー段階では AC・WC・LC により kaon 以外のバックグラウンドを抑制し、off line ではこれらの光量情報と TOF による飛行時間情報、HDC による運動量情報を組み合わせることでより厳しく kaon を選び出す。

1.3 本稿の目的

2005 年に行われた第二世代実験 E01-011 当時、HKS 側 Detector 群の付近で PMT 巻軸方向に 5[G] 程度の漏れ磁場が発生し、PMT のシグナルが著しく減少する、という事態が起こった。対策として PID Detector 群を包むように鉄の覆いをつくり 2〜3[G] まで外磁場を減らしたものの、AC 用 PMT として用いられていた 5”管は依然影響が深刻であったため、我々はバッキングコイルを使用した。その効果によって 5”管のゲインを回復させ、AC の efficiency を復活させることに成功し、実験を行うことができた。

図 1.3: E01-011 実験で AC5”管に巻かれたバッキングコイル

第三世代実験 E05-115 での HKS 側の変更点は最下流に Lucite Cherencov カウンターを新設した点のみであるので、前回実験同様の漏れ磁場が発生することが予想される。また、ビームによる放射化が激しかったために鉄の磁気シールドは施さないことが決定している。よって前回深刻な問題とならなかった WC 用 PMT(2”管) の性能悪化も無視できなくなると予想され、今回新たに WC についてもバッキングコイルを施すこととなった。磁場対策をしない場合、具体的には WC の NPE 数の減少、すなわち (K^+,p) 弁別能力の深刻な減少が予想される。

本研究のテーマは上記のように重要な装置であるバッキングコイルであり、WC 用 PMT についてバッキングコイルが機能するか、またバッキングコイルそれ自体がどのような性質を持つかを研究し、E05-115 実験における使用に役立てることを目指して行った。

また、E01-011 実験のように「磁場の PMT に与える影響」は実験の妨げになることの多いテーマであるので、磁場と PMT に関する基礎データをとることも目的として行われた。

図 1.4: 仮組み立ての段階での WC 群のセットアップ。12 セグメント、２層からなる。実験時にはこの前後に AC と LC が置かれる。

第2章　バッキングコイル原理

2.1　PMT 原理

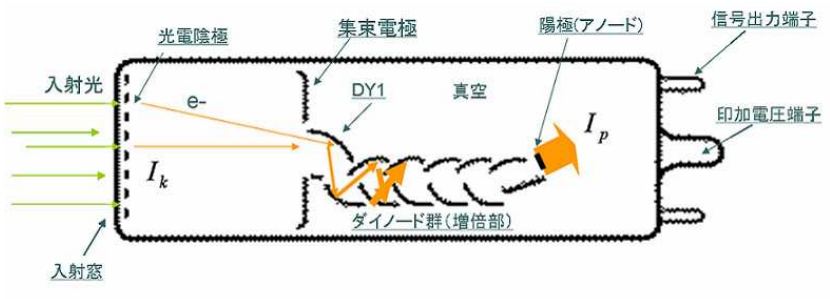


図 2.1: PMT 構造概念図

PhotoMultiplier(以下 PMT) とは、以下の段階を経て微弱な入射光を増倍された電流として出力する装置である。

1. 光電面に光が入射し、外部光電効果によって光電子が放出される
2. 光電子は集束電極によって誘導されるとともに電位差で加速されて、増倍部 (第一ダイノード) にぶつかり二次電子を放出する
3. 二次電子はまた次のダイノードにぶつかり、各ダイノード間で電子数が増倍していく

最終的に陽極から電流を取り出すことにより、PMT に入射してきた光を電流として検出することができる。

出力電流 I_p と光電面からの入力光電子流 I_k の比として定義されるゲイン (電流増倍率)μ の値は、光電子が第一ダイノードの増倍有効部分に入射する確率（収集効率 α）と第 n ダイノードの二次電子放出比 δ_n で決まる。

$$\mu = \frac{I_p}{I_k} \tag{2.1}$$

$$= \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdots \delta_n \tag{2.2}$$

$$= \alpha \cdot G \tag{2.3}$$

第三行でダイノード間での増倍率をまとめて G と置いた。収集効率は通常 60〜90 %であり、ダイノード間増倍率 G は印加電圧により変化する。

光電子、二次電子をダイノードにより効率よく集めるため、内部電極は電子軌道解析法により最適な位置と配置に設計されている。しかし磁場かかった場合運動電子はローレンツ力を受け、想

定された軌道から外れてしまう。ゆえに PMT は磁場に極めて敏感である。

浜松フォトニクス社の資料 [3] より、1”光電子増倍管の磁場依存性及びシールドケース効果のデータを載せる。比較的管径の小さな 1”PMT においても、磁気シールドを巻いた上で数ガウス程度のオーダーで磁場影響が現れることが分かる。

アッセンブリ型の PMT には磁気遮蔽のために高透磁率材料 μ メタルで作られた磁気シールドケースが付属しており、地磁気レベルでの遮蔽効果は大きい。しかしながらグラフに表れているように外部磁場が管軸方向の場合シールドが磁気を吸えないために遮蔽効果が低くくなる、という欠点がある。また、内部構造の回転非対称性から、管軸回転角度についての依存性が存在している。

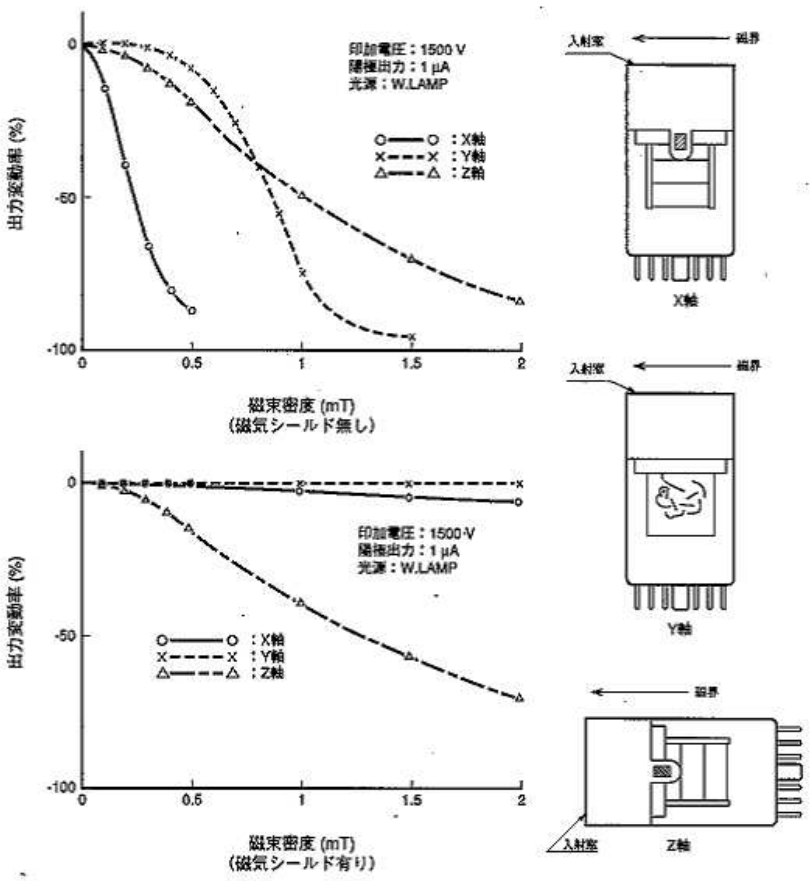


図 2.2: [3] より、PMT シールドケース効果及び磁場角度依存性のデータ。シールドケースの効果とゲインの磁場角度依存性。

2.2 バッキングコイル原理

バッキングコイルとは、PMT のケースまわりに導線を巻いて電流を流すことで局所磁場を作り、外部磁場をキャンセルするという磁気影響軽減方法である。磁場の効果が減るので、電子はもと

どおり想定された軌道を描き増倍され、ゲインが回復する。発生する磁場は管軸方向でありその方向の磁場に対しキャンセル効果が高いので、磁気シールドケースの欠点、感じくのを補える。

E05-115 実験の場合 PMT 管軸方向の磁場であることと各 PMT の周囲にさらなる磁気シールドを施すのがジグの設計上不可能であることから、磁場対策としてバッキングコイルが検討された。

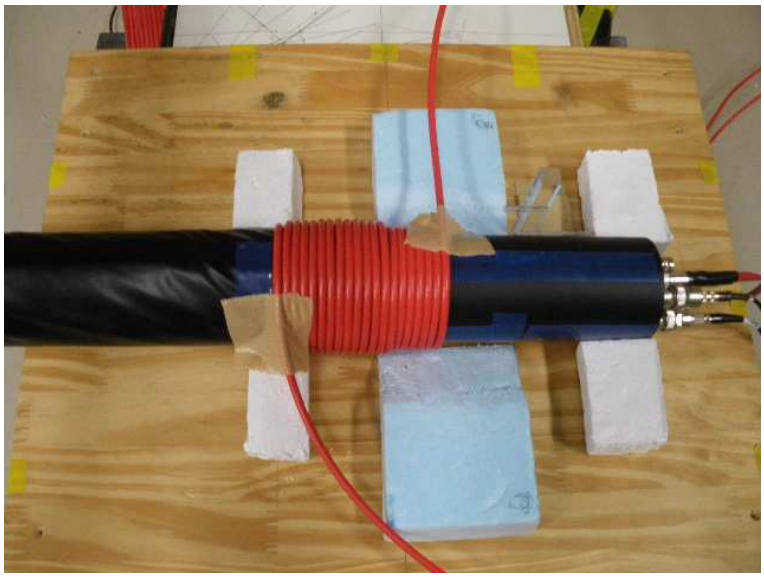


図 2.3: 実際に巻かれたバッキングコイル

この手法は広く知られているものの、詳しく研究されたことはなかった。PMT の内部構造の複雑さやバッキングコイル磁場の PMT に対する不均一さを考えた場合有効であることは自明ではなく、効果は使用する PMT や巻き方（巻く場所・巻き数等)、さらにはバッキングコイル磁場が外磁場となす角度について依存することは明らかである。

第3章　実験セットアップ

3.1　PMT

テストする PMT は、浜松フォトニクス社製ラインフォーカス型アッセンブリタイプの PMT、Hamamatsu7195(φ =2”、以下 H7195) と Hamamatsu6527(φ =5”、以下 H6527) の２種類である。

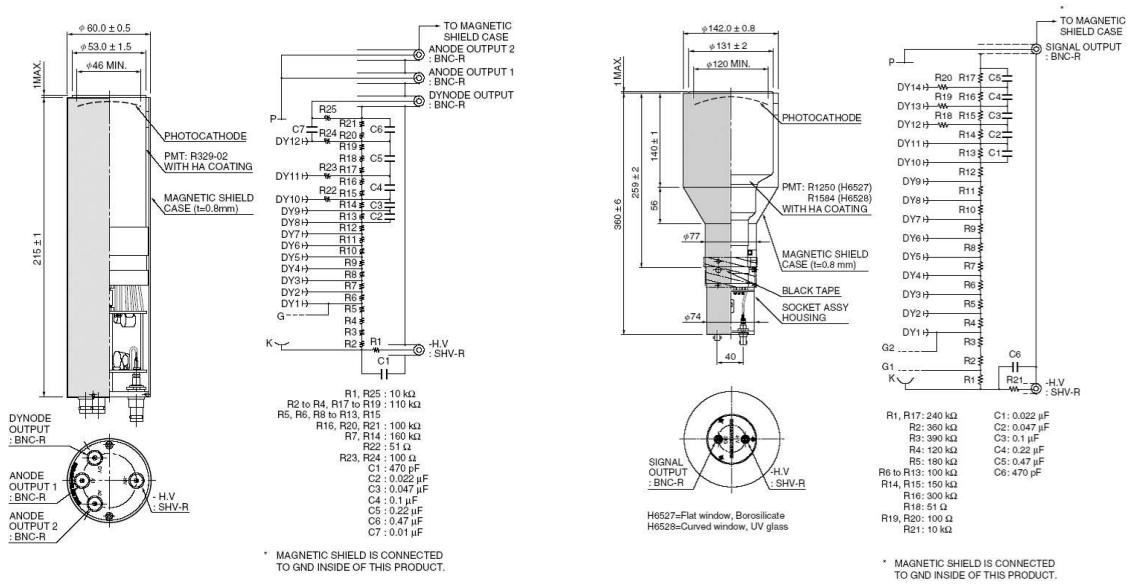


図 3.1: テストした PMT の線図、回路図。左が H7195、右が H6527。

	H7195	H6527
本体	R329-02	R1250
磁気シールド	E989-62	E989-29
管径 [mm]	60.0	142.0
全長 [mm]	215	360
ダイノード段数	12	14
ゲイン Typ.	3.0E+6	1.4E+7
標準印加電圧 [V]	2000	2000
最大印加電圧 [V]	2700	3000

表 3.1.1: PMT ステータス

H7195 は今実験において WC Low Momentum 側で使用される PMT である。High Momentum 側の WC に使用される H7195-UV は光電面の窓が UV ガラス（感度波長＞185[nm]）であり、H7195 の窓材硼硅酸ガラス（感度波長＞300[nm]）と比較して短波長領域に感度が高い点のみ違いがあるが内部構造は同じであるので、H7195 と同じ磁場依存性を示すと予想される。よって本実験の結果は全ての WC 用 PMT について適用できると考えられる。

H6527 は E01-011 実験の当初 AC に使用が予定されていた PMT である。バッキングコイルによるゲイン回復率が芳しくないと判断されて使用を控えられ、実験途中で photonis 社製の XP-4572 に代えられた。
本稿ではサイズによる磁場及びバッキングコイルの効果の違いを確かめる目的で、この PMT についても磁場依存性とバッキングコイルのデータをとった。

3.2 磁場装置

表 3.2.2 にシュミレート磁場として製作したヘルムホルツコイルのステータスを載せる。詳しくは Appindex にまとめた。

直径	81[cm]
コイル間距離	41[cm]
コイル中心高さ	46[cm]
コイル巻数	各々114 巻
抵抗	2.5[Ω]
導体断面積	4.0[mm^2]

表 3.2.2: ヘルムホルツコイルステータス

コイル間に、コイル中心の高さに合う PMT を置く台を用意し、NMR プローブを用いて磁場測定を行い、内部磁場のコイル電流値との線形性、および内部磁場の均一さを確認し、コイル電流対発生磁場の校正式を求めた。電流源としては KIKUSUI 社製直流安定化電源 16-30A を用いた。校正式を用いてコイルに流れる電流値から発生磁場を換算した。

3.3 光源

一定な入力光電子流を得るために LED を利用した。LED を底の中心に接着した厚紙の円筒を PMT に被せ、LED に Clock Generator からの TTL 信号を入力した。光電面に対し均一な光を得るために、LED の頭には光拡散キャップをつけ、円筒内側には反射材としてシールテープを貼った。また、円筒周りには遮光シートを二重に巻いた。

LED は STANLEY 3889S Yellow（波長 690[nm]、標準仕様 4[mCd]）を用いた。

図 3.2 のような出力波形で実験を行った。用いた測定系では光る時間 (TTL の width) と LED にかかる電圧の変化により光量調節が可能であったが、LED が Threshold を超えやすいようなるだけ高電圧、短 width(25〜30[ns]) とした。実験時にはクレート電圧等の揺らぎにより多少パルスの出力が変動したが、全ての測定で〜220 の光量となるよう width を微調節した。

図 3.2: LED の光入力による PMT の出力波形。青が入力パルス、黄色が PMT からの出力であり、〜220NPE 程度光っている。

3.4 実験方法

図 3.3 に実験全体のセットアップを示す。コイルの間に置いた木の台の上にさらに薄い板を置き、LED 円筒キャップを被せた PMT を固定した。PMT を乗せた台と板の角度を変えることで、磁場と PMT 管との角度 θ を変えることができる。

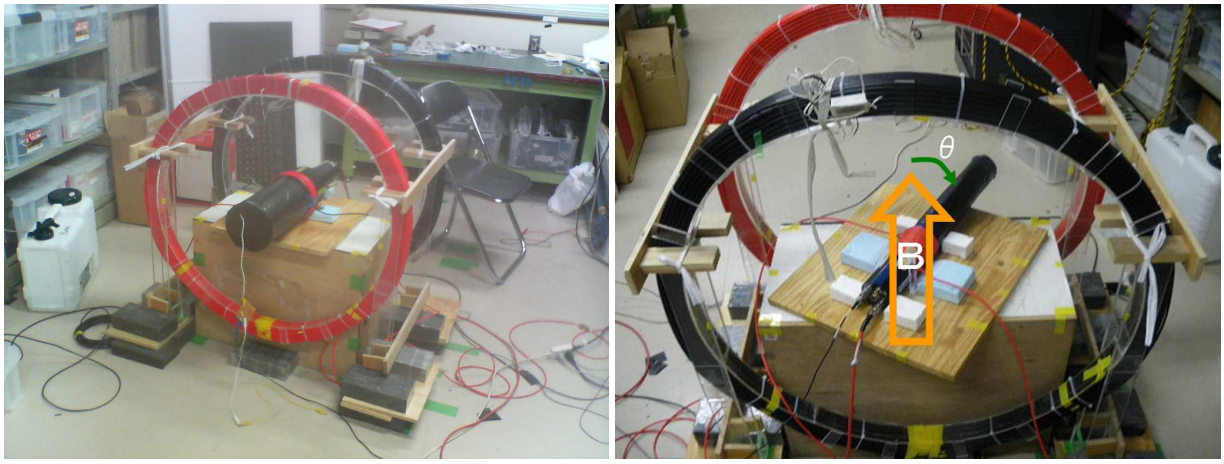


図 3.3: 実験のセットアップと発生磁場

実験室環境では〜0.3[G] のバックグラウンド磁場が床方向（PMT 管軸垂直）に台上どの位置においても存在した。また、鉄筋の床や他の磁化物など周囲のものの磁化はコイル磁場測定時にヒステリシスが存在しなかったことにより十分無視できると考えられる。

また、図 3.4 が φ 方向の定義である。PMT 光電面を覗きながら第一ダイノードに垂直または平行になるよう管軸の周りに 90° ごとに線を引き、LED 円筒キャップを被せた状態でその線とアクリルで製作した支持具を合わせることにより φ を合わせた。光電面の角度は PMT 磁気シールドをつけた状態では正確に分からないため、絶対値の信頼度は低い。あくまで φ 変化の効果を大まかに見積もることを目的とした。

出力変化の測定には LeCroy 12Channel ADC を用い、LED への TTL 出力に同期した Clock

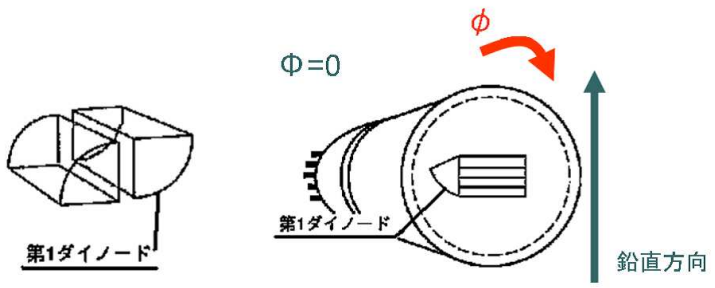


図 3.4: φ 定義

Generator の NIM 出力からゲートを作り、トリガーとした。シグナルが全てゲートにいれるよう、ADC のゲートは十分広く（〜500[ns]）とった。

実験時は TTL 周波数は 1[kHz]、DAQ のカウント数は pedestal run を含め常に 40000 カウントとした。

第4章　実験結果及び考察

4.1　PMT 出力磁場依存性

4.1.1　H7195（2”管）

図 4.1 は H7195 について管軸方向の磁場を増加させていったときの ADC 分布変化である。

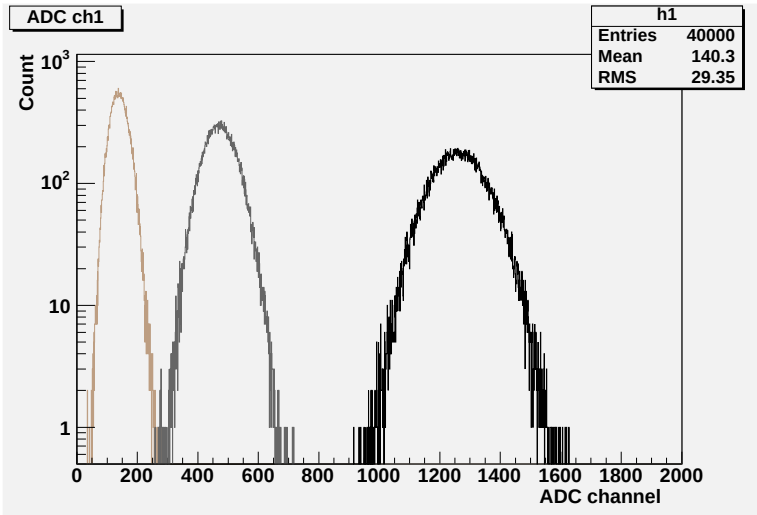


図 4.1: 管軸方向の磁場による ADC 分布変化。外磁場の大きさは右から順に 0,5,10[G] である。

～220NPE 程度を入力しているのでチャンネルはガウス分布となり、磁場の増加に伴い中心値と幅が変わっていくのが分かる。

入力光電子流 I_k が一定である場合、式 (2.1)～(2.3) より磁場のある場合とない場合のゲイン比、相対ゲインは

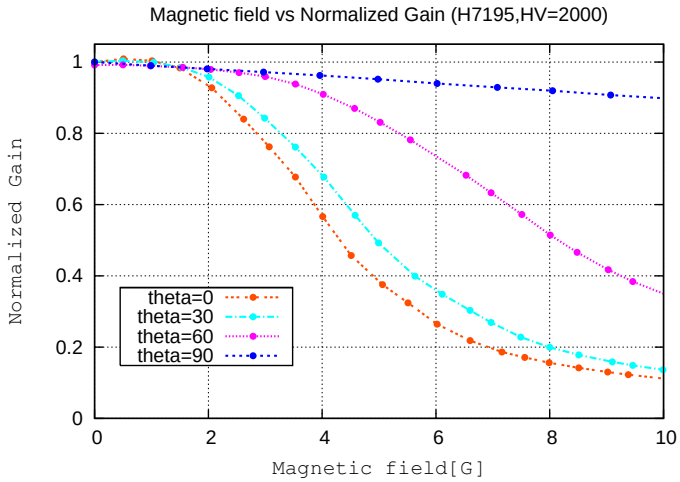
$$\frac{\mu(B)}{\mu(B=0)} = \frac{\alpha(B)\cdot G(B)}{\alpha(B=0)\cdot G(B=0)} \tag{4.1}$$

$$= \frac{I_p(B)}{I_p(B=0)} \tag{4.2}$$

で与えられる。

ADC のデータ分布中心点は入力電流平均値をあらわすので、磁場 0 のときの ADC 中心値と外磁場 B のときの ADC 中心値との比により相対ゲインを計算できる。中心値を求める際は、ガウス関数をフィットした。H6527 の場合はゲインの小さいところではポアソンフィットも使った（4.1.2）。

H7195 について、θ =0,30,60,90° における磁場強度対相対ゲインのグラフは図 4.2 のようになった。HV 値は 2000[V]、φ =0 である。

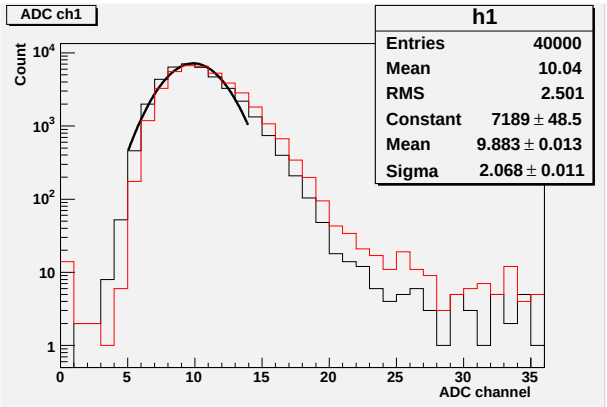


θ [°]	1.0[G]	3.0[G]	5.0[G]	10.0[G]
0	0.99	0.76	0.38	0.11
30	0.99	0.84	0.49	0.14
60	0.98	0.96	0.83	0.35
90	0.98	0.97	0.95	0.90

図 4.2: H7195 磁場依存性。 θ =0,30,60,90 ° それぞれの場合についての磁場強度対相対ゲイン値。

地磁気レベル（＜1 [G]）ではどの角度でも影響はないものの、E05-115 実験で想定される 5[G] 程度になると管軸方向の磁場に対し 4 ～ 5 割程度までゲインが落ち込むことが分かった。一方、管軸に垂直な場合は磁気シールドが大きく効果を発揮し、端末効果があるものの 10[G] で 1 割の減少ですむ。すなわち、PMT に加わる磁場のうち管軸平行方向の成分が磁気シールド内に入り、ゲインに対し影響している。

次に、ゲイン減少の原因について調べた。ゲイン減少の原因は式 4.1 より収集効率 α またはダイノード間ゲイン G の変化である。一光電子がダイノード間で増倍された結果生ずる電荷値 =OnePhotonElectron（以下 OPE）の値は、セルフトリガーで OPE の発生電流の ADC 分布をみることで求めることができるので、G 変化を見るために磁場を変化させつつ OPE の値の変化を調べた。図 4.3 に磁場をかけたときの OPEADC 分布と中心値変化のグラフをのせる。HV は 2300[V] であり、管軸方向に磁場を加えていった。



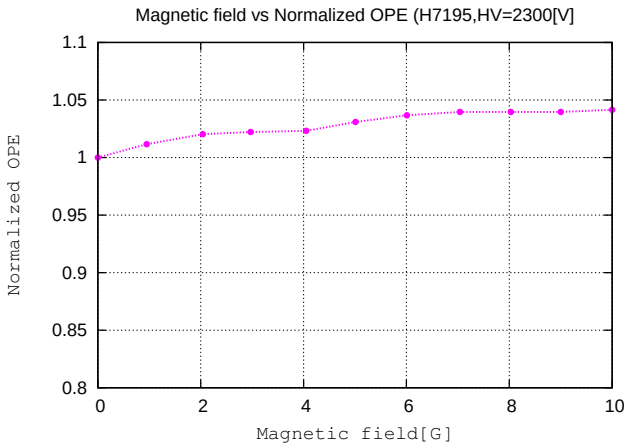


図 4.3: 磁場による OPE 変化。左は実際の分布 (黒 0[G], 赤 10[G])、右は磁場対 0 磁場のときの値で規格化した相対 OPE 値。

図 4.3 中、OPE は同じ範囲でガウスフィット（図では黒=0[G] にフィット）し、その中心値で定

義した。OPE は 5[G] で 2 %、10[G] で 4 %の増加が見られた。この微増はローレンツ力によりダイノードにぶつかる際の運動エネルギーの変化かと推測される。とはいえ、相対ゲインの変化量に比べれば微小な変化であり、磁場に対してダイノード間の増倍率はほぼ変わらず、ゲイン減少の主役は収集効率の低下と結論できる。

この収集効率のみ減少するという考察は、図 4.1 に現れるような ADC 中心値と分布幅との関係からも読み取れる。第一ダイノードに当たった電子個数 m の G 倍によって出力電荷 x[C] が決まるとし G が変化しないとすれば、x[C] の分布は m の分布のみに依存し、x の平均値 $\bar{x}$ と標準偏差 σ_x は m の平均値 $\bar{m}$ を用いて

$$\bar{x} = e \cdot G \cdot m = OPE \cdot m (OPE \equiv e \cdot G) \tag{4.3}$$

$$\sigma_x = OPE \cdot \sigma_m = \sqrt{OPE} \cdot \sqrt{\bar{x}} \tag{4.4}$$

とかける。すなわち標準偏差は分布中心値の平方根に比例する。

HV2300、管軸方向に磁場をかけていったときの中心値と幅変化を中心値対幅でプロットし $f(x) = a\sqrt{x}$ でフィットしたのが図 4.4 であり、G 一定の仮定が正しいことが分かる。

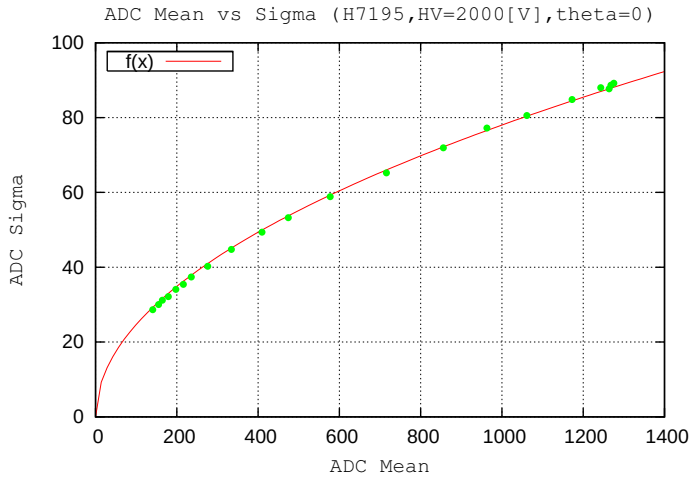


図 4.4: H7195ADC 分布中心値対 σ 及び f(x)=a$\sqrt{x}$ のフィッティング結果。磁場 0 の点 (右上) から 10[G] の点 (左下) まで。する。

E05-115 実験においては与えられた電荷値を OPE の値で割ってそのときの光量 NPE を定義するので、OPE が一定で電荷値のみ減る場合本来よりも小さい NPE 値を得る。すなわち、磁場の下では結果として NPE が減少してしまう。

また、図 4.5 は異なる HV でゲイン減少をみたものである。磁場の向きは管軸方向である。

グラフの形状は同型となるものの、HV 値が高いほどゲイン減少率は常に小さいという結果が出た。例であるが 5[G] では 1700[V] と 2300[V] で 11 %と大きな差が生じた。これは次のように考えられる。HV の電圧が分圧されて各ダイノードにかかっているので、HV を上げれば各電子の受けるクーロン力は大きくなる。光電陰極を飛び出してから第一ダイノードに届くまで、電子には磁場によるローレンツ力とダイノード間の電位差起因のクーロン力が競合するので、クーロン力が

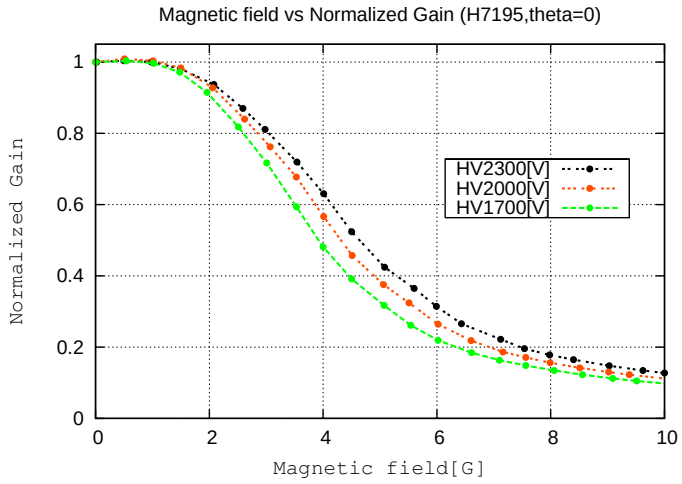
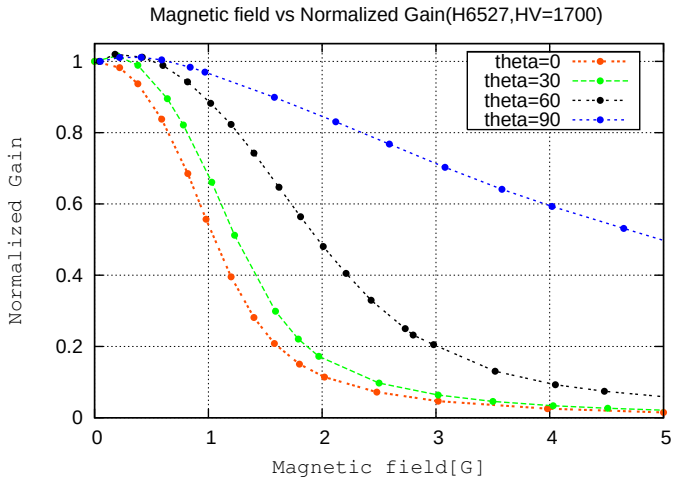


図 4.5: HV を変えたときの磁気依存性変化。磁場強度対相対ゲイン。HV が高いほど同磁場強度でのゲイン減少率が小さくなっている

大きくなればそれだけ軌道へのローレンツ力の影響が小さくなり、従って HV を上げるほど収集効率の低下が抑えることができた。

4.1.2 H6527（5”管）

H6527 についても H7195 同様に磁場と角度を変化させてゲイン変化を見た。HV 値は 1700[V]、φ =0 である。



θ [°]	1.0[G]	2.0[G]	3.0[G]	5.0[G]
0	0.56	0.11	0.05	0.02
30	0.66	0.17	0.06	0.02
60	0.88	0.48	0.20	0.06
90	0.97	0.83	0.70	0.48

図 4.6: H6527 磁場依存性。θ =0,30,60,90 ° それぞれの場合についての磁場強度対相対ゲイン値。

図 4.2 と比較することにより、H6527 が非常に磁場に対し敏感であることが分かる。～1 [G] で 90 ° においても磁場影響が顕著であり、管軸方向 5[G] の磁場が印加された際の出力は 2 %程度となった。

H7195 と同様に収集効率の減少が起こっており、特に H7195 に比べ管口サイズ・光電面-ダイノード間の距離が大きいので、飛び出した光電子がローレンツ力で軌道がずれやすいために磁場

に対しより脆弱である、と考えられる。θ=90°での変化を比較すると、管径が大きいことにより H6527 の方が端末効果の影響も大きいことが分かる。

なお、出力が 10 %を切る磁場ではダイノードにぶつかる平均電子数が小さい (220 × 0.1〜20 個) を切っていると考えられたので、ADC 分布に対してガウス分布ではなくポアソン分布をフィットして中心値を求めた。

H6527 についても、分布の中心値と幅の関係をみてみた。図 4.7 が管軸方向に磁場をかけていったときの中心値対幅の変化であり、H6527 の場合も f(x)=a$\sqrt{x}$ によくフィットする。すなわち h7195 同様収集効率の低下のみ起こっていて、ダイノード間増倍率は一定である。

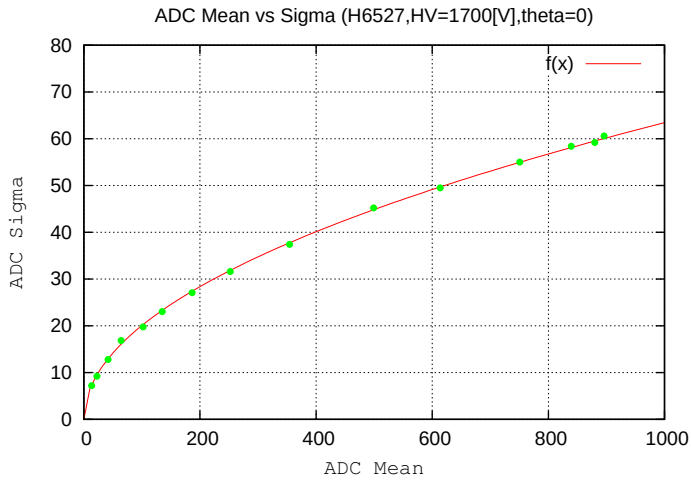


図 4.7: H6527ADC 分布中心値対 σ 及び f(x)=a$\sqrt{x}$ のフィッティング結果。磁場 0 の点 (右上) から 5[G] の点 (左下) まで。左下の 4 点はポアソンフィットで中心値と σ を求めた。

H6527 については φ 回転の効果が顕著だったためにこの効果についても調べた。磁場に対するローレンツ力の向きを考えると、θ が小さいほど φ による違いは小さいと考えられるので、磁場の方向を θ =90 として各 φ で磁場をかけた。図 4.8 に最も違いがあった φ =0 と φ =90 のデータをのせる。

最大限両者の差が見られたのは 5[G] の点であり、8 %程度の違いがみられた。総じて φ =0（第一ダイノードが鉛直上向き）の場合の方が同磁場強度でゲインが低い。これは、模式的ではあるものの図中に表した管軸方向に進む電子 (向き β) の受けるローレンツ力 F の向きにより説明できる。すなわち、F で軌道が逸れても φ =90 のほうが第一ダイノードが受け止めやすいので、有効部位にあたる確率を高く保てた、と考えられる。

また、φ によりゲイン減少のグラフの形状も変化することが分かる。図 4.6 にも現れているように H6527 は φ =0 で＜ 1[G] のとき磁場をかけるとともにゲインが上昇し 0 磁場時のゲインを越えた。バックグラウンドとして発生していた床向き〜0.3[G] の外磁場の影響も考えられるが、φ 依存性のグラフより、内部構造が関係していると思われる。

なお、φ 効果は H7195 については電気的揺らぎに隠れる程度の差しか見られず、無視できると考えられたので割愛する。

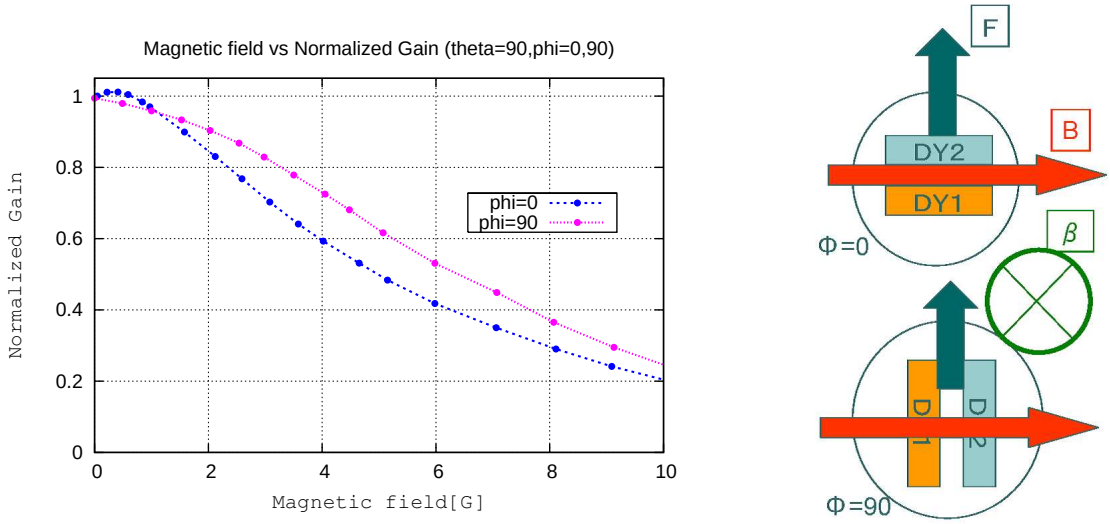


図 4.8: H6527 φ 依存性。 θ =90 ° における φ =0,90 それぞれの場合での磁場によるゲイン変化。

4.1.3 磁場依存性まとめ

磁場依存性についての結果をまとめる。

1. ゲイン減少の原因。ゲイン減少の主な原因は収集効率の低下であり、磁場のもとでは NPE の減少が起こる。

2. 磁場影響の大きさ。5[G] がクリティカルな向き (管軸方向) に働いた場合 H7195 は 40 %、H6527 は 2 %程度の出力となりえる。

3. θ 、 φ 、HV 依存性。 θ 、HV が小さいほど磁場影響は大きくなる。 φ 効果は 5”管ではっきり現れる。

4. PMT サイズ依存性。5”管は 2”管と比較して磁場に敏感である。

実験結果 1,2 から E05-115 実験で想定される 5[G] 程度の磁場下においては WC 光量の低下は免れないことが分かった。

4.2　バッキングコイル

次に、本研究のメインテーマであるバッキングコイルについての研究結果を述べる。

バッキングコイルは導体断面積 4[mm^2] φ 4.4[mm] の導線、電流源としてスイッチング式直流安定化電源を用いた。コイルの抵抗値は 0.2[Ω] であった。図 2.3 のように隙間なく巻き、巻いた端はテープで止めた。また、巻き数は常に 20 とした。遮光用の紙円筒の上から巻いた。

4.2.1　H7195（2”管）

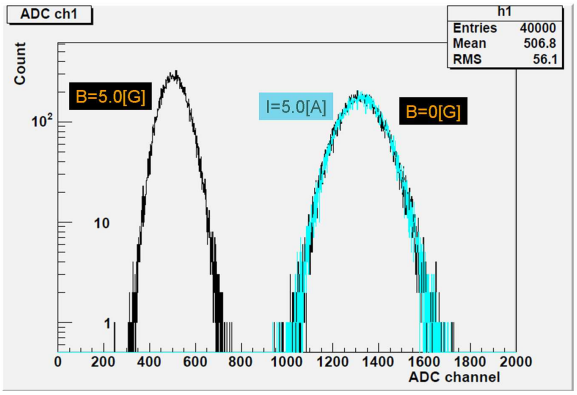


図 4.9: バッキングコイルによるゲイン回復。管軸 5G の磁場のバッキングコイル電流 5[A] でのキャンセル。

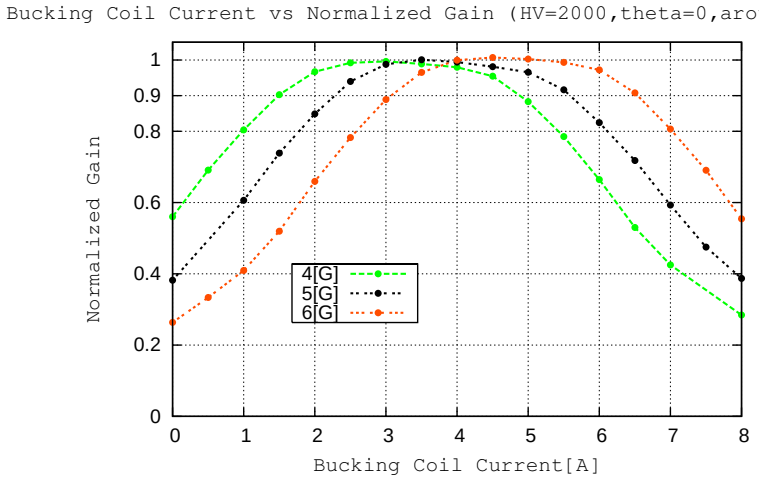
図 4.9 にバッキングコイルによって回復した ADC の分布を示す。分布がほぼ重なっていることから分かるように、バッキングコイル使用により出力を完全に回復することができた。4.1 で議論したようにダイノード間ゲインは変化しないので、当然分布の幅も元に戻る。

バッキングコイル電流値対相対ゲインのグラフを図 4.10 に示す。想定される磁場の大きさである 5[G] 付近の磁場を管軸方向に加えており、バッキングコイルはカソード上から巻き始め、その発生磁場が外磁場に対して反平行になる向きに 0.5[A] 刻みで電流を流した。PMT の HV は 2000[V]、φ =0 とした。

どの外磁場強度でも 100 %の回復が可能であった。グラフの曲線は大まかに等間隔であり、最大に回復する電流値と印加磁場との間に線形性があることが分かる。バッキングコイル電流値と発生させる磁場との間にはアンペールの法則より比例関係があるので、外磁場が大きいほどキャンセルにはより大きな磁場=電流がいるというのは当然の帰結である。また、100 %回復した後も電流値を上げていけばバッキングコイルの磁場によってゲインが下がっていくことが分かる。

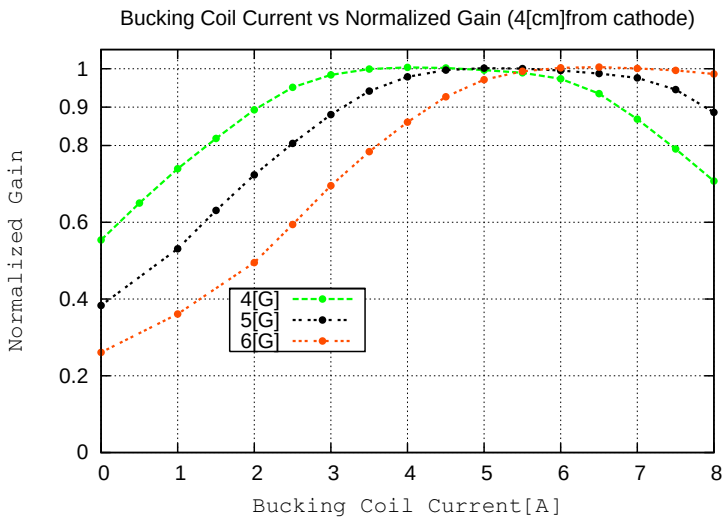
各線の横の間隔は 1[G] の差で〜0.8[A] 程度であった。すなわち、この巻き方ではバッキングコイルが 1[A] で発生させる磁場が磁場に弱い部分について管軸方向 1.3[G] の磁場に相当し、両者がキャンセルすることによりゲインが回復した、と考えられる。

一方、カソードから 4[cm] 離した位置から巻き始めたときの結果が図 4.11 である。WC のジグの構造により下側の PMT については光電面から 4[cm] の位置からしか巻けないため、その場合を想定して行った。図 4.10 と同様にグラフの曲線は大まかに等間隔であるが、比較すると回復に必要な電流値は大きく、そのかわり回復できる電流値の「幅」は広い。曲線間隔より、この巻き方で



磁場 [G]	I_{max}[A]
4.0	3
5.0	3.5
6.0	4.5

図 4.10: バッキングコイルによる H7195 のゲイン回復。バッキングコイル電流値対相対ゲインのグラフを外磁場 4,5,6[G] のそれぞれの場合で描いた。



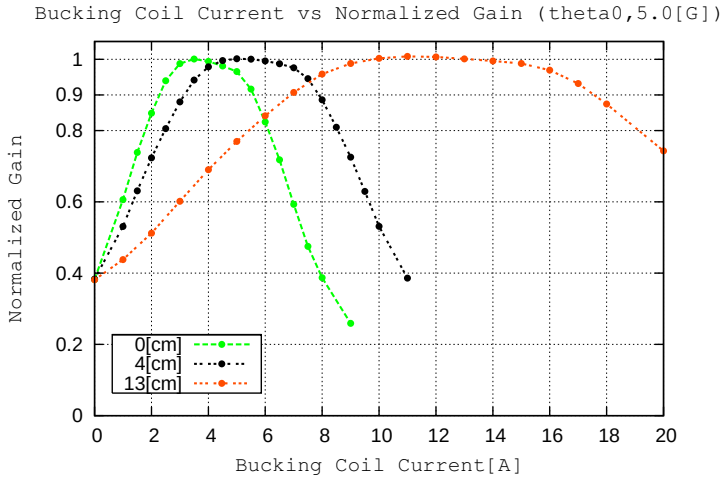
磁場 [G]	I_{max}[A]
4.0	4
5.0	5
6.0	6.5

図 4.11: カソードから [4cm] から巻いたときのバッキング効果。外磁場強度 4,5,6[G] それぞれの場合。

は 1[G] は 1.1[A] 相当、すなわち 1[A] で 0.9[G] と概算できる。

図 4.10 と図 4.11 を見比べれば、電流値の「幅」が広い分、カソードから遠いほうが外磁場の大きさが多少変わっても同電流での回復率が高いことが分かる。

よりわかりやすく巻く位置の影響を見るため、カソードの逆側から巻いた場合についてもデータをとった。（巻き始めのカソードからの距離 x[cm]=13。）上記した x=0,4 それぞれの管軸方向 5[G] の磁場をキャンセルしたときのグラフと重ねて、図 4.12 に示す。グラフから、たとえカソードの反対側から巻いたとしても、クリティカルな部分に発生している磁場さえ打ち消せれば電流値は必要となるものの回復は可能であることが分かる。



x[cm]	I_{max}[A]
0	3.5
4	4
13	12

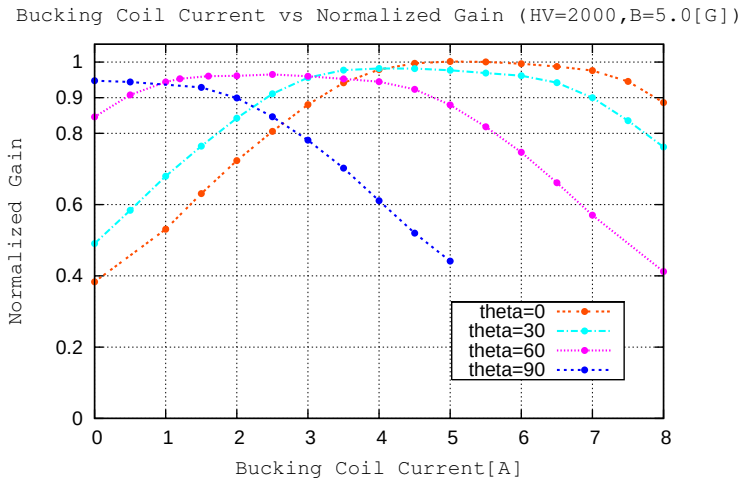
図 4.12: バッキングコイル効果の巻き位置依存性。管軸方向 5[G] の磁場をカソードからの巻き始め位置（x[cm]）を変えてバッキングした。

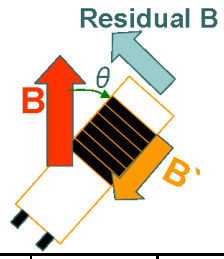
光電面付近に近い側に巻いたほうが同電流での回復効果が高く、少ない電流値で回復でき、電流値の「幅」は狭くなった。こうなる理由は、ゲインに関係するのは磁場に弱い部分に発生する磁場であるのでそこに発生させれる磁場が大きいほど低電流で外磁場をキャンセルできる一方、電流値変化に対してはゲイン変化が敏感となってしまうため、と考えられる。

また、ゲイン回復の角度依存性についても調べた。図 4.13 が、5[G] 磁場に対し角度 θ を変えていったときののバッキングコイルによるゲイン回復曲線である。巻き始めの位置はカソードから 4[cm] である。

θ =90 の場合キャンセルする磁場成分がないため当然電流を流すほどバッキングコイル磁場によってゲインは減少するものの、適切な電流値を用いればどんな角度でも元の 95 %以上のゲインを得ることができることが分かった。また、電流値の「幅」の効果により、θ が異なっても同電流である程度回復できる。この巻き方では I=3.5[A],0 ＜ θ ＜ 60 ° で 96 %のゲインを得ることができることがグラフから分かる。また、θ が小さいほど同電流で大きな回復率を得られる。

最大回復に必要な電流値が 5.5cos θ に近い数値で 95〜100 %に回復することは、この巻き方ではバッキングコイル電流 1.1[A] で発生する磁場と管軸方向外磁場 1[G] が等価であるという先ほどの推論と、図 4.2 で示した管軸方向の磁場がゲインに関係する、ということと合わせて考えることで説明できる。すなわち、角度 θ において管軸方向の磁場 5cos θ につりあう磁場を発生させ





θ [°]	I_{max}[A]	回復率 [%]
0	5	100
30	4.5	98
60	2.5	97
90	0	95

図 4.13: バッキング効果の角度依存性。

る電流値は 5.5cos θ であり、その電流値で最大限回復し、管軸垂直方向の磁場が残るために 100 %回復することができなかった、と考えられる。この考えの下 θ =30,60 で最大回復時に PMT にかかっていると考えられるのは管軸垂直方向 2.5[G],4.3[G] であり、図 4.2 で用いた θ =90 のデータでほぼその条件程度のゲイン 99 %,97 %となっていることが分かる。

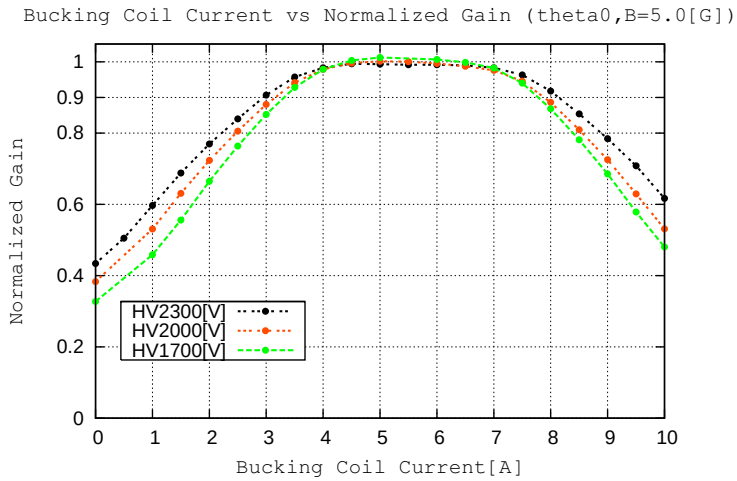


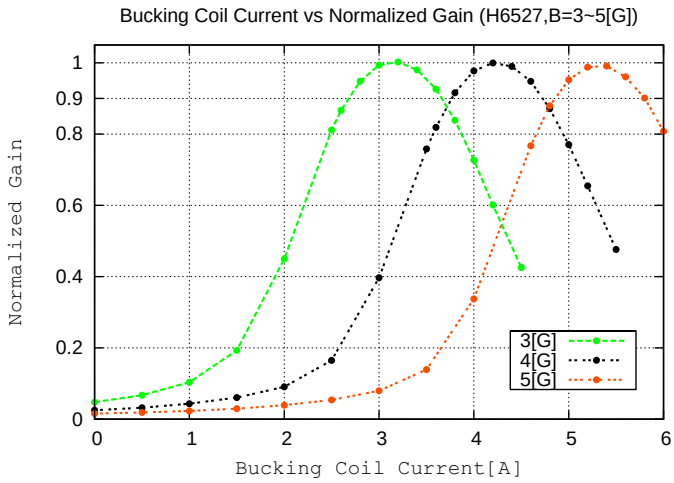
図 4.14: バッキング効果の HV 依存性。

また、異なる HV でバッキングを試したのが図 4.14 である。HV を変えた場合でも、最大回復に必要な電流値に差は見られなかった。すなわち、バッキングコイルによる磁場が管軸方向の磁場とつりあう際に最大回復するので、電子に働くクーロン力の大小は回復には関係しない。

4.2.2 H6527（5”管）

前回実験時に回復しないことが問題となった H6527 についてもバッキングコイルは成功した。導線、電流源は H7195 と同じである。図 4.15 に、図 4.10 と同条件、すなわちカソード上から 9[cm]

の幅、20 巻で巻いたときのバッキングコイル電流値対相対ゲインのグラフを示す。PMT の HV は磁場依存性を測ったときと同様に 1700[V]、 φ =0 とした。また、磁場の向きは管軸方向である。



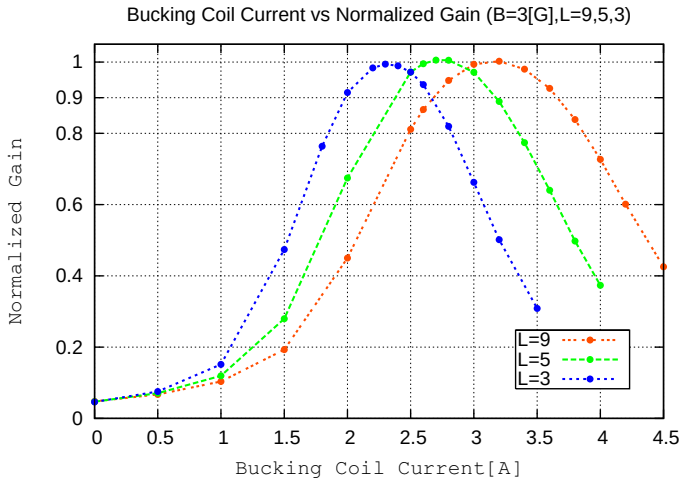
磁場 [G]	I_{max}[A]
3.0	3.2
4.0	4.2
5.0	5.4

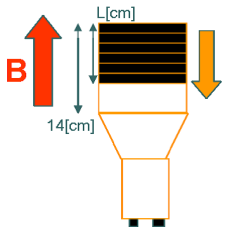
図 4.15: バッキングコイルによる H6527 のゲイン回復。外磁場 3,4,5[G] のそれぞれの場合で描いた。

H6527 についても H7195 と同様に管軸方向磁場についてはバッキングコイルで 100 %の回復が可能であることがわかり、最大に回復する電流値と印加磁場との間の線形性も見られる。曲線の間隔から、この巻き方では大まかに 1[G]〜1.1[A] であり、この電流値のオーダーは H7195 に近い。しかし曲線の幅は H7195 の場合と比較して狭い。これは、H6527 の方がバッキングコイル磁場に対しても影響を受けやすいためである。

H7195 同様に巻き方による回復の違いを見た。H6527 については全てカソードから巻いた上でその巻く領域を変えたときの効果をみた。図 4.16 は 3[G] を管軸方向にかけたときの、異なる巻き領域での回復の違いである。カソードからコイル端までの距離を L[cm] として L=3,5,9 でデータをとった。L=5 は L=9 と同じ導線をカソードに集中して二重巻きに、L=3 は φ 1[mm] 程度の細い導線をカソードに集中して一重に巻いた。全て 20 巻きである。

図 4.16 から、カソードに集中して巻くほど回復に必要な電流値は少なり、電流値の「幅」が狭くなる、という H7195 について巻く場所を変えたときと同様の効果が見られた。すなわち、カソード付近でもとくにカソードのごく近くの磁場がゲインに寄与しており、カソード付近に巻くほど磁場キャンセルが容易であることが分かる。





L[cm]	I_{max}[A]
9	3.2
5	2.7
3	2.3

図 4.16: バッキングコイル効果の巻き領域依存性。カソードから巻く領域（Lcm）を変えてバッキングした。

4.2.3 バッキングコイルまとめ

バッキングコイルについての結果をまとめる。

1. バッキングコイルはいずれの PMT でも効果があり、外磁場が管軸方向の場合 100 %ゲインを回復できる。
2. カソードに近い部分に巻くほど低電流でバッキングできる。
3. バッキングに必要な電流値はかかっている磁場に比例する。
4. キャンセル効果が低い巻き方ほど条件（電流、磁場強度、θ）が変わっても回復率の変化が少ない。
5. 外磁場に対し発生磁場が完全に平行でなくても、管軸方向の磁場を打ち消せる分ゲインは回復する。

５の θ 依存性について H6527 については確かめていない。管軸が大きい分、管軸方向磁場さえ打ち消せばよいという単純な理論ではすまなそうであるが、今回はあくまで WC 用の H7195 のテストが主目的なので割愛した。しかし前回実験で H6527 にバッキングコイルがあまり機能しなかったという報告から推測すると、外磁場が管軸平行でない場合 H6527 はバッキングコイルの効果は弱く、また、当時 AC 群の領域で発生した磁場は管軸平行ではなかった可能性がある。

１～５の結果はとても理解しやすいものであるが、PMT に加わるバッキングコイル磁場が均一でも完全に管軸に平行でもないことから自明なことではない。

３，５に基づけば、次のように述べることができる。

「最大限回復する電流値は、磁場 B[G] の下で管軸方向 1[G] に相当するバッキングコイル電流値を a[I/G] とおいて

$$I_{max} = a \cdot B cos\ \theta$$

であり、かつこのとき管軸方向に Bsin θ かかったとき程度回復する。」

大雑把な式であるが、少なくとも図 4.11 や図 4.13 はこのシンプルな式で説明できる。すなわち、

PMT に加わる外磁場とバッキングコイル磁場の競合の描像が割合シンプルであることが分かる。

これらの結果、特に１と５より、バッキングコイルが数 [G] レベルの磁場、E05115 実験での外磁場オーダーにおいては有用であると言える。
第 5 章で実際のＷＣについてのバッキングコイル使用について具体的に考察する。

謝辞

本稿の執筆にあたり多くの方のご助力をいただきました。心より感謝申し上げます。

橋本治教授にはE05115実験という壮大な実験に参加するきっかけを与えていただき、新しい物理学に関わる機会を下さったことをこのうえなく感謝しています。ありがとうございました。中村哲准教授には示唆に富んだアドバイスと時には叱咤、励ましをいただきました。先生のおかげで研究の方向が見え成功を収めることができました。ありがとうございました。田村裕和教授におかれましてはセミナーや授業を通して物理の楽しさと原子核の本質、科学の奥深さを幾度も教授していただきました。原子核物理に進むきっかけを与えてくださったのは先生です。藤井優助教には細かなアドバイスからモジュールの使い方まで、本当に深く面倒を見ていただきました。ありがとうございました。

技官の千賀信幸氏にはコイルの制作にあたり非常にお世話になりました。設計から材料の切り出し組み立てまで、氏がいなくば本研究は成立していません。心から感謝しています。秘書の川村直子氏には細かな事務手続きや連絡のみならず普段からかけてくださった優しいお声がなにより励みになりました。ありがとうございました。

最後に、スタッフの皆様、先輩同輩の皆様、私に大きな学びの場を与えてくださりまして、本当にありがとうございました。

関連図書

[1] O.Hasimoto,L.Tange,J.Reinhold,S.N.Nakamura,et al. Jlab PAC-33 proposal,January 16,2008

[2] 岡安雄一、Spectroscopic study of light Lambda hypernuclei via the (e,e'K^+) reaction、博士論文 東北大学（2008）

[3] Hamamatsu photonics、光電子増倍管 その基礎と応用 第 3 版 (2005)

[4] 川間大介、電子ビームによる次世代ラムダハイパー核分光実験用高分解能散乱電子スペクトロメータの研究、修士論文 東北大学（2007）

[5] 山本拓、電子ビームを用いた次世代ラムダハイパー核分光実験のための K 中間子検出器の研究、修士論文、東北大学（2009）

[6] 河合正晴、(e,e'K) 反応を用いた次世代ラムダハイパー核分光実験のための K 中間子検出器の開発、修士論文 東北大学（2008）

[7] M.Bonesini、A Systematic Study in High Magnetic Fields of Fine-Mesh Photomultipliers for Time-of-Flight Detectors（2004）