

特集

減光 10 万分の 1 の理論的根拠

～2012 年金環日食にむけて～

福江 純（大阪教育大学）

1. 布団の中はあたたかい

昨、2月3日の朝である。いつも、部屋が暖まるまでの間、布団の中で、その日のスケジュールやすべきことをざっとチェックする。“（今日は修論・卒論発表会なので）院生はともかく、4回生はちゃんと発表できるかなあ（毎年毎年、一年で一番長く心臓に悪い日である）”、“はあ～、そーいや誕生日だなあ、今年ぐらい、何かエエコトあるやろか”、“（この数日が雪模様で）寒いのいやだなあ～”、などなど、実はしょーもないことを考えていたりする。そういう半寝ぼけの状態、そういえば、なんで 10 万分の 1 に減光するんだらう、と思ったら、ちょうど、研究面で、ここしばらく「希釈因子」というものを計算していたためか、ああ、希釈因子が 10 万分の 1 なのか、と思ひ至った。

日食メガネでは太陽光を約 10 万分の 1 に減光する。一眼レフカメラで太陽を写真撮影する際にも、約 10 万分の 1 に減光する ND フィルターを装着する。この **10 万分の 1** という数値には、経験上はそれでいいとわかっているのかもしれないが、一方で、何か具体的な理由・理論的な裏付けがあるはずだ。知っている人は知っていることだろうが、いまのところあまり見聞きした覚えがなく、ネットでも減光の理由はヒットしないし、編集部内でもご存じないようだ。そこで、本稿で少し議論してみたい。

2. 夜空はなぜ暗いのか

まず、少し意外な感じがするかもしれないが、「夜空はなぜ暗いのか」を問うた、オルバースのパラドックスからはじめよう。

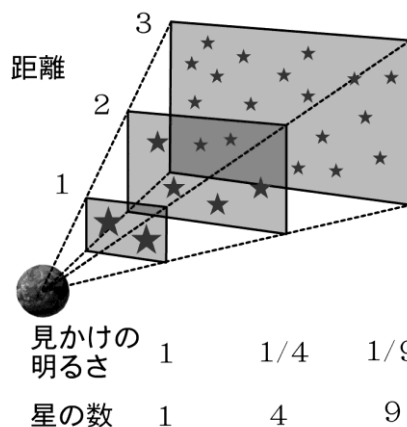


図 1 明るさの減少×星数の増加は一定

もし、宇宙が無限に広がっていて星が無数にあるなら、宇宙のどの方向を見ても、必ず星が見えるはずだ。この状態は、いわば、“星の壁”に取り囲まれているのと同じなので、夜空も昼間の如くに明るいはずだ（図 1）。

星に満ちた宇宙が暗いのは何故か、という問題をはじめてきちんと考察した、19 世紀ドイツの医者兼天文学者ハインリッヒ・ヴィルヘルム・オルバース（1758～1840）にちなんで、この疑問は、オルバースのパラドックスとして知られている。

このオルバースのパラドックスは、しばしば、宇宙膨張で説明される。すなわち、宇宙空間は膨張しているので、遠方の銀河の星からの光は波長が赤い方に延びるという効果（赤方偏移）を受けて、同時に光のエネルギーも低くなり、そのため、暗くなってしまうのだ、と。教科書や解説書によく書いてある解決法だが、実は、宇宙膨張は本質的ではない。

宇宙の年齢は無限ではないため、仮に宇宙自体が無限に広がっていても、いま“観測で

きる”宇宙の果て（宇宙の地平線）は百億光年程度で、それよりも遠方の星（銀河）からの光はまだ届いていない。そのため、いま見えている星の数は有限で夜空は暗い。これがメインの正しい答えだ。（星の寿命が有限であることも補助的な理由である）

3. 光線は続く、どこまでも

つぎに、光線と光量の違いに触れておく。オルバースのパラドックスのベースにもなっていることだが、太陽などから発した**光線**（専門的には「放射強度」）というものは、途中で吸収や散乱を受けなければ、どこまでもその強さを減らずに届いていく。専門的には、「輝度不変の原理」などという。

太陽の表面温度は **6000K** だから、太陽光線の“温度”（輝度温度という）も **6000K** なのだ。そんなに熱く感じないのは、以下述べるように、光線の本数が激減しているためだ。だから、凸レンズなどで太陽光線をたくさん集めると、焦点の温度は、原理的には **6000K** まで上がる。

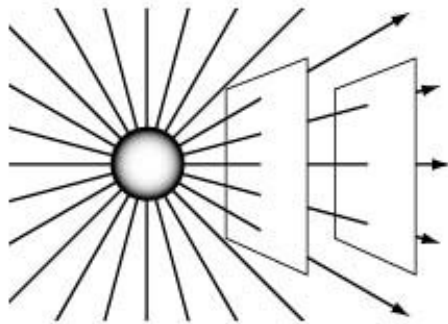


図2 光線と光量

一方、光源から遠ざかると、当然、暗くなる。いわゆる**光量**（専門的には「放射流束」と呼ぶ）が、距離の2乗に反比例して減少することは、よく知られているとおりだ。（強さの変わらない）光線は光源から四方八方へ伸びているが、単位面積あたりを通過する光線

の本数は距離の2乗に反比例して減少するため、光量も距離の2乗に反比例して減少するのだ（図2）。

ちなみに、電磁場（光線と同じ）や重力場が距離の2乗に反比例して弱くなるのも、電気力線や重力力線を考えれば、まったく同じ理屈である。このような逆自乗の法則は、空間が3次元だということと密接に関係している（すなわち、球面の面積は距離の2乗で増える）。

4. 光を薄める：希釈因子

で、ようやく、希釈因子だが、オルバースのパラドックス的に言えば、（空全体が太陽で埋めつくされているわけではなく）太陽は空の一部にしかないこと、光線と光量の話で言えば、光線が距離とともに疎らになること（希釈される）で、おおよそは理解できるだろうか。

地球を中心として、太陽と地球の距離（1AU=1億5000万km）を半径とする球面を考えてみよう。その球面の面積は、

球面全体 = 4π (1億5000万km)² である。一方、その球面上で太陽面が占める面積は、太陽半径を70万kmとすると、

太陽面 = π (70万km)² になる。その比を取ると、

$0.00000544 = \text{約 } 18 \text{ 万分の } 1$ になる。太陽の見かけの大きさは全天の約18万分の1しかないわけだ。

ここでは、わかりやすいように、面積に直して計算したが、通常は、立体角というもので計算する。実際、朝、布団の中で概算したときは、

全天の立体角は... 4π だと、太陽の張る立体角は太陽の視直径の 0.5° をラジアンに直して2乗して、

太陽の立体角... $(0.5 \times \pi / 180)^2$

だから、その比は、

$$1/4\pi \times (0.5 \times \pi / 180)^2$$

$$\sim 1/10 \times (3.14/360)^2$$

$$\sim 1/10 \times (1/100)^2$$

$$\sim 1/10 \text{ 万}$$

と、どんどん丸めながら、10 万分の 1 がポロツと出てきて、そっかと胸オチしたわけだ。

まとめると、太陽の光は、その温度は 6000K なままだが、その量が地球付近では約 10 万分の 1 に“希釈”されているのである。あるいは、先の面積の計算からわかるように、地球から 1 天文単位の距離で全天を太陽で埋めつくすには、約 10 万個の太陽が必要だということもできる。

で、そもそもの問題であった、「日食グラスや ND フィルターでは太陽光を 10 万分の 1 に減光する」理由だが、この希釈率と関係していると考えられる(最初にも書いたように、あまり議論されているモノをみたことがない。もし、文献など、ご存じの方がおられたら、教えていただきたい)。

すなわち、地球軌道/地球上では、太陽光の密度は、太陽表面付近に比べて、約 10 万分の 1 に希釈されているのだ。言い換えれば、身の回りの風景の明るさは、太陽本体の明るさの約 10 万分の 1 なのである。そういう明るさの環境下で、生物の目は発達し順応してきた。したがって、太陽光を地球環境と同じ 10 万分の 1 に減光すれば、肉眼にもちょうどよい明るさになる、ということだろう。

ちなみに、全天が太陽で埋めつくされれば、どの方向を見ても眩しくてみえないどころか、太陽光線の密度は太陽表面と同じになるので、地上も 6000K になってしまう。

5. 校正時の追加：スペクトルの補足

投稿原稿では、タトゥイーン (Tatooine) に絡めて系外惑星に少し触れていたのだが、

混乱しそうだとのことで、少し専門的になるが、スペクトル的な補足をしておく。

教科書の地上におけるエネルギー収支で、太陽スペクトルと地表からの熱放射スペクトルを描いた図が出ている(図 3 の実線と破線)。黒体放射では、太陽光(約 6000K)の方が地表からの熱放射(約 300K)よりはるかに強度が高いはずなのに、同じ強度で描かれているのを不思議に思ったことはないだろうか。

これがまさに希釈率 10 万分の 1 で説明できる。すなわち、地表付近の希釈された太陽光は、ピーク波長は同じだがエネルギー密度が 10 万分の 1 に下がっている(図の太い実線と細い実線)。一方、熱放射のスペクトルエネルギー分布は、黒体放射の性質から、温度比 $6000/300=20$ だけ波長が長くなり(振動数が小さくなり)、温度比の 4 乗 = 160000 だけエネルギー強度が下がるのだ(図の太い実線と細い破線)。アルベドその他、細かい問題はあるが、オーダーとしてはどんぴしゃりである。

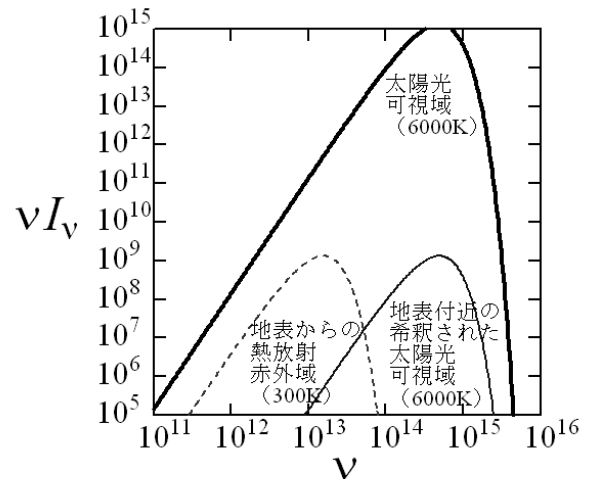


図 3 太陽光などのスペクトルエネルギー分布
横軸は振動数、縦軸はスペクトル強度に振動数をかけたもの。