

最先端物理学が描く宇宙

Frontiers of Physics & Cosmology

第10回 2025/11/26(水)

第3章 一般相対性理論：重力波, タイムマシン

第4章 原子・素粒子の理論：原子の構造

真貝 寿明
Hisaaki Shinkai

<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/mukogawa/>

真貝の武庫川講義ページtop



課題

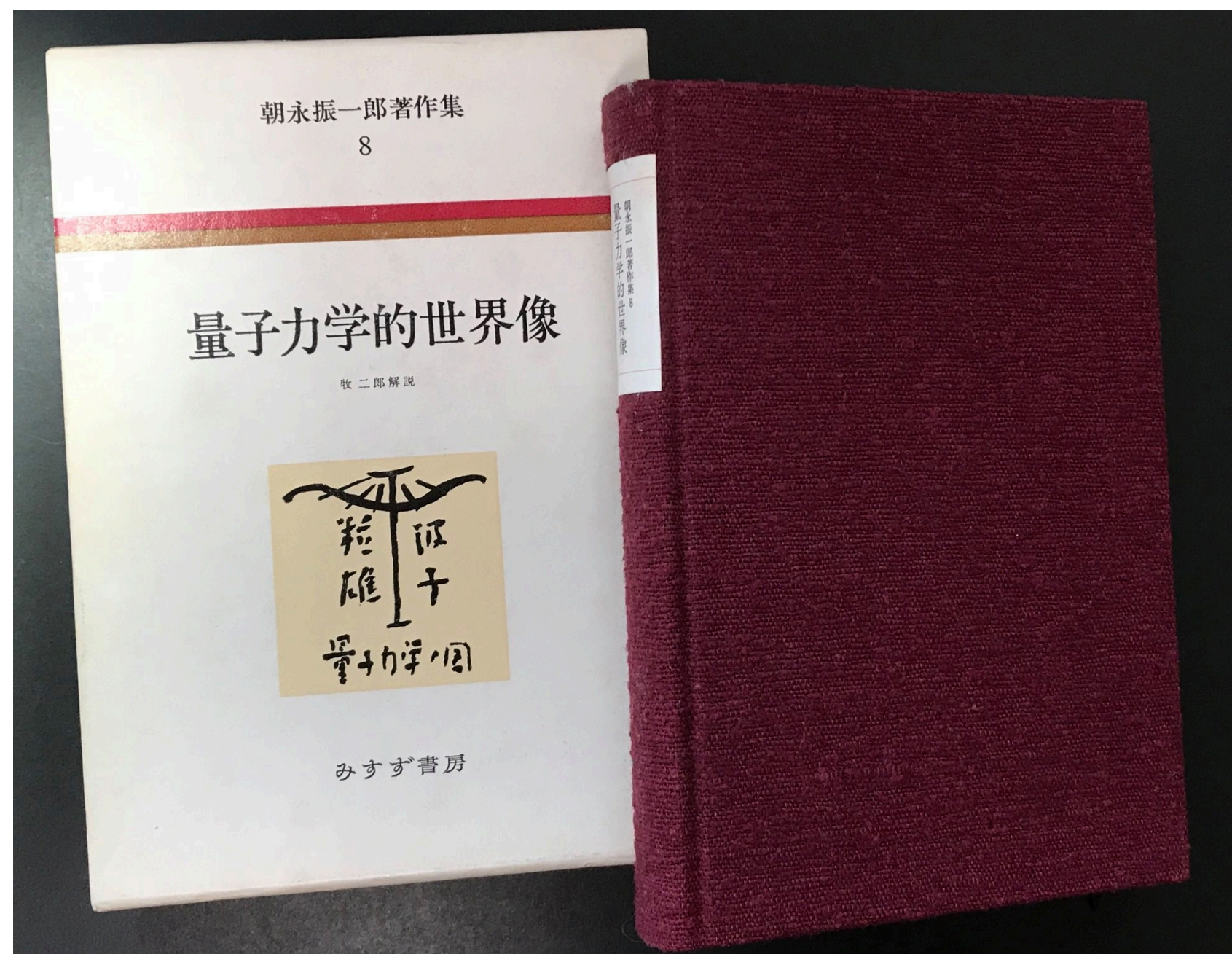
- 「光を波と考えるか，粒子と考えるか」の論争点は何か．現状ではどう理解するのが正しいか．
- 朝永振一郎の書いた『光子の裁判』(1949) のプリントを第9回の授業時に配布しています．この要旨をまとめてください．
- そして，次のキーワードから2つ以上を使って，論争点と解決案を説明してください．
『神はサイコロをふらない』『確率解釈』『不確定性原理』『観測問題』『シュレーディンガーの猫』
『EPR パラドックス』『トンネル効果』『コペンハーゲン解釈』『多世界解釈』
- 最後に，皆さんのこの問題に関する感想をお願いします．

作成要領

- A4 用紙 3-5 枚程度．表紙は不要．必要であれば，図や表を添付してよい（ページ枚数に含める）．
- 参考とした文献（web ページ含む）は必ず記すこと．（剽窃，無断転載行為が判明したら受理しない．きちんと引用するなら OK）．

提出手順

- Google Classroom の課題として提出．手書きの場合は写真撮影したものを提出．
- 提出〆切は，**2025年12月28日（日） 23:59**
- 提出ファイルの名前は，「Q 学科 XXXXXXXX ○○○○」の形式とすること．（Q は Quantum の頭文字でレポート区別するためのもの，学科は大日/短生など2文字で，XXXXXXX は学籍番号，○○○○は氏名）とすること．ファイル名には空白を入れず，学籍番号は半角で．一括ダウンロードして読むため，このファイル名をお願いします．
- ファイル内の初めにも，タイトル・学部学科学年・学籍番号・氏名を記載すること．
- pdf ファイルが望ましいが，word ファイルでもよい．



光子の裁判
——ある日の夢——



朝永振一郎（ノーベル賞 1965）

「超多時間理論」と「くりこみ理論」，
量子電磁力学分野の基礎的研究

jointly to Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger and Richard P. Feynman "for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles".

"We must now describe the photon as going partly into each of two components into which the incident beam is split."
P. A. M. Dirac, *Principle of Quantum Mechanics*

一

光子の裁判

検 「それでは被告にたずねるが、被告は前から室内にひそんでいたのではないのか」
被 「そうです。私がその直前に部屋の外にいたということには確かな証拠があります。現にその直前、私は門のところでした。すなわちそこで門衛が私をつかまえて、入門の手続きをとらせたのであります。このことはさきほど門衛の証言で明らかにされたとおります」
検 「なるほど。門衛の証言によってその点についてはアリバイが成立しているとせねばなるまい。それでは聞くが、被告は門から前庭を通じて窓のところにいき、その窓から室内に侵入し、そして室内の壁のところで捕えられたというのだね」
被 「そのとおりです」

4

3

気がつくとは私は、何かの裁判を傍聴しているようです。法廷はよく写真などで見たように、正面に判事長が威儀を正して坐っており、中央の被告席には何の犯罪かよくわからないけれども、何かの犯行をおかしたらしい被告が神妙にひかえています。今尋問をしているのは検察官らしく、犯行の模様をいちいち念をおすように聞きだしているのです。
私は、いつのまにこんなところに来てきたのでありましょう。それをいぶかりながらも、これは何か面白い事件らしいぞと思ひながら、一生懸命に聞き耳をたてていました。検察官はさらに尋問をつづけました。

検 「その部屋には二つの窓が前庭にむいて並んでいる。被告はそのどちらの窓から侵入したのか。この点は非常に重要なことだから、はっきりと答弁してほしい」
これに対する被告の答は、はなはだ奇想天外なものでありました。
被 「私は二つの窓の両方を一緒に通って室内に入ったのです」
私はこの答にあっけにとられました。一体、一人の被告が二つの窓の両方を一緒に通るなどということが可能でしょうか。検察官もこの論理を無視した答に少なからず心証を害したようです。
検 「被告は二つの窓の両方を一緒に通ったと予審においても一度ならず主張していたが、ここで

レポート理解できるか不安ですが、時間をはけてがんばります。

前回のミニッツペーパーから

インターステラーの中で 5次元空間 があったのだから、5次元とはどういう空間ですか？

空間の軸がx, y, zともう一つあって4次元, ということです。(時間が1次元)
3次元にいる私たちにはわからない空間です

いろいろ不思議なことが
おもしろい。

映画「インターステラー」の「ここでの1時間は7年」というシーンが浦島効果の時間の遅れによって説明でき、とても驚きました。演出だと思っていた現象が相対性理論に基づく実際の物理法則で起こりうることにびっくりしました。

タイムマシンや5次元を信じているので、あったら良いなって思いました。

人間が異世界に行ってしまった場合、どういう原理で迷い込んだりするのでしょうか。ブラックホールと同じ原理なのでしょうか。

異世界???



Interstellar | "Tidal Wave" Full Scene (Anne Hathaway, Matthew McConaughey) | Paramount Movies

前回のミニツツパーから

関西で一番星がきれいに見える場所はどこですか？

西はりま天文台

標高430m. 日本最大、公開用では世界最大の2mのなゆた望遠鏡あり. 公園や宿泊施設などもある.

峰山高原 標高920m.

かわべ天文台公園

標高90m. 1mの望遠鏡あり. プラネタリウムや宿泊施設などもある.

みさと天文台

標高420m. 1mの望遠鏡あり. 駐車場は夜間も開放.

標高500m. 森林科学館近くの駐車場.

フォレストパーク神野山



前回のミニッツペーパーから

虹のしくみを何回か聞いたことがありましたが、初めて理解できた気がします。
日本の電波干渉計のアイデアが面白いと思いました。
ブラックホールは、理解するのにも人に説明するのも難しいと思いました。
いざよいなど 日本のチーミングもセンスがあると思いました。

かきや 実験装置の

虹のしくみ

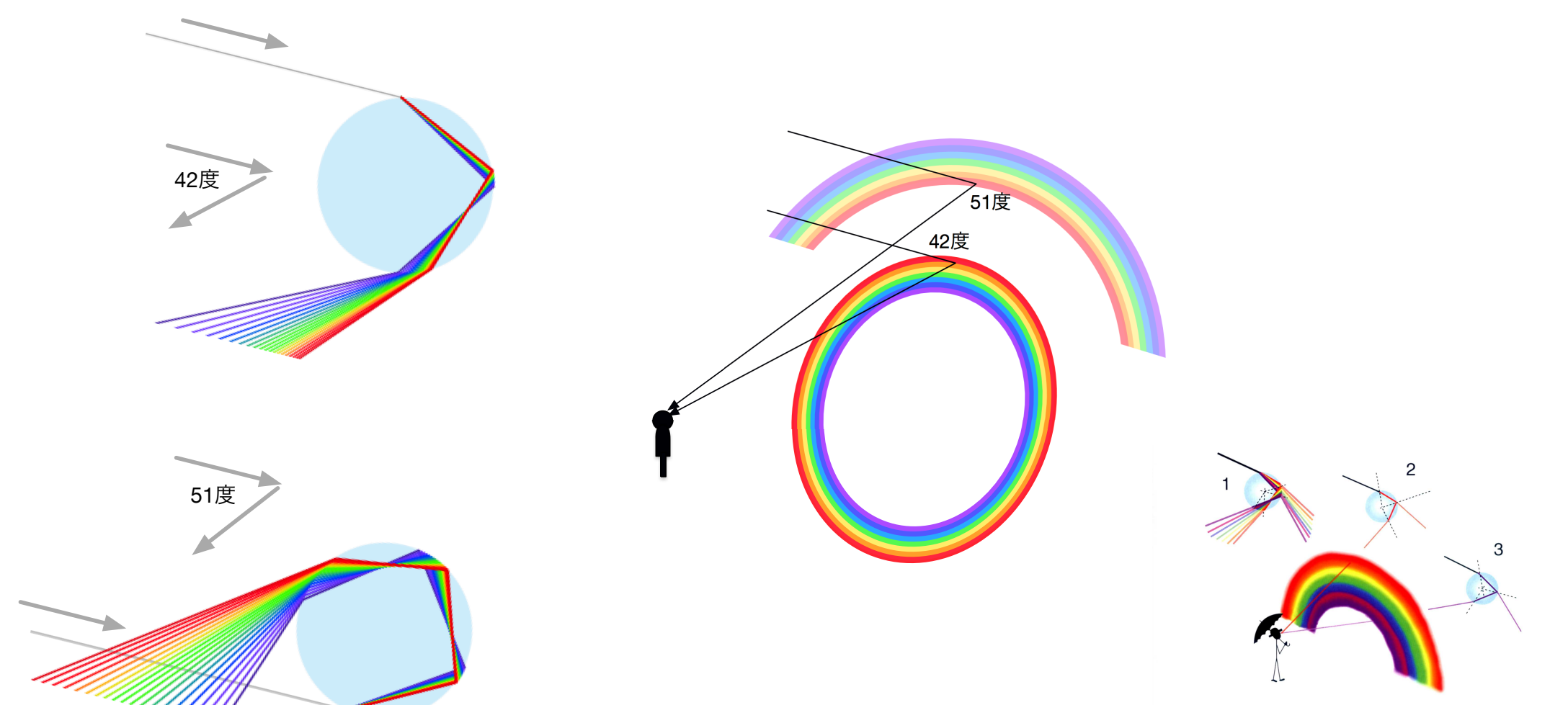


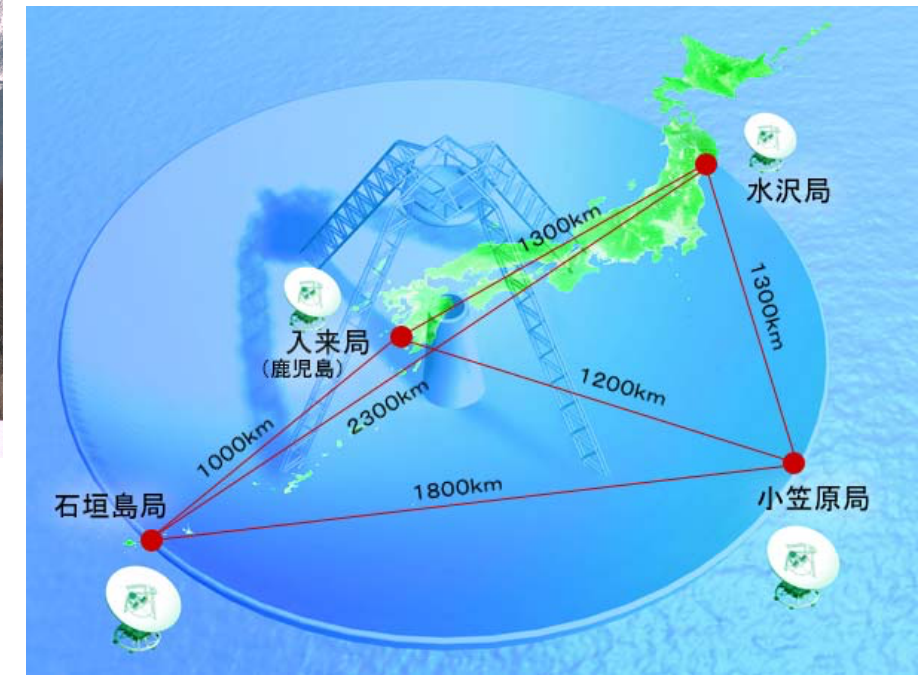
FIGURE 2.19 ► How the rainbow forms. Each water droplet, schematically represented by a sphere, is penetrated by white light, which is dispersed, then partly refracted outside the droplet, partly internally reflected.

【身近な技術】

電波干渉計



VLBI = Very Long Baseline Interferometer
VERA = VLBI Exploration of Radio Astrometry



<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/system/index.html>

【身近な技術】

アルマ望遠鏡 Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array

日本が、欧米と共同で、チリのアタカマに建設した電波望遠鏡

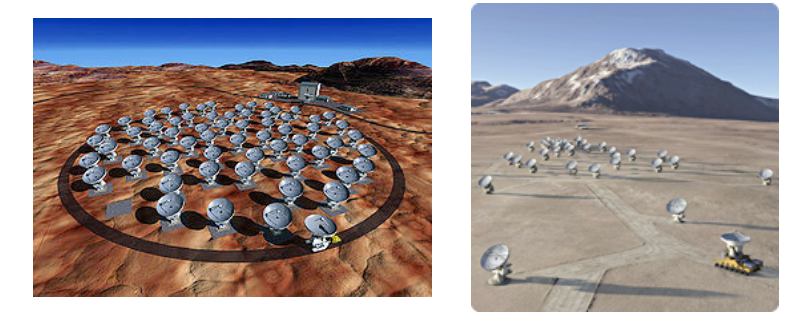
全66台のアンテナが設置され、日本は16台を担当。「いざよい」と命名、標高5000m地点に設置されている。

直径12メートルのアンテナを50台組み合わせるアンテナ群と、直径12メートルのアンテナ4台と直径7メートルアンテナ12台からなる。最大18.5キロメートルまでアンテナ間隔を広げることができ、最大の空間分解能は、0.05 マイクロラジアン。



<http://alma.mtk.nao.ac.jp/>

「大阪にある一円玉を東京から見分けられるほどの高い解像度」



1-25
火星に住むとすれば、環境を整えるのにどれだけの資金と時間がかかりますか。

オデッセイ

現在の火星で人は生きのびられるか？

『オデッセイ』(2015年)は、火星への有人探査をリアルにえがいたSF映画です。有人火星探査計画「アレス3」の乗組員たちは、火星でサンプル収集を行っている最中に猛烈な砂嵐に襲われ、逃げ遅れた主人公のマーク・ワトニーは火星に取り残されます。次に火星でのミッションが行われるのは4年後。地球との通信がとだえ、十分な食料や水もないという絶望的な状況の中、ワトニーは火星での究極のサバイバルにいどみます。

映画の中で植物学者・機械工学者のワトニーは、ジャガイモの栽培や水の精製、地球との通信手段の復旧など、多くの問題を科学の力で解決していきます。火星は1日の長さが地球の1日とほぼ同じであり、自転軸が適度に傾いているために四季があるなど、地球に近い環境をもちます。希薄ながら大気もあって、夏場の気温は20℃ほどに上がります。

それでも、大気の成分のほとんどは二酸化炭素、気圧は地球の140分の1ほどしかなく、冬場の気温はマイナス140℃にも達します。火星での生活は死と隣り合わせといえるでしょう。はたして、人が火星で生きのびることはできるのでしょうか？

火星を脱出

映画では、ワトニーが自力で火星軌道に達して火星上空で宇宙遊泳をするシーンがある。「火星脱出」のためにNASAの研究者たちは無謀ともいえる計画を立てる。なお、火星でのサバイバルミッションは、Sol(火星日)でカウントされていく。

1-25
火星に住むと仮定して、環境を整えるのにどれだけの資金と時間がかかりますか。

オデッセイ

2050年までに火星移住をめざす計画

『オデッセイ』に出てくるシーンの多くは、NASAで実際に研究されている技術や科学的知見にもとづき、現実的にえがかれています。実際、NASAでは火星での居住を想定した実験を積み重ねてきており、最近では約1年間という長期間にわたる実験プロジェクト「CHAPEA」を実施しました(2023年6月～2024年7月)。

この実験では、4名の科学者が火星に似た環境の実験施設(マーズ・デューン・

アルファ)に隔離され、野菜の栽培や宇宙遊泳、機器の操作など、火星で想定されるさまざまな活動を行いました。3Dプリンタで制作された160平方メートルの居住空間の中には、乗組員が生活するための寝室やキッチン、ラウンジ、作業スペースなどが設置され、外には火星のように赤い土をしきつめた空間も再現されました。2025年春からは第2弾の実験がはじまる予定です。

アメリカの宇宙開発企業スペースXは、

2050年までに火星に100万人が移住することをめざし、大型宇宙船「スターシップ」の開発などを進めています。スターシップは、NASAなどが月面基地や月を周回する宇宙ステーション「ゲートウェイ」の建設をめざす「アルテミス計画」で月着陸船としても使われる予定です。

実は、アルテミス計画が次なる目標として掲げるのが「有人火星探査」です。スターシップが火星に人を送る時代が、すぐそこまで来ているのかもしれません。

3Dプリンタで作った空間

NASAの実験プロジェクト「CHAPEA」で使われた居住空間「マーズ・デューン・アルファ」。外側は3Dプリンタで作られている。地球以外の場所で建造物を作る場合、建築材料の輸送コストが大きな障壁となる。3Dプリンタ技術があれば、建築材料を運ぶ必要がなくなるかもしれない。



火星基地の想像図

NASAが作成した、火星の居住地をえがいた想像イラスト。中央に宇宙飛行士、右手に宇宙飛行士の居住棟、左にローバー(探査車)がえがかれている。

Column 3 火星は近くて遠い惑星

地球と火星の距離は約1億～4億キロメートルあり、情報伝達には片道5分半～22分が必要です。つまり、地球から一言送信しても、相手から返事が来るのは10分以上あとになります(映画では12分という設定でした)。また、映画ではロケットで地球と火星を往復するのに530日あまりかかるとされていますが、現在の技術では往復で約2年かかると言われています。火星は、“近くて遠い惑星”と言わざるを得ないでしょう。

1-25
火星に住むとすれば、環境を整えるのにどれだけの資金と時間がかかりますか。

レッド・マーズ

テラフォーミングで火星が人類の故郷に

アメリカのSF作家キム・スタンリー・ロビンソンの「火星三部作」の第一部にあたる『レッド・マーズ』(1992年)は、2026年に火星に到達した100人の科学者たちを中心に、火星での環境調査や人類の移住を実現するための取り組みのようすをえがいた小説です。この物語では技術的な課題だけでなく、人間が住めるように火星の環境を変えてしまうことの是非や移住先の権

力争い、新たな社会秩序の構築といった、人間社会における普遍的な問題も重要なテーマとして語られます。物語の中で、火星での人の居住を可能にする“技術”として採用されるのが「テラフォーミング」です。テラフォーミングとは、惑星などの天体の環境を地球のように作り変えることで、人間が生きられるようにする方法です。本作では、巨大な衛星ミラーを火星の

周回軌道に送りこみ、太陽光を地表に向けて反射させ火星の温度を上昇させるという方法がとられます。一方、火星の環境を人間の都合で変えてしまうことへの反発など、火星移住にともなう倫理的・政治的なテーマもえがかれています。人類はまだ人を火星に送ることさえできていませんが、この惑星を人間が居住できるようにかえてしまうことなどできるのでしょうか？



『レッド・マーズ(上)』(東京創元社)
キム・スタンリー・ロビンソン(著)
大島豊(訳)

火星に移住してきた人々
『レッド・マーズ』では、地球から移住してきた人々の日常や火星でおきるさまざまな事件が語られる。「宇宙エレベーター」(133ページ)というSFならではの乗り物も登場し、物語の重要な骨子となる。火星への移住をテーマにしたSFには、レイ・ブラッドベリ(1920～2012)の『火星年代記』などもある。

1-25
火星に住むとすれば、環境を整えるのにはどれだけの資金と時間がかかりますか。

レッド・マーズ

テラフォーミングには課題も多い

火星に大勢の人が移住できるようにするには、多くの課題があります。たとえば58ページでも少し触れたとおり、火星は概して気温が低く、平均気温はマイナス65℃という極寒の環境です。また、地表には酸素がありません。そのため、火星を地球に似た環境に変える「テラフォーミング」(63ページ)が必要になると考えられています。

スペースX社CEOのイーロン・マスク氏も、テラフォーミングで火星を移住可能な惑星に変えることを主張する一人です。具体的には、極冠(極地の白くみえる部分)に存在するとみられる二酸化炭素を人工的に放出させ、火星大気を温暖化させるというものです。これにより、まず

火星の地下に眠る固体の水がとけだします。その後、植物を繁殖させて、水と二酸化炭素から酸素を生みだせば、人間の生存に必要な温暖で水のある環境が作られるというシナリオです。

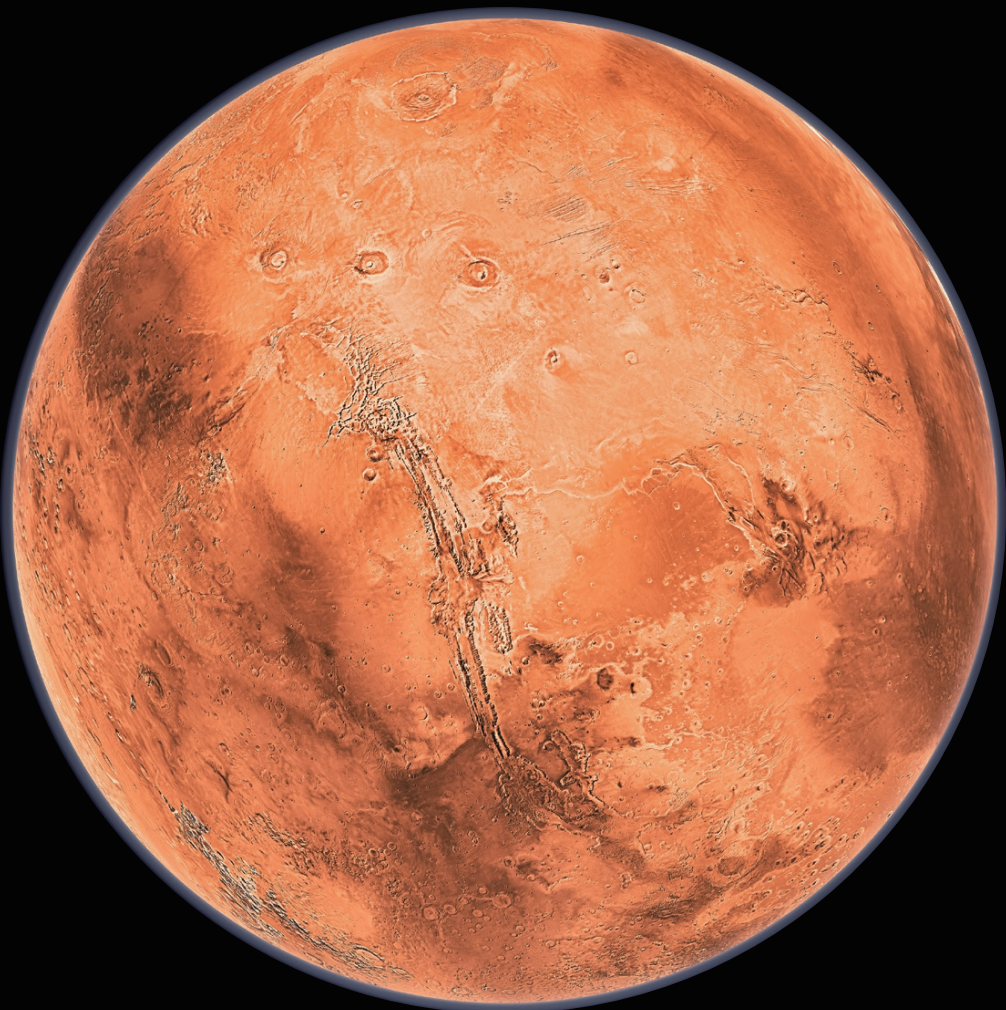
ところが、NASAが2005年に打ち上げたマーズ・リコネッサンス・オービターなどの火星探査機が極冠の炭素量を調査した結果によると、火星を温暖化するほどの二酸化炭素は存在しない可能性が高いことがわかりました。また、仮に十分な量の二酸化炭素が生じたとしても、それを保持できる重力や磁場がないことも問題のようです。

それならばと、二酸化炭素以外の物質をテラフォーミングに用いる方法が提案

されています。2024年8月に『Science Advances』上で発表された論文によると、直径9マイクロメートルほどの「ナノ粒子」を使うと、これまでの最善の方法より5000倍も効率的に火星を温暖められるといいます※。これにより、火星の温度は30℃ほど上昇するとみられています。

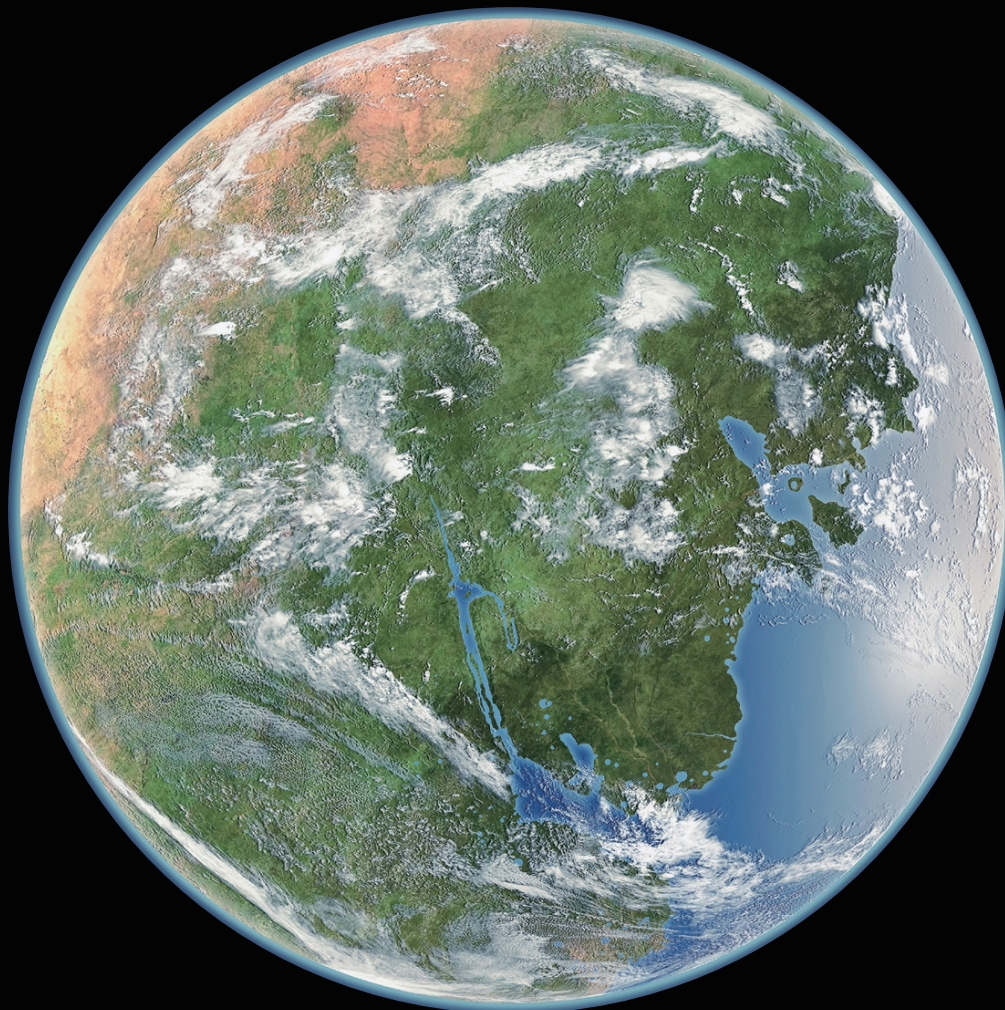
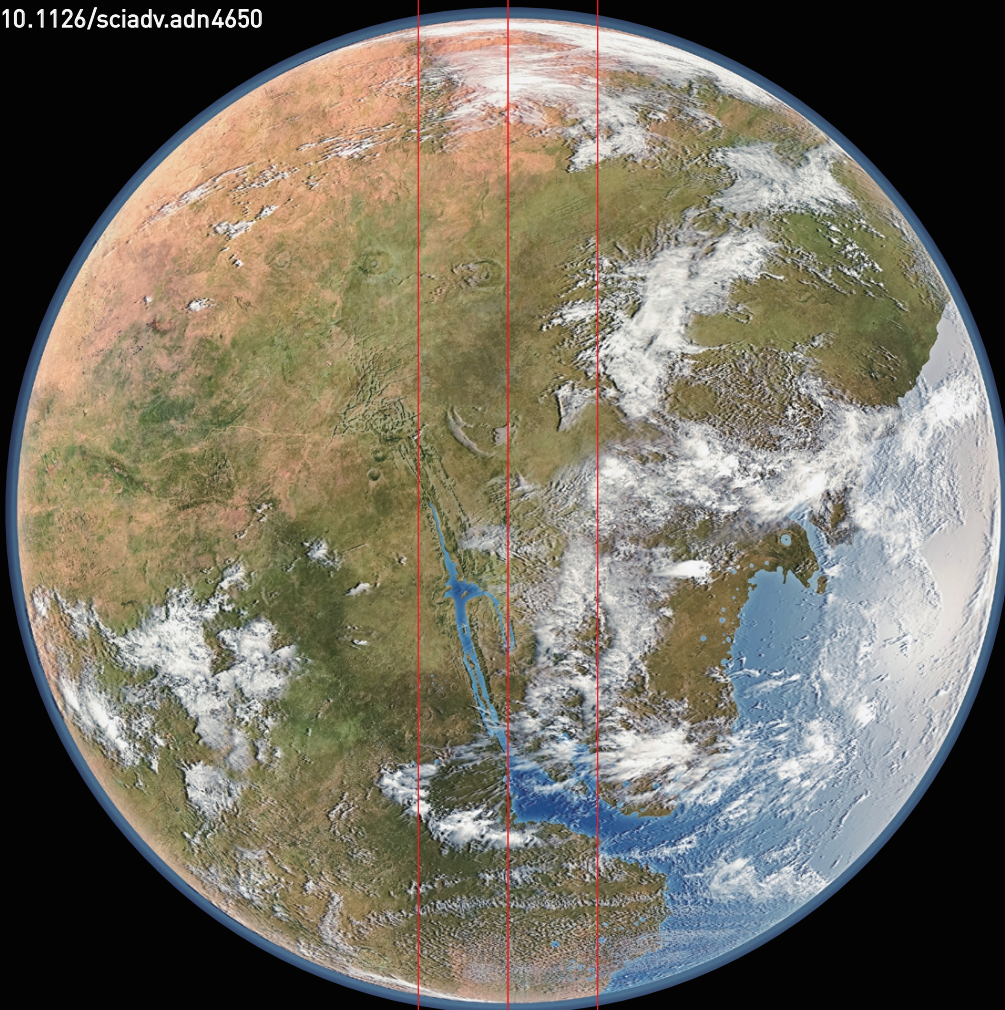
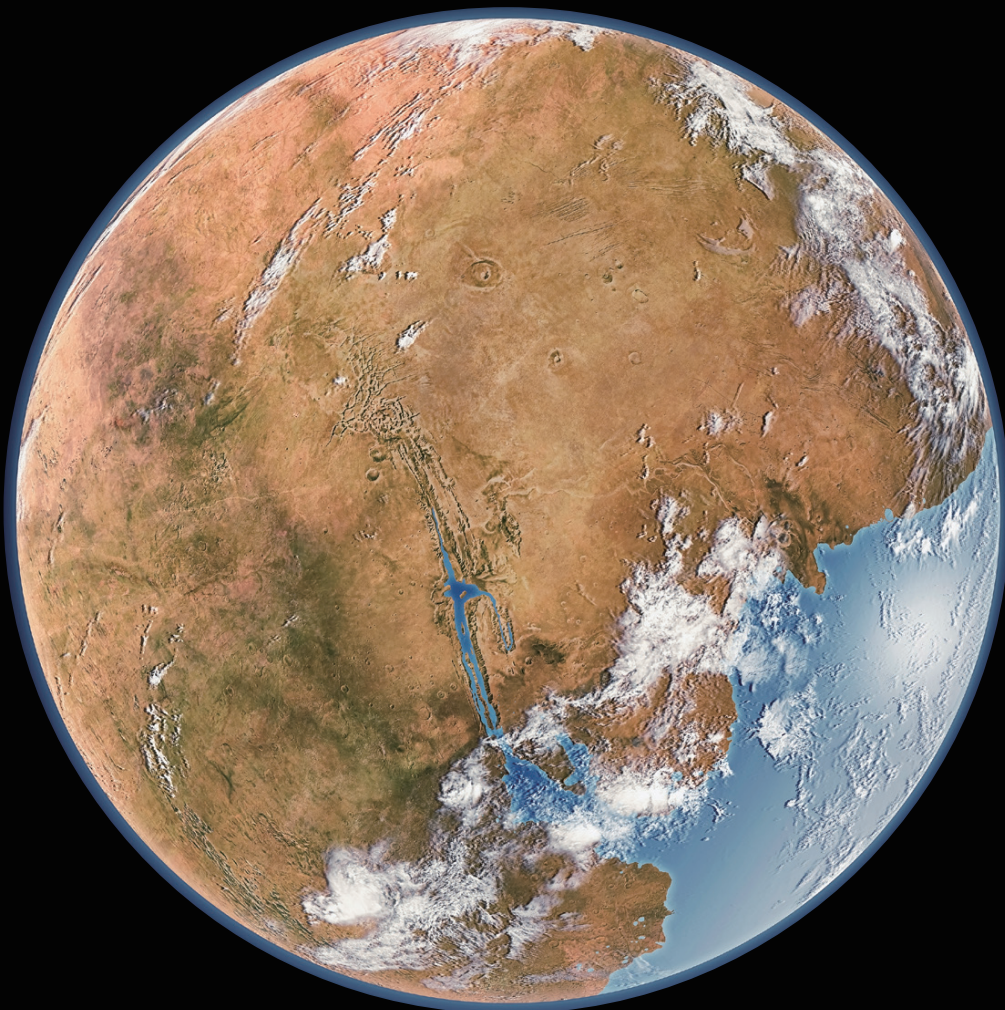
テラフォーミングに関わる問題や課題は他にもありますが、火星は、地球からの距離が比較的近いことや水が存在することなどから、人類の移住先としては最も現実的な場所だと考えられています。火星が人類の第二の故郷となる日がいつ訪れるのか、想像するだけで期待に胸がふくらみます。

※: S. Ansari et al., Science. Advances.10,eadn4650 (2024). DOI:10.1126/sciadv.adn4650



テラフォーミングで 変化する火星

このページの画像は、現在の火星(上)がテラフォーミングによって水と緑の惑星にかわっていくようすをあらわした想像図。二酸化炭素など、火星を温暖化させる物質を大気に放出することで徐々に火星を温める計画だ。



一般相対性理論

強い重力場での時空の力学
「空間が歪むのが重力の正体である」

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学
「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

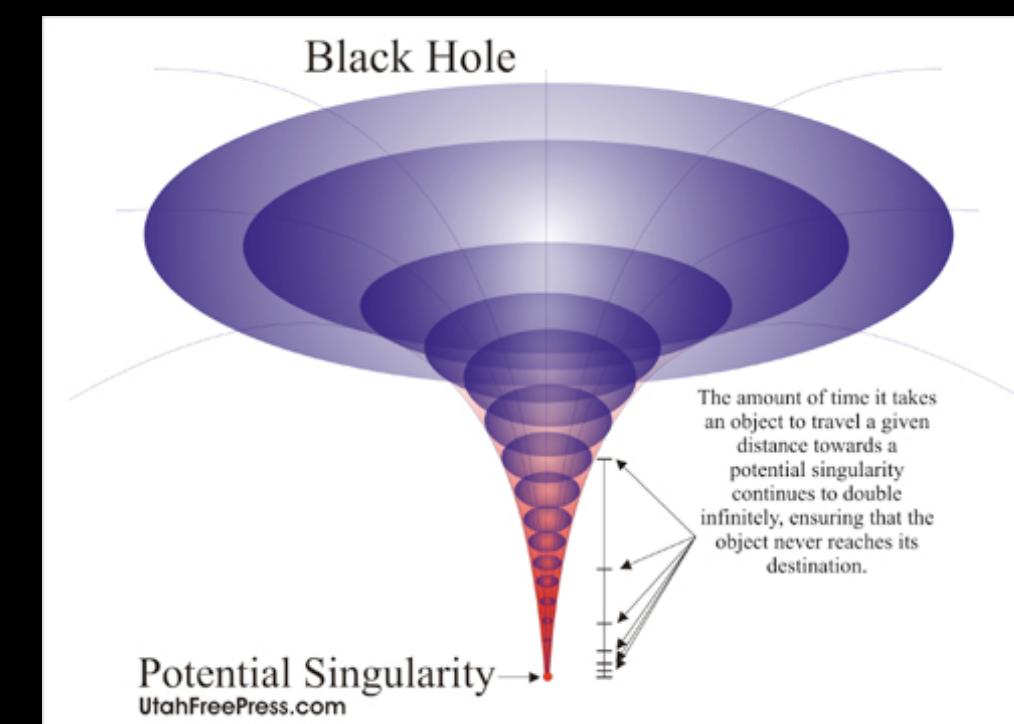
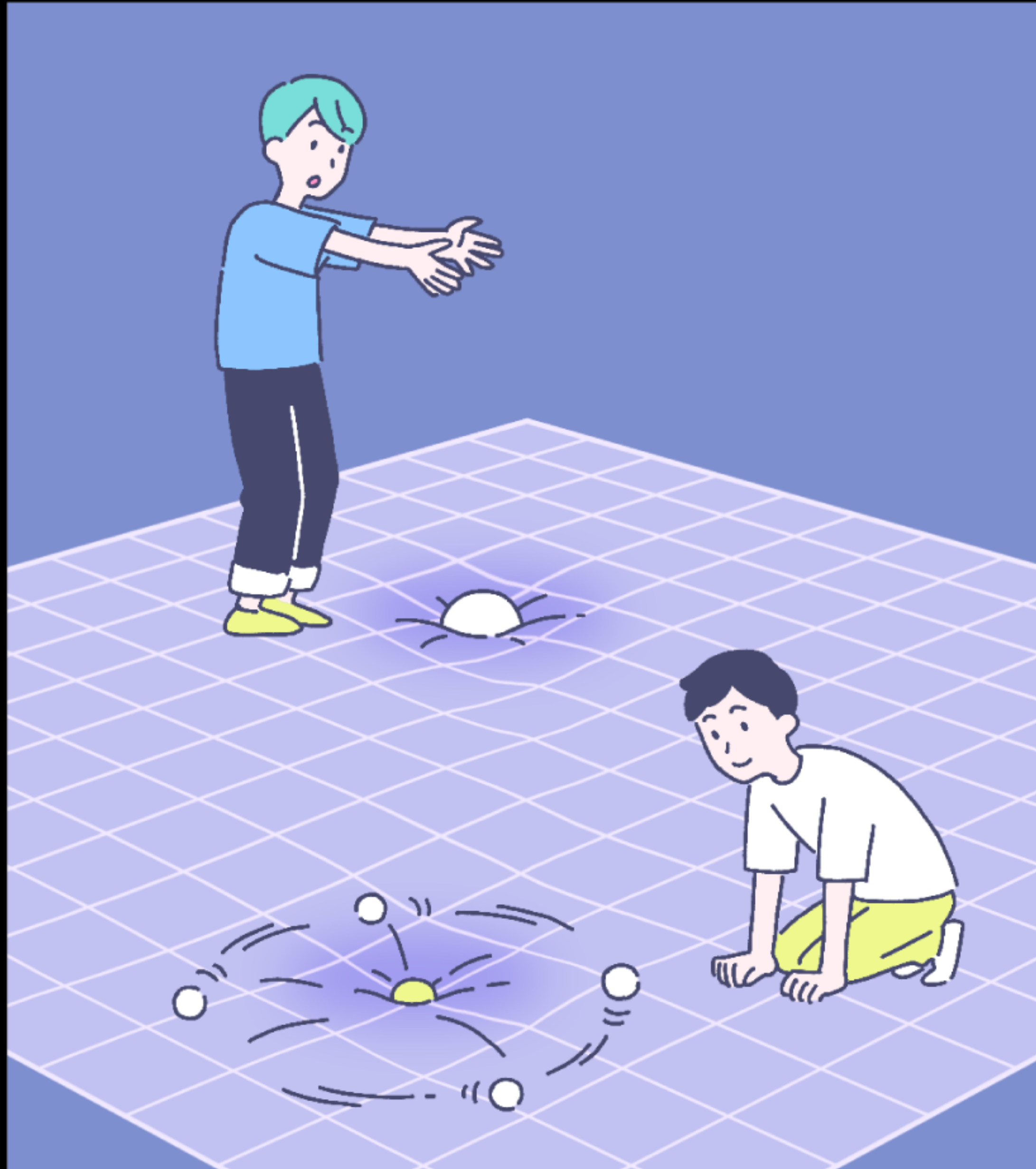
前回のミニツツペーパーから

次のそれぞれについて、
特殊相対性理論(SR)で説明できる / 一般相対性理論(GR)で説明できる / どちらでも説明できる / 別の理論で説明できる
に分類せよ。

49名中正解者

(a) 双子のパラドックス	SR	38名
(b) ブラックホール	GR	41名
(c) 光の湾曲	GR	38名
(d) 未来に行くタイムマシン	SR, GR	16名
(e) 核反応の原理	SR	20名
(f) 重力波	GR	38名
(g) ドップラー効果	x	9名
(h) 水星の近日点移動	GR	32名

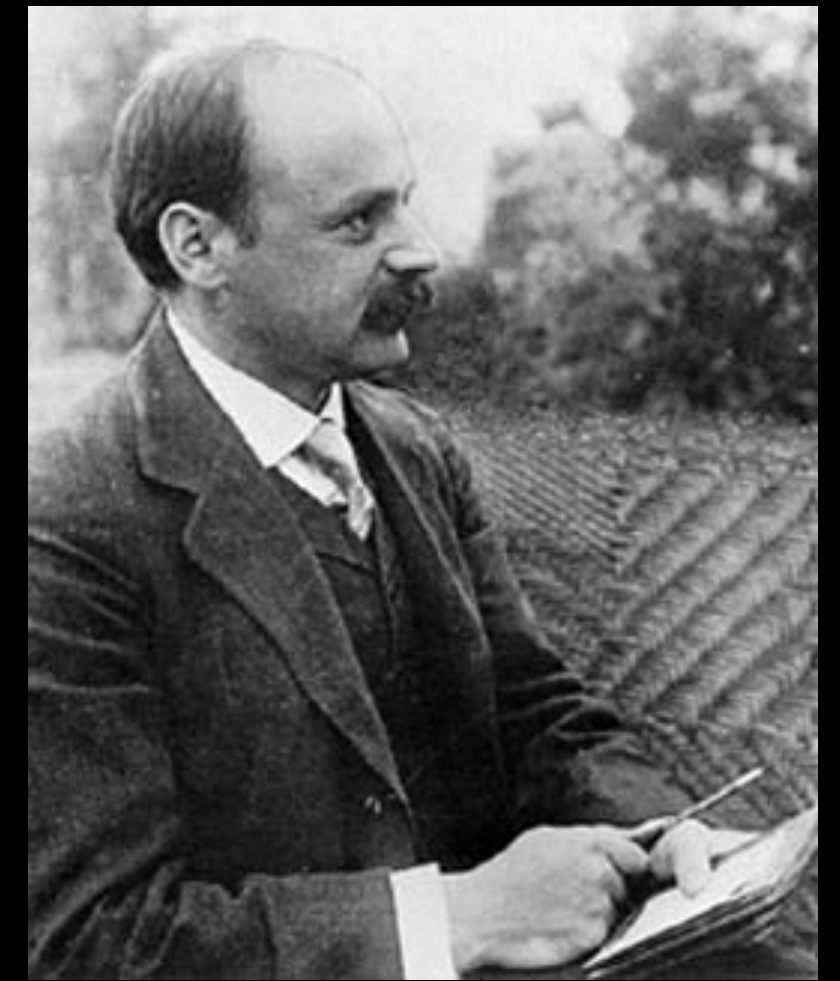
3.4 相対論の産物:(1) ブラックホールと時空特異点



アインシュタイン方程式の解 【シュヴァルツシルド解】

Schwarzschild (1916)
球対称, 真空での方程式の厳密解

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$



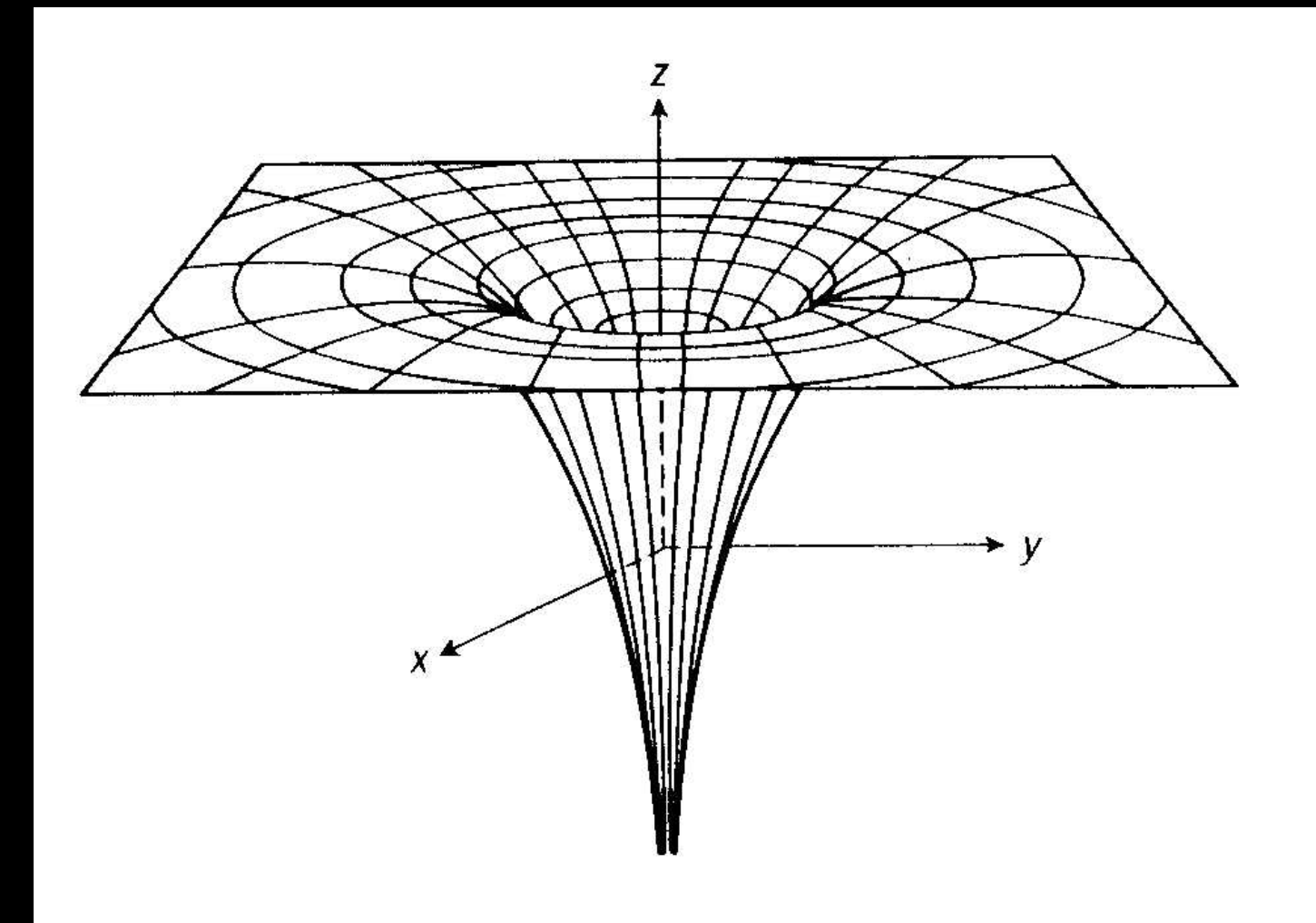
困ったことに, ……

$r=0$ で特異点

⇒ 今でも困ってる

$r=2GM/c^2$ でも特異点

⇒ ブラックホールの境界



前回のミニッツペーパーから

重力はとても身近な物ですが、
視点を変えて考えると空間を歪ませるほどの
強大な力を持ったものだといふことに驚きました。

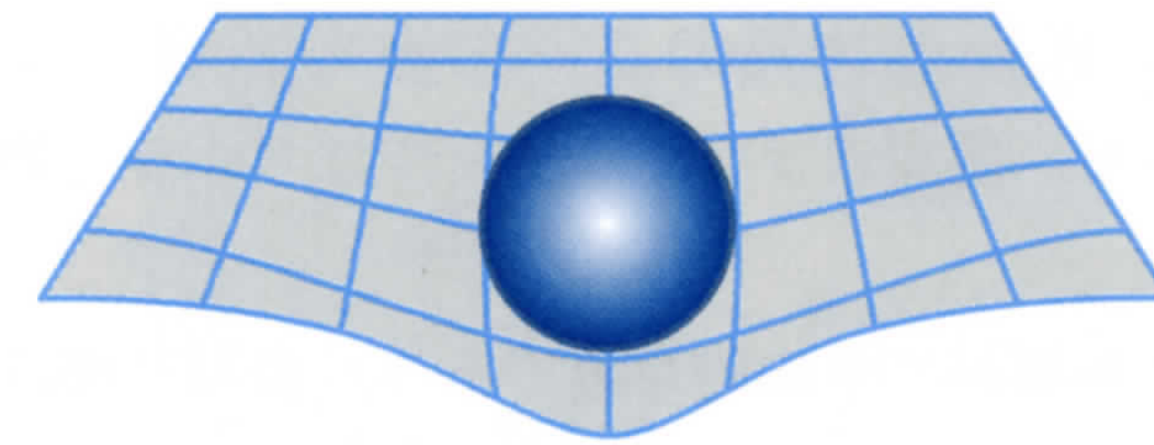
ブラックホールはまるで謎が多いと思った。

ブラックホールの中には気体はあるのか

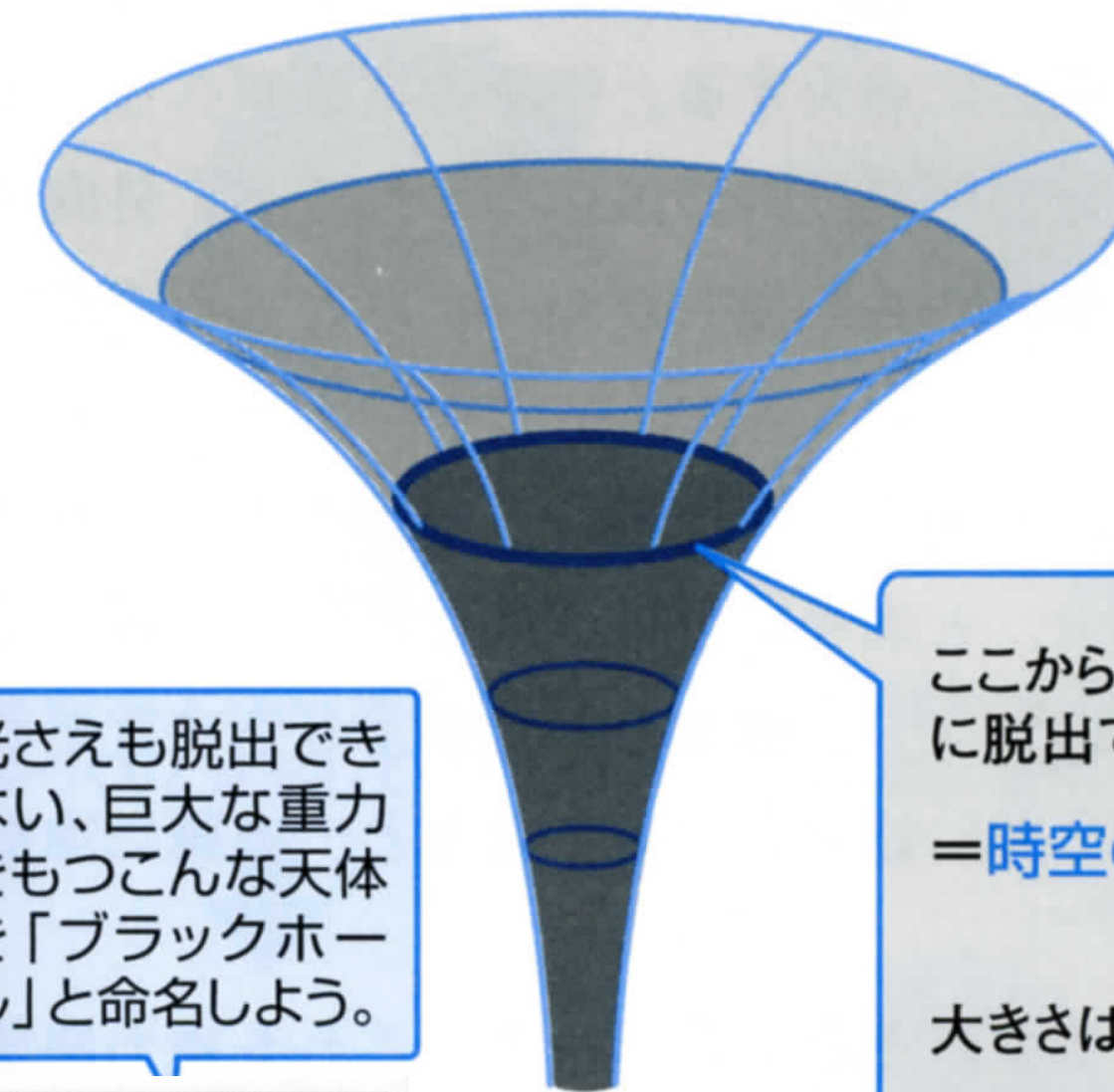
ブラックホールの中心に吸い込まれていく状態だと思います

・ブラックホールは、ただ黒いではなく、重力が強すぎて光さえも
出られない天体だと分かった。
・先生は、5年間とか色々な国に回ってリサーチして、先生の妻も一緒に
行っていたのですか？

二人目の子供はアメリカで生まれました



重い物体の周りでは
時空がゆがむ。



非常に重い物体のまわ
りでは時空が大きくゆ
がんで、ブラックホール
になる。

光さえも脱出でき
ない、巨大な重力
をもつこんな天体
を「ブラックホー
ル」と命名しよう。

ここから内側からは光さえも外向き
に脱出できない。

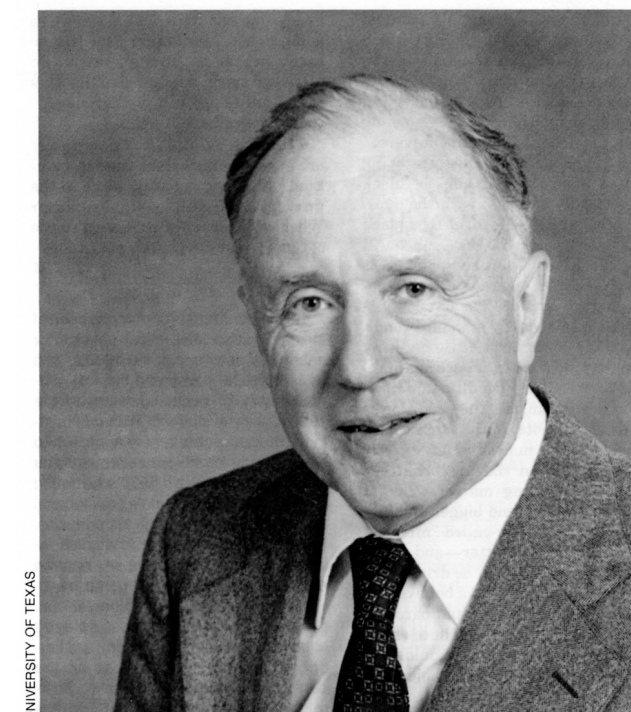
=時空の地平面 (event horizon)

大きさはシュワルツシルト半径 r

$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

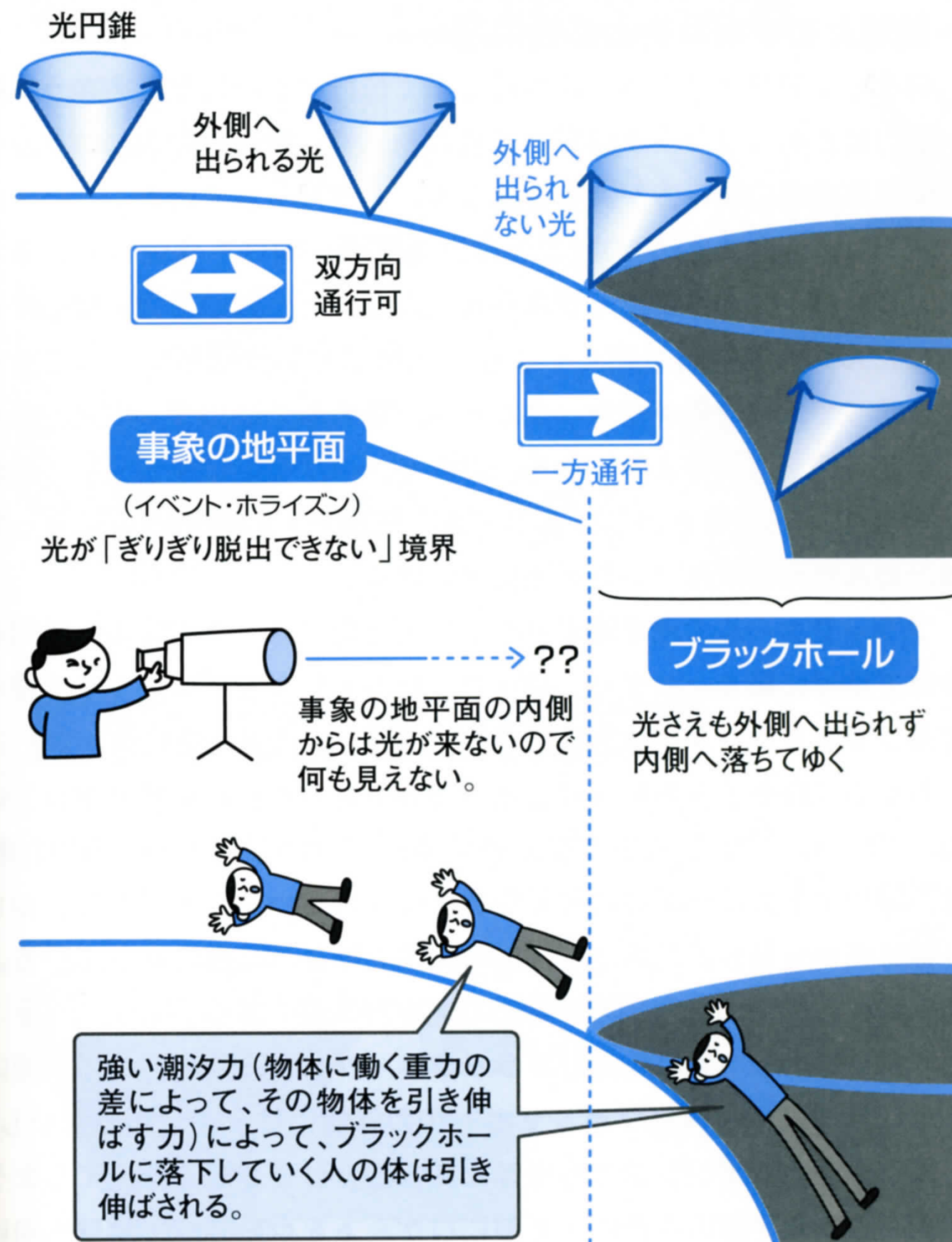
(M :物体の質量, G :重力定数, c :光速)

太陽なら半径3km、地球なら半径
9mmにそれぞれの全質量を押し
こめば、ブラックホールになる。



ホイーラー

ブラックホールの事象の地平面

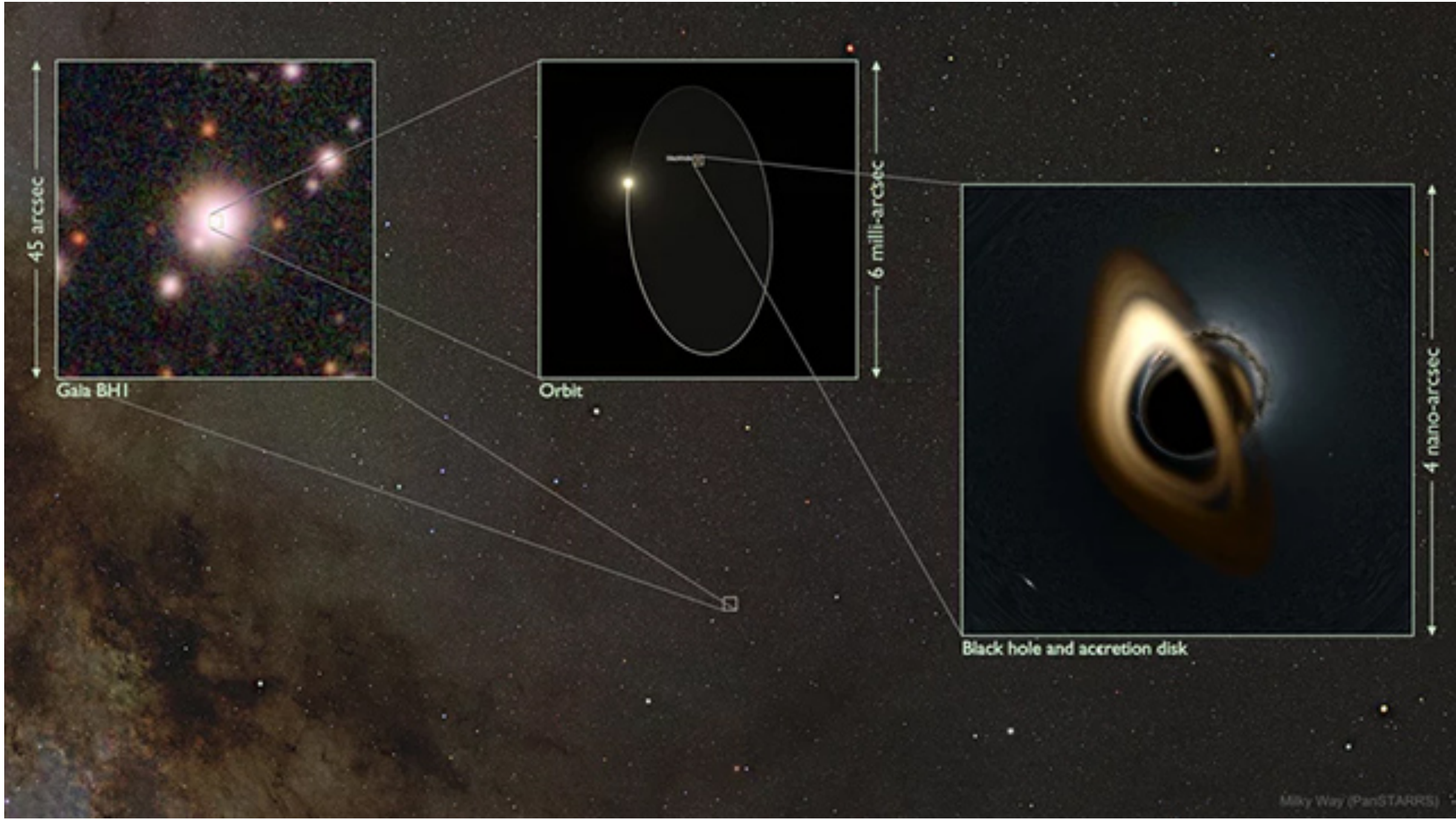


光が無限遠方まで到達できない領域を **ブラックホール** とよぶ
 ブラックホール領域の境界を **事象の地平面(Event Horizon)** とよぶ

ブラックホールの内側は、非常に強い重力がはたらく
 強い潮汐力によって、落下する物体は引き伸ばされる



New method finds black hole closest to Earth - A Sun-like star orbiting a black hole



位置天文衛星Gaiaが測定している星データのうち、17万個がふらついていて連星を形成すると考えられた。そのうち6つがブラックホールと考えられ、地上望遠鏡の追観測により、一つがブラックホールを伴う連星と同定された。GaiaBH-1と命名された。ブラックホールの質量は太陽質量の約10倍、距離はこれまでで最接。周期は185.6日。銀河系には1億個以上のブラックホールがあるとされるが、このような発見のされ方は初めて。

一番右のブラックホールは想像図

このブラックホールのもと、太陽質量の約20倍の星で、寿命が数百万年とされるが、この連星系の形成プロセスには新説が必要となるようだ。

JOURNAL ARTICLE

A Sun-like star orbiting a black hole

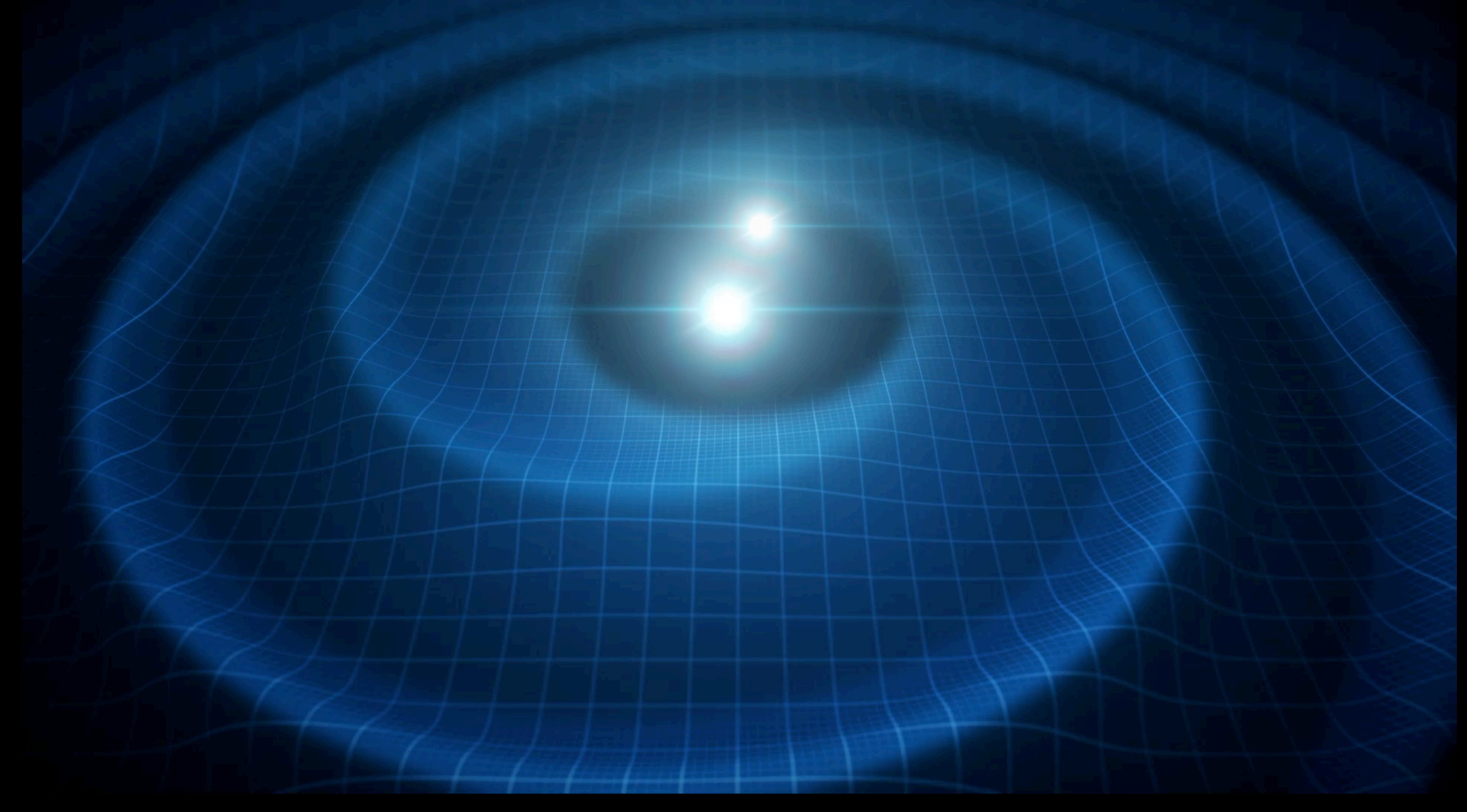
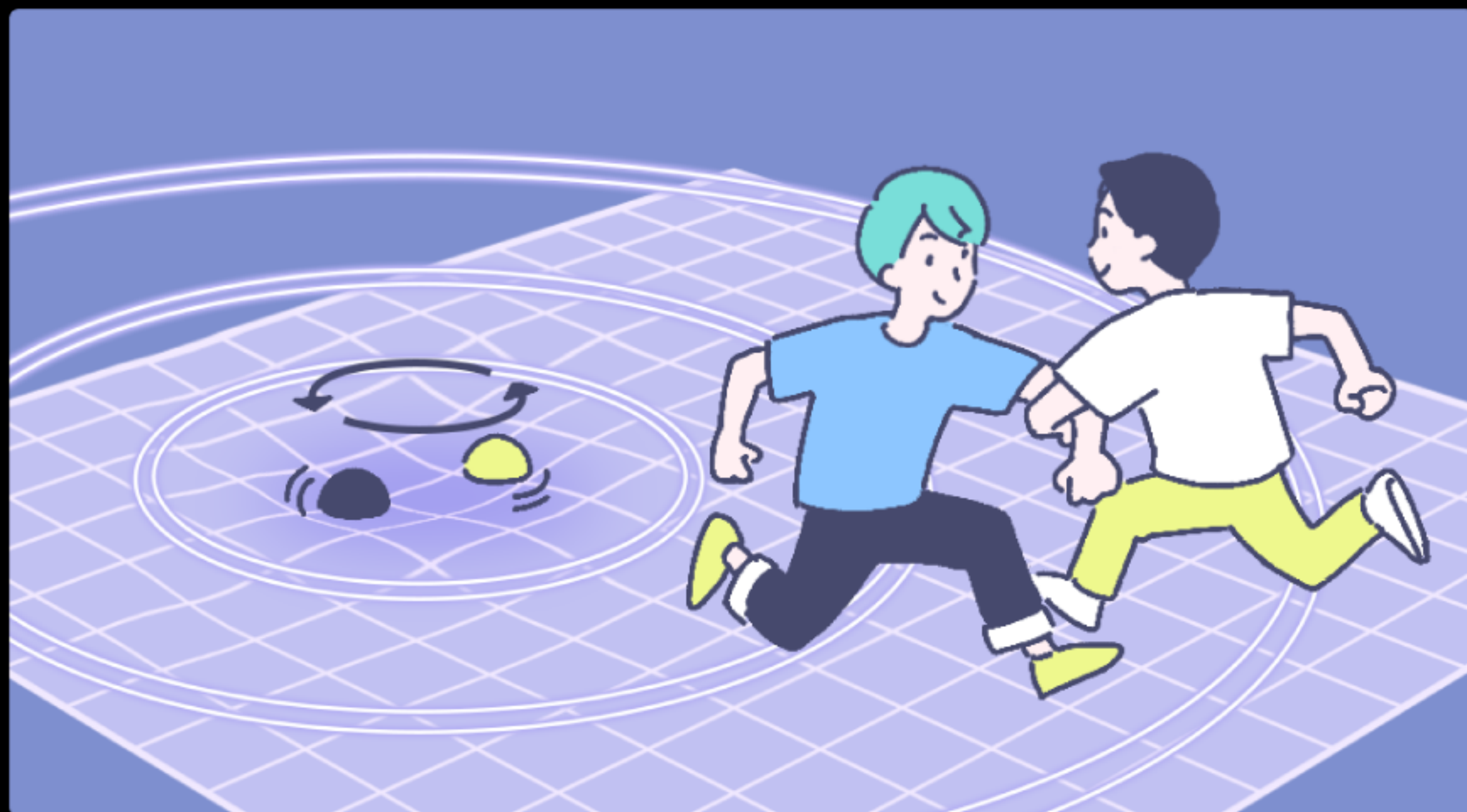
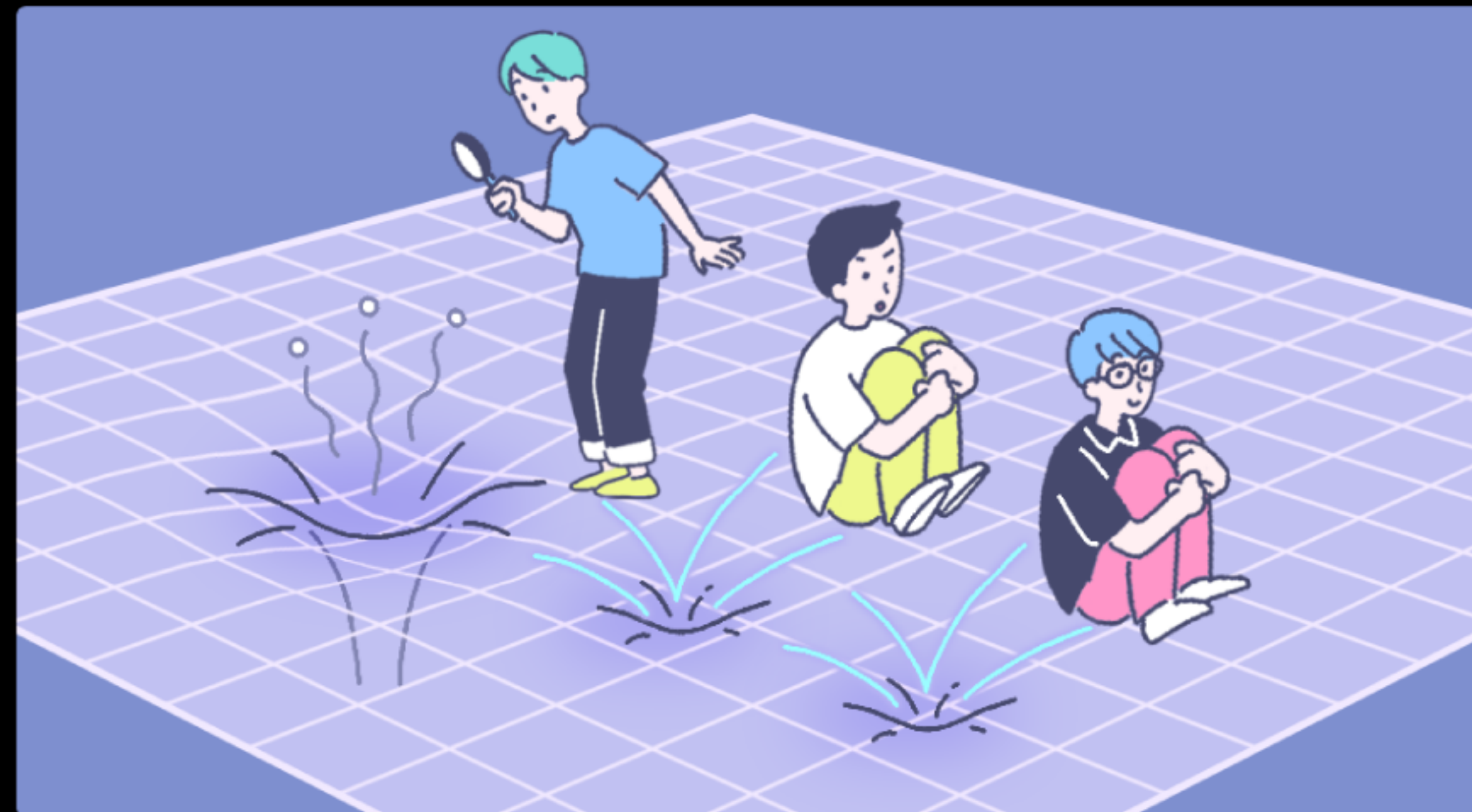
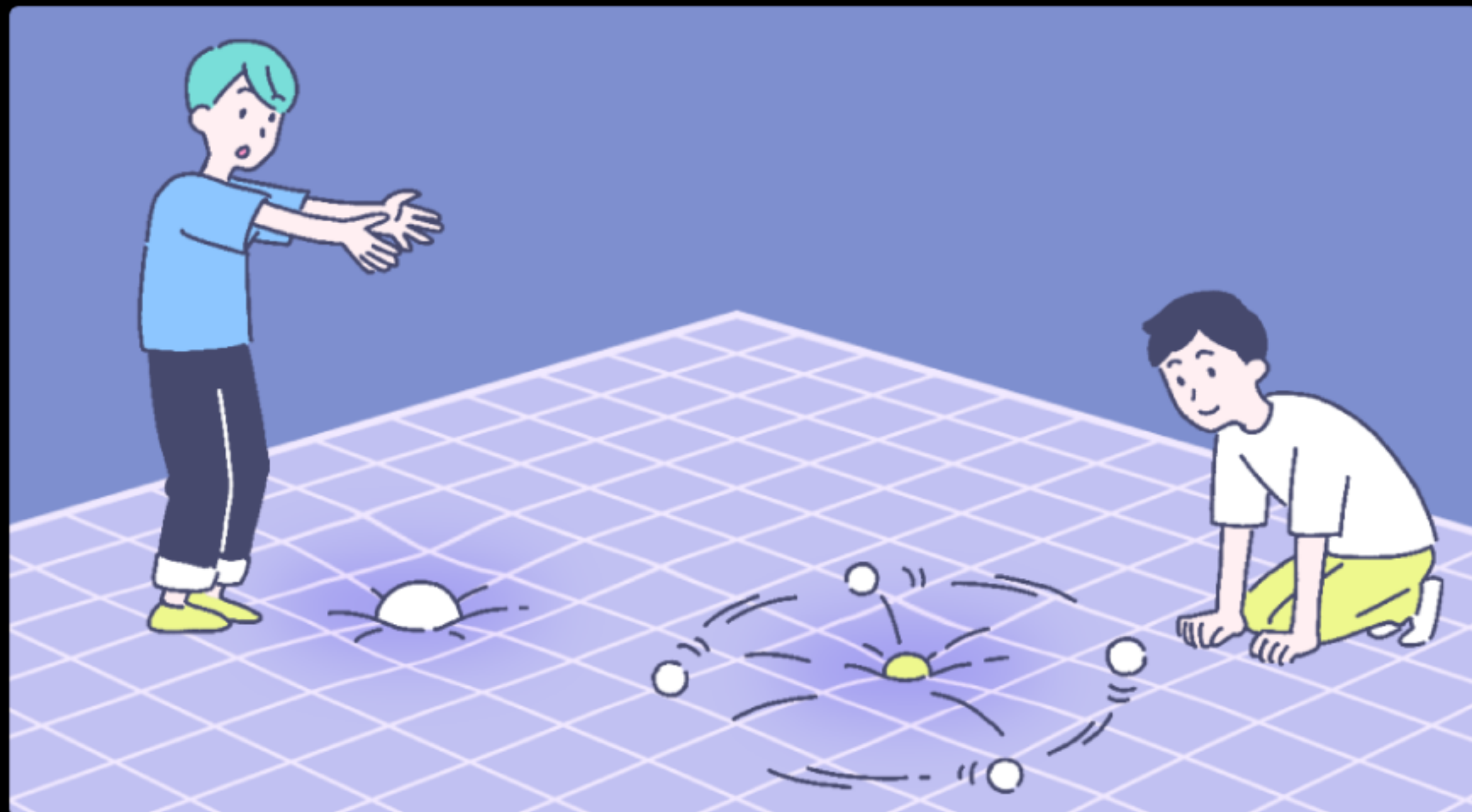
Kareem El-Badry ✉, Hans-Walter Rix, Eliot Quataert, Andrew W Howard, Howard Isaacson, Jim Fuller, Keith Hawkins, Katelyn Breivik, Kaze W K Wong, Antonio C Rodriguez ... Show more

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 518, Issue 1, January 2023, Pages 1057–1085, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3140>

Published: 02 November 2022 Article history ▼

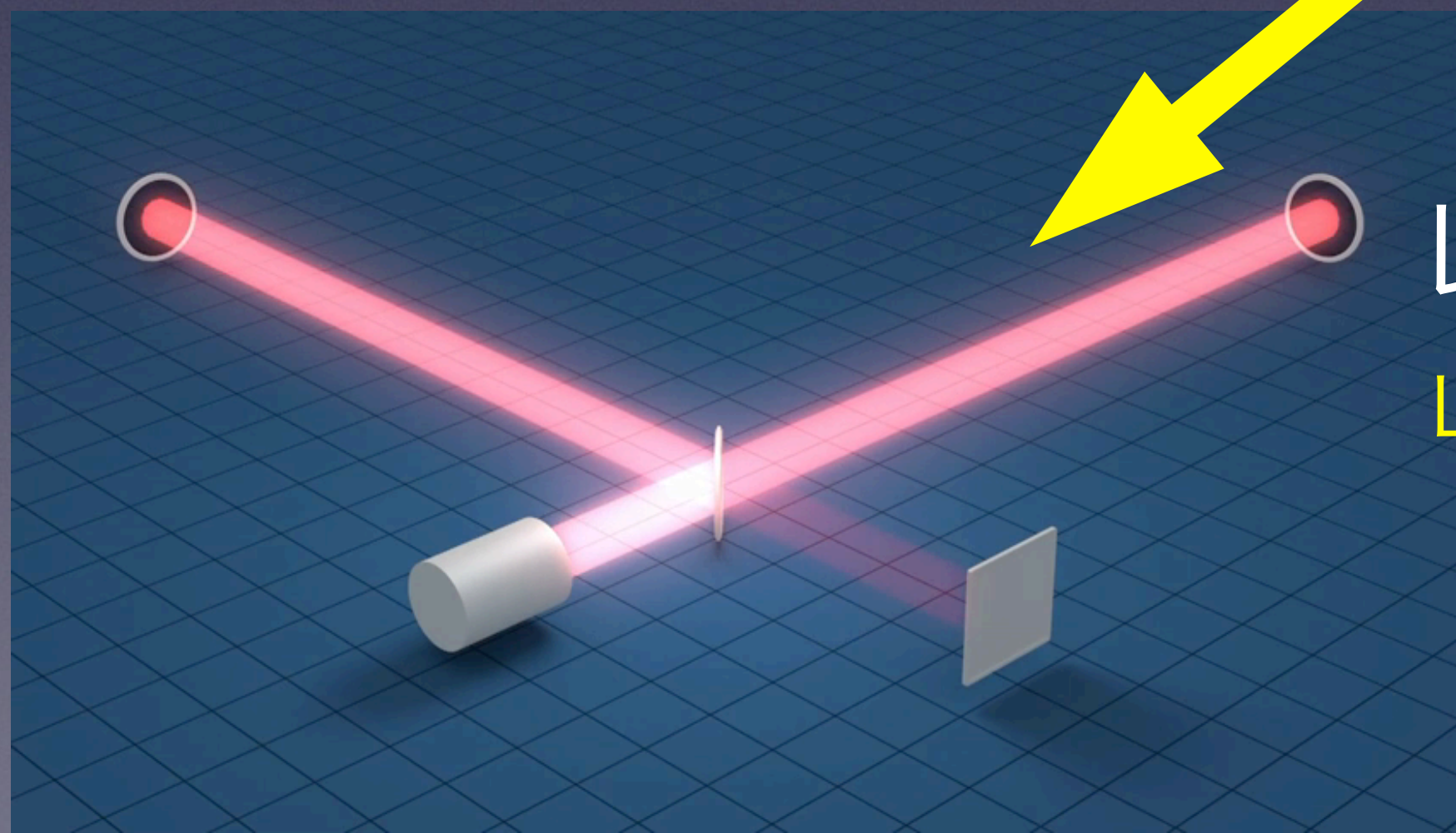
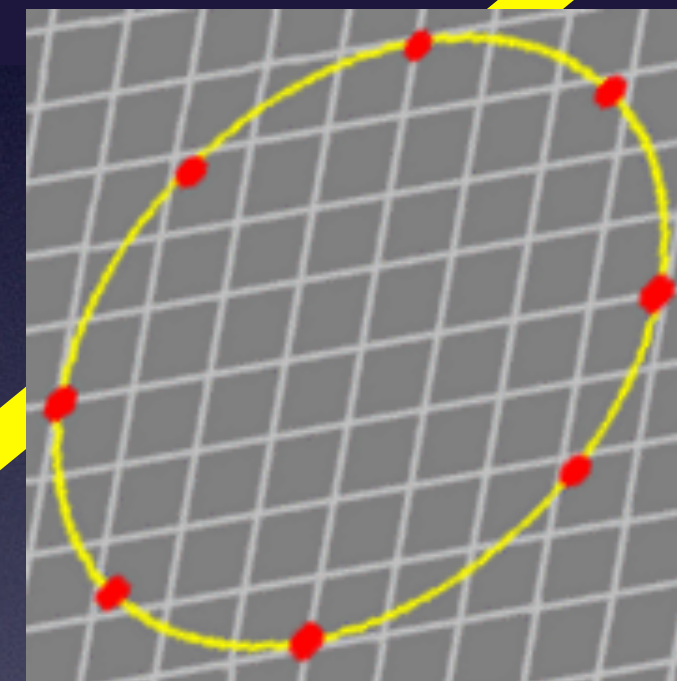
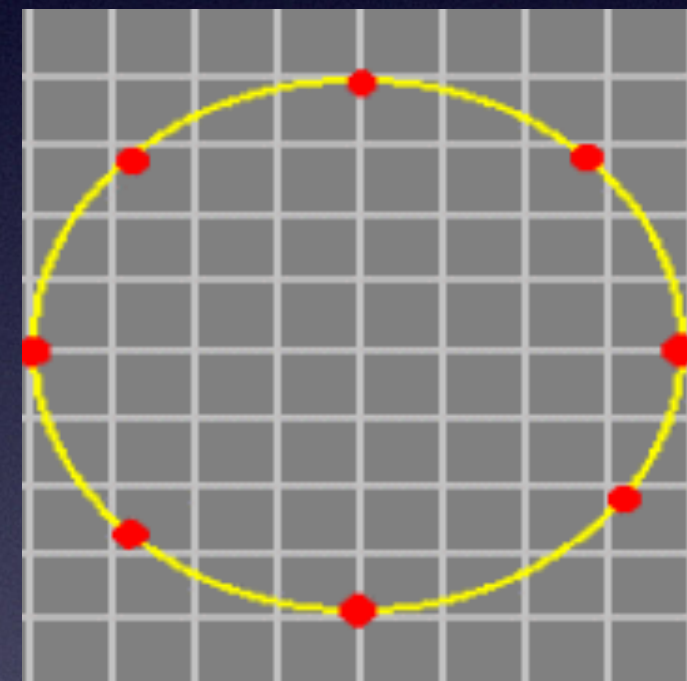
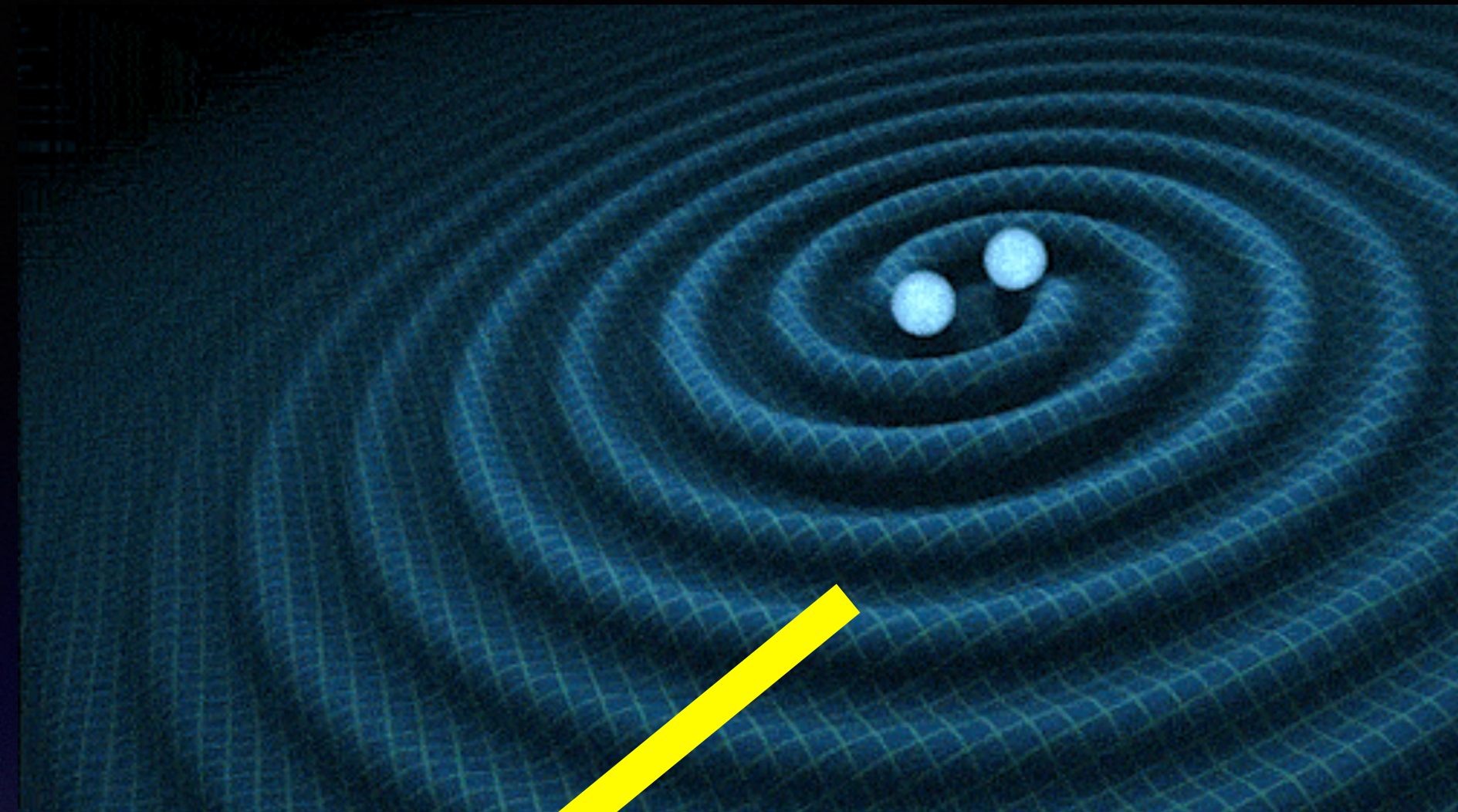
<https://doi.org/10.1093/mnras/stac3140>

http://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/12748_gaia_bh1



重力波の発生と伝播

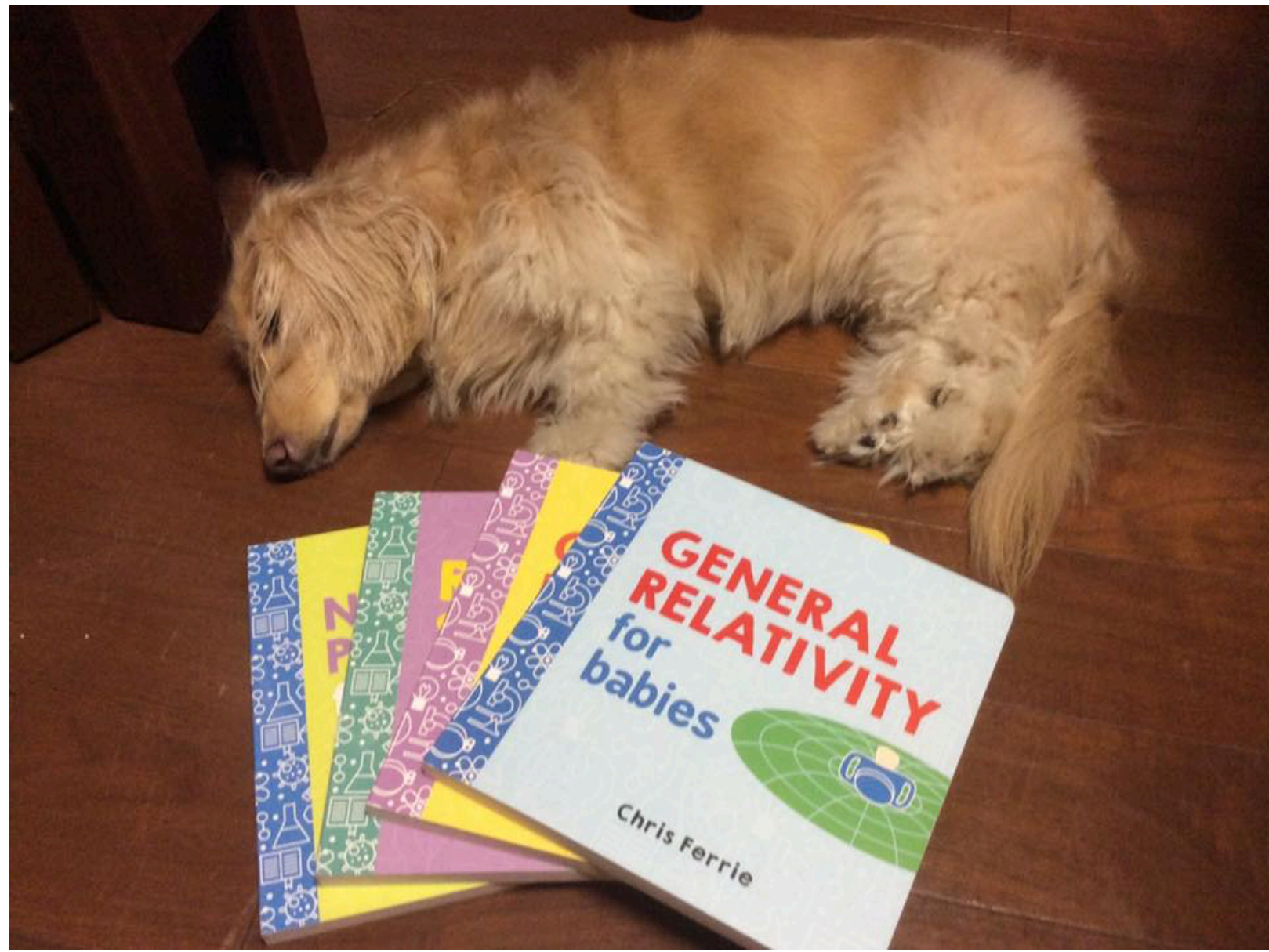
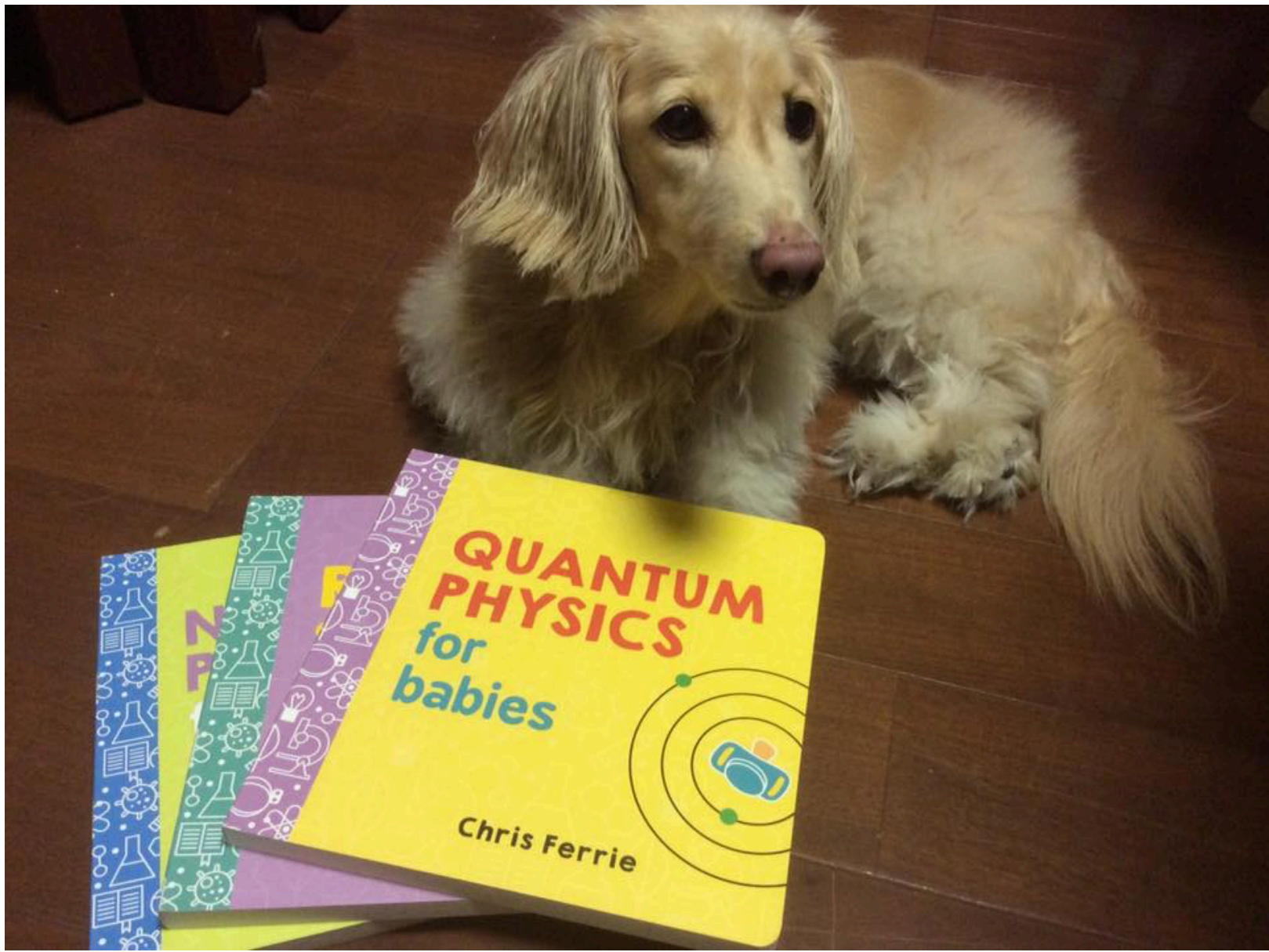
連星ブラックホールや
連星中性子星



レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory



読みやすくて楽しかった。あ。

犬の食餌、これらですか？
もっと写真載せて欲しいです！

最近の赤ちゃんも相対性理論を学べるようになったんだなと知りま

中性子星やブラックホールが合体することを初めて知った。
壮大な現象なのに、ついている効果音がコミカルで
おどろいて。

一般相対性理論は絵本でも、赤ちゃんから理解する
には難しい気がすると思った。

ブラックホールが合体するとは考え $r=2r_s$ で $r=0$ で、驚きまし $r=0$ 。

合体により受ける影響が最大のもは何でしようか。

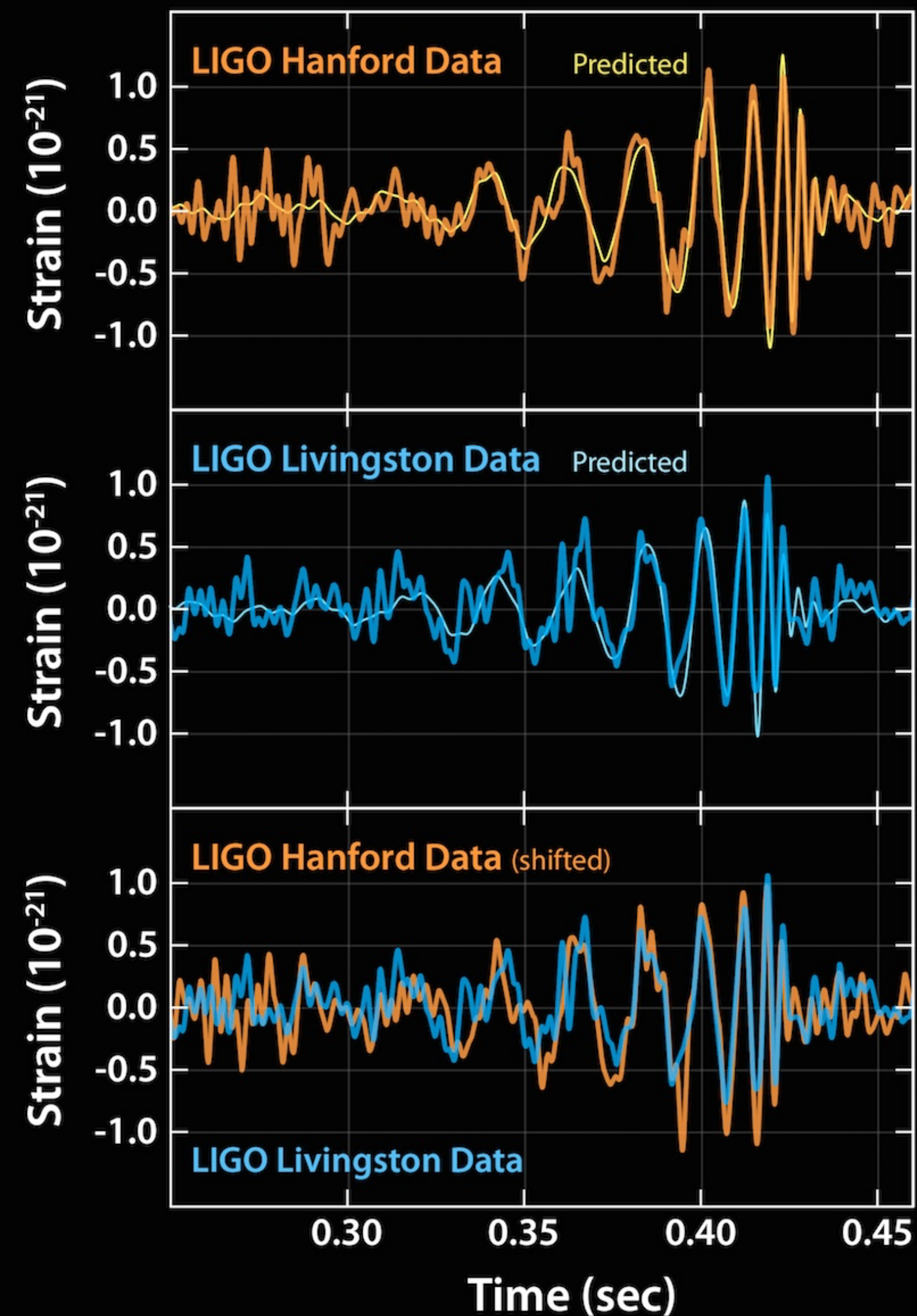
星の軌道はどのように変化をもちらるでしょうか。

シュミレーションがわかりやすいので。

最後の絵本、小エドワードに出会った $r=0$ で $r=0$ で。将軍の子とてに見えた。

一般相対性理論の絵本を見て、
漢字ばかりを見ると難しく感じるが、
絵本だと分かりやすいか。に。
写真のわんちゃんも先生が飼っているわんちゃんですか？





GW150914:FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; SIMULATION OF BLACK HOLE HORIZONS (MIDDLE-TOP), BEST FIT WAVEFORM (MIDDLE-BOTTOM)

first direct detection of gravitational waves (GW) and first direct observation of a black hole binary

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz	~10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	1×10^{-21}
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	± 0.002 fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 Mpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.054 to 0.136	peak speed of BHs	~ 0.6 c
signal-to-noise ratio	24	peak GW luminosity	3.6×10^{56} erg s ⁻¹
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M _⊙
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses M _⊙		remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, 3.5×10^5 km ²
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< 1.2×10^{-22} eV
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc ⁻³ yr ⁻¹
mass ratio	0.6 to 1	online trigger latency	~ 3 min
primary BH spin	< 0.7	# offline analysis pipelines	5
secondary BH spin	< 0.9	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
remnant BH spin	0.57 to 0.72	papers on Feb 11, 2016	13
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
likely sky position	Southern Hemisphere		
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		

Detector noise introduces errors in measurement. Parameter ranges correspond to 90% credible bounds.
Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear= 9.46×10^{12} km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= 10^3 Mpc, fm=femtometer= 10^{-15} m, M_⊙=1 solar mass= 2×10^{30} kg

前回のミニッツペーパーから

今日の講義で特にブラックホールとブラックホールの合体が特に印象に残りました。合体の瞬間は光るのでしょうか。

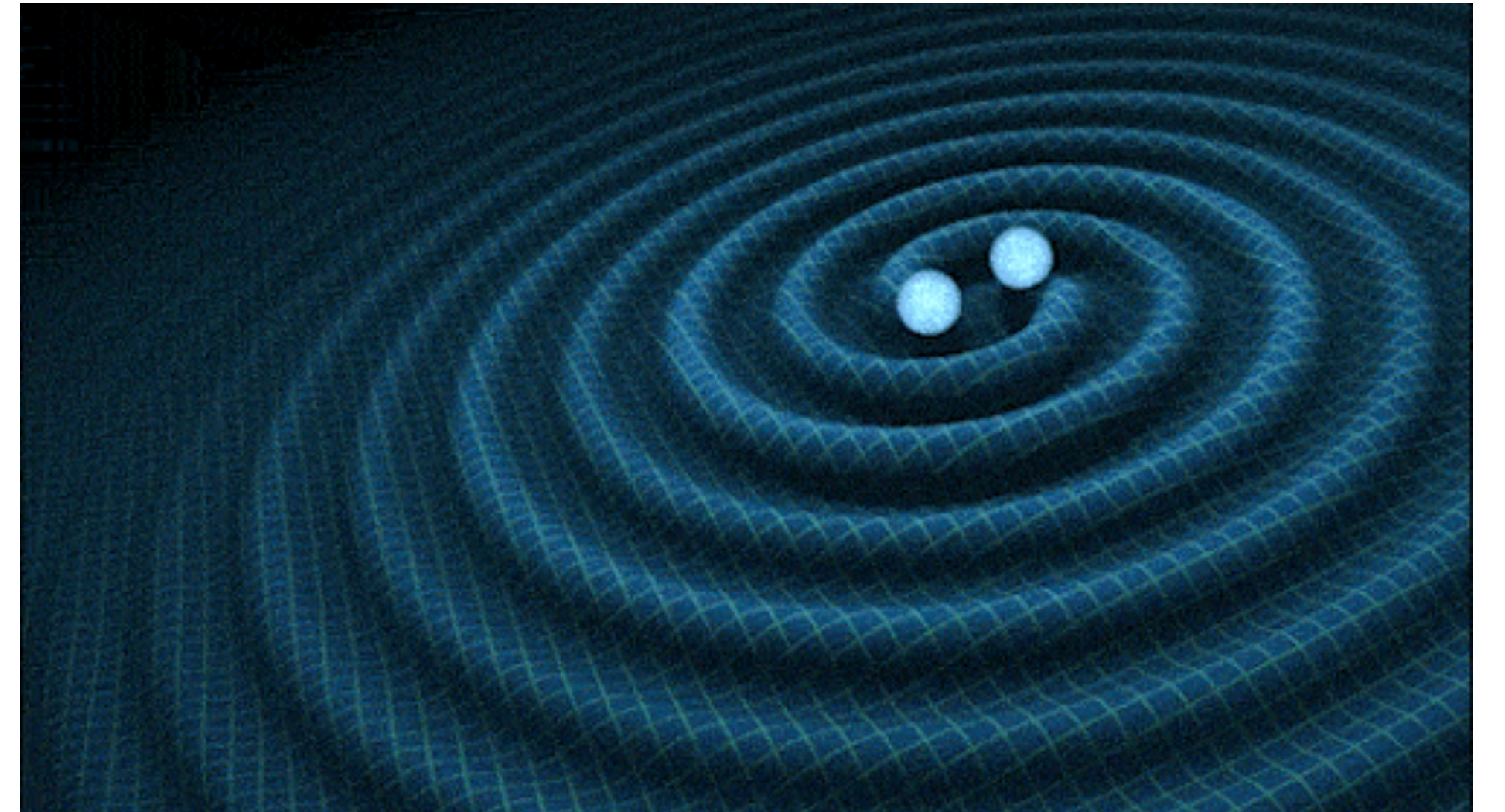
ブラックホールは合体しても光らないようです

いまだに相対性理論と特殊相対性理論をあまり分かっていない
ブラックホールは合体するし、銀河も合体するのだ。星同士も合体する
のは何故だろうか。

恒星どうしより、ブラックホールどうし、あるいは中性子星どうしの合体が多いのは、重力が強いためと考えられます。

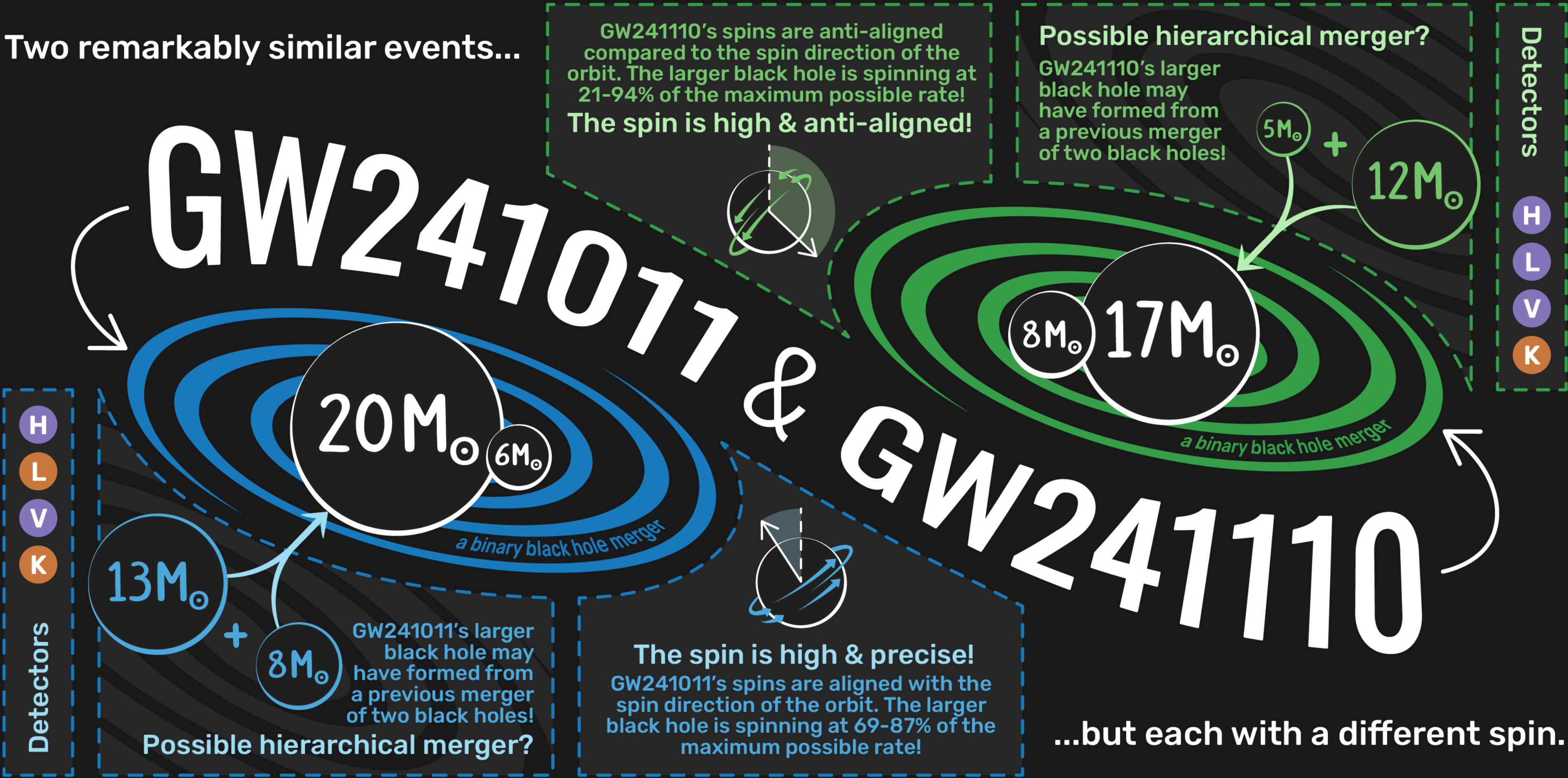
ブラックホール同士は合体することを知りました。太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して62倍になったと授業スライドがありました。合体し続けにいくと太陽の何倍のブラックホールになるんだろうと気になりました。

ブラックホールの合体の2世代目が最近観測されました。



GW241011とGW241110: 2世代目の合体か

Two remarkably similar events...



...but each with a different spin.

● Online ● Offline
H = LIGO Hanford L = LIGO Livingston V = Virgo K = KAGRA

@astronerdika
[INSERT TRANSLATOR NAME HERE] + LVK COLLABORATION

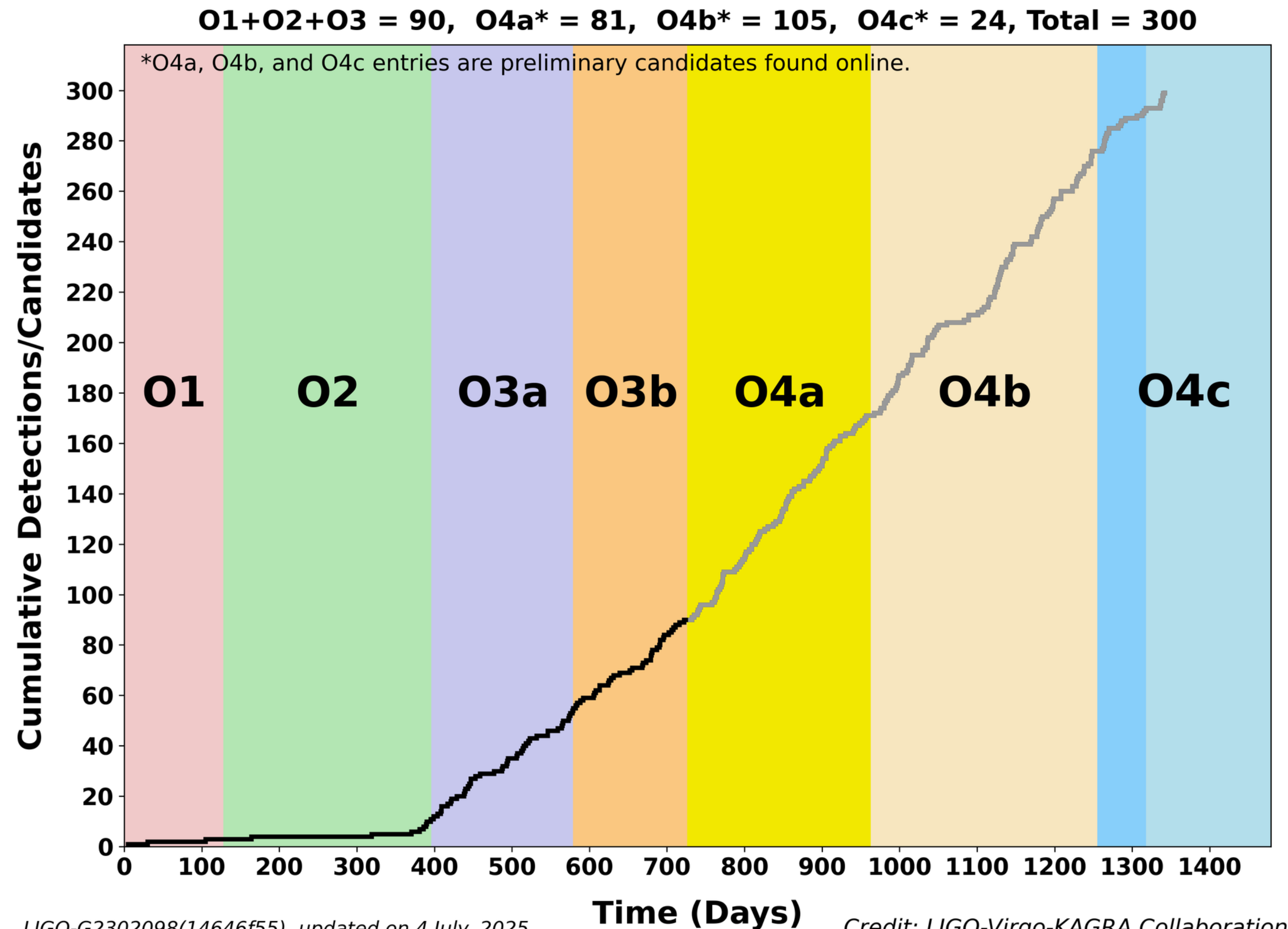
$M_{\odot}$ = Mass of the Sun
GW = Gravitational Wave

観測史上最大質量の連星ブラックホール合体を論文発表



LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、これまでの観測で最大質量となる連星ブラックホール合体からの重力波観測を報告しました。上図は、プレスリリースに使われたものです。 https://ligo.org/wp-content/uploads/2025/07/GW231123_Japanese.pdf

300個目の重力波検出を報告



LIGO-G2302098(14646f55), updated on 4 July, 2025

Credit: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration

LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、10年前に初めての重力波観測をして以来、総計300個目の重力波観測を世界中の天文台に通知しました。

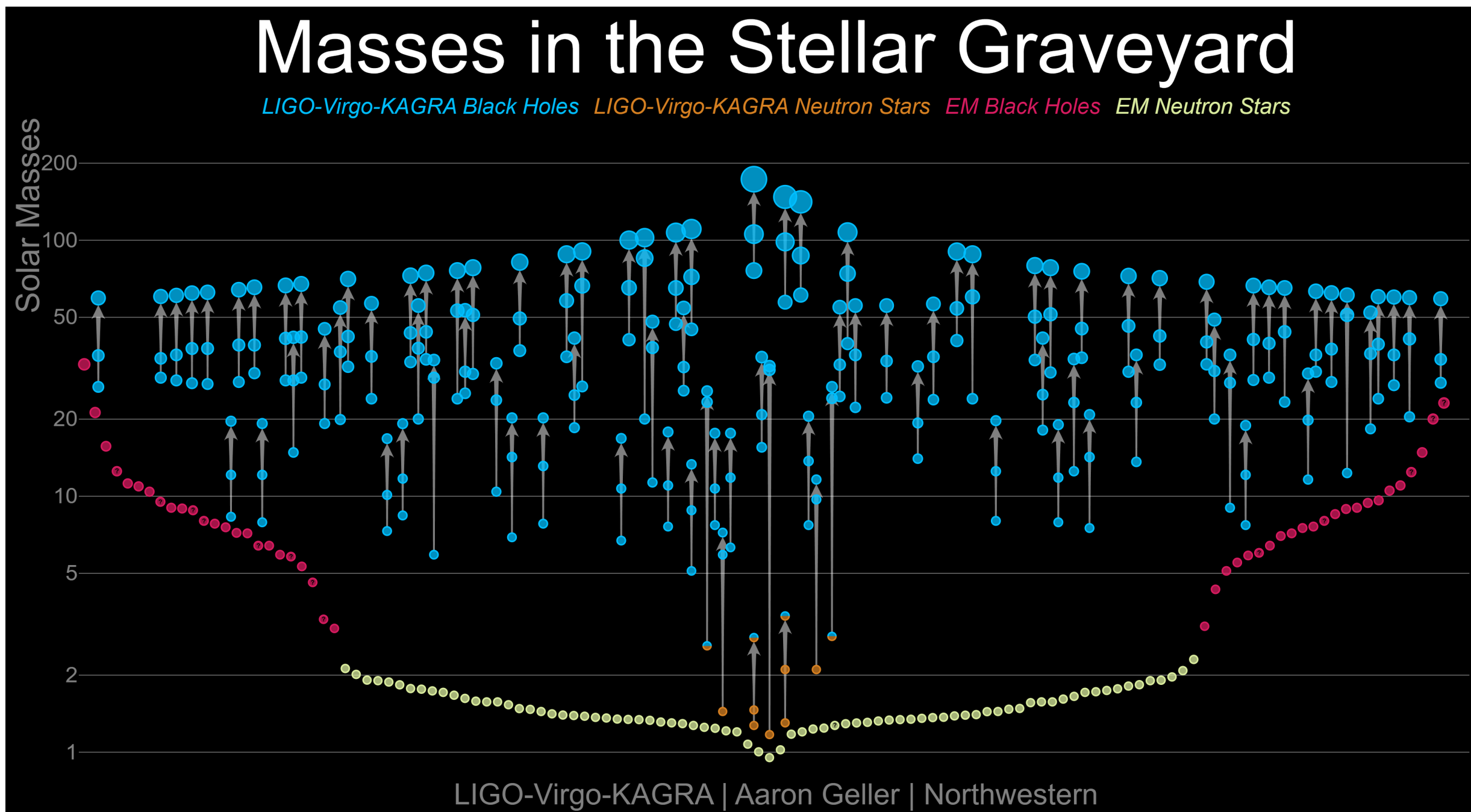
300個目の報告は、S250704abという名前で、連星ブラックホール合体の可能性82%、ブラックホールと中性子星の連星合体の可能性18%と速報されました。現在、詳しい解析が続いています。

左図は、観測運転日数を横軸に、累積報告数を縦軸にして表した図で、観測運転期間（第1期をO1、第2期をO2などとする）ごとに観測する頻度が上がっていることがわかります。干渉計の調整をして観測感度を向上させているためです。

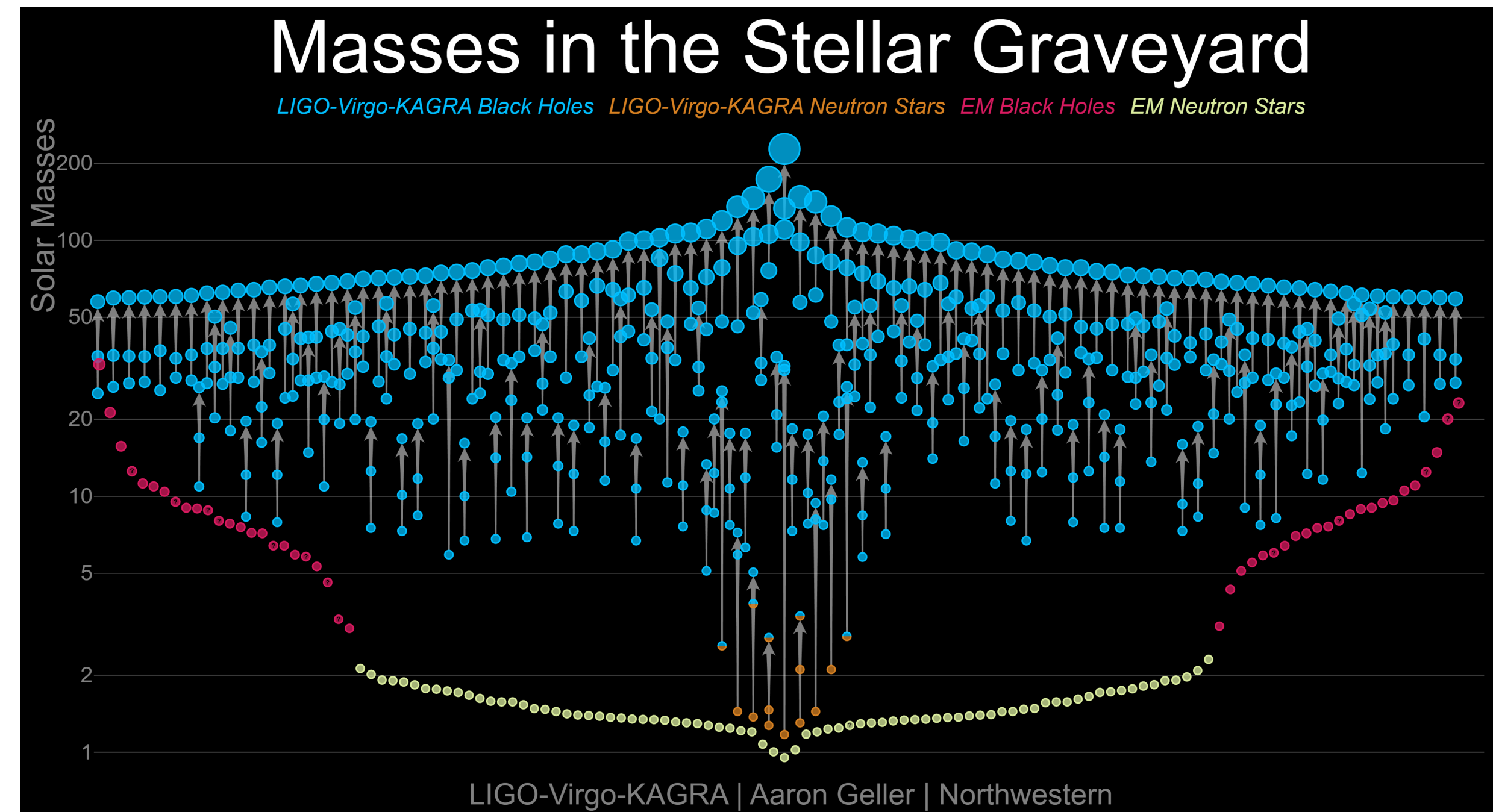
<https://gracedb.ligo.org/superevents/S250704ab/view/>

「突発性重力波カタログ4」 発表 干渉計データを公開

O3までの観測結果



O4aまでの観測結果

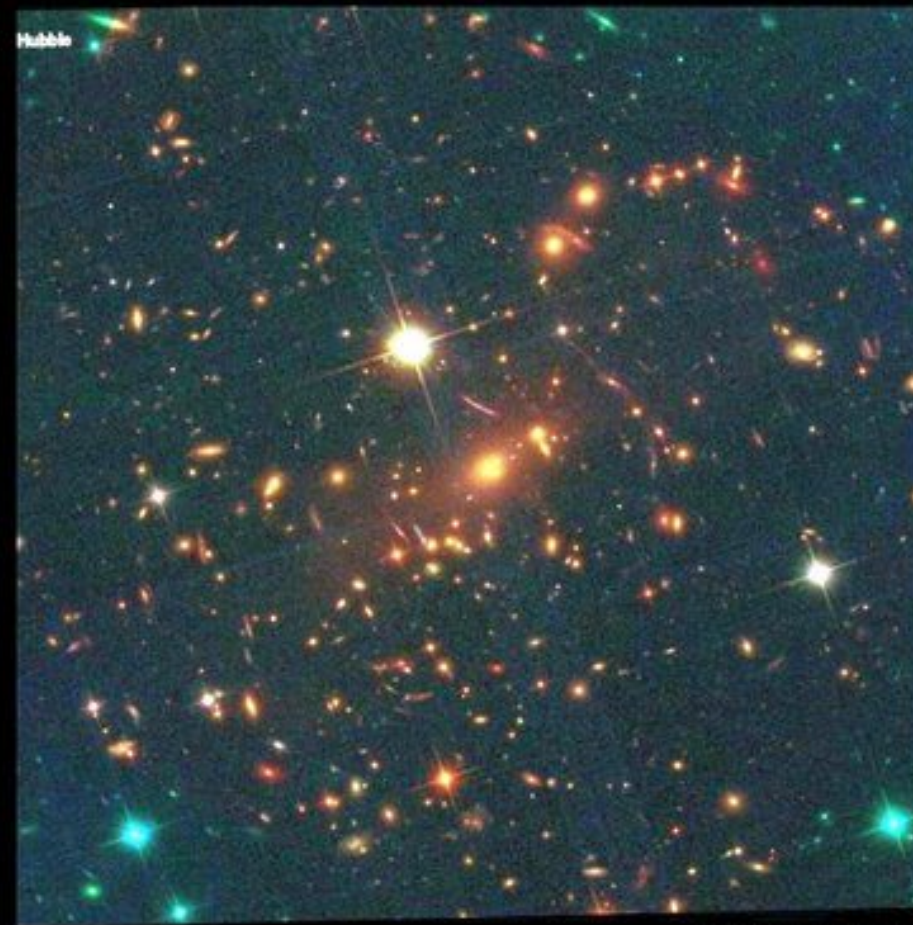


連星合体の観測結果を質量（太陽の何倍か）を基準にして一覧にしたものです。青色の丸印が各ブラックホールに相当し、オレンジ色は中性子星に相当します。2つが合体してより大きな質量のブラックホールになったことを示します。赤丸は重力波以外で知られているブラックホール、黄色丸は重力波以外で知られている中性子星です。横軸は対称になるように並べたもので意味はありません。

重力波の初観測から10年, 非常に明確なGW250114を報告

A New Perspective on the Universe

Hubble Space Telescope (2017)



NASA, ESA, CSA, and STScI

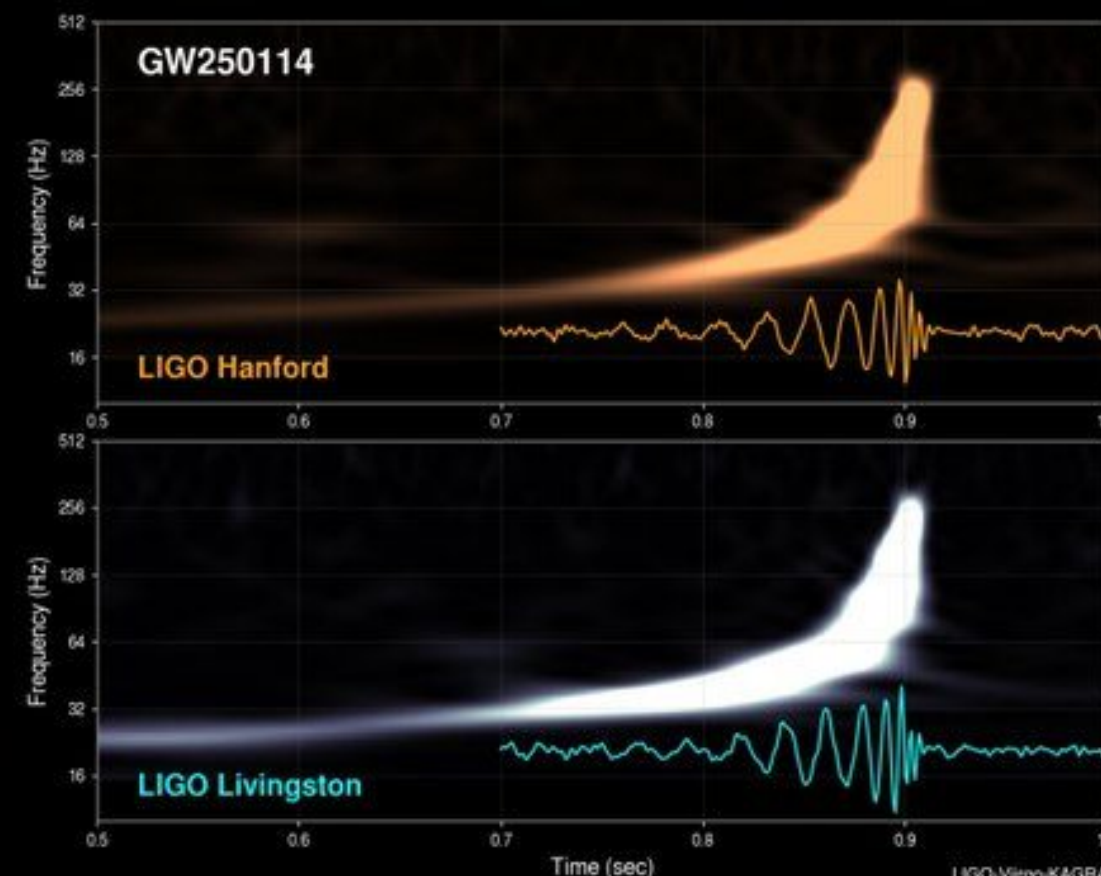
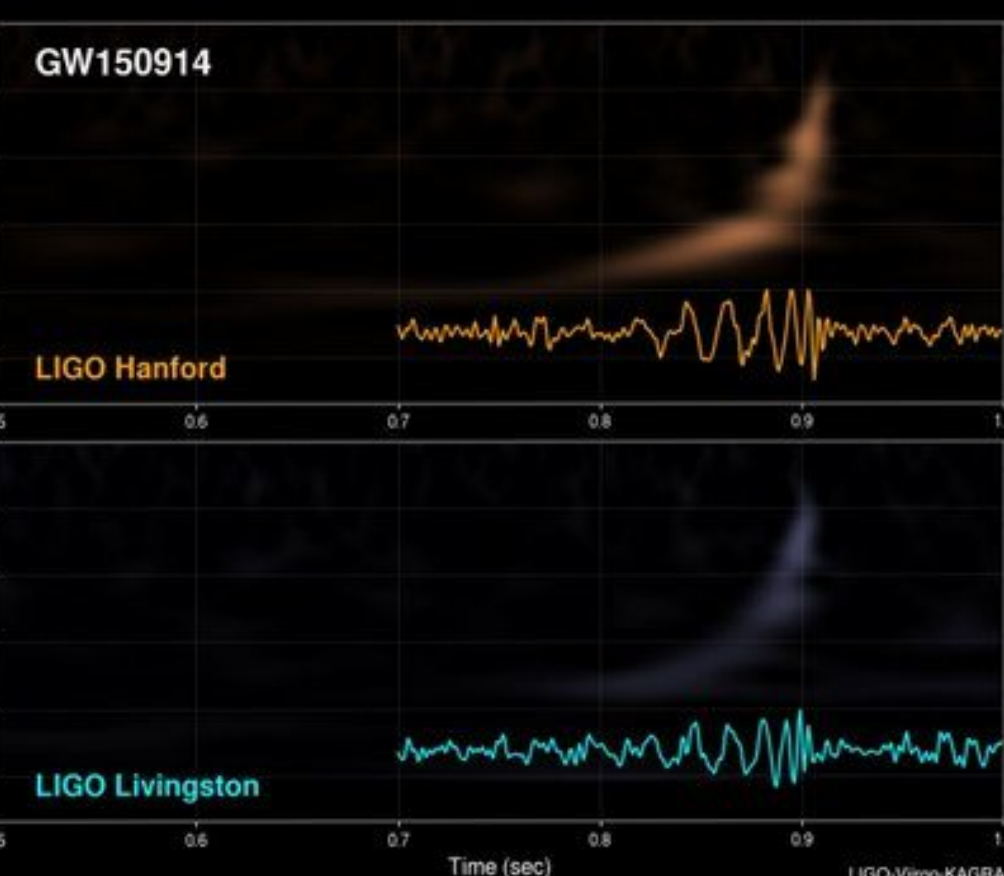
James Webb Space Telescope (2022)



NASA, ESA, CSA, and STScI

LIGO - First Observing Run (2015)

LIGO - Fourth Observing Run (2025)



重力波がはじめて観測されたのは, 2015年9月14日のことでした. GW150914と名付けられた重力波は, 連星ブラックホールの合体が存在することを初めて示した現象でもありました. LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは, 10周年となるのを記念して, 今年1月に発見された, 非常に明確に捉えられた重力波GW250114の現象を報告しました.

下の図は, GW150914と, GW250114の重力波の波形とスペクトログラム(横軸時間, 縦軸周波数)です. 色の濃いほどクリアな波形を示します. どちらも同じ程度の質量のブラックホール合体が, 同じような距離で発生したのですが, 10年経った今, 干渉計の感度が向上したことと, ノイズ除去技術の進展によって, 信号対雑音比が3倍近く向上しました. (上の図は, ハッブル望遠鏡の写真とジェームス・ウェブ望遠鏡の写真の比較です. どちらも宇宙空間の望遠鏡から同じ天体を撮影したのですが, 右の方がクリアですね)

明確なGW250114で、一般相対性理論を検証

非常に明瞭な重力波として観測されたGW250114を用いて、LIGO-Virgo-KAGRAグループは、2つの検証結果を報告しました。

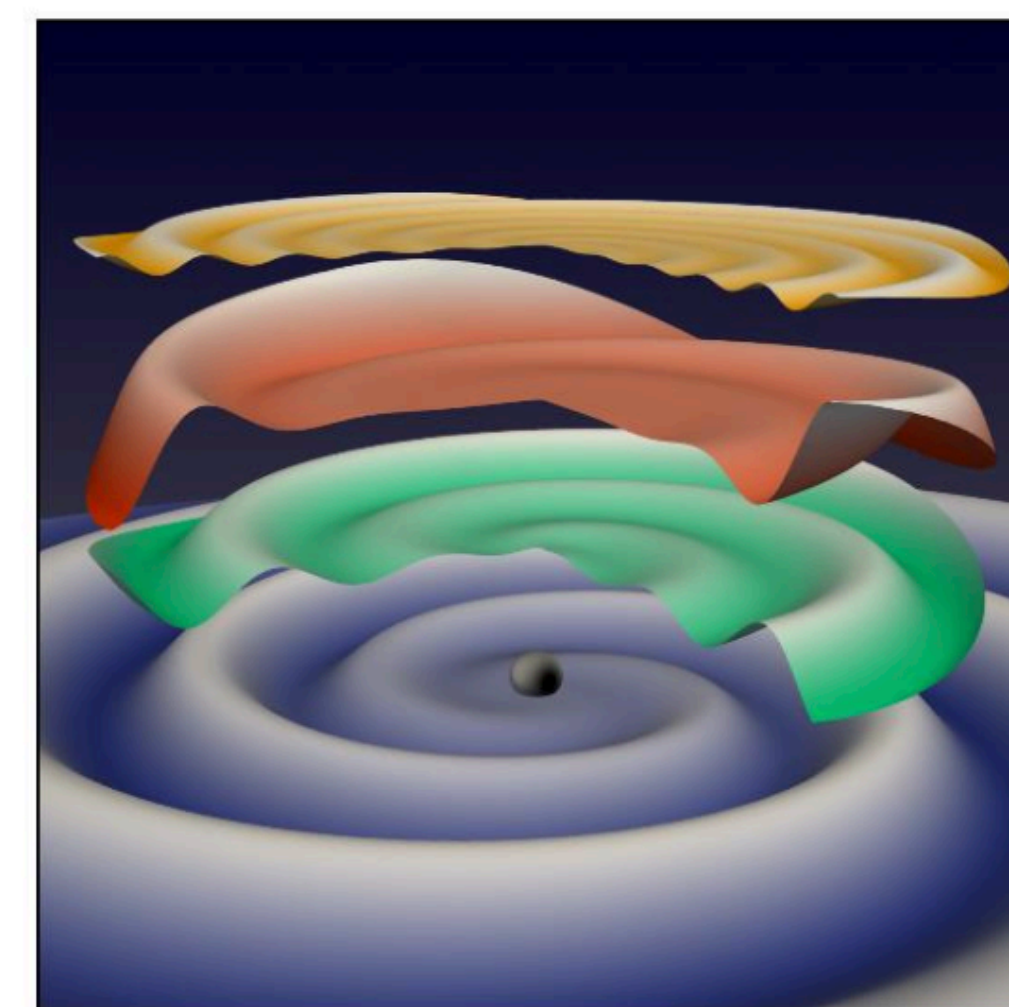
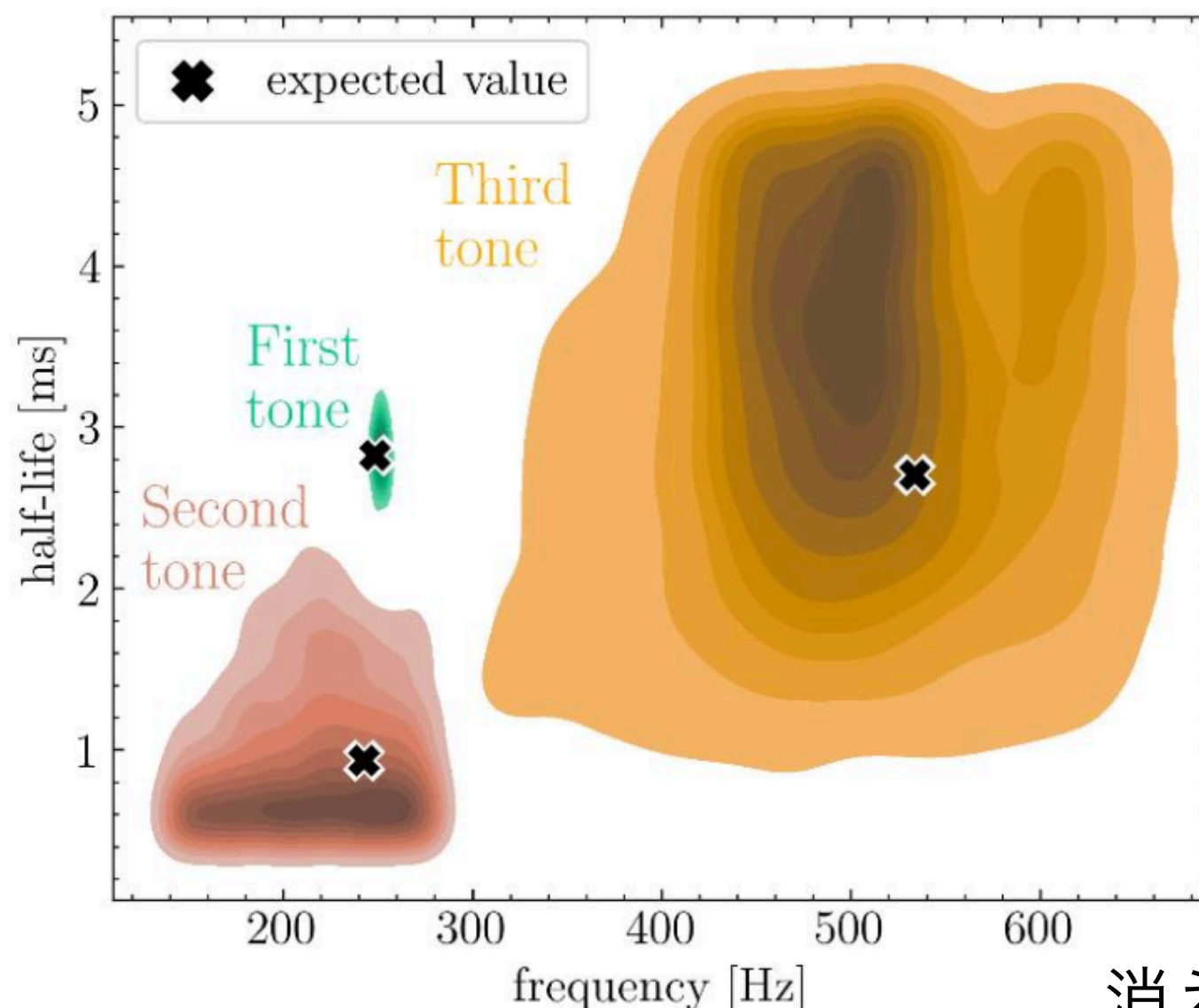
1つは、ブラックホールの表面積はエントロピーと解釈できる、とするホーキングとベッケンシュタインの理論の検証です。何でも飲み込むブラックホールは、単調に増加するエントロピーと類似して理解されますが、実際に2つのブラックホールの合体前後の大きさを算出すると、合体後は単純な和よりも大きくなっていることが確かめられました。

もう1つは、合体直後の重力波が予想されるモードの重ね合わせになっていた、ということです。ブラックホールの合体後には、急速に減衰する重力波になります。鐘の響きが次第に収まっていく状況です。ブラックホールの質量と回転の大きさから、相対性理論を使ってどのような振動数の重力波が、どのような減衰時間で見られるかが予想されますが、今回はじめて3つのモードが観測され、それらが理論予測と一致していることが示されました（下図左）。

GW250114 検出報告 日本語解説



GW250114 相対性理論検証報告 日本語解説



消えゆく重力波を3つの重ね合わせで示した図

Sの科学 Yの科学

Sの科学

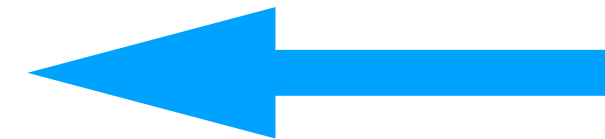
physic**s** 物理
mathematic**s** 数学
statistic**s** 統計学
genetic**s** 遺伝学

Yの科学

astronom**y** 天文学
econom**y** 経済学
biolog**y** 生物学
archaeolog**y** 考古学
anthropolog**y** 人類学
sociolog**y** 社会学

体系化の学問

対象物の性質を理論で説明



発見の学問

対象物を分類し記載

相対性理論

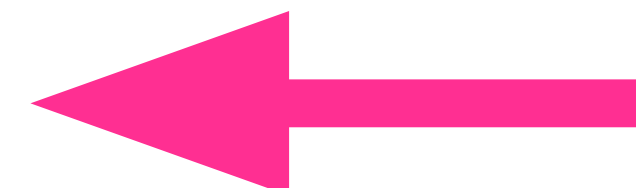


ブラックホール

膨張宇宙

重力波

宇宙物理学



2021年11月 重力波カタログ3 発表

<https://www.ligo.org/science/Publication-O3bCatalog/index.php>



LIGO-Virgo-KAGRA Science Summary (2021 年 11 月 7 日)

<https://www.ligo.org/science/outreach.php>

GWTC-3, 重力波イベントのカタログ第3版

はじめに

GWTC-3 (突発的重力波カタログ, Gravitational-Wave Transient Catalog-3) は, [ライゴ \(LIGO\)](#), [ヴィルゴ \(Virgo\)](#), および [KAGRA \(かぐら\)](#) から提供される, 3 番目の突発的重力波カタログです。GWTC-3 は, 2019 年 11 月から 2020 年 3 月まで続いた第 3 期観測期間の後半 (O3b) で検出された重力波イベントをこれまでのカタログに加えて更新したものです。その結果として, GWTC-3 は, 現在までに観測されたイベントをすべて集めた最大重力波カタログです。

まずは, これまでの重力波カタログの復習からはじめましょう。

- [GWTC-1](#) は, 第 1 期と第 2 期の観測期間 (O1 と O2) で検出された 11 個のイベントを含んだカタログでした。

- [GWTC-2](#) は, O1, O2, と第 3 期前半 (O3a) で得られた全部で 50 個のイベントを含んだカタログでした。

- [GWTC-2.1](#) は, O3a 中に検出されたイベントの定義を見直した結果, 新たに 8 個のイベントを加え, GWTC-2 の 3 個のイベントを除いたカタログでした。ここでは, **天体物理学的な信号である確率が 50% より小さなイベント候補を除くこと**にしました (以下の「重力波の検出」の項を参照してください)。結果として全部で 55 個のイベントを含んだカタログになりました。

- GWTC-3 (今回のカタログ) では, O3b 中に検出された 35 個のイベントを追加し, 現在までに観測されている合計 90 個のイベントを含むカタログになりました。(以下の[図 3](#)は, 膨大に増えてきた検出イベントの質量分布を示しています。)

O3b の最後 (2020 年 4 月) には, KAGRA が LIGO と Virgo に加わりました。KAGRA は, ドイツにある [GEO 600](#) との共同観測を 2 週間実施しました。この観測の結果については, 別に報告します。

これまでの私たちの重力波観測はすべて, **ブラックホール**や**中性子星**からなる連星の合体を波源とするものです。これらを**コンパクト天体**と呼び, 私たちは, これらが巨大な星の残骸であると想定しています。重力波のイベントには, **連星ブラックホール**の合体, **連星中性子星**の合体, **中性子星-ブラックホール**の合体の組み合わせがあります。私たちの検出器の感度がより上昇するにつれて, 重力波イベントの発見効率は劇的に改善されてきました。2015 年に最初の検出を行ってからの, 長い道のりの成果です。

この要約には, データの収集方法, 検出方法, 連星合体イベントの特徴の推定方法, GWTC-3 のハイライト, および将来計画されている観測について書かれています。

重力波検出器

長年にわたる検出器の改良とデータの質の向上, そして解析手法の改善の組み合わせにより, LIGO と Virgo の感度は向上してきました。重力波検出器の感度を測定する方法はいくつかあります。1 つは, 検出器が典型的な連星中性子星の合体を検出できるおおよその距離を推定することです。検出可能な距離が大きいほど,

より遠くの信号を検出できるため, より多くの検出が期待できます。O3 は O3a と O3b の 2 つの観測期間に分かれており, その間の 2019 年 10 月に 1 か月の休止期間がありました。この 1 ヶ月の休止期間中に, 多くのアップグレードと修理が行われました。その中には, LIGO のリビングストン (Livingston) 検出器での**鏡のクリーニング**, LIGO のハンフォード (Hanford) 検出器での真空装置の交換, Virgo での**レーザー強度の増大**な



LIGO-Virgo-KAGRA Science Summary (2021 年 11 月 7 日)

<https://www.ligo.org/science/outreach.php>

LIGO と Virgo の第 3 観測期間のブラックホールと中性子星の母集団の統計

Introduction

ブラックホールや**中性子星**のような, **コンパクト天体**で構成される連星の合体による個々の重力波イベントからは, 固有の重力波源の特性を明らかにすることができません。しかし, これらの連星系が宇宙全体でどのように形成され進化してきたかを明らかにするためには, 多くの重力波イベントを観測して母集団の統計を明らかにすることが必要です。コンパクト天体の質量とスピンの分布を測定することは, 連星系の形成過程を明らかにすることにつながるため, 私たちは, 特に注目しています。

科学者たちは, コンパクト天体の連星系が宇宙で形成される可能性として 2 つの方法に焦点を当ててきました。以下では 2 つの「チャンネル」と呼ぶことにします。**孤立した連星進化**チャンネルでは, 巨大な恒星がつくる連星が共に進化し, それぞれが最終的に爆発して, 中性子星またはブラックホールになったコンパクトな連星が形成された, と考えます。**動的形成**チャンネルでは, **球状星団**や**中心核星団**のような密集した環境で, 中性子星やブラックホールが結合して連星系を形成する, と考えます。これらの形成チャンネルはどちらも, 重力波で検出されるコンパクト天体の観測可能な量に独自の特徴を残します。LIGO によって検出可能な重力波源は, 太陽質量 (記号 $M_{\odot}$ で表します) の 1 倍から 100 倍の範囲を広くカバーすると予想されます。しかし, 天体物理学的プロセスが異なると, この質量の範囲全体で, ブラックホールや中性子星が検出されない領域が生じる可能性があります。たとえば, **X 線**と**重力波**による最近のコンパクト天体の観測では, 3~5 $M_{\odot}$ の範囲に**低い質量ギャップ**が存在し, 最も質量の大きい中性子星と最も質量の小さいブラックホールの間に空白があることが示唆されています。この空白は, **巨大星がどのように死ぬか**を支配する物理的メカニズムによって説明される可能性があります。また, **脈動対不安定型超新星**の理論によって, ブラックホールには, 約 50 から 120 $M_{\odot}$ の範囲で, **高い質量ギャッ**

プがあることが予測されています。この場合, 瀕死の星の外層が放出され, 質量の小さいブラックホールが残るか, 残骸がまったく残りません。したがって, これらのギャップのどちらかまたは両方が存在すれば, 私たちは, 巨大な星がどのように一生を終わらせるかについて学ぶことができます。

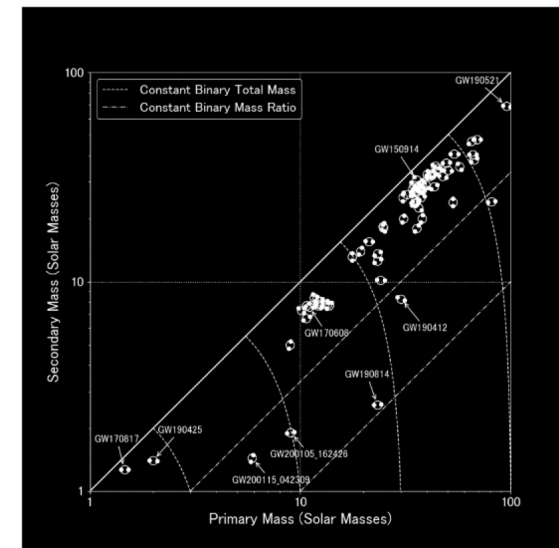
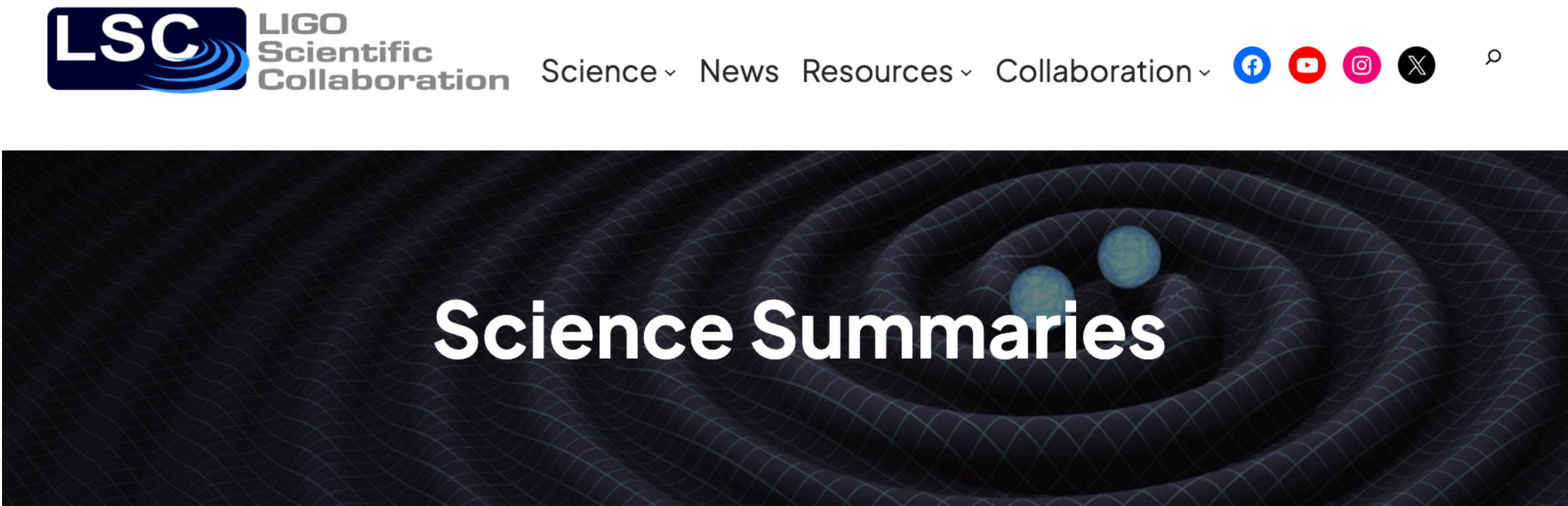


図 1: 私たちの論文で統計解析された連星系の母集団。横軸に大きい方の天体の質量, 縦軸に小さい方の天体の質量を表す。関心を引く個々のイベントをマークしている。また, 連星の質量比と総質量の線も示す。(Credit: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration / IGF&E / Thomas Dent.)

コンパクト連星系の形成史を解くもう 1 つの重要な特徴は, 構成天体の自転 (スピン) 軸の公転軌道軸に対する方向です。たとえば, 地球が, 太陽の周りの公転軸に対して, 自転軸をわずかに傾けていることが, 季節の原因になっています。孤立して形成されたコンパクト連星では, 通常自転軸が軌道の公転軸と同じ向きを向いているのに対し, 動的に形成された連星は自転軸がランダムな方向を向いている可能性があります。重力波で調べることができる 3 番目の重要な観測可能な

<https://ligo.org/science-summaries/>



For each of our new research articles, we feature a summary of the paper's key points written for the general public. Simply click on any of the '[PDF]' links for a downloadable file in PDF format. Translations into several languages are also available for some of these summaries. Most recent papers, and their summaries, are written together by the LIGO Scientific Collaboration (LSC), the Virgo Collaboration and the KAGRA Collaboration, forming the LVK collaboration.

Translations are a volunteer effort and different sets of languages are available for each summary. For most summaries, we list any available translations by their ISO 639-1 / ISO 639-2 keys, as listed [here](#). **YOU CAN FIND TRANSLATIONS BY CLICKING ON THE BLACK TRIANGLE NEXT TO EACH SCIENCE SUMMARY ENTRY.**

Jump to: [2025](#) | [2024](#) | [2023](#) | [2022](#) | [2021](#) | [2020](#) | [2019](#) | [2018](#) | [2017](#) | [2016](#) | [2015](#) | [2014](#) | [2013](#) | [2012](#) | [2011](#)

Translations

You can search for the key of your language, in square brackets – for instance [fr] for French – on this page to find all science summaries that have been translated into it.

- **[bla]**: Blackfoot
- **[bn]**: Bengali (Bangla / বাংলা)
- **[ca]**: Catalan (Català)
- **[de]**: German (Deutsch)
- **[el]**: Greek (Ellinika / Ελληνικά)
- **[es]**: Spanish (Español / Castellano)

2025

- ▼ **Searching for elusive ultralight dark matter**
2025-11-07 PDF: [\[en\]](#) [\[ja\]](#) **ja = 日本語**
- ▼ **Probing the Universe for persistent gravitational waves**
2025-10-29 PDF: [\[en\]](#) [\[ja\]](#) **ja = 日本語**
- ▼ **GW241011 and GW241110: A pair of rapidly spinning, unequal mass black hole mergers detected with gravitational waves**
2025-10-28 PDF: [\[en\]](#) [\[ja\]](#) **ja = 日本語**
- ▼ **Can we detect gravitational waves from vector boson clouds?**
2025-09-10 PDF: [\[en\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[pt\]](#) **ja = 日本語**
- ▼ **Black hole spectroscopy and tests of general relativity with GW250114**
2025-09-10 PDF: [\[en\]](#) [\[ca\]](#) [\[es\]](#) [\[gl\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[pt\]](#)
- ▼ **GW250114: Cosmic carillon of chaos**
2025-09-10 PDF: [\[en\]](#) [\[da\]](#) [\[el\]](#) [\[es\]](#) [\[gl\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[pt\]](#) [\[zh-Hant\]](#)
- ▼ **GW230814: A loud gravitational-wave signal detected by LIGO Livingston**
2025-09-09 PDF: [\[en\]](#) [\[es\]](#) [\[hi\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[ta\]](#)
- ▼ **New constraints on the cosmic expansion and general relativity with gravitational waves**
2025-09-08 PDF: [\[en\]](#) [\[ca\]](#) [\[ja\]](#) [\[pt\]](#)

黒い三角形をクリックすると、各言語版での解説リンクが現れます。

重力波 2024-0626 田中・真貝 作成

重力波の生成機構 一般相対性理論によれば，大質量でコンパクトな天体が加速度運動することにより，重力波が発生する．重力波源としては連星の合体や超新星爆発，非球対称な星の高速回転や，宇宙初期に起源をもつ重力波が宇宙空間を伝播していると考えられる．これらのうち，データとの相関解析を可能にする波形予測ができるのは，連星合体からの重力波である．十分に合体前はニュートン力学に相対論補正を加えたポスト・ニュートン展開により，合体前後は数値シミュレーションにより，合体後ブラックホールが生じる場合にはブラックホール時空の摂動によっても波形モデルが得られる．これらのモデルと重力波干渉計で得られる信号の相関をとることで，連星ブラックホール（以下 BBH）や連星中性子星（BNS），および中性子星・ブラックホール連星（NSBH）の合体現象による重力波の検出、および、パラメータ推定が 2015 年以来可能になった．

重力波の観測 これまでに，米欧のレーザー干渉計 LIGO, Virgo によって，O3b と呼ばれる観測期間終了までに，BBH 波源の重力波が 85 例，BNS 波源が 2 例，NSBH 波源が 2 例，片方が BH で相方が不明なもの 1 例 の合計 90 例が報告されている．日本の KAGRA（かぐら）も O3b の最後に共同観測に入った．O4 観測が，2023 年 5 月から **2 年間**の予定で行われている．

重力波イベントは，観測された年月日を用いて，GW150914 の形で命名される．O3a 期より，時分秒を加えた名称が正式となった．重力波イベントは速報体制が取られ，多波長電磁波追観測が可能になっているが，これまでに波源が特定されたのは GW170817 のみである．

重力波レーザー干渉計の位置と腕の向き (例えば N 36° W は，北から西方に 36° の向きを指す.)						
干渉計	所在地	腕長 (km)	緯度	経度	X-腕	Y-腕
LIGO Hanford	米国	4	46°27′19″ N	119°24′28″ W	N 36° W	W 36° S
LIGO Livingston	米国	4	30 33 46 N	90 46 27 W	W 18° S	S 18° E
Virgo	欧州	3	43 37 53 N	10 30 16 E	N 19° E	W 19° N
KAGRA	日本	3	36 24 36 N	137 18 36 E	E 28.3° N	N 28.3° W

観測期間 (Observing Run)						
観測期	Advanced LIGO		Advanced Virgo		KAGRA	
	年 月 日	年 月 日	年 月 日	年 月 日	年 月 日	年 月 日
O1	2015 9 12	–2016 1 19	–		–	
O2	2016 11 30	–2017 8 25	2017 8 1		–2017 8 25	
O3a	2019 4 1	–2019 9 30	同左		–	
O3b	2019 11 1	–2020 3 27	同左		(O3GK) 2020 4 7	
O4a	2023 5 26	– 2024 1 16	–		2023 5 26 – 6 25	
O4b	2024 4 3	– 2025 6 9 (予定)	同左		2024 年 12 月に再開	

観測された中で特筆すべきイベント 突発的重力波カタログ 3（GWTC3）として 2021 年 11 月に発表されたものが最新の重力波イベントカタログである．

GW150914 最初に報告された重力波直接観測イベント．BBH の存在を明らかにし，太陽質量 ($M_{\odot}$) の 30 倍以上の BH の存在を初めて確認した．GW170817 最初に報告された BNS イベント．直後に多くの追観測がなされ，マルチ・メッセンジャー天文学の初めての成功例となった．重力波波形から得られた中性子星の状態方程式に対する制限は核密度 $\rho_{\text{nuc}} = 2.8 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$ の 2 倍の密度における圧力として $2\rho_{\text{nuc}} = 3.5^{+2.7}_{-1.7} \times 10^{34} \text{dyn/cm}^2$ (90% 信頼区間) である． γ 線が重力波のピークと 1.7 秒差で到着したことから重力波伝播速度の光速からのずれの割合は 1×10^{-15} 以下と制限された．また，可視・赤外における追観測から鉄以

上の重元素合成の形跡が見られ， r -過程元素合成の重要なチャンネルになっていることを示唆している．GW190412 明らかに質量比の大きな BBH からの重力波で，重力波の高次モードの検出が試みられた．GW190425 2 番目に発見された BNS．GW190521 総質量が最大の BBH で，合体後の質量が $150M_{\odot}$ 程度と考えられる．いわゆる中間質量 BH の領域の候補天体の初の発見となった．BBH の合体の第 2 世代の合体とも考えられている．GW190814 星形成のシナリオでは不可能とされる $2\text{--}5M_{\odot}$ の質量領域（**質量ギャップ**）のコンパクト天体からの重力波と考えられる．GW200115: 初めて高い精度で NSBH 合体として報告されたイベント．**GW230529_181500** **LIGO Livingston** **でのみ検出されたが，1.2–2.0 $M_{\odot}$ と 2.5–4.5 $M_{\odot}$ の連星合体で，一方は NS の質量領域だが他方は質量ギャップ領域であることから，O4a 期のイベントとして速報された．**

報告されたおもな重力波（**2024 年 6 月現在**）
連星の質量を M_1, M_2 としたときの，チャープ質量 $M_c = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$ ，質量比（中央値の比） M_2/M_1 ，有効スピン χ_{eff} ，最終的に形成された BH の質量 M_{final} (NS を含む場合は全質量 $M_{\text{全}} = M_1 + M_2$)，距離，波源特定精度（平方度） $(\Delta\theta)^2$ ，シグナル・ノイズ比 (SNR) を示す．幅のある量は 90% の信頼区間．(種類ごとに日付順．BBH については，GW190521 と SNR が 17.3 より大きいもののみ．)

イベント (BBH)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{final}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW150914	$28.6^{+1.7}_{-1.5}$	0.86	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.4}_{-3.0}$	440^{+150}_{-170}	250	26
GW170814	$24.1^{+1.4}_{-1.1}$	0.82	$0.07^{+0.12}_{-0.12}$	$53.2^{+2.2}_{-2.4}$	600^{+150}_{-220}	92	17.7
GW190412	$13.3^{+0.5}_{-0.5}$	0.32	$0.21^{+0.12}_{-0.13}$	$35.6^{+4.8}_{-4.5}$	720^{+240}_{-220}	240	19.8
GW190521	$63.3^{+19.6}_{-14.6}$	0.58	$-0.14^{+0.5}_{-0.45}$	$147.4^{+40.0}_{-16.0}$	3310^{+2790}_{-1800}	1000	14.3
GW190521_074359	$32.8^{+3.2}_{-2.8}$	0.77	$0.1^{+0.13}_{-0.13}$	$72.6^{+6.5}_{-5.4}$	1080^{+580}_{-530}	470	25.9
GW190814	$6.11^{+0.06}_{-0.05}$	0.11	$0^{+0.07}_{-0.07}$	$25.7^{+1.3}_{-1.3}$	230^{+40}_{-50}	22	25.3
GW191109_010717	$47.5^{+9.6}_{-7.5}$	0.72	$0\text{--}0.29^{+0.42}_{-0.31}$	$107^{+18.0}_{-15.0}$	1290^{+1130}_{-650}	1600	17.3
GW191204_171526	$8.56^{+0.41}_{-0.28}$	0.72	$0.16^{+0.08}_{-0.05}$	$19.18^{+1.71}_{-0.93}$	640^{+200}_{-260}	350	17.4
GW191216_213338	$8.33^{+0.22}_{-0.19}$	0.64	$0.11^{+0.13}_{-0.06}$	$18.87^{+2.81}_{-0.93}$	340^{+120}_{-130}	490	18.6
GW200112_155838	$27.4^{+2.6}_{-2.1}$	0.79	$0.06^{+0.15}_{-0.15}$	$60.8^{+5.3}_{-4.3}$	1250^{+430}_{-460}	4300	19.8
GW200129_065458	$27.2^{+2.1}_{-2.3}$	0.84	$0.11^{+0.11}_{-0.16}$	$60.2^{+4.1}_{-3.2}$	890^{+260}_{-370}	130	26.8
GW200224_222234	$31.1^{+3.3}_{-2.7}$	0.82	$0.1^{+0.15}_{-0.16}$	$68.7^{+6.7}_{-4.8}$	1710^{+500}_{-650}	50.0	20
GW200311_115853	$26.6^{+2.4}_{-2.0}$	0.81	$-0.02^{+0.16}_{-0.2}$	$59^{+4.8}_{-3.9}$	1170^{+280}_{-400}	35	17.8
イベント (BNS)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{全}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW170817	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	0.87	$0^{+0.02}_{-0.01}$	–	$40^{+7.0}_{-15.0}$	16	33
GW190425	$1.44^{+0.02}_{-0.02}$	0.62	$0.07^{+0.07}_{-0.05}$	$3.4^{+0.3}_{-0.1}$	150^{+80}_{-60}	8700	12.4
イベント (NSBH)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{全}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW190917_114630	$3.7^{+0.2}_{-0.2}$	0.22	$-0.08^{+0.21}_{-0.43}$	$11.8^{+3.0}_{-2.8}$	720^{+300}_{-310}	2100	8.3
GW200115_042309	$2.43^{+0.05}_{-0.07}$	0.24	$-0.15^{+0.23}_{-0.42}$	$7.4^{+1.7}_{-1.7}$	290^{+150}_{-100}	370	11.3
GW230529_181500	$1.94^{+0.04}_{-0.04}$	0.39	$-0.1^{+0.12}_{-0.17}$	$5.1^{+0.6}_{-0.6}$	201^{+102}_{-96}	–	11.6

得られた科学的成果 連星系については，その合体頻度について，BBH は赤方偏移 $z = 0.2$ 付近において $17.9\text{--}44/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ ，BNS は $10\text{--}1700/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ ，NSBH は $7.8\text{--}140/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ と見積もられている．このほか，背景重力波に対して，宇宙膨張率に対して重力波のエネルギーが寄与する割合として（平坦なエネルギースペクトルを仮定した上で） $\Omega_{\text{GW}} < 6.0 \times 10^{-8}$ の上限が得られている．連続重力波の重力波振幅に対しては，おおよそ 1×10^{-25} 程度（200 Hz まわり）の上限が得られている．また，既知のパルサーからの連続重力波に対しても個々に上限が得られている．

一般相対性理論の検証も行われ，数あるテストすべてで，一般相対性理論から得られる予言と観測されている重力波信号との間に矛盾は生じていない．今後，発見数が増すにつれて連星系の形成シナリオが明らかになることが期待される．将来的には，銀河系形成シナリオや初期宇宙の情報などにも，重力波観測から多くの知見がもたらされるであろう．



2024年11月発売

重力波天文学で何がわかる？

対応する天体の姿

→ 天体物理学

ブラックホールの存在する強い重力場

→ 一般相対性理論の検証

中性子星連星合体のふるまい

→ 原子核の状態方程式

イベント頻度・統計

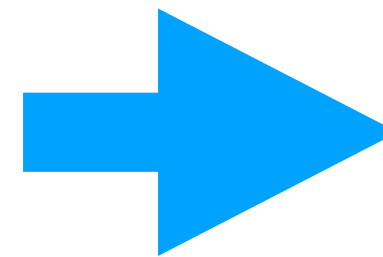
→ 星形成モデル・銀河中心ブラックホール
宇宙論パラメータ

背景重力波の存在

→ 星形成モデル・宇宙初期モデル

わかったこと

重力波は存在する
重力波は観測できる
相対性理論は正しいようだ
連星ブラックホール結構ある
連星中性子星あまりない
連星中性子星合体で元素合成
連星中性子星合体で γ 線バースト



わからないこと

超新星爆発からの重力波？
パルサーからの重力波？
相対性理論はどこまで正しいのか
今後どれだけ発見されるか
今後どれだけ発見されるか
元素合成のメカニズム
 γ 線バーストのメカニズム
ブラックホールはどう形成されたか
連星合体によるブラックホール成長？
原始ブラックホール？
銀河中心の巨大ブラックホール？
未知の重力波源？

重力波観測は, 物理学から天文学へ

重力波天文学で何がわかる？

とんでもないこと？ ➡ 世の中、実は5次元. . . とか

ブレンワールド型 タイムマシン1

～膜宇宙に生じる近道～

ブレンワールド（膜宇宙）モデルによれば、我々の住む4次元空間は高次元の中を漂う膜のようなものである。重力だけが高次元の中を伝わり、他の力や物質は膜に閉じ込められている。膜の上にいるものは、膜以外の世界を知る由もない。地球の表面に住むだけでは地球の丸みを感じることができないように、我々も4次元空間に閉じ込められているのである。

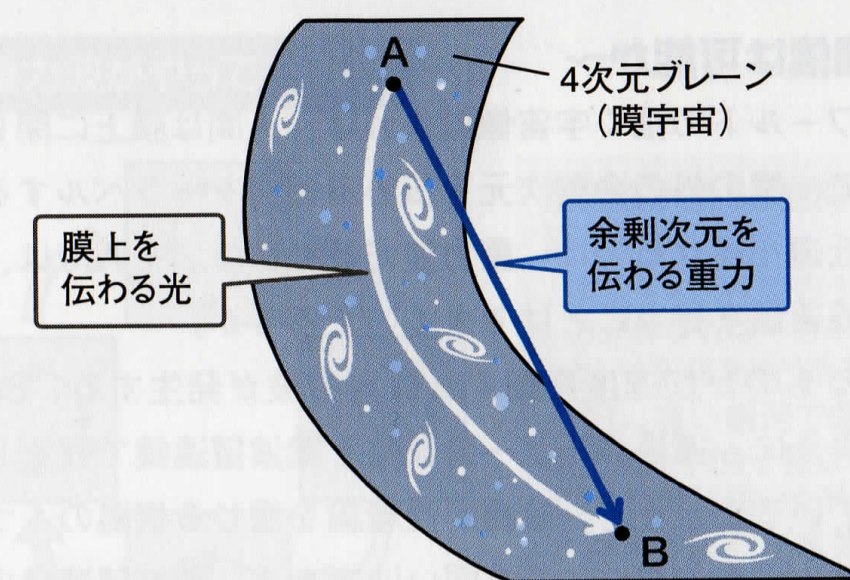
ランドールとサンドラムによって提案されたモデルのように、4次元の膜は平らである必要はなく、膜上にブラックホールなどの強い重力を

考えるのが自然だろう。持っている場合、重力の伝わる力は余剰次元を伝播できるかも速く2点間を結んで伝わるから重力が重力波として伝わる間の距離を光速で伝わって届いた重力波が伝わることも可能だ。発を望遠鏡で見ると、重力波の伝わり方が異なる。

バン宇宙モデルの問題点の1つが解決できる可能性が指摘された。重力波信号によって、情報が伝えられるかもしれない。

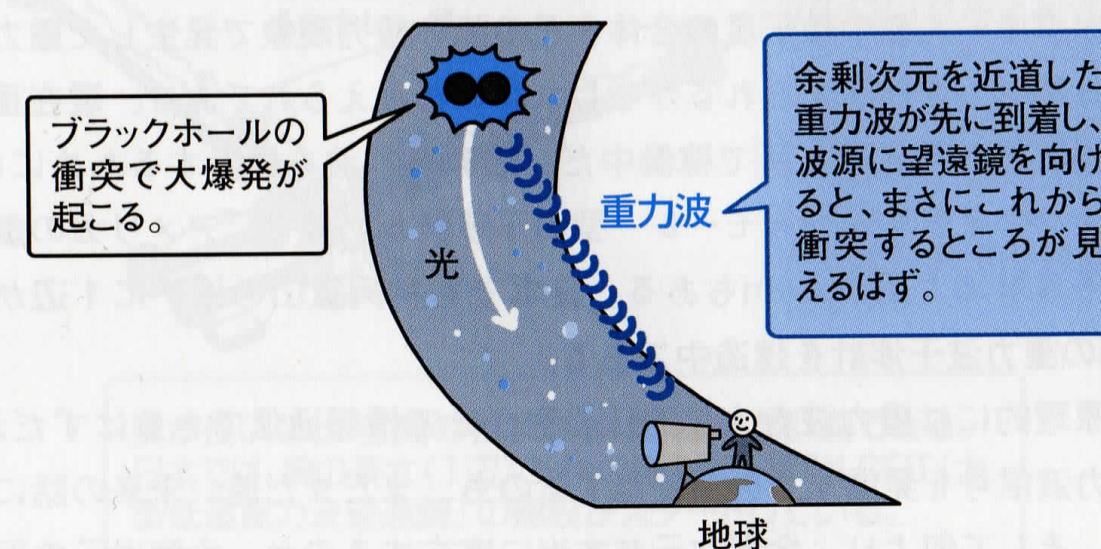


余剰次元を通過して近道をする



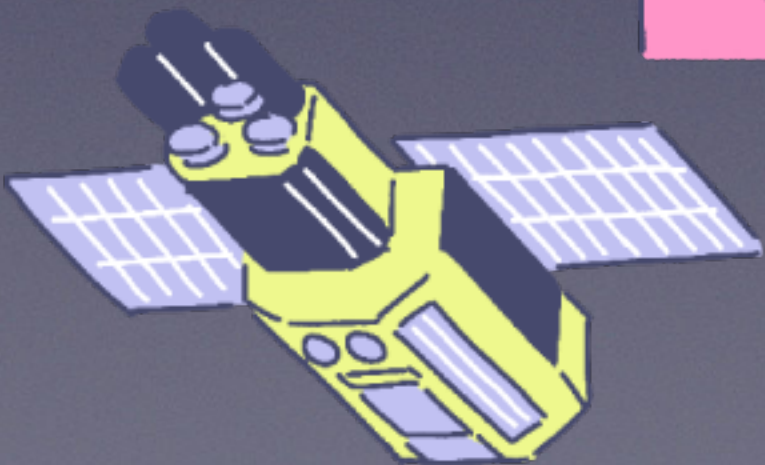
重力は余剰次元を通過することで、膜上を通過する光よりも速く伝わる

重力波信号を使えば、光速を超えた速度での情報伝達が可能になり、因果律を破って未来からの情報が伝えられる??



マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

													
	宇宙線	ガンマ線	X線	光			電磁波						
				紫外線	可視光線	赤外線	マイクロ波	超短波	短波	中波	長波	超長波	
波長[m]	10^{-13}	10^{-10}	10^{-9}	3.8×10^{-7}	7.7×10^{-7}	10^{-4}	1	10	10^2	10^3	10^4		
波長[nm]				380	770								
振動数[Hz]		3×10^{18}	3×10^{17}				3×10^{12}	3×10^8	3×10^7	3×10^6	3×10^5	3×10^4	
利用例		医療／食品照射	医療／X線写真	殺菌	光学機器	赤外線写真	携帯電話 電子レンジ	テレビ FMラジオ	短波ラジオ	AMラジオ	電波時計 飛行機の通信		



重力波





2018/10

Fermi衛星チーム，ガンマ線バースト天体カ
 タログで21星座を命名

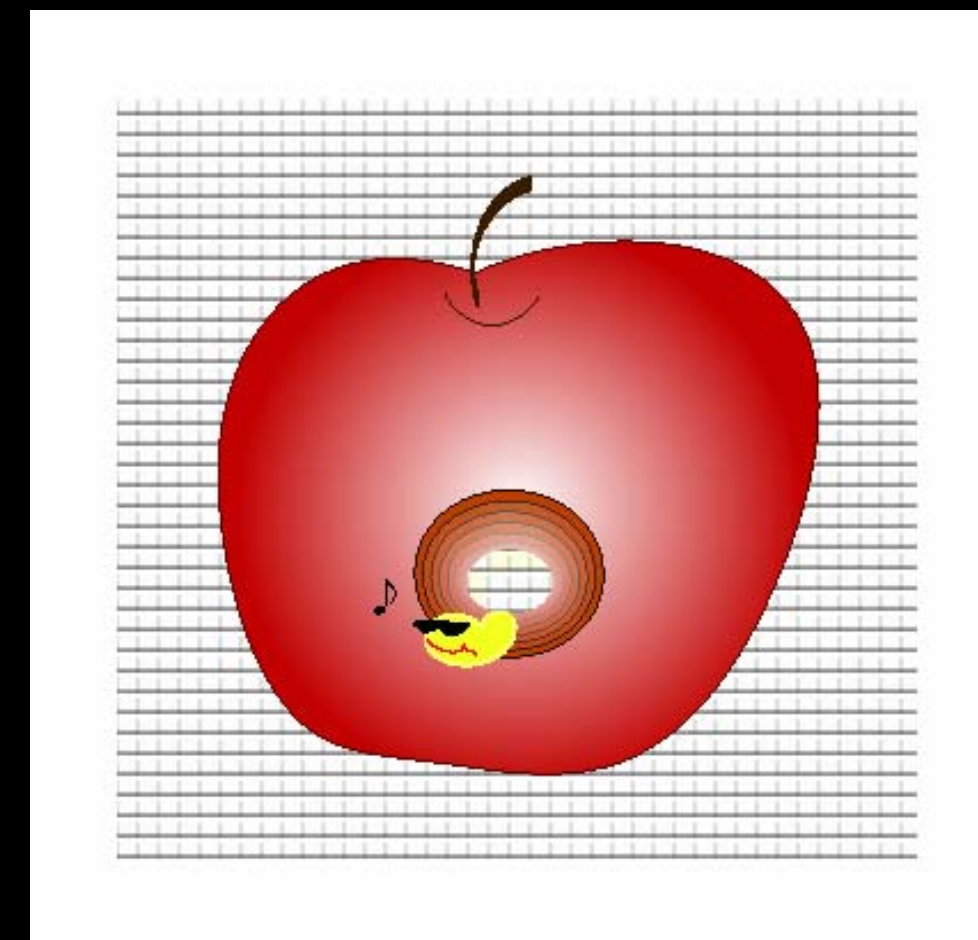
<https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/constellations/>



本当にあるのかどうか誰も知らないが、

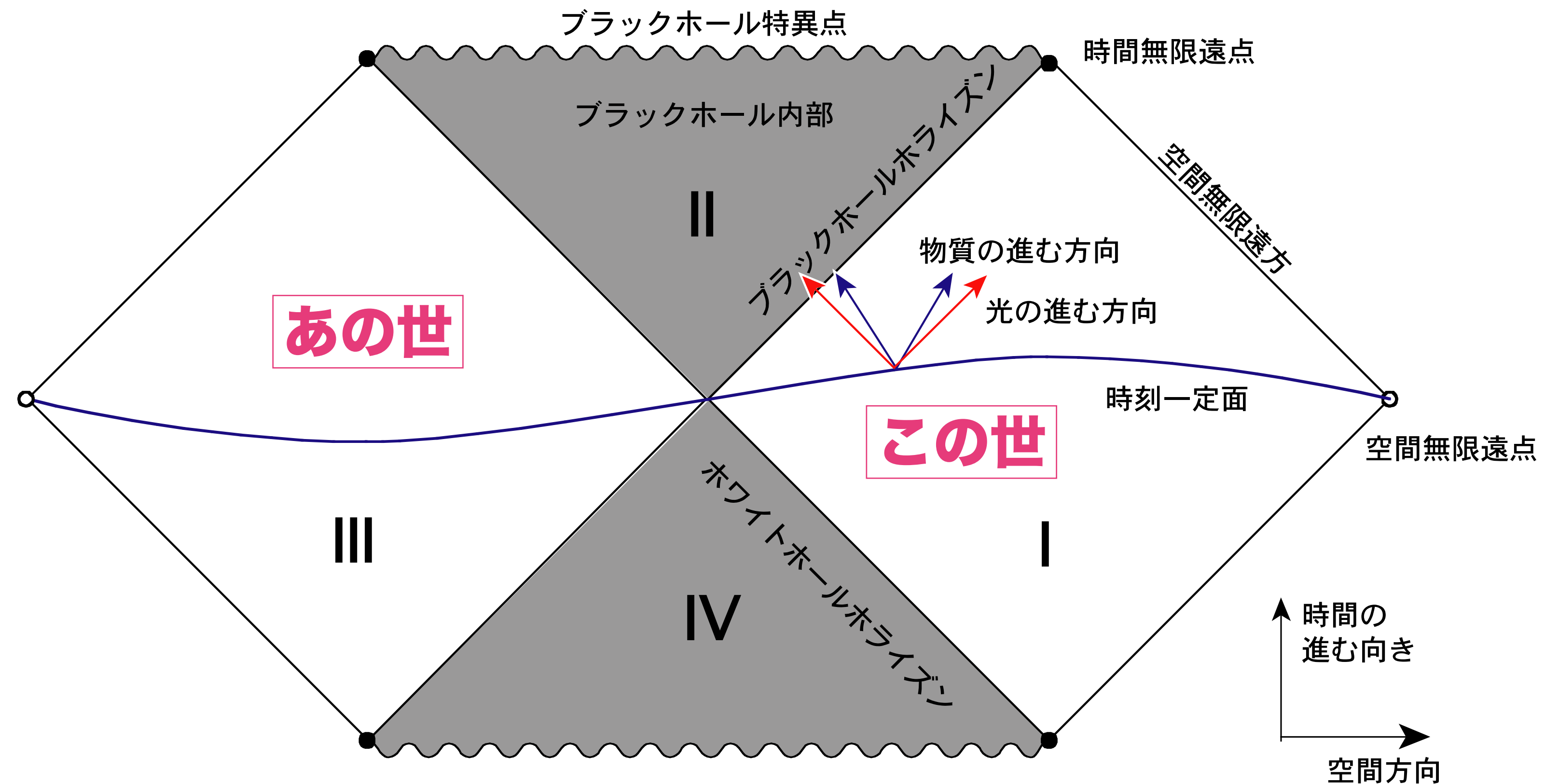
もし×××で、さらに×××で、さらに×××で、さらに×××で、
さらに×××で、さらに×××ならば、タイムマシンができる

現在の、一般相対性理論研究の**非**中心的問題。

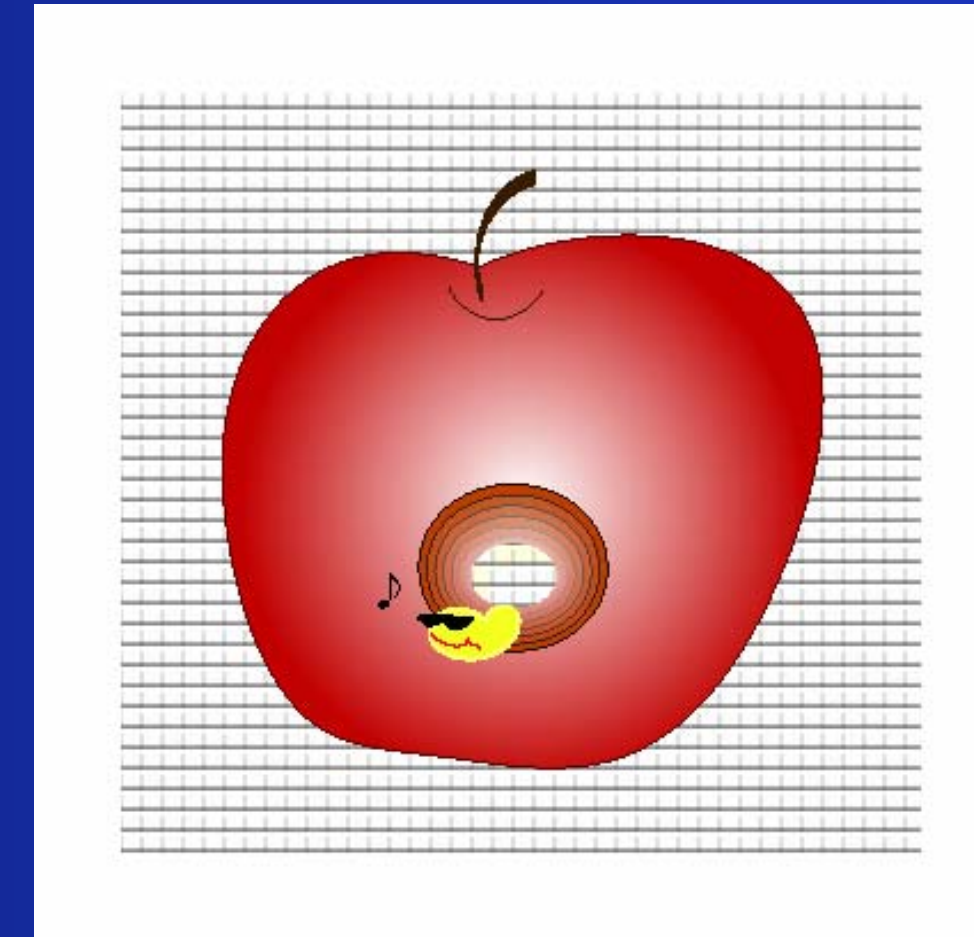
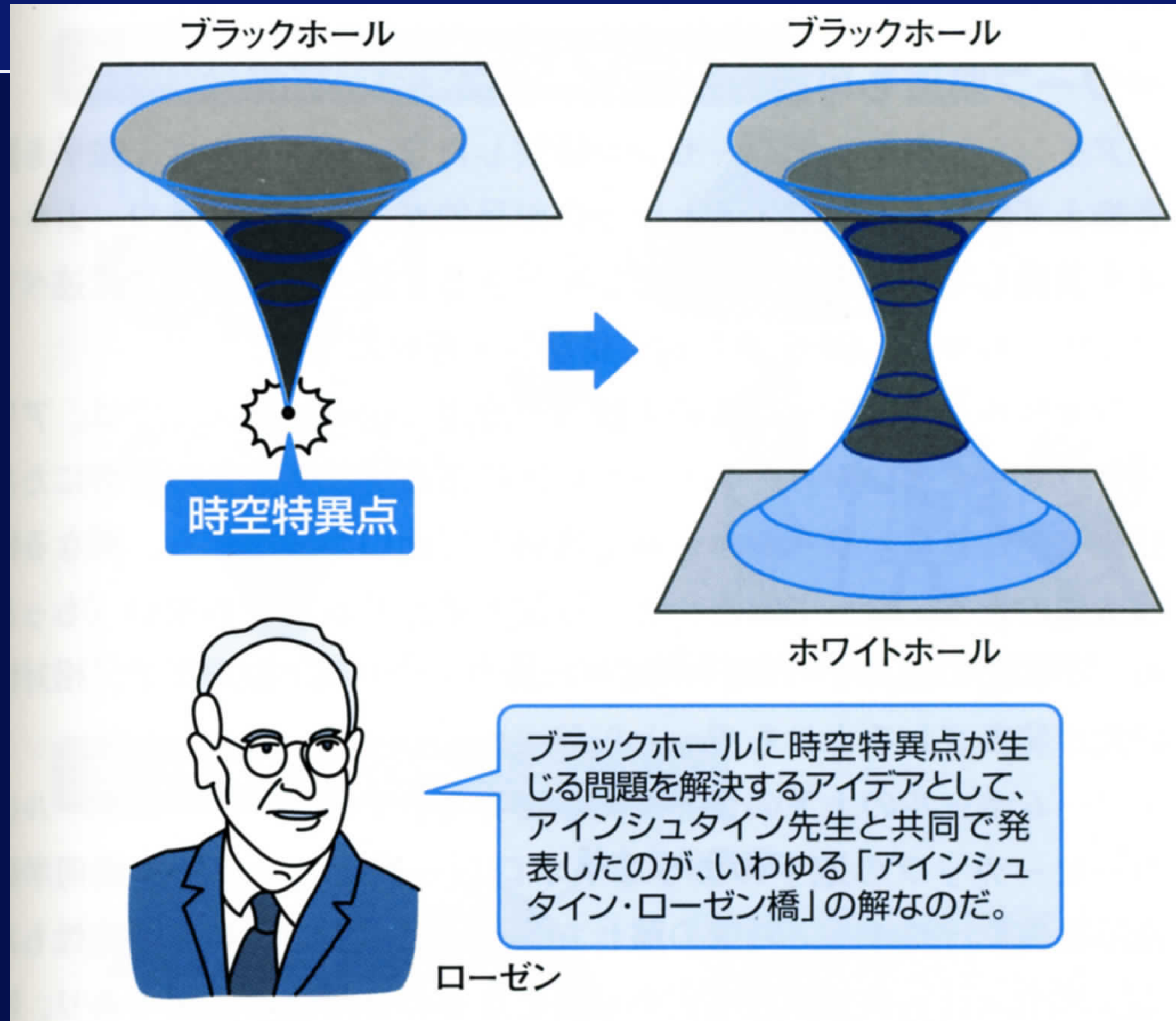


Schwarzschild Black HoleのPenrose図

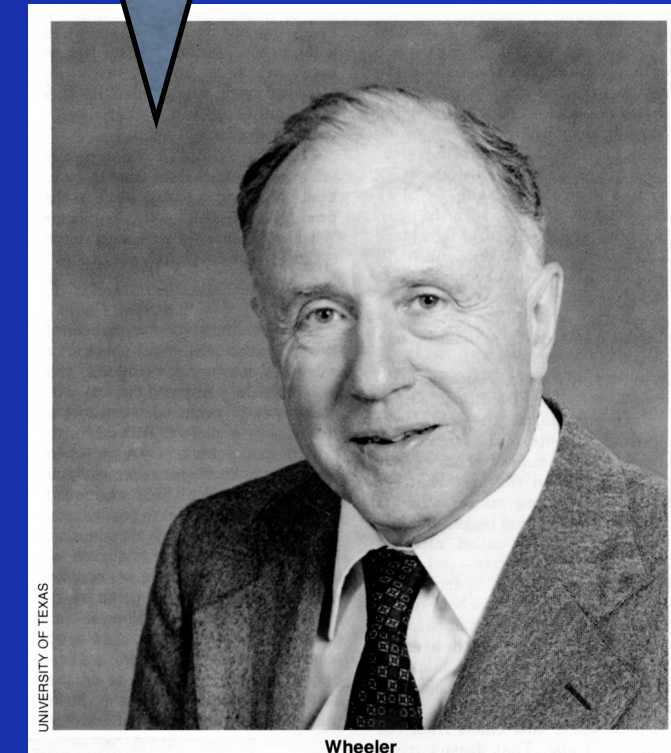
研究者が時空の大域的構造を議論するときに描く図（無限遠方を含めて考えるときの図）



アインシュタイン・ローゼンブリッジ



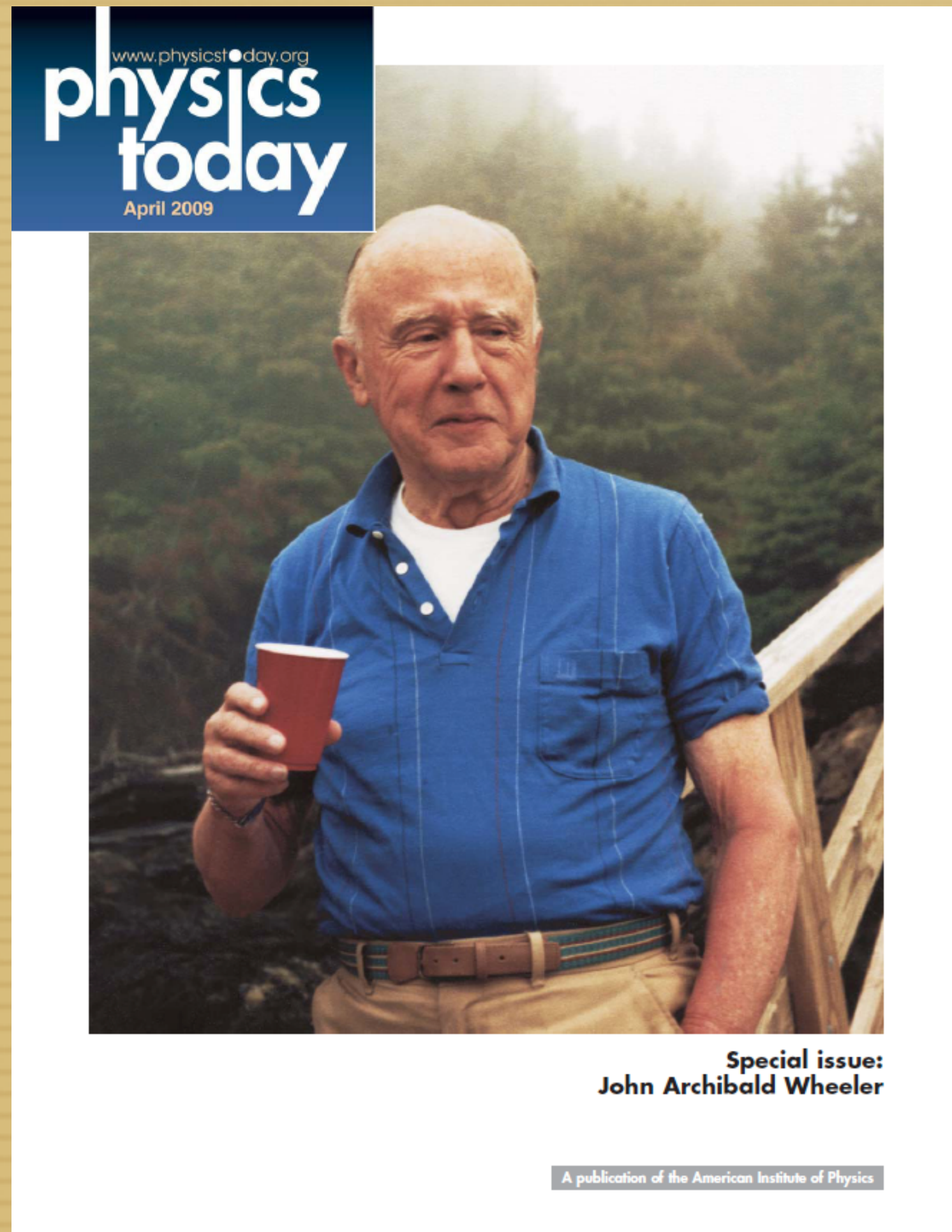
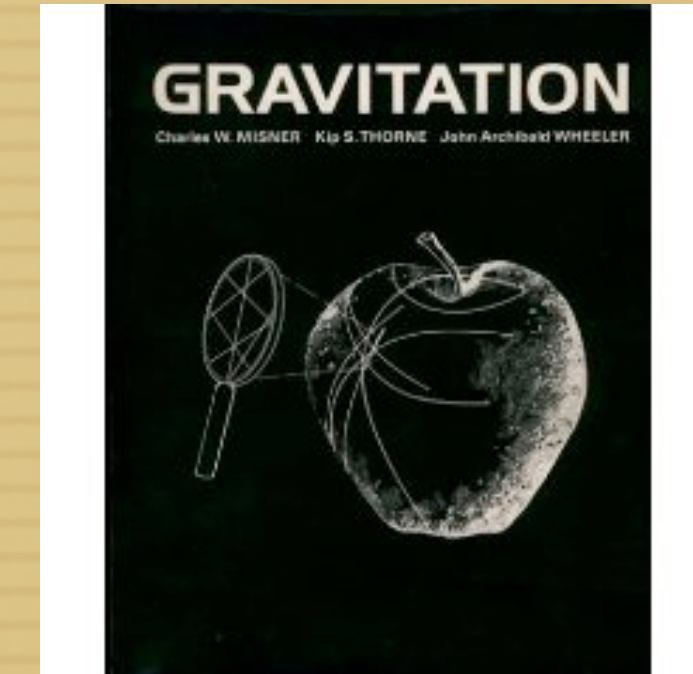
ワームホール
と呼ぼう



ホイーラー

John A. Wheeler

(July 9, 1911 – April 13, 2008)



Physics Today, 2009-4

Wheelerの創った言葉

Box 1. Wheeler coinages

John Wheeler believed that the names given to concepts or to descriptions of an idea strongly influence how we think about concepts and ideas, even how we work on them and build on them. In short, the word inspires the deed. Accordingly, Wheeler spent many hours (often soaking in a warm bathtub) searching for the most apt terms. Here, in rough chronological order, are some of his coinages:

S-Matrix the scattering operator in quantum mechanics

Sum over histories

Richard Feynman's path-integral method

Moderator the material that slows neutrons in a nuclear reactor

Stellarator a plasma magnetic confinement device

Planck length, Planck time the scales at which quantum gravity dominates

Geon an object made from waves bound together by their energy's gravity

Mass without mass gravitating object containing no massive particles

Charge without charge wormholes as sources and sinks of electric field lines

Wormhole a topological "handle" in the geometry of curved space

Quantum foam quantum fluctuations in the geometry of spacetime

Black hole* the object formed by implosion of a sufficiently massive star

A black hole has no hair a classical black hole's properties are determined by only its mass, spin angular momentum, and charge

Space tells matter how to move and matter tells space how to curve the summarized content of general relativity

Law without law** emergence of law from random processes

It from bit** a physical world built of information units

Mutability** susceptibility of physical law to evolution and change

Observer-participancy** influence of the observer on reality

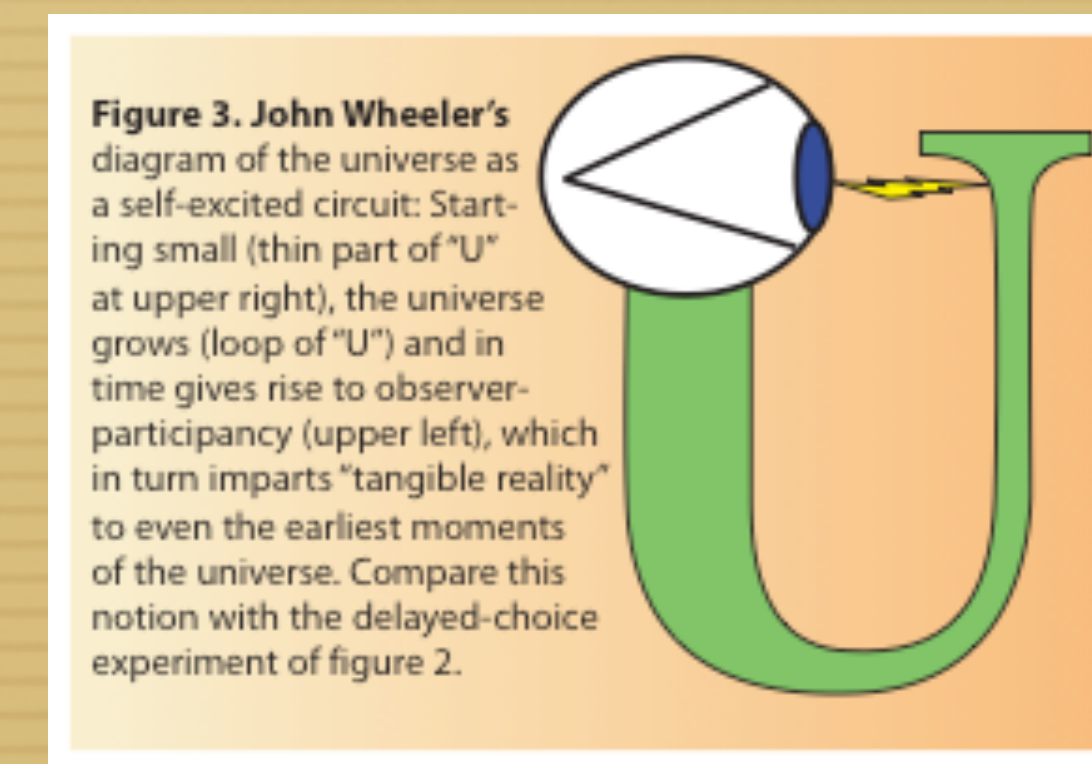
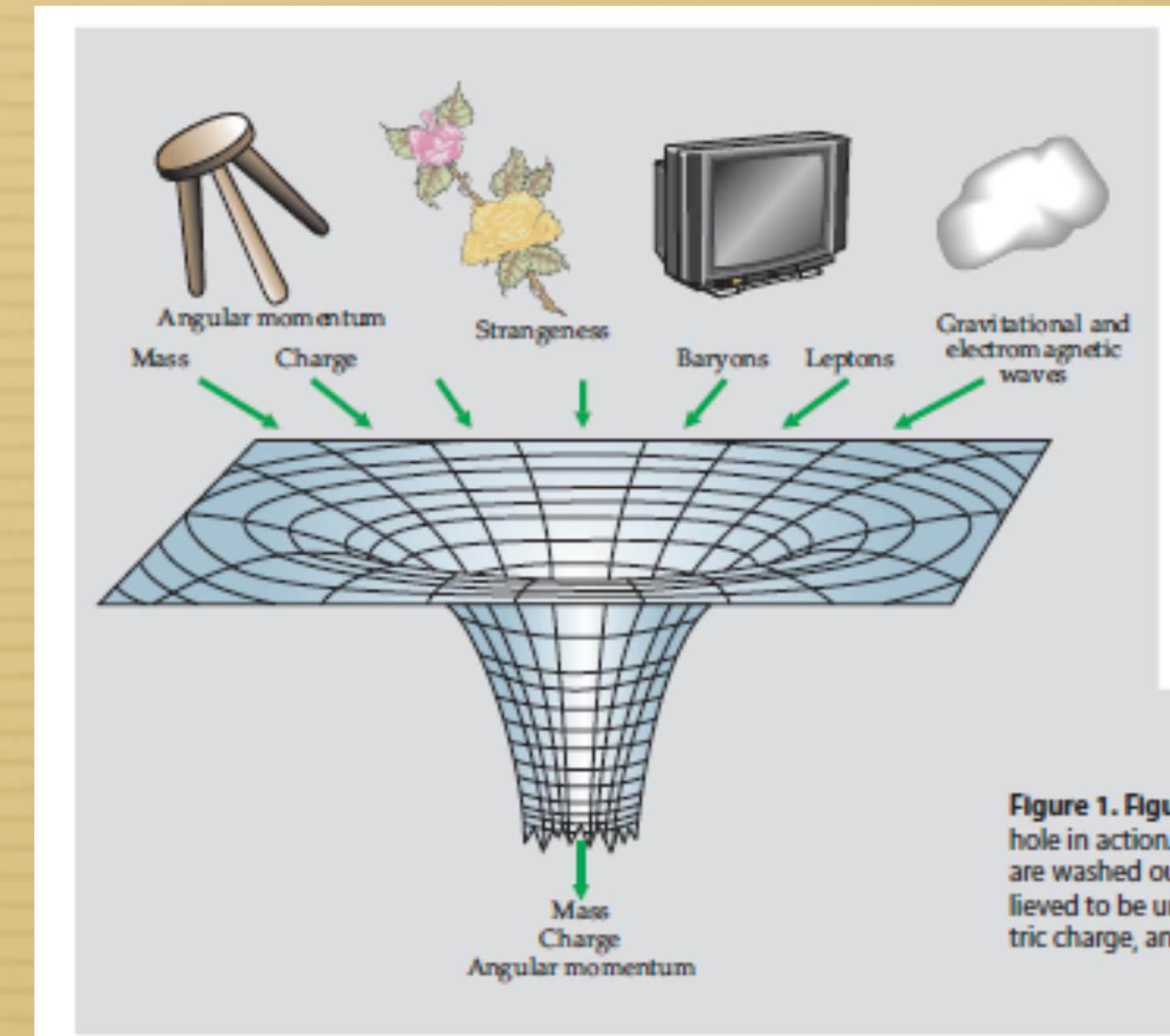
The universe as a self-excited circuit** shaping the past from the present

A single quantum cannot be cloned a theorem that puts a limit on quantum amplifiers

* The phrase "black hole" appears to have been used first, for the object formed by stellar implosion, by one or more non-physicists shortly after the 1963 discovery of quasars, but it did not stick. Wheeler recalls adopting it in 1968 after somebody at a lecture he was giving shouted it out as a suggestion, and in his hands it was quickly adopted worldwide.

**An influential, speculative idea due to Wheeler.

S-Matrix,
Sum over histories,
Planck length,
Planck time,
Wormhole,
Black Hole,
Geon,
Quantum foam,
A BH has no hair,
law without law,
it from bit, ...



ワームホール？

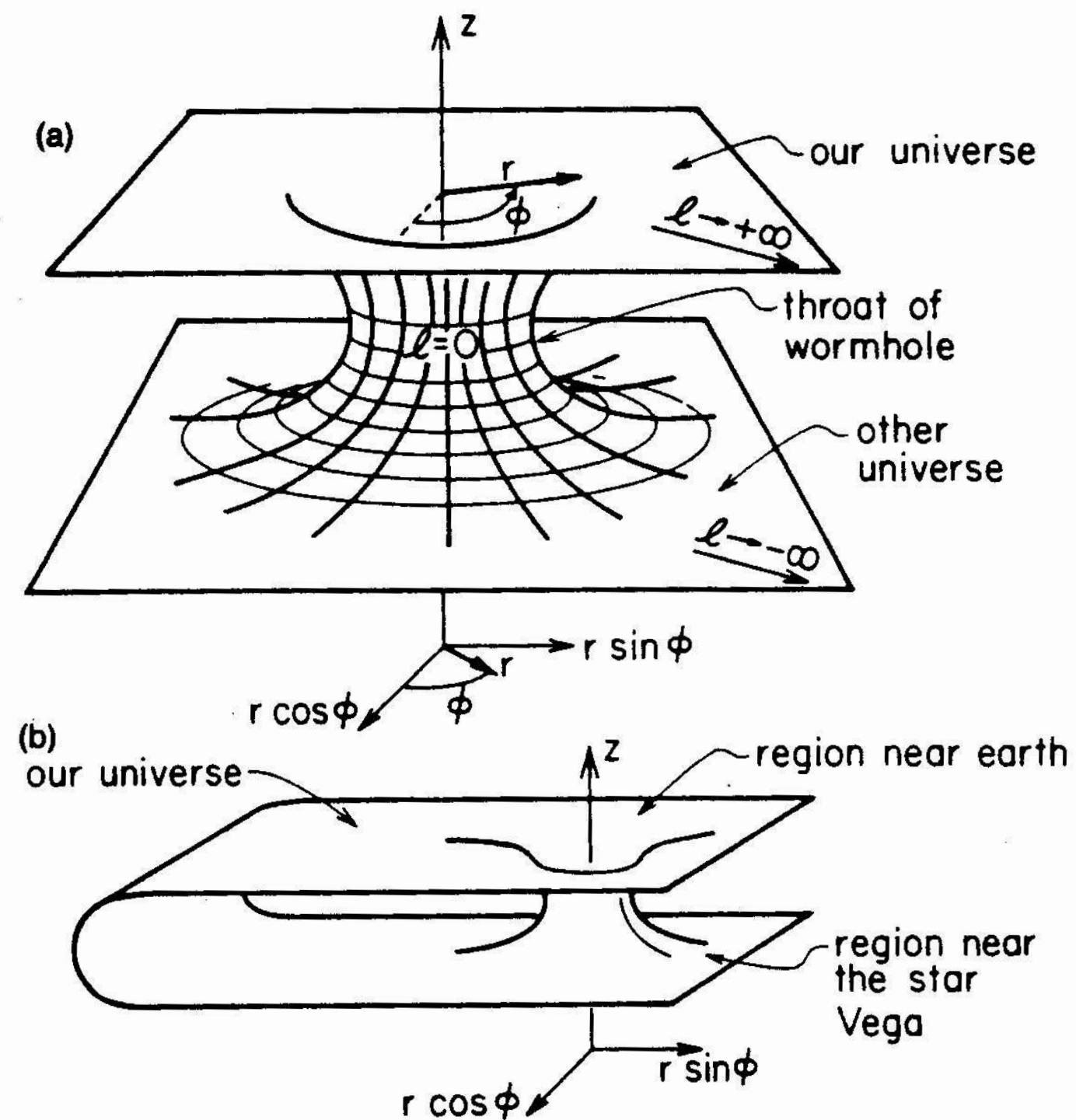
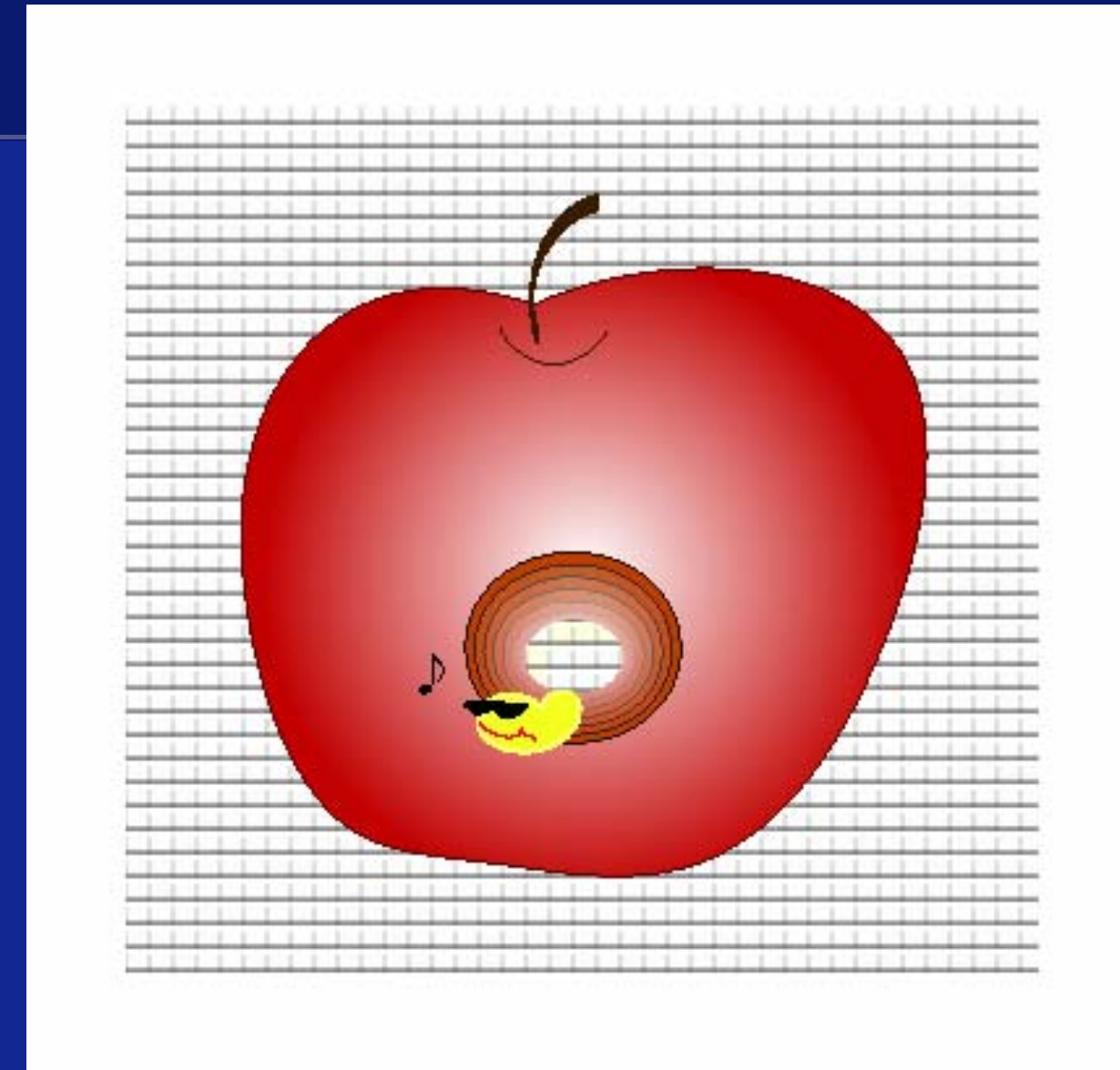
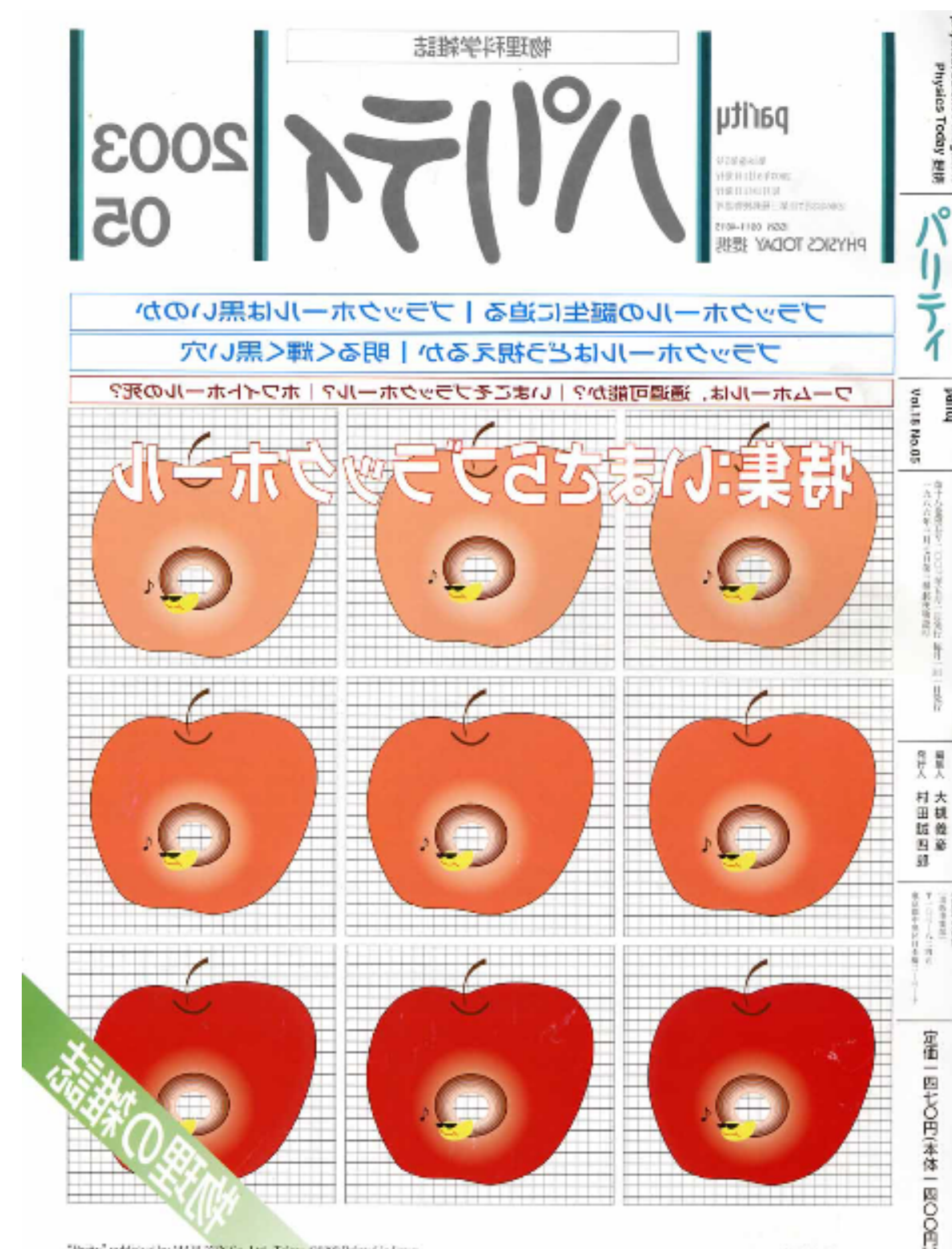


Fig. 1. (a) Embedding diagram for a wormhole that connects two different universes. (b) Embedding diagram for a wormhole that connects two distant regions of our own universe. Each diagram depicts the geometry of an equatorial ($\theta = \pi/2$) slice through space at a specific moment of time ($t = \text{const}$). These embedding diagrams are derived quickly in item (b) of Box 2, and—in a more leisurely fashion—in Sec. III C, where they are also discussed. This figure is adapted from Ref. 1, Fig. 31.5.





通過可能なワームホール？



『コンタクト』

幼い頃から宇宙に興味をもっていた天文学者エリー。彼女はある日、宇宙からの謎の電波をキャッチする。電波の発信源は、26光年先の恒星ベガ付近。電波を解読すると、恒星間移動装置の設計図が隠されていた——。ジョディ・フォスター主演で映画化もされて、話題となった。

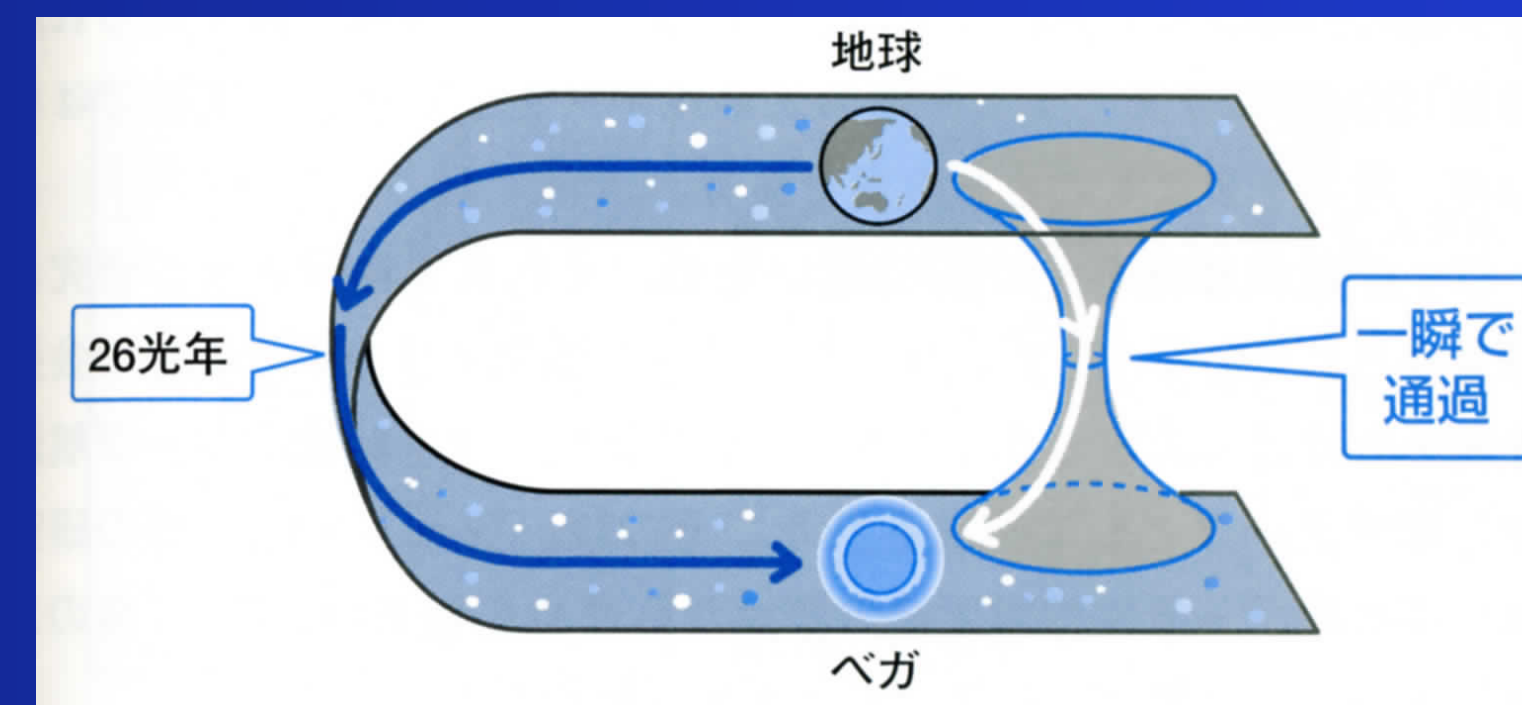
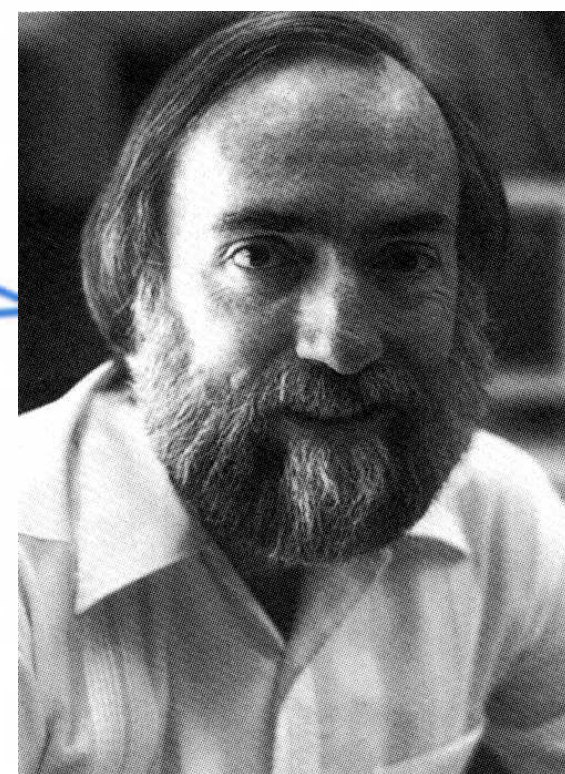


ブラックホールを使って移動する小説を書いたけど、正しいかな？

ワームホールにしたほうが現実性が増すよ。

では、そうしよう。

セーガン



Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity

Michael S. Morris and Kip S. Thorne

Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

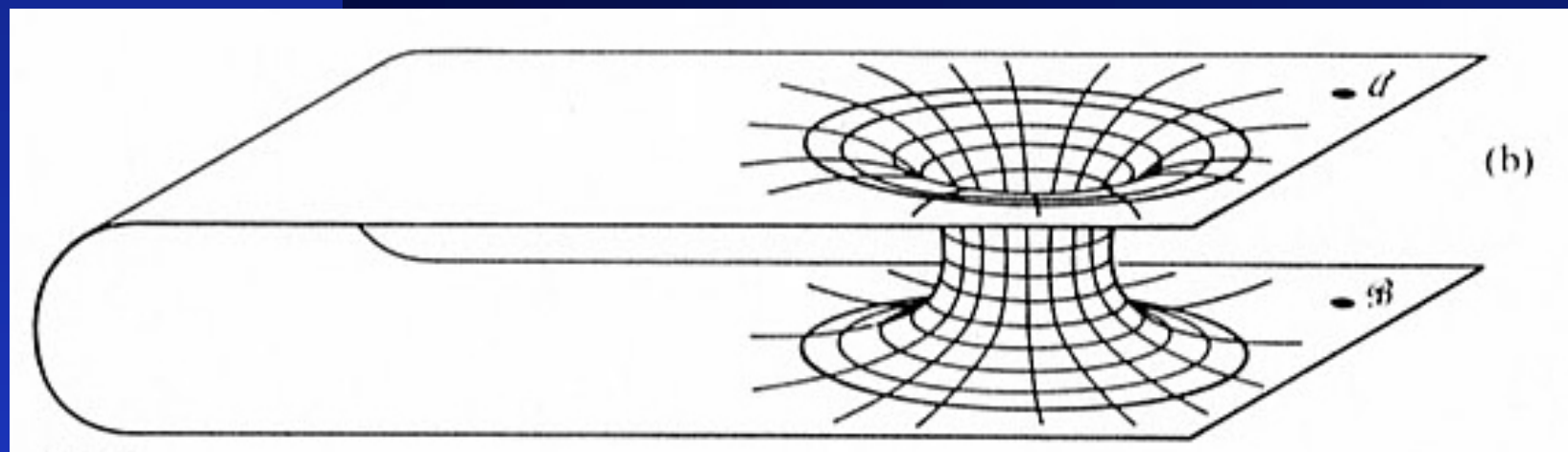
(Received 16 March 1987; accepted for publication 17 July 1987)

Rapid interstellar travel by means of spacetime wormholes is described in a way that is useful for teaching elementary general relativity. The description touches base with Carl Sagan's novel *Contact*, which, unlike most science fiction novels, treats such travel in a manner that accords with the best 1986 knowledge of the laws of physics. Many objections are given against the use of black holes or Schwarzschild wormholes for rapid interstellar travel. A new class of solutions of the Einstein field equations is presented, which describe wormholes that, in principle, could be traversed by human beings. It is essential in these solutions that the wormhole possess a throat at which there is no horizon; and this property, together with the Einstein field equations, places an extreme constraint on the material that generates the wormhole's spacetime curvature: In the wormhole's throat that material must possess a radial tension τ_0 with the enormous magnitude $\tau_0 \sim (\text{pressure at the center of the most massive of neutron stars}) \times (20 \text{ km})^2 / (\text{circumference of throat})^2$. Moreover, this tension must exceed the material's density of mass-energy, $\rho_0 c^2$. No known material has this $\tau_0 > \rho_0 c^2$ property, and such material would violate all the "energy conditions" that underlie some deeply cherished theorems in general relativity. However, it is not possible today to rule out firmly the existence of such material; and quantum field theory gives tantalizing hints that such material might, in fact, be possible.

通過できるワームホールは不可能ではない

Morris & Thorne, Am. J. Phys 56 (1988) 395

「球対称で静的，一般相対性理論，漸近的平坦，潮汐力が人間に耐えられる大きさ，有限時間に通過可能」なワームホールは，**負のエネルギーを考**えれば不可能ではない。

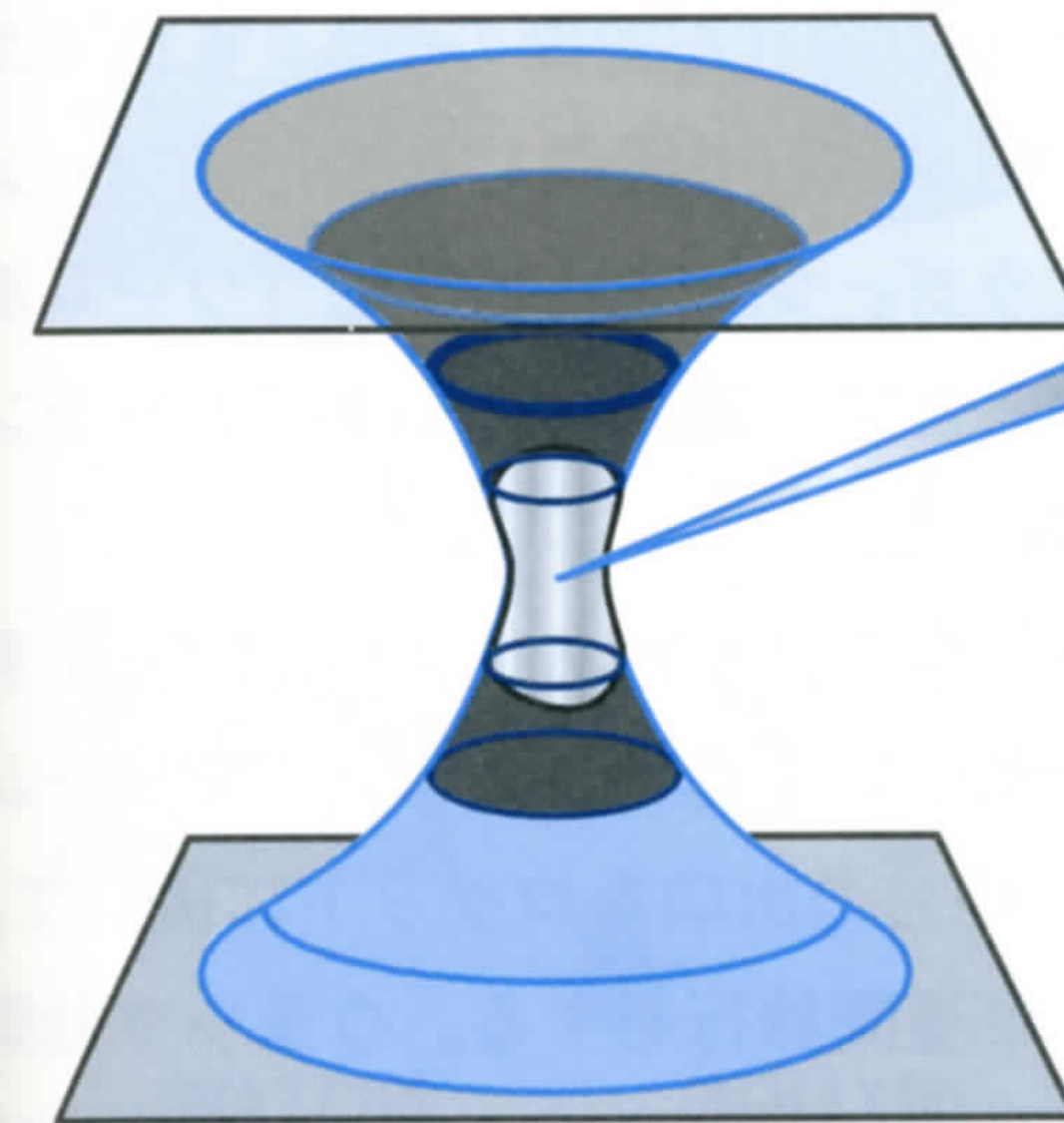


斥力を及ぼす「負のエネルギー」



ソーン

ワームホールは、モノが入るとすぐ潰れてしまう。ワームホールを通過するには……。
そうだ、重力に逆らって、ワームホールを支える物質があればいいぞ!



「エキゾチック」な物質
負のエネルギーを持ち、周囲に万有斥力(反発力)をもたらす。これをワームホール内に満たせば、通行可能になる。

万有斥力を考えるのは「禁じ手」とされていたけど、偉いソーン先生が言い出したので、解禁されたんだ。



過去へ行くタイムマシンもできる！

VOLUME 61, NUMBER 13

PHYSICAL REVIEW LETTERS

26 SEPTEMBER 1988

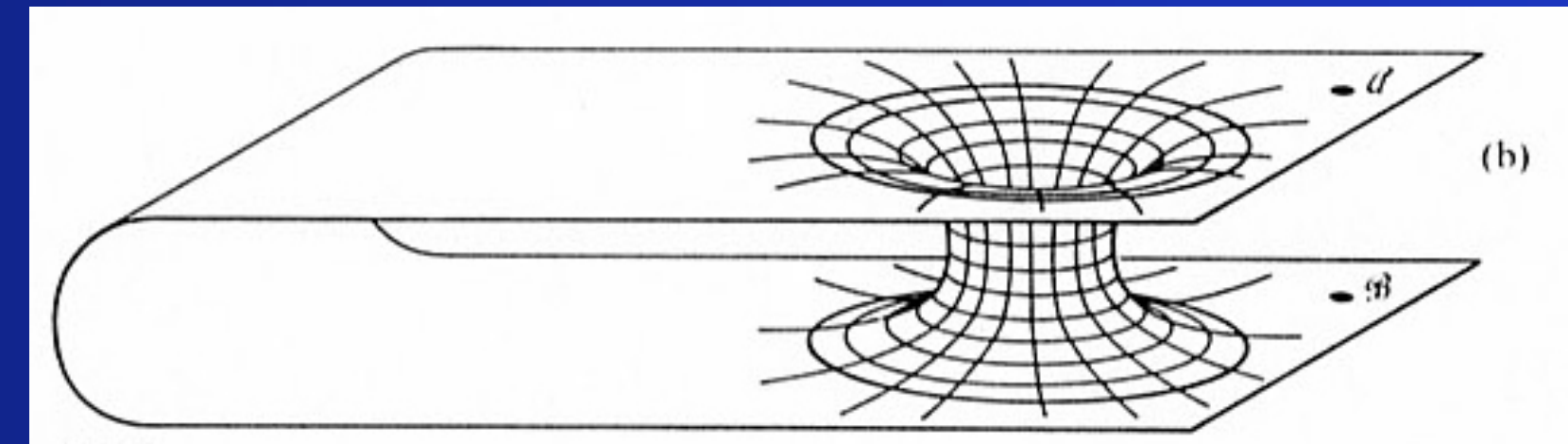
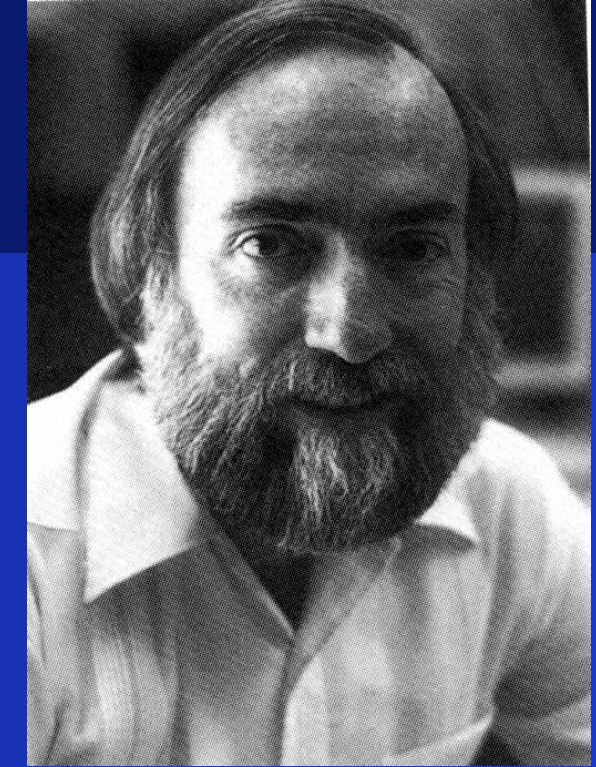
Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition

Michael S. Morris, Kip S. Thorne, and Ulvi Yurtsever

Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

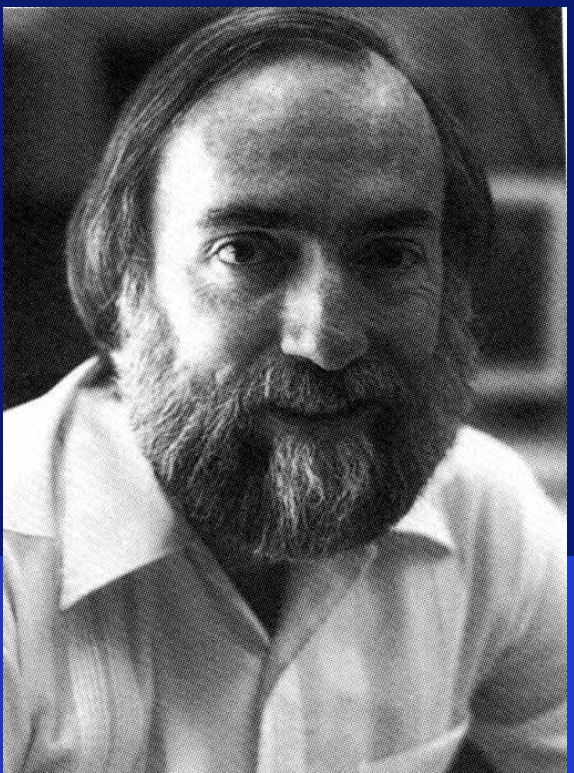
(Received 21 June 1988)

It is argued that, if the laws of physics permit an advanced civilization to create and maintain a wormhole in space for interstellar travel, then that wormhole can be converted into a time machine with which causality might be violatable. Whether wormholes can be created and maintained entails deep, ill-understood issues about cosmic censorship, quantum gravity, and quantum field theory, including the question of whether field theory enforces an averaged version of the weak energy condition.

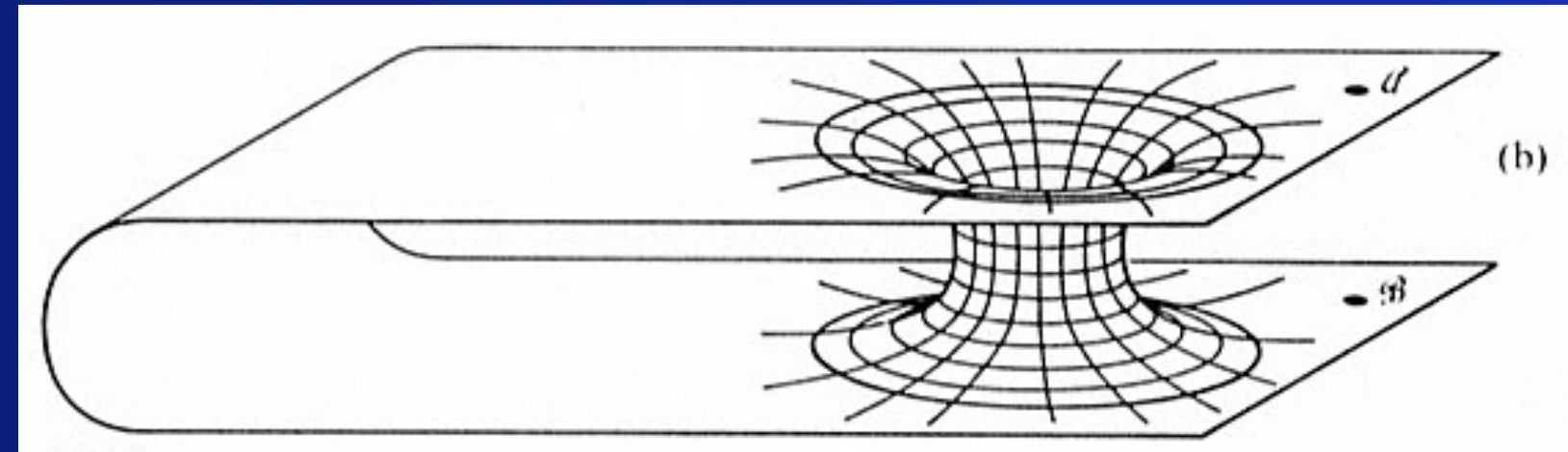
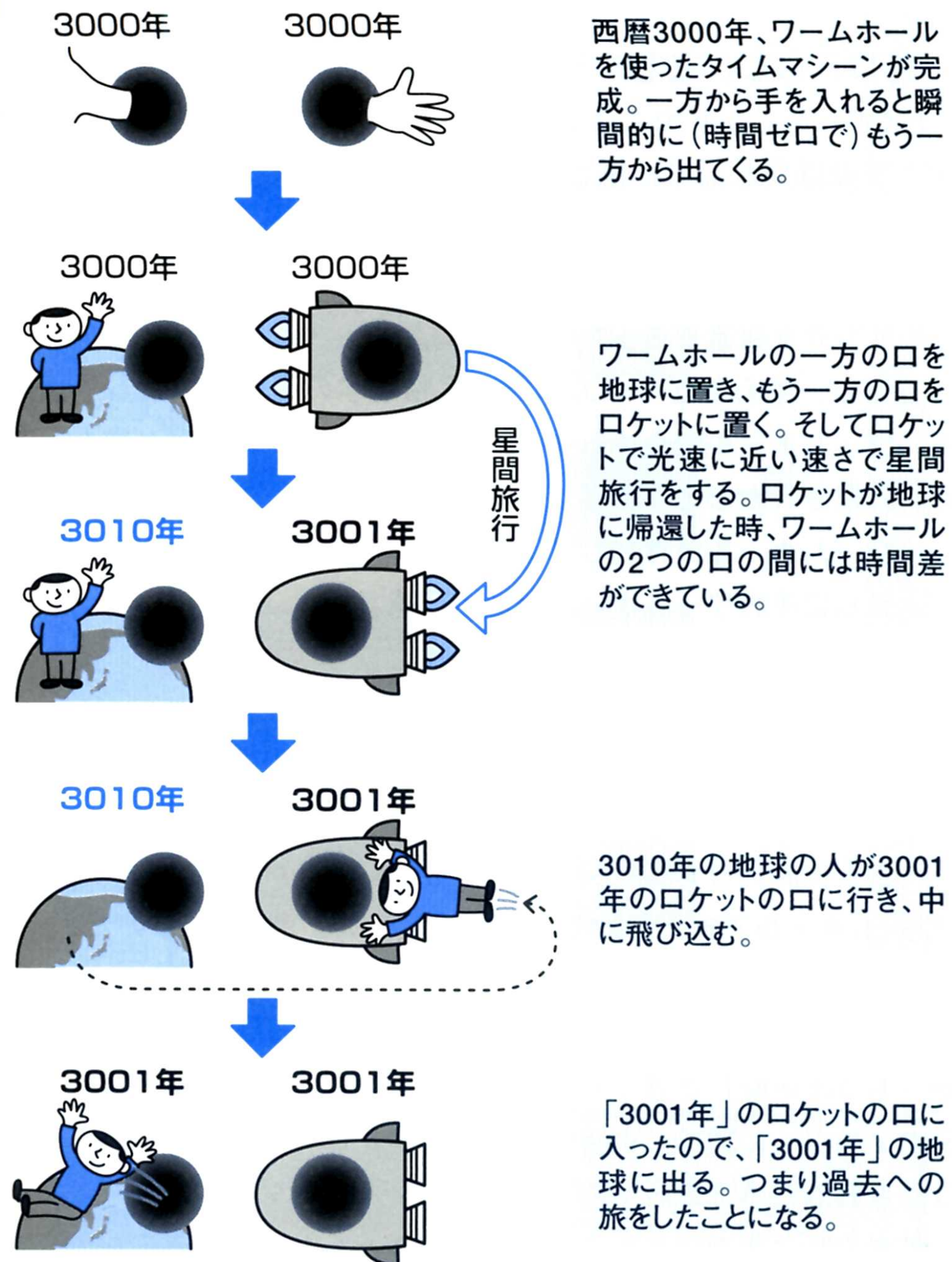


Morris, Thorne, Yurtsever, PRL 61 (1988) 3182
片方の出口を光速近くまでに加速することができれば、
旅行者の時間は遅れるので、過去へ旅することができる。

過去へ行くタイムマシンもできる！



ワームホールを使った過去への旅



www4.nhk.or.jp/zero/x/2017-11-05/31/32298/2136654/

サイエンスZERO 「人類の夢の技術」(1) タイムマシンは実現するのか！？ - NHK

NHK | 番組をみつける | ウェブで視聴 | 知る学ぶ | 報道・スポーツ | 参加・応募する | ...もっと | 受信料の窓口 | サイトマップ | 地域: 東京 | NHK 全体から検索

サイエンス
ZERO

Eテレ 毎週日曜 午後11時30分 | 再放送 毎週土曜 午後0時30分

放送予定 | 再放送予定 | 過去3か月の放送 | 番組情報 | スペシャル動画 | よくある質問 | NHKオンデマンド

シェアする ?

Twitter Facebook Google+

11月 日曜
5日

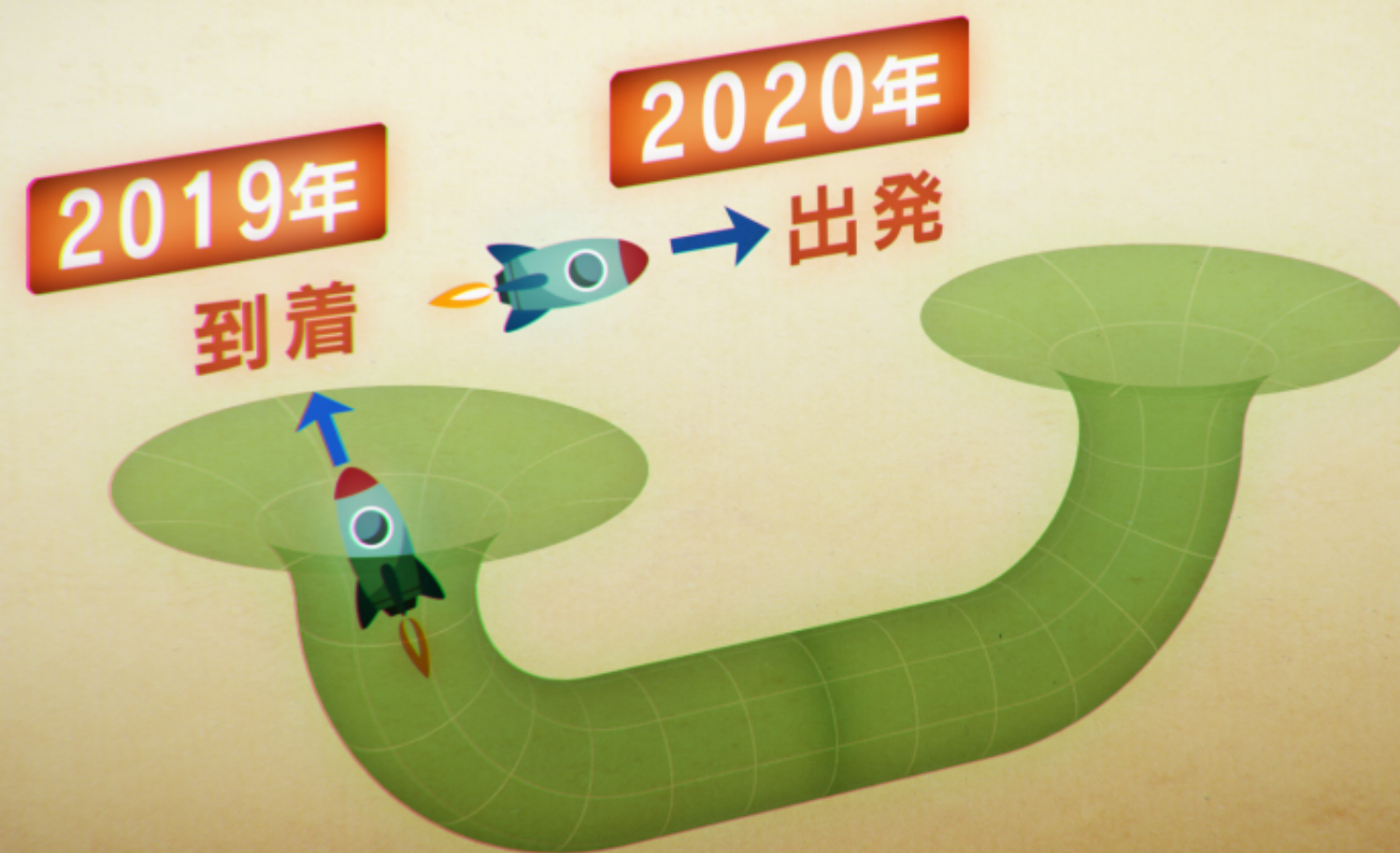
Eテレ 午後11時30分 ~ 午前0時00分

サイエンスZERO 「人類の夢の技術」(1) タイムマシンは実現するのか！？



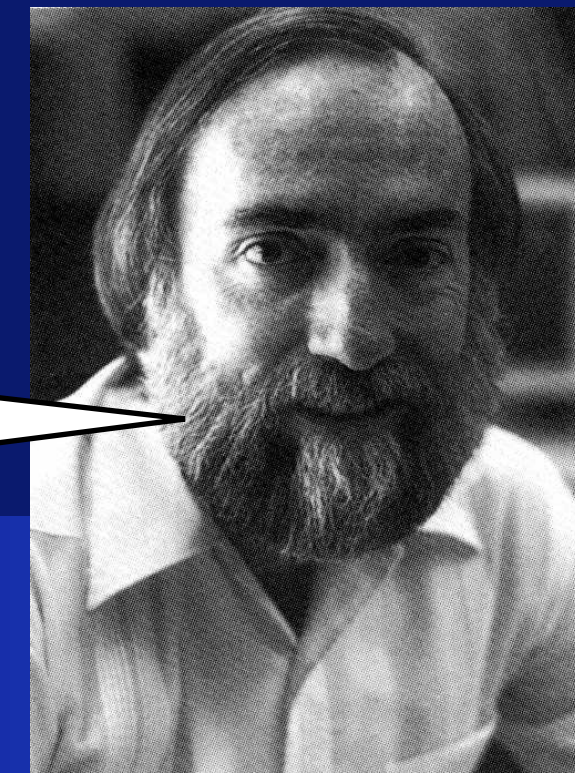
2017年11月の話





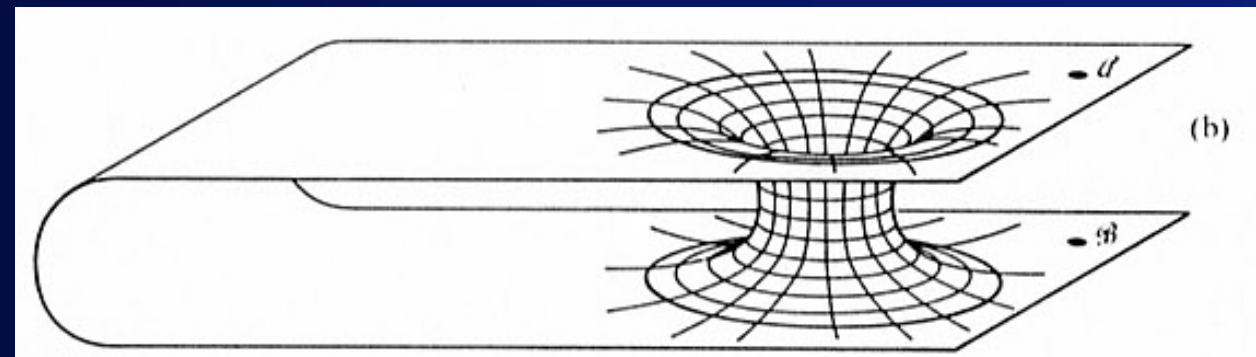
本当に？

タイムマシンはできる！



- もしワームホールが存在して,
- さらにもし負のエネルギーが安定に存在して,
- さらにもしワームホールが通過可能で,
- さらにもし人類が通過可能な技術を持ち,
- さらにもし出口を光速近くで動かすことができるならば,
- さらにもし旅行者が別ルートで同じ場所に戻れば,

タイムマシンに成り得る



No !

時間順序保護仮説を提案する。



そもそもワームホールは安定なのか？

PHYSICAL REVIEW D 66, 044005 (2002)

Fate of the first traversible wormhole: Black-hole collapse or inflationary expansion

Hisa-aki Shinkai*

Computational Science Division, Institute of Physical & Chemical Research (RIKEN), Hirosawa 2-1, Wako, Saitama, 351-0198, Japan

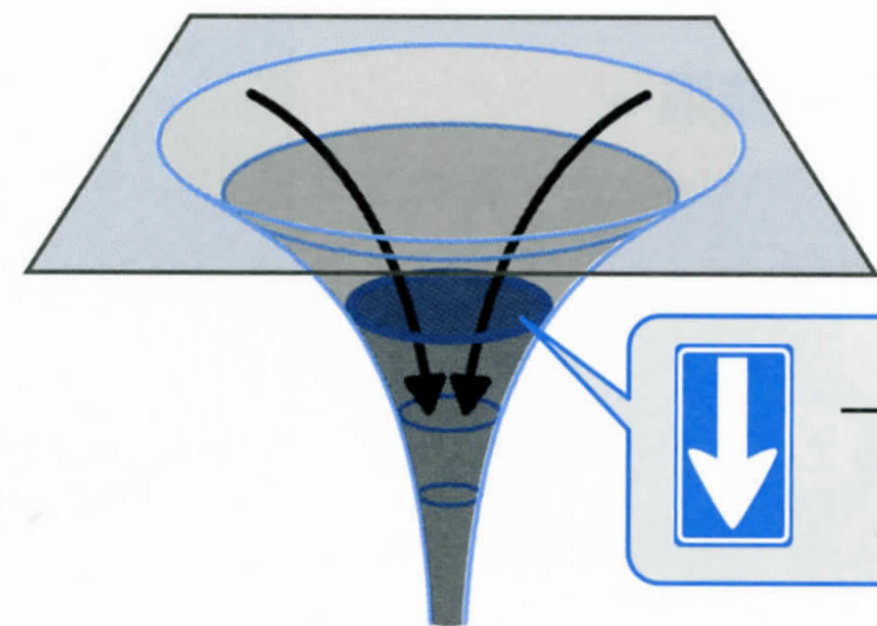
Sean A. Hayward[†]

Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

(Received 10 May 2002; published 16 August 2002)

We study numerically the stability of the first Morris-Thorne traversible wormhole, shown previously by Ellis to be a solution for a massless ghost Klein-Gordon field. Our code uses a dual-null formulation for spherically symmetric space-time integration, and the numerical range covers both universes connected by the wormhole. We observe that the wormhole is unstable against Gaussian pulses in either exotic or normal massless Klein-Gordon fields. The wormhole throat suffers a bifurcation of horizons and either explodes to form an inflationary universe or collapses to a black hole if the total input energy, is, respectively, negative or positive. As the perturbations become small in total energy, there is evidence for critical solutions with a certain black-hole mass or Hubble constant. The collapse time is related to the initial energy with an apparently universal critical exponent. For normal matter, such as a traveller traversing the wormhole, collapse to a black hole always results. However, carefully balanced additional ghost radiation can maintain the wormhole for a limited time. The black-hole formation from a traversible wormhole confirms the recently proposed duality between them. The inflationary case provides a mechanism for inflating, to macroscopic size, a Planck-sized wormhole formed in space-time foam.

一方通行か、双方向可能か



ブラックホールの境界面
は一方通行のみ許される。



一方通行の
境界面

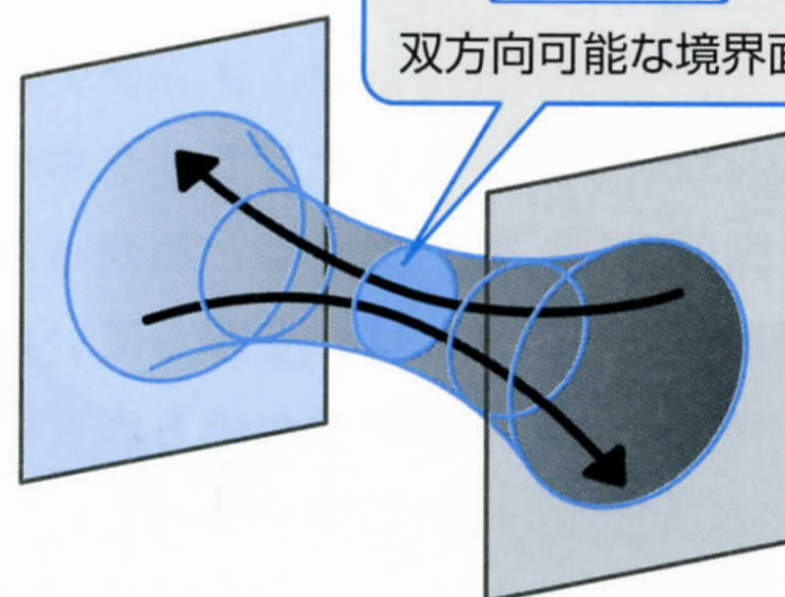
重力崩壊では境界面が
一方通行になる。



ブラックホールの蒸発
現象(7章で説明)では
境界面が双方向可能に
変化する。



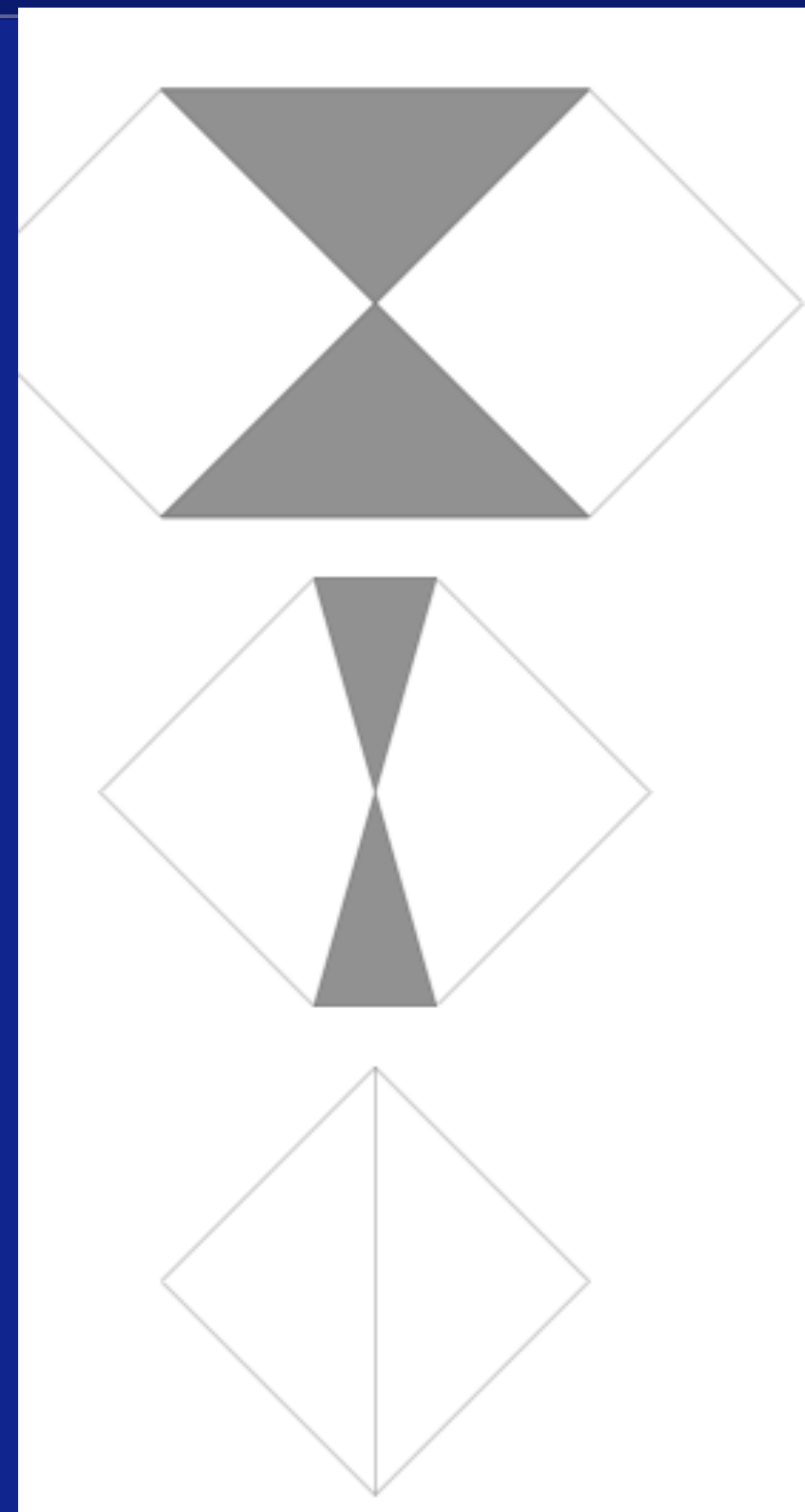
双方向可能な境界面



ワームホールの境界面
は双方向通行が可能で
ある(はず)。



ホライズン(境界面)をキーワード
にして、ブラックホールとワーム
ホールを同じように扱えるのではな
いかな?



ブラックホールが膨張宇宙に変化する！

Bifurcation of the horizons – go to a Black Hole or Inflationary expansion

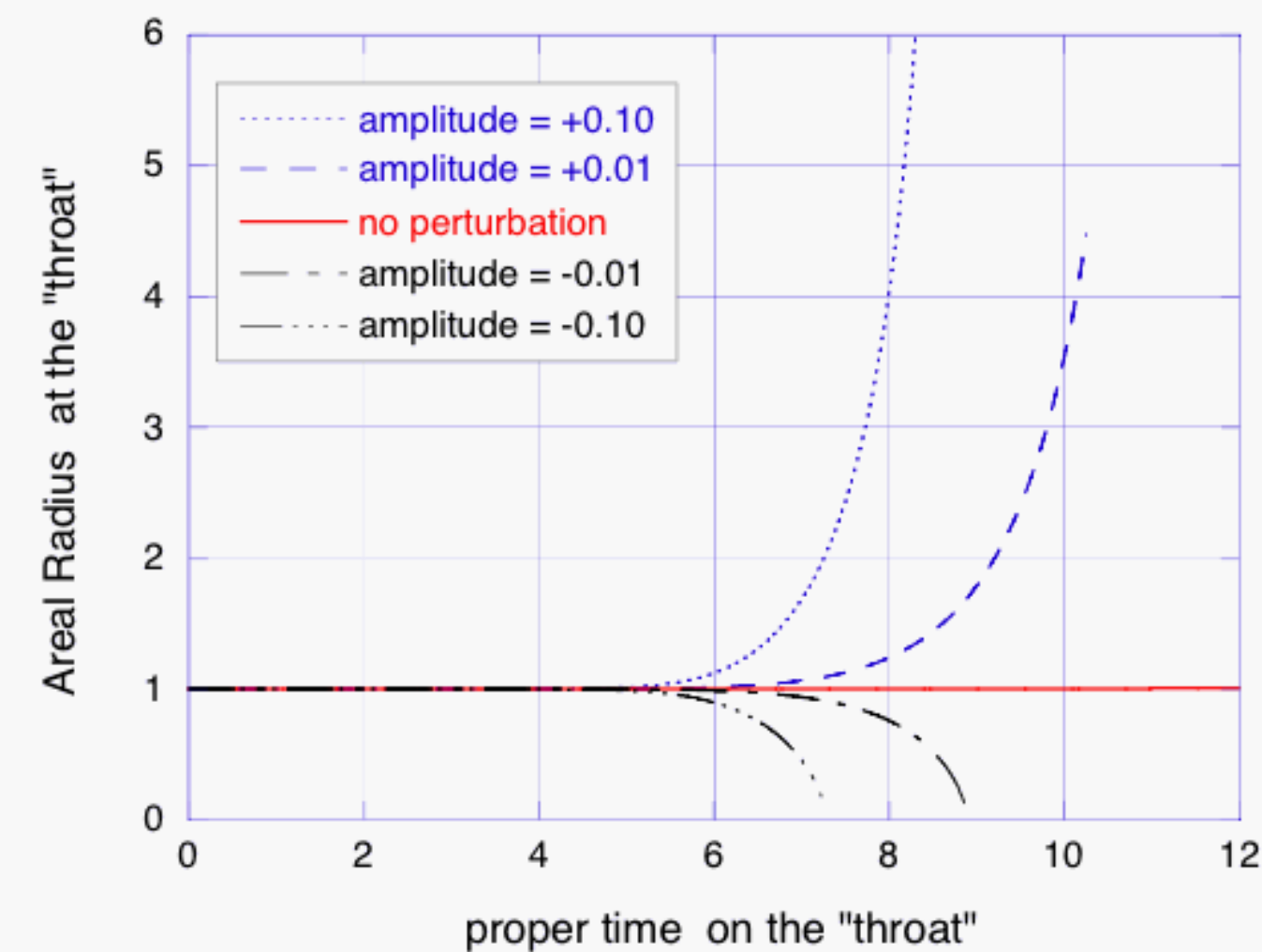
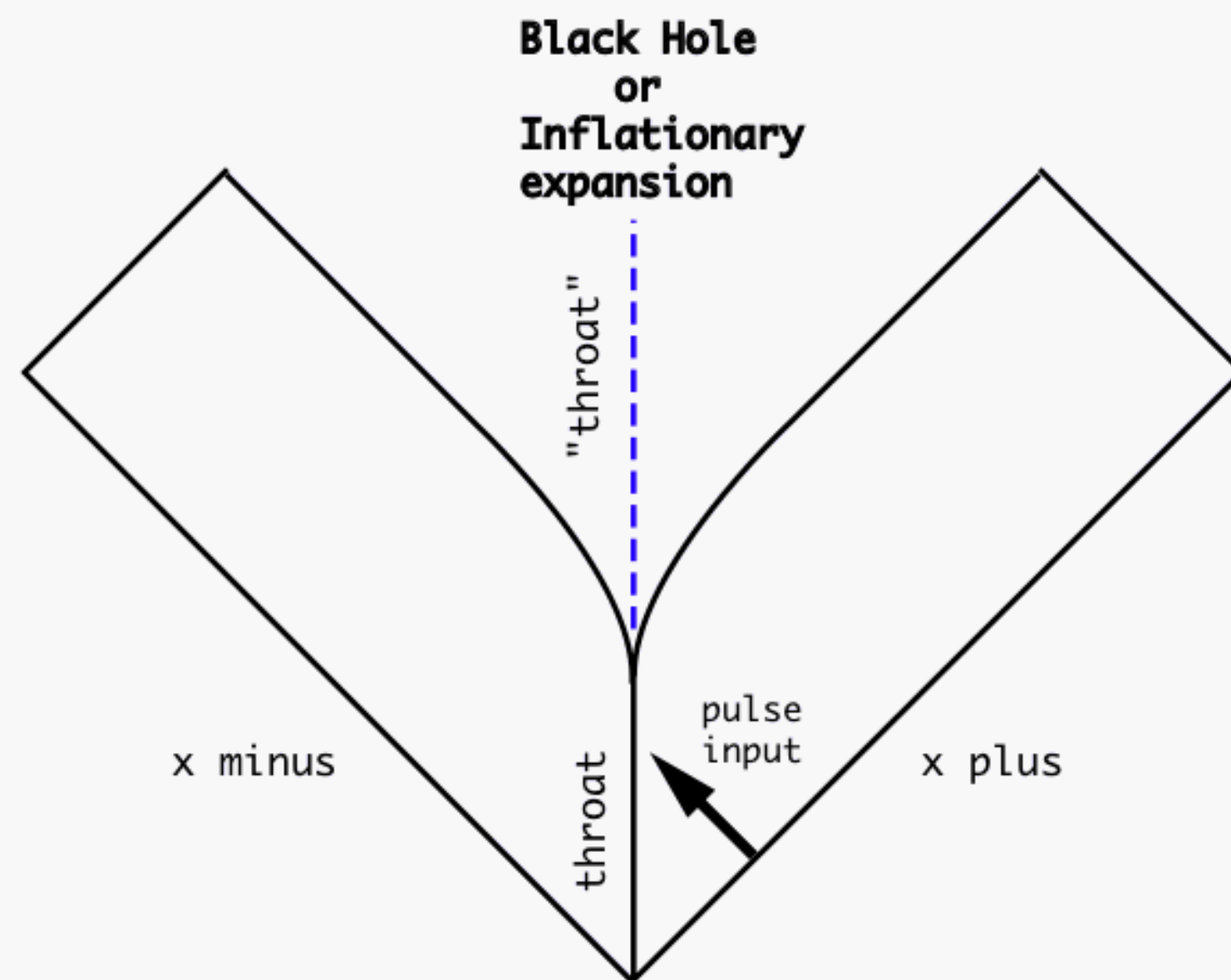


Figure 4: Partial Penrose diagram of the evolved space-time.

Figure 6: Areal radius r of the “throat” $x^+ = x^-$, plotted as a function of proper time. Additional negative energy causes inflationary expansion, while reduced negative energy causes collapse to a black hole and central singularity.

ワームホールを維持しながら通過可能

Travel through a Wormhole
-- with Maintenance Operations!

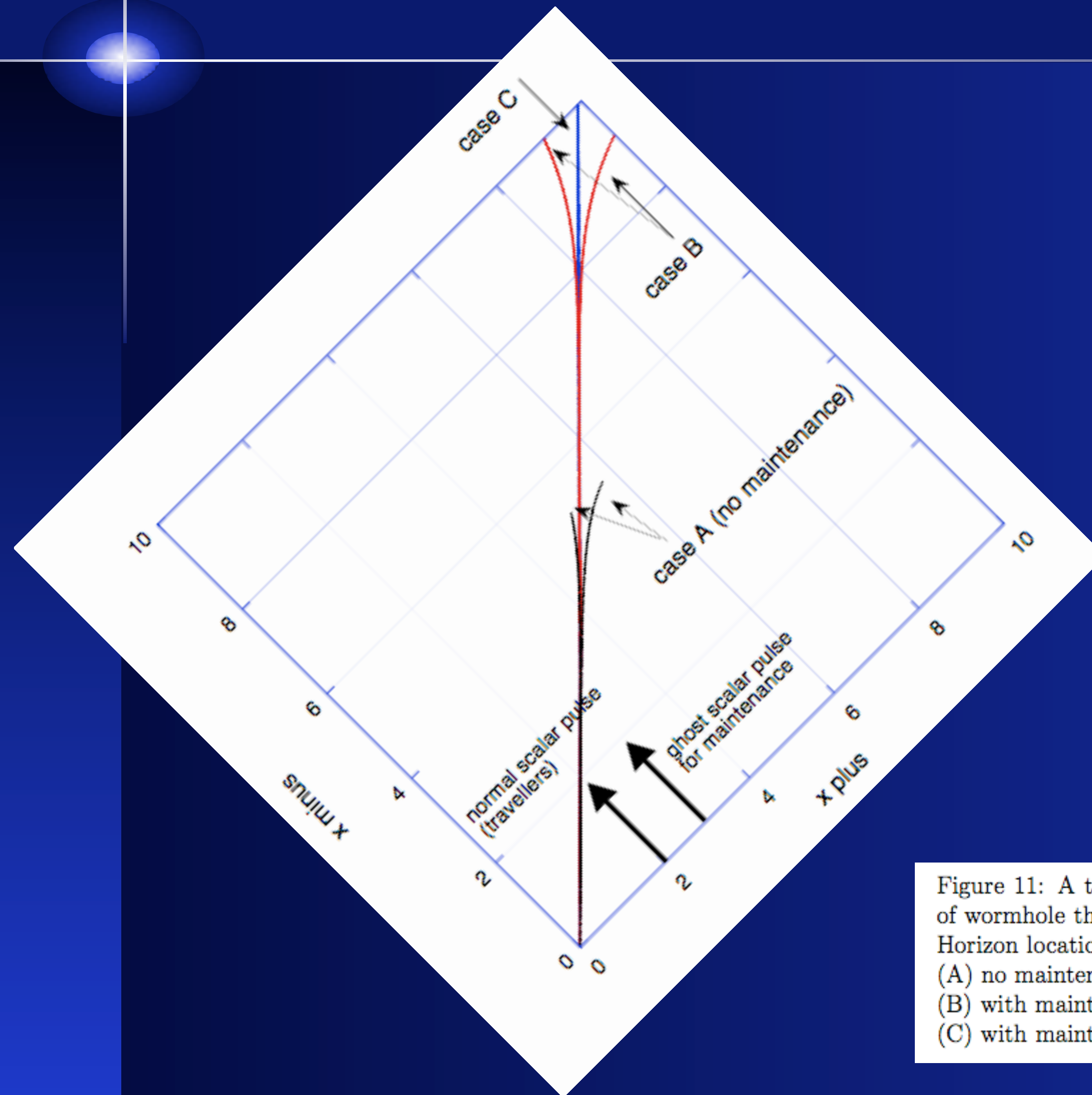
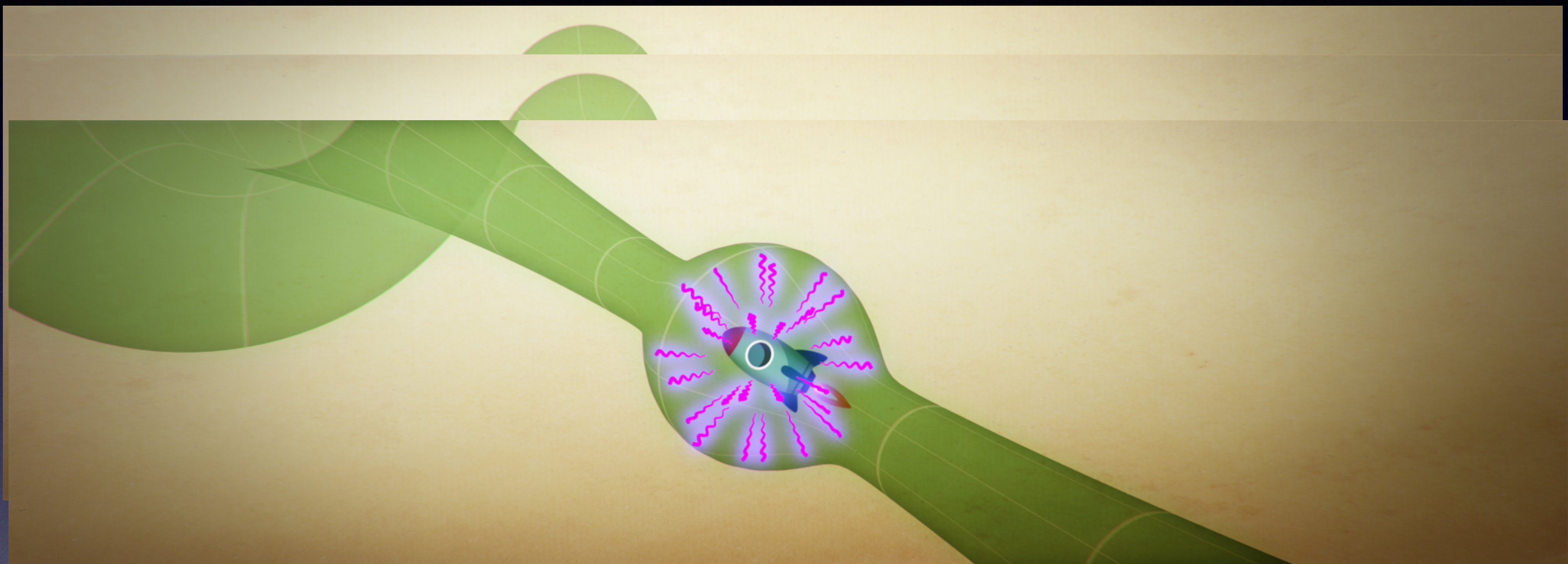


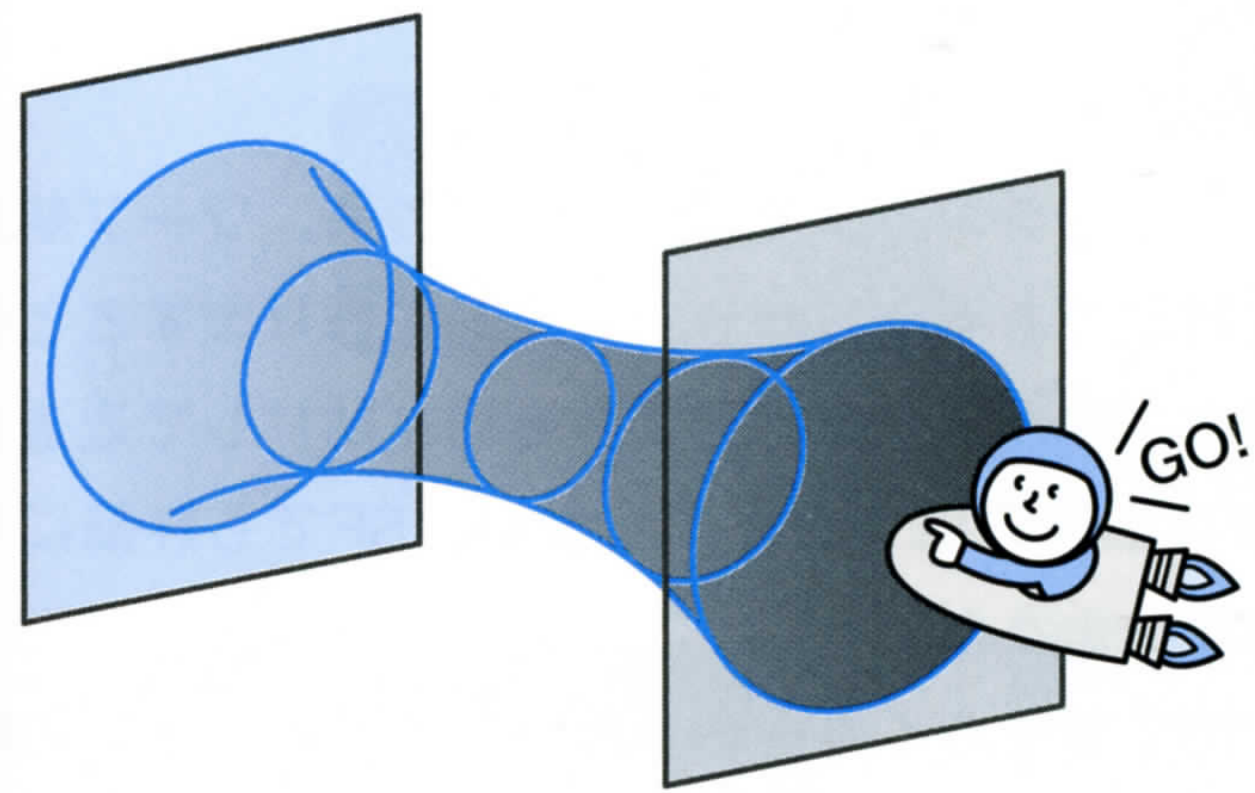
Figure 11: A trial of wormhole maintenance. After a normal scalar pulse, we signalled a ghost scalar pulse to extend the life of wormhole throat. The travellers pulse are commonly expressed with a normal scalar field pulse, $(\tilde{c}_a, \tilde{c}_b, \tilde{c}_c) = (+0.1, 6.0, 2.0)$. Horizon locations $\vartheta_+ = 0$ are plotted for three cases:
(A) no maintenance case (results in a black hole),
(B) with maintenance pulse of $(c_a, c_b, c_c) = (0.02390, 6.0, 3.0)$ (results in an inflationary expansion),
(C) with maintenance pulse of $(c_a, c_b, c_c) = (0.02385, 6.0, 3.0)$ (keep stationary structure upto the end of this range).



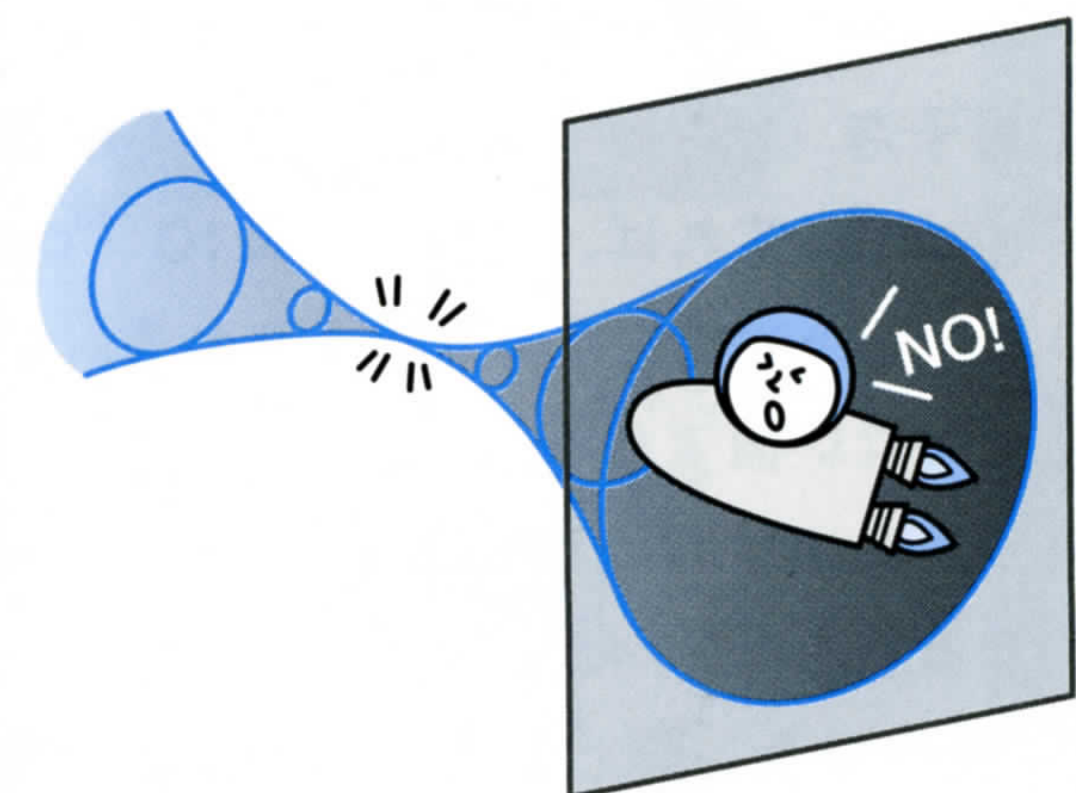


Time Machine &
Science of Space-time
(HS, 2011)

ワームホールを通過できるか

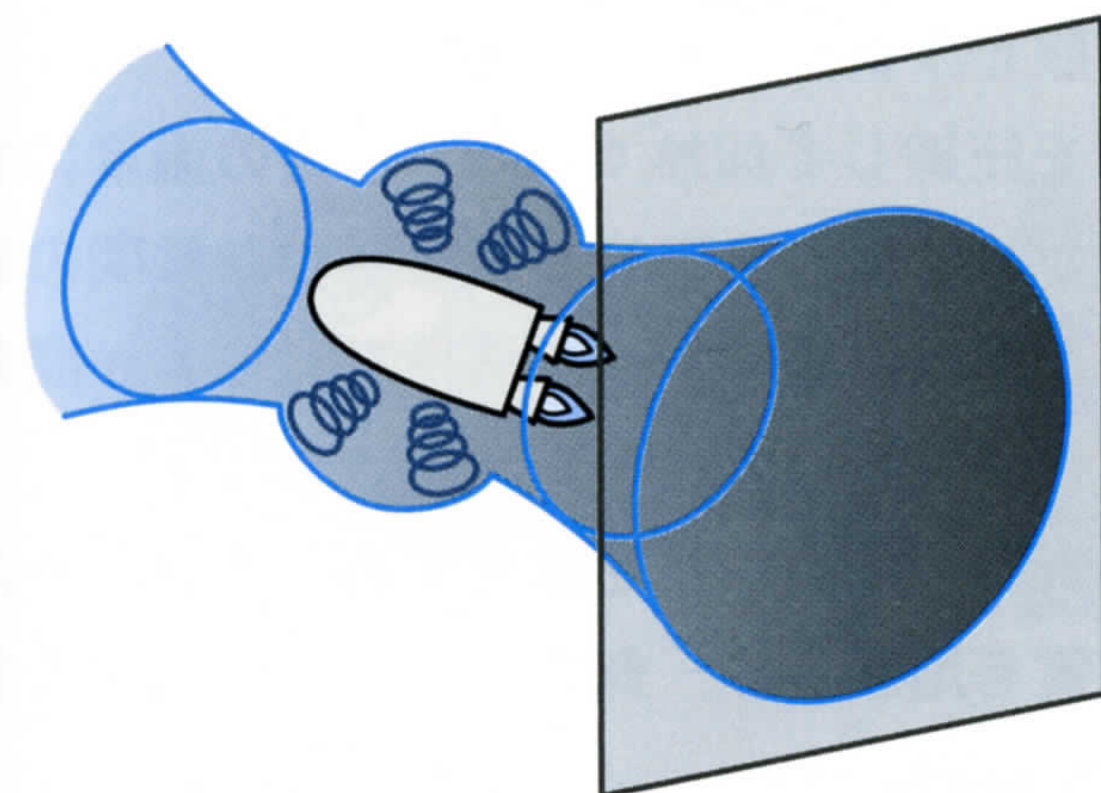


負のエネルギーで
支えられているワ
ームホールの中に、
正のエネルギーの
人間とロケットが
入るとどうなる？



結論1

何もしないと、ワーム
ホールは潰れてブラッ
クホールになってしまう。



結論2

負のエネルギービー
ムをうまく与えると、ワ
ームホールを潰さず
に通過することも可
能である。

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、コミュニケーション論を誌上講義。「ドラえもん」を題材に、わかりやすく解説します。

タイムトラベル論 講師

真貝寿明

Masaki Shinkai

大阪工業大学情報科学部教授

1966年生まれ。早稲田大学工学部物理学科、同大学大学院修士課程、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「相対性理論」宇宙論。

過去や未来へ行くことは、果たして可能なのか？

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作りあげた、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」の物語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つて、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1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。

過去に行く話はとうとうか「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、現在の自分も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つて親を殺してしまつと、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1つが、

「プロポーズ作戦」(てんと虫コミックス1巻)

12回目の結婚記念日の夜、パパとママが、どちらがプロポーズしたかで、大ゲンカ。のび太とドラえもんが、真相を確かめるべく12年前にタイムマシンで戻ってみると……。



親殺しのパラドックス&事後選択モデル

過去に行つて親を殺すと自分が存在しなくなるパラドックスと、未来で矛盾となる出来事はあらかじめ除外されるという考え方。

「あやうし！ライオン仮面」(てんと虫コミックス3巻)

フナコフフナ夫の人気連載漫画「ライオン仮面」の来月号を読みたくなったドラえもんは、1カ月後の未来へ。締め切りに追われた先生は、ドラえもんから来月号をもらって……。



作者不明のパラドックス

フナコフフナ夫のように、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。

「のび太も天才になれる?」(てんと虫コミックス32巻)

ママに脱税され、家出しようとして「宇宙救命ボート」でワープしたら、自分が住む町とそっくりなところに着く。学校では問題が簡単すぎて満点ばかり。天才になったとはしゃぐが……。



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、矛盾があつては許されません。未来へ行くタイムトラベ

4 キップ・ソーン
アメリカの物理学者。カリフォルニア工科大学教授。1988年に「ワームホール」の存在を証明し、ワームホール型タイムマシンを構築する。ワームホールは、時空のトンネル構造で、空間も時間もジャンプできる。ワームホールの存在を証明し、ワームホール型タイムマシンを構築する。ワームホールの存在を証明し、ワームホール型タイムマシンを構築する。

ワームホール

虫がトンネルをくりぬいて通うくもつと、時空の2次元をつなぐトンネルの存在。ワームホールは、虫がトンネルをくりぬいて通うくもつと、時空の2次元をつなぐトンネルの存在。ワームホールは、虫がトンネルをくりぬいて通うくもつと、時空の2次元をつなぐトンネルの存在。



エヴェレット3

ヒュー・エヴェレット3世
1977年、プリンストン大学の博士論文で多世界解釈を提唱。

あべこべ惑星

左右が逆で、西から太陽が昇り、ジャガイロやナスが女の子で、しらすや鰻が男の子という惑星。つまり、すべてがさかさまの世界。



ドイッチェ

イギリスの物理学者。量子力学のパイオニア。エヴェレットの多世界解釈を支持。

インター
ステラー

はるか遠くへ瞬間移動する「ワープ」は可能か？

『スタートレック』や『スターウォーズ』(1974年)のように、広大な銀河を宇宙船に乗って自在に移動する映像は、人々を魅了してきました。映画のように宇宙空間を自在に往来するには、光の速度(秒速30万キロメートル)よりも速く移動する技術が必要です。しかし、時空の性質を説明する理論である「相対性理論」によれば、いかなる物体も自然の最高速度である光速をこえることはできません。つまり、宇宙船そのものが光速をこえて移動することは、原理的に不可能です。

時空を操作し、宇宙船をワープさせる

そこで多くの宇宙もののSFでは、宇宙船自体を加速して超光速に到達させるのではなく、何らかの方法で時空を操作することで、宇宙船を別空間に“ワープ”させるという方法をえがいてきました。

中でも最も“現実的”といえる方法が、「ワームホール」です。ワームホールとは、相対性理論から予想される、はなれた2点間を結ぶ時空の構造のことです。ワームホールを通過すれば、何光年もはなれた場所に一瞬でワープできます。

ワームホールをはじめてえがいたSF作品が『コンタクト』です。原作小説の著者カール・セーガンは、宇宙の彼方にいる知的生命体に会いに行くために、科学的に可能な方法は何かを真剣に考えました。そこで、アメリカの物理学者キップ・ソーン博士(2017年にノーベル物理学賞)に相談したところ、ソーン博士が提案し

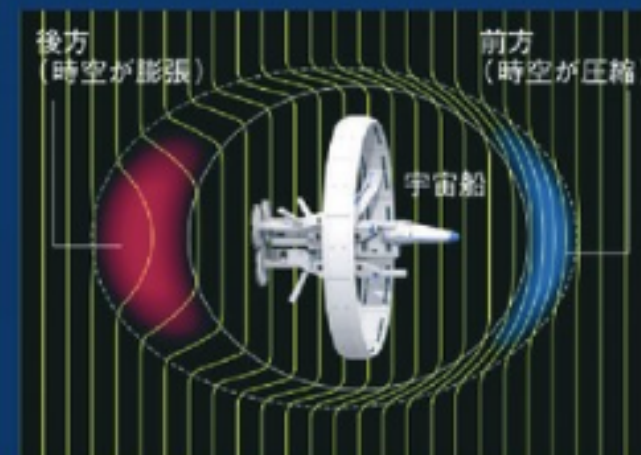
たのがワームホールだったのです。

ソーン博士が製作総指揮の一人を務めたSF映画『インターステラー』(2014年)でも、ワームホールが登場します。本作は、地球環境の荒廃により人類が絶滅の危機におちいる中、新たな移住先となる惑星をさがしに行く物語です。主人公のクーパーたちは、何らかの知的生命体によって土星の付近につくりだされたとされるワームホールを通過し、候補となる惑星に向かいます。

負の質量をもつ「エキゾチック物質」が必要

ワームホールは、一般相対性理論の基礎方程式の解としてみちびかれますが、実際に宇宙に存在しているかどうかはわかっていません。ワームホールを安定して存在させるには、「負の質量」をもち、重力に反発するなどの奇妙な性質をもつ「エキゾチック物質」を時空に注入する必要があります。負の質量をもつ状態は極小領域で瞬間的には存在しますが、その状態をエキゾチック物質としてとりだせるのか、さらにはワームホールを安定化させるのに必要な量を集めることが可能かどうかはまったく不明だと大阪工業大学の真貝寿明教授はいいます。

ワームホールを使わずにワープする方法も提案されています。メキシコの物理学者、ミゲル・アルクビエレ博士が考案したアルクビエレ・ドライブです。ワープがほんとうに実現するかはわかりませんが、科学的に不可能だと証明されたわけではないのです。



アルクビエレドライブ

アルクビエレドライブは、宇宙船を特殊な“時空の泡”でつつむという方法です。時空の泡の前方は空間を収縮させる性質をもち、後方は時空を膨張させる性質をもちます。そのため、時空の泡は全体として前へ進むことになります。そして、この時空の泡の外から見ると、時空の泡が光速を超えて進んでも、相対性理論と矛盾しないといえます。ただし、この実現についても、負の質量をもつエキゾチック物質が必要であると考えられています。

時空の“虫食い穴”を通して瞬間移動する

空間を2次元の面で表現した場合のワームホールをえがきました。空間が砂時計状に曲がった部分がワームホールです。映画『インターステラー』では、紙とペンを使ってワームホールを説明するシーンがあります。紙のはなれた場所に二つの点を打ち、紙を折りたたんで二つの点を重ね、ペンでその二つの重なった点を貫通させます。このペンでつらぬいた部分が、はなれた時空の2地点を結ぶワームホールのイメージに相当します。

エキゾチック物質で補強したワームホール

SFは実現可能か？

ワープから透明マントまで SFは実現可能か？

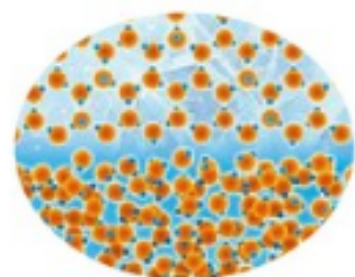
SF（サイエンス・フィクション）にえがかれてきた未来技術は、科学の発展によって、いつか本当に実現するかもしれません。ワープから透明マントまで、想像力をふくらませながら空想と現実世界の間を行き来してみましょう。

Newton ニュートン 編集部から 科学を先取り SFの可能性

「人間が想像できることは必ず実現できる」。SFの父といわれる作家ジュール・ベルヌの言葉です。ロボットや携帯電話などの今では当たり前前の技術も、かつてはSFにえがかれたものでした。現時点では到底不可能に思えるSFの世界も、将来実現する可能性が十分にあるのです。地球外知的生命体との出会いがテーマのSF映画「コンタクト」には、遠い星への移動手段としてワームホールが登場します。このアイデアを提供した物理学者キップ・ソーン氏は、ワームホールが安定して存在できる条件を理論的に考察して論文に残しました。すぐれたSF作品は、科学そのものを発展させる原動力になるのです。

私がおすすしめしたいSF作品は、手塚治虫の名作マンガ「火の鳥」です。寿命の克服、ロボット、人工知能など、現代的な科学のテーマをことごとく先取りしていることに驚かされます。多くの科学ファンに今こそ読まれてほしい作品です。（板倉龍・Newton編集部長）

最新1月号のNewtonは 11月26日発売



第2特集

感動する化学

ありふれた物質である「水」は、化学の目で見れば実はとても風変わりな物質です。氷が水に浮くのも、その変わった性質のおかげ。読んだらきっと感動する、摩訶不思議な化学の世界へと招待します。

朝日新聞デジタルで
第1特集を全部読み



朝日新聞デジタルのプレミアムコース、ダブルコースでは、Newton最新号の第1特集30分相当を全て読むことができます。毎月26日更新で、期間は各号90日間です。

雑誌の購読は
こちらから



今月のNewtonは26日発売です（一部地域を除く）。定価1190円（電子版は950円）。お求めは書店やAmazonなどから。割引がある定期購読もあります。



攻殻機動隊

体を透明にして 身をかくことは可能なのか？

人と機械が融合した未来社会をえがいた人気漫画『攻殻機動隊』（1989年）には、「光学迷彩」とよばれる透明化技術が登場します。1999年、東京大学の稲見昌彦教授がこの光学迷彩を開発し、大きな注目を集めました。

周囲の風景を 体の上に映し出す

『攻殻機動隊』では、光学迷彩を身にまとい透明になった主人公の草薙素子が敵の目をかいくぐり、任務を遂行するシーンがえがかれます。しかし厳密には、光学迷彩は自分の姿を透明にしているのではなく、周囲の風景を自分の体に映し出すことで環境の中にとけこみ、相手から自分の存在を気づかれないようにするという技術です。動物のカメレオンのように、周囲の環境に「擬態」する技術といってもいいでしょう。

稲見教授はこの技術を、「再帰性反射材」とよばれる特殊な素材を利用

することで実現しました。通常、プロジェクターで風景を体の上に映しだしても、光が乱反射して映像が歪んでしまいます。また周囲が明るいと、映像がはっきり見えません。しかし再帰性反射材は、光が入射したのと同じ方向に反射する性質をもつため、プロジェクターで投影した光が乱反射せず、見ている人の側に直接もどってきます。そのため、再帰性反射材を用いたマントを身にまとい、明るい環境でも背後の景色をはっきりと映し出すことができるのです。

稲見教授が開発した光学迷彩の技術は、さまざまな応用が検討されています。たとえば、自動車の中を透明化して、外の景色が見えるようにする「透明コックピット」です。車の内装に再帰性反射材を用い、そこに外の景色を投影することで、車内がすげているように見えるのです。車をバック駐車する際に後部座席を透明化することで、駐車しやすくなる

ことも可能です。

稲見教授は、「たとえば、車の中に空の景色を投影すれば、まるで空の上を車で走っているような体験ができます。透明コックピットは自動運転と相性がよいので、今後自動運転が普及することで、この技術も広く使われるようになっていくことでしょう」と語ります。

光の屈折を制御して 透明になる

光学迷彩のほかにも、透明化の研究は進んでいます。たとえば、生体組織の屈折率を化学的に変化させて、マウスの死体を透明にしてしまう技術などが研究されています。また、自然界には存在しない「負の屈折率」をもつ「メタマテリアル」という特殊な物質を使って、光の軌道を対象をまわりこむようにすることで、透明にみせる技術もあります。光学迷彩だけでなく、透明マントも今後実現するかもしれません。

メタマテリアルで透明マントをつくる

「メタマテリアル」は、自然界にはない特性をもつ人工的な物質のことです。物質の中に光の波長（可視光は380～780ナノメートル）よりも小さな微細構造を組みこむことで、通常の物質では不可能な方向に光を屈折させるなど、物質の光学特性を自在に操作することができます。この性質を応用すれば、SFに登場するような「透明マント」をつくることも理論的には可能だと考えられています。

右に、メタマテリアルで「透明マント」を実現する原理をえがきました。川の中に石を置くと、水が石を避けるように迂回し、ふたたび元の流れにもどります。これと同じように、屈したい物体をメタマテリアルで置くと、物体の背後から向かってくる光が物体のまわりを迂回して通り抜けます。これにより、私たちの目には物体の背景だけが見えるので、物体は視界から消えたように見えるのです。



Newton Special

4. 現代物理2:原子・素粒子の理論(量子論)

光はドップラー効果を起こす
また, 屈折・回折・干渉 の実験から,
光は波であることは確実である.

しかし
光は粒子である, と考える必要が生じた.

2つは矛盾する. どう考えたらよいか.

レポート課題 「量子論の解釈論争」(12月28日締切)

- 光を波と考えるか粒子と考えるかの論争点は何か.
- 解決策は何か.

キーワード

確率解釈, 不確定性原理, シュレーディンガーの猫...

水・音・光 波に共通する特徴

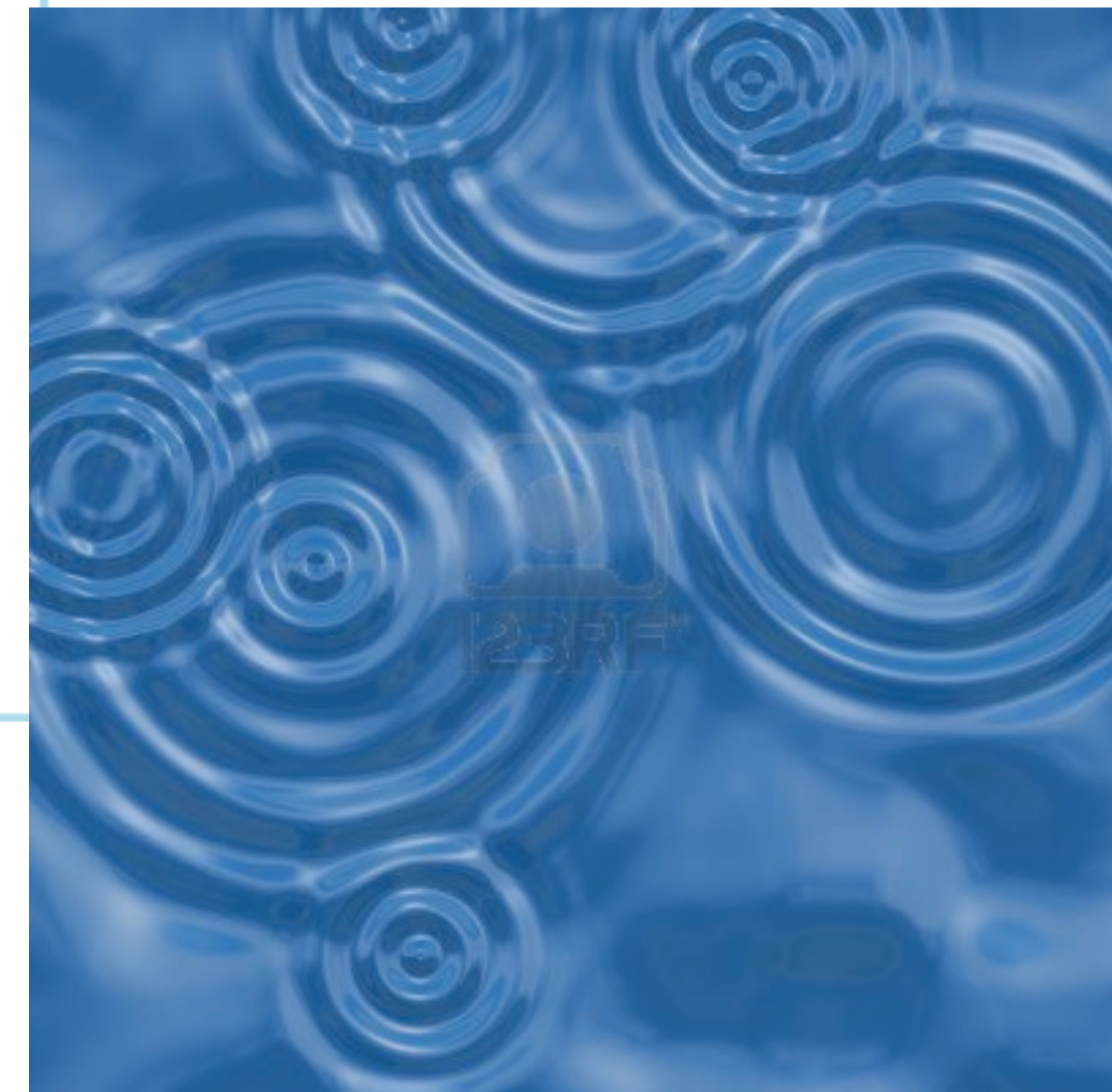
波の特徴

- ある時刻で全体像をとらえたとき，同じ形状の間隔を波長 λ （単位は [m]）という．波の振れる幅を振動中心から測った長さを振幅 A （単位は [m]）という．
- ある場所で止まって観測したとき，一定時間ごとに同じ形の振動を繰り返す．この時間を周期 T （単位は [s]）という．1 秒間に何回振動するかという量を振動数 f （単位は [Hz]）という．

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{振動数 [Hz]} = \frac{1}{\text{周期 [s]}} \quad (\text{A.18})$$

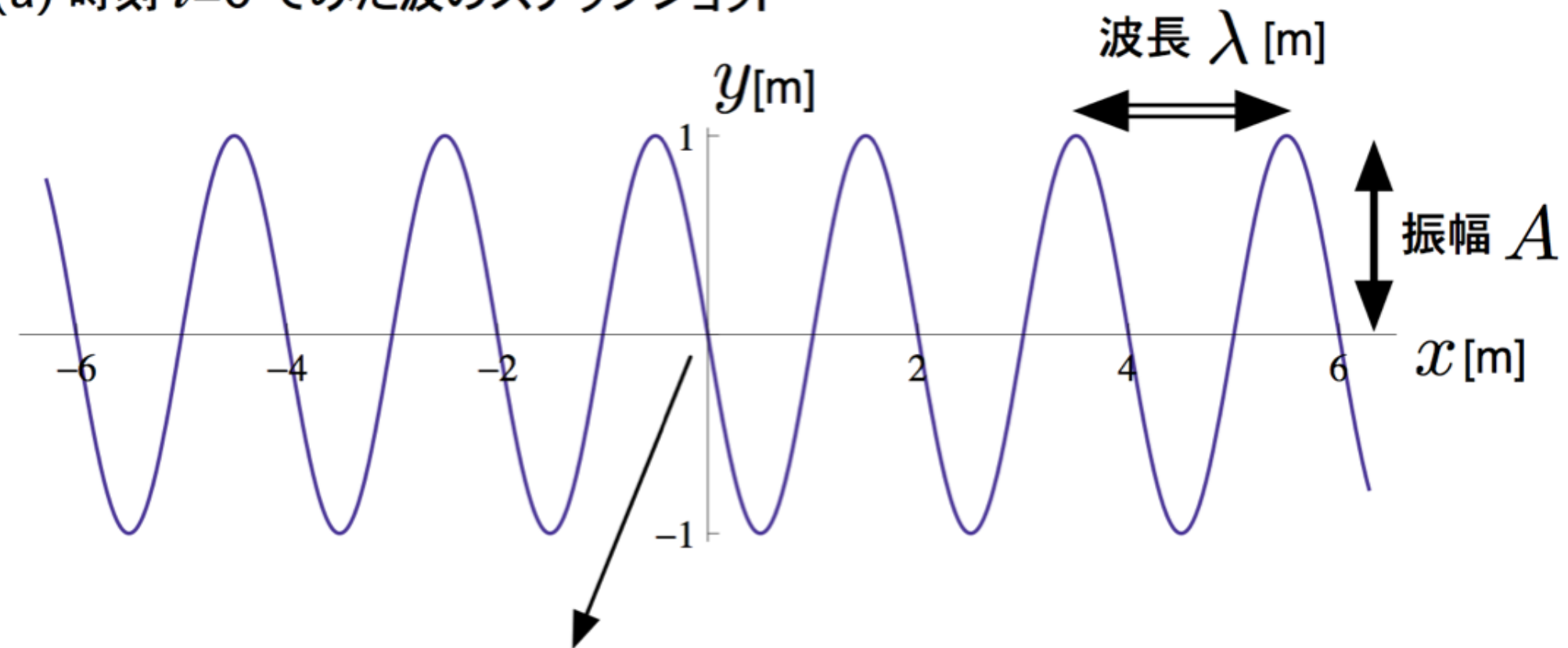
- 波の伝わる速さ v [m/s] を次のように決める．

$$v = f\lambda \quad \text{速さ [m/s]} = \text{振動数 [Hz]} \times \text{波長 [m]} \quad (\text{A.19})$$

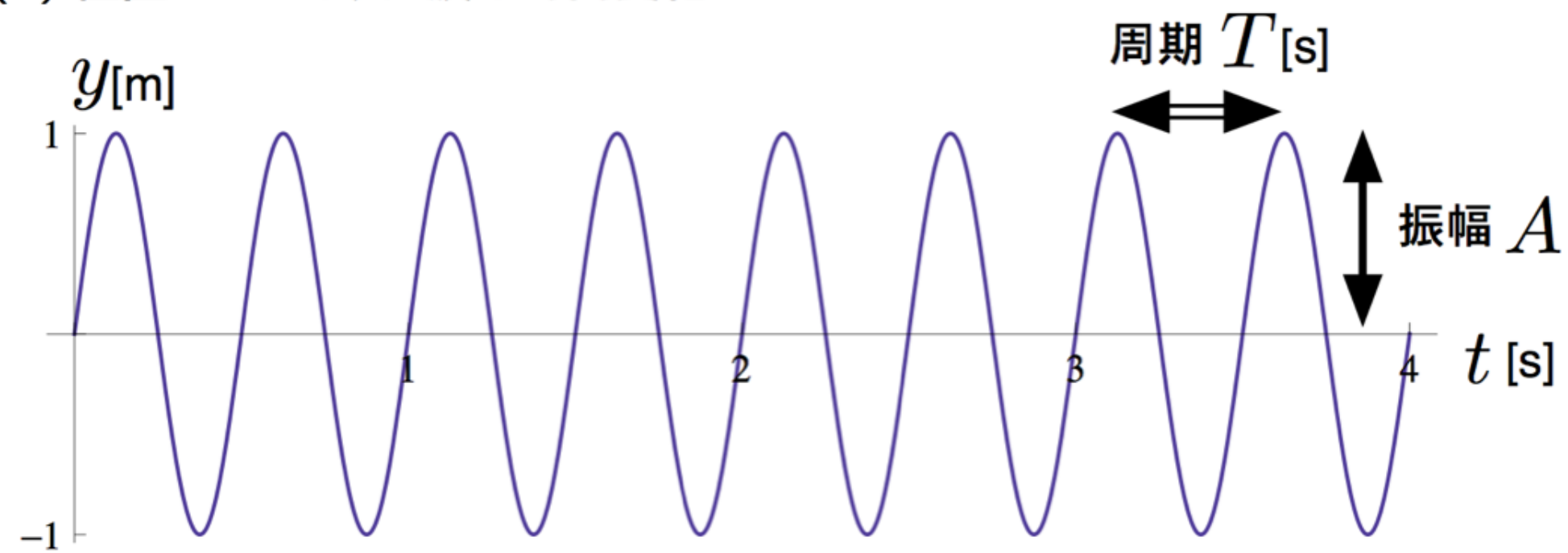


波を表す物理量

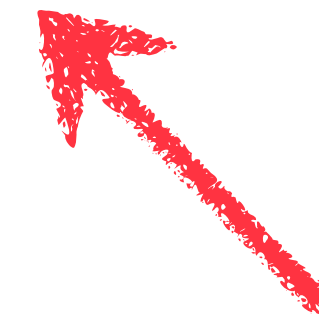
(a) 時刻 $t=0$ でみた波のスナップショット



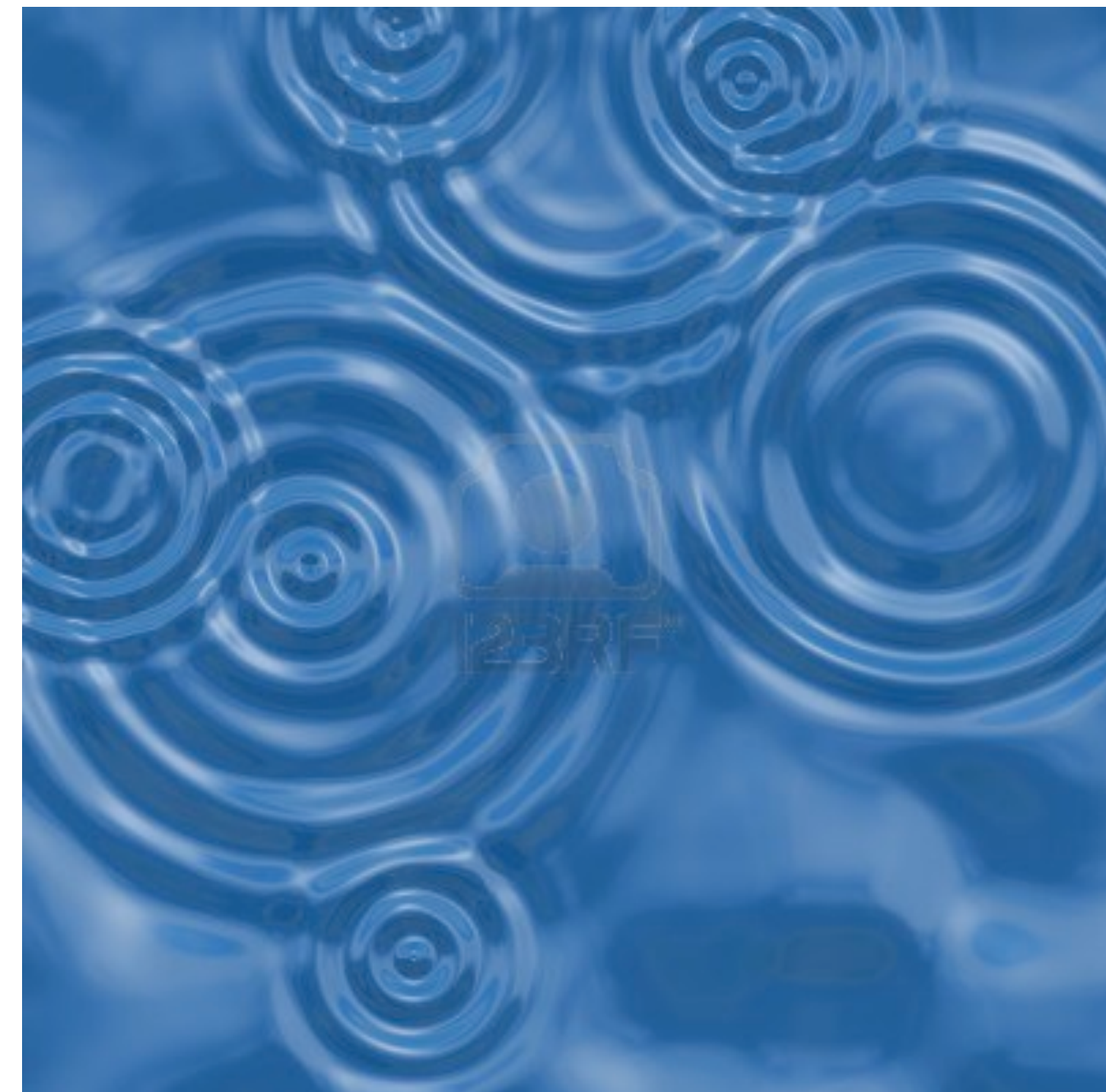
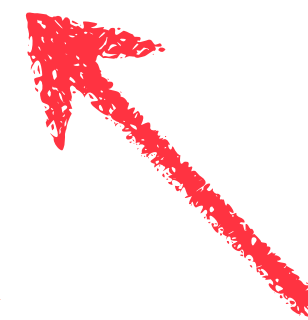
(b) 位置 $x=0$ でみた波の時間変化



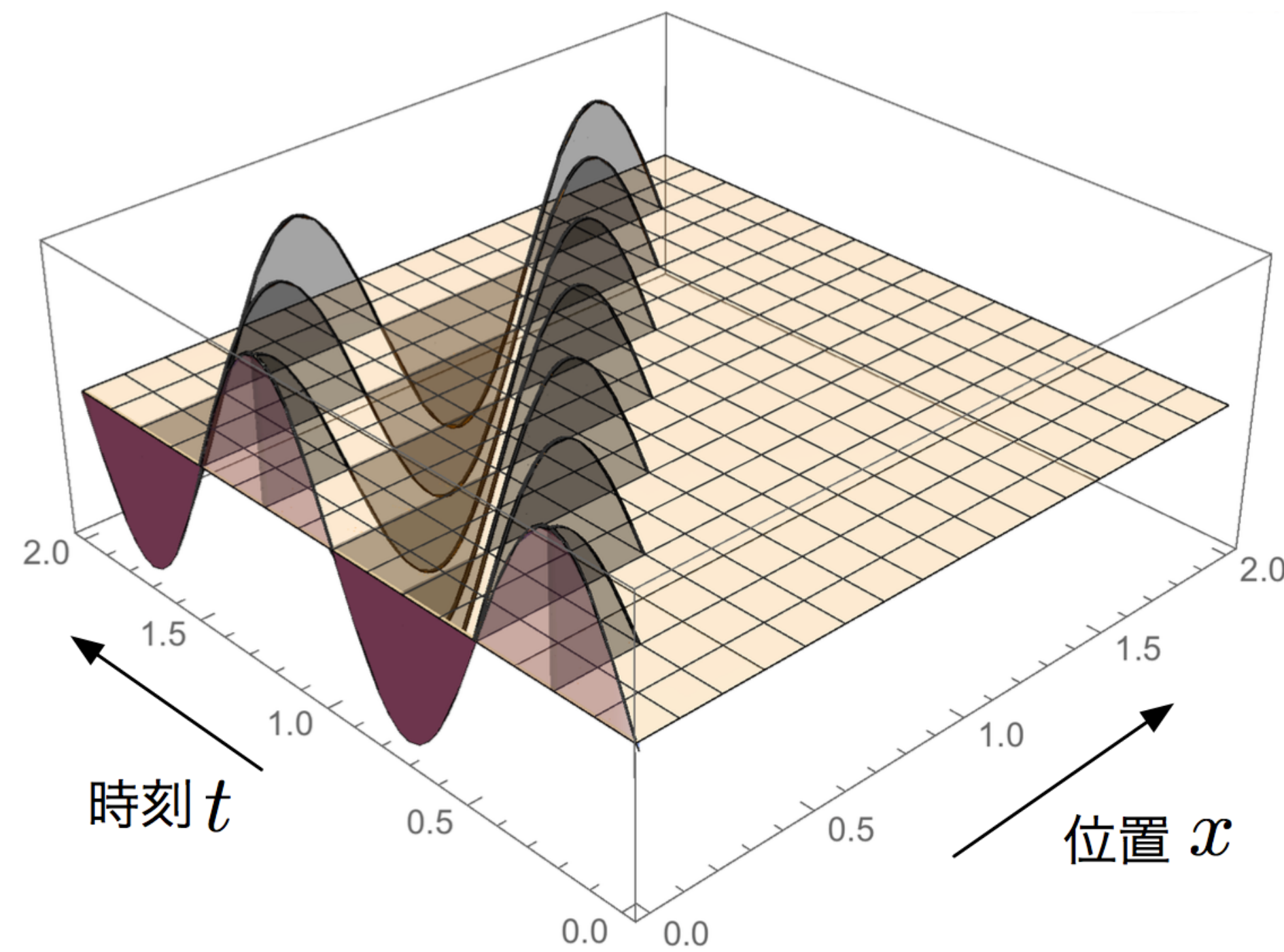
「写真を撮る」
「全体図を知る」



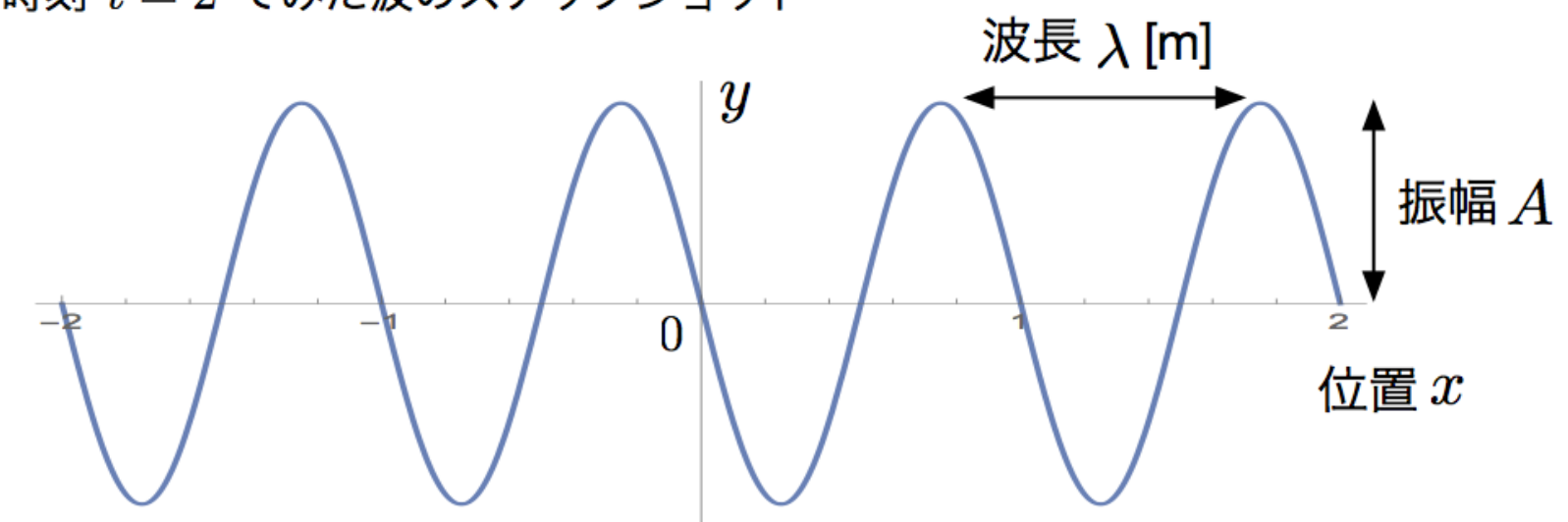
「1カ所での動きを見る」



波を表す物理量



(a) 時刻 $t = 2$ でみた波のスナップショット



(b) 位置 $x = 0$ でみた波の時間変化

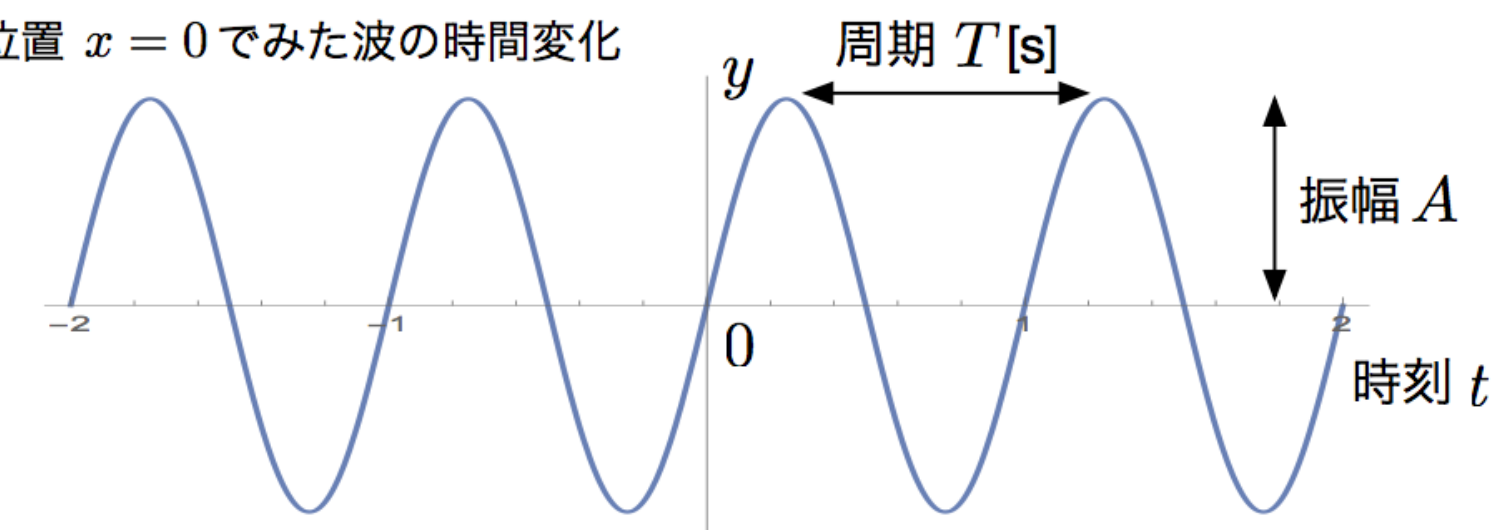
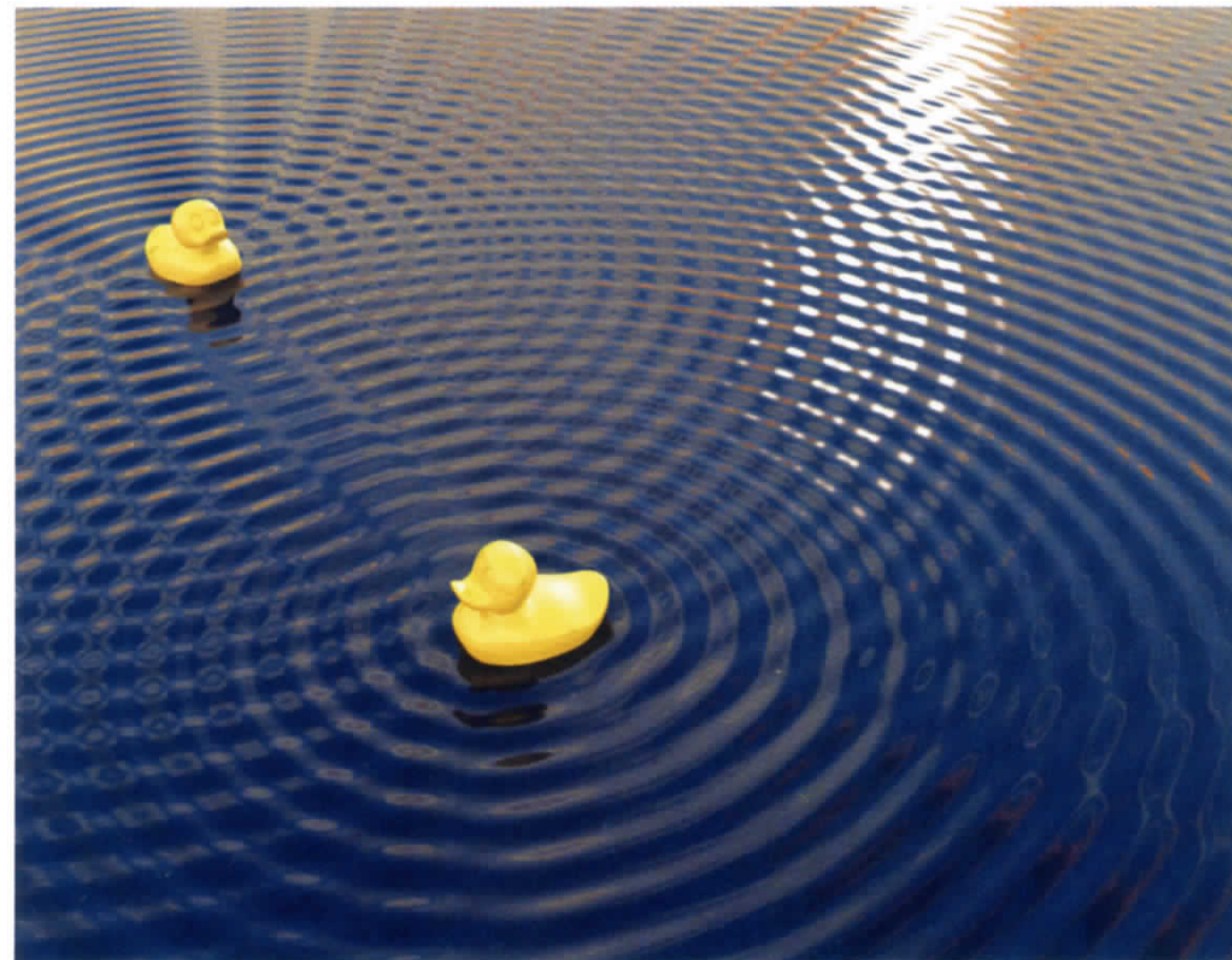


図 A.6 正弦波の伝わる様子. ある時刻で写真を撮っても, 1 か所で止まって時間変化を観測しても, 周期的な変動になる. [左] 位置 $x = 0$ で単振動している波源から, x 軸の正の向きに正弦波の伝わる様子を $1/4$ 周期ごとの波形を並べて示した. [右] (a) x 方向に進む振幅 A , 波長 $\lambda = 1$ [m] の波を時刻 $t = 2$ でみた図. (b) は, この波を位置 $x = 0$ で観測したもの. 周期 $T = 1$ [s] であることがわかるので, この波の速さ v は, $v = \lambda/T = 1$ [m/s] である.



Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

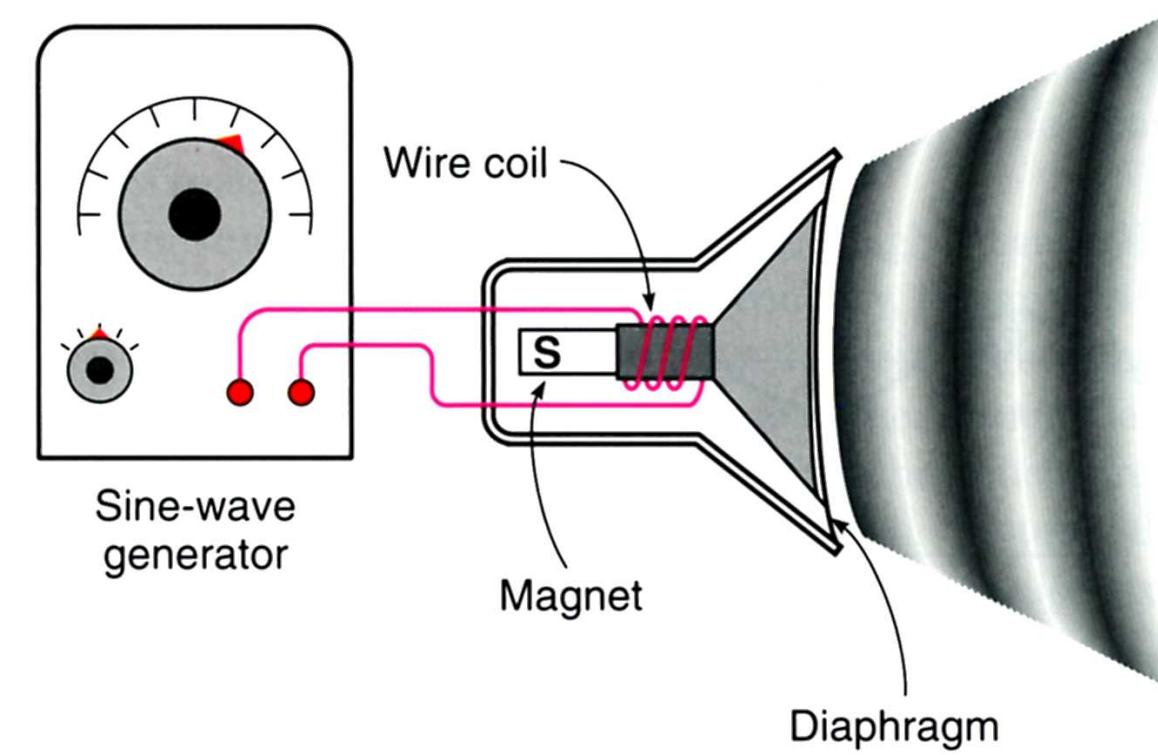


figure 15.15 An oscillating current applied to the coil of wire attached to the diaphragm of a speaker makes the diaphragm oscillate as it is attracted to or repulsed by the magnet, generating a sound wave.

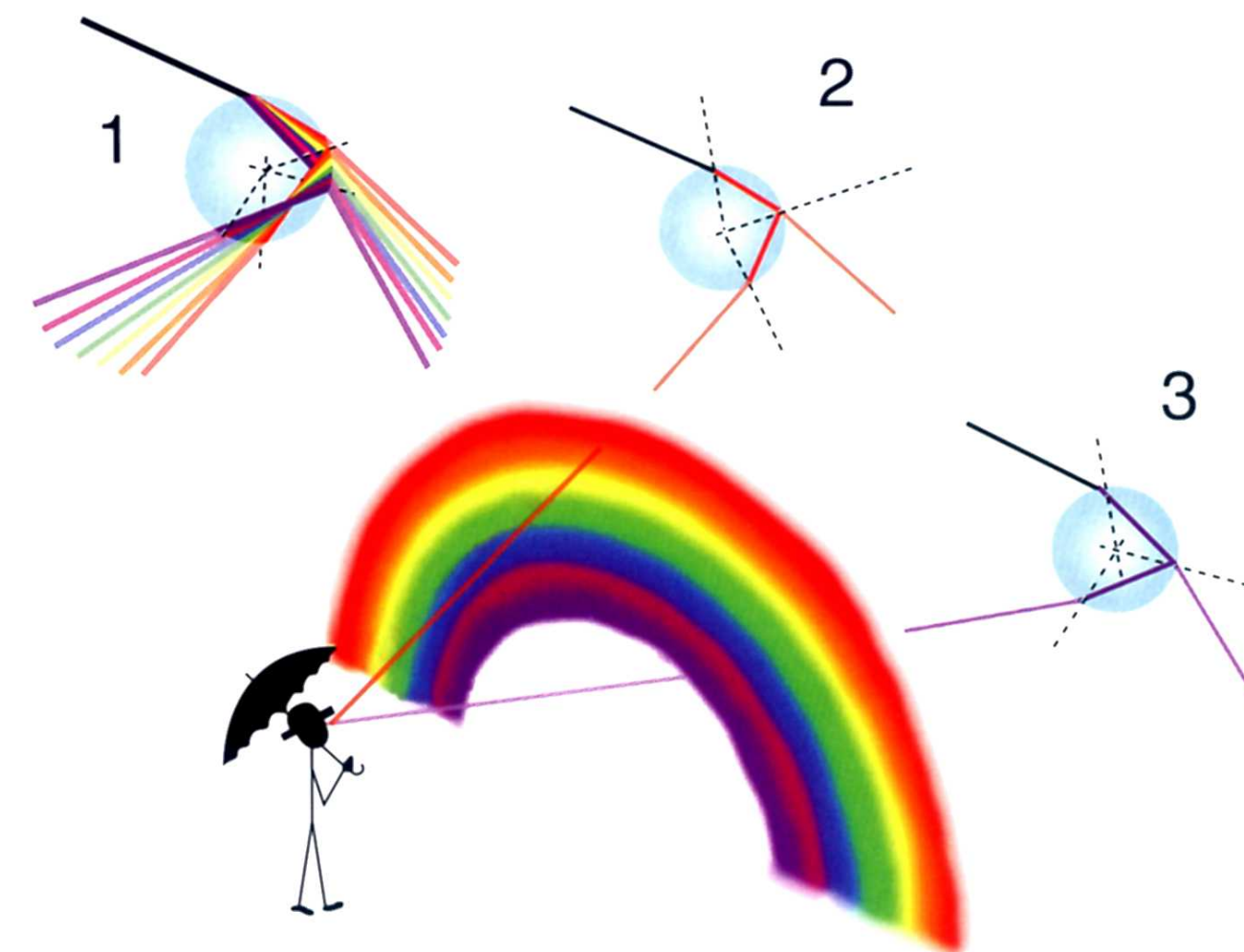
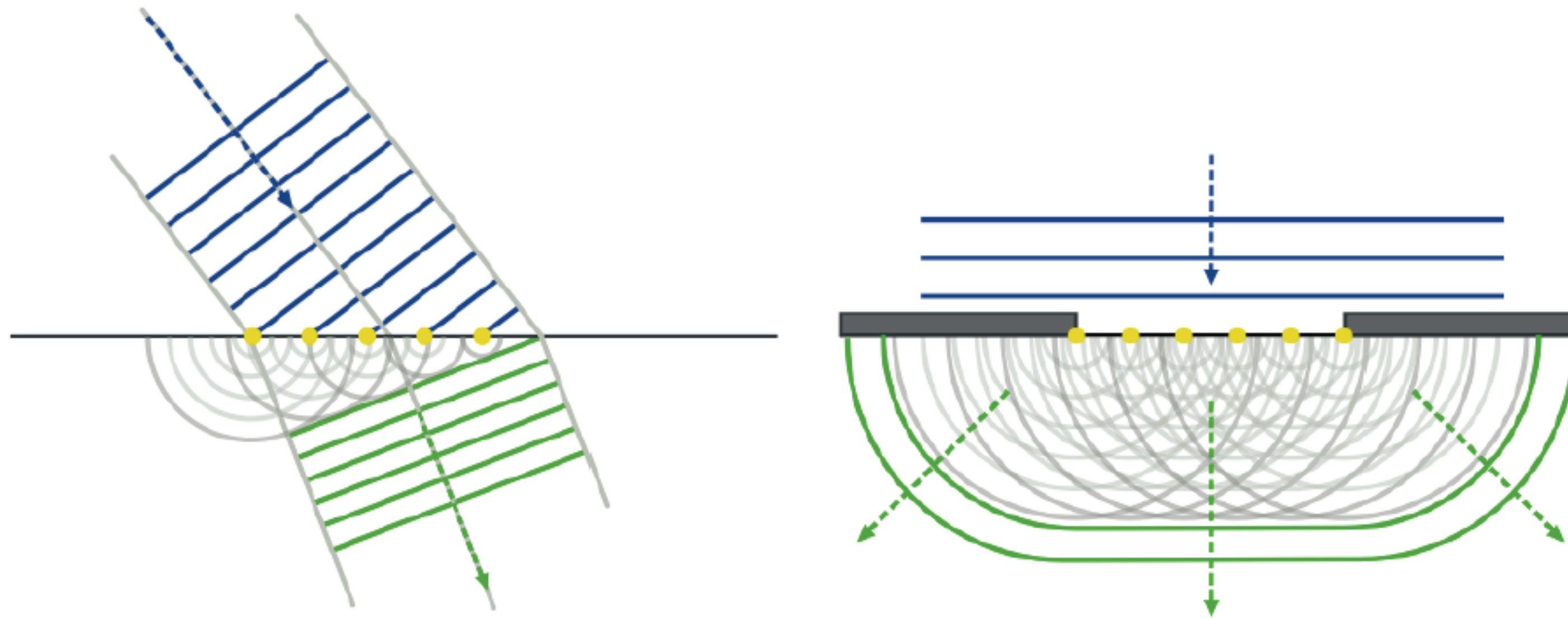


FIGURE 2.19 ► How the rainbow forms. Each water droplet, schematically represented by a sphere, is penetrated by white light, which is dispersed, then partly refracted outside the droplet, partly internally reflected.

屈折 と 回折

波の特徴：屈折と回折

- 波は媒質が異なるところへ進むとき、**屈折**する。(ホイヘンスの原理)
- 波は障害物の後ろにも**回折**して進む。(ホイヘンスの原理)



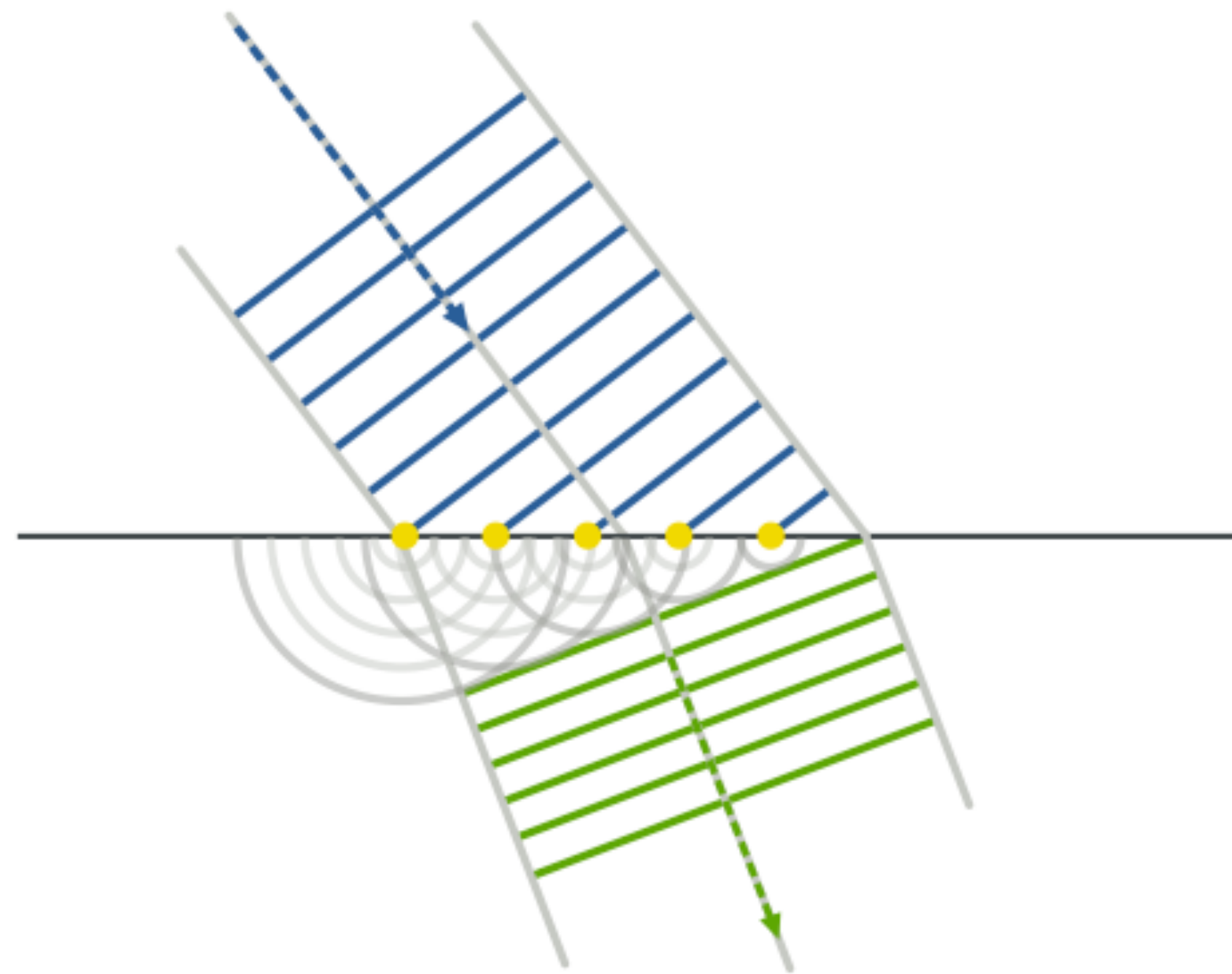
Christiaan Huygens
(1629–95)



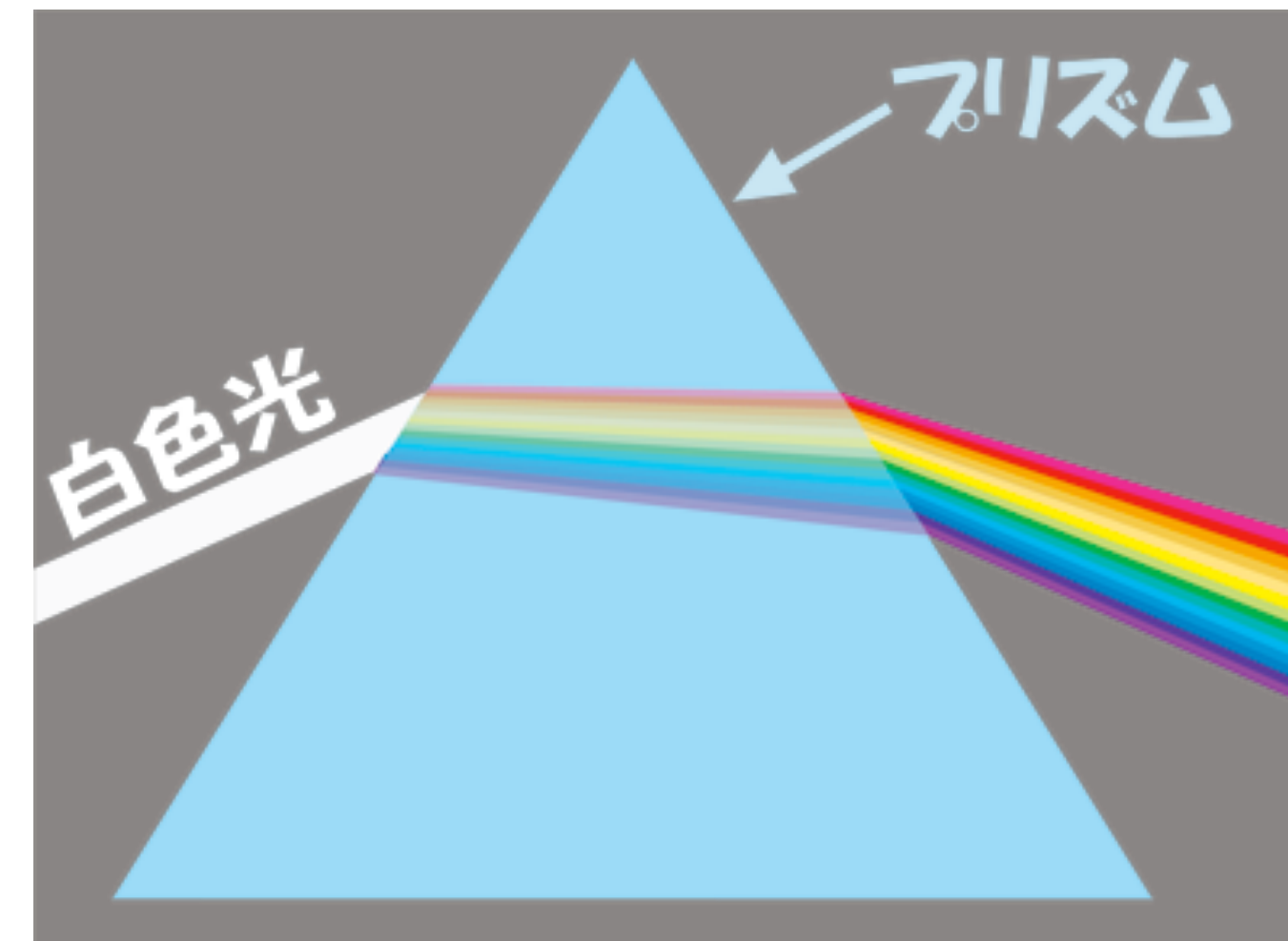
図 5.3 〔左〕屈折, 〔右〕回折. (<http://ja.wikipedia.org/wiki/ホイヘンスの原理>)

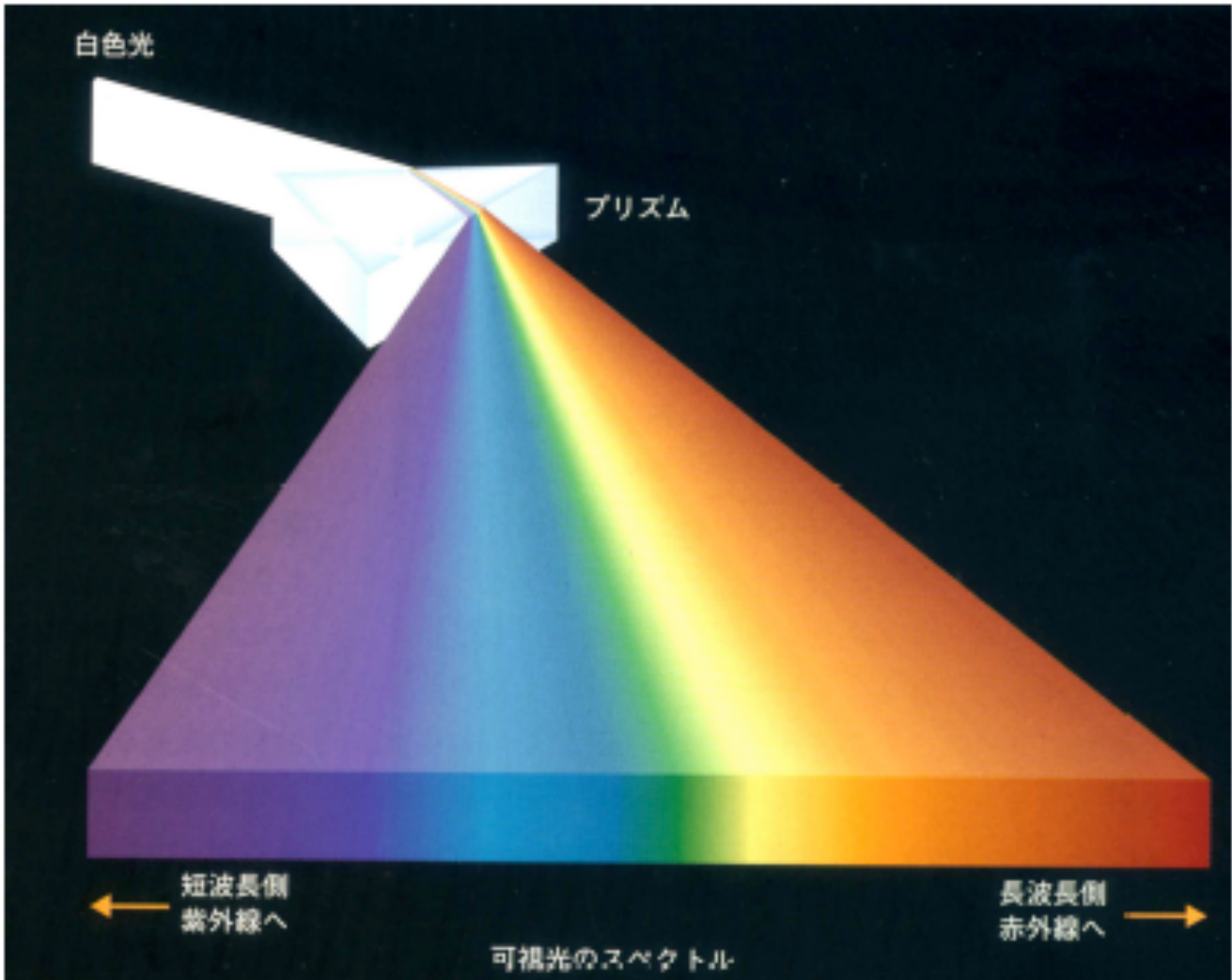
屈折 (refraction)

媒質が異なるところへ進むとき、波は**屈折**する。



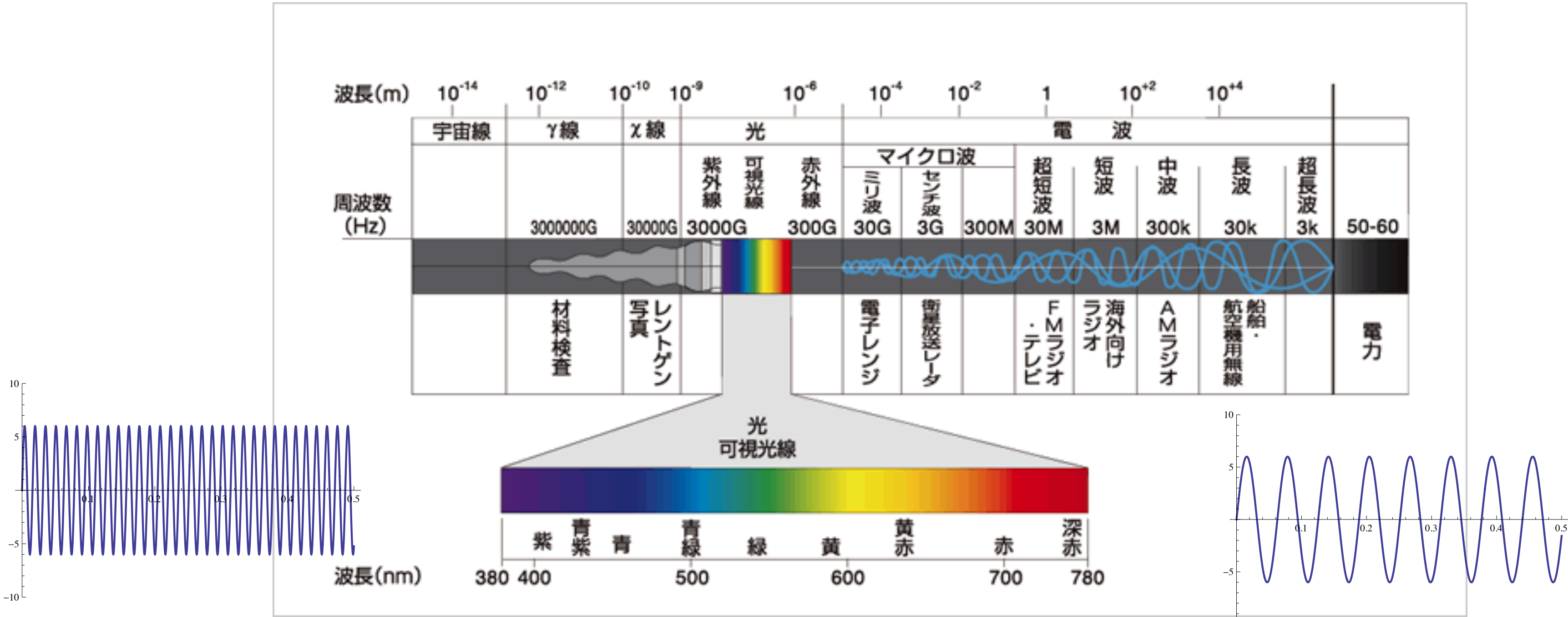
波は素元波の合成である
(ホイヘンス)





●電磁波の分類

名称		波長(振動数)	おもな利用例
γ線		$1 \times 10^{-10} \text{m}$ 以下	食品照射, 医療
X線		$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-8} \text{m}$	X線写真, 医療
紫外線		$1 \times 10^{-9} \sim 3.8 \times 10^{-7} \text{m}$	殺菌, 化学作用の利用
可視光線		$3.8 \times 10^{-7} \sim 7.7 \times 10^{-7} \text{m}$	光学器械
赤外線		$7.7 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-3} \text{m}$	赤外線写真, 暖房
電波	マイクロ波	$10^{-4} \sim 1 \text{m}$ ($3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{12} \text{Hz}$)	携帯電話, 電子レンジ
	超短波	$1 \sim 10 \text{m}$ ($3 \times 10^7 \sim 3 \times 10^8 \text{Hz}$)	FM ラジオ放送, テレビ放送
	短波	$10 \sim 10^2 \text{m}$ ($3 \times 10^6 \sim 3 \times 10^7 \text{Hz}$)	短波ラジオ放送
	中波	$10^2 \sim 10^3 \text{m}$ ($3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6 \text{Hz}$)	AM ラジオ放送
	長波	$10^3 \sim 10^4 \text{m}$ ($3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5 \text{Hz}$)	飛行機の通信, 電波時計
	超長波	$10^4 \sim 10^5 \text{m}$ ($3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4 \text{Hz}$)	



光のドップラー効果

音源と観測者が相対的に近づく

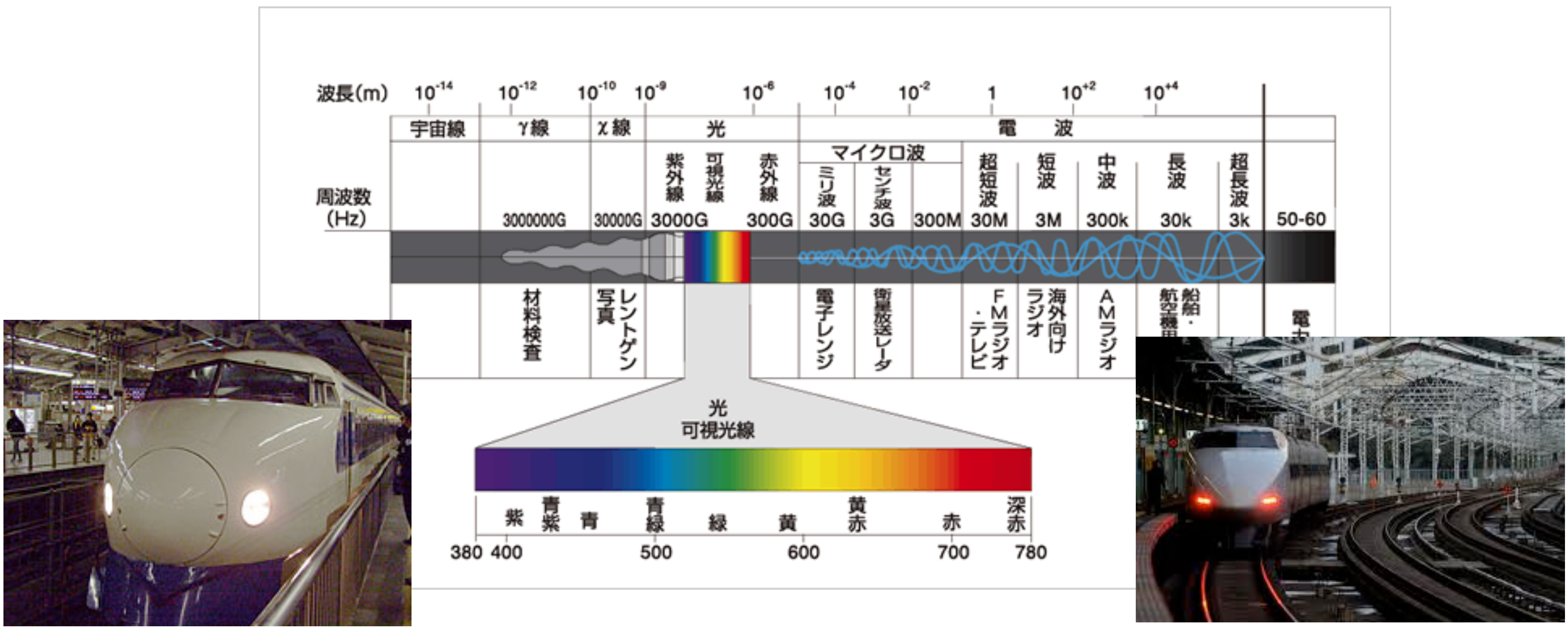
= 音が高くなる

= 色が青くなる

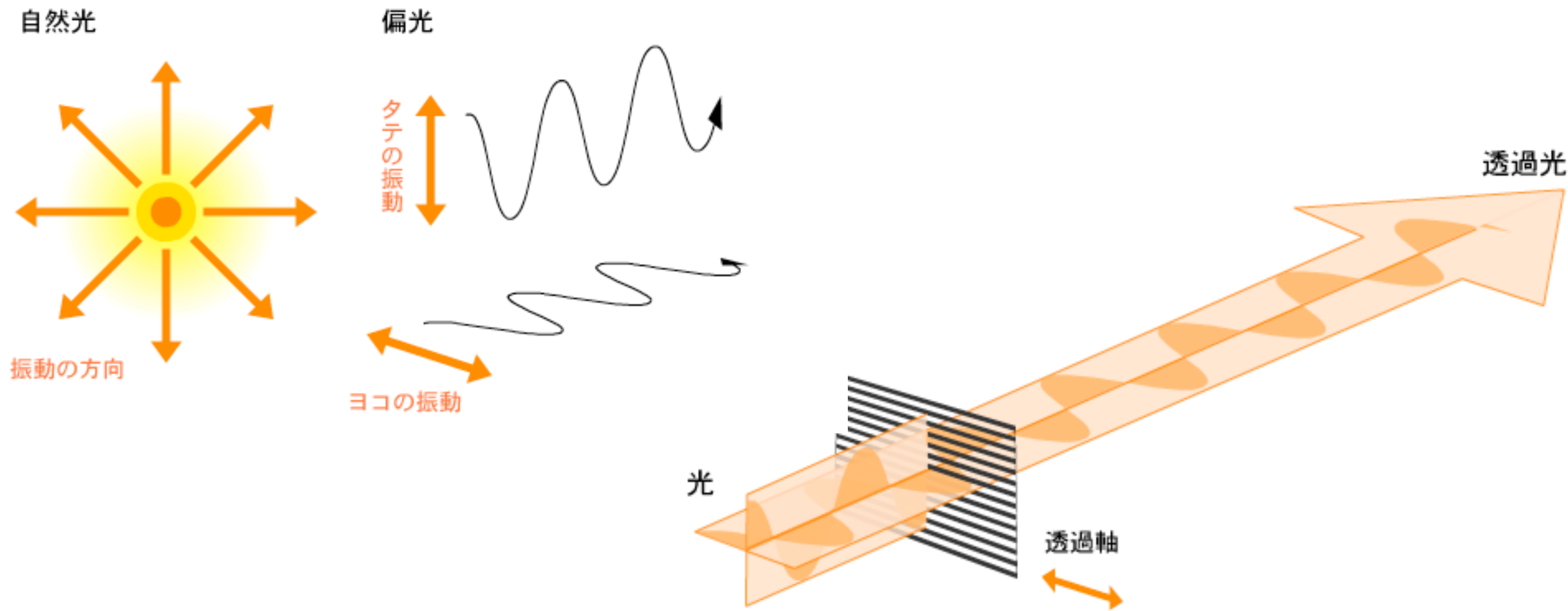
音源と観測者が相対的に遠ざかる

= 音が低くなる

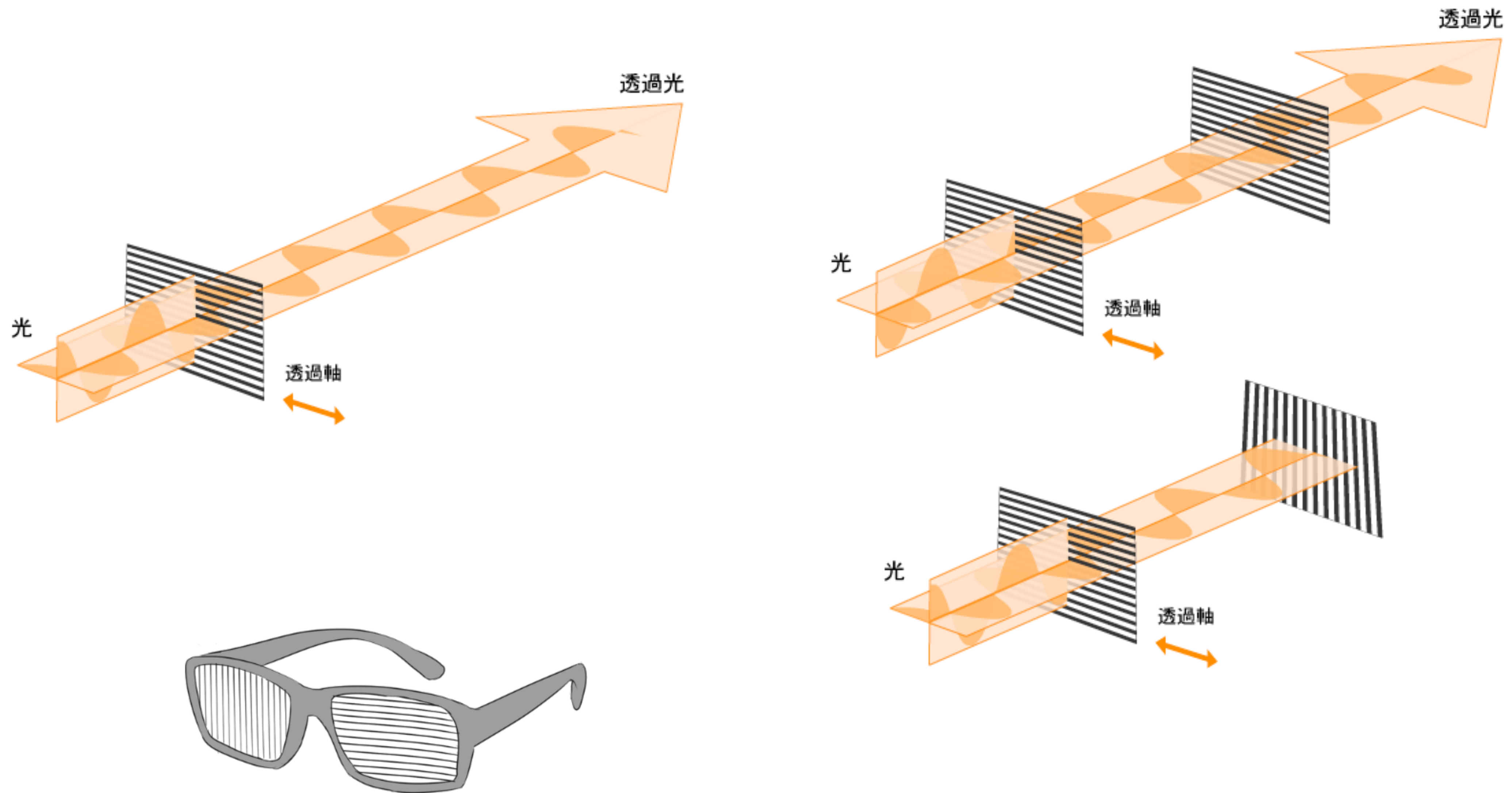
= 色が赤くなる



光は横波である

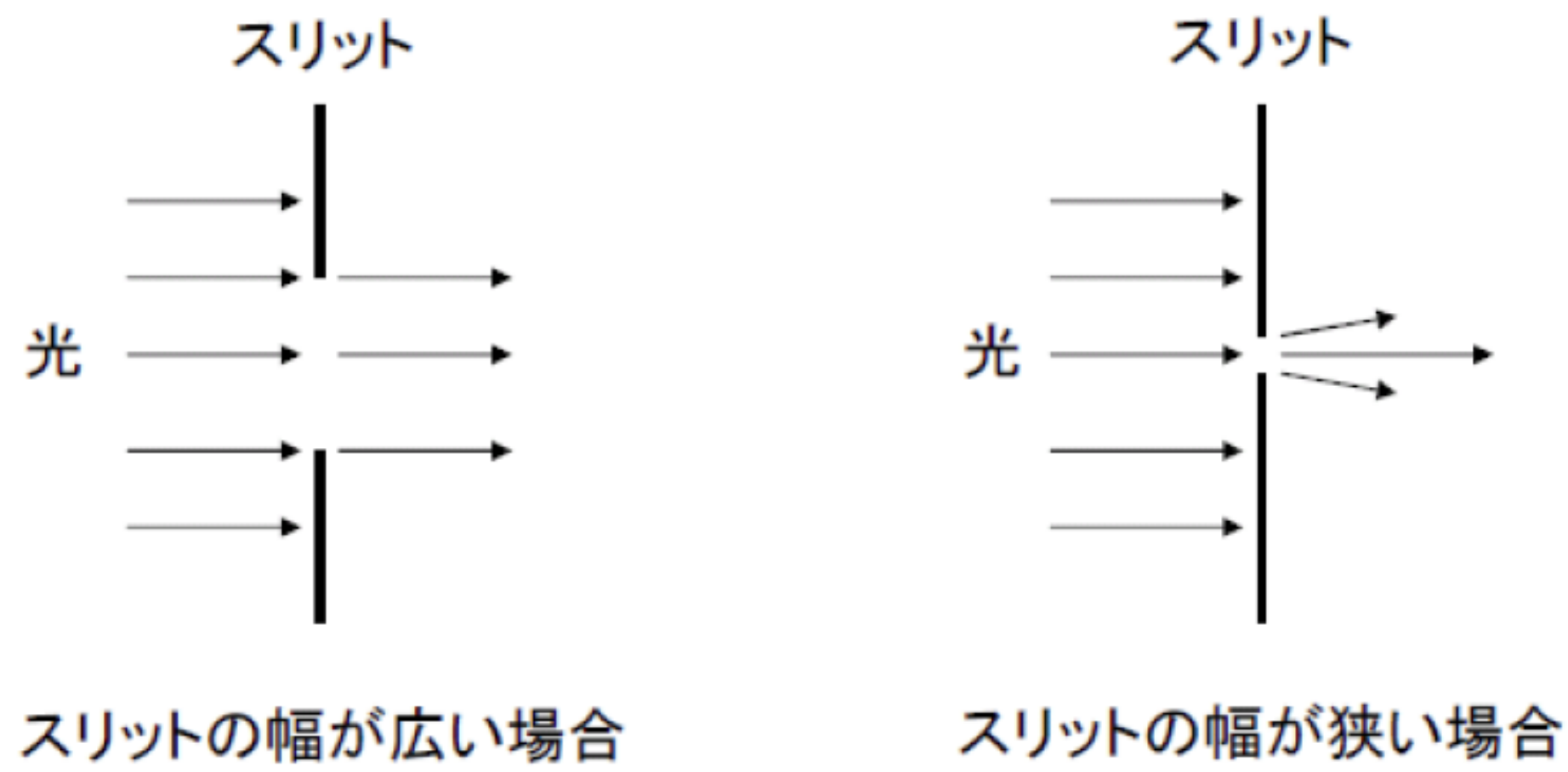


光は横波である



光は波である

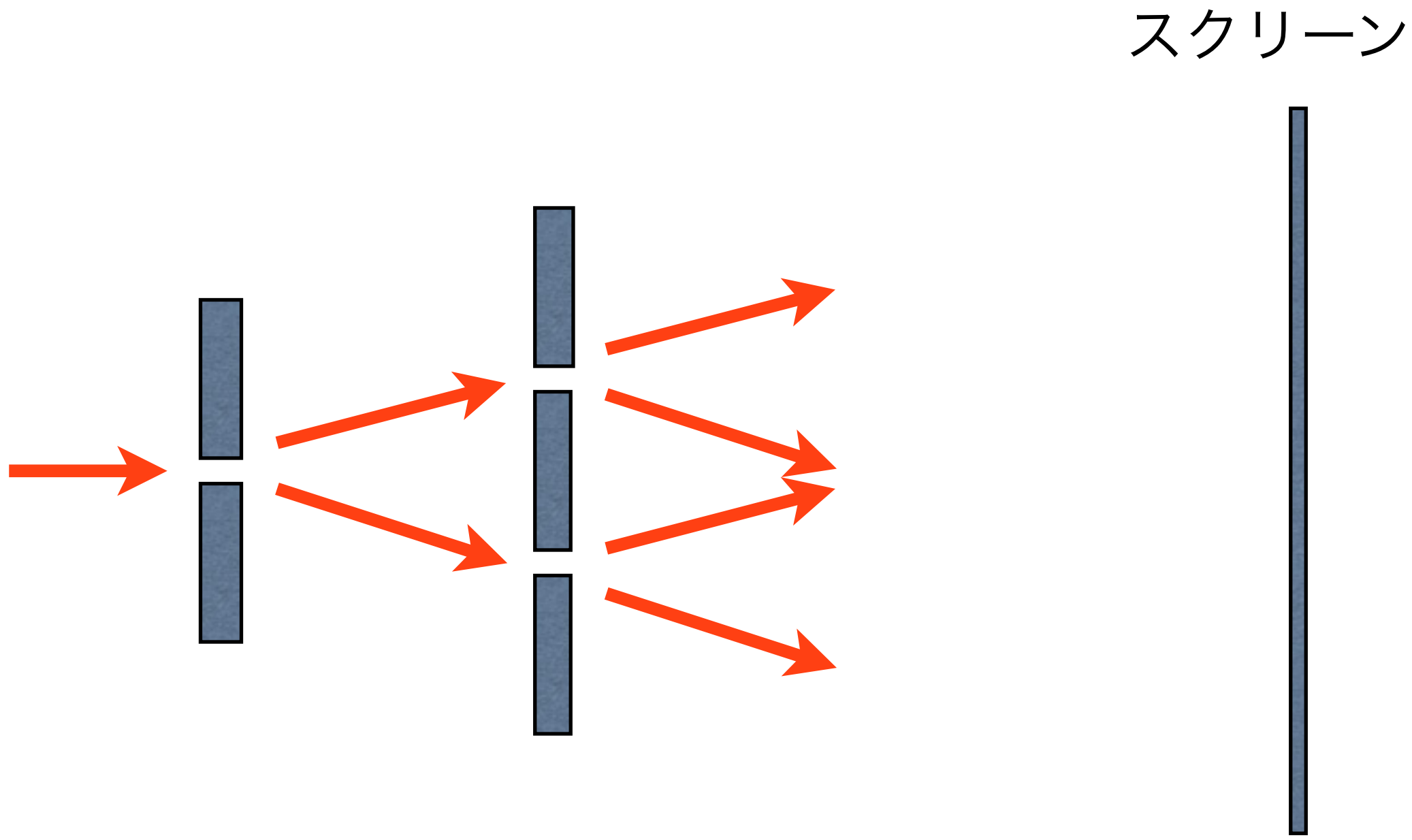
2重スリットによる干渉実験



狭いスリットを
通ると回折する

図 3 光の回折

2重スリットを通
ると??



光は波である

2重スリットによる干渉実験

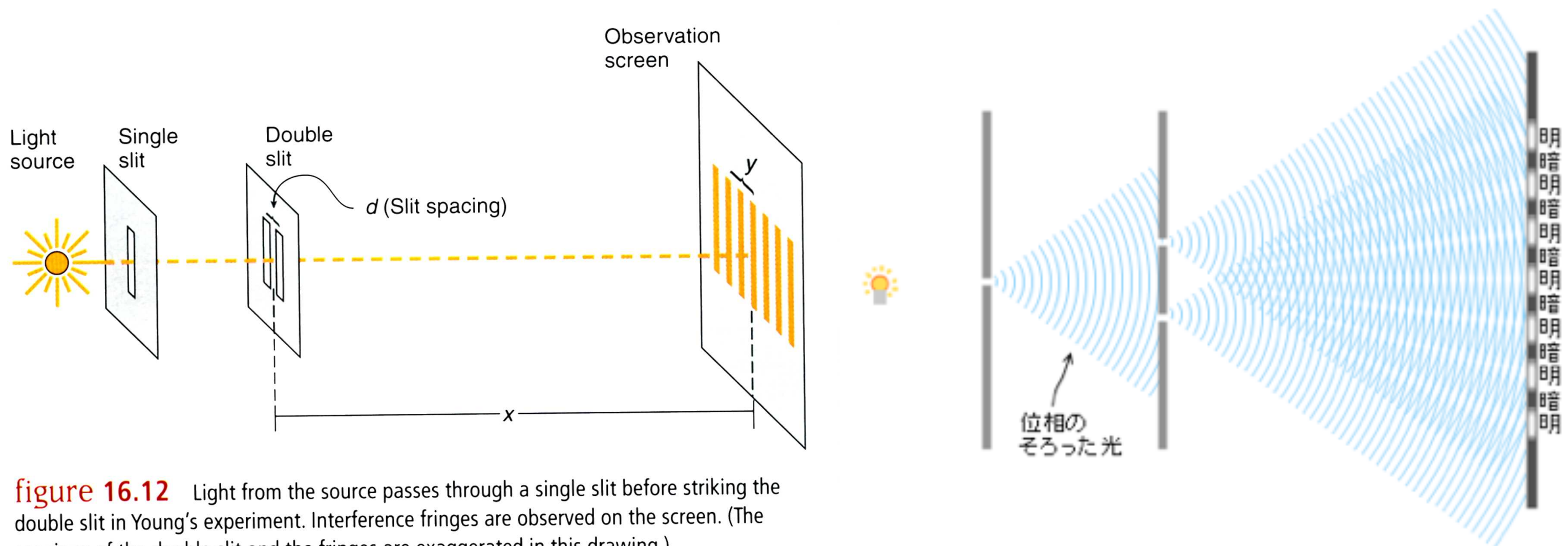


figure 16.12 Light from the source passes through a single slit before striking the double slit in Young's experiment. Interference fringes are observed on the screen. (The spacings of the double slit and the fringes are exaggerated in this drawing.)

2重スリットで
干渉縞ができる

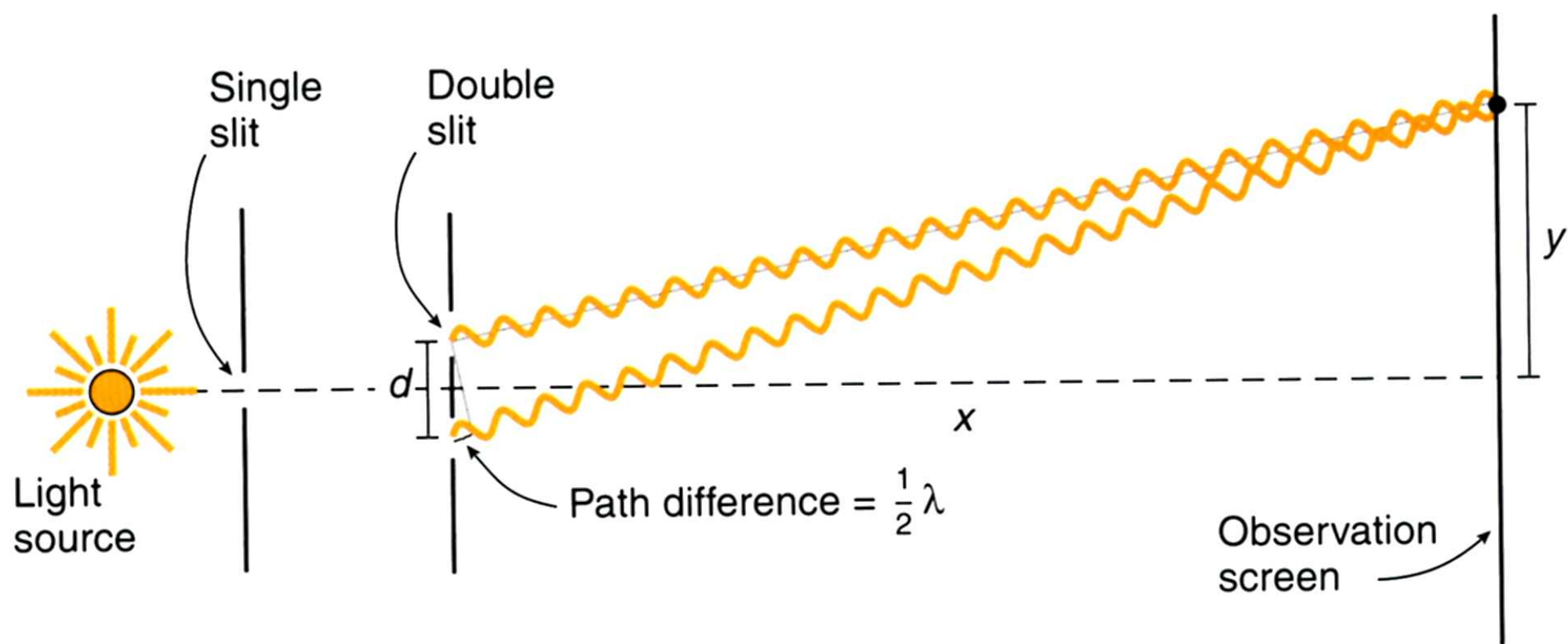


figure 16.13 When the path difference between the two waves is equal to half a wavelength, the two waves arrive at the screen half a cycle out of phase, producing destructive interference.

単スリットでもできる

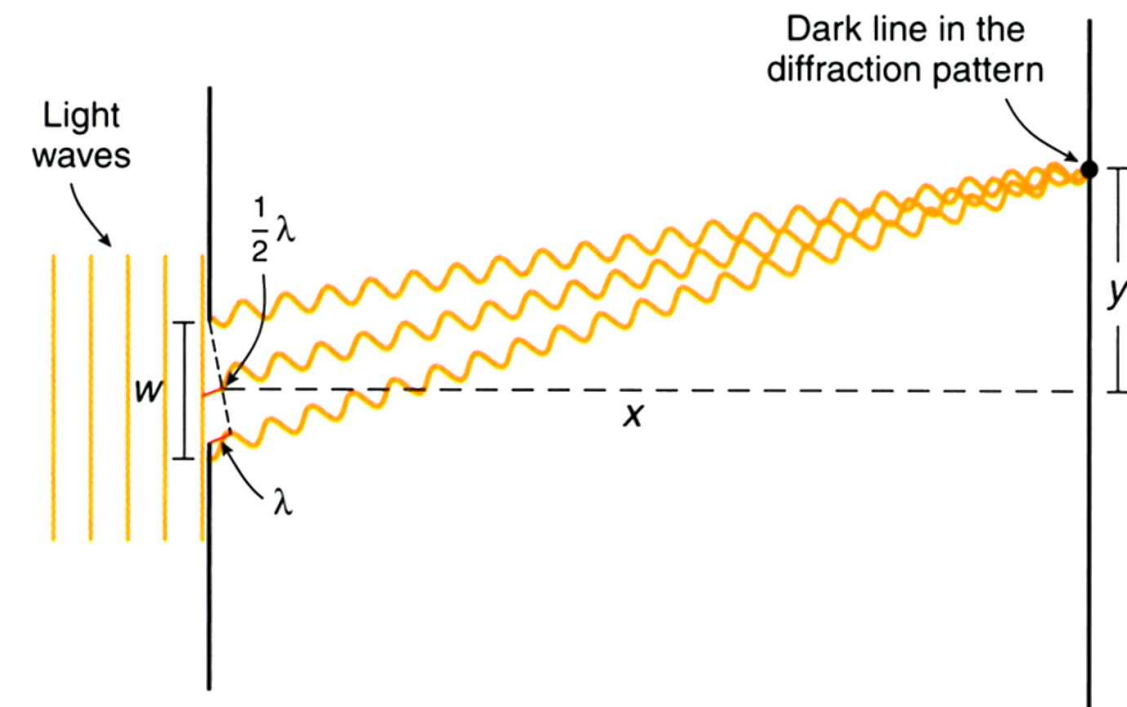


figure 16.18 When the path difference between light coming from the top half of the slit and that coming from the bottom half is $\frac{1}{2}\lambda$, a dark line appears in the single-slit diffraction pattern.

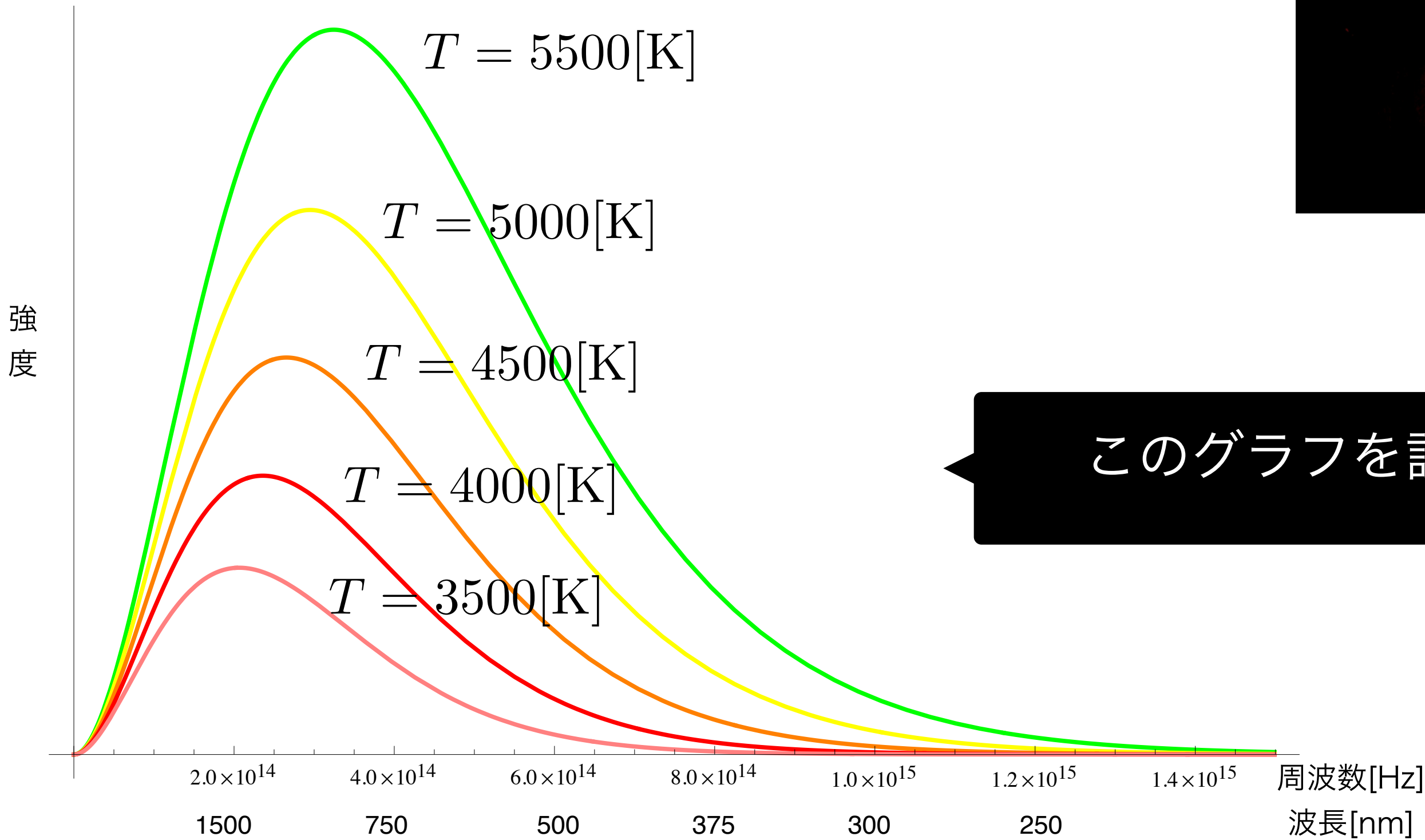
4.1.1

溶鉱炉の温度の問題

「色と温度が関係ありそうだ」
温度が上がると赤，さらに上がると白



光のエネルギー
の大きさ



このグラフを説明する理論は??

赤い色←  →青い色

4.1.1

溶鉱炉の温度の問題

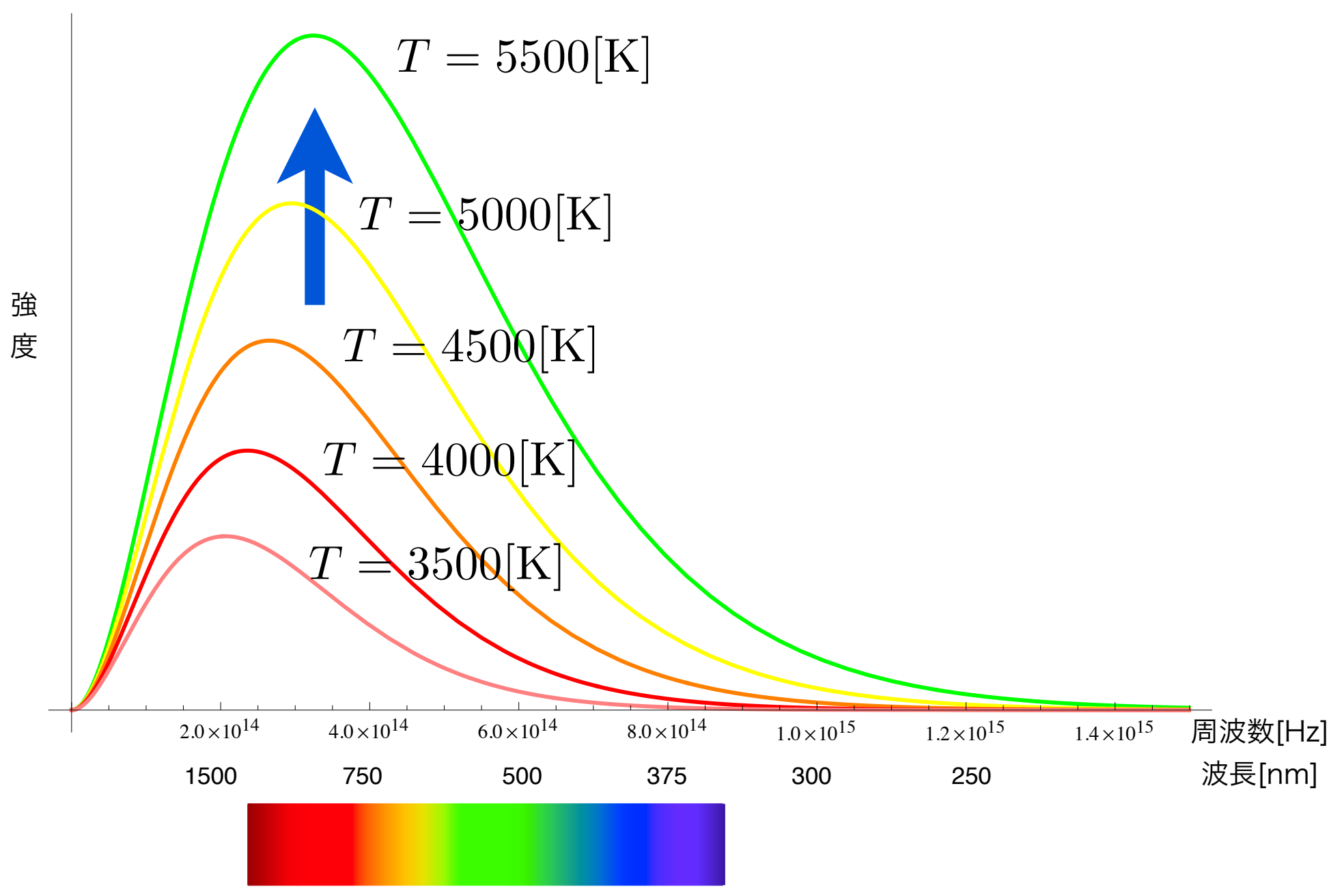
シュテファン・ボルツマンの法則

「温度が高いとエネルギーが
たくさん放出される」

$$I = \sigma T^4$$

強度

温度⁴



Joseph Stefan
(1835-1893)



Ludwig E Boltzmann
(1844-1906)

この式から，太陽表面の温度が6000度であることがわかる.

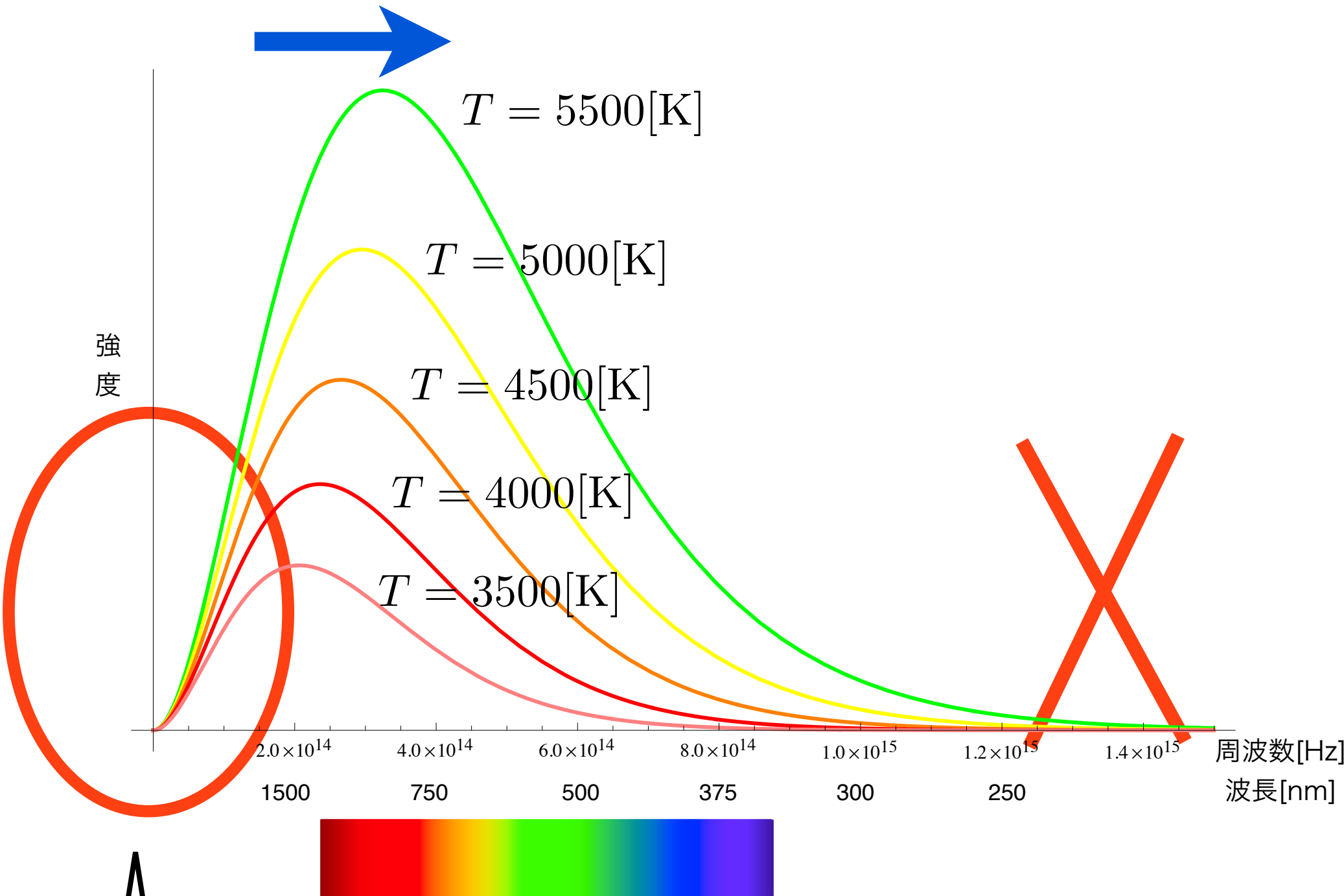
4.1.1

溶鉱炉の温度の問題

レイリー・ジーンズの法則

「高温になるほど，色が赤から青へ変化する」

$$I(\nu, T) = \frac{2\nu^2}{c^2}kT$$



しかし，この式は振動数が小さいときはOK
振動数が大きい時はダメ



John W Strutt
Lord Rayleigh
(1842-1919)



James H Jeans
(1877-1946)

4.1.1

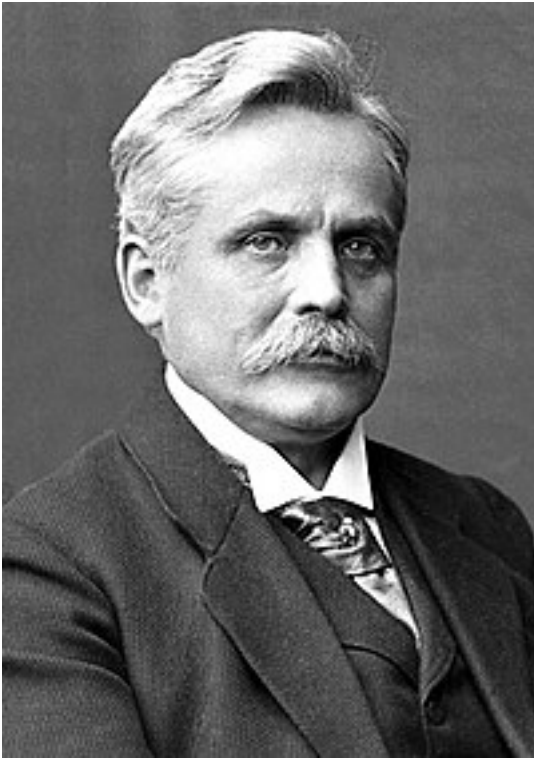
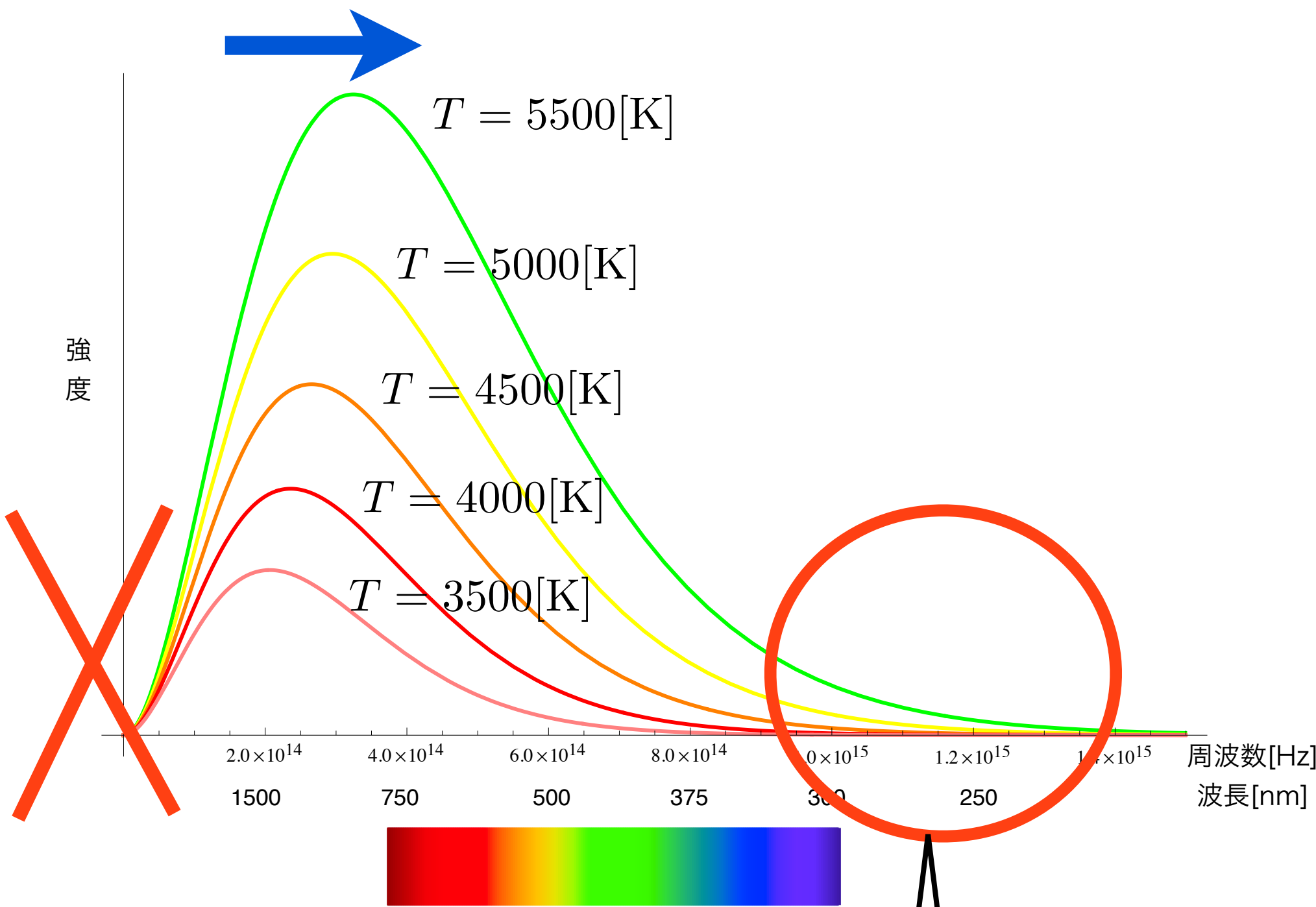
溶鉱炉の温度の問題

ヴィーンの遷移則

「高温になるほど、色が赤から青へ変化する」

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

$e = 2.71828 \dots$



Wilhelm C W O F F Wien
(1864-1928)

しかし、この式は振動数が大きいときはOK
振動数が小さい時はダメ

4.1.1

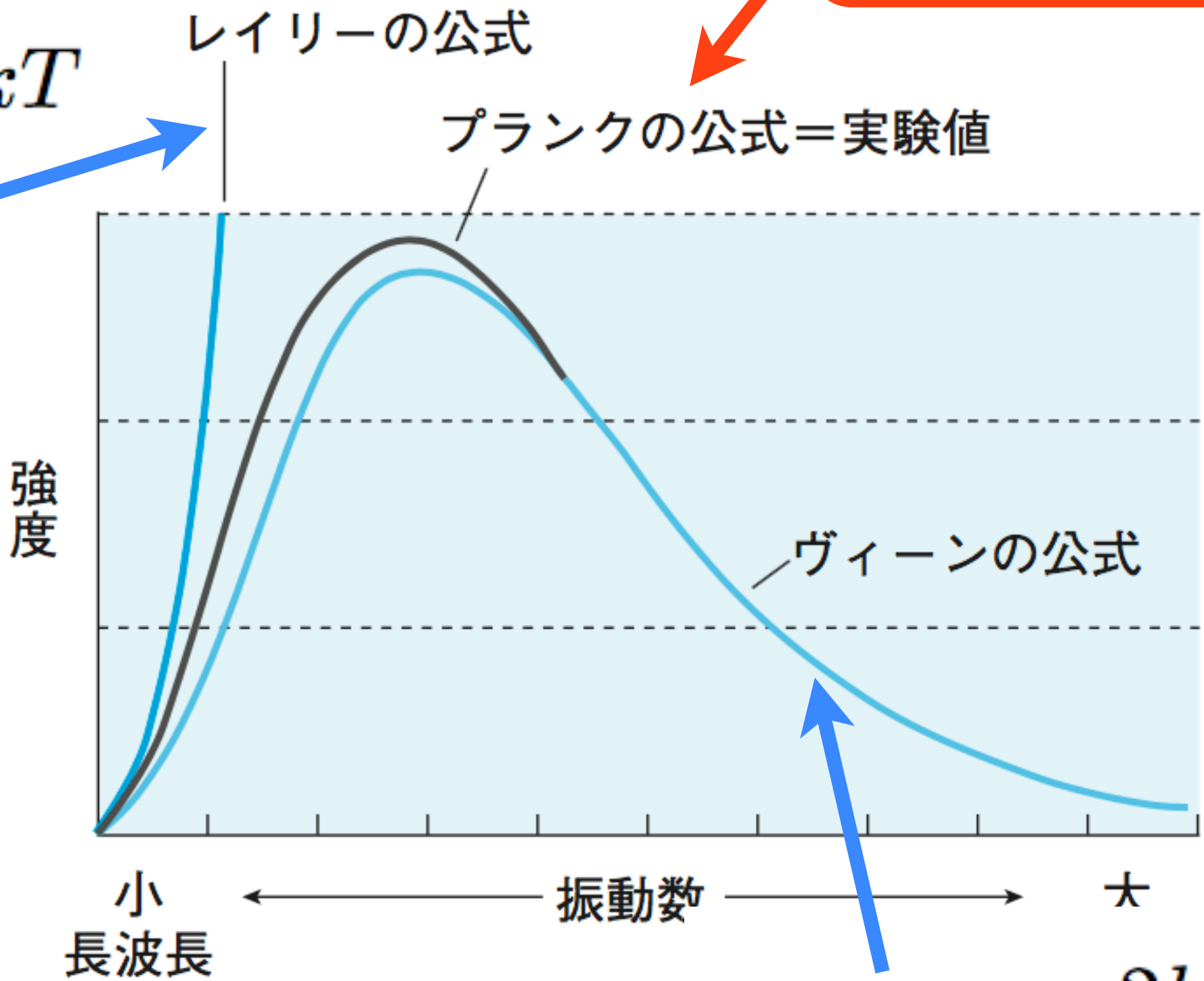
溶鉱炉の温度の問題

プランクの法則

「2つの式を合わせるとピッタリ」

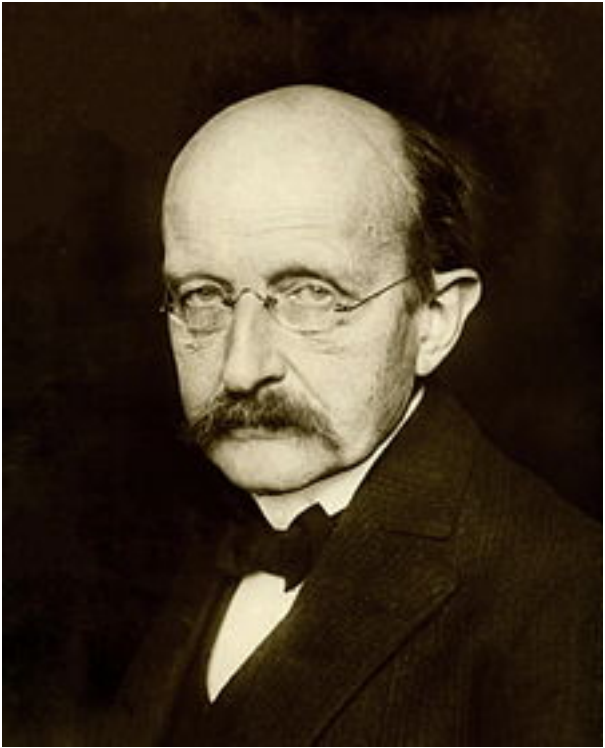
$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$I(\nu, T) = \frac{2\nu^2}{c^2} kT$$



何か本質が
隠れていそうだ.

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$



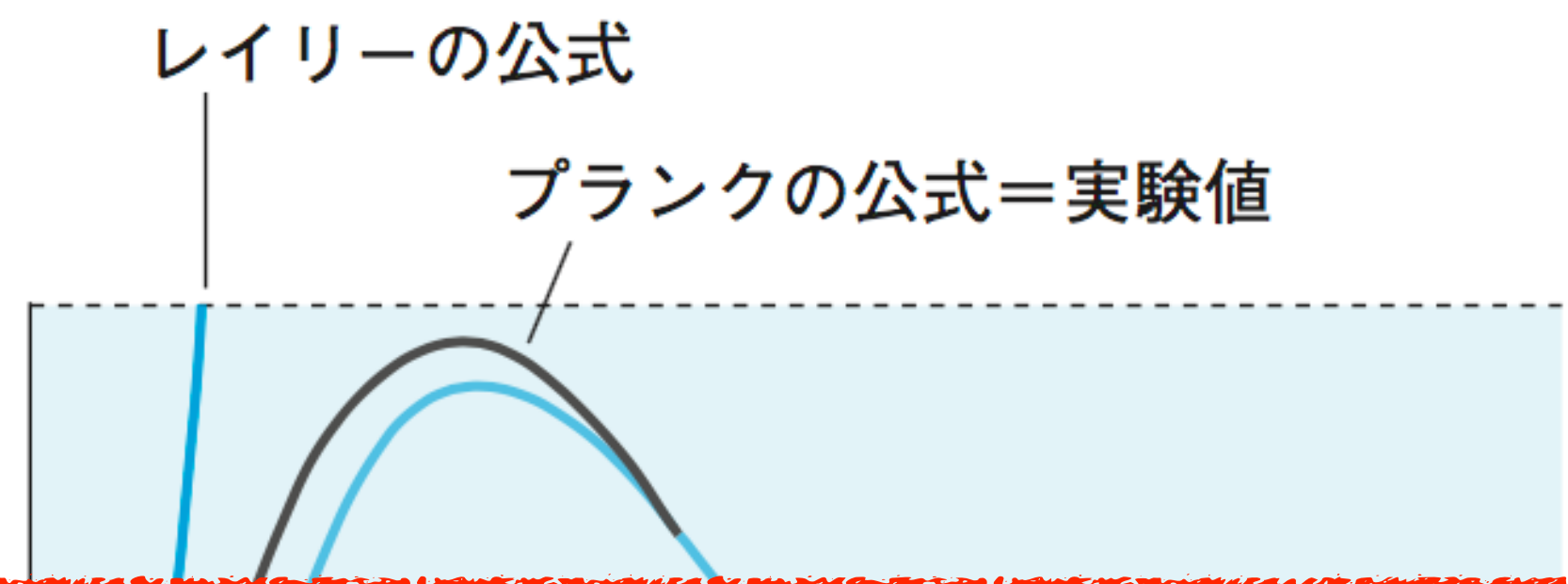
Max K E L Planck
(1858-1947)

4.1.2 プランクの量子仮説

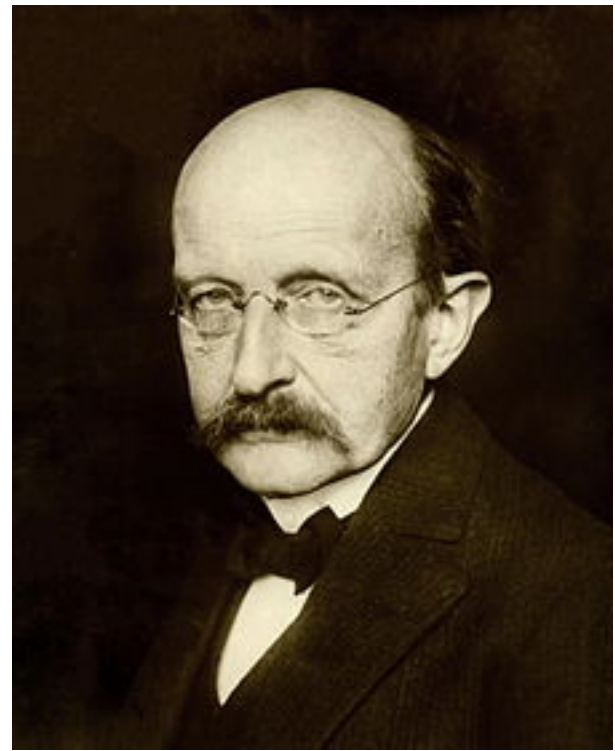
プランクの法則

「2つの式を合わせるとピッタリ」

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



何か本質が
隠れていそうだ.



Max K E L Planck
(1858-1947)

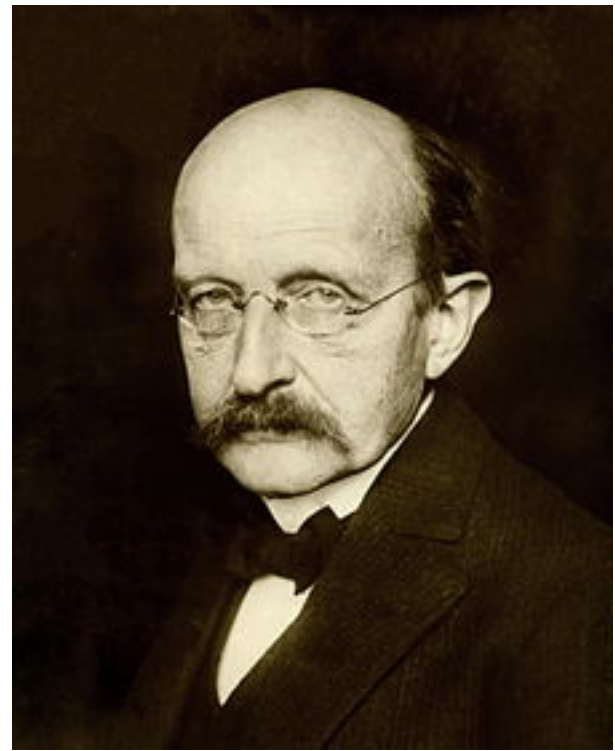
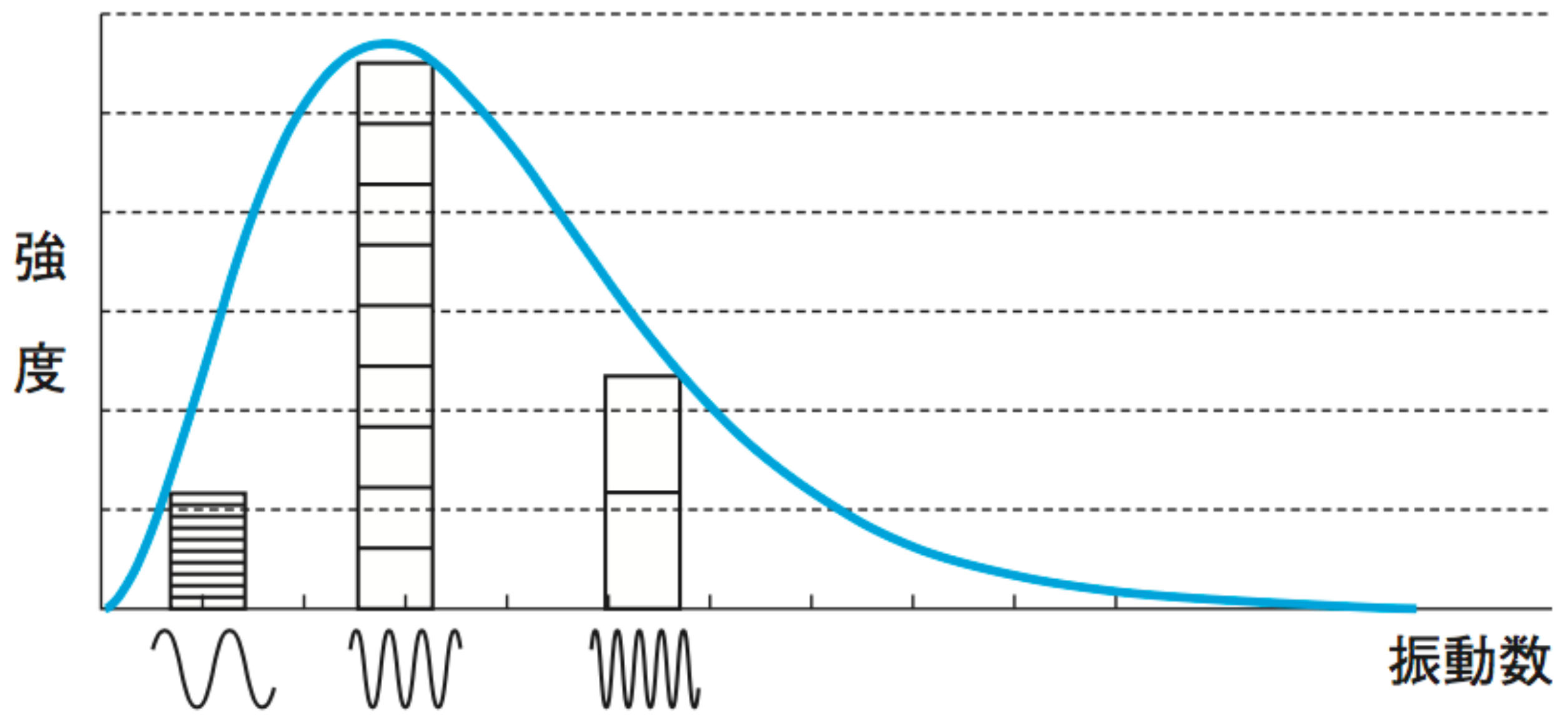
プランクの量子仮説 (1900 年)

光のもつエネルギーには最小単位があってとびとびの値をとる. その最小単位は, 振動数 ν に比例して変わる.

式で表すと, 光のエネルギー E が, 比例定数を h として,

$$E = h\nu \tag{4.6}$$

4.1.2 プランクの量子仮説



Max K E L Planck
(1858-1947)

プランクの量子仮説 (1900 年)

光のもつエネルギーには最小単位があってとびとびの値をとる. その最小単位は, 振動数 ν に比例して変わる.

式で表すと, 光のエネルギー E が, 比例定数を h として,

$$E = h\nu \tag{4.6}$$

光のもつエネルギーには
最小単位がある！

4.1.3 アインシュタインの光子仮説

光電効果

=金属に光を当てると，電子が飛び出すことがある。

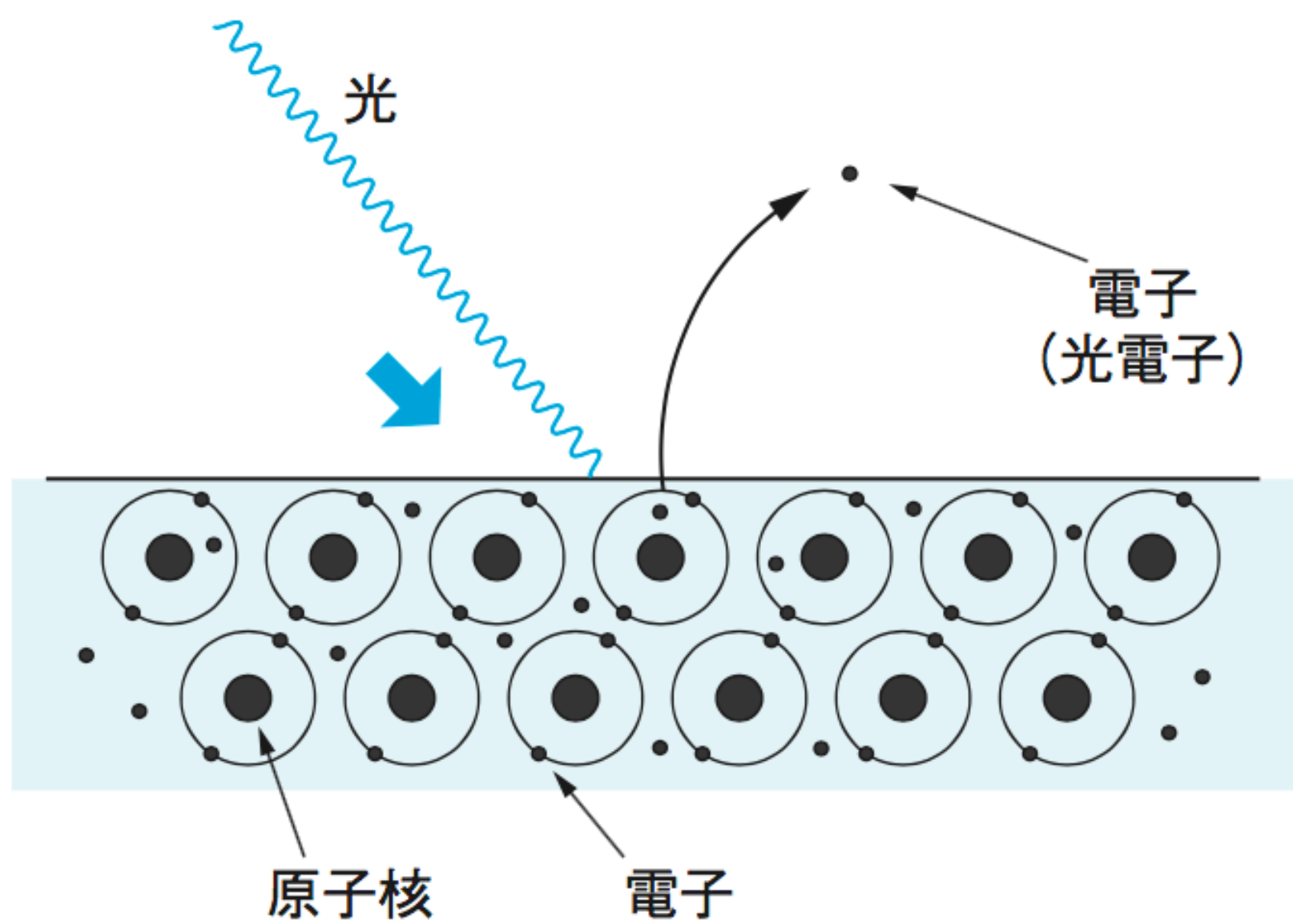
ただし，光の振動数がある値から大きいときに限る。
そうであれば，どんなに弱い光でも電子が飛び出す。

なぜ？
光が波ならこうはならない。

「光が波だと考えると不思議。
粒子だと考えよう。」 1905年

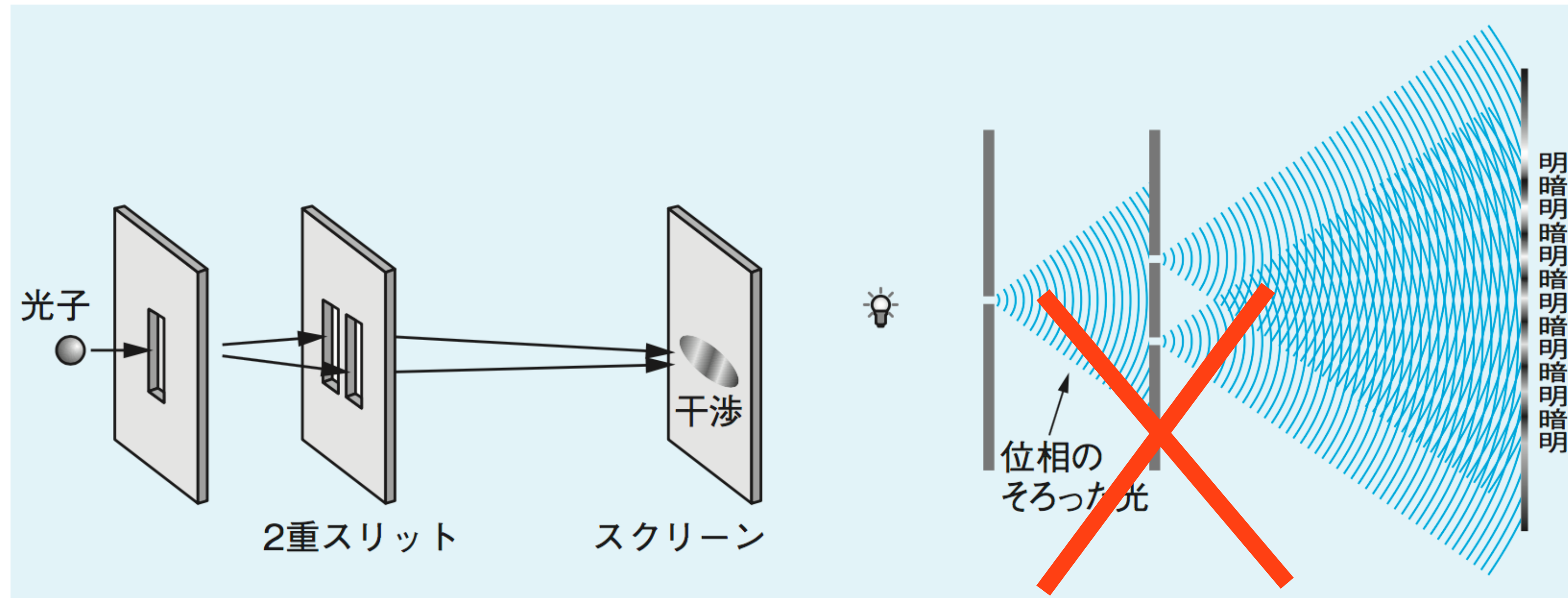
光が1つ2つと数えられる粒子（光子）と考える。
光子1つの持つエネルギーが $E = h\nu$ と考える。
(ν は振動数[Hz])

そう考えると，ある程度エネルギーの大きな光を
照射すれば電子が飛び出すことになる。

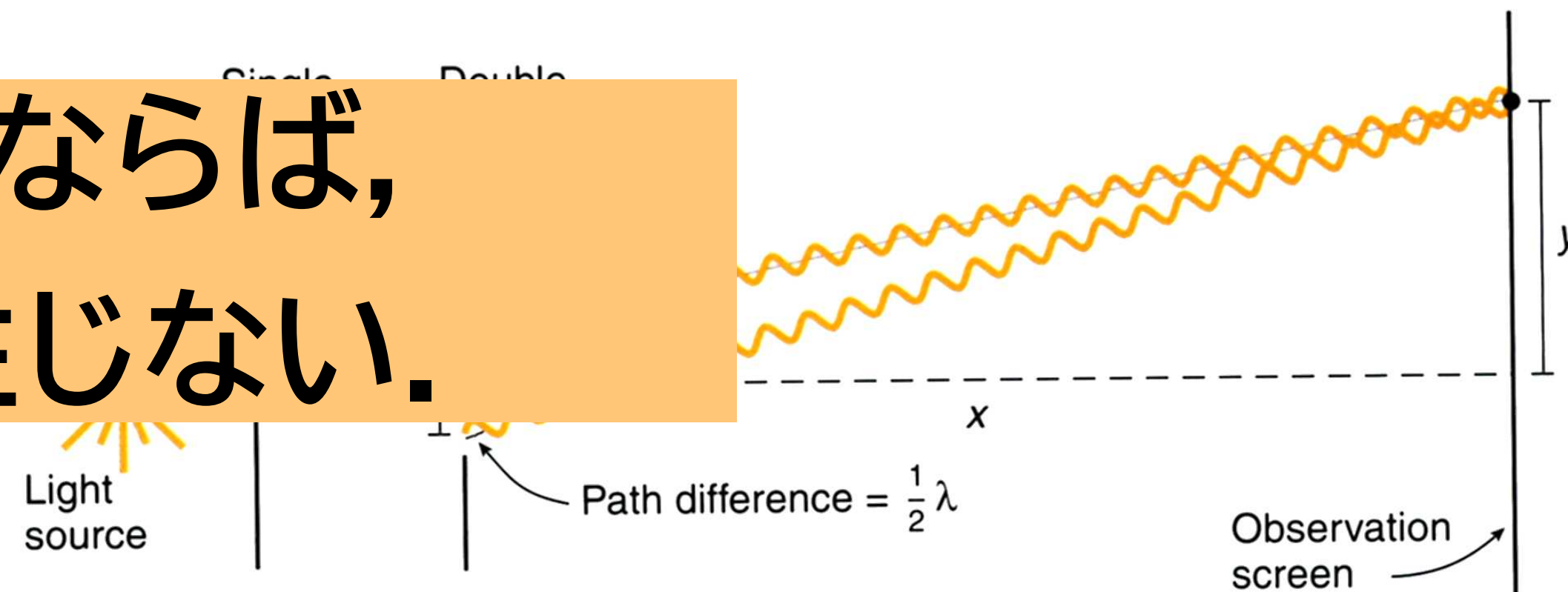


Albert Einstein
(1879-1955)

光は波である 2重スリットによる干渉実験



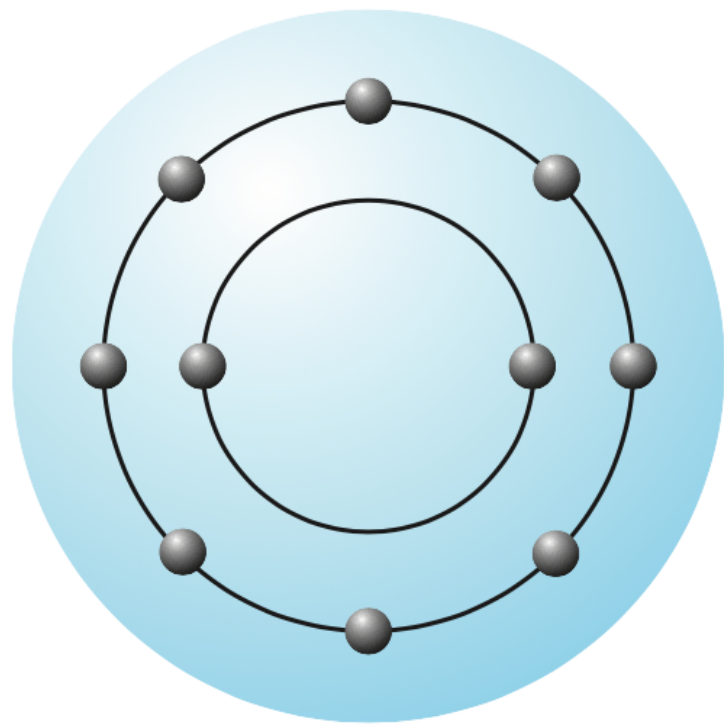
光が粒子だと考えるならば、
このような干渉縞は生じない。



4.2.1 原子模型

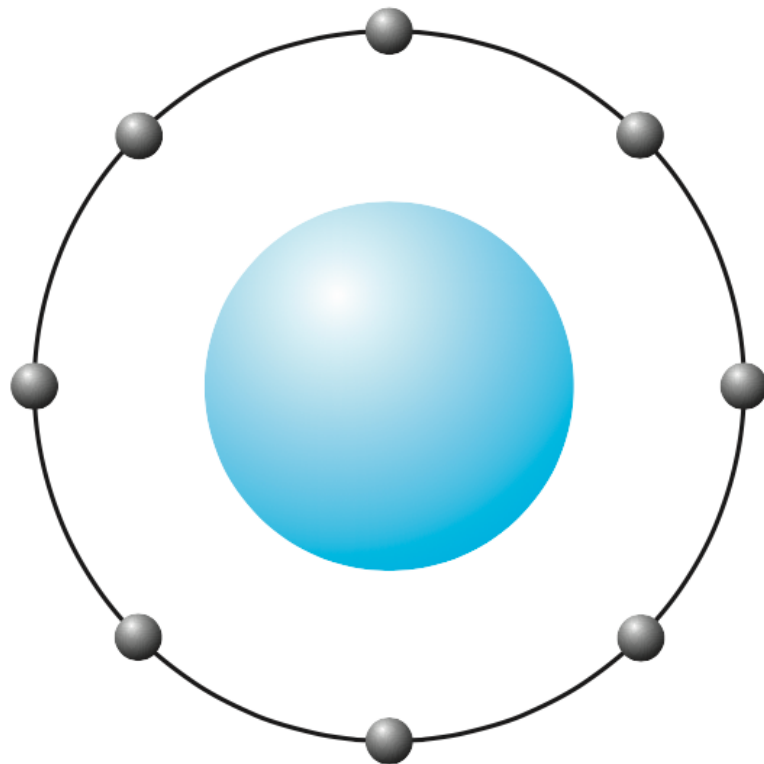
原子の構造はどうなっているのか？ プラスとマイナスの電気が存在していることは既知.

トムソン模型
1903



トムソンの
原子模型

長岡模型
1903



長岡の
原子模型



長岡半太郎

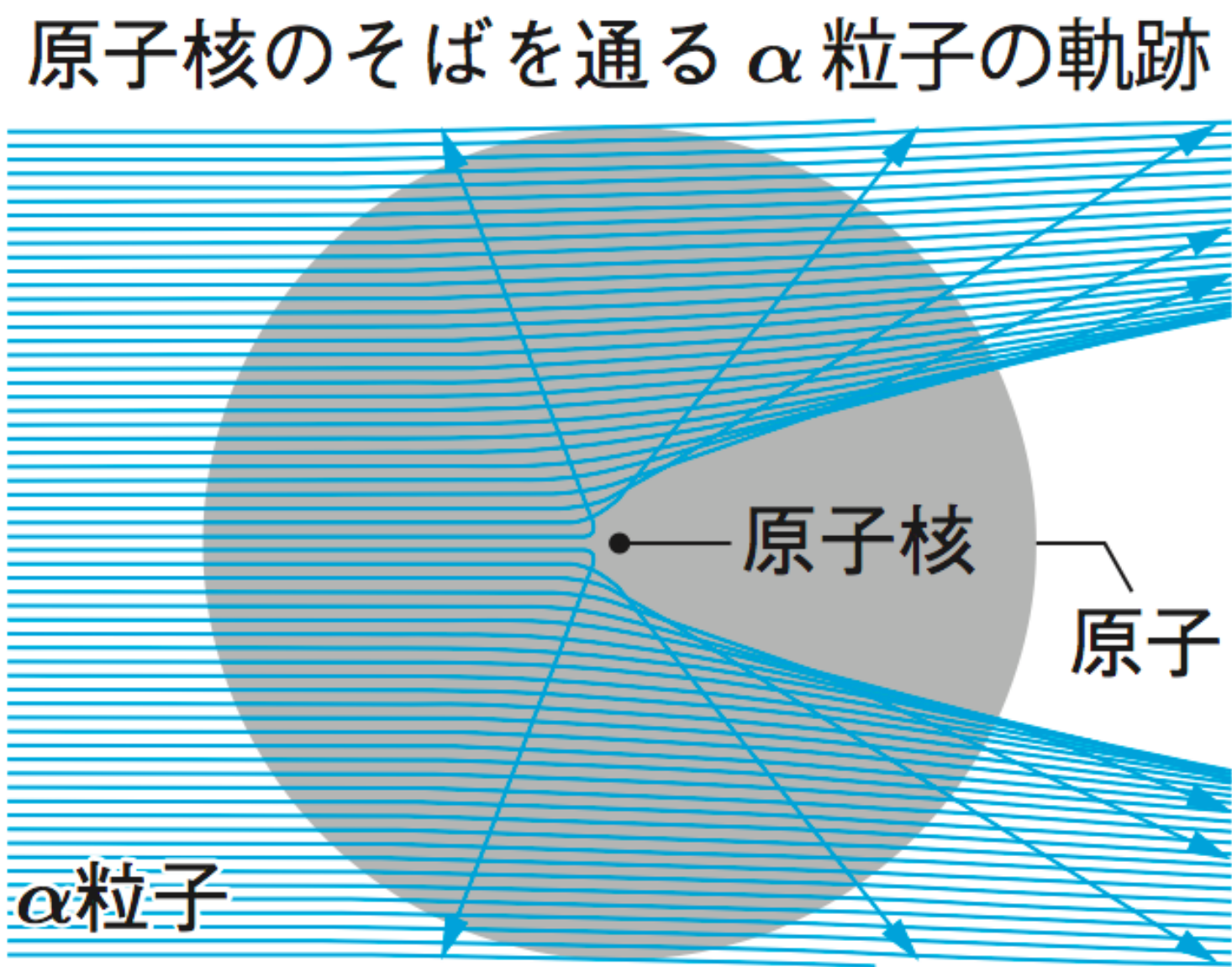
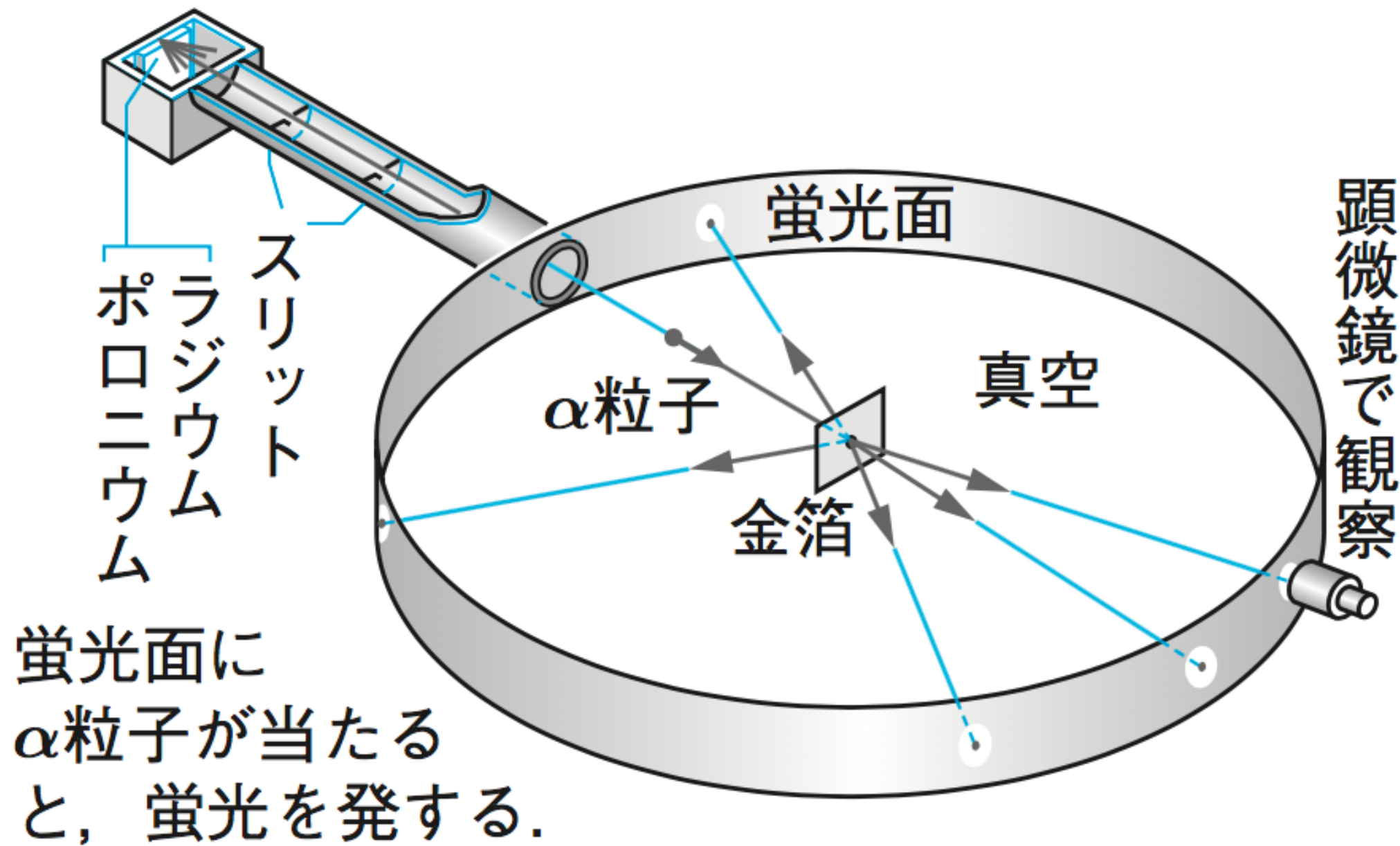
1865-1950

問題点あり

「加速度をもって飛び回る電子は、電磁波を放射してエネルギーを失っていくはずなのに、何故回り続けていられるのか」

ガイガーとマースデンの実験(ラザフォードの実験)1909

金箔にα粒子（He原子核）を照射

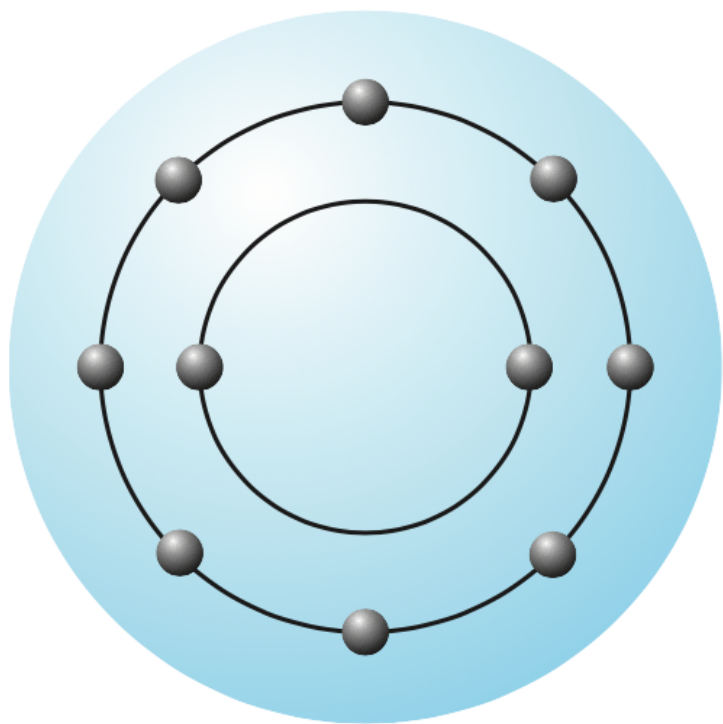


ときどき大きな反射角で散乱する
→→ 中心に「核」があるにちがいない。

4.2.1 原子模型

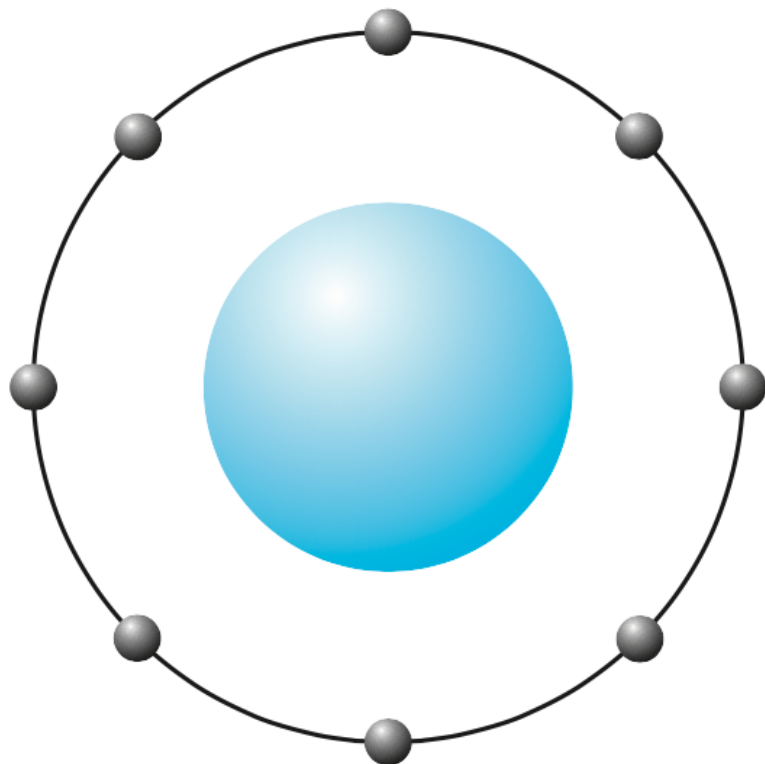
原子の構造はどうなっているのか？ プラスとマイナスの電気が存在していることは既知.

トムソン模型
1903



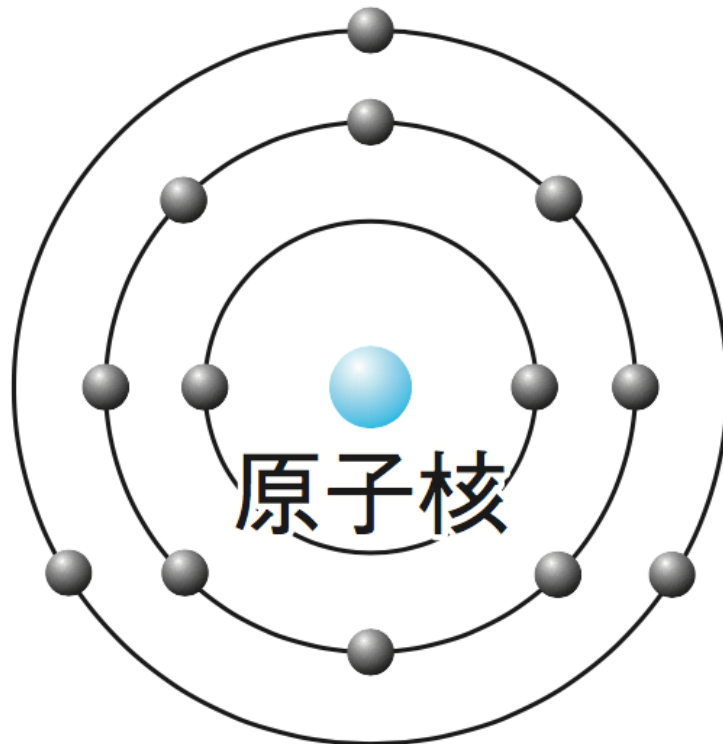
トムソンの
原子模型

長岡模型
1903



長岡の
原子模型

ラザフォード模型
1909



ラザフォードの
原子模型

やっぱり
問題は残る

WHY?

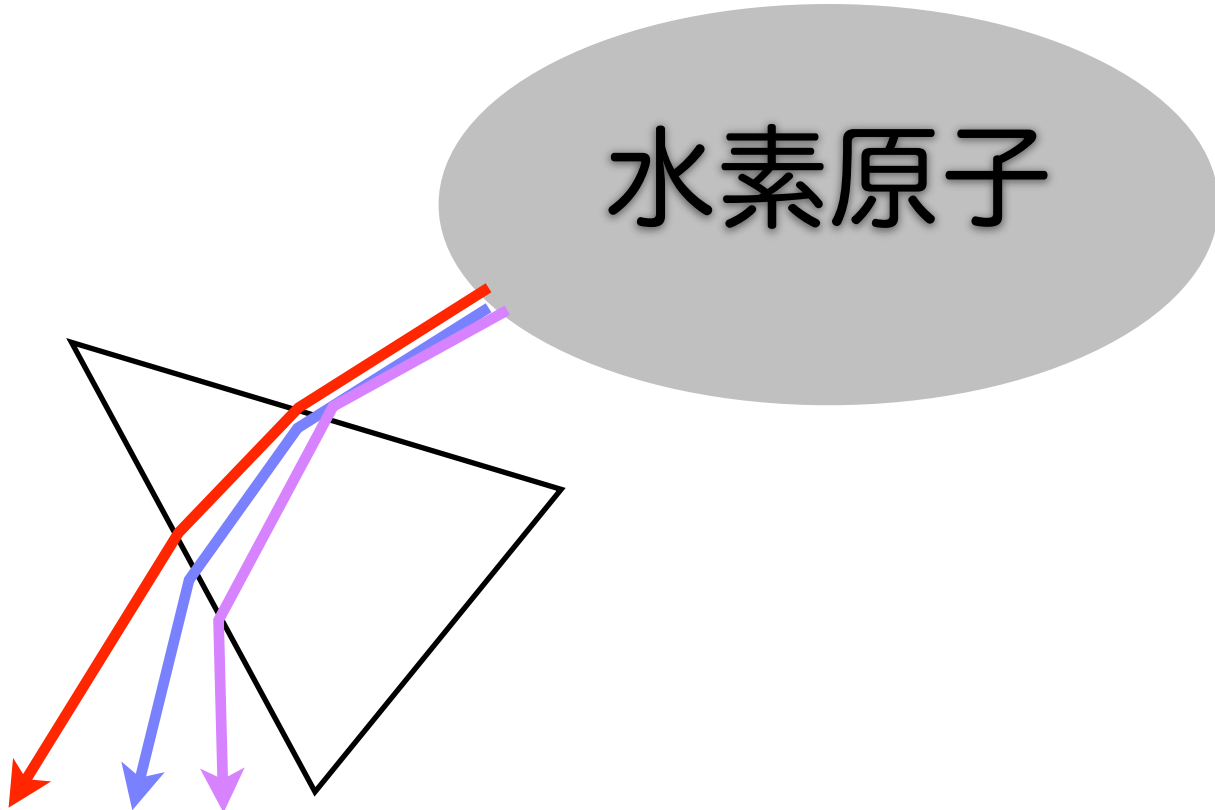
問題点あり

「加速度をもって飛び回る電子は、電磁波を放射してエネルギーを失っていくはずなのに、何故回り続けていられるのか」

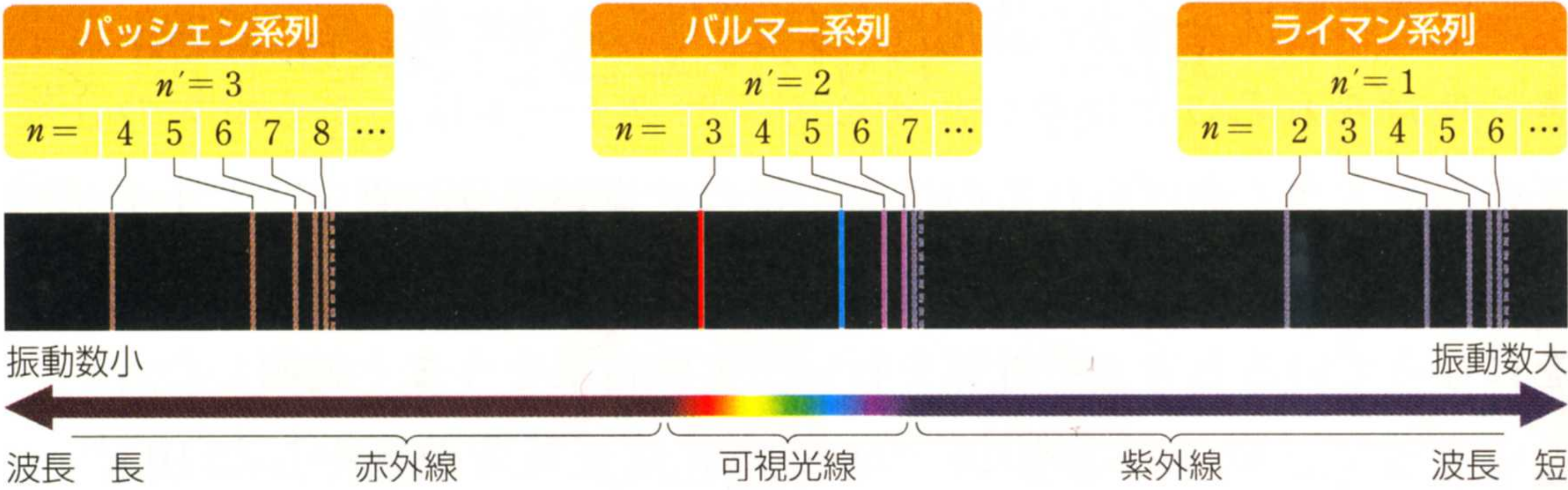
4.2.2 水素原子から出る輝線

太陽光をプリズムに通すと
連続スペクトルに分解されるが, . . .

気体から発せられる光は
いくつかの線スペクトルである



WHY?

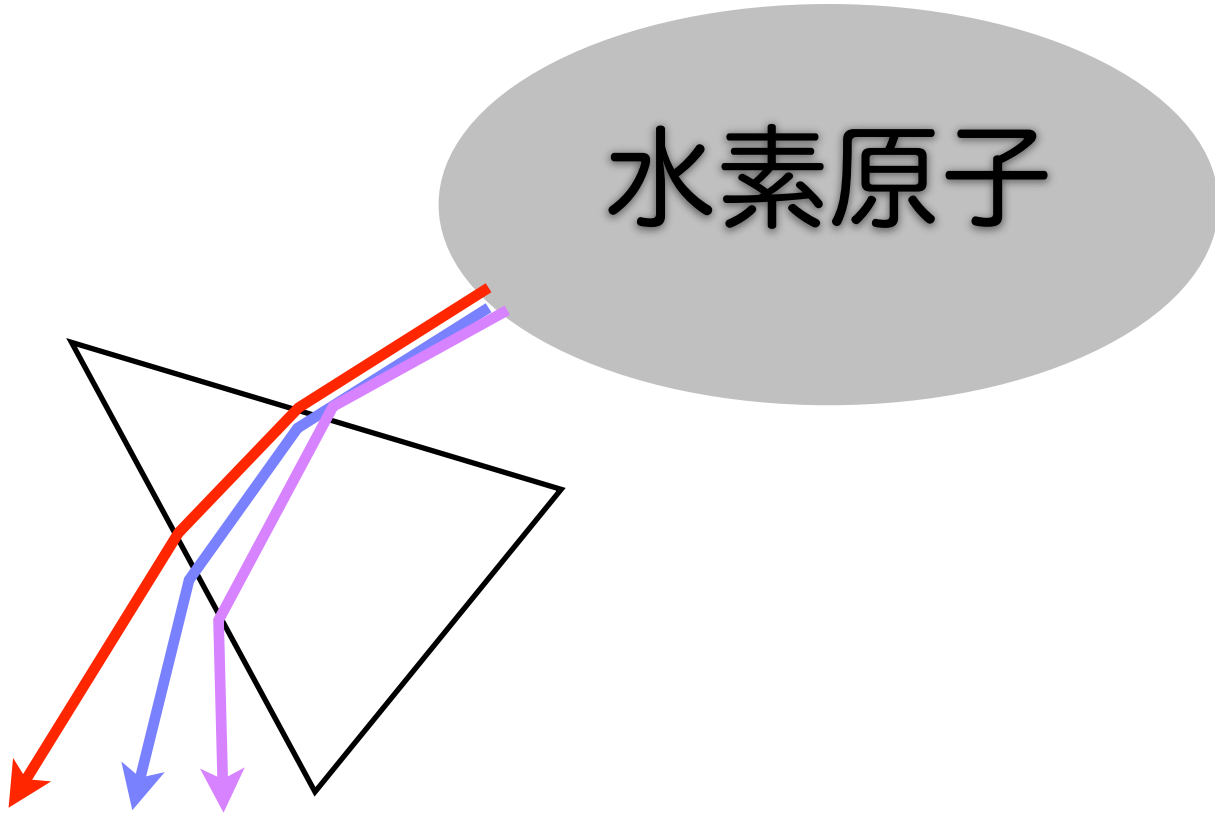


4.2.2 水素原子から出る輝線

表 4.1 水素の線スペクトルの波長 λ [nm].

	ライマン系列	バルマー系列	パッシェン系列	...
	$n' = 1$	$n' = 2$	$n' = 3$	...
$n = 1$				
$n = 2$	122			
$n = 3$	103	656.210		
$n = 4$	97.3	486.074	1870	
$n = 5$	95.0	434.01	1280	
$n = 6$	93.8	410.12	1090	
⋮				
$n = \infty$	91.2	365	820	

気体から発せられる光は
いくつかの線スペクトルである



WHY?



4.2.2 水素原子から出る輝線

表 4.1 水素の線スペクトルの波長 λ [nm].

	ライマン系列 $n' = 1$	バルマー系列 $n' = 2$	パッシェン系列 $n' = 3$	...
$n = 1$				
$n = 2$	122			
$n = 3$	103	656.210		
$n = 4$	97.3	486.074	1870	
$n = 5$	95.0	434.01	1280	
$n = 6$	93.8	410.12	1090	
⋮				
$n = \infty$	91.2	365	820	



Johann J Balmer
(1825-1898)



Johannes Rydberg
(1854-1919)

実験結果を式にすると、
こうなった！

WHY?

$$\lambda = 3.65 \times 10^{-7} \times \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad (n = 3, 4, 5, 6, \dots)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \left(\begin{array}{l} n' = 1, 2, 3, \dots \\ n = n' + 1, n' + 2, n' + 3, \dots \end{array} \right)$$

4.2.3 ボーアの原子モデル

ボーアの仮定 1 : 量子条件 (1913 年)

原子には定常状態があり、定常状態では電磁波を出さず安定であって、これまでの力学が成り立つ。定常状態は、電子の角運動量 L が、 n を整数として、

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.9)$$

の条件をみたすときである。



Niels Bohr
1885-1962

ボーアの仮定 2 : 振動数条件 (1913 年)

電子はとびとびに存在する軌道間を移ることがあり、そのときには、軌道間のエネルギー差（各軌道のエネルギー準位の差）に相当する光子を吸収あるいは放出する。 n 番目と n' 番目の軌道を遷移するとき、エネルギー差は次式で与えられる。

$$E_n - E_{n'} = h\nu \quad (E_n > E_{n'}) \quad (4.11)$$

4.2.3 ボーアの原子モデル

ボーアの仮定 1：量子条件 (1913 年)

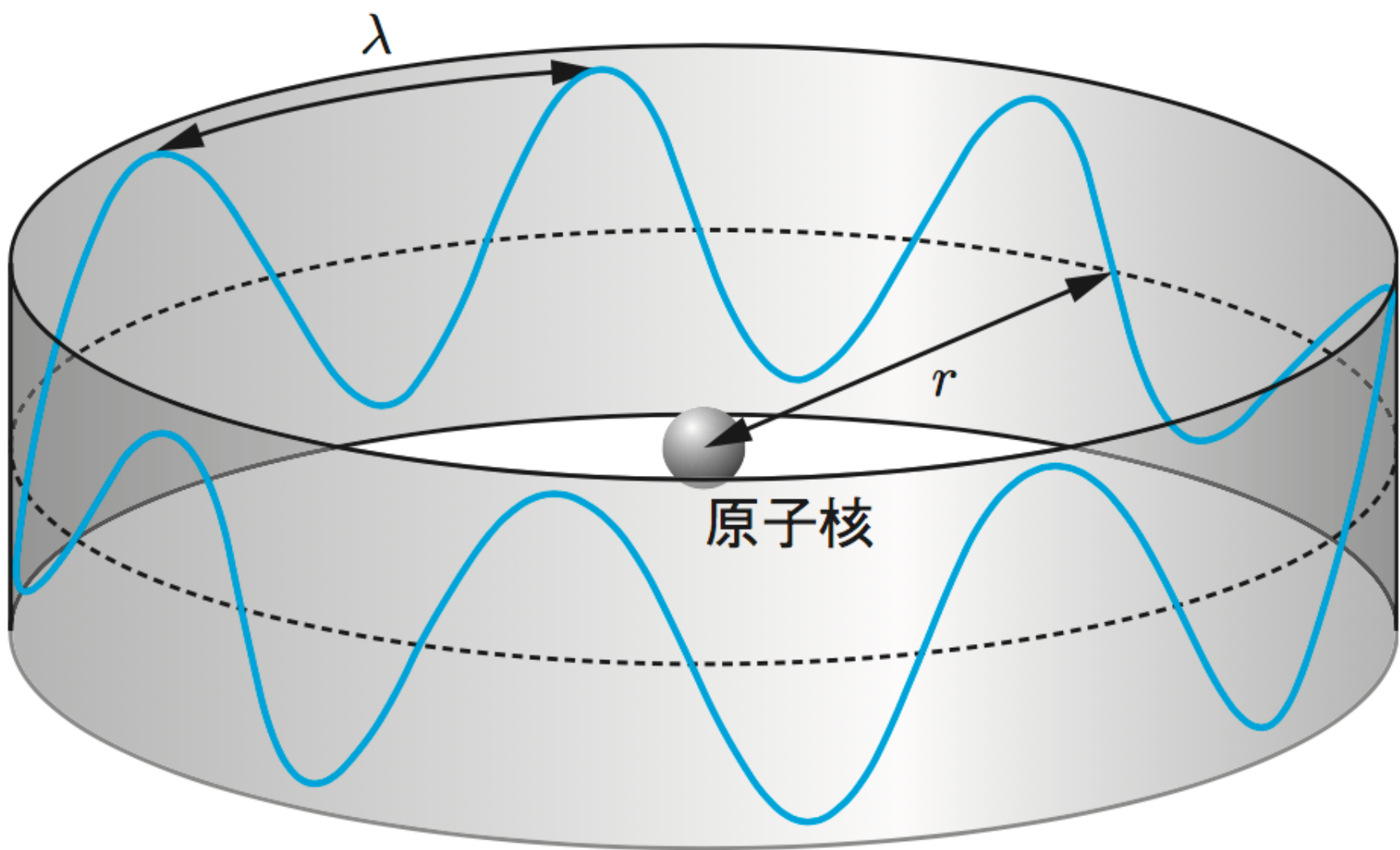
原子には定常状態があり，定常状態では電磁波を出さず安定であって，これまでの力学が成り立つ．定常状態は，電子の角運動量 L が， n を整数として，

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \tag{4.9}$$

の条件をみたすときである．



Niels Bohr
1885-1962



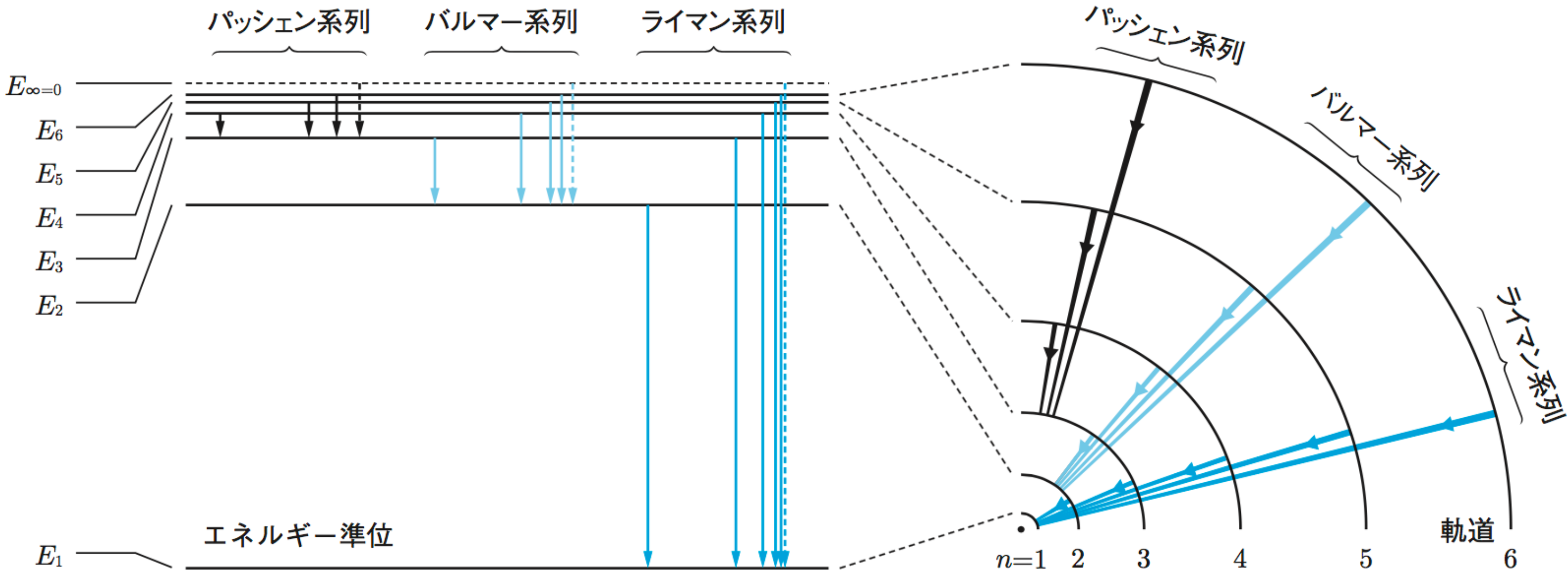
◆ Advanced ボーアの量子条件

ボーアが提案した (4.9) 式は，のちにド・ブロイが提案した「物質波」の考え (1923 年) (⇒§4.3.2) でようやく意味付けがされた．ド・ブロイは大胆にも電子の運動は波のように振る舞うと考えて，電子の「波長」 λ が $\lambda = \frac{h}{mv}$ で与えられるものとした．この考えを使うと，(4.9) 式は

$$2\pi r = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \tag{4.10}$$

と書くことができる．これは，電子軌道の 1 周の長さ $2\pi r$ が，電子の「波長」 λ の整数倍である，という式である．つまり，電子に許される軌道半径 r は，図 4.13 のように，「ちょうど 1 周したときに，波形が元の波形につながる」ときだ，ということになる．

4.2.3 ボーアの原子モデル



Niels Bohr
1885-1962

ボーアの仮定 2：振動数条件 (1913 年)

電子はとびとびに存在する軌道間を移ることがあり，そのときには，軌道間のエネルギー差（各軌道のエネルギー準位の差）に相当する光子を吸収あるいは放出する． n 番目と n' 番目の軌道を遷移するとき，エネルギー差は次式で与えられる．

$$E_n - E_{n'} = h\nu \quad (E_n > E_{n'}) \tag{4.11}$$

4.2.2 水素原子から出る輝線

表 4.1 水素の線スペクトルの波長 λ [nm].

	ライマン系列 $n' = 1$	バルマー系列 $n' = 2$	パッシェン系列 $n' = 3$	...
$n = 1$				
$n = 2$	122			
$n = 3$	103	656.210		
$n = 4$	97.3	486.074	1870	
$n = 5$	95.0	434.01	1280	
$n = 6$	93.8	410.12	1090	
⋮				
$n = \infty$	91.2	365	820	



Johann J Balmer
(1825-1898)



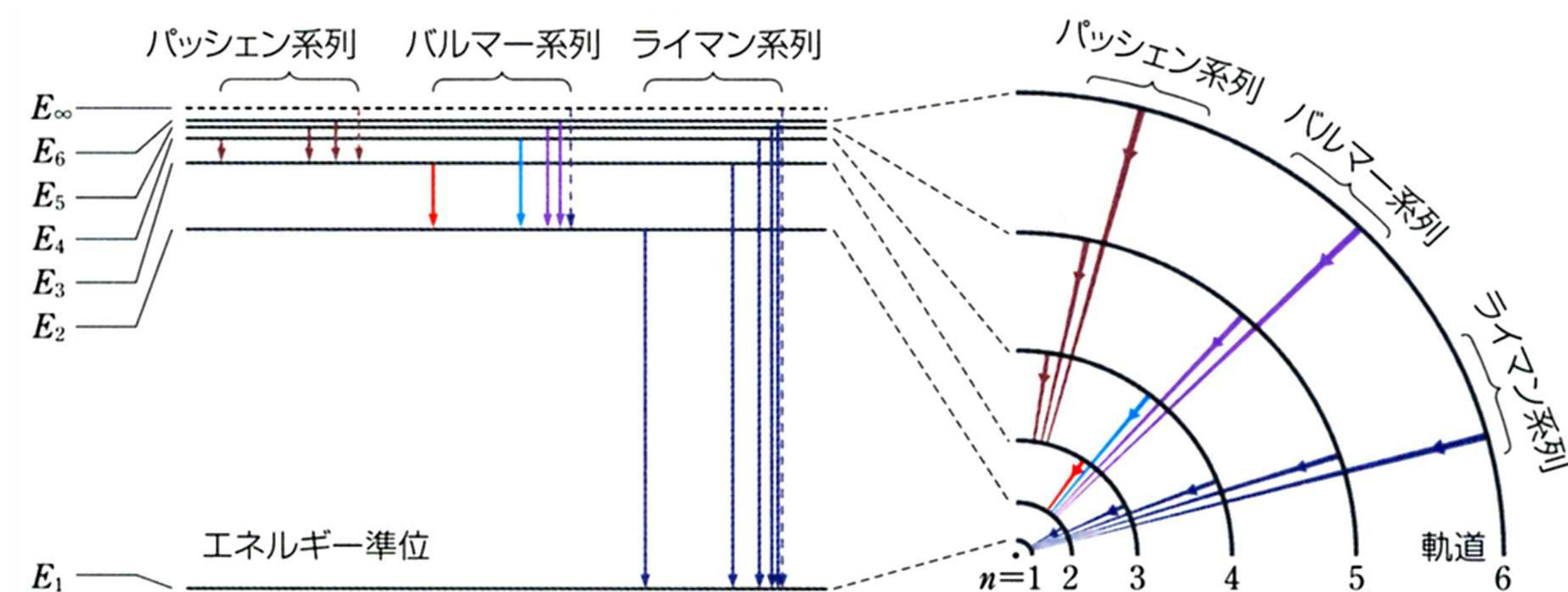
Johannes Rydberg
(1854-1919)

実験結果を式にすると、
こうなった！

WHY?

$$\lambda = 3.65 \times 10^{-7} \times \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad (n = 3, 4, 5, 6, \dots)$$

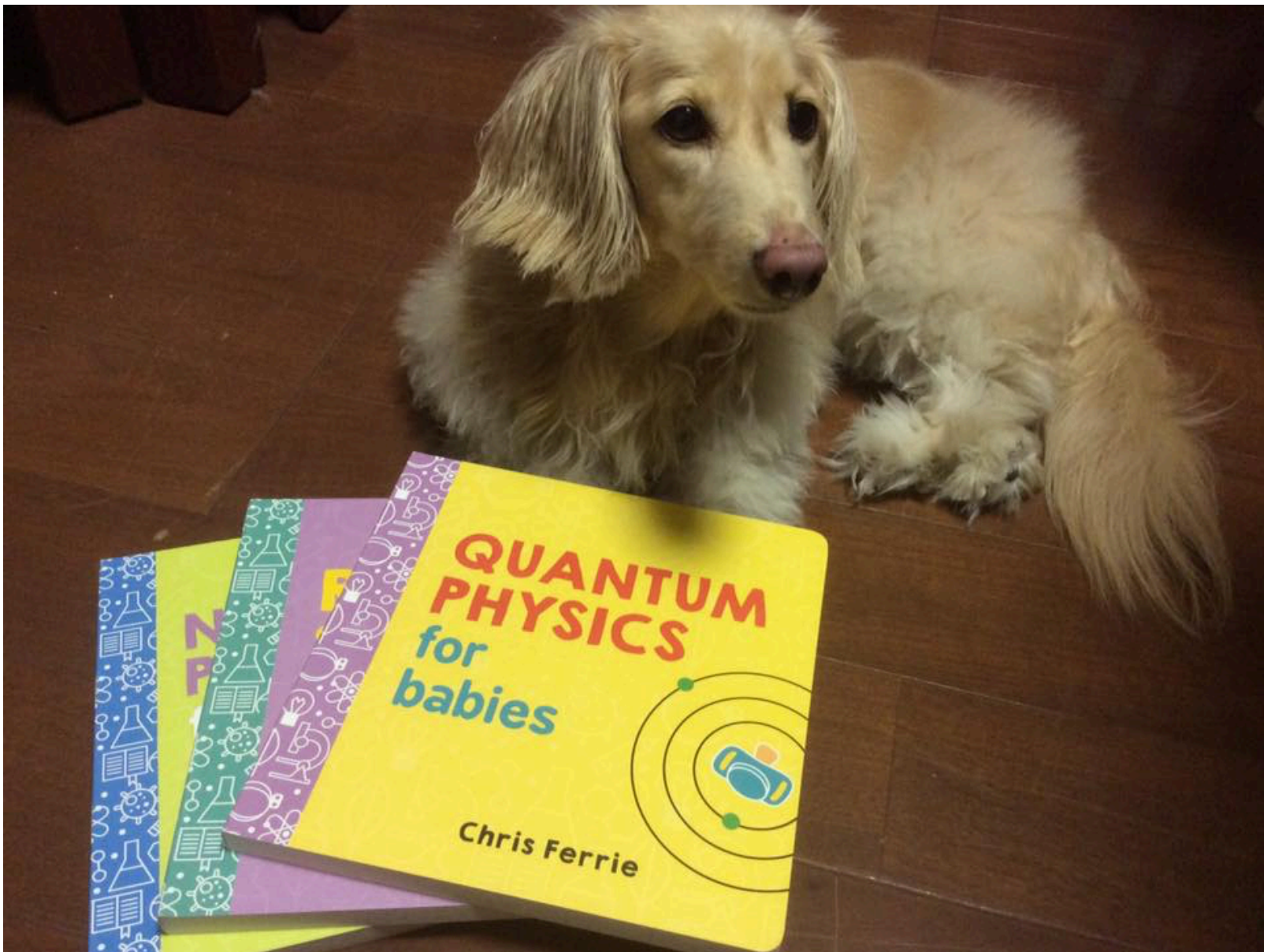
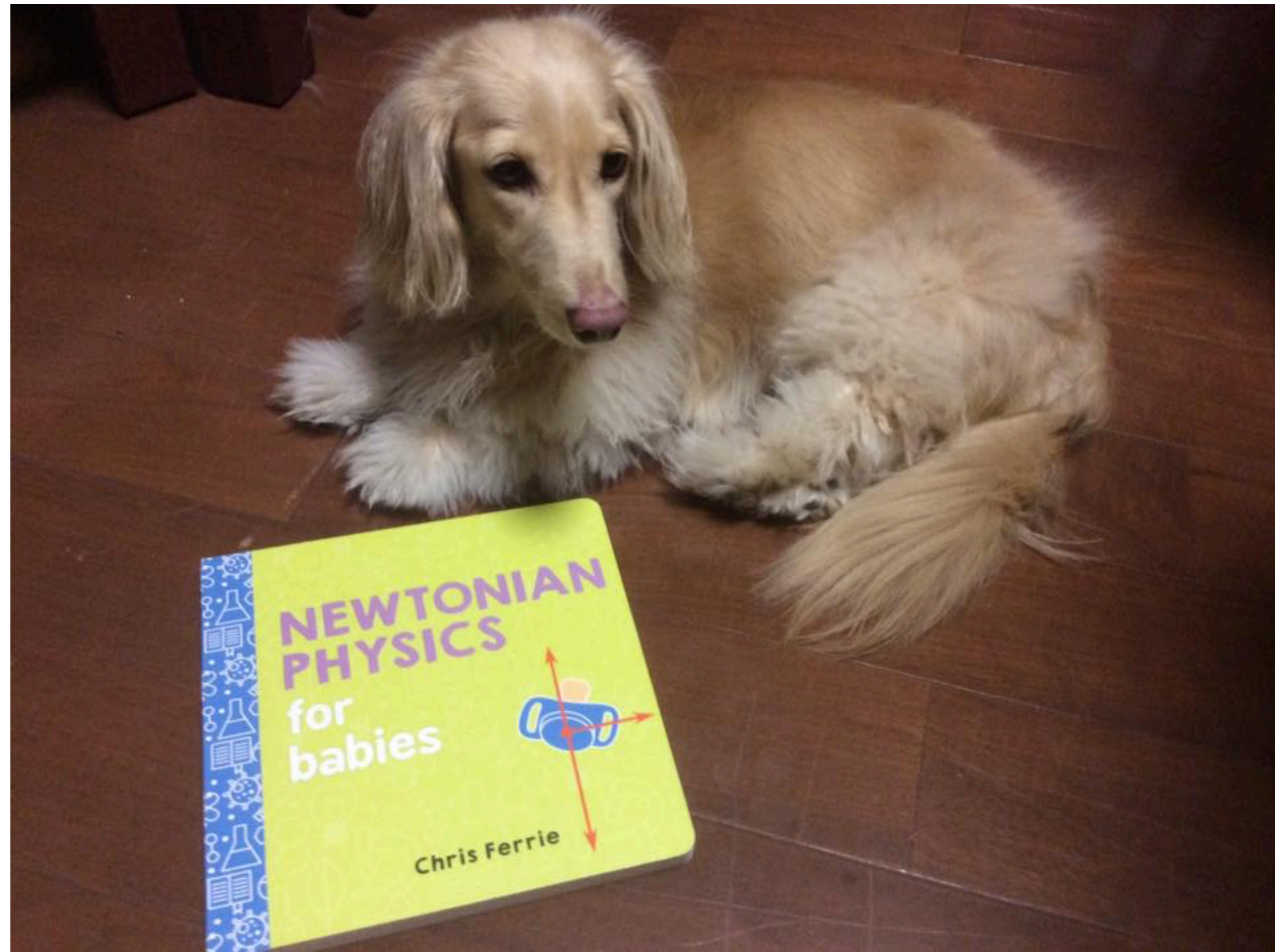
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \left(\begin{array}{l} n' = 1, 2, 3, \dots \\ n = n' + 1, n' + 2, n' + 3, \dots \end{array} \right)$$



$$r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 k_0 m e^2} n^2$$

$$E_n = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^2} \frac{1}{n^2}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{E_n - E_{n'}}{ch} = \frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{ch^3} \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$



【10-1】過去へのタイムトラベルについて、あなたはどのように思いますか？

- (a1) 過去へ行くことは可能である, とする理論が考え出されているので, 将来可能になるだろう.
- (a2) 過去へ行くことは可能である, とする理論が考え出されているが, そのすべてのステップは, 技術的に実現できそうにない.
- (a3) 過去へ行くことは可能である, とする理論が考え出されているが, そのうちのいくつかのステップは, 技術的に実現できそうにない.

- (b1) 過去へ行くことができると, 因果関係を壊されてしまうことから, 原理的に無理と考えられる.
- (b2) 過去へ行くことができても, 統合的な因果関係が構築されるように, 歴史は作られている.

- (c1) 過去には行けない. なぜなら, 未来から誰も現在へ来ていないからだ.
- (c2) 過去に戻れることができるのは, そのようなタイムトラベルが可能になってから後のことなので, 現時点で未来から人が来ていなくても反証にならない.

【10-2】光が波である証拠を複数あげよ.

【10-3】通信欄. (感想, 講義で取り上げて欲しい疑問・要望・連絡事項など、何かあれば)