

【レジュメ】時間の正体を探る 一時は流れる？戻る？分岐する？

講師：吉田 伸夫

本講義では、物理学的な時間について、数式を使わず文系の人にもわかるように解説します。また、タイムマシンやパラレルワールドなどのSF的な話題に関しても、物理学でどのように扱われるかをお話しします。

講義内容は、今春出版予定の拙著『この世界に「時間」が存在するのはなぜか』（SB 新書）に基づいています。また、このレジュメは、以下のアドレスで閲覧できます。

<http://scitech.raindrop.jp/resume/resume.pdf>

※「https://」ではなく「http://」です。

第1回 時間のありか(02/07)

一般相対論によると、時間はあらゆる場所に存在しており、エネルギー分布に応じて伸び縮みすることで重力を生み出している。

1. 硬直したニュートンの時間

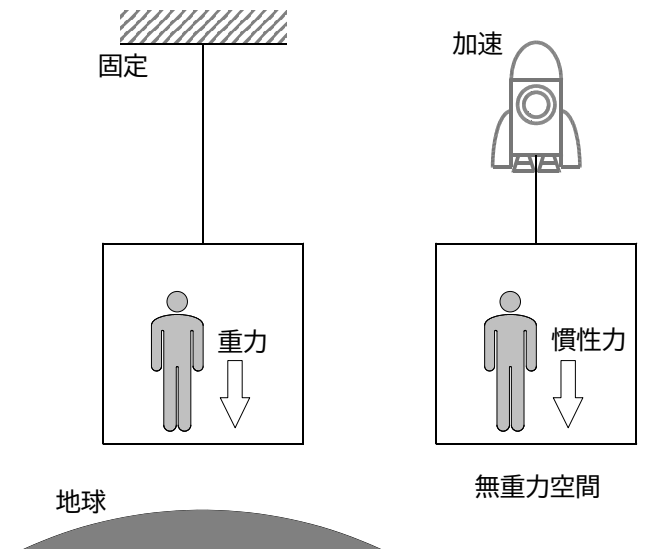
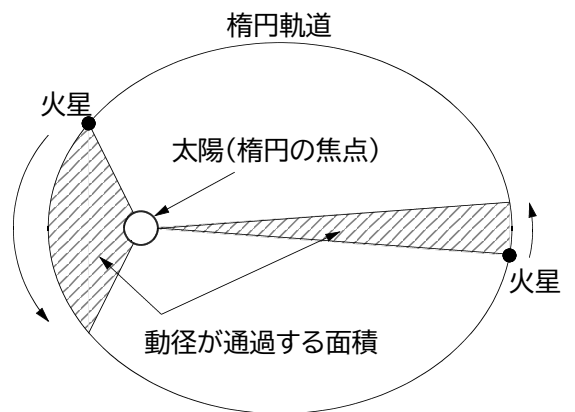
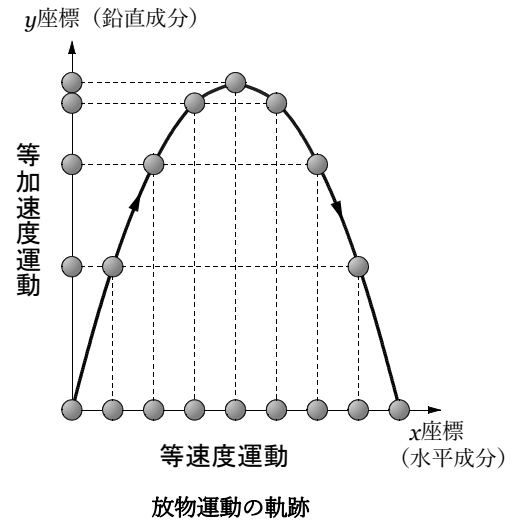
○ガリレオは、空気抵抗のような攪乱要素をすべて取り除くと、物体が自由落下するときの速度は落下時間に比例すること（「落体の法則」）を見いだした。同じ時期、ケプラーは、惑星は太陽を焦点とする楕円軌道を描き、その面積速度が一定になるというケプラーの法則を発見した。

○ニュートンは、こうした先行研究をまとめ、地上付近の落下・放物運動でも天界の惑星運動でも、同じ運動法則（力＝質量×加速度）が成り立つと主張した。この結果は、地上も天界も同一の時間に支配されることを意味する。宇宙全域で一様な時間が流れるという「絶対時間」のアイデアである。

○惑星運動がケプラーの法則のような単純な数式に従うのは、運動をかき乱す攪乱要素がないからと推定され、宇宙空間は真空だと結論づけられる。しかし、もし空間に物理現象を伝える媒質が何もないとすると、時間や重力はいかにして物体に作用するのだろうか？

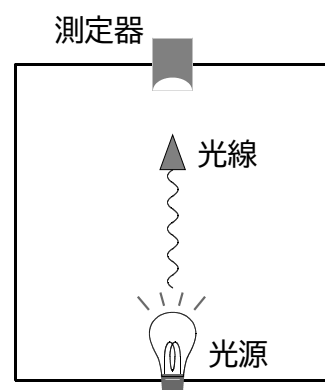
2. 時間の伸び縮みが重力を生む

○アインシュタインは、重力理論を構築する際、「慣性力（遠心力のように加速度運動しているとき感じる“見かけの”力）」と区別できないこと

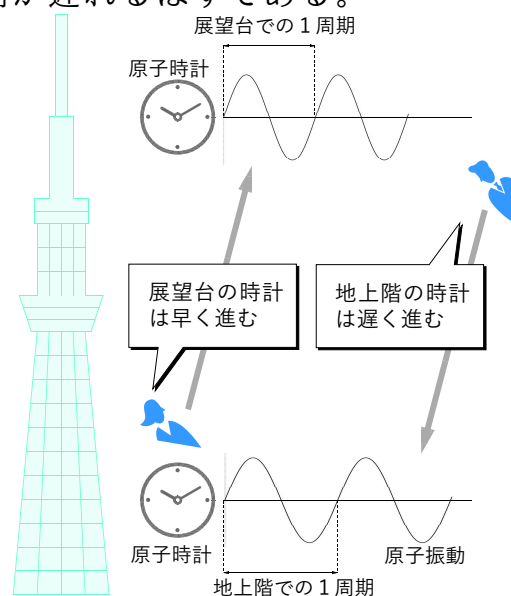


が「重力」の本質的な特徴だと洞察、両者が区別できないという「等価原理」を前提すると何が導かれるか考えた。

○彼が考案したエレベータの実験では、エレベータが上に向かって加速度運動するときの慣性力と、下に地球のような天体があるときの重力が物理的に区別できないと仮定される。エレベータの床に光源があって上に向かって光を放出する場合、加速度運動するときにはドップラー効果によって振動数が減少する。天体からの重力だけが作用するとき、これと同じ振動数の減少が生じるためには、天体に近い場所では時間がゆっくり進むと考えざるを得ない。すなわち、エネルギーの塊である質量が存在すると、その近くで時間が遅れるはずである。



○エネルギー源の近くで時間が遅れる現象は、高い精度で観測されている。2020年には、スカイツリーの地上階と450メートル上方の展望台に光格子時計を設置し、展望台の方が1日あたり10億分の4秒だけ早く進むことが観測された。

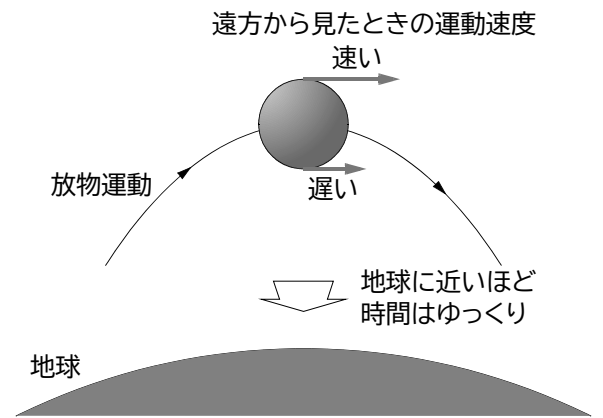


3. 柔軟なアインシュタインの時空

○重力による物体の運動は、時間の伸縮だけでほぼ説明できる（図参照）。アインシュタインは、当初、それで重力現象が解明できると期待したが、細かな計算を進めるとうまくいかなかった。

○1913年、数学者グロスマンの協力を得て、「時空（時間と空間を合わせた幾何学的実体）」のすべての次元を考慮する方法（リーマン幾何学の応用）を考案し、エネルギーが存在すると時空が伸縮するという一般相対論の枠組みを構築した。

○真空は何もないのではなく、時空が《存在》する。時空とは、その上に物理現象という絵が描かれるゴム製のキャンバス（画布）のようなもので、エネルギーが存在するとキャンバスが部分的に伸縮し、平坦なときとは異なった形の絵（＝異なる物理現象）になる。こうしたキャンバスのゆがみによって生じる効果が、重力の作用である。

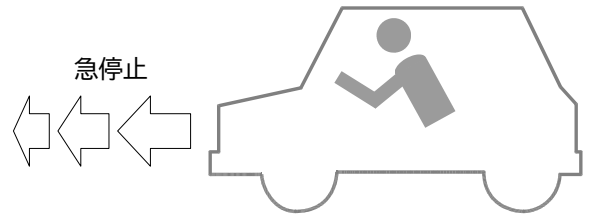


○一般相対論は、原子が真空中を動き回ったり結合したりすることで物理現象が生起するという「原子論」から、至る所に現象を引き起こす“何か”（「場（field）」）が満ちていると主張する「場の理論」への転換を促した。さらに、1920年代末に提唱された「場の量子論」によって、物質の構成要素（原子とか素粒子と呼ばれるもの）は場に生じた波動の共鳴状態であるという理論が作られる。現代物理学は、一般相対論と場の量子論を2本柱とする「場の理論」によって構築されている。ただし、両者を統一する試みは、いまだ成功していない。

【SF と現代科学】SF では、時間や空間を跳躍するタイムマシンやテレポーテーションが描かれることがあるが、場の理論を前提とすると、それは不可能である。必ず場の内部を連続的に移動しなければならない。H.G. ウェルズ「タイムマシン」など

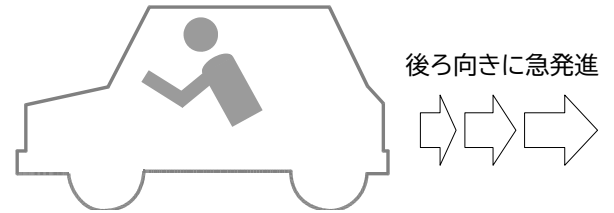
第2回 「流れる時間」の起源(02/14)

ビッグバンは、爆発ではなく整然としたエネルギーの放出である。この整然とした状態が壊れていく過程が、時間の流れとして感じられる。

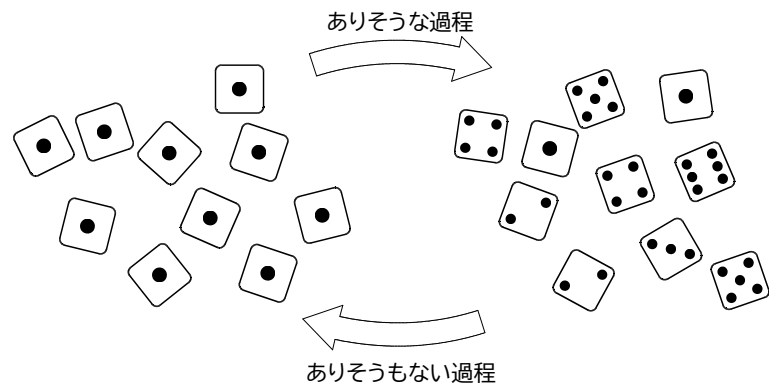


1. 始まりの謎

○基礎的な物理法則（ニュートン力学やマクスウェル電磁気学、一般相対論、場の量子論）は、すべて時間の向きを反転してもそのまま成り立つ（場の量子論の場合は、粒子・反粒子の入れ替えなどが必要）。つまり、「時間の流れ」は、基礎物理法則に由来するのではない。



○多数の小さなサイコロがランダムに転がる過程をビデオ撮影する。すべて1の目の状態からバラバラになる映像は自然で、時間が流れる向きに順再生したと推測されるが、バラバラの状態からすべて1に揃う過程は不自然で、ビデオを逆再生したと見なされる。

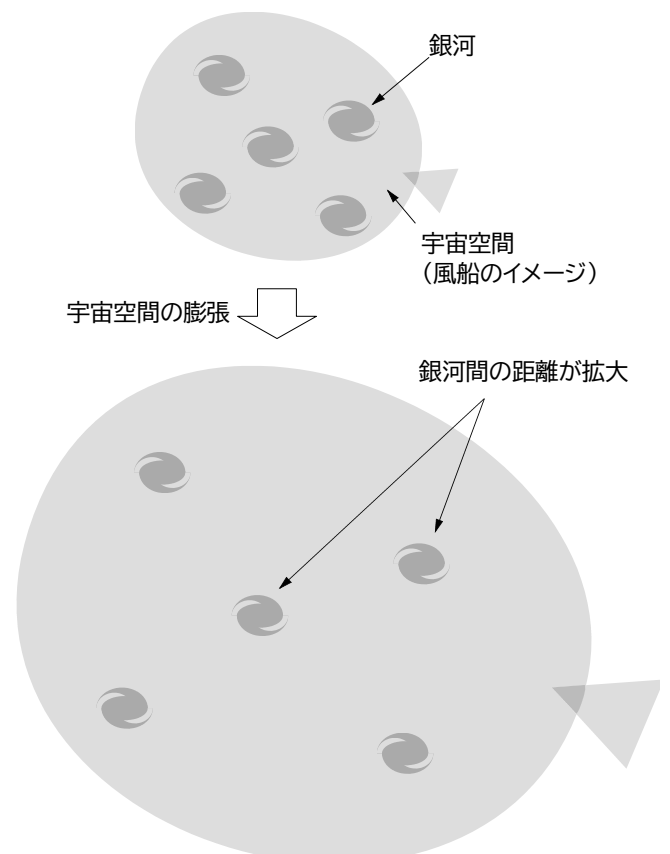


○自然に生じない（逆再生に相当する）のは、パターン数が膨大な状態から少ない状態へと変化する過程。人間にとって「時間が流れる向き」とは、パターン数が多い状態へと変化する“自然な”過程である。このパターン数の多寡を表す指標が「エントロピー」である。通常物理現象では、エネルギーを分配するときのパターン数がエントロピーを決定しており、エネルギーがどこかに偏った（パターン数の少ない、温度分布にムラのある）状態から、最も偏りのない（パターン数が最大の、温度が均一な）状態へと移行することで、エントロピーが増大する。

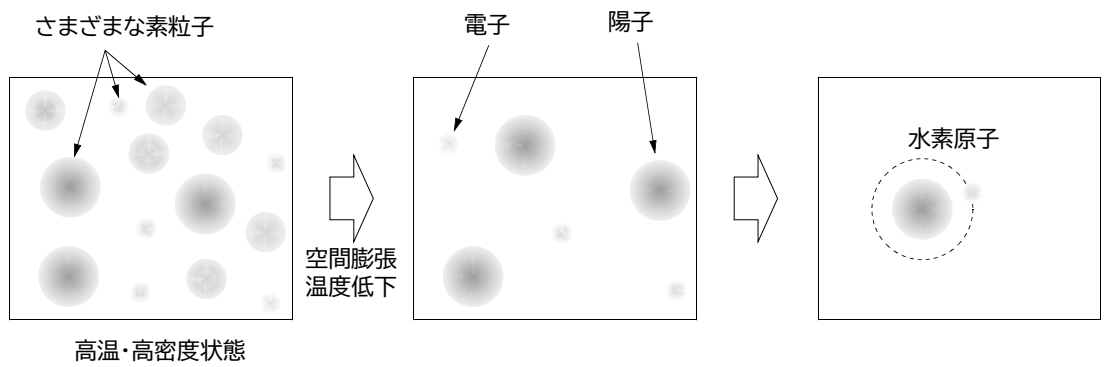
2. ビッグバンは爆発ではない

○人間の棲む“この”宇宙は、138億年前のビッグバンに始まる。かつては、高温・高圧のビッグバンは宇宙開闢の大爆発と考えられたが、現在では、物質のない宇宙が膨張する過程で、真空に潜在していた「暗黒エネルギー」が外部に放出され、物質の場を振動させて原子や光を生み出したと推測される（インフレーション理論；いまだ確実な証拠はなく仮説の段階）。

○暗黒エネルギーの放出は、爆発とは異なり、場所による差異のない整然とした過程だった。その結果、宇宙空間はどこも同じような状態となり、場所による差異がきわめて小さい（インシュタインが提唱した「宇宙原理」が成り立つ理由）。

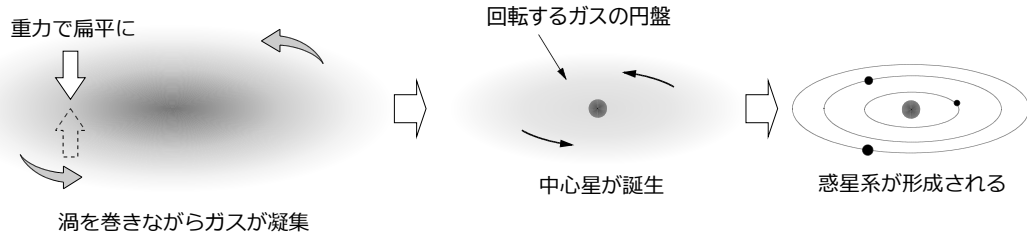


○宇宙空間は、一般相対論の運動方程式に従って、安定せず膨張か収縮をする。ビッグバン以降の宇宙空間は膨張を続けており、それに伴って、ビッグバンで放出されたエネルギーの大部分は希薄化するが、一部で共鳴状態を形成し、エネルギーの塊となった状態が長期にわたって持続する。これが、素粒子や原子である。



3. 宇宙は壊れていく

○ビッグバンとともに誕生したエネルギーの塊 (=原子) の集団は、互いに重力

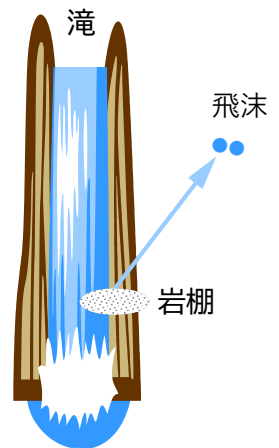


を及ぼしあって凝集する。このとき、すべての物質が1点に向かうのではなく渦巻きを描くので、遠心力が作用する方向に広がった薄い円盤状になる(原始惑星系円盤)。物質の大半は円盤の中心部に落ち込み、高温・高圧状態になって核融合を開始し恒星になる。円盤内部に広がった物質は、所々で凝集して恒星の周囲を回る惑星となる。こうして形成される惑星系では、大部分のエネルギーが中心の恒星に集中しており、エネルギーがひどく偏ったエントロピーの小さい状態である。

○核融合によって、水素以外にも炭素・窒素・酸素など多くの元素が合成される。宇宙空間で最も多い水素と3番目に多い酸素が結合すると水になる(2番目に多いのは化学結合をしないヘリウム)ため、惑星系円盤には水が豊富に含まれる。周囲の宇宙空間は絶対零度近くまで冷えているので、恒星の熱で水が蒸発しない場所にある惑星の表面には、しばしば液体の水が海を形作る。

○高温の恒星からの光が惑星表面の冷たい海に照射される際に、高温領域から低温領域へとエネルギーが大量に流れ、エントロピーが急激に増大する。この過程が、一方向的な変化の向きを規定する。宇宙は、どこもかしこも同じタブラ＝ラサ(何も書かれていない石板)の状態から出発し、希薄化されずに残留したエネルギーがさまざまなパターンで凝集することによって「時間の流れ」を生み出した。

○エネルギーが大量に流れる過程は、部分的なエントロピーの減少を可能にする。ちょうど滝において高所から低所へと水が大量に流れ落ちるとき、「水は低いところへ流れる」という法則を守りながら、飛沫が跳ね上がって水が上昇するように、高温の恒星から飛来した巨大なエネルギーの塊(高エネルギー光子)が、水中の分子に一気にエネルギーを与えて高エネルギー状態に押し上げる(「惑星内部にあるマグマからの熱流が、エントロピーを減少させた」という説も有力)。



【SFと現代科学】

エントロピーを扱ったSFで物理学的に正当な議論が記されることはほとんどないが、テッド・チャンの「息吹」とトマス・ピンチョンの「エントロピー」は、秩序立った差異が失われ混沌とした同一化に向かう傾向としてのエントロピー増大を適切に描いている。

第3回 時間の循環と分岐(02/21)

過去に戻るタイムループが存在したり、歴史がいくつものパラレルワールドに分岐したりする可能性を、物理学者は真剣に議論している。タイムマシンが可能性かどうかは、いまだ結論が出ていない。

1. 循環する時間

○一般相対論によると、時間や空間は伸び縮みするゴム製のキャンパスのようなものだが、現実には天体の周辺でわずかに変化するだけで、粘土細工のように遠く離れた地点を結びつけることは（絶対不可能とは言えないまでも）きわめて難しい。

○未来に進むタイムマシンは実現可能（巨大な重力や「ウラシマ効果」を利用）。時間を飛躍するわけではないので、遠方の観測者には搭乗者がゆっくり動いているように見える。

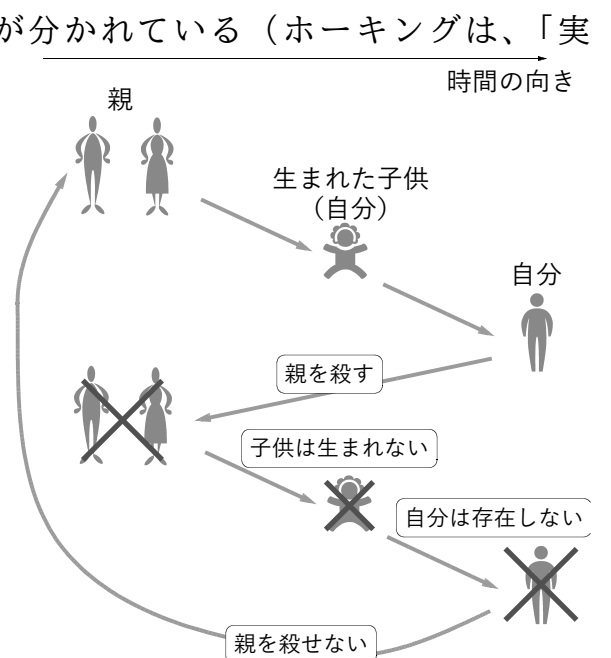
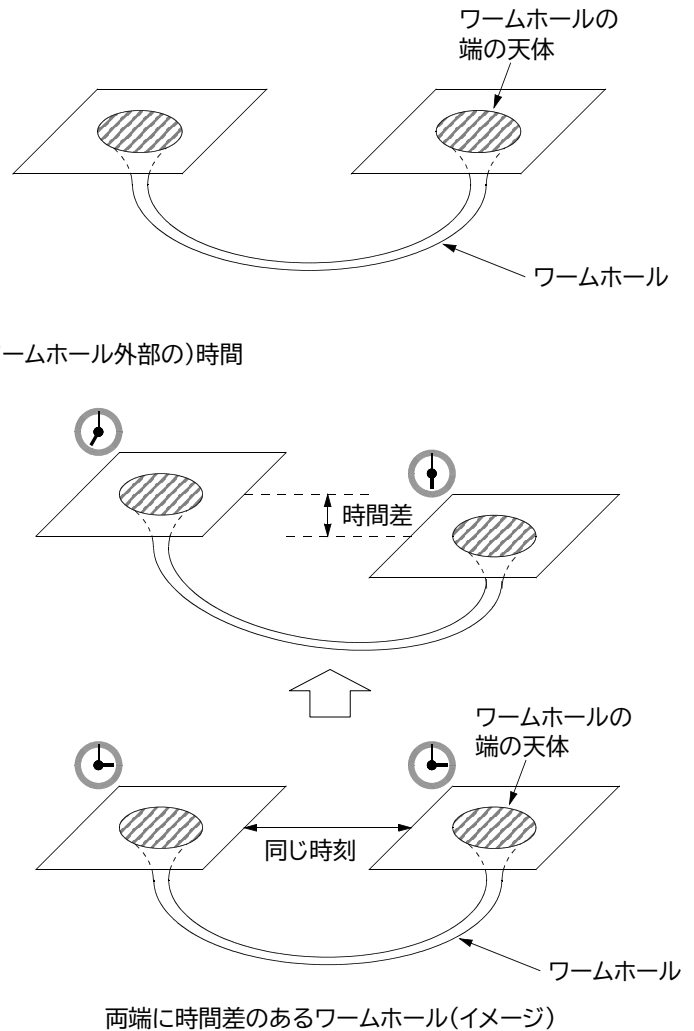
○空間的に離れた地点を結びつけるルートは、ワームホール（虫食い穴）と呼ばれ、一般相対論の枠内で記述できる。ただし、現実存在しそうな「エキゾチック物質（負の質量を持つ物質）」で内張りをしなければ、一瞬で崩壊してしまうので、実際に作るのは難しい。

○過去に戻るタイムマシンは実現不可能と思われていたが、1988年にソーンが、ウラシマ効果を利用してワームホールの両端に時間差をつければ、過去に戻るタイムマシンが作れるという論文を発表した。ソーンの議論が正しいかどうかは、物理学者の間でも意見が分かれている（ホーキングは、「実際には過去に戻れないだろう」という推測混じりの論文を発表した）。

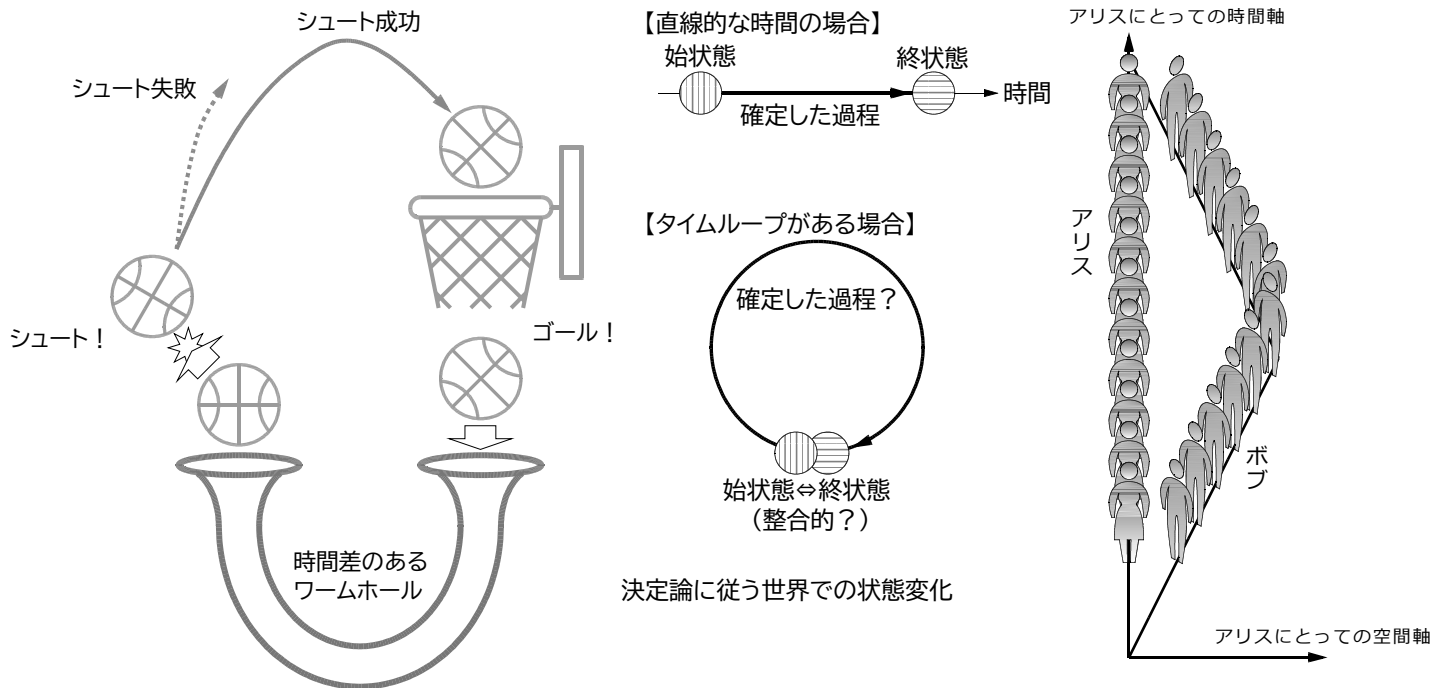
2. 未来はどこまで定まっているか？

○ソーンが正しいければ、過去に戻るルートが存在することになり、時間が一方的に流れるのではなく循環する可能性がある。循環する時間（専門用語では閉じた時間的曲線）の存在は、「親殺しのパラドクス」のようなタイムパラドクスを引き起こす。

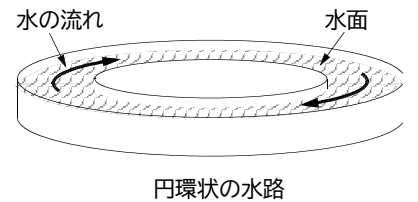
○人間がいなくても起きるケース（バスケットボールのパラドクス）など、これまでに、多くのタイムパラドクスが提案されている。「過去によって未来が



完全に決定される」という**決定論**を前提とすると、循環する時間（タイムループ）があれば必然的にタイムパラドクスが生じる。



○決定論を否定し、何が起きるかは循環する時間の中でつじつまが合うように決まるという理論を作れば、パラドクスは回避できるはず。ちょうど、円環状の水路でどこにも矛盾が生じない流れが形成されるように。しかし、そうした理論の定式化には誰も成功していない。また、循環する時間の中で人間のような複雑なシステムが形成されるとは考えにくい（一般相対論の時空では、人間は誕生から死まで広がった存在だが、円環状の時間でつじつまは合わせられない）。



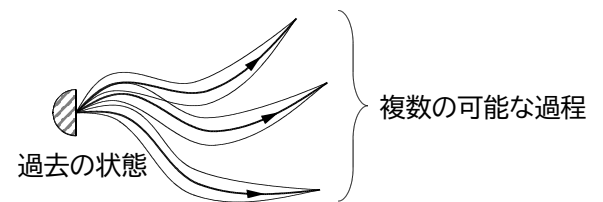
3. 分岐する時間

○タイムパラドクスを回避するもう一つの方法は、時間が分岐すると仮定すること。時間が分岐する理論としては、量子論の多世界解釈がある。これは、さまざまな可能世界がパラレルワールドとして実在するという解釈で、量子論で使われる波動関数が現実をそのまま表すと見なすことに相当する。

【ニュートン力学】



【量子論】(多世界解釈)



○ドイツユによれば、親を殺して過去に戻ると、それを契機として歴史が2つに分かれ、親を殺す人は親が死んでいない歴史からやって来たので、矛盾はないとされる。このアイデアは、さまざまなSFのネタとして利用された（例えば、アニメ『Steins;Gate』）。ただし、物理学者でその主張を本気で信じる人は、ほとんどいない。

【SFと現代科学】

ワームホールを視覚的に映像化したのが映画『インターステラー』で、ワームホールの端を天体として描いている。過去に戻るタイムマシンが登場する物語は数多くあるものの、物理学的に正当な作品は少ない。筒井康隆「時をかける少女」の女子中学生は、トラックに轢かれそうになった瞬間、過去にタイムリープして同じ1日を繰り返す。この場合、物質は過去に戻っていないが、未来の記憶を使って交通事故を回避しているので、起きなかった出来事について知っているという「情報のタイムパラドクス」が生じる。

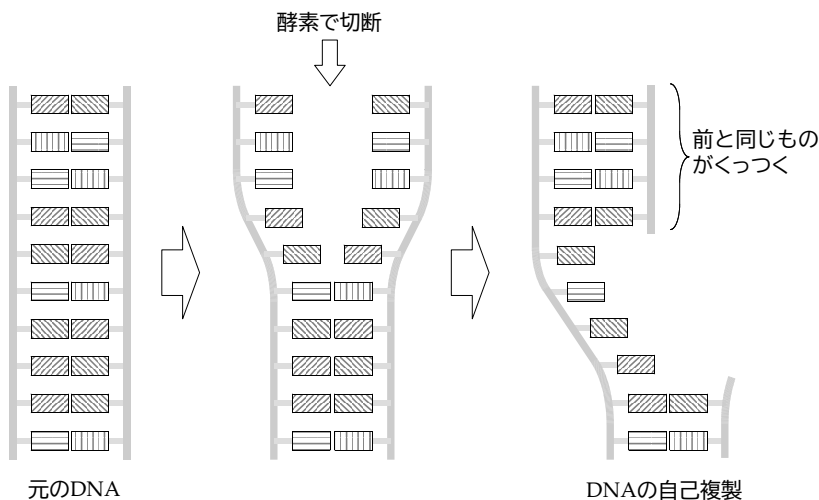
第4回 いきものの時間、人間の時間(02/28)

生命の発生を可能にするのは、整然たるビッグバンが生み出した恒星と惑星のシステムである。人間は、恒星からの光の奔流が生み出す一時的なエントロピー減少によって生かされている。

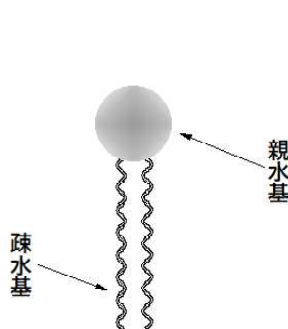
1. 物質世界も進化する

○初期の地球では、高温熱源からの熱流によって海水中でエントロピーが減少し、複雑な分子が生物なしに合成される「化学進化」が進行した。熱流としては、太陽からの光が主だと考えられるが、マグマからの熱という可能性もある。

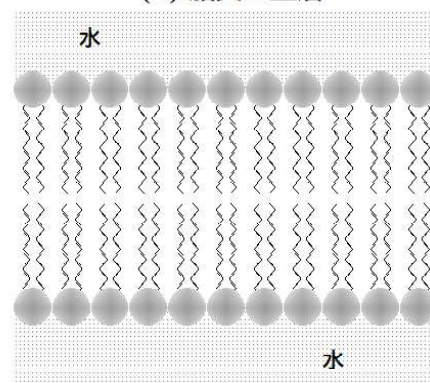
○化学進化の具体的なプロセスは、ほとんどわかっていない。核酸（DNA・RNA）の重要な部品である塩基（グアニンなど）やタンパク質の構成要素であるアミノ酸は、隕石から発見されることもあり、比較的簡単に合成できる。これらが海水中に溶解し、長期間にわたって高温熱源からの熱流を受け続けると、きわめて低い確率はあるが、生物の介入なしに核酸やタンパク質が作り上げられると推測される。



(1) 脂質分子



(2) 脂質二重層



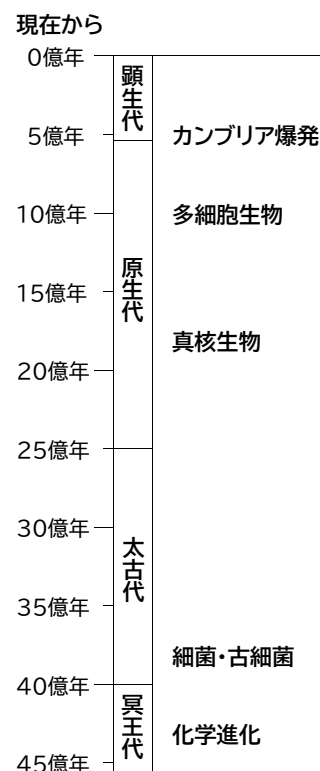
○核酸は、酵素となるタンパク質と協同することで、自己複製を行う。また、脂質分子は水中で自然に膜状に集合する性質があり、端のない閉じた膜を形作る。閉じた膜の内部に核酸とタンパク質が収まったものが、細胞の原型となったのだろう。

2. 生命誌から見た時間

○原始的な生命は、自己複製する高分子が組織化されて、40億年ほど前に誕生した。最初の生物は、脂質の膜内部に簡単な細胞内器官が備わったものだったと推測されるが、しだいに複雑化してバクテリア（真正細菌）やアーキア（古細菌）に近いものに進化。その後、数億年から十数億年を掛けながら、細胞核のある単細胞生物（2種類の細菌の共生によって生まれた真核生物）、さらには多細胞生物へと進化した。5億年前のカンブリア紀に、節足動物や脊索動物を含むさまざまな生物が、一気に進化したと考えられる。

○分子レベルでは、“行き当たりばったり”の中立進化(*)が重要な役割を果たした。このため、多細胞生物では状況に応じたさまざまな生存戦略が採用されており、時間変化に対応する方法も生物種ごとに大きく異なる。

(*)役に立たない、あるいは少々有害な突然変異も、長期にわたって集団内で維持され、進化に寄与する



○陸上に進出した植物は、太陽光をより多く浴びるために細胞壁を発達させて背を伸ばしたが、その一方で動きはきわめて緩慢になった。

○動物の場合、カンブリア紀までは緩慢な動きのものが多かったと推測されるが、アノマロカリスという巨大捕食者が現れたため、太い神経を使って全身を協調させダッシュで逃げる生存戦略を採用した脊索動物（脊椎動物の祖先）が進化した。神経組織により身体を素早く動かす動物は、捕食や逃避の際に有利になったが、大量のエネルギーを消費するため、富栄養化が進んだ海域では、あまり動かないゼラチン質の生物の方が有利となる。

3.人間にとって時間とは

○鳥類や哺乳類は、重力内部で身体をコントロールする必要があるため、神経伝達を高速化することで、数百ミリ秒の反応時間で動けるように進化した。

○リベットの**実験**：「指や手首を曲げようと思ったときに曲げる」ことを実行させ、次の3つの時刻を記録する。

(1)自分が指を曲げよう意識した時刻。

その瞬間に時計代わりのオシロスコープが示す光点の位置を目で見て報告。

(2)筋肉に指令を出す大脳運動野において、実際の動作に先んじて行われる神経の活動（「準備電位」と呼ばれる）が生じた時刻。頭皮に取り付けた電極で測定。

(3)筋肉の作用で実際に指が曲がり始める時刻。筋電図により測定。

実験を行った結果、「まず指を曲げようという意志が生じ、次いで指を動かすための神経活動が始まり、最後に脳からの指令で指の筋肉が収縮し始める」と仮定した場合の(1)→(2)→(3)ではなく、(2)→(1)→(3)となった。まず指を動かすための脳の活動が生じ、その350ミリ秒後に指を曲げようという意志が自覚され、そこから200ミリ秒後に指が曲がり始めるという。

○リベットの**実験**によると、自発的な行為であっても、その始まりは無意識的だとされる。多くの方は、自分が時間の流れを直観的に把握していると思っているが、実際には、脳が出来事の順序を再構成し、虚構的な時間の流れを作り出している。

【以下、これまで吉田が執筆した著書のうち、一般の人にも読みやすいものを紹介します】

「この世界に「時間」が存在するのはなぜか」（SB新書、2024予定）本講座のベース
「時間はどこから来て、なぜ流れるのか？」（講談社ブルーバックス、2020） 時間論
「宇宙に「終わり」はあるのか」（講談社ブルーバックス、2017） 宇宙の歴史
「人類はどれほど奇跡なのか」（技術評論社、2023） 人類と生命の歴史

*以上は本講座の内容に関連する内容を含みます

「量子で読み解く生命・宇宙・時間」（幻冬舎新書、2022） 量子論の解説
「この世界の謎を解き明かす 高校物理再入門」（技術評論社、2020）
「科学はなぜわかりにくいのか」（技術評論社、2018） 科学的方法論の解説

吉田の Web Page : <http://scitech.raindrop.jp/>

