RÉSONANCE MAGNÉTIQUE SUR DES ATOMES ORIENTÉS OPTIQUEMENT

Par JEAN BROSSSEL, BERNARD CAGNAC et ALFRED KASTLER,

Laboratoire de Physique,
École Normale Supérieure, Paris.

Sommaire. — Des atomes de sodium d'un jet atomique ont été orientés par illumination avec de la lumière de résonance 5 890-5 896 Å polarisée circulairement. Ces atomes orientés ont été utilisés pour effectuer des transitions de résonance magnétique entre les sous-niveaux Zeeman de l'état fondamental $3^2S_{1/2}$, transitions qui ont été détectées optiquement. A côté des résonances normales corres-

pondant au passage d'un niveau m à un niveau adjacent on observe, lorsqu'on augmente l'amplitude du champ de haute fréquence, des résonances nouvelles très aiguës qui font intervenir à la fois trois ou quatre niveaux Zeeman.

La création d'une inégalité de population entre les sous-niveaux Zeeman de l'état fondamental des atomes à l'aide d'un dispositif de « pompage optique » [1] a été obtenue antérieurement [2], [3]. Nous avons perfectionné l'expérience portant sur un jet atomique de sodium. Les taux d'orientation obtenus ont été doublés, et les procédés optiques

de détection de l'orientation se sont révélés sensibles et commodes. L'expérience décrite ci-après consiste à prendre un jet d'atomes orientés par le procédé précédent (décrit en détail dans la référence [2]) et à mesurer le signal d'orientation. Puis on provoque une résonance magnétique entre deux sous-niveaux Zeeman de l'état fondamental.

L'effet du champ de radiofréquence est d'égaliser la population des deux niveaux impliqués dans la résonance. Le signal d'orientation diminue, ce qui permet la mesure. Le montage utilisé est le suivant :

Un jet atomique de sodium, émis horizontalement, est placé dans un champ magnétique H_z perpendiculaire au jet. Celui-ci est illuminé en lumière circulaire droite σ_1^+ (ou gauche σ_1^-) ⁽¹⁾ sur 23 cm de long avec la raie de résonance du sodium. La lumière excitatrice se propage dans la direction du champ magnétique H_z , l'illumination étant simultanée des deux côtés. Ceci constitue la région d'orientation. Le jet passe alors à l'intérieur d'une boucle faisant partie d'un circuit accordé, et dans laquelle on envoie une intensité réglable de radiofréquence. La fréquence utilisée, contrôlée par quartz, est de 108,5 MHz. Le champ magnétique oscillant H_1 est perpendiculaire à H_z et en fait, parallèle au jet. C'est dans cette zone de « désorientation » que les transitions sont produites. Le jet aborde alors la région de détection : il y est illuminé en lumière π . L'intensité circulaire droite $I_{\sigma+}$ réémise est mesurée par un photomultiplicateur qui est monté en opposition avec un deuxième photomultiplicateur mesurant simultanément la lumière circulaire gauche réémise $I_{\sigma-}$.

En l'absence d'orientation des atomes $I_{\sigma+} = I_{\sigma-}$, les deux signaux s'annulent. L'illumination préalable σ_1^+ détruit la condition précédente et le signal d'orientation $I_{\sigma+} - I_{\sigma-}$ apparaît. Lorsque H_z varie, la boucle de radiofréquence étant alimentée, on note une baisse du signal d'orientation chaque fois que H_z passe par une valeur résonante, c'est-à-dire chaque fois que la distance de deux niveaux Zeeman de l'état fondamental du sodium est égale à 108,5 MHz. C'est ainsi que les courbes des figures 1 et 2 ont été obtenues : en abscisses, le champ H_z ; en ordonnée sont portées les variations relatives de la quantité

$$\rho = \frac{I_{\sigma+} - I_{\sigma-}}{I_{\sigma+} + I_{\sigma-}}$$

Des valeurs de ρ de 35 pour 100 ont été observées. Pour chaque courbe la puissance de radiofréquence est constante.

La figure 1, représente le diagramme Zeeman de l'état fondamental de Na : deux niveaux hyperfins $F=1$ et $F=2$ distants de 1771 MHz. Les transitions que nous observons sont les transitions basse fréquence à l'intérieur de chacune des configurations Zeeman de ces deux niveaux. Leurs facteurs de Landé g_F sont égaux et de signes opposés ($\pm \frac{1}{2}$). Nous nous plaçons dans une région du champ où l'effet Back-Goudsmit est déjà sen-

sible : les intervalles entre niveaux contigus sont différents, mais la règle de sélection $\Delta m_F = \pm 1$ s'applique encore. On doit donc s'attendre à observer six résonances A, B, B₁, B₂, C₁, C₂, D. Mais, il résulte de la formule de Breit-Rabi que les intervalles qui suivent, sont égaux (fig. 1) :

$$B_1 = B_2 = B, \quad C_1 = C_2 = C.$$

Fig. 1.

Il reste donc en fait quatre résonances distinctes A, B, C, D. La courbe I (fig. 2) montre qu'avec des puissances de radiofréquence faibles il en est bien ainsi. La résonance A, par exemple, correspond à une égalisation, par le champ de radiofréquence, des populations des niveaux (-2) et (-1) de l'état $F=2$, l'illumination préalable en lumière σ_1^- ayant initialement accumulé presque tous les atomes dans le niveau $(F, m_F) = (2, -2)$.

Lorsque l'intensité du champ de radiofréquence croît, un phénomène très remarquable apparaît : la largeur de chacune des résonances A, B, C, D augmente. Lorsqu'elles commencent à se recouvrir (fig. 2, courbe II) trois nouvelles résonances a, b, c, apparaissent aux endroits où les distances des niveaux $(m_F \rightarrow m'_F)$: $(-2 \rightarrow 0)$, $(-1 \rightarrow +1)$ et $(0 \rightarrow +2)$ sont égales à deux fois 108,5 MHz. Leur caractère le plus frappant est leur extrême finesse.

Il ne s'agit pas de transitions directes

$$\Delta m_F = \pm 2$$

(d'ailleurs interdites) provoquées par l'harmonique 2 de l'émetteur de radiofréquence : ces résonances seraient aussi provoquées directement par le fondamental de 108,5 MHz, et cela, dans un champ de 60 gauss environ; rien n'a pu être observé dans cette région.

On doit plutôt admettre que dans les conditions où l'on opère les niveaux (-2) et (0) par exemple peuvent être mis en communication par l'intermédiaire du niveau (-1) . La radiofréquence pro-

⁽¹⁾ Nous dirons que la lumière est circulaire droite lorsque son sens de circulation est celui du courant magnétisant dans les bobines produisant le champ H_z .

Fig. 2.

Fig. 3.

duit un brassage de population dans lequel les trois niveaux (-2) , (-1) et (0) entrent simultanément en jeu. Les populations finales ne sont pas nécessairement égales d'ailleurs. Nous désignerons par convention ces nouvelles résonances par le terme commode de « résonance double » en raison de leur caractère. Leur interprétation quantique sera donnée par ailleurs [4].

Comme prévu, on peut renouveler le processus : en augmentant encore l'intensité de radiofréquence, on provoque à leur tour l'élargissement des résonances doubles et lorsque la zone de recouvrement est suffisante deux « résonances triples » α et β apparaissent, correspondant, suivant l'image précédente, à l'intercommunication des niveaux $(-2, -1, 0, +1)$ d'une part et $(-1, 0, +1, +2)$ d'autre part. Ces deux résonances ont été observées aux points où les distances $(-2 \rightarrow +1)$ et $(-1 \rightarrow +2)$ sont égales à trois fois $108,5$ MHz (courbe III, fig. 2). On peut prévoir aussi une résonance « quadruple ». Nous ne l'avons pas observé avec les puissances de radiofréquence dont nous disposons.

Signalons enfin deux effets apparents sur les figures : on voit sur la figure 1 que l'intensité de A est plus grande que celle de B :

$$A > B > C > D, \quad a > b > c.$$

L'inverse a lieu, si l'orientation préalable, au lieu d'être faite en lumière circulaire gauche σ_1^- , l'est en lumière circulaire droite σ_1^+ (fig. 3). La chose correspond à une accumulation des atomes, dans le premier cas, vers le niveau (-2) , dans l'autre, vers le niveau $(+2)$ de l'état $F = 2$.

Enfin on note sur la figure 3 l'effet d'une orientation plus ou moins prononcée (lumière σ_1^+ plus ou moins intense). La courbe en trait plein $\rho = 30$ correspond à une orientation forte, avec atomes accumulés en $(+2)$. La raie A a presque disparu, les deux niveaux (-2) et (-1) étant presque complètement vidés et leurs populations étant voisines. La raie D est au contraire très intense [grande différence de population entre $(+1)$ et $(+2)$].

La courbe en pointillé $\rho = 18$ correspond à une orientation plus faible. Les niveaux (-2) et (-1) sont moins bien vidés : la résonance A est plus forte que dans le cas précédent. Par contre, les niveaux $(+1)$ et $(+2)$ sont moins bien remplis, l'accumulation en $(+2)$ moins prononcée : la résonance D est donc ici plus faible que pour le cas $\rho = 30$.

Les expériences décrites ci-dessus doivent permettre une mesure des populations des divers sous-niveaux m_F des atomes orientés.

Manuscrit reçu le 10 octobre 1953.

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] KASTLER A. — *J. Physique Rad.*, 1950, **11**, 255; *Physica*, 1951, **17**, 191.
 [2] BROSSEL J., KASTLER A. et WINTER J. — *J. Physique Rad.*, 1952, **13**, 668.

- [3] HAWKINS W. B. et DICKE R. H. — *Phys. Rev.*, 1953, **91**, 1008.
 [4] BESSET C., HOROWITZ J., MESSIAH A. M. L., WINTER J. — *J. Physique Rad.*, 1954, **15**, fascicule de février.