



Polarisation nucléaire de ^3He gazeux par pompage optique laser

P.J. Nacher, M. Leduc, Gérard Trénec, F. Laloë

► To cite this version:

P.J. Nacher, M. Leduc, Gérard Trénec, F. Laloë. Polarisation nucléaire de ^3He gazeux par pompage optique laser. Journal de Physique Lettres, 1982, 43 (15), pp.525-529. 10.1051/jphyslet:019820043015052500 . jpa-00232087

HAL Id: jpa-00232087

<https://hal.science/jpa-00232087>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification

Physics Abstracts

29.25 — 32.80B — 42.60K — 67.90

Polarisation nucléaire de ^3He gazeux par pompage optique laser

P. J. Nacher, M. Leduc, G. Trénec et F. Laloë

Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'E.N.S., 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05, France

(Reçu le 13 mai 1982, accepté le 2 juin 1982)

Résumé. — Une polarisation nucléaire élevée, de l'ordre de 70 %, a été obtenue par pompage optique dans ^3He gazeux grâce à l'utilisation d'un laser à centres colorés (F_2^+* dans NaF) fournissant plusieurs centaines de milliwatts à la longueur d'onde $\lambda = 1,08 \mu\text{m}$.

Abstract. — A high nuclear polarization, of the order of 70 %, has been obtained in ^3He by optically pumping the gas with a colour centre laser (F_2^+* in NaF) delivering several hundred milliwatts at the wavelength $\lambda = 1.08 \mu\text{m}$.

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de polariser nucléairement ^3He en phase gazeuse. La plus simple dans son principe est probablement celle qui consiste à refroidir le gaz dans un champ magnétique élevé; cependant, dans un champ de 10^5 gauss et à une température de 1 K, la polarisation nucléaire d'équilibre n'est que de l'ordre de 1 %. D'autres méthodes permettent de créer cette polarisation sans recourir à des champs élevés, et l'on peut citer le pompage optique des mélanges alcalins-hélium [1] (voir dans [2, 3] la généralisation à d'autres gaz rares), l'utilisation d'effets complexes de transferts d'orientation dans les décharges d'hélium [4], et surtout la méthode du pompage optique « indirect » *via* le niveau métastable 2^3S , méthode mise au point par F. D. Colegrove, L. D. Schearer et G. K. Walters [5]. Cette dernière utilise la transition optique $2^3\text{S}-2^3\text{P}$ de l'hélium, de longueur d'onde $\lambda = 1,08 \mu\text{m}$, pour orienter le niveau métastable 2^3S , dont l'orientation est ensuite transférée au niveau fondamental au cours des collisions dites « d'échange de métastabilité ». Grâce à l'utilisation de lampes à décharge intenses pour produire la raie $\lambda = 1,08 \mu\text{m}$, il est possible de produire de cette façon des taux de polarisation nucléaires atteignant 15 à 20 % [6, 7, 8], mais guère plus, la limitation étant l'intensité des lampes à décharge (il semble en pratique difficile d'obtenir par ce type de technique un faisceau de pompage polarisé résonnant avec les atomes dont l'intensité sur la cellule dépasse 5 ou 10 mW). Il est cependant

intéressant de tenter d'obtenir des polarisations nucléaires plus élevées ; on peut en effet penser à des applications diverses, parmi lesquelles les suivantes :

- réalisation de cibles polarisées pour l'étude de réactions nucléaires [9, 10] ou de la capture de muons [11] ;
- réalisation de jets polarisés, soit d'ions $^3\text{He}^+$ [12], soit d'électrons [13], soit encore d'atomes métastables [14] ;
- mise en œuvre d'un maser Zeeman à ^3He [15] ou d'un magnétomètre [16] ;
- polarisation nucléaire de ^3He liquide, soit pur [17], soit dilué dans ^4He [18] ;
- études d'effets quantiques propres à $^3\text{He}\uparrow$ (hélium polarisé) à basse température [19, 20], telles que modification de la viscosité ou de la conductivité thermique (qui sont des fonctions quadratiques du taux de polarisation nucléaire P_n lorsque P_n est faible).

Ces différentes raisons nous ont poussés à utiliser un laser comme source de pompage optique. Le but de cette lettre est de montrer qu'un laser suffisamment puissant conduit effectivement à des polarisations nucléaires élevées dans un gaz de ^3He à température ordinaire, et de décrire quelques résultats obtenus à plus basse température (à 77 et 4,2 K). Un compte rendu préliminaire de cette étude peut être trouvé dans la référence [21].

Pour être utilisable de façon efficace au pompage optique de l'hélium, un laser doit être :

— continu, car un laser en impulsions ne pourrait fournir un temps de pompage moyen plus court que l'inverse de son taux de répétition ; de plus, des impulsions de forte puissance instantanée induiraient de l'émission stimulée (alors que, dans le cycle de pompage optique, c'est l'émission spontanée qui doit dominer si l'on veut préserver son efficacité) ;

— accordable ; ceci permet d'amener sa fréquence en coïncidence avec celle de résonance des atomes, et d'étudier l'efficacité des diverses composantes de structure fine et hyperfine de la raie $\lambda = 1,08 \mu\text{m}$;

— suffisamment monochromatique (pour que toutes les fréquences émises tombent à l'intérieur de la largeur Doppler de la raie d'absorption des atomes) et puissant pour créer une polarisation nucléaire élevée.

Après les premiers essais avec des lasers à colorants en pompage synchrone qui nous ont conduits à des puissances moyennes trop faibles [21], nous en sommes venus à l'utilisation d'un laser à centres colorés (F_2^+)* dans un cristal de NaF, mis au point récemment par L. Molle-nauer [22]. Comme dans les expériences décrites dans [21], l'excitation du laser à centres colorés était assurée par un laser à colorant H.I.T.C., lui-même pompé par un laser à Kr^+ de puissance. Cependant ce dernier était utilisé, non sur les raies infrarouges comme dans les essais précédents [21], mais sur les raies rouges à $\lambda = 647 \text{ nm}$ et 676 nm ; en augmentant la concentration de H.I.T.C., on obtient ainsi jusqu'à 1,5 W à $\lambda = 890 \text{ nm}$ [23]. Le laser à centres colorés est lui-même décrit dans la référence [24]. Pour l'expérience présente, ce laser fonctionnait simultanément sur trois modes distants approximativement de 150 MHz, ce qui permettait de mieux couvrir le profil d'absorption Doppler des atomes ^3He ($\approx 2 \text{ GHz}$ à 300 K). Dans ce but, la cavité décrite dans [24] a été légèrement modifiée, de façon à transformer le laser en anneau en laser à ondes stationnaires présentant une grande distance ($\sim 50 \text{ cm}$) entre le milieu amplificateur (le cristal) et les miroirs de bout de cavité.

Le faisceau laser à $1,08 \mu\text{m}$ était polarisé par une lame quart d'onde et étendu par un télescope de façon à avoir un diamètre de l'ordre de 4 cm à l'entrée de la cellule. Après traversée de celle-ci, la partie non absorbée du faisceau était réfléchi sur la cellule par un miroir de renvoi ; ce dispositif permettait d'exciter directement, avec les trois modes du laser, en tout six classes de vitesses atomiques différentes. Les cellules étaient des cylindres de pyrex scellés, de 5 cm de longueur et 5 cm de diamètre, remplis de gaz ^3He à des pressions allant de 0,1 à 3 torr. La cellule était placée au centre de bobines de Helmholtz produisant un champ magnétique B_0 de 5 gauss environ. Un champ RF transversal B_1 permettait d'effectuer la résonance magnétique nucléaire et de dépo-

lariser les atomes. L'homogénéité relative du champ B_0 sur le volume de la cellule était de l'ordre de 10^{-4} , de façon à ne pas raccourcir le temps de relaxation nucléaire T_1 de ^3He par des gradients magnétiques [25, 26].

La méthode de détection optique était celle décrite dans [27, 28], qui consiste à mesurer le taux de polarisation circulaire de la raie $\lambda = 668 \text{ nm}$ émise par la décharge, dans la direction du champ B_0 . Comparée à celle qui utilise l'absorption de la raie $\lambda = 1,08 \mu\text{m}$ [5, 6, 29], cette méthode possède l'avantage considérable de donner des signaux variant linéairement avec la polarisation nucléaire P_n (même lorsque P_n est de l'ordre de 1). De plus, elle a été calibrée par comparaison avec des mesures absolues de polarisation nucléaire P_n effectuées avec un magnétomètre à pompage optique [28, 30] ou par passage adiabatique rapide en résonance magnétique [31]. Du fait de l'existence des collisions dépolarisant le niveau 3^1D de ^3He dont est issue la raie $\lambda = 668 \text{ nm}$, le rapport entre P_n et le taux de polarisation $\mathcal{P}$ de cette raie dépend de la pression : pour une pression de 1 torr, il vaut 9,1, alors que pour une pression de 0,1 torr il n'est que de 6,9 (ces chiffres sont valables à température ordinaire) [28].

Nous avons mesuré la polarisation nucléaire P_n ainsi obtenue en fonction de la puissance I du laser, pour différentes valeurs de la fréquence du peigne des trois modes du laser à l'intérieur de la structure de la raie $2^3\text{S}_1-2^3\text{P}_{0,1,2}$ (qui s'étend à peu près sur 40 GHz). Nous avons déterminé qu'à température ordinaire la pression correspondant à la plus forte valeur de P_n se situe autour de 0,3 torr. Nous avons obtenu une valeur maximale de P_n de 69 % avec une puissance laser de 300 mW sur la composante 2^3S_1 ($F = 3/2$)- 2^3P_0 de la raie $1,08 \mu\text{m}$. La courbe en traits pleins de la figure 1 montre la dépendance de P_n en fonction de I ; la forme de cette courbe est assez bien décrite par un modèle dont le détail sera exposé dans un prochain article [32]. La figure 2 indique les valeurs maximales de P_n que nous avons obtenues à différentes pressions.

Nous avons recommencé la même étude à 77 K. La plus forte valeur de P_n enregistrée est de 52 % pour une pression de 0,3 torr. La courbe en pointillés de la figure 1 donne la valeur obtenue de P_n en fonction de la puissance du laser. La meilleure raie de pompage correspondait pour cette

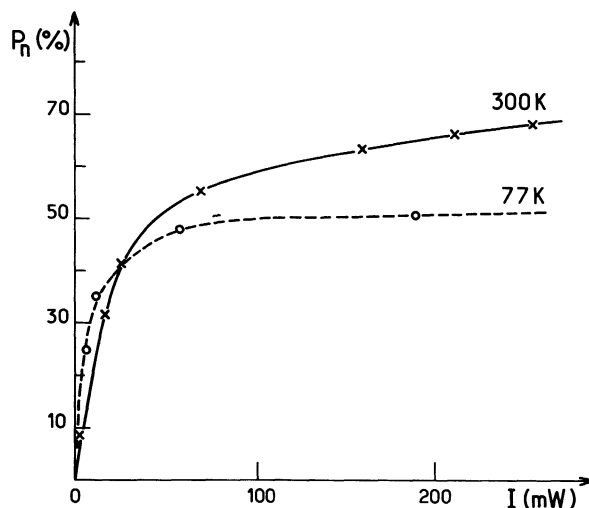


Fig. 1. — Polarisation nucléaire P_n obtenue par pompage optique dans une vapeur de ^3He à 0,3 torr de pression. En abscisse est portée l'intensité I du laser de pompage à $\lambda = 1,08 \mu\text{m}$. En traits pleins les résultats trouvés à 300 K, en pointillés ceux à 77 K.

[Nuclear polarization P_n obtained by laser optical pumping as a function of the laser power I at the wavelength $\lambda = 1.08 \mu\text{m}$. The pressure of ^3He gas was 0.3 torr. The full line gives the results at 300 K, the broken line at 77 K.]

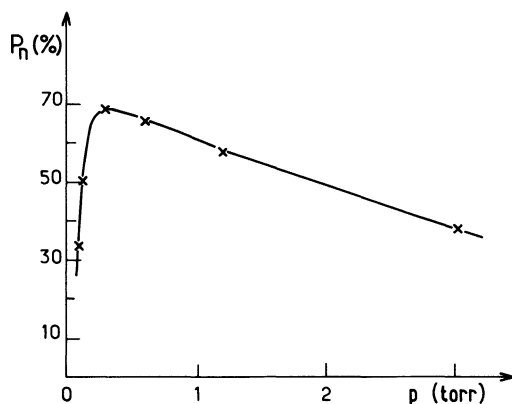


Fig. 2. — Valeur maximale de P_n obtenue à différentes pressions pour la même intensité du laser de pompage ($I \simeq 300$ mW) à 300 K.

[Maximum values obtained for P_n as a function of the ^3He gas pressure, for the same laser power ($I \simeq 300$ mW) at 300 K.]

température à la transition $2\ ^3\text{S}_1$ ($F = 1/2$)- $2\ ^3\text{P}_0$. On voit sur la figure 1 que la pente au départ de la courbe P_n fonction de I est plus forte à 77 K qu'à 300 K, ce qui s'explique qualitativement par le fait, que la largeur Doppler des atomes étant 2 fois plus faible à 77 K qu'à 300 K, la puissance du laser est mieux absorbée par les atomes. En revanche, un facteur défavorable est que la section efficace d'échange de métastabilité, qui assure le transfert d'orientation vers le fondamental, est nettement plus faible qu'à température ordinaire [33, 34, 35], ce qui peut expliquer une saturation plus sévère.

Enfin, nous avons fait des essais préliminaires de pompage de ^3He à 4,2 K. Nous avons pour cela utilisé des cellules identiques aux précédentes mais contenant, en plus de ^3He , de l'hydrogène sous une pression de 4 torr (mesurée à la température ordinaire). Selon la méthode décrite dans [36] et étudiée en détail par V. Lefèvre [31], l'hydrogène produit à 4,2 K un film solide sur les parois de la cellule, assurant ainsi de très longs temps de relaxation nucléaire T_1 pour les atomes de ^3He . Pour concentrer la puissance laser dans la structure Doppler à 4,2 K (~ 200 MHz) nous avons cette fois rendu le laser monomode avec l'un des dispositifs décrits dans [24]. Quelle que soit la fréquence du laser, la valeur de P_n atteinte n'a jamais dépassé 15 %. La saturation s'observe dès que la puissance laser dépasse 10 mW. Différentes explications sont possibles et l'étude expérimentale de ce problème est en cours.

En conclusion, les résultats obtenus semblent ouvrir la voie à l'étude de ^3He polarisé en phase gazeuse, bien que les polarisations obtenues à basse température restent encore modestes. On peut espérer améliorer ce dernier point par l'utilisation de deux lasers de façon à éviter le pompage hyperfin dans le niveau métastable $2\ ^3\text{S}_1$. Cependant la chute très rapide à basse température de la section efficace d'échange de métastabilité risque de limiter la valeur de P_n obtenue. Quoiqu'il en soit, les taux de polarisation atteints dans les meilleures conditions du pompage optique sont maintenant du même ordre que ceux obtenus en phase liquide par la méthode de la décompression rapide du solide polarisé ([37-40]).

Remerciements. — Les auteurs remercient vivement V. Lefèvre pour son aide dans divers domaines, en particulier les problèmes de pompage optique à basse température et de détection R.M.N. de la polarisation nucléaire. Ils remercient également L. Mollenauer dont l'aide et les conseils ont été déterminants au cours des premiers stades du développement d'un laser à $\lambda = 1,08\ \mu\text{m}$ dans notre laboratoire.

Bibliographie

- [1] BOUCHIAT, M. A., CARVER, T. R. and VARNUM, C. M., *Phys. Rev. Lett.* **5** (1960) 373.
- [2] GROVER, B. C., *Phys. Rev. Lett.* **40** (1978) 391 ;
VOLK, C. H., MARK, J. G. and GROVER, B. C., *Phys. Rev. A* **20** (1979) 2381.
- [3] KWON, T. M., MARK, J. G. and VOLK, C. H., *Phys. Rev. A* **24** (1981) 1894.
- [4] MCCALL, G. H. and CARVER, T. R., *Phys. Rev. Lett.* **19** (1967) 485.
- [5] COLEGROVE, F. D., SCHEARER, L. D. and WALTERS, G. K., *Phys. Rev.* **132** (1963) 2561.
- [6] DANIELS, J. M. and TIMSIT, R. S., *Can. J. Phys.* **49** (1971) 525, 539 and 545.
- [7] BLEY, P. and TUROWSKI, P., *Z. Angew. Phys.* **24** (1968) 57.
- [8] BECKMANN, R., HOLM, U. and LINDNER, B., *Z. Phys. A* **275** (1975) 319.
- [9] PHILLIPS, G. C., PERRY, R. R., WINDHAM, P. M., WALTERS, G. K., SCHEARER, L. D., COLEGROVE, F. D., *Phys. Rev. Lett.* **9** (1962) 502.
- [10] *Polarized targets and ions sources*, Proceedings of the International Conference held in Saclay (France), 1966, edited by la Direction de la Physique, CEN Saclay, B.P. n° 2, 91 Gif-sur-Yvette, France.
- [11] TELEGDI, V., communication privée.
- [12] BAKER, S. D., CARTER, E. B., FINDLEY, D. O., HATFIELD, L. L., PHILLIPS, G. C., STOCKWELL, N. D. and WALTERS, G. K., *Phys. Rev. Lett.* **20** (1968) 738.
- [13] MCCUSKER, M. V., HATFIELD, L. L. and WALTERS, G. K., *Phys. Rev. Lett.* **22** (1969) 817 ; *Phys. Rev. A* **5** (1972) 177.
- [14] RIDDLE, T. W., ONELLION, M., DUNNING, F. B. and WALTERS, G. K., *Rev. Sci. Instrum.* **52** (1981) 797.
- [15] ROBINSON, H. G. and THAN MYINT, *Appl. Phys. Lett.* **5** (1964) 116.
- [16] SCHEARER, L. D., COLEGROVE, F. D. and WALTERS, G. K., *Rev. Sci. Instrum.* **34** (1963) 1363.
- [17] MCADAMS, H. H. and WALTERS, G. K., *Phys. Rev. Lett.* **18** (1967) 436 ;
MCADAMS, H. H., *Phys. Rev.* **170** (1968) 276.
- [18] TABER, M. A., *J. Physique Colloq.* **39** (1978) C6-192 et Thèse, Stanford University (1978).
- [19] LHUILLIER, C. et LALOË, F., *J. Physique Colloq.* **41** (1980) C7-51.
- [20] BASHKIN, E. P. and MEYEROVICH, A. E., *J. Physique Colloq.* **41** (1980) C7-61.
- [21] LEDUC, M., TRÉNEC, G. et LALOË, F., *J. Physique Colloq.* **41** (1980) C7-75.
- [22] MOLLENAUER, L. F., *Opt. Lett.* **5** (1980) 188.
- [23] LEDUC, M. et TRÉNEC, G., *Revue Phys. Appl.* **17** (1982), 355.
- [24] TRÉNEC, G., NACHER, P. J. et LEDUC, M., soumis à *Opt. Commun.*
- [25] SCHEARER, L. D. and WALTERS, G. K., *Phys. Rev.* **139** (1965) A 1398.
- [26] BARBÉ, R., LEDUC, M. et LALOË, F., *J. Physique* **35** (1974) 699 et 935.
- [27] PAVLOVIĆ, M. et LALOË, F., *J. Physique* **31** (1970) 173.
- [28] PINARD, M., Thèse de 3^e cycle (1973) ;
PINARD, M. et VAN DER LINDE, J., *Can. J. Phys.* **52** (1974) 1615.
- [29] GREENHOW, R. C., *Phys. Rev.* **136** (1964) A 660.
- [30] COHEN-TANNOUDJI, C., DUPONT-ROC, J., HAROCHE, S., LALOË, F., *Phys. Rev. Lett.* **22** (1969) 758.
- [31] LEFÈVRE, V., communication privée.
- [32] NACHER, P. J. et LEDUC, M., en préparation.
- [33] COLEGROVE, F. D., SCHEARER, L. D. and WALTERS, G. K., *Phys. Rev.* **135** (1964) A 353.
- [34] ROSNER, S. D. and PIPKIN, F. M., *Phys. Rev. A* **5** (1972) 1909.
- [35] BARBÉ, R., *J. Phys. B* **9** (1976) 995.
- [36] BARBÉ, R., LALOË, F. et BROSSEL, J., *Phys. Rev. Lett.* **34** (1975) 1488.
- [37] CASTAING, B. et NOZIÈRES, P., *J. Physique* **40** (1979) 257.
- [38] CHAPELLIER, M., FROSSATI, G. and RASMUSSEN, F. B., *Phys. Rev. Lett.* **42** (1979) 904.
- [39] SCHUMACHER, G., THOULOZE, D., CASTAING, B., CHABRE, Y., SEGRANSAN, P., JOFFRIN, J., *J. Physique-Lett.* **40** (1979) L-143.
- [40] Voir les contributions des auteurs des références [37], [38], [39] au fascicule C7 du *J. Physique Colloq.* **41** (1980).