

ブラックホールのお話

(Black Hole for Dilettante)

藤田 丈久

(All Physics Institute)

ブラックホールのお話

現在でもブラックホールが色々なメディアでよく取り上げられている。しかしながら、ほとんどの場合、それを書いている人はブラックホールが何なのかを理解しているわけではない。この小ノートではブラックホールについて科学的な裏付けのある解説をして行こう。巷に氾濫している情報があまりにもひどすぎるのである。まるで「あの森に神がいた。自分は見た事がある」と言うお話にそっくりな形で「あの銀河の中心核にブラックホールがある。自分達はそれを撮影した」と主張したのである。これはブラックホールの実態を理解していない事が原因なのだが、しかしこれに対して人々は「ブラックホールが発見されたんだ」と思ってしまう危険性がかなりあると思われる。

1 ブラックホールとは何か？

最近、多くの人達からブラックホールについての質問が寄せられている。それで、ここでは簡単でしかし専門的に裏付けのある内容を解説して行きたい。ブラックホールとは星の一種と考えられているが、その定義(名前の由来)は星とは無関係であり、アインシュタイン方程式の「ある特殊解の特異点」から来ている。しかし一般的にはブラックホールの専門家と称する人々が抱くイメージは「中性子星をさらに高密度にしたような星で光がその境界から外に抜け出せない」と言う、そういう星をイメージしているのであろう。

● 時空の黒い穴：

そして彼らはそれを「黒い穴」と呼んであたかも普通の星ではない特別な「時空の穴」と言う宣伝をしている。ところが、これらの専門家はブラックホールの動力学については全く理解していないし、さらには中性子星の物理に関する計算を自分で実行できる人達ではない。実際、彼らは自分の想像力により話を進めているため、これは科学になっているとは到底、言えないものである。このため一般の人々は長い間、混乱状態に陥っている。

1.1 M87 銀河の核

最近、ブラックホールかも知れないと言われている観測上の星は、M87 銀河の中心核と関係している。これは約 6 千万光年離れた銀河系でその直径は約 1 2 万光年となっている。そしてその中心核には太陽質量の 6 5 億倍の質量を持つ銀河核が存在していると考えられている。この辺の数字の正確さは別として、銀河核に大質量の中性子星のようなものが存在していると考え事は自然なことであり、現代物理学と矛盾はしていない。この M87 銀河の中心核に中性子星が存在していたら、その半径は約 1 万 km 程度であり、地球よりもちょっとだけ大きい程度である。

- ブラックホールと中性子星 :

もしこれをブラックホールの運動学で計算したとすれば、この半径の内側では光が脱出できないと言う事になっている。中性子星との違いはこの 1 点だけである。すなわち、光が外に出られないと言う事だけがブラックホールの特徴である。従って、この違いを観測する事は最初から不可能であることがよくわかると思う。

- 大質量の中性子星の形成 :

但し、このような大質量の中性子星が形成されるためには、超新星に対応する爆発が起こっていたはずである。この時に高速の粒子が周りに飛び散るため、場合によってはそのかなり外側に何らかの形の星雲が見える可能性はあると考えられる。これがリング状になっているとしたら、角運動量の関係から何か他の大きな星 (または銀河系) との衝突も起こっていた可能性があるかも知れない。このような大質量の中性子星的な星がどのように形成され得るのかと言う計算は非常に重要なはずであるが、具体的な計算が実行された形跡はない。これは新しい重力理論が発見されてからまだ 1 0 年程しか経っていない事と関係しているものと思われる。現実的な問題として、中性子星的でその質量が膨大になるような星の存在は現代物理学の視点かみて十分可能であると考えられるし、研究対象としては面白い問題である。従ってこの分野においては、今後の発展が強く望まれるものであるが、しかし科学の定義が「再検証が可能である」と言う条件である限り、宇宙物理学が科学になり得るかどうかは難しい問題を含んでいる事は確かである。

1.2 科学担当者の責任か？

ブラックホールが発見されたなどと大げさに書いているメディアは問題ではある。しかし、この場合それを書いている科学担当者に必ずしも責任があるとは言えないかも知れない。むしろそれを発信している物理屋または天文屋に問題があると言えよう。彼らはブラックホールについて、昔ながらの知識はもっているとしても、その最新の理論物理学に関してはほとんど何も理解していないのが現状である。

1.3 ブラックホールと中性子星

この理由として、ブラックホールの物理を取り扱うためには、量子場の理論、宇宙物理学、原子核物理学そして一般相対論をかなり深く理解し、また具体的にその分野で計算ができないと理解できない問題だからである。

● 重力崩壊？：

例えば、原子核物理学の計算をしている人は、核子 – 核子間の相互作用には近距離で極めて強い斥力が働く事をよく知っている。このため中性子星をはるかに超えた高密度の星を作るとは原子核物理学の観点から言って、不可能な事である。しかしながら中性子星程度の密度の星ならば、その質量が増えても星として存在する事に問題となるような事は何もない。ましてや、重力によって星が潰れることなどあり得ない事は、重力がその原点においてもそれ程強くはならないことから明らかなのである。これは有限な密度分布を持つ場合の重力場を計算してみれば誰にでもわかる事である。ところが、大半の宇宙論屋はこの重要な点を理解していないので想像の世界で話を進めている。蛇足になると思うが、付録に有限密度の分布関数の場合の重力ポテンシャルについて、ちょっとだけ式を書いておこう。

1.4 宇宙の話とロマン

しかしブラックホールに関しては人々に取ってそれが何であるのか良くわからないため、なおさらに興味を惹かれることは至極、自然な事と言えよう。それは宇宙の話にはロマンがあるからであろう。ここではブラックホールとは一体何なのかをできる限り優しく、わかり易い言葉で解説して行こう。このため厳密さは欠いているが、その知識としては正しいものを伝達している。従って若い人達がこのノートを読んだ後、より深くこの問題を理解しようと思ひ、もう一段上の解説書(量子場の理論の教科書になるが…)を読み進みたいと思うきっかけとなるように願っている。

2 ブラックホールの物理

もともとブラックホールは物質がない場合のアインシュタイン方程式を解いた場合、そのうちの特別な解が特異点を含むことから、その特異点と関係して使われ始めたものである。従って、星の形成などの物理的な条件がないため、ブラックホールと言っても時空にある「黒い穴」であるとして見たり、その表面の空間が変形しているため光が曲がって外に出られないと言って見たりで、荒唐無稽なお話以上の物理は存在していない。このためブラックホールと言う名称だけが独り歩きして現在に至っている。

2.1 中性子星

専門的な解説では、ブラックホールは質量がギュッと詰まった状態の星であるという事になっているのであろう。従って、どちらかと言えばそれは中性子星に近い星と言うイメージとなっているが、それよりももっと密度が高い星と想像しているのであろう。しかしそれでは「それがどのように形成されるのか？」と言う物理学はブラックホールのお話には出てこない。そもそも元になっている一般相対論はダイナミクスを扱う理論ではないので、その関連の理論体系や方程式は存在していないのである。

2.2 銀河の核

ブラックホールは星の内部構造とは無関係となっていて、単純に星の密度が非常に高いとしか定義されていない。しかしながら、星の密度が非常に高い星として中性子星が見つかっており、この存在はパルサーなどの測定から確かな事である。これらの事から銀河の中心にある銀河核に中性子星を巨大化したような星が存在しているとしても驚くことではない。実際、1千億近くの恒星達を重力で引き付けている事から、銀河核に巨大な星が存在するとした方が自然な事である。しかしながら、その実態は観測が難しく、観測データの点でも十分とは言えなく、まだまだ物理学にはなっているとは言えないものである。

2.3 ブラックホールの表面

ブラックホールの表面では空間が歪んでいて光が外に出られないというのがその最も重要な仮説である。ところが3次元空間が歪むと言う物理的内容が全く分からないのである。空間の歪みは光の軌跡で置き換えているのだが、光(フォトン)が空間をどう伝搬するかと言う問題は古典力学では答えられない。一般相対論はダイナミクスとは無関係な定式化で構成されているが、これはどちらかと言えば古典力学を相対論化する事を視野に入れて作られたものである。従って、光の軌跡についてはこの理論形式では何も議論できないものである。それはフォトンは電磁場を量子化して初めて理解できるものである事に依っている。さらに言えば、空間と言ってもこれは座標系の事であり、実際の空間を人間が認識する事はできていない。

2.4 空間の歪みは物理音痴の戯言

従って、空間の歪みと言っても、勿論、これは誰も理解できなく、その絵を書いている人達は単に、SF的に想像して描いているだけである。そもそも空間が歪むなどと言う発想は物理音痴の人の戯言であり、物理学とは無関係である。

3 一般相対論のお話とアインシュタイン

一般相対論についてここで詳しい解説をするつもりはないし、その解説をする価値もない理論模型である。一般相対論は座標系に対する方程式であり、アインシュタインは星が分布していたらそのあたりの座標系が変更を受けるとであろうと想像して作った理論で、明らかにこれは物理学の素人の作品である。さらに言えば、このように作った理論が相対性理論と矛盾が生じていることはわかっていたと考えられる。このためこれまで最も重要であった相対性理論を「特殊相対論」と呼び、新しく定式化したものを「一般相対論」と呼んだのであろう。

3.1 相対性理論とその重要性

相対性理論と言うと、これはアインシュタインが成し遂げた仕事だと思っている読者が大半であろうと思うが、どうであろうか？ 実際は、彼の功績をどこまで評価してよいかはそう単純ではない事が現在はわかっている。

- 静止質量：

確かに静止質量を Lorentz 不変な量と結びつけた功績はそれなりに評価されても良いとは思われる。しかしながら相対性理論の重要性はこの静止質量の問題にあるのではなく、考えている理論形式が相対論の変換 (Lorentz 変換) に対して不変であると言う定式化にその本質的な重要性がある。そしてこれらの理論形式は何人かの人達によってアインシュタイン以前にすでに行われていたのである。主な仕事として、相対論の変換性は Lorentz が行っているし、相対論における $3 \oplus 1$ 次元空間での不変性をうまく記述する方法は Minkowski が行っている。実際、アインシュタインは Minkowski が ETH 大学で行った講義に出席していたと言われている。

- 過大評価：

現在、専門家の間では相対性理論に対してのアインシュタインの功績が過大評価され過ぎているものと考えられている。また、彼の論文ではすべて自分一人でやったような書き方をしていることが問題視される事があるが、当時においてはこのような書き方が過大評価の一因になっている可能性はあるかも知れない。

- 一般相対論は相対性理論と矛盾：

一方、一般相対論が最も重要な相対性理論の変換性を破っている事を考えると「アインシュタインは相対性理論の本質を理解していなかった」と考えざるを得ないのである。この点からしても一般相対論を評価しようがない事が理解されたと思う。

3.2 物理学の基本方程式

物理学において基本方程式を作ろうとしたら、それに対応する自然現象を精査して余程、さまざまな角度からあらゆる検討を重ねる必要がある。ところが、アインシュタイン方程式は右辺に星の分布関数を持ってきて、その影響で座標系が変更を受けるとして方程式を作ったのである。

- 理論の根拠：

ところが恐ろしい事に、その根拠となる自然現象が存在していないのである。さらに言えば、座標系に対する方程式が何を意味しているのか全く分からないし、模型の作成者本人も空間が歪むだろうと言う漠然とした描像しかなかったのであろう。19世紀の終わりに「空間の歪み」について議論した論文があるようだが、アインシュタインはそれを参考にしたのであろうか…。いずれにしてもこれは科学にはなっていない理論模型である。

3.3 アインシュタインの物理センスについて

これまで一般相対論を批判してきたが、アインシュタイン本人についてはコメントをほとんどしていない。しかしながら、ここではアインシュタインについて簡単な感想だけ述べておこう。彼が物理音痴であったかどうかそれは正確にはわからない。一般相対論が作られたときは、まだ量子力学さえ発見されていなかったので、彼が量子力学的で確率的な考え方を持っていなくても仕方がない事でもある。

- ソルベイ会議での量子力学論争：

しかしながら、1930年ソルベイ会議におけるボーアとの有名な量子力学論争をみる限り、彼は物理学における確率的な振る舞いの本質を理解できていない事がわかる。これはアインシュタインが決定論的世界観を持ち続け、その世界観の中心にある一般相対論を守りたかったのかも知れないが、これは良くわからない。今となっては量子論的そして確率論的な描像が物理学の基本である事は周知の事実である。ところが、これと矛盾している一般相対論を信奉する集団が世の中には存在していて、彼らが依然として様々な問題を惹き起こしている。彼らの目的は何なのだろうか？

4 物理学と職人

物理学の分野で何か良い仕事をするためには「物理の職人」となる事が必須条件である。そして例えば「理論物理の職人」になるためには、基礎的な物理学(特に電磁気学)の理解のため、様々な問題を解いたり、理論形式の検証に膨大な時間を注ぎ込む事が最低条件である。思い付きで物理が理解できることはめったになく、何か新しい仕事が簡単にできる事などまずあり得ないものである。

4.1 職人の重要性

この事はどの分野でも同じであろう。日本人には職人である事を誇りに思う文化が長く人々の間に根付いている。そしてこの職人氣質はドイツのマイスター制と同質と考えられるが、これが日本やドイツの発展を支えてきたものと思われる。実際、日本の発展をこれまで支えてきた人々は町工場や工房や中小企業で働いている職人達である事はまず間違いない事である。

4.2 理論物理職人の激減

理論物理学では職人的な研究者が激減している。それは現在、多くの研究者が「知識偏重」型になっている事と関係している。知識を右から左に移しても学問の真の発展はない。常に、様々な技術を磨いて、より高いレベルにと普段の努力をする事をして始めて少し進歩する可能性が見えてくるものである。ところが、近年そうした職人肌の学者があまりにも少数になってしまっている。そのうちに、理論物理学の職人は絶滅危惧種に指定されるかも知れない。

● All Physics Institute :

その中であって、現在、その数少ない職人タイプの研究者が集まって「All Physics Institute」(よろず物理研究所)を作り、理論物理学の研究に励んでいる。この集団は「赤貧」に近い状態にもかかわらず、非常に活気があり理論物理学の職人としての自覚もある。この職人集団によって新しい現代物理学が再構築されつつあり、いずれ完成された理論体系が作られることになるのであろう。

付記

一般相対論が「座標系に対する方程式」であると言う事実が直感的にわかりにくいと言う質問が寄せられている。それで、ここでは「座標系に対する方程式」に関して、できるだけわかりやすい解説を試みようとの考えに至り、以下に説明して行こう。しかしこの話の問題点をうまく伝達できているかどうか、あまり自信があるわけではない。

物理学とは座標系を用意して質点(粒子)の運動を記述しようとする学問である。この事は「普通の物理学」の所で解説しているので参考にして欲しい。ここではそれになぞらえて「水槽の中の金魚の運動」を記述する場合を考えて行こう。この場合、水槽は座標系に、そして金魚は質点に対応している。

自然界では水槽中の金魚の運動はそれがふらふら運動なのかそれとも直線的に泳ぐのかと言うような事を観測して、その運動の規則性を調べる事になっている。これは物理学で言ったら「質点の運動を調べてその運動を記述できる運動方程式を求める事」に対応している。

一般相対論は座標系に対する方程式である。それは計量テンソルがAと言う座標系からBと言う座標系に変換する時に出てくる量である事に依っている。従ってこの場合の座標は質点の座標とは異なり、座標系自体を意味している。すなわち、これはより一般的な座標を表していて一般相対論はこの座標系に対する方程式となっている。

これを金魚の例で説明しよう。一般相対論における座標系に対する方程式とは、金魚で言えば水槽に対する変化を記述しようとする事に対応している。そして、Einstein方程式とは金魚で言えば「巨大な金魚がいると水槽が変形する」と考えて作られた方程式に対応している。しかしその根拠は示されていなく、対応する自然現象はさらに存在していない。金魚の水槽が変化したら、それは金魚が原因ではなく何らかの外力が加わったと考えられるが、一般相対論における座標系の変形には星の分布関数の存在のみがその原因としている。但し「黒い穴」は星が存在しない方程式の解の特異点として定義されている。

付録 A : 重力ポテンシャル

質量 M の質点が原点にある場合 $\rho(\mathbf{r}) = M\delta(\mathbf{r})$ 、そこから距離 r 離れた質量 m の質点に働く重力ポテンシャル $V(r)$ は

$$V(r) = -\frac{GMm}{r} \quad (1)$$

となっている。これは原点で発散している。しかしながら、全質量 M の物質が球状に一様分布している場合、重力ポテンシャルは上記の形からはかなりずれることになる。実際、質量 M が半径 R の球に一様密度で分布をしている場合を考えると

$$V(r) = \begin{cases} -\frac{GMm}{R} \left(\frac{3}{2} - \frac{r^2}{2R^2} \right), & r < R \\ -\frac{GMm}{r}, & r > R \end{cases} \quad (2)$$

となる。これより、このポテンシャルには原点での発散はなく、原点での重力の強さは表面での値の 1.5 倍程度である事がわかる。

付録 B : 一般相対論

一般相対論に関して、簡単なコメントをしておこう。一般相対論は計量テンソル $g^{\mu\nu}$ に対する微分方程式である。従ってこれは慣性系の座標系に対する方程式となっている。しかし物理学は座標系を自分で決めてその中で質点の運動を記述して自然界の現象を理解しようとする学問である。このため、その座標系に対する方程式とはどういう意味があるのか、これは物理学としては理解不能である。従って、数学の方程式としては何ら、問題があるわけではないが、Einstein 方程式は物理学の方程式にはなっていない。

1 一般相対論は重力理論と無関係

それにもかかわらず、一般相対論がこれまでかなり多くの人々に受け入れられて来たように思われる。何故であろうか？これにはいくつかの理由があると思うが、その内で最も重要と思われる物理的な理由が一つある。それは Einstein がこの一般相対論は重力理論と関係していると主張したからである。そして『ある仮定』を置く と確かに重力と関係づけられるように見えたのである。それは計量テンソル $g^{(00)}$ が重力場 ϕ と

$$g^{(00)} \simeq 1 + 2\phi$$

と書かれるとした仮定である。実際には、この仮定が物理的に正当化できないし、完全に間違っている事が分かっている。それは、この計量テンソルは未知変数なのでその形は方程式を解いて始めて決められると言うものであり、その形をあらかじめ決める事は出来ない。さらに、この計量テンソルは座標系の変数であり、これが力学変数である ϕ と結びつくと言う仮定は物理的に無意味なものとなっている。従って、式 (3) が方程式として物理的に有意な意味を持つことはない。

2 無関係性の一般的証明

また計量テンソルが重力場とは無関係である事の一般的な証明はさらに簡単である。これは Einstein 方程式を吟味すればすぐにわかるものである。Einstein 方程式は

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}R = 8\pi G_0 T^{\mu\nu}$$

と書かれている。ここでこの方程式の左辺は Ricci テンソル ($R^{\mu\nu}$) とよばれる量で書かれているが、この Ricci テンソルは計量テンソル $g^{\mu\nu}$ の 2 回微分で書かれている。従って、左辺はすべて計量テンソル $g^{\mu\nu}$ で書かれていて、これが未知変数である。

2.1 右辺の計量は誰が決めたか？

まず、問題となるのは Einstein 方程式 (3) の右辺の計量はどのように決められたかと言う単純な疑問である。これは恐らくは Minkowski 計量が仮定されているのであろう。従ってこの方程式は右辺にある星の分布関数が決定された場合、それに応じて計量テンソル $g^{\mu\nu}$ の関数形が決まると主張しているものである。

2.2 右辺の $T^{\mu\nu}$ はどう計算されたか？

ここで深刻な問題は右辺に現われている物理量 $T^{\mu\nu}$ がどのように計算され、求められているかと言う事である。これは未知変数である計量テンソル $g^{\mu\nu}$ とは無関係である。この星の分布関数は重力場の方程式を解いて決められている。従って、ここではすでに重力場とその運動方程式の存在が仮定されているのである。すなわち、この Einstein 方程式は計量テンソル $g^{\mu\nu}$ が重力とは全く無関係であることをこの式自身が示している。従って、どのように頑張ってみても、一般相対論を重力と関係付ける事には無理がある。そのためこの方程式が物理学でどういう役割を果たしているのかは不明である。

3 一般相対論は物理で応用されていない！

一般相対論は重力理論とは全く無関係である事が示されている．このためこれが物理的にどういう意味合いで作られたのか，今となっては分かる術がない．しかし現実問題として，この一般相対論が物理学のどの分野においても利用されたり使われたりしていると言う事実はない．従って一般相対論が物理学において特に何らかの問題を惹き起こしていると言う事実もない．

3.1 重力波の問題

但し『重力波』などの一般相対論がらみで単発的に無意味な主張をしている物理屋がいる事は事実である．これは確かに問題で，何とかしないといけないであろう．それは彼らが膨大な科学予算と人件費を浪費しているからである．しかしながら，どうしたら良いか自分にはわからない問題でもある．

References

- [1] J.D. Bjorken and S.D. Drell, “Relativistic Quantum Mechanics”, (McGraw-Hill Book Company,1964)
- [2] J.J. Sakurai, ”Advanced Quantum Mechanics”, (Addison-Wesley,1967)
- [3] K. Nishijima, “Fields and Particles”, (W.A. Benjamin, INC, 1969)
- [4] T. Fujita, “Symmetry and Its Breaking in Quantum Field Theory” (Nova Science Publishers, 2011, 2nd edition)
- [5] T. Fujita and N. Kanda, “Fundamental Problems in Quantum Field Theory” (Bentham Publishers, 2013)