



3. 宇宙物理での微粒子

3.2 星間塵による減光：

光赤外線天文学はどこまで精密な測定が可能か

西山正吾

京都大学理学研究科宇宙物理学教室

日本学術振興会特別研究員 (PD)

(原稿受付：2010年10月19日)

観測装置の発展に支えられ、20世紀末には宇宙論が精密科学へと成熟していった。今後も装置の進歩は止まらず、観測精度はますます高くなっていくだろう。しかしそれだけで、宇宙を“精密に”とらえられるようになるのだろうか。精密化の鍵をにぎるのは、星間空間にただよう宇宙塵である。天体からの光は星間塵によって減光される。紫外線から赤外線の波長にわたる観測では、特にこの影響が顕著である。近年の研究で、星間塵による減光がいかにか“多様か”ということがわかってきた。本節では、星間減光の理解の変遷を、歴史的な経緯を含めて紹介したい。星間減光の多様性を理解すること、赤外線波長域での星間減光の観測を推し進めること、これらが今後、光赤外線天文学をより精密な科学とするために必要な要素である。

Keywords:

interstellar dust, extinction, optical and infrared astronomy

3.2.1 序章

20世紀末を境に、宇宙論は精密科学の領域へ踏み込んだと言われている。そこには様々な宇宙観測の寄与があった。可視光／赤外線波長域におけるIa型超新星の観測もそのひとつである。宇宙の加速膨張の発見は、科学者だけでなく一般の人々にも大きなインパクトを与えたであろう。

例えばIa型超新星の観測からハッブル定数を決定する場合、Ia型超新星までの距離と後退速度の関係をを用いる。後退速度は、ドップラー効果に基づくスペクトルのずれから、精度の高い測定が可能である。問題は距離の決定である。超新星の見かけの明るさと絶対等級との比較から距離が求まるのだが、そこには様々な系統誤差が含まれる。絶対等級がどれだけの精度で決まっているのか、その環境(例えば金属量)依存性はどれくらいなのか、そして星間塵による減光の影響をどれだけ受けているのか、ハッブル定数を2%の精度で測定する将来計画では、上記の系統誤差要因を1%程度におさえなければならない[1]。

こういう話を聞くと、星間減光の研究者として、本当に可能だろうかかと疑ってしまう。星間塵による減光補正の誤差を1%以下に!?本当にそんなことが可能なのだろうか?

銀河系内・系外にかかわらずどの天体を観測しても、天体と地球の間に多かれ少なかれ星間塵が存在し、その減光を受ける。この影響を考慮して天体の物理量を導出するた

1) 太陽がほとんど水素とヘリウムでできていることを初めて指摘した女性天文学者。彼女の業績は天文月報の古畑正明氏の記事に詳しい(1959年10月号, 1980年5月号)。

めには、大きく分けてふたつの方法がある。(1)正確な減光補正を行う(2)減光の影響の小さい、長波長(例えば可視光ではなく近・中間赤外線)の観測に頼る、というものである。後述するように、星間減光の絶対量は波長が長くなるほど小さくなる。しかし(大気、装置等の)熱的輻射による大きなバックグラウンドノイズなどを考えると、簡単に赤外線観測で置き換えられるケースばかりではない。(1)の場合、一般的にはふたつの波長帯で天体を観測し、既知である(と仮定した)減光の波長依存性と組み合わせて減光の絶対値を計算し、明るさの補正を行う。この“既知の減光の波長依存性”というところが問題となる。私たちは波長依存性を、どれだけ正確に理解しているのだろうか。

3.2.2 星間減光の発見

銀河系を霧の町ロンドンに例えたのはCecilia Payne-Gaposchkin¹⁾であったと記憶している。街中のある交差点に立つ。辺り一面霧に覆われている。動くことはできず、そこから見える情報だけで町全体の地図を作る。銀河系の全体像をつかむ困難さを、彼女はこのように例えた。

星や銀河からの光は、宇宙空間にただよう星間塵によって吸収・散乱を受ける。これを星間減光という。紫外線から(近・中間)赤外線の波長域で観測するかぎり、星間減

光の影響は避けられない。この影響をいかに正確に見積もるか。またはいかに小さくおさえるか。地味でありながら、常に観測天文学者が直面する課題である。

星間減光の存在についての決定的な証拠は1930年、Robert Trumpler によって得られたと言われている。銀河系内の100個の散開星団を観測し、明るさと大きさそれぞれから求まる星団までの距離（光度距離と幾何学的距離）を比較した。その結果、星団が暗い（遠い）ほど、光度距離が大きくなるような系統的な変化を発見した。このずれに関して、ふたつの説明が可能である。遠い星団ほど（平均的に）大きくなるか、もしくは星間空間における減光が存在するか。前者はいかにも不自然である。そこで Trumpler は、遠い星団の星間空間における減光のために光度距離が大きくなると考え、星間減光の影響を考慮すればふたつの距離が一致すると結論した[2]。

さらに彼は、星間減光が選択減光（selective extinction；減光の波長依存性）を示すことを明らかにした。距離ごとに星団の星の平均的な色超過²⁾を並べると、遠い星団ほど大きな値を示す（本来の色より赤く見える）。また、減光によって青くなる天体は見当たらない。これは、短い波長ほど大きな減光を受けるといふ減光の波長依存性が存在するからである。

可視光の波長域では、減光量はほぼ波長の逆数に比例する。これは、波長と同程度の大きさの星間塵が減光に寄与していることを意味する。ある意味これは、私達にとって幸運であった。可視光域で、私たちが検出しようとする大きさの減光の波長依存性が存在する。この事実によって減光を“補正する”という作業がきわめて容易になったのである。もし塵の平均サイズが今よりも大きく、可視光で波長依存性がほとんどなければ、より長波長（赤外）の観測が可能になるまで、減光の正確な補正はできなかつたであろう。補正ができなければ、宇宙における距離の測定に大きな影響を与えたはずである。

星間塵による減光の波長依存性は星間減光則（または単に減光則）と呼ばれている。減光則の正確な測定は、ふたつの意味で重要である。ひとつは、星間塵の性質を理解し、そのモデルを確立するために。星間減光を測定している研究者には、これが目的である人が多いだろう。しかし減光則は、ある天体の減光を補正しその物理量を知るためのツールとして、より重要である。星間減光則の研究で有名な Edward Fitzpatrick が述べているように、減光を生み出す星間塵の研究をしている人の数よりも、星間減光の影響を取り除きたいがために減光則を“使う”人の方が圧倒的に多いだろう[3]。

3.2.3 星間減光則：減光の波長依存性

歴史的に減光則は、縦軸に $E(\lambda-V)/E(B-V)$ 、横軸に波長の逆数をとって表現される。このグラフを減光曲線とも

2) 天体の観測された色と本来の色との差。減光だけで色超過が説明できる場合、色超過の大きさは減光量に比例する。

3) この表示方法では紫外域での波長依存性が強調されるが、赤外波長のそれは見づらくなる。赤外線観測が専門の私はあまり好きではない。

4) その区別をつけるために減光則が使われるのである。

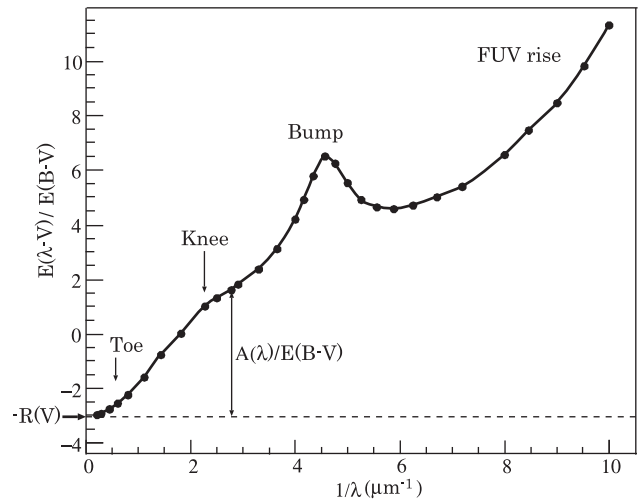


図1 銀河系の“平均的”な減光曲線。縦軸は $E(\lambda-V)/E(B-V)$ 、横軸は λ^{-1} 。 $\lambda \rightarrow \infty (\lambda^{-1} \rightarrow 0)$ の極限での値が $-R(V) = -A(V)/E(B-V)$ に相当する。基本的には短波長ほど減光が大きい、という相関があるが、曲線の傾きは Toe, Knee, FUV rise とよばれる波長あたりで変化する。炭素系の星間塵による大きな吸収(bump)も特徴的である。

呼ぶ(図1, 銀河系内の平均的な減光曲線。 B, V はそれぞれ中心波長 $0.44 \mu\text{m}, 0.55 \mu\text{m}$ の観測波長帯)。横軸が波長の逆数であるためわかりづらいが³⁾、光子のエネルギーと星間塵との散乱断面積の関係を表していると考えればよい。縦軸の $E(\lambda'-\lambda)$ は色超過を表し、観測されたの色 $(\lambda'-\lambda)$ と天体固有の色 $(\lambda'-\lambda)_0$ との差を表す量である。波長 λ での減光量(減光の絶対値) $A(\lambda)$ を使うと $E(\lambda'-\lambda) = A(\lambda') - A(\lambda)$ と書ける。つまり図1の縦軸は

$$\frac{E(\lambda-V)}{E(B-V)} = \frac{A(\lambda)}{E(B-V)} - \frac{A(V)}{E(B-V)} = \frac{A(\lambda)}{E(B-V)} - R(V)$$

となり、 $E(B-V)$ で規格化された減光量に比例する値となる。ちなみに $A(V)/E(B-V)$ は ratio of total to selective extinction と呼ばれ、 $R(V)$ で表される。ある視線方向において減光曲線が既知ならば、興味ある天体の $E(B-V)$ を測定することで減光量 $A(\lambda)$ を決定できる。

$R(V)$ を用いると、図の縦軸は

$$\frac{E(\lambda-V)}{E(B-V)} = R(V) \left\{ \frac{A(\lambda)}{A(V)} - 1 \right\} \quad (1)$$

となり、 V バンドで規格化した波長 λ の減光量に比例する値となる。そもそも縦軸を $A(\lambda)/A(V)$ とすれば感覚的にわかりやすいのだが、専門家の間では $E(\lambda-V)/E(B-V)$ が好まれているように思う。理由は、減光量の絶対値を観測から直接求めることが困難だからである(減光によって暗いのか、距離が遠くて暗いのか区別がつかない⁴⁾)。それに対し色超過は、距離に比べて正確に決めやすい。天体のスペクトルタイプ(本来の色)がわかれば容易に測定でき

る。そのため2つの色超過の比をとる $E(\lambda-V)/E(B-V)$ が好んで使われるようになった。

3.2.4 減光則は1パラメータで記述できる？

減光則はどの視線方向でも一樣なのか、異なるのか。そして減光則を使ってどれだけ正確に減光量を計算できるのか。Trumplerによる減光の波長依存性の発見以来、この分野の研究者が問い続けている問題である。

1960年代にはすでに、可視、近赤外それぞれの波長域で視線方向による減光則の違いが議論されていた[4,5]。70年代に入ると、紫外-可視光での減光則のバラツキは周知の事実となり、その変化に規則性はあるのか、例えば銀河系内の位置によって決まるのか、などという議論がなされている[6]。これらの観測結果は、減光則は一樣ではなく、場所ごとに適当な減光則を使わなければ正確な減光補正ができない、ということの意味している。

視線ごとに個性のある減光則をひとつの式にまとめてしまったのが Jason Cardelli らである[7,8]。紫外線から赤外線にかけての減光則が、ひとつのパラメータ $R(V)$ で記述できる、と彼らはいう。つまり $R(V)$ さえ測定できればその視線方向の減光則が決まってしまう、という衝撃的な主張である。

$R(V)$ は星間塵のサイズとかかわるパラメータである。大きな塵によるグレーな（波長依存性のない）減光のときには分母の色超過 $E(B-V) = A(B) - A(V)$ が小さくなり、 $R(V) \rightarrow \infty$ となる。また Rayleigh 散乱 ($A(\lambda) \propto \lambda^{-4}$) の時には $R(V) \approx 1.2$ となる。このパラメータを介してダストのサイズに関する情報を入れてしまえば、減光則が一意に決まる(図2)。より具体的には $x[\equiv \lambda^{-1}]$ と $R(V)$ を用いて

$$\frac{A(\lambda)}{A(V)} = a(x) + \frac{b(x)}{R(V)}$$

ですべての視線方向の減光則が表現できる、というのが Cardelli らの主張である。 $a(x)$, $b(x)$ は紫外/可視光と赤外線とでそれぞれ異なる x の関数である。

図2には、様々な $R(V)$ に対応する減光曲線を示す。大

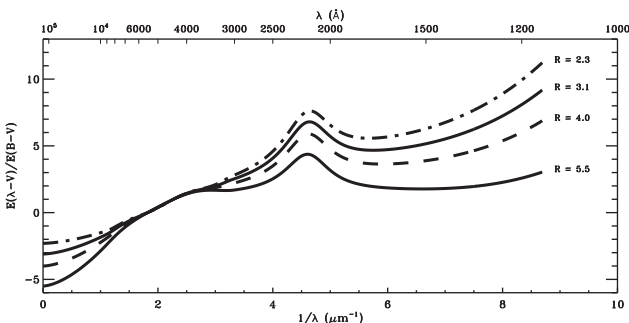


図2 減光曲線の $R(V)$ 依存性[9]。縦軸は $E(\lambda-V)/E(B-V)$ 、横軸は λ^{-1} 。曲線のパラメータは Cardelli *et al.* (1989)[8] による。曲線は上からはそれぞれ $R(V) = 2.3, 3.1, 3.0, 5.5$ に対応する。

きな $R(V)$ は大きなサイズの星間塵に対応するので、波長依存性が小さくなる。一方、小さな $R(V)$ 、つまり小さな星間塵の場合には波長依存性が強くなる。観測的には、星形成領域などの、塵が大きく成長していると考えられる場所で $R(V)$ が大きくなることが確認されている。

3.2.5 星間減光則の個性の再認識

1990年以降、減光則に関する研究は一息つくことになった。IUE (International Ultraviolet Explorer) 衛星の観測が終了し、 $R(V)$ に敏感な紫外域のデータ供給がストップしたことが一因である。その後10年、研究に大きな進展は見られなかったが、研究者の意識に変化があった。減光則がひとつのパラメータ $R(V)$ で一意に決まる、という認識がじわじわと広がっていったのである[3]。Cardelli らの論文[8]の引用数のグラフを見ればそれがよくわかる⁵⁾。当初年間20-30件だった引用数が1996年には年間100件を越え、現在では年300件以上にも達している。

しかし、本当にたったひとつのパラメータで、減光則を記述することができるのだろうか。Cardelli らの研究は、実はたった29個の星しか使っていない。IUE 衛星のミッションが終了したとはいえ、そこには数百個の星の紫外線

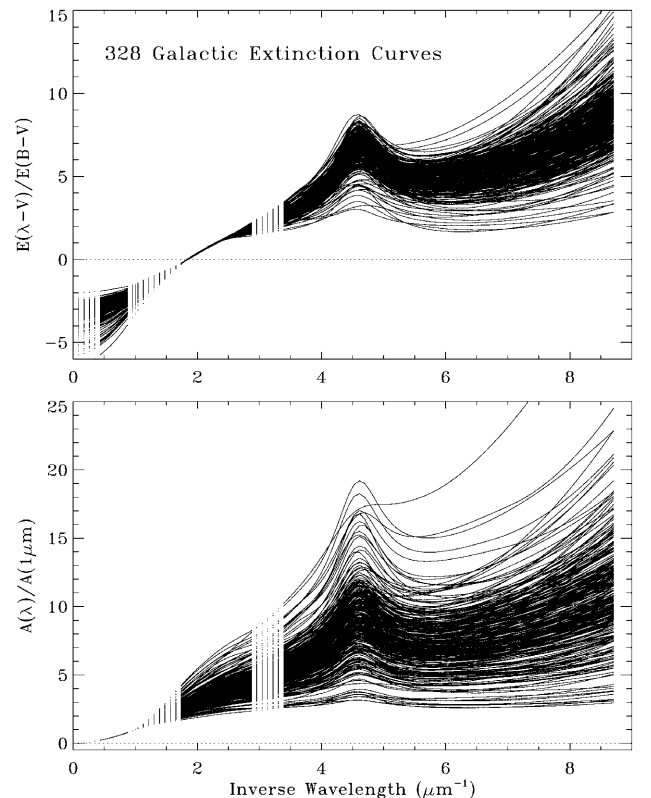


図3 銀河系内、328個のOB型星を用いて測定した、それぞれの視線方向の減光曲線[10]。上図は縦軸に $E(\lambda-V)/E(B-V)$ 、横軸は λ^{-1} 。下図は縦軸を $A(\lambda)/A(1 \mu\text{m})$ に変換している。Vバンド ($\lambda^{-1} = 1.8$) で0になるように規格化しているために、上図で $1.8 < \lambda^{-1} < 2.5$ の範囲で揃って見えているが、下図の様に書き直すとこの範囲でも大きくばらついているのが分かる。 $\lambda^{-1} < 0.45$, $0.83 < \lambda^{-1} < 1.8$, $2.7 < \lambda^{-1} < 3.3$ にある点線は、観測データの無いギャップを表している。

5) http://ads.nao.ac.jp/cgi-bin/nph-ref_history?refs=CITATIONS&bibcode=1989ApJ...345.245C

6) 近赤外線の3つの波長帯 J(1.25 μm), H(1.65 μm), K_s(2.17 μm) バンド

スペクトルがアーカイブに埋もれている。これらのデータと、近赤外線全天を観測した 2MASS (Two micron all sky survey) のデータ⁶⁾を組み合わせ、より正確な減光則の比較を行ったのが Edward Fitzpatrick と Derck Massa だった。彼らの研究により、星間塵の多様性が見えてきたと同時に、減光則を数少ないパラメータで記述したいという観測家の希望も、厳しい現実にはさらされるようになった。

Fitzpatrick らは、上記のアーカイブから 328 個の星を選び出し、個々の星について紫外-近赤外の波長域での減光曲線を測定した。サンプル数が Cardelli らの研究に比べて 10 倍以上になり、減光曲線の導出方法も改良され、より精密な議論が可能になった[10]。

彼らが測定した、すべての減光曲線を図 3 に示す。上下にふたつならんでいるが、上の縦軸は $E(\lambda-V)/E(B-V)$ 、下の縦軸は $A(\lambda)/A(1\mu\text{m})$ であり、式(1)にあるように本質的には同じものだと考えてよい。サンプルが多すぎてわかりづらいかもかもしれないが、各視線方向での個性が非常に大きいことを理解してもらいたい。紫外/可視/近赤外のそれぞれの波長域での曲線の傾きと $R(V)$ との間に明確な相関がないことも合わせて、とてもひとつのパラメータ $R(V)$ だけでは表現しきれない、と Fitzpatrick らは結論づけている。たとえパラメータ $R(V)$ で決まる減光則を使ったとしても、減光の補正には各視線方向の個性による系統誤差が含まれてしまう、ということである。

3.2.6 近・中赤外線波長での減光則

紫外-可視光がだめなら観測波長を赤外線へ伸ばせばよい。図 1 が示すように、波長が長ければ長いほど、減光量の絶対値は小さくなる。つまり、減光曲線が視線方向ごとにばらついていても、補正する減光量が小さければ、系統誤差は小さくなる。さらに近赤外波長域では、減光則は普遍的であるという主張がつい最近まで主流であった。

1980 年代以降、 $0.7 \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$ の範囲において減光則は $A(\lambda) \propto \lambda^{-\alpha}$ で近似できると考えられてきた。小さなバラツキはあるものの、ほとんどの視線方向では $\alpha \approx 1.8$ に一致する[11, 12]。これは近赤外線波長域での "universality" と呼ばれている。つまり紫外/可視光を避けて近赤外線を観測すれば、どの視線方向でも正確に減光を補正できる、ということである。

しかし紫外/可視光の場合と同様、赤外線観測装置の進歩とともに、universality に対する異論が出るようになった。銀河系ハローにある薄い星間塵を見通す方向で[13]、銀河円盤にある星間塵の影響が見える銀河系中心方向で[14]、 $\alpha \approx 1.8$ とは大きく異なる値 ($\alpha \geq 2.0$) が得られた。さらに後者の観測では、視線方向による違いも検出されている。視線方向による変化は、数 10 度という大きなスケール[15]から数 10 秒角という小さなスケール[16]まで、存在するようである。まだ 14 天体とサンプルは少ないが、紫外-可視波長と同様な手法で減光則を研究している Fitzpatrick は、少なくとも 10% 程度、 α にばらつきがあるとしている[17]。

さらに長い波長、中間赤外線にいくとどうだろうか。こ

の波長での研究は、2003 年の Spitzer 宇宙望遠鏡打ち上げ後、急速に進展している。そしてまたこの波長でも、視線方向ごとに異なる減光曲線が得られている。Spitzer を用いた大規模な銀河面サーベイと 2MASS のデータを組み合わせた研究によると、3-8 μm の波長帯の $A(\lambda)/A(2.2 \mu\text{m})$ の値は、視線方向によって 10-20% も変化する[18]。銀河面を広く観測しているため、渦状腕などの銀河の構造に関係する変化もあるようだが、これだけ波長が長くなっても星間塵の個性は消せないようだ。

3.2.7 精密測定は可能か？

観測装置の進歩とそれによる測定精度の向上、大規模サーベイによる大量のデータ、これらによって見えてきたのは星間塵の多様性であった。精度よく調べれば調べるほど、個々の視線方向の違いが明らかになり、簡単なパラメータだけでは減光則を表現できない現実にとどりつく。平均はあくまで平均であり、ほとんどすべての個々の減光曲線は平均曲線とは一致しない。これらの事実は、星間減光の精密な補正はきわめてむずかしい、ということを示している。

もちろんあるひとつの天体について、広い波長域で観測し、減光則を求めることは可能である。しかし、興味ある天体すべてについてこのような観測をする、というのは現実的ではない。同じ減光則が適用できる範囲はせいぜいひとつの星団くらいだろうか。系外銀河の中の天体など、すべてに対して異なる減光則が(厳密には)適用されるべきであろう。

さらに、減光補正による系統誤差がどれくらいになるのか、この見積りも非常にむずかしい。平均的な減光曲線を使うならば、図 3 にあるようなバラツキが系統誤差として組み込まれなければならない。どう頑張っても、この誤差を数%に押さえられるようには思えない。

減光の補正に関する系統誤差を小さくするためには、やはり長波長の観測をすべきであろう。例えば 5 μm で観測すれば、可視光の V バンド (0.5 μm) に比べて減光の絶対値はおよそ 20 分の 1 まで小さくなる。 $A(V) = 1$ 等の減光を受けた天体の場合、 $A(5 \mu\text{m}) = 0.05$ 等となる。5 μm の減光量を見積もるための減光則の系統誤差(視線方向によるばらつき)が 20% 程度であるならば、 $A(5 \mu\text{m}) = 0.05$ 等という値を ± 0.01 等、つまりほぼ 1% の精度で減光量を測定できることになる。

しかし、赤外線波長域での減光則の個性に関する研究はまだ始まったばかりである。いったいどれくらい大きなバラツキをもつものなのか、まだ誰にも予想はできない。この分野の進展が、光赤外線天文学を精密科学へ押し上げるための重要な要素となるだろう。

3.2.8 どの論文が正しい？

最後に、これまでの議論とは異なる方向から精度について考えてみたい。いかに適切な減光則を選び出せるかという、人為的な要因である。

銀河系の中心領域(銀河中心)には、銀河系で最大級の

星団や星、超大質量ブラックホールなど興味深い天体が多い。しかし太陽系は中心から約 8 kpc 離れた銀河円盤内にあるため、円盤内の星間塵が中心からの光を強くさえぎってしまう。この大きな減光を補正するために、可視-赤外線減光則を求める声が大きかった。

1985年、銀河中心方向に関する減光の波長依存性が George Rieke と Marcia Lebofsky によって発表された [19]。可視から中間赤外の波長域にわたる重要な測定であり、これによって銀河中心の天体の（減光を補正した）物理量を計算できるようになった。

しかし今日、彼らの減光則を見直してみると、多くの波長帯で測定精度がよくなかったことがわかっている⁷⁾。特に 5–10 μm の範囲では、減光量を 2 倍近く過小評価している。波長依存性 a に関しても過小評価しているようである。

上の事実は、決して Rieke と Lebofsky の研究の価値をおとしめるものではない。当時と比べはるかに性能のよい観測装置や、新しい減光則の導出方法が使えるようになった今だからこそ言えることである。当時の観測精度では、彼らの減光則で十分であったかもしれないし、先駆的な研究という意味では、今でも称賛されるべきものである。

問題は、Rieke と Lebofsky の減光則を使った減光補正がいまだに続けられている、という現実である。現在の観測装置から得られる精度を考えれば、彼らの減光曲線を使うべきではない、という論文がいくつも発表されているにもかかわらず。

しかし単に減光を補正したい（つまり、減光則の少々の違いには興味のない）大多数の研究者は、このような情報をどう得ればいいのか。Rieke & Lebofsky 論文の引用回数は 2000 回近く⁸⁾になるが、その大多数は減光を補正するために引用したものである。彼らの測定精度に疑問を投げかける論文数は、1%にも満たない。2000本近い引用論文から、1%の論文をわざわざ探して読むだろうか。そして、2000回という引用回数が Rieke & Lebofsky 論文の信頼度を表している、と考える研究者が多数であったとしても不思議ではない。私を含む、間違いを指摘する研究者がもっと大きな声をあげなければいけないのだが、減光則を応用する研究分野はあまりにも広い。

同様の問題は、他の有名な減光曲線の論文にもあてはまるかもしれない。基礎的な値を（多くの人が使っているの

だから）正しいと考えて利用する多くの人々と、その値自体に疑問を持つほんの少数の人が存在するとき、この状況は覆すことができるのだろうか。本当に光赤外天文学が精密科学であるならば、大多数の“減光則を利用する”研究者から、この値はおかしいと声が上がってくるだろう。まだそれに気づかない程度の精度だと言うこともできる。ただ、少しずつではあるが、より正確な減光則が必要だという声が私にも寄せられる。光赤外天文学が精密科学への進化段階であることは間違いないだろう。

参考文献

- [1] W.L. Freedman and B.F. Madore, *ARA&A* **48**, 673 (2010).
- [2] R.R. Trumpler, *Lick Observatory bulletins* **14**, 154 (1930).
- [3] E.L. Fitzpatrick, *ASP Conference Series* **309**, 33 (2004).
- [4] B.T. Lynds and N.C. Wickramasinghe, *ARA&A* **6**, 215 (1968).
- [5] H.L. Johnson and J. Borgman, *BAN* **17**, 115 (1963).
- [6] D.C.B. Whittet, *MNRAS* **180**, 29 (1977).
- [7] J.A. Cardelli, G.C. Clayton and J.S. Mathis, *Astrophys. J.* **329**, L33 (1988).
- [8] J.A. Cardelli, G.C. Clayton and J.S. Mathis, *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
- [9] E.L. Fitzpatrick, *PASP* **111**, 63 (1999).
- [10] E.L. Fitzpatrick and D. Massa, *Astrophys. J.* **663**, 320 (2007).
- [11] P.G. Martin and D.C.B. Whittet, *Astrophys. J.* **357**, 113 (1990).
- [12] D.C.B. Whittet, *Dust in the Galactic Environment* (Bristol: Institute of Physics Publishing, 2003).
- [13] K.A. Larson and D.C.B. Whittet, *Astrophys. J.* **623**, 897 (2005).
- [14] S. Nishiyama *et al.*, *Astrophys. J.* **638**, 839 (2006).
- [15] D. Froebrich *et al.*, *MNRAS* **378**, 1447 (2007).
- [16] A.J. Gosling *et al.*, *MNRAS* **394**, 2247 (2009).
- [17] E.L. Fitzpatrick and D. Massa *Astrophys. J.* **699**, 1209 (2009).
- [18] J. Gao *et al.*, *Astro. Phys. J.* **707**, 89 (2009).
- [19] G.H. Rieke and M.J. Lebofsky, *Astrophys. J.* **288**, 618 (1985).
- [20] T. Sumi, *MNRAS* **349**, 193 (2004).
- [21] S. Nishiyama *et al.*, *Astrophys. J.* **680**, 1174 (2008).
- [22] D. Lutz, *The Universe as Seen by ISO*, ed. P. Cox and M.F. Kessler (ESA SP-427; Noordwijk: ESA, 1999), 623.
- [23] S. Nishiyama *et al.*, *Astrophys. J.* **696**, 1407 (2009).

7) 可視域では Sumi 2004 [20] や Nishiyama *et al.* 2008 [21]、赤外域では Lutz 1999 [22] や Nishiyama *et al.* 2009 [23] などが指摘している。

8) 正確には 2010年10月20日現在で 1851回 (NASA/ADS による)。