

宇宙物理における輻射輸送問題

須 佐 元

〈立教大学理学部 〒171-8501 東京都豊島区西池袋 3-34-1〉

e-mail: susa@rikkyo.ac.jp

宇宙物理の問題には輻射輸送が重要になるものが非常に多く存在する。この文では特に多次元の輻射輸送が重要になる、宇宙再電離の問題と再電離の銀河形成への影響に関して最近の研究の結果を報告する。またこれらの計算の将来への展望についても述べる。

1. 輻射輸送問題と宇宙物理

輻射輸送問題とは光が物質と相互作用しながら伝播していく様子を解く問題である。この輻射輸送の問題は、宇宙において非常に多くの現象に現れる。たとえばそれは星形成の終盤におけるエネルギーの輸送の問題、銀河形成時の電離光子の伝播、浸透の問題、でこぼこな宇宙の再電離の問題などである。また観測される銀河や星のスペクトルを得るには、場合によっては詳細な輻射輸送の方程式を解く必要がある場合がある。さらに言えば超新星爆発のメカニズムを調べるには多次元でのニュートリノの輸送の問題が重要になるが、これは本質的に光子の伝播の方程式を解くのと何ら変わりはない。したがって輻射輸送の問題の一種と考えてよいであろう。また、輻射輸送は宇宙の問題のみならずレーザー核融合などの工学においても重要な物理である。またダークサイドの応用として、核兵器の数値シミュレーターにとっても必須のアイテムであることは周知の事実である。このように多種多様な研究対象を持つ輻射輸送の問題であるが、特に多次元での研究はたとえば磁気流体力学 (MHD) などに比べると進んでいるとは言えない。この理由は実に単純で、もちろん「膨大な計算量が必要だから」である。輻射輸送とは基本的に以下の方程式を解くことである。

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I_\nu = \alpha_\nu I_\nu + j_\nu$$

ここでは I_ν 振動数 ν での輻射の強度を表し、 \mathbf{n} は輻射の伝播方向、 α_ν は輻射の吸収係数、 j_ν は単位時間あたりに発生する単位体積当たりのエネルギーである。問題は I_ν という量が「いつ、どこで、どの方向に、どんな振動数で」伝播しているかを決めなければならないために、時間1次元、空間3次元、方向2次元、振動数1次元の計7次元 (!) 空間で値を決めなければならない量であることである。したがって3次元の普通の流体計算では1次元方向の格子点の数を N とすると時間方向は別にして計算量は N^3 は比例するが、同規模の空間分解能を保証しつつ輻射流体計算に拡張すると、単純に言えば N^6 の計算量が必要になる。もちろんこれははるかに膨大な計算量である。これについては後のほうでまた触れる。

いずれにせよ多次元での輻射流体計算は現在の計算資源では意味のある計算を実行することがきわめて困難である。したがって何らかの近似を行うことになるが、この稿では筆者がかかっている二つの例について紹介することにする。

2. 宇宙再電離の計算

でこぼこな現実的宇宙における電離光子の輻射輸送計算は、現在の宇宙論において中心的課題である宇宙再電離問題への直接的なアプローチであ

る。筑波大学のグループではこの問題に関して [1] 物質の分布は輻射の影響を受けない, [2] 宇宙の電離状態は定常解を求めることで得られる, という二つの仮定をおいて計算を行ったり, 逆にこれ以外の近似は基本的に行わないことにした。 [1] [2] の仮定のおかげで, この計算ではすべての時間ステップで膨大な輻射輸送計算を行う必要はなく, あらかじめ計算されたある時刻での物質分布を与え, それをもとに輻射の輸送を解くことになる。しかしこのような近似のもとでもかなり大きな計算量が必要であり, この問題に関してはこの計算は世界的に見ても類を見ない非常にクオリティの高い研究である。実際にどれくらいの計算時間が必要かは後述する。

さてこの計算によってわれわれはたとえば図1のような現実的な宇宙の電離状態のモデルを得ることができる。このような電離度の分布を得ることができると, 数値的に計算した領域を「観測」することによって重要な情報が引き出せる。たとえば計算領域にクエーサーを置き, その光が地球に届く途中で受ける吸収量を実際の観測と比べて

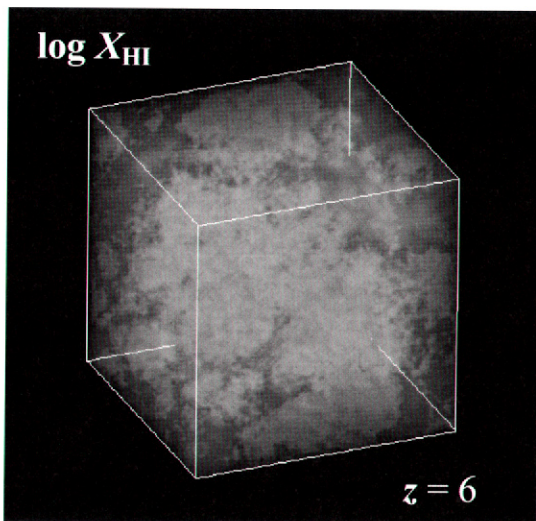


図1 計算した宇宙の電離状態をボリュームレンダリングの手法によって表したもの。濃淡は中性水素の割合を表し, 白色の濃い部分は中性度の高い領域を表す。

見ると, かつて宇宙を電離する紫外線光子がどれだけあったかを見積もることができる。その結果によると紫外線の輻射強度は, $z > 5$ の時代に z の増加とともに急激に減少したということがわかる。同様の結果は, 確率論的な手法を用いて観測データを解析することによって得られているが²⁾, 定量的な値もおさえるためにはこのような数値計算が不可欠となる。このような計算で次に調べるべき問題は, より高赤方偏移の電離の様子であり, それによって宇宙背景放射観測衛星 WMAP で最近得られた, 非常に早い宇宙再電離を説明できる紫外線電離光子の量の進化のモデルを構築することである。しかしながらこのような紫外線はそもそも宇宙の中で形成された若い銀河などから放射されるものである。したがってすべてを統合的に扱うには, やはり第一世代天体形成, およびその後の銀河形成過程を含めた輻射流体計算が将来的には重要になる。その実現可能性に関しては後で触れる。

3. 電離宇宙での銀河形成

前の章では宇宙全体の電離の進み具合の計算の話であったが, この章では個々の銀河の形成に紫外線光子およびその輸送過程がどのように影響するかについて述べる。紫外線によって電離されているガスは, 電離に伴って紫外線による加熱を受ける。したがってあまり軽い銀河(重力ポテンシャルの浅い銀河)は加熱された高圧ガスを保持することができずにガスを失ってしまう。このような現象は「光蒸発」と呼ばれ, 小さい銀河の形成の抑制のメカニズムとして働くことが知られている。しかしながらこのような紫外線による加熱過程は, 紫外線が銀河の内部まで到達できるかどうか強く依存している。一方輻射輸送の効果により, 高密度の領域には紫外線はなかなか浸透できず, 「自己遮蔽」によって電離および加熱を免れる可能性がある。特に現実的な3次元の世界では, 形成途上の銀河には, でこぼこした内部構造

が期待されるので、本当にどの程度のがスが蒸発し、銀河から失われるかは、3次元で輻射輸送を取り入れた数値シミュレーションを行わなければ見積もることはできない。そこでわれわれは3次元の流体計算に輻射の伝播方向を制限した近似を取り入れ、比較的小さい銀河の光蒸発の様子を調べた³⁾。その結果、[1] ビリアル速度が 10 km/s よりも小さい銀河では、激しい光蒸発が起き、輻射輸送の効果を含めても、ゆらぎの9割以上が星形成をほとんど起こさずに蒸発してしまう。[2] しかしすべての場合に蒸発してしまうわけではなく、速度が 10 km/s 程度の天体、あるいは宇宙の再電離時期の付近で形成された天体では、内部構造のでこぼこのピーク付近で蒸発しない成分が残り、そこで星形成が起きうる、という2点が明らかになった(表紙の左側写真)。この結果によれば、いわゆる CDM 宇宙モデルのサブストラクチャー問題(現在の標準的な宇宙論に従うと銀河よりも小さな天体がたくさんできすぎる問題)が再電離によるフィードバックで解決する可能性がある。そのほかにもわれわれは観測されている非常に暗い銀河の起源を説明する可能性も指摘している³⁾。またこのような単体の銀河形成シミュレーションで、輻射輸送を取り扱った計算は世界的に見て初めてのものであることを強調しておく。われわれはこのほかにも、低次元の計算結果を解釈し、電離光子の浸透の具合が星形成率をコントロールすることによって、天の川のような大きな銀河の形態を決める可能性があることも指摘している⁴⁾。この一連の研究の次の目標は大きな銀河の形成を計算することであるが、計算の分解能を保持したまま全体のスケールを大きくすると、ざっと 100 倍の計算能力が要求される。これは既存の計算機および計算方法では現実的ではないが、計算方法の工夫も含めて近い将来必ず取り組まなければならない課題である。これによってよりリアルな天の川銀河の形成のシナリオが解き明かされると期待される。

4. 究極の輻射流体計算へ —動くフル6次元計算—

さてこのように宇宙物理にとって重要な輻射輸送問題は多々あるが、現在までにおいて「動く輻射流体計算」が時間1次元+空間3次元+振動数1次元+方向2次元の計7次元で、宇宙物理の分野で解かれたことは過去にない(兵器に関しては当然不明である)。理由は単純でとてつもない計算量が要求されるからである。いくつか具体的に例を挙げてみよう。たとえば私も参画した前述の筑波グループのフル6次元計算は、輻射輸送に関しては基本的に何の近似もなく解いているが、時間方向のステップ(つまり流体の時間発展)は解けていない。またコロラド大学のグループ⁵⁾は流体はきちんと解く(つまり時間方向にもきちんと積分する)ものの、輻射輸送本体に関しては独特の近似法を用いており、次元数を大幅に落として計算できるようにしている。私が行った銀河形成に関する輻射流体計算も、流体部分は完全に解いているものの、輻射輸送と取り扱う際に散乱を考慮せず、限られた数の放射源しか取り扱わないために、方向の自由度を大幅に減らして計算を行っている。これらの近似はもちろんそれぞれの問題の本質に迫るために行われているわけだが、やはりそれぞれ欠点があり、完全な計算を行うことが求められている。

それではこの7次元の完全な輻射流体計算を行うと、計算量がどの程度になり、その結果どれくらいの規模の計算機があれば意味のある計算ができるようになるかを見積もってみよう。今ここでは例として筑波大のグループで行われたフル6次元計算を時間方向に積分するとどの程度になるのかを見積もることにする。筑波大学のグループで行っている計算は空間方向に 128^3 の格子点、方向にも 128^2 の格子点を切っている。振動数空間に関しては、宇宙再電離問題に特有の性質を用いることにより、ほとんど近似をせずに6次元で計算

する方法を考案して用いている。この規模でひとつの電離状態の平衡値を計算するのに筑波大学計算物理学研究センターのスーパーコンピューター(CP-PACS)を用いて約1日かかる。この計算をたとえば5000ステップ時間発展させることにし、単純に5000倍で見積もると、約5000日となり、約14年となる。もちろんこれはまったく現実的ではない。これを、現在実現している世界最速のスーパーコンピューターである地球シミュレーターではどれくらいになるかを見積もってみよう。CP-PACSで筑波大学のグループの計算で実現している処理速度は数10~100ギガフロップス(ギガフロップスは1秒間に10億回浮動小数点計算を行う速さ)である。もし地球シミュレーターで実効的に10テラフロップス(テラフロップスはギガフロップスの1000倍)出せると仮定すれば、約200倍速くなるとして、約25日になる。これは時間的に実現不可能な値ではないが、地球シミュレーター的全ノード(ノードはスーパーコンピューターの計算を行うユニット)をすべて20日間占有して1パラメータの計算を行える、ということであり、現実的に限りなく不可能に近い。しかし別の言い方をすれば、地球シミュレータークラス(より少し速い計算機)を占有して計算できるようになれば、 $128^5 \times 6$ の規模の宇宙論的輻射流体計算が行えるということを意味している。これは現在のコンシューマー向けプロセッサの能力の成長の速さからすると、近い将来、PCクラスターがこの問題を射程に収めると考えられる。このように考えてくるとこの種の計算は確かに膨大な計算量を要求するが、決して到達不能なところにあるわけではない。ただし注意すべきは必要な格子点の数や時間ステップ数は取り扱う問題によって大きく異なるので、それによって実現性は大きく異なるということである。したがってすべての輻射流体計算がこの規模の計算機で可能になるというわけではない。たとえばすべての振動数でさまざまな割合の散乱を伴う問題や、異なっ

た振動数間での散乱が重要になるような問題では、上記の計算のように振動数空間を少ないメッシュ数で表現することは不可能になり、はるかに多数の格子点が必要となる。仮に振動数空間に数百格子点を取る場合(これで十分とは限らないが)には、ペタフロップス(テラフロップスの1000倍!)級の計算能力が必要になることになる。このように3次元の輻射流体問題は問題によってはまさにこれから旬を迎える問題であり、(自分も含めて)多くの若い研究者のチャレンジを期待したい。

謝 辞

本稿は主に筑波大学の中本泰史氏、梅村雅之氏との共同研究に基づいています。改めて両氏に感謝いたします。また、ほとんどの計算は筑波大学計算物理学研究センターの計算設備を使用させていただきました。ありがとうございました。

参 考 文 献

- 1) Nakamoto T., Umemura M., Susa H., 2001, MNRAS 321, 593
- 2) Fan et al., 2001, AJ 123, 1247
- 3) Susa H., Umemura M., 2004, ApJ in press
- 4) Susa H., Umemura M., 2000, ApJ 537, 578
- 5) Ricotti M., Gendin N., Shull M., 2002, ApJ 575, 33

Radiative Transfer in Astrophysics

Hajime Susa

Department of Physics, College of Science, Rikkyo University, 3-34-1, Nishi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 171-8501, Japan

Abstract: Lots of astrophysical issues are closely related to the problem of radiation transfer. In this paper, I try to outline the recent results on the cosmic reionization, and radiative feedback on the formation of galaxies, in which the multi-dimensional radiative transfer problem is quite important. I also mention the future prospects on these issues.