

【林 忠四郎賞】

流動資産 現金 預金 有 価 証 券	285,149 16,500,000	正 味 財 産 (うち当期正味財産増加額)	16,785,149 (154,067)
流動資産合計			16,785,149
資 産 合 計		負債及び正味財産合計	16,785,149

星空市場

〈質問〉

太陽は地球と違って全部が気体で出来ています。しかし肉眼では輪郭のはっきりした球体に見えます。これは半径約 70 万 km より内側では僅か 400 km ほどで急に大気が不透明になるからだと言われています。なぜここで大気が不透明になるのでしょうか。約 70 万 km という半径にはどんな必然的な理由があるのですか。密度や圧力には急激なジャンプがありませんが、黒点・白斑・紅炎など、いわゆる太陽面現象と言われているものは太陽内部では起こっていないのでしょうか。電波ではコロナまでしか見えませんが、もし電波だけに感ずる目を持った生物がいたら、彼等には可視光でのいわゆる太陽面現象は見る事ができないと思われませんが。

佐藤明達 (東京都)

〈お答え〉

太陽は気体でできていますが、便宜上、可視光が最も多く放射される層を太陽表面 (以下で厳密に定義) と呼び、この上層 500 km くらいの大気層を光球と呼んでいます。この光球という名称は、この大気層から太陽からの可視光のほとんどが放射されることに由来しています。(熱力学的に平衡状態に近い物質では、良き吸収体は良き放射体でもあるといえます。平衡を保つには、当然ながら、入ってきた分、出さないといけないというわけです。)

さて、光球大気では密度が高く、局所的に熱力学平衡が成り立つ状態になっています。光球では可視光での良い吸収物質があり、それは、水素原子に電子が 1 個余分にくっついた水素の負イオンと呼ばれるものです。水素原子は電気的には中性ですが、陽子 1 個、電子 1 個でできているため、場所的には、陽子はもう 1 つ電子を引きつける余裕があるというわけです。余分な電子が電離するときに可視光を吸収し、水素原子に再結合する時、放射します。余分な電子は、温度が低い場合は電離しやすいマグネシウム、鉄などの金属原子が電離することにより供給されますが、温度が高くなると水素自身の電離により供給することができるようになります。太陽大気では、

数割合で、90% が水素で、10% がヘリウム、金属原子は、数十万分の 1 といったものしかありません。従って、水素原子が電離を始めると急激に水素負イオン量が増え吸収率が増えることとなります。従って、太陽大気で可視光が急激に不透明になる場所というのは、水素原子の電離を始める深さ (温度では約 6,000 度あたり) に対応しています。

光球では内部に行くほど温度が上昇し、局所的な放射強度は増加します。一方、同時に吸収率も増加し、吸収に関係する密度も大気圧と重力が釣り合うように、深さとともに指数関数的に増加します。吸収は上層大気にわたる全吸収量で効いてきます。外に出られる光量は、全吸収量の指数関数分の 1 で減少するので、深いところから出る光ほど外側に出にくくなります。従って、ある程度の深さのところにも最も多くの光が放射される層が存在することになります。この深さを計算すると、全吸収量が丁度 1 になるところで、局所的に放射される光量の $1/e$ (37%) の光量が外部に出られる深さに対応することがわかります。ここがいわゆる太陽表面です (温度約 6,400 度)。平均的な太陽大気では、この深さから 0.005% しか出てこれない深さまでわずか 60 km の差しかありません (この間に全吸収量は 5 倍に増えます)。ちなみに、全吸収量は無次元量ですが、深さとともに単調に大きくなるので、光学的深さと呼ばれ、表面の位置は光学的深さが 1 になるところと表現されます。

決して物理量に不連続があるわけではありませんが、このように、水素原子の電離により不透明度は深さとともに急激に増大するため、実質上、いわゆる表面より下層は直接可視光では見えないということになります。太陽は気体でできているにもかかわらず、あたかも表面が存在しているかのように見える所以です。厳密に言うと、波長により吸収率は異なるので、波長により見通せる深さは多少異なり、大気モデルの議論では緑色の波長 500 nm を用いるのが普通で、表面の位置もこの波長で定義されます (波長 500 nm で光学的深さが 1 になる深さ)。なお、一番深く見通せる波長は赤外の 1.6 μm にあります (それでも 500 nm より約 10 km 深い程度)。

太陽半径は約 70 万 km といいますが、太陽質量の星ですと、太陽放射の大部分を担う可視光の放射層が太陽中心から約 70 万 km あたりにできるということで、70 万 km

という数字自体に特別な物理的意味はありません。なお、光球下では、放射は不透明になるため、対流という大気自体の運動によりエネルギーが運ばれています。

上では、太陽表面の厳密な定義を与えましたが、実際の表面という言葉の使い方はかなり曖昧です。光球や、光球の上に広がる彩層大気（平均厚さ約 1,500 km）までも含めて表面と呼ぶこともあります。半径 70 万 km に比べれば、数千 km の大気層も 1 枚の薄い紙みたいなものでしょう。それと、彩層の上に惑星間空間に向かって広がる希薄なコロナ大気に対しては、薄い彩層は正に表面といった対応関係になっています。もともと太陽には固体の表面といったものは無いので、これくらいのいい加減さは許してもよいでしょう。

さて、太陽面現象に関するご質問に対するお答えですが、まず、黒点、白斑は主に光球で見られる現象です。しかし、いずれの現象も光球磁場の強いところに対応しており、磁力線は内部深くから外部のコロナまで延びていることは間違いのないので、内部、外部でもこれらの現象に対応した構造が見られることが予想されます。実際、コロナでは分解能の高い X 線観測などで、対応する暗い・明るい構造を見ることができます。残念ながら、光球下部でこれらの現象がどのようにになっているのかは直接見ることができないため、よくわかっていません。理論的には、黒点や白斑の磁力線は深さ約 20 万 km の太陽対流層の底に根ざしていると考えられています。ちなみに、黒点では温度が低いので、水素負イオン量が少なく、平均的な太陽大気より幾何学的には多少深いところを見ていることになります。最近、日震学という、太陽大気の振動を用いて丁度地震を利用して地球内部を探るように太陽内部を診断する研究が発展しています。その内、日震学により黒点や白斑の下の様子が見えてくるかもしれません。

紅炎は高温（約 200 万度）のコロナ大気中に存在する低温気体（約 1 万度）のかたまりです。紅炎も磁場と密接に絡んだ現象ですが、この定義からわかるように、太

陽表面外側のコロナでの現象であり、内部にはこれほど大きな温度差を持つ構造が存在することは考えられません。但し、ここで示した温度は原子・電子などの粒子の平均運動エネルギーを表すもので、厳密な熱力学平衡状態の温度ではない（逆に、これが成り立たないので大きな温度差のものが共存し得る）ので、放射強度はこの温度だけでは決まらないことを注意しておきます。

最後に、電波だけを感じずる生物に太陽面現象が見えるかということに対し、コメントしておきましょう。電波でも波長の短いマイクロ波（波長 cm）以下であれば表面に近い彩層（光球とコロナの間の大気層）が見えるので、原理的には可視光に近いものを見ることができます。これより波長が長くなると、ご質問にもあるように、見える場所がコロナに移っていくと（波長が長いほど外側になる）、磁力線構造もおおきくなり表面の局所情報が失われていくので、表面現象に対応するものは見づらくなります。しかし、電波眼生物の問題はむしろ空間分解能にあると思われます。人間の目では、可視光で約 18 秒角（瞳径 7 mm として）の分解能がありますが（大きな黒点であれば見える）、感度があっても波長 1 cm では 100 度の分解能しかありません（太陽直径はたった 0.5 度）。人間と同等の分解能を持つには、地球にすむ電波眼生物では瞳直径 130 m 以上の目が必要になるでしょう。どのような生物を想像されているのかわかりませんが、電波眼生物でも人間同様、望遠鏡が必要になるのではないのでしょうか。

国立天文台・野辺山電波観測所には、電波で太陽表面現象を観測するための装置、太陽電波ヘリオグラフがあります（天文月報、1995 年 5 月号参照）。ここでは、東西方向 490 m、南北方向 220 m の T 字型基線に、直径 80 cm のパラボラ・アンテナを 84 台並べて干渉計とし、周波数 17 GHz（波長 1.76 cm）で約 12 秒角、34 GHz（波長 0.84 cm）で約 6 秒角の空間分解能で観測を行っています。

末松芳法（国立天文台）

★「星空市場」では、天文に関するご質問、天文月報・天文学会に対するご意見、学会員への情報提供などを掲載しています。投稿をお待ちしています。

（天文月報編集部）

編集委員	末松芳法（編集長）、上野宗孝、大橋正健、小谷太郎、辻本拓司、野口邦男、平野尚美、宮坂正大
平成 10 年 2 月 20 日	発行人 〒 181-8588 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
印刷発行	印刷所 〒 162-0041 東京都新宿区早稲田鶴巻町 565-12 啓文堂 松本印刷
定価 700 円（本体 667 円）	発行人 〒 181-8588 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
TEL: 0422-31-1359（事務室）	／ 0422-31-5488（月報・欧文編集） FAX: 0422-31-5487 振替口座 00160-1-13595
日本天文学会のホームページ	http://www.tenmon.or.jp 月報編集 e-mail: gjimjmu@tenmon.or.jp