

# Actions mécaniques de la lumière

## Principes et applications

Jacques Derouard

Laboratoire de Spectrométrie Physique

# Photon

- Energie

$$E = h\nu$$

- Impulsion

$$\vec{p} = \hbar\vec{k} = \frac{h\nu}{c}\vec{u}_k$$

- Moment cinétique Spin

$$S = 1$$

- Moment cinétique orbital

$$L$$

# Photon

- (Energie)

$$E = h\nu$$

→ (Effets thermiques et photochimiques)

- Impulsion

$$\vec{p} = \hbar\vec{k} = \frac{h\nu}{c}\vec{u}_k$$

→ Forces

- Moment cinétique Spin

$$S = 1$$

→ Couples

- Moment cinétique orbital

$$L$$

# Objectifs et sujets abordés

- Principes physiques à la base de l'action de la lumière sur les microparticules
  - Propulsion
  - Piégeage
  - Déformation
  - Ordres de grandeurs
- Description théorique des forces radiatives
  - Grosses particules: optique géométrique
  - Petites particules: Régime Rayleigh
  - Tenseur de Maxwell

# Objectifs et sujets abordés

- Considérations expérimentales
  - Différentes configurations, développements récents
  - Conditions de piégeage
  - Techniques d'observation et de mesures
- Exemples d'application
  - Spectroscopies sur objet unique
  - Tri et manipulation de particules
  - Mesure de déformabilité d'objets
  - Mesure de nano-forces
  - ...

# Objectifs et sujets abordés

- Moment cinétique de rayonnement
  - spin et moment orbital du rayonnement
  - modes de Laguerre-Gauss
  - couples radiatifs et rotation de microparticules
- Applications à la manipulation des atomes pas abordés
- Aspects optique quantique (cf effet Casimir) pas abordés

# Historique

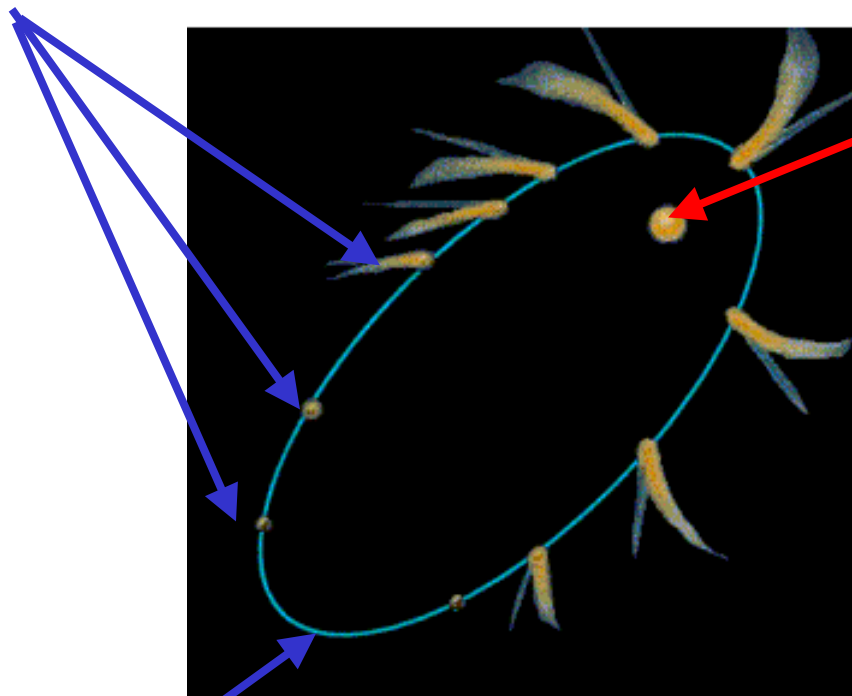
- Képler et les comètes  
1619



Comète de Hale-Bopp

# Exemple des comètes

Positions successives de la comète



soleil

Queue direction opposée  
au soleil, comme poussée  
par rayonnement

Trajectoire de la comète

Cf Képler, 1619

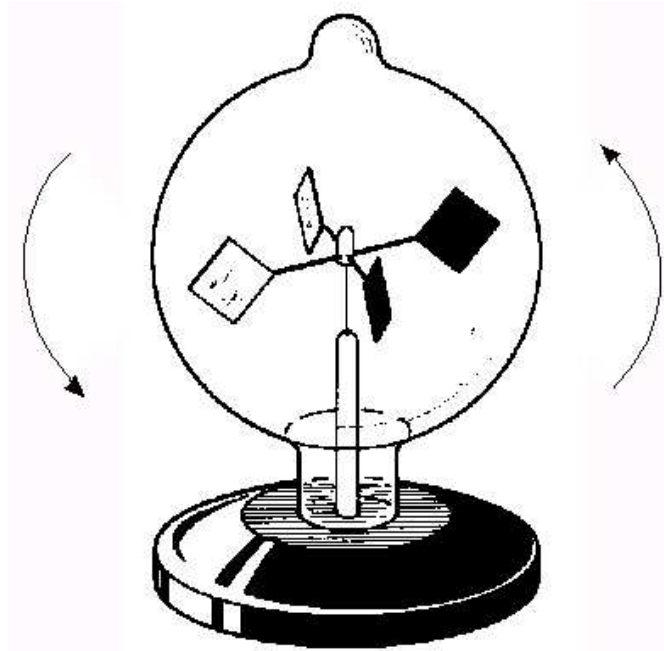


# Historique

- Képler et les comètes 1619
- Maxwell 1873 ondes électromagnétiques  
Flux d'énergie associé à flux de quantité de mouvement:  
Onde progressive exerce *Pression=Densité d'énergie*
- Bartoli, puis Boltzmann 1876, 1884: Corps noir,  
pression *thermodynamique* associée à rayonnement  
conséquence de 2ème principe, valeur cohérente avec  
Maxwell!

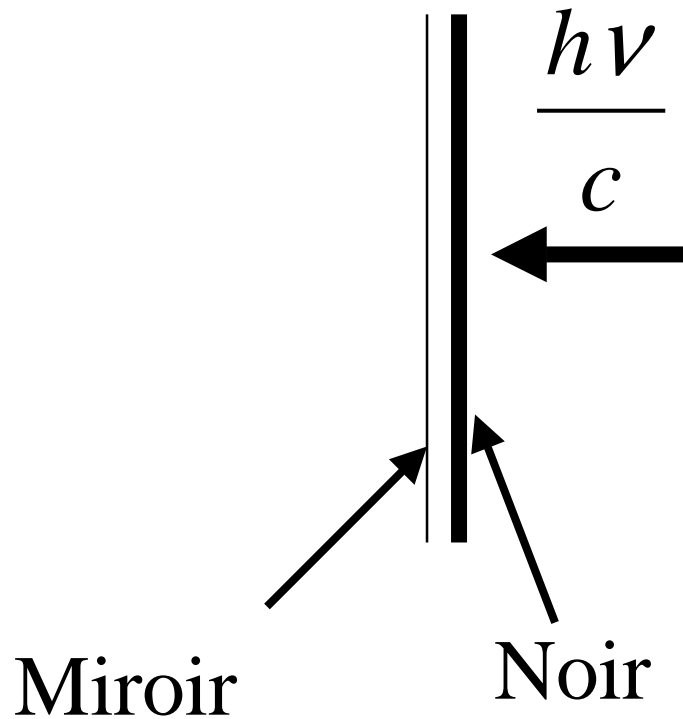
# Historique

- (Crookes et son radiomètre 1873)
  - pris comme évidence de la pression de radiation. En fait effet « radiométrique » (thermique)



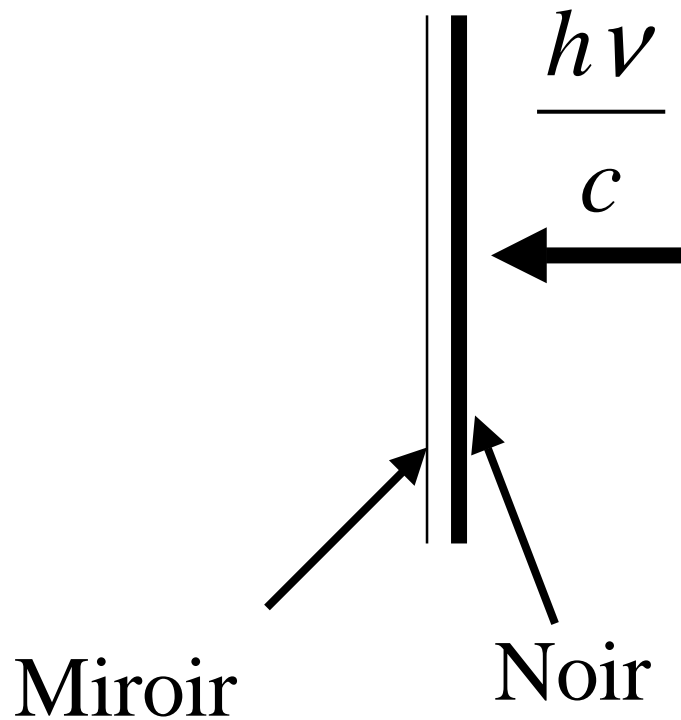
Radiomètre de Crookes

# Radiomètre de Crookes (1873)



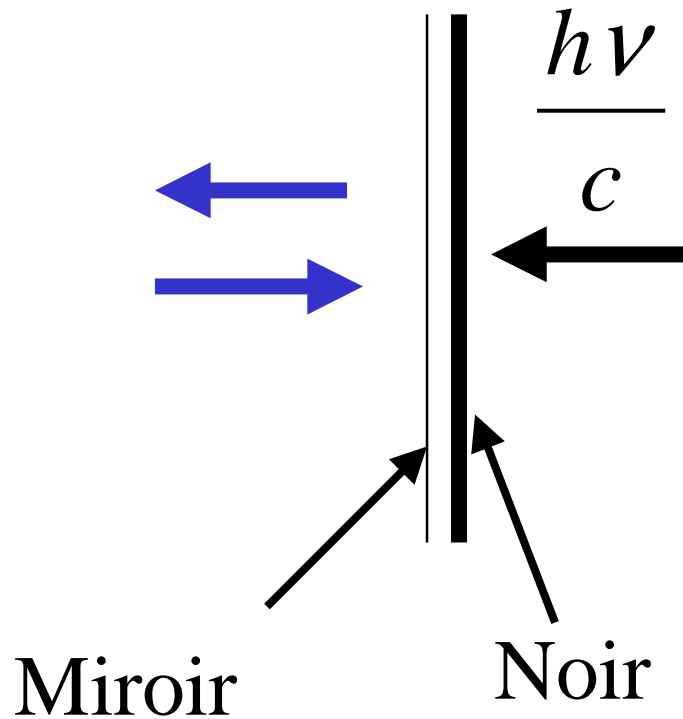
Face noircie absorbe le rayonnement, donc « encaisse le coup »

# Radiomètre de Crookes (1873)



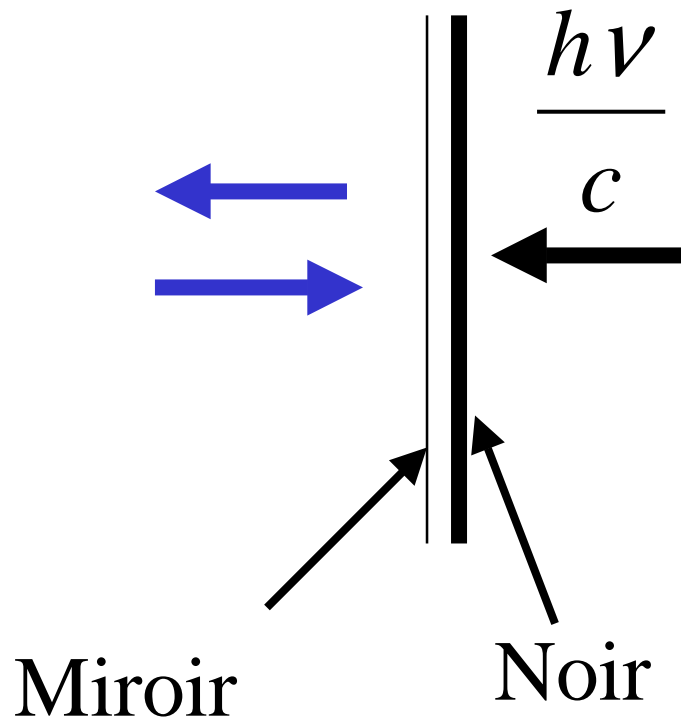
Face noircie absorbe le rayonnement, donc « encaisse le coup » ... **recule sous l'effet du rayonnement**

# Radiomètre de Crookes (1873)



Et la face réfléchissante?

# Radiomètre de Crookes (1873)



Et la face réfléchissante?

**Recul 2 fois plus grand!**

Radiomètre de Crookes ne met en évidence que chauffage, et mise en mouvement, du gaz résiduel côté noirci qui chauffe...

# Effets « radiométriques »

- forces origine thermodynamique induites par chauffage du milieu ambiant au contact d'un objet irradié
- Pour radiomètre Crookes modèle simple conduit à:

$$F_{\text{radiométrique}} \sim F_{\text{radiation}} \frac{c}{V_{th}}$$

Soit  $\sim F_{\text{radiation}} \times 3.10^8/300\text{m/s} = F_{\text{radiation}} \times 10^6$

# Historique

- Lebedev (1901), Nichols et Hull (1903)

- première mise en évidence et mesure directe de la pression de radiation. OK avec Maxwell-Bartoli  $P=U$ , soit:

$$P_{vide} = \frac{h}{\lambda_0}$$

Façon moderne d'écrire les choses car photon pas connu à cette époque

- Schwarzschild (1909), Eddington (1916)

- importance de la pression de radiation dans l'équilibre (ou le déséquilibre) gravitationnel de certaines étoiles



# Historique

- 1908-1910 Controverse Minkowski Abraham sur l'impulsion du champ EM dans un milieu diélectrique:

$$p_{milieu} = n \frac{h}{\lambda_0} \quad \text{ou} \quad p_{milieu} = \frac{h}{n\lambda_0} \quad ?$$

# Historique

- 1908-1910 Controverse Minkowski Abraham sur l'impulsion du champ EM dans un milieu diélectrique:

$$P_{milieu} = n \frac{h}{\lambda_0} \quad \text{ou} \quad P_{milieu} = \frac{h}{n\lambda_0} \quad ?$$

Mécanique quantique ou mécanique classique (relativiste) ?

$$P_{milieu} = \frac{h}{\lambda_0 / n} \quad P_{milieu} = \left(\frac{h\nu}{c^2}\right)V = \left(\frac{h\nu}{c^2}\right)\frac{c}{n} = \frac{h}{\lambda_0 n}$$

# Historique

- Jones et Richard (1954): Force exercée par rayonnement sur miroir immergé proportionnel à  $n$ 
  - NB controverse non close!

# Historique

- Ashkin 1970
  - Guidage, propulsion, confinement de particules au moyen de **faisceaux laser**.  
Envisage applications à atomes

# Historique

- Philips et al 1983
  - Décélération et arrêt d'un jet atomique
- Ashkin, Chu et al 1986
  - Piégeage de particules matérielles et d'atomes refroidis au point focal d'un seul faisceau laser
- Chu et al 1987
  - Piège magnéto-optique pour atomes
- Cornell, Wieman et al 1995
  - Condensation de Bose-Einstein d'atomes piégés et refroidis
- Grier et al 1998
  - optiques diffractives reconfigurables

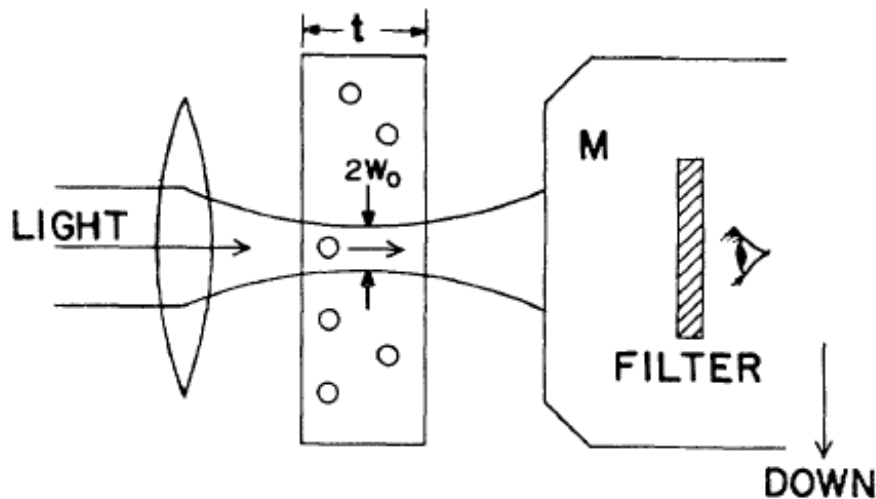
# Historique

- Poynting 1909: Moment cinétique du rayonnement
- Beth 1936: Couple exercé par lumière polarisée cohérent avec Spin 1 du photon
- Allen 1992: Moment cinétique orbital d'un faisceau

# Expérience d'Ashkin (1970)

A. Ashkin, 'Acceleration and trapping of particles by radiation pressure', Physical Review Letters, Vol. 24, No. 4, 156, 1970

billes polystyrène en suspension dans l'eau



Billes  $r=1,32\mu\text{m}$

$P_{\text{laser}}=19\text{mW}$

$\lambda=515\text{nm}$

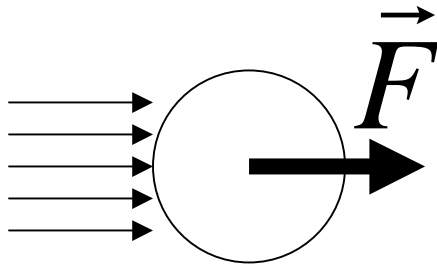
$w_0=6,2\mu\text{m}$

Observe que

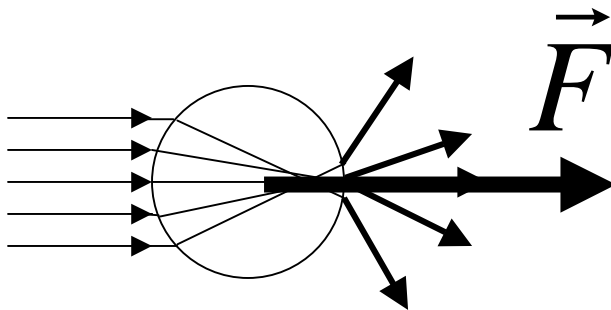
-les billes sont poussées par le laser  $\langle V \rangle = 26\mu\text{m/s}$

# Pression de radiation

- Absorption, réflexion ou diffusion d'un faisceau lumineux par une particule



**Absorption** des photons fait reculer la particule



**Dévi**ation (réfraction ou réflexion) des photons répartis symétriquement par rapport au centre de la particule conduit à force résultante dirigée suivant direction de la lumière



# Pression de radiation ordres de grandeur

- Suivant Maxwell:

$$pression = U = \frac{I}{c_{milieu}}$$

- Force intégrée sur **objet absorbant grand devant faisceau**

$$F = \frac{I}{c_{milieu}} \times Surface = n \times \frac{Puissance}{c}$$

$$F(\text{nanoNewton}) = n \times 3,33 \times P(\text{Watt})$$

## Point de comparaison:

sphère diamètre  $10\mu\text{m}$ , densité  $1\text{g/cm}^3$

- $m=5,2 \cdot 10^{-13}\text{kg}$

-Poids  $5,2\text{ pN}$

-Si  $F=1\text{nN}$ , accélération= $2000\text{m/s}^2=200\text{g}$ ,  
inversement proportionnelle à masse

# Pression de radiation

## ordres de grandeur

- Force sur **objet petit devant faisceau** diamètre  $2w$

$$F_{rad} = n \frac{I}{c} \sigma_p = n \frac{P}{c \cdot \pi w^2} \sigma_p = n \frac{P}{c \cdot \pi w^2} \pi r^2 q$$

$$q = \frac{\sigma_p}{\pi r^2}$$

- $\sigma_p$  = « section efficace de transfert de quantité de mouvement »

# Pression de radiation

- Application numérique:

$$F_{rad} = n \frac{I}{c} \sigma_p = n \frac{P}{c \cdot \pi w^2} \sigma_p = n \frac{P}{c \cdot \pi w^2} \pi r^2 q$$

- 

– P=19mW, r=1,32μm w=6,2μm n=1,33

$$F_{rad} = q \times 0,0038 nN = q \times 3,8 pN$$

# Pression de radiation

- Comparaison avec expérience: vitesse limite des billes

– Loi de Stokes  $F_{visc} = 6\pi\eta rv$

–  $r=1,32\mu\text{m}$   $v=26\mu\text{m/s}$   $\eta=0,724.10^{-3}\text{SI}$

$$F_{visc} = 0,47 \text{ pN}$$

$$F_{rad} = q \times 3,8 \text{ pN} \quad \longrightarrow \quad q = \frac{\sigma_p}{\pi r^2} = 0,12$$

# Pression de radiation

- NB force radiative appliquée sur particules queue d'une comète

$$F_{rad} = n \frac{I}{c} \sigma_p = n \frac{I}{c} \pi r^2 q$$

- $\pi r^2 = (1 \mu\text{m})^2$
- $I = 1 \text{ kW/m}^2$  (éclairage solaire au niveau de l'orbite terrestre)
- $q = 1$  (particules absorbantes)
- $n = 1$  (vide)

$$F_{rad} = 3.10^{-18} \text{ N}$$

# Pression de radiation

- Comparaison avec force de gravitation

$$F_{grav} = G \cdot \frac{m \cdot M}{R^2}$$

- $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$  MKS (constante de gravitation)
- $m = (1 \mu\text{m})^3 \cdot (10^3 \text{ kg/m}^3)$  (particules taille  $1 \mu\text{m}$  densité  $1 \text{ g/cm}^3$ )
- $M = 2 \cdot 10^{30}$  kg (masse soleil)
- $R = 150 \cdot 10^9$  m (distance terre-soleil)

$$F_{grav} = 6 \cdot 10^{-18} \text{ N}$$

# Pression de radiation

- Comparaison avec force de gravitation

$$F_{grav} = G \cdot \frac{m \cdot M}{R^2}$$

- $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$  MKS (constante de gravitation)
- $m = (1 \mu\text{m})^3 \cdot (10^3 \text{ kg/m}^3)$  (particules taille  $1 \mu\text{m}$  densité  $1 \text{g/cm}^3$ )
- $M = 2 \cdot 10^{30}$  kg (masse soleil)
- $R = 150 \cdot 10^9$  m (distance terre-soleil)

$$F_{grav} = 6 \cdot 10^{-18} \text{ N}$$

$$F_{rad} = 3 \cdot 10^{-18} \text{ N}$$

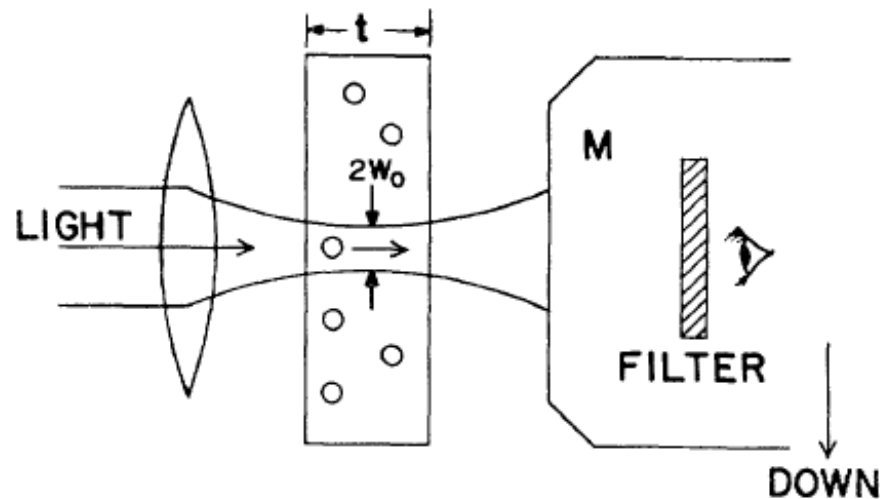
**NB  $F_{rad}/F_{grav}$  indépendant de R**



# Expérience d'Ashkin (1970)

A. Ashkin, 'Acceleration and trapping of particles by radiation pressure', Physical Review Letters, Vol. 24, No. 4, 156, 1970

billes polystyrène en suspension dans l'eau



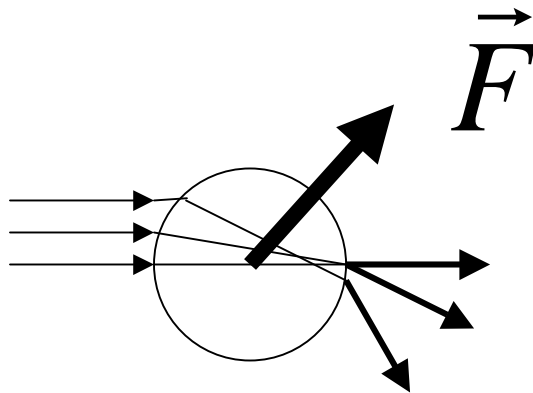
Observe que

-les billes sont poussées par le laser

-les billes sont attirées par le faisceau laser

# Force de gradient

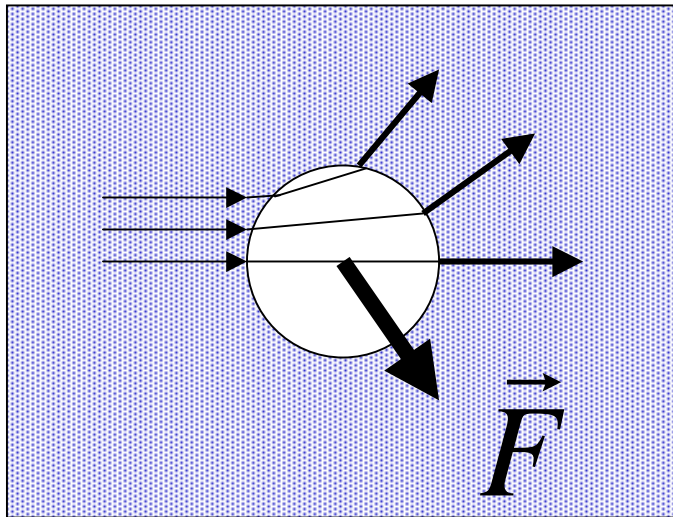
- Réflexion ou diffusion d'un faisceau lumineux **d'intensité non uniforme** par une particule



**Dévi**ation des photons **répartis non symétriquement** par rapport au centre de la particule conduit à force résultante dirigée obliquement par rapport à la direction de la lumière, tend (dans ce cas) à pousser particule vers intensité lumineuse maximum

# Force de gradient

- Réflexion ou diffusion d'un faisceau lumineux **d'intensité non uniforme** par une particule



**Dans le cas d'une particule d'indice plus faible que le milieu (bulle)**, déviation des photons tend à expulser particule des régions d'intensité lumineuse maximum

(effet du même type avec particules réfléchissantes)

Egalement observé par Ashkin en 1970

# En résumé, deux types de forces exercées par la lumière:

- **Pression de radiation:** flux de lumière repousse les particules éclairées
  - intervient section efficace d'absorption ou de transfert de quantité de mouvement  $\sigma_p$
- **Force de gradient:** attire (en général) les particules vers les régions de fort éclairement (change de signe avec contraste d'indice)

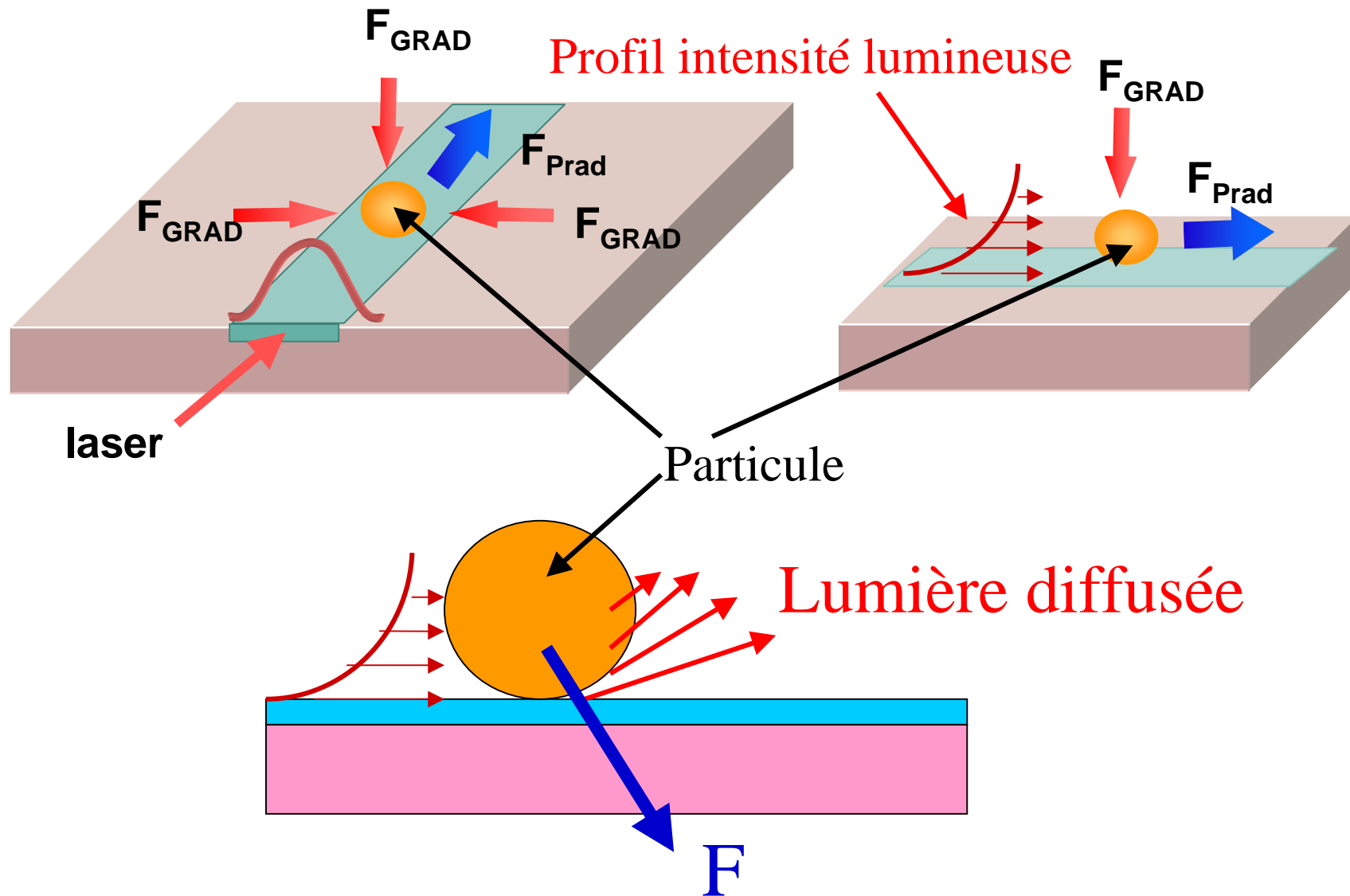
# Forces radiatives

- **Cas des atomes:**  $\sigma$  énorme au voisinage d'une résonance
- (NB résonances existent aussi pour particules diélectriques, également observées plus tard par Ashkin)

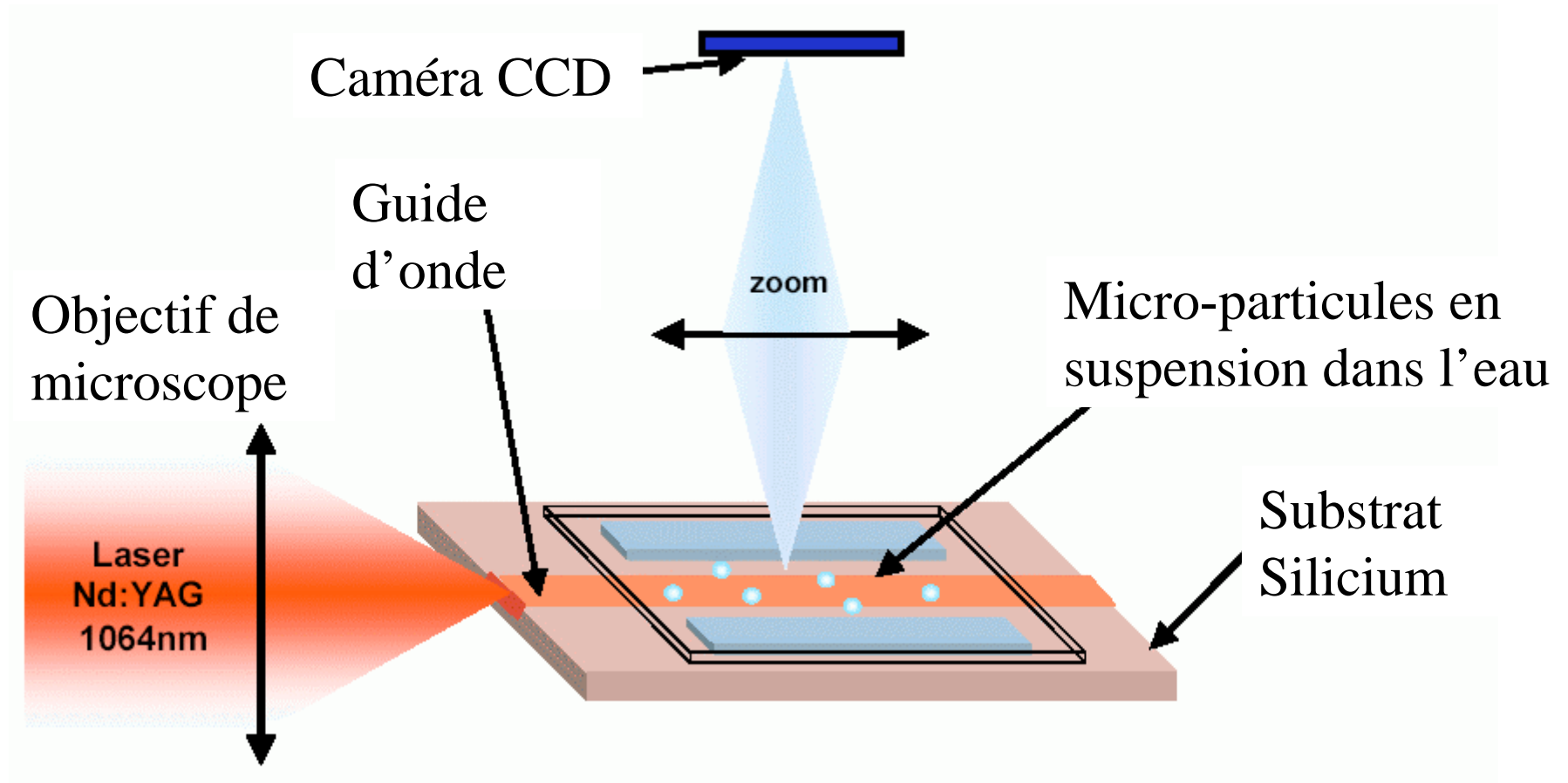
Version plus récente de la première  
expérience d'Ashkin: guidage de particules  
sur des « guides d'onde optique »

Gaugiran et coll, CEA-LETI Grenoble, 2005

# Guidage et propulsion de particules par la lumière confinée dans un guide d'onde optique

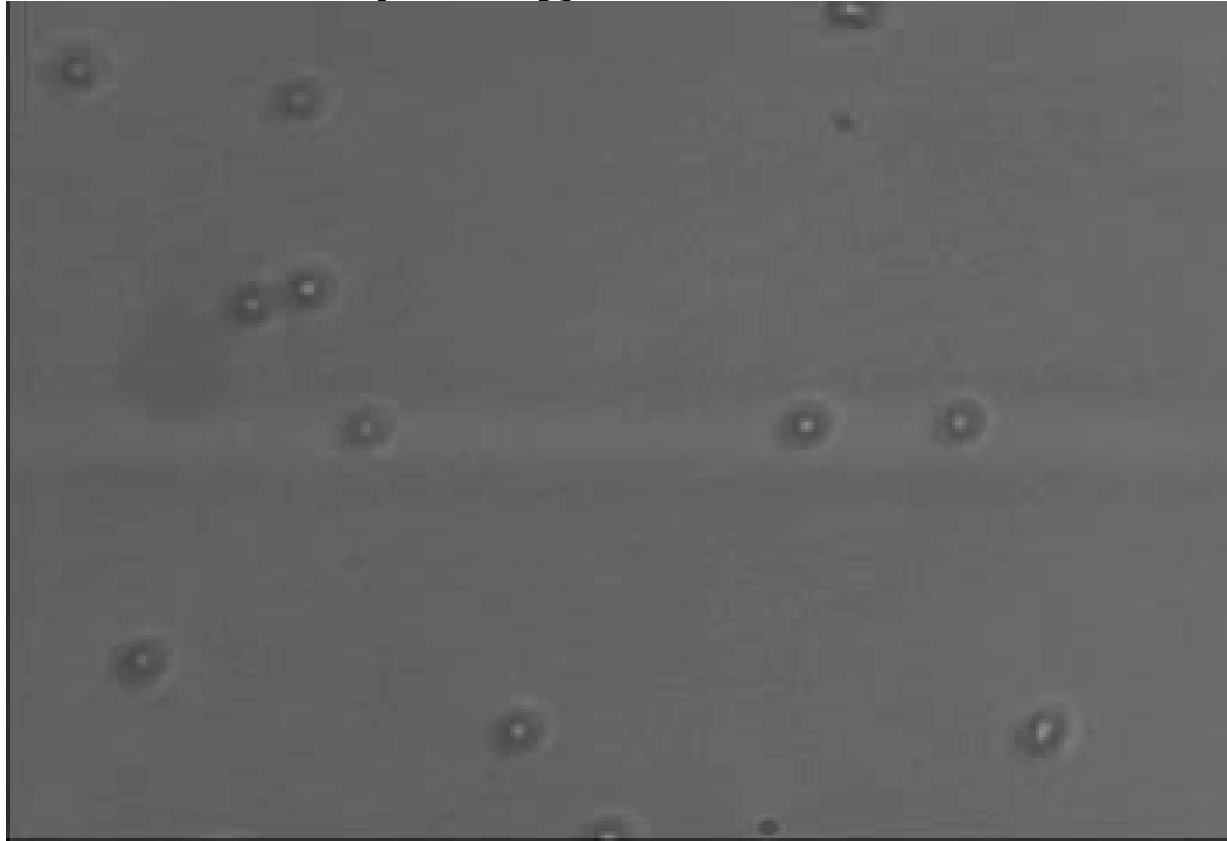


# Réalisation expérimentale



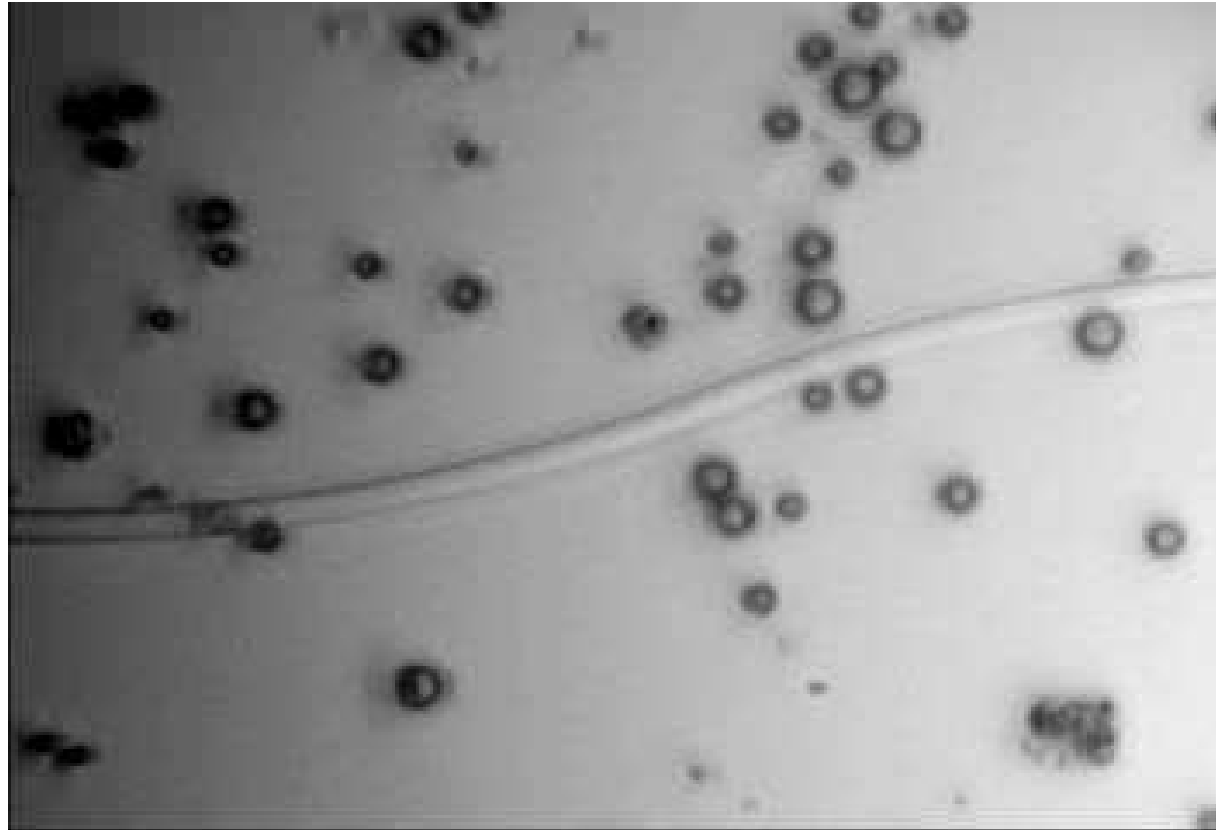


Propulsion de microparticules d'or (diamètre  $1\mu\text{m}$ )  
sur guide verre dopé  $\text{Ag}^+$ /verre



(Gaugiran et coll., 2005)

# Guidage microparticules de verre (diamètre $1\mu\text{m}$ ) sur guide nitrure/silice



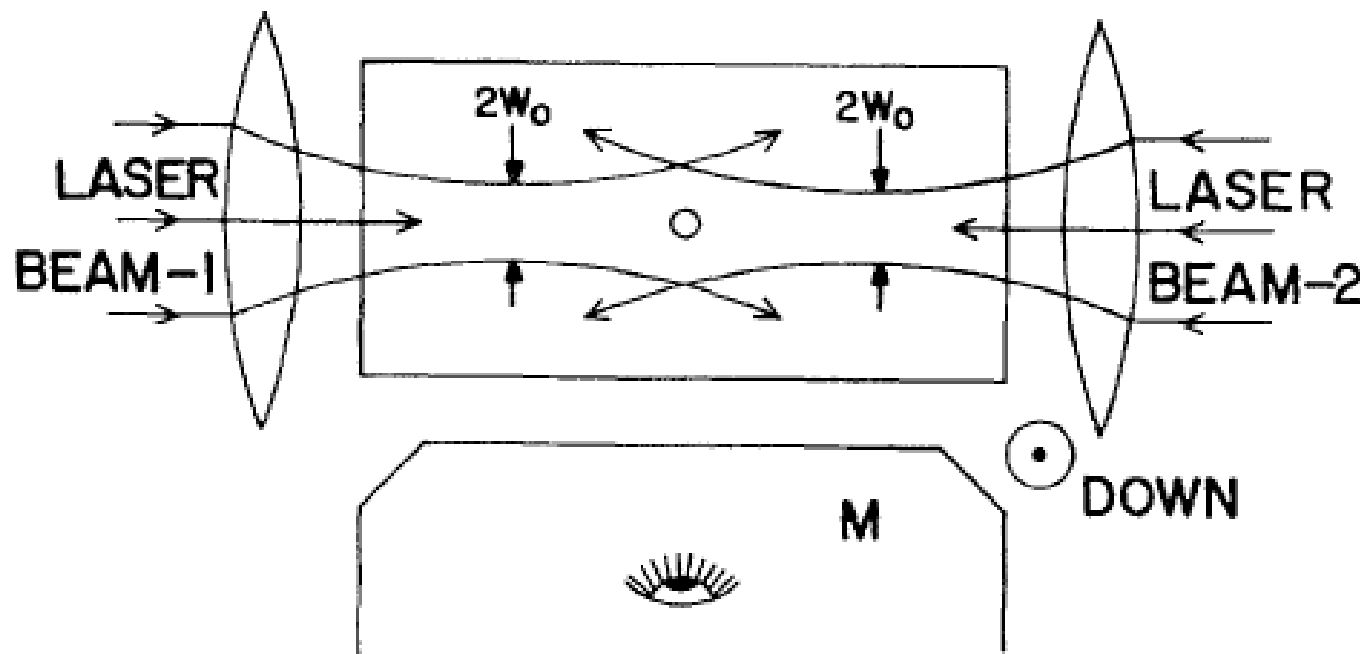
(Gaugiran et coll., 2005)

Utilisation des forces radiatives  
pour immobiliser des particules

# Première expérience de piégeage: faisceaux contra-propagatifs

Forces de gradient attirent billes vers l'axe optique

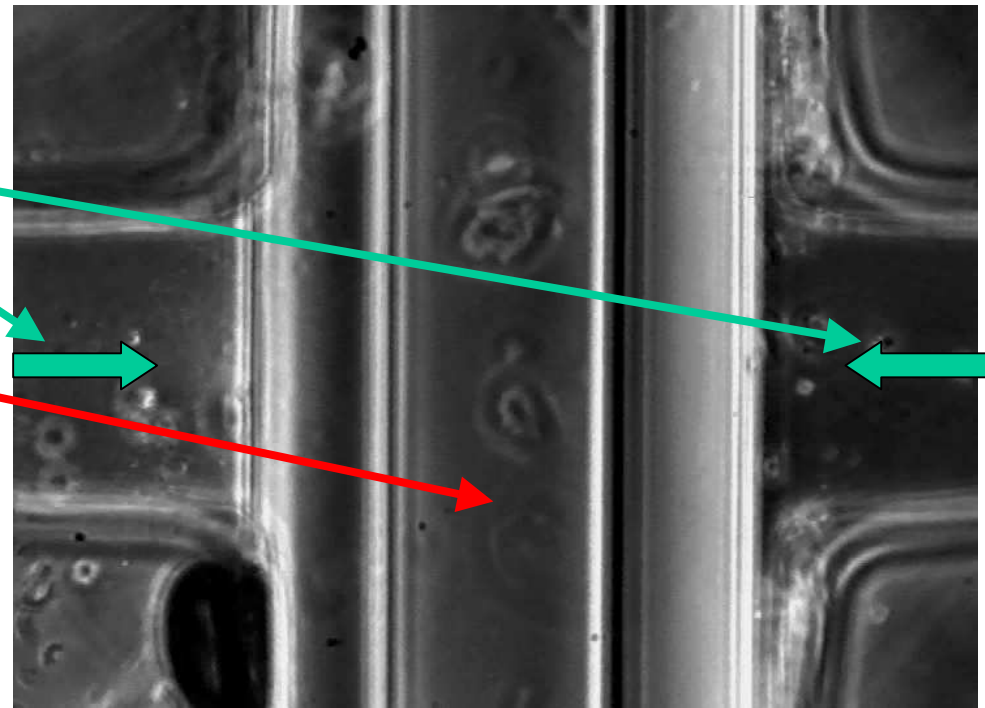
Forces de pression de radiation axiales se compensent



A. Ashkin, 'Acceleration and trapping of particles by radiation pressure',  
Physical Review Letters, Vol. 24, No. 4, 156, 1970

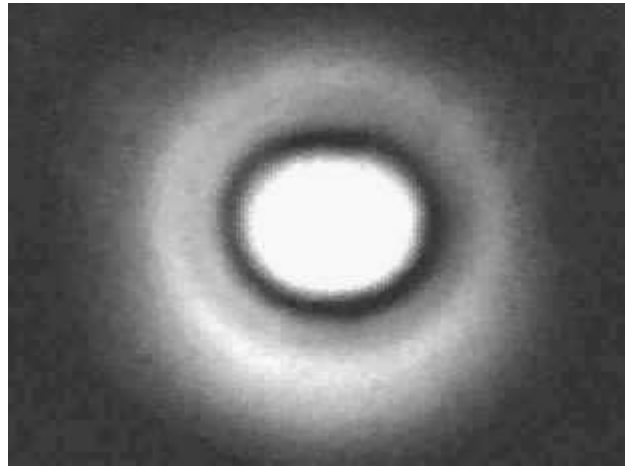
# Version récente de cette configuration: «optical stretcher» (Guck et coll, 2000, 2005)

- Laser fibré Ytterbium, fibre optiques monomodes
- Canal microfluidique
- Cellules biologiques en suspension



100  $\mu\text{m}$

# Exemple: Observation de la déformation d'un globule rouge (Guck et al 2001)



Piégé entre deux faisceaux  
contrapropagatifs

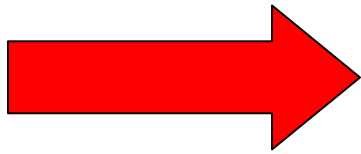
Pression de radiation étire  
au lieu de comprimer!!

# Principe: forces exercées par rayonnement

Milieu indice  $n_1$

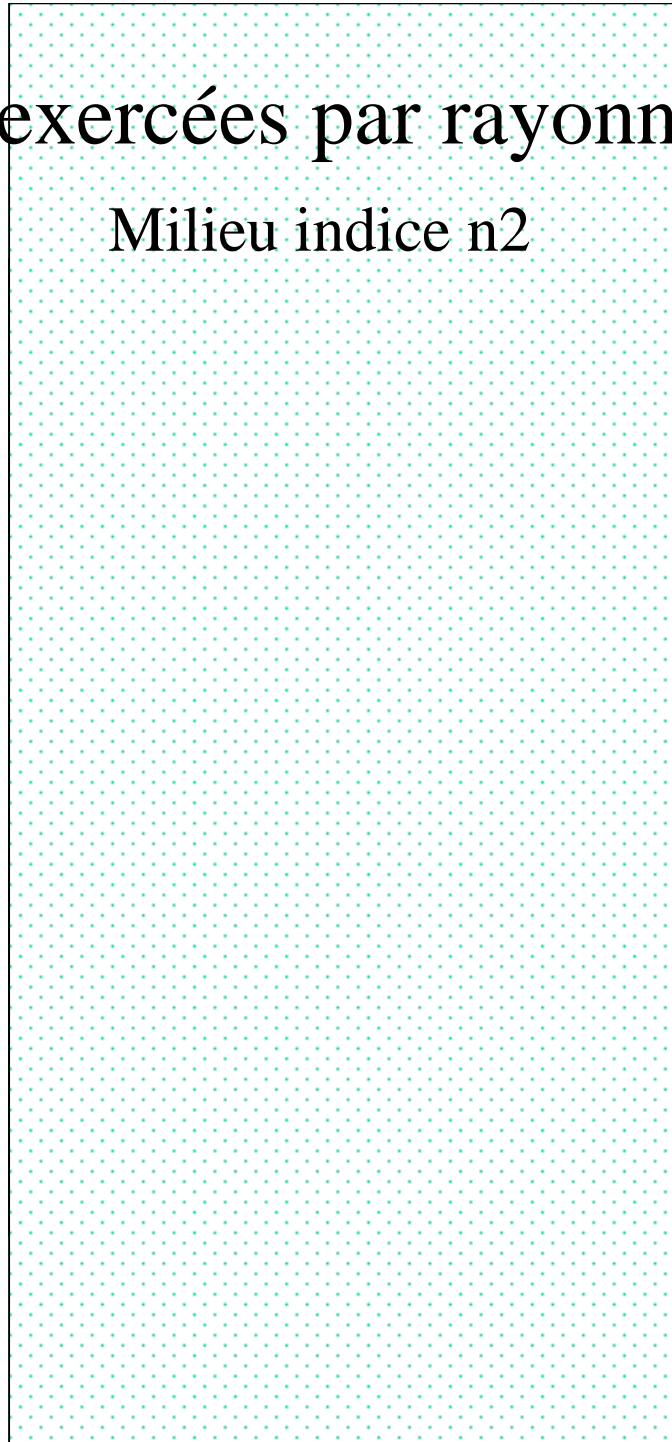
Milieu indice  $n_2$

photon



$$\vec{p}_1 = \hbar \vec{k}_1$$

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = n_1 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

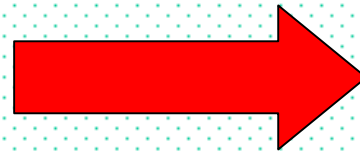




Milieu indice n1

Milieu indice n2

photon



$$\vec{p}_1 = \hbar \vec{k}_1$$

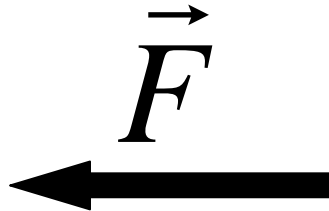
$$\vec{p}_2 = \hbar \vec{k}_2$$

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = n_1 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} = n_2 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

Milieu indice  $n_1$

Si  $n_2 > n_1$  on a  
 $p_2 > p_1$ , d'où force  $F$   
exercée à l'interface  
tendant à **tirer le  
milieu 2**



$$\vec{p}_1 = \hbar \vec{k}_1$$

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = n_1 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$\vec{p}_2 = \hbar \vec{k}_2$$

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} = n_2 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

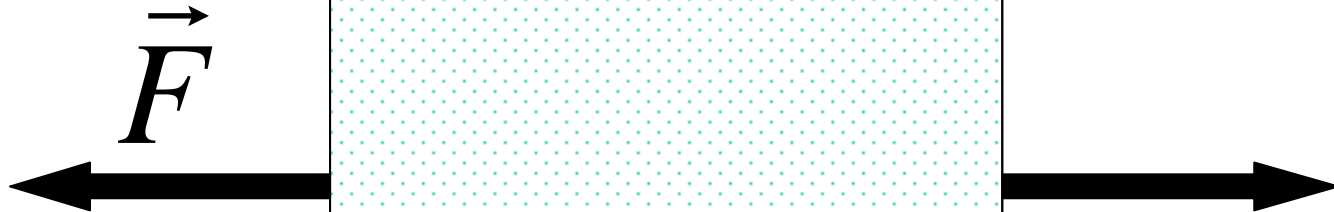
Milieu indice  $n_2$

Milieu indice n1

Milieu indice n2

Milieu indice n1

A la sortie effet  
inverse et force  
contraire



$$\vec{p}_1 = \hbar \vec{k}_1$$

$$\vec{p}_2 = \hbar \vec{k}_2$$

$$\vec{p}_1 = \hbar \vec{k}_1$$

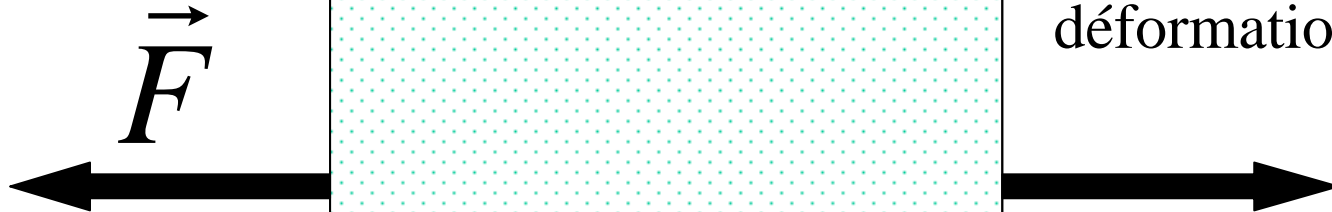
$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = n_1 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} = n_2 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

Milieu indice n1

Milieu indice n2

Milieu indice n1



d'où mise sous  
contrainte du  
milieu et possible  
déformation

# Ordre de grandeur de l'effet

- $n_1=1,33$
- $n_2=1,4$
- $I=1 \text{ Watt}$
- $F=200\text{pN}$

# Propulsion et étirement

- Force de propulsion est la différence des forces aux interfaces
- Particule poussée par lumière si force sortie > force entrée (pas le problème dans cas de 2 faisceaux opposés)
- Comment est-ce possible?

# Propulsion et étirement

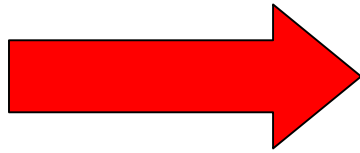
- Force de propulsion est la différence des forces aux interfaces
- Particule poussée par lumière si force sortie > force entrée
- Comment est-ce possible?
- **Tenir compte de la réflexion aux interfaces!**

Milieu indice n1

Milieu indice n2

Intensité  
incidente

I



$$\vec{p}_1 = \hbar \vec{k}_1$$

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = n_1 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$\vec{p}_2 = \hbar \vec{k}_2$$

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} = n_2 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$



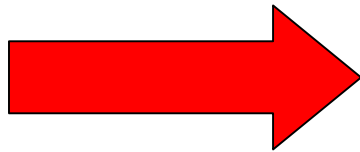
Milieu indice n1

Intensité  
réfléchie

$$I_r = RI$$



I



$$\vec{p}_1 = \hbar \vec{k}_1$$

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = n_1 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

Milieu indice n2

Intensité  
transmise

$$I_t = (1-R)I$$



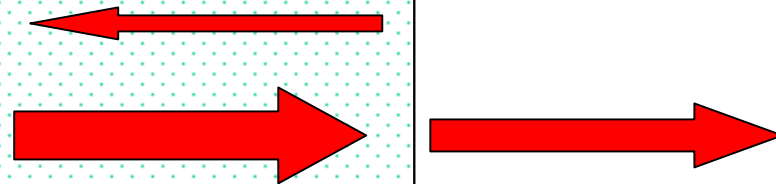
$$\vec{p}_2 = \hbar \vec{k}_2$$

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} = n_2 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

Milieu indice n1

Milieu indice n2

Idem à la  
sortie



$$\vec{p}_1 = \hbar \vec{k}_1$$

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = n_1 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$\vec{p}_2 = \hbar \vec{k}_2$$

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} = n_2 \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

# Bilan

$$F_{\text{in}} = [n_1 - (1-R)n_2 + Rn_1]P/c$$

$$F_{\text{out}} = [n_2 - (1-R)n_1 + Rn_2](1-R)P/c$$

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (\text{Formules de Fresnel})$$

$$n_1 = 1,33 \quad n_2 = 1,45 \quad R = 0,2\%$$

$$P = 500 \text{ mW} \quad F_{\text{in}} = 190 \text{ pN} \quad F_{\text{out}} = 210 \text{ pN} : \quad F_{\text{out}} > F_{\text{in}}$$

# Retour sur controverse Abraham-Minkowski

- Etirement de particule diélectrique semble accrédir

$$P_{milieu} = n \frac{h}{\lambda_0}$$

- Expérience de W. She, J. Yu et R. Feng semble montrer au contraire une *compression* du milieu diélectrique (Phys. Rev. Lett. 101, 243601, 2009)

$$P_{milieu} = \frac{h}{n\lambda_0}$$

# Retour sur controverse Abraham-Minkowski

- Expérience de W. She, J. Yu et R. Feng semble montrer au contraire une *compression* du milieu diélectrique (Phys. Rev. Lett. 101, 243601, 2009)

$$P_{milieu} = \frac{h}{n\lambda_0}$$

??

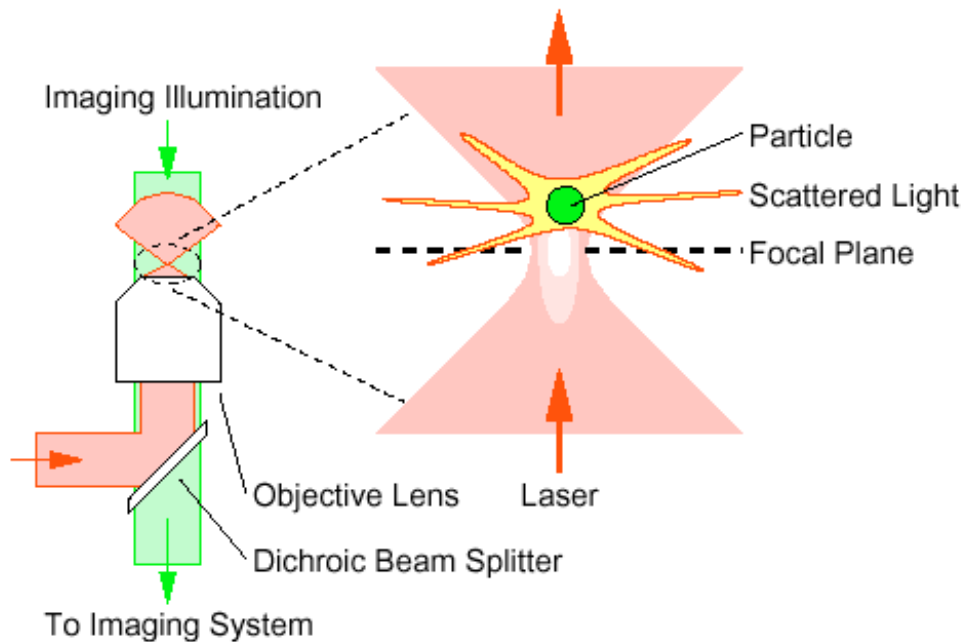
# Piégeage de particules suite...

- 2 faisceaux pour compenser pression de radiation, mais...

# Piégeage de particules suite...

- 2 faisceaux pour compenser pression de radiation, mais...
- Avec faisceau laser **très** focalisé,  $F_{\text{grad}} > F_{\text{Prad}}$

# Ashkin 1986: Première expérience de piégeage par un seul faisceau focalisé: “pince optique”

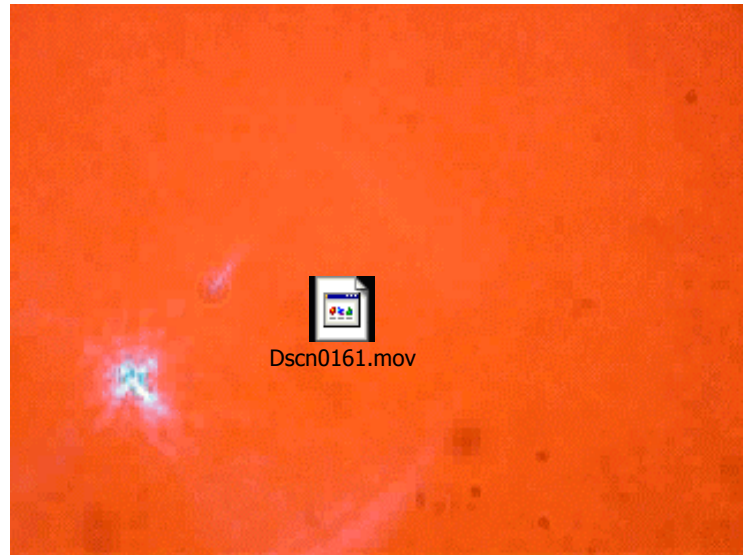


**Idée:** si faisceau est très focalisé, gradient assez fort pour que forces de gradient surmontent la pression de radiation

A. Ashkin et al ‘Observation of single-beam gradient force optical trap for dielectric particles’, *Optics Letters*, Vol. 11, No. 5, 288, 1986



# The trapped particle



- laser:  $\lambda = 480nm, 12mW$
- 1 mW in the focus
- illuminated particle is trapped
- slide is moved to the right
- trapped particle keeps position

E. di Fabrizio, Trieste, 2003