

目で見る相対論 2. 星虹 2

福 江 純*

3. 承 前

前回, 3 節の前半までで (天文月報 1988 年 1 月号 17 頁), 準光速で宇宙空間を飛翔する宇宙船のブリッジから見た時に, 天球上の星は光行差のため, その見かけの位置を (2.14) 式にしたがって宇宙船の進行方向に移動し, またドップラー効果のため, その色 (温度) を (3.4) 式にしたがって青くあるいは赤く変えることを述べた. 今回は残された問題すなわち運動時における星の等級の変化から続けよう.

3.4 輻射等級 m_{bol}

宇宙船の静止時の天体の輻射等級を

$$m_{bol0} = -2.5 \log \int_0^\infty \Omega_{s_0} B_{\nu_0}(T_0) d\nu_0$$

宇宙船が運動している時に観測される輻射等級を

$$m_{bol} = -2.5 \log \int_0^\infty \Omega_s B_\nu(T) d\nu$$

とする [(2.11) 式]. 積分範囲は 0 から ∞ である. 右辺には輻射等級の原点を決める任意の定数がつくが, すぐ差し引きするので始めから落としておく.

これら 2 つの式を辺々引いて 2 節の式を考慮すると最終的に,

$$\begin{aligned} m_{bol} - m_{bol0} &= -2.5 \log [\Omega_s B(T) / \Omega_{s_0} B_0(T_0)] \\ &= -2.5 \log f/f_0 \\ &= -2.5 \log (\nu/\nu_0)^2 \\ &= -2.5 \log (T/T_0)^2 \\ &= -2.5 \log [\gamma(1 - \beta \cos \theta)]^{-2} \quad (3.10) \end{aligned}$$

が得られる.

コメント: (1) 観測される輻射等級は, (3.10) 式にしたがって, 宇宙船船首方向の青方偏移の領域では減少し (すなわち全波長では明るくなり), 後方の赤方偏移領域では増加する. (2) 絶対等級 M に対しても (3.10) 式と同様な関係式が得られる. (3) 縦軸を m とおいた HR 図上で, 3.3 節と同じ議論ができる. (4) (3.10) 式は, 宇宙論における等級-赤方偏移関係

$$m = -2.5 \log L_0 / [4\pi D^2(1+z)^2]$$

と基本的には同一のものである. ただし上式で L_0 は天体 (銀河やクェーサー) のもとの光度, D は天体までの距離, z は赤方偏移を表わす. もちろん星虹の場合 z はマイナス (青方偏移) にもなるし, 方向や宇宙船の速度

に依存するが.

3.5 実視等級 m_v

さて実際の星虹を見る場合にもっとも重要な実視等級の問題に移ろう.

輻射等級はスペクトルの全域にわたって放射されるエネルギーから得られるものだが, 一方実際に目や写真乾板に感ずるのは, その一部, 可視域のものだけである. 実視等級を求める際には, 人間の目の感じ方に合った感度関数 (図 4 上) を用いるのが本当だが, 2 節で述べたようにここでは簡単のために ν_1 から ν_2 の間の可視光の領域で感度関数を 1, それ以外で 0 とおく.

したがって, 宇宙船の静止時の天体の実視等級として

$$m_{v0} = -2.5 \log \int \Omega_{s_0} B_{\nu_0}(T_0) d\nu_0$$

一方宇宙船が運動している時に観測される実視等級は

$$m_v = -2.5 \log \int \Omega_s B_\nu(T) d\nu$$

という方式で計算される. ただし積分範囲はどちらも ν_1 から ν_2 までである点が輻射等級と異なる.

輻射等級の場合と同じく, これら 2 つの式を辺々引いて立体的変換式 (2.20) などを用いると最終的に,

$$\begin{aligned} m_v - m_{v0} &= -2.5 \log [(v/\nu_0)^{-2} Y] \\ &= -2.5 \log [(T/T_0)^{-2} Y] \quad (3.11) \end{aligned}$$

を得る. ただし (3.11) 式で Y は積分の比:

$$Y = \int B_\nu(T) d\nu / \int B_{\nu_0}(T_0) d\nu_0 \quad (3.12)$$

である. Y の分母分子とも, 積分範囲はやはり ν_1 から ν_2 まで (図 9 参照). なお (3.12) 式で積分の下限を 0 上限を ∞ とすると $Y = (T/T_0)^4$ となり, (3.11) 式は (3.10) 式に帰着する.

さて (3.12) 式の積分が分からないことには, 実視等級の変化 (3.11) が分からない. そこで以下いくつかの

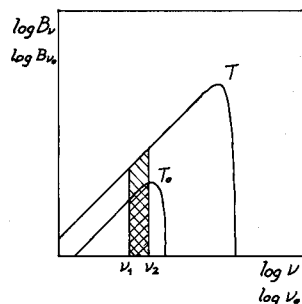


図 9 スペクトルの可視域での積分 (比 Y)

* 大阪教育大 Jun Fukue:
Visual Relativity 2. Starbow 2

場合に分けて (3.12) 式の積分を計算してみよう。

3.5.1 レイリー・ジーンズの場合

まず可視光の領域 ($\nu_1 < \nu < \nu_2$) で天体のもとのスペクトル $B_{\nu_0}(T_0)$ も、宇宙船で観測されるスペクトル $B_{\nu}(T)$ も、共にレイリー・ジーンズの分布 [(2.4) 式] になっているとしよう。これは黒体放射のスペクトルのピークが紫外より波長の短い側にあればよい (図 10 左方) 例えば船首方向の早期型星の場合などに適用できる。

この場合 (3.12) 式に (2.4) 式を代入すると積分は容易に実行できて、 $Y = T/T_0$ が得られる。したがって (3.11) 式は

$$m_{\nu} - m_{\nu_0} = -2.5 \log [(T/T_0)^{-1}] = -2.5 \log [\gamma(1 - \beta \cos \theta)] \quad (3.13)$$

となる。

この (3.13) 式からの帰結としては、船首方向の早期型星の場合、ドップラー効果によって振動数が高くなり ($\nu/\nu_0 > 1$) より高温の黒体として観測されても ($T/T_0 < 1$)、レイリー・ジーンズの部分では、天体を見込む立体角が光行差によって小さくなることに打ち消されて、実視等級は増加することが挙げられる。すなわち、可視域では暗くなる。逆に宇宙船の後方の早期型星では明るくなる場合もあるだろう。

3.5.2 ウィーンの場合

今度は可視域で $B_{\nu_0}(T_0)$ も $B_{\nu}(T)$ も、共にウィーン分布 [(2.5) 式] になっている場合 (図 10 右方) を考えてみよう。例えば低温度星や赤外線源などがこれに当たる。

この場合 (3.12) 式の積分は少し面倒だが、主要項をとって結果のみ記すと

$$Y \sim T/T_0 \times \exp(-h\nu_1/kT + h\nu_1/kT_0)$$

$$m_{\nu} - m_{\nu_0} \sim 2.5 \log [(T/T_0)e^{(h\nu_1/kT - h\nu_1/kT_0)}] \sim -2.5(h\nu_1/kT_0 - h\nu_1/kT) \quad (3.14)$$

となる。すなわち船首方向の赤外線星などは、少しの青方偏移で実視等級は大きく減少する (明るくなる)。

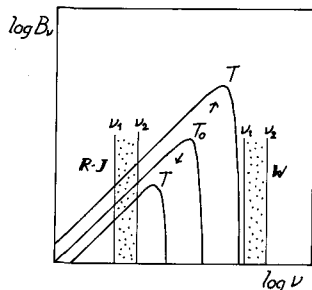


図 10 レイリー・ジーンズ vs ウィーン

3.5.3 一般のプランク分布の場合

より一般的には (3.12) 式は数値積分しなければならない。もっとも分母も分子も積分は同じ形だから別々に求める必要はない。与えられた温度 (横軸) に対して、黒体放射のスペクトルの可視域の部分の積分放射強度 $B(\nu_1 < \nu < \nu_2, T)$ の値 (縦軸) を求めて、対数グラフにプロットしたのが図 11 である (グラフ中の直線は 4 節で述べる)。

図 11 で、横軸上に T_0 と T を与えた時のグラフの縦軸の差が、 $\log Y$ になる。その値を読み取れば、(3.11) 式から実視等級の変化が分かる。なお黒体温度が約 10 万度より大きいと、3.5.1 節で述べたように可視域でレイリー・ジーンズとなっているため、積分は温度に比例し、図 11 の対数グラフ上では傾き 1 の直線で近似される。逆に低温の領域ではウィーンのため変化が大きいく。

3.6 補 足

ここまでは天体 (星) のスペクトルとして、プラズマと放射場が温度 T で完全に熱力学的平衡状態にある時に放射される黒体放射を想定してきたが、こんなことはむしろまれで、天体のスペクトルはもっと変化に富んでおり黒体とは似ても似つかない場合が多い。例えば、

(1) 同じ黒体でも、降着円盤ではさまざまな温度の黒体が一緒になった多重色 (温度) 黒体スペクトルと呼ばれるものになっている。また最初は黒体でも、高温のプラズマによってコンプトン散乱されスペクトルが黒体からずれる場合もある。後者は 3K 背景放射が銀河団の向こうから銀河間ガスを通り抜けてやってくる時や、中性子星表面からの数百万度の黒骨放射が周辺の熱いプラズマを通り抜ける時などに生ずる。

(2) プラズマは熱平衡でマクスウェル・ボルツマン分布になっているが、光学的には薄く光子の平均自由行程

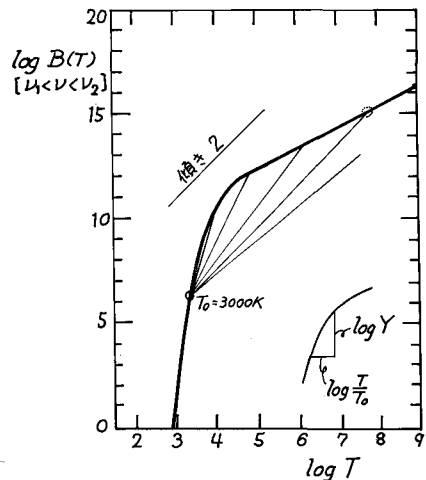


図 11 可視域での積分放射強度 $B(\nu_1 < \nu < \nu_2, T)$

が長い時. この場合は, 電子の自由自由遷移による熱制動輻射などプラズマ内部における輻射の発生時のスペクトルがそのまま見える.

(3) さらに非熱的な輻射スペクトル. すなわち平均自由行程が体系の大きさより長く, まだ熱平衡になっていない系から放射されるもの. 磁場が存在する時に, 高エネルギー粒子によって放射されるシンクロトロン放射, 高温プラズマによるコンプトン散乱などが代表的な非熱的放射である. これらはどちらもべき乗型のスペクトルになる.

今回の報告ではこれら一般的な連続スペクトルの場合に関しては省略するが, (3.1) 式はもともと一般的に成り立つ式なので, 黒体輻射でないスペクトルの場合も, B を I で置き換えれば黒体輻射の場合の議論の多くはそのまま成り立つ. もちろん例えば黒体温度という概念などは出て来ないが.

また点源でなく広がった光源 (例えば, 太陽, 惑星, 星間雲, 銀河) の場合には単に面輝度で考えればよく, 星の場合のような立体角の変化は考慮しなくてもよい. (3.11) 式で言えば立体角の変化からくる $(\nu/\nu_0)^{-2}$ の項を落として Y のみ考えればよい. その結果, 例えば $T > T_0$ であれば面輝度は常に明るくなるだろう. したがって広がった天体の場合も今までの議論の中に含まれる.

4. 星景色

前節では, 連続スペクトルを放射している点状の天体の温度や実視等級などが, 運動している宇宙船から観測した時に, どう変化して見えるかという問題を検討してきた. 星の視え方もある程度考察したが, 本節でもう一度まとめておこう.

ところで (2.15) 式から宇宙船の進行方向からの角度 θ が

$$\cos \theta = (1 - 1/\gamma) / \beta$$

という条件を満たす方向では, ドップラー偏移は起きない ($\nu/\nu_0 = 1$). この方向を星虹の中心としよう. そこでまず具体的にこれより宇宙線の船首方向, すなわち青方偏移の領域を考えてみよう.

(1) 紫外部にスペクトルのピークを持つ高温の星の場合: 青方偏移が大きければ大きいほど, 観測される温度は増加し, ますます“白く”なる. スペクトル全域にわたる輻射等級は減少するが, 実視等級は増加する (暗くなる!).

(2) 可視域や赤外部にピークを持つ G 型, K 型, M 型の星の場合: 具体例として有効温度が 3000K の M 型星を考えてみる (図 11 の直線群の起点). まず色は, 観測される温度の増加にしたがい, 赤, オレンジ, 黄, 淡黄色, 白と変化するだろう. 一方実視等級は, 青方偏移が

小さいうちは減少する. それも最初のうちは急激に減少する. (図 11 で 3000K から引いた直線に添った増加分すなわち $\log Y$ の 2.5 倍だけ.) すなわち明るくなる. しかし青方偏移が大きくなってピークが紫外へ移動するにしたがい, ドップラー偏移による輻射強度の増加より, 光行差による立体角の減少が効いて, 実視等級の減少の仕方は緩くなり, さらには増加し始める (暗くなり始める). そして今の例では観測される温度が約 600 万度ぐらいになったところで, 静止時の実視等級まで落ちてしまい, それより青方偏移が大きくなると逆に静止時より暗くなる.

(3) もちろんこれらの結論は 1 個の星に注目した場合の話で, 実際には星の面密度が立体角の変化分, すなわち $(\nu/\nu_0)^2$ に比例して増えるので, 全体として進行方向は明るくなるだろう.

宇宙船側方から後方の赤方偏移の領域についても同じように議論できる.

前回 (天文月報 1988 年 1 月号) 表紙に示した写真 (図 12) が, 以上までの議論にのっとって作成した“星景色”である. もととなるデータは Yale 天文台の Bright Star カタログから, 約 4.5 等級より明るい 1614 個の星について切り出したものを使用した.

表示してある視野範囲はオリオン座の方向を中心として前方 180 度とってある. すなわち宇宙船ブリッジの全天周スクリーンあるいはリアシート・コクピットの前半分だと思ってもらえばよい. 宇宙船の速度は左上から 0, 光速の 30%, 50%, 60% である. 速度が負, すなわち宇宙船後方の星景色も表示できるが, 宇宙船の速度が大きくなると星の数がぐっと減るのであまり面白くない. 星の見かけの位置は宇宙船の加速と共にどんどん前方 (図 12) に移動していく.

まずシリウスやカノーブスなど個々の星に注目して欲しい. 宇宙船の速度が大きくなるにつれ, 光行差によって星の見かけの位置がどんどん図の中心に移動しているのが見て取れるだろう. さらにドップラー偏移のためベテルギウスなどの色が変化しているのも分かるだろう. 星の実視等級は円の大きさと表してあるが, もともと暗く赤い星が非常に明るくなっている.

また星景色全体として視ると, 速度が大きい場合にはなんとなく色のリングすなわち星虹が視えてくるような気がしてくる.

なお図 12 は NEC のパソコン 98XA を用いて作成した. その際に設定した星の色, 塗りつぶしの円による実視等級の表現などには多分に主観的なものも入っていることを断わっておく. 図 12 を作成するために使用したプログラム (一部) をおまけにつけておく.

今回は点源で連続スペクトルを放射している天体とい

星虹プログラムの導入部分。(プログラムの全体については著者より入手可能。)

```

1000 '星虹月報.BAS *****
1010 '*
1020 '*          恒星船<Comet Wing>から見た星景色          *
1030 '*
1040 '*          Data      : Bright Star Catalogue          *
1050 '*          Mapping  : Stereo Projection                *
1060 '*
1070 '*          Ver 4.1 1987 0321 XA/F2 version              *
1080 '*          4.2      0328 Astronomical Herald.version   *
1090 '*
1100 '*          X A用の行を削除しF 2用の行を復活させればF 2仕様になります *
1110 '*
1120 '*****
1130 '          中略
1470 'プログラムの説明 ++++++
1480 '
1490 PRINT "1頁"
1500 PRINT "          プログラム名";: COLOR 6 : PRINT "<STARBOJWJ>"
1510 PRINT : COLOR 5
1520 PRINT "          Ver. 4.0 1987 0321          by Jun Fukue"
1530 PRINT
1540 PRINT " このプログラムは、太陽系近傍を準光速で航行する宇宙船のブリッジから
1550 PRINT "  見た星空の眺め<星景色>をディスプレイ上に表示するものです。
1560 PRINT "  星のデータはBright Star Catalogueから1614個
1570 PRINT "  の明るい星を選びました。
1580 PRINT "  使用者はプログラムの指示に従って以下のパラメータを入力して下さい。
1590 PRINT "  リターンキーを押せば自動的に標準値が設定されます。
1600 PRINT "  スペクトル型の移動 (Y/N)          標準値=Y
1610 PRINT "          等級の変化 (Y/N)          標準値=N
1620 PRINT "          目標星点の赤経α (時)
1630 PRINT "          目標星点の赤緯δ (度)
1640 PRINT "          宇宙船の速度 β (光速度を単位とする)
1650 PRINT "          0 < β < 1          : 宇宙船前方の星景色
1660 PRINT "          0 > β > -1        : 宇宙船後方の星景色
1670 PRINT "  もう一度視たい時は次のキーを押して下さい。
1680 PRINT "          最初に戻りたい時は S
1690 PRINT "          目標星点を変更したい時は T
1700 PRINT "          宇宙船の速度を変えたい時は Vまたは[RET]
1710 PRINT : COLOR 2
1720 PRINT "          何かキーを押して下さい。
1730 '
1740 BEEP
1750 DOCS=INKEY$: IF DOCS="" THEN 1750
1760 COLOR 6 : CLS 3
1770 '
1780 'データの読み込み ++++++
1790 '

```

う限られた場合を検討しただけだが、点源でも線スペクトルを出している場合はどうなるか? とか、広がった天体の場合は? など、星以外の天体についての視覚化は今後の課題としたい。

またデータについても赤外線天体や紫外線・X線天体なども本当は考慮しなければならない。特に3節での議論からも分かるように、青方偏移領域での赤外線星の寄与は無視できないだろう。例えば最初に挙げた Stimets and Sheldon らは赤外線天体を考慮した結果、赤外領域から可視域に移動してくる星のため星虹は見えなくなると述べている。現在ではアイラスのデータが手に入るの、より現実的な計算ができるだろう。

いろいろな点で本稿で紹介したことはまだ序の口にすぎない。最後にもう少し蛇足を付け足して今回の話を終えたい。

5. 虹・アラカルト

肉眼/可視光で見る宇宙は星々で満ち溢れているようだが、宇宙には星以外にも実に多様な天体があることに、いま一度注意を喚起しておきたい。例えば中性ガス雲、電離水素雲、分子雲などの星間雲、超新星残骸、原始星、パルサー、赤外線源、X線星、活動銀河、背景輻

射、などなど。ドップラー偏移によって波長がずれることにより、通常は電波やX線の目でしか見れないこれらの天体全てが、〈星虹〉にかかわってくるはずだ。一例を挙げておくと、電波銀河として有名なケンタウルス座A (NGC 5128) では、その電波ローブの拡がりは角度で10度にも達する。言い換えれば、視直径約30分の満月を20個並べた程の拡がりを持つ。こんなのが可視域に入ってきたら、一体どんな宇宙が見えるのだろうか! この節ではそれらの多様な天体を少し整理しておきたい。なおドップラー偏移によってスペクトルが変化した天体の姿を、今後便宜上天体の種類によらず広義の意味で〈星虹〉と呼ぼう。

まず天体の幾何学的な状態/拡がりに着目して、天体を分類することができるだろう。それらを表1にまとめる。もちろん点源かどうかについては、当然ではあるが、眼や観測装置の分解能と関係するので一概には言えない。

また表1では同時に、それらの天体によって作られる〈星虹〉の呼び名についてもいくつか提案してある。

次に〈星虹〉に色が着くかどうか、という問題に関しては、天体から放射されているスペクトルが、連続光的か単色光的かによって様子は全く違うだろう。

表 1 〈星虹〉の候補

分 類	名 称 (案)	連続スペクトル	線スペクトル
点 源 ¹⁾	星虹: starbow	星 原始星 主系列星 白色矮星 中性子星 降着目盤 赤外線源 活動銀河中心核	キューサー
点 源 の 集 団 ²⁾	群虹: cluster-bow	星団 散開星団 球状星団	
拡がりのある天体	斑虹: patch-bow 雲虹: cloud-bow ³⁾ 碎虹: fragment-bow	超新星残骸 HII 領域 銀河 太陽 惑星	中性水素雲 分子雲 発光星雲 散光星雲 惑星状星雲
背 景 放 射	散虹: diffuse-bow 景虹: background-bow	3K背景輻射 ダイフューズX線 ダイフューズ赤外線 黄道光	
すべてを重ね合わせた虹 万華虹: kaleido-bow			

注 1) 肉眼の場合にはキューサーなどの暗い天体は考えなくてもいいだろうが。
注 2) 基本的には点源と同じ扱いでよい。
注 3) 語呂が少し悪いので余り推奨できない(もちろん日本名の方)。

連続スペクトル例えば黒体輻射の場合、スペクトルは赤い側に裾をひいているので、紫、青、緑系統の色を出すことは困難である。O型やA型の星は青白いというが、普通の感覚では白とってよい。したがって虹の七色はとても望めない。

一方、線スペクトルを出す天体、例えば赤外、ミリ波で線スペクトルを出している天体は、ドップラー偏移によって可視域に移動すれば“色”が着くはずだ！もちろんこの場合も色の着き方は、スペクトル線の強度や幅に依存するだろうが。

具体的な天体の例も思いつくまま表1に挙げておく。

このような星以外の天体からの寄与を考え合わせると、それらの織りなす色とりどりのパッチワークのタペストリーに、3~4彩に輝く宝石すなわちドップラー偏移した星々をちりばめた万華虹の宇宙が視えるのではないだろうか？

パソコンにアクセスできるようになって最初に星虹をつくろうとした時に、山敷達也くんは一緒に遊んでくれました。石原藤夫氏は実視等級などについて考察するきっかけと場所を与えてくださいました。視覚化への最後のプレッシャーをかけてくれたのは佐藤 傑さんです。さらに横尾武夫氏と定金晃三氏は、しばしば趣味に走る筆者をいつも暖かく見守ってくれます。特に横尾武夫

氏からは星座プログラムと処理した BSC データを提供していただきました。また原田和洋くんをはじめ研究室の学生諸君はカメラのセットを手伝ってくれました。筆者はほとんどシャッターを押しただけです。最後に本稿を掲載するにあたり吉井 譲氏と吉沢正則氏にはいろいろと便宜を計っていただきました。この場を借りて皆さんに感謝いたします。

お 知 ら せ

三菱財団自然科学研究助成募集

上記について三菱財団より本会宛に募集要項が来います。応募を希望される方は学会事務所に御連絡下さるか、個別に下記宛「三菱財団自然科学助成応募要項」を御請求下さい。

宛 先 財団法人 三菱財団

〒100 東京都千代田区丸の内 2-5-2

三菱ビル 15 階 Tel. 03-214-5754

助成の金額は総額約1億7千万円、1件2千万円以内、研究期間は原則として1年、応募締切は昭和63年4月11日(月)必着。(極力早めにお出し下さい)