

原子衝突研究協会誌 2010年第7巻第1号

# しよとつ

Journal of Atomic Collision Research



The Society for  
**ATOMIC COLLISION  
RESEARCH**

原子衝突研究協会 2010年1月15日発行  
<http://www.atomiccollision.jp/>

# しょうとつ

## 第7巻 第1号

### 目次

総説:シリーズ 多電子原子の構造とダイナミクス — 独立粒子モデルの来し方行く末 — 第6回 原子の電子状態と遷移の計算のために (小池文博)	... 4
2010年度原子衝突研究協会会長選挙および役員選挙の結果 (2009年選挙管理委員会)	... 11
大森賢治先生にアメリカ物理学会フェロー表彰 (庶務)	... 11
国際会議発表奨励事業に関するお知らせ (庶務)	... 11
「しょうとつ」原稿募集 (編集委員会)	... 12
今月のユーザー名とパスワード	... 12

## 原子衝突研究協会賛助会員

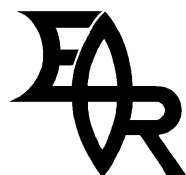
アイオーピー・パブリッシング・リミテッド(IOP 英国物理学会出版局)

<http://journals.iop.org/>

Institute *of* **Physics**

有限会社 イーオーアール

<http://www.eor.jp/>



**Electronics Optics Research Ltd.**

株式会社 オプティマ

<http://www.optimacorp.co.jp/>

Optima Corp.

株式会社 サイエンス ラボラトリーズ

<http://www.scilab.co.jp/>



**株式会社 サイエンス ラボラトリーズ**

真空光学株式会社

<http://www.shinku-kogaku.co.jp/>

真空光学株式会社 - Vacuum & Optical Instruments -

株式会社 タツオカ

<http://www.gas-tatsuoka.co.jp/>

**株式会社 タツオカ**

ツジ電子株式会社

<http://www.tsujicon.jp/>

TSUJICON

株式会社東京インスツルメンツ

<http://www.tokyoinst.co.jp/>

**TII TOKYO INSTRUMENTS, INC.**

株式会社東和計測

<http://www.touwakeisoku.ecnet.jp/>



株式会社トヤマ

<http://www.toyama-jp.com/>



株式会社 ナバテック

<http://www.navatec.co.jp/>

真空機器の未来と歩む  
*Navatec*

伯東株式会社

<http://www.g5-hakuto.jp/>



株式会社 フジクラ

[http://www.fujikura.co.jp/index\\_j.html](http://www.fujikura.co.jp/index_j.html)



丸菱実業株式会社

<http://www.ec-marubishi.co.jp/>

丸菱実業株式会社

MARUBISHI CORPORATION

株式会社 ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション

<http://www.labo-eq.co.jp/>



## 総 説

# シリーズ 多電子原子の構造とダイナミクス - 独立粒子モデルの来し方行く末 - 第6回 原子の電子状態と遷移の計算のために

小池文博

北里大学 医学部

koikef@kitasato-u.ac.jp

平成 22 年 1 月 6 日原稿受付

前回までの稿 [1-5] では、多電子原子の電子状態にまつわる話題について解説してきました。本稿をお読みの方々の中には原子過程についての具体的な課題を抱えていて、原子の電子状態や状態間の遷移の計算を試みたいと考えている方も居られるかもしれません。今回の稿ではそのような方々のためにいくつかの計算コードを紹介しようと思います。

### 1. 近似法を考える上での視点

電子を数個以上持つ原子や原子イオンの電子状態の計算においては以下の2点が考慮されなければなりません。まず始めに相対論効果 (relativistic effect) です。原子番号が  $Z$  の水素様原子イオンの基底状態 ( $1s$  状態) にある電子の軌道速度  $v$  は原子単位 ( $e = \hbar = m = 1$ ) で  $Z$  なので光速との比  $\beta$  の値は  $\beta = Z\alpha = Z/137.036$  ( $\alpha$ : 微細構造定数) になります。外場の効果を考えなければ相対論効果は  $\beta^2$  のオーダーで入って来ますので、 $10^{-2}$  程度の精度の議論をしたいと考えたと  $Z = 10$  のネオン原子でも  $\beta^2 \sim 0.5 \times 10^{-2}$  程度なので相対論効果を見捨てたら正しい考察ができない可能性があります。特に原子の内殻励起等を考える場合には上準位と下準位で相対論効果の現れ方が異なりますのでオフセットとして無視するわけにはいかなくなります。次に考慮されるべき効果は電子相関効果 (electron correlation effect) です。電子間の相互作用である電子相関のエネルギーは原子番号  $Z$  にあまり

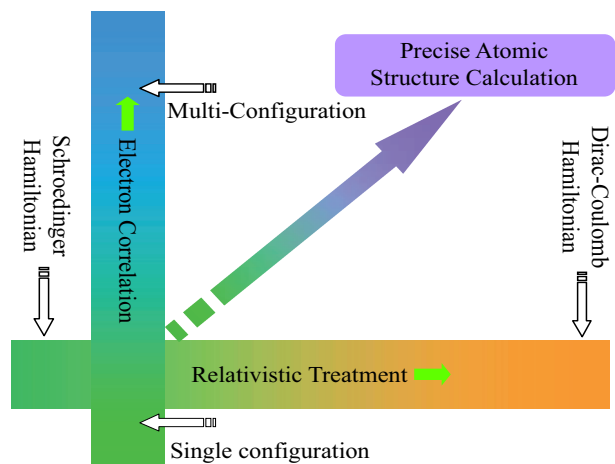


図 1: 多電子原子の電子状態の計算における考慮すべき効果。高精度の計算を求めるとき、相対論効果と電子相関の効果を十分に取り入れることが必要。

強く依存しないので高  $Z$  になって核引力ポテンシャルが強くなると電子相関の寄与は無視できるようになると考えられがちですが、これはいつも正しいわけではありません。実験データの解析等で必要になるのは遷移エネルギーであって全エネルギーではありません。核引力ポテンシャルの効果は遷移エネルギーにおいてはオフセットとして差し引かれてしまい表面には出ませんので、電子相関効果は高  $Z$  の多価イオンであっても無視できないのです。

多電子原子 (イオン) の計算の為のコードを考える場合、上記の相対論効果の扱いとそれから電子相関を含む電子間の相互作用の扱いによって分類することが出来ます。図 1 に分類の概念図を示します。

相対論効果を考えるか否かによって基礎に

なる方程式が異なります。相対論効果を考える場合ディラッククーロン (Dirac-Coulomb) のハミルトニアン (Hamiltonian) を、相対論効果を考えない場合には、シュレーディンガー (Schrödinger) のハミルトニアンを基礎に方程式を考えるのが通例です [1,2]。電子相関の効果は多体摂動の方法や後に詳しく解説する多配置型のハートレーフォック法や配置間相互作用法によって取り入れることが出来ます。あるいは、電子と電子の相対的な座標を波動関数に直接書き込むことによって評価をすることも出来ます。いろいろな考え方があり、それぞれ、長所と短所があります。

### 1.1 電子相関効果の記述

電子間の相互作用の計算はいわゆる時間多消費 (time consuming) 型の計算になるので今まで様々な方法によってこれを効率良く正確に行う試みがなされて来ました。電子  $i$  と電子  $j$  との間の相対座標  $r_{ij}$  の情報を波動関数に書き込む方法があります。Hylleraas 型の波動関数 [6] はこの試みのひとつです。超球座標法による波動関数の記述 [7] もとりあえずこの区分に入れることができるでしょう。この様な方法は複数の電子の集団的な運動 (collective motion) を記述するのに都合が良いと考えられます。そして、電子相関効果を効率良く記述する方法であるとも言えるでしょう。しかし、実際の計算はあまり簡単ではなく特に任意の電子数に対して同じように計算できるわけではありません。したがって、電子数をあらかじめ仮定しない一般的な計算コードは、私の知る限りでは発表されていないようです。

一方、平均場近似の一つであるハートレーフォック (HF) 法やこれの相対論版であるディラックフォック (Dirac-Fock, HF) 法 (ディラックハートレーフォック (DHF) 法ともいう) では電子間の相対座標  $r_{ij}$  はハミルトニアンにのみ書き込まれ、波動関数には露わには書き込まれません [1,2]。HF または DF 法 (以後は誤解の恐れのない限り単に HF 法と記すこ

とにします。) は、電子座標の 1 つ 1 つに対して 1 つ 1 つの波動関数をあてがい 1 電子軌道関数を導入して、多電子波導関数をこれらの (反対称化された) 積で表現します。1 電子軌道関数は他の全ての電子の作る平均場の中を運動する 1 電子の波動関数であると解釈できます。1 電子軌道関数はその量子数に応じた電子殻に属しますので、HF 法は電子の運動の殻模型 (shell model) を与えます。この方法は、波動関数に電子間の相対座標を含まないので、波動関数の構造を簡単にできその結果任意の電子数に対して同じように計算できるコードが開発されています。しかし、HF 法は電子相関の効果を記述できません。実際のところ電子相関とは真の値と HF 法による計算結果との差であると定義されているわけですから、HF 法が電子相関の効果を記述しないのは言葉の意味するところから自明なことではあります。

図 1 に示したように、電子相関の効果は原子内の電子の運動に関する重要な効果ですから、HF 法を超えてこの効果を取り込む努力は色々試みられてきました。HF 法を越える近似法として 2 つの立場が存在します。一つは、平均場近似の枠組みの中で電子配置を多配置とし電子相関を配置間の相互作用として記述する立場で多配置 (Multi-Configuration) ハートレーフォック (MCHF) 法や配置間相互作用 (Configuration Interaction, CI) 法がこの流れに属します [1,2,8]。もう一つは、平均場中の 1 電子軌道関数の組を基底関数系とした多体摂動法の流れです。摂動の次数を上げることによって近似を進めることが出来る点や連続状態の寄与を比較的簡単に取り入れることが出来る点がこの方法の利点です [9,10]。しかし、ここで、MCHF 法や CI 法もまた“連続状態の寄与”を取り入れることができるということに留意しておくことは有用です [8]。MCHF 法や CI 法は二乗可積分な 1 電子軌道関数を基底関数として用いますが、二乗可積分な関数系で完全系を張ることは可能だからです。ただし、個々の基底関数を電子 1 個の物理的な運動様式に対応させて意味づける

ことは困難になります。

さらに、多少テクニカルな事柄に見えるのですが、計算コードを分類し評価を行う上で重要な視点がいくつかあります。

## 1.2 多体相互作用の局所近似

HF法やMCHF法による計算で多くの計算時間を消費する部分のひとつは、2電子交換積分です。2電子交換積分  $I_{12}$  は、2つの電子の座標を  $\xi_1, \xi_2$ , 2つの1電子軌道関数を  $\varphi_1, \varphi_2$ , 相互作用をクーロン相互作用ポテンシャル  $1/r_{12}$  として次の式で表されます。

$$I_{12} = \iint \varphi_1(\xi_2)\varphi_2(\xi_1)\frac{1}{r_{12}}\varphi_1(\xi_1)\varphi_2(\xi_2)d\xi_1d\xi_2 \quad (1)$$

この積分は個々の電子に対しては非局所的な相互作用ポテンシャルを与えるのですが計算はなかなか厄介です。そこで、相互作用を局所化して計算を簡略化するなどして計算を高速化する工夫がなされてきました。スレーター近似 (Slater approximation) [11] としてよく知られている近似法もこの流れに入ります。局所ポテンシャルによる近似は局所平均1電子ポテンシャルの中を運動する独立した電子という物理的に非常に理解しやすい描象をもたらしますので、計算の簡便さとあいまって原子分子のみならず固体の電子状態の計算にも広く取り入れられています。しかし、局所ポテンシャルによる近似には欠点もあります。それは、真の積分値がわからないことです。したがって、このような近似の下に実験と比較可能な計算結果を得るためには不可避免的に経験的なパラメーターが導入されることとなります。計算機が十分に発達した今日では、2電子交換積分 (1) 式を直接計算することは原子の場合には十分に可能です。HF法やMCHF法による原子コードは、2電子交換積分に局所近似を行うか否かで分類することができます。

## 1.3 差分近似法と基底関数展開法

HF法やMCHF法による計算は、1電子軌道関数を数値的に与えるかまたは、解析的な軌道関

数の線形結合で与えるかによって分類することが出来ます。解析的な軌道関数として、原子の計算の場合にはスレーター型軌道 (STO, Slater type orbital) が選ばれることが多いです。前者が、実は、通常、HF法とかMCHF法とかいわれている方法になり、微(積)分方程式を差分近似で解いて軌道関数を得ることから、後者との対比では有限差分法 (finite difference method) と呼ばれます。後者は、これに対して基底関数展開法 (basis function expansion method) と呼ばれます。そして、これをHF法と区別してSCF法 (self consistent field method) と呼ぶこともあります。さらに、普通のHF法をSCF法と区別するために数値的HF (Numerical Hartree-Fock) 法と呼ぶこともあります。有限差分法は、微分方程式の解法のひとつの有限要素法を思い出していただくとうわかるように、差分の各分点にデルタ関数を基底関数として置く方法に他ならないですから、数学的には基底関数展開法の一つと言えなくはありません。有限差分法は1つの1電子軌道関数を記述するのに差分の分点の総数にみあう計算機の記憶領域を要求し行列要素を求める際に多くの計算ステップを要求しますので、以前はこの様な方法はどちらかという避けられてきたのですけれども、今日の計算機の容量を考えれば特段に欠点としてあげる必要はなくなったように思います。有限差分法は実は励起状態等を計算する上で大変好都合です。有限差分法によって得られる1電子軌道関数は高さの異なるデルタ関数を一列に並べたようなものですから、与えられた1電子軌道関数の節の数すなわち主量子数を数えるのは極めて容易です。そこで、計算の過程で節の数を監視して励起状態の計算に付き物の困難である変分崩壊 (variational collapse) を回避することが出来ます。

## 2. MCHF法・CI法による原子コード

この節では、MCHF (MCDF) 法によるいくつかの原子コードの紹介と比較を行います。多

配置 (MC, Multiconfiguration) コードがあれば単配置の計算は出来ます。配置状態関数 (CSF, Configuration State Function) の角運動量を指定しない、いわゆる、タームインディペンデント (term independent) な計算は原子の電子状態の大まかな様子を知るために現在でも有用ですが、これも、タームディペンデント (term dependent) な計算が出来るコードがあれば、そのオプションを切ることで可能なことが多いです。本稿では、HULLAC, RCI, Cowan's Code, GRASP, および FAC と呼ばれる原子コードを紹介します。

## 2.1 HULLAC

このコードの正式名称は Hebrew University Livermore Laboratory Atomic Physics Code です [12]。これは名前のおり Hebrew 大学と Lawrence Livermore 研究所との共同研究で作成されたコードです。

次のカテゴリーに分類できます。

- 1) 相対論的 MCHF 型コード。
- 2) 局所ポテンシャル近似。
- 3) 有限差分法による 1 電子軌道。

過大な計算時間を消費することなく原子構造や原子過程についての種々の物理量を計算します。電子間相互作用ポテンシャル  $1/r_{ij}(i, j = 1, 2, 3, \dots, i \neq j)$  の行列要素の評価にあたって、HULLAC コードは電子の動径座標  $r_i$  にのみ依存する球対称の局所場平均ポテンシャル  $V(r_i)$  を導入してこれで電子間相互作用ポテンシャルを置き換えます。HULLAC コードは、ディラック-クーロンハミルトニアン  $H_{DC}$  の代わりにゼロ次ハミルトニアン

$$H_0 = \sum_i \left[ h_i^D - \frac{Z}{r_i} + V(r_i) \right] \quad (2)$$

を導入し、 $H_0$  を最適化します。 $H_{DC}$  との差

$$H_{DC} - H_0 = \sum_{i < j} \frac{1}{r_{ij}} - \sum_i V(r_i) \quad (3)$$

は小さいと仮定します。Breit の補正と Lamb

シフトは摂動法によって計算します。HULLAC は原子やイオンに関する次の物理量を計算することができます。

- a. エネルギー準位
- b. 自発放射速度
- c. 電子衝突励起断面積
- d. 電子衝突イオン化断面積
- e. 自動電離速度
- f. 光イオン化断面積
- g. 放射再結合速度

HULLAC コードは電子間相互作用の局所近似を行っていますので上に記したように比較的簡単な計算で種々の物理量を求める事ができます。局所場平均ポテンシャル  $V(r_i)$  は 1 電子軌道エネルギーを最適化するように求められますから、原子の 1 電子過程に対しては比較的問題のない値を与えると期待できます。しかし、多電子励起状態など、電子相関が大きな役割を果たすような系についてこのコードを適用するのは注意が必要です。適用範囲についての十分な考慮が求められるでしょう。

## 2.2 RCI

このコードの正式名称は Relativistic Configuration Interaction code です。奈良女子大の香川貴司先生が中心となって開発された原子コードです [13]。

次のカテゴリーに分類できます。

- 1) 相対論的配置間相互作用法コード。
- 2) 非局所相互作用を正しく扱う。
- 3) 1 電子軌道の基底関数展開。

計算にあたって大容量の記憶領域を要求しないし計算は速いです。配置間相互作用法を用いるので計算過程に非線型な部分を含まず安定です。したがって、多数の配置関数を系統的に導入して大容量の計算をすることができます。HF 型の計算とは異なり 1 電子軌道関数自体の最適化は行わないので、一般に“良い”結果を得るた



めには計算に取り込むべき配置関数の数が大きくなります。その意味で計算結果のいわゆる“物理的解釈”が少し困難になるかもしれません。

### 2.3 Cowan's Code

ロスアラモスの R. D. Cowan 先生が中心となって開発された原子コードです [14].

次のカテゴリーに分類できます。

- 1) 非相対論的 MCHF 型+相対論補正.
- 2) 非局所相互作用を正しく扱う.  
局所ポテンシャル近似も可能.
- 3) 有限差分法による 1 電子軌道.

非相対論のコードなので大容量の計算機を要求せず、随分古くから使われてきたコードです。広い範囲の原子や原子イオンに対して質の良い計算結果を提供してきました。原子番号の大きい原子や、高精度の実験値の解析などを行うためには、遷移エネルギーの絶対値は相対論補正が必須です。この補正は、摂動的に入れたのでは不十分なことも多いので、多くの場合、遷移エネルギーの実験値を参照して補正を行います。したがって、このコードによる計算結果は、発光・吸収スペクトルの相対値についての比較に用いるのは大変有効なのですが、絶対値の比較は、もともと計算結果が実験値にあわせてあることも多いので、十分慎重に行う必要があります。

簡単な計算でしたら LANL の次のウェブページでオンラインで実行することが出来ます。ログイン ID やパスワードは不要です。

[http://aphysics2.lanl.gov/cgi-bin/  
ION/runlanl08d.pl](http://aphysics2.lanl.gov/cgi-bin/ION/runlanl08d.pl)

ソースプログラムは次の FTP サイトからダウンロード出来ます。

<ftp://aphysics.lanl.gov/pub/cowan>

上記 2 つのアドレスは次の、LANL の T-4 デビジョンのホームページ：

<http://www.t4.lanl.gov/>

からリンクを辿って入ることが出来ます。

### 2.4 GRASP, General Purpose Atomic Structure Program

GRASP は 1977 年にオックスフォード大学の I.P. Grant 先生が中心となって開発された MCDF パッケージ [15] を前身としています。その後幾つかのコードが追加され、それらをまとめてユーザーインターフェイスを改良し、1989 年に GRASP が発表されました [16]。その後、1992 年には未出版の改良版である GRASP2 が出され [17]、1996 年には会話型のユーザーインターフェイスを持ち相関軌道 (Correlation Orbital) の扱いその他を強化した GRASP92 が発表されました [18]。最近、更なる改良版である GRASP2K が発表されました [19]。

GRASP は次のカテゴリーに分類できます。

- 1) 相対論的 MCHF 型コード.
- 2) 非局所相互作用を正しく扱う.
- 3) 有限差分法による 1 電子軌道.

GRASP は Numerical Dirac-Fock 法により Dirac-Coulomb ハミルトニアン  $H_{DC}$  を最適化します。摂動によって、Breit の相互作用と Lamb シフト を評価する事ができます。振動子強度やアインシュタイン係数の計算も出来ます。最も新しい GRASP2K になると、原子核との相互作用である超微細構造の計算も出来ます。それから、非直交軌道関数系を用いての振動子強度やアインシュタイン係数の計算ができます。非直交軌道関数系を用いての輻射遷移確率や無輻射遷移の計算、光電離や電子散乱の計算のために GRASP92 と組み合わせて使うためのコードが GSI の S. Fritzsche と共同研究者により開発されています。RATIP (Relativistic Atomic Transition and Ionization Properties) コードと言います [20]。RATIP コードは GRASP92 による電子状態の計算結果を用いて原子の Auger 遷移の計算を行なうことができます。GRASP92

と同様な会話型のユーザーインターフェイスを持ち、クーロン相互作用によるオーギュメント遷移のみならずブライトの相互作用によるオーギュメント遷移の計算をします。

GRASP と RATIP のソースコードは次の CPC (Computer Physics Communications) Library のホームページから検索してダウンロードすることが出来ます。商用ではありませんが有料です。所属の機関が CPC をとっていれば個別に請求されることはありません。

<http://www.cpc.cs.qub.ac.uk/cpc/>

## 2.5 FAC Code

M. F. Gu 氏が中心となって開発された原子コードです [21,22]。正式名称を Flexible Atomic Code と言います。

次のカテゴリーに分類されます。

- 1) 相対論的 MCHF 型コード。
- 2) 局所ポテンシャル近似。
- 3) 有限差分法による 1 電子軌道。

先に紹介した HULLAC に似たコードで、原子のエネルギー準位のみならず、様々な物理量が手軽に計算できます。

ソースコードは下記のホームページから自由にダウンロードできます。

<http://plasma-gate.weizmann.ac.il/FSfAPP.html>

このホームページには、FAC Code のみならず、様々な Atomic Physics Code が掲載されており、ダウンロードが出来ます。Cowan's Code の PC 版のバイナリーもありますのでご興味のある方は覗いてみて下さい。

## 3. まとめ

本稿では、原子の電子状態を計算するための

コードの分類のためのキーとなる事項を述べ、さらに、いくつかの計算コードを紹介しそれぞれの特徴を解説しました。原子分子物理学の計算コードに関する情報へのリンクのリストが、先に紹介した、LANL の T-4 ディビジョンのホームページ：

<http://www.t4.lanl.gov/>

の下のほうにあります。ご興味のある方は、“Some other sites relevant to AMO physics” の下のリンクを選んで探検に出てみてください。また、国際原子力機関 (IAEA) の Code Network Center から、GRASP2K のオンライン計算が提供される予定があります。興味のある方は次のホームページを時々覗いてみると良いかもしれません。

<http://www-amdis.iaea.org/CCN>

## 謝辞

2007 年に最初の稿を掲載していただいて以来途切れ途切れでしたが 6 回目の稿を終え、これで最終回とさせていただきたいと思います。忍耐強く読み続けてくださった皆様に深く感謝いたします。特に、1, 2 回目を担当してくださった編集委員の市村淳氏、3 回目以降のお世話をくださった編集委員の田沼肇氏に、大変なご迷惑をかけてしまったことをお詫びするとともに忍耐強くお付き合いくださったことを深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 小池文博, しょうとつ, 第 4 巻 1 号 7 (2007).
- [2] 小池文博, しょうとつ, 第 4 巻 3 号 8 (2007).
- [3] 小池文博, しょうとつ, 第 6 巻 2 号 3 (2009).
- [4] 小池文博, しょうとつ, 第 6 巻 3 号 3 (2009).
- [5] 小池文博, しょうとつ, 第 6 巻 4 号 3 (2009).
- [6] Von Egil A. Hylleraas, Z. fuer Phys. **A65**,

- 209-225 (1930).
- [7] U. Fano, Rep. Prog. Phys. **46**, 97-165 (1983).
- [8] 藤永茂 “分子軌道法” 岩波書店 (1980).
- [9] H. P. Kelly and R. L. Simons, Phys. Rev. Lett. **30**, 529-532 (1973).
- [10] M. Ya Amusia and L. V. Chernysheva, “Computation of Atomic Processes” IOP Publishing Ltd ..Bristol and Philadelphia(1997).
- [11] J. C. Slater, Phys. Rev. **81**, 385-390 (1951).
- [12] A. Bar-Shalom, M. Klapisch., W. H. Goldstein, and J. Oreg, “The HULLAC Package - Computer set of codes for Atomic Structure and Processes in Plasmas”, unpublished (1999).
- [13] 香川貴司 : 多価イオン原子物理学講義ノート (1) - 多価イオンのエネルギースペクトルと光学特性, 文部省科学研究費補助金・重点領域研究「多価イオン原子物理学」総括班編 (1996).
- [14] R.D. Cowan, “Theory of Atomic Spectra”, (University of California Press, Berkely, 1981).
- [15] I. P. Grant, B. J. McKenzie, P. H. Norrington, D. F. Mayers, and N. C. Pyper, Comput. Phys. Commun. **21**,207 (1977).
- [16] K. G. Dyall, I. P. Grant, C. T. Johnson, F. A. Parpia, and E. P. Plummer, Comput. Phys. Commun. **55**, 425 (1989).
- [17] F. A. Parpia, I. P. Grant, K. G. Dyall, and C. F. Fischer, unpublished (1992).
- [18] F. A. Parpia, C. F. Fischer, et al, Comp. Phys. Communications **94**, 249 (1996).
- [19] P. Jonsson, X. Heb, C. Froese Fischer, and I.P. Grant, Comp. Phys. Communications **177**,597-622 (2007).
- [20] S. Fritzsche, F. Koike, J. E. Sienkiewicz, and N. Vaeck, Phys. Scr. **T80**, 479 (1999).
- [21] M. F. Gu, Canadian J. Phys. **86**,675-689 (2008).
- [22] M. F. Gu, Astrophys. J. **582**,1241 (2003).



### ADC500

変換方式  
コンバージョンゲイン

逐次比較型 15  $\mu$ sec 固定  
512,1024,2048,4096

### MCA510

MCA メモリ  
カウント容量  
インターフェイス

4kch  
32bit / ch  
10/100 Mbps イーサネット

### MCA520

MCA510 の MCA 機能に  
MCS 機能を追加

MCA / MCS メモリサイズ  
カウント容量  
Dwell time  
インターフェイス

4kch  
32bit / ch  
10  $\mu$ sec ~ 90sec  
10/100 Mbps イーサネット



### MCA600

-USB 対応マルチチャンネルアナライザ-



ADC 4Kch  
逐次比較型 15  $\mu$ sec  
MCA メモリ 4Kch  
カウント容量 32bit/ch

オプションで MCS 機能を搭載可能!

### DN-9010

-電流 / 周波数変換モジュール-

入力レンジ 1pA / 100pA  
周波数特性 500kHz



### IVC-6400

-電流 / 電圧変換モジュール-



入力レンジ 10pA ~ 780pA  
入力チャンネル 64ch ~

### 2100C / MCA

-USB 対応マルチチャンネルアナライザ-



ADC 8kch

ウィルキンソン方式 150MHz  
MCA / MCS メモリサイズ 8kch  
Windows98 ~ XP 対応ソフトウェア

### NT24-DUAL

-2パラメータ MCA-

(陽電子消滅測定等に)



ADC 15  $\mu$ sec 固定  
GAIN 4096ch  
MCA 4096ch(最大 8台)  
2パラメータ表示 1024 $\times$ 1024  
時間情報を付加してのリストモード測定  
WindowsXP 対応

### NT-2400 シリーズ

- 自動ビームスキャン型 PIXE システム
- RBS 測定システム
- 多チャンネルカウンタシステム (128ch)
- 高分解能質量分離装置

パルスモータコントローラボード  
MCA / MCS ボード  
8ch タイムスケラボード  
2ch D/A ボード (16bit 精度)  
4ch D/A ボード (10bit 精度)  
多チャンネル A/D ボード



ソフトウェア Windows LabVIEW Linux ライブラリ



MPS-1600 -マルチパラメータ MCA-  
(~8パラメータ)

(株)ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション



TEL 029-821-6051

FAX 029-821-6054

E-mail nonaka@labo-eq.co.jp

〒300-0034 茨城県土浦市港町 1-7-3