

地上大望鏡を用いた回折限界イメージング

中 島 紀

〈カリフォルニア工科大学〉

地上の大望遠鏡を用いて、その回折限界の空間分解能で天体の構造を再生するための二つの受動的干渉計イメージング技術、スペックルイメージングとノンリダundantマスキングを紹介する。それぞれの技術の長所短所を含めて原理的解説を行ったのち、今までに得られた天文学的成果を略説し、将来を展望する。

1. はじめに

観測天文学は、どの波長においても感度と空間分解能の向上に伴って進歩してきた。地上からの高分解能干渉計観測は、時間的に変化する部分的に可干渉性の光によって作られる数多くの瞬間的な干渉パターンから、空間スペクトラム解析によって天体の空間構造を引きだそうとする技術である。この技術は、天体を長時間露出により観測する場合のシーイング限界を克服し、望遠鏡が潜在的にもつ分解能、例えば、JNLT の場合には 15 ミリ秒角を達成する。但し、スペーステレスコープが正常に作動するとき、その長時間露出によって感度と分解能の両方に飛躍的進歩が期待されるのに比べ、地上からの干渉計観測は、感度を犠牲にして高分解能を得る。これは、個々の干渉パターンの寿命が短いことと、各々の干渉パターンの高次相関をとることによる必然の結果である。感度と分解能が相いれないために、地上からの高分解能観測は現在の天文学のなかで特異な位置を占めている。

高分解能観測技術としては、受動的干渉計観測の他に、歪んだ波面をリアルタイムで補正して、

Tadashi Nakajima: Diffraction-limited imaging with ground-based telescopes

長時間露出を行おうとするアダプティブオプティクスがあり、部分的成功も収めている。しかし回折限界に達するためには、人工のガイド星を目標天体の近くに作り波面を照らさなければならない、という未解決の難問がある。ここでは、1980年代に、適用限界まで含めて原理的に理解され、実験的にも確立された二つの受動的干渉計イメージング技術、スペックルイメージングとノンリダundantマスキングの解説を試みる。

2. 天体からの個々の光子の検出

瞬間的干渉パターンがどうできて、時間と共にどのように変化するかを理解することが、干渉計イメージングへの半分道中である。大気が乱流的に混じりあうと、屈折率の局所的揺らぎが生じる。単独星からの平面波は、屈折率の局所的な小さな揺らぎによって何度も散乱された結果、部分的に可干渉性な波面となる。波面は乱されているが連続性は保ち、ある有限の距離以下しか離れていない波面上の二点の位相差は、平均して 90 度以下である。このような距離をコヒーレンス長と呼び、可視域では 10 cm 程度である。口径 5 cm の天体望遠鏡に入射する波面は可干渉性で、星像は回折環を持つ。

部分的に可干渉性の光をコヒーレンス長より大

大きな大望遠鏡で集めると、ランダムな干渉パターン、スペックルパターンができる。主鏡面をコヒーレンス長の可干渉性の部分に分割して考えると、大望遠鏡は10 cmの小望遠鏡の束と等価である。小望遠鏡のペアの各々は、焦点面上に干渉縞をつくる。縞の間隔と向きは、ペアのつくるベクトル、基線、で決まるが、縞の位置、位相、はランダムである。8 mの主鏡上に4 mの同一の基線は多数あるが、このようなときその基線はリダンダントである（繰り返される）という。同一基線のつくる干渉縞（同じフーリエ成分）は焦点面上でランダムに混じりあい、縞のコントラスト、振幅、は減衰する。減衰の程度は、同一基線の数、リダンダンシィできまる。様々な減衰した干渉縞をたし合わせた結果できるパターンは、とても綺麗な縞模様にはならず、斑点模様（スペックル）となる。この中には、回折限界までの分解能の情報が、ノイズに埋もれながらもはいつている。フーリエ振幅の減衰が、ノイズの増大と同時に起こるのは自然界に普遍的な現象である。

振幅の減衰を避けるためには、同一基線がふたつできないような小望遠鏡の組み合わせを、主鏡に穴のあいたマスクをかけて選べばよい。この手法をノンリダンダントマスクング（NRM）と呼ぶ。コヒーレンス長より充分小さい穴が二つだけあるなら、振幅が1（100パーセント）で位相がランダムな干渉縞が得られる。穴が三つになると振幅1の干渉縞が重ね合わされたパターンができる。このとき個々の干渉縞は動き回るが、三つの位相の和、クロージャー位相をとると、ランダム位相は相殺されて常にゼロとなる。ゼロのクロージャー位相は、単独星が分解されないことを反映する。

乱流層が風に流されるとスペックルもNRMの干渉縞も、時間とともに鈍ってしまう。回折限界までの分解能を保つためには、10ミリ秒程度の露出時間でスナップショットを次々に取らなければならない。いくら天体が明るくても、スペックル

パターン一つあたりのS/N比は、大気のノイズのために有限である。回折限界までの情報は、何枚ものスナップショットからの平均として求める必要がある。他方、理想的なNRMの場合には、スナップショットあたり無限大のS/N比が原理的には得られる。現実には、観測する天体の明るさは有限であり、光の粒子性が光子ノイズとしてS/N比を厳しく制約してくる。大気によって乱された波面は、個々の入射光子の時間変化する波動関数となり、スペックルパターン、或いは干渉縞は、個々の光子検出の際の確率分布となる。NRMの場合、光子ノイズのききかたが厳しいために、少しの大気のノイズは我慢して、コヒーレンス長程度の穴を使うことが多い。暗い天体の観測では、個々のスナップショットにはまばらに光子が分布するだけで、スペックルにも、干渉縞にも、とても見えない。実際には二次元光子数検出器が用いられ、個々の光子の到着場所と時間(x,y,t)が観測量となる。

3. 空間スペクトラム解析による画像再生

ここまでで、単独星のスペックルパターン、或いはNRMの干渉縞のできかたを考えてきた。即ちポイントスプレッドファンクション（PSF）を扱った。では、広がった天体の場合のスペックルや干渉縞はどうなり、その天体の構造は、数多くのスナップショットからどうやって再生されるのか。

目標天体の構造は、目標天体の個々のスペックルパターンに、仮想上同時観測できる単独星のスペックルパターン（PSF）のたたみこみ関数としてかくれている。だから広がった天体のスペックルは、単独星のそれ（PSF）よりつねに鈍っている。広がった天体のスペックルもPSFもランダムに変化するものの、広がった天体のスペックルの鈍り具合には、共通のものがある。

小さな穴を用いたNRMの場合、単独星に対し

て干渉縞の振幅は1, クロージャー位相はゼロと、測らずともわかっており、広がった天体に対する、振幅、クロージャー位相とも、直接天体の構造を反映する。コヒーレンス長程度の穴を用いると、単独星に対しても大気の影響で振幅は1とはならないが、クロージャー位相の平均は相変わらずゼロである。

先にも述べたように、個々のスペックルパターン、或いは干渉縞の質は、大気と光子ノイズにより厳しい制約を受けている。だから数多くのスナップショットからとりだして、天体構造を鈍らせずにたしあげられる量が良い観測量となる。大気のせいで、スペックルパターンの絶対位置や干渉縞の絶対位相は、良い観測量ではない。スペックルをそのままたしあげれば、シーイングディスクになり、干渉縞をたしあわせれば縞は消える。スナップショットから共通の構造を取り出す自然な観測量は、二点、三点の相関関数、或いはそれらをフーリエ変換したパワースペクトラム、バースペクトラムである。パワースペクトラムはフーリエ振幅を与えるが、これだけでは真の天体構造の180度の反転に対する曖昧さが残る。例えば、親子連れが遠くにいて、どれだけ離れているかはわかるが、子供が右なのか左なのかわからない。複素数としてのバースペクトラムの位相は、クロージャー位相であり、このクロージャー位相が天体構造の非対称性の情報を持っている。つまり、親が右、子が左なのがわかる。天体が反転対称なら、クロージャー位相はゼロになる。スペックルパターンに対してクロージャー位相が測れるということ不思議に思われるかもしれないが、スペックルの場合、リダンダントな三角形をつくる基線が、ノイズの多いクロージャー位相を作り出すと考えれば良い。三角形の分布は連続的である。

スペックルイメージングの場合、像再生にあたってまずもとめるのは天体構造のフーリエ振幅である。これは、目標天体の平均パワースペクトラムと比較用の単独星の平均パワースペクトラムと

の比からもとまる。もし比較星が目標天体の近くにあり同時観測が可能なら、目標天体のフーリエ振幅は正確にもとまるはずだが、現実には交互に観測する。大気の平均的振る舞いは予想不可能で、ここに不可知のエラーが入り込む余地がある。それゆえ人工比較星がつくれたなら、受動的干渉計観測もおおいに助かるのである。スペックルの場合にも単独星の平均クロージャー位相はゼロとわかっている。目標天体の平均バースペクトラムからもとめたクロージャー位相が、そのまま天体構造のクロージャー位相となる。較正がいらぬのはクロージャー位相の大きな利点である。天体構造のフーリエ振幅とクロージャー位相に、再生画面上での天体の位置を与えてやると、フーリエ位相がもとまる。スペックルイメージングの場合、フーリエ成分が連続的なため、逆フーリエ変換により像再生ができる。

NRMの場合には、フーリエ成分が離散的なため、電波干渉計で開発された開口合成法を利用して像再生する。開口合成では、フーリエ振幅の較正は先におこなわない。クロージャー位相からフーリエ位相を求め、比較星と目標天体のそれぞれの離散的フーリエ成分をまず求める。そのまま逆フーリエ変換して、それぞれに対して一種の像、ダーティビームとダーティマップを得る。ダーティ(汚い)なのはマスク上の穴の分布がまばらでフーリエ空間のサンプリングが不完全なためである。ダーティビームを天体像で畳み込んだのがダーティマップだから、この畳み込みを解いて(ディコンボリューション)天体像を得る。このとき使われるのが開口合成のため開発されたクリーン等のディコンボリューションアルゴリズムである。像面でディコンボリューションすると、観測されなかったフーリエ成分は内挿されるが、複雑な天体構造の再生にはフーリエ空間の十分なサンプリング(色々な基線の組み合わせ)が必要である。

スペックルイメージングの場合、大望遠鏡全体

を使うため、光子の数は多くフーリエ成分のサンプリングも良いが、基線のリダダンシィのために大気のノイズを多く含み個々データの質は低い。またフーリエ振幅の較正が難しく、コントラストの良い画像は作り難い。そのせいかりダダンシィの大きくない2 m級の望遠鏡で良い結果をだしている。どちらかというとい暗い天体の簡単な構造の発見に、或いは多くの天体を観測して統計をとるのに適している。NRMでは、大気のノイズを極力抑えて高質のデータを少しづつとる。時間さえかければデータ量は増やせる。明るい天体のコントラストの良い画像を得るのに適しているが、多くの光子を捨てるため暗い天体は観測できない。NRMには望遠鏡が大きいことによる不利はない。NRMには、将来の長基線干渉計アレイによるイメージングの先駆けという意味がある。シーイングが1秒角のとき、単独星の像をダイナミックレンジ10：1でつくるための限界等級は、スペckルイメージングで振幅の較正がうまくい

て14等、NRMで11等と見積られるが、限界付近で良い結果を出すのは難しい。但し、限界等級もシーイング次第で、マウナケアで0.5秒角のシーイングがコンスタントに得られるなら2等級深くなる。表紙では、筆者らが3年前にパロマー山の5 m鏡のNRMの実験で求めた二重星像をシーイングディスクと並べてある。70ミリ秒角離れた連星が、30ミリ秒角の分離能で分離されている。像のダイナミックレンジは、30：1である。

4. 高分解能天文学

次にどんな天文学がこれまでなされ、また近い将来狙えるかを少し考えてみたい。それには分解能と限界等級を縦横の軸にとって、その二次元座標にどのような天体、或いは、天体の構造がのっているかをみるとよい(図1)。但し、天体構造が観測可能かどうかは、個々の技術によって達成可能な画像のダイナミックレンジにもよる。今までスペckルイメージングで得られたダイナミックレ

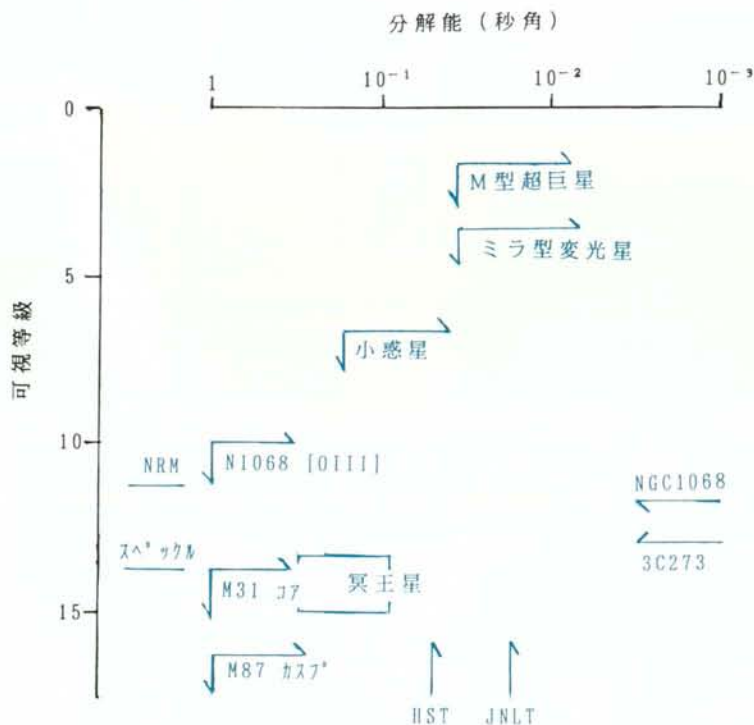


図1 分解能—可視等級図。可視域での、天体(天体構造)の大きさは、明るさの上限を示す。連星は図全体に分布する。NRMとスペckルイメージングの限界等級、スペース テレス コープ(HST)とJNLTの回折限界が添えてある。

ンジは、10：1から20：1，NRMでは50：1である。この事実も考慮して観測対象を見てみよう。

多重星 二重星は、二次元座標全体に分布する。連星観測は、星の質量決定に欠かせない。スペックル干渉計（イメージングではなく振幅のみを使う）で二重星の軌道を求めて経験的な質量—光度関係を改善する作業は、今も続けられている。二重星の光度差を正確に求めるには、NRMがむいている。ハッブル定数を評価する際一つのステップとなるヒアデス星団までの距離を、星団中の分光連星の観測から求める試みもなされている。明るさから見積もると3000太陽質量にもなり理論的にあわないと思われた大マゼラン雲の星状天体、R 136 a が、実は星の集団だったことはスペックルイメージングで確認された。特別重いと思われた星が高分解能でみると多重星だった例は、他にも二つある。

超巨星 ベテルギウスの表面とミラの外形は、NRMにより4、5m級の望遠鏡でマップされた。ベテルギウスには斑点がみられ、ミラは非対称な光球をもっていた（図2）。

太陽系 冥王星はその体に似合わない大きな月を持っており、一種の連星系をなしている。その軌道は、過去10年スペックル干渉計で測られてい

る。非球体の小惑星は、自転しながら天球上を高速で動いて行く。その連続観測により、三次元構造を求めたい。また、偏光マップを求めることも今後の課題である。

系外銀河核 銀河系外に目を向けると、コンパクトで表面輝度をもっとも高いのは、近傍の活動的銀河核 NGC 1068、クエーサー 3C 273、そしてアンドロメダ星雲の中心核である。活動的銀河核とクエーサーの場合、分光観測から空間構造が予想されている。大望遠鏡で分解されるのは、中心核の高エネルギー幅射に照らされて原子やイオンの狭い輝線を発する、中心から数十から数百パーセクの領域（狭輝線領域）である。輝線の空間分布は複雑なことが予想され、高いダイナミックレンジが要求される。実際スペースステレスコプがうつした活動的銀河核、NGC 1068の狭輝線領域は、非常に複雑な構造をもっていた。アンドロメダの中心には、銀河の他の部分とは全く動き方の違う力学的に切りはなされたコアがある、と分光観測から考えられている。このコアの星の分布を高い分解能でもとめたい。これも高いダイナミックレンジが要求される観測で、スペックルイメージングでは難しい。

5. 将来への展望

これまで色々な天体に対して高分解能観測が試みられてきたが、天文学的意義を認められたのは星に対する結果であった。今後も、NRMを用いた超巨星のマッピングと二重星の光度差の決定、及びスペックルイメージングを用いた二重星の軌道決定とその応用は確実に成果が期待される分野である。星の天文学に関しては、基線を伸ばし分解能を上げて行く意義があり、地上大望遠鏡や干渉計アレイの建設が進歩をもたらすであろう。

星以外の天体はというと、一般に暗く構造が複雑でコントラストの良い画像をつくらないと成果が期待できない。星以外に関しては、いまは0.1秒角の分解能（1 mの基線）でよいから、感度とダ

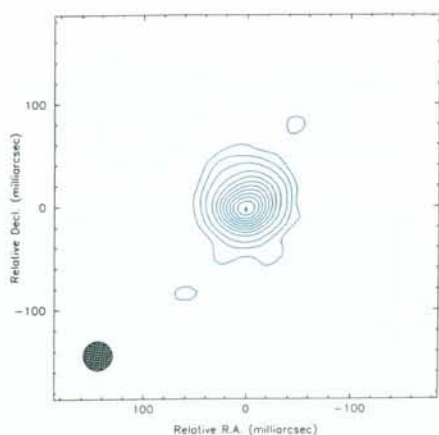


図2 NRMでもとめたミラのマップ (Haniff et al. AJ. Submitted 1991). 700.7nmの疑似コンティニウムで見ると、光球が明かに非対称であるのがわかる。

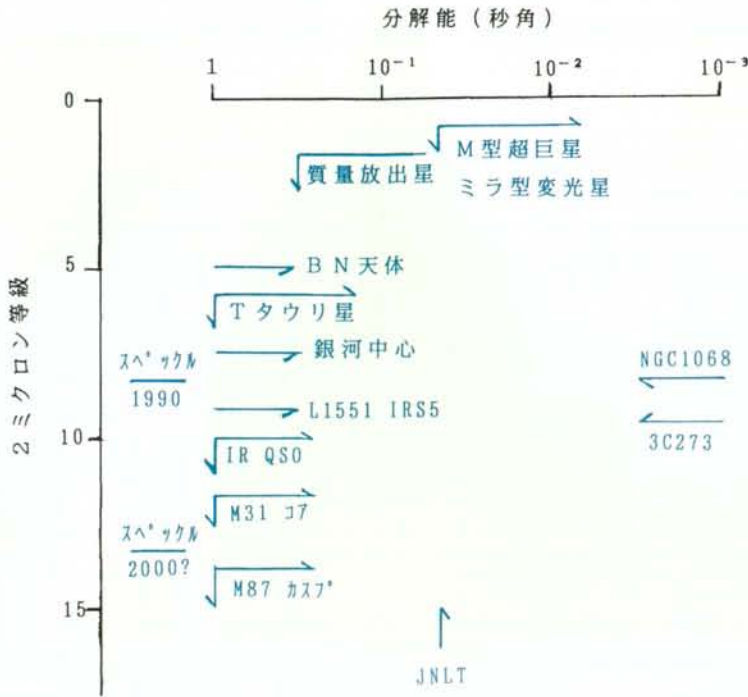


図3：分解能—2ミクロン等級図。2ミクロン帯での、天体（天体構造）の大きさ、明るさの上限を示す。連星は図全体に分布する。現在（1990）と将来（2000？）のスペックルイメージングの限界等級、JNLTの回折限界が添えてある。

イナミックレンジの向上が求められていると筆者は考える。これは、本来スペースステレスコープでなされるはずだった天文学を列挙してみれば明らかである。スペースステレスコープがかりに回復しても、一つの衛星で見られる天体の数はかぎられている。もし日本が1 mのイメージング専用の望遠鏡を軌道か月に乗せたなら、21世紀の可視域の天文学をリードできることは間違いない。人工比較星なしのアダプティブオプティクスは、13等星に対しシーイング限界の3倍の分解能が得られたら大成功といえよう。もし人工比較星が作れるが、暗くてアダプティブオプティクスが作動しないなら、受動的干渉計を使って良い画像が得られよう。

これまで可視域に限って議論をしてきたが、干渉計イメージングの原理は赤外域でもかわらない。実は、地上からの高分解能イメージングに大きな期待がもてるのは、赤外域である。特に近年二次元検出器の進歩が著しく、熱背景放射もそれほど大きくない近赤外域が狙い目である。コヒーレンス長は、波長の1.2乗に比例し、2ミクロン

では、50 cmから1 mにも達する。JNLTの8 m鏡でもリダンダンシィは大きくならずスペックルイメージングもやり易い。今のところ限界等級は検出器の読みだしノイズとコズメティックス（死んだピクセル、傷）できまり8等程度だが、JNLTができるころには熱背景放射できまる13等に近づくであろう。2ミクロン帯での分解能—限界等級図（図3）をみると、星生成領域に観測対象が多い。一番近いタウルス暗黒星雲の場合、JNLTの分解能は7天文単位となる。現在Tタウリ型星の二重星の比率が、スペックルイメージングを使って0.1秒角の分解能で求められつつある。明るい活動的銀河核も観測でき、核近傍の星の分布が得られるであろう。銀河の合体の結果と考えられるIR QSOの中には、非常に近接した合体まじかの二重核があるかも知れず、そのサーベイがまたれる。

ミラのマップを提供してくれたC. Haniffに感謝します。