




Le rayonnement synchrotron

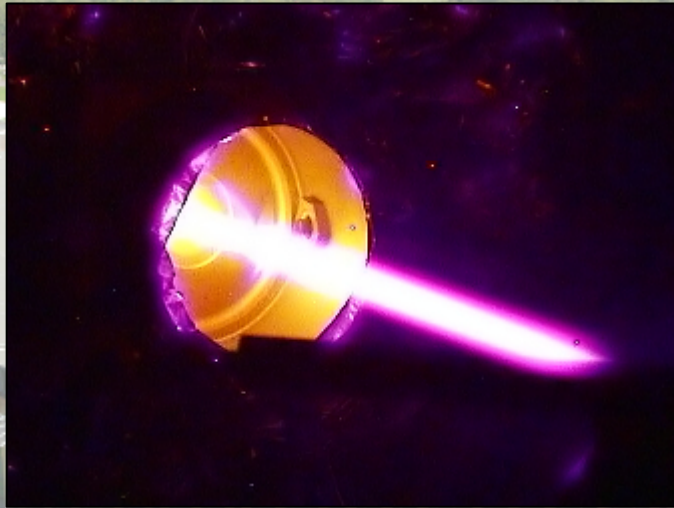


- 
- 1. Qu'est-ce qu'un rayonnement synchrotron ?**
 - 2. Comment peut-on produire le rayonnement synchrotron ?**
 - 3. Les applications du rayonnement synchrotron**



PLAN

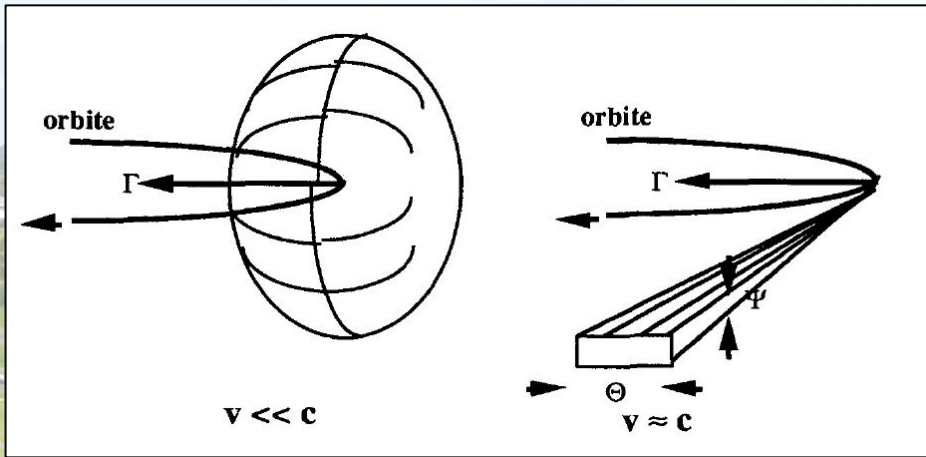
Définition : rayonnement électromagnétique émis par des électrons ou des positrons relativistes soumis à une accélération centripète (photons)



Vitesse proche de celle de la lumière

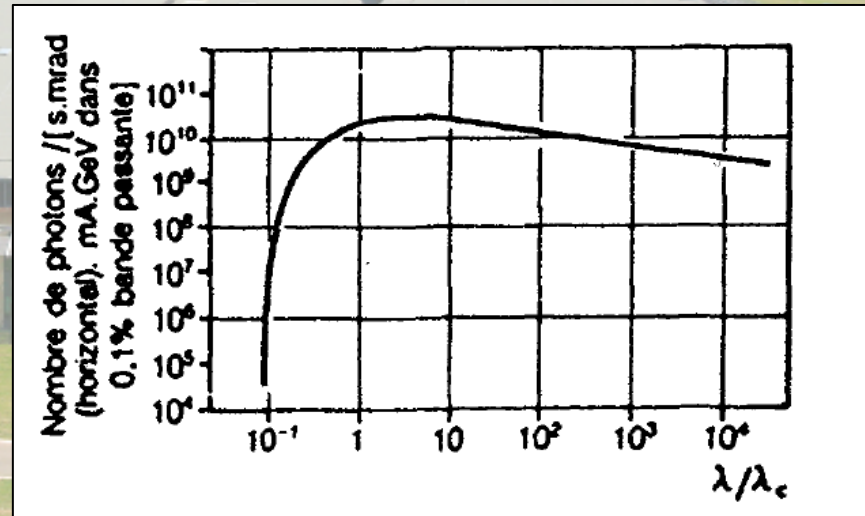
Principe de base : théorie des ondes électromagnétiques de Maxwell

1. Le Rayonnement Synchrotron



Rayonnement synchrotron
anisotrope
polarisé
tangentiel à la trajectoire
dans le plan orbital
maximal selon \vec{v}

Spectre continu dû à la superposition d'un grand nombre d'harmoniques à cause de l'effet relativiste du phénomène



$$\lambda_c = \frac{18,64}{BE^2}$$

1. Le Rayonnement Synchrotron

Puissance rayonnée par une particule suivant une trajectoire circulaire de rayon r :

$$P = \frac{2}{3} \times \frac{e^2 c \beta^4 \gamma^4}{r^2}$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad r = \frac{m\gamma c}{eB}$$

$$\gamma = \frac{E}{mc^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

**Plus une particule est légère, plus elle émet de RS
Seules des particules relativistes ($\beta \approx 1$, $\gamma \gg 1$) vont rayonner
une puissance conséquente**

1. Le Rayonnement Synchrotron

Pour N particules (électrons ou positrons), on peut définir un courant équivalent I,

$$P_r = 1,266 \times E^2 \cdot B^2 \cdot I \cdot L$$

La puissance stockée dans le faisceau :

$$P_{stockée} = 1000 \times E \cdot I$$

A.N. : pour la machine ESRF, $P_{stockée} = 500 \text{ MW}$

$$P_r = 460 \text{ kW}$$

$$P_{élec\ nec} = 6 \text{ MW}$$

→ anneau de stockage

1. Le Rayonnement Synchrotron

**Observé pour la 1^{ère} fois en 1947 à partir d'un
synchrotron à électrons**

**Technologie qui ne cesse d'évoluer :
1 GeV en 1950 → 1 TeV en 1980**

Actuellement troisième génération de synchrotrons

SOLEIL : 2,75 GeV

ESRF : 6 GeV



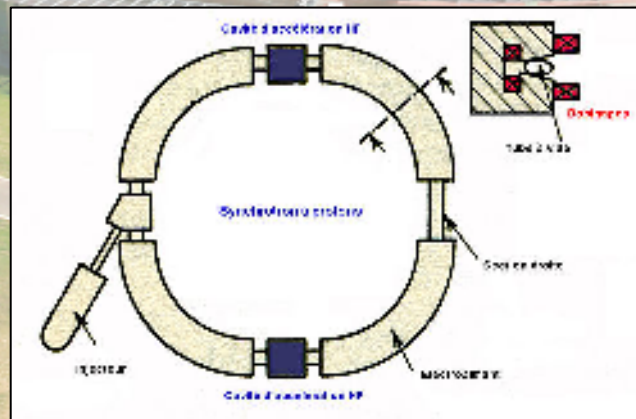
2. Le synchrotron

Qu'est-ce qu'un synchrotron ?

Grand instrument électromagnétique destiné à l'accélération à haute énergie de particules élémentaires (protons, électrons)

Plus qu'un cyclotron : fréquence variable de la tension accélératrice
→ synchronisation avec le passage des particules (paquets)

Accélérer à haute énergie des particules stables chargées



2. Le synchrotron

Fonctionnement d'un synchrotron à électrons

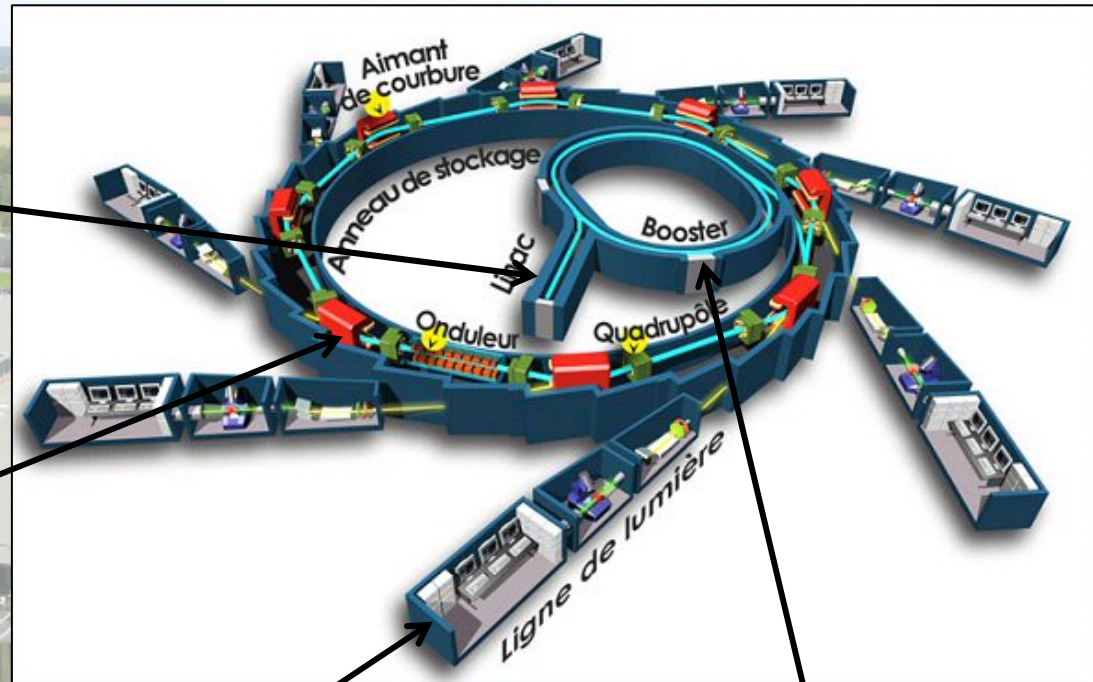
Accélérateur linéaire
*jusqu'à une vitesse
proche de celle de la
lumière*

Anneau de stockage
*plusieurs 100m de
circonférence
énergie \approx cste*

Lignes de lumière
*lentilles, miroirs ou
monochromateurs afin
de sélectionner λ*

Accélérateur circulaire
*augmenter l'énergie
jusqu'à environ 2 GeV*

Animation : <http://www.esrf.eu/files/comm/aboutus/accel.wmv>



2. Le synchrotron

Anneau de stockage : chambre à vide

Vide très poussé (qqs 10^{-10} Torr = qq $s 10^{-13}$ atm)

→ minimiser l'interaction particules/milieu extérieur

→ éviter des collisions avec des molécules d'air

Dimensions :

2-3 cm de hauteur

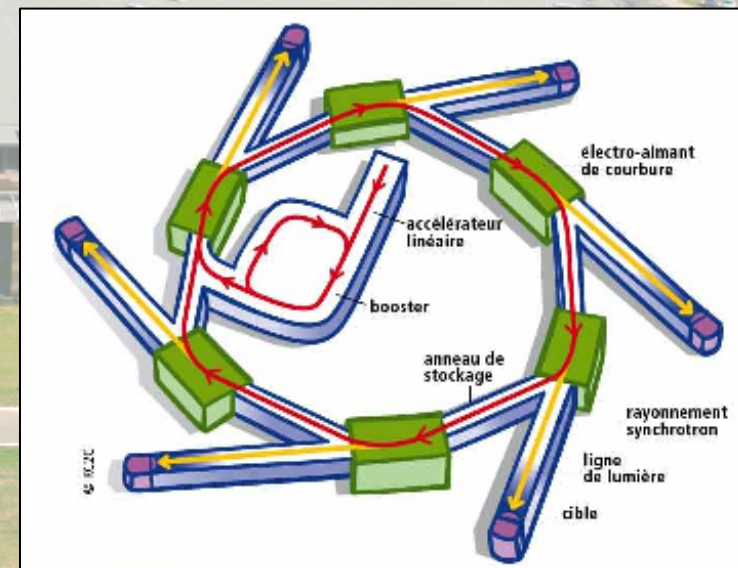
10-20 cm de largeur

1 km de longueur pour ESRF par exemple

Refroidie sur la partie externe

→ utiliser la puissance synchrotron
rayonnée

Particules : centaines de milliers de tours
chaque seconde



2. Le synchrotron

Anneau de stockage : éléments magnétiques

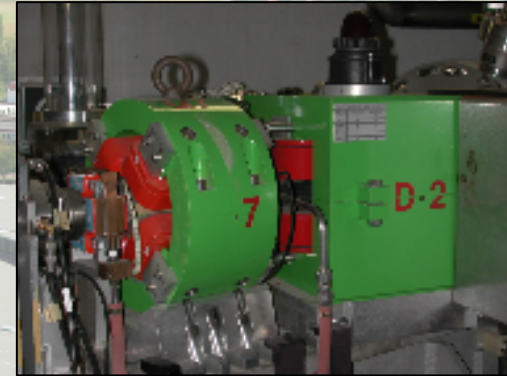
Aimants de courbure

64 sur ESRF

imposent la trajectoire des particules

champ magnétique : 1-2 T

production de RS tangentielle à la trajectoire (impulsions et courte durée)



Éléments multipolaires (quadrupoles, hexapoles)

focalisation du faisceau

Éléments d'insertion

→Éléments magnétiques responsables de la majeure partie de la puissance électrique consommée : 1MW pour 10kW de puissance synchrotron

2. Le synchrotron

Anneau de stockage : cavité radio-fréquence

Située sur une des parties droites de l'anneau

Redonner à chaque tour au faisceau de particules

Application d'un champ longitudinal périodique de plusieurs 10 kV
Fréquence = harmonique de la fréquence de révolution des particules
Accordée en phase sur la trajectoire des particules ayant une énergie nominale E_0

Accélère les particules les plus lentes et ralentit les plus rapides
→ paquets de particules



2. Le synchrotron

Anneau de stockage : éléments d'insertion

Dipôles magnétiques alternés :
trajectoire ondulée

But: augmenter la puissance rayonnée

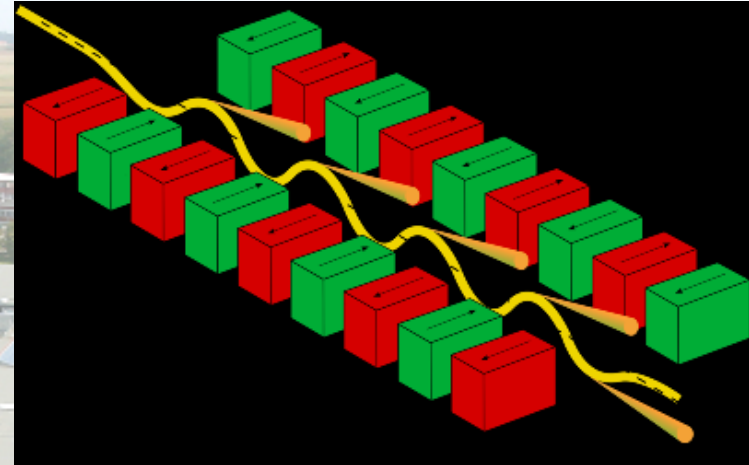
Exemple: Soleil 118 onduleurs
brillance x1000

Dispositif caractérisé par

$$K = \frac{2eB\lambda_u}{2\pi mc} = 0,934\lambda_u B$$

$K \ll 1$: onduleur

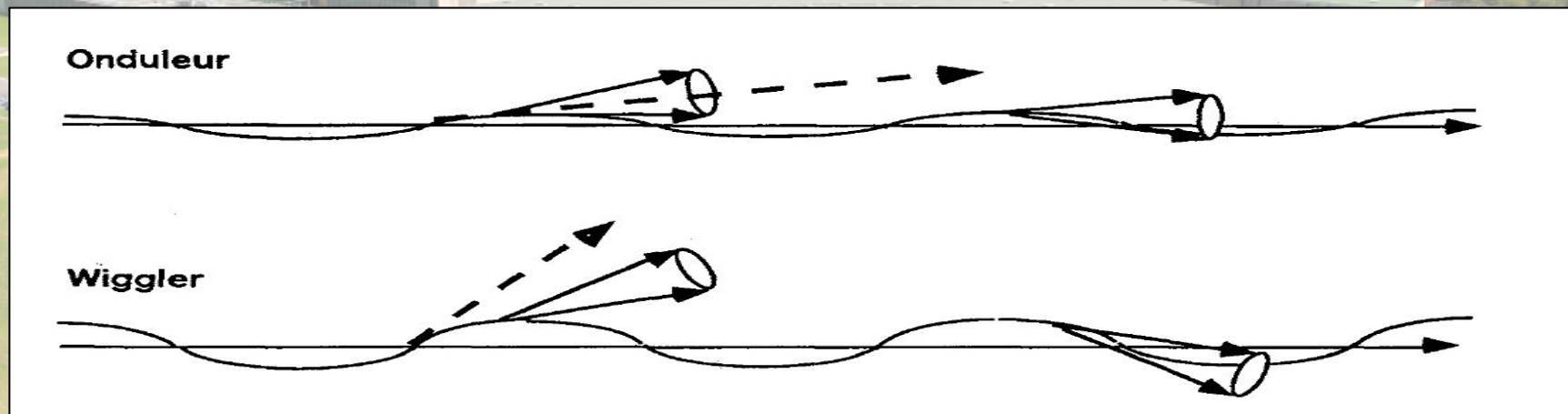
$K \gg 1$: wiggler



2. Le synchrotron

Anneau de stockage : éléments d'insertion

Onduleur: faible amplitude
interférences
spectre de bandes étroites



Wiggler: amplitude importante des oscillations
spectre blanc

2. Le synchrotron

Pourquoi on utilise beaucoup le RS ?

Caractéristiques exceptionnelles :

spectre d'émission (infrarouge aux rayons X)

*brillance exceptionnelle (petite taille, intensité) → 10000 fois le Soleil
stable et pulsé*

forte cohérence spatiale et temporelle

polarisé (anisotropie)

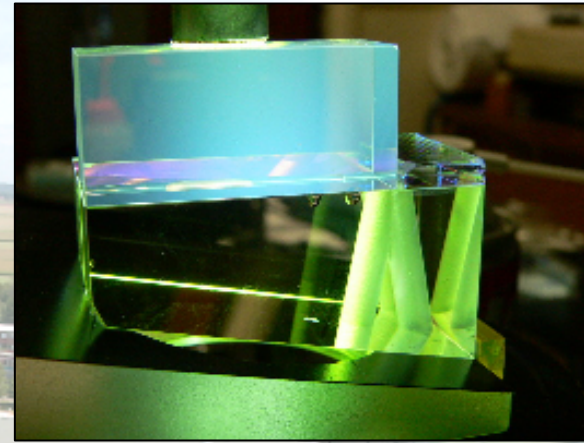
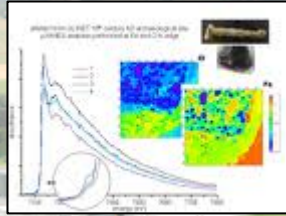
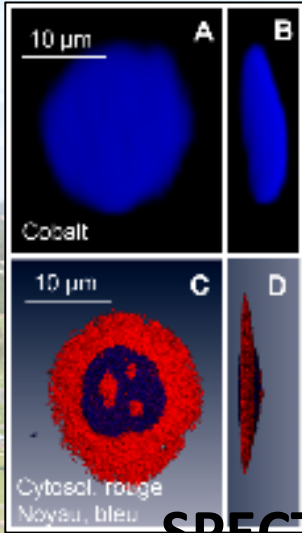
Comparé à un laser accordable sur une grande gamme de f spectrales

Expériences

*domaines très variés (chimie, physique fondamentale, analyse de
matériaux archéologiques, ...)*

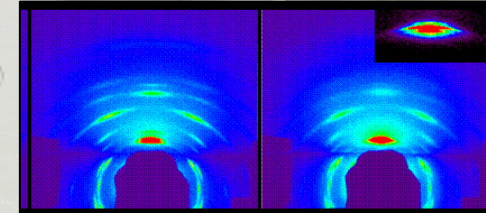
jusqu'à une dizaine en simultané

3. Les applications du RS

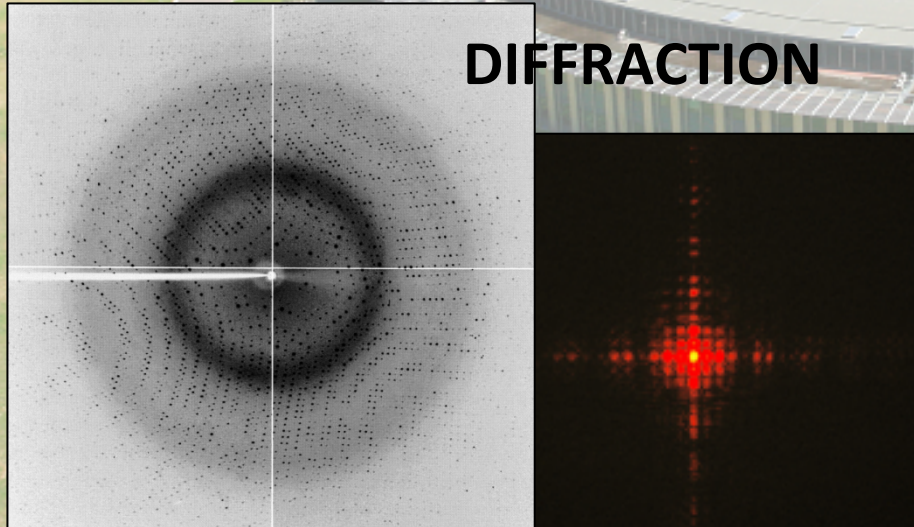


SPECTROSCOPIE

IMAGERIE



DIFFRACTION



DIFFUSION



3. Les applications du RS



Application à la cristallographie

**Détermination d'un ordre à courte distance
dans un alliage ternaire
par diffraction anormale**

Propriété exploitée : spectre blanc.



3. Les applications du RS

Ordre à courte distance

Alliage binaire AB: $\alpha_{AB}(\vec{r}) = 1 - \frac{P_{AB}}{C_A C_B}$

Alliage ternaire ABC: $\alpha_{AB}, \alpha_{AC}, \alpha_{BC}$

3. Les applications du RS

Diffusion anormale

Diffusion élastique d'une onde électromagnétique par les électrons d'un matériau

λ proche du seuil d'absorption \rightarrow résonance



3. Les applications du RS



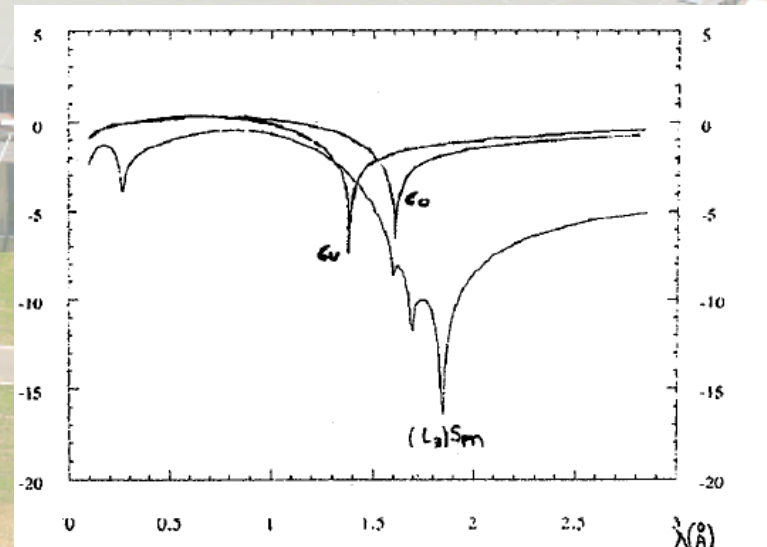
Facteur de diffusion

$$f = f(\theta, \lambda) + f'(\lambda) + i f''(\lambda)$$

f cas des électrons libres

f' et f'' facteurs de diffusion anormale.

Forte variation de f' et f''
au voisinage de λ_{abs}



3. Les applications du RS

Diffusion anormale par un alliage

Intensité diffusée par N atomes

$$I(\vec{k}) = \frac{1}{N} \sum_{m,n} f_m f_n e^{2i\pi\vec{k}\cdot(\vec{r}_m - \vec{r}_n)}$$

où $\vec{r} = \vec{R} + \delta\vec{r}$

Intensité diffusée par un alliage due à l'ordre à courte distance

$$I_{OCD} = \sum_{A,B} c_A c_B |f_A - f_B| \alpha_{AB}(\vec{k})$$

3. Les applications du RS

Cas d'un alliage ternaire

Intensité diffusée: $I_{OCD}(\vec{k})$

$$= C_A C_B |f_A - f_B| \alpha_{AB}(\vec{k})$$
$$+ C_A C_C |f_A - f_C| \alpha_{AC}(\vec{k})$$
$$+ C_B C_C |f_B - f_C| \alpha_{BC}(\vec{k})$$

3 mesures nécessaires à des λ différents
donc utilisation d'une source blanche
= le rayonnement synchrotron

3. Les applications du RS