

ダークマターと重力レンズ

環境情報教育課程 金光研究室 185646 渡邊裕和

1 序論

宇宙とは何か、どのような構造をしているのだろうか。これは長年研究されてきたことである。そして、宇宙はどれくらい広く、どのくらいの質量があるのか。これは宇宙の全体の構造を知り、謎を解明するために最も重要な事項である。しかし、宇宙の大きさは大きすぎて実際の長さを測ったりすることはできないし、宇宙に存在する物質は隕石を除くと、地上の物質のように直接手にとって様々な角度から調べるわけにはいかない。そこで、銀河で起きている運動から、これだけの質量が必要だという計算がなされ、そこから宇宙の構造を調べようとした。すると、その計算で出された質量は、実際に観測できた天体の 10 倍という結果となった。それは我々には見えない、観測不能な物質が存在していると考えた。それが「ダークマター（暗黒物質）」である。そしてそれを知る有効な手段として「重力レンズ効果」というものがある。これは、強い重力場付近を通った光は曲げられ、そしてその光は増幅されて観測されるという現象である。この重力レンズ効果の現象を詳しく調べて、ダークマターの正体をつかむことができれば宇宙の構造、全体図が見えてくるはずである。

本研究では、ダークマターが何かを、そしてそれを調べるために重要な方法である重力レンズ効果を使い、視覚的に重力レンズ効果を観測できるようにシミュレーションをやってみる。

2 ダークマターの存在

1927 年、オランダの Y.H.オルトが恒星の上下運動から銀河系の質量を見積もった。この運動を説明するには、星 4000 億個分の質量が必要であることになっている。しかし、実際にはその半分程度の質量しか観測されることがわかった。この質量の不足分は“行方不明の質量（ミッシング・マス）”と呼ばれた。1930 年ツヴィッキーは、我々には見ることもそれが何かもわからない、しかしそこに存在はする、「ダークマター（暗黒物質）」の提唱をした。

3 ダークマターの正体

ダークマターの正体の候補として以下のものが挙げられている

バリオン物質	ブラックホール、中性子星、白色矮星、褐色矮星など
非バリオン物質	ニュートリノ、ニュートラリーノ、アキシオン、ミラーマターなど

バリオンとは、陽子や中性子など、ごく普通の物質を形作っている素粒子の総称のことである。つまり、ここでは上記のような、全く光を出していない天体や、あるいは暗すぎて見えない天体が考えられる。一方、非バリオン物質としては上記のような素粒子物理学から予言される特異な素粒子が考えられている。当初、ダークマターは非バリオン物質ではないかと考えられていた。なぜなら、白色矮星や褐色矮星などの軽い星が正体だとすると、20 兆個以上もの暗くて見えない星がそこら中に点在していることになる。そんなにたくさんの小さな星が存在しているというのは考えにくい。また、ビッグバン理論から、バリオン物質が多すぎると宇宙における元素の配合が現実の宇宙と合わない。これらの理由から、ダークマターは非バリオン物質であるのが望まし

く、1980年代、ダークマターの正体はニュートリノまたはアキシオンであると考えられた。従来ニュートリノの質量は0であると思われていたが、近年では微少な質量を持っている事がほぼ確実になった。ニュートリノは宇宙全体に存在する数が非常に多い（計算では100個/cm³）ので、質量が10eV程度あれば暗黒物質の候補になるとされていた。しかしながら、ニュートリノの寄与は臨界密度の高々1.5%程度であることが分かってきたので、現在では主要な暗黒物質であるとは考えられていない。またアキシオンも未だ発見されていない。ミラーマターは純粋な理論的な存在であり、観測事実はない。

4 重力レンズ効果

もし、宇宙に物質がたくさんあるなら、それだけ光源やレンズになる天体の数も多くなり、多くの重力レンズ天体が見つかることであろう。逆に、宇宙の物質密度が小さければ、重力レンズ天体の数は減るはずである。つまり、重力レンズ天体の数を何らかの方法で数えることが出来れば、宇宙の中にある物質の量がわかるはずなのである。

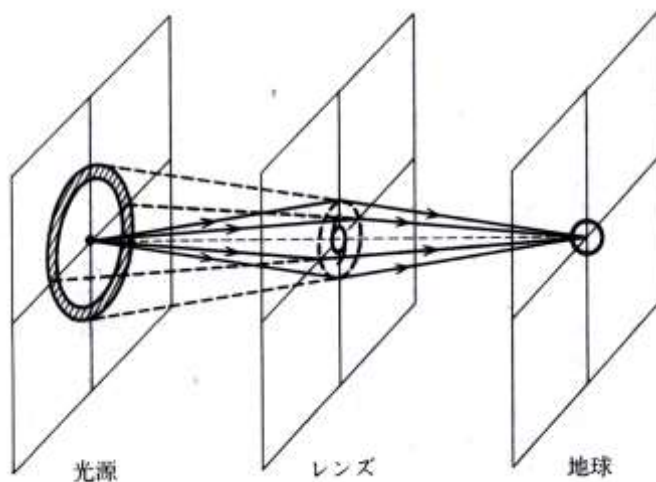
アインシュタインが一般相対性理論を検証するために提案したテストの一つが「光線の彎曲」である。光線の彎曲というのは、重い星のそばを通る光はその重力によって進路を曲げられるはずだという予言で、後に重力レンズの発見につながるものとなる。1919年に、実際に光線の彎曲が確認されると重力が光の進路を曲げるのなら、重力もレンズと同じように光を集めたり像を結んだりすることができるのではないかと考えられた。

重力レンズ効果により、光がどのように観測者に届くのかを見てみます。理想的に光源と重力レンズ天体と観測点が一直線に並んだときにはその光の像はリング状に見えるはずですが。

(図1)

図2は理想的に一直線上に並んでいる場合にできる像の画像です。アインシュタインが一般相対性理論を説明する際にこのようなことが起こると予言したことからアインシュタイン・リングと呼ばれます。

また、重力レンズ天体の位置がずれたときには、重力レンズ天体を中心として光源の半径で広げたような円弧状の像が観測されることが分かっています。



(図1 : 重力レンズ効果)



(図2 : アインシュタイン・リング)

5 Simulation

5.1 重力レンズ効果の3次元視覚化

本シミュレーションでは、実際に重力レンズ効果によってどのように光が曲げられるのかを調べる。ここでは、シュバルツシルト・ブラックホールを例に取り、その付近の光の軌跡を求め、光の彎曲を視覚化する。

一般的な強い重力場での光線の彎曲は

$$\frac{d^2}{d\varphi^2} \left(\frac{1}{r} \right) + \frac{1}{r} = \frac{3GM}{c^2} \frac{1}{r^2} \dots (1)$$

の微分方程式で表せる。したがって、この微分方程式を解くことで光線の軌跡が求められる。なお、この微分方程式の数値計算には、4次のルンゲ・クッタ法を用いる。

5.2 重力レンズ効果による光線の軌跡

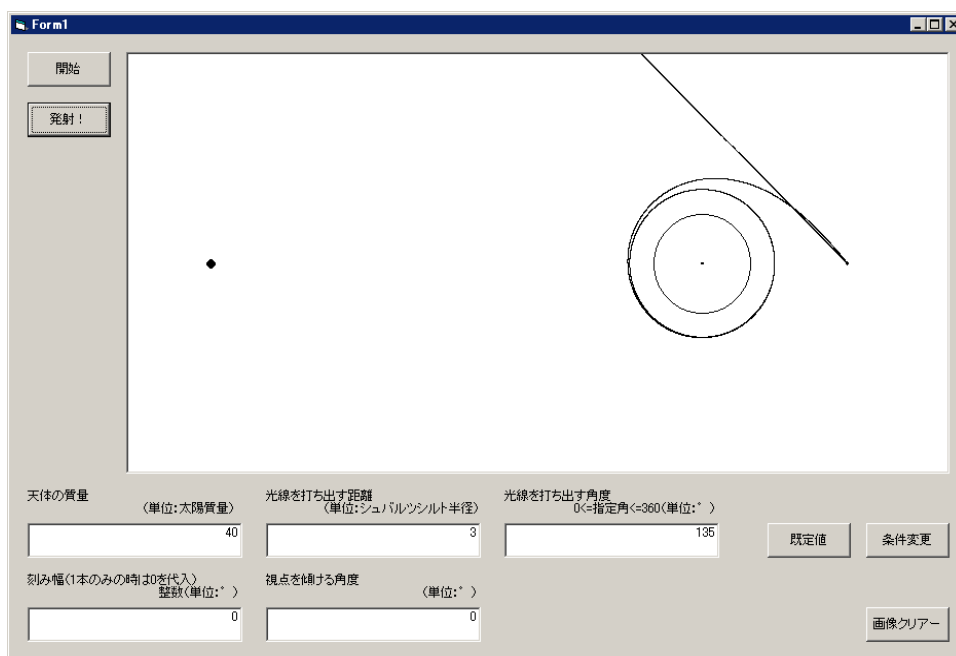
ブラックホールの天体質量、光線発射ポイントの距離、光線を発射する角度、観測点のポイントを数値で指定する。ブラックホールの天体質量は太陽質量を1として、光線発射ポイントの距離はシュバルツシルト半径を1としてそれぞれ入力する。また、光線を発射する角度はブラックホールと光線発射ポイントを結ぶ直線に対しての角度を入力する。さらに、観測点のポイントは角度で入力し、ブラックホールと光線発射ポイントを結ぶ直線を軸として入力した角度だけ回転させた像を見ることができる。これによって、より立体的に現象を観察できるようにした。さらに、刻み幅を入力すれば、光線を発射する角度を基準として0度から180度の間で前後に連続的に発射することができる。また、各パラメータを入力して「開始」ボタンを押すとユークリッド空間での光線の軌跡を表示するか聞いてくる。

このプログラムでは、天体の質量、光線を打ち出す距離、光線を打ち出す角度、刻み幅、視点

を傾ける角度を任意に入力できる。まず、天体の質量、光線を打ち出す距離、光線を打ち出す角度の欄に適当な数値を入力して開始ボタンを押すとユークリッド空間（ニュートン力学）での光線の軌跡を表示するか聞いてくる。

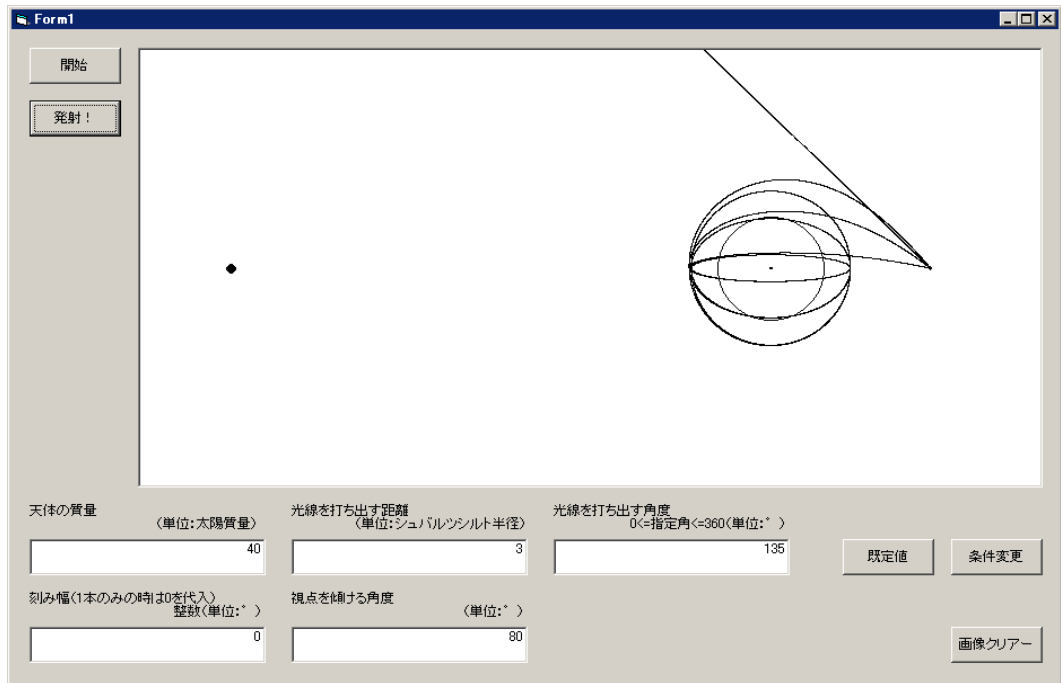
これによって、重力の影響を受けない場合の光線の進み方と対比して見ることが出来る。発射！ボタンを押すと光線が発射される。

(図3)



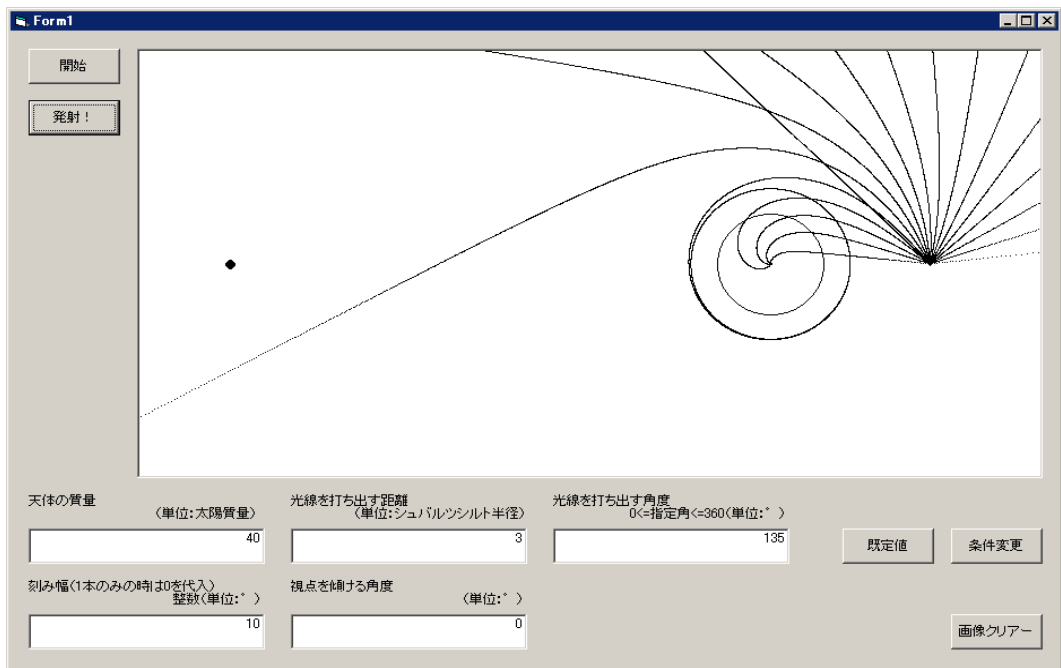
(図3)

さらに、視点を傾ける角度の欄にいろいろな数値を代入して発射させるとより立体的に現象を観察することが出来る。(図4)



(図4)

また、刻み幅の欄に適当な数値を代入して発射させると光線を打ち出す角度を基準として前後に連続的に光線を発射することが出来る。(図5)



(図5)

6 結果・考察

Simulationによって重力レンズ効果の様子、光線がどのように曲げられているかが視覚的に捉えやすくなった。現在、この重力レンズ効果がブラックホールなどの重い天体だけでなく、褐色矮星などの天体でも引き起こされること、しかもそのような天体が比較的に数多く分布していることがわかっている。