

超低速準安定状態アルゴン原子と固体表面の相互作用の研究

電気通信大学院 電気通信学研究科 量子・物質工学専攻 清水研究室
原田恵介

1 研究の背景と目的

分子間での引力や凝集の要因としてファンデルワールス力が働いていることが知られている。その引力をもたらずポテンシャルは分子間の距離 R の 6 乗に反比例して $V(R) = -C_6/R^6$ であり、また原子と固体表面の間における引力ポテンシャルは $V(l) = -C_3/l^3$ (原子と固体表面との距離 l) である [1]。原子と固体表面間の相互作用について、原子波回折による回折パターンの解析から相互作用係数 C_3 を見積もる実験が行われている。透過型回折格子による Na 原子 [4] や基底状態の希ガス原子 (He, Ne, Ar, Kr) [2] の原子回折の観測がなされている。準安定状態の希ガス原子 (He*, Ne*) の回折実験から相互作用係数は He* で $C_3(\text{He}^*) = (4.1 \pm 1.0) \text{meVnm}^3$, Ne* で $C_3(\text{Ne}^*) = (2.8 \pm 1.0) \text{meVnm}^3$ と見積もられる [3]。それ以外原子 (Ar*, Kr*) の相互作用係数の測定はなされていないため、今後計測がすることは期待されるだろう。またこれらの回折実験は主に超音速ビームによる熱原子を用いているが、レーザー冷却・トラップなどの原子光学の技術の発展により、レーザー冷却・トラップを行った冷却原子を原子源として原子波の回折実験が行えるようになった。我々の研究では主にレーザー冷却・トラップにより冷却したリチウム原子 (Li) や準安定状態の希ガス原子 (Ne*, He*) の回折実験を行ってきた。 [5, 6]

本研究の目的は、レーザー冷却・トラップされた準安定状態アルゴン原子を原子源として透過型回折格子に通し、原子と固体表面の相互作用により影響を受けた回折パターンを観測することである。また回折パターンを解析することから、ファンデルワールスポテンシャルの相互作用係数 C_3 を見積もることである。

2 原子波回折

量子力学では光と同様に原子もまた波動性を示す。光の波長に対応して原子のドブロイ波長は $\lambda_{dB} = h/mv$ となる。原子波は光波との類似性を示しており、光の波で回折実験があるように原子の波でも回折格子に通し

回折パターンを観測することができる。原子回折でも光回折の近似式を扱うことができ、回折格子のスリットの周期 d またスリットの幅 w とし、スリットが $2N + 1$ 個における回折格子でのフラウンホーファ回折式は

$$\psi(x) \propto \frac{\sin\{(2N + 1) \left(\frac{kdx}{2z}\right)\}}{\sin\left(\frac{kdx}{2z}\right)} \int_{-w/2}^{w/2} U_T(\zeta) e^{-i \frac{kx}{z} \zeta} d\zeta$$

$U_T(\zeta)$ は回折格子内の単スリットの透過関数であり、光の場合では

$$U_T(\zeta) = \begin{cases} 1 & (|\zeta| < w/2) \\ 0 & (|\zeta| \geq w/2) \end{cases}$$

ただし光との違いは、原子は重力や電磁場また固体との相互作用が起きることである。原子回折では、原子が低速であると重力による影響を考慮に入れる必要がある。原子が重力により加速されると、ドブロイ波長が短くなり、干渉縞の間隔に影響してくる。

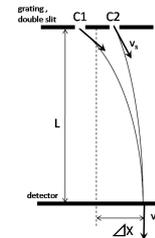


図 1. ダブルスリットによる原子干渉

また透過型回折格子では、原子と回折格子のスリット表面間でファンデルワールス相互作用が起きる。

3 原子と固体表面の相互作用

原子と固体表面間におけるファンデルワールスポテンシャル V は原子と固体表面との距離 l として $V = -C_3/l^3$ となる。透過型回折格子の場合、原子と回折格子のスリット表面間でのファンデルワールスポテンシャルである。これはスリットでの原子波の位相 ϕ に影響する。単スリットの中心をゼロとする位置 ζ として考

え、単スリットでの振幅透過関数（波動関数） $U_T(\zeta)$ は

$$U_T(\zeta) = \begin{cases} e^{i\phi(\zeta)} & (|\zeta| < w/2) \\ 0 & (|\zeta| \geq w/2) \end{cases}$$

$$\phi(\zeta) = \frac{-t}{\hbar v_s} [V_-(\zeta) + V_+(\zeta)], \quad V_{\pm}(\zeta) = \frac{-C_3}{|\zeta \pm w/2|^{-3}}$$

t は回折格子の厚さであり、 v は原子の速度である。

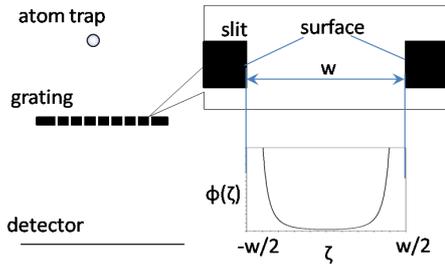


図 2. スリット内での位相シフト

原子波がスリットを通過するとき、スリット表面近傍では原子の波の位相が大きく変化する。この位相変化が π だけずれると回折パターンに寄与しなくなる。このため、回折パターンに寄与する波はスリット表面近傍を除いた部分である。

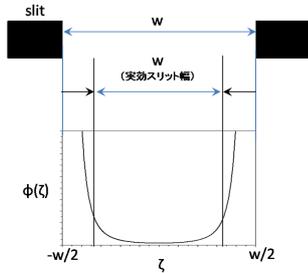


図 3. 実効スリット幅

これはまるでファンデルワールス相互作用のない状態で、スリット幅を狭くしたことと同じように見積もることが出来る。したがって、スリットが $2N + 1$ 個の回折格子でのフラウンフォーア回折式を用いて、実験で用いられている回折格子のスリット幅より小さい値をスリット幅 w に代入し、原子回折の実験データと比較して実効スリット幅を見積もる事が可能である。

$$I(x) = \frac{[\sin\{(2N + 1) \left(\frac{kdx}{2z}\right)\}]^2}{[\sin\left(\frac{kdx}{2z}\right)]^2} \frac{[\sin\left(\frac{kwx}{2z}\right)]^2}{\left(\frac{kwx}{2z}\right)^2}$$

4 アルゴン原子の諸特性

本研究では原子源に準安定状態アルゴン原子を用いている。希ガス原子であるので干渉計などの装置に気体が附着することがなく、ディテクタにはマイクロチャンネルプレート (MCP) を用いて観測できる。また超微細構造がないため Optical pumping を避けるためのリポンプ光を必要とせず、一つの冷却波長のレーザー光を用いるだけでよい。

アルゴン原子のエネルギー準位は図 4 のようになる。準安定状態となる準位は第一励起状態 $3p^5 4s^1$ の $J = 0$ と $J = 2$ である。基底状態 $3p^6$ からグロー放電により、第一励起状態 $3p^5 4s^1$ の $J = 2$ の準安定状態を生成し、第二励起状態 $3p^5 4p^1$ の $J = 3$ との間で冷却遷移となる。冷却遷移のレーザー光の波長は 811.754 nm また上準位の寿命は 27 ns である。また実験では、波長 912.547 nm におけるトランスファ光により、第一励起状態 $3p^5 4s^1$ の $J = 2$ から第二励起状態 $3p^5 4p^1$ の $J = 1$ へ励起し、第一励起状態 $3p^5 4s^1$ の $J = 0$ の準安定状態へと落ちる遷移を用いる。

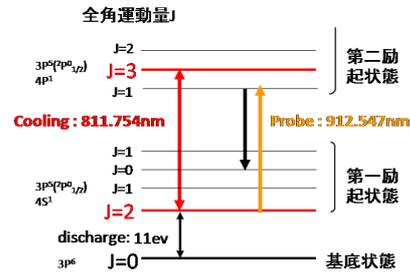


図 4. アルゴン原子のエネルギー準位図

表 1. アルゴン原子の諸特性

Ar 原子の質量	m	$6.64 \times 10^{-26} \text{ kg}$
冷却遷移の波長	λ	811.754 nm
自然寿命	τ	27 ns
最確速度 ($T=300\text{K}$)	$v_0 = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$	353 m/s

表 2. レーザー冷却

反跳速度	$\Delta v_{rec} = \frac{\hbar k}{m}$	1.2 cm/s
最大減速度	$a_{max} = \frac{\hbar k}{2\tau m}$	$2.3 \times 10^5 \text{ m/s}^2$
飽和強度	$I_0 = \frac{\pi \hbar c}{3\lambda^3} \Gamma$	1.4 mW/cm^2
吸収・放出回数	$N = \frac{m v_0}{\hbar k}$	29000 回
停止までの時間	$t_{stop} = 2N\tau$	1.5 ms
停止までの距離	$l_{stop} = \frac{v_0 t_{stop}}{2}$	26 cm

5 実験装置

5.1 光学系

レーザー光源側と真空装置側の部分に分かれる。レーザー光源側ではレーザー光の波長・スペクトルを測定するほか、や発振器レーザーの周波数ロックや3台の注入同期レーザーによる光パワーの増幅を行っている。

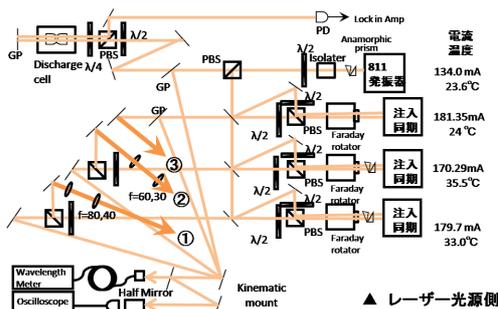


図 5. 光学系 (レーザー光源側)

レーザー光源側と真空装置側でレーザーはつながっており矢印①, ②, ③が対応している。

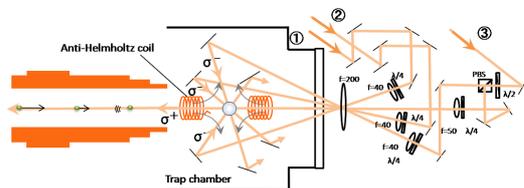


図 6. 光学系 (真空装置側)

真空装置側はトラップチャンバーに入る4つのレーザー光を $\lambda/4$ 板で円偏光にし、二つのレンズのペアによりビーム径を広げて照射することを行っている。原子トラップを行うために、4つのレーザー光は同じパワーに調節する必要があり、真空装置側の矢印③のすぐ後のPBSと $\lambda/2$ 板のペアとレーザー光源側の矢印①また②の手前のPBSと $\lambda/2$ 板のペアにより $\lambda/2$ 板を回転させてパワーを調節する。レーザーパワーの測定はチャンパー手前のレンズ($f=200$)の直前にパワーメータを設置して行っている。それぞれのレーザーパワーは $3.5 \sim 4mW/cm^2$ となる。

5.2 真空系

差動排気

真空装置の構成はソースチャンバー、ゼーマン減速器、トラップチャンバー、ディテクタチャンバーに分けられる。ソースチャンバーではアルゴンガスボンベから流れてきたガスを放電により準安定状態に励起し原子ビームとして流している。ゼーマン減速器を通して原子がレーザー冷却された後、トラップチャンバーで原子を捕獲している。トラップされた原子を下のディテクタチャンバーに落とし、マイクロチャンネルプレートで検出する。トラップチャンバーやディテクタチャンバーでの真空度を上げるために、それぞれのチャンパーの間にピンホールまたパイプを通した仕切りをとりつけることで差動排気を行っている。

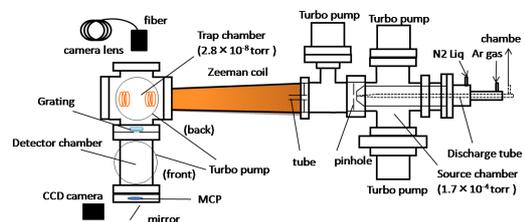


図 7. 真空系

放電管冷却器

アルゴン原子をレーザー光と相互作用させるためには、アルゴンガスを放電させて準安定状態に励起させる必要がある。放電は放電管内部と外部の電極間で起こり、放電管内部の電極に $-2.4kV$ の高電圧をかけ外部の電極をアースに取っている。また放電により加熱されるため、加熱された原子は速度の速い状態で原子ビームとして飛び出してしまふ。そこで原子をより低速にするため、冷却器に液体窒素を入れ冷やしている。またガスを効率的に冷却するため、放電管の外側を通し、放電管とその先端に取り付けられた熱伝導率のよいサファイアの狭い隙間を通して、ソースチャンバーに原子ビームとして流れる。熱はサファイアを通過して銅の部分へ移り冷却器で冷却されるようになっている。またアルゴンイオンは放電管内部へ流れ、ソースチャンバーへ排気される。

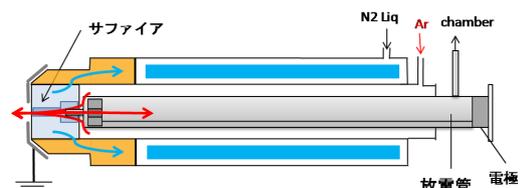


図 8. 放電管冷却器

ゼーマン減速器とトラップコイル

ゼーマン減速器にてゼーマン同調法を行いレーザー冷却を行う。またトラップのアンチヘルムホルツコイルでコイルの中心で磁場が最小となる四重極磁場を作る。これらの磁場を発生させるためには電源にて電流を流している。またコイルに電流を流すと熱が発生する。特に真空では熱が外に出ないため、コイル内に冷却水を流して水冷を行っている。電流の設定は下流側のトラップコイル (1) で 44.0A また上流側のトラップコイル (2) で 30.0A とし、ゼーマンコイル (3) で 15.0A とし、次のような磁場分布となっている。

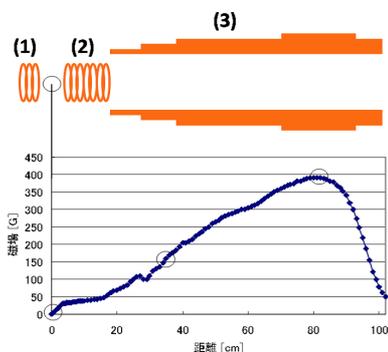


図 9. 磁場分布

5.3 トラップ特性の測定

準安定状態アルゴン原子の原子トラップの実験を行い、原子トラップの特性を観測した。



図 10. Ar*原子トラップ

蛍光からトラップサイズやトラップされた原子の個数を計算し見積もることを行った。トラップされた原子はトラップレーザー光の吸収・放出を繰り返している。肉眼ではその蛍光は見えないが CCD カメラで蛍光を観測することができる。原子トラップの大きさを見積もったところ約 3mm 程度であった。トラップされた原子個数の測定において、蛍光をカメラレンズで

集光させピンホールに通してから、フォトダイオードで検出しオシロスコープで観測した。

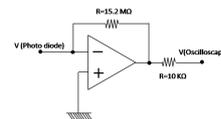
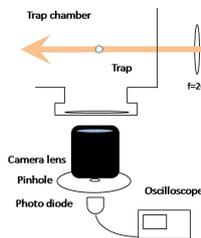
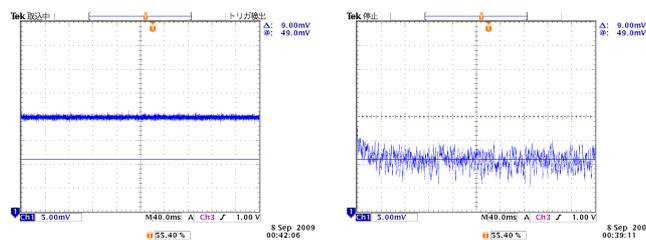


図 11. トラップの蛍光測定 図 12. PD のオペアンプ回路図

ピンホールを入れることで、トラップの蛍光以外の光が入ってこないようにしている。またトラップ&減速レーザー光の $\lambda/4$ 板を動かしてトラップ光を入れた状態のままトラップのいるときといないときを比較する。オシロスコープで観測したトラップの蛍光信号を以下に示す。トラップのいないときの電圧を基準として、トラップのいるときの電圧は 9mV であった。



トラップなし トラップあり
図 13. トラップの蛍光信号

図 12 からフォトダイオードに入ってきた光子の数を見積もる。オシロスコープで $V_{out} = 9mV$ の信号を観測したから、回路図の抵抗 $R \sim 15.2M\Omega$ により電流 $I = V_{out}/R \sim 5.9 \times 10^{-10}A$ に変換する。またこの電流における電子の数は $I/e = 3.7 \times 10^9$ 個である。フォトダイオードの量子効率 0.804 (フォトダイオードの仕様書に記載しある受光感度 0.54A/W から見積もる) により光子の数は毎秒 3.0×10^9 個だけ入射したことが分かった。またこれに吸収・放出サイクルの時間 2τ をかけると $2\tau \times 3.0 \times 10^9 \sim 160$ となる。

受光の立体角を考えると、トラップからの距離 $L \sim 200mm$ であり、レンズの開口の直径を 20mm (半径 $r = 10mm$) として $\pi r^2/4\pi L^2 \sim 6.25 \times 10^{-4}$ である。またレンズの透過率を 0.68 となり、このことから原子の個数は $160/(6.25 \times 10^{-4} \times 0.68)$ より、約 3.8×10^5 個であると見積もった。

6 回折パターンの観測

原子の検出を MCP の蛍光板の蛍光として、インテンスファイアを取り付けた CCD カメラで観測している。CCD カメラの映像を LabVIEW を使用して検出された原子の位置を積算した。右上に積算した回折パターン図が示され、右下にはトラップ個数のタイムチャートがあり、左下の部分は積算時間また原子の総個数、蛍光読み取り時の閾値、また毎秒の原子の個数わかる。原子回折実験の結果は、55 分間の積算を行い、原子の総数は 22348 個で一秒間に 7 個ほど観測された。

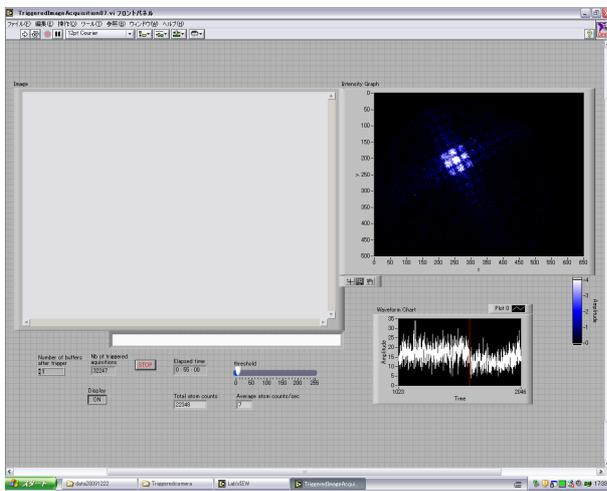


図 14. 回折パターンの観測

7 原子回折の解析と考察

7.1 回折パターンの解析

図 15 は回折パターンの解析の様子を示している。図の下のグラフは上の回折パターンから黄色の線で囲われた部分を縦方向は足し合わせ、横方向の一次元でプロットプロファイルを行っている。その下にプロットプロファイルされた強度分布が示されている。三つの山が見えるが中心の山が 0 次の回折であり、その両隣の半分ぐらいの高さの山が 1 次の回折である。左右の一次回折の強度が違うのは、トランスファ光を吸収した原子の一部が真空紫外光 (エネルギー準位図では $3P^5 4P^1 \rightarrow 3P^6$ の遷移) を放出し、この光を MCP で観測していると考えられる。

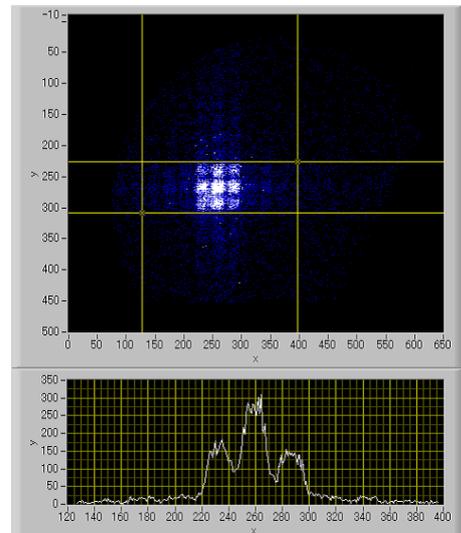
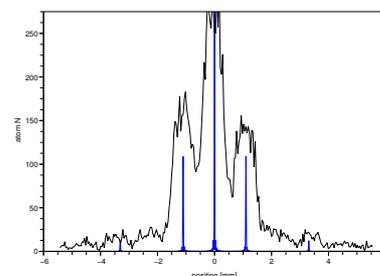


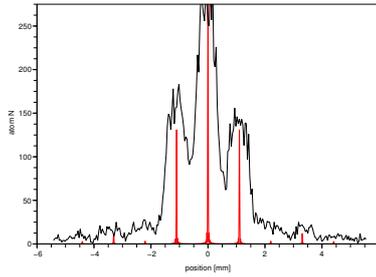
図 15. 回折パターンの解析

7.2 実効スリット幅の解析

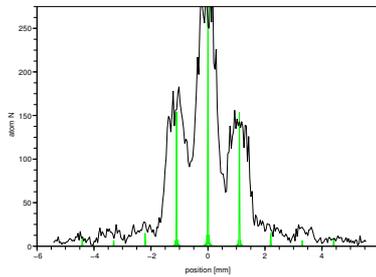
実効スリット幅の解析は実験値とファンデルワールス相互作用のない場合のフラウンホーファ回折の理論式との比較を行っている。まず実験で扱う回折格子のスリット幅と同じスリット幅で理論値の計算を行ったところ図のようになった。黒い線が実験値をプロットしたものであり、青い実線はスリット幅が実験値と同じ $w = 0.5\mu\text{m}$ の理論値をプロットしたものである。この一次回折の強度比の比較すると、実験値は理論値より一次回折の強度が大きく、原子強度がほぼ 110 個に対して 150 個である。また一次回折の強度が実験値と同じ強度になるように、スリット幅を実際より小さくして比較を行うと図のようになる。このときの理論値は緑の実線であり、スリット幅を $w = 0.4\mu\text{m}$ とした。このようにして実効スリット幅を $0.4\mu\text{m}$ として見積もった。



スリット幅 $w = 0.5\mu\text{m}$



スリット幅 $w = 0.45\mu\text{m}$



スリット幅 $w = 0.4\mu\text{m}$

図 16. 実効スリット幅

7.3 強度分布の幅

フラウンホーファ回折の計算値と違い、実験値には強度分布の幅がある。この強度分布の幅を説明するにはフラウンホーファ回折より、フレネル回折の方を用いるのが適当である。次の図は、先ほどの実効スリット幅の解析の図を重ね合わせて、フレネル回折で解析を行ったものを示す。実験値では、それぞれ回折次数の間がゼロになっていないが、トランスファ光のビーム幅をさらに小さくすることで改善されるだろう。

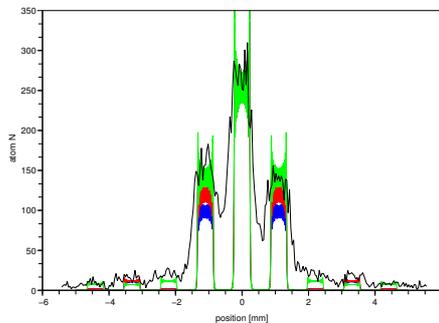


図 17. 強度分布の幅

8 まとめと今後の課題

原子源から自由落下した原子が透過型回折格子に通した後、原子回折パターンを MCP で観測した。そして回折パターンにおける理論値との比較を行いデータの解析を行った。今後の課題として挙げられるのは

- 原子トラップ位置決め、トランスファ光の最適なアライメントを行い、一次回折だけでなく、さらに高い回折次数に対しても明確に観測できるようにすること、また観測の再現性をよくすること
- さらに長時間の観測データ作成し解析を行うこと。そして相互作用係数を見積もること
- トランスファ光の AOM とカメラのトリガにパルスの信号を送って観測することより、この真空紫外光を観測しないようにすること
- 透過型回折格子だけでなく、反射型回折格子を用いて量子反射の実験を行うこと

参考文献

- [1] E.Zaremba,W.Kohn,Phys. Rev. B.13,2270(1976)
- [2] R.E.Grisenti,W.Schollkopf,J.P.Toennies G.C.Hegerfeldt,T.Kohler.Phys.Rev.Lett.83,9(1999)
- [3] R.Bruhl,P.Fouquet,R.E.Grisenti,J.P.Toennies G.C.Hegerfeldt,T.Kohler,M.Stoll,C.Walter Europhys.Lett.,59(3),pp.357-363(2002)
- [4] John.D.Perreault,Alexander,D.Cronin,T.A.Savas Phys.Rev.A71,053612(2005)
- [5] F.Shimizu,J.Fujita,M.Morinaga,T.Kishimoto,S.Mitake CP477,Atomic Physics16,edited by W.E.Baylis and G.W.F.Drake The American Institute of Physics P223
- [6] Fujio Shimizu,Kazuko Shimizu and Hiroshi Takuma.Phys.Rev.A 46,R17(1992)