第６回　講義内容　　2026/10/26

配布物

- 06_Cosmology_contents.pdf　　このファイル　　Google classroom, web
  ドラえもんのタイムマシンを検証した文章を付けます.
- 06_Cosmology2026_Viewgraph.pdf スライド　　Google classroom, web
  スライドファイルは当日朝に配布します.
- 202406_タイムトラベルの数理.pdf　雑誌コピー　　Google classroom,
  数理科学 2024 年 6 月号から．Google Classroom で配布のみ.

講義内容（予定）

- §3.1 奇跡の年 1905 年
  p208 波の干渉
  重力波の観測方法
- §3.2 特殊相対性理論
  双子のパラドックス，$E = mc^2$.

本日の復習課題例

こんなことを観たり，調べたり，考えてもらったら面白いかな，という程度のおまけ.

- アインシュタインの業績
- 高速ロケットで 1 年かけて飛行したときに，10 年先まで行きたい場合，ロケットの速度はどのくらいにすればよいか.
  高速ロケットで 1 年かけて飛行したときに，100 年先まで行きたい場合，ロケットの速度はどのくらいにすればよいか.

次回の予習項目

こんなことを調べてもらったら面白いかな，という程度の課題.

- 放射性元素の崩壊，原子力発電の放射性廃棄物の問題
- 超新星爆発のしくみ
- 映画『インターステラー』

レポート

第３回の講義のときに，レポート課題（第１回）『地球外生命体・地球外知的生命体について』を出しました. 締め切りは，10 月 31 日 (土) 23:59 です.

3. 現代物理1:相対性理論 》3.2 特殊相対性理論　教科書 p60

3.2.1 電磁気学で生じた疑問

疑問1 電磁波を伝えるもの（媒質）は何か?



音波は空気中の分子の振動が伝える。



電磁波（光）は真空中を満たす未知の媒質エーテルが伝える?

電磁波を伝える媒質として「エーテル」（ether; 天空をみたす物質）が存在するはずだ.

疑問2 電磁波が伝わる速度が「光速」であるとは、誰から見た時の光速なのか?



11

3. 現代物理1:相対性理論 》3.2 特殊相対性理論　教科書 p61

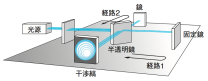
マイケルソン・モーリーの実験

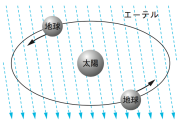
Michelson-Morley experiment 1887



→エーテルの検出に「失敗」

微小距離を測定する干渉計



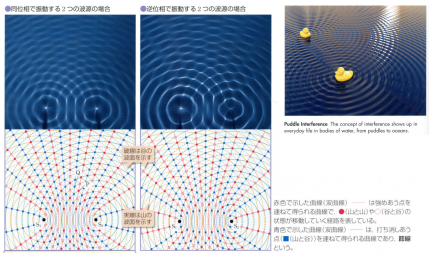


エーテルがあれば，季節で距離が変わるはず.
微妙な差でも，干渉計なら測れるはず.

14

マイケルソン・モーリーの実験を理解しよう

波の干渉 ＝ 強めあったり弱めあったりする現象



16

3. 現代物理1:相対性理論 》3.2 特殊相対性理論　教科書 p63

3.2.2 アインシュタイン 大胆な原理の導入

★**相対性原理**：物理法則は，どのように運動をする人からみても（どのような座標系から見ても）同じ形にならなくてはいけない.

★**光速度一定の原理**：真空中の光の速度は，どのような座標系から見ても同じである.



✕特別な座標系の存在？
不要である

28

3. 現代物理1:相対性理論 》3.2 特殊相対性理論　教科書 p63

光速度一定を原理とすると，時間座標も伸縮する

Advanced ローレンツ変換

ローレンツは，次のような座標変換をしてもマクスウェル方程式は不変であることを示した (1904 年). すなわち，ある慣性系 (t, x, y, z) から $+x$ 方向に速度 v で運動する慣性系 (t', x', y', z') への座標変換として

$$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$
$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-(v/c)^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z. \tag{3.7}$$

この式は，行列とベクトルの積として，次のようにも書ける.

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & \frac{-v/c^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & 0 & 0 \\ \frac{-v}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tag{3.8}$$

ローレンツ変換 (Lorentz transformation)



図 3.6: 静止している xyz 座標系と，速度 v で x 方向に動いている $x'y'z'$ 座標系.

29

特殊相対性理論の結論　時間の進み方は観測者によって異なる　教科書 p65

光時計の思考実験



光が 2億9979万2458回往復するとき「1 秒」を刻む時計



地球の人がロケット内の光時計を見ると ロケットが移動するので光は斜めの経路を進み その分長い距離を進まなければならない 光の速度は誰から見ても一定なので ロケット内の光時計は 2 億9979万2458回往復するのに地球の 1 秒より長い時間がかかる つまりロケット内の光時計はゆっくりと時を刻んでいる

動いている人の時間の進み方は 静止している人よりも遅い

時間の進み方は相対的になる

33

3. 現代物理1:相対性理論 》3.2 特殊相対性理論　教科書 p66

未来へのタイムトラベルは可能!!

コラム 16　浦島効果：未来へ行くタイムトラベルは可能！

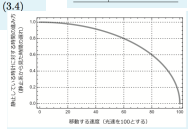
特殊相対性理論によれば，高速で動いている人ほど 1 秒の間隔は開いてくる．計算式で表すと，速度 v で移動している人の時間 $\Delta T'$ は，静止している人の時間 ΔT と同じではなく，次式になる.

$$\Delta T' = \sqrt{1-(v/c)^2}\,\Delta T \tag{3.4}$$

速度vで移動している人の1秒　　静止している人の1秒

表 3.2

v	$\sqrt{1-(v/c)^2}$
$0.1\,c$	0.99499
$0.5\,c$	0.86603
$0.9\,c$	0.43589
$0.99c$	0.14107



動いている人の時間の進み方は，静止している人よりも遅い

35

【実験ですよ】　浦島太郎

コラム 16　浦島効果：未来へ行くタイムトラベルは可能！

特殊相対性理論によれば，高速で動いている人ほど 1 秒の間隔は開いてくる．計算式で表すと，速度 v で移動している人の時間 $\Delta T'$ は，静止している人の時間 ΔT と同じではなく，次式になる.

$$\Delta T' = \sqrt{1-(v/c)^2}\,\Delta T \tag{3.4}$$

速度vで移動している人の1秒　　静止している人の1秒

$$300 \text{ year} = \int_0^{3\ \text{year}} \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\,dt \quad \Longrightarrow v = 0.9999499c$$

竜宮城は，光速の99.995%の速さで動いていた！

未来へ行くタイムマシンは可能

万葉集　巻九　水江の浦の島子を詠みし一首短歌を幷（あは）せたり

春の日の霞める時に　墨吉の岸に出で居て　釣舟の
とをらふ見れば　古（いにしへ）のことぞ思ほゆる　水江の浦の島子が
堅魚（かつを）釣り鯛（たひ）釣り誇り　七日（なぬか）まで家にも来ずて
海原を　行き廻（み）るごとに　潮の共（むた）　行き還（かよ）ひつつ
海神（わたつみ）の　神の宮の　内の重の　妙（くは）しき殿に
たづさはり　二人入り居て　老いもせず　死にもせずて
永き世に　ありけるものを　世の中の愚（おろ）かなる人の
我妹子（わぎもこ）に　告（の）りて語らく　しましくは　家に帰りて
父母に　事も語らひ　明日のごと　我は来なむと　言ひければ
妹が言へらく　常世辺（とこよへ）に　また帰り来て　今のごと　逢はむとならば
この櫛笥（くしげ）　開くなゆめと　そこらくに　堅めしことを
墨吉に　帰り来たりて　里見れど　家も見かねて　恠（あや）しみと　そこに思はく
家ゆ出でて　三年（みとせ）の間に　垣もなく　家失せめやと
この箱を　開きて見てば　もとのごと　家はあらむと
玉くしげ　少し開くに　白雲の　箱より出でて　常世辺に
たなびきぬれば　（巻九・一七四〇）

https://www.kyoto-np.co.jp/articles/-/32438

36

ドラえもんの世界を、学問してみれば。

各界の第一人者が講師となって、タイムトラベル論、デザイン論、コミュニティ論を誌上講義。『ドラえもん』を題材に、わかりやすく解説します。

過去や未来へ行くことは、果たして可能なのか？

タイムトラベル論 講師 **真貝寿明** Hisaaki Shinkai 大阪工業大学情報科学部教授

●1966年東京都生まれ。早稲田大学理工学部物理学科、同大学大学院修了。ワシントン大学、ペンシルバニア州立大学、理化学研究所研究員を経て、2006年より大阪工業大学。専門は、一般相対性理論。中性子星。

タイムマシンが可能かどうかを議論する学問は、物理学です。アインシュタインがつくりあげた、相対性理論とミクロの世界を扱う量子物理学の、両方に絡む問題です。

浦島太郎が竜宮城から帰ってきたら、知り合いは一人もおらず、自分だけ未来に着きました。このようないわゆる、ウラシマ効果の説話は世界中にありますが、現代物理学の理論上、未来へのタイムトラベルは実際に可能です。

光速に近いロケットを作って、そのロケットに10年間乗り、地球に戻ってきたら100年後になる、という話を聞いたことがあるでしょう。時間の進み方は状況によって異なる、というのが相対性理論の結論の一つです。ロケットの中の時間の進み方と、地球の時間の進み方が違うので、地球に戻ってきたら、100年後の未来だったというウラシマ効果がおきるのです。実験でも証明されています。素粒子を光速に近いスピードまで加速すると、崩壊するまでの寿命が延びるのです。

過去に行く話はどうでしょうか。下ルは、矛盾なくOKです。未来に行ったとしても、こうなっていたのか、と知るだけで、情報が過去に戻ってくるわけではないからです。一方、過去へ行くタイムトラベルでは、さまざまなパラドックスが考えられます。「ドラえもん」を題材に、どのようなパラドックスが生じるか、紹介しましょう。

過去へのタイムトラベルと、さまざまなパラドックス

まず、過去を変えてしまったら、現在の自分が消えてしまうかもしれません。「プロポーズ作戦」では、パパとママがきちんと結婚するように、のび太とドラえもんがタイムマシンで12年前のプロポーズの日に戻ります。この話に、いわゆる〈親殺し〉のパラドックスと呼ばれる矛盾が登場します。タイムマシンで過去に行って親を殺してしまうと、自分が存在しなくなる問題を、ソフトに変えていますね。

「あやうし！ライオン仮面」では、ドラえもんがタイムマシンで来月号の漫画雑誌を買ってきて、それを元に締め切りに追われた漫画家が描く話ですが、ここには〈作者不明のパラドックス〉が提示されています。未来から持ち帰った自分の漫画を本人が描き写したら、その作品は誰がはじめに描いたものか、という問題ですね。情報は無から生じない。何もないところから、意味のある情報が発生したとなると、因果律に反したことになります。

このようなパラドックスがあると、過去へのタイムトラベルは否定されるのでしょうか。いえいえ、物理学者は解決策も考えています。その一つが、



親殺しのパラドックス＆事後選択モデル
過去に行って親を殺すと自分が存在しなくなるパラドックスと、未来で予測となる出来事はあらかじめ除外されるという考え方。

作者不明のパラドックス
フニャコフニャ夫のように、未来から持ち帰った自分の漫画を描き写した場合、その作品の本当の作者はいったい誰になるのか。

パラレルワールド
パラレルワールドの存在を肯定すれば、いくつもある並行世界の中で、その中のひとつを選択しながら生きていることになる。

ラえもん」は未来から過去へ、来たわけですが、過去へのタイムトラベルが可能かどうかは現時点では未解決です。

空間も時間もジャンプする、ワームホールという存在。

キップ・ソーンというアメリカの物理学者が、1988年に「ワームホールを使ったタイムトラベルの方法を発表しました。ワームホールは、空間も時間もジャンプできる「どこでもドア」のようなものです。相対性理論は、時間と空間の物理学ですが、ワームホールのような時空のトンネル構造が方程式の解として存在します。ソーンは、ワームホール型タイムマシンを使えば、理論的には、過去へのタイムトラベルが可能である、という論文を発表し、我々に夢と希望を与えてくれました。

ところで、タイムマシンが実現可能だとすると、いろいろな矛盾が生じます。物事には順序があり、原因が先にあって結果が後にあるという因果律を基本とする物理学では、矛盾があっては許されません。未来へ行くタイムトラベ



1【相対性理論】
アインシュタインによって完成された物理学の理論。1905年の「特殊相対性理論」と、1915年の「一般相対性理論」がある。特殊相対性理論は、光速に近い速度で運動する物体の時間や空間の変化を扱う理論。一般相対性理論は、重力を含む理論で、ブラックホールや宇宙の構造を説明する。

2【ウラシマ効果】
身を隠すと通常と異なる速度で時間が進む現象。浦島太郎が竜宮城に滞在した数年間は、現実の地上では何百年も経っていたという伝説をもとに、アインシュタインの相対性理論で証明された。光速に近い速度で宇宙船が飛ぶと、地上に戻ったときに数百年経っていたという考えもある。1971年、アメリカの2人の科学者が、セシウム原子時計を乗せた飛行機を、光速に近い速度で飛ばすことで、未来へのタイムトラベルが可能になることを証明した。

3【光速】
光の速度のこと。1秒間で約30万キロメートル進む。物質の質量は、速度が光速に近づくほど増加するため、光速を超えることはできないとされる。

4【キップ・ソーン】
アメリカの理論物理学者。カリフォルニア工科大学教授。1988年、ワームホールを使ったタイムトラベルの方法を発表。共著のアイリス・マルチェンコとの論文では、ワームホールの一方の口を光速に近い速度で動かすことで、過去へのタイムトラベルが可能になることを証明した。

5【ワームホール】
虫がリンゴをうりゃいて通ろうとすると、時空のある点をつないだ2つの点間を、ワームホールという近道で通ることができる。ワームホールは、現在でも観測されていないが、理論上は存在しうるとされる。

6【エヴェレット】
ヒュー・エヴェレット3世。1957年、プリンストン大学の大学院生時に多世界解釈を提唱。

7【「あべこべ星座」】
左右が逆で、西から太陽が昇り、ジャイアンやスネ夫が女の子で、しずかちゃんが男の子で、大きな星座ほど小さいという、すべてがあべこべの星。

8【ドイッチェ】
イギリスの物理学者。量子計算理論のパイオニア。エヴェレットの多世界解釈の支持者。




（てんとう虫コミックス17巻）

エヴェレットによる多世界解釈です。量子論の確率解釈をマクロな世界に拡張した考えで、我々の世界は、多くの同じような世界（パラレルワールド）から一つを選択することで、実現しているという考え方です。

「のび太も天才になれる？」は、ある惑星では、いまの世界ののび太が天才になっていた、という一種のパラレルワールドものです。「あべこべ星座」も、すべてがあべこべだけど、一種のパラレルワールドといえるでしょう。

ドイッチェは、親殺しのパラドックスを多世界解釈で解決することを提案しました。タイムマシンで過去に行って親を殺した時点で、その世界は、自分が存在しない未来へ分岐する。自分自身は、パラレルワールドを移動しただけ、と考えれば、因果関係に矛盾は生じません。ただ、過去を変えて世界を変えたといっても、変わっていない世界が、常に存在することになります。

最近、パラドックスの解決策として〈事後選択モデル〉という考え方が提案されました。「未来でパラドックスになりそうな出来事は、あらかじめ除外される（ような作用がはたらく）」という考え方です。パラドックスが起こらない場合のみ、過去の改変が許されるということですね。先ほどの「プロポーズ作戦」では、のび太とドラえもんの活躍で、パパとママがその晩におさまります。のび太が生まれるためには無矛盾ですから、この話はまさに事後選択モデルといえるでしょう。

「ドラえもん」には、タイムトラベル論の要素が、矛盾する前提点をふめてきちんと描かれています。

第３章までの確認事項

1 宇宙の階層構造

- 太陽系の大きさ．星座盤に惑星が載っていない理由．
- 2006 年に惑星の定義が変更された理由．
- 流星群とは何か．彗星との関連は何か．
- 夜空に見える星までのおよその距離．銀河系内の太陽系の位置．
- 隣の銀河系までの距離．銀河群，銀河団，宇宙の大規模構造．
- 宇宙が膨張していることは，どのようにしてわかったか．
  地球は宇宙膨張の中心なのか．
- （物理現象）音のドップラー効果．光のドップラー効果．

2 近代物理学の幕開け

- コペルニクス・ブラーエ・ケプラー・ガリレイ・ニュートンの業績．
  地動説が生み出された理由は何か．
  ティコの超新星の持つ歴史的意味は何か．
  ケプラーの法則とは何か．
  地動説の説明に，慣性の法則が使われた理由．
- コペルニクス・ブラーエ・ケプラー・ガリレイ・ニュートンが成し得た「科学的な考え方」．
- ニュートン力学が確立した経緯．
- 物理学史における，1905 年の持つ意義．近代物理学と現代物理学の違い．
- （物理現象）ブラックホールが存在することは，どのように確認されるのか．
- 高次元時空モデル・ブレーンワールドモデルが考え出された背景は何か．

3 相対性理論

- 特殊相対性理論と一般相対性理論．それぞれ誕生した背景・目的・理論の骨子と帰結．
- 特殊相対性理論と一般相対性理論のそれぞれ検証された事実と結果．
- アインシュタインの語る「生涯最大の発見」と「生涯最大の失敗」はそれぞれ何か．
- （特殊相対性理論）
  時間の進み方が観測者によって異なることになる理由．双子のパラドックス．
  $E = mc^2$ の式の意味とその応用．
  核融合と核分裂．どちらも起こりえる理由は何か．
  宇宙の歴史と元素の起源．
- （一般相対性理論）
  ブラックホールの定義は何か．
  時空特異点とは何か．解決策は何か．
  重力波の観測で何がわかるのか．
- （物理現象）星の一生．
- （物理現象）超新星爆発のしくみ．
- GPS のしくみ．