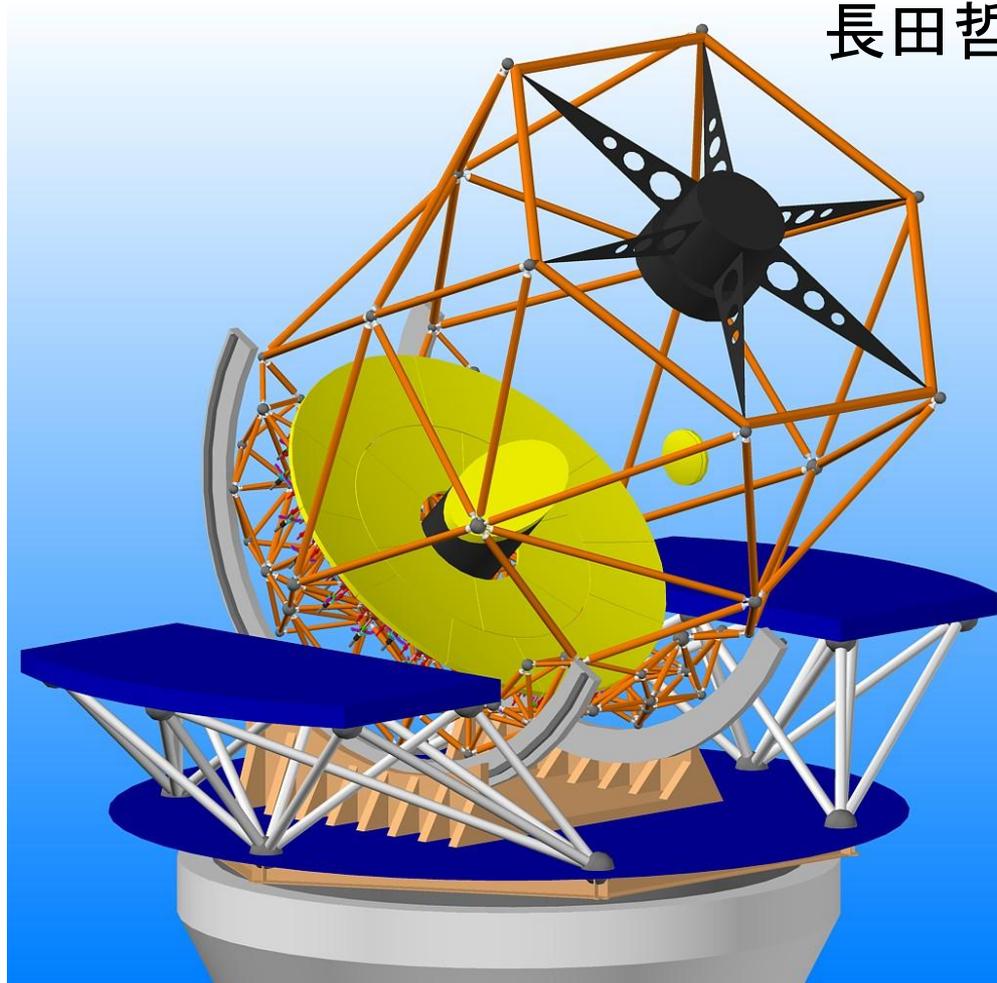


赤外線天文学 —可視光以外で宇宙を見る—

2009年6月13日科学カフェ京都

京大 理学研究科 宇宙物理学教室

長田哲也 ながたてつや



赤外線天文学

1800年にハーシェルが太陽光をプリズムで分光した時に赤外線が発見され、また、赤外線天文学も産声を上げたと言えよう。天文学の技術革新の20世紀後半から、京大でも赤外線望遠鏡を作ってさまざまな観測を行い、その発展に寄与してきた。現代の赤外線天文学は、星・惑星の誕生の現場や銀河系の中心部、宇宙創生の過去まで見通す観測天文学の主力の一つとなっている。

赤外線という電磁波の特徴 5つ

- 低温の物体からも熱放射として出る
- 分子の振動など、さまざまな輝線や吸収線がある
- 紫外線や可視光が宇宙膨張で赤方偏移して観測される
- 宇宙にたまたま固体微粒子(宇宙塵)に吸収・散乱されにくい
- 大気のゆらぎを補正して、くっきりとした像を作りやすい(補償光学)

赤外線天文学 —可視光以外で宇宙を見る—

本日の講演 イン트로ダクション

1609年、ガリレオの望遠鏡

1800年にハーシェルが赤外線を発見

20世紀後半の天文学の技術革新

本日の講演の主要部

赤外線の特徴

- 1 低温の物体からも熱放射
- 2 分子の振動などとして放射
- 3 宇宙膨張で赤方偏移
- 4 宇宙の塵に吸収・散乱されず、見通せる
- 5 大気のゆらぎを補正して、高解像度

赤外線天文学 —可視光以外で宇宙を見る—

本日の講演 イン트로ダクション

1609年、ガリレオの望遠鏡

1800年にハーシェルが赤外線を発見

20世紀後半の天文学の技術革新

本日の講演の主要部

赤外線の特徴

- 1 低温の物体からも熱放射
- 2 分子の振動などとして放射
- 3 宇宙膨張で赤方偏移
- 4 宇宙の塵に吸収・散乱されず、見通せる
- 5 大気のゆらぎを補正して、高解像度

宇宙を見る眼

物質の構成要素と階層構造

万物の根源は何か？
それらを結びつける力は？

古代ギリシア 自然哲学

4大元素
土、水、空気、火

宇宙を見る眼

物質の構成要素

万物の根源
それらを結び

古代ギリシア

4大
土、水、



ラファエロの「アテナイの学堂」

2009年4月11日

未発見の素粒子を探せ

科学カフェ京都

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sanzio_01.jpg

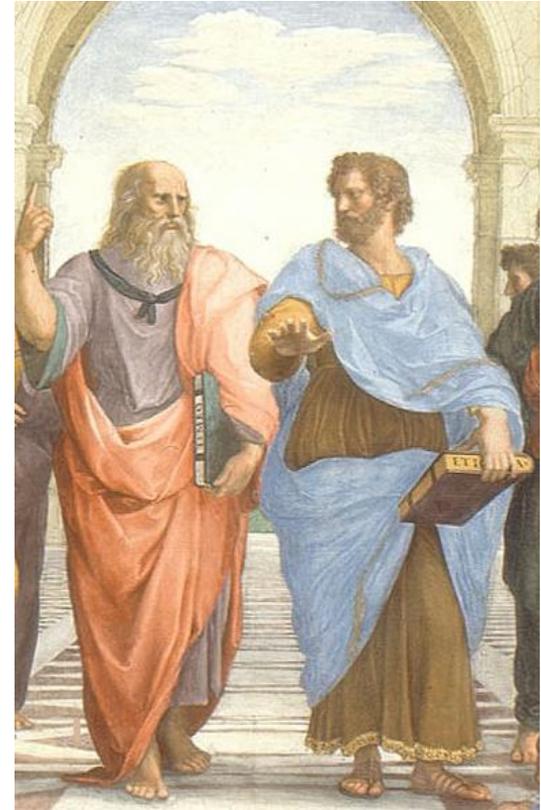
宇宙を見る眼

物質の構成要素と階層構造

万物の根源は何か？
それらを結びつける力は？

古代ギリシア 自然哲学

4大元素
土、水、空気、火



プラトンとアリストテレス

宇宙を見る眼

標準模型は実験を極めてよく説明→これまで矛盾なし

物

標準模型

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ゲージ理論
 強 電・弱



2009年4月11日

2009年4月11日の植松恒夫先生の講演

宇宙を見る眼

標準模型は実験を極めてよく説明→これまで矛盾なし

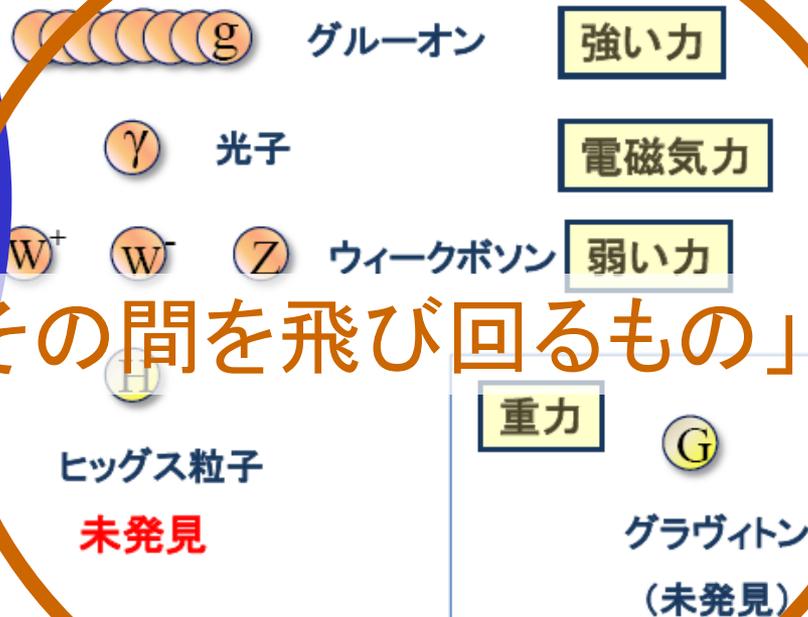
物

標準模型

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ゲージ理論
 強 電弱

物質粒子

ゲージ粒子



「物質」と、「その間を飛び回るもの」

2009年4月11日

2009年4月11日の植松恒夫先生の講演

宇宙を見る眼

標準模型は実験を極めてよく説明→これまで矛盾なし

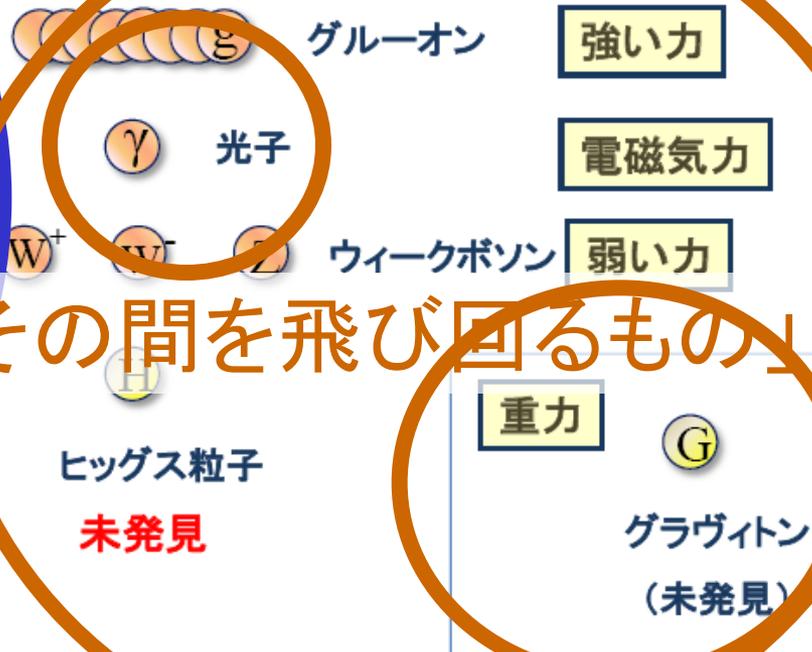
物

標準模型

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ゲージ理論

物質粒子

ゲージ粒子



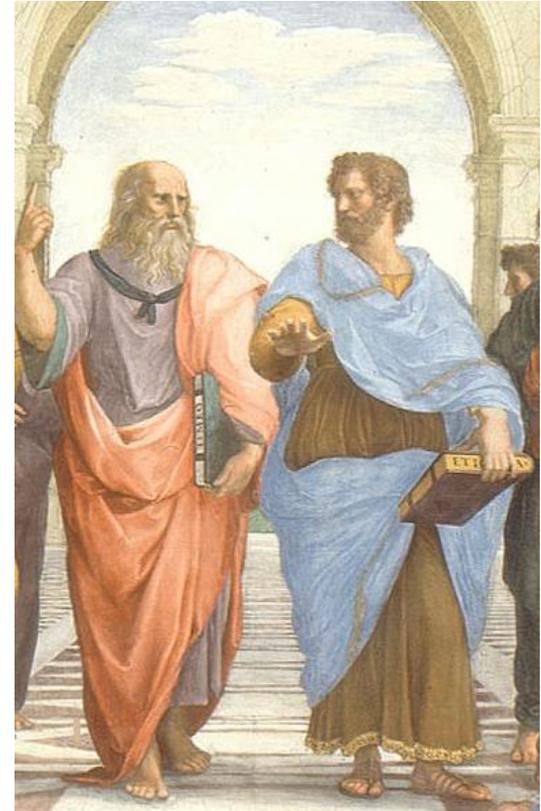
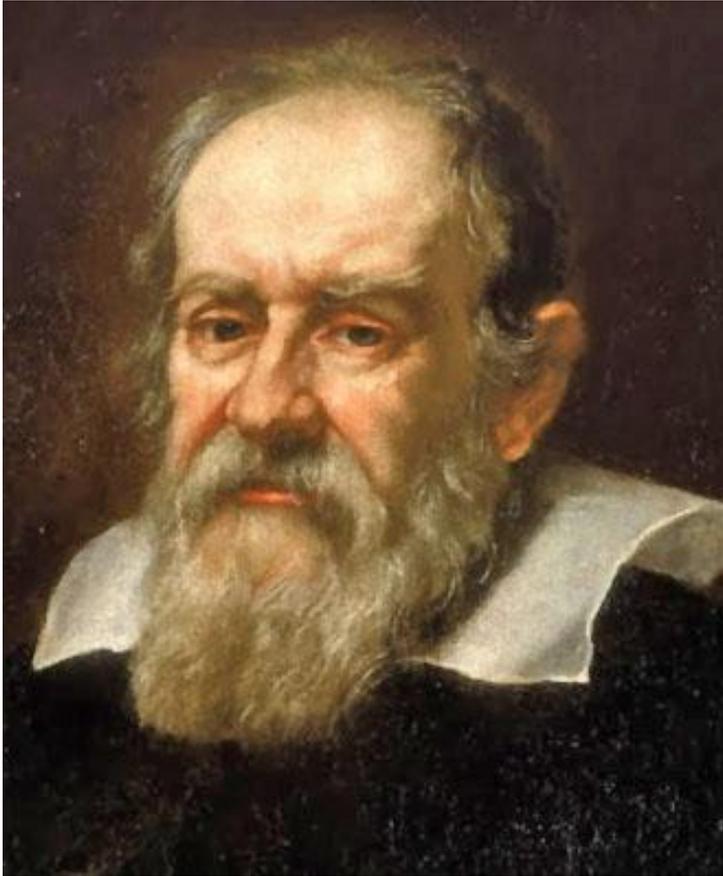
「物質」と、「その間を飛び回るもの」

2009年4月11日

「宇宙線」などと、「光」と、「重力波」

2009年4月11日 未発見の素粒子を探る 科学フロンティア

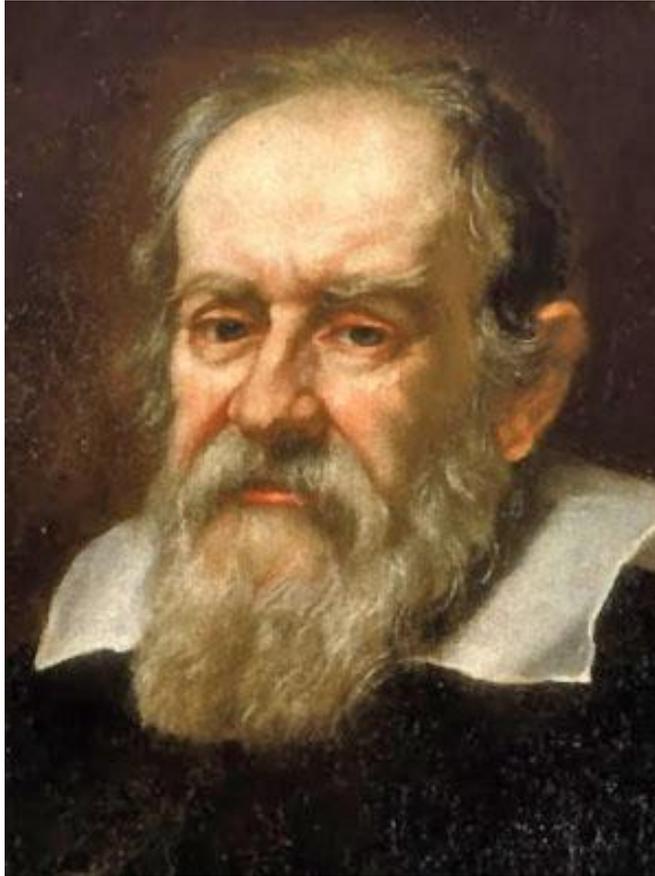
宇宙を見る眼



ガリレオ

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Galileo.arp.300pix.jpg>

宇宙を見る眼



ガリレオの望遠鏡の複製

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Galileo_telescope_replica.jpg

宇宙物理学教室での講演会

世界天文年 全国同時七夕講演会

「赤外線で見える織姫・彦星・天の川」

主催	京都大学大学院理学研究科 宇宙物理学教室
会場	京都大学理学部6号館3階301号教室
所在地	京都市左京区北白川追分町
講演者	富田良雄、長田哲也（京都大学 大学院理学研究科）
講演タイトル	「赤外線で見える織姫・彦星・天の川」
実施日時	2009年7月7日(火) 18:00-19:00
問い合わせ先	FAX:075-753-3897
事前申込	不要
対象	どなたでも
費用	無料
インターネット中継	未定



<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~nagata/tanabata.htm>

赤外線天文学 —可視光以外で宇宙を見る—

本日の講演 イン트로ダクション

1609年、ガリレオの望遠鏡 解像力、集光力

1800年にハーシェルが赤外線を発見

20世紀後半の天文学の技術革新

本日の講演の主要部

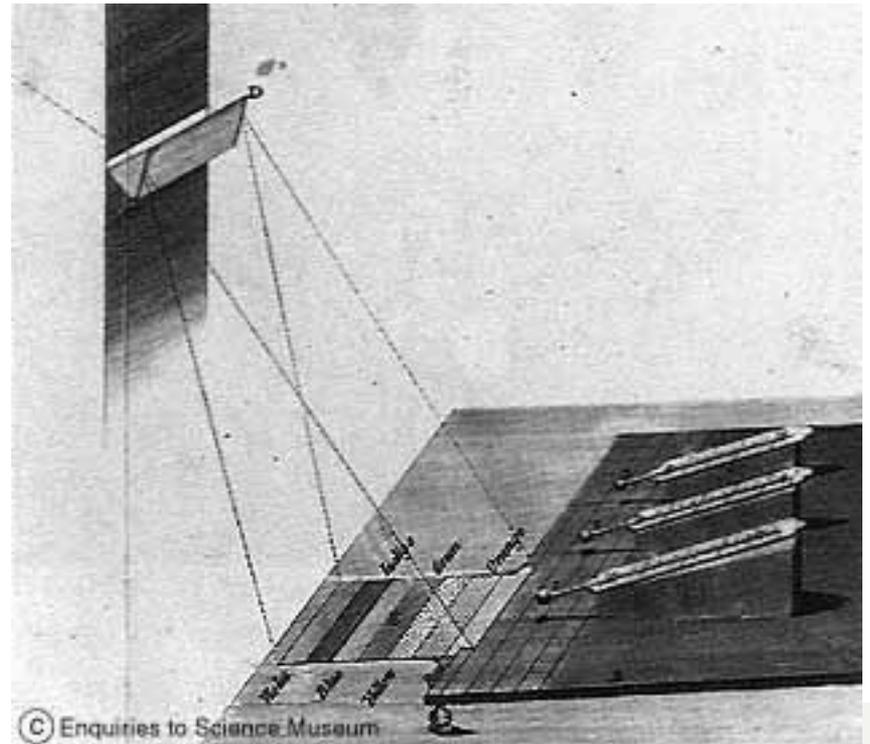
赤外線の特徴

- 1 低温の物体からも熱放射
- 2 分子の振動などとして放射
- 3 宇宙膨張で赤方偏移
- 4 宇宙の塵に吸収・散乱されず、見通せる
- 5 大気のゆらぎを補正して、高解像度

赤外線観測のための望遠鏡



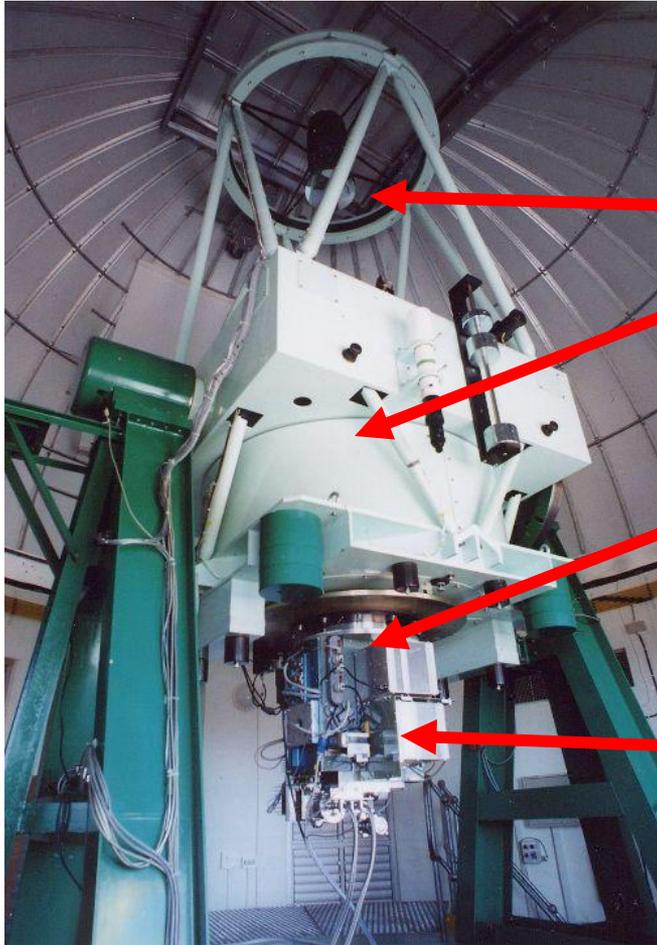
どっちでしょう？



ハーシェルによる 赤外線の見つけ(1800)



赤外線観測のための望遠鏡



普通の可視光と同様に
鏡で反射する

赤外線を検出する
半導体のセンサー

信号を増幅する
エレクトロニクス

赤外線天文学の歴史

William Herschelが太陽光の中に赤外線を発見(1800)

JohnsonらのPbS検出器による測光システム(1962頃)

Lowらが、Ge:Gaボロメータ検出器を天文学に応用(1960代)

2 μ mサーベイ(1965頃) IRCカタログ 5612個の天体

IRAS(赤外線天文衛星)による遠赤外全天サーベイ(1983)

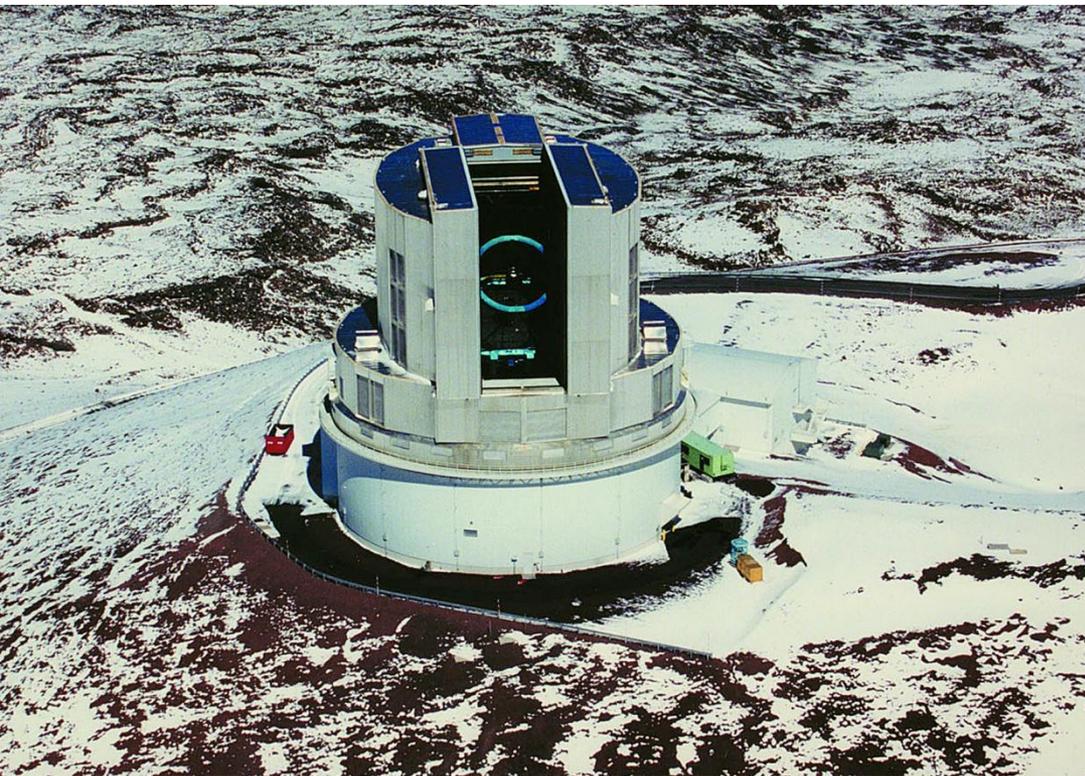
PSC 245,889個、FSC 173,044個 の天体を検出

ISO(赤外線衛星天文台)による観測(1995.11-1998.4)

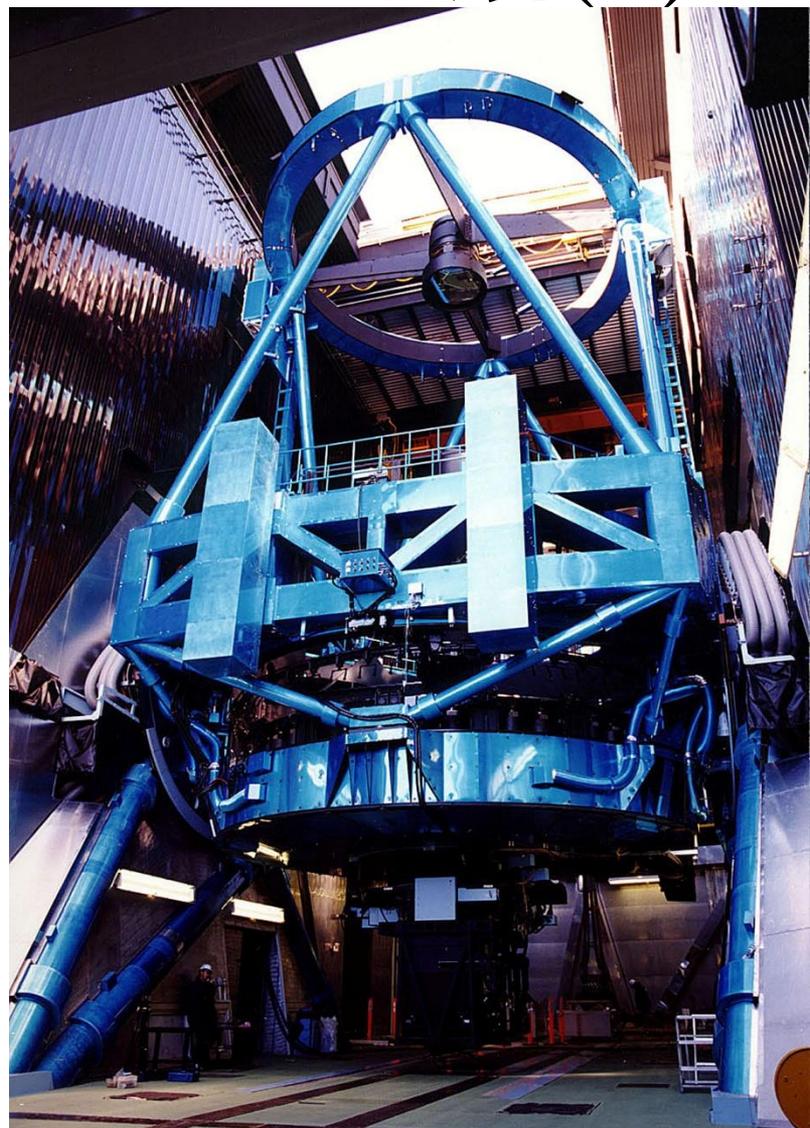
DENIS, 2MASSによる1-2 μ m全天サーベイ(1996-2001)

2MASSは4.7億個の天体を検出

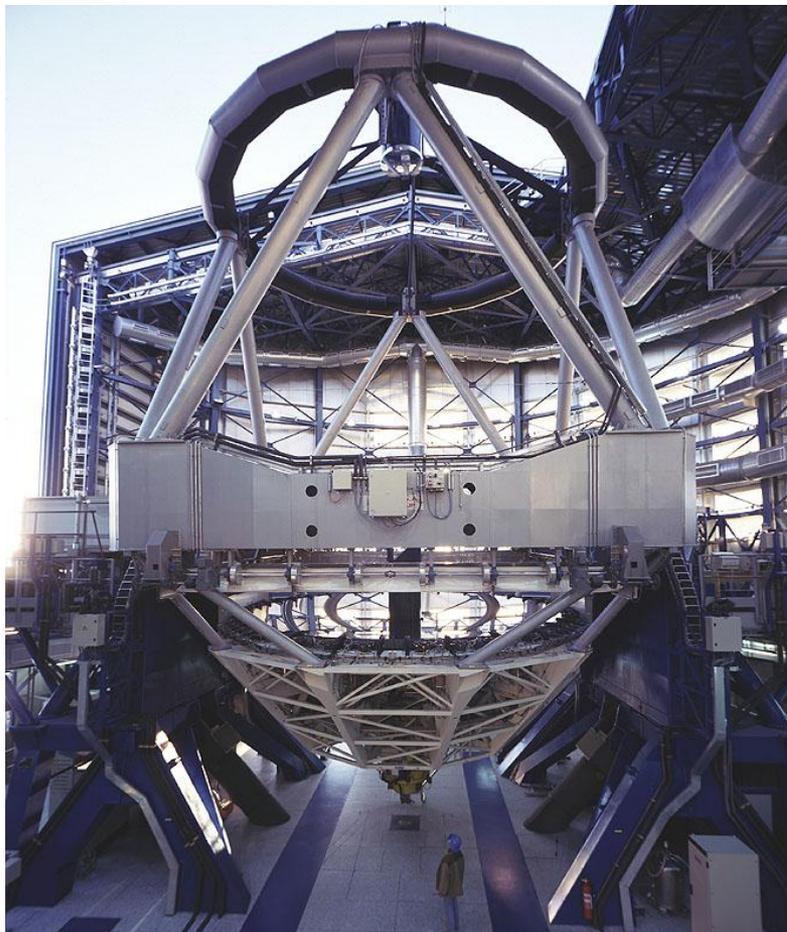
赤外線観測のための望遠鏡(2)



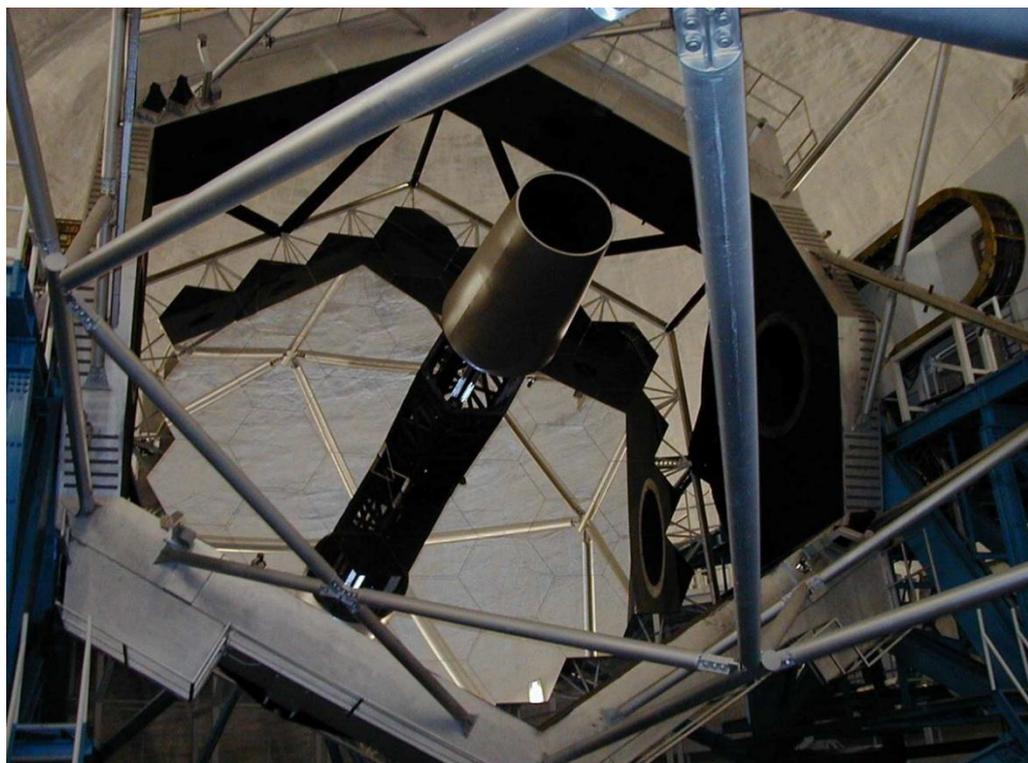
Subaru 8.2 m



赤外線観測のための望遠鏡(3)



VLT 8m



Keck 10m

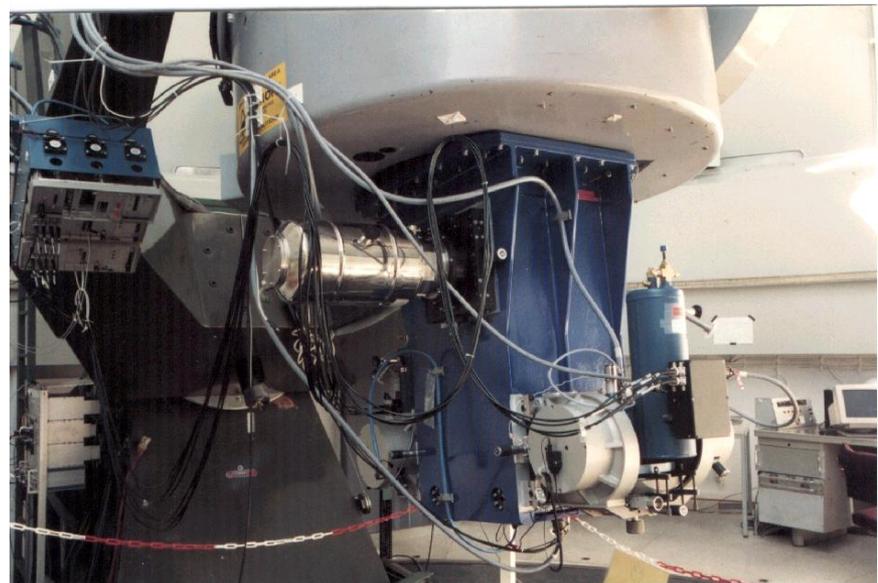


2MASS南

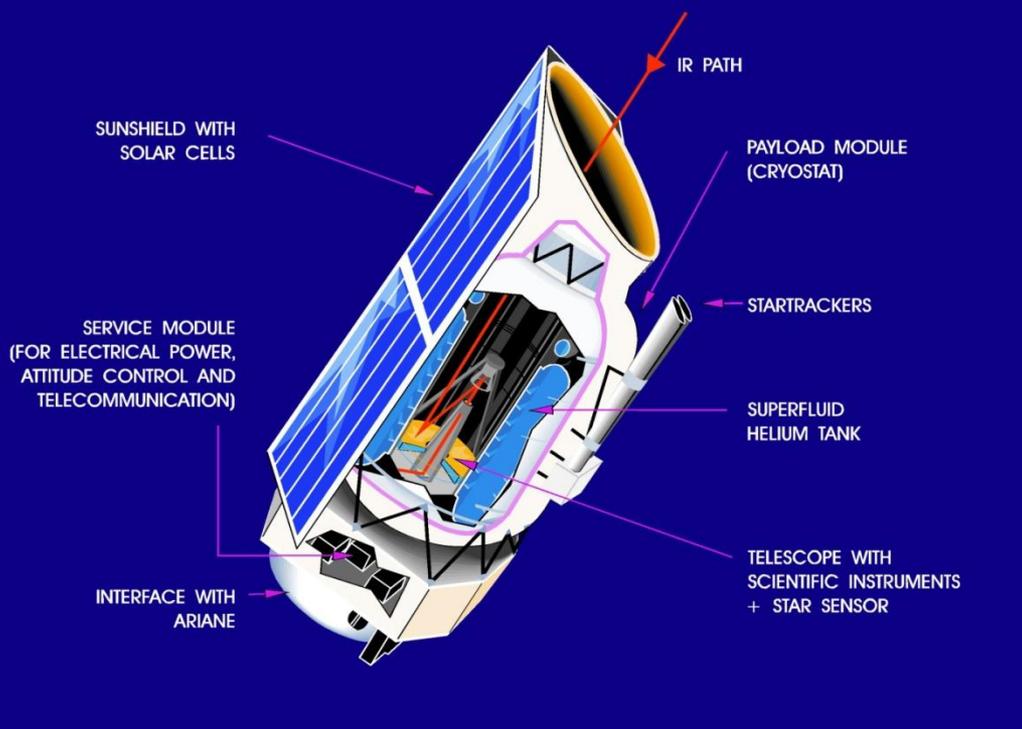
1997-2001



2MASS北



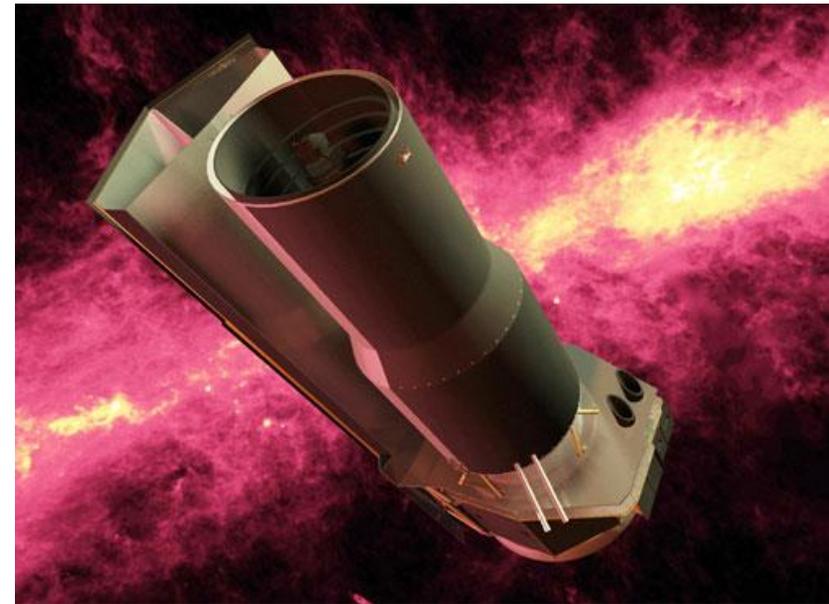
DENIS



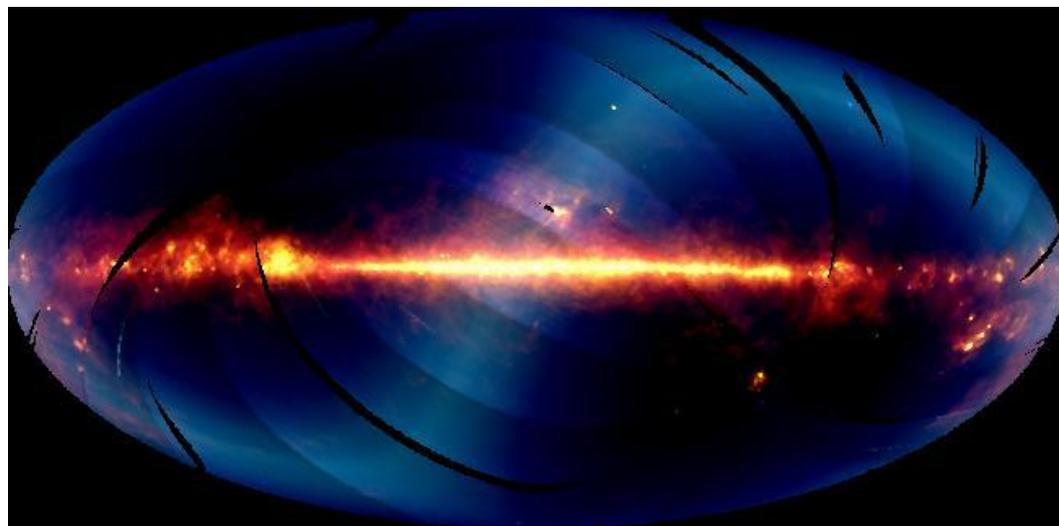
ISO 1995-1998



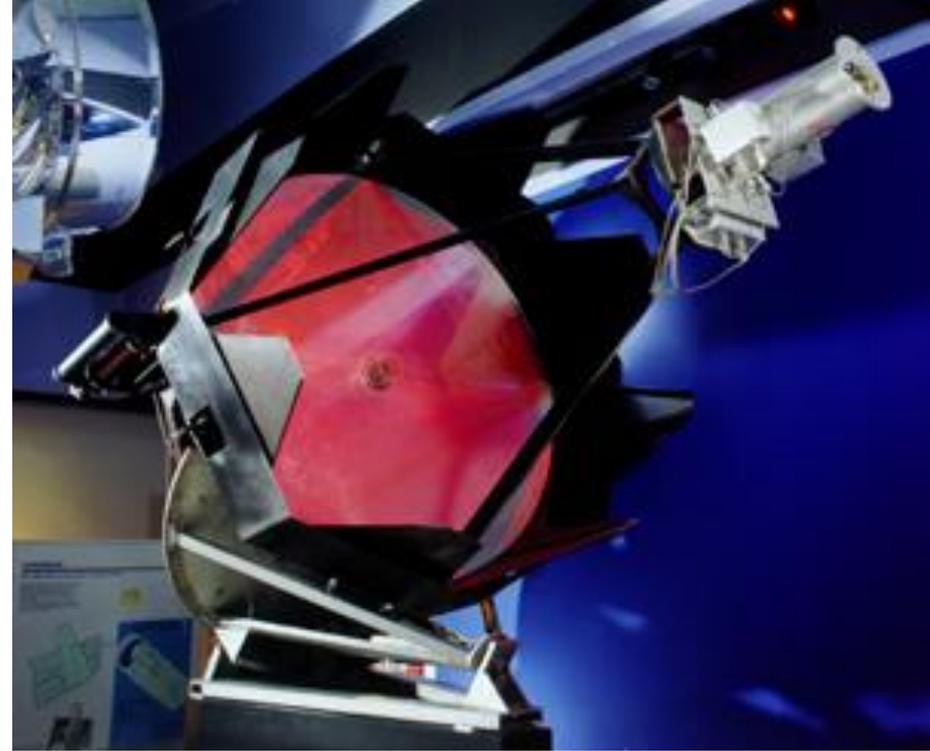
Akari 2006-



Spitzer Space Telescope



IRAS 1983.1.26打ち上げ, 2.9-11.22



1965頃

主鏡はエポキシ樹脂製！

IRCカタログを作った
62インチ赤外線望遠鏡

10.16-18 (1972)
(R&S)

大見

最終決定

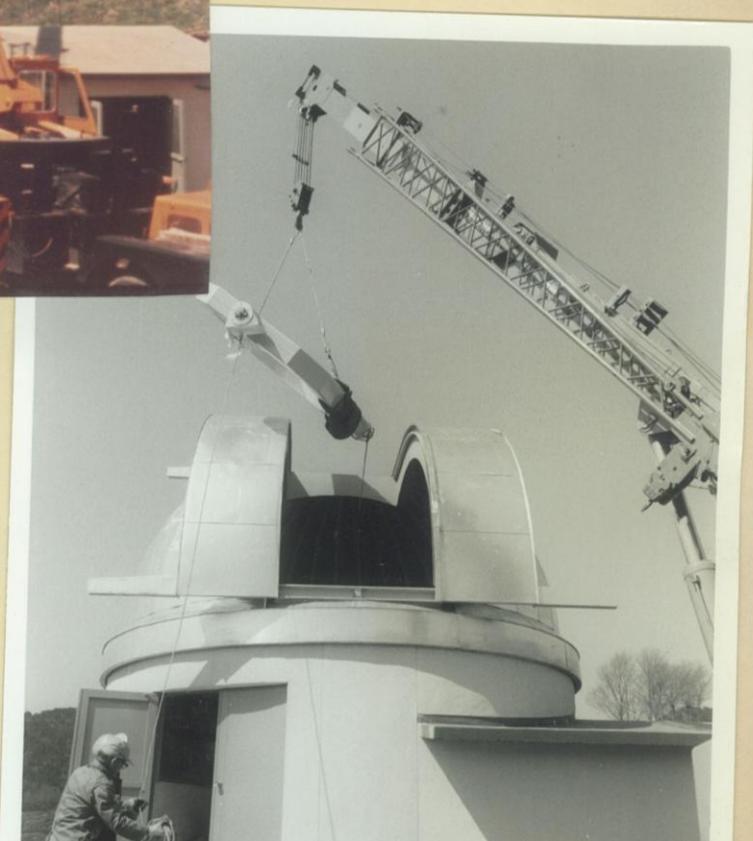
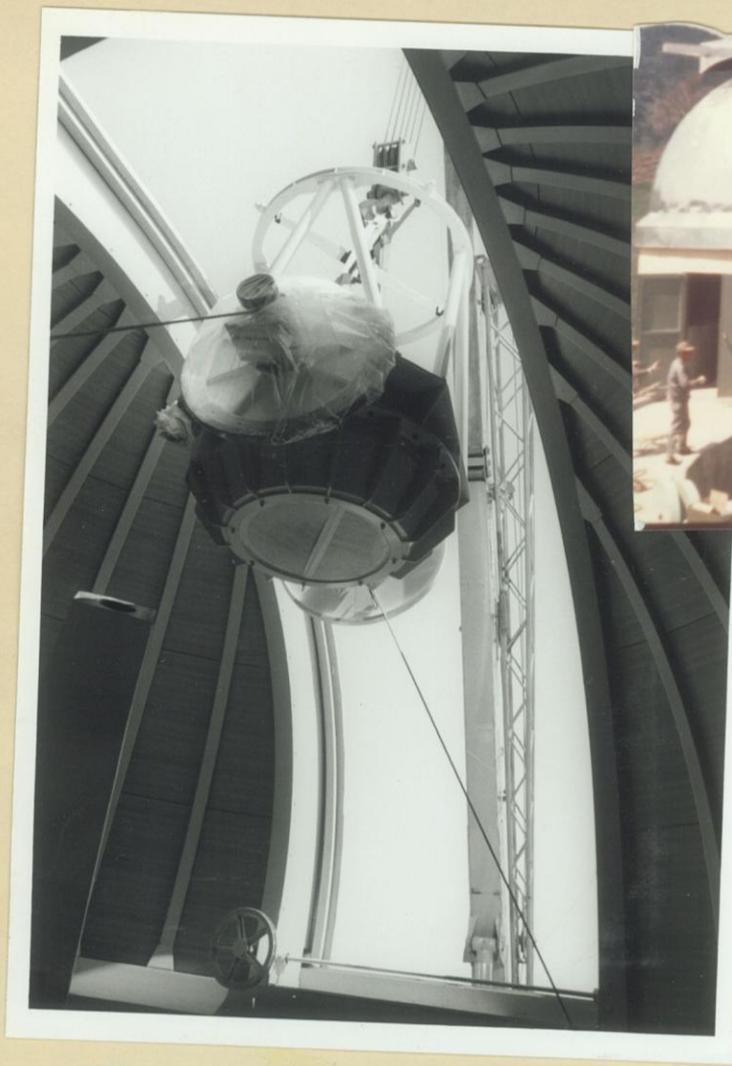


完成
予想図

1972年10月

京都大学 上松^{あげまつ}天体赤外線観測室
1m 赤外線望遠鏡の建設

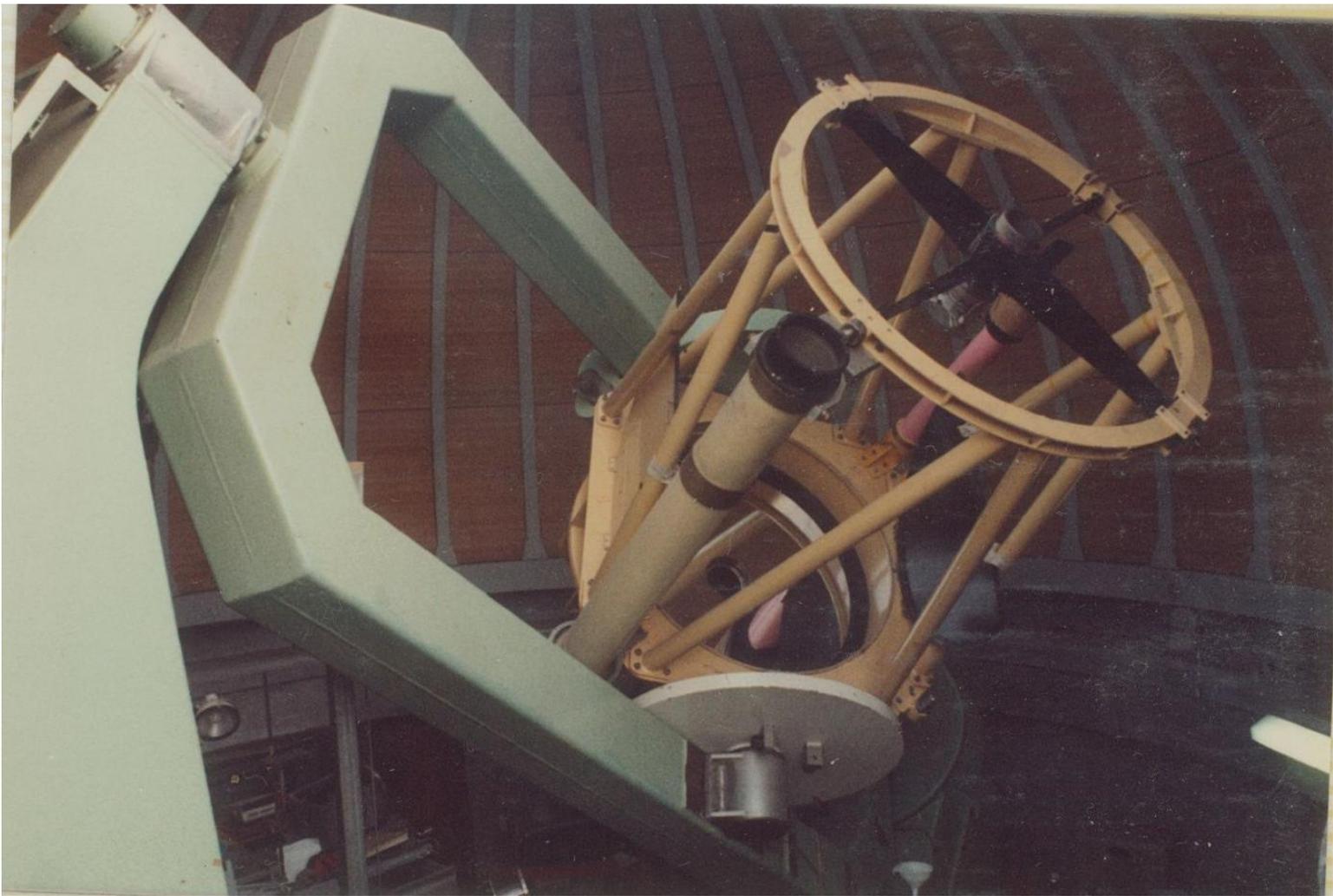
鏡筒部の搬入



1m 赤外線望遠鏡の建設 1973年



京都大学 上松^{あげまつ}天体赤外線観測室

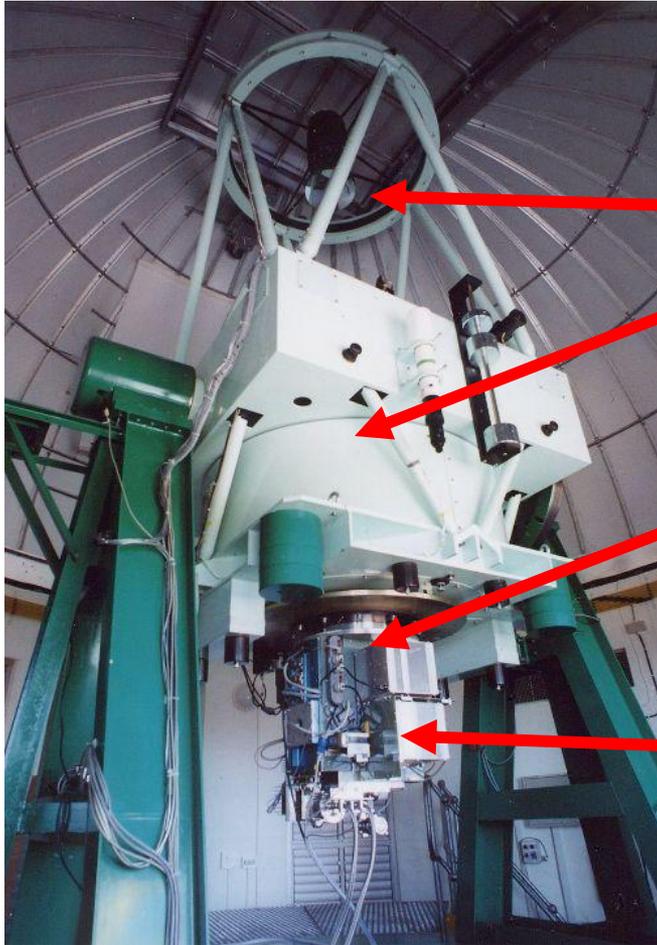


1980年

1m 赤外線望遠鏡は数々の学術論文を生み出した。
査読付き雑誌に34編。博士の学位論文を11編。

(天文月報2003年12月号による)

赤外線観測のための望遠鏡

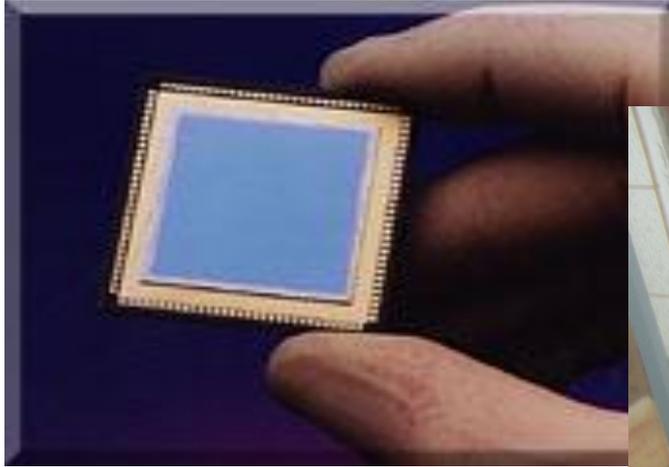


普通の可視光と同様に
鏡で反射する

赤外線を検出する
半導体のセンサー

信号を増幅する
エレクトロニクス

赤外線センサー(100万素子)



Refrigerator Head change



すばる望遠鏡

National Astronomical Observatory of Japan

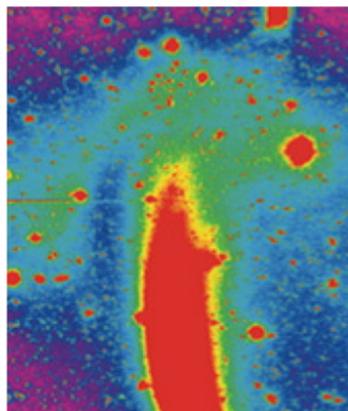
[ホーム](#) > [観測成果](#) > 2009年

観測成果

2009年

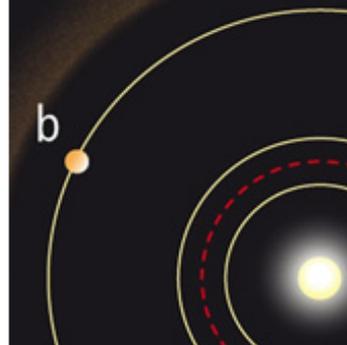
すばる望遠鏡、銀河合体の謎を解く

3



2009年6月9日

近隣の宇宙には複数の個々考えられる天体があり、そのに明るく輝くウルトラ赤外線しました。これらの銀河では爆こっており、その明るさは天ります。なぜ、このような激のか、その物理的なメカニその説明には、ウルトラ赤の合体で誕生したのかを見こころが、合体が進行するこなるので、どのような合体が大変難しい状況が続いてい

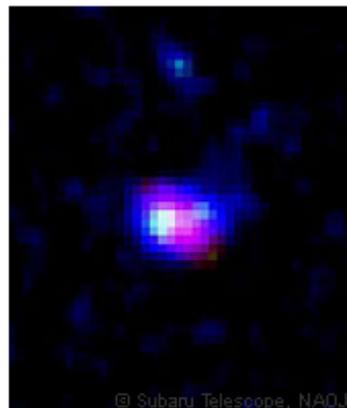


大阪大学、神戸大学、国立天文台などの研究者からなるチームが、すばる望遠鏡によって太陽系外惑星の像を直接得ることに成功しました。2008年11月、ケック望遠鏡とジェミニ望遠鏡がHR 8799という恒星を周回する3つの惑星の撮影に成功したというニュースが世界を駆け巡りました。この HR 8799は2002年にすばる望遠鏡で観測されていたため、研究チームが新たに惑星検出に最適化した画像解析を行ったところ、一番外側の軌道をまわる惑星が見つかりました。まもなく、高性能の観測装置を用いた系外惑星探査プロジェクトが始まります。今回の成果は、今後の系外惑星研究に向けての大きな弾みとなります。

[詳細はこちら](#) →

古代宇宙で巨大天体を発見 - 謎のガス雲ヒミコ

3



2009年4月22日

多数の望遠鏡を使った観測により、ビッグバンから約8億年後の生まれて間もない宇宙で、不思議な巨大天体が発見されました。これは、ライマンアルファ・ブローブという天体に分類され、その巨大なガス雲は将来銀河になる可能性を秘めていますが、本当はどのようなか分かっていません。研究者たちは、この古代宇宙でみつかった謎の巨大天体をヒミコと名付けました。これは弥生時代後期における倭国の女王、卑弥呼に由来しています。ヒミコは5万5千光年にも広がり、宇宙初期の時代の天体としては記録的な大きさで、現在の天の川銀河の円盤の半径に匹敵します。

1 すばる望遠鏡のホームページから

[詳細はこちら](#) →

すばる、系外惑星の撮影に成功

http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/j_index_2009.htm

© Subaru Telescope, NAOJ

2009年5月21日

すばる望遠鏡、結晶質の炭素分布箇所の観測に成功 - 宇宙でのダイヤモンドの作

2

赤外線天文学 —可視光以外で宇宙を見る—

本日の講演 イン트로ダクション

1609年、ガリレオの望遠鏡 解像力、集光力

1800年にハーシェルが赤外線を発見

20世紀後半の天文学の技術革新

本日の講演の主要部

赤外線の特徴

- 1 低温の物体からも熱放射
- 2 分子の振動などとして放射
- 3 宇宙膨張で赤方偏移
- 4 宇宙の塵に吸収・散乱されず、見通せる
- 5 大気のゆらぎを補正して、高解像度

●ポイント1

Brown Dwarf Gliese 229B

低温の物体からも熱放射

物質と電磁波が十分に相互作用するとプランクの黒体放射を出す

温度 T の物体から出てくる電磁波は、次のような波長分布を持つ：

$B_\nu(T)$ は、光速・1個の光子のエネルギー・光子の状態密度・確率 (Bose Einstein 統計) の積で表わされ、単位時間・面積・立体角・周波数あたりのエネルギーとして、

$$c \cdot h\nu \cdot \frac{2\nu^2}{c^3} \cdot \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad \text{あるいは、}$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 k はボルツマン定数である。これが温度 T の物体から出る波長 λ の電磁波のエネルギーである。

ウィーンの変位則

有名な $\lambda_{\text{ピーク}} \times T = 2898[\mu\text{m} \cdot \text{K}]$ で黒体放射の極大波長 $\lambda_{\text{ピーク}}$ が決まる。例えば、3000K の物体から出る光のピークは約 $1\mu\text{m}$ 。

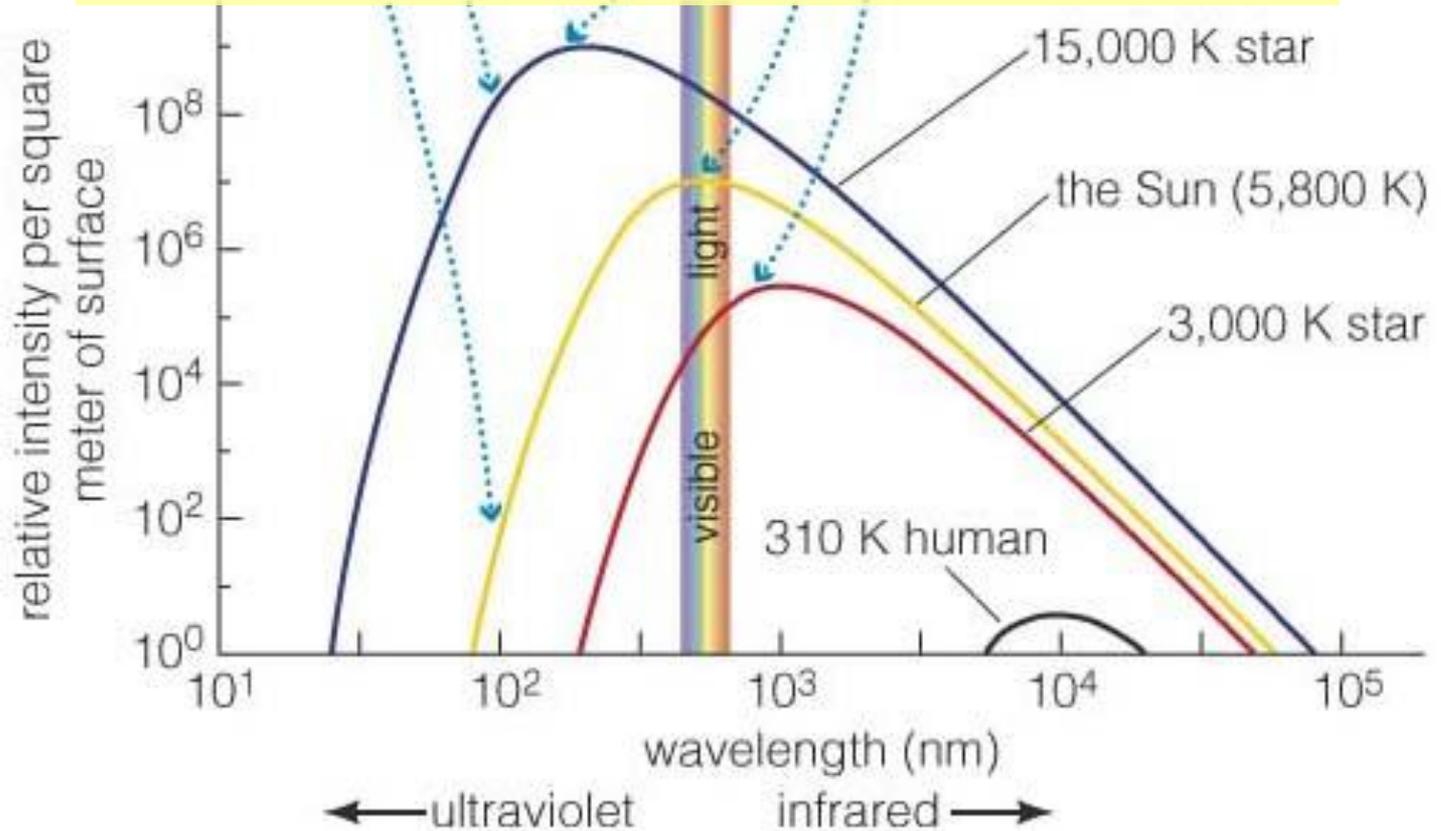
プランクの黒体放射

The curve for a hotter object is everywhere above the curve for a cooler object, showing that hotter objects emit more radiation per unit surface area at every wavelength.

The peak wavelength is further to the left for hotter objects, showing that hotter objects emit more of their radiation at shorter wavelengths (higher energy).

ピーク波長は $2898 \mu\text{m K}$ から

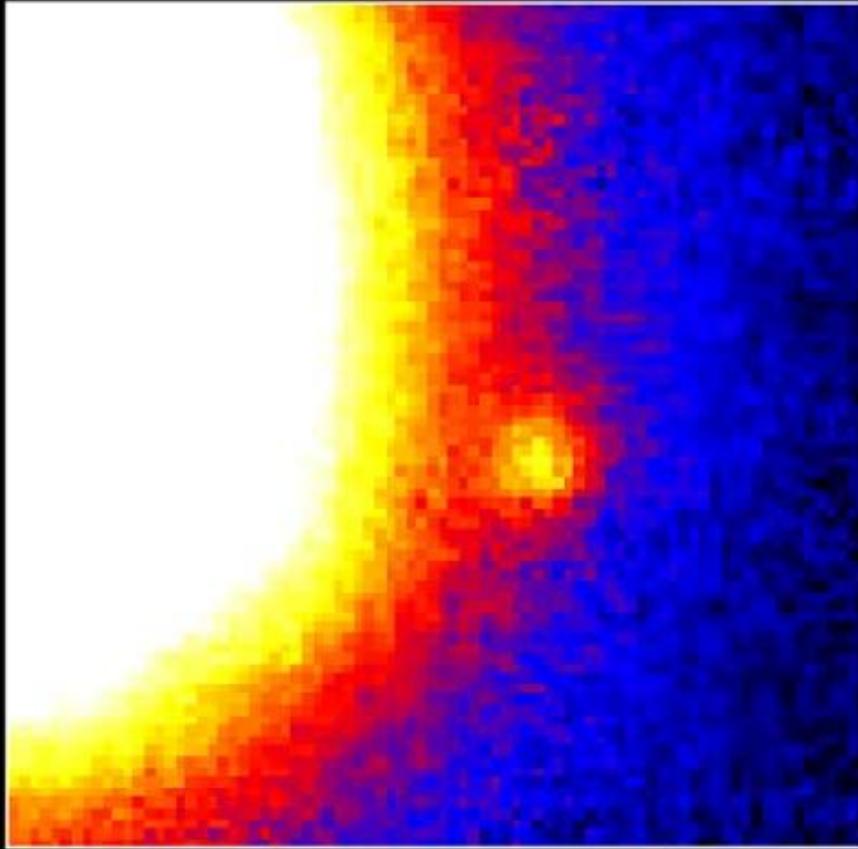
単位面積、単位波長あたりに
やってくるエネルギー



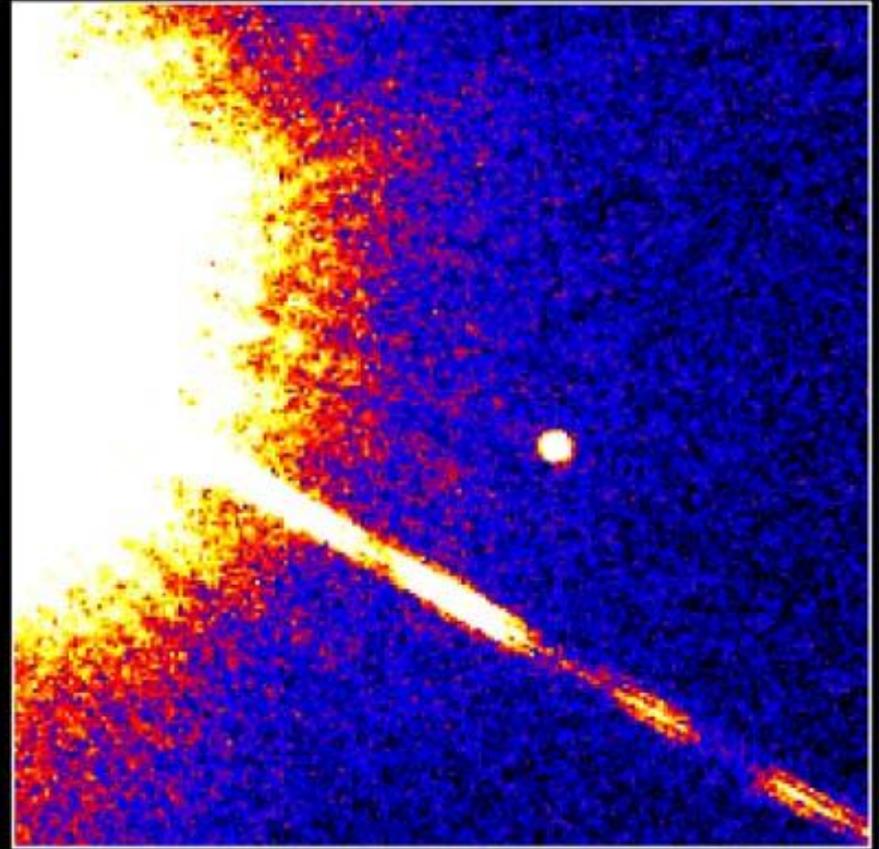
物体の温度と、その放出する電磁波の波長

T型褐色矮星Gl 229B

Brown Dwarf Gliese 229B



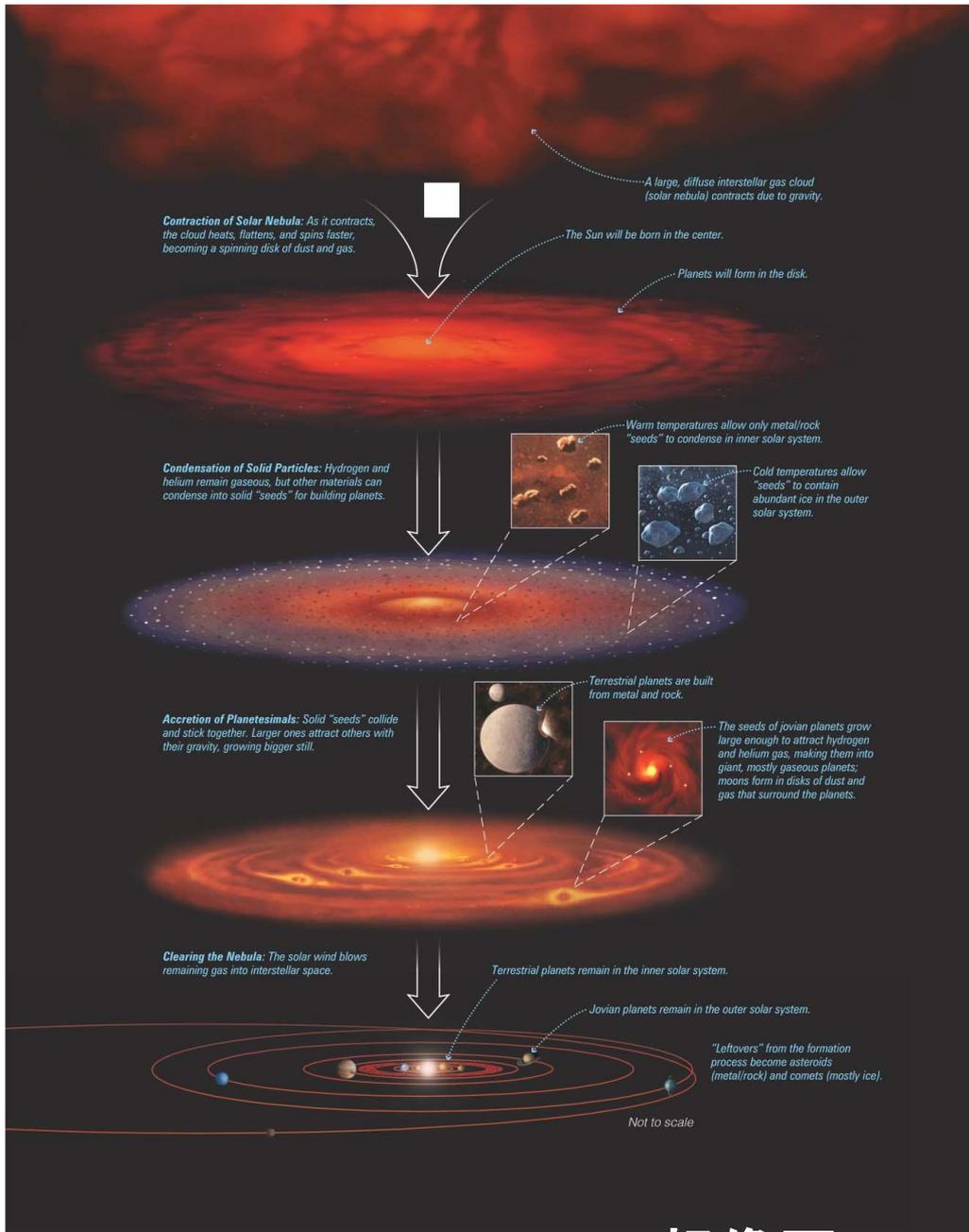
Palomar Observatory
Discovery Image
October 27, 1994



Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2
November 17, 1995

PRC95-48 · ST ScI OPO · November 29, 1995

T. Nakajima and S. Kulkarni (CalTech), S. Durrance and D. Golimowski (JHU), NASA



太陽系のような惑星システムが できつつある現場の 観測

Star Forming Region Cep A



Color : Blue = J-band (1.25 μ m)
Green = H-band (1.63 μ m)
Red = Ks-band (2.14 μ m)

Exposure : 10 sec. \times 35
Field of View : 4'.9 \times 4'.9

University of Hawaii 2.2m Telescope

UH 2.2m + SIRIUS

Simultaneous-3color InfraRed Imager for Unbiased Survey

Star Forming Region M17



Color : Blue = J-band (1.25 μ m)
Green = H-band (1.63 μ m)
Red = Ks-band (2.14 μ m)

Exposure : 5 sec. \times 10
Field of View : 7'.8 \times 7'.8

InfraRed Survey Facility 1.4m Telescope

IRSF1.4m + SIRIUS

Simultaneous-3color InfraRed Imager for Unbiased Survey

星形成領域ケフェウス座A

星形成領域 M17

Star Forming Region NGC 3603



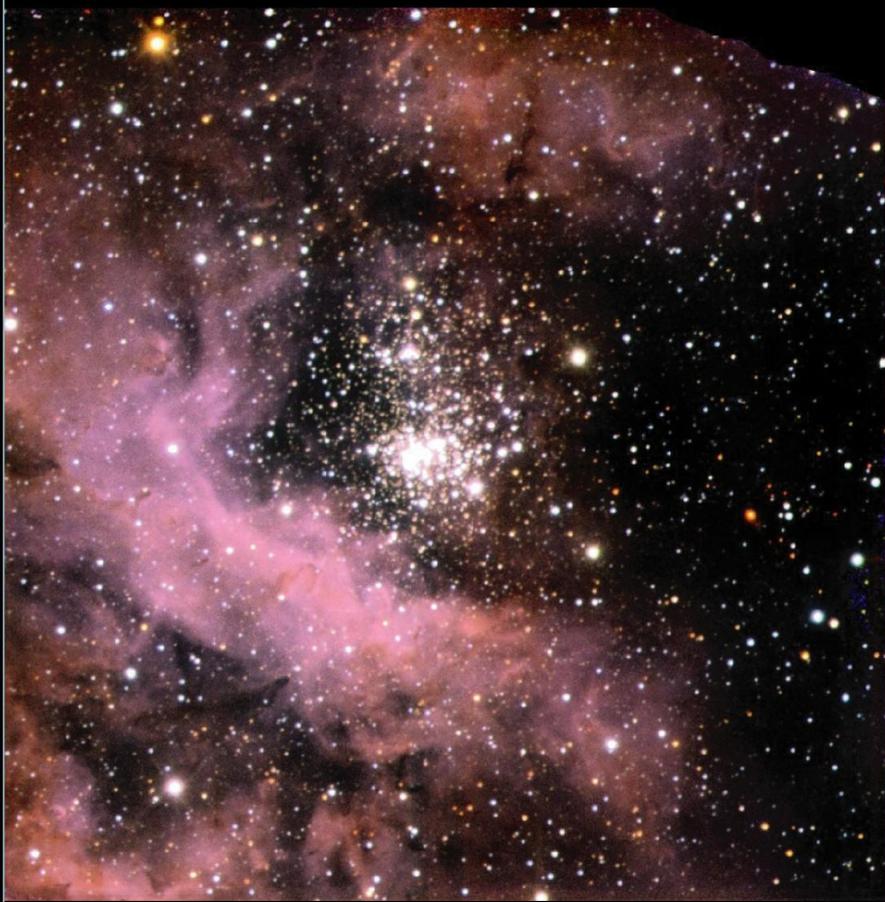
Color : Blue = J-band (1.25 μ m)
Green = H-band (1.63 μ m)
Red = Ks-band (2.14 μ m)
Exposure : 10 sec. \times 20
Field of View : 7.3 \times 7.3

InfraRed Survey Facility 1.4m Telescope

IRSF1.4m + SIRIUS

Simultaneous-3color InfraRed Imager for Unbiased Survey

Star Forming Region RCW 49



Color : Blue = J-band (1.25 μ m)
Green = H-band (1.6 μ m)
Red = Ks-band (2.2 μ m)
Exposure : 30 sec. \times 29
Field of View : 7.3 \times 7.3

InfraRed Survey Facility 1.4m Telescope

IRSF1.4m + SIRIUS

Simultaneous-3color InfraRed Imager for Unbiased Survey

星形成領域NGC3603

星形成領域 RCW49

赤外線天文学 —可視光以外で宇宙を見る—

本日の講演 イン트로ダクション

1609年、ガリレオの望遠鏡 解像力、集光力

1800年にハーシェルが赤外線を発見

20世紀後半の天文学の技術革新

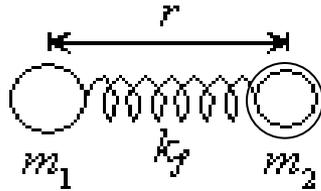
本日の講演の主要部

赤外線の特徴

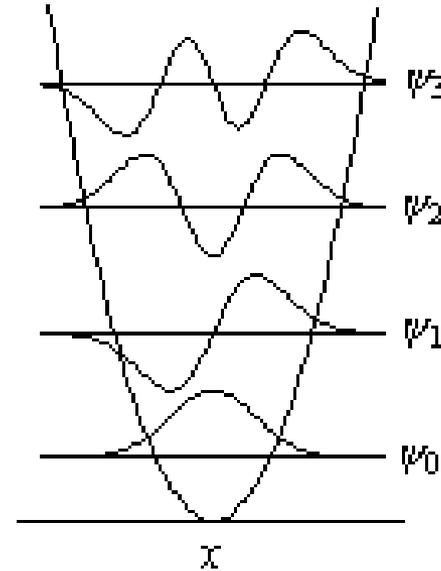
- 1 低温の物体からも熱放射
- 2 分子の振動などとして放射
- 3 宇宙膨張で赤方偏移
- 4 宇宙の塵に吸収・散乱されず、見通せる
- 5 大気のゆらぎを補正して、高解像度

●ポイント2

さまざまな輝線・吸収線



分子が振動して
電磁波を出す



量子力学の振動エネルギー準位

水素分子なら $2.12\mu\text{m}$ 等の近赤外線



すばる望遠鏡がとらえた、
オリオン星雲の水素分子
輝線



Orion KL

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (H₂ (v=1-0 S(1)) – Cont)

January 28, 1999

赤外線天文学 —可視光以外で宇宙を見る—

本日の講演 イン트로ダクション

1609年、ガリレオの望遠鏡 解像力、集光力

1800年にハーシェルが赤外線を発見

20世紀後半の天文学の技術革新

本日の講演の主要部

赤外線の特徴

- 1 低温の物体からも熱放射
- 2 分子の振動などとして放射
- 3 宇宙膨張で赤方偏移
- 4 宇宙の塵に吸収・散乱されず、見通せる
- 5 大気のゆらぎを補正して、高解像度

●ポイント3

宇宙の膨張で赤方偏移

遠方の銀河を観測すると……

宇宙は約137億年前のビッグバンから膨張し続けていると考えられている。

水素分子だけでなく、水素原子やその他の原子などのスペクトル線の波長が伸びて、赤外線の世界域に入ってくる。

すばる望遠鏡

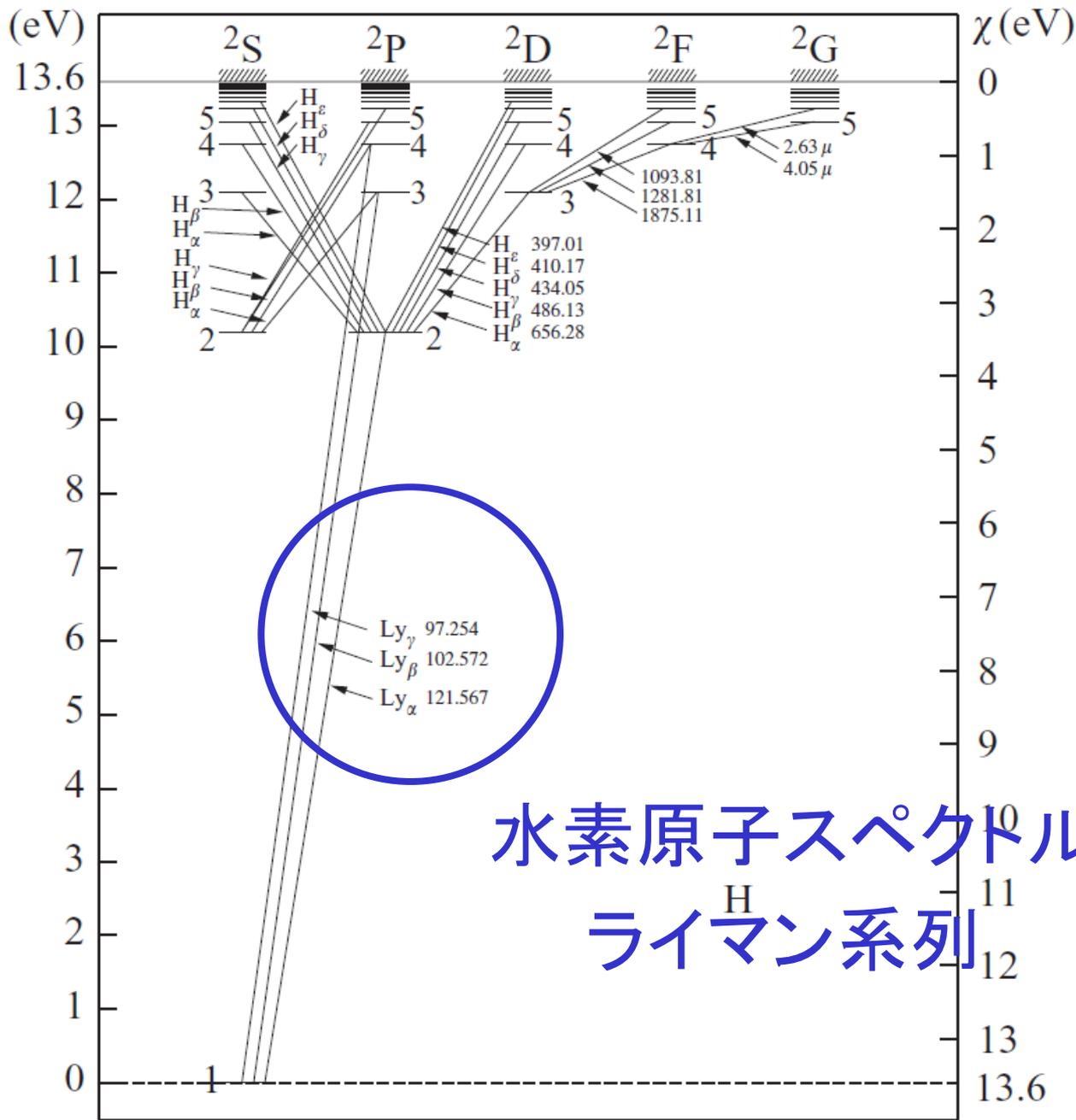
ハワイ マウナケア

口径8.2m

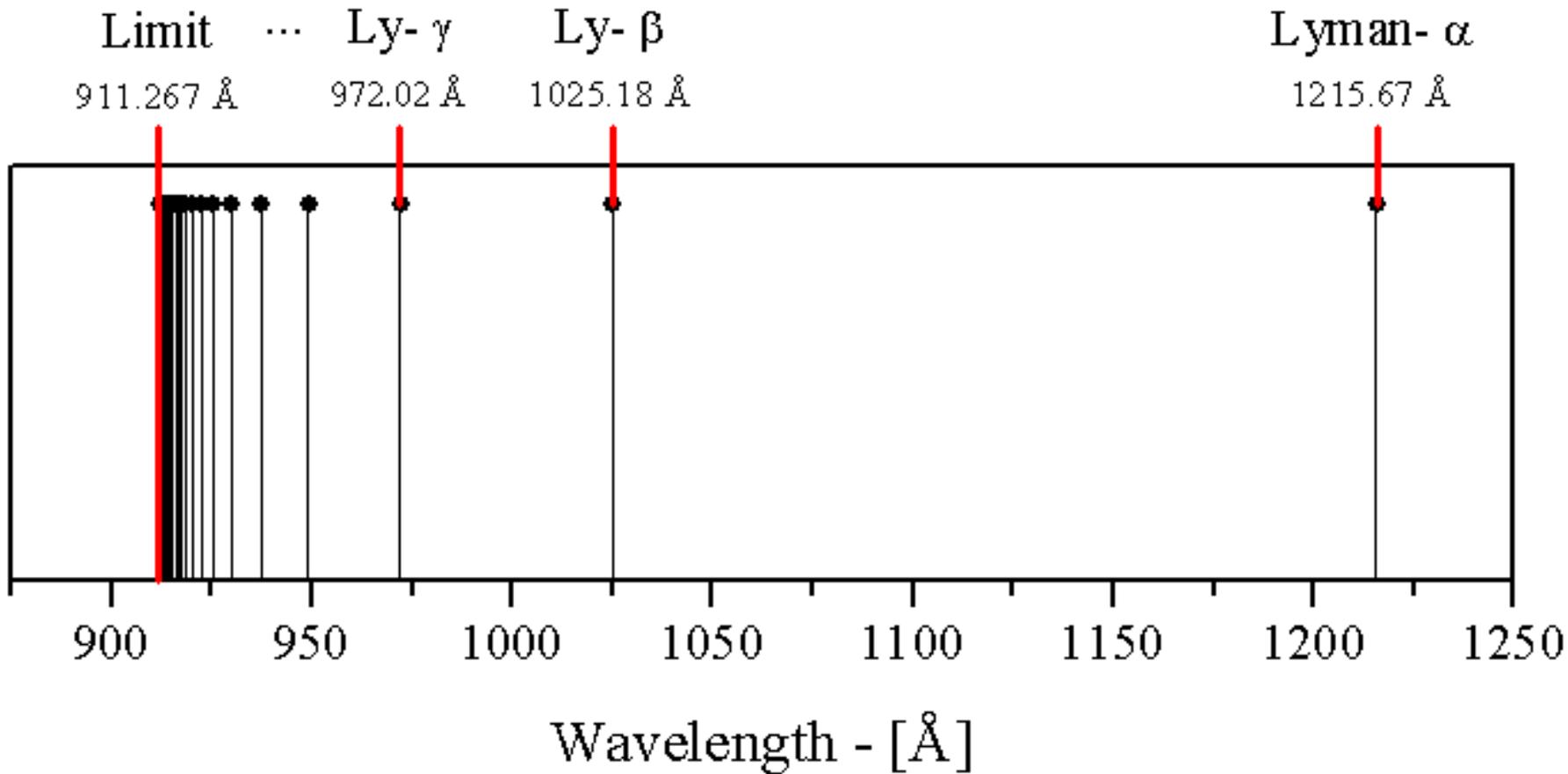


Theodore Lyman
(1874 - 1954)

水素原子スペクトルの
ライマン系列

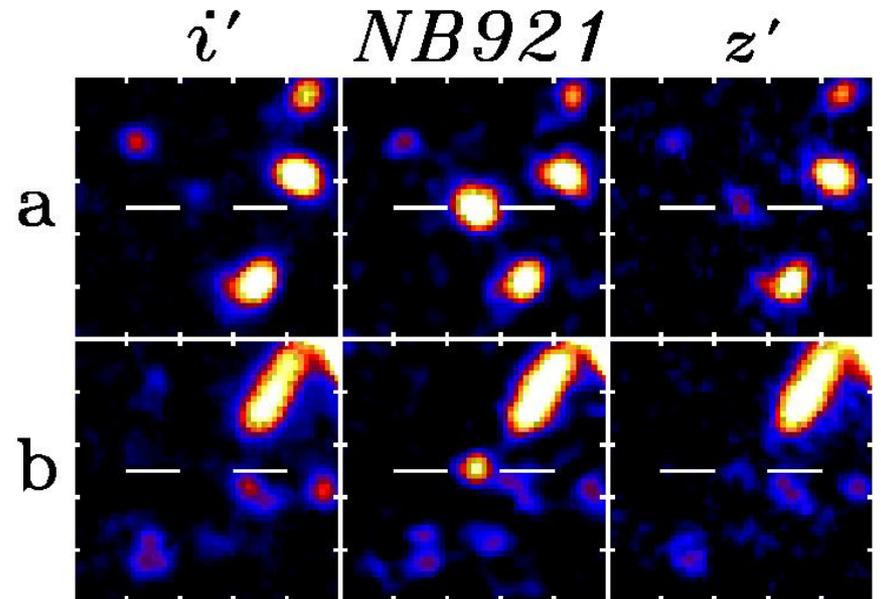
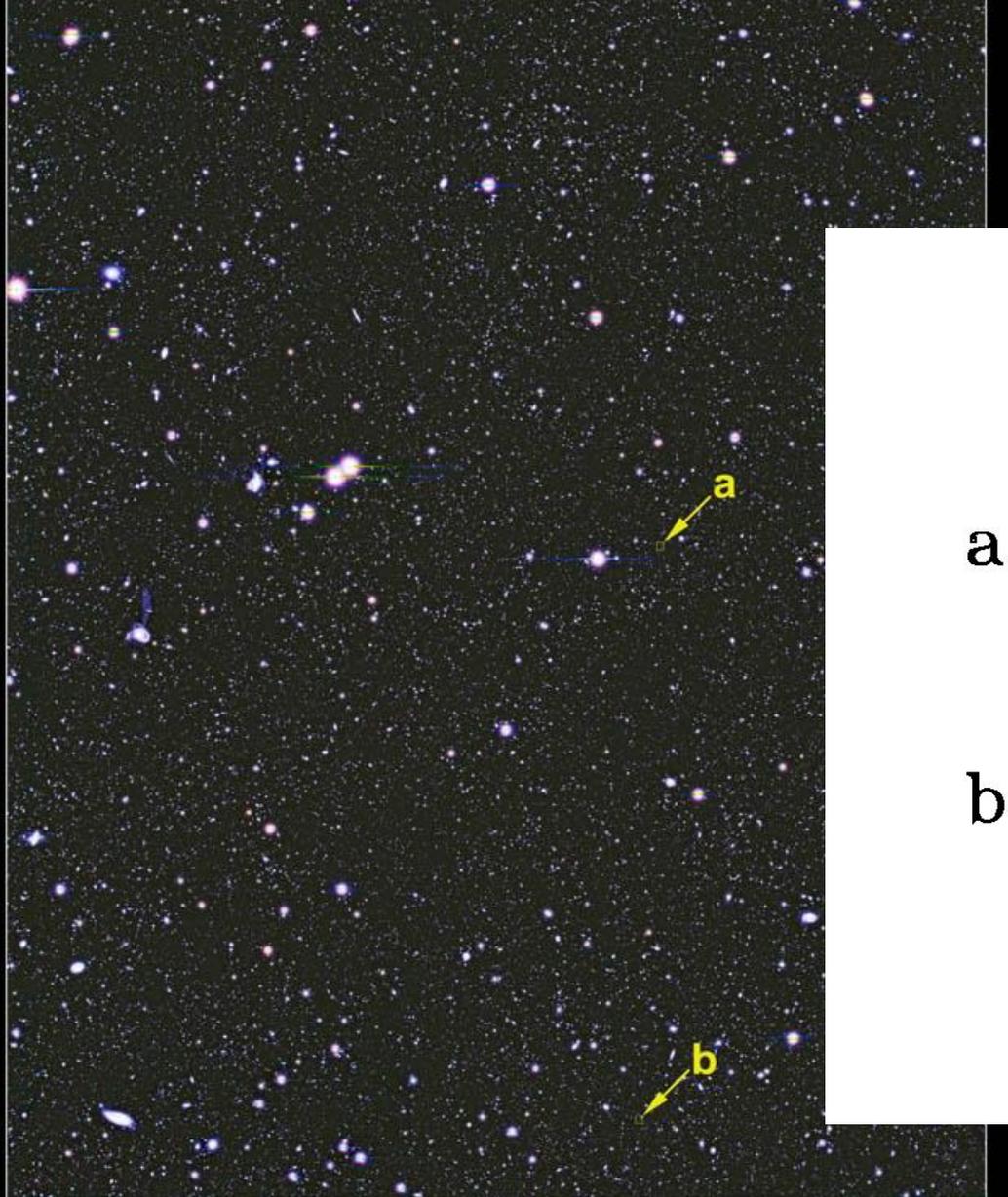


水素原子スペクトルの ライマン系列



水素原子スペクトルの ライマン系列

宇宙の膨張で赤方偏移



赤方偏移 $z > 6$ の
銀河



Subaru Deep Field: The Most Distant Galaxy Known

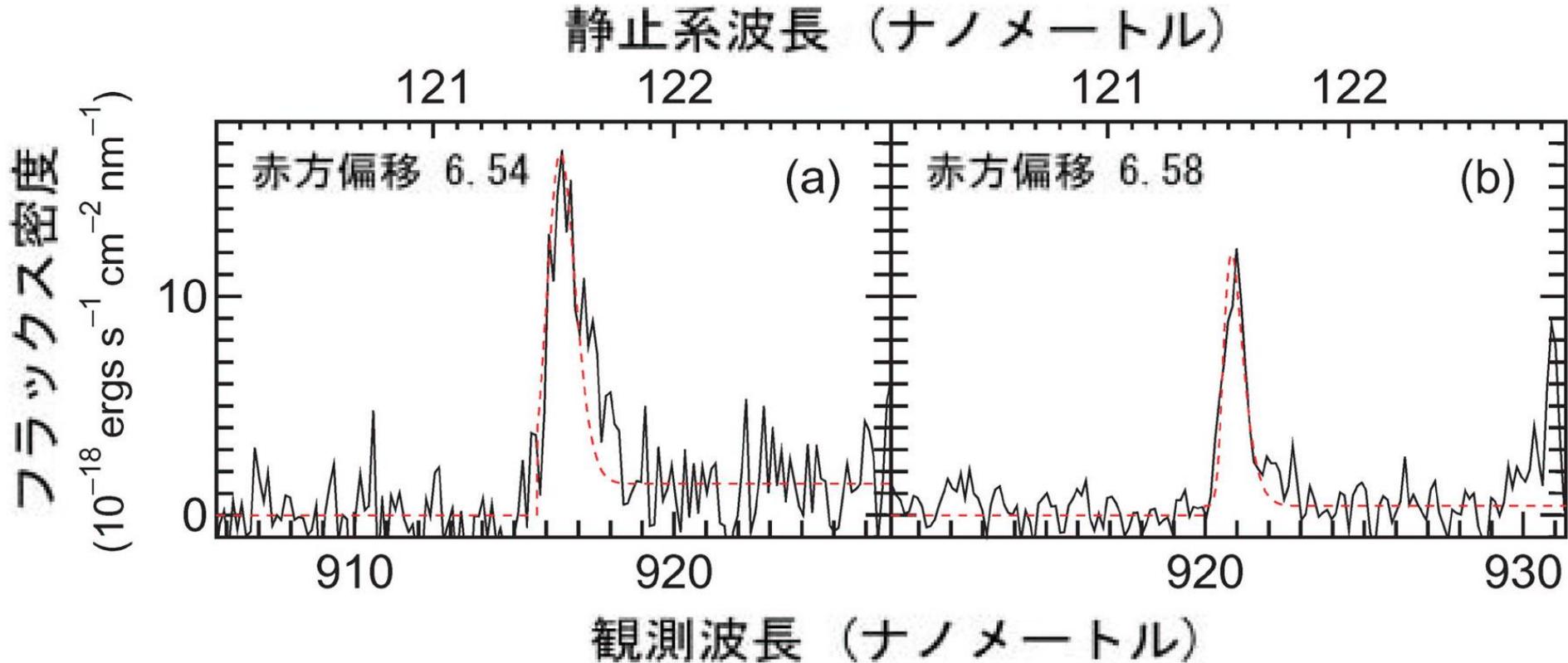
Suprime-Cam (i' , z' , 921 nm)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

March 20, 2003

Copyright © 2003 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

宇宙の膨張で赤方偏移

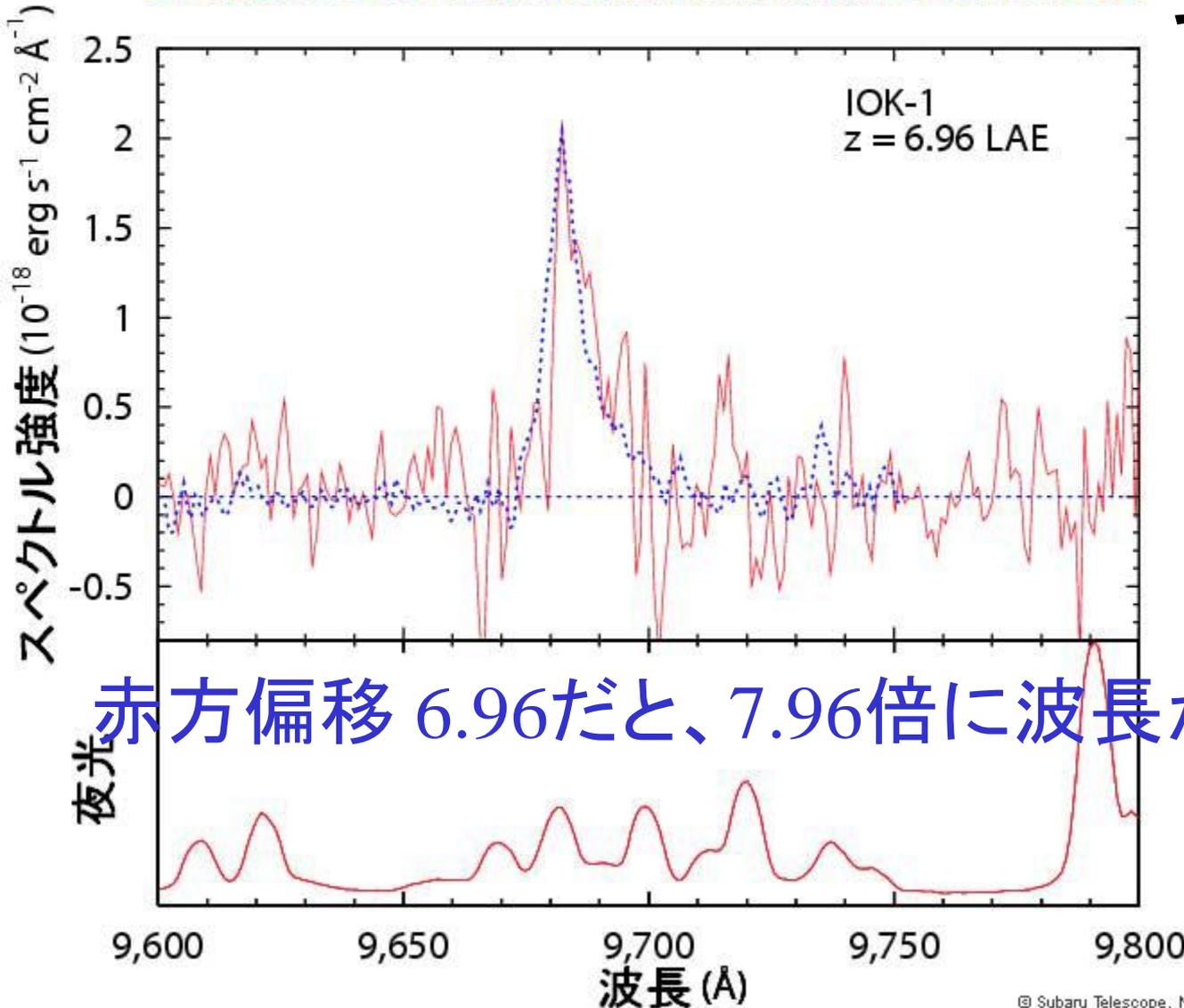
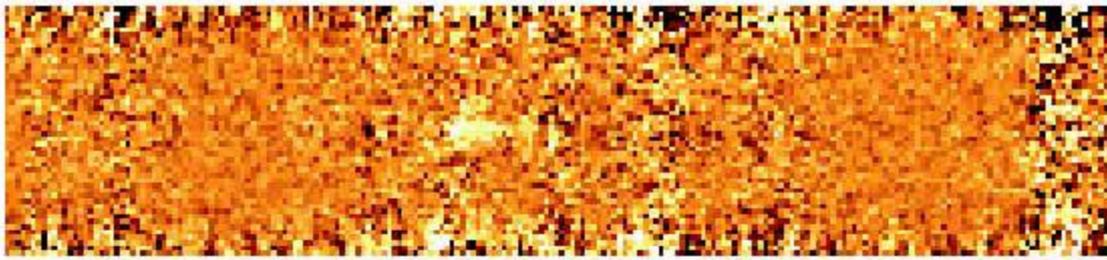


赤方偏移 6.54だと、7.54倍に波長がのびている
赤方偏移 6.58だと、7.58倍に波長がのびている

宇宙の膨張 で赤方偏移

現在見つかった
いる、最遠方の
銀河IOK-1

宇宙の膨張 で赤方偏移



赤方偏移 6.96だと、7.96倍に波長がのびている

宇宙の膨張で赤方偏移

表 1: 最も遠い銀河ベストテン (2006 年 9 月 14 日)

順位	天体名	座標	赤方偏移	距離 #	論文	公表日
1	IOK-1	J132359.8+272456	6.964	128.826	家ほか	2006 年 9 月 14 日
2	SDF ID1004	J132522.3+273520	6.597	128.250	谷口ほか	2005 年 2 月 25 日
3	SDF ID1018	J132520.4+273459	6.596	128.248	柏川ほか	2006 年 4 月 5 日
4	SDF ID1030	J132357.1+272448	6.589	128.238	柏川ほか	2006 年 4 月 5 日
5	SDF ID1007	J132432.5+271647	6.580	128.222	谷口ほか	2005 年 2 月 25 日
6	SDF ID1008	J132518.8+273043	6.578	128.219	谷口ほか	2005 年 2 月 25 日
6	SDF ID1001	J132418.3+271455	6.578	128.219	小平ほか	2003 年 4 月 25 日
8*	HCM-6A	J023954.7-013332	6.560	128.189	Hu ほか	2002 年 4 月 1 日
9	SDF ID1059	J132432.9+273124	6.557	128.184	柏川ほか	2006 年 4 月 5 日
10	SDF ID1003	J132408.3+271543	6.554	128.178	谷口ほか	2005 年 2 月 25 日

距離は宇宙年齢を 136.6 億歳とするモデルによる値。単位は億光年

* この銀河のみケック望遠鏡で発見されたが、他はすべてすばる望遠鏡による発見。

赤方偏移の大きい銀河

赤方偏移 $z=3$ (宇宙年齢22億年頃)の 銀河

3 ~ 5 mクラスの望遠鏡で撮像して
探査されてきた



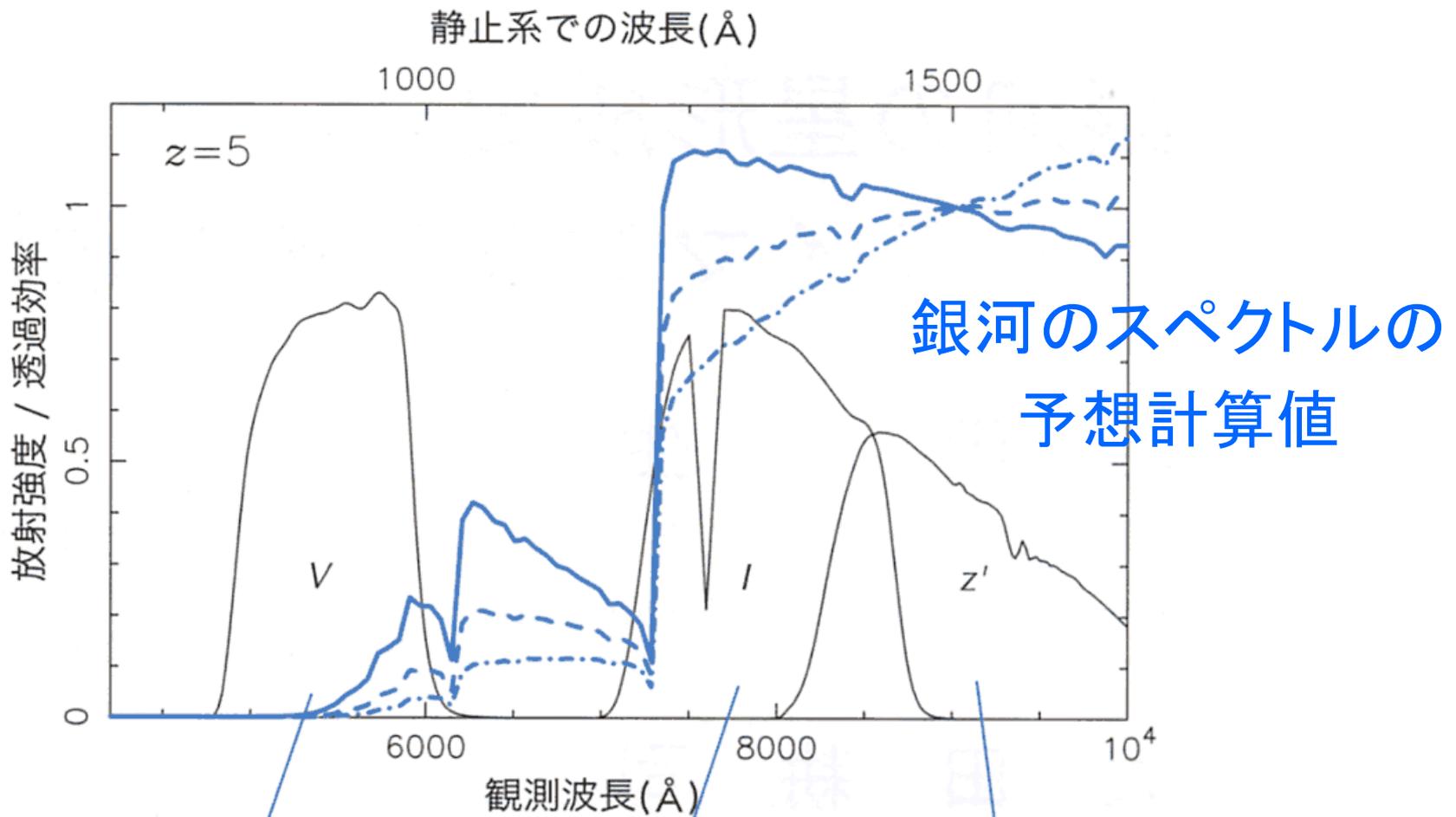
銀河間にある水素原子に吸収される



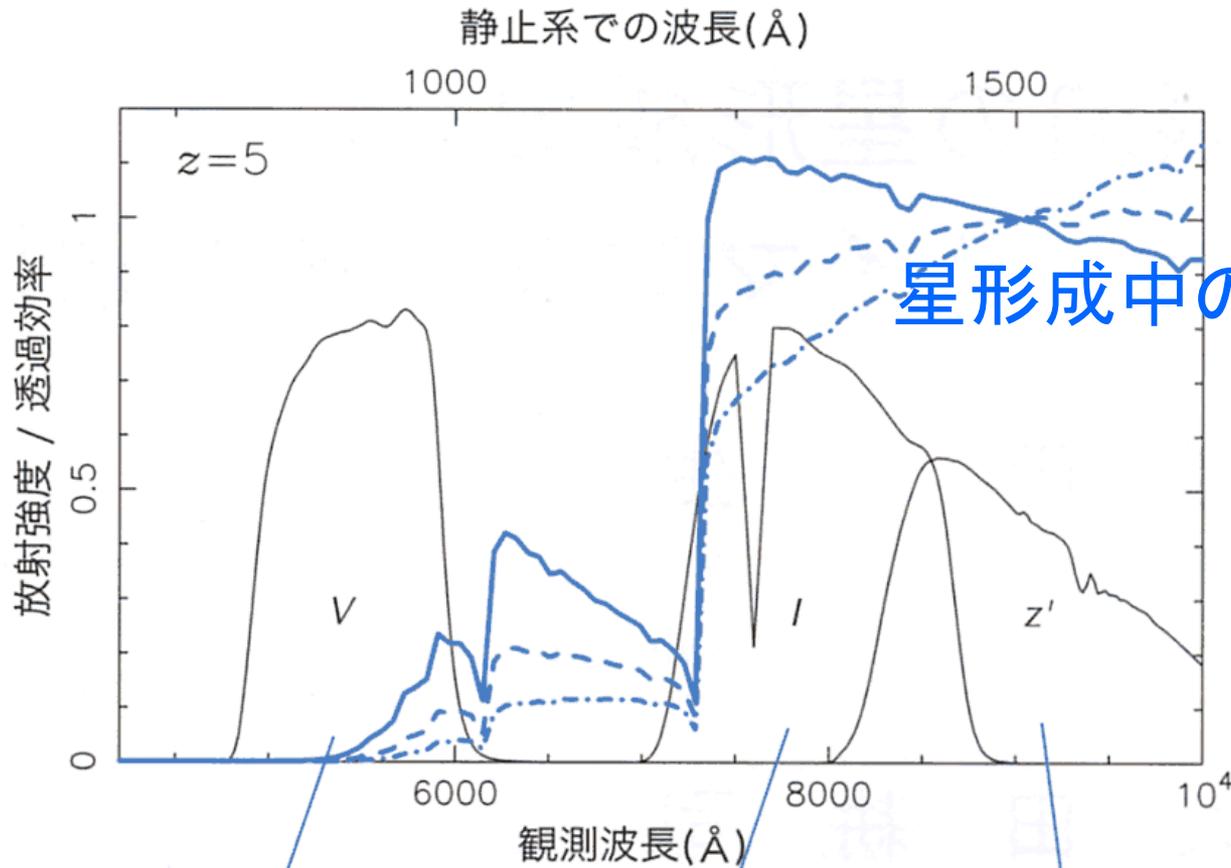
ライマン連続波成分がガクッと減る
「ライマンブレイク銀河」

活発に星形成(10^2 太陽/年)する小型の銀河

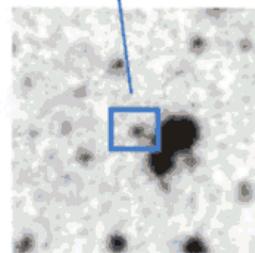
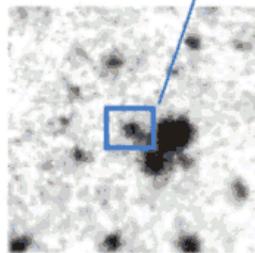
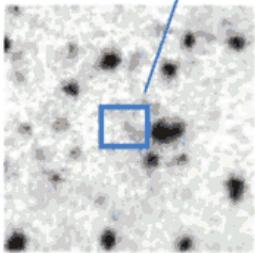
赤方偏移 $z=5$ (宇宙年齢12億年頃)の ライマンブレイク銀河



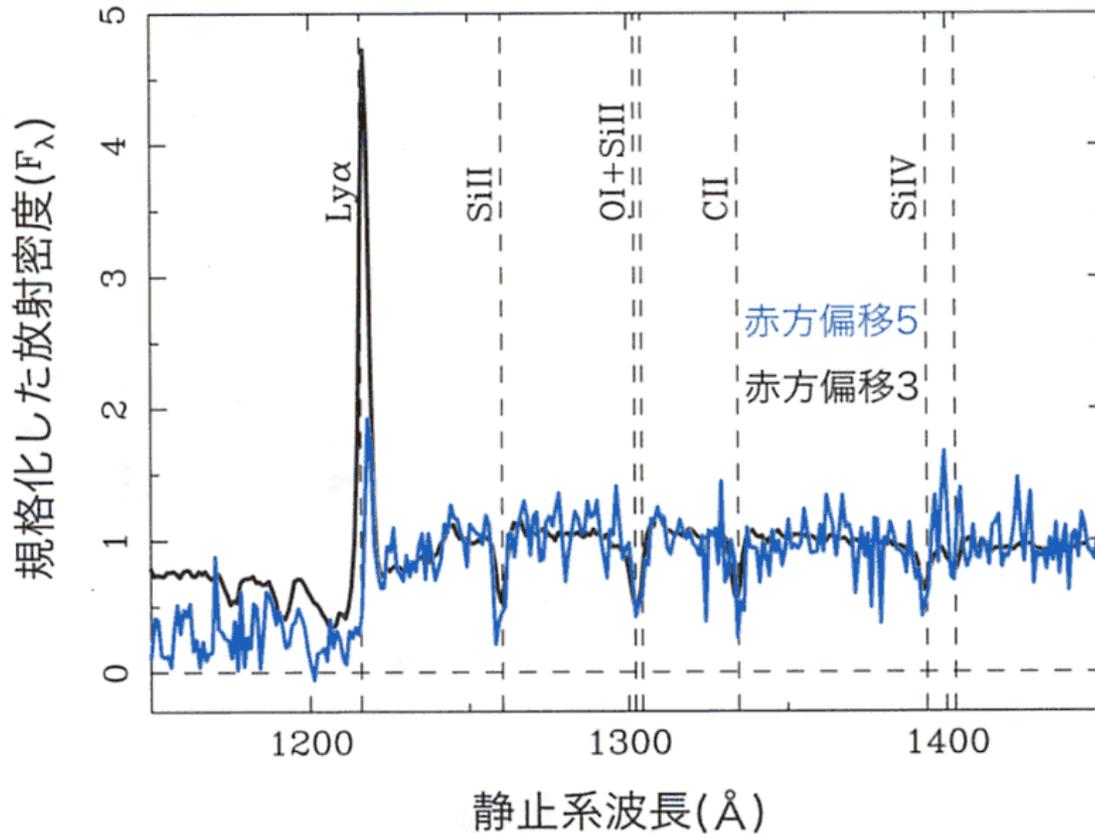
赤方偏移 $z=5$ (宇宙年齢12億年頃)の ライマンブレイク銀河



星形成中の銀河のスペクトル



赤方偏移 $z=5$ (宇宙年齢12億年頃)の ライマンブレイク銀河



● Ly α 輝線が弱い
のはダストが多い
から？

● 星間ガスの金属
すでに多い？

図 6 LBG の紫外線スペクトル. 赤方偏移 3 の LBG (黒線) は Shapley ら²⁸⁾による 800 個あまりの LBG のスペクトルを合成したもの. 赤方偏移 5 の LBG (青線) は我々が同定した 7 個の LBG のスペクトルを合成したもの.

赤外線天文学 —可視光以外で宇宙を見る—

本日の講演 イン트로ダクション

1609年、ガリレオの望遠鏡 解像力、集光力

1800年にハーシェルが赤外線を発見

20世紀後半の天文学の技術革新

本日の講演の主要部

赤外線の特徴

- 1 低温の物体からも熱放射
- 2 分子の振動などとして放射
- 3 宇宙膨張で赤方偏移
- 4 宇宙の塵に吸収・散乱されず、見通せる
- 5 大気のゆらぎを補正して、高解像度



Gustav Mie
(1868-1957)

電磁波の散乱

星間空間の微粒子によって
波長の短い光ほど減光を受ける

赤外線観測！

●ポイント4

吸収・散乱されにくい

近赤外線では、可視光の1/10しか吸収・散乱されない。

え？「10倍の差」なんて何万倍、何億倍の宇宙の話にしては規模が小さい？

曾呂利新左衛門と秀吉の話：

褒賞の米粒を、2倍、2倍と続けていけば30日でも10億倍にもなる。

可視光(波長 $0.5\mu\text{m}$)の吸収・散乱が1/2、1/2と10回繰り返されたとする。

2を10回かけると1024になるので、1/1024に弱まってしまう。

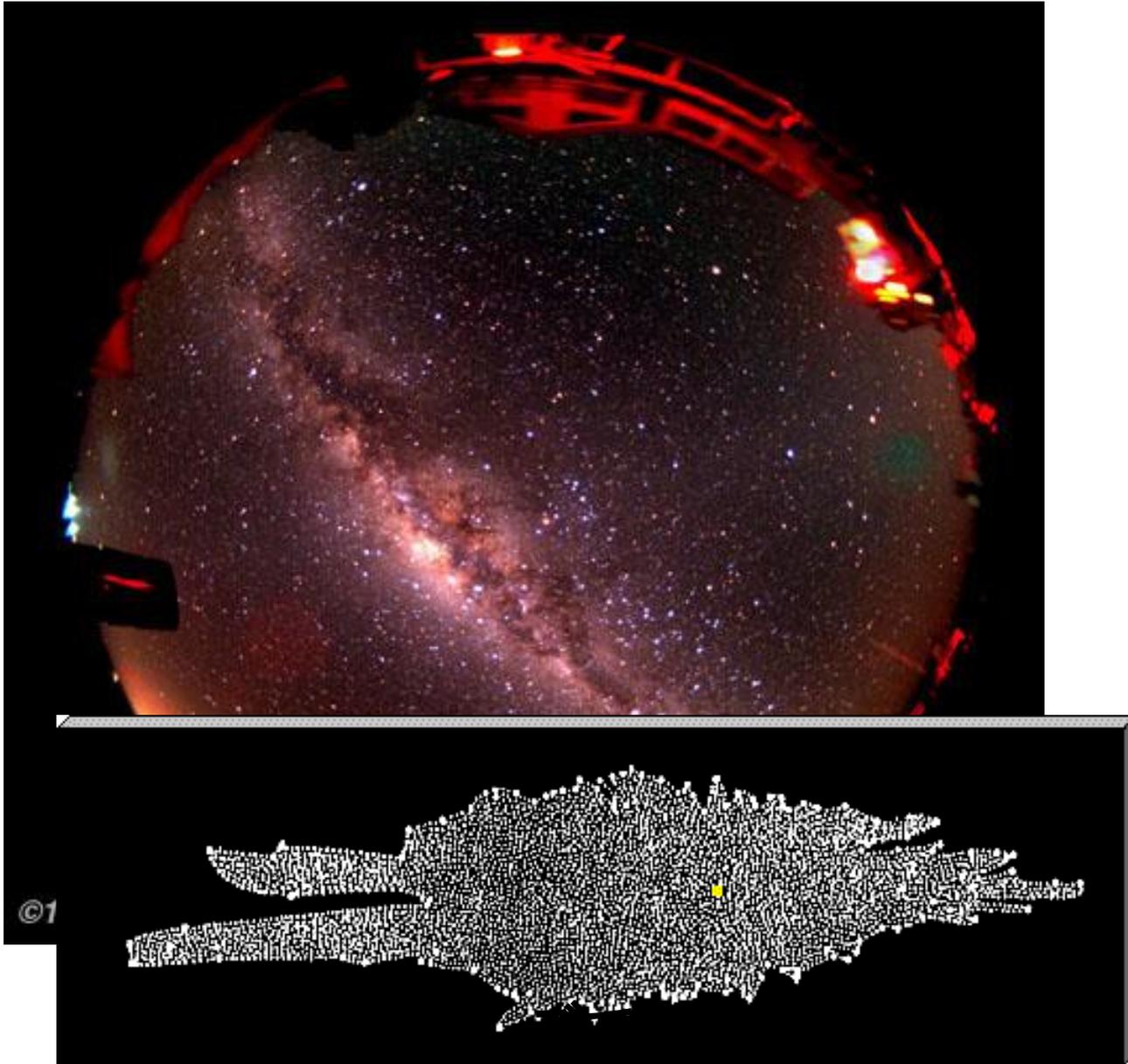
それが、赤外線(波長 $2.2\mu\text{m}$)では1回だけということで、1/2に弱まるだけ。

銀河系の中心方向：

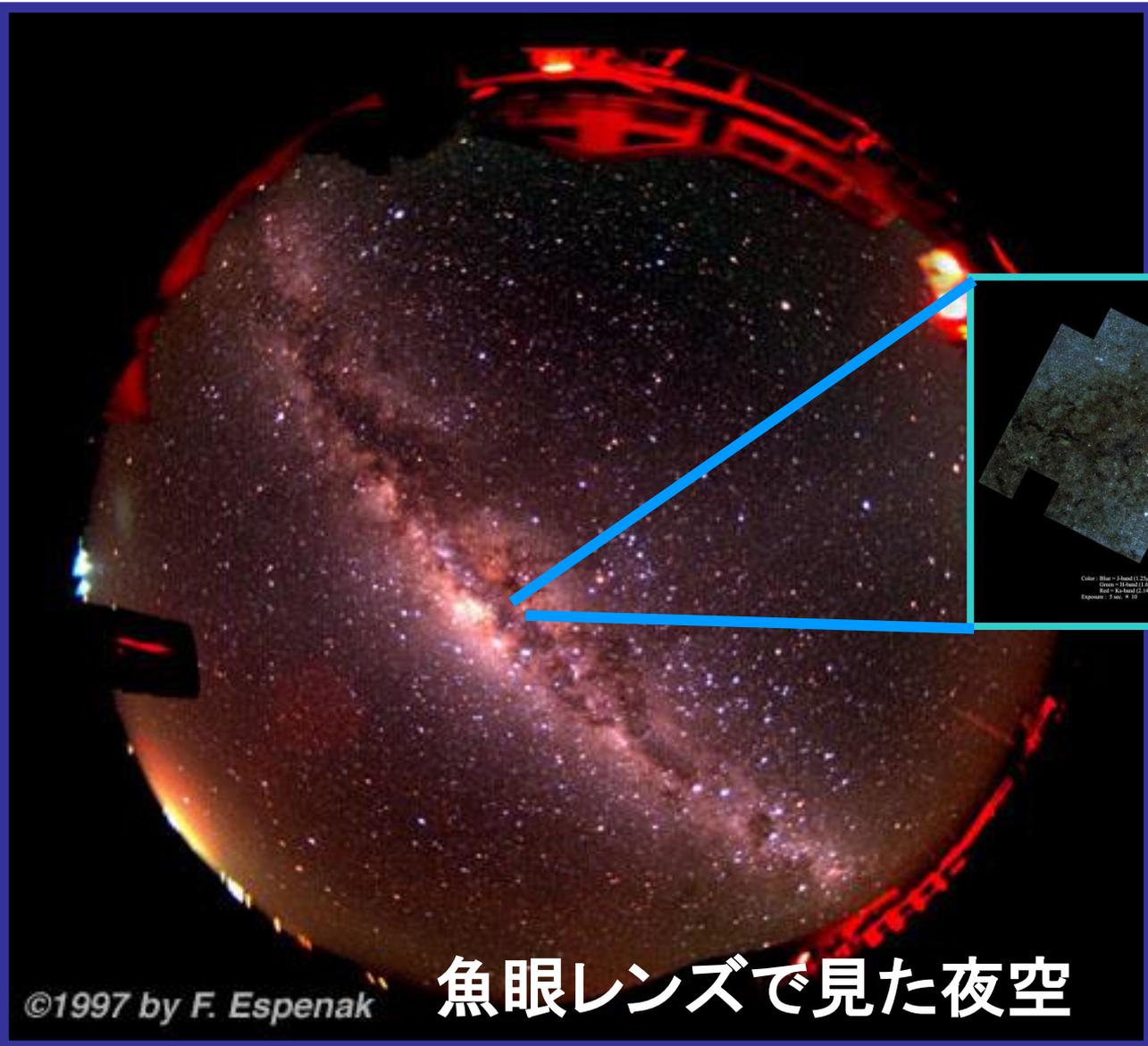
可視光で見ると、1/1024を4回ほど繰り返した量、つまり1兆分の1になっている。

赤外線では1/2を4回繰り返した量、つまり16分の1になるだけ。

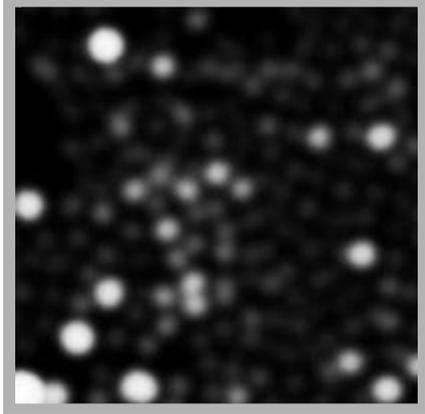
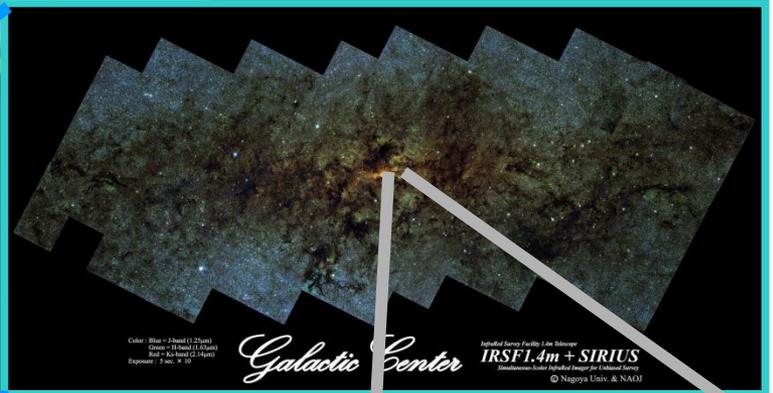
私達の銀河系(天の川銀河)



銀河系の中心部を見通したい



魚眼レンズで見た夜空

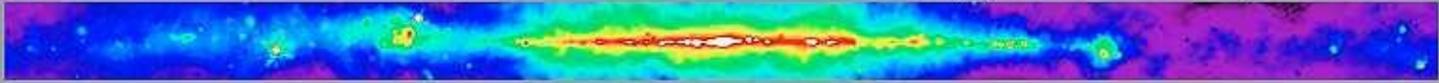


さまざまな波長で見た天の川

Multiwavelength
Milky Way

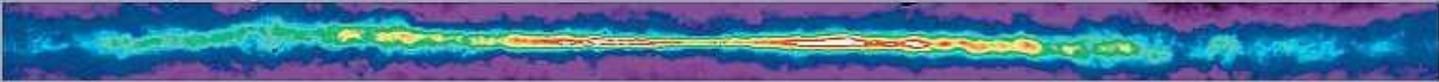
Radio Continuum

408 MHz Bonn, Jodrell Banks, & Parkes



Atomic Hydrogen

21 cm Leiden-Dwingeloo, Maryland-Parkes



Radio Continuum

2.4-2.7 GHz Bonn & Parkes



Molecular Hydrogen

115 GHz Columbia-GISS



Infrared

12, 60, 100 μm IRAS



Near Infrared

1.25, 2.2, 3.5 μm COBE/DIRBE



Optical

Laustsen et al. Photomosaic



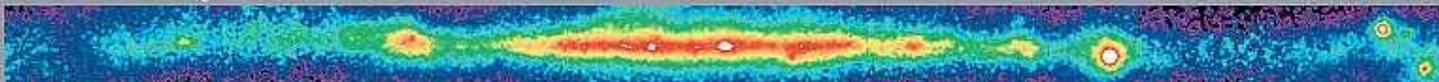
X-Ray

0.25, 0.75, 1.5 keV ROSAT/PSPC

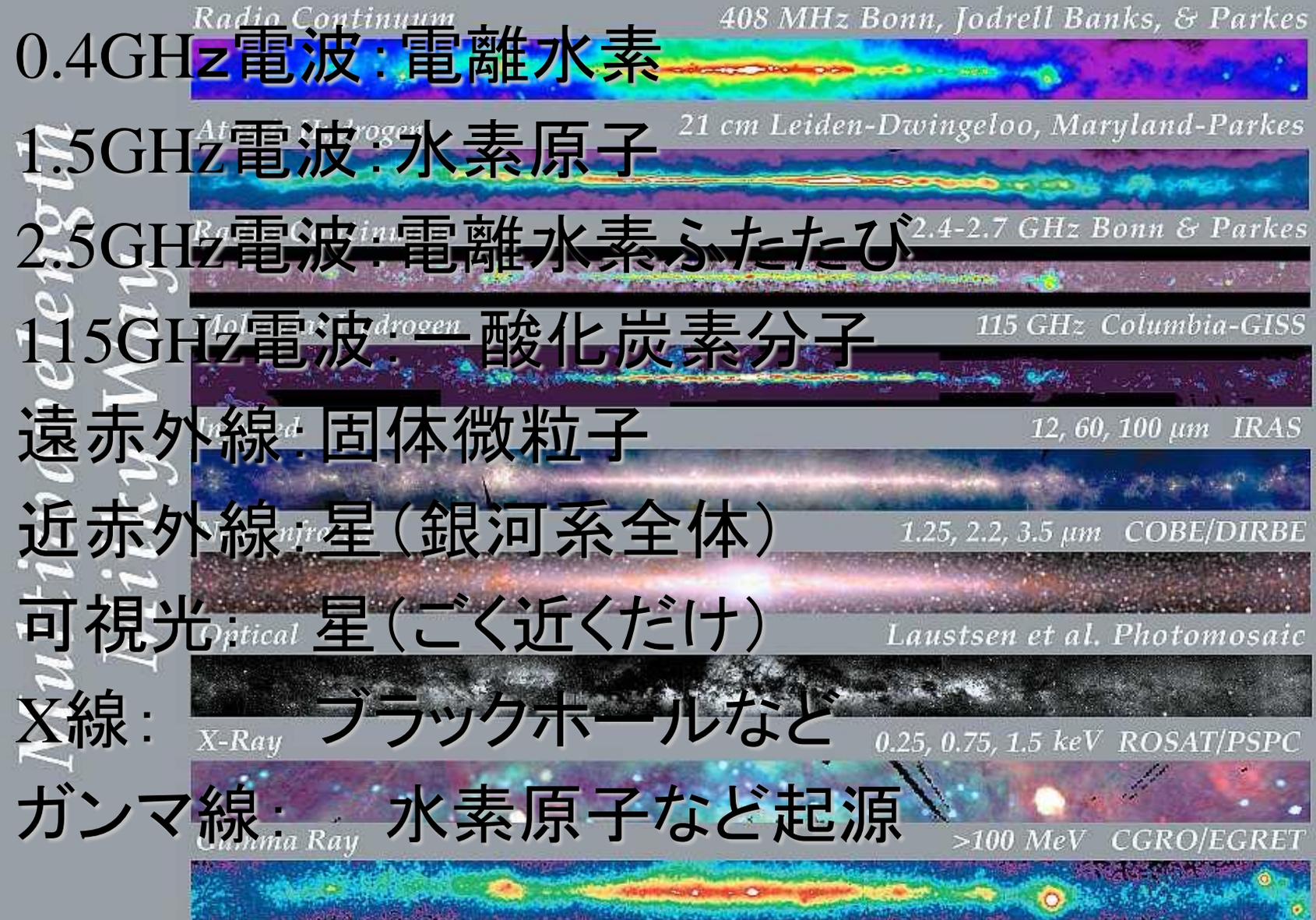


Gamma Ray

>100 MeV CGRO/EGRET



さまざまな波長で見た天の川



Multifrequency Milky Way

南アフリカ天文台
に設置した
赤外線望遠鏡
IRSF

2005 Vol.98 No.3

昭和24年5月18日 第3種郵便物認可 ISSN 0374-2466



IRSF/SIRIUS 特集 (その1)

名古屋大学・国立天文台・京都大学

筑波大学物理学専攻宇宙理論研究室・宇宙観測研究室

2005年天文月報
(日本天文学会誌)



タランチュラ星雲





IRSF 1.4m望遠鏡

南アフリカ天文台に設置

SIRIUSカメラ

(名大、国立天文台)

Blind pointing 3" rms

J=19, H=18, Ks=17mag

(10分積分にて)

8' x 8' 視野

2000.11.15.



IRSFと南天の星空



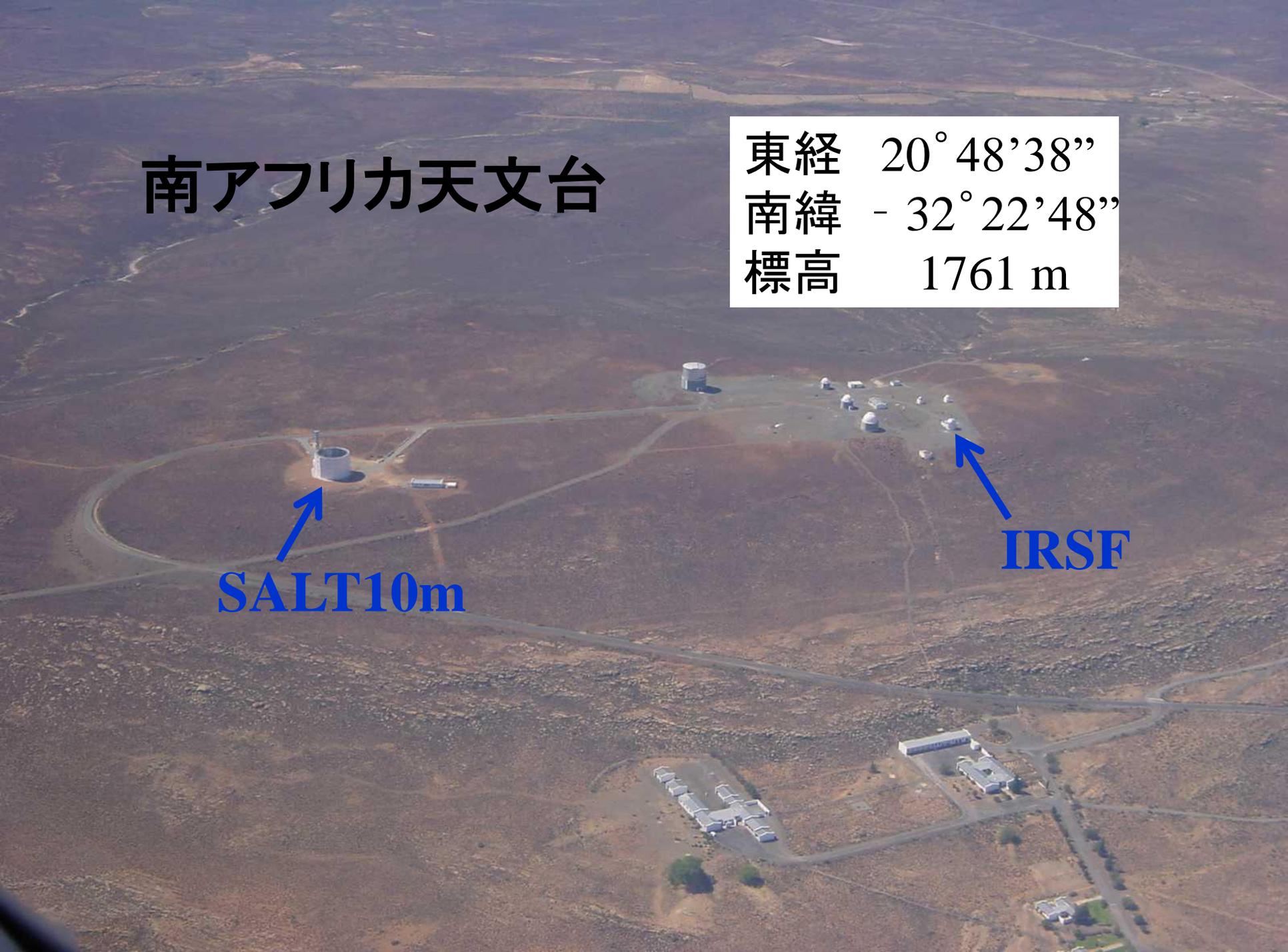
銀河面

南アフリカ天文台

東経 $20^{\circ}48'38''$
南緯 $-32^{\circ}22'48''$
標高 1761 m

SALT10m

IRSF





南アフリカ
天文台

Sutherland
telescopes

370km

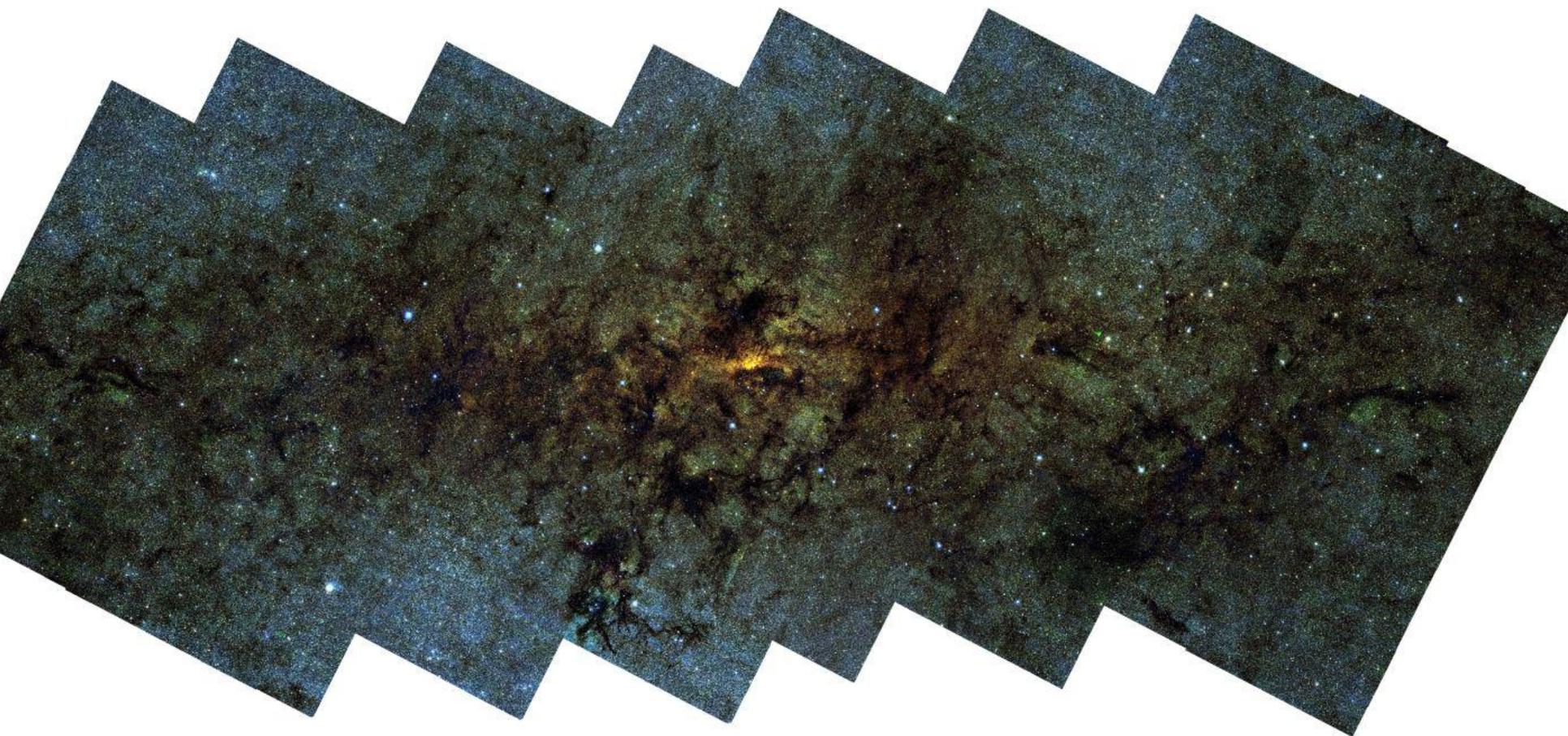
Cape Town

Province boundaries are subject to change under provisions of the South African Constitution.

* The KwaZulu/Natal provincial legislature has not

IRSF 1.2, 1.6, 2.2 μm 銀河系中心部サーベイ

5° (銀経) \times 2° (銀緯)



現代の天文学 全17巻 第2回配本「銀河 II」

「日本天文学会が総力を結集した100周年記念出版」日本評論社

か表わしていないが、中心核の活動や中心円盤の沸騰、ハローに向けてジェットを噴き出すさなどを想像できるだろう。また図を拡大コピーして、本文で学んだ様々な現象や構造を描き足してみるとおもしろいだろう。さらに各自で独自の銀河中心図を描いてみるのもよいだろう。

3.2 赤外線で見える銀河中心

3.2.1 赤外線とは

1966年8月、カリフォルニア工科大のグループは口径61cm望遠鏡をいて座に向け初めて銀河系の中心部から波長 $2.2\mu\text{m}$ の信号を捉えた。当時世界最大のパロマー5m望遠鏡を使っても、それより短い波長の可視光ではまったく検出できなかった銀河中心部の恒星からのエネルギー放射を、ようやく検出できたのだ。

赤外線は電磁波の一種で、その波長は可視光よりも長く電波よりも短い。波長 $1\mu\text{m}$ から $3\mu\text{m}$ を近赤外線、 $30\mu\text{m}$ までを中間赤外線、それ以上の波長を遠赤外線と分類することが多い。ごく普通の恒星はその放射ピークを近紫外線・可視光線から近赤外線の波長領域に持つ。ところが、銀河中心領域にある恒星からの可視光線は、星間物質によって減光を受けて、約1兆分の1(10^{-12})に弱められてしまう。我々が銀河系の円盤部にいるために、可視光が銀河中心から星間物質の中をずっと通過してくる際に、星間物質の中の星間塵(固体微粒子)によって散乱・吸収されるのである。

等級の定義から、 $-2.5 \log 10^{-12} = 30$ となり、30等の減光ということになる。減光は可視光線の付近では、波長が短いほど大きい。電磁波の散乱・吸収は星間塵の大きさと同程度の波長で最大となるため、星間空間には可視光の波長よりもやや小さい塵が多く分布しているとされる。赤外線になると減光をあまり受けなくなり、ある距離進んだときに受ける減光は波長 $2.2\mu\text{m}$ では波長 $0.55\mu\text{m}$ の約1/10にすぎない。したがって、星間塵によって等比級数的に減光が起こること、また等級の定義では対数をとることを考慮すると、波長 $2.2\mu\text{m}$ での減光は3等級程度となり、十分に観測できる。

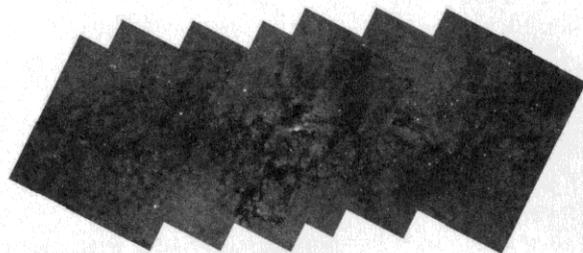


図 3.8 銀河中心の2度(銀緯)×5度(銀経)の近赤外画像。波長 1.25 、 1.6 、 $2.2\mu\text{m}$ の赤外線にて撮像した(Nishiyama 2004, 『天文月報』, 98, 240より転載)。

こうして、可視光線では検出できない銀河系の中心部が、近赤外線では恒星の大集団としてくわしく観測できる(図3.8)。特に1990年ごろからの赤外線検出器の進歩のおかげで、明るい恒星は一つひとつ観測できるようになった。

以下では、まず星と星間物質とおおまかに分けて、銀河中心付近で赤外線によって観測されるそれぞれの様子を見ていこう。

3.2.2 銀河中心の星々

近赤外線で観測したときに多数を占めるのは、赤色巨星である。巨大な半径を持ち表面温度が3000K程度で、ピークが近赤外線となるエネルギー放射を出している。赤色巨星にもさまざまな年齢のものが混じっているようであり、また、その他にも少数ではあるが若い高温の星も検出されている。恒星のスペクトル型は、通常なら可視光域で分類されるが、前述のように可視光ではまったく観測ができないため、波長 $1\sim 2.5\mu\text{m}$ での分光観測が重要になる。波長 $2.17\mu\text{m}$ の水素のブラケット γ (Br γ)線^{*4}や、 $2.29\mu\text{m}$ にあるCO分子の振動による吸収線、NaIやCaI^{*5}の吸収線等が星のスペクトル型決定によく使われる。

*4 水素原子の主量子数 n が変化して電磁波放射を出す、 $n=4$ に落ちてくるものをブラケット系列と呼んでいる。ブラケット γ は $n=7$ から4に変化するもの。

*5 ナトリウムとカルシウムの吸収線。天文学ではローマ数字のIをつける。

赤外線で見える銀河中心

HR図

(ヒッパルコス カタログ等から)

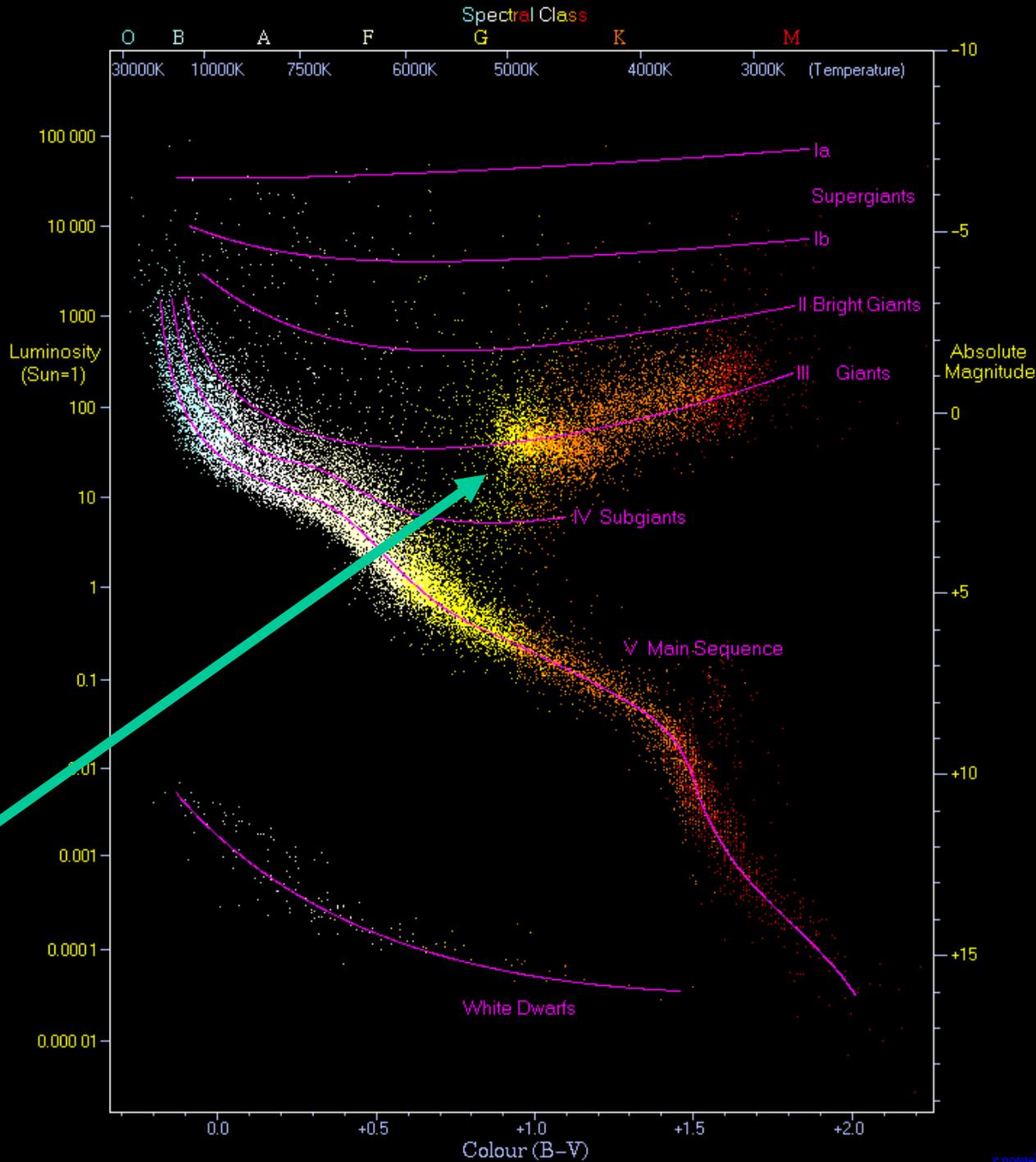
縦軸：真の明るさ

横軸：青い星から赤い星へ

一面には分布しない

主系列星 や
レッドクランプ星

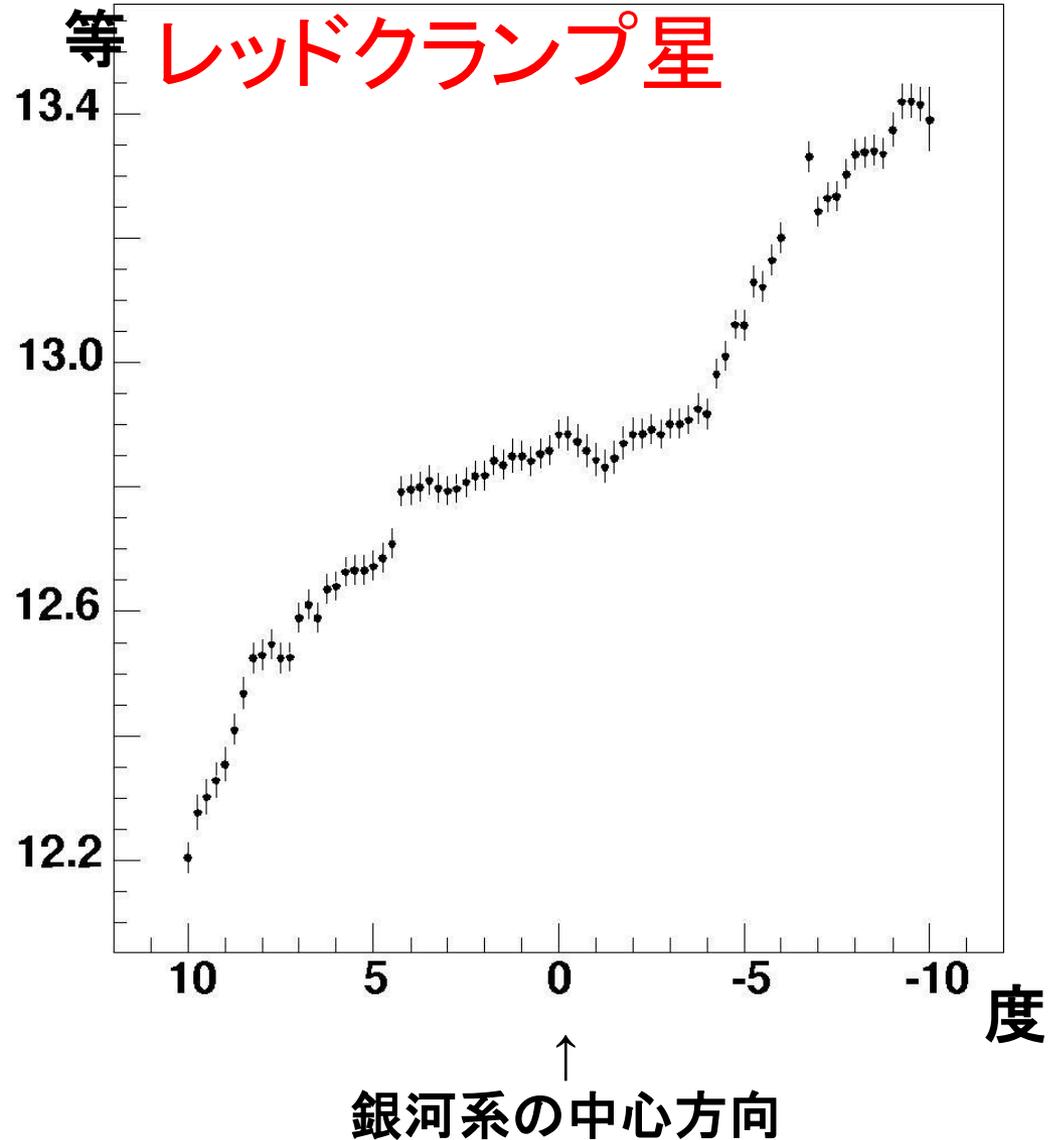
<http://www.anzwers.org/free/universe/hr.html>



HR図での「星のかたまり」の光度

遠い

暗い

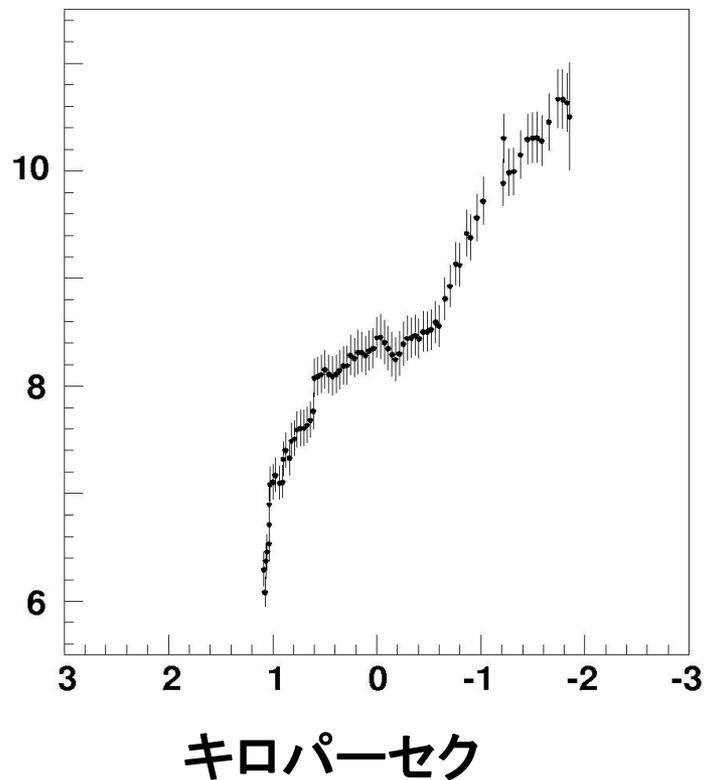


近い

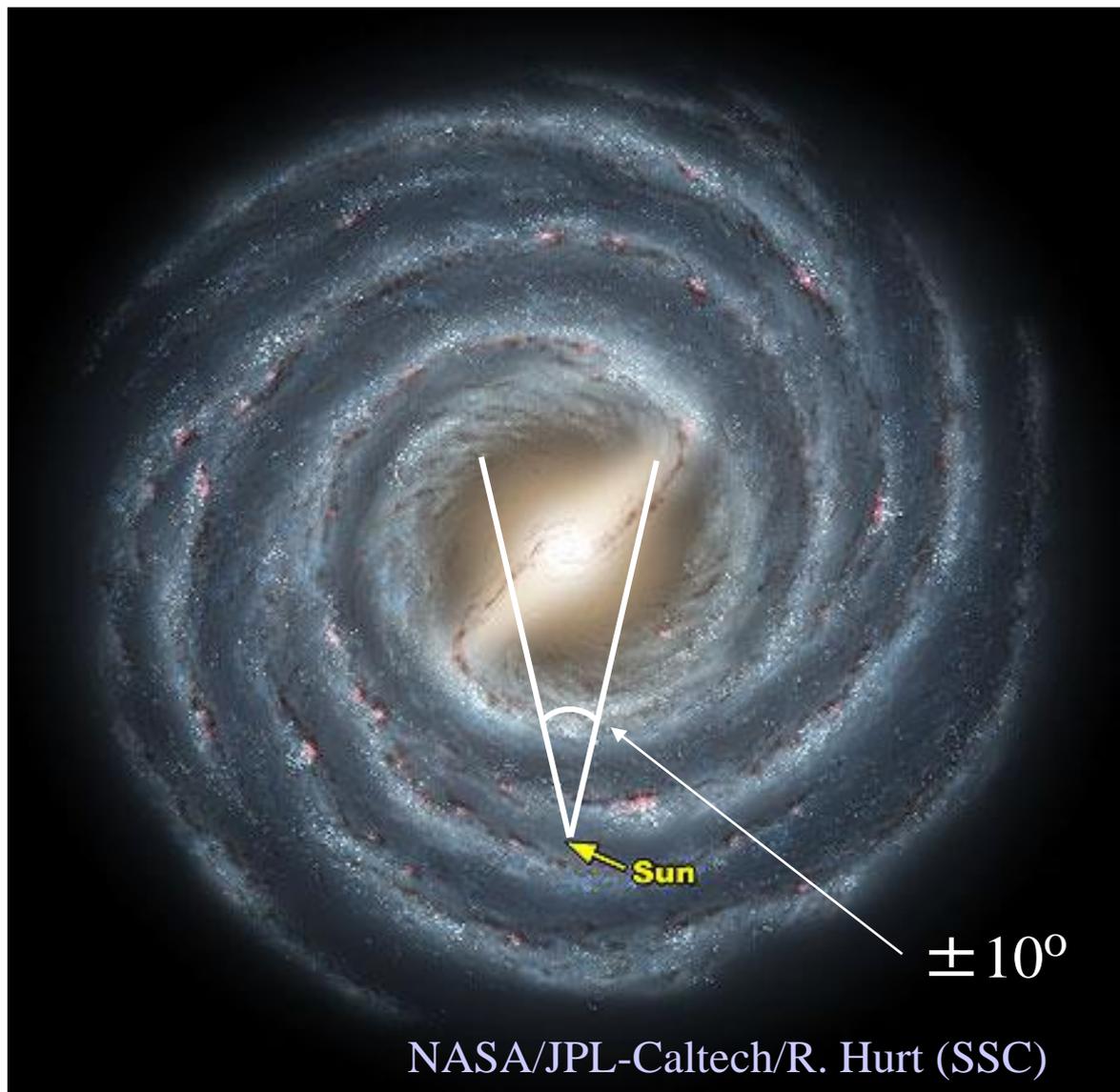
明るい

IRSF/SIRIUS 銀河系中心部サーベイ

銀河系を上から見た想像図

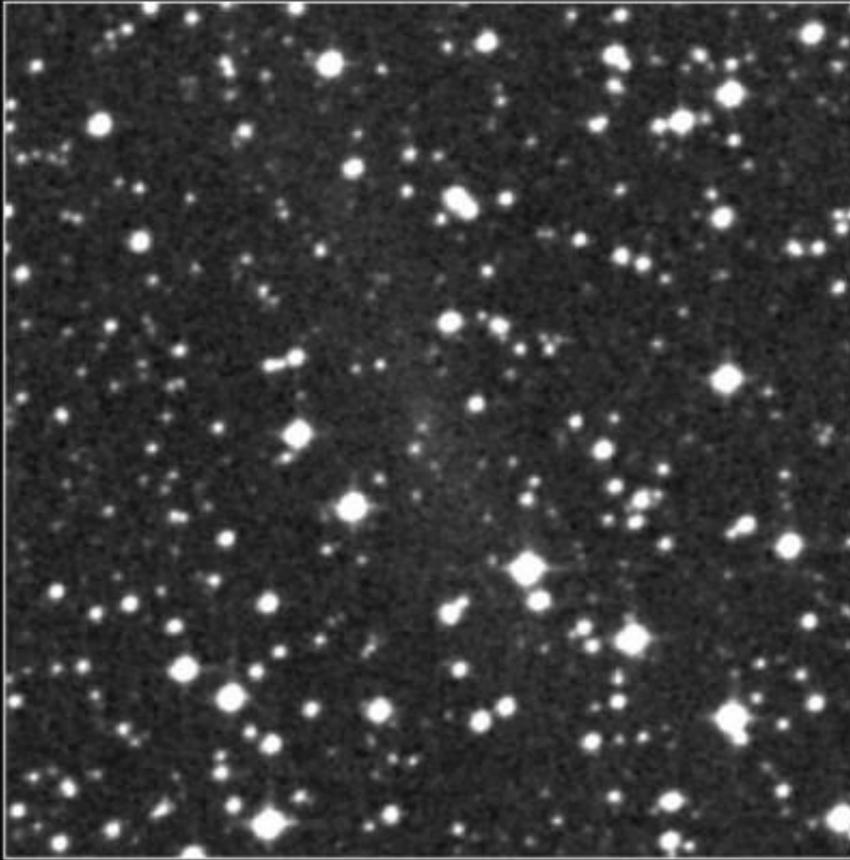


(8キロパーセクは2万6千光年)



NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC)

われわれの銀河系の背後にある
宇宙の構造を、赤外線で探る



Digitized Sky Survey (Red)

可視光

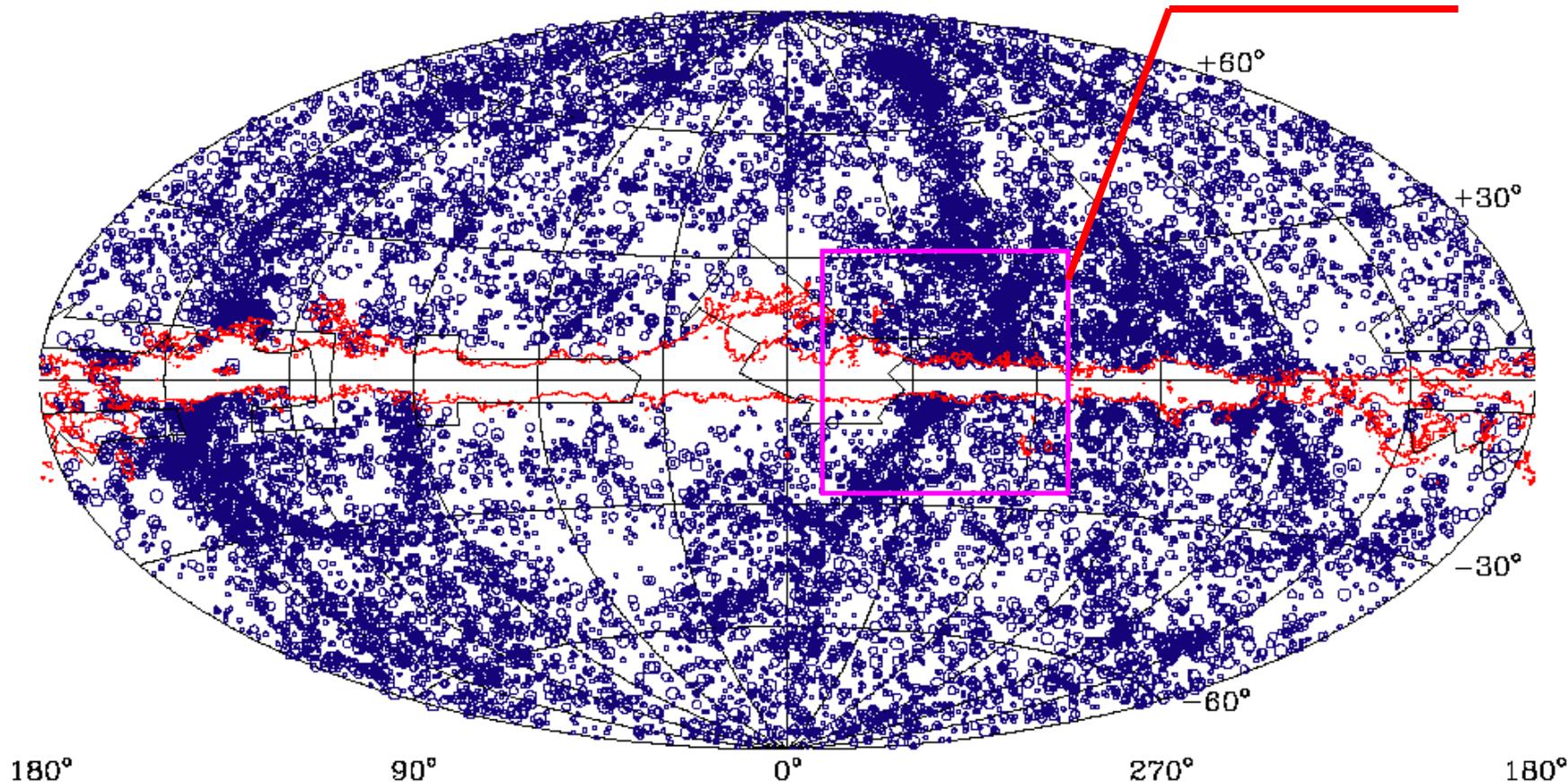


IRSF+SIRIUS

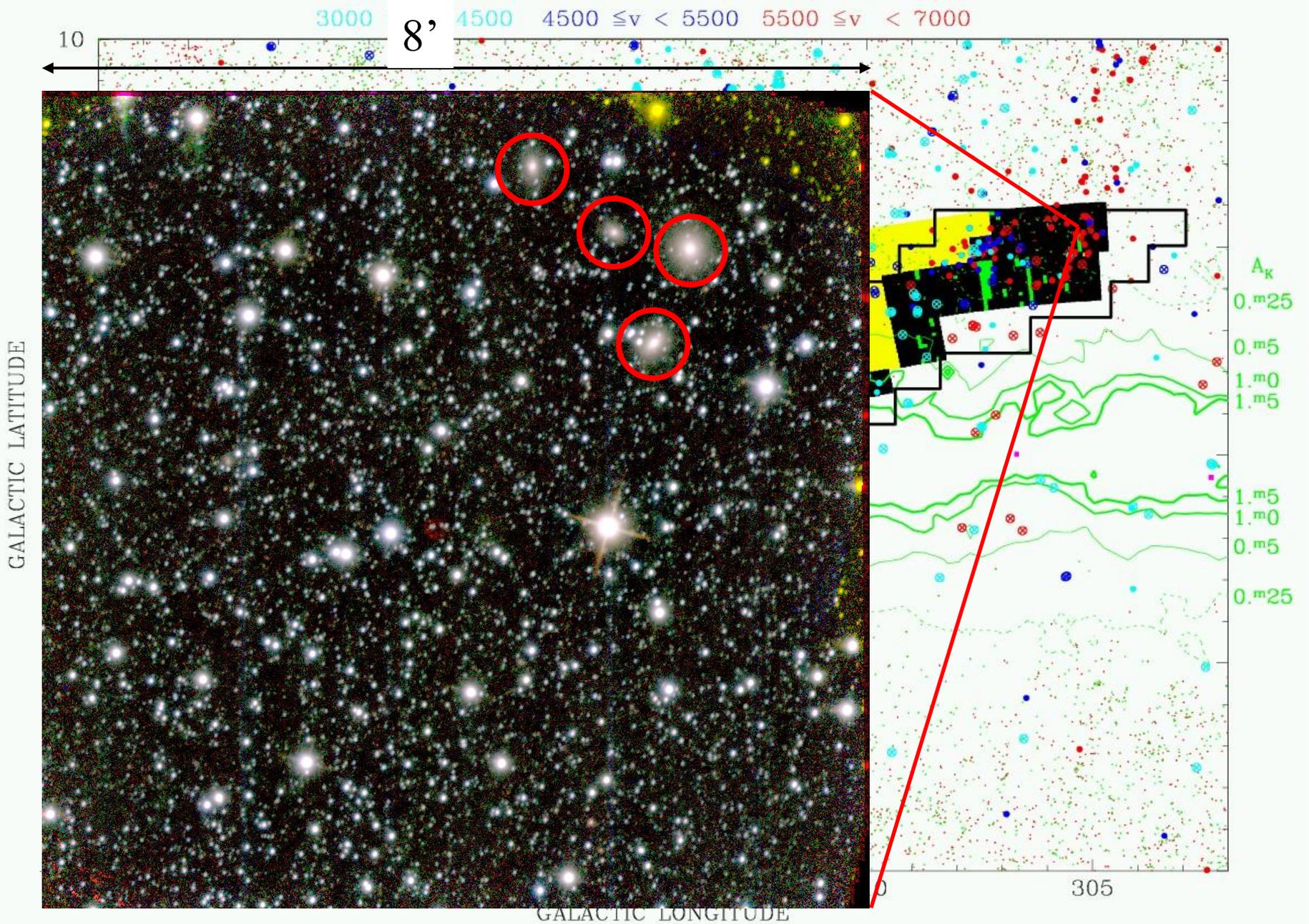
近赤外線

銀河の全天分布と グレートアトラクター

GA領域

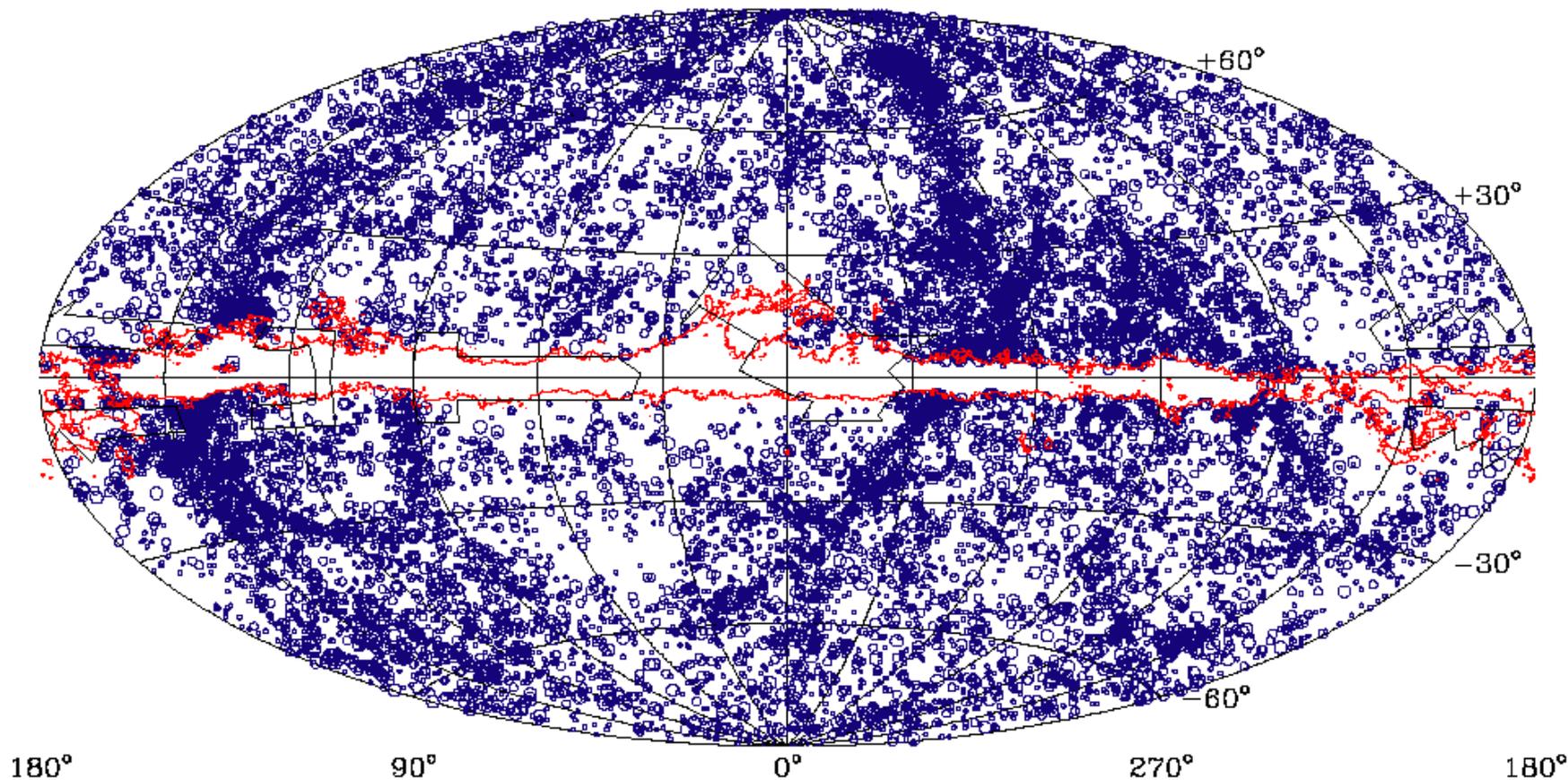


大きな銀河の分布 (直径1.3'以上; Kraan-Korteweg & Juraszek 2000)



太陽の 10^{14} 倍の質量の銀河団

グレートアトラクター



「それでも我々は動いている」

若松 謙一氏 (岐阜大学名誉教授) 6月21日(日)NPO花山 講演会

http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/hosizora/kouenkai/kouenkai_4.html

赤外線天文学 —可視光以外で宇宙を見る—

本日の講演 イン트로ダクション

1609年、ガリレオの望遠鏡 解像力、集光力

1800年にハーシェルが赤外線を発見

20世紀後半の天文学の技術革新

本日の講演の主要部

赤外線の特徴

- 1 低温の物体からも熱放射
- 2 分子の振動などとして放射
- 3 宇宙膨張で赤方偏移
- 4 宇宙の塵に吸収・散乱されず、見通せる
- 5 大気のゆらぎを補正して、高解像度

●ポイント5

大気ゆらぎを補正して、くっきり

大気のゆらぎは、光や赤外線の水の「波面」を、平面波からずらせてしまう。

原因は密度のゆらぎ

(温度のゆらぎと言ひ換えても良い — — — ボイル・シャルルの法則！)。

温度のゆらぎ → 密度のゆらぎ → 屈折率のゆらぎ

ただし、屈折率はそもそも1.0003 程度。

$v n = c$ の関係で、屈折率が大い場所では光の速さが遅くなる。

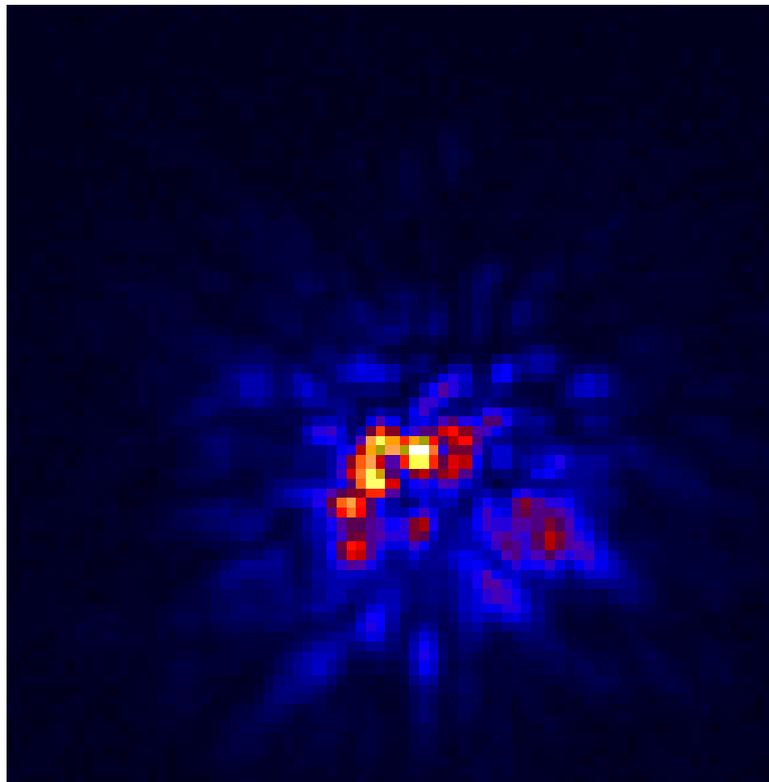
その部分を通った光は遅れる。波面が平面からずれる。

平面からずれると、やって来る向きが違ふように見える。

1波長の1/3ぐらいいまでしかずれていないならOK。したがって、波長が長い方がトク。(可視光から近赤外にかけて、屈折率はほぼ一定。)

Kolmogorovの乱流理論によると、波長の1.2乗でトクになっていく。

大気による「ゆらぎ」



銀河系の中心付近の赤色超巨星IRS7

(本当は点像のはず)

補償光学(Adaptive Optics)

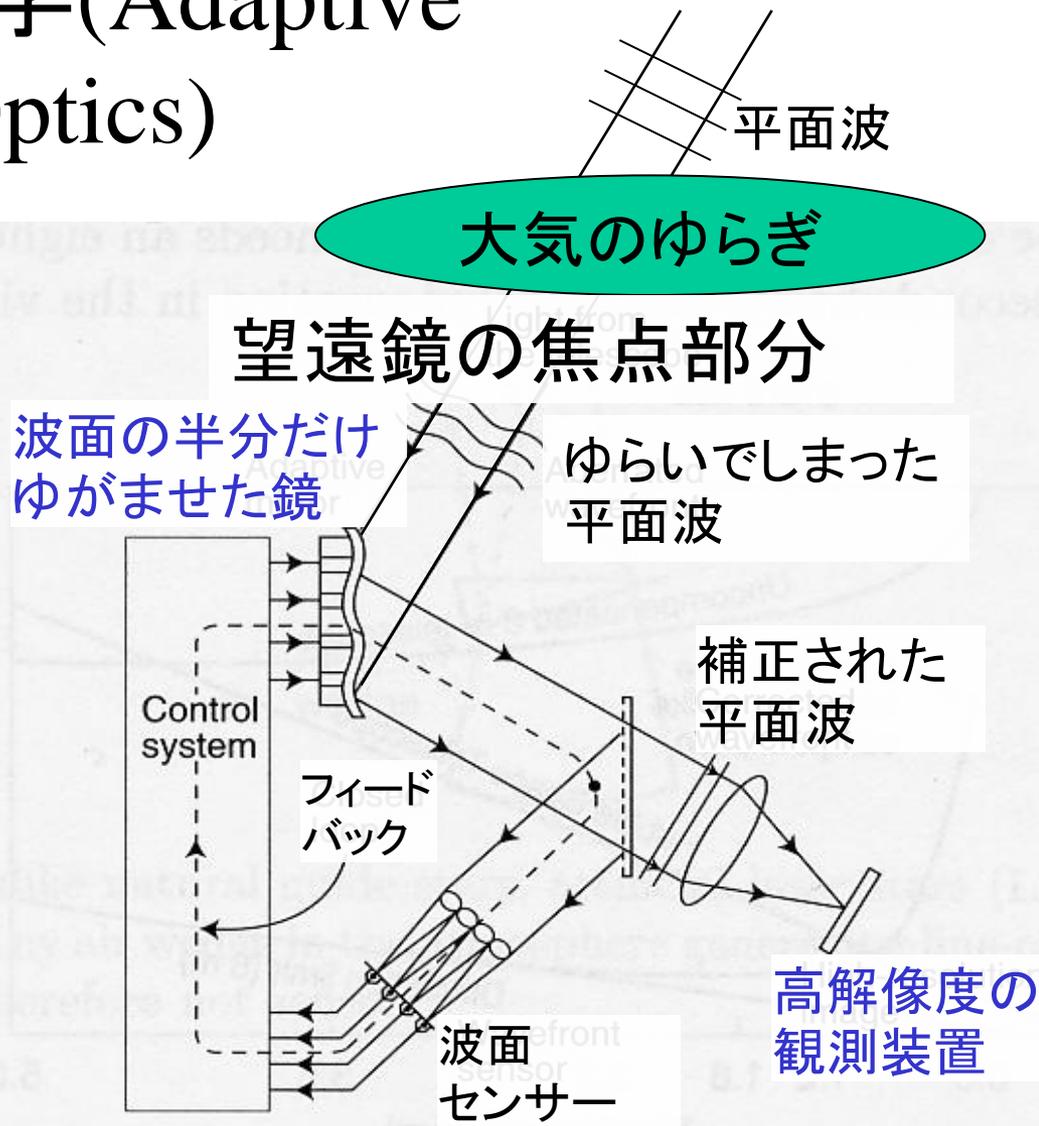


Fig. 8.29. Basic principle of adaptive correction of atmospheric seeing. The wavefront error is measured with a wavefront sensor and corrected with a deformable mirror.

波面補正の原理

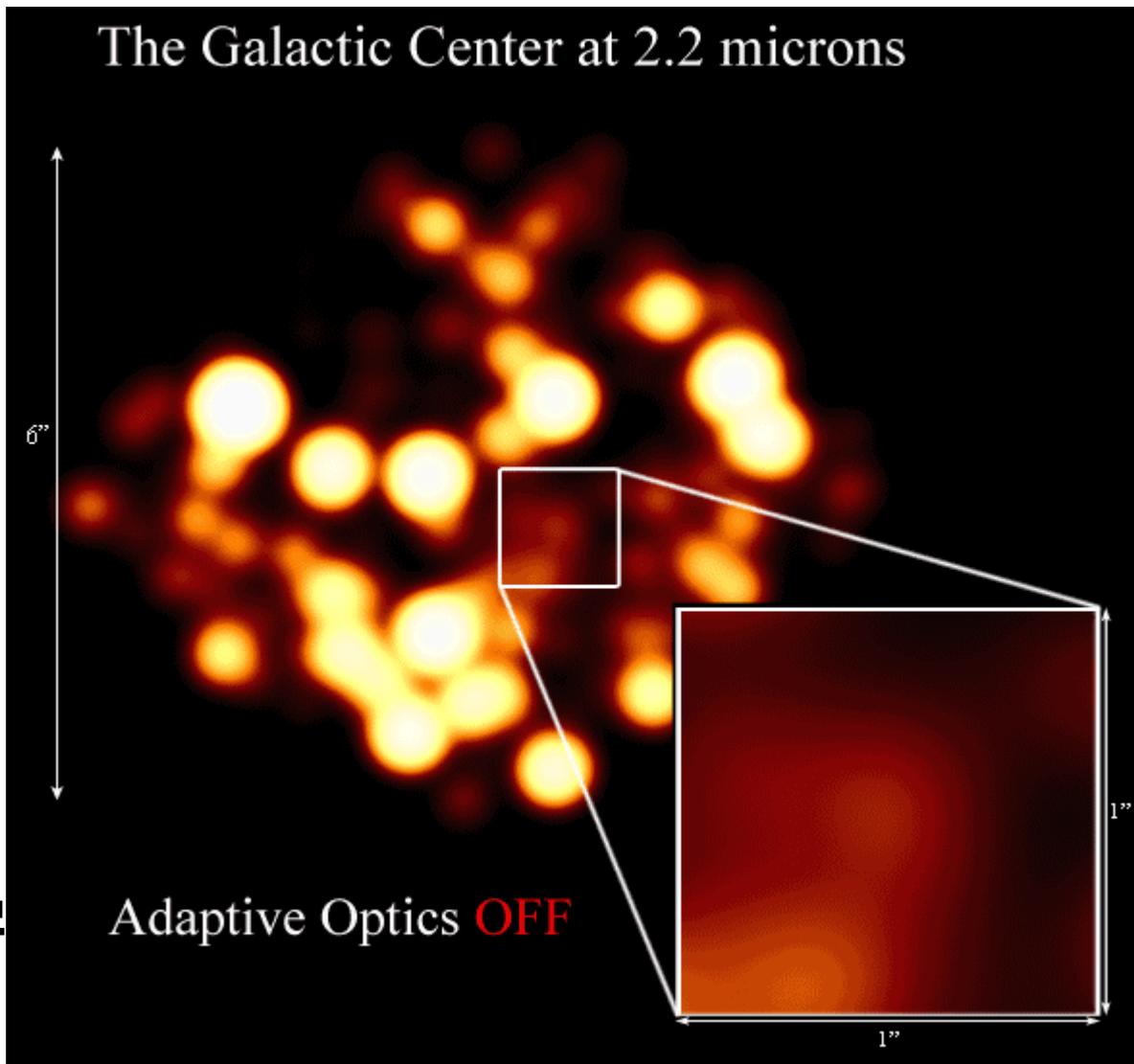
補償光学のパラメータ

Wilson,R.N. "Reflecting Telescope Optics II" 2001 Springer による

Fried parameter r_0 が、波長が長くなるにつれて大きくなることに注意。

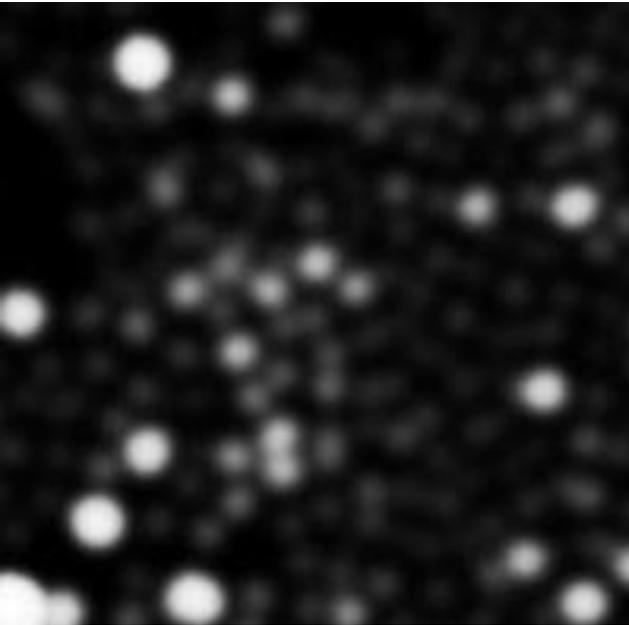
$\lambda(\mu\text{m})$	0.5	2.2	5.0	10.0	
r_0 (cm)	10	59	158	364	
N	6400	183	25	5	8m望遠鏡に 対してのN
$\tau(\text{ms})$	6	36	95	218	
$\theta(\text{秒角})$	1.8	11	29	66	

銀河系の中心の赤外線像

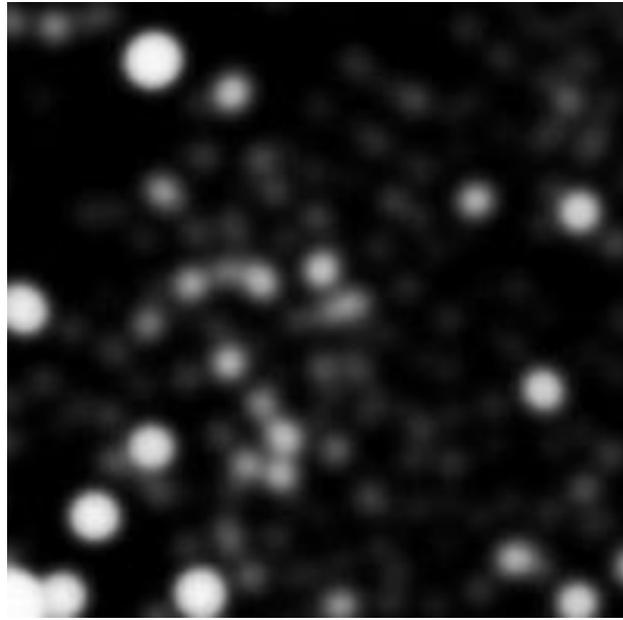


銀河系の中心の赤外線像

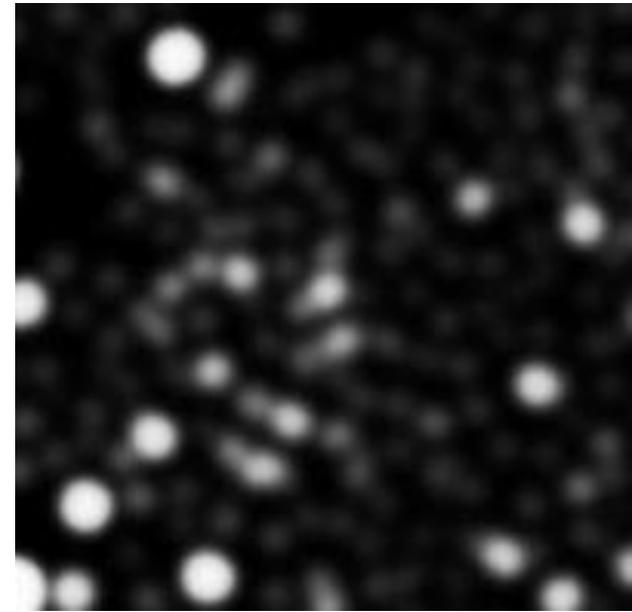
3秒角
視野



1994



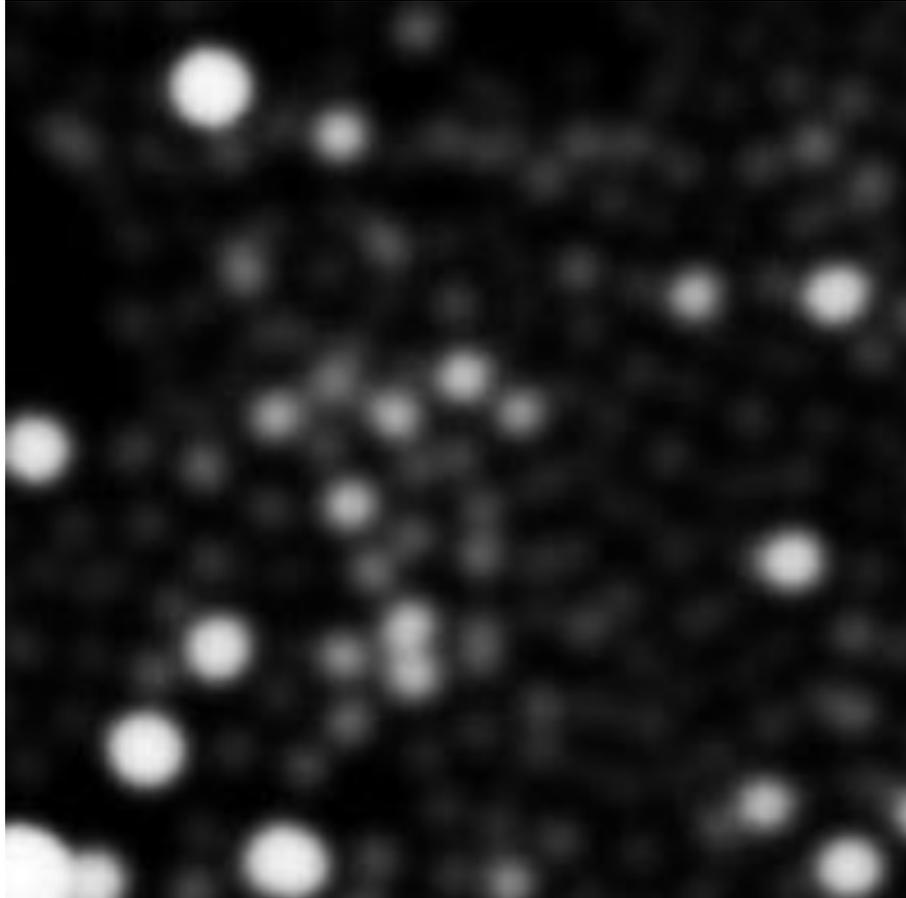
1996



2000

銀河系の中心の赤外線像

3秒角
視野

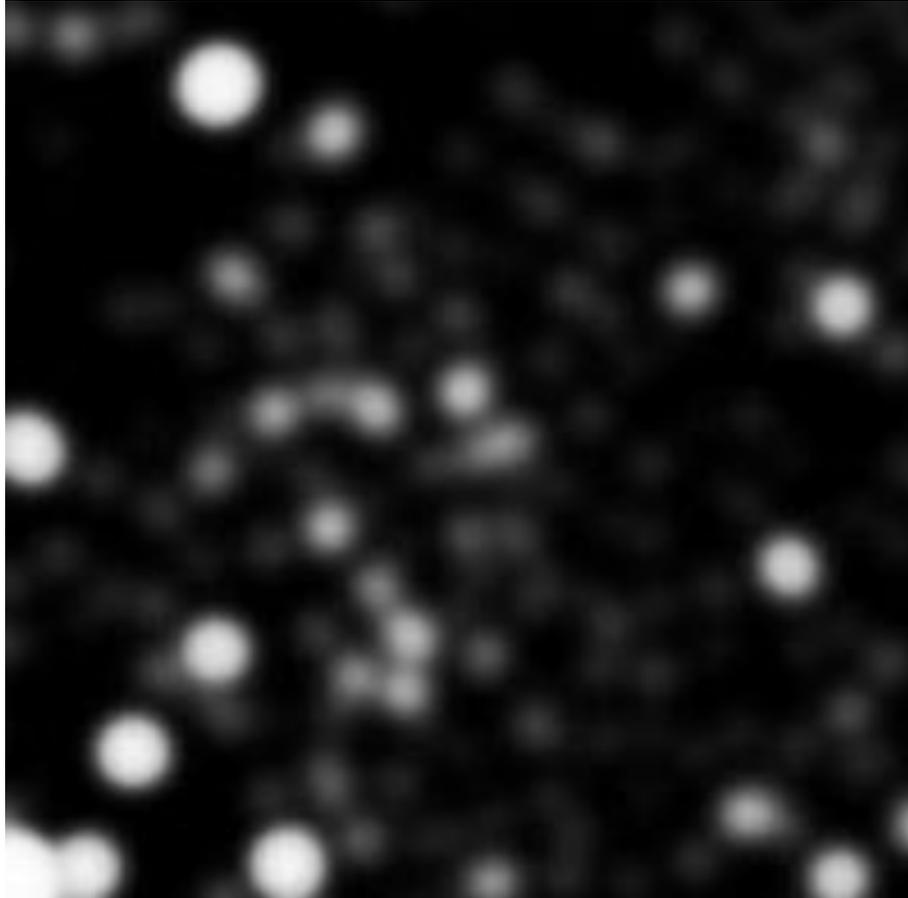


1994

http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/res_mass.php?lang=en

銀河系の中心の赤外線像

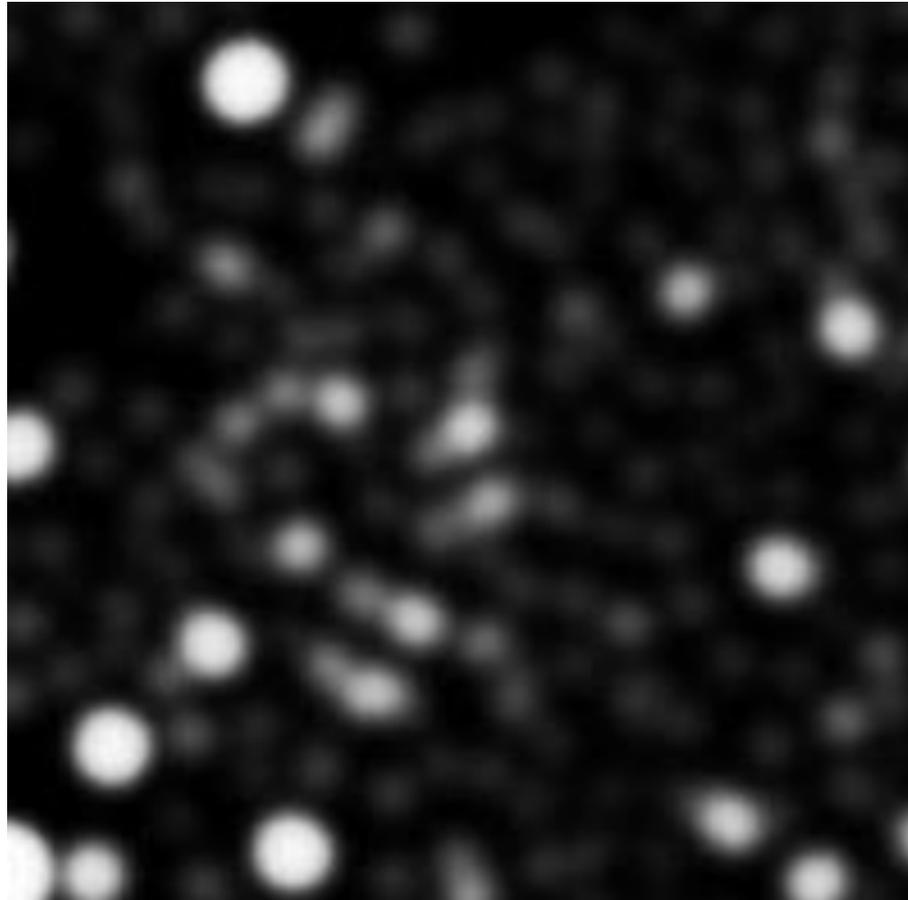
3秒角
視野



1996

銀河系の中心の赤外線像

3秒角
視野

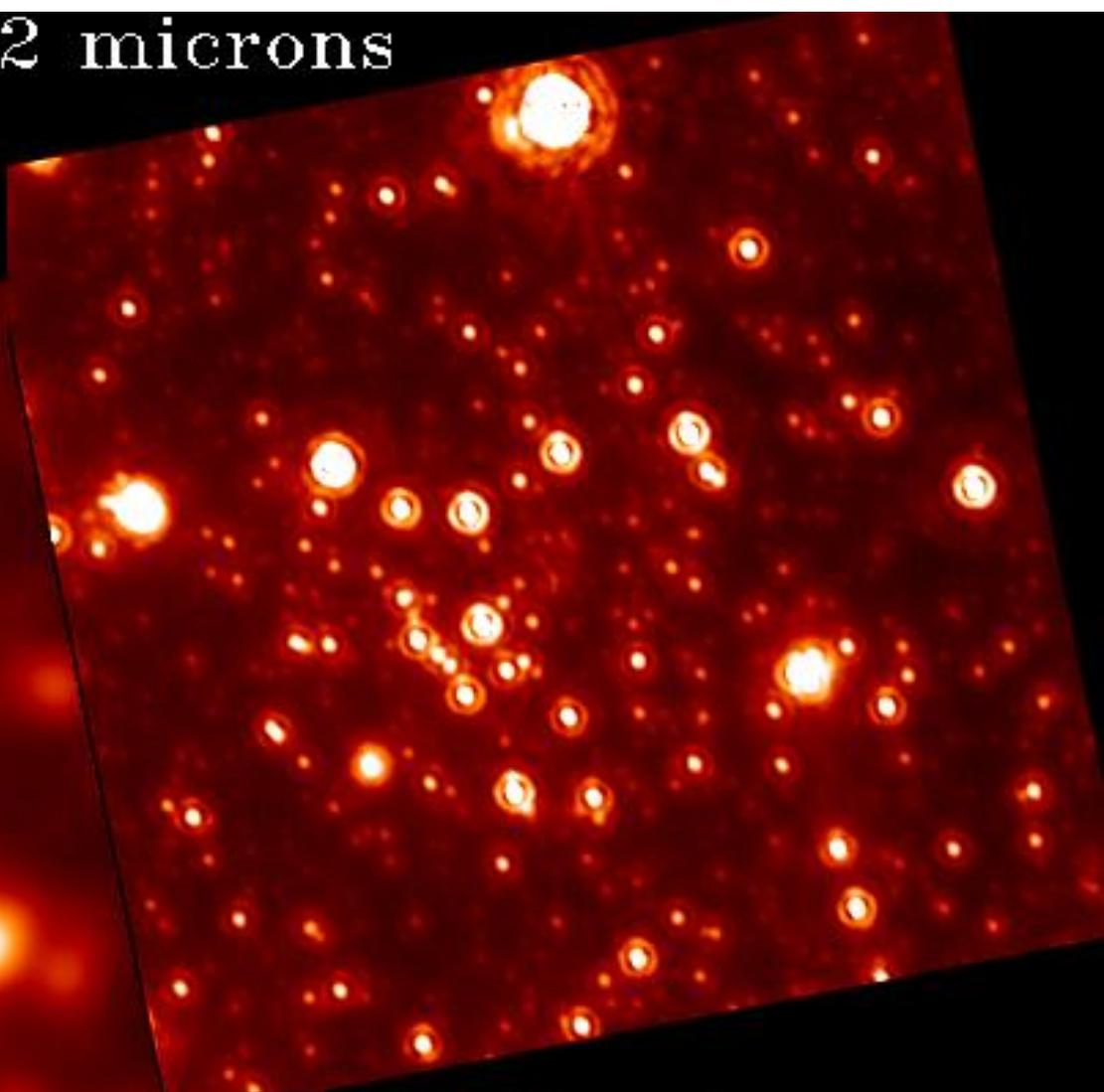
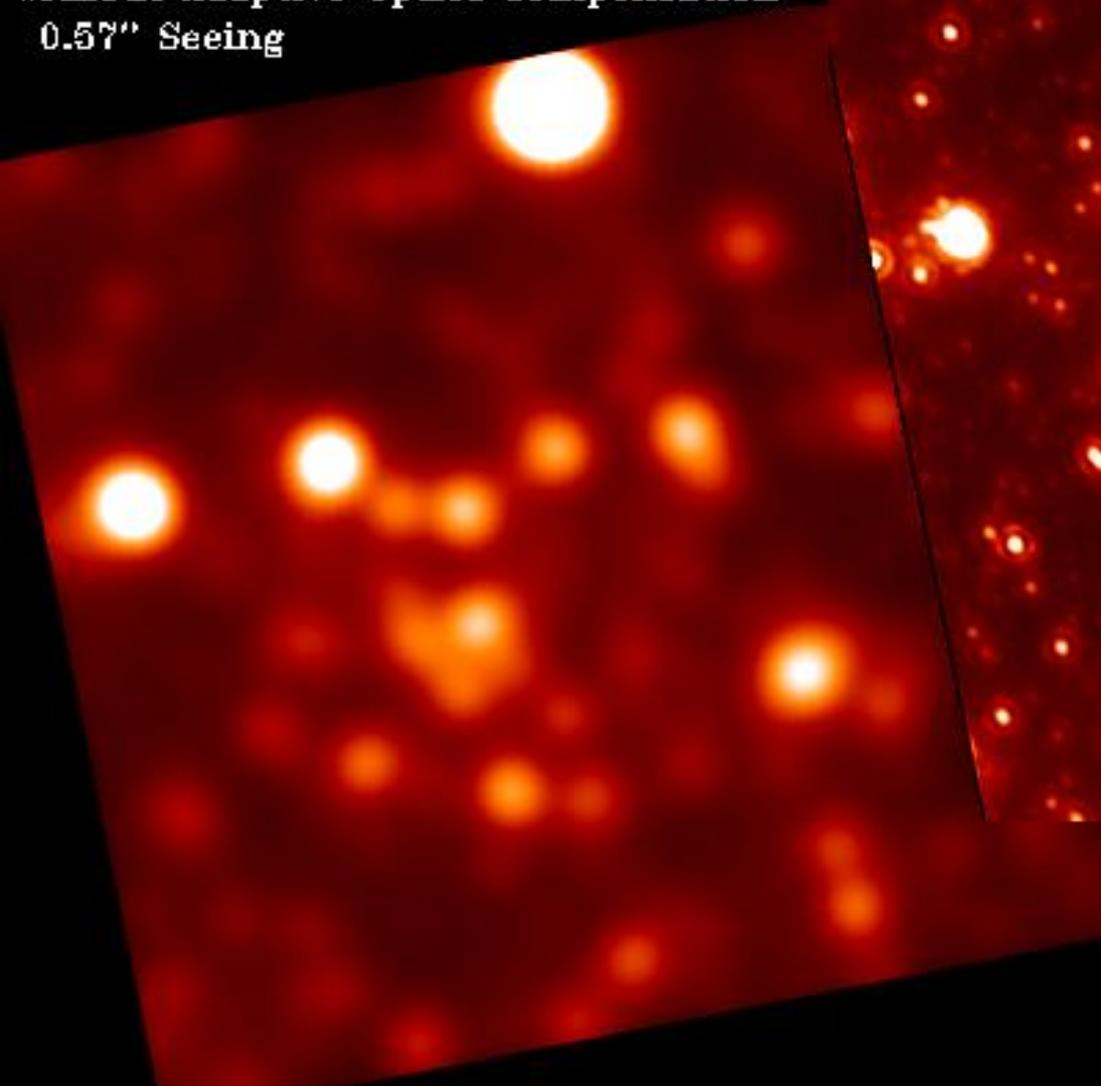


2000

Galactic Center / 2.2 microns

13"x13" Field. 15 minutes exposure.

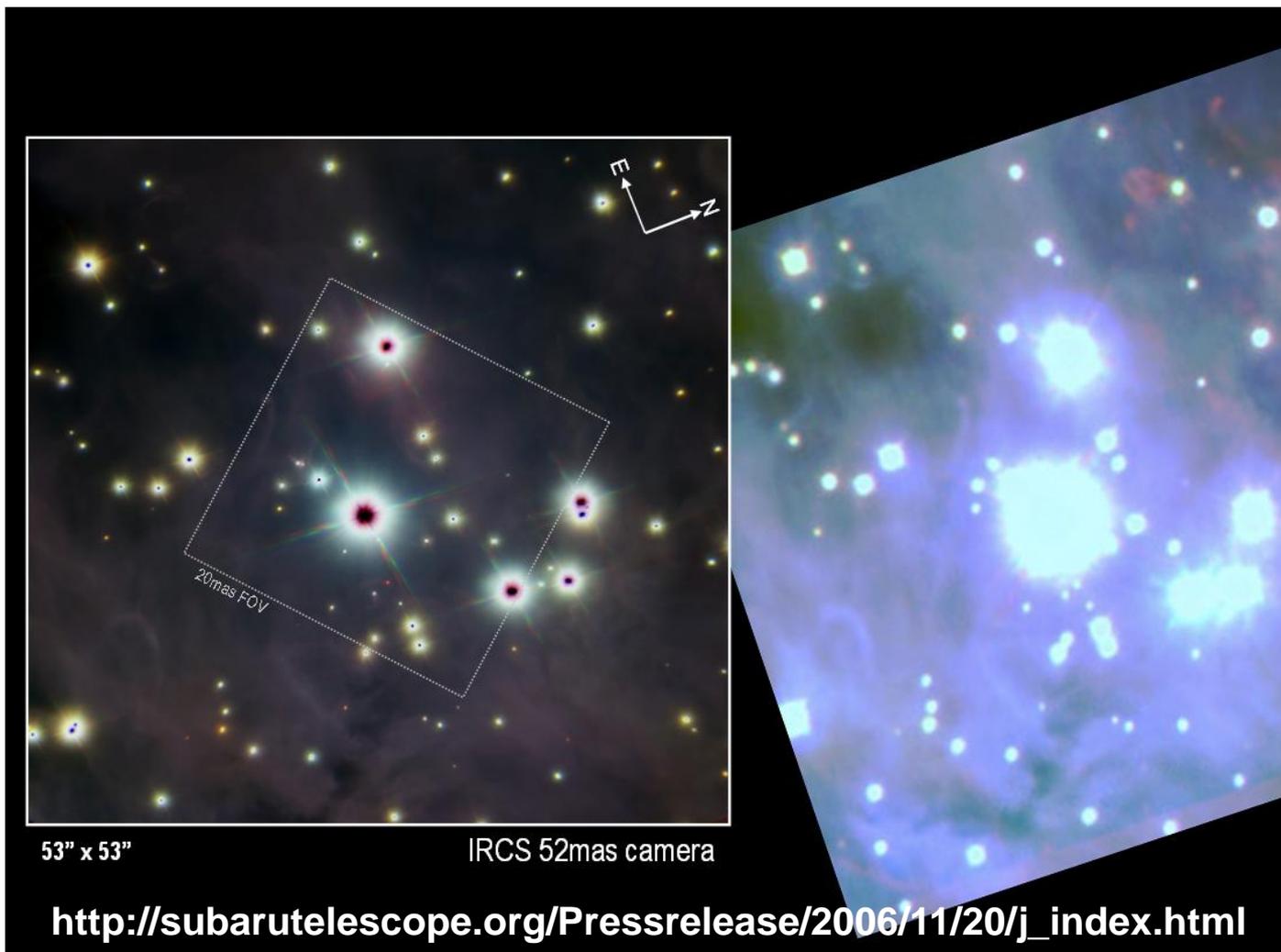
Without Adaptive Optics compensation
0.57" Seeing



With Adaptive Optics compensation
0.13" Full Width at Half Maximum

すばる望遠鏡の視力を10倍にする補償光学

(2006年11月20日新聞発表)

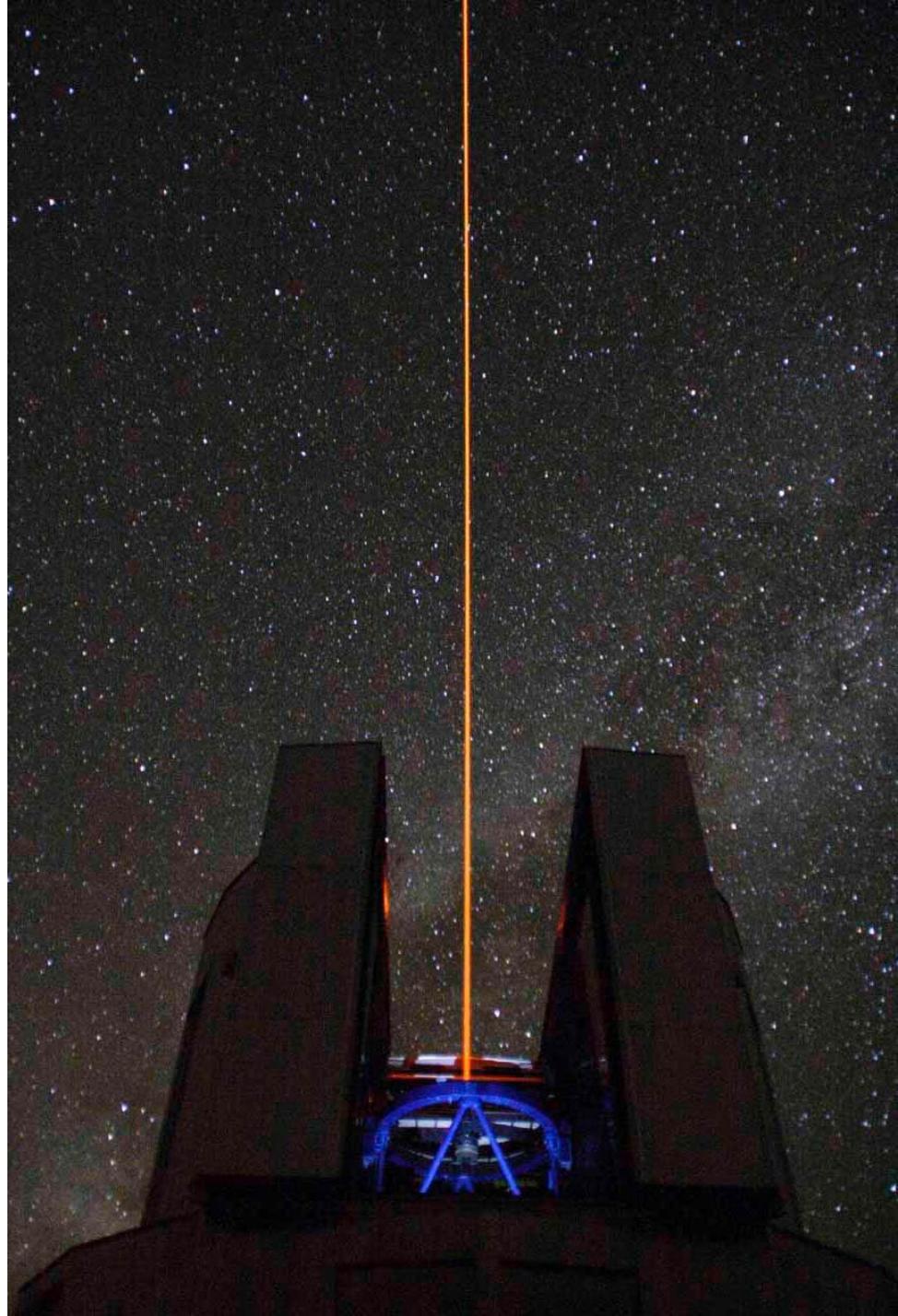


視野は53秒角—太陽や月の直径の1/35、木星がすっぽり入る程度

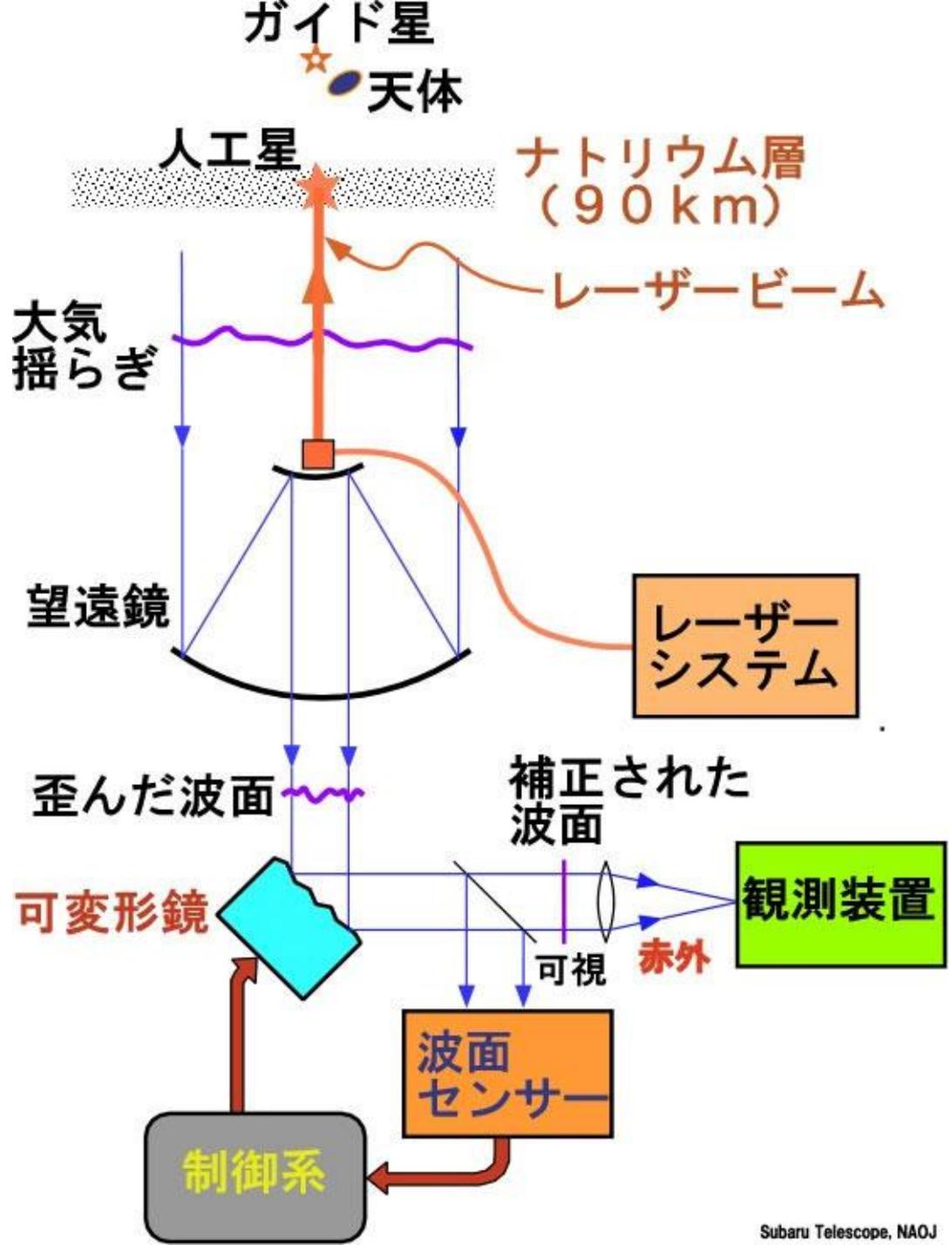
すばる望遠鏡と レーザーガイド星

補償光学

http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/11/20/j_index.html



すばる望遠鏡と レーザーガイド星



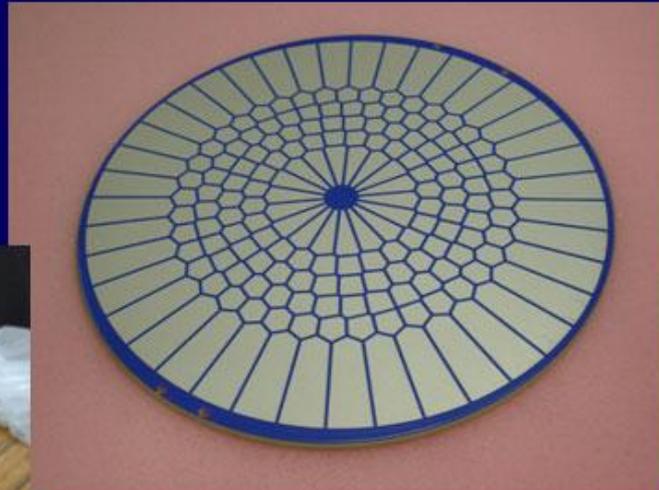
説明の原理図

すばる望遠鏡とレーザーガイド星



Bimorph deformable mirror

Number: 188
Effective: 90 mm
Blank Size: 130 mm
Manufacture: CILAS



DM electrode pattern



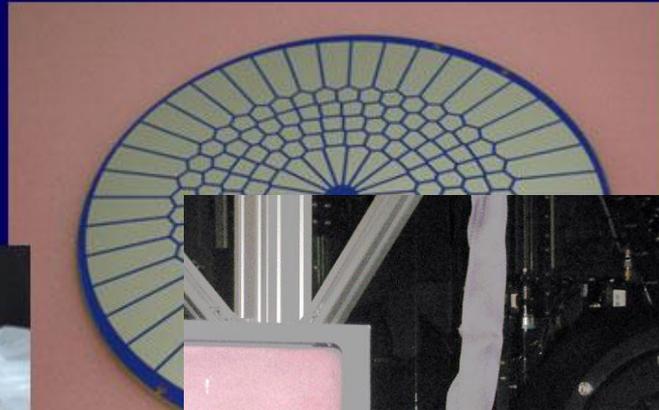
波面をコントロールする可変形の鏡

すばる望遠鏡とレーザーガイド星

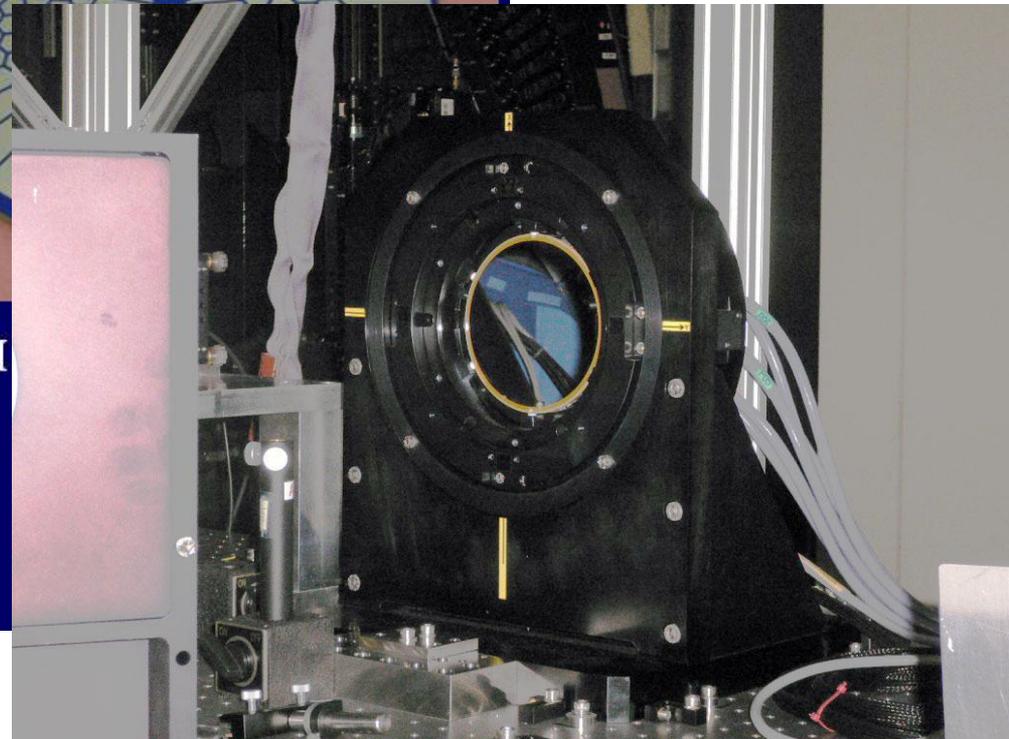


Bimorph deformable mirror

Number: 188
Effective: 90 mm
Blank Size: 130 mm
Manufacture: CILAS

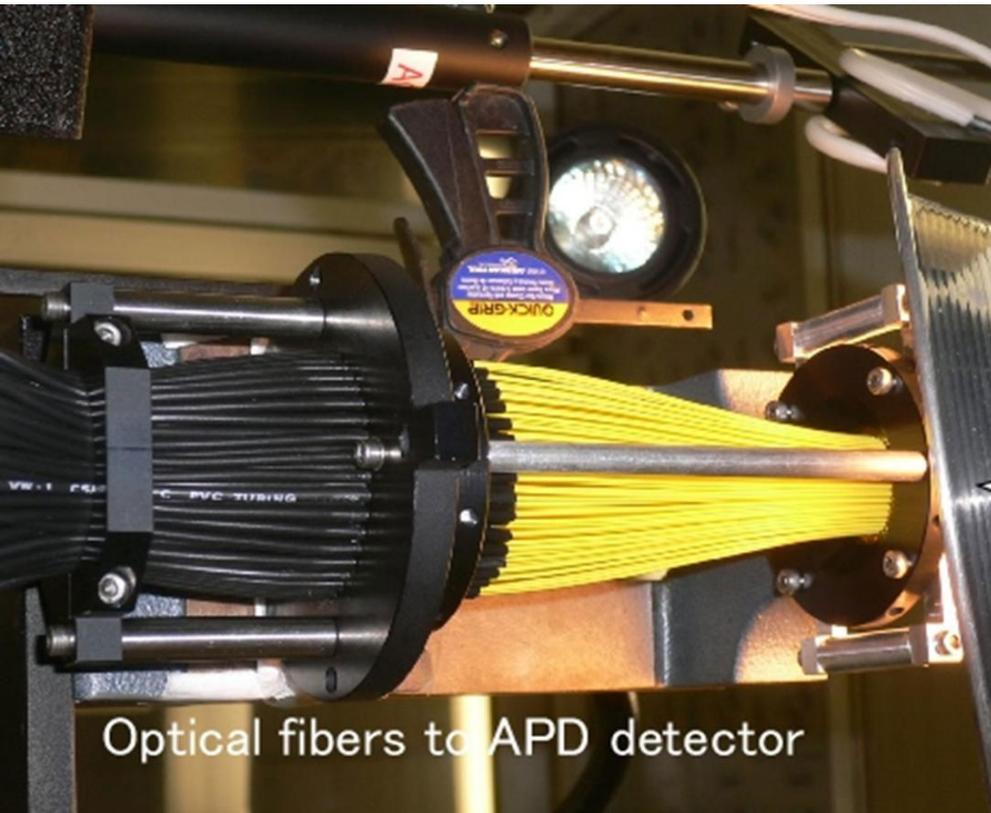


DM



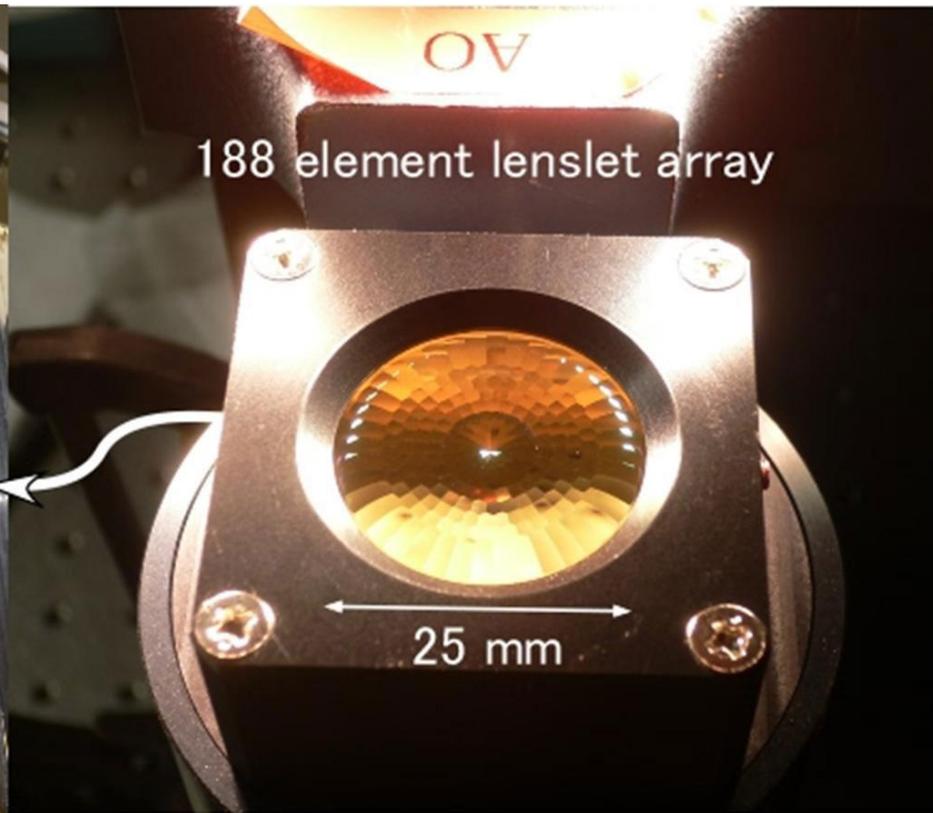
波面をコントロールする可変形の鏡、ナスミス焦点部に設置

すばる望遠鏡とレーザーガイド星



Optical fibers to APD detector

波面センサーへの光ファイバー



188 element lenslet array

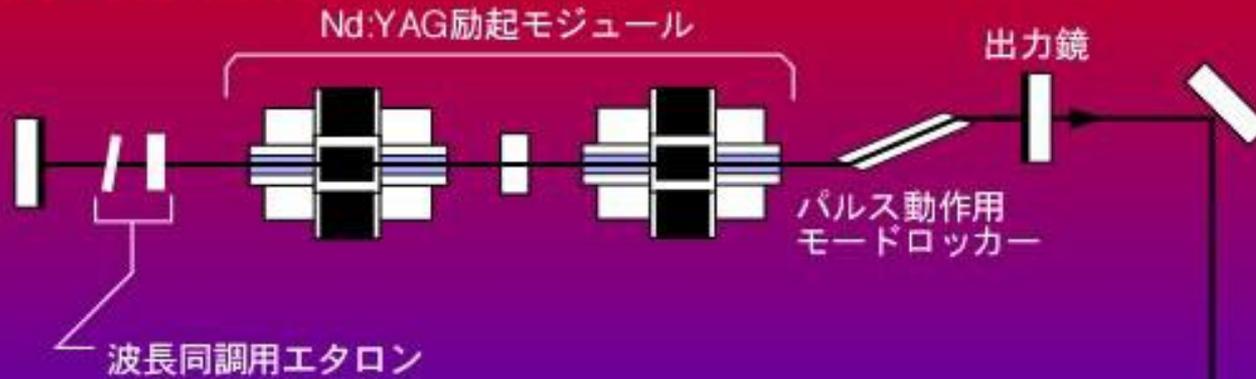
25 mm

188素子からなる分割レンズ

すばる望遠鏡とレーザーガイド星

和周波レーザー概念図

1319 nm Nd:YAG レーザー



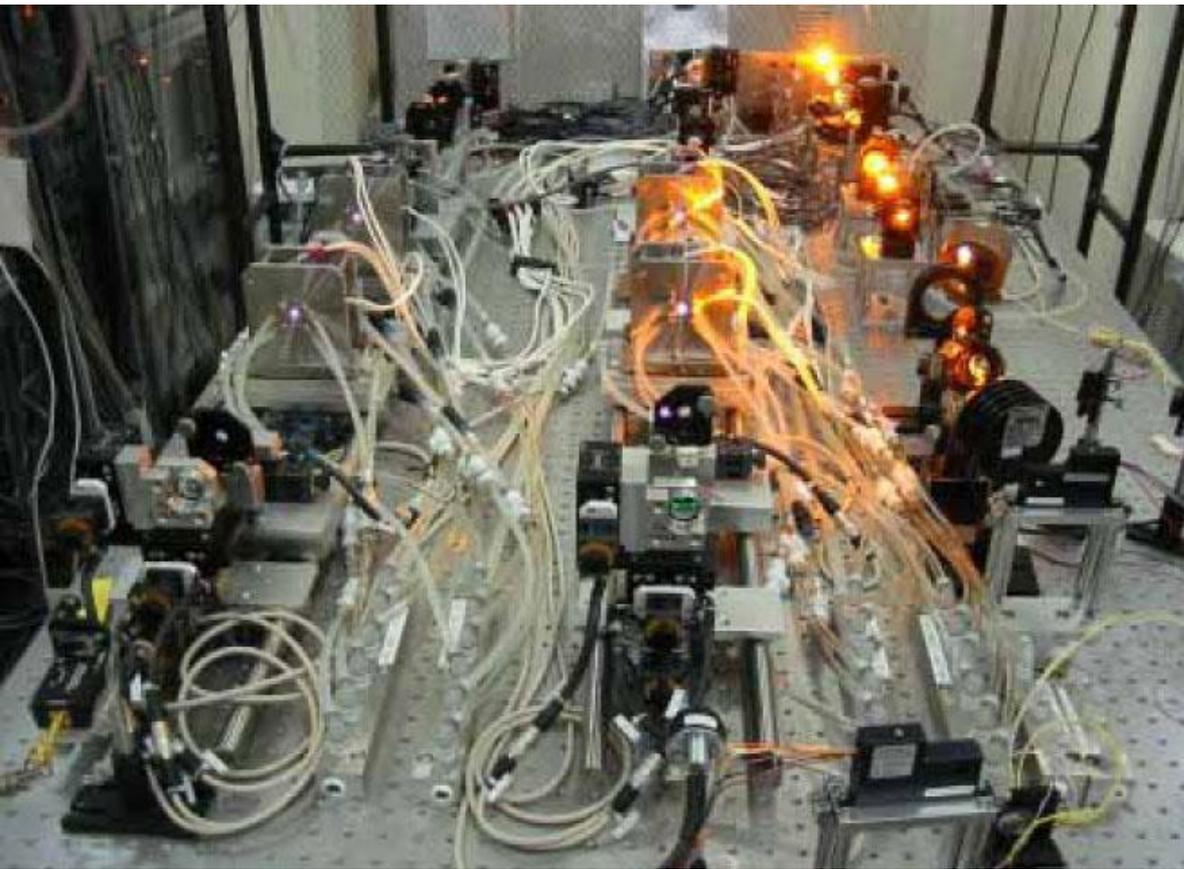
$$\text{和周波発生: } \frac{1}{1064 \text{ nm}} + \frac{1}{1319 \text{ nm}} = \frac{1}{589 \text{ nm}}$$

1064 nm Nd:YAG レーザー

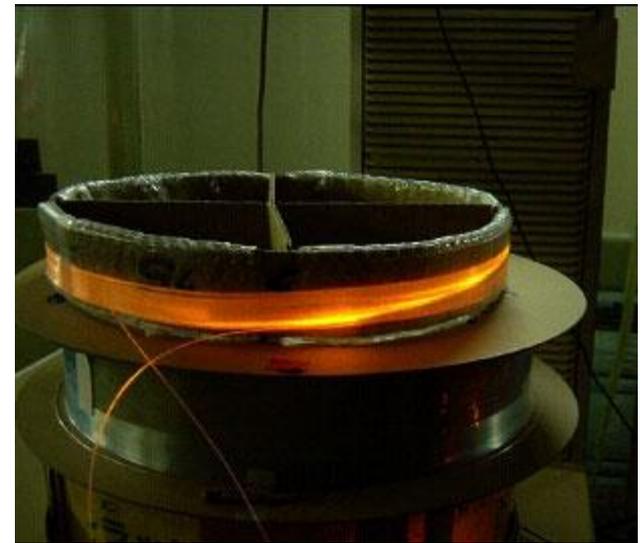


Naを光らせる和周波レーザー

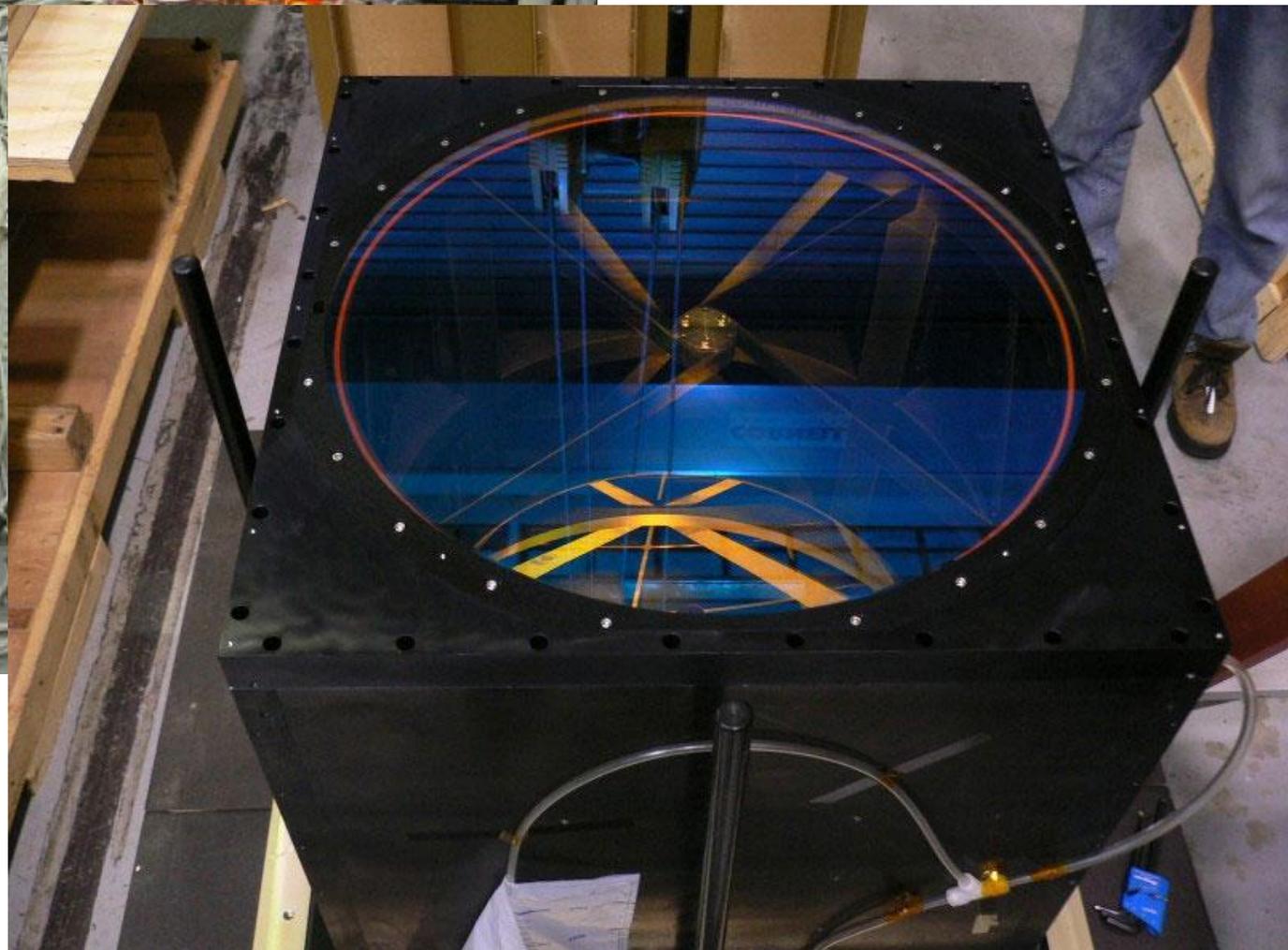
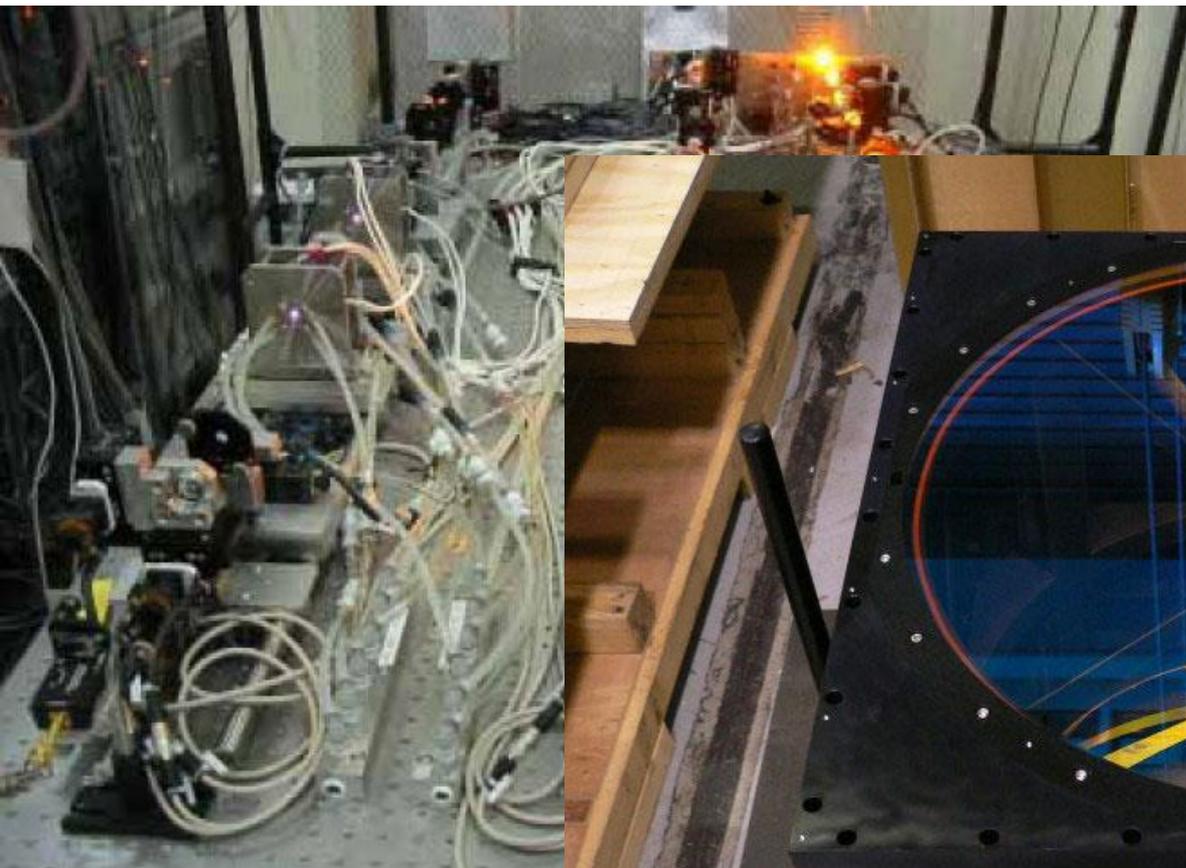
すばる望遠鏡とレーザーガイド星



ナトリウムを発光させる光と
それを通す光ファイバー



すばる望遠鏡とレーザーガイド星

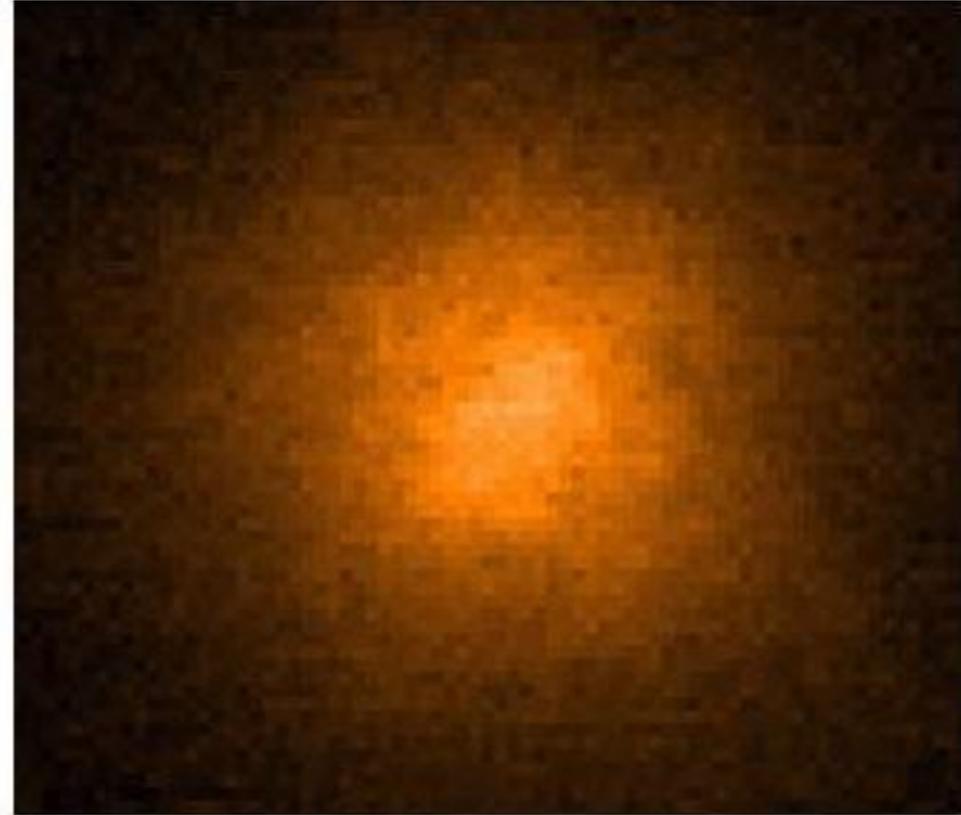


レーザー光線を発射する

すばる望遠鏡とレーザーガイド星

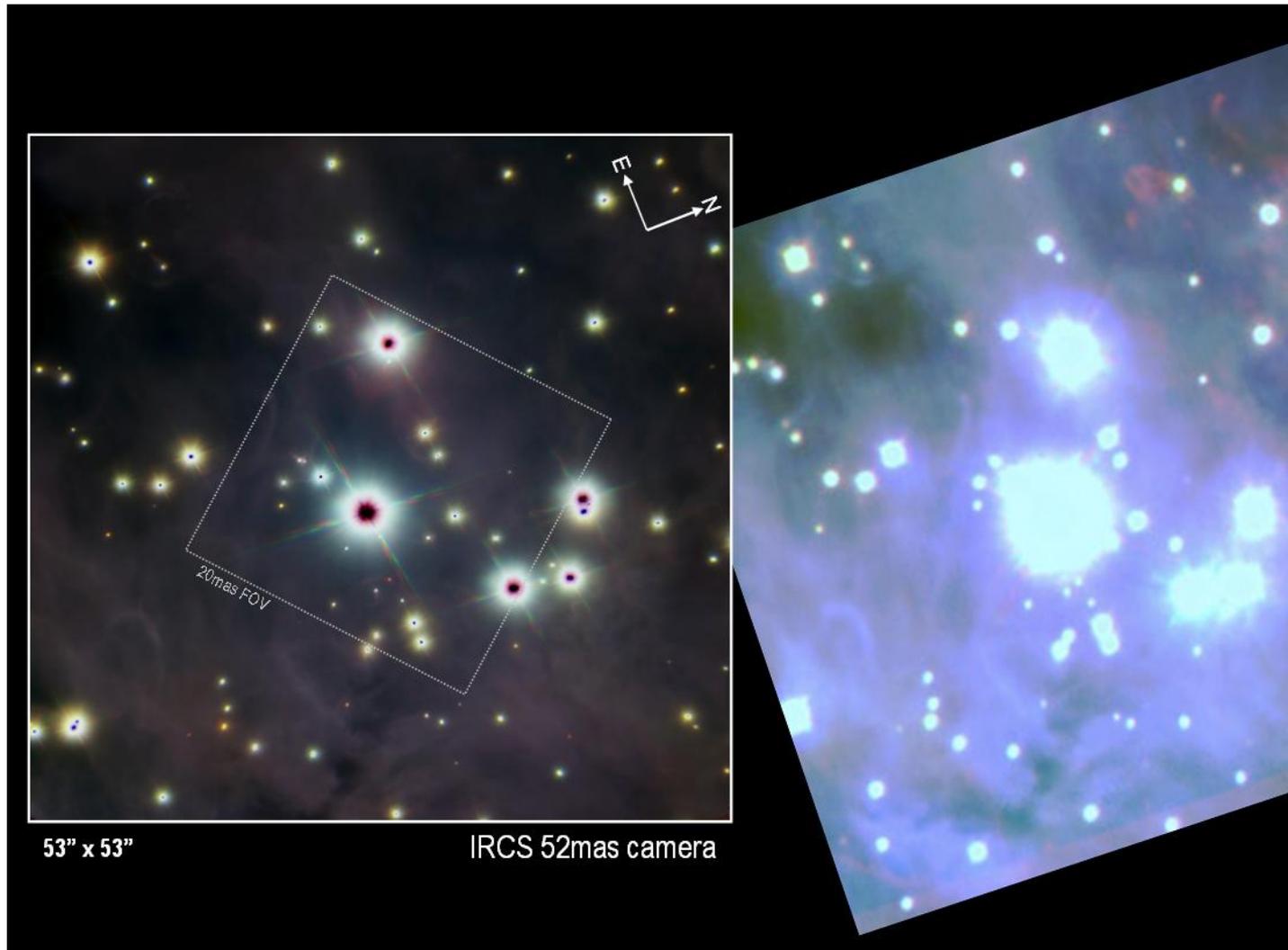


補償光学ON



OFF

すばる望遠鏡とレーザーガイド星

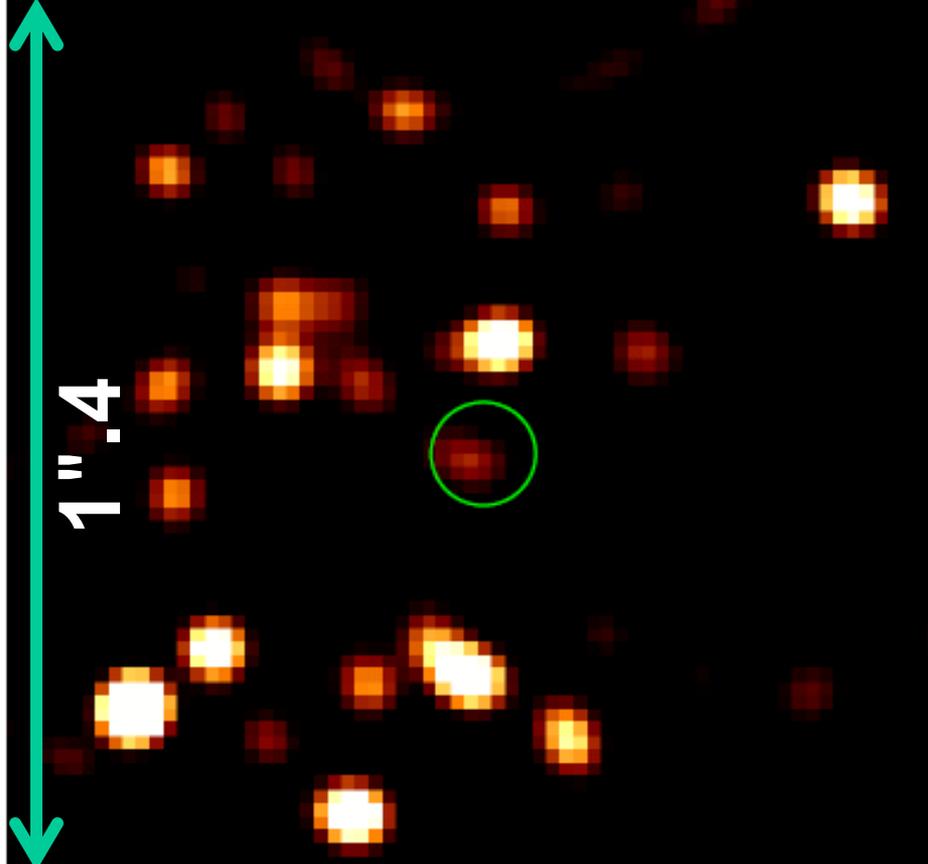


オリオン星雲の中心部 トラペジウム星団

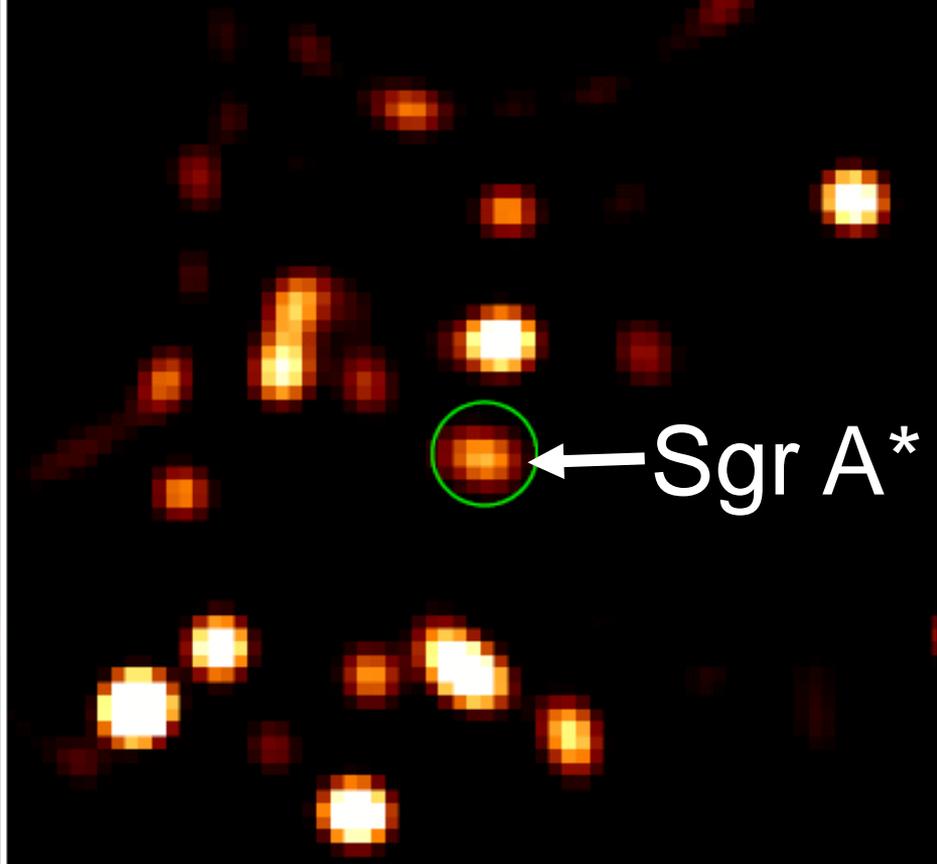
銀河系中心の超巨大ブラックホールSgr A* の観測

すばる望遠鏡と補償光学装置 西山正吾、長田哲也(京大理)ほか

静穏時



フレア時



ブラックホール（中心の黒い球体）を取り巻くガス円盤の想像図。ガスが落ち込むときに爆発的に光り、明るく見える（NASA/CXC/SAO提供）



巨大ブラックホール

ガス連続落下を観測

銀河系の中心にある巨大ブラックホール「いて座Aスタア」の周囲で、高温のガスが連続的に落下して強い光を発していることが、京都大学の西山正吾研究員ら研究チームの観測でわかった。米ハワイにある国立天文台のすばる望遠鏡を使っての成果で、24日から大阪府立大（堺市）で始まる日本天文学会で発表する。

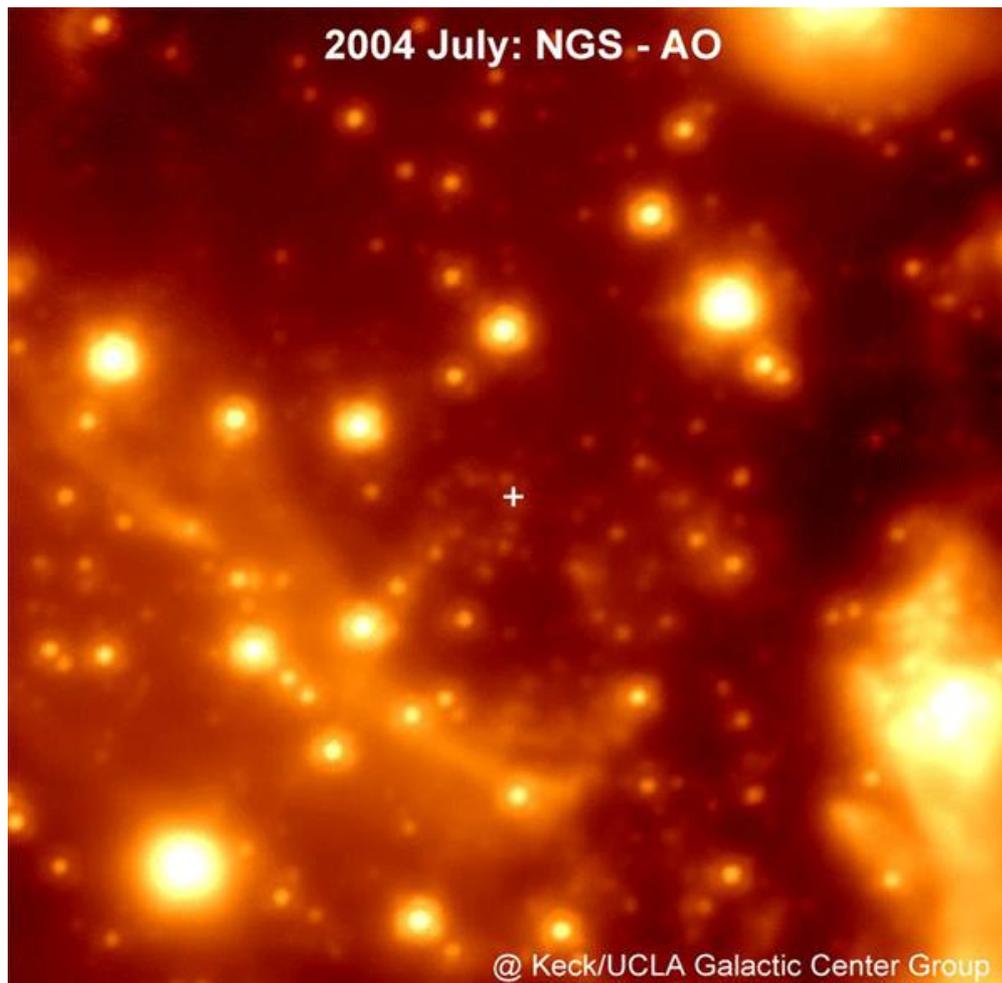
ブラックホールを円盤状に取り巻く高温のガスが回転しながら落下する際に光を発しているとみられ、このうちの1回は明るくなるまでと、暗くなるまでの時間がともに約6分半だった。秒速30万kmという光のスピードから計算すると、吸い込まれるガス円盤の直径は約1億2000万kmになり、ブラックホールから極めて近い場所でガスが回転していることがわかった。

西山研究員は「ほかの銀河にもある巨大ブラックホールで、どのような現象が起きているかの手がかりになる成果。すばる望遠鏡の赤外線カメラが近く増強されるので、より詳しく観測したい」と話している。

銀河系中心の超巨大ブラックホール Sgr A* の観測

2009/3/24 産経新聞

銀河系の中心の赤外線像



数秒角
視野

補償光学の進歩

基準として、(1)周囲の星 or (2)レーザーガイド星

銀河中心 1"範囲 の星

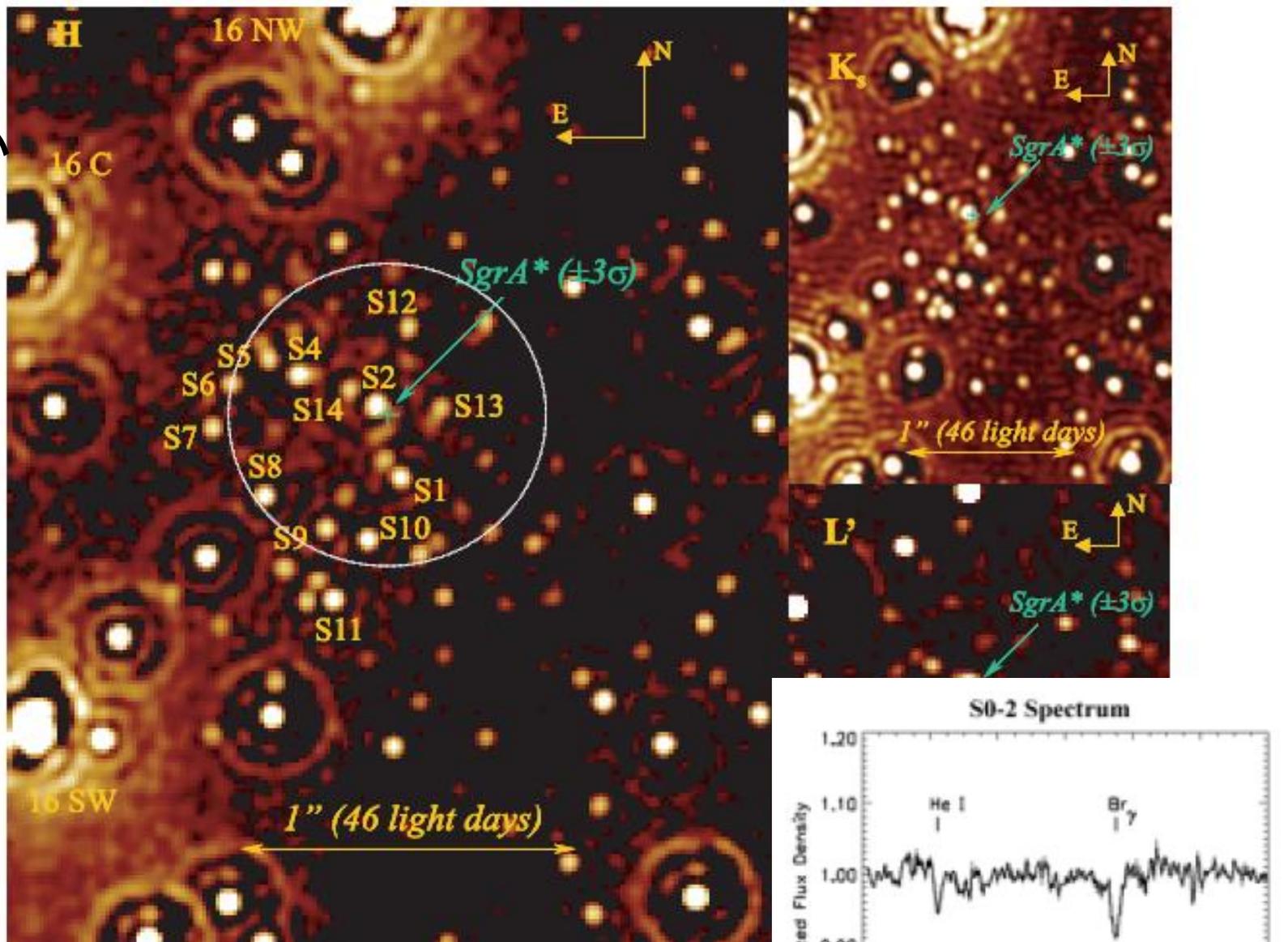
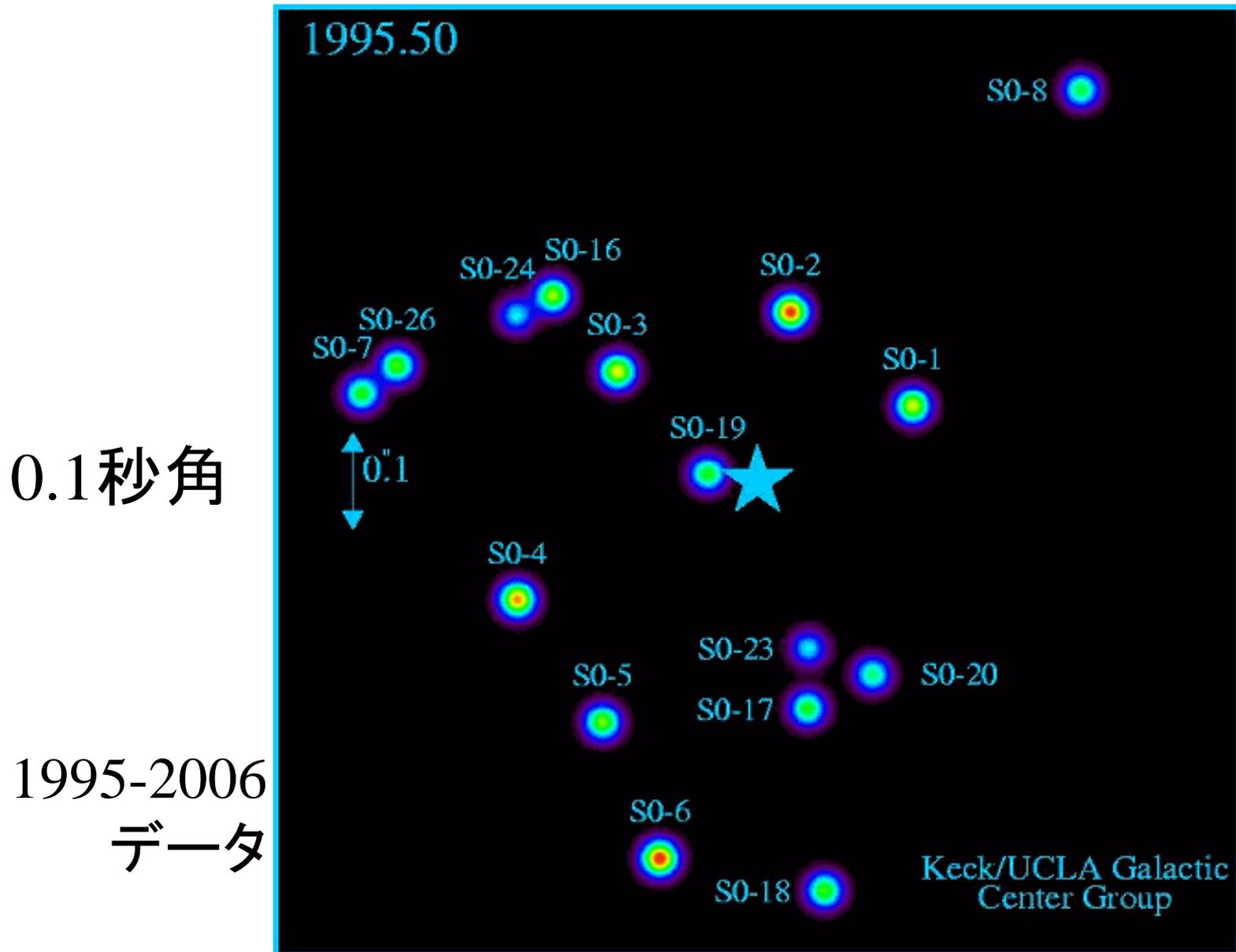


FIG. 3.—LR deconvolved images at H (left; reconvolved to 40 mas FWHM resolution), K_s (top right; reconvolved to 70 mas resolution) of the same central $2''$ region around Sgr A*. The position of small cross. Several of the S-sources in the Sgr A* cluster and three bright IRS 16 complex stars are in the radius $0.5''$, Sgr A* cluster region, containing the fastest moving stars tightly bound to the black hole. The visible wave front sensor was used, tracking on a star $\sim 20''$ northeast of Sgr A*. The ring of stars. The faintest stars recognizable on the images are $H \sim 20$, $K_s \sim 18.5$, and $L' \sim 14$.

銀河系の中心の赤外線像



力のつりあいから

$$G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

万有引力

遠心力

$$M = \frac{rv^2}{G}$$

銀河系の中心にある質量は

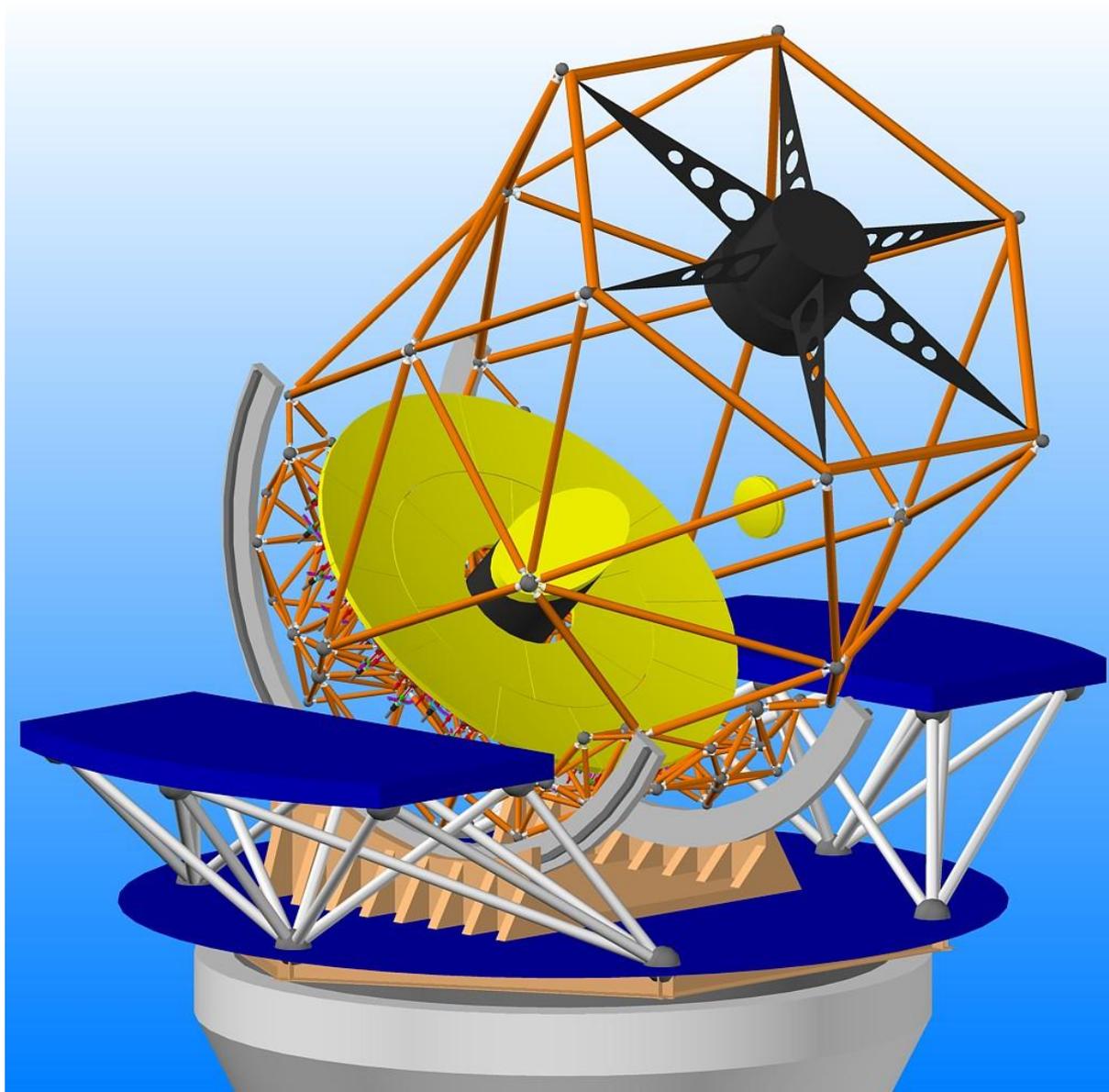
太陽の4百万倍

巨大ブラックホールと考えられる

他の銀河にも、中心部には太陽の百万倍から十億倍といったブラックホールがあるのではないかという状況証拠がある

私達の銀河系のブラックホールは、それらに比べてまったく「普通」で、特に重いわけでも、活動が活発なわけでもないようだ

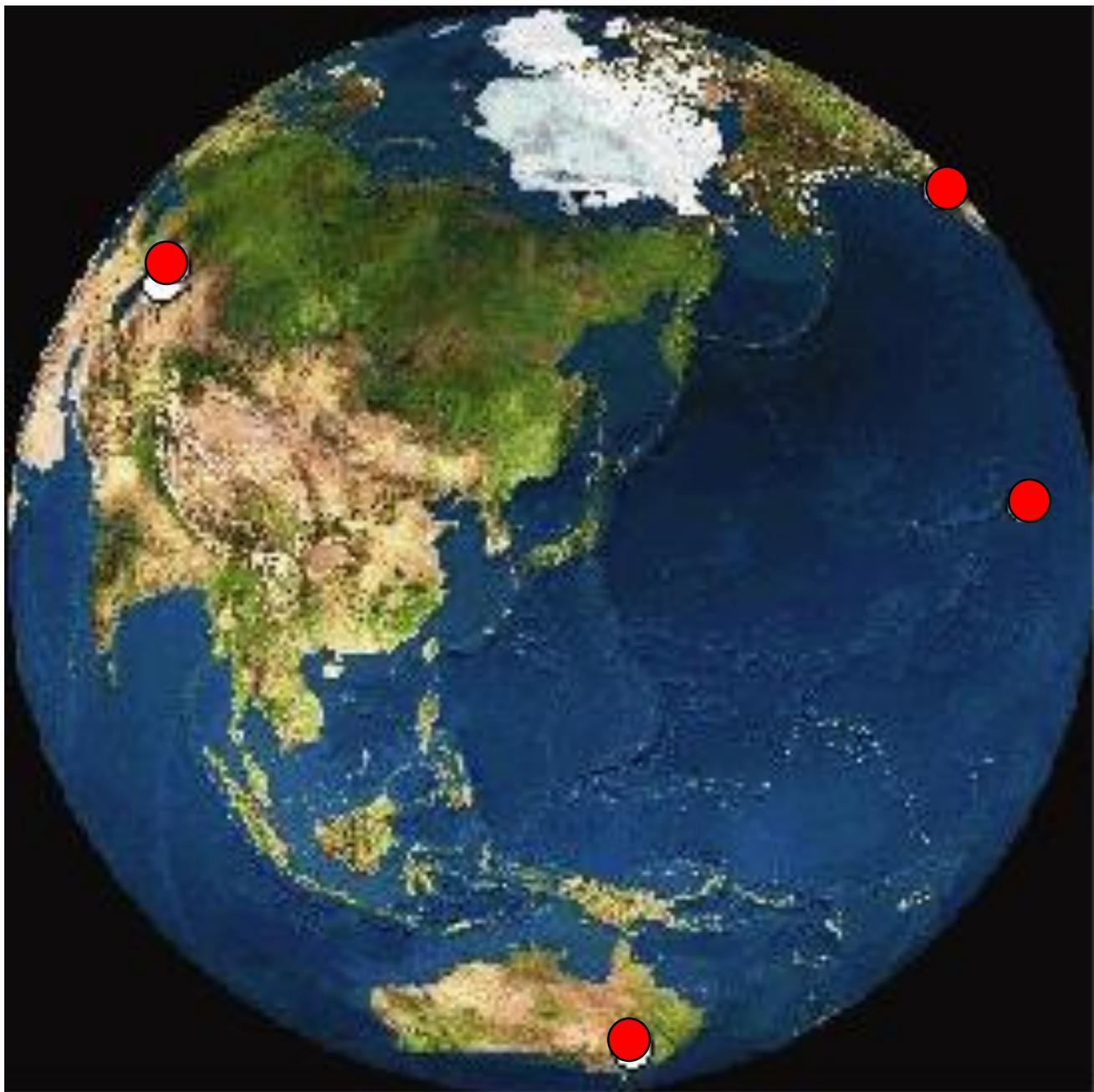
京大 岡山3.8m新技術望遠鏡計画



岡山に 設置

東アジアには
中口径望遠鏡が
ない

超新星爆発など、
突発天体の観測
に威力



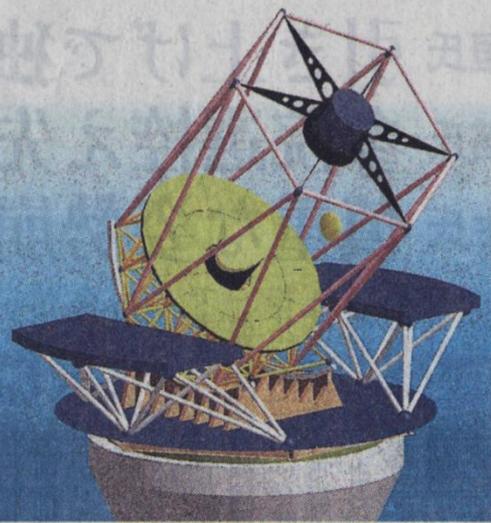
口径3m以上の望遠鏡所在地



京大、国立天文台など

口径3.8メートル アジア最大の望遠鏡

岡山に11年完成



京大などが建設するアジア地域で最大の天体望遠鏡のイメージ図（京大提供）

京大、国立天文台などは一日、岡山県にアジア地域で最大となる口径三・八メートルの天体望遠鏡を建設すると発表した。日本初の分割鏡式の望遠鏡で、二〇一二年に完成予定。民間から十億円規模の資金援助を受ける。

扇型の鏡十八枚を組み合わせて、おわん型の主鏡にする構造。理想的な球面からわずかに数ナノメートル（ナノは十億分の一）の誤差しかない超高精

ブラックホールや星の形成

宇宙の謎 解明期待

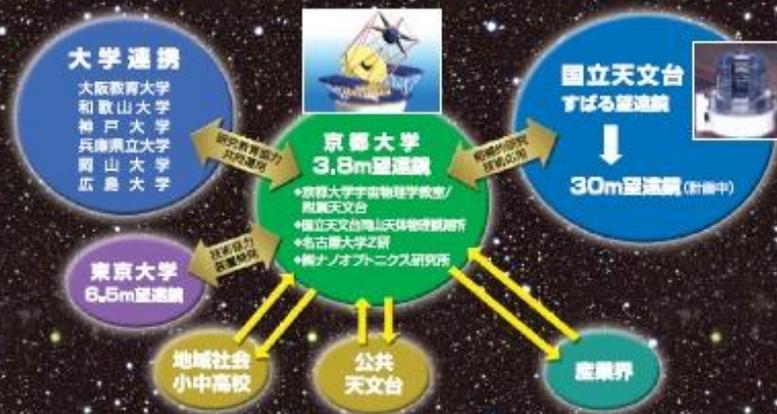
度の鏡を短期間で製作する技術や、鏡の制御システムなどは、名古屋大などが中心になり、開発を進めている。米ハワイにある「すばる望遠鏡」（八・二メートル）などの次世代となる、口径三・〇メートル以上の超大型望遠鏡を実現するための世界初の技術という。

技術開発と望遠鏡製作のために設立されたベンチャー会社「ナノオプトニクス研究所」（京都市、代表・藤原洋イン

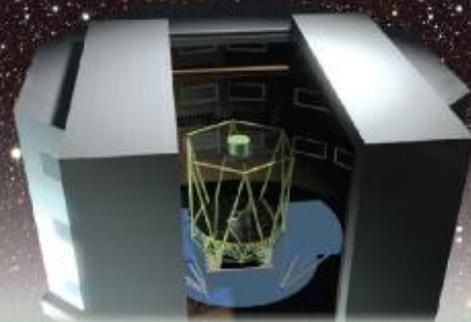
ターネット総合研究所長）が、鏡を作る大型研削盤の製作費も含め、十億円の費用の大半を提供する。民間からの援助で、大型の天体望遠鏡を建設するのも日本では初めて。建設場所は、天体観測に好条件な国立天文台岡山天体物理観測所（岡山県津口市）の敷地内。現在国内最大の望遠鏡は、兵庫県佐用町の県立西はりま天文台の「なゆた」（口径二・四メートル）だ。アジアでも三メートル超の望遠鏡は初めて。強力な集光力を生かし、ブラックホールに吸い込まれるガスなど短時間で変動する天文現象の観測や、星が形成されている領域での精密な星間物質の解析が可能になるといわれている。

計画の中心メンバーの長田哲也・京大理学研究所教授（赤外線天文学）は「（次世代の）超大型望遠鏡では数百枚の鏡を組み合わせることが必要になるが、今回の建設で基礎技術の開発につながる」と話している。

Collaboration 広がるネットワーク



岡山3.8m新技術 光学赤外線望遠鏡計画



設置場所

- 岡山県浅口市
国立天文台岡山天体物理観測所内
- 国内最高レベルの晴天率
- 国内最高レベルの星像
- アクセスの良さ



インターネットで
どこからでもリモート観測
世界にデータ発信

京都大学大学院理学研究科 宇宙物理学教室
〒606-8502 京都市左京区北白川道分町 phone: 075-753-3890 / fax: 075-753-3897
<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp>

附属天文台 (花山天文台・泉柳天文台)
〒607-8471 京都市山科区花山大峰町 phone: 075-581-1235 / fax: 075-581-9617
<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp>

京都大学大学院理学研究科 宇宙物理学教室・附属天文台
2008年3月

