

4.無限個の小宇宙を生み出す ワームホール

宇宙空間の虫食い穴ワームホールを調べていくと、実にエキゾチックな宇宙ができあがる……。

京都大学理学部 小玉英雄
Kodama Hideo

ワームホールという表題を見て、いったい何のことだろうと思う人が多いに違いない。

辞書を調べてみると、“wormhole” = “虫くい穴”とある。はて、松食い虫の話でもするのだろうか？

実は、今からお話するワームホールというのは“空間の虫食い穴”のことなのである。もちろん空間を食う虫がいるわけでもなく、空間がほころびて穴があいているというのでもない。むしろ、宇宙空間にできたトンネルのようなものである。その実体を明らかにするために、まず親類筋にあたるブラックホールの話からはじめることにしよう。

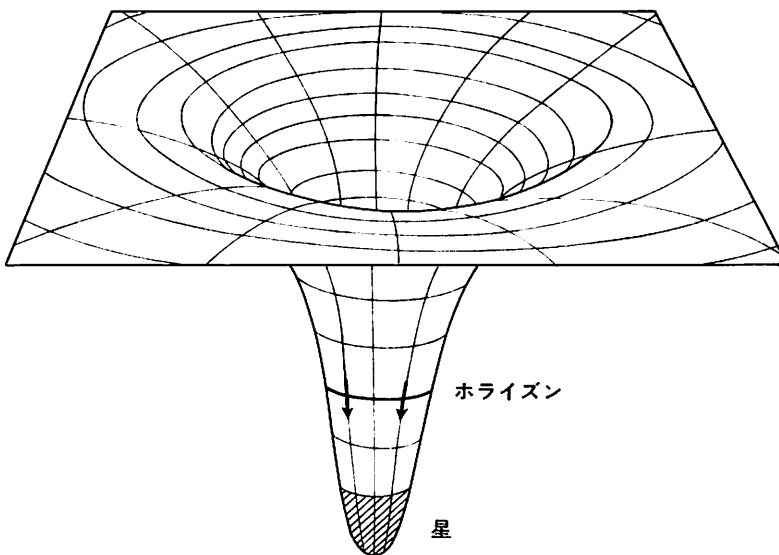
◆ブラックホールの正体

ブラックホールというのは、その言葉のとおり、外から見ると空間にポッカーリ黒い穴があいたように見える天体である。しかし、それは単に光を出さない天体ではない。その正体をさぐるために、その形成過程をみてみよう。

通常ブラックホールは、星がつぶれてできると考えられている。夜空に輝く星々は、内部での核融合反応で発生するエネルギーによって光っている。しかしこの反応も、数百万年から数百億年の後には、核燃料を使いつくして止ってしまう。すると、星は冷え出し、しだいに小さく縮んでゆ

く。軽い星の場合は、そのまま静かに冷えて、固い安定した固体の星となって一生を終えてしまう。しかし、重い星の運命は全く違っている。中心部が歯止めを失なって、ズボッとつぶれるのである。星の質量が太陽の10倍程度なら、このカタストロフ（破局）はなんとか途中で止まる。そのかわり、止まるショックで星の大部分を吹き飛ばしてしまう。これが超新星爆発である。あとには中性子星という超高密度の天体が残ることになる。

ところが星の質量が太陽の



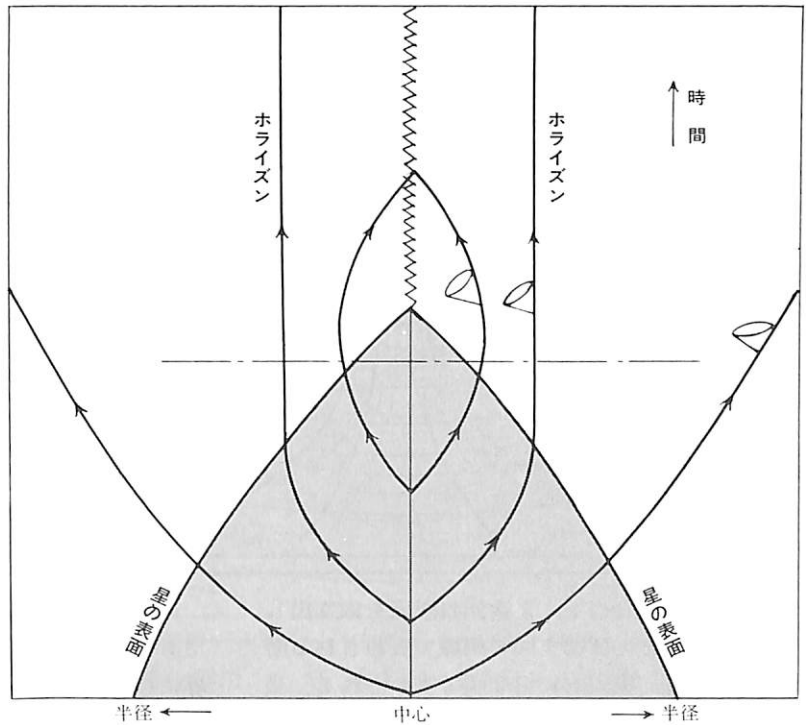
【第2図】 ブラックホール
第1図の鎖線にその断面の空間の構造を模式的に表わす。

20倍以上あると、状況が変わってくる。いかなる力も、このカタストロフを止められないのである。星の中心部は、自分自身の重力のために限りなくつぶれ続けることになる。重力崩壊と呼ばれる現象である。

ところで、このように非常に小さくつぶれた重い星のまわりでは、重力が非常に強くなっている。中性子星でも、その表面での重力加速度は地上の一千億倍もある。このような強い重力の働いているところでは、自然法則は、われわれの日常的な世界のものから大きくずれていて、一般相対性理論というもので記述されると考えられている。この

一般相対性理論というのは、非常にやっかいなものであるが、おおまかにいって次の二つの特徴をもっている。一つは、「光速が有限で一定であり、しかも、いかなる情報も光速より速く伝わることはできないこと」 もう一つは、「重力というものを、時間・空間の幾何学的構造のひずみとしてとらえること」である。これだけでは何のことだか分からないので、重力崩壊の問題で具体的にみてみよう。

星の中心に仮想的に光源をおいてみて、それから出た光の波面のふるまいに着目する。最も重要な一般相対論的効果は、主に光速が有限であることのために、光も重力の作用を受けて星の中心に引かれることである。第1図を見てほしい。星の半径が十分大きい間はこの作用は弱く、光波面は無限に広がってゆくが、星がある半径以下までつぶれると、いったん広がった光が、星の重力によって逆に引きもどされて、再び中心に集まるようになる。特に、ちょうどある瞬間に出た光は、ある程度広がった後、光波面の表面積を一定に保ったまま広がることが分かる。この状況は、川をボ



【第1図】 星の重力崩壊

星が小さくつぶれるにつれて、中心から出た光波面(矢印のついた実線)が強く中心に向かって引かれるようすを表わす。円錐は、情報の伝わることのできる方向を表わす。

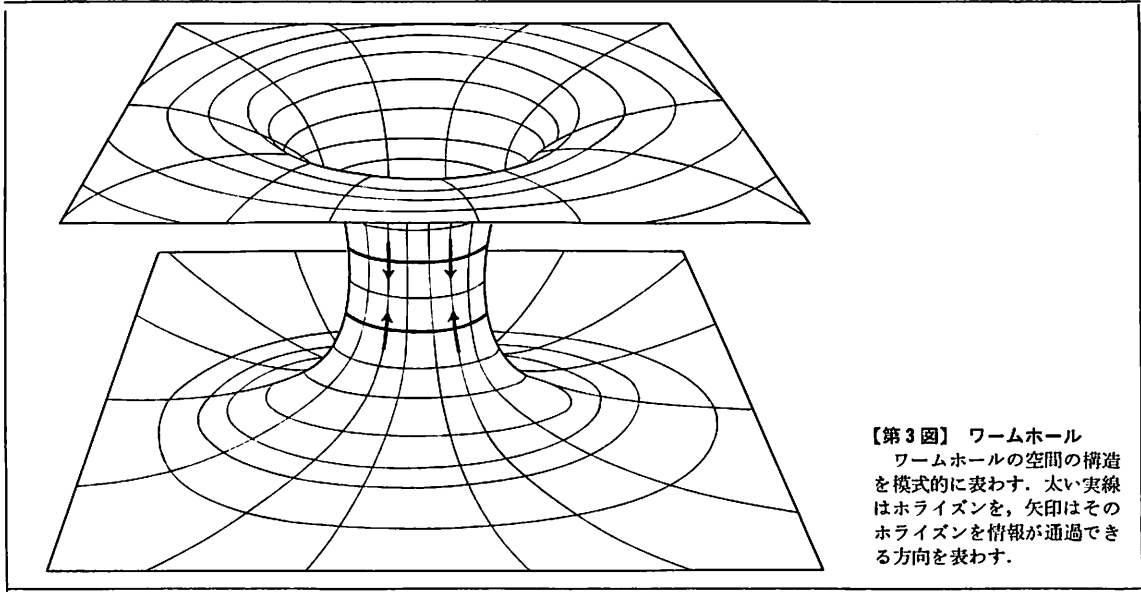
ートでさかのぼる場合と似ている。ボートの速さが川の流速と同じだとボートは前進しているが、岸から見ると、同じ位置にとどまっているというわけである。

この表面積の変らない光波面を“ホライズン”(事象の地平線)と呼んでいる。この面は奇妙な性質をもっている。

外からこの面を通過することはできるが、内側から通過することはできない。これは、この面が最大速度の光速で「外向きに広がっている」ためである。この一方通行の面ホライズンで囲まれた領域が、ブラックホールの正体なのである。まさに宇宙のおとし穴である。

◆出口のないトンネル

さきほど述べたように、一般相対性理論では、重力を時間・空間のひずみとしてとらえる。こんどはこの視点からブラックホールを見てみよう。4次元の時間・空間の幾何学的構造を視覚的に表



【第3図】 ワームホール
ワームホールの空間の構造を模式的に表わす。太い実線はホライズン、矢印はそのホライズンを情報が通過できる方向を表わす。

わすのは不可能なので、2次元の断面を取り出して考える。たとえば第1図の鎖線で表わされる断面のようすは、模式的に第2図で表わされる。星のまわりでは、空間が通常の平面から大きくひずんでいて、^{アインシュタイン}蟻地獄の穴のような形になっていることがよく分かる。蟻地獄の口に当るのが、太い実線で示されているホライズンである。ちなみに、このような空間では、三角形の内角の和は 180° より小さくなる。

さて、ここでホウィーラーという人はおもしろいことを考えた。第2図のような空間を二つ用意し、おのおのから星のしめている部分を切り取った後、この二つの空間をその切り口にそってつないでみたらどうなるであろうか。出来あがった空間は、第3図に示されたような構造を持つ。細い穴が二つの世界をつないでいる。ホウィーラーは、このような空間の構造を“ワームホール”と呼んだ。たとえば、板の表と裏を二つの世界と思うことにすると、ちょうどそれらが、板の虫食い穴でつながっているようだというわけである。もっとも、この穴を通して二つの世界を往来することはできない。第3図に示されているように、この穴には二つのホライズンがある。ところが、どちらのホライズンも、矢印で示されているように、穴にはいる向きにしか通過できない。ワームホールは出口のないトンネルなのである。

ホウィーラーのアイデアは非常に興味深いものであるが、はたしてワームホールというのは自然界に存在するのであるか。ブラックホールのように、星の重力崩壊ではとうていできそうもない。もしそのようなものが作られるとすると、もっと特異な現象が必要のようである。実は宇宙が生まれた頃に、どうもそのような現象が起っていたらしいのである。

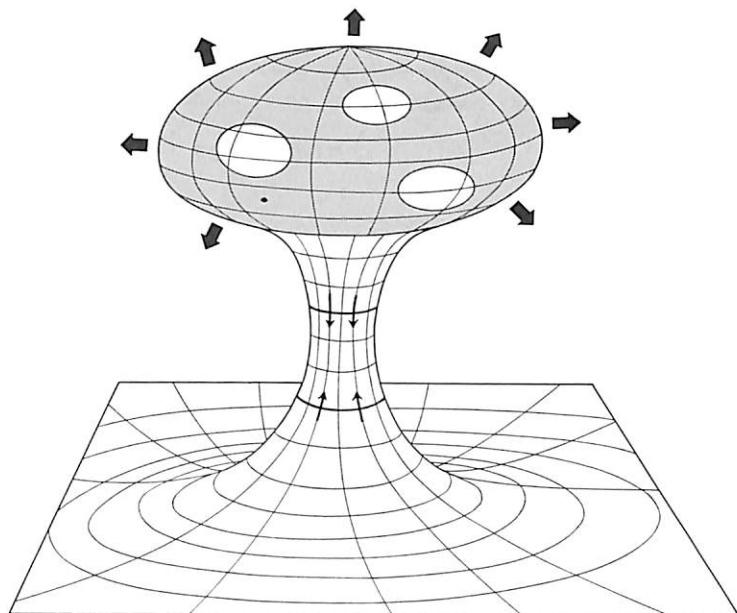
◆百万分の一秒を支配するもの

現代の物理学では、宇宙は昔からずっと今の姿のままだったのではなくて、実は宇宙自身が今から約150億年ほど前に、非常に高温・高密度の火の玉から生まれたと考えられている。この火の玉がしだいに膨張し、温度と密度が下って現在の姿になったわけである。

このビックバンモデルと呼ばれる宇宙の歴史のシナリオのうち、最もよく分かっていないのが、原子核の構成要素である陽子や中性子が出来あがるまでの温度にして10兆度以上という超高温の時代である。この時代には、物質は最も基本的な構成要素である素粒子のガスにまで分解されていて、現在の宇宙では背後にかくれている、素粒子の世界の法則が直接宇宙を支配しているからである。

この、時間にしてわずか百万分の一秒間の時代

【第4図】 宇宙論的ワームホール
ヒッグス場の気泡のまわりの空間の構造を模式的に表す。灰色の部分膨張する気泡に相当する。その中の白丸は液滴を表わす。



が、最近急激に注目をあびるようになった。素粒子の世界の現象を統一的に記述する、「統一理論」というものが登場したためである。現在、素粒子の間に働く力としては、重力を別にして3種類のもの知られている。一つは通常の電磁力、一つは陽子と中性子から原子核を作るような、素粒子を結びつける力、そして最後のものは素粒子の種類を変える力である。統一理論というのは、この見かけの全く異なる三つの力の一つの力として統一するのだが、そのやり方が変わっている。その考え方を比喩的な例で説明しよう。

異符号の電荷をおびた軽い一組の球と、中性で重い別の一組の球を考える。電荷を適当に選べば、希薄な水蒸気中で、2組の球の間に働く力を全く同一にできる。ところがこれらの球を水中に入れてみると、状況が変化する。水の分極のために、電荷をおびた組の球の間に働く力の方が弱くなる。すなわち、水蒸気中では同一に見えた2種類の力（重力と電気力）が、水中では違って見えるわけである。

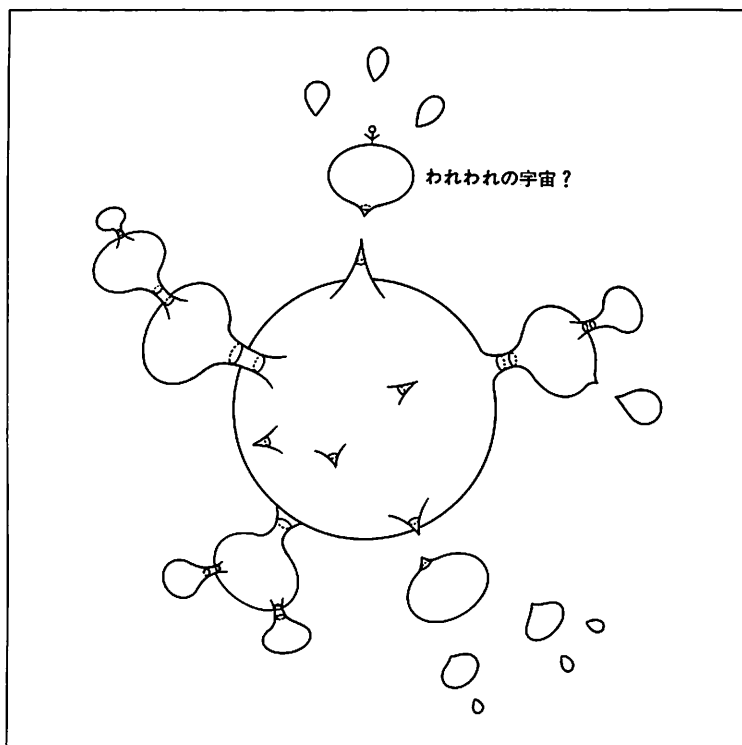
統一理論の考え方も、本質的にこの例と同じである。異なる点は、水のかわりにヒッグス場という媒体を考える点にある。現在のわれわれが住んでいる世界では、ヒッグス場は液体の状態にあっ

て、本来は一つの力が、見かけ上、上記の三種類の異なる力に分かれて見えるというわけである。われわれは水の中に住む魚のようなものである。

ところで、この理論にもとづいて宇宙の初期の時代を考えると、おもしろい事実気づく。水とのアナロジーで考えると、宇宙のごく初期の頃には、ヒッグス場も蒸発して気体の状態になっているはずである。これは現在異なって見えるさまざまな力が、宇宙のごく初期の頃には、一種類の力に融合してしまうことを意味している。統一理論に従うと、自然法則としての力の法則自体が、宇宙の膨張とともに変化するのである。

◆小宇宙が無限に出来あがる！

さて、このヒッグス場は、単に力の法則の変化をつかさどるだけではない。それ自身が非常に特異な現象の立役者となるのである。ヒッグス場が気体状態から液体状態に変化する時点で着目してみる。この状態の変化のしかたは、水蒸気が冷えて水になる場合と似ている。宇宙の温度がある限界の温度（約100兆×100兆度！）より低くなると、ヒッグス場が液体の状態になった小さな領域が、宇宙空間にポツリポツリと発生し始める。時間とともに各液滴領域はしだいに大きく成長し互



【第5図】宇宙の多重発生

いに融合して、ついには宇宙全体をおおうようになる。所々には、ヒッグス場の気泡が残っている。

これだけではなんということはないが、この気泡がくせものである。この気泡は、実は非常に大きなエネルギーを持っていて、しかも急激に膨張しているのである。膨張といっても、回りの液体を押しつけて膨張するわけではない。気泡のしめている空間自身が、風船のゴム膜のようにふくらむのである。同時に、この気泡のエネルギーは、つぶれた星の場合と同様に、回りの液体領域の空間の構造を変化させる。

この特異な現象は、実に奇妙な空間を生み出す。第4図は、気泡のまわりの空間の構造を模式的に表わしている。第3図と比較すると、これはまさにワームホールになっていることが分かる。違いは、今の場合、片方の世界がふちのない閉じた世界になっている点のみである。この閉じた小宇宙は、どんどん膨張しながら、元の宇宙と同様にヒッグス場の気体-液体の変化を起し、一人前の宇宙へと変化する。そこではふたたび、多くの

ワームホール構造をもつ気泡がとり残される……。このようにして、小さなこぶ状の小宇宙がワームホールによって次々と無限につながった、実にエキゾチックな宇宙が出来あがることになる。

ところで、このようなワームホールは、一つの宇宙でどのくらい出来るだろうか。なんと現在の時点で、一辺が100mの空間当たり1個という答えがでてくる！これでは、われわれの回りはワームホールだらけになってしまう。どう眺めてもそのような徴候はない。今までの話は全くのでたらめなのだろうか。実は、このパラドックスを解決する方法があるのである。それはホーキングの非常に興味深い発見に基づいている。

彼は、物質が量子力学という法則に従っていることを考慮すると、ブラックホールが有限な時間で蒸発して、消滅してしまうことを示したのである。彼の考え方に従うと、ブラックホールの親類に当たるワームホールも、やはり蒸発すると考えるのが自然であることが分かる。ただし、ワームホールの場合、蒸発するというのは、二つの世界を結ぶトンネルが消滅することに対応している。この考え方をさきほどの数珠つなぎの宇宙に適用すると、こぶの小宇宙は、ワームホールの蒸発によって次々と元の宇宙から独立して、自立した宇宙となってゆくことになる。一個の宇宙から、独立した無限個の小宇宙が生み出されるのである(第5図)。

このように、現代の物理学は実にファンタスティックな宇宙観を提供してくれる。しかし残念ながら、この宇宙観を直接検証することはできない。また、このシナリオが統一理論の与える唯一のもでもない。しかし、遠い昔に別れていったかもしれない兄弟宇宙の今の姿に、思いをはせるのもたのしいことである。