

銀河・銀河団形成シミュレーション

須藤 靖

〈東京大学理学部物理学教室 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp

宇宙の大構造形成シミュレーションは、1975年三好・木原の仕事によって始まった。4半世紀を経た現在、天体形成の場所であるダークマターハローの質量関数や空間相関に関しては理解が飛躍的に進んできた。この現状に至る歴史を簡単に振り返るとともに、現在世界中で盛んに研究されているダークマターハローの中での銀河の形成を記述する経験的なモデルの構築に関する進展を紹介してみる。

1. はじめに

機会あるごとに強調しているのであるが、世界で初めての宇宙論的 N 体数値実験を行ったのは、1975年に PASJ に発表された三好・木原の論文¹⁾である。ダークハロー（暗黒物質がつくる自己重力系）の質量関数を計算する解析的表式を与えたことで有名な Press と Schechter の論文²⁾の中で、彼らはこの式を検証するために、初期条件として宇宙膨張に対応する初速度を与えた一様球 ($N=1000$) の N 体数値実験を行ったことをごく簡単に述べている。このため、この論文が世界初の宇宙論的 N 体数値実験であると主張する人もいるようであるが、i) 共動座標での運動方程式を周期的境界条件のもとで解いた、ii) 銀河の2点相関関数が巾法則に従うことを、数値実験を用いて膨張宇宙における非線型重力多体系の物理として理解しようとした、という2点において、現在標準となっている宇宙論的 N 体数値実験の先駆的な業績としては間違いなく三好・木原に軍配を上げるべきである。国外では Aarseth, Gott & Turner (1979) が、三好・木原と全く同じ科学的動機の下に開始した系統的な宇宙論的 N 体数値実験³⁾が最

初と言えよう。彼らは明らかに Peebles による、銀河2点相関関数の巾法則の発見⁴⁾に影響されたのであるが、周知のようにこの結果は、東辻・木原によってすでに1969年に発見されている⁵⁾。だからこそ、三好・木原は世界に先駆けた計算を行う科学的動機を持ち得たわけである。木原先生が宇宙論の専門家でなかったことが最大の理由かもしれないが、この業績はその後国内で継承されることはなく、いわば埋もれてしまったような感がある^{*1}。

これはどちらかと言えば些細なことというべきなのかもしれない。しかしあえてこの場で長々と書き連ねたのは、これが決して特殊な例ではなく、むしろよくあることの一例であろうと想像するからである。つまり、日本人が先駆的な仕事をしているにもかかわらず、それらが国内ですら正当に認知・評価されていない、という可能性である。むしろ、このような事態は、科学においては多かれ少なかれ日本に限らずどこにでもあることなのだろう。つまり、筆者が日本の例のみをよく知りうる立場にある、という選択効果に過ぎないとも解釈できる。一方、これらを、自己宣伝を潔しとしない文化的土壌、平均値から離れたものを

*1 ちなみに、ADSによると、2003年7月の時点でこの論文は計33回引用されているが、そのうち筆者が著者として入っている論文からの引用が6回である。

嫌い一様化する方向性を求める風土（悪く働けば、やっかみの文化であるし、よく働けば、弱者を支え合い助け合う精神ともなる）という日本的なものとして理解することも可能である。

まあこれ以上ぐだぐだと似非文化論を展開したところで生産的であるとは思えない。しかし、上述のような例を繰り返さないためにも、適度の自己宣伝は必要であるし、特に国立天文台のように国民の税金で賄われている施設を利用して得られた成果を説明することは義務ですらありうる。というわけで、以下、我々のグループが国立天文台のスーパーコンピュータを用いて得た成果を中心とした研究紹介をさせていただくことをお許しいただきたい。

2. ダークハローの普遍密度プロファイル

基本的にあらゆる天体は、宇宙膨張から離脱したダークマターの自己重力系の中にバリオンが収縮することで誕生する。したがって、それらの初期条件としての、ダークマターの塊（ダークハロー）の性質を理解することは本質的な意義をもつ。特にそれらがどのような密度プロファイルに従うかという疑問は、自己重力系の物理学の問題としても、観測事実をより正確に解釈するための天文学の問題としても、興味深い。論理的には二つの可能性に大別される。密度プロファイルは、(a) 宇宙の初期条件を何らかの形でとどめている、あるいは、(b) 初期条件の情報はすべて忘れてしまい自己重力系の物理だけで決まる普遍的な分布をもつ、という全く正反対の、しかしながら同等の説得力をもつ予想である。実はこの問題は1980年代末の研究を通じて、解析的モデルと、当時の数値シミュレーションがともに一致して(a)を支持するという形で一応の決着をみていた。ところが1996年に、ダークマターハローは初期条件や質量にほとんど無関係に、 r_s というスケールをパラメータとした普遍的な密度分布：

$$\rho(r) \propto \frac{1}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2} \quad (1)$$

に従うという驚くべき数値シミュレーションの結果が発表された⁶⁾。過去のシミュレーションは粒子数が少なく、中心部のプロファイルを正しく決定するだけの分解能がなかったという主張である。

しかしこれは単に定量的な違いにとどまらず、(b)という定性的に全く異なる解釈を支持することになる。ダークマターハローは、矮小銀河から銀河団という質量にして5桁もの違いをもつ天体にあまねく存在するものと考えられており、その宇宙物理的な帰結は計り知れない。したがって、この結論は大きな反響を呼び、その後数多くの研究の火付け役となった。特に、東京大学の福重俊幸と牧野淳一郎は、このシミュレーションの空間分解能に疑問をもち、直ちに東京大学および国立天文台のGRAPEシステムを用いたより高分解能のシミュレーションを行い、中心部のカスプが r^{-1} ではなく $r^{-1.5}$ 程度のより急なプロファイルをもつことを指摘した⁷⁾。この結果は、その後の独立なグループの追試を経て、現在ではほぼ確認されたものといっておくべきであろう。

我々もまた、国立天文台および初期宇宙研究センターのスーパーコンピュータを用いて、当時としては世界最大である約100万個の粒子を用いた高精度シミュレーションを行った⁸⁾。宇宙モデルとしては、全エネルギー密度の3割を冷たいダークマターが、残りを宇宙定数が占めるものと仮定した。その結果を図1 (p. 607 カラー図)に示す。このように目から受ける印象は極めて個性に富んでいるにもかかわらず、半径 r 内の球殻で平均化したときの密度プロファイルは確かに驚くほど似ている(図2)。我々の結果は、

$$\rho(r) \propto \frac{1}{(r/r_s)^\alpha (1+r/r_s)^{3-\alpha}} \quad (2)$$

のような形でよくフィットされ、べき指数 α は1ではなく、ハローの質量 M に対して、近似的に

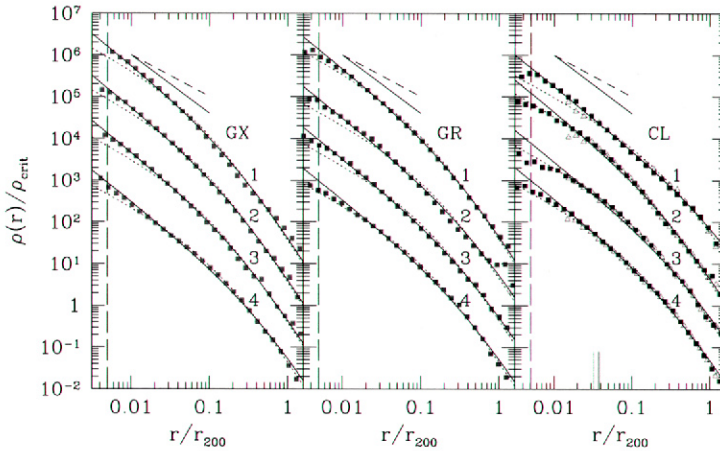


図 2 球対称で平均化したダークマターハロー密度分布プロファイル。縦軸の値は見やすいようにずらしてある(文献 9)。

$\alpha \sim 1.6 - 0.15 \log(M/10^{12} M_{\odot})$ で与えられる。実はこの質量依存性は、ダークマターの密度プロファイルを (a) の立場から説明しようとする多くの解析モデルの予言とは逆センスである。一方、(b) の立場からこのプロファイルの説明できるような理論モデルもいまだ存在しておらず今後の発展が期待される。

さらに、昨今の観測の角度分解能の飛躍的向上を背景として、単なる球対称近似にとどまらず、非球対称性をも考慮したモデル化が必要となってきた。我々は、3 軸不等楕円体モデルを提唱し、シミュレーションから時間進化を取り込んだ軸比の確率分布関数を得た⁹⁾。このハロー密度プロファイルは、理想化された非線型自己重力系という純粋な力学系の問題、X 線や重力レンズによって銀河団を観測する場合の経験的な密度モデルとしての有用性、等々、理論・観測・応用の立場から多岐にわたる研究が活発に進行しつつある^{10), 11)}。

3. ダークマター分布と銀河分布

宇宙の大構造形成シミュレーションは、1970 年代の「粒子=銀河」という大前提に基づいて膨張宇宙での非線型重力多体系の物理を理解することを目的として始まった。1980 年代中頃には、「粒

子≠銀河」というより現実的な天文学的效果をいかに取り込むかが焦点となり、いわゆる銀河形成のバイアスモデルが盛んに議論された。これは、非線型領域に達する以前のダークマターの密度ピークが将来銀河となる場所である、という考え方である。さらに 1990 年代になると、バリオンガスの冷却を取り込んで、実際に計算機の中で「疑似銀河」をつくってやろうという試みが盛んになる。仮にこのような方法で、観測されている宇宙の銀河分布が完全に再現されたとしても（もちろん今のところそのような状況とは程遠いのだが）、何かわかった気にはならない。やはり、もう少し前に立ち返って、天体形成の「描像」が欲しくなる。そこで 1990 年代後半からは、前章で述べた「ダークハローの中での天体形成」というパラダイムが定着している。これは宇宙の天体形成史を、重力だけで決まるダークハローの形成史と、ハロー内での天体形成過程、の 2 段階に分離して考えよう、というものである。前者は、数値シミュレーションあるいは解析的な質量関数の合体確率分布に基づくモンテカルロ的な方法で計算し、後者は別途パラメータ化された経験的なモデルを適用し観測事実を用いてパラメータの値を調整することが多い。

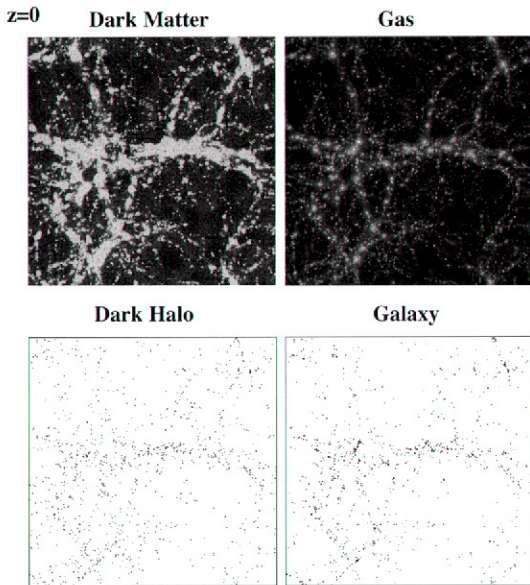


図3 現在の宇宙での、ダークマター、バリオンガス、ダークハロー、「銀河」の分布のシミュレーション例。一辺は $75h^{-1} \text{Mpc}$ に対応する (文献 12)。

この描像を直接検証するために、我々は粒子法に基づく宇宙論的流体シミュレーション (SPH: Smoothed Particle Hydrodynamics) を行った¹²⁾。全エネルギー密度の3割を冷たいダークマターが、残りを宇宙定数が占める宇宙モデルを採用し、 $N=128^3$ のバリオンガス粒子および同数のダークマター粒子を一辺 $75h^{-1} \text{Mpc}$ の立方体に分布させその進化を調べたのである。図3が、現在における、ダークマター、バリオンガス、ダークハロー、温度が 10^4K 以下になった冷たいバリオンの塊 (我々はこれを銀河に対応するものと仮定した) の分布を比較したものである。これらの2点相関関数を計算し、理論的にハローモデルから予想される結果と比べることで、上述の「ダークハローの中の天体形成」という単純ではあるが物理的に明確なモデルが観測事実をかなりよく再現できることがわかった。例えば、シミュレーションで得られた「銀河」をその形成時期の早いものと遅いもの (早期型と晚期型の個数比を説明するように $z=1.7$ を境界とした) に分けて相関関数を計算した結果が図4であるが、これはその後スローンデジタルスカイサーベイの観測データから明らかになった銀河形態によるバイアスの違いを見事に説明している。つまり、このモデルの枠内で銀河の形態とその形成時期との関係が定量的に示されたものと言えよう。

4. 酸素輝線で探るミッシングバリオン

宇宙のダークマターの存在はよく知られているが、宇宙のバリオンのほとんどが実は直接観測されていないことはあまり知られていない。ビッグバン元素合成理論の予言するバリオン総数の約1割は銀河の中の星、同じく1割程度が銀河団の中の高温ガスであり、これらはそれぞれ可視光・X線観測によって存在量が知られている。この残りは、ミッシングバリオンと呼ばれており、その大半が $10^5 \sim 10^7 \text{K}$ の Warm/Hot Intergalactic Me-

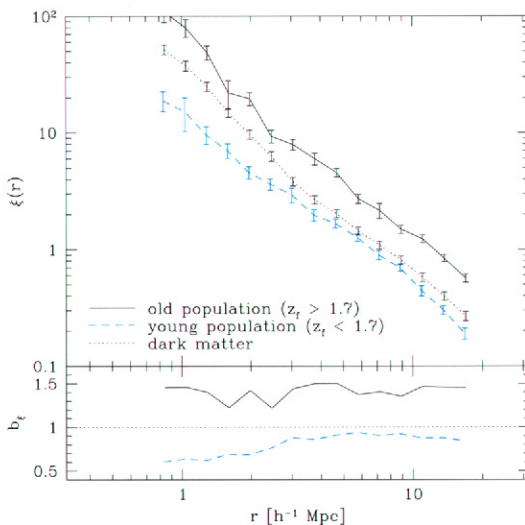


図4 銀河の形成時期によるバイアスの違い。上図は2点相関関数 $\xi_{\text{銀河}}(r)$ と $\xi_{\text{ダークマター}}(r)$ で、下図はダークマターの2点相関関数で規格化したバイアス $b(r)$ と $\sqrt{\xi_{\text{銀河}}(r)/\xi_{\text{ダークマター}}(r)}$ (文献 12)。

dium (WHIM) なのではないか、という可能性が指摘されている^{13), 14)}。この温度の WHIM は熱制動輻射による X 線強度は極めて弱いため、直接検出はほとんど不可能である。例外として、背景にある QSO の X 線連続輻射が WHIM を通過する際に OVI, OVII の吸収線系をつくることで検出しようという試みがなされて、数例検出が報告されているが、今のところ、確立したものとは言いがたい。

我々は、宇宙研、都立大、名古屋大の X 線観測グループと共同で、WHIM からの酸素輝線を検出するミッションの可能性 (DIOS: Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) について検討を開始している¹⁵⁾。吸収線とは異なり輝線観測は背景 QSO を必要としないため、サーベイ観測が可能となり WHIM の存在量の推定の信頼度は飛躍的に向上する。4 回反射を利用したコンパクトな X 線望遠鏡の設計と、TES (Transition Edge Sensor) を用いた $\Delta E = 2 \text{ eV}$ の分解能をもつ検出器の両者が実現できることが成功の本質的な鍵を握る。前章で紹介した宇宙論的流体シミュレーションの結果を用いて、WHIM の分布をプロットしたものが図 5、分光観測データのスペクトルを作成した結果が図 6 (p. 607 カラー図) である。図 5 から明らかなように、WHIM は宇宙の大構造のおりなすフィラメント構造に沿って分布しているのに対して、X 線を放射する銀河団高温ガスで観測できるのは、それらのフィラメントが交わったノットに対応する部分だけでしかない。このようにむしろ WHIM の分布が宇宙の構造をより忠実にトレースしているものと期待される。図 6 には、その右端の X 線マップの A, B, D, E の領域を、 $\Delta E = 2 \text{ eV}$ の軟 X 線分光器を用いて 1 日から 3 日間観測した場合に予想されるスペクトルが示されている。シミュレーションの WHIM と対応した酸素

輝線には、ラベルを付けてある。このように、高分解能分光器を搭載した軟 X 線ミッションによって、宇宙のミッシングバリオンを探る試みは、今後の重要な研究テーマとなりえよう。

5. おわりに

宇宙の大構造形成シミュレーションは、その非線型重力進化に関する限り、極めて信頼度の高い結果が得られるようになってきている。いまやダークマターとダークハローの 2 点相関に関する限り、今までのシミュレーションをもとにした高精度の解析的な経験式が得られており、もはや新たなシミュレーションをせずともさまざまな理論予言が可能である。このような現状には、国立天文台のスーパーコンピュータを用いた我々のシミュレーションも、世界的な役割を果たしてきたものと自負している。一方、ダークハローと銀河・銀河団を対応させる部分に関しては、定性的な描像に関するコンセンサスは得られつつあるものの、定量的な信頼性となるとまだまだこれからというべき段階にとどまっている。一方、これからの銀河・銀河団シミュレーションは、理論モデルがどのような予言をするかを調べるといった学問的興味だけにとどまらず、次期観測計画の可能性やその科学的意義を極めるための道具という実証的な役割の比重がますます高まりつつある。国立天文台に共同利用スーパーコンピュータシステムが導入されて以来、飛躍的に向上した日本のシミュレーション天文学のレベルが、今後もさらに発展し続けることを大いに期待する。本稿で紹介したシミュレーションは、上海天文台の景益鵬氏と東京大学の吉川耕司氏との共同研究に基づいており、国立天文台天文学データ解析計算センターのスーパーコンピュータを用いて行われた。

参考文献

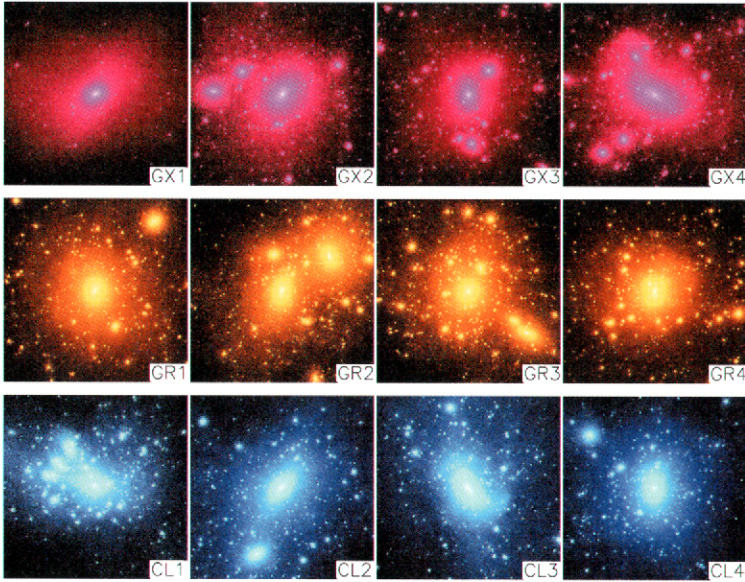
- 1) Miyoshi K., Kihara T., 1975, PASJ 27, 333
- 2) Press W. H., Schechter P., 1974, ApJ 187, 425
- 3) Aarseth S. J., Gott J. R., Turner E. L., 1979, ApJ 228, 664
- 4) Peebles P. J. E., 1974, ApJ 189, L51
- 5) Totsuji H., Kihara T., 1969, PASJ 21, 221
- 6) Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., 1996, ApJ 462, 563
- 7) Fukushige T., Makino J., 1997, ApJ 477, L9
- 8) Jing Y. P., Suto Y., 2000, ApJ 529, L69
- 9) Jing Y. P., Suto Y., 2002, ApJ 574, 538
- 10) Lee J., Suto Y., 2003, ApJ 585, 151
- 11) Oguri M., Lee J., Suto Y., 2003, ApJ, in press (astro-ph/0306102)
- 12) Yoshikawa K., Taruya A., Jing Y.P., Suto Y., ApJ 558, 520
- 13) Fukugita M., Hogan C. J., Peebles P. J. E., 1998, ApJ 503, 518
- 14) Cen R., Ostriker J., 1999, ApJ 514, 1
- 15) Yoshikawa K., Yamasaki N. Y., Suto Y., Ohashi T., Mitsuda K., Tawara Y., Furuzawa A., 2003, PASJ 55, in press (astro-ph/0303281)

Simulating the Formation of Galaxies and Clusters

Yasushi Suto

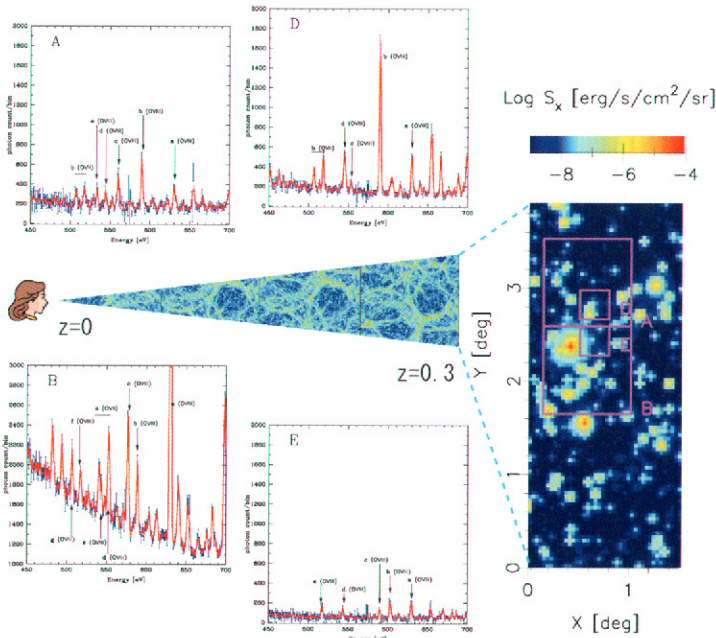
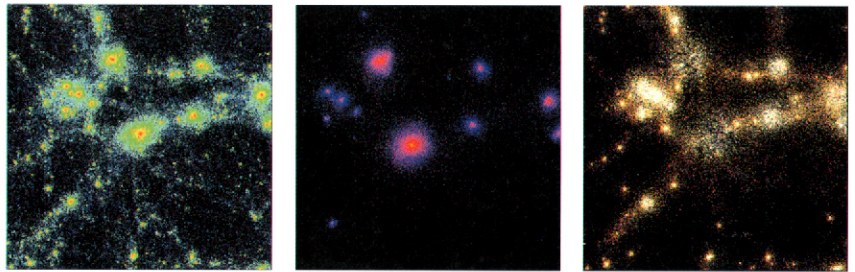
Department of Physics, University of Tokyo, Tokyo 113-0033

Abstract: It is Miyoshi & Kihara (1975) who performed the simulation of large-scale structure formation in the universe for the first time. I will briefly describe the latest results of simulations of the formation of galaxies and clusters with particular emphasis on their future prospects.

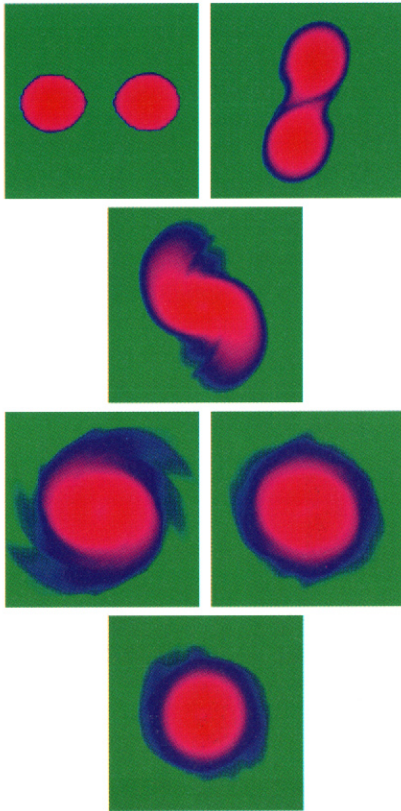


須藤 (図1)
冷たい暗黒物質宇宙モデルにおけるハローの構造. 上から銀河, 銀河群, 銀河団スケールの質量に対応する (文献9).

須藤 (図5)
ダークマター (左), 高温ガス (中央), WHIM (右) の空間分布のシミュレーション例. 一辺は $30h^{-1}$ Mpc に対応する.

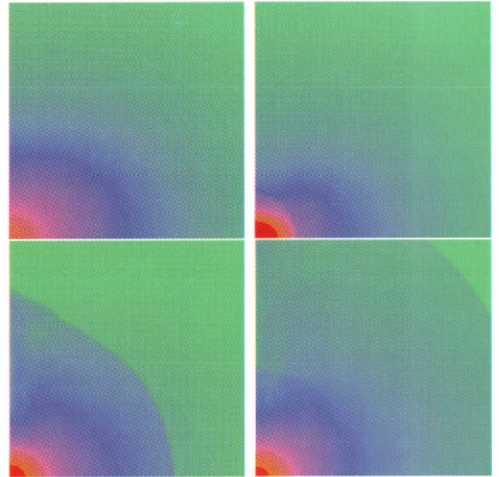


須藤 (図6)
酸素輝線の X線超精密分光観測から予想される WHIM のスペクトル (文献15).



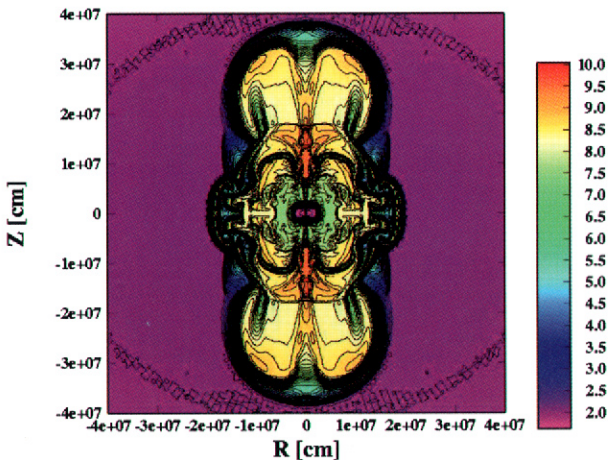
柴田 (図 1)

連星中性子星が合体して、重い中性子星が形成される様子. 連星の合計の質量を 2.8 太陽質量とした場合, 最初のパネルから最後のパネルに至るまで, およそ 9 ミリ秒である.



柴田 (図 3)

回転する大質量星のコアが重力崩壊し, 中性子星を形成する様子. 初期条件として, 中心密度が 100 億 g/cm^3 , 半径が約 2000 km の剛体回転しているコアを与えている. 図では, 重力崩壊後 67 ミリ秒から 69 ミリ秒までの様子を示している. 最初のパネルは衝撃波が形成される直前を表す. 次のパネルは, 中心密度が核密度を超え衝撃波が発生する様子を示している. 最後の 2 つのパネルでは, 衝撃波が伝播する一方で, 中心に中性子星が形成される様子が示されている.



佐藤 (図 1)

星のコアの軸対称自転重力崩壊のシミュレーション. 縦軸が自転軸でこの方向に爆発が起こっていることを示している (Kotake K., Yamada S., Sato K., 2003, ApJ, to be published).