観測的可視化プロジェクト

富 阪 幸 治
（国立天文台理博士文学部研究系 山181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1）
e-mail: tomisaka@th.nao.ac.jp

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ういうときに行うか？
発展方向というかは、今「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、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、ガスの降下現象を示し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、下降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。ここまでを第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（下降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放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ラルを予想し、それを観測と比較し一致するとこままで調べれば物理的解釈は完璧となるだろう。この放射される放射を予想するのが第2段階のシミュレーションである。ここまでくると、たとえば、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。

図1 原始星ウィザント体に下降しつつあるガスの出る典型的な分子線スペクトルと、静止している星間雲からのスペクトル(a)と下降しつつあるガスの出るスペクトル(b)の例。
「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」といった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能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、理論土木学の枠内での実験、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**。

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るべき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らえ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）と同様に「可視化」と呼ぶ。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、実験装置に付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、主に天体から放出された電磁波である。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で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線（物理シミュレーションの可視化）表示するのとどまらず、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を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と物理シミュレーションの数値結果をもとに転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、転送方程式は空間3次元、電磁波の伝播方向2次元、電磁波の拡散性方向1次元（時間の除いても）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（富岡、和田、西合、今枝、小山）は、

---

**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、光を直接結びつく励起温度分布が放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、一酸化炭素などの分子線の放射輸送方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放射輸送方程式を解き、10個の単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時間かけてと進化の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J=2→1ラインで観測したときの（積分）電波強度分布を地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沿っ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もので磁場流れ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（真横からのこと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認めれば図1(b)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も、望遠鏡のビームの大きさの効果は取り入れていないが、それでも取り入れられる。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段階の物理シュミュレーションで得られた物理的起りうる状態を、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感度観測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ュ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、天文シュミュレーション・コミュニティでは国立天文台のスーパーコンピュータシステムをさ
に強力なものにする計画を検討している。

我が国の天文シミュレーション・コミュニティーは国立天文台天文学データ解析計算センターや天文専用のスーパーコンピュータ*2を持つことで欧米諸国の同様のコミュニティー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（ブレーキスルー）となる天文シミュレーションを、いくつかキー・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。この連載の中にもその萌芽を読みとっていたただものを期待している。

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。

*2 1996年1月にスーパーコンピュータ（VPP300/16 総計算性能 24 GFlops, 総メモリ量 32 GB）を導入、2001年1月
からさらに大きな能力を持つベクトル並列型スーパーコンピュータ VPP5000（総性能 576 GFlops, 960 GB）およ
び、重力多体問題専用計算機 GRAPE-5×16 台 + GRAPE-6×8 台を擁し、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）。

第96巻 第12号 641