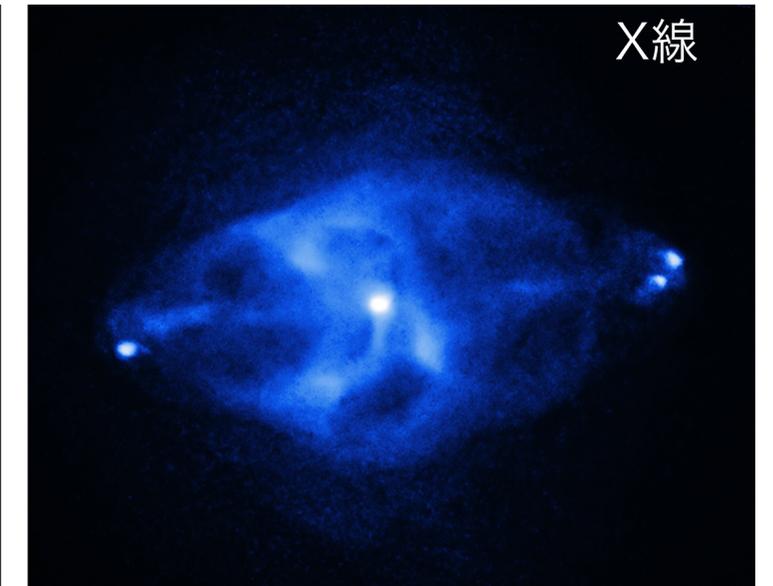
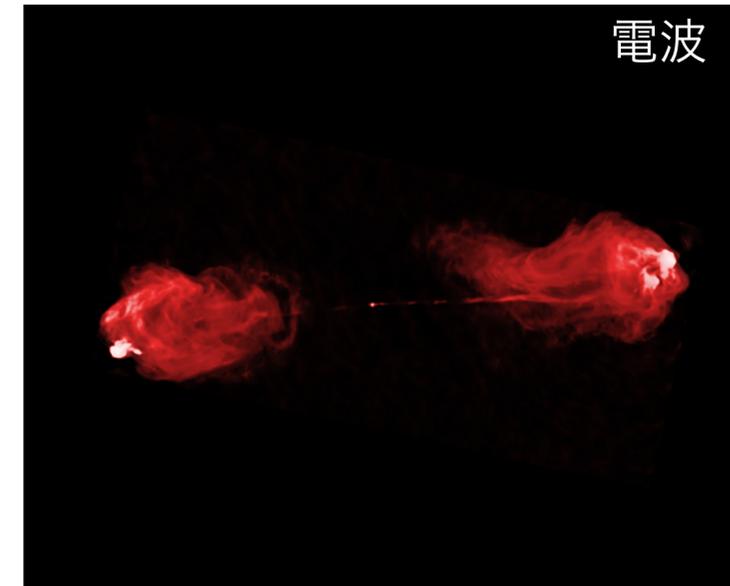


天文学

理工・総合情報学部講義 月曜5限



Cygnus Aの可視光(上), 電波(左下), X線(右下)画像
credit: X-ray: NASA/CXC/SAO, NASA/STScI, NSF/NRAO/AUI/VLA
<https://chandra.harvard.edu/photo/2015/iyl/more.html>

東京大学理学系研究科 鈴木昭宏

講義のアウトライン

- 第1回: ~~天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体~~
- 第2回: ~~電磁波による宇宙の観測~~
- 第3回: ~~太陽系内天体と天体の運動~~
- 第4回: ~~天体の距離、明るさ、色~~
- 第5回: ~~恒星1 - 恒星のエネルギー源と核反応-~~

講義のアウトライン

- 第6回: ~~恒星2 -恒星の分類と進化-~~
- 第7回: ~~星の誕生と星間物質~~
- 第8回: ~~銀河1 -銀河系の構成要素-~~
- 第9回: **銀河2 -銀河の分類と進化-**
- 第10回: ~~超新星爆発と元素の起源~~

講義のアウトライン

- 第11回: 白色矮星、中性子星、ブラックホール
- 第12回: ニュートリノ天文学と高エネルギー天体
- 第13回: 重力波天文学と中性子星・ブラックホール
- 第14回: 宇宙膨張の発見と宇宙の歴史
- 第15回: 系外惑星の世界

第9回:

銀河2

-銀河の分類と進化-

- 様々な銀河と銀河の基本量
- 銀河の活動性と超大質量ブラックホール
- 遠方銀河と宇宙の大規模構造

分子雲(molecular cloud)

- どんな分子がみつまっているのか？
- H₂,COのような単純な分子から複雑な分子まで様々
- 有機分子(炭素化合物)も見つまっている
- 生命の材料になる物質(例えばアミノ酸)はあるのか？

Table 1.2 Molecules found in interstellar clouds

<i>Simple neutral molecules</i>
H ₂ , CH, CN, CO, HCl, NH, NO, NS, OH, PN, SO, SiO, SiS, CS, HF, O ₂ , SH, CH ₂ , HCN, HCO, H ₂ O, H ₂ S, HNC, HNO, N ₂ O, OCS, SO ₂ , CO ₂ , NH ₂ , HO ₂ , NH ₃ , H ₂ CO, H ₂ CS, CH ₃ , H ₂ O ₂ , CH ₄
<i>Ionic species</i>
<i>(Cation)</i>
CH ⁺ , CO ⁺ , SO ⁺ , CF ⁺ , OH ⁺ , SH ⁺ , HCl ⁺ , ArH ⁺ , HCO ⁺ , HCS ⁺ , HOC ⁺ , N ₂ H ⁺ , H ₃ ⁺ , H ₂ O ⁺ , H ₂ Cl ⁺ , OH ₃ ⁺ , HCNH ⁺ , HCO ₂ ⁺ , C ₃ H ⁺ , H ₂ COH ⁺ , NH ₄ ⁺ , H ₂ NCO ⁺ , HC ₃ NH ⁺
<i>(Anion)</i>
C ₄ H ⁻ , C ₆ H ⁻ , C ₈ H
<i>Carbon-chain molecules and their isomers</i>
C ₂ , C ₃ , C ₂ H, C ₂ O, C ₂ S, c-C ₃ H, l-C ₃ H, C ₃ N, C ₃ O, C ₃ S, C ₂ H ₂ , C ₅ , C ₄ H, l-C ₃ H ₂ , c-C ₃ H ₂ , HC ₃ N, HCCNC, HNC ₃ , C ₅ H, l-C ₄ H ₂ , C ₅ N, C ₆ H, CH ₃ CCH, HC ₅ N, CH ₃ C ₃ N, C ₆ H ₂ , CH ₂ CCHCN, CH ₃ C ₄ H, HC ₇ N, CH ₃ C ₅ N, HC ₉ N, CH ₃ C ₆ H, HC ₁₁ N
<i>Complex organic molecules</i>
HCOOH, CH ₂ CO, CH ₃ CN, CH ₃ NC, CH ₃ OH, CH ₃ SH, HC ₂ CHO, c-C ₃ H ₂ O, CH ₂ CNH, HNCHCN, CH ₂ CHCN, CH ₃ CHO, CH ₃ NH ₂ , c-C ₂ H ₄ O, H ₂ CCHOH, HCOOCH ₃ , CH ₃ COOH, CH ₂ OHCHO, CH ₂ CHCHO, NH ₂ CH ₂ CN, CH ₃ CHNH, CH ₃ CH ₂ CN, (CH ₃) ₂ O, CH ₃ CH ₂ OH, CH ₃ CONH ₂ , C ₃ H ₆ , CH ₃ CH ₂ SH, (CH ₃) ₂ CO, (CH ₂ OH) ₂ , CH ₃ CH ₂ CHO, C ₂ H ₅ OCHO, CH ₃ OCOCH ₃ , C ₂ H ₅ OCH ₃ , n-C ₃ H ₇ CN
<i>Other molecules</i>
FeO, HNCO, HNCS, H ₂ CN, HCNO, HOCN, HSCN, CH ₂ CN, H ₂ CNH, NH ₂ CN, HCOCN, HNCNH, CH ₃ O, NH ₂ CHO

Note: Based on the Cologne Database for Molecular Spectroscopy (CDMS) (Muller et al. 2001, 2008). The classification of molecules is arbitrary

これまでにみつまっている分子のリスト

S. Yamamoto (2017) "Introduction to Astrochemistry"

分子雲 (molecular cloud)

ニュース > 科学・IT

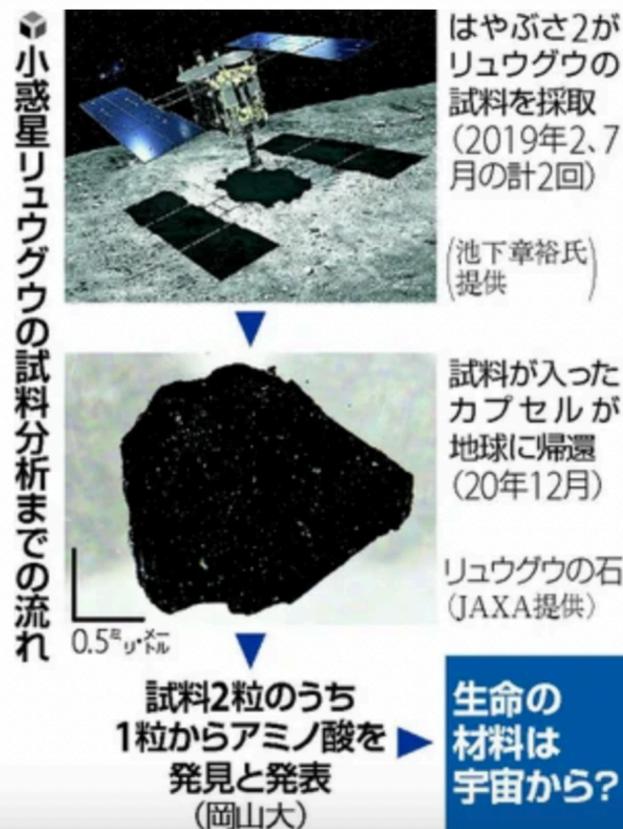
リュウグウにアミノ酸23種、はやぶさ2が持ち帰った石と砂で確認...生命の宇宙到来説を補強

2022/06/10 00:00

この記事をスクラップする

岡山大などの研究チームは、日本の探査機「はやぶさ2」が小惑星リュウグウから持ち帰った石や砂から、アミノ酸が23種類見つかったと発表した。生命活動に重要なたんぱく質を構成するアミノ酸も10種類近く含まれており、地球の生命の材料が隕石などで宇宙から到来したとの説を補強する成果だという。日本学士院紀要に10日、論文が掲載される。

小惑星リュウグウの試料分析までの流れ



はやぶさ2がリュウグウの試料を採取 (2019年2、7月の計2回)
(池下章裕氏提供)

試料が入ったカプセルが地球に帰還 (20年12月)

リュウグウの石 (JAXA提供)

試料2粒のうち1粒からアミノ酸を発見と発表 (岡山大)

生命の材料は宇宙から?

はやぶさ2は2019年2月と7月の計2回、地球から3億キロ・メートル前後離れたリュウグウの試料を採取。20年12月に、試料の入ったカプセルが地球に帰還した。

同大の中村栄三特任教授 (物質化学)らのチームは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) から提供された試料16粒の成分や構造を網羅的に分析した。アミノ酸については2粒調べ、うち1粒から検出されたという。

自然界にアミノ酸は多数あるが、たんぱく質は20種類で出来ている。チームの分析では、そのうち約半数のアミノ酸が含まれていたという。中村特任教授は「アミノ酸などの有機物は地球以外の天体で作られた後に地球にもたらされ、それらを材料に生命が誕生したのだろう」と語る。

Table 1.2 Molecules found in interstellar clouds

Simple neutral molecules

H₂, CH, CN, CO, HCl, NH, NO, NS, OH, PN, SO, SiO, SiS, CS, HF, O₂, SH, CH₂, HCN, HCO, O, H₂S, HNC, HNO, N₂O, OCS, SO₂, CO₂, NH₂, HO₂, NH₃, H₂CO, H₂CS, CH₃, H₂O₂, CH₄

Ionic species

anion)

Γ⁻, CO⁺, SO⁺, CF⁺, OH⁺, SH⁺, HCl⁺, ArH⁺, HCO⁺, HCS⁺, HOC⁺, N₂H⁺, H₃⁺, H₂O⁺, H₂Cl⁺, I₃⁺, HCNH⁺, HCO₂⁺, C₃H⁺, H₂COH⁺, NH₄⁺, H₂NCO⁺, HC₃NH⁺

cation)

H⁻, C₆H⁻, C₈H⁻

Carbon-chain molecules and their isomers

C₂H₂, C₃, C₂H, C₂O, C₂S, c-C₃H, l-C₃H, C₃N, C₃O, C₃S, C₂H₂, C₅, C₄H, l-C₃H₂, c-C₃H₂, HC₃N, HNC, HNC₃, C₅H, l-C₄H₂, C₅N, C₆H, CH₃CCH, HC₅N, CH₃C₃N, C₆H₂, CH₂CCHCN, l-C₃C₄H, HC₇N, CH₃C₅N, HC₉N, CH₃C₆H, HC₁₁N

Complex organic molecules

H₂O, H₂O₂, CH₂CO, CH₃CN, CH₃NC, CH₃OH, CH₃SH, HC₂CHO, c-C₃H₂O, CH₂CNH, CH₂CHCN, CH₂CHCN, CH₃CHO, CH₃NH₂, c-C₂H₄O, H₂CCHOH, HCOOCH₃, CH₃COOH, l-C₂OHCHO, CH₂CHCHO, NH₂CH₂CN, CH₃CHNH, CH₃CH₂CN, (CH₃)₂O, CH₃CH₂OH, l-C₃CONH₂, C₃H₆, CH₃CH₂SH, (CH₃)₂CO, (CH₂OH)₂, CH₃CH₂CHO, C₂H₅OCHO, l-C₃OCOCH₃, C₂H₅OCH₃, n-C₃H₇CN

Other molecules

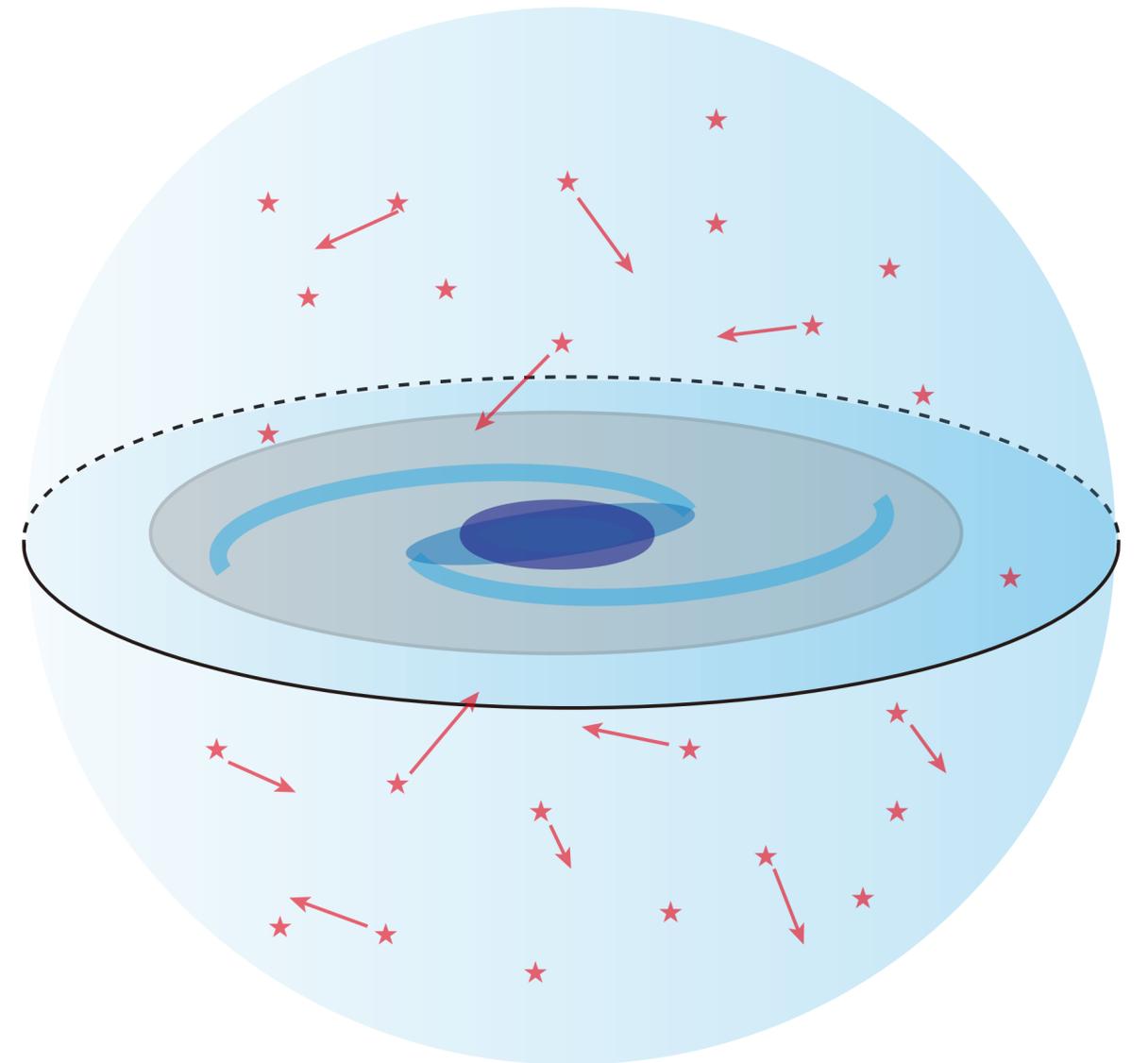
H₂O, H₂O₂, H₂CO, HNCO, HNCS, H₂CN, HCNO, HOCN, HSCN, CH₂CN, H₂CNH, NH₂CN, HCOCN, CH₂CNH, CH₃O, NH₂CHO

Reference: Based on the Cologne Database for Molecular Spectroscopy (CDMS) (Muller et al. 2001, 2008). The classification of molecules is arbitrary

これまでに見つかった分子のリスト
S. Yamamoto (2017) "Introduction to Astrochemistry"

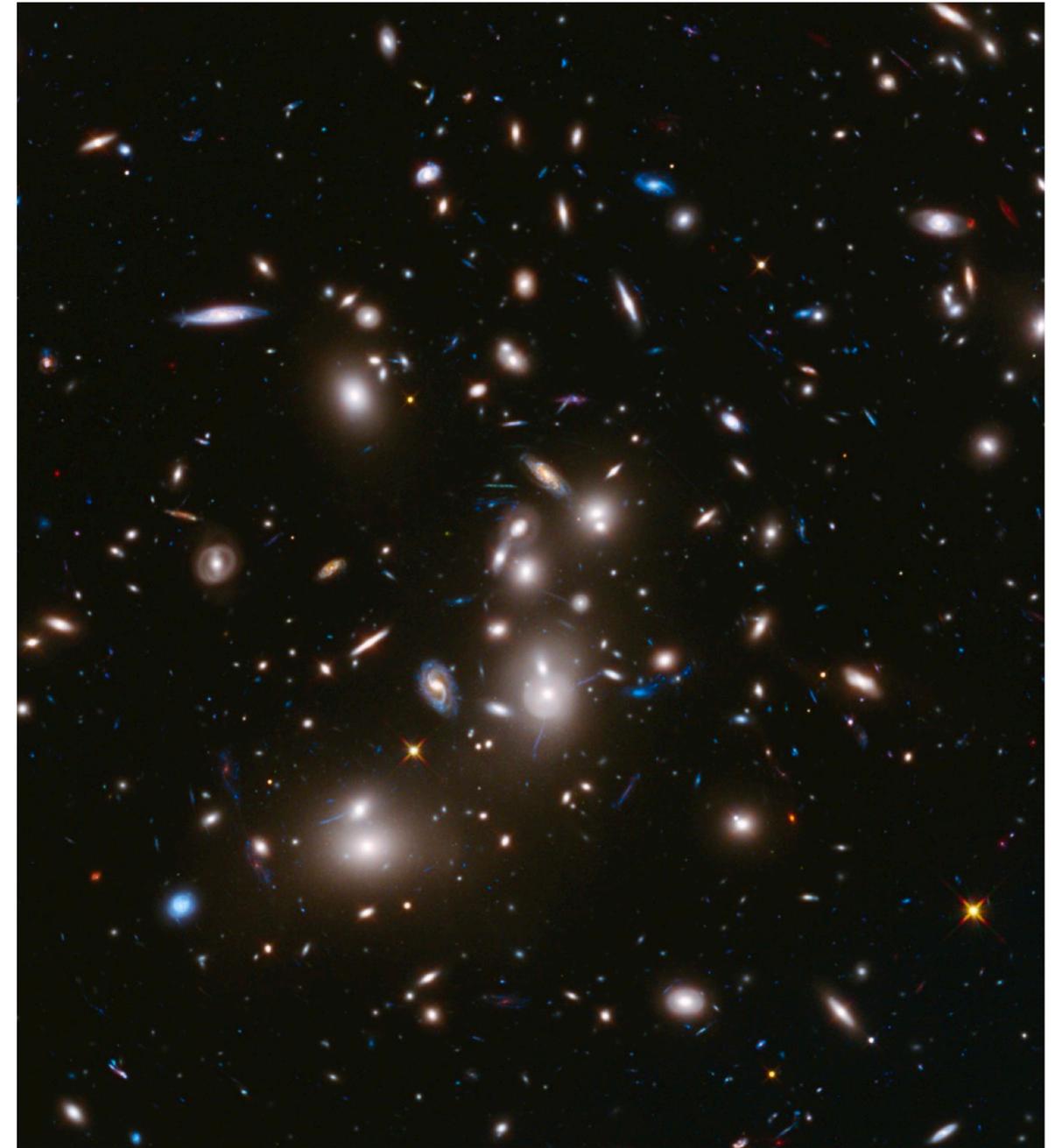
銀河の形態

- 我々の銀河系は(棒)渦巻銀河ということが分かった
- その他の銀河にはどのような種類がある？



銀河の形態

- 我々の銀河系は(棒)渦巻銀河ということが分かった
- その他の銀河にはどのような種類がある？
- いろいろある



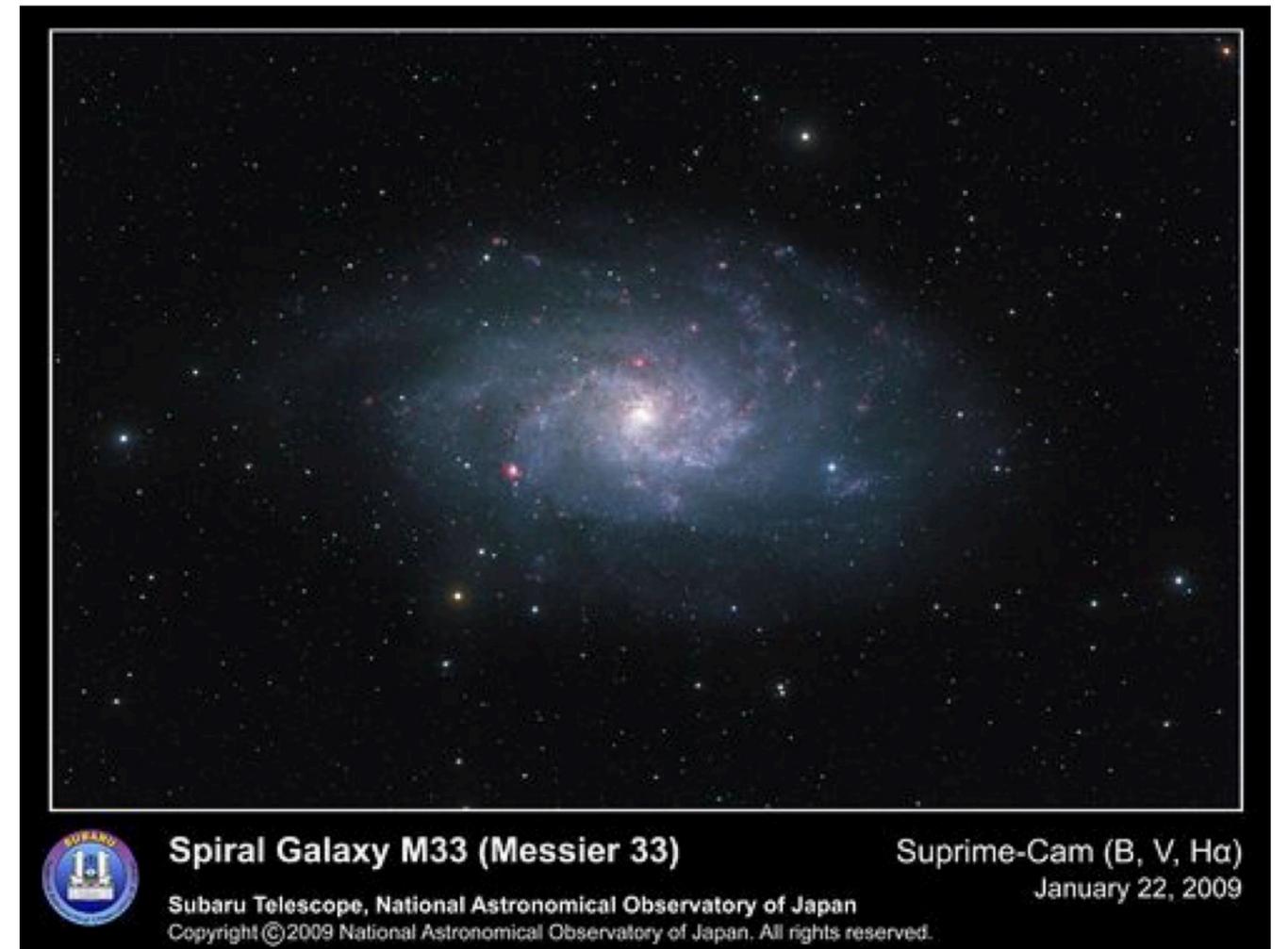
銀河団 Abel 2744

credit: NASA, ESA, and J. Lotz, M. Mountain,
A. Koekemoer, and the HFF Team (STScI)

<https://svs.gsfc.nasa.gov/30949>

渦巻銀河 (Spiral galaxy)

- はっきりと見える渦状腕(渦巻き構造)
- 円盤を上から観た場合: フェイスオン
- 円盤を横から観た場合: エッジオン
- 活発な星形成活動
- 星間ガスや星間塵(ダスト)の存在
- ダークレーン(ダストレーン)



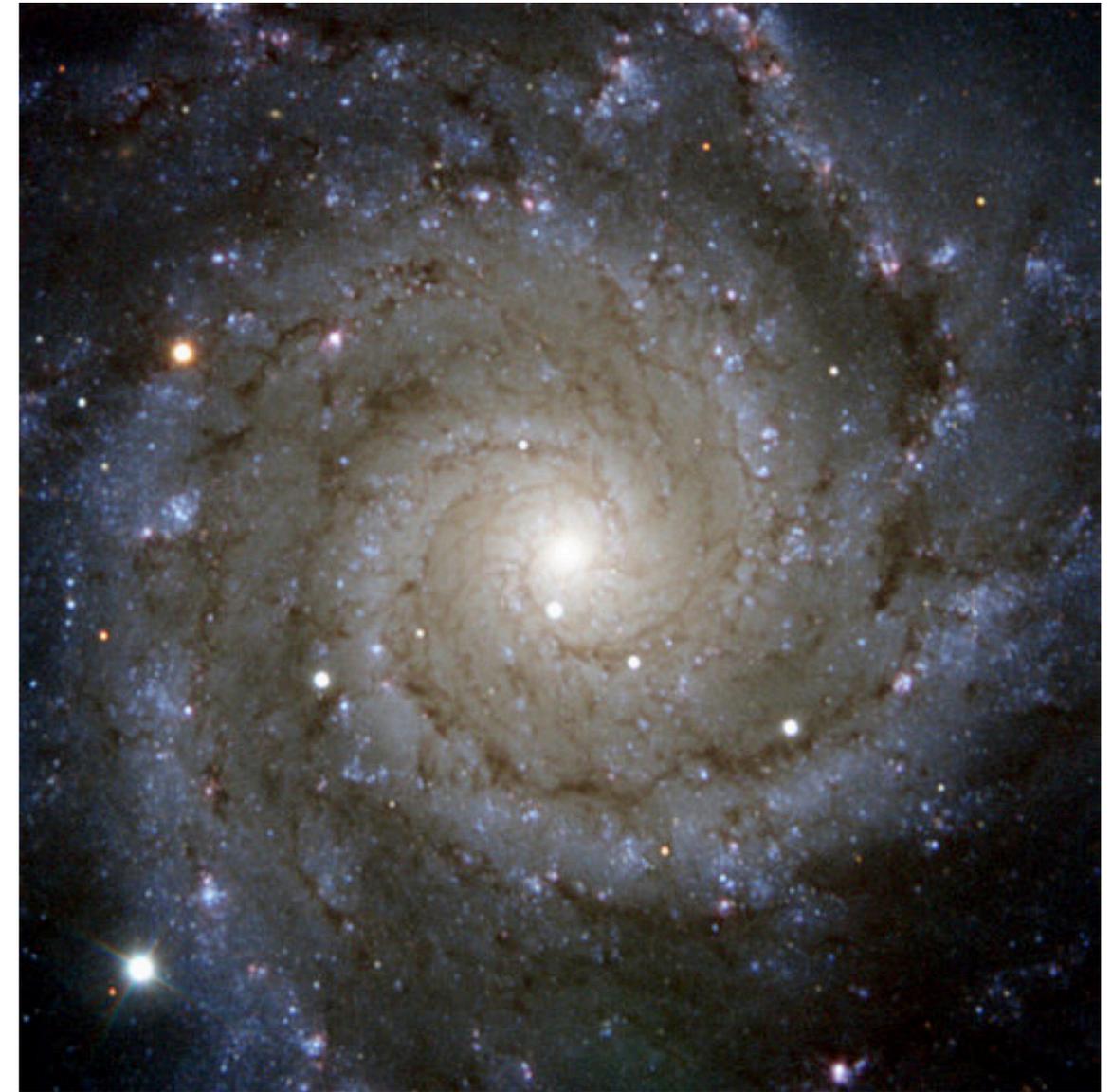
国立天文台すばる望遠鏡で撮影された渦巻銀河M33の画像

credit: NAOJ

<https://subarutelescope.org/jp/gallery/pressrelease/2009/01/22/2541.html>

渦巻銀河 (Spiral galaxy)

- はっきりと見える渦状腕(渦巻き構造)
- 円盤を上から観た場合: フェイスオン
- 円盤を横から観た場合: エッジオン
- 活発な星形成活動
- 星間ガスや星間塵(ダスト)の存在
- ダークレーン(ダストレーン)



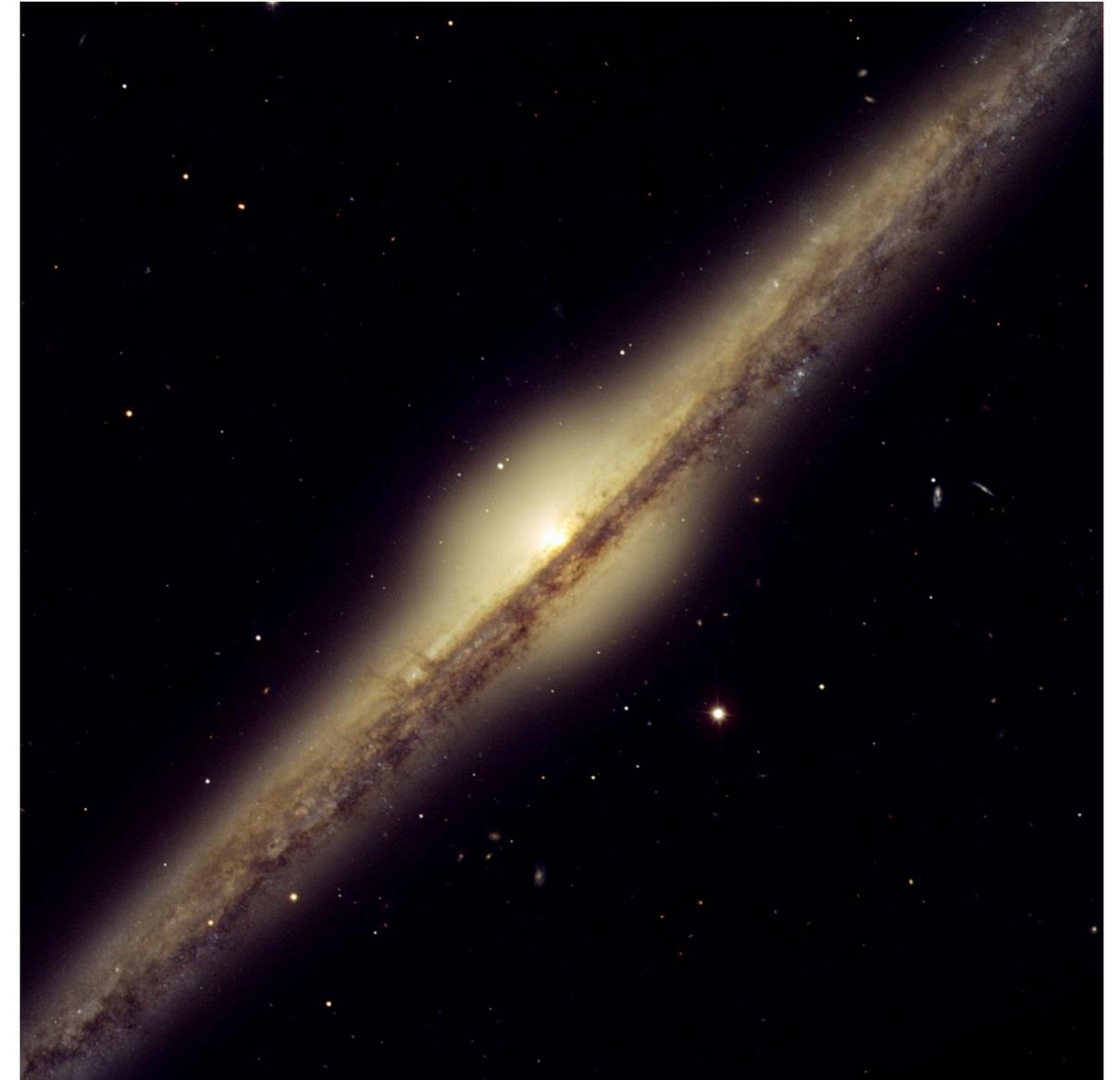
渦巻銀河をフェイスオンで観測した例: M74 (NGC628)

credit: ESO/PESSTO/S. Smartt

<https://www.eso.org/public/images/potw1335a/>

渦巻銀河 (Spiral galaxy)

- はっきりと見える渦状腕(渦巻き構造)
- 円盤を上から観た場合: フェイスオン
- 円盤を横から観た場合: エッジオン
- 活発な星形成活動
- 星間ガスや星間塵(ダスト)の存在
- ダークレーン(ダストレーン)



渦巻銀河をエッジオンで観測した例: NGC4565

credit: ESO

<https://www.eso.org/public/images/eso0525a/>

棒渦巻銀河 (Barred spiral galaxy)

- 渦巻銀河と同様に、はっきりとした渦状腕
- それに加え、中心付近に棒状の構造



ハッブル宇宙望遠鏡で撮影された棒渦巻銀河NGC1300の画像
credit: NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team STScI/AURA)
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2005/01/image/a>

楕円銀河 (Elliptical galaxy)

- 渦巻きがなく、楕円体
- 一方向へ回転する星によって構成される円盤構造がない
- 一般的に星間ガスや星間ダストが少ない

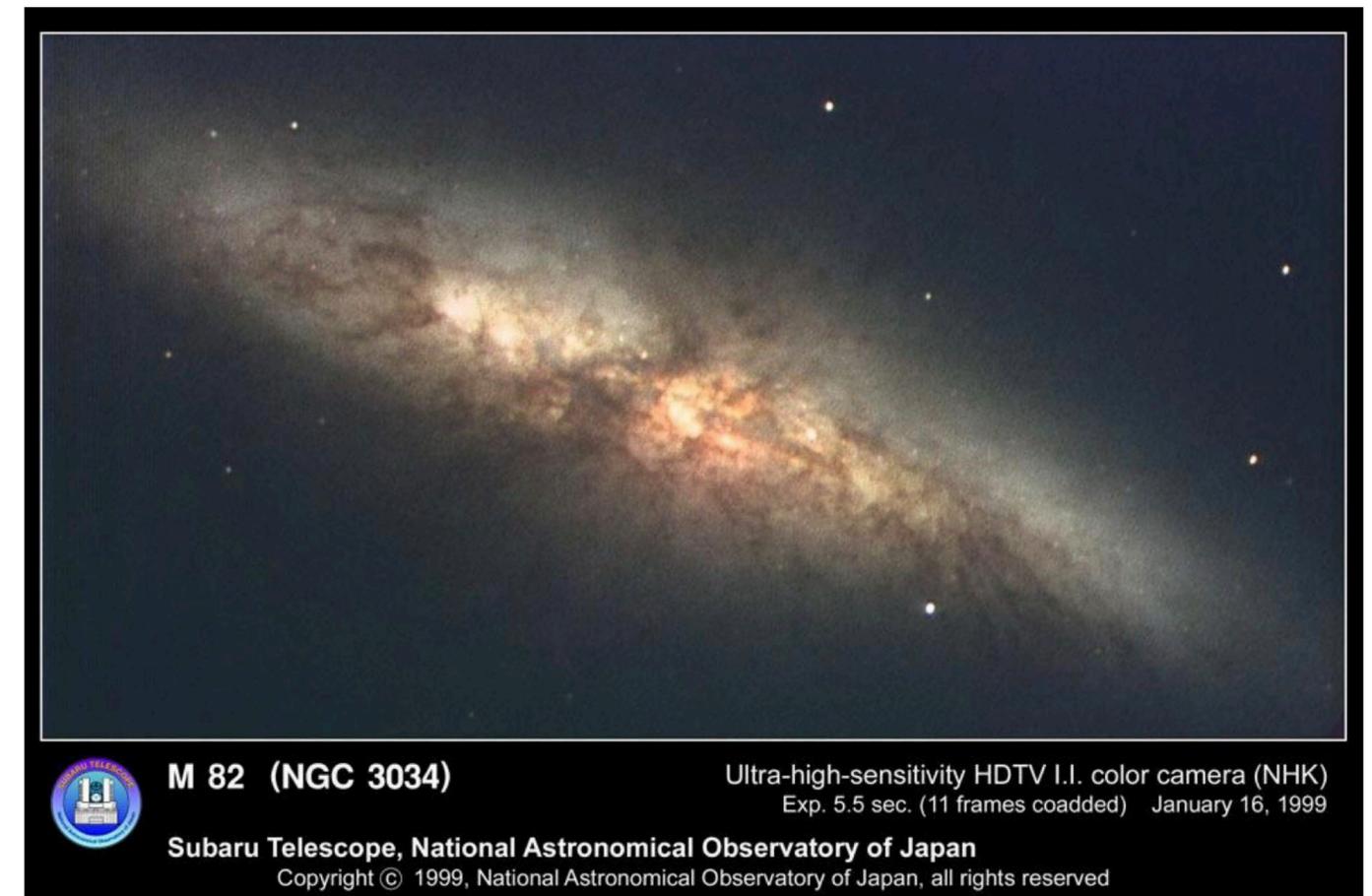


CFHT望遠鏡で撮影された楕円銀河M87

credit: Canada-France-Hawaii Telescope, J.-C. Cuillandre (CFHT), Coelum
<https://apod.nasa.gov/apod/ap040616.html>

不規則銀河 (irregular galaxy)

- 渦巻銀河、棒渦巻銀河、楕円銀河に分類できない
- 非常に不規則な形態をしている
- なぜ、こんな形をしているのか？
- 他の銀河との相互作用、合体



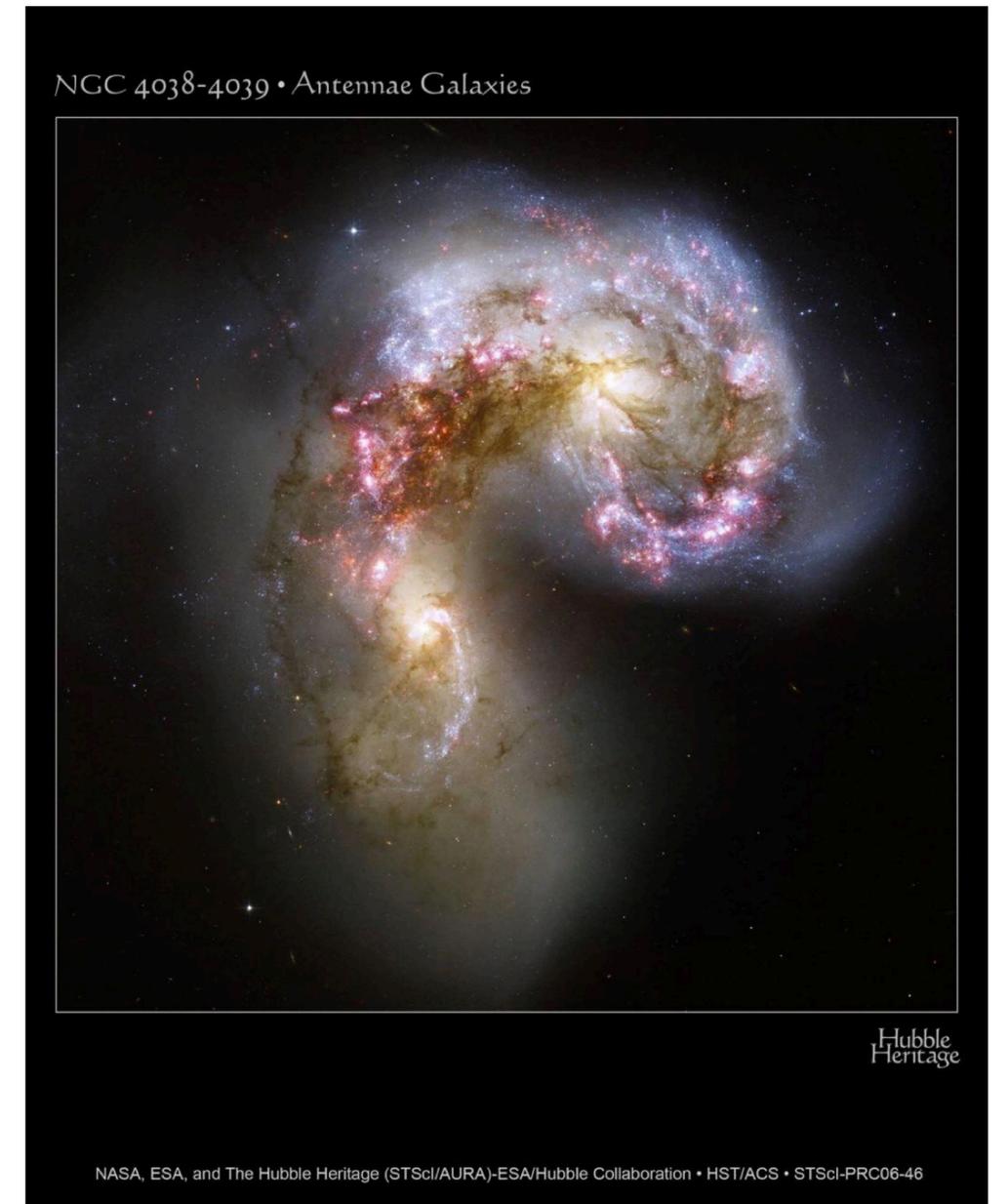
すばる望遠鏡で撮影された不規則銀河M82(NGC3034)

credit: Subaru telescope, National Astronomical Observatory of Japan

<https://subarutelescope.org/jp/gallery/pressrelease/1999/06/24/887.html>

不規則銀河 (irregular galaxy)

- 渦巻銀河、棒渦巻銀河、楕円銀河に分類できない
- 非常に不規則な形態をしている
- なぜ、こんな形をしているのか？
- 他の銀河との相互作用、合体



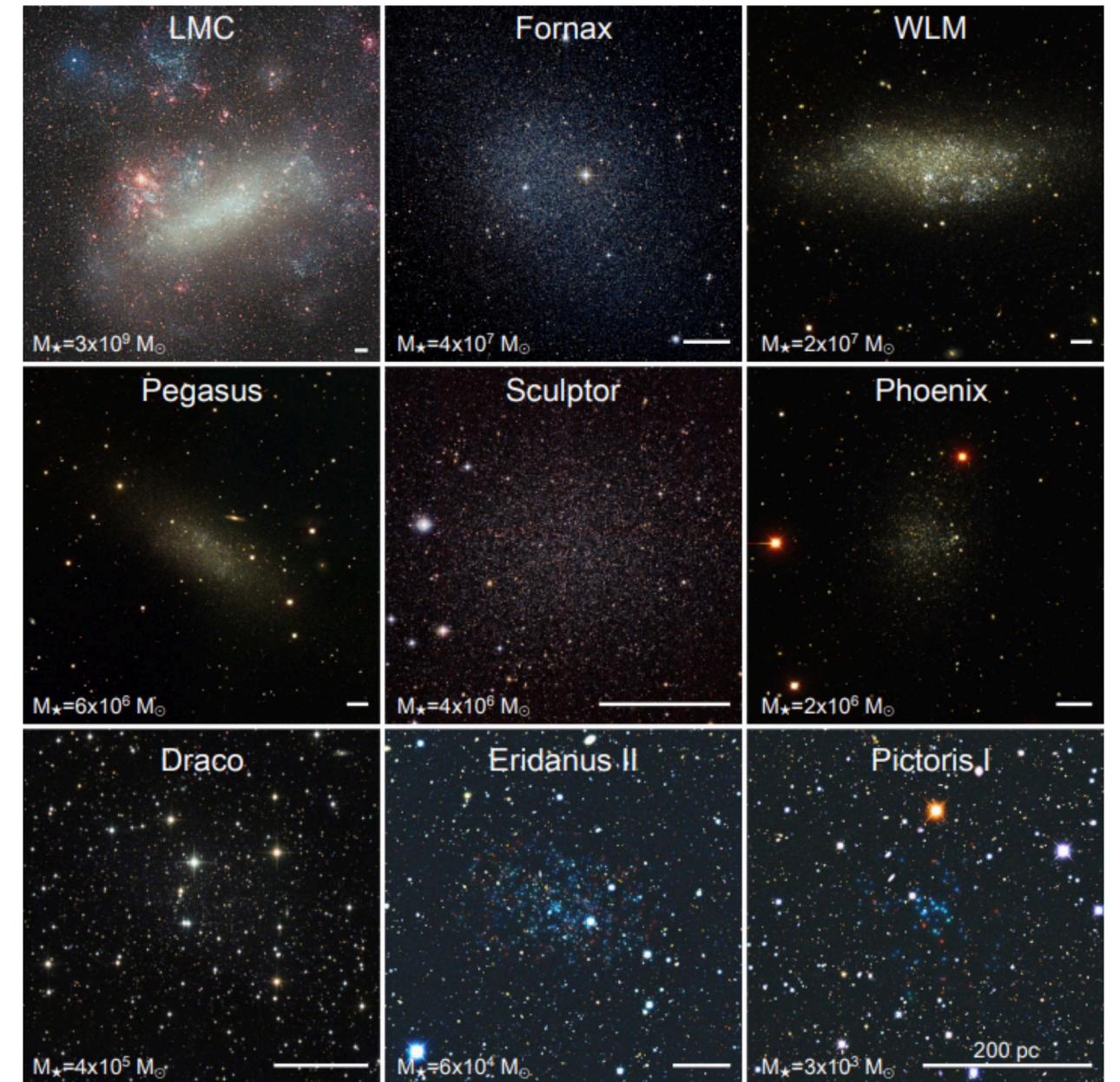
ハッブル宇宙望遠鏡で撮影された不規則銀河NGC4038-4039

credit: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration

https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1086.html

矮小銀河(dwarf galaxy)

- 通常の銀河よりも暗い
- 星の数が少ない
- 矮小楕円銀河(dwarf elliptical)、矮小楕円体銀河(dwarf spheroidal)、矮小不規則銀河(dwarf irregular)
- その形成史は、銀河系などの星形成銀河と異なると考えられている

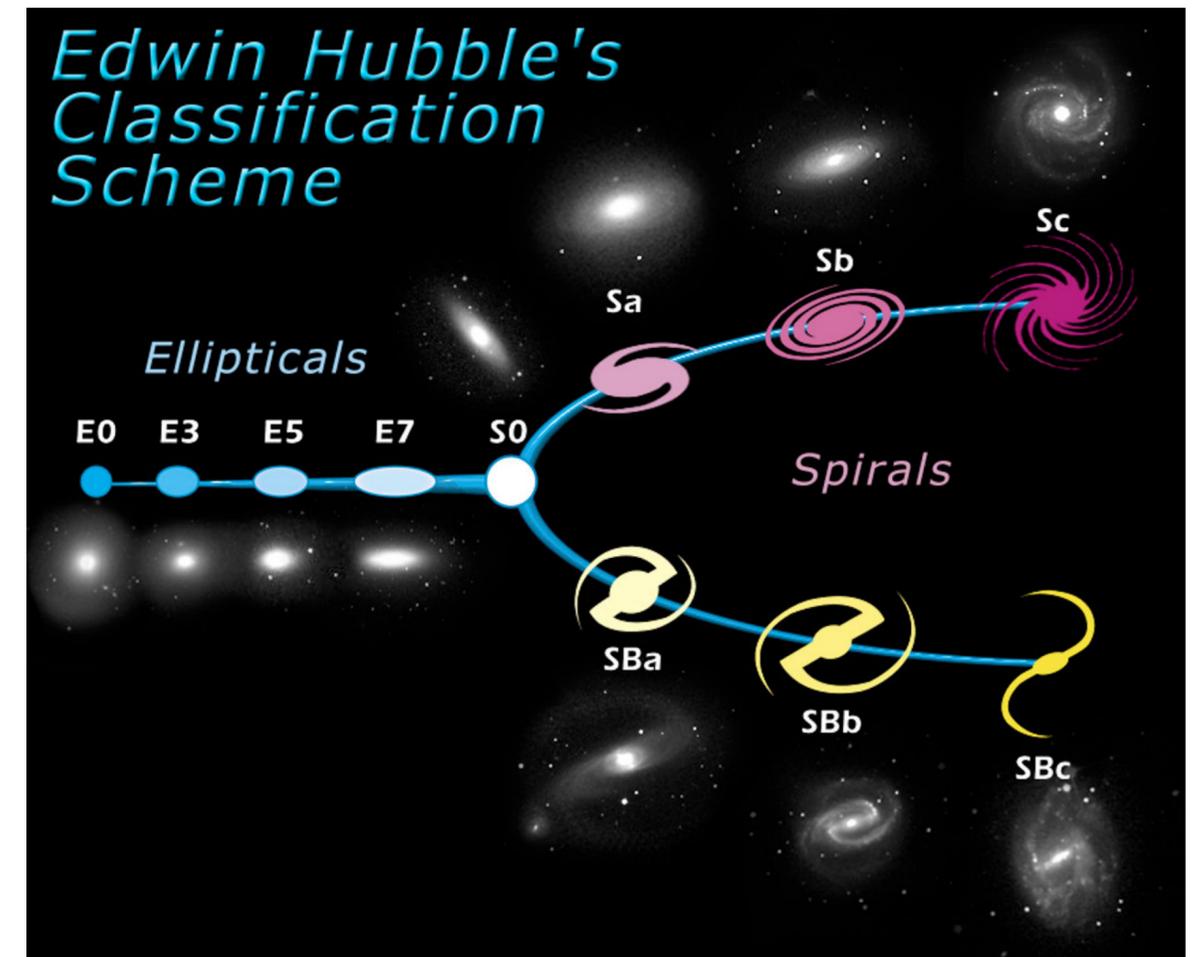


銀河系近傍の矮小銀河

credit: Bullock & Boylan-Kolchin 2017, ARA&A, 55, 343
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017ARA%26A..55..343B/abstract>

ハッブルの形態分類

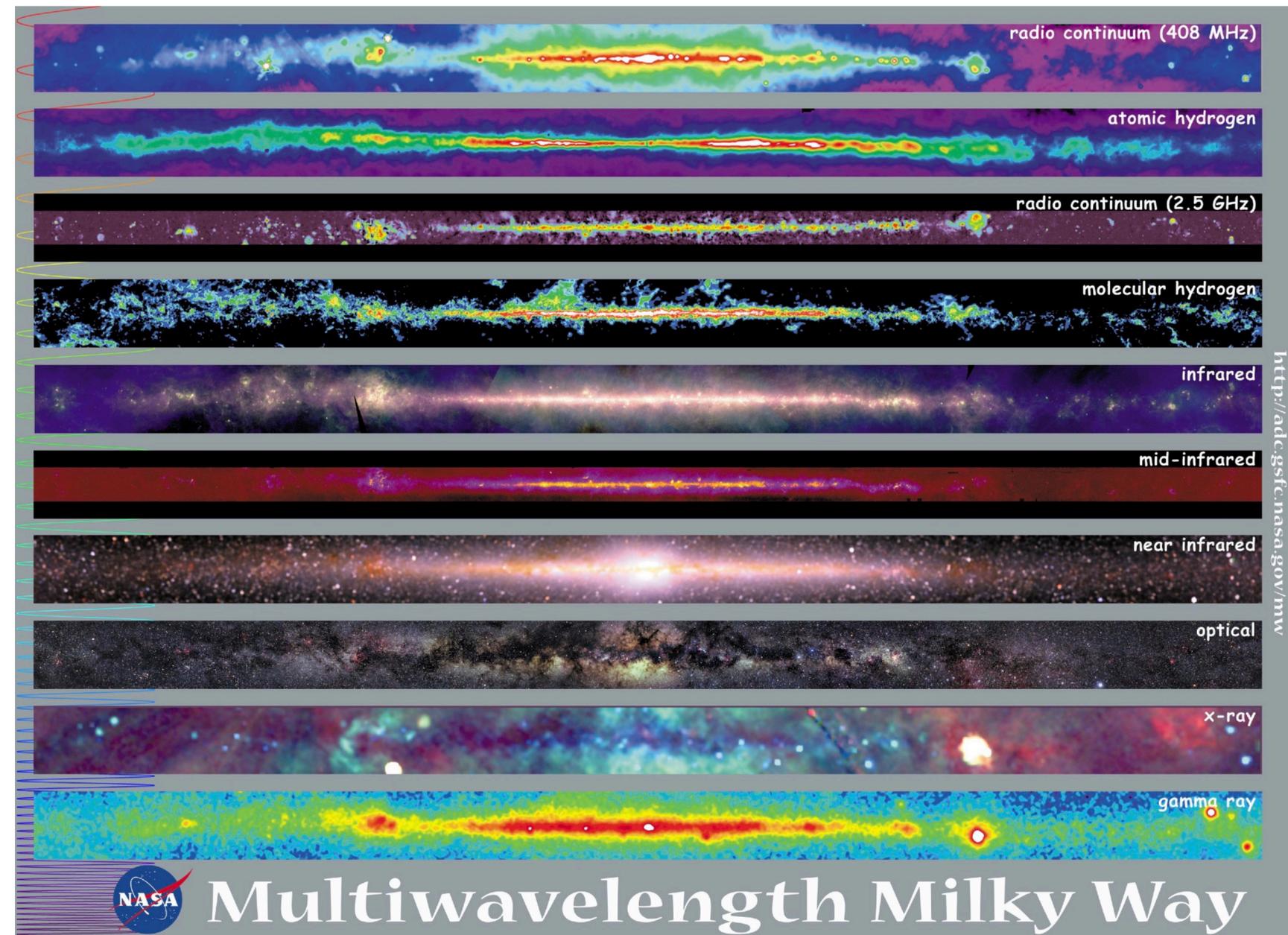
- E. ハッブル 1936年
- 楕円銀河から渦巻き銀河や棒渦巻銀河への系列
- 当時は銀河の進化を反映した系列だと思われていたが、現在はそうではないと考えられている
- 楕円銀河=早期型銀河, 渦巻銀河=晩期型銀河



E. ハッブルの形態分類 credit: NASA, ESA
<https://esahubble.org/images/heic9902o/>

銀河からの電磁波放射

- 様々な構成成分の重ね合わせ
- 星、星間物質、星間ダスト
- 星の集団や銀河の天体スペクトルはどうなっているのだろうか？



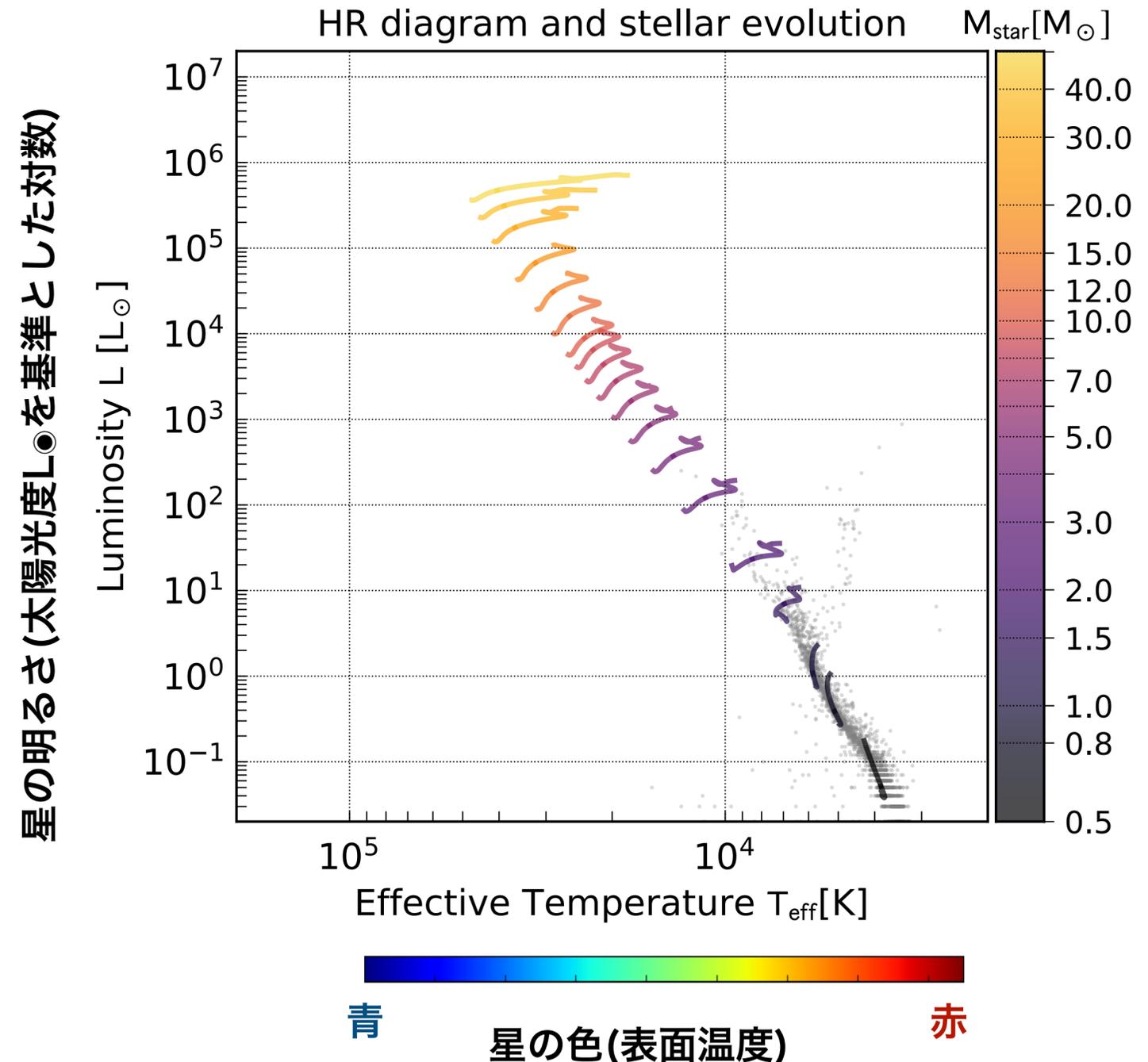
多波長での天の川銀河中心の姿 credit: NASA,

<https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mmw/>

銀河からの電磁波放射

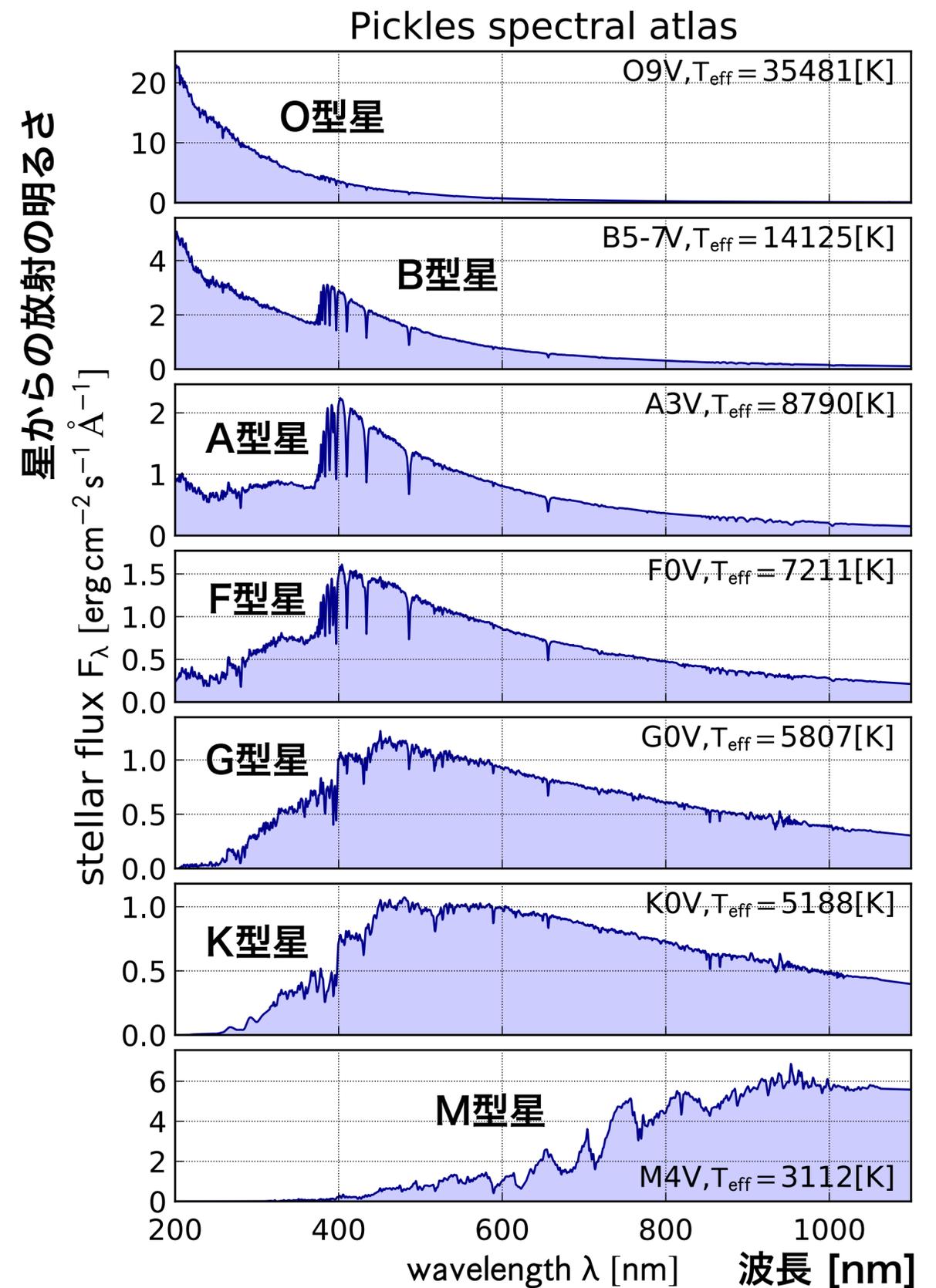
data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

- **大質量星** ($>8-10M_{\odot}$): 表面温度 数 10^4 [K], 主に紫外線, 青い可視光で光る
- **中小質量星** ($<8-10M_{\odot}$): 表面温度 数 10^3-10^4 [K], 主に可視光や赤外線で光る
- **HII領域**: 温度 10^4 [K], 大質量星に照らされ、水素輝線などを出す
- **ダスト、分子ガス**: 温度 $10-10^2$ [K], 可視光を遮り、赤外線や電波で光る



銀河からの電磁波放射

- **大質量星** (>8-10M \odot): 表面温度 数 10^4 [K], 主に紫外線, 青い可視光で光る
- **中小質量星** (<8-10M \odot): 表面温度 数 10^3 - 10^4 [K], 主に可視光や赤外線で光る
- **HII領域**: 温度 10^4 [K], 大質量星に照らされ、水素輝線などを出す
- **ダスト、分子ガス**: 温度 10 - 10^2 [K], 可視光を遮り、赤外線や電波で光る



銀河からの電磁波放射

- **大質量星** ($>8-10M_{\odot}$): 表面温度 数 10^4 [K], 主に紫外線, 青い可視光で光る
- **中小質量星** ($<8-10M_{\odot}$): 表面温度 数 10^3-10^4 [K], 主に可視光や赤外線で光る
- **HII領域**: 温度 10^4 [K], 大質量星に照らされ、水素輝線などを出す
- **ダスト、分子ガス**: 温度 $10-10^2$ [K], 可視光を遮り、赤外線や電波で光る



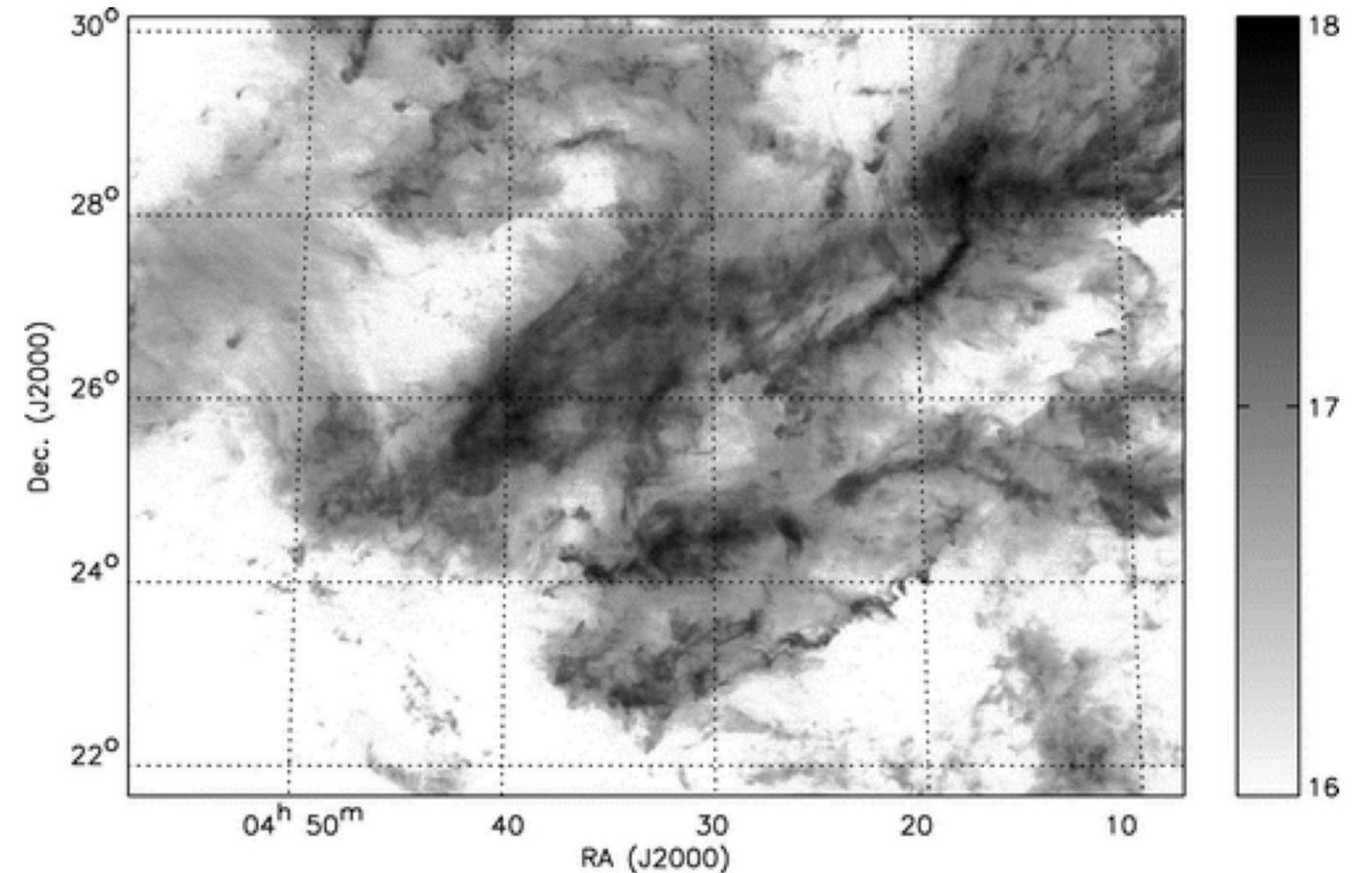
ハッブル宇宙望遠鏡によるEagle nebulaの画像

Credits: NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/messier-16-the-eagle-nebula>

銀河からの電磁波放射

- **大質量星** ($>8-10M_{\odot}$): 表面温度 数 10^4 [K], 主に紫外線, 青い可視光で光る
- **中小質量星** ($<8-10M_{\odot}$): 表面温度 数 10^3-10^4 [K], 主に可視光や赤外線で光る
- **HII領域**: 温度 10^4 [K], 大質量星に照らされ、水素輝線などを出す
- **ダスト、分子ガス**: 温度 $10-10^2$ [K], 可視光を遮り、赤外線や電波で光る



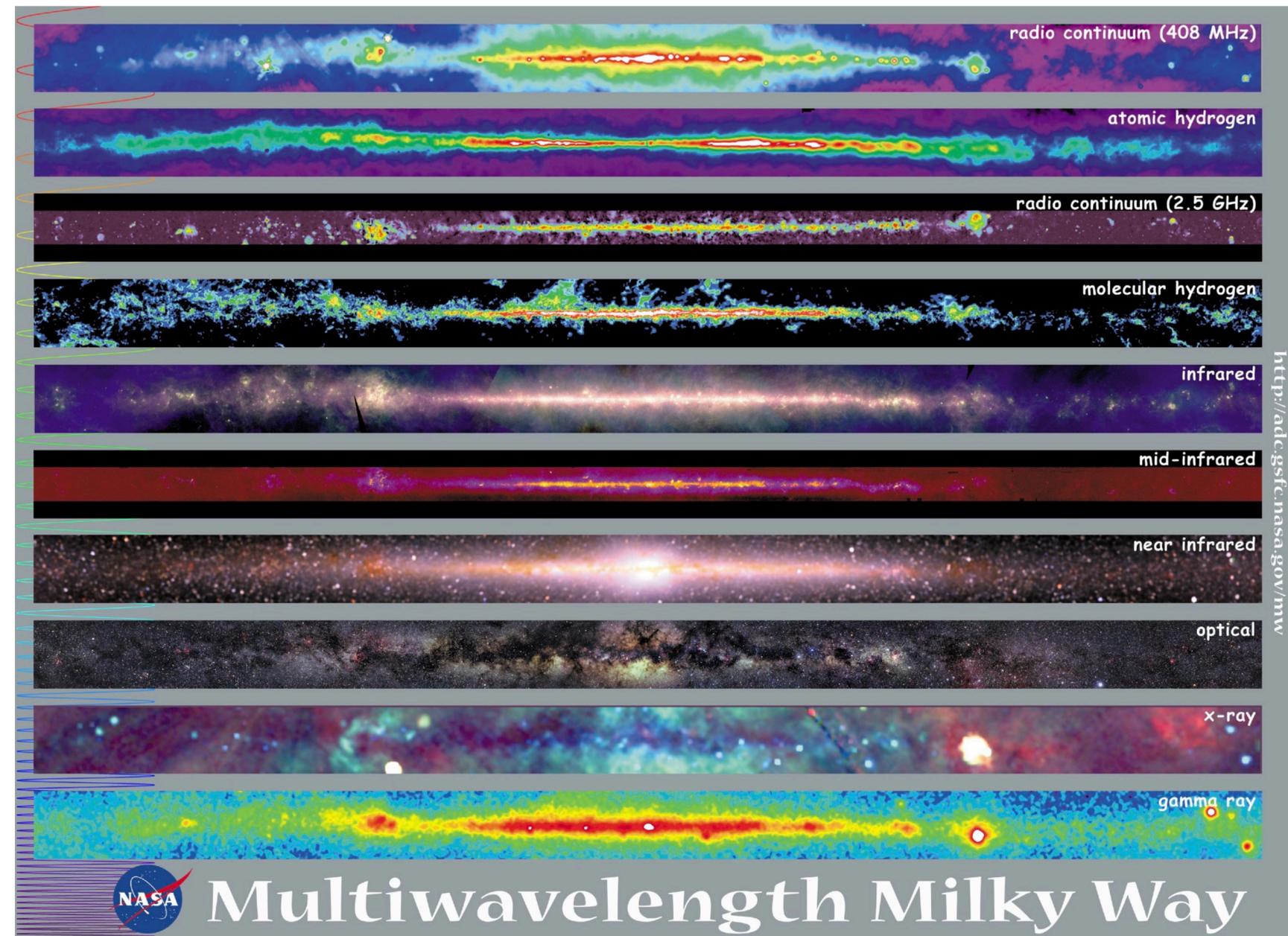
おうし座分子雲のCOマップ

Goldsmith et al. (2008) ApJ, 680, 428

<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/587166>

銀河からの電磁波放射

- 様々な構成成分の重ね合わせ
- 星、星間物質、星間ダスト
- 星の集団や銀河の天体スペクトルはどうなっているのだろうか？

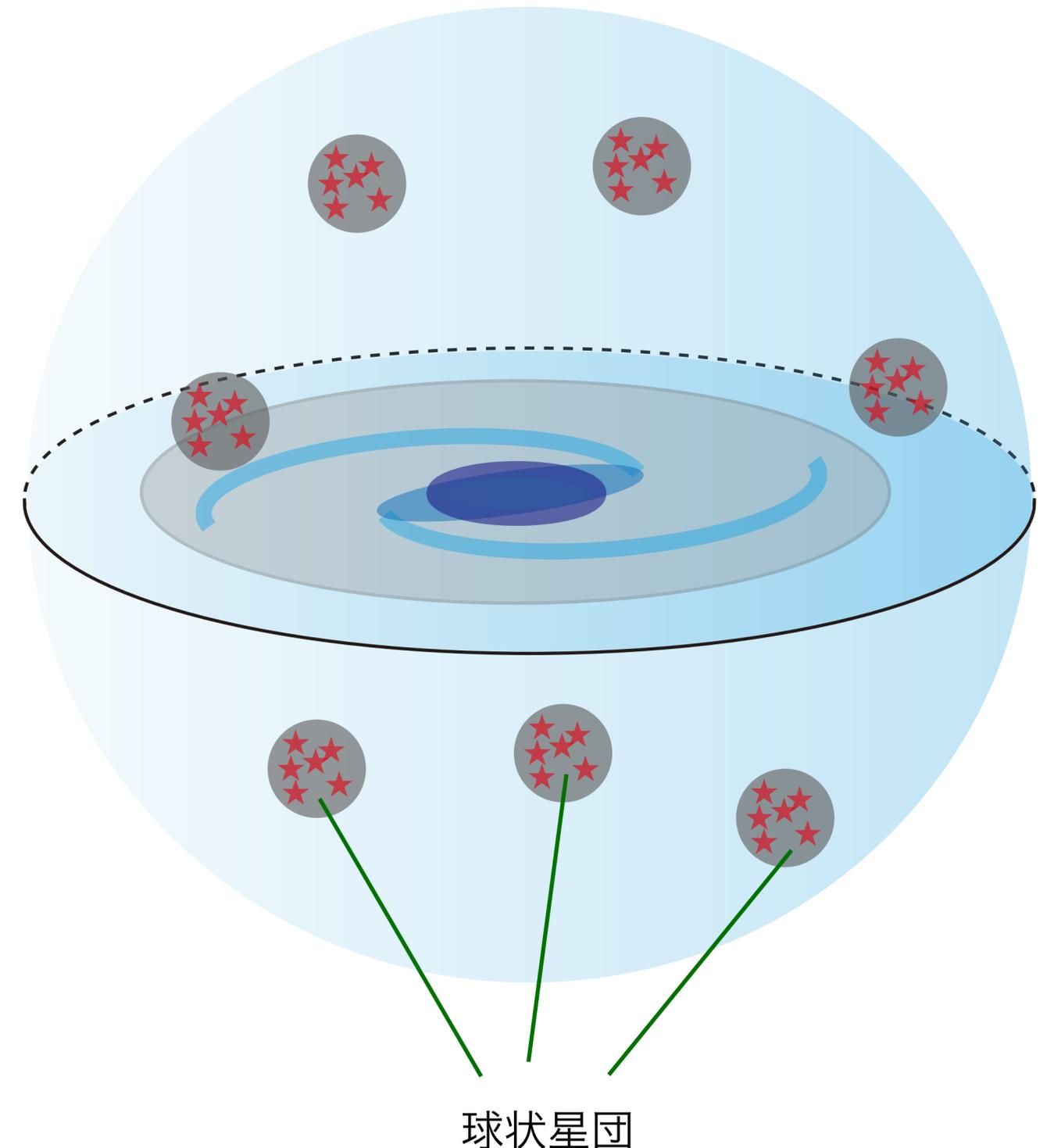


多波長での天の川銀河中心の姿 credit: NASA,

<https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mmw/>

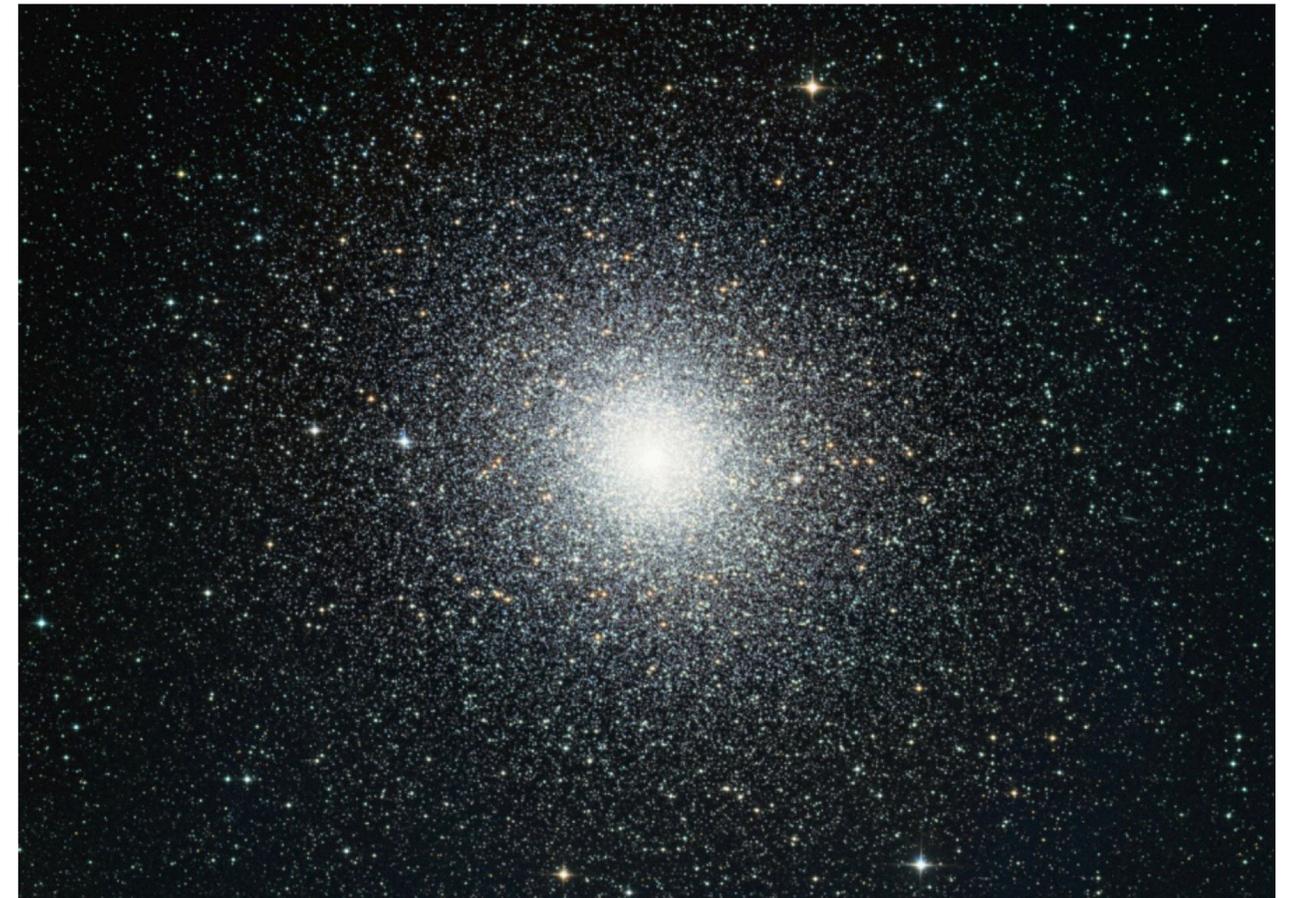
星の集団の進化

- **球状星団(globular cluster)**: 重力的に相互作用してまとまっている複数の星の集団
- 星の数 10^5 - 10^6 個
- 銀河系ハローに存在し、主に古い星で構成される
- 起源にはまだ謎が多いが、星団の星はほぼ同じ時期に生まれたと考えられている(同じ金属量 → 第10回)



星の集団の進化

- **球状星団(globular cluster)**: 重力的に相互作用してまとまっている複数の星の集団
- 星の数 10^5 - 10^6 個
- 銀河系ハローに存在し、主に古い星で構成される
- 起源にはまだ謎が多いが、星団の星はほぼ同じ時期に生まれたと考えられている(同じ金属量 → 第10回)



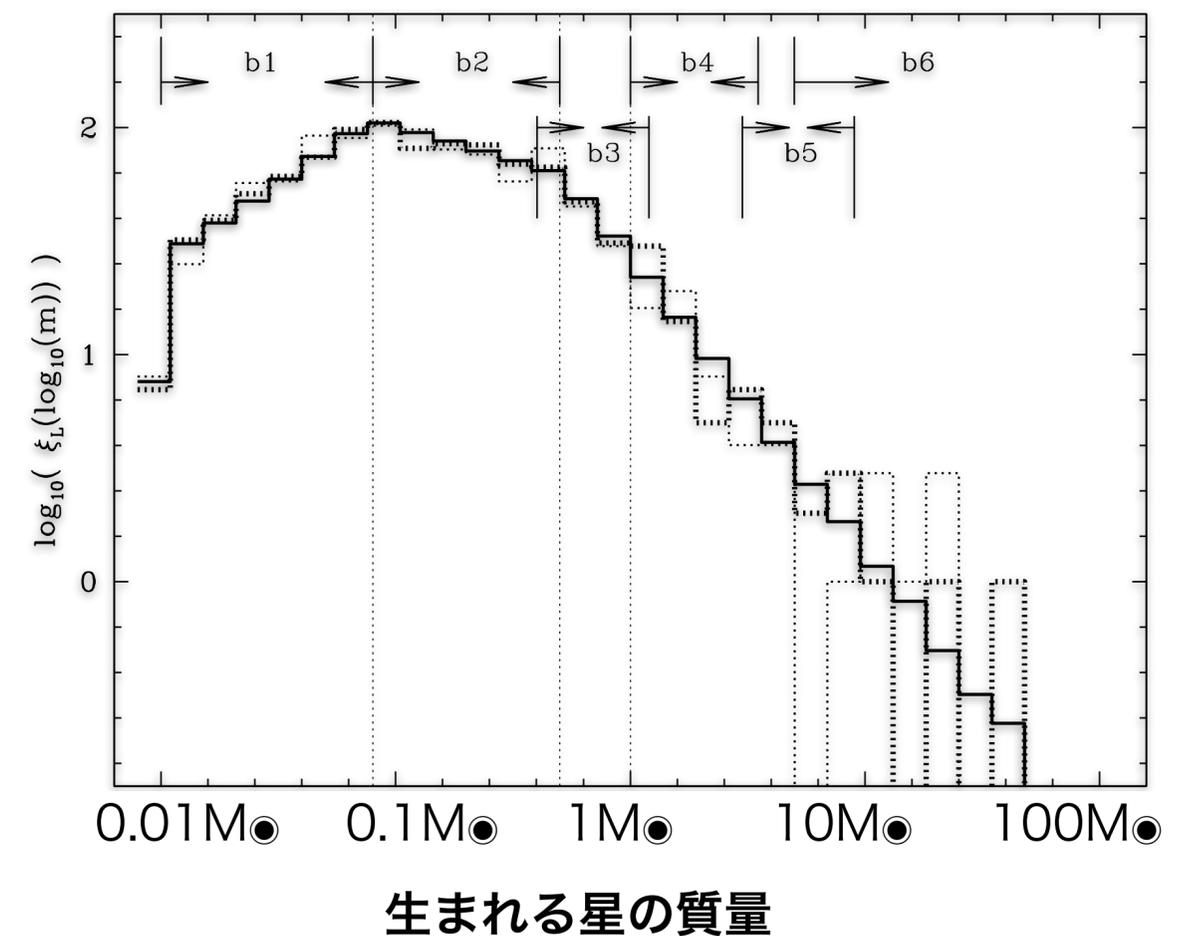
球状星団 47 Tucanae or NGC 104
credit: Dieter Willasch (Astro-Cabinet)
<https://apod.nasa.gov/apod/ap110116.html>

星の集団の進化

- 例えば、一斉に星が生まれた場合を考える
- 初期質量関数(IMF): 重い星や軽い星が生まれる相対頻度
- 大質量星は数が少なく寿命は短い(100-1000万年程度)、中小質量星はたくさんあり寿命は長い(太陽は100億年)
- 大質量星からいなくなっていく

初期質量関数の例 (Kroupa 2001)

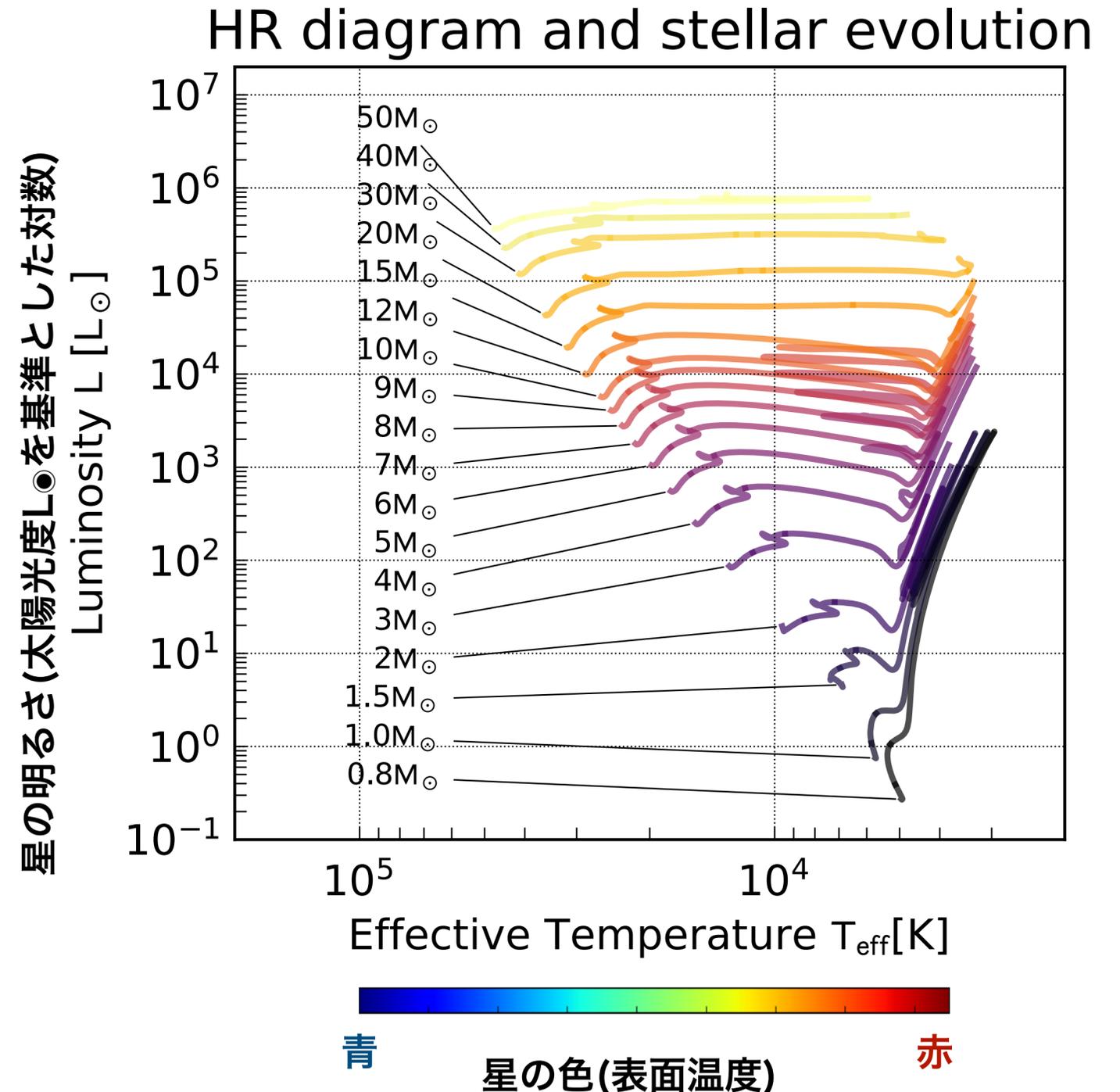
その質量の星が生まれる頻度



主系列星の寿命

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

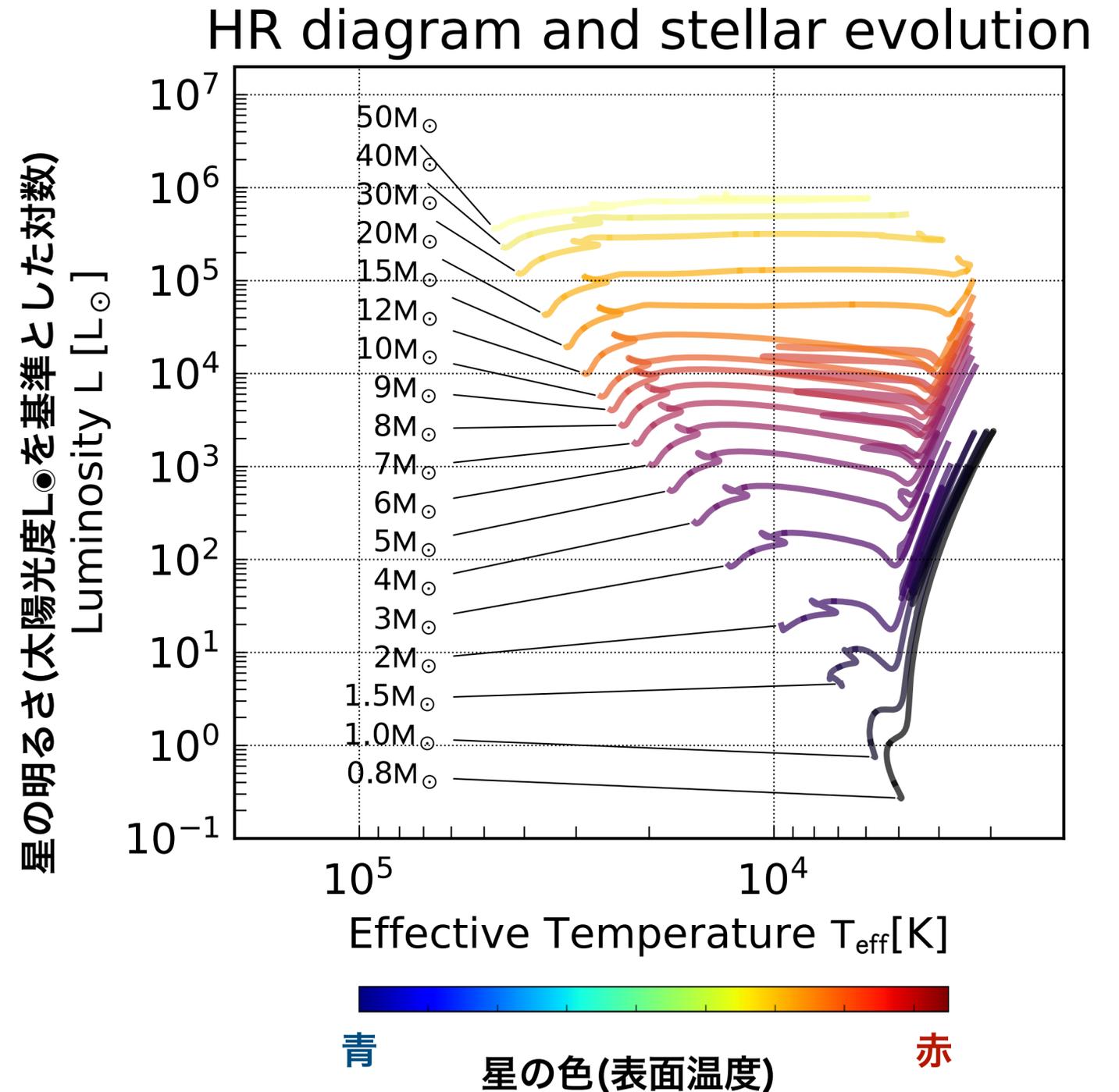
- $10M_{\odot}$ の主系列星の光度 $\approx 10^4 L_{\odot}$
- 質量(燃料)が10倍になっただけで光度(エネルギーの損失率)が1万倍に
- 太陽の寿命は約100億年ということは学習した
- $10M_{\odot}$ の主系列星の寿命は？



主系列星の寿命

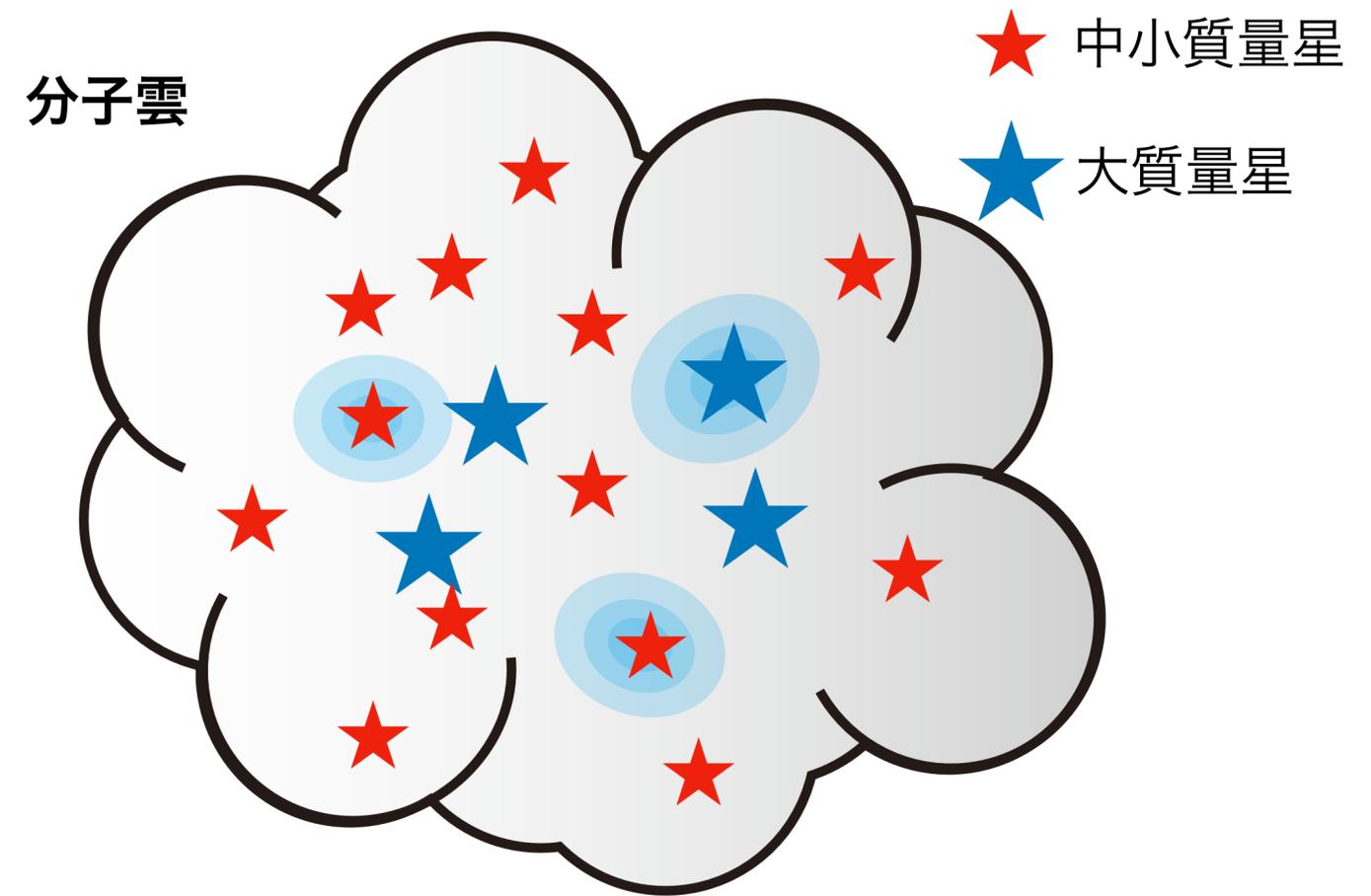
data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database
<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

- $10M_{\odot}$ の主系列星の光度 $\approx 10^4 L_{\odot}$
- 質量(燃料)が10倍になっただけで光度(エネルギーの損失率)が1万倍に
- 太陽の寿命は約100億年ということは学習した
- $10M_{\odot}$ の主系列星の寿命は？
- $100\text{億年} \times 10/10^4 = \mathbf{1000\text{万年!}}$



星の集団の進化

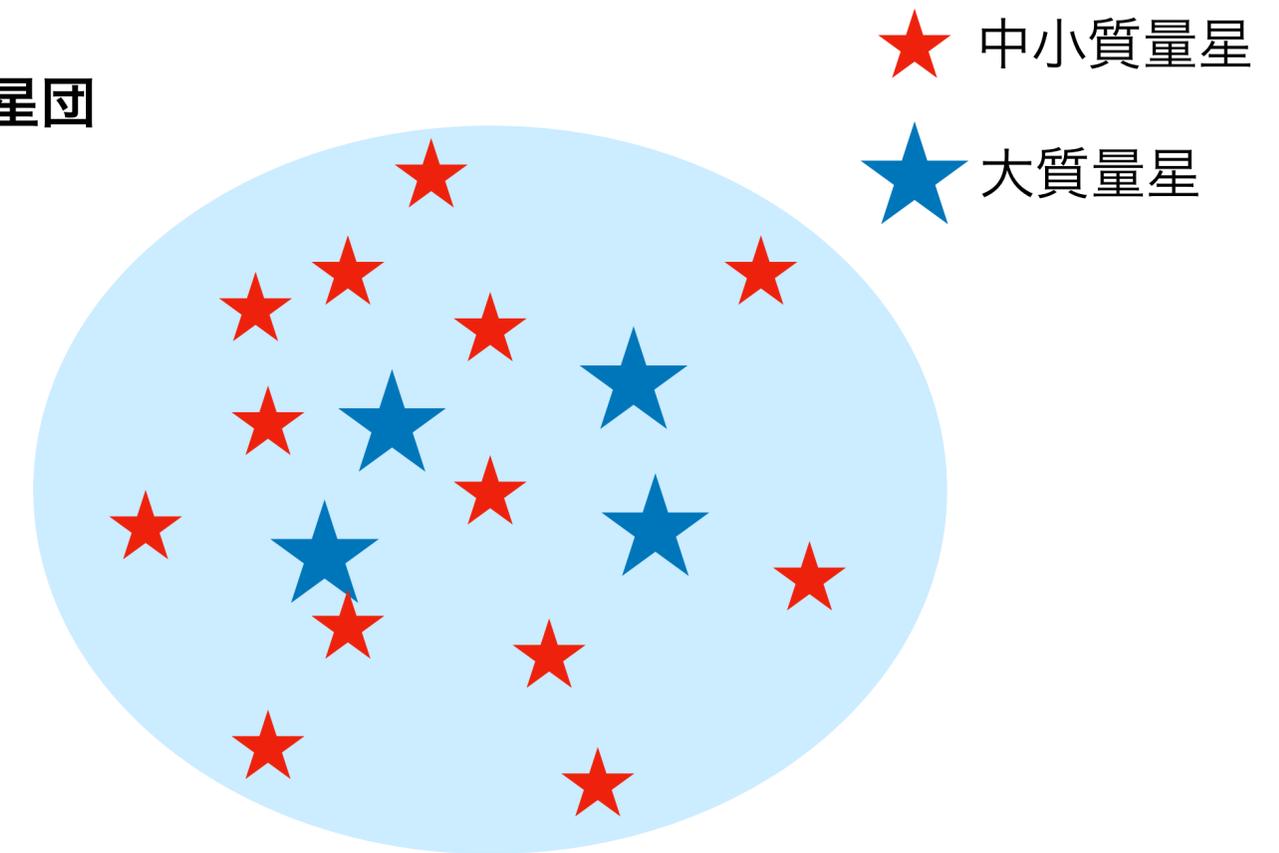
- 例えば、一斉に星が生まれた場合を考える
- 初期質量関数(IMF): 重い星や軽い星が生まれる相対頻度
- 大質量星は数が少なく寿命は短い(100-1000万年程度)、中小質量星はたくさんあり寿命は長い(太陽は100億年)
- 大質量星からいなくなっていく



星の集団の進化

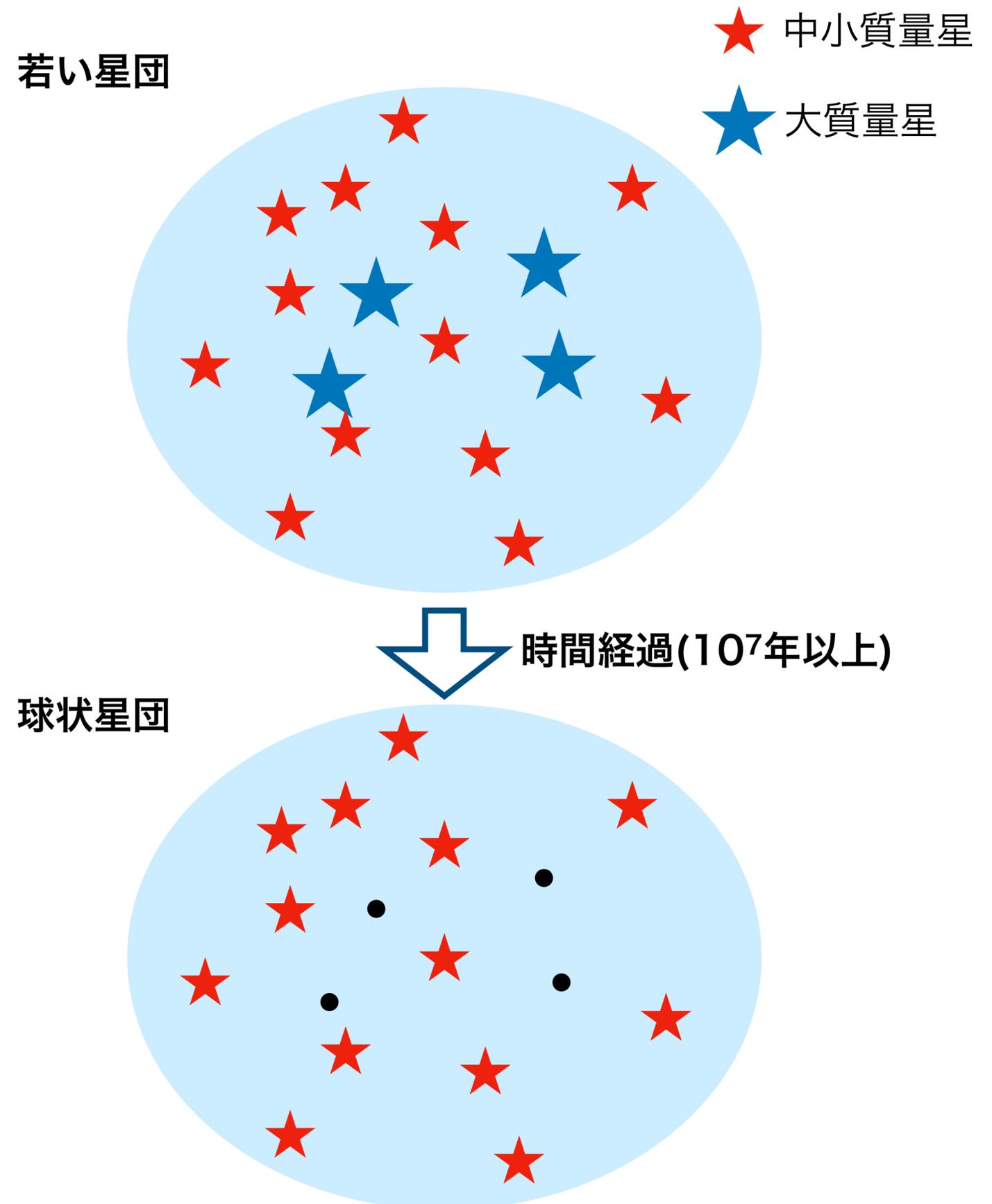
- 例えば、一斉に星が生まれた場合を考える
- 初期質量関数(IMF): 重い星や軽い星が生まれる相対頻度
- 大質量星は数が少なく寿命は短い(100-1000万年程度)、中小質量星はたくさんあり寿命は長い(太陽は100億年)
- 大質量星からいなくなっていく

若い星団



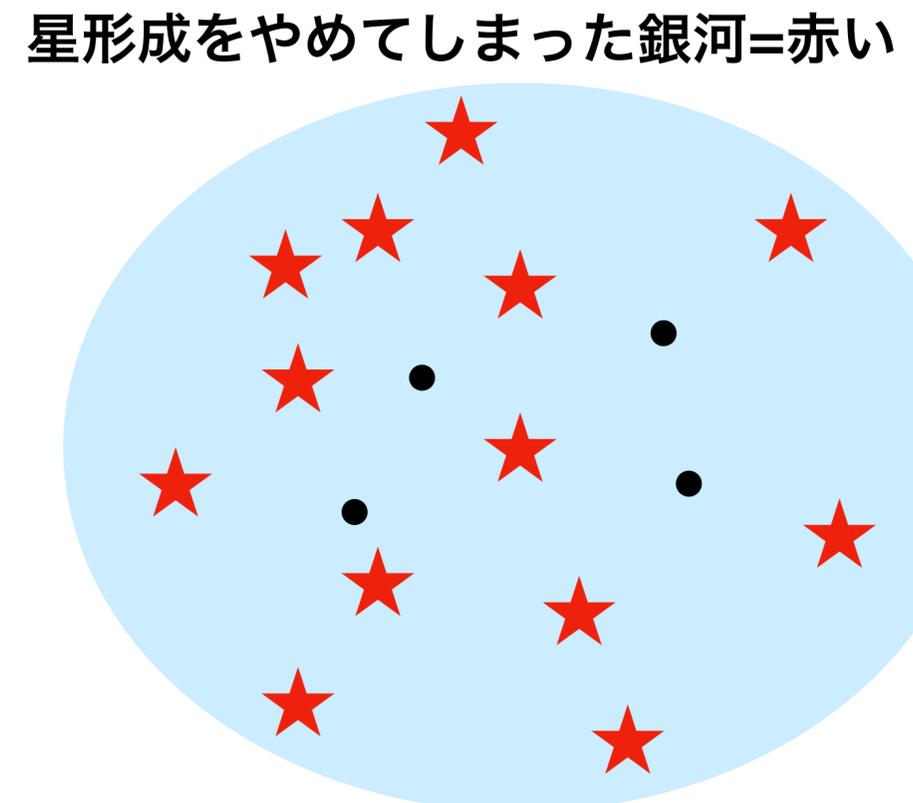
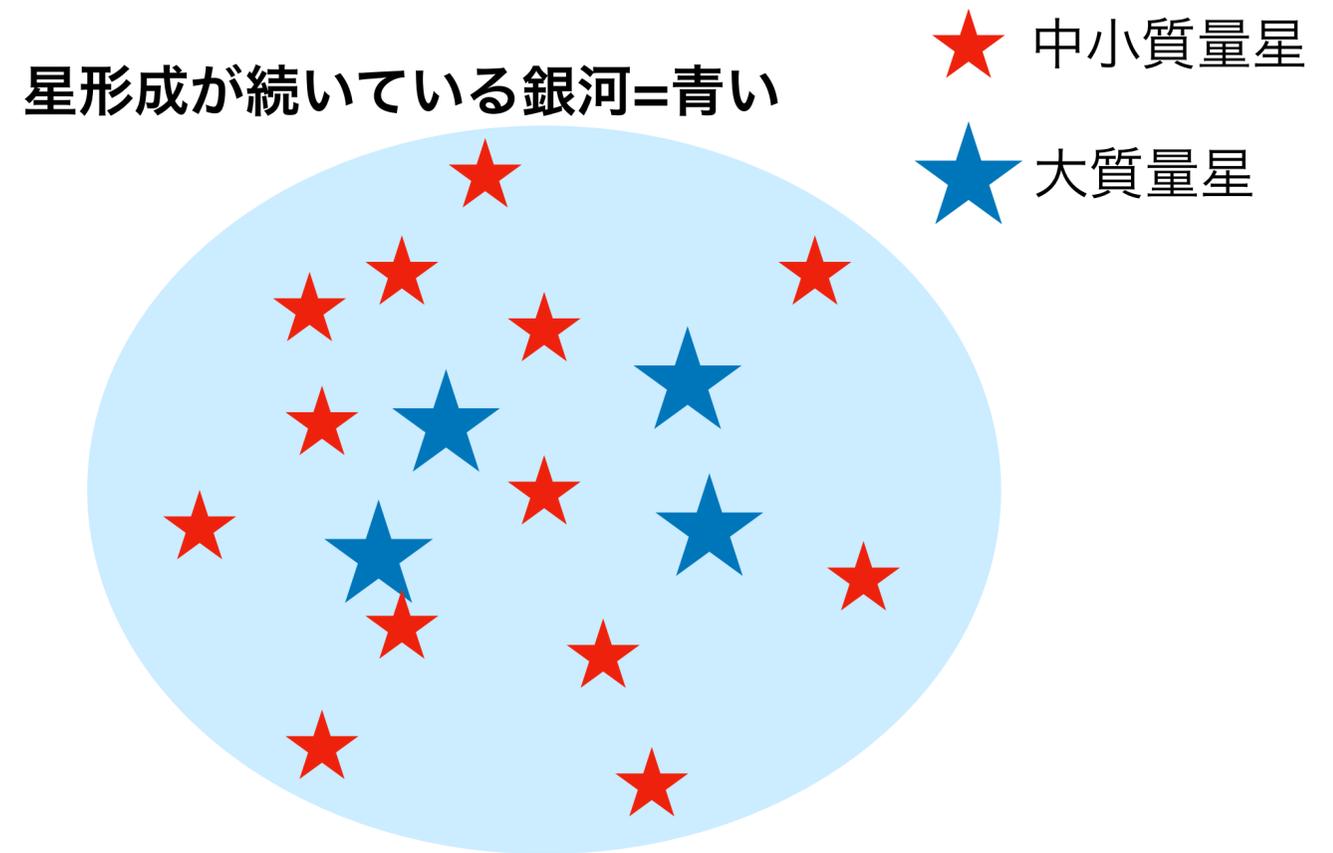
星の集団の進化

- 例えば、一斉に星が生まれた場合を考える
- 初期質量関数(IMF): 重い星や軽い星が生まれる相対頻度
- 大質量星は数が少なく寿命は短い(100-1000万年程度)、中小質量星はたくさんあり寿命は長い(太陽は100億年)
- 大質量星からいなくなっていく



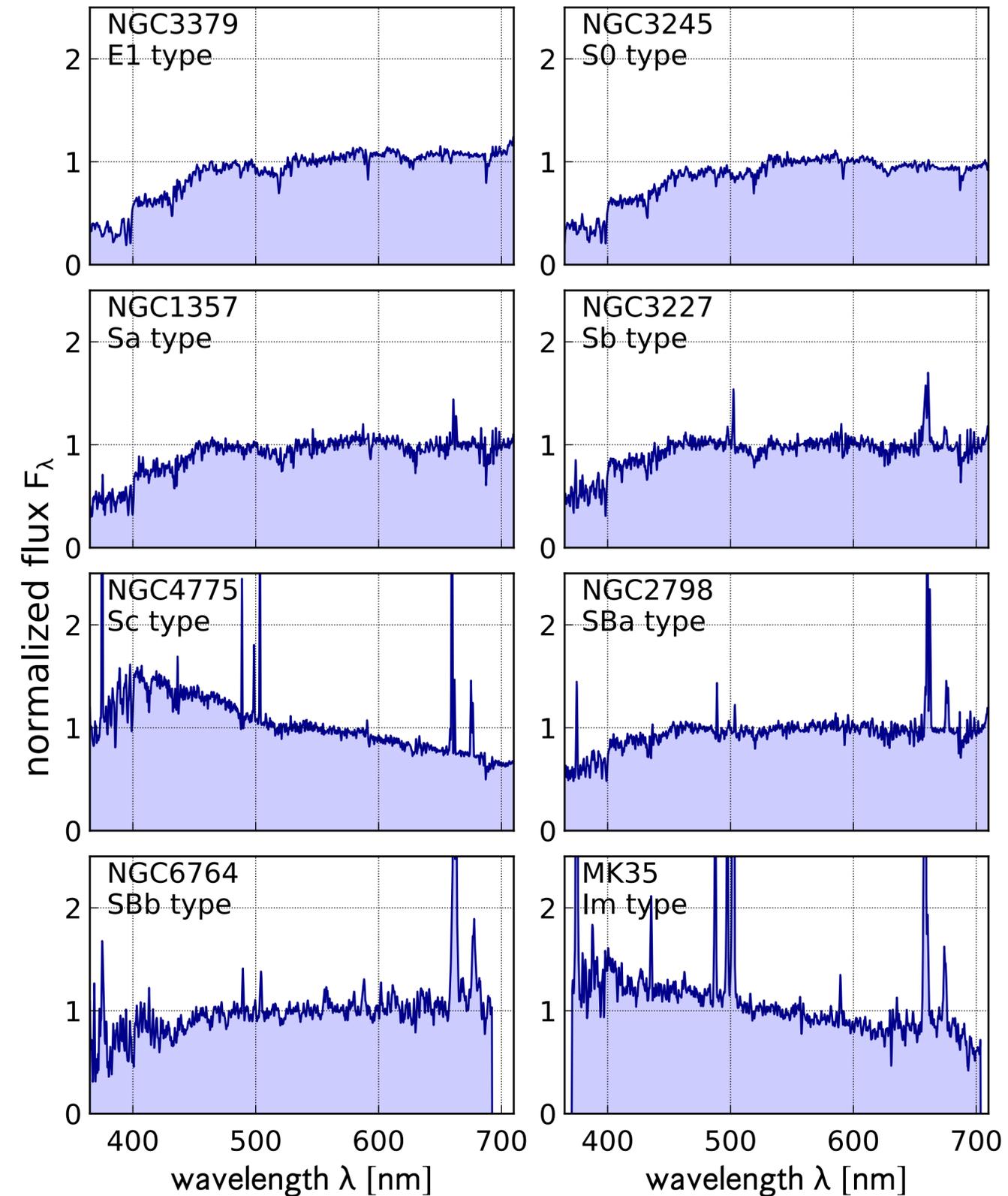
銀河のスペクトルと基本量

- 銀河系内の星の集団と違い、個々の星を分解して観測できないが、全体のスペクトルは観測できる
- 渦巻,棒渦巻銀河: 比較的青い光が多い, 輝線放射が見られる
- 楕円銀河: 比較的赤い光が多い
- どんな星をどれだけ含んでいるかが分かる



銀河のスペクトルと基本量

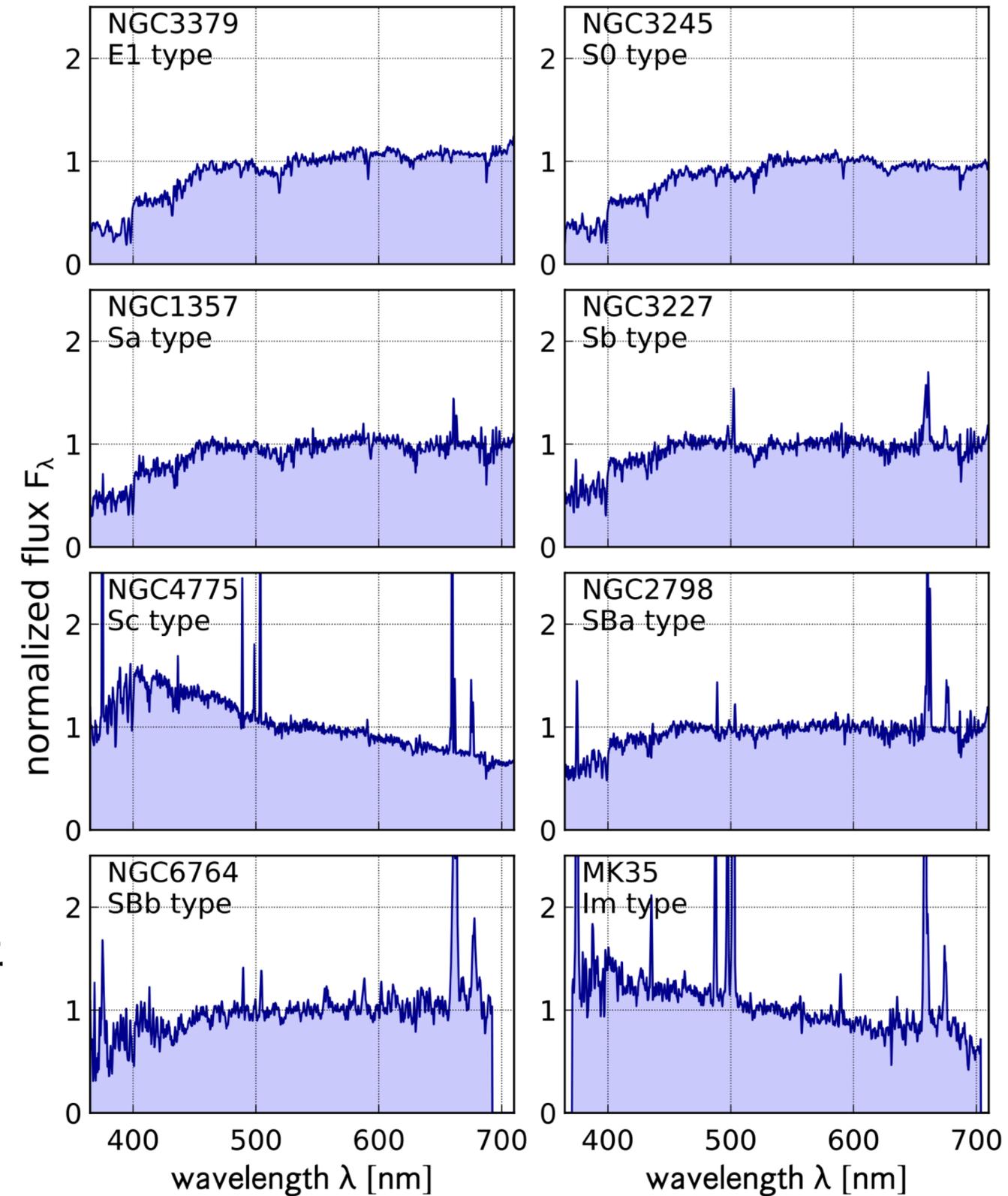
- 銀河系内の星の集団と違い、個々の星を分解して観測できないが、全体のスペクトルは観測できる
- 渦巻,棒渦巻銀河: 比較的青い光が多い, 輝線放射が見られる
- 楕円銀河: 比較的赤い光が多い
- どんな星をどれだけ含んでいるかが分かる



銀河のスペクトルの例 data source: Kennicutt (1992)
The Astrophysical Journal Supplement Series, 79 255

銀河のスペクトルと基本量

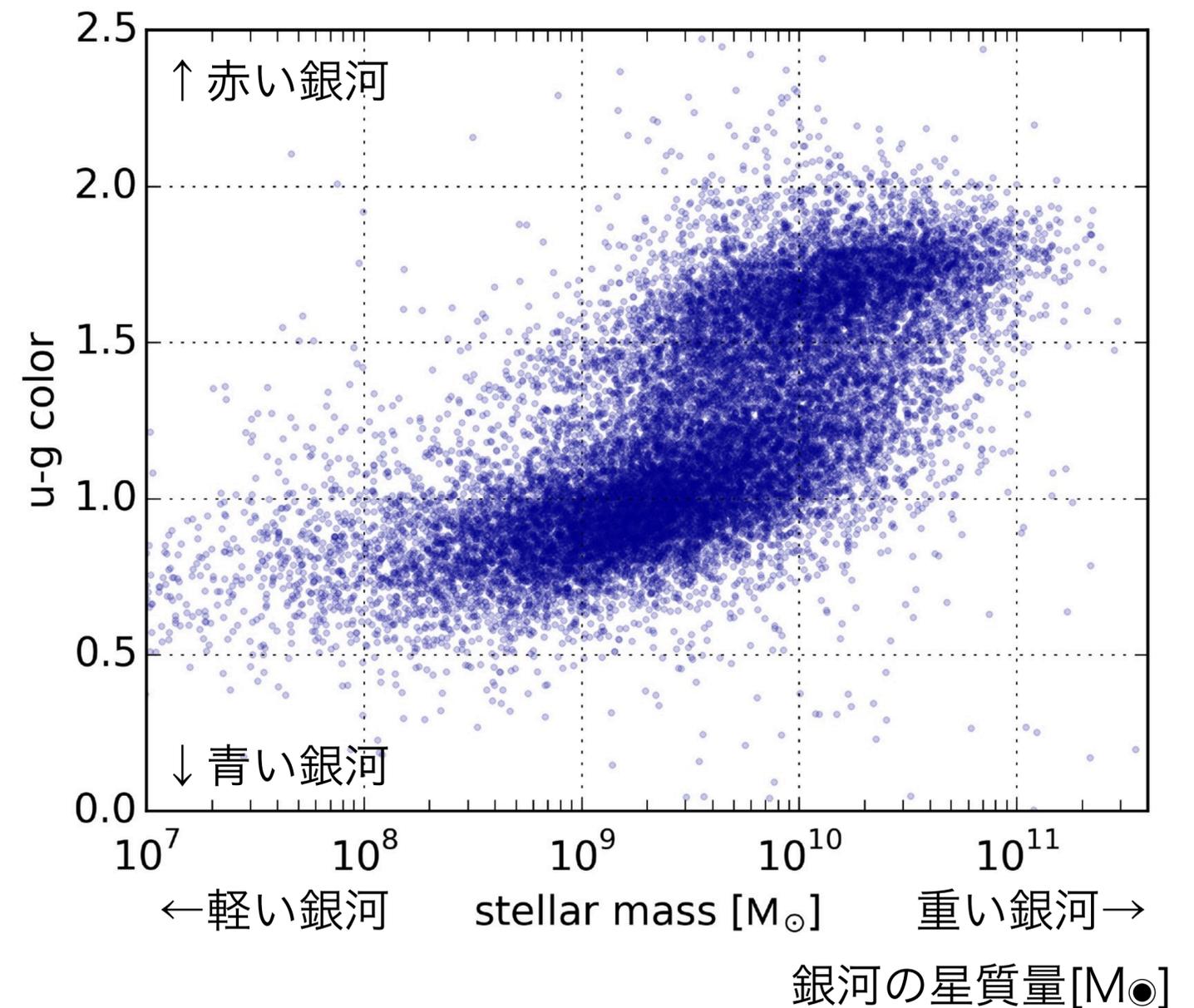
- **星質量(stellar mass; M_{\odot}):** 星として光っている分の質量(星が多いほど明るい)
- **年齢(age; yr):** 銀河が星を作り始めて何年か
- **金属量(metallicity):** 重元素の量
- **星形成率(star formation rate; M_{\odot}/yr):** 星をどれだけ作っているか
- **ダスト質量(dust mass; M_{\odot}):** 可視光を吸収し、スペクトルを赤くする



銀河のスペクトルの例 data source: Kennicutt (1992)
The Astrophysical Journal Supplement Series, 79 255

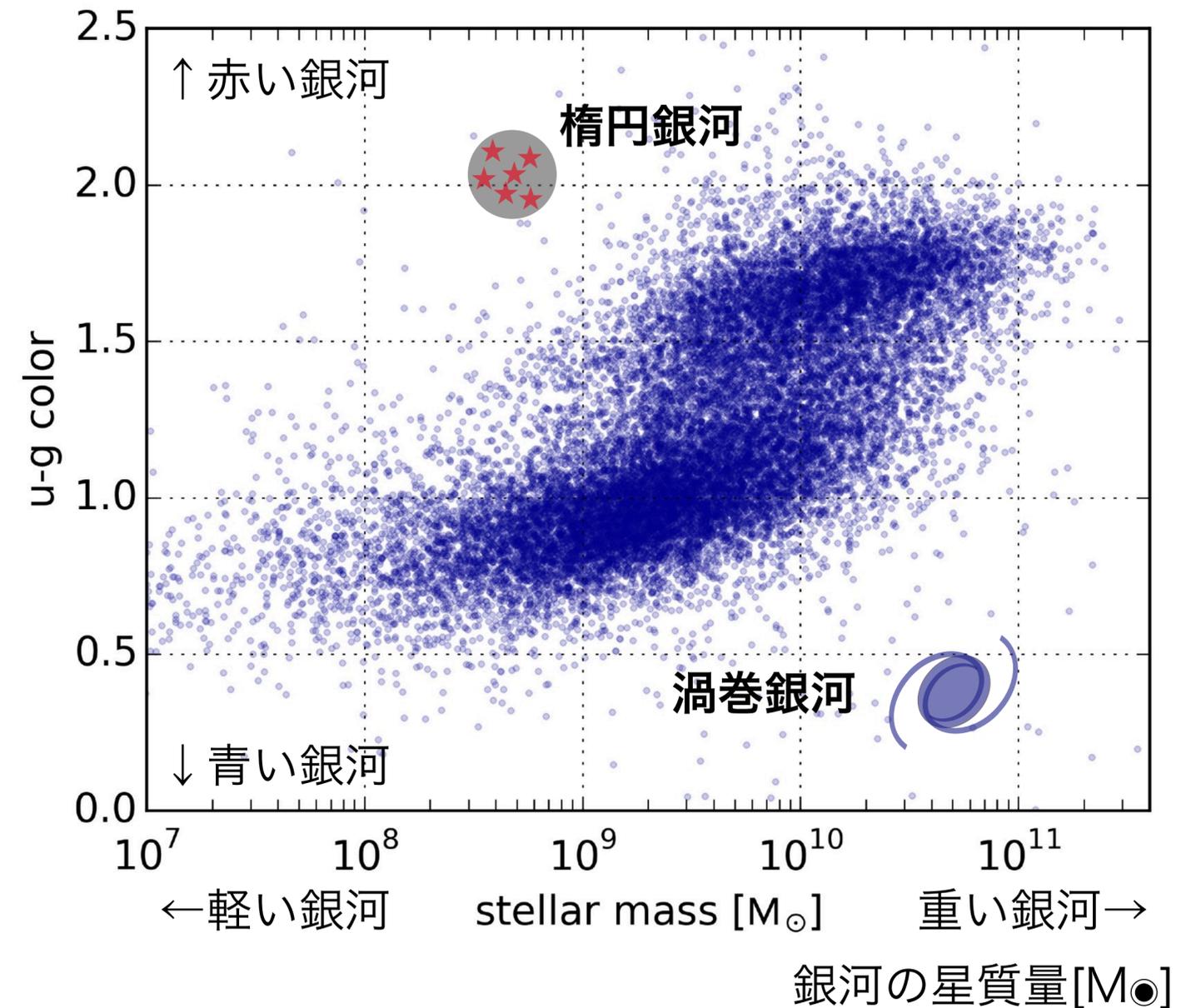
銀河のスペクトルと基本量

- 銀河の星質量 vs 銀河の色
- 主に2つの構成成分
- 青い銀河: 主に星形成銀河(渦巻,棒渦巻)
- 赤い銀河: 主に星形成を終えた楕円銀河



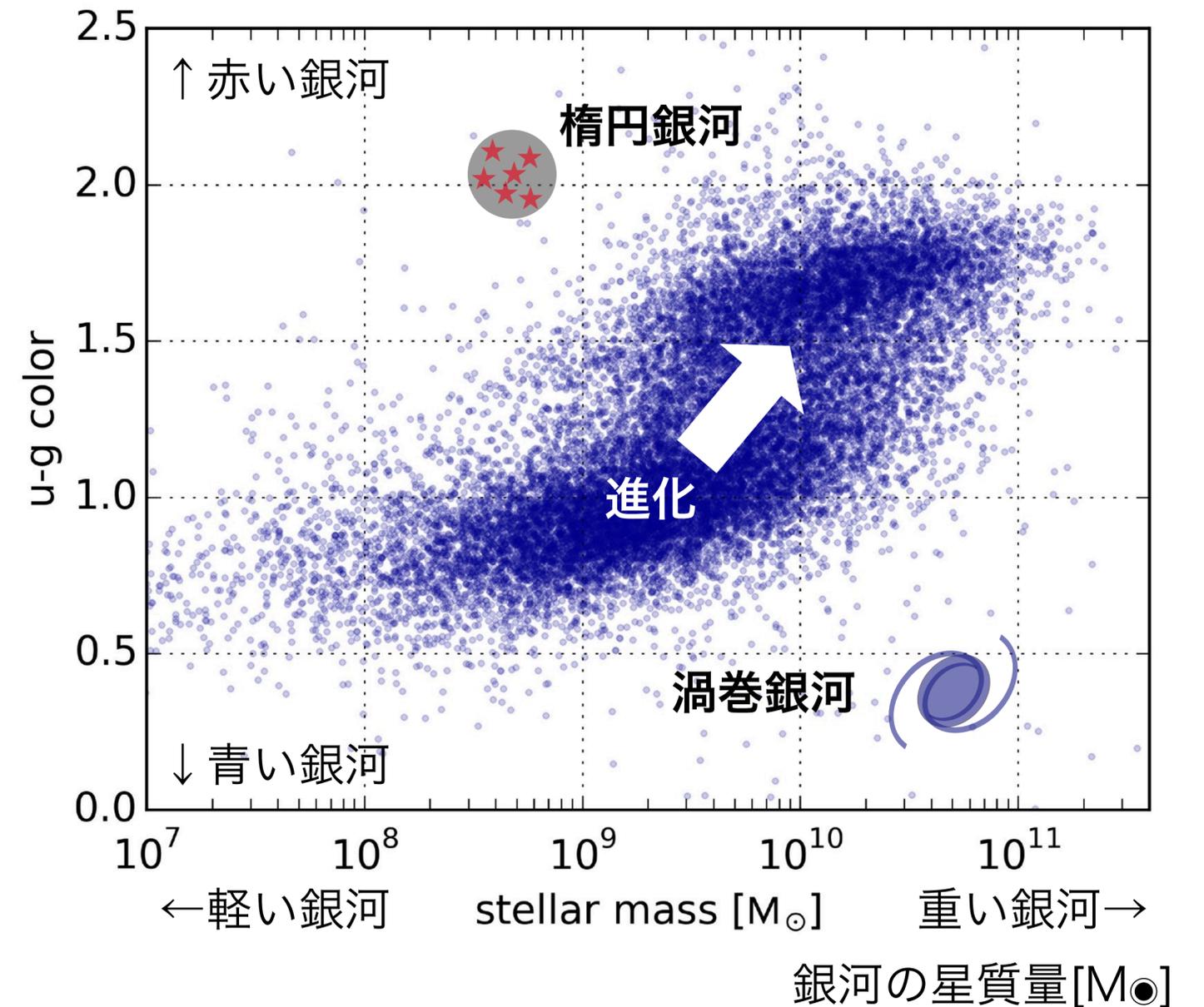
銀河のスペクトルと基本量

- 銀河の星質量 vs 銀河の色
- 主に2つの構成成分
- 青い銀河: 主に星形成銀河(渦巻,棒渦巻)
- 赤い銀河: 主に星形成を終えた楕円銀河



銀河のスペクトルと基本量

- 銀河の星質量 vs 銀河の色
- 主に2つの構成成分
- 青い銀河: 主に星形成銀河(渦巻,棒渦巻)
- 赤い銀河: 主に星形成を終えた楕円銀河



第9回:

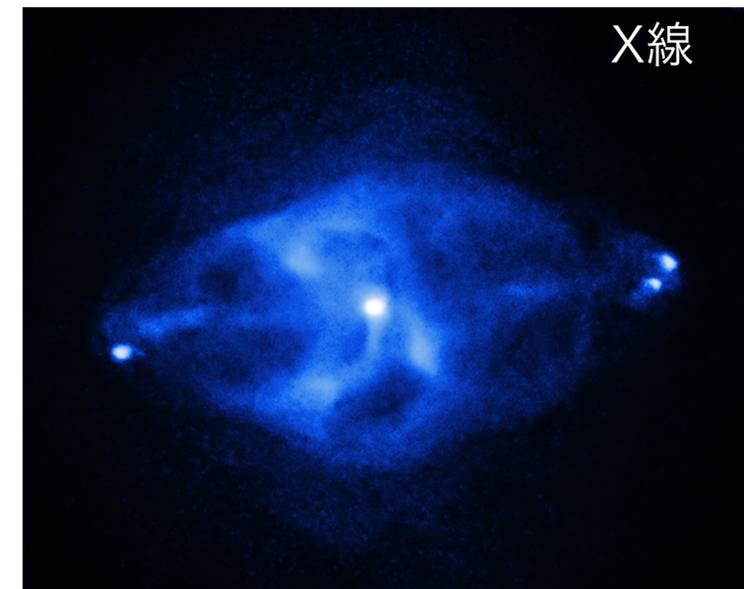
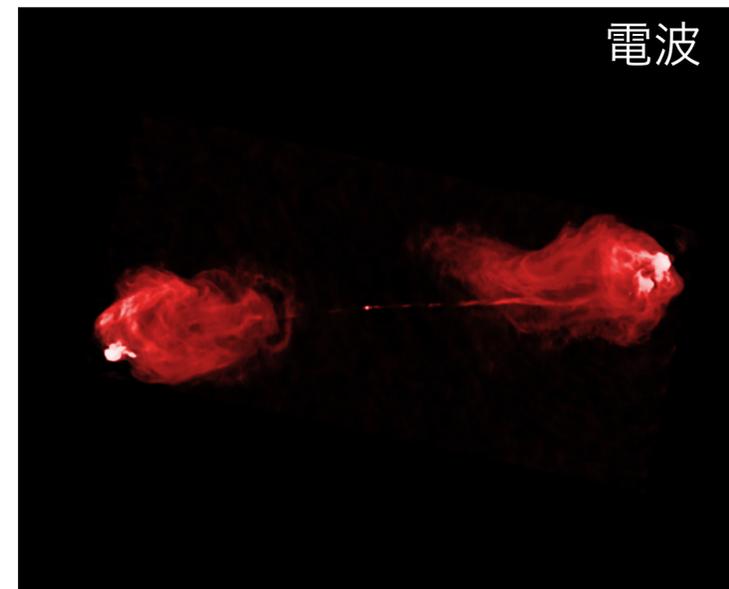
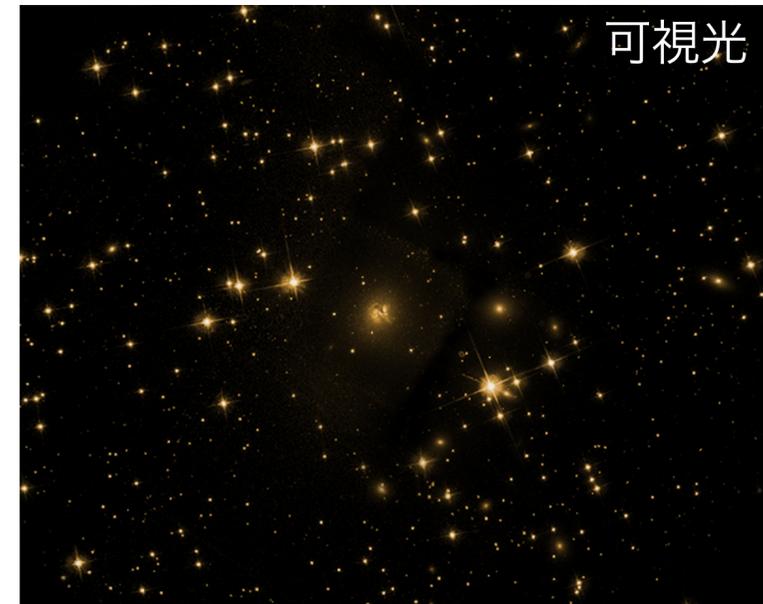
銀河2

-銀河の分類と進化-

- 様々な銀河と銀河の基本量
- **銀河の活動性と超大質量ブラックホール**
- 遠方銀河と宇宙の大規模構造

銀河のさまざまな活動性

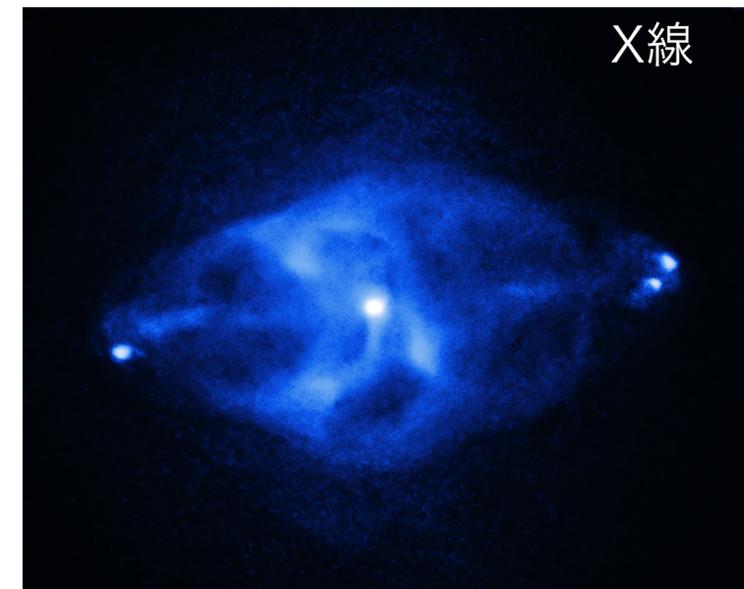
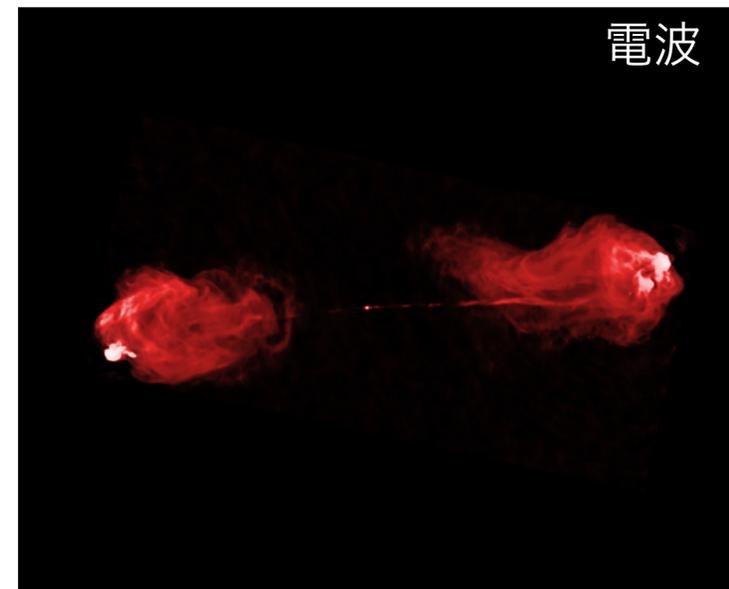
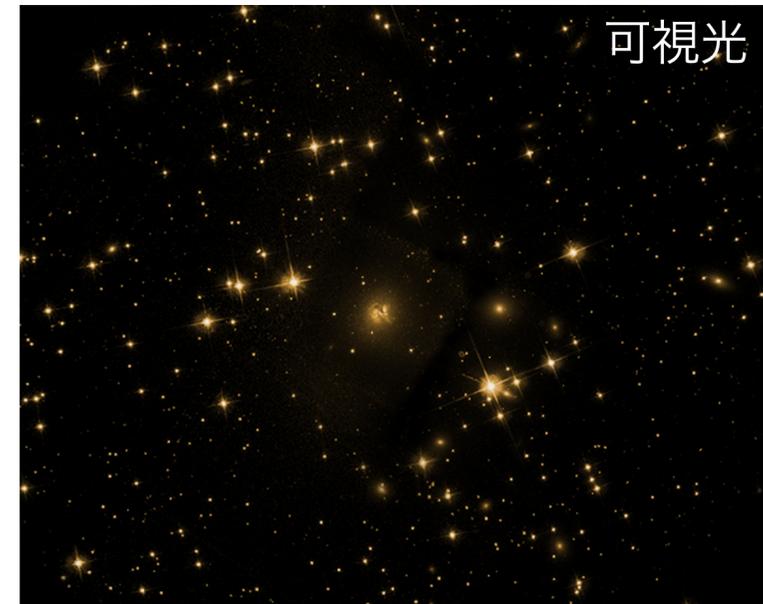
- 今までは、主に可視光をもとにした銀河での星や星形成活動の話だった
- 他の波長ではそれ以外の活動性がみられる(多波長天文学: **multi-wavelength astronomy**)
- 電波, X線, ...
- 例えば、はくちょう座A(Cygnus A)という電波銀河



Cygnus Aの可視光(上), 電波(左下), X線(右下)画像
credit: X-ray: NASA/CXC/SAO, NASA/STScI, NSF/NRAO/AUI/VLA
<https://chandra.harvard.edu/photo/2015/iyl/more.html>

銀河のさまざまな活動性

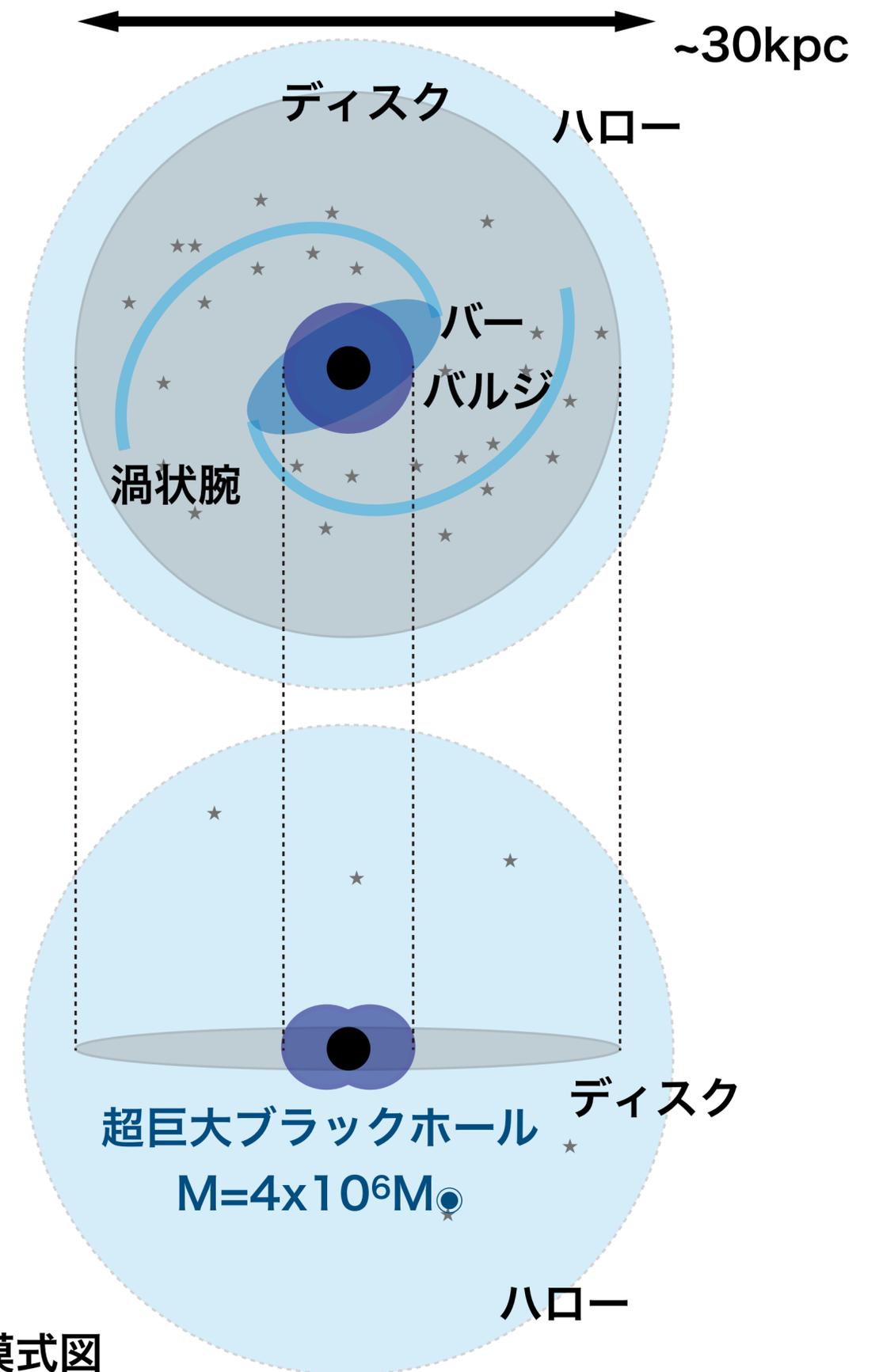
- **宇宙ジェット (cosmic jet)**: 天体からガスが細く絞られて噴出する現象
- ある種の銀河では、銀河スケール(kpc)でのジェットの活動性が確認でき、それは銀河中心にあるブラックホールと関係していることが分かっている
- **超巨大ブラックホール(super massive black hole)**: 銀河の中心にある普通の星よりはるかに重いブラックホール



Cygnus Aの可視光(上), 電波(左下), X線(右下)画像
credit: X-ray: NASA/CXC/SAO, NASA/STScI, NSF/NRAO/AUI/VLA
<https://chandra.harvard.edu/photo/2015/iyl/more.html>

銀河のさまざまな活動性

- **宇宙ジェット (cosmic jet)**: 天体からガスが細く絞られて噴出する現象
- ある種の銀河では、銀河スケール(kpc)でのジェットの活動性が確認でき、それは銀河中心にあるブラックホールと関係していることが分かっている
- **超巨大ブラックホール (super massive black hole)**: 銀河の中心にある普通の星よりはるかに重いブラックホール



銀河系の模式図

銀河中心の超大質量ブラックホール

- イベントホライズン望遠鏡(Event Horizon Telescope; EHT)によるM87の中心ブラックホールの観測
- ブラックホールの「陰」 (**Blackhole shadow**; ブラックホールの重力によって光が曲げられ、暗くなった部分)が観測された
- ブラックホール直接撮像の時代

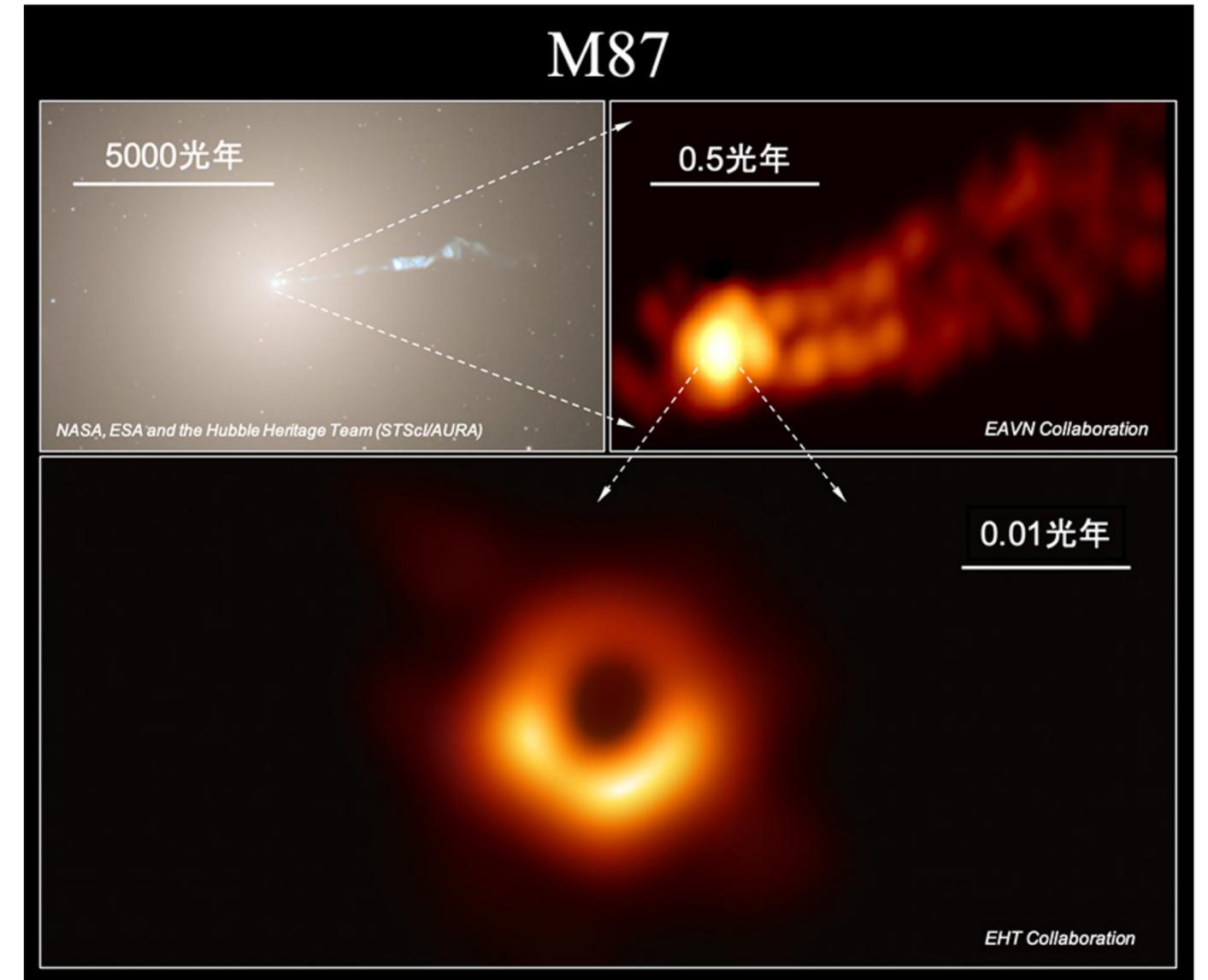


EHTの望遠鏡ネットワーク

credit: NRAO/AUI/NSF, EHT collaboration
<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20190410>

銀河中心の超大質量ブラックホール

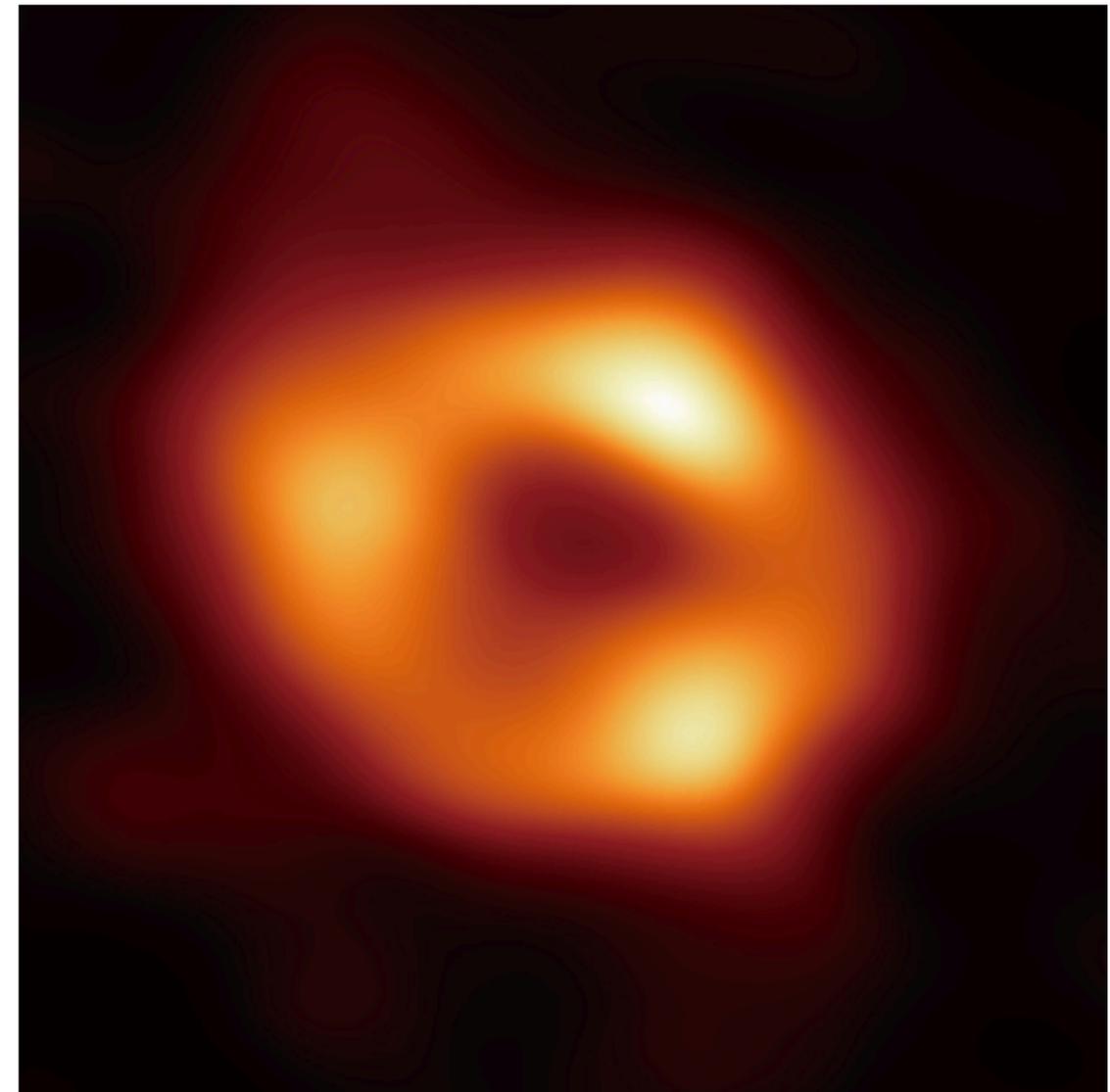
- イベントホライズン望遠鏡(Event Horizon Telescope; EHT)によるM87の中心ブラックホールの観測
- ブラックホールの「陰」(**Blackhole shadow**; ブラックホールの重力によって光が曲げられ、暗くなった部分)が観測された
- ブラックホール直接撮像の時代



EHTによるM87の中心領域の観測結果
credit: EHT collaboration

銀河中心の超大質量ブラックホール

- イベントホライズン望遠鏡(Event Horizon Telescope; EHT)によるM87の中心ブラックホールの観測
- ブラックホールの「陰」(**Blackhole shadow**; ブラックホールの重力によって光が曲げられ、暗くなった部分)が観測された
- ブラックホール直接撮像の時代



EHTによるSgr A*観測結果
credit: EHT collaboration

活動銀河核 (AGN)

- **活動銀河核 (active galactic nuclei; AGN):** 明るい放射やジェットなどの活動性を示す銀河の中心領域
- 銀河の中心部に存在する巨大ブラックホールとそこに吸い込まれるガスによって様々な活動性がみられる
- 明るい電離放射
- ジェット



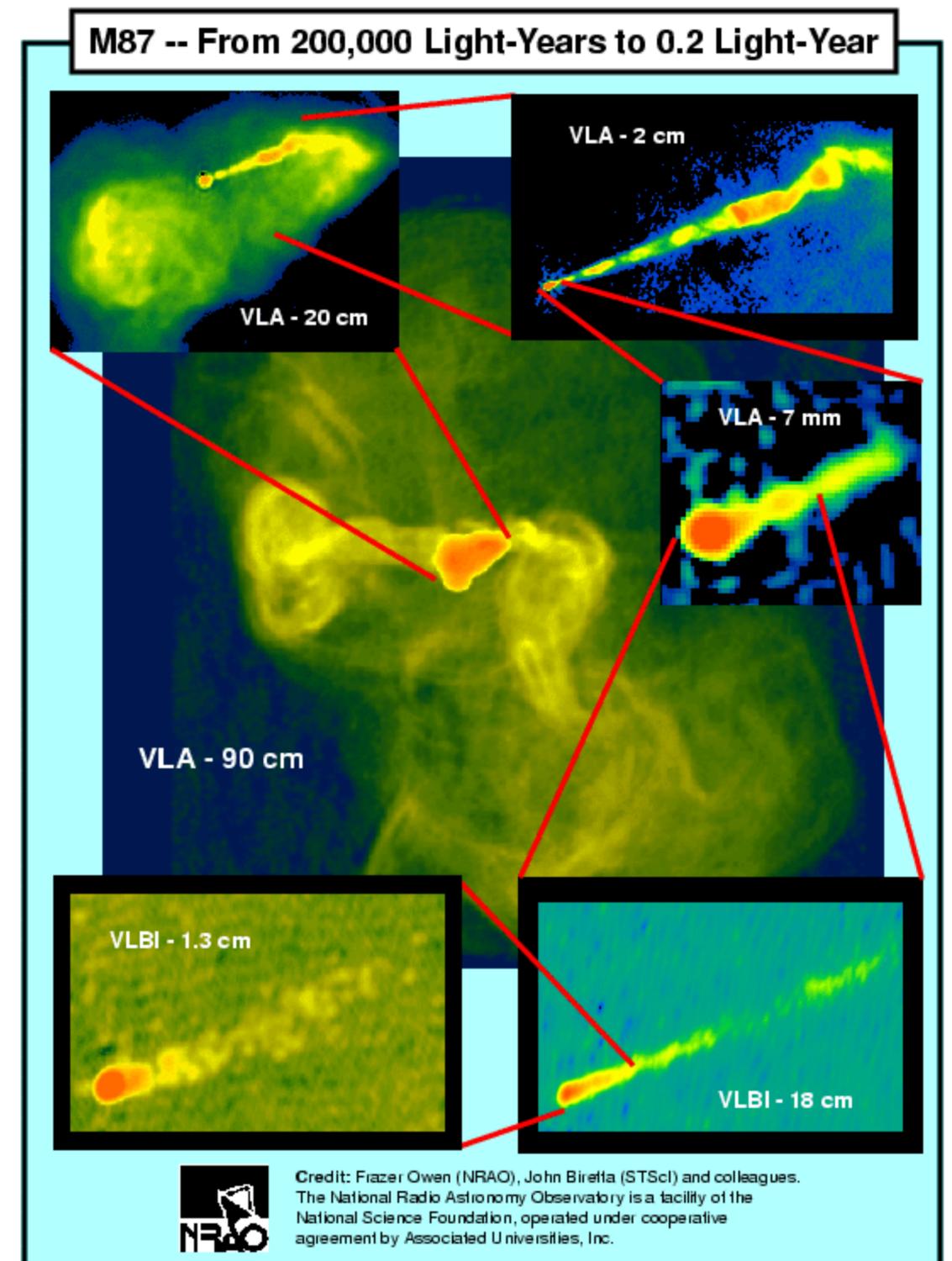
1型セイファート銀河 NGC 4151の可視光画像

credit: Adam Block/Mount Lemmon SkyCenter/University of Arizona

https://ja.wikipedia.org/wiki/NGC_4151

電波銀河 (radio galaxy)

- 電波で極めて明るく輝く
- 可視光スペクトルはセイファート銀河とほぼ同じ
- ジェットとジェットが銀河を取り巻く物質に衝突してできる構造(電波ローブ)が電波で光る

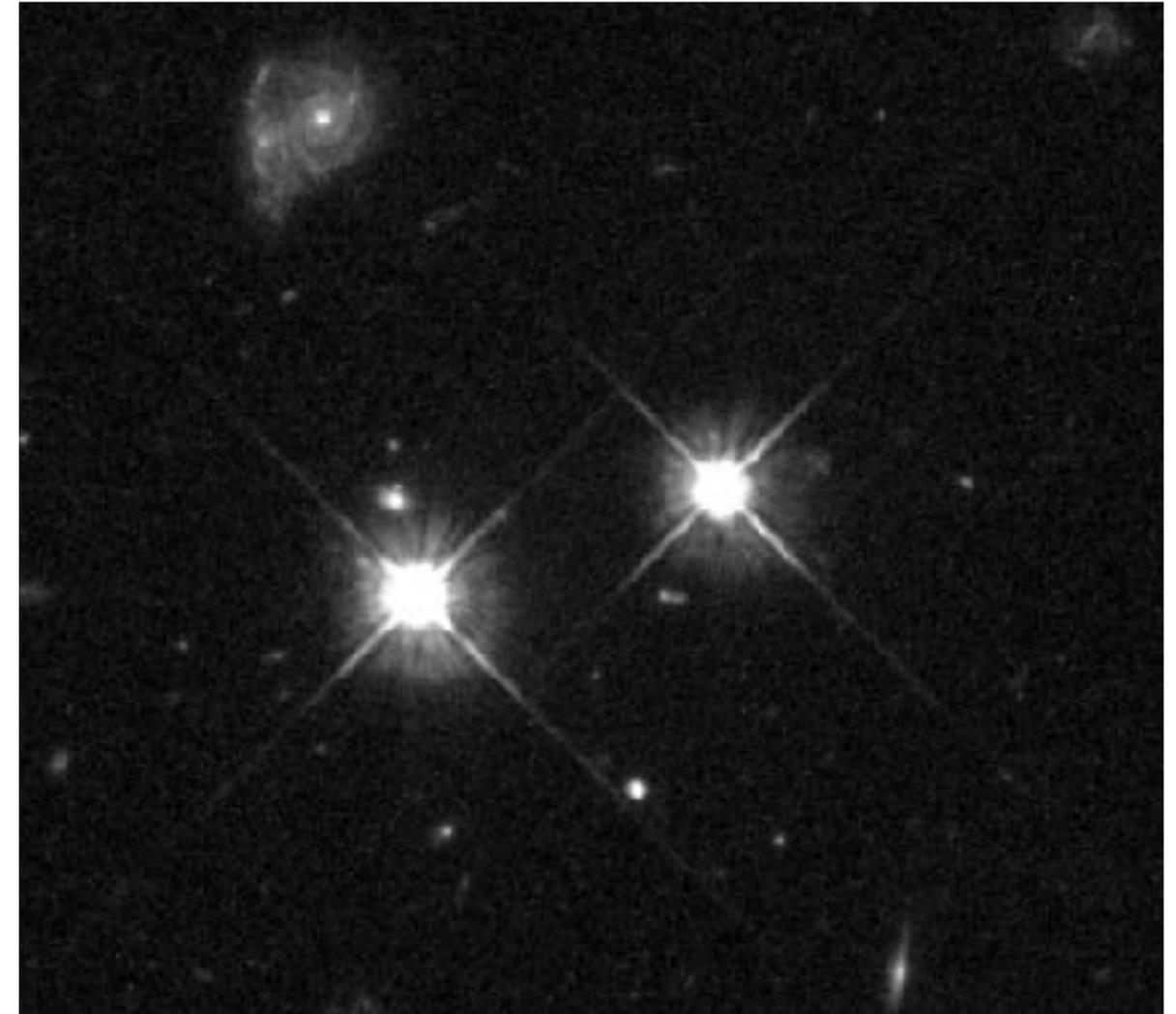


電波銀河M87の電波ジェット

credit: F. N. Owen (NRAO) et al., VLA, NRAO, AUI
<https://apod.nasa.gov/apod/ap990216.html>

クエーサー(quasar, QSOs)

- Quasi-Stellar radio source (準恒星天体)と分類されていた、電波で明るく可視光でほぼ点状の天体
- 中心核が極めて明るく、まわりの銀河部分がよく見えない



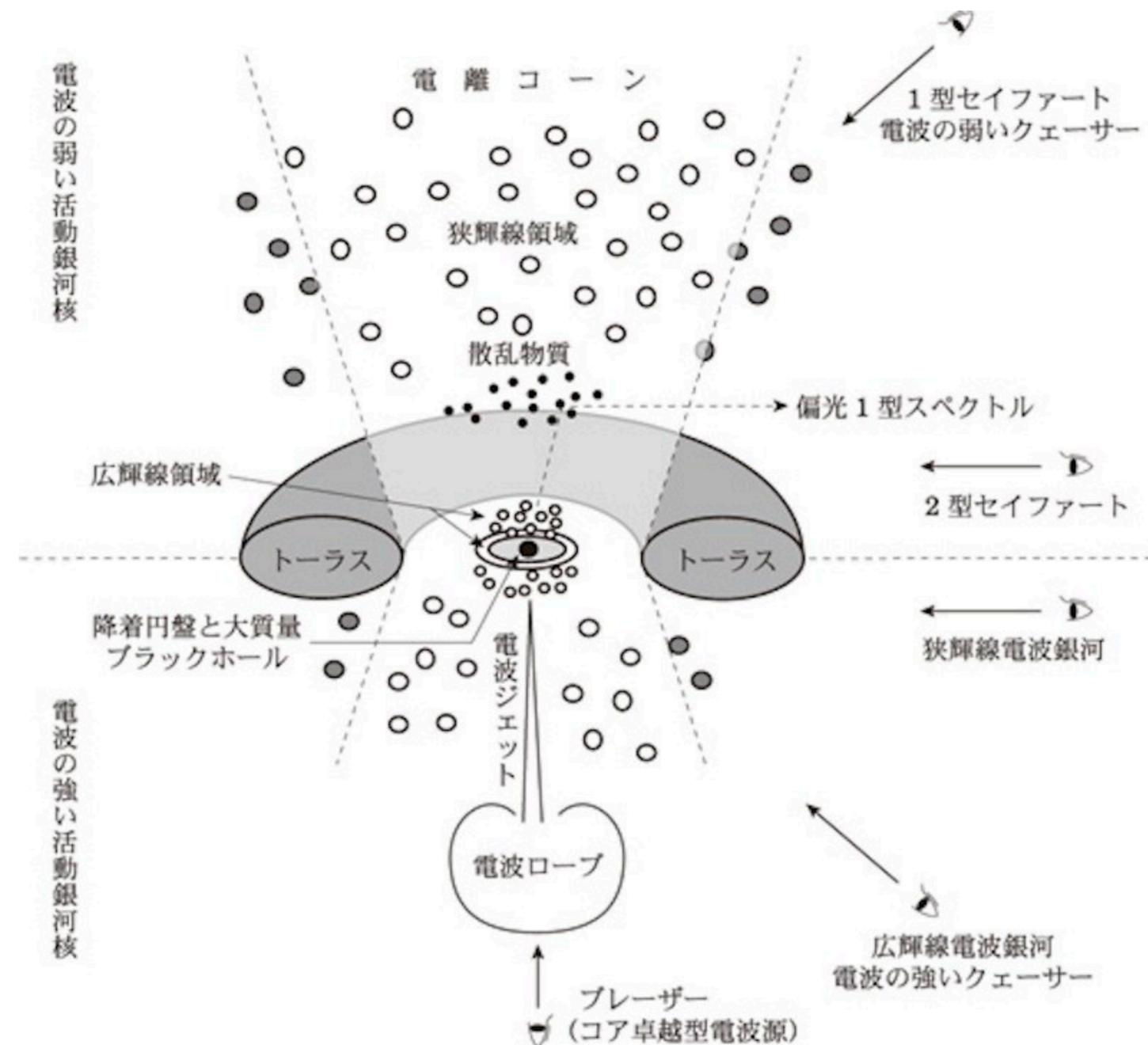
あるクエーサー(左)と恒星(右)

credit: C. Steidel (Caltech), HST, NASA

<https://apod.nasa.gov/apod/ap960818.html>

活動銀河核の分類と統一モデル

- 活動銀河核、その中心核をどの方向から観測したかで異なる姿を見せていると考えられる
- 1型セイファート → 中心軸近く
- 2型セイファート → 円盤近く
- ブレーザー → ジェットを正面から



活動銀河核の統一モデル

第9回:

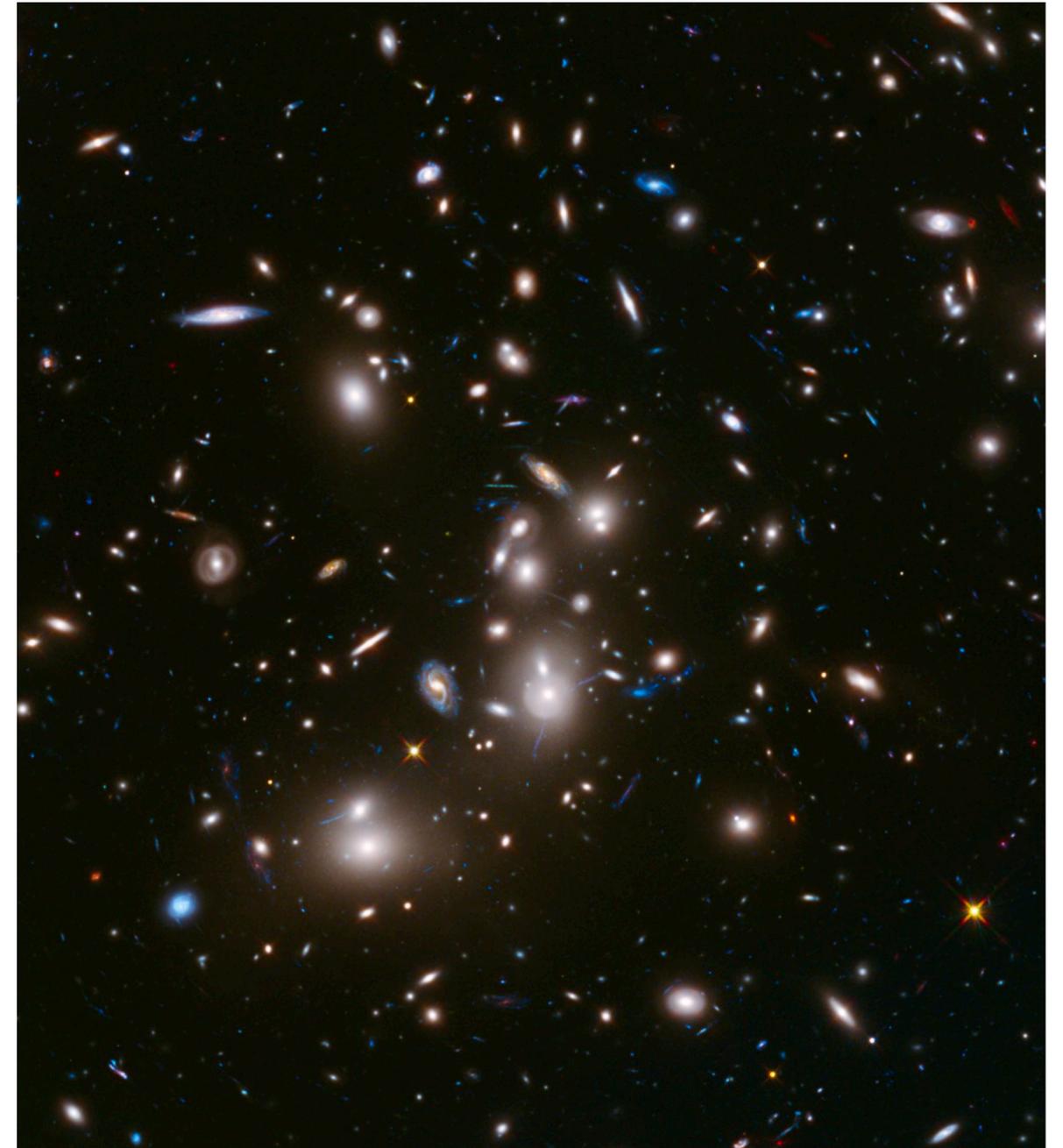
銀河2

-銀河の分類と進化-

- 様々な銀河と銀河の基本量
- 銀河の活動性と超大質量ブラックホール
- 遠方銀河と宇宙の大規模構造

遠くの日体を観測する

- 銀河には様々な種類があることを学んだ
- 近くの銀河と遠くの銀河で違いはあるのか？
- そもそも遠くの日体を観測するとは？



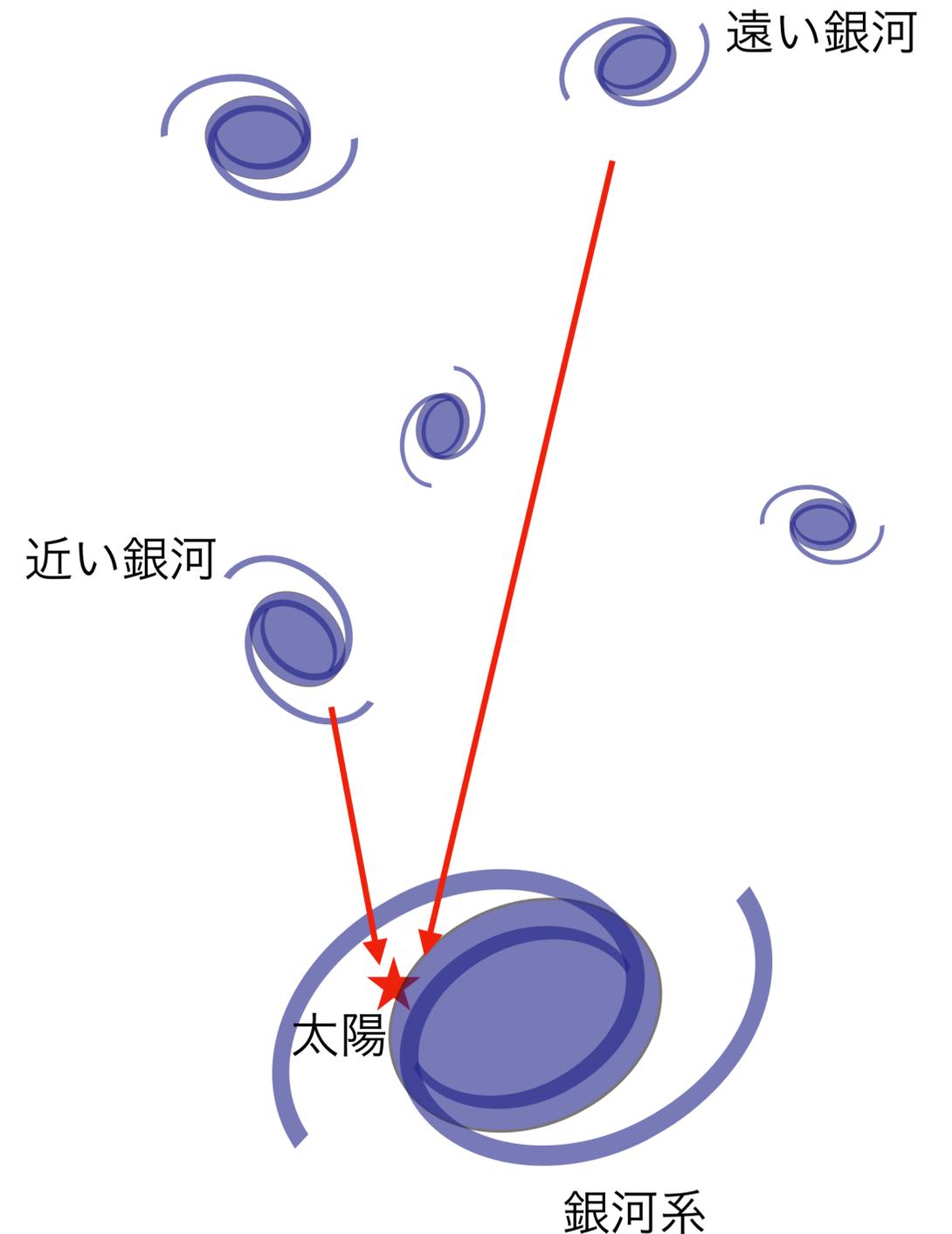
銀河団 Abel 2744

credit: NASA, ESA, and J. Lotz, M. Mountain,
A. Koekemoer, and the HFF Team (STScI)

<https://svs.gsfc.nasa.gov/30949>

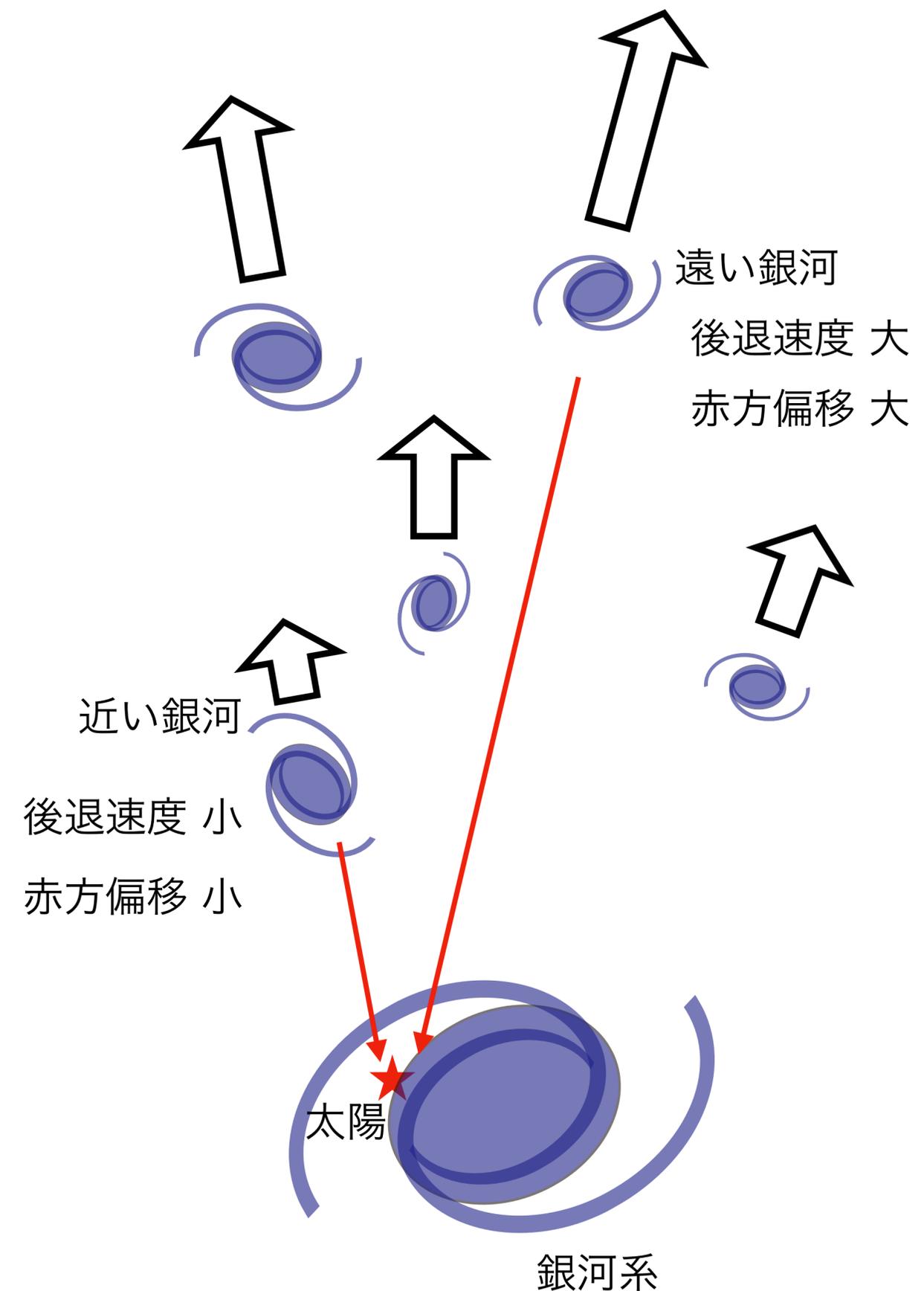
遠くの日体を観測する

- 光の速さは有限($c=3 \times 10^8 \text{m/s}$): 太陽からの光が地球に届くには8分程度かかる
- 我々が見ているのは8分前の太陽の姿
- アンドロメダ銀河(距離 2.5×10^6 光年)から届く光は250万年かけて地球に到達
- もっと遠くの銀河はもっと古い姿を観ている(**遠くを観ることは過去を観ること**)



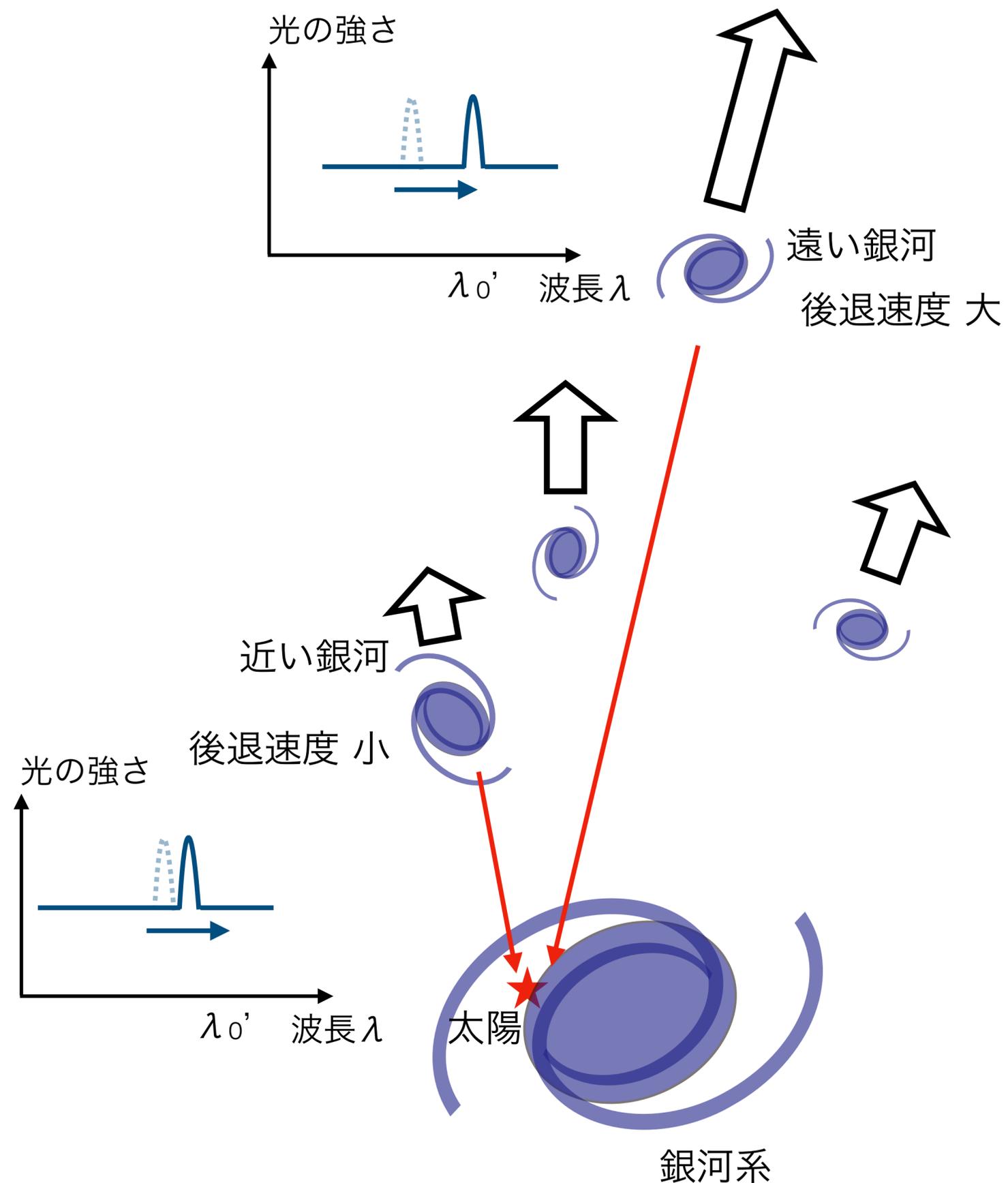
遠方銀河と赤方偏移

- 宇宙論的ドップラー効果(第14回)
- 宇宙膨張のため、遠い銀河ほど光がやってくるのに時間がかかり、その間に宇宙が膨張する
- 光の波長が伸び、赤い側にずれる(赤方偏移)
- 銀河までの距離が、赤方偏移 z で特徴付けられる



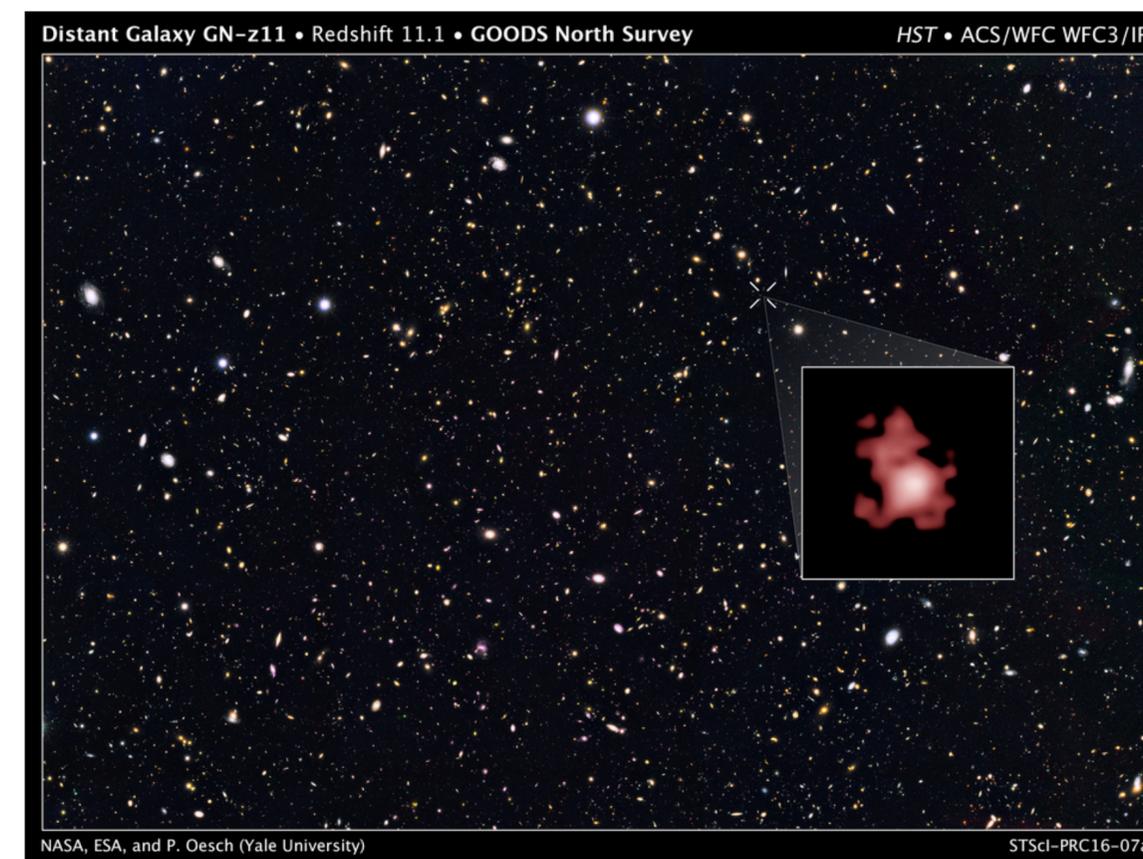
遠方銀河と赤方偏移

- 宇宙論的ドップラー効果(第14回)
- 宇宙膨張のため、遠い銀河ほど光がやってくるのに時間がかかり、その間に宇宙が膨張する
- 光の波長が伸び、赤い側にずれる(赤方偏移)
- 銀河までの距離が、赤方偏移 z で特徴付けられる



遠方銀河と赤方偏移

- 例えば、現在の最遠方天体GN-z11は赤方偏移 $z=11$ で発見された天体
- この天体からの光は約134億年かけて地球までやってきた
- 宇宙年齢は約138億年なので、宇宙の誕生から約4億年後のこと

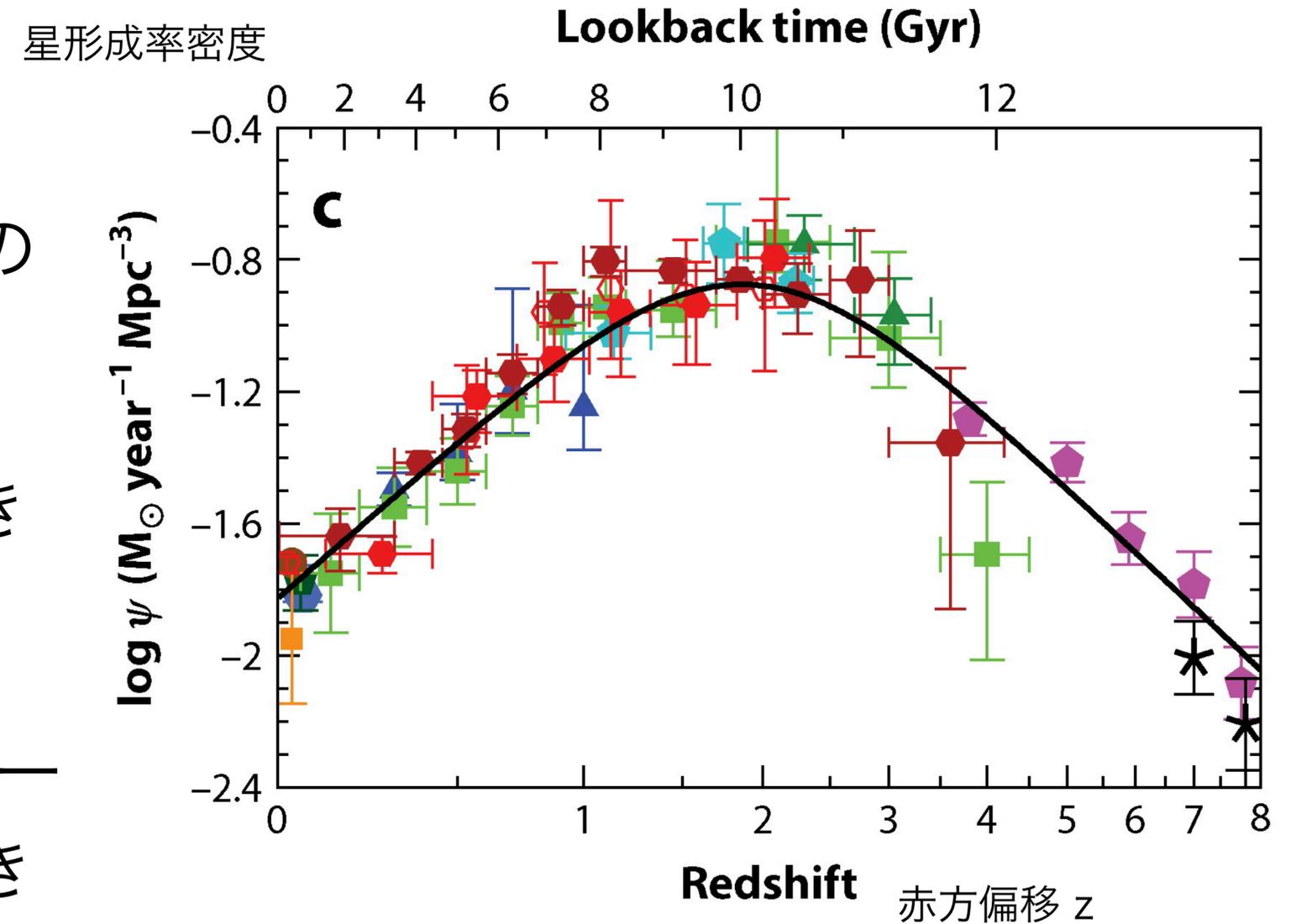


現在の最遠方天体 GN-z11
credit: NASA, ESA, and P. Oeschi (Yale U.)

遠方銀河と赤方偏移

現在から何年前か [10⁹年]

- 様々な赤方偏移(=距離=時代)での銀河の観測
- 銀河が平均してどれだけの星を作ってきたかということも分かっている
- $z=2$ (だいたい100億年前)に星形成のピークを迎え、あまり星を作らなくなっている



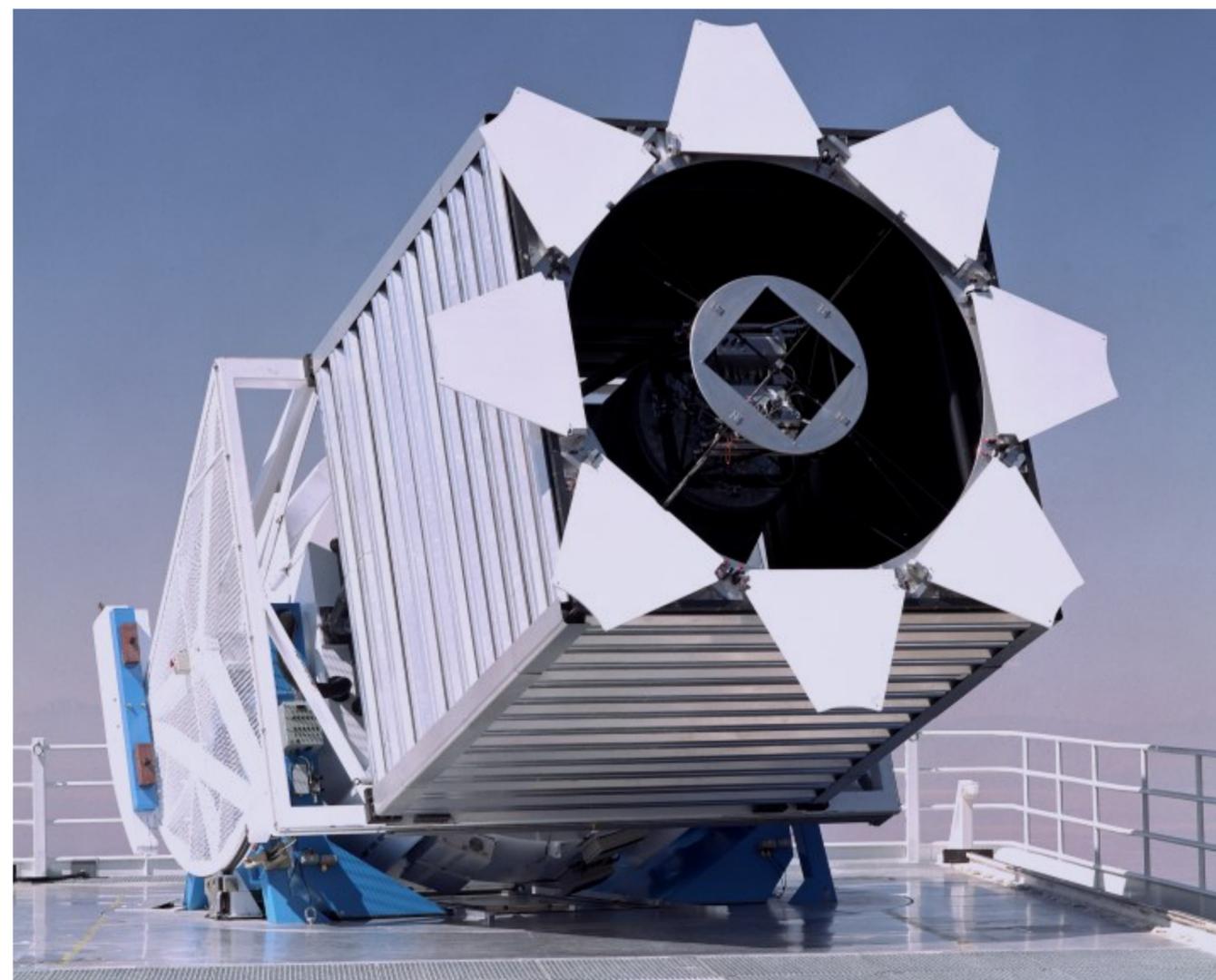
宇宙の星形成率密度の時間進化

credit: Madau & Dickinson 2014 ARA&A, 52, 415

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ARA%26A..52..415M>

遠方銀河と宇宙の大規模構造

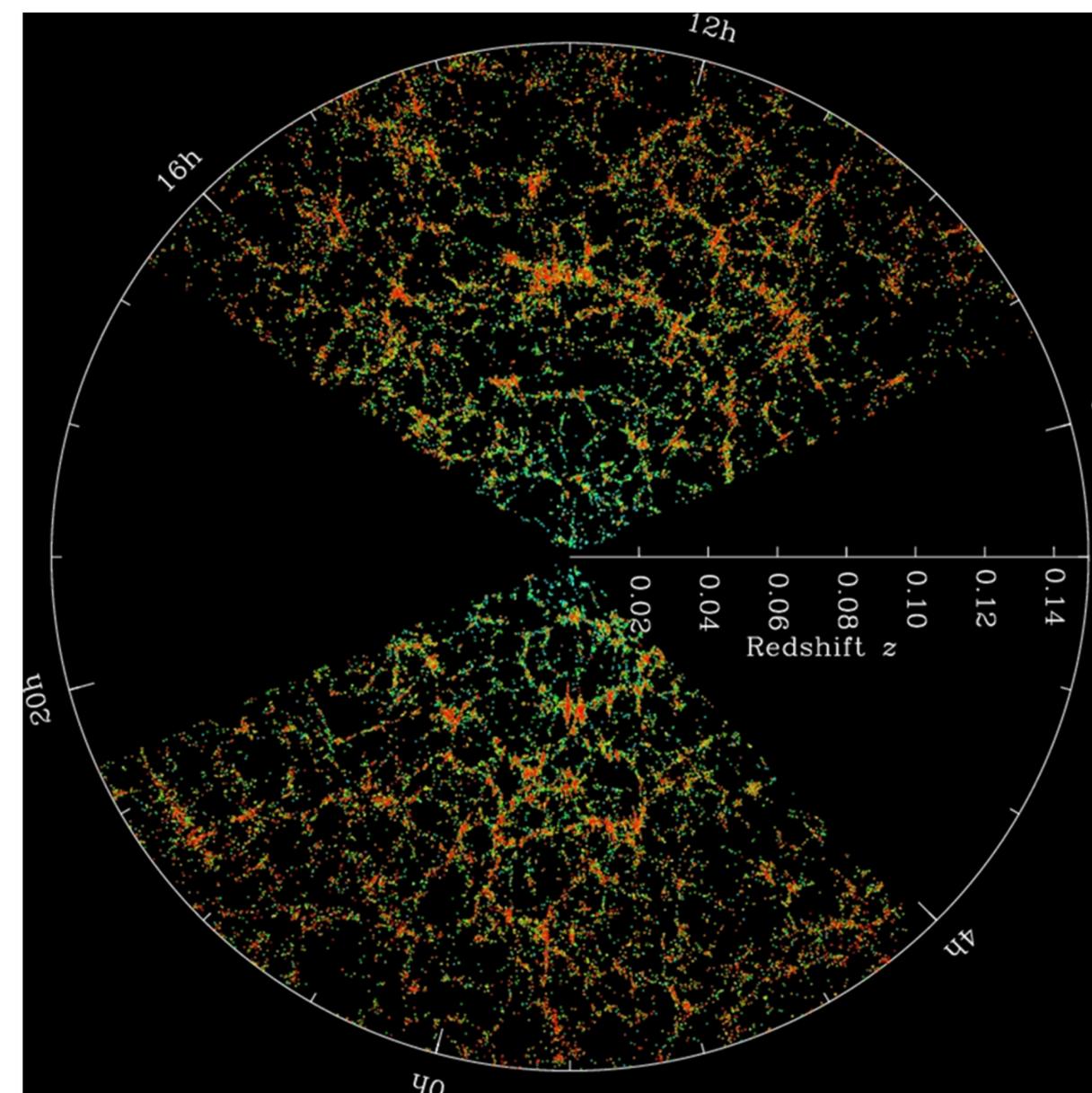
- 銀河は宇宙の中でどのように分布しているのか？
- 銀河が集まっているところと集まっていないところ(ヴォイド; void)に分かれる
- 宇宙の**大規模構造(Large scale structure)**
- なぜ、このような空間分布になるのか？
→第14回 宇宙論



Sloan Digital Sky Survey(SDSS) 2.5m望遠鏡
credit: Sloan digital sky survey
<https://www.sdss.org/instruments/>

遠方銀河と宇宙の大規模構造

- 銀河は宇宙の中でどのように分布しているのか？
- 銀河が集まっているところと集まっていないところ(ヴォイド; void)に分かれる
- 宇宙の**大規模構造(Large scale structure)**
- なぜ、このような空間分布になるのか？
→第14回 宇宙論



Sloan Digital Sky Survey(SDSS)が明らかにした銀河分布
credit: Sloan digital sky survey

http://www.sdss3.org/images/gallery/sdss_pie2.jpg