最先端物理学が描く宇宙
Frontiers of Physics & Cosmology

第14回　2025/12/22

第5章　宇宙論　宇宙の熱史
第6章　これからの宇宙論研究

Musesの授業アンケート
お願いします.

真貝　寿明
Hisaaki Shinkai



真貝の武庫川講義ページtop

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

レポート締切　12/29(日) 23:59, 次の講義　1/20；レポート締切　1/27(月) 23:59

【レポート関連】

量子論の解釈論争

本格的にレポートに取り組まなければならない時期になってきたので真面目に頑張ります。

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．

レポート課題頑張ります。

レポート地獄楽める人尊敬します。

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

成績20点分

- 提出ファイルの名前は，「Q 学科 XXXXXXX ○○○○」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，このファイル名でお願いします．
- 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．

レポートの平均点が気になります。

80%以上の点数になっているかと.

【レポート関連】

最終　まとめ確認レポート

課題

1 以下の問題 (1)-(6) より，1 つ選んで説明せよ．(A4 1〜1.5 枚程度)

2 以下の問題 (7)-(12) より，1 つ選んで説明せよ．(A4 1〜1.5 枚程度)

3 この講義で扱ったトピックについて，自分で問題を考えて，解答例を示せ．(枚数自由)

論点

(1) ケプラーが発見した惑星法則
(2) ガリレオが発見した天体観測の成果
(3) ニュートン物理学が受け入れられていく過程
(4) 物理学史における 1905 年の持つ意義
(5) アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼンのパラドックス
(6) ビッグバン膨張宇宙論と定常宇宙論の論争
(7) アインシュタインの導入した「宇宙項」
(8) ダークマターとダークエネルギー
(9) インフレーション宇宙モデル
(10) ブラックホールが存在することはどうしてわかるのか
(11) マルチメッセンジャー天文学の成果
(12) 星までの距離の測定方法

前々回プリント配布

レポート，2つとも頑張ります!!

作成要領

- 参考とした文献 (web ページ含む) などがあれば，**必ず**記すこと．剽窃行為が認められる場合は評価を下げます．（参考文献から引用するのは構いませんが，引用範囲は必ずそう明記すること．）
- インターネット上の文献を引用するときは，書き手が不明な個人のものは避けること．
- 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）．

成績30点分

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，2026年1月30日（金）23:59
- 提出ファイルの名前は，「C 学科 XXXXXXX ○○○○」(C 大日 2212345 武庫川子) の形式とすること．(C は Cosmology 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，このファイル名でお願いします．
- 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．

2026年の惑星観望

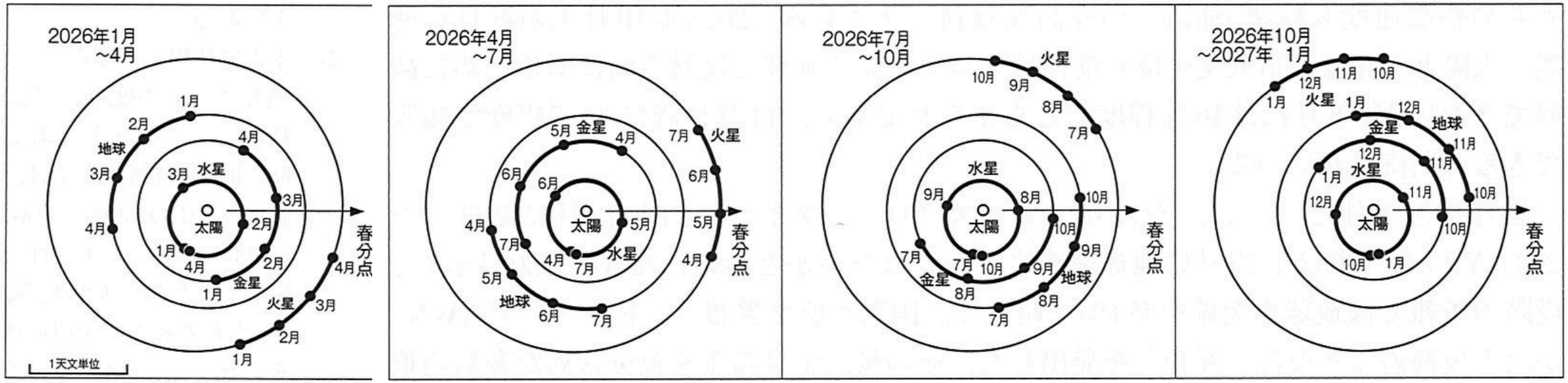


図２　3ヵ月ごとの内側惑星の動き　・印は毎月1日の位置

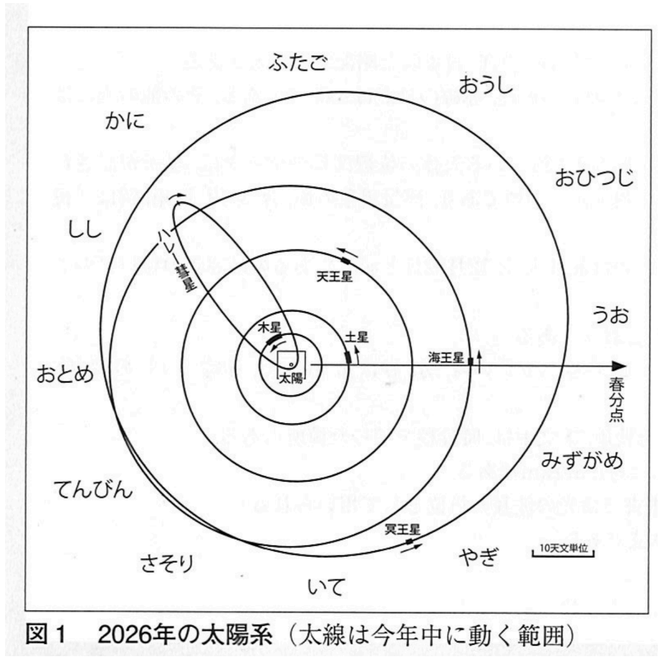
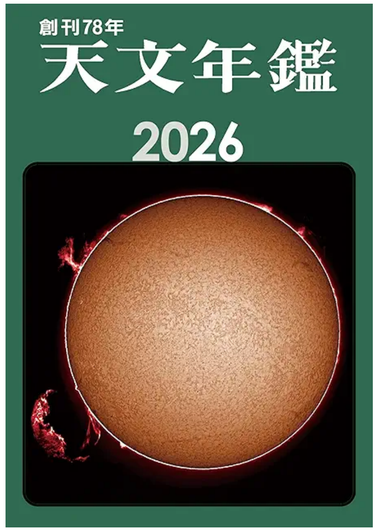


図１　2026年の太陽系（太線は今年中に動く範囲）





2026年の火星

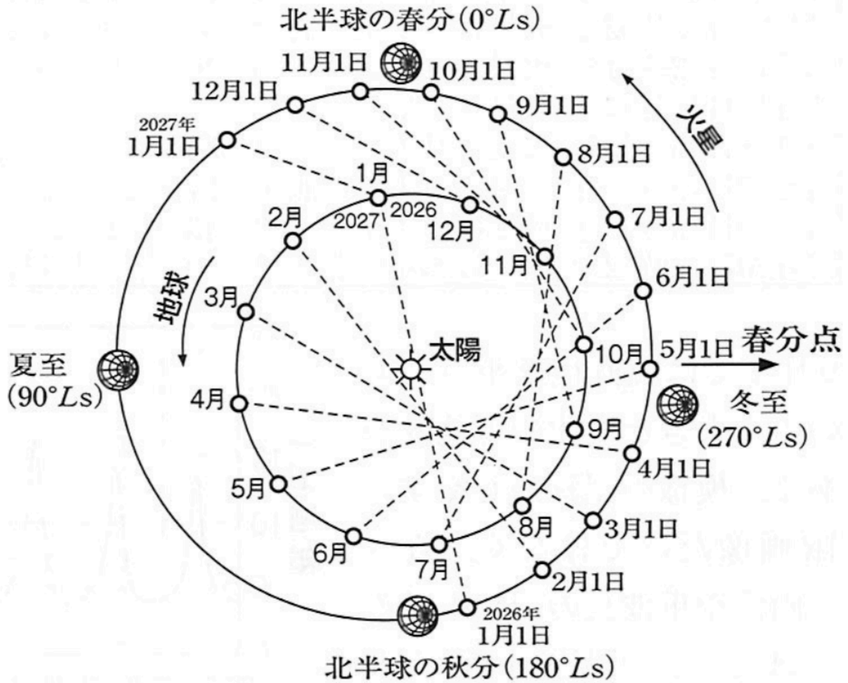


図1　2026年　地球と火星の位置

次に接近するのは2027年2月,
それまでしばらくはお預け

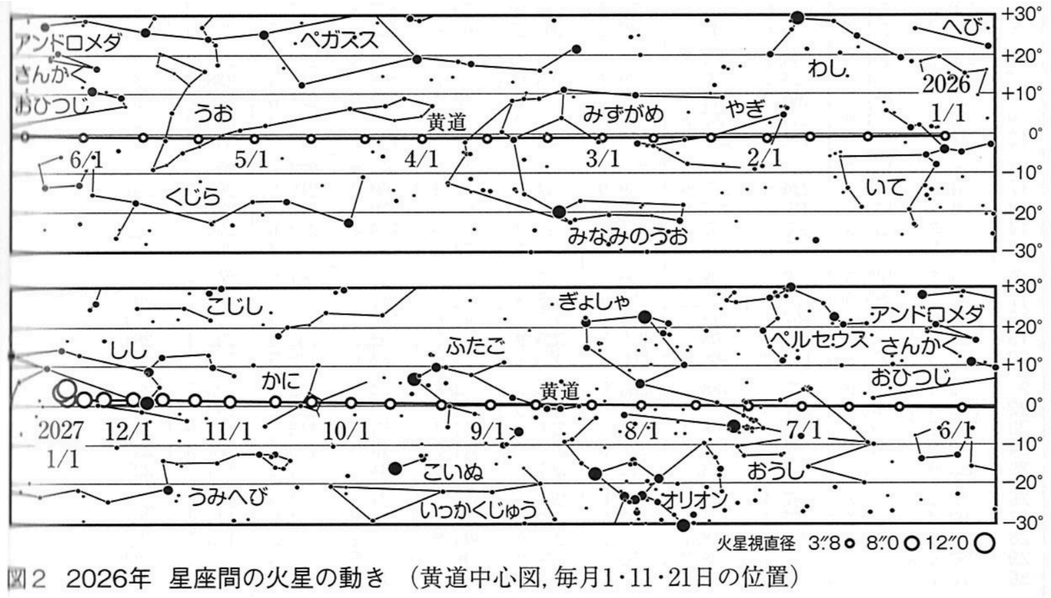


図2　2026年　星座間の火星の動き　(黄道中心図, 毎月1・11・21日の位置)

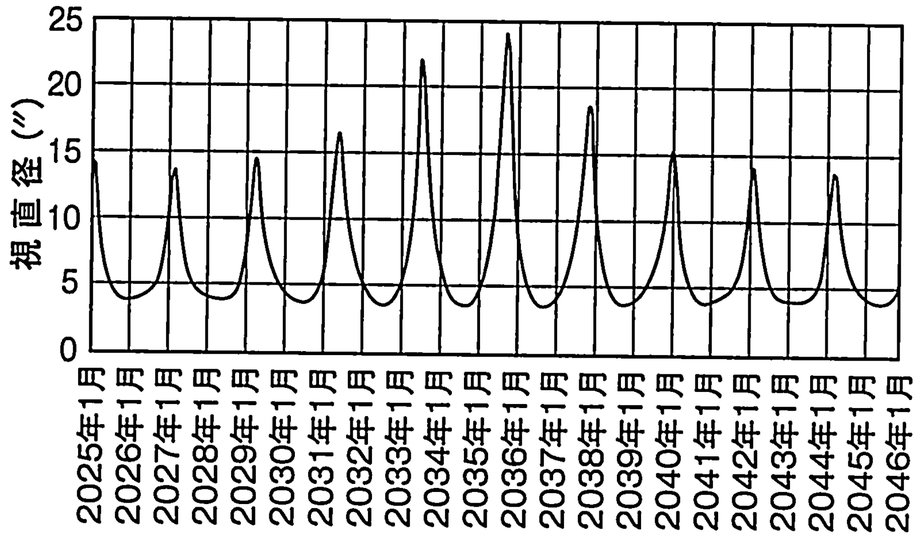
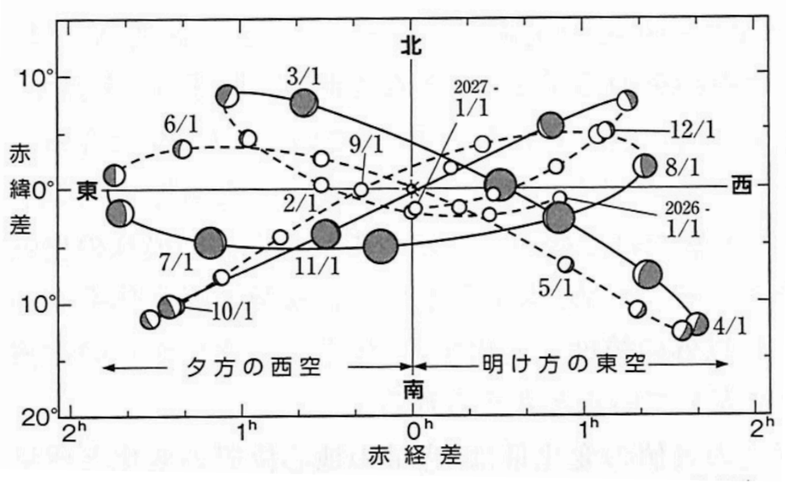


図3　火星の視直径の変化（2025年～2045年）

2026年の水星・金星



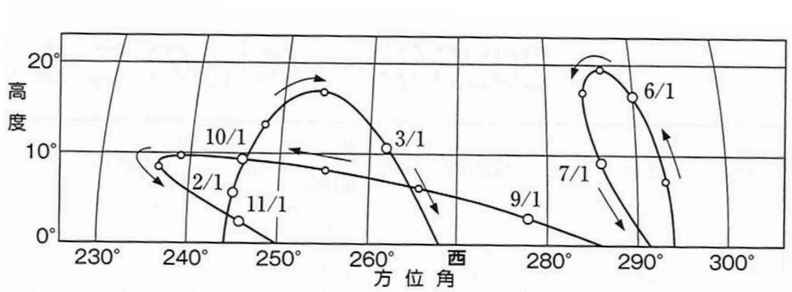


図3　日没時の水星の高度と方位角（東京での値）

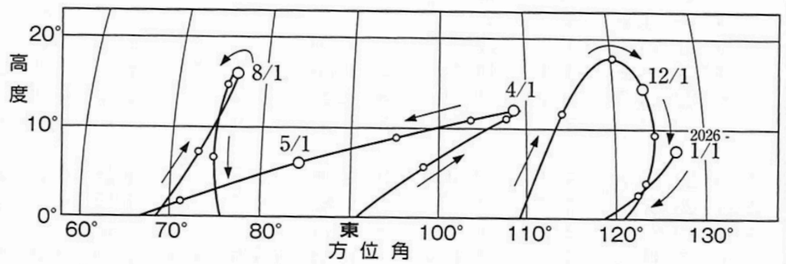


図4　日出時の水星の高度と方位角（東京での値）

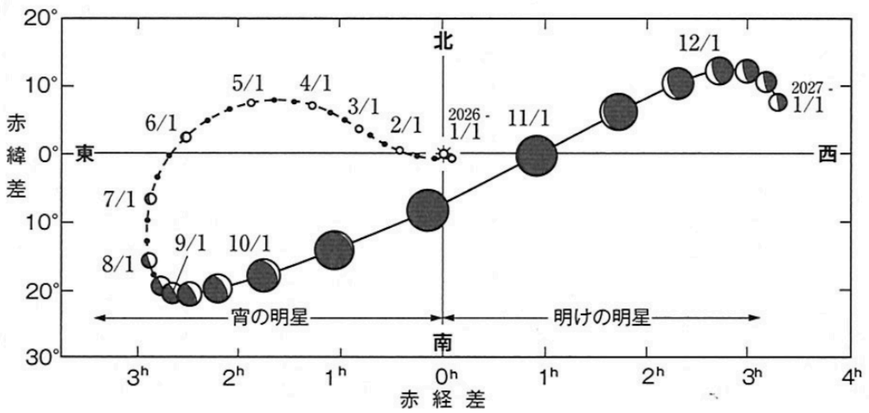


図1　太陽の周りの金星の動き（毎月1・11・21日の位置）

金星は10月までが宵の明星，11月以降が明けの明星．

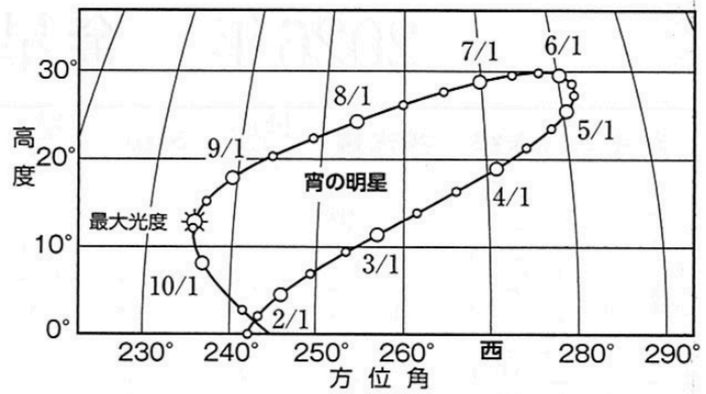


図3　日没時の金星の高度と方位角（東京での値）

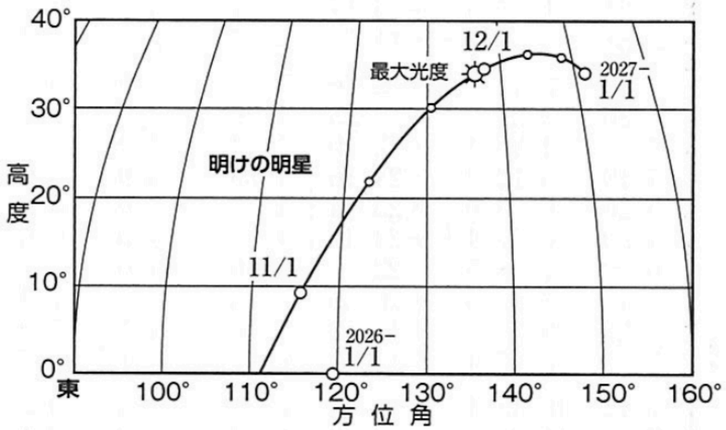
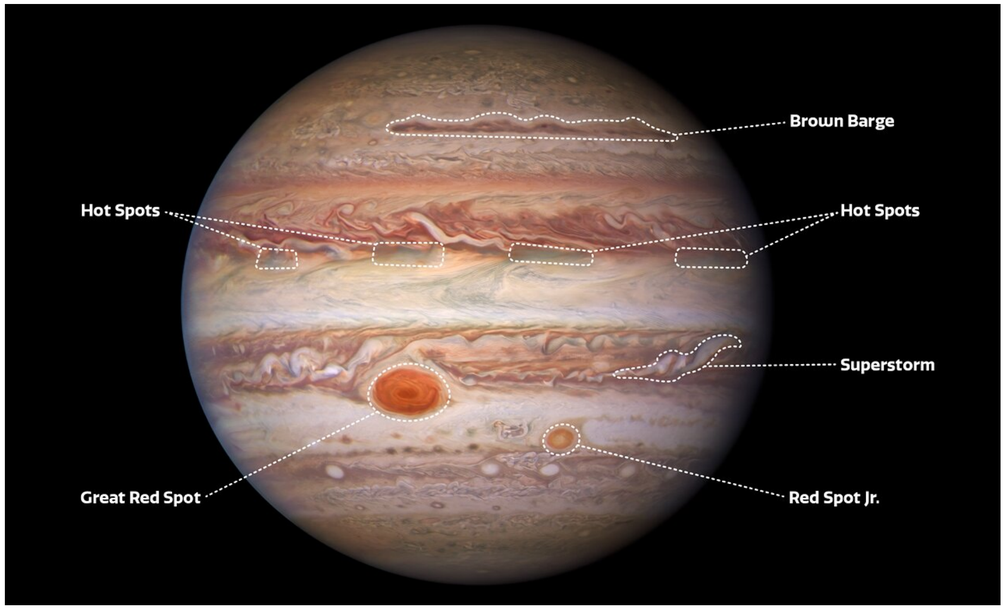
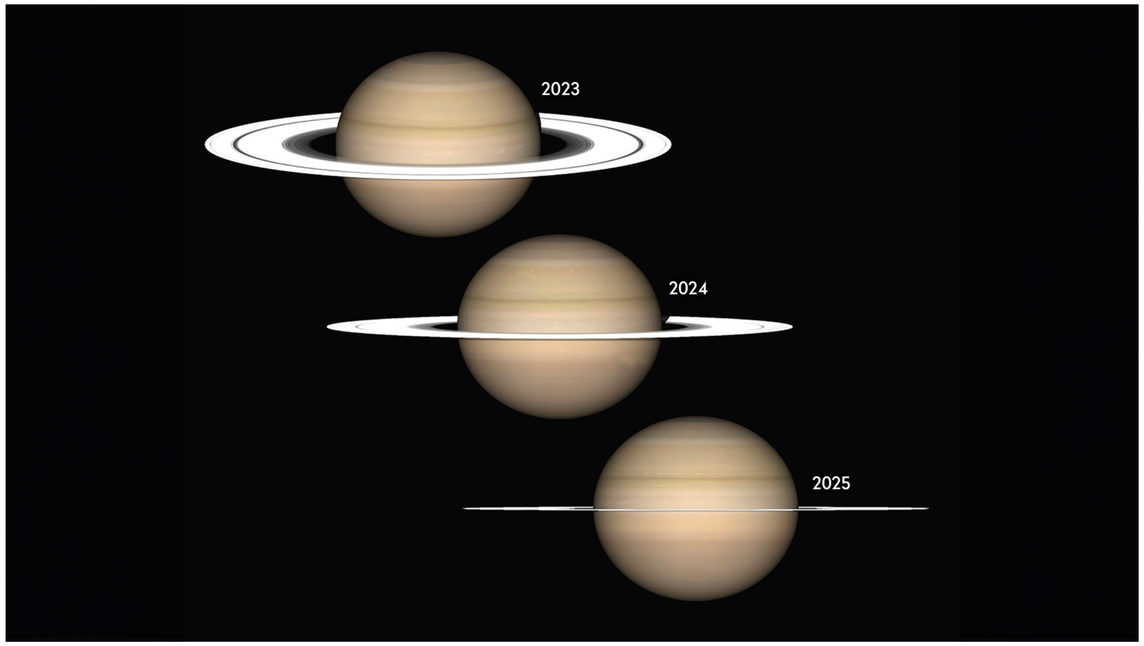


図4　日出時の金星の高度と方位角（東京での値）

2026年の木星・土星





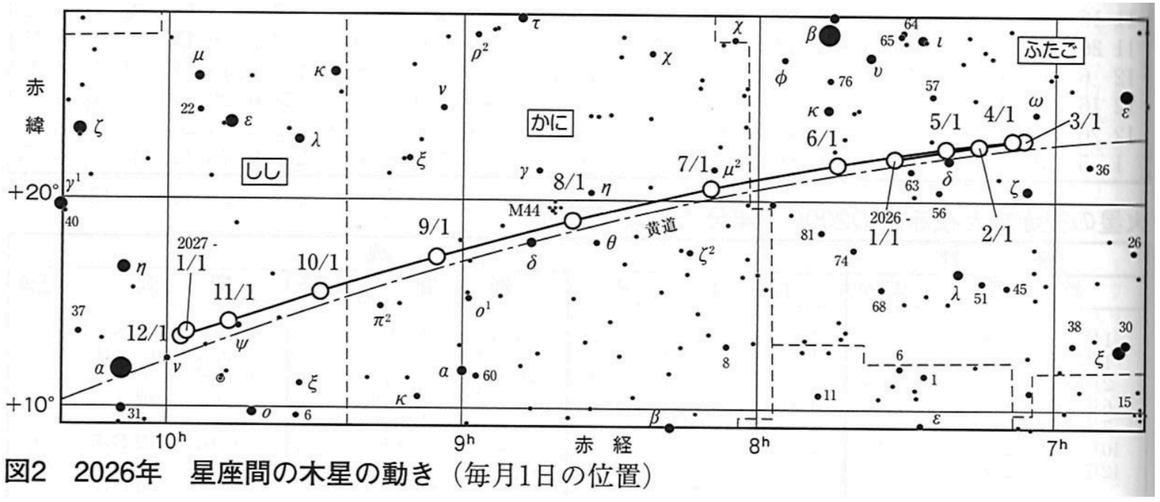


図2　2026年　星座間の木星の動き（毎月1日の位置）

現在よく見えている. 2026年は初夏まで.

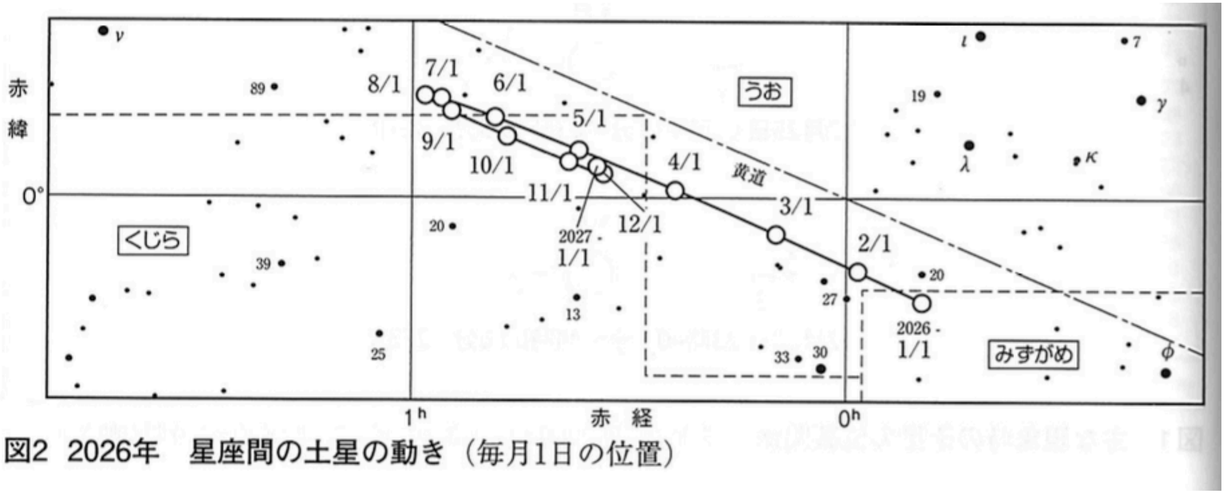


図2　2026年　星座間の土星の動き（毎月1日の位置）

2026年は夏以降に見える. 土星の輪は見えはじめる

2026年の流星群

表１　主要流星群

流星群名称	出現期間	極大 日時（日本時）	極大 太陽黄経（J2000.0）	輻射点 赤経	輻射点 赤緯	最大HR	極大時月齢	速度	観測条件
1 しぶんぎ座	12月28日～ 1月12日	1月 4日06時	283.°15	230°	+49°	20	14.8	中～速	最悪
2 4月こと座	4月14日～ 4月30日	4月23日05時	32.32	271	+34	15	5.3	中～速	最良
3 みずがめ座η	4月19日～ 5月28日	5月 6日18時	45.5	338	−01	5	18.9	速	悪
4 やぎ座α	7月 3日～ 8月15日	7月31日	128	307	−10	少	17	緩～中	最悪
5 みずがめ座δ南	7月12日～ 8月23日	7月31日	128	340	−16	少	17	中～速	最悪
6 ペルセウス座	7月17日～ 8月24日	8月13日11時	140.0	48	+58	40	0.3	速	良好
7 はくちょう座κ	8月 3日～ 8月28日	8月17日	144	288	+52	少	5	緩～中	普通
8 9月ペルセウス座ε	9月 5日～ 9月21日	9月10日03時	166.7	48	+40	少	28.0	速	良好
9 10月りゅう座	10月 6日～10月10日	10月 9日10時	195.4	262	+54	少	27.9	緩～中	普通
10 オリオン座	10月 2日～11月 7日	10月22日	208	95	+16	10	11	速	良好
11 おうし座南	9月20日～11月20日	11月 6日	223	52	+15	少	26	緩～中	良好
12 おうし座北	10月20日～12月10日	11月13日	230	58	+22	少	3	緩～中	良好
13 しし座	11月 6日～11月30日	11月18日09時	235.27	152	+22	5	8.7	速	良好
14 ふたご座	12月 4日～12月20日	12月14日23時	262.2	112	+33	60	5.5	中	最良
15 こぐま座	12月17日～12月26日	12月23日07時	270.7	217	+76	少	13.9	中	悪

どちらも楽しみ

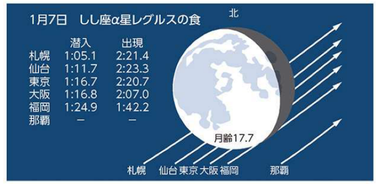
AstroArts

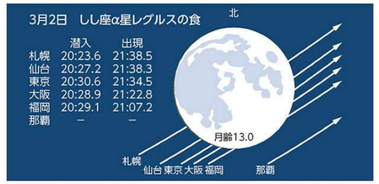
星空ハンドブック2026

月刊「星ナビ」2026年1月号 特別付録

天文カレンダー資料／アストロアーツ　構成・作図／石田 智＋星ナビ編集部

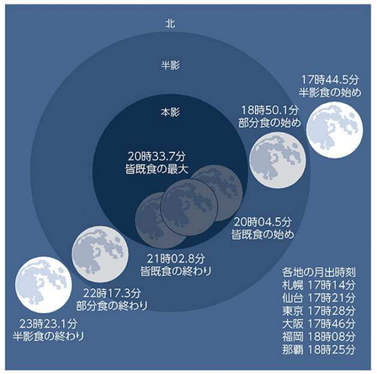
■1月7日／3月2日　レグルス食





2026年にはしし座α星レグルスの食が頻繁に起こり、日本からは1月7日、3月2日、5月23日にレグルス食が見られる。1月7日の食は南中に近い月の暗縁からの出現が見やすい。3月2日の食は宵の東の空で起こるが、満月に近く、ごくわずかな暗縁に潜入することになる。5月23日の食は日中の現象だ。

■3月3日　全国で皆既月食



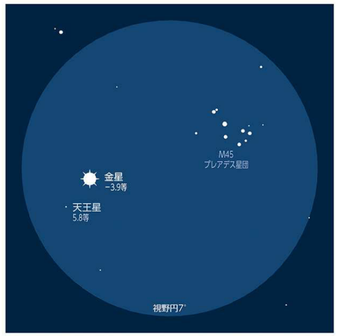
2025年9月8日の皆既月食から半年後の3月3日の宵、再び全国で皆既月食が起こる。月が昇って間もない18時50.1分に本影食が始まり、皆既食が最大となる20時33.7分の月の高度は30度前後で見やすい。最大食分は1.156で地球の影の南側を通る。皆既中にしし座56番星（5.9等）の食が起こる。

2026年 注目の天文現象

1月	1日	前夜から未明、**プレアデス星団の食**
	4日	明け方、しぶんぎ座流星群に注目
	7日	**レグルスの食**（02時21分出現）
	10日	ふたご座で木星が衝（−2.7等）
3月	2日	**レグルスの食**（20時31分潜入）
	3日	全国で**皆既月食**（20時34分食最大）
4月	24日	夕方、**金星と天王星、プレアデス星団が接近**
	24日	夕方〜宵、月とプレセペ星団が大接近
5月	6〜7日	明け方、みずがめ座η流星群に注目
6月	8〜10日	夕方、**金星と木星が大接近**
7月	4日	未明、火星と天王星が超接近
	9日	宵空、金星とレグルスが大接近
	11日	明け方、細い月とプレアデス星団が接近
8月	12〜13日	**ペルセウス座流星群**に注目
	13日	アイスランド、スペインなどで**皆既日食**（日本からは見えない）
	15日	夕方の西の空で金星が**東方最大離角**
	19日	伝統的七夕（旧七夕）
9月	1〜3日	夕方、金星とスピカが大接近
	14日	夕方、**月と金星が大接近**
	25日	中秋の名月（十五夜）
10月	5日	くじら座で土星が衝（0.3等）
	12日	未明、**火星とプレセペ星団が大接近**
11月	1日	深夜から翌未明、**プレセペ星団の食**
	3日	未明〜明け方、月と木星・火星が接近
	15〜17日	未明、火星と木星が大接近
	24日	18〜19時、**プレアデス星団の食**
12月	1日	未明、木星・火星・レグルス・月が集合
	14〜15日	**ふたご座流星群**に注目
	24日	スーパームーン（本年最大の満月）
	27日	宵〜翌明け方、月と木星が大接近

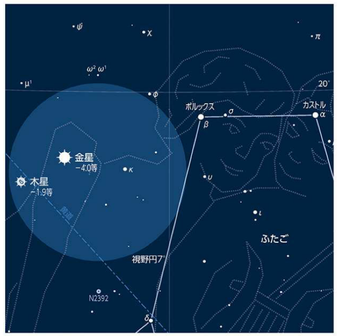
2026 Highlight 天文現象ハイライト

■4月24日　M45と金星と天王星が接近



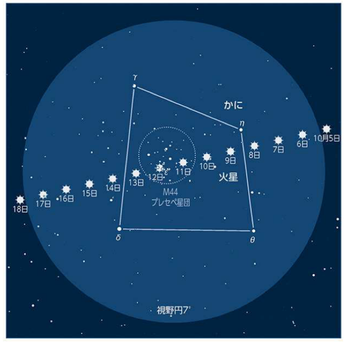
4月中旬から下旬にかけて、西北西の空で少しずつ高度を上げる宵の明星・金星が、プレアデス星団の近くを通過する。プレアデス星団の近くには5.8等の天王星もあり、4月24日には金星が天王星に1度弱まで接近する。高度は低いが、双眼鏡で散開星団の星々と明るい金星を眺めながら天王星を探してみよう。

■6月9日　ふたご座で金星と木星が接近



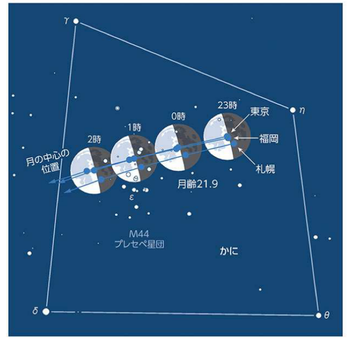
まだ薄明が残る6月上旬の宵の西の空で金星と木星が並んで輝いている。6月9日には金星と木星が1.6度まで大接近し、低倍率の望遠鏡でも同視野に見える。ふたご座のカストルとポルックスの下方には6月16日に東方最大離角となる水星も見える。夕方に見える水星としては最も条件が良いので探してみよう。

■10月12日　火星がプレセペ星団を通過



2027年2月20日に地球に最接近する火星が、未明の東の空で高度を上げてきている。10月上旬から中旬にかけて火星はかに座を横断し、10月12日前後には、かに座の散開星団プレセペ（M44）の中を通過する。6等以下の暗い星が集まる大きな散開星団と1等の明るさでオレンジ色に輝く火星の対比が美しい。

■11月1〜2日　プレセペ星団の食



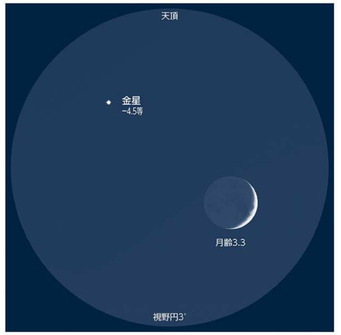
11月1日深夜から2日の未明、かに座のプレセペ星団の中を下弦の月が通過して散開星団の星々を隠す現象が見られる。プレセペ星団の星は暗いので、月の暗縁からの出現が観望対象となる。望遠鏡の倍率を高めにして月の明るい部分をできるだけ視野の外に出せば、暗い星が次々と出現するようすがとらえられるはずだ。

■8月13日　ペルセウス座流星群が極大



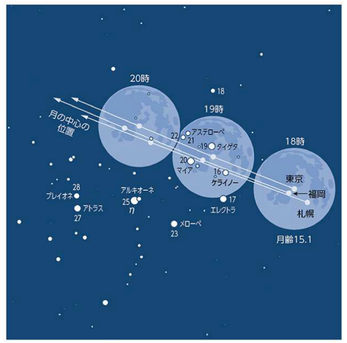
三大流星群のひとつであるペルセウス座流星群が8月13日に極大を迎える。13日が新月なので月明かりがまったくない好条件だが、予想される活動のピークが13日11時で日中なのが惜しい。13日の明け方だけでなく13日の宵にも注目したい。空の暗い場所なら、数分で1個程度の頻度で流星が見られるだろう。

■9月14日　月と金星が大接近



夕方の空で高度を下げている金星が、9月14日に月齢3.3の月と約1.5度まで大接近する。9月19日に最大光度となる金星は−4.5等と明るく、日没前から三日月と並んでいるようすが見えるだろう。なお、9月9日の明け方には月齢27.1の細い月と木星が大接近し、ガリレオ衛星を従えた木星と地球照を伴う月が楽しめる。

■11月24日　プレアデス星団の食



2025年からプレアデス星団（すばる）の食のシーズンに入ったが、2026年に日本から条件よく見られるのは11月24日の現象しかない。満月で星団の星の潜入や出現の瞬間をとらえるのはむずかしいので、月と散開星団を同時に観望する感覚で楽しみたい。写真撮影なら多段階露光してHDR処理に挑戦してもいいだろう。

■12月14日　ふたご座流星群が極大



三大流星群のひとつであるふたご座流星群が12月14日に極大を迎える。極大日には月齢5の月があるが、宵のうちに沈んでしまうので月明かりの影響はほとんどない。14日23時と予想されるピーク時には放射点が高く昇り、最高の条件下で観望できる。ペルセウス座流星群を超える出現も期待できるだろう。

皆既月食が3月3日とに起こる. 20時34分に食が最大.

真貝は, ハルカス屋上で観望会イベント

秋には夜空に多くの惑星が集合する

完璧なクリスマスツリーの飾り方！数学で大解明

Treegonometry creates perfect Christmas tree

Festive maths students from the University of Sheffield (UK) have created formulas for the perfect Christmas tree.



100cmのツリーならば,



$$\text{Number of baubles} = \frac{\sqrt{17}}{20} \times (\text{tree height in cms})$$

21個

$$\text{The length of tinsel (cms)} = \frac{13 \times \pi}{8} \times (\text{tree height in cms})$$

511cm



$$\text{The length of lights (cms)} = \pi \times (\text{tree height in cms})$$

314cm

$$\text{The height of the star/fairy (cms)} = \frac{\textit{height of tree (in cms)}}{10}$$

10cm





http://www.field-pr.net/news_bqLc5n6L38.html

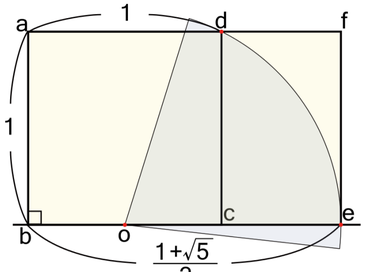
http://www.shef.ac.uk/news/nr/debenhams-christmas-tree-formula-1.227810

【話題】

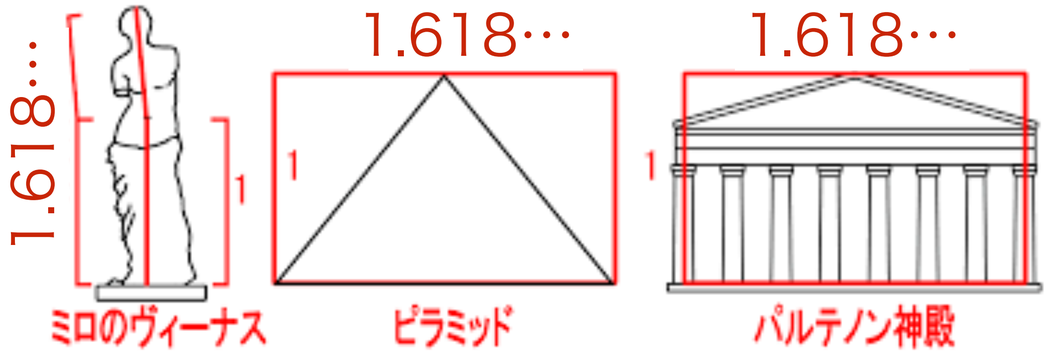
黄金比 Golden Ratio

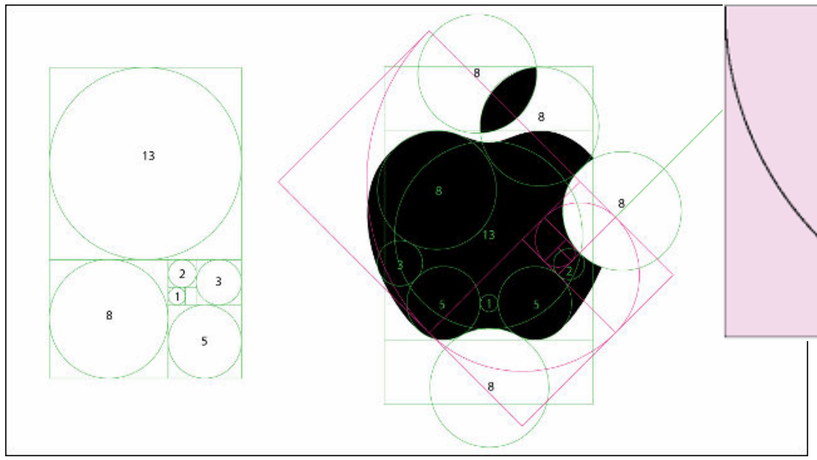
$$\frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1.6180339887\ldots$$

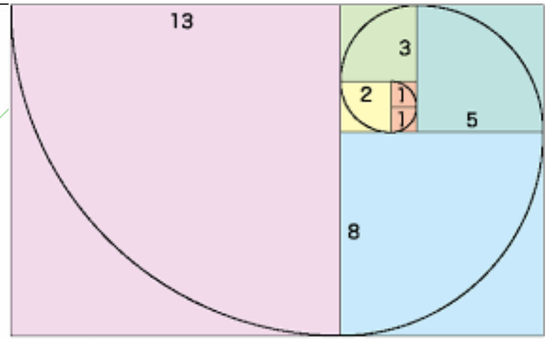
作図 [編集]

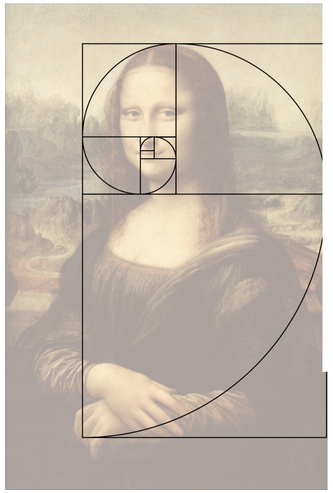


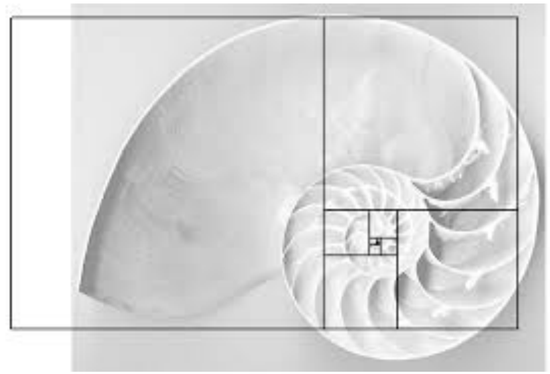
正方形 abcd を作り、辺 bc の中点 o を中心に、線分 oa または od を半径とした円を描き、それと辺 bc の延長線との交点を e とすると、ab : be が黄金比となる。

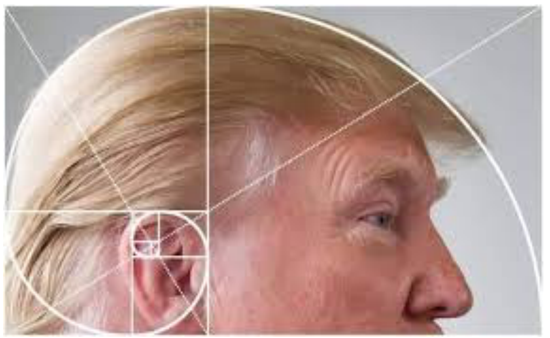












【クリスマス】

トナカイの鼻が赤いのは…「寒空に必須」毛細血管が発達

BMJ

BMJ 2012;345:e8311 doi: 10.1136/bmj.e8311 (Published 17 December 2012)

RESEARCH

CHRISTMAS 2012: RESEARCH

Why Rudolph's nose is red: observational study

OPEN ACCESS

Can Ince *professor*[1], Anne-Marije van Kuijen *PhD candidate*[2], Dan M J Milstein *postdoctoral research fellow*[3], Koray Yürük *PhD candidate*[3], Lars P Folkow *professor*[4], Wytske J Fokkens *professor*[2], Arnoldus S Blix *professor*[4]

[1]Department of Intensive Care Medicine, Erasmus Medical Center, Erasmus University Rotterdam, 's-Gravendijkwal 230, PO Box 2040, 3000 CA Rotterdam, Netherlands; [2]Department of Otorhinolaryngology, Academic Medical Center, University of Amsterdam, Netherlands; [3]Department of Translational Physiology, Academic Medical Center, University of Amsterdam; [4]Department of Arctic and Marine Biology, University of Tromsø, Norway

Abstract

Objective To characterise the functional morphology of the nasal microcirculation in humans in comparison with reindeer as a means of testing the hypothesis that the luminous red nose of Rudolph, one of the most well known reindeer pulling Santa Claus's sleigh, is due to the presence of a highly dense and rich nasal microcirculation.

Design Observational study.

Setting Tromsø, Norway (near the North Pole), and Amsterdam, the Netherlands.

Participants Five healthy human volunteers, two adult reindeer, and a patient with grade 3 nasal polyposis.

Main outcome measures Architecture of the microvasculature of the nasal septal mucosa and head of the inferior turbinates, kinetics of red blood cells, and real time reactivity of the microcirculation to topical medicines.

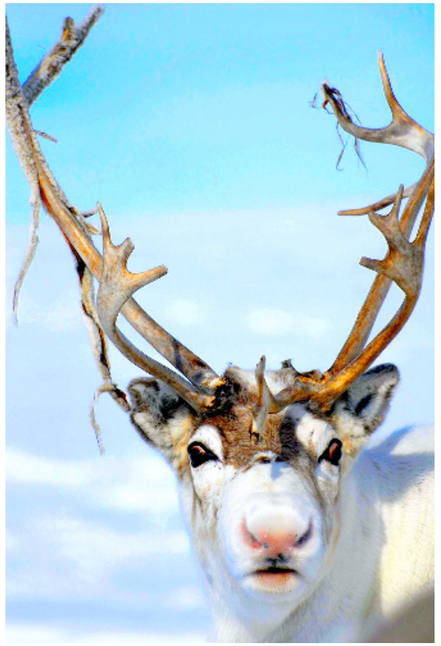
Results Similarities between human and reindeer nasal microcirculation were uncovered. Hairpin-like capillaries in the reindeers' nasal septal mucosa were rich in red blood cells, with a perfused vessel density of 20 (SD 0.7) mm/mm^2. Scattered crypt or gland-like structures surrounded by capillaries containing flowing red blood cells were found in human and reindeer noses. In a healthy volunteer, nasal microvascular reactivity was demonstrated by the application of a local anaesthetic with vasoconstrictor activity, which resulted in direct cessation of capillary blood flow. Abnormal microvasculature was observed in the patient with nasal polyposis.

Conclusions The nasal microcirculation of reindeer is richly vascularised, with a vascular density 25% higher than that in humans. These results highlight the intrinsic physiological properties of Rudolph's legendary luminous red nose, which help to protect it from freezing during sleigh rides and to regulate the temperature of the reindeer's brain, factors essential for flying reindeer pulling Santa Claus's sleigh under extreme temperatures.

Introduction

The nasal microcirculation has important physiological roles such as heating, filtering, and humidifying inhaled air, controlling inflammation, transporting fluid for mucous formation, and delivering oxygen to the nasal parenchymal cells. The pathophysiology of many nasal conditions, such as

英医学誌「ＢＭＪ」クリスマス特別号





トナカイの鼻が赤いのは，鼻の毛細血管がよく発達していて赤血球が十分供給されているためであることが，オランダとノルウェーの研究チームの研究でわかった．外気を取り入れる際に温め，脳を守る役目があるらしく，「寒空でサンタクロースのそりを引くために，赤鼻が必須の役割を果たしている」としている．

http://www.bmj.com/content/345/bmj.e8311.pdf%2Bhtml

【天文】

北米航空宇宙防衛司令部(NORAD) 今年もサンタを追跡



サンタの追跡方法

NORAD はレーダー、人工衛星、サンタ・カメラ、ジェット戦闘機の 4 つの最新鋭システムでサンタを追跡します。



まず使用するのは北米警戒システムと呼ばれる NORAD レーダー ・システムです。この強力レーダー・ システムは、北米の北部国境に張り巡らされた 47 の施設で構成されています。NORAD はクリスマスイブにこのレーダーを絶えず監視してサンタクロースが北極を出発する瞬間をキャッチします。

サンタが飛び立ったのをレーダーで確認したら、次の検知システムの出番です。地球の上空約 35,888 km の静止軌道上には赤外線センサーが搭載され熱を感知することのできる人工衛星が複数配置されています。なんと赤鼻のトナカイ、ルドルフの鼻からは赤外線信号が放出されているため、NORAD の人工衛星はルドルフとサンタの位置を検知できるのです。

3 番目の追跡システムはサンタ・カメラ・ネットワークです。サンタ追跡プログラムをインターネット上で展開し始めた 1998 年から使用しています。サンタ・カメラは超クールなハイテクの高速デジタル カメラで、世界中にあらかじめ設置されています。NORAD ではこれらのカメラをクリスマスイブの 1 日だけ使用します。これで世界中を飛び回るサンタとトナカイの画像と動画を捉えます。



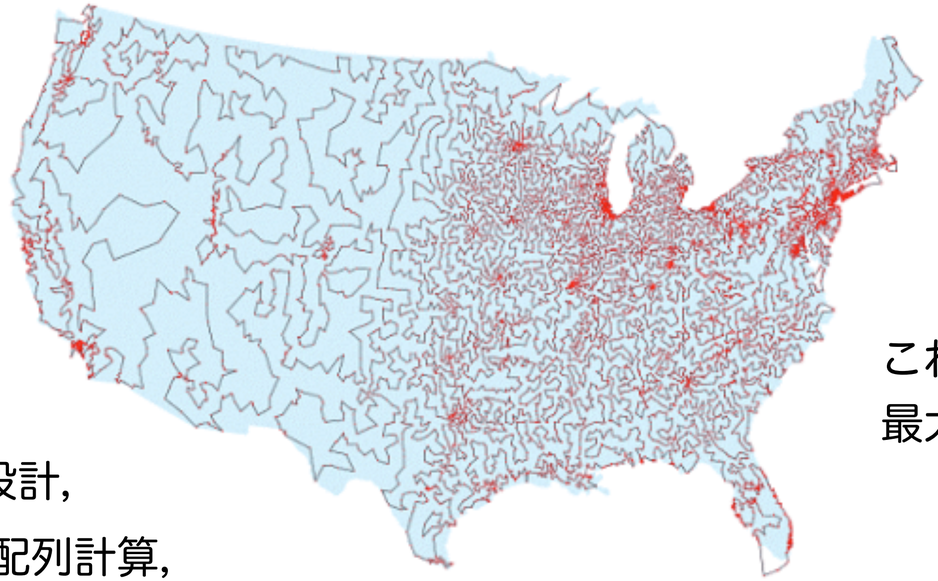
追跡システムの 4 番手はジェット戦闘機です。CF-18 戦闘機を操縦するカナダ NORAD のパイロットがサンタに接近し北米へと迎え入れます。米国内ではF-15 や F-16、F-22 戦闘機を操縦する米国 NORAD のパイロットがサンタとその有名なトナカイ達、ダッシャー、ダンサー、プランサー、ヴィクゼン、コメット、キューピッド、ドナー、ブリッチェン、そして勿論、ルドルフとのスリル満点の共同飛行を実現します

http://www.noradsanta.org/

巡回セールスマン問題 Traveling Salesman Problem

多くの都市を最短ルートで巡る方法は？

【原理的に解けるが，数が多いと難しい問題】



これまで解かれた
最大数は85900都市

応用例：

コンピュータ回路設計，

遺伝子技術のDNA配列計算，

航空機の路線設定，

光ファイバーケーブルのネットワーク形成，

チェーンストアの在庫管理システム．．．

http://thatsmaths.com/2012/12/20/santas-tsp-algorithm/

【クリスマス】

サンタクロース問題(Fermilab, 1)

Fermilab

FERMI NEWS

Volume 21 | Friday, December 11, 1998 | Number 23

FermiNews Main Page

Response in FermiNews, 05/12/2000



Santa at Nearly the Speed of Light

by Arnold Pompos, Purdue University, and Sharon Butler, Office of Public Affairs

About this time of year, inquisitive children of a certain age begin to question whether Santa is real. After all, Santa has a major delivery problem. There are some 2 billion children in the world expecting Christmas presents. Assuming an average of 2.5 children per household, then, Santa has to visit about 800 million homes scattered about the globe.

The distance Santa has to travel can be estimated from the following. First, while the surface area of Earth is about 10^{14} square meters, only about 30 percent of that is land mass, or about 0.3×10^{14} square meters. Second, we'll assume, for simplicity's sake, that the 800 million homes are equally distributed on this land mass. Dividing 0.3×10^{14} by 800 million gives 4×10^{4} square meters occupied by every household (about six football fields); the square root of that is the distance between households, about 200 meters. Multiply this by the 800 million households to get the distance Santa must travel on Christmas Eve to deliver all the children's gifts: 160 million kilometers, farther than the distance from here to the sun.

Thanks to the rotation of the earth, Santa has more time than children might initially think. Standing on the International Date Line, moving from east to west and crossing different time zones, Santa has not just 10 hours to deliver his presents (from 8 p.m., when children go to bed, until 6 a.m., when they wake up), but an extra 24 hours— 34 hours in all.

Even so, Santa's task is daunting.

Now, some have guessed that Santa accomplishes his task by traveling at a speed close to that of light—let's say, 99.999999 percent of the speed of light. By traveling that fast, in fact, Santa can deliver all his presents in just 500 seconds or so, with plenty of time left over (the remainder of the 34 hours) to polish off the cookies the children have left him on their kitchen tables.

https://www.fnal.gov/pub/ferminews/santa/

光速に近いサンタ
パデュー大学アーノルド・ポンポス、広報室シャロン・バトラー著

この時期になると、好奇心旺盛な年頃の子どもたちは、サンタは本当にいるのだろうかと疑問を抱くようになる。何しろ、サンタは配達に大わらわなのだ。クリスマスプレゼントを待っている子どもたちは、世界に約20億人いると言われています。一家に平均2.5人の子供がいると仮定すると、サンタは世界中に散らばる約8億軒の家を訪れなければならない。

このサンタの移動距離は、次のようなことから推定することができる。まず、地球の表面積は約10^{14}平方メートルですが、そのうち陸地は約30%、つまり約0.3×10^{14}平方メートルしかありません。次に、簡単のために、8億戸の住宅がこの陸塊に均等に分布していると仮定する。0.3×10^{14}を8億で割ると、1世帯あたり4×10^{4}平方メートル(サッカー場約6面分)、その平方根が世帯間の距離で、約200メートルとなる。これを8億世帯で割ると、クリスマスイブにサンタが子供たちにプレゼントを届けるのに必要な距離は1億6千万キロメートルとなり、ここから太陽までの距離よりも遠くなる。

地球の自転のおかげで、サンタは子どもたちが思っているよりずっと時間があるのです。国際日付変更線上に立ち、東から西へ移動し、異なるタイムゾーンを通過するため、子どもたちが寝る午後8時から起きる午前6時までの10時間だけでなく、さらに24時間、合計34時間もプレゼントを届ける時間があるのです。

それにしても、サンタの仕事は大変なものだ。

さて、サンタは光速に近い速度、例えば光速の99.999999パーセントで移動することで任務を遂行するのではと推測する人がいる。その速さなら、たった500秒ですべてのプレゼントを届けることができ、残りの34時間で、子供たちが台所のテーブルに置いていったクッキーを食べきることができるのだ。

【クリスマス】

サンタクロース問題(Fermilab, 2)

There are certain consequences, however, of Santa's traveling at this frantic pace. For example:

First, children may not be able to see Santa racing across the dark night sky, but they may be able to see a trail of light caused by Cerenkov radiation, a phenomenon created when charged objects travel faster than the speed of light (which they can do in transparent media, but not in a vacuum). Since the basic component of our atmosphere is nitrogen, light is slowed to 99.97 percent of its usual speed of 300,000 kilometers per second. Santa travels faster than this and undoubtedly is charged; as a consequence, then, he will emit visible photons. (Unfortunately, that light will be obscured by the light caused by the friction created when Santa rushes through the atmosphere. Also, Santa might roast in all this heat, but we'll presume that Santa's sleigh, like space capsules, has special protective shielding.)

Second, children will notice that as Rudolph, Santa's lead reindeer, is rushing toward their homes, his nose is no longer red. The color depends on just how fast Rudolph is moving, turning yellow, then green, then blue, then violet, and finally turning invisible in the ultraviolet range as he accelerates to higher and higher speeds. This change in color is a well-known phenomenon, called the Doppler shift, which astronomers take advantage of to figure out the speeds with which the stars and galaxies in our expanding universe are moving with respect to us; from that information, the distances to these celestial objects can be deduced. Using the accompanying table, children can determine how fast Rudolph is traveling by noting the color of his nose.

One worry Santa has is whether, with his irremediable girth, he'll be able to squeeze into all those chimneys. Traveling at nearly the speed of light makes the problem worse, because Santa gains mass (his kinetic energy adds to his mass, as Einstein's famous $E = mc^2$ attests). Children believe that Santa will easily fit in the chimney, because from their frame of reference, even though Santa is heavier, he has contracted. From Santa's frame of reference, though, the chimney is narrower than Santa is.

But children need not fear. The theory of relativity assures us that Santa will fit (see figure 4), and their packages will be delivered on time.

https://www.fnal.gov/pub/ferminews/santa/

しかし、このようなスピードで移動すると、あることが起こります。たとえば、次のようなことです。

荷電した物体が光速より速く移動するときに生じるチェレンコフ放射(透明な媒体では可能だが、真空では不可能)という現象が、光の軌跡として子どもたちに見えるかもしれません。大気の基本成分は窒素なので、光は通常の速度である秒速30万キロメートルの99.97パーセントに減速されます。サンタはこれより速く移動し、間違いなく帯電しているので、目に見える光子を放出します。(しかし、その光は、サンタが大気を駆け抜けるときに生じる摩擦による光で見えなくなってしまいます。また、サンタは熱で焼けてしまうかもしれませんが、サンタのそりには宇宙カプセルと同じように特別な遮蔽物があると仮定します)。

次に、サンタの先頭のトナカイ、ルドルフが家に向かって急いでいるとき、彼の鼻がもう赤くないことに子供たちは気づくでしょう。黄色、緑、青、紫と変化し、さらに高速になると紫外線域で見えなくなる。この色の変化は、ドップラー効果と呼ばれる有名な現象で、天文学者は、膨張する宇宙の中で星や銀河が私たちに対してどのような速度で動いているかを知り、その情報から天体までの距離を推測しているのです。付属の表では、ルドルフの鼻の色から、その速さを知ることができます。

サンタさんの心配は、そのどうしようもない腹囲で、煙突に入りきれるかどうかです。光速に近いスピードで移動すると、サンタさんの質量が増えるからです(アインシュタインの有名な$E=mc^2$が示すように、運動エネルギーが質量に加算されるのです)。子どもたちは、サンタが煙突に簡単に入ると信じています。なぜなら、子どもたちの視点からは、サンタは重くなったが、収縮しているのだから。しかし、サンタさんから見れば、煙突はサンタさんより狭いですね。

しかし、子どもたちは心配する必要はありません。相対性理論によって、サンタさんは煙突に収まり(図4)、荷物は時間通りに届けられるのです。

【クリスマス】

サンタクロース問題(Fermilab, 3)

Children might also wonder why Santa never seems to age. From year to year, he retains his cherub face and merry laugh, his long white beard and his round belly that jiggles like a bowlfull of jelly. The fact is that for objects traveling at close to the speed of light, time slows down. So, the more packages Santa delivers, the more he'll travel, and the more he'll remain the same, carrying on the Christmas tradition for generations of children to come.

Color of Rudolph's nose:	Red	Yellow	Green	Blue	Violet
Corresponding wavelength (in nanometers):	650	580	550	480	400
Santa's speed as a percentage of the speed of light (v/c)*:	0	11	17	29	45

* $v/c = \frac{\left(\frac{\lambda'}{\lambda}\right)^n - 1}{\left(\frac{\lambda'}{\lambda}\right)^n + 1}$; λ' is the wavelength of Rudolph's red nose (in Santa's frame of reference); λ is the wavelength of the color children see.

Can Santa fit in the chimney if he's traveling at nearly the speed of light?
To answer that question, we need to talk about two frames of reference: Santa's and ours. We also need to place two periodically blinking lights, A and B, on the sides of the chimney. These lights will help us and Santa find the edges of the chimney in the darkness and therefore will determine when Santa is right above the chimney, ready to slide in. For Santa to fit into the chimney, his right and left sides need to be between lights A and B when they blink.

https://www.fnal.gov/pub/ferminews/santa/

しかし、子どもたちは心配する必要はありません。相対性理論によって、サンタさんは煙突に収まり(図4)、荷物は時間通りに届けられるのです。

また、子どもたちは、なぜサンタさんが年をとらないのか不思議に思うかもしれない。サンタクロースは毎年、童顔で陽気な笑い声を上げ、長い白髭を蓄え、丸いお腹をゼリーのように揺らしているのだ。実は、光速に近いスピードで移動する物体は、時間が遅くなる。だから、サンタが荷物を届ければ届けるほど、サンタは旅を続け、何世代もの子どもたちのためにクリスマスの伝統を受け継ぐ、変わらない存在になる。

ルドルフの鼻の色	Red	Yellow	Green	Blue	Violet
対応する波長 (in nanometers):	650	580	550	480	400
サンタクロースの速さは光速の何%か	0	11%	17%	29%	45%

【クリスマス】

サンタクロース問題(Fermilab, 4)

Can Santa fit in the chimney if he's traveling at nearly the speed of light?
To answer that question, we need to talk about two frames of reference: Santa's and ours. We also need to place two periodically blinking lights, A and B, on the sides of the chimney. These lights will help us and Santa find the edges of the chimney in the darkness and therefore will determine when Santa is right above the chimney, ready to slide in. For Santa to fit into the chimney, his right and left sides need to be between lights A and B when they blink.

サンタが光速で移動している場合、煙突に入ることができるでしょうか？
この問いに答えるには、2つの座標系について話す必要があります。サンタの視点と私たちの視点です。また、煙突の側面にAとBという2つの周期的に点滅するライトを設置する必要があります。このライトは、暗闇の中で私たちやサンタが煙突の端を見つけるのに役立ち、その結果、サンタが煙突の真上にいて、滑り込もうとするタイミングを判断することができます。サンタさんが煙突に入るには、サンタさんの左右がライトAとBの点滅の間に入る必要があります。



Figure 1: If Santa is traveling at normal earthbound speeds, say, 100 km per hour, he sees lights A and B blink at the same time. Just as his left arm touches A, his right arm also touches B; therefore Santa fits in (since Santa is not bigger than the chimney).

図1: サンタが通常の地上速度、例えば時速100kmで移動していると、AとBのライトが同時に点滅するのが見える。左腕がAに触れると同時に、右腕もBに触れるので、サンタは煙突より大きくないので、煙突の中に入ることができる。



Figure 2: If Santa is moving at close to the speed of light, the situation changes. From our frame of reference, according to Einstein's theory of relativity, Santa's width contracts and he is narrower than the chimney. Therefore Santa has plenty of space to slide in.

図2：サンタが光速に近い速度で移動している場合、状況は変わる。アインシュタインの相対性理論によると、我々の基準点から見ると、サンタさんの幅は縮まり、煙突より狭くなる。したがって、サンタは滑り込むための十分なスペースがある。

https://www.fnal.gov/pub/ferminews/santa/



Figure 3: From Santa's frame of reference, however, the chimney is moving backward and is, in fact, narrower than he is. If Santa were to see A and B blinking at the same time, the chimney would be too narrow for him.

図3：しかし、サンタの視点からは、煙突は後方に移動しており、実際、サンタよりも幅が狭くなっている。AとBが同時に点滅していると、サンタさんには煙突の幅が狭すぎるのです。



Figure 4: Not to worry. From Santa's frame of reference, the two lights are not blinking at the same time. As light A blinks, Santa's left side slips into the chimney. The chimney keeps moving backward as Santa's body squeezes in, until finally, when light B blinks, Santa's right side is perfectly aligned with the side of the chimney. Now all of Santa is in.

図4: 心配はいらない。サンタさんの視点からは、2つのライトは同時に点滅していません。Aのライトが点滅すると、サンタさんの左側が煙突の中に入り込みます。煙突はサンタさんの体を押し込むように後退し続け、Bの点滅でようやくサンタさんの右側が煙突の側面と完全に一致するようになります。これでサンタさんが全部入りました。

【クリスマス】

サンタクロース問題（NYScienceTeacher, 1）

https://newyorkscienceteacher.com/sci/subjects/phy/holidays.php

NewYorkScienceTeacher.com presents...

The Physics of Christmas

Click here for a printer friendly version of this list

To link to this page, use the URL below:
http://www.newyorkscienceteacher.com/holidays/

Below is a scientific listing of some of the concepts of the holidays that many people, especially youths have accepted as true. Lets take a look…



1. No known species of reindeer can fly (there are 300,000 organisms yet to be classified, most are insects and germs, this does not rule out flying reindeer)

2. There are about 2 billion children (persons under 18) in the world.



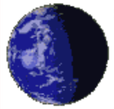
3. "Santa" doesn't (appear) to handle the Muslim, Hindu, Jewish and Buddhist children.

4. This reduces the workload to 15% of the total - 300 million kids.

5. On average, there are 3.5 children per household.

6. That's 85.7 million homes.

7. One presumes there's at least one good child in each.



8. Thanks to the different time zones and the rotation of the earth, Santa has 31 hours of Christmas to work with (assuming he travels east to west).

9. This works out to 768 visits per second.

10. This means Santa has 1/1000th of a second to park, hop out of the sleigh, jump down the chimney, fill the stockings, distribute the remaining presents under the tree, eat whatever snacks have been left, get back up the chimney, get back into the sleigh and move on to the next house.



1. 既知の種のトナカイは空を飛ぶことができない（まだ分類されていない生物が 300,000 あり、そのほとんどは昆虫と細菌であり、これはトナカイが空を飛ぶ可能性を排除するものではありません）

2. 世界には約 20 億人の子供（18 歳未満の人）がいます。

3.「サンタ」は、イスラム教徒、ヒンズー教徒、ユダヤ教徒、仏教徒の子供たちを扱うようには見えません。

4. これにより、ワークロードが全体の 15%（3 億人の子供）に削減されます。

5. 平均して、1 世帯あたり 3.5 人の子供がいます。

6. 8,570 万戸です。

7. それぞれに少なくとも 1 人の良い子がいると仮定します。

8. 異なるタイム ゾーンと地球の自転のおかげで、サンタは 31 時間のクリスマスを過ごすことができます（彼が東から西に移動すると仮定）。

9. これは、1 秒あたり 768 回の訪問になります。

10. これは、サンタが 1/1000 秒で駐車し、ソリから飛び降り、煙突を飛び降り、靴下に水を入れ、ツリーの下に残りのプレゼントを配り、残ったおやつを食べ、煙突に戻ることを意味します。そりに戻り、次の家に移動します。

【クリスマス】

サンタクロース問題（NYScienceTeacher, 2）

11. Assuming each stop is evenly distributed (which we know to be false), we are talking about 0.8 miles per household, a total trip of 75.5 million miles.

12. This is not counting stops to do what most of us must do at least once every 31 hours.

13. This means that Santa's sleigh is moving at 677 miles per second.

14. That is 3,385 times the speed of sound (0.2 miles/second).



15. The fastest man-made vehicle is the Helios 2 (launched April 17, 1976) space probe which moves at 41.7 miles per second.

16. A conventional reindeer can run, tops, 15 miles per hour.

17. Assuming that each child gets nothing more than an Apple 4 GB iPod nano (1 pound), the sleigh is carrying 150,000 tons (US), not counting Santa, who is invariably described as overweight.

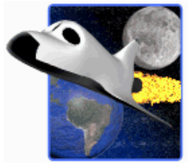


18. On land, conventional reindeer can pull 300 pounds.

19. Assuming that "flying reindeer" could pull TEN TIMES the normal amount; we cannot do the job with eight, or even nine.

20. We need 100,000 reindeer. This increases the payload - not even counting the weight of the sleigh to 176,065 tons.

21. This is 1.8 times the weight of the Nimitz-class aircraft carrier.



22. 176,715 tons traveling at 650 miles per second creates enormous air resistance, which will heat the reindeer up in the same fashion as spacecraft re-entering the earth's atmosphere.

23. Each lead pair of reindeer will absorb 7.2 x 10^{18} joules of energy per second.

24. In short, they will burst into flames almost instantaneously creating deafening sonic booms in their wake. The entire reindeer team will be vaporized within 0.004 seconds.



25. Santa, meanwhile, will be subjected to centrifugal forces 17,500 times greater than gravity. A 250-pound Santa (which seems ludicrously slim) would be pinned to the back of his sleigh by 4,315,015 pounds of force.

11. 各停留所が均等に分散されていると仮定すると（これは誤りであることがわかっています）、1 世帯あたり約 0.8 マイル、合計で 7,550 万マイルの移動になります。

12. これは、少なくとも 31 時間に 1 回はしなければならないことを行うための停止回数ではありません。（31時間中ずっとです）

13. これは、サンタのそりが毎秒 677 マイルで動いていることを意味します。

14. これは、音速（0.2 マイル/秒）の 3,385 倍です。

15. 最速の人工乗り物はヘリオス 2（1976 年 4 月 17 日打ち上げ）の宇宙探査機で、秒速 41.7 マイルで移動します。

16. 普通のトナカイは、時速 15 マイルで走ることができます。

17. 各子供が Apple 4 GB iPod nano（1 ポンド）だけを受け取ると仮定すると、そりは 150,000 トン（米国）を運ぶことになります。

18. 陸上では、従来のトナカイは 300 ポンドを引っ張ることができます。

19.「空飛ぶトナカイ」が通常の 10 倍の量を引っ張ることができると仮定します。8 人、あるいは 9 人でさえも仕事をすることはできません。

20. 100,000 頭のトナカイが必要です。これによりペイロードが増加します - そりの重量を数えなくても 176,065 トンに達します。

21. これは、ニミッツ級空母の 1.8 倍の重量です。

22. 毎秒 650 マイルで移動する 176,715 トンの空気抵抗は、宇宙船が地球の大気圏に再突入するのと同じように、トナカイを加熱します。

23. トナカイのリードペアは、毎秒 7.2 x 10^{18} ジュールのエネルギーを吸収します。

24. 要するに、彼らはほとんど瞬時に炎上し、その後に耳をつんざくような音速の壁を作り出します。トナカイチーム全体が 0.004 秒以内に気化します。

25. 一方、サンタは重力の 17,500 倍の遠心力を受けます。250 ポンドのサンタ（ばかげてスリムに見える）は、4,315,015 ポンドの力でそりの後ろに固定されます。

https://newyorkscienceteacher.com/sci/subjects/phy/holidays.php

前回のミニッツペーパーから

今回の授業も難しく、宇宙は奥深いなと感じました。

今回の授業で宇宙への解釈が大きく変わりました。

ビックバンについて詳しく知ることができて良かったです。

見えないものを想像したり考えるのが楽しいのは、実際にはどうなっているのか分からないからだと思いました。
いつも楽しい講義をありがとうございます。宇宙関連やそれ以外でもいいですが、先生の好きな映画は何ですか。





らむりん

にゃっきい

前回のミニッツペーパーから

宇宙の仕組みがどれほど正確に説明されているかを知らなかった。
科学者の存在が偉大すぎると感じた。

たくさんの理論があって難しい







リサランドールさんは、45歳にみえなくてびっくりした。（2007.8）

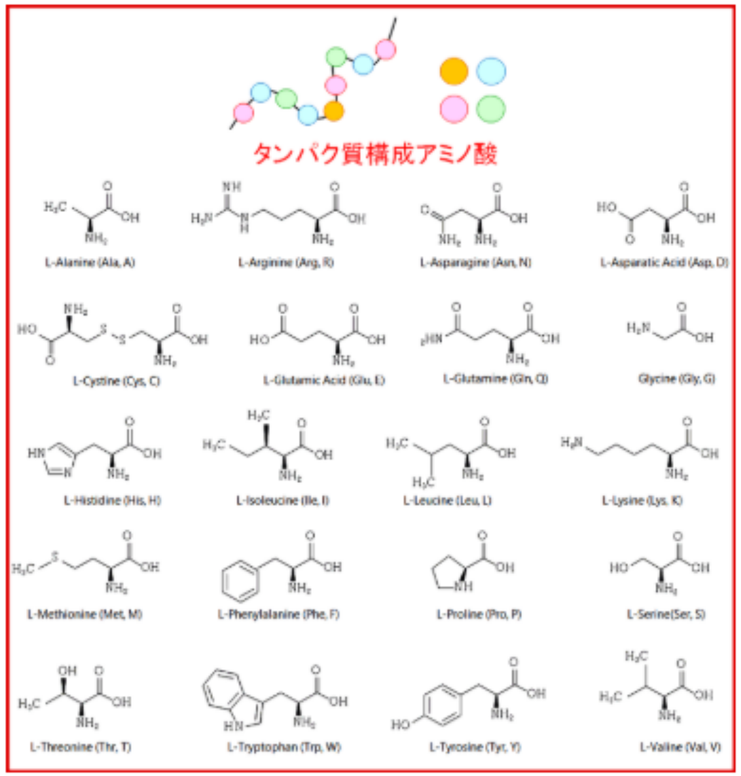
宇宙にはまだわからないことが沢山あるけど、
そのぶん可能性も沢山あるのだなと思いました。

前回のミニッツペーパーから

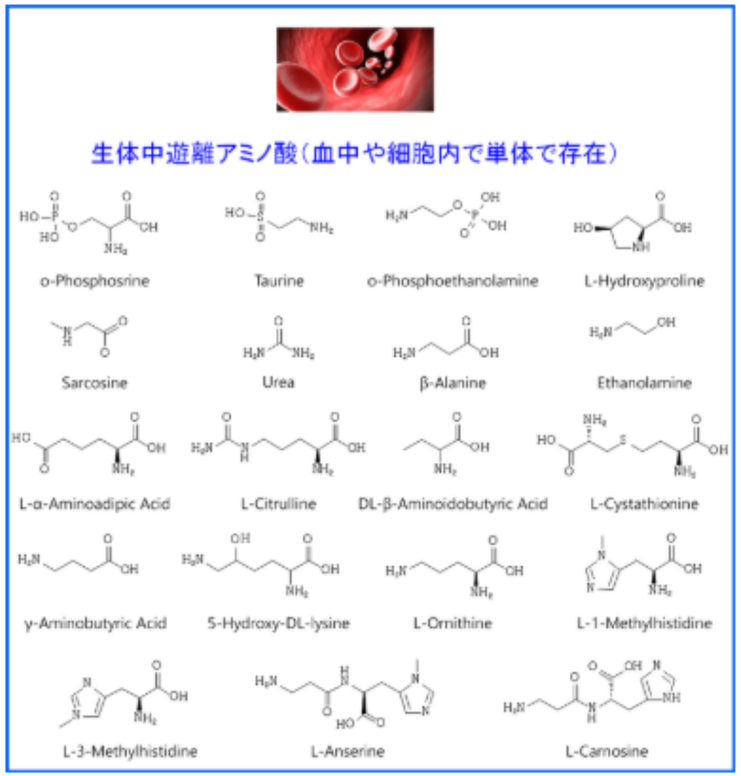
今回の授業内容とは別になりますが，人間は科学式で表わせるのでしょうか？

化学式

水(H_2O)とか？



タンパク質構成アミノ酸の構造式



生体中遊離アミノ酸の構造式

https://www.jasco.co.jp/jpn/technique/topics/amino/about.html

教科書 p162

宇宙マイクロ波背景輻射の発見 Discovery of CMB



宇宙と全然関係ない人達があっさりと見つけてしまったのが面白かったです。技術や研究の進歩によって、より数値が細かく的確になっていくのがすごいです。

Arno A. Penzias (1933–)
Robert W. Wilson (1936–)

ベル研究所, 電波通信の実験
「どうしても取り除けないノイズがある」
「昼夜によらず, 季節によらず, 方向によらないノイズがある」

1978年, ノーベル物理学賞受賞

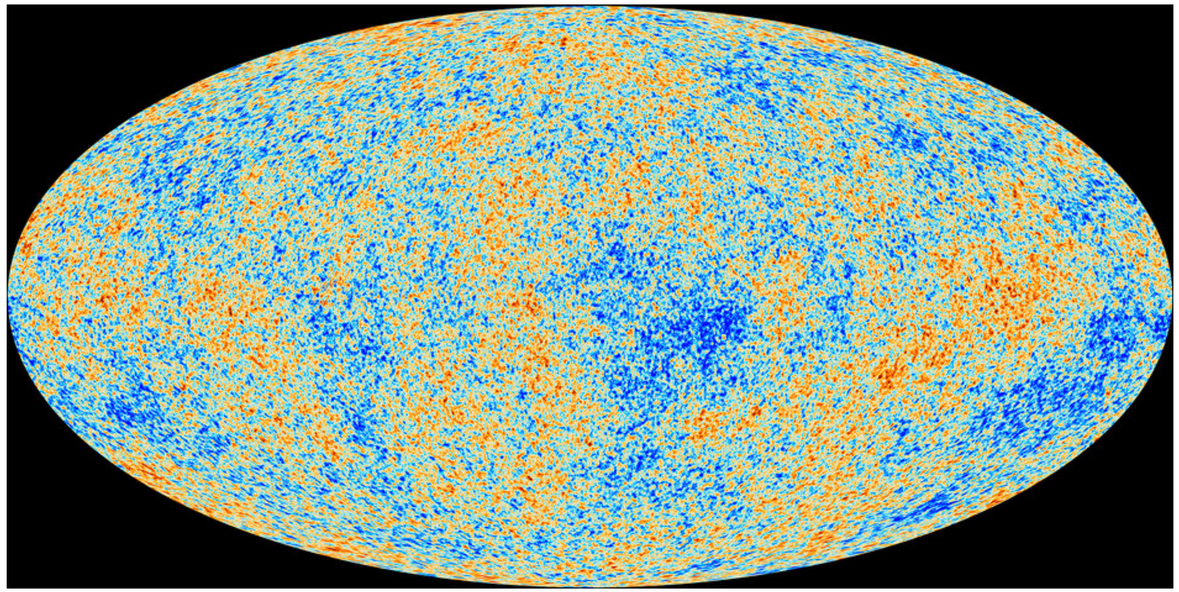
宇宙誕生後, 30万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. その時の温度(約3000K)が放射されて残っているはず.

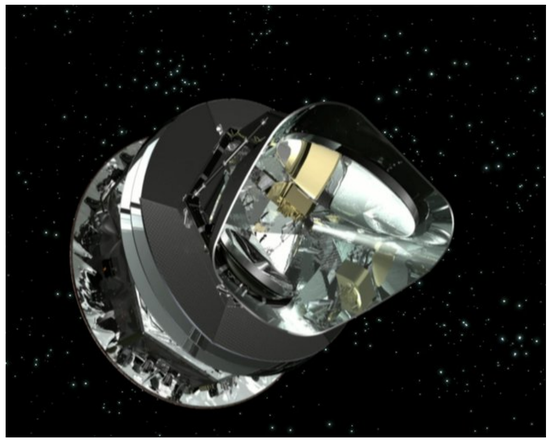
宇宙膨張で温度下がって　~~5～7K~~ **3.5K** (-268°～ -266°)位

教科書 p162

Planck衛星によるCMBの測定

Planck, 2013





精密な宇宙モデルが出来上がりつつあり、それによって宇宙の年齢がわかるようになったことを知りました。

38万年

宇宙の年齢は138±0.5億年, と報告

宇宙誕生後, ~~37~~万9000年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. その時の温度(約3000K)が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって　~~2.725~~K (-270°)位

2.72548±0.00057 K

CMBの測定

COBE衛星（1992），WMAP衛星（2003），Planck衛星（2013）

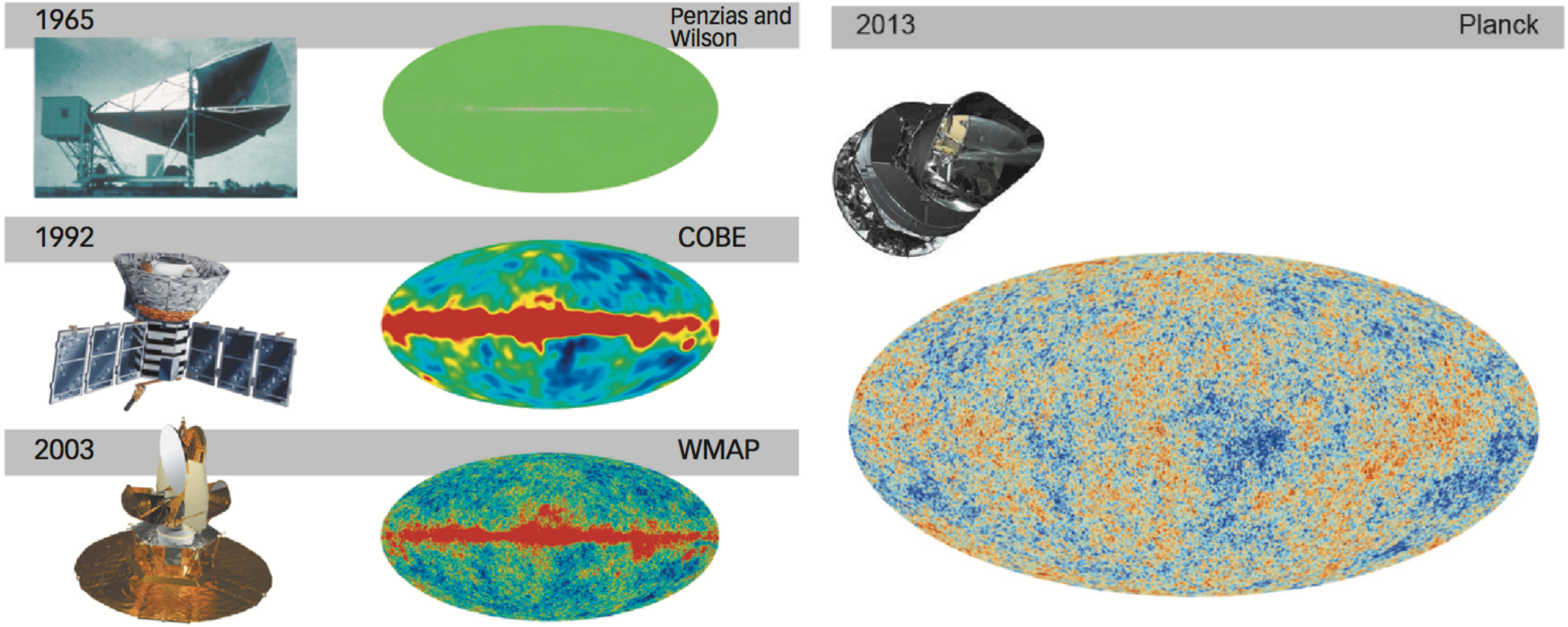
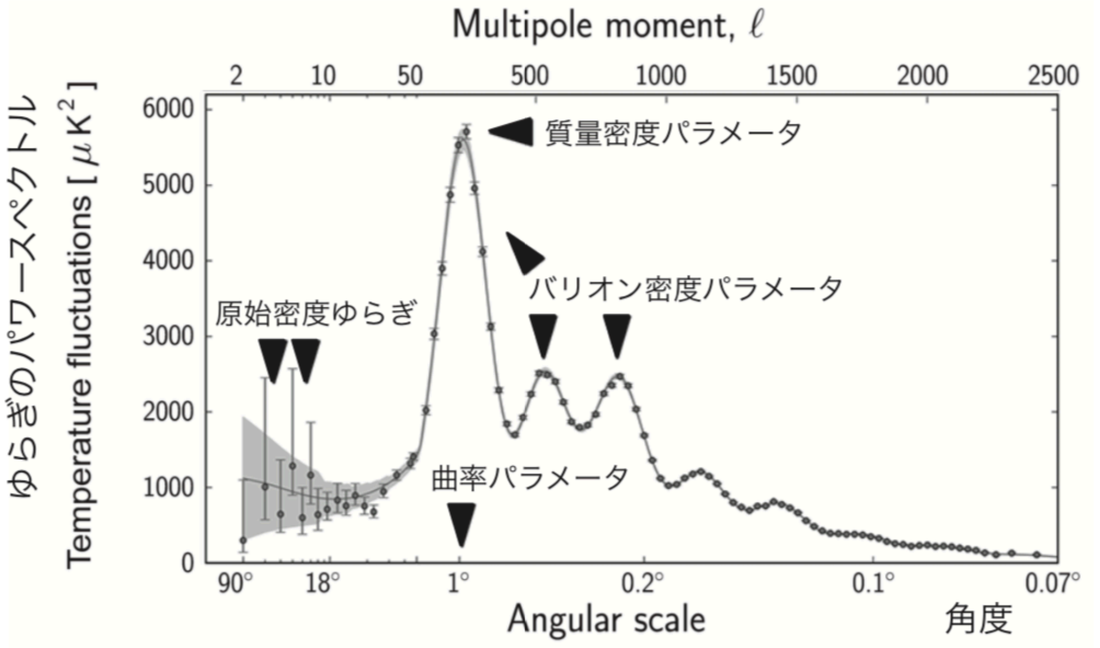


図 5.38 （本文 186 ページ）

CMB で描いた全天図を観測年代ごとに比較したもの．中心の水平軸は天の川銀河面を示す．1965 年のペンジアスとウィルソンの観測では「全天から一様な CMB」，1992 年の COBE 衛星は「10 万分の 1 程度のゆらぎ」が報告された．2003 年の WMAP 衛星，2013 年の Planck 衛星の観測結果は，ゆらぎの観測の角度分解能が格段に上がり，より精密なデータが得られるようになった．

CMBの2点相関関数から宇宙論パラメータを決定する



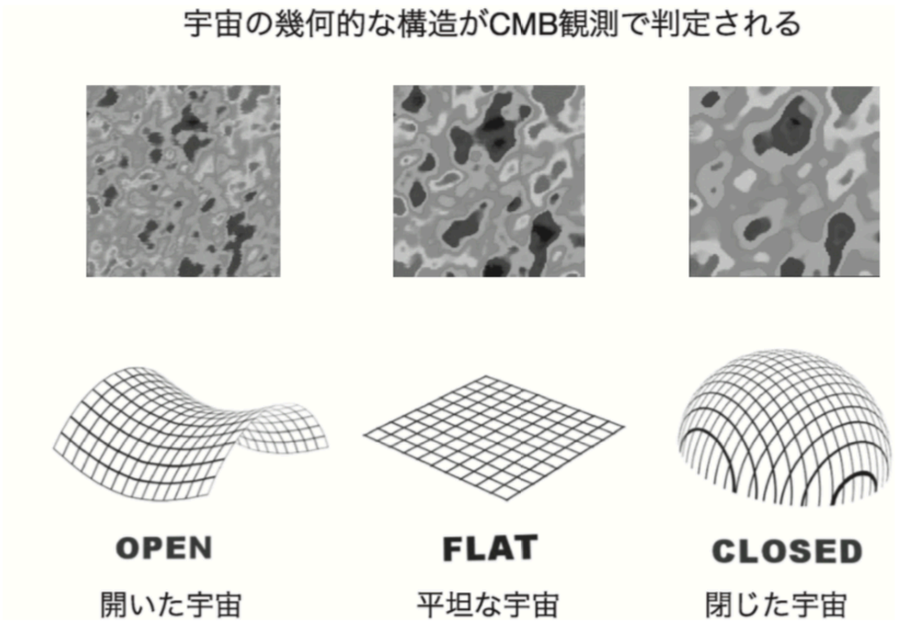


図 5.39 〔左〕CMB の角度相関図を理論曲線に重ねて示した図．1 度スケールにピークがあり，この大きさから質量密度パラメータ，この位置から曲率パラメータがわかる．〔右〕CMB の温度ゆらぎを統計解析することで，宇宙の曲率が，開いている・平坦・閉じているのいずれかが判定できる．結果は，「平坦」であった．（NASA/ESA のサイトで得られる図を加工した）

観測からパラメータがわかる ▶ アインシュタインの相対性理論から宇宙モデルが決まる
▶ 宇宙年齢がわかる（138億年）

標準ビッグバンモデル:まとめ

(1) 宇宙膨張の発見 (1929)

遠くの銀河は私たちの銀河からの距離に比例した速度で一様に遠ざかっている.

(2) 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の発見 (1964)

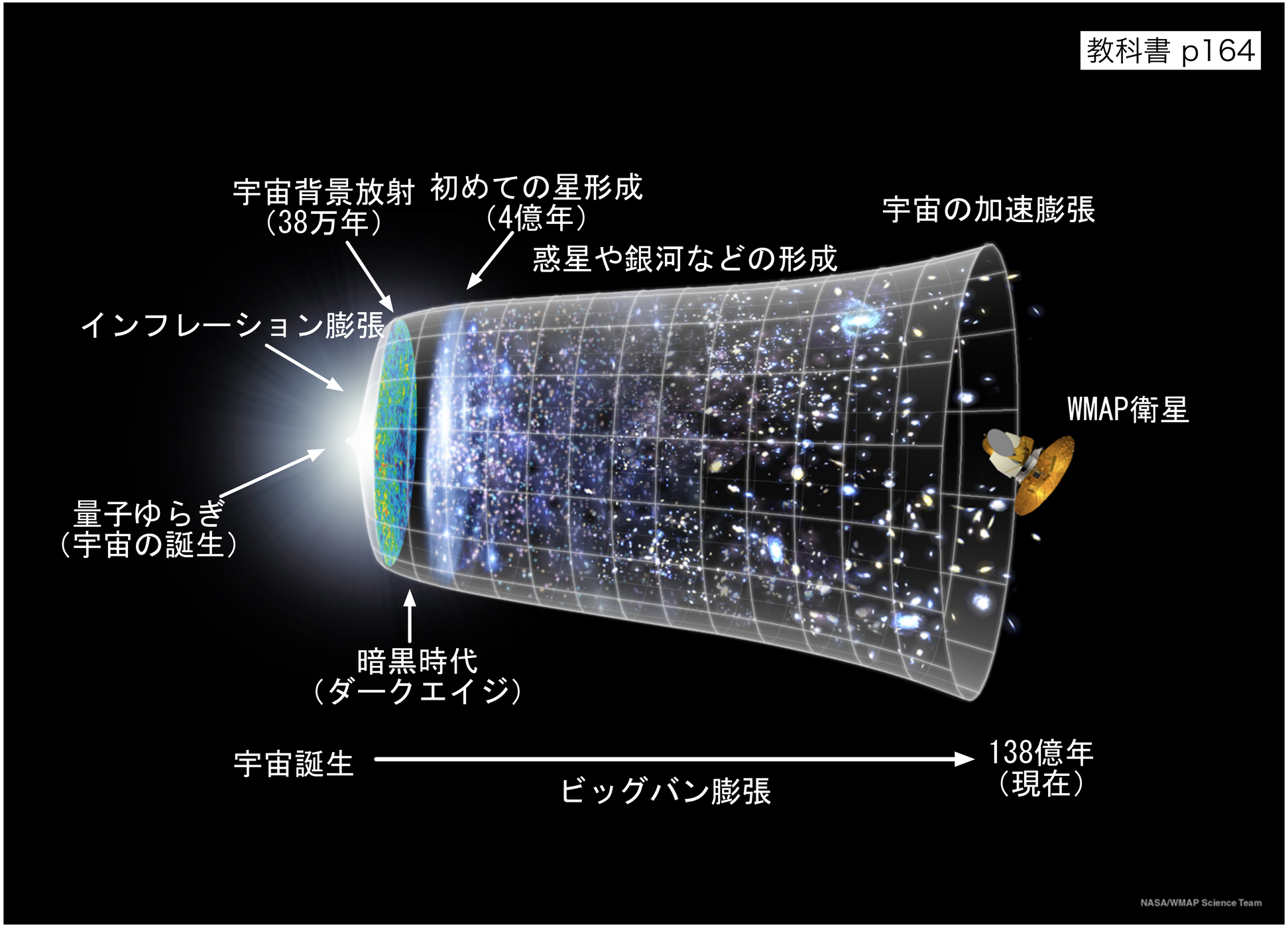
等方的に，かつて宇宙が高温だったことを示すマイクロ波が観測された.

(3) He，重水素の存在比の観測

初期宇宙の熱核反応で，陽子と中性子から生成されると考えられるHeと重水素の存在比が，星間空間で観測される値とほぼ一致した.

標準ビッグバン宇宙論は正しい

教科書 p164


宇宙背景放射
（38万年）
初めての星形成
（4億年）
宇宙の加速膨張
惑星や銀河などの形成
インフレーション膨張
WMAP衛星
量子ゆらぎ
（宇宙の誕生）
暗黒時代
（ダークエイジ）
宇宙誕生
138億年
（現在）
ビッグバン膨張
NASA/WMAP Science Team

教科書 p170

ビッグバン宇宙モデルの問題点

(A)**地平線問題**. なぜ，CMB は全天で一様に近い温度分布を示すのか.

(B)**平坦性問題**. なぜ，現在の宇宙は平坦（曲率が 0）に見えるのか.

(C)**構造形成の種問題**. 星や銀河など物質ができるためのゆらぎはどうやって生まれたのか.

(D)**モノポール問題**. 宇宙初期の相転移で生じる位相欠陥のうち，とくにモノポールはどのように消滅していくのか.

(E)**バリオン数生成の問題**. なぜ，宇宙には物質だけ存在して反物質が存在しないのか.

(F)**宇宙の初期特異点問題**. 時刻 0 のとき，宇宙は密度が無限大の特異点になる．物理的にどうやって説明するのか.

(G)**時空の次元問題**. 私たちの住む時空は，なぜ，4 次元であって 3 次元や 5 次元でないのか.

インフレーション宇宙モデル（1981年）

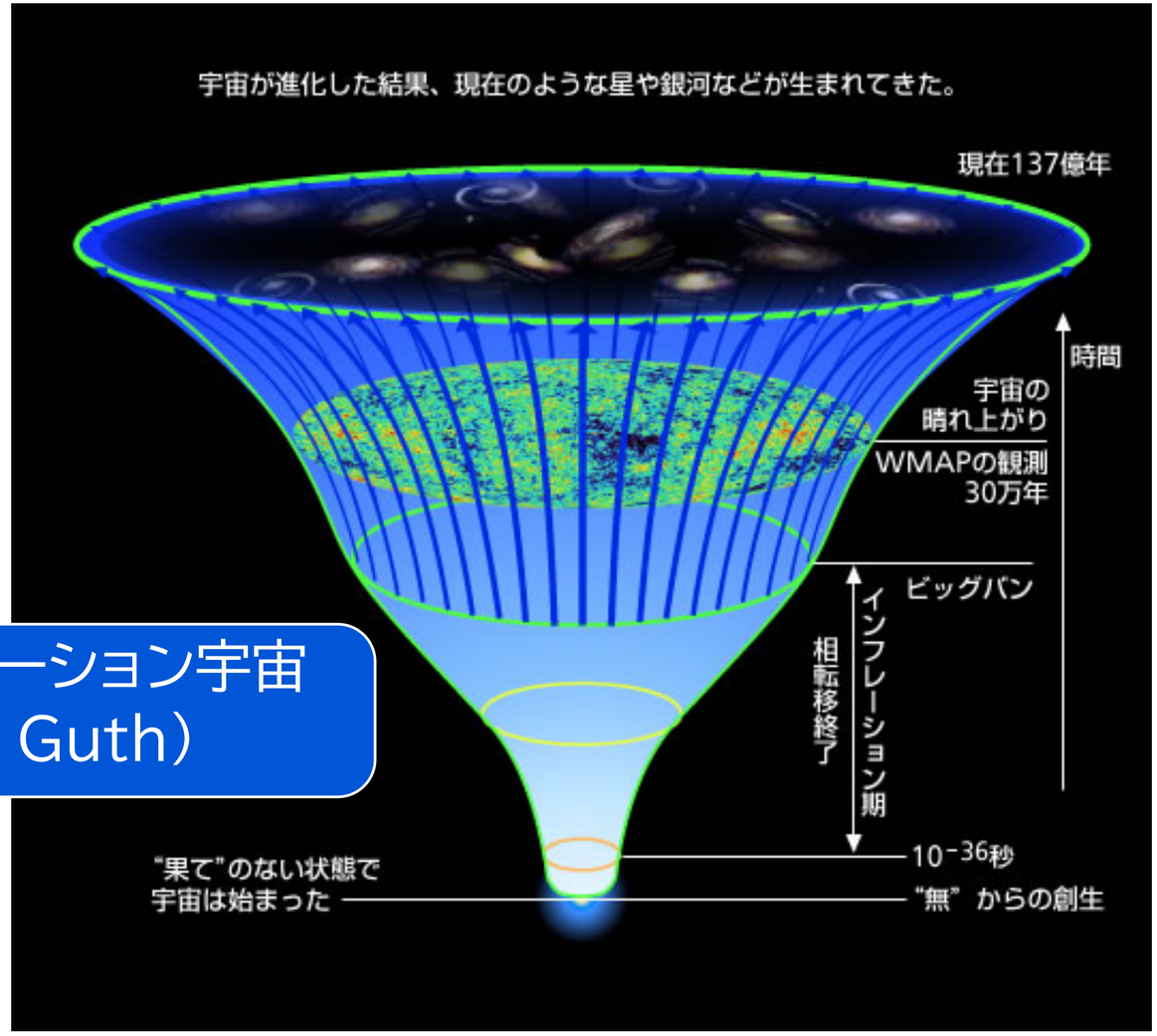
宇宙の初期に急激な膨張があった，と考える



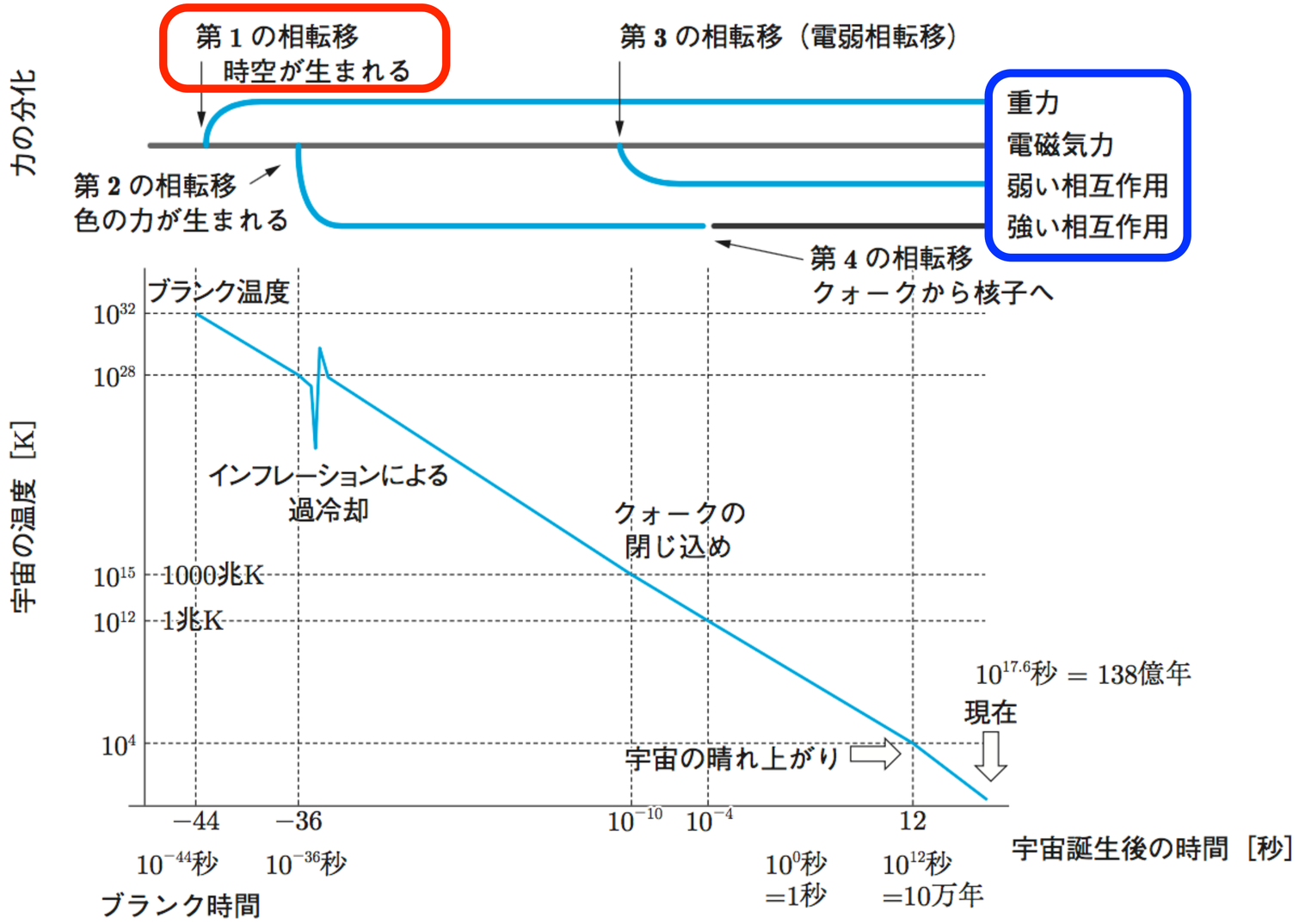
初期の宇宙は
指数関数的膨張
（佐藤勝彦）



インフレーション宇宙
（A. Guth）



宇宙初期の力の相転移

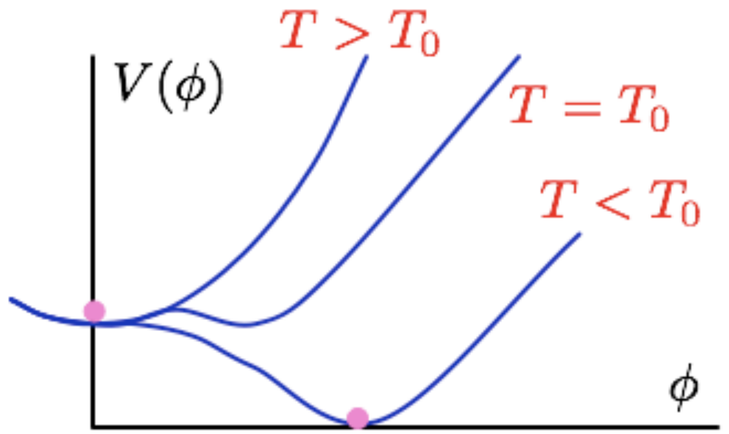


重力

電磁気力

強い力　（原子核内の陽子と中性子をつなぐ力）

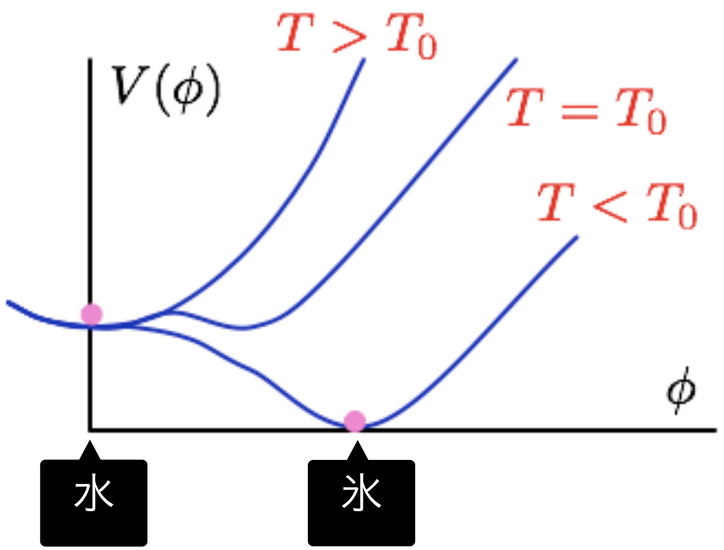
弱い力　（ニュートリノをつなぐ力）



水の状態　氷の状態

相転移
＝物質の状態が変化すること
例）温度が下がると，水→氷

相転移現象



横軸 φ は，状態を表す変数

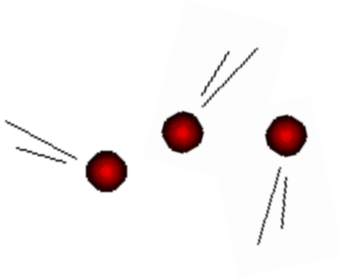
縦軸 V(φ) は，エネルギー．

（下へ行くほど安定な坂道）

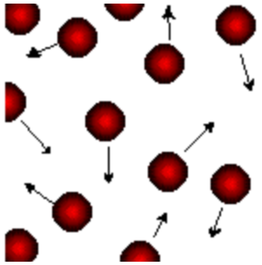
固体から液体へ＝**相転移現象**

phase transition

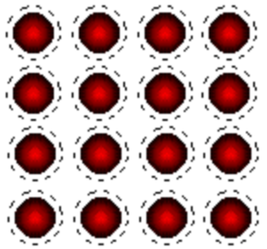
気体（気相）



液体（液相）



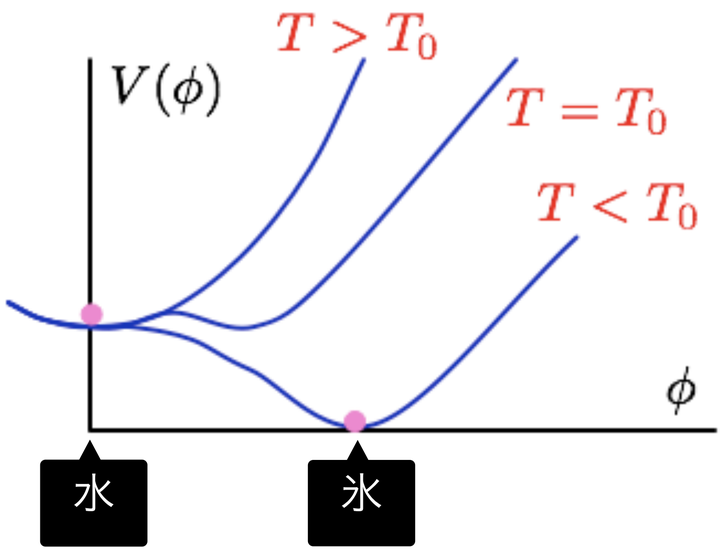
固体（固体相）



相転移は同時に一様に生じるわけではない

冷蔵庫にいれていたペットボトルの水を出すと，一瞬で凍った.

＝　過冷却現象



横軸 φ は，状態を表す変数

縦軸 V(φ) は，エネルギー.

（下へ行くほど安定な坂道）



Topic　過冷却と樹氷

水が凍ったり，沸騰したりするきっかけは，不純物の混入による．精製水をゆっくりと −5℃ の冷蔵庫で凍らせようとしても，液体のまま（**過冷却**状態）であり，外気に触れた瞬間に凍りつくことになる．雪国などでみられる樹氷は，過冷却状態の水滴が木にぶつかって，一瞬で凍ることが一つの理由だという．



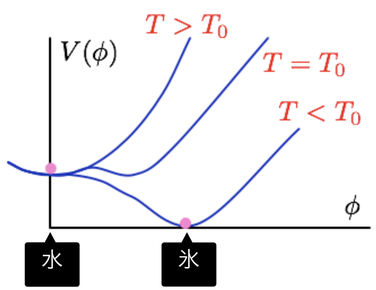
図 4.8　ぶつかると凍る過冷却の風

前回のミニッツペーパーから

相転移は同時に一様に生じるわけではない

冷蔵庫にいれていたペットボトルの水を出すと，一瞬で凍った．

＝　過冷却現象



横軸 φ は，状態を表す変数
縦軸 V(φ) は，エネルギー．
（下へ行くほど安定な坂道）



Topic　過冷却と樹氷

水が凍ったり，沸騰したりするきっかけは，不純物の混入による．精製水をゆっくりと −5℃ の冷蔵庫で凍らせようとしても，液体のまま（**過冷却**状態）であり，外気に触れた瞬間に凍りつくことになる．雪国などでみられる樹氷は，過冷却状態の水滴が木にぶつかって，一瞬で凍ることが一つの理由だという．



図 4.8　ぶつかると凍る過冷却の風

39

よく、ネットで、ペットボトルで過冷却を起こそうとして失敗しているところをよく見かけますが、どうしたら絶対成功できますか？

- 過冷却現象を一度やってみたことがあるのですが、うまくできませんでした。また今度再チャレンジしてみようと思います。
- 11次元，超ひも理論，膜宇宙論の理解がとても難しかったです。

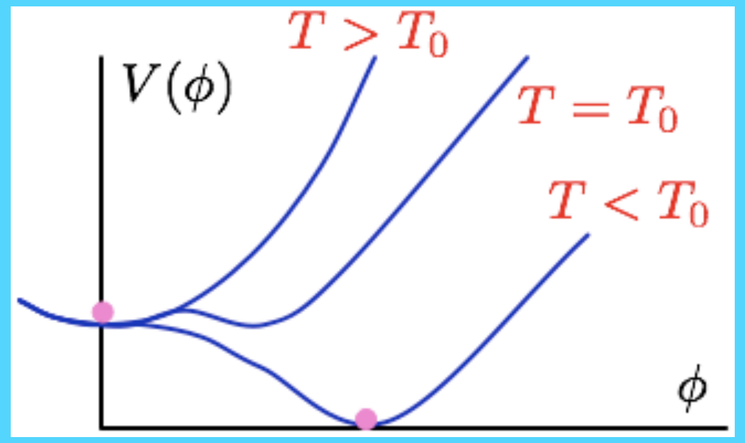
ゆっくりと衝撃を与えずに冷やす
0度以下まで冷やす

成功した秘訣は次の2つと思います．

＊　安い冷蔵庫だったので，室温より低くしようと頑張る冷蔵庫だった．室温が0度近いとそれより低くしようと頑張ってくれた．

＊　一週間冷蔵庫を開けなかった．

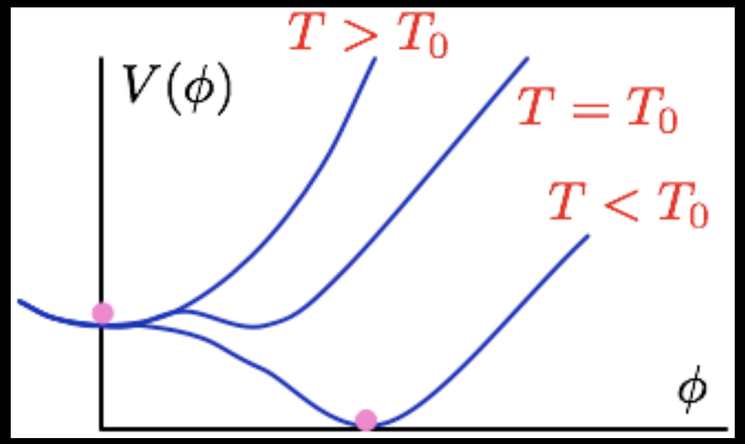
インフレーション宇宙モデル



偽真空　　真の真空

インフレーション膨張

インフレーションは
偽真空の泡の衝突で終わる.



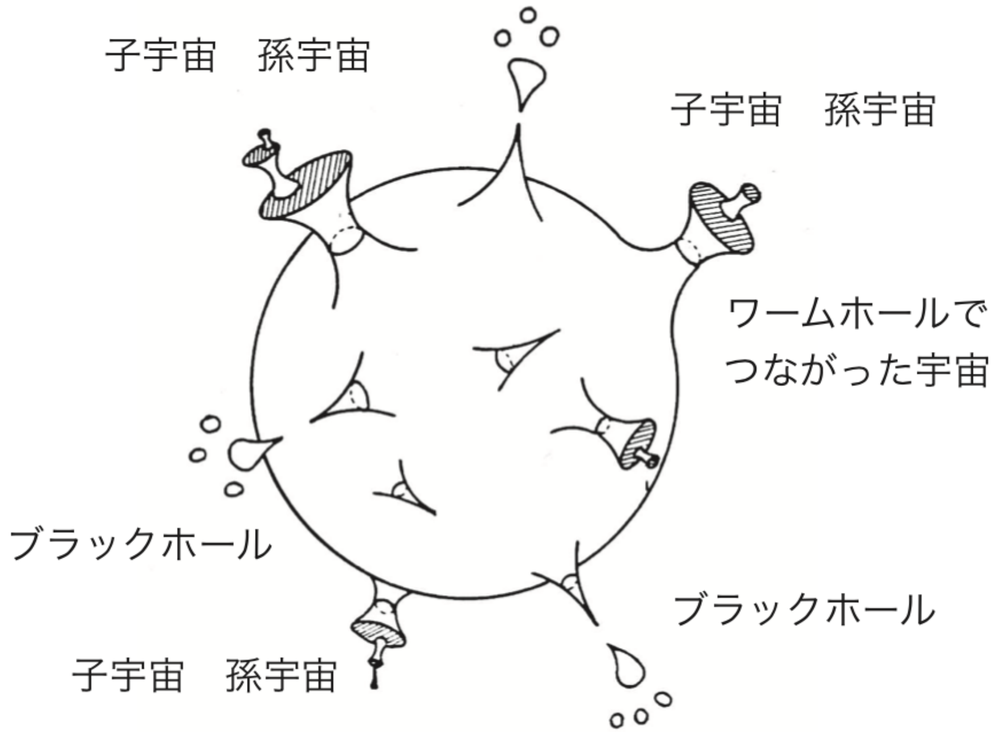
偽真空

超高温超高密度の
ビッグバンのはじまり

教科書 p173

インフレーション宇宙モデル

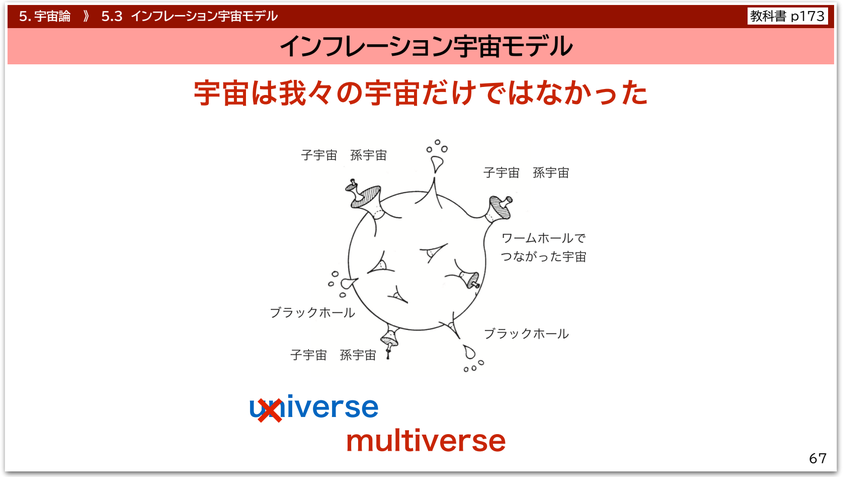
宇宙は我々の宇宙だけではなかった



~~universe~~

multiverse

前回のミニッツペーパーから



宇宙は1つだけではない というのは、観測できないけれど そうであるだろうと考えられるのは、話をきいて たしかにと納得しました。

「宇宙は一つではない」という可能性に触れ、
私たちの存在が無数の法則がある宇宙の一つにすぎないかも しれないと初めて考えさせられ面白いと感じました。

③ 隣の宇宙とぶつからないのか疑問に感じた。
隣の宇宙とぶつかったら、熱が発生してそこから
新たな別の宇宙が誕生することはあるのか気になった。

別の宇宙の確実な存在を自分が死ぬ前に知ることが
できたらいいなと思いました。

宇宙が一つではない可能性があると考えると、平行世界、もう一つの地球、宇宙人の生息する星など
今まで「SF」として扱われてきたものが現実のものとして発表されるときもいつか来るのかもしれないと
期待してしまいます。

前回のミニッツペーパーから

【13-2】「宇宙は1つではない.」 証拠はないし, 観測できる可能性もない.
しかし, 科学者が, そう信じる理由は？

◎ 偽真空のようなものが他に存在していても不思議ではないから. 相転移が場所によって違うことがおこることがあるように.

◎ 宇宙はマルチバースだと考える方が自然だから

◎ そう考えることが自然だった。何では理解できてない(私が)

◎ インフレーション理論の予測や物理定数の微調整問題や量子力学や弦理論の示唆などが考えられるから。
(宇宙が1つしかないと仮定するよりも多元宇宙仮説を採用したほうが理論的に無理がないと考えられることもある.)

○ インフレーション宇宙モデルから、宇宙は異なる領域で異なる性質を持つ構造を形成する可能性があり、独立した別の宇宙が存在するという考えがあるから。

○ 泡のようにいろいろな宇宙が(同時に)発生する可能性があるから。 ユニバース ⇕ マルチバース

○ 相転移がくり返されたら、親宇宙から子宇宙がうまれる可能性があるから。宇宙初期には量子的なゆらぎがたくさん存在したはずだから。

○ インフレーション宇宙論では、宇宙初期の急激な膨張があり、それが偽真空の泡の衝突で終わると考えられている。そのため泡の衝突が1回ではないと考えられるから.

△ 宇宙が1つしかないとするとこの宇宙の全ての性質を証明することができないから.

△ 宇宙が1つしかなければ宇宙の性質すべての説明が出来ないから

前回のミニッツペーパーから

インフレーション理論は、直接的な証拠がまだ見つかっていないので、今後のCMB観測や理論の発展によって、どこまで検証できるのかに興味を持った。

インフレーション理論が観測的にどこまで検証されているのか知りたいです。

【天文】

インフレーション宇宙の証拠を発見？　教科書 p174



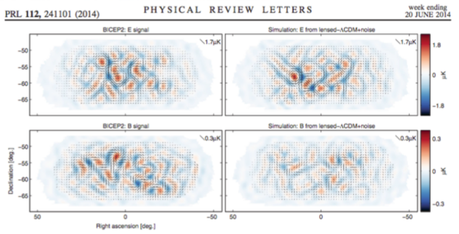


FIG. 3 (color). Left: BICEP2 apodized E-mode and B-mode maps filtered to $50 < \ell < 120$. Right: The equivalent maps for the first of the lensed-ΛCDM + noise simulations. The color scale displays the E-mode scalar and B-mode pseudoscalar patterns while the lines display the equivalent magnitude and orientation of linear polarization. Note that excess B mode is detected over lensing+noise with high signal-to-noise ratio in the map ($s/n > 2$ per map mode at $\ell \approx 70$). (Also note that the E-mode and B-mode maps use different color and length scales.)

図 5.15: 〔左〕BICEP2 望遠鏡．〔右〕BICEP2 グループが発表した偏光データとシミュレーション結果の比較．上が『E モード』下が『B モード』．[2]

*11 BICEP は，Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization の略で，南極点近くのアムンゼン - スコット基地に設置された望遠鏡を用いて，宇宙背景輻射の偏光観測を行うプロジェクト．望遠鏡が 2 代目のため，2 がついている．

【天文】

インフレーション宇宙の証拠を発見？　教科書 p174

■インフレーション宇宙の証拠発見？

2014 年 3 月 17 日，カリフォルニア工科大学のチームによって「宇宙背景輻射の観測によって，インフレーション理論の直接的な証拠を発見」とした発表があった．南極に設置した BICEP2 望遠鏡*11が，重力波特有の『B モード』(図 5.14) と呼ばれる偏光の存在を約 1 度角スケールで発見した，というものだ．

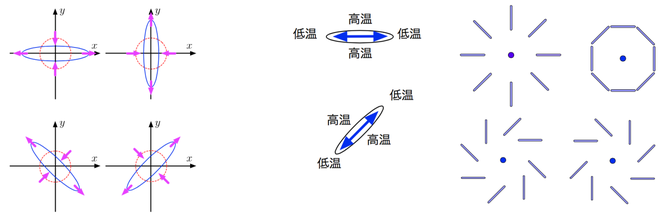


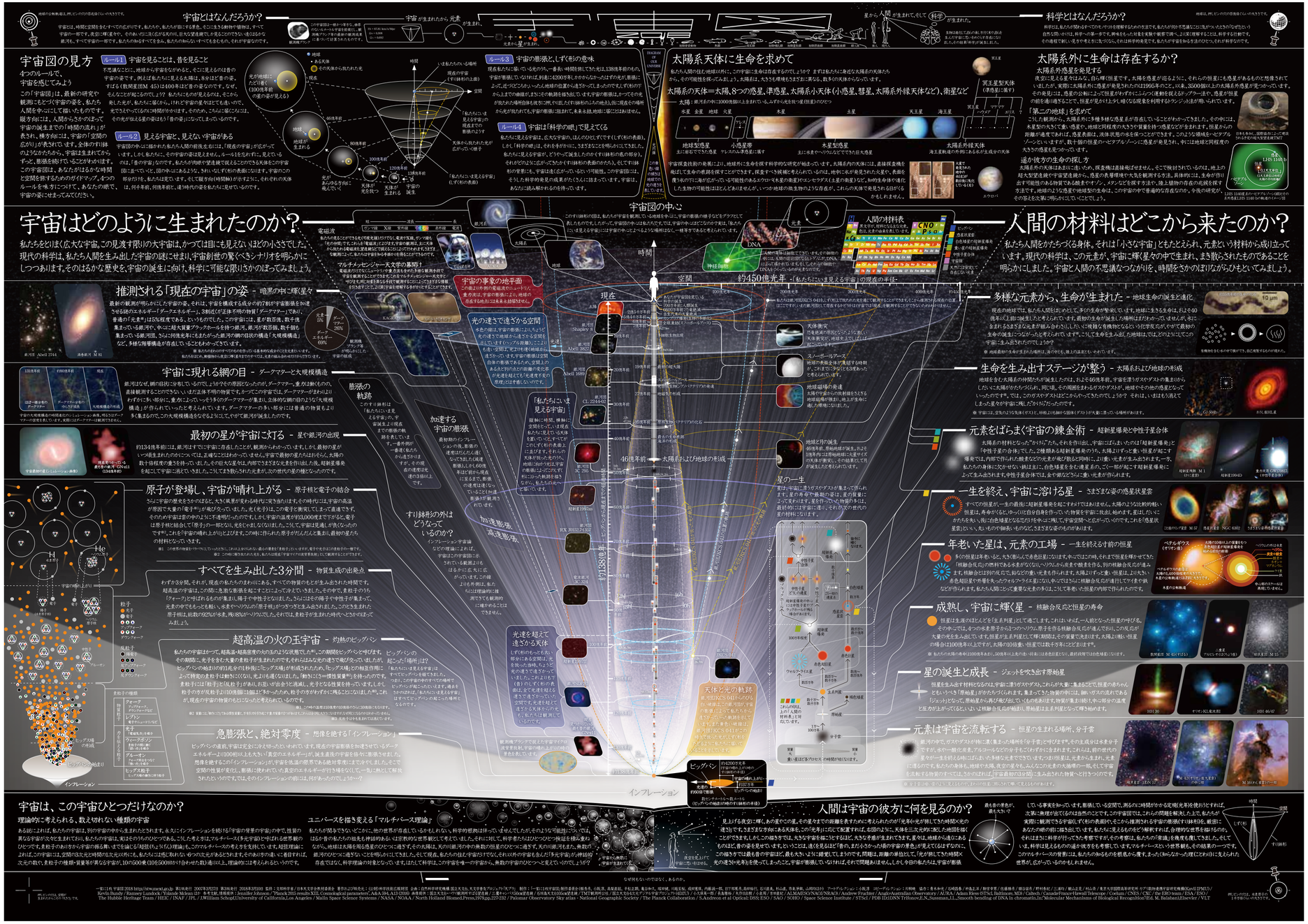
図 5.14: 〔左〕重力波の振動モード．紙面に垂直に波が進んでいるときに，空間を歪ませる方向が 2 つ存在する．〔中〕空間に温度ゆらぎがあれば，時空の振動方向もゆがむ．〔右〕宇宙背景輻射の観測結果に予想される『E モード』(上) と『B モード』(下)．

いままでの宇宙のあらゆる観測で，インフレーション膨張があったと考えることは矛盾しない．　consistent

（具体的なモデルは未確定だが）

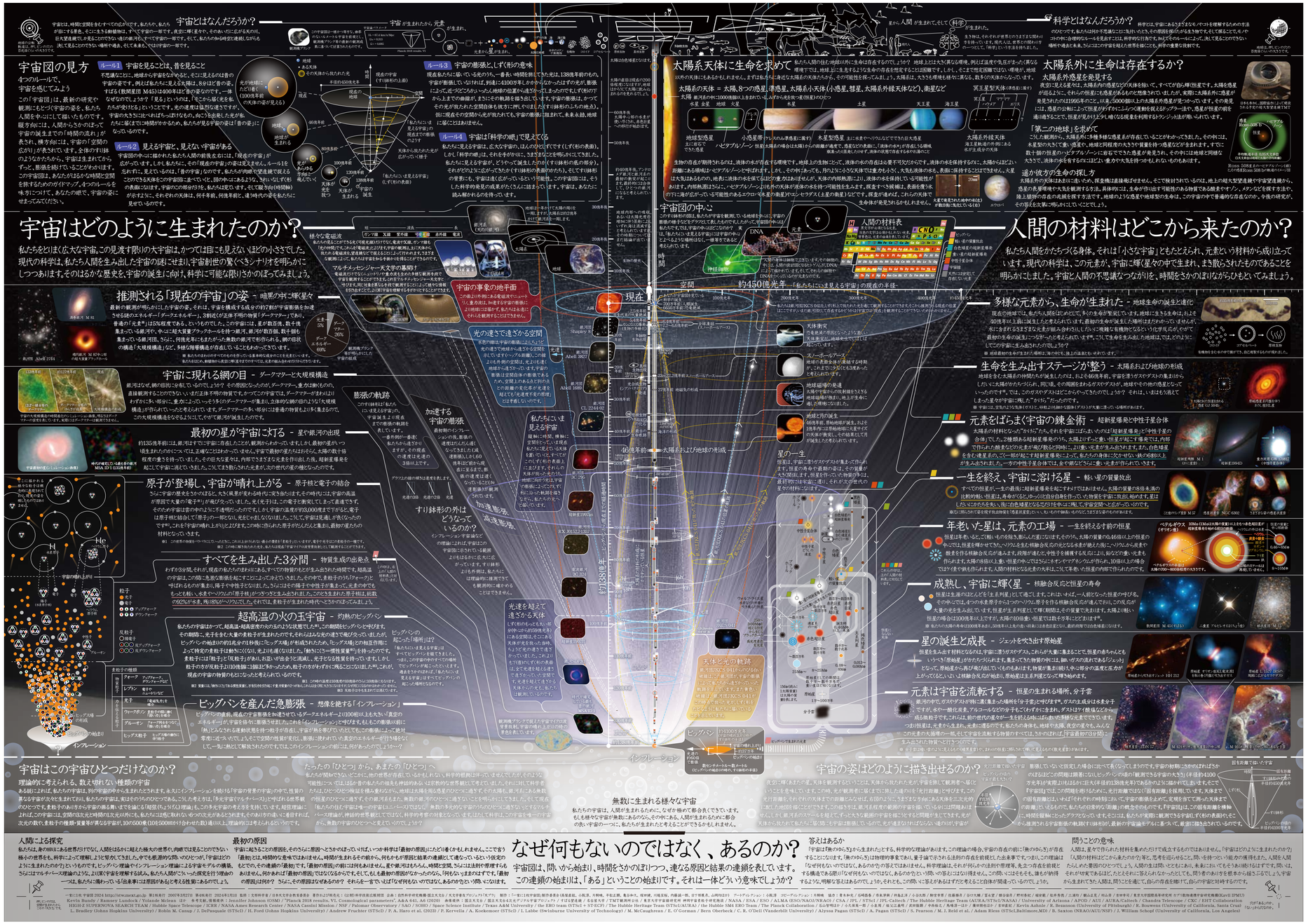
宇宙マイクロ波背景ゆらぎ（CMB）の統計解析で，Bモードと呼ばれるゆらぎが発見されれば，

インフレーション膨張の直接的証拠になる．　evidence?



http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu2018/

2018 version



文部科学省　一家に一枚　宇宙図 2024

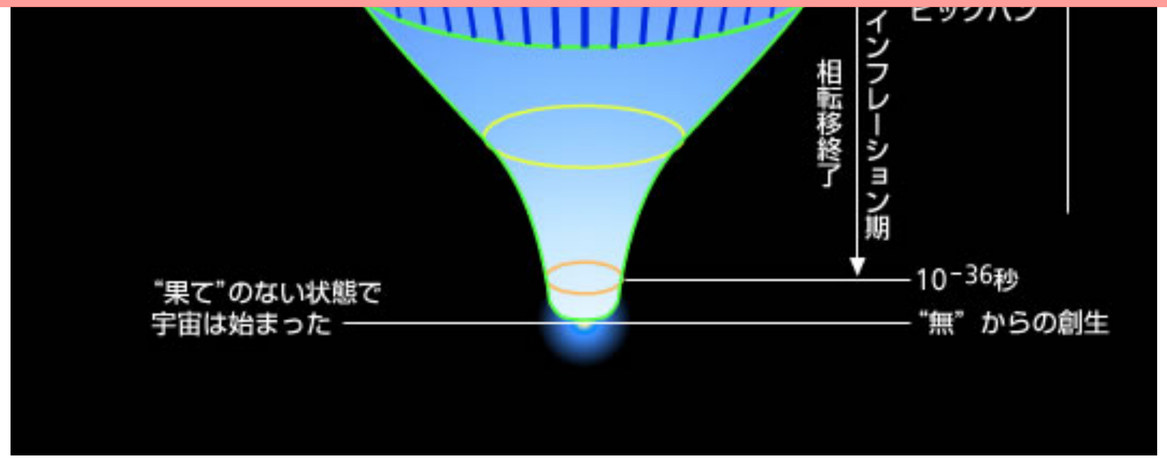
宇宙の熱史

表 5.2 宇宙の歴史.

時刻 t	大きさ	温度 T	赤方偏移 z	できごと
0	0	∞	–	宇宙誕生.
(プランク時間)			–	量子ゆらぎの終了，インフレーション開始.
10^{-44} 秒	0.01 mm	10^{32} K	10^{32}	重力が発生.
10^{-36} 秒	1 cm	10^{28} K	10^{28}	強い核力が発生．バリオン数が発生.
10^{-11} 秒	100 AU	10^{15} K	10^{15}	弱い相互作用と電磁力が分離．電子が誕生.
10^{-6} 秒		10^{13} K	10^{13}	陽子・反陽子の対消滅.
10^{-4} 秒		10^{12} K	10^{12}	中間子が対消滅．クォークがハドロンになる.
10 秒		3×10^{9} K		電子・陽電子が対消滅して光になる.
100 秒	1000 光年	10^{9} K	10^{9}	元素合成開始．重水素・ヘリウム・リチウムなど.
1 万年				放射の時代の終わり．物質の時代の始まり．〔再結合時代〕
38 万年	1 億光年	3000 K	1090	陽子と電子が結合．水素原子ができる．宇宙の晴れ上がり.
2 億年			20	最初の天体形成．宇宙の再電離.
10 億年				クェーサー形成.
30 億年				銀河ができる.
90 億年				太陽と地球の誕生.
138 億年	480 億光年	2.7 K	0	現在

時空は拡大　温度は低下

宇宙の熱史（1）時空の誕生



宇宙は「無」から生まれた.

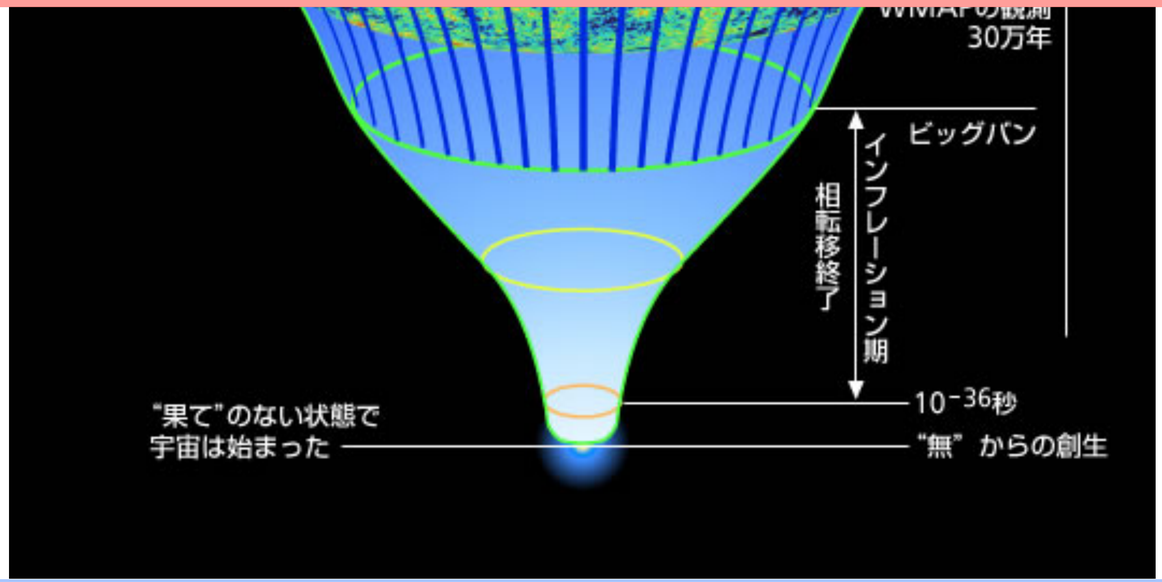
「無」とは, 物質も空間も, 時間さえもない状態.

しかし「無」では, ごく小さな宇宙が生成消滅を繰り返す.
そのひとつが何らかの原因で消えずに成長したのが, 私たちの宇宙.

生まれたての宇宙では, 時間＋空間 は11次元. なんらかのメカニズムで, やがて余分な次元が小さくなり, 空間の3次元と時間の1次元だけが残った.（という説が主流）.

教科書 p165-166

宇宙の熱史（2）時空の急膨張



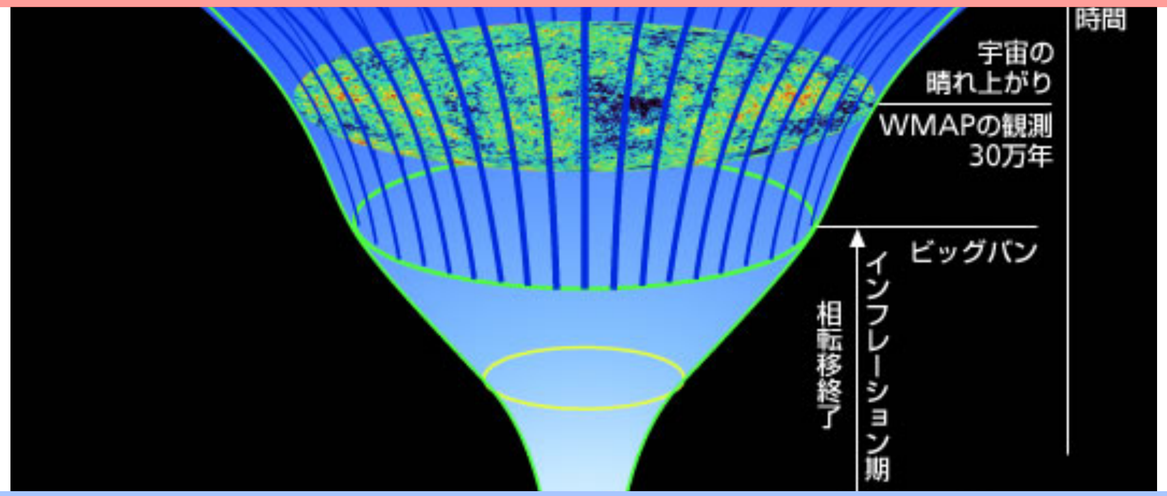
真空のエネルギーで宇宙はインフレーション膨張.

宇宙誕生から $10^{-36} \sim 10^{-34}[\mathrm{s}]$ **に，** 10^{78} **倍に膨張した．(数cmになった)**

1秒の1000兆分の１の
1000兆分の１の
1万分の１

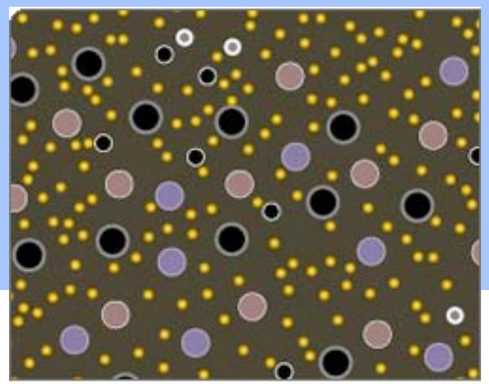
ウイルスが一瞬にして
銀河団以上の大きさになるほど

宇宙の熱史（3）高温・高密度のビッグバン



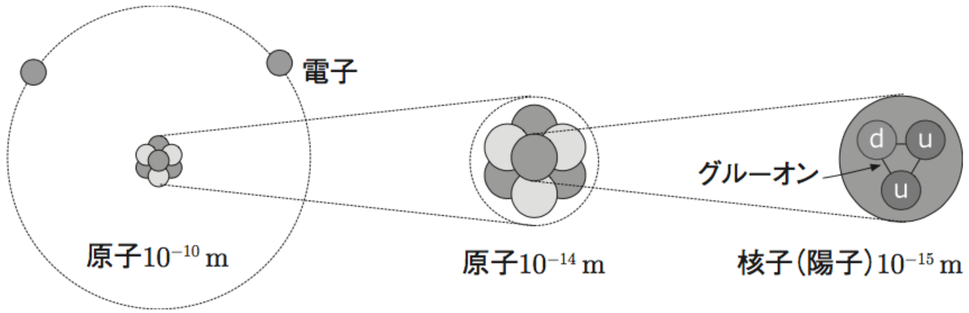
偽真空の泡の衝突でインフレーション膨張が終了．
ビッグバンの始まり．

泡の運動エネルギーが熱エネルギーに転化．
超高温・超高密度の宇宙が誕生する．



大量の素粒子が生まれる．
「粒子」と「反粒子」が生まれ，結合すると光となって消える．
しかし，粒子よりも反粒子の方が10億個に1個ほど少なかった．

究極の素粒子：クォークへ



「どうして，原子核はくっついていられるのだろうか？」

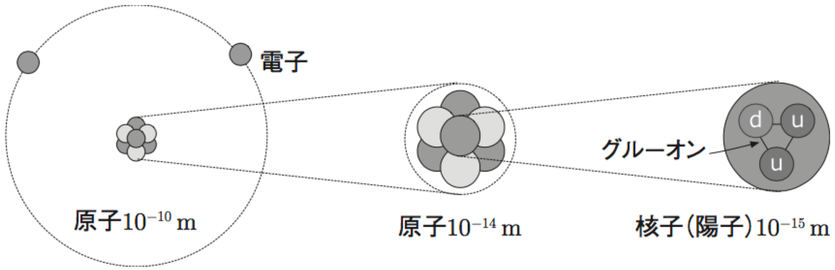
陽子と中性子が中間子を交換していると考えよう．(1935年)．「**中間子論**」

現在では，強い相互作用(強い力)で結びついていると考える．



湯川秀樹 (1907-81)

究極の素粒子：クォーク

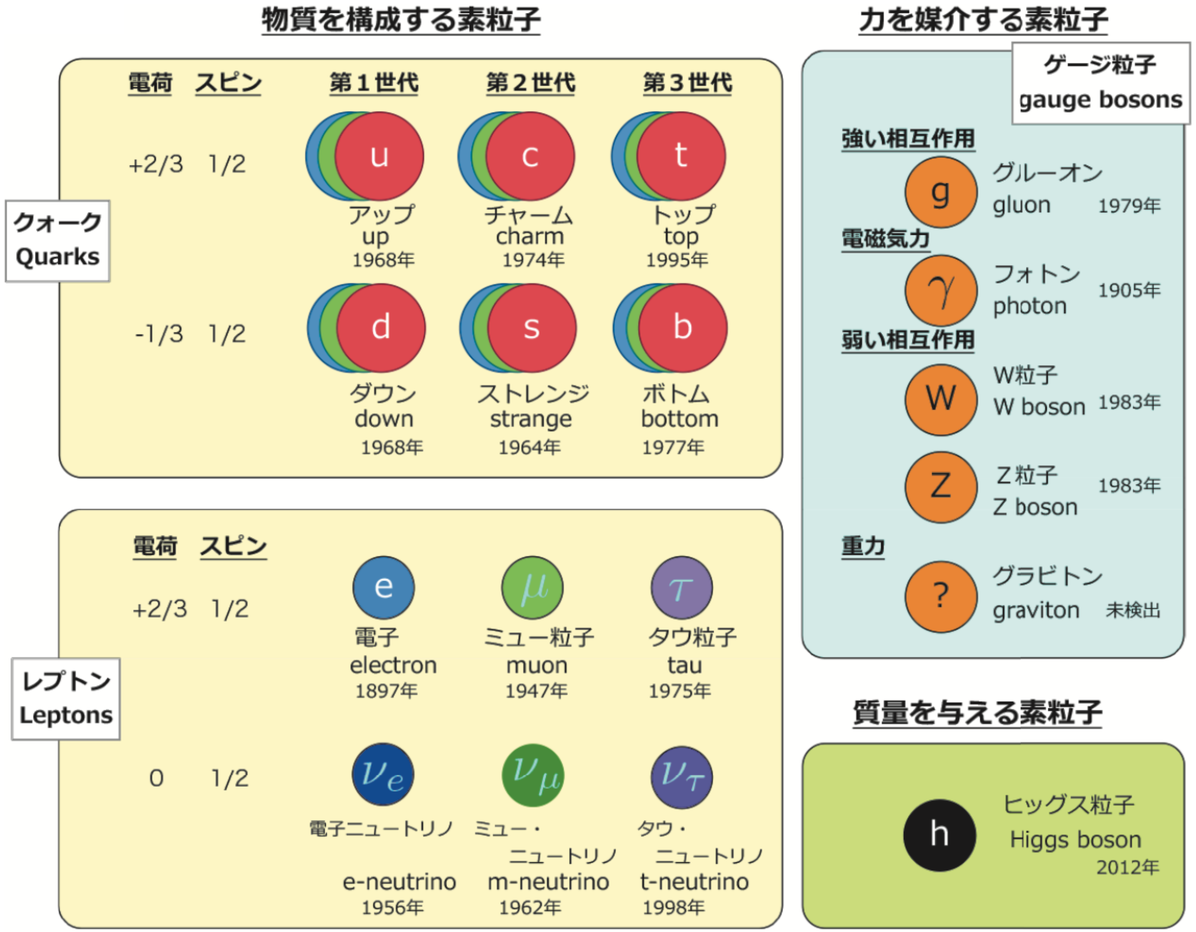


クォーク（quark）は 3 個で核子を構成する.

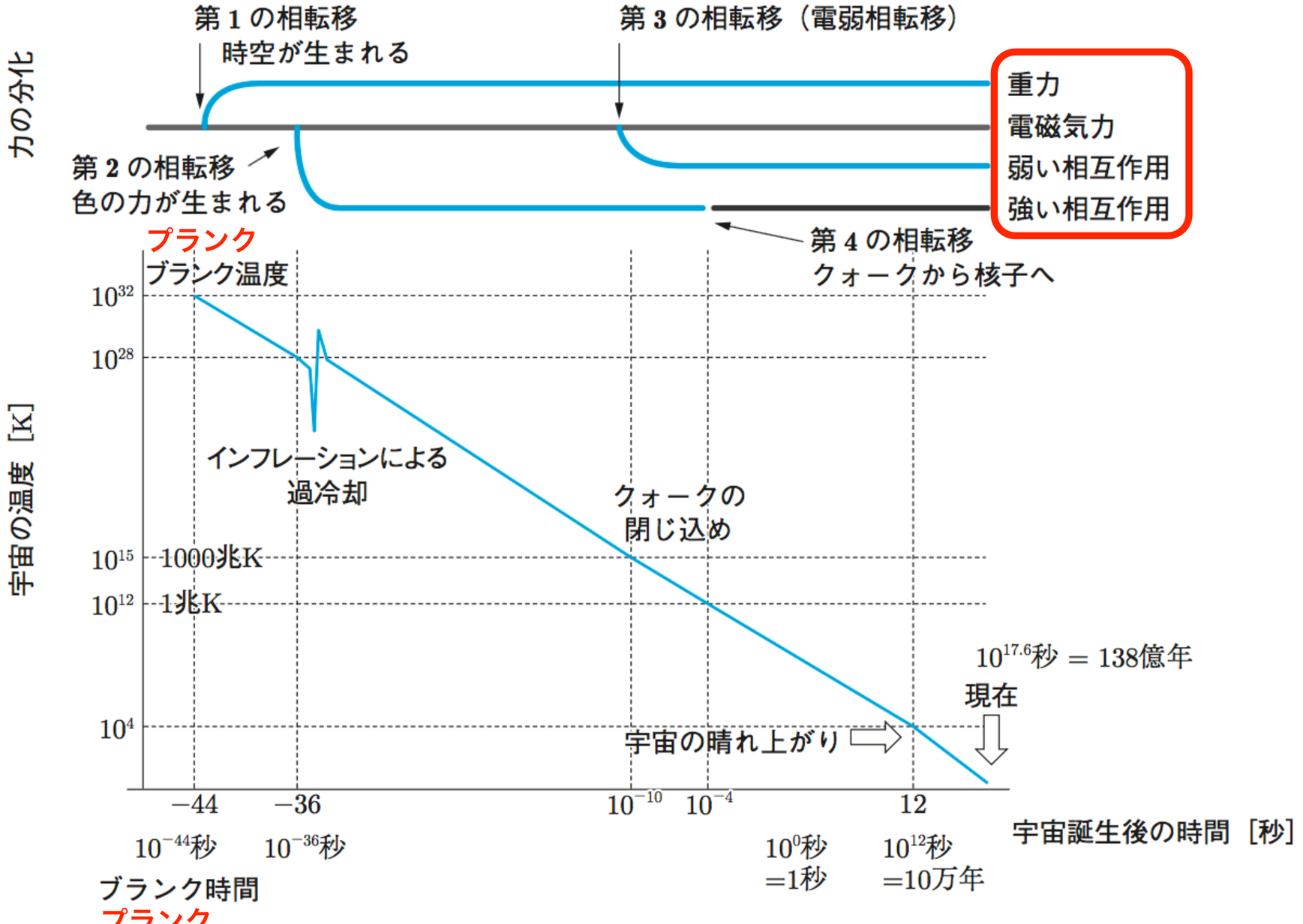
クォーク理論の提唱者ゲルマンはカモの鳴き声にちなんで kwork とする予定だったが, ジョイス（J. Joyce）の小説『フィネガンズ・ウェイク』(Finnegans Wake) に, “Three quarks for Muster Mark!”（マーク大将のために三唱せよ, くっくっクオーク）とあることからスペルを変えた.



M. Gell-Mann, 1929–2009

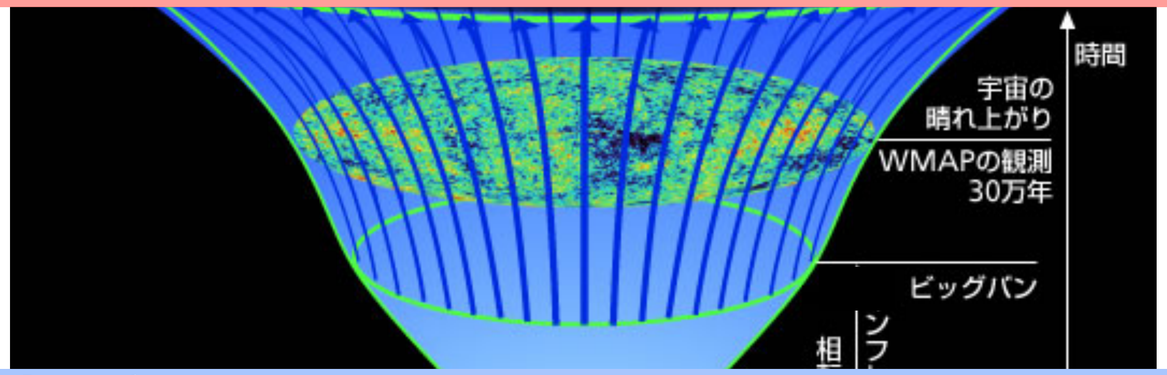


４つの力


第 1 の相転移
時空が生まれる
第 3 の相転移（電弱相転移）
重力
電磁気力
弱い相互作用
強い相互作用
第 2 の相転移
色の力が生まれる
第 4 の相転移
クォークから核子へ
力の分化
プランク
プランク温度
10^{32}
10^{28}
インフレーションによる
過冷却
クォークの
閉じ込め
10^{15}
1000兆K
10^{12}
1兆K
10^{4}
宇宙の温度［K］
$10^{17.6}$秒 ＝ 138億年
現在
宇宙の晴れ上がり
−44
−36
10^{-10}
10^{-4}
12
10^{-44}秒
10^{-36}秒
10^{0}秒
＝1秒
10^{12}秒
＝10万年
宇宙誕生後の時間［秒］
ブランク時間
プランク

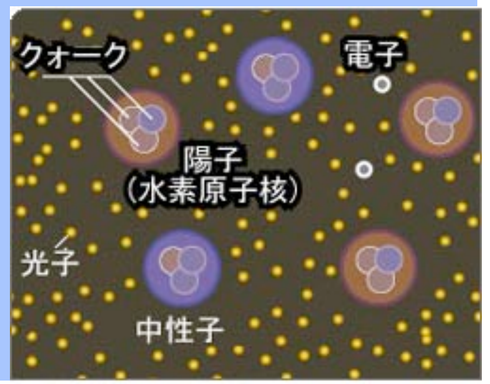
教科書 p165-166

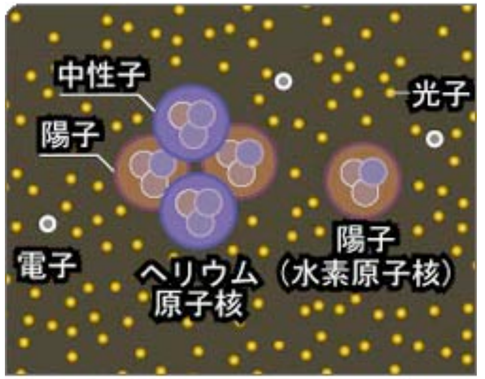
宇宙の熱史（4）はじめの3分間



物質の素ができる.

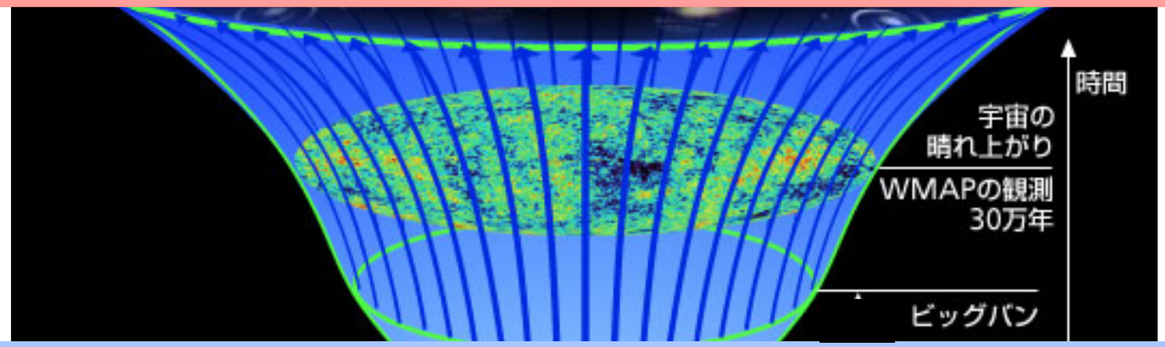
クォークから陽子・中性子・電子へ.
そして, 水素の原子核へ.
核融合でヘリウムの原子核へ.





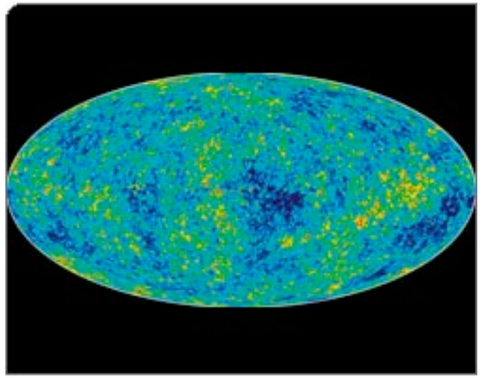
宇宙膨張で温度は下がり, 3分後には核融合は止まる.
水素 92 %, ヘリウム 8% の宇宙になる.

宇宙の熱史（5）宇宙の晴れ上がり



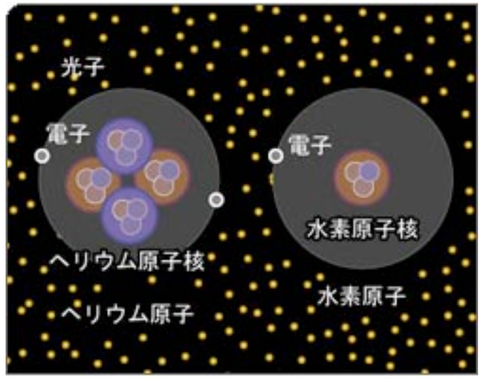
宇宙誕生後38万年. 光が直進できるようになる.

宇宙の温度が 3000K に下がり, 飛び回っていた電子が, すべて原子核へ捕えられる.
電子に邪魔されて直進できなかった光が, そのまま外部へ飛び出す.

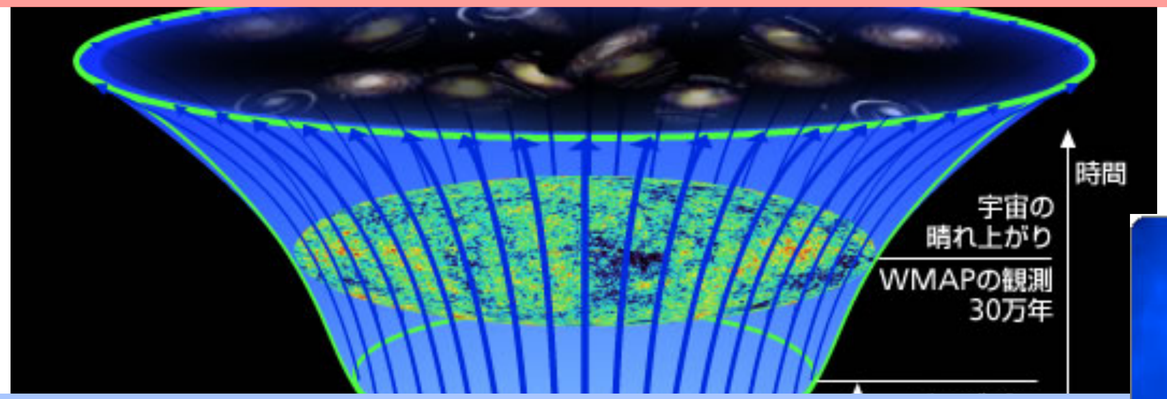


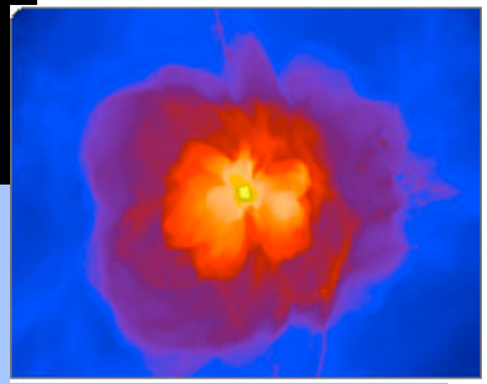
この時の光が, 宇宙背景放射
（光で見える最遠方）

わずかなゆらぎが, 構造形成の種



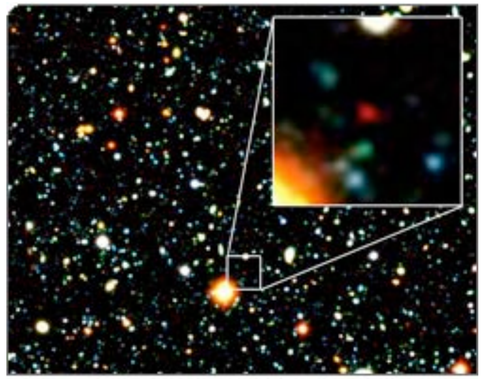
宇宙の熱史（5）星の誕生, 銀河の誕生





第1世代の星ができる.
集まって銀河ができる.

はじめてできた星は, おそらく太陽の数100倍程度の大きさ.
130億年前には銀河ができていたことが観測されている.



この時代の詳しいことはわかっていない.
＝ 宇宙のダークエイジ

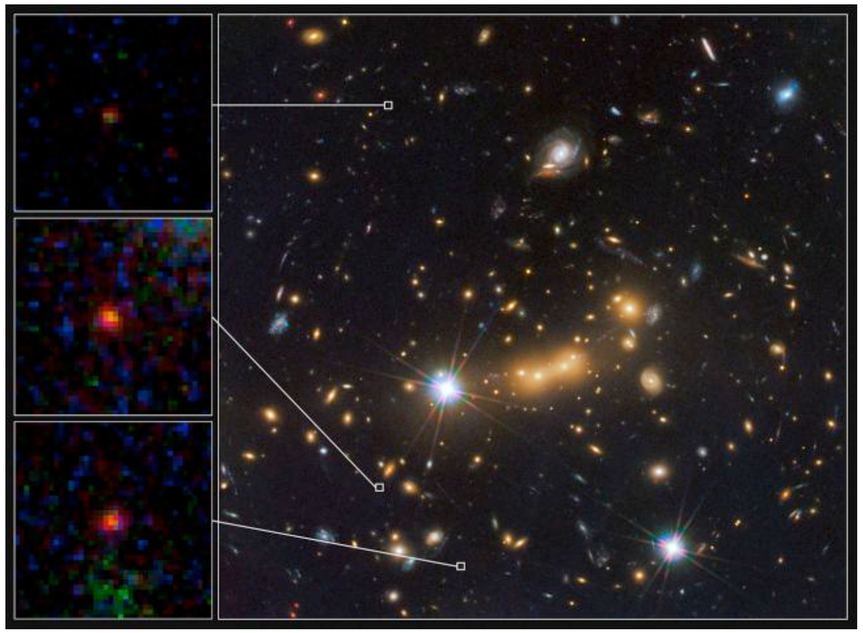
超新星爆発で, 元素を合成してまき散らす.

宇宙がどこまで観測可能なのかはわりつこになった

最遠方の銀河を発見 133億光年先

2012/11/19

Hubble helps find candidate for most distant object in the Universe yet observed



大質量銀河団の重力を通して見える遠方銀河（左枠）。重力レンズ効果で拡大された3つの像が見える。クリックで拡大（提供：NASA, ESA, and M. Postman and D. Coe (Space Telescope Science Institute), and the CLASH team）

Hubble宇宙望遠鏡と赤外線天文衛星 Spitzerによって，これまで知られている中で最も遠い，133億光年かなた（宇宙誕生後わずか4億2000万年後）と見られる銀河が発見された．

CLASHプロジェクト（ハッブルによる銀河団拡大観測および超新星サーベイ）で発見されたこの銀河は，これだけ遠いと，本来なら非常に暗く観測することができないが，この銀河の80億光年手前に大質量銀河団があり，その強い重力によって光が屈折し拡大された3つの像が観測された．

MACS0647-JD　と名付けられたこの銀河の幅はわずか600光年未満で（天の川銀河は直径約15万光年），質量も天の川銀河の星を全て合わせたものの0.1%から1%程度に過ぎない．銀河の初期段階にあると見られる．

銀河までの距離を確実に知るためには，光を細かい波長に分離して「分光赤色偏移」を測定する方法があるが，MACS0647-JDは非常に遠く暗いため，精度は落ちるがより暗い天体に適用できる「測光赤色偏移」を測定する方法が採られている．そのためこの天体の距離は「参考記録」ではあるが，この小さな銀河が最遠方天体の記録ホルダーであることは，どの観測結果からも示されている．

注：「測光赤色偏移」　測光からスペクトルエネルギー分布（SED）を求め，既知の銀河の中で最も一致するSEDの赤方偏移の値を採用する距離推定方法．

jp.arXiv.org > astro-ph > arXiv:1211.3663

Astrophysics > Cosmology and Extragalactic Astrophysics

CLASH: Three Strongly Lensed Images of a Candidate z ~ 11 Galaxy

Dan Coe, Adi Zitrin, Mauricio Carrasco, Xinwen Shu, Wei Zheng, Marc Postman, Larry Bradley, Anton Koekemoer, Rychard Bouwens, Tom Broadhurst, Anna Monna, Ole Host, Leonidas A. Moustakas, Holland Ford, John Moustakas, Arjen van der Wel, Megan Donahue, Steven A. Rodney, Narciso Benitez, Stephanie Jouvel, Stella Seitz, Daniel D. Kelson, Piero Rosati

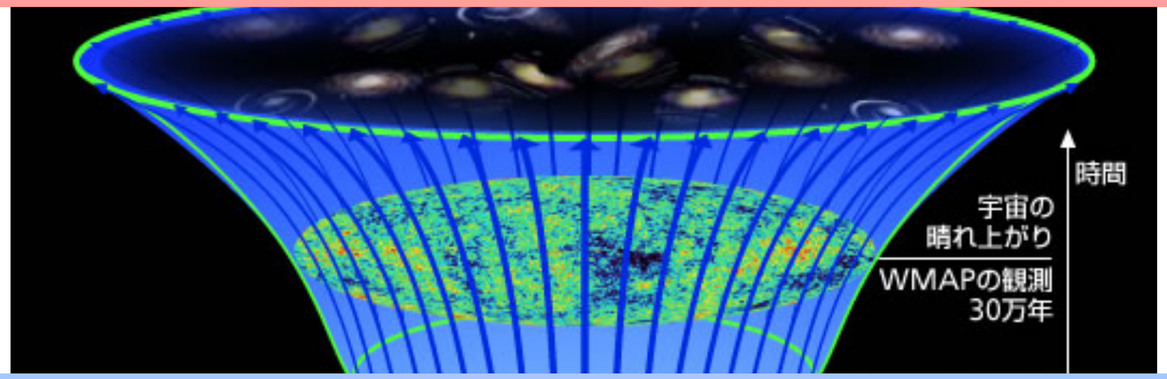
(Submitted on 15 Nov 2012)

We present a candidate for the most distant galaxy known to date with a photometric redshift z = 10.7 +0.6 / −0.4 (95% confidence limits; with z < 9.5 galaxies of known types ruled out at 7.2-sigma). This J-dropout Lyman Break Galaxy, named MACS0647-JD, was discovered as part of the Cluster Lensing and Supernova survey with Hubble (CLASH). We observe three magnified images of this galaxy due to strong gravitational lensing by the galaxy cluster MACSJ0647.7+7015 at z = 0.591. The images are magnified by factors of ~8, 7, and 2, with the brighter two observed at ~26th magnitude AB (~0.15 uJy) in the WFC3/IR F160W filter (~1.4 – 1.7 um) where they are detected at >~ 12-sigma. All three images are also confidently detected at >~ 6-sigma in F140W (~1.2 – 1.6 um), dropping out of detection from 15 lower wavelength HST filters (~0.2 – 1.4 um), and lacking bright detections in Spitzer/IRAC 3.6um and 4.5um imaging (~3.2 – 5.0 um). We rule out a broad range of possible lower redshift interlopers, including some previously published as high redshift candidates. Our high redshift conclusion is more conservative than if we had neglected a Bayesian photometric redshift prior. Given CLASH observations of 17 high mass clusters to date, our discoveries of MACS0647-JD at z ~ 10.8 and MACS1149-JD1 at z ~ 9.6 are consistent with a lensed luminosity function extrapolated from lower redshifts. This would suggest that low luminosity galaxies could have reionized the universe. However given the significant uncertainties based on only two galaxies, we cannot yet rule out the sharp drop off in number counts at z >~ 10 suggested by field searches.

Comments: Accepted for publication in the Astrophysical Journal. 23 pages, 18 figures

http://www.spacetelescope.org/news/heic1217/
http://www.astroarts.co.jp/news/2012/11/19clash/index-j.shtml

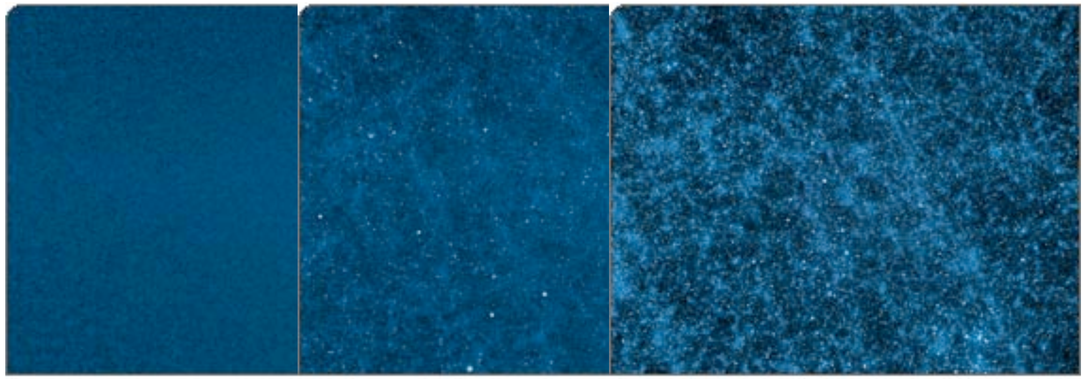
宇宙の熱史（6）大規模構造の形成



重力による構造形成が進み，現在の宇宙へ．

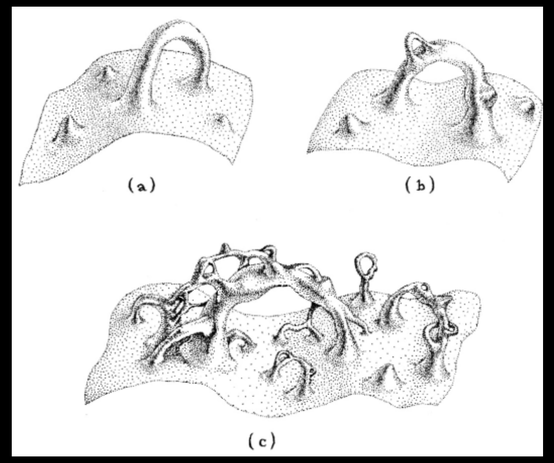
光らない物質（ダークマター）が存在しないと計算が合わない．

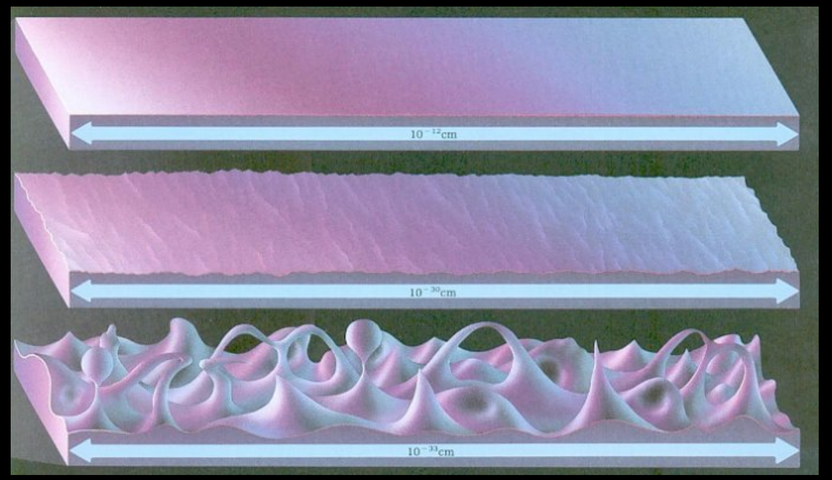
どうやら，加速膨張しているらしい．（ダークエネルギー）が存在しないと計算が合わない．





- ビッグバン宇宙の始まり
  ＝インフレーション膨張した
  偽の真空泡の衝突
- その前は？





混沌とした量子時空の世界？ or else?

- **超ひも理論**（超弦理論 superstring theory）
  ＝11次元時空で構成された量子重力理論の候補

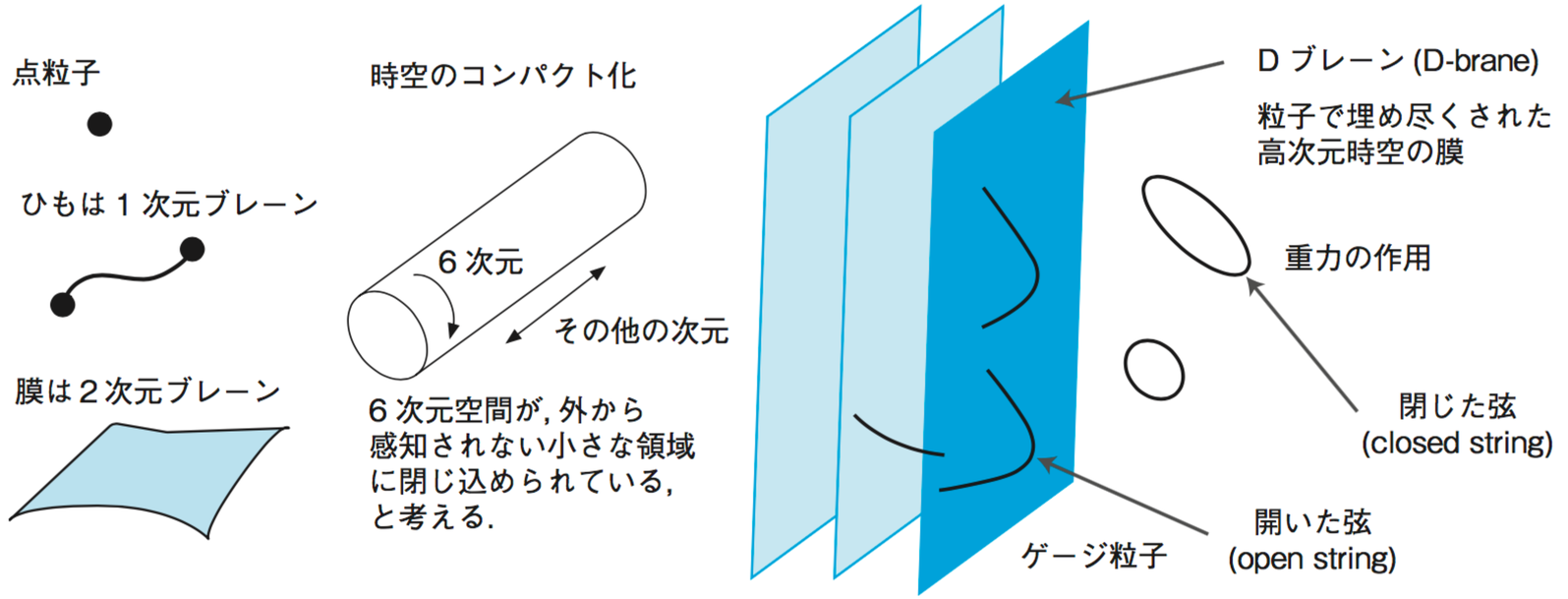


図 5.30　超弦理論に登場するさまざまな概念．弦（ひも）は，さまざまな振動モードを持ち得るが，その振動モードの違いが，素粒子の種類を表している，と考える理論である．数学的には 10 次元空間で弦を考えることが一番無理なく粒子を表現できる．現実の時空は 4 次元時空なので，余分な 6 次元空間は見えないように小さく閉じ込められている，と考える．1995 年以降，弦（粒子）が多数重ね合った D ブレーン (D-brane) と呼ばれる高次元の膜が，超弦理論の要素としてモデル化された．

10次元空間＋時間＝11次元時空



膜宇宙論（Brane-world cosmology）

私たちは高次元中の4次元時空にtrapされている.
小さなスケールでは高次元かもしれない.

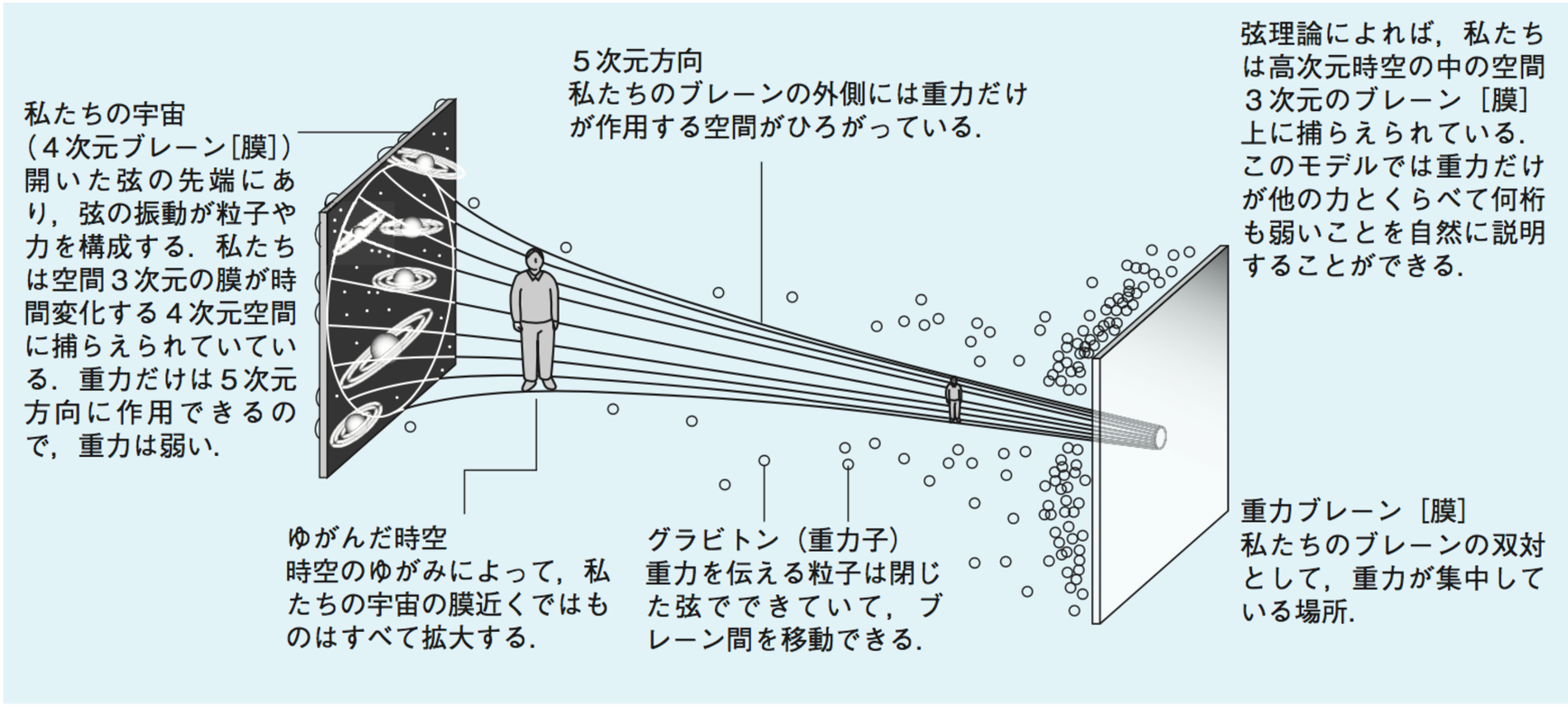
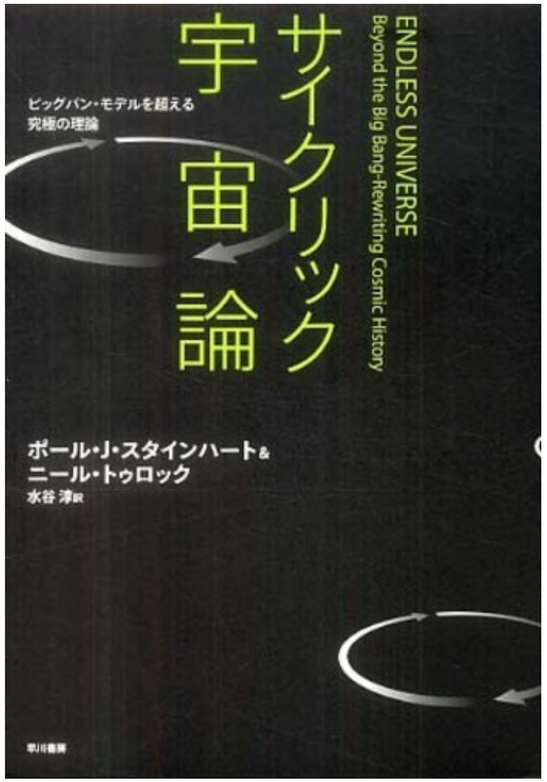
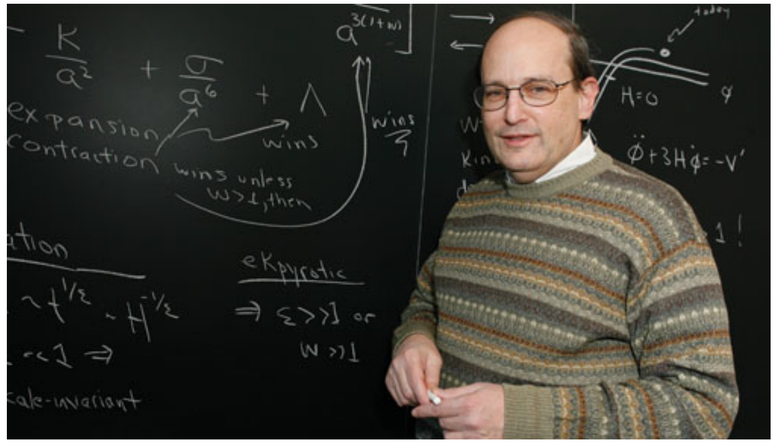


図 5.31 ランドールとサンドラムが提案したブレーンワールド・モデルの１つ．（膜宇宙モデル，1999）

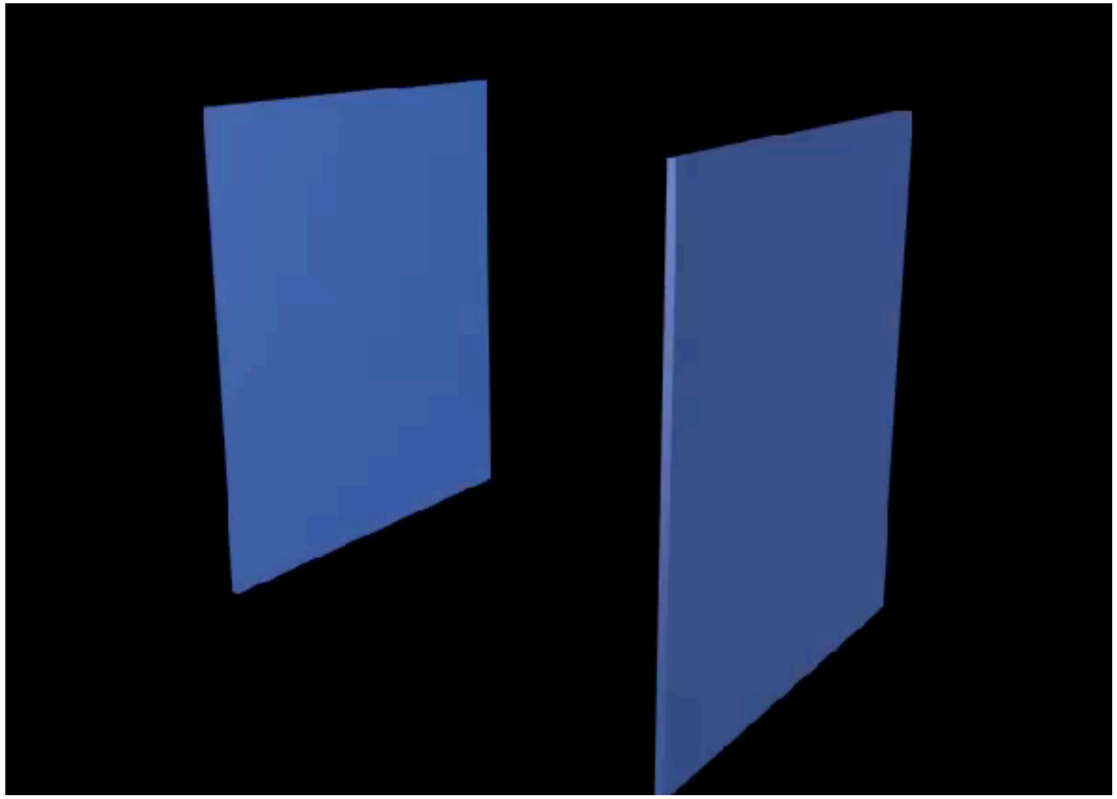
L. Randall & R. Sundrum (1999)

別のアイデア

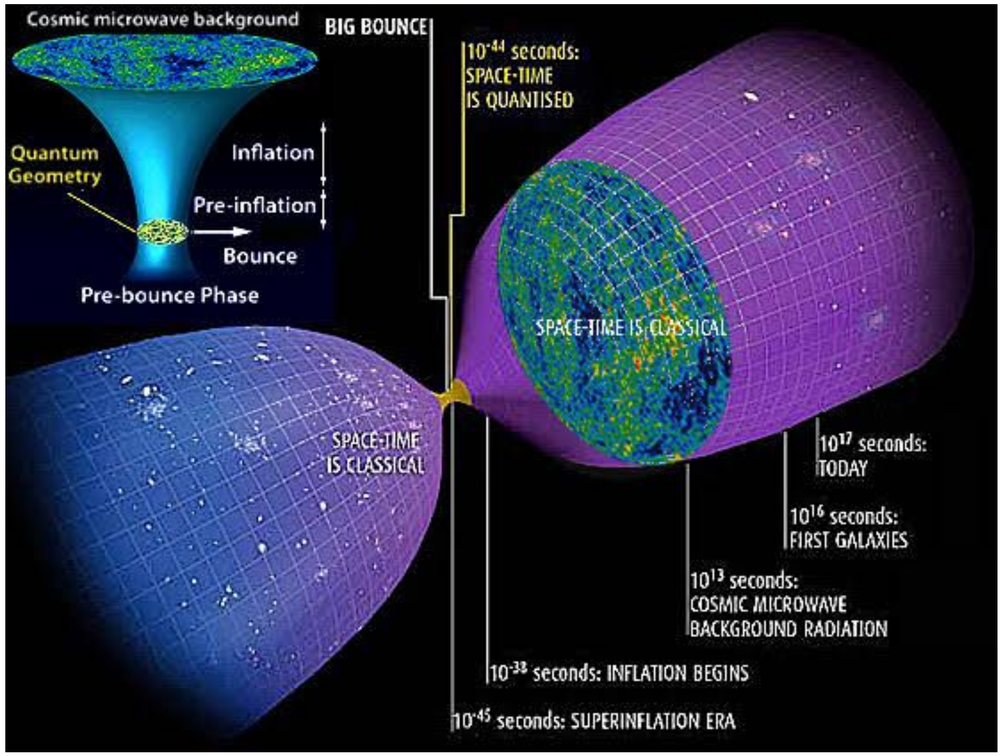




膜宇宙の交差によってビッグバンが生じた



http://www.physics.princeton.edu/~steinh/cycliccosmology.html



The Big Bounce, Signs in the CMB? A Loop Quantum Gravity update



時空を細胞のような単位で考える「ループ量子重力理論」では，宇宙がビッグバウンスすることを予言する．

Abhay Ashtekar

https://www.youtube.com/watch?v=MgwJmWXoWWI

PHYSICAL REVIEW LETTERS **125,** 051302 (2020)

Alleviating the Tension in the Cosmic Microwave Background Using Planck-Scale Physics

Abhay Ashtekar,[1] Brajesh Gupt,[1] Donghui Jeong,[2] and V. Sreenath[3]
[1]*Institute for Gravitation and the Cosmos & Physics Department, Penn State University, University Park, Pennsylvania 16801, USA*
[2]*Institute for Gravitation and the Cosmos & Department of Astronomy and Astrophysics, Penn State University, University Park, Pennsylvania 16801, USA*
[3]*Department of Physics, National Institute of Technology Karnataka, Surathkal 575025, India*

(Received 2 February 2020; revised 19 May 2020; accepted 9 July 2020; published 29 July 2020)

Certain anomalies in the CMB bring out a tension between the six-parameter flat ΛCDM model and the CMB data. We revisit the PLANCK analysis with loop quantum cosmology (LQC) predictions and show that LQC alleviates both the large-scale power anomaly and the tension in the lensing amplitude. These differences arise because, in LQC, the *primordial* power spectrum is scale dependent for small k, with a specific power suppression. We conclude with a prediction of larger optical depth and power suppression in the B-mode polarization power spectrum on large scales.

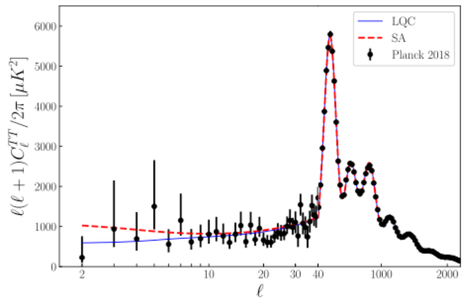


FIG. 2. TT power spectra. The 2018 PLANCK spectrum (black dots with error bars), the LQC [solid (blue) line], and the standard ansatz predictions [dashed (red) line].

TABLE I. Comparison between the standard ansatz and LQC. The mean values of the marginalized PDF for the six cosmological parameters, and values of $S_{1/2}$ calculated using C_ℓ^{TT}.

Parameter	SA	LQC
$\Omega_b h^2$	$0.022\,38 \pm 0.000\,14$	$0.022\,39 \pm 0.000\,15$
$\Omega_c h^2$	0.1200 ± 0.0012	0.1200 ± 0.0012
$100\theta_{MC}$	$1.040\,91 \pm 0.000\,31$	$1.040\,93 \pm 0.000\,31$
τ	0.0542 ± 0.0074	0.0595 ± 0.0079
$\ln(10^{10}A_s)$	3.044 ± 0.014	3.054 ± 0.015
n_s	0.9651 ± 0.0041	0.9643 ± 0.0042
$S_{1/2}$	42 496.5	14 308.05

with the value 6771.7 of $S_{1/2}$ obtained from the full sky map, i.e., using the PLANCK C^{TT} data for all ℓ. The difference between LQC and this PLANCK value is also

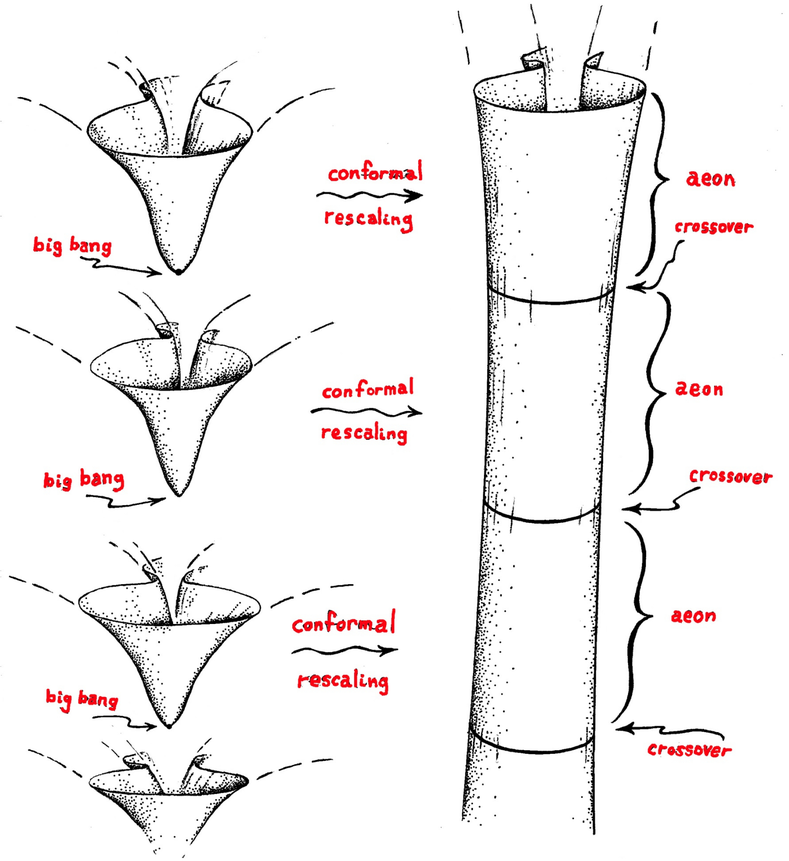
別のアイデア

conformal cyclic cosmology

Roger Penrose - Did the Universe Begin?



https://www.youtube.com/watch?v=OFqjA5ekmoY



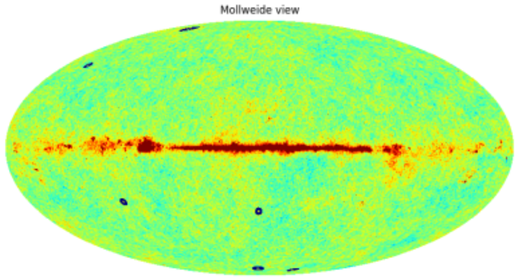
Monthly Notices
of the
ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS **495,** 3403–3408 (2020) doi:10.1093/mnras/staa1343
Advance Access publication 2020 May 18

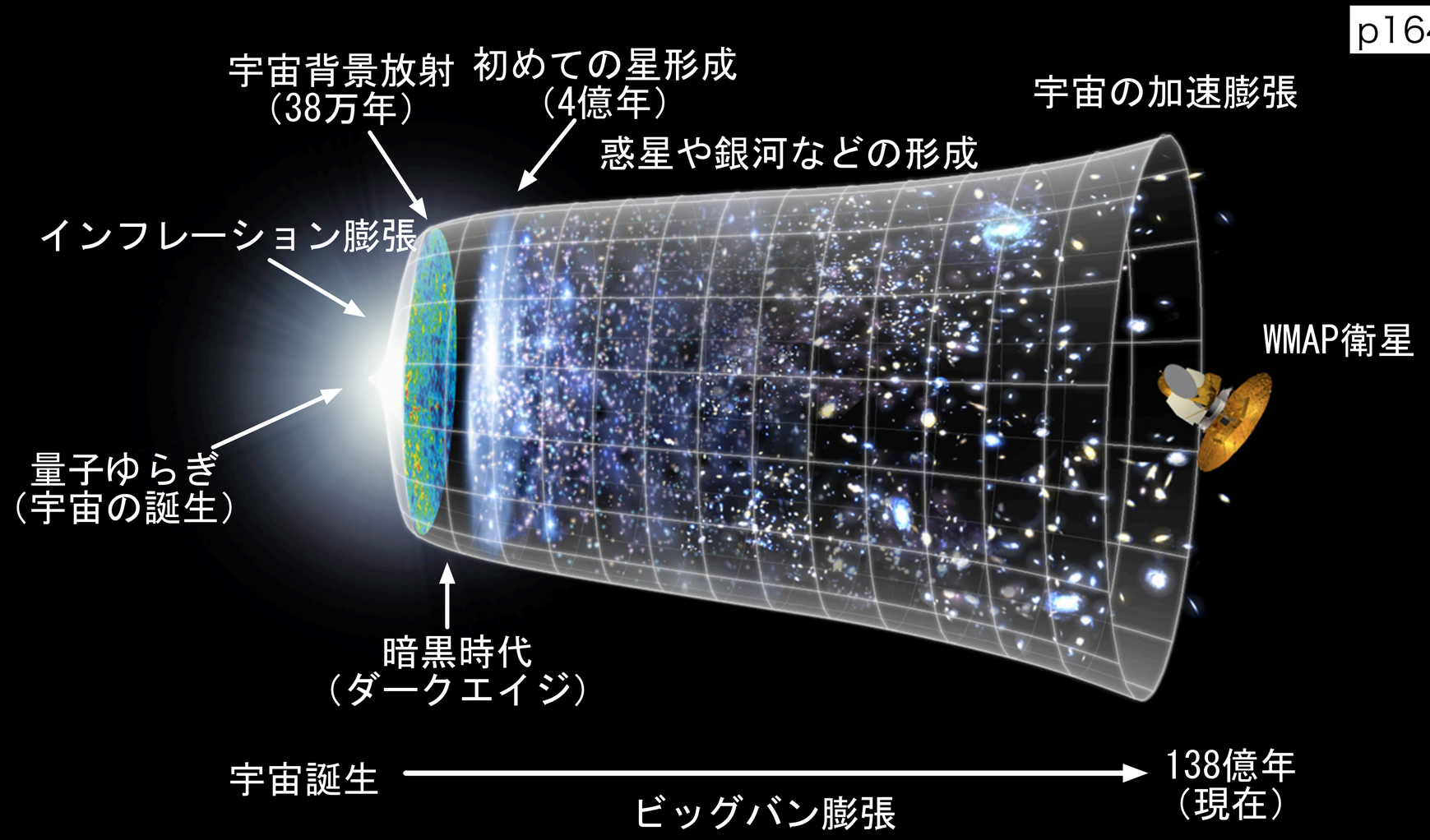
Apparent evidence for Hawking points in the CMB Sky★

Daniel An,[1] Krzysztof A. Meissner,[2] Paweł Nurowski[3]† and Roger Penrose[4]

[1]*Science Department, SUNY Maritime College, 6 Pennyfield Av., Throggs Neck, NY 10465, USA*
[2]*Faculty of Physics, University of Warsaw, Pasteura 5, PL-02-093 Warsaw, Poland*
[3]*Center for Theoretical Physics of PAS, Al. Lotników 32/46, PL-02-688 Warsaw, Poland*
[4]*Mathematical Institute, Oxford University, Radcliffe Observatory Quarter, Woodstock Rd., Oxford OX2 6GG, UK*



https://www.maths.ox.ac.uk/node/36137



未知の問題

ダークエイジ	dark age
ダークマター	dark matter
ダークエネルギー	dark energy

）宇宙関係の話にとにかくダークが多いなと思いました。

ダークマター:見えていない質量



ミッシングマス問題

渦巻銀河の回転速度は,
「光る星の6倍以上の質量が存在する」ことを示す.



Vera C Rubin (1928--2016)

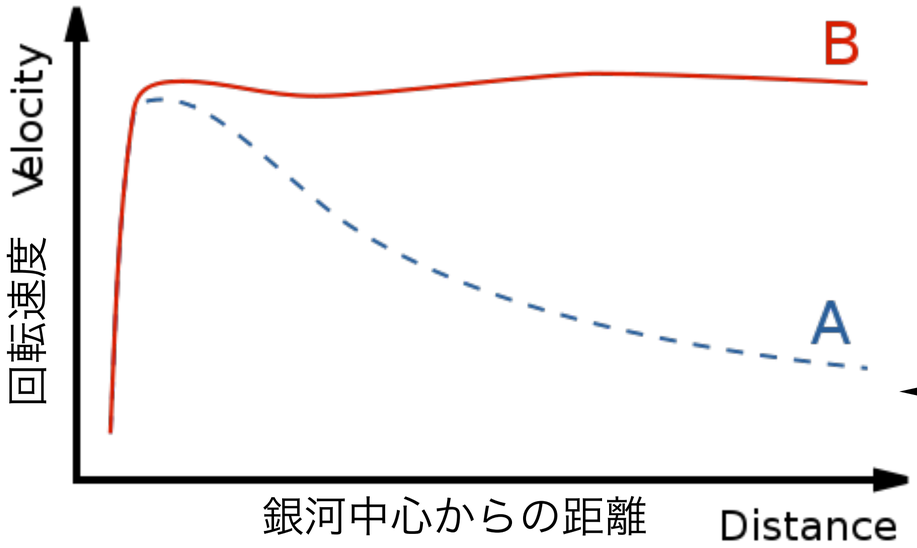
◆Advanced　人工衛星の動きから地球の質量がわかる

ダークマターの存在は，銀河系の星の運動から推測された．その理由はニュートン力学で説明できる．質量 m の人工衛星が地球（質量 M）の万有引力を受けながら，速度 v で半径 r の円運動をしているとき，運動方程式

$$m\frac{v^2}{r} = G\frac{Mm}{r^2} \qquad (5.10)$$

より，$v = \sqrt{GM/r}$ の関係が得られる．つまり，v は人工衛星の質量に無関係で，M と r によってのみ決まる．このことは人工衛星の動きから地球の質量がわかることを意味している．

同じことを銀河系で行ったのが，図 5.33〔右〕の (A) のグラフである．見えている星は中心部分に集中しているのでこのグラフになりそうだが，実際に観測すると (B) のグラフになった．これはダークマターの質量が銀河全体に広がっているため，と考えられている．



Aとなるはずなのに，Bである
見えていない質量があるはず.

重力レンズによるダークマターの検出

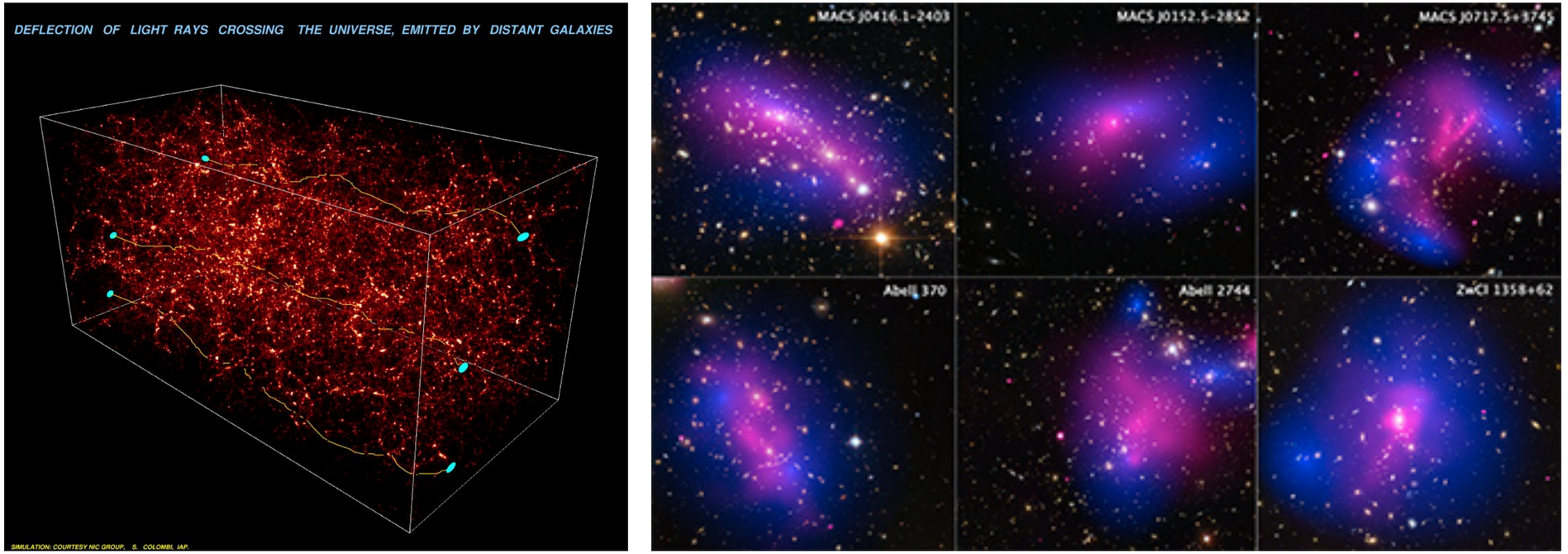


図 6.11: 〔左〕銀河団のシミュレーション結果に，光の進む様子を描き込んだ図．ダークマターを含んだ銀河によって，光の経路が歪む様子がわかる．
[http://www.cfht.hawaii.edu/News/Lensing/]
〔右〕銀河団の衝突による質量分布．ピンク色が高温ガスの分布，青い部分がダークマターの分布を表す．ダークマターが銀河と重なって分布していることがわかる．
[http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2015/10/full/]

ダークマターの候補

素粒子論からのダークマターの候補

ニュートリノ ○微小な質量を持つことがわかっている
×宇宙全体では量が不足，銀河形成モデルとも合致せず

ニュートラリーノ ○超対称性理論を仮定すれば自然に登場する粒子
×未発見.

アキシオン 温度ゼロの仮想の粒子 ×未発見.

天体物理学からのダークマターの候補

ブラックホール・白色矮星・中性子星
恒星進化の最後の姿だが，どの位存在するのかが未知.

褐色矮星・惑星 恒星へなれなかった小さな星．これも存在量が未知.

結局，不明のまま.
未知の素粒子は何か，に期待が高まっている

ダークマター探査実験：XMASS

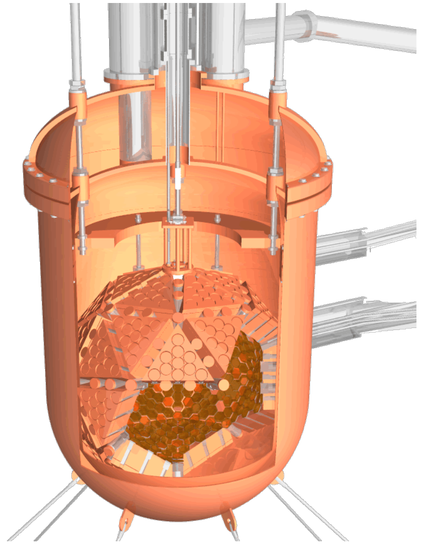
未知の素粒子検出を目指す.

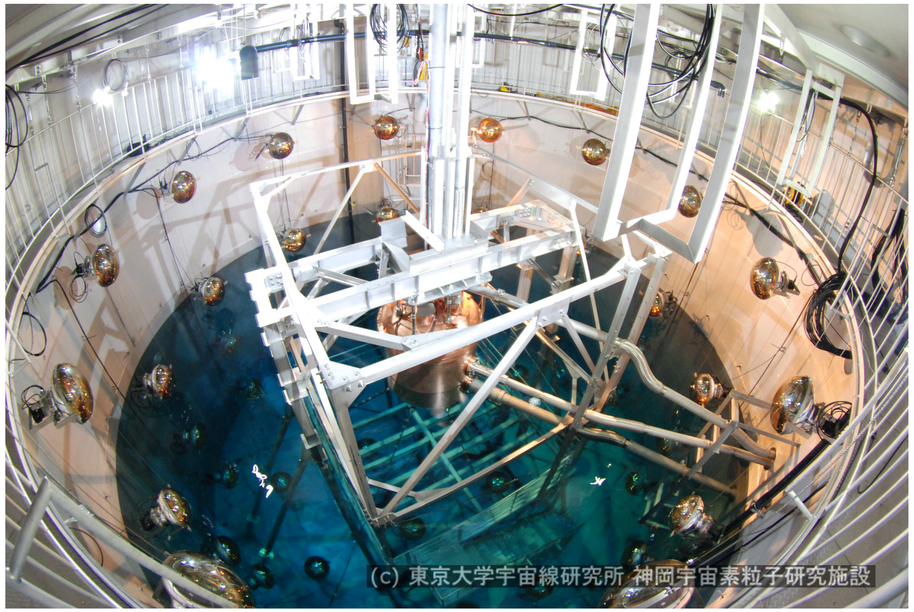
岐阜県神岡鉱山跡に，液体キセノン（約-100℃）タンクを設置.



直径10m、高さ10mの水タンク

中央に１トン液体キセノン検出器を設置する





1トンの液体キセノンが

642本の光電子増倍管で囲まれている

2011年より実験開始．13-19年データ取得.

http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/

【話題】

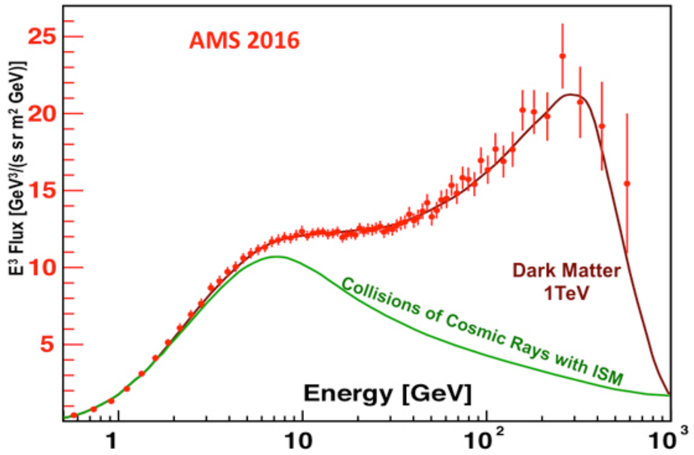
ダークマター　発見か？





ダークマター　発見か？





陽電子フラックスの観測データと理論モデルの比較
(出所: AMS Collaboration)

国際宇宙ステーションISSにヨーロッパの研究グループが設置した
AMS（アルファ磁気検出器）が反陽子・陽電子を捉えたが，これまでの
モデルでは説明できず，ダークマター由来のモデルだと合致する．
（2016年12月8日発表）

https://home.cern/about/experiments/ams
http://news.mynavi.jp/news/2016/12/13/047/

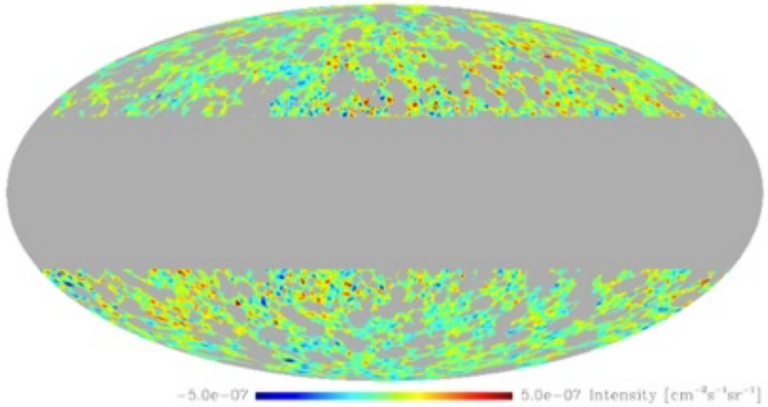
【宇宙物理】

ダークマター　発見できず

諸説紹介

アムステルダム大学の研究チームは，天文観測衛星「フェルミガンマ線宇宙望遠鏡」が収集した宇宙ガンマ線背景放射のデータを精密解析した結果，ダークマター粒子の存在証拠は見つからなかったと発表した．
（2016年12月28日発表）

http://news.mynavi.jp/news/2016/12/28/189/



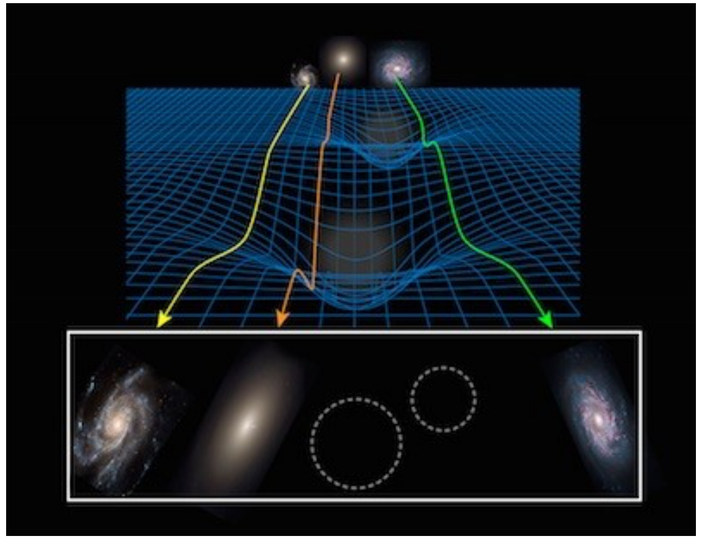
全天観測から得られた銀河系外の宇宙ガンマ線背景放射分析データ．銀河中心面を除いている．(出所: アムステルダム大学)

ダークマター　不要

諸説紹介

ライデン天文台の研究チームは，宇宙における重力分布の測定データを分析し，「エントロピック重力理論(ヴァーリンデ理論)」と一致する結果を得たと報告した．ダークマターの質量を仮定しなくても，重力レンズ効果が説明できるという．
（2016年12月22日発表）

http://news.mynavi.jp/news/2016/12/22/230/



暗黒物質がついに見えた！？

ー天の川銀河のハローから高エネルギーガンマ線放射を発見ー

東京大学のグループは，フェルミガンマ線観測衛星のデータに，天の川銀河の中心方向から，約20ギガ電子ボルト(GeV)のガンマ線が，角度にして30度以上にぼんやりと広がって放射されていることを発見した．
これは暗黒物質ハローが放射している場合に予想される形状とよく一致していて，さらにこの放射は20 GeV 付近でのみ特に強い．一般に，天体起源のガンマ線は様々なエネルギーで比較的均等に放射され，このような強いエネルギー依存性は示しません．一方，陽子の500倍程度の質量をもつWIMPの対消滅から予想される依存性とはよく合致する．放射強度から見積もられる対消滅の頻度も，理論予想と概ね合致します．これらの理由から，今回発見されたハロー状の放射成分は，暗黒物質由来のガンマ線の有力な候補と言える，という．このシナリオが正しければ，暗黒物質の正体はWIMPである可能性が高くなる．

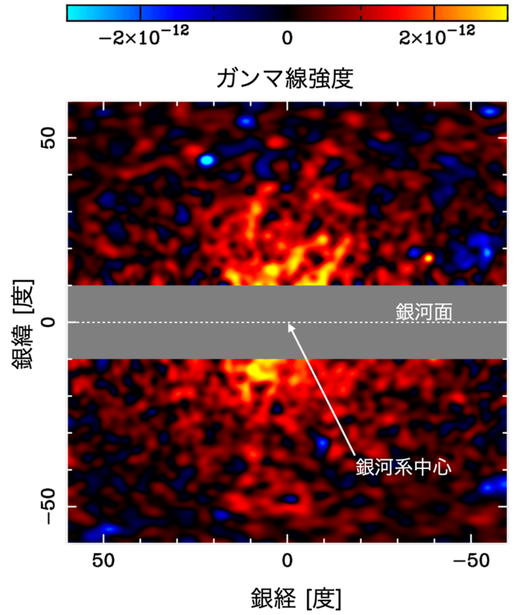


図1：ハロー状に光るガンマ線放射の強度マップ
天の川銀河を中心とする銀河座標で表示。銀経は銀河面方向に測った経度、銀緯は銀河面から測った緯度。観測されたガンマ線強度マップから、ハロー以外の成分を除去したもの。銀緯±10度の銀河面領域は、天体起源の放射を避けるために解析から除かれた（中央灰色のバー）。

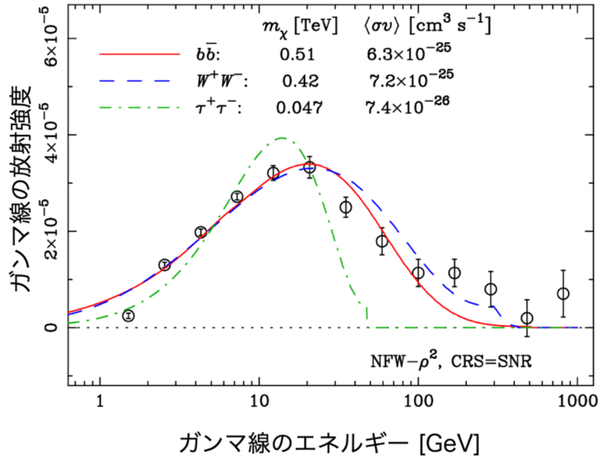


図2：ハロー状放射のエネルギースペクトル
ハロー状放射の強度をガンマ線のエネルギーごとに示したもの（スペクトル）。20 GeV 付近でハロー状放射が特に強くなっている。500 GeV 程度の質量（陽子の約500倍）の暗黒物質粒子が対消滅し、最初にb（ボトムクォーク）とその反粒子、あるいはWボソンのペアが生じた場合に予想されるガンマ線スペクトル（赤線・青線）が、データとよく合致している。ボトムクォーク、Wボソンは素粒子標準理論に含まれる既知の素粒子。

https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/10983/

https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/11/080

PAPER

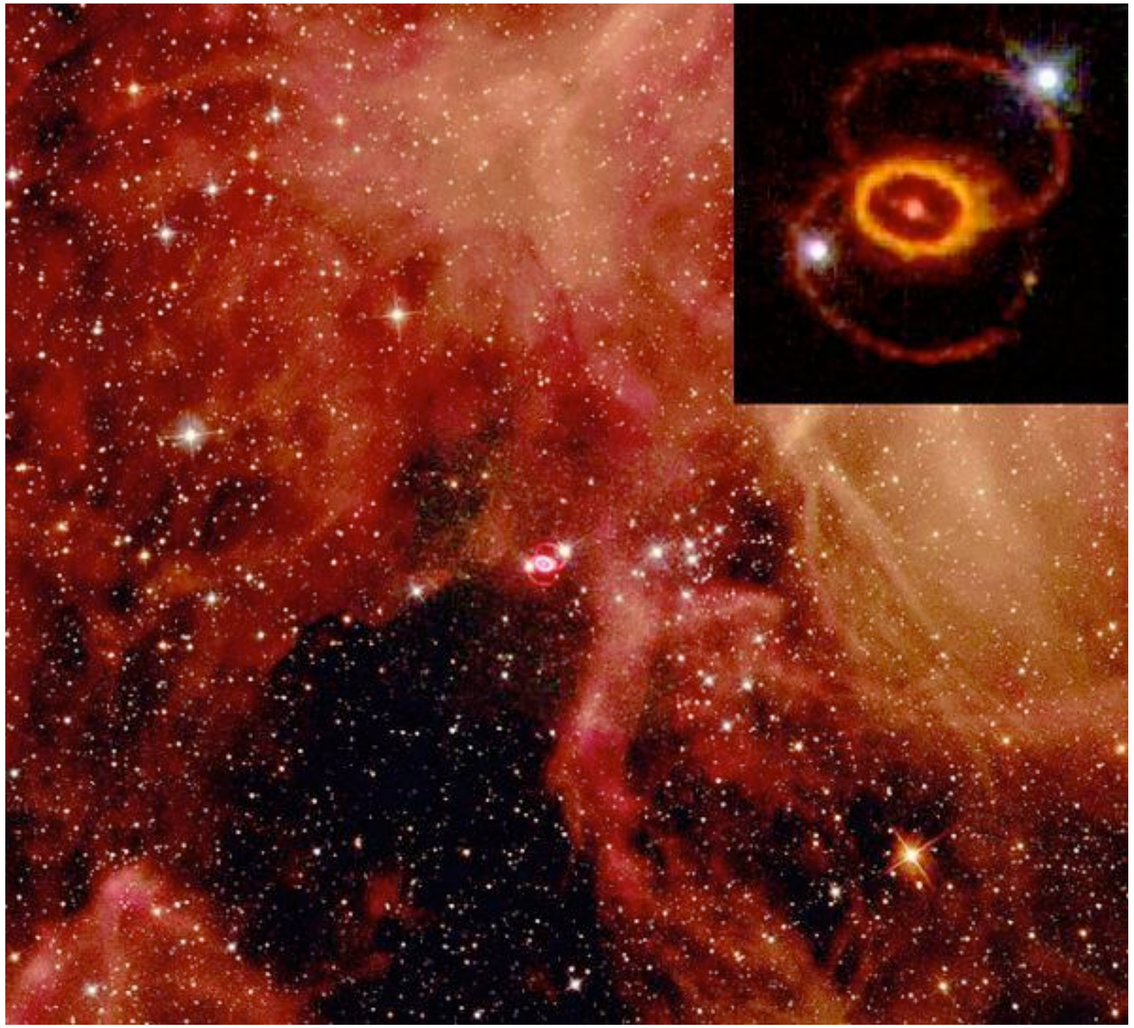
20 GeV halo-like excess of the Galactic diffuse emission and implications for dark matter annihilation

Tomonori Totani

Published 25 November 2025 • © 2025 IOP Publishing Ltd and Sissa Medialab. All rights, including for text and data mining, AI training, and similar technologies, are reserved.
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Volume 2025, November 2025
Citation Tomonori Totani JCAP11(2025)080
DOI 10.1088/1475-7516/2025/11/080

超新星による加速膨張の観測・ダークエネルギー？

超新星爆発
＝燃え尽きた星の
最後の爆発

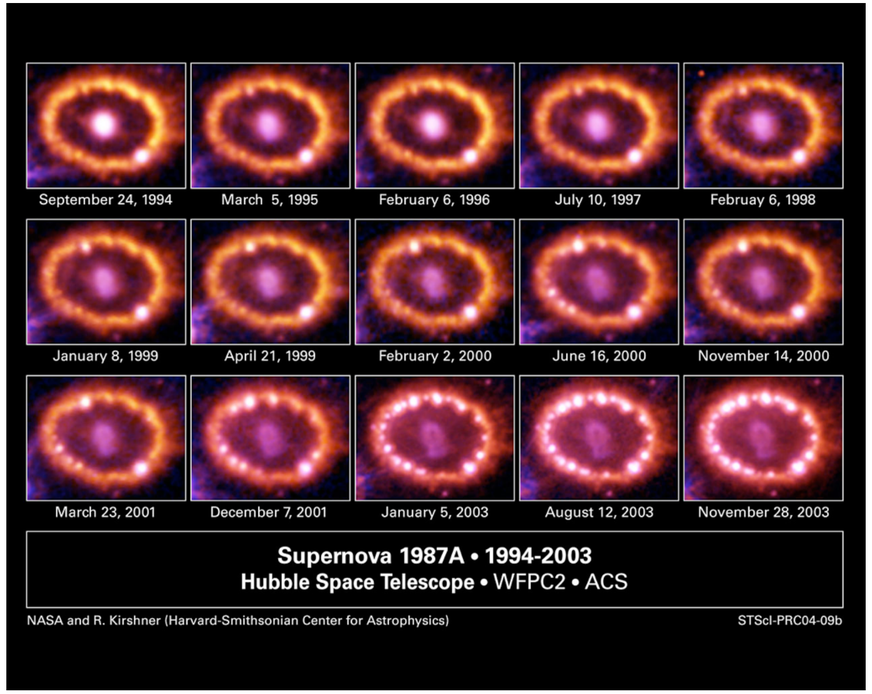


SN1987Aの2007年の画像

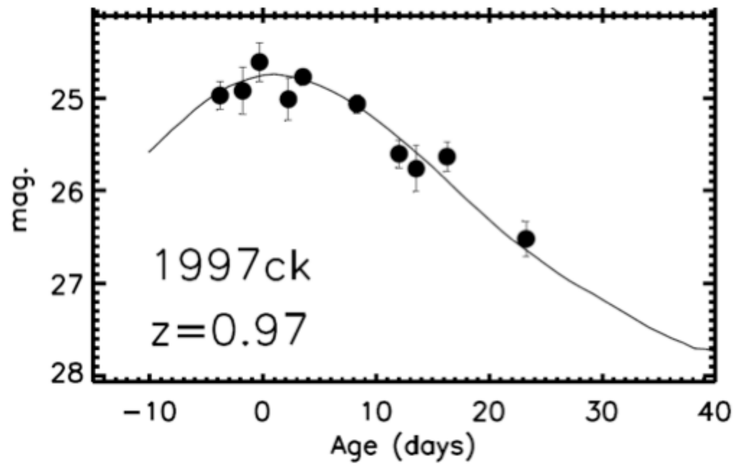
超新星爆発＝スタンダードキャンドル

爆発のメカニズムは物理的に決まっている. どの超新星爆発もほぼ同じ質量の星が爆発するので, 放出されるエネルギーも同じ.

爆発後の減光のしかたも同じ. 超新星爆発ではカルシウムや鉄, ニッケルなど, 重い元素がどんどん作られるが, その変化のしかたも同じになる. スペクトルから元素の構成比を観測することで, 爆発後のどの時期に相当するのかもわかる.



観測される明るさから
距離が正確に判定できる



【贈賞】

超新星爆発を用いた，宇宙の加速膨張の発見

Nobelprize.org
The Official Web Site of the Nobel Prize

for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae.
2011年ノーベル物理学賞受賞



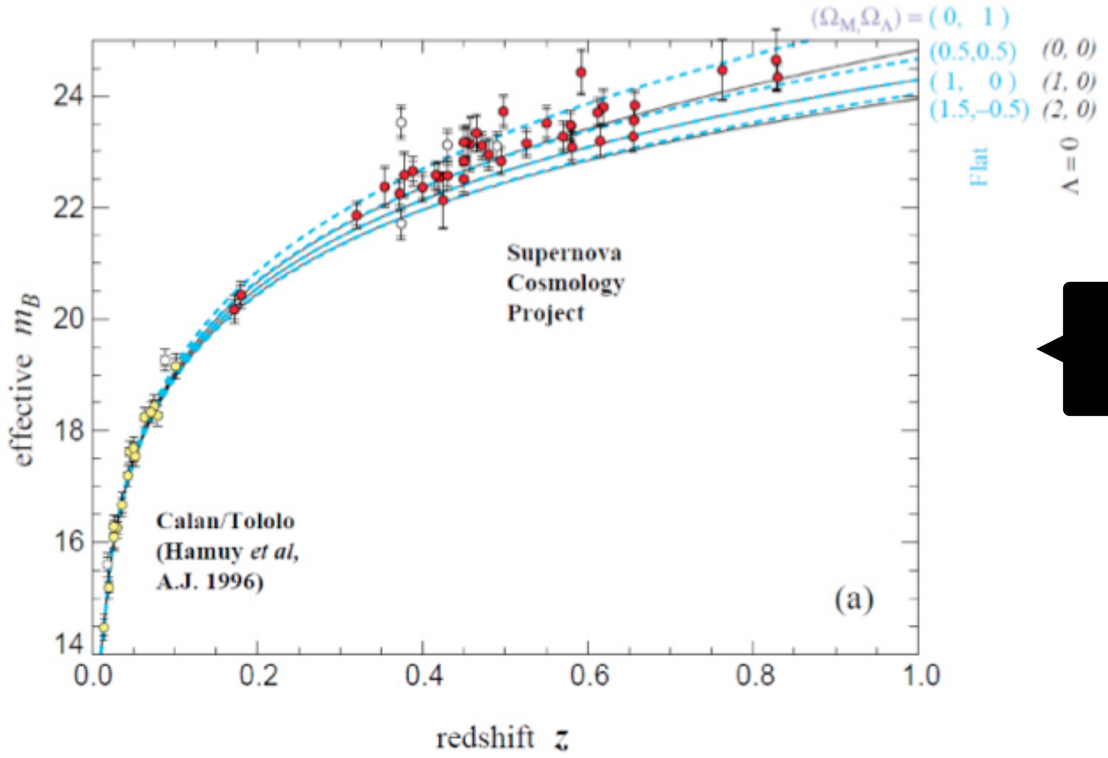
Photo: U. Montan
Saul Perlmutter



Photo: U. Montan
Brian P. Schmidt



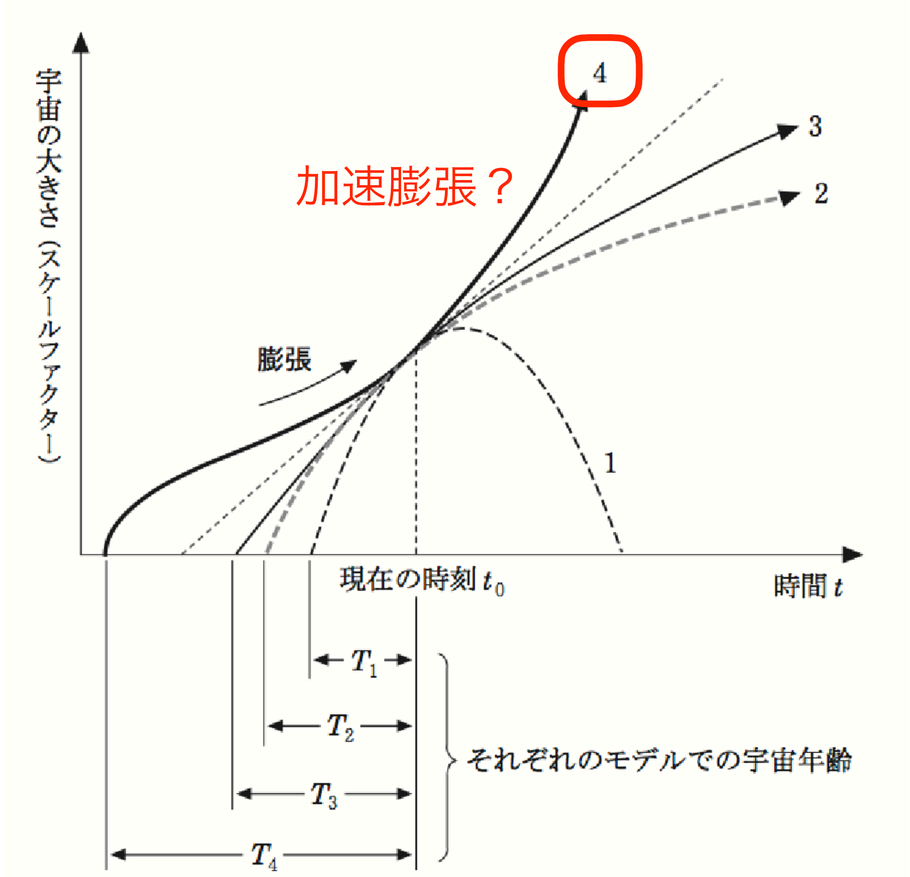
Photo: U. Montan
Adam G. Riess



加速膨張している！

理由は不明

膨張宇宙モデル，現在考えられているのは？



1. 閉じた宇宙で宇宙項なし．$\Lambda = 0, k = +1.$
2. 平坦な宇宙で宇宙項なし．$\Lambda = 0, k = 0.$
3. 開いた宇宙で宇宙項なし．$\Lambda = 0, k = -1.$
4. 平坦な宇宙で宇宙項あり．$\Lambda > 0, k = 0.$

宇宙の膨張はどこまで続いて，それはいつか止まることはあるのか。

宇宙の最期

ビッグクランチ

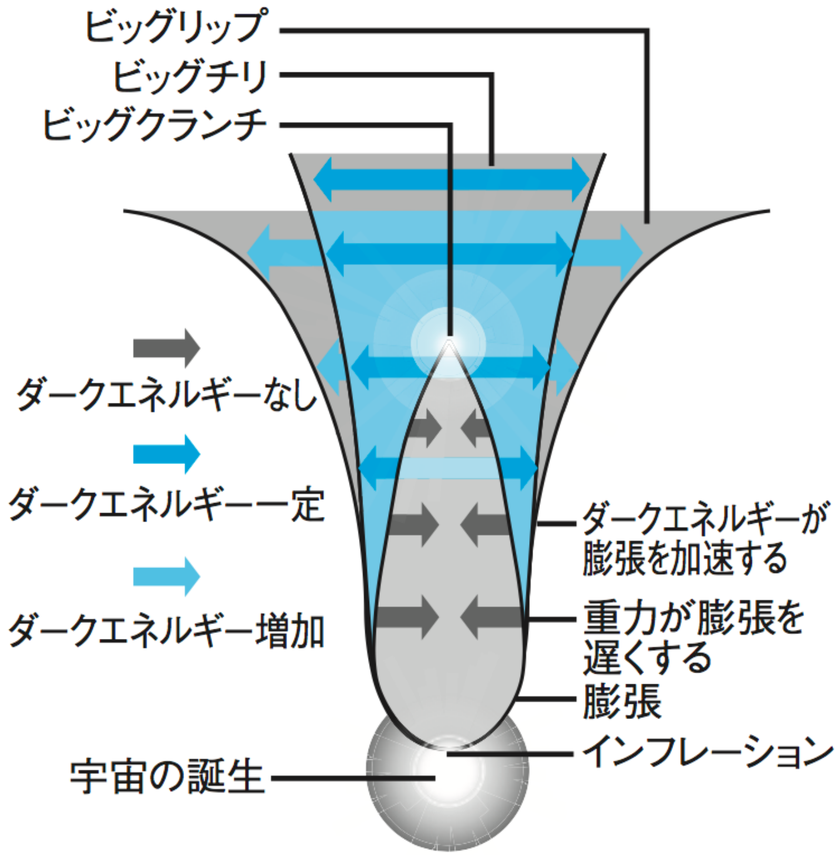
どこかで加速膨張が終わり，やがて重力が強くなって最期には再び収縮する．ビッグバンの逆戻りとなって，すべてが再び融合する．

ビッグフリーズ，ビッグチリ

現在のまま宇宙は永遠に膨張を続け，すべての銀河が孤立し，やがて星は燃え尽きて温度ゼロ状態の「熱的な死」へ．

ビッグリップ

今後もますます加速膨張をつづけ，やがては時空自体が引き裂かれ，銀河も星も何も構造が残らない．



【天文】

宇宙、あと１４００億年は「安泰」　すばる望遠鏡で調査

東山正宣　2018年9月27日09時25分

シェア 286　ツイート list　ブックマーク 7　スクラップ　メール　印刷



中央の銀河と「暗黒物質」によって光が曲がる重力レンズ効果。周囲の小さな銀河が同心円状に引き延ばされて見える（国立天文台提供）

宇宙 はこのまま静かに広がり続けるのか、それとも速く広がり過ぎて引き裂かれてしまうのか――。すばる 望遠鏡 で多くの銀河を精密に観測した結果、少なくともあと１４００億年は「安泰」だと分かった。 東京大学 と 国立天文台 などのチームが２６日、論文を公開した。

宇宙 は、約１３８億年前に「ビッグバン」と呼ばれる大爆発で誕生後、膨張を続けている。 宇宙 の９５％を占める正体不明の「 暗黒エネルギー 」や「 暗黒物質 」によって、膨張が加速していることが分かってきたが、今度は膨張が速くなり過ぎて 宇宙 が引き裂かれる「ビッグリップ」が起こるかが焦点になっている。

東大カブリ数物連携 宇宙 研究機構の日影千秋特任助教らは、すばる 望遠鏡 に取り付けた超広視野のカメラで約１千万の銀河を観測。銀河や 暗黒物質 の重力で遠くの光が曲がる「重力レンズ効果」を精密に調べた。

その結果、 宇宙 を広げる 暗黒エネルギー はそれほど増えておらず、 宇宙 は年齢の１０倍ほどの時間（約１４００億年）は存在できることが分かった。日影さんは「さらに多くの数の銀河を観測し、 宇宙 の終わりがどうなるのか確かめたい」と語った。論文はサイト（ https://arxiv.org/abs/1809.09148 ）で読める。（ 東山正宣 ）

宇宙が加速膨張している原因は何か？？？

重力場の方程式（一般相対性理論）

空間の曲がりがモノの運動を決める ⇔モノがあると空間が曲がる

＜空間の歪み＞ $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ ＜モノの分布＞

②アインシュタインの理論を修正する

修正重力理論

①斥力を及ぼす特殊な物質を考える.

ダークエネルギー

膨張宇宙の解

我々は特殊な位置

③フリードマン宇宙モデルの前提となった「宇宙原理」を疑う

ビッグバンモデル

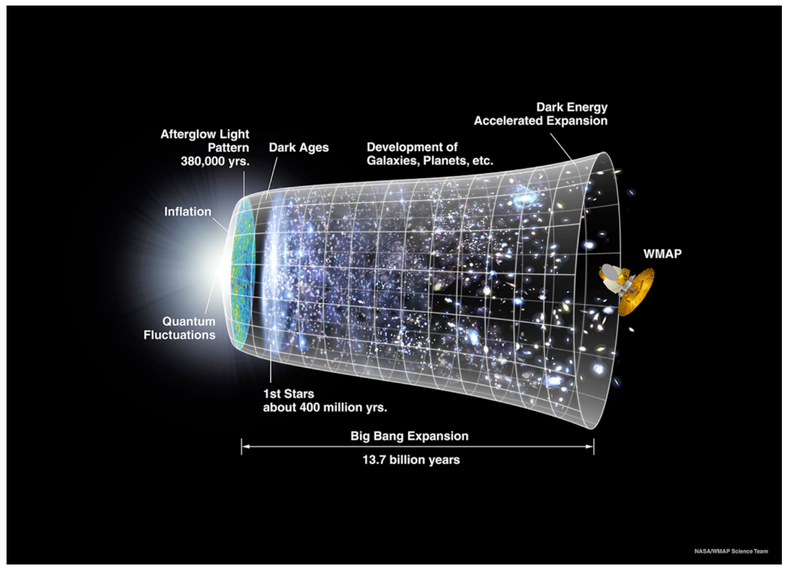
⓪観測結果を疑う

加速膨張の発見

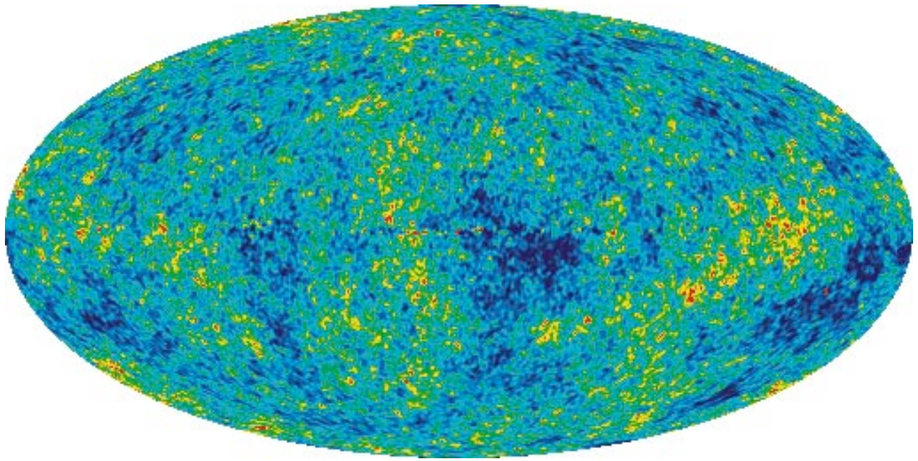
宇宙マイクロ波背景輻射(CMB)の観測

Cosmic Microwave Background (CMB)

宇宙誕生後, 38万年のとき, 温度の低下によって物質が形成されはじめ, 光が直進できるようになった. このときの光が, 宇宙全体を満たしており, CMBと呼ばれる.



現在では, 温度 2.7K に相当する完璧なPlanck分布の電磁波であることが知られていて, そのスペクトルのゆらぎなどから, 宇宙論パラメータのフィッティングが行われている.



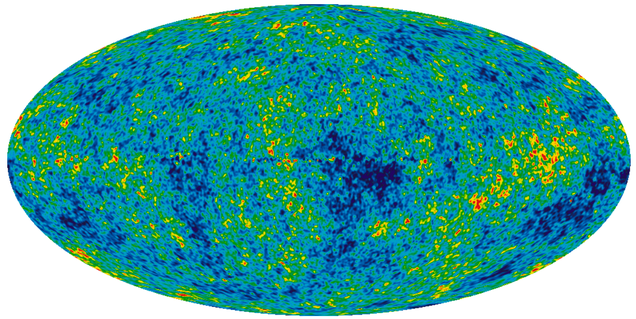
WMAP衛星の9年目のデータが, 2012年12月にリリースされた.
Planck衛星のデータにもとづく論文が2013年3月に発表された.

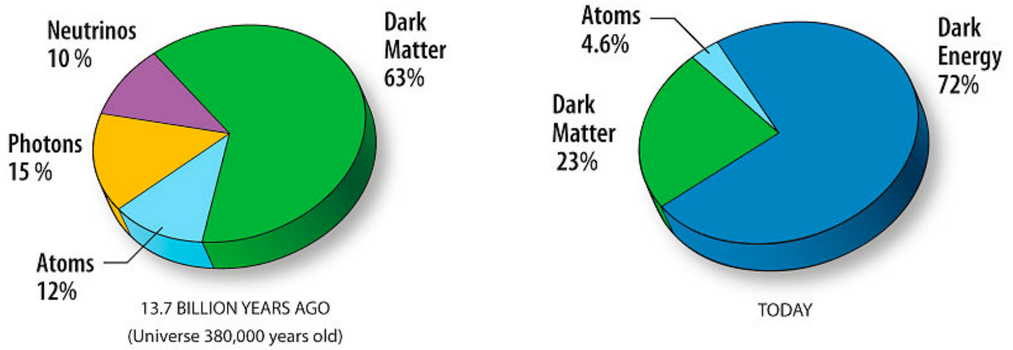
WMAP衛星　宇宙背景放射9年目データを発表

WMAP has refined its measurements with a final 2 years of data.　2012/12/21

2012年12月21日に宇宙背景放射を観測しているWMAP衛星の9年間のデータの最終結果がリリースされた.
その結果は,
★宇宙背景放射(宇宙の晴れ上がり)は, 宇宙誕生後 37万5000年 の光である.
★宇宙の年齢は, 137.4 ± 1.1億年. ハッブル定数は, H_0=70.0 ± 2.2 [km/s/Mpc].
(2年前のデータでは, CMBは宇宙誕生後37万9000年の光で, 宇宙年齢は137.5± 1.2億年だった.)

そして, 宇宙の膨張モデルを当てはめると, 現在の宇宙の構成要素は,
✳71.4% が正体不明の(宇宙を加速膨張させる要因の)ダークエネルギー,
✳24% が正体不明の(物質として存在しているはずの)ダークマター,
✳残りの4.6%が既知の物質
である. つまり, 宇宙全体の95.4%は正体不明の物質であることがわかった.





http://map.gsfc.nasa.gov/news/

http://jp.arxiv.org/abs/1212.5225, http://jp.arxiv.org/abs/1212.5226

WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の観測結果（2012年12月リリース）.
（左）CMBのゆらぎを全天で示したもの.　（中）CMBが放射されたときの
宇宙の構成要素の割合.　（右）現在の宇宙の構成要素の割合.

プランク衛星, 宇宙背景輻射の観測結果公開（1）

Planck project announces the first result of Cosmic Microwave Background

宇宙誕生後, 光が初めて直進できるようになった時期の名残である「宇宙背景輻射」(CMB)の最新の観測結果が公表された. 2009年に打ち上げられた Planck 衛星による, 15ヶ月分の観測データをまとめたもの. CMBの観測は, これまでにCOBE衛星, WMAP衛星の結果があるが, それらをはるかに上回る精細なデータで, 宇宙論のパラメータが詳しく決定されるために待ち望まれていた.

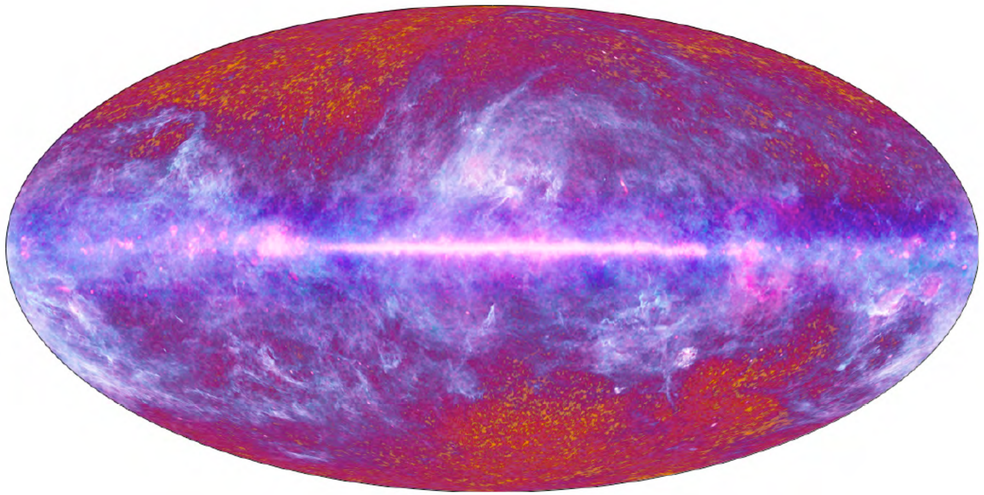
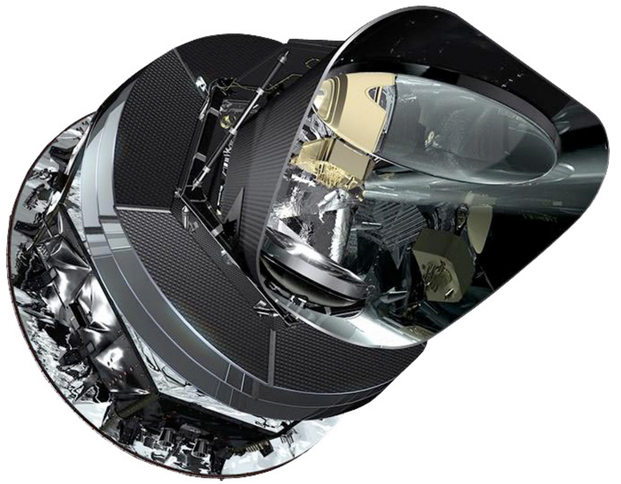


Fig. 1. The image of the entire sky released by *Planck* in 2010 is a composite of all the data gathered over the first nine months of the mission, and illustrates artistically the multitude of Galactic, extragalactic, and cosmological components that contribute to the radiation detected by its payload.

宇宙全天のCMBのゆらぎを表す観測データ. 銀河面が赤道となるように描かれている.



Planck衛星.

http://jp.arxiv.org/abs/1303.5062

http://www.rssd.esa.int/index.php?project=Planck

プランク衛星, 宇宙背景輻射の観測結果公開（2）

Planck project announces the first result of Cosmic Microwave Background

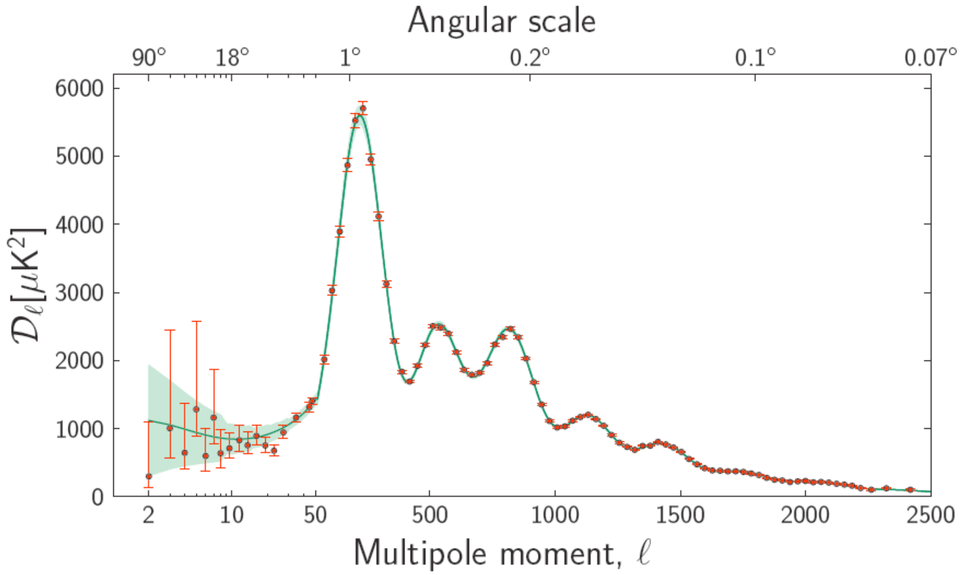


Fig. 19. The temperature angular power spectrum of the primary CMB from *Planck*, showing a precise measurement of seven acoustic peaks, that are well fit by a simple six-parameter ΛCDM theoretical model (the model plotted is the one labelled [Planck+WP+highL] in Planck Collaboration XVI (2013)). The shaded area around the best-fit curve represents cosmic variance, including the sky cut used. The error bars on individual points also include cosmic variance. The horizontal axis is logarithmic up to $\ell = 50$, and linear beyond. The vertical scale is $\ell(\ell+1)C_l/2\pi$. The measured spectrum shown here is exactly the same as the one shown in Fig. 1 of Planck Collaboration XVI (2013), but it has been rebinned to show better the low-ℓ region.

ゆらぎの角度相関. Planck衛星の結果のみをプロットしたもの. 実線は, 宇宙項のあるCDM宇宙モデルの場合に予想される値. 7つのピークを含めて, 小角度でよく一致している.

たった6つのパラメータで, 宇宙モデルをきちんと再現できることは驚き！

http://jp.arxiv.org/abs/1303.5062

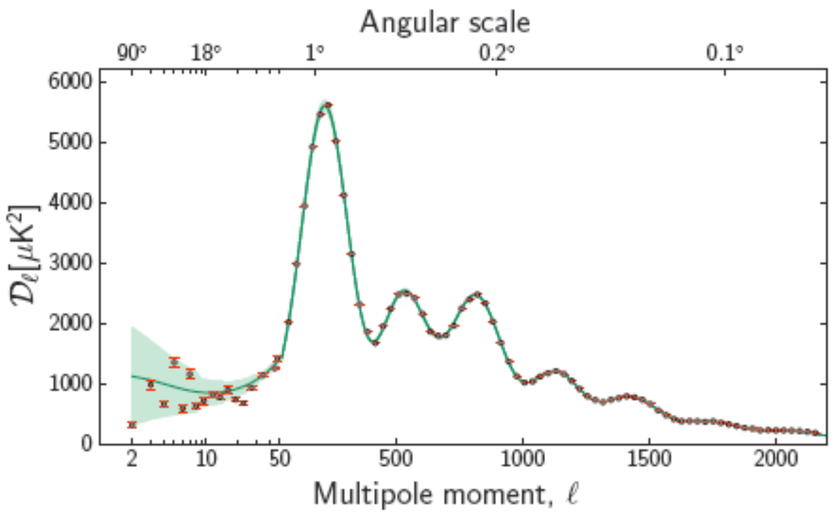


Fig. 20. The temperature angular power spectrum of the CMB, estimated from the SMICA *Planck* map. The model plotted is the one labelled [Planck+WP+highL] in Planck Collaboration XVI (2013). The shaded area around the best-fit curve represents cosmic variance, including the sky cut used. The error bars on individual points do not include cosmic variance. The horizontal axis is logarithmic up to $\ell = 50$, and linear beyond. The vertical scale is $\ell(\ell+1)C_l/2\pi$. The binning scheme is the same as in Fig. 19.

左と同じデータを, 他の観測結果も含めて表示したもの.

プランク衛星，宇宙背景輻射の観測結果公開（4）

Planck project announces the first result of Cosmic Microwave Background

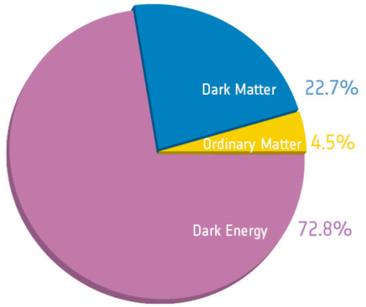
Parameter	PlanckTT+lowP+lensing	PlanckTT, TE, EE+ lowP+lensing+ext
$\Omega_b h^2$ . . .	0.02226 ± 0.00023	0.02230 ± 0.00014
$\Omega_c h^2$ . . .	0.1186 ± 0.0020	0.1188 ± 0.0010
$100\theta_{MC}$.	1.04103 ± 0.00046	1.04093 ± 0.00030
τ	0.066 ± 0.016	0.066 ± 0.012
$\ln(10^{10}A_s)$	3.062 ± 0.029	3.064 ± 0.023
n_s	0.9677 ± 0.0060	0.9667 ± 0.0040
H_0	67.8 ± 0.9	67.74 ± 0.46
Ω_Λ	0.692 ± 0.012	0.6911 ± 0.0062
Ω_b	0.0484 ± 0.0010	0.04860 ± 0.00051
Ω_c	0.258 ± 0.011	0.2589 ± 0.0057
Ω_m	0.308 ± 0.012	0.3089 ± 0.0062
$\Omega_m h^2$ . . .	0.1415 ± 0.0019	0.14170 ± 0.00097
$\Omega_m h^3$ . . .	0.09591 ± 0.00045	0.09598 ± 0.00029
σ_8	0.815 ± 0.009	0.8159 ± 0.0086
$\sigma_8\Omega_m^{0.5}$ . .	0.4521 ± 0.0088	0.4535 ± 0.0059
Age[Gyr]	13.799 ± 0.038	13.799 ± 0.021
r_{drag}	147.60 ± 0.43	147.50 ± 0.24
k_{eq}	0.01027 ± 0.00014	0.010288 ± 0.000071

正体不明のダークエネルギーは，69.1％

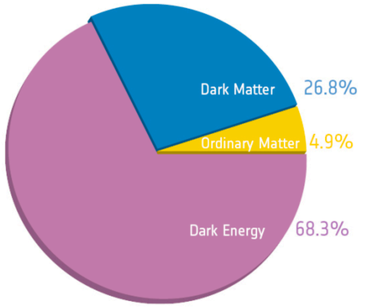
通常物質は，4.86 ％

ダークマター＋通常物質は，30.9 ％

宇宙年齢は，
137.99億年±2100万年



Before Planck



After Planck

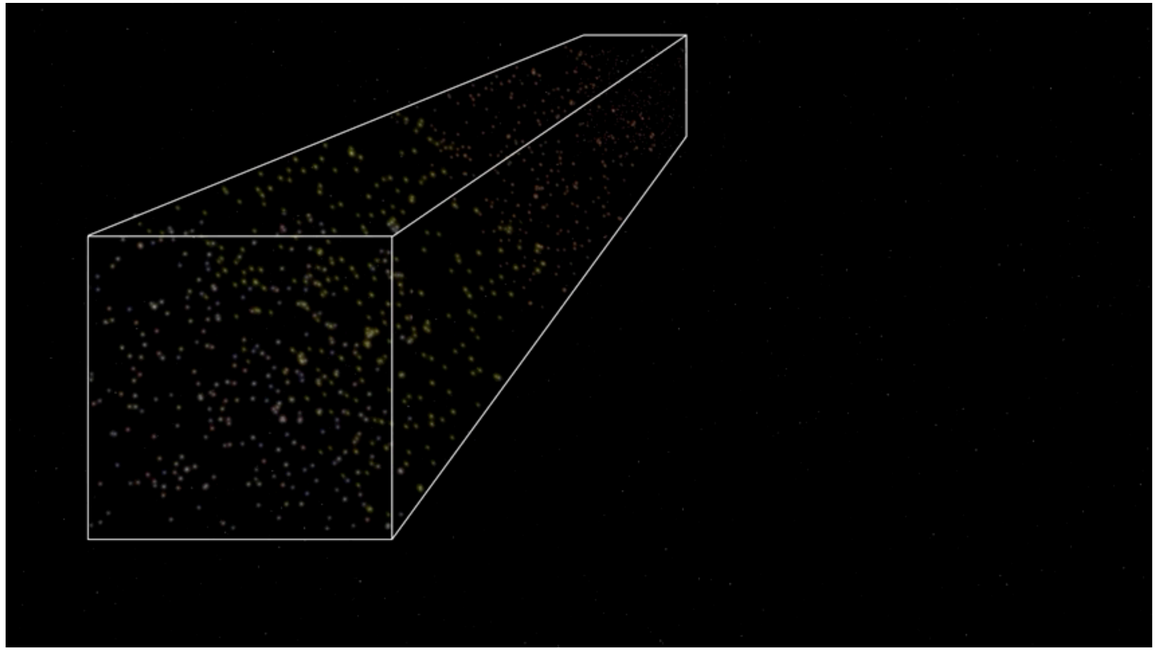
https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2016/10/aa27101-15.pdf

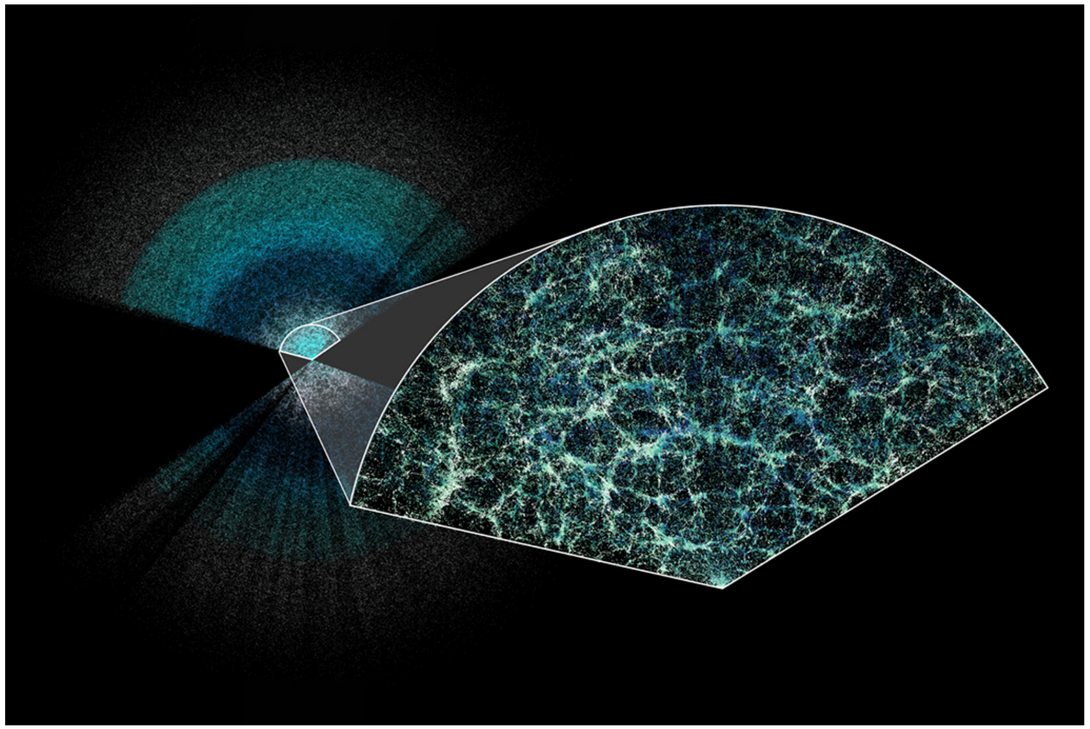
【宇宙物理】　DESIが初年度観測結果を公表:ダークエネルギーの理解に変更をもたらすか

2024/4/5

宇宙深部110億光年先までの銀河の精密なマップ作成に取り組んでいるDESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) プロジェクトは，初年度の観測結果を発表した．１％以内の誤差で，80億光年以遠の銀河やクェーサーの３D位置が明らかになり，これまで宇宙論で必要とされた謎の要素「ダークエネルギー」の解釈に変更がなされるかもしれない．

BAO ＝　バリオン音響振動



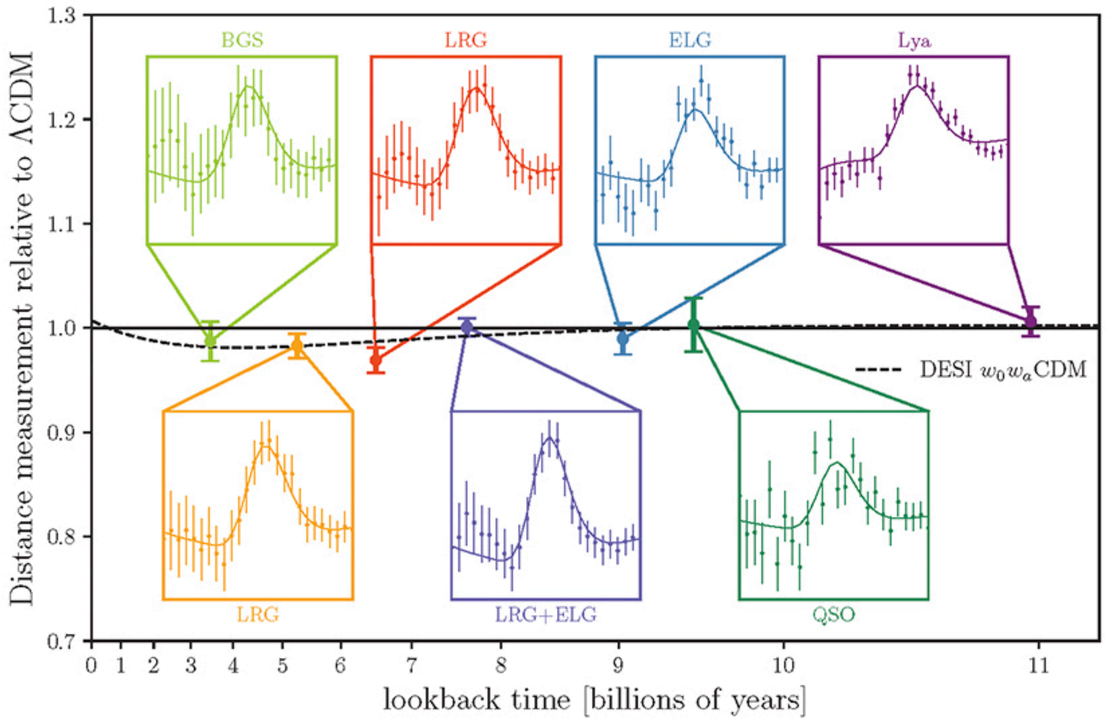


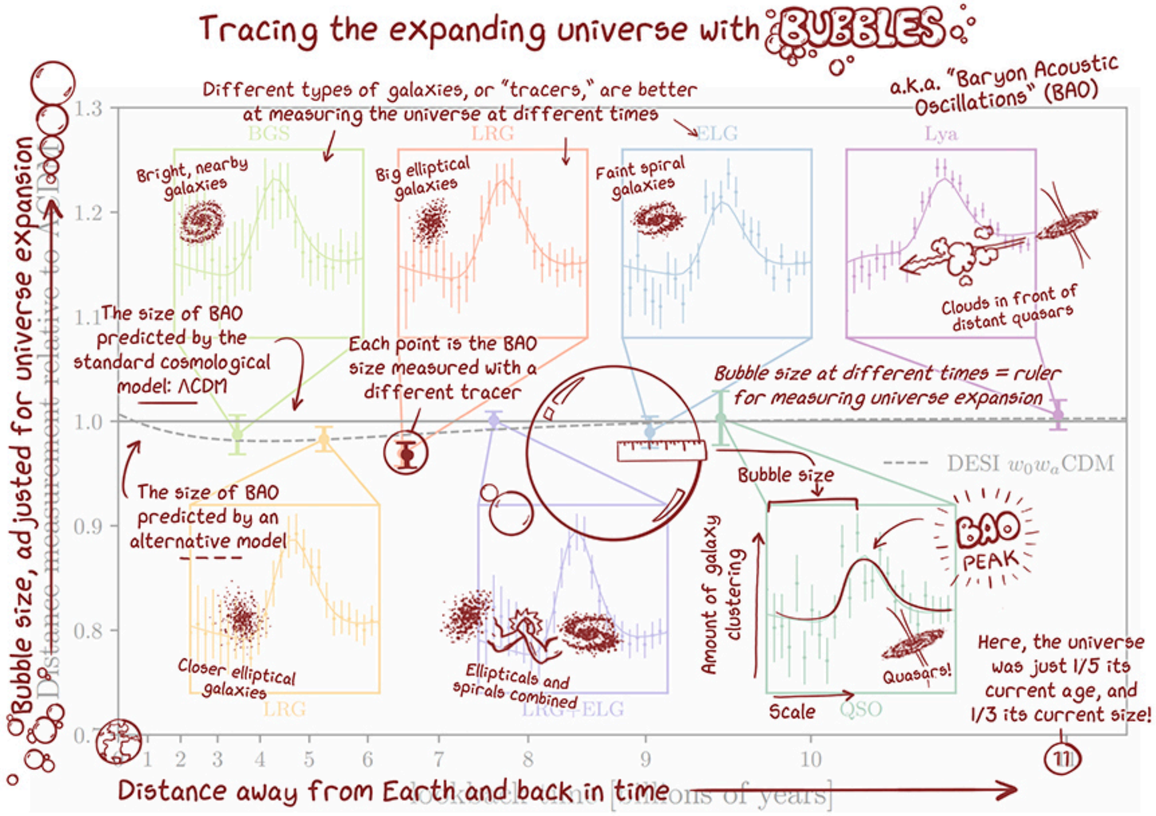
https://newscenter.lbl.gov/2024/04/04/desi-first-results-make-most-precise-measurement-of-expanding-universe/

DESIが初年度観測結果を公表:ダークエネルギーの理解に変更をもたらすか

宇宙深部110億光年先までの銀河の精密なマップ作成に取り組んでいるDESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) プロジェクトは，初年度の観測結果を発表した．１％以内の誤差で，80億光年以遠の銀河やクェーサーの３D位置が明らかになり，これまで宇宙論で必要とされた謎の要素「ダークエネルギー」の解釈に変更がなされるかもしれない．

BAO ＝　バリオン音響振動

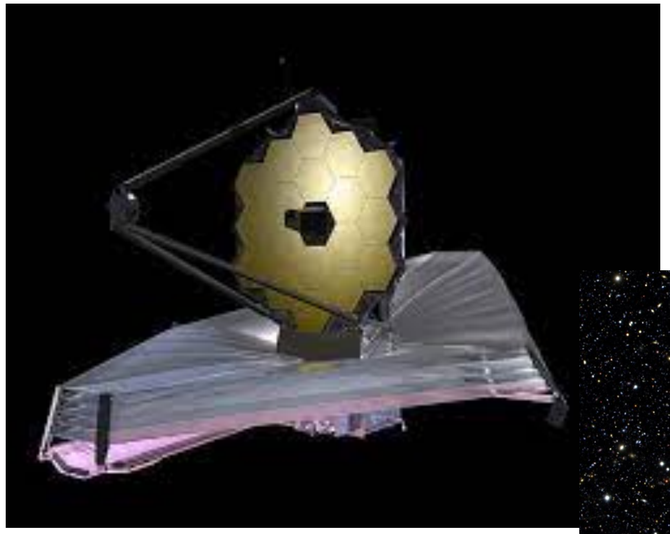




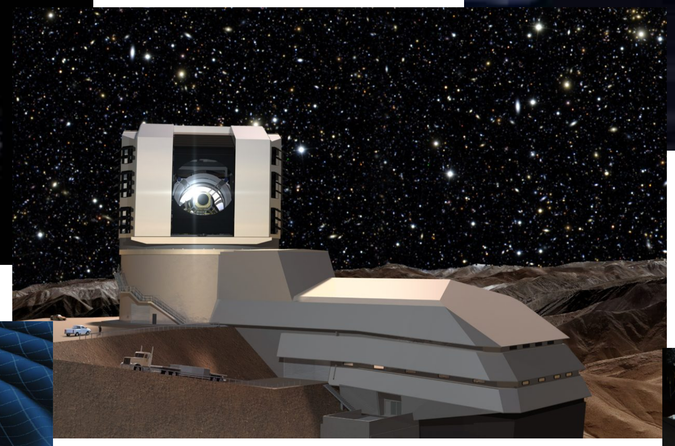
https://newscenter.lbl.gov/2024/04/04/desi-first-results-make-most-precise-measurement-of-expanding-universe/

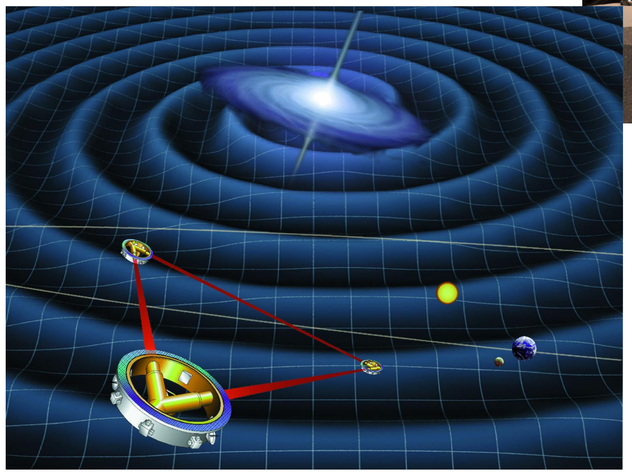
Finale　これからの宇宙論研究

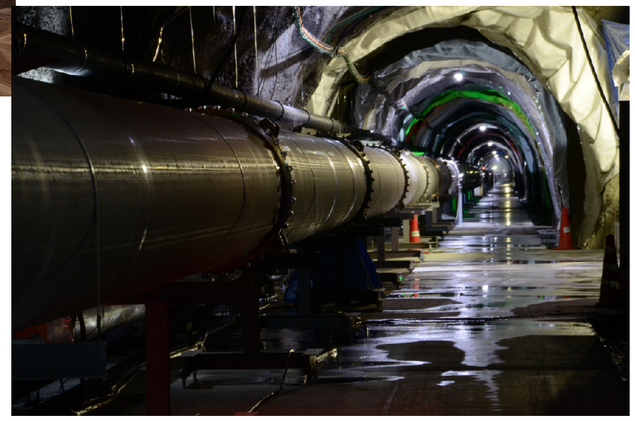
より遠くまで　より広範囲に　より詳細に　より広いエネルギー幅で











Finale　これからの宇宙論研究

より遠くまで　より広範囲に　より詳細に　より広いエネルギー幅で



	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	電子レンジ 携帯電話	FMラジオ テレビ	短波ラジオ	AMラジオ	飛行機の通信 電波時計	

ガンマ線　X線　可視光　赤外　電波　重力波





大気の窓

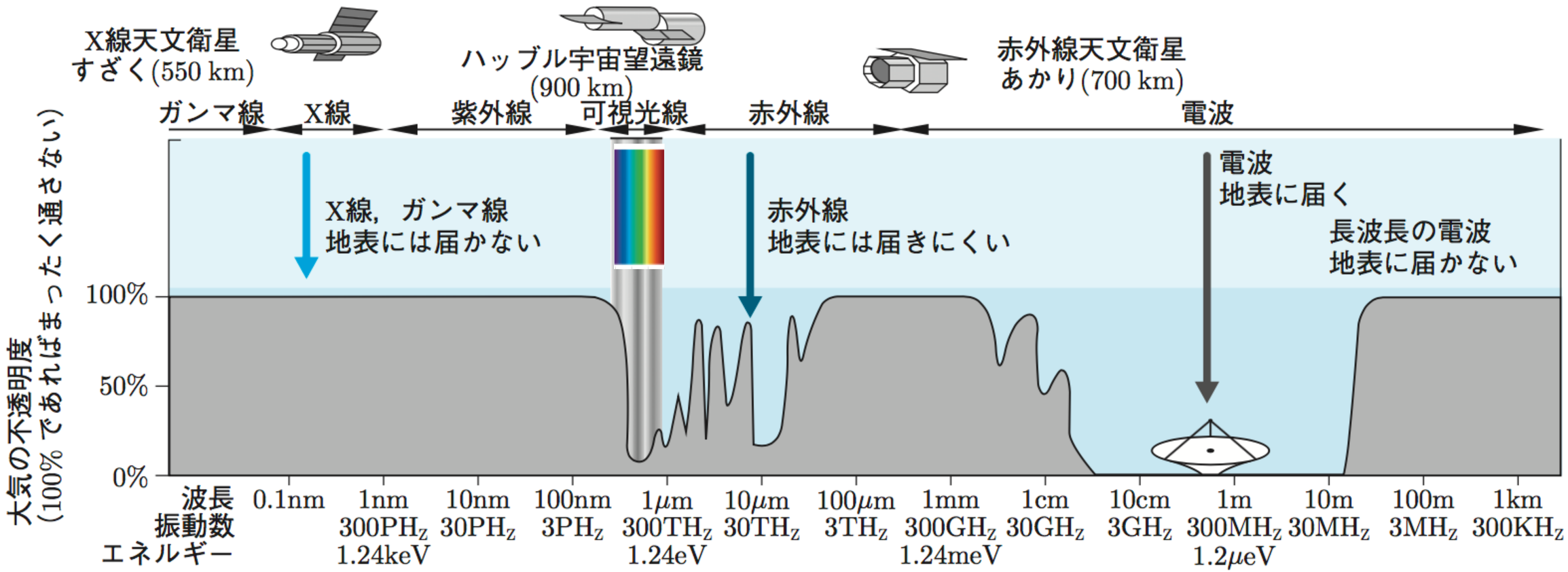
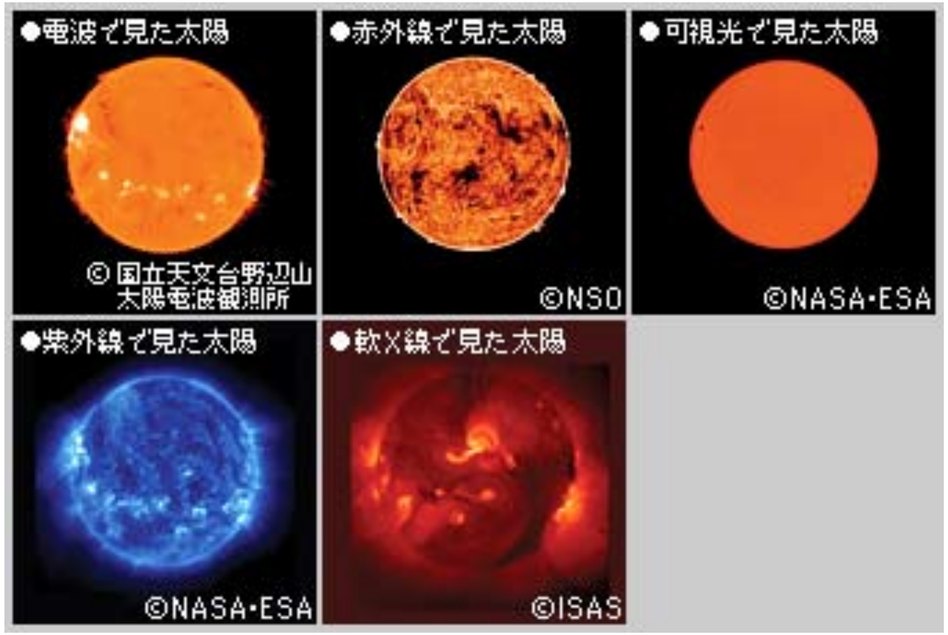
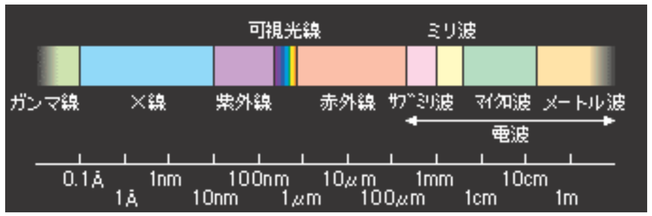
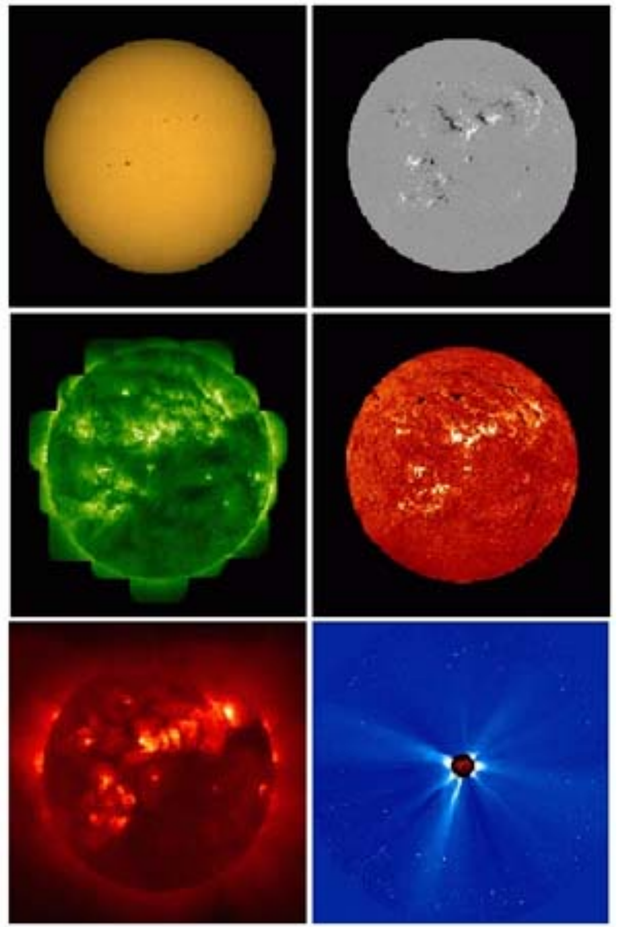


図 A.12　大気の窓．電磁波にとって大気を通過できるのは可視光と電波の領域である．したがって，可視光と電波の観測は地上で可能だが，ガンマ線・X 線・赤外線での観測は不可能である．

いろいろな波長で見た太陽





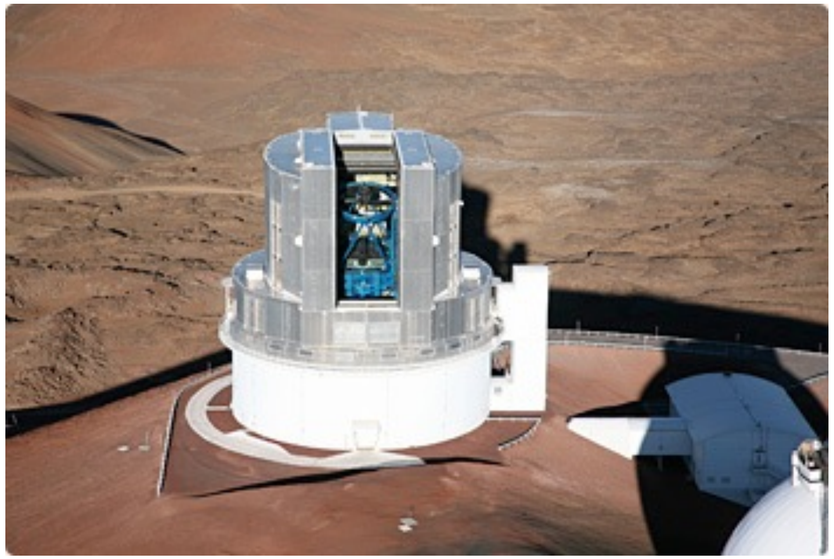


左列、上から順に、可視光（光球）、紫外線（低温コロナ）、X線（高温コロナ）。
右列、上から順に、光球面磁場、水素輝線（彩層）、コロナグラフ写真。
（BBSO、NASA、宇宙航空研究開発機構提供）

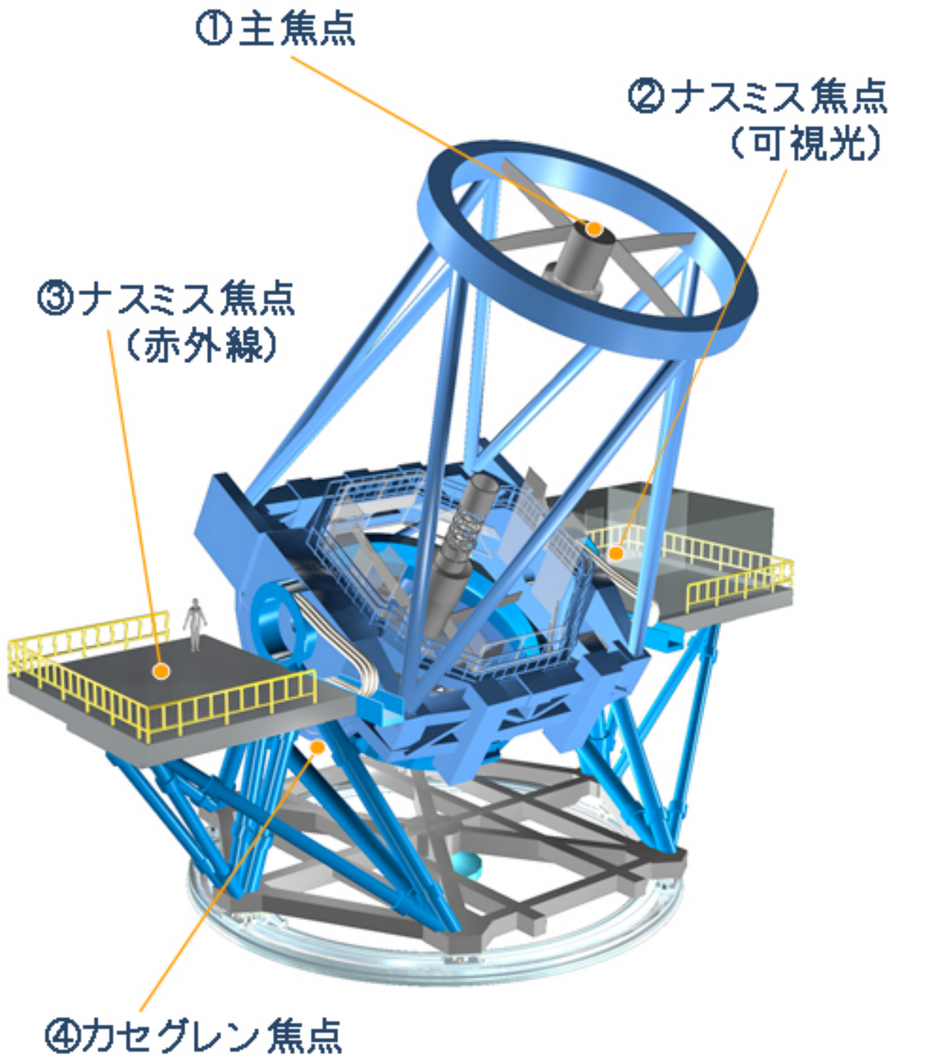
http://edu.jaxa.jp/materialDB/html/materials/advanced/chapter1/1_2/1_2_1_a.html
http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/naze/sun/sun52.html

【観測装置】
可視光・赤外

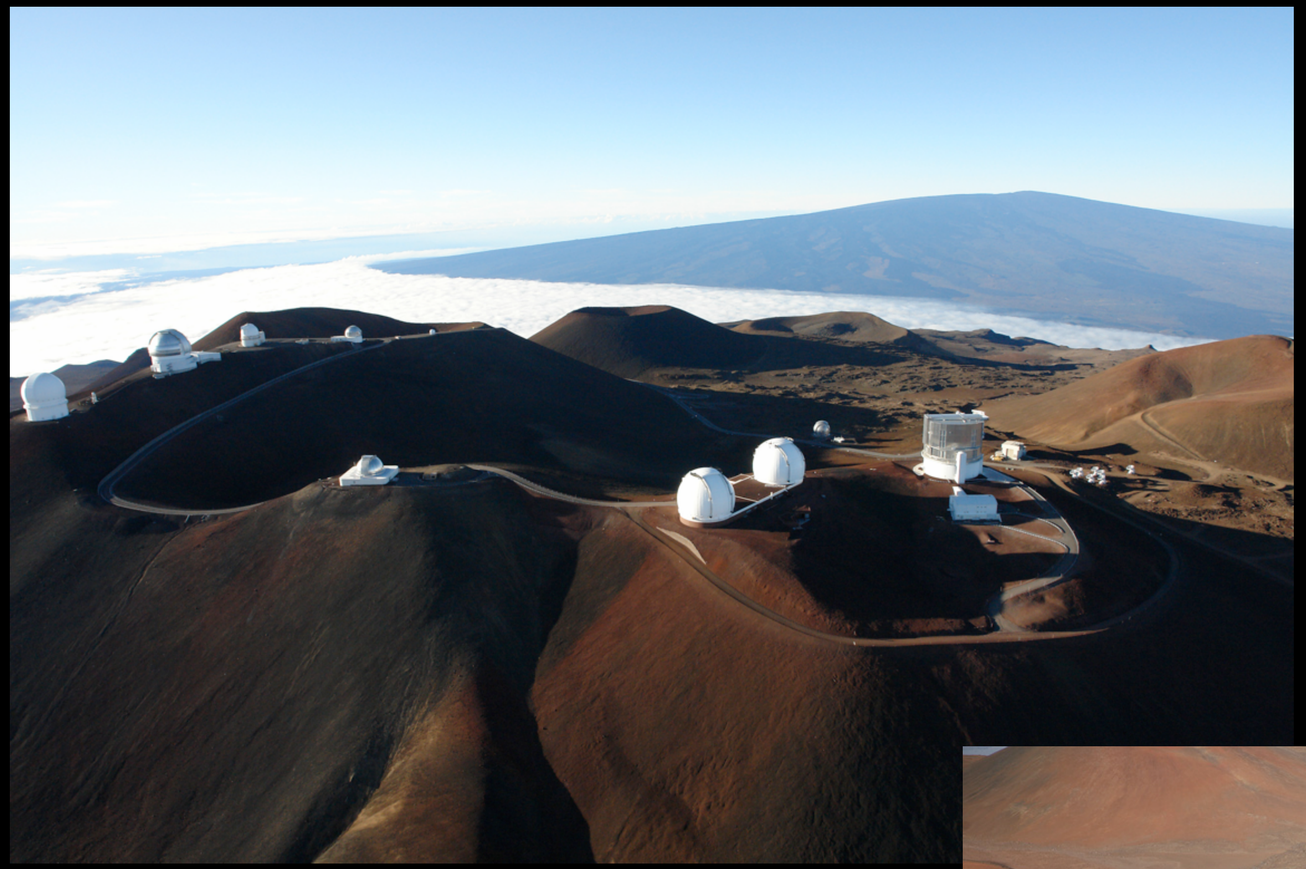
すばる望遠鏡 (SUBARU telescope)

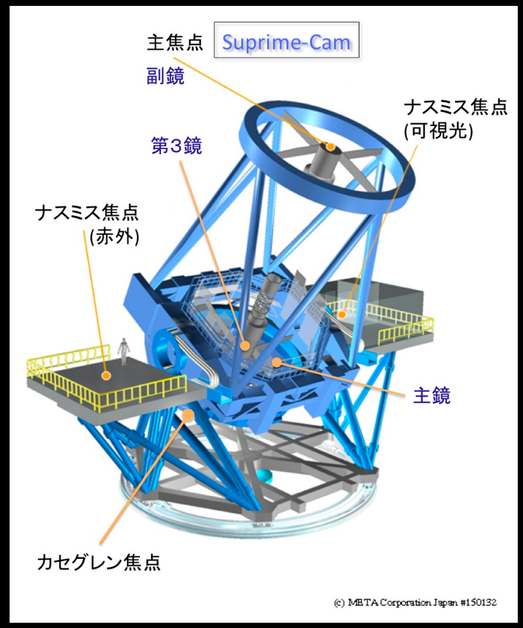


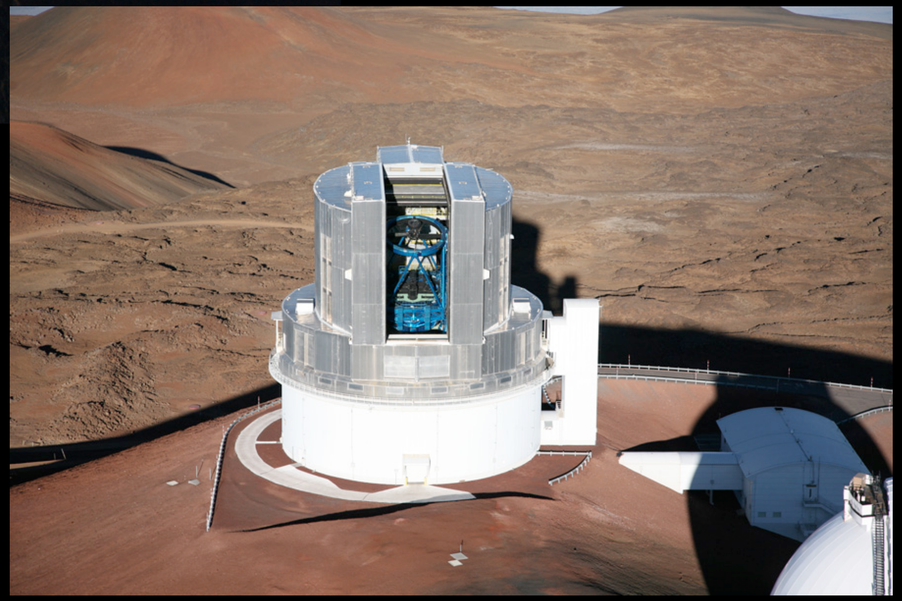
ハワイのマウナケア山
(4200m)
主反射鏡の口径が 8.2m
（一枚鏡で厚さ20cm，重さ
22.8 トン）．



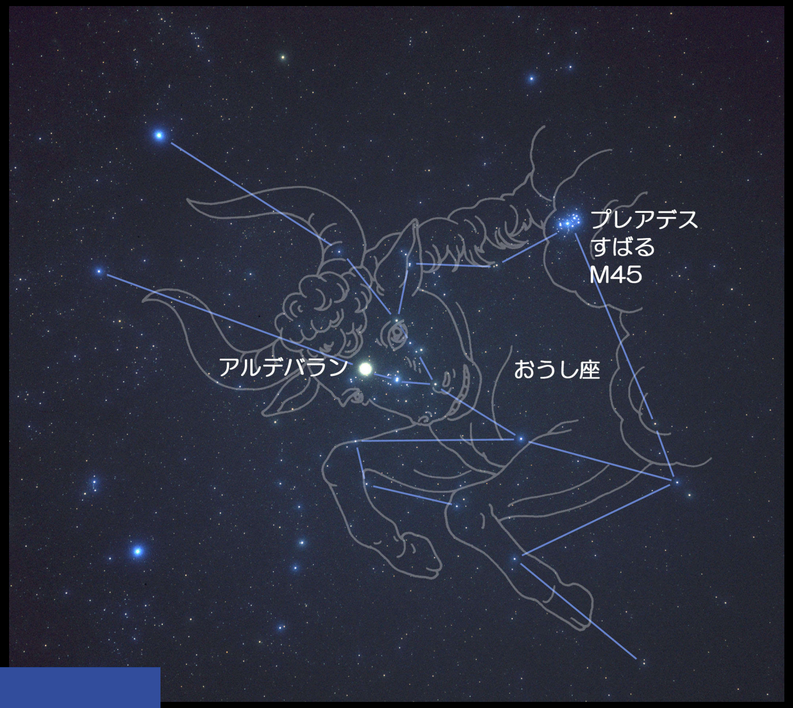
(c) MBTA Corporation Japan #150132







ハワイにある日本の
すばる望遠鏡

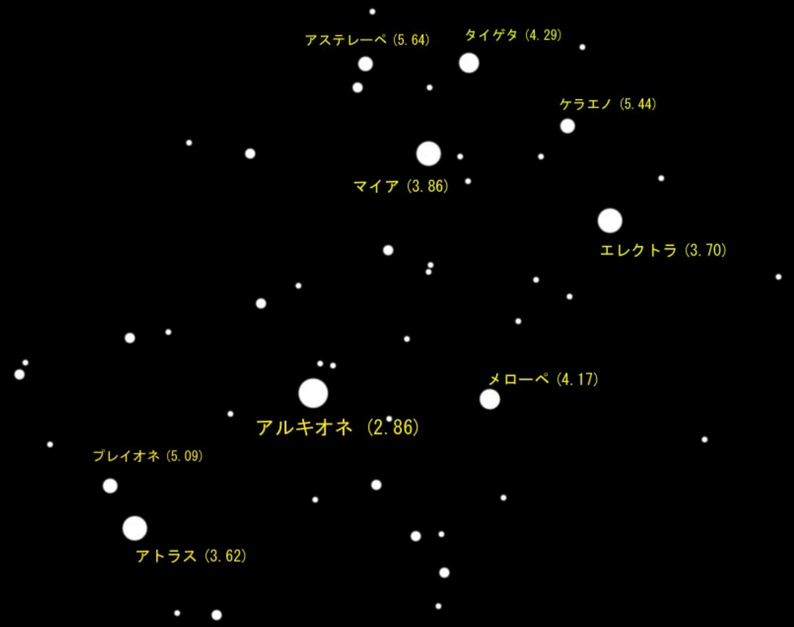






SUBARU

Confidence in Motion



すばる（昴）
プレアデス星団

枕草子　229段

星は
すばる。ひこぼし。ゆふづゝ。
よばひほし、すこしおかし、
おだになからましかば、まいて

星はすばるがいいわよね．彦星も．宵の明星も．
流れ星も少し趣があってオススメ．
尾を引かなければもっと良いのに（笑）



寒昴　季語

【寒昴】（かんすばる）　冬昴　六連星（むつらぼし）
おうし座プレアデス星団の和名「昴」は1月24日深夜に南中するので「寒昴」と呼ばれ冬の季語．肉眼では六星と見えるので「六連星」ともいわれる．

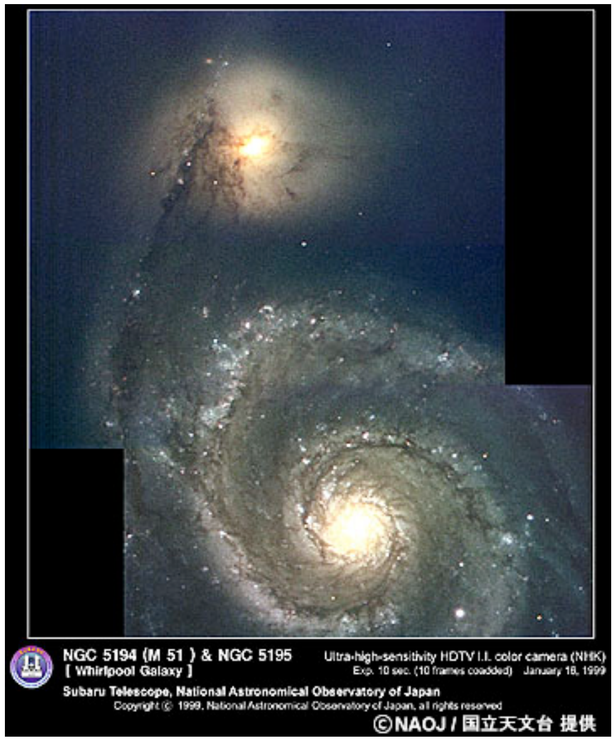
『寒昴 天のいちばん上の座に』山口誓子

「統ばる（すばる）」とは、「統べる」の古語で、「一つにまとまる」「統一される」「集まる」という意味の動詞

【天文】

すばる望遠鏡 (SUBARU telescope)





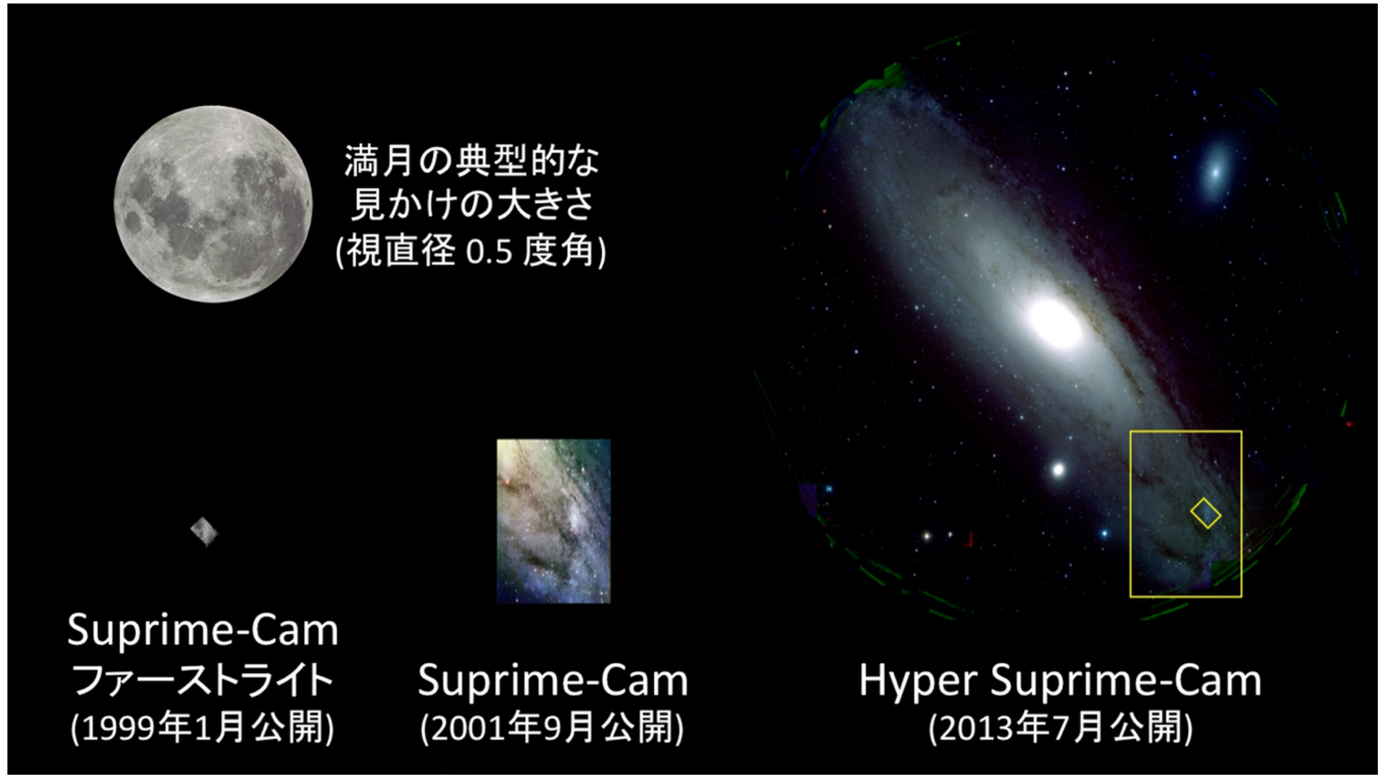


SUMIRE (Subaru Measurement of Images and Redshifts)プロジェクトが進行中．宇宙の詳細な3次元マップを作成し，宇宙膨張やダークマターの分布などを明らかにする．

9億ピクセル・重量約4トンのカメラと，同時に数千の遠方銀河を観測できる分光器を製作・取り付け，数十億光年離れた銀河を観測して宇宙の起源に迫る．

すばる望遠鏡，新型の超広視野カメラがファーストライト

Subaru telescope revised. First Light of HSC.



超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam（ハイパー・シュプリーム・カム, HSC）がファーストライト.
満月9個分の広さの天域を一度に撮影できる世界最高性能の超広視野カメラ.
独自に開発した 116 個の CCD 素子を配置し, 計8億7000万画素を持つ巨大なデジタルカメラ.
アンドロメダ銀河のほぼ全体を1視野で捉えることに成功. すばる望遠鏡に当初から搭載されている　Suprime-Cam（シュプリーム・カム）　では, アンドロメダ銀河の一部　（満月よりやや広い視野）　をシャープに撮影できていましたが, HSC の登場により観測の効率がさらに大きく高まった.

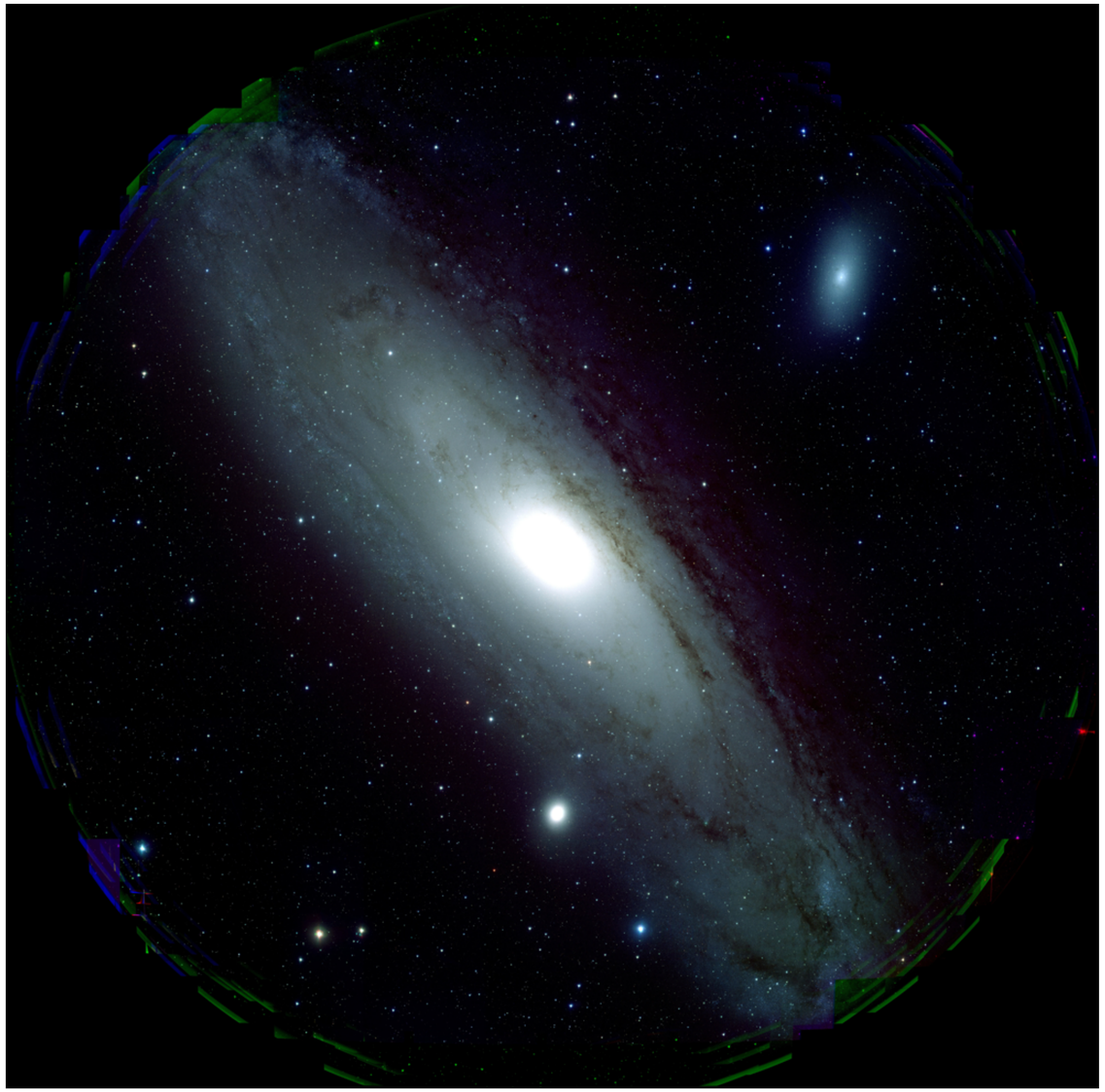
http://www.naoj.org/Topics/2013/07/30/j_index.html

【天文】

すばる望遠鏡，新型の超広視野カメラがファーストライト

2013/7/30

Subaru telescope revised. First Light of HSC.



すばる望遠鏡に搭載された　HSC　がとらえたアンドロメダ銀河 M31　の姿。g　r，i　バンドの画像が青、緑、赤色に対応し、それぞれ 10 分積分（露出）。（クレジット：HSC Project / 国立天文台）

http://www.naoj.org/Topics/2013/07/30/j_index.html

【観測装置】
可視光・赤外

30m 望遠鏡 TMT（Thirty Meter Telescope）

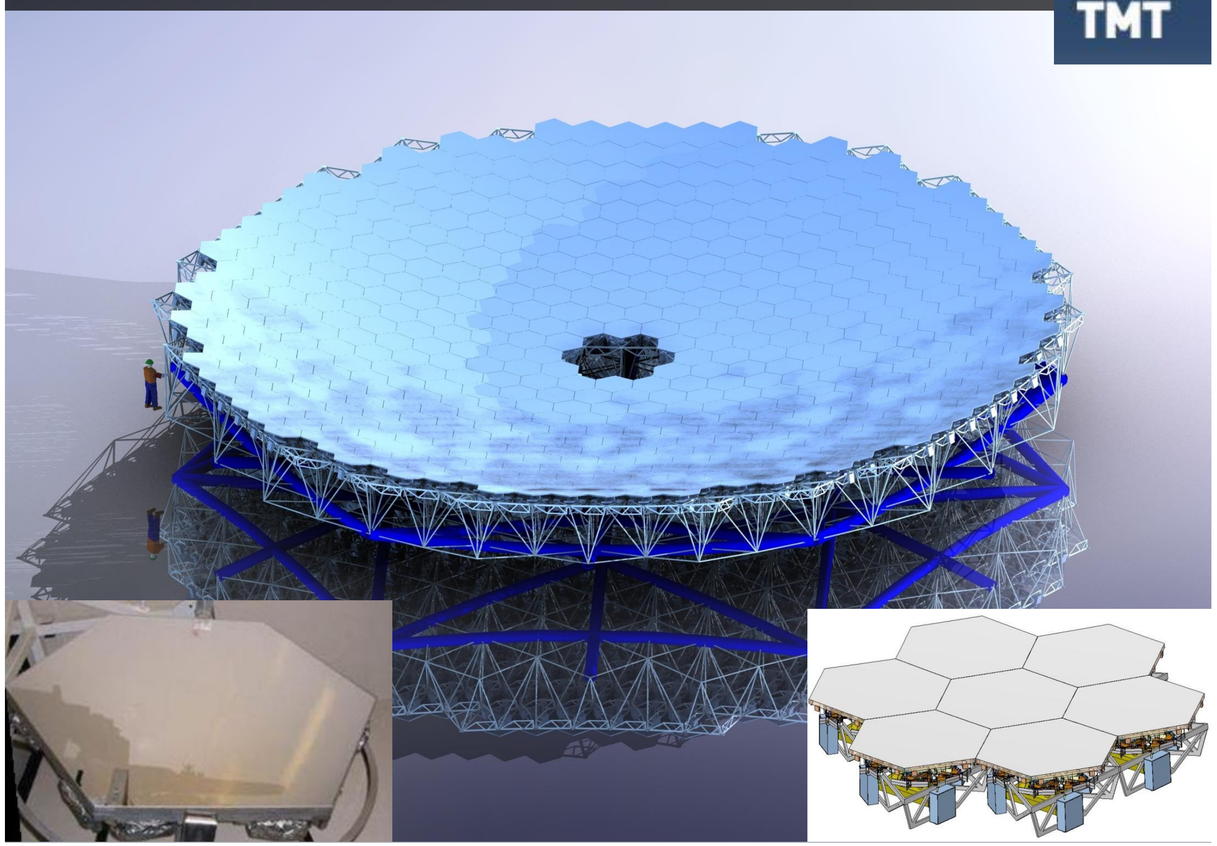


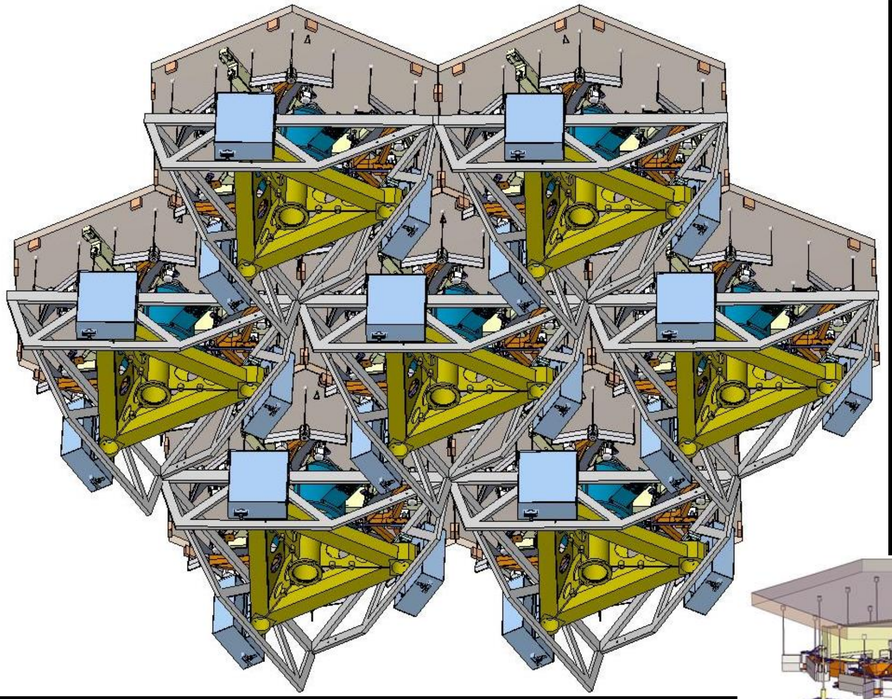
2013年12月理論天文学・宇宙物理学懇談会シンポジウム，柏川氏のスライドから

【観測装置】
可視光・赤外

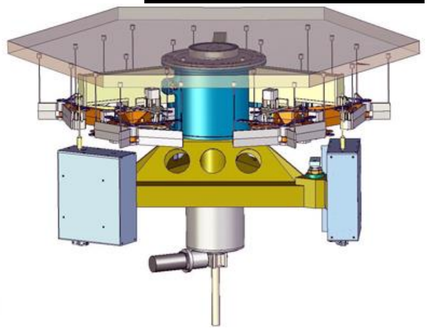
30m 望遠鏡 TMT（Thirty Meter Telescope）

■ 492枚の鏡を敷き詰める。１枚の直径1.44m





■ 鏡の裏からロボットで支える。
重力による変形を瞬時に補正。



2013年12月理論天文学・宇宙物理学懇談会シンポジウム，柏川氏のスライドから

【観測装置】
可視光・赤外

30m 望遠鏡 TMT（Thirty Meter Telescope）

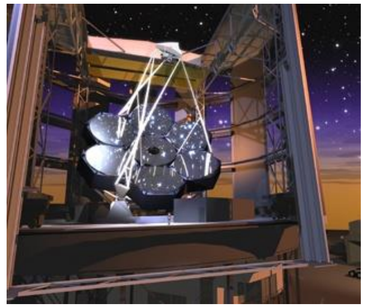
TMT
THIRTY METER TELESCOPE

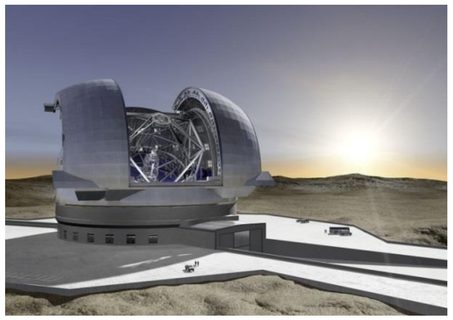
世界の次世代超大型望遠鏡計画

NAOJ
National Astronomical Observatory of Japan

計画	TMT	GMT	E-ELT
直径	30m	22m(8.4m x 7)	39m
建設地 (標高)	ハワイ：マウナケア (4050m) 北の宇宙	チリ：ラスカンパナス （2550m）南の宇宙	チリ：セロアマゾネス （3060m）南の宇宙
予算規模	1500億円	1100億円？（推定額）	2000億円？(推定額)
建設期間 (完成予定)	９年(2022年)	7年（2020年代？）	11年(2024年？)
メンバー	日本、米国(カリフォルニア大ほか）、カナダ、中国、インド	米国（カーネギー天文台、ほか）、韓国、オーストラリア	欧州南天天文台 (15ヶ国)







2013年12月理論天文学・宇宙物理学懇談会シンポジウム，柏川氏のスライドから

【観測装置】
可視光・赤外

Vera Rubin 望遠鏡（旧LSST）



VERA C. RUBIN
OBSERVATORY



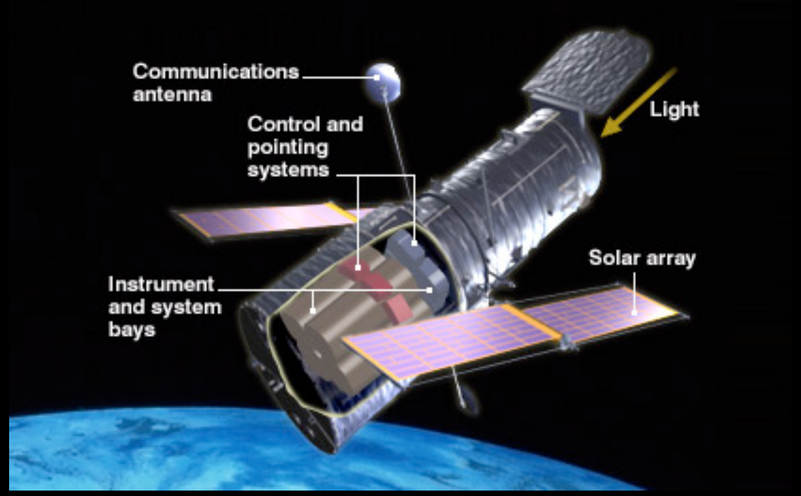
Vera C Rubin
(1928–2016)

アメリカの22の大学・研究機関の共同プロジェクト.
チリの標高2660mの高さに建設. 2024年観測開始予定. 口径 8.4 m
当初はLarge Synoptic Survey Telescope(LSST)という望遠鏡名で呼ばれていたが、2020年に名称決定

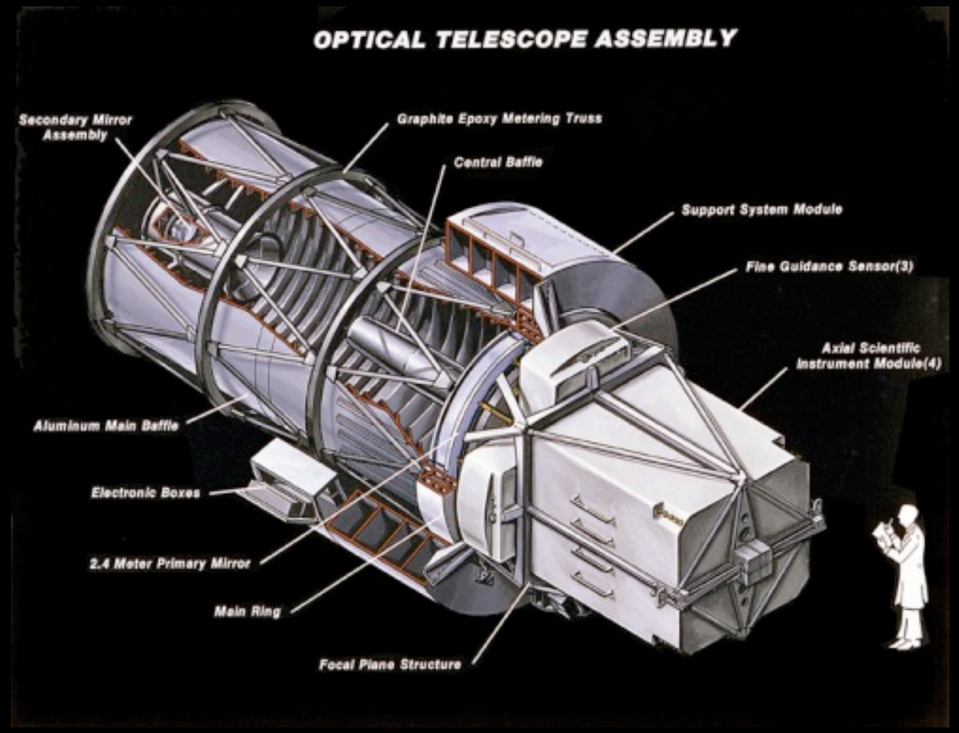
https://www.lsst.org

https://www.youtube.com/watch?v=9aQY6f1Bcpk

ハッブル宇宙望遠鏡 （Hubble Space Telescope; HST）1990-現在



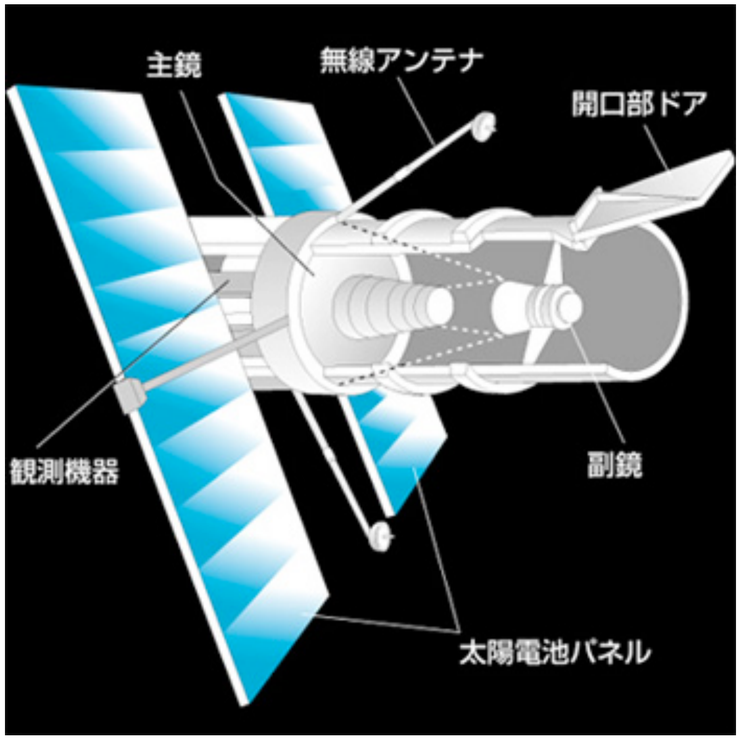




【観測装置】

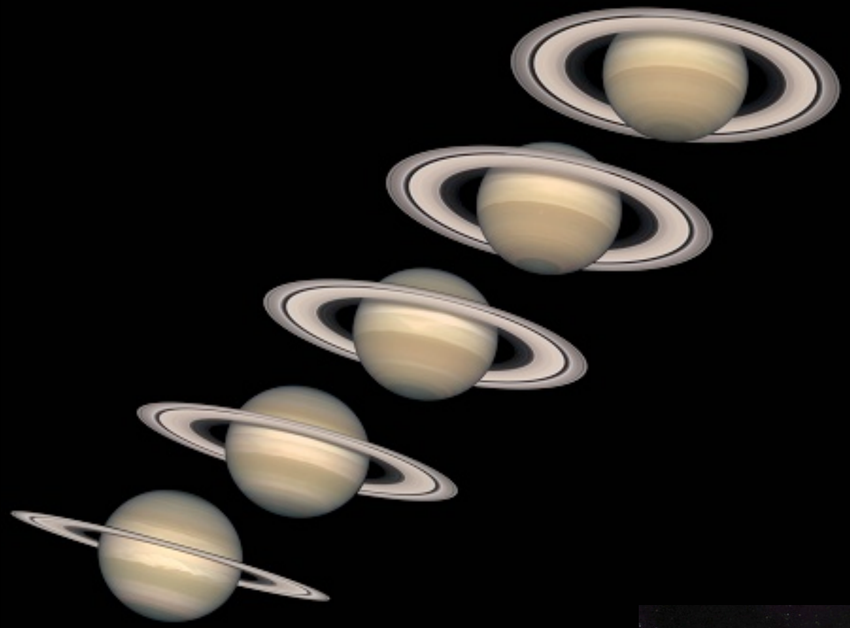
ハッブル宇宙望遠鏡（Hubble Space Telescope; HST）1990-現在



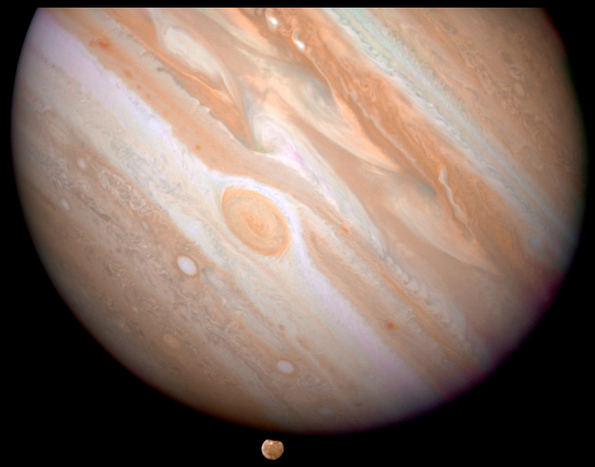


アメリカが1990年，宇宙空間に打ち上げた望遠鏡.
衛星は長さ 13.1m の筒型，重さは 11トン
反射望遠鏡の主鏡直径は 2.4 m .
宇宙空間にあるため，大気の影響を受けず，鮮明な画像が得られる.

ハッブル宇宙望遠鏡（Hubble Space Telescope; HST）1990-現在

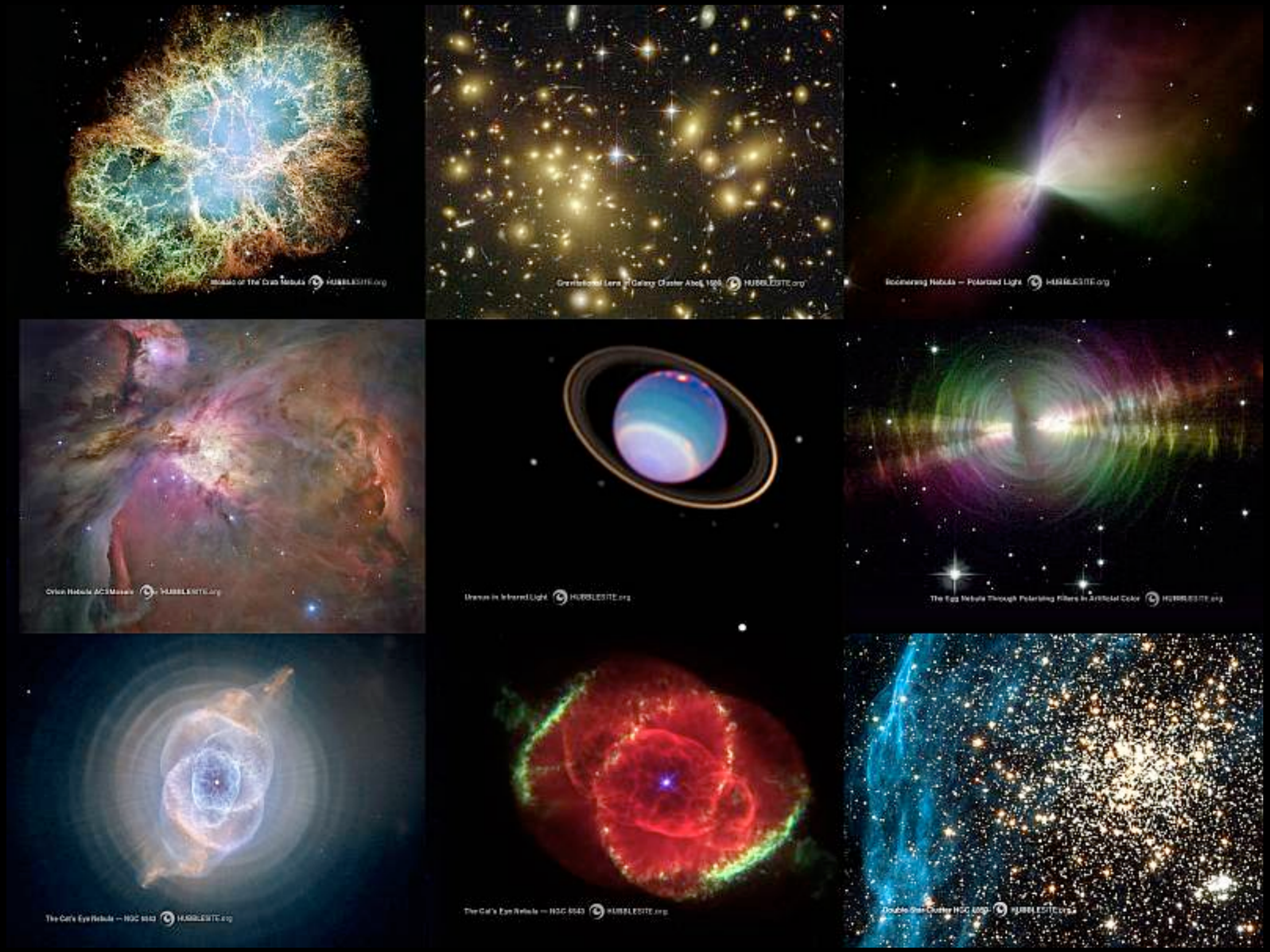








ハッブル宇宙望遠鏡（Hubble Space Telescope; **HST**）1990-現在



apod.nasa.gov/apod/ap091014.html

Astronomy Picture of the Day

Discover the cosmos! Each day a different image or photograph of our fascinating universe is featured, along with a brief explanation written by a professional astronomer.

2009 October 14



Pleiades and Stardust
Credit & Copyright: Rogelio Bernal Andreo (Deep Sky Colors)

Explanation: Have you ever seen the Pleiades star cluster? Perhaps the most famous star cluster on the sky, the Pleiades can be seen without binoculars from even the depths of a light-polluted city. Also known as the Seven Sisters and M45, the Pleiades is one of the brightest and closest open clusters. Hurtling through a cosmic dust cloud a mere 400 light-years away, the Pleiades or Seven Sisters star cluster is well-known for its striking blue reflection nebulae. This remarkable wide-field (3 degree) image of the region shows the famous star cluster near the center, while highlighting lesser known dusty reflection nebulas nearby, across an area that would span over 20 light-years. In this case, the sister stars and cosmic dust clouds are not related, they just happen to be passing through the same region of space.

http://apod.nasa.gov/

【観測装置】
可視光・赤外

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡
James Webb Space Telescope

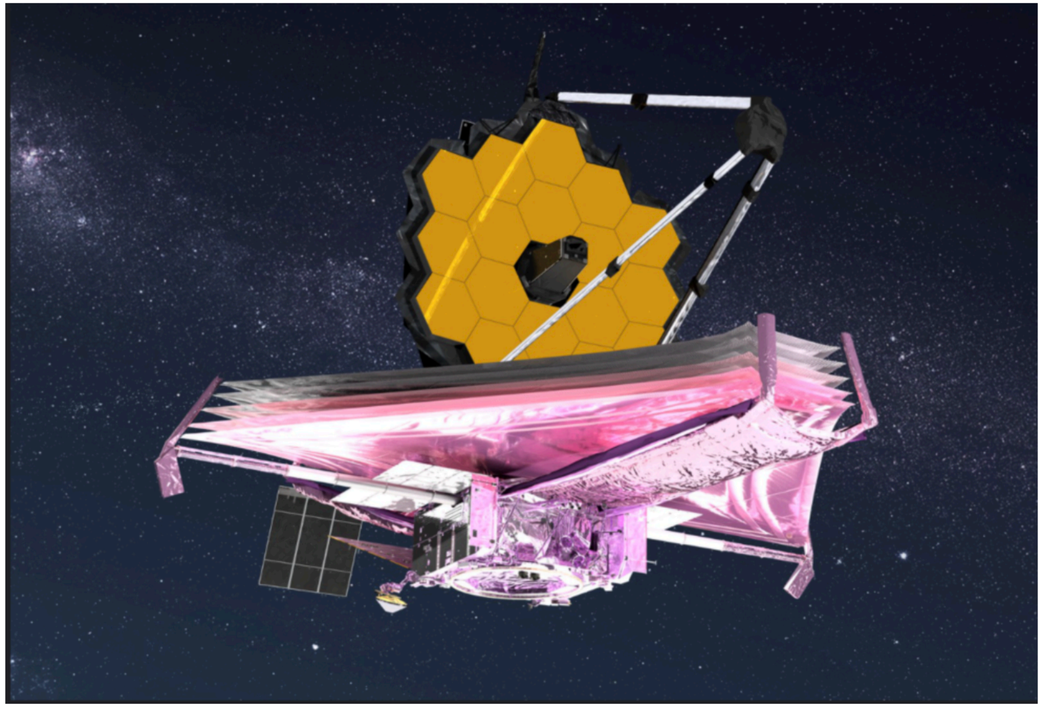
2021年12月25日打ち上げ成功

James Webbは1960年代のNASA長官．アポロ計画を推進した

Webb Telescope

Jan 9, 2022
RELEASE 22-004

NASA's Webb Telescope Reaches Major Milestone as Mirror Unfolds



https://www.jwst.nasa.gov

Quick Facts

PRIMARY MIRROR SIZE: 21.3 feet (6.5 meters) across

MIRROR SHAPE: The mirror is comprised of 18 gold-plated hexagonal deployable segments

SUNSHIELD: Webb's five-layer deployable sunshield is the size of a tennis court

INSTRUMENTS: Webb has four science instruments: Near-Infrared Camera (NIRCam), Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec), Mid-Infrared Instrument (MIRI), and Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph (NIRISS) with the Fine Guidance Sensor (FGS)

WAVELENGTHS: Visible, Near Infrared, Mid Infrared (0.6-28.5 micrometers)

TRAVEL DISTANCE: 1 million miles (1.5 million kilometers) from Earth

LOCATION IN SPACE: Orbiting the Sun around the second Lagrange point (L2)

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡　First Image

James Webb Space Telescope

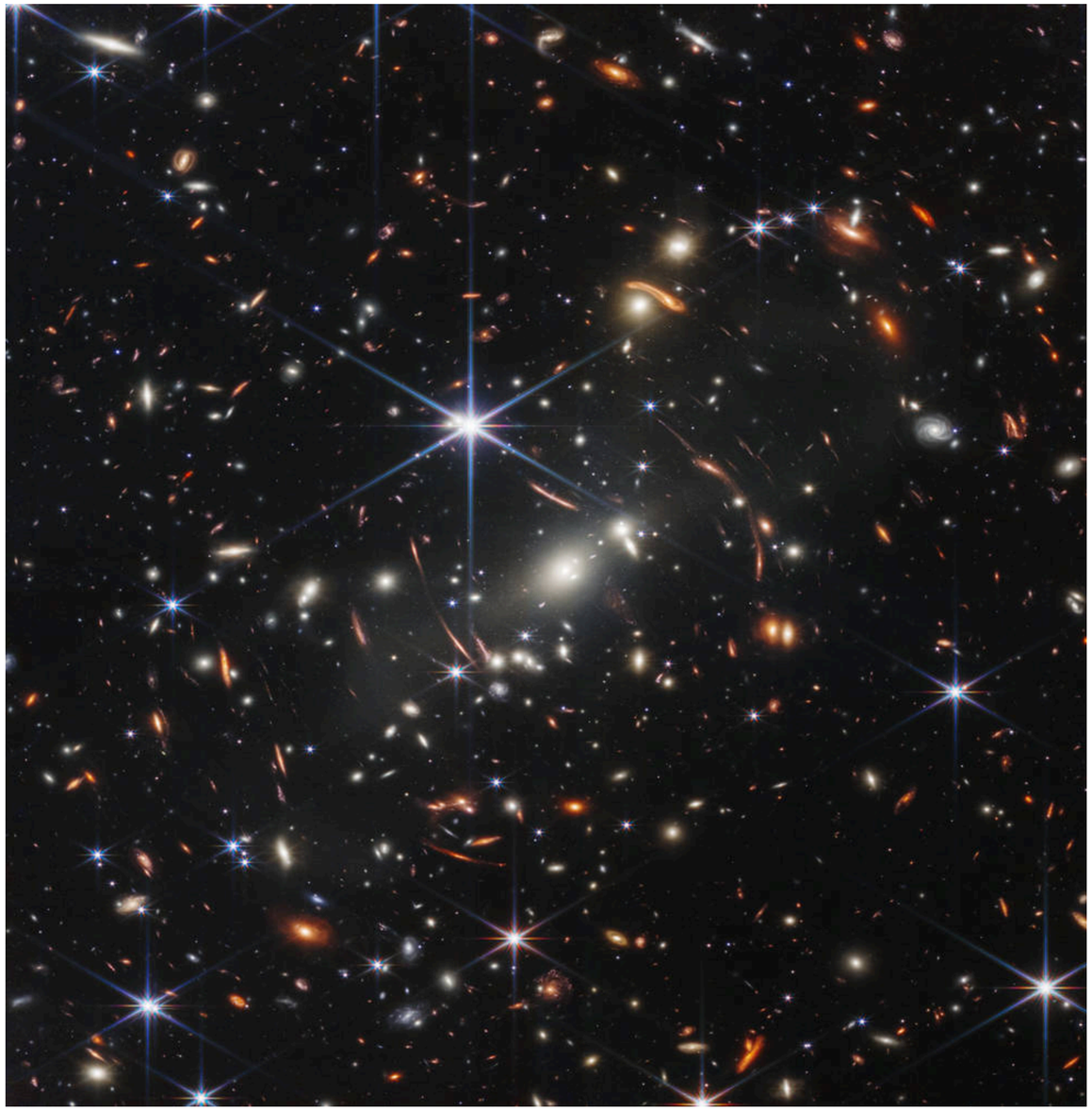


Stephan’s Quintet, a visual grouping of five galaxies, is best known for being prominently featured in the holiday classic film, “It’s a Wonderful Life.” Today, NASA’s James Webb Space Telescope reveals Stephan’s Quintet in a new light. This enormous mosaic is Webb’s largest image to date, covering about one-fifth of the Moon’s diameter. It contains over 150 million pixels and is constructed from almost 1,000 separate image files. The information from Webb provides new insights into how galactic interactions may have driven galaxy evolution in the early universe.

https://www.nasa.gov/webbfirstimages

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡　First Image

James Webb Space Telescope



NASA’s James Webb Space Telescope has produced the deepest and sharpest infrared image of the distant universe to date. Known as Webb’s First Deep Field, this image of galaxy cluster SMACS 0723 is overflowing with detail.
Thousands of galaxies – including the faintest objects ever observed in the infrared – have appeared in Webb’s view for the first time. This slice of the vast universe covers a patch of sky approximately the size of a grain of sand held at arm’s length by someone on the ground.

https://www.nasa.gov/webbfirstimages

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡　First Image

2022/7/12

James Webb Space Telescope





ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡　First Image

James Webb Space Telescope

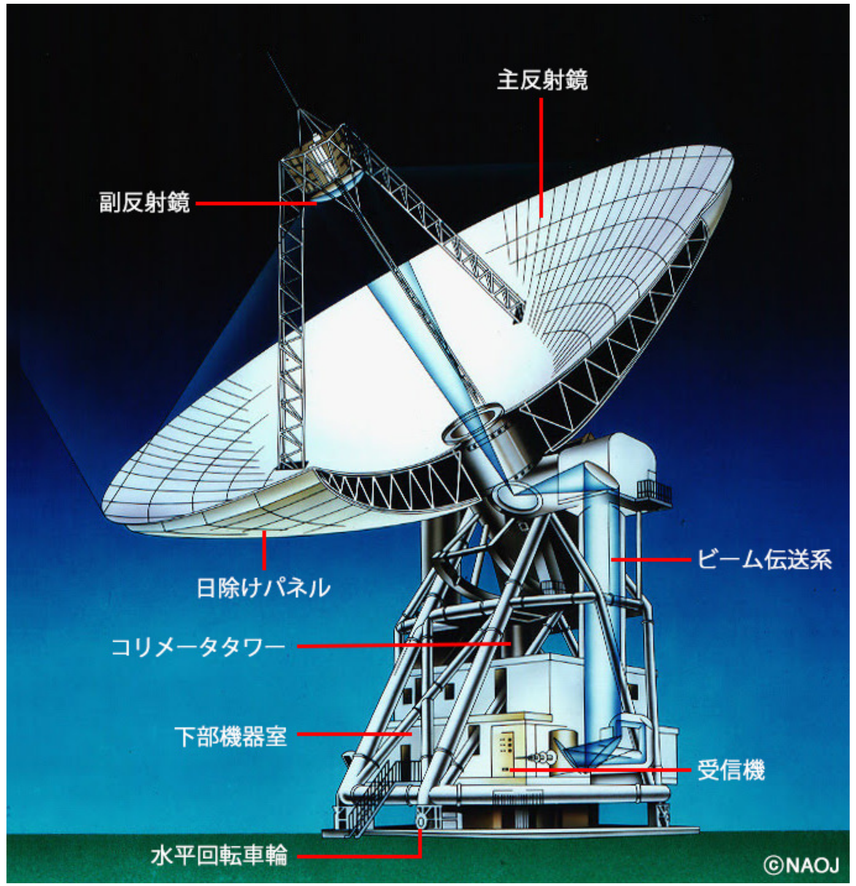


This landscape of “mountains” and “valleys” speckled with glittering stars is actually the edge of a nearby, young, star-forming region called NGC 3324 in the Carina Nebula（カリーナ星雲，りゅうこつ座）．　Captured in infrared light by NASA’s new James Webb Space Telescope, this image reveals for the first time previously invisible areas of star birth.

https://www.nasa.gov/webbfirstimages

【観測装置】
電波

電波望遠鏡　口径が大きいほど集光力高い，分解能高い



野辺山45m望遠鏡



分解能＝波長/口径

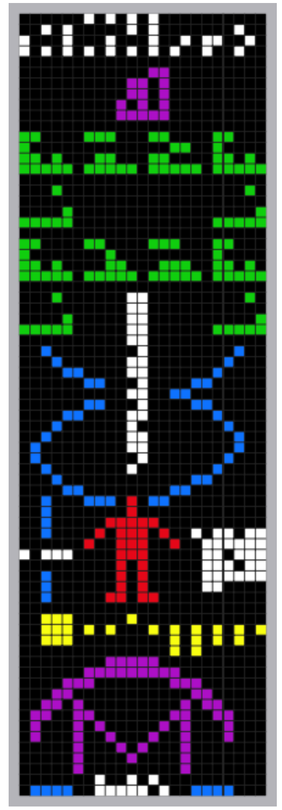
http://www.mitsubishielectric.co.jp/me/dspace/column/c1805_2.html

【観測装置】
電波

アレシボ電波望遠鏡　305メートル球面電波望遠鏡(1963ー2020)

（Arecibo Observatory,　プエルトリコ）





1964　水星の自転周期55日の発見
1968　かにパルサー中心に中性子星発見
1974　連星中性子星発見
1989　小惑星カスタリア直接観測
1992　パルサーを公転する太陽系外惑星発見

アレシボ・メッセージ (1974)
SETI (1999—)

2020年 11月　集光部分落下，終了

【観測装置】
電波

中国「天眼（FAST）」 500メートル球面電波望遠鏡（2016ー）

（Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope: FAST）



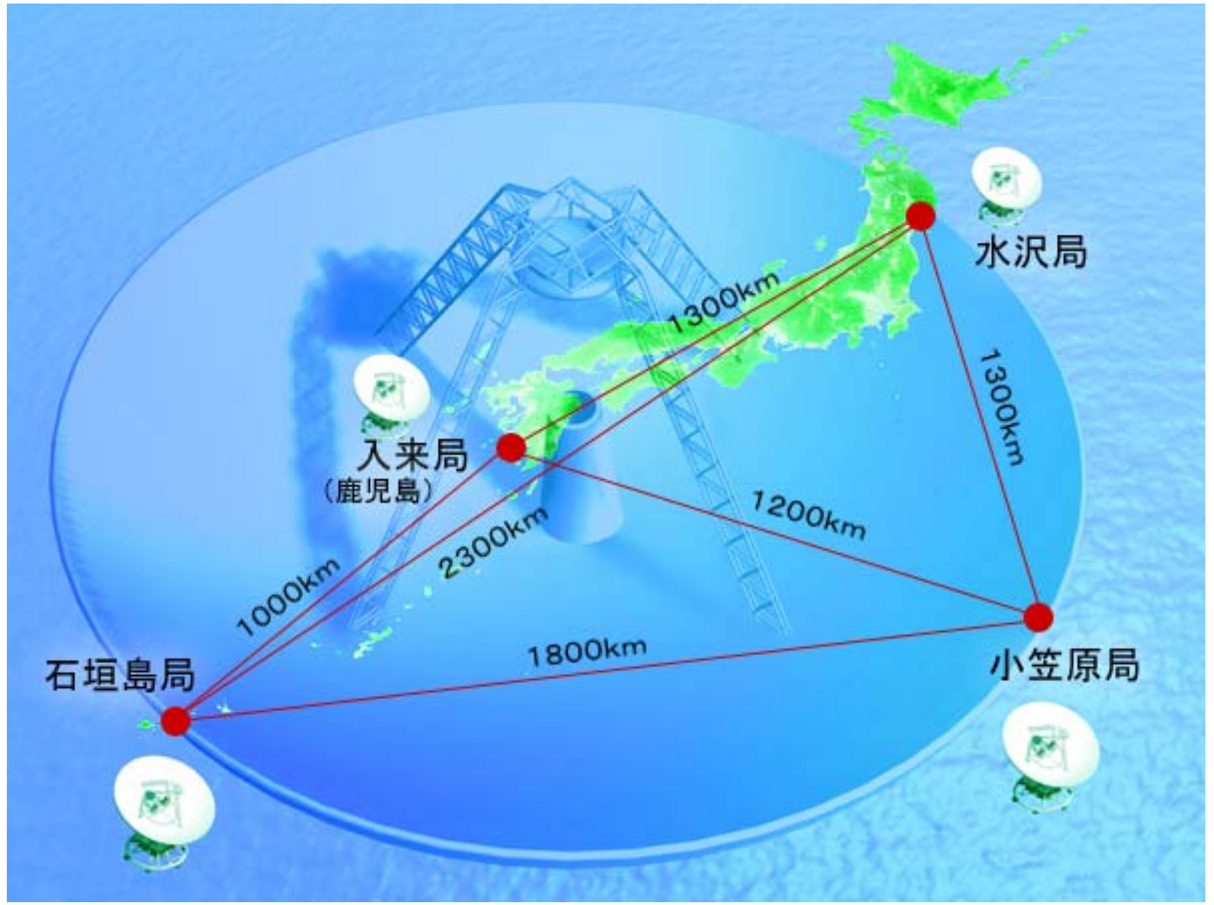
中国南西部の貴州省，185億円，天頂から40度の範囲を観測可能，
１万人強制移住，半径５km以内携帯電話禁止

http://japanese.china.org.cn/business/txt/2016-07/04/content_38806293.htm



NOBEYAMA
国立天文台 野辺山宇宙電波観測所

VERA = VLBI Exploration of Radio Astrometry



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

【観測装置】
電波

アルマ望遠鏡 Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array

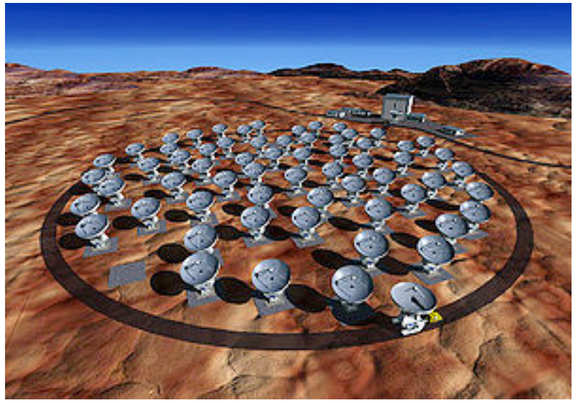
日本が，欧米と共同で，チリのアタカマに建設した電波望遠鏡

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．



「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」





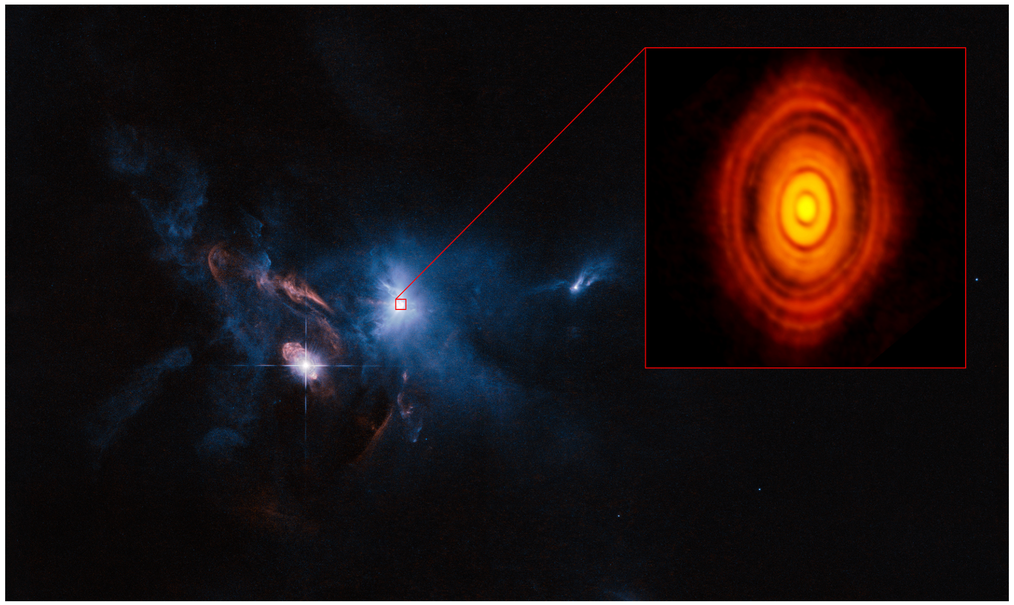
http://alma.mtk.nao.ac.jp/

【天文】

アルマ望遠鏡、「視力2000」を達成！

2014/11/06

First Resolved Image of a Long-Period Comet's Nucleus



アルマ望遠鏡が観測したおうし座HL星と、ハッブル宇宙望遠鏡で撮影したその周囲の様子。大量のガスがおうし座HL星の周囲を取り囲んでいるため、ハッブル宇宙望遠鏡ではその中を観測することができないが、アルマ望遠鏡はそのガスの奥深くに埋もれた星のすぐ近くの様子を詳しく観測することができた.
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/NASA/ESA

サイディングスプリング彗星(C/2013 A1)が, 10月20日(日本時間), 火星から14万kmの距離を通過した. 天文学的にはニアミスともいえる大接近で, 火星で活動中の周回機や探査車が観測を行った.

NASAの探査機「マーズ・リコナサンス・オービター」(MRO)に搭載された高解像度カメラ「HiRISE」は, 最接近時の彗星を1ピクセルあたり138mでとらえた. 画像では, 彗星核が2, 3ピクセルの大きさで写っている. 太陽系の果てのオールト雲から初めて太陽系中心部にやってきた彗星の核がはっきりと撮像されたのはこれが初めてのこと. 核の大きさはおよそ1kmと思われていたが, 実際にはその半分以下であることがこの観測から判明した.

MROなど火星上空の周回機は, 彗星から放出された塵によるダメージを避けるため, リスクの高い時間帯に火星の裏側に回る軌道を取っていた. その後, 探査機は全て正常な状態であることが確認されている.

http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201411067466.html
http://www.astroarts.co.jp/news/2014/10/21sidingspring/index-j.shtml

2019年4月10日, 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



地球から5500万光年

https://alma-telescope.jp/news/press/eht-201904

The Astrophysical Journal Letters, 875:L1 (17pp), 2019 April 10 https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec
© 2019. The American Astronomical Society.
OPEN ACCESS

First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole

The Event Horizon Telescope Collaboration
(See the end matter for the full list of authors.)
Received 2019 March 1; revised 2019 March 12; accepted 2019 March 12; published 2019 April 10

Abstract

When surrounded by a transparent emission region, black holes are expected to reveal a dark shadow caused by gravitational light bending and photon capture at the event horizon. To image and study this phenomenon, we have assembled the Event Horizon Telescope, a global very long baseline interferometry array observing at a wavelength of 1.3 mm. This allows us to reconstruct event-horizon-scale images of the supermassive black hole candidate in the center of the giant elliptical galaxy M87. We have resolved the central compact radio source as an asymmetric bright emission ring with a diameter of 42 ± 3 μas, which is circular and encompasses a central depression in brightness with a flux ratio $\gtrsim$10:1. The emission ring is recovered using different calibration and imaging schemes, with its diameter and width remaining stable over four different observations carried out in different days. Overall, the observed image is consistent with expectations for the shadow of a Kerr black hole as predicted by general relativity. The asymmetry in brightness in the ring can be explained in terms of relativistic beaming of the emission from a plasma rotating close to the speed of light around a black hole. We compare our images to an extensive library of ray-traced general-relativistic magnetohydrodynamic simulations of black holes and derive a central mass of $M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9\,M_\odot$. Our radio-wave observations thus provide powerful evidence for the presence of supermassive black holes in centers of galaxies and as the central engines of active galactic nuclei. They also present a new tool to explore gravity in its most extreme limit and on a mass scale that was so far not accessible.

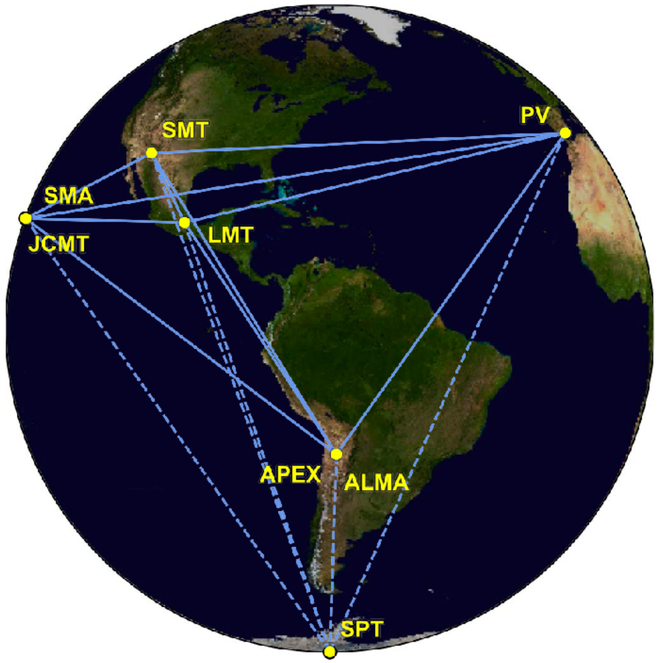


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual

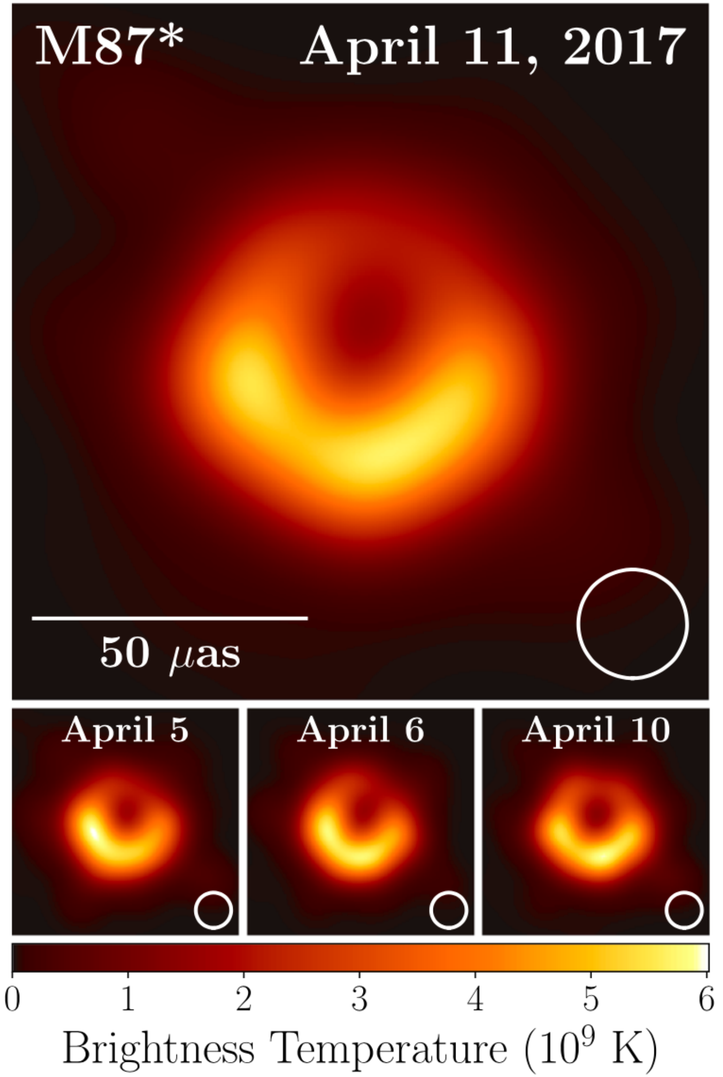


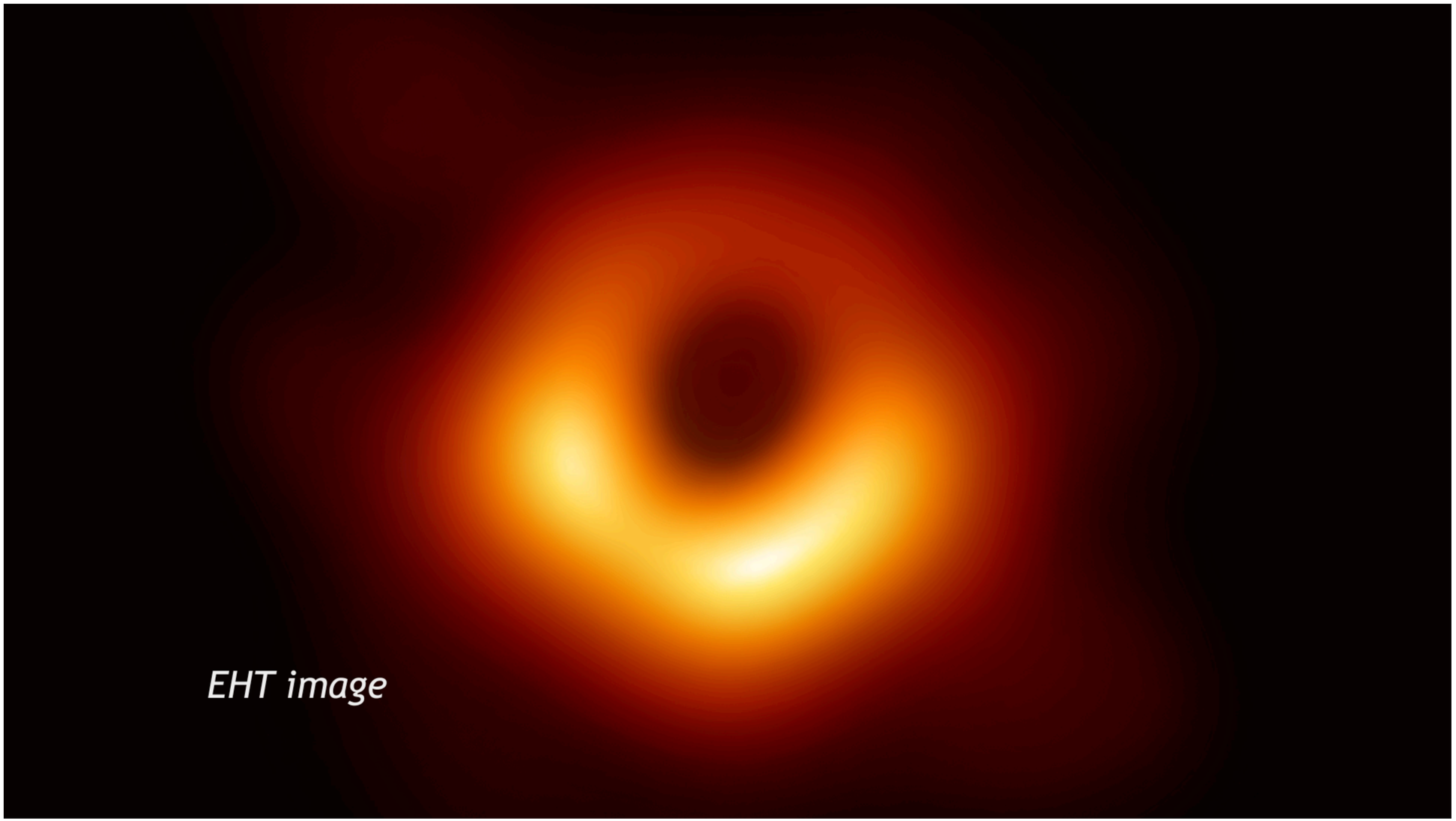
Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the three kernels (20 μas FWHM) is shown in the lower right. The image is shown in units of brightness temperature, $T_b = S\lambda^2/2k_B\Omega$, where S is the flux density, λ is the observing wavelength, k_B is the Boltzmann constant, and Ω is the solid angle of the resolution element. Bottom: similar images taken over different days showing the stability of the basic image structure and the equivalence among different days. North is up and east is to the left.

2019年4月10日, 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



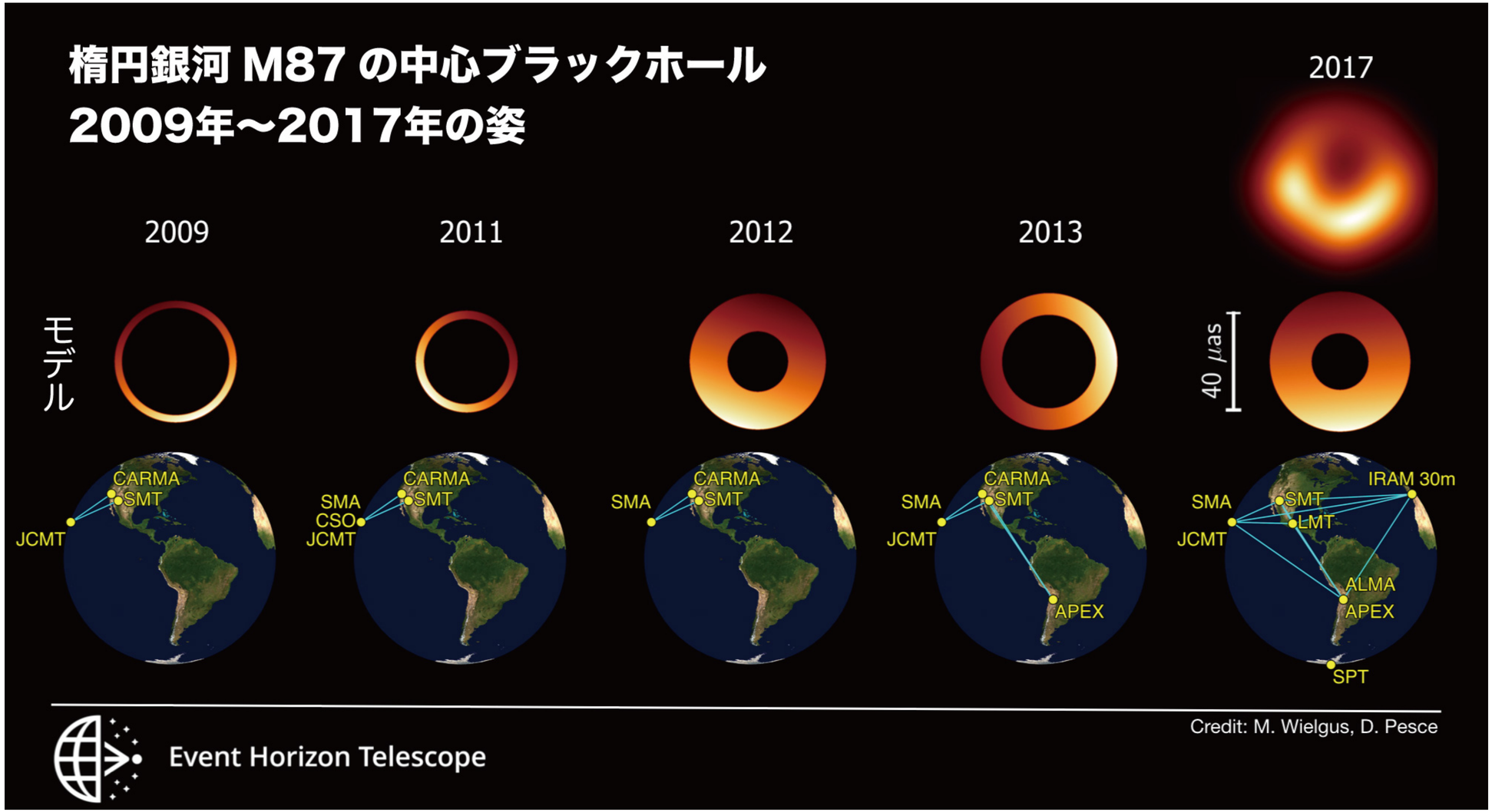
https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190410-eht.html

ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像



https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eht/videos.html　　0’58”

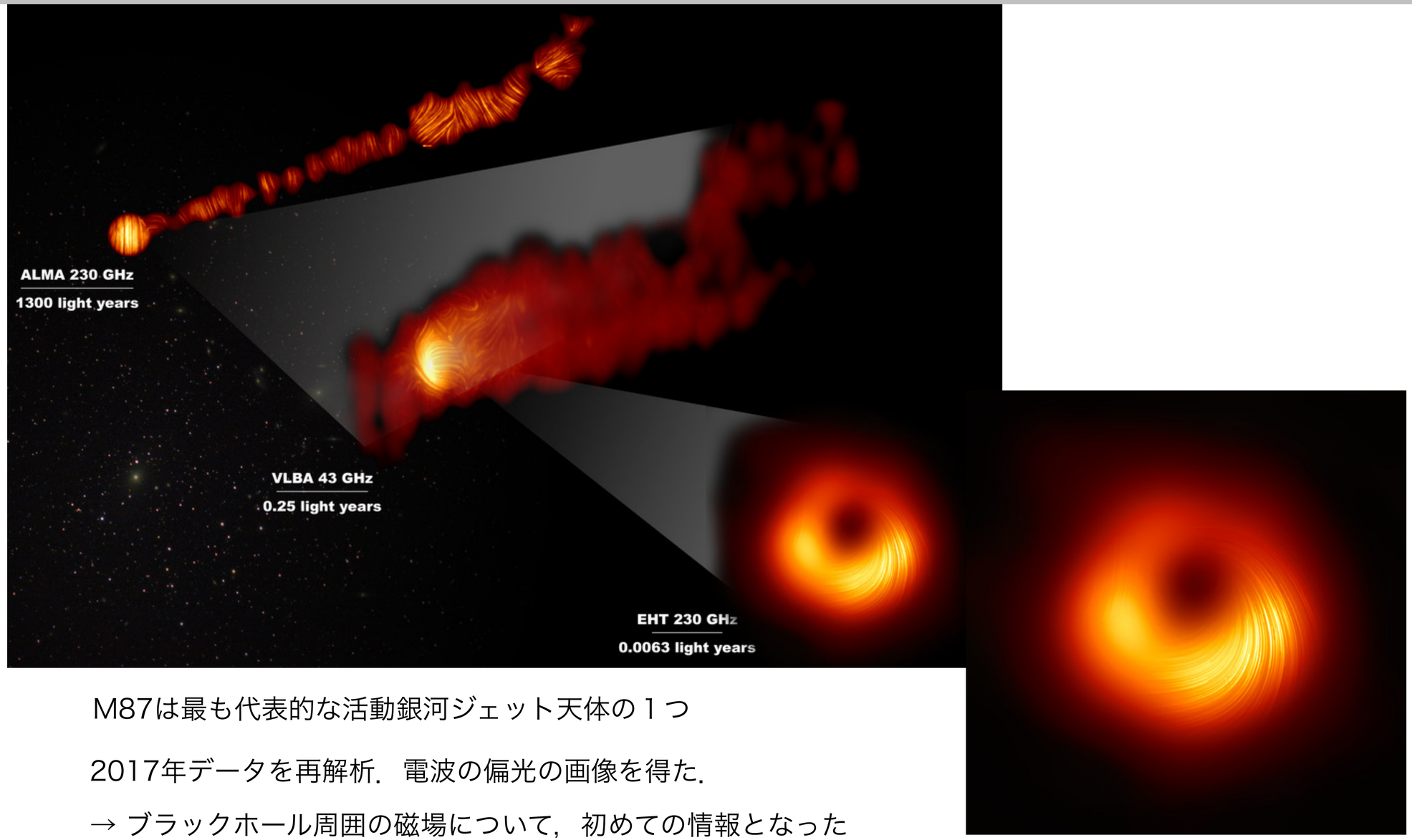
M87 ブラックホールのリング像は揺れ動いていた



ブラックホールを取り囲む非対称なリング構造が8年間にわたり定常的に存在する一方で、リングの明るい部分の向きが揺れ動いていた．（過去の試験データを解析）

https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20200923

M87 ブラックホール近傍の偏波画像.（周辺の磁場の向きを表す）



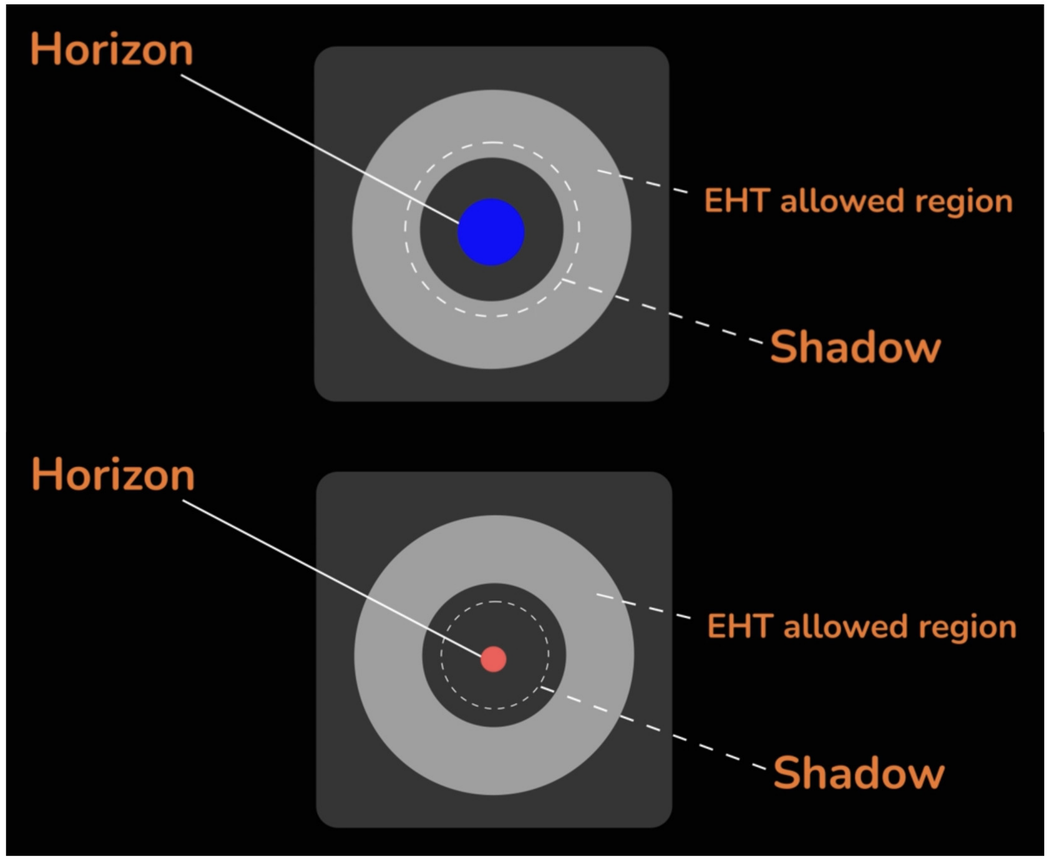
M87は最も代表的な活動銀河ジェット天体の１つ

2017年データを再解析．電波の偏光の画像を得た.

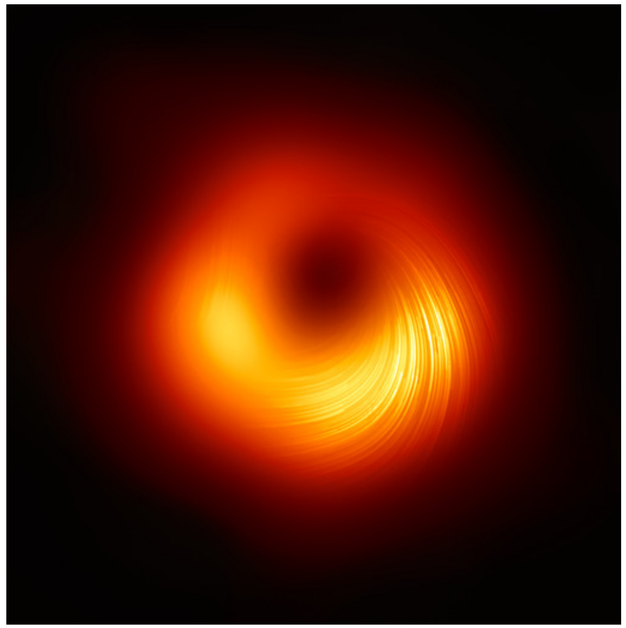
→ ブラックホール周囲の磁場について，初めての情報となった

https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20210324

M87 ブラックホールの画像で, 相対性理論の検証



理論によって, ブラックホール・シャドウの大きさは異なる.



→ M87の観測データは、一般相対性理論と見事に一致し、
超ひも理論に基づく重力理論ともある程度一致

https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20210520

天の川銀河中心のブラックホールを直接観測成功!

The Astrophysical Journal Letters, 930:L12 (21pp), 2022 May 10 https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6674
© 2022. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.
OPEN ACCESS

First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way

The Event Horizon Telescope Collaboration
(See the end matter for the full list of authors.)
Received 2022 March 25; revised 2022 April 4; accepted 2022 April 8; published 2022 May 12

Abstract

We present the first Event Horizon Telescope (EHT) observations of Sagittarius A* (Sgr A*), the Galactic center source associated with a supermassive black hole. These observations were conducted in 2017 using a global interferometric array of eight telescopes operating at a wavelength of $\lambda = 1.3$ mm. The EHT data resolve a compact emission region with intrahour variability. A variety of imaging and modeling analyses all support an image that is dominated by a bright, thick ring with a diameter of 51.8 ± 2.3 μas (68% credible interval). The ring has modest azimuthal brightness asymmetry and a comparatively dim interior. Using a large suite of numerical simulations, we demonstrate that the EHT images of Sgr A* are consistent with the expected appearance of a Kerr black hole with mass $\sim 4 \times 10^6\, M_\odot$, which is inferred to exist at this location based on previous infrared observations of individual stellar orbits, as well as maser proper-motion studies. Our model comparisons disfavor scenarios where the black hole is viewed at high inclination ($i > 50°$), as well as nonspinning black holes and those with retrograde accretion disks. Our results provide direct evidence for the presence of a supermassive black hole at the center of the Milky Way, and for the first time we connect the predictions from dynamical measurements of stellar orbits on scales of 10^3–10^5 gravitational radii to event-horizon-scale images and variability. Furthermore, a comparison with the EHT results for the supermassive black hole M87* shows consistency with the predictions of general relativity spanning over three orders of magnitude in central mass.

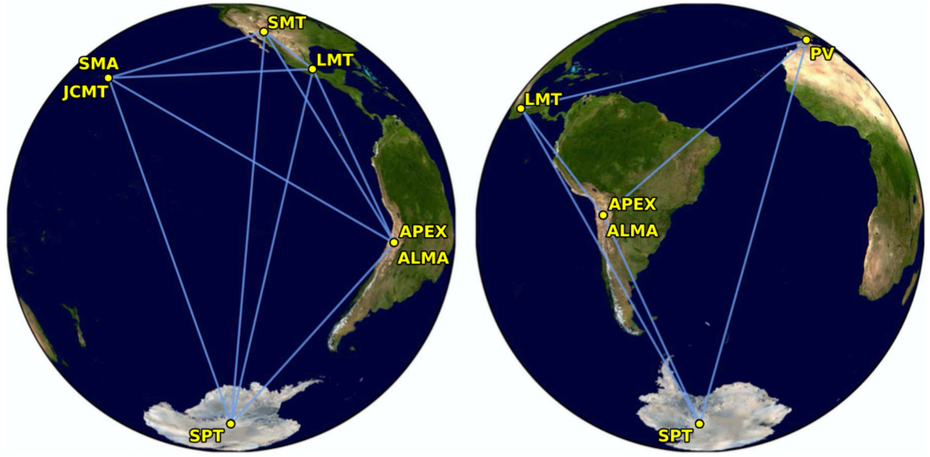


Table 1
Measured Parameters of Sgr A*

Parameter	EHT Estimate
Emission ring:[a]	
Diameter, d	51.8 ± 2.3 μas
Fractional width, W/d	~30–50
Orientation, η	…
Brightness asymmetry, A	~0.04%–0.3%
Angular gravitational radius,[a] θ_g	$4.8^{+1.4}_{-0.7}$ μas
Black hole mass,[b] M	$4.0^{+1.1}_{-0.6} \times 10^6\, M_\odot$
Angular shadow diameter,[c] $d_{\rm sh}$	48.7 ± 7.0 μas
Schwarzschild shadow deviation,[c] δ	$-0.08^{+0.09}_{-0.09}$ (VLTI)
	$-0.04^{+0.09}_{-0.10}$ (Keck)
Parameter	**Previous Estimate**
Angular gravitational radius, θ_g:	
Stellar orbits (VLTI)[d]	$5.125 \pm 0.009 \pm 0.020$ μas
Stellar orbits (Keck)[e]	$4.92 \pm 0.03 \pm 0.01$ μas
Black hole distance, D:	
Stellar orbits (VLTI)[d]	$8277 \pm 9 \pm 33$ pc
Stellar orbits (Keck)[e]	$7935 \pm 50 \pm 32$ pc
Masers (cm VLBI)	8150 ± 150 pc
Black hole mass, M:	
Stellar orbits (VLTI)[d]	$(4.297 \pm 0.013) \times 10^6\, M_\odot$
Stellar orbits (Keck)[e]	$(3.951 \pm 0.047) \times 10^6\, M_\odot$

Notes.
[a] The orientation and magnitude of the ring's brightness asymmetry are poorly constrained; they vary significantly among the reconstructed image modes and among different modeling and imaging methods. For details, see Paper IV.
[b] To translate our estimate of θ_g into an estimated mass of Sgr A*, we use the distance to Sgr A* estimated using trigonometric VLBI parallaxes and proper motions of molecular masers in spiral arms of the Milky Way (Reid et al. 2019). For details, see Paper IV.
[c] Estimates of $d_{\rm sh}$ are determined solely from EHT data, but estimates of δ use priors for θ_g from resolved stellar orbits as indicated. For details, see Paper VI.
[d] Gravity Collaboration et al. (2022).
[e] Do et al. (2019).
[f] Reid et al. (2019).

天の川銀河中心のブラックホールを直接観測成功!

The Astrophysical Journal Letters, 930:L14 (64pp), 2022 May 10 https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6429
© 2022. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.
OPEN ACCESS

First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. III. Imaging of the Galactic Center Supermassive Black Hole

The Event Horizon Telescope Collaboration
(See the end matter for the full list of authors.)

Received 2022 February 28; revised 2022 March 25; accepted 2022 March 27; published 2022 May 12

Abstract

We present the first event-horizon-scale images and spatiotemporal analysis of Sgr A* taken with the Event Horizon Telescope in 2017 April at a wavelength of 1.3 mm. Imaging of Sgr A* has been conducted through surveys over a wide range of imaging assumptions using the classical CLEAN algorithm, regularized maximum likelihood methods, and a Bayesian posterior sampling method. Different prescriptions have been used to account for scattering effects by the interstellar medium toward the Galactic center. Mitigation of the rapid intraday variability that characterizes Sgr A* has been carried out through the addition of a "variability noise budget" in the observed visibilities, facilitating the reconstruction of static full-track images. Our static reconstructions of Sgr A* can be clustered into four representative morphologies that correspond to ring images with three different azimuthal brightness distributions and a small cluster that contains diverse nonring morphologies. Based on our extensive analysis of the effects of sparse (u, v)-coverage, source variability, and interstellar scattering, as well as studies of simulated visibility data, we conclude that the Event Horizon Telescope Sgr A* data show compelling evidence for an image that is dominated by a bright ring of emission with a ring diameter of $\sim$50 μas, consistent with the expected "shadow" of a $4 \times 10^6\ M_\odot$ black hole in the Galactic center located at a distance of 8 kpc.

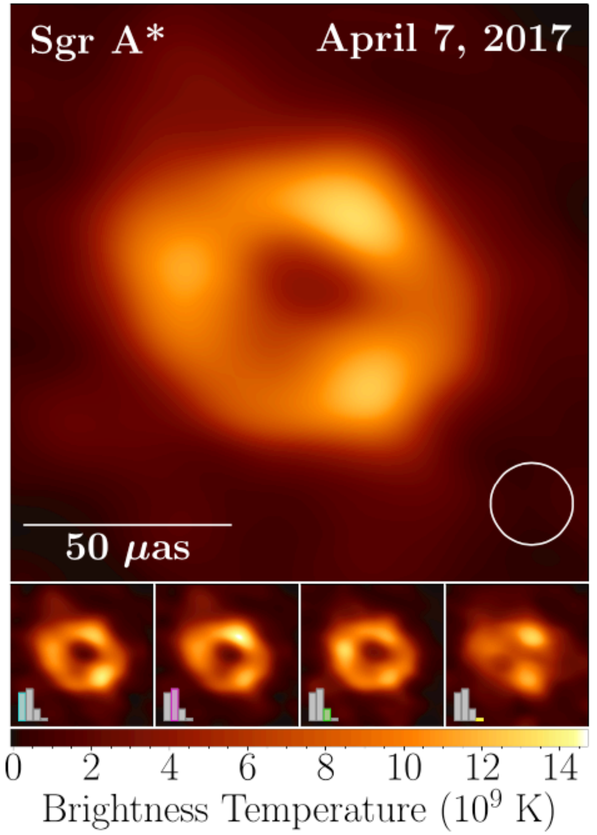
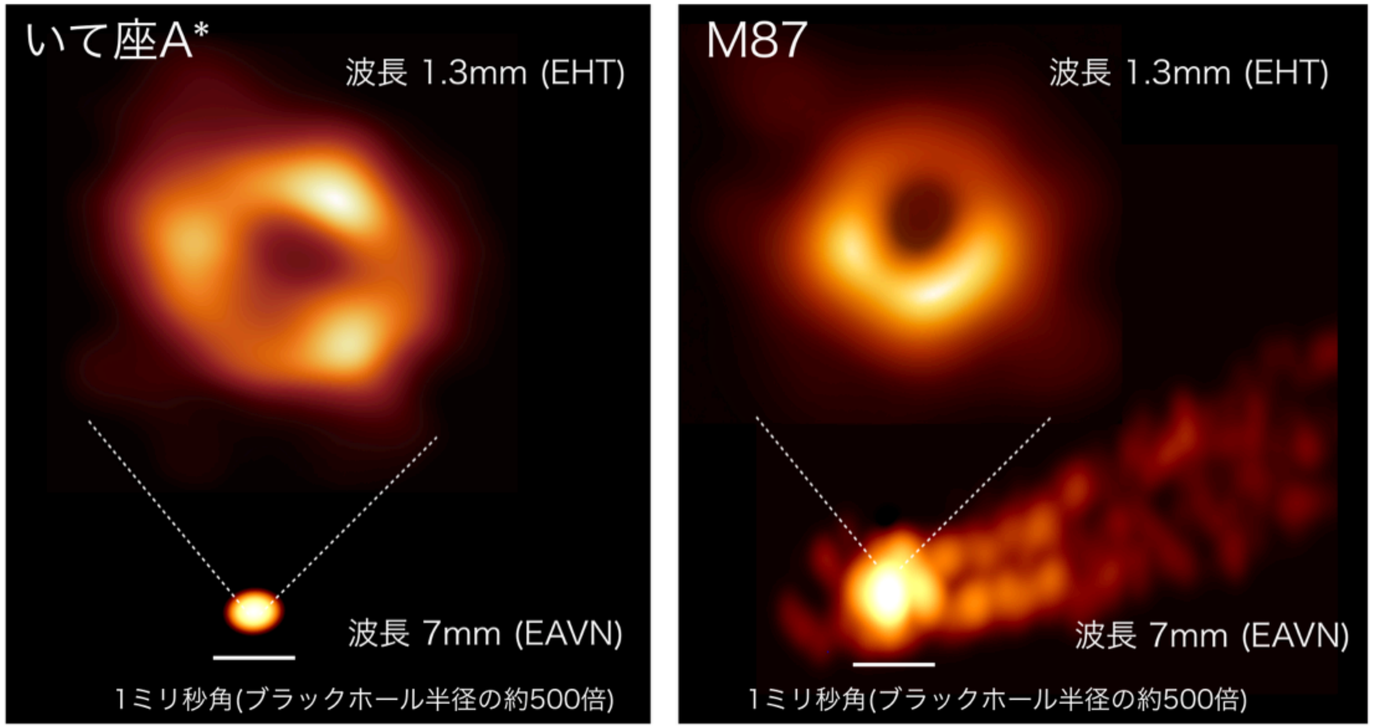


Figure 13. In the top main panel we show the representative image of Sgr A* obtained with the EHT from observations on 2017 April 7. This top image is obtained by averaging the bottom four images. On the bottom from left to right, we show the average images of three prominent ring clusters with different azimuthal structures and a nonring cluster. The height of the colored bar (lower left corner in each panel) represents the relative fraction of images in the Top Sets for each cluster. We note that the THEMIS posterior sample only includes ring images. In each cluster, the image is computed through a weighted average over the descattered reconstructions, including all Top Set images from the three imaging methods (DIFMAP, eht-imaging, and SMILI) and 1024 images randomly selected from descattered posteriors from THEMIS. Images are weighted by the inverse of the total number of Top Set or posterior images used from each pipeline, so that pipelines are represented equally in each image. Note that DIFMAP model images are convolved with a 20 μas beam (represented by the inset circle), while no blurring is applied to the rest of the images.

天の川銀河中心のブラックホールを直接観測成功!

Sgr A*	M87
400万太陽質量	65億太陽質量
8 kpc	16.8 Mpc

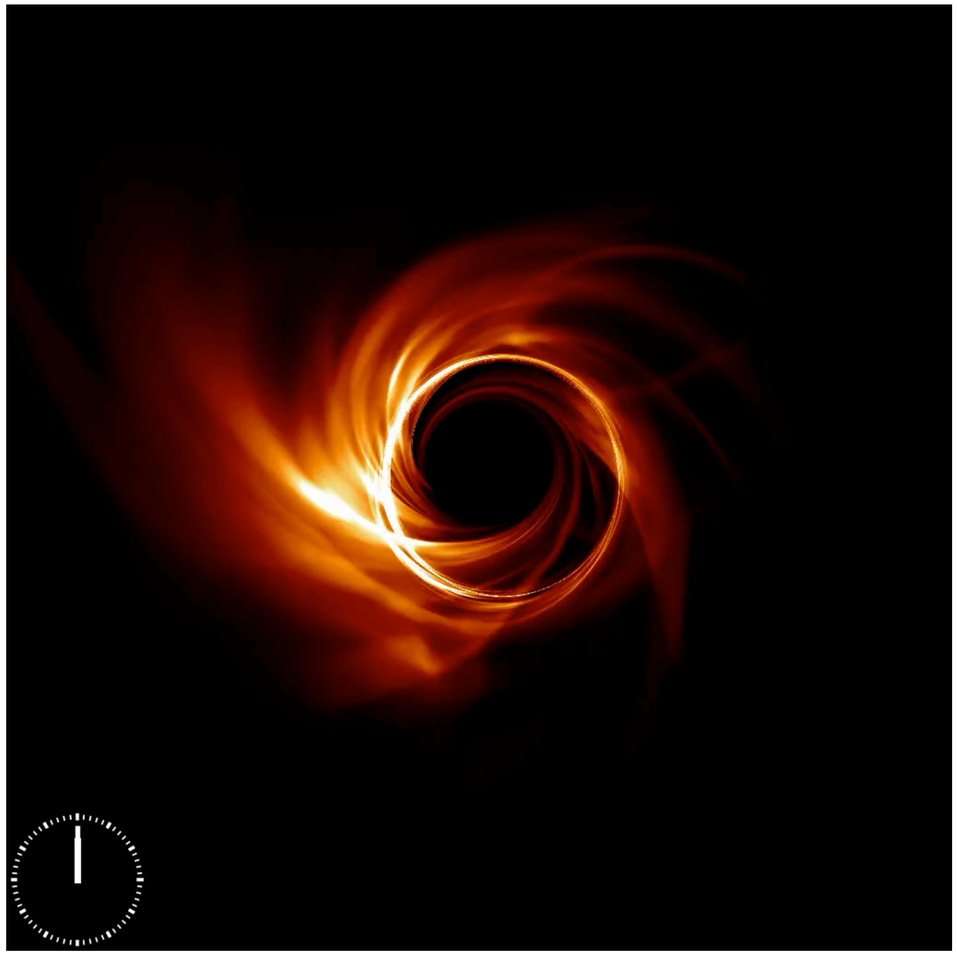
3桁大きなBHが
3桁遠くにいるので,
同じ位の大きさに見える

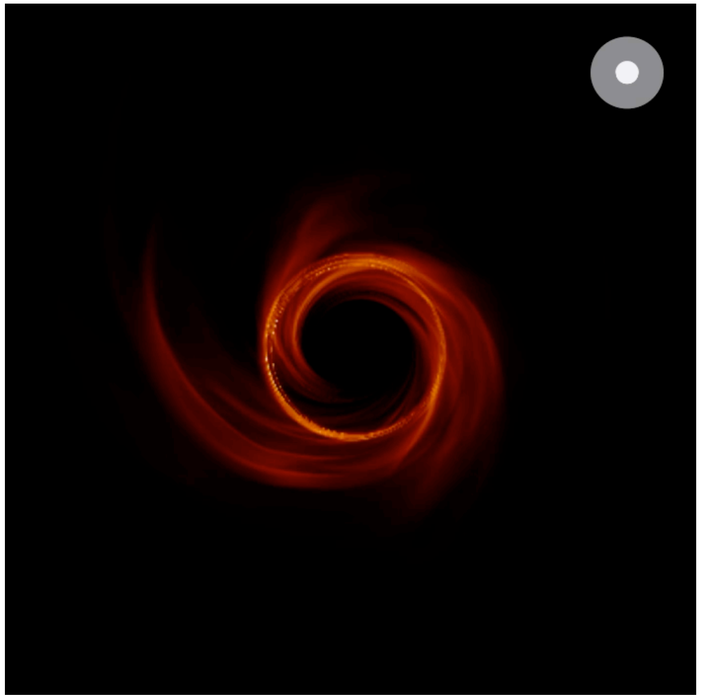


[図6] いて座A*（左）とM87（右）の画像比較。上側のリングはEHTで得られたブラックホール近傍画像。下側の画像は東アジアVLBI観測網（EAVN）で得られたブラックホール遠方画像。ブラックホール遠方画像において、M87では図の左下から右上へと伸びるジェットが見られるのに対し、いて座A*ではジェットの明確な証拠は得られていない。その一方でEHTで得られたリング画像はとてもよく似ている。（クレジット：EHT Collaboration, EAVN Collaboration）

https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20220512

将来的には，動画（時間変化）撮影が期待される





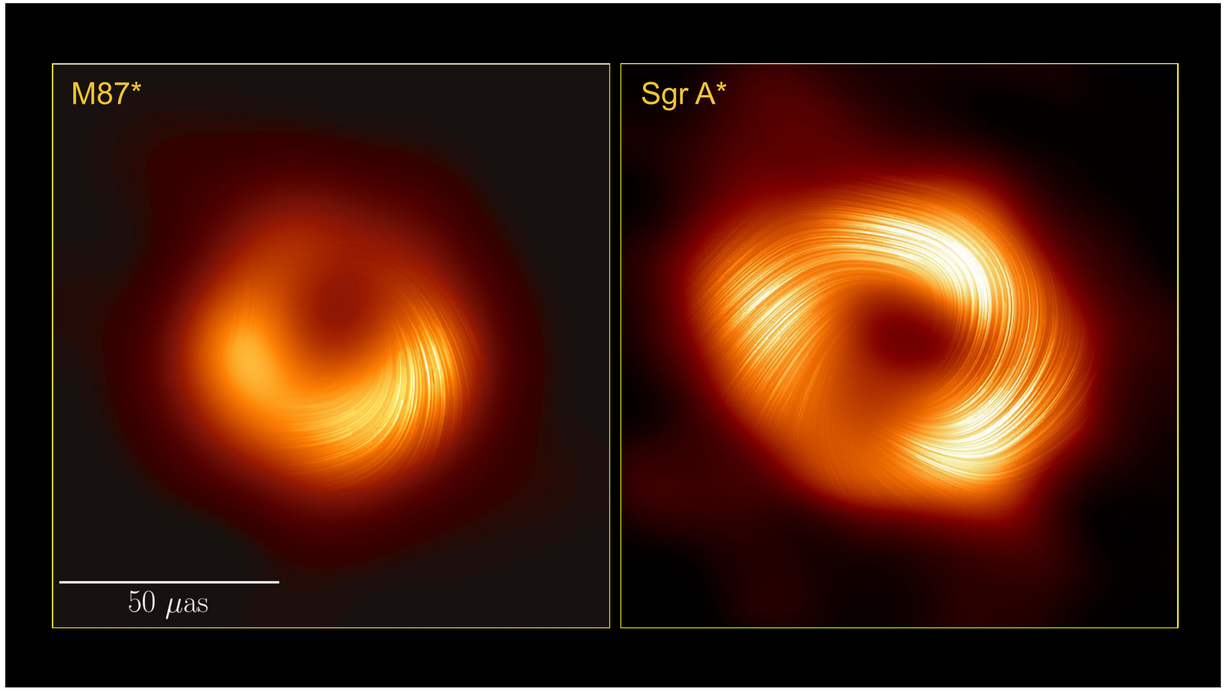
見込み角の違いによるいて座A*の理論モデル画像の変化
（クレジット：Vedant Dhruv, University of Illinois at Urbana-Champaign）

いて座A*の理論モデル画像（クレジット: Abhishek Joshi, University of Illinois at Urbana-Champaign）

https://www.nao.ac.jp/news/sp/20220512-eht/videos.html

EHT ブラックホールの偏光画像が類似, 磁場構造形成プロセスが共通か

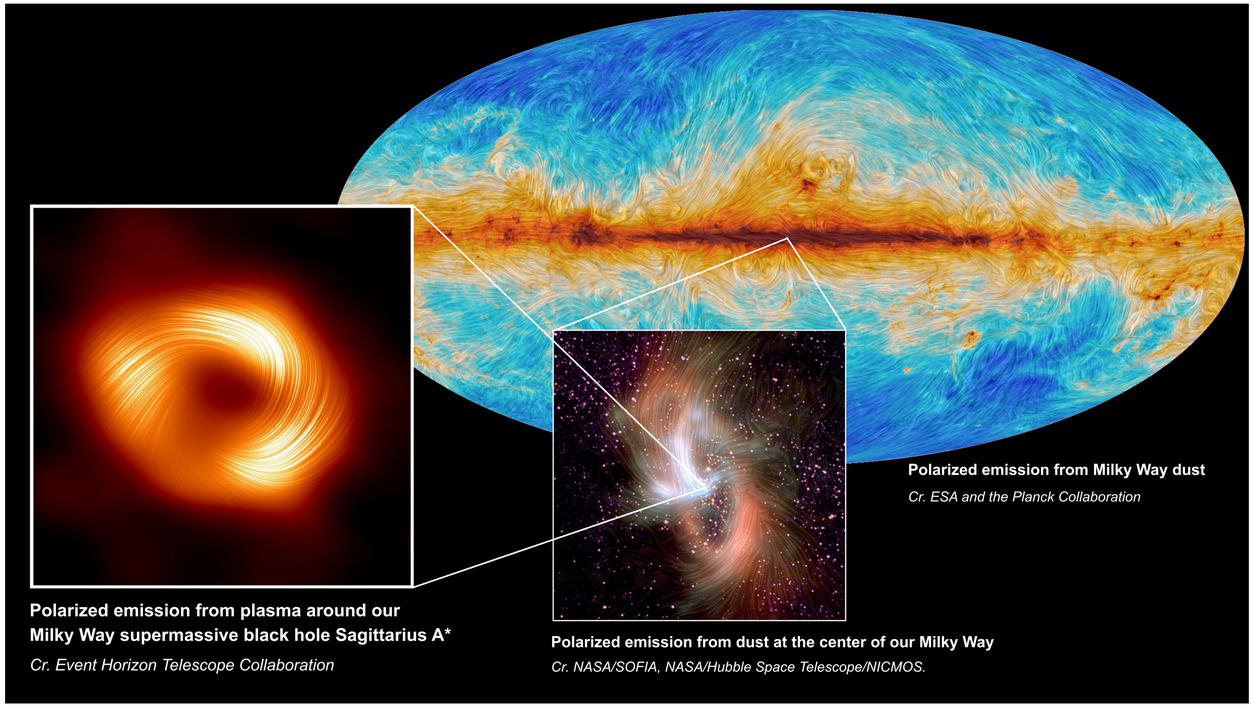
電波望遠鏡の世界的ネットワークでブラックホールの直接撮像に成功しているイベントホライズンテレスコープ（Event Horizon Telescope; EHT）は，1000倍もスケールの違うM87 といて座A* の類似性を補完するものとして，偏光画像も類似していることが得られた，と発表した.



M87 といて座A* の偏光画像の比較。両者には渦巻き状の構造が共通して見られ、これらのブラックホールの縁が類似した磁場構造を持つことが示された．これはブラックホールにガスが供給され、その一部がジェットとして噴出される一連の物理的過程が巨大ブラックホールの間で普遍的である可能性を示唆する．（画像クレジット:EHT Collaboration）

https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20240327.html

https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/13530_sgr_a



OPEN ACCESS

First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. VII. Polarization of the Ring

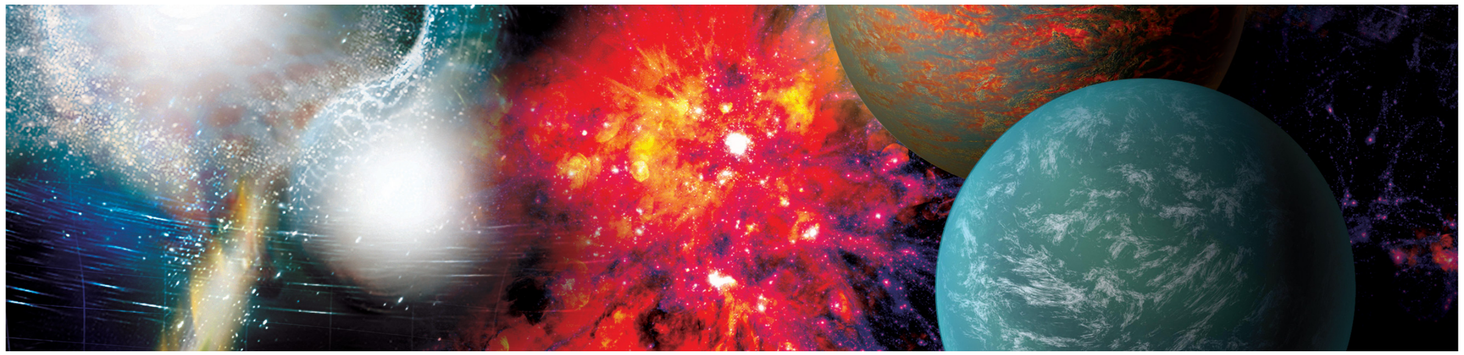
The Event Horizon Telescope Collaboration, Kazunori Akiyama[1,2,3], Antxon Alberdi[4], Walter Alef[5], Juan Carlos Algaba[6], Richard Anantua[3,7,8], Keiichi Asada[9], Rebecca Azulay[5,10,11], Uwe Bach[5], Anne-Kathrin Baczko[5,12] + Show full author list

Published 2024 March 27 • © 2024. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.
The Astrophysical Journal Letters, Volume 964, Number 2
Citation The Event Horizon Telescope Collaboration *et al* 2024 *ApJL* **964** L25
DOI 10.3847/2041-8213/ad2df0

2024 ApJL 964 L25　　2024 ApJL 964 L26

Astro2020（アメリカの10年計画, 2021年11月発表）

https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020



（ｉ）Pathways to Habitable Worlds　地球外生命体はいるのか.

太陽系外惑星をその環境を決める中心星の性質と合わせて統一的に理解することを目指す。

（ii）New Windows on the Dynamic Universe　新しい「眼」で宇宙を観測する

従来の電磁波（可視光、赤外線、電波、X線、ガンマ線）に加えて、超高エネルギー宇宙線、
ニュートリノ、重力波という新たな観測手法を用いて、未知の物理学の開拓を目指す。

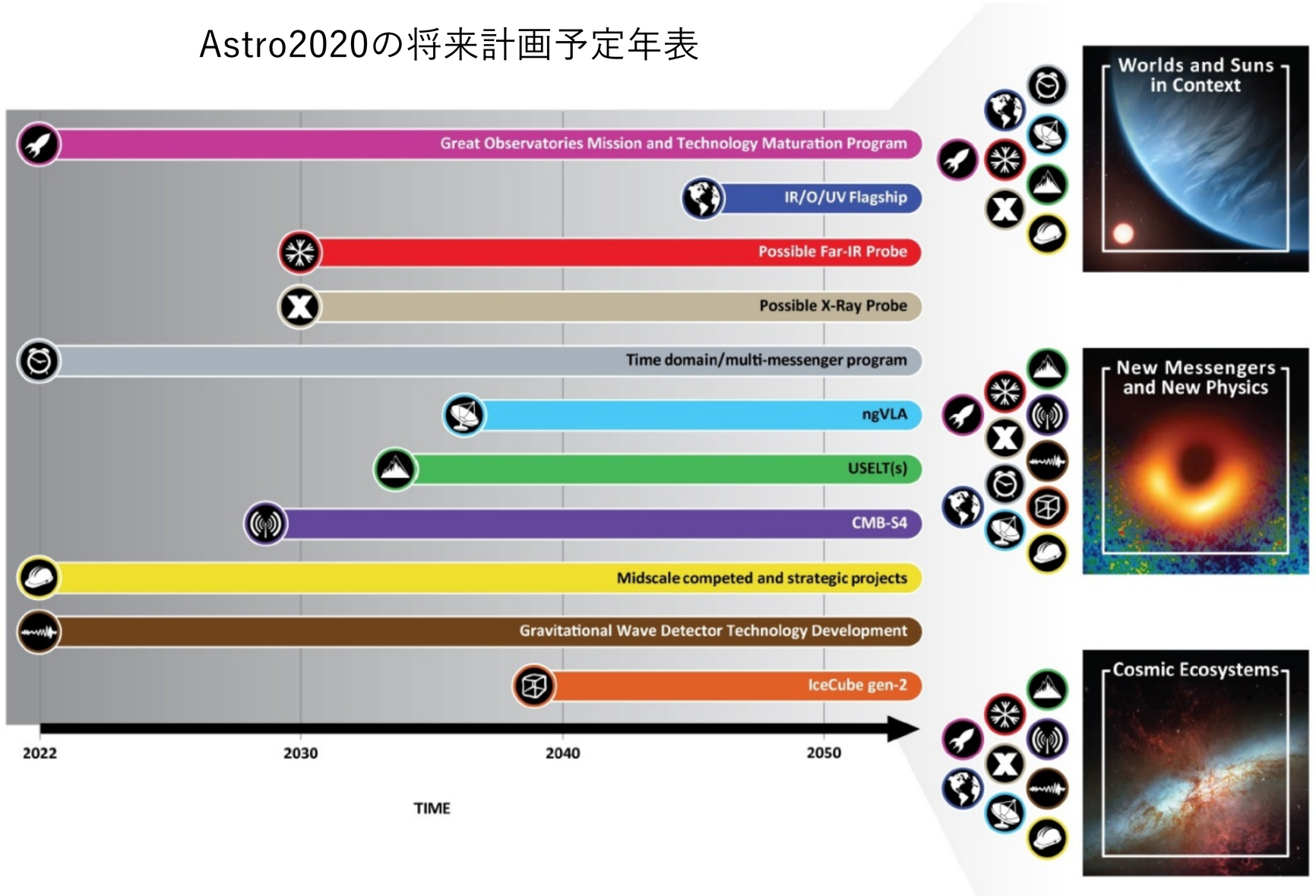
（iii）Drivers of Galaxy Growth　銀河進化を生態系として理解する

天体は、その化学的・力学的進化の最期に再び宇宙空間に戻って次世代の天体を形成する。
その基礎過程を解明する.

Astro2020（アメリカの10年計画, 2021年11月発表）

https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020

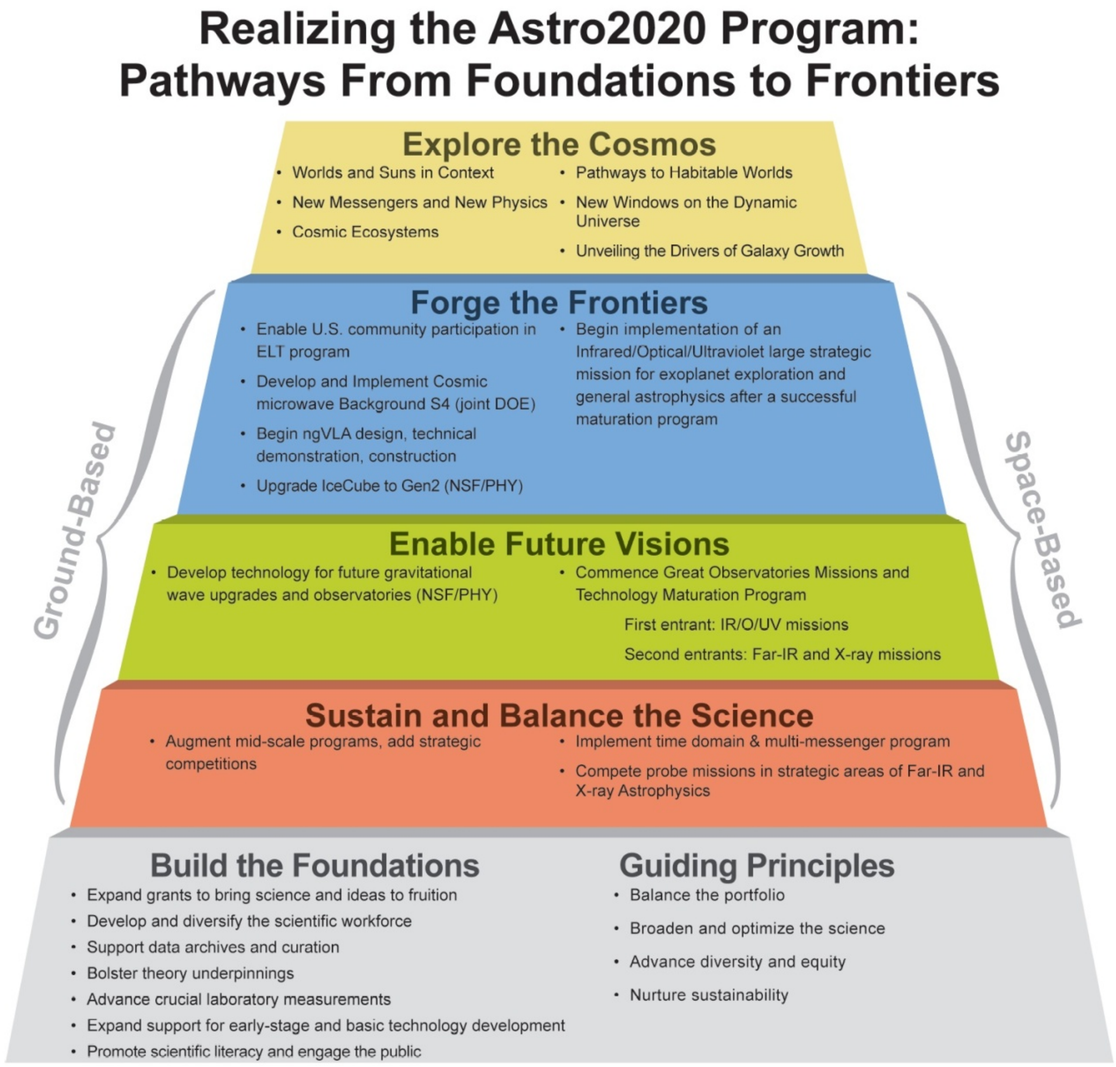
Astro2020の将来計画予定年表



Astro2020（アメリカの10年計画, 2021年11月発表）

https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020

Astro2020プログラム実現のための道筋と構造



本日のミニッツペーパー記入項目

出席票を兼ねます.

【14-1】宇宙を構成する次の3つの物質を多い順に並べよ.

普通の物質, ダークマター, ダークエネルギー

【14-2】X線を観測するための望遠鏡を宇宙に打ち上げる理由は何か？

【14-3】可視光線で観測するための望遠鏡を宇宙に打ち上げる理由は何か？

【14-4】通信欄. (講義はあと1回. どうしても聞いておきたい話は？
感想・連絡事項など、何かあれば)

Musesの授業アンケート
お願いします.

レポート締切　12/28(日) 23:59, 次の講義　1/19；レポート締切　1/30(金) 23:59

Happy Holidays!