

# Proposition d'étude de résonance de l'horloge interne de l'électron dans la ligne d'extraction de ThomX

3 juillet 2023

## 1 Résumé

La ligne d'extraction de ThomX offre des conditions qui pourraient être utilisées pour effectuer une mesure de résonance de l'horloge interne de l'électron en condition de canalisation dans un cristal mince. Ce document décrit les conditions dans lesquelles une telle expérience pourrait être réalisée en minimisant l'impact sur les programmes prioritaires de ThomX.

## 2 Principe de l'expérience

Le but de cette expérience est de réaliser une confirmation d'un résultat obtenu à l'ALS-Saclay et publié en 2008 par Gouanère *et al.* [1, 2], mettant en évidence un effet résonant dans la distribution angulaire d'un faisceau d'électrons transmis en condition de canalisation axiale dans un cristal à 80 MeV. En effet, la distribution angulaire caractéristique des électrons émergeant d'un cristal mince aligné selon un axe majeur avec la direction du faisceau incident est représentée sur la figure 1. Elle est caractérisée par une déplétion au voisinage de l'orientation axiale, en raison de la probabilité élevée de collision élastique au voisinage des noyaux d'atomes, pour les électrons qui ressentent l'influence du potentiel continu attractif des noyaux écrantés. Cependant, une petite fraction du faisceau émerge du cristal à petit angle : il s'agit des électrons piégés dans ce potentiel attractif, et dont la trajectoire décrit un mouvement de rosette autour d'une rangée. Leur angle à l'émergence reste inférieur à l'angle critique de canalisation, de l'ordre de 1-2 mrad à ces énergies. L'expérience, dont le schéma est représenté figure 2, a permis de mesurer la fraction émergeant à petit angle, grâce à un scintillateur de petite taille (SC2) placé dans l'axe du faisceau, et d'un scintillateur de grande taille (SC3) permettant la normalisation, en fonction de l'énergie du faisceau. Les résultats montrent une variation significative de cette fraction à petit angle à une impulsion de 81 MeV/c (figure 3).

Cet effet serait dû à l'existence de l'horloge interne de l'électron prédite par Louis De Broglie dans sa thèse [3] : à toute particule de masse  $m$  on peut associer une fréquence propre  $\nu_0 = mc^2/h$ , dont la valeur est  $1,2 \times 10^{20}$  Hz pour l'électron. Une résonance avec cette fréquence peut être atteinte avec le potentiel périodique d'une rangée d'atomes d'un cristal aligné, ressenti par une particule relativiste. Une autre interprétation serait une résonance avec la fréquence du Zitterbewegung, prédit par E. Schrödinger en 1930 [4] selon la théorie de Dirac : un électron, animé d'une vitesse  $v$ , subit en fait un mouvement oscillant à la vitesse  $c$ , d'amplitude  $\simeq \Lambda_c$ , et de fréquence  $\nu_{ZB} = 2mc^2/h = 2\nu_0$ . Le Zitterbewegung peut aussi être interprété comme une oscillation entre les états d'énergie positive et négative (e+ et e-).

L'effet observé s'explique, dans les deux interprétations, comme une diffusion cohérente résonnante par le potentiel périodique de la rangée, dans la condition de résonance  $\nu_n = n\gamma v/d$ ,

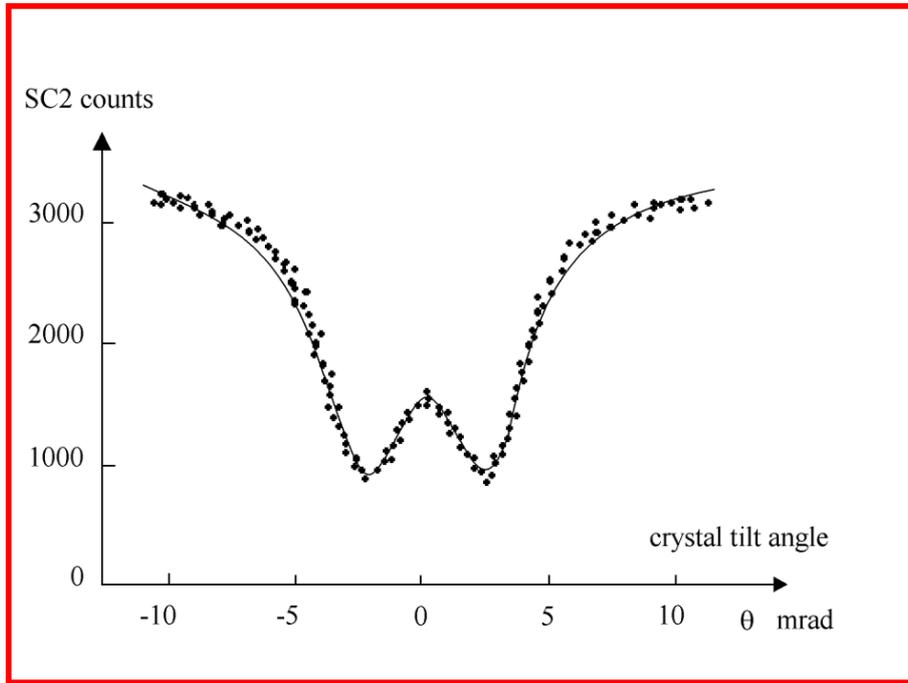


FIGURE 1 – Nombre d'électrons transmis dans la direction du faisceau incident en fonction de l'angle d'orientation d'un cristal de silicium de  $1\mu\text{m}$  par rapport à la direction axiale  $\langle 110 \rangle$  ([2]).

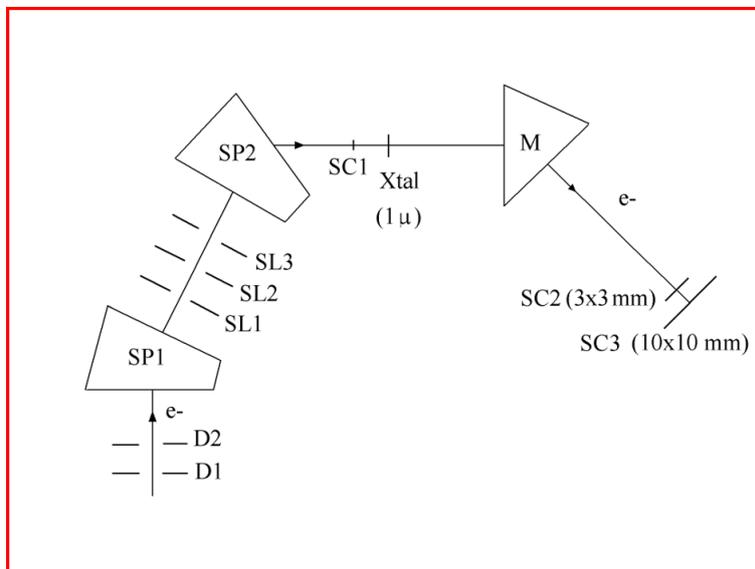


FIGURE 2 – dispositif expérimental utilisé dans [2]

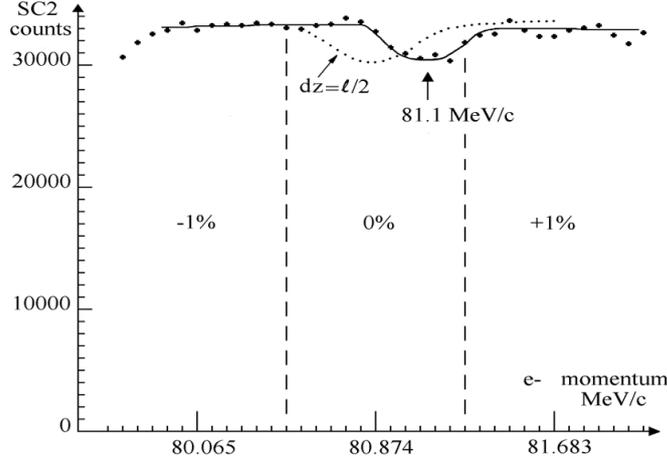


FIGURE 3 – fraction d’électrons comptés à petit angle (SC2) en fonction de l’impulsion des électrons [2].

où  $v$  est la vitesse de la particule, et  $d$  la distance interatomique de la rangée, et  $n$  un nombre entier. Il s’apparente à l’effet d’excitation résonnante cohérente d’un projectile ayant une énergie d’excitation interne  $h\nu_n = n\gamma v/d$ , observé pour les excitations atomiques.

Plusieurs tentatives de confirmer les résultats se sont soldées par un échec : auprès de la ligne BTF du LNF-Frascati tout d’abord, les qualités optiques des faisceaux secondaires d’électrons ou de positons produits par gerbes électromagnétiques (principalement leur divergence angulaire et leur dispersion en impulsion) ne permettant pas d’observer un effet aussi fin. Ensuite, une tentative au SAGA-LS par T. Takabayashi et al. avec des électrons de plus haute énergie, mais sur des orientations cristallines d’indices élevés ([5]).

L’observation de la signature de l’horloge interne, menée par M. Gouanère et al. [2], a été recherchée vers 80 MeV/c, ce qui correspond au niveau fondamental ( $n = 1$ ) pour l’orientation  $\langle 110 \rangle$  dans un monocristal de silicium, et au premier harmonique ( $n = 2$ ) pour la fréquence de Zitterbewegung. Comme suggéré par Rivas *et al.*[6], des harmoniques plus élevés pourraient être utilisés tout en restant sur des orientations cristallines axiales majeures. Le tableau ci-dessous (4) permet d’identifier des énergies accessibles auprès de ThomX pour l’axe  $\langle 110 \rangle$  du silicium ou du diamant. Notons que pour les valeurs dans les cases jaunes, l’observation d’un effet signifierait l’interprétation exclusive par le zitterbewegung.

Un sous-produit de cette expérience, une fois mis en place le système de collimation/goniomètre, pourra être l’étude des phénomènes de rayonnement EM en condition de canalisation : rayonnement de canalisation, bremsstrahlung cohérent...

### 3 Besoins sur le faisceau

- Faisceau stable de faible multiplicité (maximum 1 électron par tir après collimation).
- Énergie : selon la résonance choisie, variation par exemple de 40 MeV/c à 41 MeV/c par pas de 50 keV/c (obtenu principalement en changeant le champ des dipôles de la ligne d’extraction). Pour une première étude de faisabilité, la variation de l’énergie sera réalisée autour de l’énergie nominale de 50 MeV. La dispersion en énergie du faisceau doit être inférieure à 0,5 % pour réaliser des pas de l’ordre de  $10^{-3}$  ;

	Silicium <110>		Diamant <110>	
	ZB	Internal clock	ZB	Internal clock
	Pe (MeV/c)	Pe (MeV/c)	Pe (MeV/c)	Pe (MeV/c)
n=1	161,79	80,89	106,21	53,11
n=2	80,89	40,45	53,11	26,55
n=3	53,93	26,96	35,40	17,70
n=4	40,45	20,22	26,55	13,28
n=5	32,36	16,18	21,24	10,62
n=6	26,96	13,48	17,70	8,85

FIGURE 4 – Impulsions des faisceaux d’électrons correspondant aux résonances pour différents harmoniques pour les axes <110> du silicium et du diamant selon l’interprétation du zitterbewegung (ZB) et de l’horloge interne de De Broglie. Les valeurs entourées sont accessibles sur ThomX

- Emittance : l’émittance du faisceau devra être telle que i) le diamètre sur cible soit inférieur au diamètre utile du cristal aminci et plan, soit typiquement inférieur ou égal à 1 mm, ii) la divergence angulaire soit faible devant l’angle critique de canalisation : typiquement  $\Delta\theta < 0,1$  mrad
- Afin de ne pas perturber les travaux liés au démarrage de ThomX les prises de données pour cette étude se feront de préférence aux horaires où la machine n’est pas utilisée.

## 4 Description de l’expérience

Pour réaliser ces expériences 3 collimateurs (A, B et C) seront installés dans la ligne d’extraction de part et d’autre du dipôle EL/AE/DP.02 et en amont d’un goniomètre (G) permettant d’exposer un cristal au faisceau d’électrons et d’un système de mesure de la position des électrons (M) capable de mesurer la position d’électrons un par un. Un schéma de l’expérience se trouve sur la figure 5.

Les positions A, B, C et G ont l’avantage de ne pas requérir le déculassage d’un aimant pour l’insertion d’une nouvelle chambre. Pour plus de précision le collimateur A pourrait être installé au point D mais cela demande des travaux mécaniques plus importants.

Les collimateurs auront une forme de V inversé et traversé par une barre et surmonté de deux trous permettant de contraindre progressivement la position du faisceau puis de la contraindre complément par le passage dans l’un des deux trous. Une ébauche de dessin de collimateur est sur la figure 6.

## 5 Mode opératoire

1. Pour effectuer une mesure il faudra d’abord cycler les dipôles et quadrupoles de la ligne d’extraction afin d’éliminer tout champ magnétique non désiré.
2. Les quadrupoles EL/QP.04, EL/QP.05, EL/QP.06 et EL/QP.07 seront mis à l’arrêt après cyclage.
3. Un transport normal du faisceau à l’énergie désirée devra ensuite être établi jusqu’à l’arrêt de la ligne d’extraction.
4. Le dipôle EL/AE/DP.02 sera réglé au champ désiré pour l’énergie requise.
5. L’écran EL/DG/SST.01 sera ensuite inséré.

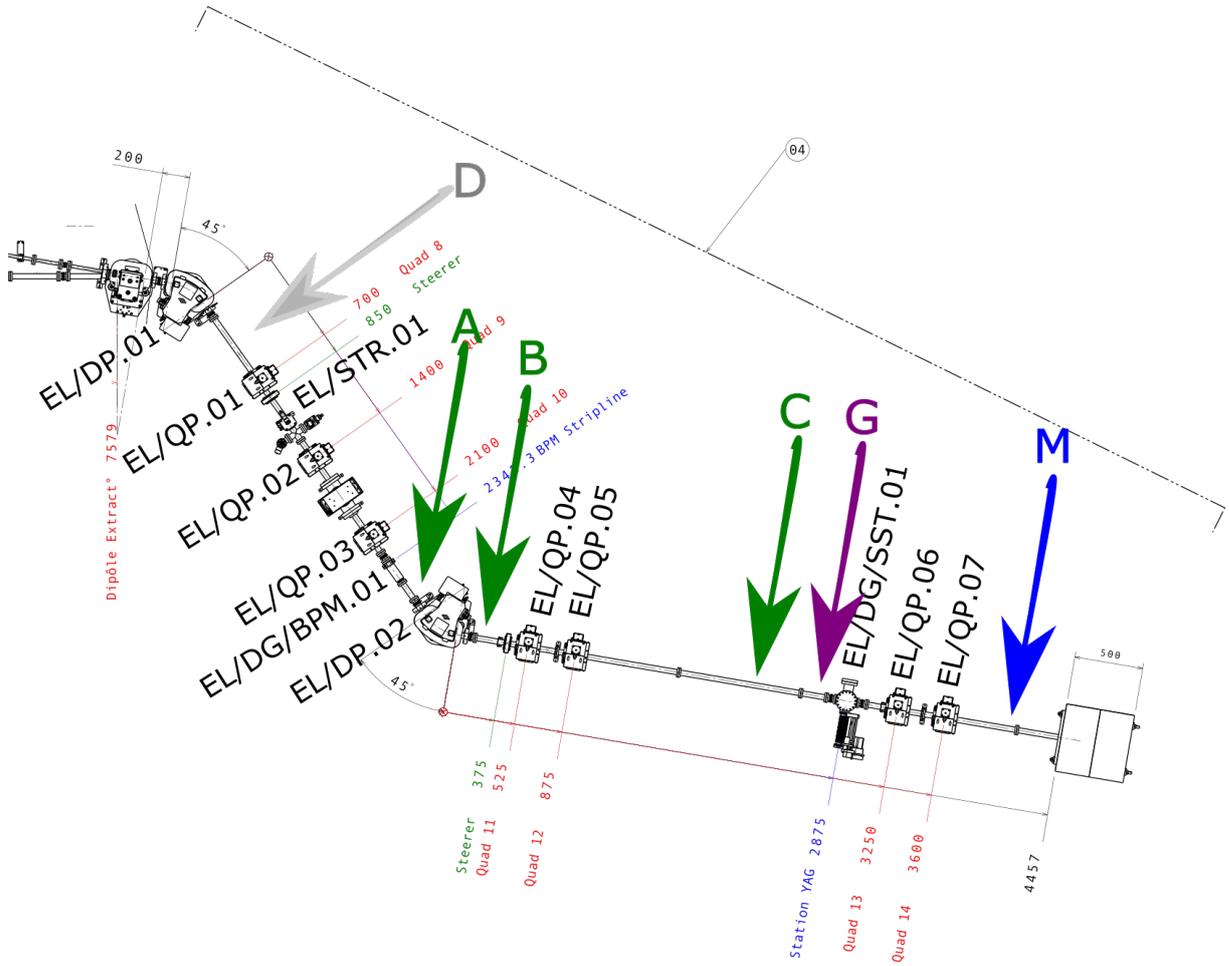


FIGURE 5 – Implantation de l'expérience dans la ligne d'extraction de ThomX. Les flèches A, B et C montrent les collimateurs, la flèche M l'emplacement du goniomètre et la flèche M le point de mesure de la déflexion des électrons.

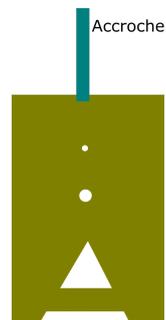


FIGURE 6 – Dessin d'un collimateur.

6. Les collimateurs A et C seront ensuite insérés progressivement. Lorsque l'ombre d'un collimateur deviendra visible, une reprise des réglages des actionneurs de la ligne de transfert ou du champ de EL/AE/DP.01 ou EL/STR.01 sera nécessaire. Après chaque pas avec A et C, le collimateur B sera inséré partiellement pour vérifier que le faisceau a aussi la bonne énergie. Cette procédure prendra probablement beaucoup de temps lors des premières tentatives.
7. Une fois les collimateurs réglés, pour chacun d'entre eux l'un des deux trous sera inséré permettant de contraindre le passage des particules au diamètre du trou.
8. L'écran EL/DG/SST.01 sera alors extrait.
9. Si plusieurs électrons arrivent en même temps sur le système de mesure de manière trop fréquente, l'atténuateur du laser sera utilisé pour baisser la multiplicité observée.
10. La position du faisceau arrivant en G et M pourra alors être connue avec la précision choisie.
11. Une fois la mesure à une énergie donnée effectuée, un léger changement de champ du dipôle permettra de choisir des particules ayant la même trajectoire mais une énergie légèrement différente (dans la limite de la dispersion en énergie du faisceau).

## 6 Mesures préliminaires

- Mesure du champ de fuite au plus proche de EL/AE/DP.02 pour voir si une mesure proportionnelle au champ est possible en direct en insérant une sonde de hall au plus proche dans le dipôle.
- Stabilité faisceau sur TL/DG/SST.02 (c'est à dire stabilité en énergie du faisceau).
- Déviation minimale du faisceau sur TL/DG/SST.02 quand on change les dipôles TL/PS/DP.01 pour savoir quels sont les pas en énergie minimum faisables.
- Variation du champ sur EL/AE/DP.02 et incidence sur le faisceau. Est-ce que EL/AE/DP.02 est lié à EL/AE/DP.01 ?

*(commentaire Denis : il est important de mesurer l'"acceptance", cad la largeur en  $dP/P$  qu'on peut avoir en balayant le champ du dipôle, cf la limite de dispersion en énergie évoquée au point 11 de la section 5)*

## 7 Expérience de qualification

Afin de valider le mode opératoire proposé, une expérience de qualification pourra être effectuée. Pour celle-ci les 3 collimateurs seront nécessaires ainsi que le système de mesure. Elle permettra de vérifier qu'après les réglages machine décrits en section 5, un faisceau stable d'électrons uniques est bien observé sur le système de mesure. En particulier, cela permettra de s'assurer qu'il n'y a pas trop de diffusion sur les bords des collimateurs et que le bruit de fond issu des gerbes créées par les particules perdues dans les collimateurs est acceptable.

## 8 Équipement nécessaire

- 5 Systèmes d'insertion (2 peuvent être récupérés du projet ETALON; Grenoble peut peut-être en fournir d'autres).
- 3 collimateurs (en tungstène?). À fabriquer à l'atelier ?

- Un système de mesure type pixel ou hodoscope pour lire la position des électrons un par un.
- Un goniomètre et sa motorisation : *un système existant à Lyon nécessite une mise à jour (motorisation pas à pas par une alim TL78 de Microcontrôle à changer)*
- 5 croix UHV permettant d'installer les systèmes d'insertion sur la ligne de faisceau.
- Un système de contrôle commande (un système WAGO peut probablement être récupéré du projet ETALON.)
- Une sonde de hall lisible à distance pour vérifier le champ de EL/AE/DP.02 (à acheter ?)
- *la cible cristalline (cristal de Si et/ou de diamant de  $1\mu\text{m}$  autoporté, sous forme de fenêtre centrale amicie)*

## 9 Ressources nécessaires

- Support de la mécanique pour la fabrication des collimateurs.
  - Support du groupe vide et de la mécanique pour l'installation des collimateurs.
  - 5 jours d'installation (à confirmer avec le vide et la mécanique)
  - 10 demi-journées de faisceau pour l'expérience de qualification.
  - XXX demi-journées de faisceau pour la mesure.
- La programmation des moteurs et le contrôle commande sera assuré par les expérimentateurs.

## 10 Calendrier possible

- Janvier 2023 : Demande d'accord pour utiliser ThomX pour cette expérience + demande de support pour la mécanique et le vide.
- Février-Mars 2023 : Réalisation des collimateurs
- Avril 2023 (pendant les vacances scolaires) : Installation des collimateurs (A, B et C) et du système de mesure à l'emplacement G.
- Mai-Juillet 2023 : Expérience de qualification
- Septembre-Décembre 2023 : Recherche de financement pour les équipements supplémentaires.
- Hiver 2024 : Déplacement du système de mesure à l'emplacement M et installation du goniomètre à l'emplacement G.
- Printemps-été 2024 : Expérience

## 11 Calculs

### 11.1 Précision sur la trajectoire des particules

Les collimateurs B et C sont séparés d'environ  $l_{BC} = 2.5\text{ m}$ . Pour un trou de diamètre  $d$ , l'écart angulaire maximal possible entre trajectoires passantes est donc :  $T = \frac{2d}{l_{BC}}$ . La distance C-G est de l'ordre de  $l_{CG} = 0.25\text{ m}$ , donc le diamètre de la zone où arriveront les électrons en G sera :  $d_G = d + T \times l_{CG} = d + \frac{2d}{l_{BC}} \times l_{CG}$ . La distance C-M est de l'ordre de  $l_{CM} = 2\text{ m}$ , donc le diamètre de la zone où arriveront les électrons en M sera :  $d_M = d + A \times l_{CM} = d + \frac{2d}{l_{BC}} \times l_{CM}$ . Pour un trou de  $100\mu\text{m}$ , cela donne :  $A \simeq 80\mu\text{rad}$ ,  $d_G \simeq 120\mu\text{m}$  et  $d_M \simeq 260\mu\text{m}$ .

## 11.2 Précision sur l'énergie des particules

Les collimateurs A et C sont séparés d'environ  $l_{AC} = 3$  m (en suivant l'orbite du faisceau). Pour un trou de diamètre  $d$ , l'écart angulaire maximal possible entre trajectoires passantes est donc :  $T' = \frac{2d}{l_{AC}}$ . Le dipôle donne une déviation de  $45^\circ$  soit  $\alpha = 0.785$  rad pour  $E = 50$  MeV. L'erreur ( $\delta E$ ) sur l'énergie induite par T' est donc approximativement  $\delta E = \frac{E}{\alpha} \times T' = \frac{E \cdot 2d}{\alpha l_{AC}}$ .

Pour un trou de  $100 \mu\text{m}$ , cela donne :  $\delta E \simeq 4.2$  keV.

Pas en énergie du dipôle :  $160 \text{A} = 50$  MeV donc  $1 \text{A} = 300$  keV et  $0.1 \text{A} = 30$  keV.

## Références

- [1] Gouanère M, Spighel M, Cue N, Gaillard M, Genre R, Kirsch R, Poizat J C, Remillieux J, Cattillon P and Roussel M 2008 **33** URL <https://fondationlouisdebroglie.org/AFLB-331/aflb331m625.htm>
- [2] Catillon P, Cue N, Gaillard M J, Genre R, Gouanère M, Kirsch R G, Poizat J C, Remillieux J, Roussel L and Spighel M 2008 *Foundations of Physics* **38** 659–664 publisher : Springer Us
- [3] De Broglie L 1925 *Thèse de Doctorat (1924) : Recherches sur la Théorie des Quanta (Annales de Physique* vol Tome III) (Masson)
- [4] Schroedinger E 1930 *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften. Physikalisch-Mathematische Klasse* **24** 418
- [5] Remillieux J, Artru X, Bajard M, Chehab R, Chevallier M, Curceanu C, Dabagov S, Dauvergne D, Guérin H, Gouanère M, Kirsch R, Krimmer J, Poizat J C, Ray C, Takabayashi Y and Testa E 2015 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms* **355** 193–197 ISSN 0168-583X URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X15001147>
- [6] Rivas M 2008 Measuring the internal clock of the electron Tech. rep. publication Title : arXiv e-prints ADS Bibcode : 2008arXiv0809.3635R Type : article URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008arXiv0809.3635R>