

スペックル干渉

安藤 裕 康*

はじめに

1970年にフランスの光学研究者のラベイリーが天文の世界に耳慣れない“スペックル”というものを導入してきた。それは従来、望遠鏡の分解能がシーイングサイズ(普通 $1''$)でおさえられているものを、理論分解能にまで向上させる方法であるというので多くの天文屋さんが興味を持った。私なども1974年夏頃にこの仕事を知り、大いに刺激されて天文若手夏の学校などで議論したりいろいろの人と話しているうちに、ここで紹介するはめになりました。深遠な理論は光学の専門家にまかせて、ここでは天文屋の立場から紹介します。

“スペックル”というのは“小さな斑点”という意味ですが、この用語が光学の分野で用いられたのは比較的新しくレーザーが出現した1960年代である。粗い面にコヒーレントな光(レーザー光)を当てて反射光を観察すると、斑点状の不規則模様が生じるが、これは不規則に反射された光の干渉による。これを“スペックルパターン”といい、各斑点を“スペックル”という。この現象ははじめレーザー光の回折、散乱、ホログラフィー等のコヒーレント結像にノイズとして現われ、その軽減のために盛んに研究された。一方その性質がわかってくると、逆に“スペックル”の観察から物体のマイクロな変位、変形、振動、面の粗さなどの測定に応用されている。他方ラベイリーは光学における“スペックル”と大気を通した天体写真撮影との間に存在する類似性に気づいて天文における“スペックル干渉”を考え、ハール天文台の5m鏡を用いて、普通の方法では測定できない星の直径、連星系の間隔を測定して天文学に新しい分野を切り開いた。

スペックルとは

ラベイリーが気づいた類似性とはこうである。普通、光学系では物体(又は光源)と結像面の間に波面を乱す媒体がなければレンズ等によって結像面にレンズの特性だけで決まる像が得られるが、波面を乱す媒体(粗い面など)があれば“スペックル”となって観察される。上記で述べたレーザを用いた光学実験では光源分布がわかっていて波面を乱す媒体の性質を“スペックル”を分析して求めた。ラベイリーは大気の流れを上記の媒体として考え、大気の流れの性質がわかれば“スペックル”を分析することにより光源の分布(ここでは天体の

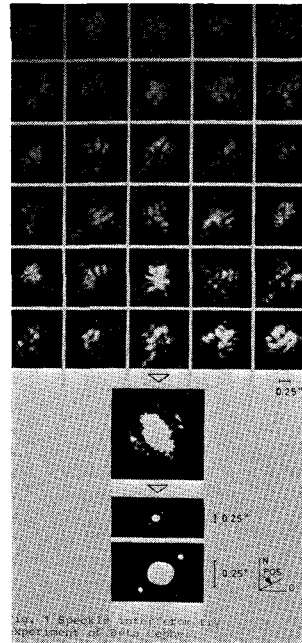


図1 スペックル干渉によるケフェウス座 β 星の像

輝度分布)が推定できると考えた。ただし大気の流れのタイムスケールより短い時間で観察しないと“スペックル”は見えない。ではこのようにして得た“スペックル”には何が写っているのだろうか。点光源とみなされる1つの星を望遠鏡で 10^{-2} 秒の程度(大気の流れのタイムスケールより短かければよい)の露出で単色光の

写真をとってみると、乾板には多数の点として写っている。1つ1つの点の広がり(一番小さなものは口径 D と光の波長 λ で決まるエアリーディスクの大きさ($\sim \lambda/D$ 秒)であり、点の全体の集合の広がり(平均としてシーイングサイズに等しく、(実はこの点の全体の平均的広がり(長時間露出の写真の星のシーイングサイズを決めているのである。))点の数は大気の流れが大きいほど増える。1つの点として写るべきものが多数の点として写るのは大気によって波面がゆがめられるからである。二重星の場合には乾板に2つの点の対が多数写っている。しかもその二重星の間隔が小さいとその対の間隔はどれも同じである。しかし、二重星の間隔が大気の流れの大きさ(望遠鏡からみて)より大きいと乾板に写る二重星の間隔は対によって異なるのでこの場合には間隔は決められない。一般に広がった(シーイング程度とする)天体の場合でも二重星の場合と同様で1つ1つの“スペックル”にはやはり広がった天体の像が写っているのである。実はこのような現象を我々は無意識のうちに日常経験している。有名なものでは明治の文豪、夏目漱石の作品の「三四郎」の中にも登場する。主人公が三四郎池に写る若い女性のゆらゆら揺れる姿をじっと観察しているところが出てくる。これは光学の言葉では“スペックル”を見ていることになる。鏡のように静かな水面の場

* 東京天文台 H. Ando: “Speckle Interferometry”

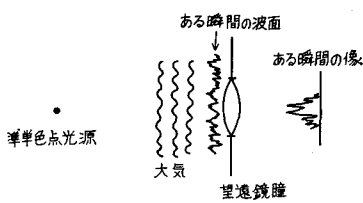


図2 大気が存在する場合の望遠鏡による結像概念図

合、そこに写る女性の姿は一見して判断でき、目鼻立ちなど細部についても（即ち美人かどうか）すぐ判断できる。しかし風が吹けば池は波立ち、女性の姿が揺れてすぐには美人がどうか判断できない。ひどいときには男女の区別さえつかない。池にたつ波のスケールが大きい場合には頭、胴、足といったものが人間本来の配置になく、波の動きと共に個々ばらばらに動き、時には頭が2つになったり足が4本に見えたりする。これがいわゆる“スペックル”というものである。しかし、この場合目鼻立ちといった細部は個々の“スペックル”の中では本来の姿を保っていて判断がつくし、全体の姿もしばらくすればわかる。この判断というのは実は人の目がこのばらばらのものを記憶に止め、適切に重ね合せて像を作っていることであり、写真で長時間写したのでは元も子もない。さらにこの波が乱れてスケールの小さい波が加わってくると、細部までも判断がつかず目が4~8ケにも見えたりする。こうなると人間の目で正しく重ね合せることが難しくなり男女の区別さえも出来なくなる。全体が大きく乱れている上に細部まで乱れているからである。さざ波の場合には頭、胴、足といった大きな部分はずれないが細部が乱れる。人の目には男女の区別は出来るが美人かどうか判別出来ないのである。文学向きだが天文向きではなくなる。

この現象はまさしく天文の眼視観測で経験することと同じである。惑星など見ていると、大気の安定している時には細部がよく見え、大気が乱れてくると全体はあまり動かないのに細部が見えなくなったり、全体が踊りだしたり変形したりします。水面との関係で言えば乱れのスケールのちがいがイメージの表われ方に出ているからである。これが“スペックル”だとわかると、何も新しいことではない。昔から二重星の眼視観測に無意識に応用されていたのである。観測者は時折大気の良い時に一瞬分離される間隔を記憶しそれを頭の中で重ねて間隔を求めていた。しかし乱れが少しでも大きくなると見分けが難しく個人の能力差が生じ“名人”なるものが誕生したのである。従ってラベリーの功績は“スペックル”の天文的意味付けと客観的なイメージの解析法を与えたことだと言える。

スペックルからイメージへ

上で述べたようにスペックルからイメージへ進むには

まず個々のスペックルを分離して重ね合せばよいことがわかる。図1に実際にドイツのワイゲルトによって観測された30枚の二重星β Cepのスペックルが示されているが、個々の写真を見てこれが二重星の対だと同定しにくい。これは個々のスペックルが不完全な上にスペックル同士重なったり、ノイズが存在したりしているからである。直接、単純に写真からイメージを作るのはむずかしく、統計的な方法が導入された。まず結像の概念図は図2に示すようになっていいる。今単色の点光源が大気の乱れと望遠鏡を通して像面にできる瞬間の像分布を $t(x, y)$ とする。もし大気の乱れがなければ $t(x, y)$ は口径 D と波長 λ で決まる大きさ (λ/D 秒程度) のエアリーディスクになる。大気の乱れがあると $t(x, y)$ は“スペックル”となる。もし光源が $o(x, y)$ という分布を持っていたとすると瞬間の像分布 $i(x, y)$ は

$$i(x, y) = o(x, y) \otimes t(x, y) \quad (1)$$

として表わされる。ここで \otimes はたたみ込み(コンボリューション)を意味する。図1の二重星の30枚のスペックル写真は各瞬間における大気状態に対応した $t(x, y)$ から(1)式によって与えられる $i(x, y)$ を示している。この写真を単に重ねる(従来長時間露出写真)と $t(x, y)$ の代りに $\langle t(x, y) \rangle$ ($\langle \rangle$ は平均の意味)で置きかえられる。 $\langle t(x, y) \rangle$ は前にも述べたようにスペックルがつぶされてシーイングサイズに広がったものになり、(1)式で与えられる像はシーイングサイズより小さい模様は示さない。ラベリーは像空間でスペックルを見分けて重ねる代りにそれをフーリエ変換した空間周波数空間で重ね合せることを考えた。(1)式をフーリエ変換すると、

$$I(u, v) = O(u, v) T(u, v) \quad (2)$$

ここで $I(u, v)$, $O(u, v)$, $T(u, v)$ はそれぞれ $i(x, y)$, $o(x, y)$, $t(x, y)$ をフーリエ変換したものである。大気の乱れがない場合には $T(u, v)$ は位相を除けば周波数の o から D/λ で決まる周波数まで広がったディスク(望遠鏡の収差は無視する)となる。従って得られる像の分解能はその空間周波数までである。大気の乱れがある場合 $t(x, y)$ は“スペックル”になるが、今簡単のためエアリーディスクが平均としてシーイングサイズに広がりその中でランダムに分布しているものとする。この場合ランダムに分布したエアリーディスクのフーリエ変換 $T(u, v)$ は1つのエアリーディスクをフーリエ変換したものと絶対値は同じで位相が異なったものの多数の重ね合せであり、しかも平均の位相のずれはシーイングサイズに比例している。そのため $T(u, v)$ をそのまま重ねたのでは長時間露出写真と同じで、シーイングサイズに相当する空間周波数より大きい波数では $T(u, v)$ は平均として0となるからである。ラベリーはそこで位相に

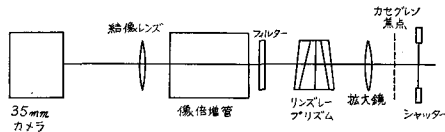


図3 スペックル撮影のための光学系

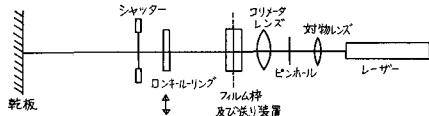


図4 スペックルの2次元パワースペクトルを作る装置

関する情報はあきらめて、絶対値の2乗 $|T(u, v)|^2$ を重ね合わせることをすれば D/λ で決まる空間周波数まで生きのこることに目をつけた。具体的な処理法はこうである。まず多数のスペックル写真をとり、それらをレーザー光で光学的にフーリエ変換して1枚の乾板に焼付ける。(写真だから自動的に絶対値になっている。) 即ち、

$$\langle |I(u, v)|^2 \rangle = |O(u, v)|^2 \cdot \langle |T(u, v)|^2 \rangle \quad (3)$$

となる。ここで $\langle |T(u, v)|^2 \rangle$ は数が多ければ平均的に決まったものであり、(3)式より $|O(u, v)|^2$ がわかる。 $\langle |T(u, v)|^2 \rangle$ は実際には点光源とみられる星と同様な処理を施すと $|O(u, v)|^2$ は1であるのでそのときの $\langle |I(u, v)|^2 \rangle$ に等しい。このようにして得られた二重星の $|O(u, v)|^2$ が図の中程にあるもので縞の間隔の逆数が間隔を与え、その直角の方向が位置角を与え、縞のコントラストが等級差を表わしている。どの方向に明るい星があるかは位相を落しているので決まらない。(3)式はまさに(1)式のパワースペクトルであり、それと同等な像空間の自己相関関数を作っても解像できることがわかる。図1の下段の写真はこのようにして得た自己相関関数である。

観測のやり方

観測装置はキットピーク天文台4mカセグレンに着けられたものを紹介する。図3に光学系を示す。カセグレン焦点の後ろに拡大レンズを置き実効焦点距離を476mにする。これはスペックルを1つ1つ分解するためのもので1mmが約0.4にしてある。レンズレイブリズムは大気分散を打ち消すように置かれ、準単色光にするためバンド巾20~50Åの干渉フィルターが置かれる。スペックル写真では大気の乱れのタイムスケールより短い時間(0.1秒~0.001秒)でシャッターを切る必要があるので像増倍管が用いられる。この像を普通の35mmカメラで写す。キットピークでは露出時間0.02秒で南中近くの星を250枚セットでとる。半分は目的の星、残り半分は $\langle |T(u, v)|^2 \rangle$ を求めるための星(等級、天頂距離の近いもの)を写している。ドイツのワイゲルトは1m望遠鏡で行なって目的星30枚程度で十分であるこ

とを示している。得られたフィルムは図4に示すような装置で処理される。フィルムは液体の中に入れられ順次送られる。これはフィルム面での乱反射を防ぐためである。レーザー光からの光はピンホールを通して広げられレンズを通してフィルム面の像をアナログ的に二次元フーリエ変換し、スクリーン上の1枚の乾板に絶対値として自動的に重ねられる。目的の星と比較の星について処理を行ない $\langle |I(u, v)|^2 \rangle / \langle |T(u, v)|^2 \rangle$ を求めると目的の天体の像のパワースペクトルが得られる。

その他望遠鏡の収差、SN比などの問題についても詳しい話があるがここでは詳細は省く。ただシーイングが悪い場合はやはりこの方法でも良い像は得られず、今まで観測者の経験では2"~3"ぐらいのシーイングは必要とする。又前にも述べたようにシーイングサイズより広がったものはこの方法では処理できない。ヘール天文台の5m鏡で連星系を観測すれば理論的には 10^{-2} 秒露出、50Å巾、 10^4 枚の写真をとると眼視等級で14等級まで可能である。しかし実際には9等級程度までしか行なわれていない。日本の188cm鏡では6等級といったことになる。しかしこれは今後変りうる。等級差についても写真でやる限り3等級ぐらいが限界であるが、写真より大きいダイナミックレンジをもつ検出器を使えばもっと大きな等級差でも可能と思われる。“スペックル干渉”の長所として他のマイケルソン干渉計などにくらべて暗い天体まで観測出来ることであり、普及していく要素もっている。

今後の発展

スペックルは今まで述べたように位相の情報をすてざるを得なかったのであるが、これでは天体の“完全な絵”は書けない。位相情報を何とか保持できないものか。今はこの方向で努力が続けられている。今の段階で次の3つの方法が考えられている。

(i) 観測する星のすぐ近く(1"以内)に比較光源(星でもよい)をおいて位相を回復する比較ビームとして利用する。

(ii) スペックルをフーリエ変換しその複素振幅(振幅と位相を含む)の自己相関関数を作り、その位相を統計処理することによってもとの位相を再現できる。

(iii) 同じ大気状態の下で比較星と目的星のスペックルを同時に個別撮影し、2つを比較して対応するスペックルで良質のもの2~3枚を選択し、デジタル化してフーリエ変換して重ねる。これはスペックル1つ1つを位相をそろえて重ねていることになる。

以上のように改良の努力はなされているものの、まだ実験段階である。しかし近い将来可能なものから実現されていこう。スペックルのポイントは分解能向上にある。その点から言えば分解能は望遠鏡口径の1乗でし

か向上せず、光量で決まる仕事は口径の2乗で差をつけられる。中小口径と5m鏡の光量差は桁の差であるが分解能はファクターの差である。口径が桁違いに大きい望遠鏡が出来たら話は別だがまだまだ中小口径でも一流の仕事が出来る余地はある。例えば新しい連星系の発

見(軌道面が視線と直角でも可能)恒星の直径、銀河系の微細構造など興味ある問題に取り組めるのである。次の機会には紹介記事でなく、手持ちの結果について書きたいと念じている。

「天文学将来計画についての検討会」報告

天文学研究連絡委員会・将来計画小委員会主催になる公開の将来計画検討会が、天文学会春季年会の期間を利用して開かれた。5月9日と11日の2回、それぞれ午後6時から約3時間にわたって、東京大学天文学教室にて行われ、各地から集った総計90人ちかくの参加者が、活発な意見交換を行った。第1回は、小委によって行われたカードによる問題意識の発掘とその整理結果の報告を中心に討議が進められ、“どうしてKJ法カード方式がとられたか? ”、“カードの結果をこれからどう生かすか?”などが主に議論された。これらの間に対して出された答の要点を以下に記す。●いろいろ今までは違った大きな情勢の変化があるので、広い範囲から自由な意見を大規模に募る必要があった。●成文化した将来計画を作る予定であるが、それには、今まで以上にビジョンというべきものを盛りこみたい。●具体的計画の原案は小委員会および小委員会の依頼で加わってもらう人々で作成するが、その人々が考える上で、基本的背景として皆の問題意識を認識する必要がある。●カードには多くの情報が含まれているので、できるだけ多くの人に見てもらいたい、意見を書いて下さった人の立場を尊重して、小委員会の責任において貸し出す。●小委員会には特別な権限は何もないが、リーダーシップをとって委員以外の方々からも秀れた考えを集め、皆の合意を促進することによって、その中から信頼性のある将来計画が生まれるよう努力する。●限られた数の小委の能力には限界があるので、各分野での意見調整、小委への意見の伝達には、各自の積極的努力を期待する。

また第2回は、個別の問題を中心に討議された。主な論点は次のとおり(順不同)。●位置天文学も改革の時期に来ている。●組織と人材への配慮から、大型装置は共同利用が望ましい。●太陽物理も基本的分野であり、将来計画を立てつつある。●大気圏外観測によって、即応性のある地上精密観測装置の需要が急増している。●宇宙研の拡充改組が実現するなら、天文学の性質上、高エネルギー分野の他に、飛翔体による観測の不可欠な分野として、赤天文、太陽・太陽系物理、恒星・銀河物理、理論天文学などが包括されねばならない。●光学

技術によって像を作るような望遠鏡を用いて宇宙空間から観測する将来計画は、必要なら早急に立てなくてはならない。●国外の条件の良い所に大型望遠鏡を置く計画を、長期的視野に立って練る。●現存の中・小型装置を利用して、国外における天文観測の試験研究を始める。●電波でも大気圏外観測は必要となる。●地上からの赤外観測の強化を行うなら、急ぐことが肝要である。●早く大型宇宙電波望遠鏡が活動しだして、天文学振興に大きな力となることを期待する。●地方の大学、特に女子大にも天文学の講座を置いて欲しい。●天文学は実験物理学とは異って、急に様式を変え難い学問ではあるが、新しい必要性に対処できるように、いくつかのタイム・スケールをもった将来の青写真を作る。

なお席上、小委の一人である小田氏より、我国の大気圏外観測の将来計画についての説明があり、その実行機関としての国立共同利用研究所設立の可能性が強まってきたことにも言及された。

以上が速記録をもとにしてまとめた要点であるが、出席された方で是非補足が必要と思われる方は、ご連絡いただきたい。また、将来計画小委では、今までの広範な意見を基にして検討すべき問題を整理し、今後の検討に参加を依頼する人々を選び、6月18日の本委員会にその素案を計る予定である。夏の間は国際天文学連合総会もあるので、本委員会の了承のもとに実質的検討にかかるのは今秋以降と予想される。したがって、公開討論会に参加された方々はもちろんのこと、この報告を見られてからでも遅くはないと思われますので、ご意見があれば、小委員会宛にお寄せ下さい。ご意見はできるだけ具体的に富んだビジョン(将来の見通しに基いて、何時、何処で、誰が、何を、どうするか、の実行可能な計画時系列)を歓迎します。原案に関する公開討論などは追って行う予定です。

昭和54年5月21日

天文学研究連絡委員会
将来計画小委員会

(文責 小平)