

気体の高エネルギー励起

中 村 正 年 (教育大・光研)

§ 1. はじめに

X U V (極端紫外) 領域での気体の吸収係数は非常に高い (吸収断面積にして $10^{-16} \sim 10^{-15} \text{ cm}^2$ の程度) ので, その領域の光によって殆んどすべての気体は電離されるか, あるいは高いエネルギー状態に励起され, それによって生じた光電子, イオン, そして励起状態の原子分子は他の中性原子分子といろいろの反応を起し, エネルギーの輸送が行われる。そのような基礎物理的な興味の外に, 最近特にロケットによる上層大気物理の研究が進むにつれて, 上層大気中の原子分子と, 太陽 X U V 光との相互作用に関する問題が重要な課題となり, 従って上層大気中での物理現象を理解するためには, そのような高い励起状態にある原子分子の準位などの十分な知識が必要となってきた。

ところが 600 Å 以下の波長領域では, まだ簡単に気体の吸収測定を行える連続光源は無いと言っても良く, 近年開発された Balloffet et al [1] によるスパーク放電や, 筆者による変形ライマンスパーク放電 [2] も $500 \text{ Å} \sim 1000 \text{ Å}$ の領域で連続光を発光するものの, 多くの強い輝線の存在に防げられて, 気体の吸収の微細な構造を調べるにはまだ困難性がある。つまり 600 Å 以下の波長領域では, 気体の連続吸収が非常に強いこと, 適当な強い連続光源が簡単に使えないこととで, この領域での気体の吸収構造は殆んど知られていない状況である。

このような実状にある X U V 領域の気体分光にとって S O R は実に有効な光源であることは, 後に述べられる米国, N B S に於ける Madden 等により発見された稀ガス, 酸素, 窒素等の吸収構造の多くが, 従来のライマンスパークを光源とした実験では見落されていたものであり, S O R を光源として使って初めて発見されたことを考えるとき明白である。以下に現在までに主として S O R を使ってなされた気体の高いエネルギー状態への吸収実験のいくつかを紹介しよう。

§ 2. 自動的電離 (Autoionization)

殆んどすべての原子分子は $10 \sim 20$ eV 以上のエネルギーをもつ光によって、電離化連続状態に励起されるが、そのような連続エネルギー状態の中にも、中性原子分子の不連続的エネルギー準位が存在し、その中のあるものは連続エネルギー状態との相互作用の結果、いわゆる自動的電離準位を形造っている。原子分子が光の吸収によってそのような準位に励起されると、短い時間の後 ($10^{-13} \sim 10^{-14}$ 秒の程度)、原子分子内の電子は再配列を起して、その中の一つの電子を離してイオンになる。これが自動的電離現象である。

この自動的電離準位の出来方はいろいろの場合があるが、簡単のために稀ガスの場合について考えると大別して次の三通りになる。

a) 最外殻電子の励起

$$np^6 \ ^1S_0 \rightarrow np^5 ms \ ^1P_1 \quad \text{または} \quad np^5 md \ ^1P_1$$

つまり最外殻電子が励起されて、リードベルグ系列を形造るとき、それはイオンの基底状態に収斂するわけであるが、稀ガスの場合はそれが二重項であるために、その二重項の中のエネルギーの高い方の状態に収斂する系列の一部は、他方の項の電離化連続エネルギー状態の中にあり、自動的電離準位を形造る。このような準位への吸収はすべての稀ガスに就て、それぞれの第1電離エネルギーに対応する波長の近くで観測されている。即ち Xe では $1022\text{\AA} \sim 923\text{\AA}$, Kr では $885\text{\AA} \sim 845\text{\AA}$, Ar では $787\text{\AA} \sim 778\text{\AA}$, Ne では $575\text{\AA} \sim 572\text{\AA}$ に於て観測されている。

b) 内殻電子の励起

$$ns^2 np^6 \ ^1S_0 \rightarrow ns np^6 mp \ ^1P_1$$

$$(n-1) d^{10} ns^2 np^6 \ ^1S_0 \rightarrow (n-1) d^9 ns^2 np^6 mp \ ^1P_1$$

$$(n-1) p^6 (n-1) d^{10} ns^2 np^6 \ ^1S_0 \rightarrow$$

$$(n-1) p^5 (n-1) d^{10} ns^2 np^6 ms \ ^1P_1$$

この b) にあげられているのは、内殻電子の励起による場合である。その

中の第1の場合は最外殻のp電子と同じ主量子数をもつs電子の励起によるもので、これはやはりNeからXeまでの稀ガスに就てそれぞれ観測されており（これより以下に述べられる観測は、特別にことわらぬ限り米国NBSのMadden等によってSORを光源として使ってなされたものである）Neでは $276\text{\AA} \sim 255\text{\AA}$ [3], Arでは $466\text{\AA} \sim 425\text{\AA}$ [4], Krでは $500\text{\AA} \sim 450\text{\AA}$ [5] Xeでは $590\text{\AA} \sim 540\text{\AA}$ [6]の附近でそれぞれ観測されている。

第2の場合は更に内殻の、主量子数の一つ低いd電子の励起によるものである。これについては、KrとXeに対して観測され、Krでは $135\text{\AA}$ 附近に[7], Xeでは $190\text{\AA}$ 附近[8]に、それぞれ自動的電離に特有の共鳴型の強い吸収線として観測されている。

この種の最後のものはKrの3p電子、またはXeの4p電子が最外殻のms軌道（Krでは $m \geq 5$, Xeでは $m \geq 6$ ）へ移ることによる励起の場合である。この遷移による吸収については、Xeに対して $80\text{\AA}$ 附近で観測されている。^[8a] またLukirskii et al [9]は、X線の技術を使って、KrとXeに対してこの遷移による吸収を観測して報告している。

c) 2電子励起

$$|s^2\ ^1S_0 \rightarrow m\ell\ m'\ell'$$

$$np^6\ ^1S_0 \rightarrow np^4\ m\ell\ m'\ell'$$

$$ns^2\ np^6\ ^1S_0 \rightarrow ns\ np^5\ m\ell\ m'\ell'$$

$$(n-1)d^{10}\ ns^2\ np^6\ ^1S_0 \rightarrow (n-1)d^9\ ns^2\ np^5\ m\ell\ m'\ell'$$

この中の第1の例はLassetre [10]によって電子ビームをHe原子にあてての散乱断面積測定から初めて観測されたものであるが、その後Madden等がSORを光源としてのHeの吸収測定から、 $205\text{\AA} \sim 190\text{\AA}$ の領域で実にきれいな共鳴吸収のスペクトルを観測し[10a], Fano [11]によって提出された自動的電離の理論を確認し、Beutler [12]による自動的電離化吸収実験以来の第2の旋風を巻き起したとも言うべき、Heの2電子励起に

よる自動的電離準位の例である。これに就ては別に詳しい解説がなされると思うので、ここでは詳細は省略する。その他の三つの例は、何れも b) に於て述べられた 1 電子励起に伴ってその吸収の短波長側にあられる多くの吸収線に対応するもので、何れも Ne から Xe に至る稀ガスに就て、現在までに多くが Madden 等によって観測され、その一部は報告されている [12a]

§ 3. 分子の高い励起状態

分子の場合も原子と同様に、その第 1 電離化エネルギーよりも高い状態に励起されれば当然、自動的電離現象が起きるわけで、分子の場合は前期解離との対応から、前期電離とも呼ばれている。

N_2 分子については Huffman et al [13] によって $650\text{\AA} \sim 700\text{\AA}$ 附近で N_2^+ イオンの $B^2 \Sigma_u^+$ 状態に収斂するリードベルグ系列が、吸収で観測された。これは従来、その共鳴吸収の形から emission と誤認され、Hopfield の emission 系列と呼ばれていたものであるが、Huffman 等によって、これは N_2 分子の自動的電離準位によるものであると同定された。この観測は SOR によるものではないけれども、彼等によって開発改良された He 連続光源によるもので、これ又、優れた連続光源が気体の吸収測定にとって如何に重要であるかの好例であろう。

更に N_2 分子に対しては、Madden 等 [14] は SOR を使って、 $500\text{\AA}$ 附近に N_2^+ イオンの $C^2 \Sigma_u^+$ 状態に収斂するリードベルグ系列を見出している。これは N_2 分子の基底状態からの 2 電子励起による遷移に相当するものである。

O_2 分子に対しても、やはり $500\text{\AA}$ 附近で O_2^+ イオンの $C^4 \Sigma_u^-$ 状態に収斂するリードベルグ系列が自動的電離を示すことが、Madden 等 [15] によって観測同定された。

その他 CO , SF_6 [16] 等の分子の吸収構造が、Madden 等によって NBS シンクロトロンを使って精力的に調べられている。

§ 4. INS-SOR 実験グループによる成果

INS-SOR 実験グループによる研究が、我が国に於けるこの領域での

研究の唯一のものであると言って良く、今までに He , Ne , Ar 等の稀ガスの吸収測定がなされたが、これらに就ては核研シンクロトロンから、 $100\text{\AA}$ より長波長領域では光源として余り有効でなく、それらの稀ガスの吸収スペクトルは NBS に於けるそれらを凌ぐことは出来ない状態である。然し $100\text{\AA}$ より短波長の軟 X 線領域に於ては非常に有効な光源であって、今までに Ar の L 吸収端に続く微細な構造が、 $50\text{\AA}$ 附近で初めて明らかに観測され、 Ar の L_{II} L_{III} 準位の間隔も正確に測定された。また、 N_2 , O_2 分子に対してもその K 吸収端が $30\text{\AA}$, $23\text{\AA}$ 附近にそれぞれはっきりした構造をもって観測され、またその波長も精確に測定され、 Ar の測定値と共に、近く報告される予定である。

§ 5. 今後の興味ある問題

$600\text{\AA}$ 以下における気体の吸収測定は、前にも述べられた様に、吸収断面積が余りに大きいこと、適当な強い連続光源が得られなかったことのために、今まで殆んど未開拓のまま残されており、シンクロトロンよりの放射、あるいは、さらにストレージリングによる SOR を光源として使えば、吸収スペクトルに関してだけでも新しい観測結果は、続々と生れるはずである。

ただ単に吸収スペクトルによって高い励起準位を調べるだけではなく、その他に興味のある問題をいくつかあげてみると次のようなものが考えられる。

a) 光電離部分断面積の測定

一般の光電離断面積の測定は、いわゆる全断面積の測定であって、ある波長の光を気体にあて、気体が電子を離してイオンになったとき、そのイオンがどのようなエネルギー状態のイオンになるかは測定されていない。光電離によって生じたイオンの中、ある特定のエネルギー状態のイオンになる断面積が部分断面積 (partial cross section) と呼ばれるものである。これは光電子のエネルギースペクトルを調べることによって明らかにされる。最近このような技術が開発され、強い輝線 (例えば $\text{He I } 584\text{\AA}$ など) を気体にあてたときの光電離部分断面積が測定されるようになってきたが、SOR の強い連続光を使えば、励起光の波長を連続的に変えることが出来るので、各波長に対して、光電離により生じたイオンの

励起状態まではっきり突きとめることが出来て、エネルギー輸送の問題に極めて重要な資料を提供出来るものと思われる。

b) 螢光測定

近年、X U V 光によって励起された N_2 , O_2 分子等が螢光を発することが見出され、これは上層大気中での物理現象との関連でいろいろ調べられているが、普通の実験室での光源では螢光が非常に弱いことから、その螢光のスペクトルを観測することは末だ僅かにしかなされていない。〔17〕
従ってストレージリングが建設されて強い S O R が得られるようになれば、螢光を分光して調べることも可能になり、入射エネルギーがどのように消費されてゆくかの過程を明らかにすることができるものと思われる。

c) 光学的に禁止された遷移の観測

光学的には禁止された準位間の遷移による吸収は一般には非常に弱いけれども、吸収気体の圧力を高くし、光源の強度を強くすれば、多くの禁止遷移が観測される例は非常に多い。例えば極く最近 Tanaka 等〔18〕は H_e , H_e , A_r , K_r , X_e 等で、 $p \rightarrow p$ 遷移を観測し、また、それら稀ガスの分子の吸収も観測している。このような観測は、電子衝突による励起状態との関聯をつける上でも、また、高い励起状態のありさまを観測する上に於ても非常に有効であり、S O R の強度の大きいことの利用法の一つと言えよう。

以上のように、X U V 領域での気体の吸収に対応する気体の高いエネルギー状態の問題は、非常に興味があり、しかも殆んど白紙のままに残されているとも言え、今後 S O R を光源としての吸収測定によって新しい問題はいくらかでも生じてくるものと思われる。

参 考 文 献

- 〔1〕 G. Balloffet, J. Romand and B. Vodar : C.R. Acad. Sci. Paris 252, 4239, (1261)
- 〔2〕 M. NAKAMURA : Science of Light 16 179 (1967)
- 〔3〕 R.P. Madden and K. Codling : Phys. Rev. Letters. 10

基研研究会報告

- 516 (1963)
- [4] R. P. Madden and K. Codling : Phys. Rev. Letters. 10
516 (1963)
- [5] R. P. Madden and K. Codling : J. Opt. Soc. Am 54 268
(1964)
- [6] R. P. Madden and K. Codling : J. Opt. Soc. Am 54 268
(1964)
- [7] K. Codling and R. P. Madden : Phys. Rev. Letters 12
106 (1964)
- [8] K. Codling and R. P. Madden : Phys. Rev. Letters 12
106 (1964)
- [8a] K. Codling and R. P. Madden : Applied Optics 4 1431,
(1965)
- [9] A. P. Lukirskii, T. M. Zimkina and I. A. Britov : Izv.
Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz. 28 772 (1964)
- [10] E. N. Lassetre ; Suppl. Radiation Res. 1 530 (1959)
- [10a] R. P. Madden and K. Codling : Astrophysical J. 141,
364. (1965)
- [11] U. Fano : Phys. Rev. 124 1866 (1961), Phys. Rev.
140 A 67, (1965)
- [12] H. Beutler : Zeit. fur Phys. 86 710, (1933), ibid
93, 177, (1935)
- [12a] K. Codling, R. P. Madden. and D. L. Ederer : Phys. Rev.
155 26 (1967)
- [13] R. E. Huffman, Y. Tanaka and J. C. Larrabee : J. Chem,
Phys. 39 910 (1963)
- [14] K. Codling : Astrophys. J, 143 552 (1966)
- [15] K. Codling and R. P. Madden : J. Chem. Phys. 42 3935
(1965)
- [16] K. Codling : J. Chem. Phys. 44 4401 (1966)

[17] D.L. Judge and G.L. Weissler : Technical Rep. No.
Usc - Vac UV - 105, (1965), Univ of Southern Calif.

[18] 私 信

ウィスコンシン大学の 200 MeV ストレージ・リング見学記

佐 川 敬 (東北大・理・物理)

§ 1. はじめに

シンクロトロン軌道放射 (SOR) が軟X線から電波領域に及ぶ多目的光源として、物性物理を始め多くの研究分野に占める重要性は日を追って高まりつつある。昨年11月私はたまたま訪米の機会を得、各地の大学・研究所を歴訪する事が出来たが、中でもMURA (Midwestern Universities Research Association) のストレージ・リング見学は、この意味で欠かす事の出来ないものの1つであった。私がこのリング建設計画を知ったのは1) 1964年の初頃であり、更にそれがSOR光源として重要な役割りを果す事になる事を知ったのはアメリカ物小委の白書²⁾を見る事の出来た1965年の春であった。それが私の訪ねた11月には、もう明日にでも運転を始める迄に出来上がり、それと併行して附帯する研究装置も、後述の各グループによって着々と準備されてるのを見聞して、そのスピードぶりにアメリカの底力を今更ながら感ずると共に、日本で我々のグループが早くからその緊急重要性を指適して来たにもかかわらず、いまだに体制にすらない事実とを深刻に対比せずにはおられなかった。

現在MURAは解体し、リングそのものはウィスコンシン大学の Physical Science Laboratory に所属していた。解体のいきさつその他は筆者にはおしはかるすべもないが、リングの共同利用は支障なく行われる模様で、現在迄提出されている研究計画は、月刊誌「物性」に投稿された藤田秀さんの文³⁾に詳しい。不必要な重複をさけて、ここではその標題だけを掲げよう。