

Recherche d'éléments lourds cachés dans des matériaux anciens par spectroscopie du rayonnement bremsstrahlung induit par un faisceau d'électrons

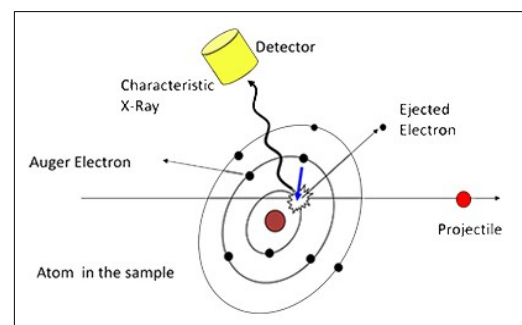
Maxence Binot, Louis Bodart, Oscar Boquillon, Alexandre Bourdon, Lucas Breyne, Lalie Delecourt, Thomas Delfosse, Gaspard Dereux, Mathys Desmettre, Valentin Dupriez, Tristan Honvault, Pauline Huchin, Louis Janin, Arthur Jehoulet, Cyprien Kerampran, Arthus Labey, Philippine Lambrechts, Jules Lebeurre, Amicie Lefebvre, Maelys Lefranc, Matthieu Vanbelle

Lycée de la Croix Blanche – Bondues, FRANCE
Le 8 avril 2025

I - Introduction

Certains objets anciens, des objets d'art ou des objets précieux, pourraient encore nous révéler des secrets, non pas en surface, mais plus en profondeur, dans leur constitution interne. Notre équipe BREM (Bremsstrahlung Research on Elementary Mysteries) a pour ambition de concevoir une expérience, avec un faisceau de particules de haute énergie, capable de détecter des atomes lourds (comme l'or ou le tungstène) présents à l'intérieur d'objets anciens. Il est important de pouvoir détecter ces atomes même s'ils sont présents en très faible quantité et la méthode doit être non destructive afin d'analyser des objets précieux.

Dans les musées et les instituts spécialisés en archéométrie, plusieurs techniques non destructives, telles que PIXE (Particle Induced X-ray Emission) [1] ou RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) [2], permettent d'analyser la composition élémentaire des objets d'art. Bien qu'efficaces et précises, ces méthodes se limitent à l'analyse des couches superficielles, sur quelques dizaines de microns tout au plus.



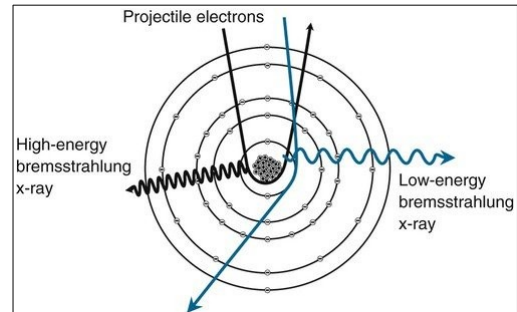
Operating principle of the PIXE analysis method.
<https://www.cmam.uam.es/facilities/iba-techniques/pixe/>

Notre projet vise donc à repousser cette limite : peut-on imaginer une méthode capable de traverser la matière pour révéler des inclusions cachées, comme une

dorure ancienne ou une structure métallique dissimulée, sans endommager l'objet étudié ? C'est ce défi que nous cherchons à relever en venant au LHC ou au DESY.

II - Proposition d'expérience

Afin d'étudier la présence d'atomes lourds dans des objets, nous nous appuyons sur le rayonnement Bremsstrahlung, phénomène électromagnétique dominant lorsque des faisceaux de haute énergie interagissent avec la matière. Ce rayonnement correspond à l'émission de photons (souvent des rayons X ou gamma) lorsqu'une particule chargée, comme un électron, est ralentie ou déviée par le champ électrique d'un noyau atomique.



<https://physicsoopenlab.org/2017/08/02/bremsstrahlung-radiation/>

1) Description théorique du rayonnement Bremsstrahlung

Même si les calculs théoriques complets dépassent notre niveau, nous pouvons exploiter les formules issues de ces théories pour comprendre le phénomène.

Dans le cadre de l'électrodynamique classique, la puissance rayonnée par une charge q accélérée est donnée par la formule de Larmor [3] :

$$P = \frac{q^2 a^2}{6 \pi \epsilon_0 c^3}$$

où P est la puissance rayonnée, q est la charge de la particule, a est l'accélération de la particule, c est la vitesse de la lumière dans le vide et ϵ_0 est la permittivité du vide.

Dans notre cas, l'accélération d'un électron soumis à l'attraction coulombienne d'un noyau de charge Ze , à une distance r , s'écrit :

$$a = \frac{Z e^2}{4 \pi \epsilon_0 m_e r^2}$$

En remplaçant cette expression dans la formule de Larmor, on obtient une estimation de la puissance rayonnée par un électron :

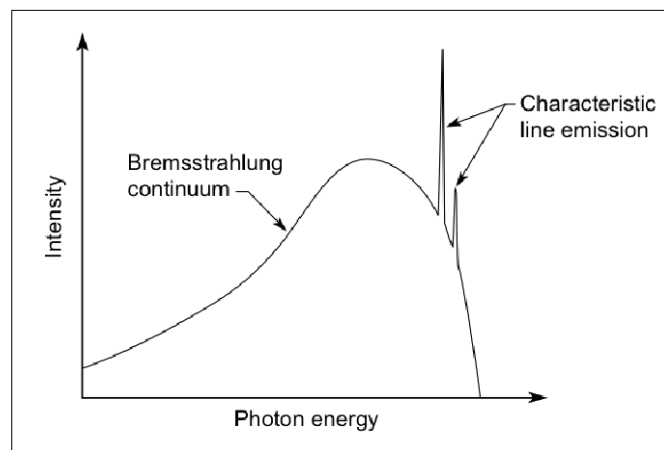
$$P = \frac{Z^2 e^6}{96 \pi^3 \epsilon_0^3 m_e^2 c^3 r^4}$$

Dans le cadre relativiste, la formule de Larmor relativiste a pour expression :

$$P = \frac{q^2 \gamma^6}{6\pi \epsilon_0 c} (\vec{a}^2 - (\vec{\beta} \wedge \vec{a})^2)$$

Cette expression montre que la puissance rayonnée augmente fortement avec le facteur de Lorentz γ , qui est très élevé à des vitesses proches de celle de la lumière. On retrouve également une dépendance au carré de l'accélération, et donc, indirectement, au carré de Z , le numéro atomique du noyau cible.

Des théories plus avancées permettent également de prédire le spectre continu du rayonnement bremsstrahlung.



Spectre Bremsstrahlung

Ce rayonnement bremsstrahlung est exploité par exemple :

- en radiothérapie, où des électrons bombardent une cible (souvent du tungstène) pour générer des rayons X ;
- en astrophysique, pour l'analyse de nébuleuses.

Puisque la puissance rayonnée et le spectre Bremsstrahlung dépendent de Z , peut-on, à partir de l'analyse du spectre émis, identifier la présence d'atomes lourds dans un matériau bombardé ? Est-il possible d'estimer leur proportion dans ce matériau ? Et jusqu'à quelle épaisseur de l'objet peut-on mener cette analyse ?

2) Description de l'expérience

Avant de pouvoir analyser de vraies œuvres d'art, nous devons établir une base de comparaison en générant des spectres caractéristiques avec des cibles de compositions bien connues. C'est le but de notre expérience. Elle nous permettra de savoir si l'étude d'objets est possible et de calibrer la méthode.

L'étude du rayonnement bremsstrahlung se fait généralement avec des électrons, car ils interagissent fortement avec la matière en la traversant. Plus l'énergie est élevée,

plus le rayonnement de freinage dominant s'étend dans des gammes de photons X et Gamma de haute énergie, mais surtout plus le faisceau sera pénétrant. Nous pensons donc utiliser **un faisceau d'électrons de quelques GeV**.

Notre cible doit simuler un objet « classique ». Il est donc judicieux de choisir un matériau de base de faible numéro atomique : le carbone solide (graphite). Nous voulons aussi pouvoir modifier l'épaisseur de cette cible et pouvoir y incorporer facilement différentes quantités de métaux lourds. Nous pensons donc créer simplement nos cibles avec des plaques de graphite et de fines plaques de métaux, voir de très fines feuilles d'or.



Plaques de graphite



Feuilles d'or



Plaques de tungstène

Notre montage est simple : Le faisceau d'électrons bombarde notre cible. A haute énergie, le rayonnement bremsstrahlung est émis dans la direction d'incidence. Afin de n'observer que les photons, nous plaçons directement derrière la cible un aimant permettant de dévier les électrons qui auraient traversé la cible. Une chambre à fil permet de détecter ces électrons déviés.

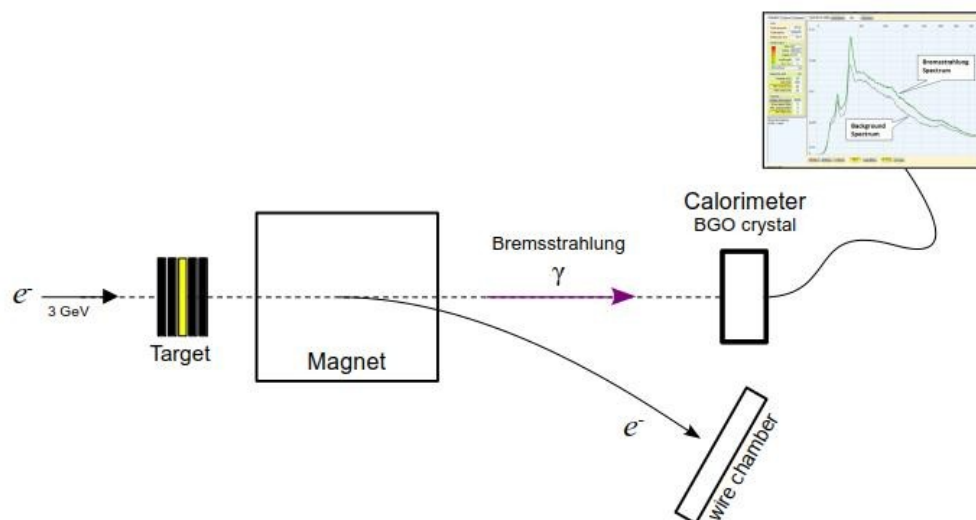


schéma de l'expérience

Le spectre bremsstrahlung est obtenu grâce à un calorimètre (scintillateur couplé à un photomultiplicateur). Un scintillateur transforme l'interaction du photon gamma (ou X) en éclairs de lumière, laquelle est collectée par un photomultiplicateur (PMT) ou une photodiode, puis convertie en signal électrique. Le cristal BGO (Cristal de

germanate de bismuth) est un scintillateur bien adapté aux hautes énergies que nous avons. Il permet d'obtenir le spectre bremsstrahlung complet. Il permettra aussi d'utiliser éventuellement une approche hybride : l'utilisation du bremsstrahlung pour détecter les éléments lourds et la fluorescence X secondaire pour l'identification précise.

3) Protocole expérimental

- La première mesure consiste à enregistrer le spectre de bremsstrahlung sans cible pour avoir le spectre initial du faisceau (interaction dans l'air).

- Ensuite, il nous faut établir le spectre de cibles constituées uniquement de graphite et d'épaisseurs différentes (de 1cm à 20cm). Nous aurons ainsi le spectre de freinage de notre matériau de base.

- **Étude de l'influence de la quantité de métal lourd** : nous effectuerons la mesure du spectre pour différentes cibles de même épaisseur mais constituées de différents métaux, en quantités variées et placés à des profondeurs différentes. Les mesures sont effectuées dans des conditions de faisceau identiques (même énergie, même intensité...). L'analyse des données nous permettra de comprendre l'évolution des spectres en fonction des paramètres modifiés.

- **Étude de l'influence de l'épaisseur** : pour une fraction de métal donnée, nous faisons varier l'épaisseur totale de la cible. Comme précédemment, les relevés de l'évolution du spectre nous permettront d'identifier l'influence de l'épaisseur.

- **Analyse et exploitation des données** : afin d'analyser précisément le spectre, il sera nécessaire de corriger le bruit de fond. Des mesures telles que l'aire sous le spectre, l'énergie moyenne des photons détectés... pourront être utiles. Enfin, une comparaison des résultats expérimentaux avec une simulation de type Monte-Carlo (Geant4...) pourra consolider nos résultats [4].

III - Qu'espérons nous retirer de cette expérience

Ce projet nous a permis de découvrir un nouvel aspect de la physique peu abordé dans les programmes scolaires. Nous avons également développé notre démarche scientifique avec la mise en place d'hypothèses, l'imagination de l'expérience et la rédaction d'un protocole. La cohésion de groupe est également un point clé à retenir de cette expérience car nous avons partagé nos idées, nos projets et ainsi tiré le meilleur que chacun pouvait apporter dans la « BREM team ».

Nous espérons donc pouvoir mener notre expérience dans l'un des laboratoires afin de tester l'effet bremsstrahlung sur des objets concrets. Si grâce à cette expérience nous parvenons à détecter les métaux lourds, nous pourrions aider les musées et découvrir des merveilles invisibles à l'œil nu.

IV - Proposition de sensibilisation aux sciences

Nous vous remercions d'avoir lu notre proposition d'expérience. Grâce à ce projet, nous avons beaucoup appris sur la physique des particules et le fonctionnement des accélérateurs, ainsi que sur les différentes méthodes d'analyse non destructives permettant d'étudier la composition d'œuvres d'art.

Forts de cette expérience, nous souhaitons présenter, à un public non scientifique, non seulement notre projet, mais aussi les méthodes scientifiques qui sont au service de l'art et de l'histoire de l'art. Ce sera pour nous l'occasion de partager notre passion pour les sciences.

Dans un premier temps, nous organiserons, avant la fin de l'année, des interventions dans les collèges environnants, en partenariat avec les professeurs d'art plastiques. Ensuite, nous aimerions animer une conférence dans le musée du Louvre-Lens, situé à 50km de notre lycée afin d'expliquer simplement et de manière ludique comment la physique des particules peut contribuer à des découvertes en art et en histoire de l'art.

A titre d'exemple, le C2RMF au Louvre utilise PIXE pour déterminer la composition chimique de poteries anciennes. Cela révèle la provenance de l'argile et aide à retracer les échanges commerciaux ou les influences culturelles.

Nous sommes convaincus que sensibiliser le public aux applications concrètes de la science peut susciter un intérêt accru pour les découvertes en physique. Cela permettra également de montrer comment les théories a priori complexes peuvent s'appliquer à la vie réelle — en l'occurrence à l'art — et influencer sur notre façon de vivre et de résoudre des problèmes.

V - Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier le CERN, et plus particulièrement l'équipe du projet BL4S pour nous avoir donné l'occasion de préparer cette proposition d'expérience.

Nous remercions également M. Arnaud Gniady, notre cher professeur de mathématiques. Il nous a suggéré de participer au concours, a créé l'équipe, a répondu à nos questions, a mené le projet et nous a consacré beaucoup de temps pour nous permettre de développer les idées de la « BREM team ».

VI - Références

[1] Geoffrey Grime, *Proton Induced X-ray Emission*

<https://indico.ictp.it/event/a05196/session/16/contribution/8/material/0/0.pdf>

[2] Wikipedia, *Rutherford backscattering spectrometry*

https://en.wikipedia.org/wiki/Rutherford_backscattering_spectrometry

[3] Julian Sonner, *Emission des ondes électromagnétiques*

<http://www.sonnerphysics.net/uploads/6/1/9/9/61993493/chap5.pdf>

[4] Andreas Schalicke, Vladimir Ivanchenko, Michel Maire, Laszlo Urban. *Improved Description of Bremsstrahlung for High-Energy Electrons in Geant4*. 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record.

<https://bib-pubdb1.desy.de/record/85443/files/N37-1.pdf>