

2021 年度
課題研究 P1 実験レポート

ガムテープバリバリ発光における X 線スペクトル

指導教員

鈴木 淳也
田島 治

氏名

塚本 大智
當銘 啓

2022 年 3 月 28 日

1 実験動機

物質を剥がす、引っ搔く、擦る、砕くなどした場合に発光が生じる現象を摩擦発光という。この現象は古くから観測、研究がされているものの、発光メカニズムの詳細はいまだ不明な点が多い。

摩擦発光はガムテープの粘着面同士を貼り合わせてから剥がすことでも観測できる (図 1.1)。ここでは可視光が観測されているが、真空中でテープをロールを剥がすと X 線が放出されるという報告がある [1]。

前年度の P1 ではこの報告を参考に実験を行い、ガムテープの粘着面同士の剥離により空気中でも X 線が放出されることを明らかにした。本研究は前年度の先行研究を発展させ、X 線の詳細なスペクトルの観測を主な目的に研究を行った。

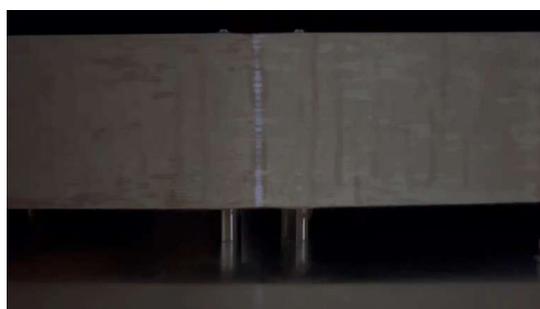


図 1.1: ガムテープの剥離による摩擦発光

2 実験原理

2.1 ガムテープバリバリ発光の原理

多くの摩擦発光は前述の通りその発光メカニズムが完全に明らかになっていないものが多いが、テープの剥離に伴う X 線放出については多くの論文において次のようなメカニズムが提案されている:

1. テープ表面が剥離時に帯電する。
2. 表面の電荷によって電場が形成される。
3. 電場によって電子が加速される。
4. 加速された電子が制動放射で X 線を放出する。

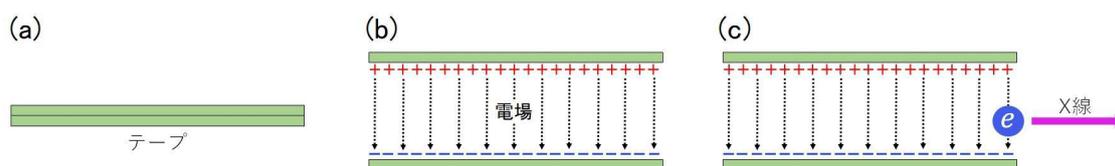


図 2.1: 発光原理の模式図。張り合わされたテープ (a) が剥離によって帯電し電場が形成され (b)、その電場で電子が加速されることで制動 X 線が放射される (c)。

論文 [2] によると、幅 1.9cm のテープと幅 1.5mm のテープを同条件で剥離した際、放出される X 線のエネルギースペクトルに大きな差は見られなかったという。したがって上記のメカニズムは少なくとも 1mm 以下の領域で生じていると考えられる。

2.2 検出器の動作原理

本実験では X 線の観測にシリコンドリフト検出器 (以下 SDD) を用いたので、SDD の動作原理も説明する。

SDD は基本的にシリコン単結晶とそれに取り付けられた電極からなる。シリコン単結晶に X 線や γ 線が入射すると一定の確率で電子と正孔が対生成される。その際、取り付けられた電極に電圧をかけておくことで電子が電極に流れ込み電流が生じる。生成される電子の数は入射光子のエネルギーに比例するため、入射光子のエネルギーを知ることができる。

3 実験装置

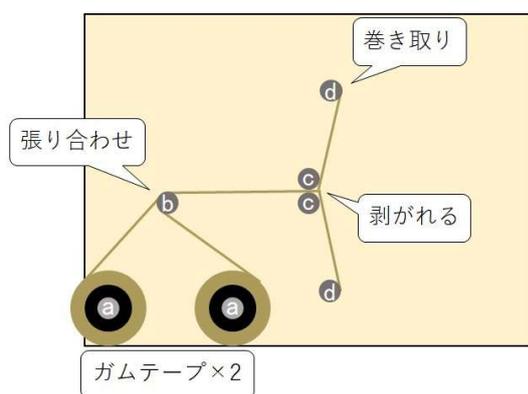
3.1 ガムテープ剥離装置のメカニズム

本研究ではガムテープを剥離するための装置を作成した。ここで装置の動作を概説する。

図 3.1 は剥離装置の概略図である。剥離装置はガムテープを装着するローラー a、張り合わせローラー b、ガイドローラー c、巻き取り軸 d、及びローラー・軸・テープを載せる基板、軸 d に接続されているモーター (図 3.1B) からなる。

はじめに図 3.1A のようにテープをセッティングした後にモーターを稼働させることで d がテープを巻き取り、それによって c 地点で剥離、b で張り合わせ、a からテープの供給が順次行われる。このようにして装置でテープを剥がし続けることができる。

なお、図 3.1B のようにローラー軸とモーター軸の間にフレキシブルカップリングを挟むことでローラー軸とモーター軸の角度が多少ずれても回転を伝えられるようになっている。



(A) 基板上的配置



(B) モーターとローラー d の軸の結合

図 3.1: 剥離装置の概略

3.2 昨年度のガムテープ剥離装置の問題点

予備実験の段階で前年度研究で作成・使用されたガムテープ剥離装置 (図 3.2) を流用したところ、装置の稼働中にテープが千切れる、張り合わせがずれる、モーターと軸の結合が外れるといったことが多く見られた。これらは長時間のテープ剥離の妨げになる問題であり、次の原因で生じていた:

- ガムテープをロールに通しているだけでしっかり固定していない (図 3.2A)。
- 基板が木製であるため、ガムテープを剥がす際にかかる力で基板が歪む (図 3.2A)。
- 装置のフレームから出るねじが影響し基板が水平にならない (図 3.2B)。
- 装置のフレームに歪みがあり装置が安定して自立しない。



(A) 旧剥離装置の基板



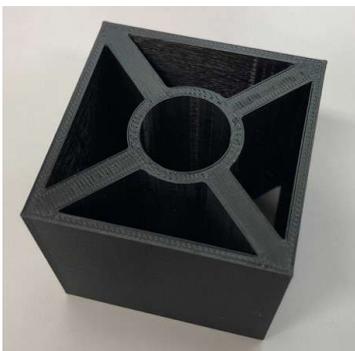
(B) モーターの配置と固定

図 3.2: 昨年度作成された剥離装置 (ヒカル君)

3.3 剥離装置の改良

本研究では 3.2 節で上げた装置の問題点を解消するために以下のような改良を行った:

- ガムテープのロールを固定する部品を 3D プリンターで作成した (図 3.3)。



(A) テープ用リール



(B) リールに装着したテープ

図 3.3: テープ用リールとテープの装着

- 装置の外枠をアルミ製の角材に置き換えた (図 3.4)。
これにより装置フレームの歪みが解消され、頑丈性も増したため装置の安定性が向上した。



図 3.4: 新しいアルミ製フレーム

- モーター固定用の板を木製からアルミ製に変更した (図 3.5)。
アルミ板を用いることでモーター稼働時に装置が歪まず、安定してガムテープを剥離できる。

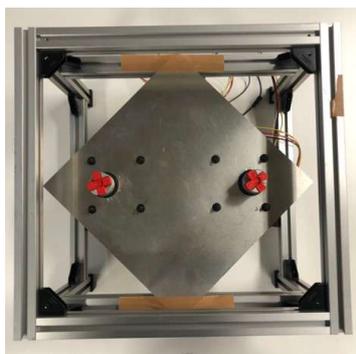


図 3.5: アルミ板で固定されたモーター

- 装置の基盤をアルミ製の平板に置き換えた (図 3.6)。
ガムテープの剥離時に平板が歪まないため長時間ガムテープを剥がせるようになった。



図 3.6: 装置のアルミ基板

これらの改良によりガムテープの張り合わせと剥離をほぼ均一に行えるようになり、長い観測時間を安定して実現できるようになった。

3.4 X線検出装置の改良

前年度の研究では CdTe ダイオード検出器を用いていた。しかしながら前年度の研究結果から放射される X 線のエネルギーは数 keV 程度であることが判明し、CdTe 検出器のエネルギー分解能が 60keV において 5.5keV であることから X 線のエネルギースペクトルを詳細に見ることが出来なかった。したがって今年度は Amptek 社の SDD(エネルギー分解能 $\sim 100\text{eV}$) を用いて実験を行った。



図 3.7: 下:SDD とプリアンプ 上:PX5(デジタルパルスプロセッサー)

4 実験方法

本実験は改良された装置を用いてガムテープを剥離し観測を行った。実験は以下のように行った:

1. 2つのガムテープを剥離装置に装着し、図 3.1A のようにテープをセッティングする。
2. モーターのスイッチを入れ、巻き取り軸を回転させてテープを巻き取って剥がす。本実験での剥離速度は $4 \sim 9\text{cm/s}$ とした。
3. テープの剥離面の前方に SDD(Amptek 社製 XR-100) を設置し、放出される X 線を観測する。
4. 観測されたシグナルを PX5 で処理し、最終的にコンピュータで読み込む。PX5 の操作や読み込まれたデータの確認は DPP-MCA というソフトウェアを用いて行う。

5 実験結果

測定の結果データ A(図 5.1) とデータ B(図 5.2) の二つが得られた。データ A は $\text{gain}=4.59$ で 1 分程度測定し、データ B は $\text{gain}=36.00$ で 4 分程度測定した。

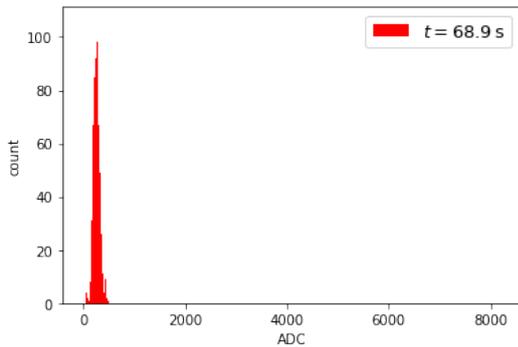


図 5.1: データ A:gain=4.59 で測定。

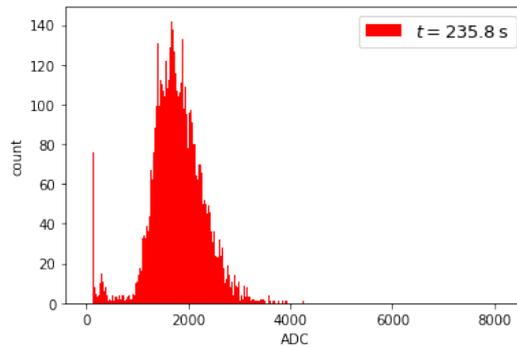


図 5.2: データ B:gain=36.00 で測定。

6 解析

6.1 較正方法

データ A(図 5.1) とデータ B(図 5.2) に対しそれぞれ次のようにキャリブレーションを行った。

6.1.1 データ A の較正

データ A のキャリブレーションは以下の手順で行った。

1. ^{241}Am をアルミ板上で gain=4.59 として測定し、ADC 値が 7000 程度のピークを Am の特性 X 線 59.54 keV と対応させた。
2. 同様の測定を銅板上で行い、アルミ板上での測定結果と比較して新たに現れた ADC 値が 950 程度のピークを銅の特性 X 線 8.05 keV と対応させた。
3. 8.05 keV のピークと 59.54 keV のピークを用いて銅板上での Am の測定データをキャリブレーションし、他のピークのうち Am 由来と思われるピークを Am の X 線のエネルギーと対応させた [3]。
4. ピークは DPP-MCA の ROI 機能を用いて中央値を求め、それをエネルギーと対応させた。またエネルギー E と ADC 値 X は線型

$$E = aX + b \quad (6.1)$$

と仮定し、 a と b を最小二乗法で求めた。

6.1.2 データ B の較正

データ B の測定を行った際検出器が破損したため Am でのキャリブレーションはできなかった。その代わりに ADC カウント 200 から 500 の領域にある二つのピークをそれぞれ Gaussian でフィッティングし、ピークの中心を N_2 と O_2 の特性 X 線 [4] と仮定してキャリブレーションを行った。

6.2 較正結果

各データでのピークの中心と対応するエネルギーは表 6.1 と表 6.2 の通り。

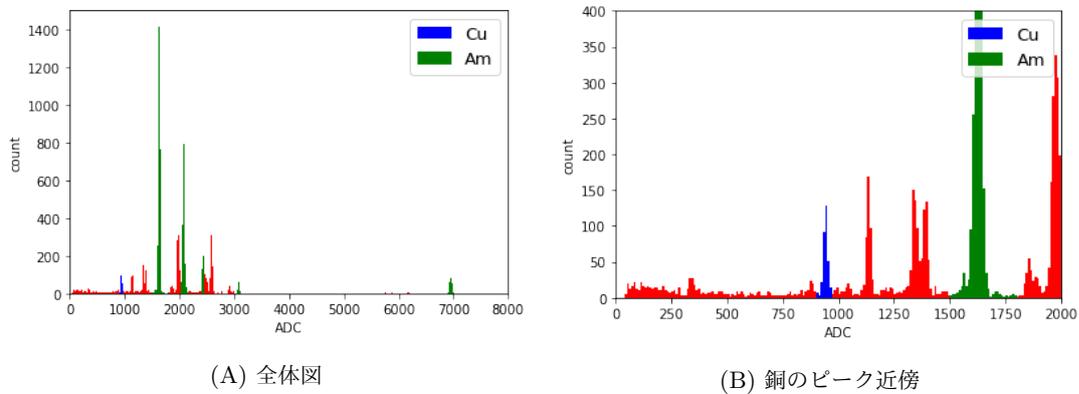


図 6.1: データ A の較正に用いたピーク:緑のピークが Am、青のピークが銅に対応する。他のピークは銀や亜鉛など検出器の特性 X 線と考えられる。

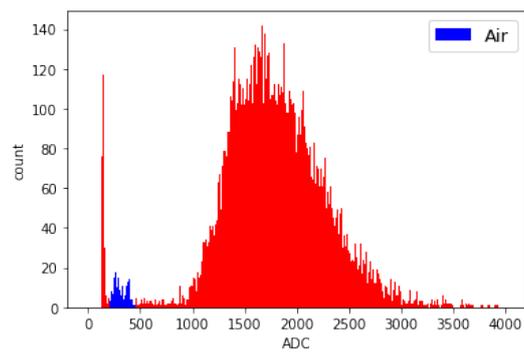


図 6.2: データ B の較正に用いたピーク:青色のピークが空気の特性 X 線に対応する。

表 6.1: データ A でのピークと対応するエネルギー

ADC 値	エネルギー [keV]
941.52	8.05
1628.01	13.95
2074.76	17.74
2427.04	20.8
3076.48	26.35
6951.39	59.54

表 6.2: データ B でのピークと対応するエネルギー

ADC 値	エネルギー [keV]
280.92	0.392
382.34	0.526

較正の結果は図 6.3 と図 6.4 の通り。

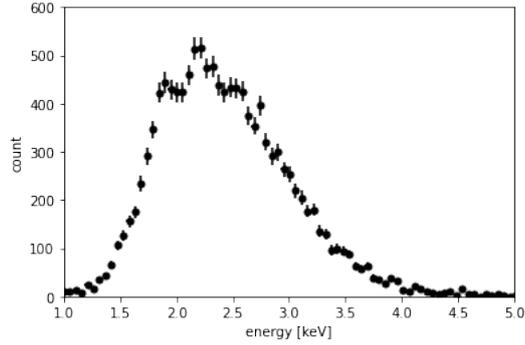
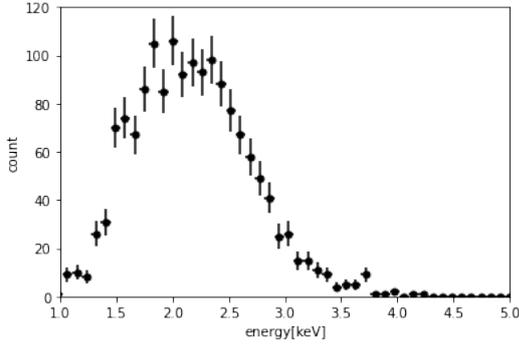


図 6.3: 較正後のデータ A:刻み幅は 10 カウント 図 6.4: 較正後のデータ B:刻み幅を 40 カウント
毎、85.7 keV 毎にしている。 毎、52.8 eV 毎にしている。

図 6.3 と図 6.4 から、制動 X 線のスペクトルは 1 keV から 5 keV の範囲に分布していることがわかった。

6.3 検出器の検出効率や空気減衰の補正

制動 X 線のエネルギーが数 keV 程度であるため、検出器の検出効率や空気減衰を考慮する必要がある。
厚さ l のある物質をエネルギー E の光子が通過する確率 $T(E)$ は

$$T(E) = e^{-\mu(E)l} \quad (6.2)$$

で与えられる。ここで $\mu(E)$ は物質の減衰係数である。これを用いて検出器の検出効率および空気の減衰を求めた。減衰係数 $\mu(E)$ については NIST のデータベース [5] を用いて次のように計算した。

1. NIST のデータからエネルギー E を含む区間を選び、その下端を E_L 、上端を E_R とする。
2. $E = E_L$ での $\mu(E)$ を μ_L 、 $E = E_R$ での $\mu(E)$ を μ_R とする。
3. 区間 $[E_L, E_R]$ で $\ln \mu$ は $\ln E$ に対し線型と近似し $\ln E$ を求めた。つまり

$$\ln \mu(E) = \frac{\ln \mu_R - \ln \mu_L}{\ln E_R - \ln E_L} (\ln E - \ln E_L) + \ln \mu_L = \frac{\ln (E_R/E)}{\ln (E_R/E_L)} \ln \mu_L + \frac{\ln (E/E_L)}{\ln (E_R/E_L)} \ln \mu_R \quad (6.3)$$

6.3.1 検出器の検出効率

検出器の検出効率は検出部分の検出効率 $P_{\text{det}} = 1 - T_{\text{det}}(E)$ と窓の通過確率は $T_{\text{win}}(E)$ の積で与えられる。Amptek のホームページによると検出器には C1 という窓が使われており、検出器は表 6.3 のように構成され

ている [4]。 $T_{\text{win}}(E)$ については窓の一部を Si のグリッドが覆っていたのでグリッドで覆われた領域と覆われていない領域で分割してそれぞれの透過確率の和とした。

表 6.3: 検出器の構成物質

検出器のパーツ	構成物質	厚さなど
検出部分	Si	500 μm
検出器窓部分	N_3Si_4	90 nm
窓コーティング	Al	250 nm
グリッド	Si	15 μm 、窓の 22% を覆う

6.3.2 空気による減衰

空気の減衰係数は空気を N_2 が 78%、 O_2 が 21% の混合気体で気圧は 1 atm、気温は 0°C として計算した。また空気の厚さは 10 mm, 15 mm, 20 mm の三つの場合を考えた。

6.3.3 補正結果

検出器の検出効率と空気の減衰を掛け合わせた、剥離面から生じた X 線が検出される確率 $P(E)$ は図 6.5 のようになった。図 6.3 と図 6.4 を $P(E)$ で割ると図 6.6 と図 6.7 を得られた。それぞれの図で青が空気の厚さ 15 mm、橙が空気の厚さ 10 mm、緑が空気の厚さ 20 mm に対応している。

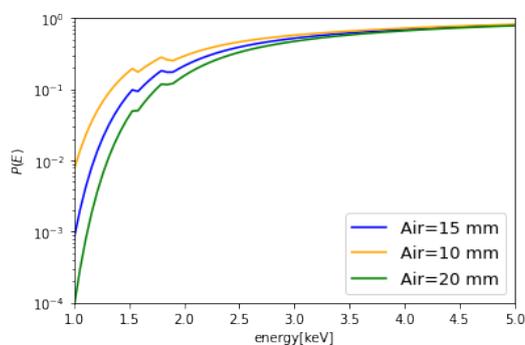


図 6.5: 各エネルギーにおける検出確率

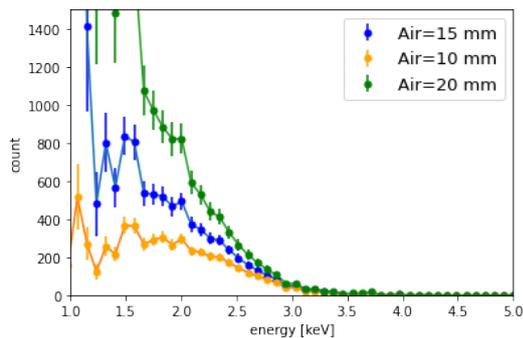


図 6.6: 検出効率を考慮したデータ A

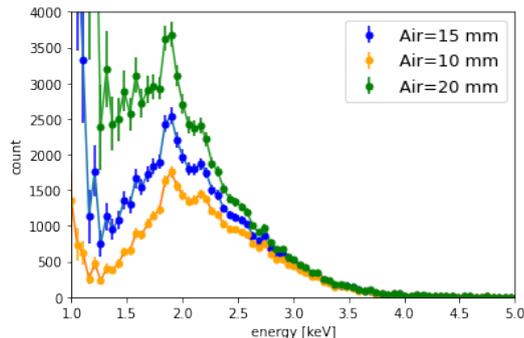


図 6.7: 検出効率を考慮したデータ B

6.4 スペクトルの最大エネルギー

ガムテープから放出される X 線は制動放射によって生じていると考えられているので、最大エネルギーが議論できる。図 6.6、図 6.7 においてカウントが 10 以上となる最大のエネルギー値を最大エネルギーとしたところデータ A では 3.72 keV、データ B では 4.54 keV となった。

7 考察

7.1 データ同士の比較

解析して得られた 2 つのデータ (図 6.6、図 6.7) を比較するとデータ A ではピークが 1.5 keV 程度、最大エネルギーが 3.72 keV であるのに対しデータ B ではそれぞれ 2.0 keV 程度と 4.54 keV でデータ B の方がより高いエネルギースペクトルを持っていることがわかった。

今回の実験ではガムテープを巻き取ることにより巻き取り軸が太くなり、それによって剥離速度が増加していく構造をしていた。したがって平均剥離速度は測定時間の長いデータ B の方が大きい。一方で金属面からテープを剥がした際には剥離速度が速いほどより高いエネルギースペクトルの X 線が生じることが知られており [6]、今回の実験でも平均剥離速度の差によってエネルギースペクトルの差が生じたと考えられる。またこの事実から粘着面同士を剥離した今回の実験でも金属面から剥離した場合と同様のメカニズムで X 線が生じていることが示唆される。

7.2 他論文との比較

ここからは他論文との比較によって考察を行う。

テープの剥離による X 線放出を調べた他の研究と本研究における差異は主に

1. 気圧の違い
2. テープの剥離面の違い
3. 放射される X 線のエネルギーの違い

の 3 つに分類される。

まず1については他の研究が0.133Pa程度の真空中で行われているのに対し、本研究は1atmの大気圧中で行われた。

2は剥離が「テープの粘着面と基材(テープの粘着面ではない面)の剥離」であるか「テープの粘着面同士の剥離」であるかの違いであり、多くの研究が前者、本研究は後者である。

そして3に関しては、従来の研究では15～20keV以上であるのに対し、本研究では3keV程度であった。

1の違いについて、0.1Pa以下または1.0Pa以上の領域ではテープの剥離によるX線が放出されないという報告[7]がある。この報告から、気体分子の存在がX線放出に重要な役割を果たしていると推察される。他の研究や2節で紹介したメカニズムを鑑みるに、X線放射は恐らく気体分子と加速された電子の衝突(加速された電子が気体分子の核付近を通過した際に軌道を大きく曲げられるという過程だと思われる)によって放出されると考えられる。気圧が0.1Pa以下でX線放出がない理由は、衝突する気体分子がごく少ないため衝突過程が殆ど生じないからだといえる。また1.0Pa以上の状態でもX線放出が起こらない理由は、気体分子が多くなった分電子の平均自由行程が短く、十分に加速されないということの説明ができる。

一方、今回の実験では空気中による剥離でX線放出に至っている。これに関しては2の違いが関係していると考えられる。従来の実験ではテープの粘着面と基材を剥離していたが、テープの基材には細かい凹凸があり、粘着面と基材の正味の粘着面積は見かけ上の粘着面積よりも小さくなっている。対して今回の実験では粘着面同士を張り合わせており、高い柔軟性をもつ粘着剤同士を張り付ける正味の粘着面積は従来の実験よりも増加している。剥離時帯電の量は粘着面積にほぼ比例するため[8]、本実験での剥離時帯電量は従来よりも増加していたと考えられる。そのため強い電場が形成され、電子がより加速された結果短い飛程でもX線放出に至ったと考えられる。

3の違いは、帯電量の多さからX線放出には至るが飛程の短さから15keV程のX線を出すまでの加速は受けられず、放射されるX線のエネルギーは3keV程度になるという説明ができる。

以上のことから、本研究における他研究との違いは粘着面同士の剥離という特色によって生じているものと考えられる。

もしこれらの考察が正しければ、真空中で粘着面同士を剥離した場合には従来の論文よりもエネルギーの高いX線が出ることになる。またガムテープを剥離する際に出てくる放射線の中に電子が多く含まれることも考えられる。この考察を検証するためには、真空実験を行うか、本実験と同様の設定でテープを剥離した際に電子が放出されているか(厳密には別の放射線源を置いたときと比べて電子が多く出ているか)などを調べる必要があるだろう。ともかくにも、本研究の特色は粘着面同士の剥離だといえるので、今後の研究において剥離面の違い(粘着面と基材か粘着面同士か)に焦点を当てることは意味があることだと思われる。

8 結論

粘着面同士を貼り合わせたガムテープを4m/sから9m/sで剥がし、SDDで測定を行った結果スペクトルが1keVから5keV程度のX線が観測された。

得られた2つのデータの比較から測定時間が長いデータの方がより高いエネルギーのX線が多く、このことから剥離速度とX線のエネルギーに相関があることがわかった。このことはX線が放出される機構はテープを接着する物質に関わらず同じであることが示唆している。

他研究との比較から粘着面同士を貼り合わせたことで基材からテープを剥がしていた他研究の場合と比べて剥離時帯電量が多く、それにより従来では観測されなかった大気圧中でX線を観測されたと考えられる。またこの考察から真空中では従来の研究より高いエネルギーのX線を観測される可能性が示唆されている。

9 展望

今後の展望としては、まず真空実験への移行が挙げられる。7.2 節でも述べたように多くの研究は真空中で行われている。本研究の特色である粘着面同士の剥離を真空中で行うことで新しい発見がある可能性は高いと思われる。

また真空実験への移行に際しては、モーターの新調が必要不可欠である。前年度及び今年度の実験で用いたモーターは真空環境に対応しておらず、そのまま流用すれば真空度の低下や真空ポンプの破損につながる恐れがある。

そして今年度用いた観測装置 (SDD) は我々の不注意で破損してしまい (本当にすみませんでした)、来年度以降は恐らく新品の購入か別の装置を用いる必要がある。しかしながら新品の購入は P1 の予算では難しいため、既にある CdTe 検出器を再び用いるか、もしくは観測装置の自作というのが考えられる手であろう。

真空中で実験を行うことが出来るならば、放射される X 線のエネルギーは今回よりも高くなることが予測されるため、CdTe 検出器でもスペクトルはそれなりに見れるかもしれない。

または一転して、電子の放出を調べる方向に切り替えるのも新しい発見を見つけることにつながるかもしれない。

いずれにしても、実験を行う前に検出器を保護する部品や機構を作り、検出器の破損させないような対策も必須である。

10 謝辞

本実験は京都大学大学院理学研究科物理学第二教室高エネルギー物理学研究室の支援のもので行われました。関係するすべての方に感謝申し上げます。特に、田島さん・鈴木さん・栗林さん・河本さんの惜しみない協力と適切な助言なくして本研究は成立しませんでした。本当にありがとうございました。

また今回の研究の根幹を成した検出器は物理学第二教室の宇宙線研究室からのご厚意で貸していただきました。宇宙線研究室の皆様方に感謝申し上げます。

そしてこの度は貸していただいた検出器を破損させてしまい、誠に申し訳ございませんでした。

宇宙線研究室と高エネルギー研究室の皆様方には心よりお詫び申し上げます。

参考文献

- [1] Carlos G. Camara, Juan V. Escobar, Jonathan R. Hird, and Seth J. Putterman. Correlation between nanosecond x-ray flashes and stick-slip friction in peeling tape. *Nature*, Vol. 455, pp. 1089–1091, October 23 2008.
- [2] C.G. Camara, J.V. Escobar, and S.J. Putterman J.R. Hird. Mechanically driven millimeter source of nanosecond x-ray pulses. *Appl Phys B*, Vol. 99, pp. 613–617, 2010.
- [3] Kharkov Institute of Physics and Technology. Samples of CdTe and CdZnTe Detector Spectra, 2018. https://www.kipt.kharkov.ua/kipt_sites/isspmst/nrdetectors/en/detectors/spectra/index.html[Accessed:02/02/2022].
- [4] Inc Amptek. User Operating Manual 25 mm² XR-100FastSDD X-Ray Detector & Preamplifier, 2021.

<https://www.amptek.com/-/media/ametekamptek/documents/products/user-manuals/xr100-fastsdd-25-user-manual-b2.pdf?1a=en&revision=77b84d66-bb2c-4065-af23-cc1e51790a5e>[Accessed:02/02/2022].

- [5] National Institute of Standards and Technology. X-Ray Form Factor, Attenuation, and Scattering Tables, 2016. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/FFast/html/form.html>[Accessed:02/02/2022].
- [6] Hartmut Stöcker, Maximilian Rühl, Anett Heinrich, Erik Mehner, and Dirk C. Meyer. Generation of hard x-ray radiation using the triboelectric effect by peeling adhesive tape. *Journal of Electrostatics*, Vol. 71, pp. 905–909, 2013.
- [7] E. Constable, J. Horvat, and R. A. Lewis. Mechanisms of x-ray emission from peeling adhesive tape. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 97, , 2010.
- [8] 掘靖朗, 穂永信, 石部功. 粘着テープの剥離時帯電. 日本接着学会誌, Vol. 43, No. 3, pp. 97–103, 2007.