Est-il possible de fabriquer un émetteur à Rayons X portable afin de faciliter l'accès à la radiographie ?

Avec LACLAVERIE Jean-Michel
Professeur Encadrant
MICHELI Baptiste, PEREZ Lucas, SHAFROTH Lisa
Lycée Bernard Palissy – Agen - Académie de Bordeaux

Résumé

De nos jours, les rayons X sont utiles en médecine, notamment en radiographie où ils permettent des analyses plus approfondies du corps. Cependant, ces machines proposant une précision exceptionnelle coûtent très cher et donc sont peu accessibles, en particulier dans les pays du tiers-monde qui en ont besoin pour l'avancée de leur médecine. De plus, les Rayons X représentent une importance capitale en sciences, et ont permis par exemple de préciser la structure de l'ADN grâce à la cristallographie. Le but de notre projet est donc de produire des Rayons X avec un dispositif peu coûteux et miniature, le rendant transportable et surtout plus facilement utilisable tout en respectant les normes de sécurité concernant les radiations. Grâce à la Pyroélectricité, un phénomène encore méconnu, nous sommes arrivés à cette émission simplifiée et en prime à résultats très satisfaisants !

Avant-propos

Ce projet prend son origine aux Arts et Métiers à Paris en mai dernier, à la fin du concours C'Génial. Nous souhaitions alors nous attaquer à travers la science aux problèmes du quotidien. Nous avions précédemment visité l'ESRF de Grenoble et c'est à ce moment que nous avons décidé de consacrer notre projet aux rayons X, après avoir été fasciné par les recherches menés au Synchrotron. Nos propres études ont donc commencé dès cette date.

C'est cependant dans son originalité que ce projet tire sa force. En effet, c'est un projet fait par nous, les élèves et débuté par une idée que nous avons imaginé et développé sans proposition de notre professeur. C'est au cours de l'été que le projet s'est poursuivi, sans aucune aide et par nos propres moyens mais surtout, depuis la rentrée, sur nos heures de temps libre en dehors du travail scolaire car les deux heures d'atelier scientifique ne nous permettaient pas d'avancer suffisamment vite. Notre ambition était de proposer un projet à échelle d'élèves, entièrement réalisé par nous et ainsi découvrir par nous même les notions essentielles ainsi que la rigueur nécessaire à la construction complète d'un dossier comme celui-ci. C'est dans cette optique là que nous nous sommes tant investis.

Nous tenions notamment à remercier Lisa Shafroth, notre amie et première supportrice, qui est en réalité un membre à part entière du projet, mais malheureusement sa poursuite d'études en Classe Préparatoires au Lycée Henry IV ne lui a pas permis de participer aux Olympiades de Physiques. Toutefois, Lisa nous a mis en relation avec un chercheur de l'Université de Binghamton dans l'État de New York aux Etats-Unis, qui travaille sur les cristaux pyroélectriques : James D. Brownridge. Ce dernier, dès notre premier email, a été très intéressé par notre projet, il avait et a toujours une volonté de nous aider sans limite. De plus, c'est grâce à cet homme, que nous avons eu des cristaux pyroélectriques. En cela, pour la confiance qu'il nous accorde, nous souhaiterions le remercier du fond du cœur, et même nous espérons le rencontrer un jour !

Ensuite, nous nous devions d'écrire un petit mot à Amaury Micheli, élève à l'école Polytechnique, qui a su nous guider dans les moments difficiles et apporter sa connaissance. Enfin, nous adressons une pensée et nos vœux de réussite à Léa Cabrol, notre amie, qui a choisi dès le départ de se concentrer à son travail scolaire plutôt que de participer aux Olympiades de Physique.

Sommaire

Introduction 3
Problématique 4
I) Les principes physiques régissant le monde des particules 4
A) La lumière 4
B) Émettre de la lumière 5
C) Émettre des rayons X : le rayonnement continu de freinage 5
II) Émettre nos propres rayons X : première version 6
A) Le tube à rayons X 6
B) Etude du spectre continu d'un tube à rayons X 6
C) Etude des raies caractéristiques 9
D) Générer des hautes tensions 11
III) Émettre nos propres rayons X : deuxième version 11
A) La pyroélectricité 11
B) Les cristaux pyroélectriques 12
C) Modification du Tube de Coolidge 14
D) Fabrication de notre tube 15
IV) Fabrication d'un détecteur à rayons X 16
A) Le film photographique 16
B) Détection par scintillation 18
C) Fabrication de notre détecteur 18
Conclusion et perspectives 19

Introduction

Que sont les rayons X ? Ce sont des rayonnements électromagnétiques éloignés du visible, les rendant peu utilisés dans la vie de tous les jours. Ces rayonnements trouvent tout de même une grande part dans les applications technologiques actuelles et font partie des plus grandes découvertes scientifiques à ce jour. Ils peuvent ainsi servir pour l'imagerie médicale, leur utilisation la plus connue, afin de réaliser des radiographies ou pour scanner les bagages des passagers lors des contrôles dans les aéroports. Cependant, d'autres utilisations sont bien moins connues du grand public car réservées à la recherche scientifique. Ainsi, il est possible d'étudier la matière à l'échelle

de l'infiniment petit par rayonnement dit « synchrotron ». Cette étude est par exemple réalisée à l'ESRF de Grenoble que nous avons eu la chance de visiter et où les électrons sont accélérés à très grande vitesse puis déviés de leur trajectoire pour émettre des rayons X dans des lignes de lumière spécialisées. Une autre application réside dans la cristallographie. En effet, les rayons X permettent d'analyser la structure des cristaux moléculaires grâce à l'étude de leur arrangement spatial. De manière plus générale, il est possible de déterminer la structure d'un matériau grâce à la spectrométrie X dont on peut tirer des spectres caractéristiques des différents atomes. Ce sont leurs utilisations multiples qui nous ont amené à les étudier.

Pour réaliser ce projet, nous avons donc fait nombre de recherches et nous sommes posés de nombreuses questions sur l'émission de ces radiations, sur leurs applications actuelles mais surtout sur les futures applications possibles qu'il reste à découvrir. Tout au long de ce projet, notre intérêt a été de fabriquer notre propre émetteur de Rayons X expérimental, permettant d'élargir le domaine des applications notamment pour une utilisation médicale, dans le grand problème actuel des déserts médicaux français mais aussi pour un accès à la radiographie plus développé. Marchant dans les pas des grands physiciens du XXème siècle ayant travaillé sur les rayons X, nous avons cherché la méthode la plus adéquate pour les émettre et ainsi réaliser nos ambitions. Elèves de lycée, ce fut un défi difficile de manipuler ces rayons pour proposer une expérience à notre portée mais après de nombreux d'efforts, notre dispositif a finalement pu être conçu.

Dans un premier temps, nous aborderons la physique de l'infiniment petit pour aborder les notions des particules que nous utiliserons. Dans un deuxième temps, nous présenterons la première idée que nous avons eue pour émettre des rayons X puis dans un troisième temps, la seconde idée qui nous a conduits à fabriquer notre émetteur final. Enfin, dans un dernier temps, nous détailleront la conception théorique d'un détecteur adapté aux rayons X.

Problématique

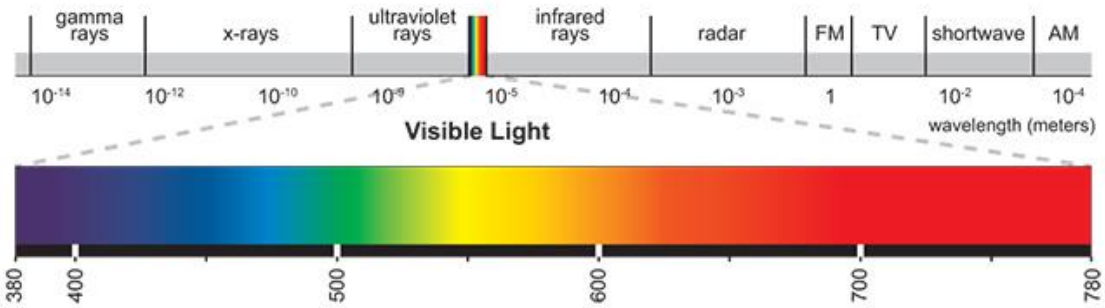
Est-il possible de fabriquer un émetteur à Rayons X portable afin de faciliter l'accès à la radiographie et à la spectrométrie ?

I) Les principes physiques régissant le monde des particules

A) La lumière

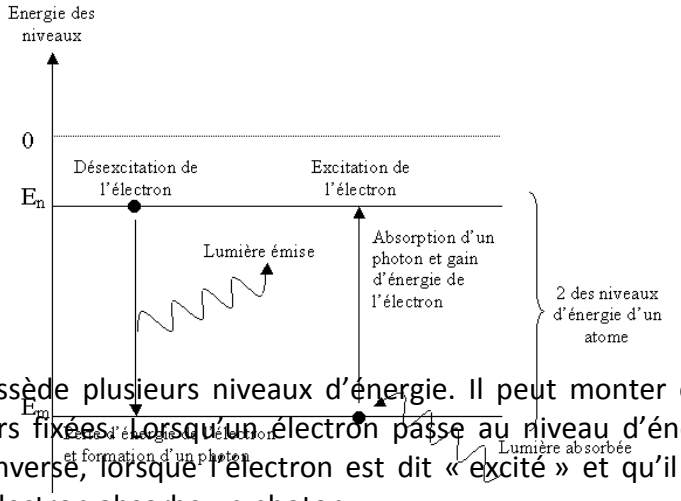
En physique, on considère que les photons sont à l'origine de la lumière. Sachant que le photon est une particule élémentaire et même un boson, il est soumis à la dualité onde-corpuscule de la mécanique quantique. Donc le photon peut être considéré comme une

onde. Ainsi, on peut associer à la lumière une longueur d'onde. Le photon est considéré en physique quantique comme le médiateur de l'interaction électromagnétique. On peut alors voir la lumière comme un rayonnement électromagnétique, et tracer son spectre pour les différentes longueurs d'ondes possibles. La lumière dite « visible » n'est qu'une partie du spectre électromagnétique.



B) Émettre de la lumière

Nous avons vu précédemment que les photons constituaient la lumière. Nous nous sommes demandés comment pouvait-on émettre de la lumière, et donc par conséquent, comment émettre des photons. Il existe trois méthodes pour émettre des photons : la transition électronique, la transition nucléaire et l'annihilation de paires particule/anti-particule. Nous allons nous intéresser à la production de photon par transition électronique.



Un électron possède plusieurs niveaux d'énergie. Il peut monter ou descendre de niveau avec des valeurs fixées. Lorsqu'un électron passe au niveau d'énergie inférieur, il émet un photon. A l'inverse, lorsque l'électron est dit « excité » et qu'il passe au niveau d'énergie supérieur, l'électron absorbe un photon.

C) Émettre des rayons X : le rayonnement continu de freinage

Afin de réaliser notre projet, nous devons produire des rayons X. Pour ce faire, il existe deux principales manières. De manière naturelle, lorsque certains isotopes se désintègrent, ils peuvent produire des rayons X. Mais, pour produire des rayons X utilisables, on utilisera le Rayonnement continu de Freinage ou *Bremsstrahlung (nom d'origine)*.

Lorsqu'on fait entrer des électrons accélérés en collision avec un solide (généralement en métal), ceux-ci sont fortement ralentis par le solide. Un ralentissement

d'un faisceau d'électrons correspond à une réduction de vitesse de particules chargées. Selon la Formule de Larmor :

$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\varepsilon_0 c^3}$$

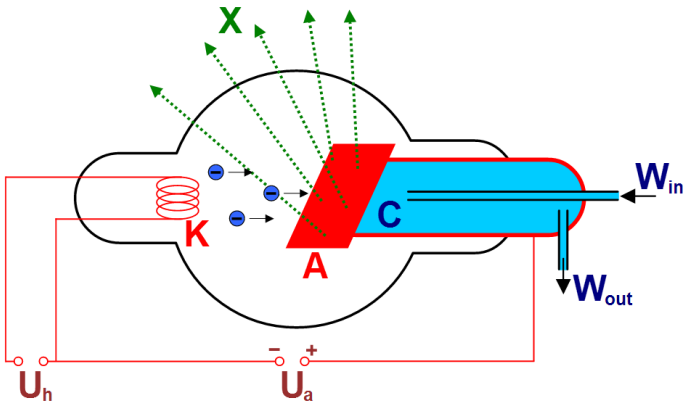
Où q est la charge de la particule, a l'accélération, ε_0 la permittivité du vide, c la célérité de la lumière

Donc, les électrons subissant une réduction de vitesse émettent un rayonnement électromagnétique.

II) Émettre nos propres rayons X : première version

A) Le tube à rayons X

Pour rappel, les premiers rayons X ont été émis à partir d'un tube cathodique (comme on peut trouver dans les téléviseurs cathodiques) modifié. Ces tubes spéciaux sont alors définis comme des tubes à rayons X. La première version a été inventée par Crookes et est appelée le Tube de Crookes. Ce tube a été amélioré par Coolidge et a donné le Tube de Coolidge :



Les tubes de Coolidge sont constitués d'une cathode K dans laquelle on fait passer une haute-tension afin de générer une différence de potentiel avec l'anode A, ce qui va permettre d'accélérer des électrons entre la cathode et l'anode. Les électrons vont aller se collisionner sur l'anode, provoquant un rayonnement continu de freinage. Toutefois, la collision des électrons sur l'anode provoque énormément de chaleur (dû à l'Effet Joule), c'est pourquoi il faut refroidir l'anode.

B) Etude du spectre continu d'un tube à rayons X

Pour produire nos premiers rayons X, nous allons chercher à reproduire un tube de Coolidge. Cependant, avant d'expérimenter, il nous faut déterminer certaines choses,

comme le spectre émis par le tube, et par conséquent la différence de potentiel entre la cathode et l'anode. De plus, l'anode est susceptible de s'échauffer, il faut choisir en quel matériau fabriquer notre anode.

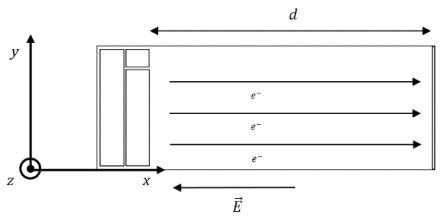
Pour déterminer le spectre d'un rayonnement continu de freinage, on peut démontrer la longueur d'onde minimale du spectre à l'aide de la Seconde Loi de Newton.
En effet, nous savons que l'énergie du photon sera inférieure ou égale à l'énergie de l'électron qui émet. Par conséquent :

$$E_e \geq E_p$$

De plus, on sait que :

$$E_e = \frac{1}{2}mv^2 \text{ et } E_{photon} = \frac{hc}{\lambda}$$

On décrit l'expérience par le schéma suivant :



Donc définissions :

$$\vec{v}(0) = \vec{o} \qquad \vec{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}$$

$$\text{Pour } t = 0 : \begin{cases} x(0) = 0 \\ y(0) = 0 \\ z(0) = 0 \end{cases}$$

Or, rappelons que l'émission du photon a lieu au contact de la cible, donc on cherche la vitesse pour un temps t correspondant à la collision avec la cible. L'électron se déplace dans le vide, il est soumis à la gravité mais sa masse est négligeable. On ne considèrera donc seulement la force due au champ électrique produit par le Tube. Donc selon la Deuxième Loi de Newton :

$$m\vec{a} = \sum \overrightarrow{F_{ext}} \iff m\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = -e\begin{pmatrix} E_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\iff \begin{cases} ma_x = -eE_x \\ ma_y = 0 \\ ma_z = 0 \end{cases}$$

$$<=> \begin{cases} ma_x = -eE_x \\ v_y = 0 \\ v_z = 0 \end{cases} \text{ avec les Conditions Initiales précédemment énoncées}$$

$$<=> \begin{cases} ma_x = -eE_x \\ y(t) = 0 \\ z(t) = 0 \end{cases} \text{ avec les Conditions Initiales précédemment énoncées}$$

$$\text{Donc : } a_x = \frac{-eE_x}{m}$$

$$<=> v_x(t) = \left(\frac{-eE_x}{m}\right) t + constante$$

$$v_x(0) = constante \text{ or } v_x(0) = 0 \text{ donc : } v_x(t) = \left(\frac{-eE_x}{m}\right) t$$

$$x(t) = \left(\frac{-eE_x}{2m}\right) t^2 + constante \text{ or } x(0) = 0 \text{ donc } constante = 0$$

On appelle t_1 le moment où les électrons rencontrent la cible donc :

$$x(t_1) = d \text{ donc } d = \left(\frac{-eE_x}{2m}\right) {t_1}^2$$

$$\text{Sachant que : } t_1 = \sqrt{\frac{2dm}{-eE_x}} \text{ donc } v_x(t_1) = \frac{-eE_x}{m}\sqrt{\frac{2dm}{-eE_x}}$$

$$<=> v_x(t_1) = \sqrt{\frac{-2E_x d \times e}{m}}$$

$$\text{Donc } v_{cible} = \sqrt{\frac{-2E_x d \times e}{m}}$$

$$E_e = \frac{1}{2} m \left(\frac{-2E_x d \times e}{m}\right) <=> E_e = -(E_x d \times e) \ <=> -E_x = \|\vec{E}\| = \frac{U}{d}$$

$$<=> E_e = eU$$

$$\text{Donc } eU \geq \frac{hc}{\lambda}$$

Donc, nous aboutissons sur la formule suivante décrivant la longueur d'onde minimale du spectre généré, car nous avons auparavant calculé l'énergie maximale de ce même spectre :

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eU}$$

Où λ_0 est la longueur d'onde minimale du spectre, h la constante de Planck, c la célérité, e l'énergie d'un électron et U la différence de potentiel entre la cathode et l'anode

Afin de déterminer pour quelle longueur d'onde les Rayons X seront les plus intenses, on utilise cette loi empirique :

$$\lambda_{max} = \frac{3}{2}\lambda_0$$

Où λ_{max} est la longueur d'onde pour l'intensité maximale possible du spectre et λ_0 la longueur d'onde minimale du spectre

Comme abordé précédemment, les rayons X varient d'une longueur d'onde de 10^{-9} nm à 10^{-12} m (soit de l'ordre du nm à 10^{-3}nm). Ainsi, nous modélisons sur un tableur cette formule en fonction de différentes longueurs d'ondes minimales possibles.

Cependant, avant de présenter nos résultats, il est important de rappeler que les rayons X peuvent être plus ou moins impactant sur la santé des individus qui y sont exposés. Plus la longueur d'onde est faible, plus le rayon est énergétique. Ainsi, plus le rayon est énergétique, plus il est dangereux pour un tissu humain, par exemple. De plus, il faut un compromis entre avoir le minimum de risque possible et la plus grande partie du spectre émis dans les rayons X et si la longueur d'onde est trop petite, l'image finale obtenue ne sera pas suffisamment contrastée puisque peu de rayons seront absorbés par les organes.
De plus, il faut faire varier la longueur d'onde en fonction du type de radiographie désiré. En effet, pour une mammographie par exemple, les tissus sont plutôt mous, il faut donc un fort contraste possible avec des grandes longueurs d'ondes (de l'ordre de 0.03 nm à 0.04 nm). Par opposition, une radiographie du thorax nécessite un faible contraste car la zone présente à la fois des tissus mous et une structure osseuse ; les longueurs d'ondes requises seront donc plutôt de 0.01 nm. Ici, nous baserons nos calculs dans l'objectif d'effectuer une radiographie de la main. La radiographie de la main nécessite une longueur d'onde comprise entre 0.0250 et 0.0260 nm, d'après nos calculs.

Nos calculs montrent que pour de telles longueurs d'ondes, λ_{max} est comprise entre 0.0375 et 0.0390 nm.

λ0 (nm)	0,01	0,0125	0,0135	0,0145	0,0155	0,017	0,0175	0,019	0,0195	0,021
U (kV)	123,9	99,152	91,807	85,476	79,961	75,12	70,823	66,99	63,559	60,46
λmax (nm	0,015	0,0188	0,0203	0,0218	0,0233	0,025	0,0263	0,028	0,0293	0,031
λ0 (nm)	0,022	0,0225	0,0235	0,0245	0,025	0,026	0,026	0,027	0,0275	0,029
U (kV)	57,65	55,084	52,74	50,588	49,576	48,6	47,669	46,77	45,069	43,49
λmax (nm	0,032	0,0338	0,0353	0,0368	0,0375	0,038	0,039	0,04	0,0413	0,043

C'est pour cette raison que nous choisissons des longueurs d'ondes comprises entre 0.025 et 0.026, étant considérés comme des rayons X dits *légers*. Donc, nous obtenons les résultats ci-contre:

Ce tableau révèle que nous devons produire des tensions de l'ordre du kilovolt, et cela ne se fait pas à l'aide des générateurs disponibles au lycée utilisés pour pratiquer l'électronique classique.

C) Etude des raies caractéristiques

Au spectre continu émis par le tube, va se superposer un spectre de raies, qui ne dépendent que de la composition de l'anode. En effet, les atomes composant l'anode, sous l'effet de la collision avec le flux d'électrons sont dits ionisés. C'est-à-dire qu'un électron

gravitant autour du noyau est expulsé. La place ainsi rendue libre est occupée par un électron d'une orbite plus éloignée du noyau : ce saut est accompagné de l'émission d'un photon dans lequel se retrouve l'énergie que l'électron a perdue en se rapprochant du noyau. Au niveau du spectre, ces phénomènes d'ionisations sont caractérisés par des raies aux longueurs d'ondes caractéristiques. Ces mêmes raies peuvent ainsi être calculées à l'aide la loi de Moseley :

$$\sqrt{\upsilon} = C(Z - \sigma) <=> \upsilon = C^2(Z - \sigma)^2$$

Où υ est la fréquence de la raie, C et σ des constantes, et Z le numéro atomique constituant l'anode

Or C et Z sont des constantes qui dépendent du type de raies émises (K, L, etc… selon la notation des rayons X). Leurs valeurs sont donc les mêmes pour l'émission de toutes les raies K_α ou L_α (selon la notation de Siegbahn où la lettre principale est la couche électronique d'arrivée et l'indice détermine la couche de départ avec α s'il y a un décalage d'une couche supérieure et β si deux couches supérieures). Les travaux de Rydberg et sa constante ont permis une réécriture différente de la loi de Moseley tel que :

$$\upsilon = R\infty \cdot \mathrm{c} \cdot \left(\frac{1}{\mathrm{n}^2} - \frac{1}{\mathrm{n}'^2}\right) \cdot (\mathrm{Z} - \sigma)^2$$

Où υ est la fréquence de la raie, R_∞ la constante de Rydberg, c la célérité de la lumière, n le nombre quantique principal de la couche d'arrivée, n' le nombre quantique principal de la couche de départ, Z le numéro atomique de l'anode et σ une constante.

Sachant que $R\infty = 1{,}097\ \mathrm{x}10^7\ m^{-1}$. Si on la multiplie par la célérité on obtient $R\infty\,.\,\mathrm{c} = 3.291\ \mathrm{x}10^{15}\ s^{-1}$. Après de nouvelles recherches, Moseley trouva que la valeur de σ, pour les transitions $K_{\alpha,}$ valait 1 et valait 7,4 pour les transitions L_α. De là, on obtient 2 formules, pour les fréquences des raies K_α et L_α :

$$\upsilon(\mathrm{K}\alpha) = (3{,}291\ \mathrm{x}10^{15}) \cdot \left(1 - \frac{1}{4}\right) \cdot (Z - 1)^2 \text{ et } \upsilon(\mathrm{L}\alpha) = (3{,}291\ \mathrm{x}10^{15}) \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9}\right) \cdot (Z - 7{,}4)^2$$

Sachant que pour rappel dans le cas d'onde électromagnétique :

$$\lambda = \frac{c}{\upsilon}$$

Où λ est la longueur d'onde, c la célérité de la lumière et υ la fréquence

On peut donc en déduire les longueurs d'onde caractéristiques.

Comme dit précédemment, l'anode est susceptible de chauffer énormément. Il faut donc un matériau ayant une température de fusion élevée. Généralement, les anodes de tube de Coolidge sont fabriquées en Tungstène ou en Molybdène, même si on pourrait envisager un élément comme le Tantale. Donc selon la Loi de Moseley, en modélisant nos calculs sur un tableur, on obtiendrait les raies caractéristiques suivantes :

Anode	Z	υ(Kα) (Hz)	λ(Kα)	ΔE(eV)	υ(Lα) (Hz)	λ(Lα)	ΔE(eV)
Tungstène	74	1,3149E+19	2,28E-11	5,45E+13	2,0268E+18	1,48E-10	8,3986E+12
Molybdène	42	4,1479E+18	7,23E-11	1,72E+13	5,4704E+17	5,48E-10	2,2668E+12
Tantale	73	1,2792E+19	2,35E-11	5,30E+13	1,9664E+18	1,53E-10	8,1483E+12

On peut trouver sur Internet des valeurs expérimentales mesurées avec précision, pour rappel nous calculons avec une loi empirique, qui ne décrit pas parfaitement le modèle des raies caractéristiques, alors nous comparons :

Anode	ΔE(eV)(Kα)	Inexactitude	ΔE_{exp}(eV)(Lα)	Inexactitude
Tungstène	5,93E+13	8,11561053	8,40E+12	0,01701016
Molybdène	1,75E+13	1,78442313	2,30E+12	1,44439941
Tantale	5,75E+13	7,81763304	8,14E+12	0,10141605

D) Générer des hautes tensions

Afin de produire des rayons X, nous avons besoin d'un flux d'électrons en direction de l'anode. Pour générer ce flux, les Tube de Coolidge utilisent des filaments de Tungstène chauffés par des hautes tensions. Selon nos précédents calculs, nous allons chercher à générer des tensions de l'ordre du kilovolt (voir section ***II***, B)

De fait générer de telles tensions pose deux problèmes : cela relève d'expériences dangereuses impossibles à réaliser dans le cadre du lycée et un tel générateur prendrait beaucoup trop de place pour un émetteur dit "portable". Nous avons donc réalisé que générer des hautes tensions de manière "classique" posait un réel problème.

Heureusement, pour pallier à ce problème, Lisa est la petite-fille du chercheur Stephen Shafroth de l'Université de Chapell Hill en Caroline du Nord. Ce dernier a établi et publié des recherches sur les cristaux pyroélectriques. Ces derniers sont capables de produire des hautes-tensions en dépensant peu d'énergie et surtout, prennent peu de place.

III) Émettre nos propres rayons X : deuxième version

A) La pyroélectricité

La pyroélectricité peut être définie comme la capacité d'un cristal à générer une tension temporaire quand il est chauffé ou refroidi. Une variation de température induit une modification de la polarisation électrique du cristal, qui entraine la génération d'une tension temporaire. En vulgarisant, un changement de température induit un rapprochement ou un éloignement des atomes entre eux dans le réseau cristallin, ce qui induit une variation de la polarisation, cette dernière produisant donc une tension discontinue.

A l'origine, la surface du cristal est chargée à cause de la polarisation interne. Mais, cette surface est neutralisée par l'absorption d'ions de l'air ambiant qui est en équilibre avec la surface du cristal. Aucun champ électrique n'est donc formé. Si la température du cristal est modifiée, la polarisation interne change à cause du petit déplacement d'ions dans le cristal. Néanmoins, les périodes d'absorption et de désorption des ions sont beaucoup plus longues que le temps nécessaire au changement de la polarisation interne pour que la surface du cristal atteigne une charge stable. C'est ce décalage qui permet la genèse d'une tension.

Par exemple, quand une surface chargée négativement du cristal (surface -z) est placée à l'opposée d'une cible et si l'on augmente sa température, la surface -z acquiert une charge positive. Cela s'explique par le fait que la charge électrique négative de la surface -z diminue, ce qui cause une libération d'ions positifs, ce qui retarde le changement de température sur la surface -z du cristal.

D'un autre côté, la surface -z acquiert une charge nette négative quand la température est réduite. Un champ électrique est généré par la charge de la surface du cristal. Les molécules du gaz sont ionisées par le champ électrique, produisant des électrons et des ions positifs. Puis, les électrons sont accélérés par le champ électrique vers la cible et des rayons X sont donc générés quand les électrons entrent en collision avec la cible.

B) Les cristaux pyroélectriques

Nous pouvons diviser tous les cristaux existants en 32 classes. Dans ces 32 classes, 10 classes sont polaires spontanément, c'est-à-dire que ce sont des cristaux n'ayant pas besoin d'un champ électrique extérieur pour être polarisé. Si un cristal est polaire, il est pyroélectrique, la réciproque est aussi valable.

Après des recherches, nous avons pu dresser le tableau suivant :

Système	**Classe**	**Symétrie**	**Schönflies**	**Nom de la Classe**	**Exemples connus**
Triclinic	1	non	C_1	Pedial	Analcime, Zéolite, Hilgardite, Kaolin
Monoclinic	2	$1A_2$	C_2	Sphenoidal	Afwillite, Barytocalssite
Monoclinic	m	1m	Cs	Domatic	Chamosite, Dickit, Scolecite
Orthorhombic	mm2	$1A_2$, 2m	C_2v	Rhombic-pyramidal	Blossite, Chambersite, Natrolite
Tetragonal	4	$1A_4$	C_4	Tetragonal-pyramidal	Piypite
Tetragonal	4mm	$1A_4$, 4m	C_4v	Ditetragonal-pyramidal	Duabouleite, Wakefieldite
Hexagonal	3	$1A_3$	C_3	Trigonal-pyramidal	Gordaite, Jarosite, Zussmanite
Hexagonal	3m	$1A_3$, 3m	C_3v	Ditrigonal-pyramidal	Acetamide, Tourmaline
Hexagonal	6	$1A_6$	C_6	Hexagonal-pyramidal	Nepheline
Hexagonal	6mm	$1A_6$, 6m	C_6v	Dihexagonal-pyramidal	Brokenhilite, Greenockite, Moissani

Toutefois, pour que la pyroélectricité fonctionne parfaitement, il faut que le cristal ne présente pas d'impuretés (voir section ***III***, A). De plus, la polarisation spontanée d'un cristal pyroélectrique n'est vraie que jusqu'à une certaine température : la température de Curie notée T_c. Pour cela, les cristaux nécessitent un polissage spécial que nous ne sommes pas en mesure d'effectuer. C'est pourquoi nous choisissons d'utiliser des cristaux synthétiques tels que $LiNbO_3$ ou le $LiTaO_3$.

On peut définir le coefficient pyroélectrique primaire en première approximation par :

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta T}$$

Où p le coefficient pyroélectrique en $\frac{C}{m^2K}$, *ΔP la différence de polarisation en* $\frac{C}{m^2}$ *et ΔT la différence de température en Kelvins*

On appelle ce coefficient le primaire car Zheng en 2008 a découvert qu'il existait deux coefficients pyroélectriques. En effet, le primaire décrit le modèle classique, et le secondaire décrit quand le changement de température est si important qu'il y a présence d'effet piézoélectrique. Nous ne nous intéressons qu'au primaire. De plus, la polarisation peut s'exprimer de cette manière :

$$\Delta P = \frac{Q}{A}$$

Où ΔP la différence de polarisation, Q la charge en Coulomb et A l'aire en m^2

$$pA\Delta T = Q$$

On peut alors considérer le tube à Rayons X comme un condensateur, ce qui nous permet d'utiliser la formule suivante :

$$Q = CU$$

Où Q la charge électrique, C la capacitance du condensateur et U la tension

Sachant que la Capacitance vaut :

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{t}$$

Où C la capacitance, $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ *la permittivité du matériau, A l'aire et t l'épaisseur*

En combinant :

$$\frac{Qt}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A} = U$$

On obtient alors notre formule finale :

$$\frac{p\Delta Tt}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = U$$

Où U est la tension à atteindre, p le coefficient pyroélectrique du matériel, t l'épaisseur, ΔT la différence de température en Kelvins, $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ *la permittivité du matériel*

On peut donc combiner cette dernière formule avec la formule du début (voir section ***II***, B) pour trouver de combien faudrait-il augmenter en température pour obtenir des rayons X à la longueur d'onde voulue. On étudie pour des cristaux de Lithium Tantalate ($LiTaO_3$) et de Lithium Nobiate ($LiNbO_3$) avec une permittivité expérimentale jugée en matrice 11 et 33 donnée par l'Université de Stanford et des coefficients pyroélectriques donnés également par l'Université de Stanford :

$LiTaO_3$: $p = -175\ \mu c/(m^2K)$, $\varepsilon_{11} = 51$, $\varepsilon_{33} = 46{,}2$
$LiNbO_3$: $p = -95{,}8\ \mu c/(m^2K)$, $\varepsilon_{11} = 43$, $\varepsilon_{33} = 28$

Donc on obtient le tableau de valeurs et graphique suivant :

Cristal	p(300K)	t(m)	ε_{11}	ε_{33}	U(kV)	ΔT(11)(K)	ΔT(33)(K)
$LiNbO_3$	-0,0000988	0,005	43	28	57,6465116	-44,4076518	-28,9166105
					55,0844444	-42,4339784	-27,6314278
					52,7404255	-40,6282772	-26,4556224
					50,5877551	-38,9699802	-25,375801
					49,576	-38,1905806	-24,868285
					48,6039216	-37,4417457	-24,3806716
					47,6692308	-36,7217121	-23,9118125
					46,7698113	-36,0288496	-23,4606462
					45,0690909	-34,7187096	-22,6075318
					43,4877193	-33,5005093	-21,8142851
					42,0135593	-32,3648988	-21,0748178

C) Modification du Tube de Coolidge

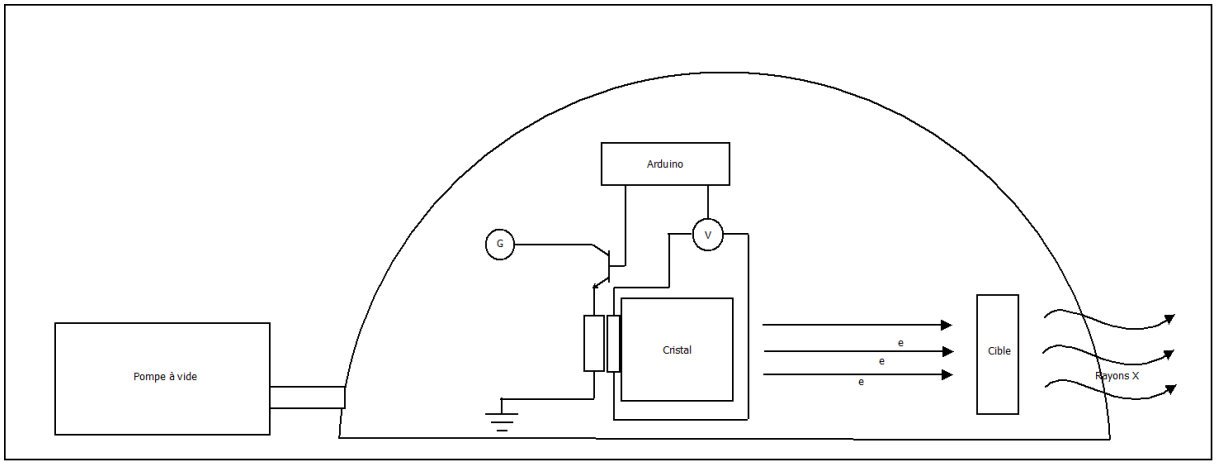
Même si nous changeons une part du système, les Rayons X restent émis par rayonnement continu de freinage. Toutefois, désormais, il n'y a plus uniquement que la cible à produire les rayons X. Pour rappel, le cristal produit en phase "de chauffage", et la cible ne va produire que sur l'autre phase. Pour la cible, les Tube de Coolidge utilisent des cibles en Tungstène ou en Molybdène car ces matériaux possèdent des températures de fusion très élevées. Ici, nous n'avons pas ce problème, car la cible ne sera pas continuellement utilisée. Cela nous permet donc d'utiliser une cible en cuivre, beaucoup plus accessible financièrement.
Pour information, voici les raies caractéristiques du cuivre et une comparaison avec des valeurs expérimentales précises :

Anode	Z	υ(Kα) (Hz)	λ(Kα)	ΔE(eV)	υ(Lα) (Hz)	λ(Lα)	ΔE(eV)
Cuivre	29	1,9345E+18	1,5508E-10	8,0162E+12	2,1319E+17	1,4072E-09	8,8341E+11

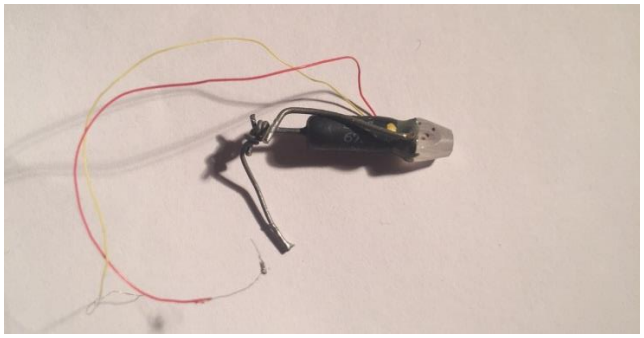
Anode	ΔE(eV)(Kα)	Inexactitude	ΔE_{exp}(eV)(Lα)	Inexactitude
Cuivre	8,05E+12	0,42028261	9,29E+11	4,9069591

De plus, Brownridge nous a suggéré de faire baisser la pression à l'aide d'une pompe à vide. En effet, selon lui, si nous ne baissons pas la quantité de gaz présent dans le tube, l'excédent de charge généré va être directement compensé et cela rend donc la production de Rayons X impossibles. C'est pourquoi nous choisissons de mettre le cristal du moins, sous vide à une pression de $1{,}3 \times 10^{-4}$ Pa. Cependant, la pompe à vide du lycée n'étant pas capable d'atteindre cette valeur, nous nous limiterons à 670×10^{-4} Pa. Le système global pour maintenir le tube hermétique sera donc composé d'une cloche à vide avec son support relié à notre pompe à vide. Tout le dispositif électronique sera disposé sous la cloche à vide, à l'exception de certains branchements.

Enfin, nous devrons utiliser une cible de cuivre, que nous choisissons de placer à 1 cm du cristal environ. Voici le schéma de notre expérience :

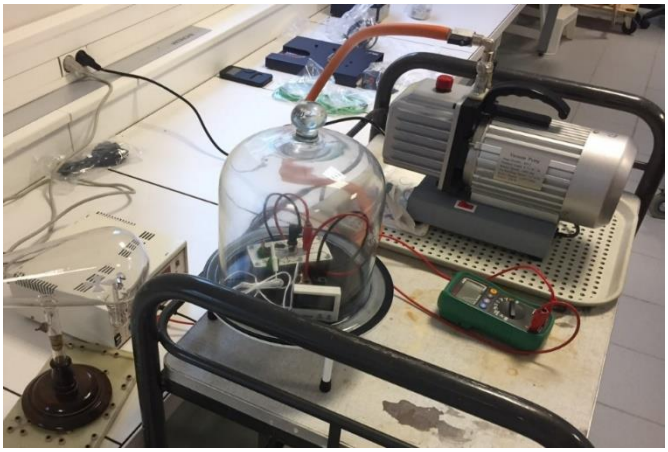


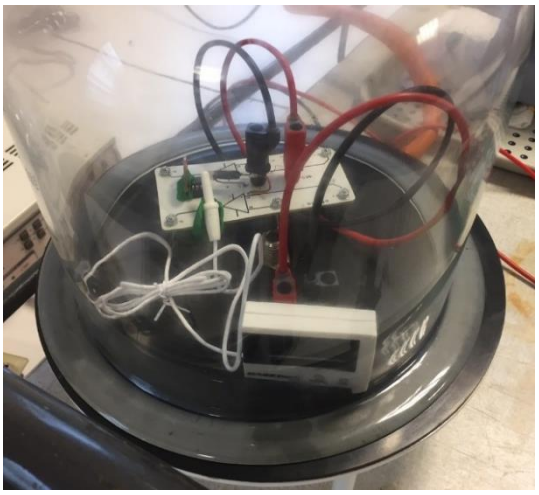
Manquant un peu de temps, nous avons choisi de réaliser une première expérience pour vérifier si nous étions capables de produire des rayons X avec le matériel présupposé pour. Nous avons donc réfléchi à la mise en pratique de notre tube à la réception par Baptiste des cristaux pyroélectriques envoyés par Brownridge. Celui-ci avait déjà couplé le cristal à une résistance ainsi qu'à un thermocouple pour vérifier la tension du cristal :



Il nous fallait maintenant un support pour placer le cristal ainsi qu'un autre peu éloigné (environ 1 cm) pour placer la plaque de cuivre permettant l'émission de rayons X. Une fois reliée à un générateur, la résistance peut amener le cristal à une température avoisinant les 120°C. Nous avons également placé une sonde à côté pour nous permettre de suivre en temps réel l'évolution de la température de cette même résistance. C'est alors que nous avons réfléchi à la manière dont nous pouvions faire le vide autour du cristal car le support total était déjà trop grand pour être contenu dans un récipient connecté à la pompe à vide. C'est pourquoi notre professeur nous a conseillé d'utiliser directement la cuve à vide du lycée à l'intérieur de laquelle le matériel pouvait être placé. Le problème de la plaque de cuivre s'est ensuite posé et nous avons décidé d'utiliser à la place une pièce de monnaie. Enfin, n'ayant pas encore fabriqué de détecteurs, nous utilisons la partie sensible à la fluorescence X d'un vieux tube de Coolidge trouvé dans les placards du lycée, que nous plaçons sur la trajectoire de l'émission de nos propres rayons X émis par le cristal, pour vérifier si notre expérience permet bien d'émettre des Rayons X dans un premier temps.

Voici donc des photos de l'installation :





Cependant, cette expérience s'est soldée par un échec. En effet, après avoir répété plusieurs fois le protocole, la partie fluorescente du tube n'a rien détecté. Ainsi, nous avons essayé de comprendre, avec James Brownridge, les raisons de cet échec. Selon lui, nos rayons X sont trop mous et trop peu énergétiques pour traverser la paroi de la cuve à vide. De plus, la pièce est trop épaisse, tous nos Rayons X émis étaient absorbés par elle.

Ainsi, nous cherchons à reproduire notre expérience en évitant nos précédentes erreurs. Nous avons suivi le protocole à la lettre (voir Annexe), et la principale modification était d'avoir remplacé la pièce de cuivre par un film d'aluminium très fin.

De plus, nous avons changé de méthode de détection. Ainsi, nous avons rigoureusement placé un film photographique et nous l'avons laissé s'imprimer (voir le résultat dans la partie suivante).

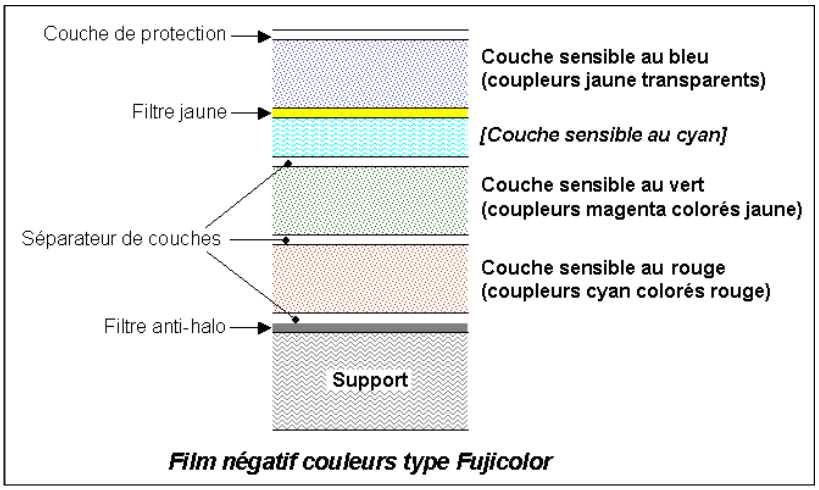
IV) Fabrication d'un détecteur à rayons X

Précisons d'abord les différents usages possibles de notre émetteur à Rayons X avant de montrer quels détecteurs pouvons-nous éventuellement fabriquer. En effet, nous voulions dans un premier temps utiliser notre émetteur dans le domaine médical.

A) Le film photographique

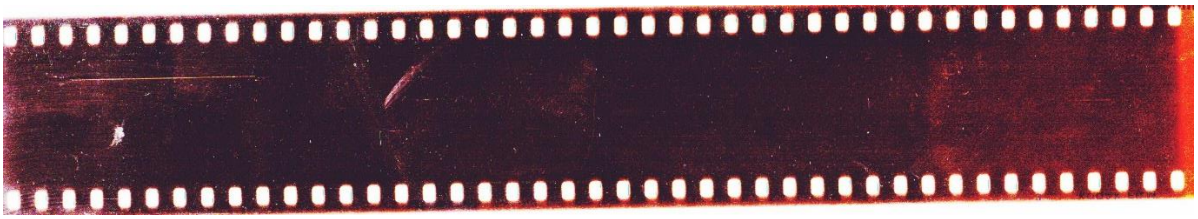
Le film photographique est utilisé depuis très longtemps déjà dans le domaine du visible pour les photographies, il est le 1er support ayant permis l'impression d'une image. C'est aussi un film photographique modifié et rendu fluorescent qui a permis à Röntgen de découvrir les Rayons X en 1895 et de réaliser la 1ère radiographie, celle de la main de sa femme. Il est à noter que tous ces films réagissent à toutes les régions du spectre électromagnétique, même les plus énergétiques, dont les rayons X qui sont notre base d'étude. Concernant les rayons X, l'émulsion est appliquée des deux côtés du film photographique pour permettre une absorption maximale. De plus, on lui applique une fine

couche de plomb pour augmenter sa sensibilité. La technique est cependant identique, les rayons bombardent le filtre et l'émulsion réagit à chaque photon qu'elle rencontre. Dans le domaine médical, le patient est placé entre la source de rayons X et le film qui est directement utilisable après la radiographie.



Pour les films couleur, 3 couches d'émulsion sont placées, chacune réagissant respectivement aux 3 couleurs primaires (RVB). Les émulsions sont donc faites de bromure d'argent mais surtout d'un coupleur chromatique qui libère un colorant de couleur complémentaire à la sienne lorsqu'il est placé à proximité du bromure d'argent réagissant à la lumière. Cependant, ces colorants « polluent » les couches inférieures du film.

Nous avons donc mené une expérience avec un film photographique



Nous avons ensuite récupéré le film photographique, après son développement chez un photographe. Sur celui-ci, nous avons pu observer très clairement une zone de démarcation au niveau de l'impression du film. Cette ligne est d'ailleurs assez nette. Ayant pris toutes les précautions pour que le film ne subisse pas la lumière visible, il est exclu que ce n'en soit. La partie noircie était ainsi celle présente sur la trajectoire des rayons X et donc impressionnée par eux. D'après M. Brownridge, cette diffusion sur une large zone est due à la manière dont sont émis les rayons X depuis l'aluminium. Mais comment être sûr que ce sont bien des rayons X ? Tous nos calculs tendent à montrer que les longueurs d'onde émises par le cristal ne se situent que dans le domaine des rayons X. Le film étant capable d'être impressionné par ceux-ci, nous en concluons que le cristal a bien émis des rayons X.

Pour vérifier notre hypothèse, nous allons à nouveau reproduire l'expérience mais cette fois-ci en changeant de méthode de détection. Nous avons ainsi acheté un cristal scintillateur (voir section **IV**, C), mais nous ne l'avons pas encore reçu. Nous vous présenterons les résultats obtenus lors de la finale des Olympiades de Physique le 3 et 4 Février.

B) Détection par scintillation

La scintillation est un phénomène physique comparable à la fluorescence ou à la phosphorescence. En effet, ces trois phénomènes permettent d'observer de la lumière visible après avoir reçu une quantité d'énergie. La fluorescence est un phénomène très rapide (de l'ordre de la nanoseconde) car les états électroniques se désexcitent particulièrement rapidement, le temps d'une transition atomique. La phosphorescence, quant à elle, est plus lente, de quelques microsecondes à plusieurs mois, car les électrons excités sont tout de même dans un niveau métastable et se désexcitent en passant par un stade intermédiaire. Ainsi, la scintillation est plus proche de la fluorescence car l'émission d'un photon visible est très rapide, quasiment instantanée. Un rayonnement incident, comme un photon X dans notre cas, va venir perturber les atomes du cristal qui vont s'exciter et leur désexcitation spontanée va ensuite émettre un photon dans le domaine du visible, grâce à une perte d'énergie, le long de la trajectoire du photon X absorbé.

Les scintillateurs peuvent donc être utilisés comme détecteurs de particules car l'énergie qui les traverse est quantifiée et dépend de la particule ayant traversé le matériau. Ils sont donc classés en deux catégories : les scintillateurs organiques composés de matière organique dont le délai de réponse est très rapide et utilisé surtout pour des mesures d'évènements très courts ainsi que les scintillateurs inorganiques, entièrement minéraux comme celui que nous allons utiliser, qui possèdent un délai de luminescence plus long. Néanmoins, c'est bien un scintillateur inorganique que nous allons utiliser car leur résolution est bien supérieure et c'est ceci que nous privilégions.

Les principaux détecteurs inorganiques sont donc composés de cristaux d'iodure de Sodium (NaI), préalablement dopés au Thallium pour ajouter des impuretés aux cristaux. Ces impuretés vont permettre de créer des lieux spécifiques dans le réseau cristallin où les électrons vont se désexciter et émettre un photon après le passage de la particule. Celui-ci se situera dans le domaine du visible car sa longueur d'onde aura augmenté du fait que l'énergie libérée est inférieure à l'énergie absorbée. On parle ainsi de cristaux NaI (Tl). Ceux-ci peuvent aisément absorber les rayons X, dont l'énergie est comprise entre 100 eV et 100 keV, à hauteur d'au moins 60%. Cette précision est suffisamment élevée pour notre expérience. Néanmoins, lorsque l'électron se désexcite, il y a un délai durant laquelle il ne peut à nouveau recevoir de l'énergie. Ce délai de luminescence est d'environ 0.25 µs pour les cristaux NaI (Tl), ce qui est également suffisant pour nos expérimentations. Une fois les photons dans le visible émis, il nous restera ainsi à les amplifier puis à les collecter pour estimer le flux de photons X transmis par notre cristal pyroélectrique.

C) Fabrication de notre détecteur

Pour l'utilisation médicale, nous faisons le choix d'acheter simplement dans le commerce une certaine quantité de films photographiques, ceci est très peu onéreux qui plus est.

Pour pratiquer des détections précises et sûres en termes de Rayons X, nous choisissons d'utiliser un détecteur à scintillation. Nous l'avons acheté sur eBay à un prix abordable (price) en provenance de vieux laboratoires en Ukraine. C'est un détecteur d'Iodure de Sodium dopé au Thallium de format 60x10mm :

Nous sommes en attente de le recevoir pour mener d'autres expériences plus précises.

Conclusion et perspectives

Les rayons X sont et resteront toujours sources de nombreuses découvertes ce qui en fait un domaine d'étude d'avenir. Pour ce projet, nous ne sommes partis de rien, nous inspirant seulement de notre visite à l'ESRF. Malgré cela, nous avons réussi en seulement quelques mois à émettre nos premiers rayons X grâce à notre éminent mécène James Brownridge.

Notre étude des rayons X nous a ainsi permis d'appréhender un domaine de la physique plus vaste que nous pouvions l'imaginer.

Notre première intuition nous avait poussé à étudier les tubes à rayons X avec pour exemple le tube de Coolidge que notre lycée possède. Pour cela, nous avons étudié les propriétés des électrons, la manière dont les photons X étaient émis mais également la longueur d'onde caractéristique de ses photons et son lien avec la composition de l'anode. Néanmoins, il était impossible pour nous de fabriquer notre propre tube à Rayons X car trop de composants ne nous étaient pas accessibles.

C'est alors à ce moment, grâce à Lisa, que nous avons découvert le potentiel des cristaux pyroélectriques et leur intérêt l'avenir comme une source de rayons X plus accessible et donner des dispositifs moins encombrants pour les radiographies, ce que nous avons cherché à faire tout au long de ce projet. Notre propre dispositif est au final assez encombrant notamment du fait de la nécessité de faire le vide mais il faut rappeler qu'il est n'est fabriqué qu'avec le matériel disponible au lycée. Lorsqu'on étudie les composants principaux, on remarque l'émetteur ne fait finalement qu'un peu plus d'un centimètre. Cela ouvre d'immenses perspectives dans la miniaturisation de ces émetteurs et par ce biais, dans un développement plus large d'un accès à une médecine avancée. La détection de ces rayons X est aussi source d'innovation et de nombreux procédés le permettent. Pour

remplacer les parois fluorescentes du tube de Coolidge, nous avons ainsi pensé à notre propre détecteur que nous essayons maintenant de mettre au point pour réaliser une expérience d'émission de rayons X entièrement fabriquée par nos soins et opérationnelle.