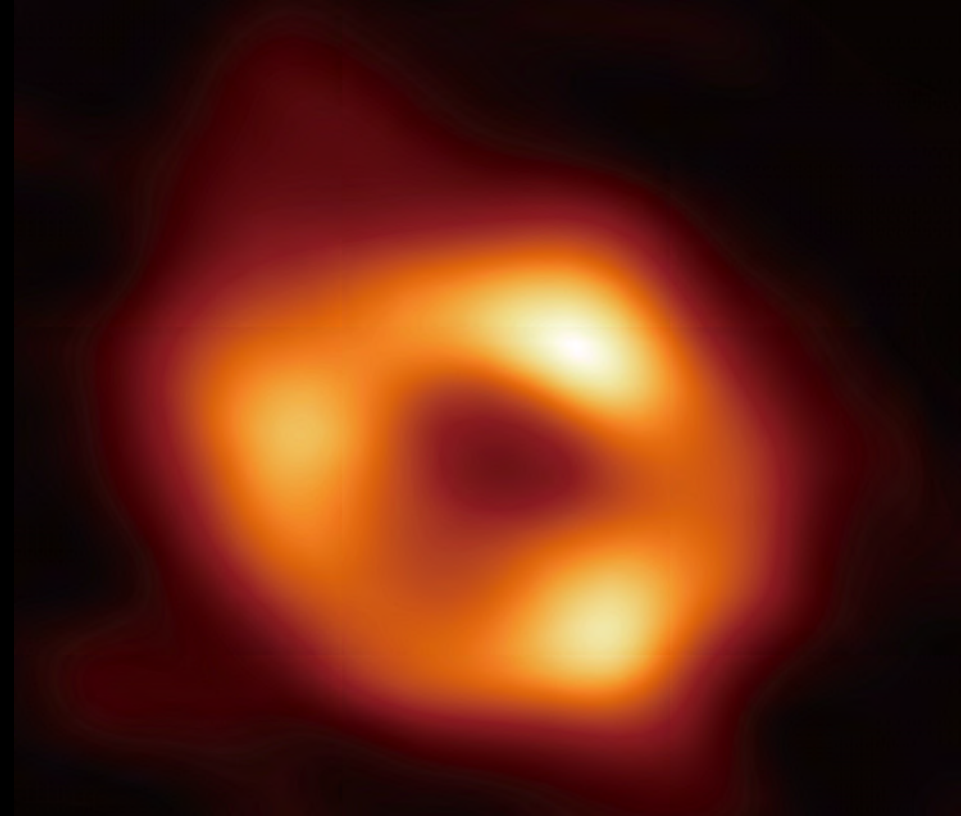


世界は法則にしたがっている ～ねえ君 ふしぎだと思いませんか～



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

追手前ゼミナール 2022年6月25日 @高知県立追手前高校

今日の話の内容をもっとよく知りたければ



主な著書

宇宙は数式でできている

なぜ世界は物理法則に支配されているのか

須藤 靖
Suto Yasushi

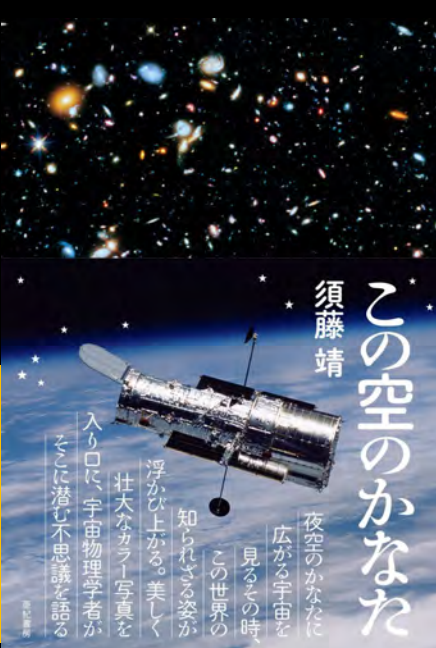


朝日新書
定価: 869円
(本体790円+税10%)

神が法則をしくんだのか?

宇宙は「信じがたい精度で」数学に従っている

高知新聞連載 (2016-2019) をまとめたもの



この空のかなた

須藤 靖

夜空のあなたに
広がる宇宙を
見るその時
知られざる姿が
浮かび上がる。美しく
壮大なカメラ写真を
入り口に、宇宙物理学者が
そこに潜む不思議を語る

BLUE BACKS 不自然な宇宙

宇宙はひとつだけなのか?

須藤 靖



この宇宙は不自然なほどよくできている! その謎を解く鍵は「マルチバース」だった

ものの大きさ

自然の階層・宇宙の階層 第2版

須藤 靖



私たちの住む宇宙は、偶然なのか? 必然なのか?

微視的世界と巨視的世界の階層の背後に潜む物理法則は、この宇宙をどこまで記述し尽くすのか? 系外惑星、宇宙論、人間原理とマルチバースの話題を大幅に加筆し、現代物理学に基づいた宇宙観・世界観を論ずる書、待望の改訂版。

東京大学出版会

解析力学・量子論 第2版

須藤 靖 [著]



東京大学出版会

一般相対論入門 [改訂版]

須藤 靖

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufzufassen zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Anomalien führt, welche den Phänomenen nicht entsprechen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das hochbehohlene Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung, die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der Bewegung ist, streng voneinander zu trennen sind. Demgegenüber ist die Fragestellung, ob und unter welcher Bedingung die Bewegung des Magneten die elektrodynamische Kraft von gewissen Energieerzeugern, welche an dem Orte, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Punkt aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen ein elektrisches Feld, welches an dem Orte, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Punkt aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen ein elektrisches Feld, welches an dem Orte, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Punkt aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen ein elektrisches Feld, welches an dem Orte, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt.

日本書房

情けは宇宙のためならず

須藤 靖



宇宙はひとつなのか 我々はひとりなのか

世界の「見方」が変わる最新宇宙入門

毎日新聞出版
定価: 本体1500円 (税別)

三日月とクロワッサン

須藤 靖
Suto Yasushi

宇宙物理学者の天文学的人生論



今回の内容

- 1 なんのために生まれて なにをして生きるのか
こたえられないなんて そんなのはいやだ
- 2 宇宙を知り世界を問う
- 3 世界は法則にしたがっている
- 4 今日皆さんに伝えたかったこと

1 なんのために生まれて
なにをして生きるのか
こたえられないなんて
そんなのはいやだ



皆さんの現在の目標 ≠ 人生の最終目的

- 好きな部活動を頑張りたい
- いい点数をとって成績を上げたい
- 有名な大学へ入りたい
 - 自慢したい
 - 異性(同性でも良い)にもてたい
 - やりたい仕事をして高い給料が欲しい
- ではその先は？その後どうする？
 - と考えてみれば、何かに役に立つための勉強という意味での（中間）目標は、決して人生の最終目的ではないはず

謎解きはジュケンの後で

『東大ing 2014』 (東京大学新聞社)

- 決して面白いとは言いがたい高校物理は通過儀礼でしかない。大学でなぜそうなるのかを学ばすっきりする。さらにこの世界が少数の単純な摂理に支配されているという驚くべき事実に感動すらしてしまうかも
- その先には膨大な謎とさらなる摂理の探求の地平が広がっている。時間がかかろうと、科学を学ぶことで初めて解明できる無数の謎が残っている。それにチャレンジする人生も悪くない

物理



すとう やすし
須藤 靖 教授
(理学系研究科)

30年以上も前のことなのであまり良く覚えていないのだが、高校の物理を面白いと思つた記憶がない。一方で、数学の難しい問題を考えている時間は楽しくて仕方なかったし、美しい解き方を思いつくとある種の感動を抱いたりもした。なぜだろう。

高校数学はある意味では自己完結しているのに対して、高校物理はそれだけでは結局理解できない事実が多すぎるからそう考えればつじつまがあいそうだ。この世界の物質すべては少数の素粒子

に還元できる。それらを支配する相互作用と対称性が、原理的にはこの世界の振る舞いを決めていく。一方で、分割するだけでは到底説明できない多体現象がこの世界の多様性を保証する。

ミクロな世界とマクロな世界は何によつて区別されるのか、真空と何か、宇宙には始まりはあるか、宇宙は見えている物質だけでできているのか、この空間は本当に3次元なのか、物理「定数」は時間変化しない定数なのか。

高校物理の先にこれほど魅力的で、哲学的とすら形容すべき問題が待ち構えており、しかもそれらが先人達による科学の蓄積によつて解き明かされつつあることなど、ほとんど想像不可能ではあるまいか。

どう考えても面白いとは思いがたい斜面上の物体の運動、高校物理の範囲では意味が分かるはずのない交流回路のリアクタンス、数学で習っていないがなぜか

謎解きはジュケンの後で

(高校)物理で覚えておくべきたった一つの結論

- 物理学者リチャード・ファインマンは、「この科学文明が滅亡するとした場合、次の世代に伝えたいたった一つの知識は何か」という問いに対して、「**すべての物質は原子からできていること**」だと答えたと言われている
 - これは「世界は粒でできている」、あるいは「この世界の多様性は少数の基本構成要素の組み合わせで説明尽くされる」と言い換えられる
- 私なら「**この世界が（数学で記述された）物理法則に支配されていること**」と答えたい
 - どの問題に対してどの公式（物理法則）を用いるべきかなどは些細なこと。**科学（法則）を用いれば原理的には世界を理解できる**という経験的事実以上に驚くべき発見はないのでは？

試験が得意な人≠新しいことを開拓する人

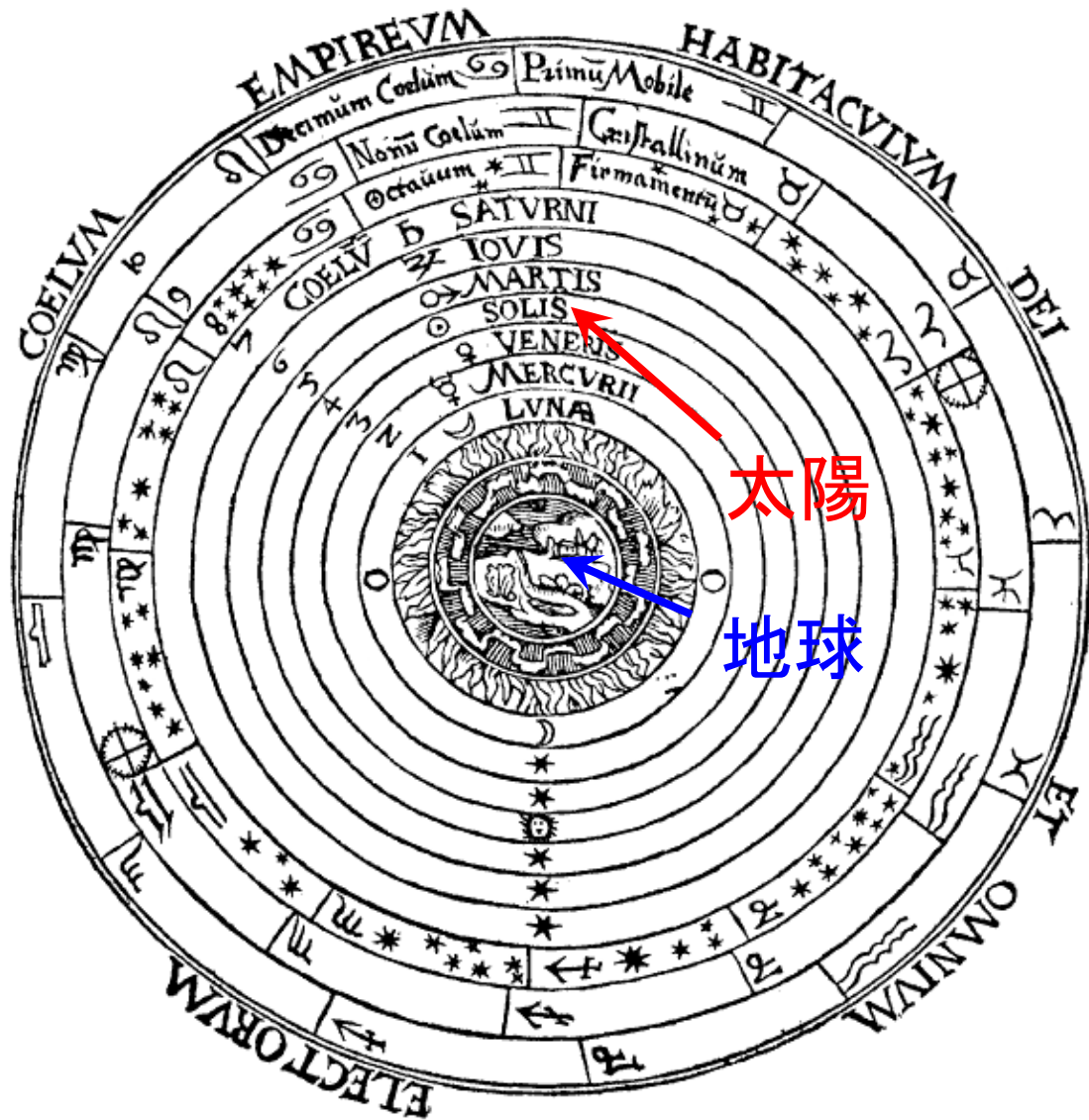
- 大学入学までに行われる「試験」での評価基準
 - 正解がすでに知られている問題を
 - 決められた時間内に
 - 一人だけで何も見ず
 - すべての科目を万遍なく解答することが求められている
- これらは社会の現場とはすべて「矛盾する」
 - 試験での秀才は必ずしも優れた研究者・社会人ではない
- 人間の才能は1次元に数値化できるものではなく、多次元空間で表現すべきもの
 - 必ずしも（とびぬけて）優秀である必要はない
 - 何でも良いから余人をもって代えがたい度合いが重要
- 広く学ぶ意義は、人生で自分が好き・楽しめることを見つけるため

invaluable > valuable

- 「役に立たない」 ≠ 「価値がない」
 - 芸術、音楽、文学、恋愛は役に立つのか？
 - でもそれらは生きる理由を与えてくれる
 - **valuable** は、「価値を判断できる」ほど大切、意義深いという意味
 - **Invaluable** は、「もはや価値を判断する事すらできない」ほど重要であるという意味
 - 人生には、usefulではなくuselessだが、valuable以上にinvaluableなことが無数にあることに気づいてほしい

2 宇宙を知り世界を問う

古代ギリシャの世界観

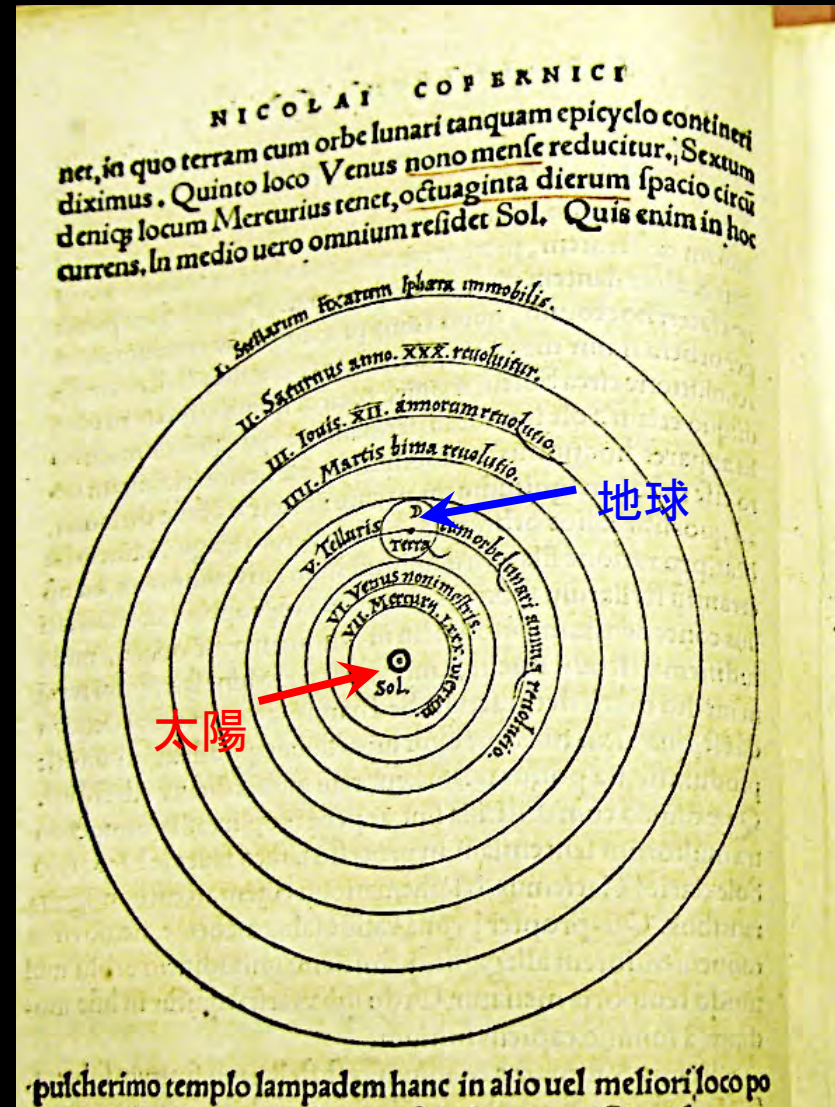
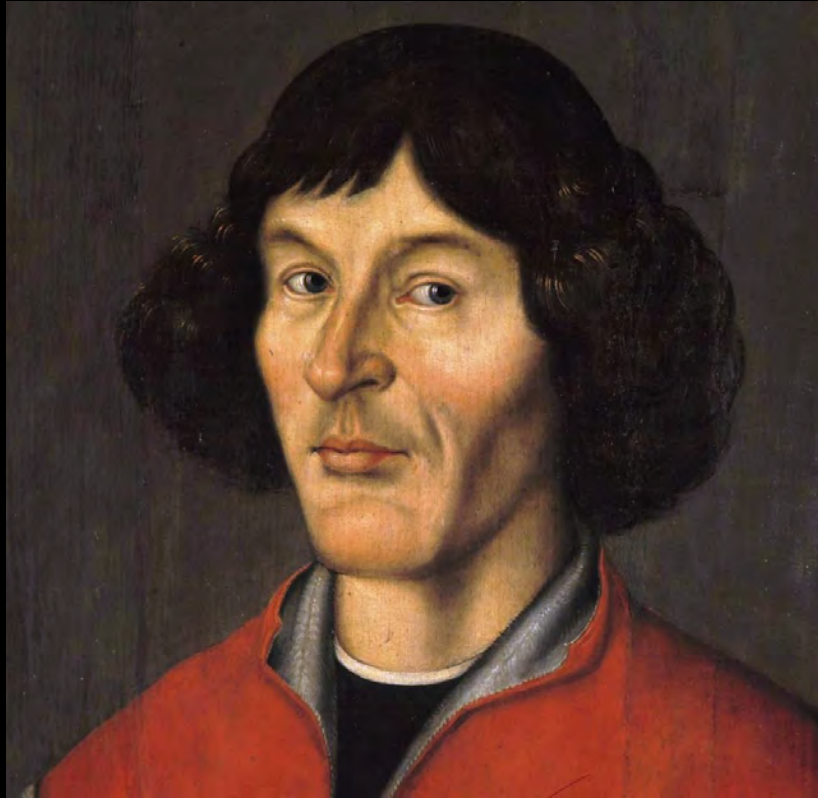


■ プトレマイオス「アルマゲスト」(紀元150年頃)

- 古代ギリシャ天文学の集大成
- アリストテレス的宇宙観
- 天動説
- その後10世紀以上にわたって大きな影響を与え続けた

ペトルス・アピアヌス Cosmographia (1539年)
Wikipediaより

ニコラウス・コペルニクス 「天球の回転について」(1543)



2007年10月24日

日本学術振興会先端拠点形成プログラム
「ダークエネルギーネットワーク」
国際会議@エジンバラ王立天文台
の際に特別公開中の図書館で撮影

アナクシマンドロス（紀元前610年頃 - 紀元前546年）



- 極めて先駆的な古代ギリシャの哲学者
 - 天候は神の意志ではなく自然現象で、雨水はもともとは海や川の水である
 - 大地は無限の平面ではなく、虚空に浮遊する有限な大きさの物体だ
 - 自然を形づくる事物の多様性はすべて、目に見えないなにかを起源とする
 - あらゆる動物は原初の水に起源をもつ。最初の動物は魚で、やがて陸にあがり適応し人間となった

宇宙と世界

- 宇宙=space-time (淮南子)
 - 宇=天地四方上下 (三次元空間全体)
 - 宙=往古来今 (過去・現在・未来の時間全体)
- 世界=時空 (サンスクリット ⇒ 漢語)
 - 世=過去・現在・未来の三世 (時間)
 - 界=東西南北上下 (空間)

(広義の)世界



(我々が観測できる)宇宙



(狭義の)世界



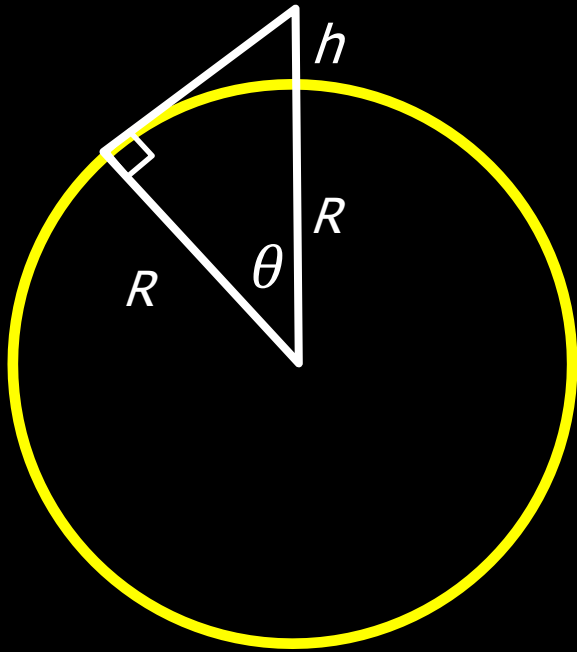
50年前の私にとっての「世界」 @高知県安芸市

「子供の頃、海を見て育っちょらん人間は
信用できん」 (西原理恵子)

- この水平線は世界の果てなのか？
- その先に別の世界があるのか？
- もしあるならばそこに広がる風景は？

世界を知る = より遠くを見る

■ 地平線(ホライズン)のサイズ



$$\cos \theta = \frac{R}{R + h}$$

$$1 - \frac{\theta^2}{2} \approx 1 - \frac{h}{R}$$

$$\ell = R\theta \approx \sqrt{2hR} \approx 4 \sqrt{\frac{h}{1\text{m}} \frac{R}{R_{\oplus}}} \text{ km}$$

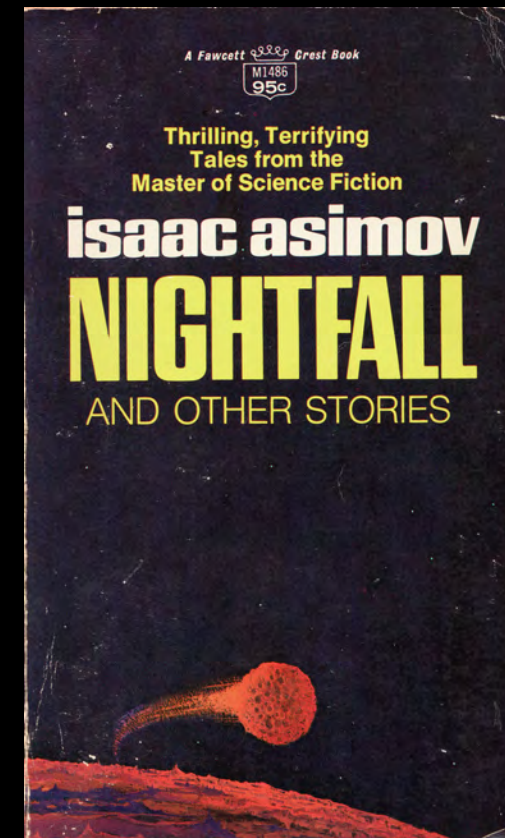
■ 自分のホライズンを広げるには、、、

■ より高い場所に登り、世界を俯瞰する = 天文学

■ 五台山、スカイツリー、飛行機、宇宙ステーション

アイザック・アシモフの短編SF小説 「Nightfall (夜来たる)」

- 6つの太陽を持ち「夜」のない惑星ラガッシュ
 - 空に複数の太陽が昇っているためいつも「昼」
- 古来からの伝説によると、約2000年に一度だけラガッシュに「夜」が訪れるという
 - これは、たまたま空に一つしか太陽が昇っていない時に、ラガッシュの内側の惑星が起こす皆既日食
 - 物語はこれから数時間で「夜」が訪れる時から始まる
 - 初めて「夜」を見た瞬間、ラガッシュの住民は何を知ったのか



「我々は何も知らなかった」



イラスト：羽馬有紗

- その瞬間に彼らの世界観が一変した
- ホライズンの先を見て自分の住む「世界」を知る=科学

この青空はこの世界の果てなのか？
その先にも、(見えない)別の世界が
広がっているのか？



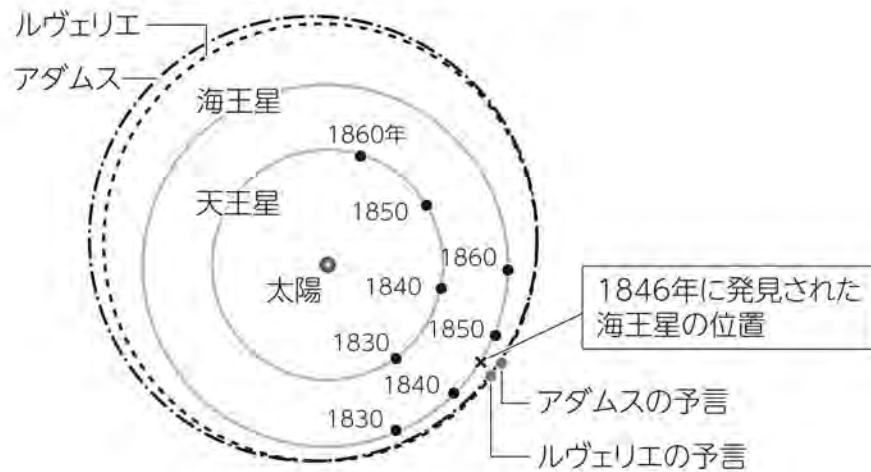
この星空の先には
別の世界が広がっているのか？



3 世界は法則にしたがっている

3.1 海王星の発見：古典力学(ニュートン)の信頼性

- 太陽系内惑星のうち、水星、金星、地球、火星、木星、土星の6つは、誰が最初に発見したかわからないほど昔から知られていた
- 天王星はウィリアム・ハーシェルが、1781年に偶然発見
- その軌道を詳細に観測したところ、ニュートン理論の予言とわずかに矛盾していた。ニュートンは間違っていたのか？
 - ユルバン・ルヴェリエとジョン・クーチ・アダムズは、1846年、天王星の軌道を説明できるようにその外側を好転する未知の惑星の存在を独立に予言

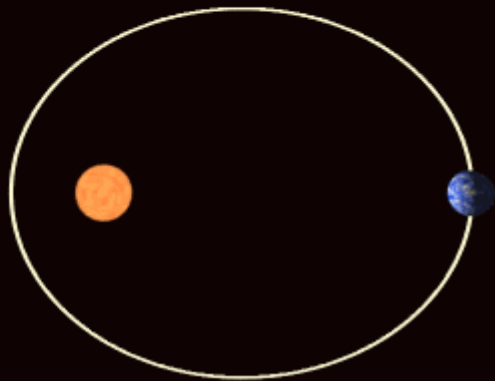


- ガレは、ルヴェリエの予言からわずか0.9度、アダムズの予言から2.5度しか離れていない位置に新たな惑星を発見
- 法則が未知の天体の存在を正しく予言
 - ニュートンは正しかった！

3.2 水星軌道の近日点移動と古典力学の一致

■ 太陽の周りの水星の楕円軌道公転運動

- 他の惑星がなければこの楕円軌道は変化しない（ケプラー問題）
- ただし他の惑星からの重力のために、ニュートン力学の範囲内で、水星の楕円軌道は100年間に532秒角だけ余分に回転するはず（左下図：太陽にもっとも近い位置が徐々にずれるので、近日点移動と呼ばれる）
- しかし実際の観測値は575秒角 ⇒ **100年に43秒角だけ謎のズレが存在**



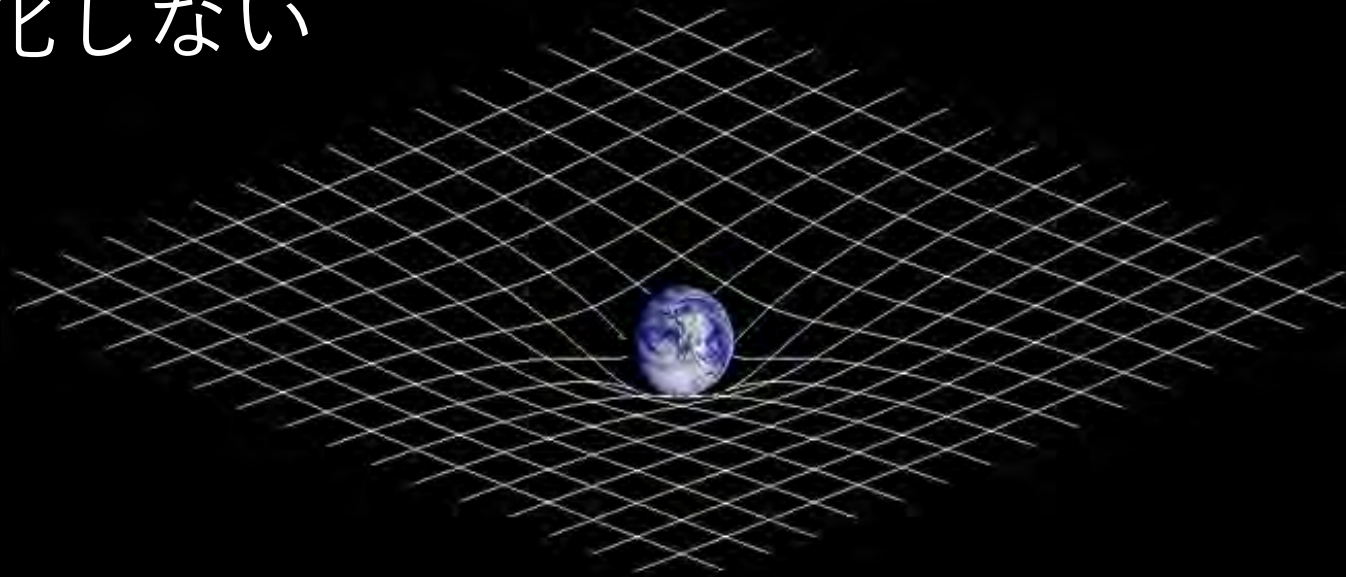
- 水星の公転周期は88日なので、100年間に約400回公転
- 1公転あたりわずか0.1秒角のズレ(比にすると 8×10^{-8})
 - ニュートン力学は事実上十分正しいと言って良い
 - 政治経済や医学分野ではありえない精度で、物理学理論と天文観測データは一致している
- とはいえ、この100年に43秒角のズレは、天文学者の観測の間違いなのか、ニュートン力学の間違いなのか

3.3 水星軌道の近日点移動と一般相対論の一致

- さらに驚くべきことに、アインシュタインの一般相対論は、ニュートン力学が説明できなかった水星の近日点移動の43秒角のズレを自然に解決した
 - 観測の誤差0.5秒角の精度で完全に一致
 - アインシュタインの時代には観測値は 45 ± 5 秒角だった
 - 一般相対論は、このズレを説明する「ため」に考えられた理論ではない。重力はなぜ働くかを追及した結果、「重力は時空のゆがみによって生まれる」という驚くべき結論に至ったもの
 - この信じがたい結論を支持するのは、高精度の観測データとの定量的な一致（理論のみならず技術の発展が不可欠）
- 単なる主張や感想、価値観、偶然などではない
 - 一般相対論はより正しい理論（しかし最終的なものではない）
 - 「世界は法則に（厳密に）したがっている」を実感できる例

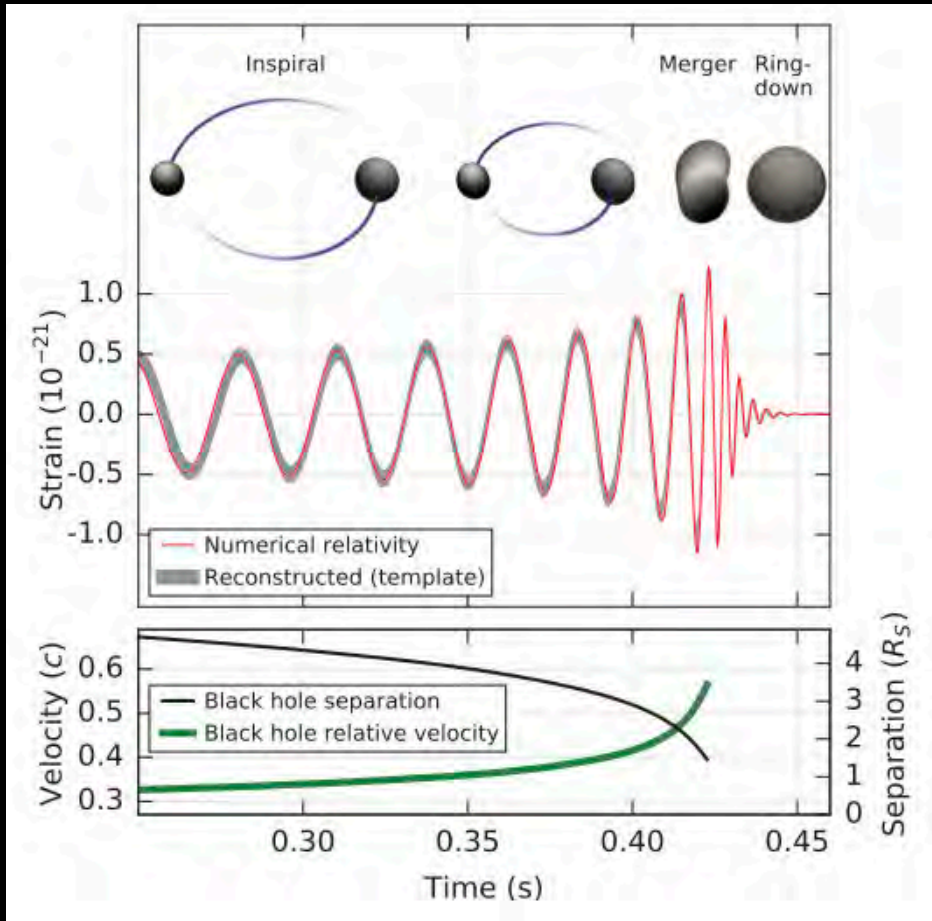
3.4 時空の歪みを伝える波（重力波）と一般相対論（1）

- 物体が静止している時には、それによって生まれる空間の歪みは変化しない



- しかし一般相対論によると、物体が激しく運動すれば歪みのパターンが時間変化し、波として伝わる（重力波）
- とはいえ、その振幅はとてつもなく小さい

3.4 時空の歪みを伝える波（重力波）と一般相対論（2）



Abbott et al.

Phys.Rev.Lett. 116 (2016) 061102

<https://www.ligo.caltech.edu/>

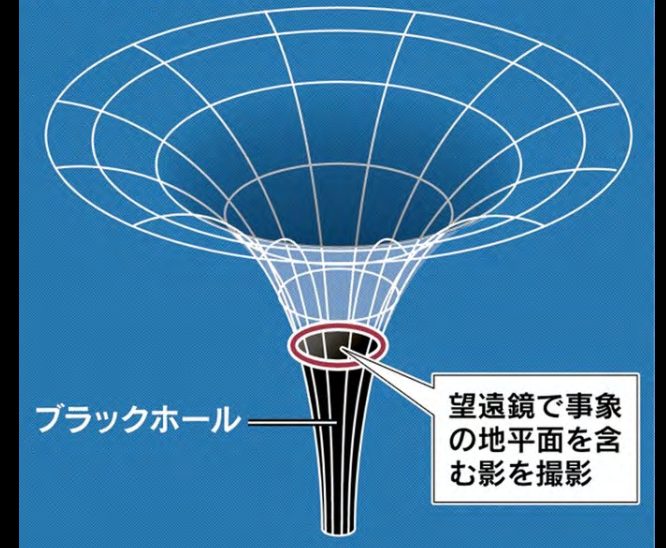
- 3km離れた2点間の距離 L の変化を $\Delta L/L=10^{-21}$ の精度で検出 (2015年)
 - 地球・太陽間の距離がわずかに原子1個分だけ変化した程度に対応する驚異的な感度
 - 2017年ノーベル物理学賞を受賞した大発見
 - 一般相対論の予言以来100年後の確認
 - 基礎物理学理論と最新測定技術発展のすごさ
- 一般相対論は世界を近似しているのではなく、厳密に記述しているのではないか？
 - 「間違った」理論がここまで定量的に観測事実を予言する偶然などありえない

3.5 ブラックホールシャドウの撮影 (1)

- 一般相対論が完成した直後の1916年、シュワルツシルトが、奇妙な性質を持つ解を発見
 - そこからは、光を含むいかなる物質も外に出ることはできない
 - 現在ブラックホールと呼ばれているこの天体は、アインシュタインでさえ、現実的にはありえない数学的解に過ぎないと考えた
 - しかし、その後の観測によってブラックホールだと考えられる天体が数多く発見されてきた
 - しかし、ブラックホールは本当に「ブラック」なのか（そこから光は脱出できないのか）確認されたわけではなかった



のみ込まれた物質や光はブラックホールの外に脱出できない

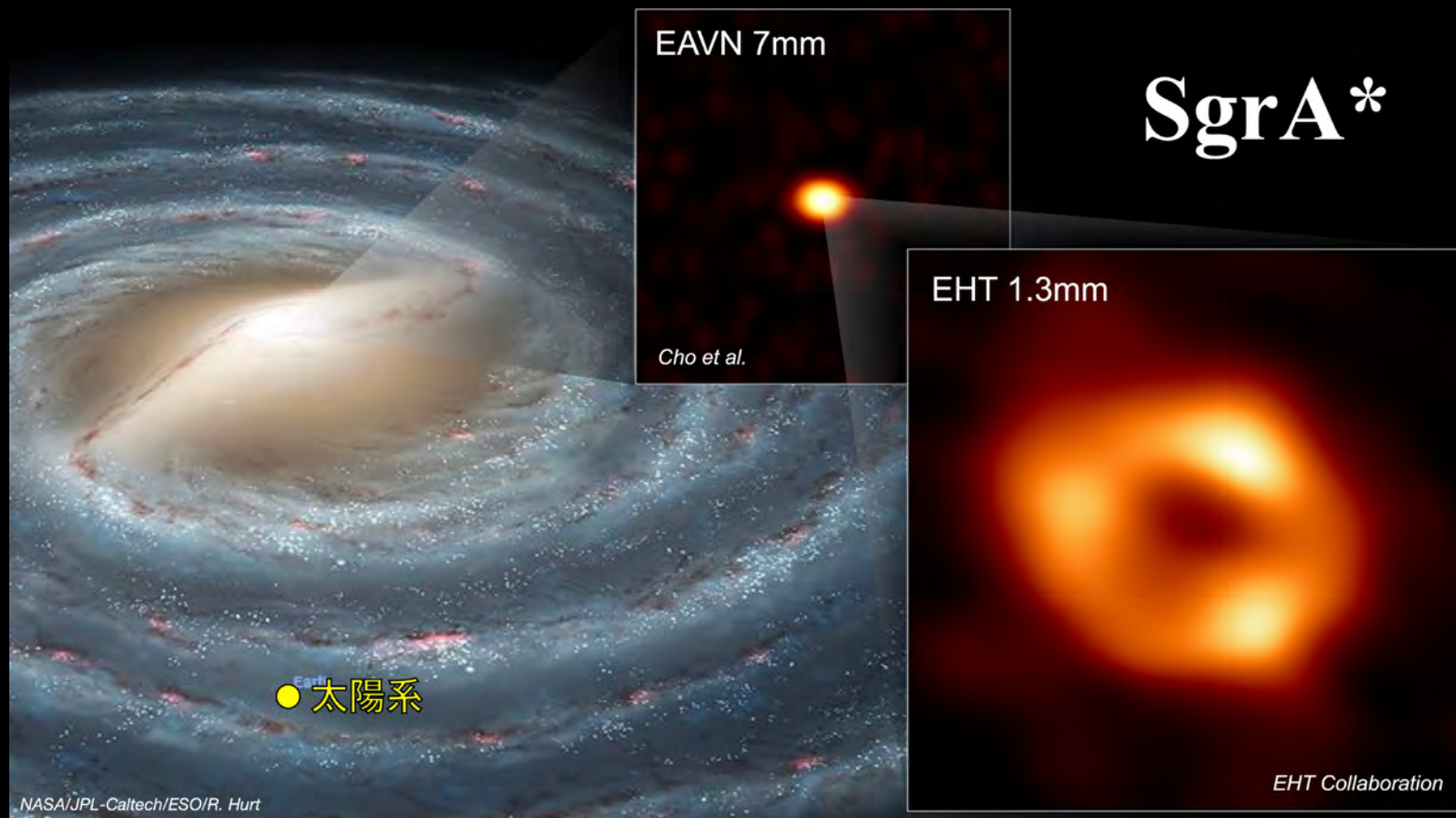


3.5 ブラックホールシャドウの撮影 (2)

- 2022年5月12日、国際共同プロジェクトEHT(Event Horizon Telescope:事象の地平線望遠鏡)が、天の川銀河の中心にあるブラックホールの「影」の撮影結果を発表

- 2019年4月10日の楕円銀河M87 (5千万光年先)の中心ブラックホールに続く2例目

- **ブラックホールは本当に「ブラック」であることを証明**



宇宙を記述する数式(微分方程式)

■ 重力の逆二乗則 と運動方程式 (ニュートン)

$$\vec{F} = -\frac{GmM}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} + m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}$$

- りんご、ロケット、天体など驚くべきほど広範な現象が、この式によって記述される

■ 一般相対論の基礎方程式 (アインシュタイン)

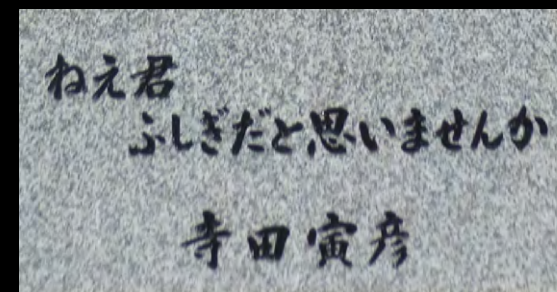
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

- 極めて難しく見えるものの、実際は上のような式を複雑にした10個の連立方程式に対応するだけなので、原理的には同じ
- これらは世界の近似なのか、厳密な表現なのか？

微分方程式で表された物理法則の数学的解は実際にこの宇宙のどこかで実現しているらしい

- この世界の振る舞いを経験的にうまく説明できるように提案されたものが物理法則
 - その法則自体は世界の近似に過ぎないはず。さらにその法則を具体的に書き下した微分方程式は、決して厳密な意味での世界の記述ではないはず
 - にもかかわらず、それらの方程式の今まで知られていなかった数学的性質や厳密解を発見すると物理学者は大興奮する
 - 物理学者は、微分方程式が厳密にこの世界を記述するものと勘違いしているだけでは？
- ところが、この宇宙では当初は数学的な解に過ぎないと思われた現象が次々と発見されてきた。これはなぜなのか？
 - 中性子星、ブラックホール、重力波、、、
 - やっぱり宇宙は法則（微分方程式）に従っている！



なぜ法則は数学で正確に記述可能なのか

- ガリレオ・ガリレイ
 - 宇宙の原理は数学という言葉で記述されている
- ユージン・ウィグナー
 - 数学の不合理的なまでの有効性
- アルベルト・アインシュタイン
 - 経験とは独立した思考の産物であるはずの数学が、物理的実在とこれほどうまく合致するのはなぜか
- リチャード・ファインマン
 - 数学を知らずして自然界のもっとも深遠な「美」を理解することはできない
- 実は、世界（法則）と数学は同じものなのでは？

4 今日皆さんに伝えたかったこと

我々が高校で身につけるべき最も重要な科学観
「世界は法則にしたがっている」

- 物理法則に矛盾する現象は絶対に起こらない
 - 「原理的には」すべての物事は予言可能なはずであるが、「実際には」その信頼性には限界がある
 - 一方「科学的にあり得ない」という結論はほぼ信頼できる
- しかし、「科学的結論だから絶対正しい」あるいは「科学は万能である」は、明らかな間違い（まさに非科学的）
 - 科学は単純な基本法則(law)に加えて、複雑な条件+推論からなる
- 科学リテラシー：科学の有効性と限界をとともに理解し疑うことができる態度 ≠ 科学的知識(の暗記)

答えを知るより疑問に思う心が大切

眼は、いつでも思った時にすぐ閉じることができるようになっている。
しかし、耳のほうは、自分では自分を閉じることができないようになっている。

なぜだろう。

(大正十年三月、渋柿)

寺田寅彦 1878年11月28日～1935年12月31日

高知県出身

東京帝国大学物理学教授

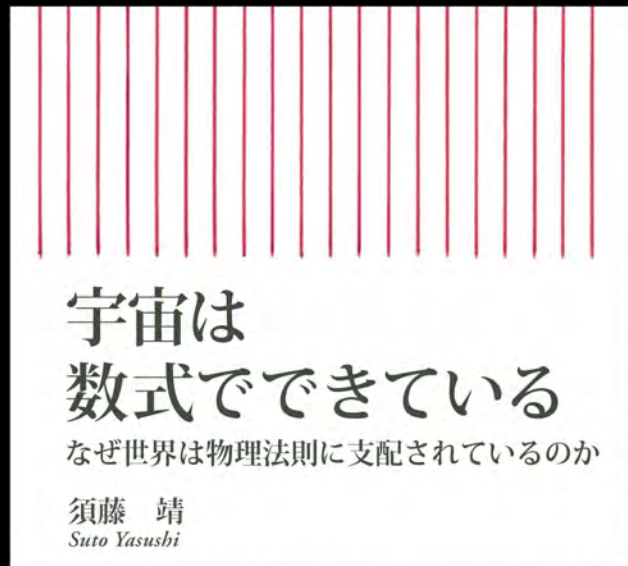


その世界の先を探る = 「学」 + 「問」

学びて問い続けるべき理由

- **幸せで楽しい人生を送るため！**
 - 有名な会社に入り、安定した収入を得るためではない
 - 人より優れている必要はない（そもそも他人との比較は無意味）
 - 自分がうちこめること、興味を持てるものを見つけて、社会に貢献できればそれ以上の幸せはない
 - 自分以外にできないこと(=生きる真の意味)をじっくり探そう
- **学び知る事で、以前は見えなかったものが見える**
 - 自分の世界、人生の可能性が広がる
 - 自分が嫌な事を無理やり強制されてやる必要はない
 - 何もせず無駄に時間を過ごしているだけでは、せっかく生まれてきたのにもったいない

今回の講義の内容に関する主な参考文献



朝日新書 2022年



東京大学出版会
初版 2006年 第2版 2021年



講談社ブルーバックス 2019年