

[質問]

太陽は黒体ではなく、周囲の空間と熱力学的平衡状態にあるわけではないのに、プランクの輻射公式が近似的に成り立つのはなぜですか。 佐藤明達（東京都）

[回答]

熱力学的平衡状態にある物質が放射する光（電磁波）強度の波長分布は、物質に依らず、温度のみで決まり、プランク分布という温度の関数で与えられることが知られています。特に、電磁波の熱力学的平衡を考える際に、よく理想モデルとして、黒体（全ての波長の電磁波を反射することなく吸収するもの、放射はする）、或いは、恒温槽に浸された空洞（空洞に熱力学的平衡を乱さない程度の小さな穴を開け、そこから出てくる電磁波を観測するとする）が考えられます。いずれにしても、物質と電磁波が相互作用を（エネルギーを交換）十分し、平衡に達したときに電磁波はどのような波長分布をするかを考えるものです。それで、熱力学的平衡にある物質が放射する電磁波のことを、黒体輻射或いは空洞輻射と呼びます。

ご質問にあるように、太陽全面からの平均電磁波は、可視域、赤外域では約6千度のプランク分布によく合っています。これ以外の波長域では、また別の温度を考えないといけません。ご質問の主旨はここまで及んでいないと判断されますので、輻射エネルギーの大部分が出ている可視・赤外域について説明します。先の説明から予想されるように、回答は、可視域の光はほとんどが約6千度の熱力学的平衡が近似的に成り立っている大気層（光球と呼ばれる）から出てきているということです。また、この裏付けとして、プランク分布では、波長で積分した全輻射強度は温度の4乗に比例する（ステファン・ボルツマンの法則）こととなりますが、太陽の全輻射強度にこの関係を当てはめると、温度5780度（理科年表、有効温度と呼ばれる）が得られ、波長分布自体を与える温度と非常に良い一致を示します。

熱源が中心のみにある太陽では、温度は外側に向かって単調に減少していきます（最外層では上昇に転じるのですが、ここの議論には影響しないので無視します）。従って大気のどの部分でも温度勾配が存在し、厳密には熱力学的平衡は存在しません。しかし、この温度勾配の特

徴的距離が、輻射と大気物質とのエネルギー交換の平均距離より大きければ、そこでは局所的に熱力学的平衡が成り立っていると考えられます。

輻射と大気物質（原子、電子）がエネルギー交換をするという意味は、大気が輻射に対して不透明で、広い波長域の輻射を十分吸収でき、原子・電子の運動エネルギーに転嫁できる、またこの逆の過程も可能ということです。実際、太陽大気からの可視域・赤外域光輻射の大部分が出てくるのは、不透明から透明に変わる範囲の薄い大気層になります（当然、全く不透明だと輻射は出てこれない）。この大気層が太陽半径に比べて極端に薄いことは、太陽が円盤としてはっきりした縁をもっていることから予想できます。

太陽で特徴的なことは、可視・赤外域光の吸収・赤外域光の吸収・放射の主たる担い手（90%以上）が、水素の負イオンと呼ばれるイオンになっていることです。太陽大気の90%を占める水素原子は陽子と電子の正負の素粒子から成り立っていますが、太陽の光球大気では、これに電子が1個加わったもの（従って全電価としては-1）が存在し得ます。水素の負イオンは1.65ミクロンより短い波長の光を束縛・自由遷移により、これより長い波長では自由・自由遷移により吸収・放射します。この吸収率は波長に依存し、従って波長により不透明になる深さが変わりますが、この深さ変化での温度変化が小さいため、広い波長範囲を1つの温度のプランク分布で大体合わせることができるようになります。

なお、太陽円盤をみると、中心が明るく、周縁に向かって暗くなっています。円盤の平均輻射ではなく、個々の場所で光強度の波長分布をみると、最適のプランク分布の温度は、中心から周縁にかけて、約6500度から5000度程度まで変わります。周縁ほど高い大気層を見ることになるので、可視・赤外光が出る大気層で、実際、これくらいの温度変化があることとなります。従って、ご指摘のように、決して太陽大気は熱力学的平衡にはないのですが、局所的にはこれが成り立っていると見なせるということです。そもそも温度など熱力学量が定義できることもこれによっています。

末松芳法（国立天文台）

編集委員 谷川清隆（編集長）、坂尾太郎、田代 信、中川貴雄、中村 土、濱部 勝、林 左絵子、半田利弘	発行人 〒181 東京都三鷹市大沢2-21-1国立天文台内	社団法人 日本天文学会
平成6年5月20日	印刷所 〒162 東京都新宿区早稲田鶴巻町565-12	啓文堂 松本印刷
印刷発行	発行所 〒181 東京都三鷹市大沢2-21-1国立天文台内	社団法人 日本天文学会
定価 700円（本体 680円）	電話 (0422)31-1359 (FAX自動切換)	振替口座 東京 6-13595