

卒業論文

X線発生装置を用いたTES型マイクロカロ リメータの測定

東京都立大学 理学部物理学科 宇宙物理実験研究室

笠松 健太郎

目次

1	目的	6
1.1	X線天文学	6
1.2	本研究の目的	6
2	TES型マイクロカロリメータと極低温冷凍機	8
2.1	TES型マイクロカロリメータの原理	8
2.2	極低温冷凍機	9
3	X線発生装置 (<i>generator</i>)	12
3.1	X線発生装置によるX線発生機構	12
3.2	X線蛍光 (<i>X-ray fluorescence</i>)	13
3.3	X線発生装置の性能評価	13
3.3.1	本装置の性能	13
3.3.2	本装置の危険性	14
3.4	X線2次 targetbox	14
3.4.1	X線2次 targetbox の構造	15
3.4.2	X線2次 targetbox の安全性能	16
4	比例計数管 (<i>proportional counter</i>)	17
4.1	比例計数管の原理	17
4.2	エスケープイベント (<i>escape-event</i>)	18
4.3	使用する比例計数管	18
4.3.1	比例計数管の構造と性能	18
4.3.2	比例計数管の印加電圧	19
4.4	データの取得と解析方法	19
5	比例係数管での測定	21
5.1	1次X線のエネルギースペクトル	21
5.1.1	emission 電流と countrate の関係	22
5.1.2	印加電圧と countrate の関係	22
5.2	2次X線のエネルギースペクトル	23
5.2.1	鉄線源での測定	23
5.2.2	各 target でのスペクトル取得	24

5.2.3	target — Cu	25
5.2.4	target — Zn	27
5.2.5	target — Fe	28
5.2.6	target — Ti	29
5.2.7	target — Ge	30
5.3	target 全般の考察	31
6	X 線入射窓の製作	33
7	断熱消磁冷凍機、X 線発生装置、X 線 2 次 targetbox の接続	36
8	TES 型マイクロカロリメータでの測定	39
8.1	各 target でのスペクトルの取得	39
8.1.1	target — Cu	40
8.1.2	target — Ge	40
8.1.3	target — Ti	41
8.2	target 全般の考察	42
8.3	理論的な countrate 値の算出	42
8.4	取得スペクトルと 2 次 target の大きさとずれ	48
9	まとめと課題、問題点	49

図一覧

2.1	TES 型マイクロカロリメータの動作概略	8
2.2	極低温冷凍機内に設置した TES 型マイクロカロリメータ	9
2.3	断熱消磁冷凍機 — ADR(<i>Adiabatic Demagnetization Refrigerator</i>)	10
2.4	ASTRO-E に搭載された半導体カロリメータ (<i>XRS</i>) 用 ADR。中央の He insert の 中に ADR の中心部となる saltpill がある。	10
2.5	ADR が導入された個体 Ne デュワー	10
3.1	generator(<i>OXFORD-INSTRUMENTS series5000.xrc50-50</i>)	13
3.2	generator の Be 窓	13
3.3	generator 内の 1 次 target	14
3.4	X 線 2 次 targetbox	15
3.5	X 線 2 次 targetbox の各 target	15
3.6	2 次 targetbox の設計図	15
3.7	コリメート用部品	15
4.1	比例計数管	17
4.2	比例計数管の動作原理概要	17
4.3	比例計数管概要	18
4.4	Be 膜のサポート構造	18
5.1	HV:10kV、emision 電流:0.2mA	21
5.2	HV:10kV、emision 電流:0.8mA	21
5.3	HV:30kV、emision 電流:0.2mA	21
5.4	emision 電流と count の関係	22
5.5	HV と count の関係	22
5.6	Be 窓上に設置した鉄線源の様子	23
5.7	鉄線源のスペクトル。下は escape ピーク部を抜き出したもの。	23
5.8	エネルギーと channel の関係	24
5.9	測定のセットアップ概要図	24
5.10	測定セットアップ写真	24
5.11	Cu のスペクトル全体図	25
5.12	近似した Cu のスペクトル	25
5.13	ガウス分布として近似した Cu のスペクトル	26

5.14 Zn のスペクトル全体図	27
5.15 近似した Zn のスペクトル	27
5.16 Fe のスペクトル全体図	28
5.17 近似した Fe のスペクトル	28
5.18 Ti のスペクトル全体図	29
5.19 近似した Ti のスペクトル	29
5.20 別のパターンとして近似した Ti のスペクトル	30
5.21 Ge のスペクトル全体図	31
5.22 近似した Ge のスペクトル	31
6.1 X 線入射窓の概念図	33
6.2 3K shield に導入した X 線入射窓の様子	34
6.3 detector table に導入した X 線入射窓の様子	34
6.4 現在の入射窓の X 線透過率	34
6.5 これからの目標とする入射窓の X 線透過率	35
7.1 真空装置接続全体図	37
7.2 generator と targetbox の接続	37
7.3 非金属部分	37
7.4 generator と非金属部分の接続 no.1	37
7.5 generator と非金属部分の接続 no.2	38
7.6 targetbox と ADR の接続	38
7.7 targetbox とフレキシブルチューブとの接続	38
7.8 フレキシブルチューブと ADR の接続	38
8.1 カロリメータでの測定セットアップ概要図	39
8.2 カロリメータでの測定セットアップ写真	39
8.3 target Cu におけるスペクトル	40
8.4 target Ge におけるスペクトル	41
8.5 target Ti におけるスペクトル	41
8.6 比例計数管の efficiency	43
8.7 このセットアップでの X 線透過率	44
8.8 カロリメータ (素子 <i>sii32</i> の X 線透過率)	45
8.9 カロリメータの X 線量子効率	45

表一覧

3.1	Fe の X 線阻止能の見積り	16
5.1	target Cu の主要なピーク	26
5.2	target Zn のそれぞれのピーク	27
5.3	target Fe の主要なピーク	28
5.4	target Ti のそれぞれのピーク	29
5.5	target Ti の別の fitting でのそれぞれのピーク	30
5.6	target Ge のそれぞれのピーク	31
5.7	各 target における測定結果	32
8.1	各 target における測定結果	42
8.2	各 target からの countrate 値	46
8.3	現在のセットアップでのカロリメータでの理論 countrate 値	46
8.4	真空装置接続後のカロリメータでの理論 countrate 値	47
8.5	目標とする shield を確立した時の TES での理論 countrate 値	47

第 1 章

目的

1.1 X 線天文学

可視光領域の天文学は非常に古い歴史をもつが、X 線天文学は 1962 年に Giacconi らがロケット実験を行い、全天で最も明るい X 線源である Sco X-1 が偶然発見されてから始まった。

X 線は波長 0.3~10Å(光子のエネルギー 1~30keV) 程度である。宇宙からの X 線は大気に完全に吸収されるため、地上での観測は不可能である。1960 年代には小型の観測ロケットにより X 線天体について断片的な知識が集められ始めたが、1970 年に世界初の X 線天文衛星 *Uhuru*(米) が登場し、全天走査の結果約 400 個の X 線天体をリストアップすることで研究は大きく飛躍した。その後は各国のそれぞれ特徴を持った観測器が次々に打ち上げられ、それらの幅広い活躍により X 線という波長は宇宙物理学にとって不可欠な窓として確立されてきた。現在では、ブラックホール、中性子星、超新星残骸、活動銀河核、銀河団などを筆頭に、ほとんどすべての天体が大なり小なり X 線を出していることが知られており、カタログ化された X 線天体は 10 万個以上にもなっている。日本では、1979 年に日本初の X 線天文衛星「はくちょう」が登場し、その後は「てんま」、「ぎんが」、「あすか (ASCA)」と 4 つの衛星が打ち上げられ、多くの成果を挙げてきている。

衛星が次々と打ち上げられると同時に、X 線検出器もめざましく進歩した。シンチレーター、比例計数管から、半導体検出器へと移り、現在では、高分解能で観測を行うカロリメーターや超伝導体を利用した検出器などの開発が行われている。

2000 年 2 月に打ち上げを試みた ASTRO-E 衛星はカロリメーター検出器 (XRS) を搭載し、エネルギー分解能は $\Delta E_{FWHM} \sim (k_B T^2 C)^{1/2}$ と、入射 X 線のエネルギーに依らず、 $\Delta E \leq 12\text{eV}$ という X 線天文学上最良のエネルギー分解能で X 線観測を行う予定であった。しかし、ASTRO-E 衛星は残念ながら軌道にのせることができず、その再挑戦機として現在 ASTRO-E2 を製作中である。

1.2 本研究の目的

当研究室は、将来衛星に搭載することを目標として、XRS を超えた、さらなる分解能、性能の向上を目指した TES 型マイクロカロリメーターの研究、また、その動作環境を構築する極低温冷凍機の研究を行っている。

カロリメーターによる測定を重ねていくわけだが、現在使用している冷凍機は、カロリメーターの動作領域が極低温ということから、外部との接触を一切遮断し、冷凍機内部に放射線源を入

れることによって X 線のスペクトルを取得する、という形でのみ実験が可能であった。それに対し、X 線入射窓を冷凍機内に設置し外部入射が可能となると、X 線発生装置を用いることにより、一度の冷却実験でエネルギー、count rate の異なる X 線での測定が複数回可能となり、実験自体の効率を上げ、X 線発生装置のスイッチを off にすることにより、background の測定をも一度にすることが可能となる。また、入射窓設置による外部環境がカロリメータに及ぼす影響、カロリメータの X 線強度変化依存性、エネルギー変化依存性、角度依存性などは世界的にもまだあまり知られていない事柄であり、そのシステムを構築することでカロリメータにおいて様々な実験に応用することができる。

本研究はその一連の動作環境を構築することを目的としたもので、具体的には X 線発生装置の立ち上げと、比例計数管での X 線強度測定、断熱消磁冷凍気 (ADR) との接続、冷凍機の X 線入射窓の製作、さらに実際に TES 型マイクロカロリメータを用いて測定を行なった結果をまとめる。

第 2 章

TES 型マイクロカロリメータと極低温冷凍機

2.1 TES 型マイクロカロリメータの原理

カロリメータとは X 線が入射した際のわずかな温度上昇を捕えることで高いエネルギー分解能を得ることのできる検出器。温度変化を捕える方法は抵抗変化を捕えたり、磁場変化を捕えるなどの方法が取られている。このうち TES 型マイクロカロリメータは、温度計として超伝導体を使用し、超伝導遷移端という温度に対してとても敏感な抵抗変化を利用する検出器のことである。

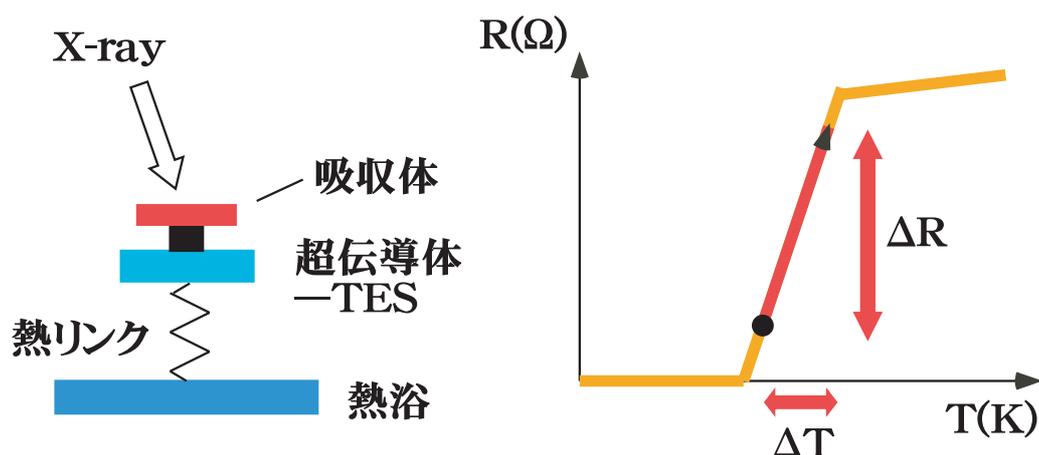


図 2.1: TES 型マイクロカロリメータの動作概略

図 2.1 が TES 型マイクロカロリメータの簡単な動作原理。極低温でのもと超伝導状態にあるカロリメータが X 線を吸収すると、入射 X 線のエネルギーに比例して温度上昇が見られ、抵抗値が上昇する。その抵抗値の変化を電流値の変化として見ることで、X 線を測定する。図 2.2 が冷凍機内に設置した TES 型マイクロカロリメータ (素子 *sii13*) の様子。大きさは数 mm。細かい配線が周囲にめぐらされている。

検出したい X 線のエネルギー範囲は 0.1~10keV ないし 20keV 程度だが、仮に 100keV としても $1.6 \times 10^{-12} \text{J}$ にしか相当しないので、通常の方法ではこの熱を感知することはできない。しかし X 線を吸収する吸収体の比熱を C とすれば X 線入射による微小な温度変化は $\Delta T = E/C$ なので、熱容量を非常に小さくする、すなわち吸収体を小さくし、かつ極低温にすることで ΔT を大きくでき、十分感知することが可能となる。比例係数管やシンチレーション検出器のような放射線検出器では、X 線入射によって生成されるイオン数の揺らぎがエネルギー分解能をほぼ決めているが、カロリメータの場合は温度を測定するので分解能は熱的ノイズなどで決まる。これを計

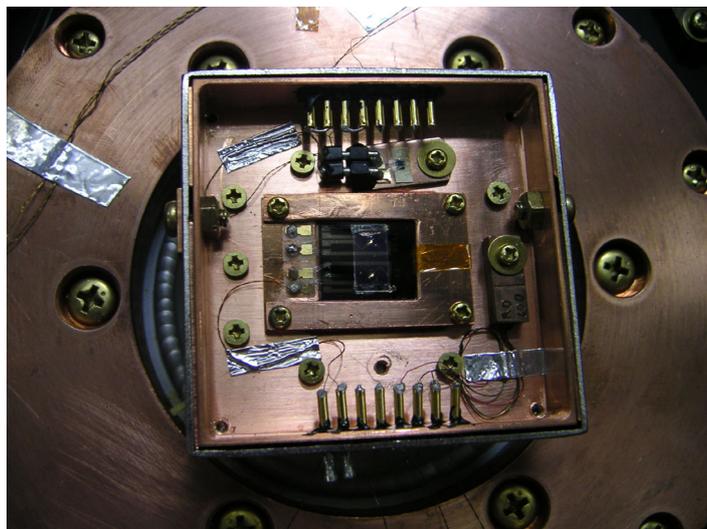


図 2.2: 極低温冷凍機内に設置した TES 型マイクロカロリメータ

算すると、エネルギー分解能は FWHM(半値幅) で、

$$\Delta E_{\text{FWHM}} = 2.35\xi\sqrt{k_B T^2 C(T)} \quad (2.1)$$

ここで ξ は α で決まるパラメータ* で、 α の大きい方が ξ が小さい。 k_B はボルツマン定数である。

上式より、 α が大きくなればエネルギー分解能は基本的に良くなる。よってこの α を大きくしようというのが TES 型カロリメータである。TES 型カロリメータは温度計として超伝導体を使い、これの超伝導遷移端を動作点として使用することで、温度に対して高い抵抗感度を持たせている。

2.2 極低温冷凍機

高いエネルギー分解能が期待できるカロリメータは、その目的と動作原理より、100mK 以下という極低温で動作させる必要がある。現在この 100mK 以下の状態を作り出せる冷凍機は希釈冷凍機と断熱消磁冷凍機の二つしか存在しない。

希釈冷凍機は液体 3 ヘリウム (以下 ^3He) と液体 4 ヘリウム (以下 ^4He) を分留、混合することで冷却する冷凍機である。 ^3He と ^4He の混合液は、臨界温度 0.76 K 以下で ^3He -濃厚層 (*concentrated phase*) と ^3He -希薄層 (*dilution phase*) の 2 つの層に分離する。 ^3He は ^4He に比べ軽いので、concentrated phase は dilution phase の上に浮かぶことになる。 ^3He のエンタルピーは 2 つの層で異なり、 ^3He を concentrated phase から dilution phase へ希釈混合させることにより冷却が起こる。希釈冷凍機は ^3He を外から排気、導入する循環運転をしており、循環速度を上げることで大きな冷凍能力が得られる。また冷凍サイクルが磁場などにほぼ影響を受けないため、現在の地上の実験室で使用されている冷凍機はほとんどが ^3He - ^4He 希釈冷凍機である。しかし希釈冷凍機は ^3He と ^4He 混合液の 2 層分離を利用しており、無重力状態の宇宙空間では使用できない。宇宙空間で 100mK 以下の極低温を作り出すには、もうひとつの断熱消磁冷凍機—ADR[†] が必要となる。

断熱消磁冷凍 (図 2.3) は常磁性体 (*salt pill*) を冷媒として、磁場を用いて温度とエントロピーのカルノーサイクルを作り出して冷却する磁気冷凍システムである。常磁性体は低温で強磁性とな

* α はカロリメータの温度と抵抗から見積られるパラメータで、通常はカロリメータの動作温度における温度変化と抵抗変化の関係から $\frac{d \log R}{d \log T}$ で表す。すなわち温度計の感度である。

[†] ADR : Adiabatic Demagnetization Refrigerator の略



図 2.3: 断熱消磁冷凍機 — ADR(*Adiabatic Demagnetization Refrigerator*)

リエントロピーがさがるため、低温にて大きな比熱を持ち得るため冷媒として使用することができる。断熱消磁冷凍は希釈冷凍と違って個体冷媒をデュワー内にあらかじめ封入させる必要があるため、冷凍能力については希釈冷凍に劣る。しかし断熱消磁冷凍ではその冷凍サイクルに重力を使用しないため、宇宙空間でも使用可能である。また冷媒に個体を使用しているため、ヒーターを用いて温度制御する希釈冷凍機よりも高い温度安定性を実現できる。



図 2.4: ASTRO-E に搭載された半導体カロリメータ (*XRS*) 用 ADR。中央の He insert の中に ADR の中心部となる salt pill がある。



図 2.5: ADR が導入された個体 Ne デュワー

図 2.4 及び 2.5 は、日本の 5 番目の X 線天文衛星 ASTRO-E に搭載された半導体型マイクロカロリメータ (*XRS*) 用の ADR のデュワーである。個体ネオンを予冷用冷媒に使用した冷凍機で、宇宙空間では一回の断熱消磁冷凍で動作温度 60mK を 36 時間保持できると設計されていた。このように、衛星搭載用 X 線検出器を開発するにあたって、宇宙空間にて極低温動作環境を作り出す

のに今のところ ADR は不可欠である。

検出器の地上試験では希釈冷凍機が多く使用されているが、温度安定性と冷却の手軽さで ADR が勝る。また ASTRO-E に搭載されていた半導体マイクロカロリメータはほとんど磁場に影響されずに動作するが、TES 型マイクロカロリメータは超伝導体を使用しており、ADR の冷凍サイクルが作り出す磁場の影響が懸念される。ADR を用いて TES の開発を行なっている研究チームは世界にいくつかあるが、磁場が TES にどのような影響を与えているか具体的に調べた例はあまり報告されていない。

第 3 章

X 線発生装置 (*generator*)

外部からカロリメータに当てる X 線は冷凍機内部に設置する各 shield に対してある程度の透過率をもっていなければならない、また、約 200mm ほど前方にある $200\mu\text{m}\phi$ という小さなコリメータ穴を通過しても、なお測定を行う上で十分な countrate を保てるものでなくてはならない。線源として原子の崩壊の使用を考えると、日本の法律で使用可能な強度があり、例えその最大のものを手に入れても到底目的とする強度を得ることができない (海外では強い線源が使えるので、例えば入射窓の立体角を大きくして、線源側と素子側とにコリメータを設け、線源側を動かすことで $100\mu\text{m}$ 単位の位置依存性を一度に測定したりできたりする。)。また、いろいろなエネルギーの X 線を当てて測定を行うという点でも不利益を生じる。そのため、X 線発生装置 (*generator*) を立ち上げ、それによる X 線を使用する。

3.1 X 線発生装置による X 線発生機構

4~50kV の高電圧を generator の filament につけ、電子を加速し、一次 target にぶつける。高速電子が物質と相互作用すると、そのエネルギーの一部は制動放射の形で電磁放射線に変換される。電磁放射線に変換する電子でエネルギーの割合は電子エネルギーが増加するにつれて増加する。また、吸収物質の原子番号が大きい程その値は大きくなる。

この filament からくる電子により、励起過程によって target の原子の軌道電子が正規の配列から外されると、この電子は短時間の間、励起状態になる。通常固体内では、1ns あるいはそれ以下の時間内に電子は原子の最低エネルギー、すなわち基底状態に戻って再配列する性質を持っている。このように励起状態から基底状態への遷移時に放出されるエネルギーは特性 X 線 (固有 X 線) の形をとり、そのエネルギーは初期状態と最終状態間のエネルギーの差になる。例えば、K 殻に 1 個の空孔が一次的にできたとすると、その後、電子がこの空孔に埋められる際に K 系列の特性 X 線が放出される。空孔を埋める電子が L 殻からくる場合には、K 殻と L 殻の結合エネルギーの差に等しいエネルギーを持つエネルギーを持つ K_{α} 光子が放出される。M 殻から電子がくる場合には、少しエネルギーの大きな K_{β} 光子が放出される。いろいろなエネルギーの特性 X 線が同じ量だけ放射されるというわけではなく、その割合は蛍光収率 (*flourescent yield*) に従い、実験的に定義されている。

3.2 X 線蛍光 (*X-ray fluorescence*)

導入する X 線発生システムには交換可能ないろいろな物質からの特性 X 線を発生させることができる、という性能が求められ、その X 線には制動放射による連続成分の混入ができるだけ少ない方が望ましい。そのため、一連のシステムにおいて、外部放射線による励起 (X 線蛍光—*X-ray fluorescence*) を利用する。

generator から放射された X 線を新たな物質 (2 次 target) にぶつける。この時、光電吸収によって物質内で相互作用し、励起電子を作り出す。物質内の多数の励起原子は引き続いて特性 X 線を放出しながら基底状態へと遷移するので、この物質はすなわちこれらの X 線の線源として働く。

放出される X 線のエネルギーは target 物質に依存する。原子番号 Z の小さい target は軟らかい X 線を放出するし、 Z の大きい target は高エネルギーの X 線を発生する。対応する原子の遷移を起こす励起状態が入射放射線によって作られるためには、入射放射線は target から出てくる X 線の最大エネルギーよりも大きなエネルギーを持つ必要がある。また、この時の特性 X 線スペクトルには入射 X 線ビームからの散乱光子が混入するが (コンプトン散乱)、target 物質と配置を適当に選ぶことによってその成分を全光子収量の 10~20%以下に減らすことができる。

3.3 X 線発生装置の性能評価

3.3.1 本装置の性能



図 3.1: generator (OXFORD-INSTRUMENTS series5000.xrc50-50)

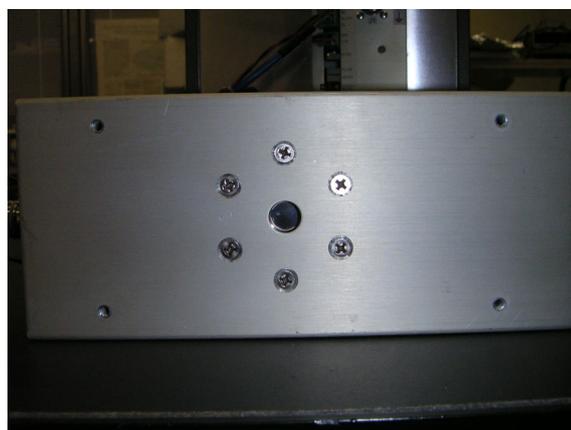


図 3.2: generator の Be 窓

使用する generator は cool-x、manson-generator といくつか候補が挙がったが、結局 OXFORD-INSTRUMENTS の series5000.xrc50-50 (松定プレジジョン社 (株)、図 3.1) となった。ボタン操作で外部から印加電圧 (最大 50kV) と emission 電流 (最大 1.0mA) を変えることができる。generator 内に装備する 1 次 target は W、Mo、Rh、Ag、Pb から選ぶことができ、W を使用している。この generator から放射される X 線は励起用のもので、2 次的に他の target に当てることより測定を行なうものとして作られている。図 3.3 にあるように、放射窓は Be (図 3.2) で、 $125\mu\text{m}$ 、 $11.43\text{mm}\phi$ 。target から Be 窓までの距離は 32.5mm、角度は 25 度になるように設計されている。

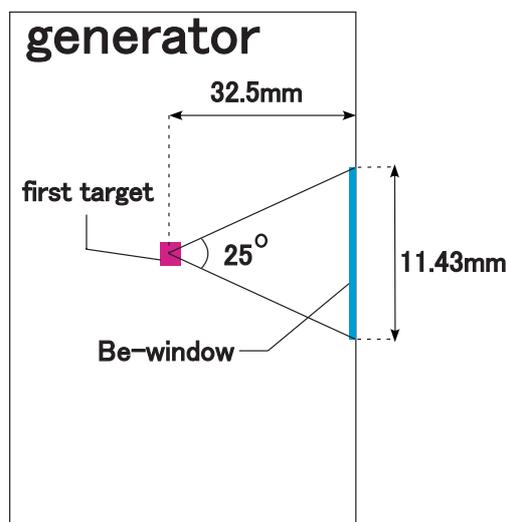


図 3.3: generator 内の 1 次 target

3.3.2 本装置の危険性

本装置はかなり危険である。小さくて扱いやすく、操作時に油断しがちだが危険物として扱った方がよい。特に注意すべき点を挙げておく。

- 本体には高電圧がかけられる割には、以外に細い導線が使用されており、接続部も比較的容易に取り外しが可能。
- 1 次 target からの X 線は必ずしも Be 窓だけから放射されるとは限らない。X 線発生中、ガイガーカウンターで装置の側面を調べてみるとかなりの photon 数を検出する。X 線発生時には本体のまわりにも光電吸収率の大きい鉛板 ($Z = 82$) の shield を必ず設置すること。
- 実験終了後、HV と emission 電流を 0 にしたとしても安心してはならない。generator 内に電子が残っていて、しばらくの間は X 線が放出され続ける。

初めてこの generator を使用する者は必ずマニュアルに目を通しておくこと。

3.4 X 線 2 次 targetbox

1 次 target から放射された X 線を 2 次 target に当てるために X 線 2 次 targetbox(図 3.4) を用いる。

空気の吸収を防ぐために将来的に generator からカロリメータの間を真空にするわけだが、この 2 次 targetbox は回転導入端子と回転面を 45 度傾けることのできるユニバーサルジョイントを使用しているので、外部から 2 次 target を交換でき、実験中に真空から大気圧にいちいち戻す必要がない。試料は一度に 6 つまで装着可能。図 3.5 にあるように現在、Fe(6.40keV)、Ge(9.89keV)、Zn(8.64keV)、Ti(4.51keV)、Cu(8.05keV) の 5 つを設置している。各 target は基本的には 16×16mm の正方形で、厚みは 1mm だが、Ge では形状に凹凸が生じていて、また、ネジ穴が一つ破損してしまっているため Zn ではその部分を切り取る形で設置している。現在使用していない箇所は Al(1.49keV) を設置する予定。このエネルギーの X 線は、targetbox 内の距離のみで空気にすべて吸収されてしまうのでまだ取り付けていない。各装置間を真空にしてから設置する予定である。



図 3.4: X 線 2 次 targetbox

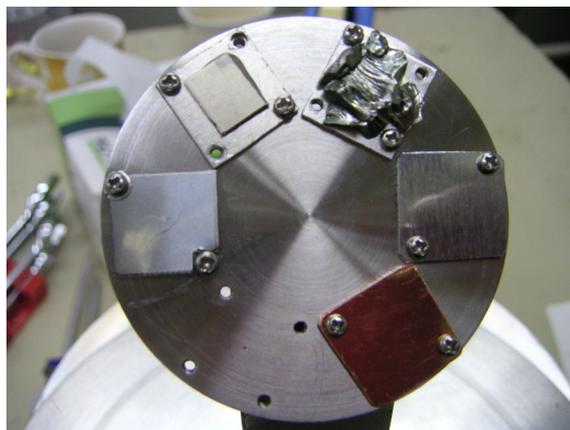


図 3.5: X 線 2 次 targetbox の各 target

3.4.1 X 線 2 次 targetbox の構造

X 線 2 次 targetbox の構造図を載せておく。

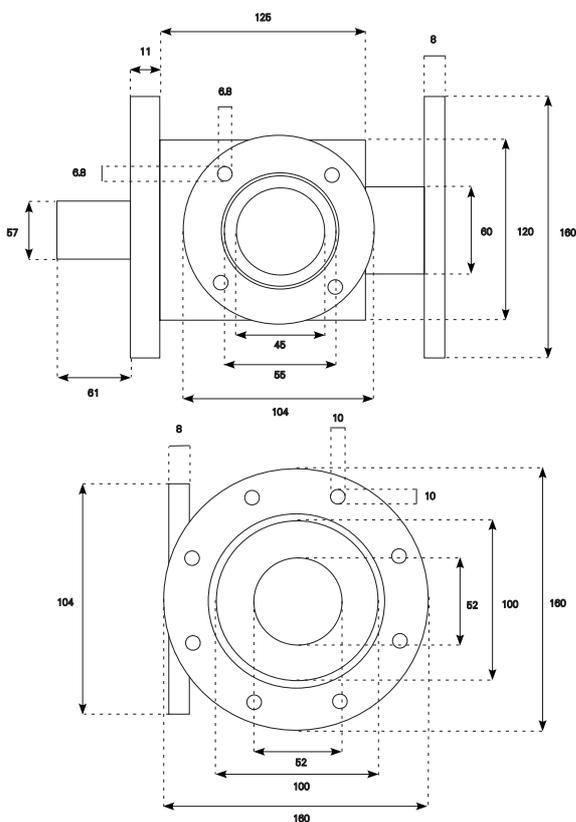


図 3.6: 2 次 targetbox の設計図

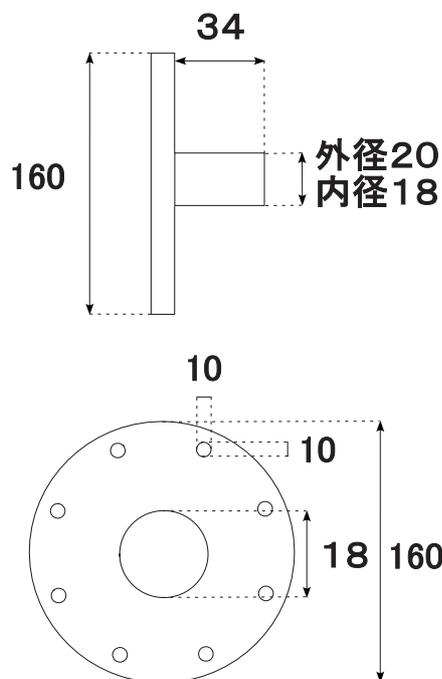


図 3.7: コリメート用部品

コリメート用の部品が用意されていて、1 次 X 線を 2 次 target に当てる時に使用する。そうすることで測定する 2 次 X 線には 2 次 target からの特性 X 線のみが検出できる。構造上、1 次 X 線の入口と 2 次 X 線の出口を逆にしても使用できるが、そうするとこの部品では筒の穴が大きすぎてきちんとしたコリメートとしては役割を果たさない。そのような場合には装置間に距離を持たせてやるか、そのことを考慮したコリメータを検出器前などに設置することが必要である。

3.4.2 X 線 2 次 targetbox の安全性能

X 線 2 次 targetbox を使う上でのその安全性を記しておく。

X 線 2 次 targetbox はステンレス製 (SUS304) で、一番薄いところで厚さ 2mm である。SUS304 は 18-8 ステンレスと言われ、密度 7.9g cm^{-3} 、融点 1400 ^{26}Fe に、 ^{24}Cr 18~20%、 ^{28}Ni 8~11 %、 $^{25}\text{Mn} \leq 2\%$ 、 $^{14}\text{Si} \leq 1\%$ の合金である。

2 次ターゲット BOX を、近似的に密度 7.9g cm^{-3} の Fe 出来ていると考える。Fe の質量吸収係数から計算した結果を Table 3.1 に示す。2mm の厚みでは 41.2keV の X 線は約 99.5% 吸収される

表 3.1: Fe の X 線阻止能の見積り

Energy (keV)	質量吸収係数	吸収係数	1/e になる厚み (mm)
4.944	155	1224.5	8.17×10^{-3}
5.886	83.9	662.81	1.51×10^{-2}
8.240	288	2275.2	4.40×10^{-3}
10.30	162	1279.8	7.81×10^{-3}
15.45	53.6	423.44	2.36×10^{-2}
20.6	23.9	188.81	5.30×10^{-2}
24.72	14.2	112.18	8.91×10^{-2}
30.9	7.54	59.566	1.68×10^{-1}
41.2	3.35	26.465	3.78×10^{-1}

ことになる。光電吸収される確率は原子番号を Z とすると、 Z に比例して大きくなる。Cr が 20%、Ni が 10% 程度入っているのので、吸収は小さくなると思われるが、それでも 99.3% は吸収される。

安全性は、X 線発生装置の使う強度によって考えなければならない。高エネルギーの X 線を強い強度で放射する場合はさらに鉛板 ($Z = 82$) を shield をして使うべきである。

第 4 章

比例計数管 (*proportional counter*)

実際に TES 型マイクロカロリメータを用いた測定を行う前に、2 次 target からどのような X 線が、どのくらい放射されているかを調べるため、常温で使用でき、色々なエネルギーの X 線を見ることができる検出器として、比例計数管を用いた測定を行う。ここでは比例計数管の原理と今回使用する比例計数管について述べる。

4.1 比例計数管の原理



図 4.1: 比例計数管

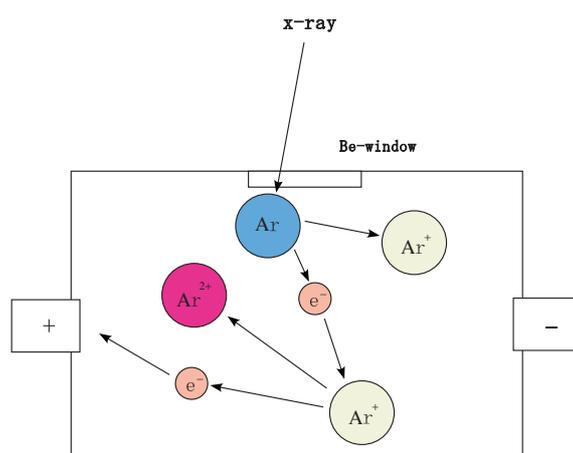


図 4.2: 比例計数管の動作原理概要

比例計数管 (図 4.1) はガス入りの放射線測定器で、1940 年代後半に導入された。構造としては、検出器にガスが入っていて (主に不活性ガス)、陽極の芯線に高電圧がかけられるようになっている。

放射線が Be 窓を通過すると、ガスと相互作用を起こし、放射線のエネルギーに比例した数の 1 次イオン対が作られる (ここでは Ar ガスを使用しているので、 $Ar \rightarrow Ar^+ + e^-$)。この電荷が移動する間に中性ガス分子と多数回の衝突を行なう。イオンは重いので移動度が小さく、衝突間にはほとんどエネルギーを得ることができない。逆に、自由電子は印加電圧によって容易に加速され、衝突時には大きな運動エネルギーを持ちうる。このエネルギーが中性ガス分子の電離エネルギーより大きい場合にはイオン対がさらに作られる。この 2 次電離過程で作られた電子も電極により加速され、中性ガス分子と衝突し、イオン対を作る。そして最終的には陽極に集まる。このように、放射線との相互作用によって作られた 1 次イオン対が電場によって増幅され、2 次イオン対が

多数作られる ($Ar^+ \rightarrow Ar^{2+} + e^-$)。図 4.2 はその概要図。

印加電圧に比例領域 (*true proportionality region*) を用いると、この 2 次イオン対は 1 次電子対の数に比例する。すなわち、最終的に得られた電荷を測定することで、放射線のエネルギーを測定することができる。

4.2 エスケープイベント (*escape-event*)

escape-event の発生機構について述べる。エネルギー E_x を持った入射 X 線は位置エネルギー E_c が E_x より小さい内殻電子をたたき出す。あいた準位に上の準位の電子が落ちてきて、準位間エネルギー E_i に相当する光子を放出する (光子を放出する確率は $\frac{Z^4}{Z^4+33^4}$)。この光子はある確率 (蛍光効率) で原子の外に逃げてしまう。光子が比例計数管の外へ逃げてしまうと、比例計数管内には $E_x - E_i$ に相当するエネルギーしか残らないので、光電ピークより E_i だけ低いところにもピークが現れることになる。3.2keV 以上の X 線では K 殻と L 殻の準位エネルギーの差に相当する escape(K-escape) が起こる。

4.3 使用する比例計数管

波多野佑亮 (2003 年学部卒) が製作した比例計数管を当初は使用していたが、実験途中で故障してしまったので、今回データを取得した比例計数管は全て加保貴奈さん (1996 年修士卒) が製作した比例計数管である。その比例計数管の構造と性能について簡単にふれておく。詳しいことは加保さんの修論を見て欲しい。

4.3.1 比例計数管の構造と性能

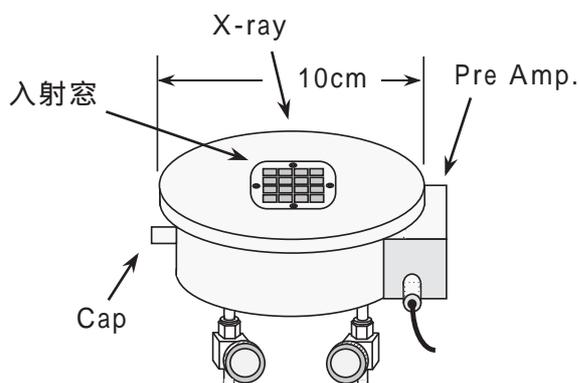


図 4.3: 比例計数管概要

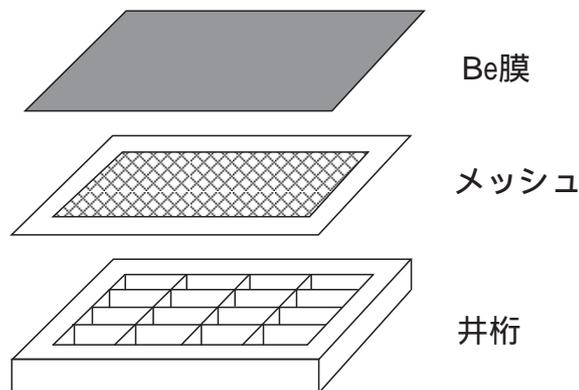


図 4.4: Be 膜のサポート構造

入射窓には X 線透過率の高い Be の薄膜を使用している。厚さは $12\mu\text{mt}$ 。家庭用アルミホイルは厚さ $15\mu\text{mt}$ である。それよりさらに薄い Be 膜を、2.0 気圧程度まで耐えるように入射窓として取り付けなければならないので、そのサポート構造として、ステンレスで井桁をつくり (5mm ピッチ、幅 0.25mm)、さらにステンレスのメッシュ (透過率 84%) をのせ、その上に Be 膜を乗せる形となっている。

窓の大きさは、 $20 \times 20\text{mm}$ 。有効面積は、井桁、メッシュで隠れる分を除くと、 311mm^2 である。井桁とメッシュと Be 膜の接着にはエポキシ系接着剤を使用。比例計数管の内部に露出する部分に

は、不純物ガスがあまり出ない重合型エポキシ系接着剤を用いている。製作時、接着剤が Be 膜のまわりに約 1mm はみだしてしまつたらしい。接着剤の比重は 1.5gcm^{-3} で、Be は 1.84gcm^{-3} であるが、接着剤に含まれる炭素 C による吸収を考えると低エネルギー X 線の透過率は少し落ちてしまうだろう。

この比例計数管は今回は全て gas-flow 形式で使用したが、ガスの出入り口をふさぐことで封じ切り型としても使用できる。充滿させるガスは最もポピュラーな PR ガス (Ar ガスに 5~10% のメタン (CH_4) が混合)。メタンは可燃性であるので注意が必要である。PR ガスは比較的安価で、得られるエネルギー分解能も良いが、高エネルギーの X 線を測定する場合などは Xe ガスの方が X 線阻止能が高い。

この比例計数管の大きな特徴として、観測する特性 X 線のエネルギーが高くなるにつれ、X 線が Pr ガスで止まらなくなつてしまい、X 線の一部が比例計数管本体のステンレスの特性 X 線を出してしまう。gas-flow として使用しているときは、その流すガスの加減にもよるだろうが、その境目のエネルギーは加保修論では 6kV となっている。

4.3.2 比例計数管の印加電圧

この比例計数管の印加電圧は、20keV までの X 線を測定する場合、1700V が適当である。1900V では空間電荷効果により、予想されるエネルギー分解能 12% の gauss 分布からずれ始め、パルスの波高の直線性 (*linearity*) も失われる。2300V をかけた場合も同様に空間電荷効果が起き、gauss 分布を示さなくなる。

4.4 データの取得と解析方法

データの取得は、比例計数管からの信号を、shaping アンプで増幅し、network-MCA という A-D converter によりデジタル化したものを personal computer に取り込む方法を用いる。この方法でスペクトルを取った図は横軸が channel でエネルギーに比例し、縦軸が強度 (Counts/bin/time の次元) である。

データの解析はワークステーション上で、dis45 (*Interactive Histogram Browser*) を使用する。比例計数管では単色の X 線も gauss 分布で広がってしまう。単色 X 線のエネルギーと channel とを対応させるために、得られたデータを gauss 分布を仮定して fitting し、ピークと幅を求める。また、比例計数管は分解能が悪く、様々なラインが重なって見えるがそれぞれの gauss 分布の重ね合わせとして fitting を行う。

次に取得したスペクトルの具体的な解析方法について述べる。

近似して得られた gauss 関数から標準偏差、ピーク値、エネルギー、count rate の導出方法を示す。さらに標準偏差からエネルギー分解能も求める。

gauss 分布は、

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

m はそのエネルギー、 σ は標準偏差に対応する。gauss 分布として近似することで得た関数を積分する (gauss 積分) ことにより、総 count 数、及び count rate を求めることができる。

gauss 関数は規格化されているので、

$$\int \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = 1 \quad (4.2)$$

したがって、

$$A \int \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = A \quad (4.3)$$

ここで A はピーク値を意味する。総 count 数を N とすると、この式を用いて N は以下のように求められる。

$$N = A \int e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = A\sigma\sqrt{2\pi} \quad (4.4)$$

また、測定時間を t とすると、count rate c は、

$$c = \frac{A\sigma\sqrt{2\pi}}{t} \quad (4.5)$$

として表される。

エネルギー分解能 R の正式な定義は、測定におけるピーク channel を H とすると、

$$R = \frac{FWHM}{H} \quad (4.6)$$

として与えられる無次元の値。一般に百分率で表される。ここで、 $FWHM$ (*full width at half maximum*) は半値幅であり、ピークの最高値のちょうど半分の高さにおける分布の幅として定義される。gauss 分布においてこの半値幅は標準偏差 σ を用いて、

$$FWHM = 2.35\sigma \quad (4.7)$$

として計算できることが知られている。また、エネルギー分解能は $FWHM$ そのものを指し、 eV を単位として表されることもある。

第 5 章

比例係数管での測定

5.1 1 次 X 線のエネルギースペクトル

比例係数管を用いて generator からの 1 次 X 線のスペクトルを取得した。HV と emission 電流をさまざまな値にしたので、ここではその代表的なものとして、以下 3 通り載せておく。

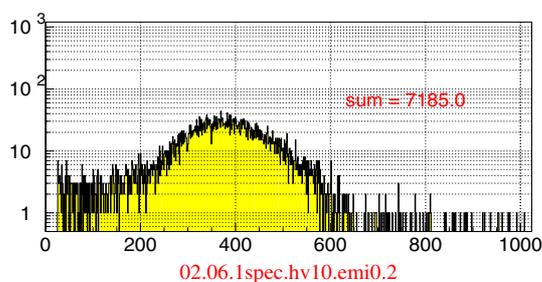


図 5.1: HV:10kV、emision 電流:0.2mA

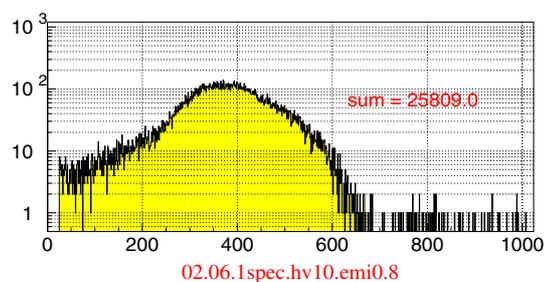


図 5.2: HV:10kV、emision 電流:0.8mA

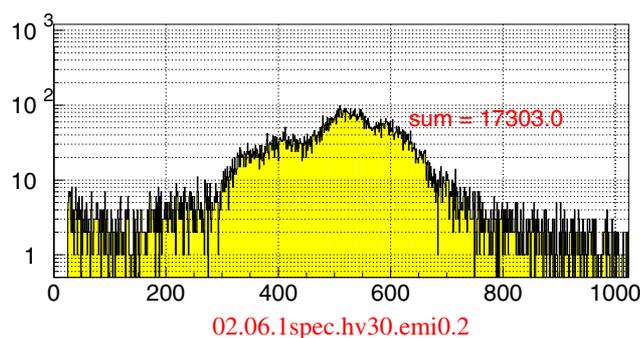


図 5.3: HV:30kV、emision 電流:0.2mA

1 次 target として K_{α} 線のエネルギーが 59.3keV の W を使用している。3000channel 前後にそのピークは現れるはずだが、generator の印加電圧が最大 50keV ということもあり、まず出ることはない。高い準位での電子の落ち込みによる X 線はある程度放射されるはずだが、それは少ない確率でのもとなので目立ったものは見えなかった。

印加電圧を 10kV に固定して、emision 電流を変化させていった時は、制動放射による連続成分のみが見られ、その値を大きくするにつれ、counrate が増加した。

emission 電流を 0.2mA に固定して印加電圧をあげていった時、ピークらしいものがいくつか観測された。このそれぞれのピークエネルギーを求めると、Fe、Cr、Ni であることが分かる。これは比例係数管の主成分。4 章の比例計数管の性能でも述べた通り、generator の印加電圧をある一定の値 (20kV 加保修論では 6kV) 以上になると、比例係数管の成分によるピークが現れてしまう。

5.1.1 emission 電流と countrate の関係

比例係数管を用いて、HV を一定にし (10kV)、emission 電流を変化させて emission 電流と count の関係を調べた。X 線は 1 次 target からのものを使用。

図 5.4 は縦軸は実測値で count、横軸は emission 電流 (mA) とした emission 電流と count の関係のグラフ。観測時間はすべて 600s。比例関係があることが分かる。

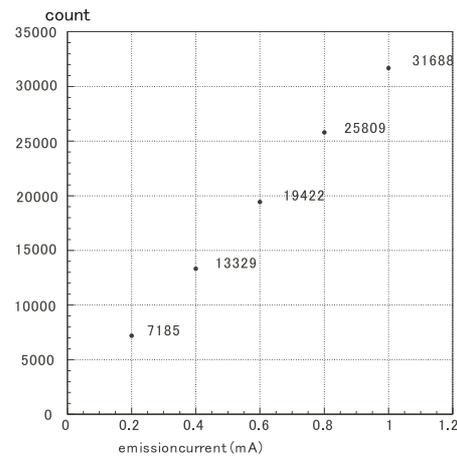


図 5.4: emission 電流と count の関係

5.1.2 印加電圧と countrate の関係

次に、emission 電流を一定にし (0.2mA)、HV を変化させて HV と count の関係を調べた (図 5.5)。これも X 線は 1 次 target からのものを使用。観測時間はすべて 600s。この図だと少し分かりにくいですが、count は印加電圧の 5/3 乗に比例する。

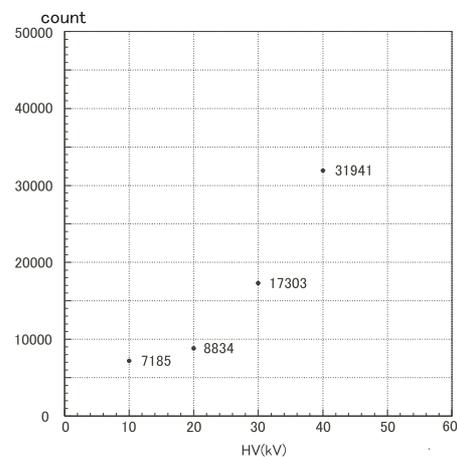


図 5.5: HV と count の関係

5.2 2次 X 線のエネルギースペクトル

4章の冒頭でも述べた通り、実際にカロリメータでの測定を行なう前に、2次 target からどのような X 線がどのくらい放射されるかを調べるため、比例係数管を用いて各 target による X 線のスペクトル取得を行なう。

5.2.1 鉄線源での測定

network-mca でデータを処理すると、スペクトルが縦軸 count、横軸 channel として出てくるため、実際に generator での測定を行なう前に、あらかじめピークエネルギーが分かっている鉄線源のスペクトルをとることにより、channel とエネルギーの関係を調べる。

鉄線源からの X 線はエネルギー 5.9keV の Mn の K_{α} 線であり、そのラインと、比例計数管内部に充填する Ar ガスとの escape ピークとしてエネルギー 2.9keV のラインが観測されるはずである。線源は図 5.6 にあるように比例計数管の Be 窓のすぐ上に乗せる形をとった。

測定環境は、

- AMPLIFIER : 10.0
- HV : 1.700kV
- shaping time : $3\mu\text{sec}$
- COARSE GAIN : 100
- 観測時間 : 100s
- コリメータ : $1\text{mm}\phi$
- gain(network-mca) : 1000

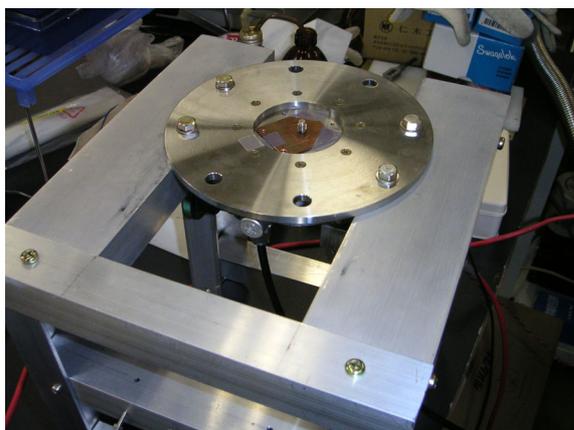


図 5.6: Be 窓上に設置した鉄線源の様子

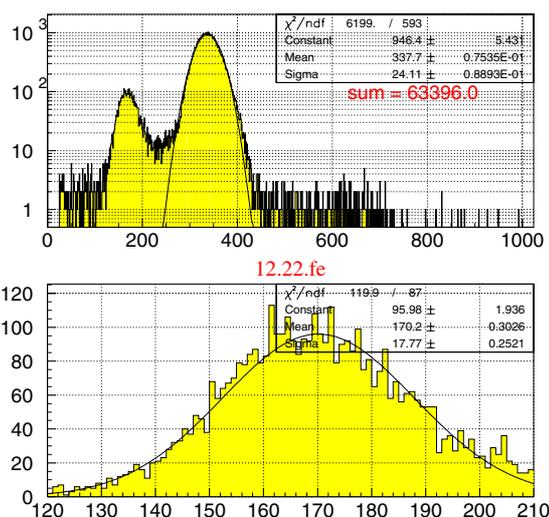


図 5.7: 鉄線源のスペクトル。下は escape ピーク部を抜き出したもの。

図 5.7 より二つのピークが現れることが分かる。その peak channel はそれぞれ、

- 338channel — Mn の K_{α} 線によるピーク：エネルギー 5.9keV
- 170channel — escape ピーク：エネルギー 2.9keV

総 count 数は K_{α} 線と escape ピークのものを合わせて、63396count。countrate は 634count/sec であった。

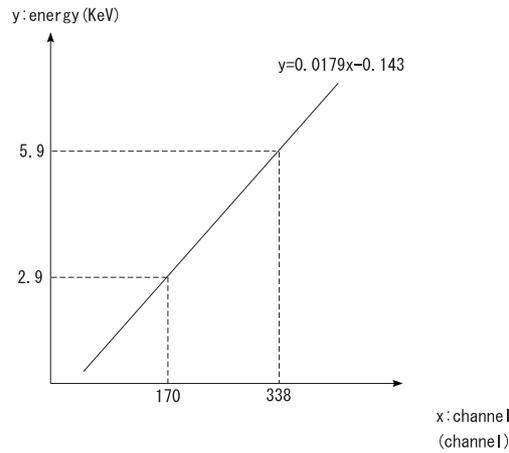


図 5.8: エネルギーと channel の関係

比例計数管の linearity は直線なので、この 2 点から図 5.8 のようなエネルギーと channel に関する直線を引くことができる。この直線から 2 次 target から放射される X 線のそれぞれのピークがどのエネルギーに対応しているかを知ることができる。

5.2.2 各 target でのスペクトル取得

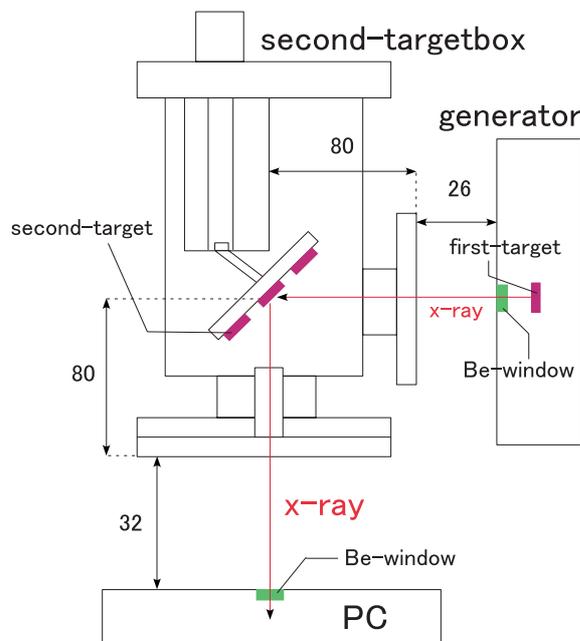


図 5.9: 測定のセットアップ概要図

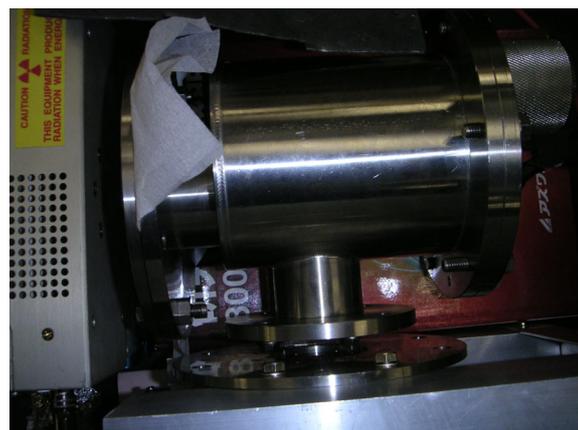


図 5.10: 測定セットアップ写真

X 線 2 次 targetbox を用いて、2 次 target から放射される X 線のスペクトル取得を行う。セットアップは図 5.9、図 5.10 の通り。カロリーメータでの測定と基本的には同じで、検出器のみが異なる

という形になる。target は Cu(8.05keV)、Zn(8.64keV)、Fe(6.40keV)、Ti(4.51keV)、Ge(9.89keV) の 5 つを使用。残り一つは低エネルギー側の特性 X 線を放出する Al(1.49keV) での測定を行う予定だが、現在のセットアップでは空気によって全て吸収されてしまうので行わない。

以下の各 target の測定結果において、gain や比例係数管にかける電圧などは鉄線源で調べたエネルギーと channel の関係を維持するためにすべて同じにしてある。また、各スペクトルのグラフの縦軸は見やすいように bin まとめ (8 つの山を 1 つにしている) を行なっているため、実測値ではない。解析時には補正を行なっている。今回は targetbox 内の真空引きを行っていないため、空気の透過率がそれぞれの countrate に影響する。このセットアップでは、generator の Be 窓から 2 次 target までは 106mm、2 次 target から比例係数管の Be 窓までの距離は 112mm、generator の Be 窓から比例係数管の Be 窓までの距離は合計 218mm である。比例計数管と generator は 45 度の位置にあるので散乱による 1 次 target からの X 線は観測されることはない。すなわち、目的とする target からの特性 X 線を主として見る事ができる。

5.2.3 target — Cu

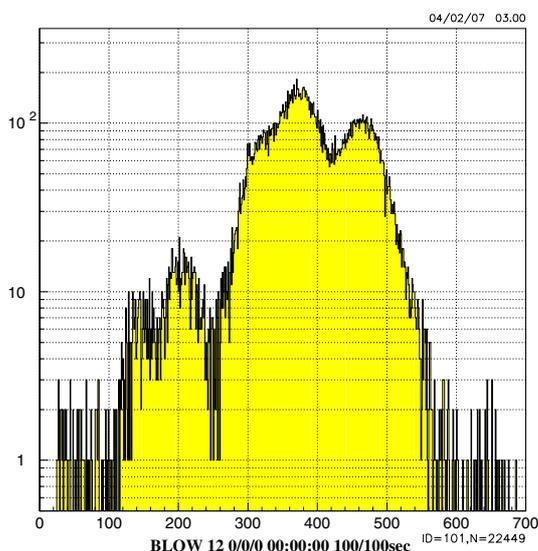


図 5.11: Cu のスペクトル全体図

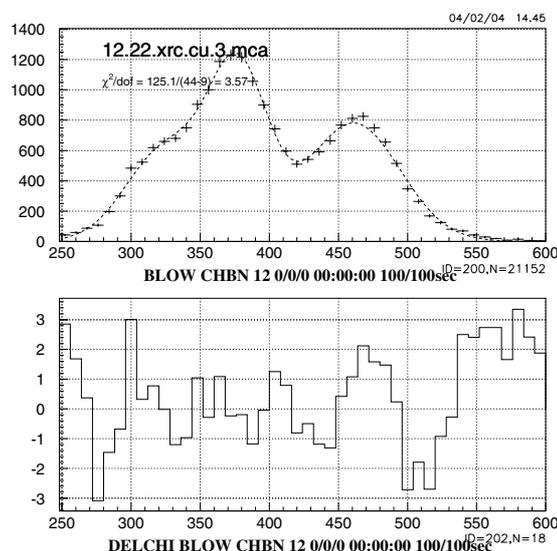


図 5.12: 近似した Cu のスペクトル

図 5.11 が取得したスペクトル。ピーク部を見やすいように縦軸を log スケールにしてある。図 5.12 はスペクトルを bin まとめし、fitting したものとその誤差について。

- HV : 15.038kV
- emission 電流 : 0.03008mA
- コリメータ : 2mmφ
- 測定時間 : 100s
- 総 count 数 : 22474count

考察

1. 375channel のピークは Fe のライン。targetbox と比例係数管の成分であるステンレス合金から

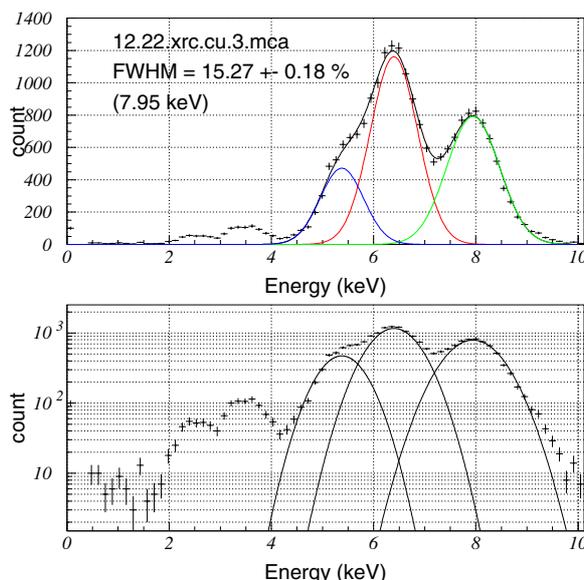


図 5.13: ガウス分布として近似した Cu のスペクトル

表 5.1: target Cu の主要なピーク

peak channel(channel)	energy(keV)	σ (eV)	countrate(count/sec)	分解能 (eV)	I.D.
375	6.56	484	98.5	1138	Fe
465	8.18	540	74.8	1269	Cu
315	5.49	444	36.7	1044	Cr

放射されたもの。3章で記したが、Feは使用しているステンレスの成分比が一番大きい。また、この generator の HV でのもとなら比例計数管のステンレスからの特性 X 線も放出される。

- 465channel のピークが目的とする Cu のライン。countrate が Fe よりも悪い結果となった。
- Cr は使用しているステンレスの成分で Fe の次に割合を占めるもの。countrate も大きい。
- 140、200channel にある小さなピークのエネルギーはそれぞれ 2.6keV、3.5keV。2.6 + 2.96 = 5.56keV、3.5 + 2.96 = 6.46keV であることから、ピークとして見えていた Cr と Fe の Ar ガスとの escape ピークと考えられる。
- エネルギーが高いせいで出にくいということもあり、Cr、Fe のラインが見えているにも関わらず、ステンレス合金の主成分の一つである Ni のラインが見えなかった。Ni の K_{α} 線はエネルギー 7.48keV。逆算すると 426channel に見えるはず。Cu と Fe のピークと重なってしまい見えにくくなっていることが予測される。
- target である Cu の escape ピークは $8.05 - 2.96 = 5.09keV$ 。Cr のラインと重なってしまっている。これにより Cr のラインをある程度大きくしてしまっているだろう。Cr の countrate を求める時は無視している。
- 主として見えていた Fe、Cu、Cr の総 count 数の和をとると、20996count。全ての count の合計は 22474count なので、大部分がこの 3つの成分による K_{α} 線が占めていることが分かった。

5.2.4 target — Zn

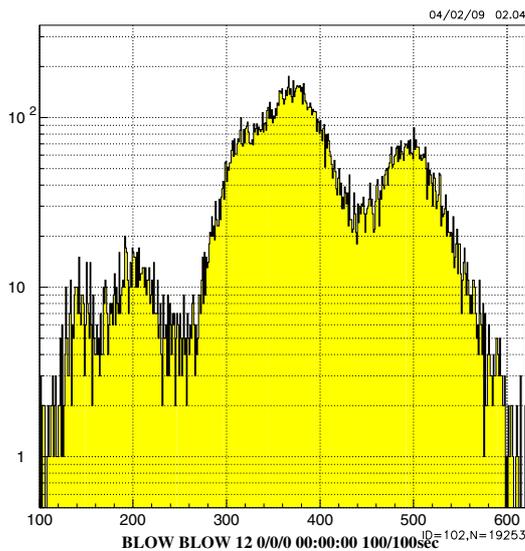


図 5.14: Zn のスペクトル全体図

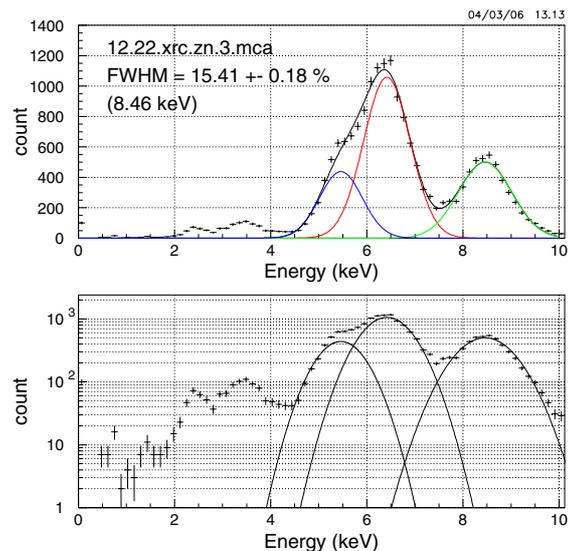


図 5.15: 近似した Zn のスペクトル

- HV : 15.038kV
- emission 電流 : 0.03007mA
- コリメータ : 2mmφ
- 測定時間 : 100s
- 総 count 数 : 19454count

表 5.2: target Zn のそれぞれのピーク

peak channel(channel)	energy(keV)	σ (eV)	countrate(count/sec)	分解能 (eV)	I.D.
376	6.58	505	93.5	1187	Fe
495	8.72	580	50.8	1363	Zn
320	5.58	466	35.7	1095	Cr

考察

1. Cu の時と同様に Zn の K_{α} 線は Fe よりも countrate が悪い結果となった。2.45keV、3.47keV にある小さなピークは Cr と Fe の Ar ガスとの escape ピーク。
2. target である Zn の escape ピークは $8.64 - 2.96 = 6.68keV$ に見えるはず。完全に Fe のラインと重なってしまっている。これによって Fe の countrate をある程度大きくさせてしまっているだろう。ここでもその効果は無視できるものとしている。
3. 主として見えていた Fe、Cu、Cr の総カウント数の和をとると、18007count。全ての count の合計は 19454count であり、Cu の時と同様、大部分がこの 3 つの成分で占められていた。

4. Zn はエネルギーが高いため、今回 Ni のラインと思われるものがはっきりと確認できた。7.6keV あたりに見える。このことから、他の target で Ni のピークが見えないものでもその因子により、重なるピークを大きく見せている、またその分解能を悪くしている、ということが分かった。

5.2.5 target — Fe

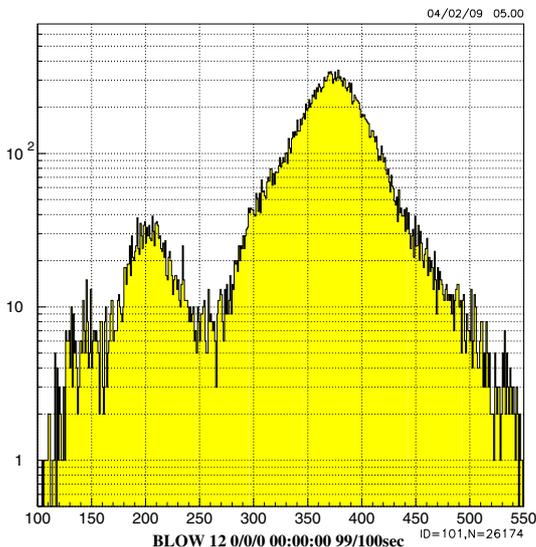


図 5.16: Fe のスペクトル全体図

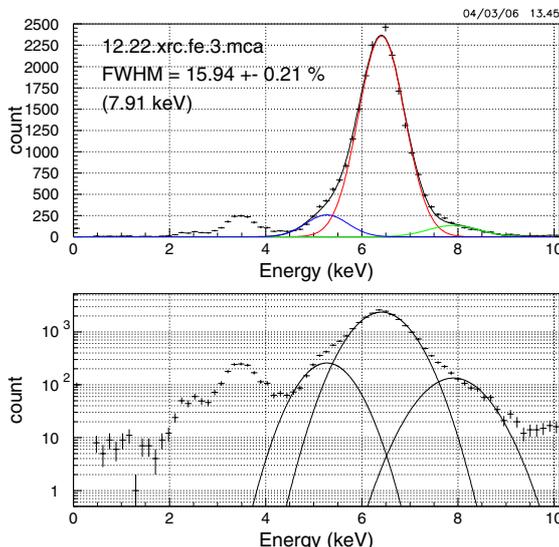


図 5.17: 近似した Fe のスペクトル

- HV : 15.038kV
- emission 電流 : 0.03008mA
- コリメータ : 2mmφ
- 測定時間 : 100s
- 総 count 数 : 26518count

表 5.3: target Fe の主要なピーク

peak channel(channel)	energy(keV)	σ (eV)	countrate(count/sec)	分解能 eV	I.D.
375	6.57	505	208.2	1186	Fe
309	5.38	458	20.6	1076	Cr
463	8.14	561	13.1	1317	Ni

考察

1. 他の target から分かる通り、ステンレスの主成分である Fe の countrate は基本的に大きい。今回はさらに target も Fe であることからの Fe のラインが顕著に強く現れた。また、そのため Fe の escape ピークも他の target に比べて大きい。

2. Fe、Cr、Ni の総 count 数の和をとると、24192count。全ての count の合計は 26518count。そのうち Fe の count 数は 20818count。9 割近くを Fe のラインが占めるという結果となった。

3. Cr に関して測定条件は他の target と同じはずなのに、それに相応しい数の countrate を得られなかった。原因としては、分解能の悪い Fe のピークと大部分が重なってしまったため、正確なガウス分布での近似ができなかったためだろう。しかし、2.4keV 当たりに見えるその escape ピークも他の target に比べると若干小さい。

5.2.6 target — Ti

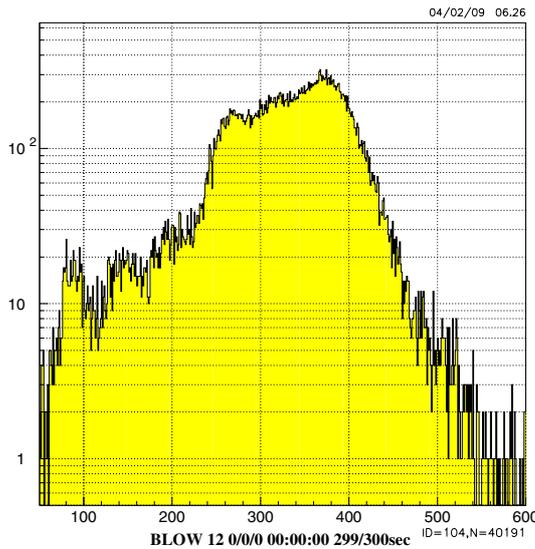


図 5.18: Ti のスペクトル全体図

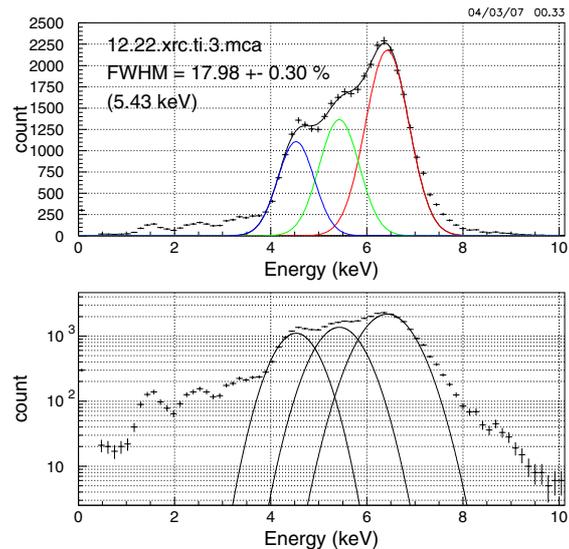


図 5.19: 近似した Ti のスペクトル

- HV : 10.011kV
- emission 電流 : 0.15126mA
- コリメータ : 2mmφ
- 測定時間 : 300s
- 総 count 数 : 40609count

表 5.4: target Ti のそれぞれのピーク

peak channel(channel)	energy(keV)	σ (eV)	countrate(count/sec)	分解能 (eV)	I.D.
376	6.59	472	60.0	1110	Fe
317	5.54	434	34.6	1020	Cr
265	4.60	396	25.6	932	Ti

考察

1. 分解能が悪く、今回はさらに Cr のピークが Fe と Ti に挟まれる形となるため、十分な近似を

行うことができなかつた。しかもこの target の時のみ HV と emission 電流の値を変えたので他の target との比較も信憑性に欠ける。

2. Ti の escape ピークは $4.51 - 2.96 = 1.55\text{keV}$ に見えるはずであり、比較的きれいにそれらしいものが確認できる。
3. 主として見えていた Fe、Ti、Cr の総 count 数の和は、36044count。全ての count の合計は 40609count。この target でも大部分が 3 成分のもので占められていた。

この近似では、Fe の countrate が小さいのにも関わらず、Cr の countrate が大きくなってしまった。近似にプログラムを組んで 3 つの gaussian として解析を行うわけだが、この fitting とは別なパターンとして近似を行ったものを載せておく。

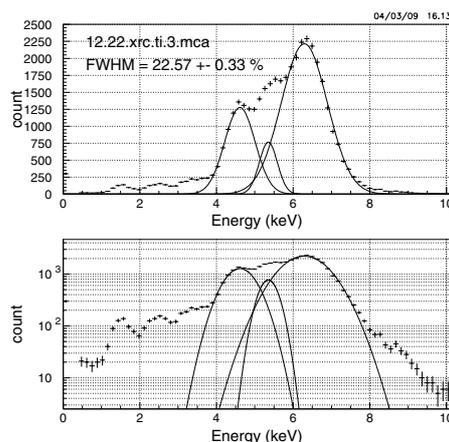


図 5.20: 別のパターンとして近似した Ti のスペクトル

この fitting のもとでは各 countrate は次のようになる。目立った変化はないが、Ti の countrate が Cr の countrate よりも大きくなる。

表 5.5: target Ti の別の fitting でのそれぞれのピーク

peak channel(channel)	energy(keV)	σ (eV)	countrate(count/sec)	分解能 (eV)	I.D.
368	6.45	632	81.6	1484	Fe
270	4.69	414	30.8	973	Ti
313	5.46	248	11.1	583	Cr

count は emission 電流の 1 乗に、HV の $5/3$ 乗に比例するという結果を前に得たので、測定から得た各成分の countrate を、他の target と同じ HV(15kV) と emission 電流 (0.03mA) のもとでの countrate に補正を行う。すると、逆に countrate は減少してしまい、予想されるものとは異なる。他の target に比べて Fe、Cr の countrate が著しく少ない。

5.2.7 target — Ge

- HV : 14.950kV
- emission 電流 : 0.03061mA

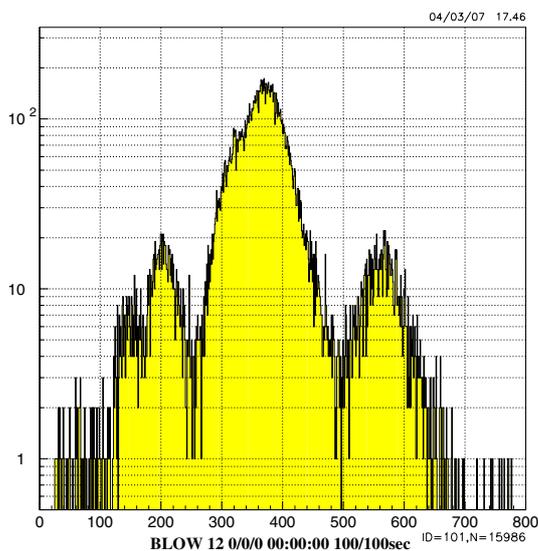


図 5.21: Ge のスペクトル全体図

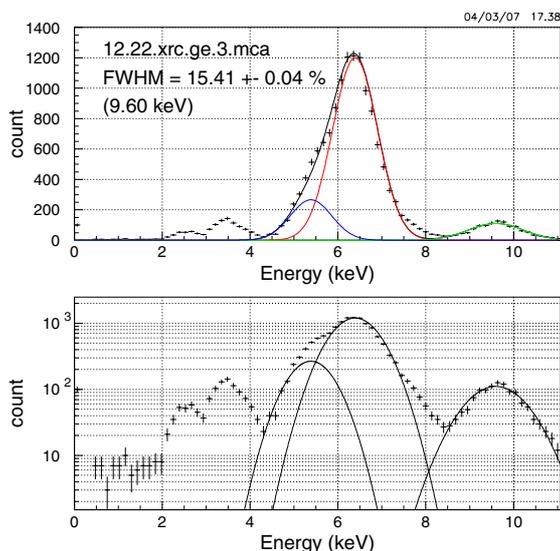


図 5.22: 近似した Ge のスペクトル

- コリメータ : 2mmφ
- 測定時間 : 100s
- 全てのピークの総 count 数 : 15997count

表 5.6: target Ge のそれぞれのピーク

peak channel(channel)	energy(keV)	σ (eV)	countrate(count/sec)	分解能 (eV)	I.D.
374	6.55	537	112.8	1262	Fe
315	5.50	493	23.0	1158	Cr
562	9.91	658	12.7	1546	Ge

考察

1. 近似としては十分とは言えないものの、Ge に関してはエネルギーが高く、他のピークと分離してくれたので比較的きれいな fitting ができた。Ge の K_{α} 線はエネルギーが高いため countrate は小さい。
2. Ge の escape ピークは $9.89 - 2.96 = 6.93\text{keV}$ に見えるはずであるが、Fe と完全に重なってしまうのでみえない。Fe の countrate を計算する時は、Ge の大きさから考えて、その影響は無視できるものとしている。
3. Fe、Ge、Cr の総 count 数の和は、14845count。全てのエネルギーの count の合計は 15997count なのでやはりこの 3 成分によるピークが大きい。

5.3 target 全般の考察

以上の結果をまとめておく。

表 5.7: 各 target における測定結果

target	target(count/s)	Fe(count/s)	Cr(count/s)	Ni(count/s)
Cu(8.05keV)	74.8	98.5	36.7	-
Zn(8.64keV)	50.8	93.5	35.7	-
Fe(6.40keV)	108.2	100	20.6	13.1
Ti(4.51keV)	25.6	60.0	34.6	-
Ge(9.89keV)	12.7	112.8	23.0	-

注意しておきたいのが、Tiでの測定はHV=10kV、emission 電流=0.15mAとしたが、それ以外のtargetでは全てHV=15kV、emission 電流=0.03mAとしたこと。HVによって放射されるFe、Cr、Niのcountrateが異なる。targetはそのエネルギーに差があるため、HVを一定に測定するとcountrateにばらつきが生じる。エネルギーが高いものは出にくい。escapeピークに関しては、カロリメータでの測定では消える因子なので言及しない。

target Feのcountrateに関してはtargetであるFe以外にもステンレスの成分からのものを含んでしまっているため補正を行った。測定環境はCu、Zn、Geと同じなので、ステンレスからのX線は100count/sであるとしている。fittingに関しては、比例計数管では分解能が悪く、それぞれのピークがどうしても重なってしまうので全体的に正確なものとは言えない。Tiでは最初に述べた方のfitting結果を使用した。また、targetのescapeピークがFeやCrのピークなどと重なる場合があったが、その影響は全てのtargetにおいて完全に無視できるものとしている。

Tiでの測定において、その考察でも述べた通り、他のtargetと同じHV(15kV)とemission 電流(0.03mA)のもとでのcountrate値に補正を行うと減少してしまう。FeやCrにおいてこの時だけcountrateが著しく少なく、他のtargetに比べてエネルギーが小さいにも関わらずTiのcountrateも少ない。原因が不明のため、残念ながらTiに関しては、そのデータの信憑性に欠けると言わざるおえない。HV(15kV)、emission 電流(0.03mA)のもとできちんとした測定を行えば、おそらくTiのcountrateはもっと大きくなるだろう。

第 6 章

X 線入射窓の製作

外部からの X 線をカロリメータで測定するため、ADR 内部に X 線入射窓を設置する。入射窓設置の際に要求されるのは、以下の 3 つ。

- X 線透過率が高い
- 電磁波や赤外線など、X 線以外のものをブロックする
- 輻射熱を最小限に抑えることができる

X 線以外の電磁波、特に長波長のものは主に二つの好ましくない効果をもたらす。ひとつはうまでもなく検出器にノイズを作り出し、また検出器を温めてしまうこと。例えば波長 1mm 以下のものは主にノイズをもたらし、1mm 以上のものは検出器を温めてしまう。特に $2\mu\text{m}\sim 2\text{cm}$ の 300K からの赤外線輻射は 10^{-9} 以下まで弱める必要がある。輻射熱を抑えるには radiation shield を導入するのが常識だが、この場合 X 線透過率が問題となる。X 線に対し十分な透過率を持たせながら、かつ熱的ノイズを取り除く filter を確立しなければならない。

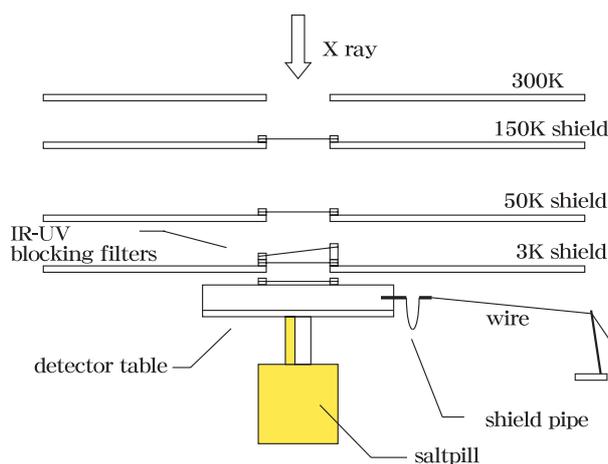


図 6.1: X 線入射窓の概念図

図 6.1 は X 線入射窓の構造図。ADR の通常の実験状態とはさかさまにしてある。入射窓の理論より、行ったセットアップは以下の通り。

- 300K — Be sheet $30\mu\text{mt} \times 10\text{mm}\phi$
- 150K shield — 両面 Al 蒸着フィルム $30\mu\text{mt} \times 10\text{mm}\phi$ 2 枚

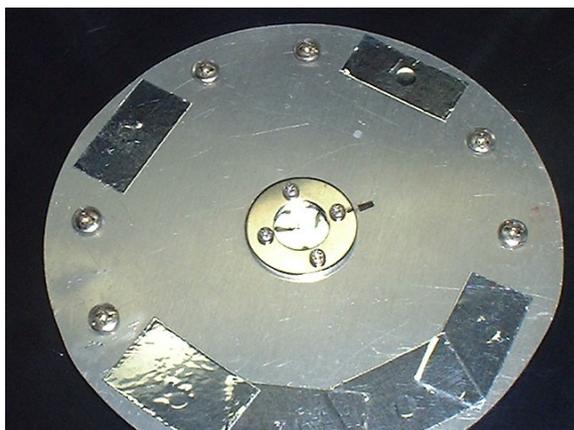


図 6.2: 3K shield に導入した X 線入射窓の様子



図 6.3: detector table に導入した X 線入射窓の様子

- 50K shield — 両面 Al 蒸着フィルム $30\mu\text{mt} \times 10\text{mm}\phi$ 2 枚
- 3K shield — 両面 Al 蒸着フィルム $30\mu\text{mt} \times 10\text{mm}\phi$ 3 枚
- detector table — 片面 Al 蒸着フィルム $0.5\mu\text{mt} \times 4\text{mm}\phi$ 3 枚

図 6.2、6.3 は X 線入射窓の実際の写真。detector table には熱伝導性をよくするため STYCAST 接着し、その他の部分はネジ圧着の方法を取っている。

150、50、3K の両面 Al 蒸着フィルムは 1 枚につき、Polyimide = $9\mu\text{mt}$ 、Al = $0.2\mu\text{mt}$ でできていて、detector table の片面 Al 蒸着フィルムは 1 枚につき、Polyimide = $0.5\mu\text{mt}$ 、Al = $0.1\mu\text{mt}$ でできている。合計すると、Be = $30\mu\text{mt}$ 、Polyimide = $64.5\mu\text{mt}$ 、Al = $1.7\mu\text{mt}$ となる。単純にこれらの成分を足し合わせたものから透過率を計算すると図 6.4 のようになる。

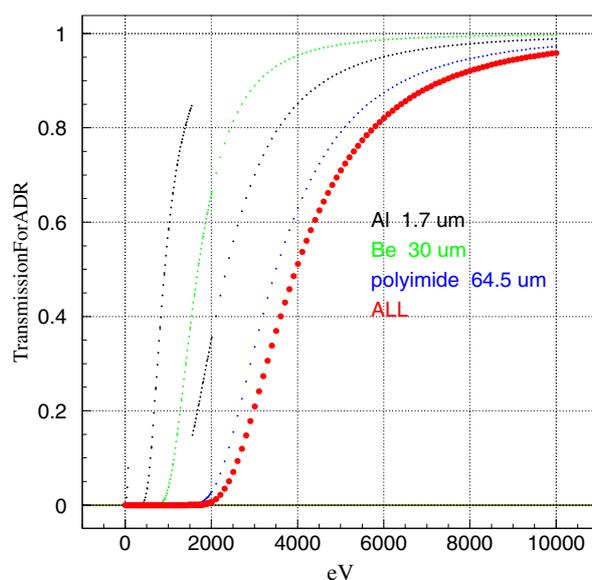


図 6.4: 現在の入射窓の X 線透過率

導入した入射窓は、輻射熱の影響を極力防ぐためにフィルターを多く入れた。そのため X 線透過率という点ではやはり限界がある。2keV 以下の X 線は全く透過しない。測定を行う上での

count rate を考えると、4keV 以下では難しいだろう。低エネルギー側の X 線も検出するためにはもっと薄い入射窓を確立しなくてはならない。

とりあえず現段階での目標としては、フィルターの枚数は変えずにフィルムの厚さを全て $0.5\mu\text{mt}$ まで下げること。これより透過率は図 6.5 のようになる。現在は shield に強度を与えるために、Polyimide の成分を多く使用しているが、それを外そうという試み。これを確立することで、低エネルギー側の X 線の観測を可能とすることができる。ただ、数 μmt という薄い shield を人間の手で張り付けるわけなので、製作者の腕が重要となるのはいうまでもない。shield にシワができてしまうと透過率に影響を及ぼしてしまうことが懸念される。

また、入射窓の大きさを広げることもこれからの課題の一つ。カロリメータの位置依存性を測定することを考えると数十 $\text{mm}\phi$ という大きさが必要となる。輻射熱をどう抑えるかと、製作可能かどうか、ということの兼ね合いとなるが、これも検討しながら進めていかななくてはならない。ちなみに、ASTRO-E 衛星に搭載された XRC は、detector table 上の入射窓が $40\text{mm}\phi$ という大きさを持っていた。

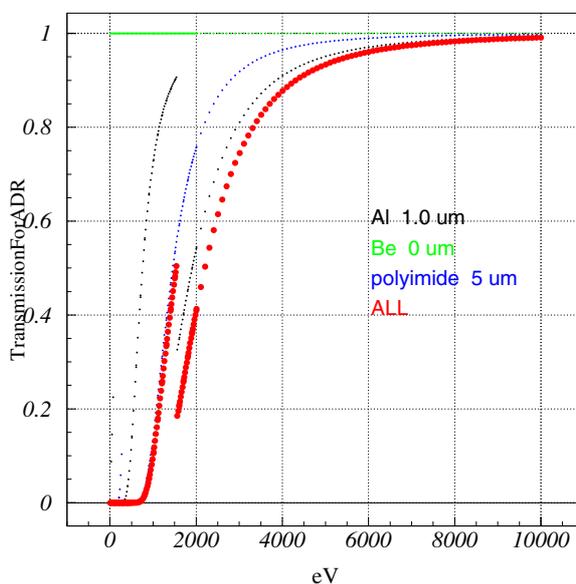


図 6.5: これからの目標とする入射窓の X 線透過率

第 7 章

断熱消磁冷凍機、X線発生装置、X線2次targetboxの接続

ADR と generator を接続する目的は、装置内部の真空引きを行うことにより X 線の空気の吸収を防ぐためと、各装置をきちんと固定するセットアップを行なうため。generaor と ADR の底面にある 300Kshield に targetbox をべた付けしたとしても、targetbox の構造上、2次 target からの X 線は 80mm の空気を通過することになり、例えばその距離でのエネルギー 4.5keV の Ti の空気透過率は 47%。約半分の X 線しか通過できない。すなわち、その因子をなくすことでカロリメータでの測定において、倍近くの countrate を得ることができる計算となる。また、この距離での低エネルギー側の X 線は空気にすべて吸収されてしまうのでこのままでは測定が行えない。

さらに、各装置をきちんと固定することで、測定中、カロリメータに X 線が当たらないという事態を防ぐことができる。X 線がカロリメータに到達する前には、ADR につけられた何枚もの shield、さらにカロリメータ前に付けられたコリメータの微小な穴を通過しなくてはならない。まだ真空装置が届いていない現在では (装置は新島真空に発注済み。2004 年 3 月完成予定。) 目測での装置配置、その場しのぎのセットアップが続いたが、この装置を導入することで実験自体に安定性と安全性を与えることができるだろう。

注文し、訂正を加えた設計図を次ページから載せておいた。generator と targetbox の間に非金属であるアクリルを挿入することにより、ADR と generator を絶縁できるようになっている。これだけではネジの部分で導通してしまうが、図 7.1 にあるようにネジ穴にもアクリルのタップ状のものを使用することで完全に絶縁される形となっている。generator とアクリル板をつなぐ部分は特殊な形になっているが、これは単にネジで接続できるようにしただけ。立体角の確保という点では X 線の通過道をそれぞれこの幅にすることにより問題ない (詳しくは 8 章の理論 countrate 値の算出を参照)。targetbox と ADR との間にフレキシブルチューブを入れることで、真空引き時の各装置間の伸縮を調整。現在問題となっている ADR の振動に対する弱さ (振動が入るとノイズが大きくなる) を考えると、generator の振動が入ることが懸念されるが、装置の下に防振材を設置することで調整が可能だろう。

この接続をすることで、generator から 2次 target までの距離は 119mm。2次 target から ADR の 300Kshield までの距離は 213mm。合計すると 332mm となる。

設計時に大きなミスを犯した。図 7.2 の generator のネジ穴は図のようにはなっていないく、少しスペースの空いた構造になっているのに気付かなかった。そのためこのままでは真空引きを行うことはできない。P-30 o-ring のすぐ外側のネジ穴の generator 側を接着材で塞いでやることで真空引きが可能となる。

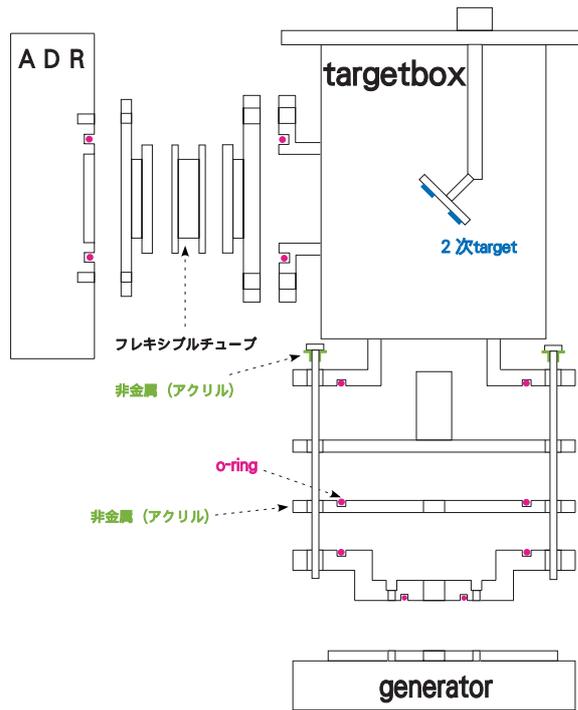


図 7.1: 真空装置接続全体図

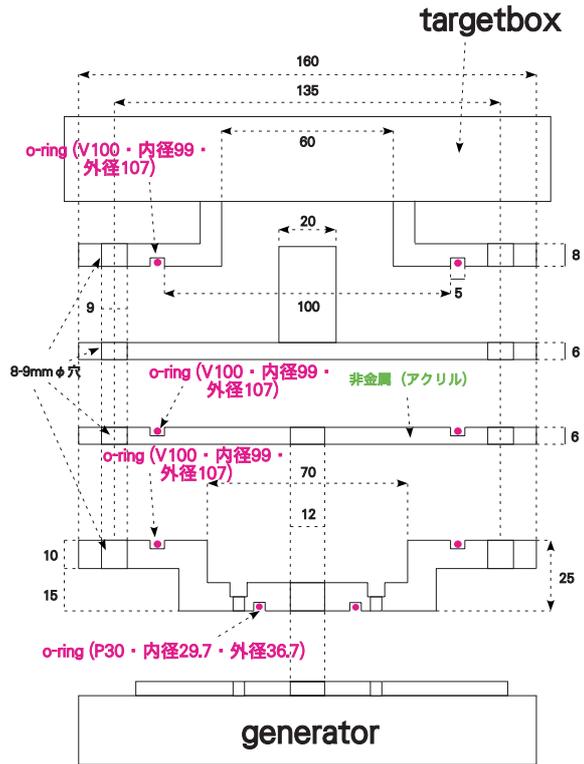


図 7.2: generator と targetbox の接続

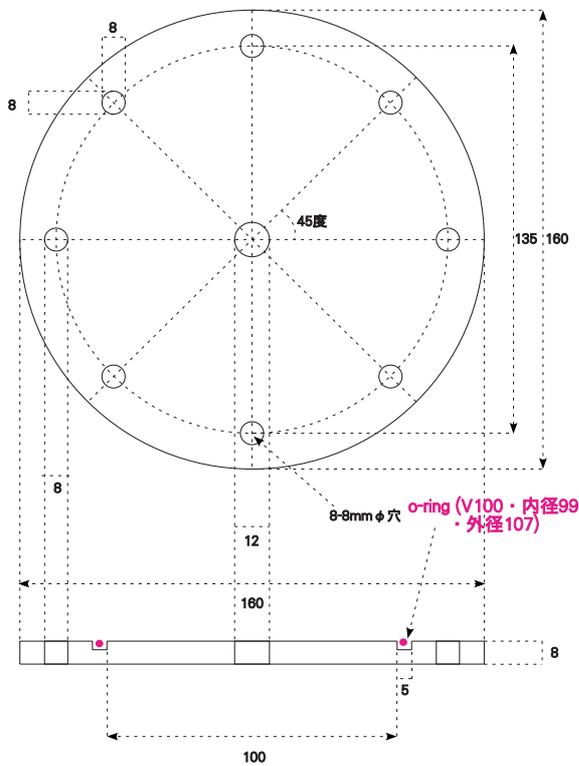


図 7.3: 非金属部分

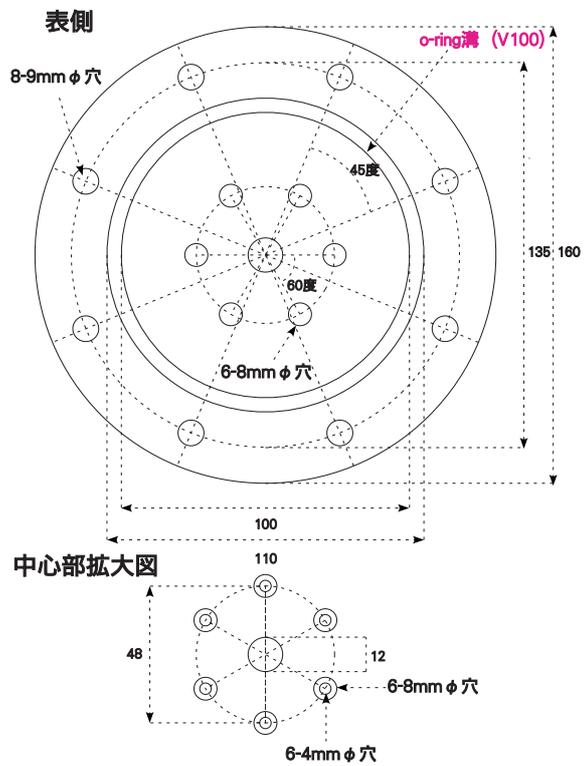


図 7.4: generator と非金属部分の接続 no.1

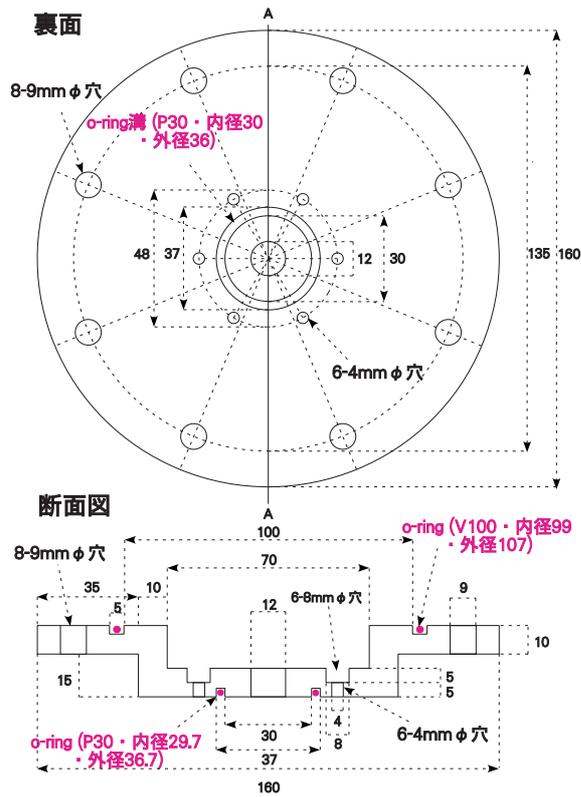


図 7.5: generator と非金属部分の接続 no.2

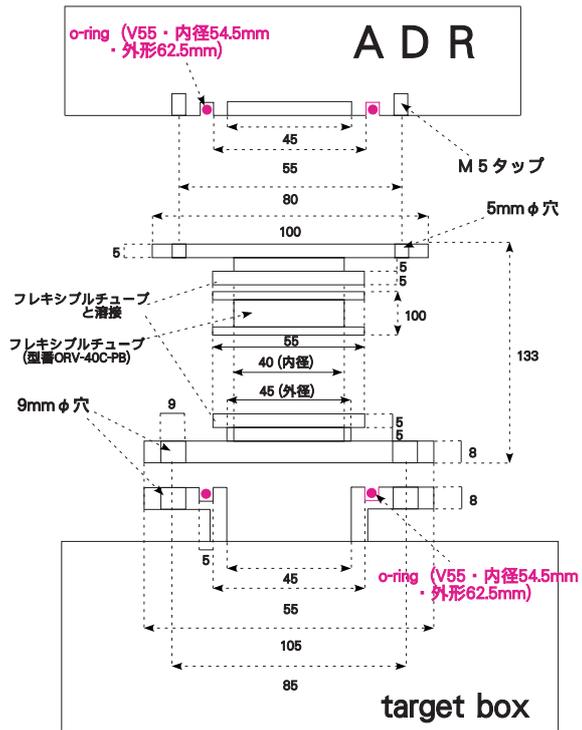


図 7.6: targetbox と ADR の接続

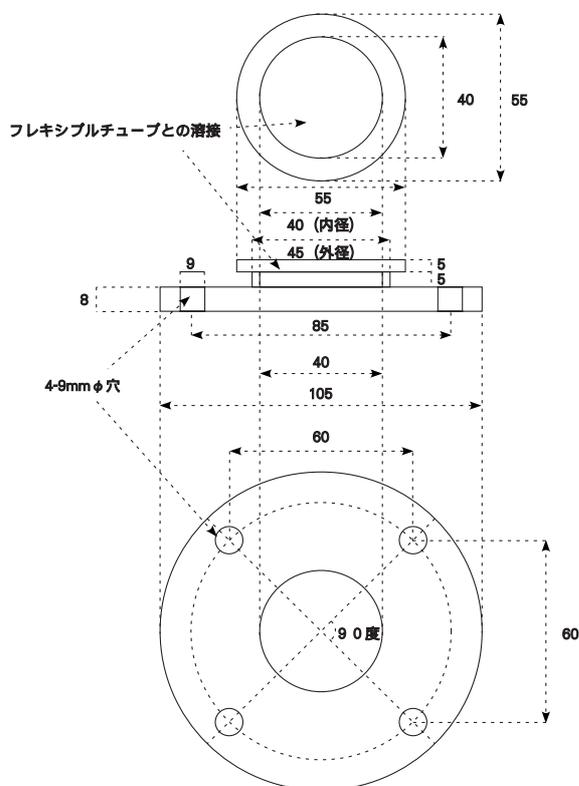


図 7.7: targetbox とフレキシブルチューブとの接続

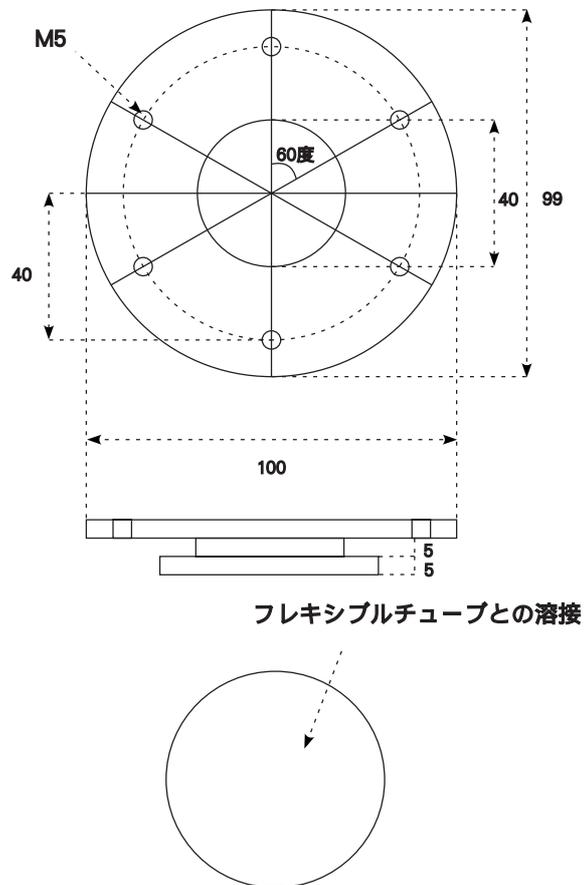


図 7.8: フレキシブルチューブと ADR の接続

第 8 章

TES 型マイクロカロリメータでの測定

8.1 各 target でのスペクトルの取得

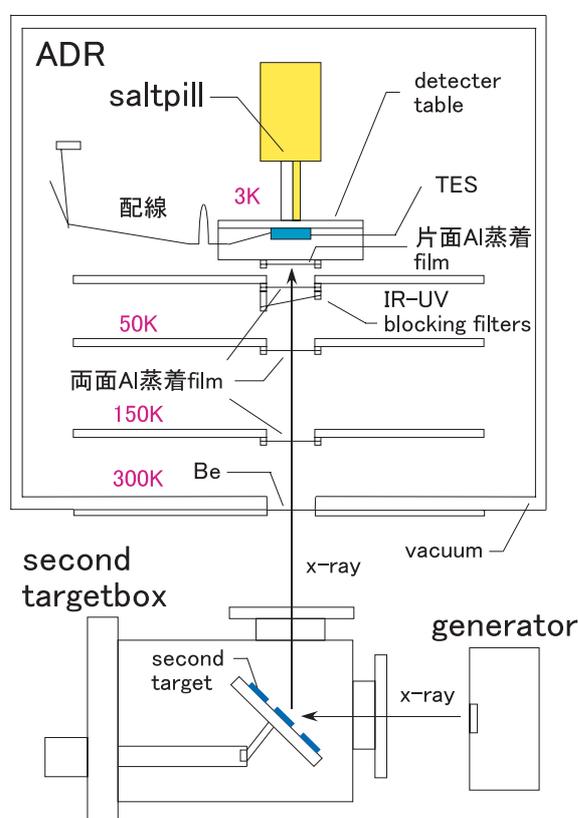


図 8.2: カロリメータでの測定セットアップ写真

図 8.1: カロリメータでの測定セットアップ概要図

第 7 章では各装置を接続し、真空引きを行えるセットアップについて述べたが、現在はその部品を発注したものの、まだ届いていないので、各装置を接続せずに測定を行った。図 8.1、図 8.2 がそのセットアップ。空気の透過率の影響を少なくするため各装置はできるだけ近づけるようにしている。

実際に測定を行った結果、2 次 target からの X 線を TES 型マイクロカロリメータにおいて検出することに成功した。以下、取得したスペクトルについて述べていく。

8.1.1 target — Cu

使用した素子は sii13。なお、このときの測定では targetbox と ADR の Be 窓までの距離を 5mm 離れた。すなわち、2 次 target から ADR の Be 窓までの距離は 85mm、カロリメータまでの距離は 195mm となる。ただし、ADR 内部は真空であると考えていいので、2 次 target から放射される特性 X 線が空気の吸収を受けるのは 85mm という距離となる。

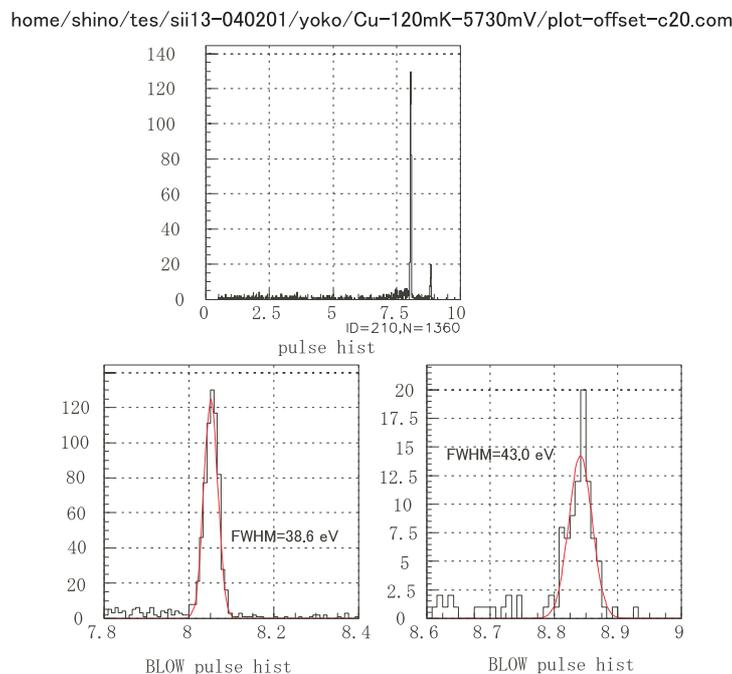


図 8.3: target Cu におけるスペクトル

図 8.3 が取得したスペクトル。HV は 20kV, emission 電流は 0.8mA で測定した。8.05keV にあるのが Cu の K_{α} 、8.91keV あるのが Cu の K_{β} である。 K_{α} のエネルギー分解能は 38.6eV、count rate は 4.4count/sec。 K_{β} のエネルギー分解能は 43.0eV だった。比例計数管で見えていた Fe、Cr など、2 次 targetbox、比例計数管の成分であるピークは見えなくなった。これは単に立体角の問題でカロリメータから target を見た時、targetbox のステンレスが見えていないためだと考えられる。

8.1.2 target — Ge

使用した素子は sii13。このときでは targetbox と ADR の Be 窓までの距離を 20mm 離れたので 2 次 target から ADR の Be 窓までの距離は 100mm となる。

図 8.4 が取得したスペクトル。HV は 20kV, emission 電流は 0.4mA である。target である Ge(9.89keV) のエネルギー分解能は 162.2eV, count rate は 0.46 ± 0.026 count/sec だった。また、Ge 以外に Fe と Cr のラインも検出された。まだセットアップが曖昧なため、Fe の時とは逆に、カロリメータから target を見た時、2 次 targetbox のステンレスが見えていることが考えられる。Fe(6.40keV) のエネルギー分解能は 104eV、count rate は 0.24 ± 0.019 count/sec だった。

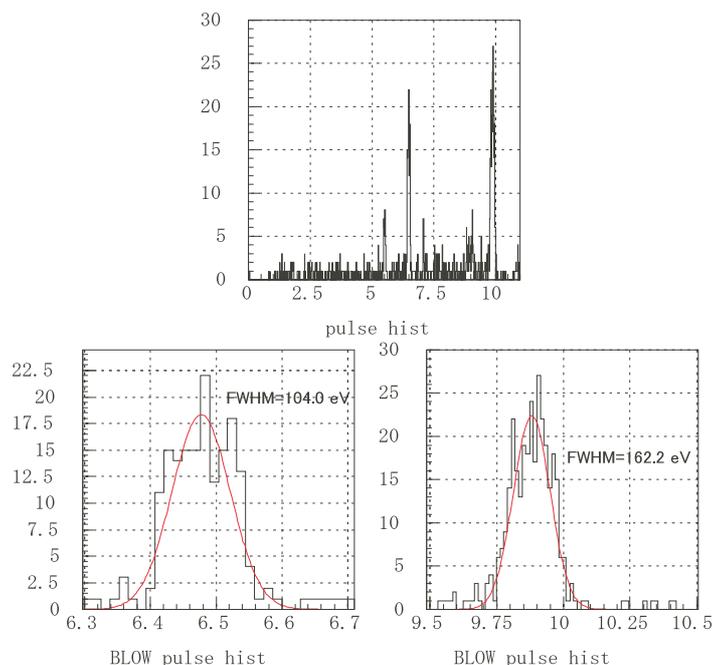


図 8.4: target Ge におけるスペクトル

8.1.3 target — Ti

使用した素子は sii13。Ge の時と同様、targetbox と ADR の Be 窓までを 20mm 離したので 2 次 target から ADR の Be 窓までの距離は 100mm。

図 8.5 が取得したスペクトル。HV は 20kV, emission 電流は 0.8mA である。target である Ti(4.51keV) のエネルギー分解能は 65.2eV、count rate は $1.07 \pm 0.047c/s$ だった。Ge の時と同様に、Ti 以外に Fe と Cr のラインも検出された。Fe(6.40keV) のエネルギー分解能は 117eV、count rate は $0.27 \pm 0.024count/sec$ だった。

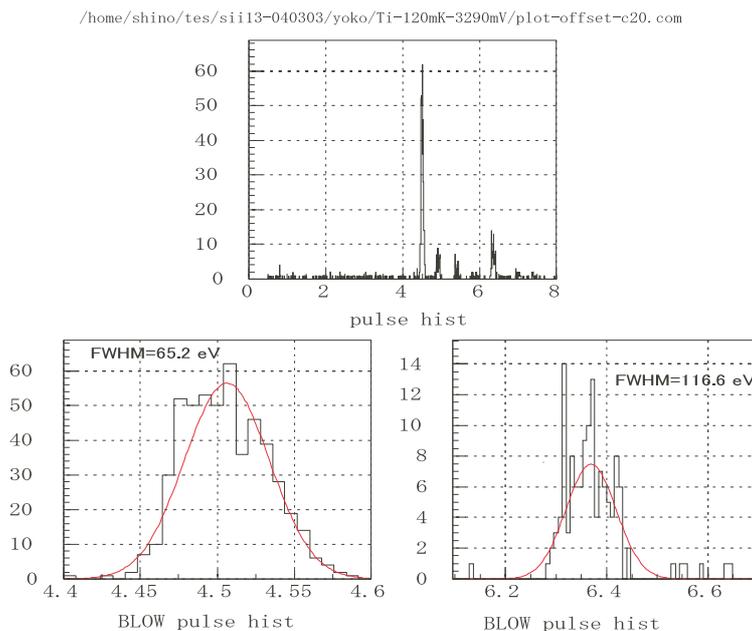


図 8.5: target Ti におけるスペクトル

8.2 target 全般の考察

以上の結果をまとめてみた。

表 8.1: 各 target における測定結果

	Cu(8.05keV)	Ge(9.89keV)	Ti(4.51keV)	Fe(6.40keV)	Zn(8.64keV)
エネルギー分解能 (eV)	38.6	162.2	65.2	-	-
countrate(count/sec)	4.4	0.46	1.07	-	-

度重なる実験の失敗と、実験毎のデータの比較を意識したため、target Fe、Zn のスペクトルを取得するまでに至らなかった。各 target ごとに測定環境が異なることに注意。

振動によるノイズ、light curve の変動などが分解能に悪影響を及ぼしており、数 eV に至るまでの性能は導くことができなかった。100eV の壁を超えることができたのは Cu と Ti のみであるが、それも安定せず、実験毎に大きく値が異なる。しかし、全体的に countrate にそれほどの変動は見られず、本研究の目的である、外部入射による X 線を TES 型マイクロカロリメータで検出するということは十分達成できた。

8.3 理論的な countrate 値の算出

カロリメータでの測定の際における countrate を比例計数管で測定した countrate から理論的に算出する。generator からの 1 次 X 線を考えていくと、generator の印加電圧と emission 電流次第で放射される X 線の強度が異なり、複雑な議論となるので、ここでは 2 次 target からの X 線の振る舞いを考える。用いるデータは 5 章で使用したもの。ここで議論する対象は fitting が一番きれいに行えた Cu。また、カロリメータは素子 sii32(Au と Ti の 2 層薄膜) を用いる。

まず始めに、比例計数管で測定した countrate から、2 次 target から放射される countrate を算出する。

- 2 次 target から比例係数管の Be 窓までの空気の X 線透過率

target から比例係数管の Be までの距離は 80mm。さらに測定時、targetbox から Be 窓までの距離を 32mm 離したので計 112mm。その距離でのエネルギー 8.05keV の X 線の空気透過率は 88%。

- 2 次 target から比例係数管の Be 窓への立体角

比例係数管の Be 窓は 1 辺 20mm の正方形。測定時に 2mm ϕ のコリメータを使用しているため、立対角は、コリメータ穴を半径 1mm の球の一部と近似して計算すると、

$$\frac{\times 1^2}{4 \times 112^2} = 2.0 \times 10^{-5} \quad (8.1)$$

ただしここでは、取得スペクトルに比例計数管の成分であるピークが見られるため、4章で述べた比例計数管の有効面積は考慮していない。

- efficiency

図 8.6 が比例計数管の efficiency。これには比例係数管の Be 窓の X 線透過率 (厚さ $12\mu\text{m}$) も考慮されている。エネルギー 8.05keV の比例係数管の efficiency は 45%。

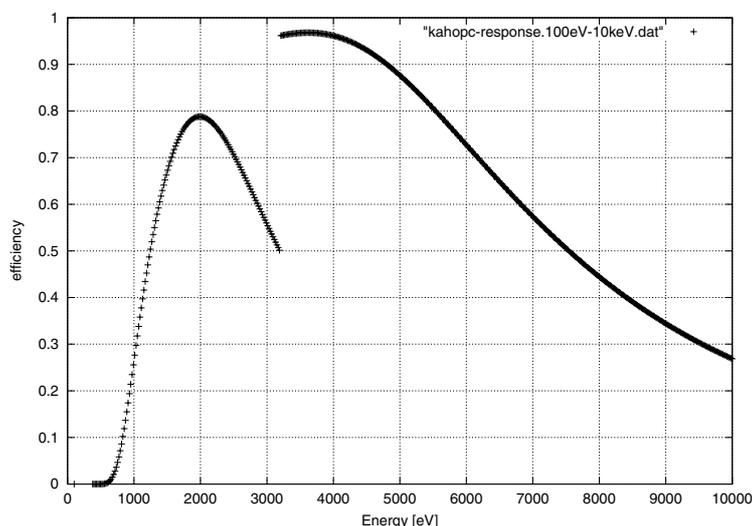


図 8.6: 比例計数管の efficiency

- 測定結果として得られた countrate — 74.8count/sec

以上より、target Cu から放射される X 線の countrate を c とすると、

$$c \times 0.88 \times 2.0 \times 10^{-5} \times 0.45 = 74.8 \quad (8.2)$$

したがって、

$$c = 9.44 \times 10^6 \text{ count/sec} \quad (8.3)$$

ということになる。

この結果から、カロリメータで測定した際の countrate を見積もる。

- 2次 target から ADR の Be 窓までの空気の X 線透過率

2次 target から targetbox の X 線放射口までの距離は 80mm。targetbox から Be 窓までの距離は各測定ごとに異なるが、ここでは 5mm 離れたとして計算する。すなわち、合計 85mm。その距離でのエネルギー 8.05keV の Cu の空気透過率は 90.8%。なお、ADR 内は真空であると考えてよいので、この間での空気透過率は考慮しない。

- 2次 target からカロリメータへの立体角

今回 targetbox から ADR の Be 窓までを 5mm 空けた。Be 窓からカロリメータまでの距離は 110mm。ただし、これは常温時の値で、冷却すると ± 5mm 程度の誤差が生じる。カロリメータ自身の大きさは 500 × 500 μm。カロリメータには吸収体が付いていて、この大きさは 300 μm φ、さらにその上にはサファイヤカロリメータが付いていて、これは 200 μm φ。立対角は、このカロリメータの大きさで考える。2次 target からの X 線は 360 度均一に放射されるのでこの 2次 target は点であると仮定する。カロリメータ穴の大きさを半径 100 μm の球の一部と近似し、距離の誤差をないものとして計算すると、

$$\frac{\pi \times 1 \times 10^{-2}}{4 \times 195^2} = 6.6 \times 10^{-8} \tag{8.4}$$

- ADR の各 shield を合わせた全体の透過率

単純に各 shield の成分の厚さの和をとり、透過率を調べる (Al=1.7 μm、Be=30 μm、Polyimide=64.5 μm)。図 8.7 が計算したグラフ。この状態でのエネルギー 8.05keV の透過率は 90%。

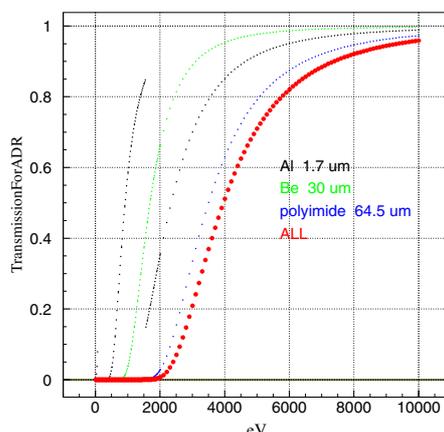


図 8.7: このセットアップでの X 線透過率

- efficiency

カロリメータの各成分の X 線透過率 (図 8.8) を計算し、単純に 1 との差をとって量子効率を計算する。図 8.9 が導きだしたグラフ。ここでの計算では素子 sii32(Au と Ti の 2 層薄膜) を用いているので他の素子で測定を行う時は異なる。

このグラフから、Ti(4.5keV) の量子効率は 15%。

- サファイヤカロリメータの X 線透過率

図 8.8 で青の曲線がサファイヤカロリメータの X 線透過率。分かる通り、6keV 以上のエネルギーのものはサファイヤカロリメータを通過してしまう。Cu では約 1 割程通過することになるが立体角など、議論が難しくなるのでここでは無視する。

- emission 電流による補正

比例係数管では generator の emission 電流を 0.15mA で測定した。カロリメータでは色々な値の emission 電流での測定を行なう。ここでは例えば generator でかけることのできる

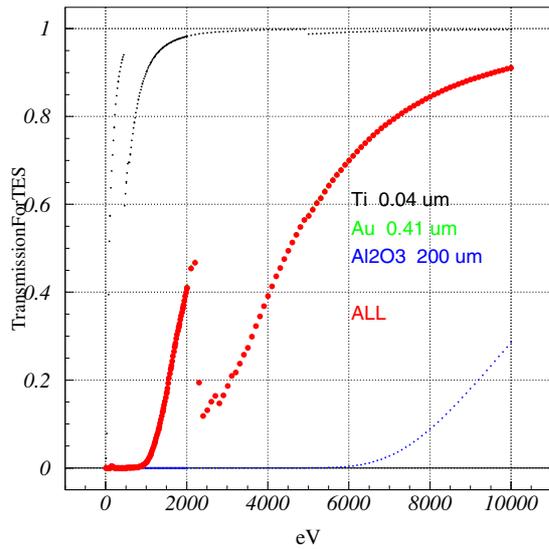


図 8.8: カロリメータ (素子 *sii32* の X 線透過率)

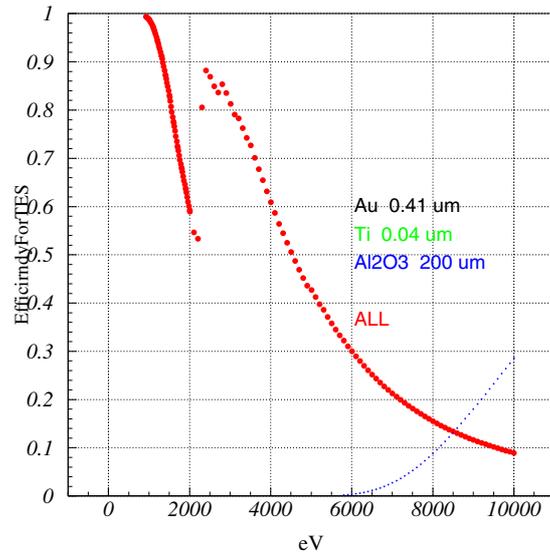


図 8.9: カロリメータの X 線量子効率

最大値 1.0mA とする。前に count は emission 電流に比例するという結果が得られたので、count rate は単純に $1.0/0.03$ の 33.3 倍される。

- 印加電圧による補正

比例係数管での測定では印加電圧は 10kV。ここでは例えば 20kV とする。前に count が HV の $5/3$ 乗に比例するという結果が得られたので、 $2^{5/3} = 3.175$ 倍される。

以上より計算すると、ADR 内のカロリメータにおいて測定される count rate の理論値は、

$$9.44 \times 10^6 \times 0.908 \times 6.6 \times 10^{-8} \times 0.90 \times 0.15 \times 33.3 \times 3.175 = 8.08 \text{ count/sec} \quad (8.5)$$

と算出することができる。

全ての target について計算したものをまとめておく。

表 8.2: 各 target からの countrate 値

target	測定 countrate	空気透過率 (112mm)	立体角	efficiency(PC)	countrate(target)
Cu(8.05keV)	74.8	0.88	2.0×10^{-5}	0.45	9.44×10^6
Zn(8.64keV)	50.8	0.903	2.0×10^{-5}	0.375	7.50×10^6
Fe(6.40keV)	108.2	0.775	2.0×10^{-5}	0.65	1.07×10^7
Ti(4.51keV)	25.6	0.47	2.0×10^{-5}	0.93	2.93×10^6
Ge(9.89keV)	12.7	0.934	2.0×10^{-5}	0.275	2.47×10^6
Al(1.49keV)	-	0	2.0×10^{-5}	0.65	-

表 8.3: 現在のセットアップでのカロリメータでの理論 countrate 値

target	空気透過率 (85mm)	立体角	ADR 透過率	efficiency(TES)	countrate(TES)
Cu(8.05keV)	0.908	6.6×10^{-8}	0.90	0.15	8.08
Zn(8.64keV)	0.926	6.6×10^{-8}	0.95	0.14	6.45
Fe(6.40keV)	0.824	6.6×10^{-8}	0.85	0.26	13.6
Ti(4.51keV)	0.570	6.6×10^{-8}	0.70	0.48	0.49
Ge(9.89keV)	0.950	6.6×10^{-8}	0.95	0.09	1.40
Al(1.49keV)	0	6.6×10^{-8}	0	0.75	0

全てにおいて generator の emission 電流が 1.0mA、印加電圧が 20kV、素子は sii32 の場合を想定して計算を行っている。また、2 次 target と ADR の Be 窓との距離はすべて 5mm としている。前述の通り、6keV 以上のエネルギーのものはサファイヤカロリメータを通過してしまう。該当するのは、Cu(8.05KeV)、Zn(8.64KeV)、Fe(6.40KeV)、Ge(9.89KeV)。その因子は無視できるものとしてここでは考慮しなかった。Al での測定は空気の透過率、ADR の各 shield の透過率が 0 のためこのままでは不可能である。

emission 電流と印加電圧による補正を行い、測定結果と比較すると、各 target の countrate はだいたい factor2~3 で一致することができた。

表 8.4: 真空装置接続後のカロリメータでの理論 countrate 値

target	countrate(target)	立体角	ADR 透過率	efficiency(TES)	countrate(TES)
Cu(8.05keV)	9.44×10^6	2.4×10^{-8}	0.90	0.15	3.24
Zn(8.64keV)	7.50×10^6	2.4×10^{-8}	0.95	0.14	2.53
Fe(6.40keV)	1.07×10^7	2.4×10^{-8}	0.85	0.26	6.02
Ti(4.51keV)	2.93×10^6	2.4×10^{-8}	0.70	0.48	0.31
Ge(9.89keV)	2.47×10^6	2.4×10^{-8}	0.95	0.09	0.54
Al(1.49keV)	-	2.4×10^{-8}	0	0.75	-

次に、真空装置を接続した時の理論 countrate 値を計算してみた。これも全てにおいて emission 電流が 1.0mA、HV が 20kV、使用する素子は sii32 の場合である。2 次 target から ADR の Be 窓までの空気の透過率が 1 となるので countrate が大きくなるように思えるが、真空部品を接続することで立体角の因子が大きくなってしまい逆に小さくなる。立体角は真空装置の構造上、2 次 target とカロリメータとの距離が 323mm となるので、

$$\frac{\pi \times 1 \times 10^{-2}(mm)}{4 \times 323^2(mm)} = 2.4 \times 10^{-8} \quad (8.6)$$

である。HV は 50kV まで上げることができ、countrate は最大ではさらにこの $(5/2)^{\frac{5}{3}} = 4.61$ 倍することが可能である。この場合においても Al は ADR の shield の透過率が 0 のため観測は不可。

表 8.5: 目標とする shield を確立した時の TES での理論 countrate 値

target	countrate(target)	立体角	ADR 透過率	量子効率 (TES)	countrate(TES)
Cu(8.05keV)	9.44×10^6	2.4×10^{-8}	0.97	0.15	3.49
Zn(8.64keV)	7.50×10^6	2.4×10^{-8}	0.98	0.14	2.61
Fe(6.40keV)	1.07×10^7	2.4×10^{-8}	0.96	0.26	6.80
Ti(4.51keV)	2.93×10^6	2.4×10^{-8}	0.90	0.48	0.399
Ge(9.89keV)	2.47×10^6	2.4×10^{-8}	0.99	0.09	0.559
Al(1.49keV)	-	2.4×10^{-8}	0.1	0.75	-

最後に現在目標としている shield を確立した時の理論 countrate 値を計算してみた。素子は sii32b。全てにおいて emission 電流が 1.0mA、印加電圧が 20kV の時の値で、真空部品を装着し、真空引きを行っている場合を想定した。shield の成分と X 線透過率は図 6.5 で参照できる。

この shield が確立できれば高エネルギーの target にはさほどの効果はないが、低エネルギー側にある target に透過率を持つことになり、Al などでの測定が可能となる。前述の通り、最大では countrate をこの 4.61 倍にまですることができる。

8.4 取得スペクトルと 2 次 target の大きさとずれ

カロリメータで測定を行った結果、パルス取得には成功したものの、そのスペクトルには target からの特性 X 線だけではなく、ステンレスの成分である Fe や Cr などの特性 X 線が観測される場合とされない場合に分かれた。これは測定結果でも述べた通り、立体角の問題であると考えられる。ここではカロリメータでの測定の際に影響してくると思われる target の大きさや位置関係について述べる。

- target の位置ずれ

現在の測定では、基本的に目測でのセットアップのため、単純に考えて 2 次 targetbox 自体が正規の位置からずれているか、いないかだけの問題だろう。しかし、きちんと各装置を固定したセットアップを行った場合でもこれらのピークが観測されないとは限らない。2 次 targetbox は外部から target を交換でき、測定を行っていくわけだが、レバーを回して target を交換するとき、きちんと設定 target に合わせたつもりでもきちんとそれが目的とする場所に位置しているとは限らない。そのため、それ次第では立体角の因子において各測定ごとにステンレス部分がはみ出したり、はみ出さなかったりしてしまい、そのステンレスのラインが出たり出なかったりする可能性がある。targetbox のネジ閉めの強弱とその時のバランスで決まるものなので定期的に targetbox を分解し、メンテナンスする必要がある。

- target の形状

target 自体の形がそれぞれ微妙に異なる。詳しくは 4 章の各 target の写真で確認できる。基本的には $16 \times 16 \text{mm}$ の正方形で、厚みは 1mm のものを用いているが、例えば Ge では凹凸の形状をしている。また、Ti は大きさが $10 \times 8 \text{mm}$ 程度の長方形のものを Al の上に接着することで使用している。2 次 targetbox に target を接続するネジ穴が一つ破損してしまっていて、Zn は一つの角を切り取るという形で接続している。

- target の大きさとカロリメータとの立体角

カロリメータでの測定において、ステンレスの成分によるピークがまったく出ない時は前述の通り、カロリメータから見た時、2 次 target しか見えていないということが考えられる。では、きちんと固定し、調整したセットアップでのもと、どのくらいの大きさの target ならその成分のみの X 線が観測されるかを考えると、一概には言えない。

カロリメータから 2 次 target を見たとき、最も視界を遮っているのがカロリメータから約 0.3mm の距離にある $4 \text{mm} \phi$ のサファイアカロリメータ。これから単純に 195mm 前方での視野範囲を計算すると $130 \text{mm} \phi$ 、と非常に広い。これでは常にステンレス部が見えてしまい、target のみの特性 X 線が観測されるということはあるにない。これには ADR 内の各 shield に位置関係が影響してくる。各 shield はそれぞれ中心に位置するよう作られているのだが、それは人の手で製作したものであり、 10^{-1}mm というオーダーでどうしても誤差を生じる。このため、このことに関してはそこまで深い議論は行えない。

第 9 章

まとめと課題、問題点

本研究の結果として、外部入射による X 線を TES 型マイクロカロリメータにおいて測定することに成功した。本研究で構築したシステムを用いてカロリメータにおける位置依存性、エネルギー変化依存性、強度変化依存性など、まだ世界的にもあまり知られていない未知数の性質、可能性を検証することが可能となるだろう。また、カロリメータでの測定において一度に色々な X 線での測定が可能となるので、実験効率の向上という面でもかなりの成果が上げられたのではないだろうか。

しかし、まだまだ問題、課題は山積みで、その 1 つ 1 つを克服していかななくてはならない。これからの課題、問題点を挙げておく。

- 数 eV に至るまでの分解能の向上

数 eV という分解能が達成可能なカロリメータの性能をまだ引き出すことができていない。これまでの測定では最高で 38.6eV。これでは上に挙げたようなカロリメータの測定は行えない。当面は分解能の向上というのが目標となるだろう。

- 真空部品接続後のスペクトル取得

真空部品を接続することで全体的に countrate が減少してしまうと予想されるが、低エネルギー側の X 線を測定するためにも、これからはこの部品を実験毎に必ず使用することが必要だろう。また、今日まで不安定だった Fe、Cr、Ni のラインの有無も重要な要素なので気になるところ。

- 低エネルギー側の X 線に透過率を持つ入射窓の確立

6 章の入射窓の製作でも述べた通り、現在の入射窓では真空部品を接続しても低エネルギー側の X 線を観測できない。これではカロリメータにおけるエネルギー変化依存性を測定することはできない。また、実際に ADR を衛星に搭載し、宇宙空間での使用を考えるとこのことは致命的だろう。

- 数十 mmφ という大きさを持った入射窓の確立

これはカロリメータの位置依存性を測定する時に必要となる。透過率と兼ね合わせて考慮していくわけだが、人間の腕で製作するのは大変難しい。しかし、いずれ必要となるので検討していかななくてはならない。

以上を確立することで TES 型マイクロカロリメータの未知なる性能を検証する実験が行える環境が整う。おそらくその道のりはまだ長い。しかし、時を得て、数ある人間が参加したこの一連のシステムの存在価値の実証を次世代の人に託すと共に、この研究活動が有意義なものであったことを証明してもらいたい。

参考文献

- [1] 篠崎 慶亮, 断熱消磁冷凍機を用いた極低温 X 線検出器動作環境の構築, 東京都立大学, (2003)
- [2] 加保 貴奈, X 線検出器の正システムの開発, 東京都立大学, (1996)
- [3] 古賀 丈雄, TES 型 X 線マイクロカロリメータの多素子化の研究, 東京都立大学, (2004)
- [4] 波多野 佑亮, 比例計数管の製作, 東京都立大学, (2003)
- [5] 木村 逸郎・阪井 英次 訳 (Glenn F. Knoll), 「放射線計測ハンドブック」, 日刊工業新聞社, (1991)

謝辞

僕が実験を行い、この論文を書くまで、この宇宙物理実験の研究室の方々には数えきれないくらいお世話になりました。

大橋さん、ふとした時につぶやくセリフはきっと忘れられないでしょう。石田さん、あなたとの出会いは刺激的で、得たものも多かったです。石崎さん、車の運転最高でした。パソコンに対する知識と頭の回転の早さにはびっくりです。梅代さん、その声は 152 を大いに盛り上げ、楽しい時が過ごせました。いつまでもそんな梅代さんでいて下さい。輝さん、僕とからむことはあまりありませんでしたが、その独特の雰囲気は格別でした。佐藤さん、そういえば飲みや飯でしか会ったことはないですが、実験中はとても一生懸命なことを僕は知っています。池袋のカレー屋とても美味しかったです。井上さん、いつも冷静でよかったです。古賀さん、もっと仲良くなれたと思うのに残念です。社会に出ても頑張ってください。早川さん、いかにも体育会系の行動と発言はとてもよかったです。高井さん、長いこと席を借りました。申し訳ないです。常に清潔を保ったので安心して下さい。そして篠崎さん、あなたには本当にお世話になりました。僕のあまりの無知さに何度もイライラしたことでしょう。そんな時でも優しく質問に答えてくれた姿、実験に対する意志、執着心にはつねづね感心させられました。結局、事実上二人だけの実験になってしまいましたね。僕が最後まで頑張れたのもそんな篠さんが隣にいたからでしょう。二人で過ごした時間はとても有意義なものとして僕の記憶に残ると思います。1 年ちょいもしたら僕は M 論、篠さんは D 論ですね。フィールドは違いますが、お互い頑張りましょう。

3 年までの間、たいした心構えもなく、ろくに勉強しなかった僕ですが、最後の学年を自分なりに一生懸命やることで物理学に対してそれなりの充実感を持ってこの大学を卒業することができそうです。そのような場を提供してくれたみなさんに感謝します。