

宇宙はどこまで解明されたか

- 4月25日** 天文学と宇宙物理学：観測技術の進展と星までの距離の測定
- 5月23日 惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？
- 6月27日 星とブラックホールと惑星系と銀河：構造形成は何が先か？
- 7月25日 超新星爆発と宇宙論：6つのパラメータで描かれる膨張宇宙
- 8月29日 初期宇宙と素粒子物理：高次元モデルが描くビッグバン以前
- 9月26日 重力波と重力理論：アインシュタインはどこまで正しいか？

真貝寿明（しんかい ひさあき）

大阪工業大学 情報科学部 教授

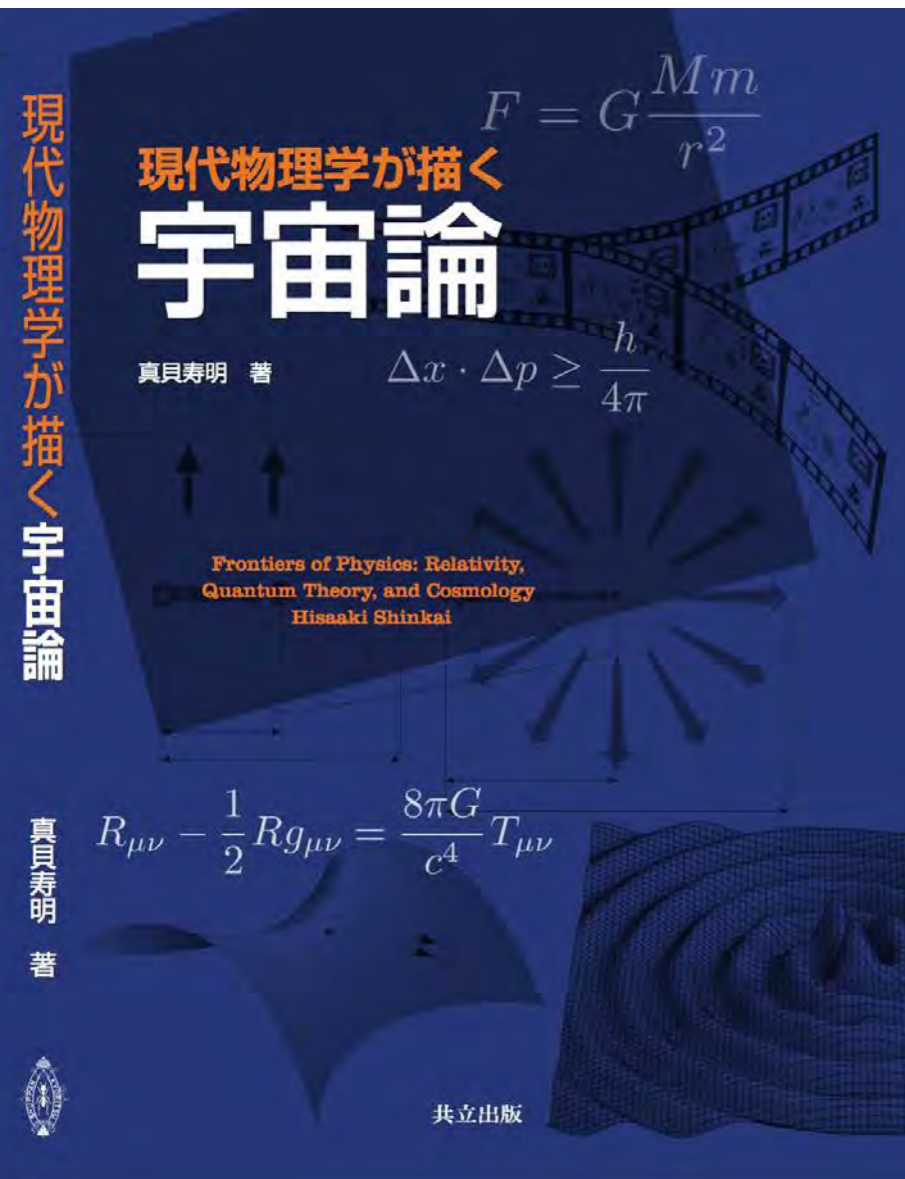
武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員

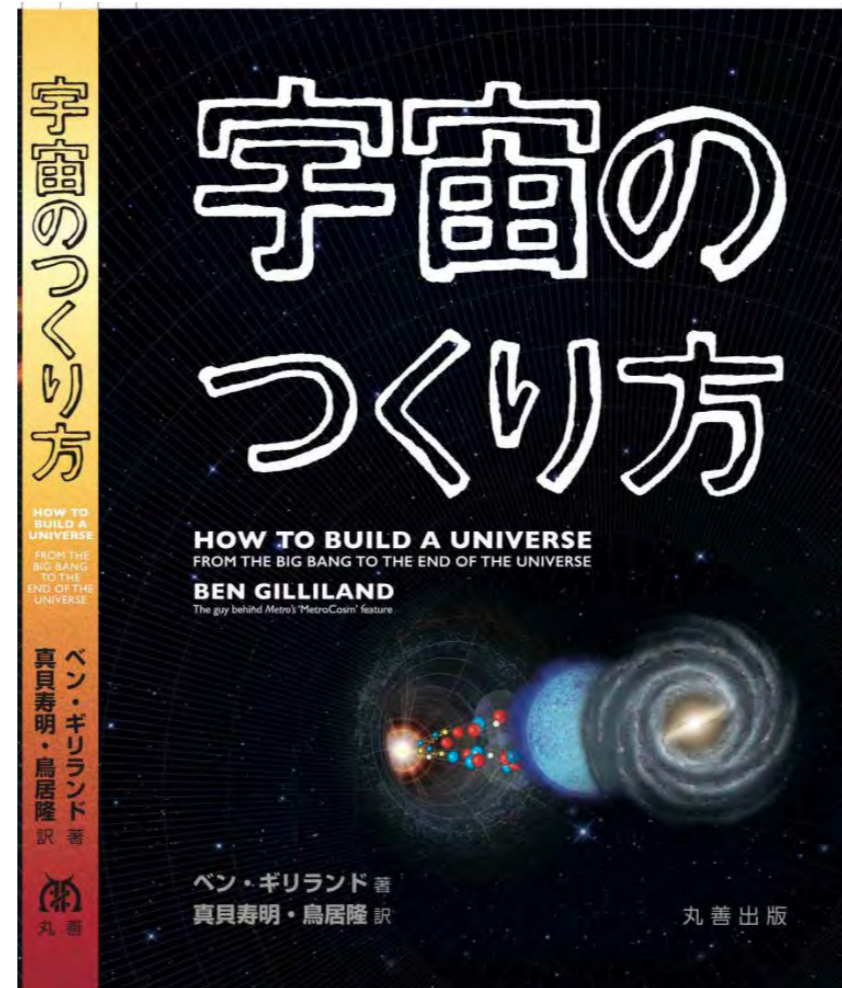


<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>

参考資料



2018年9月刊

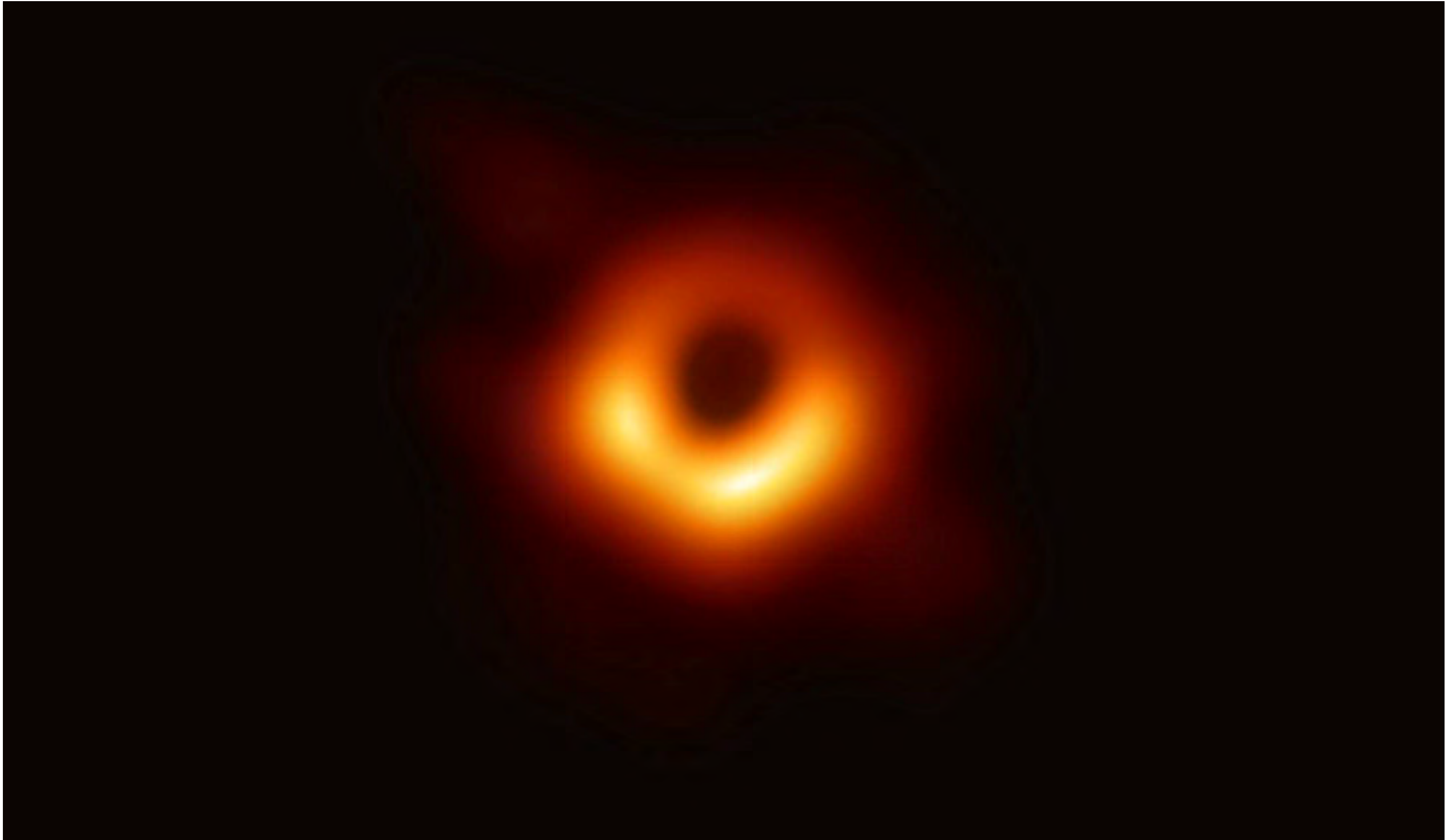


2016年12月刊



2015年9月刊

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>

地球・月



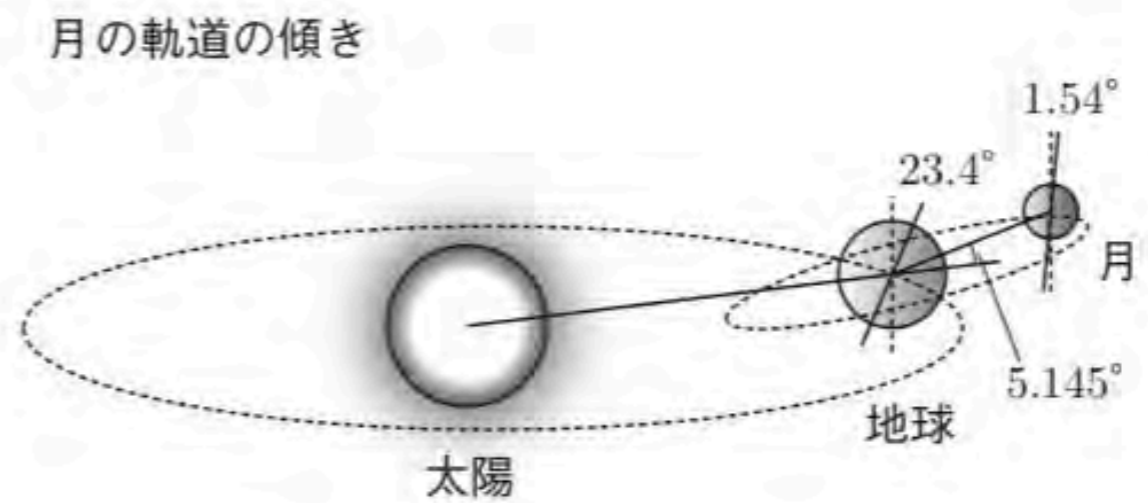
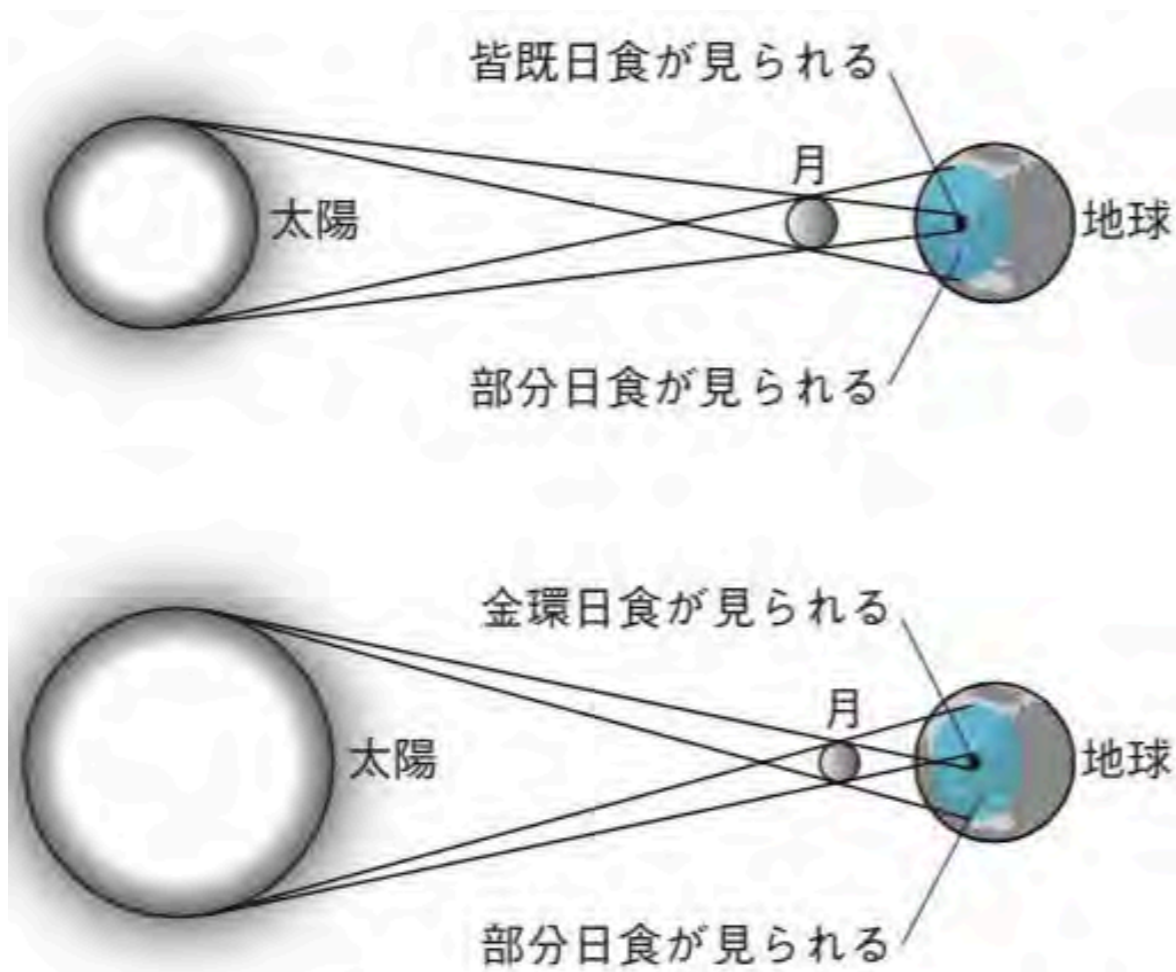
半径 6378km



半径 1677km

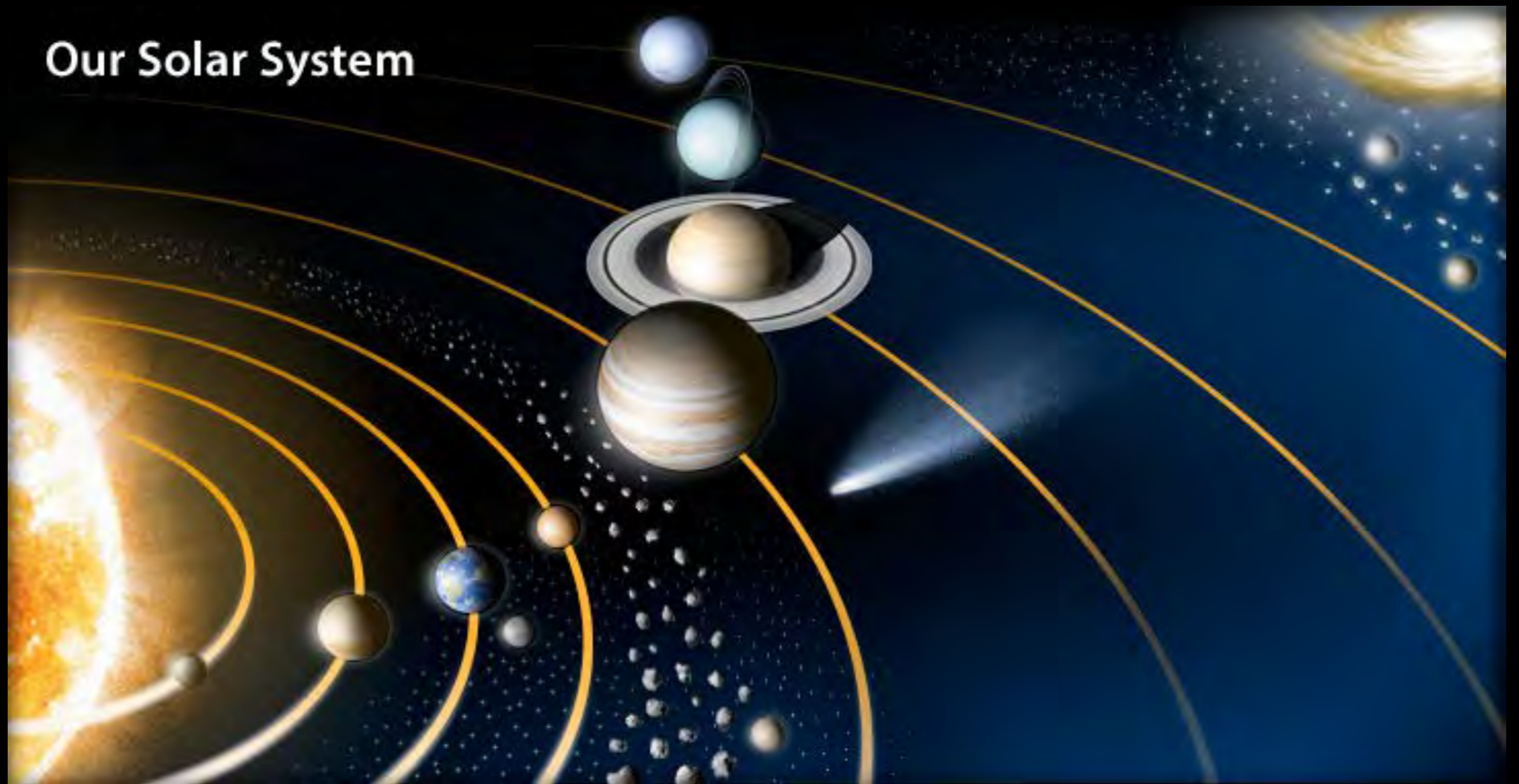
距離 388400km

地球・月



地球を直径10cmの球とすれば、
月は直径2.6cmの球、距離は304cm先
太陽は、直径10.9mの球、距離は117m先

地球・月 ▶ 太陽系



地球・月 ▶ 太陽系

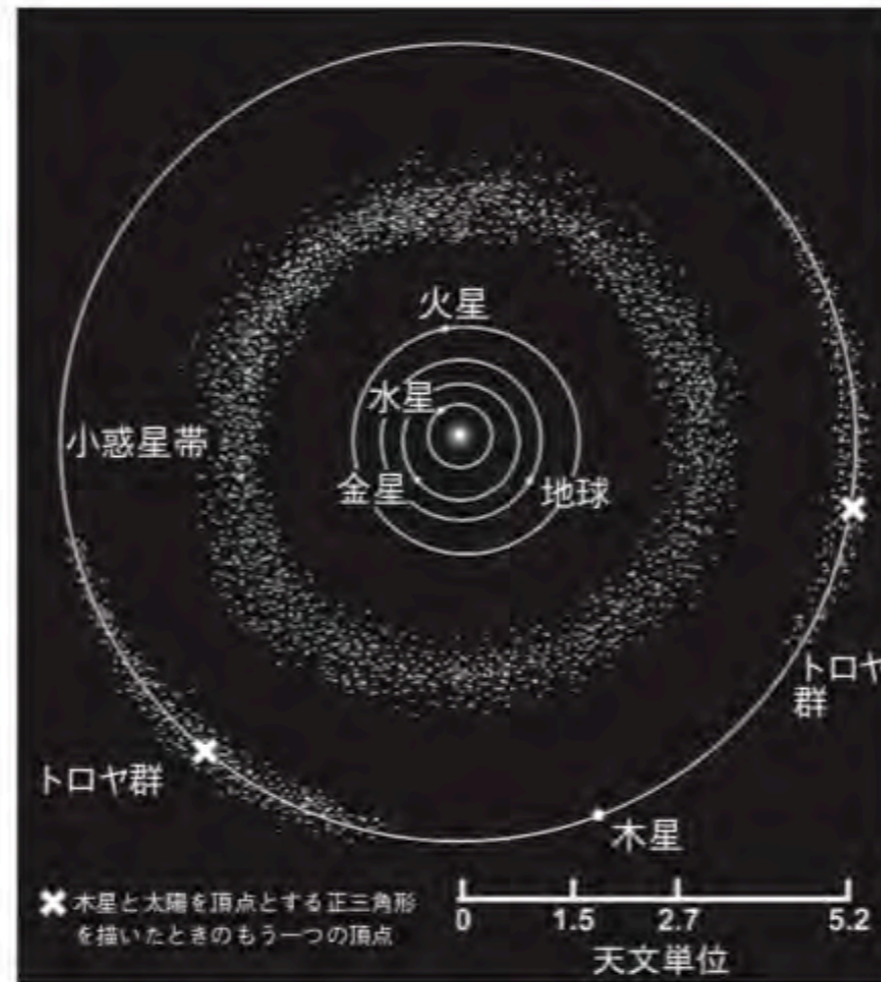
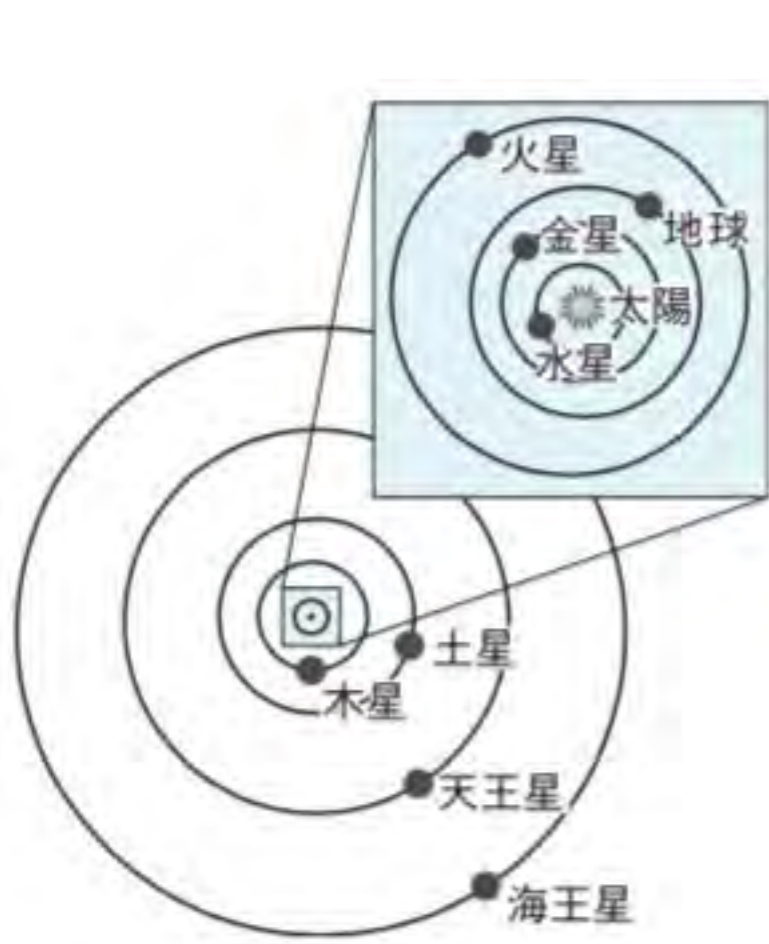
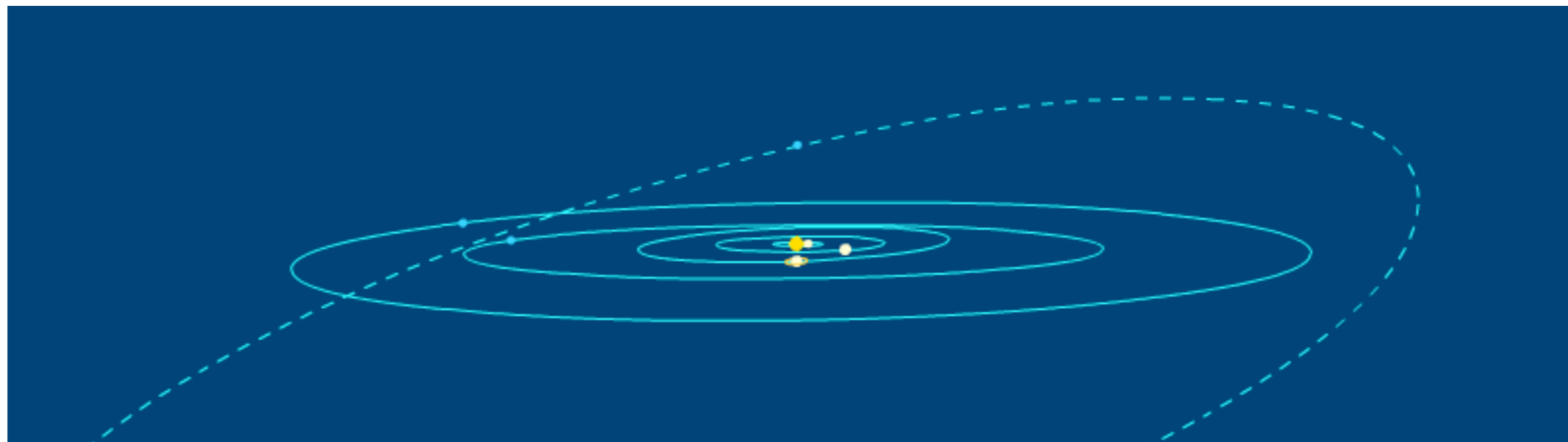
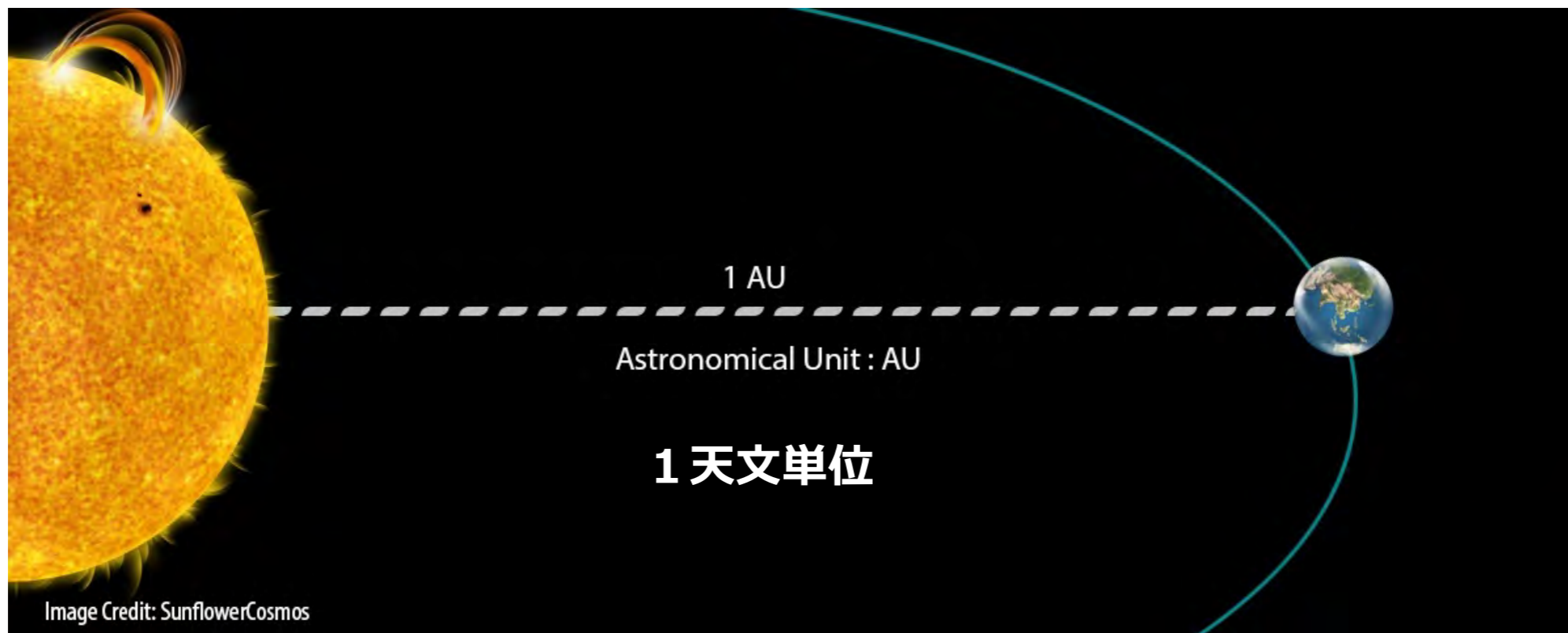


図 1.20 小惑星帯は火星と木星軌道の間にある。また、木星軌道にはトロヤ群と呼ばれる小惑星帯もある。トロヤ群は太陽と木星を2つの頂点として正三角形を描いたときの3つ目の頂点付近にある。



距離の単位 【天文単位, AU】

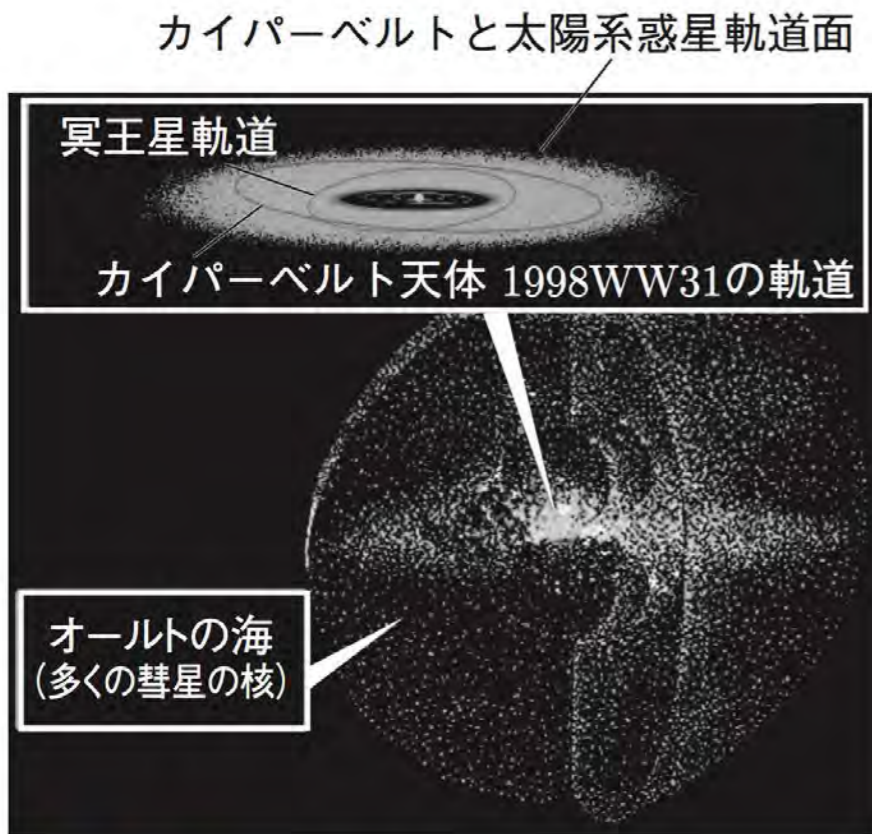
名	記号	長さ	定義
▶ 天文単位	AU	1億5000万 km	地球と太陽の距離
光年	ly	9.46×10^{12} km	光が1年間に進む距離
パーセク	pc	3.09×10^{13} km = 3.26 ly	地球からの年周視差が±1秒角
赤方偏移	z		本来の光の波長のずれの比



$$\frac{1 \text{ 億}5000 \text{ 万 [km]}}{\text{光速 } 30 \text{ 万 [km/s]}} = 500 \text{ [s]} = 8 \text{ 分}20 \text{ 秒}$$

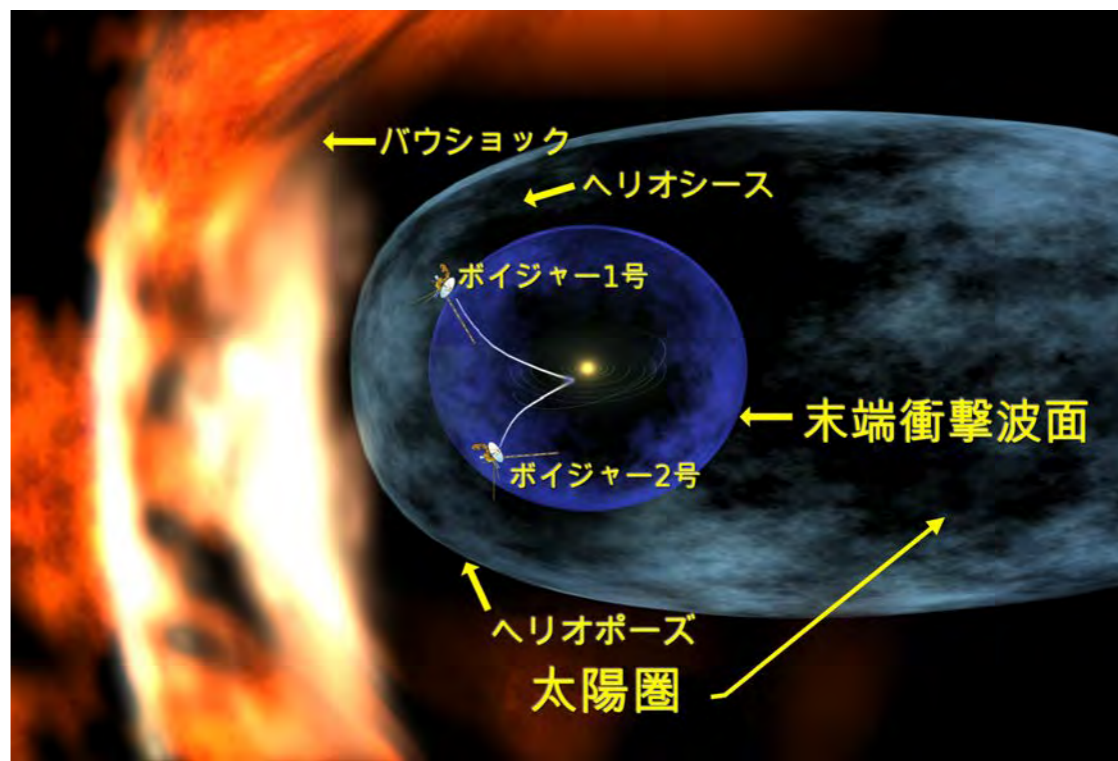
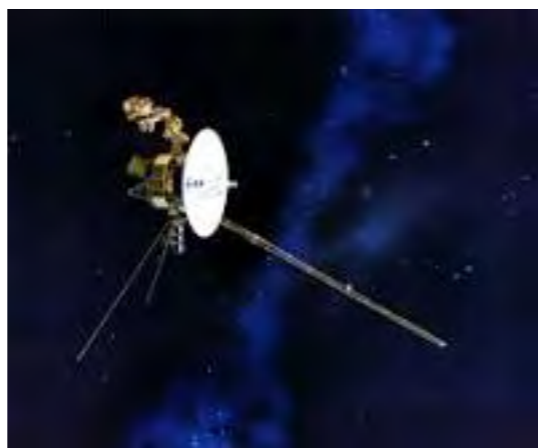
太陽光が地球に届くまでの時間

地球・月 ▶ 太陽系



● 太陽系はどこまでか

太陽系はどこまで広がっているのか、現在まだ正確にはわかっていない。太陽系を球殻状に取り巻いていると考えられる仮想的な天体群をオールトの雲という。太陽から放出された粒子（太陽風）が到達する範囲を太陽圏（ヘリオスフィア, Heliosphere）、その境界面をヘリオポーズ (Heliopause) と呼ぶ。ヘリオポーズは、学説により、50-160 AU の距離にあるとされる。ヘリオポーズに到達する内側には、星間物質との衝突や星間磁場の影響によって、太陽風が減速されて末端衝撃波面を形成している。



1977年に打ち上げられたボイジャー1/2号、2005年に末端衝撃波面を通過、現在は太陽系の外に

光速は 秒速30万km (= 299792458 km/s 定義値)

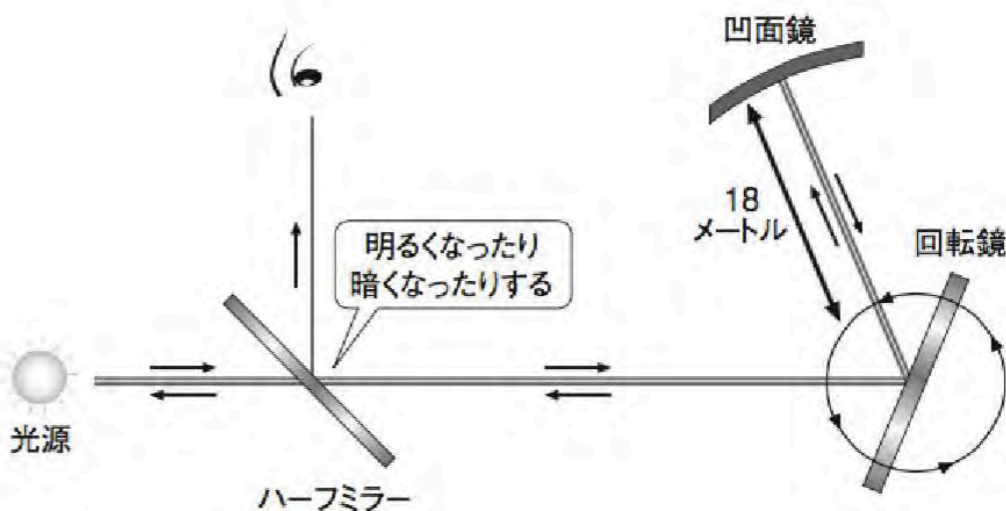
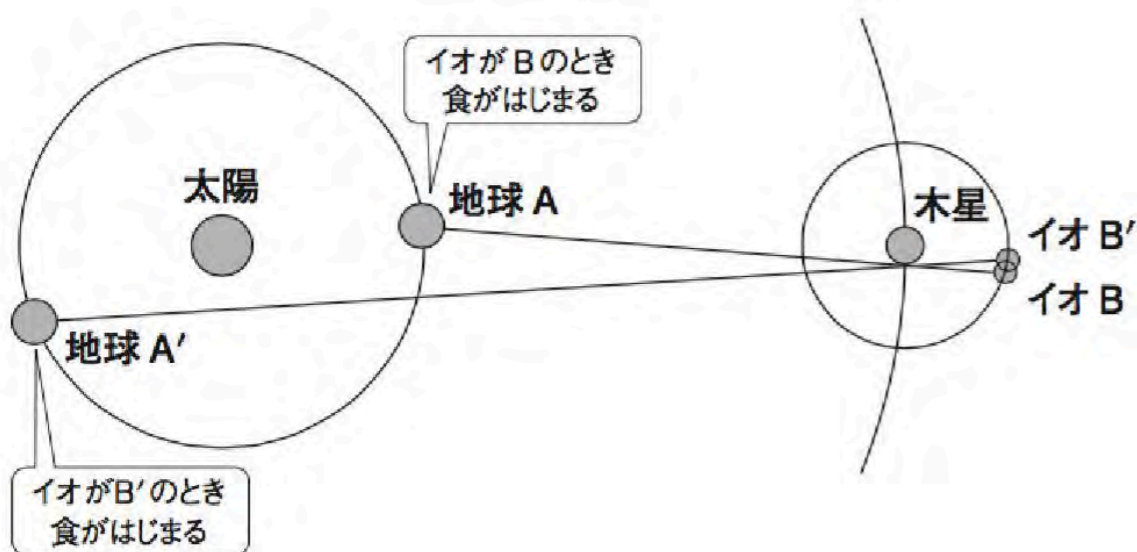
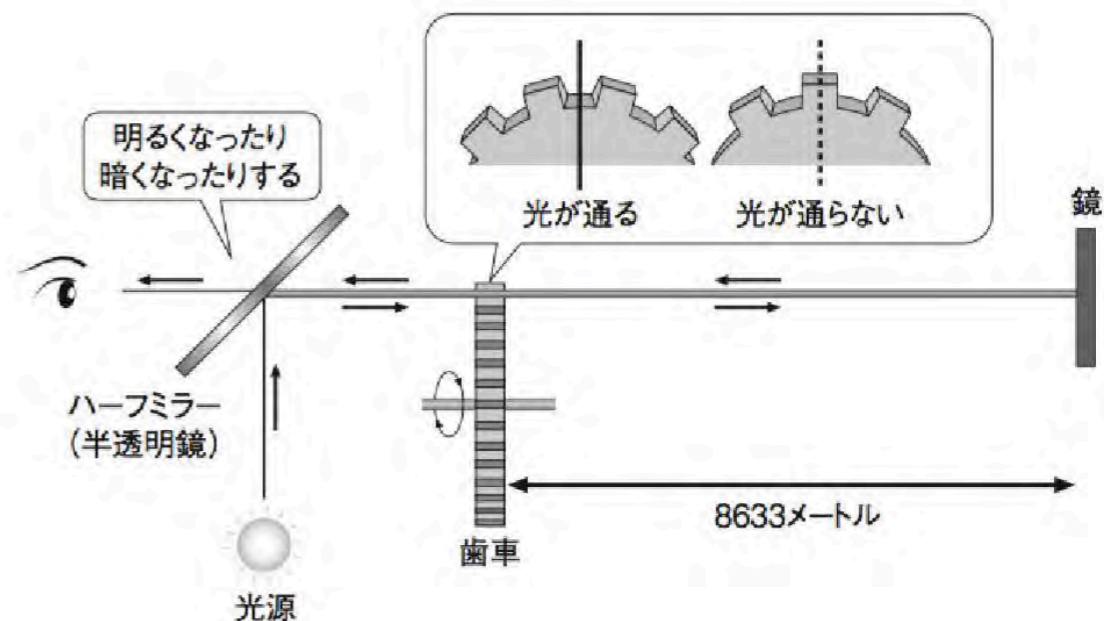
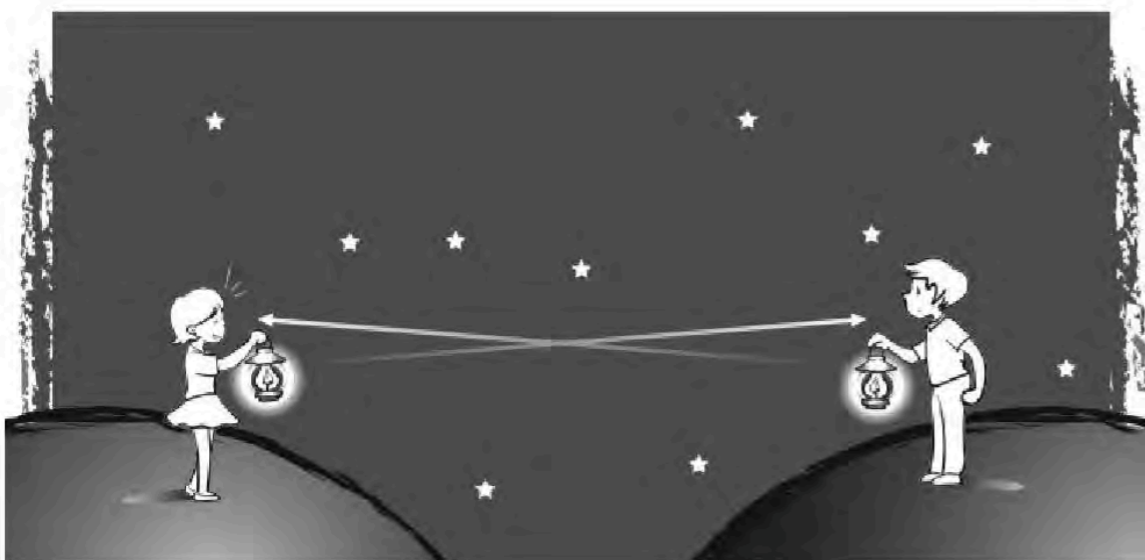


図 6-1 光速の測定 [上] ガリレイは、一人が光で合図した時にもう一人がそれに光で応え、その時間差を測ることを試みた (17世紀前半)。しかし、光が速すぎて測定ができなかった。[下] カッシーニとレーマーは、木星を42時間周期で回る衛星イオの食 (木星に隠れる期間) のわずかな時間差が光の到達距離の違いによるものだと考えて光速を初めて計算した (1670年代)。秒速22万5000kmという値を得た。

図 6-2 光速の測定 (続き) [上] フィゾーは歯車回転装置を使い、歯車の回転速度を変えると、高速のシャッターになり、短い時間が計測できる原理を用いて、初めて実験から光速を測定した (1849年)。秒速31万5000kmという値を得た。[下] フーコーは回転鏡装置を使って、室内でも光速測定ができることを示した (1862年)。秒速29万8000kmという値を得た。

距離の単位 【マイル, mile】

1 mile = 1.6 km

60 mile/s = 96 km/s



距離の単位 【天文単位, AU】

名	記号	長さ	定義
▶ 天文単位	AU	1億5000万 km	地球と太陽の距離
光年	ly	9.46×10^{12} km	光が1年間に進む距離
パーセク	pc	3.09×10^{13} km = 3.26 ly	地球からの年周視差が ± 1 秒角
赤方偏移	z		本来の光の波長のずれの比

天体名		a [AU]	周期 [年]	離心率	半径 [km]
太陽	Sun	-	-	-	696000
水星	Mercury	0.39	0.24	0.21	2440
金星	Venus	0.72	0.62	0.007	6052
地球	Earth	1.00	1.00	0.02	6378
火星	Mars	1.52	1.88	0.09	3396
木星	Jupitar	5.20	11.86	0.05	71492
土星	Saturn	9.55	29.46	0.06	60268
天王星	Uranus	19.22	84.02	0.05	25559
海王星	Neptune	30.11	164.77	0.009	24764
ケレス	Ceres	2.77	4.6	0.08	474
冥王星	Pluto	39.54	247.80	0.25	1151
ハウメア	Haumea	43.03	282.29	0.197	楕円体
マケマケ	Makemake	45.35	305.45	0.163	??
エリス	Eris	68.05	305.45	0.163	??

太陽光が届くまでの時間

地球 = 500 [s] = 8分20秒
 火星 = 750 [s] = 12分30秒

天王星 = 2 h 40 m
 海王星 = 4 h 12 m

冥王星 = 5 h 30 m

惑星

準惑星

距離の単位 【光年, light year】

名	記号	長さ	定義
天文単位	AU	1億5000万 km	地球と太陽の距離
▶ 光年	ly	9.46×10^{12} km	光が1年間に進む距離
パーセク	pc	3.09×10^{13} km = 3.26 ly	地球からの年周視差が ± 1 秒角
赤方偏移	z		本来の光の波長のずれの比

光が1年間に進む距離 = 1光年 1光年 = 9.46×10^{12} km = 63240 天文単位

太陽から一番近い恒星 = ケンタウルス座アルファ星 4.1光年

星	星座	距離 (光年)
シリウス	おおいぬ	8.60 ± 0.04
ベテルギウス	オリオン	642 ± 147
プロキオン	こいぬ	11.46 ± 0.05
アンタレス	さそり	553.48 ± 113.19
ベガ (織女)	こと	25.03 ± 0.07
アルタイル (牽牛)	わし	16.72 ± 0.05
デネブ	はくちょう	1411.26 ± 226.94
北極星	こぐま	432.36 ± 6.4
太陽	—	1 天文単位

距離の単位 【パーセク, pc】

名	記号	長さ	定義
天文単位	AU	1億5000万 km	地球と太陽の距離
光年	ly	9.46×10^{12} km	光が1年間に進む距離
▶ パーセク	pc	3.09×10^{13} km = 3.26 ly	地球からの年周視差が ±1 秒角
赤方偏移	z		本来の光の波長のずれの比

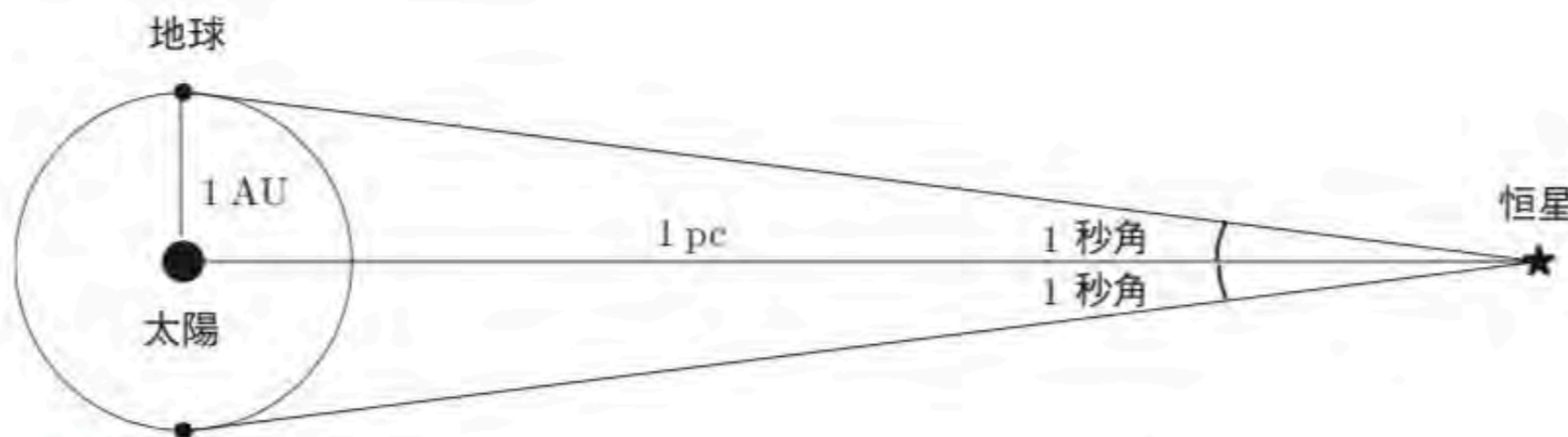


図 A.2 距離パーセク (pc) の定義. 地球から見る星の位置が半年で 2 秒角ずれる場所までの距離を 1 pc とする.

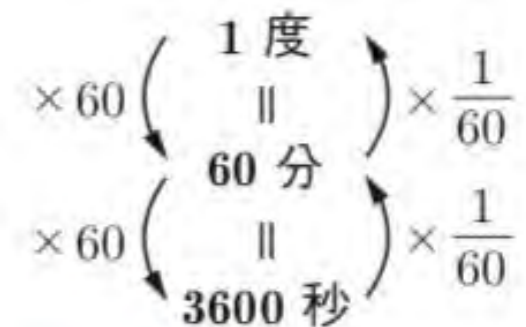
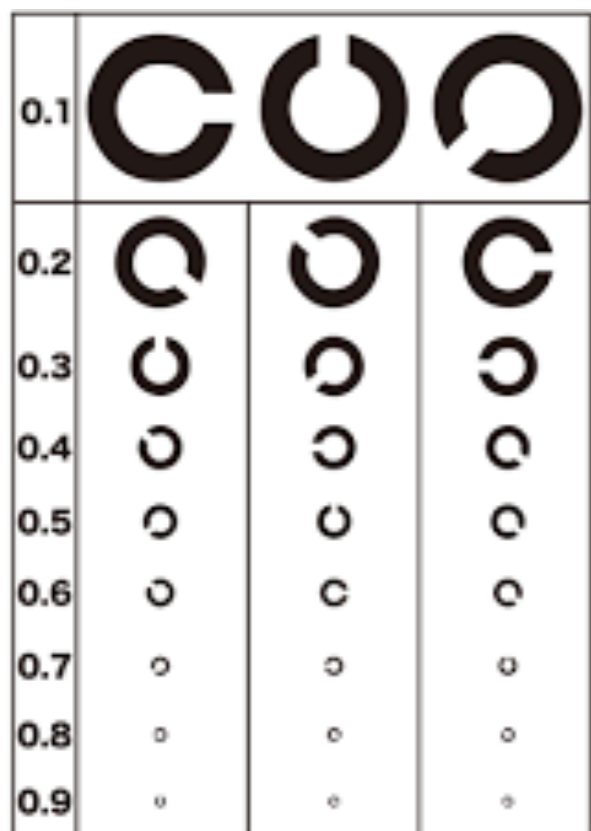


図 A.1 1 分角, 1 秒角.

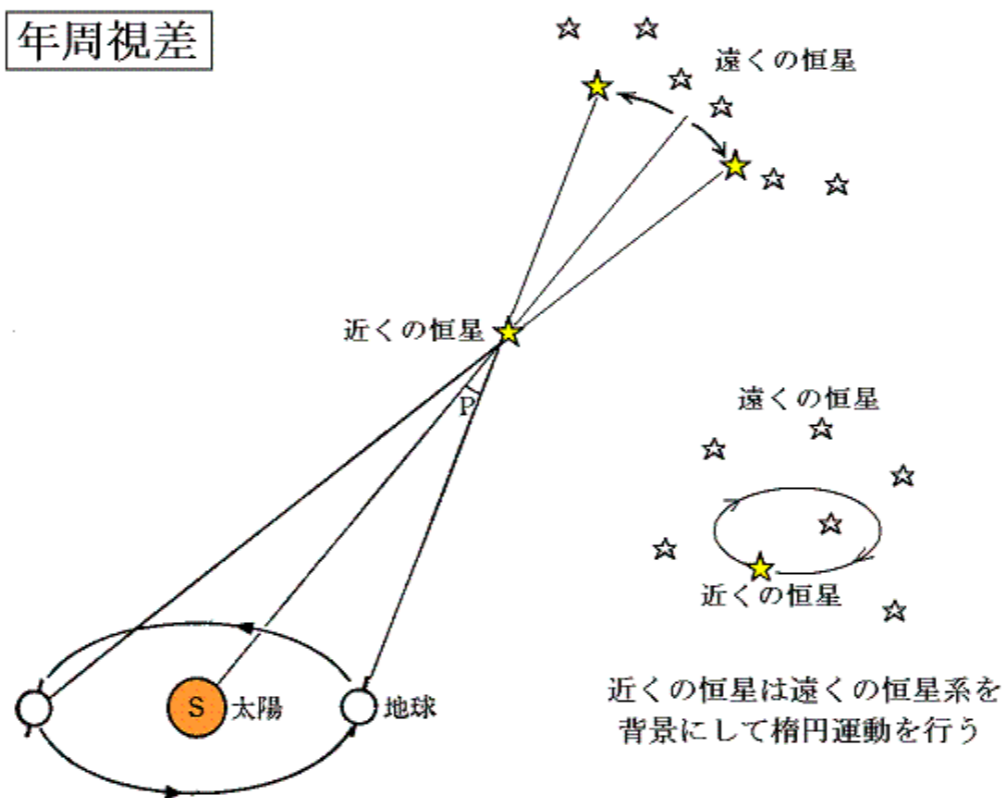
年周視差を測ることで距離がわかる

チコ・ブラーエは、年周視差が観測できず、地動説を信じなかった。

チコは、2分角（1度の1/30）までの観測能力を持っていた。
（望遠鏡発明前，1600年頃）



年周視差



視力 1.0 = 5m離れて，視角1分を視認できる
= 7.272mmの輪の1.454mmの欠損

視力 0.5 = 5m離れて，視角2分を視認できる



星の明るさ（見かけの等級，絶対等級）

1等星



6等星



← 約100倍の明るさの違い →

$(2.5)^5 = 100$ だから，一等級の違いは2.5倍

もっと明るい場合

もっと暗い場合

← -1等星

-2等星

7等星 →

8等星 →



星の明るさ（見かけの等級，絶対等級）

表 1.8 恒星の見かけの等級と絶対等級の例 †.

星	星座	距離（光年）	見かけの等級	絶対等級
シリウス	おおいぬ	8.60± 0.04	-1.47	1.42
ベテルギウス	オリオン	642 ±147	0.42	-5.50
プロキオン	こいぬ	11.46± 0.05	0.34	2.61
アンタレス	さそり	553.48±113.19	1.09	-5.06
ベガ（織女）	こと	25.03± 0.07	0.03	0.60
アルタイル（牽牛）	わし	16.72± 0.05	0.77	2.22
デネブ	はくちょう	1411.26±226.94	1.25	-6.93
北極星	こぐま	432.36± 6.4	2.00	-3.61
太陽	-	1 天文単位	-26.7	4.82

星の明るさ（見かけの等級，絶対等級）

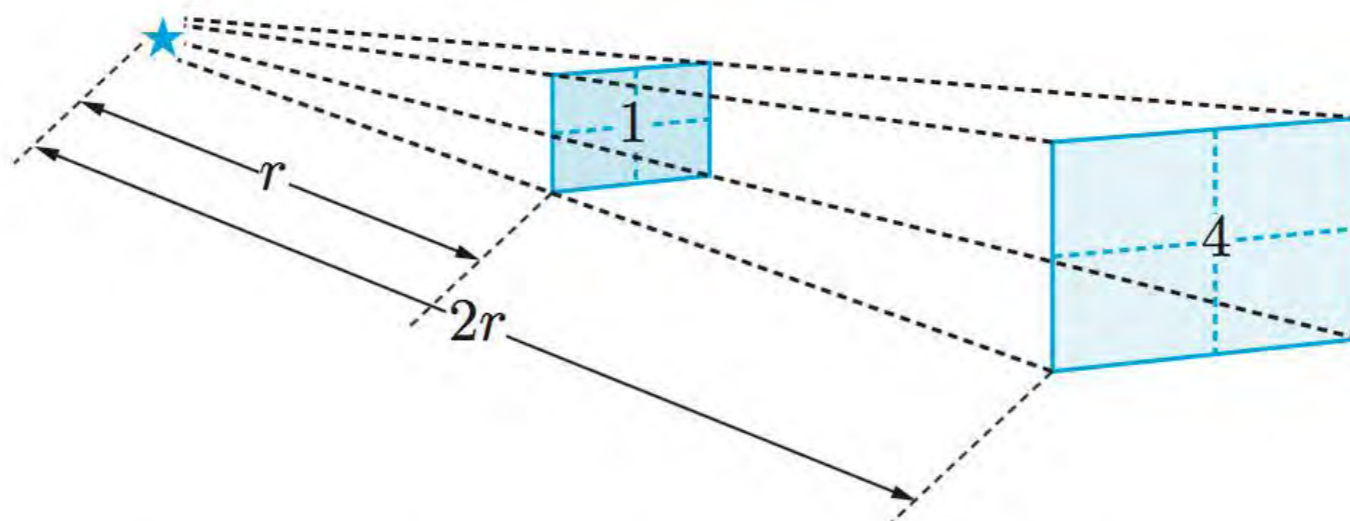
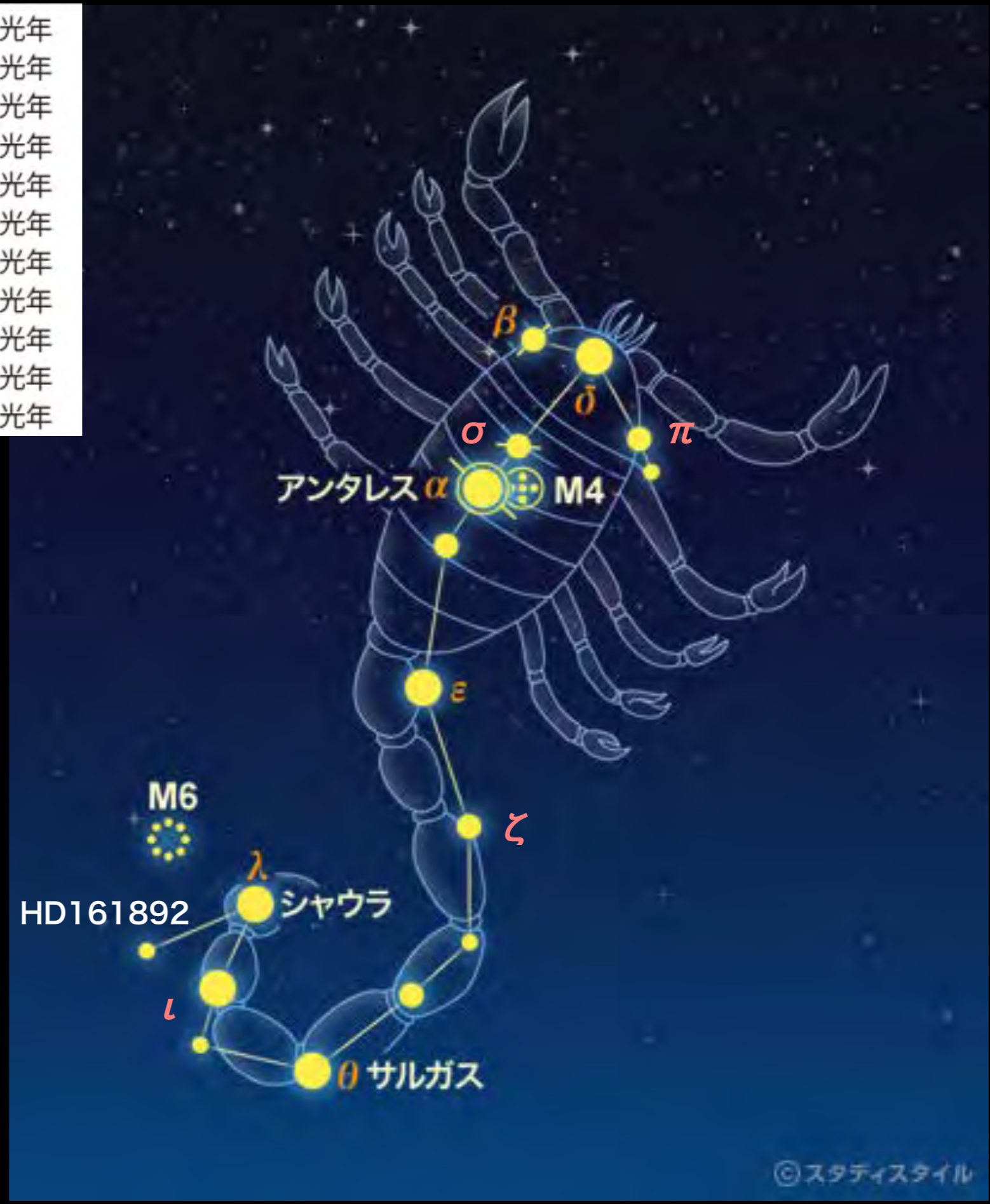


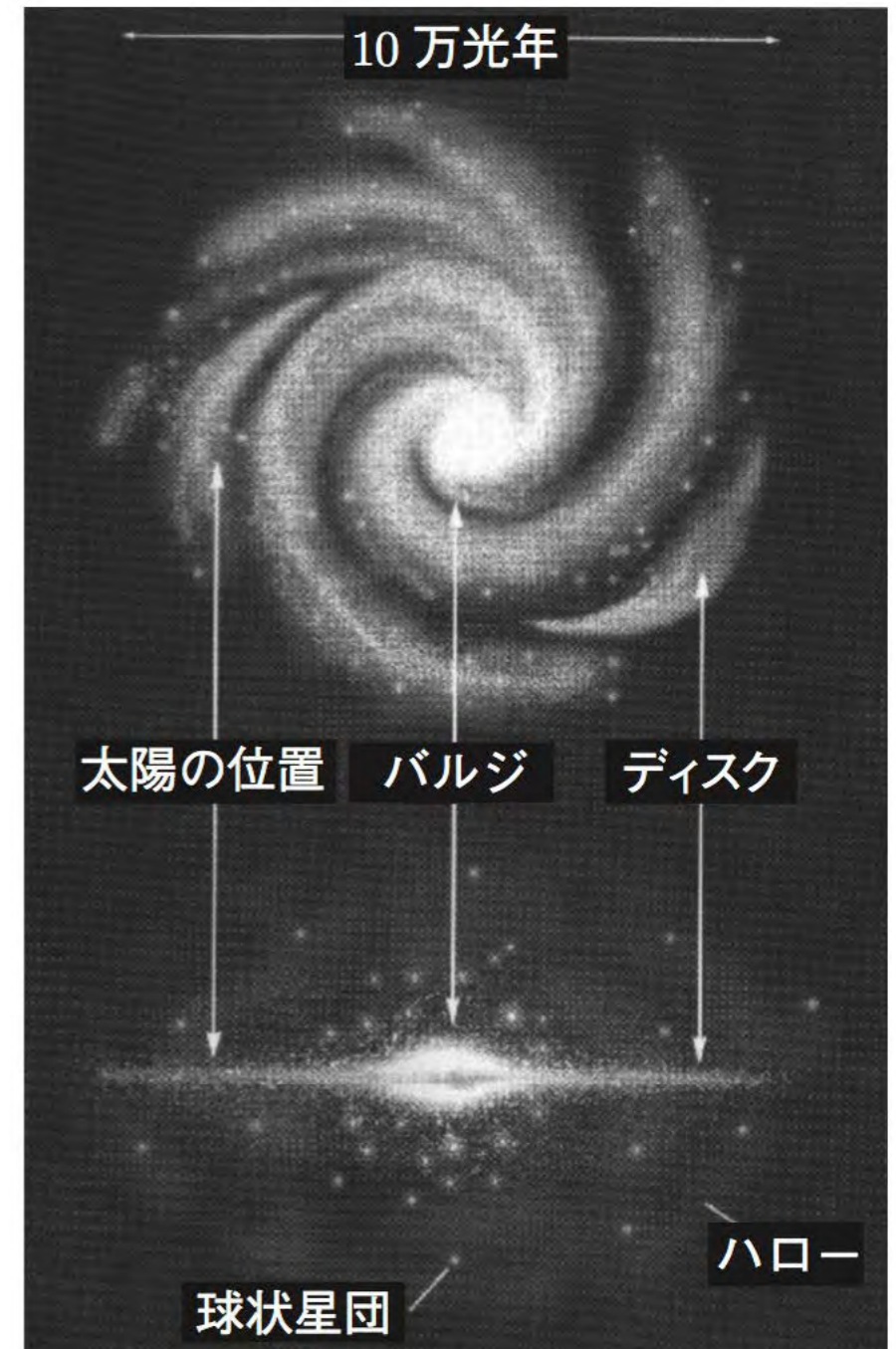
図 1.26 距離が倍になると，光の照射面積は 4 倍になるので，光量は $1/4$ になる．
すなわち，明るさは距離の 2 乗に比例して小さくなる．

同じような大きさと同じように明るい星でも
遠くにあれば暗い

α (アルファ) 星 アンタレス	550 光年
β (ベータ) 星	400 光年
δ (デルタ) 星	490 光年
ε (イプシロン) 星	64 光年
ζ (ゼータ) 星	150 光年
θ (シータ) 星	300 光年
ι (イオタ) 星	2000 光年
λ (ラムダ) 星	570 光年
π (パイ) 星	590 光年
σ (シグマ) 星	690 光年
HD161892	127 光年



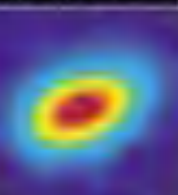
地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系





WE ARE HERE

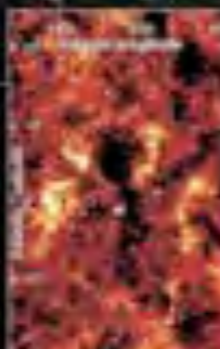
like an almost
star's velvet past,
its lurk arrange
0.126, detected by
telescopes
red



Light from the
star is absorbed
by and warms the
dust, making it glow.
As stars like the
sun die, they
become factories
for interstellar dust.
Celestial ash—the
remnants of its
red giant stage—
surrounds the tiny-hot central star of NGC
7027 (above right). Blown outward, the
dust would obscure our view of the center
of NGC 7027 were it not for this remark-
able composite image in infrared and



visible light from
the Hubble Space
telescope.
Clouds of inter-
stellar dust might
stream over huge
regions along the
central plane of the
Milky Way, but
are not dust and
smooth but seem
as frothy as the
head on a glass of
beer. Supernova
shock waves and
stellar wind from



evolving stars may have shaped this sur-
prising pattern.
When a massive star comes to the end
of its nuclear fuel supply, it collapses and
then rebounds in a brief, powerful explo-
sion, or super-
nova. The Chinese
called these cele-
stial fireworks
great stars and
recounted one such
event in the con-
stellation Taurus
in July 1054 that
was visible in
broad daylight.



In that location
today astron-
omers find the fast-
expanding Crab
Nebula (left), a
supernova remnant.
As its heart lies a
pulsar—a collapsed
star—whirling 30
times a second.
Satellite galaxies
of the Milky Way
host equally remark-
able celestial phe-
nomena. In the Large
Magellanic Cloud
(above right), 130,000 light-years from



Earth, clumpy, filamentary
clouds of hydrogen gas
reveal their steady march in
a death rattle from the Aus-
tralian Telescope Compact
Array. The blue half of the
cloud (blue) is rotating toward the Earth
while the top half (red) turns away.

Gleaming along the spiral arms of
the galaxy, bright emission nebulae
mark regions where new stars are form-
ing. The Laguna Nebula (shown) glows
5,000 light-years distant, is easily detached
with the naked eye as a fiery spiral in the
southern constellation Sagittarius. Wide-
field images show that it covers more of

the sky than does the full moon. Where
there's less than a year's worth of
radiation from the brightest and most
massive young star in the nebula, Har-
schel 25, heats and ionizes the gas across
a wide region. Despite the brilliance of the
Laguna Nebula and similar objects like
the famous Orion Nebula, such areas are
usually little more than hot blisters on the
skin of giant interstellar clouds.

LAGUNA NEBULA



Photo: The
University of
Texas at
Austin
Photo: The
University of
Texas at
Austin
Photo: The
University of
Texas at
Austin

天文学的な距離の測定方法：距離のはしご (distance ladder)

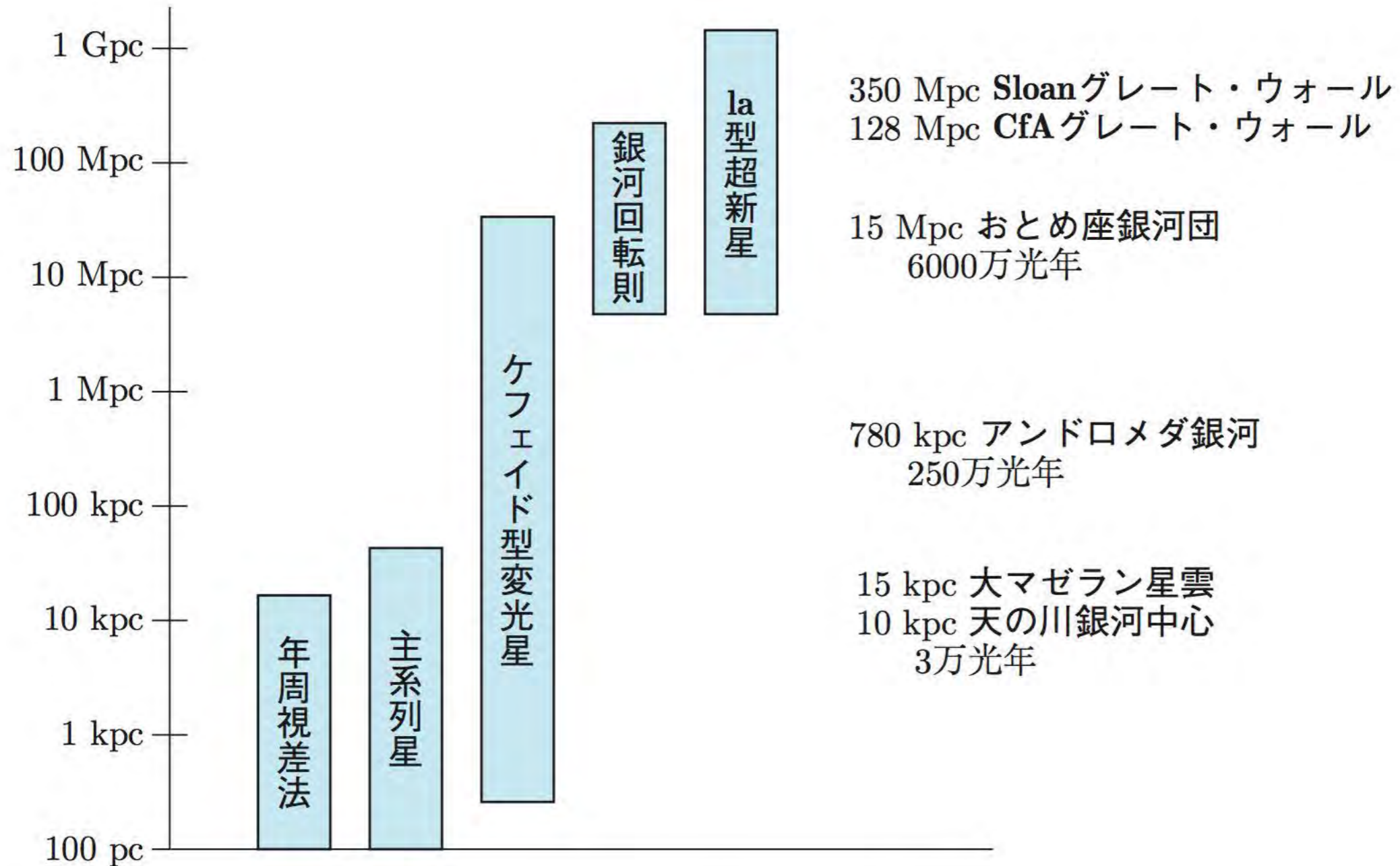


図 A.3 距離のはしご. 多くの手法を組み合わせて遠方の天体までの距離を特定している.

年周視差法

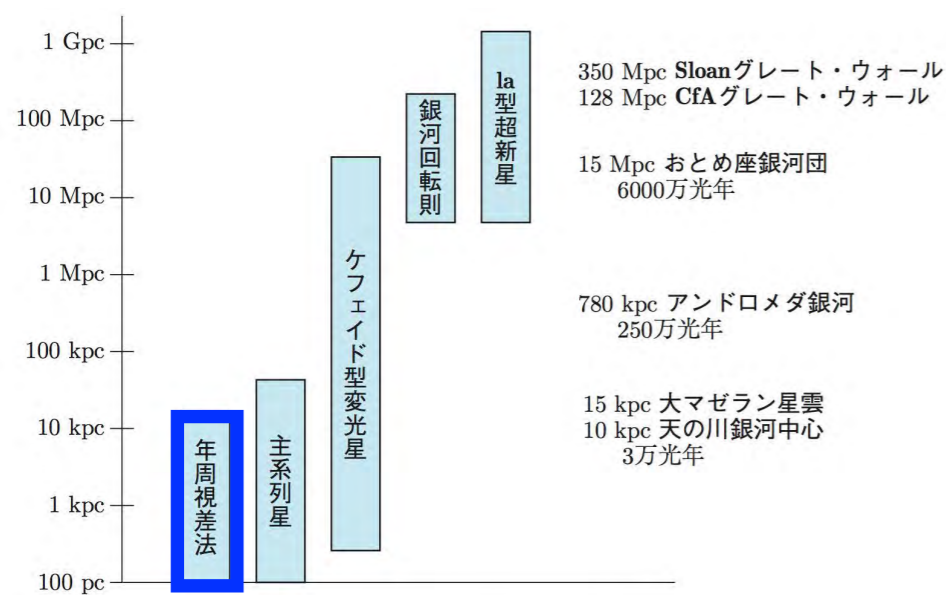
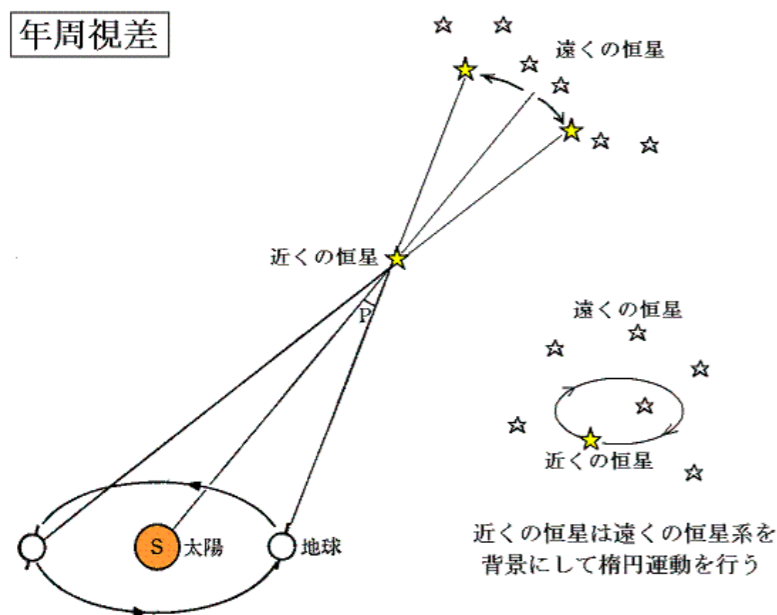


図 A.3 距離のはしご。多くの手法を組み合わせて遠方の天体までの距離を特定している。

● 年周視差法

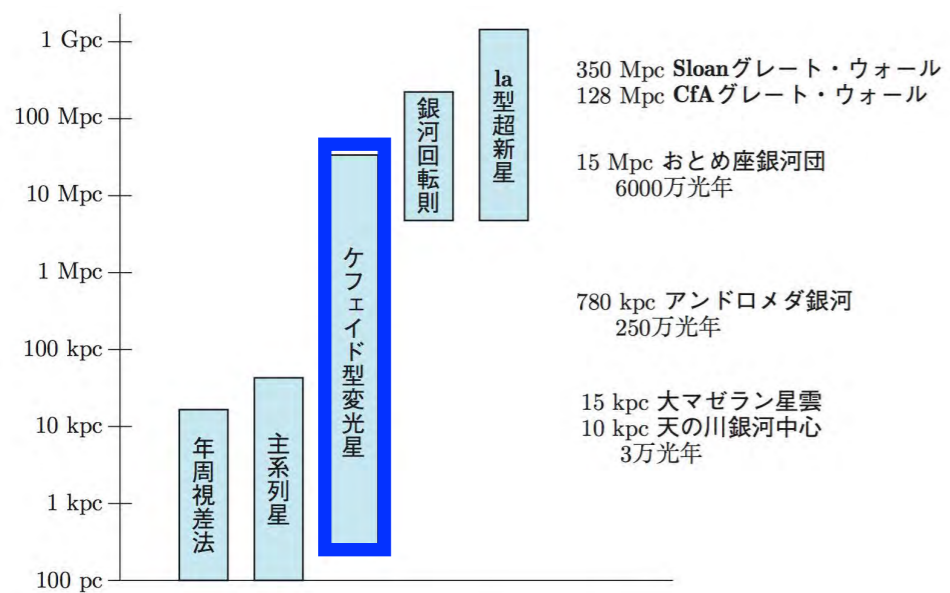
もっとも信頼できるのは、三角測量する方法である。地球が公転することにより、半年で3億 km 離れたところから私たちは天体を観測することができる (年周視差法)。しかし、遠方の星になると望遠鏡の角度分解能が必要になる。欧州宇宙機関 (ESA) は、GAIA 衛星 (2013-) を用いて、10 億個以上の星の距離を測定するプロジェクトを進めている。もっとも近い恒星までの距離を 0.001% の精度で、銀河中心付近の星の距離を 20% の精度で決定する計画である。日本も JASMINE¹⁾ 赤外線位置天文観測衛星計画を進めている。しかし、年周視差法で距離測定ができるのは、天の川銀河の中心ほどの距離である。

年周視差



もっとも正確だが、天の川銀河の中心くらいまで

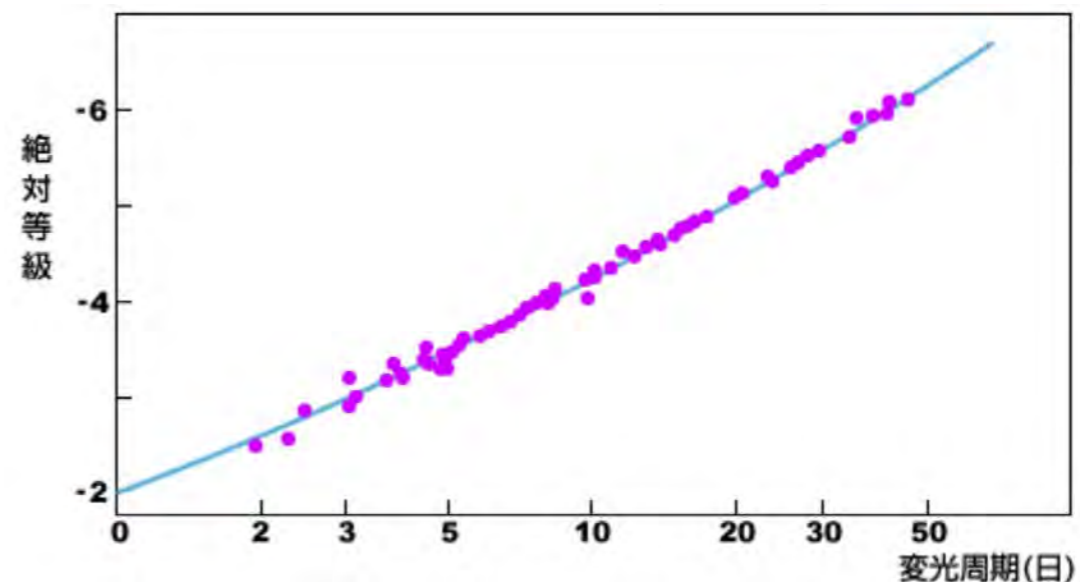
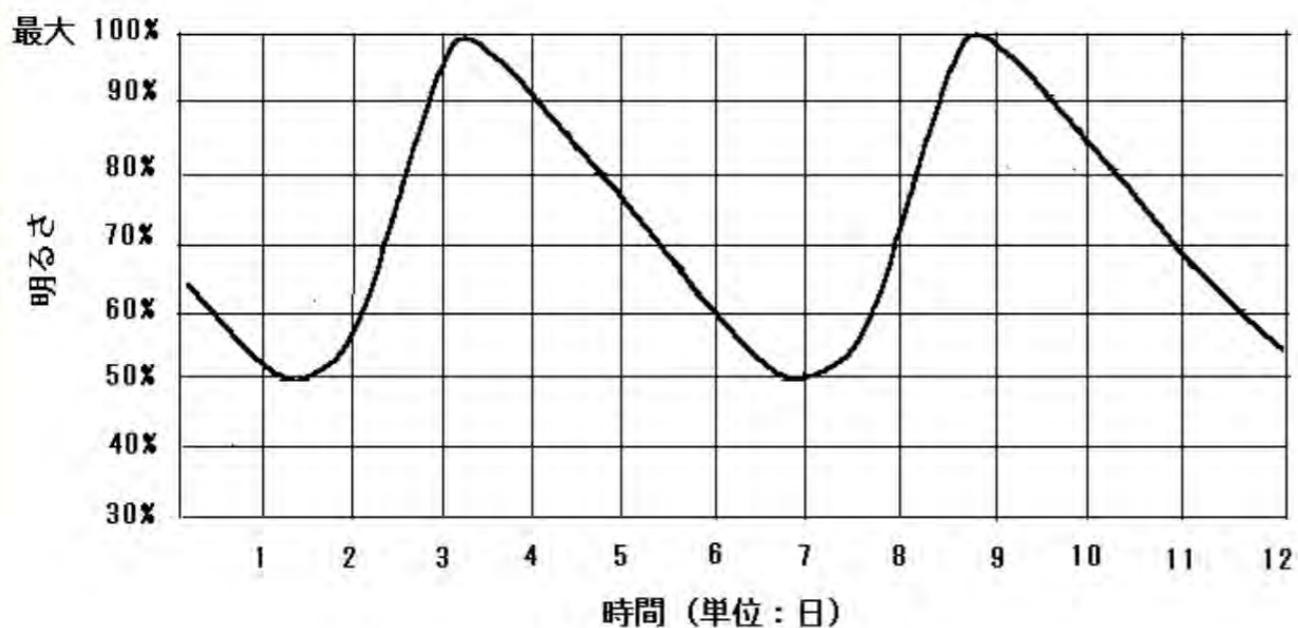
ケフェイド型変光星



● ケフェイド型変光星 (セファイド型変光星)

もともとの明るさがはっきりとわかる星であれば、見かけの明るさが距離の2乗にしたがって暗くなることを利用して、距離を特定することができる。ケフェイド型変光星は、変光の周期と明るさに相関があることが知られていて、この性質を使うと遠方の銀河中にケフェイド型変光星を探すことによってその銀河の距離を特定することができる。

図 A.3 距離のはしご。多くの手法を組み合わせて遠方の天体までの距離を特定している。



銀河回転則

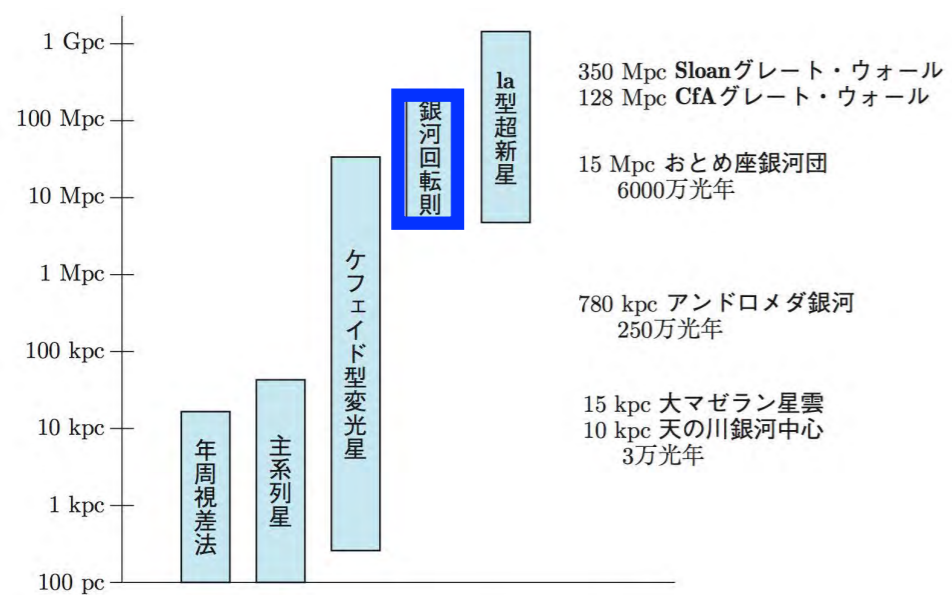
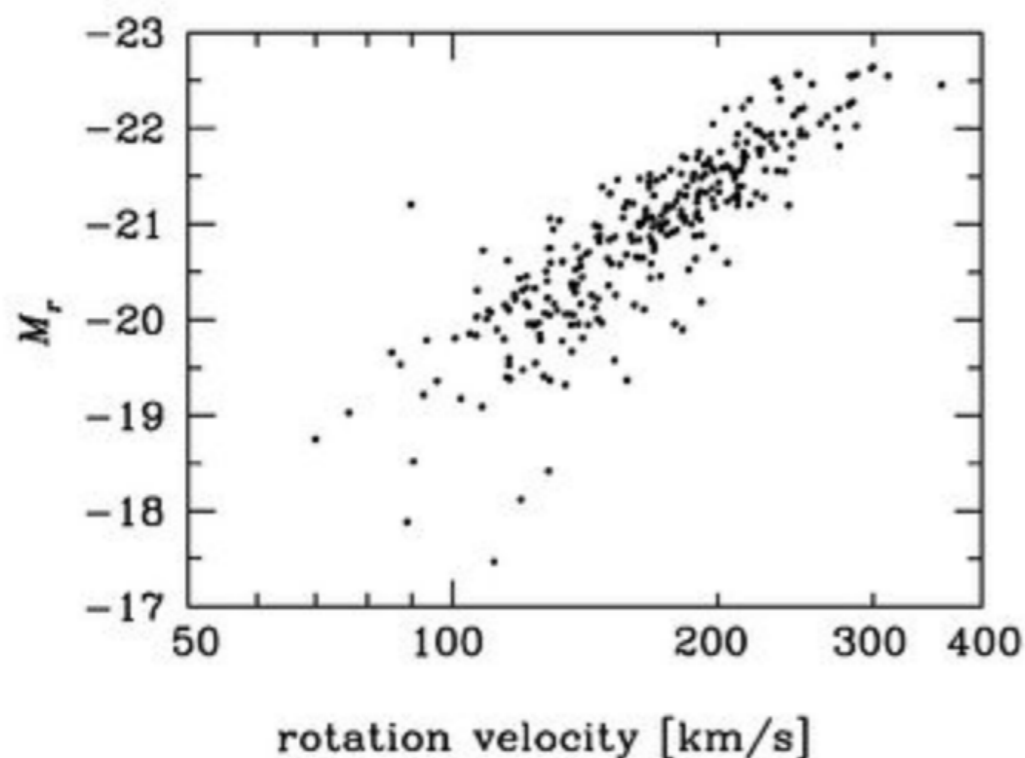


図 A.3 距離のはしご。多くの手法を組み合わせることで遠方の天体までの距離を特定している。

● 銀河回転則

渦巻き銀河に対しては、回転の速い銀河ほど明るいことが経験則（タリー・フィッシャー関係）として知られていて、シミュレーションからも支持されている。銀河の星の運動をドップラー効果などから測定できれば、銀河の明るさの情報からその銀河の距離を特定することができる。

また、楕円銀河に対しても、星の速度分散と銀河の大きさ、明るさの間には経験則（フェイバー・ジャクソン関係）があることも知られている。これらは 100 Mpc 程度の距離までを特定することが可能にする。



M33

Ia型超新星

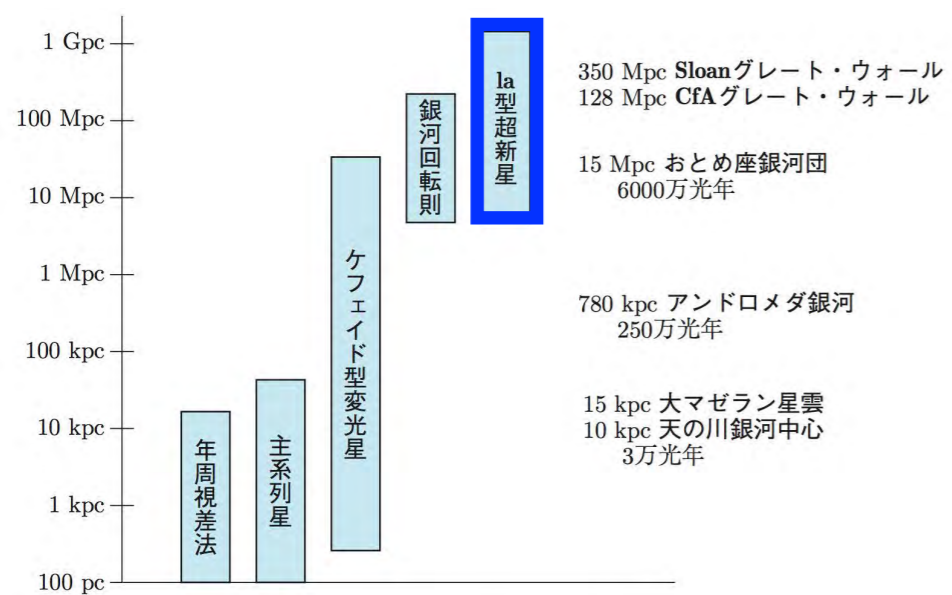
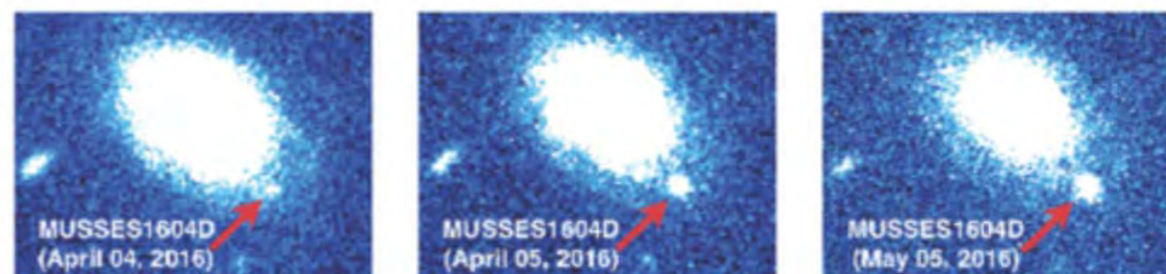
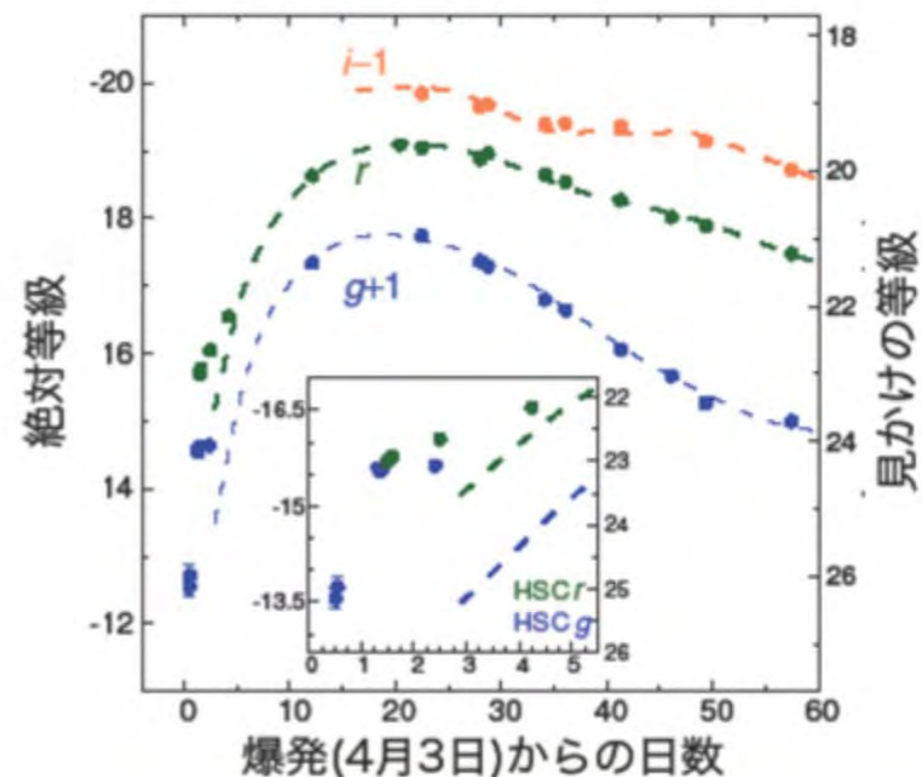


図 A.3 距離のはしご. 多くの手法を組み合わせることで遠方の天体までの距離を特定している.



<http://www.optronics-media.com/news/20171005/48569/>

Ia型超新星

Ia型超新星は、爆発のメカニズムが決まっています。どの超新星爆発もほぼ同じエネルギーを放出するため、距離測定の標準光源といわれる。

はくちょう座



こと座



へびつかい座



わし座



銀河中心

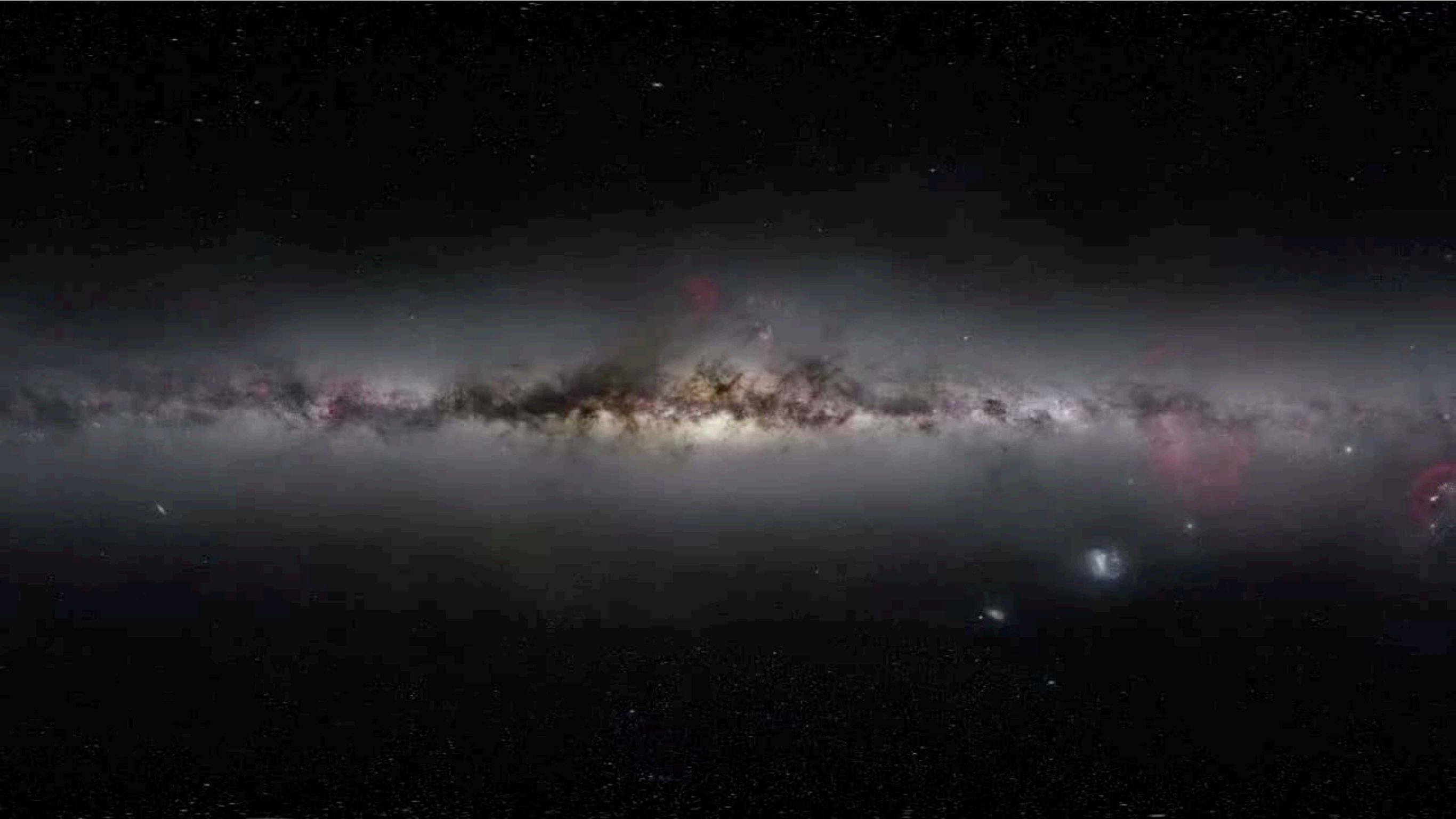


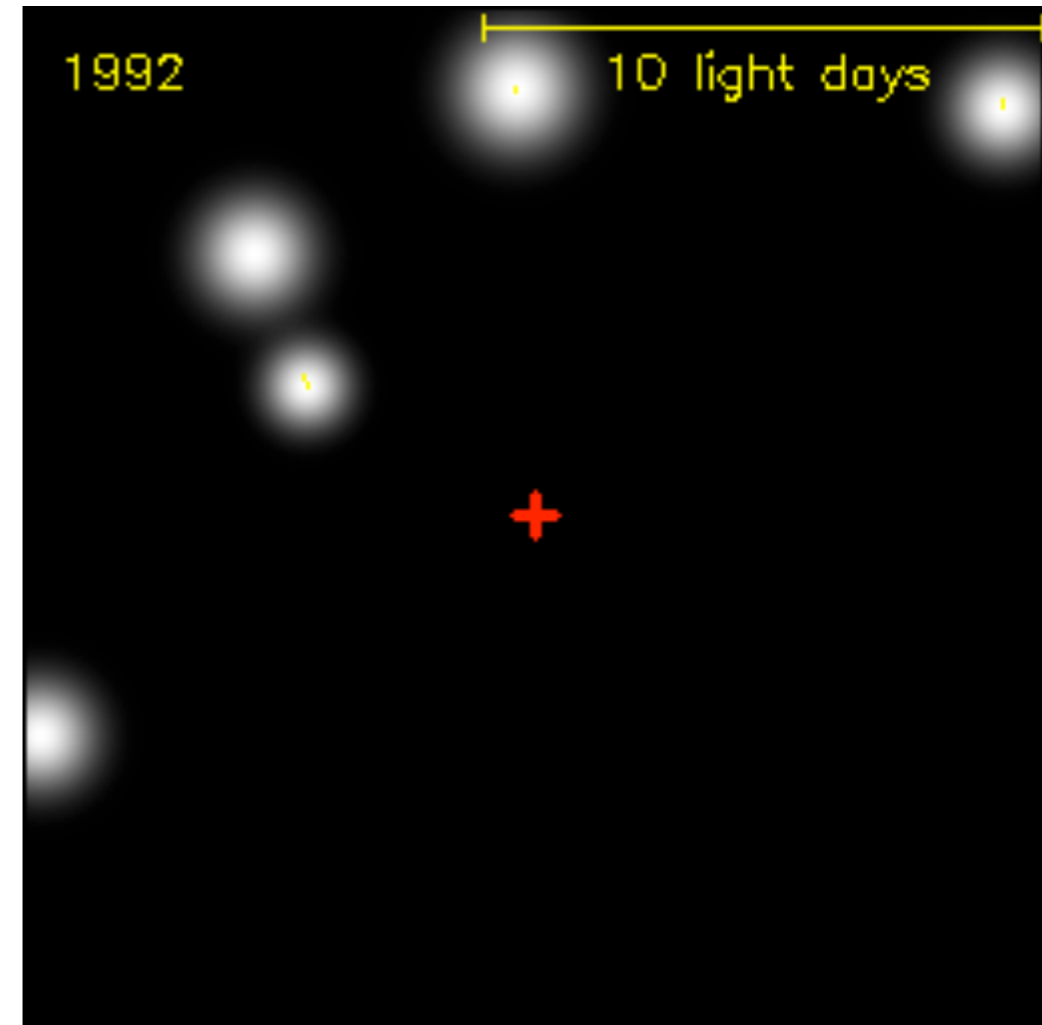
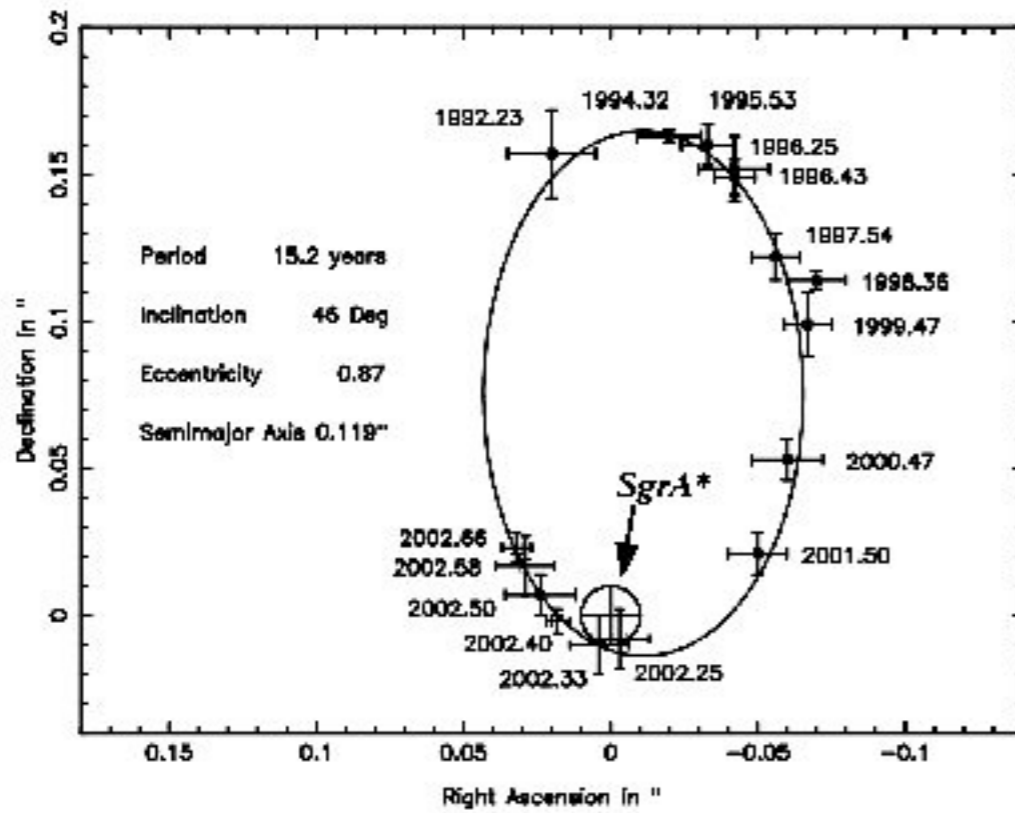
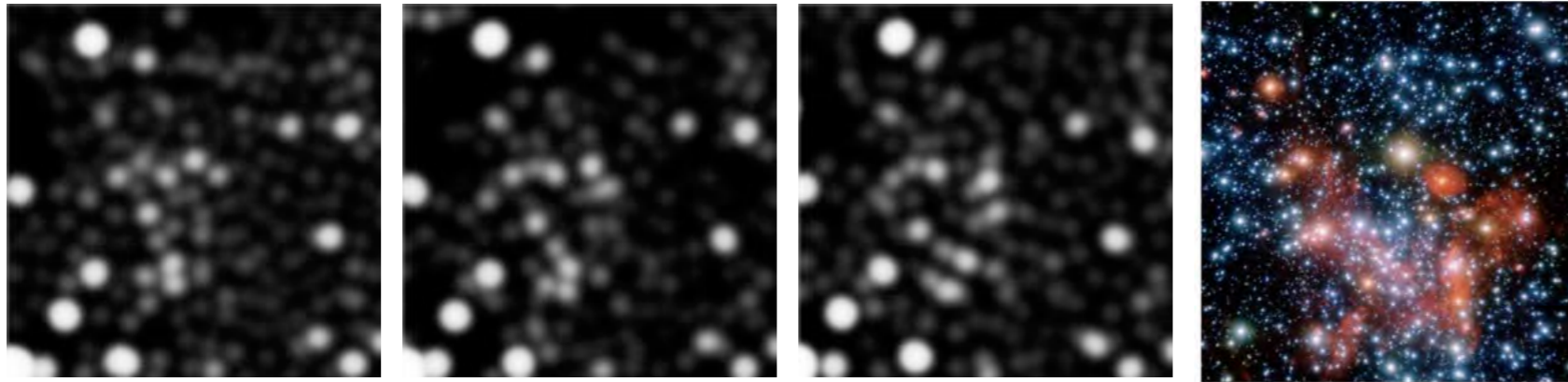
いて座



さそり座

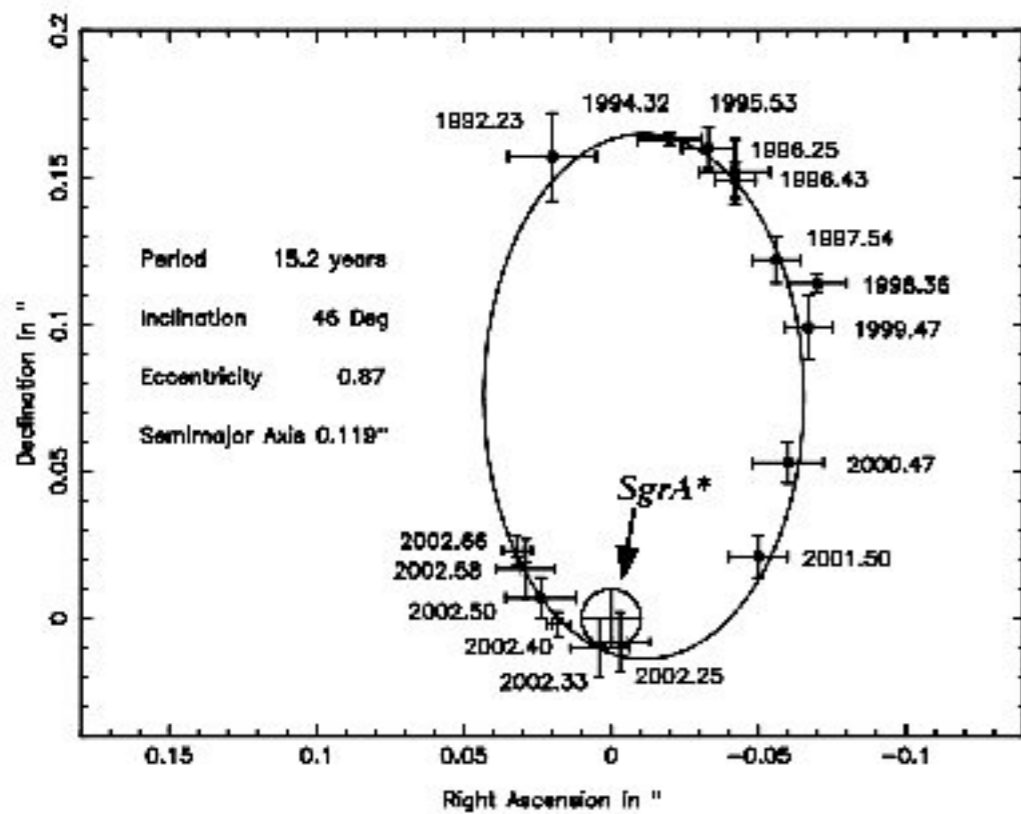
銀河系の中心には巨大ブラックホールがある





<http://www.extinctionsift.com/SignificantFindings08.htm>

<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>



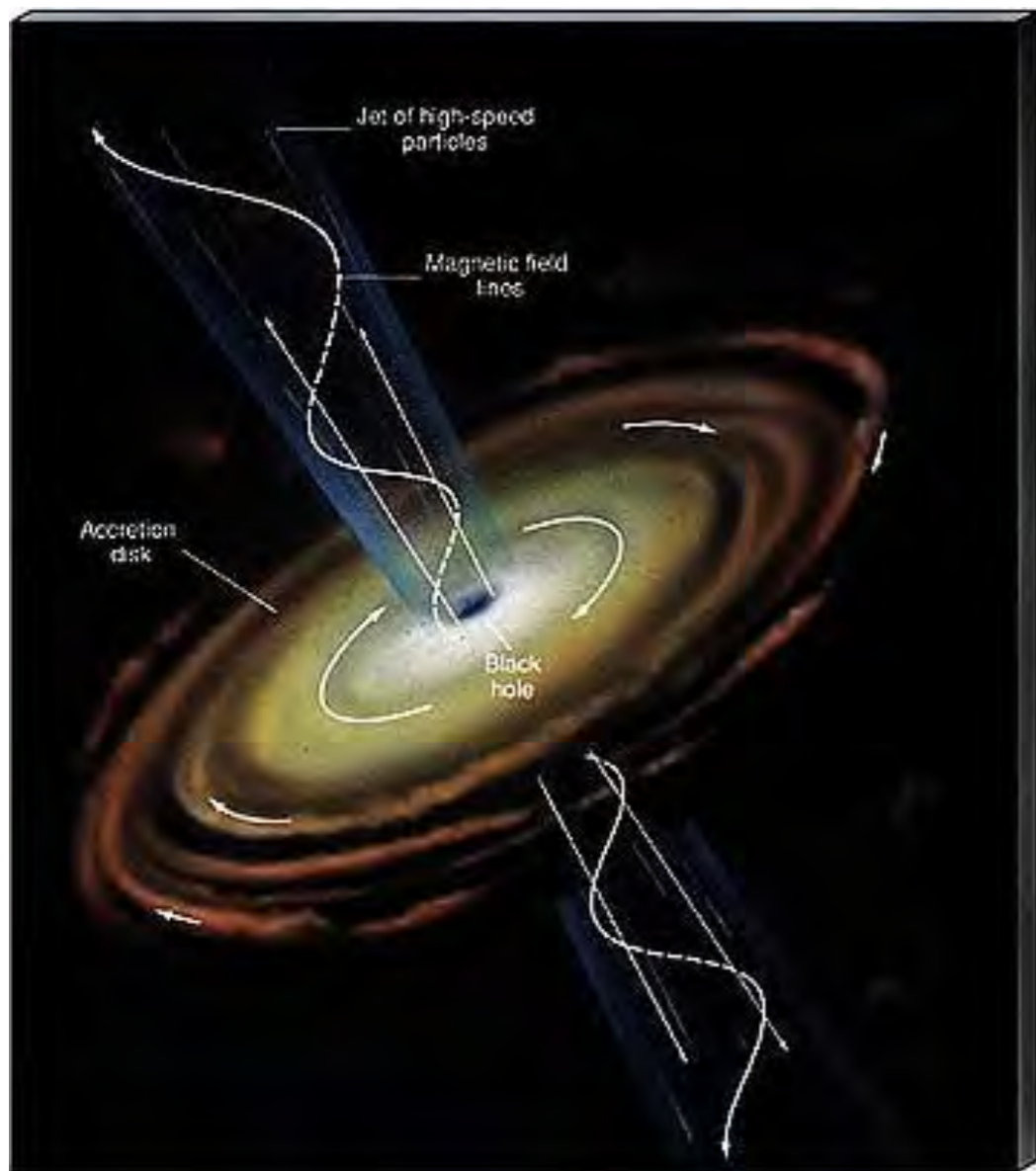
周りの星の激しい運動から
強い重力源であることがわかる



落下していくガスが
高い温度で輝く

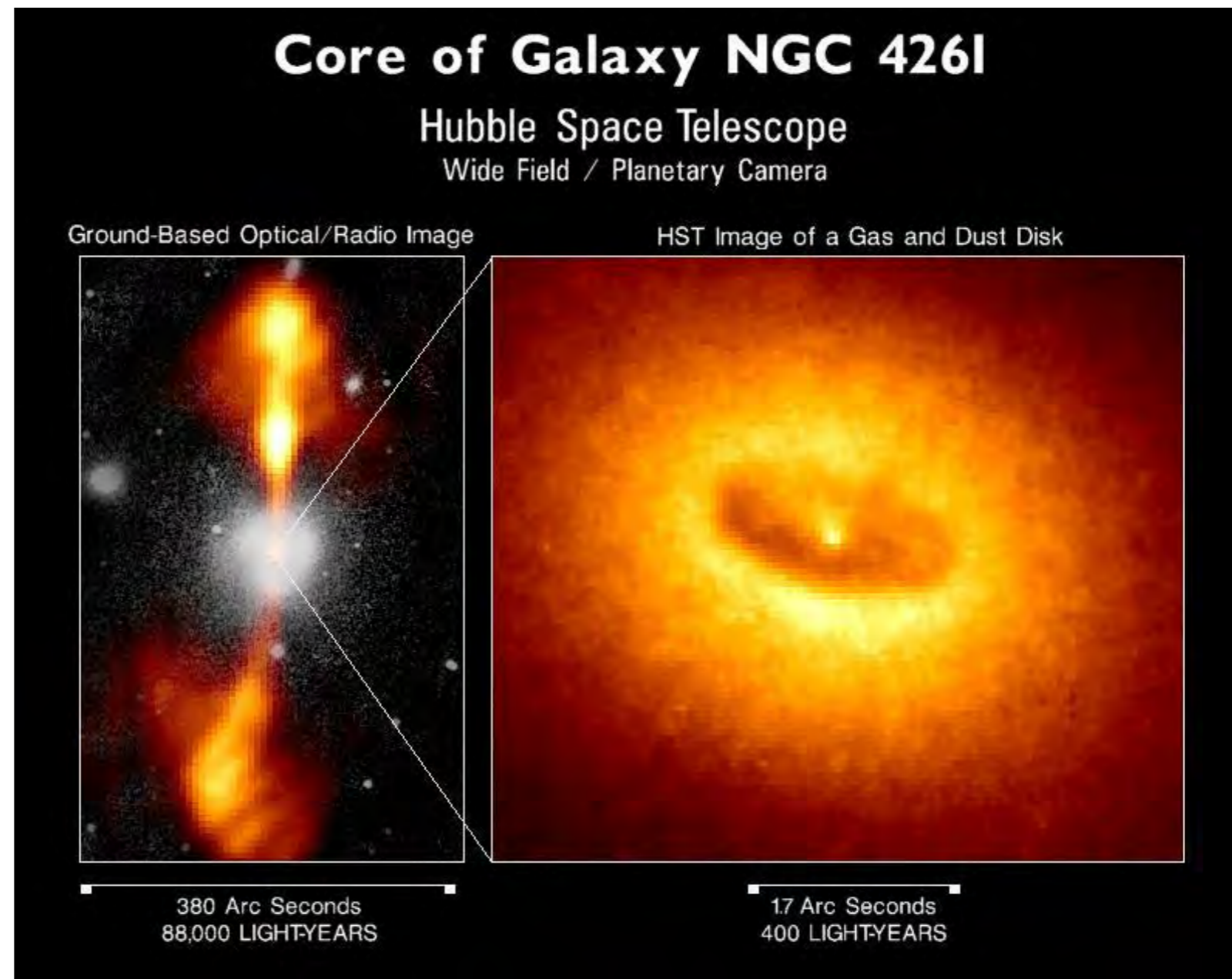
(降着円盤 accretion disk)

想像図



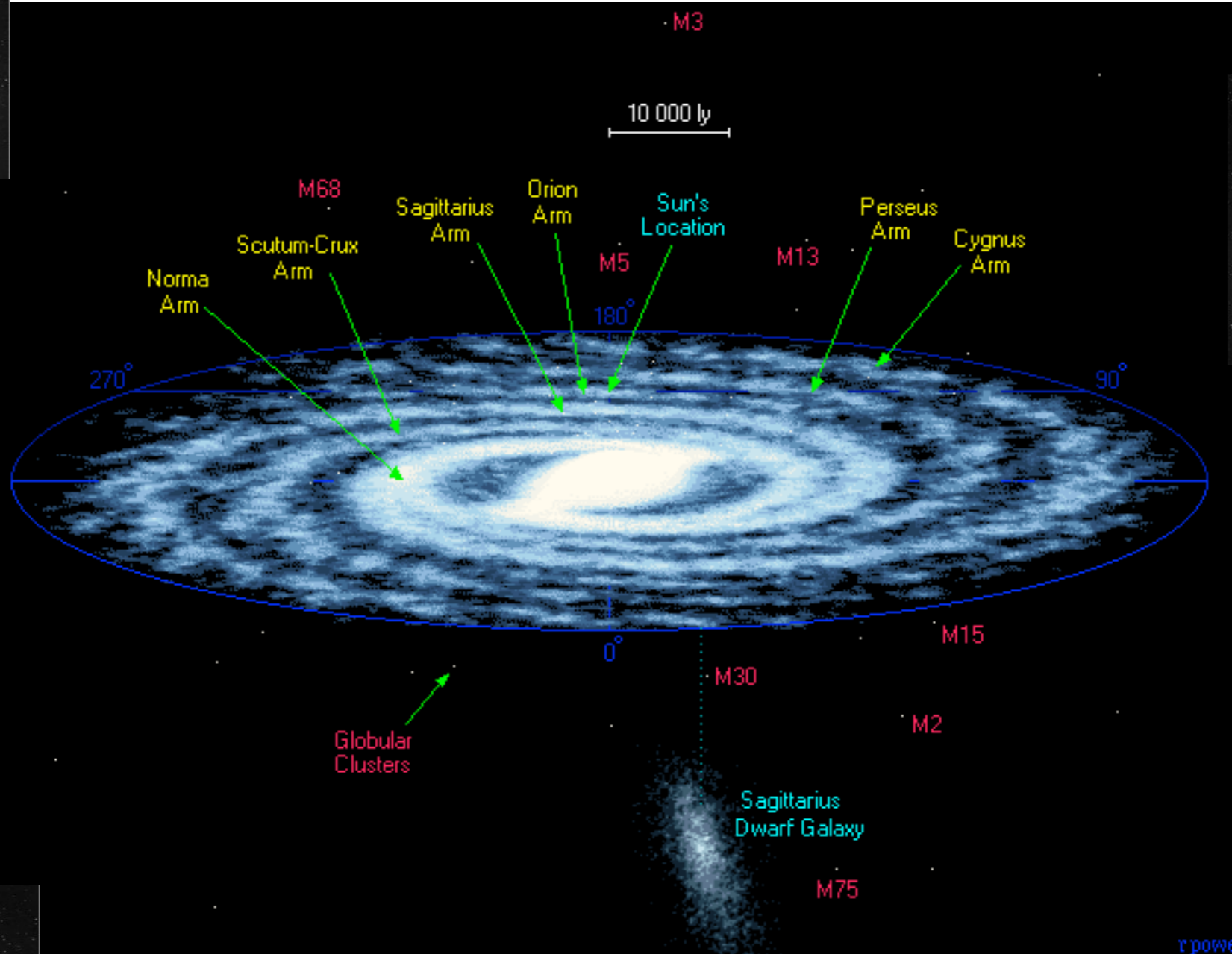
<http://www2.astro.psu.edu/users/rbc/a1/lec26n.html>

想像図



銀河中心からジェットが吹き出す
 (活動銀河核 active galactic nuclei)

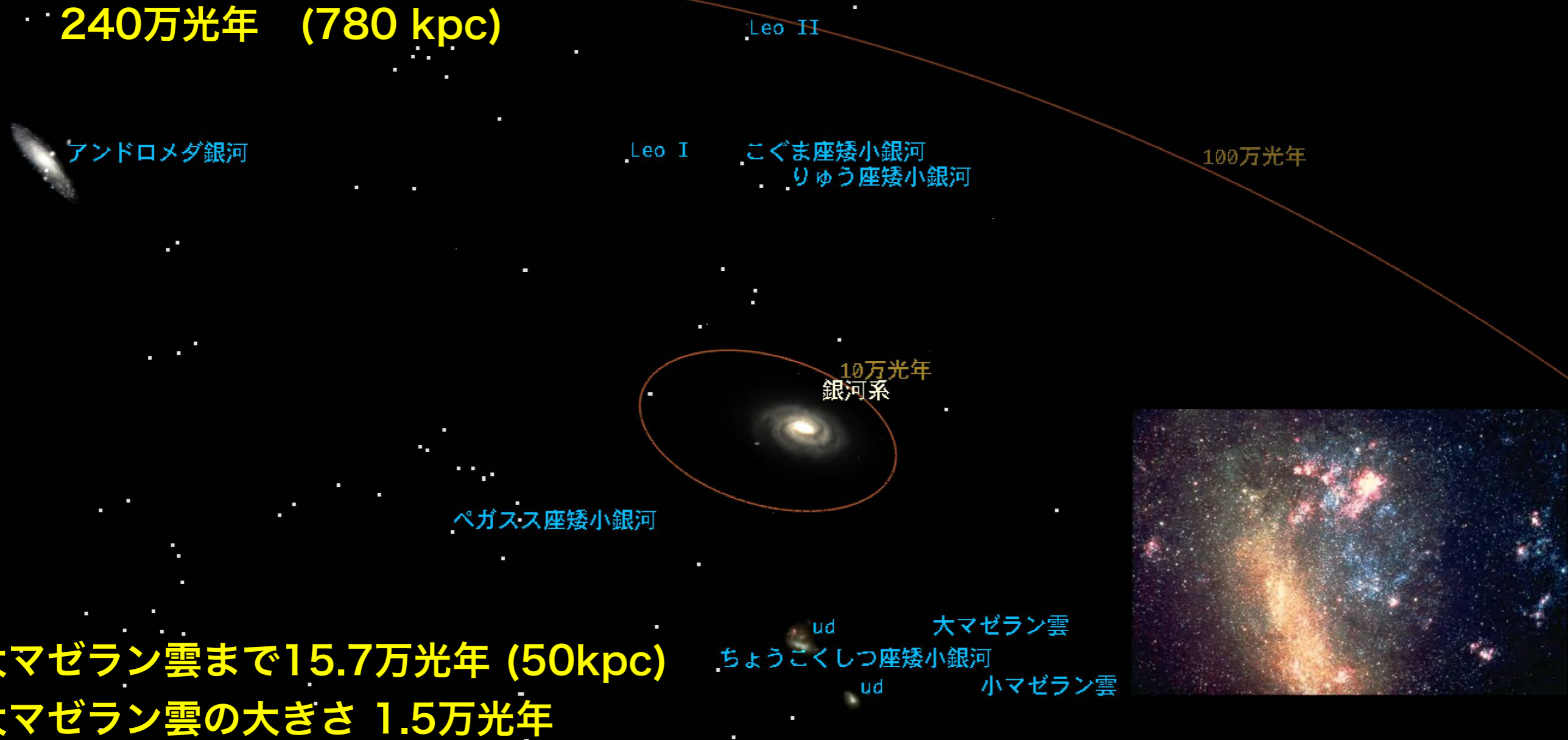
地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系



←球状星団(globular cluster)

地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系 ▶ 銀河群

隣の銀河（アンドロメダ銀河）まで
240万光年（780 kpc）



大マゼラン雲まで15.7万光年 (50kpc)
大マゼラン雲の大きさ 1.5万光年

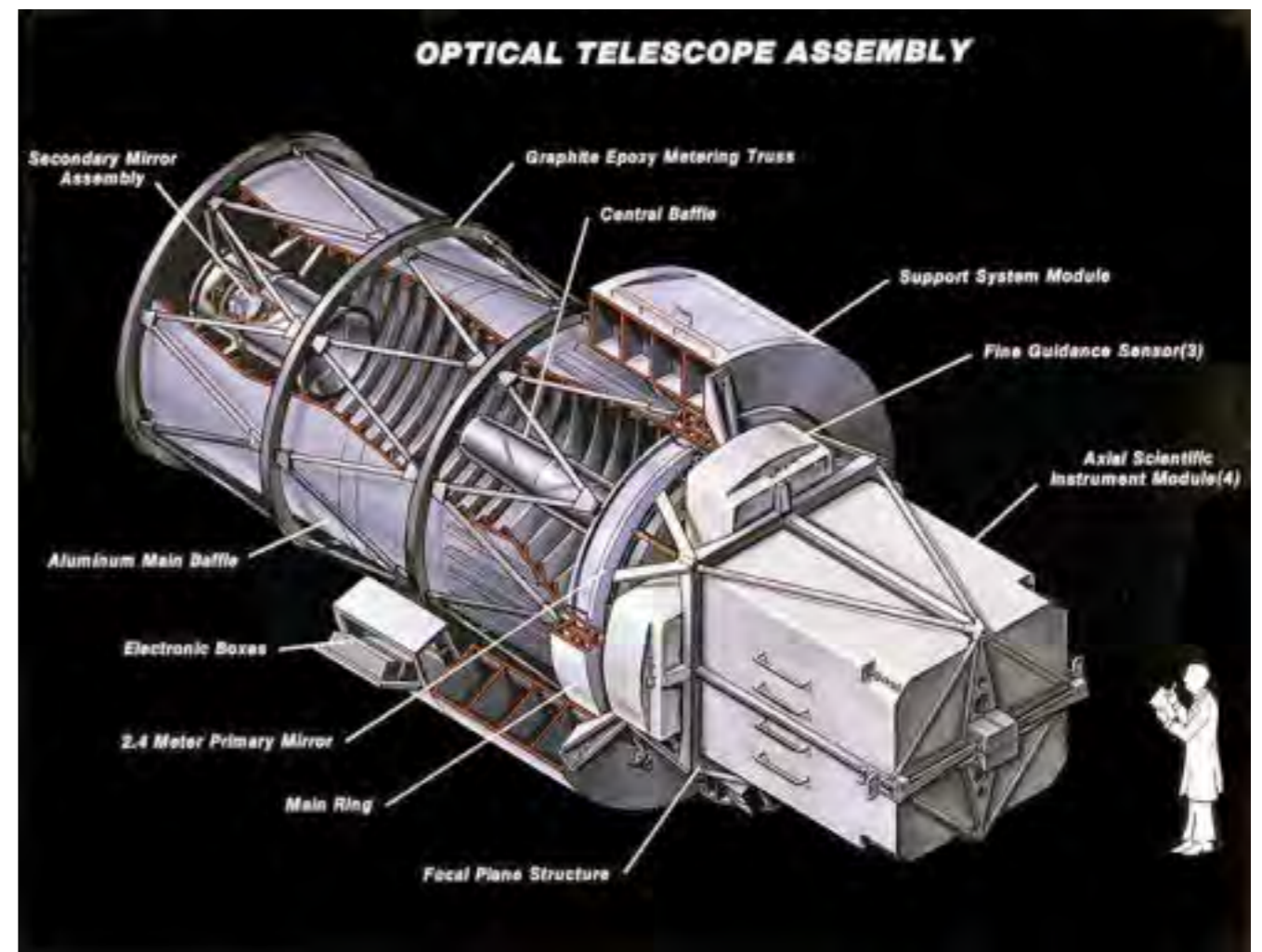
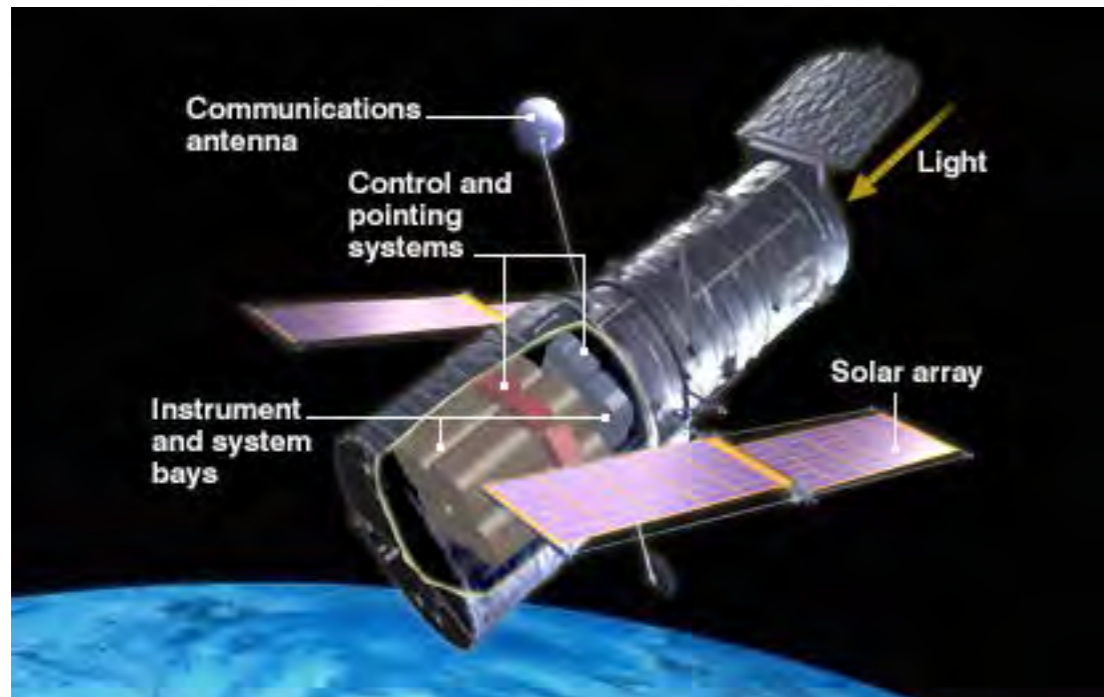
宇宙空間の距離を測る指標は、大マゼラン星雲までの距離を基準としている。もし、将来、大マゼラン星雲までの距離が10%間違っていたことが判明すれば、宇宙全体の距離もそのまま10%狂うことになる。



© Robert Gendler

<https://apod.nasa.gov/apod/ap181217.html>

ハッブル宇宙望遠鏡 Hubble Space Telescope (HST)



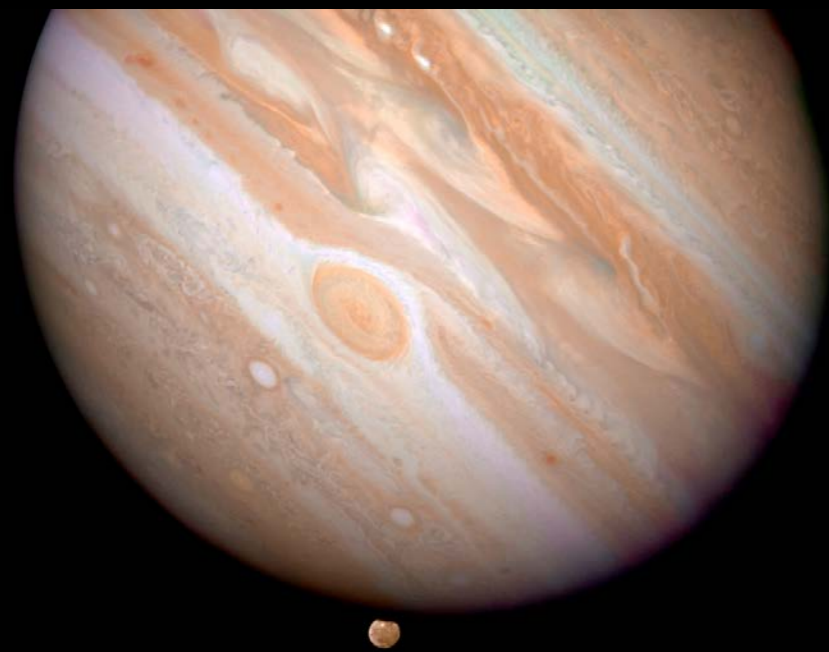
アメリカが1990年、宇宙空間に打ち上げた望遠鏡。

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)



ハッブル宇宙望遠鏡 Hubble Space Telescope (HST)



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



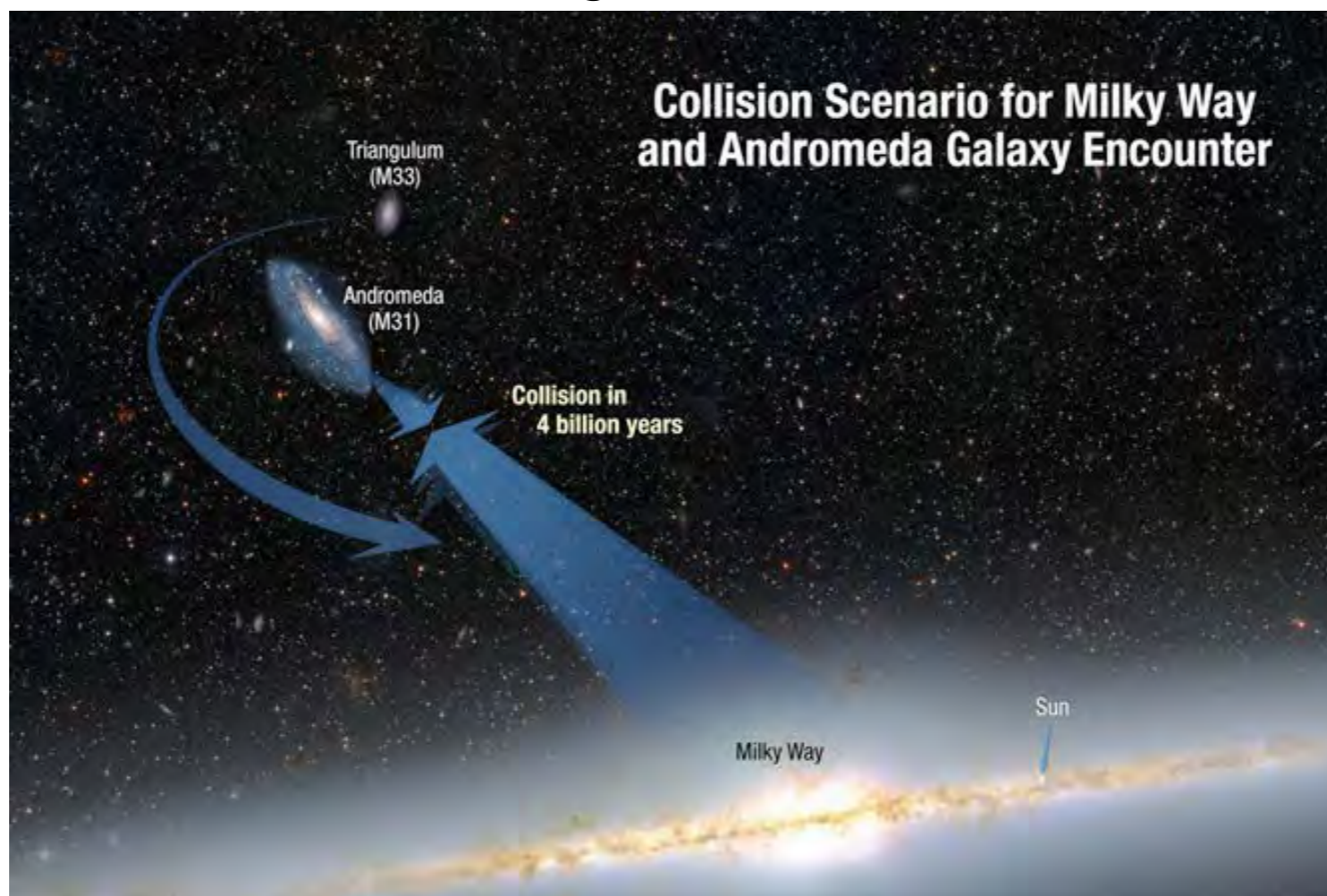
Pleiades and Stardust

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](#). Hurling 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.

アンドロメダ銀河と、天の川銀河は40億年後に衝突する！

When galaxies collide



NASA's Hubble Shows Milky Way is Destined for Head-On Collision
05.31.12

NASA astronomers announced Thursday they can now predict with certainty the next major cosmic event to affect our galaxy, sun, and solar system: the titanic collision of our Milky Way galaxy with the neighboring Andromeda galaxy.

The Milky Way is destined to get a major makeover during the encounter, which is predicted to happen four billion years from now. It is likely the sun will be flung into a new region of our galaxy, but our Earth and solar system are in no danger of being destroyed.

我々の銀河と、230万光年先にあるアンドロメダ銀河は、互いの重力で近づきつつあります。ハッブル宇宙望遠鏡の詳細な観測から、40億年後の衝突の様子をシミュレーションした結果が、公開されました。

http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/milky-way-collide.html

アンドロメダ銀河と、天の川銀河は40億年後に衝突する！



Milky Way Versus Andromeda As Seen from Earth (3:53)

<http://www.youtube.com/watch?v=qnYCpQyRp-4>

アンドロメダ銀河と、天の川銀河は40億年後に衝突する！



現在



20億年後



37.5億年後



38.5億年後

アンドロメダ銀河と、天の川銀河は40億年後に衝突する！



© AP

40億年後



51億年後



70億年後

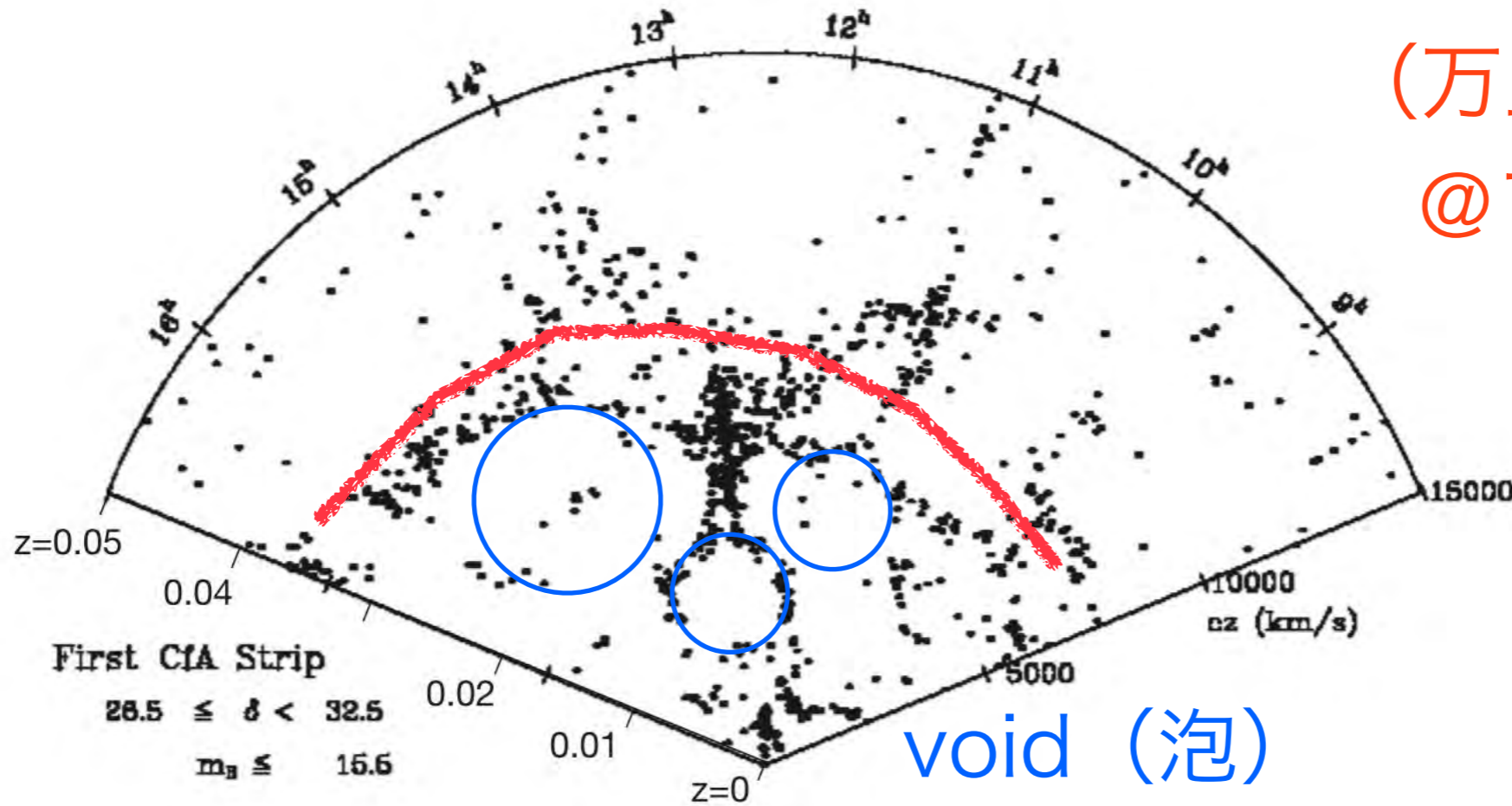
Illustration Sequence of the Milky Way and Andromeda Galaxy Colliding

NASA, ESA, Z. Levay and R. van der Marel (STScI), T. Hallas, and A. Mellinger • STScI-PRC12-20b

銀河が衝突しても、星どうしが衝突することはほとんどありません。星と星の間の距離が長く、銀河系内は「疎」なのです。70億年後には合体して1つの銀河になるようです。

地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系 ▶ 銀河群 ▶ 銀河団

Great Wall
(万里の長城)
@128Mpc

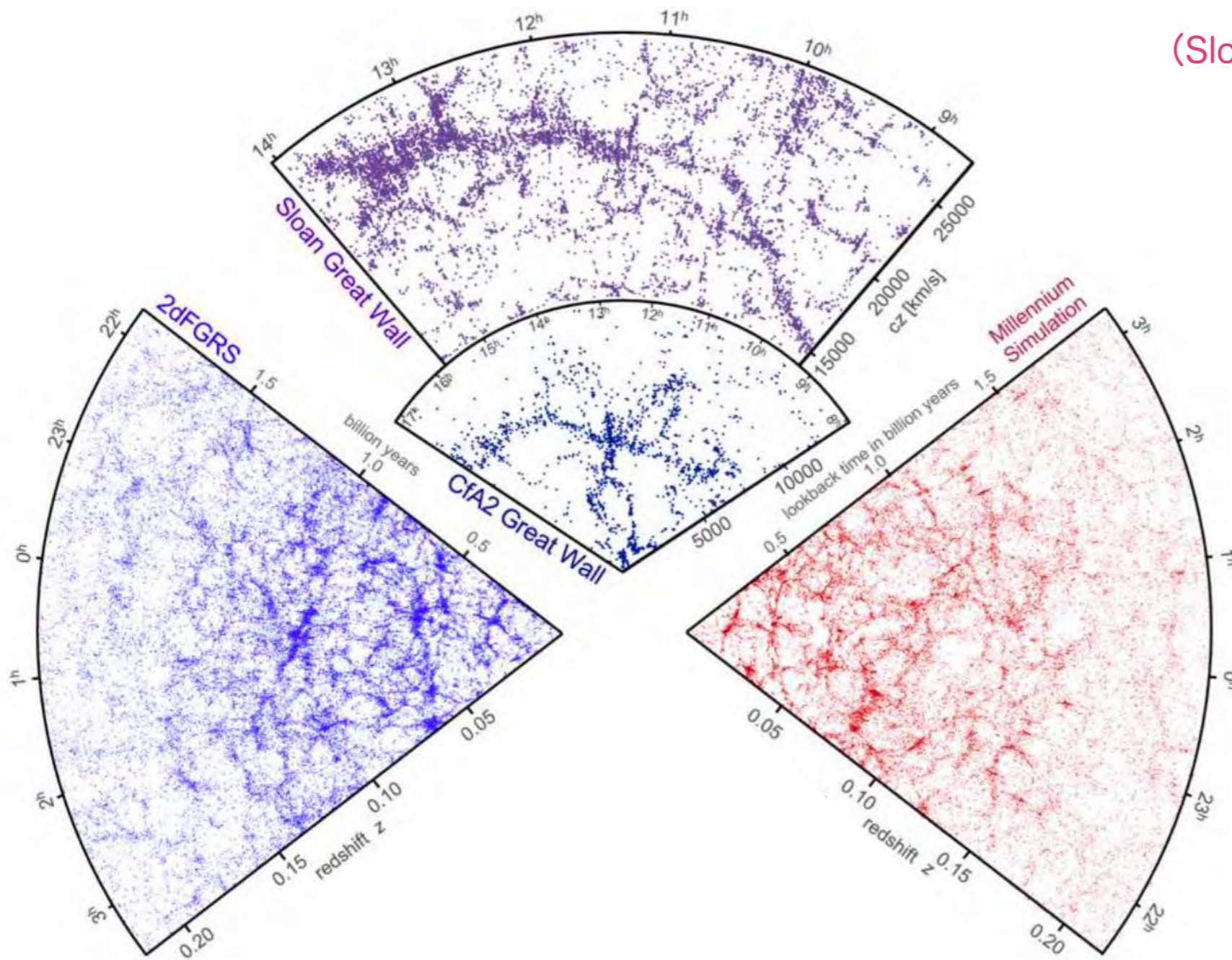


Margaret Geller

図 1.34 1989年に報告された CfA サーベイの図. 扇子を広げたように、見かけの範囲を狭く、奥を深く銀河をサーベイした結果の図である. 中心はかみのけ座銀河団 (Coma cluster). 1つ1つの点が銀河であり、全部で 1027 個のデータがある. 右側の距離の目盛りは赤方偏移から測った後退速度を示している. 左側の目盛りは赤方偏移 z を記入した. $z = 0.03$ と記された距離が 128 Mpc に相当する. [CfA が提供している図を加工]

1027個の銀河分布を観測 (1989)

地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系 ▶ 銀河群 ▶ 銀河団 ▶ 大規模構造



(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)

65万個の銀河分布を
観測 (2006)

図 1.35 銀河の分布観測とシミュレーションによる疑似分布を並べたもの。〔上〕SDSS サーベイによる銀河の分布図と図 1.34 を重ねたもの。SDSS は、北天から見える 65 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している。1.3 億光年の距離に及ぶ 1 万個以上のグレートウォール (万里の長城) も新たに発見された。〔左〕2dFGR サーベイによる銀河の分布図。南天の 22 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している。〔右〕ミレニアム・シミュレーションという数値計算結果を似せて示したもの。[Springel, Frenk, White の論文 (2006) を加工]

地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系 ▶ 銀河群 ▶ 銀河団 ▶ 大規模構造

1611.07049

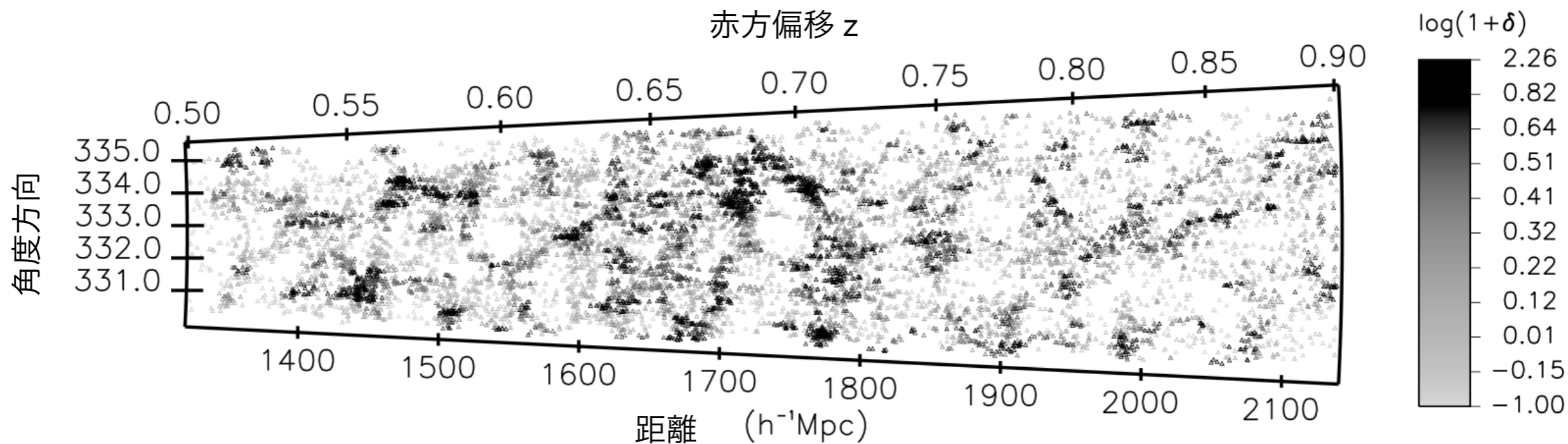
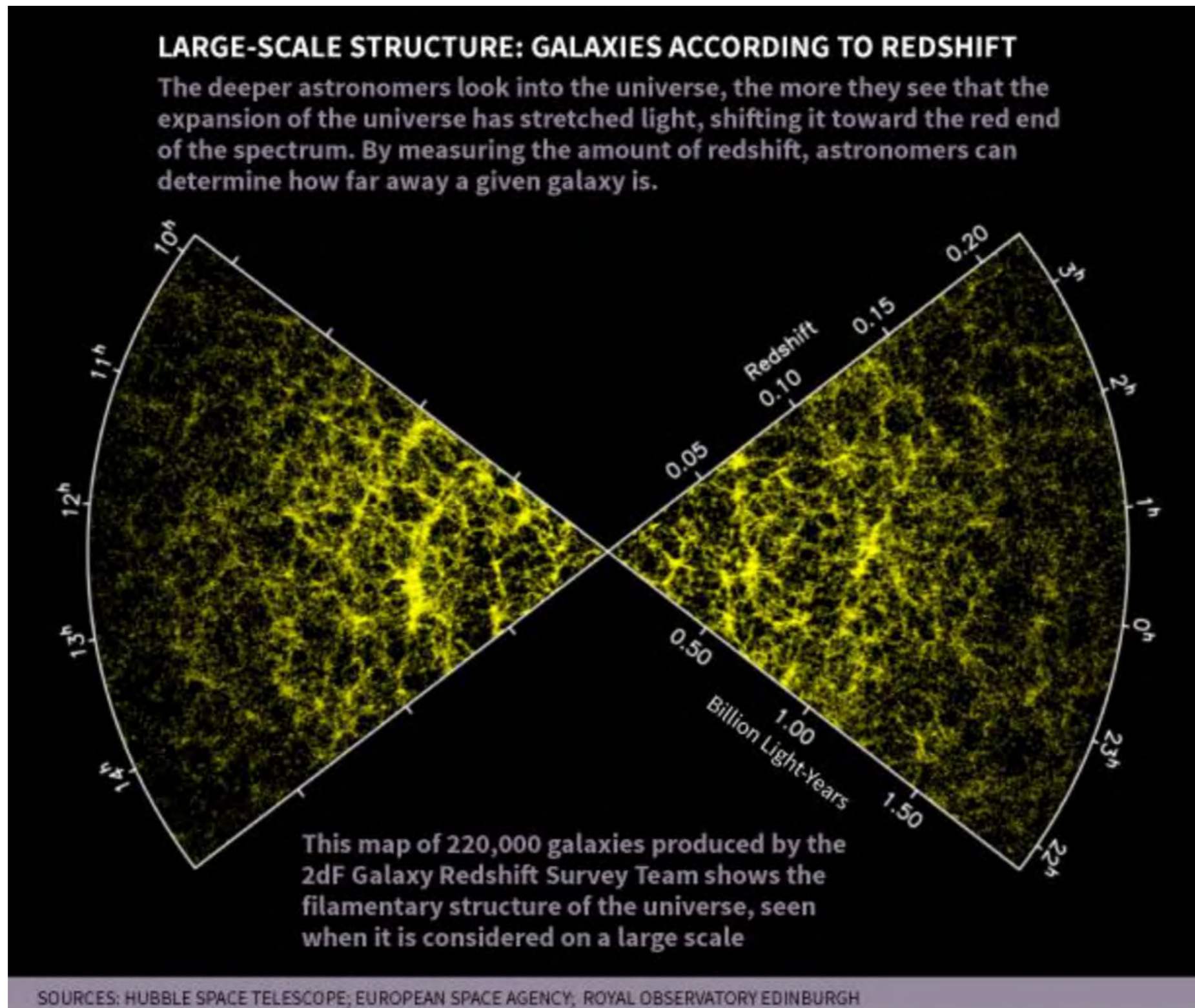
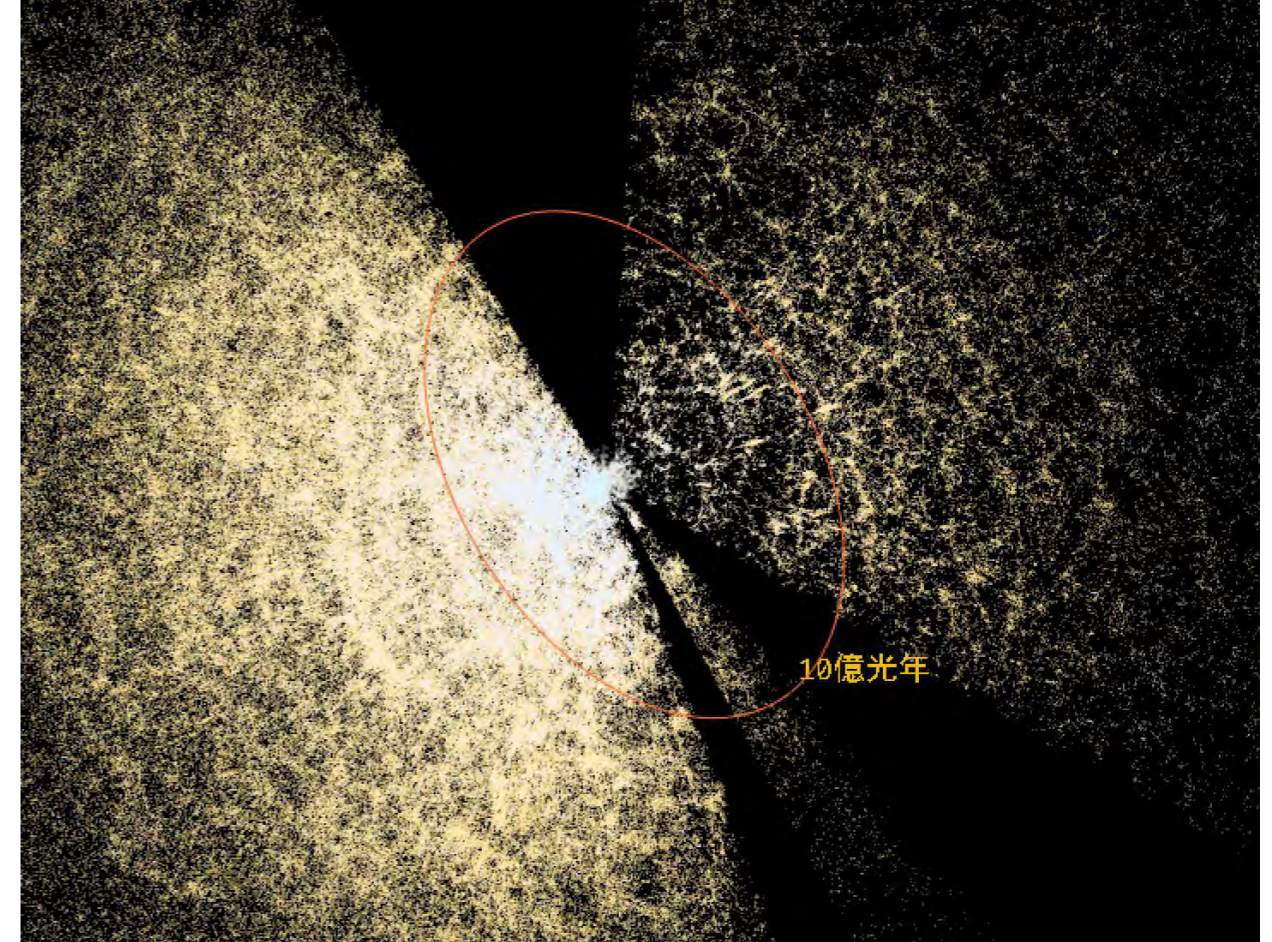
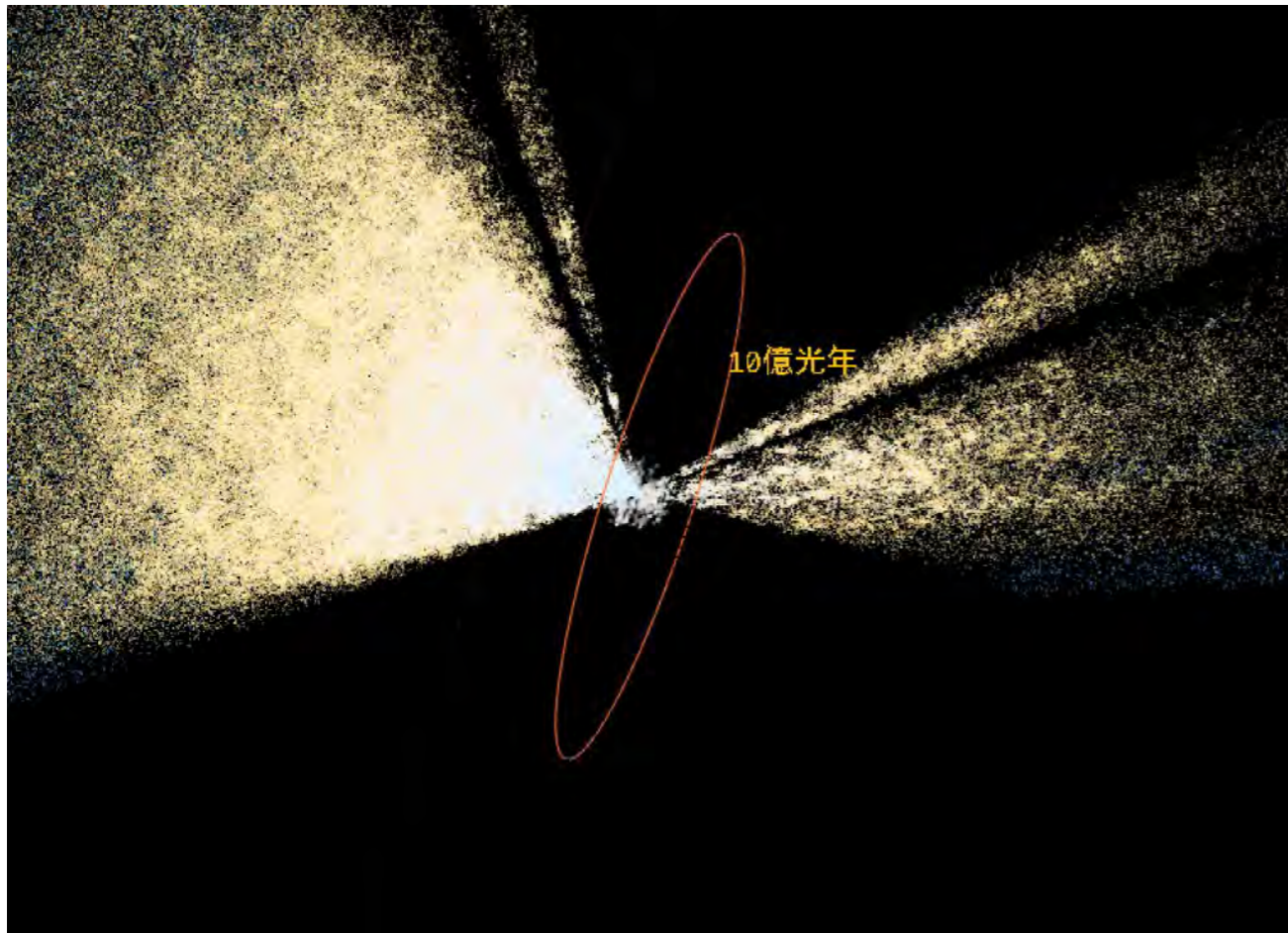


図 1.36 VIMOS サーベイにおける銀河の分布図 (2016). 図 1.35 よりも遠方について、角度を絞って深く宇宙を探索したもので、10 万個の点それぞれが銀河を示す. 宇宙誕生から現在までの中間程度の頃の構造を示している. ところどころ銀河分布の少ないボイド構造が見られる.

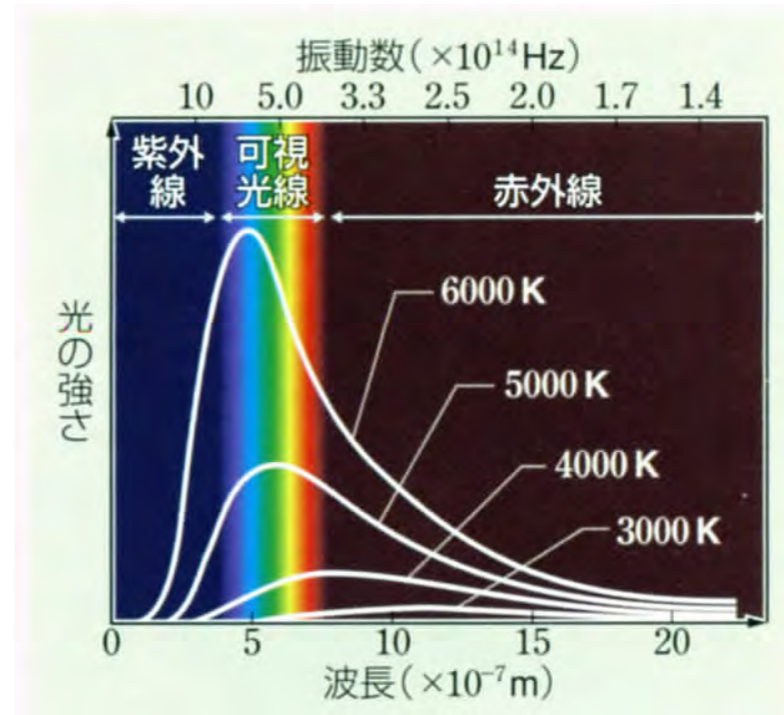
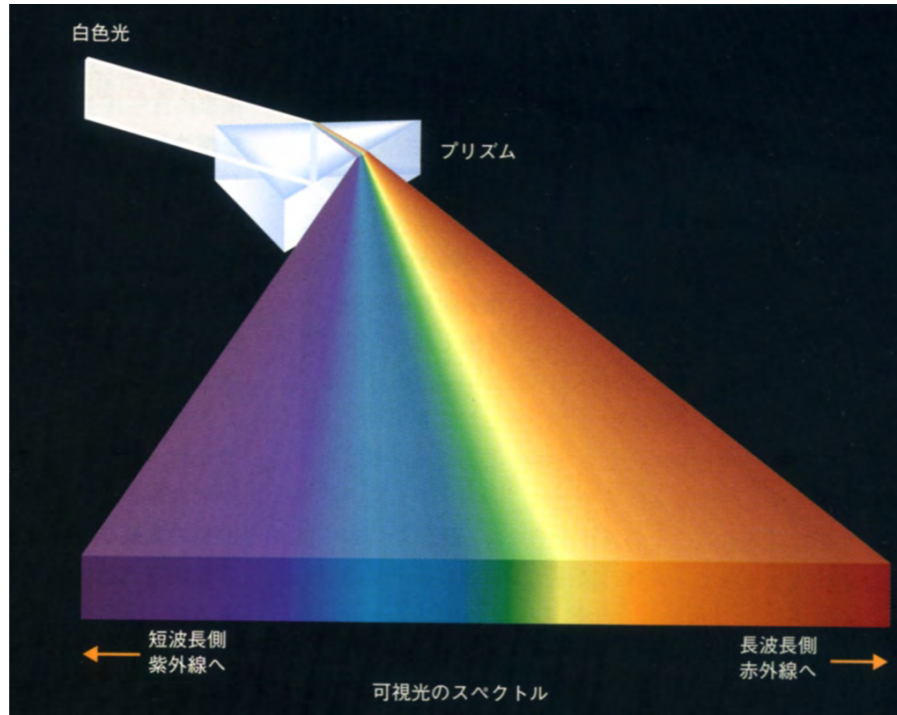
地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系 ▶ 銀河群 ▶ 銀河団 ▶ 大規模構造



地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系 ▶ 銀河群 ▶ 銀河団 ▶ 大規模構造



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

図 A.11 電磁波の波長域と、可視光の範囲.

大気の窓

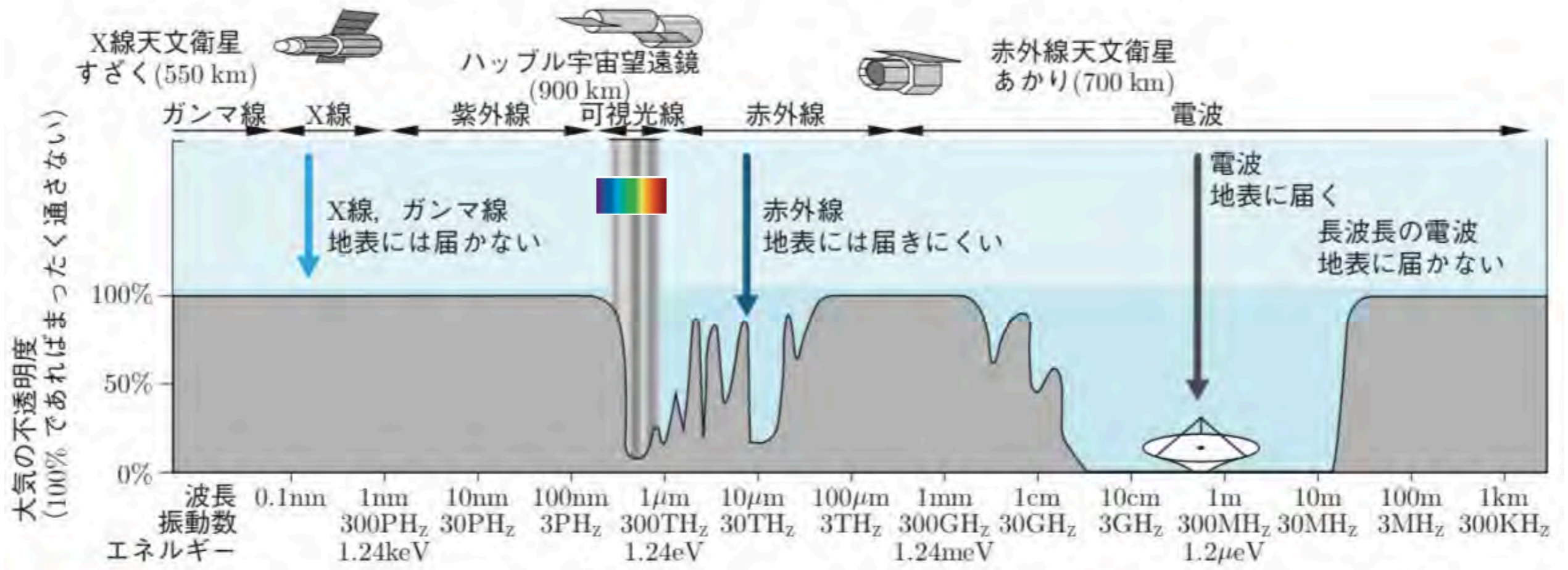
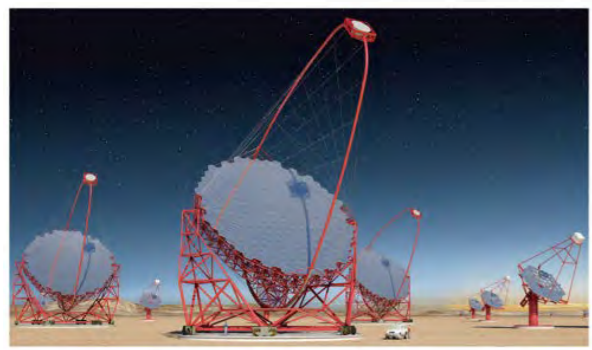


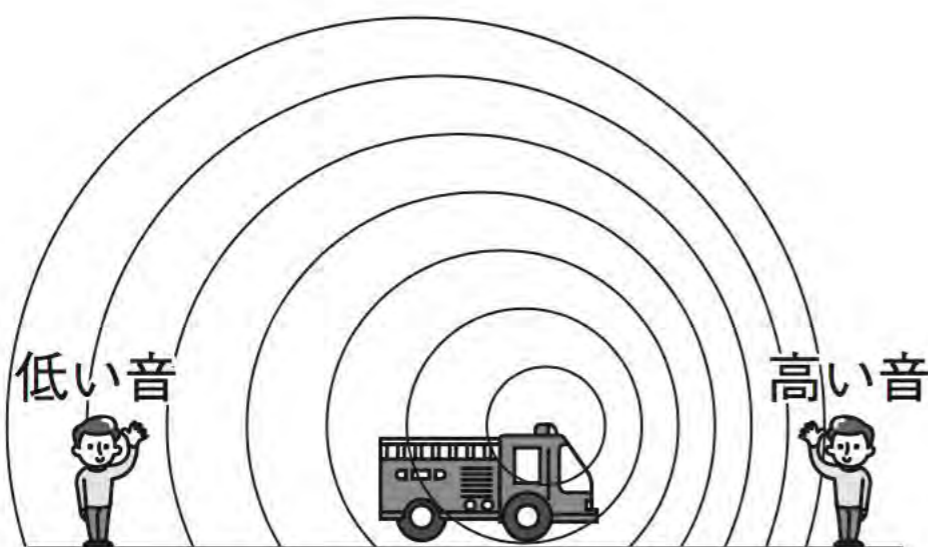
図 A.12 大気の窓. 電磁波にとって大気を通過できるのは可視光と電波の領域である. したがって, 可視光と電波の観測は地上で可能だが, ガンマ線・X線・赤外線での観測は不可能である.



距離の単位 【赤方偏移, red shift parameter z 】

名	記号	長さ	定義
天文単位	AU	1億5000万 km	地球と太陽の距離
光年	ly	9.46×10^{12} km	光が1年間に進む距離
パーセク	pc	3.09×10^{13} km = 3.26 ly	地球からの年周視差が ± 1 秒角
▶ 赤方偏移	z		本来の光の波長のずれの比

光のドップラー効果から星の遠ざかり方を知り, 宇宙膨張則から距離を測る



遠ざかるとき

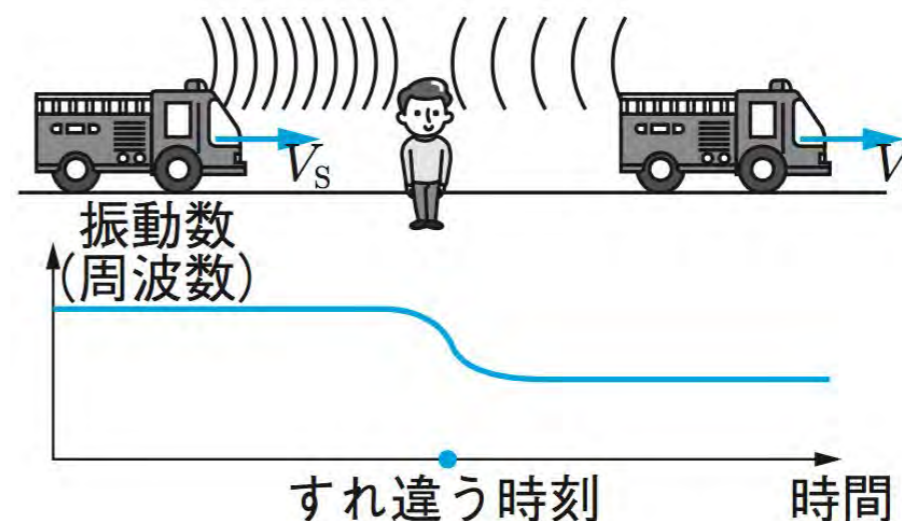
音：低い音

光：赤方偏移

近づくとき

音：高い音

光：青方偏移



距離の単位 【赤方偏移, red shift parameter z 】

表 A.2 赤方偏移パラメータ z と対応する年代.

z	何年前か	宇宙年齢	
0	現在	137 億年	
0.023	3 億年前	134 億年	かみのけ座銀河団
0.05	7 億年前	130 億年	
1	77 億年前	60 億年	
7	129 億年前	8 億年	報告されている最遠方の銀河
10	132 億年前	5 億年	宇宙の再電離開始 (?)
20	135 億年前	2 億年	原始銀河の誕生 (?)
1090	137 億年前	38 万年	宇宙の晴れ上がり

赤方偏移パラメータ

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_S}{\lambda_S}$$

距離の単位 【赤方偏移, red shift parameter z 】

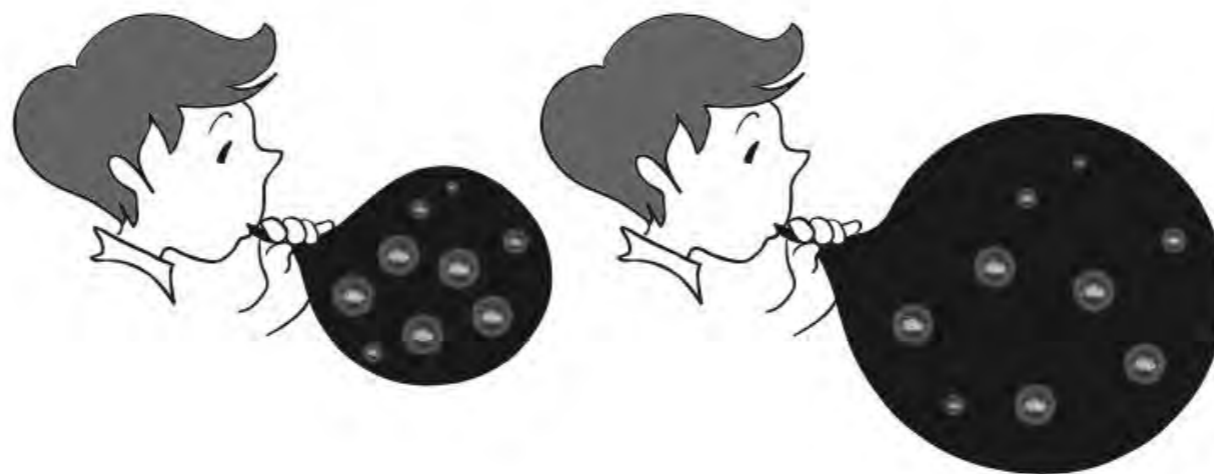
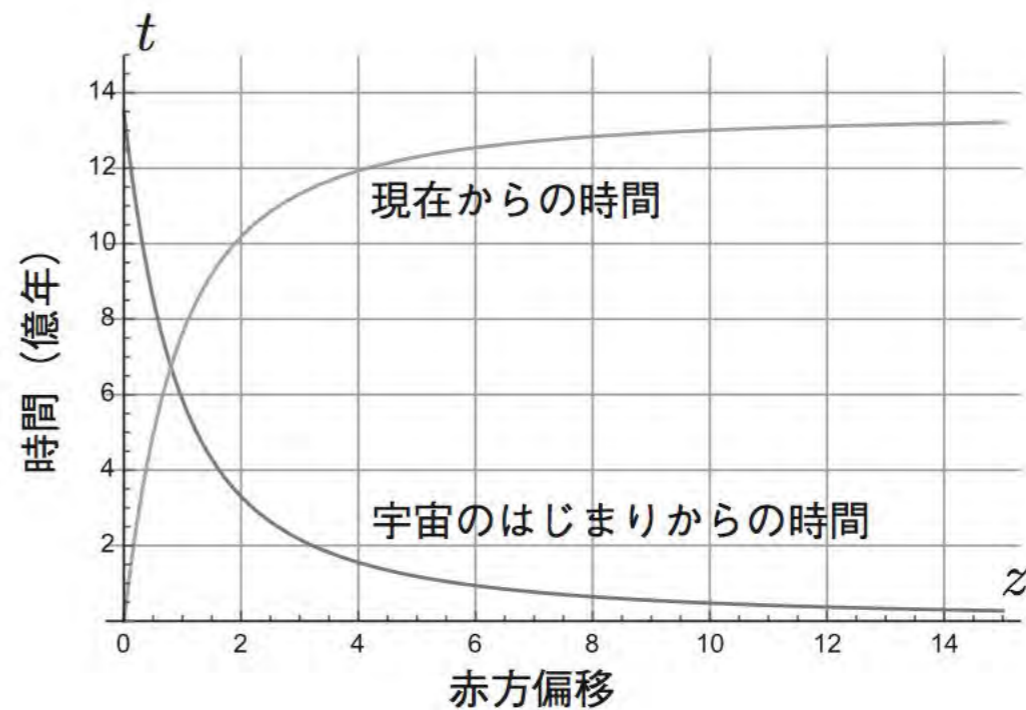
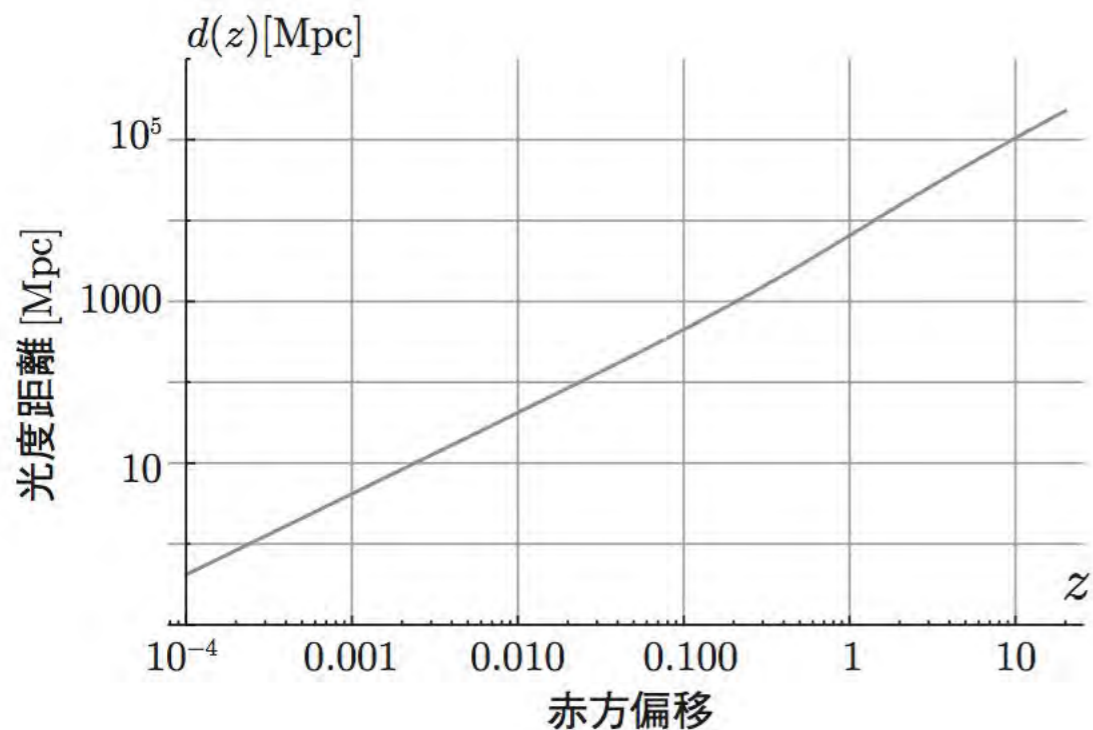
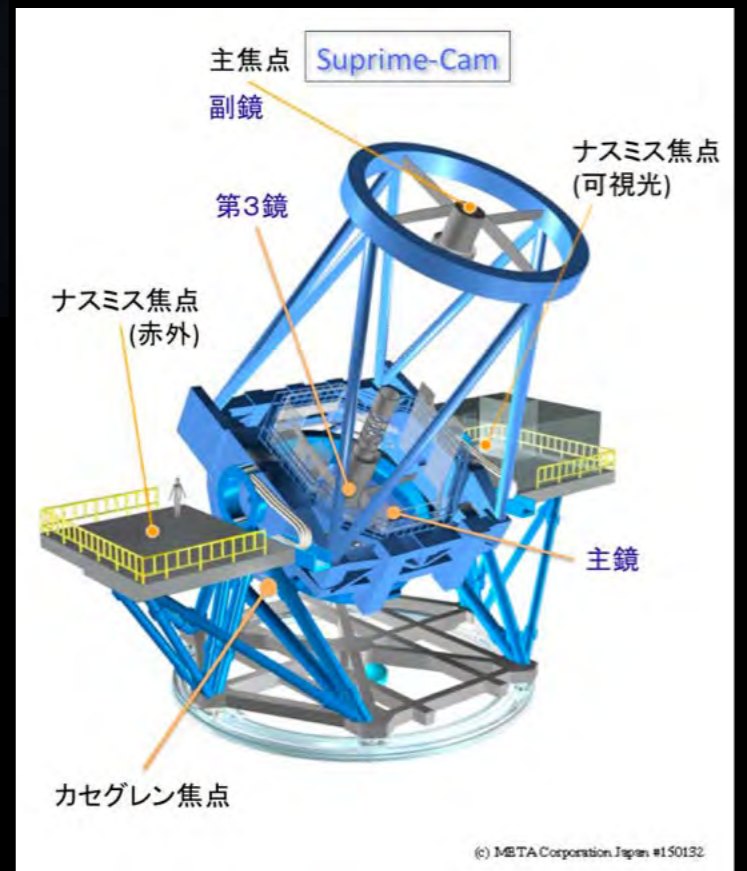


図42 遠方の銀河ほど速く遠ざかっている、というハッブルの法則は、我々が宇宙の中心にいることを意味するわけではない。

すばる望遠鏡 (ハワイ Subaru telescope)



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.

2013/7/30



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。

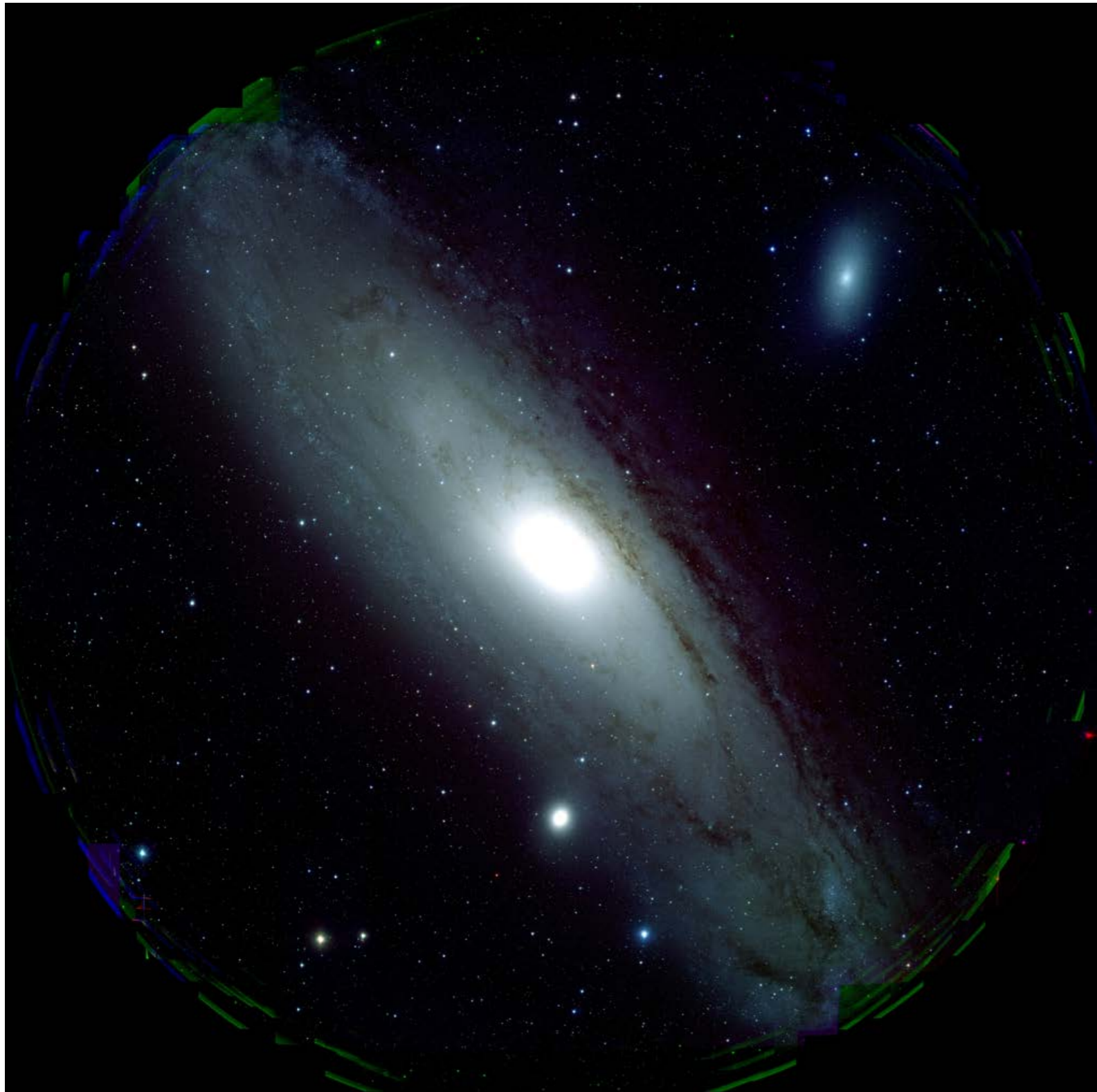
独自に開発した116個のCCD素子を配置し、計8億7000万画素を持つ巨大なデジタルカメラ。

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。

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.

2013/7/30



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) です。(クレジット : HSC Project / 国立天文台)

アルマ望遠鏡 Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array

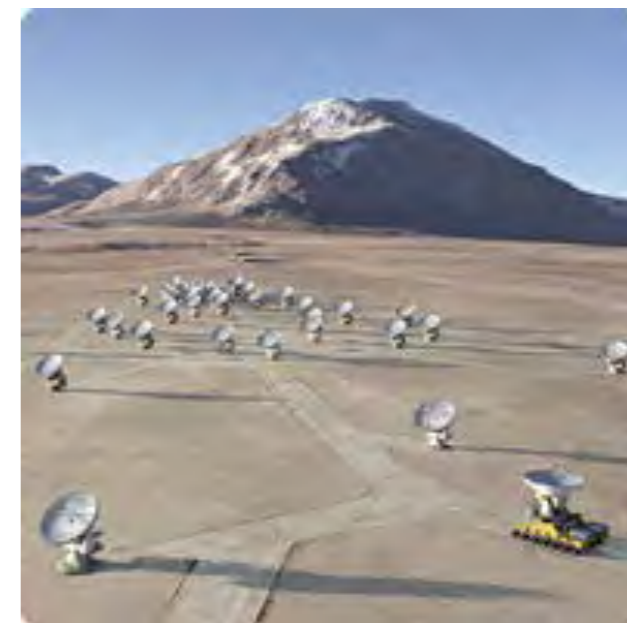
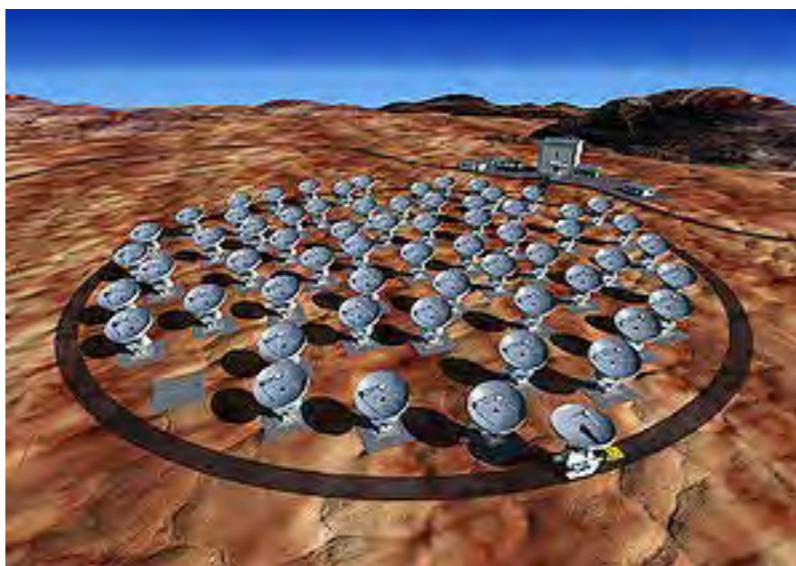
日本が、欧米と共同で、チリのアタカマに建設した電波望遠鏡

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/>

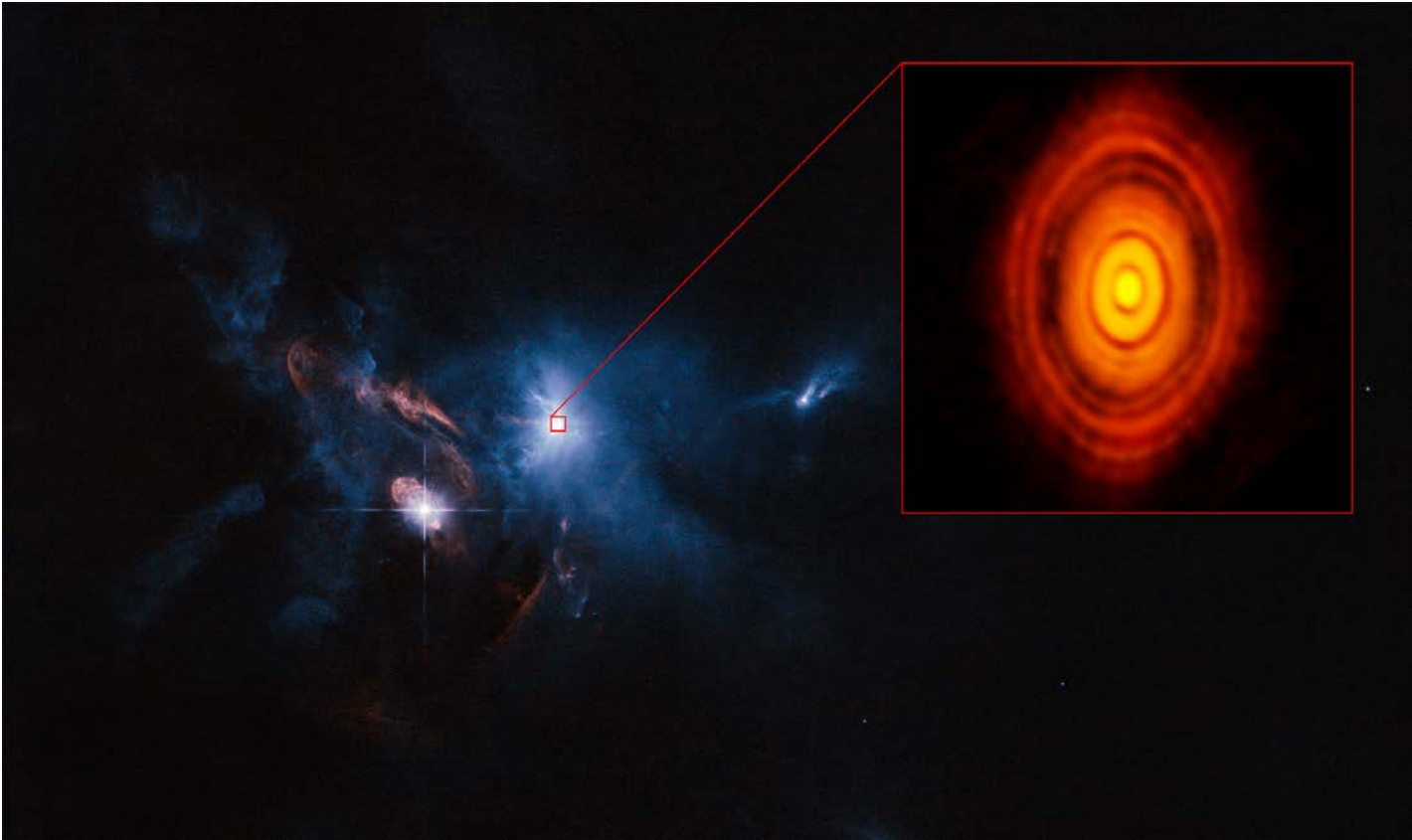
アルマ望遠鏡、「視力2000」を達成！

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

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で、核の大きさはおよそ1kmとされていたが、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。



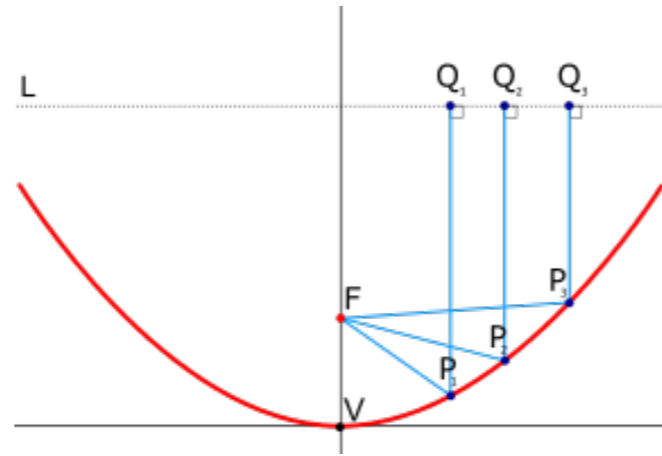
アルマ望遠鏡が観測したおうし座HL星と、ハubble宇宙望遠鏡で撮影したその周囲の様子。大量のガスがおうし座HL星の周囲を取り囲んでいるため、ハubble宇宙望遠鏡ではその中を観測することができないが、アルマ望遠鏡はそのガスの奥深くに埋もれた星のすぐ近くの様子を詳しく観測することができた。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/NASA/ESA

<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201411067466.html>

<http://www.astroarts.co.jp/news/2014/10/21sidingspring/index-j.shtml>

パラボラ (parabolla) = 放物線



NHK 「大科学実験」
みんなここに集まってくる

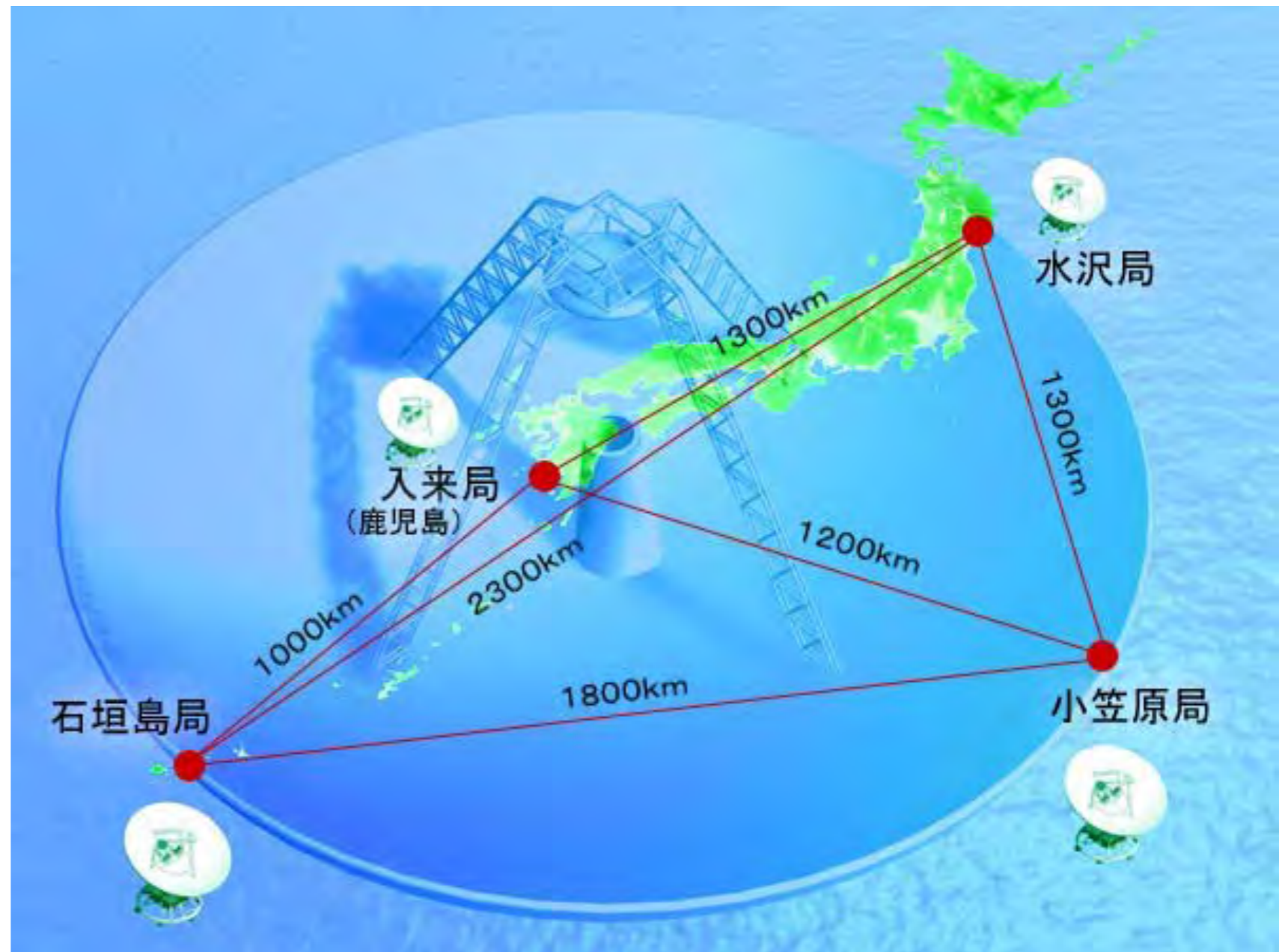
Click on Start, 3min





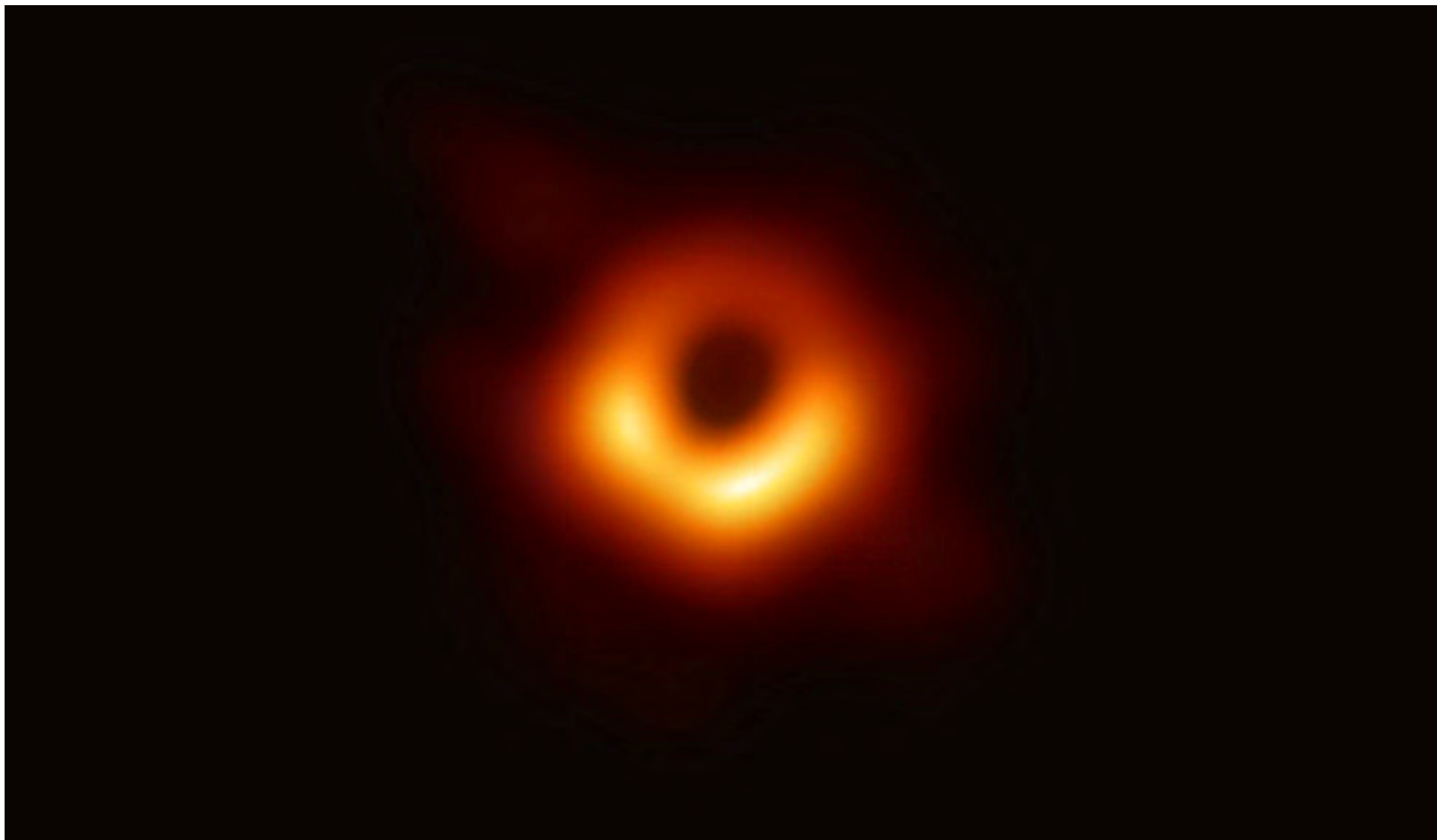
NOBEYAMA
国立天文台 野辺山宇宙電波観測所

VERA = VLBI Exploration of Radio Astrometry



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

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>



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 $42 \pm 3 \mu\text{as}$, 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.

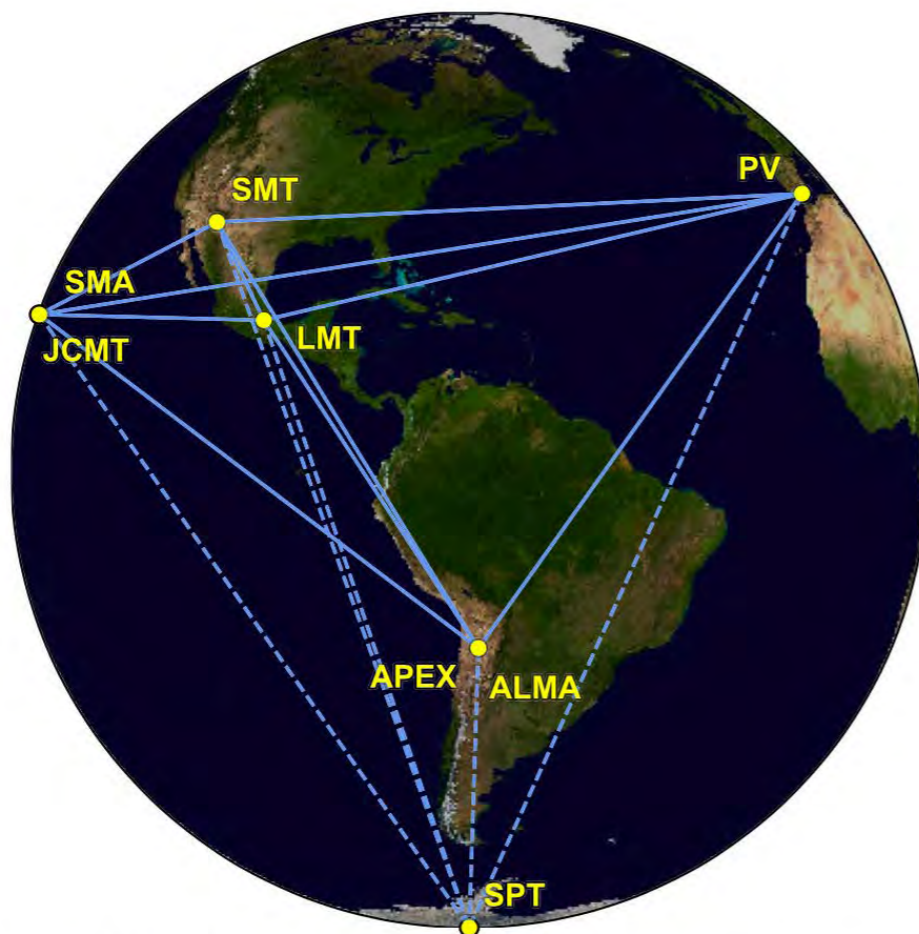


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual

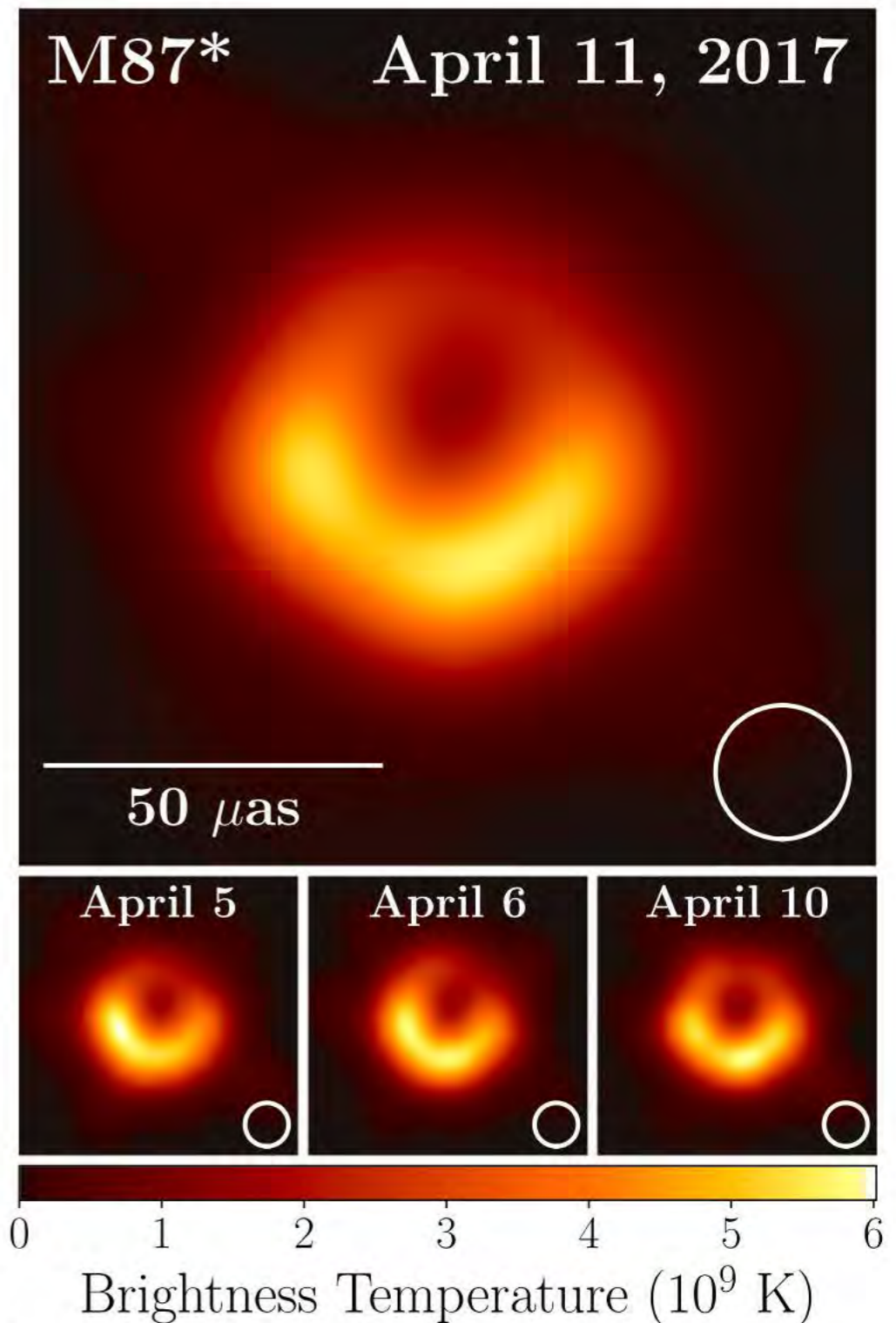


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the three kernels ($20 \mu\text{as}$ 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.

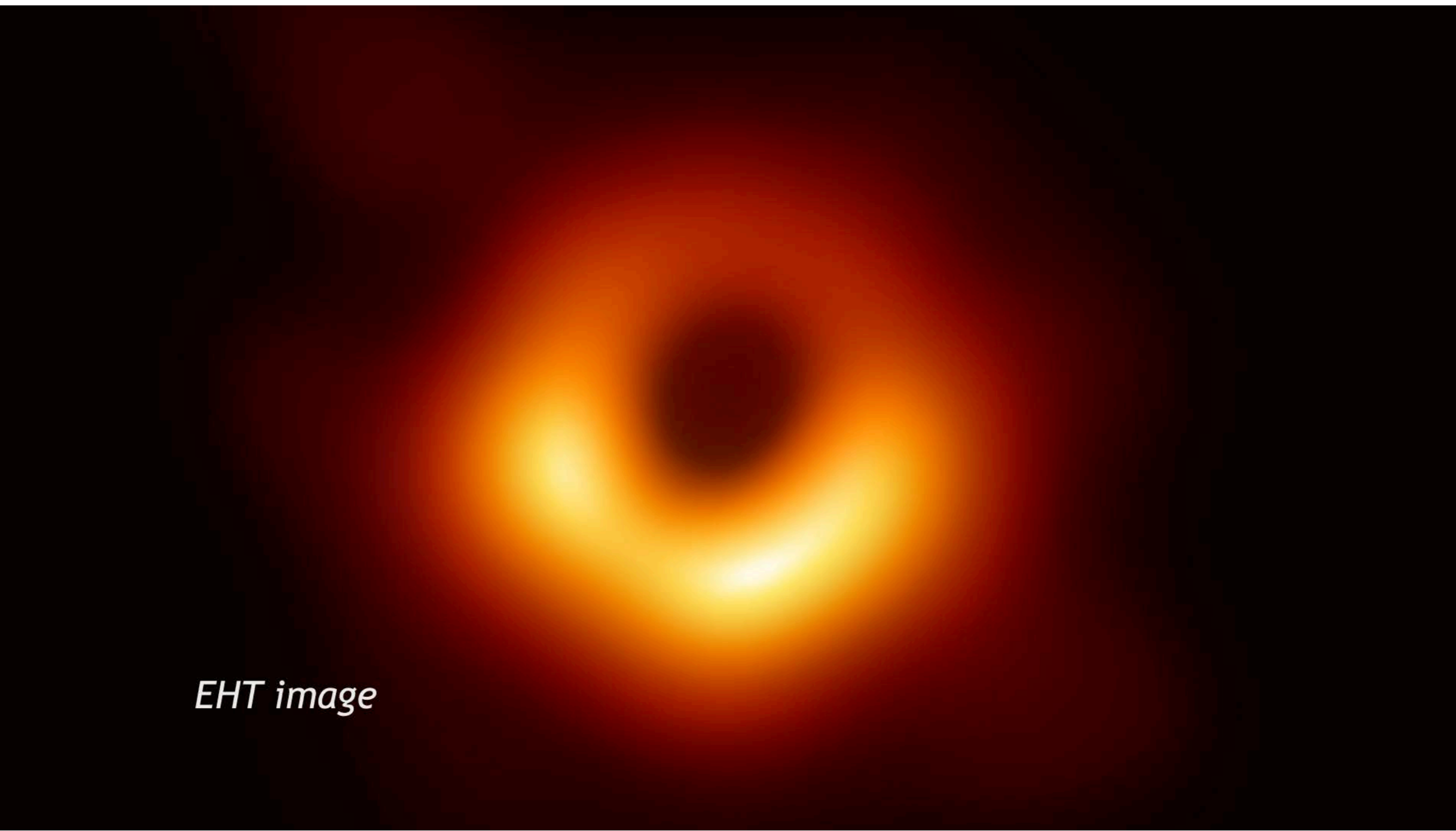
イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT)

— 各地の電波望遠鏡をつなぎ、地球サイズの仮想望遠鏡を構成 —



<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



EHT image

<https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eht/videos.html>

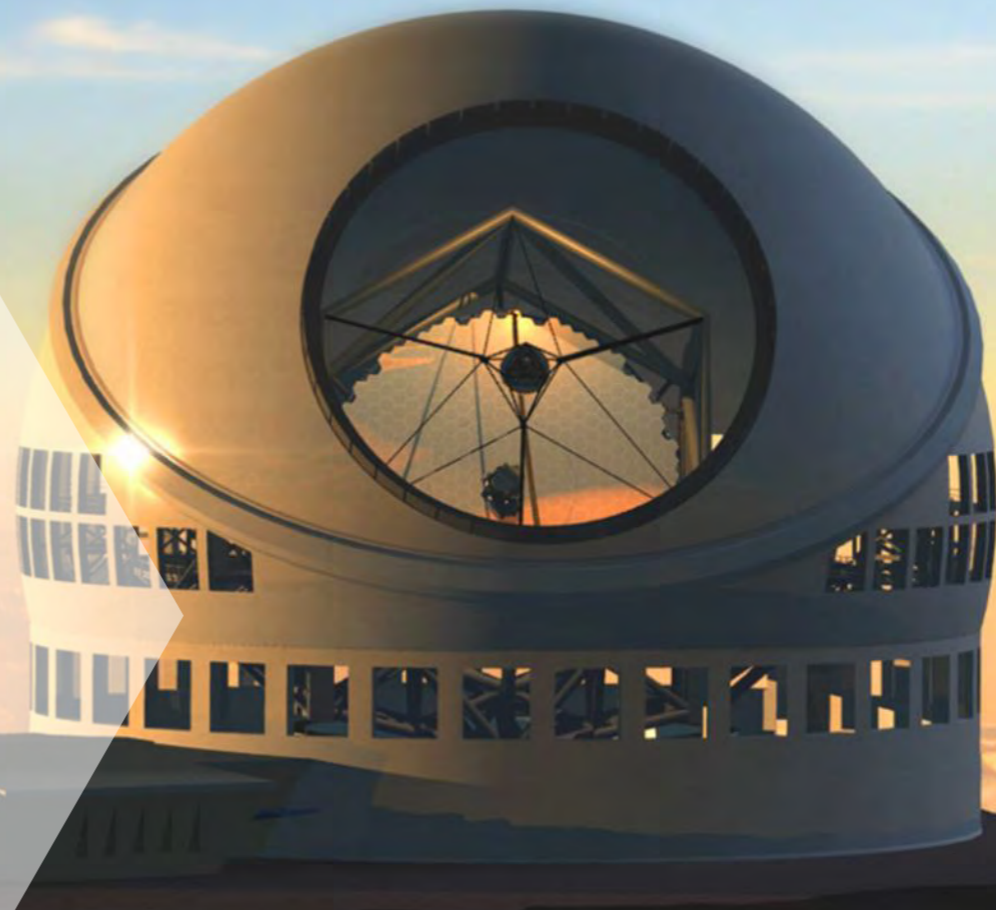
0'58"

30m望遠鏡 (ハワイ TMT)

30m望遠鏡 Thirty Meter Telescope (TMT)

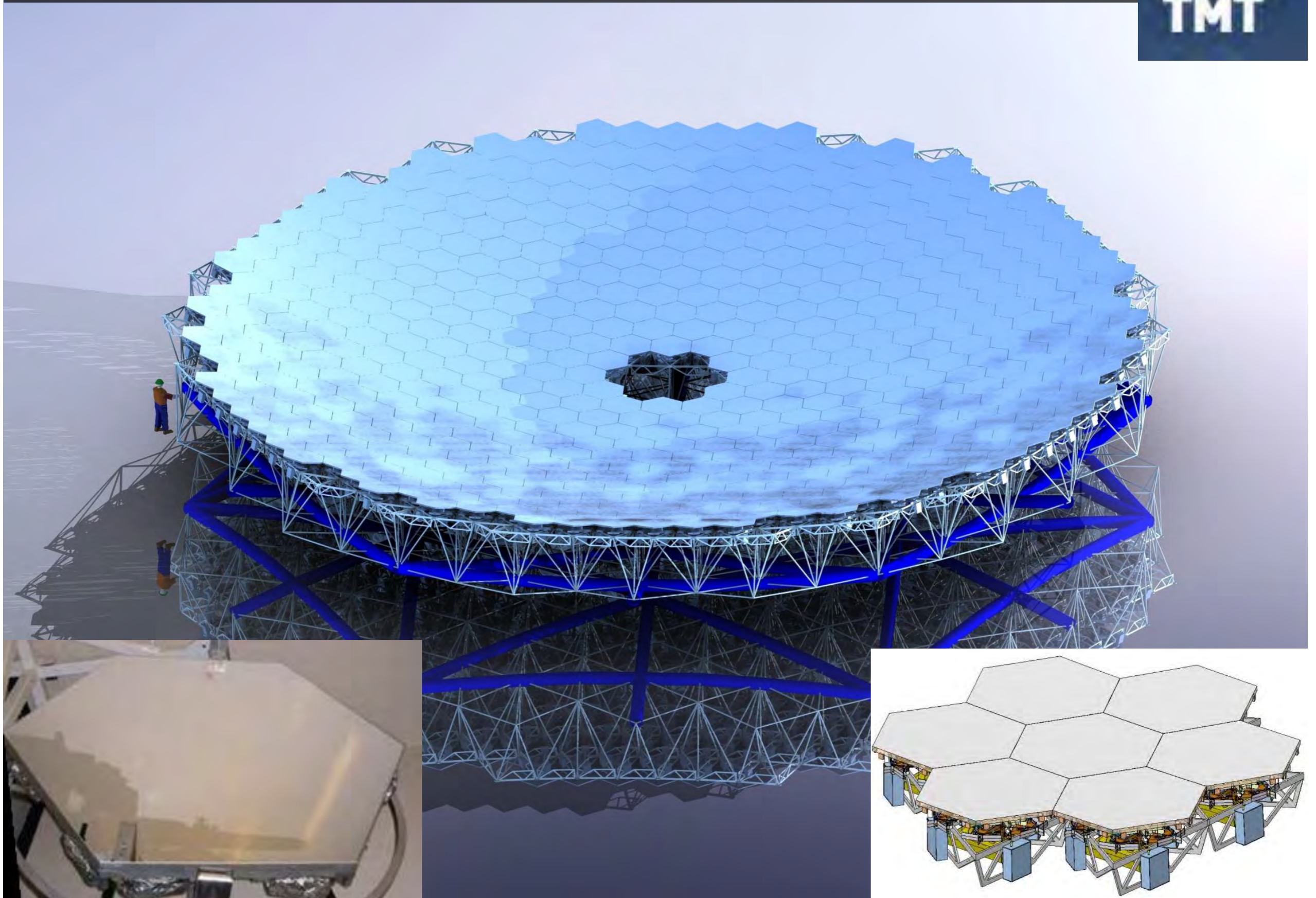


- ◆ 口径30m
- ◆ 0.31-28 μ m
- ◆ 日本・アメリカ・カナダ・NSF・中国・インドの国際協力
- ◆ ハワイ・マウナケア
- ◆ 総予算1500億円
- ◆ 2021年末観測開始

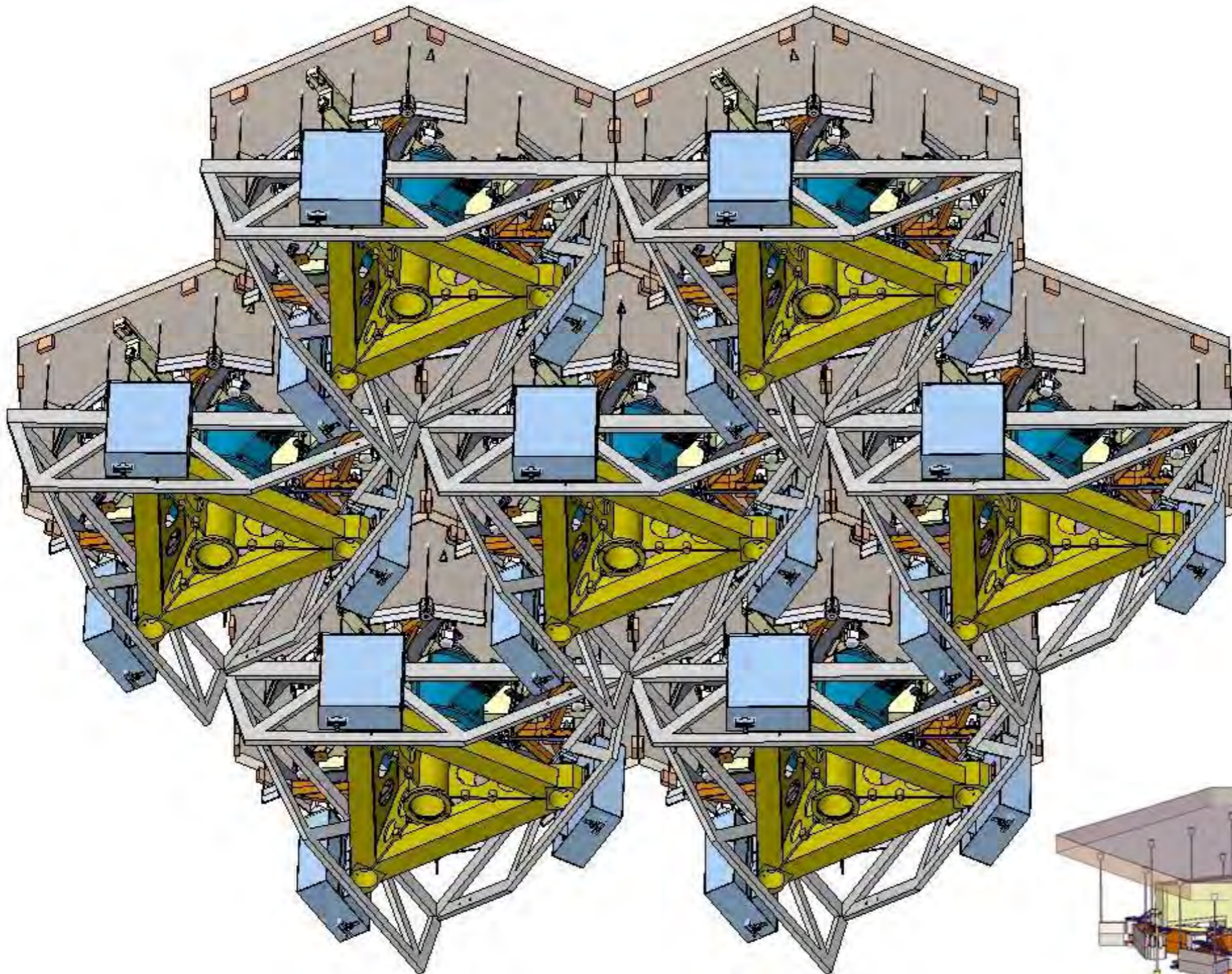


2013年12月理論天文学・宇宙物理学懇談会シンポジウム, 柏川氏のスライドから

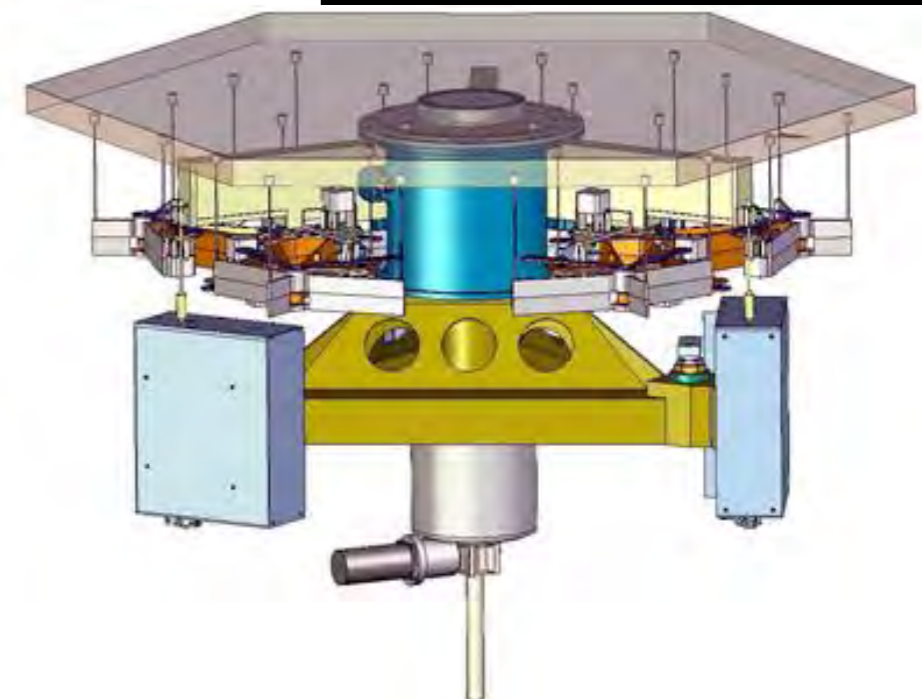
■ 492枚の鏡を敷き詰める。1枚の直径1.44m



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



■ 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。



国立天文台が開発した Mitaka ソフトウェア (無料)

Mitaka

4D2U
国立天文台 4次元デジタル宇宙プロジェクト

トップ

はじめてみよう
(チュートリアル)

宇宙空間モード

プラネタリウムモード

その他の機能

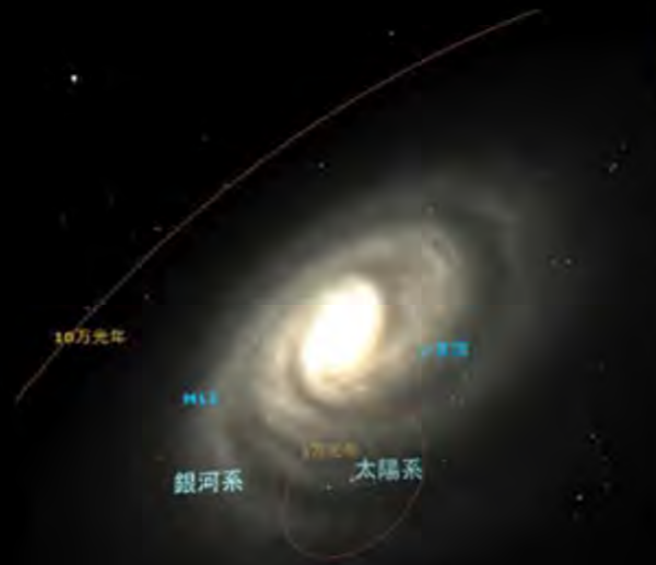
使用データ

よくある質問(FAQ)

更新履歴

[English](#)

[4D2U プロジェクト](#)
[国立天文台](#)



新着情報

2019/01/24

バージョン 1.5.1 を公開しました。

このバージョンでは、長期間にわたる惑星などの位置や地球の自転の計算精度が向上しました。紀元前の日食の再現などでもできるようになりました。また全天H α 線マップが高解像度になったほか、小惑星リュウグウの立体形状モデルも搭載されました。

(更新内容についての詳細は[更新履歴](#)をご覧ください。)

また同時にバーチャルリアリティ (VR) 版の **Mitaka for VR** **バージョン 1.5.1** を公開しました。(VRゴーグルは Oculus Rift および HTC Vive に対応)

2019/01/24

Mitaka のダウンロード数が、累計97万件を越えました。

2018/08/01

国立天文台制作映像「[宇宙を体験する 黒田有彩×Mitaka](#)」が公開されました。宇宙飛行士を目指すタレント・黒田有彩さんが4D2UドームシアターとVRゴーグルでMitakaを体験します。番組の後半ではサプライズゲストも登場します！ぜひご覧ください！

国立天文台YouTubeチャンネル：[「宇宙を体験する」](#) (字幕無し)、[「宇宙を体験する」](#) (字幕あり)

国立天文台が東京都三鷹市にあることにちなむ

<http://4d2u.nao.ac.jp/html/program/mitaka/>

宇宙はどこまで解明されたか

- 4月25日** 天文学と宇宙物理学：観測技術の進展と星までの距離の測定
- 5月23日 惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？
- 6月27日 星とブラックホールと惑星系と銀河：構造形成は何が先か？
- 7月25日 超新星爆発と宇宙論：6つのパラメータで描かれる膨張宇宙
- 8月29日 初期宇宙と素粒子物理：高次元モデルが描くビッグバン以前
- 9月26日 重力波と重力理論：アインシュタインはどこまで正しいか？

真貝寿明（しんかい ひさあき）

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員



<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>