

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：構造形成は何か先か？
- 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

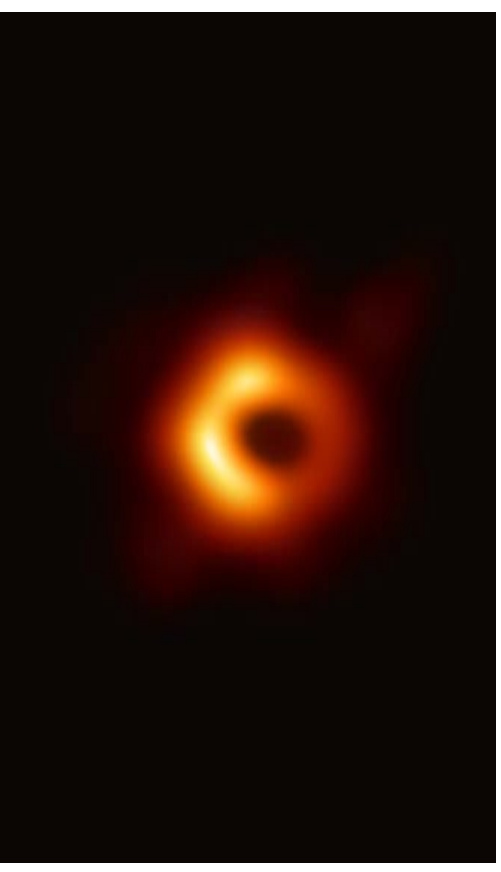
武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員



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

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」



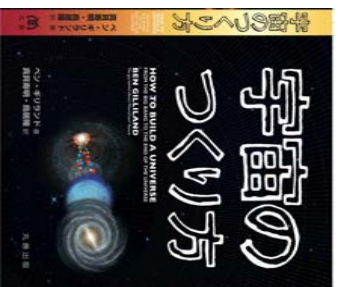
地球から55500万年

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

参考資料



2018年9月刊



2016年12月刊



2015年9月刊

宇宙の階層構造

地球・月

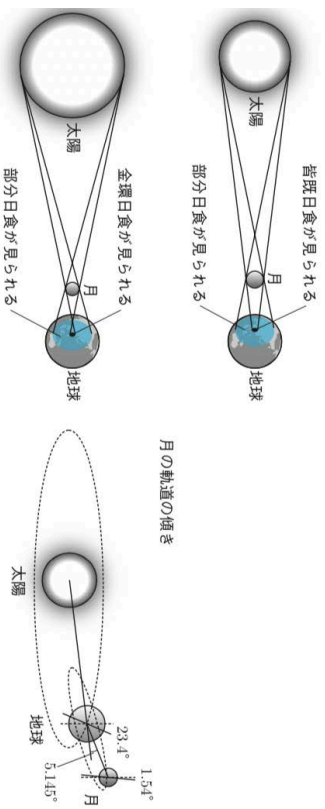


半径 6378km

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

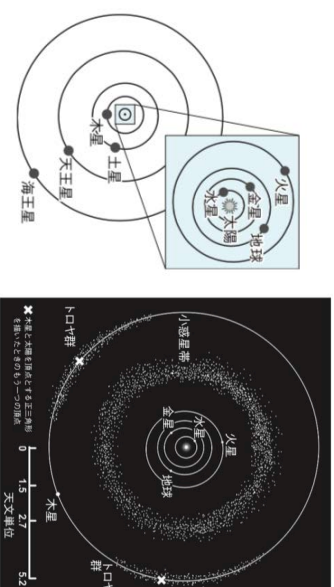
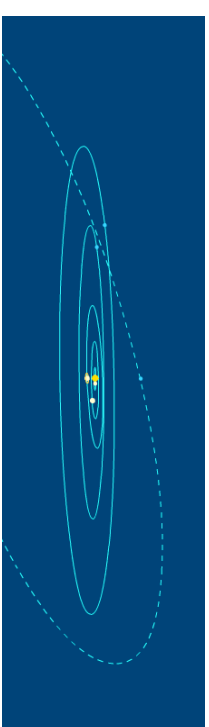
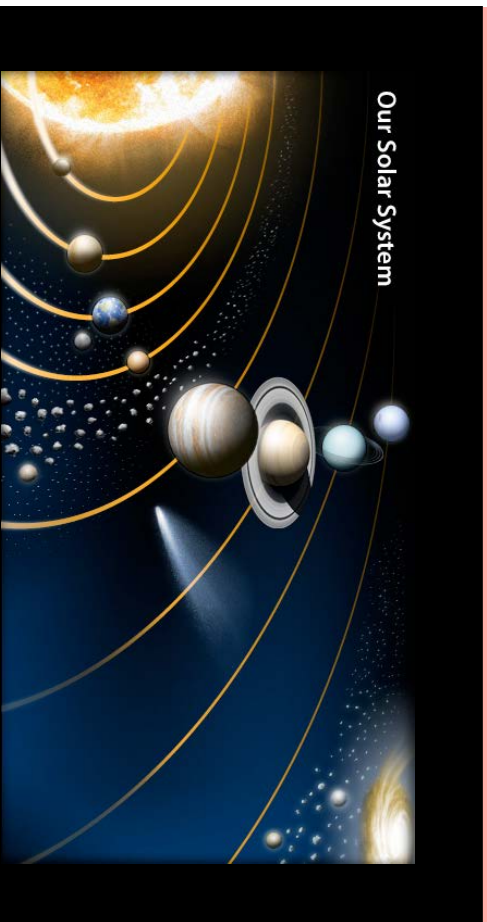


図1.20 小惑星帯は火星と木星軌道の間にある。また、木星軌道にはトロヤ群と呼ばれる小惑星帯もある。トロヤ群は太陽と木星を2つの頂点として正三角形を描いたときの3つ目の頂点付近にある。



地球・月 ▶ 太陽系



地球・月 ▶ 太陽系

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

距離の単位 [光年, light year]

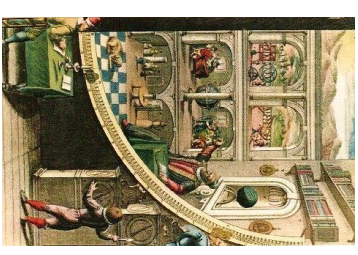
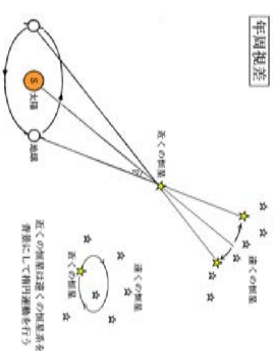
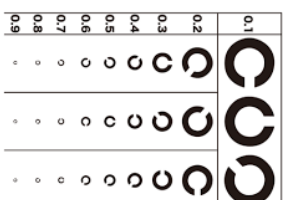
名	記号	長さ	定義
天文単位	AU	1億5000万km	地球と太陽の距離
光年	ly	9.46×10^{12} km	光が1年間に進む距離
パーセク	pc	3.09×10^{13} km = 3.26 ly	地球からの年周視差が±1秒角
赤方偏移 ^z			本来の光の波長のずれの比

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

星	星座 (光年)	距離 (光年)
シリウス	おおいてぬ	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	はくちよう	1411.26 ± 226.94
北極星	こぐま	432.36 ± 6.4
太陽	—	1天文単位

チョコ・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。

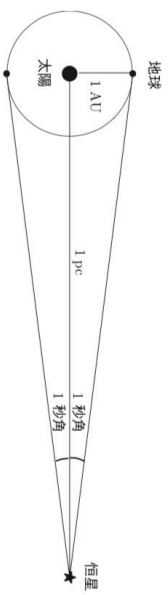
チョコは、2分角 (1度の1/30) までの観測能力を持っていた。
 (望遠鏡発明前, 1600年頃)



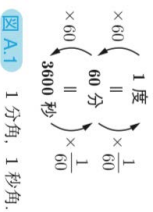
視力 1.0 = 5m離れて、視角1分を視認できる
 $= 7.272\text{mm}$ の輪の1.454mmの欠損
 視力 0.5 = 5m離れて、視角2分を視認できる

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A2 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1pcとする。



図A1 1分角, 1秒角。

年周視差を測ることで距離がわかる

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	おおいてぬ	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	はくちよう	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)

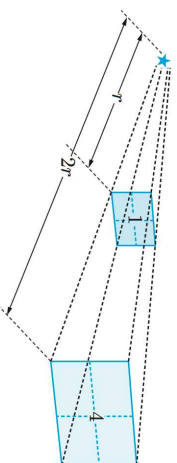
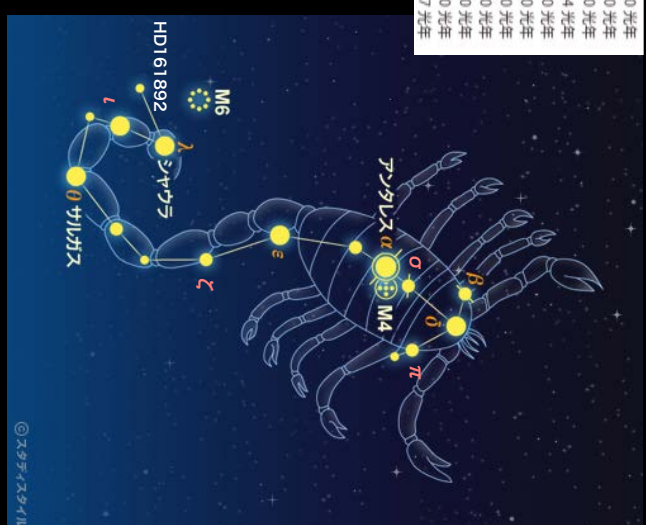


図 1.26 距離が倍になると, 光の照射面積は 4 倍になるので, 光量は 1/4 になる。すなわち, 明るさは距離の 2 乗に比例して小さくなる。

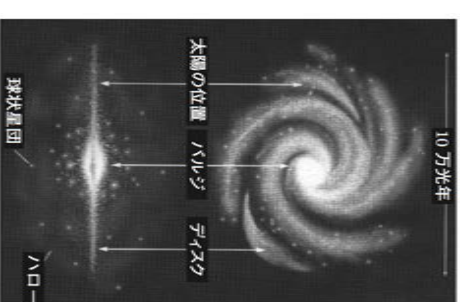
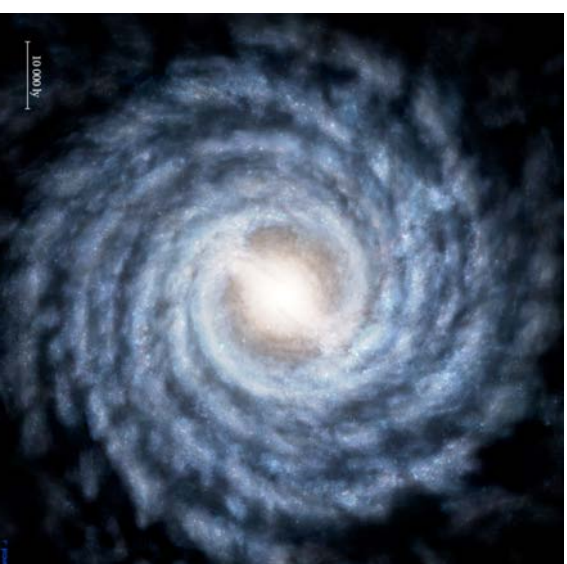
同じような大きさで同じように明るい星でも
遠くになれば暗い

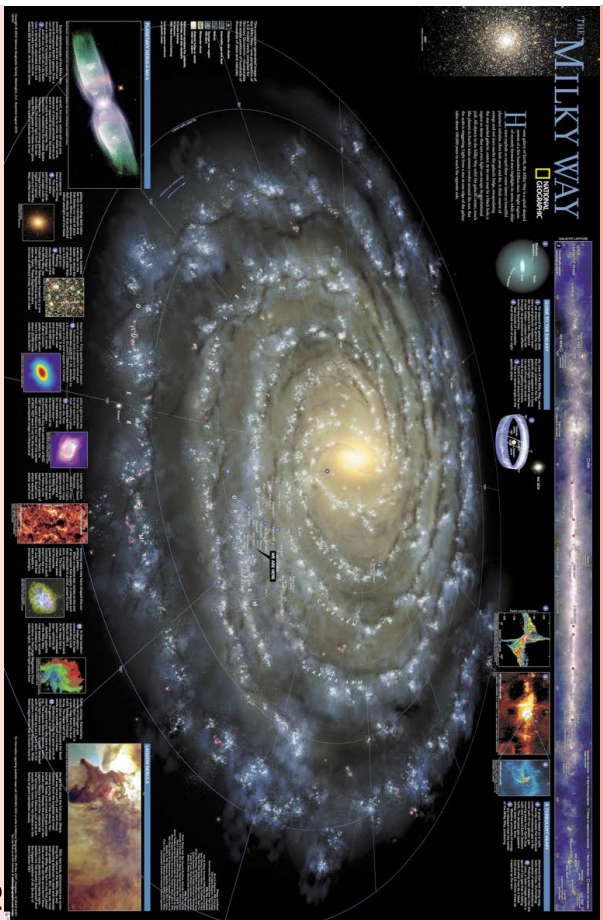
α (アルファ) 星	β (ベータ) 星	δ (デルタ) 星	ε (イプシロン) 星	θ (シータ) 星	ι (イオタ) 星	λ (ラムダ) 星	π (パイ) 星	σ (シグマ) 星
550 光年	400 光年	490 光年	64 光年	150 光年	300 光年	2000 光年	570 光年	590 光年
HD161892								127 光年



宇宙の階層構造

地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系





真貝寿明 「宇宙はどこまで説明されたか」【第1回】星までの距離測定

2019/4/25 明日文化センター(他田)

距離の測定方法

天文学的な距離の測定方法：距離のはしご (distance ladder)

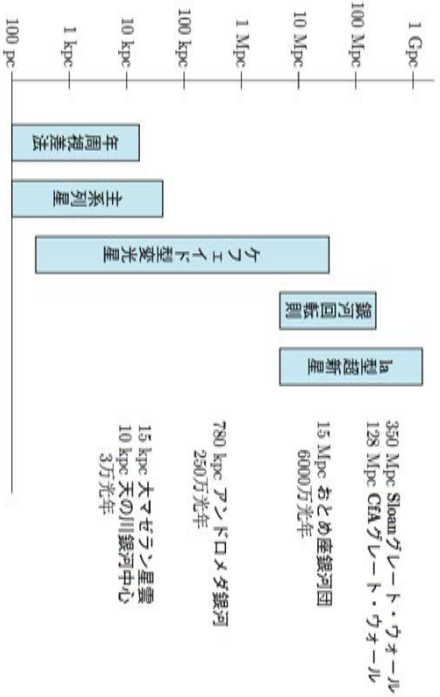


図 A3 距離のはしご：多くの手法を組み合わせて遠方の天体までの距離を特定している。

真貝寿明 「宇宙はどこまで説明されたか」【第1回】星までの距離測定

2019/4/25 明日文化センター(他田)

天文学的な距離の測定方法：距離のはしご (distance ladder)

年周視差法

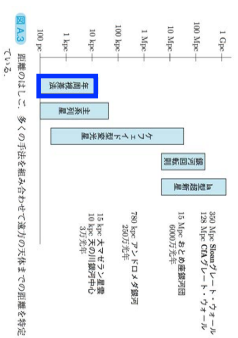
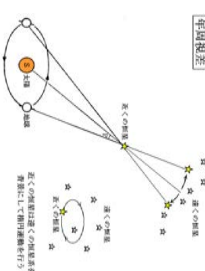


図 A3 距離のはしご：多くの手法を組み合わせて遠方の天体までの距離を特定している。

●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。

もっとも正確だが、天の川銀河の中心くらいまで



真貝寿明 「宇宙はどこまで説明されたか」【第1回】星までの距離測定

2019/4/25 明日文化センター(他田)

天文学的な距離の測定方法：距離のはしご (distance ladder)

クワエイド型変光星

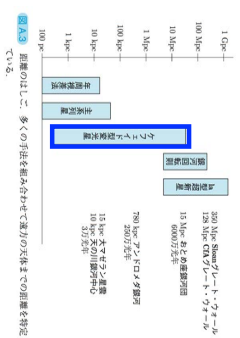
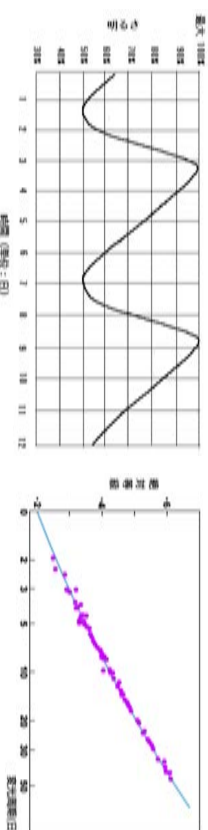


図 A3 距離のはしご：多くの手法を組み合わせて遠方の天体までの距離を特定している。

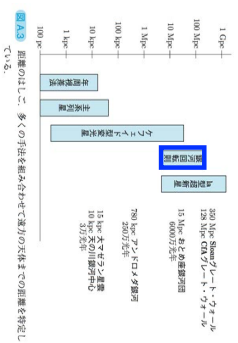
●クワエイド型変光星(セファイド型変光星)
 もっともとの明るさがおなじりとわかる星であれば、見かけの明るさが距離の2乗に反比例して暗くなることを利用して、距離を特定することができる。クワエイド型変光星は、変光の周期と明るさに相関があることが知られていて、この性質を使うと遠方の銀河中にクワエイド型変光星を探すことによってその銀河の距離を特定することができる。



真貝寿明 「宇宙はどこまで説明されたか」【第1回】星までの距離測定

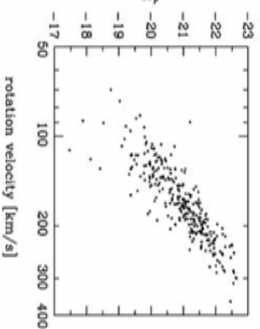
2019/4/25 明日文化センター(他田)

天文学的な距離の測定方法：距離のはしご (distance ladder) 銀河回転則



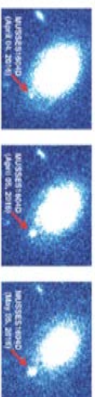
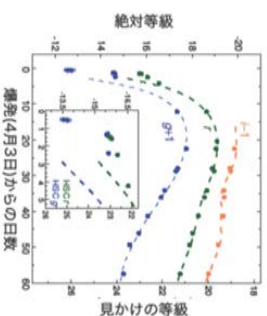
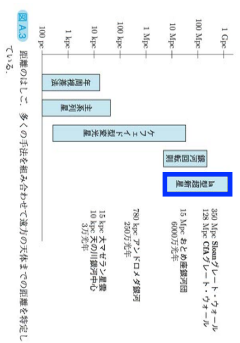
● 銀河回転則

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。



頁目説明 「宇宙はどこまで説明されたか」【第1回】星までの距離測定 2019/4/25 朝日文化センター(4冊)

天文学的な距離の測定方法：距離のはしご (distance ladder) Ia型超新星



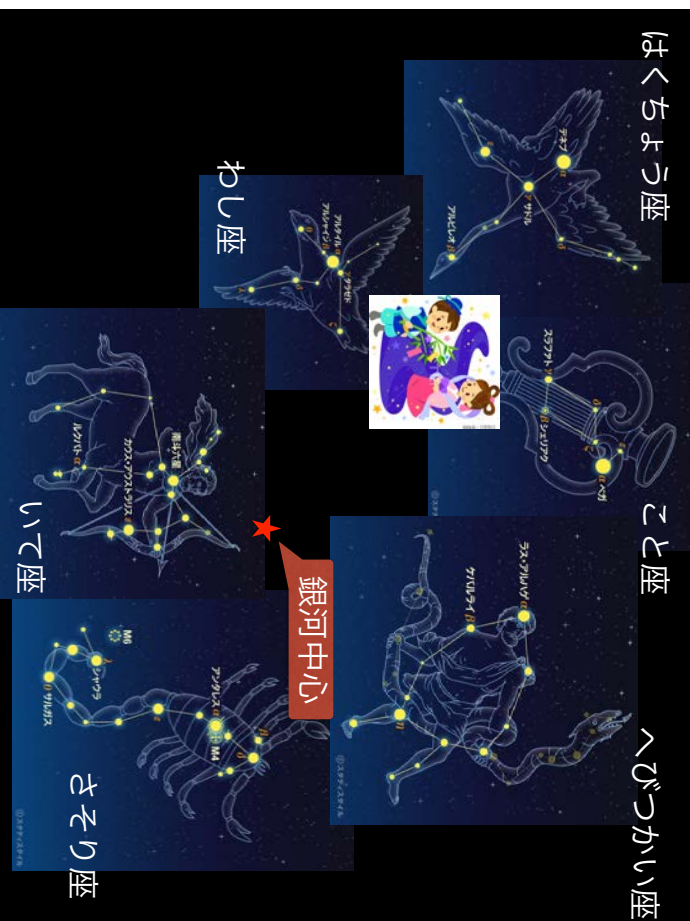
● Ia型超新星

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、距離測定の際の標準光源といわれる。

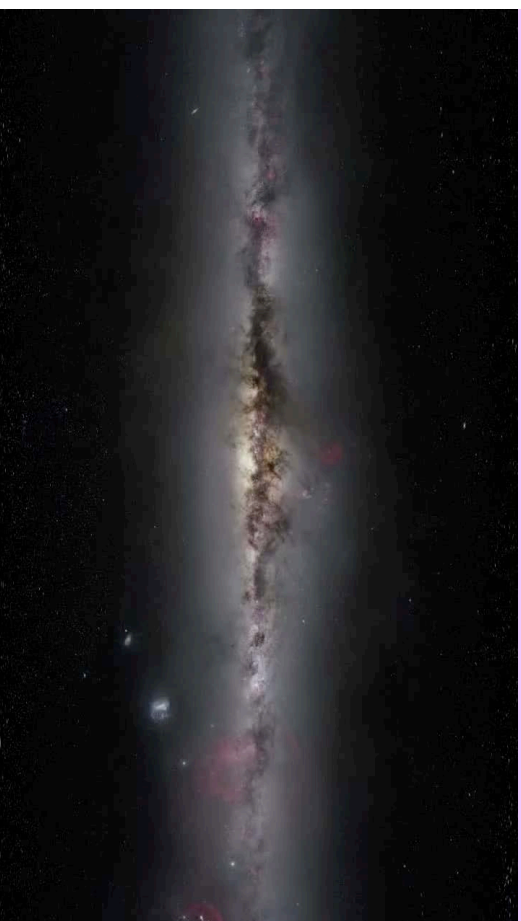
Ia型超新星は、爆発のメカニズムが決まっています。

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

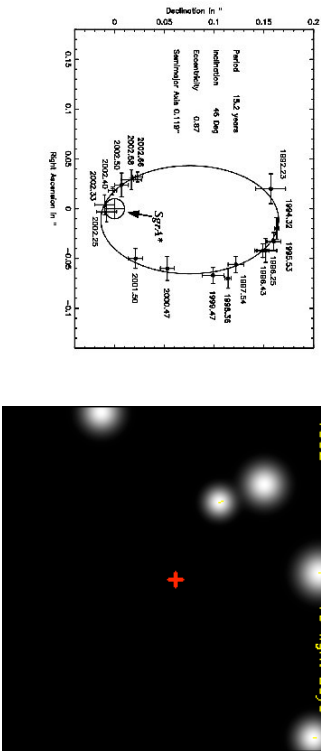
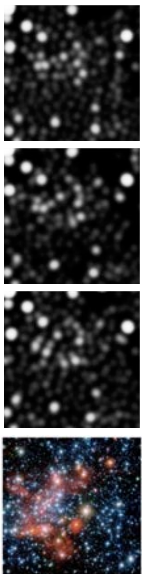
頁目説明 「宇宙はどこまで説明されたか」【第1回】星までの距離測定 2019/4/25 朝日文化センター(4冊)



銀河系の中心には巨大ブラックホールがある

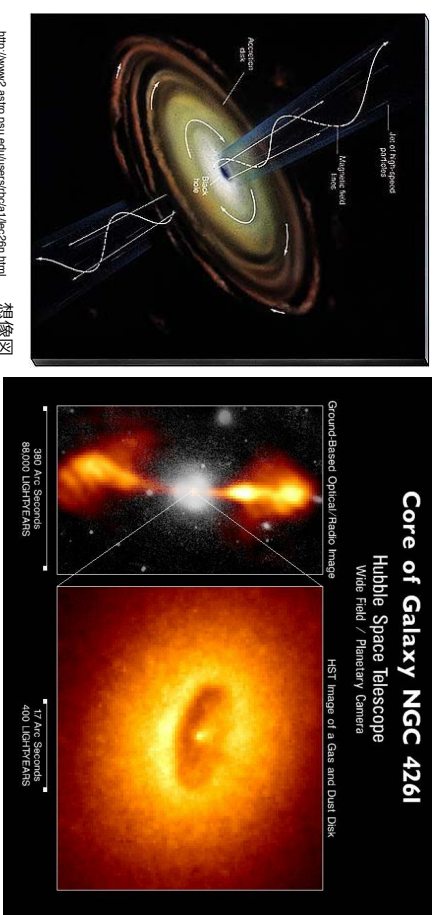


<https://www.youtube.com/watch?v=XHJUNWEKUY8> (1:15)



<http://www.extinctionshift.com/SignificantFindings08.htm>
<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>

Core of Galaxy NGC 4261

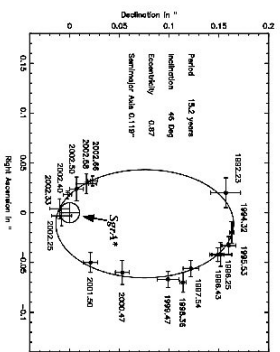


銀河中心からジェットが吹き出す
 (活動銀河核 active galactic nuclei)

想像図

<http://www2.astro.psu.edu/user/srchoa/hae26n.html>

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



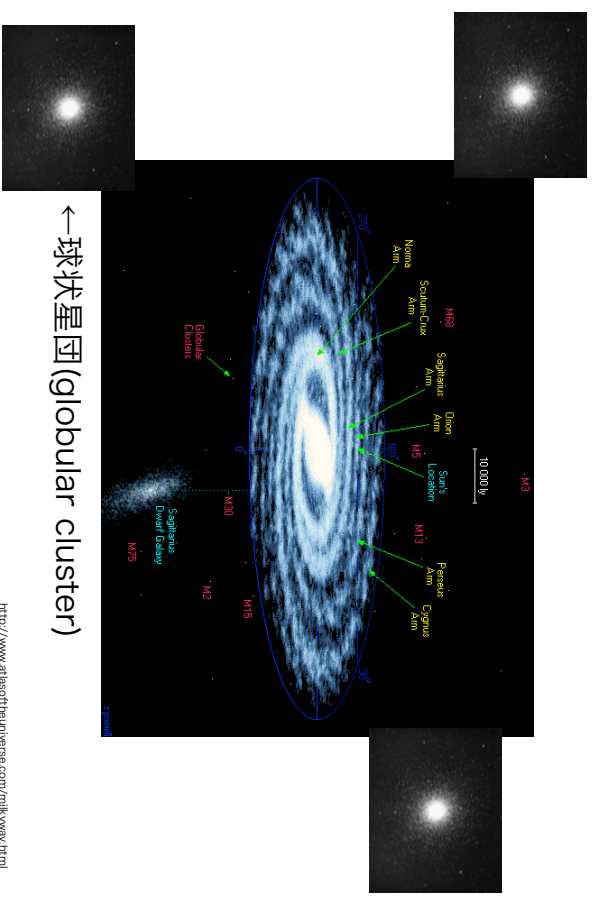
落下していくガスが
 高い温度で輝く
 (降着円盤 accretion disk)

想像図

<http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/black-hole-spews-atoms/>

宇宙の階層構造

地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系



←球状星団(globular cluster)

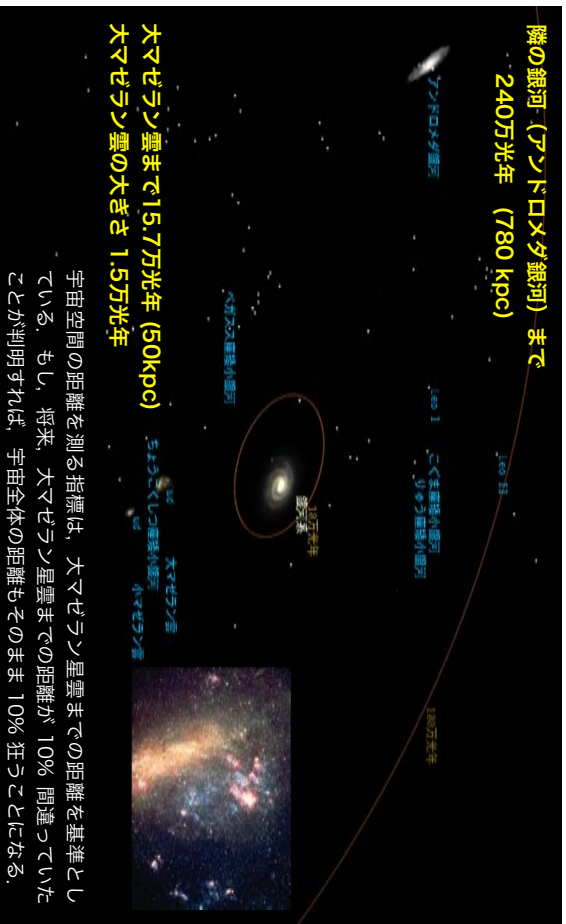
真貝啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第1回】 星までの距離測定

2019/4/25 朝日文化センター(4冊)

<http://www.artsci.tokushima-u.ac.jp/milkyway.html>

地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系 ▶ 銀河群

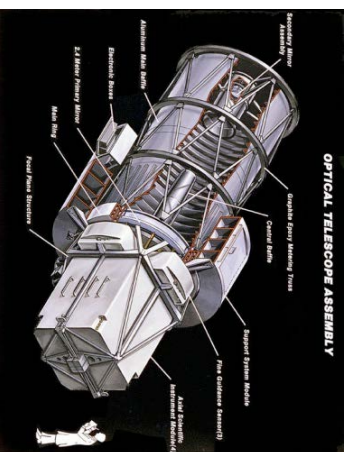
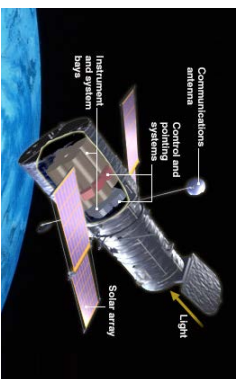
隣の銀河 (アンドロメダ銀河) まで
240万光年 (780 kpc)



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。

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2.4m。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。

Astronomy Picture of the Day

2009 October 14



Pleiades and Sunburst
Credit & Copyright: Robert Romo-Adelman (Deep Sky Colors)

Do you remember how you ever saw 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. (You know it as the Seven Sisters and M45.) The Pleiades is one of the brightest and closest open clusters. Having formed a mere 400 light-years away, the Pleiades stars have never known interstellar dust and gas. In this view, the stars and the surrounding gas clouds are so transparent, they just happen to be passing through the same region of space.

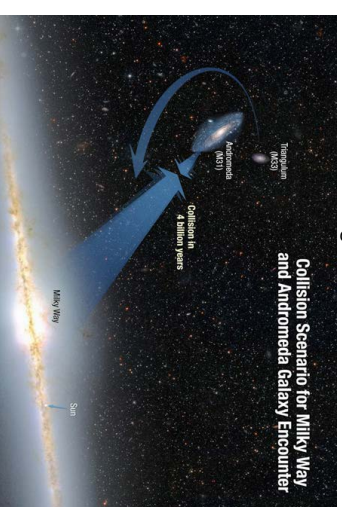
<http://apod.nasa.gov/>

最近のニュースから

アンドロメダ銀河と、天の川銀河は40億年後に衝突する！

2012/6/1

When galaxies collide



Collision Scenario for Milky Way and Andromeda Galaxy Encounter

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.

<http://www.nasa.gov/mission/pages/hubble/science/milky-way-collide.html>

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。

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=qnyCQoURp4>

地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系 ▶ 銀河群 ▶ 銀河団

Great Wall
(万里の長城)
@128Mpc

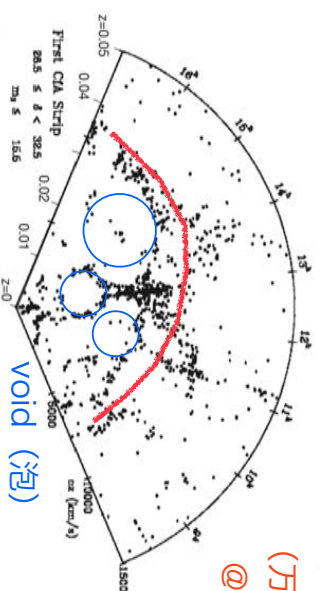


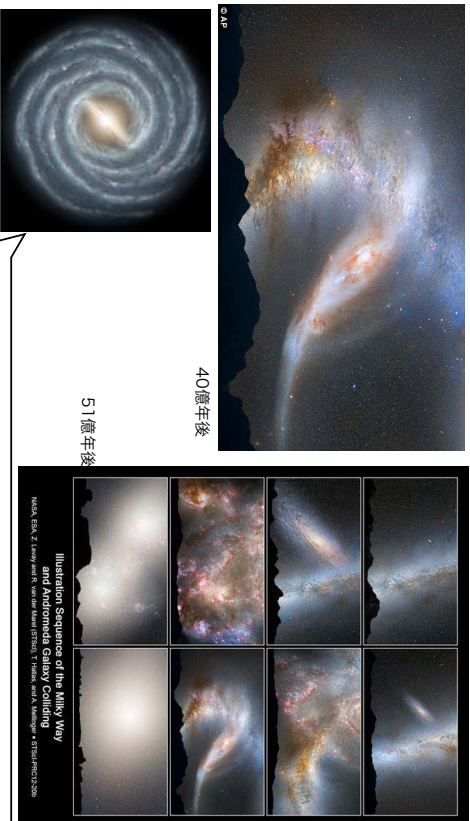
図 1.34 1989年に報告されたCFAサーベイの図。扇子を広げたように、見かけの範囲を狭く、奥を深く銀河をサーベイした結果の図である。中心はかみのけ銀河団 (Coma cluster)。1つ1つの点が銀河であり、全部で1027個のデータがある。右側の距離の目盛りは赤方偏移から測った後退速度を示している。左側の目盛りは赤方偏移を記入した。z = 0.03 と記された距離が 128 Mpc に相当する。[CFA が提供している図を加工]



Margaret Geller

1027個の銀河分布を観測 (1989)

アンドロメダ銀河と、天の川銀河は40億年後に衝突する！

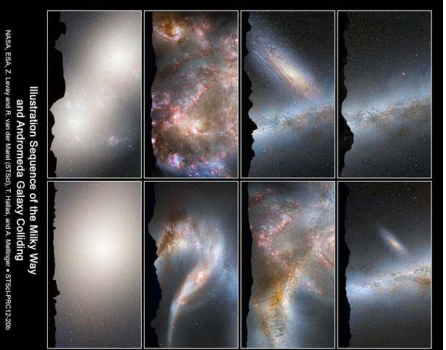


40億年後

51億年後

70億年後

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「隙」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 ▶ 大規模構造

65万個の銀河分布を
観測 (2006)

(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)

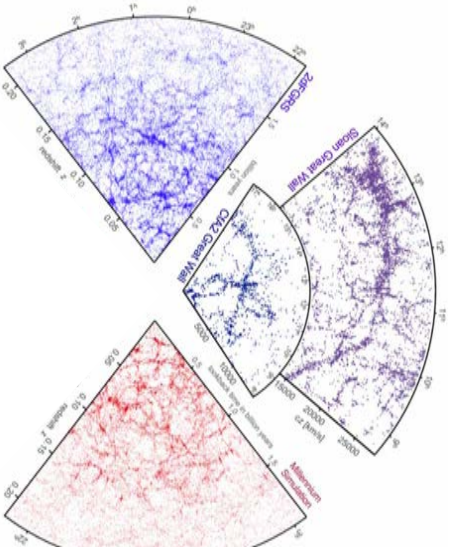
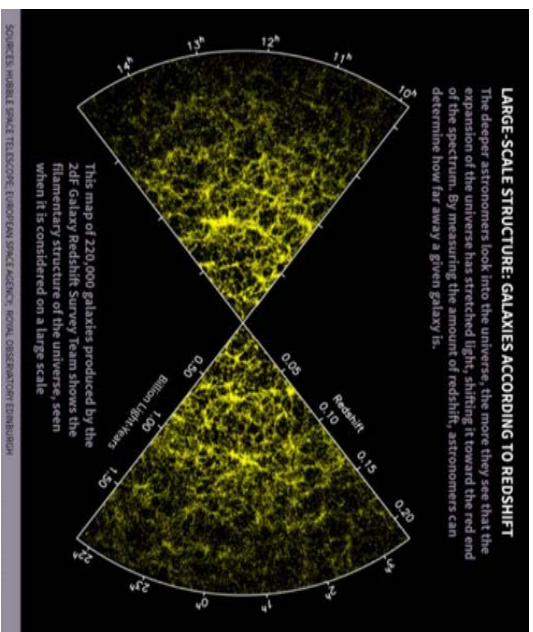
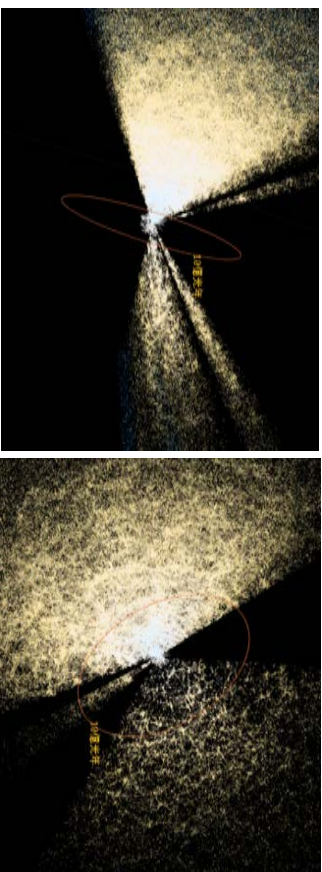


図 1.35 銀河の分布規則とシミュレーションによる観測分布を比べたもの。[上] SDSS サーベイによる銀河の分布を図 1.34 を重ねたもの。SDSS は、北天から見える 95 万個以上の銀河を 2 億光年まで探している。1.3 億光年の距離に及ぶ 1 万個以上のグループと 7 万個の長城も新たに発見された。[左] 2dFGR サーベイによる銀河の分布規則。南天の 22 万個以上の銀河を 2 億光年まで探している。[右] ミニボム・シミュレーションという数値計算結果を添えて示したもの。[Springel, Brink, White の論文 (2006) を加工]

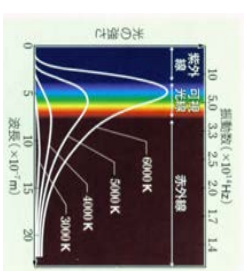
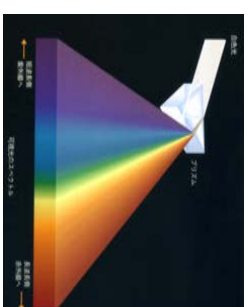
地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系 ▶ 銀河群 ▶ 銀河団 ▶ 大規模構造



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



利用例	電磁波											
	宇宙線	ガンマ線	X線	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^{-15}	10^{-10}	10^{-9}	3.8×10^{-7}	7.7×10^{-7}	10^{-4}	10^{-1}	10	10^3	10^4	10^5	10^7
波長 [nm]					380	770						
波長 [Hz]												
利用例	医療 金属照射	医療 X線写真	殺菌	光学機器	携帯電話	FMラジオ	短波ラジオ	AMラジオ	電波行線	電波行線の通信		

図 A11 電磁波の波長域と、可視光の範囲。

大気之窗

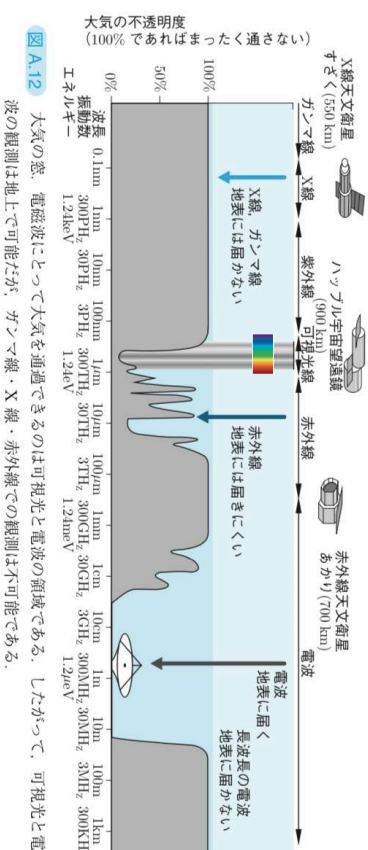


図 A12 大気之窗、電磁波にによって大気を通してできるのは可視光と電波の領域である。したがって、可視光と電波の観測は地上で可能なが、ガンマ線・X線・赤外線での観測は不可能である。

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

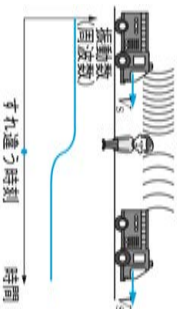


遠ざかるとき

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]

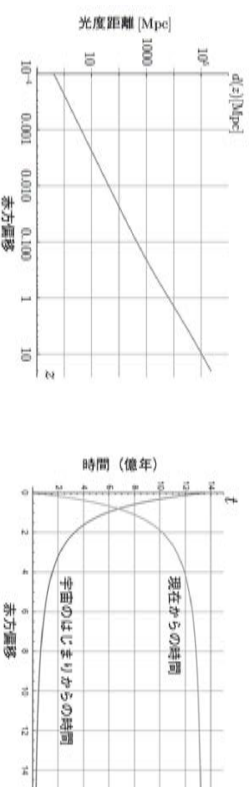


図42 遠方の銀河ほど速く遠ざかっている。というハッブルの法則は、我々が宇宙の中心にいることを意味するわけではない。

距離の単位 [赤方偏移, red shift parameter z]

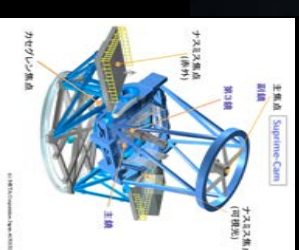
表 A.2 赤方偏移パラメータ z と対応する年代.

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

$$z \equiv \frac{\lambda_{obs} - \lambda_s}{\lambda_s}$$

すばる望遠鏡 (ハワイ Subaru telescope)



すばる望遠鏡 (SUBARU telescope)

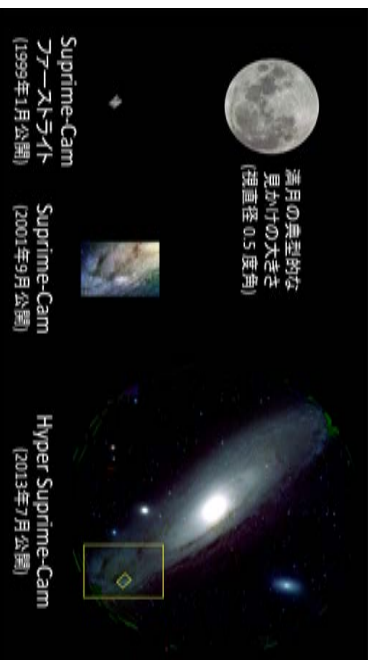


SUMIRE (Subaru Measurement of Images and Redshifts)プロジェクトが進行中。宇宙の詳細な3次元マップを作成し、宇宙膨張やダークマターの分布などを明らかにする。
9億ピクセル・重量約4トンのカメラと、同時に数千の遠方銀河を観測できる分光器を製作・取り付け、数十億光年離れた銀河を観測して宇宙の起源に迫る。

【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

Subaru telescope revised. First Light of HSC. 2013/7/30



超広視野主焦点カメラ Hyper Subaru-Cam (ハイパー・シュブリーム・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。フレンドロムタ銀河のほぼ全体を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 Subaru-Cam (シュブリーム・カム) では、フレンドロムタ銀河の一部(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/index.html>

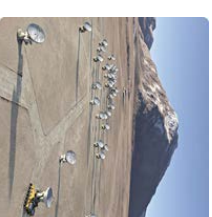
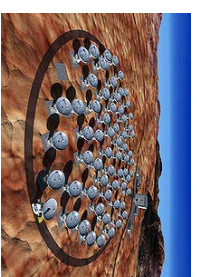
最新鋭の望遠鏡

アタルマ望遠鏡 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。



「大抵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://almamtk.nao.ac.jp/>
真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第1回】 星までの距離測定 2013/4/25 朝日文化センター(朝日)

58

【天文】

アタルマ望遠鏡、「視力2000」を達成！

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

2014/1/06

サイテアングスワンプ星 (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「ローズ・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トルー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。

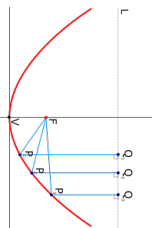
MROなど火星上空の周回機は、彗星から放出された塵によるダメージを避けるため、リソースの高い時間帯に火星の裏側に回る軌道を取っていた。その後、探査機は全て正常な状態であることが確認されている。



アタルマ望遠鏡が観測したおろし星HLEと、アタルマ望遠鏡で撮影したものの周囲の様子。大星のガスが周囲HLEの周囲を取り囲んでいるため、アタルマ望遠鏡ではその中を観測することができないが、アタルマ望遠鏡はそのガスの奥深くに隠れた星のすぐ近くを観測することができた。
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/NASA/ESA

<http://almamtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201411067466.html>
http://www.asctrarts.co.jp/news/2014/10/21/sidingspring/index_s.html

パラボラ (parabolla) = 放物線



NHK「大科学実験」
みんなここに集まってぐる
Click on Start, 3min

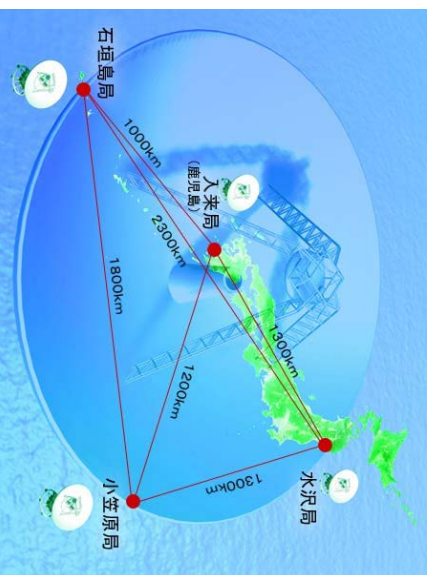


http://www2.nhk.or.jp/school/list/clip_freeword.cgi?kw=みんなここに集まってぐる



国立天文台 野辺山宇宙電波観測所
NOBEYAMA

VERA = VLBI Exploration of Radio Astronomy



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

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 —

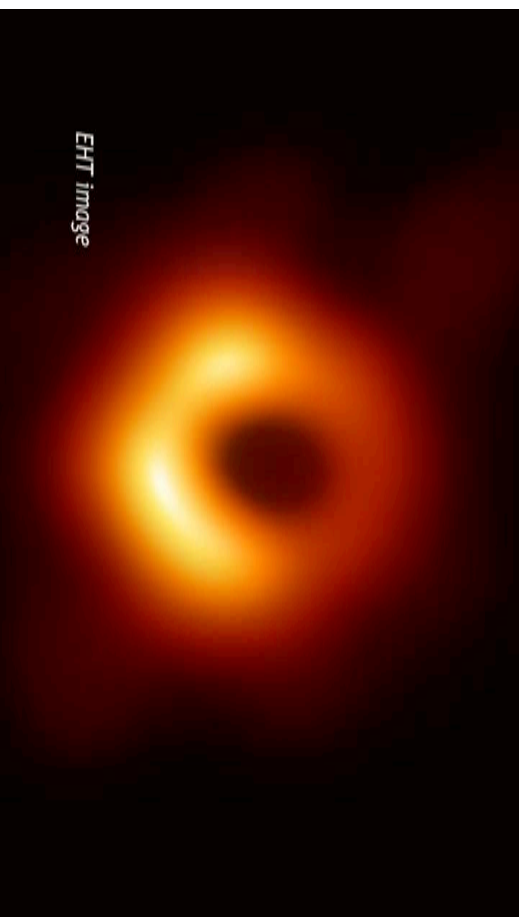


<https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190410-eh-t.html>

真貝雅明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第1回】 星までの距離測定 2019/4/25 朝日文化センター(自由)

最近のニュースから

フラックホールシヤドウのメカニズム解説映像



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

0'58"

真貝雅明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第1回】 星までの距離測定 2019/4/25 朝日文化センター(自由)

