

銀河のダークハロー構造の多様性： 自己相互作用するダークマターの観点から



鎌田 歩 樹

〈基礎科学研究院 純粋物理理論研究団 34126 韓国大田広域市〉

e-mail: akamada@ibs.re.kr

宇宙のダークマターは天文学から素粒子物理学にまで及ぶ現代物理学の最大の謎の一つである。我々がダークマターについて知っていることのほとんどは、重力的相互作用を通じて宇宙の構造を観測することで得られたものである。近年このようなダークマターの重力的探査が見直されている。重力的探査では他の方法では探査することが難しいダークマターの性質を調べることができる。ダークマター粒子の自己相互作用はその代表である。本稿では、自己相互作用するダークマターが再注目されるようになった経緯について筆者の主観で概観する。特に、自己相互作用するダークマターが通常物質であるバリオンと“共謀”しながら、観測されている銀河の回転曲線の多様性をどうやって説明するのかについて詳しく議論する。

1. はじめに

宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎの精密観測に代表されるように、現代宇宙論は一般相対性理論を基礎として、宇宙がどう成長してきたか今に至るのかを明らかにしてきた。その結果、驚くべきことに、宇宙の構造がダークマターと呼ばれる未知の重力源によって支えられていることがわかった。また、ダークマターが満たすべきいくつかの性質が明らかになっており、素粒子標準模型にはダークマターの候補となる粒子が存在しないことさえわかっている。ダークマターの正体は天文学から素粒子物理学にまで及ぶ現代物理学の最大の問題の一つである。

特に、素粒子標準模型の別の大問題である階層

性問題^{*1}と深く関係している未知の新粒子であるウィンプが、ダークマターの有力な候補として、過去数十年にわたって精力的に探査されてきた。ウィンプ・ダークマターによる原子核反跳を探す直接検出実験や、ウィンプ・ダークマターの対消滅が作る高エネルギー宇宙線を探す間接検出実験 [1]、さらには高エネルギー加速器でウィンプを直接生成する実験が挙げられる。一方、精力的な探査にもかかわらず、ウィンプ・ダークマターの有力な手がかりは見つかっておらず、厳しい制限が設けられつつある。ウィンプ・ダークマターの可能性が否定されたわけではないものの、ダークマターの新しい可能性・探査戦略が考えられはじめている [2]。

このような流れの中で、ダークマターの重力的

^{*1} 電弱対称性の破れと量子重力のスケールが、なぜ16桁も離れているのかという問題。素粒子標準模型を超える物理を考える上で、階層性問題の解決（例えば超対称性）は過去数十年にわたって指導原理となってきた。しかし、驚くべきことに、欧州原子核研究機構（CERN）で行われている大型ハドロン衝突型加速器（LHC）実験で、階層性問題を解決する新物理から期待されていた新粒子（例えば超対称性粒子）が未だ発見されていない。ウィンプ同様、階層性問題とその解決にも見直しが必要になっており、非常にエキサイティングな時期にいると言える。

探査 [3] に注目が集まっている。これまでに知られているダークマターの性質のほとんどは、その存在を含めて、それが作る巨視的な重力ポテンシャルがバリオンに与える影響を観測することで、つまり大規模構造形成を通じて、得られたものである。例えば、素粒子標準模型に含まれるニュートリノは、電荷を持たず宇宙年齢よりも長寿命で、ダークマターとして持つべき性質のほとんどを満たしている。しかし、ニュートリノの質量が軽すぎるために、その自由流長以下の大きさの構造形成を妨げてしまう。この自由流長は銀河団の典型的な大きさ (10 Mpc 程度) 以上で、ニュートリノ・ダークマターの宇宙には、我々の住む天の川銀河は存在しない。このような議論をさらに推し進めて、より高い精度・より広いスケールの宇宙の構造を観測することでダークマターの性質の示唆を得ようという、野心的かつボトムアップな試みが、重力的探査である。

ダークマターの重力的探査の基本理念は、現代宇宙論の標準的な仮定である冷たい無衝突ダークマターからのズレを探ることである。冷たい無衝突ダークマターはあくまでも最も単純化された仮定であり、ダークマターの性質はそのズレに痕跡を残している。例えば、旧来のウィンプ・ダークマターでも、観測は難しいが地球サイズのダークマター・ハローの構造形成においては、冷たい無衝突ダークマターと異なる。このようなズレの候補達が銀河サイズのダークマター・ハローですで見られており、まとめて小スケール問題と呼ばれている [4]。

以下では、そのような小スケール問題のうち、20 年来のコア・カスプ問題とその現代版である回転曲線の多様性の問題を取り上げる*²。さらに、それらの問題をダークマターの自己相互作用

が解決する可能性について、主観的だがその歴史とともに述べる (文献 [6] を参照)。ここで強調しておきたいのは、ダークマターの重力的探査は、ダークマター間の自己相互作用のような、他の探査方法では調べるのできないダークマターの性質を探査可能だということである (本稿では触れないが、ダークマターが未知の素粒子ではなく、原始ブラックホールである可能性も探査できる [7])。

2. コア・カスプ問題と自己相互作用するダークマター

冷たい無衝突ダークマターにもとづく宇宙論的 N 体シミュレーションにおいて、ダークマター・ハローの密度分布はハローの大きさによらず普遍的であることが知られている [8, 9]。その分布は、内側に行くほど密度が高くなるカスプ状のものである (密度が中心からの距離に反比例する NFW 分布 [10] で記述されることが多い)。この振る舞いは、銀河団では典型的な大きさの数倍内側まで確認されている [11, 12] もの、銀河・矮小銀河では観測と合わない。矮小銀河の回転曲線は、内側で密度が一定なコア状の分布を示唆している。これがコア・カスプ問題と呼ばれ、 N 体シミュレーションに取り入れられていない、銀河形成・超新星爆発等のバリオン・ダイナミクスや、ダークマターの素粒子的性質が、銀河・矮小銀河の構造形成で重要な役割を果たすことを示唆している。当時も今もバリオン・ダイナミクスとダークマターの素粒子的性質のどちらがより本質的な役割を果たすのかについては決着していないが、本稿では後者を紹介する。また本稿では、矮小銀河といった際には、我々の銀河に付随していない、孤立してガスの多いものをさす (ガスの少ない衛

*² 他的小スケール問題でよく知られているものに、ミッシング・サテライト問題がある。冷たい無衝突ダークマターにもとづく宇宙論的 N 体シミュレーションから、天の川銀河と同程度の大きさの銀河を持つ。シミュレーション銀河中のサブハローの個数が、天の川銀河に観測されている衛星銀河の個数よりも 1 桁以上多い。より本質が顕現な現代版として、TBTF (Too Big To Fail) 問題が提起されている (これらの問題に関しては、文献 [5] を参照)。

星銀河に関しては、林航平博士による本号の記事と文献 [13] を参照).

コア・カスプ問題 [14] (1994年) が指摘されたのち、自己相互作用するダークマターがその解決となる可能性が指摘された [15] (1999年). ダークマター粒子同士の弾性散乱は、ハロー中の熱交換をもたらす. ハローの内側にいる温度の低いダークマター粒子は、ハローの外側にいる温度の高いダークマター粒子との散乱によって温められ、内側に止まることができない. 結果、自己相互作用するダークマター・ハローは内側でコア状の密度分布を持つ (図1左). この自己相互作用による熱交換が有効なのは、散乱断面積の大きさで決まる特徴的な範囲内のみである. 言い換えると、この特徴的な範囲内では、銀河ができてから今までにダークマター粒子が一度以上散乱を経験している. コア・カスプ問題を解くためには、この特徴的な範囲が銀河の典型的な大きさ以上でなければならず、ダークマターの質量で割った散乱断面積は $1 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度以上であることが要求される (以下ダークマターの質量で割った散乱断面積を単に散乱断面積と呼ぶ). これは核子同士の散乱断面積と同程度であり、旧来のウィンプ・ダークマターで期待されるものよりも、十数桁大きい.

一方、ダークマターの自己相互作用は、ハローを球形にするという効果もある. 無衝突ダークマターのハローは、生成の際にどの方向から崩壊したかに応じて、典型的に短軸が長軸の約半分くらいの楕円体である [11]. ダークマターの自己相互作用によってハローが大局的に熱平衡に入る (図1右) と、そういった崩壊の際の履歴が消えてしまって、ハローは球形になる. 一方、重力レンズ効果を用いた銀河団 (MS 2137-23) ハロー

の密度分布測定から、ハローの中心領域 (70 kpc 程度) でその密度分布が有意な楕円率を持つことがわかっている. 自己相互作用するダークマターが提案されてすぐに、このことを用いて散乱断面積に $0.02 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度より小さいという制限が設けられた [17] (2000年). この上限は、コア・カスプ問題を解くのに必要な散乱断面積よりも2桁程度小さい.

矮小銀河と銀河団ではダークマターの速度が1桁程度違うので、散乱断面積に速度依存性を考えれば無矛盾である. しかし、そもそもウィンプ・ダークマターでは考えられないほど大きな散乱断面積が必要なこともあり^{*3}、自己相互作用するダークマターの研究は下火になった. 状況が変わりはじめたのは、ATICやPAMELAに代表される高エネルギー宇宙線実験が単純なベキ関数的エネルギー分布では説明できない、陽電子過剰を報告したところからである [18] (2008年). これらがダークマターの対消滅起源であるとする、その熱的残存量が現在のダークマター密度に合う典型的な対消滅断面積よりも最低2桁くらい大きくなってはいけぬ. この数桁のギャップを解決する方法が、対消滅断面積に速度依存性を持たせることである. 熱的残存量が決まる初期宇宙ではダークマター粒子がほぼ光速で運動しているが、現在はダークマター粒子は重力的な速度でもっとゆっくり運動している. ダークマター粒子に重力以外の引力相互作用があると、初期宇宙では運動エネルギーの方が大きくほとんど影響を受けないが、現在は引力相互作用の影響を受けて対消滅断面積が大きくなる.

この引力相互作用は、ダークマター粒子のみが感じる引力相互作用であり、旧来のウィンプでは

^{*3} 当時の素粒子物理学では、階層性問題に関わらないものは軽視される傾向にあり、筆者もその一人であった. このため、ウィンプ以外のダークマターの候補粒子を積極的に考える動機があまりなかったと思われる (本稿では触れないが、アクシオン・ダークマターには素粒子物理学から別の動機が存在する). この先入観を打ち砕いたのはやはり実験で、LHC実験で階層性問題を解決する新物理から期待されていた新粒子が見つからないことで、ウィンプ以外のダークマターの候補粒子にも注目が集まりはじめている.

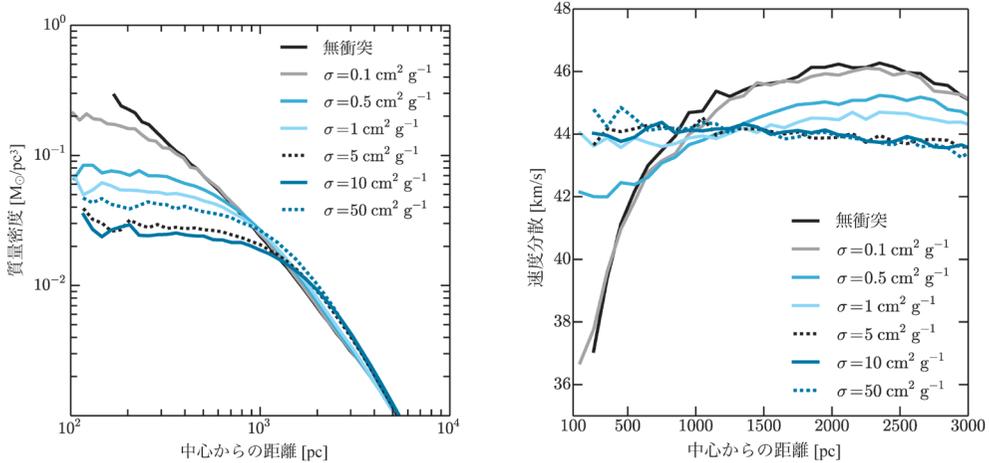


図1 ダークマターのみのN体シミュレーションの結果(文献 [16] から転載). 質量が $10^{10} M_{\odot}$ 程度のダークマター・ハローの密度分布(左図)と速度分散分布(右図). [左図] 実線は, 300 pc 付近の密度が高い方から, 冷たい無衝突ダークマター, $\sigma=0.1, 0.5, 1, 10 \text{ cm}^2/\text{g}$ の散乱断面積を持つ自己相互作用するダークマターである. 2つの点線は, 300 pc 付近の密度が高い方が $\sigma=50 \text{ cm}^2/\text{g}$, 低い方が $\sigma=5 \text{ cm}^2/\text{g}$ の自己相互作用するダークマターである. 無衝突ダークマターでは, 内側に行くほど密度が高くなるカスプ状の分布であるのに対し, 自己相互作用するダークマターでは, 内側で密度が一定なコア状の分布が実現されている. $\sigma=0.1-10 \text{ cm}^2/\text{g}$ の自己相互作用するダークマターでは, 散乱断面積を大きくするほど内側の密度が下がっている. $\sigma=50 \text{ cm}^2/\text{g}$ の自己相互作用するダークマターでは, ダークマター・ハローが重力熱力学的コア崩壊に差ししかかっており, 内側の密度が逆に上がっている. [右図] 実線は, 2000 pc 付近の速度分散が高い方から, 無衝突ダークマター, $\sigma=0.1, 0.5, 1, 10 \text{ cm}^2/\text{g}$ の散乱断面積を持つ自己相互作用するダークマターである. 2つの点線は, 500 pc 付近の速度分散が高い方が $\sigma=50 \text{ cm}^2/\text{g}$, 低い方が $\sigma=5 \text{ cm}^2/\text{g}$ の自己相互作用するダークマターである. $\sigma=1-50 \text{ cm}^2/\text{g}$ の自己相互作用するダークマターでは, 速度分散(つまり温度)が中心からの距離のよらず一定で, ダークマター・ハローが大局的熱平衡にあることが見てとれる($\sigma=5-50 \text{ cm}^2/\text{g}$ の自己相互作用するダークマターは, ほとんど区別できない).

なかなか実現できない. この高エネルギー宇宙線における騒動によって, 素粒子物理学でウィンプ以外のダークマターを考えることに対する心理障壁が少し下がった. また, この引力相互作用は対消滅断面積に影響するだけでなく, ダークマター粒子の大きな散乱断面積を容易に実現する. さらに, この散乱断面積は速度依存性を持ち, 銀河団の楕円率からの制限を満たしながら, 矮小銀河のコア・カスプ問題を解決できる. ここにきて, 自己相互作用するダークマターを考える動機が再燃した. さらに, 自己相互作用するダークマターにより詳細なN体シミュレーションがなされた [19, 20]. これにより, 自己相互作用するダークマターのハロー中の密度分布を, 精度良くかつ解析

的に記述する方法がわかった. 次章で紹介する筆者の研究もこの方法にもとづいている. また, 解析的な概算で設けられた銀河団の楕円率からの制限は, 少なくとも1桁くらい弱くなることがわかっている(保守的に $1 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度より小さいと言われるが, まだもっともらしい制限はつけ直されていない).

3. 回転曲線の多様性の問題と自己相互作用するダークマター

3.1 回転曲線の多様性の問題

そんな中, コア・カスプ問題が現代的に再検討された [21] (2015年). THINGSのように高い角度分解能を持つHIサーベイで得られた銀河の

2次元速度分布からは、非回転成分のような系統誤差の少ない良質な回転曲線が銀河の内側まで得られる。また、EAGLEのような流体力学シミュレーションは、バリオン・ダイナミクスが他の小スケール問題（脚注3を参照）の解決となりうることをすでに確認しつつある。このシミュレーションの予言と、観測された回転曲線を比べる（図2）。具体的には、観測されている各銀河の回転曲線に対して、その外側で回転速度が一致する“銀河”をシミュレーションから持ってきて、内側の回転曲線を比較する。すると、シミュレーションが内側の回転速度を大きく予言しすぎる銀河（図2右）と、シミュレーションと観測が非常によく合う銀河（図2左）の両方がほぼ同数あることがわかった。

図2は2つの問題を示唆していることに注意してほしい。まず、図2右の銀河に見られるように、EAGLEのような流体力学シミュレーションでも、コア・カスプ問題を解けていない。これは、今考えている銀河サンプルは、天の川銀河よりも1桁くらい軽く、星形成が天の川銀河よりも不活発で、ダークマター・ハローに与える影響が小さいためである。実際、この図に見られるように、バリオン・ダイナミクスを考慮した流体力学シミュレーションの結果と、ダークマターだけを考慮したN体シミュレーションの結果はあまり変わらない。ただ、これはあくまでも現在の流体力学シミュレーションにもとづいており、さらに空間的・時間的に分解能の高いシミュレーションで結果が変わっても不思議ではない*4。

さらに本質的な問題だと思われるのが、同程度の質量（つまり外側の回転速度）を持つダークマター・ハローでも、その密度分布に銀河ごとの多様性があることである。図2の左右で、内側（数kpc）の回転速度に2倍程度の差があるので、質量では4倍程度の差があることになる。一方、冷たい無衝突ダークマター・ハローにはほとんど個性がないことが知られている。一般にダークマターの密度分布には、典型的な半径と密度の2つのパラメーターがあるが、その2つは独立ではない。これは、質量と質量集中度の関係として、宇宙論的N体シミュレーションから示唆されている。つまり、図に見られるように、外側の回転速度を決めてしまうと、内側の回転曲線はほとんど一意に決まってしまう。

上述した2つの問題が示唆することは、ダークマター・ハローの密度分布をカスプ状からコア状にかえるメカニズムが何かあったとすると、その効率は同程度の大きさの銀河ごとに異なるということである。とある銀河ではよく働くが、別の銀河ではほとんど働かない。多様性の問題がより本質的だと考えられている理由は、ナイーブにはダークマターの性質がその解決にならないためである*5。ダークマターの性質による影響は、ハローに普遍的な影響を及ぼす。例えば自己相互作用するダークマターでは、無衝突ダークマターで説明できなかった銀河（図2右）を説明できるようになるが、無衝突ダークマターで説明できていた銀河（図2左）を説明できなくなる、と思われていた。

*4 コア・カスプ問題は、ハローの動力学に関する問題であり、他の問題に比べて、空間的にも時間的にも高い分解能がシミュレーションに要求される。実際、コア・カスプ問題を解決すると思われるバリオン・ダイナミクスはあるものの、まだ流体力学シミュレーションでは確認されていない。このようなダイナミクスとして、超新星爆発が挙げられる [22]。超新星爆発に伴いガスが突発的に中心部から外側へ流れると、低くなった重力ポテンシャルに沿ってダークマターも外側に流れる。これが継続的に起こると、ダークマター・ハローの密度分布がコア状になると考えられている。

*5 実際、文献 [21] には次のように書かれている：“Finally, we note that the diversity of rotation curves illustrated in Fig. 5 disfavors solutions that rely on modifying the physical nature of the dark matter... and suggests that a mechanism unrelated to the nature of the dark matter must be invoked to explain the rotation curve shapes.”

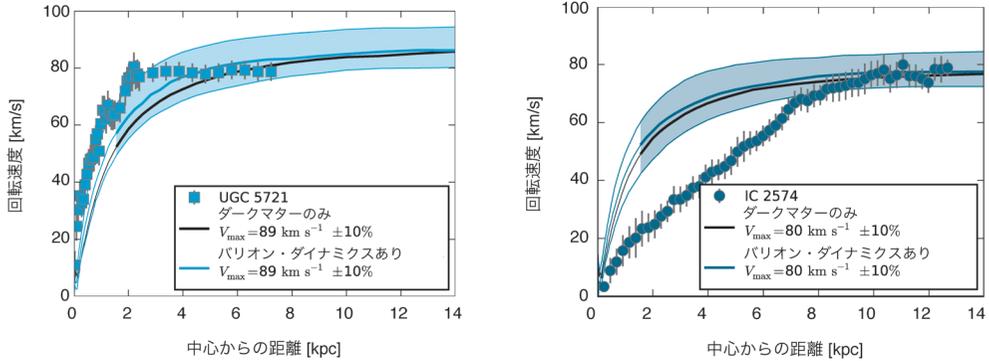


図2 観測されている銀河の回転曲線と、冷たい無衝突ダークマターにもとづきバリオン・ダイナミクスを取り入れた流体力学シミュレーション結果との比較 (文献 [21] から転載). 外側の回転速度が実銀河と同程度 (80–90 km/s) であるシミュレーション銀河が選ばれている. シミュレーション銀河の回転曲線の示しうる範囲が色塗りされている. 色塗りよりも内側 (2 kpc) では, シミュレーションの分解能が不足している. 2つの実線は, シミュレーション銀河の回転曲線の平均が, バリオン・ダイナミクスの有無でどのくらい変わるかを示している. バリオン・ダイナミクス有りの方が回転速度が少しだけ大きい. 左図の銀河 (UGC 5721) の回転曲線は, シミュレーション銀河と内側までよく合っている. 一方, 右図の銀河 (IC 2574) は内側の回転速度が, シミュレーション銀河の1/2程度しかない.

自己相互作用するダークマターとバリオンの共謀*6を指摘することで, その予想を覆したのが筆者たちの仕事 [24] である. 宇宙論的な起源は定かではないが, 少なくとも観測的に, 同程度の大きさのダークマター・ハロー中でもバリオンの密度分布には多様性がある. 渦巻銀河だけ見ても, 内側に集まった銀河ディスクを持つものもあれば, 外側に広がった銀河ディスクしか持たないものもある. 自己相互作用するダークマターが, バリオンの多様な密度分布に応じて, その密度分布を大きく変化させ, 銀河の回転曲線の多様性を説明する.

3.2 筆者たちの仕事

この仕事をなせた背景から振り返ってみたい. 前章に述べたように, 自己相互作用するダークマターのより詳細なN体シミュレーションにより, そのハロー中の密度分布を, 精度良くかつ解析的に記述する方法がわかってきた. それは, 散乱断面積で決まる特徴的な範囲外では, ダークマター

粒子が銀河年齢 (10 Gyr 程度) の間に一度も散乱を経験せず, 無衝突ダークマターと変わらないことにもとづく. 外側では無衝突ダークマターの分布を使うので, 上述した質量と質量集中度の関係から, 質量を決めるとその分布が決まってしまう. 一方, 内側では自己相互作用のためにハローが大局的熱平衡に入るので, 密度勾配による圧力と重力が釣り合っている等温分布を用いる. 等温分布には, 温度と中心密度の2つのパラメータがあるが, 特徴的な範囲の境界で, 密度と質量が外側の無衝突ダークマターの分布と一致するように決めてしまう. この方法を用いると, 自己相互作用するダークマターの密度分布を与えられたハローの質量に対して構成することができる.

この方法を応用して, 自己相互作用するダークマターの密度分布が, バリオンの分布に応じてどう変わるかを計算することができる. この方法で, 天の川銀河の銀河バルジ・ディスクを取り入れて, より現実的なダークマター・ハローの密度

*6 英語ではコンスピラシー (conspiracy) であるが, この分野に対する悪い偏見を読者に与えないことを願う. この共謀は, ダークマターなしで銀河の回転曲線を説明する修正ニュートン力学にピタリとハマるため, 元々そちらで研究されていた [23] (ただし, 修正ニュートン力学は今のところ宇宙論的な要請には答えない).

分布が計算された [25] (2013年). 驚くべきことに, ダークマターだけの計算に比べて, ハローの中心密度が高くなり, コアの大きさが1桁ほど小さくなることがわかった. これはバリオンの作る重力ポテンシャルが, ダークマターを中心に集めるためである. また, 銀河ディスクの作る軸対称な重力ポテンシャルに応じて, 同じ距離でもディスク方向のハローの密度の方が高くなる. 筆者はその一年後(2014年)に, この論文の著者のカリフォルニア大学(UC) RiversideのHai-bo Yu准教授の博士研究員になった. また, もう一人の著者であるManoj Kaplinghat教授のいるUC Irvineに車で1時間で行けるようになったので, 自然とこの続きの研究をやることになった.

まず手をつけたのは, 銀河ディスクの作る重力ポテンシャルによってダークマター・ハローの密度分布がどの程度変わるのかを系統的に調べることである. ここでいきなり技術的な問題に出くわした. 軸対称なジーンズ方程式, つまり2次元非線形偏微分方程式を解くだけなのだが, それが上手くいかない. 天の川銀河のダークマター・ハローを調べる際に用いた空間を格子に区切る計算方法は, 銀河ディスクの分布次第では数値的に安定しない. よって, 別の先行研究 [26] で用いられていた多重極展開を用いる方法に切り替え, 一から計算コードの開発をはじめた. しかし, この方法にも数値的に安定しない領域があり, 開発は難航した. 別のプロジェクトによる中断期間を挟みながら安定したコードを得られたのは, 2015年の半ばであった*7.

銀河ディスクの質量は同じにしたままで, 分布

を外側に広がったものから内側に集まったものに変えていき, 自己相互作用するダークマターのハローの密度分布がどう変化するかを見た. その結果は非常に面白いものであった. 外側に広がった銀河ディスクは, ダークマターにほとんど影響を与えず, ハローの内側の密度は低いままである. 一方, 内側に集まった銀河ディスクは, ダークマターを内側に集め, ハローの内側の密度は無衝突ダークマターよりも高くなりうる. この効果が上述した銀河の回転曲線の多様性を説明するのではないかと考えた. ここで, 同様の効果は無衝突ダークマターにもあるが, 銀河ディスクの分布に応じて, ハローの内側の密度が高くなるが, 低くはならないことに注意してほしい. この効果が多様性だけなら出すことができるが, 図3右の銀河(IC 2574)のように, 観測されている回転速度の方が理論予想よりも小さい銀河で, 不一致を解消する助けにはならない. 共謀と呼ぶからには, 実際に観測されている多様な銀河の回転曲線を説明できなくてはならない.

かなりはじめの方に図2左の銀河(UGC 5721)を解析した. これは無衝突ダークマターのカスプ状の密度分布が非常によく合う銀河で, バリオンの作る重力ポテンシャルなしでは, 自己相互作用するダークマターではとても説明できないと思われていた銀河である. 観測されている銀河ディスクの分布から*8, 先の方法で自己相互作用ダークマターのハローの平衡分布を計算し, 銀河の回転曲線と比べた. 結果は驚くべきもので, 図3左のように, 自己相互作用ダークマターの平衡分布は銀河の回転曲線を非常によく説明する*9.

*7 Hai-boは残念ながら数値計算手法に詳しくなく, 実用上のアドバイスをもらうことはできなかったが, 常に“熱烈に励まして”もらった. 当時は大変だったが, 最終的にコードが完成したのは, Hai-boの熱意とカリフォルニアの開放的な大地によるところである.

*8 正確には, 観測されているバリオンの輝度分布に質量光度比をかけて, 銀河ディスクの厚みは無視し, 指数関数的分布でフィットしたもの. 質量光度比は種族合成モデルから大きく逸脱しない範囲で回転曲線に合うようにフィットしている.

*9 あまりに上手いので, 自分のコードが信じられず, 数週間チェックし続けた. その後, Hai-boに結果を持って行った時の興奮ぶりは今でも忘れられない. 筆者だけ楽しむのはズルいというので, コードの使い方を説明すると, 本当に昼夜を問わず銀河を解析し続けていた.

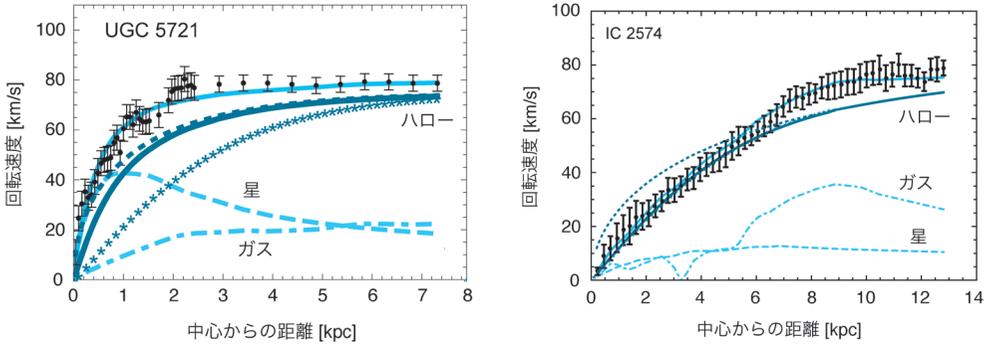


図3 図2と同じ銀河の回転曲線と自己相互作用するダークマターの予言の比較 (文献 [24] から転載). ダークマターの散乱断面積は $3 \text{ cm}^2/\text{g}$ にとつてある. 両銀河の回転曲線とも, 自己相互作用するダークマターでよく説明されている. 予言される回転曲線をダークマター・ハローの寄与 (“ハロー”・実線), 銀河ディスクの寄与 (“星”・長破線), ガス・ディスクの寄与 (“ガス”・長鎖線) に分解してある. 参照用に, 銀河ディスクの作る重力ポテンシャルを無視した時の, 自己相互作用するダークマターのハローの寄与 (“ハロー”・星印), および無衝突ダークマターのハローの寄与 (“ハロー”・短破線) も示してある. 銀河ディスクの作る重力ポテンシャルの有無で, 自己相互作用するダークマターのハローの寄与が, 左図では大きく変わっているが, 右図ではほとんど変わっていない (実線と星印はほとんど区別できない).

図3左の銀河 (UGC 5721) では, 自己相互作用ダークマターのハローの平衡分布 (実線) はバリオンの作る重力ポテンシャルの影響を大きく受けており, それなしの分布 (星印) とは大きく異なる. これは, 銀河ディスクが非常に内側に集まっていて, その重力ポテンシャルが支配的であるためである. 図3右の銀河 (IC 2574) では, 元々期待されていたように, 自己相互作用するダークマターの予言は, その回転曲線をよく再現する. こちらでは, 自己相互作用ダークマターのハローの密度分布はバリオンの作る重力ポテンシャルの有無でほとんど異ならない. これは, 銀河ディスクが外側まで広がっていて, ダークマター・ハローの重力ポテンシャルが支配的であるためである.

4. まとめと進展

最後にこの結果において重要な点を繰り返しておきたい. まず, ほとんどパラメータがないことである. ダークマターの散乱断面積は $3 \text{ cm}^2/\text{g}$ に固定されており, バリオンの分布, ダークマター・ハローの外側の回転速度, 質量集中度が与

えられれば, ハローの密度分布は一意に決まってしまう. 質量集中度は質量と強く関係しており, バリオンの分布は質量光度比の不定性をのぞいて観測的に決まってしまう. つまり実質的には, 外側の回転速度に対して内側の回転曲線は予言と言っていない. それでも, 銀河間の多様性を再現しながら, 本稿では全てをお見せできなかったが, 30個程度の銀河の回転曲線をかなりよく再現できる. ただ, この研究において, なぜ同程度の大きさのダークマター・ハロー中のバリオンの分布に多様性があるのかという問題は, 観測事実だから仕方ないとして説明を放棄している. 別の言い方をすれば, 銀河の回転曲線の多様性の問題をバリオンの分布の多様性に還元したとも言える. この謎が近い将来に解明されることを願ってやまない.

本稿では, 自己相互作用するダークマターがなぜ最近再注目されるようになったのかと, その一因を担った銀河の回転曲線の多様性の問題を紹介した. その一方で, 紹介できなかった重要な話題もある. これらを説明するにはまた本稿程度の分量が必要になるので, 別の機会とし, ここでは軽

く触れておくだけにする。一つは、ダークマター粒子の散乱断面積の速度依存性である。コア・カスプ問題や銀河の回転曲線の多様性の問題は、散乱断面積を $1 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度にとると、非常によく説明できると述べた。しかし、これは銀河や矮小銀河での話であり、典型的なダークマター粒子の速度は $30\text{--}200 \text{ km/s}$ である。一方、弾丸銀河団や合体銀河団の観測から、散乱断面積に $0.1 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度より小さいという制限が設けられている（文献 [5] を参照）。ここでは、典型的なダークマター粒子の速度は $1,000 \text{ km/s}$ 程度である。種々の不定性を考えるとまだ確定的ではないものの、これは散乱断面積の速度依存性を示唆しているのかもしれない。このように違う大きさの構造の観測を組み合わせることで、ダークマターの性質の詳細に迫ることができるのがダークマターの重力的探査の醍醐味の一つである。

もう一つは、ダークマター粒子の散乱断面積をさらに大きくしていった時にハローに何が起こるのかの理解が、数値実験により進んでいることである。2020年現在の理解では、本稿で述べた2016年以前の話は、散乱断面積がある程度よりも小さい、つまり平均自由行程がある程度よりも長いところに限定されている。この領域では、散乱断面積を大きくするにつれ、無衝突ダークマターからどんどんズレていく。しかし、散乱断面積がある程度よりも大きくなると、話が変わってくる。極限を考えてみるとわかりやすい。散乱断面積を極めて大きくすると、つまり平均自由行程が極めて短くすると、銀河年齢の間にダークマター粒子はほとんど動くことができない。つまり、ダークマター・ハロー中での熱交換が極めて非効率になり、コア状の密度分布を作ることができない。さらに積極的に調べられているのは、この中間領域で何が起こるかということである。散乱断面積を $100 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度にとると、球状星団でよく知られている重力熱力学的コア崩壊を起こすと考えられている [27]（球状星団と違い連星形成を

起こさないで、コア崩壊が効率的に進むと考えられている）。今のところ数値実験に限られているが、これから解析的な理解も進み、そう遠くない未来に、その観測的な帰結まで明らかにされることが期待される。そうするべく筆者も懸命に取り組んでいる。

5. さいごに

先に述べたように、バリオン・ダイナミクスとダークマターの素粒子的性質のどちらがより本質的な役割を果たすのかについては、決着していない。より正確に言うと、どちらでも解決できることがわかってきた。しかし、我々の研究では、少なくとも銀河の回転曲線の多様性を説明するためには、ダークマターの自己相互作用がハローを大局的に熱平衡にすることと、観測されているバリオンの分布の両方が重要であった。我々の研究から得られる示唆は、どちらが重要かという二元論ではなく、どちらも重要かもしれないということである。最終的にどう決着するのはわからないが、観測・理論予言の両面で現在進行形で大きく進展している。今後の動向に注目してほしい。

そもそもダークマターの存在が宇宙の構造形成から示唆されたことを考えると、ダークマターの重力的探査の歴史は長い。直接検出実験などの影に隠れてきた。直接検出実験において有力な手がかりが見つからないことを受けて、ダークマターの重力的探査に近年また注目が集まっている。実際、直接検出実験などは相補的なダークマターの性質を調べることができ、非常に興味深い。この学際分野の主な担い手は、若い天文学者と素粒子物理学者であり、林航平博士による本号の記事と本稿がそれを象徴している。本稿によって、さらに多くの人々がダークマター探査に興味を持ってくれ、その御旗のもとに天文学と素粒子物理学の交流がさらに進むことを願って、結びとする。

謝 辞

本稿は、UC Riverside の Hai-bo Yu 准教授、UC Irvine の Manoj Kalinghat 教授、Andrew Page 博士と行った共同研究にもとづいています。素粒子出身の筆者が、宇宙の構造形成について曲がりなりにも研究できているのは、吉田直紀教授の寛容さのおかげです。本稿が日の目を見たのは、本当に気長に執筆をすすめてくださった大栗真宗助教と、編集を担当してくださった岡部信広准教授のおかげです。また、林航平博士が本号の関連記事を担当してくれたおかげで、伸び伸びと本稿を書くことができました。皆さまに感謝いたします。

参考文献

- [1] 白崎正人, 2015, 天文月報, 108, 414
 [2] Feng, J. L., 2010, ARA&A, 48, 495
 [3] Buckley, M. R., & Peter, A. H. G., 2018, Phys. Rept. 761, 1
 [4] Bullock, J. S., & Boylan-Kolchin, M., 2017, ARA&A, 55, 343
 [5] 井上開輝, 2017, 天文月報, 110, 341
 [6] Tulin, S., & Yu, H.-B., 2018, Phys. Rept. 730, 1
 [7] 新倉広子, 2020, 天文月報, 113, 6
 [8] 福重俊幸, 2005, 天文月報, 98, 750
 [9] 吉田直紀, 2006, 天文月報, 99, 452
 [10] Navarro, J. F., et al., 1996, ApJ, 462, 563
 [11] 大栗真宗, 2010, 天文月報, 104, 30
 [12] 岡部信広, 2018, 天文月報, 111, 18
 [13] 林航平, 2015, 天文月報, 108, 405
 [14] Moore, B., 1994, Nature, 370, 629
 [15] Spergel, D. N., & Steinhardt, P. J., 2000, Phys. Rev. Lett. 84, 3760
 [16] Elbert, O. D., et al., 2015, MNRAS, 453, 29
 [17] Miralda-Escude, J., 2002, ApJ. 564, 60
 [18] Arkani-Hamed, N., et al., 2009, Phys. Rev. D, 79, 015014
 [19] Rocha, M., et al., 2013, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 430, 81
 [20] Peter, A. H. G., et al., 2013, MNRAS, 430, 105
 [21] Oman, K. A., et al., 2015, 452, 3650
 [22] Read, J. I., et al., 2016, MNRAS, 459, 2573
 [23] McGaugh, S. S., et al., 2016, Phys. Rev. Lett. 117, 201101
 [24] Kamada, A., et al., 2017, Phys. Rev. Lett. 119, 111102
 [25] Kaplinghat, M., et al., 2014, Phys. Rev. Lett. 113, 021302
 [26] Amorisco, N. C., & Bertin, G., 2010, AIP Conf. Proc. 1242, 288
 [27] Balberg, S., et al., 2002, ApJ, 568, 475

Diversity of Galactic Halos: Self-interacting Dark Matter

Ayuki KAMADA

Center for Theoretical Physics of the Universe, Institute for Basic Science (IBS), Daejeon 34126, Korea

Abstract: Dark matter in the Universe is one of the biggest mysteries of the modern physics, ranging from astronomy to particle physics. The known properties of dark matter so far are basically inferred from observations of the structure of the Universe. The gravitational probes of dark matter has been re-evaluated. The gravitational probes can probe properties of dark matter that are almost inaccessible in other probes. Self-interaction of dark-matter particles is representative. In this article, I give an overview of how self-interacting dark matter has been attracting renewed attention. In particular, I describe how the “conspiracy” between self-interacting dark matter and ordinary matter of baryons explains the diversity of the observed galactic rotation curves.