

研究課題名:修正重力の N 体シミュレーションを用いた検証

鈴木 隆之 (山口大学)

利用カテゴリ XT4C・SX9B・GRAPE-B・汎用 PC

1 研究の概要と動機 ~ 宇宙のダークサイドと修正重力

宇宙論は近年、宇宙背景輻射 (CMB)・銀河団・Ia 型超新星・バリオン音響振動... などの様々な天文観測データにより、様々な宇宙論パラメータが誤差棒付きで精密に決定された。嘗ては 100 億年から 200 億年と言われた宇宙年齢も 137 億年と明確に定められた。しかし、その宇宙の組成の内訳は殆どが「未知の存在」であることも近年の観測によりわかった紛れもない事実である。未知の存在の一つ目はダークマターと呼ばれるものである。ダークマターは未知の重力源と呼ぶことができる。銀河の回転曲線から見積もられる質量分布と実際の光度を観測して見積もった質量分布が一致していないことや銀河団の重力的安定性などの議論から 1980 年代にはその存在が確実視されていた。現在ではそれ以外にも宇宙の構造形成に関するシミュレーションや重力レンズを用いた質量推定などの様々な傍証がある。未知の存在の二つ目はダークエネルギーと呼ばれるものである。これはダークマターよりも不可解なもので、未知の斥力源と呼ぶべき存在である。90 年代後半、Ia 型超新星という明るさが推定できる天体を用いて、宇宙膨張の様子を直接探ったところ、宇宙が 50 億年程まえから、減速膨張から加速膨張に転じていることも分かった。ダークマターを含め、普通の物質は万有引力を及ぼすので、宇宙はかならず減速膨張をする。加速膨張をさせるためには「斥力を及ぼす未知の存在」を仮定する必要性が生じる。創生直後の宇宙で急激な加速膨張が起こったとするインフレーション理論は 80 年代に理論的に確立し、これも観測的に実証されつつあるが、インフレーションの引き金となった「インフラトン」の正体も謎である。

これら現代宇宙論に残る大いなる謎について、「未知の存在を個別に持ち出すのではなく、重力理論を変更することによって統一的に記述できる」とする試みも存在する。

その候補の一つとして、2005 年に J.W.Moffat により考案された「スカラー・テンソル・ベクトル重力理論」が存在する。(以下モファット重力と呼称)(J. W. Moffat, [JCAP\(03\):004, 2006](#))。これによると、重力源から離れたところに於いて重力が強くなり、ダークマターなしに銀河の回転曲線や銀河団の安定性が説明可能とされる。また、宇宙の膨張は、極初期に滑らかな反跳を行った後、減速膨張をし、その後、加速に転じ、インフラトンやダークエネルギーを仮定する必要はなくなる。1980 年代に提唱された MOND とは違い、単純な現象論ではなく、作用原理から記述できる相対論的重力理論である。不定性あるパラメータはなく、高い予測性を持つ理論で、様々な観測データとよい一致を見ている。多種多様な修正重力のモデルが近年の精密実験により次々と棄却されているが、モファット重力については太陽系実験等による重力理論のテストで棄却されてはいない。アインシュタインの次を目指せる重力理論と呼べるかもしれない。しかし、これらはすべて考案者の Moffat 及び彼の共同研究者の主張である。また、それらの論文は単純な近似計算に基づく予測からの主張で、この理論に基づく精密な数値計算やシミュレーションは行われていなかった。

本研究の目的は、「モファット重力に基づく宇宙モデルを N 体シミュレーションの視点からの検証を試みる」というものである。

2 Moffat の修正重力とその主張

それでは、具体的にモファットの重力理論の主張を紹介しよう。モファット重力は一般相対論に斥力としての質量を持つベクトル場が付加された理論であり、「スカラー・テンソル・ベクトル重力」という正式名称はこれに由来する。弱い重力場に於ける、点源による重力加速は $\ddot{r} = -\frac{G_N M}{r^2} [1 + \alpha - \alpha(1 + \mu r)e^{-\mu r}]$ と記述される。逆二乗則の引力に湯川型の斥力が付加されることにより、重力源近傍では通常のニュートン重力として振る舞うが、中心天体の質量で決定される湯川型の重力の有効到達距離から実効重力定数が上昇し、その後ある値で一定になる。ここで、有効到達距離と無限遠での実効重力定数の増分は $\mu = \frac{D}{\sqrt{M}}, \alpha = \frac{19M}{(\sqrt{M}+E)^2}$ で与えられ、天体の質量が大きいものほど、有効到達距離と実効重力定数の増分も大きくなり、銀河から銀河団まで広範囲に互るスケールのダークマターによる効果を説明する事が出来る。

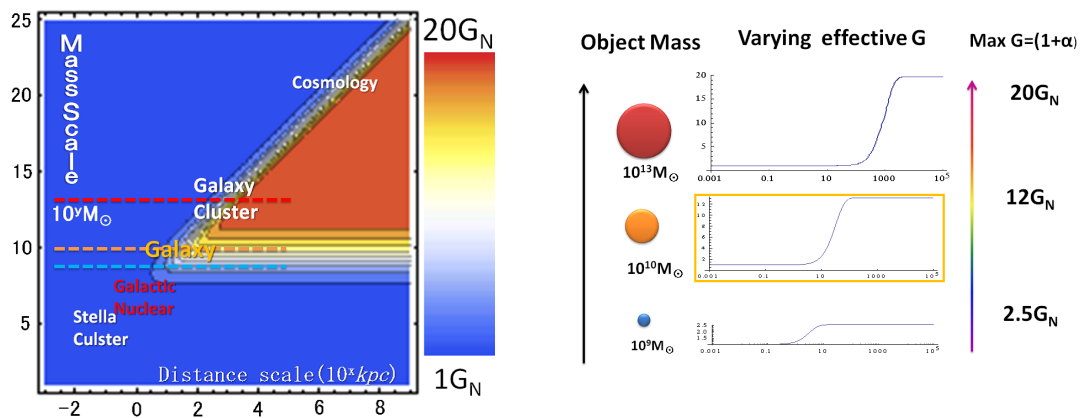


図 1: 実効重力定数とスケールの関係。
x 軸: 距離スケール。
y 軸: 天体質量

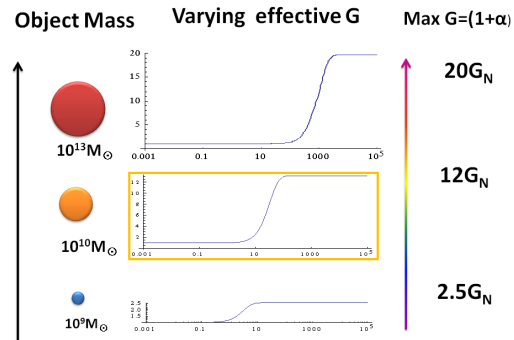


図 2:
天体からの距離と実効重力定数。
三つの異なる質量の天体について:
 $10^9 M_\odot, 10^{10} M_\odot, 10^{13} M_\odot$

D と E は有効到達距離や実効重力定数の増分に関するパラメータであり、様々な観測データからの考察から一意に決定される。 $(D \simeq 6250 M_\odot^{1/2} \text{kpc}^{-1}, E \simeq 25000 M_\odot^{1/2})$ 不定なパラメータは存在せず、従って高い予測能力を持つ理論である。先述のとおり、1980 年代に提唱された MOND とは違い、単純な現象論ではなく、作用原理から書き下される相対論的重力理論であるため重力レンズ等の相対論的天体現象や宇宙論にも適応でき、ダークエネルギーなしに加速膨張する宇宙解も存在し、CMB・Ia 型超新星など主要な宇宙論的観測とも概ね一致している。(J. W. Moffat and V. T. Toth, *Class. Quant. Grav.* **26** 085002, 2009)

3 Moffat の修正重力のシミュレーションによる検証

先述のとおり、モファットの重力理論は、ダークマター・ダークエネルギーに関わる様々な天文現象に適応され、既に、考案者やそれを支持する研究者により様々な論文が書かれているが、本研究では「宇宙論的構造形成」と「銀河の力学進化」に関し、視点を向け、検証を行った。

3.1 宇宙の構造形成

一般に宇宙の構造形成には、ダークマターによる重力ポテンシャルが必要と考えられているが、モファット重力はこれについても、大規模なスケールで重力が強くなるものとして、バリオンのみで現在の宇宙構造を作り上げることができるとされる。予測されるパワースペクトルはSDSSの銀河団の観測データを満たすものであった。しかし、当該論文で主張される構造形成の議論は線形摂動にスケールにより実効重力定数が変化することを導入し、時間発展をさせたという単純な議論に基づくものである。本研究ではこれをシミュレーションを用い精密に検証することを試みた。

具体的には、モファット重力による宇宙構造形成のN体シミュレーションを実行し、非線形な密度揺らぎの時間発展について予測を行い、その結果を統計量を含め観測データと比較し、モファット重力による宇宙モデルを評価することを計画した。

3.2 銀河の力学進化

電磁波で観測される銀河は中心付近に殆どの光源が集中し、中心から離れるに従い急激に明るさは減衰するとされる。(銀河の輝度分布は円盤銀河では $\exp(-r)$ 、楕円銀河では $\exp(-1/4 r)$ とされる。)もし、光っている物質が重力源の全てであれば、中心から離れた部分における回転速度は太陽系等と同じくケプラー則で減衰すると考えられる。ところが、ドップラー効果などを用い、実際に円盤銀河の回転運動を測定すると、銀河中心から離れた部分に於いても回転速度は減衰せず、観測された回転速度と中心からの距離をグラフにすると「平らな回転曲線」が描かれたのであった。これを説明するには、重力源となる光らない未知の物質を仮定する必要がある。これが、ダークマターハローに埋め込まれた現在の定説となる銀河モデルである。

それに対するモファット重力による説明は次のとおりである。前節で述べたとおり、モファット重力では中心天体の質量によって決まる典型スケールに於いて実効重力定数の上昇が起こる。銀河のディスクスケールに於いて実効重力定数は中心からの距離に比例するようになる。重力定数が中心からの距離に比例しているならば、ケプラー運動に於ける回転速度は一定となる。

Brownstein et al.(2006),ApJ,vol636,P721-P741 に於いて101の渦巻銀河について、ダークハローを仮定せずに輝度分布のみからモファット重力を用い予測される回転曲線と直接観測される回転速度によく一致する事が主張される。しかし、これは銀河の静力学的な観点からの議論に留まる。

しかし、これら全て銀河の「静」力学的な観点からの議論であり、銀河の動的な進化や安定性が検証されたわけではない。そういった検証はN体シミュレーションを用いて行わ

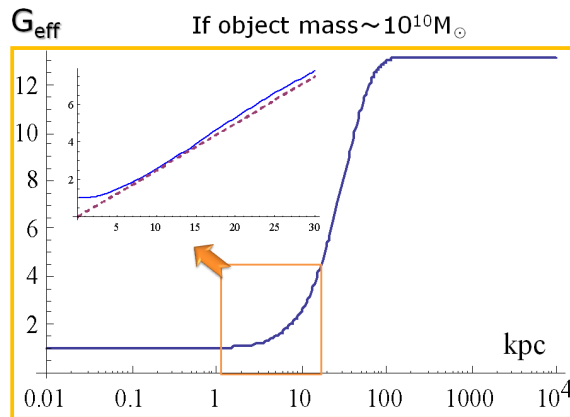


図 3: 実効重力定数と距離の関係、天体質量が $10^{10} M_{\odot}$ ~ 銀河円盤程度の場合、ディスクスケールで G_{eff} が r に比例している。

れるもので、標準的なダークマターによる銀河モデルの力学進化に関する研究も様々行われている。しかし、モファット重力による N 体シミュレーションによる検証はこれまで殆ど行われていない。そこで今回、銀河スケールにおける N 体シミュレーションを行い、動的な重力多体の振る舞いから理論の検証を試みた。

4 昨年度の研究成果と今後の展望

昨年度は、モファット重力による N 体計算のコードの基礎を開発し、テスト計算として小粒子数の計算をいくつか行った。

4.1 モファット重力の N 体コードの開発

そもそも、モファット重力による N 体計算は初の試みとなるため、計算コードを一から作り上げる必要があり、まず、最初にコード開発を実施した。Moffat et al.(2009), MNRAS, vol397,4, P1885- P1892 に於いて、モファット重力による N 体計算についての示唆がなされている。論文に記述されているのは、連続な密度分布によって生じる重力についてであるが、それを離散化し、粒子間の相互重力についての記述を書き下すと、以下の式になる。

$$a_i = - \sum_j \frac{G_N m_j (\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^3} [1 + \alpha - \alpha_{ji} (1 + \mu_{ji} |r_j - r_i|) e^{-\mu_{ji} |r_j - r_i|}] \quad \text{ここで } \mu_{ji} = \frac{D}{\sqrt{M_{eff}}}, \alpha_{ji} = \frac{19M_{eff}}{(\sqrt{M_{eff}} + E)^2} M_{eff} = - \sum_l m_l \exp\left(\frac{|r_l - r_j|}{|r_j - r_i|}\right)$$

である。この計算は直接行くと、 $\mathcal{O}(N^3)$ の計算量を必要とし、とても現実的な時間に於いて、大規模な計算を実施することはできない。一つ一つの粒子に対し、Mass shell を定義する手法を考案し、計算量を通常の $\mathcal{O}(N^2)$ に落とす事に成功した。次に示す研究成果に於いても Mass shell を用いた近似を用いて計算を行っている。

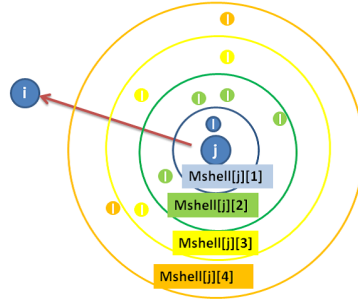


図 4: mass shell のイメージ

4.2 銀河の力学進化

表にあるパラメータをもつ指数則の銀河円盤を初期条件 (勿論ダークハローは含めない) として与え、それをモファット重力による N 体計算のコードで時間発展させるという単純な計算を行った。

1R	(距離)	40kpc
1M	(質量)	$4 \times 10^{10} M_{\odot}$
1T	(時間)	0.6Gry
1V	(速度)	65km/s

表 1: 単位系の規格化

R_d (銀河円盤のスケール長)	4.0kpc
Z_d (銀河円盤のスケール高)	0.4kpc
M_d (銀河円盤の質量)	$4 \times 10^{10} M_{\odot}$
eps(ソフトニング長)	1.25kpc
Nbody(粒子数)	2千 or 1万 or 3万

表 2: 初期条件のパラメータ

結果、色々なスケールの銀河に於いて平坦な回転曲線が、数十億年の時間、維持されることが示された。ただし、輝度分布については外縁部では指数則が維持されるものの、中心部では密度分布の中心集中が進み変化してしまった。円盤銀河の輝度分布が指数則となることは昔から観測的に解っているため、これは否定的な結果と看做される。ただし、汎用 PC での計算であり粒子数が少ないため、中心付近の振る舞いは非現実的な近接散乱が多発するため、信頼性に於いて疑問が残る。そして、粒子数を変化させ計算をした所、密度分布の指数則からの差異が粒子数を増やす事によって緩和される事が解った。今後は、並列計算を用いた大粒子数の計算も実施し、検証を進めていく。

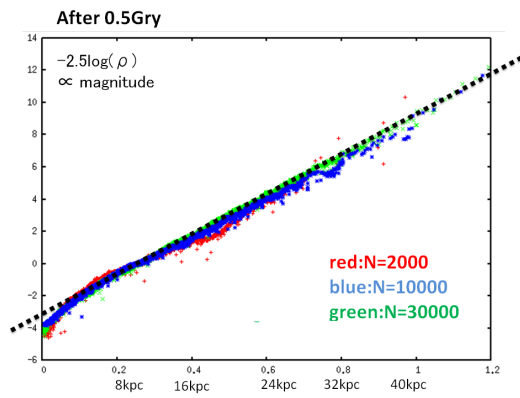


図 5: シミュレーション開始後五億年の、輝度分布と粒子数の関係。N=2000 は初期の指数則から大きくずれているが、N=10000 と N=30000 は直線を保っている。

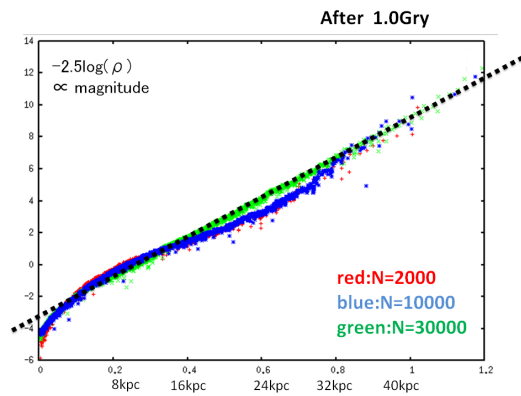


図 6: シミュレーション開始後十億年後、N=10000 も指数則から変化し始めるが、N=30000 はあまり変化していない。

4.3 宇宙論的構造形成

モファット重力の N 体計算コードを、周期的境界と宇宙膨張の効果を導入し、宇宙論的 N 体計算のコードに改造したものをを用いて、宇宙の大規模構造の形成についてのシミュレーションにも取り組んだ。

本来であれば、grafic 等の宇宙論的構造形成シミュレーション用の初期条件生成ツールを用いて、計算を行わなくてはならないが、テスト計算として定性的な傾向をみるため、ホワイトノイズを初期粒子分布として与えた。スケールとして現在の宇宙における 100Mpc のものを $z=40$ から現在に至るまでの計算を行い、そのパワースペクトルを、「POWMES」のコードを用いて解析した。(比較のために、標準宇宙モデルのものもニュートン重力による一般的なコードを用いて計算している。)

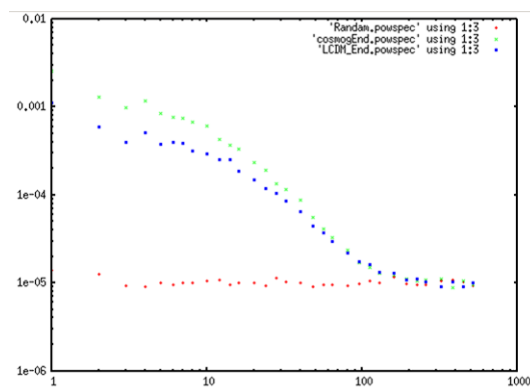


図 7: 初期状態 ($z=40$) と最終状態 ($z=0$) のパワースペクトル。

その結果は、図の様なものとなった。緑色のモファット重力のモデルのほうが、左側の大スケールにおける成長が青色の標準宇宙モデルに比べ速く、理論の定性的な特徴が表れている。(小スケールの成長が全くないが、粒子数が少なく、小スケールに於いて有意な結果が表れているとは言い難い)

これについても、次年度以降、より現実的な初期条件生成を行い、並列化を行ったコードを用い、大粒子数の計算を実施し、結果を示す予定である。