

ダークマターについて

金光研究室 藤野 隼吾

1. 序論

宇宙はどのくらいの質量があるのだろうか。銀河の運動の様子からこれだけの質量がないと現在観測されているような様子は見られないはずだという質量が理論的に計算された。それらの数は、どの銀河の運動を見ても実際に観測される星の数から推測される質量のおよそ 10 倍にもなっていた。つまり、実際に目に見えている星の質量の 10 倍もの質量が行方不明になっているのだ。そこで、我々の目に見えないような物質が宇宙に大量に存在していると考えられた。それが「ダークマター（暗黒物質）」である。その有効な調査方法に「重力レンズ効果」がある。重力レンズ効果というのは強い重力場の付近を通った光が曲げられて、さらにその観測された光は増幅されて観測されるという現象である。この現象を詳しく調べることによって宇宙の構造がはっきりと見えてくるはずなのである。

本研究では、このダークマターの正体を探る上で重要な鍵になるはずである「重力レンズ効果」について調べ、視覚的に重力レンズ効果を観察できるようなパソコンシミュレーションを作る。

2. ダークマターの発見

1927 年、オランダの Y.H.オー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ないことがわかった。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。理論上の運動を観測と一致させるには、常に、目に見える（光を発している）天体を遥かに上回るほどの質量がどうしても必要になる。そこで、われわれの目に見えないような質量をもった物質が宇宙に大量に存在していると考えられた。そのような物質を“暗黒物質（ダーク・マター）”と名付けられた。

3. ダークマターの正体

現在ダークマターの正体として考えられているものは大きく分けると以下の二つに分けられる。

バリオン物質	ブラックホール、中性子星、白色矮星、低質量星、褐色矮星など
非バリオン物質	ニュートリノ、アクシオン、Susy 粒子など

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、ビッグバン宇宙論から、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クシオンであると考えられた。しかし、ニュートリノは重さがないことを前提に考えられた物質であるし、またアクシオンも未だ発見されていない。いずれにしても、ダークマターの正体として明確な根拠をもった候補はまだ登場していない。

1993年、MACHO（有質量ハロ天体）が重力レンズ効果を利用した観測によって発見されると、重力レンズ効果を引き起こすバリオン物質が多量に存在することが解明され、ダークマターの正体がバリオン物質であるという見方が強まった。また、1997年に日本のスーパーカミオカンデのグループがニュートリノには質量があるとの研究成果を発表した。ニュートリノは宇宙空間に充満していると考えられているので、宇宙に大量の質量が充満していることになり、ダークマターの有力候補として注目されている。

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。こちらも1979年に重力レンズ効果を受けた像が実際に観測され、それ以来たくさんの重力レンズ天体が発見されている。

5. シミュレーション

5. 1 重力レンズ効果の3次元的視覚化

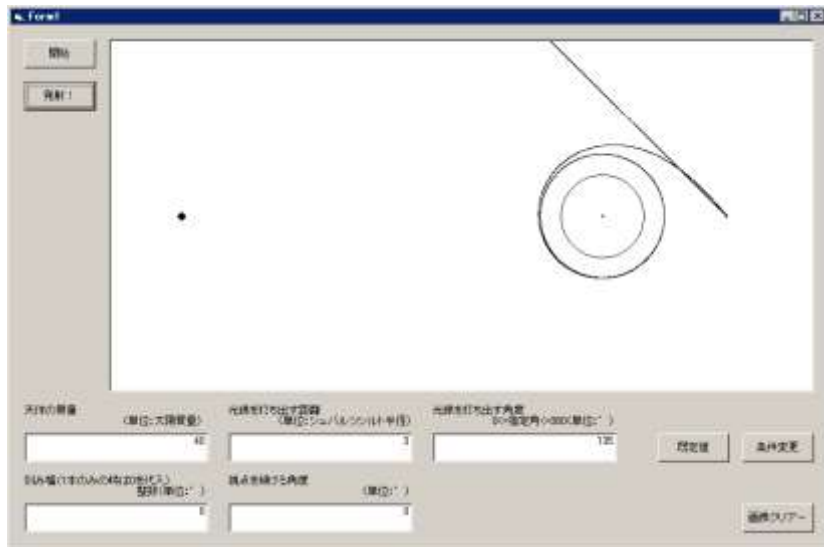
本シミュレーションではダークマターの最有力候補として挙げられる、重力レンズ効果を引き起こすバリオン物質を探る方法として、実際に重力レンズ効果によってどのように光が曲げられるのかを調べる。ここでは、シュバルツシルト・ブラックホールを例に取り、その付近の光の軌跡を求め、光の彎曲を視覚化する。

一般的な強い重力場での光線の彎曲は

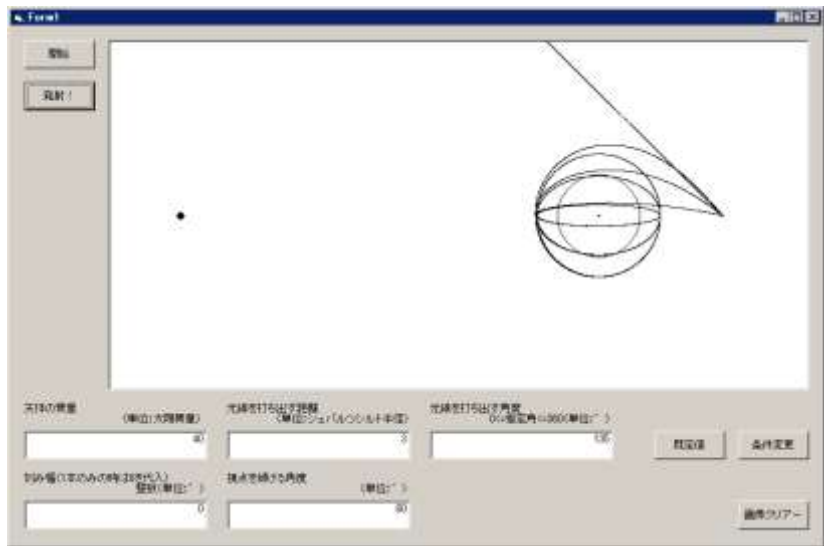
$$\frac{d^2}{d\phi^2} \left(\frac{1}{r} \right) + \frac{1}{r} = \frac{3GM}{c^2} \frac{1}{r^2} \dots (1)$$

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。

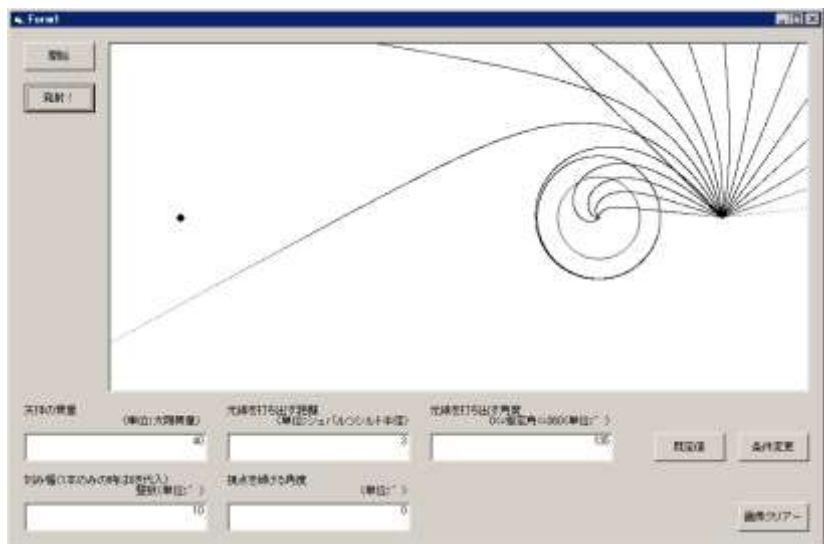
このプログラムでは、天体の質量、光線を打ち出す距離、光線を打ち出す角度、刻み幅、視点を傾ける角度を任意に入力できる。まず、天体の質量、光線を打ち出す距離、光線を打ち出す角度の欄に適当な数値を入力して開始ボタンを押すとユークリッド空間（ニュートン力学）での光線の軌跡を表示するか聞いてくる。これによって、



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1) 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

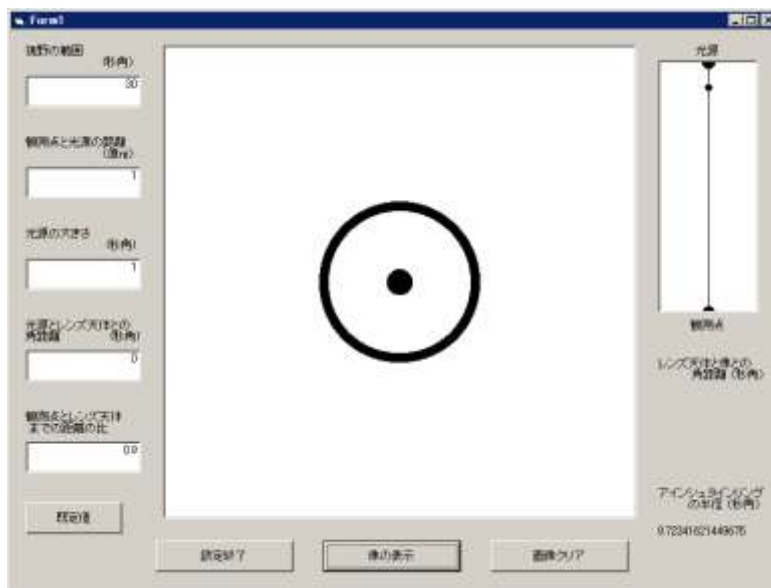


立体的に現象を観察することが出来る。(図2) また、刻み幅の欄に適当な数値を代入して発射させると光線を打ち出す角度を基準として前後に連続的に光線を発射することが出来る。(図3)

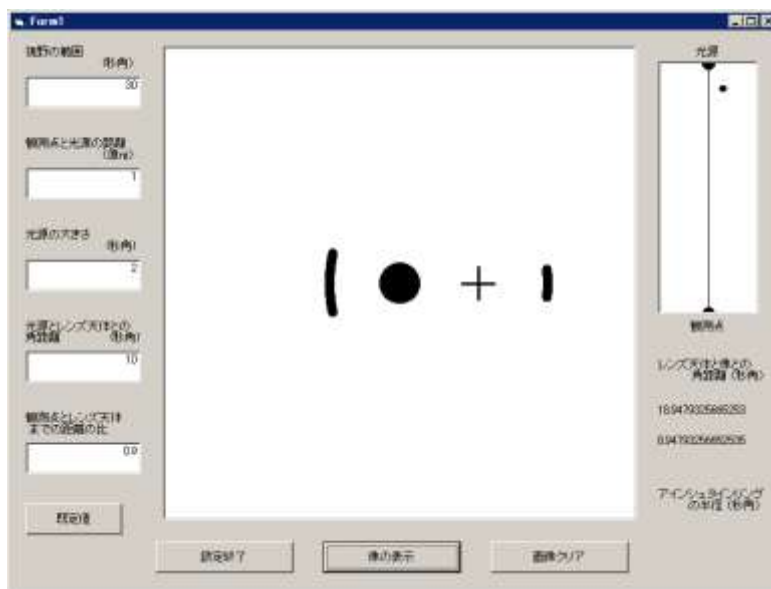


5. 2 重力レンズ効果を受けた光線の見え方

このプログラムでは、視野の範囲、観測点と光源の距離、光源の大きさ、光源とレンズ天体との角距離、観測点とレンズ天体までの距離の比を任意に入力できる。適当な数値を入力して設定終了ボタンを押すと、左の欄に、光源が中心に円で、重力レンズ天体が光源からの角距離に十字で表示される。また、右の欄に、光源、重力レンズ天体、観測点の位置関係が表示される。



像の表示ボタンを押すと観測される像が表示される。光源とレンズ天体との角距離に 0 を入力すると像は円（アインシュタインリング）になる。この時、右下にその半径が表示される。（図 4）そうでない場合は二つの円弧が見られる。この時は、右下に重力レンズ天体からそれぞれの像までの角距離が表示される。（図 5）



6. 結果・考察

このように重力レンズ効果によってどのように光線が曲げられどのような像が観測されるかわかった。この像を詳しく調べていけば、重力レンズ天体となっているがどれくらいの質量でどこに存在しているかなどが判明してくるので、ダークマターのいくらかをこのようなバリオン物質で説明できるようになるだろう。