

## 輻射と超高層\*

石川 業 六\*\*

近年バルーンやロケットによる高層大気の観測が発達するにつれて、気象学の研究分野も対流圏のみならず超高層にも焦点が向けられるようになった。超高層の問題が対流圏内のそれと著しく違う点は、水の相変化に伴う気象現象およびこれに付随する熱力学的諸問題がないかわりに、紫外線等による分子の解離あるいは電離というような問題が新たに加わってくることである。このために超高層の気象をとりあつかうに際しては、輻射の問題が本質的な役割を果すようになってくる。しかし輻射と超高層気象との関連をはっきりした形にまとめることは、現在まだ難しい段階にあってすべてが解明されているわけではない。なるほど紫外線による電離層の生成だとか、荷電微粒子によるオーロラの出現だとかいう問題だけをとり上げれば、いかにも輻射と高層大気との直接的な相互作用を解明することによって問題が片付きそうにも見える。しかしながら実際にはこのような場合にも力学や熱力学でとりあつかわなければならない部分が対流圏の場合と同じように存在しているのであって一概に単純化することは許されない。更に exosphere あたりの現象になると、大気粒子の平均自由行路が非常に大きくなるために、普通考えられているような温度という概念の適用限界の問題とか、kinetic temperature と rotational あるいは vibrational temperature との関係がどうなっているかというような問題もあって、問題は一層複雑なものとなっている。ここでは主に輻射と超高層気象に関連する研究の一端を紹介し大方の御参考に共したいと思う。

簡単に超高層といっても、研究者によりあるいは分類基準の着眼点によってさまざまな区分けがなされている。しかしこれらの nomenclature は統一されていない状態なので、ここでは必要に応じて凡その高度を示し

て混乱をふせぐことにする。

さて超高層で問題になる輻射は主として太陽輻射に限られる。太陽輻射の他にも他の恒星からの輻射や宇宙線等が考えられるが、その量は太陽輻射に比して非常に少ないので無視してもさしつかえないことがわかる。これらの事情をはっきりさせるためにまず各種の輻射について簡単に説明をする。

## (1) 太陽輻射

すべての波長領域を含めての太陽輻射エネルギーはいわゆる太陽常数として50年も前からスミソニアン研究所から出版されている。太陽常数というのは、地球と太陽との平均距離において地球大気外の太陽輻射に垂直に置かれた  $1\text{cm}^2$  の面積に1分間に入射する全輻射エネルギーであるが、この値は永年にわたってほとんど変動がない。絶対値については紫外線の測定値に対する補正の仕方に変化があったために戦前と戦後で多少のくいちがいが生じたが、現在最も信頼される値として  $0.140\text{watt cm}^{-2} = 2.00\text{ cal cm}^{-2}\text{min}^{-1} = 8.36 \times 10^7\text{erg cm}^{-2}\text{min}^{-1}$  という値が出されている。この輻射エネルギーを  $6000^\circ\text{K}$  の黒体輻射によって近似することは昔から行われていたことであるが、細かい資料が集積するに従って多くの波長領域で実際とずれていることが分っている。

元来太陽輻射をこのようにただ一つの温度の黒体輻射で近似することは原理的に無理のあることで、単に最も卓越したエネルギー領域を近似することができるにすぎない。その理由は太陽輻射が一定温度の薄層から出ているのではなくて、異った温度の種々の層から射出され、且つ途中で異った温度、組成をもったいろいろの層によって吸収や再輻射を受けるためである。それで何よりもまず各波長域についての正確なエネルギースペクトラムを知ることが必要である。そこで地球に入射する輻射を幾つかの領域に分けてその推定値を概説してみよう。

\* 本学会創立75周年記念大会における総合講演

\*\* 気象研究所高層気象研究部

(a) Radio Frequency Emissions (600 $\mu$ —30m)

この波長領域の輻射は地球大気外に到達するエネルギーとして  $3 \times 10^{-7} \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  と推定される。長波に対しては太陽大気の optical depth が大きいので、大部分はその最外層のコロナ付近から出てくるものと考えられる。

(b) Infra Red Emissions (3 $\mu$ —600 $\mu$ )

この波長領域は太陽の chromosphere および photosphere から出てくるもので、その量は  $3 \times 10^4 \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  以下と推定される。

(c) Optical (3000 $\text{\AA}$ —3 $\mu$ )

この部分は太陽輻射のエネルギーの大部分を担っており、6000°k の黒体輻射でよく近似できる。

(d) Near Ultra Violet (1500 $\text{\AA}$ —3000 $\text{\AA}$ )

この領域のエネルギーは  $5 \times 10^4 \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  程度で、photospheric continuum の上に種々の金属の強い resonance line が重って観測される。フレアがあるとこの部分に強い擾乱が現われる。それは主として chromosphere の MgII ダブレットから出る 2795—2803 $\text{\AA}$  の線が増加するためである。もし全太陽面がすべてフレアに蔽れたとするとそのエネルギーは  $5.83 \times 10^5 \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  程度になるが、実際のフレアはせいぜい全太陽面の  $10^{-3}$  程度のひろがりしかないからエネルギー的には大したことはない。

(e) Lyman Ultra Violet (900 $\text{\AA}$ —1200 $\text{\AA}$ )

この部分は主に chromosphere からくるもので、特に Lyman  $\alpha$  line が主要部分を占めている。エネルギーは  $1 \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  程度と推定されるが、これは chromosphere の温度の推定によって大きく左右される。

(f) Far Ultra Violet (10 $\text{\AA}$ —1000 $\text{\AA}$ )

この内 100 $\text{\AA}$ —900 $\text{\AA}$  の部分の信頼される測定はない。この部分は主にコロナと chromosphere の He II から出るもので、他に MgX を始めとした種々の金属の resonance line を含んでいる。電離層の生成にきくのは主にこの領域の紫外線で超高層の問題には重要な領域である。エネルギーとしては  $0.1 \sim 1 \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  程度と推定される。

(g) Soft X-Rays (1 $\text{\AA}$ —10 $\text{\AA}$ )

ロケット観測による直接測定によると、この領域のエネルギーフラックスとして  $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$

が得られている。スペクトラムはこの内 7—8 $\text{\AA}$  のところにほとんど集まっている。

(h) Hard X-Rays and  $\gamma$  Radiation

この部分については未だよく知られていない。

## (i) Corpuscular Radiation

現在までのところ Corpuscular Radiation を直接に測定したという資料はない。しかしオーロラや宇宙線の現象を説明するために、ほとんど確定的に Corpuscular Radiation の存在が必要になってくる。そしてその速度も一定なものでなく、速いものも遅いものもある。最も直接的と考えられる観測としてオーロラの H $\alpha$  line のドップラー効果の観測がある。Meinel の観測によるとオーロラを起す微粒子は 3000 km sec $^{-1}$  程度で地球に向かって突入してくる。エネルギーフラックスは H $\alpha$  の強度から推定され、 $2 \times 10^4 \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  が得られる。この推定には微粒子流の温度をどう仮定するかによってオーダーが2つぐらい違うので、Corpuscular Radiation のエネルギーフラックスが可視光のそれと同程度になることもあり得るかもしれない。もっとも微粒子は荷重しているために地磁気によって集束され、いわゆるオーロラ帯に入ってくるだけなので、地球全体としてはそう大きなエネルギーを受けるわけではない。エネルギーについての別の推定は入射粒子密度を仮定することによって得られる。いま微粒子が陽子であると、その密度を  $1 \sim 1000 \text{個 cc}^{-1}$  と仮定し、速度を  $10^8 \sim 10^9 \text{cm sec}^{-1}$  とするとエネルギーフラックスは  $10^3 \sim 10^6 \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  程度になる。もしもこの微粒子流が 90—100 km の大気薄層内で全部止ったとすると、その部分の温度は 100°C 程度上昇することになる。その付近での輻射による heat loss は主に Co $_2$  の 2.8 $\mu$  および 4.3 $\mu$  bands がきくだけで、温度に直して 1°C/min 程度にすぎないから大規模な循環が起らなければならないという説もある。Corpuscular Radiation と気象との関係はごく最近注目された問題であるからもう少し紹介しておく。

Corpuscular Radiation の存在を示す証拠として上述の他に次のようなものがある。

(i) Ca II の H と K line wiggles による吸収の観測が Richardson によって提出された。これは後に Smith と Kahn によって疑問をなげかけられているが一応の証拠と考えられる。

(ii) Bierman による彗星の尾の曲りの観測から微粒子流の密度を推定している。

(iii) 磁気嵐がフレアに引続いて起る場合、その時間差が5~50時間におよぶことは、磁気嵐を起すものは光よりも遅い速度でやってくることを示している。磁気嵐の理論でこれまで受け入れられているものは、ほとんどその原因を荷電微粒子流に求めている。また磁気擾乱の27日回帰の存在も太陽 M 領域から出る Corpuscular Radiation を仮定することによってうまく証明される。

(iv) Radio Nois の東西非対称も、Nois 伝播の途中に微粒子流があるとして説明される。

以上のように微粒子流の存在は大体まちがいないと信ぜられるが、その発生について2つの機構が考えられている。第1は spicule source によるもので、太陽活動度の弱い時に卓越するものである。これは27日回帰が明瞭にみられ、いわゆる M 領域輻射に相当する。

黒点を中心とした cone of avoidance には spicule source の微粒子が排除され、そのへりに近い部分に密度の大きいところがある。

第2は active region source で、これは活動の激しい太陽黒点付近から間歇的に射出されるもので広い速度幅をもったものである。射出角は統計からかなり広いものと推定される。地磁気の K 指数と黒点の子午面通過前後の日数の関係をしらべてみると明瞭にこれら2種類の微粒子が区別される。

この他にベルリン現象と称するものがある。これは1952年に Scherhag が発表したもので第1ベルリン現象は1952年1月の26日からベルリン上空の10~20mb 付近の温度が約 60°C 低下し、1月30日にもなお 23° ばかり減少が続いた。2月の4日にはこの現象は終わったが、更に2月9日に第2ベルリン現象が起りやはり 60°C 程度の温度低下をもたらした。第2ベルリン現象は2月の23日頃まで続き、その間に明瞭な低温部の下層移行がみられた。Scherhag はこの現象を corpuscular radiation によるものとし、これと cold vortex が南下することと同時に起った時、ベルリン付近で上層の温度低下が観測されたとした。

次に太陽以外に原因をもつ輻射を考えてみよう。

#### (j) 恒星からの光

これは地球近傍で  $1.5 \times 10^{-3}$  erg cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> 程度のエネルギーフラックスになり、太陽からのものの  $10^{-9}$  程度にすぎない。この光は平均的には G-star のスペクトラムを持つとしてさしつかえないから、各エネルギー域についてほとんど無視してもかまわない程度のものである。

#### (k) Cosmic-Rays

一次宇宙線は高エネルギーの陽子を主成分として種々の原子核からなり、その地球近傍に於けるエネルギーフラックスは、 $10^{-2}$  erg cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> の程度である。星の光と違う点は、各粒子の持つエネルギーが  $10^9$  ev 以上の莫大なものである点と、荷電粒子であるために地球磁気の偏向力を受けて大きな緯度効果を持つことである。一次宇宙線が地球大気に突入すると空気の原子核と核反応を起して種々の中間子を発生し、それがなだれを作って地表に降りそそぐ。また電離損失によって自らのエネルギーを失う。地表付近でのこれら二次宇宙線のエネルギーフラックスは  $10^{-5}$  erg cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> の程度だから、一次宇宙線はそのエネルギーの大部分を大気中で失うと考えてよい。

#### (l) 流星及び Cosmic dust

これは radiation というカテゴリーに入るかどうかかわからないが、地球外から日夜地球大気にエネルギーを供給していることは事実である。Van de Hulst によれば粒子サイズは  $10^{-1}$ ~ $10^{-2}$  cm 以下のところに集中しており、その空間密度は  $5 \times 10^{-21}$  gr cc<sup>-1</sup> と推定される。これは全地球表面で1日に約 2000 吨の accretion に相当する。但しこの推定は人によって大部異なり、Allen は 20 吨、Watson は 1 吨という数値を出している。Pettersson や Rotschi が海底の <sup>63</sup>Ni 含有量から出したものは1日に数千吨という値である。Watson のものは粒子サイズの大きいものについてであるから一寸性質が違う。いま1日に2000吨の accretion が直径  $10 \mu$ 、密度 4 の粒子によって起っているとし、その平均速度を 30 km/sec とすると、エネルギーフラックスは  $10^{-2}$  erg cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> というオーダーになる。

以上のべたことをまとめて第1表に表示した。

輻射エネルギーの見積りは以上のようなものであるが、これが超高層の問題とどう関係するかは難しい別の問題である。例えば上の表で最もたく越している optical 域の輻射は超高層大気との相互作用が弱いためにほとんど素通りで対流圏まで侵入してしまうので、エネルギーが大きいからといって作用が大きいとは限らない。ある波長  $\nu$  の輻射のフラックスを  $J_\nu$  としたとき、特定の場所 Z でそれが吸収される量は  $k_\nu(z) J_\nu(z)$  という積で定まる。  $k_\nu$  は吸収の効率を現す係数で、主としてその層の大気組成によって定まるものである。種々の波長別および吸収物質別の  $k_\nu$  の値は、例えば L. Goldbergy, Ab-

区 分	スペクトル域	フラックス	分 散	
太 陽 源	Radio	600 $\mu$ ~30m	$3 \times 10^{-7}$ erg cm $^{-2}$ sec $^{-1}$	10 $^2$
	Infra red	3 $\mu$ ~ 600 $\mu$	$3 \times 10^4$ //	微 少
	Optical	3000 $\text{\AA}$ ~ 3 $\mu$	$1.41 \times 10^6$ //	//
	Near U. V.	1500 $\text{\AA}$ ~3000 $\text{\AA}$	$2 \times 10^4$ //	//
	Lyman U. V.	900 $\text{\AA}$ ~1200 $\text{\AA}$	1 //	10 $^3$ (?)
	Far U. V.	10 $\text{\AA}$ ~1000 $\text{\AA}$	1 //	大
	Soft X-rays	1 $\text{\AA}$ ~10 $\text{\AA}$	$10^{-3}$ > //	大
	Hard X-rays	1 $\text{\AA}$ >	?	?
	$\gamma$ -rays		?	?
Corpuscular	10 $^4$ ev~10 $^5$ ev	$> 10^4$ //	大 緯度変化大	
太 陽 外	Stellar radiation		$1.5 \times 10^{-3}$ //	微 少
	Cosmic rays		$10^{-3}$ //	緯度変化大
	Meteor		$10^{-2}$ //	大

orption Spectrum of the Atmosphere, The Earth as a planet, The solar system II, Chapter 9を参証されたい。

ある層での輻射が吸収される量が定まっただけでは問題が解決されたことにはならない。というのは、この吸収されたエネルギーがどんな形に変わったかがわからないとすぐ気象要素にむすびつけることはできないからである。例えば赤外輻射が下層大気中の H<sub>2</sub>O によって吸収されれば、それは H<sub>2</sub>O 分子の振動や回転のエネルギーに変形するから、吸収された赤外線輻射エネルギーが直接にその部分の kinetic temperature にむすびつく。ところが例えば Corpuscular Radiation が大気中で衝突励起や電離をくりかえしたあげくに持っている運動エネルギーを消費しつくしたような場合には事柄がそう単純ではない。すなわち微粒子が大気分子と衝突して励起や電離に消費されたエネルギーがそれぞれどんな割合であるか。また、電離する場合に電子とイオンが運動エネルギーとして持つ分は何割になるか、deexcitation や recombination によって再び光子のエネルギーに戻る分は何割になるか、電子が余分の運動エネルギーを持ったとしてそれが kinetic temperature とどんな関係にあるか等々という問題をすべて知らなければならない。ところがこのような問題は案外研究されておらずほとんど空白のまま残されている状態なのである。前記の90~100kmの大気層で微粒子輻射が全部止ったとし、そのエネルギーが全部熱に変わったとすれば 1000°C 程度の莫大な温度上昇があるというのも、単に上限を勘定した以外にはほとんど無意味なオーダーエスティメーションと言

うより他ない。

さらに N<sub>2</sub> やオゾン U. V. 域の輻射による解離の例をとってみても、その反応によって生じた原子や分子の electronic state によって様々な熱効果が見れる。ところが残念なことに N<sub>2</sub> やオゾンに関することらの反応は極めて不十分にしか知れていない。

次に大気の組成について正確な知識が得られているかということ、それはせいぜい対流圏内のことだけである。成層圏のそれも対流圏のそれと大差はないと考えられるが、オゾンの含有量にはかなりの差がある。対流圏内の組成については例えば Goody, Physics of the Stratosphere, p. 56 の表を参照されたい。電離層になると対流圏とはかなり違った組成を持っている。100km 以上の高度では酸素はほとんど解離していると考えられ、さらにその幾割かは電離している。また H<sub>2</sub>O は 80km 以上で、CO<sub>2</sub> は 100km 以上でそれぞれやはり分解してしまって存在しないと考えられている。H<sub>2</sub>, X, Rn, CO 等については特にその垂直分布がよく知られていないが、ロケット観測が進めばある程度ははっきりしてくるであろう。He の含量は 20~25km のところで3%の増加が観測されているが、拡散による分離の結果としては少なすぎるので、100km 附近までは垂直方向の混合が存在しその time const. は1時間~数日と推定される。酸素の解離についての Wulf 等の解析によると、O<sub>2</sub>→O の転位層は昼で大体 100km のところにあり、夜はそれが 20km 程度上昇する。しかし Majumdar によれば転位層は 150km 付近にあるという結果が得られている。この差は解析の際に仮定した温度の差によるもので前者では

転位層付近の温度を  $219^\circ$ 、後者では  $300^\circ$  ととっている。いずれにしても  $100\text{km}$  を越える超高層の観測資料は現段階では間接測定によるものが大部分で、地上のものに比べて精度がずっと悪い。もっとも  $100\text{km}$  から  $30\text{km}$  にわたる領域はいわゆる電離層と称されるもので、電子密度に関する観測資料はかなりくわしく得られている。そこで各層についての概略な説明をしておく。

(i) D層: この層は昼間安定に存在し夜間は異常に弱くしか現れないもので、層の高さは  $60\sim 80\text{km}$  付近にあり、電子密度の極大値は  $10^2\sim 10^3/\text{cc}$  の程度である。この付近の大気密度は  $10^{-7}\text{g}/\text{cc}$  であるから結局 D 層付近の比電離度は  $10^{-13}\sim 10^{-12}$  という小さい数になる。D 層は長波通信の反射層として大きな役割を果している割に観測資料に乏しく、気象要素との関連についてもあまり研究されていない。D 層の生成に関しては今のところ定説がないが、NO 分子の Lyman U. V. による電離説がある。

(iia)  $E_1$  層: この層の昼の電子密度は  $10^5/\text{cc}$ 、すなわち比電離度で  $10^{-9}\sim 10^{-8}$  であり、太陽の天頂角による変化は前後ほぼ対称の  $\cos^{1/2}\chi$  という形をしている。夜は行が一つ落ちしかもほぼ一定になる。高さは  $105\sim 130\text{km}$  付近にある。

(iib)  $E_s$  層: この層は sporadic E 層という名の示すように、反射電波がたえず激しく消長していて不定時に起る。高さは  $E_1$  層に近く、 $105\sim 110\text{km}$  近傍に起り、層の厚さは  $3\sim 10\text{km}$  程度の薄いものである。電子密度は  $10^4\sim 10^6/\text{cc}$  程度に大きく変化する。この層の生成も定説はないが、恐らく micrometeor か corpuscular radiation によるものであろう。

(iic)  $E_2$  層: この層は  $E_1$  層のやや上に朝夕の短時間に現れるもので、さらに 2 層に分れることがある。くわしいことはよく分っていない。

(iia)  $F_1$  層: 高度  $230\sim 280\text{km}$  付近に日中現れるもので、低緯度ではっきり観測されるが高緯度では現れない。観測によれば  $F_1$  層は朝方  $F_2$  層から分離して下に下って来てまた夕方に  $F_2$  層に合致するように見える。電子密度は  $2.5\times 10^5/\text{cc}$  程度で、時によると  $F_2$  と  $F_1$  の間にさらに中間層が現れることもある。

(iib)  $F_2$  層: この層は高度  $300\sim 400\text{km}$  付近に現れ、現在分類されている層の中では一番電子密度が大きい。すなわち昼で  $1.5\times 10^6/\text{cc}$ 、夜は  $2.5\times 10^5/\text{cc}$  程度であり、この層の上にもっと弱い他の層があるかどうかはわかっていない。太陽高度による変化は E 層のように

対称ではなく、また緯度によっても大きな変化がある。比電離度はこの付近の大気密度の正確な値が知れていないので今のところ不明であるが、いま粒子密度を  $10^8/\text{cc}$  程度とすると、比電離層は  $10^{-3}\sim 10^{-2}$  程度になる。

次に気象要素として温度についてのべよう。超高層の温度の推定は様々な方法によって行われているがすべて間接測定なので測定別に大きな違いがある。

まず昔から行われている方法として、電離層の厚さからその付近の温度を推定する方法がある。それは各層における電子密度  $N$  の高度  $Z$  による分布函数を、

$$N(Z) = N(Z_m) \left\{ 1 - \frac{Z - Z_m}{\tau} \right\}^2$$

と近似する。ここで  $Z_m$  は  $N_{max}$  の高度であり、 $\tau$  は層の厚さを表わすパラメーターである。観測から  $\tau$  を出してみると E 層では約  $20\text{km}$ 、F 層で  $40\sim 180\text{km}$  程度が得られる。さて Chapman の理論によると、 $\tau$  と気温  $T$  とは次のような関係がある。

$$\tau \sim 1.7 \frac{T}{\mu} \left( 1 + \frac{Z}{R_0} \right) \text{km}$$

ここで、 $T$  は絶対温度、 $\mu$  は平均分子量、 $R_0$  は地球半径を表わすものとする。

E 層については上の式はかなり近似がよく、 $\tau = 20\text{km}$  に対する温度はもし酸素が全部解離しているとするれば  $280^\circ$ 、全部  $\text{O}_2$  分子状ならば  $335^\circ$  となる。

$F_2$  層については上式は近似があまりよくない上に、 $\tau$  の値が  $40\sim 180\text{km}$  程度のひらきを持つので、推定温度も  $350^\circ\sim 2500^\circ$  という大きな分散を持つものになる。しかも、窒素がどの程度解離しているかについての確定的な知識がないので誤差はさらに大きくなる。もつとも層の温度が実際にこの程度の変動を持つと考える人もいる。

Seaton は電離層の温度を電子再結合常数が  $T^{-3}$  に比例するという関係から出している。それによると、E 層で  $T = 500^\circ$ 、F 層で  $110\sim 200^\circ$  が得られるが、これは甚しく従来の結果に反するものである。

夜光とオーロラのスペクトラムから温度を推定することもいろいろな人によって試みられている。すなわち  $N_2$  の回転帯の強度分布を測定して rotational temperature を出すものである。Vegard はこの方法で  $200\sim 800\text{km}$  付近の温度を  $210^\circ\sim 230^\circ$  と出している。Swigs, Cabannes, Dufay 等は  $90\text{km}$  付近で  $150^\circ\sim 230^\circ$  を得ている。ところで現段階では rotational と kinetic な温度の関係があまりはっきりしていない。各エネルギーレベ

ルにおける励起分子数は励起の process によるのであって、その部分の温度によるとは限らない。もし分子の衝突頻度が大きくなって大約  $10^8 \text{sec}^{-1}$  以上にもなればエネルギーの等配が成立って rotatinal と kinetic temperature が一致するのであるが、100km 付近では衝突回数は  $10^5$  のオーダーであるからすでにこの条件が充されていない。振動帯についても同様なことが言える。

Rosslund や Steensholt 等の振動帯強度分布による推定では、E 層付近で  $2500^\circ$  という桁違いの温度が得られている。これは電子衝突によって  $N_2$  分子の振動が回転よりもはるかに大きい影響を受けているだろうという推論を与えるだけで、kinetic temperature との関係はやはり不明である。

Seaton や Vegard の出した  $200^\circ$  内外の温度が低すぎることは次のような考察から結論される。それは  $6300 \text{Å}$  の酸素線に対する 300km, 700km の光子強度の解析で、Bates によると前者は、 $2.3 \text{cc}^{-1} \text{sec}^{-1}$ 、後者で  $0.35 \text{cc}^{-1} \text{sec}^{-1}$  という値が得られている。このことから 300km における励起 O 原子の数は、 $300 \text{cc}^{-1}$ 、700km で  $45 \text{cc}^{-1}$  でなければならない。そこでもし、100~700 km における温度が  $200^\circ$  内外であるとする、スケールハイトは 13km になり  $\rho_{700}/\rho_{100} \sim 10^{-20}$ 、あるいは 700km での原子密度が  $10^{-6} \text{cc}^{-1}$  という甚だ小さな値になり上の結果と合わない。上の結果と合うためには少なくともスケールハイトが 23km、温度にして  $400^\circ$  は必要なのである。Bates の研究によると 300km における 1D-state にある酸素原子の数は 700km のそれよりも 6.6 倍大きいことになる。この値は励起状態の O に対するスケールハイトが 210km、すなわち温度に直して  $3600^\circ$  なければならないことを意味する。もつともこの研究では励起状態の原子と安定状態のそれとが等しいという仮定が用いてあるが、実際は衝突励起が O の励起準位の population に関係するので正しくはない。従って少くともスペクトルによる温度の推定は、現在はその下限が約  $400^\circ$  であるということぐらいしか言えない。

次にもう一度組成の問題にかえるが、100km 以上で酸素は大部分解離していると考えられることは前にのべたが窒素については不明な点が多い。例えば 800Å 以上の V. V. によっては窒素は解離よりも先に電離が起るといふ Chapman & Price の説があるし、Herzberg や Wulf, Deming 等のように窒素の解離が 100~300km

近傍で起るといふ人々もいる。しかし 300km 付近に原子状態の N があることはオーロラスペクトルの解析からはっきりしていることである。一方オーロラの  $N_2^+$  線が 1000km 付近でも強く観測される事実は、その高さでもまだ  $N_2$  がかなり存在していることを示している。いずれにしても  $F_2$  層以上の高度での大気状態はほとんど分っていない状態である。

最後に exosphere について一言ふれておくが、exosphere というのは思考上次のように存在するものである。すなわち非常に高い場所では平均自由行路が大きくなり、ある層から上向に動き出した粒子は衝突前に重力で下向きに自由落下するようになる。このような領域を exosphere という。exosphere では衝突は無視され、平均自由行路は方向によって異った値をとる。exosphere の下限ははっきりしたものではなくある幅を持つが、便宜上その中心を exosphere の底と考え critical level と呼ぶ。critical level の高さを  $Z_c$ 、そこでの粒子密度を  $\eta_c$  とすると、

$$\eta_c = 1/4\pi a^2 H$$

という関係がある。ここで  $a$  は粒子の半径であり  $1.5 \times 10^{-8} \text{cm}$  程度の量である。また  $H$  はスケールハイトである。もし、 $\eta_c$  か  $H$  のどちらかが分れば、他方が上式から知られる。いま  $H$  を 100km とすると  $\eta_c = 3.5 \times 10^7 \text{cc}^{-1}$  が得られる。 $F_2$  層の  $\eta$  を  $10^8$  のオーダーとすると、 $Z_c$  は 500~1000km ぐらいと推定される。exosphere の中に粒子が滞在する時間は、光電離に必要な時間よりずっと短い。例えば逸脱速度の半分程度の速度を持った粒子が垂直に打上げられたとした場合の滞在時間は30分程度であり、光電離に要する時間は年のオーダーである。従って exosphere 内にイオンが存在するとしてもそれは電離平衡として存在するのではなくて、F 層からの拡散によるものと考えられる。地球外からやってくる中性粒子は 10ev 程度のエネルギー以下のものは大体 critical level 以上のところで止ってしまう。また同程度のエネルギーの荷電粒子ならばさらに上の方で止まってしまう。

以上甚だまとまりのない事を書き並べたが、今次地球観測年に際してすでに打上げられ且つ今後打上げられるであろう人工衛星の資料が解析された暁には、超高層の物理は飛躍的な発展をするに違いない。