

JAERI-Research

98-065



レーザー誘起蛍光法によるウラン原子の
超微細構造と同位体シフトの測定

1998年11月

赤岡克昭・大場正規・若井田育夫・有澤 孝

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

レーザー誘起蛍光法によるウラン原子の超微細構造と同位体シフトの測定

日本原子力研究所関西研究所光量子科学センター
赤岡 克昭・大場 正規⁺・岩井田育夫⁺・有澤 孝

(1998年10月7日受理)

クヌーセンセル型の原子ビーム発生装置と2台のCWリングダイレーザーを用いてウラン235の0eV、2eVそして4eVの各エネルギーレベル間において25本のスペクトルをレーザー誘起蛍光法により測定し、今まで測定されていない9本のレベルの超微細構造定数を含め、全部で15本のレベルに関して超微細構造定数を決定した。更に、同位体シフトを10本のレベルについて測定した。

Measurement of the Hyperfine Structures and Isotope Shifts of
Uranium Atom by Laser Induced Fluorescence Method

Katsuaki AKAOKA, Masaki OHBA⁺,
Ikuo WAKAIDA⁺ and Takashi ARISAWA

Advanced Photon Research Center
(Tokai Site)
Kansai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 7, 1998)

We measured 25 atomic spectra and isotope shifts of uranium atom by laser induced fluorescence method, using 2 ring dye lasers and atomic beam source. Fifteen hyperfine structure constants including new 9 constants and 10 isotope shifts lying on 2 and 4eV energy levels were determined.

Keywords: Hyperfine Structure, Uranium, Spectroscopy, Laser, Atom, Isotope Shifts

⁺ Department of Materials Science, Tokai Research Establishment

目 次

1. はじめに	1
2. 実 験	1
3. 解析方法	2
4. 結 果	4
4.1 0eVと2eVのエネルギーレベルの超微細構造及び同位体シフト	4
4.2 4eVのエネルギーレベルの超微細構造及び同位体シフト	5
5. おわりに	6
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Experiments	1
3. Analysis of the Spectrum	2
4. Results	4
4.1 Hyperfine Structures and Isotope Shifts of 0 and 2eV Levels	4
4.2 Hyperfine Structures and Isotope Shifts of 4eV Levels	5
5. Conclusion	6
Reference	6

This is a blank page.

1 はじめに

原子法レーザー同位体分離はレーザー光の有する高い単色性と同位体間の微細なスペクトルの差である同位体シフトを利用して特定の同位体のみを選択的に励起・電離することにより分離する方法であり、天然に0.7%しか存在しない ^{235}U 等の重元素同位体を天然ウランから分離、濃縮するために非常に有用で効果的な方法である。原子法レーザー同位体分離をウラン濃縮に適用する場合、着目同位体である ^{235}U は3本のレーザー光を用いて選択励起、中間励起、電離の3段階でイオン化され回収される。核スピンの持たない ^{238}U が単純なエネルギー構造を持つのに比べ、核磁気双極子モーメント及び核電気4重極子モーメントを持ち原子核のスピンの $7/2$ である ^{235}U は ^{238}U に対応するエネルギーレベルが、更に8本以上の超微細構造と呼ばれる複雑なエネルギー構造に分裂する。これらのエネルギーレベルの組み合わせで決定されるスペクトルもまた分裂し広がるため ^{235}U の超微細構造スペクトルは ^{238}U のスペクトルと重なり、選択性や励起効率を悪くする。従って、選択性が良く、スペクトル広がり小さい励起・電離スキームを得るために、 ^{235}U の超微細構造と同位体シフトを詳細に調べる必要が有る。 ^{235}U の超微細構造は1970年代から精力的に測定されてきたが、公表されているものは少なく、我々の知る限り20レベルについてのみである¹⁾⁻¹³⁾。そこで、我々は原子法レーザーウラン濃縮における3段階光電離法に必要な超微細構造と同位体シフトについて、レーザー誘起蛍光法を用いた超高分解能分光を行った。これにより基底レベル、準安定レベル、選択励起レベル、そして中間励起レベルの16本のエネルギーレベルに対して、今まで測定されていない9本のレベルの超微細構造定数を含め、全部で15本のレベルの超微細構造定数を決定した。また、 ^{238}U に対する ^{235}U と ^{234}U の同位体シフトを10レベルについて測定した。

2 実験

実験はCWリングレーザーと原子ビームを用いてレーザー誘起蛍光法により原子の超微細構造や同位体シフトの高分解能分光を行った。実験装置の概略図をFig.1に示す。2台のアルゴンイオンレーザーを用いて2台のCWリングレーザーを発振波長幅が1MHz以下で発振させた。測定に用いた色素はローダミン6Gであり、その発振波長域は約560~620nmである。一方のレーザー光を偏光回転器を用いて偏光面を回転させ、他方のレーザー光と偏光ビームスプリッターによって結合した。この結合されたレーザー光は抵抗加熱型原子ビーム発生装置より発生したウラン原子ビームに対して直交する

ように入射し、更に、その蛍光をレーザービーム及び原子ビームの両方に直交する方向から観測した。蛍光は集光器により集光され、バンドル系 5.0mm ϕ の光ファイバーで焦点距離 25 cm の分光器に導かれ、光電子増倍管で検出される。分光器により最も S/N 比が高く検出することのできる蛍光スペクトルのみを分光することにより原子ビーム発生装置やレーザー光及び外界からの迷光を避けた。検出された信号はプリアンプを通して光子カウンターに導かれ X-Y レコーダーに記録される。測定されたスペクトルの間隔を正確に決定するためにレーザー光はフリースペクトルレンジ 150MHz、フィネス 200 の温度安定化されたファブリーペロー干渉計でモニターされ、スペクトルと共に X-Y レコーダーに記録される。原子ビーム発生装置内部は約 1×10^{-6} Torr の真空中に保たれ、コリメーターにより指向性が高くドップラー広がり少ない原子ビームを発生させることができるようになっている。用いられた 93%濃縮の ^{235}U 金属試料は内径 6.0mm、外径 10.0mm、高さ 20.0mm の単結晶タングステンのるつぼ内に収められ、その外側をイットリアのるつぼで、更にその外側をタングステンるつぼで保持されている。このるつぼはタングステン 4 層、モリブデン 3 層の熱遮蔽板で覆われたタングステンメッシュヒーターで約 1500°C に加熱される。熱遮蔽板の外側は外部の温度上昇を避けるために、水冷ジャケットで覆われ冷却されている。集光器は光反応部の蛍光を効率よく集めるために有効径 120mm、焦点距離 160mm の対物レンズと焦点距離 200mm の集光レンズの組み合わせで構成され、レーザーにより誘起させられた蛍光を集光率約 4% で光ファイバーに導いている。原子ビーム発生装置やレーザー光や外界の迷光を避けられるように、真空容器内部に種々の遮光板を設置してある。この実験で用いた原子ビーム発生装置と集光器の構造を Fig.2 に示す。

3 解析方法

^{235}U は核スピンの大きいため、そのエネルギースペクトルが 8 本以上の超微細構造レベルに分裂する。更に、上準位と下準位のエネルギーレベルの組み合わせで、超微細構造スペクトルが決まるため、一組の超微細構造スペクトルは 20 本以上のスペクトルから構成される。また、これを決定する超微細構造定数の誤差が大きいと超微細構造エネルギーレベルの入れ替わりが起こる可能性がある。そこで、測定されたスペクトルの相対位置と強度を元にカシミールの式とスペクトル強度から最小二乗法を用いて超微細構造定数を計算する計算コードを作成した。これにより、多くのレベルの超微細構造定数を高い精度で決定できるようになった。以下にその概要を示す。

核スピンの I である原子において、軌道電子の角運動量が J である場合のエネルギーレベルはこれら二つの角運動量の合成された全角運動量 F で特徴づけられた超微細構造

を持つ。原子核の磁気双極子モーメントに基づく超微細構造定数を A_J 、電気四重極子モーメントに基づく超微細構造定数を B_J とした時、超微細構造のエネルギーレベル $E_{I,J,F}$ はカシミールの式を用いて以下の様に表される。

$$E_{I,J,F} = E_J + \frac{1}{2} CA_J + \frac{3C(C+1) - 4I(I+1)J(J+1)}{8I(2I-1)J(2J-1)} B_J \quad (1)$$

$$C = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1) \quad (2)$$

$$|J-I| \leq F \leq |J+I| \quad (3)$$

但し、上式において超微細構造を持たない時のエネルギーレベルを E_J とした。観測されるスペクトルは初状態 $|I, J, F\rangle$ の超微細構造エネルギーレベル $E_{I,J,F}$ と終状態 $|I, J, F'\rangle$ のエネルギーレベル $E_{I,J,F'}$ との差として以下の様に表される。

$$\lambda(I, J, F; I, J', F') = |E_{I,J,F} - E_{I,J',F'}| \quad (4)$$

また、上述した2つの超微細構造エネルギーレベル間の観測された超微細構造スペクトルの強度 Q は初状態 $|I, J, F\rangle$ から終状態 $|I, J, F'\rangle$ への遷移についてウイグナーの6jシンボルを用いて以下の様に表される。

$$Q(I, J, F; I, J', F') \propto \frac{(2F+1)(2F'+1)}{2I+1} \left\{ \begin{matrix} J & F & I \\ F' & J' & I \end{matrix} \right\}^2 \quad (5)$$

観測された超微細構造は非常に複雑なスペクトル構造を示し、超微細構造の分裂したエネルギーレベルの数は $2J+1$ 個あるいは $2I+1$ 個のどちらか小さい方になる。²³⁵U の場合には核スピン $I=7/2$ であり、原子法レーザー同位体分離に利用されるエネルギーレベルの電子の軌道角運動量子数 J は核スピンよりも大きいために、その超微細構造エネルギーの数は $2I+1$ の8本になり、その超微細構造スペクトルはその遷移の選択則より22本のスペクトルが現れる。われわれが作成した解析コードにおいては、あらかじめ、核スピン角運動量 I と電子の軌道角運動量 J が判っているものとし、幾つかの強度の強い超微細構造スペクトルを用いて、そのスペクトルの初状態、終状態の合成角運動量 F, F' を同定し、超微細構造スペクトルの波長に対して最小二乗法を適用し、超微細構造定数 A, B を決定する。この解析コードにおいては、初状態と終状態の超微細構造定数 $A_{I,J,F}, B_{I,J,F}, A_{I,J',F'}, B_{I,J',F'}$ の他に $E_{I,J,F}$ と $E_{I,J',F'}$ の6変数が未知数となるが、最後の未知数を $E_{I,J,F} - E_{I,J',F'}$ と表した時、これはスペクトルの同位体シフトを示すので、未知数は5変数となるため、超微細構造スペクトルデータは最低5本以上必要になる。5本以上のスペクトルデータに最小二乗法を適用することにより、得られた超微細構造定数や同位体シフトは最小二乗法による統計誤差を含む。

4 結果

基底レベル，準安定レベル，選択励起レベル7本，そして中間励起レベル7本のエネルギーレベル間において26本の超微細構造スペクトル及び同位体シフトスペクトルを観測し，15本のエネルギーレベルについて超微細構造定数を，10本のエネルギーレベルについて同位体シフトを決定した．これらエネルギーレベルと遷移のスキームを測定された超微細構造スペクトルの図の番号と共に Fig.3 に示し，その結果得られた超微細構造定数及び同位体シフトを Table.1 に示す．表には，超微細構造定数 A, B と共に同定したエネルギーレベルとその配置、項，また，測定できた場合には ^{235}U 及び ^{234}U の同位体シフトを示した．更に，公表されているデータがある場合には表中に併記した．本方法による超微細構造定数は既報告と比べ妥当な値であると共に，精度も同等かそれ以上であることが確認できた．なお，超微細構造定数の後に示されている誤差は，最小二乗法により得られる統計誤差を示してある．複数のスペクトルにまたがるエネルギーレベルの超微細構造定数は先の解析方法で同定した超微細構造エネルギーレベルの結果を元に再度カシミールの式を用いて全てのデータについて最小二乗法により，超微細構造定数を決定した．

4.1 0eV と 2 eV のエネルギーレベルの超微細構造及び同位体シフト

基底レベル (0.0cm^{-1})，準安定レベル (620.323cm^{-1}) と選択励起レベル ($16505.773\sim 18406.522\text{cm}^{-1}$)間の超微細構造スペクトルは1台の CW リングレーザーの波長を掃引することによって測定した．この時のスペクトル幅は約 60MHz であった．測定した超微細構造スペクトル及び同位体シフトとその解析結果を Fig.4~Fig.12 に示す．それぞれは図の番号の後に記された a), b), c) の3種類の図で構成されており，a) は同位体シフトを明らかにするために ^{235}U と共に ^{238}U のスペクトルを同時に測定したスペクトルであり，解析した結果得られた ^{235}U のスペクトルの重心と ^{238}U のスペクトル，及び観測に掛かった場合には ^{234}U のスペクトルを同時に示した．b)は超微細構造を詳しく解析するために ^{235}U の超微細構造スペクトルにのみ着目して測定した結果である．スペクトルの頭にアルファベットで書いた記号 A, B, C..., a, b, c..., α , β , γ ... は上準位と下準位の核スピンを考慮した全角運動量の差 ΔF がそれぞれ，+1, 0, -1 に対応するものであり，超微細構造を解析して得られた結果を元に記した．また，c)は超微細構造スペクトルから得られた超微細構造定数 A, B を元に超微細構造スペクトルとそのエネルギーレベルを再現したものであり，実験結果をよく再現していることが判る．図の左側の再現された超微細構造スペクトルの横軸は超微細構造スペクトルの重心の周波数を 0 MHz として記述したものである．また，右図のエネルギーレベルの図に示され

た縦軸はエネルギーレベルのスケールを示し、超微細構造エネルギーレベルの重心を 0MHz として記述した。各エネルギーレベルの左右に書かれた半整数はそのエネルギーレベルの全角運動量量子数 F の値を示している。またエネルギーレベル間を結んだ矢印は各超微細構造間の最も遷移強度の強いスキームを示してあり、そのこに記述したアルファベットは図の b) で示した測定された超微細構造スペクトルのスペクトル内に記述したアルファベットに対応するものである。

4.2 4 eV のエネルギーレベルの超微細構造及び同位体シフト

中間励起レベルの超微細構造を測定するために、ウラン原子をまず前節「4.1 選択励起レベルの超微細構造及び同位体シフト」で同定した選択励起レベルのうち、遷移確率の大きい 16900cm^{-1} と 17362cm^{-1} 、二つの選択励起レベルのどちらか一方に励起した。これらの選択励起レベルへの励起には 1 台の CW リングレーザーを使用して $0-16900\text{cm}^{-1}$ (Fig.5) と $0-17362\text{cm}^{-1}$ (Fig.8) 及び $620-17362\text{cm}^{-1}$ (Fig.9) の 3 種類の選択励起遷移を利用した。選択励起レベルに励起された原子は、更にそこから、もう 1 台の CW リングレーザーを用いて中間励起レベル ($33421.069\sim 34659.215\text{cm}^{-1}$ Fig.13~21) に励起され、レーザー誘起蛍光法によりそれぞれの超微細構造スペクトルを測定した。1 台目のリングレーザーによっては選択励起レベルの超微細構造エネルギーレベル 8 本中のうち 1 本にしか励起できないために、超微細構造スペクトルのうち遷移の強い励起を利用し、複数の超微細構造間のスペクトルを測定し合成することにより、一連の超微細構造スペクトルの組を得た。この時のスペクトル幅は約 100MHz であった。測定した超微細構造スペクトルとその解析結果を Fig.13~Fig.21 に示す。エネルギーレベル 34160.569cm^{-1} は $0-16900\text{cm}^{-1}$ (Fig.5) と $620-17362\text{cm}^{-1}$ (Fig.9) の二つの遷移を利用して二つの超微細構造スペクトル (それぞれ, Fig.16 と Fig.19) から超微細構造定数を求め、 34659.215cm^{-1} は $0-16900\text{cm}^{-1}$ (Fig.5) と $0-17362\text{cm}^{-1}$ (Fig.8), $620-17362\text{cm}^{-1}$ (Fig.9) の三つの遷移を利用して超微細構造スペクトル (それぞれ, Fig.17 と Fig.18, 21) から定数を求めた。Fig.13~Fig.21 のそれぞれは前節「4.1」と同様に図の番号の後に記された a), b) の 2 種類の図で構成されており、a) は測定した ^{235}U の超微細構造スペクトルであり、解析の結果得られたそれぞれのスペクトルの全角運動量量子数 F と共に超微細構造スペクトル全体の重心も示した。更に測定したスペクトルの横には、選択励起レベルのスペクトルの指標として前節「4.1」で示したアルファベット (A, B, C..., a, b, c..., α , β , γ ...) と共に、関与した選択励起レベルの全角運動量量子数 F も合わせて記述した。また、b) も 4.1 と同様に超微細構造スペクトルから得られた超微細構造定数 A, B を元に超微細構造スペクトルとそのエネルギーレベルを再現したものを示した。

5 おわりに

レーザー誘起蛍光法により ^{235}U の高分解能分光測定を行った。超微細構造スペクトルを 25 本測定することにより、今まで決定されていない 9 レベルの超微細構造定数を含め 15 レベルについて超微細構造定数を決定した。更に、選択励起レベルについては ^{238}U に対する ^{235}U と ^{234}U の同位体シフトを 10 レベルについて測定した。

レーザー誘起蛍光法と超微細構造定数を決定する計算コードにより、ウラン濃縮に不可欠な超微細構造と同位体シフトを高い精度で決定できるようになった。

参考文献

- 1) S. Gerstenkorn, P. Loc and Cl. Banchearnoult, J. Phys. (Paris) 34, 805(1973)
- 2) J. A. Paisner, C. A. May, L. R. Carlson, E. F. Worden, S. A. Jhonson and R. W. Solarz, UCRL-78736, Sept. 30(1976)
- 3) H. D. V. Bohm, W. Michaelis and C. Weitkamp, Optics Comm. 26, 177(1978)
- 4) D. J. H Wort, C. G. Brown and R. D. Plumbe, J. Phys. E, 12, 829(1979)
- 5) L. A. Hackel, C. F. Bender, M. A. Johnson, and M. C. Rushford, Opt. Soc. Am 69, 230(1979)
- 6) W. J. Childs, O. Poulsen, and L. S. Goodman, Opt. Lett. 4, 35(1979)
- 7) W. J. Childe, O. Poulsen and L. S. Goodman, Opt. Lett. 4, 63(1979)
- 8) S. J. Goodship, P. T. Greenland and D. J. H. Wort, AERE-TP--883 APR. (1981)
- 9) R. Avril, M. de LabacheIlerie, F. Viala, and A. Petit, J. Less Common, Metals122. 47(1986)
- 10) Y. Demers, J. M. Gange, C. Dreze, and P. Pianarosa, J. Opt. Soc. Am. B, 3. 1678(1986)
- 11) J. Blaise and L. J. Radziemski, Jr., J. Opt. Soc. Am. 66, 644(1976)
- 12) R. Engleman, Jr. and B. A. Palmer, J. Opt. Soc. Am. 70, 308(1980)
- 13) R. Avaril, A. Petit, J. Radwan, E. Vors, JAERI-CONF 95-005, 425(1994).

Table 1 Summary of ^{235}U hyperfine structure constant, and ^{235}U and ^{234}U isotope shift obtained by laser induced fluorescence.

Energy level (cm ⁻¹)	Configuration Term	Hyperfine structure constant		Isotope shift	
		Our works (MHz)	Published (MHz)	Our works (MHz)	Published (MHz)
0.000	f^6ds^2 $^5L^{\circ}6$	A=-61±1.4 B=4120±54	-60.559±0.003 41-4.14±0.20 (Ref.6)	$^{235}\text{U}=0$ $^{234}\text{U}=0$	0 0
620.323	f^3ds^2 $^5K^{\circ}5$	A=-68.1±0.12 B=33±4.2	-68.3457±0.0010 40.110±0.030 (Ref.7)	$^{235}\text{U}=0$ $^{234}\text{U}=0$	0 183
16505.733	f^3s^2p 5K6	A=-74.91±0.068 B=3104±2.8		$^{235}\text{U}=5385$	5700 6359
16900.387	f^3dsp 7M7	A=-170.1±0.20 B=2643±8.3	-170.0±0.3 2636±6 (Ref.6)	$^{235}\text{U}=-8388$ $^{234}\text{U}=-10034$	-8400 -10130
17070.469	5L6	A=-131.7±0.11 B=2271±4.3	-131.0±0.3 2219±5 (Ref.7)	$^{235}\text{U}=-2268$ $^{234}\text{U}=-2609$	-1600 -2689
17361.895	f^3dsp 7L6	A=-95.39±0.082 B=2777±3.2	-98.3±2.7 2807±80 (Ref.9)	$^{235}\text{U}=-4982$	-4800 -5924
18185.999	4	A=-59.6±0.26 B=775±8.7		$^{235}\text{U}=1247$	1200 1550
18253.870	f^4s^2 3K6	A=-71.8±0.12 B=2119±7.9		$^{235}\text{U}=-2354$	-1900 -2683
18406.522	f^3dsp 7K5	A=-110.9±0.15 B=93±5.3		$^{235}\text{U}=-6933$ $^{234}\text{U}=-8288$	-6600 -8178
33421.069	F^3ds8s $^7L^{\circ}6$	A=-0.5±0.52 B=3460±20			-10800 -12804
33752.026	$^{\circ}6$	A=-78.4±0.37 B=1060±15			-18300
33907.155	$^{\circ}6$	A=-79.9±0.38 B=1170±15			-17400
34160.569	f^4dp $^7M^{\circ}6$	A=-81.8±0.25 B=1089±9.9			-23100 -27696
34372.982	f^4dp $^{\circ}6$	A=-76.7±0.17 B=1012±6.8			-18450
34659.215	f^3ds8s $^7L^{\circ}7$	A=-167.4±0.27 B=2740±13	169±2.1 2794±87 (Ref.13)		-15150 -17580

The isotope shifts for ^{235}U are referred to Ref.11 and those for ^{234}U are to Ref.12.

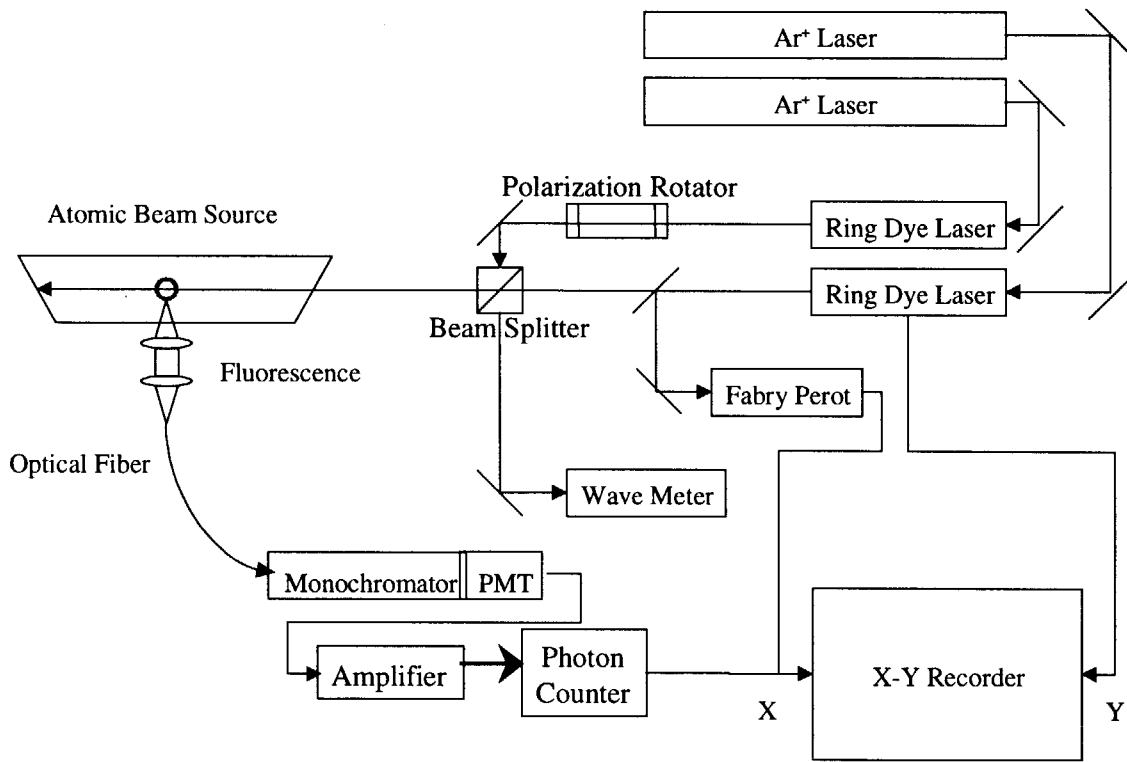


Fig.1 Experimental setup

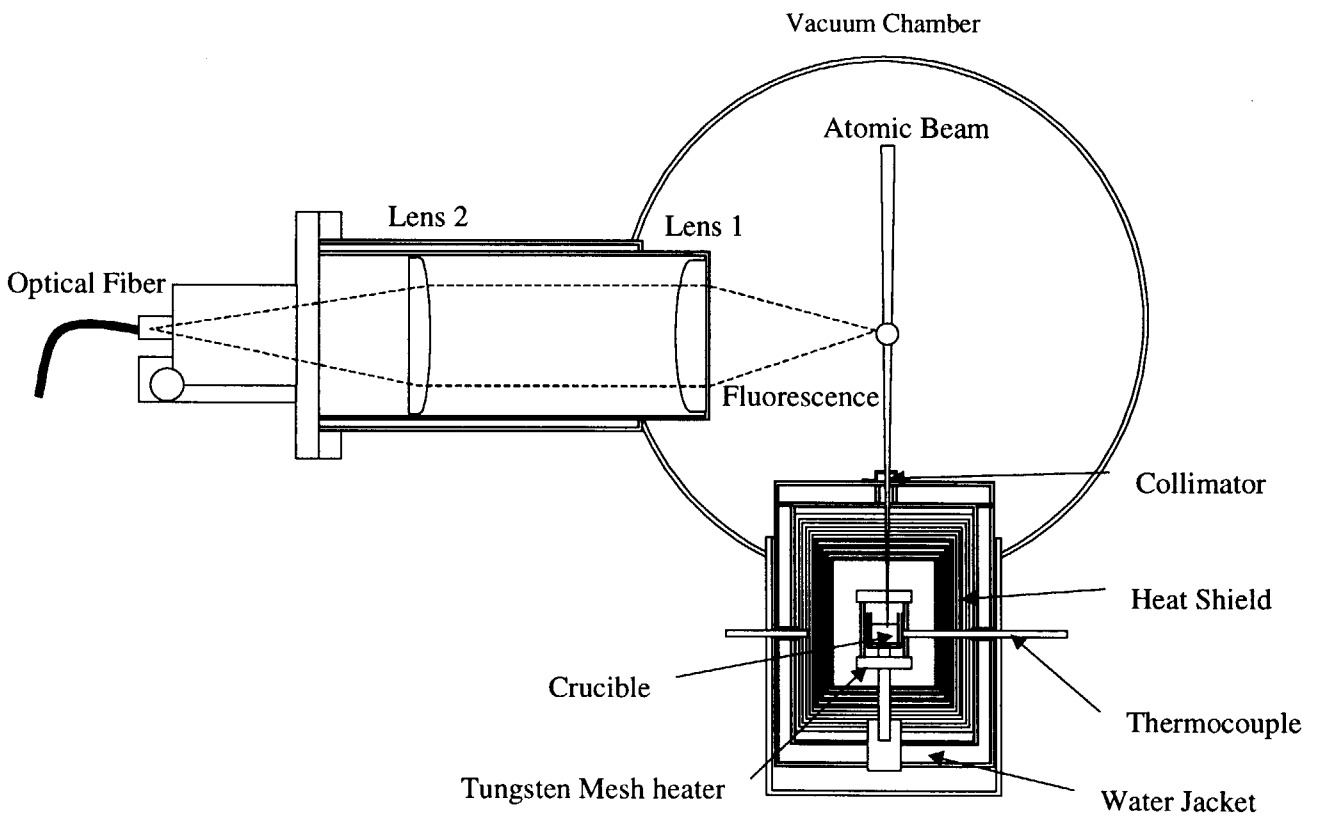


Fig.2 Atomic Beam Source

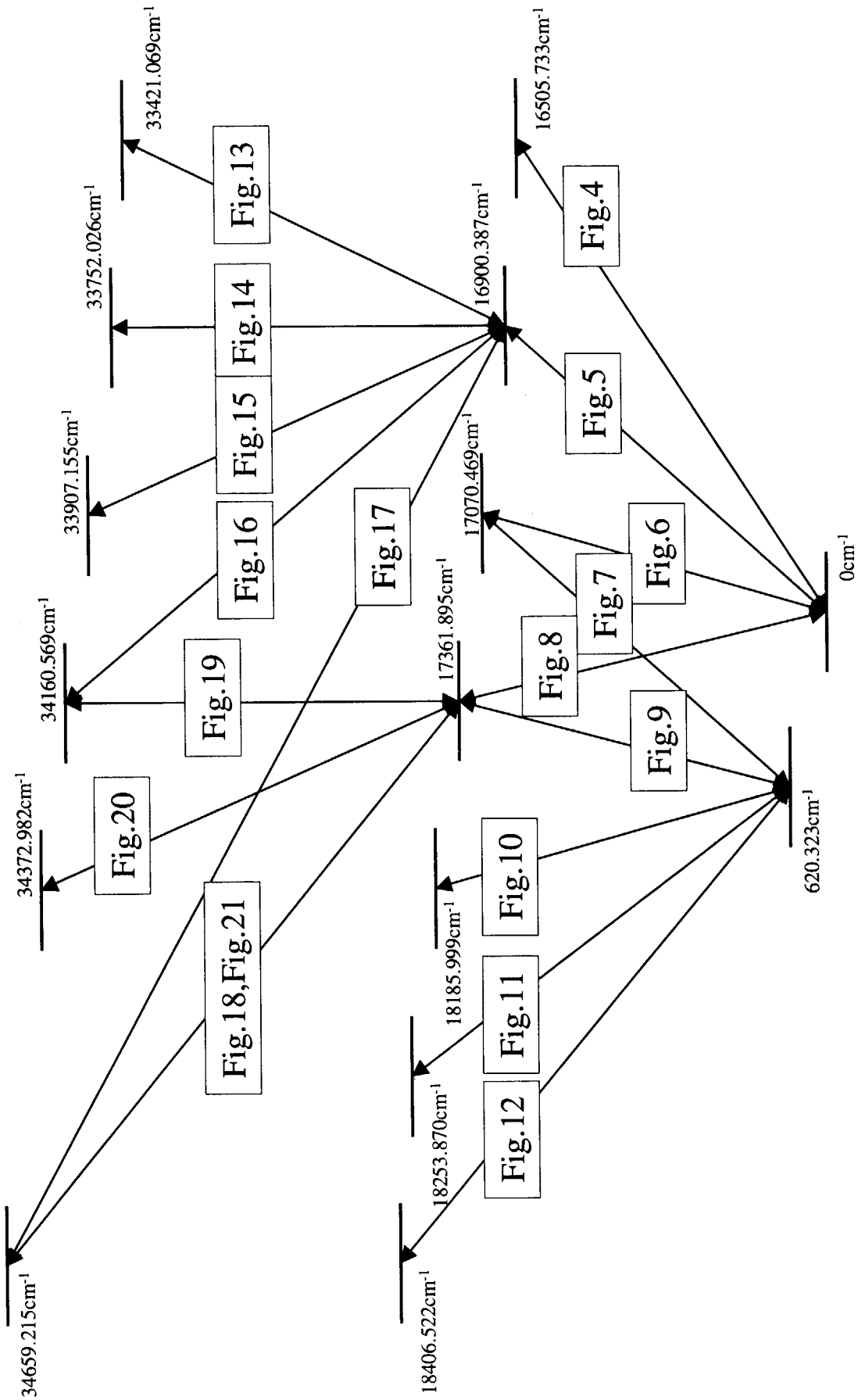


Fig.3 Energy levels and transition schemes for measurements of hyperfine spectra

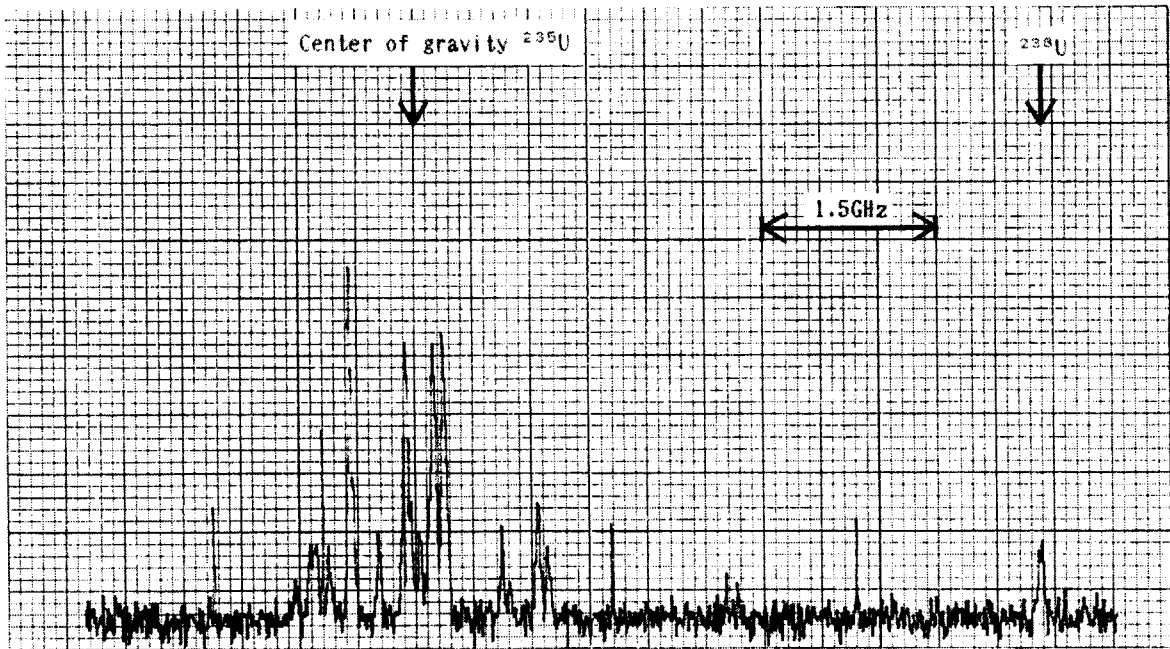


Fig.4 a) Hyperfine spectra and isotope shift of the 0-16505 transition. (The fluorescence of 16505-620 transition was measured.)

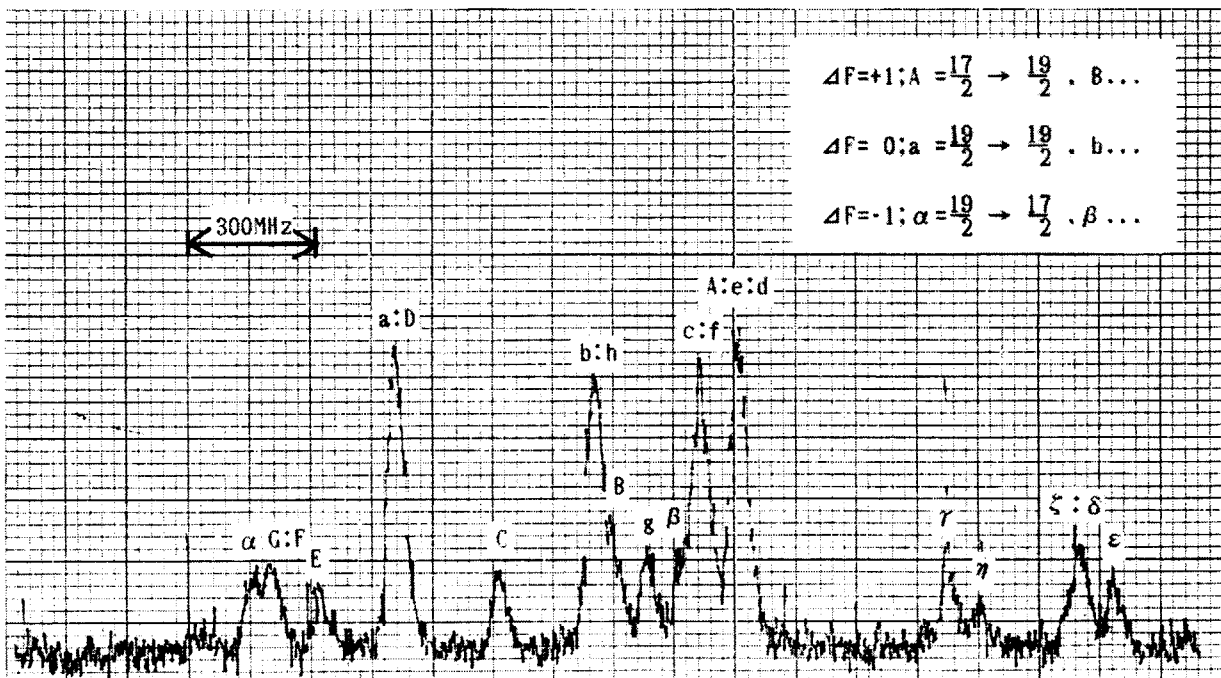


Fig.4 b) Hyperfine spectra of the 0-16505 transition. (The fluorescence of 16505-620 transition was measured.)

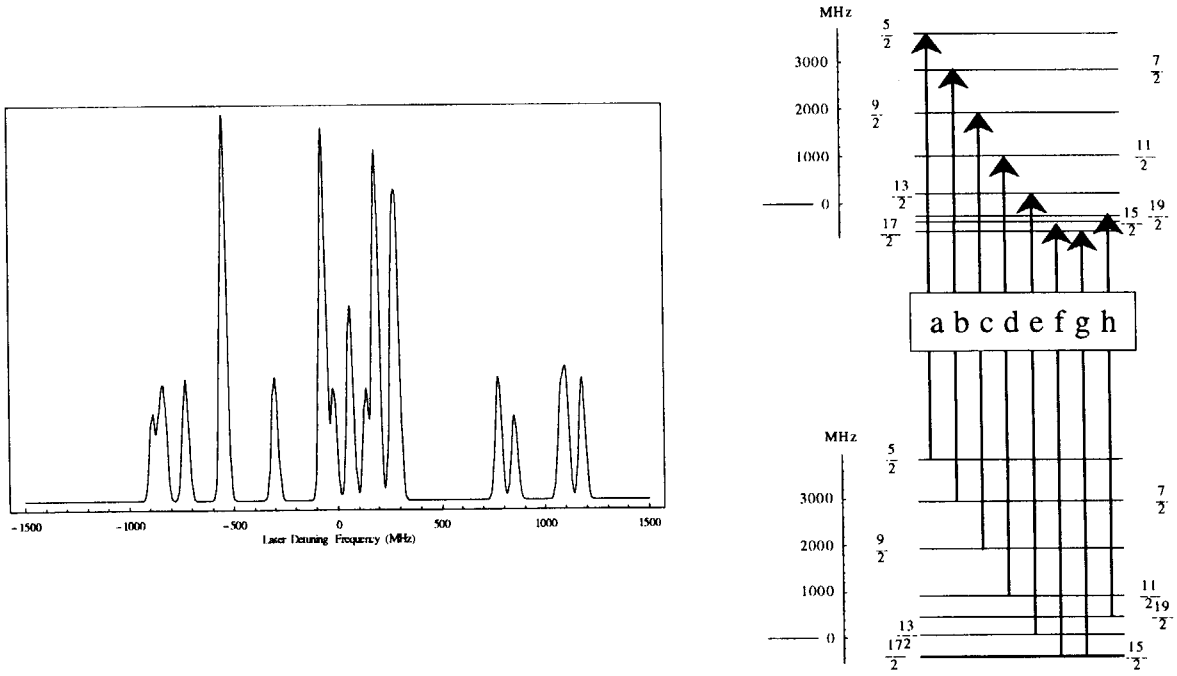


Fig.4 c) The Analysis of the hyperfine structure for the 0-16505 transition .

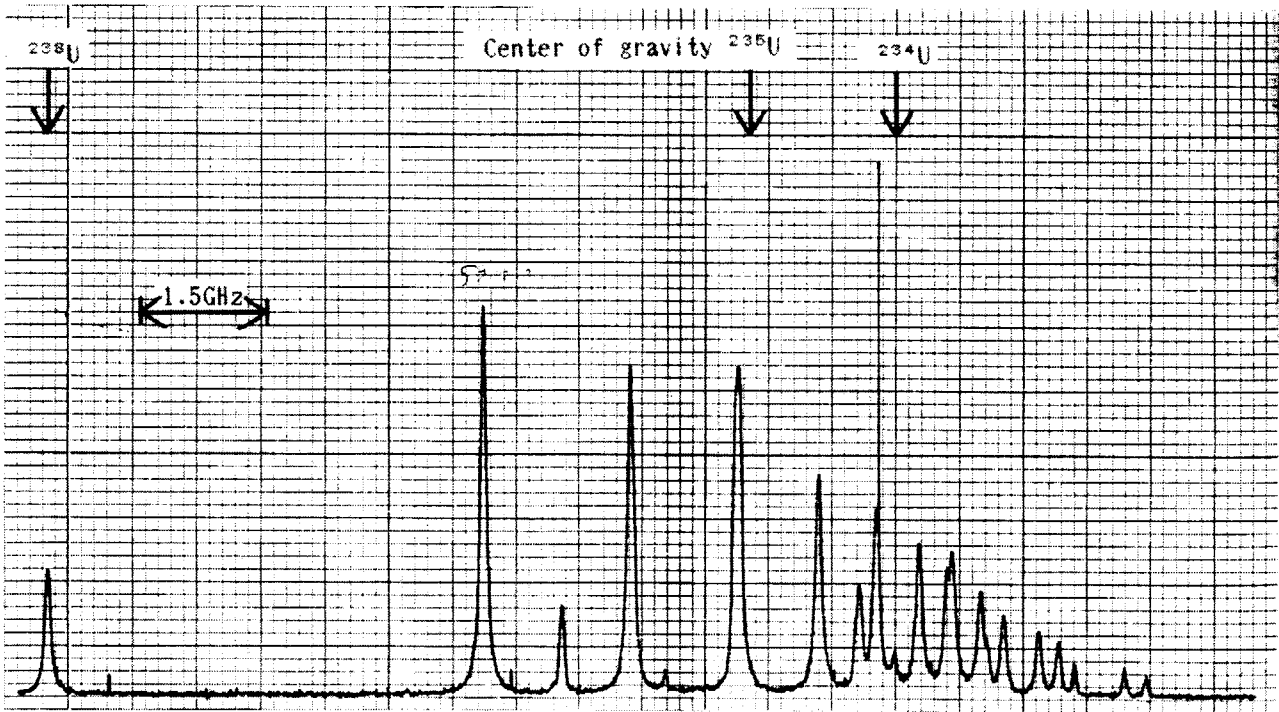


Fig.5 a) Hyperfine spectra and isotope shift of the 0-16900 transition.
(The fluorescence of 16900-0 transition was measured.)

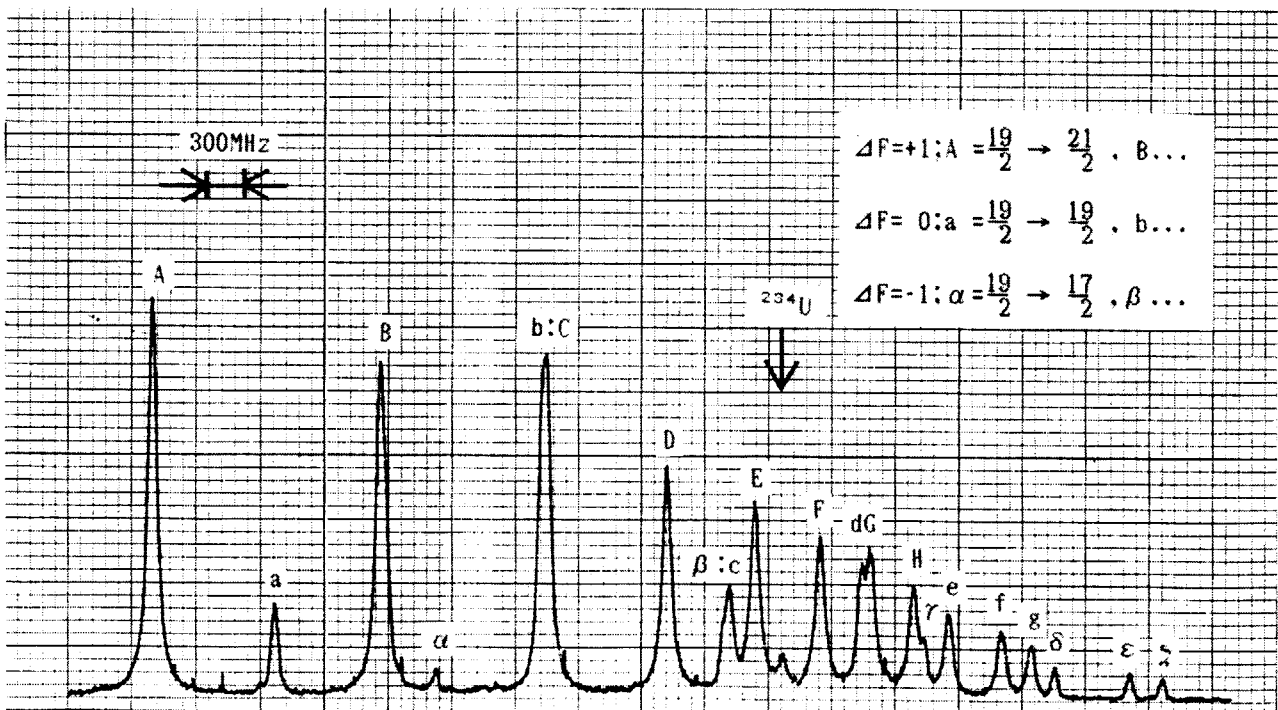


Fig.5 b) Hyperfine spectra of the 0-16900 transition.
(The fluorescence of 16900-0 transition was measured.)

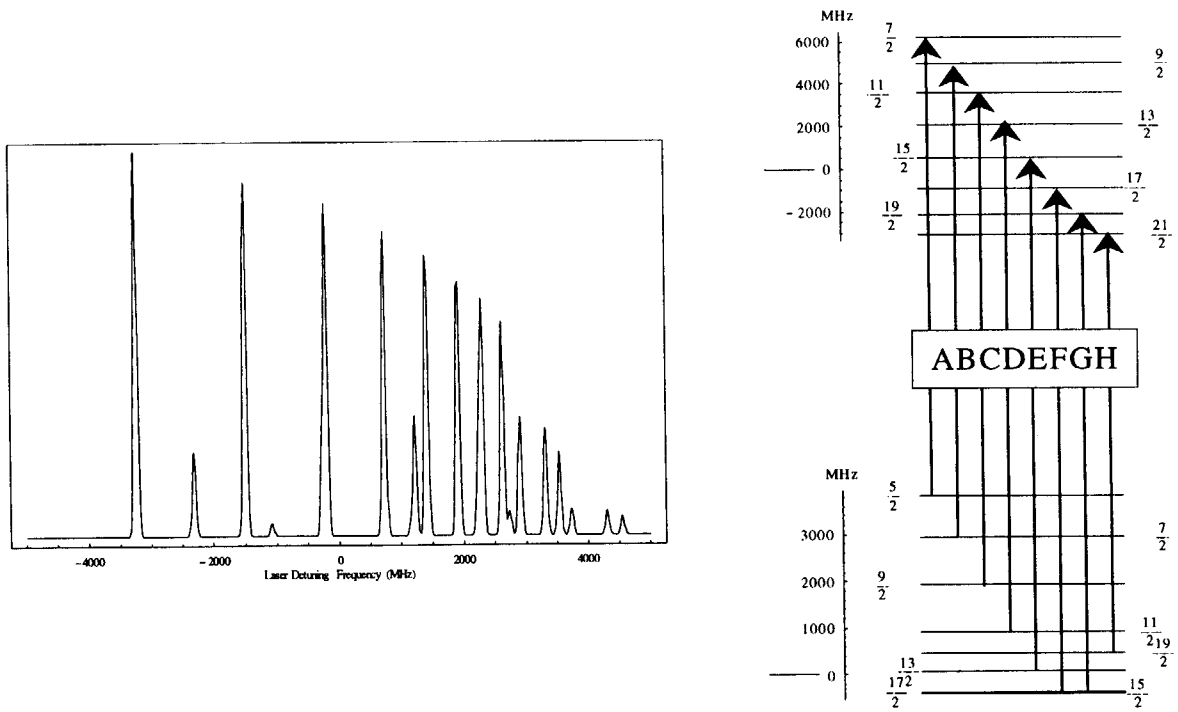


Fig.5 c) The Analysis of the hyperfine structure for the 0-16900 transition .

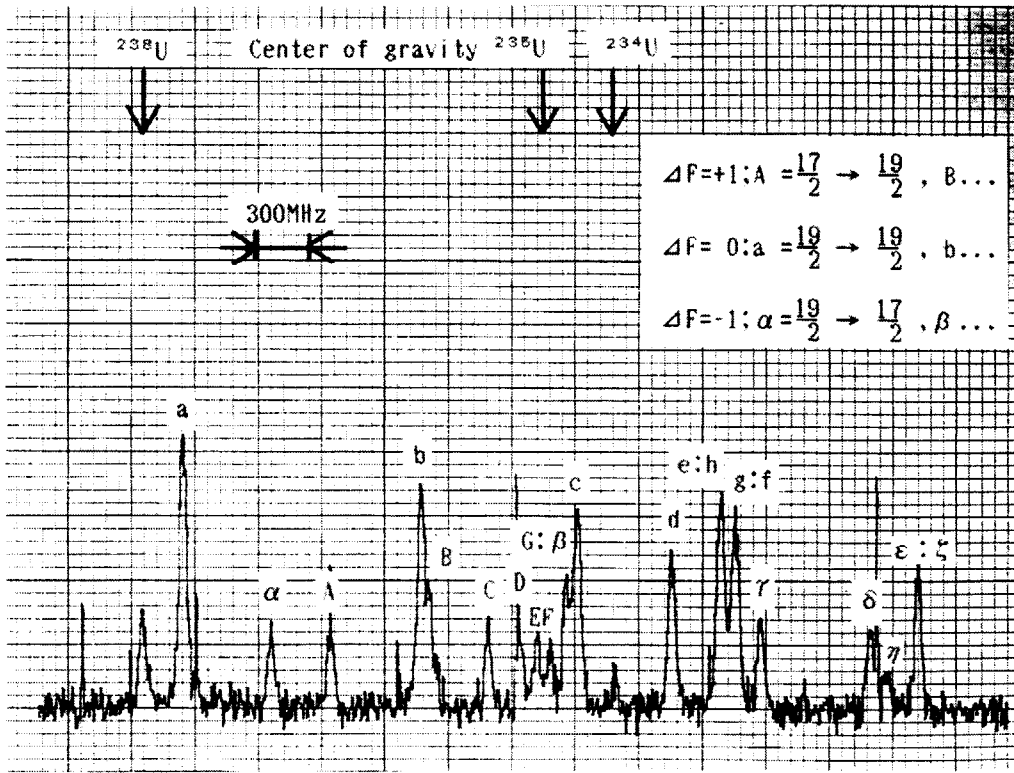


Fig.6 a),b) Hyperfine spectra and isotope shift of the 0-17070 transition. (The fluorescence of 17070-620 transition was measured.)

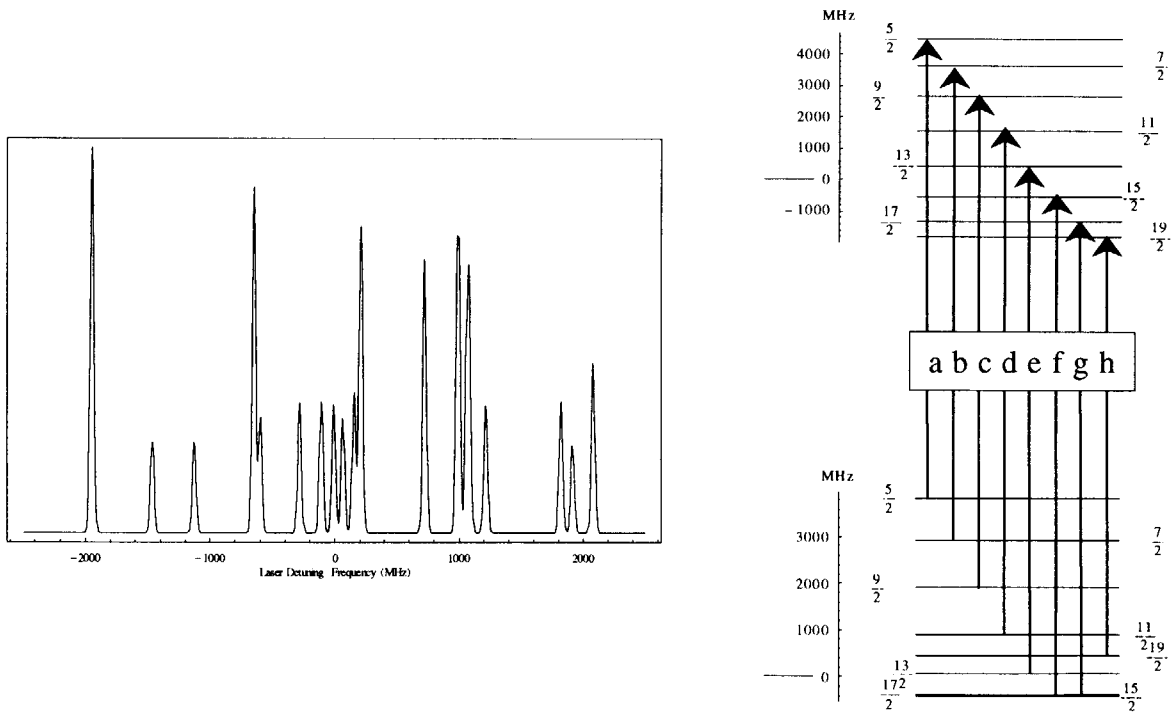


Fig.6 c) The Analysis of the hyperfine structure for the 0-17070 transition .

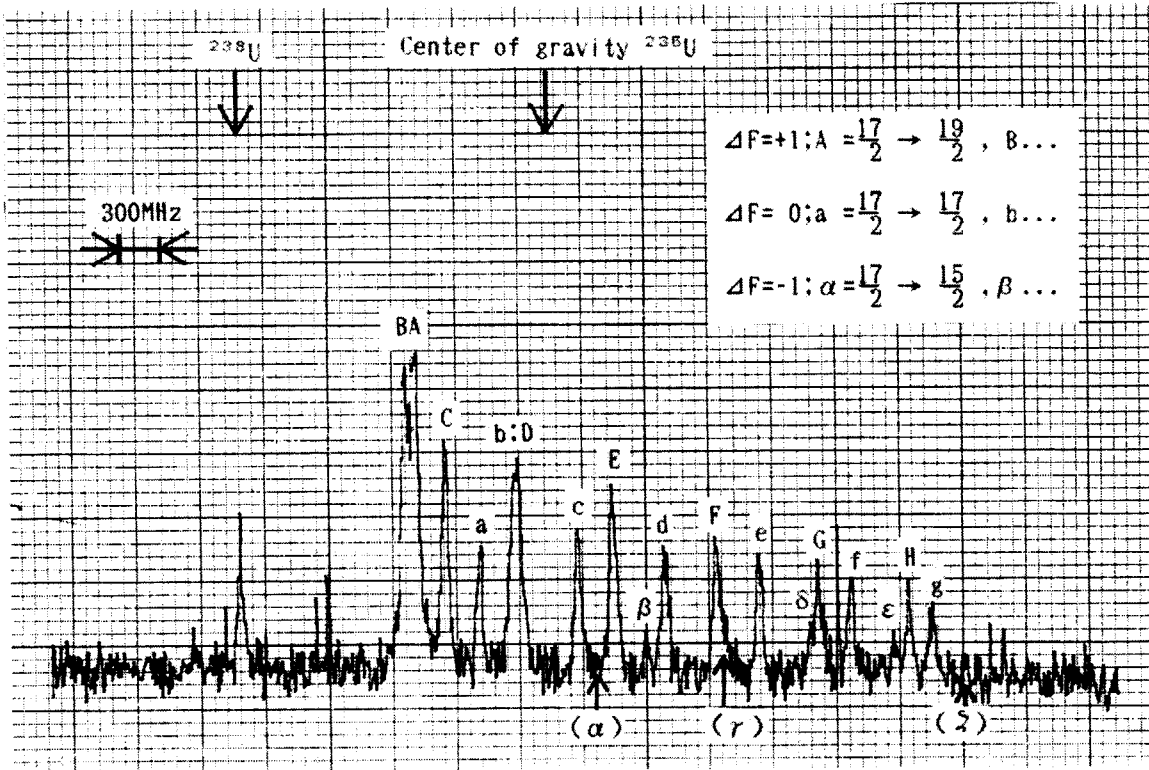


Fig.7 a),b)Hyperfine spectra and isotope shift of the 620-17070 transition. (The fluorescence of 17070-620 transition was measured.)

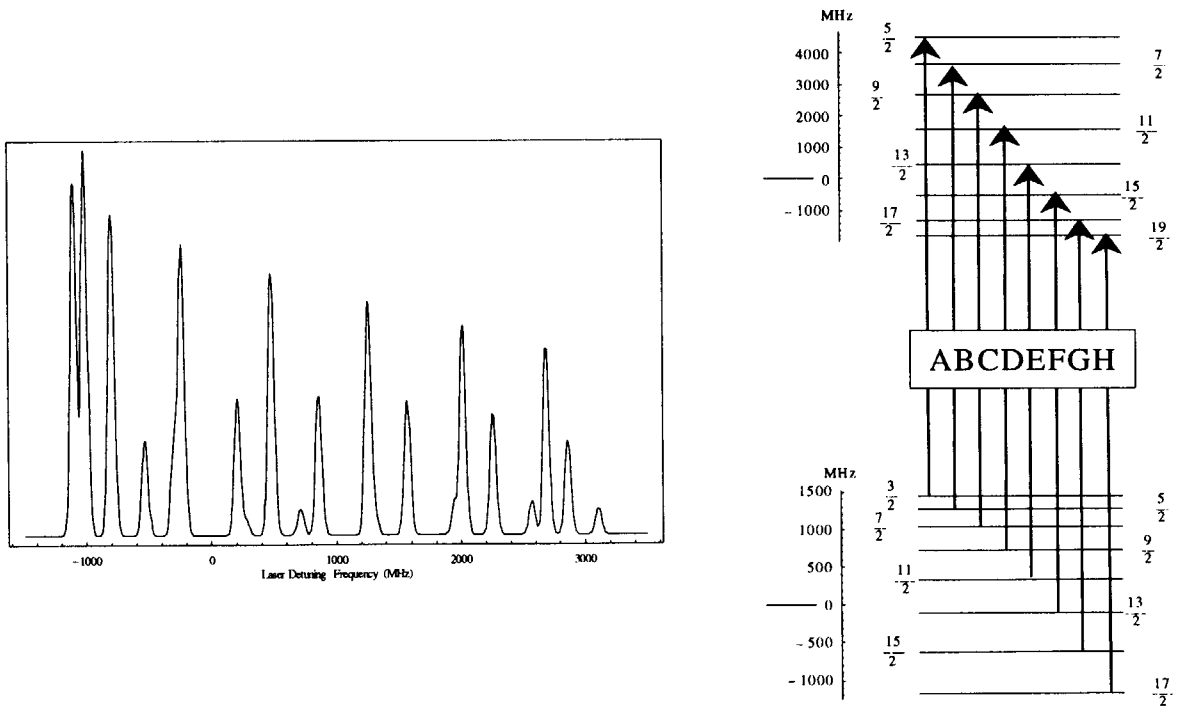


Fig.7 c) The Analysis of the hyperfine structure for the 620-17070 transition .

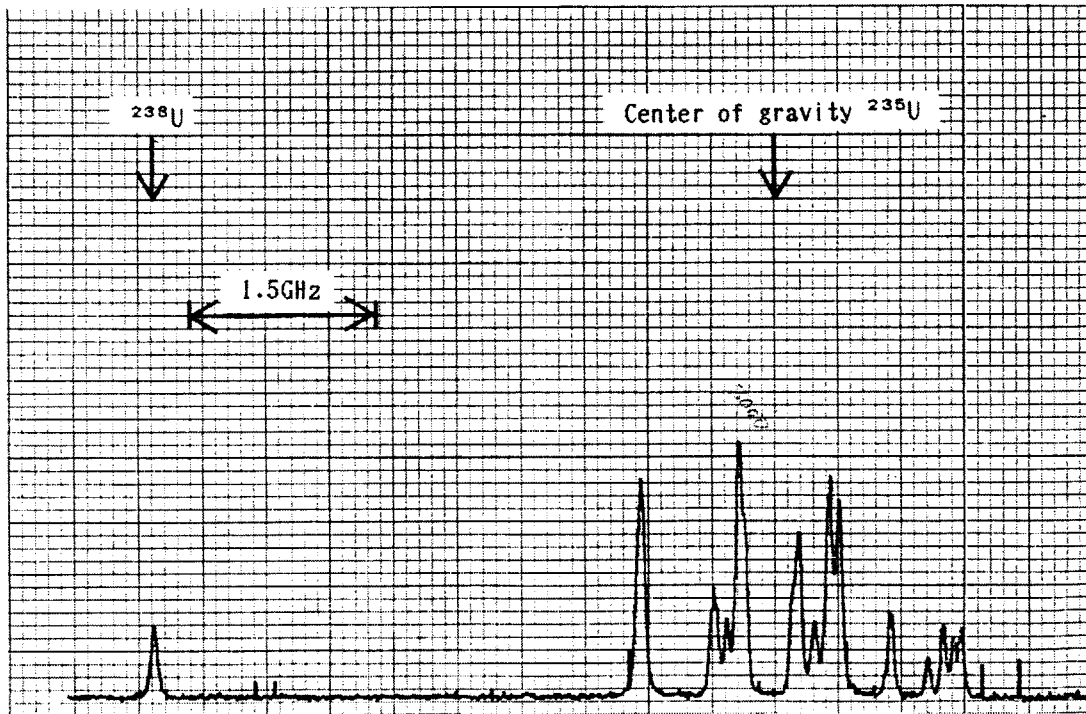


Fig.8 a)Hyperfine spectra and isotope shift of the 0-17362 transition.
(The fluorescence of 17362-620 transition was measured.)

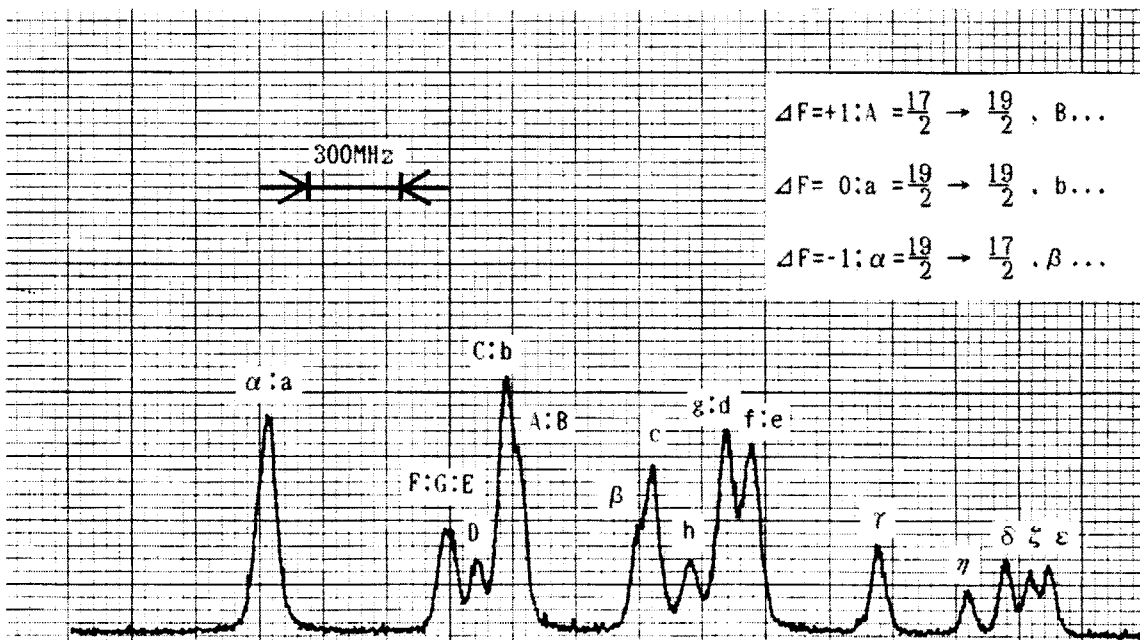


Fig.8 b)Hyperfine spectra of the 0-17362 transition.
(The fluorescence of 17362-620 transition was measured.)

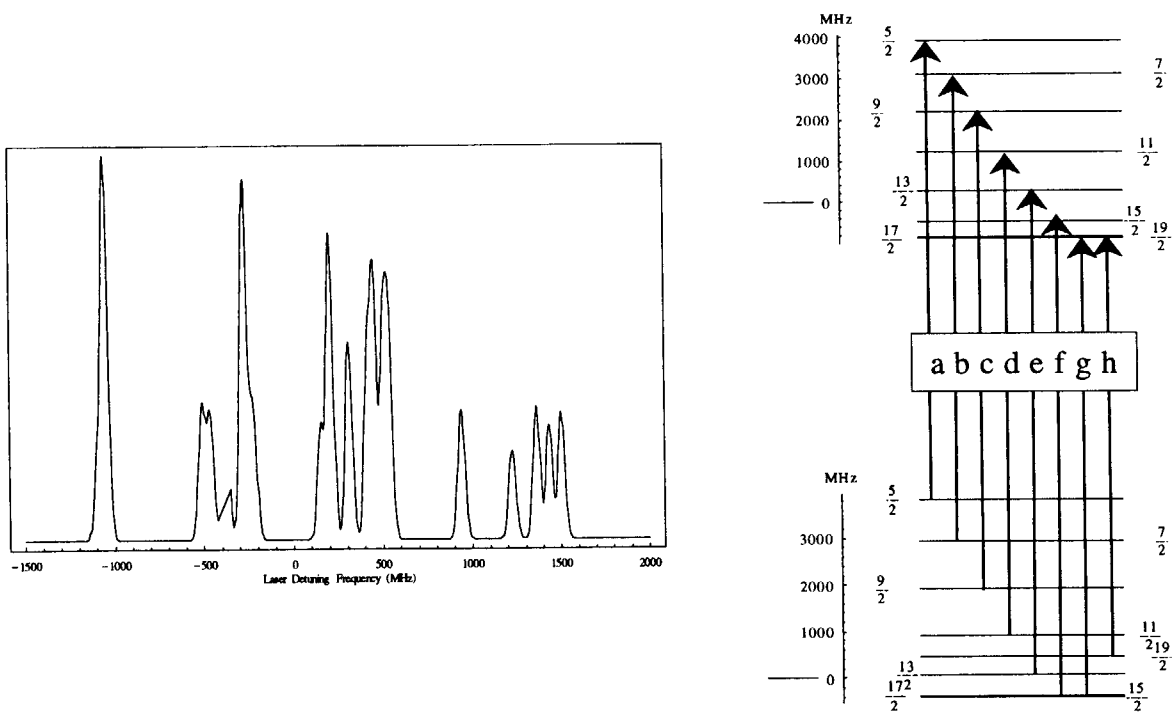


Fig.8 c) The Analysis of the hyperfine structure for the 0-17362 transition .

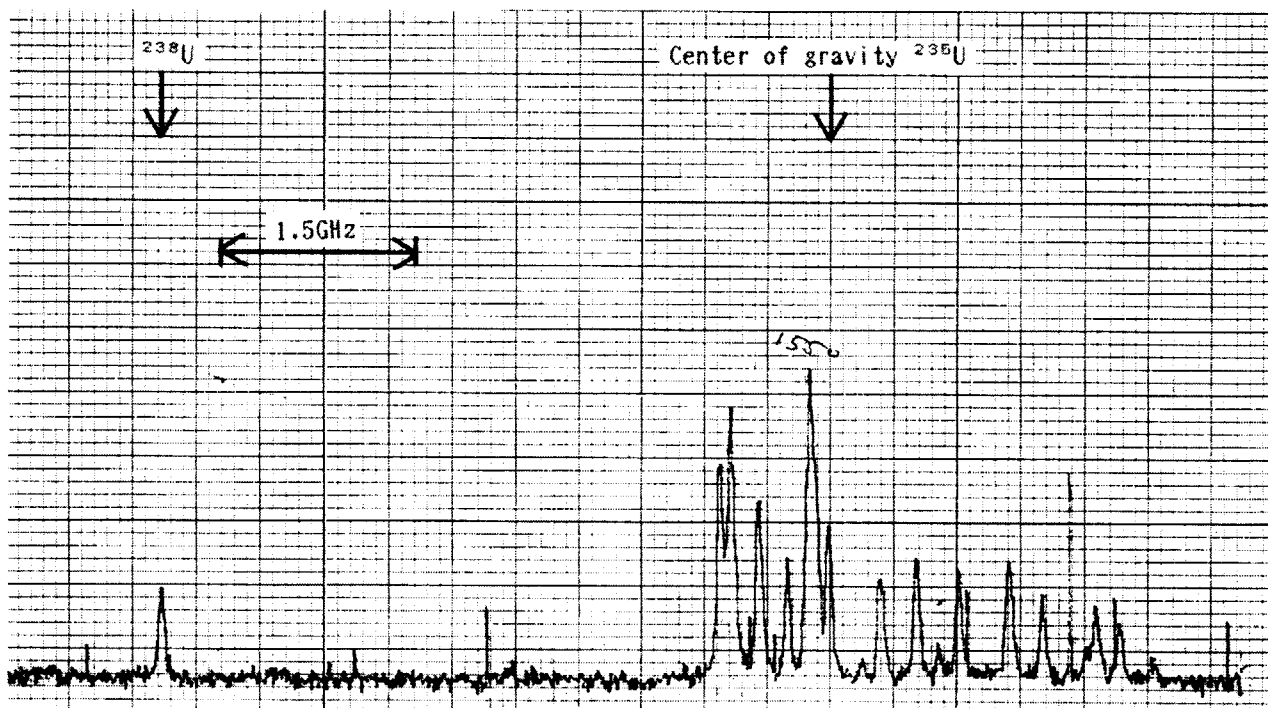


Fig.9 a) Hyperfine spectra and isotope shift of the 620-17362 transition. (The fluorescence of 17362-620 transition was measured.)

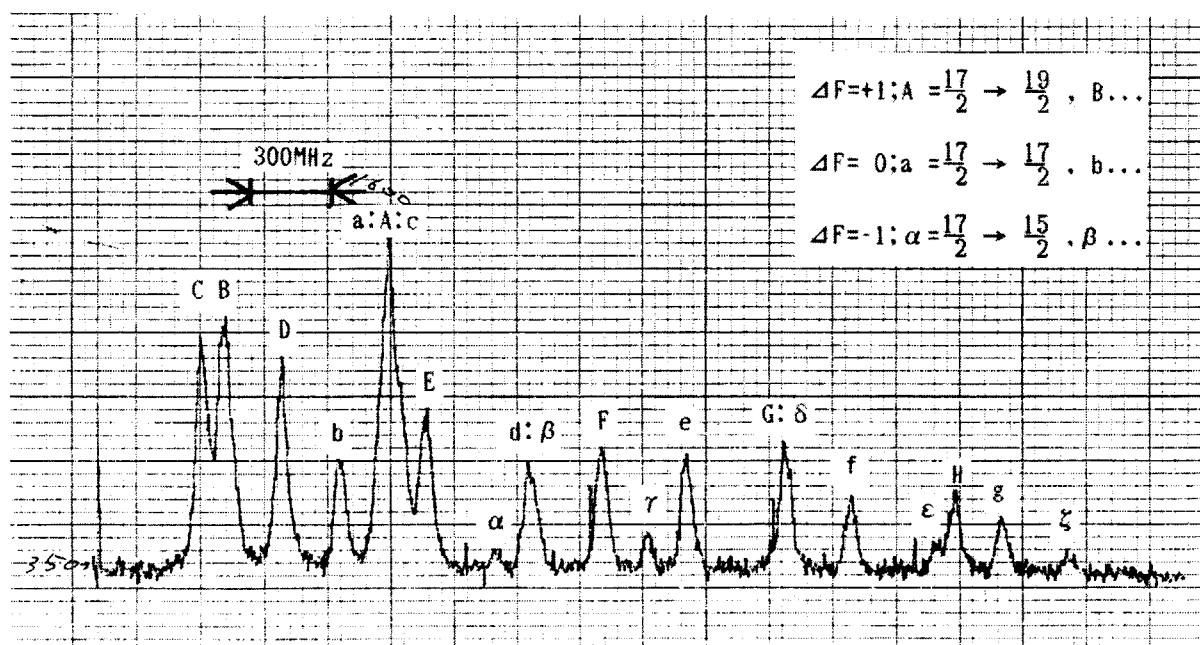


Fig.9 b) Hyperfine spectra of the 620-17362 transition. (The fluorescence of 17362-620 transition was measured.)

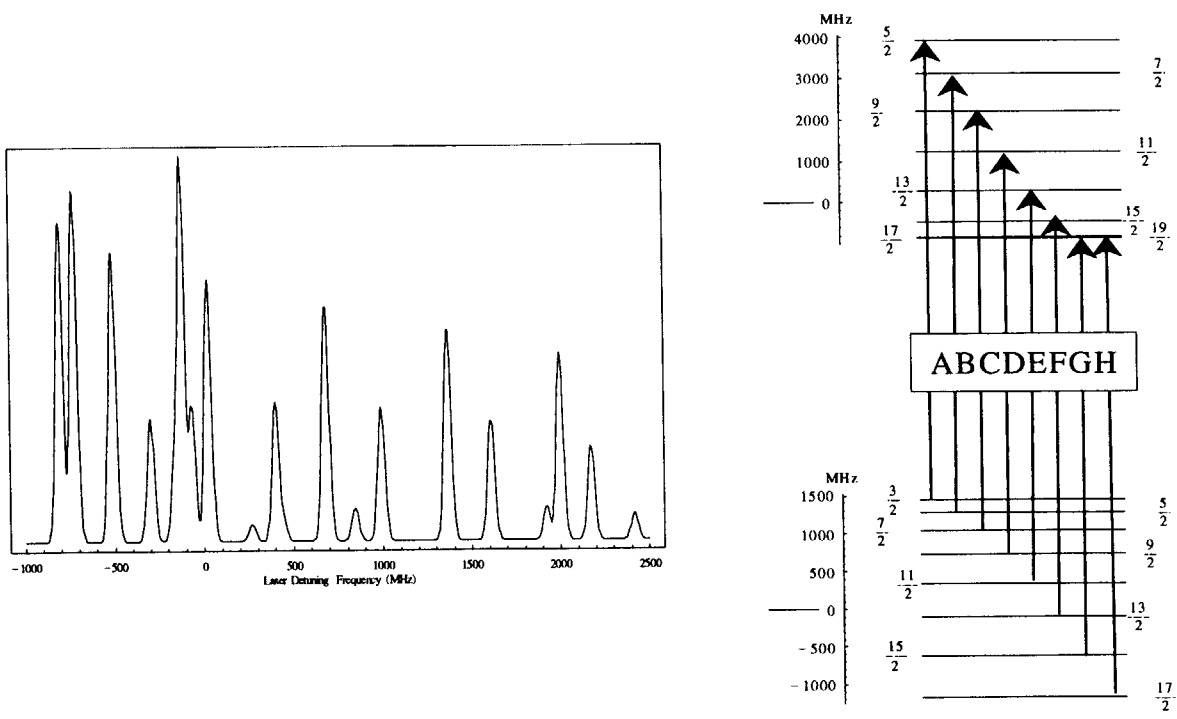


Fig.9 c) The Analysis of the hyperfine structure for the 620-17362 transition .

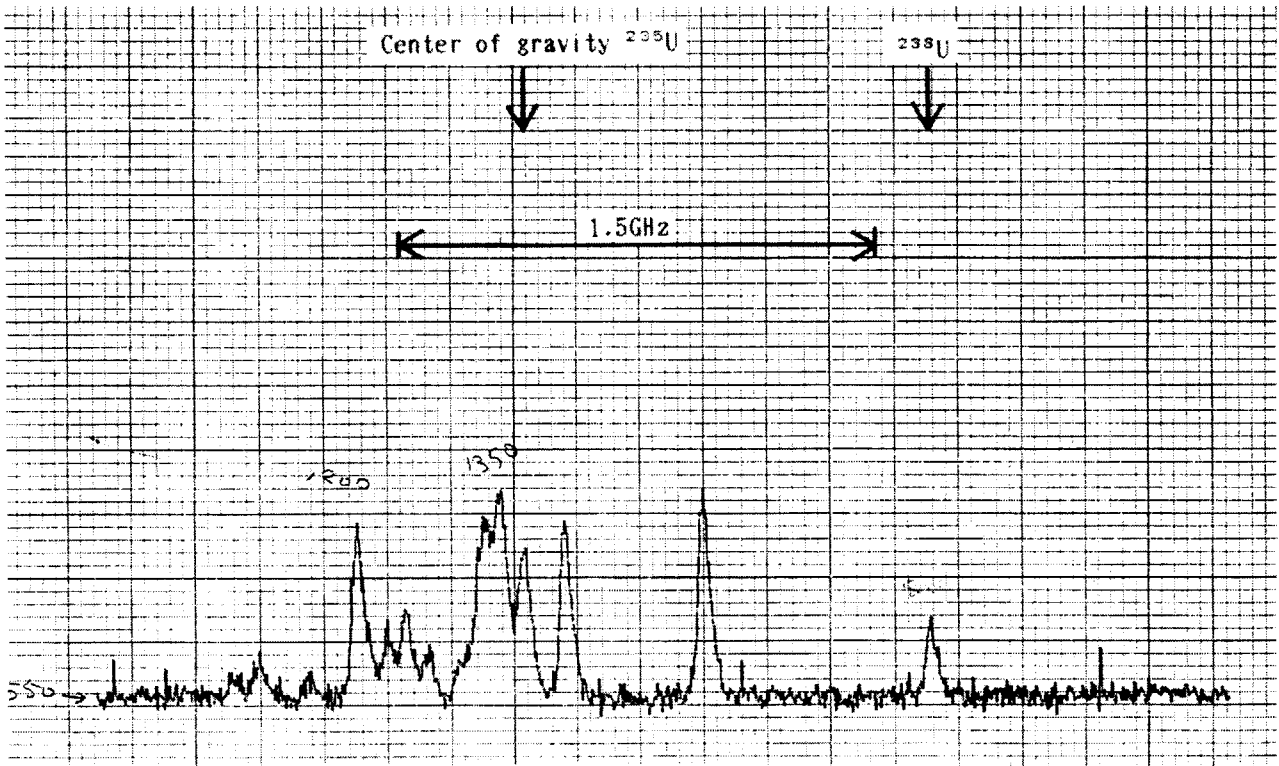


Fig.10 a) Hyperfine spectra and isotope shift of the 620-18186 transition. (The fluorescence of 18186-620 transition was measured.)

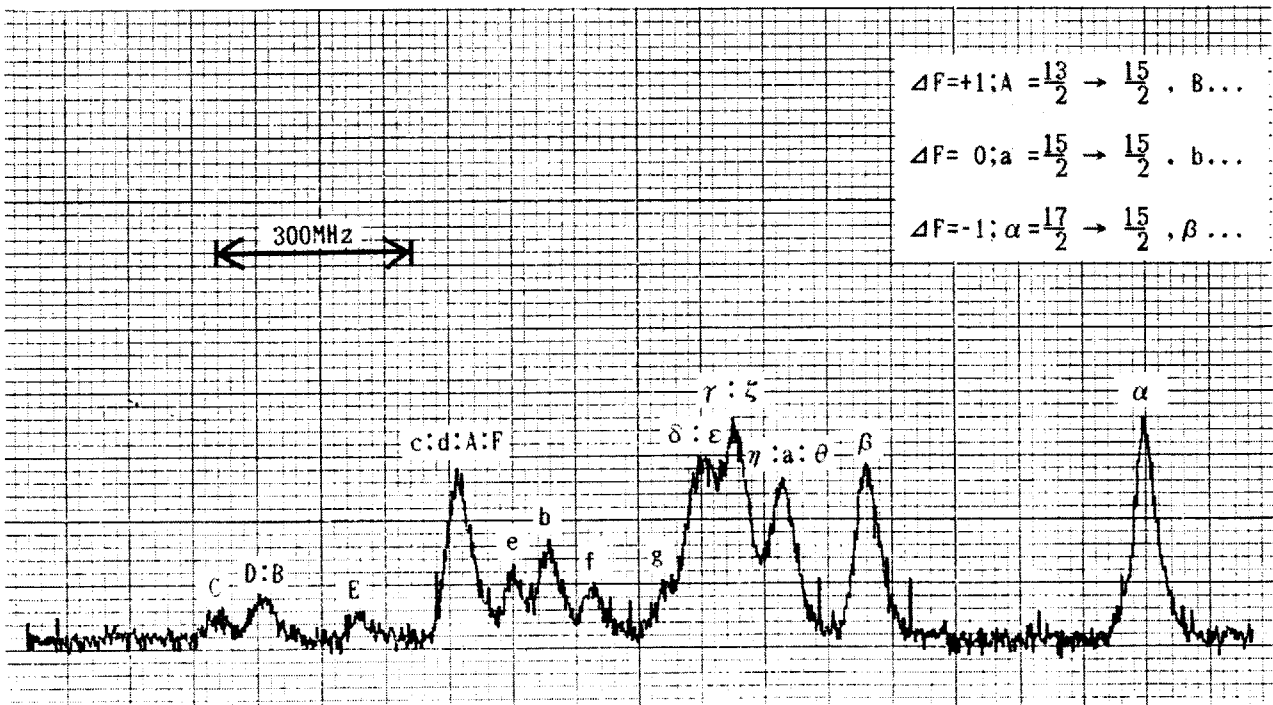


Fig.10 b) Hyperfine spectra of the 620-18186 transition. (The fluorescence of 18186-620 transition was measured.)

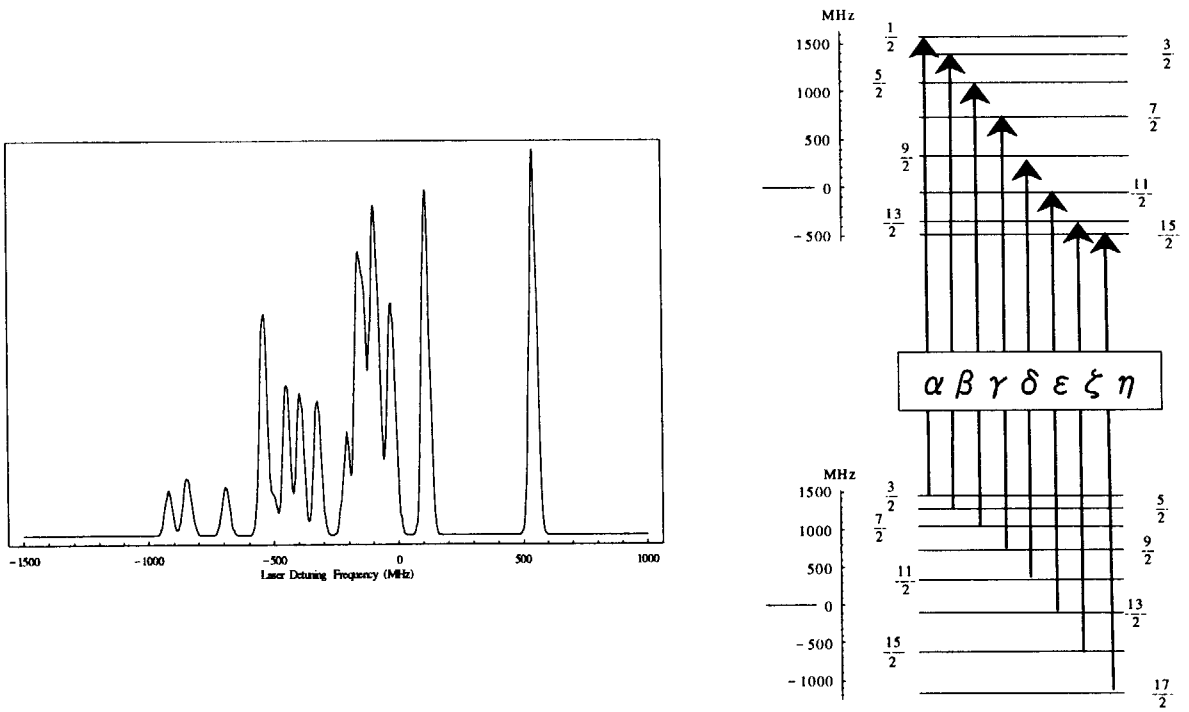


Fig.10 c) The Analysis of the hyperfine structure for the 620-18186 transition .

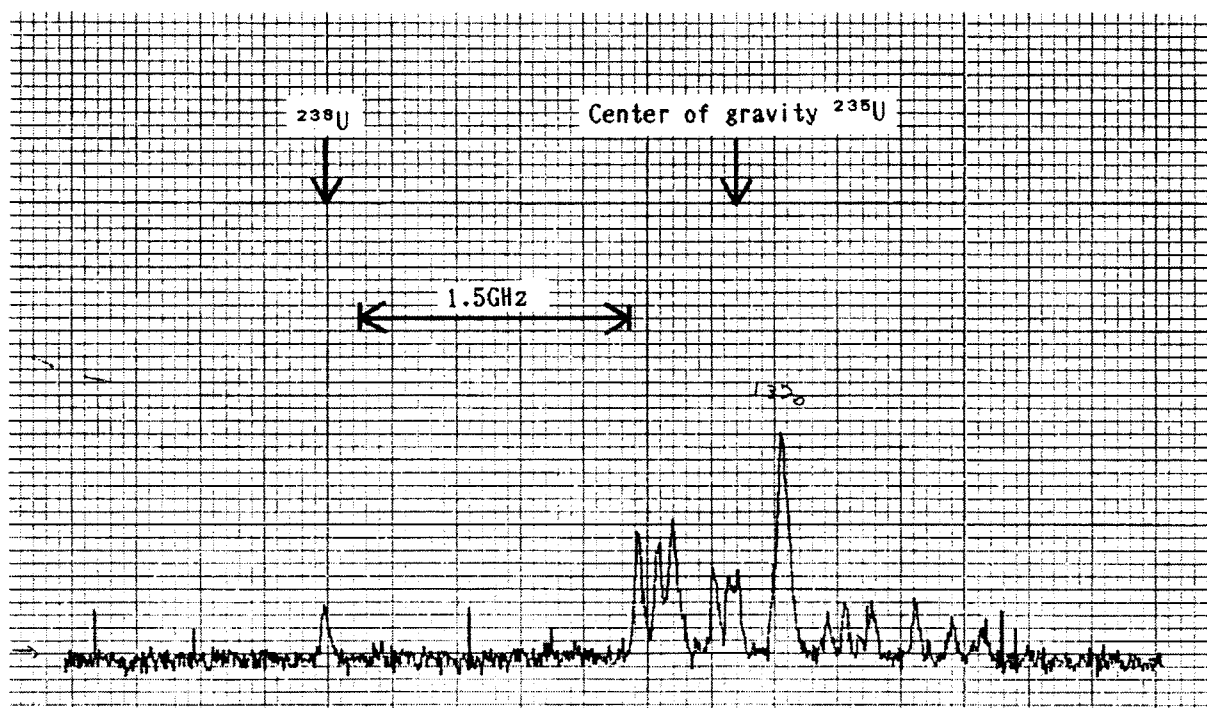


Fig.11 a) Hyperfine spectra and isotope shift of the 620-18254 transition. (The fluorescence of 18254-620 transition was measured.)

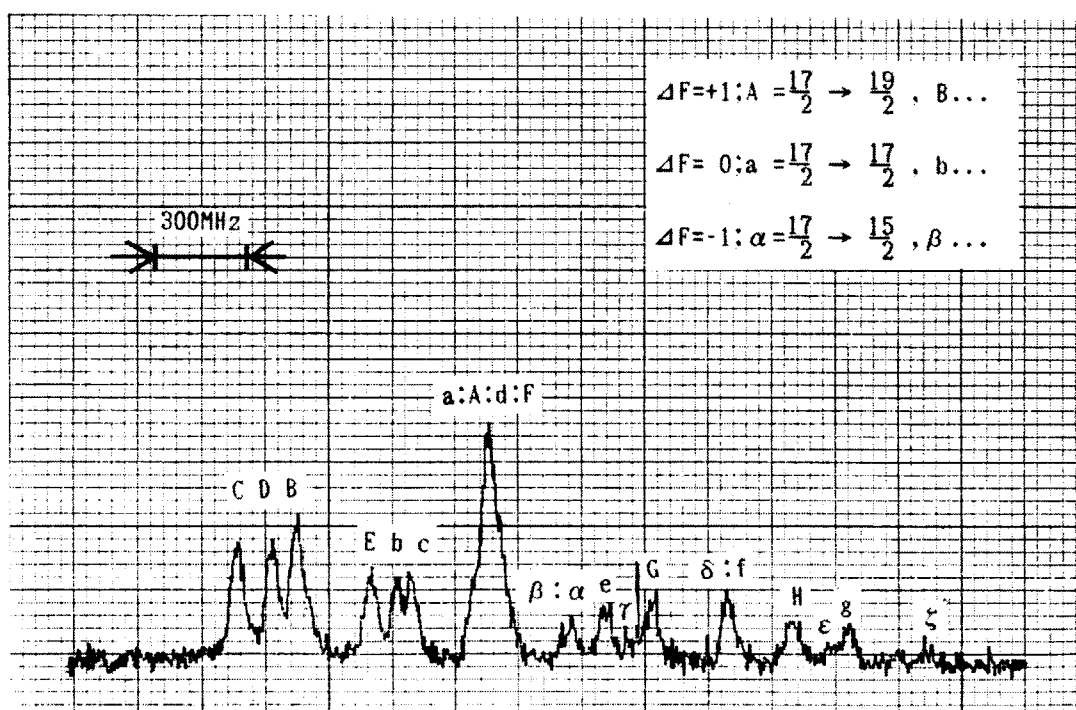


Fig.11 b) Hyperfine spectra of the 620-18254 transition. (The fluorescence of 18254-620 transition was measured.)

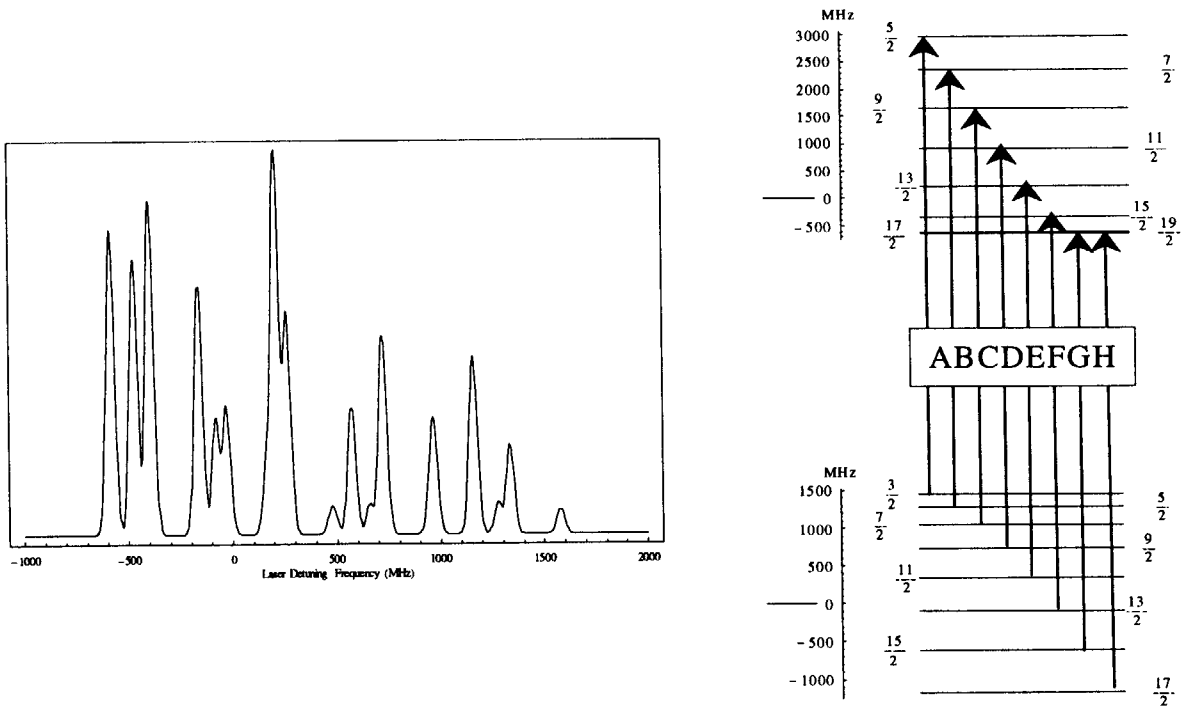


Fig.11 c) The Analysis of the hyperfine structure for the 620-18254 transition .

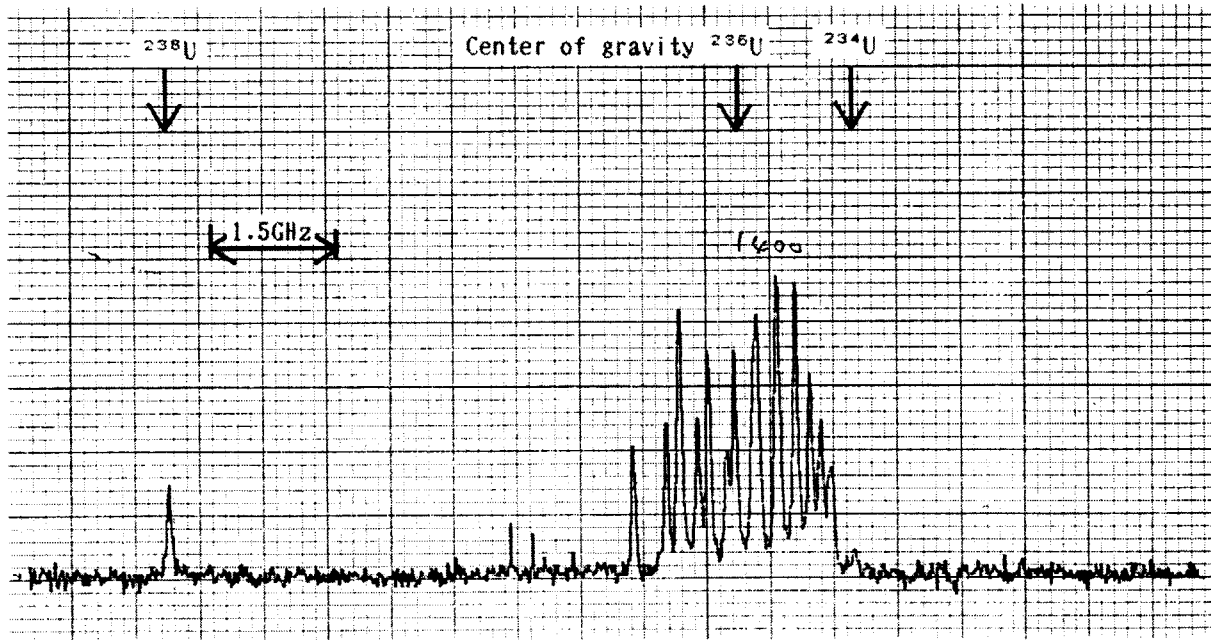


Fig.12 a) Hyperfine spectra and isotope shift of the 620-18406 transition. (The fluorescence of 18406-620 transition was measured.)

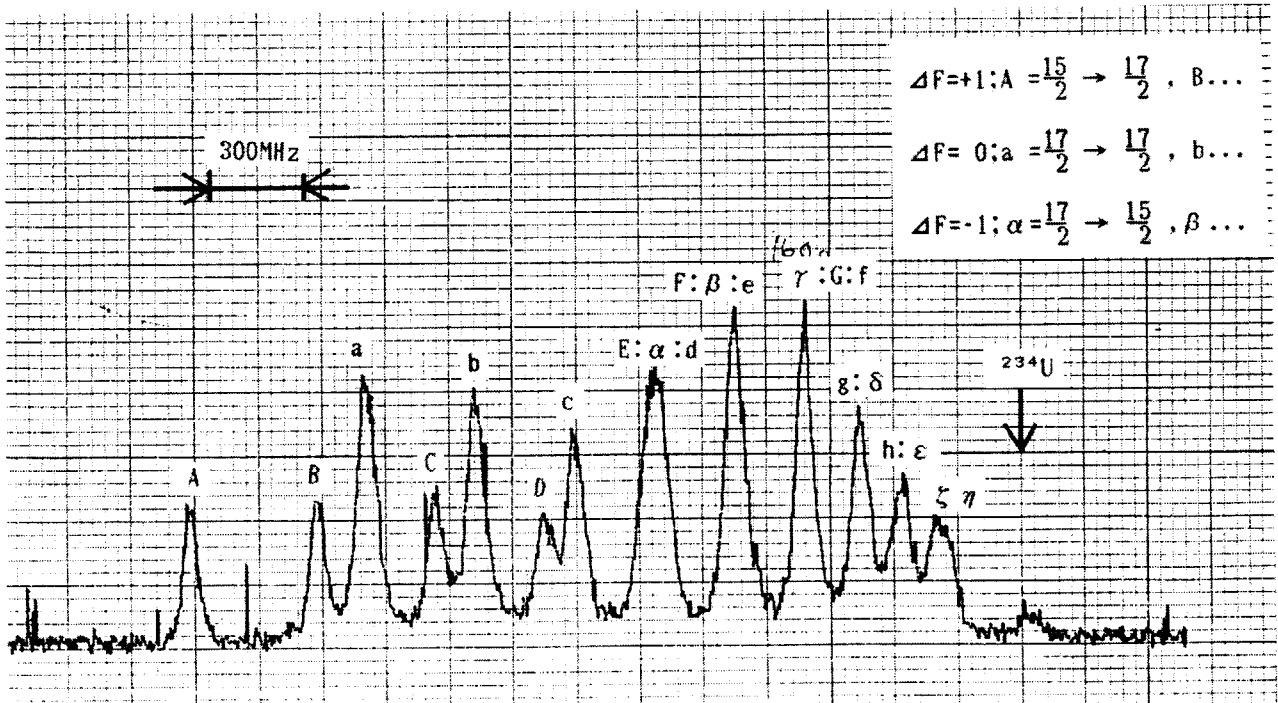


Fig.12 b) Hyperfine spectra of the 620-18406 transition. (The fluorescence of 18406-620 transition was measured.)

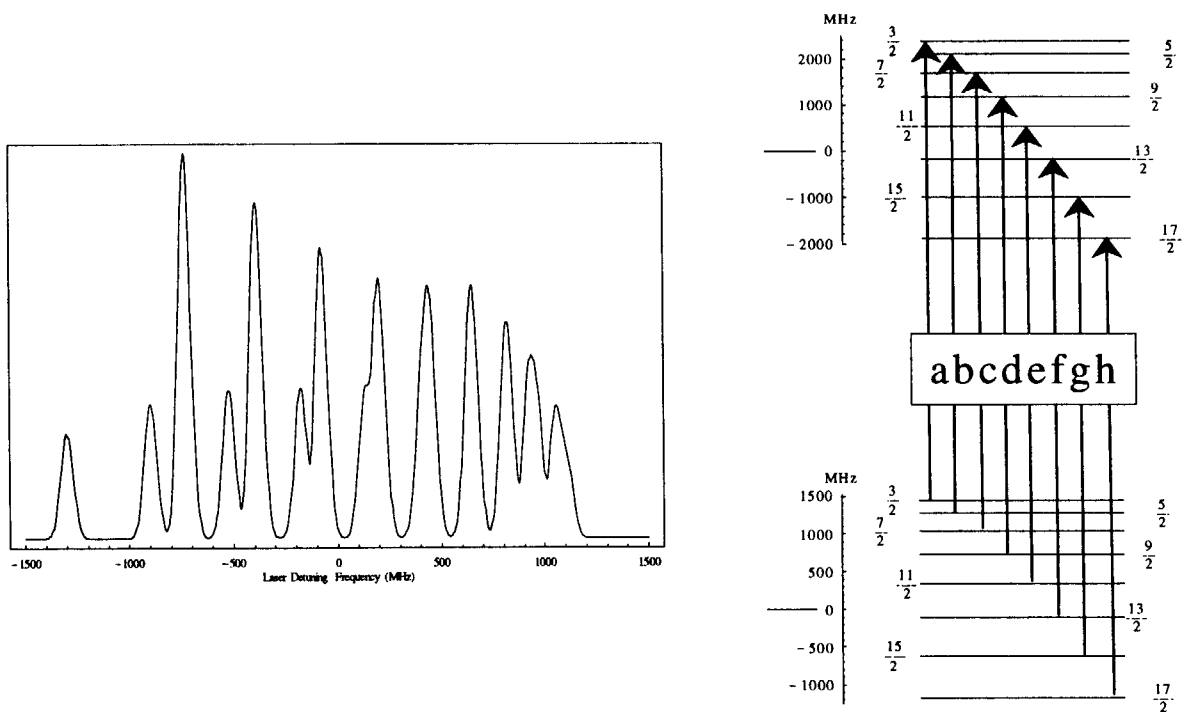


Fig.12 c) The Analysis of the hyperfine structure for the 620-18406 transition .

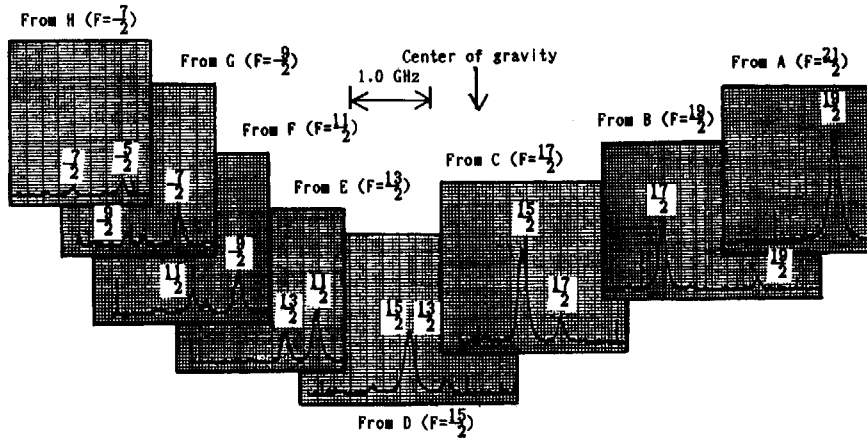


Fig.13 a) Hyperfine spectra of the 16900-33421 transition. (The excitation scheme for the first step was the transition (Fig.5). The fluorescence for the 33421-14644 transition was measured.)

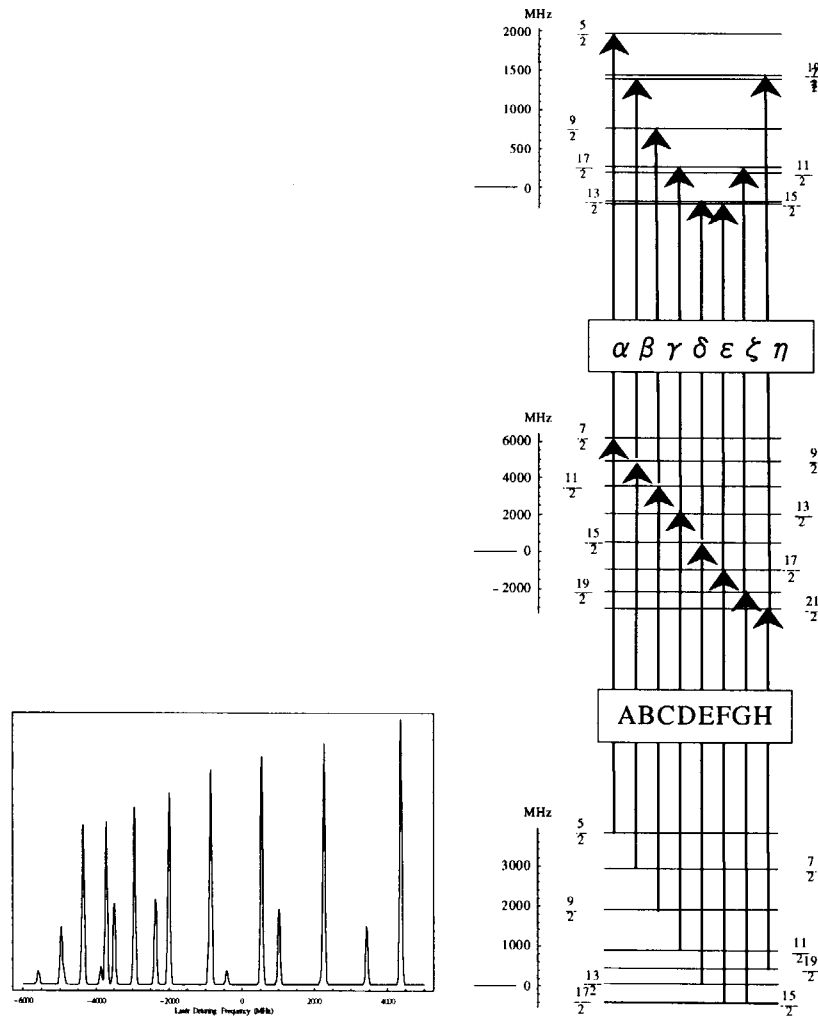


Fig.13 b) The Analysis of the hyperfine structure for the 16900-33421 transition .

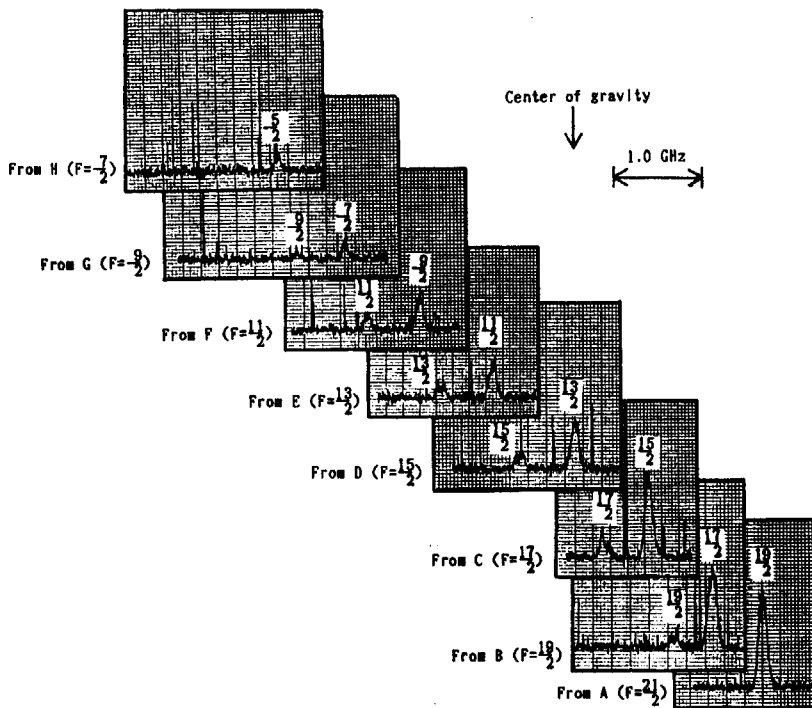


Fig.14 a) Hyperfine spectra of the 16900-33752 transition. (The excitation scheme for the first step was the transition 0-16900(Fig.5). The fluorescence for the 33752-? transition (The wavelength was 412nm) was measured.)

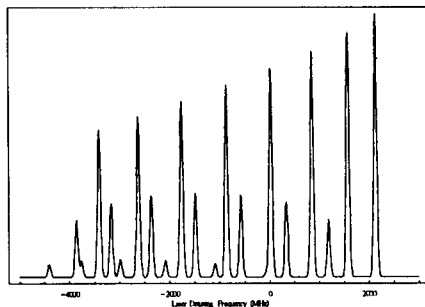
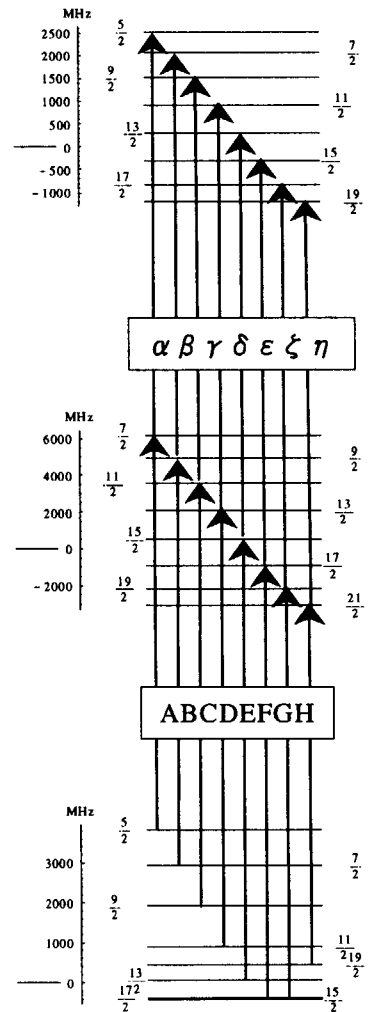


Fig.14 b) The Analysis of the hyperfine structure for the 16900-33752 transition .

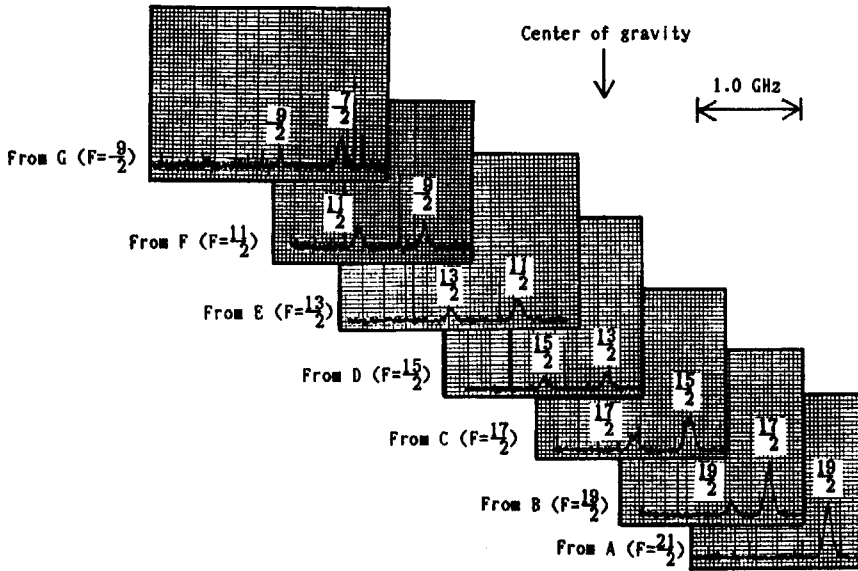


Fig.15 a) Hyperfine spectra of the 16900-33907 transition. (The excitation scheme for the first step was the transition 0-16900(Fig.5). The fluorescence for the 33907-14840 transition was measured.)

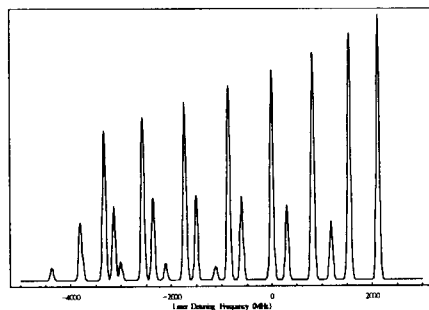
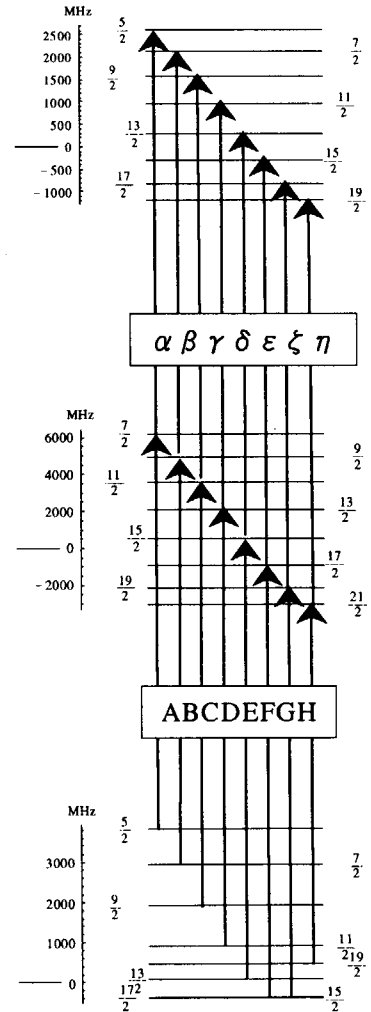


Fig.15 b) The Analysis of the hyperfine structure for the 16900-33907 transition .

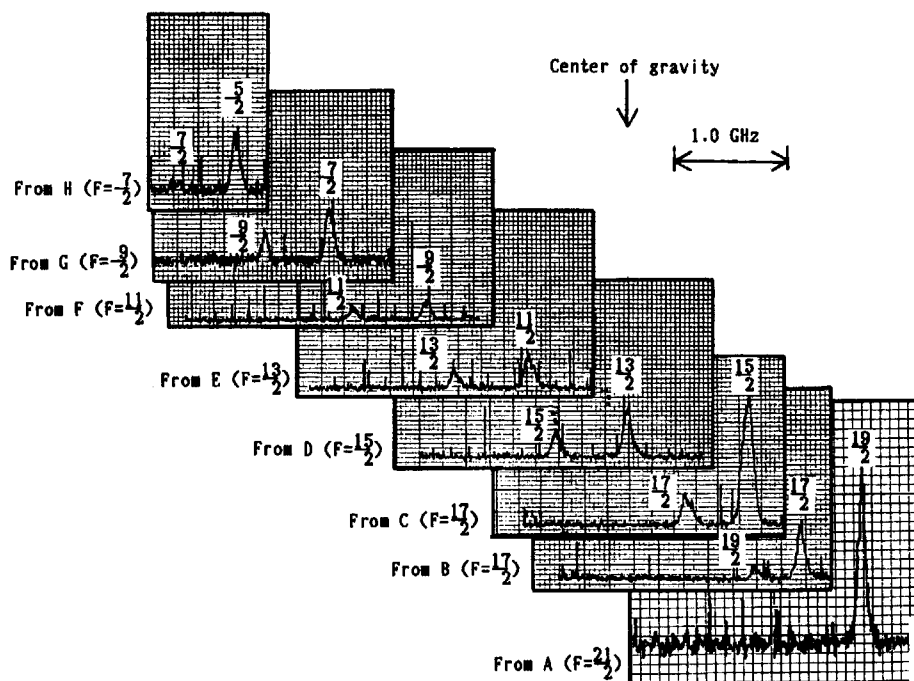


Fig.16 a) Hyperfine spectra of the 16900-34160 transition. (The excitation scheme for the first step was the transition 0-16900(Fig.5). The fluorescence for the 34160-14840 transition was measured.)

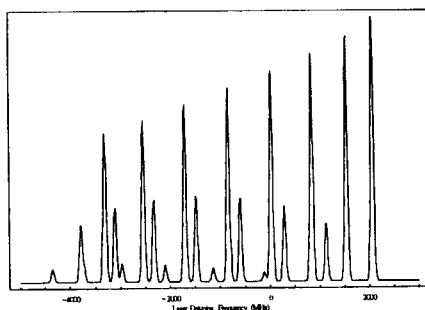
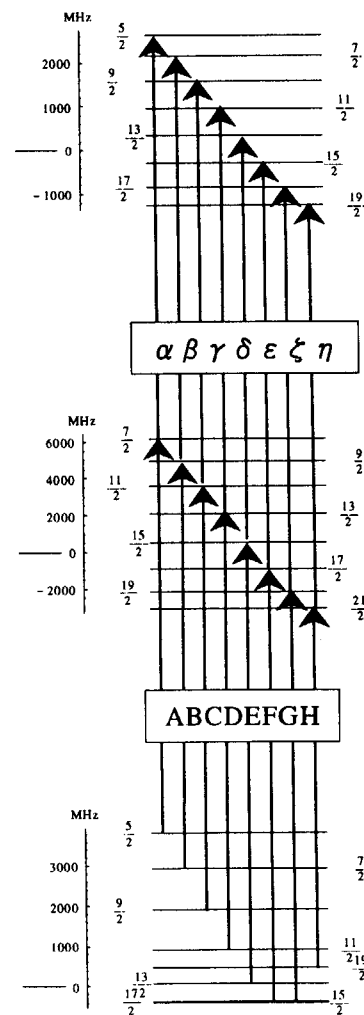


Fig.16 b) The Analysis of the hyperfine structure for the 16900-34160 transition .

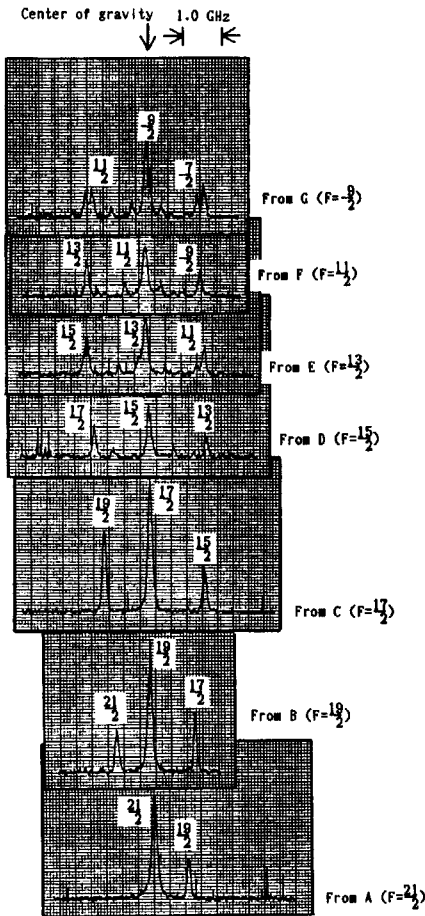


Fig.17 a) Hyperfine spectra of the 16900-34659 transition. (The excitation scheme for the first step was the transition 0-16900(Fig.5). The fluorescence for the 34659-16900 transition was measured.)

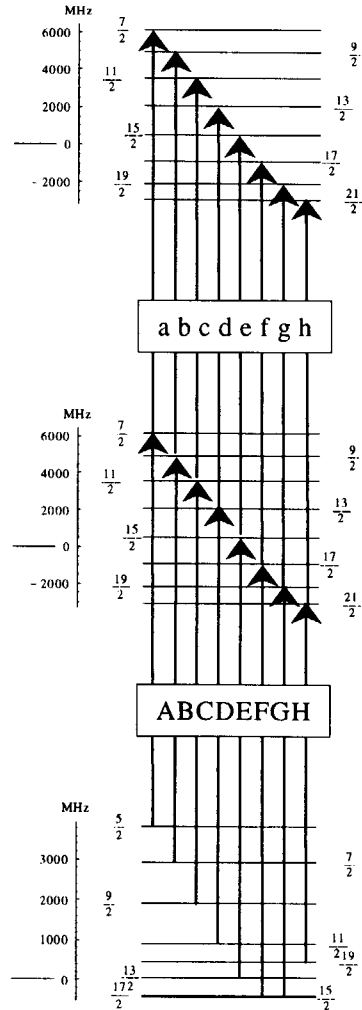
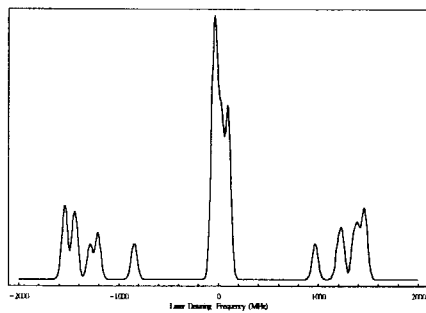


Fig.17 b) The Analysis of the hyperfine structure for the 16900-34659 transition .

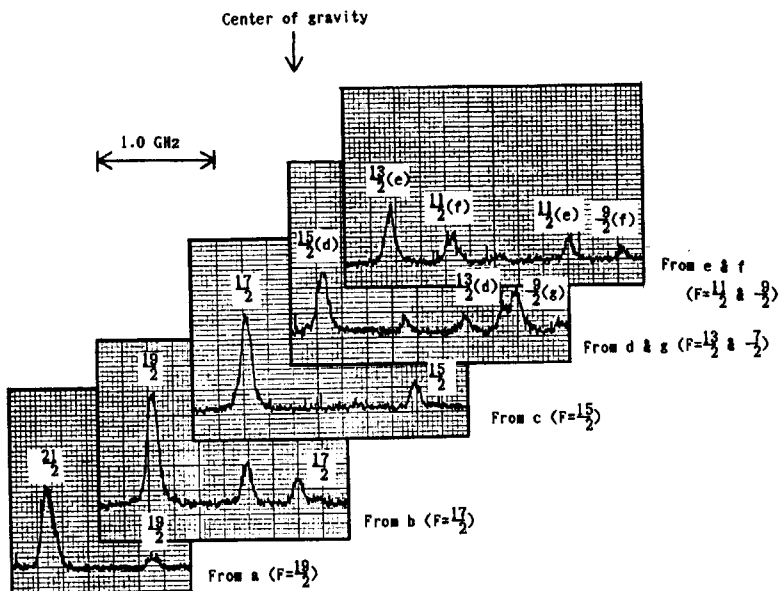


Fig.18 a) Hyperfine spectra of the 17362-34659 transition. (The excitation scheme for the first step was the transition 0-17362(Fig.8). The fluorescence for the 34659-16900 transition was measured.)

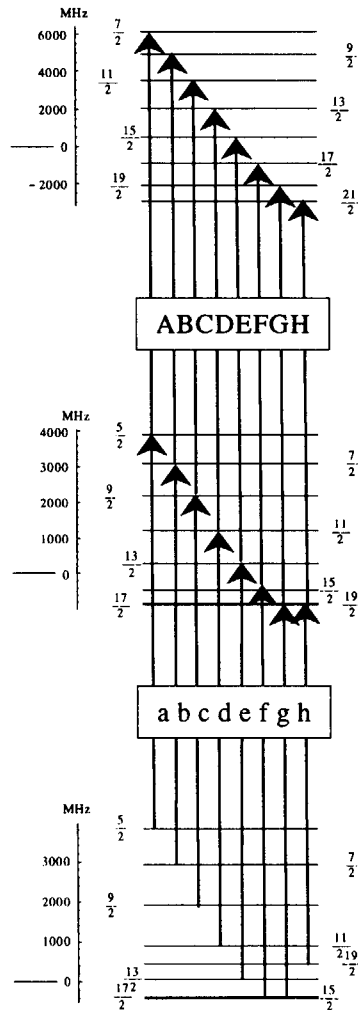
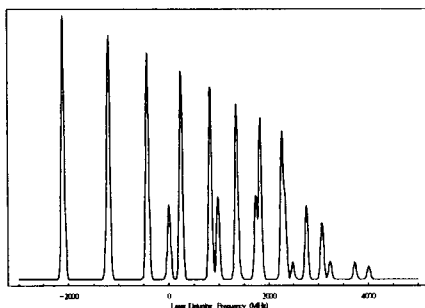


Fig.18 b) The Analysis of the hyperfine structure for the 17362-34659 transition .

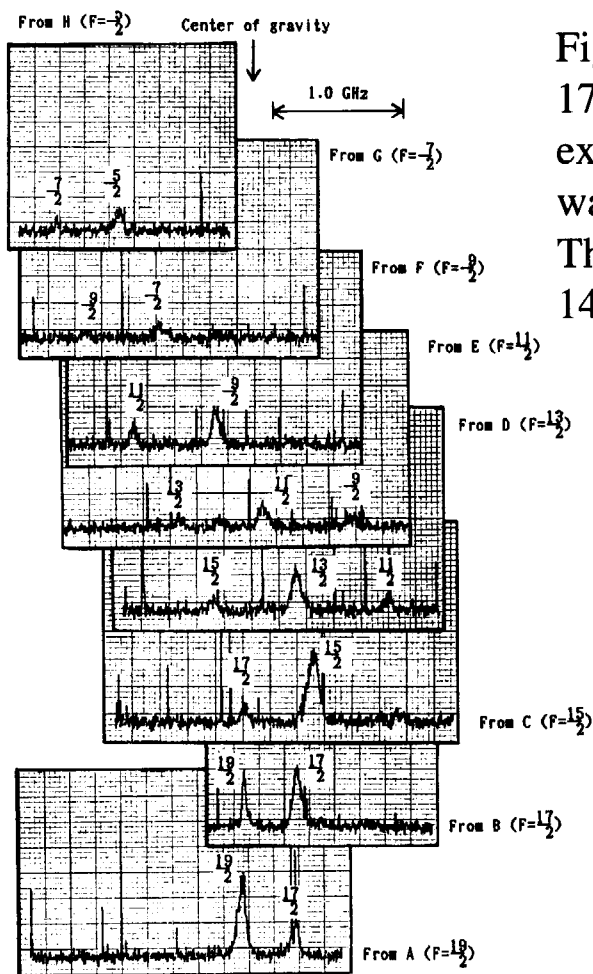


Fig.19 a) Hyperfine spectra of the 17362-34160 transition. (The excitation scheme for the first step was the transition 620-17362(Fig.9). The fluorescence for the 34160-14840 transition was measured.)

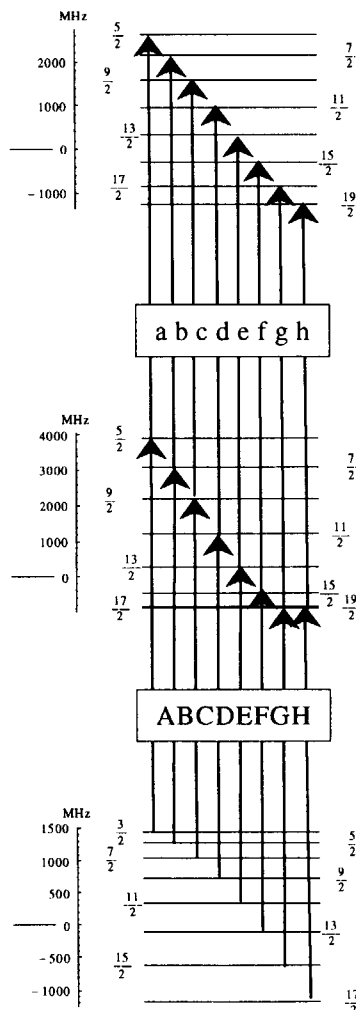
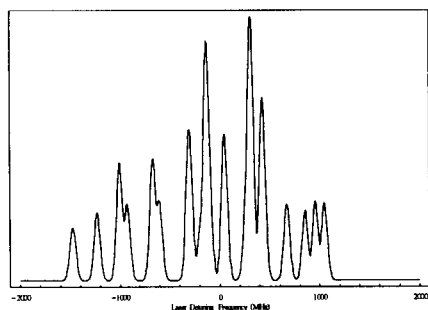


Fig.19 b) The Analysis of the hyperfine structure for the 17362-34160 transition .

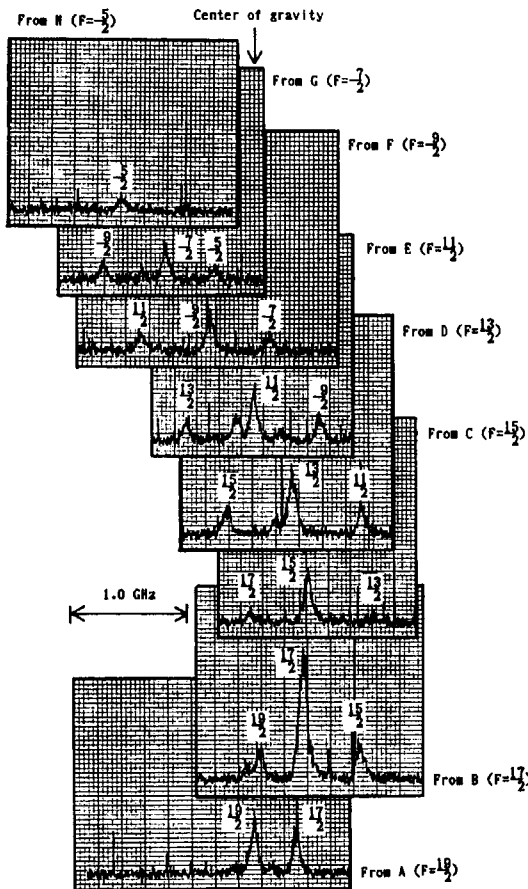


Fig.20 a) Hyperfine spectra of the 17362-34373 transition. (The excitation scheme for the first step was the transition 620-17362(Fig.9). The fluorescence for the 34373-14840 transition was measured.)

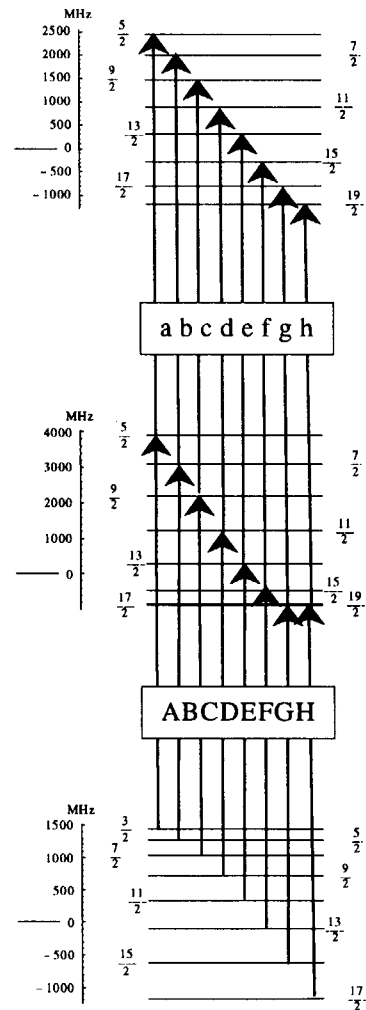
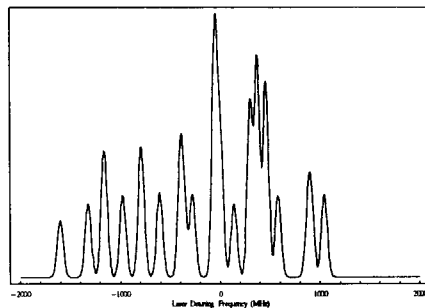


Fig.20 b) The Analysis of the hyperfine structure for the 17362-34373 transition .

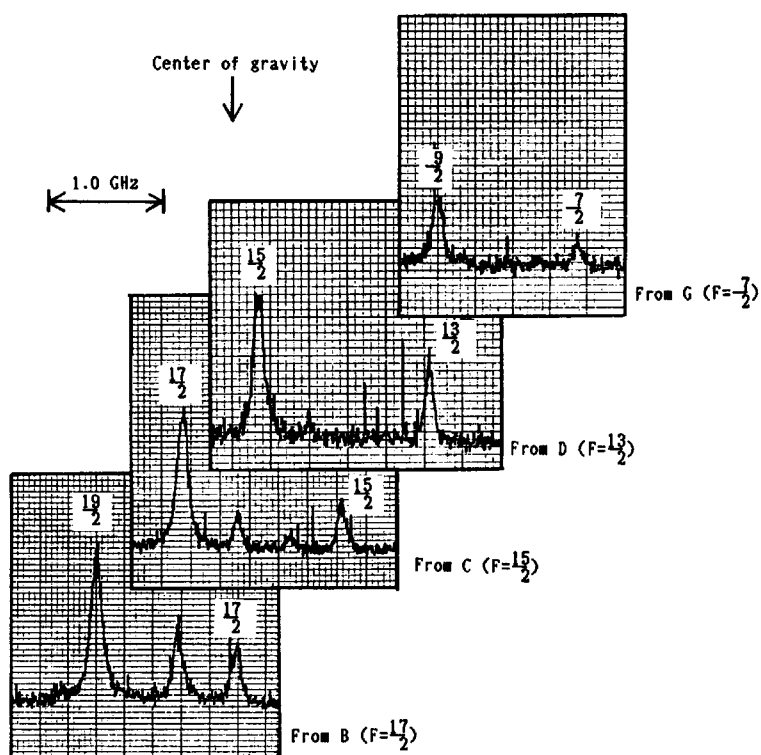


Fig.21 a) Hyperfine spectra of the 17362-34659 transition. (The excitation scheme for the first step was the transition 620-17362(Fig.9). The fluorescence for the 34659-16900 transition was measured.)

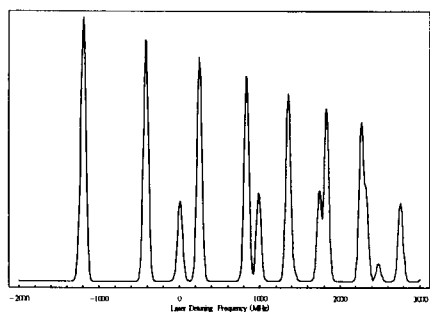
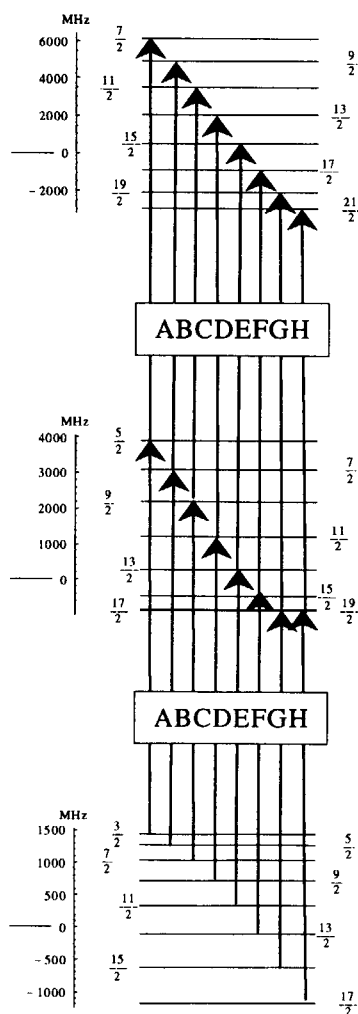


Fig.21 b) The Analysis of the hyperfine structure for the 17362-34659 transition .



国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつ SI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ - ン	b
バ - ル	bar
ガ - ル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ - ド	rad
レ - ム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J(計量法)
= 4.184 J(熱化学)
= 4.1855 J(15 °C)
= 4.1868 J(国際蒸気表)
仕事率 1 PS(仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

レーザー誘起蛍光法によるフリン原子の超微細構造と同位体シフトの測定