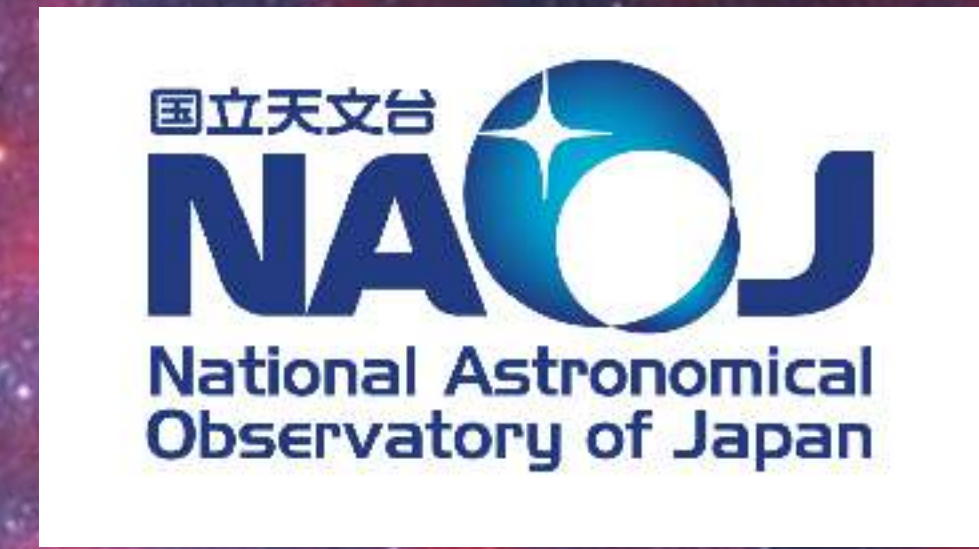


齊藤 俊貴^{1,2,3}

¹静岡大学 グローバル共創科学部

²静岡大学 大学院 総合科学技術研究科 理学専攻 物理学コース

³国立天文台 客員研究員



超巨大電波望遠鏡で探る隠された宇宙の姿

Image credit: NRAO/AUI/NSF, B. Saxton: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); NASA/Hubble



お品書き

- 1. ご挨拶
- 2. 七夕のお話
- 3. 天文学のお話
- 4. アルマ望遠鏡のお話
- 5. 研究のお話
- 6. まとめ

前半

後半

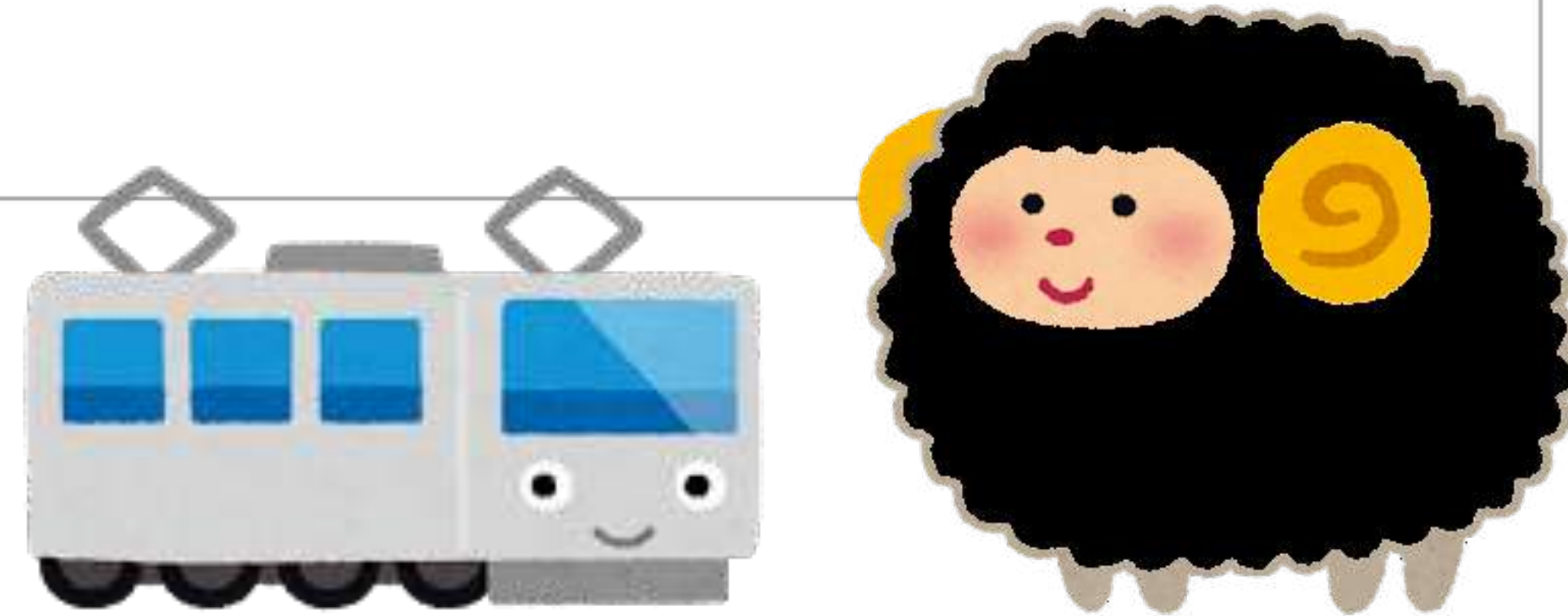
初めまして、電波天文学者です！

- 北海道帯広市出身です.
- 仙台, 東京, ドイツ, 郡山などを転々として, 去年**静岡**に辿りつきました.
- 趣味
 - サッカー, フットサル, ボルダリング, ランニング, ...
 - キャンプ, お酒全般, 落語鑑賞, 温泉, 旅行, ...

早速ですが…天文学者って何者？

「数学的なジョーク」『フリー百科事典 ウィキペディア日本語版』

天文学者、物理学者、そして数学者がスコットランドを走る列車に乗っている。天文学者は窓の外を眺め、一頭の黒い羊が牧場に立っているのを見て、「なんと奇妙な。スコットランドの羊はみんな黒いのか」と言った。すると物理学者はそれに答えて「だから君たち天文学者はいいかげんだと馬鹿にされるんだ。正しくは『スコットランドには黒い羊が少なくとも一頭いる』だろう」と言う。しかし最後に数学者は「だから君たち物理学者はいいかげんだと馬鹿にされるんだ。正しくは『スコットランドに少なくとも一頭、少なくとも片側が黒く見える羊がいる』だ」と言った。



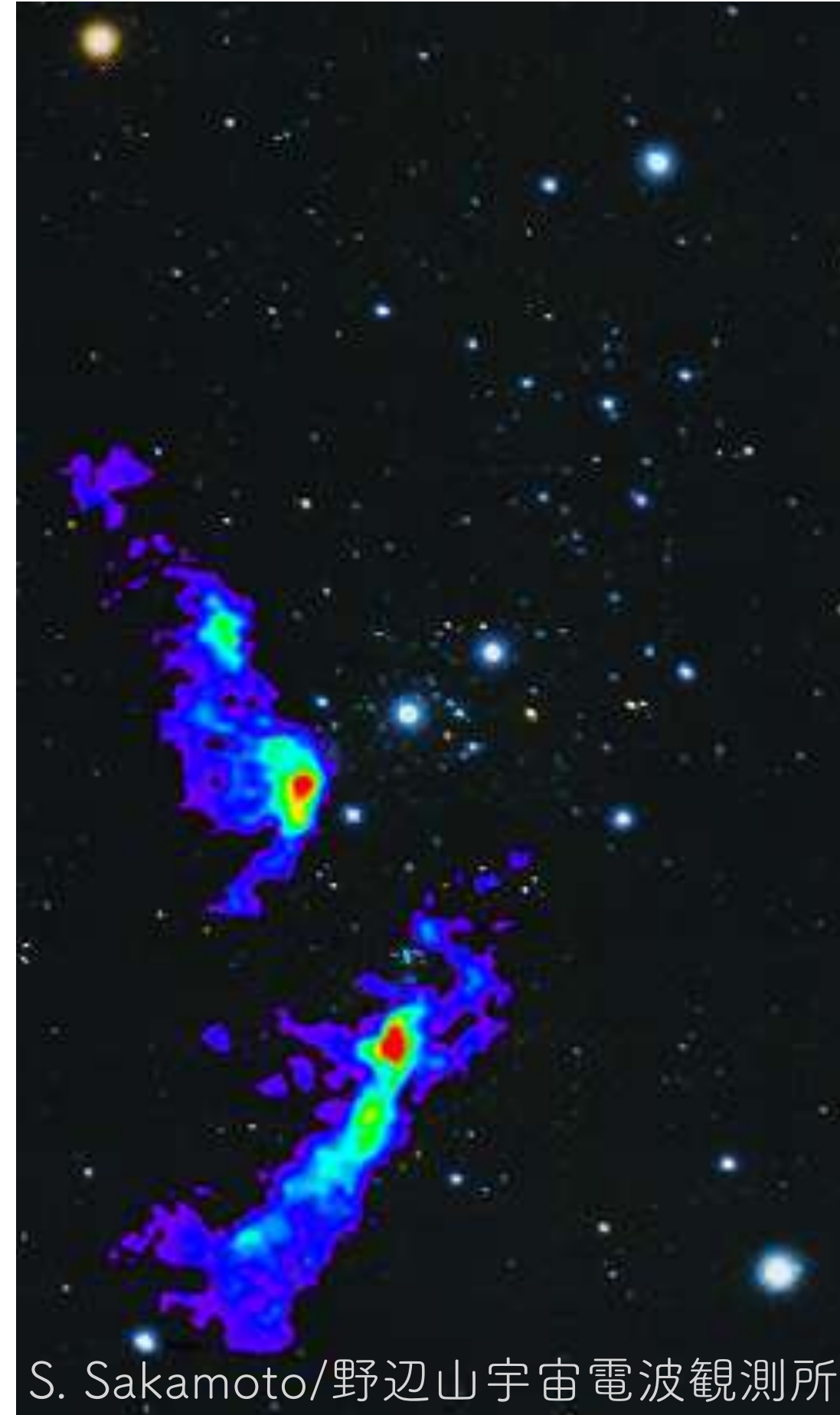
1. とても**大雑把**な生き物.

“電波”天文学者って何者？

目(可視光)で見たオリオン座



電波で見たオリオン座



S. Sakamoto/野辺山宇宙電波観測所

1. とても**大雑把**な生き物.
2. **目に見えないもの**を見ようとしているちょっとアレな生き物.

“電波”天文学者って何者？

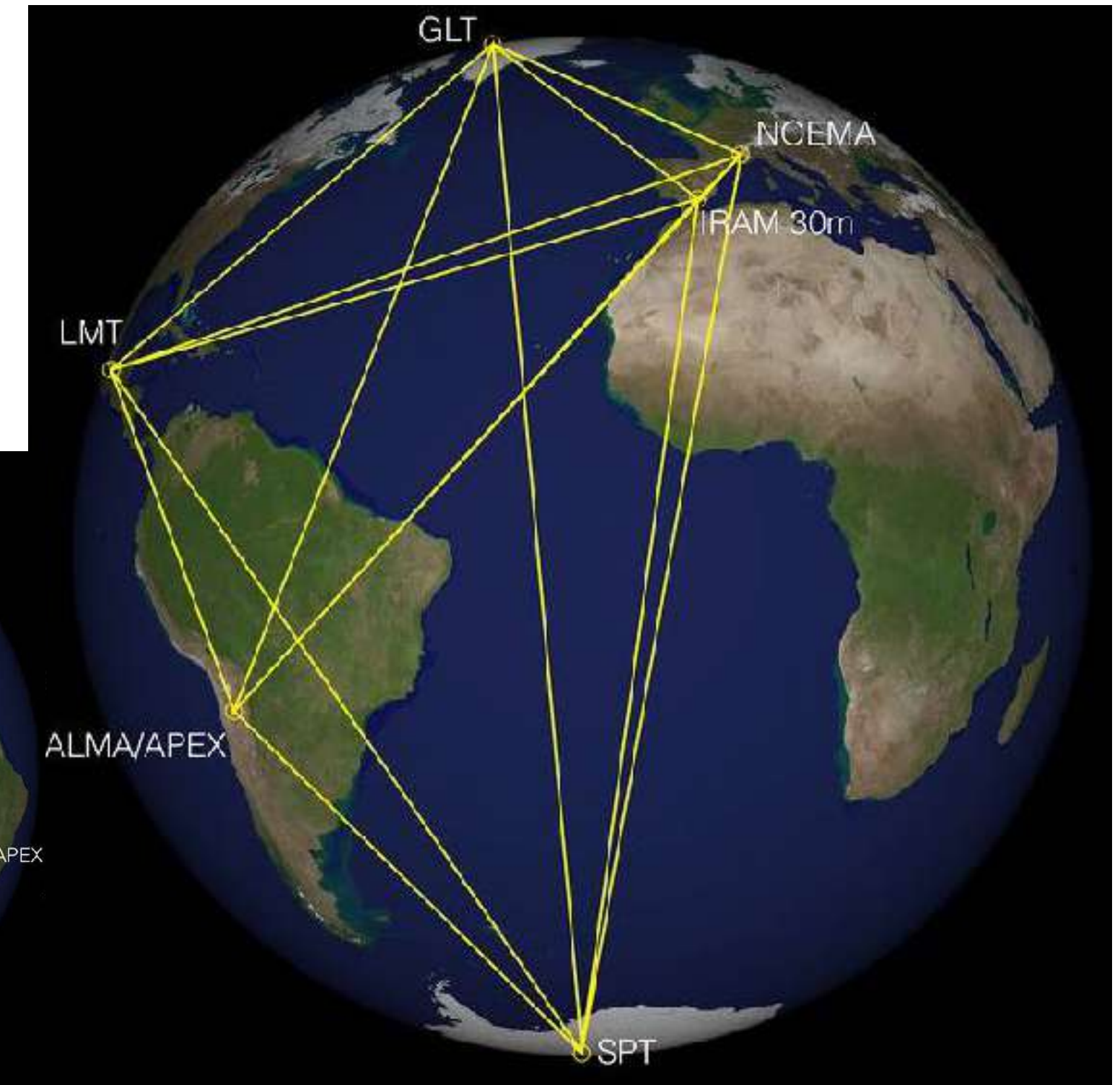
すばる望遠鏡 (標高4,200m)



ハッブル宇宙望遠鏡 (地上600km)



イベントホライズン(事象の地平線)望遠鏡
(人類史上最大の望遠鏡)



ALMA望遠鏡 (標高5,000m)



1. とても**大雑把**な生き物.
2. **目に見えないもの**を見ようとしているちょっとアレな生き物.
3. **宇宙のこと**を本気で知りたいと思っている生き物.

自己紹介も終わったところで…

今日は6月26日…

だいたい7月7日なので、七夕ですね！



お品書き

- 1. ご挨拶
- 2. 七夕のお話
- 3. 天文学のお話
- 4. アルマ望遠鏡のお話
- 5. 研究のお話
- 6. まとめ

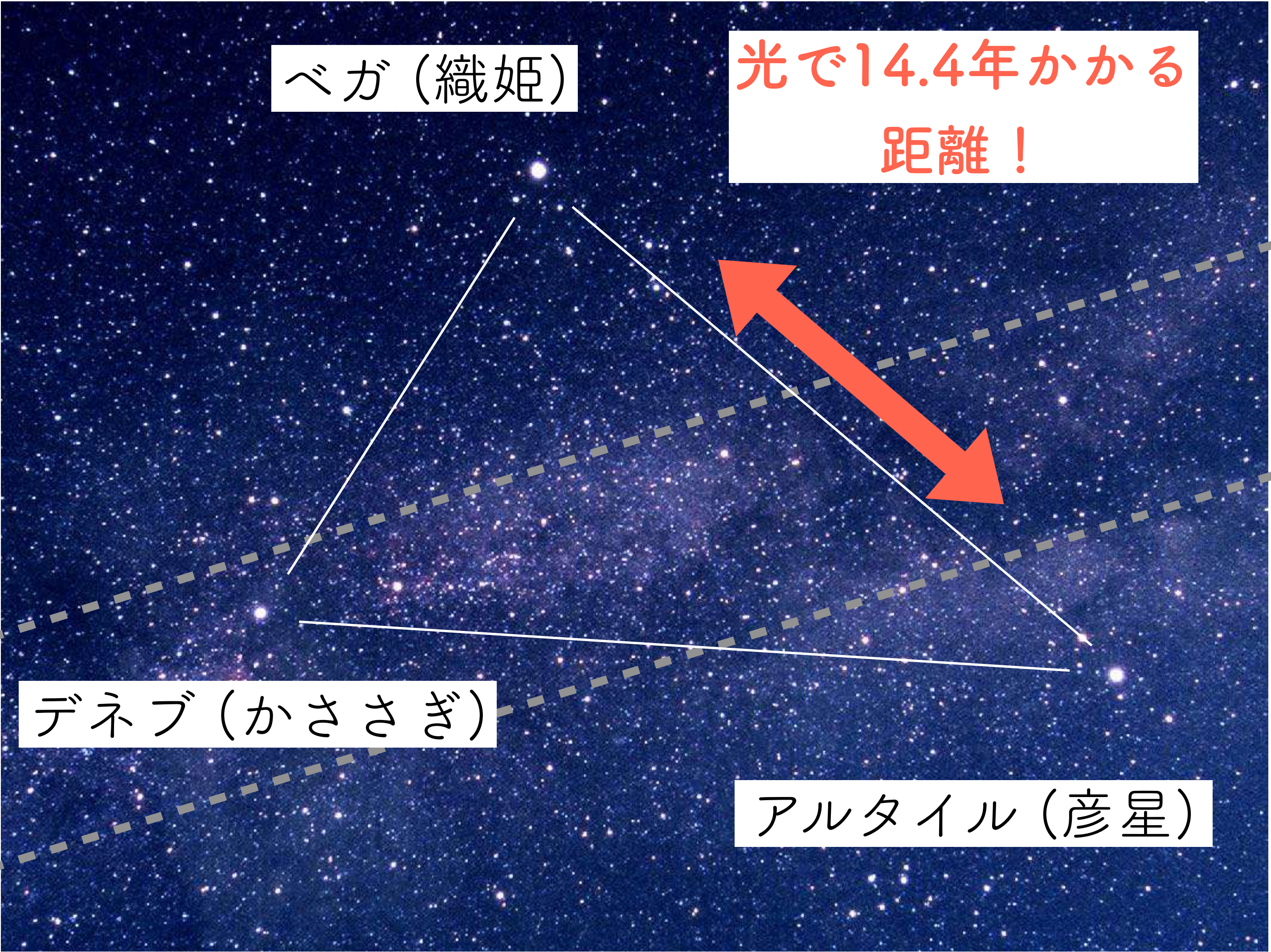
前半

後半



七夕伝説

夏の大きな三角形



= 13623000000 km
(マラソン金メダリストで、
10万年かかる距離)

天の川

暗いところと明るいところ
があって、本物の川のように



七夕伝説、銀河研究者の視点で…

光で14.4年かかる距離！= 14.4光年 (= 136230000000 km) すごい遠くて織姫と彦星が可哀想…

天の川を可視光望遠鏡で撮影した写真



天の川銀河の直径は約10万光年！

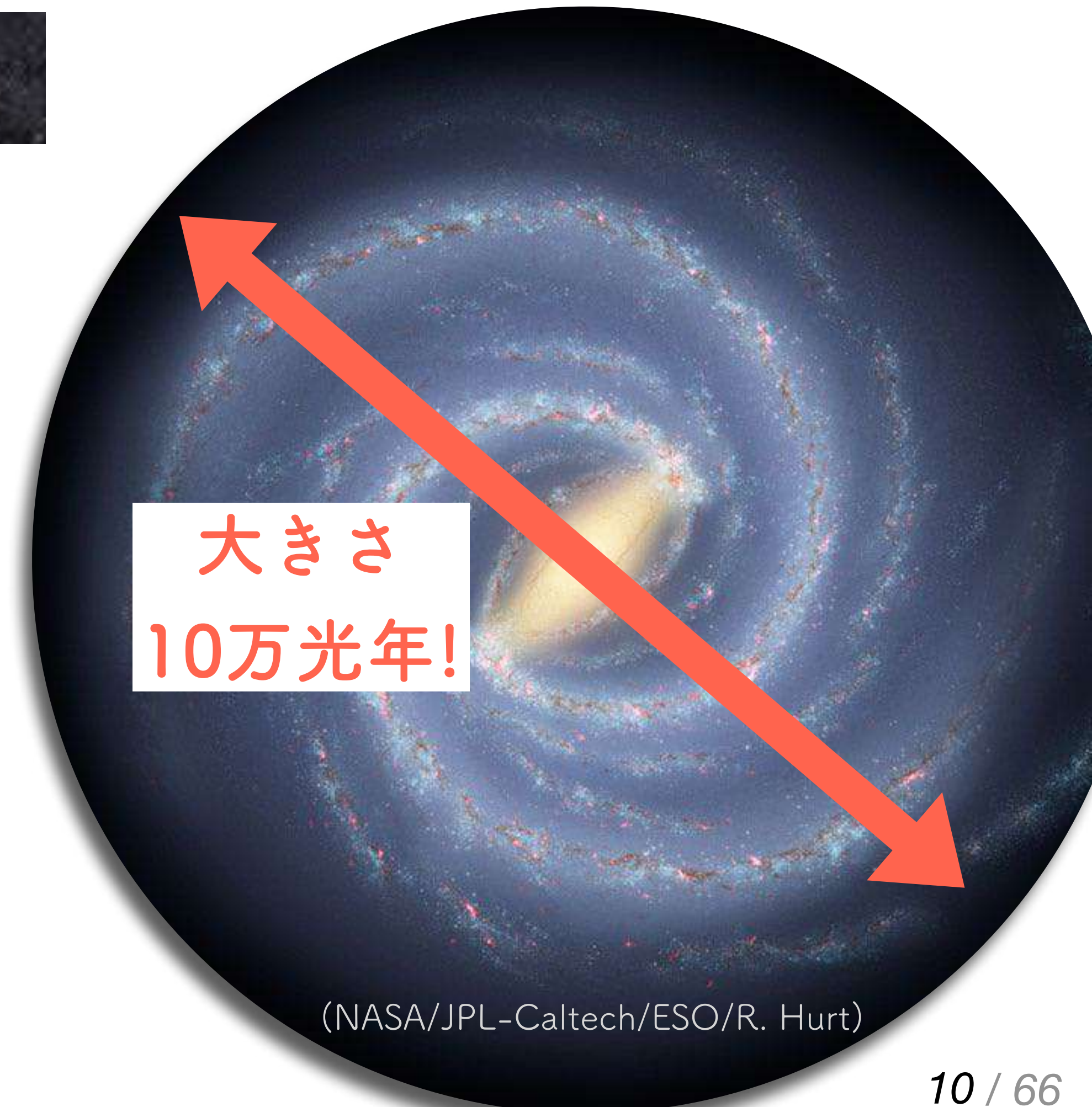
住んでいる銀河の大きさを考えると、織姫と彦星は
すごく近くに住んでいるのでは…？

同じ町内会に住んでいるくらいの感覚な気がする…

実はあまり仲が良くない説？



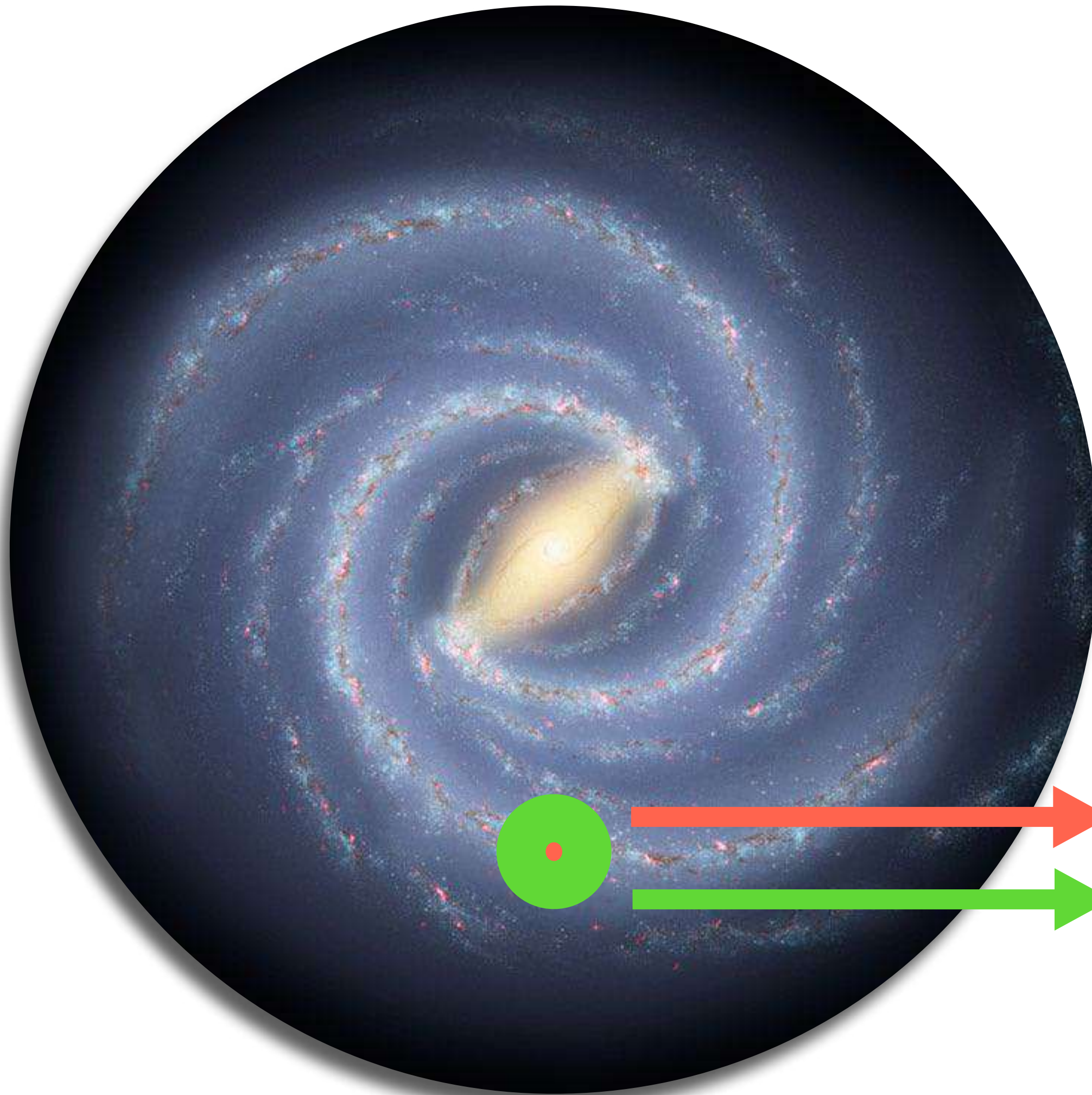
天の川銀河を上から見た想像図



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

我々が目で見ている星空はせいぜい町内会レベル

天の川銀河の想像図



天の川銀河の他の部分何があるのか?
何が起きているのだろうか?

直接見に行けないから、地球に届く光
を観測する学問、それが天文学

太陽系の場所 (= 地球の場所)

目で見える星の範囲 (~1万光年)



お品書き

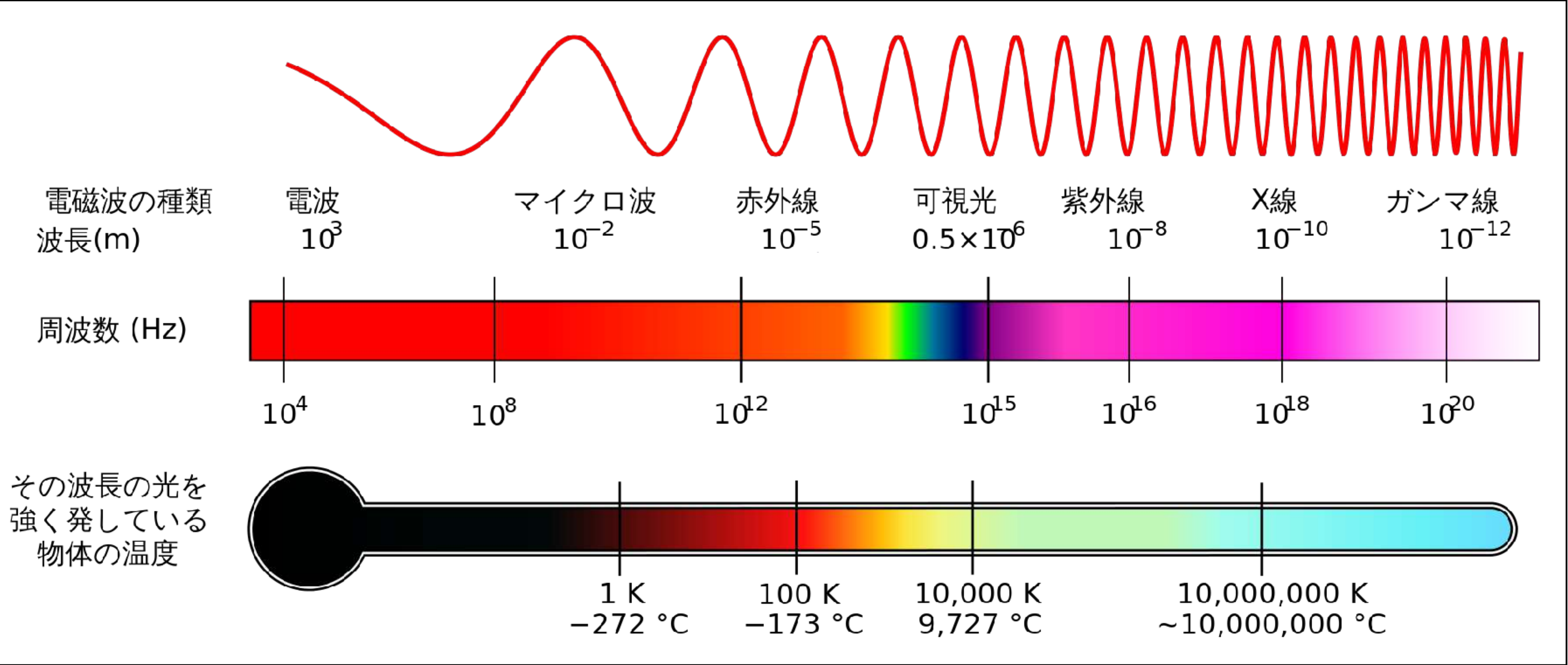
- 1. ご挨拶
- 2. 七夕のお話
- 3. 天文学のお話
- 4. アルマ望遠鏡のお話
- 5. 研究のお話
- 6. まとめ

前半

後半

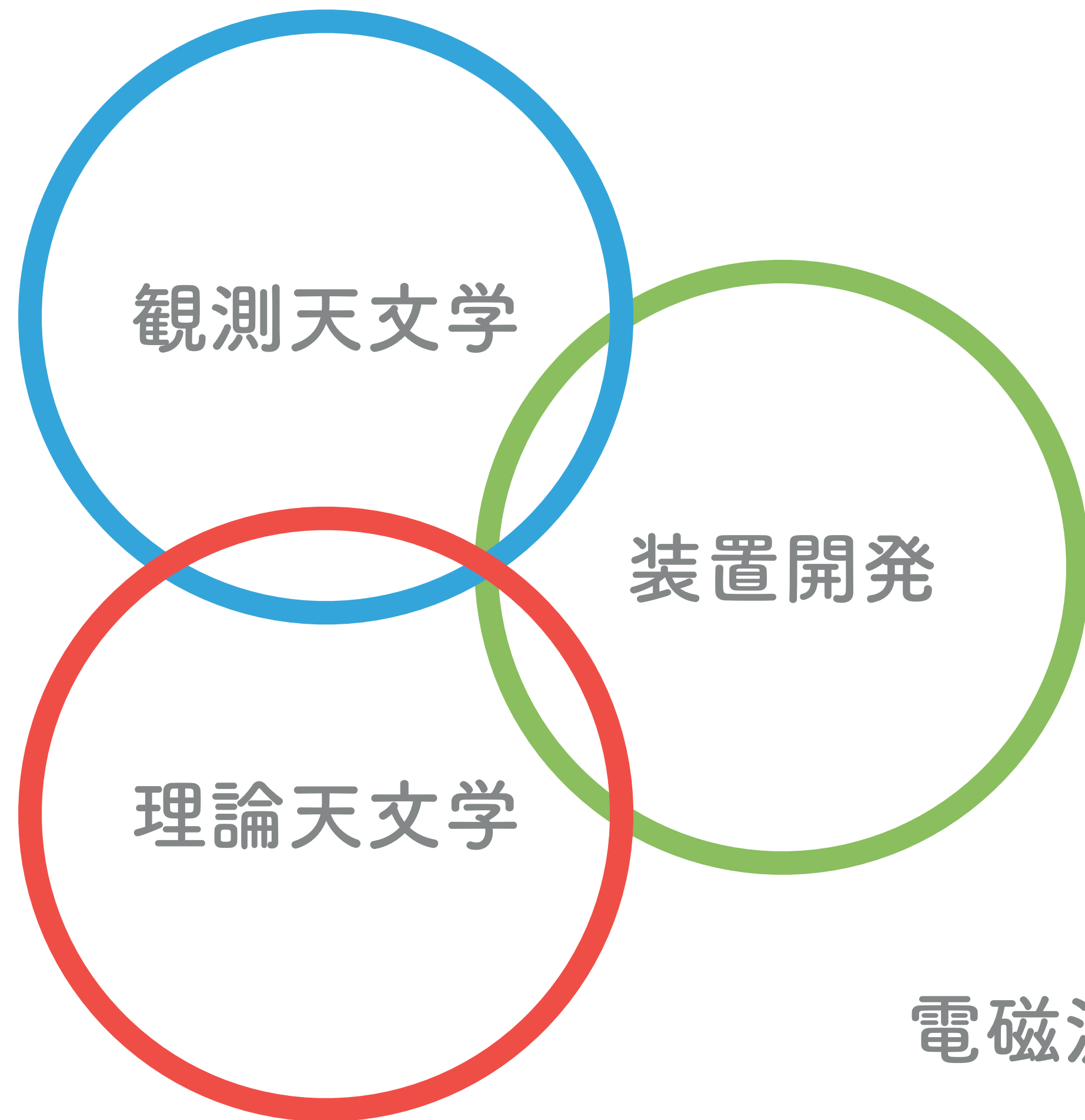
直接見に行けないので、地球に届く光(=電磁波)を観測する、それが天文学

「電磁スペクトル」『フリー百科事典 ウィキペディア日本語版』





天文学の発展の歴史



可視光（紀元前2000年）

赤外線（1800年）

可視光以外の電磁波の発見(太陽)

電波（1931年）

長距離通信研究で発見

X線（1963年）

ロケットに検出器をつけてみたら発見

γ線（1967年）

アメリカの核実験監視衛星が発見

ニュートリノ（1987年）

カミオカンデが発見

重力波（2016年）

アインシュタインの予想から100年で発見

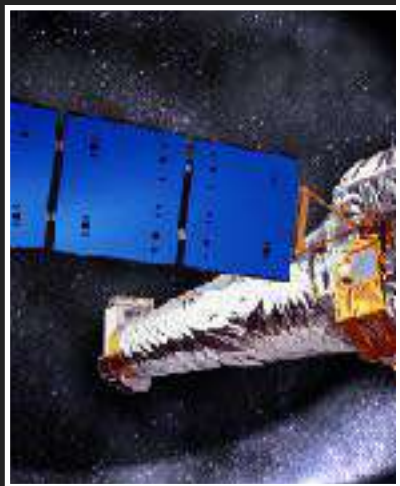
電磁波じゃない！

電磁波天文学

Centaurus A (ケンタウルス座A)



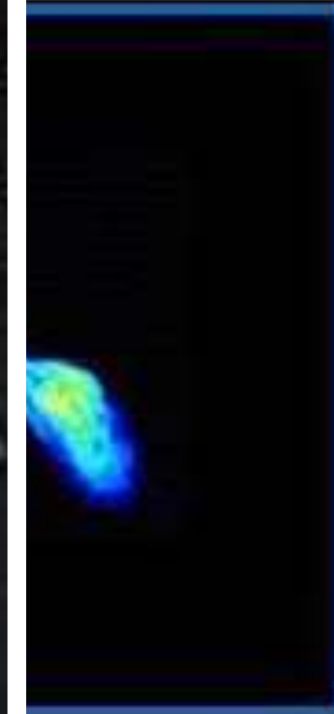
X-ray



← 高温



radio



→ 低温

A radio-loud elliptical galaxy

+ warped gas disk + super massive black hole
+ relativistic jet

※ 齊藤が修士1年生だった
時の講演会資料です…

天の川銀河の多波長観測

天の川をさまざまな望遠鏡で撮影した写真

電波 (408 MHz)

水素原子 (1.4 GHz)

電波 (2.4 GHz)

CO分子 (115 GHz)

中間赤外線

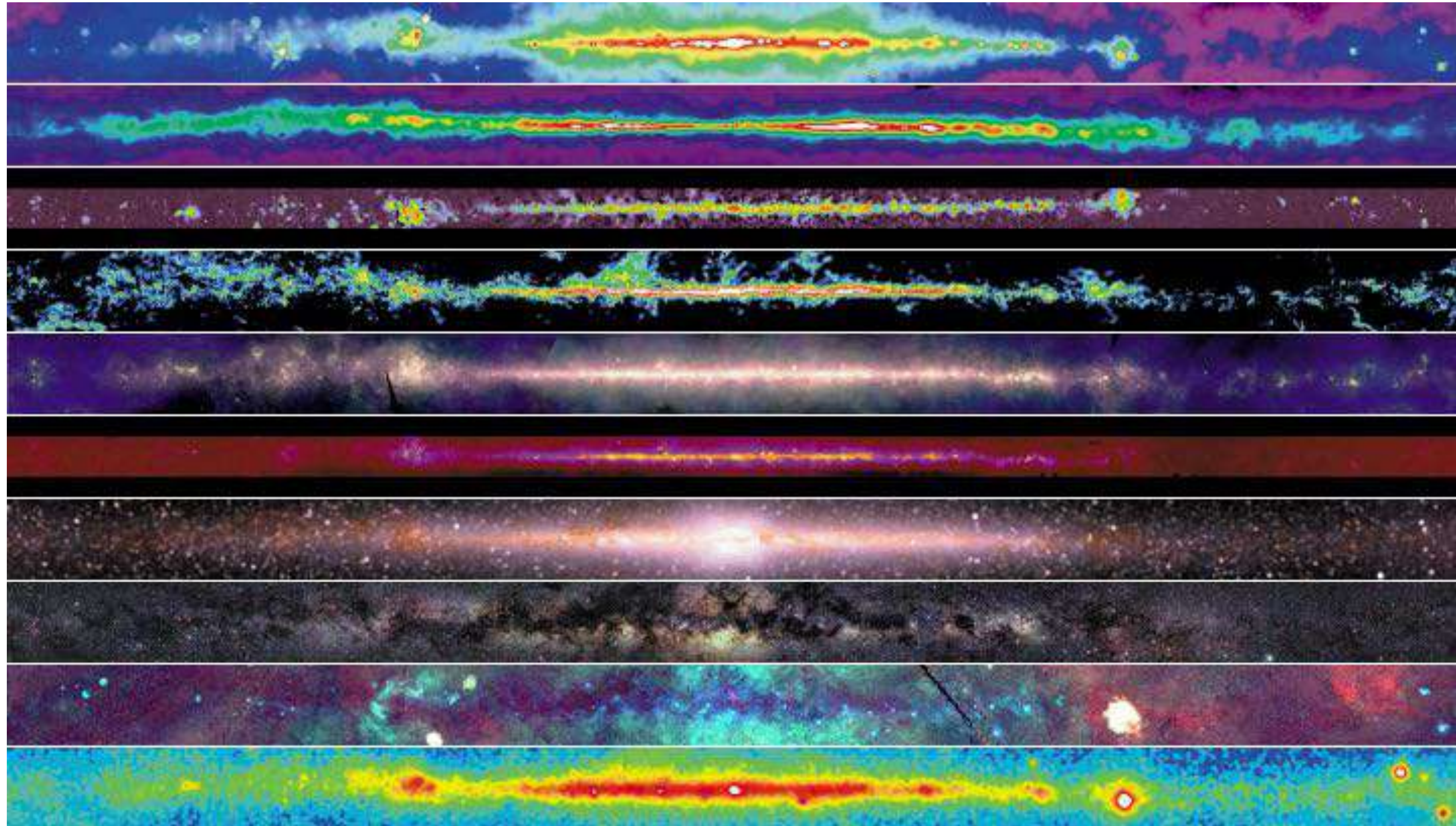
中間赤外線

近赤外線

可視光 (人間の目)

X線

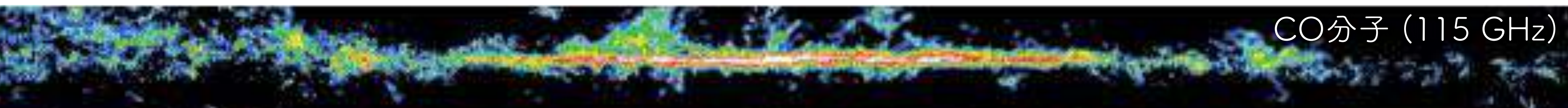
ガンマ線



天の川銀河の多波長観測



可視光 (人間の目)



CO分子 (115 GHz)

隠された宇宙と電波天文学

可視光 (人間の目)

-> 目で見えるものといえば太陽。つまり、恒星からの放射を見ている。黒い帯は光が遮られている場所。

可視光で見える黒い帯と、低温分子ガス(CO分子)の分布は
驚くべきほど綺麗に一致している。

-> 電波天文学は、隠された宇宙を見通すことのできるツール。

CO分子 (115 GHz)

-> 超低温($\sim 260^{\circ}\text{C}$)な分子ガスからの放射を見ている。

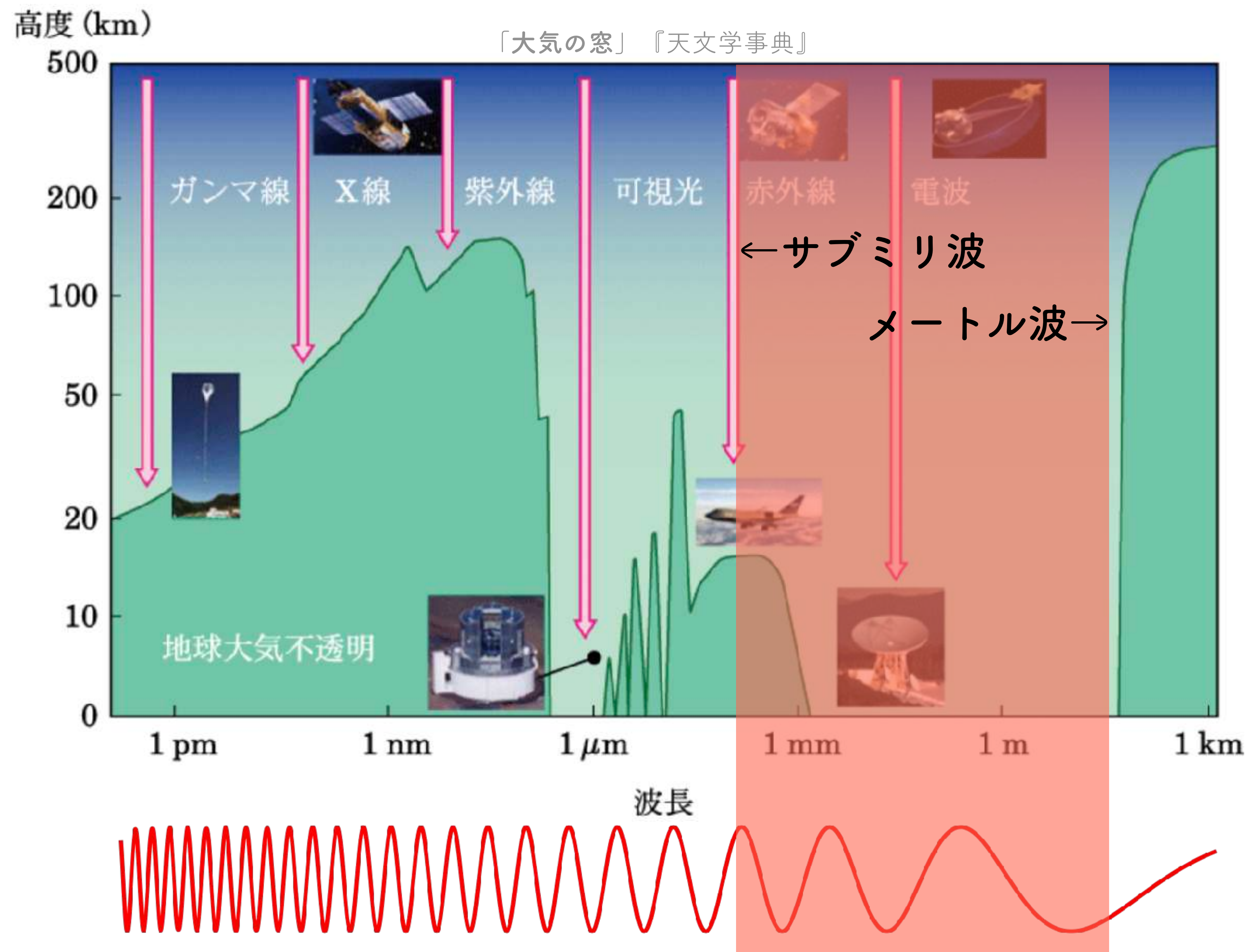
お品書き

1. ご挨拶
2. 七夕のお話
3. 天文学のお話
4. アルマ望遠鏡のお話
5. 研究のお話
6. まとめ

前半
後半

アルマ望遠鏡…の前に…

Q. なぜ望遠鏡を地上に置いたり宇宙に飛ばしたりするのか?



A. 波長によっては, 大気が
邪魔になるから.

ただし, 電波の中でも, サブミリ波・
ミリ波からメートル波は, 大気の影響を受けずに観測できる.
→ 電波望遠鏡は, 基本地上に置く.

世界の電波望遠鏡

野辺山 45m ミリ波望遠鏡
(今年のコ○ン君の映画では大活躍…)



Credit: 齊藤

アレシボ 305m センチ波望遠鏡
(火山の火口に設置された固定型天文台)



天文学事典, <https://naic.nrao.edu/ao/photos>

ソフィア 2.5m サブミリ波・遠赤外線望遠鏡
(ボーイング747を改造した飛行天文台)



NASA photo / Jim Ross

望遠鏡は口径が大きいほど視力が高い - 大きい望遠鏡が欲しい!

グリーンバンク 100m 電波望遠鏡 (可動型としては世界最大)

@1988年11月15日

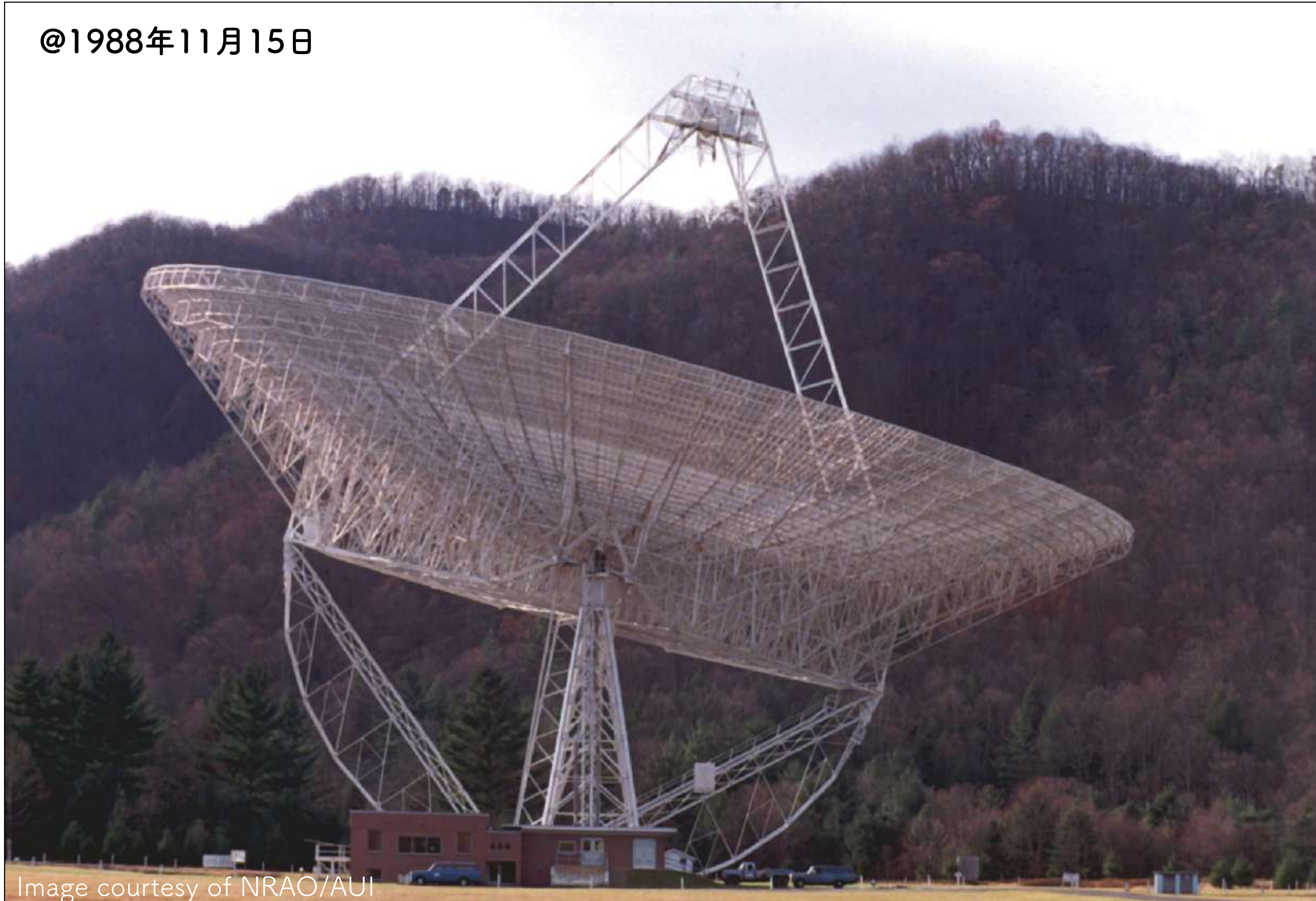


Image courtesy of NRAO/AUI

望遠鏡は口径が大きいほど視力が高い - 大きい望遠鏡が欲しい!

グリーンバンク 100m 電波望遠鏡 (可動型としては世界最大)

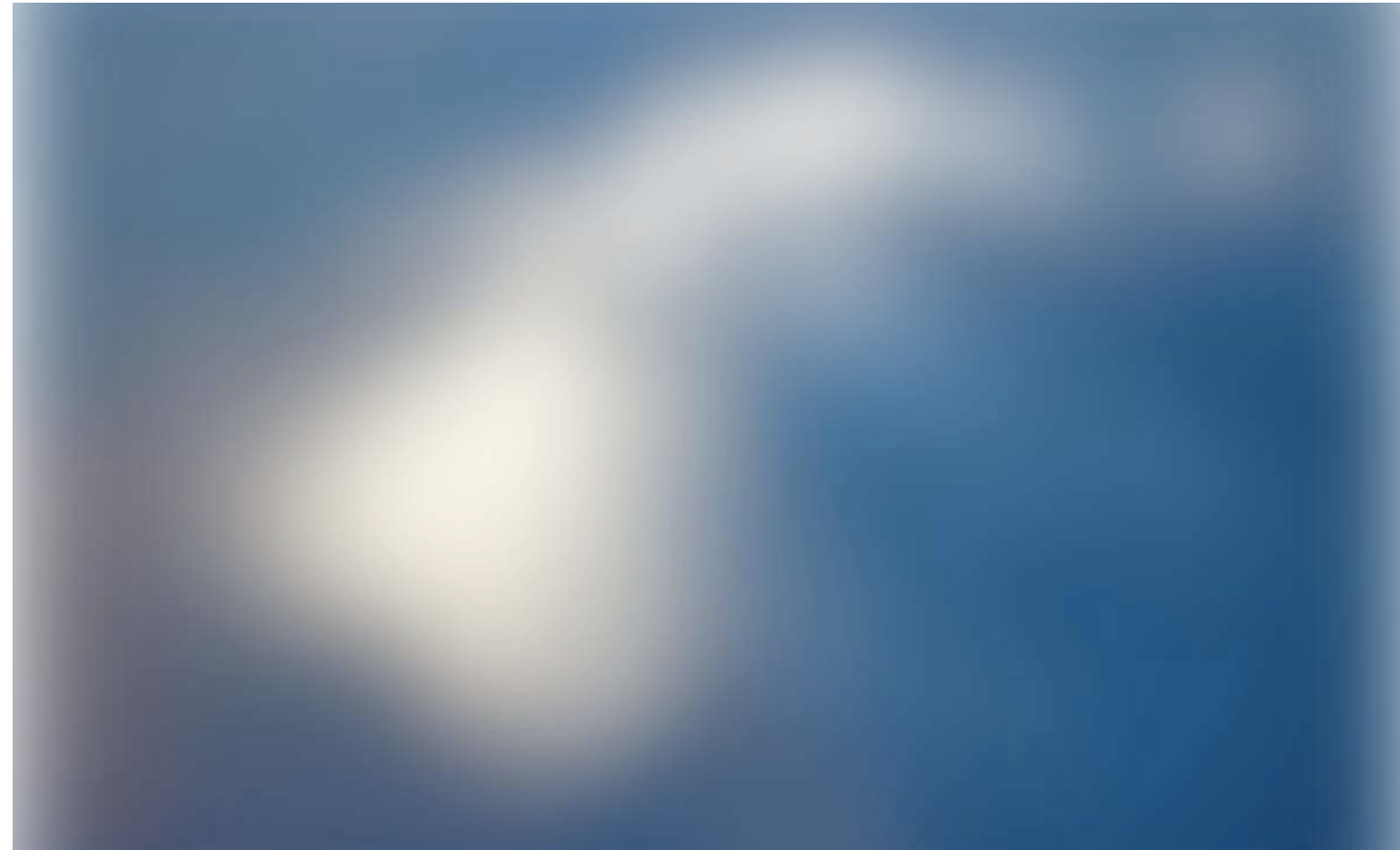
@1988年11月16日



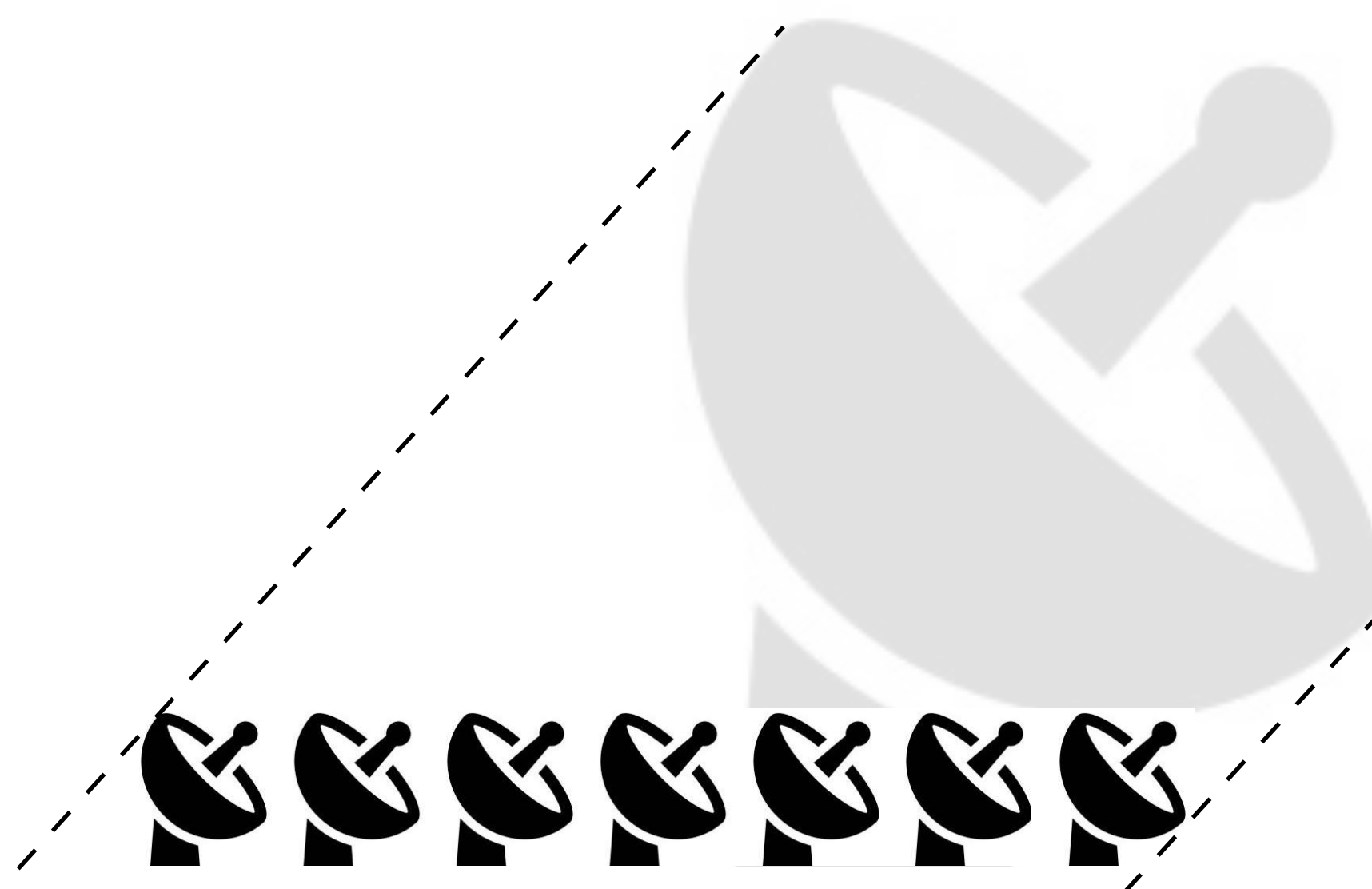
Image courtesy of NRAO/AUI

電波干渉計の登場!

小口径の望遠鏡で観測した場合



大口径の望遠鏡で観測した場合



大きいと壊れてしまう…

小さいやつを並べよう!



世界最大の電波望遠鏡: アルマ (ALMA)

Atacama **L**arge **M**illimeter/submillimeter **A**rray

南米チリのアタカマ砂漠

ミリ波・サブミリ波(を観測する)

巨大

アレイ(望遠鏡群)

南米チリに建設。日本+台湾+韓国、北米、欧州の国際協力。66台のアンテナを最大16kmの範囲に展開し、巨大な望遠鏡を実現。これまでの電波望遠鏡に比べて、感度・解像度ともに100倍。標高5000m!



アルマ望遠鏡のココがすごい！

高精度パラボラアンテナ66台
直径12mが54台、7mが12台
このうち日本製は12m 4台、7m 12台
(アタカマコンパクトアレイ)



アルマ望遠鏡に使われた技術がすごい！

アルマ望遠鏡のココがすごい！

表面の凸凹は髪の毛の1/3以下！



超高感度受信機を
国立天文台で作成



アンテナで集められた信号
を処理する「相関器」。
4秒でDVD1枚がいっぱい
になってしまうデータ量。
標高5000mでも正常に動作
させなくてはならない。

アルマ望遠鏡に使われた技術がすごい！

アルマ望遠鏡のココがすごい！

天体の電波は微弱。
観測条件の良い場所が必須！



アルマ望遠鏡を作った場所がすごい！

アルマ望遠鏡に行こう：日本からチリ/サンペドロ

Courtesy of D. Iono



飛行機+車で1日半
時差12-13時間、季節も逆
標高5000m

アルマ望遠鏡を作った場所がすごい！

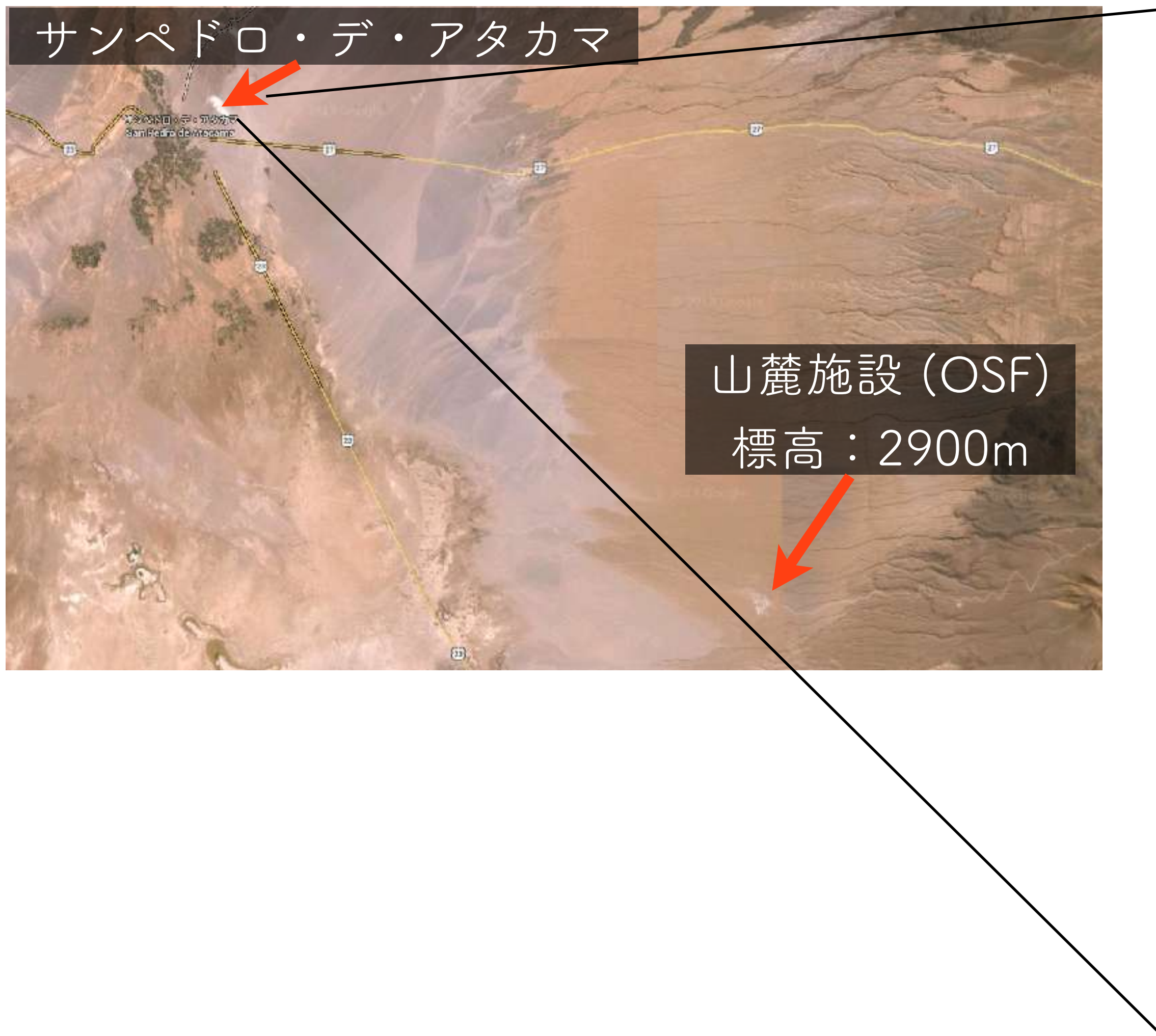
アルマ望遠鏡に行こう：日本からチリ/サンペドロ



アルマ望遠鏡に行こう：サンペドロで一泊



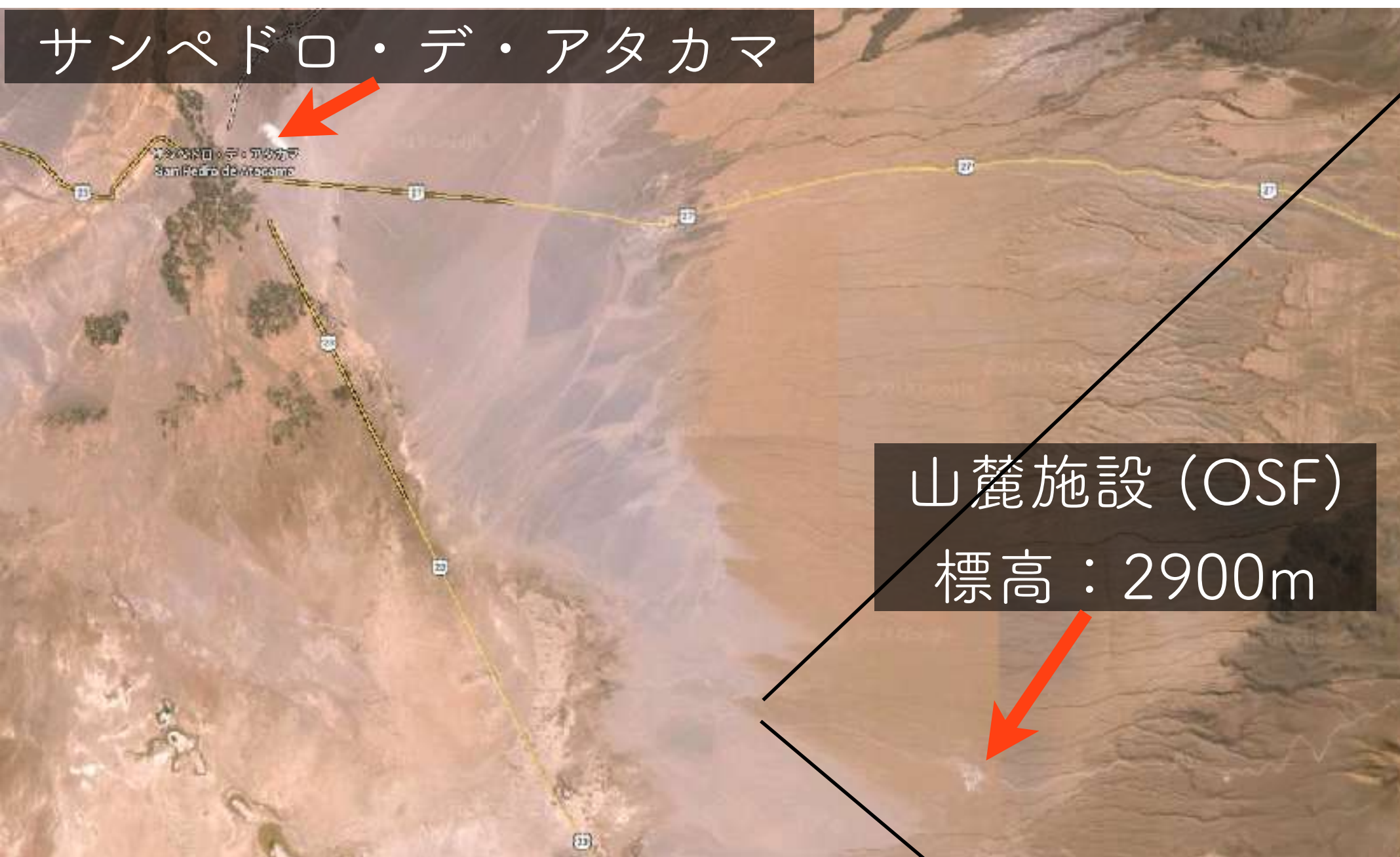
アルマ望遠鏡に行こう：サンペドロで一杯



アルマ望遠鏡に行こう：OSFまでの道中



アルマ望遠鏡に行こう：OSFまでの道中



アルマ望遠鏡に行こう：OSFで一泊











アルマ望遠鏡のココがすごい！



標高5,000mで空にしたペットボトルは、
地上だとペシャンコに…

アルマ望遠鏡のココがすごい！



アルマ望遠鏡のココがすごい！

アルマ望遠鏡の最大視力は・・・？

6000!

アルマ観測中！



www.eso.org



お品書き

- 1. ご挨拶
- 2. 七夕のお話
- 3. 天文学のお話
- 4. アルマ望遠鏡のお話
- 5. 研究のお話
- 6. まとめ

前半
後半



宇宙は多種多様な形の銀河で満ち溢れている。



銀河進化の謎

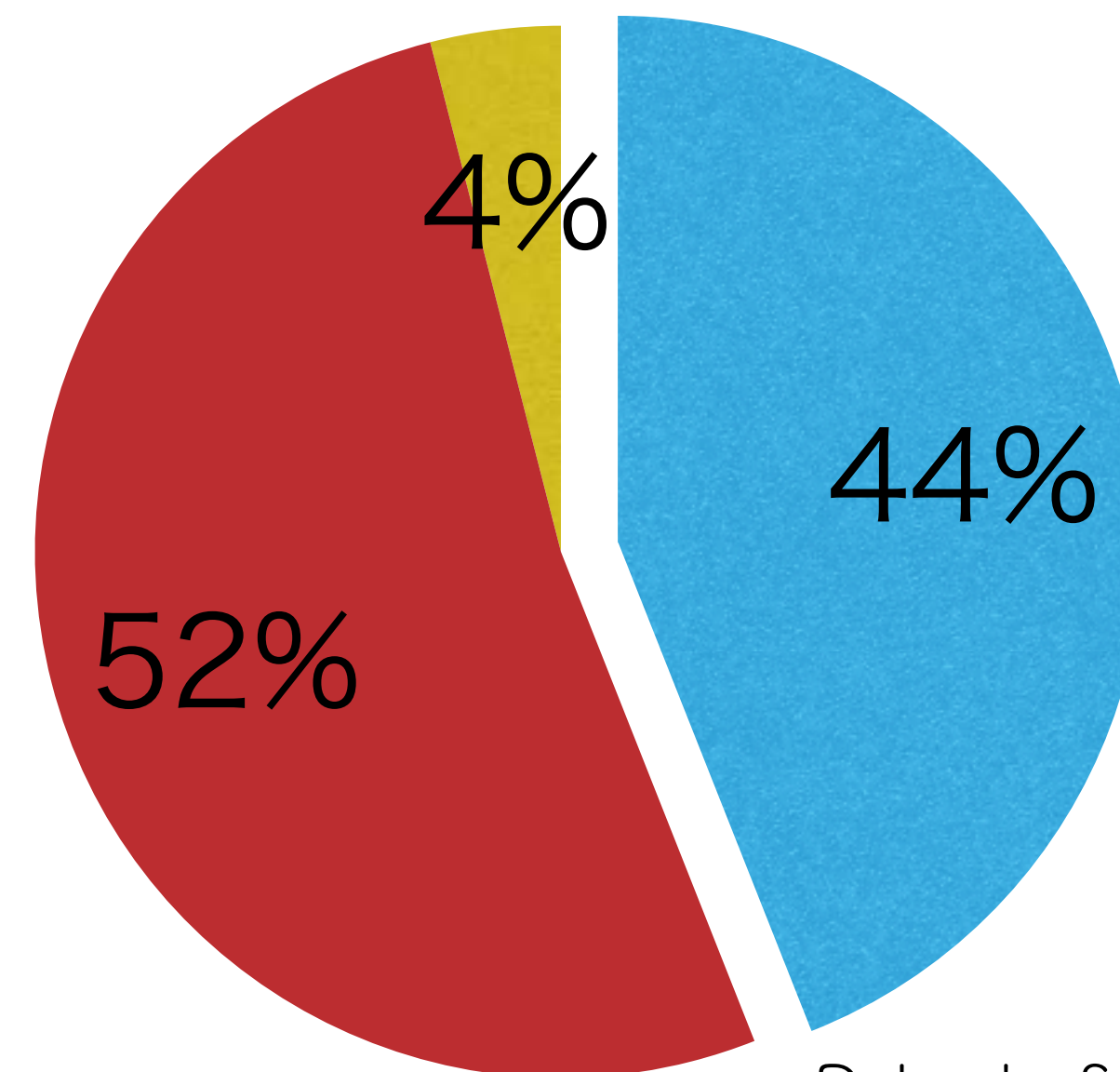
今現在の宇宙は渦巻き型の銀河がほとんど!

天の川銀河は、渦巻き銀河

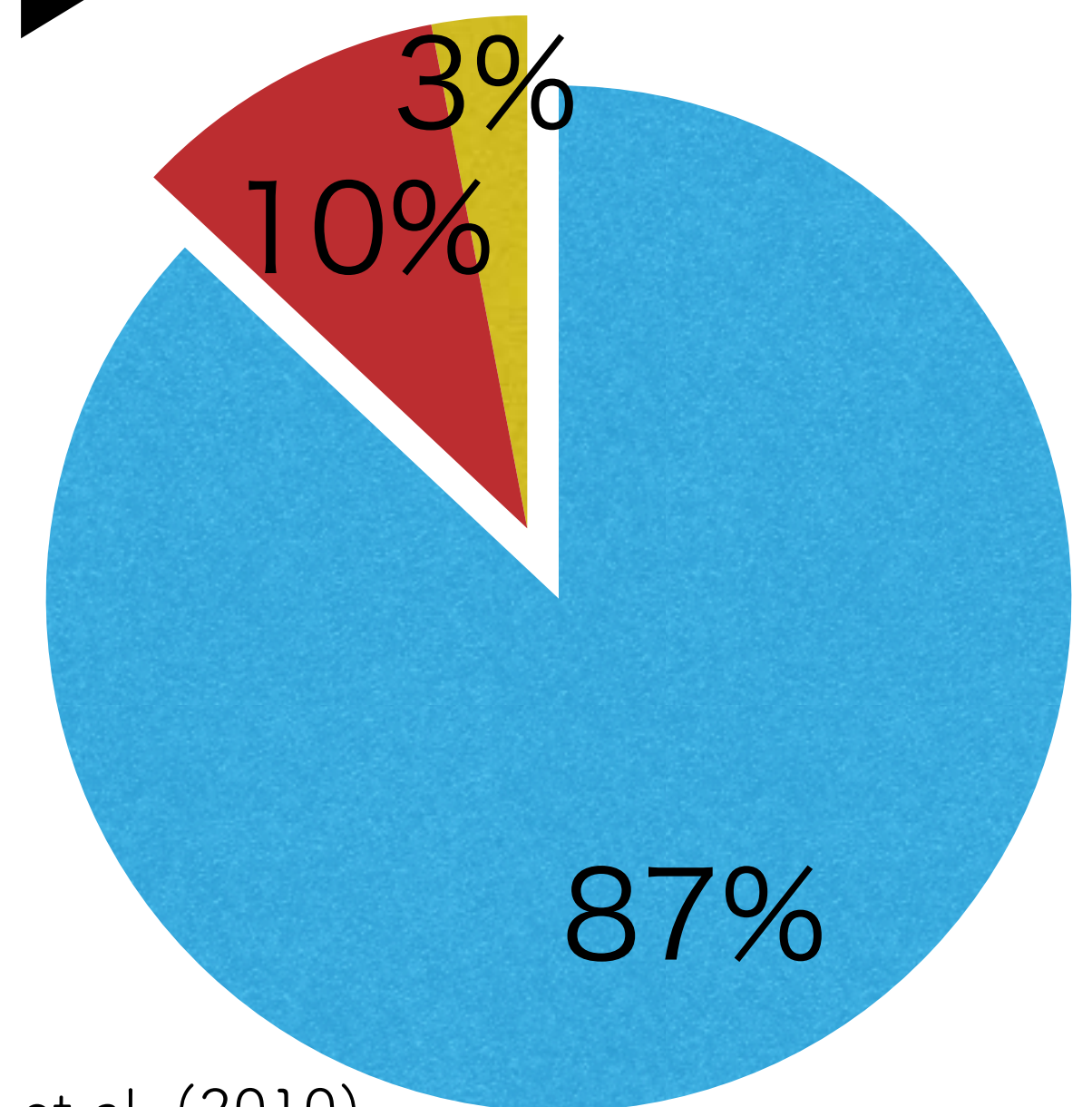
宇宙の時間進化と共に、不規則銀河
が渦巻き銀河に進化?



60億年前の宇宙



現在の宇宙



Delgado-Serrano et al. (2010)

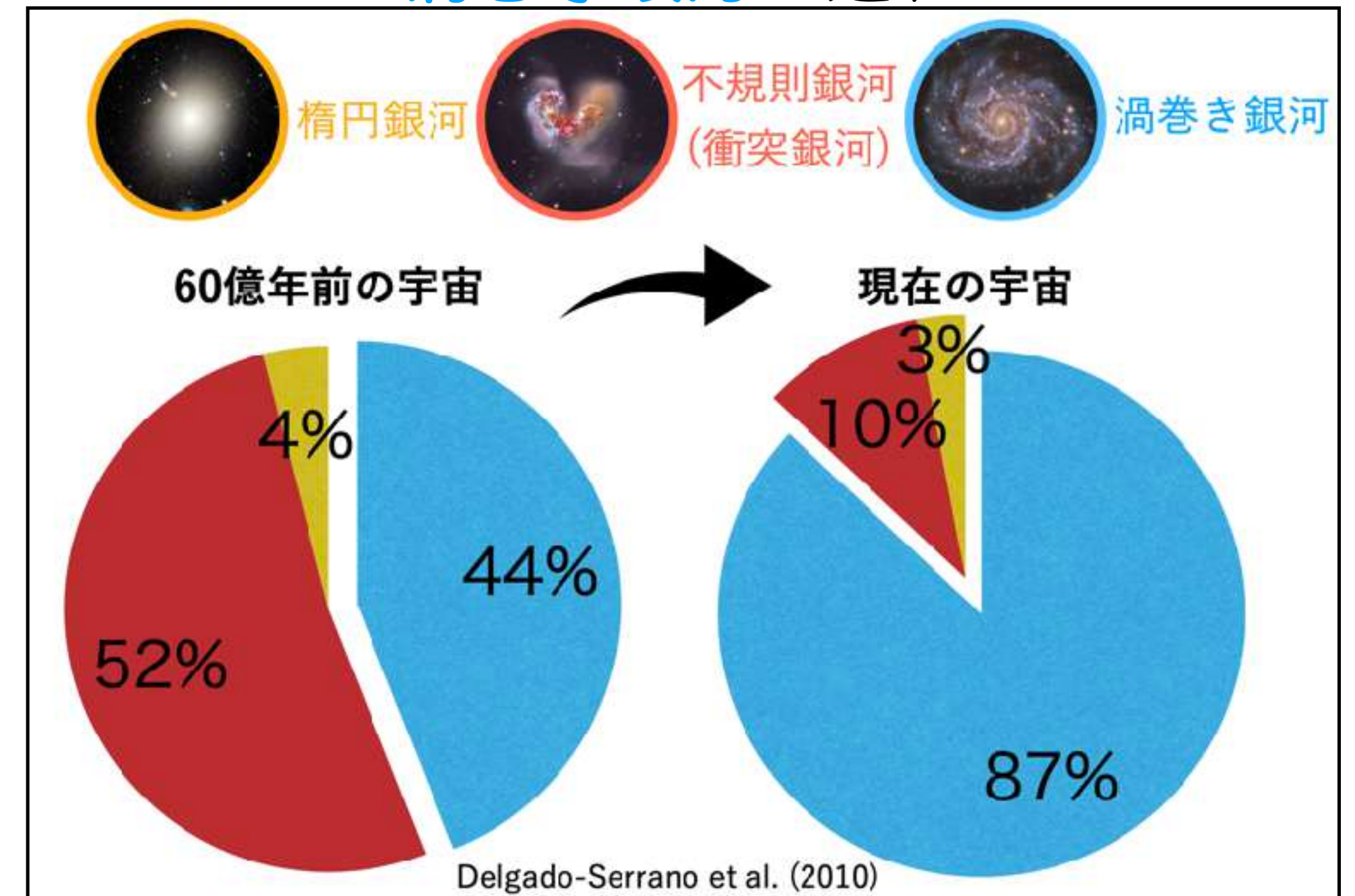
天の川銀河の想像図 (提供: NASA/JPL, Caltech)

銀河進化の謎

銀河衝突により、大きい**楕円銀河**が形成される(定説)



しかし観測事実としては、**衝突銀河**は
渦巻き銀河に進化

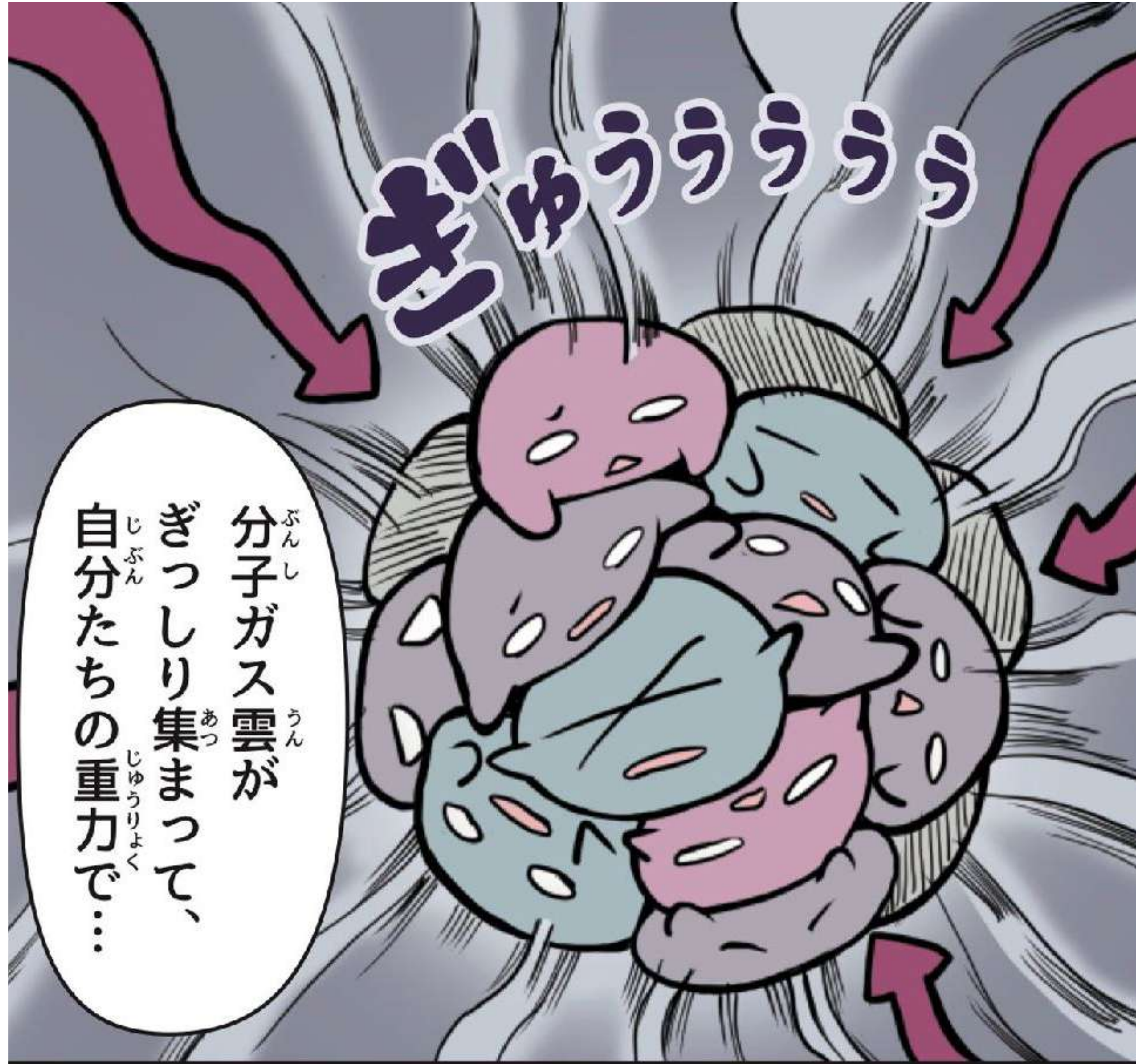


なぜ今現在の宇宙は**渦巻き型**の銀河ばかりなのか？ 衝突銀河で何が起こっているのか？

→ 極論, 我々が住む天の川銀河について人類はまだ何も知らない…

→ 近傍の**渦巻銀河**と**衝突銀河**を調べるのがまず大事。何を調べる？

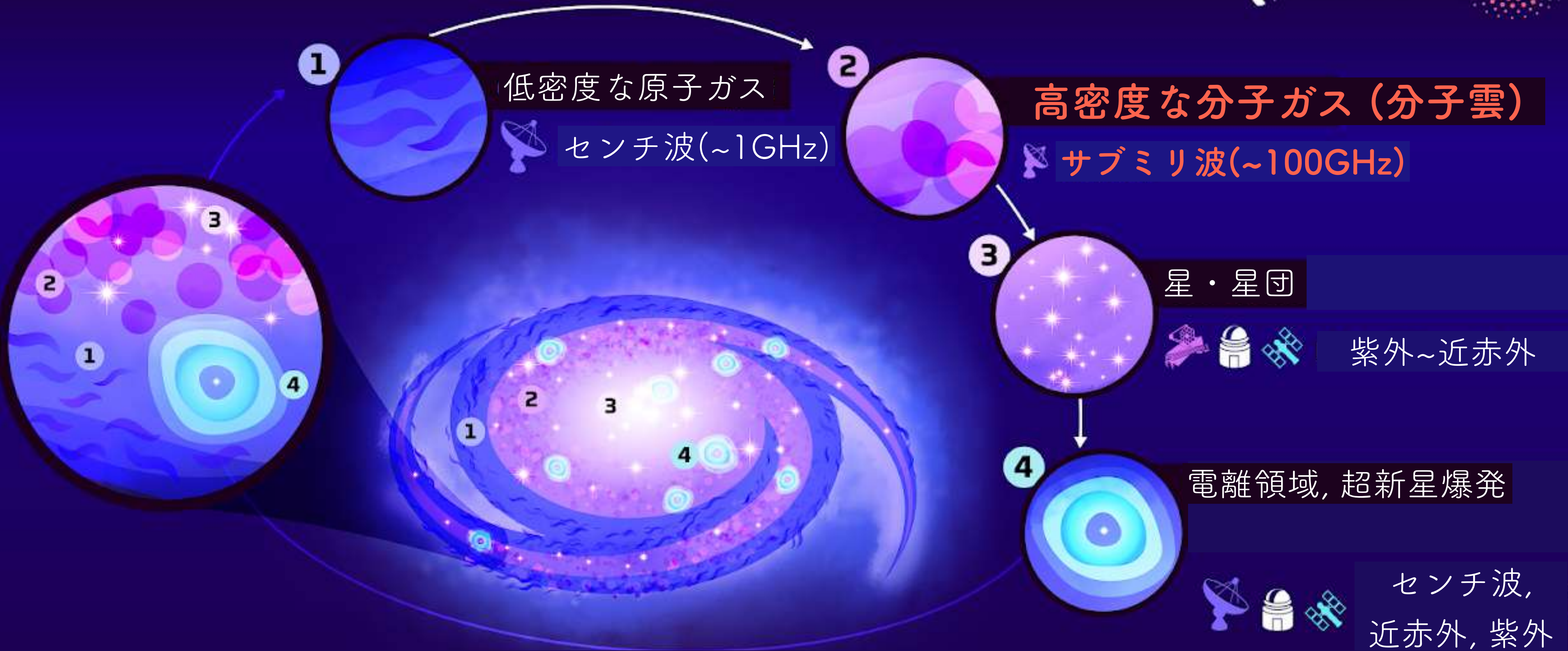
分子ガスの塊（分子雲）から星が生まれる



宇宙における物質のライフサイクル※

※人間の血に鉄分が含まれていることが証拠

Phangs



個々の分子雲が物理・化学状態を変化させながら、星を生み(星形成し)進化していく。
分子雲というミクロな系からなるマクロな系、それが銀河。

PHANGS Collaborationによる銀河進化研究

Eva Schinnerer, Frank Bigiel, Guillermo Blanc, Eric Emsellem, Andres Escala, Brent Groves, Annie Hughes, Kathryn Kreckel, Diederik Kruijssen, Janice Lee, Adam Leroy, Sharon Meidt, Miguel Querejeta, Jerome Pety, Erik Rosolowsky, Patricia Sanchez-Blazquez, Karin Sandstrom, Andreas Schruba, Antonio Usero Gagandeep Anand, Ashley Barnes, Francesco Belfiore, Samantha Benincasa, Ivana Bešlić, Mederic Boquien, Jacob den Brok, Yixian Cao, Rupali Chandar, Jeremy Chastenet, Melanie Chevance, I-Da Chiang, Ilyes Choubani, Enrico Congiu, Daniel Dale, Sinan Deger, Oleg Egorov, Nelida Diaz Fernandez, Cosima Eibensteiner, Chris Faesi, Sina Farahani, Matthew Floyd, Francesca Fragkoudi, Molly Gallagher, Axel Garcia-Rodriguez, Simon Glover, Munan Gong, Katie Grasha, Stephen Hannon, Jonathan Henshaw, Cinthya Herrera, Alex Hygate, Sarah Jeffreson, Maria Jimenez-Donaire, Da Eun Kang, Sarah Kessler, Jaeyeon Kim, Ralf Klessen, Eric Koch, Kirsten Larson, Alexandra Le Reste, Jing Li, James Lilly, Daizhong Liu, Laura Lopez, Joshua Machado, Ness Mayker, Rebecca Minsley, Rebecca McElroy, Angus Mok, Eric Murphy, Lukas Neumann, Nadine Neumayer, Elias Oakes, Eve Ostriker, Hsi-An Pan, Ismael Pessa, Francesca Pinna, Johannes Puschig, Alessandro Razza, Ryan Rickards Vaught, **Toshiki Saito**, Francesco Santoro, Amy Sardone, Mattia Sormani, Fabian Scheuermann, Sophia Stuber, Jiayi Sun, Eltha Teng, David Thilker, Jordan Turner, Leonardo Ubeda, Jose Utreras, Dyas Utomo, Schuyler Van Dyk, Stella Vjesnica, Jacob Ward, Elizabeth Watkins, Brad Whitmore, Thomas Williams

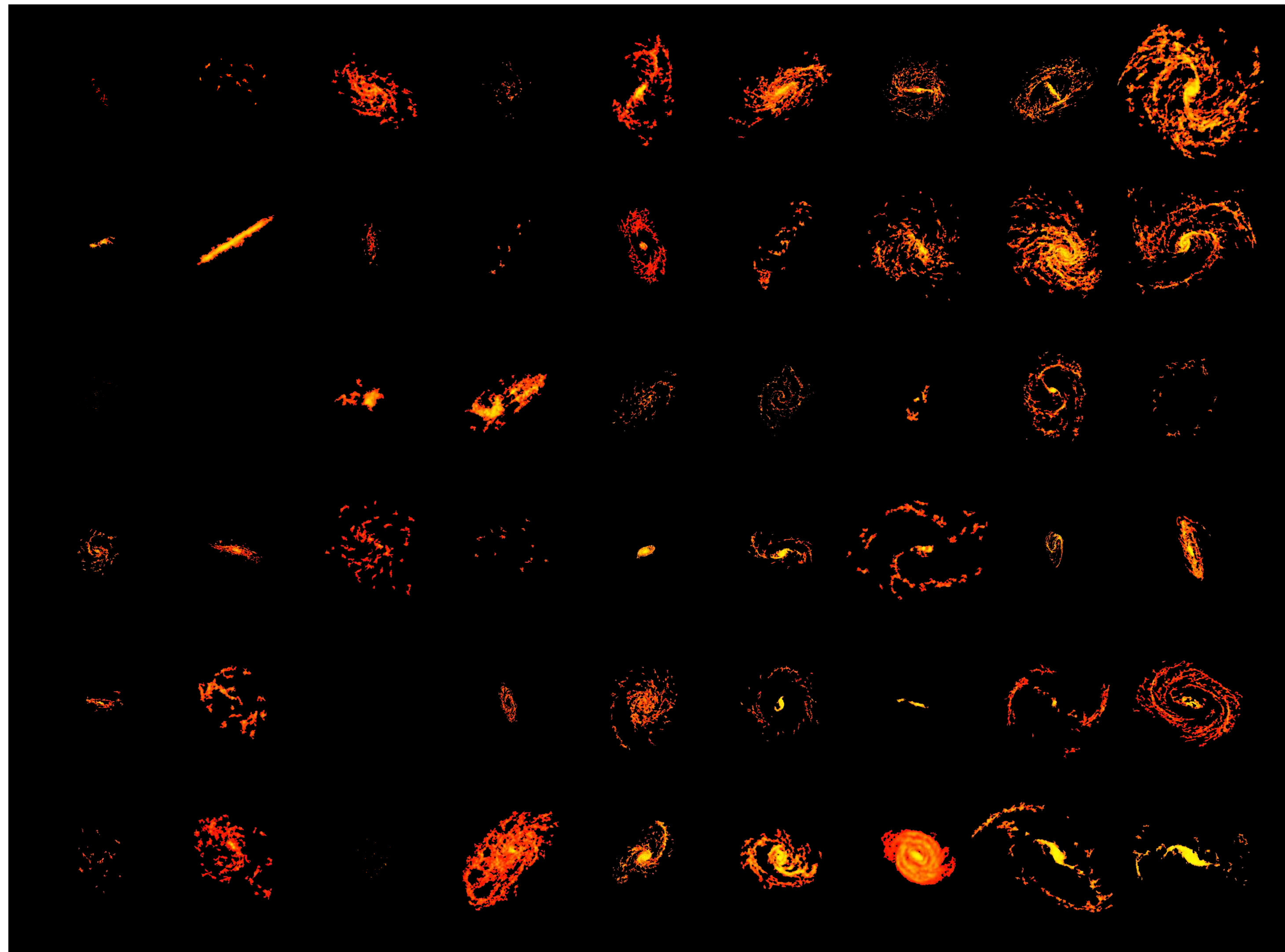


See www.phangs.org

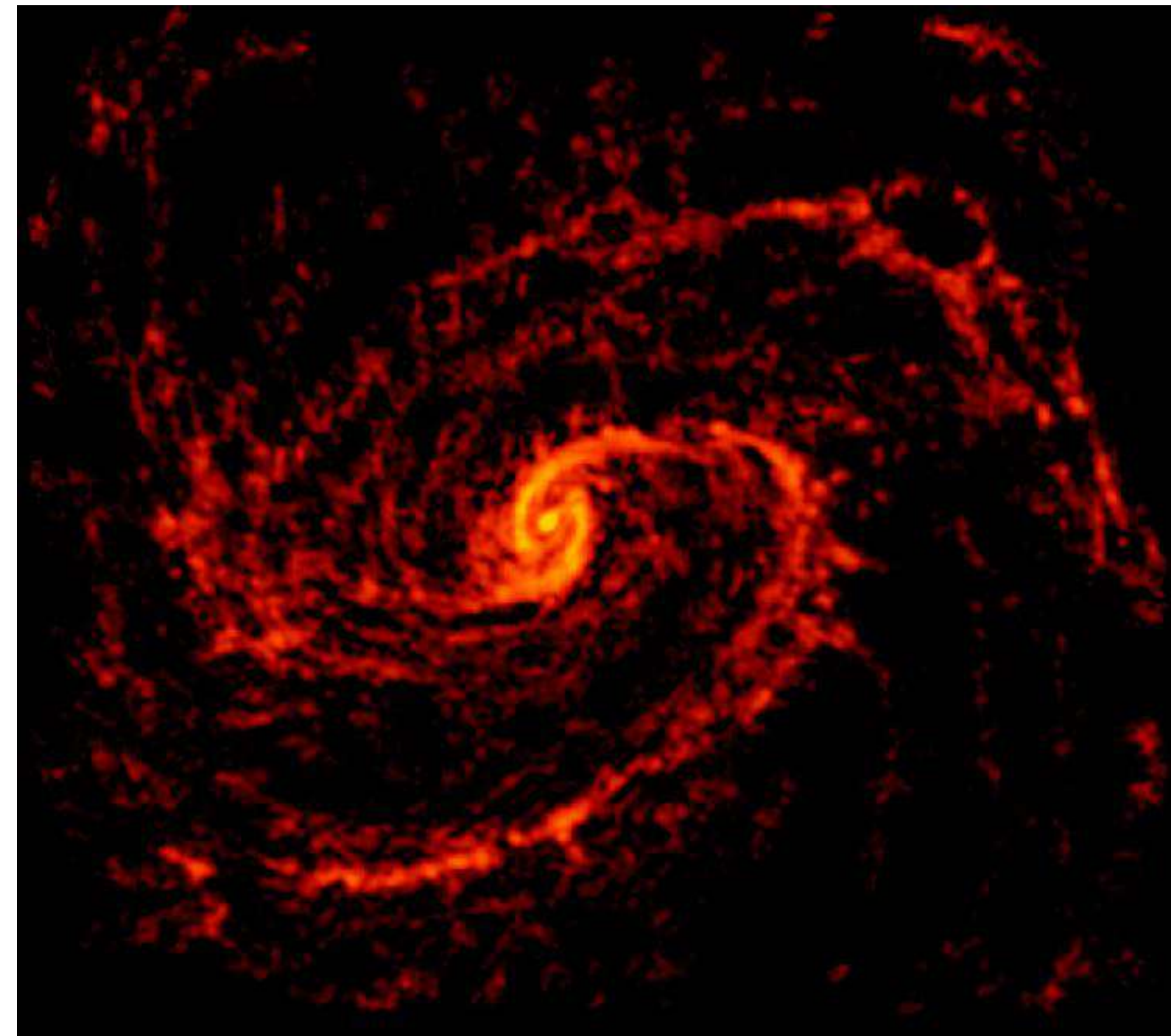
PHANGS meeting 2018 at UCSD



渦巻銀河の研究: ALMA望遠鏡での最大規模分子ガス観測



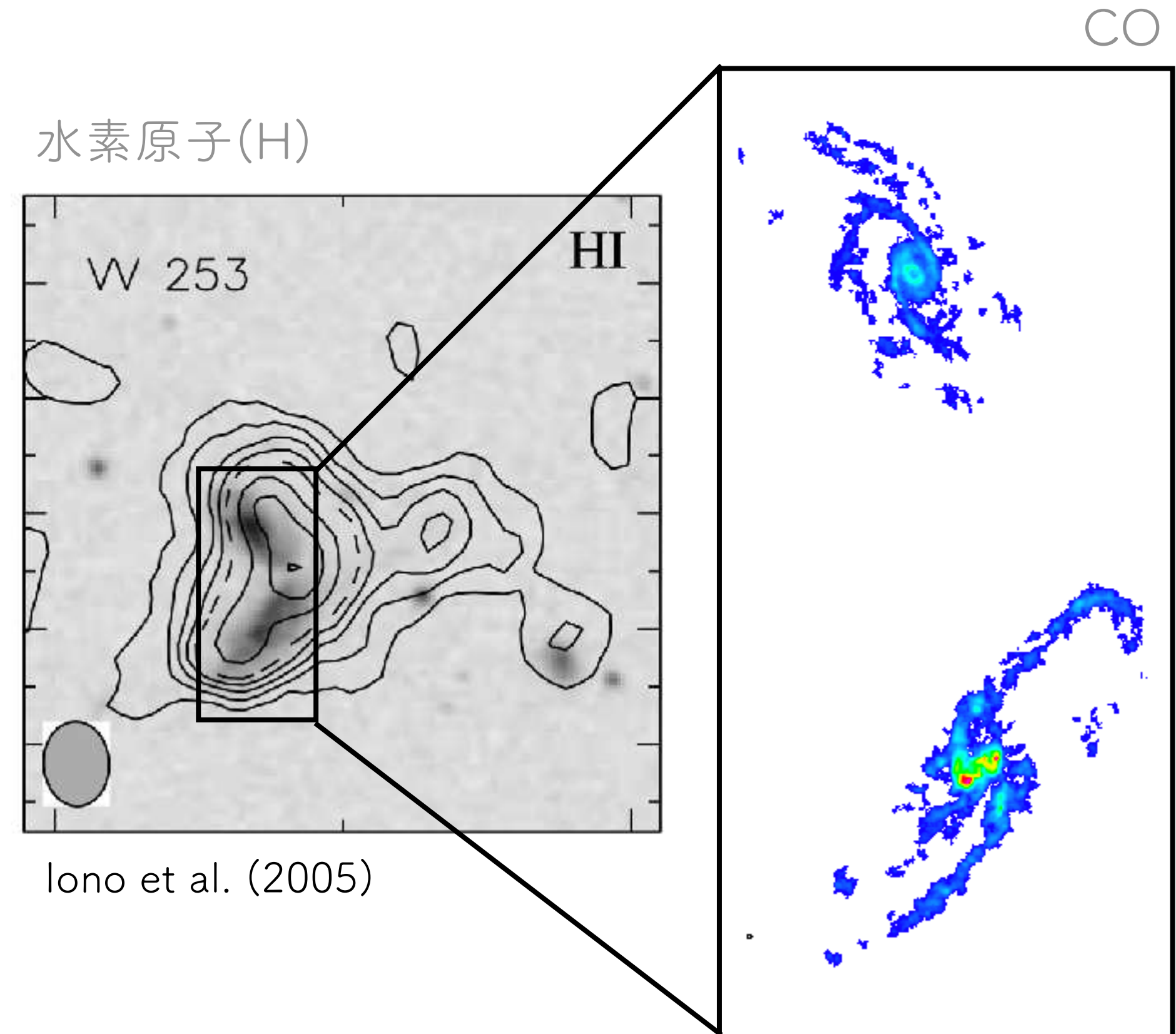
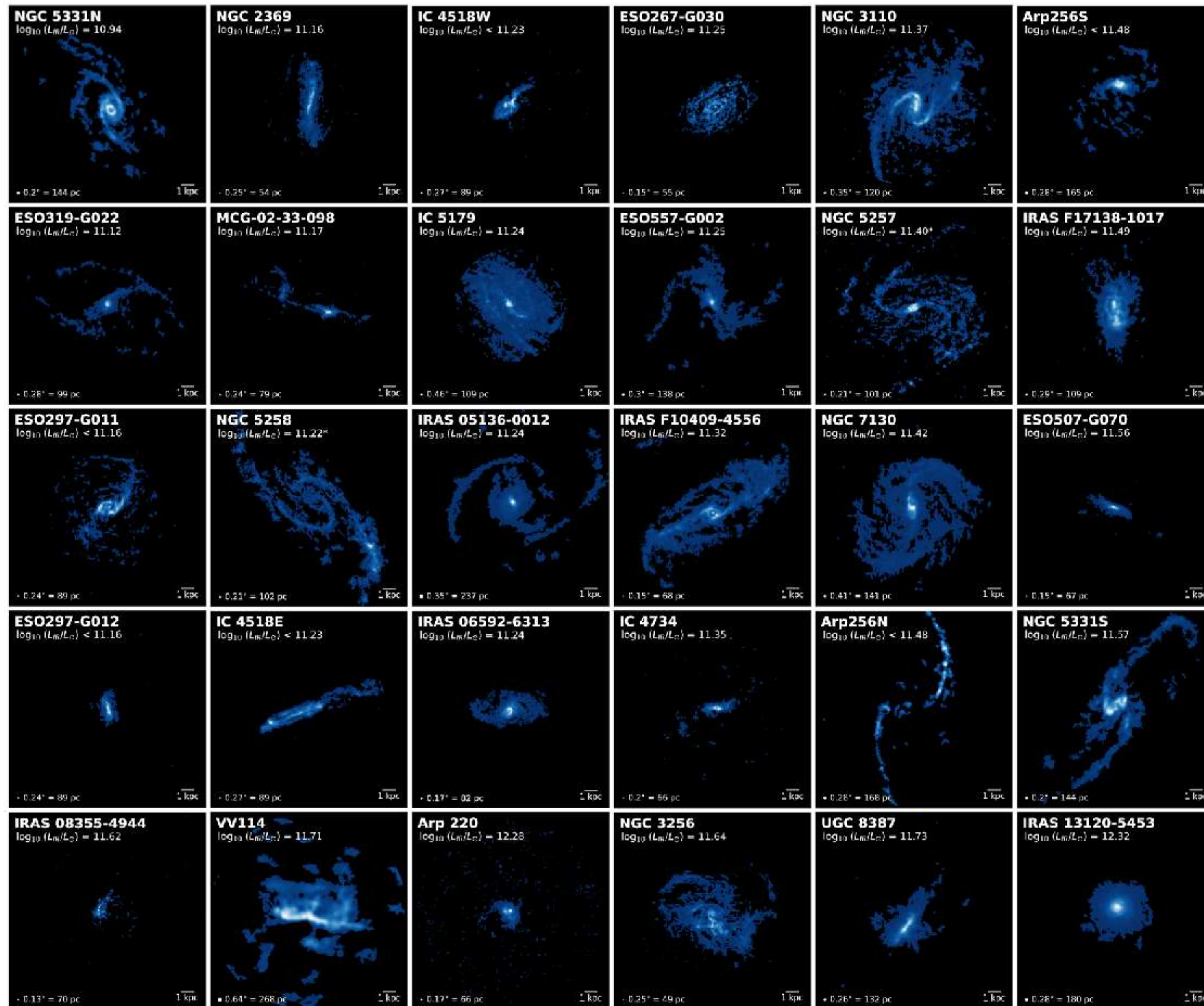
低質量銀河



高質量銀河

一つ一つの小さな点が分子雲
(星が生まれるかもしれない場所)

斉藤が率いている衝突銀河大規模分子ガス観測



分子ガスの物理状態に違いはある？

運動エネルギー

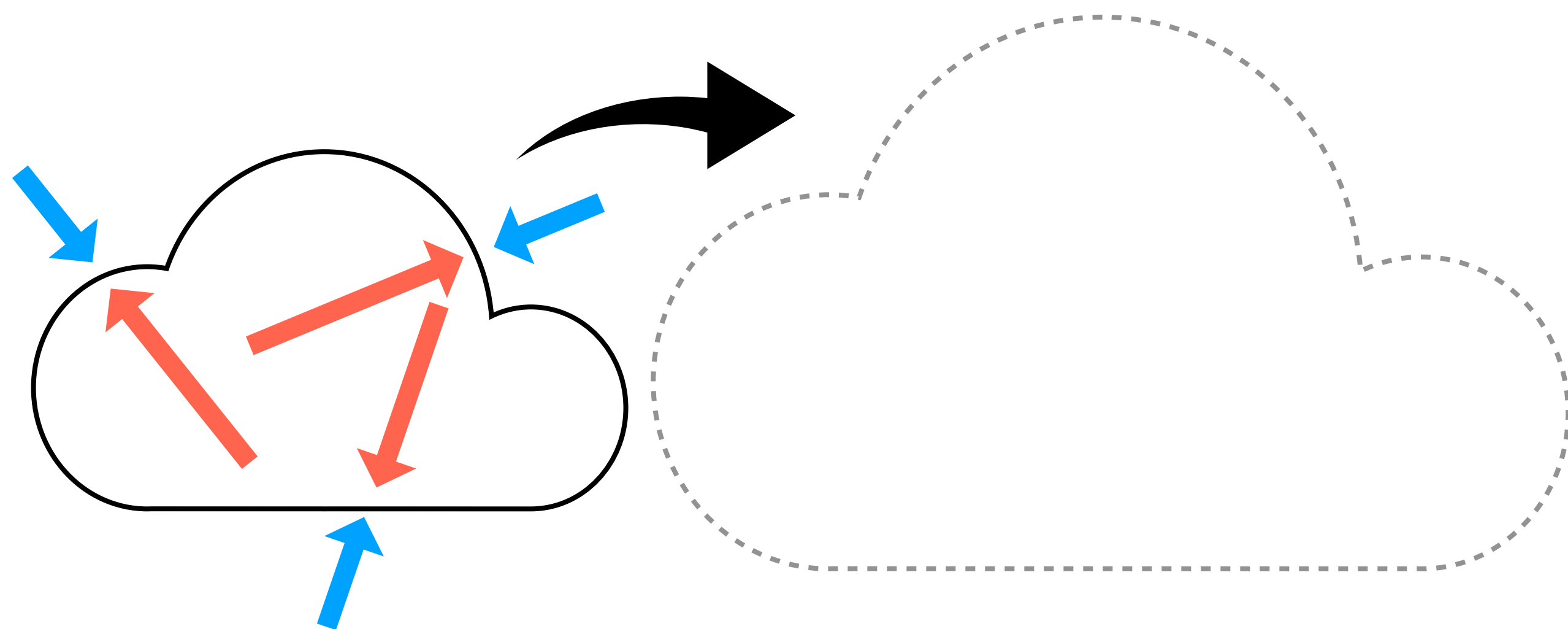
重力エネルギー

$$\text{ビリアル定理} \quad 2\langle T \rangle + \langle V \rangle = 0$$

内部運動（外に向かって押す力）と 重力（内側から引く力）は（安定していれば）釣り合う

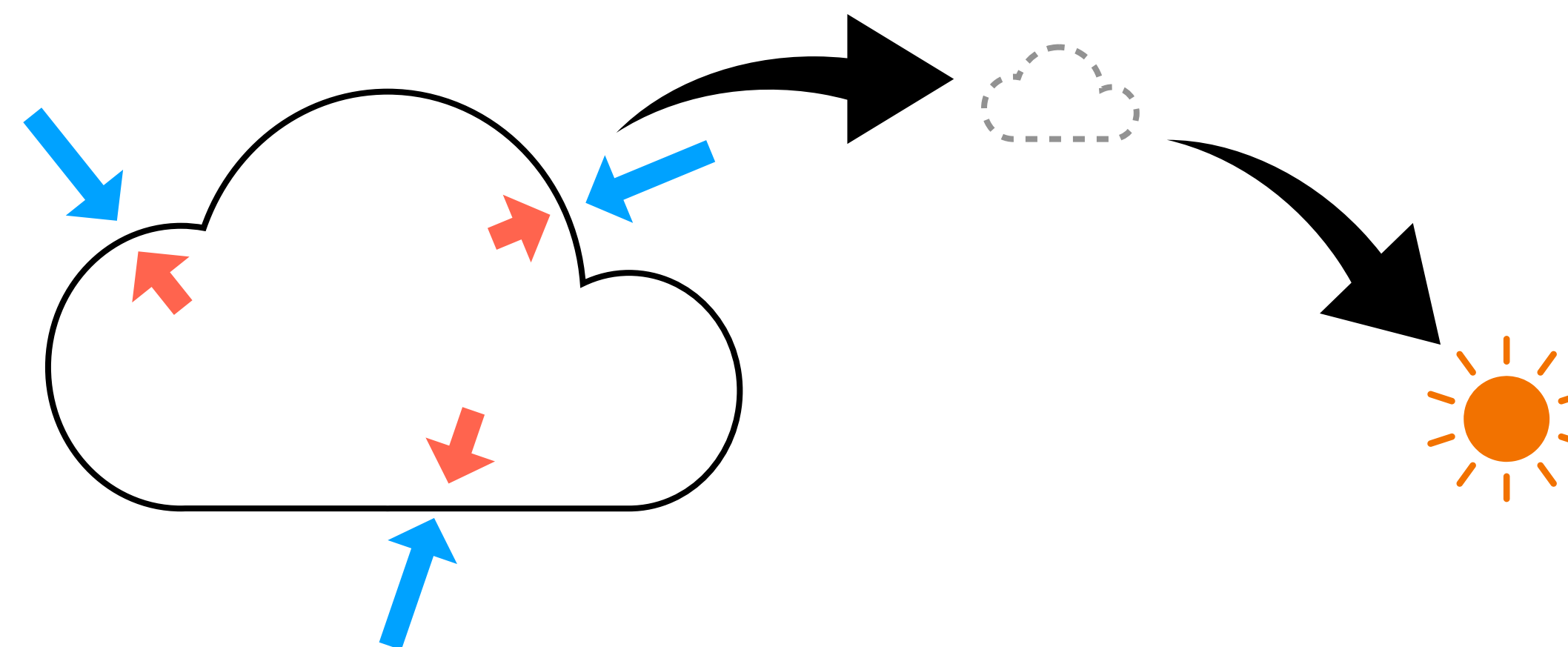
分子ガスの塊（分子雲）について考えてみる…

押す力が強すぎると…



分子雲はふわっと消えてしまう…
（分子ガスは観測できない）

逆に押す力が弱すぎると…



すぐ潰れて星になってしまう
（分子ガスは観測できない）

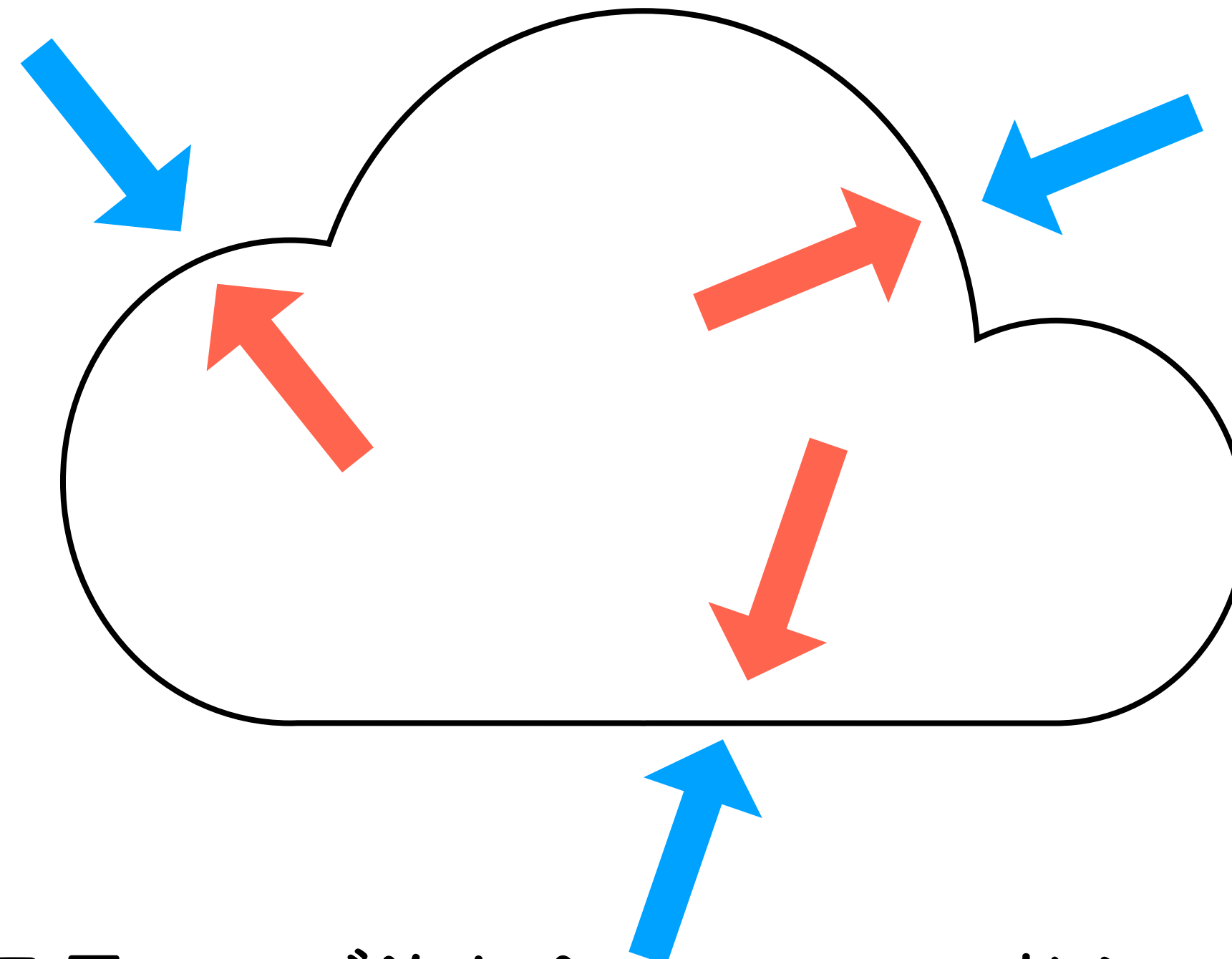
分子ガスの物理状態に違いはある？

$$\text{ビリアル定理} \quad 2\langle T \rangle + \langle V \rangle = 0$$

押す力 と 重力 (引く力) は (安定していれば) 釣り合う

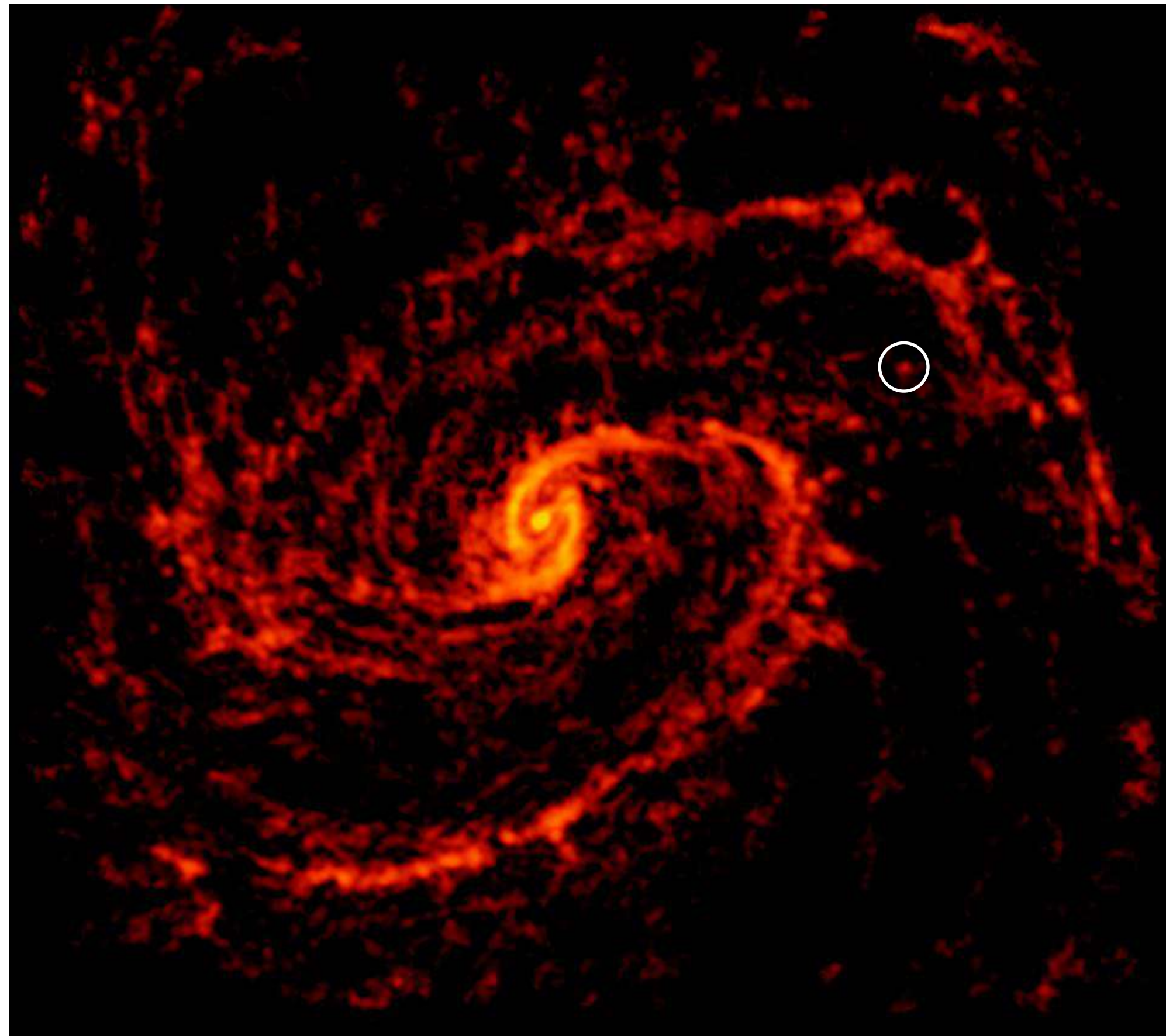
分子ガスの塊 (分子雲) について考えてみる…

我々人類は、ほとんどの銀河から分子ガスを検出できているので…



分子雲はほぼ釣り合っていると考えるべき
(分子ガスはいつでも観測できる)

分子雲の物理状態を調べる



引く力(重力)を計測する



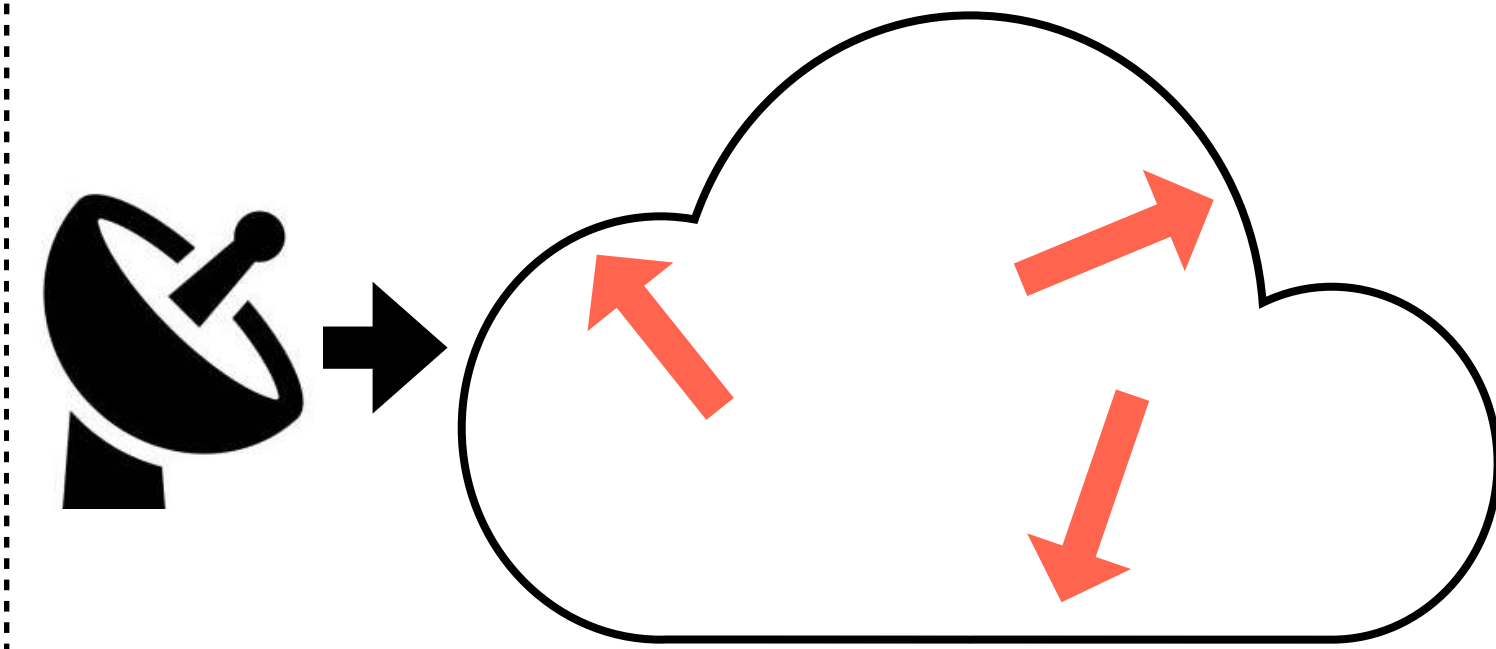
- 明るさ = 物の量 = 重さ
- サイズ = 重心からの距離

$$\text{重力} \propto \text{明るさ} / \text{サイズ}^2$$

一つ一つの小さな点が分子雲
(星が生まれるかもしれない場所)

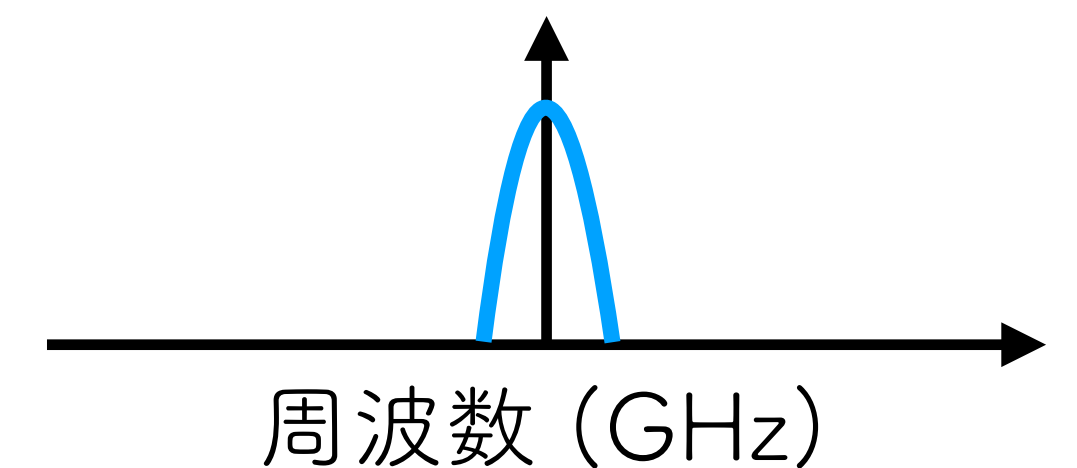
画像認識、統計手法を駆使して全ての銀河、全ての分子雲でこれらの観測量を取得。

押す力を計測する

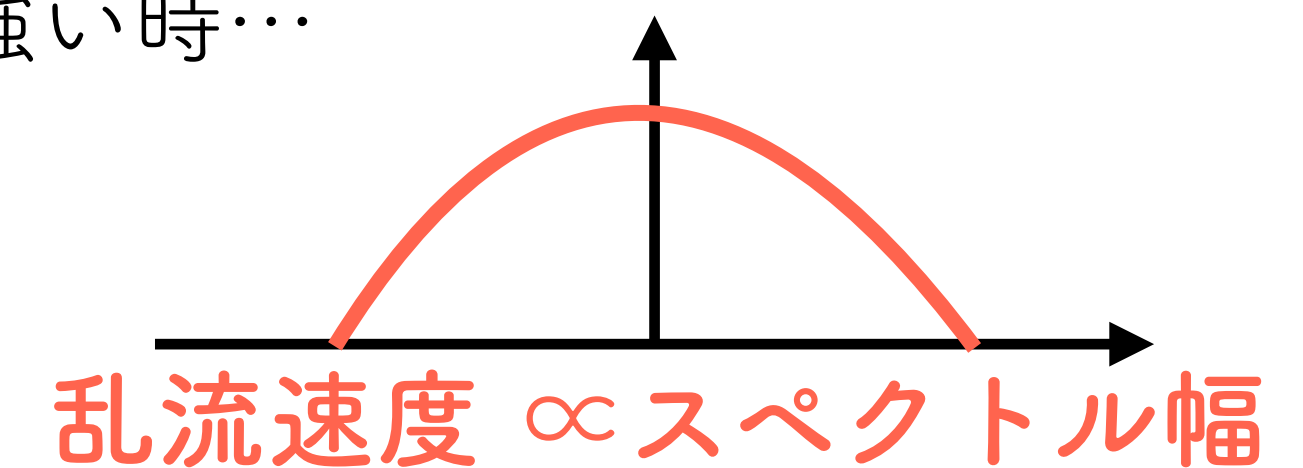


光のドップラー効果により、動きがわかる。

押す力(乱流)が弱い時...



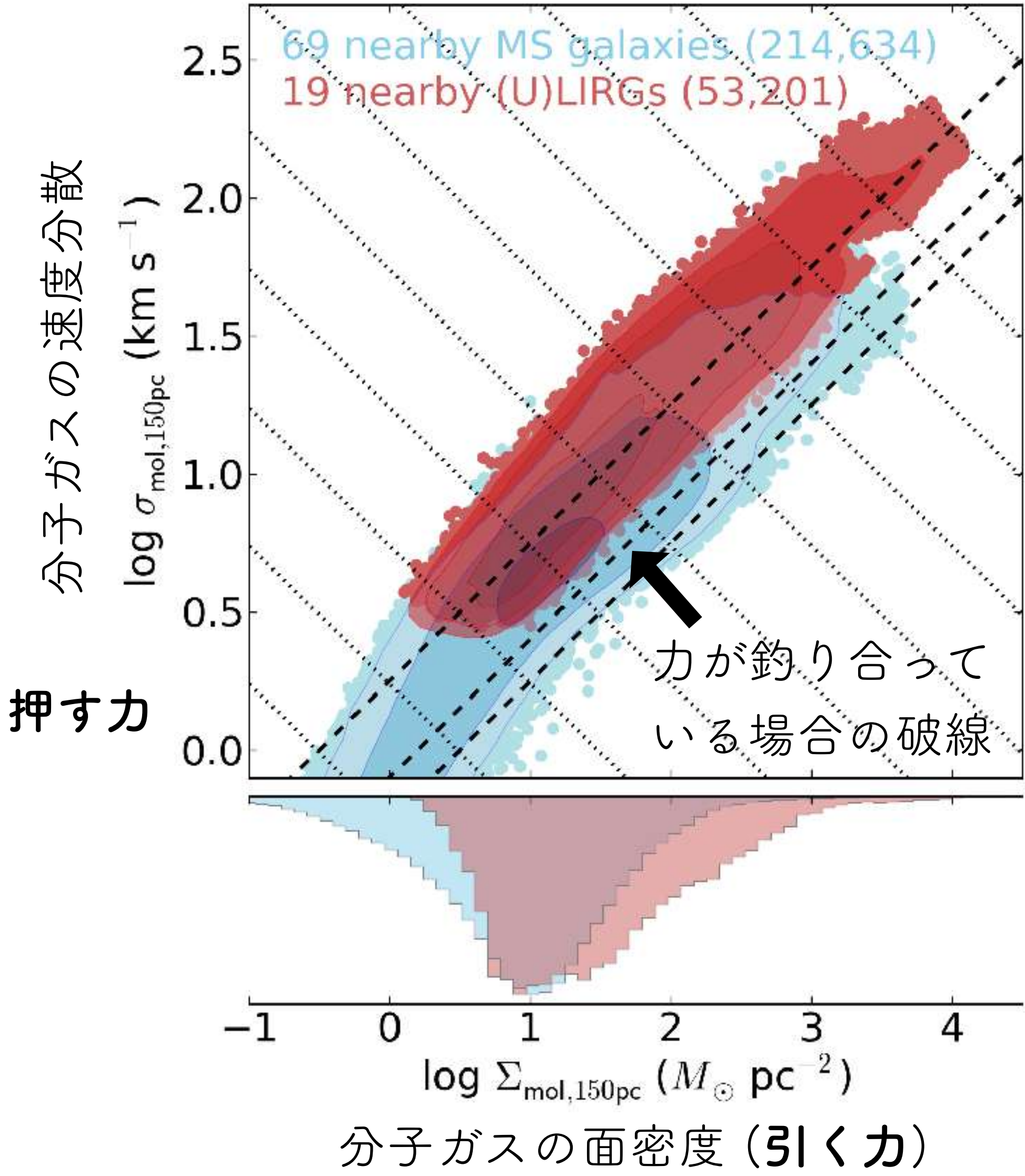
強い時...



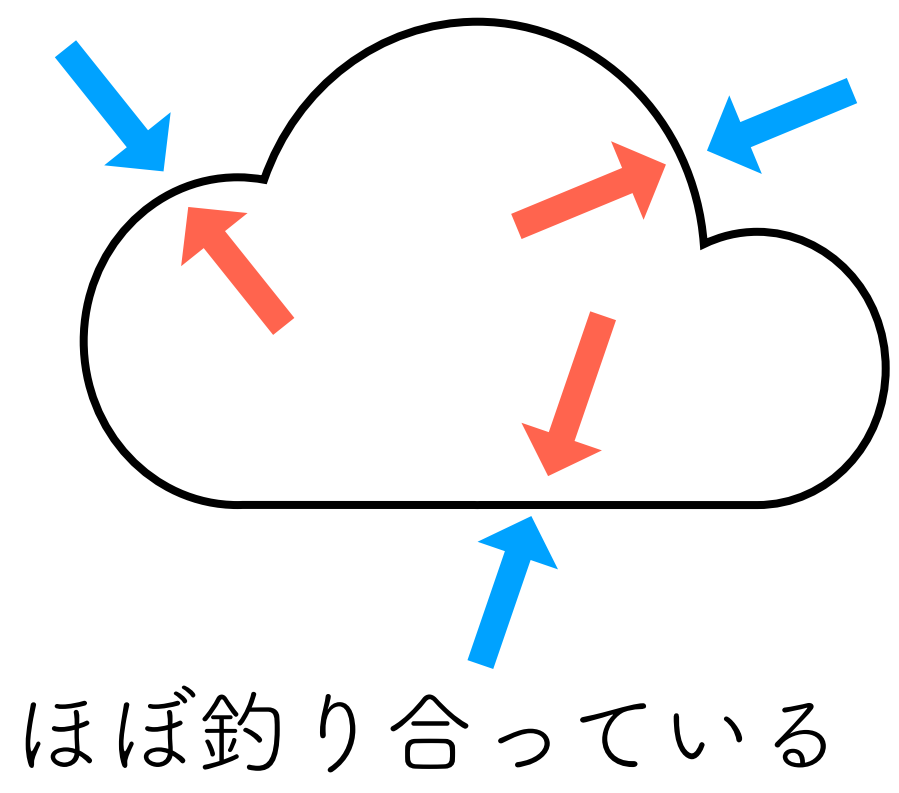
$$\text{乱流速度} \propto \text{スペクトル幅}$$

分子ガスの統計的性質に違いを発見!

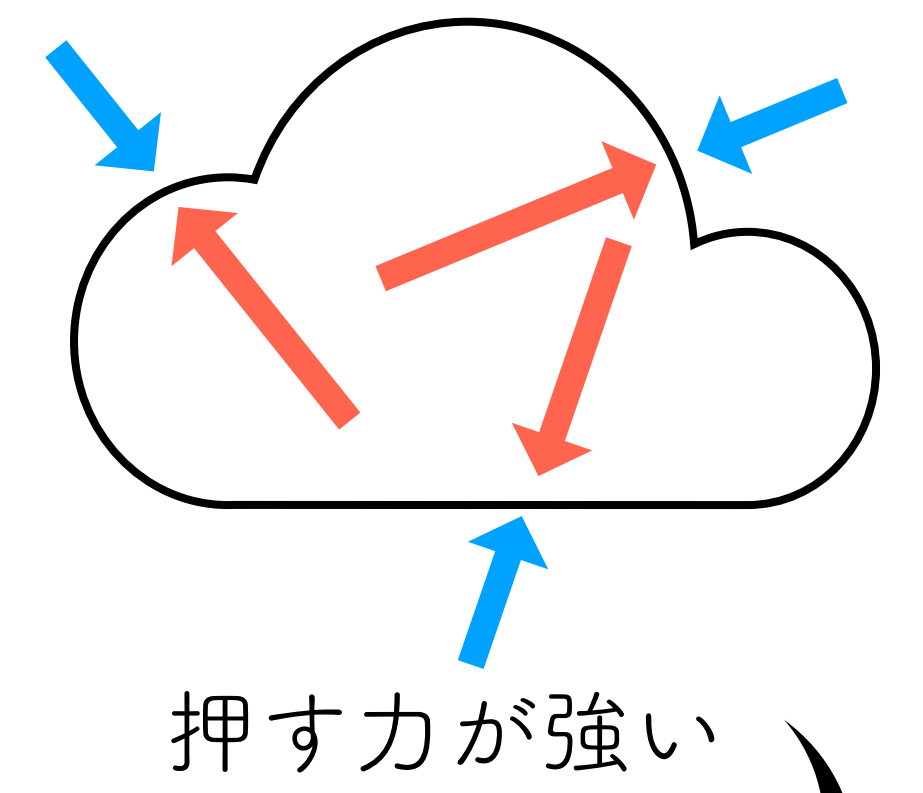
衝突銀河 vs. 渦巻銀河



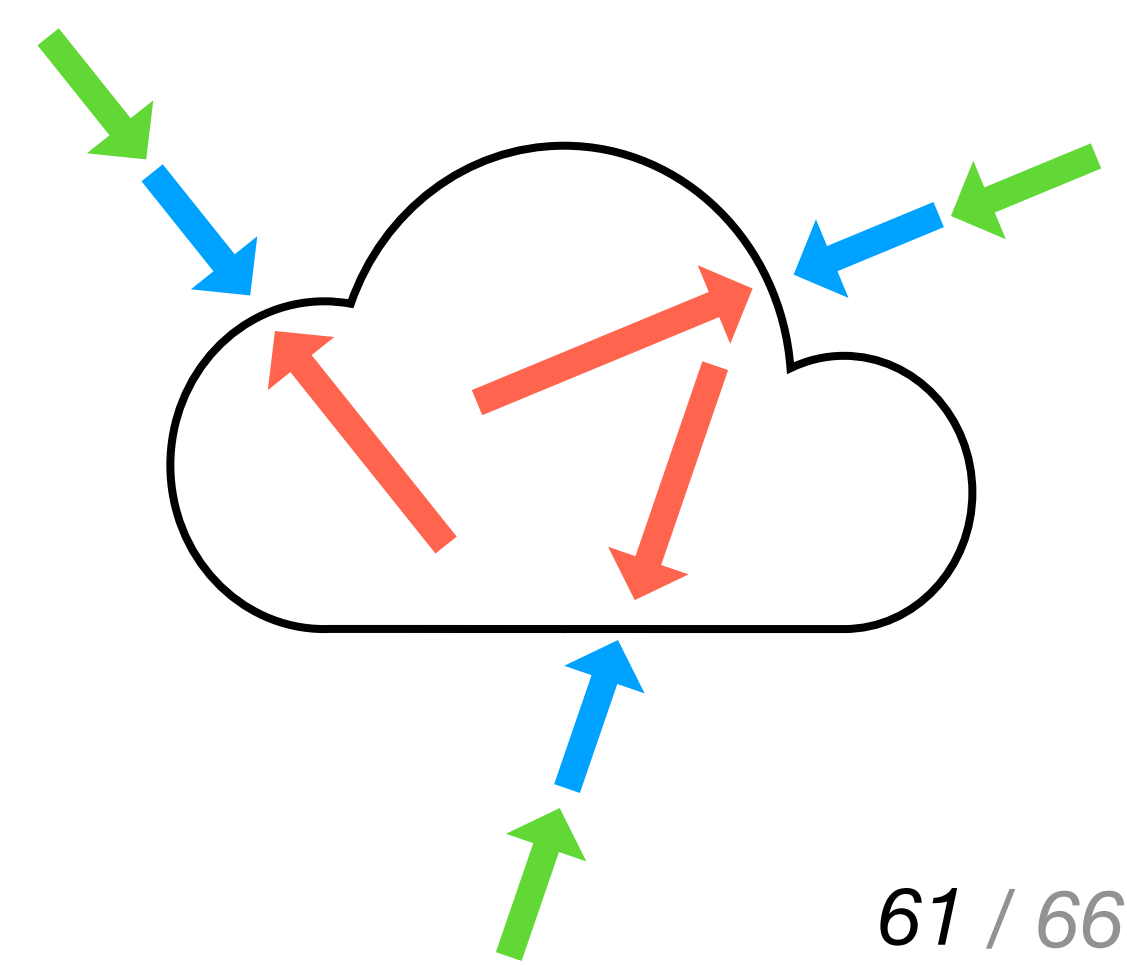
渦巻銀河の場合



衝突銀河の場合



外側から押し返す力(外力)
がさらに必要



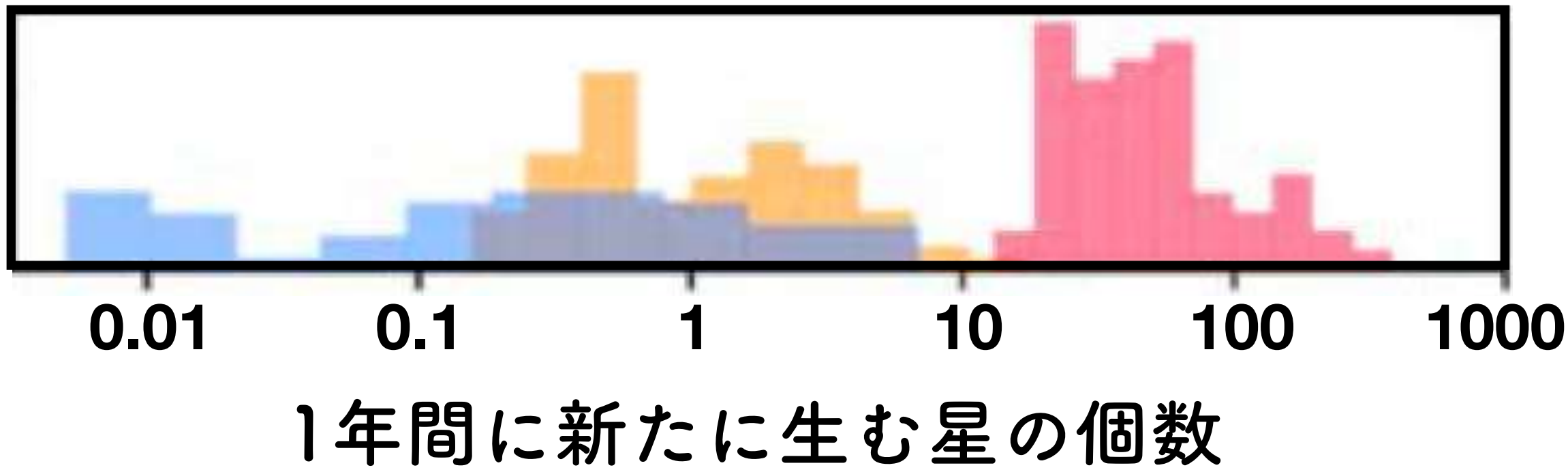
衝突銀河と渦巻銀河の違いは…
衝突しているかどうか
(衝撃波が外力の正体の可能性)

銀河衝突というマクロな事象が、個々の分子雲というミクロな事象に影響を与えることを示した初の例!



これにより新たな疑問も…

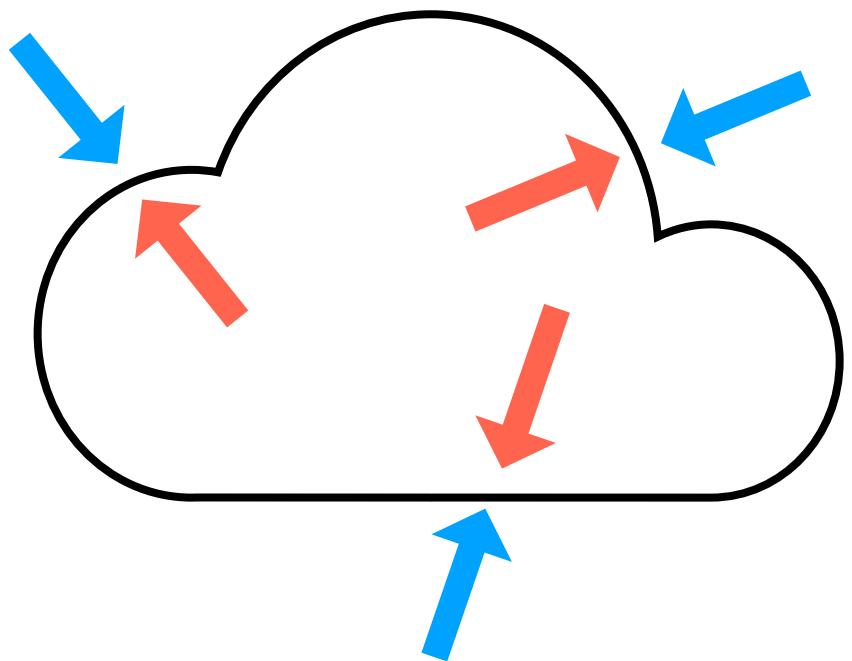
渦巻銀河 vs. 衝突銀河 Lee, …Saito et al. (2021)



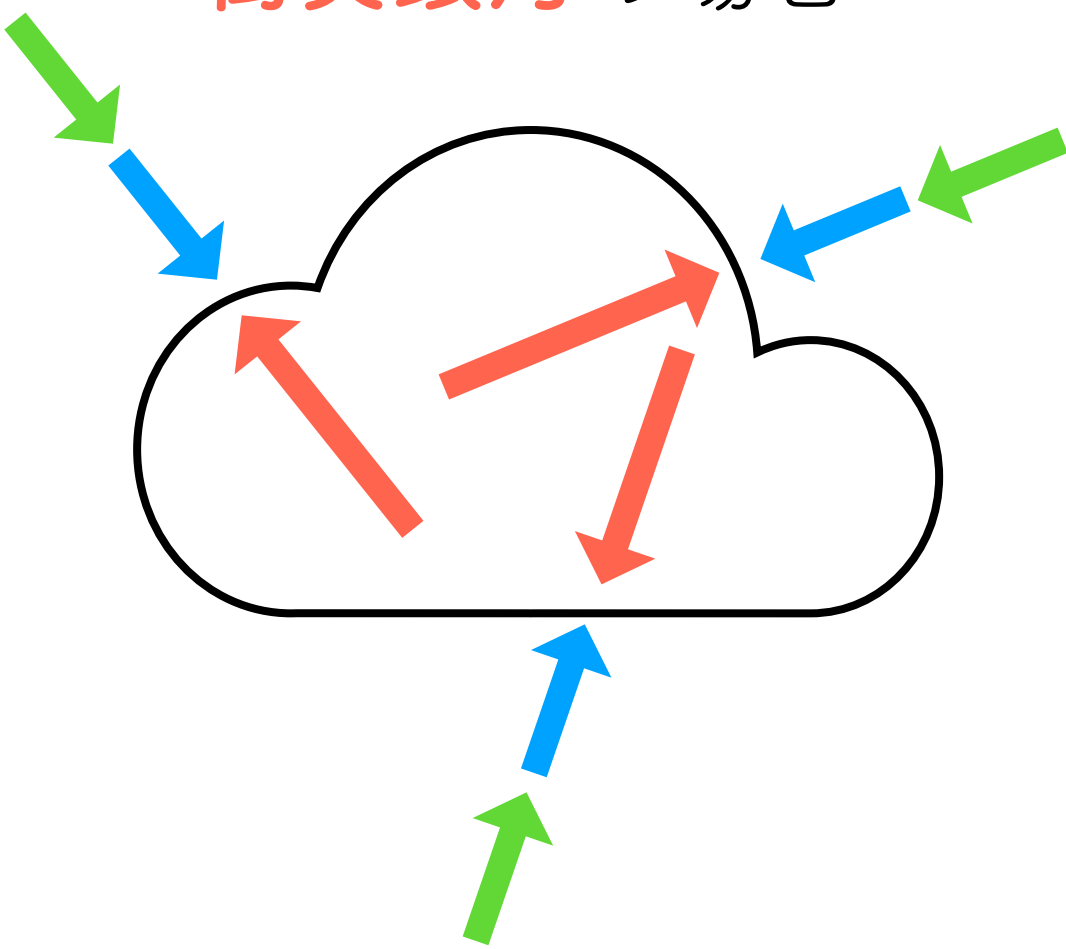
1年間に新たに生む星の個数

衝突銀河は、渦巻銀河に比べてより星を多く産んでいる(スターバーストをしている)ことが観測事実として知られている。
定性的には、衝突により分子ガスが効率的に圧縮されるため、と考えられる。

渦巻銀河の場合



衝突銀河の場合



しかし、我々の分子雲の観測結果から、衝突銀河の分子雲は圧縮にうまく抗っているように見える。

衝突銀河のどこでどうやってスターバーストを起こしているのか、さらなる解析・追観測が必要。場合によっては新たな星形成理論を構築する必要がある？



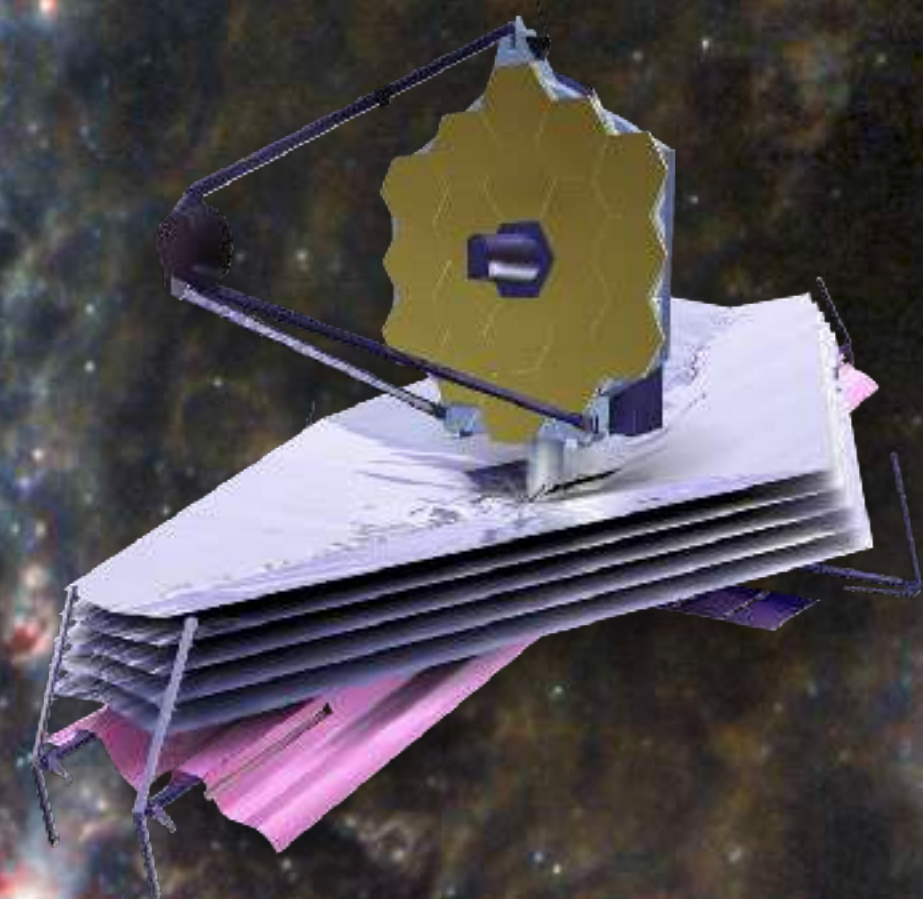
お品書き

- 1. ご挨拶
- 2. 七夕のお話
- 3. 天文学のお話
- 4. アルマ望遠鏡のお話
- 5. 研究のお話
- 6. まとめ

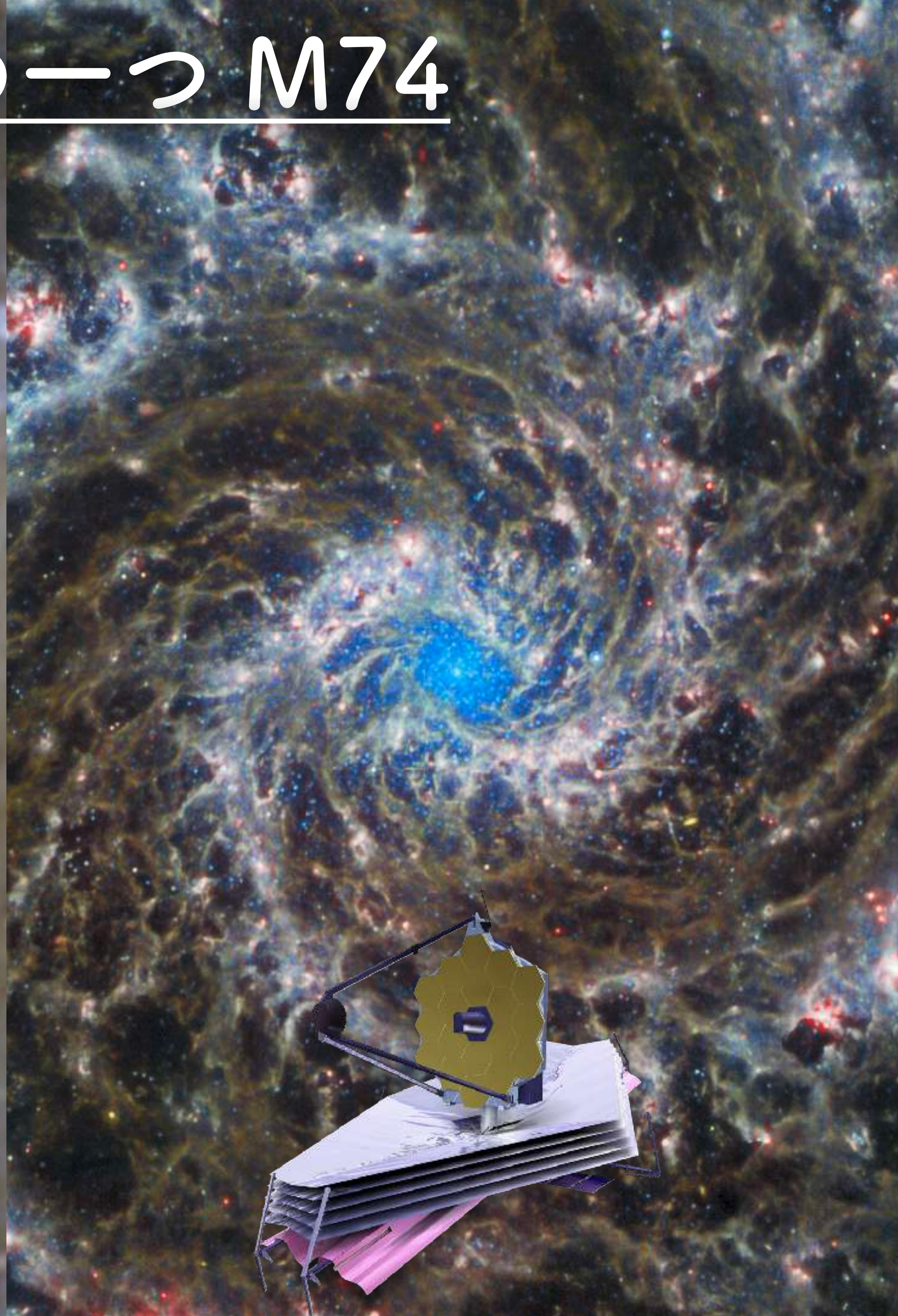
前半
後半

PHANGS銀河の一つ M74

ジェームズウェブ宇宙望遠鏡（中間赤外線；
これも塵を見えています）



PHANGS銀河の一つ M74



今日のまとめ

1. 天文学者は大雑把, そして本気で宇宙の謎に挑んでいる生き物。
2. 標高5000mに建設された**アルマ望遠鏡**により、宇宙の謎解きが進んでいる。
3. 宇宙の謎・銀河の謎を解くには、「**目に見えない隠された宇宙**」を見なければならない。このために**電波天文学**が必要。
4. 銀河進化の謎を明らかにするには、他の波長の望遠鏡との協力体制が不可欠。
5. アルマ望遠鏡とジェームズウェブ宇宙望遠鏡の大活躍に期待。





お品書き

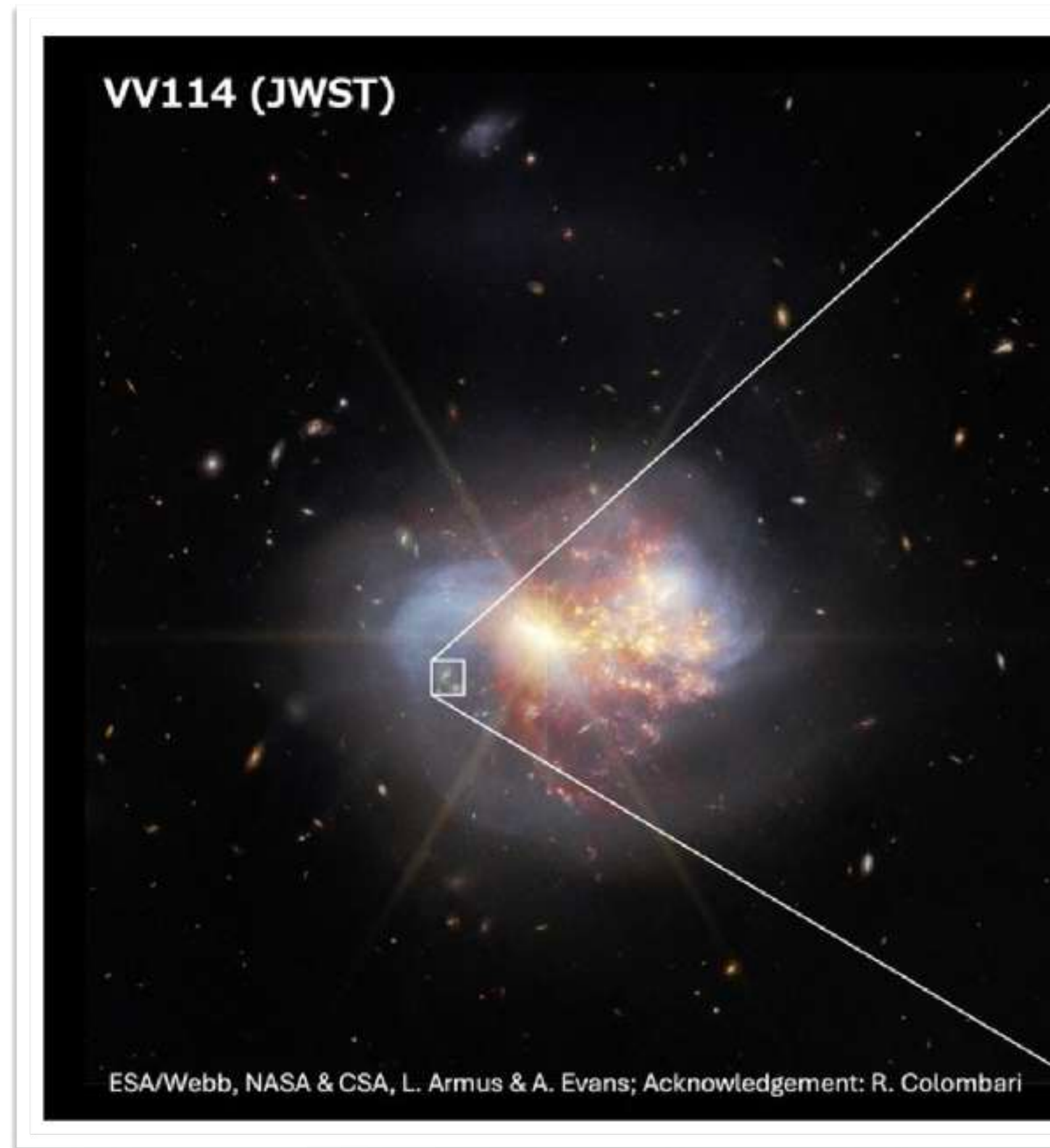
- 1. ご挨拶
- 2. 七夕のお話
- 3. 天文学のお話
- 4. アルマ望遠鏡のお話
- 5. 研究のお話
- 6. まとめ
- 7. おまけ

前半
後半

研究は長い道のり… 10年越しの発見!

先月, 静岡大学, 名古屋大学, 東京大学, 国立天文台の共同研究が雑誌「Nature」に受理され, プレスリリースを行いました.

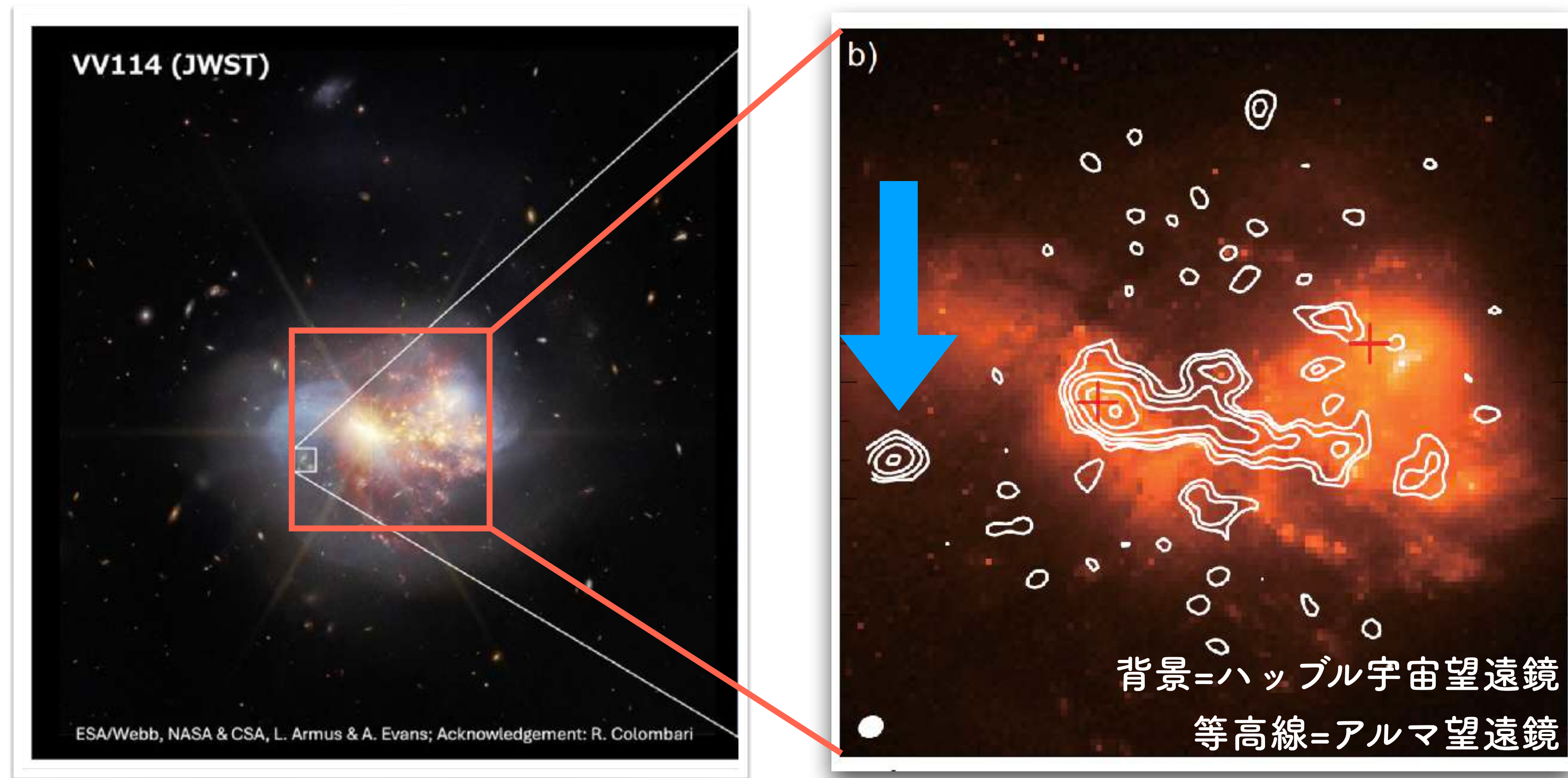
手前の衝突銀河の背景に, **遠方(過去)の超巨大渦巻銀河**を発見しました.



研究は長い道のり… 10年越しの発見!

齊藤が修士1年の時に指導教官から与えられたテーマが、**手前の衝突銀河のアルマ望遠鏡を使った研究**でした。

なんか明るいノイズがある，と議論していたが当時は無視していました。



研究は長い道のり… 10年越しの発見!

その後、遠い銀河であることが判明したが、その物理は不明なままでした。

その後ちよくちよくとデータを集めて、博士論文の付録に載せたり、学生と一緒に論文を書きましたが、**よくある遠方銀河**だという結論だった。

Tamura, Saito et al. 2014; Saito et al. 2017, Ph.D thesis; Mizukoshi et al. 2021 incl. Saito

その後、2022年にNASAが打ち上げたジェームズウェッブ宇宙望遠鏡が、手前の衝突銀河を観測し、背景の銀河が**異常なほど巨大な渦巻銀河**であることが判明しました。



Huang, Kawabe, Umehata, Kohno, Tamura, & Saito, 2025, Nature

銀河衝突により、大きい**楕円銀河**が形成される(定説)

渦巻銀河同士の衝突の理論計算

円盤構造が壊され、一つの楕円銀河に進化する



(時間進化)

昔の宇宙の銀河なのに、天の川銀河より大きいことが判明し、今回の研究成果により、「**銀河衝突により大きな楕円銀河を作る**」という定説が揺るぎつつあります。**研究は受け継がれてゆくことを実感…**

ご清聴ありがとうございました!