

酸素分子と低エネルギー電子の衝突断面積

高柳和夫・高橋 旦*

Effective Cross Sections for Collision Processes between Molecular Oxygen and Slow Electrons

By

Kazuo TAKAYANAGI and Tan TAKAHASHI

Abstract: This is a continuation of the previous work on N_2 [this report Vol. 2, 1309 (1966)]. Available cross section data are reviewed for collision processes between molecular oxygen and electron with the collision energy below 100 eV. Elastic scattering, attachment, rotational and vibrational transitions, electronic excitation and ionization are considered. The experimental generalized oscillator strengths reported by Lassette and his collaborators are used to calculate the Born cross section for some electronic excitation and ionization processes.

概 要

100 eV あたりから下のエネルギーをもつ電子と O_2 分子との衝突で起るすべての主要過程についての有効断面積を調べた。実測値・計算値としてどういうものがわかっているか、それらの間に矛盾はないか、今後どういう過程について更に研究する必要があるかを論じた。若干の電子状態励起や電離については、Lassette 達が求めた一般化された振動子強度を利用し、Born 近似で断面積を計算した。

1. 序 論

さきに窒素分子とおそい電子の衝突断面積について報告した [203]。上層大気中で重要なもう一つの分子 O_2 とおそい電子との衝突断面積を論じるのが本論文の目的である。 N_2 のときと同様に主として 100 eV 以下のエネルギー範囲を考えることにする。

O_2 と電子の衝突の実験は N_2 のときよりもさらに不十分である。理論的計算の可能性にも限度があり、本論文のおわりでまとめられる知識はまだまだ不満足なものである。この重要な分子について今後何を調べなければならぬかを明らかにすることも、この論文の目的の一つである。

記号その他説明なしに使っているものは N_2 のときと同じ意味と置いていただきたい。

2. O_2 分子の諸性質

酸素の原子核には質量数 16 のもののほか 17 と 18 のものも存在するが、天然に見いだされるものの 99.76% が質量数 16 なので、ここではそれだけを考える。もし質量数 17 ま

* 理化学研究所 放射線研究室

たは 18 の同位元素を含む分子を考えるなら、振動や回転の準位が若干変る。また異なった質量の原子を組み合わせて O_2 を作ると、それと電子の相互作用の中に $P_1(\hat{r} \cdot \hat{R})$ を含む項が現れるであろうが、これはきわめて小さいものと考えられる。

O_2 分子の質量 M は原子単位 (a. u.) で 5.831×10^4 なので、電子の静止質量を m とすれば

$$\frac{2m}{M} = 3.430 \times 10^{-5} \quad (1)$$

である。

酸素分子の基底状態は $^3\Sigma_g^-$ 状態であり、スピン角運動量 S が 0 でない。分子の骨組みつまり核の回転に伴う角運動量を K とすると、全角運動量 J は

$$J = K + S \quad (2)$$

で与えられる。 K と S の結びつきはそう強くないので、少なくともそれぞれのベクトルの大きさは一定に保たれていると考えてよい。 K^2 , S^2 の固有値をそれぞれ $K(K+1)$, $S(S+1)$ とすると、 $K=1, 3, 5, \dots$, $S=1$ である。酸素原子核はスピン 0 の Bose 粒子なので、分子の全波動関数は核の入れかえに対して不変でなければならない。この要求から、 Σ_g^+ , Σ_u^- 状態では K =偶数、 Σ_u^+ , Σ_g^- では K =奇数に限られることが出てくる。 S は K との結びつきが弱く、また回転励起などでもそう重要な役割を果していないようなので[157]、以下 S のことは忘れて話を進めることにする。

二原子分子の振動、回転のエネルギーは

$$E_{v,K} \cong E_v + B_v K(K+1) \quad (3)$$

の形に書かれる。 O_2 に対する E_v, B_v のいくつかを第 1 表に示す。これは文献[4]の数値に

第 1 表 基底状態にある O_2 分子の振動・回転準位

v	E_v		B_v	
	eV	a.u.	eV	a.u.
0	0	0	0.00017826	6.551×10^{-6}
1	0.19296	7.091×10^{-3}	0.00017630	6.479×10^{-6}
2	0.3830	1.407×10^{-2}		
3	0.5701	2.095×10^{-2}		
4	0.7543	2.772×10^{-2}		

に基づいている。そのほか、基底状態にある O_2 分子の性質の一部を第 2 表に示す。これらの値がすべて最終的なものであるとは限らない。たとえば電離エネルギー I にしても、表に示した文献[5]の値のほか

12.065 eV 文献 [51]

12.078 eV [61]

12.063 eV [65]

などの値が報告されている。また回転励起に重要な四極能率 Q の値についても、最近気体の粘性率と第二ビリアル係数とから 1.48×10^{-26} cgs esu という値が報告されている[210]。

第 2 表 基底状態の O₂ 分子に関する諸定数

			a.u.	文 献
振 動 量 子	$\hbar\omega_e$	0.19593 eV	7.2007×10^{-3}	[1]
同 補 正	$\hbar\omega_e x_e$	0.001497 eV	5.501×10^{-5}	[1]
回 転 定 数	B_e	0.00017924 eV	6.587×10^{-6}	[1]
同 補 正	α_e	1.958×10^{-6} eV	7.194×10^{-8}	[1]
平 衡 核 間 距 離	R_e	1.2074 Å	2.282	[1]
解 離 エ ネ ル ギ ー	D	5.115 eV	0.1880	[3]
電 離 エ ネ ル ギ ー	I	12.075 eV	0.4438	[5]
四 極 能 率	Q	-0.39×10^{-26} cgs esu	-0.290	[204]
分 極 率	α	1.598 Å ³	10.78	[205]
" (非球対称部分)	α'	0.733 Å ³	4.95	[205]

この値は第2表の値より精度が悪いとは思いますが、今後重ねての測定が望まれる。

O₂ やそのイオンの励起電子状態にどんなものがあるか、その断熱ポテンシャル曲線や推定される電子配置などについては文献 [1~6] によってかなりの程度まで知ることができるが、大ていの分子でそうであるように、エネルギーの高いところへいくほど状態の数も急激にふえ、一つ一つについての知識は怪しくなっている。比較的低いところにあるおもな状態を第3表と第4表に示してある。表に示した励起エネルギーは基底状態の $v=0$ の振動準位から励起状態の $v=0$ 準位までのエネルギー差である。これら準位のいくつかを第1図に示した。そこには観測されているいくつかの遷移とその大体の波長が示してある。二、三の励起状態については、平衡核間距離 R_e が O₂ の基底状態の値 1.21 Å と著しく異なるため、基底状態の $v=0$ から R の値をほとんどかえずに（いわゆる垂直に）励起されたときの励起準位の位置は表3や表4に示すものとかなりずれている。そういう場合の垂直上方の準位

第 3 表 O₂ のおもな電子状態

電子配置*	励起エネルギー [4]	そ の 他
M	13.118 eV	
H	12.464	
F	9.918	
E	9.592	
$B^3\Sigma_u^-$ 233	6.119	$R_e=1.604$ Å [1]
$c^1\Sigma_u^-$ 233	4.490	
$A^3\Sigma_u^+$ 233	4.340	($R_e=1.42$ Å [1])
$C^3\Delta_u$ 233	4.256	
$b^1\Sigma_g^+$ 242	1.627	$R_e=1.2268$ Å [1]
$a^1\Delta_g$ 242	0.977	$R_e=1.2155$ Å [1], life $\tau=45$ min [88]
$X^3\Sigma_g^-$ 242	0	$R_e=1.2074$ Å [1]

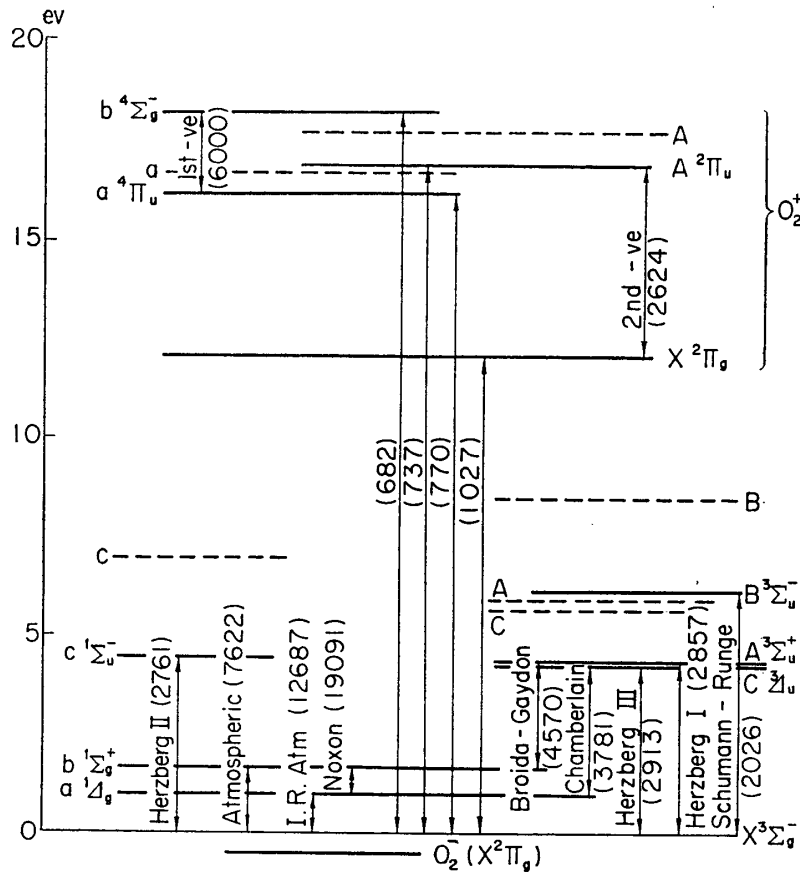
* 外殻電子配置がほぼ $(3\sigma_g)^2 (1\pi_u)^2 (1\pi_g)^2$ で表わされるとしたときの $n_1 n_2 n_3$ を示す。(文献 [6] による)

第4表 O₂⁺, O₂⁻ のおもな電子配置

電子配置*	励起エネルギー**	平衡核間距離 (R _e)
O ₂ ⁺		
c ⁴ Σ _u ⁻	24.562 eV	
b ⁴ Σ _g ⁻ 1 4 2	18.173	1.2795 Å [1]
A ² Π _u 2 3 2	16.824	1.4089 [1]
a ⁴ Π _u 2 3 2	16.106	1.3813 [1]
X ² Π _g 2 4 1	12.075	1.1227 [1]
O ₂ ⁻		
X ² Π _g 2 4 3	-0.44 eV	1.30 Å [206]

* 表3と同じ.

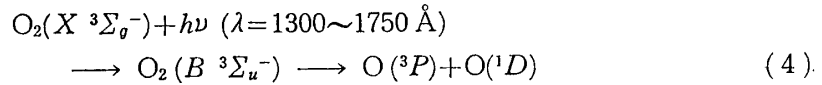
** O₂⁺ は文献 [4], [5], O₂⁻ は [6] による. いずれも O₂(X³Σ_g⁻) から測った値.



第1図 O₂ およびそのイオンのおもなエネルギー準位振動の基底状態を示してある. 括弧に入れた数字は band origin の波長を Å 単位で表わしたもの. 破線の意味については本文参照.

の大体の位置が第1図では破線で示してある.

主要遷移の確率, それに相当する振動子強度などを与えている文献を [67]~[91] に集めてある. とくに重要な遷移の一つである Schumann-Runge の連続吸収



については多くの測定や計算があるが、その振動子強度を積分した値を第5表に掲げた。また 300~900 Å あたりの吸収を積分したものに対する f 値として、6~7 の値が報告されている [37][68][70]。

個々の遷移を構成する多数の bands の相対強度は、いわゆる Franck-Condon 因子 $q_{v',v''}$

第5表 Schumann-Runge continuous absorption に対する integrated oscillator strength の測定値

測 定 者	f-value	remarks
Ladenburg and Wolfsohn (1932) [68]	0.2	
Ladenburg and Van Voorhis (1933) [34]	0.193	
Ditchburn and Heddle (1953) [38] [41]	0.215	Schumann-Runge discrete absorption $f=0.044$
Watanabe, Inn, and Zelikoff (1953) [43]	0.161	
Rense and Mercure (1955) [70]	0.177	
Kotani, Mizuno, Kayama, and Ishiguro (1957) [71]	{0.152 0.010	dipole length dipole velocity (theoretical calculation)
Keck, Camm, and Kivel (1958) [73]		$f=0.016$ for emission at 4100°K
Bethke (1959) [76]	0.163	
Traenor and Wurster (1960) [79]		$f=0.048$ for discrete absorption in 2650~3900 Å
Lassette, Silverman, and Krasnow (1964) [169]	0.230	electron impact
Metzger and Cook (1964) [56]	0.142	
Goldstein and Mastrup (1966) [62]	0.156	

第6表 Franck-Condon 因子の文献索引

遷 移	文 献 番 号
O ₂	Herzberg I [7] [8] [9] [21] [25]* [27] [32]
	Herzberg II [21] [27]
	Herzberg III [21] [27]
	Schumann-Runge [7] [12] [14] [15] [17] [18] [19] [20] [22] [24]* [25]* [30]* [31]*
	Chamberlain [21] [27]
	Broida-Gaydon [10] [21] [27]
	Noxon [27]
	Atmospheric [10] [25]* [27]
	I. R. Atmospheric [25]* [27]
O ₂ ⁺	First negative [21] [28]
	Second negative [7] [11] [13] [25]* [28]
O ₂ -O ₂ ⁺ O ₂ (X)-O ₂ ⁺ (X, a, A, b)	[16] [23] [26]*

* isotope effect を調べている。

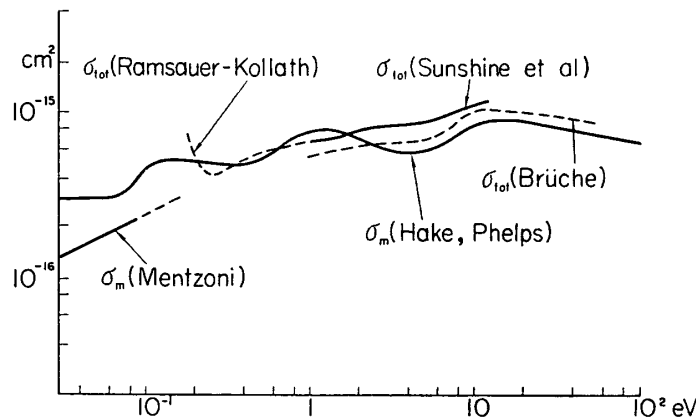
できる。この因子の数表を与えている文献を [7]~[32] に示し、第6表でその索引を与えた。

エネルギー準位の決定をはじめ、あとで電子状態の励起や電離の断面積の推定に必要な photoabsorption や photoionization に関する文献は [33]~[66] である。

最近 10.8 eV あたりに準安定状態があるとする説もあるが、まだ確実でない [207][208][209]。

3. 全散乱断面積

エネルギーのそろった電子線を用いて O_2 の全散乱断面積 σ_{tot} を求めたものとしては、古くは Brüche[95] や Ramsauer and Kollath[96] のものが代表的であり、最近では Sunshine 達のもの [110] などがある。第2図で見られるように40年をへだてて行なわれたこれらの



第2図 全衝突断面積 σ_{tot} および運動量移行断面積 σ_m の実測値

実験がほぼ一致した結果を与えていることは見事なものである。低エネルギー領域で大きな断面積を示す過程は弾性散乱のほかは回転励起くらいのもので、測定された σ_{tot} もほぼこの二種の断面積の和と考えられる。

理論的には分子の向きを固定して散乱断面積を計算し、それを分子の向きで平均すればほぼ弾性散乱と回転遷移の和に相当する量が得られる [211]。Fisk[97] の計算はこの種の計算の最初のものであるが、用いたポテンシャル場は数学的な簡単化のためにえられたモデル的なものなので実際の O_2 を正しく表わしていないし、その後の理論計算 [105][106] もまだ不十分なものである。

電子エネルギーの thermalization にきくのは実は σ_{tot} でなくて momentum transfer の断面積 σ_m である [203]。これを出すには σ_{tot} のほかに散乱角分布がわかっている必要があるが、残念ながら O_2 についてはそのような実験がまだない。そこで electron-swarm の実験に頼るほかはない。その方面での最も新しく信用できそうなものは Hake と Phelps によるものである [109]。その結果も第2図に示してある。見てわかるように電子線を用いて出した σ_{tot} の値とそうひどくは変わらない。

文献[109]による σ_m の値と、それから計算した阻止断面積

$$S_m = \frac{2m}{M} E \sigma_m \quad (5)$$

の値を第7表に示す。Eは電子のエネルギーであり、 $2m/M$ は(1)で与えられている。

第7表 O₂の運動量移行断面積およびそれに対応する阻止断面積

E (eV)	σ_m (10 ⁻¹⁶ cm ²)	S_m (10 ⁻¹⁸ cm ² eV)	E (eV)	σ_m (10 ⁻¹⁶ cm ²)	S_m (10 ⁻¹⁸ cm ² eV)
0.01	3.0		1.4	7.8	0.0375
0.02	3.0		1.6	7.55	0.0414
0.03	3.0		1.8	7.2	0.0445
0.04	3.0	この部分は気体の 温度によって著し く変る	2.0	6.8	0.047
0.05	3.0		2.5	6.1	0.052
0.06	3.0		3.0	5.7	0.059
0.07	3.1		3.5	5.5	0.066
0.08	3.4		4.0	5.5	0.0755
0.09	3.9		4.5	5.55	0.086
0.10	4.4	0.0015	5.0	5.6	0.096
0.12	4.8	0.0020	5.5	5.8	0.109
0.14	5.0	0.0024	6.0	6.0	0.123
0.16	5.0	0.0027	7.0	6.6	0.158
0.18	4.97	0.0031	8.0	7.2	0.198
0.20	4.9	0.0034	9.0	7.6	0.235
0.25	4.7	0.0040	10.0	8.0	0.27
0.30	4.6	0.0047	12.0	8.6	0.35
0.4	4.7	0.00645	15.0	8.8	0.45
0.5	5.1	0.00875	20.0	8.6	0.59
0.6	5.5	0.0113	25.0	8.35	0.72
0.7	6.1	0.0146	30.0	8.1	0.83
0.8	6.8	0.0187	35.0	7.9	0.95
0.9	7.4	0.0228	40.0	7.7	1.06
1.0	7.6	0.0261	60.0	7.0	1.44
1.2	7.9	0.0325	100.0	6.5	2.23

(注) Hake と Phelps とは $E \cong 4.5$ eV あたりに共鳴性の励起があるとしたときと、それを考えない場合とについて、 σ_m を求めており、1 eV 以上での値に数%の差がでている。そのような共鳴があることはほかには何の証拠もないことなので、ここではそれを考えない場合の値を採用した。

4. 電子付着

O₂は余分の電子をつかまえて負のイオンを作ることができる。その機構としてはつぎの三つがあげられる。



これら、とくに(7)(8)については古来沢山の研究が報告されている([111]~[152]). その中には1930年前後に行なわれた Cravath [111] や Bradbury [113] の実験をはじめとして, electron-swarm を用いたものが多い. これらの実験で作られた負イオンが(7)によるものか(8)によるものかははじめのうち明かではなかった. Bloch と Bradbury[212] は(8)の代りに



という二段構えの反応を提案しその確率を概算している. O_2^{-*} は振動の励起状態にある負の分子イオンを意味する. その後 Craggs 達 [121] が電子線を用いて(7)の断面積の絶対測定を行ない, それを電子の速度分布(たとえば Maxwellian として)で平均すると従来 electron-swarm の方法で得られていた結果の主要部分が説明できることを見いだした.

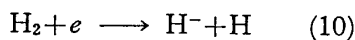
6.2 eV のあたりに極大を示す断面積のピークは典型的な共鳴型であって, ほぼ 2.1 eV の半値幅をもっている. これは反応(7)〔解離性付着〕に対応し, Craggs 達のあとも多くの人によって測定されている. このピークのはじまるエネルギー, 極大になる場所とそこでの断面積の値を第8表に示す.

第8表 O_2 での解離性付着断面積 (4~10 eV 領域)

測定者	出現電位	極大の場所	極大値
Buchelnikova [124]	4.63 eV	6.2 eV	$1.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$
Craggs et al [121]	4.7	6.7	2.25
Schulz [140]	4.4	6.7	1.3
Asundi et al [141]	{4.6 4.7}	{6.5 6.9}	{1.3 1.34}*
Rapp & Briglia [151]	4.5	6.5	1.4
Christophorou et al [148]	4.9	6.7	1.5

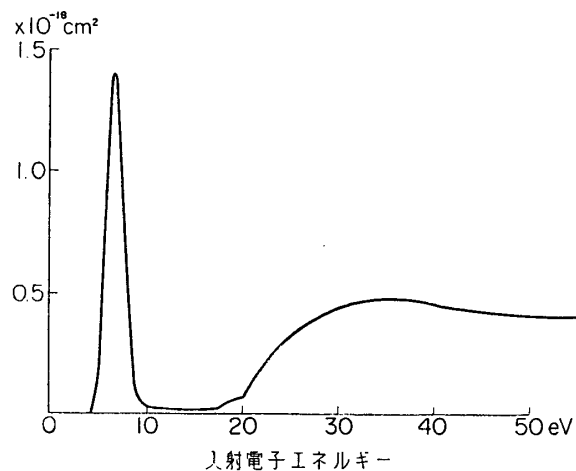
* 文献 [141] の二つの値は異なった ion collector を用いて求められた.

(7)の型の解離性付着は最近原子衝突における共鳴理論の研究者の間で関心をもたれ, O_2 よりも簡単な H_2 における同種の反応



がいろいろな人によって論じられている([213]~[216]). 最近 O'Malley[220] は, 高温で(7)の断面積のピークが低エネルギーの側に移動しかつ大きくなるという事実[149]を, 振動・回転の励起によるものとして説明している.

第3図には Rapp 達による断面積の測定結果を図示してある[146][151]. ただ



第3図 O^- 生成の有効断面積

し 17.5 eV, 21 eV あたりからはじまる断面積曲線の山は (7) ではなくてイオン対生成



によるものと考えられている。

さて、電子エネルギーのごく低いところでは (7) や (11) は起らないので、比較的低温の electron-swarm の実験で見られる負イオン生成は (8) または (9) によるものと考えてよいだろう。最近の swarm experiment のうち Chanin 達[137] の研究では (8) の反応で M が O_2 の場合の反応係数 K_3 として第 9 表の値を与えている。また Pack と Phelps

第 9 表 300°K の気体酸素中での三体付着係数

電子の平均エネルギー	$K_3(\text{O}_2)$
0.04 eV	2.8×10^{-30} cc ² /s
0.06	4.5
0.08	4.9
0.10	4.8 _s
0.15	4.0
0.2	3.5
0.4	2.3 _s
1.0	1.4

[152] は

$$T_e = T_{\text{gas}} = 300^\circ\text{K} \text{ で } K_3(\text{O}_2) = 2.0 \times 10^{-30} \text{ cc}^2/\text{s}$$

477 2.3

525 2.8

を見いだした。Conway[138] は $T_e = T_{\text{gas}} = 300^\circ\text{K}$ で 4×10^{-30} cc²/s を与えている。もちろん (8) と思っていても実は (9) の形の二段構えの反応で、その第二段目が律速段階になっているのかもしれない。Conway は、電子の平均エネルギーが 0.04~0.05 eV のとき、二体反応による負イオン生成があると

し、それはやはり (9) で、第一段目が律速段階になっているものと思っているようである。いずれにしても (9) は魅力あるメカニズムである。 O_2^{-*} の素性に関しては、Chanin 達は $\text{O}_2^{-}(X^2\Pi_g)$ の $v=3$ の振動状態らしい(彼らの求めた O_2 の electron affinity $\cong 0.44$ eV から)と推定しているのに反し、Conway の方は、それも可能であるが、もっとありそうなことは $\text{O}_2^{-}(^4\Sigma_g^-)$ の $v=1$ の状態だといっている。しかし O_2^{-} の $^4\Sigma_g^-$ の $v=0$ の状態は、安定であるかどうかさえ怪しいので、第二の説は根拠不十分である。

さて生じた振動励起の O_2^{-} がどのくらいの速さでその振動エネルギーを失うかは、電子衝突の問題ではないが興味あるものである。中性酸素分子は室温あたりでいったんもらった振動エネルギーを 10^7 回ぐらいいも衝突した上でないと放さないことが超音波の実験などでわかっている。しかし、今問題になっているのはイオンであり、一種のイオン分子反応をやるわけであるから、分子分極による引力のためにある程度 deactivation が促進されるであろう [217][218][219]。また



のような電荷移行が起る可能性もある。これで振動が deactivate されたのと同じことになる。衝突相手が他の原子分子のときは (12) のようにはうまく電荷移行が起りにくいだろう。Chanin 達が N_2 や He を第三体として見かけ上の (8) の反応速度 $K_3(\text{N}_2)$, $K_3(\text{He})$ 係数を測定して $K_3(\text{O}_2)$ よりも一けた以上小さい値を得ているのは、(12) に相当する反応が起り得ないためではないかと推論されている。

ふく射を伴う付着 (6) の確率は Branscomb [135] が報告しているが、電子エネルギー 0.2, 1, 3 eV に対して、それぞれ 2×10^{-25} , 1.4×10^{-24} , 2×10^{-23} cm² 程度にすぎない。

おわりに、上層大気中での負イオンの生成・分解等については Branscomb の review[143] があることを注意しておく。

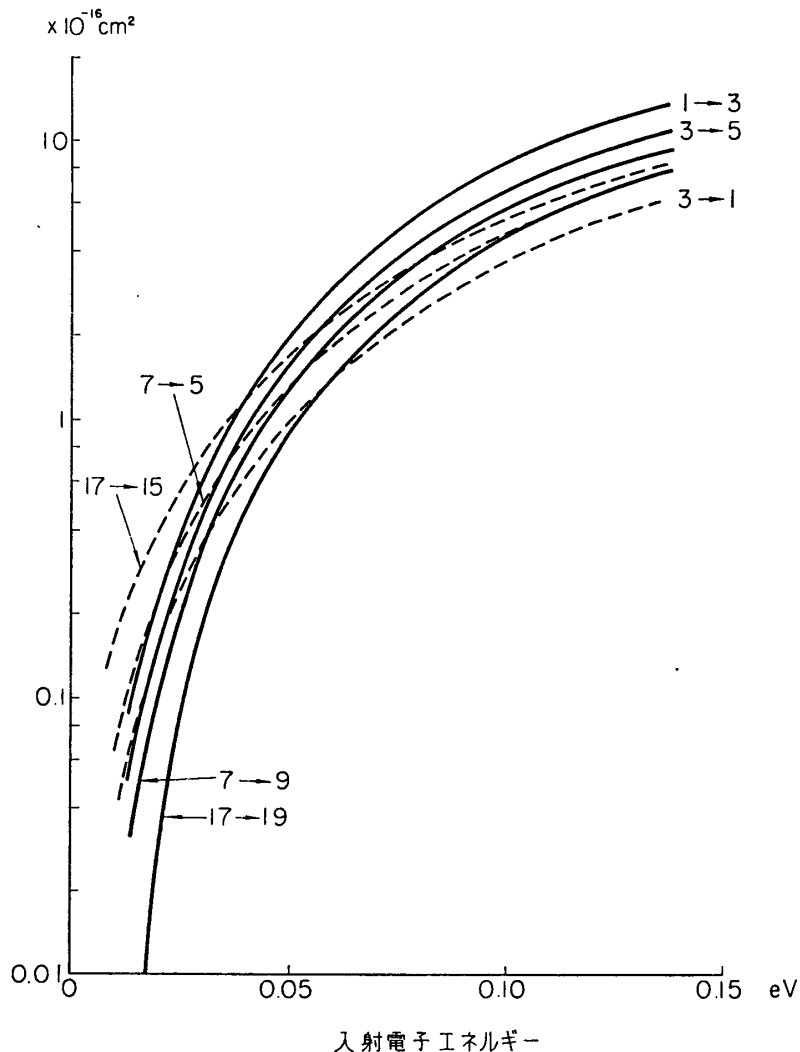
5. 回 転 遷 移

従来、分子の回転励起は分子のもつ電気的極能率 Q と入射電子との相互作用ではほぼ説明つくと考えられていた。O₂ では §2 で示したように Q の絶対値が大変小さいから、この分子の回転励起は N₂ などの場合よりもずっと起りにくいだろうと考えられる。ところが Mentzoni と Rao [153] は、酸素プラズマ中の電子エネルギーの relaxation rate から、O₂ の回転励起確率は N₂ より小さいどころかむしろ一けたぐらいも大きいという結論を出した。

この事実を説明できたのは今のところ Geltman と Takayanagi [157] の計算だけである。はじめ O₂ でスピン S が 0 でないこと (§2 参照) が原因ではないかとも考えたが、これはそう目立った影響をもたないことがわかった。そこで従来あまり考慮されていなかった近距離力に目をつけた。きわめて低いエネルギーの場合を除き入射電子はかなり分子の内部にまでは入り込み、近距離力が無視できないことが判明した。N₂ では四極能率からくる力と近距離力の非球対称部分とが逆符号で、かなりの打ち消し合いがある。しかし O₂ では $|Q|$ が小さいので、近距離力が弱められずに作用している。これが断面積を大きくする原因である。回転励起に最も寄与が大きいのは入射電子波のうちの p 波である。電子温度 100°K あたりから p 波はかなり分子内に侵入して近距離力に触れるので、回転励起確率はこれ以上のエネルギーで急激に増加する。この近距離力を考えていない Sampson 達 [158] の計算や、近距離力は考えたが逆に電子加速に役立つ長距離引力 (分子の分極による) を無視した Ok-syuk [154] の計算で、断面積が小さすぎたことは容易に理解できる。

さて Geltman と Takayanagi の計算は、分子と電子の間の相互作用のうち、回転遷移にあずかる部分が小さいとして摂動論を用いたいわゆる Distorted Wave (略して DW) の方法によっている。ところが問題とする力は実はそう小さくないために、電子エネルギーが 0.1 eV くらいになると計算結果はもう受け入れられないくらいに大きくなりすぎてしまう。

第4図には計算された励起断面積 $\sigma(K \rightarrow K+2)$ をいくつかの K に対して示した。低エネルギーでの値は第10表にもかかっている。detailed balancing の関係を用いて求めた逆過程の断面積 $\sigma(K \rightarrow K-2)$ のいくつかも第4図に示してある。はじめ状態 K に分子があるとして、弾性散乱 $K \rightarrow K$ と回転遷移 $K \rightarrow K \pm 2$ の断面積を合計したものはほぼ低エネルギーでの全衝突断面積になるはずである。ところが計算された $\sigma(K \rightarrow K+2) + \sigma(K \rightarrow K-2)$ は 0.15 eV あたりですでに Ramsaner-Kollath [96] の全断面積の測定値 (を外挿したもの) をこえてしまう。したがってこの辺での第4図の曲線は本当の値より大きすぎると思わなければいけない。一方 Mentzoni 達 [153] によると、室温の O₂ 中での電子の fractional energy loss は衝突1回当たり 2.3×10^{-2} 程度であるという。回転準位の間隔 ($K \rightarrow K \pm 2$ に対し) が室温での電子のエネルギーより一けた以上小さいこと、励起 $K \rightarrow K+2$ の効果が逆方向の $K \rightarrow K-2$ によってかなり打ち消されてしまうことなどを考慮すると、回転遷移の断面積は全断面積 σ_{tot} にくらべてずっと小さい (1/10 以下) というこ



入射電子エネルギー
第 4 図 回転遷移の断面積 (DW 近似)

第 10 表 O₂ の回転励起の断面積
 $\sigma(K \rightarrow K+2)$ in 10^{-16} cm^2

K	E=0.0136 eV	E=0.0408 eV
1	0.0964	1.30
3	0.0628	0.980
5	0.0469	0.856
7	(0.0355)	(0.775)
9	0.0261	0.712
11	(0.0185)	(0.656)
13	0.0121	0.608
15	(0.0065)	(0.561)
17	(0.0014)	(0.515)

注) 括弧をつけたのはグラフにより内外そうして求めた値. そのほかは歪曲波方法での計算値. E は入射電子エネルギー

とはなさそうである。ただし Mentzoni 達が採用している全断面積は彼が求めた σ_m (第2図参照) であって, Ramsauer 達の σ_{rot} よりは 0.1 eV あたりではずっと小さい。それでそのあたりの回転遷移断面積は $2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ の程度と推定される。こうしてみると, 第4図の曲線は 0.1 eV ですでに大きすぎることになる。0.3 eV あたりから σ_m も σ_{rot} も徐々に増加するが, そのとき回転遷移の断面積も一緒に増加しているかどうかについては今のところ何もいえない。ただ, 回転励起には主に p 波がきくので, p 波のもちうる最大の断面積 $3\pi/k^2$ (k は電子の波数) をこえることはないだろうと思われる。これから阻止断面積の上限

$$S_{rot} < 16B_0 \cdot \frac{3\pi}{k^2} = \frac{1.02}{E(\text{eV})} \times 10^{-17} \text{ cm}^2 \text{ eV} \quad (13)$$

が得られる。低エネルギー領域の $E=0.0136 \text{ eV}$, 0.0408 eV では第10表などを利用して阻止断面積が計算できるが, この辺では結果は回転量子数 K によってかなり変り, N_2 のときと同様にほぼ

$$S_K \cong a - bK(K+1) \quad (14)$$

の形に書ける。 $E=0.0136 \text{ eV}$ では $a=0.0198$, $b=0.00093$, 0.0408 eV では $a=0.240$, $b=0.00320$, いずれも $10^{-18} \text{ cm}^2 \text{ eV}$ を単位としての値である。気体分子が T_{gas} の温度でボルツマン分布をしているとして平均すると

$$S_{rot} = \langle S_K \rangle_{AV} \cong a - b' T_{\text{gas}} \quad (15)$$

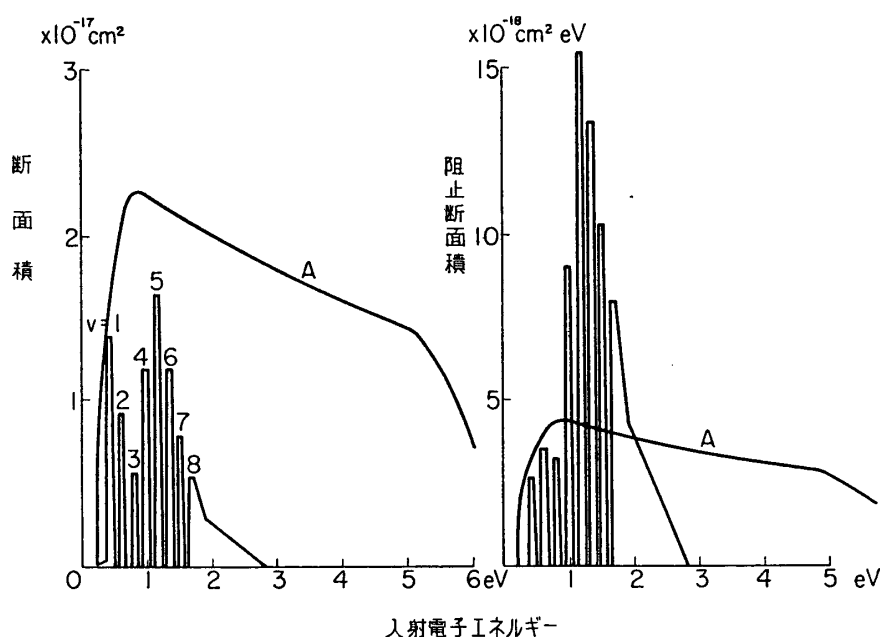
上記の二つのエネルギーに対しては $b'=0.00045$, 0.0015 (それぞれ $10^{-18} \text{ cm}^2 \text{ eV deg}^{-1}$ の単位で) である。

6. 振動励起

Schulz ら [159] は電子線を用いて O_2 の振動励起を求めているが, いろいろな振動状態の励起断面積をそれぞれの threshold から 0.16 eV 上の一点で求めているだけなので, その他の入射エネルギーでどういう断面積になっているかは全くわからない。それで現在利用できるのは swarm experiment から求めた Phelps の値が二通りあるだけである [160][161]。1964年の論文では最低の励起状態 $v=1$ だけが励起されるとして分析しており, 最近のものでは Schulz の測定に合わせて $v=8$ の準位までがそれぞれの threshold のすぐ上でよく励起されるとして分析している。これらの断面積およびそれから計算した阻止断面積を第5図に示す。swarm experiment にきくのは阻止断面積の方であるが, 3 eV 以下の領域では沢山あるピークを平均してしまうと 1964年の結果とそう変わらないことがわかる。それだからおそい電子の slowing down を論ずるには (少なくとも平均においては) どちらを用いても大差なさそうである。やかましくいえば違うのだがどちらがよいかは今のところ明かでない。4 eV あたりから上はいろいろな電子状態の励起がはじまるので swarm experiment の分析結果はしだいに不確実になってくる。

7. 電子状態の励起

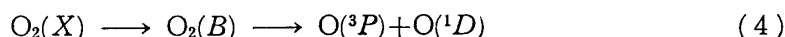
電子状態の励起についての知識は現在のところきわめてわずかきりない。光学的に許された遷移という点で重要なものは $X^3\Sigma_g^- \longrightarrow B^3\Sigma_u^-$ (Schumann-Runge) である。 B 状態のポ



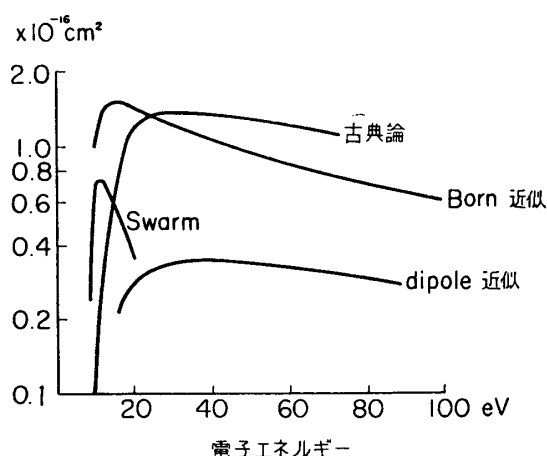
第5図 振動励起の断面積および阻止断面積

A は $v=1$ の準位だけが励起されるとして実験からきめたもの。残りは $v=8$ までが励起されるとして分析した結果。

テンシアルの谷は浅いし、またその底は基底状態 X とかなり違った平衡核間距離をもつので、励起の結果は大部分の分子が解離してしまうことになる。



おそい電子線を用いて直接この過程を調べた例はまだなく、今後実験室での研究が要求されるものの一つであるが、近似的な断面積は幾通りかの方法で推定される。第6図に四つの近



第6図 Schumann-Runge 解離の断面積

近似になっていて、入射電子の分子内電子とのクーロン斥力を展開して dipole の項だけをとったものである。この近似での断面積は

近似曲線が示してある。まず Born 近似では Lassette 達 [167] が 500 eV ぐらいの電子線を用いて求めた「一般化された振動子強度」 $F(K)$ (この K は電子の波数ベクトルの変化の大きさ) を利用している。電子の energy-loss spectrum は 8.4 eV あたりにピークをもち、Born 近似の計算ではそのエネルギーの所に単一のエネルギー準位があるかのように考えて (実際のスペクトルのもつ大きい幅を無視して) 断面積を求めている。(第11表)

次に dipole 近似というのは光学的許容遷移に対する歪曲波 (Distorted Wave) 公式の

第11表 Born 近似による励起断面積
($\Delta E=8.44\text{ eV}$ は Schumann-Runge 解離に対応)

ΔE (eV)	8.44	9.94
10	1.04	$0.033 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
15	1.52	0.165
20	1.41	0.157
25	1.32	0.143
30	1.22	0.131
40	1.06	0.112
50	0.94	0.098
60	0.84	0.087
70	0.76	0.078
80	0.70	0.072
90	0.65	0.066
100	0.60	0.061

$$\sigma(a \rightarrow b) = \frac{8\pi}{\sqrt{3}} \frac{I_H}{E} \frac{I_H}{\Delta E} f_{ab} \cdot \bar{q} \cdot \pi a_0^2 \quad (16)$$

の形に書ける。 I_H は水素原子の電離エネルギー (13.6 eV), a_0 は Bohr 半径, E は入射電子エネルギー, ΔE は励起エネルギー, f_{ab} は光学的振動子強度. 残りの因子 \bar{q} を $E/\Delta E$ の関数として見ると H 原子の $1s \rightarrow 2p$, He の $1^1S \rightarrow 3^1P$, Na の $3s \rightarrow 3p$ など経験的に似たようなものになる [221][222]. $E, \Delta E$ を eV 単位で表わしておくと (16) は

$$\sigma(a \rightarrow b) = \frac{f \cdot \bar{q}}{(\Delta E)^2 \cdot (E/\Delta E)} \times 2.36 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \quad (17)$$

と書ける. H の $1s \rightarrow 2p$ を用いると [222], $\bar{q}(E/\Delta E)$ はほぼ第12表のようになる. Schumann-Runge 解離の場合 $f=0.16$ (第5表参照), $\Delta E=8.5\text{ eV}$ ととれば, 断面積は第6図

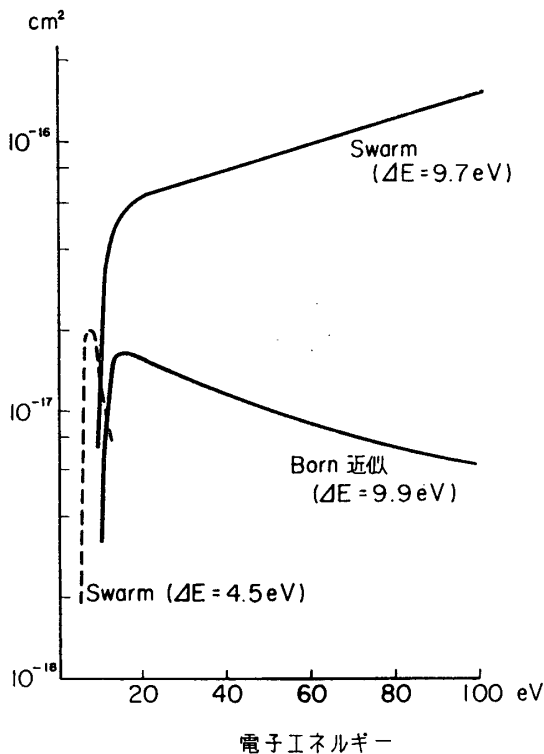
第12表 (17) 式中の $\bar{q}(E/\Delta E)$ の値

$E/\Delta E$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$\bar{q}(E/\Delta E)$	45	63	65	65	64	62	60	57	55	$\times 10^{-3}$

に示したようになる. Born 近似とくらべてひどく小さいようであるがこれにはいろいろな理由が考えられる. 第一に H の $1s \rightarrow 2p$ の \bar{q} を用いたが, Schumann-Runge でそれと同じ \bar{q} でよいかどうかははっきりしていない. 同じ $s \rightarrow p$ 遷移でも He や Na では 50% 近く \bar{q} が大きい. また ΔE として Schumann-Runge 紫外吸収のピークに近い 8.5 eV という値を採用したが, もっと低いエネルギーでも解離は起るので ΔE を少し小さくとれば σ はふえる. また (17) は dipole 近似であるから, もっと高次の相互作用まで入れると σ もふえるだろう. 一方 Born 近似は低エネルギー領域で一般に大きすぎる傾向がある. これらから考えて, 本当の断面積は両者の中間にあると考えられる. たとえば断面積の極大は 20 eV あたりにありその大きさは 10^{-16} cm^2 よりやや小さいだろうと推定される.

第6図にはこれらのほか Bauer 達 [170] が Gryzinski 流の古典理論で計算した値および Phelps 達 [171] が swarm の実験から推定したものをかかっている。後者が 20 eV あたりから先で急速に小さくなってしまって他の結論とひどく異なっているが、これは $\Delta E=9.7$ eV の励起を Phelps 達が大きく推定しすぎたことのはねかえりと見られる。

Lassette 達の実験でも 9.9 eV あたりの energy loss の存在が知られており [168], これ



第7図 $\Delta E=4.5$ eV および $\Delta E=9.9$ eV あたりの励起に対する有効断面積

のそれぞれ threshold の上 0.16 eV のところだけで断面積を測っている。いまこれら準位の励起エネルギーを ΔE とし、励起断面積がほぼ $E-\Delta E$ に比例し、かつ E が ΔE の数倍になったところで極大になると仮定すると、 a, b 両状態の励起断面積はいずれも 10^{-18} cm^2 よりは大分小さいことになる。ところが Bauer 達 [170] の古典的な計算によると、両断面積とも 12.05 eV でピークをもち、それぞれ 5.5×10^{-17} , 5.3×10^{-17} cm^2 というかなり大きな値になっている。これらの励起は入射電子と分子内電子の交換によって可能になるものであるが、古典論がこの種の過程でどのくらい正しい答を与えるかについて実験との比較が可能な He や N_2 の計算 [170] でみるとしばしば factor 2 くらい大きすぎるようなので、ここでも彼らの答を 2 で割って採用することにする。第12図に示した a, b は 2 で割ったものである。今後直接電子線を用いて実験してほしい過程の一つである。

ているかは全くわかっていない。第3表によると E とか F とか呼ばれる状態あたりだとは想像されるがその性格ははっきりしていない。(第11表および第7図参照)

もっと励起エネルギーの高い方は電離と重なってしまってますますわからなくなる [169]。ただ光学的な全吸収と光電離測定と比較から、電離の 10~20% くらいは中性原子への解離が起っているものと推定される。

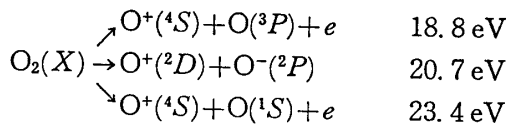
逆に低エネルギー領域へ戻ると Phelps 達は 4.5 eV あたりに励起準位があるとして実測値を説明している。第1図で見ると、これは A および C 状態に相当していると考えてよからう。(第7図参照)

もっと低いところに $a^1\Delta_g, b^1\Sigma_g^+$ という二つの準位があり、もしこれらがかなりの確率で励起されるなら、おそい電子の slowing down にはきわめて大きい影響をもつことになるが、これらについてはほとんどわかっていない。Schulz 達 [166] はこれら二つの状

8. 電 離

電離の全断面積は Tate と Smith[173] の測定が昔から標準的なものとして引用されてきたが、ここでは最近 Rapp 達 [192] が求めた値を用いることにする。

N₂ の場合と同様、ここでも電離とひと口によぶものの中にいろいろな種類のものがあることが問題となる。最も簡単なのはただ一つの電子が放出されて O₂⁺ ができることである。このイオンのいくつかの状態のエネルギーは第4表に示してある。20 eV 前後になると解離を伴う電離が起るようになり O⁺ イオンが作られる。Weissler 達によるといろいろな解離のはじまるエネルギーは次の通りである [223]。

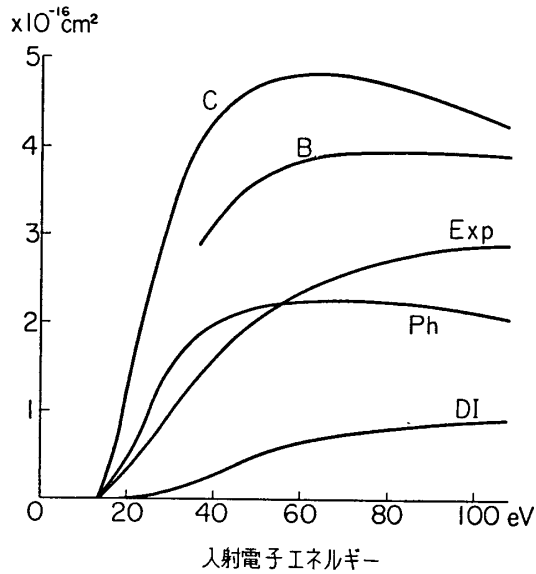


ほかに O⁺(⁴S)+O(¹D), O⁺(²D)+O(³P) なども同じエネルギー領域ではじまると推定されているし、第3図で 17.5 eV あたりにはじまる立上りは O⁺(⁴S)+O⁻(²P) によるものと解釈できる。

Rapp 達 [191] によると解離を伴う電離は 30~100 eV の範囲では全電離の 20~30% 程度はあるようで、その大部分は O⁺ イオンの生成であろうと思われる。(第8図参照)

二つ以上の電子が放出される電離のはじまるエネルギーのいくつかを第13表に示す。(文献 [196] による)

さて全電離断面積は直接測定のほかにもいくつかの推定方法がある。それらを第8図に示す。C とした曲線は Gryzinski 流の古典論によって Bauer と Bartky [189] が求めたもので、ほかの target のときもそうであるが、低エネルギー領域で実測値よりかなり大きくなっている。つぎに B と書いたのは Lassetre 達 [188] の一般化された振動子強度を用いて Born 近似を用いて計算したものである。その際電離エネルギーより大きいエネルギー損失はすべて電離に対応していると考え



第8図 電離断面積
Cは古典論, BはBorn近似, Phは光電離断面積から求めたもの, ExpはRapp達の全電離断面積, DIは解離を伴う電離の実測値

第13表 高次イオンの出現電位

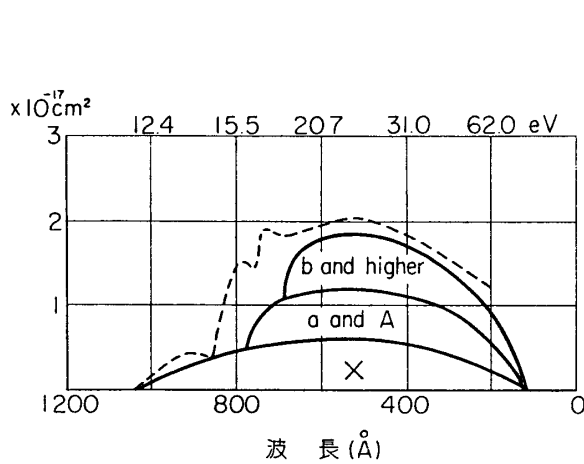
イオン	出現電位	備考
O ₂ ⁺⁺ (X ¹ Σ _g ⁺)	37.2 eV	約4 eV上に O ₂ ⁺⁺ (A ³ Σ _u ⁺)がある
++	52.7 eV	
O ⁺⁺⁺	130 eV	

第 14 表 Lassette 達 [188] が求めた「一般化された振動子強度」を用い, Born 近似で計算した電離断面積 (E , 入射エネルギー, いろいろなエネルギー損失 ΔE の範囲についての部分断面積とその和を示す.)

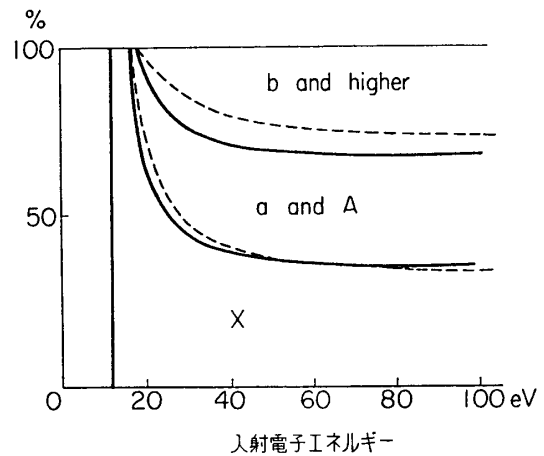
E (eV) \ ΔE (eV)	40	60	80	100
12.1~13.7	0.145	0.130	0.114	$0.097 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
13.7~16.1	0.535	0.490	0.440	0.397
16.1~18.1	0.486	0.455	0.424	0.392
18.1~20.0	0.329	0.345	0.321	0.292
20~30	1.248	1.400	1.295	1.238
30~40	0.358	0.654	0.676	0.648
40~50		0.278	0.378	0.382
50~60		0.066	0.175	0.210
60~70			0.077	0.119
70~80			0.056	0.111
80~90				0.047
全電離断面積	3.10	3.82	3.96	3.93

で計算しているが, 実際には中性原子へと解離する過程も若干含まれているはずである. 計算された断面積の内訳を第 14 表に示す.

Ph とした曲線は光电離断面積 $a(\epsilon)$ を用い, 前論文 [203] の (40) 式によって計算した電離断面積である. $a(\epsilon)$ としてはまず Weissler [47] による光の吸収断面積 (第 9 図の破線) に, 同じ Weissler の文献にある電離効率を乗じたものを用いた. 光电離のときに放



第 9 図 紫外吸収の断面積 (破線) と, 採用した光电離断面積の内訳 (実線)



第 10 図 電子衝撃でできる O_2^+ イオンの内訳
実線は光电離から推定したもの, 破線は古典論による計算値

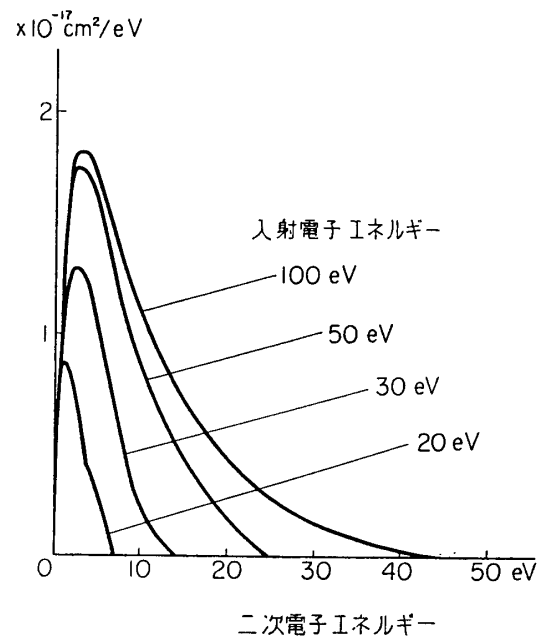
出される電子のエネルギーは Schoen [57] が測っているので, それを手がかりに O_2^+ がどういう状態に残されるかを推定する. すなわち Schoen の測定に基づいて, O_2^+ の $X^2\Pi_g$, $a^4\Pi_u$ および $A^2\Pi_u$, $b^4\Sigma_g^-$ およびそれ以上の状態の三者にいく比をきめ, Weissler の $a(\epsilon)$ を

分割する。ただしこのやり方を厳密に行なうと得られる部分断面積の中程にこぶができるなど実際にはありそうにない形となるので、Cook and Metzger [54] などの測定を参考にして threshold 付近での $a(\epsilon)$ を少し修正した。また 300 \AA 以下の短波長領域では Samson 達 [224] や Aboud 達 [43] の測定にしたがって Weissler の $a(\epsilon)$ を延長するとともに少しく修正した。Schoen の論文からは 23 eV 以上の電子のエネルギーでの電離の内訳が出ないので、このあとは 23 eV のときと同じと仮定した。このようにして第9図の実線のような分割がなされ、これを用いて第8図の Ph 曲線が得られたものである。もともとこれは Born 近似から出た計算方法なので、Born 近似の計算がしばしばそうなるように今回の結果も低エネルギー領域でやや大きく出ている。一方 dipole 近似をやっているので、他の相互作用の寄与は無視していることになる。高エネルギー領域で小さくなっている原因の一つはそこにあると考えられる。この近似と Bauer 達の古典論計算から出た電離の内訳の比較が第10図に示してある。前に述べたように解離を伴う電離が $20\sim 30\%$ ぐらいはありそうであるが、第10図の b and higher とした部分はこの解離性電離を収容するにはやや窮屈に見える。 X や a and A の部分がもう少し小さいと考えるべきであろう。

N_2 の場合と同じ方法で $a(\epsilon)$ を用いて推定した二次電子分布を第11図に示す。前と同様、非常に正確なものとは考えないでいただきたい。

さて O_2^+ の $A^2\Pi_u$ 状態が作られると second negative band system の光を出して O_2^+ の基底状態へおちる。この system の励起曲線は 100 eV 以上で Nishimura [194] の測定があるだけである。(第12図の FN 曲線) 観測された bands の励起を合わせても 10^{-18} cm^2 の程度にすぎないが、前述のように a and A はかなり励起されているので、その大部分が a でない限り second negative band system ももっと強く励起されているに違いない。今後スペクトル範囲を広げて実験することが望ましい。

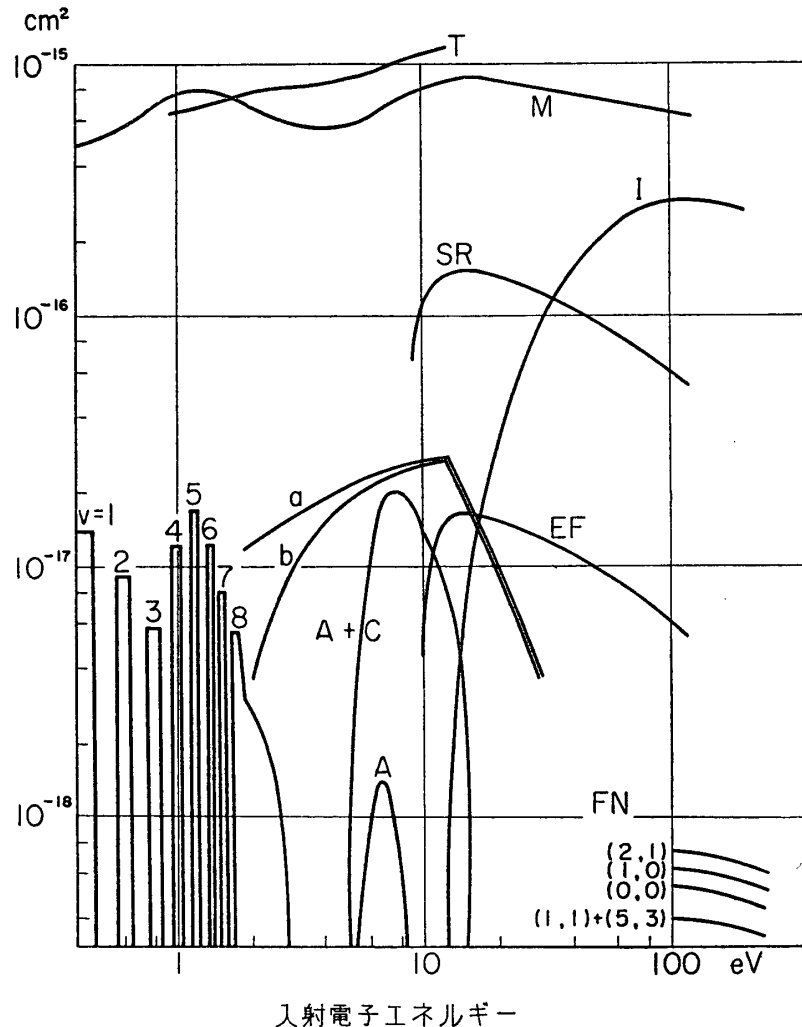
また $\text{O}_2^+(b^4\Sigma_g^-)$ ができれば first negative band system が見られるはずである。これに属するいくつかの bands の励起は Stewart 達 [177] によって測定されているが、 100 eV における (2, 5), (2, 4), (3, 3), (4, 3) bands の励起断面積はそれぞれ 10^{-20} cm^2 を単位として 5.9, 3.75, 1.65, 1.2 で、そのほかはもっと小さい。しかしここでも観測されていない bands がまだまだあるはずで、とくに紫外領域にはもっと強い bands があるものと予想される。



第11図 電離における二次電子エネルギー分布

9. ま と め

以上集められた断面積のまとめを第12図に示す。まず曲線 T は Sunshine 達の得た全衝突断面積, M は Hake と Phelps が測った momentum transfer の断面積である。回転励



第12図 電子と O_2 の衝突断面積のまとめ

起の断面積はこの図に示したエネルギー範囲では信用できる値が得られていないので入れてないが, 10^{-16} cm^2 よりは大いと思われる。 $v=1$ から8までの振動励起のピークおよび $A+C$ ($A^3\Sigma_u^+$ と $C^3\Delta_u$) は Hake と Phelps による swarm experiment によるもので, 今後電子線を用いて直接測定をすることが望ましい。古典論で計算された a, b 両状態の励起についても同様である。

曲線 A は解離性付着, I は全電離の断面積で, いずれも Rapp 達の測定値である。 SR は Schumann-Runge 解離を, EF は $\Delta E=9.94 \text{ eV}$ の励起 (E, F 状態あたりに対応) を表わし, とともに Lassette 達の一般化された振動子強度を用いて Born 近似で計算されたも

のである。おわりに FN は Nishimura による first negative band system の励起断面積を表わす。Born 近似の断面積は factor 2 くらい大きい可能性もあり、一方 first および second negative bands の中にはまだ観測されていないものでもっと強いものがあると思われるので、いずれも実験的にたしかめることが望ましい。

おわりに O_2^+ イオンと電子の再結合係数については、室温で $(1.7 \pm 1) \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{sec}$ という値が与えられており [200]、一方 300°K から 900°K まで温度をあげるとこの係数がほぼ 30% へるといふ報告もある [201]。再結合係数は電子温度のほか分子イオンの振動状態によってもかなり変ると思われるので今後さらに念入りな研究が望まれる。

1967年6月2日 宇宙科学

参 考 文 献

- I. Energy levels and adiabatic potential curves of O_2 , O_2^+ , and O_2^-
- [1] G. Herzberg: Spectra of Diatomic Molecules, D. Van Nostrand Co., Princeton, N. J. (1950)
 - [2] J. T. Vanderslice, E. A. Mason and W. G. Maisch: J. Chem. Phys., **32**, (1960) 515
 - [3] P. G. Wilkinson: J. Mol. Spectry. **6**, (1961) 1
 - [4] L. Wallace: Astrophys. J. suppl. **7**, (1962) 165
 - [5] R. E. Huffman, J. C. Larrabee and Y. Tanaka: J. Chem. Phys. **40**, (1964) 356
 - [6] F. R. Gilmore: J. Quant. Spectry. Radiative Transfer **5**, (1965) 369
- II. Franck-Condon factor
- [7] M. E. Pillow: Proc. Phys. Soc. A **63**, (1950) 940
 - [8] M. E. Pillow: Proc. Phys. Soc. A **66**, (1953) 733
 - [9] M. E. Pillow: Proc. Phys. Soc. A **66**, (1953) 1064
 - [10] M. E. Pillow: Proc. Phys. Soc. A **67**, (1954) 847
 - [11] R. W. Nicholls, D. Robinson, W. Parkinson and W. R. Jarman: Proc. Phys. Soc. A **69**, (1956) 713
 - [12] R. W. Nicholls: Proc. Phys. Soc. A **69**, (1956) 741
 - [13] N. R. Tawde and M. I. Savadatti: Proc. Phys. Soc. **71**, (1958) 514
 - [14] R. W. Nicholls: Can. J. Phys. **38**, (1960) 1705
 - [15] I. T. Yakubov: Opt. and Spectry. **9** (1960) 212
 - [16] M. E. Wacks and M. Krauss: J. Chem. Phys. **35**, (1961) 1902
 - [17] R. W. Nicholls: J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer **2**, (1962) 433
 - [18] S. S. Prasad: Proc. Phys. Soc. **80**, (1962) 873
 - [19] W. R. Jarman: Can. J. Phys. **41**, (1963) 414
 - [20] W. R. Jarman: Can. J. Phys. **41**, (1963) 1926
 - [21] R. W. Nicholls: Ann. Geophys. **20**, (1964) 99
 - [22] H. A. Ory & A. P. Gittleman: Ap. J. **139**, (1964) 357
 - [23] M. E. Wacks: J. Chem. Phys. **41**, (1964) 930
 - [24] M. Halmann & I. Laulicht: J. Chem. Phys. **42**, (1965) 137
 - [25] M. Halmann & I. Laulicht: J. Chem. Phys. **43**, (1965) 438
 - [26] M. Halmann & I. Laulicht: J. Chem. Phys. **43**, (1965) 1503
 - [27] R. W. Nicholls: J. Res. NBS A **69**, (1965) 359
 - [28] R. W. Nicholls: Can. J. Phys. **43**, (1965) 1390
 - [29] M. Druetta & M. Dufay: Phys. Letters **23**, (1966) 239
 - [30] M. Halmann & I. Laulicht: J. Chem. Phys. **44**, (1966) 2398
 - [31] M. Halmann: J. Chem. Phys. **44**, (1966) 2406
 - [32] W. R. Jarman & R. W. Nicholls: Proc. Phys. Soc. **90**, (1967) 545

III. Photoionization and Photoabsorption of O₂

- [33] E. C. G. Stueckelberg : Phys. Rev. **42**, (1932) 518 [theory, Schumann-Runge dissociation]
- [34] R. Ladenburg & C. C. Van Voorhis : Phys. Rev. **43**, (1933) 315 [absorption, 1300—1750 Å]
- [35] K. C. Clark : Phys. Rev. **87**, (1952) 271 [absorption, 580—1026 Å]
- [36] K. Watanabe, E. C. Y. Inn & M. Zelikoff : J. Chem. Phys. **20**, (1952) 1969 [absorption, 1050—2500 Å]
- [37] G. L. Weissler & Po Lee : J. Opt. Soc. Amer. **42**, (1952) 200 [absorption, 300—1300 Å]
- [38] R. W. Ditchburn & D. W. Heddle : Proc. Roy. Soc. A **220**, (1953) 61 [absorption, 1300—1800 Å]
- [39] N. Wainfan, W. C. Walker & G. L. Weissler : J. Appl. Phys. **24**, (1953) 1318 [photoionization, 436—1004 Å]
- [40] K. Watanabe, E. C. Y. Inn & M. Zelikoff : J. Chem. Phys. **21**, (1953) 1026 [absorption, 1050—1900 Å]
- [41] R. W. Ditchburn & D. W. O. Heddle : Proc. Roy. Soc. A **226**, (1954) 509 [absorption, 1750—2000 Å]
- [42] R. W. Ditchburn : Rocket Exploration of the Upper Atmosphere, ed. by R. L. F. Boyd & M. J. Seaton, (1954) p. 313 [absorption, 400—1000 Å. review]
- [43] A. A. Aboud, J. P. Curtis, R. Mercure & W. A. Rense : J. Opt. Soc. Amer. **45**, (1955) 767 [absorption, 100—1000 Å]
- [44] Po Lee : J. Opt. Soc. Amer. **45**, (1955) 703 [absorption, 200—1320 Å]
- [45] N. Wainfan, W. C. Walker & G. L. Weissler : Phys. Rev. **99**, (1955) 542 [photoionization, 473—1100 Å]
- [46] K. Watanabe & F. F. Marmo : J. Chem. Phys. **25**, (1956) 965 [absorption and photoionization, 850—1500 Å]
- [47] G. L. Weissler : Handb. der Phys. **21**, (1956) 804 [photoionization, a review article]
- [48] K. Watanabe : Adv. in Geophys. **5**, (1958) 153 [review]
- [49] J. C. Keck, J. C. Camm, B. Kivel & T. Wentink, Jr. : Ann. of Phys. **7**, (1959) 1 [2000—10000 Å, emission, 4000—9000 °K]
- [50] R. W. Ditchburn & P. A. Young : J. Atm. Terr. Phys. **24**, (1962) 127 [absorption, 1850—2500 Å]
- [51] A. J. C. Nicholson : J. Chem. Phys. **39**, (1963) 954 [photoionization, 890—1030 Å, arbitrary scale]
- [52] B. A. Thompson, P. Harteck & R. R. Reeves, Jr. : J. Geophys. Res. **68**, (1963) 6431 [absorption, 1850—4000 Å]
- [53] K. D. Beyer, & K. B. Welge : Z. f. Naturforsch. **19**, (1964) 19 [photodissociation, 1100—1500 Å]
- [54] G. R. Cook & P. H. Metzger : J. Chem. Phys. **41**, (1964) 321 [absorption and photoionization, 600—1000 Å]
- [55] R. E. Huffman, J. C. Larrabee & Y. Tanaka : J. Chem. Phys. **40**, (1964) 356 [absorption, 580—1060 Å]
- [56] P. H. Metzger & J. R. Cook : J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **4**, (1964) 107 [absorption, 1050—1800 Å]
- [57] R. I. Schoen : J. Chem. Phys. **40**, (1964) 1830 [energy distribution of photo-electrons for $h\nu=12-24$ eV]
- [58] V. N. Soshnikov : Opt. i Spektroskopiya **17**, (1964) 349; Opt. & Spectry. **17**, (1964) 186 [5600—2000 Å, Calc. of absorption coeff. at 2000—1200 °K]
- [59] I. V. Kosinskaya & G. P. Startsev : Opt. i Spektroskopiya **18**, (1965) 735; Opt. & Spectry. **18**, (1965) 416 [absorption, 1000—1750 Å]
- [60] A. J. Blake, J. H. Carver & G. N. Haddad : J. Quant. Spectry. Radiat. Transfer **6**, (1966) 451 [absorption, 1250—2350 Å]
- [61] B. Brehm : Z. f. Naturforsch. **21 a**, (1966) 196 [absorption, 12—12.9 eV, relative]

- [62] R. Goldstein & F. N. Mastrup: J. Opt. Soc. Amer. **56**, (1966) 765 [absorption, 1270—1740 Å]
 [63] R. D. Hudson, V. L. Carter & J. A. Stein: J. Geophys. Res. **71**, (1966) 2295 [1580—1950 Å, temperature effect in absorption]
 [64] R. J. McNeal & G. R. Cook: J. Chem. Phys. **45**, (1966) 3469 [photoionization of O₂ (*a* ¹Δ_g), 1080—1130 Å]
 [65] J. A. R. Samson & R. B. Cairns: J. Opt. Soc. Amer. **56**, (1966) 769 [photoionization, 993—1045 Å]
 [66] S. A. Golden: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **7**, (1967) 225 [1700—3800 Å, calc. of absorption coeff. for Schumann-Runge at 200 °K]
 See also [223] [224].

IV. Transition probability and oscillator strength of O₂ and O₂⁺ (Ⅲに記載したものを除く).
 SR≡Schumann-Runge

- [67] W. H. J. Childs and R. Mecke: Z. f. Physik **68**, (1931) 344 [atmospheric, A_{0,0}=0.14 sec⁻¹]
 [68] R. Ladenburg and G. Wolfsohn: Phys. Rev. **40**, (1932) 123 [*f*=0.2 for λ 1470 peak (SR) and *f*=5.9 for λ 550 peak]
 [69] G. Poots: Proc. Phys. Soc. A **66**, (1953) 1181 [2nd-ve, R-dependence of transition moment]
 [70] W. Rense and R. Mercure: Phys. Rev. **98**, (1955) 1195 [*f*=0.177 for SR continuous absorption and *f*=6.9 for 100—900 Å range]
 [71] M. Katani, Y. Mizuno, K. Kayama and E. Ishiguro: J. Phys. Soc. Japan **12**, (1957) 707 [theoretical, *f*-values for SR, ¹Δ_g-¹Δ_u, and ¹Σ_g⁺-¹Σ_u⁺ transitions]
 [72] P. S. Rao and J. D. Ranade: Ind. J. Phys. **31**, (1957) 491 [theoretical, 1st-ve.]
 [73] J. Keck, J. Camm and B. Kivel: J. Chem. Phys. **28**, (1959) 723 [*f*-value for SR emission]
 [74] D. Robinson and R. W. Nicholls: Proc. Phys. Soc. **71**, (1958) 957 [2nd-ve, relative intensity]
 [75] J. Vallance-Jones and A. Harrison: J. Atm. Terr. Phys. **13**, (1958) 45 [Infrared Atmospheric, A_{0,0}=1.9×10⁻⁴ sec⁻¹]
 [76] G. W. Bethke: J. Chem. Phys. **31**, (1959) 669 [SR continuous absorption, *f*-value]
 [77] L. M. Biberman, S. P. Erkovich and V. N. Soshnikov: Opt. & Spectry. **7**, (1959) 346 [SR band intensity]
 [78] D. W. O. Heddle: J. Chem. Phys. **32**, (1960) 1889 [SR continuum, *f*-value]
 [79] C. E. Treanor and W. H. Wurster: J. Chem. Phys. **32**, (1960) 758 [SR system in 2650—3900 Å region, *f*=0.048]
 [80] G. R. Hebert and R. W. Nicholls: Proc. Phys. Soc. **78**, (1961) 1024 [SR, R-dependence of transition moment]
 [81] J. Noxon: (1961) referred to in [86] [Noxon, A_{0,0}=2.5×10⁻³ sec⁻¹]
 [82] J. C. Keck, R. A. Allen and R. L. Taylor: J. Quant. Spectrosc. Radiative Transfer **3**, (1963) 335
 [83] N. I. Krindach, N. N. Sobolev and L. N. Tunitskii: Opt. i Spektroskopiya **15**, (1963) 298; Opt. & Spectry. **15**, (1963) 161 [SR bands]
 [84] N. I. Krindach, N. N. Sobolev and L. N. Tunitskii: Opt. i Spektroskopiya **15**, (1963) 601; Opt. & Spectry. **15**, (1963) 326 [SR bands, *f*-value]
 [85] R. S. Rao: Proc. Phys. Soc. **81**, (1963) 240 [1st-ve, relative intensity]
 [86] G. V. Marr: Can. J. Phys. **42**, (1964) 382 [SR bands, R-dependence of transition moment]
 [87] R. W. Nicholls: Ann. de Geophys. **20**, (1964) 99 [review]
 [88] R. M. Badger, A. C. Wright and R. F. Whitlock: J. Chem. Phys. **43**, (1965) 4345 [absorption intensity at 1.26 μ and 1.065 μ; lifetime of ¹Δ_g=45 min.]
 [89] M. Jeunehomme: J. Chem. Phys. **44**, (1966) 4253 [*f*-value for 1st-ve and 2nd-ve]
 [90] W. R. Jarman and R. W. Nicholls: Proc. Phys. Soc. **90**, (1967) 545 [*f*-value for Herzberg I]
 [91] A. Schadee: J. Quant. Spectr. Radiative Transfer **7**, (1967) 169 [SR, R-dependence of *f*-value]

- V. Elastic scattering cross section (theoretical \equiv T), total scattering cross section (beam experiment) and momentum-transfer cross section (swarm experiment).
- [92] J. Robinson: *Ann. der Physik* **31**, (1910) 769 [3.2—1650 eV]
 [93] J.S. Townsend and V.A. Bailey: *Phil. Mag.* **42**, (1921) 874 [swarm]
 [94] H.L. Brose: *Phil. Mag.* **50**, (1925) 536 [0.2—5.6 eV]
 [95] E. Brüche: *Ann. der Physik* **83**, (1927) 1065 [1—50 eV]
 [96] C. Ramsauer and R. Kollath: *Ann. der Physik* **4**, (1930) 91 [0.16—1.5 eV]
 [97] J.B. Fisk: *Phys. Rev.* **49**, (1936) 167 [T, 0—27 eV]
 [98] R.A. Nielsen and N.E. Bradbury: *Phys. Rev.* **51**, (1937) [swarm]
 [99] R.H. Neynaber, L.L. Marino, E.W. Rothe and S.M. Trujillo: *Phys. Rev.* **123**, (1961) 148 [2.3—11.6 eV]
 [100] I.P. Shkarosky, M.P. Bachynski and T.W. Johnson: *Planet. Space Sci.* **6**, (1961) 24 [collection of cross sections]
 [101] J.A. Carruthers: *Can. J. Phys.* **40**, (1962) 1528 [swarm]
 [102] F.C. Fehsenfeld: *J. Chem. Phys.* **39**, (1963) 1653 [swarm]
 [103] W. Aberth, G. Sunshine and B. Bederson: *Atomic Collision Processes*, ed. by McDowell, (1964) p. 53 [1—25 eV]
 [104] M.H. Mentzoni: *J. Res. NBS* **69 D**, (1965) 213 [swarm]
 [105] Yu. D. Oksyuk: *JETP USSR* **49**, (1965) 1261; *Sov. Phys. JETP* **22**, (1966) 873 [T, 0—25 eV]
 [106] B.J.W. Boness and J.B. Hasted: *Phys. Letters* **21**, (1966) 526 [transmission experiment, 0.2—1.3 eV]
 [107] J.W. Daiber and H.F. Waldron: *Phys. Rev.* **151**, (1966) 51 [swarm, 2000—3500 °K]
 [108] S. Geltman and K. Takayanagi: *Phys. Rev.* **143**, (1966) 25 [T, 0.1—7 eV]
 [109] R.D. Hake, Jr. and A.V. Phelps: *Westinghouse Res. Lab. Paper 66-1E2-Gases-PI* (1966) [swarm, 0.01—100 eV]
 [110] G. Sunshine, B.B. Aubrey and B. Bederson: *Phys. Rev.* **154**, (1967) [0.5—11.3 eV]
- VI. Attachment
Diss.=dissociative, **Three**=three-body attachment X =field strength in v/cm, p =pressure in mmHg
- [111] A.M. Cravath: *Phys. Rev.* **33**, (1929) 605 [swarm, $X/p=0.5-5$]
 [112] J.T. Tate and P.T. Smith: *Phys. Rev.* **39** (1932) 270 [5—25 eV, relative]
 [113] N.E. Bradbury: *Phys. Rev.* **44**, (1933) 883 [swarm, $X/p=0.5-20$]
 [114] W.W. Lozier: *Phys. Rev.* **46**, (1934) 268 [**Diss.**, 4—40 eV, relative]
 [115] H.D. Hagstrum and J.T. Tate: *Phys. Rev.* **59**, (1941) 354 [**Diss.**, 2—40 eV, relative]
 [116] H.D. Hagstrum: *Rev. Mod. Phys.* **23**, (1951) 185 [**Diss.**, 4—25 eV, relative]
 [117] A. Doehring: *Z. Naturforschg.* **7 a**, (1952) 253 [swarm, $X/p=0.5-10$]
 [118] R. Geballe and M.A. Harrison: *Phys. Rev.* **85**, (1952) 372 [swarm, $X/p=25-60$]
 [119] M.A. Harrison and R. Geballe: *Phys. Rev.* **91**, (1953) 1 [swarm, $X/p=25-60$]
 [120] D.S. Burch and R. Geballe: *Phys. Rev.* **106** (1957) 183 [swarm, $X/p=9-50$]
 [121] J.D. Craggs, R. Thorburn and B.A. Tozer: *Proc. Roy. Soc. A* **240**, (1957) 473 [**Diss.**, 1—29 eV, comparison with swarm data]
 [122] E.E. Muschlitz: *J. App. Phys.* **28**, (1957) 1414 [**Diss.**, 4—16 eV, relative, secondary processes in gas]
 [123] T.E. Bortner and G.S. Hurst: *Health Phys.* **1**, (1958) 39 [swarm in O_2+Ar , $X/p=0.05-0.55$]
 [124] I.S. Buchelnikova: *JETP USSR* **35**, (1958) 1119; *Sov. Phys. JETP* **8**, (1959) 783 [**Diss.**, 4.5—8 eV]
 [125] D.C. Frost and C. McDowell: *J. Am. Chem. Soc.* **80**, (1958) 6183 [**Diss.**, 4—8 eV, relative]
 [126] D.C. Frost and C. McDowell: *J. Chem. Phys.* **29**, (1958) 503 [**Diss.**, 5—9 eV, relative]
 [127] B.A. Tozer, R. Thorburn and J.D. Craggs: *Proc. Phys. Soc.* **72**, (1958) 1081 [**Diss.**, correlation]

- between beam and swarm data]
- [128] L. M. Chanin, A. V. Phelps and M. A. Biondi: Phys. Rev. Letters **2**, (1959) 344 [swarm, **Diss.** for $E_{av}=1.5-3\text{eV}$, **Three** for $E_{av}=0.02-1\text{eV}$, for details, see [136]]
- [129] G. S. Hurst and T. E. Bortner: Rad. Res. suppl. **1**, (1959) 547 [**review** of $-ve$ ion formation in O_2]
- [130] G. S. Hurst and T. E. Bortner: Phys. Rev. **114**, (1959) 116 [swarm, O_2+N_2 , $O_2+C_2H_4$]
- [131] E. Kuffel: Proc. Phys. Soc. **74**, (1959) 297 [swarm, O_2 , air, air+ H_2O]
- [132] J. B. Thompson: Proc. Phys. Soc. **73**, (1959) 821 [correction to the calculation in [126]]
- [133] J. J. Lennon and M. J. Mulcahy: Proc. Phys. Soc. **78**, (1961) 1543 [swarm, O_2+N_2 , **Three**]
- [134] A. N. Prasad and J. D. Craggs: Proc. Phys. Soc. **77**, (1961) 385 [swarm, $X/p=35-50$]
- [135] L. Branscomb: Atomic and Molecular Processes, ed. by D. R. Bates, (1962) p. 100 [**Radiative** attach.]
- [136] J. A. Carruthers: Can. J. Phys. **40**, (1962) 1528 [swarm, **Three**]
- [137] L. M. Chanin, A. V. Phelps and M. A. Biondi: Phys. Rev. **128**, (1962) 219 [swarm **Diss.** for $E_{av}=1.5-3\text{eV}$, **Three** for $E_{av}=0.02-1\text{eV}$]
- [138] D. C. Conway: J. Chem. Phys. **36**, (1962) 2549 [**review** of experimental data. discuss on mechanism]
- [139] A. N. Prasad and J. D. Craggs: Atomic and Molecular Processes, ed. by D. R. Bates, (1962) p. 206 [**review**]
- [140] G. J. Schulz: Phys. Rev. **128**, (1962) 178 [**Diss.**, 4—12 eV]
- [141] R. K. Asundi, J. D. Craggs and M. V. Kurepa: Proc. Phys. Soc. **82**, (1963) 967 [**Diss.**, 4—10 eV]
- [142] J. Dutton, F. M. Harris and F. Llewellyn Jones: Proc. Phys. Soc. **81**, (1963) 52 [swarm, $X/p=30-38$]
- [143] L. M. Branscomb: Ann. de Geophys. **20**, (1964) 88 [a **review** of negative ion processes relevant to aeronomy]
- [144] J. B. Freely and L. H. Fisher: Phys. Rev. **133**, (1964) A 304 [swarm, $X/p=15-60$]
- [145] L. Frommhold: Atomic Collision Processes, ed. by McDowell, (1964) p. 556 [**Diss.**, swarm, $X/p=40-150$]
- [146] D. Rapp and D. D. Briglia: Rept. Lockheed Missiles & Space Co. LMSC-6-74-64-40 (1964) [**Diss.**, 0—60 eV]
- [147] P. A. Chatterton and J. D. Craggs: Proc. Phys. Soc. **85**, (1965) 355 [swarm, CO_2 , CO , air, $He+O_2$, $X/p=2-30$]
- [148] L. G. Christophorou, R. N. Compton, G. S. Hurst and P. W. Reinhardt: J. Chem. Phys. **43**, (1965) 4273 [**Diss.**, 4.5—10.5 eV]
- [149] W. L. Fite and R. T. Brackmann: 4th Int. Conf. on the Phys. of Electronic and Atomic Collisions, (1965) p. 100 [**Diss.**, 1—11 eV, relative, temperature-dependence]
- [150] R. Hackam and J. J. Lennon: Proc. Phys. Soc. **86**, (1965) 123 [swarm, afterglow in O_2 , O_2+N_2 , 296—870 °K]
- [151] D. Rapp and D. D. Briglia: J. Chem. Phys. **43**, (1965) 1480 [**Diss.**, 4—60 eV]
- [152] J. L. Pack and A. V. Phelps: J. Chem. Phys. **44**, (1966) 1870 [swarm, **Three**]

VII. Rotational transitions

- [153] M. H. Mentzoni and K. V. Rao: Phys. Rev. Letters **14**, (1965) 779 [swarm]
- [154] Yu. D. Oksyuk: JETP USSR **49**, (1965) 1261; Sov. Phys. JETP **22**, (1966) 873 [T]
- [155] K. Takayanagi: Rept. Ionos. Space Res. Japan **19**, (1965) 1 [T, Born]
- [156] K. Takayanagi and S. Geltman: Abstract of Papers 4th Int. Conf. Phys. of Electronic and Atomic Collisions, (1965) p. 360 [T. Born and DW]
- [157] S. Geltman and K. Takayanagi: Phys. Rev. **143**, (1966) 25 [T, Born and DW]
- [158] D. H. Sampson and R. C. Mjolsness: Phys. Rev. **144**, (1966) 119 [T, DW]

VIII. Vibrational transitions

- [159] G. J. Schulz and J. T. Dowell: Phys. Rev. **128**, (1962) 174
 [160] A. V. Phelps: Note. Bur. Stds. Tech. Note No. 211, **5** (1964)
 [161] R. D. Hake, Jr. and A. V. Phelps: Westinghouse Res. Lab. Paper 66-1E2-Gases-P1 (1966).

IX. Electronic excitation and dissociation

ELS=energy-loss spectrum (ΔE =energy loss)

Diss.=dissociation

F -value=determination of the generalized oscillator strength

E =incident electron energy

- [162] R. H. Dalton: J. Am. Chem. Soc. **51**, (1929) 2366 [ELS, $\Delta E=7.9$ and 10.6 (V, $E=0-20$ eV)]
 [163] G. Glockler and J. L. Wilson: J. Am. Chem. Soc. **54**, [ELS, $E=3-20$ eV] (1932) 4544
 [164] G. Mollenstedt: Z. f. Naturforsch. **7a**, (1952) 465 [ELS, $E=35-50$ keV]
 [165] E. N. Lassetre: Radiation Res. Suppl. **1**, (1956) 530 [Diss. (Schumann-Runge), F -value]
 [166] G. J. Schulz and J. T. Dowell: Phys. Rev. **128**, (1962) 174 [${}^1\Delta_g, {}^1\Sigma_g^+$ excitation at 0.16 eV above threshold]
 [167] E. N. Lassetre, A. S. Berman, S. M. Silverman and M. E. Krasnow: J. Chem. Phys. **40**, (1964) 1232 [$E=512$ eV, $\Delta E=8.4$ eV, F -value]
 [168] E. N. Lassetre, S. M. Silverman and M. E. Krasnow: J. Chem. Phys. **40**, (1964) 1261 [ELS, $E=510$ eV, $\Delta E=5-30$ eV, F -value for $\Delta E=8.4$ and 9.9 eV]
 [169] S. M. Silverman and E. N. Lassetre: J. Chem. Phys. **40**, (1964) 2922 [ELS, $E=500$ eV, $\Delta E=10-80$ eV; F -value]
 [170] E. Bauer and C. E. Bartky: Aeronutronic Publ. No. U-2943 (1965); J. Chem. Phys. **43**, (1965) 2466 [classical theory, Diss. (Schumann-Runge) for $7-65$ eV, Exc. of a, b states for $1-28$ eV]
 [171] R. D. Hake, Jr. and A. V. Phelps: Westinghouse Res. Lab. Paper 66-1E2-Gases-P1 (1966) [excitations with $\Delta E=4.4, 8.0, 9.7$ eV, swarm experiment]

X. Ionization (including dissociative ionization)

R=relative scale

AP(X^+)=appearance potential of X^+ determined

T=theoretical calculation

- [172] H. D. Smyth: Proc. Roy. Soc. A **105**, (1924) 116 [AP (O_2^+, O^+, O^{++}); also ratio O_2^+/O^+ for $20-700$ eV]
 [173] J. T. Tate and P. T. Smith: Phys. Rev. **39**, (1932) 270 [$12-750$ eV]
 [174] W. W. Lozier: Phys. Rev. **46**, (1934) 268 [O^+ production, $20-110$ eV, R]
 [175] H. D. Hagstrum: Rev. Mod. Phys. **23**, (1951) 185 [AP(O^+)]
 [176] F. W. Lampe, J. L. Franklin and F. H. Field: J. Am. Chem. Soc. **79**, (1957) 6129 [cross section at 75 eV]
 [177] D. T. Stewart and E. Gabathuler: Proc. Phys. Soc. **72**, (1958) 287 [O_2^+ 1st -ve (2, 1), 2nd -ve (2, 5) bands for $20-200$ eV, R; absolute value of 2nd -ve (2, 4), (2, 5), (3, 3), (4, 3), (5, 2), (5, 3) bands at 100 eV]
 [178] D. C. Frost and C. McDowell: J. Am. Chem. Soc. **80**, (1958) 6183 [$12-22$ eV, R]
 [179] W. L. Fite and R. T. Brackmann: Phys. Rev. **113**, (1959) 815 [$12-500$ eV]
 [180] F. H. Dorman, J. D. Morrison and A. J. C. Nicholson: J. Chem. Phys. **32**, (1960) 378 [O^+ ($17-23$ eV) and O_2^+ ($12-18$ eV) production, R]
 [181] A. N. Prasad and J. D. Craggs: Proc. Phys. Soc. **77**, (1961) 385 [swarm, $E_{av}=4-7$ eV]
 [182] R. K. Asundi, J. D. Craggs and M. V. Kurepa: Proc. Phys. Soc. **82**, (1963) 967 [$13-90$ eV]
 [183] F. H. Dorman and J. D. Morrison: J. Chem. Phys. **29**, (1963) 1906 [O_2^{++} production, $38-63$ eV, R]
 [184] S. S. Prasad and K. Prasad: Proc. Phys. Soc. **82**, (1963) 655 [T, $12-700$ eV, classical]

- [185] C. E. Brion: J. Chem. Phys. **40**, (1964) 2995 [12—23 eV, R]
 [186] P. Englander-Golden and D. Rapp: Rept. Lockheed Missiles & Space Co. 6-74-64-12 (1964) 12—1000 eV]
 [187] W. McGowan, E. M. Clarke, H. P. Hanson and R. F. Stebbings: Phys. Rev. Letters **13**, (1964) 620 [near-threshold fine (vibrational) structure, R; comparison with photoionization]
 [188] S. M. Silverman and E. N. Lassetere: J. Chem. Phys. **40**, (1964) 2922 [$E=500$ eV, ELS, $\Delta E=10-80$ eV, also F-value]
 [189] E. Bauer and C. E. Bartky: J. Chem. Phys. **43**, (1965) 2466; Aeronutronic, Pub. No. U-2943 (1965) [T, 12—150 eV, classical; production of O_2^+ ($A^2\Pi_u$) for 20—180 eV, classical]
 [190] K. Batabyal, A. K. Barua and B. N. Srivastava: Ind. J. Phys. **39**, (1965) 219 [cross section at 70 eV]
 [191] D. Rapp, P. Englander-Golden and D. D. Briglia: J. Chem. Phys. **42**, (1965) 4081 [dissociative ioniz., 12—1000 eV]
 [192] D. Rapp and P. Englander-Golden: J. Chem. Phys. **43**, (1965) 1464 [12—1000 eV]
 [193] B. L. Schram, F. J. de Heer, M. J. van der Wiel and J. Kistemaker: Physica **31**, (1965) 94 [0.6—20 keV]
 [194] H. Nishimura: J. Phys. Soc. Japan **21**, (1966) 1018 [O_2^+ 1st -ve (2,1), (1,0), (0,0), (1,0), and (5,3) bands, 100—1500 eV]
 [195] R. E. Winters, J. H. Collins and W. L. Courchene: J. Chem. Phys. **45**, (1966) 1931 [12—21 eV, R]
 [196] N. R. Daly and R. E. Powell: Proc. Phys. Soc. **90**, (1967) 629 [AP(O_2^+ , O^{++} , O^{+++})]

XI. Recombination

α =recombination coefficient in cm^3/sec

- [197] M. E. Gardner: Phys. Rev. **53**, (1938) 75 [$\alpha(O_4^+?)=2.08 \times 10^{-6}$ at 25 °C, 76 mmHg]
 [198] R. B. Bayan, R. B. Holt and O. Oldenberg: Phys. Rev. **106**, (1957) 83 [afterglow study, Atmospheric (0,0) band observed]
 [199] W. H. Kasner, W. A. Rogers and M. A. Biondi: Phys. Rev. Letters **7**, (1961) 321 [$\alpha(O_2^+)=3.8 \times 10^{-7}$]
 [200] M. A. Biondi: Ann. de Geophys. **20**, (1964) 5 [review. the value in [199] corrected as 1.7×10^{-7}]
 [201] M. H. Mentzoni: J. App. Phys. **36**, (1965) 57 [temperature dependence of α for 300—894 °K]
 [202] C. S. Warke: Phys. Rev. **144**, (1966) 120 [theoretical calc. of dissociative recombination]

XII. Other references

- [203] 高柳和夫, 高橋 旦: 宇宙航空研究所報告 **2**, (1966) 1309
 [204] D. E. Stogryn and A. P. Stogryn: Mol. Phys. **11**, (1966) 371
 [205] N. J. Bridge and A. D. Buckingham: Proc. Roy. Soc. A **295**, (1966) 334
 [206] J. Rolfe: J. Chem. Phys. **40**, (1964) 1664
 [207] W. Lichten: J. Chem. Phys. **37**, (1962) 2152
 [208] V. Cermak: J. Chem. Phys. **44**, (1966) 1318
 [209] C. H. Dugan: J. Chem. Phys. **46**, (1967) 1534
 [210] T. H. Spurling and E. A. Mason: J. Chem. Phys. **46**, (1967) 322
 [211] K. Takayanagi: Progr. Theor. Phys. suppl. in press (1967)
 [212] F. Bloch and N. E. Bradbury: Phys. Rev. **48**, (1935) 689
 [213] J. N. Bardsley, A. Herzenberg and F. Mandl: Proc. Phys. Soc. **89**, (1966) 321
 [214] J. C. Y. Chen: Phys. Rev. **148**, (1966) 66
 [215] T. F. O'Malley: Phys. Rev. **150**, (1966) 14
 [216] H. S. Taylor, G. V. Nazarov and A. Golebiewski: J. Chem. Phys. **45**, (1966) 2872
 [217] K. Takayanagi: Joint Inst. Lab. Astrophys. Rept. No. **17** (1964)
 [218] H. Shin: J. Chem. Phys. **42**, (1965) 1739

- [219] H. Shin: Ion-Molecule Reactions in the Gas Phase, ed. by R. F. Gould, American Chem. Soc. Publications, (1966) p. 44
- [220] T. F. O'Malley: Phys. Rev. **155**, (1967) 59
- [221] H. Van Regemorter: Astrophys. J. **136**, (1962) 906
- [222] M. J. Seaton: Atomic and Molecular Processes, ed. by D. R. Bates, (1962) 374
- [223] G. L. Weissler, J. A. R. Samson, M. Ogawa and G. R. Cook: J. Opt. Soc. Am. **49**, (1959) 338 [photoionization, 430—1570 Å, mass analysis of ions]
- [224] J. A. R. Samson and R. B. Cairns: J. Opt. Soc. Am. **55**, (1965) 1035 [photoabsorption, 550—200 Å]

~~~~~

訂正および追加

窒素分子と低エネルギー電子の衝突断面積

「宇宙航空研究所報告 **2**, 4 A (1966) 1309」

高柳和夫・高橋 旦

(4) 式の下に記した  $N_2$  の解離エネルギー 7.373 eV は古い値で、現在最も確からしい値は 9.756 eV である。(たとえば P. G. Wilkinson, J. Mol. Spectry. **6**, 1 (1961) 参照) この点について今仁和武氏、山下拓郎氏などから御注意を頂いた。ここに謝意を表す。

その後発表された文献のうち次の二つはとくに重要と思われるのでこの機会に追加しておきたい。

I. P. Zapesochnyi and V. V. Skubenich: Opt. and Spectry. **21**, (1966) 83 [Excitation of 1st+ve, 2nd +ve, Meinel, and 1st -ve bands,  $\leq 140$  eV]

N. R. Daly and R. E. Powell: Proc. Phys. Soc. **89**, (1966) 273 [dissociative ionization]