

Le scanner à rayons X

« Si on laisse passer la décharge d'une grosse bobine de Ruhmkorff à travers un tube à vide [...], on voit alors, dans la pièce complètement obscure, qu'un écran de papier recouvert de platinocyanure de baryum, amené à proximité de l'appareil, s'illumine fortement et devient fluorescent lors de chaque décharge. » C'est ainsi qu'en 1895 Wilhelm Röntgen (1845-1923) fit connaître au monde sa formidable découverte, si étrange qu'il lui donna le nom habituel de l'inconnue en mathématiques : les rayons « X ». Surpris par leur puissance, le physicien intercala bientôt différents objets entre l'émetteur et l'écran de papier : tandis qu'un liore épais était transparent aux rayons X, une croix en métal semblait les arrêter puisque son ombre s'inscrivait sur l'écran. Il répéta bientôt l'expérience avec... la main de sa femme et réalisa la première radiographie de l'histoire. Il reçut le premier prix Nobel de physique en 1901.

Depuis, l'imagerie médicale a fait des progrès considérables : ainsi, le scanner à rayons X est aujourd'hui un examen courant...

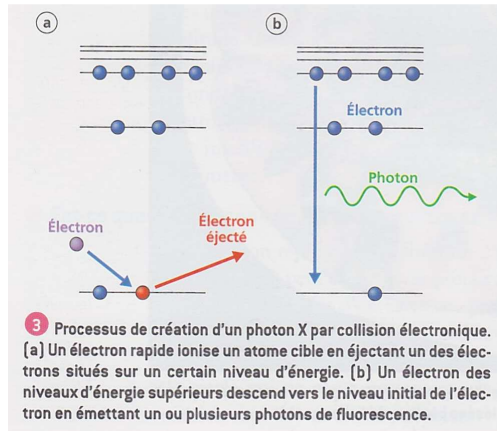
Les rayons X

Si les propriétés particulières des rayons X ont frappé de stupeur les physiciens de la fin du XIX^{ème} siècle, ce rayonnement n'est pourtant qu'une onde électromagnétique comme la lumière ou les micro-ondes - mais de courte longueur d'onde (entre 0,01 nm et 10 nm). Du point de vue corpusculaire, les photons qui constituent les rayons X sont beaucoup plus énergétiques que ceux du domaine visible. En physique « microscopique » moderne, les énergies (celles des particules et donc des photons) sont habituellement exprimées en eV (électronvolts), une unité beaucoup plus petite que le joule, l'unité légale. Pour fixer les idées, les photons X transportent typiquement une énergie de quelques dizaines de keV, alors que les photons visibles ont une énergie de l'ordre de l'eV.

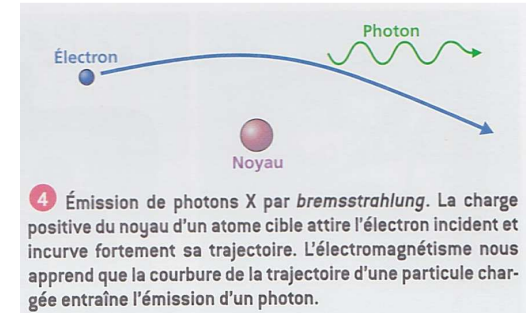
Comment produire les rayons X ?

Un des moyens pour obtenir des photons de haute énergie est d'accélérer des électrons à l'aide d'un champ électrique, en leur donnant une énergie cinétique supérieure à celle des photons X que l'on souhaite produire, puis de les diriger vers une cible solide. Lorsqu'un électron de grande énergie cinétique (une centaine de keV) pénètre dans le solide, deux types de phénomènes se produisent.

- L'électron incident éjecte des électrons d'un atome cible. Si cet électron provient d'une couche interne de l'atome, il en résulte une réorganisation des autres électrons, suivie de l'émission d'un photon dit de fluorescence, caractéristique de l'élément cible. L'énergie des photons sera d'autant plus grande que cette cible est constituée d'atomes de numéro atomique élevé.



- Quand l'électron incident passe très près du noyau (positif) d'un atome, il est attiré par ce dernier, ce qui dévie sa trajectoire. Cette déviation brutale provoque l'émission d'un photon, ralentissant l'électron. Pour désigner ce « rayonnement de freinage », les physiciens ont conservé le terme allemand de *Bremsstrahlung*, le phénomène se produisant plus généralement chaque fois qu'une particule chargée décrit un mouvement autre que rectiligne et uniforme (c'est-à-dire à vitesse constante).

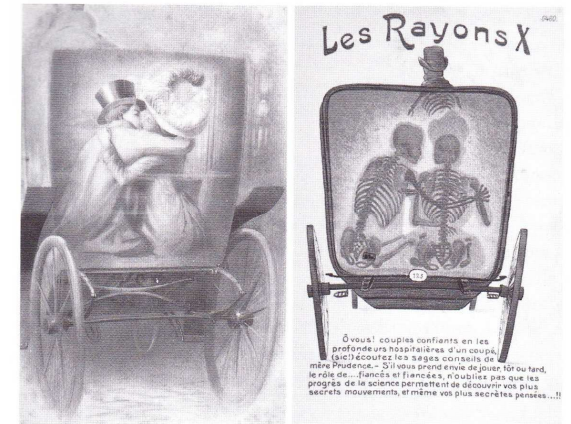


L'énergie des photons émis dépend de la déviation subie par l'électron, déviation qui est elle-même fonction de la distance à laquelle l'électron frôle le noyau. Comme dans les nombreuses collisions électron-atome, ces distances peuvent avoir des valeurs très diverses, les photons émis présentent une répartition continue d'énergie.

En résumé, les rayons X sont produits par collision d'électrons avec une cible solide puis fluorescence, ou par *Bremsstrahlung*.

Voir à travers la matière

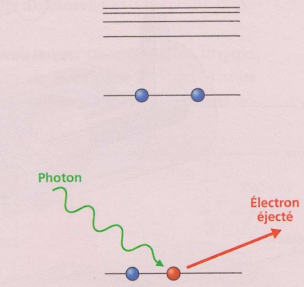
Avec la radiographie, il devenait possible de traverser la matière et de « voir » le squelette humain : imaginez l'émoi que suscita une telle découverte sur le grand public à la fin du XIX^{ème} siècle... Pour comprendre pourquoi les photons visibles (la lumière) ne traversent pas un objet comme une main, alors que les rayons X possèdent cette propriété, il faut décrypter, à l'échelle de la matière, l'interaction entre un photon et les atomes qu'il rencontre.



L'INTERACTION DES RAYONS X AVEC LA MATIÈRE

Les rayons X interagissent avec la matière de plusieurs façons, mais un phénomène domine dans la gamme d'énergie de la radiographie ou du scanner à rayons X (quelques dizaines de keV) : lorsqu'un photon interagit avec un atome, il peut arracher un électron d'un niveau électronique profond (figure 5). Dans ce processus, le photon disparaît : une partie de son énergie est utilisée pour arracher l'électron, tandis que le reste est transféré sous forme d'énergie cinétique à l'électron libéré. Cet effet s'appelle l'effet photoélectrique ; il fut interprété par Albert Einstein en 1905, *annus mirabilis* pour le physicien qui publia cette année-là plusieurs articles fondateurs de la physique moderne.

La probabilité d'interaction d'un rayon X avec un atome est d'autant plus importante que son noyau contient un grand nombre de protons (c'est-à-dire qu'il est de numéro atomique élevé). Il en résulte que la capacité d'atténuer les rayons X est plus grande pour un matériau lourd et dense, le plomb par exemple, que pour un matériau léger, comme l'eau. Pour schématiser, on peut dire que les matériaux lourds sont opaques aux photons X, alors que les éléments légers sont transparents.

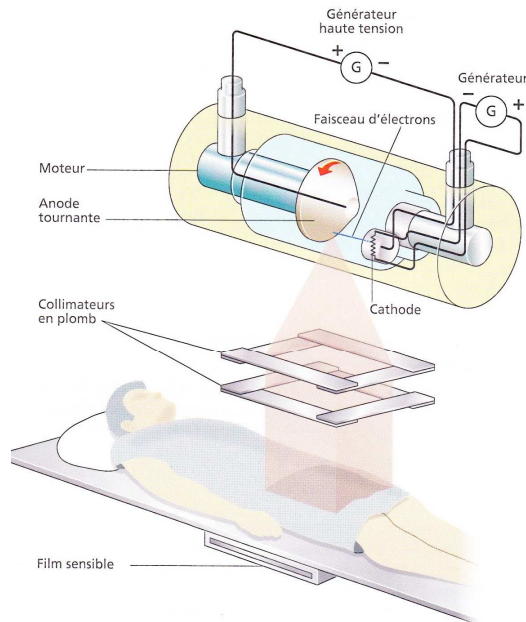


5 L'effet photo-électrique. Si son énergie est suffisante, un photon peut être absorbé en éjectant un électron d'un niveau électronique profond d'un atome.

La radiographie

Un appareil de radiographie est constitué d'une source de rayons X et d'un film sensible aux rayons X (comme une pellicule photo, sensible à la lumière et aux RX).

La source de rayons X est ce qu'on appelle un tube à rayons X, dans lequel on chauffe un filament métallique afin d'en extraire des électrons. On accélère ensuite ces électrons par une grande différence de potentiel (et donc en établissant un champ électrique intense) entre le filament et une électrode appelée anode. Le vide est fait dans le tube afin d'éviter que les électrons n'entrent en collision avec des molécules de diazote ou de dioxygène durant leur parcours vers l'anode. A l'instant où les électrons frappent cette dernière, de nombreux rayons X sont émis dans toutes les directions. Le tube est blindé et ne laisse sortir les rayons X que par une petite ouverture : on obtient ainsi un faisceau de rayons X. Un système de caches (ou collimateurs) en plomb (de fort coefficient d'atténuation) sert à définir avec précision la zone à radiographier.



7 Dans un appareil de radiographie, le tube à rayons X permet, à l'aide de collimateurs en plomb, d'irradier une zone précise. Cette technique ne fournit pas d'information sur la profondeur des zones observées.

Lorsqu'ils atteignent le patient, les rayons X sont davantage atténués par ses os (le calcium a un numéro atomique supérieur à celui de l'hydrogène ou de l'oxygène, et une plus forte densité que l'eau) que par les tissus formés principalement d'eau, et donc de faible coefficient d'atténuation. Un film sensible aux rayons X, situé sous le patient, enregistre cet effet d'atténuation.

Comment passer à trois dimensions ?

La simple observation de l'ombre portée (à deux dimensions) sur le film radiographique s'avère très utile pour étudier une fracture osseuse, ou pour révéler la présence d'un morceau de métal dans le corps du patient, par exemple. Pendant la Première Guerre mondiale, Marie Curie et son équipe avaient ainsi formé près de deux cents unités mobiles d'appareils radiologiques, afin de pratiquer l'examen sans avoir à transporter les blessés. Les infirmières - rapidement surnommées les « petites Curie » - firent durant cette période plus d'un million d'exams et sauvèrent d'innombrables vies.

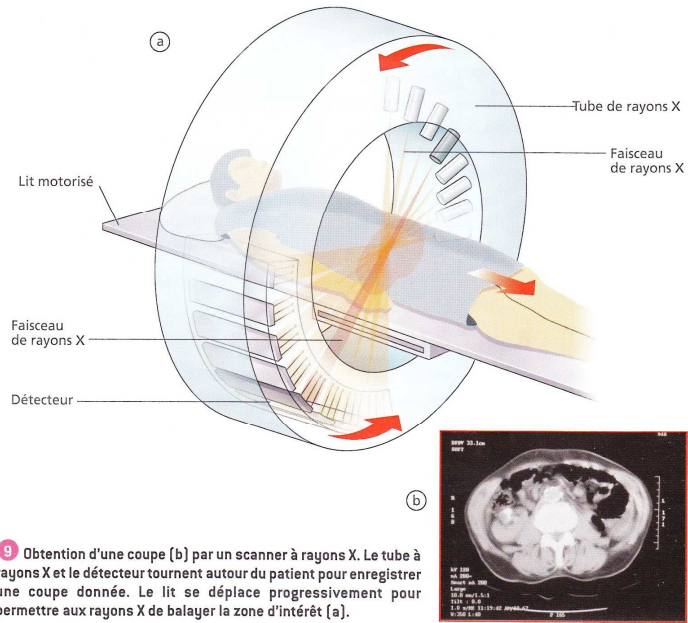
La profondeur à laquelle se trouve par exemple un corps étranger reste toutefois impossible à déterminer, tout comme sa forme exacte, à moins de multiplier les clichés sous différents angles. Une solution est de découper virtuellement le patient en tranches, c'est-à-dire d'obtenir des images « en coupe de patient ». Songez à un cake aux raisins dont on chercherait à déterminer la position de tous les grains de raisins : le découper en tranches est certainement une stratégie payante... Ainsi, pour obtenir une image à trois dimensions d'un objet (organe ou patient entier), on effectue une série de coupes bidimensionnelles : c'est le principe du scanner, dont les calculs complexes de reconstruction seraient inenvisageables sans ordinateurs performants. La paternité du scanner est souvent attribuée à l'ingénieur anglais G.N. Hounsfield, qui mit au point le premier prototype industriel en 1968, et au physicien américain A. M. Cormack dont les travaux proposaient un procédé similaire : ils partagèrent le prix Nobel de médecine en 1979. La décision étonna car, dès 1960, un neurologue américain, W. Oldendorf, avait construit tant bien que mal un prototype de scanner, mais son invention en était restée là car elle avait semblé de peu d'intérêt pour les industriels de l'époque. Des problèmes de brevets pourraient être à l'origine de cet « oubli » de la fondation Nobel, comme cela arrive parfois en sciences.

Pour obtenir une carte précise de chaque coupe, il est nécessaire de réaliser de nombreux clichés. Ils sont obtenus en faisant pivoter autour du patient l'ensemble source-détecteur. Les rayons X traversent ainsi le patient sous des angles différents avant d'être détectés. Toutes les informations enregistrées par le détecteur sont traitées par un ordinateur qui crée une image de chaque coupe.

Un mouvement de translation du patient déplace progressivement le plan de coupe, afin d'obtenir une série de clichés. De ce mouvement combiné de rotation et de translation, il résulte que le tube à rayons X décrit une hélice autour du patient : le scanner est dit en acquisition hélicoïdale.

L'ensemble de ces coupes bidimensionnelles sont ensuite analysées par un puissant ordinateur, qui reconstruit un modèle tridimensionnel complet. Il est alors possible, pour affiner le diagnostic, de manipuler ce modèle tridimensionnel et de fabriquer des images suivant un plan de coupe complètement différent de ceux qui ont été réalisés avec la source de rayons X !

Les détecteurs ont beaucoup évolué grâce aux progrès de la physique fondamentale : aujourd'hui, leurs performances permettent d'améliorer la qualité des images tout en soumettant le patient à des doses moindres de rayons ionisants.



Questions

1. Certains organes, tissus mous ou système sanguin, n'apparaissent pas clairement sur une radiographie : comment procède-t-on pour les visualiser ?
2. La tomodensitométrie par rayon X (scanner) a-t-elle d'autres applications que médicales ?
3. Avez-vous entendu parler des rayons T ?