

鉄多価イオン分光用小型イオン源の製作と評価

量子・物質工学専攻 中村信行研究室 菊池浩行

1. 背景

多価イオンとは2価以上のイオンのことを言い、取り去る電子が q 個のとき、これを q 価の多価イオンと呼ぶ。

太陽観測衛星「ひので」[1]に搭載されている極端紫外線撮像分光装置(EUV Imaging Spectrometer : EIS)は太陽コロナに含まれる 10 価程度の鉄多価イオンの分光診断により、コロナ加熱機構を解明することを目的としている。図 1 に太陽大気の色度と電子密度の様子を示す[2]。

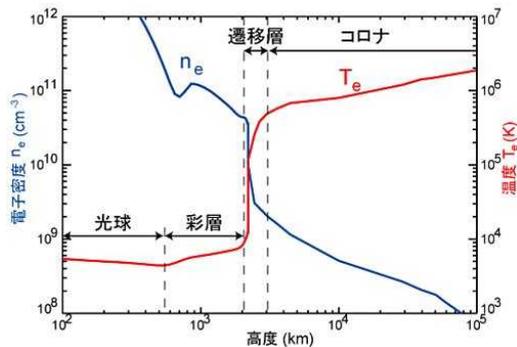


図 1. 太陽大気の色度と電子密度の様子

通常このような分光診断は電子衝突断面積などの基礎原子データに基づいたモデル計算との比較により行われるが、鉄多価イオンの原子データにおいて信頼できる実験データは不十分であり、計算値に頼っているのが現状である。そこで我々の研究室では電子ビームイオントラップ(Electron Beam Ion Trap:EBIT)を用いて得られる実験室スケールによりそれらの実験データを収集し、モデル計算の精度を向上させることを目的としている。

2. 電子ビームイオントラップ

(Electron Beam Ion Trap : EBIT)

電子ビームイオントラップ EBIT[3]は多価イオンの分光測定を目的として開発された。図 2 に EBIT での多価イオン生成原理図を示す。

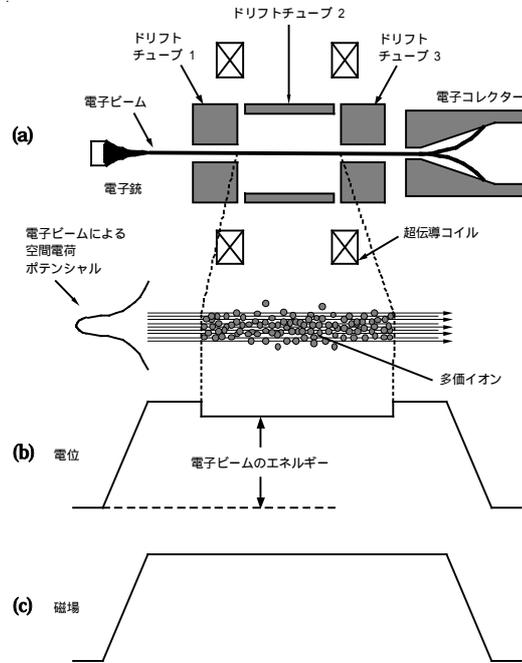


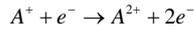
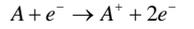
図 2. EBIT の多価イオン生成原理図

EBITは大きく分けて電子銃、ドリフトチューブ(Drift Tube : DT)、電子コレクターの3つから成る(図2(a))。またDTの周りにはヘルムホルツ型超伝導コイルを配置し、軸方向の強磁場(図2(c))を形成する。電子銃から出射した電子ビームは図2(b)のような電位配置によって加速され、磁力線に沿って動径方向に圧縮されながらDTに入射する。中央のドリフトチューブ電極(DT2)の電位を両極(DT1、DT3)より低くして、そこで生成されたイオンを軸方向に封じ込める。また高密度電子ビームの空間電荷によりイオンは径方向にも閉じ込められる。こうしてDT2内部に閉じ込められたイオンが電子の逐次衝突を受け、電離が進み多価イオンが生成される。DTを通過した電子は電子コレクターで発散し回収される。EBITは単色電子ビームとトラップ多価イオンから成る非常に単純化されたプラズマ光源であり、多価イオンの基礎原子データの収集には最適の装置である。

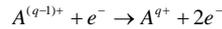
3. EBIT における多価イオンの生成原理

3.1 逐次電離

逐次電離とは電子を 1 つずつ順番に電離していくことである。電子ビームに束縛されたイオンは連続的に電子ビーム衝撃を受け、



...



のように電子が 1 つずつ剥がれて多価イオンとなっていく。電子ビームの閉じ込めが完全で、逐次電離のみが起こると考えた場合、イオン化の進行は次の連立微分方程式で表される[4]。

$$\frac{dn_q}{d\tau} = n_{q-1}\sigma_i(q-1, q) - n_q\sigma_i(q, q+1)$$

ここで、 $n_{q-1}(q-1, q)$ は $q-1$ 価イオンが q 価に成る時の電離断面積、 n_q は q 価イオンの数密度である。

τ は Ionization factor と呼ばれる量で、電子ビームの電流密度 J とイオンが電子ビーム衝撃を受ける時間 t を用いて $\tau = Jt/e$ と定義される。

3.2 イオンの閉じ込め

EBIT では DT の電位配置によるビーム軸方向の閉じ込め、コイル磁場により圧縮された電子ビームの空間電荷による動径方向の閉じ込めを行う。電子ビームの作る動径ポテンシャル $V(r)$ は次式により計算することができる。

$$V(r) = \begin{cases} V_0 \left(\frac{r}{r_e} \right)^2 & (r \leq r_e) \\ V_0 \left(1 + 2 \ln \frac{r}{r_e} \right) & (r \geq r_e) \end{cases}$$

$$V_0 = V(r_0) = \pi n_e r_e^2 = \sqrt{\frac{m_e}{2}} \frac{I_e}{\sqrt{E_e}}$$

$V(r)$ は電子ビーム中心軸の電位を 0V とした時の軸からの距離 r での電位を示している。 r_e は電子ビーム半径、 e は素電荷、 n_e は電子ビーム断面の電子密度、 m_e , I_e , E_e はそれぞれ電子の質量、電子ビーム電流、電子ビームエネルギーを示す。この式から電子ビーム内のポテンシャルの深さ、つまり電子ビーム内に閉じ込める力は、電子ビームエネルギーの平方根に逆比例し、同電流に比例する

ことがわかる。

3.2 電子ビームの圧縮

EBIT において高効率に電離を行うには電子密度の高い電子ビームを形成することが非常に重要であり、そのため磁場により電子ビームを細くする必要があり、磁場が完全に遮蔽された理想的な陰極面から初速度ゼロ (温度 $T=0K$) で放出された電子ビームは軸方向の磁場 B によりビーム半径 r_B まで圧縮される。

$$r_B = \sqrt{\frac{2^{1/2} I}{\pi \epsilon_0 \left(\frac{e}{m} \right)^{3/2} B_z^2 E_e^{1/2}}}$$

ここで ϵ_0 は真空中の誘電率、 B_z は磁場の軸方向成分を示す。

3.3 価数分布

3.1 では理想的な逐次電離を考えたが、実際には残留ガスとの衝突や放射性再結合 (radiative recombination) による電子捕獲が起こるため、生成されるイオンの価数は逐次電離によるイオン化と電子捕獲との競合で決まる。そのため、3.1 の逐次電離の式に、これら 2 つの影響による電子捕獲の項を付け加えて考えなければならない。しかし、本研究のように生成する多価イオンの価数がそれほど高くない場合、放射性結合の割合はイオン化の割合に比べてとても小さいため無視することができる[5]。残留ガスとの衝突による電子捕獲により q 価のイオンが $q-1$ 価のイオンになるときの電子捕獲断面積を $\sigma_c(q, q-1)$ とおき、与えられた電子ビームエネルギーで到達する最高価数が q 価とすると、平衡に達したときの価数分布は以下のようになる。

$$\frac{n_q}{n_{q-1}} = \frac{n_e v_e \sigma_i(q-1, q)}{n_0 v \sigma_c(q, q-1)} = \frac{(J/e) \sigma_i(q-1, q)}{n_0 v \sigma_c(q, q-1)}$$

ここで、 J_e は電子ビームの電流密度、 v_e, v は電子ビームの速度と衝突のときの相対速度、 n_e, n_0 は電子ビームと残留ガスの数密度である。この関係より、EBIT での多価イオン生成において、大きな J と小さな n_0 、すなわち高密度の電子ビームと超高真空が必要であることがわかる。

4. 小型 EBIT の製作

我々はこれまで電気通信大学レーザー新世代研究センターの Tokyo EBIT[6]を用いて鉄多価イオンの分光測定を行ってきた。しかしながら、Tokyo EBIT は最大 300keV もの高エネルギー電子ビームによって、 U^{92+} のような高電離重元素イオンを生成することを目的に設計されているため、本研究で目的としている 10 価程度の鉄多価イオンの生成に適した 1keV 以下の電子ビームでの運転は不適で、統計的な測定を行なう実験は困難であった。また、装置の大きさは 5m 程と大きく、更には運転の際に高価な液体ヘリウムを使用するなど、本研究には不都合な点がいくつかあった。そのため今回、10 価程度の鉄多価イオンの EUV 分光に最適な小型 EBIT を製作した。

本装置は、設計仕様を最大電子ビームエネルギー：1keV、同電流：10mA、最大軸上磁場：0.2 T とした。1keV の電子ビームでは Fe^{16+} までの鉄多価イオンが生成可能である。低エネルギー、低磁場仕様のため全長で約 50cm 程と、装置全体の大幅な小型化が可能となった。図 3 に小型 EBIT の概略図を示す。また、表 1 に小型 EBIT の設計仕様を示す。

4.1 電子銃

電子銃は Tokyo-EBIT と同じ電子銃を使用した。Pierce 型で直径 3mm の凹面カソード、アノード、フォーカス、スノート、またそれらを囲むように配置される磁気シールドで形成されている。

電子銃を空間電荷制限領域で動作させたい場合、得られる電子ビーム電流値 I [A] と、陽極電圧 V_a [V] との間には、次式が成立する。

$$P = I/V_a^{3/2} \quad [A/V_a^{3/2}]$$

この式より、 V_a を 1000V 程度にすると 10mA 以上の電流値が得られる。EBIT の電子ビームは完全な層流が理想とされるため、TRICOMP と呼ばれる市販のソフト[7]を用いて電子ビームの空間電荷を考慮したシミュレーションを繰り返し、電極電位と軸上磁場分布の最適化を行った。図 4 に軌道シ

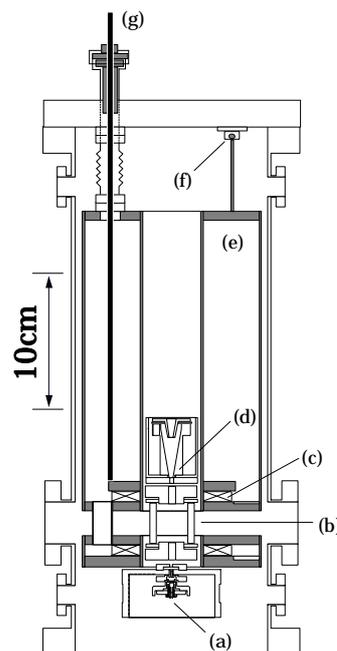


図 3. 小型 EBIT の概略図

- (a)電子銃、(b)イオン化領域、(c)コイル
- (d)電子コレクター、(e)液体窒素容器
- (f)吊り下げ機構、(g)電流導入端子

	小型 EBIT	Tokyo-EBIT
装置サイズ	~ 0.6m	~ 5m
最大電子ビームエネルギー	1keV	300keV
最大電子ビーム電流	~ 10mA	330mA
電子銃パービアンズ	$0.4\mu A/V_a^{3/2}$	$0.4\mu A/V_a^{3/2}$
最大電流密度	32A/cm	10000A/cm
最大磁場強度	0.2 T	~ 4.5 T
イオントラップ領域長さ	2cm	3cm

表 1. 小型 EBIT の設計仕様と Tokyo-EBIT との比較

ミュレーションの結果を示す。以下に、電子銃を構成する各電極の詳細を述べる。

4.1.1 カソード

多孔質タングステンの表面に BaO, CaO, Al_2O_3 を含浸し仕事関数を減少させており、動作温度を減少させるためにオスミウムなどをカソード表面に塗っている。カソード自体は数 W のヒーター電力で最大電流 300mA 以上の電子放出能力を持つ。

4.1.2 アノード

カソードに対して正の電位を印加することにより電子をカソード表面から引き出す働きをする。

4.1.3 フォーカス

カソードとアノードの間に位置し、カソード～アノード間に同心球の電場を作るための補修電極で、ビーム電流や条件に応じてカソードに対して 0V ~ - 数 10V の負電位を印加する。

4.1.4 スノート

アノードを出た電子ビームはスノートによりさらに加速される。また、電子ビームの軌道を修正する働きをする。

4.1.4 磁気シールド

スノートとアノードとの間に位置し、超伝導コイルからの磁場を遮蔽する働きをする。材質は電磁軟鉄(SUYBO)を使用している。磁気特性を満たすために 850 で 3 時間焼鈍した後、ニッケルメッキを施した。

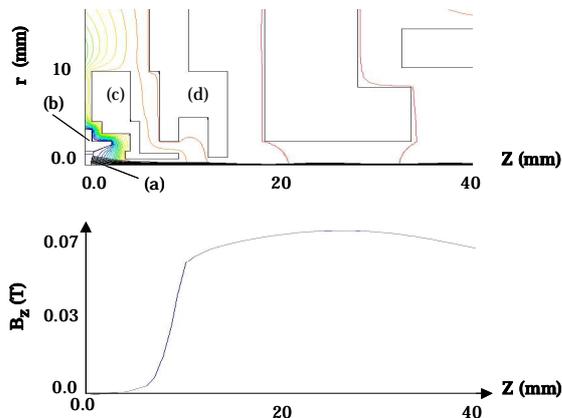


図 4. 電子銃部における電子の軌道と軸上磁場分布

(a) Cathode 0.0V (b) Focus 0.0V
(c) Anode 900V (d) Snout 1000V

4.1 ドリフトチューブ(DT)

電子ビームはカソード～DT 間の電位差で加速される。本装置では、DT の周りに配置する接地電位の超伝導コイル、液体窒素容器との放電などを防ぐために DT2 を接地電位に固定している。

また、DT1,DT3 に中央の DT2 に対して数 10V 程度の正の電位を印加することにより、電子ビーム

軸方向に多価イオンをトラップすることができる。

4.3 電子ビームコレクター

イオン化領域を通り抜けた電子ビームは、電子コレクターで全て回収されなければならない。Tokyo-EBIT では 300keV の電子ビームを回収するためドリフトチューブ～電子コレクター間で 3keV 程度まで減速して回収しているが、小型 EBIT の電子ビームは 1keV : 10mA であるため、減速せずに電子コレクターで回収している。しかし、ビームを回収することで少なからず発熱(10W 程度)が起きるため、熱伝導性に優れた絶縁碍子を通して液体窒素容器の熱で電子銃全体の冷却を行っている。図 5 に電子ビームコレクター領域での軌道シミュレーションの結果を示す。以下に、電子コレクターを構成する各電極の詳細を述べる。

4.3.1 コレクター電極

コレクター電極はテーパ型をしており、DT2 と同じ接地電位に設定される。

4.3.2 磁気シールド

コレクター電極と同じく接地電位に設定される。コレクター部での磁場を遮蔽し、電子ビーム自身の空間電荷によって発散させる働きをする。

4.3.3 エクストラクター電極

コレクター電極よりさらに - 100V 程度の負電位を印加することで電子軌道を修正して全ての電子をコレクター電極で回収できるようにしている。

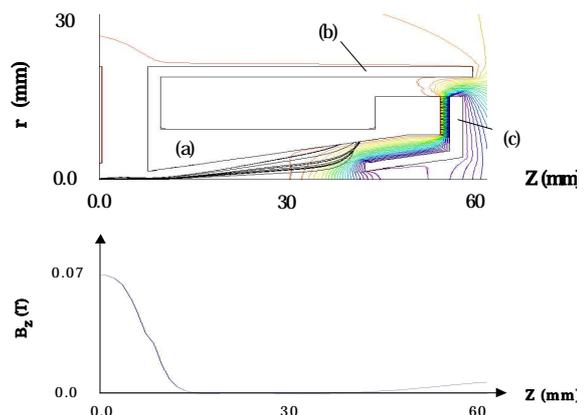


図 5. 電子コレクター部における電子の軌道と軸上磁場分布

(a)Electron collector, (b)Shield, (c)Extractor

4.4 高温超伝導コイル

DT の外周を同心上に取り囲む液体窒素容器の中に収められ、超伝導状態で動作するヘルムホルツ型コイルである。高温超伝導線材は住友電工社製のビスマス系超伝導線(DI-BSCCO)を使用した。図6に高温超伝導コイル、表2に設計仕様、図7にDT中心領域での磁場分布を示す。

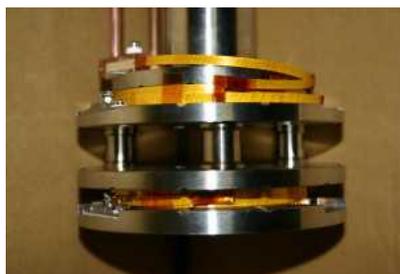


図6. 高温超伝導コイル

中心磁場	0.2 T
磁場均一度	0.01 T
電流	50 A
起電力	8600 AT
コイル巻き数	172 TURNS
電流密度	42.5 A/mm ²
断面形状	8.4mm ² × 18.9mm ² (× 2 個)
内径	50 mm
外径	68.9 mm
コイル間隔	36 mm

表2. 設計仕様

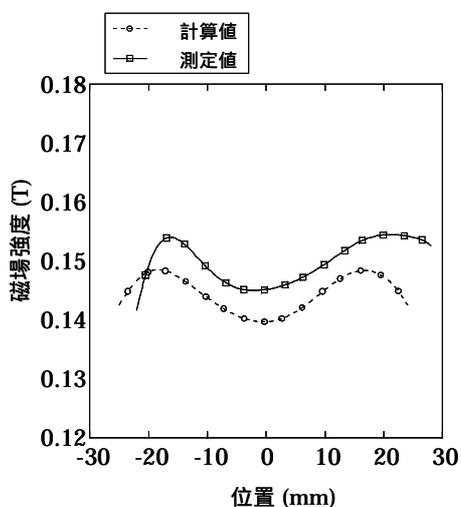


図7. DT中心領域での磁場分布

4.5 液体窒素容器、真空容器

液体窒素容器は内部に超伝導コイルを含んでおり、コイルを液体窒素温度(77K)まで冷やす他に、イオン化領域での真空度を向上させるクライオポンプの働きをする。容器の容量は約 3.2 程で、一度の充填で約6時間程度の連続運転が可能である。真空容器は、EBIT全体を構成する真空容器で、内部に電子銃と液体窒素容器を収納する。多価イオンからの発光を観測するため、ドリフトチューブ中央の高さに6個の観測ポートがあり、分光測定時の発光観測用ポートの他に、真空イオンゲージ、四重極型質量分析器、ガス導入などの取り付けに使用している。チャンバー全体はベーキングを行い、ターボ分子ポンプとスクロールポンプによる排気によって真空度 1×10^{-7} Pa 程度が得られている。

5. 小型EBITの評価

小型EBIT製作の目的は、極端紫外線領域において10価程度の鉄多価イオンからの発光の様子を詳細に調べ、鉄多価イオンの基礎原子データを収集し、モデル計算の精度を向上させることである。製作した小型EBITで目的とする多価イオンが生成できるかどうかを試験するため、電子ビーム通過実験、電子ビーム径の測定を行い、研究室に既存の可視分光器により多価イオンからの発光を観測した。

5.1 電子ビーム通過実験

製作した小型EBITで実際に電子ビームを出し、最大電子ビームエネルギー、最大電子電流を測定した。試験運転にて、1keV:10mA, 800eV:10mA, 500eV:5mA, 200eV:8mAの電子ビームの運転に成功した。この運転により、設計仕様であった1keV, 10mAの電子ビームが運転可能であることを確認した。

5.2 電子ビーム径の測定

EBITにおいて高効率で電離を行うには、電子ビームを磁場により細く圧縮し高密度の電子ビームを作ることが重要である。よって、電子ビーム径はEBITにとって重要なパラメータであるため、

電子ビーム径を測定する必要がある。測定の結果、電子ビームの直径は約 0.2mm であり、製作した小型 EBIT の電子ビームの電流密度は約 32 A/cm² と見積もることができる。

5.3 多価イオンの可視分光

過去に観測例が報告されている発光線を測定対象とし、電子ビームエネルギー(E_e)に対する多価イオンの発光スペクトルの依存性を調べ、報告例と比較し考察を行った。図 9 に、実験の配置図を示す。

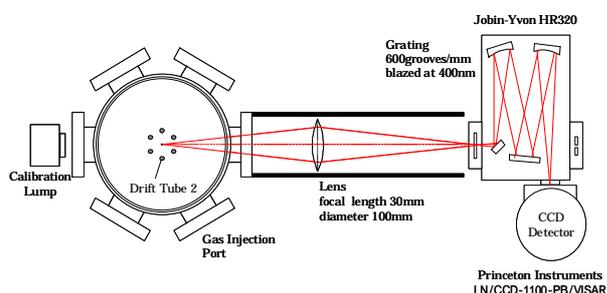


図 8. 可視分光測定の配置図

まず初めに、比較的取り扱いの容易な希ガス元素(Kr)による測定を行い、その後に鉄を用いて測定した。希ガス元素は観測ポートに取り付けたガス導入から導入し、鉄は有機金属化合物のフェロセン(C₁₀H₁₀Fe)を蒸気圧でガス導入まで送り、ガス導入を通して EBIT チェンバー内に導入している。また、波長の較正は He,Ne,Ar,Kr の標準ランプから観測されるスペクトルを用いて行った。

図 10 に Fe¹³⁺の(3s²2p²P_{1/2} - ²P_{3/2})の遷移による 530.2nm の発光スペクトルを示す。電子ビームエネルギー(E_e)は 300eV ~ 500eV、電子電流は 10mA、測定時間は 60min で行った。

Fe¹³⁺の生成に必要な電子ビームエネルギー、すなわち Fe¹²⁺のイオン化エネルギーは約 372eV であり、この閾値を超えると発光線が突然現れることから、この同定が正しいことが確かめられる。また、電子ビームエネルギーの変化に依存して発光の様子が変わることが確認できる。Fe¹³⁺は太陽コロナに存在する多価イオンであり、この発光線はコロナの中で最も強いラインの 1 つである。

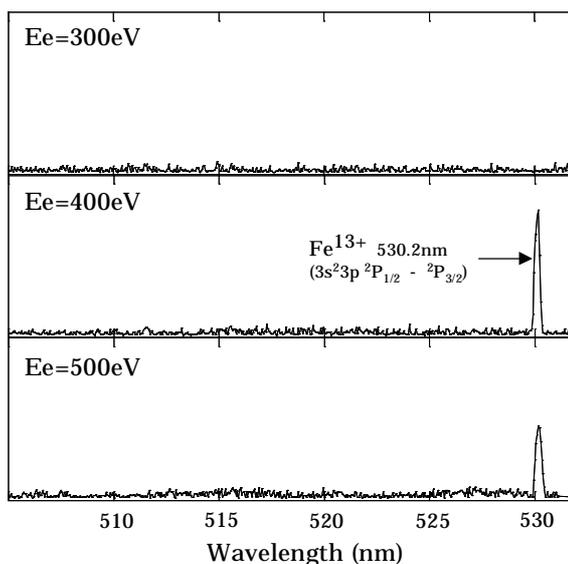


図 9. Fe¹³⁺の発光スペクトル

6. まとめ

10 価程度の鉄多価イオン分光用の小型イオン源を設計・製作した。設計仕様を電子ビームエネルギー:1keV、同電流:10mA、最大軸上磁場:0.2 Tとすることで、EBIT 全体の大幅な小型化が可能となった。また、製作した小型 EBIT での可視分光により、電子ビームの適宜調整によって Fe¹³⁺などの目的の多価イオンを生成し、1 時間以上の長時間でトラップできることを確認した。

今後は、極端紫外線領域での分光測定を行い、10 価程度の鉄多価イオンの基礎原子データの構築を行う。

[1] <http://hinode.nao.ac.jp/index.shtml>
 [2] http://hinode.nao.ac.jp/panf/make_corona.shtml
 [3] M.A.Levine, R.E.Marss, J.R.Henderson, D.A.Knapp, and M.B.Schneider, Physica Scripta T22,157
 [4] H. Tawara and H. Imamura, in Workshop on EBIS and Related Topics, edited by B. Wolf and H. Klein, GSI, Darmstadt, 1977, p. 77.
 [5] Penetrante, B.M., Bardsley, J.N., DeWitt, D., Clark, M., Schneider, D., Phys.Rev.A43, 4861-4872 (1991)
 [6] 中村信行, 大谷俊介, 日本物理学会誌 52 巻, p.919
 [7] <http://www.fieldp.com/index.html>