

2022 年度 卒業論文

LHC-ALICE 実験
高度化のための電磁カロリメータ開発に
向けた性能評価

奈良女子大学 理学部

物理科学科 高エネルギー物理学研究室

佐々木優花

2023 年 3 月 25 日

概要

素粒子であるクォークやグルーオン (パートン) は、通常強い相互作用によりハドロン内に閉じ込められている。しかし宇宙の誕生から数 10 μ 秒後の超高温で高密度な状態で、この閉じ込めから解放され自由粒子のように動き回っていたと考えられている。この状態を Quark Gluon Plasma (QGP) という。この QGP の物性を解明することは宇宙起源の解明につながり、私たちの身の回りの物質の起源を理解することにつながる。この解明に向け、世界各国の研究施設で高エネルギー重イオン衝突実験が行われている。欧州原子核研究機構 (CERN) にある世界最大のハドロン衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) で行われている ALICE 実験 A Large Ion Collider Experiment もそのうちのひとつである。ALICE 実験は重イオン衝突に特化した実験で、光速近くまで加速させた原子核同士を衝突させビックバンの直後にあったとされる QGP を地球上で生成し、その性質の解析を行っている。QGP 解明のためには衝突初期段階について理解することは極めて重要であり、そのためにカラーガラス凝縮 (CGC) を詳しく調べる必要がある。ALICE 実験ではこれらの測定に向け、アップグレード計画として超前方領域における直接光子やハドロン測定を目的とする Forward Calorimeter (FoCal) を導入する予定である。FoCal は電磁カロリメータである FoCal-E とハドロンカロリメータである FoCal-H の二部で構成されており、日本では筑波大学や奈良女子大学などを中心に FoCal-E について開発が行われている。

FoCal-E は検出層にシリコン (Si)、吸収層にタングステン (W) を用いている。FoCal 検出器は、実験で検出器が受ける放射線量が多い前方方向に設置されるため、検出層で用いられるシリコンセンサーは、放射線耐性がある p 型を使用する予定である。そのため p 型の性能評価、特に中性子照射前後についての性能の違いを比較して、放射線耐性が十分であることを検証する必要がある。

本研究では、p 型シリコンセンサーの性能評価を行った。特に p 型のシリコンセンサーに中性子を照射する前後での I-V 特性の比較を行った。また、使用予定の読み出しシステム HGCROC により、シリコンセンサーの周辺温度が 50 $^{\circ}$ C 付近まで上昇する可能性があるため、センサー周辺の温度を 50 $^{\circ}$ C にした後、経過時間に依存した I-V の変化を測定することで、この温度下でセンサーが安定して動作するまでにかかる時間を求めた。次に青色 LED を用いて、中性子照射前後でのシリコンセンサーの光強度依存性と印加電圧依存性の測定を行い、照射前後での変化を調べた。

この結果、センサーの周辺温度が 50 $^{\circ}$ C にした後、約 10 分経過するとシリコンセンサー本体の温度が安定し、I-V 特性はシリコンセンサー本体の温度による影響が見られなくなることがわかった。また光強度依存性について、中性子照射前後共に収集電荷量との線形性が見られるが、見られる範囲については照射前と比べ照射後の方が広いことがわかった。印加電圧依存性について照射前では変化が見られないのに対し、照射後では印加電圧が 200V 以降収集電荷量が一定となることがわかった。

目次

1	序論	1
1.1	標準模型	1
1.2	量子色力学 (QCD)	1
1.3	Quark-Gluon Plasma(QGP)	2
1.4	LHC-ALICE 実験	2
1.5	カラーガラス凝縮 (CGC)	3
1.6	前方の物理	3
1.7	研究目的	5
2	FoCal 検出器について	6
2.1	検出器の物理	6
2.2	カロリメータ	8
2.3	半導体検出器	9
2.4	FoCal 検出器	12
3	p 型シリコンセンサーの I-V 特性についての測定	14
3.1	p 型シリコンセンサー	14
3.2	使用機器	15
3.3	測定のセットアップ	16
3.4	測定方法	16
3.5	測定結果	17
4	p 型シリコンセンサーの LED 照射についての測定	20
4.1	p 型シリコンセンサー	20
4.2	使用機器	21
4.3	測定のセットアップ	23
4.4	測定結果	24
5	まとめと今後の課題	27

図目次

1	標準模型 [1]	1
2	ビックバン直後の宇宙の展開図 [2]	2
3	LHC 加速器 [2]	3
4	ALICE 検出器 [2]	3
5	カラーガラス凝縮 (CGC)[3]	3
6	物質ごとの電離損失 [4]	8
7	p 型半導体 [5]	9
8	n 型半導体 [5]	10
9	順バイアスかけた時 [5]	10
10	逆バイアスかけた時 [5]	11
11	半導体検出器の仕組み [6]	11
12	FoCal 設定予定位置 [7]	12
13	FoCal-E の構造 [7]	13
14	使用したシリコンセンサー (治具付き)	14
15	ピンの位置場所について	14
16	恒温槽	15
17	ピコアンメータ	15
18	回路図 [6]	16
19	温度依存性による I-V 特性の変化	17
20	温度依存性 - 150V 付近	18
21	経過日数による I-V 特性の変化	18
22	経過日数による I-V 特性の変化 (150V)	19
23	使用したシリコンセンサー (中性子照射後)	20
24	Function Generator	21
25	電圧設定装置	21
26	MCA(Multi Cannel Analyzer)	22
27	Preamplifer	22
28	回路図	23
29	測定時の様子 (中性子照射後)	23
30	MCA からの波高分布 (中性子照射後)	24
31	MCA からの波高分布 (中性子照射前)	25
32	中性子照射後 - 0V	25
33	中性子照射後 - 100V	25
34	中性子照射前 - 0V	26

35	中性子照射前 - 100V	26
36	中性子照射後 - 印加電圧依存性	26

1 序論

1.1 標準模型

私たちの身の回りにあるあらゆる物質は原子からできている。原子は中心にある原子核とその周りを回る電子で構成される。原子核は陽子と中性子できており、この二種類をまとめて核子という。さらに核子はクォークと呼ばれる粒子3つでできている。電子やクォークは物質を構成する最小の要素でこれらを素粒子と呼ぶ。

素粒子には、6種類のクォーク、6種類のレプトン、クォークとレプトン間で相互作用を媒介するゲージ粒子、素粒子に質量を与えるヒッグス粒子といった種類がある。クォークとレプトンは以下の図1のように3世代あり、それぞれの世代に電荷の符号が反対の性質を持つ反粒子を持つ。

自然界には”強い相互作用”、”電磁相互作用”、”弱い相互作用”、”重力相互作用”といった4つの基本的な相互作用がある。標準模型とは、重力相互作用以外の3つの相互作用を記述するためのモデルである。

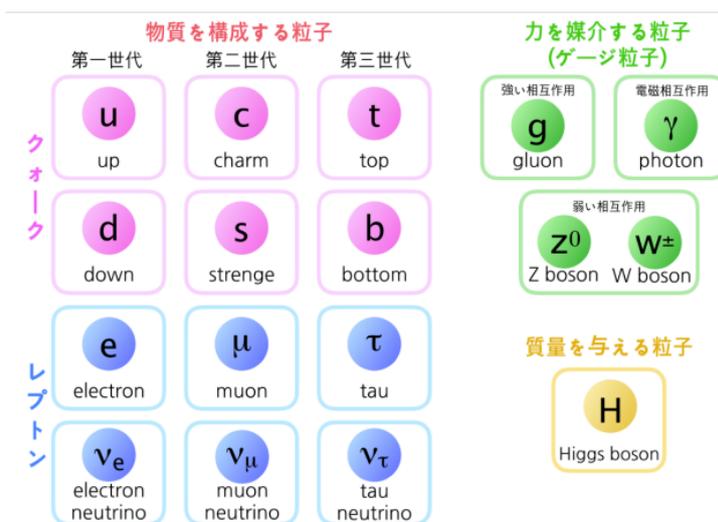


図1 標準模型 [1]

1.2 量子色力学 (QCD)

量子色力学 (Quantum Chromodynamic : QCD) は、強い相互作用を記述する場の量子論である。クォークやグルーオンはパートンと呼ばれており、レプトンの電荷に相当する色荷と呼ばれる量子数を持っている。色荷を持つ量子間に働く相互作用を強い相互作用と呼ぶ。クォークは3種類、グルーオンは8種類の色荷をそれぞれ持っており、光の三原色のように組み合わせると白色になることで安定な状態となる。その安定した状態をハドロンと呼び、その中でもクォーク3つで構

成されるものをバリオン、2つで構成されるものをメソンと呼ぶ。バリオンには陽子や中性子があり、メソンには π 中間子やK中間子などがあり、パートンは通常強い相互作用によりハドロン内に閉じ込められているため、単体で取り出すことはできない。

1.3 Quark-Gluon Plasma(QGP)

前述の通り、パートンは通常核子内に強い相互作用により束縛され、単体で取り出すことは不可能である。しかし超高温・高密度な状態ではクォークやグルーオンがその束縛から解放され自由に動き回ると考えられている。この状態を Quark-Gluon Plasma(QGP) という。図2にあるように宇宙が誕生してから数10 μ 秒後にこのQGPが存在したと考えられているため、QGPの解明により宇宙の起源の解明の手掛かりになると期待されている。

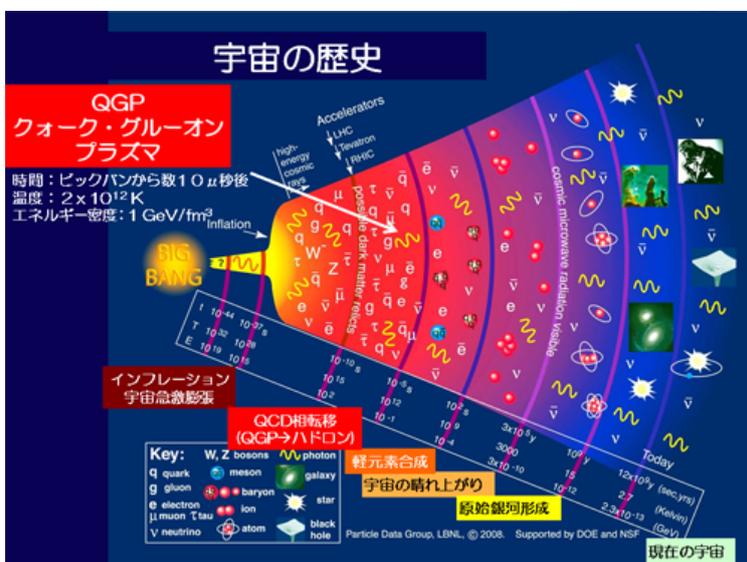


図2 ビッグバン直後の宇宙の展開図 [2]

1.4 LHC-ALICE 実験

LHC 加速器 (Large Hadron Collider) はヨーロッパ共同原子核研究機構 (CERN) によって建設された世界最大のハドロン衝突型加速器である。全長が 26.7km にも及ぶ巨大な加速器が地下約 100m の位置に、フランスとスイスの国境をまたぐようにして建設される。LHC 加速器では、ALICE 実験、CMS 実験、ATLAS 実験、LHCb 実験、LHCf 実験、TOTEM 実験の 6 つの実験が行われている。その中の ALICE 実験 (A Large Ion Collider Experiment) は、重イオンを加速、衝突させることで QGP を生成し、その性質についての解明を目的としている実験である。

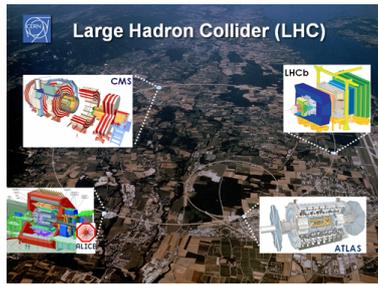


図3 LHC 加速器 [2]

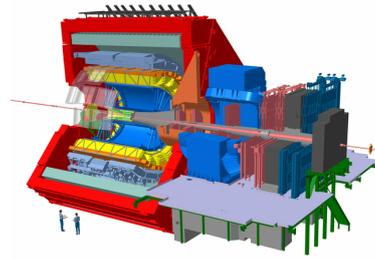


図4 ALICE 検出器 [2]

1.5 カラーグラス凝縮 (CGC)

グルーオンはクォークを強い相互作用によってハドロン内に閉じ込める役割を担っている。陽子・中性子はクォーク3つで構成されており、クォークは量子揺らぎとして絶えずグルーオンを放出・吸収しているが、通常のエネルギーでは揺らぎの寿命が非常に短いため、基本構造は大きく変わらない。しかし、高エネルギーの状態では揺らぎが長寿命化し、グルーオンの雪崩的生成グルーオン同士の相互作用が生じることで、次第にグルーオンが高密度飽和状態になる。この高密度飽和状態をカラーグラス凝縮 (CGC) と呼ぶ。高エネルギー原子核衝突実験の衝突直前に核子はこのCGC 状態となる。

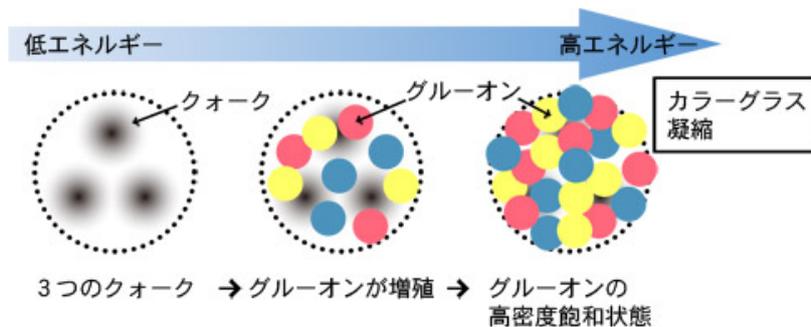


図5 カラーグラス凝縮 (CGC)[3]

1.6 前方の物理

1.6.1 直接光子

高エネルギー原子核衝突実験では、多くの光子が生成される。その光子のうち、検出されるもののほとんどが衝突により生成されたハドロンが崩壊した崩壊光子であるが、衝突反応より直接生成される直接光子がある。崩壊光子は反応終了後に生成されるため、衝突反応時の情報を持っていない。一方で直接光子は反応領域で生成されるため、衝突初期や反応領域の情報を持つ。CGC 等の衝突前の情報を得るには、衝突による相互作用をしない粒子を検出する必要があり、光子はクォー

クやグルーオンとほとんど相互作用せず、ハドロンとは直接相互作用しないことから、直接光子の測定を行う事が非常に重要である。

1.6.2 横運動量

運動量ベクトルの、ビーム軸に垂直な成分の大きさを横運動量といい、ビーム軸に対して垂直な平面を x-y 平面としたとき、運動量 p_T は $p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ で表される。横運動量はローレンツ変換に対して不変な量であり、衝突前の横運動量は 0 であるが、衝突により横運動量を持つ。そのため、衝突後の粒子を測定するために重要である。

1.6.3 ラピディティ・擬ラピディティ

高エネルギー重イオン衝突実験において、発生した粒子の運動を記述するうえで重要な物理量として、ラピディティがある。ラピディティは相対性理論において速度に変わる運動の大きさの尺度のことを言う。ラピディティ y は E を粒子のエネルギー、 p_z をビーム軸を z 軸としたときの運動量の z 成分とすると、次の式で表される。

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_z}{E - p_z} \right) = \tanh^{-1} \left(\frac{p_z}{E} \right) \quad (1)$$

y が小さい時 $y \sim \frac{p_z}{E}$ となり、 z 軸方向の粒子速度に等しい。これを用いるとラピディティによって、ローレンツ変換を単純な計算で記述することができる。さらに粒子が光速まで加速されるとき粒子の質量は運動量に対して非常に小さく無視できるため、ラピディティは θ をビーム軸からの粒子の放出角度とした時、以下のように近似できる。

$$y \approx \eta = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (2)$$

この η を擬ラピディティと呼ぶ。 η は θ にのみ依存し、 E には依存しない。つまり、 θ の測定から粒子のラピディティを近似で求めることができる。

1.6.4 Bjorken-X

Bjorken-x とは、ハドロンが持つ縦運動量に対する各パートンの運動量比のことである。Bjorken-x は式 3 で定義される。

$$x = \frac{2p_T}{\sqrt{s}} \exp(-y) \quad (3)$$

ここで、 p_T はビーム軸を z 軸とした時の横運動量 $p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ 、 \sqrt{s} は重心系での核子あたりの衝突エネルギー、 y はラピディティをあらわす。式 3 より、 x は衝突エネルギー \sqrt{s} に反比例し、ラピディティ y に対して指数関数的に減少することがわかる。よって、高エネルギー・高ラピディティの領域では x は小さくなる。特に $x \leq 10^{-2}$ の領域を small-x と呼ぶ。FoCal 検出器はこの small-x の領域の観測を目的としている。

1.7 研究目的

LHC-ALICE 実験では、直接光子を small-x となる衝突前方方向で観測することを目的とした Forward Calorimeter(FoCal) の導入を計画している。日本では現在筑波大学や奈良女子大学などがこの FoCal プロジェクトに参加しており、特に電磁カロリメータである FoCal-E について開発を進めている。FoCal-E とは、検出層であるシリコン (Si)、吸収層であるタングステン (W) の組み合わせで構成されたサンプリング型カロリメータである。検出層に用いられる Si は、p 型と n 型の 2 種類あるが、FoCal が配置される予定の超前方領域では放射線量が高いことから、より放射線耐性のある p 型の Si の使用を予定している。従来の FoCal の試作機では n 型を使用していたことから、p 型の Si について基礎性能の評価を行う必要がある。

本研究では、p 型シリコンセンサーについて性能評価を行った。中性子照射前後について I-V 特性の比較、シリコンセンサーの周辺温度を 50 °C で一定に保った時のシリコンセンサー本体の温度依存性、シリコンセンサーに LED を照射した際の中性子照射前後での比較について着目する。

2 FoCal 検出器について

2.1 検出器の物理

2.1.1 制動放射

高速の荷電粒子が物質中に入射すると、物質を構成する原子核の電場により減速し、光子を放出する。この現象を制動放射という。制動放射は物質中で確率的に発生し、その確率は粒子の質量の2乗に反比例し、物質の原子番号の2乗に比例する。そのため、質量の軽い電子や陽電子が入射粒子の場合、または原子番号が大きな物質中で制動放射は起きやすい。制動放射によるエネルギー損失は式4で与えられる。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_0 \frac{Z^2}{A} r_e^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} = \frac{E}{X_0} \quad (4)$$

上記の式において、 α は微細構造定数、 N_0 は物質の原子密度、 Z は物質の原子番号、 A は物質の原子量、 r_e は古典電子半径、 E は入射エネルギー、 X_0 は放射長を表す。放射長は初期エネルギーから $1/e$ になるまで通過する長さのことで次の式で表すことができる。

$$X_0 = \frac{716.4A}{287Z(Z+1)\sqrt{Z}} [g/cm^2] \quad (5)$$

上式からわかるように放射長は物質の原子量と原子番号に依存する。

2.1.2 光電効果

物質中に光子が入射すると原子内に束縛される電子に全エネルギーを与え、軌道電子を一つ原子外に放出する。この現象を光電効果といい、この時に放出される電子を光電子と呼ぶ。入射光子のエネルギー $h\nu$ が結合エネルギー I 以上であるとき放出される電子の運動エネルギー E_0 は次式で表される。

$$E_0 = h\nu - I \quad (6)$$

上式より、放出される電子のエネルギーは入射光の振動数に依存する。

2.1.3 コンプトン散乱

光子が物質に入射した際、物質中の束縛される電子と衝突し、散乱することで入射した光子のエネルギーが失われ、その原子内の軌道電子に与えられる。この現象をコンプトン散乱と呼び、この時電子が原子核からはじき出される場合があり、こののはじき出された電子を反跳電子と呼ぶ。入射した光子のエネルギーが束縛エネルギーよりも十分高い時、軌道電子の束縛エネルギーは無視できるため、静止している自由電子との反応と近似することができる。コンプトン散乱はエネルギー保

存則と運動量保存則から式 7 が成り立つ。

$$\hbar\omega' = \frac{\hbar\omega}{1 + \frac{\hbar\omega}{m_e c^2 (1 - \cos\theta)}} \quad (7)$$

ω : 入射光子の角振動数

ω' : 散乱光子の角振動数

2.1.4 電子対生成

電子対生成とは、電子 2 つ分の静止質量 ($0.511\text{MeV} \times 2 = 1.02\text{MeV}$) 以上のエネルギーを持つ光子が物質を構成する原子の近くを通るときに、原子核の電場により光子が消滅し、電子と陽電子が対になって生成される現象のこと。

2.1.5 電離損失

電離損失とは、荷電粒子が物質中を通過する際に、部室を構成する原子を電離・励起させることでエネルギーを失うことである。電離損失は物質の原子番号と原子量の比、荷電粒子の電荷の 2 乗、入射する荷電粒子の速さに比例する。単位長あたりに失うエネルギーを阻止能といい、以下の Bethe-Bloch の式で表される。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left(\ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \quad (8)$$

N_A : アボガドロ定数 m_e : 電子の静止質量 z : 入射粒子の電荷 I : 物質のイオン化ポテンシャル

$\beta = \frac{v}{c}$: 相対論における速度比

$\gamma = \frac{1}{1-\beta^2}$: ローレンツ因子

横軸に $\beta\gamma$ 、縦軸に阻止能をとると、以下の図 6 のようになる。この図から、どの物質においても電離損失は $\beta\gamma = 3$ 付近で最小値を取る。このように物質中を最小の電離損失で通過する粒子のことを最小電離 (Minimum Ionization Particle : MIP) という。MIP の落とすエネルギーは粒子によらず一定のエネルギーと決まっている。

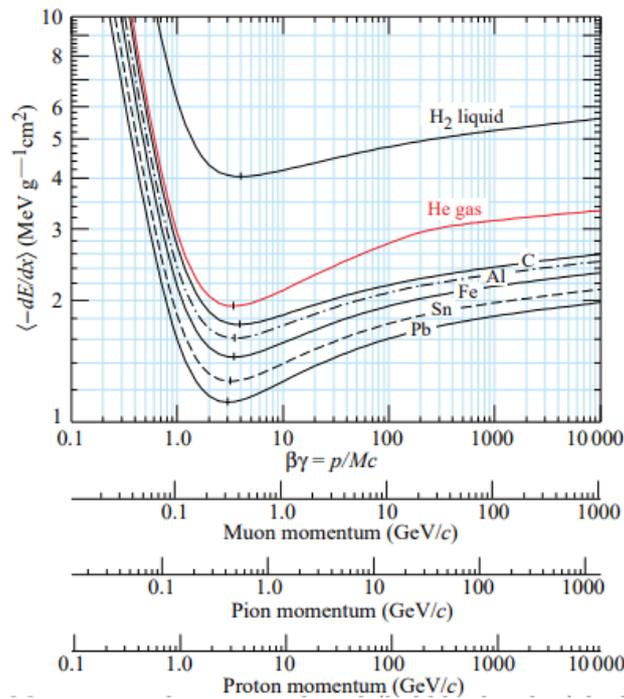


図6 物質ごとの電離損失 [4]

2.1.6 電磁シャワー

高いエネルギーの電子や陽電子、光子が物質中に入射すると、制動放射や電子対生成を起こし、電子と陽電子、光子を生成する。さらに生成された電子や陽電子、光子が制動放射や電子対生成を起こす。この反応が連続的に繰り返されることで電子や光子が雪崩的に発生する。この現象を電磁シャワーという。電磁シャワーにより粒子数が増えていくと、個々のエネルギーが減っていき、制動放射や電子対生成をが起こらなくなるまで電磁シャワーは続く。

2.2 カロリメータ

粒子のエネルギーを測定するための検出器をカロリメータという。電子や光子のエネルギーを測定するための電磁カロリメータと、ハドロンエネルギーを測定するためのハドロンカロリメータがある。また、構造には全吸収型カロリメータとサンプリング型カロリメータがあり、FoCalはサンプリング型カロリメータである。サンプリング型カロリメータはエネルギーを吸収する層(吸収層)と粒子が落としたエネルギーを読みだして処理する層(検出層)で構成される。検出器では電磁相互作用によって荷電粒子の信号を検出するが、光子のような非荷電粒子は電磁相互作用を起こさず、検出器を通過してしまう。そのため、電磁シャワーを用いて光子を荷電粒子の信号に変更し、光子のエネルギー測定を行う。

2.3 半導体検出器

2.3.1 半導体

半導体は導体と絶縁体の中間の性質をもつ物質である。半導体にはシリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) などがあり、本研究ではシリコンを用いるためシリコンについて記述する。シリコンは4本の結合手を持ち、純粋なシリコンの結晶は荷電氏がすべての共有結合に使われるため、電気をほとんど通さない。このような純粋な半導体を真性半導体という。しかし半導体結晶中に少量の不純物を加えることで様相が変化する。

2.3.2 p 型半導体

シリコンの結晶内に結合手を3本持つホウ素 (B) などの元素をドーピングすることでつくられる半導体を p 型半導体という。シリコンとの結合に必要な電子が1個足りず、ホール (正孔) が発生する。電場を与えると以下の図7のように電子がホール側に移り、またその電子の場所に新しいホールができ、これを繰り返すことでホールが正の電荷をもった電子のようにふるまうため、電流が流れるようになる。

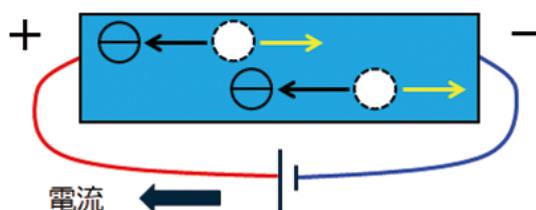


図7 p 型半導体 [5]

2.3.3 n 型半導体

シリコン結晶内に結合手を5本持つリン (P) やヒ素 (As) などの元素をドーピングすることでつくられる半導体を n 型半導体という。これらがドーピングされると、結合ができない電子が発生する。この電子はきわめて低いエネルギーで励起され、電場を与えると自由電子として振る舞い、以下の図8のように電流が流れる。

2.3.4 P-N 接合

p 型半導体と n 型半導体を1つの半導体結晶として接合することを P-N 接合という。接合部分では、熱運動により、電子が p 型側、ホールが n 型側に広がる。そのため、接合付近では電気的に中性な領域ができる。この領域を空乏層と呼ぶ。

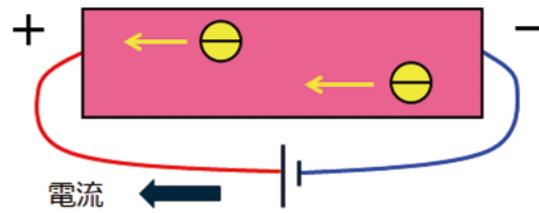


図 8 n 型半導体 [5]

2.3.5 印加電圧

電圧の印加方法には順バイアスと逆バイアスの 2 つがある。

順バイアス

順バイアスは p 型半導体の方に正の電圧を印加することである。順バイアスを印加すると p 型側に電子が、n 型側にホールが移動するため、接合付近では電子とホールが結合して電荷が消滅する。その結果空乏層が小さくなり、p 型から n 型に向かって電流が流れるようになる。

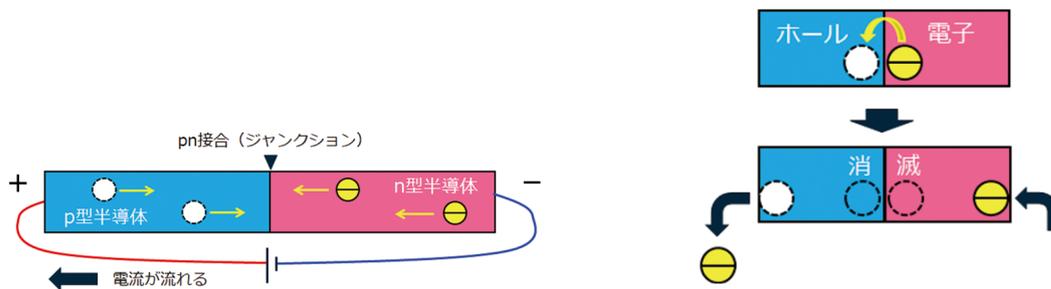


図 9 順バイアスかけた時 [5]

逆バイアス

逆バイアスは n 型半導体のほうに正の電圧を印加することで、印加すると順バイアスの場合と反対で p 型側にホールが、n 型側に電子が移動するため空乏層が大きくなり電流が流れなくなる。

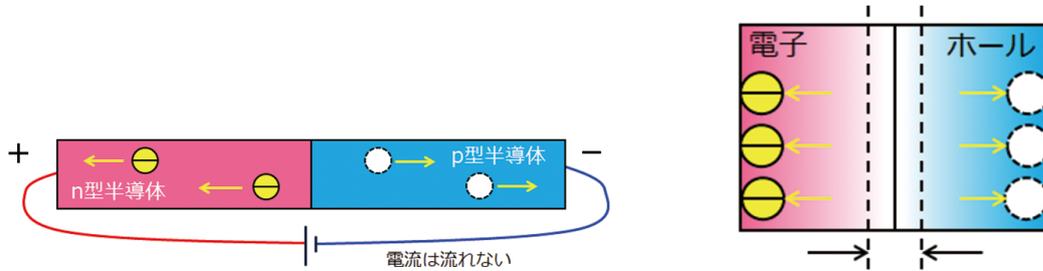


図 10 逆バイアスかけた時 [5]

2.3.6 半導体検出器の仕組み

半導体検出器では逆バイアスを印加することで検出器内の空乏層を広くし、検出効率を上げたうえで入射粒子を検出している。粒子が空乏層に入射すると電子とホールが発生し、電場の影響を受け電子は n 型側に、ホールは p 型側に移動する。キャリアがほとんど存在しない空乏層では電子とホールは再結合する前に両端にある電極に到達する。両端の電極に達した時、パルスが発生する。

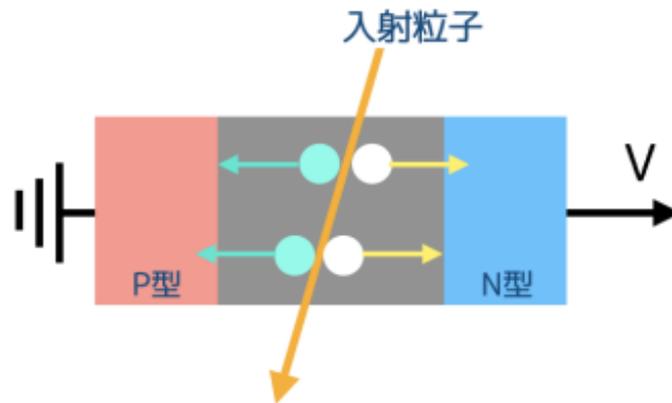


図 11 半導体検出器の仕組み [6]

2.4 FoCal 検出器

FoCal(Forward Calorimeter) は LHC-ALICE 実験のアップグレード計画のための検出器である。2027 年から始まる Run4 での運用が予定されている。電磁カロリメータ (FoCal-E) とハドロンカロリメータ (FoCal-H) で構成されており、日本では筑波大学を中心に FoCal-E の性能評価が行われている。FoCal の目的は、これまでに観測されていない超前方方向領域 ($3.2 < \eta < 5.8$) での直接光子を測定することである。これにより衝突初期段階の状態を理解するために重要な small- x ($x \leq 10^{-6}$) 領域でのパートン分布関数や CGC についての詳細な測定が期待される。設置位置は以下の図 12 に示すように衝突地点からビーム軸の前方方向に 7m 離れた地点を予定している。

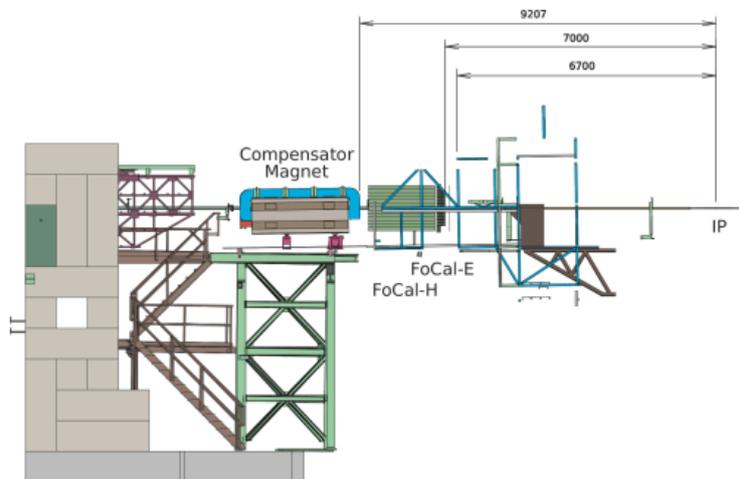


図 12 FoCal 設定予定位置 [7]

2.4.1 FoCal-E

FoCal-E はサンプリング型カロリメータで吸収層にタングステン (W)、検出器にシリコン (Si) を用いており、それぞれが 20 層ずつ交互に並ぶ構造である。FoCal-E における吸収層で電磁シャワーを起こしている。吸収層に用いられるタングステンは放射長が $X_0 = 3.5\text{mm}$ 、モリエール半径が $R_M = 9.3\text{mm}$ であり、鉛 ($X_0 = 5.6\text{mm}$ 、 $R_M = 17.1\text{mm}$) と比較してみると、タングステンを用いることで放射長とモリエール半径が小さく、電磁シャワーのサイズが小さくなるため、検出器がコンパクトにでき、近接した光子の識別の最適化が可能になる。また、吸収層の 1 層の厚さは放射長と同じ 3.5mm であり、以下の図 13 のように検出層と交互に 20 層並ぶため全長 $15 \sim 25\text{cm}$ になる予定である。検出層には直接光子と崩壊光子を区別するための高い位置分解能を持つ HGL(High Granularity Layer) とエネルギー測定をするための LGL(Low Granularity Layer) の 2 種類がある。

HGL

HGLには崩壊光子と直接光子の識別を行う役割がある MAPS(Monolithic Active Pixel Sensors)と呼ばれる $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ の小さいサイズのシリコンセンサーでできており、これで $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ のミニピクセルを構成し、高い分解能を持つ。これによりシャワー形状から崩壊光子と直接光子を識別することを可能にしている。

LGL

LGLは光子のエネルギーを測定するための検出器である。以下の図13にあるように $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ のシリコンパッドを使用しており、これを 8×9 個格子状に並べ(これを Single PAD と呼ぶ)、この Single PAD を5枚横に並べることで1層を構成する。Single PAD1枚に対して1つずつ HGCROC という読み出しシステムがついており、HGCROC1つにつき72個の読み出し channel がある。それにより光子のエネルギーを測定する。

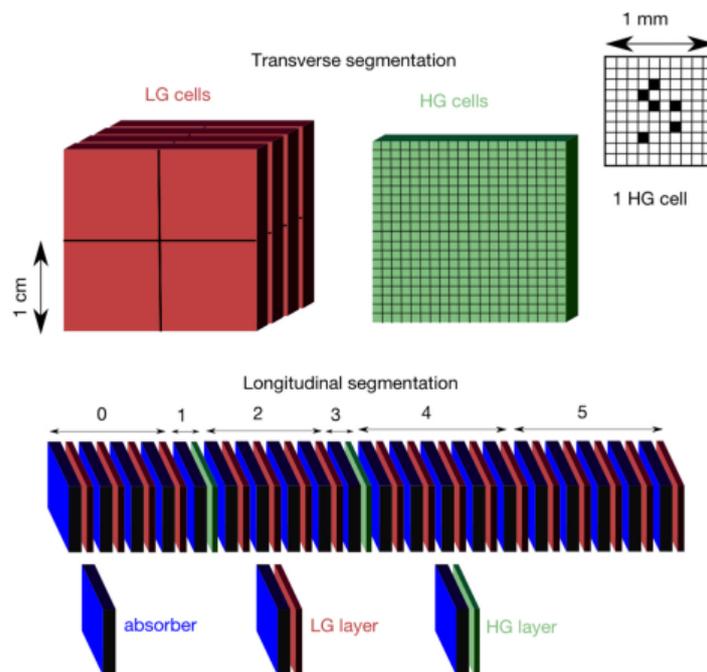


図13 FoCal-Eの構造 [7]

3 p型シリコンセンサーのI-V特性についての測定

本研究ではp型シリコンセンサーの性能評価について、シリコンセンサーに電荷を印加することでI-V特性の測定を行った。本章ではその時の実験方法や実験結果をまとめる。

3.1 p型シリコンセンサー

I-V特性の測定で使用したセンサーは $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ のp型のシリコンセンサーで中性子を照射後のものを使用する。シリコンセンサーは治具にセットされており、シリコンセンサーに接続するためのピンが合計7本ついている。シリコンセンサーにつながるピンが6本、グランドにつながっているピンが1本ある。ピンにつながっている場所について詳しくは図15に示す。

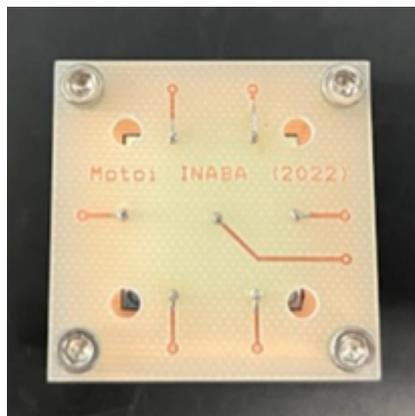


図14 使用したシリコンセンサー (治具付き)

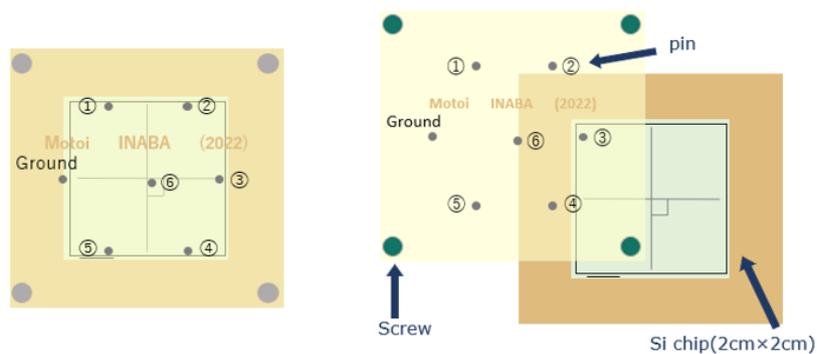


図15 ピンの位置場所について

3.2 使用機器

恒温槽 (Model OZONE GENTLE LU-113, ESPEC)

測定時にシリコンセンサー周辺の温度を一定に保つために使用。設定範囲は $-25 \sim 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ まで設定可能で、実際の測定では HGCROC という読み出しシステムにより周辺温度が約 $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ まで上昇するため、本研究では $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ で設定し測定を行う。設定の温度と実際の温度に $1 \sim 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ の差が見られるため別の温度計も使用した。



図 16 恒温槽

ピコアンメータ/電圧源 (Model 6487, KEITHLEY)

シリコンセンサーに電圧をかけその時流れる電流を測定するために使用した危機。最大電圧は 500V まで測定可能で $0 \sim 500\text{V}$ を 5V 刻みで 10 回ずつ本研究では測定した。



図 17 ピコアンメータ

3.3 測定のセットアップ

図に示した回路図のように接続し測定を行った。恒温槽内は密閉空間で恒温槽内で温度を保ちつつ恒温槽内に光が入らないようにしている。

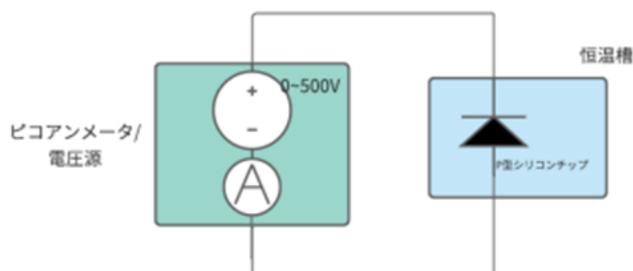


図 18 回路図 [6]

3.4 測定方法

ここでは「シリコンセンサー本体の温度依存性」と「中性子照射後の I-V 特性」の 2 つを行った。どちらも I-V 特性を見ているため測定のセットアップなどは上記を用いている。しかし、温度依存性については方法が少し違うためここでは温度依存性の測定方法について詳しく説明する。

I-V 特性 - 温度依存性

上記で示したように恒温槽では設定温度と実際の温度で 1 ~ 2 °C ほどずれが生じるため、別の温度計を用いている。シリコンセンサーを恒温槽内に入れた状態で恒温槽内の温度を 50 °C に設定し、別の温度計に表示される温度 (約 49 °C) が安定したとき恒温槽内の温度が一定になっていると考える。安定してから時間が経つにつれシリコンセンサーの本体の温度があたためられると考え測定を行った。本研究では別の温度計の温度が安定してから 0 分, 5 分... と 5 分経過するごとに測定を行った。

3.5 測定結果

以下ではそれぞれの測定についての結果である。測定誤差が非常に小さいため誤差棒は見えない図となっている。400V から一定となっているのはピコアンメータが 2.5mA までしか測定できないためである。

3.5.1 I-V 特性 - 温度依存性

以下に示す図は決めたピン番号別の I-V 特性の経過時間による結果である。

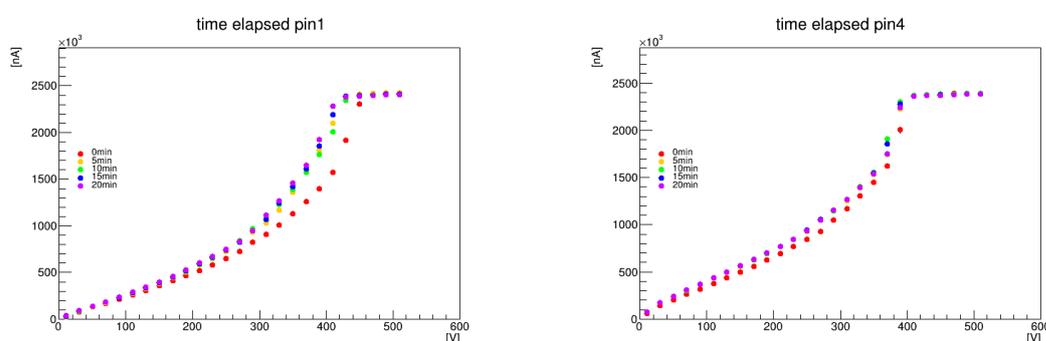


図 19 温度依存性による I-V 特性の変化

本研究ではピン 1 から順番に測定を行った。上の図からわかるように時間が経過するにつれて、つまりシリコンセンサーの本体温度が上昇するにつれ、電流値が上昇することがわかる。先行研究より、かける電圧が高い時、自己発熱によりシリコンセンサーの温度が上昇し、150V までは自己発熱による温度依存性の影響がない。よって次に自己発熱による影響がない 150V 付近での I-V 特性について考える。

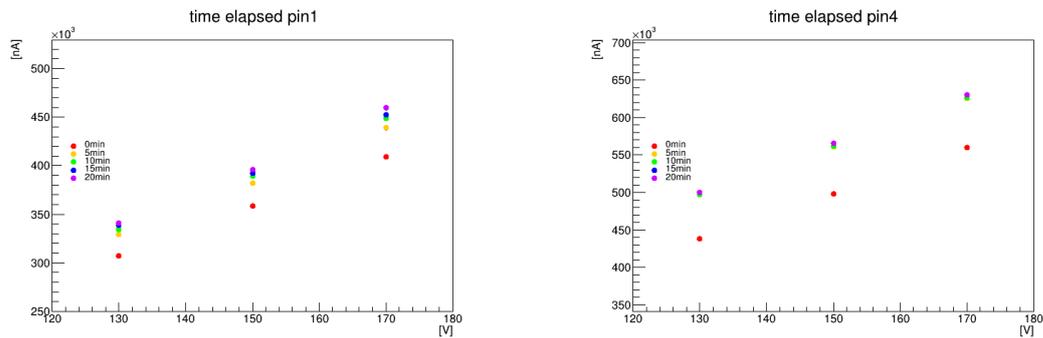


図 20 温度依存性 - 150V 付近

上図は 150V 付近の部分拡大したものである。上図から経過時間が 5 分以上では電流値に変化が見られないことがわかる。以上の結果より温度計が安定してから、いずれのピンにおいて少なくとも 10 分待てば温度依存性による影響はないことがわかった。

3.5.2 I-V 特性 - 中性子照射後、日数経過

以下に示す図は中性子照射後の経過日数による I-V 特性の変化である。

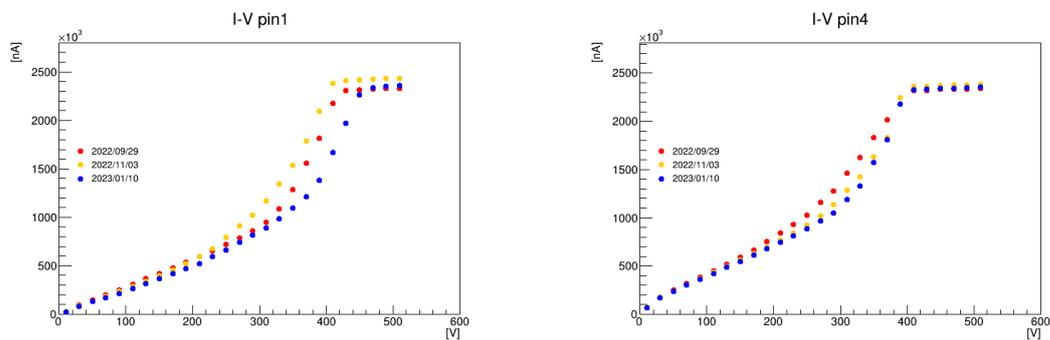


図 21 経過日数による I-V 特性の変化

上述で示したようにかける電圧が高い時、自己発熱により電流値が上昇している。自己発熱が影響しない電圧が低いところでは少しずつ中性子照射後、日数が経過するにつれ電流値が減少していることがわかる。次に 150V に着目し経過日数での電流値の変化を見る。

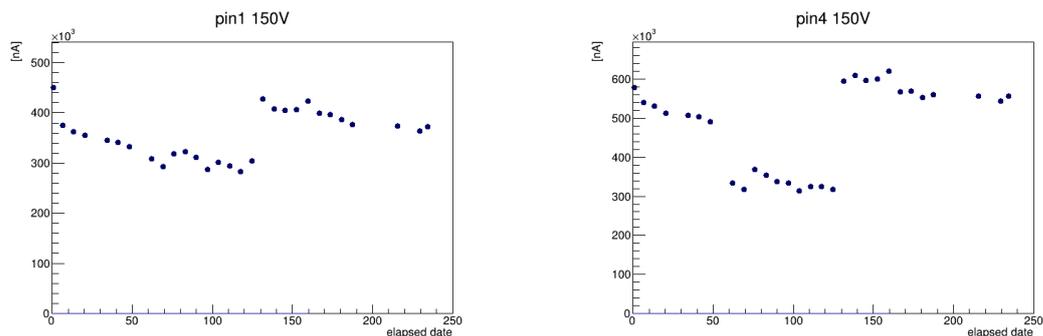


図 22 経過日数による I-V 特性の変化 (150V)

上図では 150V のときの経過日数による電流値の変化で、縦軸が電流値で、横軸が経過日数となる。140 日あたりで急激に電流値が上昇しているのは上記で述べたように温度依存性を考慮して 10 分待ってから測定するようにしたため、結果としてシリコンセンサー本体の温度が上昇し、電流値が上昇した。この電流値の上昇はすべてのピンで見られる。上の図からわかるように 150V では電流値は日数が経過するにつれ電流値が減少しており、今は I-V 特性の測定を開始してから 180 日が経過してから現在まで、すべてのピンにおいて安定している。

4 p型シリコンセンサーのLED照射についての測定

本研究ではp型シリコンセンサーの性能評価についてシリコンセンサーにLEDを照射することでシリコンの特性を測定し、中性子照射前後について比較を行った。本章ではその時の実験方法や実験結果をまとめる。

4.1 p型シリコンセンサー

LED照射についての測定で使用したセンサーはすべてp型のシリコンセンサーで2枚(中性子照射前:1枚、中性子照射後:1枚)である。中性子照射後で用いたシリコンセンサーは前章のI-V特性での測定で用いたシリコンセンサーと同じセンサー $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ のもの(図23)を用いた。前述の通り、シリコンセンサーは治具に取り付けられており、治具についている7本のピンは1本はグランド、残りの6本はシリコンセンサーとつながっており、このピンから入射粒子(光子)の信号を読みだしている。中性子照射前については $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ のシリコンセンサー(図なし)を用いた。このシリコンセンサーはシリコンにwire bondingで取り付けられたワイヤーより入射粒子の信号を読みだす。本研究ではこの2つのセンサーを用いて比較する。

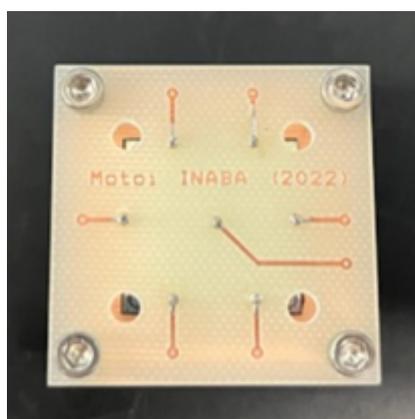


図 23 使用したシリコンセンサー (中性子照射後)

4.2 使用機器

Function Generator

測定時、シリコンセンサーに照射するために使用した青色 LED の光強度を設定するために使用した (図 24)。設定範囲は 500mV~10V まで変更可能である。

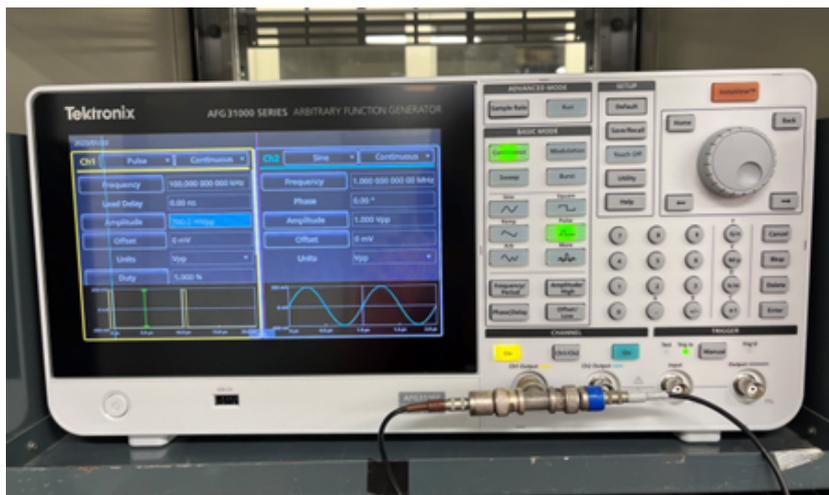


図 24 Function Generator

電圧設定装置

シリコンセンサーに LED を照射して測定を行う際、空乏層を広げるためシリコンセンサーに電圧を印加するために使用した (図 25)。本研究では設定範囲は 0 ~ 500V で測定を行った。



図 25 電圧設定装置

MCA(Multi Cannel Analyzer)

今回の実験で、入射粒子からの信号を読み出す機器として図の MCA(Multi Channel Analyzer) を使用した。MCA とは、アナログパルスの最大波高を測定し、その値をデジタル数値に変換する波高分析器である。MCA の入力レンジは 0 ~ 10V でこの入力レンジの分割数 (channel 数) を ADC ゲインで設定できる。([8]) 本研究では 16384ch に設定し測定を行った。



図 26 MCA(Multi Cannel Analyzer)

プレアンプ

プレアンプは検出器からの信号を測定に使う信号に変換させるためのもの。



図 27 Preamplifer

4.3 測定のセットアップ

図 28 に示した回路図のように接続し、測定を行った。測定時間は 1 分間で、LED をセンサーに 1 分間、10n 秒間隔で 1 回 0.5n 秒間照射し測定を行う。シリコンに光子が入射することで出てきた収集電荷量に対応するシグナルをプレアンプで検知し、暗箱の外にあるメインアンプで信号を増幅させ、それを MCA で ADC 値に変換し測定した。測定時は LED とシリコンセンサーともに暗箱の中に入れており、外の光が中に入らないようにして行っている。今回の測定環境は中性子照射前、照射後どちらの場合も常温での環境で測定を行う。

下図のように治具に空いている穴から LED の光がシリコンセンサーに当たるようにセットし測定

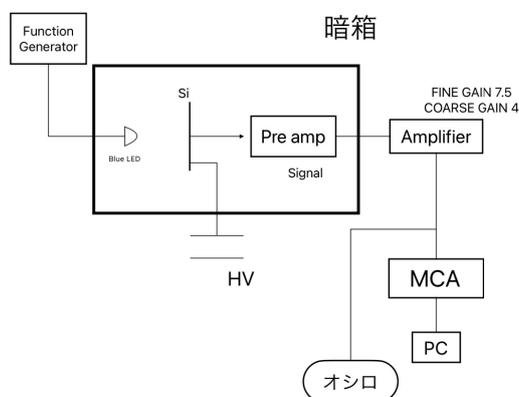


図 28 回路図

を行った。中性子照射前についてもシリコンセンサーに光が当たるようにセットし測定を行った。

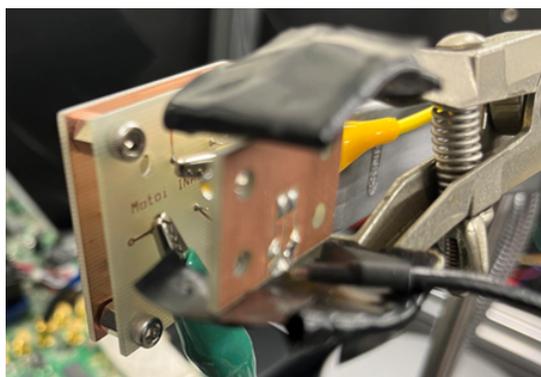


図 29 測定時の様子 (中性子照射後)

4.4 測定結果

以下は測定での結果である。印加電圧が 450V 以上のときについて、光強度が強すぎるとき正確なシグナルが見られなかったため、本研究では 0 ~ 400V の範囲のみ考える。まず初めに MCA から出力される波高分布について中性子照射前後で比較する。

中性子照射後

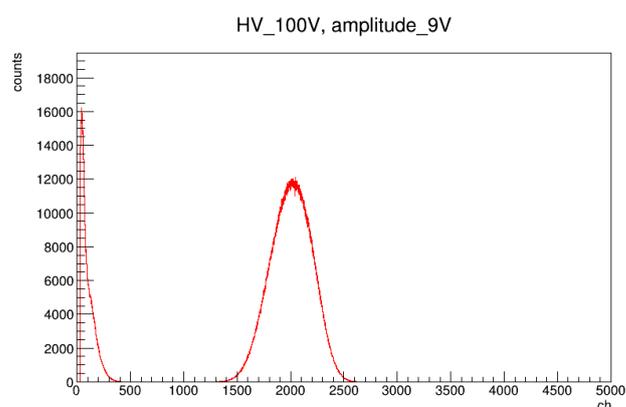


図 30 MCA からの波高分布 (中性子照射後)

上の図が中性子照射後の MCA からの波高分布である。シグナル (上図の場合だと 1300 ~ 2700 あたり) 部分の中央値の channel 数を対応した収集電荷量としてプロットする。

中性子照射前

上の図が中性子照射前の MCA からの波高分布である。この場合中性子照射後と比べ、収集電荷量の量が少ないため、シグナル部分の波形の右側のみガウスフィットさせ、その中央値をプロットする。

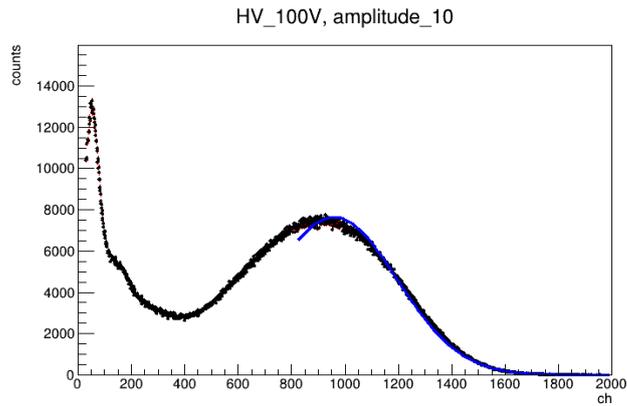


図 31 MCA からの波高分布 (中性子照射前)

これらの操作により得た値をシリコンセンサーによる応答として、本研究では「光強度依存性」と「印加電圧依存性」について調べた。

4.4.1 光強度依存性

以下の図は LED の光強度でシリコンセンサーによる応答がどう変化するかを測定した結果である。

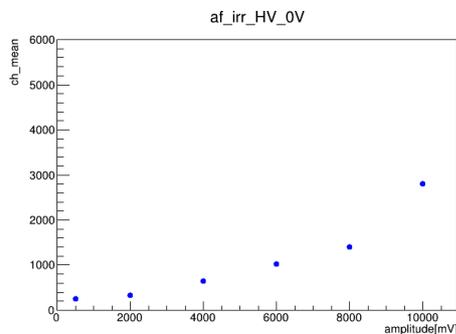


図 32 中性子照射後 - 0V

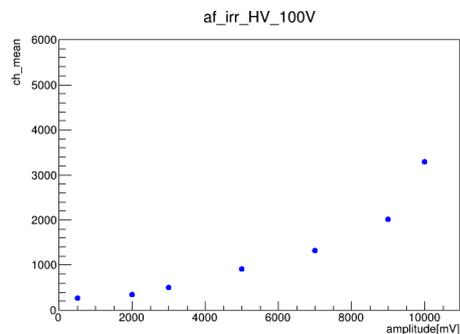


図 33 中性子照射後 - 100V

上の図 32、図 33 は中性子照射後のシリコンセンサーについて印加電圧が 0V、100V のときの LED 光強度依存性をあらわしたもので、下の図 34、図 35 は中性子照射前のシリコンセンサーについて 0V、100V での LED 光強度依存性を表したものである。中性子照射後についてはいずれの印加電圧についても 2 ~ 9V で線形性が見られることに対し、中性子照射前では 4 ~ 8V と中性子照射後に比べ線形性が見られる範囲が少ない。また、印加電圧によるシリコンの応答の変化についても中性子照射後は印加電圧が増えるごとに上昇しているのに対し、中性子照射前では変化が見られない事がわかった。また収集電荷量も中性子照射前に比べ、中性子照射後のほうが約 2 倍変化している。

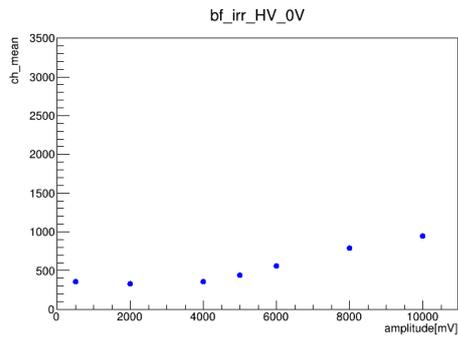


図 34 中性子照射前 - 0V

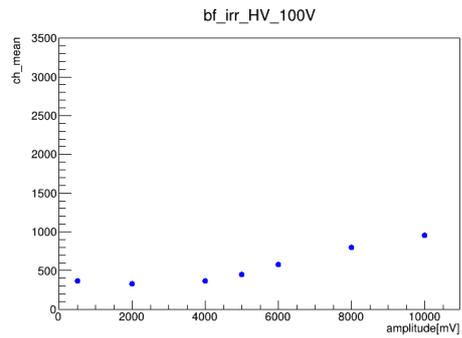


図 35 中性子照射前 - 100V

4.4.2 印加電圧依存性

ここでは中性子照射後について印加電圧によるシリコンの応答の依存性について測定した。図 36 は中性子照射後の印加電圧依存性について各光強度についてそれぞれプロットしたものである。

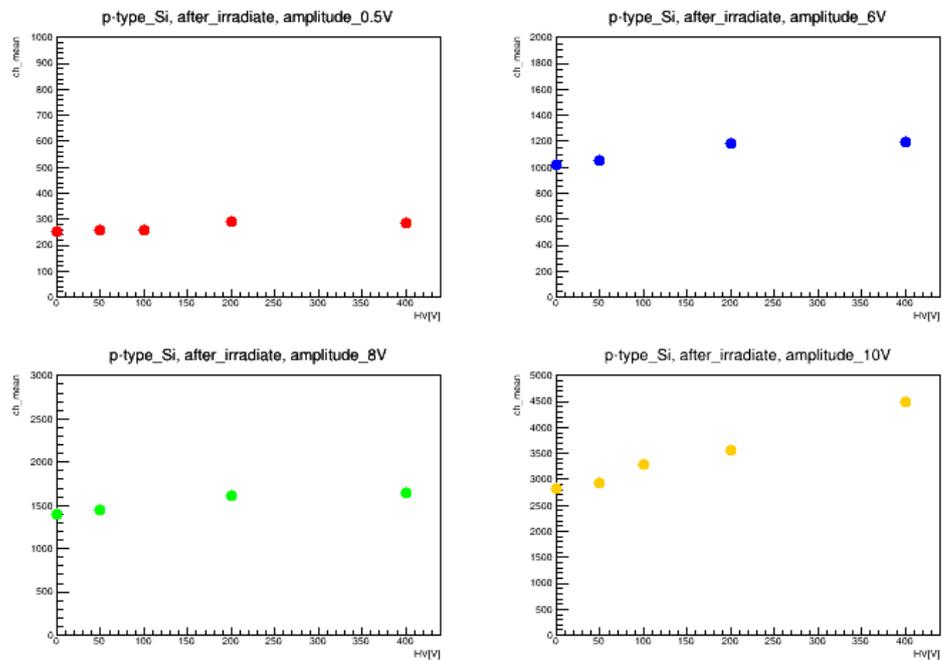


図 36 中性子照射後 - 印加電圧依存性

光強度が 10V 以外の 0.5、6、8V で印加電圧が 200V 以降シリコンからの応答が一定になっている。また、光強度依存性で線形性が見られた 6V、8V のとき、200V までは線形性が見られる。

5 まとめと今後の課題

本研究では p 型シリコンセンサーの性能評価を行うため、中性子をシリコンセンサーに照射させたものについて I-V 特性を測定し、測定環境を 50 °C 一定に保ったうえでシリコンセンサー本体の温度依存性と経過日数による変化を調べた。温度依存性については測定環境の温度が一定になってから約 10 分経過するとシリコン本体の温度は安定し、I-V 特性は温度による影響が見られなくなることがわかった。また、中性子照射後の経過日数による I-V 特性の変化については、自己発熱による影響がない 150V において測定開始日の 2022 年 5 月 20 日から 180 日経過してから今まで電流値が安定することがわかった。

もう一つ本研究で行った、青色 LED を用いて p 型シリコンセンサーの特性を測定し、中性子照射前後で比較した。光強度依存性に関して中性子照射前後で収集電荷量との線形性がどちらも見られたが、中性子照射後のほうが線形性が見られる範囲が照射前と比べ広いことがわかった。また、印加電圧依存性に関しては中性子照射前では変化が見られなかったが、中性子照射後については印加電圧が 200V 以降収集電荷量が一定になることがわかった。

LED 照射の測定について、むき出しの LED をシリコンセンサーに照射させて測定を行ったため、シグナルに揺らぎが生じた。より正確な収集電荷量を得るために、LED の照射位置を補強するなど工夫を行う必要がある。

今後の課題として、2023 年 3 月理化学研究所にて p 型シリコンセンサーの中性子照射が行われた。今回の測定では中性子照射前後でそれぞれ 1 つのシリコンセンサーのみ行ったため、今回照射されたシリコンセンサーについて今後調べる予定である。

参考文献

- [1] "LHC-ALICE 実験の高度化に向けたシリコン電磁カロリメータ開発と性能評価"
令和元年度 奈良女子大学大学院 数物科学専攻 高エネルギー物理学研究室 港 陽子
- [2] LHC-ALICE 実験 日本グループ、<http://alice-j.org/>
- [3] 高エネルギー加速器研究機構、News@KEK、
<https://www2.kek.jp/ja/news/highlights/2010/CGC.html>
- [4] Particle Data Group (2019),"Passage of Particles Through Matter",
pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2018-rev-passage-particles-matter.pdf
- [5] 半導体基礎知識—半導体製品—新電元工業株式会社-Shindengen、
<https://www.shindengen.co.jp/products/semi/column/>
- [6] "LHC-ALICE 実験の高度化に向けたシリコン電磁カロリメータのためのシリコンセンサーの性能評価"、2021 年度 奈良女子大学 数物科学科 高エネルギー物理学研究室 波多美咲
- [7] ALICE Collaboration(2019), "A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment",
<https://cds.cern.ch/record/2696471/files/focal.pdf>
- [8] "LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用電磁カロリメータ開発に向けた p 型シリコンセンサーの動的特性の測定"、令和 2 年度 筑波大学理工学群物理学類卒業論文 麻谷有輝
- [9] "LHC-ALICE 実験 超前方領域光子測定用電磁カロリメータ開発に向けた P 型シリコンセンサーの性能評価"、令和 2 年度 筑波大学理工学群物理学類卒業論文 榎本真隆

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にご支援、ご協力いただき心から感謝いたします。特に指導教官である下村先生、蜂谷先生には大変お世話になりました。ミーティングや個別で質問させていただいた際、データの解析方法や検出器についての知識など様々なことを教えていただきました。心から感謝を申し上げます。宮林先生、研究室の先輩方にはミーティングなどで様々なアドバイスをいただきました。ありがとうございます。

また、測定を行うために筑波大学に訪問をさせていただいた際、中條先生、Abderrahmane Ghimouz さんには測定方法など教えていただき大変お世話になりました。感謝を申し上げます。

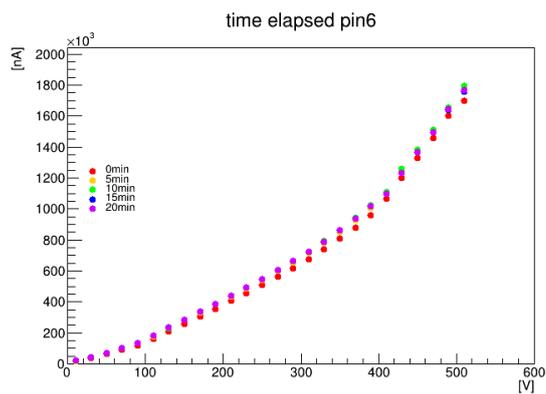
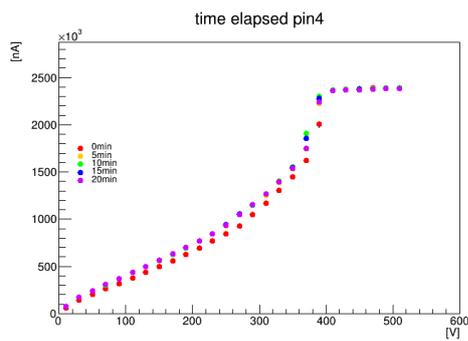
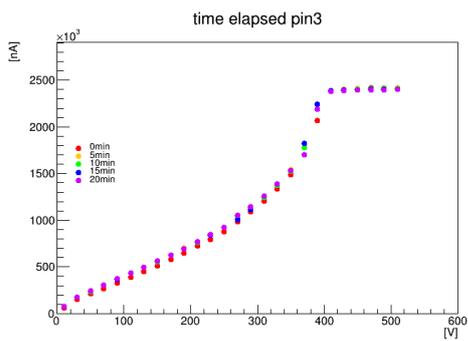
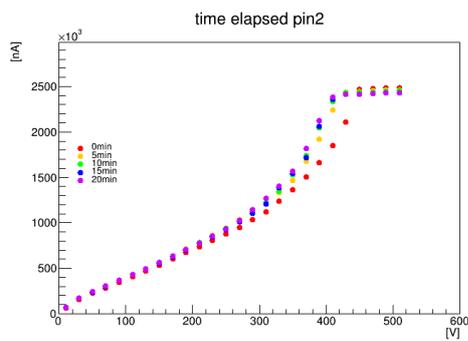
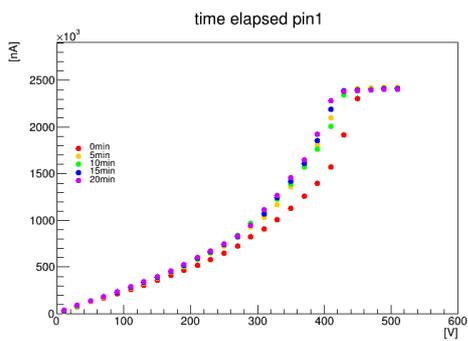
また FoCal グループの皆様には今年度様々な場所に出張で訪れ、ご一緒した際に気にかけてくださり、質問した際にも物理的知識など教えていただき大変お世話になりました。ありがとうございました。

そして同じ研究室で1年間一緒に過ごした、同期の水上さん、加納さん、辻端さん、藤原さん、岡田さんにもお互いわからないところを質問しあったりと大変お世話になりました。感謝を申し上げます。

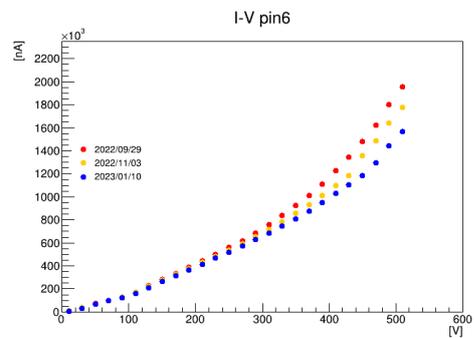
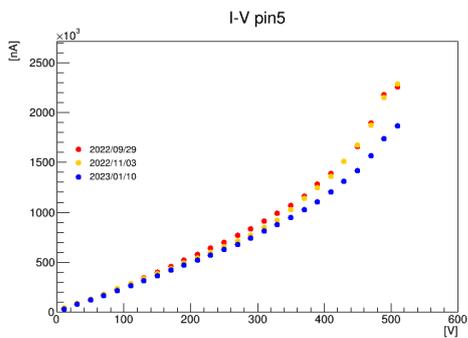
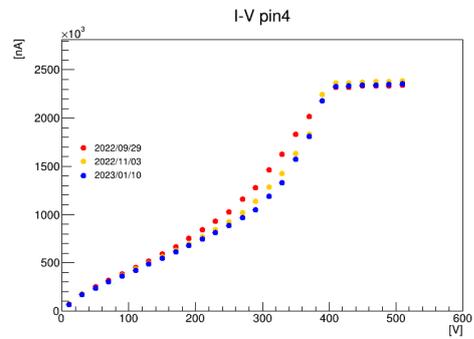
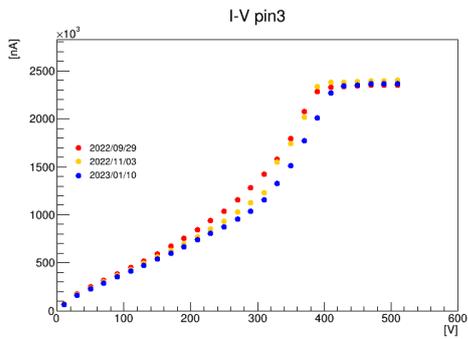
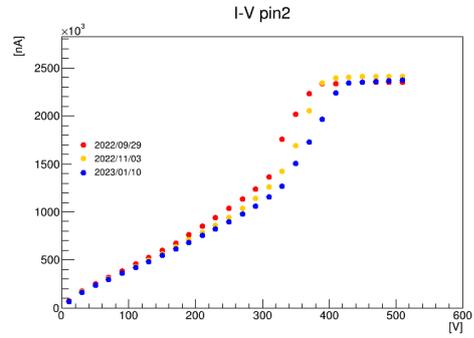
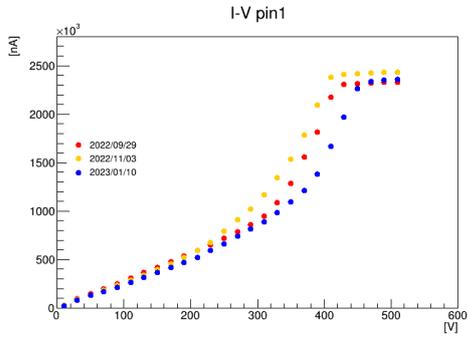
本研究を進めるにあたり、支えとなったすべての皆様にこの場を借りて心から重ねてお礼申し上げます。

付録 A - I-V 特性

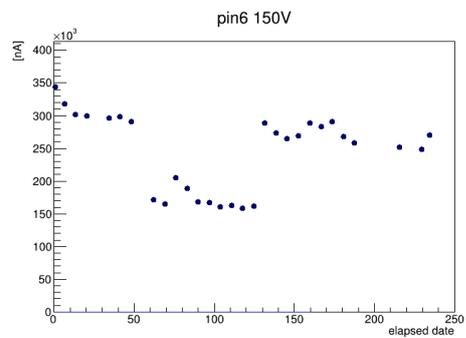
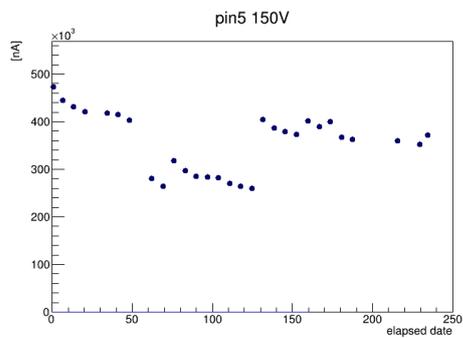
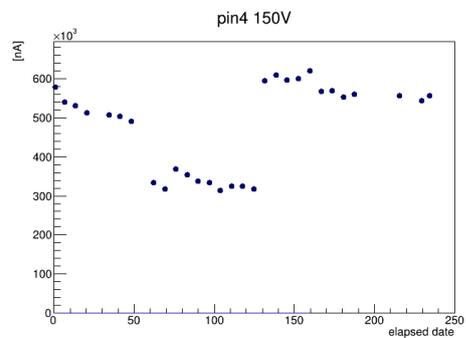
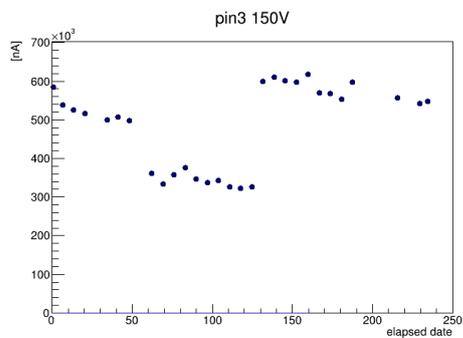
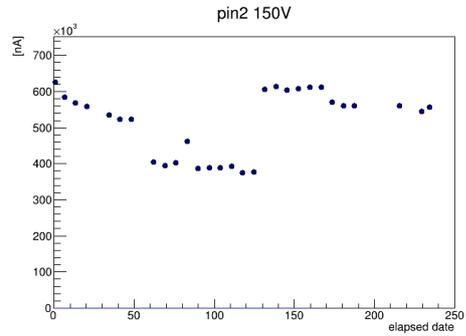
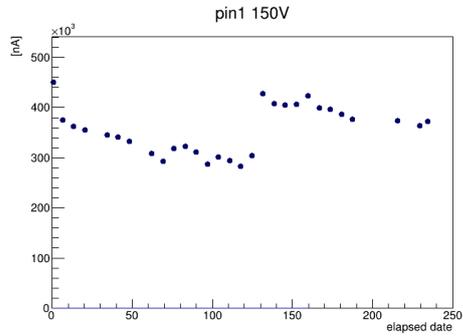
温度依存性



経過日数

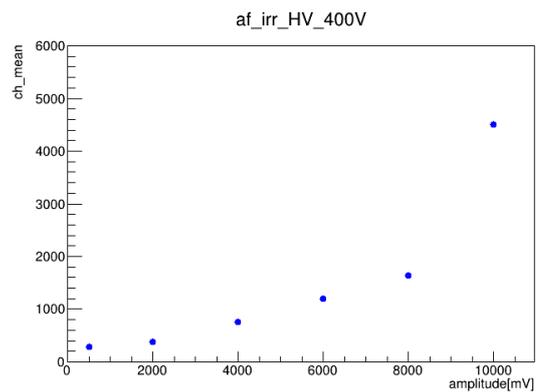
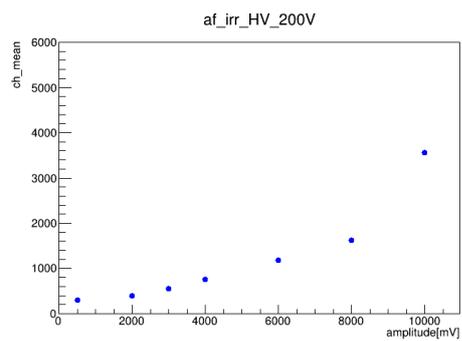
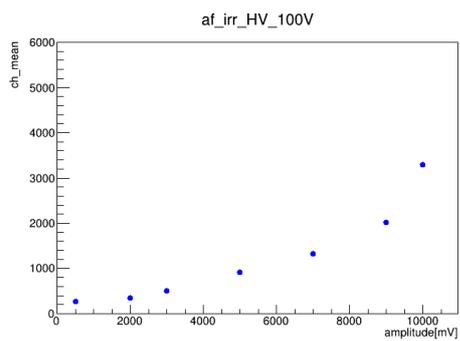
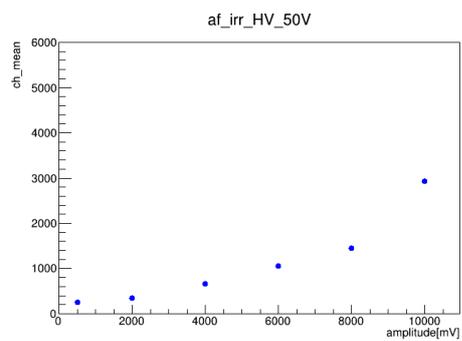
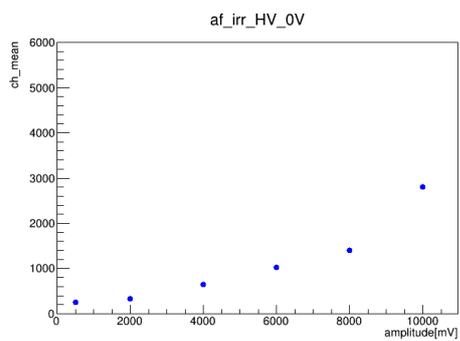


経過日数 - 150V



付録 B - LED 照射

光強度依存性 (中性子照射後)



光強度依存性 (中性子照射前)

