

JAERI-Research  
99-028



JP9950293



2段階レーザー誘起蛍光法による  
ウラン原子のゼーマン効果測定

1999年3月

大場正規・赤岡克昭・宮部昌文・若井田育夫

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）で複写による実費頒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, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

2段階レーザー誘起蛍光法によるウラン原子のゼーマン効果測定

日本原子力研究所東海研究所物質科学研究部

大場 正規・赤岡 克昭<sup>+</sup>・宮部 昌文<sup>\*</sup>・若井田育夫

(1999年3月3日受理)

ウラン原子のゼーマン効果を測定することにより、ウラン原子のエネルギーレベルのJ値、g因子を測定した。2本のリングレーザーを用いた2段階励起により、 $32000\text{ cm}^{-1}$ ～ $35000\text{ cm}^{-1}$ のエネルギーレベルについて測定を行い、27本のエネルギーレベルについてのデータを得た。g因子については、ほとんどこれまでに報告されていないもので、今回の測定ではじめて報告された。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

+ 関西研究所光量子科学センター

※ 出向中：科学技術庁

Zeeman Effect of U Atoms Measured by  
Two Step Laser Induced Fluorescence Spectroscopy

Masaki OBA, Katsuaki AKAOKA<sup>+</sup>, Masabumi MIYABE<sup>\*</sup> and Ikuo WAKAIDA

Department of Materials Science  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 3, 1999)

We measured the J-value and g-factor of uranium atom by Zeeman effect measurement. Two step excitation with two ring dye lasers were used to measure the levels lying between 32000 cm<sup>-1</sup> to 35000 cm<sup>-1</sup> and J-value and g-factor of 27 levels were measured.

Keywords: Uranium, Zeeman Effect, J-value, g-factor, Laser, Spectroscopy, Fluorescence,  
Two Step, Atom

---

<sup>+</sup> Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment

<sup>\*</sup> On loan to Science and Technology Agency

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実験方法 .....	2
3. J 値の判定および g 因子の導出 .....	3
4. 測定結果 .....	4
5. おわりに .....	5
参考文献 .....	6

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental .....	2
3. Determination of the J-value and g-factor .....	3
4. Result .....	4
5. Conclusion .....	5
References .....	6

This is a blank page.

## 1. はじめに

原子の全角運動量 $J$ 、ランダウの $g$ 因子、励起寿命、エネルギー準位、遷移確率、超微細構造などの分光学的パラメータは、原子構造解析やイオン化分光、レーザー化学やレーザー同位体分離などの応用に欠かせない。しかし、アクチノイドやランタノイドなどの原子構造が複雑な原子については一部のデータが得られているだけで、十分な情報を得ているとは言えない。原子法レーザーウラン濃縮では、ウラン原子をレーザー光により3段階で励起し、イオン化するため、格段の励起準位についてのデータが欠かせないが、これらのデータが報告されていないエネルギー領域が多く存在している。とくに、2段階目の領域については、エネルギーレベルが込み入って存在しているため、測定を困難にしている。

全角運動量 $J$ 値は、最も基本的な物性値の一つであり、選択則など、原子の物性を司る重要なパラメータである。J.BlaiseとRadziemski はホローカソードランプに磁場を掛け、ゼーマン分裂を観測することによりウラン原子のエネルギー準位や、各エネルギー準位の $J$ 値、 $g$ 因子などの多くの物性データを取得した[1]。しかし、ホローカソードランプでは高励起準位まで原子を励起するためには電流値を増加しなければならず、原子の熱運動の増加によるドップラー広がりが増加のため分解能が著しく低下する。そのため、ゼーマン分裂を観測するには磁場の強度も増加しなければならず、その磁場強度は10kガウス以上にもなる。そのため、スペクトルが込み入っているところでは分裂したスペクトル同士が重なってしまうなど、解析が困難になり、測定可能な高励起準位は限られている。また、強磁場のために、接近したエネルギー準位同士が相互作用を起こすなどの非線形効果が生じ、 $g$ 因子の精度低下する可能性も考えられる。この測定法で測定できなかった準位のデータを補うために、遷移の選択則を利用した測定法が用いられている[2]~[4]。この測定法は、レーザーを用い、各エネルギー準位間の遷移が可能かどうか様々な $J$ 値を持つ下準位から励起することにより上準位の $J$ 値を決定するものである。2段階目励起準位の $J$ 値、 $J$ を決定するのに、1段階目の励起準位の $J$ 値、 $J-1$ 、 $J$ 、 $J+1$ の最低3つの準位からの励起を確認することで2段階目の励起準位の $J$ 値が決定できる。しかし、選択則を利用したこのような測定では、始状態（基底準位、準安定準位）の $J$ 値が、6及び5であるから、1段階目で励起可能な準位の $J$ 値は4~7に限られる。従って、決定できる2段階目の励起準位は $J$ 値が5及び6のものに限られ、この測定法でも十分なデータが得られていない。また、エネルギー準位の込み入った高励起準位では近接したエネルギー準位を区別するのに、高い精度の絶対波長を測定する必要がある。また、この測定法では $g$ 因子は得られない。

我々は、上述の方法では得られないエネルギー準位の $J$ 値、 $g$ 因子の測定法として、レーザー誘起蛍光法を用いてゼーマン効果を測定し、ウラン原子の全角運動量 $J$ 値および $g$ 因子を求めた。

この測定法は高分解能で、比較的低磁場中で測定でき、約数百ガウス程度で測

定できるため、エネルギー準位の分裂によるスペクトル同士の重なりなどもほとんどない。また、選択則を用いた測定のように複数の下準位からの遷移を観測する必要がなく、遷移可能なエネルギー準位であれば原理的にすべて測定可能であり、選択則を用いた測定で決定できるJ値の範囲よりも広がる。今回は特に、選択則を用いた方法ではJ値測定が困難であるために測定されていない2段目励起準位を中心に、ゼーマン効果からJ値、g因子を求めた。

## 2. 実験方法

実験装置図をFig.1に示す。原子ビーム発生部では、真空容器内で金属ウランを抵抗加熱により加熱蒸発し、ウラン蒸気を2mmφのコリメータでビーム状にコリメートして原子ビームを発生する。試料は天然ウランを用いる。天然ウランは99%が<sup>238</sup>Uであり、核スピンのないため、超微細構造は現れない。高温の液体金属ウラン試料は浸食作用が大きいいため、試料を入れるルツボには高温の液体金属ウランに耐えられる単結晶タングステンルツボを用いており、約1800℃まで使用可能である。このルツボはさらに液体金属ウランに比較的浸食されにくいイットリアセラミックルツボに入れられ、さらにこのイットリアルツボはセラミックルツボが割れたときの保持用として焼結タングステンルツボに入れられ、ウラン試料がルツボの外に漏れないように3重構造のルツボになっている。試料を加熱するヒーターはタングステンのメッシュヒーターを用いて試料を1800℃まで昇温することができる。真空容器の外にはヘルムホルツコイルが設置され、最大約700ガウスまでの磁場を発生することが出来る。

光源にはアルゴンレーザー励起のリングダイレーザー (Coherent CR699) 2台を用いて2段励起によりウラン原子を高励起準位に励起する。1本のレーザー光は基底準位あるいは準安定準位から1段目の励起準位へ励起するためのレーザー、2本目は、1段目の励起準位から2段目の励起準位に励起するためのレーザーである。用いた色素はR6G、DCM、R110である。1本目のレーザー光波長を1段目のゼーマン分裂したスペクトルの1本に固定し、2本目のレーザー光波長を掃引して、スペクトルを観測する。波長掃引の様子はFSR: 150MHzのスペクトラムアナライザーによりモニターされ、フリンジを波長掃引のマーカーとする。

光反応部では原子ビームとレーザー光が反応し、レーザー光によりウラン原子が励起される。また、レーザー光の入射方向は、原子ビームに垂直な方向、及び磁場と同一方向に入射する。励起原子から放出された蛍光を、原子ビーム及びレーザー入射方向に垂直な方向から集光レンズにより光ファイバーに集光し、ファイバーを通った蛍光は分光器に入射する。集光レンズの集光効率率は光反応部から見た全立体角の約3%である。励起された原子は、複数の下準位に脱励起し、複数の波長の蛍光を放出するが、観測する蛍光は、レーザー光の散乱光と分離するため、レーザー



光波長と異なる波長の蛍光を放出し、比較的蛍光強度の大きいブランチを分光器により選択する。分光器により波長選択された蛍光が光電子増倍管により検出される。蛍光が微弱であるため、検出法には光子数を計数するフォトンカウンティング法を用いる。光電子増倍管により検出された光子は電気パルス信号に変換され、フォトンカウンターにより計数される。蛍光が微弱であるため、レーザー光や、ヒーターからの放射による迷光が雑音となることから、レーザー光の散乱光が光ファイバーに入射しないようにアパチャーを設けた黒色の遮光板を設置し、ヒーターからの放射が散乱しないよう原子ビーム発生部の上部に光吸収体を設置している。

### 3. J値の判定およびg因子の導出

レーザービームを磁場と平行に入射した場合は、原子は円偏光遷移となり、遷移可能なゼーマン副準位の磁気量子数 $m$ に

$$\Delta m = \pm 1$$

の関係がある。 $\Delta m$ は上準位の副準位磁気量子数 $m_2$ と下準位の副準位磁気量子数 $m_1$ の差

$$\Delta m = m_2 - m_1$$

である。磁場 $H$ によって分裂したエネルギー準位 $E_m$ は、

$$E_m = E_0 + g\mu_B H m \quad (1)$$

で表される。 $E_0$ は磁場がない場合の分裂前のエネルギー準位、 $g$ はランダウの $g$ 因子、 $\mu_B$ はボーア磁子である。

1段目励起用レーザー光をゼーマン分裂した1段目のスペクトルのある1本に波長を固定する。次に2段目励起用のレーザー光を掃引することで2段目励起準位のスペクトルを観測する。このとき、1段目励起準位の $J$ 値 ( $J_1$ ) と2段目励起準位の $J$ 値 ( $J_2$ ) によって、各 $m_1$ からの遷移に対して観測されるスペクトルの本数に特徴が現れる。この特徴を用いればすべての $m_1$ に対して測定を行う必要がなく、 $m_1 = J_1, J_1 - 1, J_1 - 2$  (または、 $m_1 = -J_1, -(J_1 - 1), -(J_1 - 2)$ ) について測定を行えば十分である。Fig.2にその遷移の状態を示した。 $J_2 = J_1 + 1$ の場合、各 $m_1$ から円偏光遷移によるスペクトルは

$$\begin{aligned} m_1 = J_1 &\rightarrow m_2 = J_1 + 1 (= J_2 : \Delta m = +1) \\ &J_1 - 1 (= J_2 - 2 : \Delta m = -1) \end{aligned}$$

など、すべて2本ずつ観測される。 $J_2=J_1$ の場合、 $m_1=\pm J_1$ からの遷移に対しては、観測されるスペクトルは

$$m_1=\pm J_1 \rightarrow m_2=\pm (J_1-1) (= \pm (J_2-1) : \Delta m = \bar{+}1)$$

のそれぞれ1本だけであるが、それ以外の $m_1=\pm (J_1-1)$ 、 $\pm (J_1-2) \cdots$ からの遷移に対してはそれぞれ2本のスペクトルが観測される。同様に $J_2=J_1-1$ の場合、 $m_1=\pm J_1$ 、 $\pm (J_1-1)$ からの遷移に対しては

$$\begin{aligned} m_1=\pm J_1 \rightarrow m_2=\pm (J_1-1) (= \pm J_2 : \Delta m = \pm 1) \\ m_1=\pm (J_1-1) \rightarrow m_2=\pm (J_1-2) (= \pm (J_2-1) : \Delta m = \bar{+}1) \end{aligned}$$

のそれぞれ1本だけであるが、それ以外ではそれぞれ2本のスペクトルが観測される。これらをTable.1にまとめて示す。この測定法により、1段目励起準位のJ値が既知であれば、Table.1の関係から2段目励起準位のJ値を求めることが出来る。g因子は2本観測されたスペクトル間隔が、2段目励起準位のゼーマン分裂を直接表していることから、式(1)を用いて次式から求められる。

$$h\Delta\nu = 2g\mu_B H \quad (2)$$

$h$ はプランク定数、 $\Delta\nu$ は2本のスペクトル波長の間隔である。右辺の係数2は、観測された2本のスペクトルの $m$ の差が2であることによる。この測定法では遷移可能なエネルギー準位について、原理的にすべて測定可能である。

#### 4. 測定結果

Fig.3に1段目励起準位のゼーマン効果の例を示す。遷移は $0 - 16900 \text{ cm}^{-1}$ である。加えた磁場は525ガウスである。ドップラー広がりによるスペクトル幅は約100MHzであるが、この磁場強度で各スペクトルは十分分解され、スペクトルを判別できることがわかる。 $0 \text{ cm}^{-1}$ のJ値は6、 $16900 \text{ cm}^{-1}$ のJ値は7と、既に知られており、ゼーマン分裂したスペクトルは26本観測されている。このスペクトルの内、外側の3本のスペクトルに着目し、1段目の励起波長をこのスペクトルに合わせる。最も左側のスペクトルは $16900 \text{ cm}^{-1}$ の $m=-7$ に遷移するスペクトルであり、2番目は $m=-6$ 、3番目は $m=-5$ に遷移するスペクトルである。3本のそれぞれのスペクトルから2段目に励起し、観測したスペクトルの例をFig.4に示す。例では、 $16900 \text{ cm}^{-1}$ か

ら $34177\text{ cm}^{-1}$ への遷移である。磁場は690ガウスである。この測定では、 $m = -7$ からの遷移に対して、観測されるスペクトルは1本であるが、 $m = -6$ 及び $-5$ からの遷移に対しては2本のスペクトルが観測されている。従って、Table.1により $\Delta J = 0$ であることがわかり、 $34177\text{ cm}^{-1}$ のJ値は7であることが判明する。また、スペクトルの間隔は2.09GHzであり、式(2)を用いてg因子の値は $g = 1.08$ と求めることが出来る。同様に他のエネルギー準位について測定した結果をTable.2に示す。

この測定で $34128\text{ cm}^{-1}$ のJ値がMironらの測定と相違が見られる。この原因としてはいくつか推測されるが、 $34128\text{ cm}^{-1}$ に近接したエネルギーレベルが存在することも考えられる。また、Mironらは、 $34128\text{ cm}^{-1}$ から脱励起により放出される蛍光を分光して脱励起先のエネルギー準位のJ値からJ値を決定している。彼らは $10051\text{ cm}^{-1}$ ( $J=5$ )に遷移していることから $J=6$ と判定している。しかし、 $24066\text{ cm}^{-1}$ ( $J=7$ )に脱励起した後、 $0\text{ cm}^{-1}$ に遷移した可能性も考えられる。 $24066\text{ cm}^{-1}$ から $0\text{ cm}^{-1}$ に脱励起される強い蛍光も観測されている[5]。このときの波長の相違は $0.2\text{ nm}$ であり、分解能 $0.3\text{ nm}$ の分光器を用いても判別することは困難である。ただし、この推測を示すためには $34128\text{ cm}^{-1}$ から $24066\text{ cm}^{-1}$ に遷移するかを確認する必要がある。

ここで示した測定法により、27本の2段目励起準位についてJ値、g因子を求めることが出来、測定可能範囲も $J=4\sim 8$ に広がり、従来の方法によって決定できなかったエネルギー準位についても求めることが出来た。また、高励起準位のg因子は報告が極めて少なく、ほとんど今回の測定で初めて求められた。

## 5. おわりに

2台のリングレーザーを用いたウラン原子のゼーマン効果測定法により、高励起準位のJ値を決定できることを示し、27本のエネルギー準位について測定した。さらに測定可能範囲も $J=4\sim J=8$ に広がり、従来の測定法では測定が困難であった準位についても測定することができた。また、高励起準位のg因子についてはこれまでほとんど報告されておらず、g因子の測定に本測定法が有効であることが示された。

本研究は科学技術庁からの受託研究「レーザー法ウラン濃縮技術開発」で得られた成果の一部である。

参考文献

- [1] Jean Blase, Leon J. Radziemski, Jr.; J. Opt. Soc. Am., vol.66, No.7, 644, July, 1976
- [2] L.R. Carlson, J.A. Paisner, et. al.; J. Opt. Soc. Am.; vol.66; No.8; Aug.; 846; 1976
- [3] Miron, R. David, et. al.; J. Opt. Soc. Am., vol.69, No.2, Feb., 256, 1979
- [4] V K Mago, B Lal, et. al.; J. phys. B 20, 6021, 1987
- [5] Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry; Uranium; Suppl. vol. A5; Springer-Verlag

Table 1 Relation between J-value and observable number of spectrum

Zeeman sublevel of first excited sublevel	$\Delta J (= J_2 - J_1)$	+1	0	-1
$m_1 = J \quad (-J)$		2	1	1
$m_1 = J-1 \quad (-J+1)$		2	2	1
$m_1 = J-2 \quad (-J+2)$		2	2	2

Table 2 determined J-value and g-factor

second excited levels (cm <sup>-1</sup> )	first excited level	J-value	g-factor	ref.1		ref.2
				J-value	g-factor	J-value
32970	B	6	1.13			6
33046	B	5	1.11	5		5
33046	B	7	1.15			6,7
33119	B	7	1.07	7		6,7
33264	A	7	1.10			6,7
33275	B	5	1.11			5,6
33363	A	8	1.13			6,7,8
33406	A	7	1.10			6,7,8
33421	C	6	0.866	6		6
33444	E	4	0.839	4	0.855	
33549	A	7	1.11			5,6,7
33590	C	7	1.22			6,7
33737	C	7	1.14			6,7
33801	A	8	1.13			6,7,8
33837	C	7	1.09			6,7
33907	C	6	1.08	6		6
33962	C	7	1.07			6,7
34048	C	7	1.16			6,7
34128	C	7	1.20			6
34160	C	6	0.904	6	0.890	6
34177	C	7	1.08			6,7
34319	C	7	1.095			6,7
34373	D	6	1.03	6		6
34418	C	7	1.12			6,7
34434	C	7	1.12			6,7
34487	D	7	1.15			6,7
34622	D	6	1.06			5,6

first excited levels

A: 15632cm<sup>-1</sup> (J=7)    B: 16505cm<sup>-1</sup> (J=6)    C: 16900cm<sup>-1</sup> (J=7)    D: 17362cm<sup>-1</sup> (J=6)  
 E: 16121cm<sup>-1</sup> (J=4)

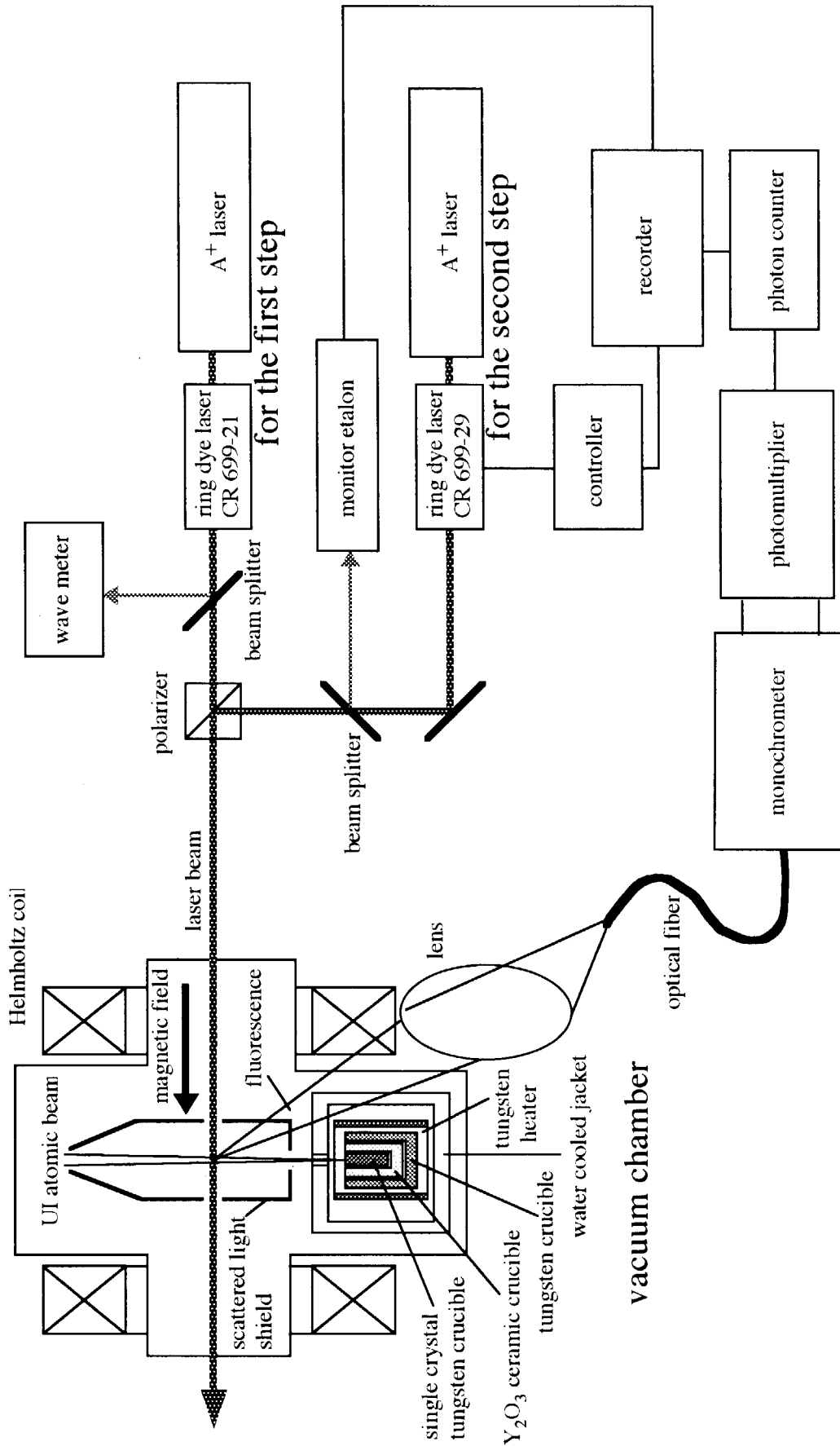


Fig. 1 Experimental setup

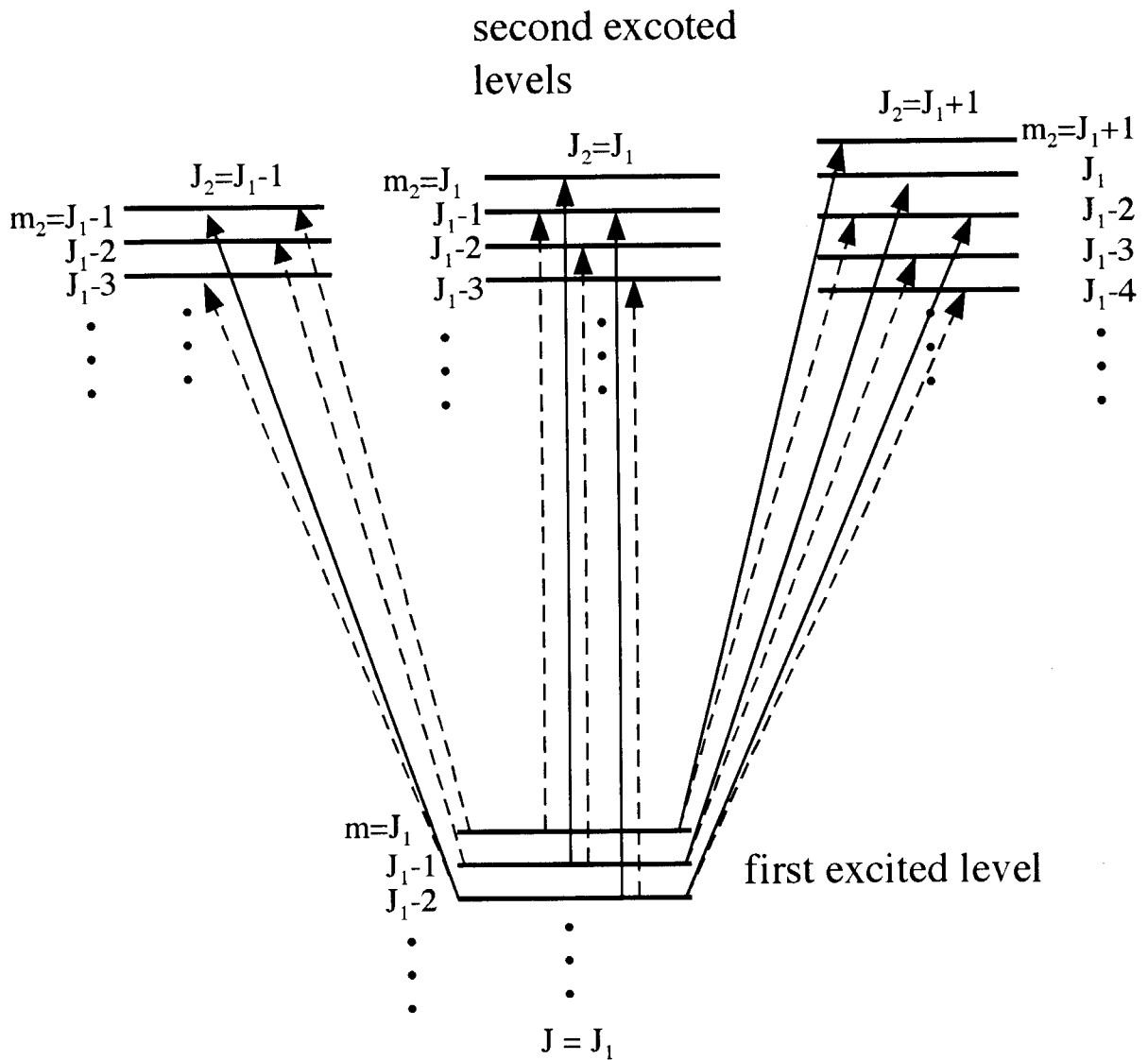


Fig.2 Transition between zeeman splitted sublevels and the circular polarized transition scheme

for the  $\Delta m = +1$  transition  


 for the  $\Delta m = -1$  transition



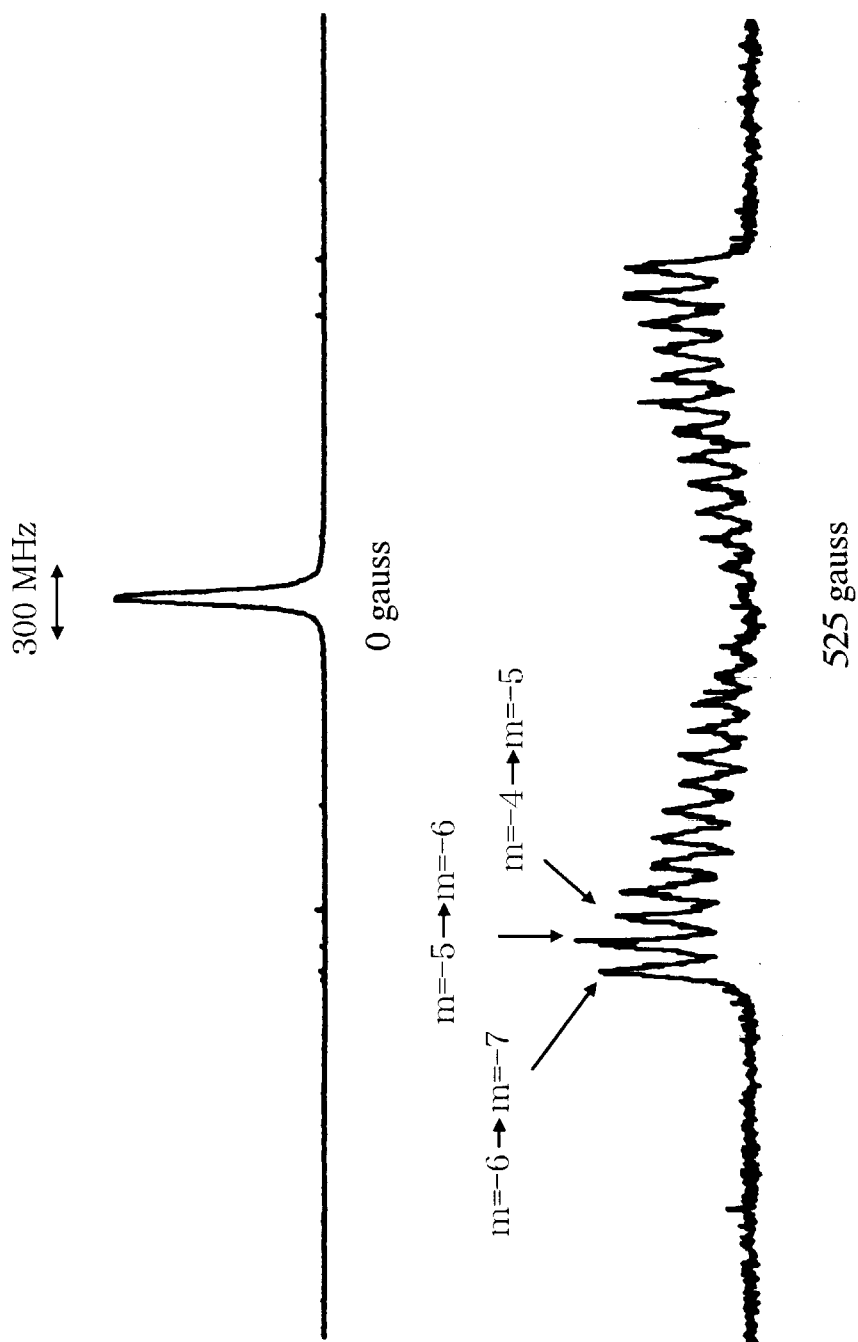


Fig.3 Zeeman split pattern of the first step  
0-16900  $\text{cm}^{-1}$

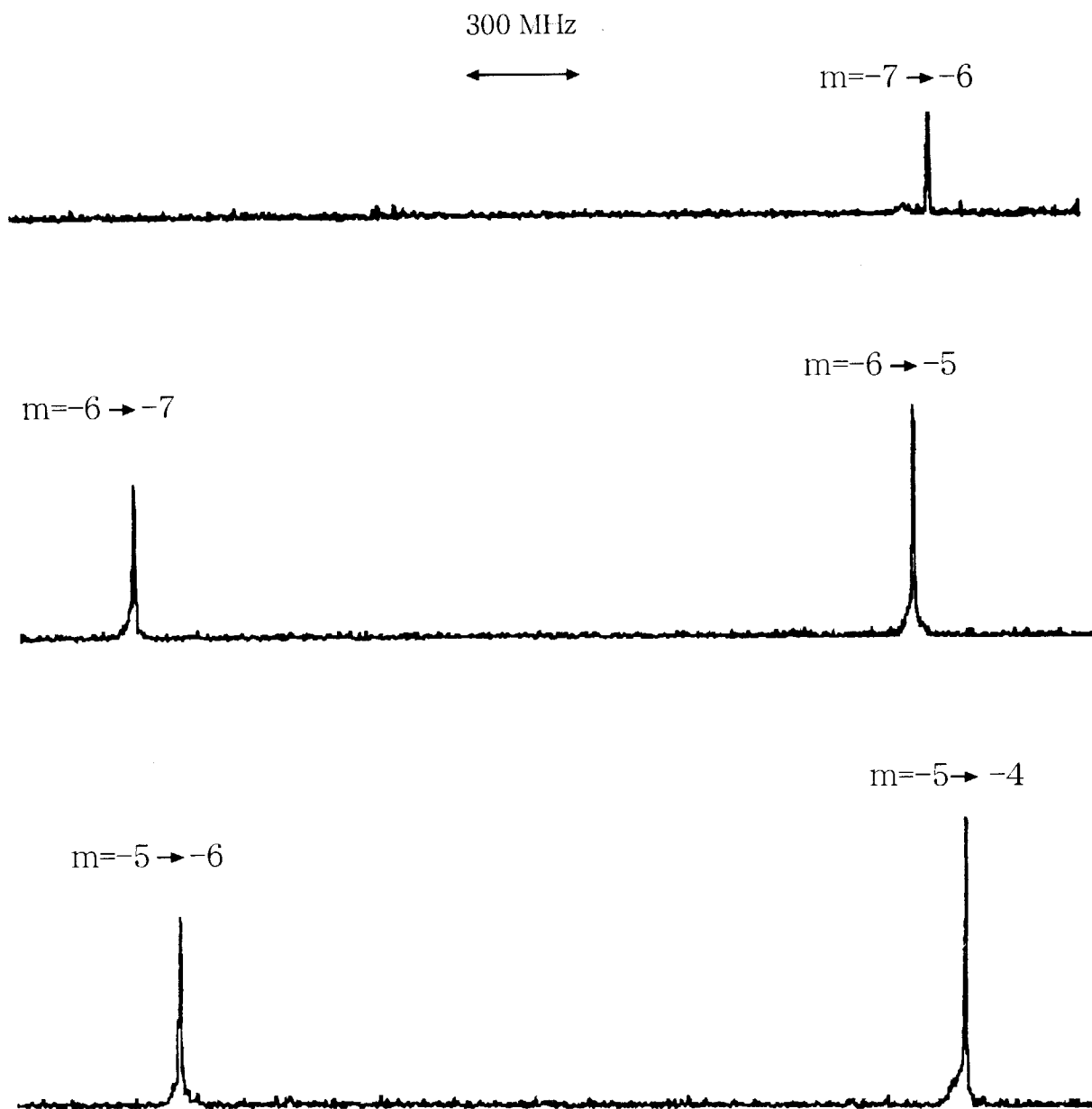


Fig.4 Zeeman splitted spectram of the second step  
from 16900cm-1 to 34177 cm-1  
magnetic field : 690 gauss

# 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	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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
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	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
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	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射線量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	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<sup>-19</sup>J  
1 u=1.66054×10<sup>-27</sup>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
バー	bar
ガロン	gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10<sup>-10</sup>m  
1 b=100fm<sup>2</sup>=10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup>  
1 bar=0.1MPa=10<sup>5</sup>Pa  
1 gal=1cm/s<sup>2</sup>=10<sup>-2</sup>m/s<sup>2</sup>  
1 Ci=3.7×10<sup>10</sup>Bq  
1 R=2.58×10<sup>-4</sup>C/kg  
1 rad=1cGy=10<sup>-2</sup>Gy  
1 rem=1cSv=10<sup>-2</sup>Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	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。
- E.C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 <sup>5</sup> 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/m<sup>2</sup>)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal= 4.18605J (計量法) = 4.184J (熱化学) = 4.1855J (15°C) = 4.1868J (国際蒸気表) 仕事率 1 PS(仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499W
	1	0.101972	2.77778×10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813×10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150×10 <sup>18</sup>	
	9.80665	1	2.72407×10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487×10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082×10 <sup>19</sup>	
	3.6×10 <sup>6</sup>	3.67098×10 <sup>3</sup>	1	8.59999×10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522×10 <sup>6</sup>	2.24694×10 <sup>25</sup>	
	4.18605	0.426858	1.16279×10 <sup>-6</sup>	1	3.96759×10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272×10 <sup>19</sup>	
	1055.06	107.586	2.93072×10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515×10 <sup>21</sup>	
	1.35582	0.138255	3.76616×10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506×10 <sup>-3</sup>	1	8.46233×10 <sup>18</sup>	
	1.60218×10 <sup>19</sup>	1.63377×10 <sup>20</sup>	4.45050×10 <sup>20</sup>	3.82743×10 <sup>20</sup>	1.51857×10 <sup>22</sup>	1.18171×10 <sup>19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 <sup>-11</sup>
	3.7×10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

2段階レーザー誘起蛍光法によるウラン原子のゼーマン効果測定