連載　シネマ天文楽【5】

ピンポイントクラッシュ

福江　純（大阪教育大学）

1．地球最後の日

はるか宇宙の深奥から地球と太陽系を目指して真一文字に突き進んでくる天体。このままだと地球を直撃してしまうだろう。かりに運良く地球を逸れたとしても、その直後に、地球の後方の太陽に飛び込むだろう。地球の滅亡は避けられないのか。太陽系はお仕舞なのか。

何故だかしらないが、昔から地球はよく狙われる。火星人や彗星・小惑星など、太陽系内から狙われるのは、まぁ、比較的近いから仕方ないとしても、太陽系外からもよく狙われる。有名なところでは、ガミラス帝国や白色彗星帝国なんかから狙われたことがある。この場を借りて、ガミラス帝国のデスラー総統に言いたいが、だいたいが、マゼラン星雲にも惑星はあるだろうに、10万光年以上も離れた地球くんだりまで、わざわざやってこなくてもいいだろう。白色彗星帝国も、銀河系内の他の惑星には目もくれずに、銀河系の辺境にある太陽系へ向かって、まっしぐらにやってきた。

太陽系外からの宇宙人だけじゃない。星やブラックホールからも狙われてきた。外から見ると、地球はずいぶんと魅力がある惑星らしい。

今回の話は、太陽系外から地球（と太陽）へ向かって飛来する天体の問題だ。

2．『地球最後の日』・『妖星ゴラス』・『さよならジュピター』

まず最初に取り上げるのは、観たことのある人は少ないだろうが、古典的名作『地球最後の日』だ。これはエドウィン・パルマーとフィリップ・ワイリーのＳＦ小説『地球最後の日』（こちらはいまでも書店で売っている）を、ジョージ・パルが1951年に映画化したものだ（パルはH.G.ウェルズの『宇宙戦争』も1953年に映画化している）。ぼくは観た覚えはあるが、製作はぼくが生まれる前だから、おそらくTVでの放映を観たんだろう。監督はルドルフ・マテ（うーん、知らん。ジョージ・パルの方が有名すぎる。だいたい、最初はジョージ・パル監督って書いてしもうたくらいやし）。

でもって、どういう話かというと、地球に向かって、惑星ビラスと惑星ザイラが接近してきて、惑星ビラスが地球に衝突するコースに乗っているわけだ。そこで、（地球に衝突しない方の）惑星ザイラへ向けて地球を脱出するロケットが建造される。ロケットに乗れるのはたった40人。

地球に衝突する話よりは、だれがロケットに乗れる資格があるのか、選ばれなかった人間はどうするのか、といった人間模様が話の中心だった。

続いて、1960年代の日本映画『妖星ゴラス』。こいつも観たことのある人、いないだろうなぁ。往年の東宝特撮映画で、監督は本多猪四郎、そして特技監督があの円谷英二だ（1962年）。大昔に観た覚えはあるが、製作年のときは6歳になっているから、映画館で観たのかもしれない。

ストーリーは結構ぶっとんでいて（気にしちゃいけない）、地球の約6000倍もの質量（だか重力だか；ここらへんは資料によっても違う；気にしちゃいけない）をもつ巨星がやってくる。その名前はゴラス。何だか怪獣みたいだが、気にしちゃいけない。ゴラスの調査に飛び立ったロケットが爆発する前の解析に

よって、ゴラスが２年後には地球に衝突することが判明する。そんなの、地球から観測して軌道解析したらわかるだろうとは思うが、気にしちゃいけない。

さて、この“妖”星ゴラスの地球衝突から人類を救うための方法がすごい。さすが邦画特撮、洋画とは一味違う。ちゃちいロケットを作って数十人の人間を助けるなんてケチなことはせずに、地球ごと助けるのだ。何と、ゴラスをかわすために、地球の南極に巨大な噴射口をつけて、地球そのものをロケットに仕立て、地球の公転軌道から外れて、ゴラスをよけるのだ。必要なエネルギー、地球を動かしたときの影響、んなもん、気にしちゃいけない。

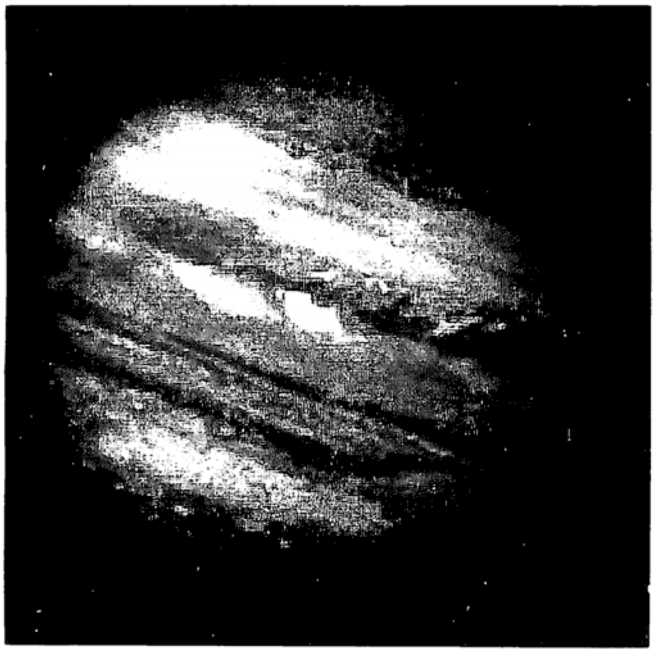

図１　木星

そして３つ目は、これは観たことなくても聞いたことぐらいはあるだろう、1984 年の邦画『さよならジュピター』だ（図 1)。原作・総監督・製作・脚本が小松左京の作品だ。主役は三浦友和、聖母であらせられる山口百恵のダンナだ。

ときは太陽系内の開発が進んだ 22 世紀、深宇宙から太陽を目指してブラックホールが飛び込んでくる。ブラックホールの質量は木星の数十倍。しかもコースは太陽へ一直線のピン・ポイント・クラッシュ！　太陽系未曾有の危機をしのぐために、その時点で進行していた木星太陽化計画を転用し、木星の一部を爆発させて、残りをブラックホールにぶつけて進路を逸らす大賭博が行われる。

ええと、以前には黙ってたんだけど、まぁ、書いちゃおう。小松左京たちが、かなり科学考証したそうだけど、この話、直感的に気になる点が２つある。

一つは、ブラックホールの質量が木星の数十倍もあるので、かりに、地球を逸れたとしても、地球や他の惑星の軌道運動に対する影響はかなりあっただろうなぁ、と思う。

も一つは、木星の一部をブラックホールにぶつけて、ブラックホールの軌道を変えるわけだが、運動量の受け渡しはうまくいくのかなぁ、という点だ。まぁそりゃ、爆発によって弾かれた木星の一部がもっていた運動量が、すべてブラックホールに当たれば、ブラックホールの軌道はそれ相応に変わるだろうとは思う。だけど、木星の数十倍のブラックホールの大きさは、木星の大きさに比べると、無視できるくらい小さいので、ブラックホールが受け取れる運動量は高が知れている。横からぶつかってきた木星のカケラの影響などものともせずに、カケラを突き抜けてブラックホールは邁進するだろうなぁ。

とまぁ、２、３ケチをつけたところで、以下では、それ以前の問題を考えてみたい。

３．遭遇ーピンポイントクラッシューの確率

ブラックホールその他の天体が宇宙の各地から地球・太陽系をめざしてやってくるわけだが、本当にピンポイントで来るのだろうか。実際にはどれぐらいの頻度で遭遇するのだろう。これは、ブラックホールなどの天体の性質というよりは、もっと単純に、天体密

度の問題になる。

太陽にもっとも近い恒星アルファ・ケンタウリまでは約4光年で、太陽系近傍での星々の平均距離は数光年といったところだ。簡単のために小さめに見積もって、太陽系近傍での、

星の平均距離＝1光年

としよう。したがって、太陽系近傍での、

星の空間密度＝1個／1立方光年

となる。

数字で書くとピンとこないが、星と星の間の距離はあまりにも莫大であり、星たちはとんでもなく疎らに存在しているのだ。以下でも、もう少し定量的に考えてみよう。

3．1　平均自由行程と平均衝突時間

まず平均自由行程というものと平均衝突時間というものを導くが、考え方は大変シンプルなものである。

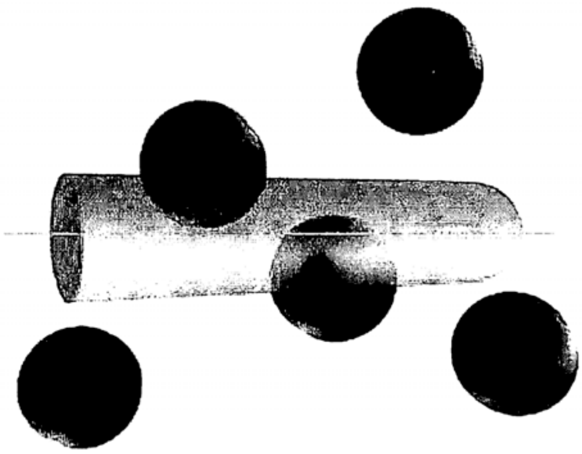

図2　ブラックホールの“衝突”円筒
丸（球）は星、直線はブラックホールの経路、円筒はブラックホールと星が衝突する範囲を表す。

宇宙空間内に星が一様に分布していて、そこをブラックホールが突き進んでいるとしよう（図2）。ブラックホールの飛行経路を取り囲む円筒状の領域－“衝突”円筒と呼ぶ－に星のどれかが引っかかると、ブラックホールとその星は“衝突”することになる。ただし、ここで、“衝突”とは、以下出てくるように、物理的な衝突だけでなく、重力的な影響も含めた広い意味で使っている。

このような状況で、ブラックホールと星が衝突する平均の距離を「平均自由行程」と呼び、それまでの時間を「平均衝突時間」と呼ぶ。

平均自由行程 x と平均衝突時間 t の一般的な式を導くために、星の個数の空間密度を n、ブラックホールの速度を v、“衝突”が起こる断面積（ブラックホールの経路を取り囲む円筒の面積）を σ とする。

そうすると、ブラックホールの経路を取り囲む円筒の体積は σx なので、円筒内の星の個数は $n\sigma x$ になる。ブラックホールと星のどれか1個が衝突するということは、円筒内の星の個数が1になることと同じなので、平均自由行程に対しては、

$$n\sigma x=1$$

という条件になる。

一方、$x=vt$ だから、平均衝突時間に対しては、

$$n\sigma vt=1$$

という条件になる。

これらの条件を書き直せば、平均自由行程と平均衝突時間として、

$$\text{平均自由行程}\quad x=\frac{1}{n\sigma}$$

$$\text{平均衝突時間}\quad t=\frac{1}{n\sigma v}$$

が得られる。

3．2　太陽への直接衝突

具体的な例として、ブラックホールと太陽の物理的で直接な衝突を評価してみよう。

この場合は、衝突の断面積 σ は星の物理的な断面積になる。太陽の場合なら、半径 70

万 km（太陽半径）の円の面積である。そして星の空間密度nは、太陽近傍ということで、先に述べたように$n=1$ 個／1 立方光年とする。さらにブラックホールの速度vはわからないのだが、太陽近傍の星の空間速度程度として$v=100$km/s としよう。

で、これらの数値を先の関係式に入れると、

平均自由行程 x ＝5.9×10^{13}光年

平均衝突時間 t ＝1.8×10^{17}年

という結果になる。

これはどういうことかというと、宇宙空間をフラフラ飛んでいるブラックホールがたまたま太陽に直接ぶつかるには、宇宙の大きさよりもはるかに長い距離を踏破しなければならないし、あるいは、宇宙年齢よりもはるかに長い時間がかかるということなのだ。

つまりはピンポイントクラッシュは偶然だけではほとんど起こりえないことなのである。

３．３　太陽の重力的捕捉

つぎに、もう少し条件をゆるめて、太陽を重力的に捕捉する場合、すなわち、ブラックホールの重力によって太陽を引き付け太陽を大きく動かしてしまう場合を評価してみよう。

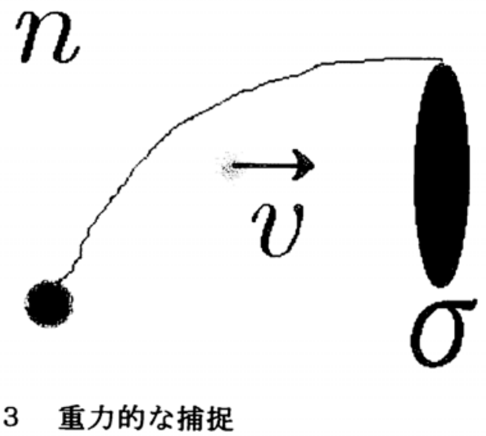

図３　重力的な捕捉

ブラックホール（→のついた丸）が右方に動いているとき、太陽（左下のもう一つの丸）は、ブラックホールの重力に引かれて曲がった軌道を描き、右方から左下へ動かされる。

この場合、“衝突”の断面積σは、重力的な影響を受ける円筒領域の断面積ということになる（図 3）。すなわち、ブラックホールがある速度で運動しているときに、その運動方向に垂直にある面積σをもった円内に存在していた星は、ブラックホールの重力に引かれて大きく動かされるというわけだ。

この重力的“衝突”をする断面積の半径Rは、ブラックホールの質量をM、ブラックホールの速度を v とすると、

$$R=2\,GM/\,v^2$$

となることが知られている。具体的数値として、ブラックホールの質量を太陽の 10 倍、速度を 100km/s とすると、

“衝突”有効半径$R=380$太陽半径

となる。

これから断面積σを計算し、後は、先ほどと同じように、$n=1$ 個／1 立方光年、$v=$ 100km/s として、数値を関係式に入れると、

平均自由行程 x ＝3.8×10^{10}光年

平均衝突時間 t ＝1.2×10^{14}年

という結果になる。

平均衝突時間は、まだまだ宇宙年齢より長い。

３．４　太陽系の破壊

では最後に、もっともっと条件をゆるめて、ブラックホールが太陽系の縁をかすめ、太陽系の力学を破壊してしまう場合を評価してみよう。

衝突半径として、

$R=100$ 天文単位

とする。後は同じで、$n=1$ 個／1 立方光年、$v=100$km/s として、数値を先の関係式に入れると、

平均自由行程 x ＝13 万光年

平均衝突時間 t ＝3.8 億年

という結果になる。

宇宙年齢よりは短くなったが、まだ 1 億年

のオーダーだ。

以上、簡単に見積もってみたように、太陽（太陽系）という特定の星へ向けてブラックホールが飛来する可能性はきわめて小さく、あまつさえ、太陽や地球にピンポイントクラッシュするなんていうことは、ほとんどありえないことになってしまった。

4．早期に発見して厄災を避ける方法

もう一つの大きな問題として、宇宙の深遠から妖星なり妖ブラックホールなりがやってきたとして、一体全体、どれくらいまで近づいたら気づくのだろうか。映画などでは、太陽系にかなり近づいてから観測されて残り時間が少なく、結構きびしい状況になってしまうことが多いようだが、もっと十分遠方で気づくことはできないのだろうか。時間的余裕がたっぷりあれば、軌道を逸らせるにせよ避難するにせよ、いろいろな対策を立てることもできるだろう。

そこで以下では、一番見つけにくいと思われるブラックホールが到来する場合を想定して、早期発見の手段を考えてみたい。漆黒の宇宙空間でブラックホールを見つけるのは不可能のように思えるかもしれないが、ブラックホールの生態を理解すれば、ブラックホールを見つける方法はいくつもあるのだ。以下の話は、結果だけは何箇所かで書いたことがあるが、その数値的な評価の理由なども含めて、ここでは定量的に説明したい。

4．1　重力場を検出する

まず、第一の方法は、ブラックホールの重力場を探知する方法だ。もっとも、何の基準も存在しない宇宙空間で、重力場そのものを直接検出するのは、実は非常に難しい。人工衛星の内部が無重量（自由落下状態）になるように、地球も太陽も自由落下状態にあるし、飛来するブラックホールも自由落下状態なので、お互いに遭遇して重力相互作用を行っても、やはり自由落下状態のままで重力場を検出することはできない。

では決して重力場を検出できないかというと、そうでもない。自由落下によって重力場が消去できるのは系の重心のみで、大きさのある天体の場合は、重心以外に働く潮汐力は消去できないからだ。ブラックホールに近い場所に働く重力の方が、遠い場所に働く重力より強いので、太陽系（地球）にブラックホールが近づいたときに、重力場の強さそのものは検出できないかもしれないが、重力の差である潮汐力を検出すればいいのだ。

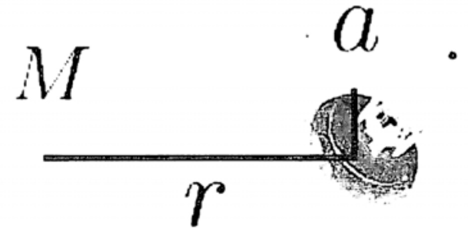

図４　広がりをもった物体に働く潮汐力

潮汐力の大きさは、ブラックホールの質量Mに比例し、ブラックホールからの距離rの3乗に反比例し、そしてまた物体や天体の広がりa（たとえば宇宙船のサイズや地球の半径）に比例する（図４)。これは相対論を使うまでもなく、ニュートンの万有引力の法則で導かれる話である。

式で表せば、単位質量あたりの潮汐力、sなわち潮汐加速度gは、

$$g \sim \frac{GM}{r^3}a$$

のように書ける。

具体的に、太陽の10倍の質量のブラックホール（半径は約30km）に直径（長さ）100m程度の宇宙船が近づいた場合に対して、宇宙船の船体に働く潮汐力の大きさは見積もってみよう。そうすると、宇宙船がブラックホールから240万km（3.4太陽半径）の距離まで近づいたときに、潮汐力は地球の表面重力（1G）の100万分の1になる。さらに、宇宙船が0.034太陽半径まで近づけば、潮汐力の大きさは、地球表面での重力と同じになる。

ということは、太陽系外縁などに探査船を飛ばして、飛来するブラックホールの潮汐力を検出するのは、とてつもなく困難だということである。

しかし、観測システムの基線を長くすれば、検出精度は高まる。たとえば、地球軌道上のラグランジュ点に探査機を置けば、地球と探査機の間で1天文単位の基線が取れる。この場合、ブラックホールの潮汐作用によって、地球と探査機との間の潮汐加速度が100万分の1Gになるのは、ブラックホールが約18天文単位まで近づいたときだ。

もちろん、探査機を飛ばさなくても、ブラックホールの潮汐作用は、太陽を重心とする太陽系全体の惑星運動へ影響する。たとえば、冥王星にかかる潮汐加速度の影響が100万分の1Gまで検出できるとするなら（これは少し難しそうだが）、太陽と冥王星の距離を40天文単位として、ブラックホールは62天文単位の遠方で検出できる。

4．2　エネルギー放射を検出する

深宇宙から飛来するブラックホールを見つける2番目の方法として、ブラックホール（？）からのX線放射を探知する方法がある。

宇宙空間といえども完全な真空ではない。銀河系宇宙の平均的な空間では、1立方cm当たり1個程度の（水素）原子が存在している。そして、星間ガス中を運動するブラックホールは、その重力によって進路上の星間のガスを吸い込むことができる。ブラックホール自体は光らないが、吸い込まれたガスが高温になって光り出すのだ（図5）。

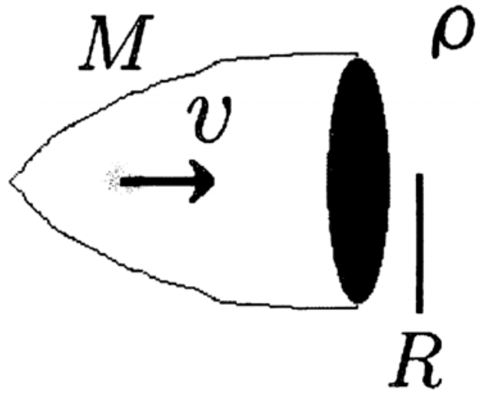

図5　ホイル＝リットルトン降着

この過程は「ホイル＝リットルトン降着」と呼ばれていて、よく調べられている。そして、ブラックホールが吸い込んだガスの輝き具合、すなわち放射光度Lは、ブラックホールの質量Mの2乗に比例し、星間ガスの密度ρに比例し、そしてブラックホールの速度vの3乗に反比例することが知られている。

式で表せば、

$$降着半径 \quad R = \frac{2GM}{c^2}$$

$$質量降着率 \quad \dot{M} = \pi R^2 \rho c$$

$$放射光度 \quad L = \epsilon \dot{M} c^2$$

のようになる。ここで ϵ は放射効率で0.1ぐらいの値をもつ。

具体的に、数値を見積もってみよう。たとえば、太陽の10倍の質量のブラックホールが、水素原子が1個/立方cmの密度の星間ガス中を、毎秒10kmの速度で動いているとする。またブラックホールに吸い込まれたガスは、アインシュタインの式にしたがって、その質量に等価なエネルギーをもつが、その1割が光に変換されると仮定する（ϵ =1；これは悪い仮定ではない）。

上の状況のもとでは、ブラックホールは、半径約180天文単位の宙域から、毎秒370億kg の割合でガスを吸い込み、その結果、（ブラックホールのまわりのガスは）なんと太陽の明るさの 0.87 倍くらいの明るさで輝くのだ。しかもガスは非常に高温になるため、強いX線を放射するだろう。

というわけで、ブラックホールに落下しつつある星間ガスからの高エネルギーX 線を検出するのはかなり有望だ。

しかし、当然ながら星間ガスの密度が小さい領域ではあまり強い放射は出ない。またブラックホールが高速で動いているときにも、ガスは置いてけぼりになって、あまりX線を出さないだろう。とくに、速度に対しては、その3乗に反比例するので、速度が10倍になっただけで、放射光度は1000分の1になる。つまり高速で飛来するブラックホールほど、ガスを吸い込まずに光らない、したがって検出しにくい、ということになってしまう。

4．3　重力レンズ効果を検出する

宇宙の彼方のブラックホールを見つける3番目の方法で、（ぼくが）もっとも有望だと思っているのが、重力レンズ効果を利用して探知する方法である。重力レンズ効果によるブラックホールの探知方法とは、全天の星空を観測し、星の位置をきわめて精度よく走査して、重力レンズ効果による（星の分布の）系統的な歪みを検出する方法だ。

まず、ブラックホールその他の重力を及ぼす天体があると、その近傍を通過する光線は曲げられる。遠方の星の光線も曲げられるので、星の見える方向が真の方向からずれて見える（図6）。

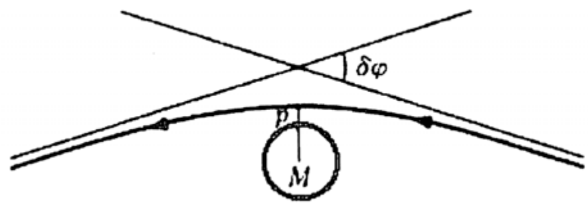

図6　ブラックホール近傍での光線の彎曲

重力が弱い近似では、曲げられる角度 $\delta\phi$ は、ブラックホールの質量Mに比例し、光線と重力天体との最接近距離（近ブラックホール距離）pに反比例する。

曲げられる角度を式で表せば、

$$\delta\varphi = \frac{4GM}{c^2 p}$$

のように書ける。ここでGは万有引力定数、cは光速である。

参考までに、太陽の縁をかすめる光線は、Mに太陽質量、pに太陽半径を入れると、1.75秒角ほど曲げられることが計算できる。

さて、上の式には、ブラックホールまでの距離 r が入っていないので、両辺に r を掛けて、無理やり、

$$r = \frac{4GM}{c^2}\frac{1}{p/r}\frac{1}{\delta\varphi}$$

のように変形する。こう表したときに、右辺の分母のδφは、星の見かけの方向と真の方向とのずれ（の角度）である。またやはり分母の $p／r$ は、近ブラックホール距離をブラックホールまでの距離で割ったものなので、星の見かけの方向と（見えない）ブラックホールの方向のなす角度になっている。

具体的に数値をあたってみよう。全天のどこかの方向から 10 太陽質量ぐらいのブラックホールが飛来しつつあるとしよう。また星の位置を精査する望遠鏡の検出精度は、0.1 秒角だとしよう（現有の技術精度）。同じ検出精度を $p／r$ にも当てはめる。つまり、星の位置のずれが検出できれば、同時に、ブラックホールの方向も計算できることを意味する。この検出限界で重力レンズ効果の影響による星の位置のずれが測定にかかる距離は、約 26.5 光年になる。これは十分に大きな距離だ。

というわけで、“重力レンズ法”を使えば、かりに検出精度がもっと悪くても、十分遠方で安全な距離からブラックホールの存在を検出できるだろう。またこの方法は、星の位置を精査して、星図（チャート）と比較するだけなので、現有技術でもプログラムによる自動的な検出が可能である。

太陽系に飛来するブラックホールを見いだすことはもとより、太陽から数十光年内のブラックホールを発見するためにも使える方法だ。是非、誰か検討して欲しいものだ。>関係者

参考文献

北島明弘、2000 年、『何回でもみたくなる SF 映画選集』講談社
黒住光他、1999 年、『SF 宇宙映画の逆襲』アスペクト
永田よしのり編、1996 年、『カルト映画館ＳＦ』社会思想社
福江　純、1997 年、『SF 天文学入門』裳華房