12　計算宇宙物理学

宇宙には，恒星・ブラックホール・星団・銀河・銀河団・宇宙大規模構造など様々な階層の構造が存在する．しかし，それらを支配する基礎物理過程の観点から見ると，およそ 3 つに集約される．それは，流体過程，重力過程，輻射過程である．宇宙での流体過程は主に圧縮性流体であり，航空工学で使われるものと基本的に同じである．また，宇宙の現象では自己重力が本質的に重要な役割を果たしている．自己重力系では，各部分に働く重力の総和によって運動が決まる．もう一つ重要な基礎過程に輻射がある．輻射は宇宙に普遍的に存在するものであり，あらゆる宇宙現象において，エネルギー収支を司っている．輻射は，3 次元空間の各点において方向 2 次元，振動数 1 次元の自由度を持つため，輻射を正確に取り扱うためには，6 次元の自由度で光子の分布関数を求めなければならない．光子の分布関数の変化を記述する式は，ローレンツ変換された光子のボルツマン方程式であり，これは“ 輻射輸送方程式 ”と呼ばれる．意味のある輻射輸送計算を行うためには，総計 100GB 以上の主記憶が必要であり，演算量はペタ (10^{15}) を越える．この高次元性が，多次元輻射輸送計算の実現を阻んできたが，CP-PACS は大規模な多次元輻射輸送計算を可能なものにした．

また，宇宙進化と天体形成の解明には，流体方程式，自己重力，輻射輸送方程式を組み合わせた計算を行うことが必要である．この場合，輻射輸送方程式だけでなく，自己重力の計算量の膨大さもあり，これらをすべて採り入れた自己重力輻射流体力学の実現はこれまで困難であった．しかし，未来開拓推進事業の中で進められた HMCS(Heterogeneous Multi-Computer System) では，N^2 のコストのかかる自己重力計算を重力計算専用機 GRAPE-6 によって高速に処理し，6 次元問題である輻射輸送を汎用スーパーコンピュータ (CP-PACS) によって解き上げることで，自己重力輻射流体力学の実現を可能にした．

以下に，これまで行ってきた宇宙再電離の輻射輸送計算，電離宇宙における銀河形成の輻射流体力学計算，原始星のフラットスペクトルの輻射輸送計算の成果を示す．

12.1　宇宙再電離の 6 次元輻射輸送計算

宇宙の 150 億年の歴史には，ミッシングリンクとなっている謎の時代がある．宇宙論の標準理論によれば，宇宙進化はビッグバンによる物質創生に始まり，その後，星・銀河の誕生を経て，太陽系のような惑星系形成に至ったと考えられている．しかし，ビッグバンから約 10 万年後の“ 宇宙晴れ上がり ”から，銀河誕生までの約 10 億年間は，観測的にも理論的にも未解明の時代で「宇宙暗黒時代」と呼ばれ，宇宙進化のミッシングリンクとなっている「宇宙暗黒時代」を解く鍵を握っているのが宇宙の再電離である．宇宙は“ 晴れ上がり ”の時点で，それまでの電離状態から中性状態へと変わったが，宇宙年齢数 10 億年の頃までに，どこかで再び電離されたことが遠方のクェーサーの観測からわかっている．宇宙の再電離がどのようにして起こったかを明らかにするためには，膨張する非一様な宇宙の中で電離光子がどのように伝播し宇宙を電離していくかを計算しなければならない．これを正確に行うためには，6 次元の輻射輸送方程式を解く必要がある．我々は， CP-PACS を用いて，世界で始めて 6 次元輻射輸送方程式を解き，宇宙の再電離の過程をシミュレーションすることに成功した [1, 2, 3, 4, 5] ．計算の結果を図 21 に示す．これは，128^3 の実空間格子点について，6 次元輻射輸送を解いたものである．ここでは，中性原子の割合を色で示している．赤から黄色の領域が，ほぼ中性の領域である．宇宙年齢 2.3 億年 (Z=15) の頃には，“ 自己遮蔽効果 ”によって中性の高密度領域が，網の目状に広がっているのがわかる．その他の領

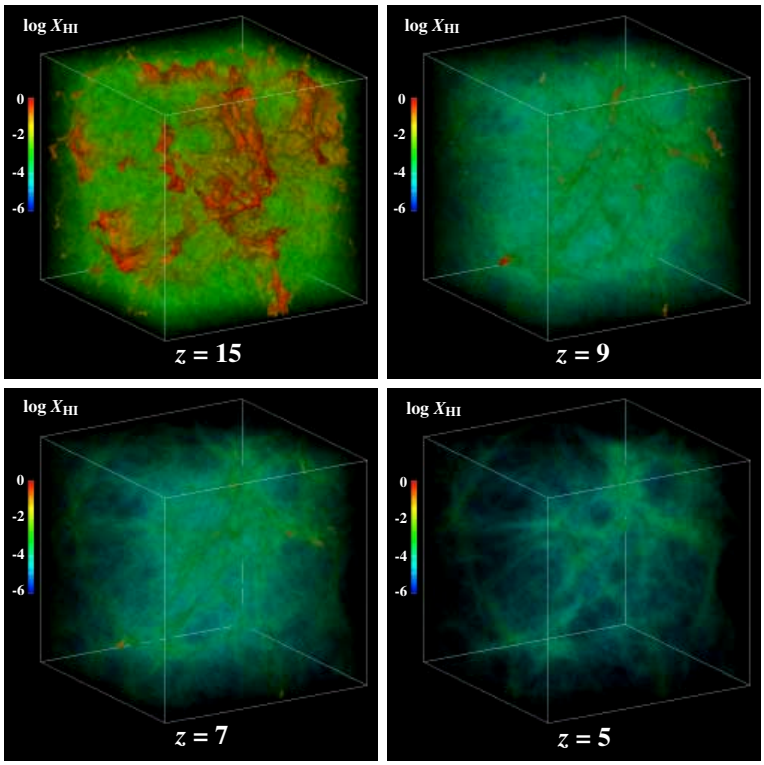


図 21: 宇宙再電離の 6 次元輻射輸送計算．赤が中性領域，緑から青にかけて電離度が高い領域を示す．

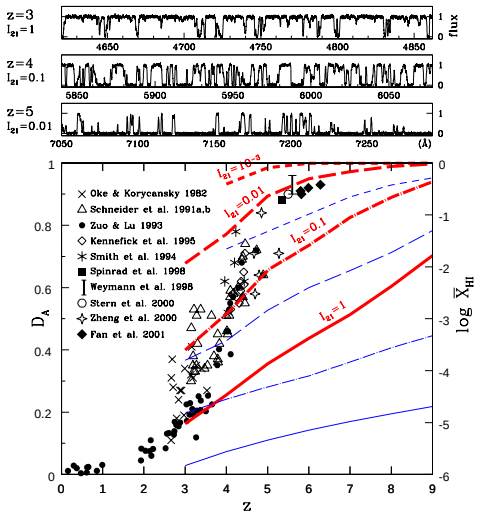
域では，水色から青色にかけて電離度が高くなっている．宇宙年齢 4.7 億年 (Z=9) の頃になると，中性領域も次第に紫外線で侵食されていき，宇宙年齢 10 億年 (Z=5) では，ほぼ全体が再電離された宇宙になる．注目すべきことは，この時点で宇宙の電離状態はどこでも同じではなく，電離度が 3 桁以上違う領域が混在しているということである．中性原子の割合は高い所で千分の一，低い所では百万分の一以下になっている．この計算により，宇宙の再電離は，このような非一様性の効果によって，これまで予想していたよりもゆっくりと進行することが明らかになった．

宇宙が，このような電離構造をもっていると，クェーサーのスペクトルには，電離度が相対的に低い (中性原子が多い) 領域に対応していくつもの吸収線が見えることになる．これと観測されているスペクトルを直接比較することにより，宇宙の再電離の歴史を知ることができる．水素の Lyα 吸収線による Continuum Depression は，宇宙の電離状態を表す良い指標になる．Lyα 吸収線の Continuum Depression は

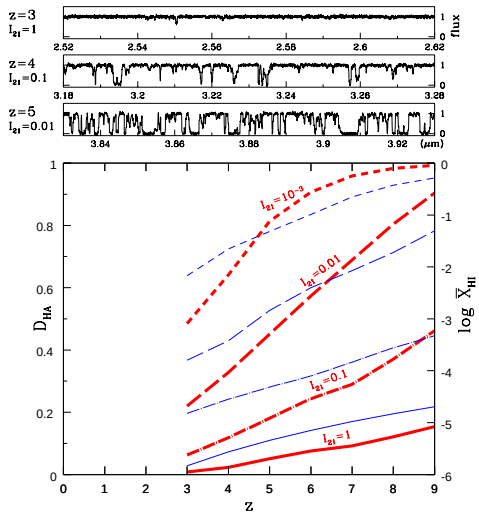
$$D_A \equiv \int_{\nu_{\rm Ly\alpha}}^{\nu_{\rm Ly\beta}} \frac{f_\nu - f_{\nu,\rm cont}}{f_{\nu,\rm cont}} d\nu / (\nu_{\rm Ly\beta} - \nu_{\rm Ly\alpha}) \qquad (f_{\nu,\rm cont}:\ \text{Continuum flux})$$

で与えられる．観測されている 100 近いクェーサースペクトルから，D_A は $z \simeq 4$ を境に，赤方偏移の増加と共に急激に 1 に近づくため，宇宙再電離の時期がこの辺りであることが示唆される．しかし，シミュレーションとの比較の結果，宇宙再電離の時期は，この急激な増加の時期には対応しておらず，$z_{\rm reion} > 7$ でなければならないことがわかった (図 22(a)) [6, 7]．さらに，宇宙背景紫外線強度が $z = 4$ から $z = 6$ にかけて 2 桁近く弱くなっていなければならないことが明らかになった．

一方で，Lyα は高密度宇宙では減衰が強く起りすぎるため，高赤方偏移の電離状態を細かく調べるのには不向きであることも判明した．例えば宇宙が 99%以上電離された状態にあっても，Lyα



(a) Lyα 吸収線系 (上 3 パネル) と Continuum Depression (下) . 印は , 観測で得られている Continuum Depression .



(b) Hα 吸収線系 (上 3 パネル) と Continuum Depression (下)

図 22: 宇宙再電離計算に基づくクェーサー吸収線系と Continuum Depression

の Continuum Depression は $D_A \sim 1$ になってしまう . $z > 4$ の宇宙の物質状態を詳しく知るには , (1) 輝線が観測でき , (2) Lyα よりオパシティが小さく , (3) ダストによる減光が小さい , という 3 条件を満たす line が理想的であると言える . 3 番目の条件は , 高赤方偏移天体がダストで覆われている可能性が高いことを考慮したものである . この 3 条件に最も適合したものは Hα である . 実際 , Hα 吸収線系をシミュレートした結果 , Hα の Continuum Depression は , 宇宙の再電離史を良くトレースできることがわかった (図 22(b)) .

12.2 電離宇宙における銀河形成の輻射輸送流体力学計算

銀河は , 宇宙を構成する基本的単位となっている天体であるが , その形成過程は未だ解明されておらず , 宇宙物理学の最重要課題の一つになっている . 銀河には , 全質量が同程度でありながら楕円型銀河と円盤型銀河という 2 つのタイプが存在する . このような形態の違いがどのようにして生じたかは , 銀河形成史の謎を解く鍵であると考えられている . この 2 つのタイプの銀河の重要な違いは , 楕円型銀河は主に古い星からできており , 円盤型銀河では今なお星が次々に生まれているという点である . この事実は , 銀河の形態と星形成史が密接に関係していることを示している . 実際 , これまでの数値シミュレーションで , 早い時期に星形成が起った銀河では , 無散逸な系としての力学的緩和により楕円型になり , 星形成の進行が遅い銀河では , 回転ガス円盤が形成されて円盤型の銀河に進化することが示されてきた . ここで問題になるのが , 星形成の効率はいかなる物理が支配しているのかという問題である . この問題は , 長い間ブレークスルーが見出せず , これまでのシミュレーションでは星形成効率はパラメータの一つとして扱われてきた . これは , 銀河形成問題の本質的解明を長い間阻んできた . 我々は , HMCS で可能となった自己重力輻射流体力学によって , この問題に本格的に切り込み , 銀河形成の新たなパラダイムの構築を行っ

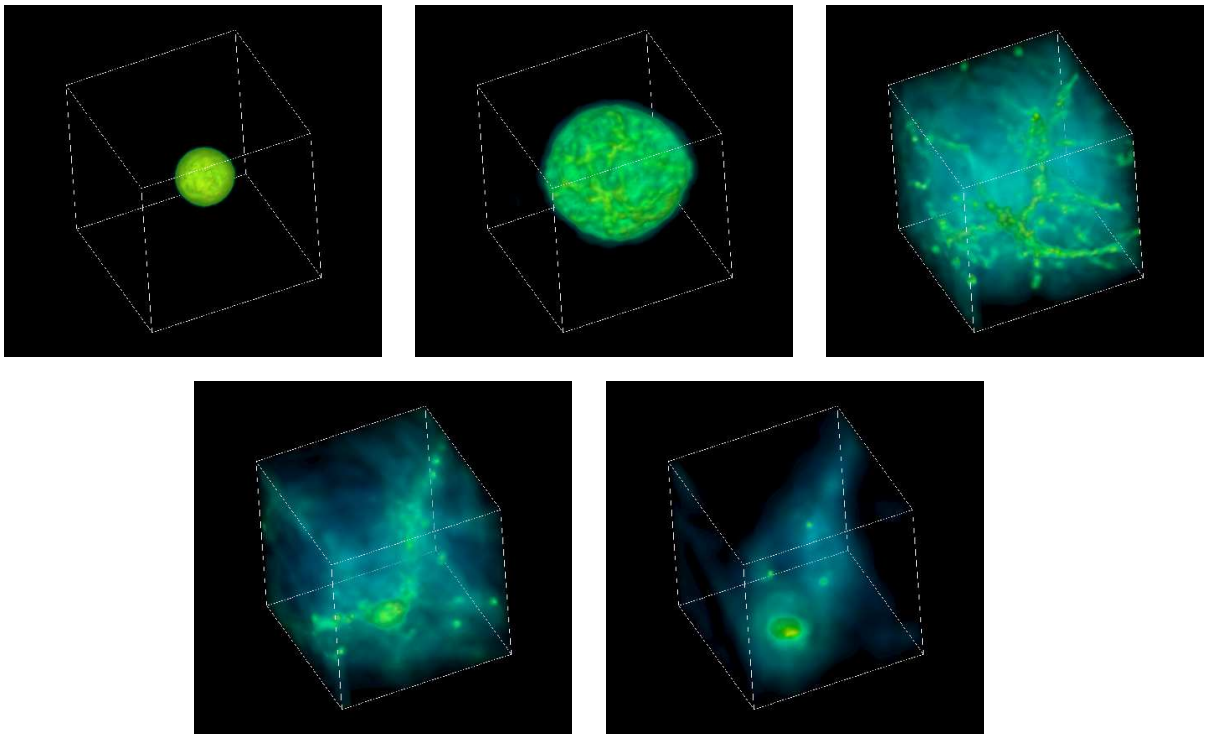


図 23: HMCS を用いた自己重力輻射流体による銀河形成シミュレーション．13 万体 (SPH 粒子 65536，ダークマター粒子 65536) のシミュレーション．図は，SPH 分布の時間進化を示す．

た．我々が注目したのは，銀河形成期の宇宙には紫外線光が充満していたという点である．これは遠方のクェーサーのスペクトル観測により明らかになっている．紫外線光はガスを加熱するため，星形成を阻害する働きがある．紫外線光が，どの程度星形成史に影響を及ぼすかを正確に調べるためには，輻射輸送と重力流体を同時に扱ったシミュレーションが不可欠である．HMCS では，紫外線輻射場の中でのガスの熱的・力学的進化を正確に扱うことが可能である．これまでの自己重力輻射流体シミュレーションによって，比較的初期に出来る銀河では背景紫外線光に対する‘ 自己遮蔽効果 ” が強く効いて，紫外線の浸透は起こらず，星形成は急速に進行するのに対し，後期にできる銀河では自己遮蔽が弱く，背景紫外線光に阻害され星形成がゆっくりしか進まないことが示された．つまり，星形成の速さを決めるのは，紫外線からの自己遮蔽の程度であるということである．そして，原始銀河のガスが急速に星化した系では，力学的緩和により楕円型銀河へ進化する．また，星形成が遅れた系では角運動量障壁が効くまでガスのまま重力落下する成分が円盤を作り，最終的に円盤型銀河へと進化する．銀河形態の起源は，背景紫外線に対する自己遮蔽であるという考え方は，これまで全く考えられてこなかったものであり，銀河形成の新たなパラダイムにつながるものである．これは，HMCS による自己重力輻射流体の実現によって初めて達成できた成果である (図 23) [8, 9] ．

12.3　T タウリ型星フラットスペクトルの 5 次元輻射輸送計算

昨今，ハッブル宇宙望遠鏡などの大型観測装置により，星形成の現場が捉えられてきている．これらが提供してくれる分解能の高いデータを用いて，星形成の現場の物理状況を解明するために

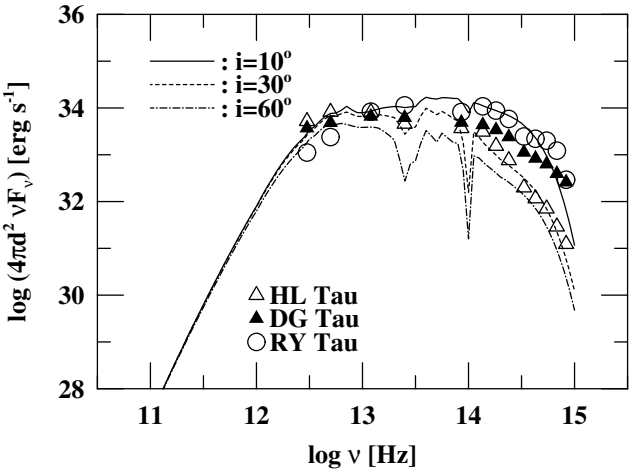


図 24: 計算の結果得られたモデル輻射スペクトル．見込み角 (i) を変えて求めた．三角や丸は，実際のフラットスペクトル T タウリ型星の観測結果．

は，輻射輸送計算によりスペクトルを生成し，観測と直接比較することが極めて重要である．この目的で，我々は，星形成現場の現象論的なモデル化を行っている．中心星とその周囲の密度分布や放射源分布を仮定し，輻射輸送方程式を解く．新たな高精度計算法を開発した結果，2 次元軸対称系で 5 次元輻射輸送と物質温度を無矛盾に計算することに成功した [10, 11]．

T タウリ型星と呼ばれる誕生しつつある若い星の中に，'フラットスペクトル T タウリ型星' と呼ばれる特異なスペクトルを示す星々がある．この「フラットスペクトル」の成因は従来より謎であった．我々はこの天体に対し，「中心星 + 星周ディスク + ハロー」という構成のモデルを考えた．ハローは前二者を包み込む密度の薄いガス雲であるが，このハローの存在が私達のモデルの特徴である．そして各々の性質をいろいろに変えながら輻射スペクトルを計算した結果，ある状態で「フラットスペクトル」がうまく再現されることを見出した (図 24)．そのときのハローは，長波長の輻射 (電波や遠赤外線) には透明であるが，短波長輻射 (可視光) には不透明であるような密度になっている．この密度は，輻射スペクトル以外の観測結果とも調和的である．こうした計算の結果，直接撮像出来ないハローや星周ディスクの様子 (図 25) が明らかとなり，一連の星形成過程における 'フラットスペクトル T タウリ型星' の意味も明らかになった．すなわちそれは，'原始星' から 'T タウリ型星' への遷移期に位置する天体である．この成果は，星形成の進行に関する物理的理解において極めて貴重な情報を与るものである．

参考文献

[1] M. Umemura, T. Nakamoto, and H. Susa, "3D Radiative Transfer Calculations on the Cosmic Reionization", *Numerical Astrophysics 1998*, eds. S. M. Miyama, K. Tomisaka, & T. Hanawa (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht), 43-44 (1998)

[2] M. Umemura, T. Nakamoto, and H. Susa, "Reionization of an Inhomogeneous Universe", RESCEU International Symposium, *The Birth and Evolution of the Universe*, eds, K. Sato

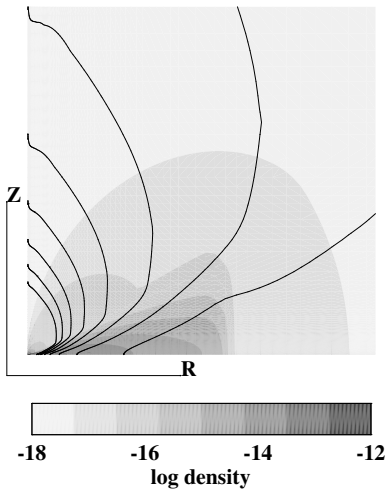


図 25: 計算の結果得られた温度の空間分布 (等高線) . 外側 (右側) より , 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100K. グレースケールは , 与えた密度分布 (g cm^{-3} 単位).

and M. Kawasaki (Universal Academy Press: Tokyo), 297-300 (2000)

[3] T. Nakamoto, H. Susa, and M. Umemura, "Photoionization of a Clumpy Universe", *New Horizon of Computational Science*, eds. T. Ebisuzaki & J. Makino, Astrophysics and Space Science Library (Kluwer), **263**, 265-268 (2001)

[4] T. Nakamoto, M. Umemura, and H. Susa, "The Effects of Radiative Transfer on the Reionization of an Inhomogeneous Universe", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **321**, 593-604 (2001)

[5] T. Nakamoto, M. Umemura, and H. Susa, "3D Radiative Transfer Effects on the Cosmic Reionization", *The Physics of Galaxy Formation*, ASP Conference Series, **222**, 143-148 (2001)

[6] M. Umemura, T. Nakamoto, and H. Susa, "Cosmic Reionization and Galaxy Formation" *The Physics of Galaxy Formation*, ASP Conference Series, **222**, 109-114 (2001)

[7] M. Umemura, T. Nakamoto, and H. Susa, "Cosmic Reionization History and QSO Absorption Line Systems" *Studies of Galaxies in the Young Universe with New Generation Telescopes*, Japan-German Seminor 2001, in press (2002)

[8] H. Susa and M. Umemura, "A Simulation of Galaxy Formation by Radiation-SPH , IAU Symposium 208, Astrophysical Supercomputing using Particle Simulations, in press (2002)

[9] H. Susa and M. Umemura, "Galaxy Formation in the Presence of Ultraviolet Background Radiation Field — A Simulation by Radiation-SPH —" *Studies of Galaxies in the Young Universe with New Generation Telescopes*, Japan-German Seminor 2001, in press (2002)

[10] N. Kikuchi, T. Nakamoto, and K. Ogochi, "Disk-Halo Model for Flat Spectrum T Tauri Stars", *Publ. Astron. Soc. Japan*, submitted (2002)

[11] T. Nakazato, T. Nakamoto, and M. Umemura, "A Spectrophotometric Method to Determine the Inclination of Class I Objects", *Astrophysical Journal*, submitted (2002)