

JAERI-Research



JP0550003

2004-023



3 段階共鳴イオン化分光法による
 ^{40}Ca のイオン化ポテンシャルの高精度測定

2004年11月

宮部 昌文・大場 正規・加藤 政明
若井田 育夫・渡部 和男

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。

入手の間合わせは、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, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

3段階共鳴イオン化分光法による ^{40}Ca のイオン化ポテンシャルの高精度測定

日本原子力研究所東海研究所環境科学研究部

宮部 昌文・大場 正規・加藤 政明・若井田 育夫・渡部 和男

(2004年11月4日受理)

単一モード連続発振の外部共振器半導体レーザーを用いた3段階共鳴イオン化分光により、カルシウム原子の摂動のない長いリドベルグ系列を観測した。電場補償用電極を用いて光反応領域の残留電場を数mv/cmまで減らすことで、 $4snp$ (1P_1) 系列と $4snf$ (1F_3) 系列の高リドベルグ状態を $n=20-150$ の範囲で観測できた。ネオンのドップラーフリー吸収線で波長を校正したマイケルソン干渉計を用いて、各状態の準位エネルギーを $1.8 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$ の精度で決定した。さらに得られた準位エネルギーをリドベルグリッツの拡張公式によって最小自乗近似することにより、カルシウム40のイオン化ポテンシャルを従来報告されている値より1桁高い精度で $49305.9240(20) \text{cm}^{-1}$ と決定することができた。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

Determination of the ^{40}Ca Ionization Potential by High-precision Three-step Resonance Ionization Spectroscopy

Masabumi MIYABE, Masaki OBA, Masaaki KATO, Ikuo WAKAIDA
and Kazuo WATANABE

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

(Received November 4, 2004)

Three-step resonance ionization spectroscopy with single-mode extended cavity diode lasers has been applied to observe long and unperturbed Rydberg series of atomic calcium. By using a field compensation electrode, residual electric field in the photo-excitation region was reduced less than several mV/cm so that the series of $4snp$ (1P_1) and $4snf$ (1F_3) Rydberg states were measured in the range of $n=20-150$. The level energies were determined with a Michelson interferometer calibrated with several Doppler-free resonance lines of neon. By fitting an extended Ritz formula to the energies, ionization potential of ^{40}Ca was determined to be $49305.9240(20)\text{ cm}^{-1}$ with the accuracy improved one order of magnitude higher than previously reported values.

Keywords : Diode Laser, ECDL, Resonance Ionization Spectroscopy, Rydberg Series, Ionization Potential, Quantum defect

目 次

1. はじめに.....	1
2. 実験装置	2
3. 結果と議論	5
4. 結論.....	16
謝辞	16
参考文献.....	17

Contents

1. Introduction.....	1
2. Experimental setup.....	2
3. Results and discussions	5
4. Conclusions.....	16
Acknowledgement	16
References.....	17

This is a blank page.

1 はじめに

単一モードレーザーを用いた共鳴励起、共鳴電離分光法は、様々な原子物性値を精度良く測定できる優れた手法である。アルカリ金属やアルカリ土類金属、希土類元素のリドベルグ状態も、ここ20～30年間、この方法で幅広く調べられ、イオン化極限の精密測定や、イオンコアの分極率の研究に重要な役割を果たしてきた¹⁾⁻⁹⁾。しかし、アルカリ土類金属の1つであるカルシウム原子では、筆者の知る限り、Mueller¹⁰⁾らの報告したリドベルグ状態の同位体シフトの研究を除けば、単一モードレーザーによる精密分光研究は報告されていない。

カルシウムのリドベルグ状態から電離ポテンシャルを決定する研究は、これまでにGarton, Penkin, Brown, Borgstoem, Armstrong, Beigangなどによって行われている¹¹⁾⁻¹⁸⁾。またSugarらは、これらの報告値の誤差を評価し、カルシウムの電離ポテンシャルの推奨値として $49305.96(8) \text{ cm}^{-1}$ を提案している¹⁹⁾。またGentileらは、レーザーとマイクロ波の2重共鳴分光法を利用して、偶パリティリドベルグ状態の、近接する状態間の間隔を極めて高い精度で測定している²⁰⁾。またLaughlinは角運動量の大きなリドベルグ状態の分極率やコア貫入性を理論的に計算して実測値との比較を試みている²¹⁾。さらにArmstrongは多チャンネル量子欠損理論を用いて偶パリティ状態、特に $4snp$ 状態が、複数の2重励起状態から強い摂動を受け、系列全体に渡ってその影響が現れていることを明らかにしている¹⁵⁾⁻¹⁶⁾。またこのような摂動の存在から、正確な電離ポテンシャルを決定するには奇パリティ系列の方が適していることが分かっている¹⁷⁾。カルシウム原子の奇パリティ系列は、Brown¹³⁾が $4snp$ 系列、Mueller¹⁰⁾やMakdisi²²⁾が $4snf$ 系列を、それぞれ $n=11-79$, $n=13-40$, $n=33-59$ の範囲で同定している。

本研究では、我々がこれまで共鳴イオン化精密分光分析用に開発してきた単一モード周波数安定化半導体レーザーシステムを利用して、カルシウム原子の奇パリティ高リドベルグ系列を観測することで、イオン化ポテンシャルを高精度で測定した。観測した系列は $4snp$ 及び $4snf$ 系列の $n=20-150$ の範囲で、拡張リッツ公式を用いて ^{40}Ca の系列極限を評価し、従来より1桁以上高い精度の値を求めることができた。

本報告では第2章において実験装置及びレーザー周波数の絶対値校正について述べ、第3章で実験結果と、得られたイオン化ポテンシャル、リッツ係数の誤差について議論する。

2 実験装置

図1に実験装置の概要、図2に本研究で用いたカルシウムの3段階共鳴電離スキームと関連するエネルギー準位図を示す。実験装置は大きく分けて、(1)外部キャビティ半導体レーザー(ECDL)4台を用いたレーザー光源系と(2)抵抗加熱坩堝からなる原子蒸発系、(3)生成されたイオンを検出し記録する信号処理系の3つから構成される。

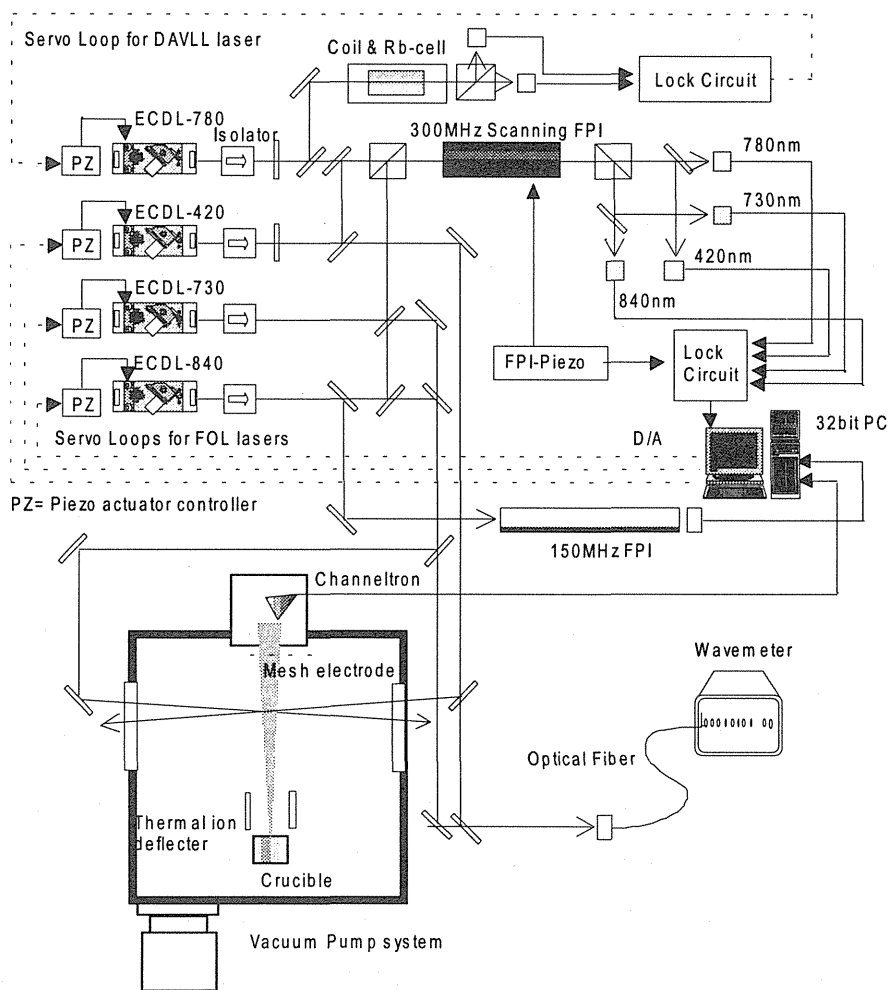


図1 実験装置のブロックダイアグラム

4台のECDLのうち1台は、発振周波数をルビジウムの原子吸収線周波数にロックさせた“周波数基準”となるレーザーである。また、残りの3台は、走査型ファブリペロエタロン干渉計 (Free Spectral Range: 300MHz, フィネス:200) で発生する干渉縞の間隔を一定に保つ方法 (フリンジオフセットロック法) を用いて、基準レーザーに対する相対周波数を安定化させた3段階励起用ECDLである。このうち3段目のレーザーは市販品(SDL TC40-D)で、Littman-Metcalf型共振器構造を持つオシレータと、テーパ型アン

プ素子でMOPAを構成した高出力ECDL(500mW)である。その他の、基準レーザー(Sanyo DL4140)、第1励起レーザー(Nichia NDHV310)、第2励起レーザー(Frankfurt Laser FIDL-10S-730)は、Littrow型共振器構造を持つ自作ECDLである。これらの詳細な構造と個々の性能は別に報告した通りである²³⁾⁻²⁴⁾。

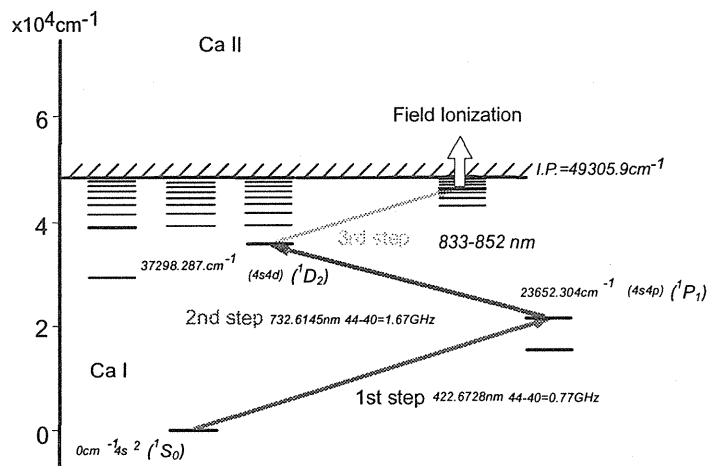


図2 観測に用いたカルシウムの3段階電離スキームと関連するエネルギー準位図

カルシウムの中性原子ビームは、真空度 10^{-5} Pa以下の真空容器内で、金属カルシウムを入れたカーボンつぼを、その周囲に配置したタングステンヒータで約 550°C (蒸気圧 10^{-1} Pa) まで加熱することで発生させた。原子ビームはつぼから約30cm直上の光反応領域で3本のレーザービームと交差させた。3段階共鳴吸収でリドベルグ状態まで励起された原子は、長い励起寿命を持つため、途中でほとんど脱励起することなく、約10cm直上のイオン検出器まで到達した。イオン検出器はメッシュ電極を介したシールドボックス内に配置し、検出器からの電場が光反応領域に漏洩しないようにした。イオン検出器近傍に到達したリドベルグ原子は約 3kV/cm の電場でイオン化させた。発生したイオンは、セラトロン増倍管(村田製Ceratron-E)で検出した。光イオンパルスは1GHzの高速プリアンプ(Ortec 9306)で電流電圧変換した後、ゲート型フォトンカウンタ(SRS SR400)で計数し、A/D変換してコンピューターに記録した。

1段目と2段目のレーザーの同調は、光反応領域で発生する第1、第2励起準位の脱励起に伴う蛍光をCCDカメラで観測することで行った。まず、主要同位体である ^{40}Ca (天然存在比97%) の蛍光像が、原子ビームのほぼ中心になるよう1段目の波長を同調した。レーザーを十分強くすると反応領域を透過して真空容器の窓で反射したレーザー光が再び反応領域に戻ることでもう1つの蛍光スポットが現れた。2つのスポットは対向する同一周波数の光で生じるため、これらが重なるように周波数を調整することで、横方向の速度成分を持たない原子ビームの中心に1段目の波長を共鳴させた。この状態で、CCDカメラに赤色光のみを透過させるフィルタを取り付け、1段目とは反対方向から2段目のレーザー光を照射し、第2励起準位からの蛍光が最も強くなるよう波長を調整した。イオンスペクトルは、この状態で3段目のレーザーを波長掃引することで測定した。周波数の相対的な変化は、同時に計測したFSRが150MHzまた

は300MHzのエタロン干渉計の干渉信号によってモニタし、周波数の絶対値はマイケルソン干渉計式波長計(Burleigh WA500)を用いて測定した。

リドベルグ系列極限の測定では、系列の準位エネルギー、即ち周波数の絶対値精度が重要なため、波長計の絶対校正が不可欠である。この波長計の校正には、天然同位体比90.5%の ^{20}Ne を利用し、3段目のECDLの発振波長範囲(830-850nm)に共鳴波長がある5本の原子吸収線のドップラーフリー飽和吸収線を観測することで行った。この波長域のNeの吸収線は、準安定状態を始状態とするため、準安定状態を放電によって生成することのできるシースルー型ホロカソードランプを原子吸収セルとして用いた。3段目のレーザーを2本に分け、強度の強いポンプビームを光チョップで変調させてセルに通し、これと対向させてプローブビームをセルに透過させた。この透過光強度に現れる変調成分を、ロックインアンプ(NF 5600A)で位相敏感検波してドップラーフリーのスペクトルを測定した。得られたスペクトルの一例を図3に示す。現れたスペクトルの中心波長を波長計で読みとり、文献値²⁵⁾と比較した。表1に示すように、波長計の表示値と文献値は7桁の最後の1桁が1違う場合があるほかは文献値と一致しており、系統誤差はないことが確かめられた。

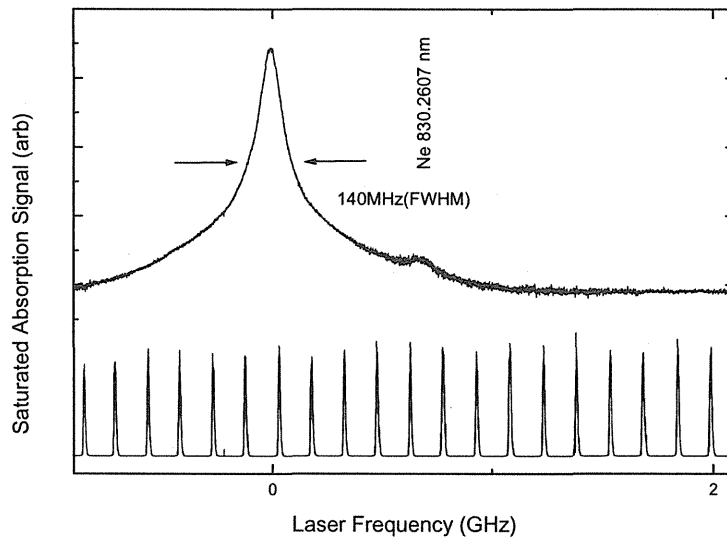


図3 波長計の波長校正に用いたネオン原子の飽和吸収スペクトル

表1 波長校正値と文献値の比較

Measured wavelength (nm)	Reported wavelength (nm)
830.2607	830.2607
836.8046	836.8047
837.9910	837.9909
842.0740	842.0740
849.7694	849.7693

3 結果と議論

高リドベルグ状態は電気分極率が大きいことから、その観測のためには光反応領域の残留電場を可能な限り減らすことが重要である。本研究では反応領域において、検出器からの電場をシールドすると同時に、原子ビーム方向にかかる微弱な残留電場を補償するため、反応領域とイオン検出器の間にメッシュ電極を設置した。これによりリドベルグ状態のピークの波長を測定する前に、そのピークのDCシュタルクシフトを観測して、その大きさが最小になるよう、電極に印加する電圧を最適化した。図4に様々な電圧で測定したリドベルグ状態の典型的なスペクトル（対数目盛）を示す。ピークの放物線的なシフトから最適電圧を決定した。このようにして最小化した残留電場の下でリドベルグ状態のスペクトルを測定し、各ピークの波長を波長計により測定した。

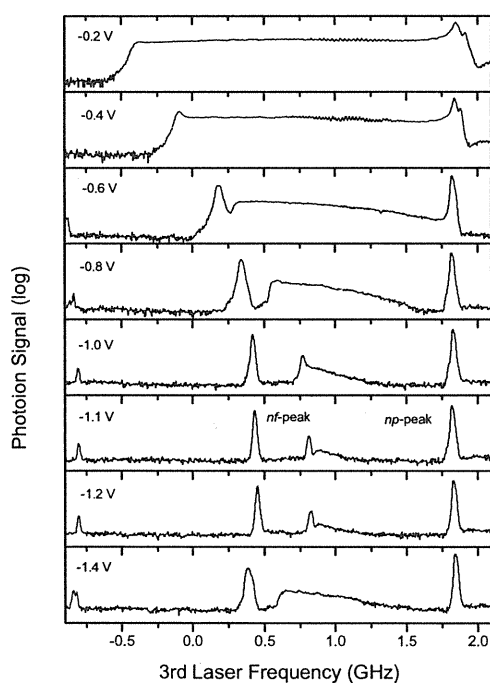


図4 リドベルグ状態の放物線的シフトの観測による残留電場の低減化

図5 aに測定したスペクトルの一部を示す。図の下側のトレースは間隔が300MHzの周波数マーカである。カルシウムイオンの基底状態へ収束する2本の強い系列と、1本の弱い系列が観測できた。これらの線幅は約25 MHz (FWHM)であり、主にECDLの発振幅による広がりと考えられる。カウントレート約100cpsのバックグラウンドノイズは、カルシウムの第1励起状態の原子が2段目の光を2光子吸収して連続状態に励起されて生じたイオンである。

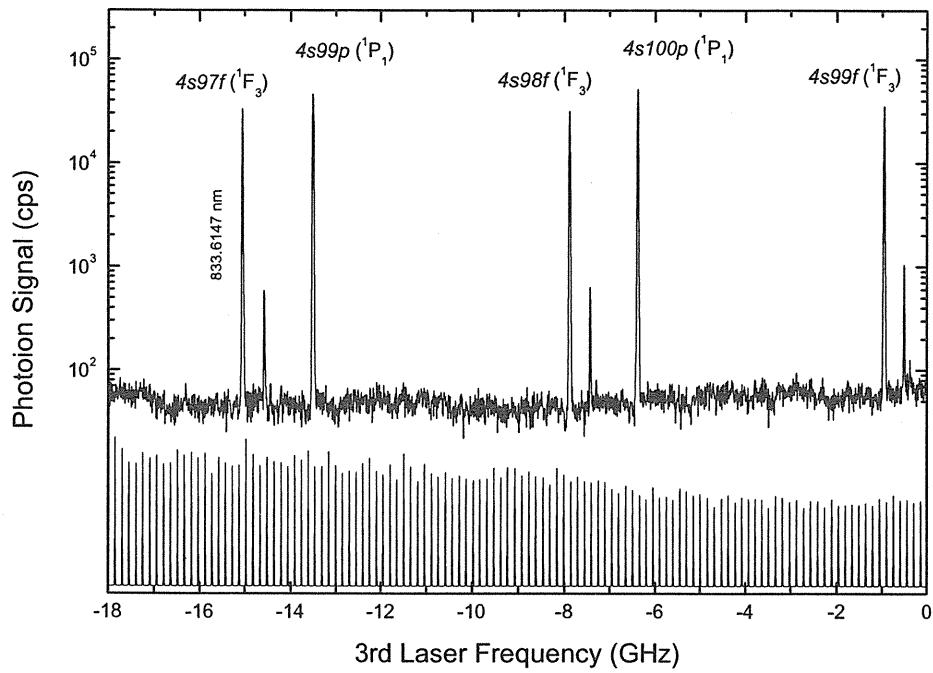


図5a 観測したリドベルグ系列 ($n=100$ 付近)

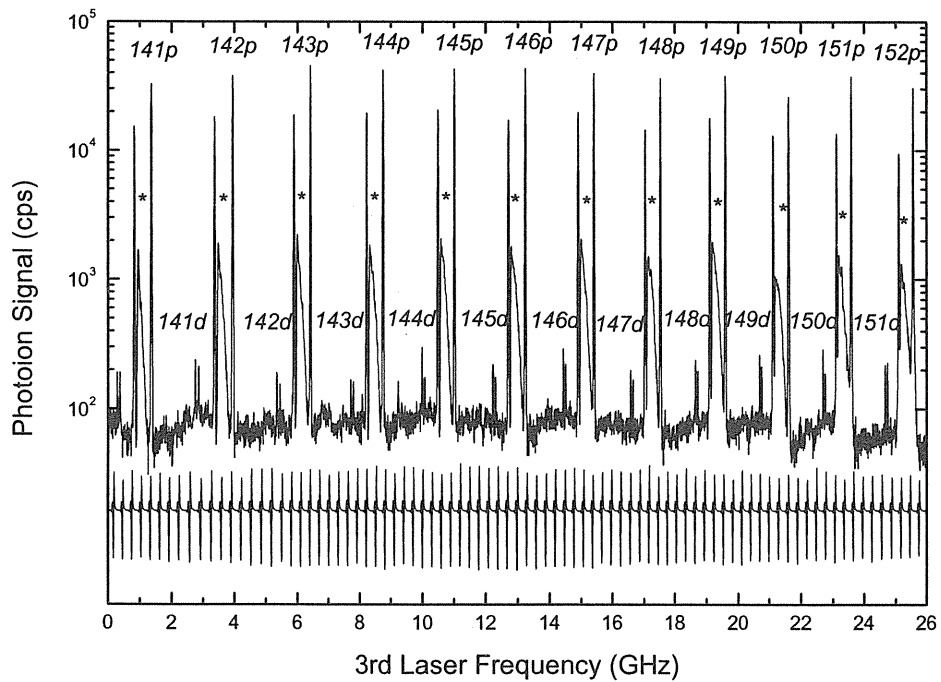


図5b 観測したリドベルグ系列 ($n=150$ 付近)

文献^{10),13)}により、観測された最も強いピークと2番目に強いピークはそれぞれ $4snp$ (P_i) 系列と $4snf$ (F_j) 系列と同定できる。これらの系列ピークの波長測定値と、第2励起準位のエネルギーを加算して求めた準位エネルギーを、報告値とともに表2、3に示す。測定した系列全体で、系列準位と相互作用する準位(摂動準位)は観測されなかったが、高エネルギー領域には、弱い残留電場によって生じた弱い nd 系列や、シュタルク効果による非対称で幅の広い構造が観測された。図5bに示した $n=150$ 付近のスペクトルでは、この $4snd$ 系列や、アスタリスクで示したシュタルク構造が n の増加とともに成長する様子がわかる。下の周波数マーカの間隔は150MHzである。 $n > 100$ の np 系列と nf 系列では、この弱いシュタルク効果によりピークの周波数がそれぞれ反対方向にわずかにシフトしている。従って、高精度イオン化ポテンシャルの決定ではシュタルクシフトの誤差を防ぐため $n \leq 100$ のデータだけを利用した。

観測されたカルシウムの2つのリドベルグ系列の準位エネルギーは次のような拡張されたリッツ公式を用いて解析した。

$$E = I - \frac{R_{40}}{(n-\delta)^2}, \quad (1)$$

ここで E は主量子数 n の準位エネルギー、 I はイオン化ポテンシャル、 R_{40} は質量補正されたリドベルグ定数 ($109735.81037 \text{ cm}^{-1}$: ^{40}Ca)、 δ は量子欠損である。イオンコアの偏極のため、一般に量子欠損は弱い主量子数依存性を持ち、次のような展開級数で記述できる⁸⁾⁻⁹⁾。

$$\delta = \delta_0 + \frac{\delta_2}{(n-\delta_0)^2} + \frac{\delta_4}{(n-\delta_0)^4} + \dots \quad (2)$$

(2)式の高次の展開項は主量子数の小さいリドベルグ状態で必要になるもので、本研究では4次の項までを考慮した。非線形最小自乗近似により、イオン化ポテンシャルとリッツ係数を各系列について同時に最適化した。得られたイオン化ポテンシャルとリッツ係数の値は、文献値とともに表4、5にまとめて示した。但し、本測定値の最後に括弧で示した数値は近似の標準偏差を表している。合わせて、表2、3には得られたイオン化ポテンシャルとリッツ係数から、(1)、(2)式を使って計算で求められる準位エネルギーをコラム5に、また、その計算値と測定値の差をコラム6に示した。

最小自乗近似の精度は図6と図7のグラフを用いて評価した。図6の白丸は測定した準位エネルギーとイオン化ポテンシャルを(1)式に代入して求めた量子欠損で、その値は表2、3のコラム4にも示した。さらにこの図には(2)式とリッツ係数から計算した量子欠損も点線で示した。点線と白丸の差は解析した系列の広い範囲に渡ってランダムに分布することがわかった。一方、図7には準位エネルギーの測定値と計算値の残差を示した。各系列とも残差は $\pm 8 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 以内であることがわかった。これらの図から、測定値は拡張リッツ公式でよく表せることが確かめられた。

表2 ^{40}Ca の $4snp$ (1P_1)系列の準位エネルギーと量子欠損

n	λ_{vac} (nm)	$E(n)$ (cm^{-1})	δ	$\text{Calc. } E(n)$ (cm^{-1})	ΔE $10^{-4}(\text{cm}^{-1})$	$\text{Rep. } E(n)$ (cm^{-1})
22	852.03345	49034.915	1.87747	49034.915	2.4	49034.98
23	850.21985	49059.951	1.87823	49059.951	0.5	49060.02
24	848.65250	49081.673	1.87889	49081.673	1.9	49081.75
25	847.28860	49100.641	1.87948	49100.641	-0.5	49100.72
26	846.09420	49117.302	1.87996	49117.302	2.4	49117.38
27	845.04230	49132.014	1.88044	49132.014	-1.3	49132.09
28	844.11095	49145.071	1.88083	49145.071	0.1	49145.15
29	843.28240	49156.711	1.88120	49156.711	-2.4	49156.78
30	842.54195	49167.132	1.88149	49167.132	1.0	49167.20
31	841.87755	49176.499	1.88176	49176.499	1.9	49176.58
32	841.27910	49184.949	1.88203	49184.949	1.2	49185.02
33	840.73810	49192.597	1.88223	49192.597	3.3	49192.68
34	840.24745	49199.543	1.88247	49199.543	1.3	49199.62
35	839.80105	49205.869	1.88269	49205.869	0.0	49205.95
36	839.39380	49211.648	1.88282	49211.648	2.3	49211.72
37	839.02100	49216.940	1.88297	49216.940	2.6	49217.02
38	838.67915	49221.798	1.88324	49221.798	-2.9	49221.87
39	838.36475	49226.269	1.88335	49226.270	-1.6	49226.35
40	838.07500	49230.393	1.88355	49230.394	-4.5	49230.45
41	837.80730	49234.206	1.88352	49234.206	1.4	49234.28
42	837.55960	49237.736	1.88381	49237.736	-5.0	49237.82
43	837.32980	49241.013	1.88375	49241.013	0.5	49241.09
44	837.11630	49244.058	1.88375	49244.058	3.2	49244.13
45	836.91760	49246.895	1.88385	49246.894	2.6	49246.98
46	836.73235	49249.540	1.88400	49249.540	0.8	49249.61
47	836.55935	49252.012	1.88412	49252.012	-0.5	49252.08
48	836.39750	49254.325	1.88396	49254.324	4.8	49254.41
49	836.24595	49256.491	1.88411	49256.491	2.8	49256.56
50	836.10380	49258.524	1.88426	49258.524	0.7	49258.60
51	835.97025	49260.435	1.88414	49260.435	4.1	49260.51
52	835.84470	49262.232	1.88439	49262.232	0.5	49262.30
53	835.72640	49263.924	1.88482	49263.925	-5.7	49263.99
54	835.61490	49265.521	1.88463	49265.521	-1.8	49265.59
55	835.50980	49267.028	1.88478	49267.028	-3.2	49267.10
56	835.41035	49268.452	1.88439	49268.452	3.0	49268.52
57	835.31635	49269.799	1.88468	49269.799	-0.5	49269.88
58	835.22735	49271.075	1.88499	49271.075	-3.8	49271.14
59	835.14295	49272.285	1.88470	49272.285	0.3	49272.35
60	835.06290	49273.433	1.88458	49273.433	2.0	49273.50
61	834.98690	49274.523	1.88456	49274.523	2.5	49274.60
62	834.91470	49275.558	1.88490	49275.559	-0.8	49275.62
63	834.84600	49276.544	1.88487	49276.544	-0.2	49276.61
64	834.78060	49277.482	1.88481	49277.482	0.7	49277.55
65	834.71830	49278.377	1.88486	49278.377	0.5	49278.44
66	834.65890	49279.229	1.88489	49279.229	0.4	49279.30
67	834.60220	49280.043	1.88450	49280.043	3.7	49280.10
68	834.54810	49280.820	1.88483	49280.820	1.2	49280.88
69	834.49640	49281.562	1.88505	49281.562	-0.3	49281.62
70	834.44695	49282.272	1.88495	49282.272	0.6	49282.34
71	834.39965	49282.952	1.88513	49282.952	-0.5	49283.01

表2 ^{40}Ca の $4snp$ (1P_1) 系列の準位エネルギーと量子欠損

n	λ_{vac} (nm)	$E(n)$ (cm^{-1})	δ	Calc. $E(n)$ (cm^{-1})	ΔE $10^{-4}(\text{cm}^{-1})$	Rep. $E(n)$ (cm^{-1})
72	834.35435	49283.602	1.88500	49283.602	0.5	49283.67
73	834.31095	49284.226	1.88481	49284.226	1.7	49284.30
74	834.26935	49284.823	1.88468	49284.823	2.5	49284.88
75	834.22945	49285.397	1.88457	49285.396	3.1	49285.46
76	834.19120	49285.946	1.88559	49285.947	-2.4	49286.00
77	834.15440	49286.475	1.88468	49286.475	2.5	49286.54
78	834.11910	49286.983	1.88535	49286.983	-0.9	49287.05
79	834.08515	49287.471	1.88553	49287.471	-1.6	49287.57
80	834.05250	49287.940	1.88579	49287.940	-2.7	
81	834.02105	49288.392	1.88499	49288.392	1.0	
82	833.99080	49288.827	1.88508	49288.827	0.6	
83	833.96165	49289.246	1.88469	49289.246	2.3	
84	833.93360	49289.649	1.88573	49289.650	-1.9	
85	833.90655	49290.038	1.88649	49290.039	-4.7	
86	833.88040	49290.414	1.88492	49290.414	1.3	
87	833.85520	49290.777	1.88459	49290.777	2.5	
88	833.83090	49291.126	1.88533	49291.126	-0.1	
89	833.80740	49291.464	1.88464	49291.464	2.2	
90	833.78475	49291.790	1.88632	49291.790	-3.2	
91	833.76280	49292.106	1.88531	49292.106	0.1	
92	833.74160	49292.411	1.88532	49292.411	0.1	
93	833.72110	49292.706	1.88557	49292.706	-0.6	
94	833.70125	49292.991	1.88506	49292.991	0.8	
95	833.68205	49293.268	1.88523	49293.268	0.4	
96	833.66345	49293.535	1.88487	49293.535	1.3	
97	833.64545	49293.794	1.88539	49293.794	0.0	
98	833.62800	49294.045	1.88536	49294.045	0.1	
99	833.61110	49294.288	1.88611	49294.289	-1.7	
100	833.59470	49294.525	1.88597	49294.525	-1.3	
101	833.57880	49294.753	1.88618	49294.753	-1.7	
102	833.56335	49294.976	1.88477	49294.976	1.4	
103	833.54835	49295.192	1.88287	49295.191	5.4	
104	833.53385	49295.400	1.88517	49295.400	0.5	
105	833.51975	49295.603	1.88608	49295.603	-1.3	
106	833.50600	49295.801	1.88296	49295.801	4.8	
107	833.49270	49295.993	1.88424	49295.992	2.3	
108	833.47975	49296.179	1.88363	49296.179	3.4	
109	833.46720	49296.360	1.88612	49296.360	-1.2	
110	833.45490	49296.537	1.88063	49296.536	8.4	
111	833.44305	49296.707	1.88463	49296.707	1.4	
112	833.43150	49296.874	1.88683	49296.874	-2.2	
113	833.42020	49297.036	1.88363	49297.036	3.0	
114	833.40925	49297.194	1.88485	49297.194	1.0	
115	833.39860	49297.347	1.88710	49297.347	-2.4	
116	833.38820	49297.497	1.88658	49297.497	-1.6	
117	833.37805	49297.643	1.88404	49297.643	2.1	
118	833.36820	49297.785	1.88540	49297.785	0.2	
119	833.35855	49297.924	1.88138	49297.923	5.7	
120	833.34920	49298.059	1.88327	49298.058	3.0	
121	833.34005	49298.190	1.88137	49298.190	5.4	

表2 ^{40}Ca の $4snp$ ($1P_1$) 系列の準位エネルギーと量子欠損

n	λ_{vac} (nm)	$E(n)$ (cm^{-1})	δ	$Calc. E(n)$ (cm^{-1})	ΔE $10^{-4}(\text{cm}^{-1})$	$Rep. E(n)$ (cm^{-1})
122	833.33115	49298.318	1.88194	49298.318	4.5	
123	833.32250	49298.443	1.88606	49298.443	-0.7	
124	833.31400	49298.565	1.88290	49298.565	3.2	
125	833.30575	49298.684	1.88499	49298.684	0.6	
126	833.29770	49298.800	1.88729	49298.800	-2.0	
127	833.28980	49298.914	1.88420	49298.914	1.5	
128	833.28210	49299.025	1.88270	49299.024	3.1	
129	833.27460	49299.133	1.88370	49299.133	2.0	
130	833.26730	49299.238	1.88817	49299.238	-2.7	
131	833.26010	49299.342	1.88299	49299.341	2.6	
132	833.25310	49299.442	1.88267	49299.442	2.9	
133	833.24625	49299.541	1.88092	49299.541	4.5	
134	833.23955	49299.638	1.87836	49299.637	6.9	
135	833.23305	49299.731	1.88341	49299.731	2.0	
136	833.22665	49299.823	1.88145	49299.823	3.8	
137	833.22045	49299.913	1.88888	49299.913	-2.9	
138	833.21430	49300.001	1.88222	49300.001	2.9	
139	833.20830	49300.088	1.87808	49300.087	6.4	
140	833.20250	49300.171	1.88597	49300.171	-0.3	
141	833.19675	49300.254	1.88083	49300.254	3.9	
142	833.19115	49300.335	1.88051	49300.334	4.1	
143	833.18570	49300.413	1.88594	49300.413	-0.3	
144	833.18030	49300.491	1.87930	49300.491	4.8	
145	833.17505	49300.567	1.87967	49300.566	4.4	
146	833.16990	49300.641	1.87828	49300.640	5.4	
147	833.16490	49300.713	1.88566	49300.713	0.0	
148	833.15995	49300.784	1.88247	49300.784	2.2	
149	833.15510	49300.854	1.87907	49300.854	4.5	
150	833.15040	49300.922	1.88671	49300.922	-0.7	
151	833.14575	49300.989	1.88486	49300.989	0.5	

Rep. $E(n)$ from Brown ¹³⁾

表3 ^{40}Ca の $4snf(1F_3)$ 系列の準位エネルギーと量子欠損

n	λ_{vac} (nm)	$E(n)$ (cm^{-1})	δ	$Calc. E(n)$ (cm^{-1})	ΔE $10^{-4}(\text{cm}^{-1})$	$Rep. E(n)$ (cm^{-1})
20	852.46725	49028.943	0.09560	49028.943	1.8	49028.934
21	850.59220	49054.802	0.09588	49054.802	-3.4	49054.793
22	848.97455	49077.203	0.09611	49077.203	-2.0	49077.195
23	847.56905	49096.736	0.09631	49096.736	-0.2	49096.734
24	846.34005	49113.869	0.09653	49113.869	-6.5	49113.869
25	845.25895	49128.981	0.09667	49128.981	-2.6	49128.981
26	844.30290	49142.378	0.09679	49142.378	0.4	49142.375
27	843.45325	49154.309	0.09688	49154.308	4.2	49154.307
28	842.69480	49164.979	0.09706	49164.980	-2.2	49164.977
29	842.01480	49174.563	0.09715	49174.563	-1.0	49174.561
30	841.40275	49183.202	0.09715	49183.201	7.3	49183.199
31	840.85005	49191.014	0.09740	49191.014	-5.6	49191.012
32	840.34900	49198.105	0.09740	49198.105	0.4	49198.104
33	839.89350	49204.558	0.09750	49204.559	-1.3	49204.556
34	839.47810	49210.450	0.09750	49210.450	2.1	49210.447
35	839.09830	49215.842	0.09765	49215.842	-2.3	49215.840
36	838.75005	49220.790	0.09767	49220.790	-0.6	49220.788
37	838.43000	49225.341	0.09776	49225.341	-2.1	49225.338
38	838.13515	49229.537	0.09781	49229.537	-2.0	49229.534
39	837.86290	49233.414	0.09775	49233.414	1.9	49233.411
40	837.61105	49237.002	0.09782	49237.002	0.8	49236.999
41	837.37760	49240.331	0.09798	49240.331	-3.2	
42	837.16070	49243.425	0.09777	49243.424	4.5	
43	836.95895	49246.304	0.09784	49246.304	2.9	
44	836.77095	49248.989	0.09811	49248.989	-3.4	
45	836.59540	49251.496	0.09812	49251.497	-2.8	
46	836.43125	49253.842	0.09805	49253.842	-0.3	
47	836.27755	49256.040	0.09799	49256.039	1.4	
48	836.13350	49258.100	0.09846	49258.100	-7.6	
49	835.99815	49260.036	0.09826	49260.036	-3.0	
50	835.87090	49261.857	0.09809	49261.857	0.6	
51	835.75115	49263.571	0.09824	49263.571	-1.6	
52	835.63830	49265.187	0.09853	49265.188	-5.7	
53	835.53175	49266.713	0.09818	49266.713	0.0	
54	835.43110	49268.155	0.09782	49268.154	5.3	
55	835.33600	49269.518	0.09828	49269.518	-0.8	
56	835.24595	49270.808	0.09845	49270.809	-2.7	
57	835.16060	49272.032	0.09834	49272.032	-1.1	
58	835.07965	49273.193	0.09822	49273.193	0.4	
59	835.00280	49274.295	0.09807	49274.295	2.1	
60	834.92980	49275.342	0.09820	49275.342	0.9	
61	834.86035	49276.338	0.09792	49276.338	3.7	
62	834.79430	49277.286	0.09840	49277.286	-0.9	
63	834.73130	49278.190	0.09754	49278.189	6.9	
64	834.67135	49279.050	0.09845	49279.051	-1.0	
65	834.61410	49279.872	0.09837	49279.872	-0.3	
66	834.55945	49280.657	0.09841	49280.657	-0.5	
67	834.50725	49281.406	0.09867	49281.407	-2.3	
68	834.45730	49282.124	0.09801	49282.123	2.5	
69	834.40955	49282.809	0.09807	49282.809	2.0	

表3 ^{40}Ca の $4snf(1F_3)$ 系列の準位エネルギーと量子欠損

n	λ_{vac} (nm)	$E(n)$ (cm^{-1})	δ	Calc. $E(n)$ (cm^{-1})	ΔE $10^{-4}(\text{cm}^{-1})$	Rep. $E(n)$ (cm^{-1})
70	834.36385	49283.466	0.09837	49283.466	0.0	
71	834.32005	49284.095	0.09811	49284.095	1.7	
72	834.27810	49284.698	0.09859	49284.698	-1.2	
73	834.23780	49285.277	0.09735	49285.276	5.9	
74	834.19920	49285.831	0.09795	49285.831	2.4	
75	834.16215	49286.364	0.09888	49286.364	-2.5	
76	834.12650	49286.876	0.09819	49286.876	1.1	
77	834.09225	49287.369	0.09793	49287.368	2.4	
78	834.05930	49287.842	0.09726	49287.842	5.4	
79	834.02765	49288.297	0.09825	49288.297	0.8	
80	833.99715	49288.736	0.09818	49288.736	1.1	
81	833.96780	49289.158	0.09893	49289.158	-2.0	
82	833.93950	49289.565	0.09897	49289.565	-2.1	
83	833.91220	49289.957	0.09828	49289.957	0.7	
84	833.88590	49290.335	0.09864	49290.335	-0.7	
85	833.86050	49290.701	0.09800	49290.700	1.7	
86	833.83600	49291.053	0.09803	49291.053	1.5	
87	833.81235	49291.393	0.09839	49291.393	0.3	
88	833.78950	49291.722	0.09859	49291.722	-0.4	
89	833.76740	49292.040	0.09798	49292.040	1.6	
90	833.74605	49292.347	0.09808	49292.347	1.2	
91	833.72545	49292.643	0.10057	49292.644	-6.1	
92	833.70545	49292.931	0.09958	49292.931	-3.1	
93	833.68610	49293.209	0.09892	49293.209	-1.2	
94	833.66740	49293.478	0.10009	49293.479	-4.2	
95	833.64925	49293.740	0.09912	49293.740	-1.6	
96	833.63170	49293.992	0.10012	49293.992	-4.0	
97	833.61465	49294.237	0.09868	49294.237	-0.4	
98	833.59815	49294.475	0.09902	49294.475	-1.2	
99	833.58215	49294.705	0.09946	49294.705	-2.2	
100	833.56660	49294.929	0.09804	49294.929	1.0	
101	833.55155	49295.146	0.09923	49295.146	-1.5	
102	833.53690	49295.356	0.09758	49295.356	1.9	
103	833.52270	49295.561	0.09764	49295.561	1.8	
104	833.50895	49295.759	0.10074	49295.759	-4.4	
105	833.49555	49295.952	0.10078	49295.952	-4.3	
106	833.48250	49296.139	0.09862	49296.139	-0.2	
107	833.46990	49296.321	0.10321	49296.322	-8.4	
108	833.45755	49296.499	0.09977	49296.499	-2.2	
109	833.44560	49296.671	0.10140	49296.671	-4.9	
110	833.43395	49296.838	0.10090	49296.839	-3.9	
111	833.42260	49297.002	0.09912	49297.002	-0.9	
112	833.41160	49297.160	0.10160	49297.161	-4.8	
113	833.40085	49297.315	0.10024	49297.315	-2.6	
114	833.39040	49297.465	0.10058	49297.466	-3.0	
115	833.38020	49297.612	0.09875	49297.612	-0.3	
116	833.37030	49297.755	0.10063	49297.755	-2.9	
117	833.36065	49297.894	0.10223	49297.894	-5.1	
118	833.35120	49298.030	0.09906	49298.030	-0.7	
119	833.34205	49298.161	0.10269	49298.162	-5.4	

表3 ^{40}Ca の $4snf(^1F_3)$ 系列の準位エネルギーと量子欠損

n	λ_{vac} (nm)	$E(n)$ (cm^{-1})	δ	$Calc. E(n)$ (cm^{-1})	ΔE $10^{-4}(\text{cm}^{-1})$	$Rep. E(n)$ (cm^{-1})
120	833.33310	49298.290	0.10323	49298.291	-6.0	
121	833.32440	49298.416	0.10709	49298.417	-10.6	
122	833.31585	49298.539	0.10352	49298.539	-6.0	
123	833.30750	49298.659	0.09888	49298.659	-0.4	
124	833.29940	49298.776	0.10018	49298.776	-1.9	
125	833.29150	49298.889	0.10229	49298.890	-4.2	
126	833.28380	49299.000	0.10606	49299.001	-8.2	
127	833.27620	49299.110	0.09900	49299.110	-0.5	
128	833.26885	49299.216	0.10170	49299.216	-3.3	
129	833.26165	49299.319	0.10158	49299.320	-3.1	
130	833.25460	49299.421	0.09919	49299.421	-0.6	
131	833.24775	49299.520	0.10247	49299.520	-3.8	
132	833.24105	49299.616	0.10503	49299.617	-6.2	
133	833.23450	49299.710	0.10752	49299.711	-8.4	
134	833.22805	49299.803	0.10278	49299.804	-3.8	
135	833.22180	49299.893	0.10711	49299.894	-7.6	
136	833.21565	49299.982	0.10535	49299.982	-5.9	
137	833.20970	49300.068	0.11460	49300.069	-13.7	
138	833.20380	49300.153	0.11045	49300.154	-9.9	
139	833.19805	49300.235	0.11025	49300.236	-9.6	
140	833.19245	49300.316	0.11490	49300.317	-13.1	
141	833.18690	49300.396	0.10700	49300.397	-6.6	
142	833.18155	49300.473	0.11450	49300.474	-12.2	
143	833.17625	49300.549	0.11028	49300.550	-8.8	
144	833.17110	49300.624	0.11377	49300.625	-11.2	
145	833.16605	49300.696	0.11606	49300.698	-12.6	
146	833.16110	49300.768	0.11767	49300.769	-13.5	
147	833.15625	49300.838	0.11915	49300.839	-14.2	
148	833.15150	49300.906	0.12106	49300.907	-15.3	
149	833.14685	49300.973	0.12400	49300.975	-16.9	
150	833.14225	49301.039	0.11753	49301.040	-12.3	

Rep. $E(n)$ from Mueller ¹⁰⁾

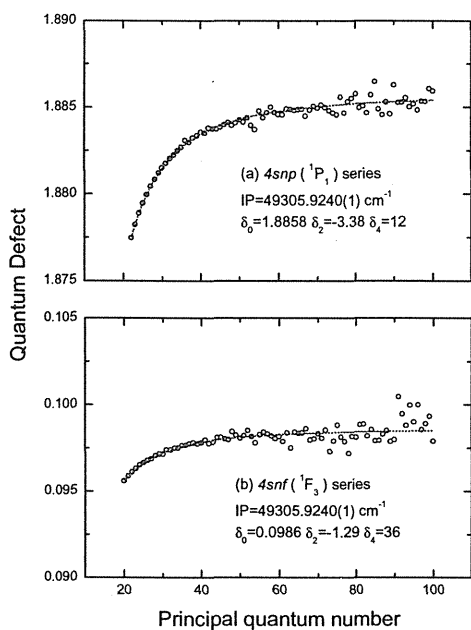


図6 量子欠損の n 依存性

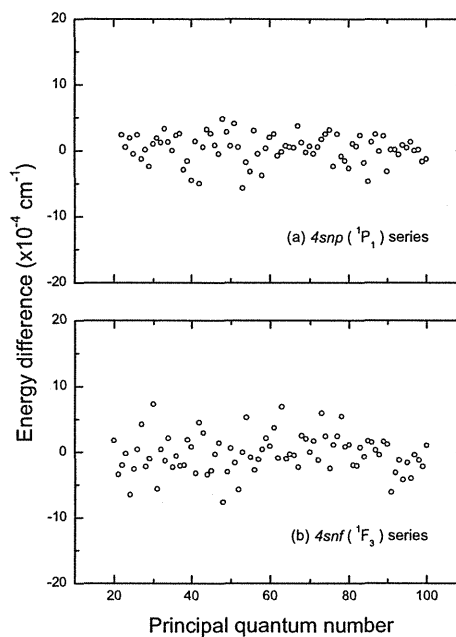


図7 準位エネルギーの残差の n 依存性

波長計の校正により、我々の絶対波長の測定誤差は 1.8 mK と評価される。またカルシウムの第 2 励起状態の文献値²⁵⁾に含まれる誤差は 1 mK なので、決定したリドベルグ状態のエネルギーに含まれる誤差は約 2 mK である。得られた準位エネルギーを文献値と比較すると、 np 系列と nf 系列ではそれぞれ約 -70 mK と +3 mK の系統的なずれがある。しかし文献値の誤差が 120 mK と 5 mK であることや、我々の測定誤差が 2 mK であることを考え合わせれば、本研究で得られた準位エネルギーと文献値は一致していると考えられる。なお、 np 系列の文献値が系統的に 70 mK 程度大きいことは Mueller¹⁰⁾ からも報告している。表 4 に示したイオン化ポテンシャルの値で括弧内に示した誤差は、最小自乗近似による統計偏差だけを考慮した値であるが、実際には、前述したように、準位エネルギーの測定誤差の方がずっと大きい。これを考慮すると、本研究で最終的に求められるカルシウム (${}^{40}\text{Ca}$) のイオン化ポテンシャルの値は $49305.9240(20) \text{ cm}^{-1}$ となる。これは、現在、文献 19) で推奨されているカルシウムのイオン化ポテンシャルに比べて 1 桁高精度の値である。今回のイオン化ポテンシャルに含まれる誤差は、波長計の測定精度だけでなく、下準位である第 2 励起準位のエネルギー絶対精度にも依存する。周波数の絶対精度を向上させ、下準位のエネルギーも同様に決定することで、さらに高精度の評価が可能になると考えられる。

表4 カルシウムイオン化ポテンシャルの測定値と文献値の比較

Ionization Potential (cm ⁻¹)	References
49305.92401(9)	This study for <i>np</i> -series
49305.92403(8)	This study for <i>nf</i> -series
49306.1(2)	Garton <i>et al</i> (1965)
49305.99(12)	Brown <i>et al</i> (1973)
49305.92(10)	Borgstrom & Rubbmark (1977)
49305.94(4)	Beigang <i>et al</i> (1982)
49305.96(8)	Sugar & Corliss (1979)

表5 リッツ展開係数の測定値と文献値の比較

	<i>np</i> (¹ P ₁)-series			<i>nf</i> (¹ F ₃)-series		
	δ_0	δ_2	δ_4	δ_0	δ_2	δ_4
This study	1.88576(10)	-3.38(10)	13	0.09864(9)	-1.29(9)	36
Literature exp	1.885584(3)	-3.240(5)	-23(2)	0.1036	-3.6040	310.8
Literature theo				0.1041	-0.8415	-0.3046

p-series from Gentile²⁰⁾

f-series from Laughlin²¹⁾

カルシウム原子の *np* 系列のリッツ係数はレーザー、マイクロ波 2 重共鳴分光により、我々よりも高い測定精度の値が報告されている²⁰⁾。その文献値と比較すると、表5に示すように、 δ_0 と δ_2 については良く一致したが、 δ_4 の一致は良くなかった。これは、Gentile らの測定では *n* の小さい領域を高精度で観測したため、イオンコアの分極の影響を高次まで評価する必要があったのに対し、今回我々が測定した領域の高励起状態では、その測定精度の範囲内でイオンコアの多重極分極率の影響が小さく、 δ_4 までの展開に意味が無かったためではないかと考えられる。実際、最小自乗近似にこれらの文献値を用い、イオン化ポテンシャルだけを近似パラメータとして計算しても、得られる値は上述したイオン化ポテンシャルの誤差範囲であった。このことも、4次の展開項の物理的な意味が小さいことを示唆している。

4 結論

単一モード連続発振の外部共振器半導体レーザーを用いた3段階共鳴イオン化分光により、カルシウム40のイオン化ポテンシャルを高精度で決定した。基底状態のカルシウム原子を $4snp$ (1P_1) 系列と $4snf$ (1F_3) 系列の $n=20-150$ の範囲の項リドベルグ状態に励起して、得られた準位エネルギーをリドベルグリッツの拡張公式で近似することにより、イオン化ポテンシャルを従来より1桁高い精度で 49305.9240 (20) cm^{-1} と決定することができた。

謝 辞

本研究を進めるにあたって多くの助言を頂きましたドイツマインツ大学K. Wendt博士、C. Geppert氏に深く感謝します。また、本原稿を読んでいただき、貴重なコメントを頂きました物質科学研究部原子分子科学研究グループリーダー、横山淳氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Lorenzen C-J and Niemax K *Physica Scripta* 27 300 (1983).
- 2) Lee S A, Hall J L and Stoicheff B P *Opt. Letters* 3 141 (1978).
- 3) Beigang R, Luecke K, Timmermann A, West P J and Froelich D *Opt. Commn.* 42 19 (1982).
- 4) Weber K-H and Sansonetti C J *Phys. Rev.* A35 4650 (1987).
- 5) Neukammer J, Joensson G, Koenig A, Vietzke K, Hireronymus H and Rinneberg H *J Phys. Rev.* A38 2804 (1988).
- 6) Beigang R *J.Opt.Soc.Am.* B5 2423 (1988).
- 7) Arnold E, Borchers W, Carre M, Duong H T, Juncar P, Lerme J, Liberman S, Neu W, Neugart R, Otten E W, Pellarin M, Pesnelle A, Pinard J, Vialle J L, Wendt K and ISOLDE Collaboration *J. Phys.B: At. Mol. Phys.* 22 L391 (1989).
- 8) Bushaw B A, Blaum K and Noertershaeuser W *Phys. Rev.* A67 022508 (2003).
- 9) Scmitt A, Bushaw B A and Wendt K *J. Phys.B: At. Mol. Phys.* 37 1633 (2004).
- 10) Mueller P, Bushaw B A, Noertershaeuser W and Wendt K *Eur. Phys.J.* D12 33 (2000).
- 11) Garton W R S and Codling K *Proc. Phys. Soc.* 86 1067 (1965).
- 12) Penkin N P and Shavanova L N *Opt. Spectrosc.* 18 425 (1965).
- 13) Brown C M, Tilford and Ginter M L *J.Opt.Soc.Am.* 63 1454 (1973).
- 14) Borgstoem S A and Rubbmark J R *J. Phys.B: At. Mol. Phys.* 18 3607 (1977).
- 15) Armstrong J A, Esherick P and Wynne J J *Phys. Rev.* A15 180 (1977).
- 16) Armstrong J A, Wynne J J and Esherick P *J. Opt. Soc. Am.* 69 211 (1979).
- 17) Bhatia K S, Connerade J P and Makdisi Y *J. Phys.B: At. Mol. Phys.* 23 3475 (1990).
- 18) Beigang R, Luecke K, Schmidt D, Timmermann A and West P J *Physica Scripta* 26 183 (1982).
- 19) Sugar J and Corliss C *J. Phys. Chem. Ref. Data* 8 865 (1979).
- 20) Gentile T R, Hughey B J, Kleppner D and Ducas T W *Phys. Rev.* A42 440 (1990).
- 21) Laughlin C *J. Phys.B: At. Mol. Phys.* 28 2787 (1995).
- 22) Makdisi Y and Bhatia K S *Can. J. Phys.* 68 1464 (1990).
- 23) Miyabe M, Oba M, Kato M, Wakaida I and Watanabe K *JAERI-Tech* 2004-064 (2004).
- 24) Miyabe M, Oba M, Kato M, Wakaida I and Watanabe K *JAERI-Tech* 2004-065 (2004).
- 25) Atomic Line Data (R.L. Kurucz and B. Bell) Kurucz CD-ROM No. 23. Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophysical Observatory (1995).

This is a blank page.

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=1.60218×10⁻¹⁹J
1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

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

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	ジーメンズ	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	
光強度	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
線量等量	シーベルト	Sv	J/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
バール	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

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

(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, 1eVおよび1u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 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=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10bar)	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= 4.18605J (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

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

3段階共鳴イオン分光法による pH のイオン化ポテンシャルの高精度測定

R100

古紙配合率100%再生紙を使用しています