



再帰励起による超自然幅分光法

中山, 和之

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2003-09-30

(Date of Publication)

2016-02-18

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2916

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002916>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 261 】

氏 名・(本 籍)	中山 和之	(兵庫県)
博士の専攻分野の名称	博士 (理学)	
学 位 記 番 号	博い第231号	
学位授与の 要 件	学位規則第4条第1項該当	
学位授与の 日 付	平成15年9月30日	

【 学位論文題目 】

再帰励起による超自然幅分光法

審 査 委 員

主 査	教 授	福田 行男
	教 授	加藤 肇
	教 授	林 真至
	教 授	國友 正和
	助教授	河本 敏郎

(氏名：中山 和之 NO. 1)

共鳴周波数の精密測定を通しての原子の基礎的な性質の研究は、物理学の基礎的な相互作用の過程の研究などに非常に重要である。分光学における共鳴周波数の精密測定の精度を制限する主要な要因は、測定によって得られるスペクトル線の線幅である。これまでこれらのスペクトル線の広がりをしてできるだけ狭くして観測するさまざまなレーザー分光法が開発されてきた。特に気体資料におけるドップラー幅等、不均幅については、大部分を取り除く分光手法が確立している。通常分光法では、量子力学的に予想される線幅である自然幅が通常分光測定で得られる最も狭い線幅であると考えられている。しかし原子系の応答を繰り返し同じ原子系に入力することにより、通常よりも狭い線幅を持つスペクトルを得る再帰励起分光法と呼ばれる分光法が最近提案された。再帰励起分光法で得られるスペクトルの形状は、通常分光法で得られるスペクトルの形を再帰励起の回数だけかけ合わせたものになる。そのため、再帰励起を繰り返し行うにつれてスペクトル幅は狭くなる。この分光法は、自然幅にも制限されないため、この方法を利用すると、大きな自然幅を持つ原子の励起状態のエネルギー準位構造をより精度良く測定できることが期待される。本論は、この再帰励起分光法と呼ばれる、新しい型の分光測定法を用いた超自然幅分光法の研究についてまとめたものである。

本稿ではまず、再帰励起分光法の基礎的なアイデアを述べ、分光スペクトルの周波数解析を線型応答理論によって行った。その後密度行列に基づく時間波形の解析を行い、これが周波数軸での解析と等価なスペクトルを与えることを述べた。本論文は新奇な分光法の基礎的過程の研究という側面から、試料としては分光学的性質の良く知られ、各種物理定数も詳しく調べられているアルカリ金属原子を採用した。アルカリ金属原子は水素に類似した簡単な構造を持ち、実験的にも取り扱いやすい物質である。実験では、ナトリウムランプ等がよく知られている、D 線と呼ばれるアルカリ金属原子の強い遷移を用いて分光実験を行った。

本研究では、超微細構造準位間の共鳴周波数を精度良く測定することにより、原子の超微細構造の相互作用ハミルトニアン¹⁾の結合係数である磁気双極子相互作用定数と、電気四重極相互作用定数を精密に決定することを一つの主題とした。そこでまず、再帰励起分光法の特性を明らかにする予備的実験として、分裂周波数が小さく信号寿命が長く測定が比較的容易な、Na 原子の D₁ 線基底状態 F=2 のゼーマン副準位間のコヒーレンスを観測する実験を行った。実験系は、光源である連続発振の色素レーザー、電気光学変調器による強度変調系、データを取り込む測定系からなっている。光源によって原子系を励起し、測定系で応答波形を取り込み、次段の励起光として強度変調系で再現した応答波形を使う。このプロセスを再帰的に行うことにより再帰励起分光測定を行う。Na 原子に適当な不均一磁場をかけることにより、磁気副準位の縮退を解き数十 MHz 程度の中心振動周波数と 2MHz 程度のスペクトル幅を持つ信号を用意し、それに対して再帰励起分光を行った。実験の結果磁場の不均一性によって決まる幅よりも格段に狭いスペクトルを得ることができ、

(氏名：中山 和之 NO. 2)

スペクトル線の尖鋭化に成功した。

これを受けてより測定の困難な高周波で短寿命の励起状態の量子ビート信号を観測するため、色素レーザーよりも安定なチタンサファイアレーザーを用い、さらに測定装置の帯域を広げて実験を行った。ここでは Rb 原子の基底状態 $5^2S_{1/2}$ から励起状態 $5^2P_{3/2}$ への D₂ 線と呼ばれる遷移の励起状態の超微細構造分裂信号に対して再帰励起分光を適用し、高分解能周波数測定を試みた。実験ではコヒーレンス信号の協力的な重ね合わせの結果長く伸びたビート信号が観測され、このフーリエ変換から超自然幅を持つスペクトルを得ることにより高分解能分光を行うことに成功した。⁸⁷Rb 原子の超微細構造準位 F=0 と F=1, F=1 と F=2 の間の共鳴周波数の測定値より、励起状態の超微細相互作用ハミルトニアン²⁾の結合定数である二つの超微細構造定数を求めることができた。またより低い周波数を持つ、Rb 原子のもう一方の同位体である ⁸⁵Rb の D₂ 線の励起状態の超微細構造準位 F=1 と F=2, F=2 と F=3 の間の超微細構造分裂の共鳴周波数の高分解能分光測定を同様にを行い、超微細構造を求めることができた。ただし、スペクトル線幅の狭窄化の飽和効果のため、十分な狭窄化を行うことができず、超微細構造定数の精度は過去の文献値と同程度の結果を得るのにとどまった。

今後最も重要な課題は飽和効果を取り除くことである。そのために物質系の持つ時間的な揺らぎを抑えるか、揺らぎに対して応答信号が受ける影響を小さくすることが考えられる。一つ方法として電気光学変調器を用いた位相変調によってレーザーの線幅を広げ、レーザーが短時間に揺らぐことによって原子系を感じる光のスペクトルの変動を小さく抑えることが考えられる。逆に原子の線幅に比べはるかに狭いレーザーを用いることにより飽和効果を抑制できる可能性がある。またレーザーのパワーを低く抑えるためノイズを用いた実験と組み合わせることも考えられる。

氏名	中山和之		
論文題目	再帰励起による超自然幅分光法		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	福田行男
	副査	教授	加藤肇
	副査	教授	林真至
	副査	教授	國友正和
	副査	助教授	河本敏郎

要旨

分光学的測定は、原子、分子の基礎的な性質や基礎的な相互作用過程の研究において、重要な役割を担っている。この分光学的測定において、共鳴周波数の測定精度の向上はとりわけ重要な課題である。共鳴周波数の精密測定の精度を制限する主要な要因は、スペクトル線の有限の線幅である。これまでに、スペクトル線の広がりを取り除いて観測されるスペクトルを狭窄化するためのさまざまなレーザー分光法が開発されてきた。特に気体試料におけるドップラー幅等の不均一幅については、その大部分を取り除く分光手法が確立している。しかし、不均一幅を除去したとしても、量子力学的な不確定性による線幅である自然幅が分光測定で得られる最も狭い線幅の限界であると通常は考えられている。

本論文は再起励起分光法と呼ぶ新しい分光法の基礎とその応用に関する理論的、実験的な研究成果をまとめたものである。この分光法は入力光に対する原子系の応答を再び同じ原子系に入力する過程を繰り返すことによって原子系のスペクトル幅を狭窄化し、系の共鳴周波数の測定精度を向上させるユニークな分光法である。再帰励起分光法は、従来の方法とは異なり、自然幅を含むスペクトル幅一般について、その狭窄化を可能にする。再帰励起分光法で得られるスペクトルの形状は、通常の分光で得られるスペクトルの形を再帰励起の回数だけかけ合わせたものになるため、再帰励起の回数を増やすにつれてスペクトル幅は狭くなる。この方法を利用すると、自然幅に比べて狭い幅を持つスペクトルを観測できる、いわゆる、超自然幅分光が可能になり、大きな自然幅を持つ原子の励起状態のエネルギー準位構造をより精度良く測定できると期待される。

第1章(序論)では、本研究の背景と本論文の概要を述べている。

第2章(再帰励起分光法の理論)では、まず、再帰励起分光法について線型応答理論による周波数軸での詳細な解析を行い、線幅が再帰励起回数 n の平方根に比例して狭窄化され、信号対雑音比(S/N , SN 比)が n の $3/4$ 乗に比例して向上することを明らかにしている。また、密度行列の方法を用いて信号の時間波形の解析を行い、これが周波数軸での解析と等価な結果を与えることを示している。さらに、信号に雑音加わることにより、線幅は初期の幅のほぼ SN 比の逆数倍程度に制限されることを示している。

第3章(アルカリ原子の分光学的性質)では、第4章以下で述べる実験的研究に用いるアルカリ原子(Na と Rb)の性質をまとめている。新しい分光法の基礎過程の実験的研究には、水素に類似した簡単な構造を持ち、実験的にも取り扱いが容易なアルカリ金属原子は試料として好適である。

第4章(Na 原子 D_1 線の再帰励起分光)では、再帰励起分光法の基本的な特性を実験的に調べている。実験では、 Na 原子の強い遷移である D_1 線を用いて、 Na の基底状態 $3^2S_{1/2}$ のゼーマン副準位の分光を行っている。 Na 原子の D_1 線に同調する色素レーザーを用いた実験装置を製作し、磁場の不均一性によって広がったスペクトル幅の狭窄化を観測して、その結果が理論の予想とよく一致することを示している。

第5章(Rb 原子 D_2 線の励起状態の再帰励起分光)では、チタンサファイアレーザーを用いた実験装置により、 Rb 原子(^{85}Rb と ^{87}Rb)の D_2 線の励起状態 $5^2P_{1/2}$ の超微細構造の再帰励起分光を行い、超微細構造定数を測定した結果を報告している。2つの同位元素 ^{85}Rb と ^{87}Rb について超微細構造定数を高精度に測定することに成功し、得られた結果を過去の文献値と比較している。また、スペクトル線幅の狭窄化により、超自然幅のスペクトルの観測に成功しているが、狭窄化による線幅の限界値が理論の予想に比べて大きい。この原因は明らかでなく、今後の興味ある課題として残されている。最後に、再帰励起の初回の励起に擬ランダムピンクノイズで変調した光を用いた実験について述べている。線幅の限界値の理論との不一致等の残された幾つかの課題を解決するための試みとして、単一の短パルスに代えて、特定の周波

氏名

中山和之

数領域で白色のノイズを調製して用いる実験を提案し、励起状態 $5^2P_{1/2}$ の超微細構造の信号を得ている。 SN 比が小さいため、この試みはまだ予備実験の段階にあるが、興味ある提案である。

第6章(まとめと展望)では、本論文の内容のまとめ、残された課題、及び、光学遷移の分光への再帰励起分光法を応用する可能性等が述べられている。

なお、付録として、原子系と光の相互作用についての理論的補足や、実験的研究に用いた幾つかの手法の説明が与えられている。

以上述べた通り、本研究は再帰励起による超自然幅分光法について、その基礎と応用に関する理論的、実験的な研究を行ったものであり、新しい分光法について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者の中山和之は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。