

# ダークマターシミュレーション解説

三田村彰大 (地球惑星物理学科4年)

[https://shota-mitamura.com/works/2026gogatsusai\\_simulation/](https://shota-mitamura.com/works/2026gogatsusai_simulation/)



**Figure1:** 銀河の画像 (wikipedia より)。こんな画像なんぼあってもいいですからね。

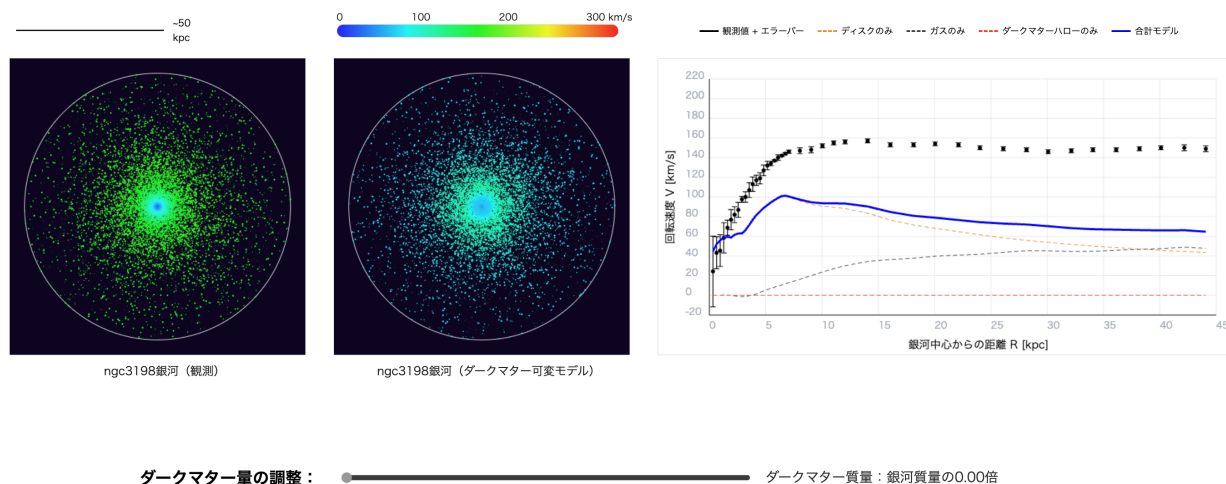
## ※ 学生向け

- index.html をダブルクリックするだけでコードが動きます。
- calc.js で諸々のパラメタを設定できます。fps、粒子数、粒子サイズ、回転速度スケールを変更すると (パソコンの負荷と引き換えに) 綺麗な動画を出力することができます。

## 概要

### ダークマターの量を推定してみよう！

ダークマターの量を調整して銀河の回転速度が観測と一致する値を探して見ましょう。



Credit: SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves, DOI: 10.3847/0004-6256/152/6/157

([https://shota-mitamura.com/works/2026gogatsusai\\_simulation/](https://shota-mitamura.com/works/2026gogatsusai_simulation/)にシミュレーションのリンクを置いてあるのでぜひ触ってみてください。)

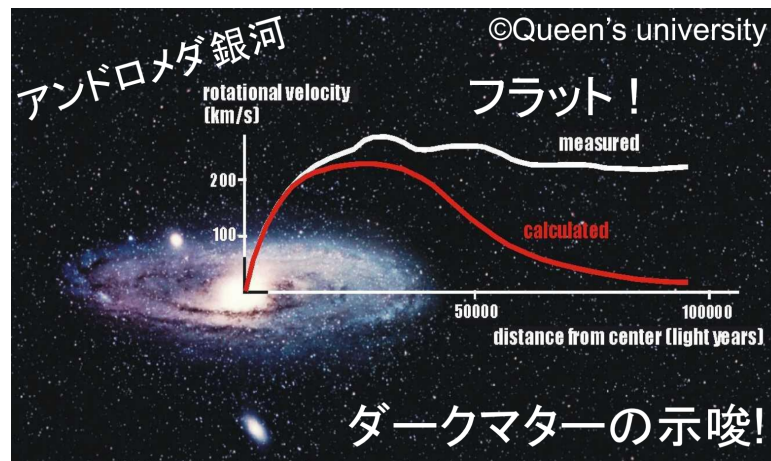
さて、このシミュレーションでは、ダークマターの量を推定する過程を体験することができます。画面一番左の動画 (図中の緑に見える部分) は実際に観測されている銀河の回転の様子を表しています。また、その隣にある動画 (図中の水色に見える部分) は、計算から求めた銀河の回転の様子を表す動画です。このとき、動画を見ると、計算から求めた銀河の回転速度が観測から求めた銀河の回転速度に比べて遅いことがわかれると思います。

そこで、下のスライダを右に動かして少しずつ銀河にダークマターを足してみてください。スライダの右側に今あなたがどのくらいのダークマターを注入しているかを表示しています。すると、ダークマターを注入すれば注入するほど、計算モデルの銀河の回転速度が上がっていくことがわかれると思います。(色が赤に近づくほど回転速度が速いことを表しています。) すなわち、画面一番左の「観測されている銀河の回転の様子」とその隣の「計算から求めた銀河の回転の様子」が一致するようなダークマターの量が、「我々の宇宙をよく説明してくれるダークマターの量」ということになります。

また、画面一番右では回転速度をグラフとして表示しています。横軸が銀河中心からの距離、縦軸がその距離での回転速度です。また、黒色のプロットが観測されている銀河の回転速度、青色のグラフが今作っている計算モデルの回転速度に対応しています。このグラフを見ながらだと、観測と計算モデルが一致するダークマター量をより正確に推定できます。

## 原理

銀河の回転速度を求める方法は二通りあります。純粋に観測から求める方法<sup>\*1</sup>と、愚直に手計算から求める方法です。(後者は銀河に存在する物質が及ぼす重力と遠心力の釣り合いを考えて計算します) この時、観測で求めた回転速度と手計算で求めた回転速度がずれる、というのがいわゆる「銀河の回転曲線問題」というものになります。(下図参照。)



で、この回転速度のずれを説明したいわけですね。今、手計算で求めた回転速度は観測より遅いので、この「遅さ」を埋めたいわけですね。一体どうすれば銀河の回転速度を速くすることができるでしょうか。

そこで、太陽の周りを回る地球を思い出してみましょう。今太陽が仮にとっても重かったとすると、地球に働く引力は強くなるのでそれと釣り合うためには地球は大きな遠心力を持つ必要があり、結果地球の公転速度は速くしなければなりません。逆に、太陽が軽かったとすると、地球に働く引力は弱くなるのでその引力と釣り合うために必要な遠心力も小さくなり、地球の公転速度は遅くても良いことになります。

このような考察から、何か天体があった時にその回転（公転）を早くするにはより大きな質量が中心にあればいいということが分かります。

ここで銀河に話を戻しましょう。今、計算モデルの回転速度を上げるために何か大きな質量を銀河中心においてあげる必要があります。しかし、ガスやディスク、バルジなどの見えている物質は全て計算に織り込んでしまっています。なので、「我々がまだ観測できておらず計算にも織り込んでいないような物質」の存在を新たに仮定し、計算モデルに追加してあげる必要があります。

そうして出てくるのがダークマターです。つまり、「我々には観測できないが、なんか重力相互作用する物質がいる」という仮定からダークマターが出てくる訳ですね。

より詳しくは、下図のような球状の分布をもつダークマターの存在を仮定します。<sup>\*2</sup>すると、ダークマター量をうまく調整することで観測と計算モデルの銀河の回転速度を一致させることができます。

<sup>\*1</sup> 詳しくは恒星の速度を連続観測してその極大点を接線速度として出すらしい

<sup>\*2</sup> ただし質量は中心に集まっていますので、ダークマター密度が距離に対して2乗減衰するようなモデルを考えます。



Figure2: ダークマターハロー。図でハローとして描かれている灰色の球がダークマターを表している。

## より詳しく知りたい人向け

観測データは<https://astroweb.case.edu><sup>\*3</sup>に公開されているものを用いています。また、ダークマターのモデルとしては、2乗減衰を入れつつ、かつ銀河中心で発散しないように、銀河中心からの距離  $R$  に対してダークマター密度  $\rho(R)$  が次のように表されるようなモデルを仮定します。

$$\rho(R) = \frac{\rho_0}{1 + (R/R_c)^2} \quad (1)$$

この時、このモデルのパラメタは基準密度  $\rho_0$  と密度の減衰スケール  $R_c$  です。なので、観測と計算モデルを一致させるときはこの二つのパラメタに対して回帰をすることになります。それを行ったのが Figure3です。

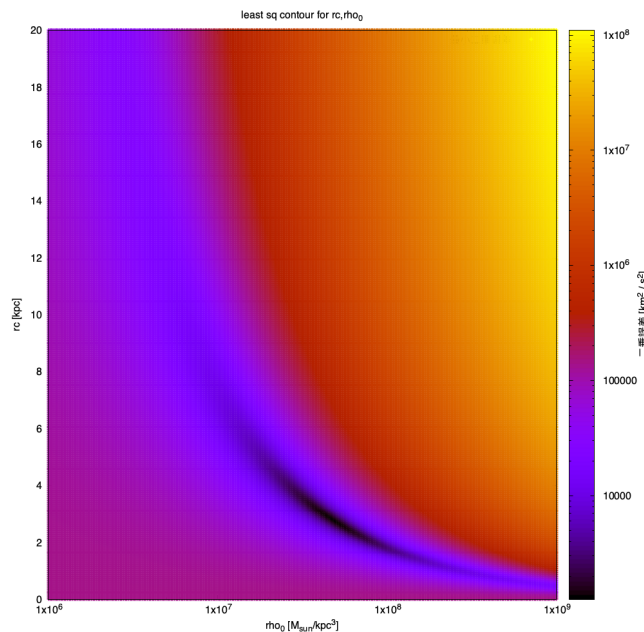


Figure3: 最小二乗誤差

\*3 >SPARC > Basic\_Sparc\_Data > Newtonian\_Mass\_Models > zip\_file > NGC3198\_rotmod.dat

このと数値解 (contour が最小となる点) は、

$$\rho_0 = 4.98 \times 10^7 ; [M_\odot/\text{kpc}^3] \quad (2)$$

$$R_c = 2.75 [\text{kpc}] \quad (3)$$

です。今回のシミュレーションでは、 $R_c$  としてはあらかじめ推定した上記の値を用いており、来場者の方には  $\rho_0$  の推定を体験してもらっています。ただし、今回スライドで調整してもらおうのはダークマターの質量です。具体的には

$$M_{\text{DM}} = \iiint_0^{R_{\text{max}}} \frac{\rho_0}{1 + (R/R_c)^2} dV \quad (4)$$

(もっと具体的には、ダークマターのバリオンに対する質量比

$$r_{\text{DM/baryon}} = M_{\text{DM}} / (M_{\text{gas}} + M_{\text{disk}}) \quad (5)$$

) を調整してもらってます。<sup>\*4\*5 \*6</sup> その上で上式を逆解きして、入力してもらった  $M_{\text{DM}}$  (より厳密には  $r_{\text{DM/baryon}}$ ) を  $\rho_0$  に変換することで、先の 2 乗減衰モデルを使ってダークマター込みモデルの回転速度を計算しています。

また、最終的な回転速度の計算は、遠心力と重力の釣り合いから導かれる

$$\frac{V_{\text{darkmatter}}^2(r; \rho_0)}{r} = \frac{GM_{\text{DM}}(r)}{r^2} = \frac{G \cdot \iiint_0^r \frac{\rho_0}{1 + (R/R_c)^2} dV}{r^2} \quad (6)$$

という力学関係式を用いて計算しています。これと、 $V_{\text{gas}}$ 、 $V_{\text{disk}}$ 、 $V_{\text{bulge}}$  などのバリオンの回転速度寄与を足し合わせることで、

$$V_{\text{total}}^2(r) = V_{\text{gas}}^2(r) + V_{\text{disk}}^2(r) + V_{\text{darkmatter}}^2(r; \rho_0) \quad (7)$$

として計算モデルの銀河の回転速度の計算をしています。<sup>\*7</sup>

<sup>\*4</sup> ここで、積分を  $R = R_{\text{max}}$  で打ち切っていることに注意してください。ダークマターの質量は全体積分すると普通に発散するので、観測データが存在している  $R$  の範囲内に限って計算しています。なので今回シミュレーションでは「ダークマター質量の銀河質量の比」を調整してもらっていますが、より正確に言うなら「観測限界  $R_{\text{max}}$  で打ち切った時の銀河円盤上のバリオンとダークマターハロー球のダークマター質量の比」です。

<sup>\*5</sup> ※ さらに細かい解説 1:  $M_{\text{disk}}$  についての計算は観測データとして与えられた (銀河からの中心距離ごとの) 放射輝度密度を用いています。ただし質量/輝度比として  $\Upsilon_{\text{disk}} = 0.5$  を採用しています。(詳しくは SPARC の論文を参照。) これを用いて放射輝度密度をディスクの質量面密度の情報に換算し、それを台形積分することで (観測データが存在している限界距離  $R_{\text{max}}$  までの内側に存在している) 銀河ディスクの質量を算出しています。

<sup>\*6</sup> ※ さらに細かい解説 2:  $M_{\text{gas}}$  についての計算は質量と遠心力の関係式  $GM/r^2 = v^2/r$  を用いています。そもそも、今回用いているデータにおいて、ガスについてはその回転速度への寄与  $V_{\text{gas}}(R)$  しか与えられていません。よってこれを用いてどうにか  $M_{\text{gas}}$  を算出する必要があるのですが、今回は  $R_{\text{max}}$  において近似的に  $GM_{\text{gas}}/R_{\text{max}}^2 = v(R_{\text{max}})^2/R_{\text{max}}$  が成り立つと仮定して、(観測データが存在している限界距離  $R_{\text{max}}$  までの内側に存在している) ガスの質量を算出しています。

<sup>\*7</sup>  $V_{\text{gas}}(r)$   $V_{\text{disk}}(r)$  は実用的には銀河円盤の明るさから求めます。(明るさは大体恒星の質量に対応しているので、銀河円盤の明るさから銀河円盤の面密度を算出し、重力と遠心力の釣り合いから速度を算出します。) ただ、こら辺はすでに計算済みの速度  $V(r_i)$  のデータが与えられているので、今回はそれを線形補間する形で  $V(r)$  を算出しています。

## ポイント

- 最終的な答えはおおよそ 4~5 倍ということになるかと思います。実際、現在の宇宙論においてバリオンに対するダークマター質量は 5 倍程度とされており、今回 5 倍程度の解が出ることで整合的です。(銀河は比較的バリオンが多い領域なので、そういう意味で 5 より少し小さくなるのもいい結果と言えます。)
- ダークマターの量を知るためにはこういった間接証拠を用いて推定を行う必要があります、実際に行われています。また実際にこうした問題を解く上では、スライダを動かす代わりにコンピュータを使って何百・何千という値を試させ、観測と計算のズレが一番小さくなる値を探させます。(そう言う意味も含めて、地球惑星物理学科においては計算機が重要となります。)
- より詳しく知りたい方は、逆問題や機械学習といった文脈について調べてみると面白いかもしれません。

## よくあった質問

- Q. 粒子は星を表している？ そう思っていて OK です。基本的には半径に応じた回転速度で粒子を回しているだけなので、特にこれといった意味を持たせていませんが、恒星だと思っていて構いません。
- Q. 多体計算している？ していません、動画は回転速度に応じて粒子を回転させているだけです。(多体計算は重すぎるので...)
- Q. こういうシミュレーションのプログラミングコードを書ける学生が多いのか？ 地球惑星物理学科では授業としてみっちりプログラミングを叩き込まれるので、そう言う意味では弊学科の人間はプログラミングができる学生が多いと言えるかもしれません。ただしもちろん、大学入学以前からプログラミングに親しんでいたような学生もいます。
- Q. ダークマターは直接観測することができないのか 現段階ではまだ直接観測はできていません。銀河の回転速度や重力レンズなどの問題から間接証拠が出てきていますが、直接観測に成功したらノーベル賞がもらえるかもしれませんね...
- Q. ダークマターは銀河以外の場所にも存在している？ 存在しているとされています。我々が生きている空間にも存在しています。

## その他の話題 (このシミュレーションの解説中に来場者の方との間で発生したもの)

- 今回は「ダークマター量」→「二乗減衰モデル」→「計算された回転速度」というように「条件」・「物理モデル」・「結果」を組み合わせる逆問題的にダークマター量を推定しているが、どうやら最近はこの物理モデルの部分をニューラルネットワークに置き換えて逆問題的推定を行ってしまうようなことが天文の分野で行われているとかいないとか...?
- 最近の中学・高校の地学ではあんまり銀河とかの話はしないっぽい...?
- なぜこのシミュレーションを天文学科の人間ではなく地球惑星物理の人間がやっているのか?