

## 観測的可視化プロジェクト

富阪幸治

< 国立天文台理論天文学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1 >

はじめに

短期連載「シミュレーション天文学」のまとめに代えて、天文シミュレーションの一つの発展方向として、観測的可視化プロジェクトについて書いてみたいと思う。

数値シミュレーションはどのようなときに行うか？

発展方向というからには、「数値シミュレーションはどのような研究手段か」というところから考えたい。これまでに知られていないような天文現象が観測されたとする。これを説明するモデルが妥当なのかどうかを検討するときに、通常、我々が扱う対象は非線形多成分の方程式系によって支配されており解析的な取り扱いはできないことが多い。そこで、この問題をコンピュータを用いて数値的に解くことによって、その天文現象の物理的本質を明らかにしようとする。これがシミュレーションである。

たとえば、ある星間分子雲の分子線観測で通常は図 1 (a) のようなスペクトルが観測されるのに、(b) のようなものが観測されたとする。新たな現象である。「ガスの落下現象をみているのではないか」と予想をつけ、適当な初期モデルを仮定し、落下しつつある星間分子雲の温度、密度、速度構造などを流体力学に基づいてシミュレートしてみる。ここまですべて第 1 段階のシミュレーションと呼ぶことにする。さらに進んで、観測されるスペク

トル(図 1 [b])と比較するため、第 1 段階のシミュレーションの結果(落下しつつある星間雲の流れの場)に対して、その分子線に関する輻射輸送方程式を数値的に解き、放射される分子線スペクトルを予想し、それを観測と比較し一致するところまで調べれば物理的解釈は完璧となるだろう。

この放射される輻射を予想するのが第 2 段階のシミュレーションである。ここまで来ると、たとえば、その結果、中心ほど高い温度と密度の分布が分子線の自己吸収プロセスによってこのようなスペクトルを作り出していることがわかったりする。

「物理はわかった」？

歴史的には第 1 段階のシミュレーションのみを行って、天体の物理的な構造や進化が理解できれば、「物理はわかった」といってそれでお仕舞いという場合も多かった。これには、観測と比較を行うだけの多数のモデルを計算するのに十分な計算機資源に恵まれていなかったり、大きな構造から小さなものまで同時に解くのに十分なダイナミックレンジが計算機の実力の制限から得られなかったという過去の事情もある。しかし、「物理はわかった。それでおしまい」という感覚が生まれたのは、天文シミュレーションの役割を狭くとらえ、理論天文学の枠内での実験、言葉を換えていえば理論を証明するための実験とだけ見ていたか

らではないだろうか<sup>1</sup>。今や観測天文学も含んだ天文学における実験の役割を果たすのが天文シミュレーションである。これには第1段階（これを物理シミュレーションと呼ぶ）と第2段階のシミュレーション（その観測的可視化と呼ぶ）が組み合わさって実現されねばならないことは想像して頂けるだろう。それが可能な時期に我々は到達している。

### 観測的可視化とは

物理シミュレーションの結果得られるのは密度、温度など分布を表す数値的データであり、この結果を我々にとって理解しやすくするために加工し（たとえば等密度線 [ 2次元 ] や等密度面 [ 3次元 ]、流線を書くなどの方法で）図示することを、流れの可視化 (visualization) と同じように「可視化」と呼び、物理シミュレーションから研究過程として物理的本質を抜き出すためには必須の手順である。

直接、実験装置につけられた測定器から物理状態が得られる物性物理実験や観測衛星が測定する地球磁気圏の観測と異なり、天文学観測において捕まえられるのは、一部にニュートリノなどの素粒子や重力波なども含まれるが、主には天体から放出される電磁波である。いずれにしても天体が出した電磁波などを測定して天体の実相に迫るという意味で「間接的な測定」である。そのような

特徴を持つ天文学という分野の特殊性のため、シミュレーションももう一歩進めて、物理シミュレーションの結果を、ある方法（電磁波、素粒子、重力波など）で観測した場合にどのように観測されるのかというところまでシミュレーションを行う必要がある。たとえば、密度がある値に等しくなる面を表示した等密度面（物理シミュレーションの可視化）表示するのにとどまらず、ある観測で光学的深さが1に等しくなる光球面を表示すれば、観測したときにどのように見えるかを直接予想することができる。このように、科学的に現実的に可視化することを最近、我々は「観測的可視化」と呼んでいる。もちろんこのとき、観測的可視化の結果は天体のある部分のある方向から見たときに観測される電磁波のスペクトルに限らず、観測天文学で通常利用される位置 - 速度図、積分強度分布図なども作成し観測結果と直接比較しようというのである。

### 観測的可視化の例

「観測的可視化」シミュレーションを実行しようとする物理シミュレーションの数値結果を元に輻射輸送方程式を解いて天体から放射される電磁波のスペクトル、強度分布などを知らなければならない。今月号の須佐氏の記事にあるように、輻射輸送方程式は空間3次元、電磁波の伝搬方向2次元、電磁波の振動数方向1次元の時間を除いても計6次元の独立変数空間を持つため計算量は非常に大きなものになる。

筆者ら（富阪、和田、西合、今枝、小山）は、

---

<sup>1</sup> もちろん、物理がわかることは必須である。結果が羅列してあるだけの論文では、結果を得るためのプログラムを配ってもらった方が。。。と思ってしまうのは筆者だけだろうか。

「観測的可視化」を行うために、最近、局所熱平衡を仮定せず（つまり、輻射に直接結びつく励起温度分布が輻射輸送の結果として決まっている取り扱い。nonLTE と呼ばれる）散乱を含まない、一酸化炭素など分子線の輻射輸送方程式を解くモンテ・カルロ法に基づくコードを開発した。空間  $128^3$  格子、各格子から 200 本の光線を飛ばしてその光線路上での輻射輸送方程式を解き、10 個の準位の励起温度を計算すると、緩和法で 30 回ほど繰り返すと収束する。この計算には、ベクトル型並列計算機 VPP5000 の 32 個の CPU を同時に使っても 4 時間以上を必要とする。つまり国立天文台計算機センターの VPP5000 システムで現在許される最大の計算機パワーを投入して 4 時間かけると進化の 1 コマが「観測的可視化」されるのである。長いと思われるかもしれないが、実現可能であることが重要である。

その例を図 2 に示す。左側は密度分布、右側はその星間雲を一酸化炭素  $^{12}\text{CO}(J=2 \rightarrow 1)$  ラインで観測したときの（積分）電波強度分布を天球図上にプロットしている。左側の密度分布は上下方向に磁場に貫かれた星間雲が重力収縮してできる回転ガス円盤を横の方から見たときのもので磁気流体力学的シミュレーションの結果得られたものである（天文月報 2000 年 10 月号 604 頁参照）。右側の図はそれを電波天文学で標準的に用いられる分子線で真横から観測した場合の積分強度を表している（真横からというのに特別な意味はない）。図には示していないが、このとき中心部すなわち座標(0,0)付近でのスペクトルを見れば図

1b のような自己吸収と赤青非対称な輝線が「観測」される。図 2 では無限に小さいビームで観測したとして、望遠鏡のビームの大きさの効果は取り入れていないが、それも取り入れられる。ここで示したように、いくつかの代表的な観測手段について、第 1 段階の物理シミュレーションで得られた物理的に起こりうる状態を、直接観測と比較することが可能になっているのである。さらに、まだ観測されていない高い励起順位間遷移の分子線で見るとどのように見えるか、高い分解能で見ればどのように見えるか、ALMAでの観測予想をすることももちろん可能である。

#### 天文シミュレーションの発展方向

この記事では天文シミュレーションの一つの発展方向として「観測的可視化」を取り上げた。現在、国立天文台のスーパーコンピュータシステムをさらに強力なものにする計画を検討している。

我国のシミュレーション天文・コミュニティは国立天文台天文学データ解析計算センターに天文専用のスーパーコンピュータ<sup>2</sup>を持つことで欧米諸国の同様のコミュニティに対して優位な地位を占めてきた。その成果はこの天文月報連載に

---

<sup>2</sup> 1996 年 1 月にスーパーコンピュータ（VPP300/16 総計算性能 24GFlops、総メモリ量 32GB）を導入。2001 年 1 月からはさらに大きな能力をもつベクトル並列型スーパーコンピュータ VPP5000（総性能 576GFlops、960GB）および、重力多体問題専用計算機 GRAPE-5 x 16 台 + GRAPE-6 x 8 台を擁す。前者は連続体シミュレーション、後者は粒子系シミュレーションに最適化されている（天文月報 2003 年 10 月号 534 頁和田桂一氏記事参照）

まとめられている。その条件をさらに活かし、得意分野で我が国のコミュニティーしかできないシミュレーション研究を進めることを目指して、キー・プロジェクト計画というものを考えている。それは、天文学の発展に重要な一歩（ブレークスルー）となる天文シミュレーションを、いくつかのキー・プロジェクトとして採用し、そこに、計算機資源を優先して配分することによって、まねの

できない、シミュレーションを実現することにある。この連載の中にその萌芽を読みとっていただけたものと期待している。

計算機の能力の発展はシミュレーションの質を変化させる。観測的可視化という手法も、計算機の能力の発展によって可能となった。いまや、シミュレーションは観測データと比べられるのである。

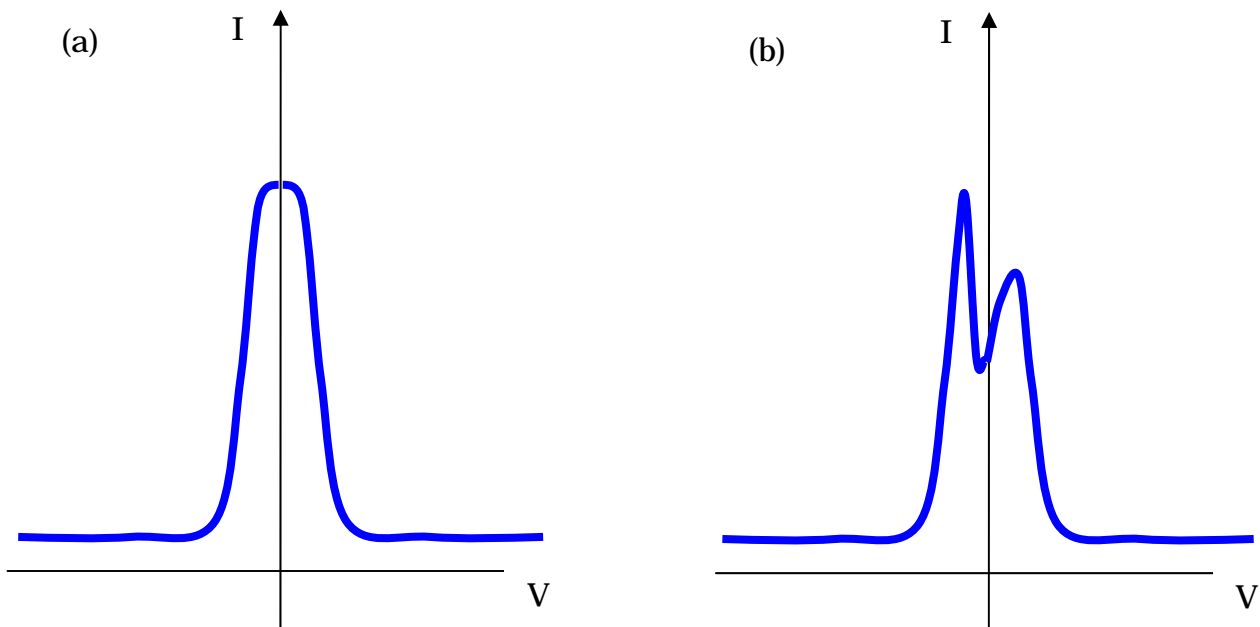


図1：原始星候補天体に落下しつつあるガスの出す典型的な分子線スペクトル。静止している星間雲からのスペクトル (a) と落下しつつあるガスの出すスペクトル (b) の例。

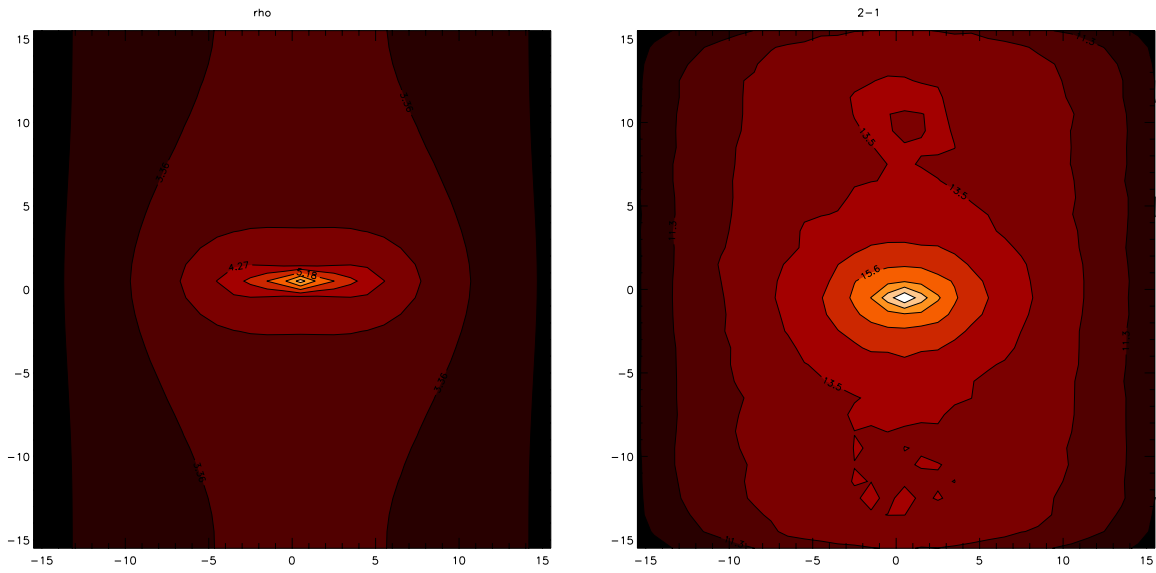


図 2：観測的可視化の例。これは、一酸化炭素  $^{12}\text{CO}(J=2 \rightarrow 1)$  ラインの積分強度図の一例（右）とその元になった 2 次元軸対称密度分布（左）を示したものである。