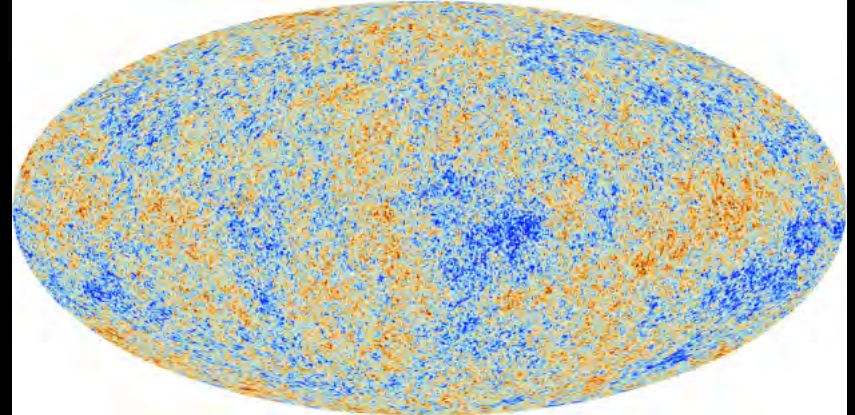


生まれ続ける新たな宇宙像



東京大学大学院理学系研究 物理学専攻 須藤 靖

2019年5月27日 14:30-15:00@国立科学博物館講堂

天文学の100年：過去から未来へ

—国際天文学連合100年記念シンポジウム—

ホライズン

我々が知ることでできる世界の限界

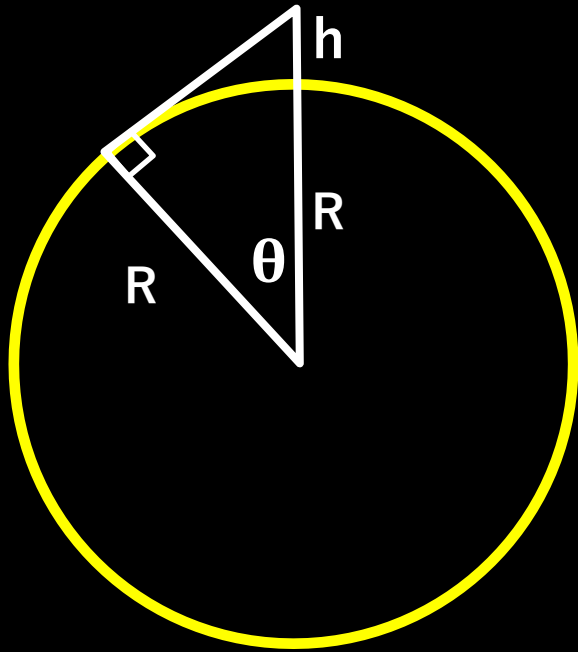
50年前の私にとっての「世界」 @高知県安芸市

「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
- スカイツリー、マウナケア、アタカマ、大気圏外

宇宙のホライズン開拓年表

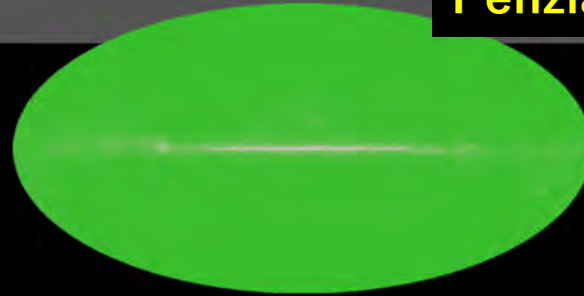
西暦	天体	距離	説明
1923	アンドロメダ	800kpc	系外銀河の発見 (ハッブル)
1963	3C273	750Mpc	クエーサーの発見 (シュミット)
1965	CMB	4000Mpc	ビッグバン残存光子の発見 (ペンジアス、ウィルソン)
1967	PSR B1919+21	700pc	パルサー (中性子星) の発見 (ベル、ヒューイッシュ)
1969	月	1.2×10^{-8} pc	有人月着陸に成功(アポロ11号)
1976	火星	2×10^{-6} pc	火星表面軟着陸に成功 (バイキング1号)
1992	CMB全天地図	4000Mpc	宇宙初期の温度ゆらぎの発見 (COBE)
1995	51 Peg b	16pc	太陽系外惑星の発見 (マイヨール、ケロー)
2015	GW150914	400Mpc	重力波の直接検出+ブラックホール連星の発見 (LIGO)
2017	GW170817	40Mpc	中性子星連星からの重力波の検出 (LIGO-VIRGO)
2019	M87	16Mpc	ブラックホールシャドウ(Event Horizon Telescope)

138億光年先の宇宙のホライズン

1965

Penzias & Wilson

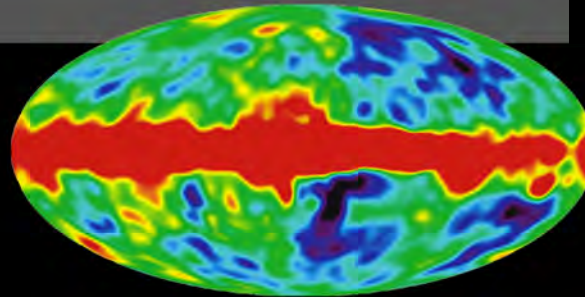
私



@高知県安芸市

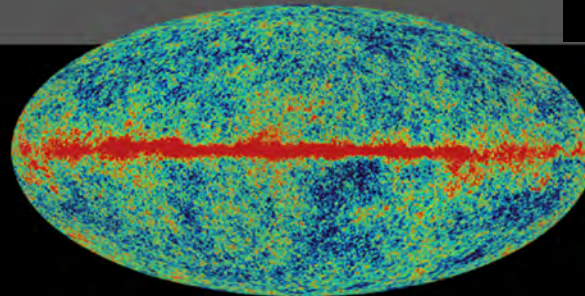
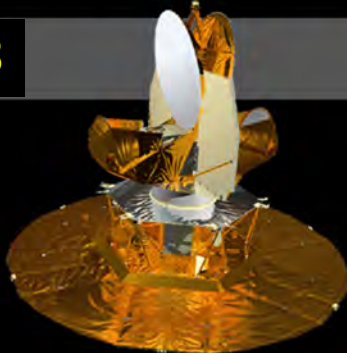
1992

COBE



2003

WMAP

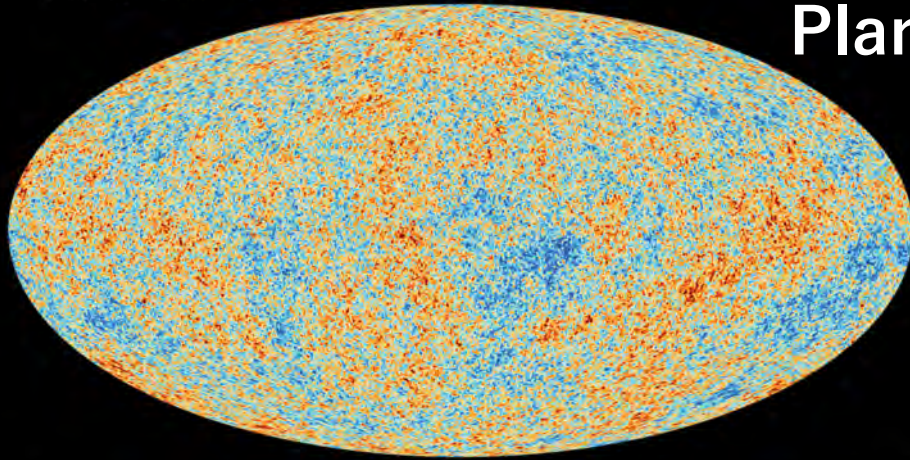


@すばる望遠鏡

https://map.gsfc.nasa.gov/mig/030644/030644_300.tif

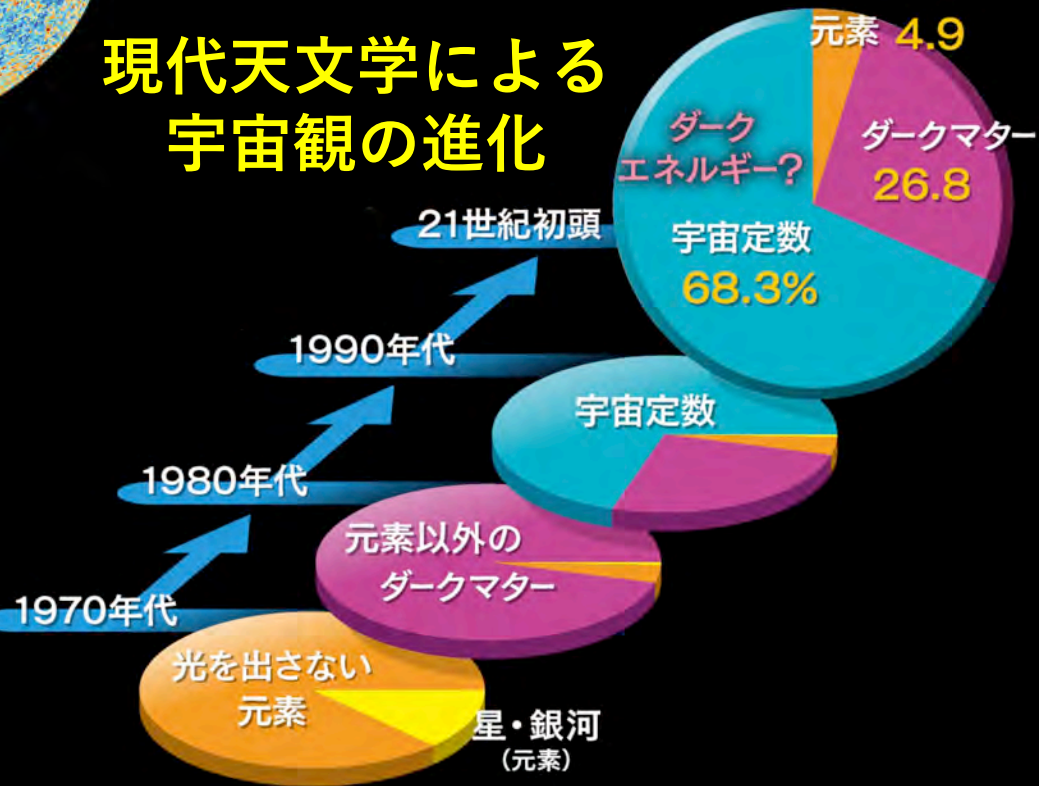
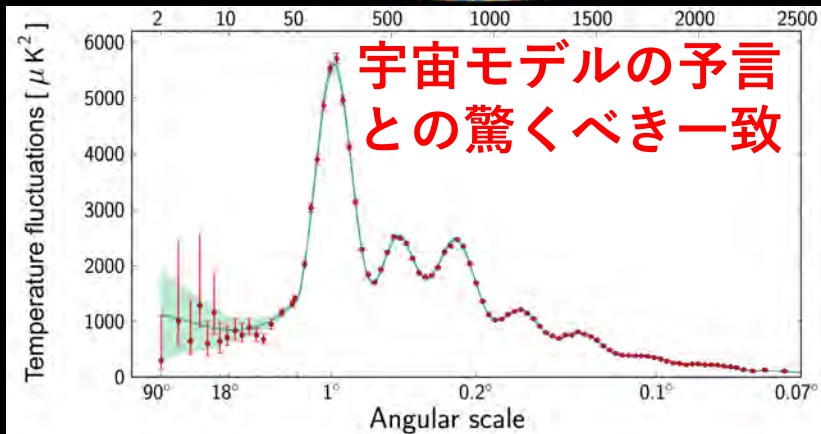
ダークマター、ダークエネルギー以上に重要な発見 宇宙はその果てまで物理法則に従っている

→ THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND
Planck Legacy Release 2018



Planck衛星 (2013)

現代天文学による 宇宙観の進化



http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2018/07/Planck_s_view_of_the_cosmic_microwave_background2

1995年 宇宙は惑星で満ちていた

A Jupiter-mass companion to a solar-type star

Michel Mayor & Didier Queloz

Nature 378(1995)355

Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauvigny, Switzerland

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

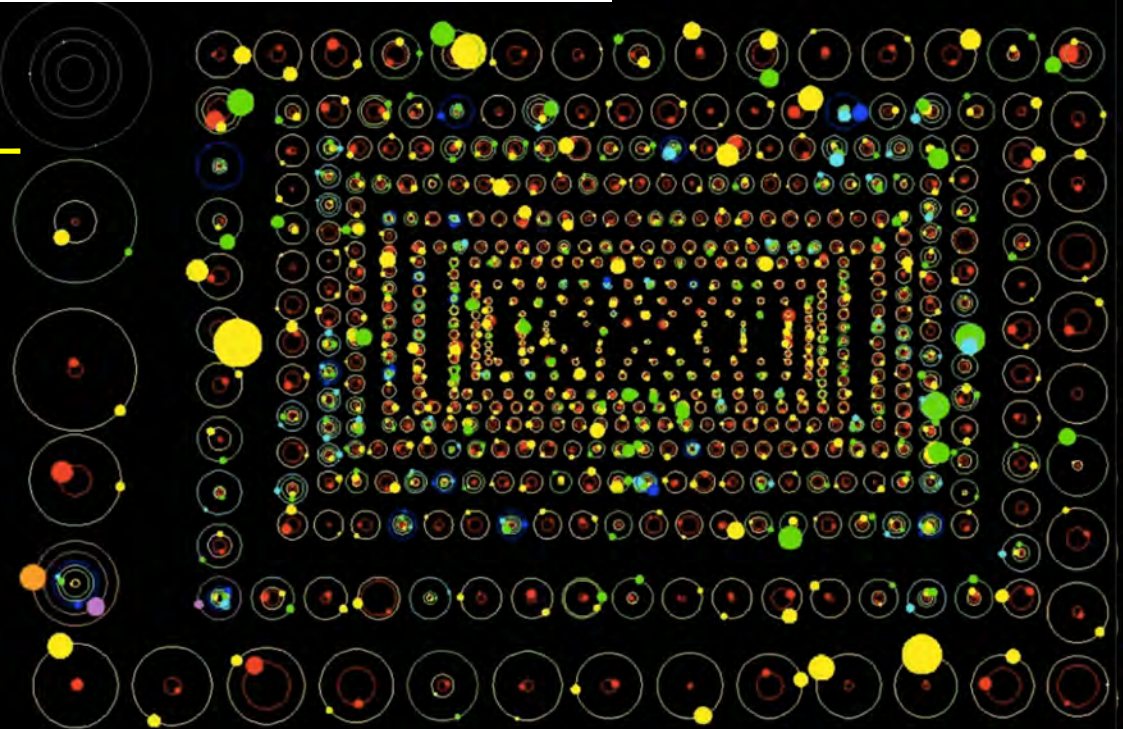
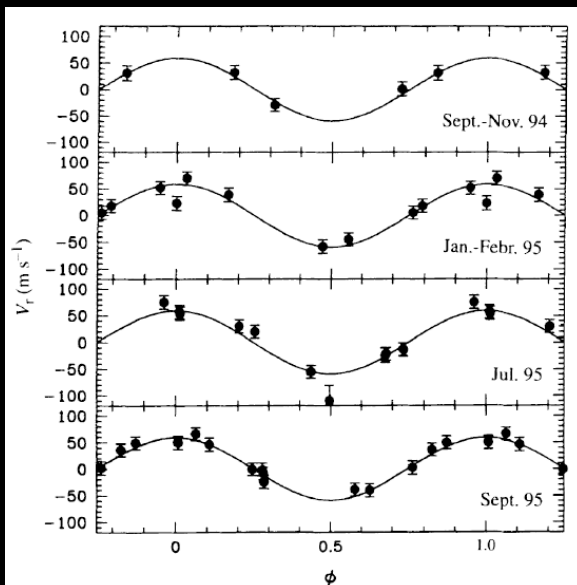
Kepler planets
August 3, 2015
NASA/Daniel Fabrycky

t[BJD] = 2455215

初めて発見された系外惑星

51Peg b

4.2日で公転するホットジュピター



<https://solarsystem.nasa.gov/resources/311/kepler-orrery-iii/>

1919年 日食観測から光線の湾曲が検証され、 一般相対論とアインシュタインは一躍有名に

New York Times

**LIGHTS ALL ASKEW
IN THE HEAVENS**

Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

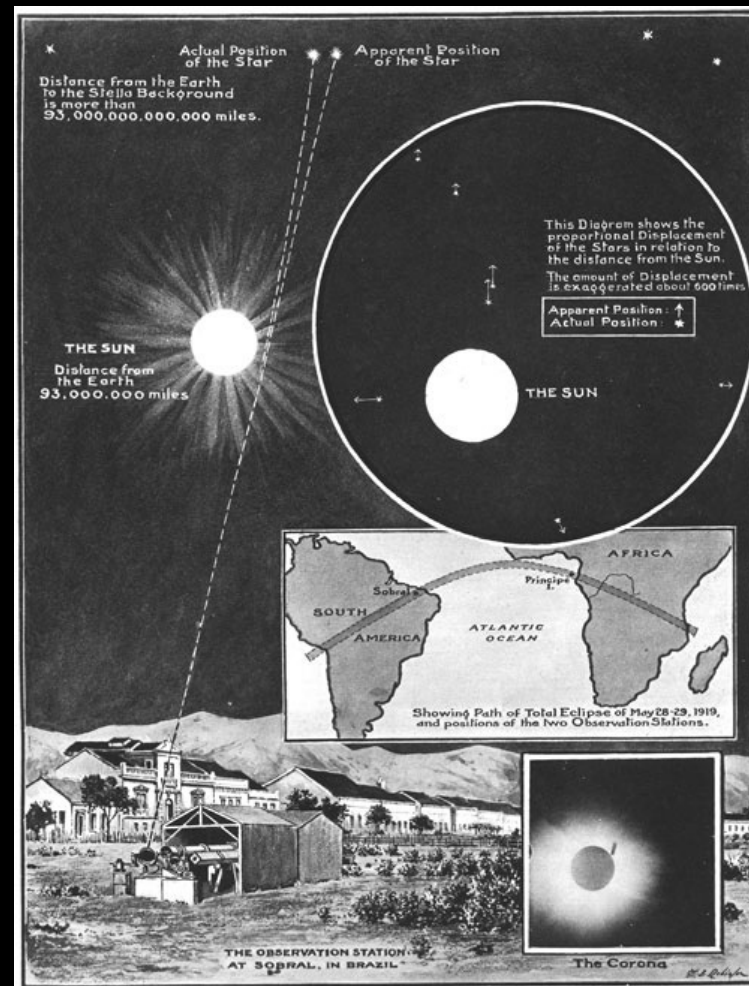
EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.

The illustrated London News



<http://www.astro.caltech.edu/~rjm/Principe/1919eclipse.php>

2016年 重力波直接検出の発表



発行所 高知新聞社
高知市本町3丁目2-15
088-822-2111 780-8572
© 高知新聞社 2016

重力波を初観測

国際実験チーム

宇宙誕生の謎迫る

【ワシントン共同】浅見英一「アインシュタインが100年前に存在を予言した「重力波」について、米大学を中心とした国際実験チーム「LIGO(ライゴ)」が11日、二つのブラックホールが合体したときに放たれた重力波の観測に成功した、と発表した。重力波の直接観測は世界初で、宇宙の成り立ちに迫るノーベル賞級の成果。

重力波はアインシュタインが一般相対性理論で1916年に予言した。ブラックホールのような非常に重い物体が激しく動くと、周囲の時間の流れや空間が揺れて、波のように伝わる現象とされる。

重力波はアインシュタインの一般相対性理論で1916年に予言した。ブラックホールのような非常に重い物体が激しく動くと、周囲の時間の流れや空間が揺れて、波のように伝わる現象とされる。

重力波望遠鏡を米西部ワシントン州と南部ルイジアナ州で運用。2台ともほぼ同時に重力波を捉えた。一辺の長さが4キロのL字形の巨大装置で、それぞれの中心部から直角の2方向に同時にレーザー光を放ち、4キロ先の鏡に反射させ戻ってきた光を測る。重力波が届くと鏡までの距離が伸び縮みし、光の戻る時間にずれが生じるのを検知する仕組みだ。日本も岐阜県飛騨市の地下に重力波望遠鏡「かぐら」を建設。ノーベル物理学賞を受賞した梶田隆章東大宇宙線研究所長らが観測を目標としている。

円急騰一時110円台

米利上げ観測後退で

ロンドン市場

重力波の初観測により、重力や時空を説明する相対性理論の正しさがあらためて裏付けられた。光や電波では見えない天体の姿や生まれたての宇宙を調べられると期待されている。

【ロンドン共同】11日の海外市場で安全資産とされる円の対ドル相場が一時1ドル110円台へ急騰する一方、原油価格は1ドル26円台(下落)欧州、アジア株も軟調に推移、投資

資金のリスク回避の動きが加速した。世界経済の追加利上げ観測が後退。円急騰による輸出関連企業の採算悪化など日本に悪影響が及ぶ恐れが強まった。(4面に関連記事) 円相場は11日のロンドン市場で急上昇し、一

札幌	6	足指	高知	室戸
東京	9			
名古屋	12			
大阪	15			
岡山	18			
福岡	21			
那覇	0			
降水確率(%)				
	6	20	10	0
	12	30	20	10
予想最高気温		19	17	16
予想最低気温		12	6	10

天気

12日

しかし香川県ではうどんに負けた ブレグジット、トランプ現象、ポピュリズムと いった動きと共通した何かを想起させる

重力波、世界初観測

米大学など 国際チーム 宇宙の起源に迫る

ワシントン共同。慶応英二（アインシュタイン）が10年前に存在を予言した「重力波」について、米大学を中心とした国際実験チーム「LIGO（ライゴ）」が11日（日本時間12日未明）、ワシントンで重力波の直接観測は世界初で、宇宙の成り立ちに迫る。ノーベル賞級の成果。（3面に関連記事）

アインシュタインが予言

姓理の正しさがあつたため「重力波」は予言されていた。重力波はアインシュタインの相対性理論から導き出された。

県内うどん店100店調査

かけうどん235.7円

	今回調査	前回調査 2014年4月	差額
全体	235.7円	232.5円	3.2円
セルフ 店舗所	202.0円	199.4円	2.6円
一般店	314.5円	309.8円	4.7円

四国新聞社は人気店の平均価格は235.7円で、2014年4月の消費税増税時に比べて3.2円値上がりしていることが四国新聞社の調べで分かった。値上げした店は15店。大半は増税時に値上げを見送った店。結果的に増税負担に耐えられなかったようだ。50円の大増改定をした店もあった。しかし、増改定が除くだけで増税時を回った。天ぷらなどのサイドメニューの価格を改定した店もあつた。（19面に「特報」）

増税以降3.2円値上がり

今回の調査は消費税率が8%に引き上げられた直後、15店のうち13店は増税の値上げを前調査時より値段を上回った。平均値上げ額は5円から50円の幅で引き上げており、平均値上げ額は21.8円だった。増税に合わせた51店が値上げし、前調査時の平均値上げ額は19.7円で、今回の値上げ幅は増税時を1.9円上回った。

調査ではこの1年でのサイドメニューの価格変動も聞いた。サイドメニューを値上げした店は25店。内訳は、天ぷら22店、おでん8店、ご飯類12店だった。このうち値下げをした店はなかった。

うどんの価格は据え置き。一方、サイドメニューの値上げに踏み切った店もあつた。この間、小麦価格は大きく上がった。食料品、食油やエビなどの輸入食料の値上がりも影響した。

UPIは14年4月以来、UPIは235.7円で、前調査時の232.5円から3.2円上がった。UPIは14年4月以来、UPIは235.7円で、前調査時の232.5円から3.2円上がった。

UPIは14年4月以来、UPIは235.7円で、前調査時の232.5円から3.2円上がった。



須藤 靖

2016年10月4日、本年度のノーベル物理学賞が、重力波を直接検出した米国のLIGO（ライゴ）実験を牽引した二人に贈られることが発表されました。実はこのLIGO実験には、現在私がセンター長をしている東京大学ビッグバン宇宙国際研究センターに所属しているキップ・キャンノン教授も大きな貢献をしています。そこで今回は、この歴史的発見について解説してみたいと思います。

何もない池の表面はほとんど平らです。でも、そこにボートをとんとン浮かべれば、そのまわりの水面は沈んで下がります。その結果、周囲に浮かんで

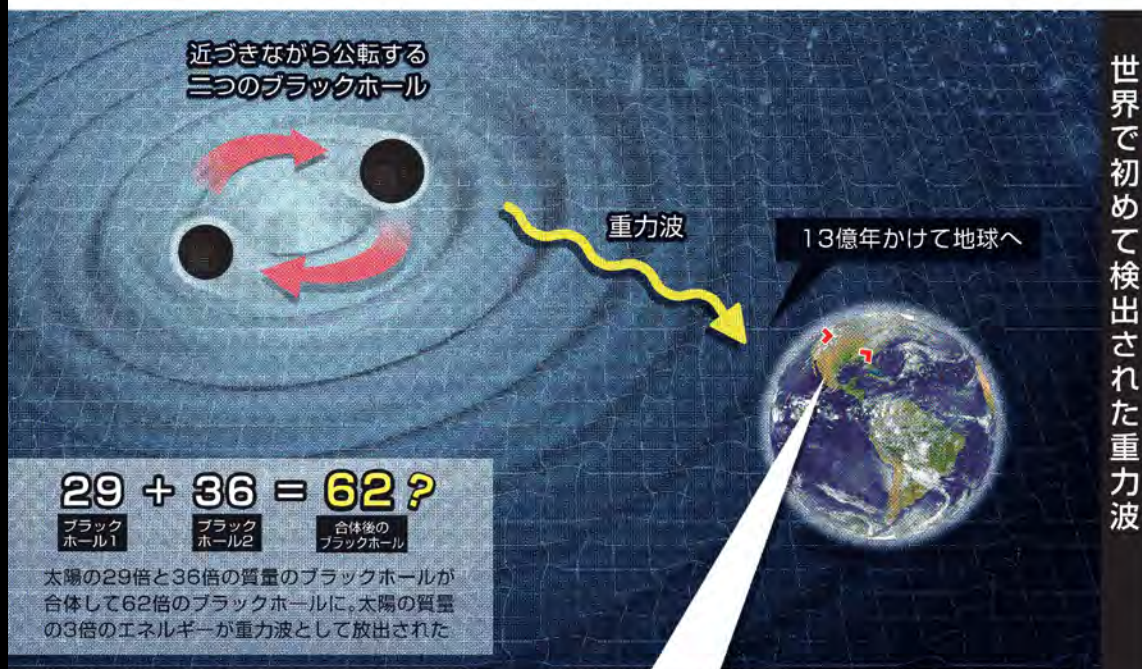
いる物体もそのボートの近くに吸い寄せられるでしょう。実はこれは二つの物体同士になぜ引力（重力）が働くのかを一般相対論の立場で説明したことになるのです。この例で言う池の水面の高さの変化が「空間の歪み」で、それによって周囲の物体が受ける効果が「重力」というわけです。

さらに、このボートが急に動き出すと水面が変化し、それはやがて波となって外へ伝わります。同じように、物体が激しい運動を行えばその周りの空間の歪みが時々刻々変化し、やがて外へ伝わります。これが重力を伝える波、すなわち重力波です。

実はアインシュタイン自身ですら、重力波の存在を疑った時期があったはず。この大発見を成し遂げたLIGOは、互いに約3キロメートル離れたワシントン州ハンフォードとルイジアナ州リビングストン

世界で初めて検出された重力波

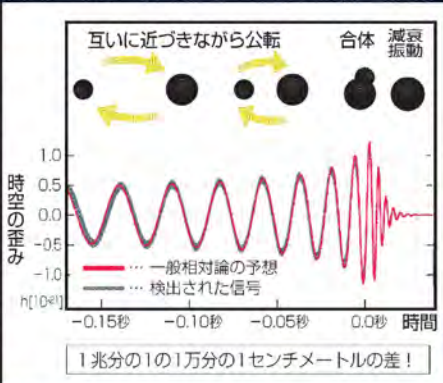
29 + 36 = 62 でノーベル賞



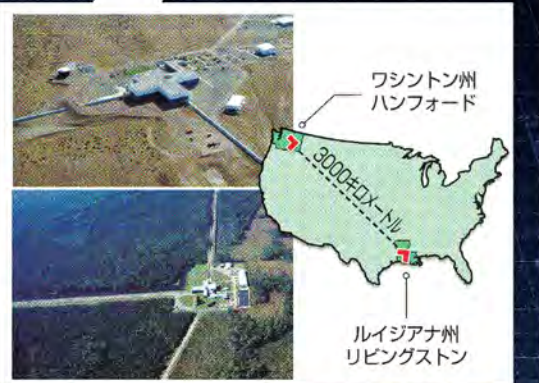
29 + 36 = 62?

ブラックホール1, ブラックホール2, 合体後のブラックホール

太陽の29倍と36倍の質量のブラックホールが合体して62倍のブラックホールに。太陽の質量の3倍のエネルギーが重力波として放出された



LIGOの実験施設



デザイン 宮川優希

2015年9月14日の重力波

幻の高知新聞二〇一六年十月八日朝刊

人類史上初めて検出された重力波は、日本時間の15年9月14日18時50分45秒にやってきました。左下の図は、この2カ所で同時に観測された検出器の二つの腕の長さの微小なずれの時間変化の様子です。わずか0.2秒以内

この大発見を成し遂げたLIGOは、互いに約3キロメートル離れたワシントン州ハンフォードとルイジアナ州リビングストンの二つの地点にL字型をした二つの腕からなる実験施設です。それぞれ腕の長さは4キロメートルで、重力波が到来した際の二つの腕の長さの微妙な差をレーザー光を用いて精密に測定します。実は重力波以外の装置の雑音や地震によっても頻りに長さが変化するため、遠く離れた2点で、同じ時刻に同じ時間変化を示す信号を検出することが大切なのです。

重力波の強さは、互いに離れた2点間を重力波が通過する際に、もとの距離に対して伸び縮みする変化分の割合あるいは空間の歪みに対応するhというパラメータで表されます。典型的には、h=10^-21程度の信号しか期待できないので、もとの長さより1桁小さい変化分（1兆分の1）のさらに10億分の1を抽出できる装置を完成させる必要があります。これは、地球と太陽間の距離がわずか原子100個分変化することに対応します。どう表現してもピンと来ないかもしれません。ところが分かってもらえれば十分です。この重力波直接検出を目指した研究は、60年代から世界中で試みられてお

須藤 靖

2016年2月12日、米国のLIGO (ライゴ) 実験施設で、一般相対論が予言する時空のさざ波(重力波)が直接検出されたことが発表されました。このLIGO実験には、現在私がセンター長をしている東京大学ヒッグバン宇宙国際研究センターのキップ・カンノン准教授も大きな貢献をしています。そこで今回は、この歴史的大発見を紹介してみたいと思います。

アインシュタインの一般相対論によれば、質量をもつ物体の周りの空間は歪んでいます。いきなり空間が歪むと言われても意味がわからないのは当たり前ですが、その説明は難しいのでとりあえず次の例えで分かったつもりになっていただければ十分です。

何もない池の表面はほとんど平らです。でも、そこにポットを落とすと浮かべれば、そのまわりの水面は沈んで下がります。その結果、周囲に浮かんでる物体もそのポットの近くに吸い寄

せられるでしょう。実はこれは二つの物体同士になぜ引力(重力)が働くのかを一般相対論の立場で説明したことになるんです。この例で言う池の水面の高さの変化が「空間の歪み」で、それによって周囲の物体が受ける効果が「重力」というわけです。

さらに、このポットが急に動き出すと水面が変化し、それがやがて波となって外へ伝わります。同じように、物体が激しい運動を行えばその周りの空間の歪みは時々刻々変化し、やがて外へと伝わります。これが重力を伝える波、すなわち重力波です。

実はアインシュタイン自身すら、重力波の存在を疑った時期があったほどで、重力波が本当にあるかどうかは大論争となりました。しかし、1974年に二つの中性子星がなる連星系が発見され、その運動が重力波によってエネルギーを失っている場合の予想とぴったり一致していることから、重力波の存在は「間接的」に証明されました。この業績により、米国プリンストン大学のジョセフ・テイラーとラッセル・ハルスが93年のノーベル物理学賞を受賞しています。

いつまでもそれはあくまで間接的ではなく、地上実験で重力波を直接検出することは物理学者の長年の夢となっていました。なぜ「夢」だったのかといえは、この重力波は想像を絶するわずかな変化しか及ぼさないからです。重力波の強さは、互いに離れた2

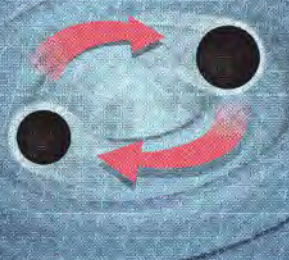
点間を重力波が通過する際に、もとの距離に対して伸び縮みする変位の割合(あるいは空間の歪み)に対応するhというパラメータで表されます。典型的には、h=10⁻²¹程度の信号しか期待できないので、もの長さより1桁小さい変化分(1兆分の1のさざ波)を捉える必要があります。これは、地球と太陽間の距離がわずか原子100個分変化するに相当します。どう表現してもピンと来ないかもしれませんが、とにかく想像を絶する小ささであることが分かってもらえれば十分です。

この重力波直接検出を目指した研究は、60年代から世界中で試みられてお

29 + 36 = 62 を発見!

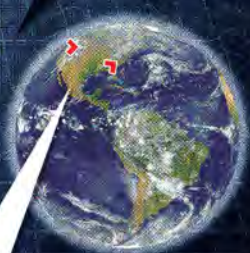
世界で初めて検出された重力波

近づきながら公転する
三つのブラックホール



重力波

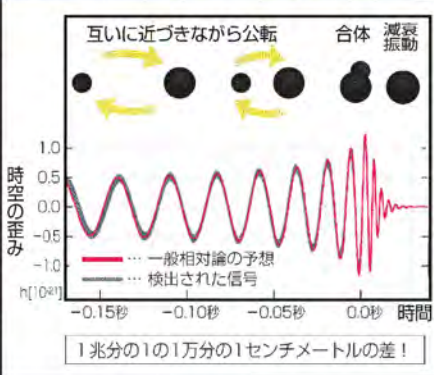
13億年かけて地球へ



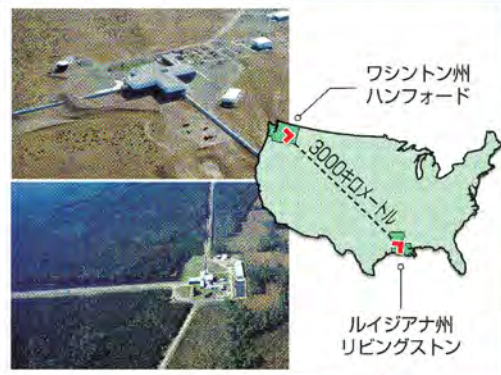
29 + 36 = 62?

ブラックホール1 ブラックホール2 合体後のブラックホール

太陽の29倍と36倍の質量のブラックホールが合体して62倍のブラックホールに。太陽の質量の3倍のエネルギーが重力波として放出された



LIGOの実験施設



デザイン 宮川優希

2015年9月14日の重力波

り、日本でも、東京大学物理学教室において故並川浩二教授が独創的な検出器を開発し、先駆的な基礎実験を行っていました。実は私は大学院の最初の2年間を並川先生に指導いただいたながら、重力波検出実験の途方もない困難さと自分の才能の限界を思い知り、研究分野を転回しました。落伍者です。しかしながら、それ以来30年以上にもわたり、世界中の研究者が知力と情熱を傾けて検出器の感度を向上し続けた経緯、ついに夢が現実となったのです。

この大発見を成し遂げたLIGOは、互いに約3キロメートル離れたワシントン州ハンフォードとルイジアナ州リビングストンの二つの地点におかれたL字型の二つの腕からなる実験施設です。それぞれの腕の長さは4キロメートルで、重力波が到来した際の二つの腕の長さの微妙な変化分をレーザー光を用いてそれぞれ独立に精密に測定します。重力波以外の装置の雑音や地震によっても頻繁に長さが変化するため、遠く離れた各点を、同じ時刻に同じ時間変化を示す信号を検出することが大切なのです。

人類史上初めて検出された重力波は、日本時間の15年9月14日18時50分45秒にやってきました。左下の図は、この2カ所で同時に観測された検出器の二つの腕の長さの微小なずれの時間変化の様子です。わずか0.2秒間以内には得られたこの信号が、歴史的大発見になりました。この信に驚き、歴史的発見にその重力波を発生させた本体です。そもそも地上で検出可能な大きさの重力波を発生できる天体の候補は極めて限られています。すでに述べた中性子星の連星は今から数億年先には合体するはずですが、その合体直前の最後の瞬間にだけかろうじて観測可能な大きさの重力波を放出するものと予想さ

M87*

April 11, 2017

2019年 ブラックホール シャドーが見えた

The Astrophysical Journal
875(2019)L1

50 μ as



The Event Horizon Team at Harvard on April 11, 2019



2015年 火星と地球は似過ぎている



アイオリス山(標高5500m) 2015年9月



チコ山 (標高5150m) とオナール山 (標高5400m) 2003年



アイオリス山麓の盆地 2015年10月



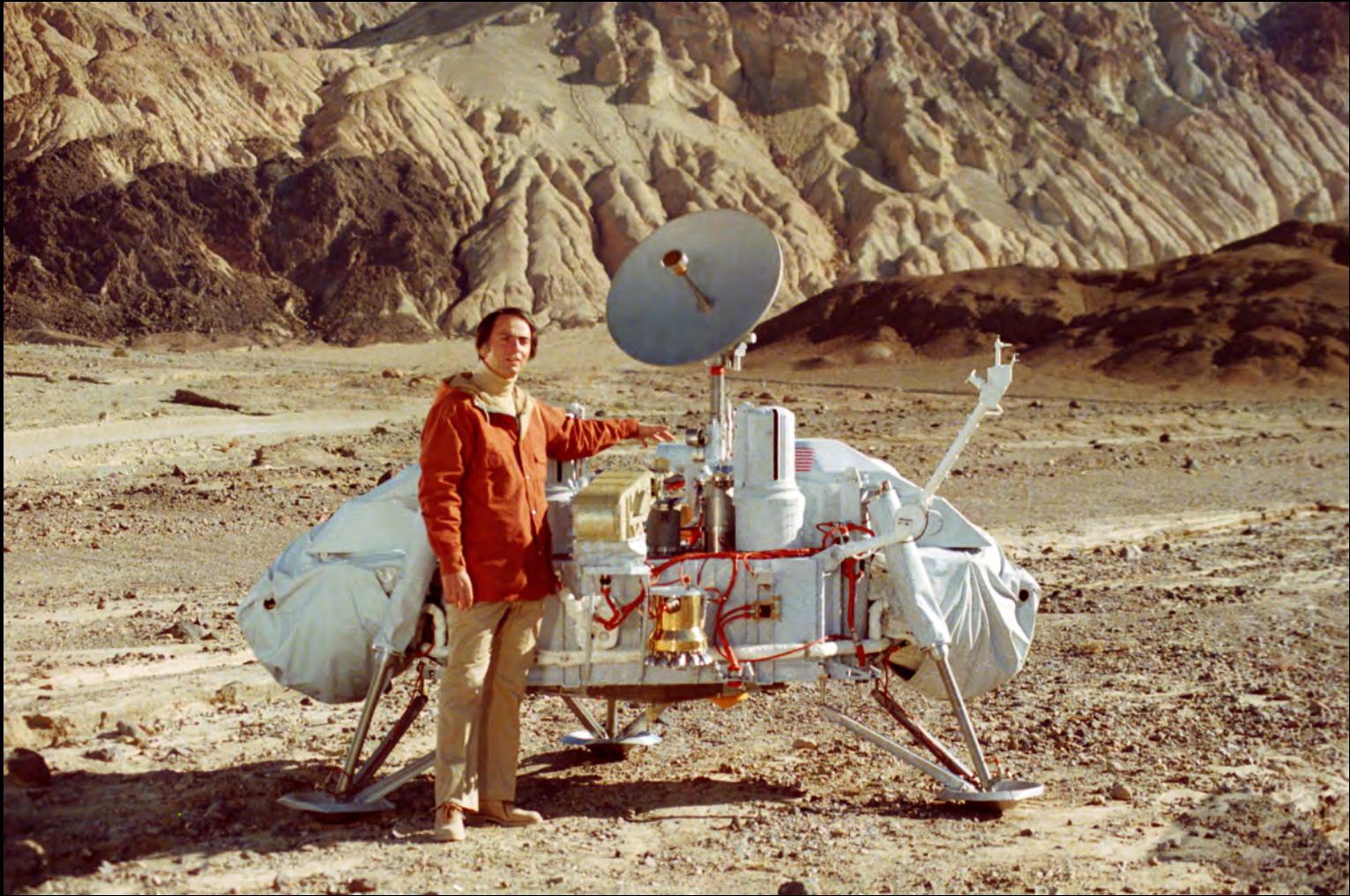
アスペロ山 (標高5262m) 2002年2月

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA19912>

土居守氏、河野孝太郎氏撮影

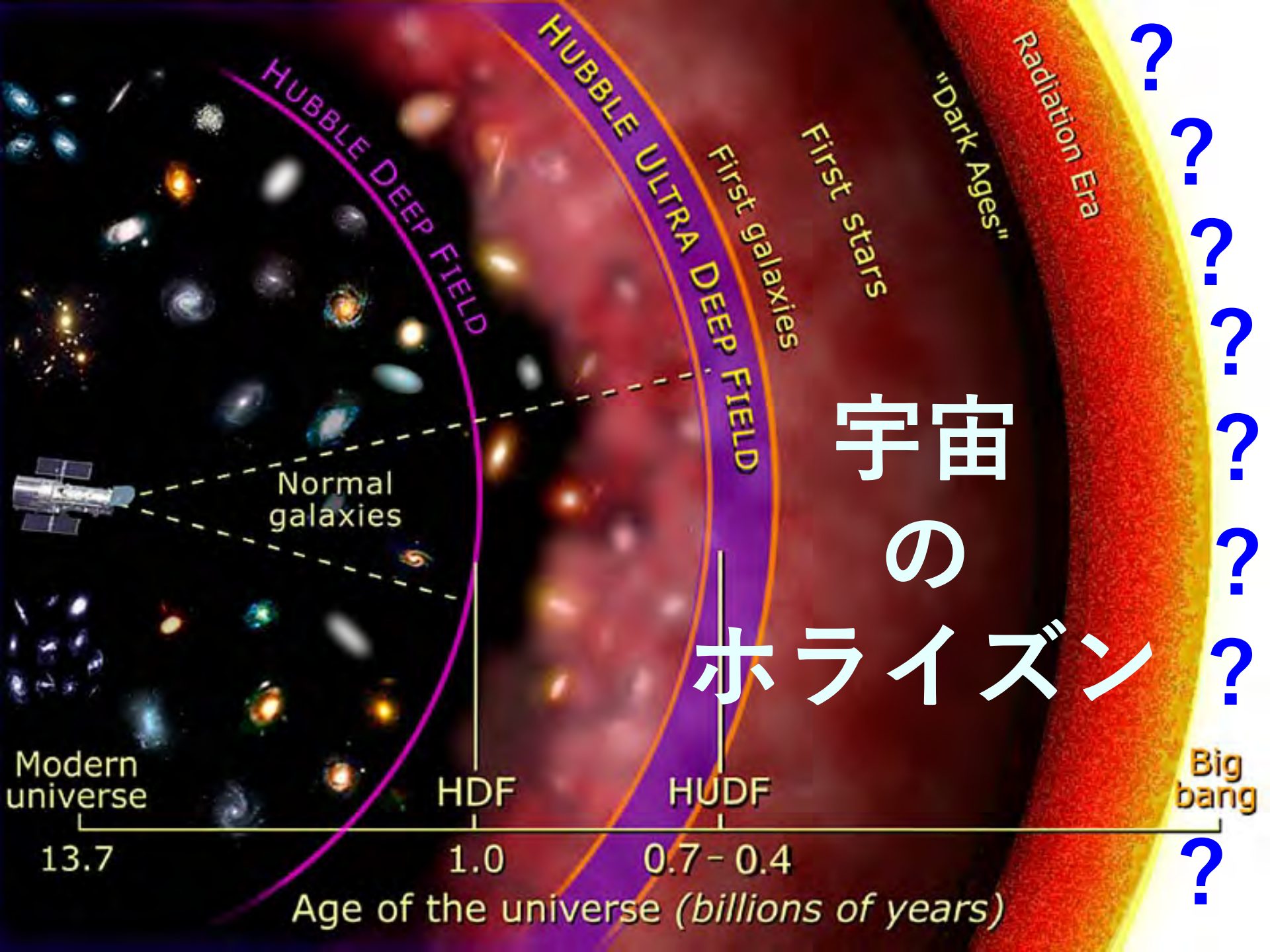
<https://mars.nasa.gov/resources/7505/strata-at-base-of-mount-sharp/>

さっきの写真は嘘ではありません



カール・セーガンとバイキング1号ランダー模型の写真。これを見ると、キュリオシティが撮影した火星表面の写真は、本当は地球ではないか疑いそうになるほど、火星は地球と似ている。

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sagan_Viking.jpg



宇宙 の ホライズン

Modern universe
13.7

HDF
1.0

HUDF
0.7 - 0.4

Big bang

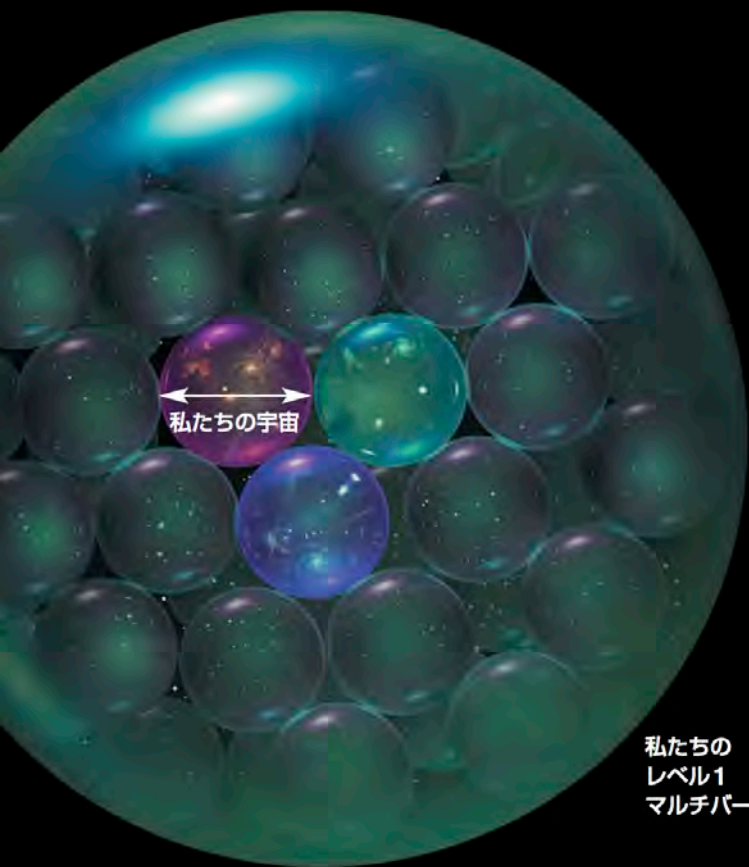
Age of the universe (*billions of years*)

?
?
?
?
?
?
?
?
?
?

「我々の宇宙」に関するまとめ

- 現在の我々は、半径138億光年の地平線球の内部だけが観測できる
- 観測可能な範囲の宇宙でわかっていること
 - 振る舞いは物理法則に支配されている
 - 物理法則は数学で記述できる
 - 物理法則を特徴付ける物理定数の値は不自然
 - しかしその不自然さのゆえ世界が安定である
 - さらにそのほとんどは未知のダーク成分に占められている（未知の物理法則の存在を示唆）

本当にこれですべて？ 我々のホライズンの先の「宇宙」

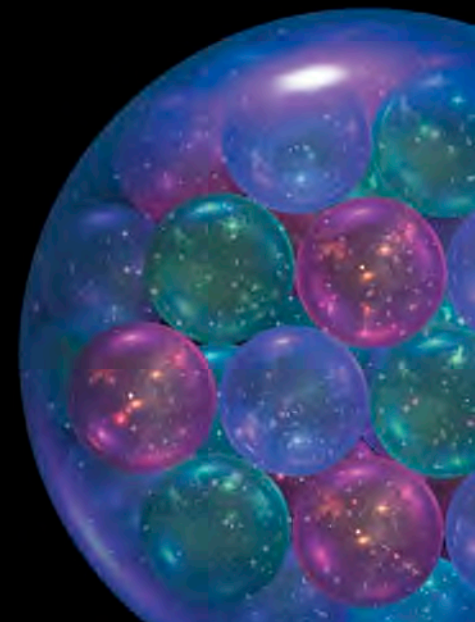


私たちの
レベル1
マルチバース



並行して存在する
レベル1
マルチバース

何も無い空間
(膨張している)



マックス・テグマークが提唱する 4つの異なるマルチバース

レベル	説明
1	現在観測可能ではない地平線の外側にも、同様のユニバースが無限に存在。それらは徐々に観測可能な領域に入る。これら同じ物理法則をもつユニバースの集合がレベル1マルチバース
2	無限個のレベル1マルチバースは、原理的にも因果関係を持たないまま、階層的に存在するかもしれない。それらは物理法則が異なるかもしれない。それらの集合がレベル2マルチバース
3	量子力学の多世界解釈に対応する無数の時空の集合。レベル3マルチバース内の異なる元を遍歴する軌跡の一つが我々のユニバースであると解釈される
4	異なる数学的構造に対応する具体的な時空は必ず実在する。言い換えれば、抽象的な法則は必ず対応する物理的実体を伴うのではないか。それらの集合をレベル4マルチバースと定義する

レベル1マルチバース

- 現在の地平線内にある我々の（レベル1）ユニバースは、レベル1マルチバースに属する元の一つ
- 我々の地平線球の外側にも、同じく地平線球（レベル1ユニバース）が無数にあるが、現在は「まだ」互いに因果関係を持たない
- それらの集合が（我々の属する）レベル1マルチバース
- 同じレベル1マルチバース内のレベル1ユニバースは、初期条件が異なろうと、物理法則は同じ

日経サイエンス2003年8月号



現在見えない領域にも宇宙は広がっている

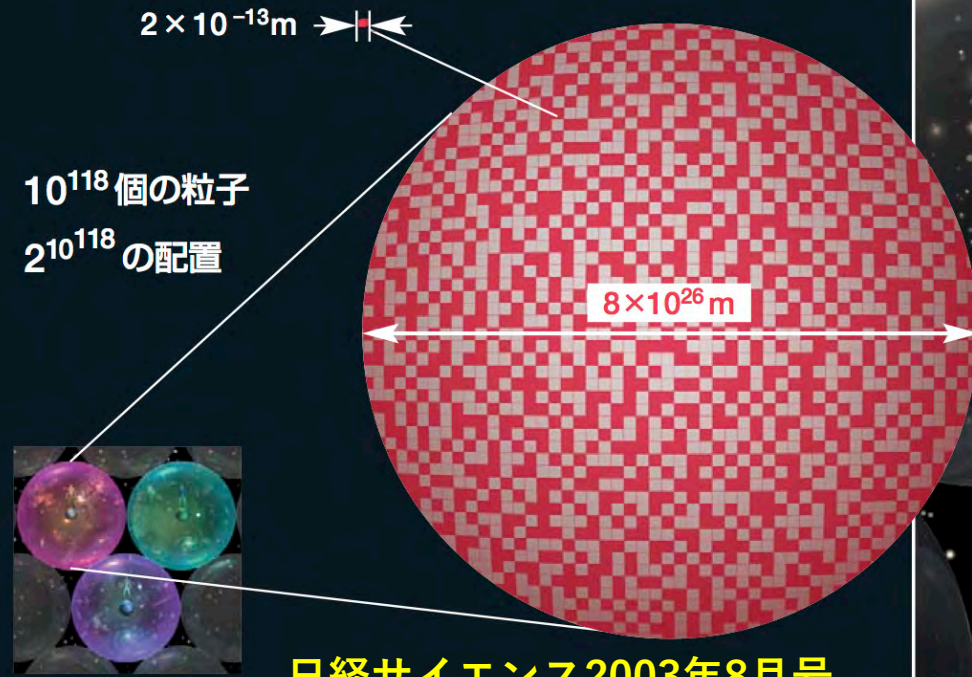
■ レベル1マルチバースの存在はほぼ自明

- (ほぼ) 無限に広がる空間内で、我々の地平線球が特殊な位置にあるとは考えられない

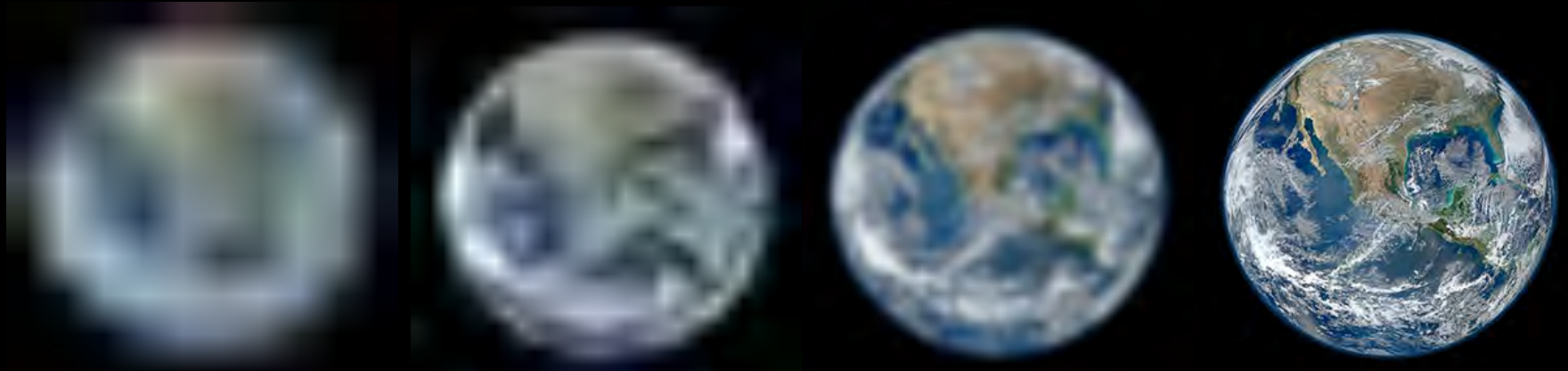
■ さらに我々のレベル1ユニバースと同一のレベル1ユニバースのクローンがどこかに存在する(?)

- 地平線球内の素粒子の数は有限。したがって、宇宙が無限の体積を持つとするならば、どこかで同じレベル1ユニバースが繰り返し登場するはず

上と同じ論法を実際の宇宙に適用するとどうなるか。私たちの宇宙には 10^{118} 個の素粒子が入る空間がある。可能な配置パターンは2の 10^{118} 乗通りで、これはざっと10の 10^{118} 乗通りと考えてよい。これに宇宙の直径を掛けると、最も近い同一宇宙までの平均距離が求まる。つまり、10の 10^{118} 乗メートルだ(べき乗が大きいのので、係数は無視できる)。



世界はデジタルか、アナログか？



https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_2159.html

- この作業を繰り返していくと、いずれは近似ではなく本物（と区別できないクローン）に到達する？
 - すべての物質は有限個の素粒子からなる
 - 時間と空間もまた連続ではなく離散的かも？
 - とすれば超高性能3Dプリンターで宇宙を創り続けると、（原理的には）いずれクローン宇宙が出現するはず？

法則は宇宙のどこに刻まれているのか

- 法律(law)は、いつどこで誰が決めたかわかっているし、文書として記録も残っている
 - にもかかわらず、法律違反は当たり前のように起こるし、違反かどうか判定する人間すら必要
- 法則(law)は、いつ誰がどころか、具体的な実態としてどこに存在するのかすら不明
 - にもかかわらず、法則違反はありえないし、どののような法則があるのかを探し続ける人間（科学者）すら存在する
- とすれば宇宙そのものが法則と同一なのでは

無矛盾な数学的構造は必ず実在する？

- 我々のユニバースでの実験とは一致しないが、論理的に無矛盾な物理法則（数学的体系）があったとする
 - 実験で否定される以上、その体系はこの世界と矛盾しており、それ以上考えても無意味（標準的考え）
 - 単にたまたま我々の宇宙で採用されていないだけで、それを採用する宇宙がどこかに実在しているだけ？
- 本当は異なる物理法則を持つ世界が無数に存在しているのでは？（世界＝数学的構造＝物理的実体＝宇宙）
 - 物理法則とまで言わずとも、異なる物理定数の組みを持つ宇宙が無数に存在するとするのがレベル2マルチバース
 - レベル4はそれをさらに過激に推し進めたもの
- 観測者が存在しない宇宙の実在を認めるなら、それは結局論理的な構造の実在と同義ではないか？

その世界の先を探る = 「学」 + 「問」

■ 果てのないホライズンの拡大

- 高いところに登る = 「学」
- 遠くを眺めてその先を考える = 「問」

■ 学問とは常に問い続ける営み

- 謎を解明する(問題に答える)以上に、**新たな謎を発見(世界の不思議さを認識)**することがそれ以上に重要 = **我々は何も知らなかった**
- **競争のための競争は無意味**：勝ち負けという価値観は科学とは本来相容れない