

La diffusion aux petits angles

PRINCIPE



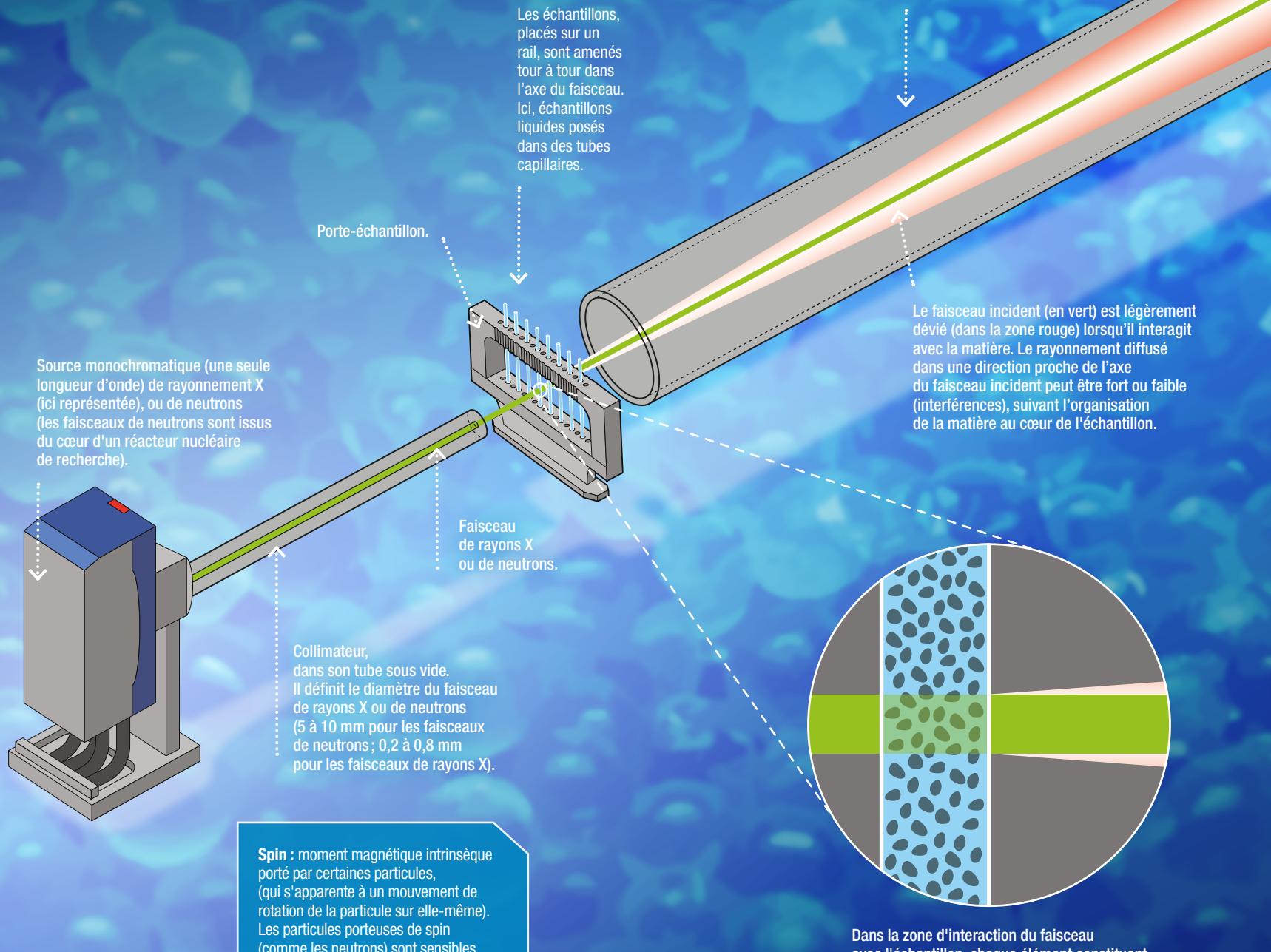
En apparence désordonnée, la matière dite molle, lorsqu'elle est soumise à un rayonnement X ou neutrons, diffuse légèrement une partie du rayonnement incident, avec une faible déviation (à petits angles, typiquement entre 0,1 et 5°). Il se forme ainsi un halo autour de l'axe du faisceau incident, source d'informations précises sur l'organisation locale de la matière, de l'échelle du nanomètre au micron.

QUELLE SOURCE CHOISIR: X OU NEUTRONS?

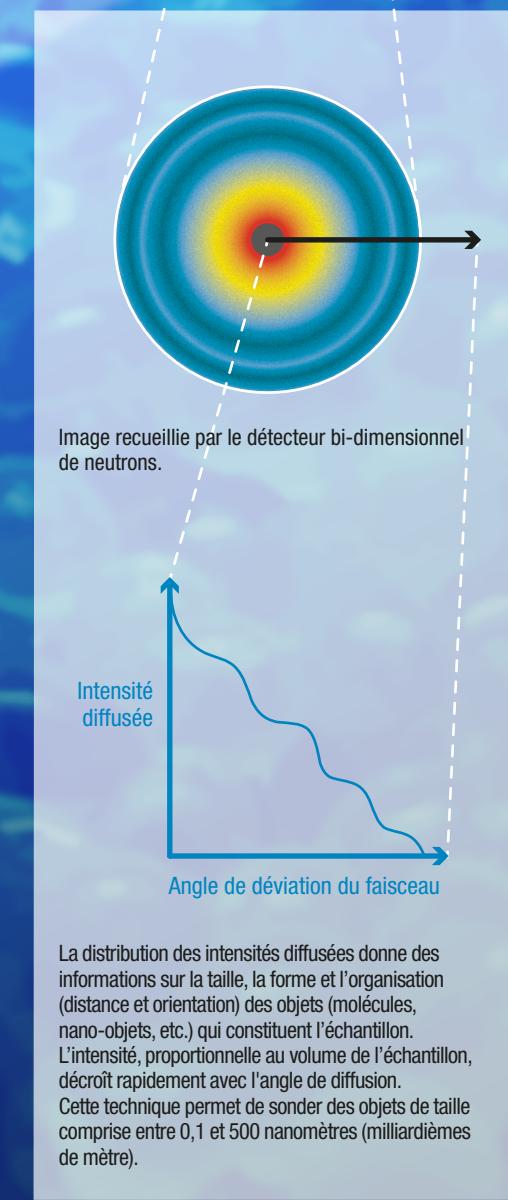
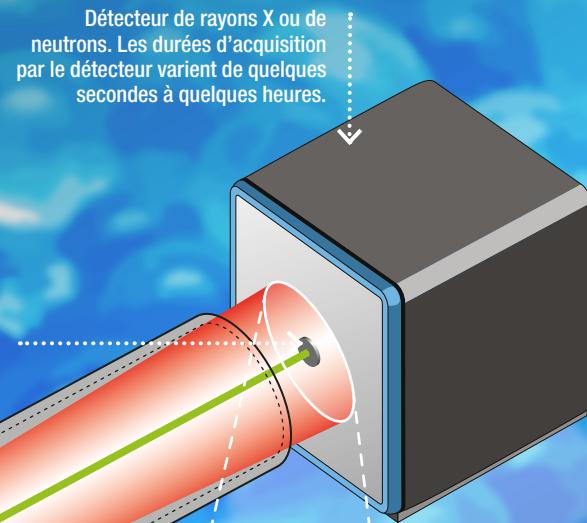
- Les rayons X (rayonnement électromagnétique de très haute énergie) sont composés de photons sans masse. Ils sont faiblement diffusés par les électrons des atomes et sont donc adaptés à l'étude des atomes lourds, qui ont beaucoup d'électrons.
- Les neutrons, en revanche, ont une masse. Ils interagissent essentiellement avec les noyaux des atomes et sont donc sensibles à la position de tous les noyaux, même les plus légers (H, D, He, Li... matière organique). Faiblement absorbés par la matière, ils permettent de sonder les échantillons sur l'ensemble de leur volume.
- Comme les photons (rayons X), les neutrons ont un **spin** mais leur interaction avec l'aimantation des matériaux est bien plus forte. Ils sont donc adaptés à l'étude des propriétés magnétiques de la matière (exemple : étude des supraconducteurs, couches minces constituant les capteurs magnétiques, nouveaux aimants sans terres rares...).

X ou neutrons... Chacune de ces sources s'accompagne de spécificités techniques en termes de flux incidents, taille de faisceaux, résolution des détecteurs, durées d'acquisitions, dimension de la ligne, etc.

Spin : moment magnétique intrinsèque porté par certaines particules, (qui s'apparente à un mouvement de rotation de la particule sur elle-même). Les particules porteuses de spin (comme les neutrons) sont sensibles au magnétisme de la matière explorée.



Dans la zone d'interaction du faisceau avec l'échantillon, chaque élément constituant la matière à analyser (protéine, nano-objets, etc.) diffuse le rayonnement.



La distribution des intensités diffusées donne des informations sur la taille, la forme et l'organisation (distance et orientation) des objets (molécules, nano-objets, etc.) qui constituent l'échantillon. L'intensité, proportionnelle au volume de l'échantillon, décroît rapidement avec l'angle de diffusion. Cette technique permet de sonder des objets de taille comprise entre 0,1 et 500 nanomètres (milliardièmes de mètre).



Plateforme SAXS du CEA à Saclay, dédiée aux études de la matière par diffusion de rayon x.

Exemples d'un large champ d'applications

Sondre les molécules du vivant

La dystrophine est une protéine qui assure un rôle de « charpente » de la membrane des cellules musculaires ; son absence entraîne de sévères myopathies actuellement incurables. Pour mieux comprendre son rôle et contribuer à la conception de thérapies, les interactions dystrophine/membrane ont été étudiées par diffusion de neutrons et de rayons X aux petits angles en utilisant des bicelles lipidiques (agrégats lipidiques composés de phospholipides à longue chaîne et de détergent). Les rayons X sondent le complexe entier protéine/bicelle, tandis que les neutrons peuvent sonder sélectivement la dystrophine seule, pour caractériser ses changements de structure.

Découvrir des propriétés : les skyrmions magnétiques

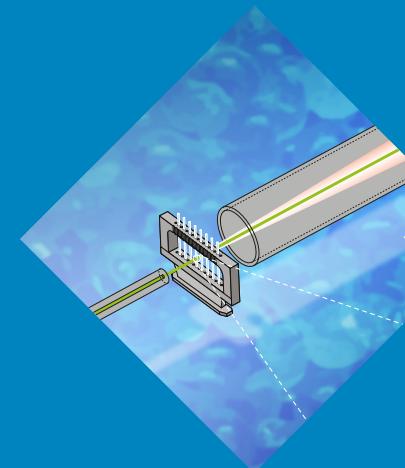
Les skyrmions magnétiques sont des configurations où l'aimantation d'un matériau est localement repliée sur elle-même, sur une échelle allant du nanomètre au dixième de microns. La diffusion neutronique aux petits angles a permis leur découverte et joue un rôle essentiel dans l'étude de leurs propriétés fondamentales (taille, forme et organisation spatiale). Ces « tourbillons » se comportent comme des particules : ils sont à la fois stables vis-à-vis de perturbations extérieures et facilement manipulables par l'application de courants électriques. Grâce à ces propriétés, ils sont envisagés comme les briques élémentaires de l'électronique de demain, où les unités logiques (bits) pourraient présenter des tailles comparables à la distance entre les atomes du matériau-hôte.

Améliorer des propriétés : exemple des pneumatiques

Les propriétés des pneumatiques peuvent être améliorées par inclusion de nanoparticules au sein du matériau, formant ainsi des nanocomposites. Pour mieux comprendre le phénomène, les scientifiques construisent un système modèle, constitué de polystyrène (mimant la matrice du pneumatique, faite de chaînes de polymères enchevêtrées) et de nanoparticules de silice, et l'étudient par diffusion aux petits angles de rayons X et de neutrons : si les particules ont peu d'affinités avec le polymère, elles se connectent en réseau et favorisent le renfort mécanique ; si elles se regroupent en amas isolés, ce qui comprime les chaînes polymères, cela favorise l'adhérence du pneu.

Caractériser les nanoparticules

De nombreux matériaux (cosmétiques, médicaments, additifs...) contiennent des nanoparticules, dont la caractérisation est devenue primordiale pour mieux quantifier leurs propriétés et se conformer à la législation. La diffusion aux petits angles (rayons X ou neutrons), méthode non destructive, permet contrairement à la microscopie de sonder d'un coup plusieurs milliards de nano-objets. Elle apporte des informations sur leur taille (précision inférieure à 1 nm), leur concentration (l'intensité diffusée est proportionnelle à la quantité de nanoparticules présentes) et la distribution de ces nano-objets. Dans ce but, rayons X ou neutrons interagissant de façon différente avec la matière sont très complémentaires. Ces méthodes permettent aussi de suivre l'évolution de ces matériaux, au cours des synthèses permettant de les créer à façon.



La diffusion aux petits angles

C'est par l'interaction avec des rayonnements (lumière ou particules) que l'on peut observer la matière et l'étudier. Pour la matière dite « molle », peu organisée (non cristallisée), l'étude par diffusion de rayons X ou de neutrons aux petits angles, est une méthode de choix.

ENJEUX



L'étude par diffusion de rayonnement X ou neutrons aux petits angles s'applique à de nombreux matériaux dits « désordonnés », que l'on rassemble souvent sous le terme de « matière molle » : matières plastiques, gels, élastomères, cristaux liquides, cosmétiques, matériaux nanostructurés, céramiques... La déviation, même faible, des rayons X et des neutrons envoyés sur l'échantillon que l'on étudie renseigne sur l'organisation des molécules ou atomes présents, même lorsqu'elle est limitée. Les neutrons (particules) et les rayons X

(onde électromagnétique), interagissant chacun à leur manière avec la matière, apportent des informations très complémentaires. Cette technique intéresse l'ensemble des domaines de la physique, de la chimie et de la biologie. L'information structurale obtenue est généralement un bon moyen de comprendre l'origine profonde des propriétés physique, chimique ou biologique, et apporte ainsi la maîtrise nécessaire pour la conception de matériaux fonctionnels.