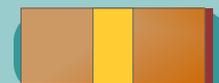


アインシュタインの時間論

絶対時間からどこでも時間へ

講師 吉田 伸夫



○本日の講義は、この春刊行予定の拙著『この世界に「時間」が存在するのはなぜか』（SB新書、2024年6月刊行予定）第1章の内容に基づいています。

○惑星運動を論じたニュートンは、真空によって遠く隔てられた天体たちが、距離によらず一瞬で伝わる重力を及ぼし合い、全宇宙で均一に流れる時間に応じて運動すると仮定しました。しかし、そもそも重力は何もない所をどうやって伝わり、時間はどんなメカニズムで運動を支配するのでしょうか？

○アインシュタインの一般相対論は、こうした謎をまとめて解決しました。あらゆる場所に固有の時間が存在し、互いにならずかずつズレているということです。このズレによって生じる運動の差異が、重力の効果として観測されます。ズレがわずかしかしない原因は、どうやらビッグバンの前に起きた出来事にあるらしいのですが、完全には解明できていません。

第I部 硬直したニュートンの時間

○ニュートンは、主著『プリンキピア（自然哲学の数学的諸原理）』（1687）において、「時間は全宇宙で均一に流れる」という《絶対時間》の概念を、根拠らしい根拠を示さないうまま導入した。

○絶対時間は、「基礎的な物理法則は時間に対する単純な式で表される」というガリレオやケプラーが示した性質を一般化するために必要だった。

○宇宙空間は完全な真空だと仮定したため、真空なのになぜ重力や時間が物理現象を引き起こすかという謎が残された。

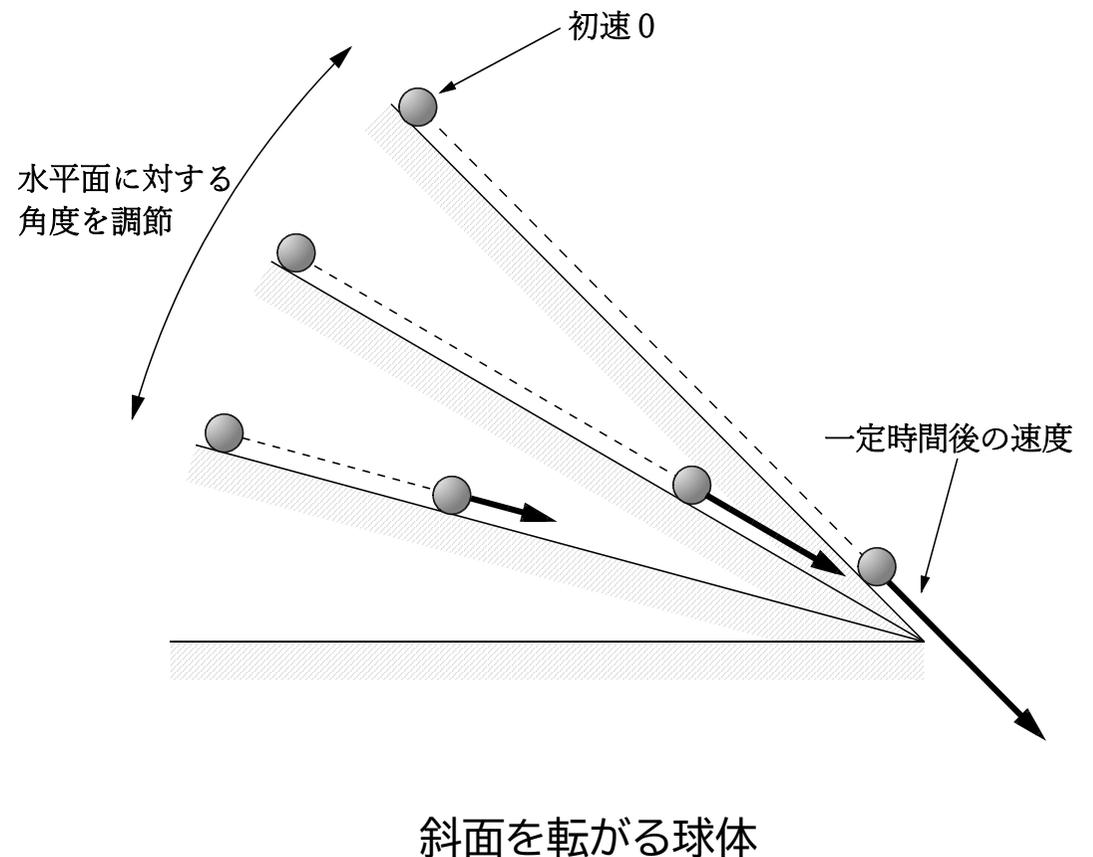
1-1.ガリレオとケプラー

○17世紀前半に活動したガリレオとケプラーは、物理法則が時間変化についての簡単な式で表されることを実証的に示した。

○落体の法則（ガリレオ）：

「自由落下するときの速度は、物質の量（質量）によらず落下時間に比例する（等加速度運動）」

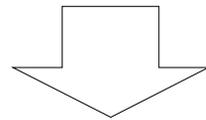
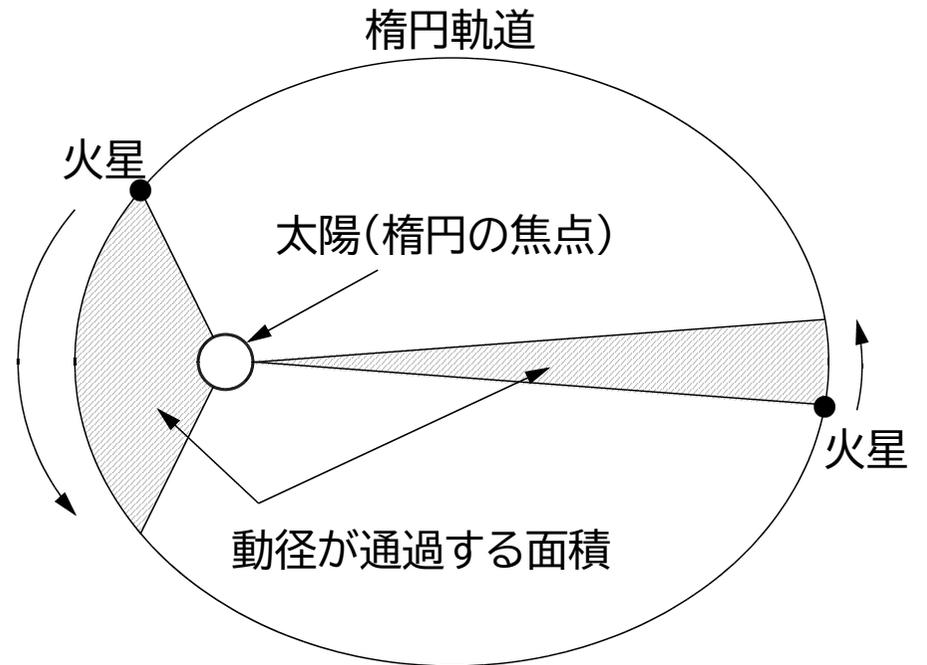
○当時は精密な時計がなく自由落下そのものを調べることができなかつたので、ガリレオは斜面をブロンズの球が転がるケースで実験を行った。



○面積速度一定の法則（ケプラー）

「ある惑星と太陽を結ぶ線分が単位時間に通過する面積は一定」

○数式で書くと「 $r\omega = \text{一定}$ （ ω :角速度）」となり、落体の法則と同じく単純な数式になる。



○ガリレオとケプラーの発見は、地上付近の落下運動でも宇宙空間の惑星運動でも、時間変化が単純な数式で表されることを示す。

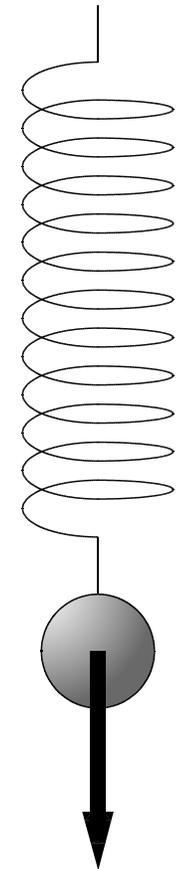
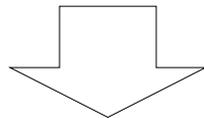
○この結果は、「全宇宙で通用する単一の時間が定義できる」「運動の基礎法則は時間変化を表す単純な式になる」というニュートンの発想を引き出した。

1-2. 動力学を構築したニュートン

○ニュートンは次のように考えて運動法則に到達したと推測される。

- (1) 「重力は質量に比例する力だ」と洞察
- (2) 「落体の法則」を「力を質量で割った値が一定の場合は等加速度運動になる」という形で一般化
- (3) 一定という制約をなくして動力学に拡張、運動方程式「**力 = 質量 × 加速度**」を導いた

○単純な数式で表される落体の法則は、空気抵抗や摩擦のない極限で成り立つ。一方、同じように単純な数式で表されるケプラーの法則は、現実に成り立っているので、宇宙空間に摩擦や抵抗はないはず。したがって、宇宙空間は真空と考えられる。



バネの伸び方から
重力 \propto 質量(物質の量)

宇宙空間が真空ならば、時間はどこにあり、重力は何を伝わってくるのか？

第II部 時間の伸び縮みが重力を生む

○ニュートンは、抵抗や摩擦などを取り除くと、宇宙でも地上でも物体の運動は同じ運動方程式で表されることを示した。運動方程式は、加速度という時間変化の量を含むので、宇宙でも地上でも、同一の時間（絶対時間）が支配すると考えられる（実は、この仮定は正しくなかった）。

○宇宙空間は真空なのに、重力が伝わり単一の時間に支配されるのはなぜか。この謎は、ニュートン以来二百数十年にわたって、解決できなかった。

○答えが出なかった理由は、「宇宙空間には何もない」という最初の仮定が間違っていたから。

2-1.アインシュタインの思考実験

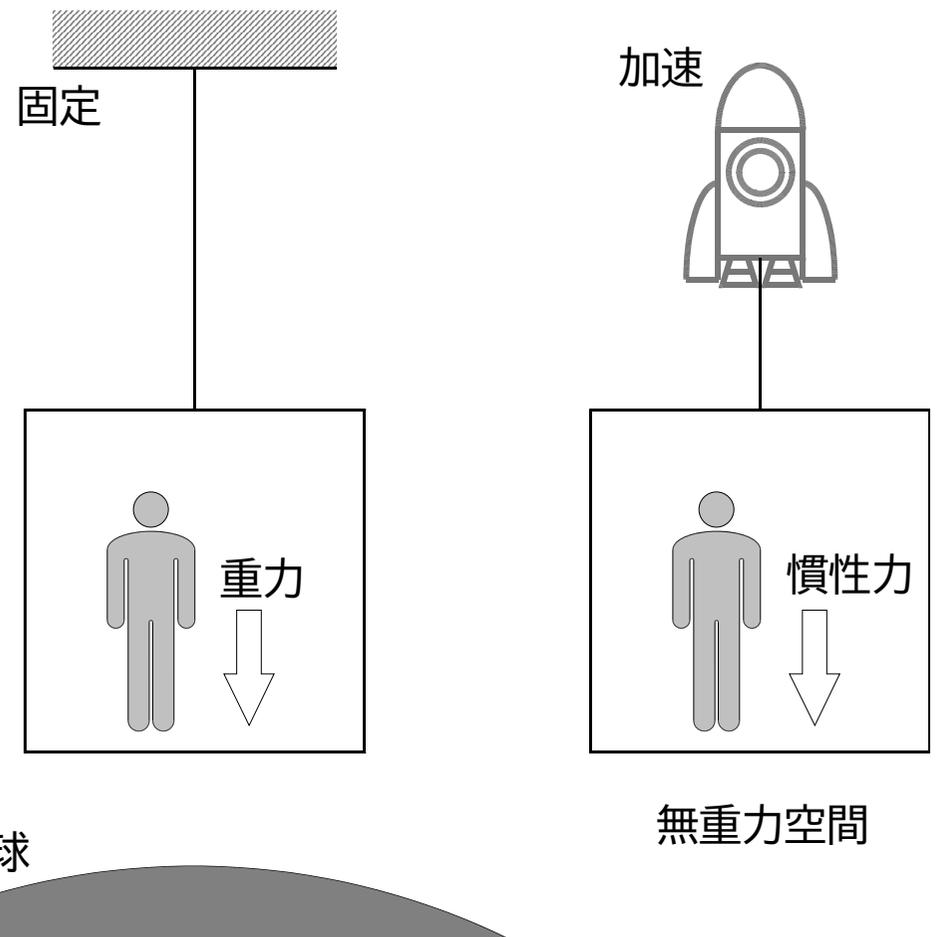
○衛星軌道上の人工衛星内部は無重力状態になる。ニュートン力学によれば、この状況は「地球からの重力と加速度運動に伴う慣性力（円運動の場合は遠心力）が釣り合うから」と説明される。

○一方、アインシュタインの重力理論では、重力と慣性力は原理的に区別できない（等価原理）。

○外が見えないエレベータで下向きの力を感じたとき、それが近くの天体からの重力か、エレベータが上向きに加速されることによる慣性力かは、エレベータ内部でどんな実験をしてもわからない。

エレベータ実験

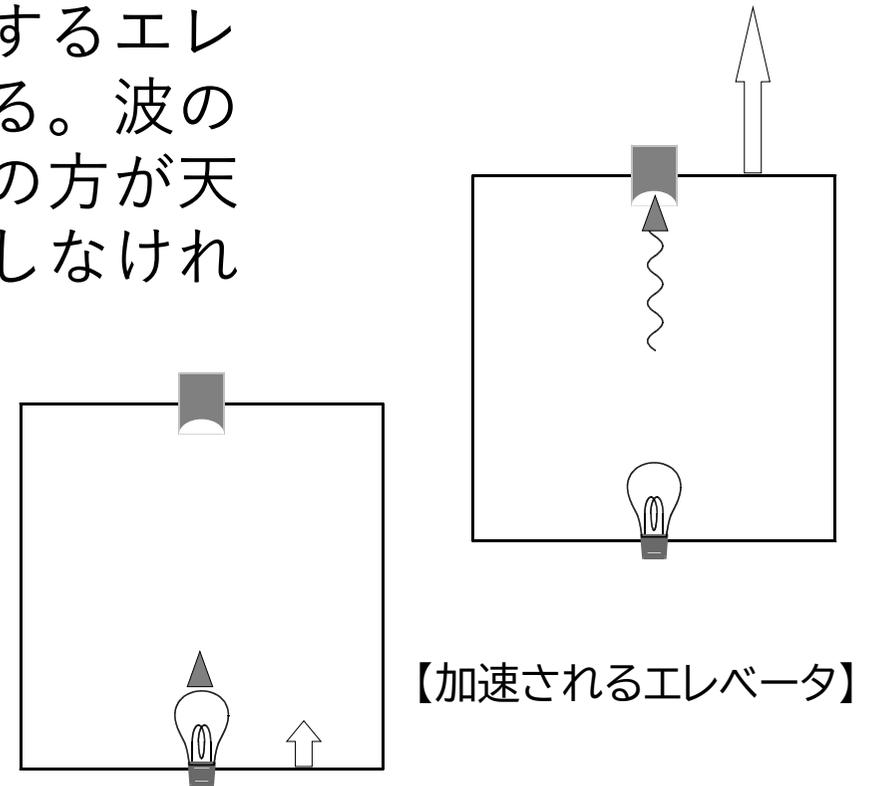
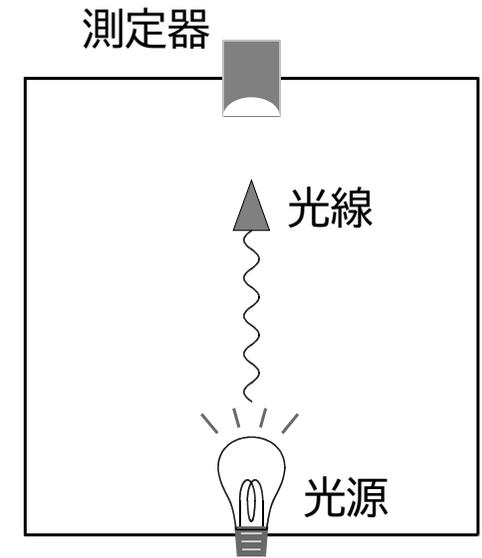
（アインシュタイン 1907）



○「どんな実験」の例として、床の光源から光線を発射し、天井の測定器で振動数を測定する実験を考える。

○加速されるエレベータでは、光源よりも測定器の速度が大きいのでドップラー効果が生じ、観測される振動数は光源より小さくなる。

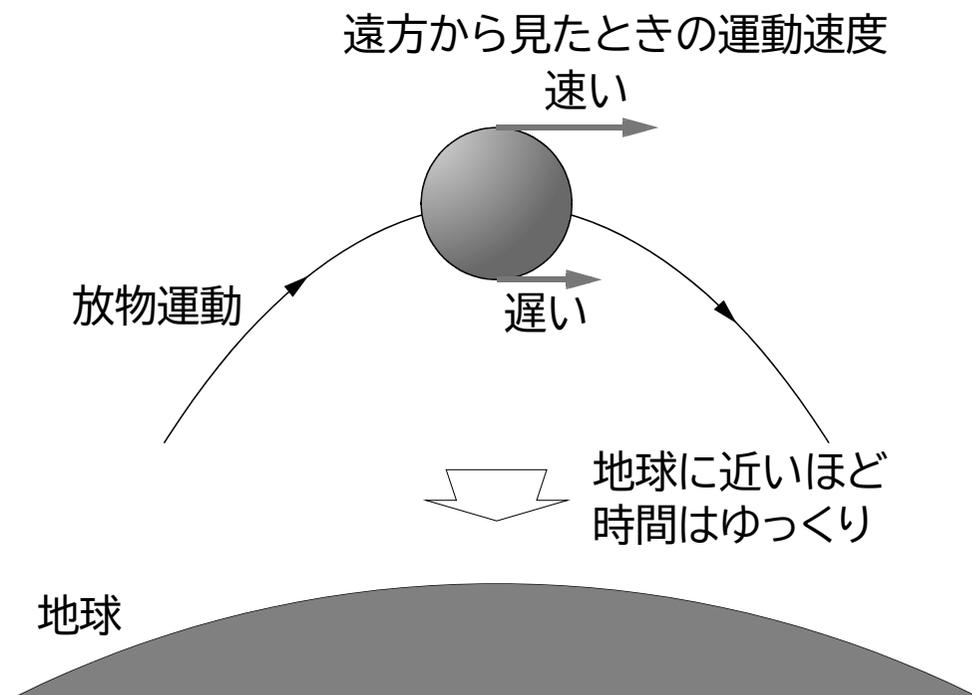
○「重力と慣性力が区別できない」という等価原理が正しければ、天体の近くで静止するエレベータでも、振動数の減少が観測される。波の個数自体は変化しないはずなので、床の方が天井より時間がゆっくり経過すると解釈しなければならない。



2-2.場所によって時間が変わる

○エレベータを用いた思考実験では、重力源（天体）に近いほど時間がゆっくり進むことが示された。時間は宇宙全域で均一に流れるのではなく、あらゆる場所に別々に存在する。

○重力の影響は、場所によって時間が伸びたり縮んだりすることによって生じる。物体の軌道が重力によって曲げられるのは、時間が伸縮した結果。

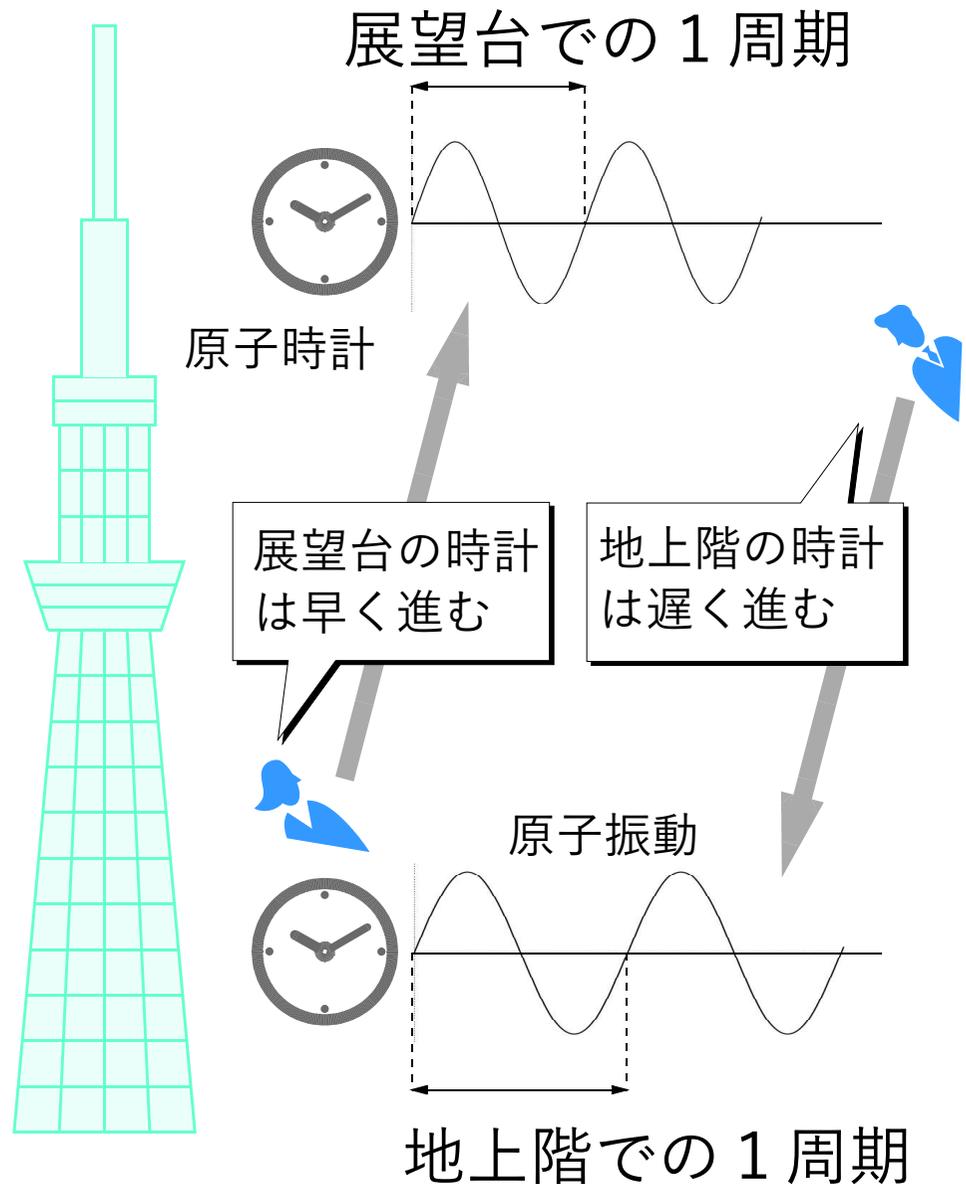


厳密に言えば、時間の伸縮に基づく直観的な説明が当てはまるのは波動現象に限られる。物体の運動が実は波動だという量子論と組み合わせ、はじめて完全な説明になる。

○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高性能の原子時計（光格子時計）を設置し、時間の進み方が異なることを直接検証。

○展望台の時計は、1日あたり10億分の4秒だけ早く進むことがわかった。

○ブラックホールの近くなどきわめて重力勾配が大きいところでは、人間の感覚で捉えられるほど時間の伸縮が大きくなる。



第III部 柔軟なアインシュタインの時空

○アインシュタインは当初時間の伸縮のみを考慮していたが、後に空間の伸縮も考慮した「一般相対論」を完成（1913）。

（ただし、完全な運動方程式を見いだしたのは1915年）

○時間・空間の伸縮がない「特殊な」ケースに限定した相対論が「特殊相対論」、この制約を取り払って一般的なケースを扱うのが「一般相対論」。

3-1. 相対論的な時空概念

○一般相対論の時間と空間は、その上に物理現象が描かれる画布（キャンバス）のようなもの。ただし、時間と空間の各方向に伸縮が生じる「ゴム製のキャンバス」である。

○ニュートンが考えたような“何もない真空”はなく、たとえ物質がなくても、物理現象が生じる時間と空間という実体が（物理現象が描かれるキャンバスとして）存在する。

○時間は空間と同じく（1次元の）広がり。時間は流れておらず、過去から未来に至るまで、広がって存在する。



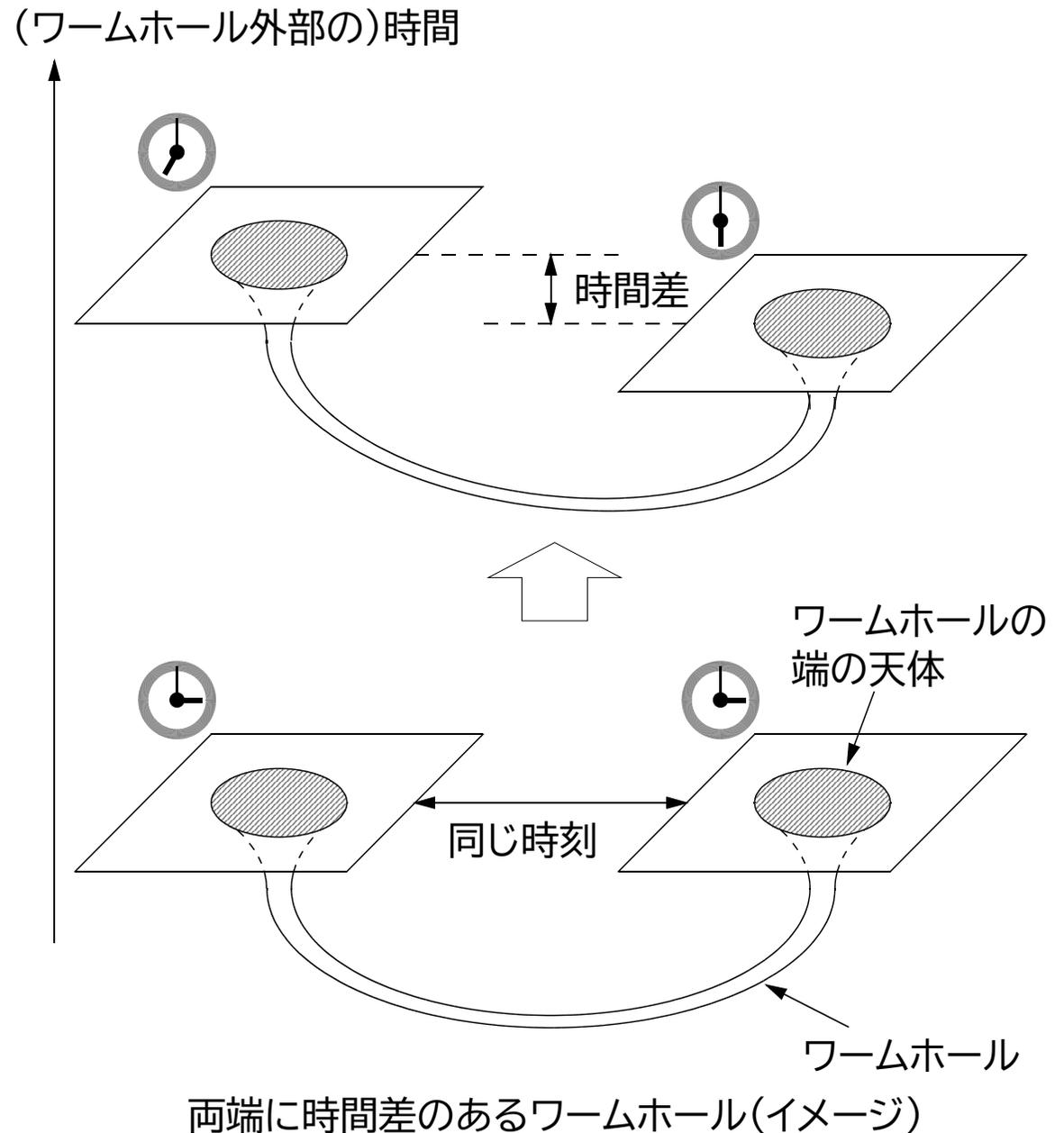
3-2.場の理論に基づく世界観

- 一般相対論の世界観は「場の理論」に基づく。「場の理論」に対置されるのが「原子論」で、19世紀半ばまでは原子論が有力だったが、20世紀前半に場の理論が一般化した。
- 原子論：原子が真空中を動き回ったり結合したりすることで、さまざまな物理現象が生起する。原子のない領域は、物理現象が生じない単なるスペース（空隙）。
- 場の理論：あらゆる領域に物理現象を引き起こす実体的な場が存在しており、何もない「真空」は存在しない。
- 「一般相対論」が重力に関する場の理論であるのに対して、電磁気や核力（原子核を形作る力）に関する場の理論は「場の量子論」と呼ばれる。この2つが現代物理学の2本柱だが、両者を統合する試みはいまだ成功していない。

3-3.時間の循環

○時空が変形できるのならば、未来と過去をつなぐタイムループを作って過去に戻るタイムマシンが作れる可能性もある。

○重力波の研究でノーベル賞を受賞したソーンは、空間的に離れた2点をショートカットする「ワームホール」を作り、ウラシマ効果や重力源による時間の遅れを利用してワームホールの両端に時間差を付ければタイムマシンになると主張した(1988)。



○ソーンの議論に対しては、(1)負の質量を持つ物質で支えなければワームホールは一瞬で消滅する、(2)消滅しない場合でも内部を物質が移動することはできないだろう、(3)移動できたとしても重力勾配で素粒子レベルまでズタズタにされる---などの反論がある。ただし、過去に戻るタイムマシンが原理的に不可能だと証明されたわけではない。

○過去に戻れるならば「親殺しのパラドクス」などのタイムパラドクスが生じる。ソーンの議論は、一般相対論に欠陥があることを示すのかもしれない。

○量子コンピュータの研究で知られるドイッチュは、過去に戻るワームホールが存在すると、量子論の多世界解釈に従って歴史が分岐すると主張。過去に戻って親殺しを実行する場合、殺人者は、親が殺されなかった歴史からやってきて、親が殺される歴史に入り込んだことになる。ただし、多くの物理学者が支持する主張ではない。

本日の講義について

◇本日の講義は、今年6月に刊行予定の拙著『この世界に「時間」が存在するのはなぜか 最新科学から迫る宇宙・時空の謎』（SB新書）に基づいています。

◇また、次のサイトに講師（吉田）のホームページがあります。科学技術のいろいろなトピックを論じたり、これまで刊行した著書を紹介しているので、興味のある人は覗いてみてください

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

(https://ではなく http://です)