**Introduction**

Grâce à des faisceaux laser, les physiciens savent aujourd'hui piéger et contrôler des atomes un à un. La force de van der Waals s'exerçant entre deux atomes de rubidium a ainsi pu être mesurée directement pour la première fois. Ce sujet propose de comprendre les grandes étapes de la mesure de cette force de van der Waals s'exerçant entre deux atomes, placés dans des états de Rydberg.

Un ensemble de valeurs numériques et un formulaire sont disponibles en fin d'énoncé. Il est conseillé de les lire avant de commencer à traiter le sujet.

Les parties de ce sujet sont dépendantes entre elles mais le candidat pourra admettre un résultat pour aborder la partie suivante.

Certaines questions, peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Leur énoncé est repéré par une barre en marge. Il est alors demandé d'explicitier clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

I Étude la force de van der Waals

Lorsque deux atomes présentant un moment dipolaire électrique sont à distance suffisante, ils interagissent entre eux sous forme d'interaction dipôle – dipôle. Cette partie cherche à expliquer le principe de cette interaction.

I.A –

Q 1. Rappeler la définition d'un dipôle électrostatique et de son moment dipolaire \vec{p} (il est conseillé de s'appuyer sur un dessin).

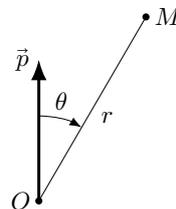
Q 2. Donner un exemple de dipôle électrostatique rencontré dans la nature ainsi que l'ordre de grandeur du moment dipolaire de l'exemple choisi.

I.B – Le potentiel électrique d'un dipôle électrostatique placé à l'origine O évalué en un point M situé à grande distance de O s'écrit

$$V(M) = \frac{\vec{p} \cdot \overrightarrow{OM}}{4\pi\epsilon_0 \|\overrightarrow{OM}\|^3}.$$

Q 3. À quelle condition peut-on considérer que le point M se trouve à grande distance de O ?

Q 4. Déterminer dans le système de coordonnées sphériques (figure 1) le champ électrique créé par le dipôle en un point M en fonction des variables $r = \|\overrightarrow{OM}\|$ et θ .

**Figure 1**

Q 5. Tracer schématiquement sans démonstration les lignes de champ électrostatique associées au dipôle.

I.C – Polarizabilité d'un atome

Lorsqu'un atome est soumis à un champ électrique extérieur \vec{E}_{ext} uniforme à l'échelle de l'atome on constate qu'il acquiert alors un moment dipolaire \vec{p}_{ind} , dit *moment dipolaire induit* vérifiant

$$\vec{p}_{\text{ind}} = \alpha\epsilon_0\vec{E}_{\text{ext}} \quad (\text{I.1})$$

où α s'appelle la polarisabilité de l'atome.

Q 6. Justifier qualitativement la relation (I.1) et donner l'unité de α dans le système international d'unités. Justifier que α est une grandeur positive.

Pour déterminer un ordre de grandeur de α , on peut utiliser le modèle de l'atome d'hydrogène proposé en 1904 par le physicien anglais Sir Joseph John Thomson (1856–1940) :

- l'atome est assimilé à une sphère de centre O et de rayon a ;
- la charge positive e de l'atome est répartie uniformément dans le volume intérieur de cette sphère ;
- la sphère est supposée fixe dans un référentiel galiléen propre à l'étude, auquel on associe le repère orthonormé direct $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$;
- l'électron se déplace librement à l'intérieur de la sphère ;
- on néglige l'interaction gravitationnelle devant l'interaction électromagnétique.

Q 7. Quelle est l'expression de la force ressentie par l'électron en fonction des données du problème et de la position de l'électron ? Commenter.

Q 8. On ajoute maintenant un champ extérieur \vec{E}_{ext} supposé uniforme sur la dimension de l'atome. En admettant que l'électron reste dans la sphère de rayon a , déterminer sa position d'équilibre.

Q 9. En déduire une expression de α dans le cadre de ce modèle et proposer un ordre de grandeur.

I.D – Interactions entre atomes de rubidium

Les atomes de rubidium ($Z = 37$) servant à l'étude des interactions de van der Waals, ne possèdent pas de moment dipolaire propre, tout comme l'atome d'hydrogène étudié précédemment. Néanmoins, ils peuvent posséder des moments dipolaires induits et la force qui existe entre deux atomes, résulte de l'interaction entre ces deux moments dipolaires induits.

Q 10. Proposer une explication qualitative de ce phénomène.

Pour modéliser le phénomène, on considère deux dipôles alignés sur un axe (Ox) et espacés d'une distance $x = O_1O_2$ (figure 2).



Figure 2

Q 11. À partir de l'expression de l'énergie potentielle d'un dipôle dans un champ extérieur, montrer que la force exercée par le premier dipôle sur le second dipôle peut s'écrire sous la forme

$$\vec{F}_{1/2} = p_2 \frac{dE_1}{dx} \vec{e}_x$$

où E_1 est la composante selon \vec{e}_x du champ électrique créé par le dipôle p_1 à l'abscisse x (au niveau de p_2).

Q 12. En déduire que cette force peut se mettre sous la forme

$$\vec{F}_{1/2} = \frac{K}{x^7} \vec{e}_x$$

où K est une constante dont on précisera le signe.

Q 13. Cette force est-elle attractive ou répulsive ? Comment pouvait-on prévoir ce résultat sans calcul ?

Q 14. En déduire l'énergie potentielle d'interaction entre les deux dipôles.

On admettra par la suite que dans le cas général l'énergie d'interaction entre dipôles induits se met sous la forme $E_p = -\frac{A}{r^6}$ où A est une constante positive.

II Atomes de Rydberg

II.A – Atome d'hydrogène

On s'intéresse dans cette sous-partie à l'atome d'hydrogène dans le cadre du modèle de Bohr : dans ce modèle, l'électron suit une trajectoire circulaire autour du proton.

On rappelle que le noyau est un proton de charge $+e$ supposé fixe dans le référentiel galiléen d'étude. L'électron est une particule non-relativiste de masse m_e , très faible devant celle du proton et de charge $-e$. L'électron est soumis à la force électrostatique attractive due au proton. L'énergie de l'atome d'hydrogène correspond à l'énergie mécanique de son électron et elle ne peut varier que lors du processus d'absorption ou d'émission lumineuse.

Bohr fait également l'hypothèse que, parmi tous les mouvements de l'électron que la mécanique classique reconnaît comme possibles, seuls sont stables et réalisés dans la nature ceux qui sont circulaires.