

宇宙と時間について

KENZOU

2004年4月11日

本稿¹は謎好きアリスさんが「楽しい物理の小部屋」に寄せられたご質問（掲示板参照）に対する回答²です。ご質問が非常に一般的且つ現代物理学のホットな話題ですので、ここに一般に公開することにしました。一揆もとい一気に書き上げましたから内容には誤りが多くあるかも知れませんが、そういうのを発見されれば是非ご一報・（本人が気落ちしない程度にやさしく）ご指導賜れば幸いです。

1 宇宙の果て

1.1 宇宙の始まりと終わり

宇宙ってなんだ？銀河系の集まりか？銀河系って空間に無限に分布しているのか？そもそもどうしてそんなものが生まれたのか？「生まれた」ら当然「死」もあるだろう。宇宙が死ぬということは一体どういうことなんだ？

冒頭のでだしから恐縮ですが、宇宙という広大なものを考えるとき、いくらでも疑問が沸き起こってきますね。まさに、宇宙の起源については、ほんのつい最近（1965年頃）まで、よくわかっていませんでした。それでは現時点では十分理解されているのかというと、そうでもないというのが実情です。“物理学”で理解するというのは理論が実験で証明されて始めてわかったとなるのですが、相手がなにせ非常に広大な宇宙ですから、実験がとてつもなく難しいということに起因しているようです。

さて、それでは以前（1965年まで）と現在では宇宙をどのように捉えているのかを簡単にレビューしておきましょう。

1.1.1 ビッグバン宇宙論と定常宇宙論について

宇宙論の中でも、宇宙は昔も今も不変だという考えが一番安心できるように思いますが、いかがでしょうか。それはともかく、定常³宇宙論の起源は古く、すでに古代ギリシャ時代には「宇宙には始まりも終わりもない」ということが唱えられていました。いわゆる原始宇宙論っていうやつです。時代はうんとさかのぼって、1929年、ハッブル望遠鏡で有名なハッブルは、近隣の銀河が天の川銀河からどんどん遠ざかっているということを観測してい

¹宇宙の画像を pdf に取り込むことができましたので、ついでに若干加筆し更新しました（2004.4.13）。

²本稿は L^AT_EX2_ε で書きました。

³常に一定していること。変化のないこと。（三省堂「大辞林 第二版」）

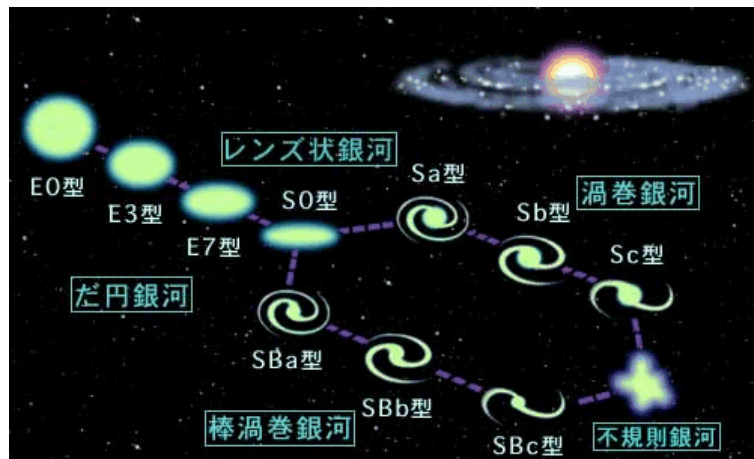


図 1: 宇宙のさまざまな銀河 (http://spaceinfo.jaxa.jp/index_j.html)

ます。また、1931年には英国の科学者エディントンがアインシュタインの一般相対性理論を用いて「宇宙は風船のように膨張している⁴」というアイデアを提唱しております。

1940年代後半に入ると、ハッブルの膨張宇宙を説明する宇宙論が2つ世に出されました。その1つはガモフらをはじめとする火の玉宇宙（ビッグバン宇宙）、もう1つはホイール、ナリカ、バービッジらの定常宇宙論でした。ビッグバン宇宙論（ $\alpha\beta\gamma$ 理論とも呼ばれる）は、宇宙はビッグバンという大爆発で始まり、その高温・高圧状態のなかで核融合が進んで多くの物質が合成され、宇宙はどんどん膨張していると主張しています。一方、ホイールらの定常宇宙論の主張は、ビッグバン論者の宇宙の創造、進化、変化といった概念をしりぞけ、宇宙は常に不変であり、この宇宙では膨張して密度が下がった分だけ、宇宙全体から物質が湧き出してくるというものです。

さて、そしたらどちらが正解なのか？と気の早い私などはすぐ思ったりするのですが、どちらも次に見るように一長一短はあるようです。しかし、現時点では、宇宙が誕生したビッグバン（大爆発）直後に発せられた光がなんと現在、電波（宇宙背景マイクロ波放射）となって観測されています。この事実からビッグバン宇宙論の方に軍配が上がっているようです⁵。

- ビッグバン宇宙論

宇宙の初めにビッグバンにより無（現物質イーレムと名づけた中性子がア prioriに存在していたと仮定）から有をつくりだすような説明できないことが1回起こることを仮に許すとすると、こうしたことは連続的に起こってもいいはずである。いや、むしろそのほうが法則性があって、より自然なのではないか、という論点ですね。1965年の宇宙背景放射（3 K放射）の発見など、ビッグバン宇宙論に有利な観

⁴宇宙膨張論を逆に考え、遠ざかっている銀河の速度を逆転して銀河たちが一点に集まる時期を計算するとわずか20億年ほど前という答えがはじきだされ、なんと宇宙の年齢は地球の年齢より若いという決定的な矛盾が明らかになりました。これは理論の決定的な欠陥とみなされていましたが、その後ハッブルらの観測データに大きな誤差があったことが分かりこの矛盾は解消されることになりました。

⁵2003年2月12日NASAのマイクロ波観測衛星WMAPの観測により、宇宙のもっとも初期の姿が捉えられた。この観測から、宇宙の年齢が137億年であることも高い精度で求められた。ちなみに次のURLを上げておきます。<http://www.astroarts.co.jp/news/2003/02/12wmap/index-j.shtml>

測が続いていますが、ホイールらは定常宇宙論を捨てずにその正しさを主張しているとのことで、観測の精度が高くなるにつれ、現在のビッグバン宇宙では説明しにくい事象が、いくつも見つかってきている事実もあるようです…。

- 定常宇宙論

「真空から物質が生成される」という点は非常識な主張のように思えますが、ガモフの提唱したビッグバン理論でも、宇宙が始まった瞬間にすでに原物質（イーレム）が存在していたと仮定しているのです、その点では大同小異です。ただし、果てしない宇宙の永遠が過去から未来にわたって絶えず物質を生成し続けるという「無限の不思議」には抵抗を感じますが…。



[コーヒーブレイクその1：宇宙の輝き]

宇宙から星の輝きを取り去ったらどうなるか。宇宙は全く光明のない暗黒の世界となるのでしょうか？ 実はそうはならないのです。ビッグバンの宇宙創世期の光が雪洞のようにあたりを照らしているのです。これが宇宙背景輻射といわれるものです。ビッグバンの時に発せられた光は宇宙の膨張とともにどんどんと遙か彼方の遠方に遠ざかっていきますが、どんどんと遠ざかっていく光を観測すると、それはドップラー効果⁶によって光の波長が長くなって見えます（赤方偏移と呼ばれる）。ビッグバン直後に発せられた光が百数十億年かけてその波長を約2ミリメートル（これはマイクロ波といわれる領域です）まで長くなってしまったのです。光のエネルギーは波長に反比例し、約2ミリメートルの波長を温度に換算すると絶対温度で2.7K（約3K）となります。このビッグバンの残光が発見されたことから、ビッグバン自体の存在が証明されたのです。

1.1.2 宇宙の構造について

宇宙はどのような姿・形をしているのでしょうか。ここでは現在どのように考えられているか、簡単にレビューして見ましょう。宇宙の構造はアインシュタインの一般相対性理論で計算することができますが、しかし、いくつかの仮定が必要となります（仮定をおかないと計算が進められない）。1917年にアインシュタインは「宇宙はどこでも、どの方向をみても同じである」という一様等方性の仮定をおき最初の模型を創案しました。その後、1920年代にフリードマンがアインシュタインのアイデアを発展させたいわゆるフリードマン模型を提唱しました。このフリードマン模型が現在の宇宙論の基礎となっています。それでは宇宙は数学的にどのように記述されるのか、その一端だけでも垣間見ることにしましょう。それは次式⁷であらわされます。

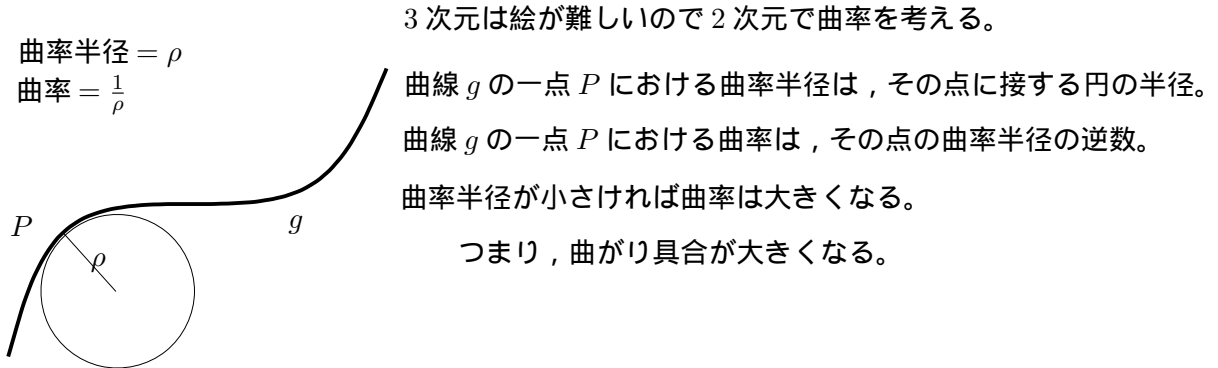
$$ds^2 = -dt^2 + R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right] \quad (1)$$

なっなんだこれは～！というところですが、あまり深く考えないように。といっても少しは(1)の説明をしておきましょう。 θ, ϕ は原点から注目する位置を見た場合の座標軸

⁶踏み切りに近づく電車の音はだんだんと大きく高い音に聞こえ、遠ざかっていくと急に音がしぼむように小さくなる、これはドップラー効果といわれています。

⁷これは *Robertson - Walker* の計量と呼ばれています。

とのなす角度です（球面座標系）。 r は距離で、 ds は2点間の距離、 dt は2点間の時間差、 $R(t)$ は宇宙の半径、 k が空間の曲率と関係するものです。ところでここでちょっと一服して、曲率とはなんだと下の絵でその概念をつかんでおくことにしましょう。もっとも絵は2次元⁸ですが、...



さて、再び(1)に戻り、空間の曲率定数を K とすると宇宙の半径 $R(t)$ と

$$K = \frac{k}{R(t)^2}$$

という関係にあり、 K の値によって宇宙の構造は次のように分類されることになります。

- $K = 0$... 宇宙は平坦
- $K > 0$... 球のように閉じている
- $K < 0$... 馬の鞍のように開いている

ところで現実の宇宙はどの姿をしているのかということが次に問題になるわけですが、あ

《宇宙の構造（空間的に見てくださいね）》

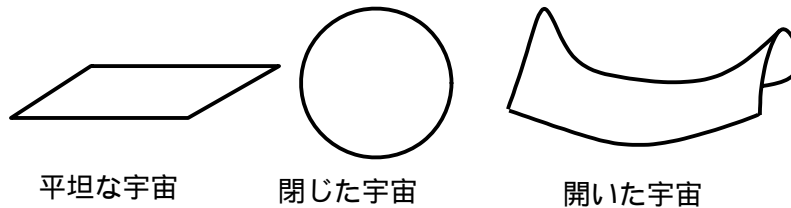


図 2:

るいはフリードマンの模型にはない形⁹をしているのか、... これは宇宙論最大の問題とされています。つまり未だに決定打がないということです。なぜ決定打がでないかということですが、どんな立派な理論も実験の検証を経なければならぬことは冒頭申し上げたとおりです。宇宙空間の曲率は極端に小さいので、宇宙空間の曲率を直接測定することは非常に難しいということです。なぜ、そのように小さいのかということは1980年代に我国の佐藤勝彦氏（東大）が提唱されたインフレーション理論で明らかにされました、ここでは

⁸ 3次元曲面の曲率は2次元の場合の円を球体にかえて、その球体の半径を K とすると曲率は $\frac{1}{K^2}$ で定義されます。

⁹ ドーナツ形の宇宙というのも研究されている。もうこうなったら想像力だけでフォローするのはしんどいも二がありますね。

この話には立ち入らないことにします。いずれにしても理論計算で非常に小さい曲率をはじきだしても、実験で自然が本当にその曲率をとっているか実証されなければ絵に描いた餅同然という厳しい判定がくだるわけです（自然科学の厳しさ）。

1.1.3 宇宙の終わりについて

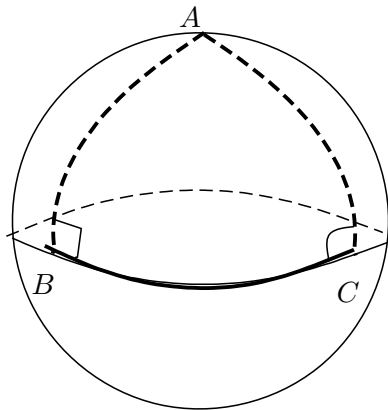
宇宙の終わり¹⁰は「開いた宇宙」、「平坦な宇宙」、「閉じた宇宙」でそれぞれそのシナリオが異なります。宇宙の終焉までのシナリオを以下に述べます。まず「開いた宇宙」の場合ですが、この場合宇宙は永遠に膨張し続け、無限の時間が経ったとしてもその膨張速度は有限の値をもつとされています。つまり終わりが無いということでしょうか、宇宙が膨大に拡散してしまっただけでその結果何もなくなるということでしょうか。「平坦な宇宙」の場合も永遠に膨張を続けますが、膨張率は無限の時間が経つとゼロとなり、ついには無限の未来で静止します。その時点が平坦な宇宙の最後でしょうか。最後に「閉じた宇宙」の場合ですが、この宇宙はある時点でその膨張が止まり、その後再び収縮を始め、だんだん温度が上昇し、最後に異常な高温状態となって爆発（ビッグクランチと呼ばれています）が起こり、そこで宇宙の終焉を迎えると考えられています。以上の三つのシナリオは次のように考えると分かりやすいと思います。地上から特定の速度で打ち上げられたロケットを考えます。もしそのロケットが地球の重力から脱出するのに十分な速度を持っていないければ、いずれは地球に落ちてきます。これは、ある時点で収縮を始める「閉じた宇宙」の例に相当します。もし、ロケットが地球の重力を「ちょうど」振り切るだけの速度を持っていれば、ロケットは地球を飛び出し、地球から無限に遠い地点で静止するでしょう。これは「平坦な宇宙」の例にあたります。もしロケットが地球の重力から脱出するのに必要な速度以上の速度を持っていればロケットは地球を飛び出し、無限の遠方においても有限の速度を保って飛び続けることになります。これは「開いた宇宙」の例に相当します。現実の宇宙は、最近の精密な観測によれば開いた宇宙であるらしいので、灼熱地獄のビッグクランチは避けられそうで何よりです。しかしまあ仮に現実の宇宙が閉じた宇宙であったとしてもビッグクランチは気が遠くなるほどの時間の経過（何百億年）必要とされていますので、生身の私らにはピンとこないものがありますが（笑い）



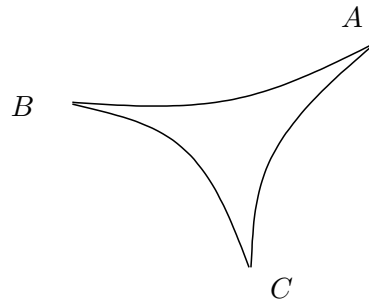
[コーヒーブレイクその2：三角形の内角の和は180度？]

われわれの住んでいる空間は縦・横・高さで規定できる3次元空間と普通考えていますが、アインシュタインの相対性理論によればそれに時間を加えた4次元の時空間ということになります。位置を表す x, y, z の座標軸と時間軸 t を区別しない4次元空間が現実の空間の本当の姿とされています。3次元空間は簡単に絵にかけますが、4次元空間となるとおいそれと簡単に書くわけにはいきませんね。そこで大抵は4次元空間をある断面で切り取り、例えば x, t 軸で表される2次元時空に次元を落として考えたりします。その話とはともかく、先ほど空間の曲率のゼロ、正、負によって空間は平坦、球のように閉じている、馬の鞍のように開いている、となにやらわけの分からない絵で示しましたが、実はこのそれぞれの空間で三角形の内角の和を求めると必ずしも180度ではないのです。平坦な空間の場合は180度になります。しかし閉じた空間では180度以上となってしまう、開いた空間では180度以下となってしまう。これが空間のひずみを意味しているのです。具体的に絵を見て考えてみてください。

¹⁰本節は元のバージョンを加筆修正しています(2004.04.13)。



三角形 ABC の内角の和は 180 度より大きい



三角形 ABC の内角の和は 180 度より小さい

図 3: 三角形の内角の和

これで宇宙の構造の一端が少しは分かるのではないのでしょうか (あまり自信ないが)。

1.2 宇宙の果てについて

宇宙に果たして果てがあるのかないのがよく分からないというのが正直なところだと思います。米国の宇宙天文学者ハッブルは 1929 年にアンドロメダ星雲 (SF でよくでてきますね。何か宇宙人でもいるような) を観測し、それが銀河系の外のある全く別の銀河系であることを突き止めました。そして次々に新しい銀河を発見し、その多くが地球から猛スピードで遠ざかっていることを観測し、宇宙は膨張していると結論づけました。ハッブルの詳しい観測から、銀河までの距離と後退速度の間には単純な比例関係

$$\text{後退速度} = \text{ハッブル定数} \times \text{距離} \quad \cdots \text{ハッブルの法則}$$

が成立することが知られています。この式からビデオの逆回しの要領で計算していくと、以前お話しした宇宙の年齢が計算できます。ただし、ハッブル定数¹¹の値は観測の精度があがるにつれ大きくなったり、小さくなったりといろいろ変遷していますが、最近では宇宙の年齢の精度は非常な精度で求められていることは以前お話したとおりです。ハッブルの式から分かることとして "因果の地平線 (シュバルツシルト半径)" があります。後退速度と距離は単純に比例関係にありますから、ある距離になると後退速度は光速を超えます。するとその距離より遠くにある銀河からの光は地球に届かないこととなりますね。この光が届かなくなる場所を因果の地平線と呼んでいます。ところで、超高速は特殊相対性理論でご法度になっているのではという疑問が当然起こりますが、因果地平の彼方にある銀河はわれわれから見ると確かに光速を超えていく(るように見え)ますが、その彼方に行けば光はやはり光速で進んでいるのです。光がいくら進んでもその場所と地球との距離が増える割合が大きいので、地球に光が到達できないのです。結局整理すると

¹¹ハッブル定数の最新データは 2003 年に 71Km/sec/Mpc と得られた。1Mpc はメガ・パーセクと読み 320 万光年という単位になります。したがってハッブル定数は 320 万光年離れた銀河は秒速 71 Km で遠ざかっていることとなります。ちなみにアンドロメダ銀河は約 0.7Mpc ですからおよそ秒速 50Km の速さで遠ざかっていることとなります。

1. 因果地平より遠くの星からの光は、地球には届いていないのだから、われわれの見ることのできる光は最初から有限である。
2. 宇宙が始まってから、有限の時間しかたっていないのだから、無限の遠くから光はこないのだから、われわれの見る光は有限である。

ということになりましょうか。いやまあ、なんとも歯切れの悪い結論となりましたが、現代の宇宙物理学ではっきり分かっているということであればこういうことになるのではないのでしょうか（ご批判、ご教示賜れば幸いです）。



[コーヒーブレイクその3：宇宙の中心]

宇宙背景輻射のところでも宇宙あらゆる方向からビッグバンの名残りである残光がマイクロ波となって地球に届いていると書きましたが、ということは地球が宇宙の真ん中？ という疑問を抱きますね、まさにビッグバンの火芯が地球かと。。。

この疑問は、3次元の中の有限な空間というイメージで捉えると確かにそのような考え方ができます。しかし、現実の宇宙空間は4次元の時空間（モノの本によっては5次元あるいはそれ以上の多次元空間と書かれています、それは今置いておきます）なのですね。しかし3次元以上の多次元空間をイメージせよといわれてもなかなかピンときませんので、次元を一つ落として3次元の時空間であると考えます。空間が2次元（平面）、時間が1次元を考えます。これはちょうど風船に例えることができます。風船の表面は2次元平面（曲面）と考えることができます。時間の次元は時間とともに風船が膨らむので風船の表面に垂直な方向を考えます。ビッグバンはこの風船（膨らむ前は点の状態のように無限に小さい）が点の状態から一気に膨らんで広がっている状態だと考えてください。現在もどんどん風船は大きく広がっています。私たちはこの風船の中にはなく、風船の表面に住んでいるようなものと考えれば風船の表面にちりばめられた星々（銀河団）は、結局どれもが中心ではないかと考えられます。つまり、宇宙空間の中心というものはない、そういう考え方はできないということになるのです。ドッジボールの表面のどの部分がボールの中心かという問題と同じですね。

2 時間

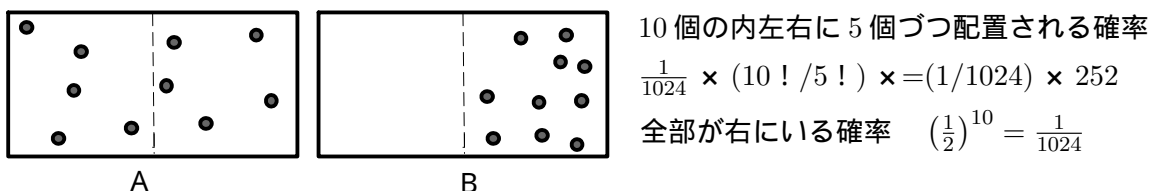
昔、隠密剣士というTV番組があり、霧の遁平という忍者がひょいと高い壁に飛び上がった後、子供たちはそれをまねすべくいろいろと努力を重ねたものだが... じつはこのジャンプはフィルムを逆回しして撮っているのです。これは時間の進む向きを後退させていることとなります。テーブルの上にこぼれたコーヒーは時間を逆に回せば元の状態に戻ることができます。しかし、これらのことはあくまでフィルム上での話であって現実には起こりえない。つまり、現実には時間の後退というものはない。時間は一方向に向かう矢（時間の矢）である、ということになるわけです。

アインシュタインは、時間の矢は常に前進するものであると主張しました。光の速度を超えるものはないといったのでした。時間の矢と光の速度とどういう関係があるの？ となりますが、もし光の速度を超えることができたなら、時間の矢は後退することも可能にな

るのです。たとえば光より早い乗り物に乗って未来にいったとしましょう¹²。すると未来に起こることが先にわかってしまい、仮にその事件が都合の悪いことであれば¹³、再び光より早い乗り物で戻ってきてその対策を講じることができます。未来から見れば時間を逆戻りしていることとなりますね。しかし、残念ながら、現実にはそういうことは起きない!! ということで、時間の矢は、やはり前進するしかほかない。。。のだろうか？

2.0.1 時間の流れについて

先ほどテーブルの上にこぼれたコーヒーの話をしました。これは熱力学的時間の矢と呼ばれます。つまり、物事はすべて乱雑に向かうというやつです。言い換えるとエントロピー増大の法則ということになりますが、エントロピーの詳しい話はまた別の機会に譲るとして、ここでは概念的につかんでおけばいいでしょう。下の絵をご覧ください。10個の玉がそれぞれ A, B のように分布する確率を求めています。計算結果は A を実現する確率



は B を実現する確率の 252 倍も大きいということになります。高々10個でそうですから、もっと数が増えると圧倒的に A の実現確率が高まりますね。この確率がエントロピーに相当するのものと考えてもいいでしょう、つまり、エントロピー増大の法則とは、ものごとは常に乱雑な方向に進むと直感的に捉えればいいと思います。以上が「熱力学的時間の矢」の正体(?)であり、その概要でした。つまり、時間は一方方向にしか進まない。

2.0.2 マクスウェルの悪魔

19世紀最大の物理学者の一人と言われるマクスウェルは、上で述べたようなエントロピー増大の法則に従わないような存在がもしあれば、空気からエネルギーを取り出すことができることに気がきました。

空気を入れた箱を考えます。悪魔は仕切り板に棲みついでいて、その仕切り板の一部を開けたり閉めたり操作しています。箱の左側から速度の速い空気の分子が走ってくると、悪魔はその戸を開け、右側の仕切りの中に入れます。当然、遅い分子には戸を閉めて通しません。一方、箱の右側から速度の遅い空気の分子が走ってくると、悪魔は戸を開けて左の仕切り部屋に送り込みます。これを続けていると箱の右側には早い分子ばかりが、箱の左側には遅い分子ばかりが溜まります。速度が速いということは温度が高いということですから、右側はどんどん温度が上がることとなりますね。この温度をエネルギーとして取り出せば、完全省エネのエンジンができるのですが、現実には残念ながらマクスウェルの悪魔は存在しません。

¹²映画「バックツ・ザ・フューチャ」がそうでしたね！

¹³何もそれだけにかかわらないが、話の成り行き上そういうことにしておきます。

2.0.3 時間はいつから始まり、いつ終わるのか

さて、時間を上のように熱力学的時間と捉えるなら、時間の始まりはまさに宇宙に始まりということになるのではないのでしょうか。ビッグバン発生と同時に時間が流れ始めたと考えていいのではないのでしょうか。

いつ終わるのか…それは宇宙の終焉とともに消滅すると思いますが。この辺の議論はアインシュタインの生まれ変わりと言われている英国の物理学者ホーキング博士がいろいろ啓蒙書を書かれています。怠惰な私はいずれも読んでいないのでその辺のお話ができないのが残念です。興味ある方は一度本屋で立ち読みなどされてはどうでしょうか。

3 終わり

ここまでお付き合いいただきまして、大変お疲れ様でした。まあ、何か分かったような分からないような曖昧模粉としたものが多く残ったと思いますが、それは偏に小生の筆力不足がおおいに関係していると思います。この小稿を読んだが、さっぱり分からんといって、決してご自分を反省されるようなことはくれぐれなされませんように。また、そういうことはほとんどないと思いますが、よく分かった(?)といっても問題自体が非常に奥深いですから、さらに分かるように気張ってみることも大事かと、老婆心ながら思ったりします。それではまたお会いできる機会を楽しみにしてこの辺で筆をおきます。

< 履歴 >

- ・ 2004.4.12 宇宙の終わりについてを加筆修正
- ・ 2004.4.13 コーヒーブレイクその1 追記
- ・ 2004.4.14 コーヒーブレイクその2 追記
- ・ 2004.4.15 コーヒーブレイクその3 追記
- ・ 2004.4.16 脚注いろいろ追記

[参考文献]

下記サイトは本稿を書くに際して非常に参考になりました。サイトの著者にお礼申し上げます。

- ・ 科学と技術の諸相

http://www005.upp.so-net.ne.jp/yoshida_n/index.htm

- ・ 時間と空間

<http://homepage3.nifty.com/iromono/kougi/timespace/timespace.html>

- ・ 宇宙情報センター

http://spaceinfo.jaxa.jp/index_j.html

- ・ 膨張宇宙の研究

<http://www.com.mie-u.ac.jp/syudai/D/ronbun.html>