

COMMENT FAUT-IL COMPTER LES ATOMES ?

- ❶ Où l'on fait des expériences systématiques
- ❷ Où l'on essaie de reproduire des observations par un modèle.
- ❸ Où l'on affine le modèle en inventant des règles de comportement, des « lois ».

OBSERVATION DE LA NATURE

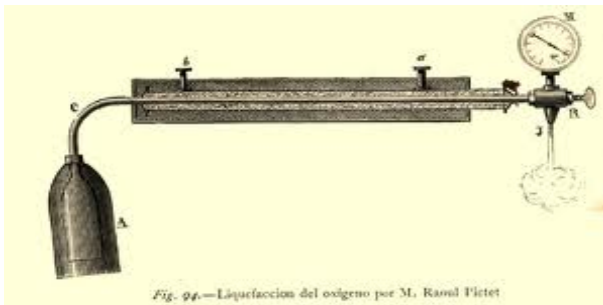


EXPÉRIENCES



eau ➡ vapeur = gaz

EXPÉRIENCES SYSTEMATIQUES

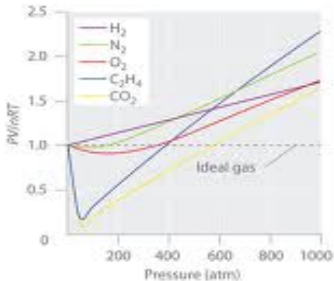


EXPÉRIENCES SYSTÉMATIQUES

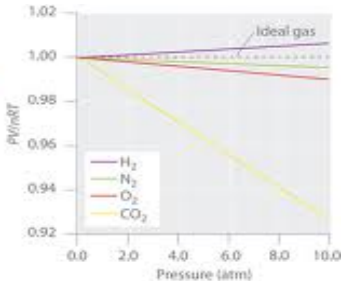


- ➔ On relie les conditions de l'expérience à des nombres
- ➔ On fait varier ces conditions de façon systématique

LOIS, RELATIONS, IDENTITÉS



(a) PV/nRT at high pressures

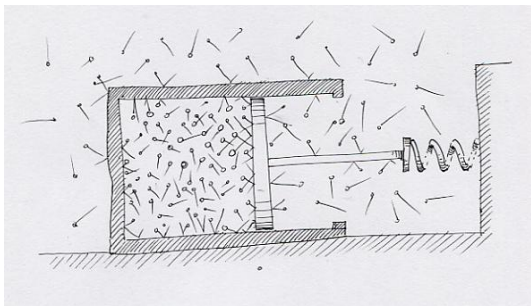


(b) PV/nRT at low pressures

- ➔ On trace des courbes pour représenter ces mesures
- ➔ On essaie de trouver des comportements remarquables :

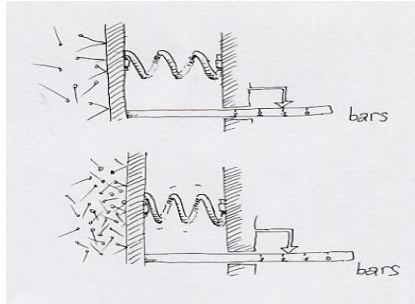
$$PV = nRT$$

MODÈLE DE PARTICULES EN MOUVEMENT



➔ On imagine un modèle simple qui permet de **reproduire** cette relation remarquable

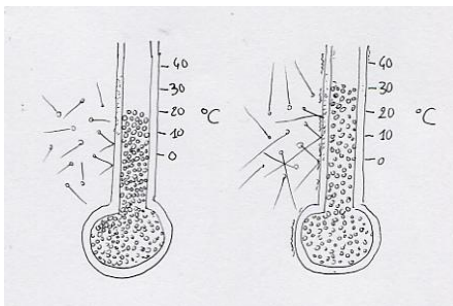
À QUOI CORRESPOND LA PRESSION ?



➔ La pression est proportionnelle au nombre de particules qui frappent la paroi

$$P = N \times \dots$$

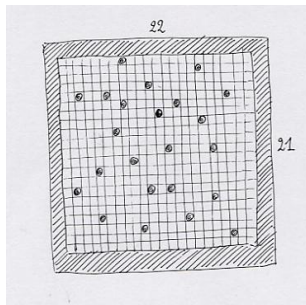
À QUOI CORRESPOND LA TEMPÉRATURE ?



➔ La température correspond à l'énergie cinétique des particules qui heurtent la paroi

$$T = (\text{vitesse})^2 \times \dots$$

COMMENT DONNER UNE POSITION À UNE PARTICULE DANS LE MODÈLE ?



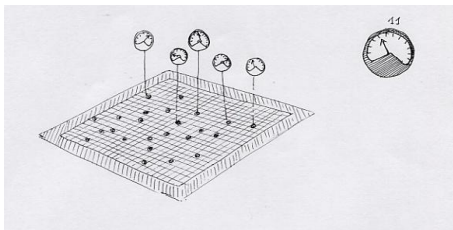
➔ Il est trop compliqué de connaître sa trajectoire à un instant donné

➔ On décompose l'espace en Ω_V cellules élémentaires :

$$\Omega_V = \frac{V}{v} = 21 \times 22$$

➔ On remplit les cellules **au hasard !**

COMMENT TENIR COMPTE DES DIFFÉRENTES VITESSES ?



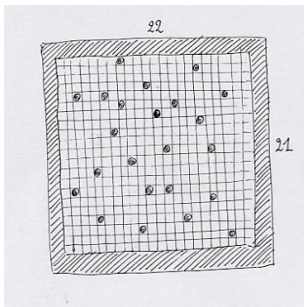
➔ On décompose les vitesses possibles en Ω_T vitesses élémentaires (en fait c'est un peu plus compliqué). Par exemple sur le dessin

$$\Omega_T = 11$$

➔ Le nombre total Ω d'états possibles pour une particule est donc

$$\Omega = \Omega_V \times \Omega_T = 21 \times 22 \times 11$$

COMMENT DONNER UNE POSITION À N PARTICULES ?



➔ On donne la position à la première, puis à la seconde, puis ...

$$\Omega_V = \left(\frac{V}{v} \right)^N$$

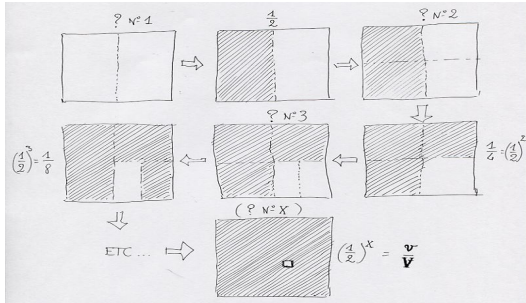
➔ ... ou bien on envisage toutes les configurations possibles et on en choisit une

$$\Omega_V = \frac{1}{N!} \left(\frac{V}{v} \right)^N$$

CES DEUX FAÇONS DE PROCÉDER ONT DES CONSÉQUENCES
DIFFÉRENTES SUR LE COMPORTEMENT DU MODÈLE!!!

LAQUELLE CHOISIR ?

COMBIEN DE QUESTIONS FAUT-IL POUR CONNAÎTRE LA POSITION D'UNE PARTICULE ?



➔ Pour une cellule de taille v dans un volume total V il faut poser

$$s_V = \log_2 \left(\frac{V}{v} \right)$$

questions

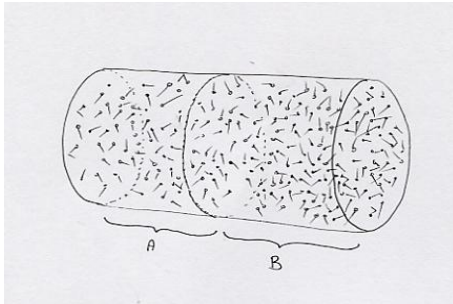
COMBIEN DE QUESTIONS POUR SITUER N PARTICULES ?

➔ avec la méthode D, on pose s_V questions pour la première particule, puis s_V pour la seconde, $\dots$, donc pour N particules il faut poser

$$S_V = N \log_2 \left(\frac{V}{v} \right) = \log_2 \left(\frac{V}{v} \right)^N = \log_2 (\Omega_V)$$

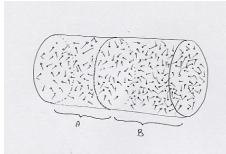
questions.

PARADOXE DE GIBBS AVEC LA MÉTHODE D



- ➔ Pour connaître le gaz A il faut $S_A = N \log_2 \left(\frac{V}{v} \right)$ questions
- ➔ Pour connaître le gaz B il faut $S_B = N \log_2 \left(\frac{V}{v} \right)$ questions
- ➔ Pour connaître le gaz A il faut $S_{A+B} = 2N \log_2 \left(\frac{2V}{v} \right)$ questions
- ➔ On devrait avoir $S_{A+B} = S_A + S_B$, mais ça ne marche pas.

SOLUTION AU PARADOXE DE GIBBS : MÉTHODE I



➔ Chaque configuration ne dépend pas de l'ordre des particules : on parle de « particules indiscernables », et on a

$$\Omega_V = \frac{1}{N!} \left(\frac{V}{v} \right)^N$$

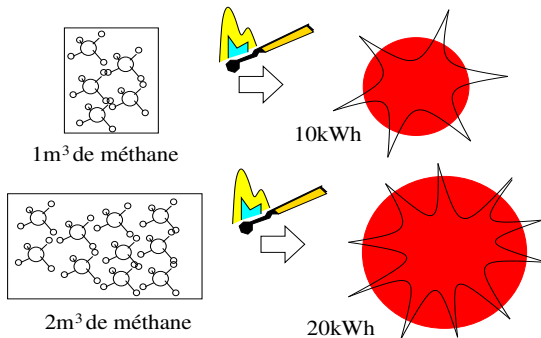
$$\rightarrow S_V = \log_2 (\Omega_V) = N \log_2 \left(\frac{V}{v} \right) - \log_2 (N!) \simeq N \log_2 \left(\frac{V}{Nv} \right)$$

$$\rightarrow S_{A+B} = 2N \log_2 \left(\frac{2V}{2Nv} \right) = 2N \log_2 \left(\frac{V}{Nv} \right) = S_A + S_B$$

SI ON VEUT QUE DEUX MOITIÉS D'UN GAZ FORMENT LE GAZ,
ON DOIT OPTER POUR LA MÉTHODE I ET LES PARTICULES
INDISCERNABLES

HYPOTHÈSE D'INDISCERNABILITÉ NÉCESSAIRE

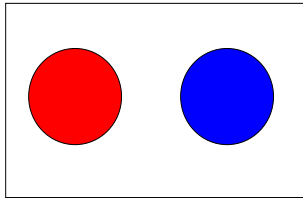
à 15°C et P. atmosphérique:



- ➔ fait expérimental : quand on brûle deux fois plus de gaz, il se dégage deux fois plus de chaleur
- ➔ Pour décrire fidèlement ce fait, il faut faire l'hypothèse que les particules sont indiscernables

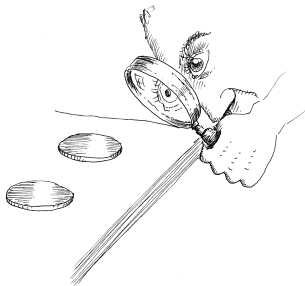
DEVOIR COMPTER LES PARTICULES DU MODÈLE COMME SI ELLES ÉTAIENT INDISCERNABLES, EST-CE QUE ÇA IMPLIQUE QUE LES VRAIES PARTICULES DU GAZ SONT INDISCERNABLES ?

ÉVIDEMMENT DISCERNABLES



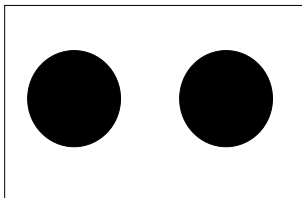
➔ La discernabilité peut être basée sur une différence perceptible

INTRINSÈQUEMENT DISCERNABLES



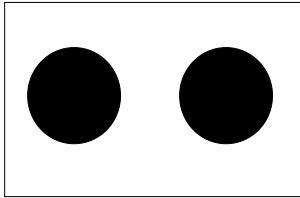
➔ Elle peut être basée sur une caractéristique invisible a priori mais qui existe néanmoins et reste potentiellement détectable

INDISCERNABLES ?



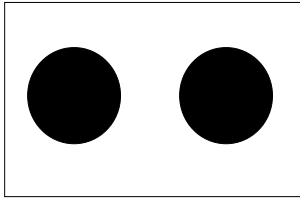
➔ Est-il possible de donner des identités à des particules parfaitement similaires ?

INDISCERNABLES ?



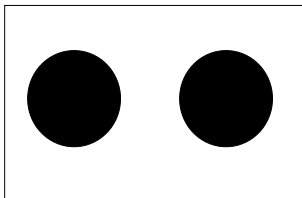
- ➔ Est-il possible de donner des identités à des particules parfaitement similaires ?
- ➔ Celle de droite et celle de gauche...

INDISCERNABLES ?



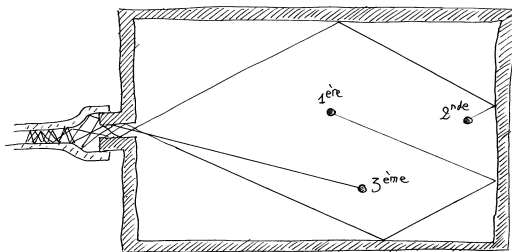
- ➔ Est-il possible de donner des identités à des particules parfaitement similaires ?
- ➔ Celle de droite et celle de gauche...
- ➔ ...et si elles bougent ?

INDISCERNABLES ?



- ➔ Est-il possible de donner des identités à des particules parfaitement similaires ?
- ➔ Celle de droite et celle de gauche...
- ➔ ...et si elles bougent ?
- ➔ On peut les reconnaître en les suivant à la trace

SI ON PLACE LES PARTICULES DU GAZ UNE PAR UNE ET QU'ON
LES SUIT À LA TRACE, ELLES SONT PRATIQUEMENT
DISCERNABLES



C'EST CE QU'ON FAIT DANS LA VIE QUOTIDIENNE. . .

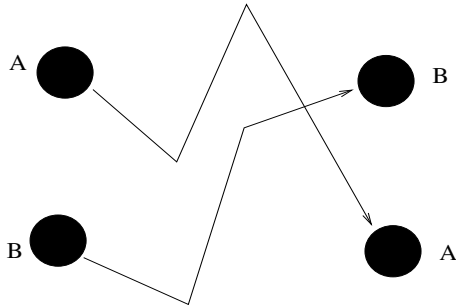
- ➔ Je sais distinguer mon argent de celui d'un autre parce qu'il reste **continûment** dans ma poche
- ➔ En réalité je ne vérifie que de temps en temps qu'il est bien dans ma poche, le reste du temps je crois qu'il est dans ma poche
- ➔ Ma **mémoire** me permet d'avoir la conviction que la quantité n'a pas varié

... OU PAS ...



- ➔ Dès que l'on est inattentif à la trajectoire, on n'arrive plus à distinguer proprement les choses
- ➔ Une trajectoire est une notion qui a un sens à notre échelle : on la reconstruit avec un mélange de mémoire et de foi dans la continuité des choses

TRAJECTOIRES $\Rightarrow$ DISCERNABILITÉ

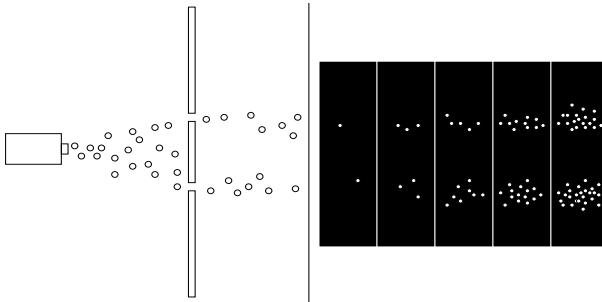


- ➔ Si on pouvait les trajectoires des particules à l'échelle microscopique, on pourrait les distinguer entre elles, et il serait plus naturel d'utiliser la méthode D.
- ➔ Dans l'exemple ci-dessus, il y a « la particule qui était en haut au début », et « la particule qui était en bas »

EN FAIT LES TRAJECTOIRES AUSSI SONT INDISCERNABLES. . .

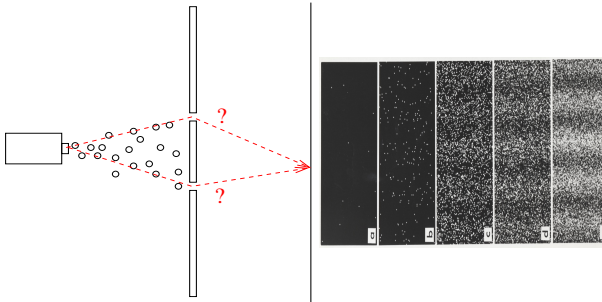
➡ Dans l'expérience suivante des fentes d'Young, on doit renoncer complètement à la notion usuelle de trajectoire d'une particule

FENTES D'YOUNG AVEC DES PARTICULES MACROSCOPIQUES : LES TRAJECTOIRES SEMBLENT BIEN DÉFINIES



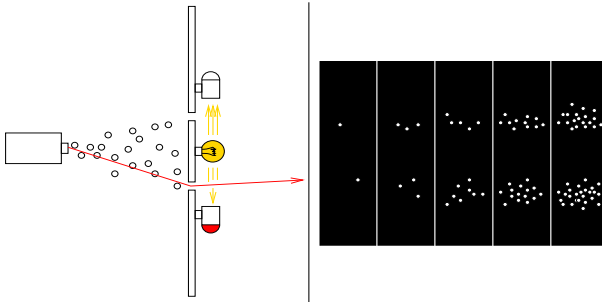
➔ Avec des particules discernables, on peut suivre le chemin suivi par chaque particule, ce qui amène à des figures de détection « intuitives » les particules sont détectées en face des trous

PARTICULES MICROSCOPIQUES : ELLES NE SEMBLENT PLUS SUIVRE DES TRAJECTOIRES BIEN DÉFINIES



➔ On observe alors un « phénomène d'interférence »

RÉTABLISSEMENT FORCÉ DE LA DISCERNABILITÉ



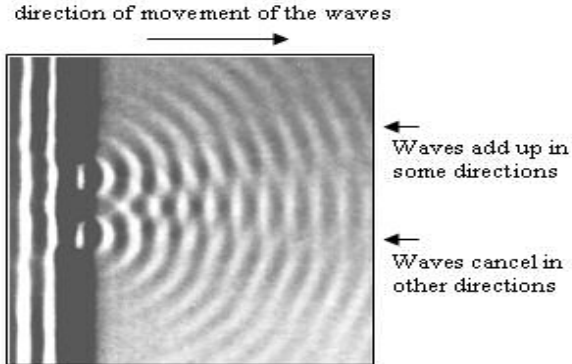
➔ Dès qu'on modifie l'expérience pour savoir quel chemin a emprunté la particule, et reconstruire ainsi une trajectoire, le phénomène d'interférences disparaît !!!

COMPORTEMENT DE TYPE ONDULATOIRE



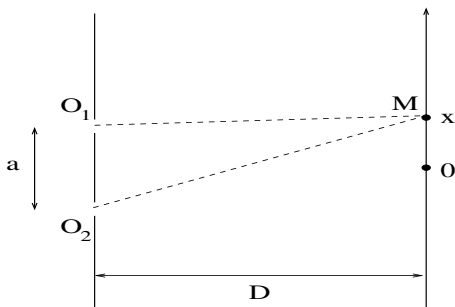
➡ Le phénomène d'interférence est bien connu dans la physique des ondes

EXPÉRIENCE D'YOUNG AVEC DES ONDES



➔ La figure obtenue avec des particules indiscernables est identique à celle obtenue par des rides sur de l'eau

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE, FONCTION D'ONDE

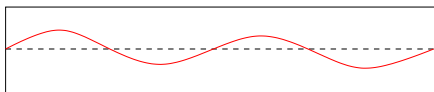


$$\rightarrow \psi(x) = A \exp \frac{2i\pi O_1 M}{\lambda} + A \exp \frac{2i\pi O_2 M}{\lambda}$$

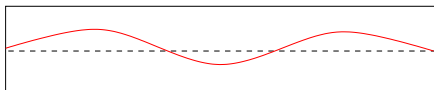
$$\rightarrow N(x) = |\psi(x)|^2$$

$$\rightarrow N(x) \simeq 2A^2 \left(1 + \cos \frac{2\pi ax}{\lambda D} \right)$$

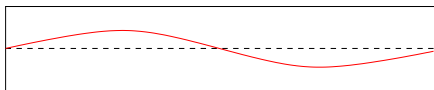
REPENSER LA NOTION DE PARTICULE



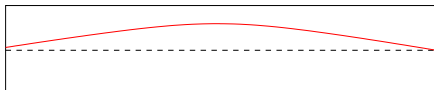
$N=3$



$N=2$



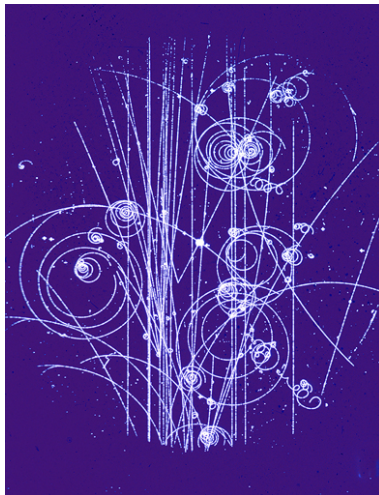
$N=1$



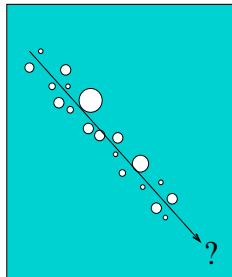
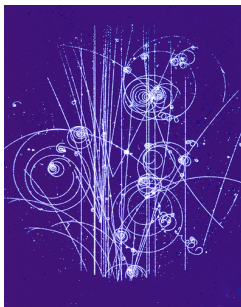
$N=0$

➔ En théorie quantique des champs, deux particules identiques sont deux excitations élémentaires d'un même champ

MAIS ALORS QUE DÉTECTONS-NOUS DANS LES
ACCÉLÉRATEURS ?



C'EST LA TRACE DE L'INTERACTION DES PARTICULES AVEC LA
MATIÈRE. . .



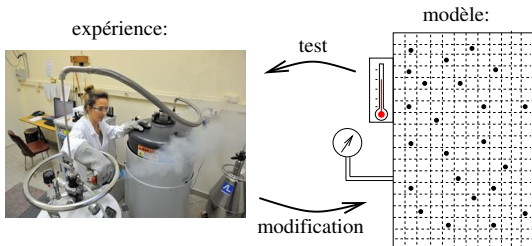
- ➔ Nous détectons l'interaction de ces excitations avec un environnement préparé dans un état instable : le « détecteur »
- ➔ Ces interactions sont « ponctuelles » dans le temps et l'espace, et donnent l'impression que ce sont des objets ponctuels qui les ont engendrées

CONCLUSION

- ➔ La matière se comporte comme si elle était constituée de particules indiscernables
- ➔ En fait, dans les modèles plus récent, on dit que ces « particules » sont indiscernables parce que ce ne sont pas vraiment des particules, mais plutôt des **excitations d'un champ** - un peu comme des vagues sur l'eau. . .
- ➔ . . . les vagues ne sont pas vraiment discernables, elles peuvent disparaître et réapparaître, et alors c'est la même ou c'en est une autre ?

MODÈLE STATISTIQUE D'UN GAZ

La physique statistique est une approche théorique qui tente de décrire les propriétés macroscopique d'un système (par exemple un gaz) sous différentes conditions (variations de températures, volumes et pressions)



- ➔ On fait l'hypothèse que le gaz est constitué de particules microscopiques (atomes, molécules)
- ➔ On décompose le volume en petites cellules dans lesquelles il y a au plus une particule