

## Chapitre 4 : Propriétés générales des collisions

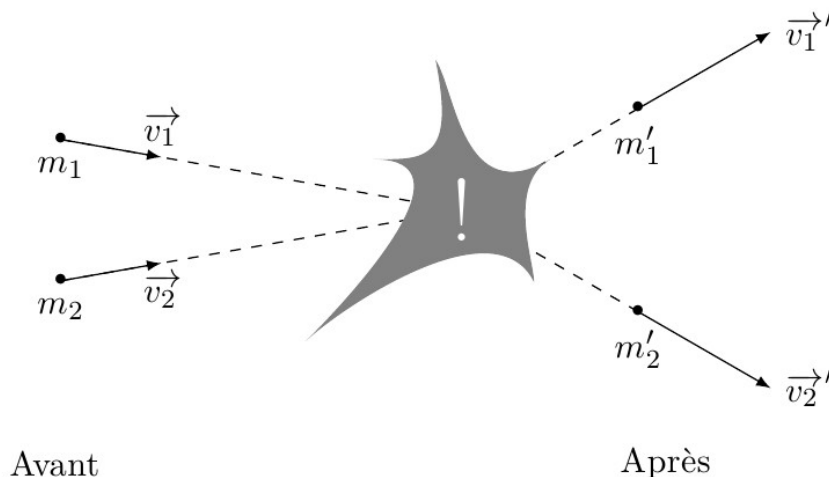
### Introduction:

Nous abordons dans ce chapitre les processus de collision qui font intervenir deux particules ou objets macroscopiques. Nous verrons comment, malgré l'absence d'information sur l'interaction durant la collision, il nous est possible de décrire complètement ou partiellement l'état du système après la collision si on le connaît avant le choc.

Il existe des situations dans lesquelles des corps matériels interagissent entre eux seulement lorsqu'ils sont très proches. Par ailleurs, il arrive souvent que cette interaction soit difficile à expliciter. Dans ce cas, le point de vue le plus simple consiste à dire que les particules subissent un choc : on suppose alors qu'ils n'interagissent pas avant ni après et que l'interaction se produit sur une durée très courte.

### Définition:

On dit qu'il y a collision ou choc entre deux ou plusieurs particules quand ces objets subissent une interaction mutuelle de courte durée et de courte portée. En règle générale, les forces d'interaction sont négligeables quand les particules sont suffisamment éloignées. On peut donc distinguer un « avant » et un « après » la collision.



Ainsi, avant et après la collision, les particules se déplacent en ligne droite avec des vitesses uniformes. On notera  $\vec{v}_i$  la vitesse d'une particule avant le choc et  $\vec{v}_i'$  celle après. La problématique, peut-on déduire quelques informations sur les vitesses après le choc, compte tenu de la mesure des vitesses sur les vitesses  $v_i$  avant le choc, malgré l'absence de détails concernant l'interaction lors du choc ? Réciproquement, quelle information nous apporte la mesure des vitesses finales ?

### Grandeurs Conservés:

#### La quantité de mouvement:

soit un système isolé de N particules en interaction ,

$$(\vec{F}^{\text{ext}} = \vec{0}).$$

$$\frac{d\vec{p}_S}{dt} = \vec{F}^{\text{ext}} = \vec{0}$$

La quantité de mouvement du système se conserve donc.

$$\vec{p}_{\mathcal{S}}^{\text{avant}} = \vec{p}_{\mathcal{S}}^{\text{après}}$$

avec

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

### Conservation de l'énergie:

Si les forces d'interaction dérivent d'une énergie potentielle d'interaction  $E_p$ , alors l'énergie totale  $E_{\text{tot}}$  du système s'écrit :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_c(\mathcal{S}) + \mathcal{E}_p^{\text{int}}(\mathcal{S}) + \sum_{\text{particules}} U_i$$

$\mathcal{E}_c(\mathcal{S})$  représente l'énergie cinétique macroscopique du système

$\mathcal{E}_p^{\text{int}}(\mathcal{S})$  est l'énergie d'interaction entre les particules.

$U_i$  l'énergie interne de chaque particule.

Le système étant isolé de l'extérieur, l'énergie totale se conserve. De plus, avant et après le choc, on considère que les particules n'interagissent pas entre elles. On peut donc écrire, si l'on note  $N_1$  le nombre de particules avant le choc et  $N_2$  celui après le choc :

$$\left[ \mathcal{E}_c(\mathcal{S}) + \sum_{i=1}^{N_1} U_i \right]^{\text{avant}} = \left[ \mathcal{E}_c(\mathcal{S}) + \sum_{i=1}^{N_2} U_i \right]^{\text{après}}$$

Dans la suite on se limite aux collisions mobilisant seulement deux points matériels.

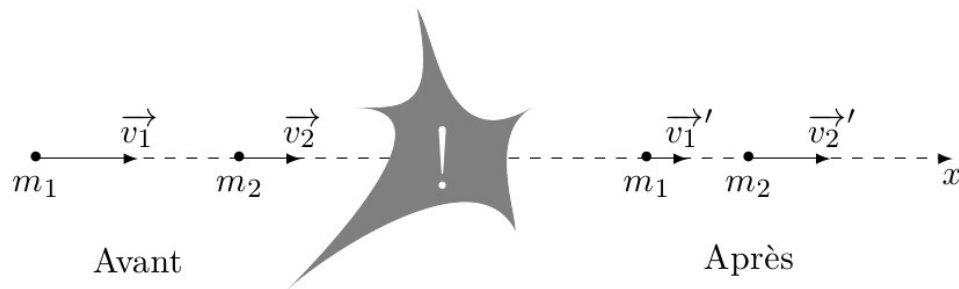
### Collision élastique :

On dit qu'il y a collision élastique lorsque le nombre de particules reste constant et que l'énergie interne de chaque particule reste inchangée avant et après le choc. En d'autres termes, les particules ne se déforment pas ni ne changent de nature. Les lois de conservation sont donc

$$m_i = m'_i \quad \text{et} \quad \vec{p}_{\mathcal{S}}^{\text{avant}} = \vec{p}_{\mathcal{S}}^{\text{après}} \quad \text{et} \quad \mathcal{E}_c(\mathcal{S})^{\text{avant}} = \mathcal{E}_c(\mathcal{S})^{\text{après}}$$

## Collision à 1 dimension :

Traisons l'exemple d'une collision frontale élastique entre deux corps assimilables à deux points matériels. Notons  $v_1$  et  $v_2$  les vitesses avant le choc, et  $v_1'$ ,  $v_2'$  les vitesses après le choc.



Les deux relations de conservation ( de quantité de mouvement et de l'énergie cinétique) nous donne:

$$\begin{cases} m_1 v_1 + m_2 v_2 & = & m_1 v_1' + m_2 v_2' \\ m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 & = & m_1 (v_1')^2 + m_2 (v_2')^2 \end{cases}$$

cela donne:

$$\begin{cases} m_1 (v_1' - v_1) & = & m_2 (v_2 - v_2') \\ m_1 ((v_1')^2 - v_1^2) & = & m_2 (v_2^2 - (v_2')^2) \end{cases}$$

En divisant la deuxième relation par la première on obtient

$$v_1' + v_1 = v_2' + v_2$$

et par substitution, on trouve les vitesses finales en fonction des vitesses initiales

$$\begin{aligned} v_1' &= \frac{2m_2 v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2} \\ v_2' &= \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2} \end{aligned}$$

## Cas particuliers :

a) Masse identiques ( $m_1=m_2$ ) :

$$v_1' = 0 \quad \text{et} \quad v_2' = v_1$$

La première particule est stoppée et la seconde se met en mouvement  
exemple : La pendule de Newton



D. Cordier, 2005

### b) La cible étant immobile:

dans ce cas

$$v_2 = 0$$

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} v_1$$

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

### c) Si le projectile est beaucoup plus léger que la cible

$$(m_1 \ll m_2)$$

on a :

$$v_1' \simeq -v_1 \quad \text{et} \quad v_2' \simeq 0$$

Il y a rebond avec inversion du sens de la vitesse. Ayant une grande inertie, la cible ne bouge pas. C'est ce que l'on obtient lorsqu'on laisse tomber une boule indéformable par terre sur un sol parfaitement rigide.

d) Si

$$m_1 \gg m_2$$

on obtient:

$$v_1' \simeq v_1 \quad \text{et} \quad v_2' \simeq 2v_1$$

c'est ce qui se passe quand on tape dans une balle avec une raquette par exemple.

### Collision inélastique:

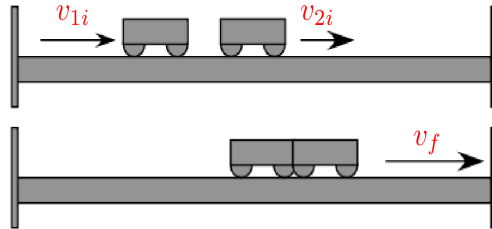
On dit une collision inélastique lorsqu'il y a la conservation de la quantité de mouvement, et pas de conservation de l'énergie cinétique. Dans ce cas une partie de l'énergie cinétique initiale du système s'est transformée en d'autres formes d'énergie. La collision s'accompagne alors d'une variation d'énergie interne et/ou d'une modification du nombre de particules. Les exemples sont nombreux :

- Lorsqu'on laisse tomber une boule en pâte à modeler, celle-ci ne rebondit pas : toute l'énergie cinétique acquise par la boule avant l'impact est convertie en énergie interne d'où une déformation et un échauffement du projectile.
- Les réactions chimiques sont en fait le résultat d'une ou plusieurs collisions inélastiques. Par

exemple, le processus élémentaire  $A+B \rightarrow C+D$  est un choc inélastique puisque les particules après la collision sont différentes des particules avant.

- Les réactions nucléaires (désintégration, fusion et fission) sont également des processus inélastiques. En général, ces réactions dégagent une énergie considérable.

### Collisions parfaitement inélastique :

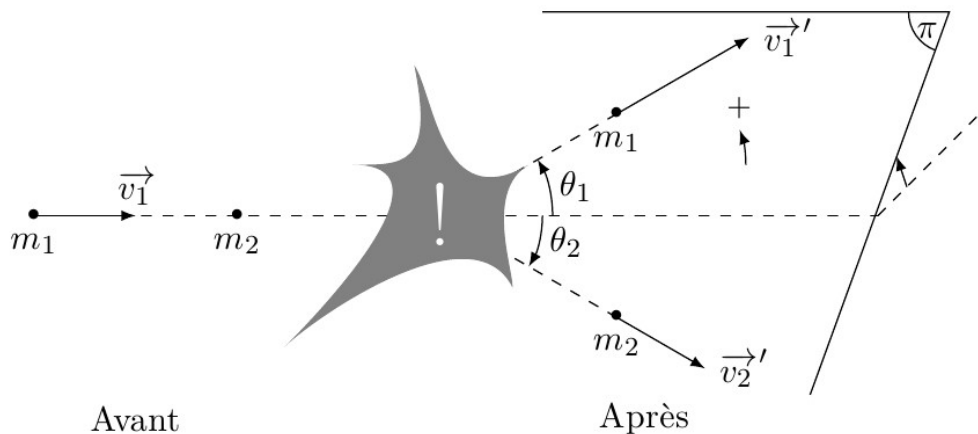


$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = (m_1 + m_2) v_f$$

$$v_f = \frac{m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i}}{m_1 + m_2}$$

### Collision à 2 dimensions :

Considérons la collision élastique entre un point matériel de masse  $m_1$  animé d'une vitesse  $v_1$  et un point matériel de masse  $m_2$  initialement au repos.



Les lois de conservation donnent

$$\begin{cases} m_1 \vec{v}_1 = m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2' \\ m_1 v_1^2 = m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2 \end{cases}$$

Ce système présente trois équations scalaires pour quatre inconnues suivant  $ox$ ,  $oy$ . Pour cela, la seule possibilité est de faire des approximations.

Cas particulier :  $m_1 = m_2$

Le système d'équations précédant donne :

$$\begin{cases} \vec{v}_1 &= \vec{v}_1' + \vec{v}_2' \\ v_1^2 &= v_1'^2 + v_2'^2 \end{cases}$$

Si on élève la première équation au carré, on trouve

$$v_1^2 = v_1'^2 + v_2'^2 + 2\vec{v}_1' \cdot \vec{v}_2'$$

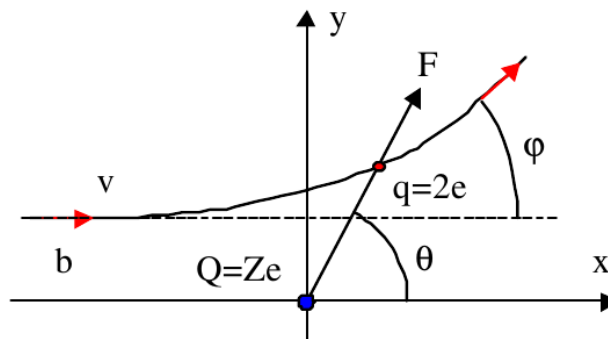
En la soustrayant à la deuxième, on obtient :  $\vec{v}_1' \cdot \vec{v}_2' = 0$

Les deux vecteurs vitesses forment un angle droit. Autrement dit, on a  $\theta_1 - \theta_2 = \pi/2$

### Diffusion Coulombienne ou la diffusion de Rutherford :

Une particule de masse  $m$  et de charge  $q$  arrive avec une vitesse  $v$  parallèle à  $Ox$  sur une charge  $Ze$  très lourde placée en  $O$ . La force d'interaction électrostatique est :

$$\vec{F} = \frac{qZ|e|}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^3}$$



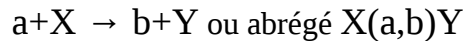
La diffusion de cette particule chargée subit quand elle est soumise à une force électrostatique répulsive, est un problème particulièrement intéressant en raison de son application à la physique atomique et nucléaire. Par exemple, quand un proton, accéléré par une machine telle qu'un cyclotron, passe près d'un noyau de la matière de la cible, il est dévié sous l'action d'une force de ce type, provenant de la répulsion électrostatique du noyau (c'est la raison pour laquelle nous parlons aussi de diffusion coulombienne)

En envoyant des noyaux d'hélium ( $m = 4 \text{ uma}$ ,  $q = +2|e|$ ) sur une cible en or ( $M = 197 \text{ uma}$ ,  $Z = 79$ ) Rutherford a constaté une répartition des directions de diffusion des noyaux d'hélium conforme à celle produite par une charge  $+Z|e|$  pratiquement ponctuelle et montré que le rayon du noyau était de l'ordre de  $10^{-14} \text{ m}$ .

## Chapitre 5: Réactions Nucléaires

### Définition:

Une **réaction nucléaire** est une transformation d'un (ou plusieurs) noyaux atomiques provoquées par l'interaction d'une particule projectile (autre noyau, particule alpha, électron, nucléon, rayonnement gamma). Elle s'écrit:



où a= particule projectile

X=noyau cible=état initial ou voie d'entrée

b=particule sortante

Y=noyau résiduel=état final ou voie de sortie

### Notions sur les mécanismes de réactions nucléaires:

- diffusion élastique :  $a+X \rightarrow a+X$
- diffusion inélastique :  $a+X \rightarrow a^*+X^*$
- réaction de transmutation :  $a+X \rightarrow b+Y$  ( $a \neq b$ )
- réaction à plusieurs corps :  $a+X \rightarrow Y+b_1+b_2+\dots$
- fusion nucléaire :  $a+X \rightarrow Y^*$
- fission induite :  $a+X \rightarrow Y_1+Y_2$
- photoémission :  $a+X \rightarrow Y+\text{gamma}$
- photonucléaire :  $\text{gamma}+X \rightarrow Y+b$

Le plus souvent, les particules produites sont différentes des projectiles. Si c'est le cas, il s'agit automatiquement d'une diffusion inélastique. Si les particules finales et initiales sont identiques, il y a diffusion élastique ou inélastique. La désintégration peut être considérée comme un cas particulier d'une réaction, avec une seule particule dans l'état initial.

La transmutation peut être soit spontanée, c'est-à-dire sans intervention extérieure au noyau, soit provoquée par la collision d'autres noyaux ou de particules libres. La réaction nucléaire de certains atomes s'accompagne d'un dégagement de chaleur. Il y a fission lorsque, sous l'impact d'un neutron isolé, un noyau lourd se divise en deux parties sensiblement égales en libérant des neutrons dans l'espace. Il y a fusion lorsque deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd.

### Lois de conservation

Les particules qui participent à une réaction nucléaire forment un système isolé. Les grandeurs suivantes, relatives à ce système, sont conservées lors de la réaction :

- Le nombre de nucléons A.
- La charge électrique et donc aussi le nombre de charge Z.
- La somme de l'énergie cinétique  $E_c$  et de l'énergie au repos  $E_0=mc^2$ .
- La quantité de mouvement p.

### Réaction exothermique :

D'après le principe de la conservation de l'énergie, l'énergie totale des produits d'une réaction nucléaire est égale à l'énergie totale des réactifs. Il est à rappeler que l'énergie totale est la somme de l'énergie au repos  $E_0=mc^2$  et de l'énergie cinétique  $E_c$ .

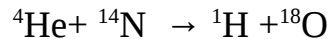
Une réaction nucléaire est exothermique lorsque l'énergie cinétique des produits est supérieure à celle des réactifs. Il en suit que l'énergie au repos doit diminuer lors d'une telle réaction. L'énergie

libérée E au cours de la réaction s'obtient par :  
 $E = E_0(\text{réactifs}) - E_0(\text{produits})$   
 Elle est égale à l'augmentation de l'énergie cinétique.

## Le noyau composé

Nous considérons ici le cas de projectiles légers, non relativistes, et de système à deux corps (deux particules produites). Les équations obtenues resteront valables lorsque plus de deux particules sont produites (cas de la fission).

Rutherford a découvert (vers 1920) la première réaction à deux corps (transmutation) : il bombardait une mince couche d'azote par des particules  $\alpha$  :



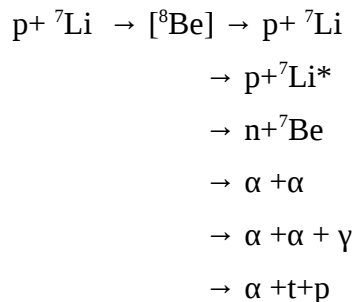
Il en déduira que les noyaux d'Hydrogène sont des composants élémentaires du noyau et leur donnera le nom de protons.

Si la particule incidente a une énergie cinématique qui n'est pas trop élevée (<30 MeV), on peut généralement considérer que le premier stade d'une réaction nucléaire est la formation, avec le noyau initial, d'un nouveau noyau appelé noyau composé. Ce noyau composé se trouve dans un état d'excitation, ce qui entraîne la 2<sup>ème</sup> étape de la réaction nucléaire: l'émission d'une ou plusieurs particules «légères» (n, p,  $\gamma$ ,  $\alpha$ , ...). Notons par [C] le noyau composé, la réaction nucléaire s'écrit:



Le noyau composé dans un état excité donné peut se transformer suivant différentes possibilités, chacune d'elles ayant une certaine probabilité de se réaliser (rapport de branchement).

Exemple:



La durée de vie d'un noyau composé est « longue » ( $10^{-15}$  s), ce qu'on appelle un état métastable. Cette durée est grandement supérieure à celle que mettrait le neutron pour traverser le noyau cible ( $10^{-20}$  s)

N.B : Dans le cadre de ce cours, nous n'étudierons que les réactions nucléaires à basse énergie (<30 MeV). Lorsque l'énergie de la particule incidente dépasse ce domaine, il y aura souvent l'éjection de plusieurs nucléons ou groupe de nucléons. Lorsque l'énergie disponible est supérieure à 150 MeV, les réactions nucléaires font apparaître de nouvelles particules: les mésons ....



## Bilan d'énergie de réaction ou «Q de réaction»:

Soit une réaction de type  $a+X \rightarrow b+Y$

Soit  $T_i=T_a+T_x$  l'énergie cinétique totale avant la réaction, et  $T_f=T_b+T_y$  l'énergie cinétique totale après la réaction. Le bilan d'énergie de l'interaction se note Q et vaut :

$$Q=T_f - T_i$$

si  $T_f=T_i$  (conservation de l'énergie cinétique totale) ,  $Q=0$ . Il s'agit dans ce cas d'une diffusion élastique, le projectile subit une déviation de sa trajectoire.

Si  $T_f \neq T_i$  le processus est inélastique,  $Q \neq 0$

Le bilan devient :  $Q=(m_a+m_x-m_b-m_y)c^2$

On peut passer des masses nucléaires aux masses atomiques, car on peut négliger la différence des énergies de liaison des électrons dans les atomes , donc :

$$Q=(M_a+M_x-M_b-M_y)c^2$$

- si  $Q>0$  : la réaction est exoénergétique : elle libère de l'énergie.
- Si  $Q<0$  : la réaction est endoénergétique : elle nécessite de l'énergie.

## Energie seuil d'une réaction à Q négatif :

dans le cas d'une réaction endoénergétique, il faut que la particule « a » ait une énergie cinétique minimum pour que la réaction soit possible. Pour déterminer cette valeur de seuil, il suffit de remarquer que la fraction de l'énergie cinétique incidente de « a » convertie en énergie d'excitation du noyau composé doit au moins égale à  $|Q|$ .

L'énergie cinétique seuil  $T_{a0}$  est donnée par :

$$|Q|=T_{a0} \frac{m_x}{m_x+m_a} \quad \text{donc} \quad T_{a0} = |Q| \frac{m_x+m_a}{m_x}$$

et la condition pour qu'il y ait réaction s'écrit :  $T_a \geq T_{a0}$

## La section efficace d'une réaction nucléaire

Toutes les réactions nucléaires ne sont pas également probables. D'autres part, toutes les voies de sortie ne sont pas également probables, pour un état initial donné  $a+X$  :

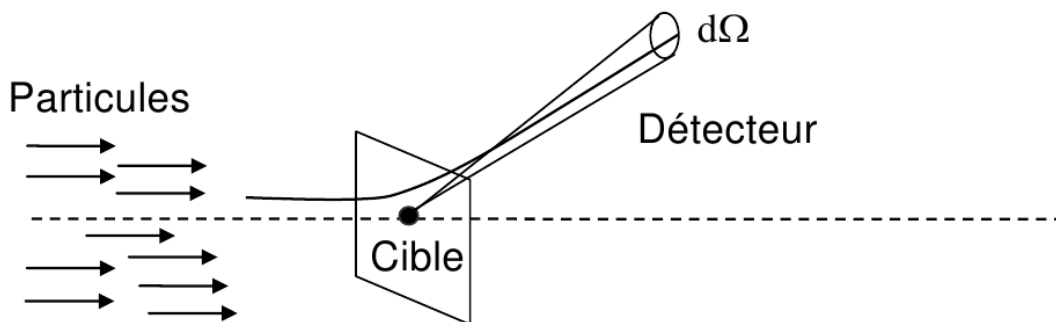
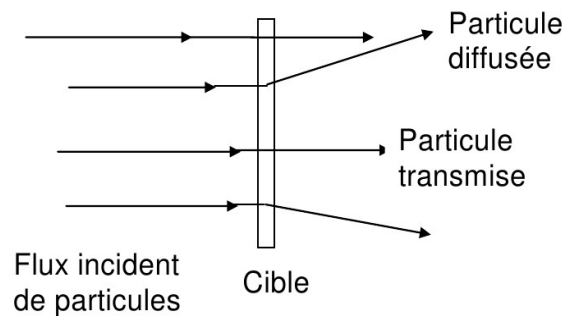
Exemple :

$a+X \rightarrow a+X$	30 %
$\rightarrow a^*+X^*$	15 %
$\rightarrow b+Y$	20 %
$\rightarrow Y+b_1+b_2+\dots$	5 %
$\rightarrow Y^*$	10 %
$\rightarrow Y_1+Y_2$	5 %
$\rightarrow Y+\text{gamma}$	15 %

La section efficace d'une réaction, symbolisée par  $\sigma$ , reflète la probabilité de l'observer. Chaque voie est caractérisée par une section efficace dite « $\sigma$  partielle»

Pour explorer les propriétés du noyau on fait généralement des expériences de diffusion (collision) de particules d'un faisceau qu'on envoie sur une cible et on observe la diffusion « derrière » la cible. Ce qui intéresse en général le physicien c'est la probabilité qu'une « réaction se produise ».

En fait la mesure consiste à faire un grand nombre de mesures entre un grand nombre de particules incidentes et un grand nombre de noyaux cible et de mesurer les particules diffusées par un détecteur. On s'intéresse à la moyenne des valeurs mesurées. La probabilité qui nous intéresse c'est le rapport entre le taux d'interaction et le flux incident. Nous allons voir que cette probabilité qu'on appelle section efficace est indépendante des variables caractérisant le faisceau et la cible, c'est-à-dire l'intensité du faisceau et la géométrie et densité de la cible.



Le nombre de particules que l'on détecte est bien sûr proportionnel au nombre de particules incidentes et au nombre de noyaux cible. La relation de proportionnalité s'exprime par l'intermédiaire d'un coefficient de proportionnalité  $\sigma$ .

La relation entre le taux d'interaction ( $T$ ) (nombre de particules « diffusées » par unité du temps) et la section efficace ( $\sigma$ ) est alors

$$T = \sigma \Phi N_{cible} = \sigma \Phi s_{cible} S$$

Avec :

$\Phi$  - le flux, c'est-à-dire le nombre de particules incidentes par unité de surface et par unité du temps,

$N_{cible}$  - le nombre de particules cible dans le volume de la cible correspondant à la surface ( $S$ ) couverte par le faisceau,

$s_{cible}$  - le nombre de particules cible par unité de surface (densité surfacique de particules).

## Probabilité d'interaction:

Dans la discussion de l'interaction des particules avec la matière, on s'intéresse souvent à la probabilité ( $p$ ) qu'une particule interagisse avec un milieu d'épaisseur donnée, qui est donnée par le rapport entre le taux d'interaction  $T$  et le taux de particules incidentes  $\Phi S$ :

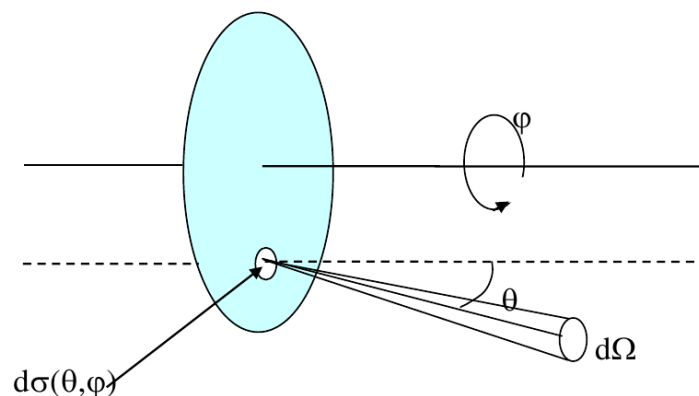
$$p = \frac{T}{\Phi S} = \sigma s_{cible} = \sigma \cdot N_A(\rho \cdot d)/A$$

On voit que la probabilité d'interaction dépend directement de la quantité  $(\rho d)$ , appelée la densité de masse surfacique, qui a comme unité de mesure le  $g/cm^2$ . De plus on voit apparaître l'unité de mesure de  $\sigma$  :  $p$  étant sans dimension,  $\sigma$  a les dimensions d'une surface. On peut imaginer  $\sigma$  comme une surface géométrique : une particule qui frapperait la cible dans cette aire serait diffusée, tandis qu'à l'extérieur de cette aire elle traverserait la cible sans diffusion. Cependant il faut faire très attention : cette aire représente la probabilité d'un processus : elle n'a rien à voir avec la taille physique des centres diffuseurs de la cible.

**Unité usuelle pour la section efficace :** 1 barn =  $10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$

## Section efficace différentielle:

La distribution angulaire des particules diffusées peut apporter des informations sur l'interaction qui a eu lieu entre le faisceau et le noyau cible (par exemple sur la forme du potentiel d'interaction). De plus, en général, les détecteurs ont une certaine granularité et sont donc capables de mesurer le nombre de particules diffusées dans une direction définie par  $(\theta, \varphi)$  dans un angle solide élémentaire  $d\Omega$  (coordonnées sphériques).



on définit la section efficace différentielle  $\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)$

Le nombre  $dn$  de particules diffusées dans la direction  $(\theta, \varphi)$  dans l'angle solide élémentaire  $d\Omega$  est :

$$dn = N_i (\sigma \cdot n_{cible} \cdot x) = N_i \left[ \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right) d\Omega \cdot n_{cible} \cdot x \right]$$

En intégrant dans tout l'espace on retrouve bien sûr

$$\sigma_T = \int \frac{d\sigma(\theta, \varphi)}{d\Omega} d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{d\sigma(\theta, \varphi)}{d\Omega} \sin \theta d\theta d\varphi$$

où  $\sigma_T$  est la section efficace totale.

## La fission nucléaire :

La rencontre d'un neutron " lent " et d'un noyau lourd donne naissance à un noyau extrêmement lourd et instable qui se scinde en deux et qui libère de nouveaux neutrons lents qui pourront à leur tour donner lieu à de nouvelles fissions :

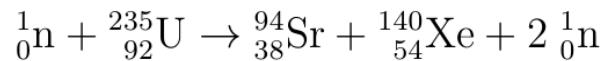
## Principe et intérêt de la fission :

La fission nucléaire est la rupture d'un noyau lourd fissile qui, sous l'impact d'un neutron, se divise en deux noyaux plus légers.

La plus connue des réactions de ce type est la fission de l'uranium 235 par absorption d'un neutron. Le noyau d'uranium se brise en deux noyaux plus légers accompagnés de deux ou trois neutrons, tout en libérant une énergie importante.

## Bilan d'une réaction de fission :

Une réaction possible de la fission du noyau d'uranium 235 est :



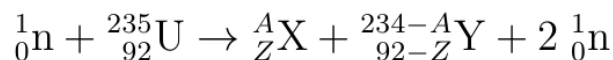
Comme pour toute autre transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de masse et du nombre de charge.

L'énergie libérée par cette réaction est :

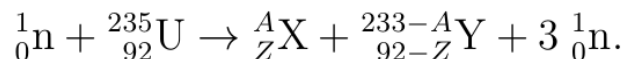
$$\begin{aligned} E &= E_0(\text{réactifs}) - E_0(\text{produits}) \\ &= (m_n c^2 + m_U c^2) - (m_{\text{Sr}} c^2 + m_{\text{Xe}} c^2 + 2 m_n c^2). \end{aligned}$$

Remarque : un gramme d'uranium libère la même énergie que la combustion de 1,8 tonnes de pétrole.

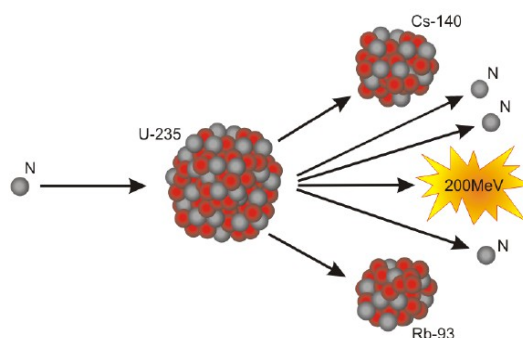
La fission d'un noyau d'uranium peut donner différents noyaux plus légers. L'équation générale d'une fission est :



ou bien :

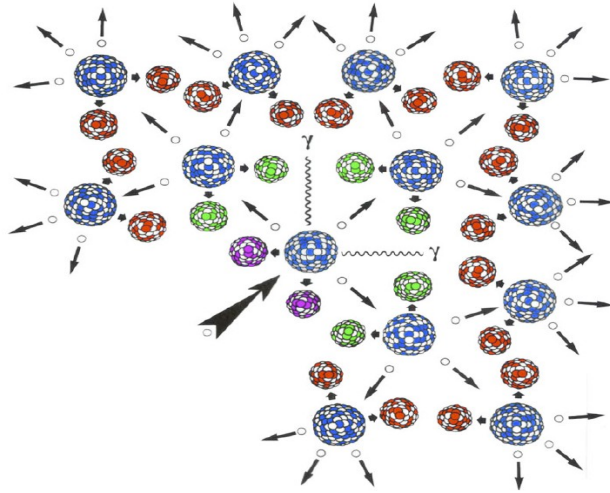


Remarque : les noyaux X et Y sont souvent radioactifs  $\beta$  - et émis dans un état excité et donnent alors lieu à l'émission de rayons  $\gamma$ .



### La réaction en chaîne :

À la suite de la capture d'un neutron, un noyau fissile d'uranium 235 ou de plutonium 239 a subi une fission. Plusieurs neutrons accompagnent les produits de fission. Dans l'exemple de la figure, les trois neutrons secondaires provoquent trois nouvelles fissions, qui génèrent chacune trois neutrons de seconde génération, qui déclenchent à leur tour neuf fissions tertiaires. La réaction en chaîne prend un tour explosif, ce qui arrive dans une bombe atomique où la proportion de noyaux fissiles est très élevée.



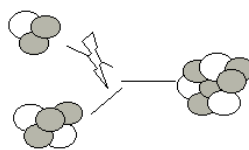
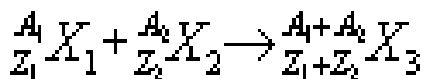
Dans le cœur d'un réacteur où les noyaux fissiles ne dépassent pas 4 % et où beaucoup de neutrons se perdent en route, le nombre de neutrons entretenant la fission est exactement un et la réaction en chaîne s'entretient sans se développer.

### Fusion thermonucléaire

#### Principe de la fusion:

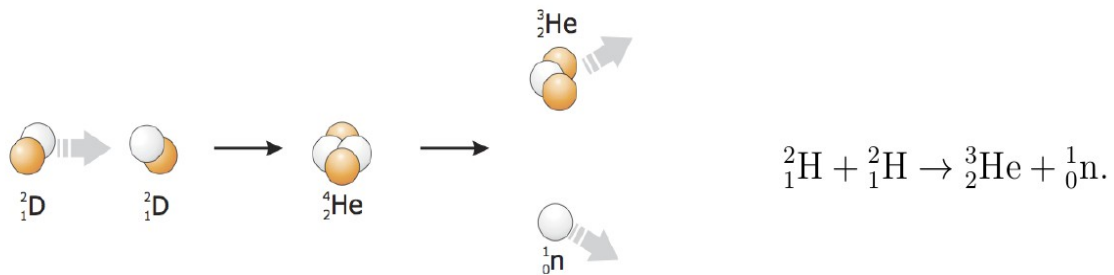
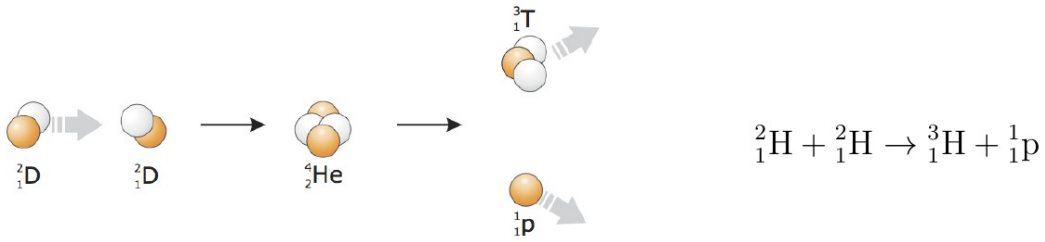
Une fusion nucléaire est une réaction au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent, c'est-à-dire fusionnent, pour en former un plus lourd, tout en libérant une énergie importante. Les principales réactions de fusion se font à partir de l'hydrogène  $^1\text{H}$  et de ses deux isotopes, le deutérium  $^2\text{H}$  et le tritium  $^3\text{H}$ .

A très haute température, deux noyaux légers peuvent fusionner pour en donner un seul et en émettant un rayon  $\gamma$ ,



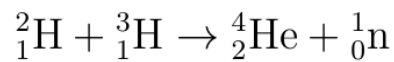
## Bilan d'une réaction de fusion

Les figures montrent deux exemples de réactions de fusion.



Comme pour toute autre transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de masse et du nombre de charge.

Pour la réaction de fusion :



l'énergie libérée est :

$$\begin{aligned} E &= E_0(\text{réactifs}) - E_0(\text{produits}) \\ &= (m_{2\text{H}} c^2 + m_{3\text{H}} c^2) - (m_{4\text{He}} c^2 + m_{\text{n}} c^2). \end{aligned}$$

Remarque : la fusion d'un gramme de tritium libère la même énergie que la combustion de 13,5 tonnes de pétrole.