

宇宙はどこまで解明されたか

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

真貝寿明（しんかい ひさあき）

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員



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

Astronomy Picture of the Day

[Discover the cosmos!](#) Each day a different image or photograph of our fascinating universe is featured, along with a brief explanation written by a professional astronomer

2019 June 17

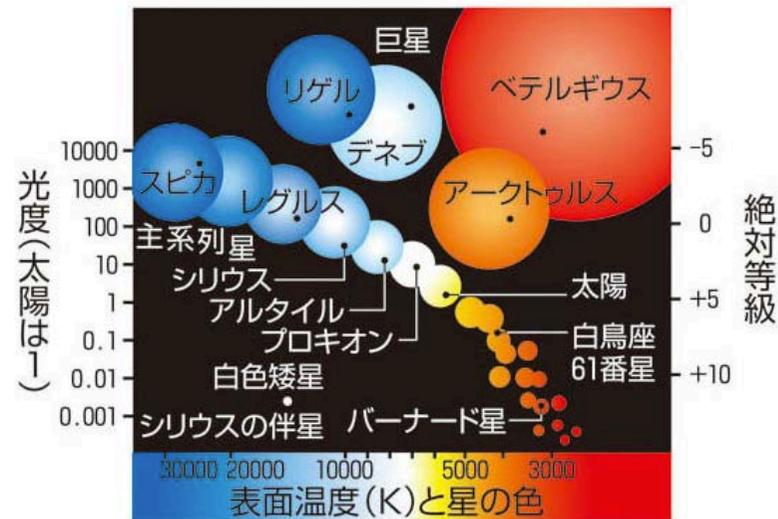
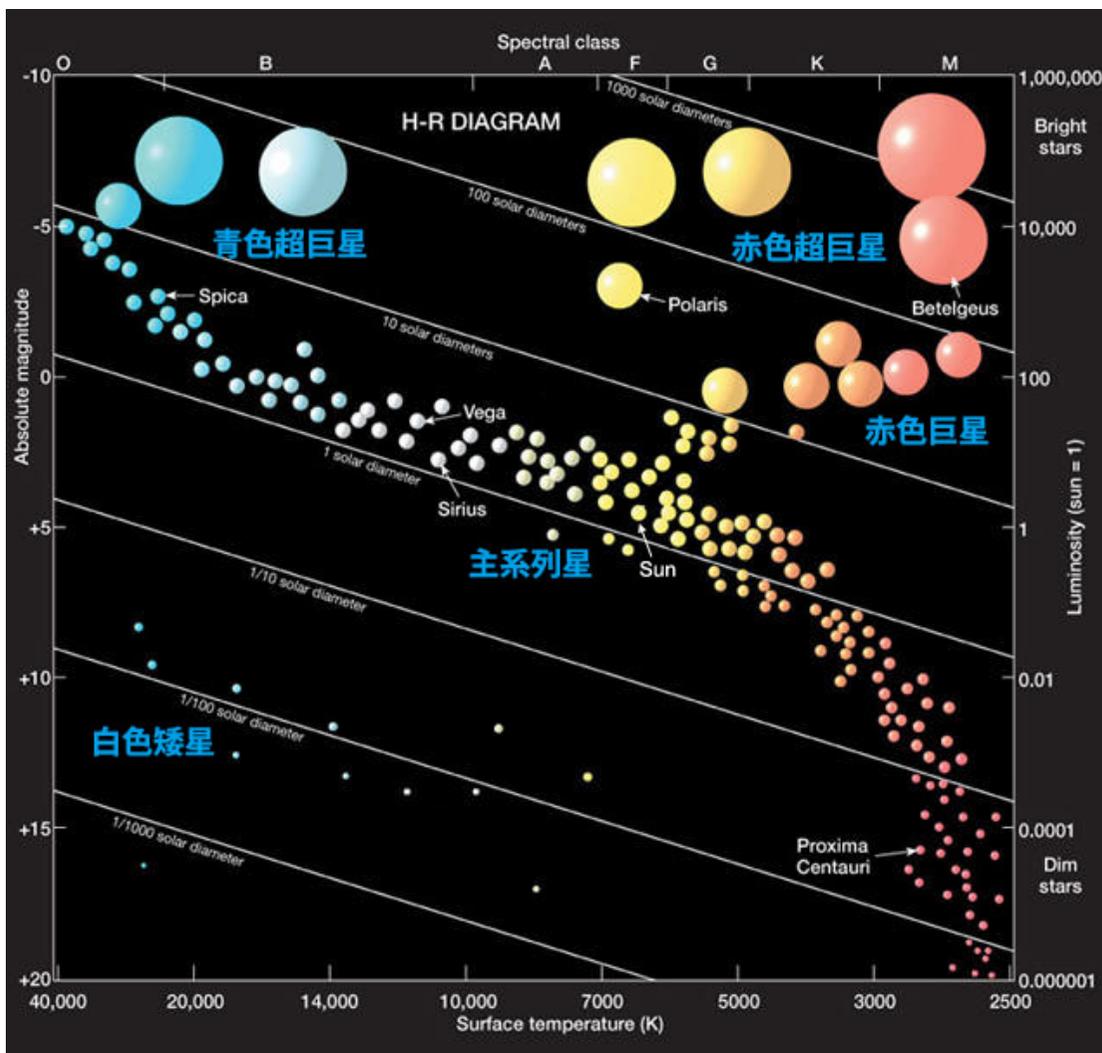


 Robert Fedez

Milky Way over Pyramid of the Feathered Serpent

<https://apod.nasa.gov/apod/ap190617.html>

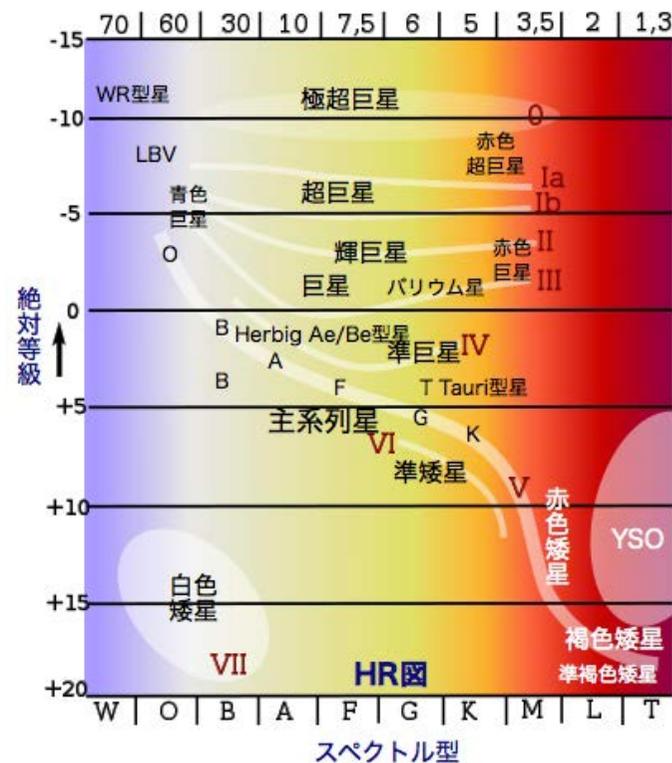
ヘルツシュプルング・ラッセル図 (Hertzsprung-Russell Diagram)



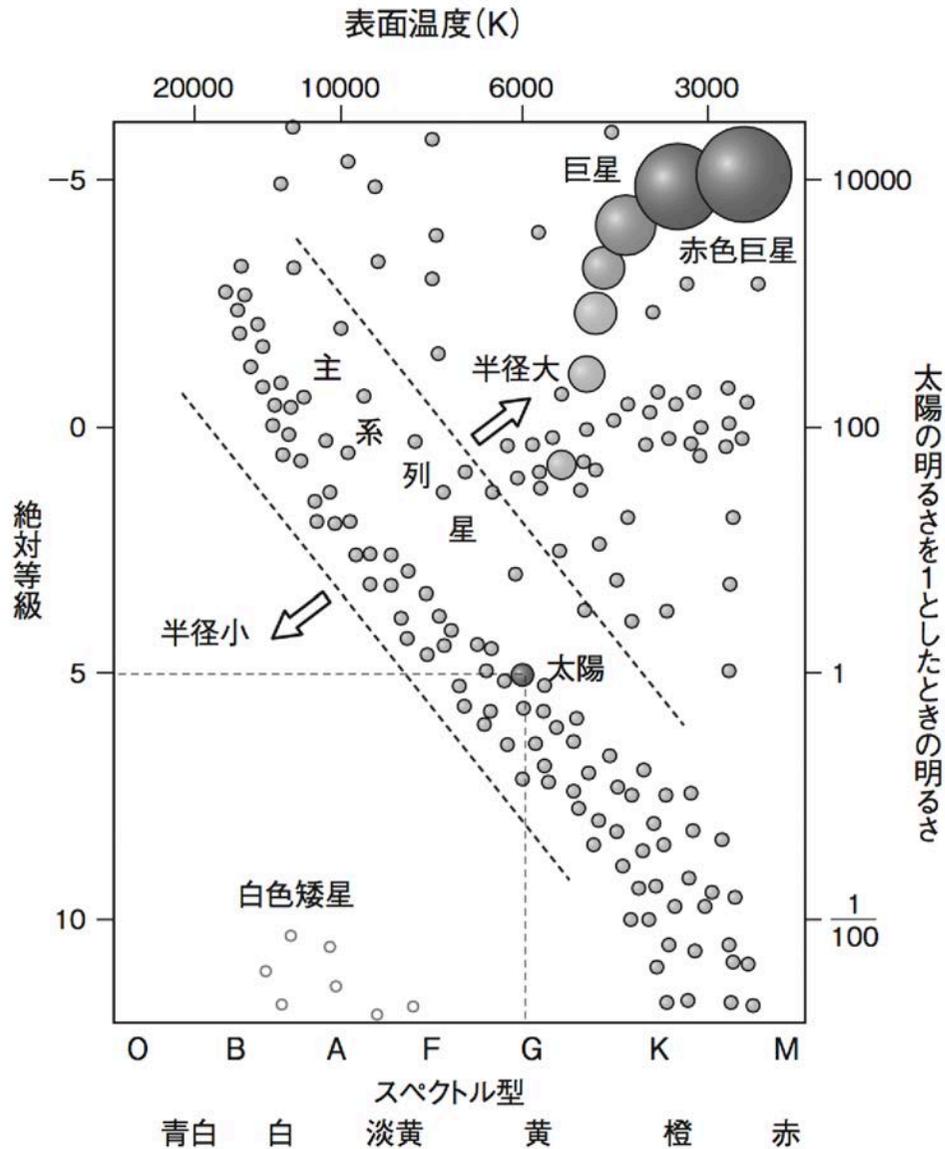
星の表面温度 (高い→低い)

<http://img-cdn.jg.jugem.jp/>

<https://kotobank.jp/> <https://ja.wikipedia.org/>



ヘルツシュプルング・ラッセル図 (Hertzsprung-Russell Diagram)



太陽の明るさを1としたときの明るさ

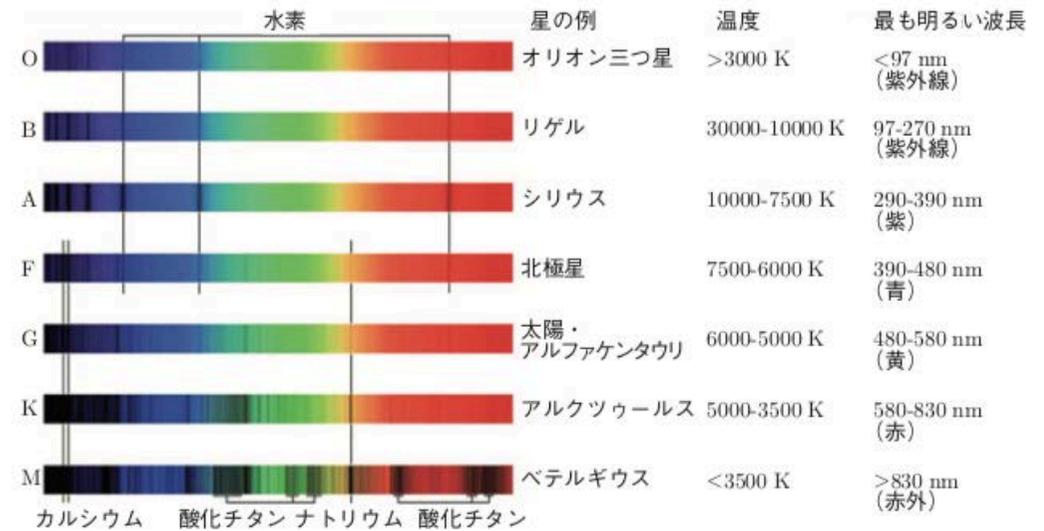


図 A.21 (本文 217 ページ)

O型星からM型星までのスペクトルの例。人間の目には、6000 K以上の星は白く見える。

Oh, be a fine girl, kiss me.

星は何を燃やしているのか

コラム 18 酸素がない宇宙で太陽が燃えているのは何故？

太陽系の起源は約 50 億年前と考えられている。物理学がそろい始めた 19 世紀末、太陽のエネルギー源は何か、という大問題が解けずにいた。（当時、太陽の年齢は 3 億年以上ということしかわかっていなかったが）単純に化学反応で説明するには寿命が長すぎているのだ。ケルビンとヘルムホルツ (von Helmholtz, H. L. F. 1821–94) は「太陽は大きな重力で収縮しているため、周囲に熱を放出する」という説を考えたが、それでも太陽年齢は 2000 万年以上にはならなかった。

決定的な理論となったのは、アインシュタインが 1905 年に提出した相対性理論による、 $E = mc^2$ という式である。この式から、1920 年、天文学者エディントン (Eddington, A. S. 1882–1944) は、太陽内部での水素からヘリウムへの核融合の可能性を指摘している。太陽が水素で満たされていることが 1925 年にわかり、1930 年代に物理学者チャンドラセカール (Chandrasekhar, S. 1910–95) とベータ (Bethe, H. 1906–2005) によって核融合の理論が進むと、太陽のエネルギー源が核融合反応であることがようやく明らかになる。

このコラムのタイトルにした疑問はよく科学館に寄せられる質問だそうだ。核融合反応は物理的な結合エネルギーの組み替えで発生している反応であり、化学的燃焼とは違うので酸素は不要なのである。

拙著「現代物理学が描く宇宙論」より

アインシュタイン：特殊相対性理論（1905年）

① **発端：**
電磁気学の式に出てくる「光速 c 」は誰から測った速さなのか。
光は真空でも伝わるのか。

② **当時の考え：**
光はエーテル中を伝わる。「光速 c 」は座標系によって変化するはずだ。
ただし、エーテルは未発見。 . . .

③ **アインシュタインの考え：**
光速度は誰から見ても一定，光は真空でも伝わり，物理法則は座標系によらず不変のものでなければならない。

3次元空間 + 時間 = 4次元時空 で物理を考えよう



$$E=mc^2$$

4次元時空としてエネルギー保存則を考えると, . . .

特殊相対性理論を使ってエネルギーを計算すると,

$$E = m \frac{c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \dots$$

となることがわかった. 第2項は運動エネルギーだが, 第1項は物体が静止しているときにももつ質量エネルギーである. 第3項以下は相対論的補正項といえる.

静止質量エネルギー (エネルギーと質量の等価性)

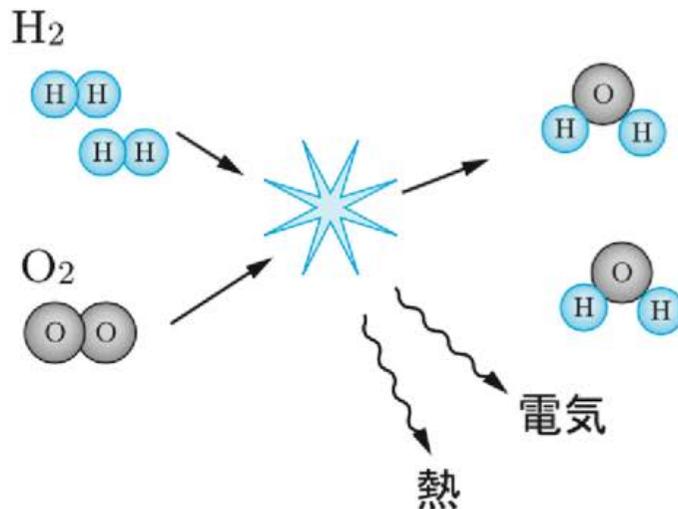
$$E = mc^2$$

質量はエネルギーに変換できる!

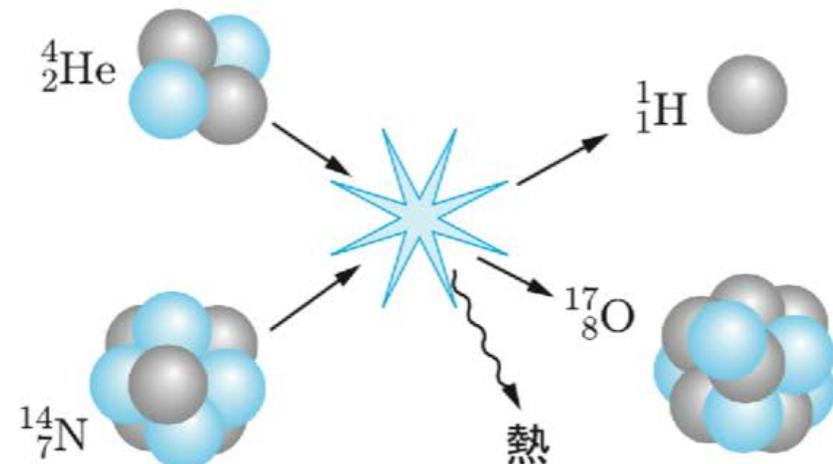
化学反応 と 原子核反応

分子どうしの組み替えは、**化学反応**

原子核の組み替えは、**核反応**



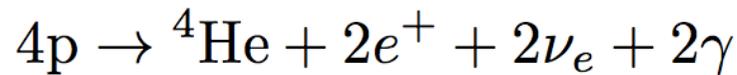
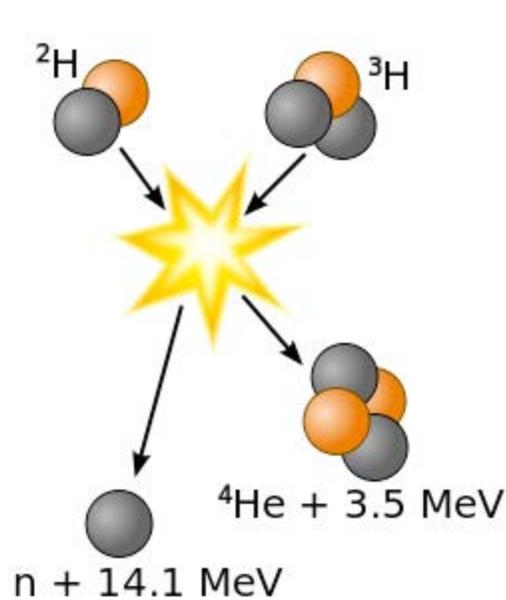
(a) 化学反応



(b) 核反応

図 3.14: 化学反応は実験室レベル。核反応は、原子爆弾や水素爆弾、原子力発電や太陽の中心。エネルギーレベルがまったく異なる。

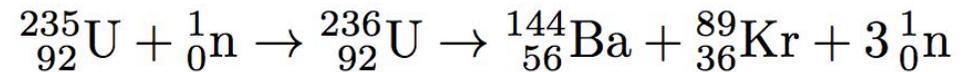
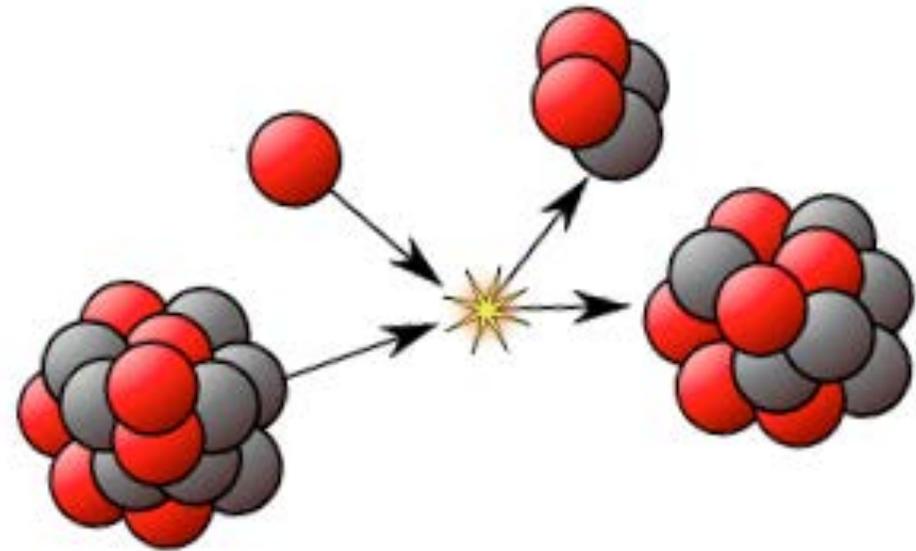
核融合 と 核分裂



核融合

(nuclear fusion)

合体した方が安定
(エネルギー放出)

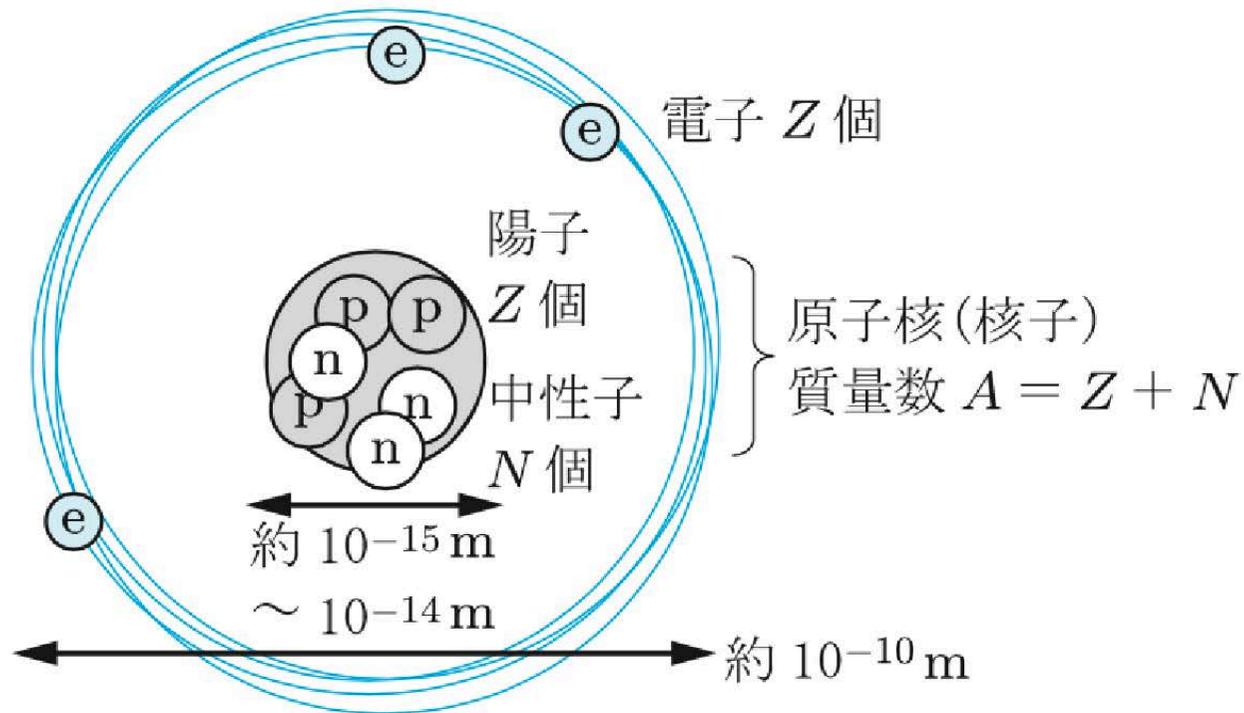


核分裂

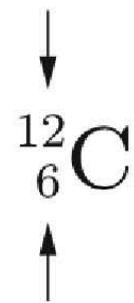
(nuclear fission)

分裂した方が安定
(エネルギー放出)

原子 = 原子核 (中性子 + 陽子) + 電子



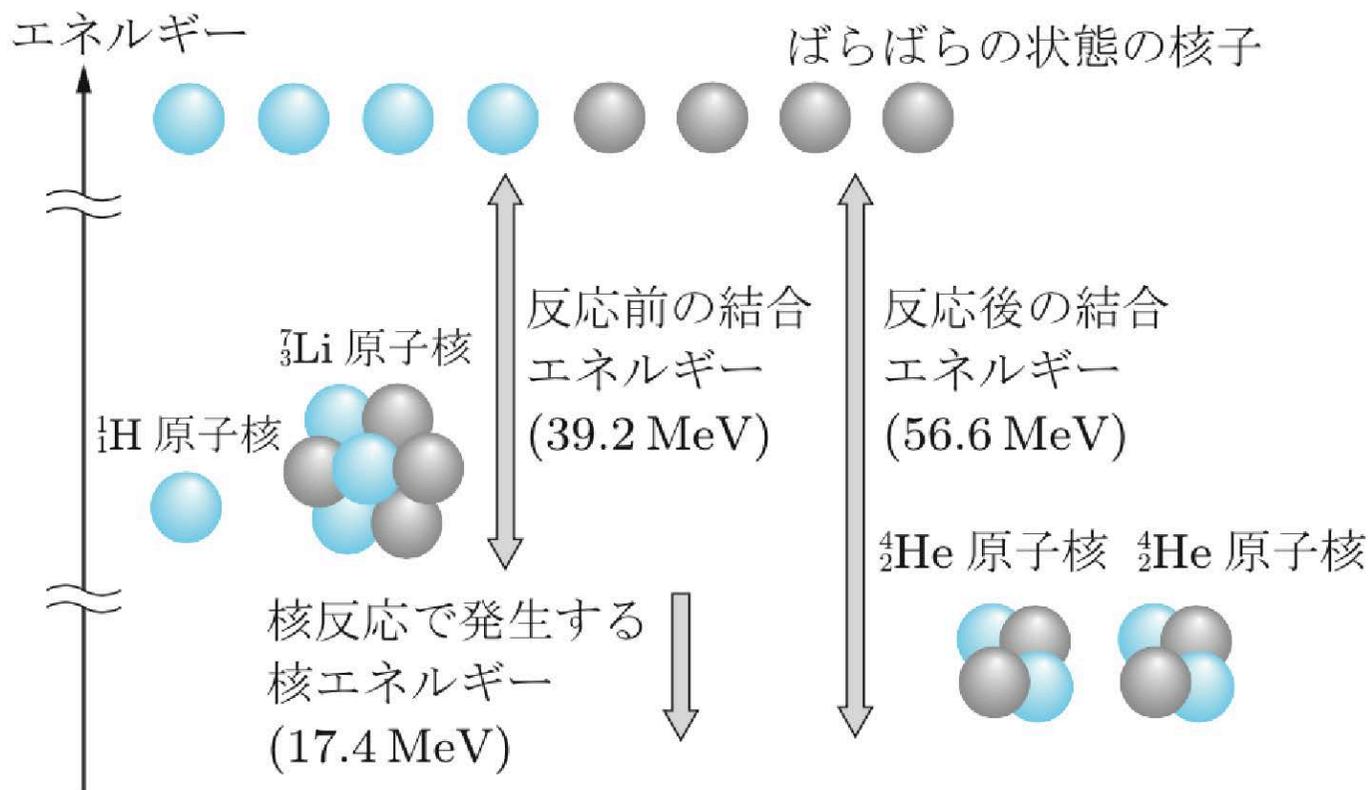
質量数 A
 (核子の数)



原子番号 Z
 (陽子の数)

記号		電荷	質量	質量比
陽子	p proton	+1	$1.67262158 \times 10^{-27} \text{ kg}$	1836.15
中性子	n neutron	0	$1.67492735 \times 10^{-27} \text{ kg}$	1838.68
電子	e electron	-1	$9.10938188 \times 10^{-31} \text{ kg}$	1

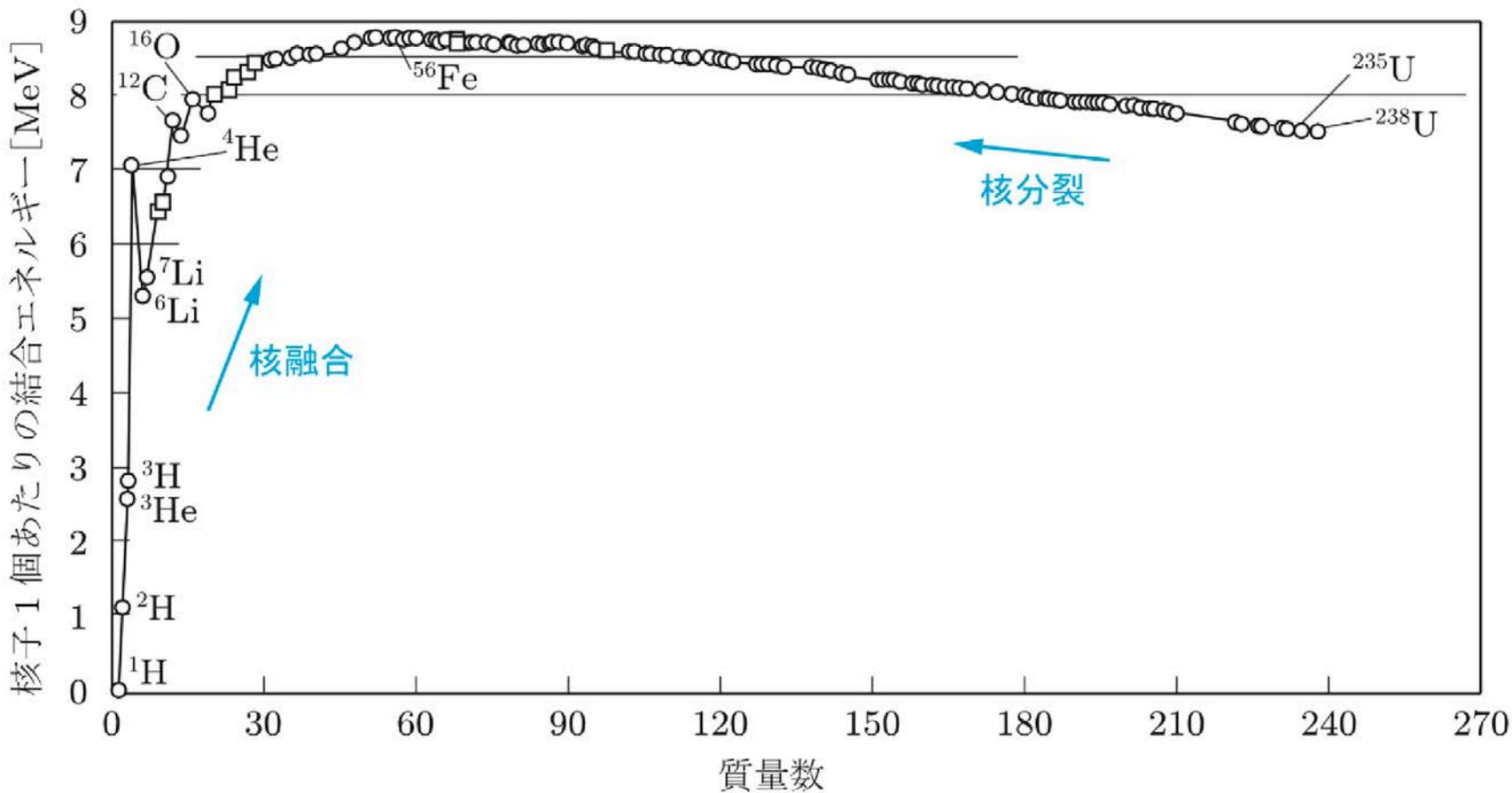
結合エネルギー



ばらばらでいるより、結合している方が、エネルギーが低い

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？

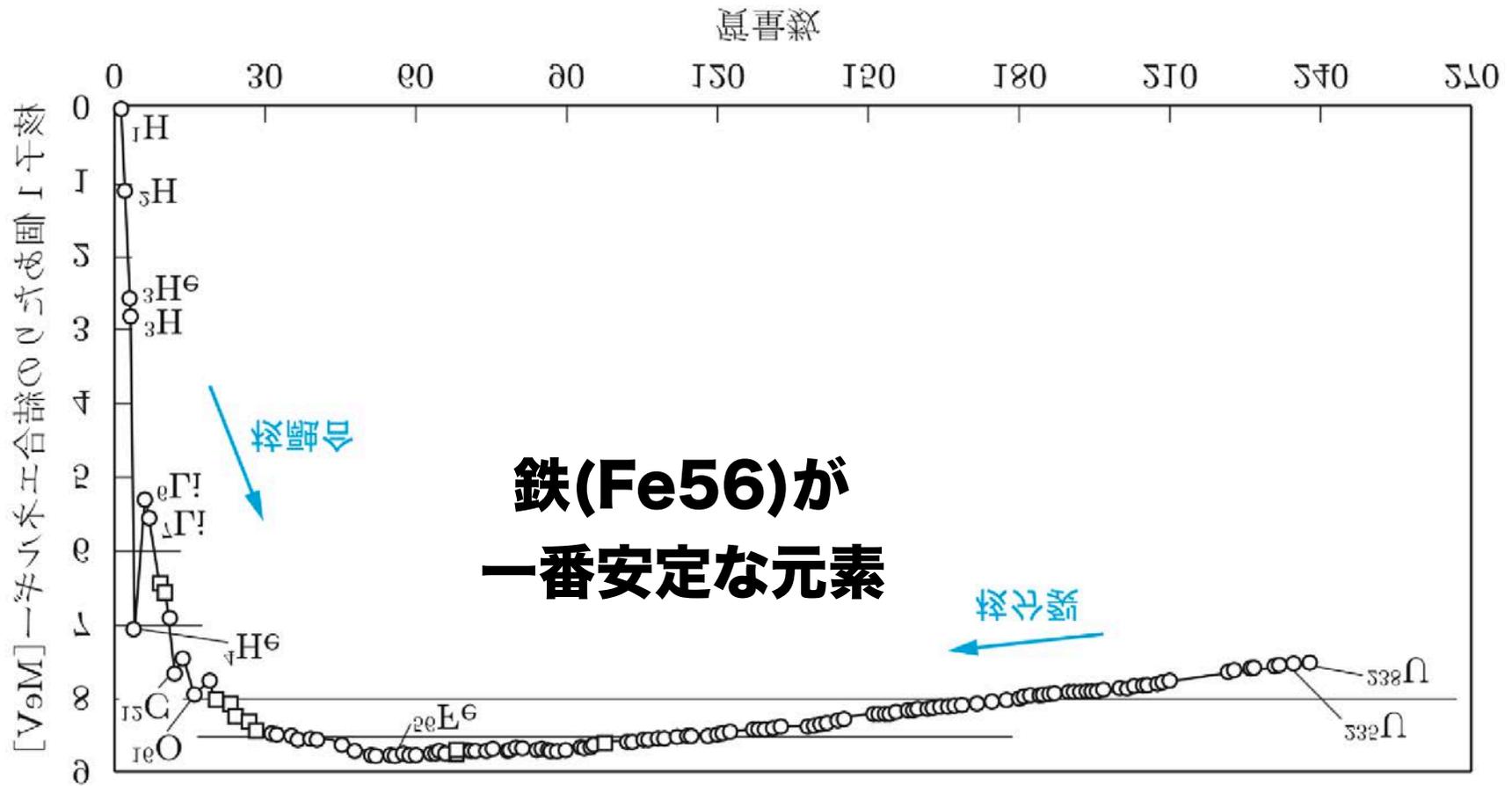
↑ ↑
結合エネルギー（大）



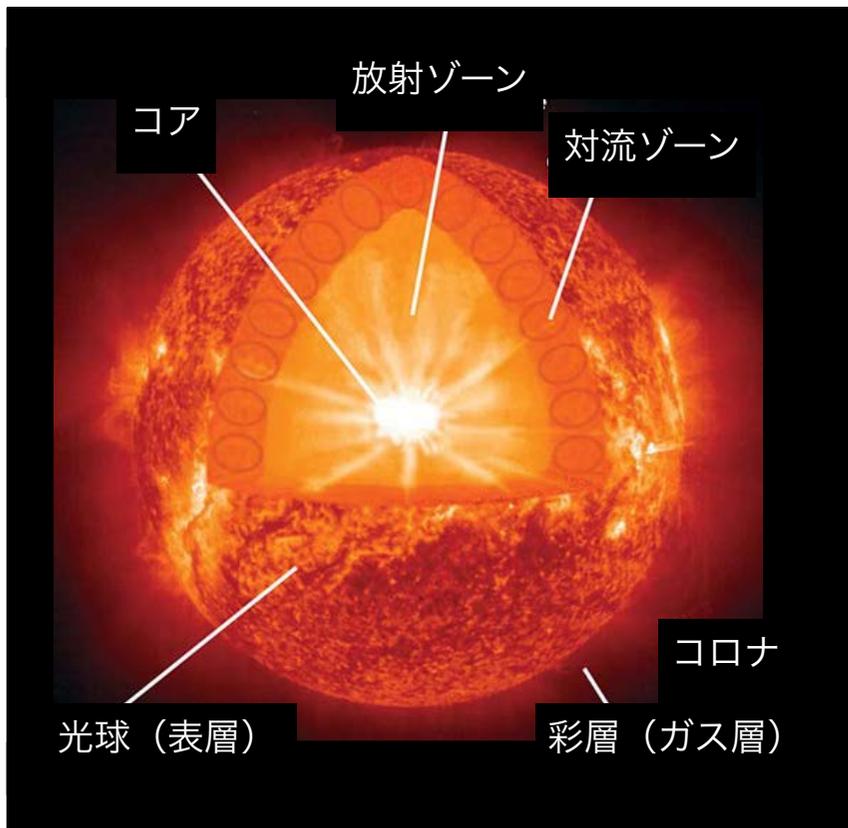
→ → 質量数（大）

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？

結合エネルギー（大）

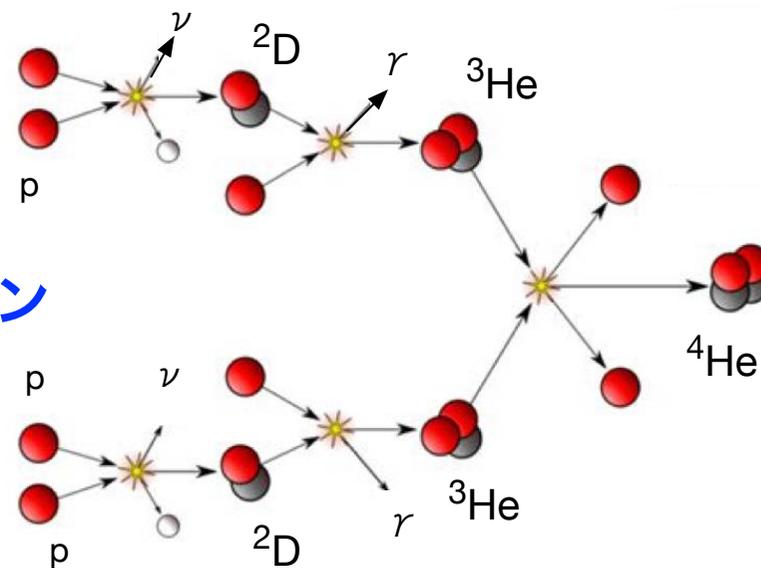


→ → 質量数（大）

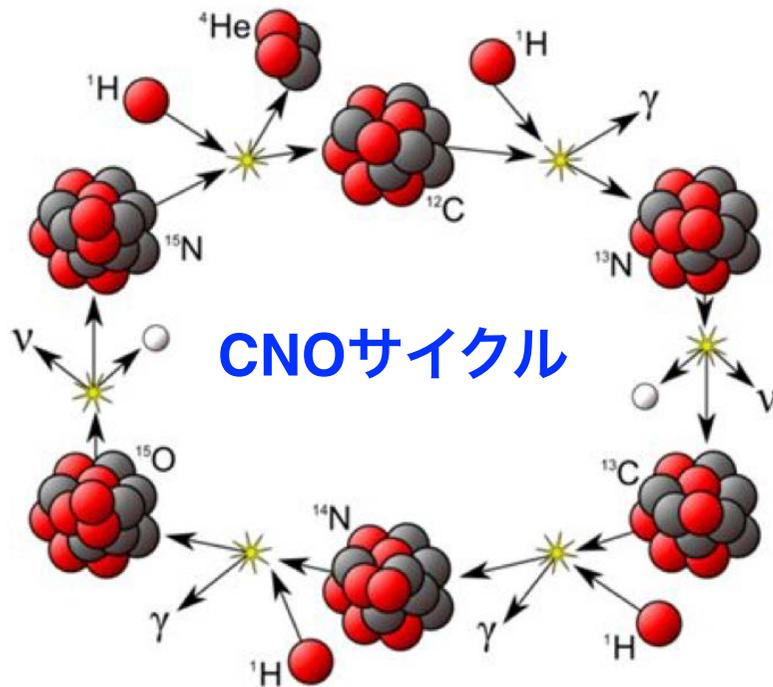


- 陽子 (proton)
- 中性子 (neutron)
- 陽電子 (positron)
- γ ガンマ線
- ν ニュートリノ

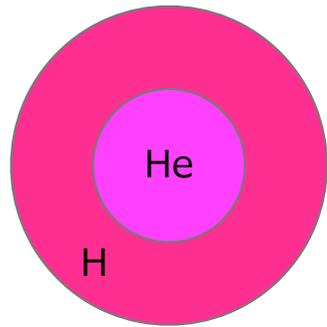
ppチェーン



CNOサイクル

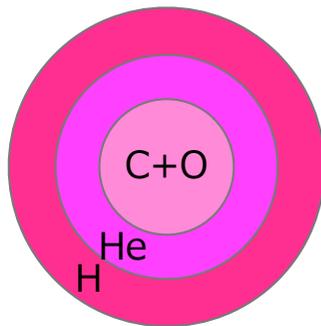


水素HからヘリウムHeへ (pp chain)

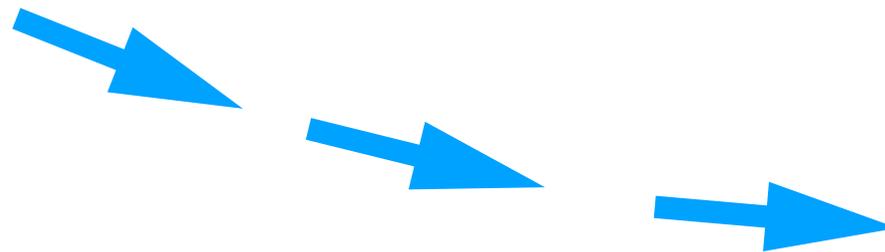


中心部がHeになると、核融合止まる。
冷却し、収縮し、温度上昇して、次の核融合に点火

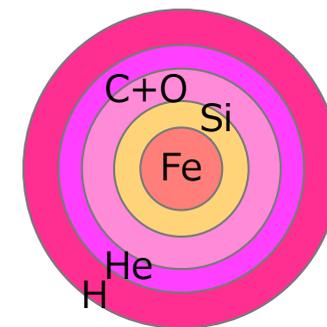
ヘリウムHeからCNOへ (pp chain)



中心部がCNOになると、核融合止まる。
冷却し、収縮し、温度上昇して、次の核融合に点火



中心部がFeになると、...



周期表 (periodic table)

Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	1A	2A	3B	4B	5B	6B	7B	8B	8B	8B	1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A	VIII A
1	1s 1 H 水素 hydrogen 1.008																	2 He ヘリウム helium 4.003
2	2s 3 Li リチウム lithium 6.941	4 2A Be ベリリウム beryllium 9.012											5 3A B ホウ素 boron 10.81	6 4A C 炭素 carbon 12.01	7 5A N 窒素 nitrogen 14.01	8 6A O 酸素 oxygen 16.00	9 7A F フッ素 fluorine 19.00	10 Ne ネオン neon 20.18
3	3s 11 Na ナトリウム sodium 22.99	12 2A Mg マグネシウム magnesium 24.31											13 3B Al アルミニウム aluminum 26.98	14 4B Si ケイ素 silicon 28.09	15 5B P リン phosphorus 30.97	16 6B S 硫黄 sulfur 32.07	17 7A Cl 塩素 chlorine 35.45	18 Ar アルゴン argon 39.95
4	4s 19 K カリウム potassium 39.10	20 2A Ca カルシウム calcium 40.08	21 3d Sc スカンジウム scandium 44.96	22 4B Ti チタン titanium 47.87	23 5B V バナジウム vanadium 50.94	24 6B Cr クロム chromium 52.00	25 7B Mn マンガン manganese 54.94	26 8B Fe 鉄 iron 55.85	27 8B Co コバルト cobalt 58.93	28 8B Ni ニッケル nickel 58.69	29 9B Cu 銅 copper 63.55	30 10B Zn 亜鉛 zinc 65.41	31 4p Ga ガリウム gallium 69.72	32 14B Ge ゲルマニウム germanium 72.64	33 5B As ヒ素 arsenic 74.92	34 6A Se セレン selenium 78.96	35 7A Br 臭素 bromine 79.90	36 Ar クリプトン krypton 83.80
5	5s 37 Rb ルビジウム rubidium 85.47	38 2A Sr ストロンチウム strontium 87.62	39 4d Y イットリウム yttrium 88.91	40 5B Zr ジルコニウム zirconium 91.22	41 6B Nb ニオブ niobium 92.91	42 7B Mo モリブデン molybdenum 95.94	43 8B Tc テクネチウム technetium 98	44 9B Ru ルテニウム ruthenium 101.1	45 10B Rh ロジウム rhodium 102.9	46 11B Pd パラジウム palladium 106.4	47 12B Ag 銀 silver 107.9	48 13B Cd カドミウム cadmium 112.4	49 5p In インジウム indium 114.8	50 14B Sn スズ tin 118.7	51 15B Sb アンチモン antimony 121.8	52 6A Te テルル tellurium 127.6	53 7A I ヨウ素 iodine 126.9	54 Ar キセノン xenon 131.3
6	6s 55 Cs セシウム cesium 132.9	56 2A Ba バリウム barium 137.3	57-71 † 5d ランタノイド lanthanides	72 6B Hf ハフニウム hafnium 178.5	73 7B Ta タンタル tantalum 180.9	74 8B W タングステン tungsten 183.8	75 9B Re レニウム rhenium 186.2	76 10B Os オスミウム osmium 190.2	77 11B Ir イリジウム iridium 192.2	78 12B Pt 白金 platinum 195.1	79 13B Au 金 gold 197.0	80 14B Hg 水銀 mercury 200.6	81 6p Tl タリウム thallium 204.4	82 15B Pb 鉛 lead 207.2	83 16B Bi ビスマス bismuth 209.0	84 7A Po ポロニウム polonium 209	85 8A At アスタチン astatine 210	86 Ar ラドン radon 222
7	7s 87 Fr フランシウム francium 223	88 2A Ra ラジウム radium 226	89-103 ‡ 6d アクチノイド actinides	104 7B Rf ラザホージウム rutherfordium 261	105 8B Db ドブニウム dubnium 262	106 9B Sg シーボーギウム seaborgium 266	107 10B Bh ボーリウム bohrium 264	108 11B Hs ハッシュウム hassium 277	109 12B Mt マイトネリウム meitnerium 268	110 13B Ds ダームスタチウム darmstadtium 281	111 14B Rg レントゲニウム roentgenium 272	112 15B Cn コペルニシウム copernicium 285	113 7p Nh ニホニウム nihonium 284	114 16B Fl フレロビウム flerovium 289	115 17B Mc モスコビウム moscovium 288	116 18A Lv リバモリウム livermorium 292	117 19A Ts テネシン tennessine 293	118 Ar オガネソン oganesson 294
			† 4f ランタノイド lanthanides (rare earth metals)	57 La ランタン lanthanum 138.9	58 Ce セリウム cerium 140.1	59 Pr プラセオジウム praseodymium 140.9	60 Nd ネオジウム neodymium 144.2	61 Pm プロメチウム promethium 145	62 Sm サマリウム samarium 150.4	63 Eu ユウロピウム europium 152.0	64 Gd ガドリニウム gadolinium 157.3	65 Tb テルビウム terbium 158.9	66 Dy ジスプロシウム dysprosium 162.5	67 Ho ホルミウム holmium 164.9	68 Er エルビウム erbium 167.3	69 Tm ツリウム thulium 168.9	70 Yb イッテルビウム ytterbium 173.0	71 Lu ルテチウム lutetium 175.0
			‡ 5f アクチノイド actinides	89 Ac アクチニウム actinium 227	90 Th トリウム thorium 232.0	91 Pa プロトアクチニウム protactinium 231.0	92 U ウラン uranium 238.0	93 Np ネプツニウム neptunium 237	94 Pu プルトニウム plutonium 239	95 Am アメリシウム americium 243	96 Cm キュリウム curium 247	97 Bk バークリウム berkelium 247	98 Cf カリホルニウム californium 251	99 Es アインスタイニウム einsteinium 252	100 Fm フェルミウム fermium 257	101 Md メンデレビウム mendelevium 258	102 No ノーベリウム nobelium 259	103 Lr ローレンシウム lawrencium 262

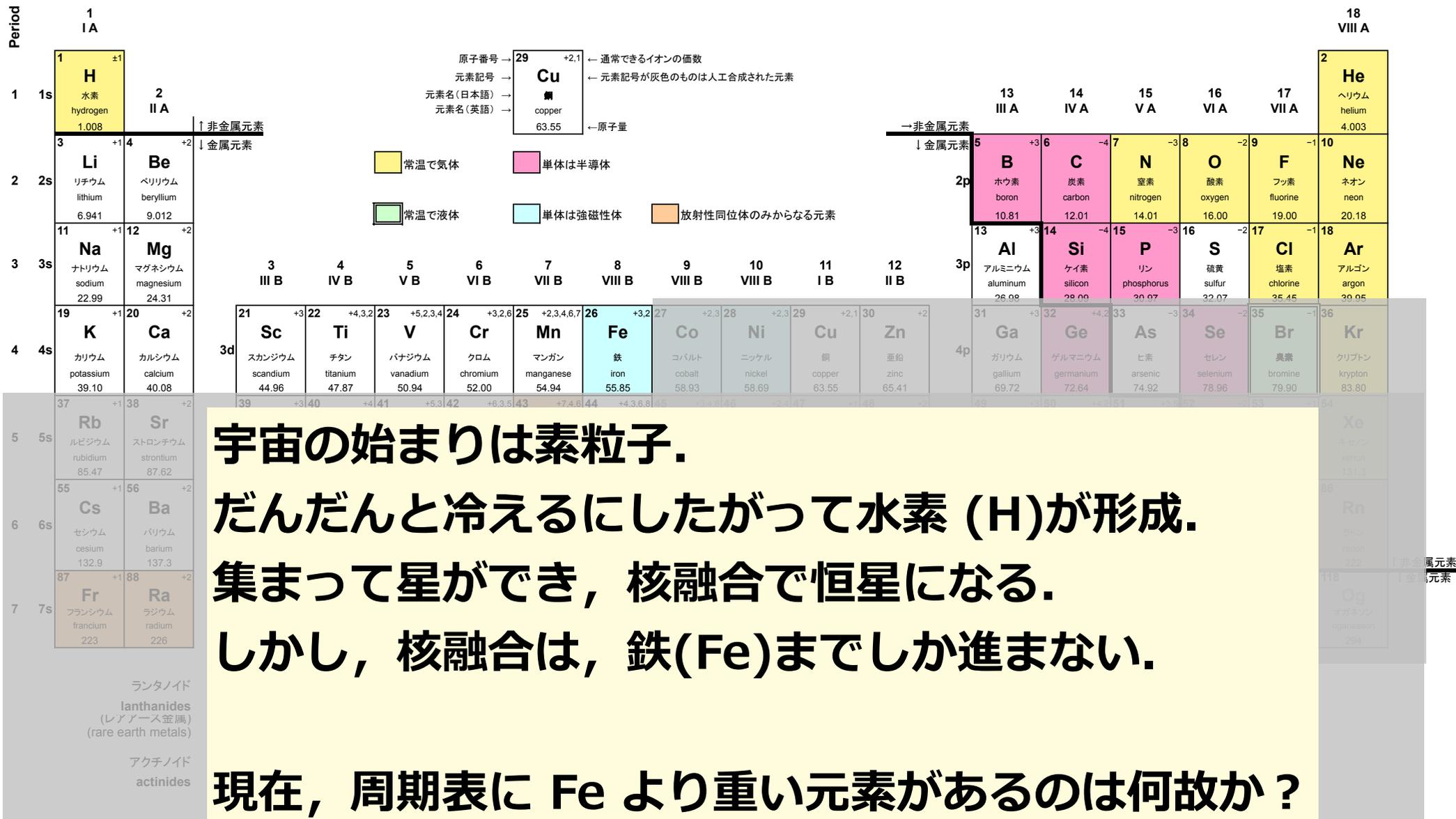
原子番号 → 29
 元素記号 → Cu
 元素名(日本語) → 銅
 元素名(英語) → copper
 原子量 → 63.55

← 通常できるイオンの価数
 ← 元素記号が灰色のものは人工合成された元素

↑ 非金属元素
 ↓ 金属元素

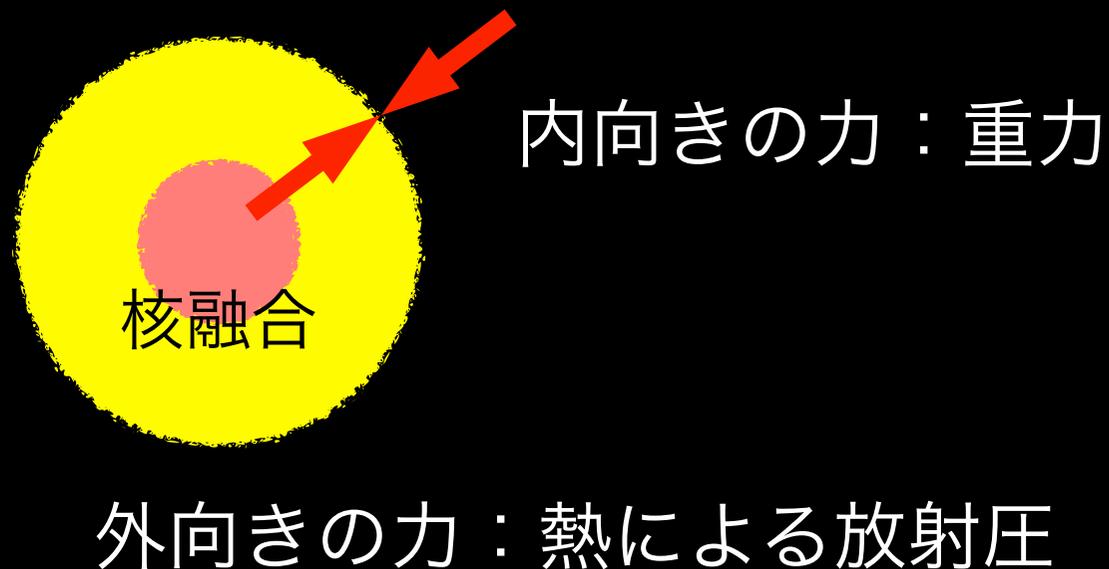
■ 常温で気体 ■ 単体は半導体
 ■ 常温で液体 ■ 単体は強磁性体 ■ 放射性同位体のみからなる元素

周期表 (periodic table)



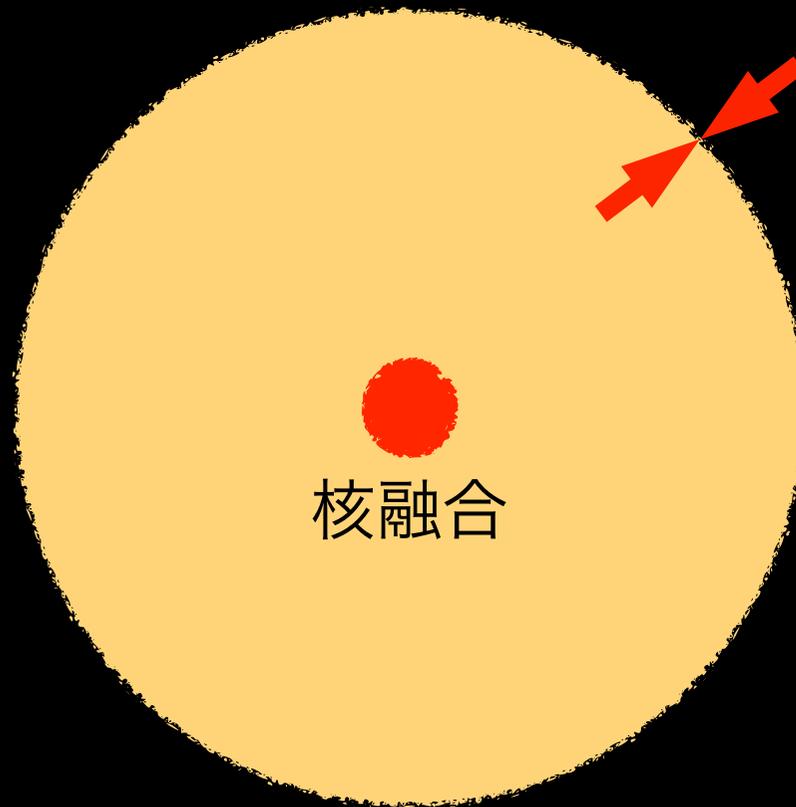
超新星爆発で作られた！

連星中性子星の合体で作られた！



*現在の太陽：水素がヘリウムに核融合

*放射圧＝重力 となるところで星の半径が決まる



内向きの力：重力

外向きの力：

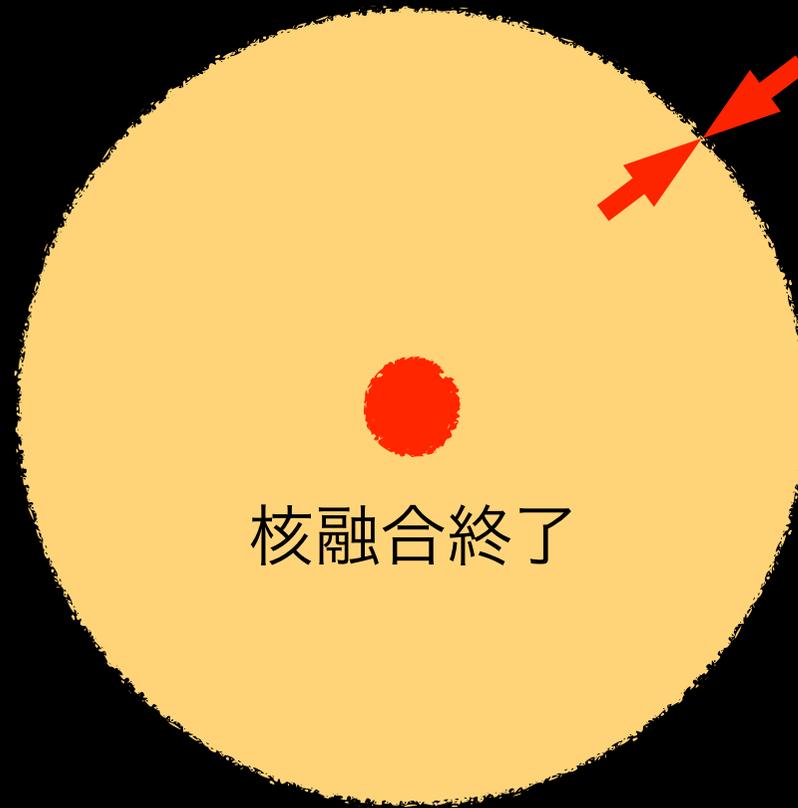
熱による放射圧

核融合

*核融合反応で質量をエネルギーに変換し続けると、
軽くなるので重力が弱くなる。

*放射圧 = 重力 となるところで星の半径が決まる

超新星爆発のしくみ (3) 核融合終了



内向きの力：重力

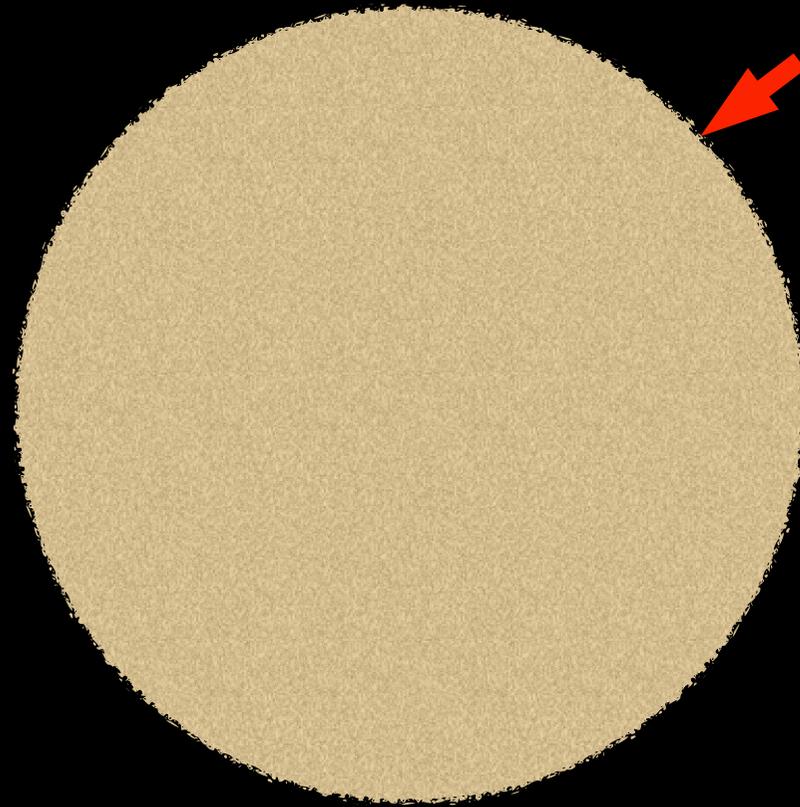
外向きの力：

熱による放射圧

核融合終了

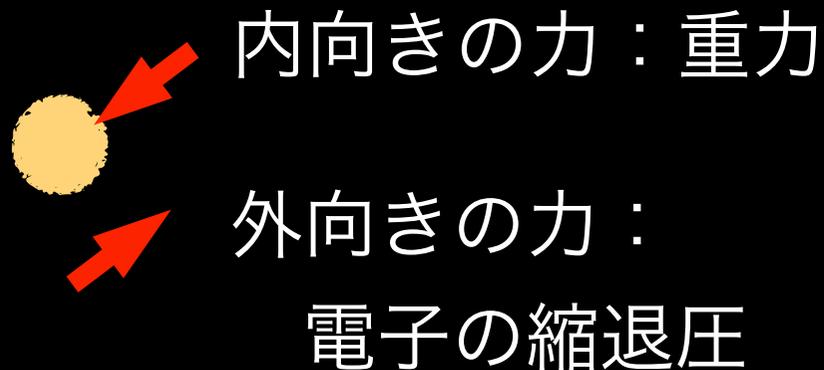
*核融合反応は鉄まで進むと終了

*放射圧がなくなるので星の収縮が始まる



内向きの力：重力

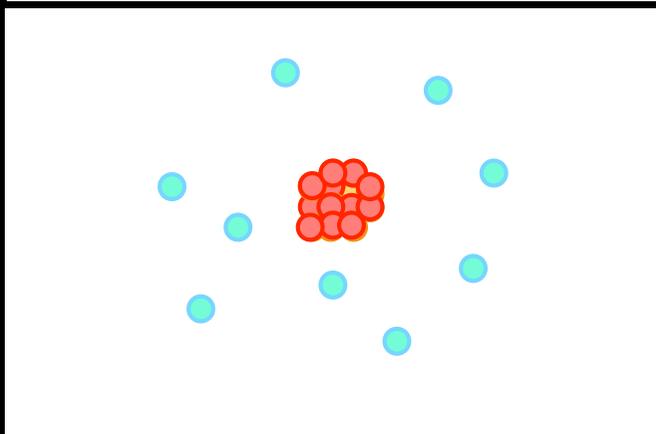
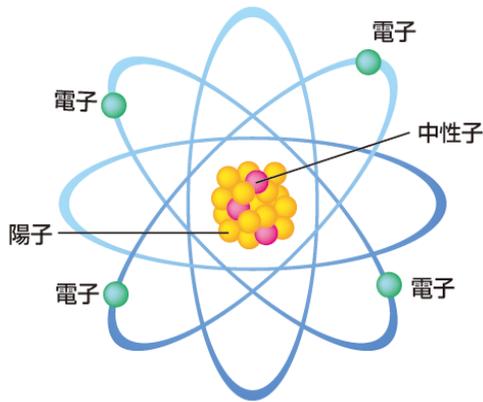
*収縮が始まる



*密につまった物質が星を支えるようになる

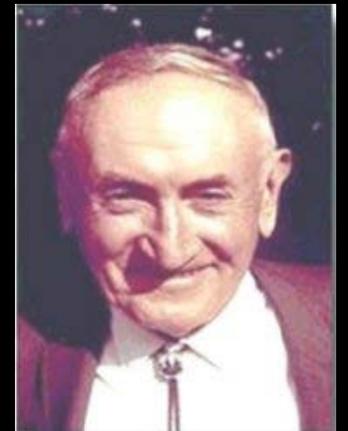
【運命その1】 電子の縮退圧で支える「白色矮星」になる

1933年チャンドラセカールの考え



内向きの力：重力

外向きの力：
中性子の縮退圧

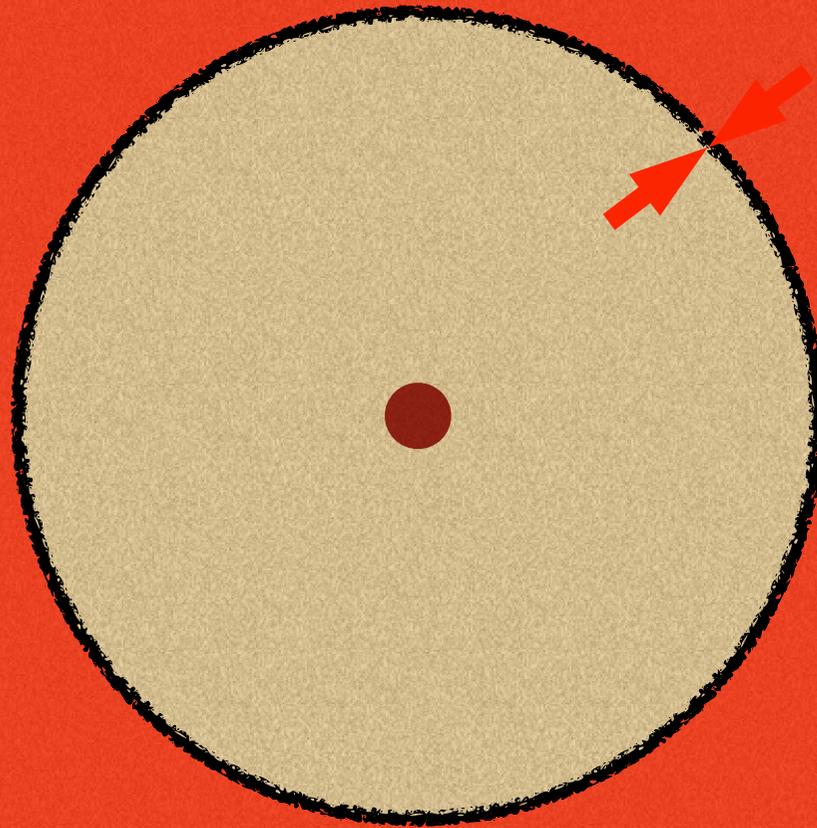


*密につまった物質が星を支えるようになる

【運命その2】 中性子の縮退圧で支える「中性子星」になる

1938年ツヴィツキーの考え

超新星爆発のしくみ (6) さらに降り積もると...



内向きの力：重力

外向きの力：

中性子の縮退圧

硬い殻ができる

*収縮が始まる

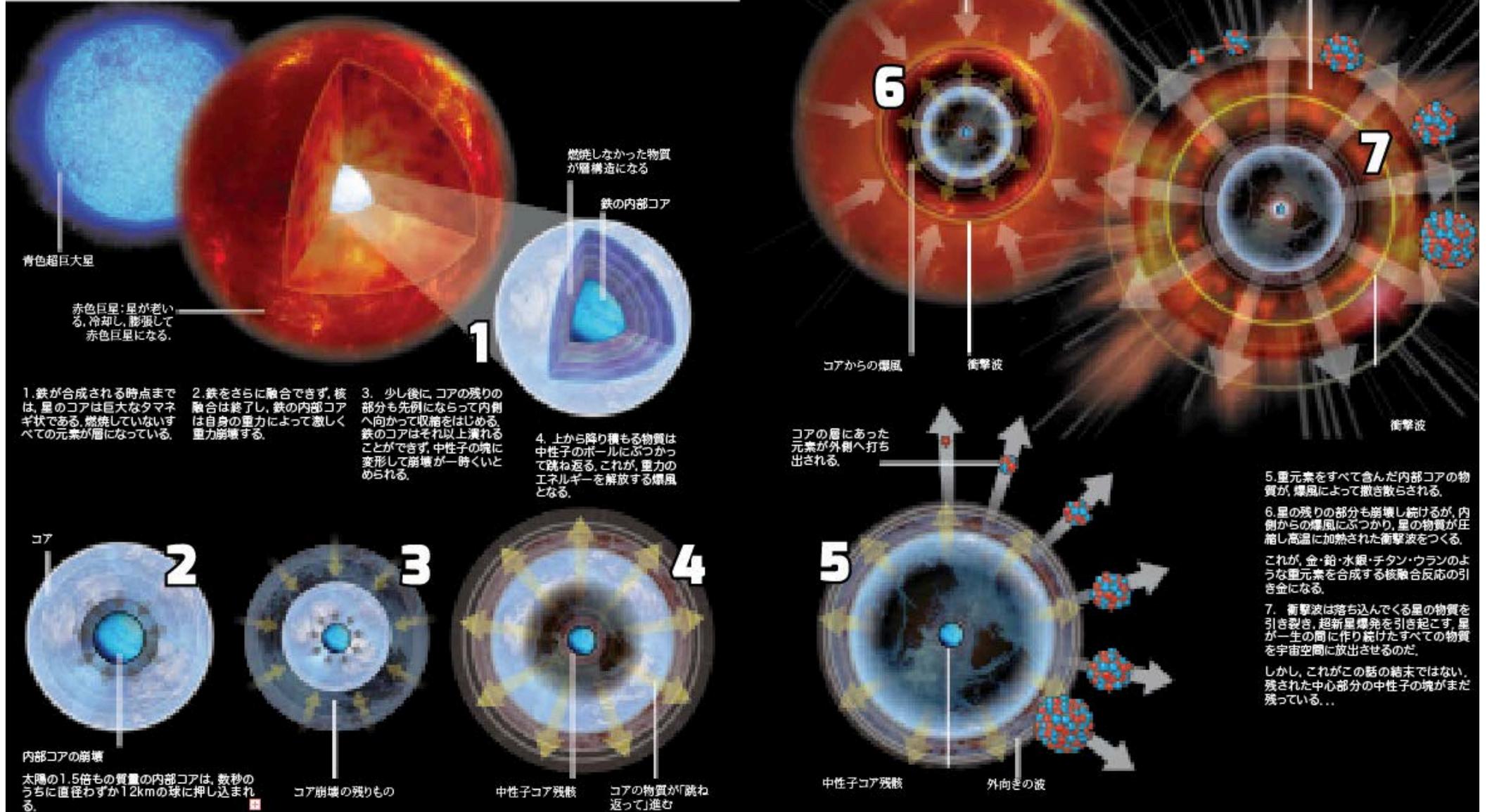
中性子の塊ができる。

さらに外側からガスが落下すると...

星の一生

ダイハード:重元素を合成するまでは死ねない

鉄の核融合を発生させるには、エネルギーを解放するよりも多くのエネルギーを必要とする。ひとたび星のコアに鉄ができれば、それは死を意味する。核融合反応は終了し、星は重力の報酬を受けることになる。重元素が合成されるのは、この星の断末魔の時期である。



「宇宙のつくり方」 Ben Gilliland著, 真貝・鳥居訳 (丸善, 2016/12)

星の輪廻

星(恒星)の一生を決めるのは、どれだけの質量があるか、そしてどのように燃えていくかの2つの要素だ。巨大な星は、核燃料の消費もはやく、数万年くらいの寿命しかないが、小さな星は現在の宇宙年齢の数倍も燃焼し続ける可能性がある。

褐色矮星*はよく「星のなりそこない」と呼ばれる。水素の核融合反応に点火するほどの質量を持ってなかった星の残骸だからだ。これらの星は、まわりの空間に熱を放出して、ゆっくりと死んでゆき、やがて消えてゆく。巨大なガス惑星と同じなので、「できすぎた惑星」と考えてもよいかもしれない。[*訳注：矮星(dwarf)は、小さな星という意味。]

赤色矮星は小さいけれども水素の核融合を起こすことのできる星だ。低い温度で燃えるために、宇宙が今の何倍の年齢になったとしても薄暗く輝き続けることができる。宇宙にある多くの星は -- 全体のおよそ75パーセントの星は -- 赤色矮星である。

太陽型恒星(あるいは黄色矮星)は、水素とヘリウムの両方の核融合反応に点火できる十分な質量を持つ星だ。これらの星がヘリウムを失ったあとは赤色巨星になり、周囲のガス層を照らして惑星ガス雲とし、そしてやがて白色矮星となる。100億年以上の時間をかけて(もし宇宙がそれだけ長く続けば、だが)、これらの星はゆっくりと冷却して、褐色矮星になってゆく。

超巨星や極超巨星は、星の仲間たちからみても病的に肥満している星である。太陽の10倍から数百倍の大きさの質量のものは、燃料の消費も大きく、数十万年程度の寿命である。

宇宙におけるすべての重元素の合成主の星たちは、その星のコアでひとたび鉄が合成されると、超新星として爆発する。

瘦せている星は中性子星やパルサーとなって生き延びるが、肥満している星は、自分の巨大な体重で押しつぶされてブラックホールに変貌する。

図にした星の大きさは正しいものではない。例えば、太陽の20倍の質量をもつ超巨星は、太陽の75倍の大きさになる。

褐色矮星
質量：太陽の0.08倍
表面温度：1000°C
寿命(主系列)：不明

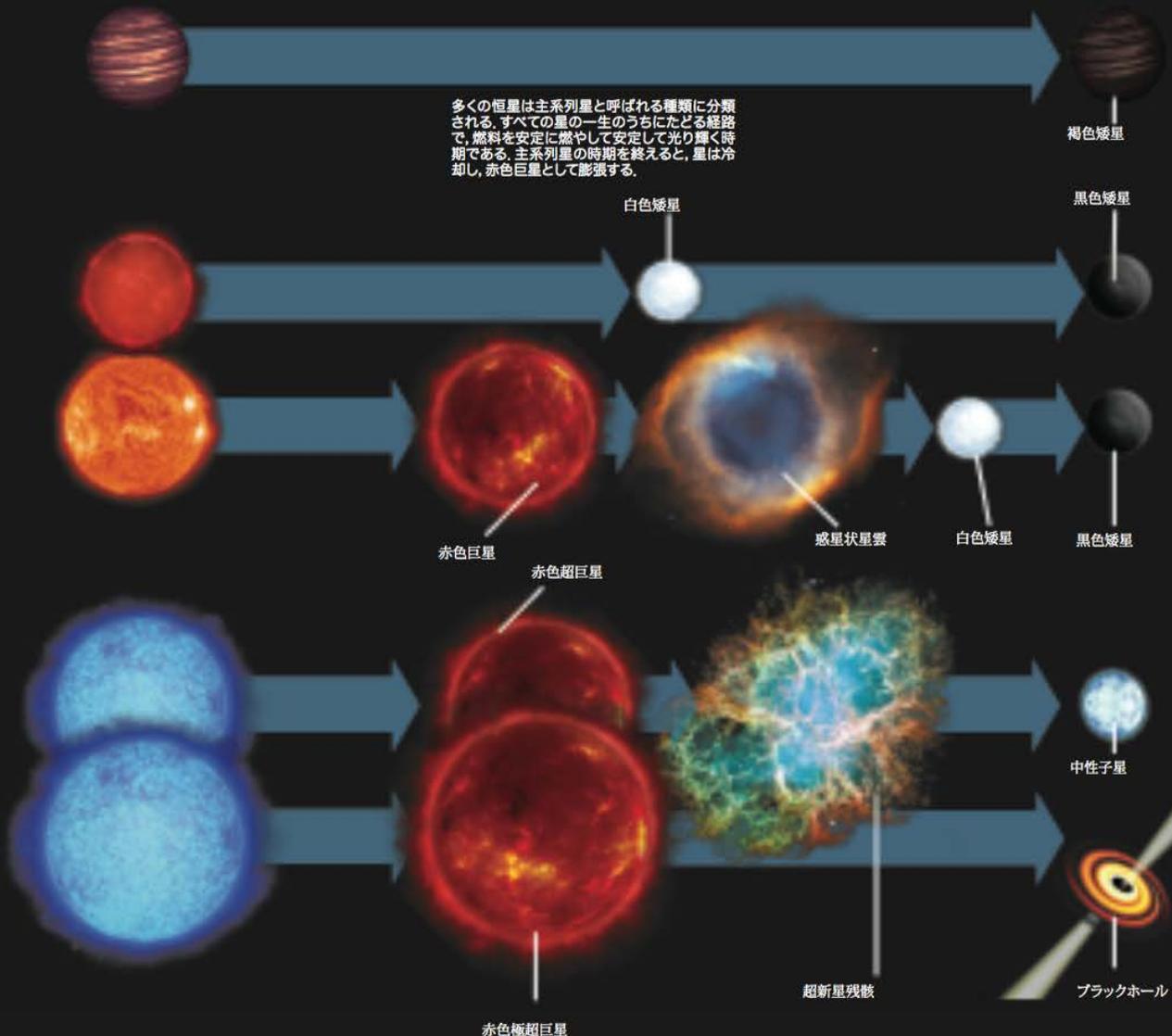
赤色矮星
質量：太陽の0.2倍
表面温度：3000°C
寿命：10兆年

太陽型恒星
質量：太陽の1倍
表面温度：5000°C
寿命：100億年

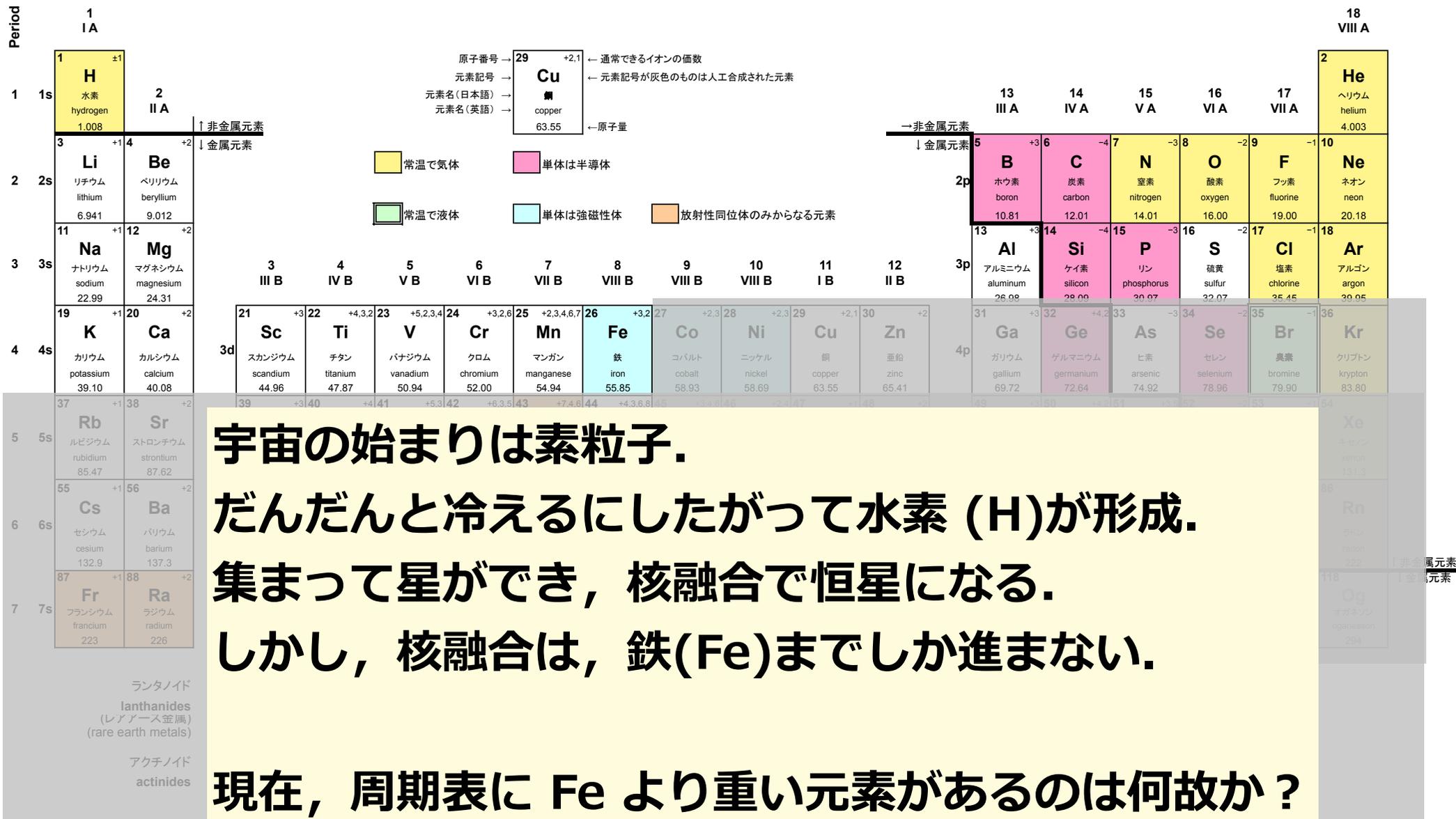
超巨星
質量：太陽の20倍
表面温度：12000°C
寿命：500万年

極超巨星
質量：太陽の100倍
表面温度：40000°C
寿命：100万年

多くの恒星は主系列星と呼ばれる種類に分類される。すべての星の一生のうちにとどまる経路で、燃料を安定に燃やして安定して光り輝く時期である。主系列星の時期を終えると、星は冷却し、赤色巨星として膨張する。



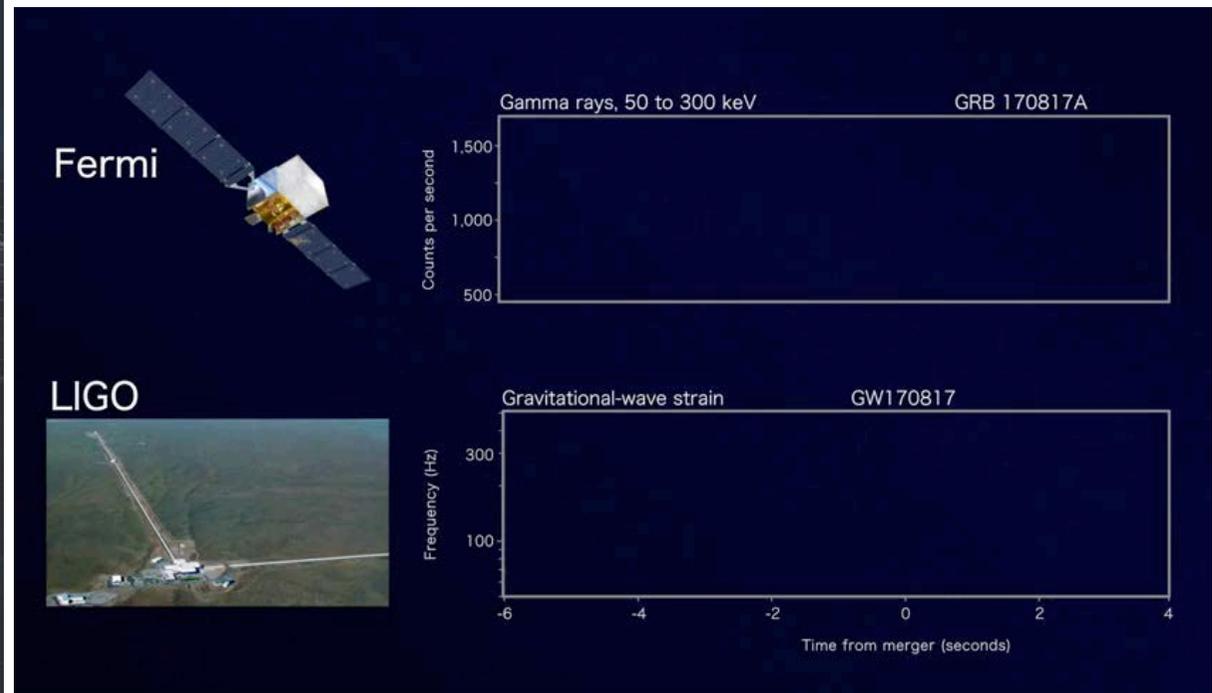
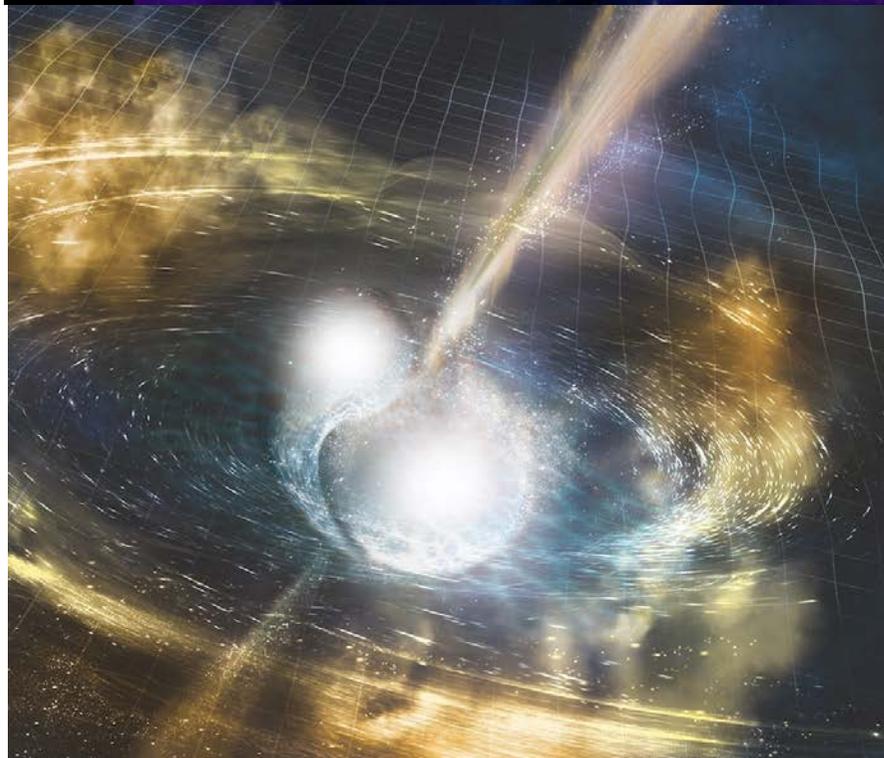
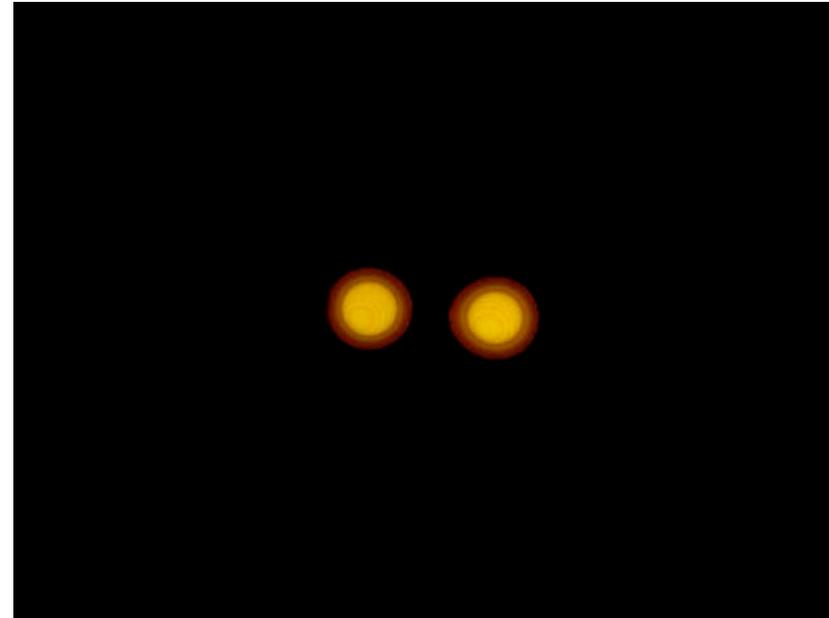
周期表 (periodic table)



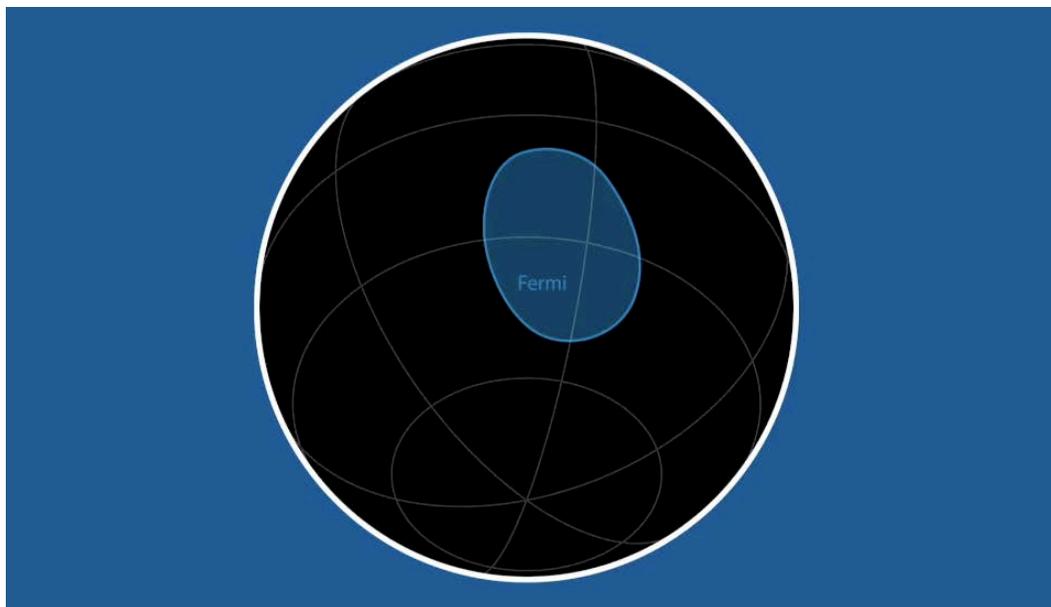
超新星爆発で作られた！

連星中性子星の合体で作られた！

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測



連星中性子星合体 重力波検出，多くの天文台が同時観測



波源はNGC4993 (40Mpc先) !

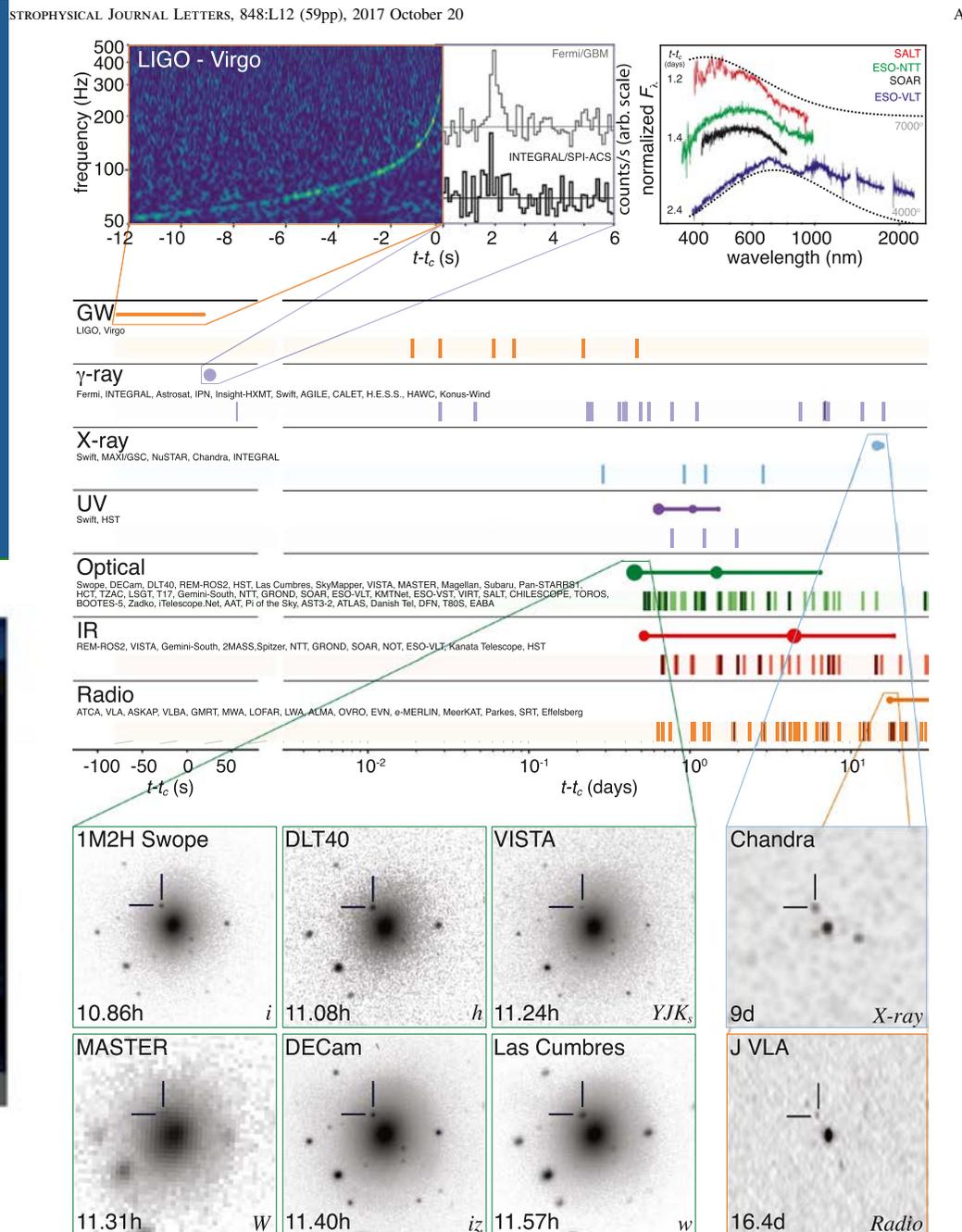


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and relative time (hours) of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band/messenger. First, the shaded dashes represent the time information was reported in a GCN Circular. The names of the relevant instruments, facilities, or observing teams are collected at the beginning of the row

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

**FIRST COSMIC EVENT OBSERVED
IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT**
Colliding Neutron Stars Mark New Beginning of Discoveries

Collision creates light across the entire electromagnetic spectrum. Joint observations independently confirm Einstein's General Theory of Relativity, help measure the age of the Universe, and provide clues to the origins of heavy elements like gold and platinum

Gravitational wave lasted over 100 seconds

On August 17, 2017, 12:41 UTC, LIGO (US) and Virgo (Europe) detect gravitational waves from the merger of two neutron stars, each around 1.5 times the mass of our Sun. This is the first detection of spacetime ripples from neutron stars.

Within two seconds, NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope detects a short gamma-ray burst from a region of the sky overlapping the LIGO/Virgo position. Optical telescope observations pinpoint the origin of this signal to NGC 4993, a galaxy located 130 million light years distant.

LIGO Georgia Tech Center for Relativistic Astrophysics

超新星爆発の後

SN1006 おおかみ座

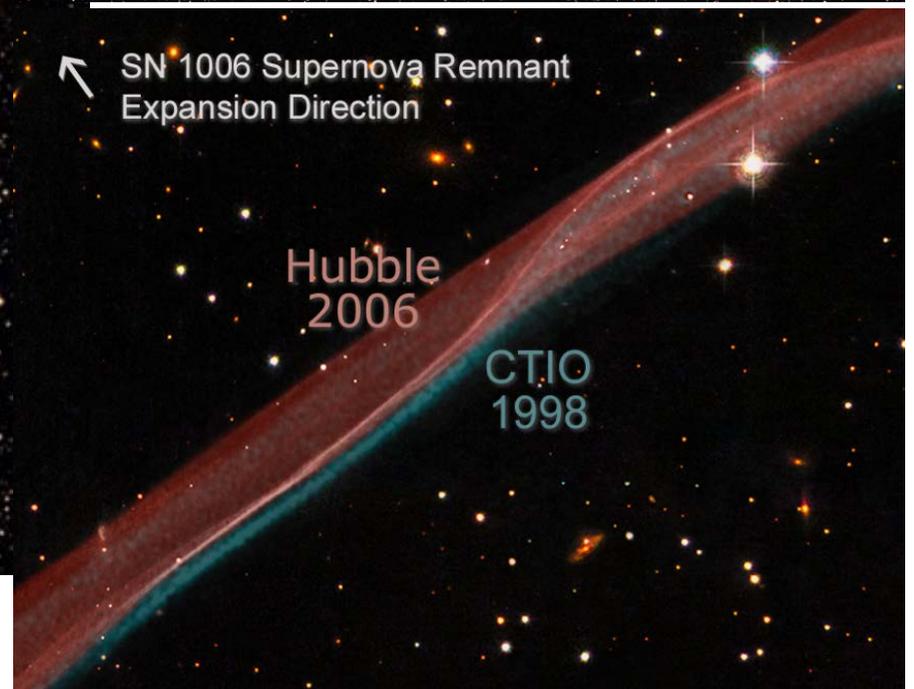
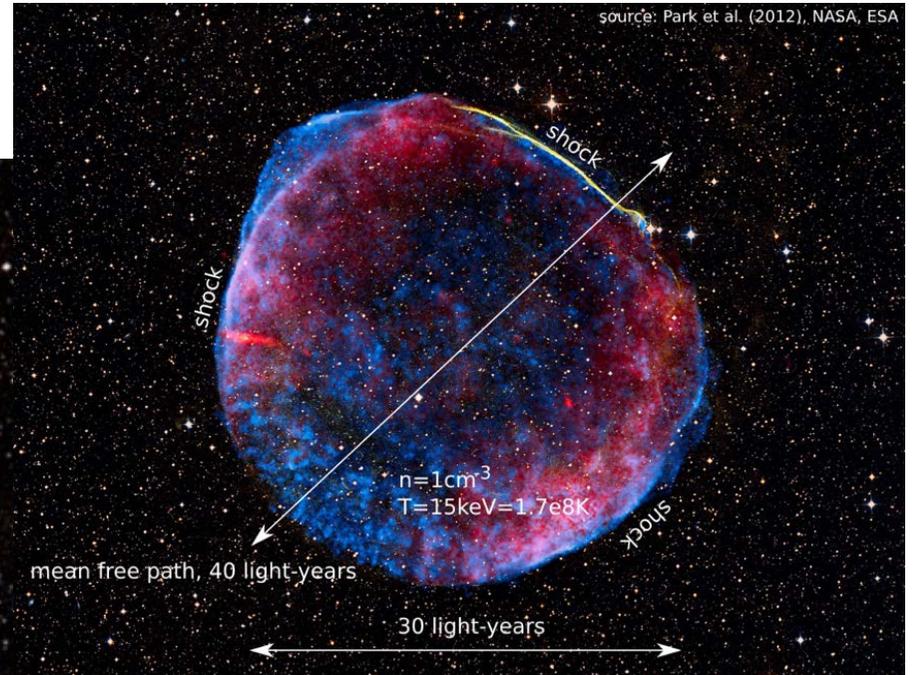
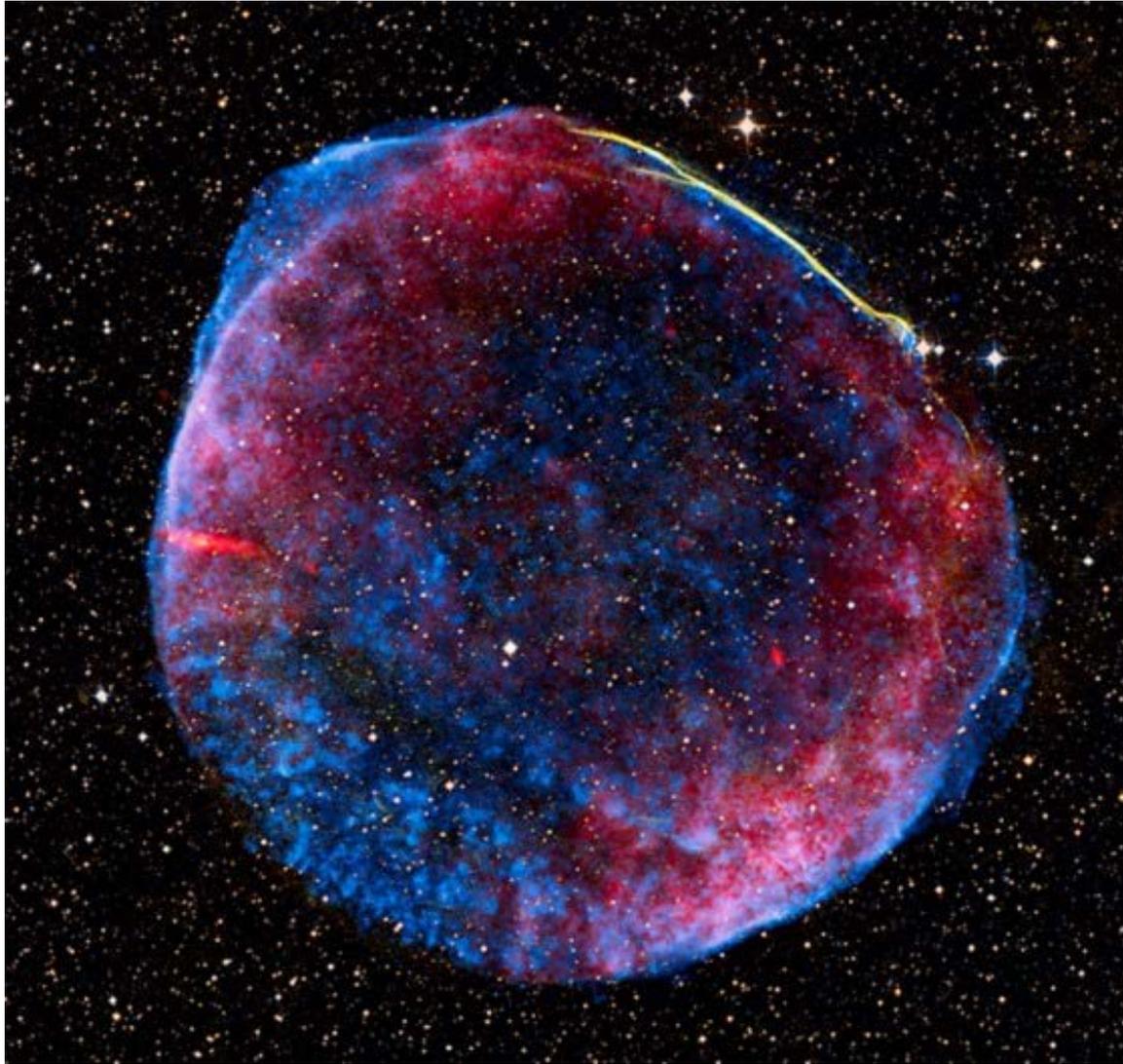
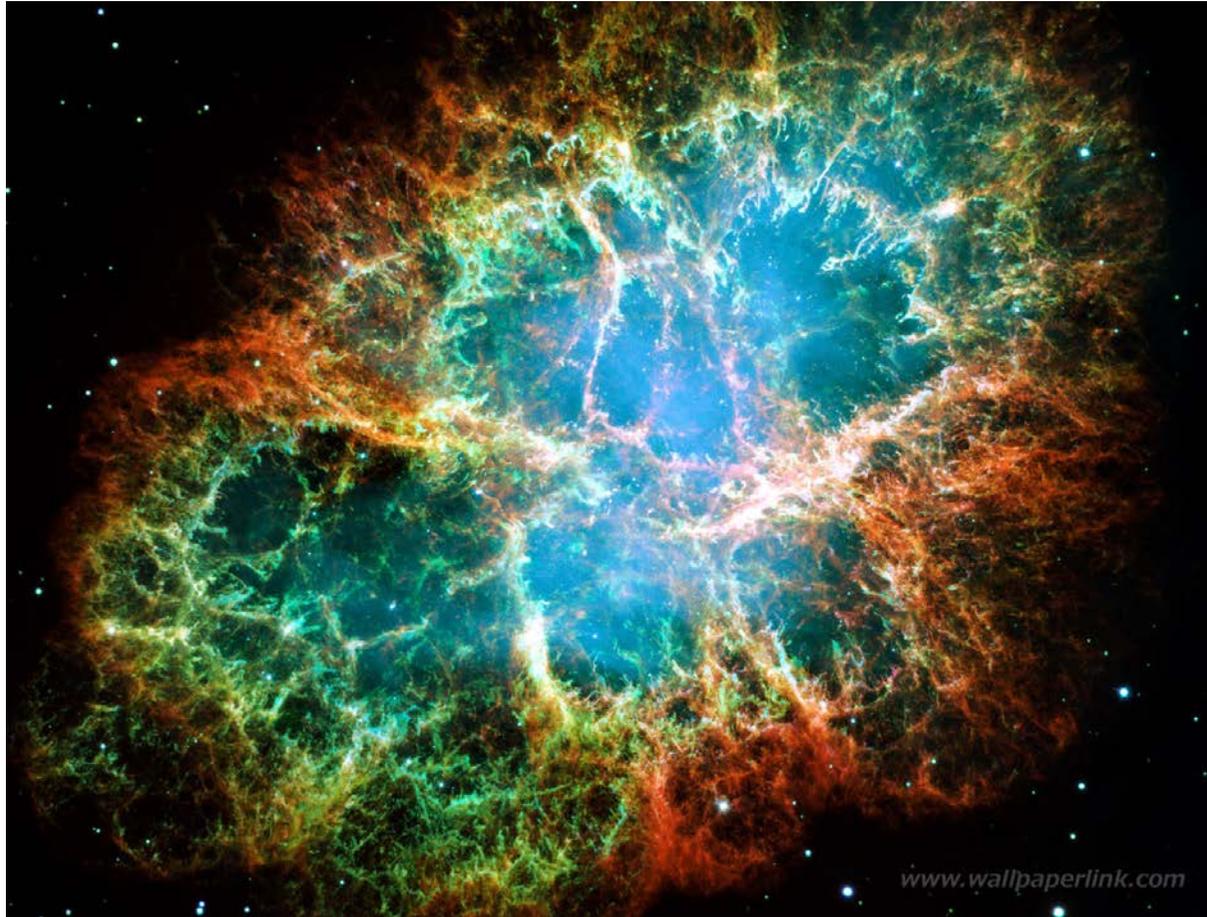


Image credit: Chandra, Hubble, and NRAO teams, retrieved from heasarc.gsfc.nasa.gov.

超新星爆発の後



SN 1054

かに星雲 (Crab Nebula, M1, NGC1952)

中心にある星は、パルサー（中性子星）で、1969年発見.

直径は約10km. 光度は16等級. 1秒間に30回という高速回転をしており、33msの周期で電波やX線を出し、また可視光線で星雲全体を照らしている.

一般相対性理論

強い重力場での時空の力学
「空間が歪むことが重力の正体である」

特殊相対性理論

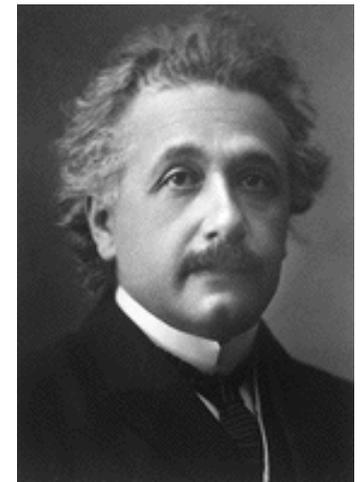
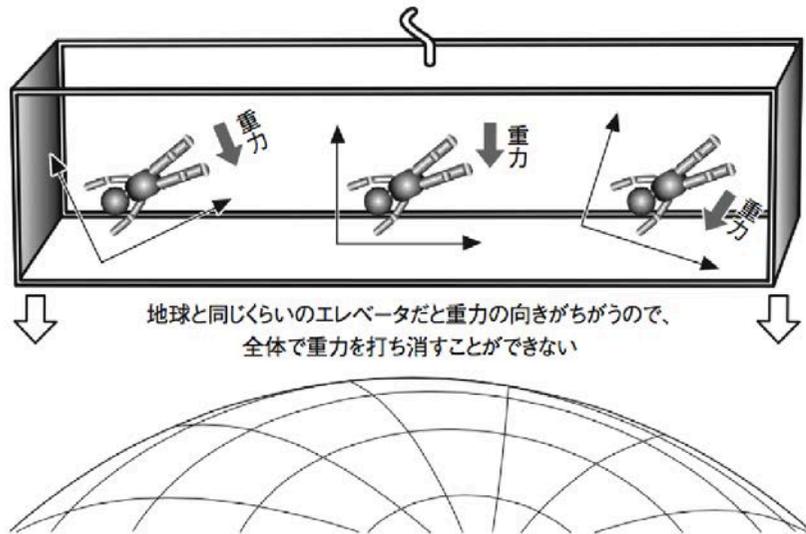
光の速さに近い場合の力学
「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

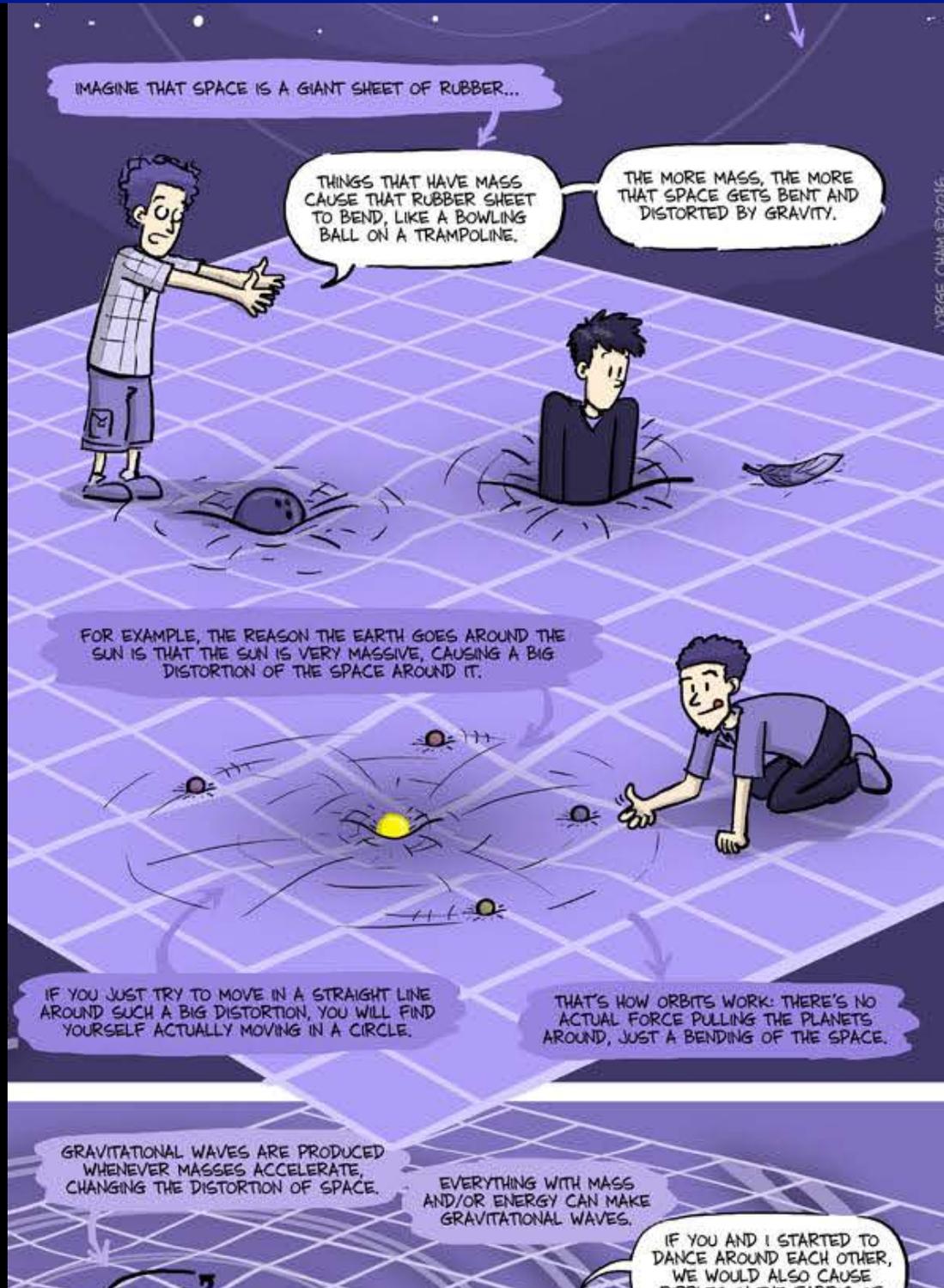
アインシュタイン：一般相対性理論（1915年）

- ① 発端：特殊相対性理論では、加速度のある運動を扱えなかった。
重力加速度はどう考えたらよいだろうか。
- ② ブレークスルーとなった考え：
自由落下するエレベータ内では、重力を感じない。重力は消去できる！
しかし、地球規模の大きさでは重力は消去できない。



- ③ 結論：重力の正体は、時空の歪みである。

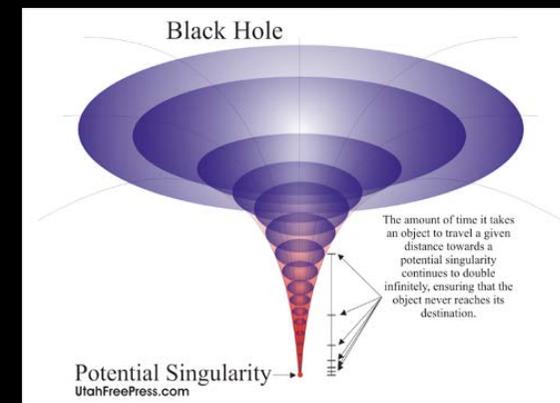
ブラックホール



FailsShot



Subscribe

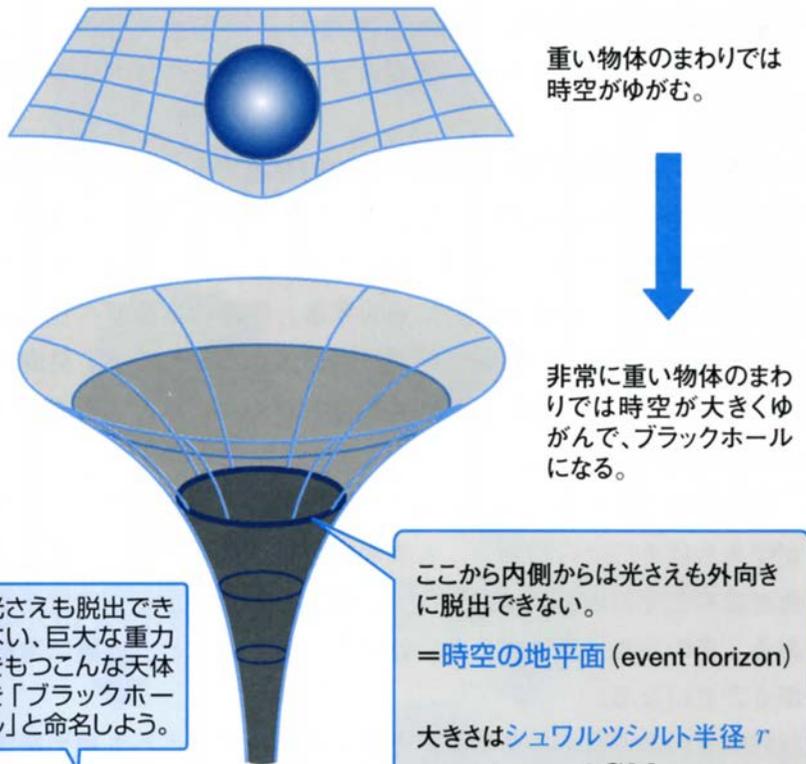


ブラックホール

= 重力が強すぎて、光さえも出られない天体

= 因果的に隔離される領域

境界 = 地平面 (ホライズン)



光さえも脱出できない、巨大な重力をもつこんな天体を「ブラックホール」と命名しよう。

ここから内側からは光さえも外向きに脱出できない。
= 時空の地平面 (event horizon)

大きさはシュワルツシルト半径 r

$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

(M : 物体の質量, G : 重力定数, c : 光速)

太陽なら半径3km、地球なら半径9mmにそれぞれの全質量を押しこめば、ブラックホールになる。

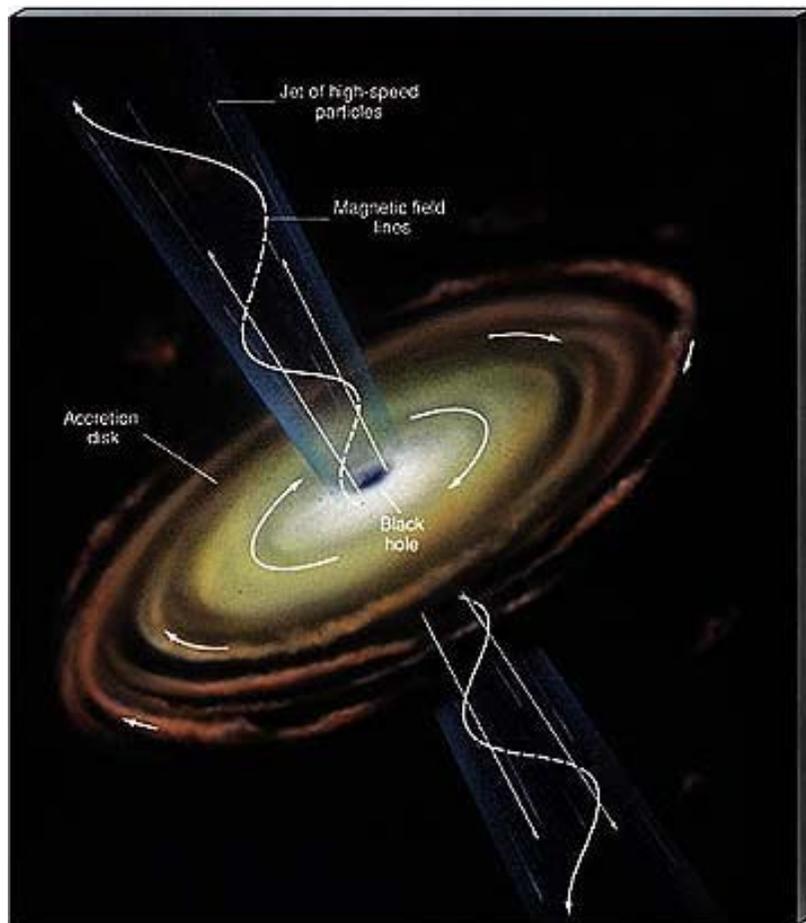
表 4.1: シュワルツシルト半径 (対応するブラックホールの大きさ). 質量 M の物体がどの位の半径 R_{Sch} に押し込まれたらブラックホールになるか, という目安. Sgr A* は天の川銀河中心の超巨大ブラックホール.

天体	M	R_{Sch}
地球	$6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$	8.9 mm
太陽	$M_{\odot} = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$	2.95 km
Sgr A*	$4.2 \times 10^6 M_{\odot}$	$1.24 \times 10^7 \text{ km}$



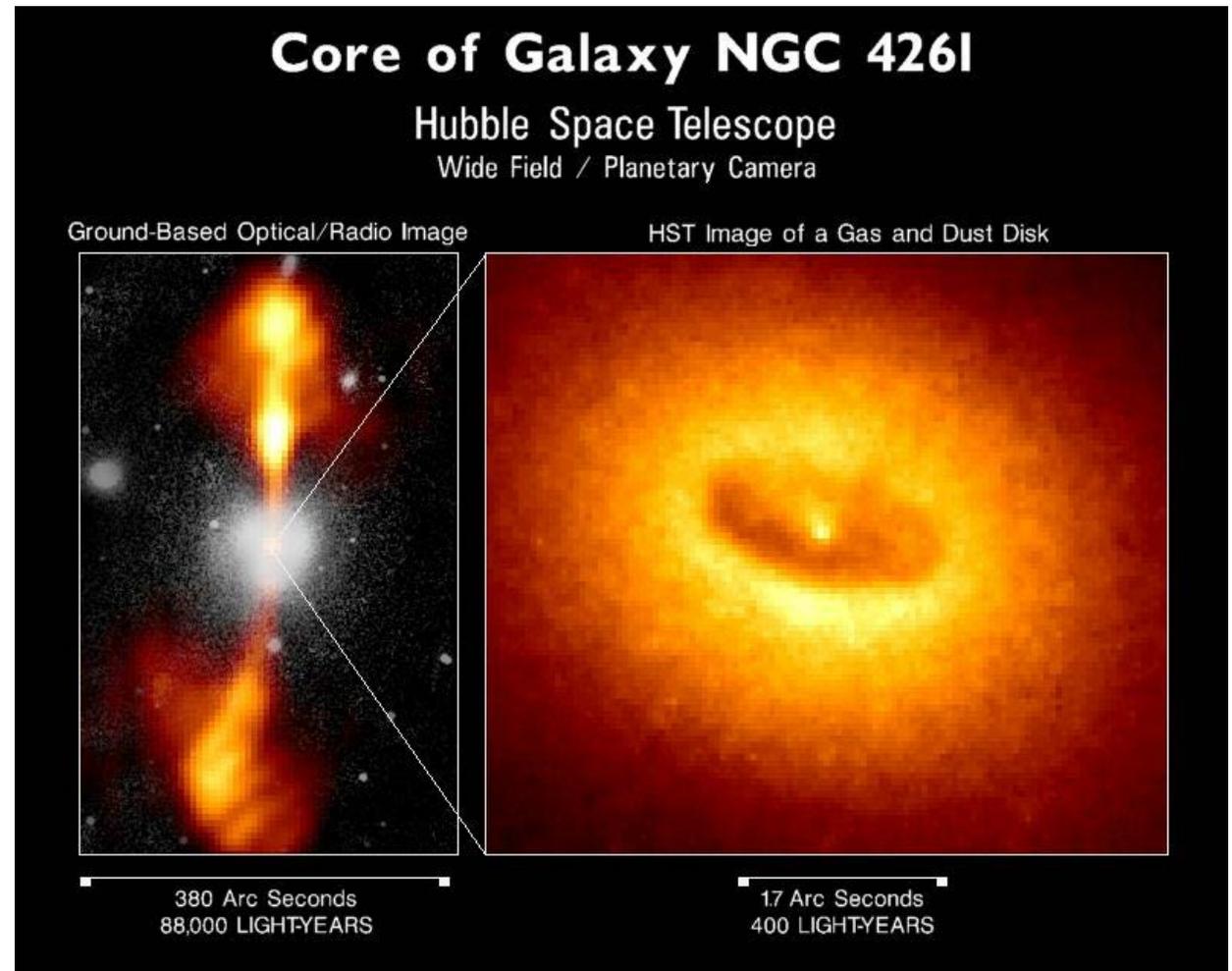
ホイーラー

天文学的には、ブラックホールは光源



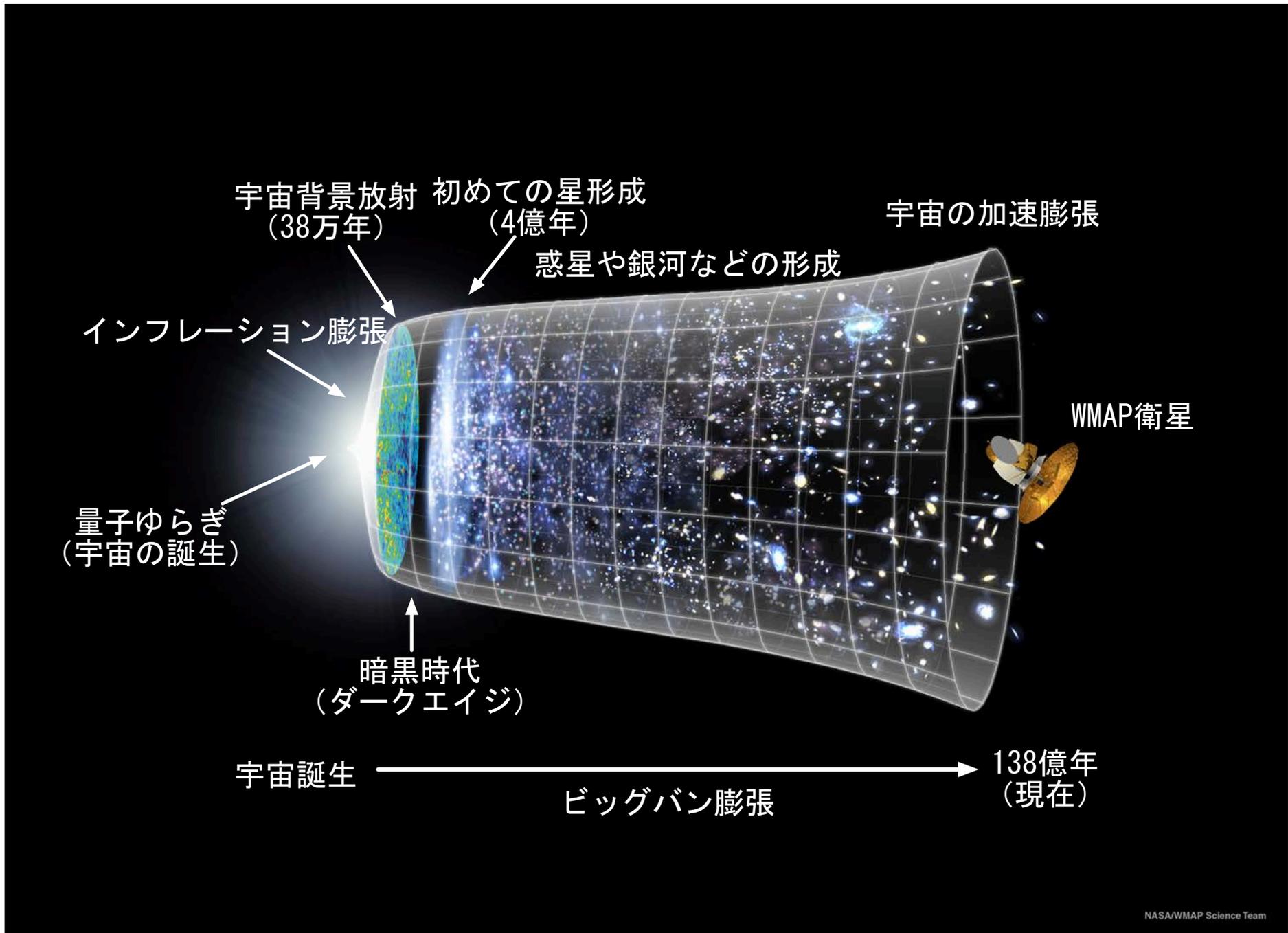
<http://www2.astro.psu.edu/users/rbc/a1/lec26n.html>

想像図



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

宇宙の暗黒時代 (ダークエイジ)



銀河系形成の謎

THE MILKY WAY

NATIONAL GEOGRAPHIC

Some galaxy in Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode on repeat their outer layers as beautiful planetary nebulas, then fade away and die. A thick reservoir of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may be a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.

LOOK TO THE GALAXY

1 The beyond the galaxy disk, yet above the galactic plane, is a galaxy's central region. The galactic core, a region of dark matter and stars, is surrounded by a thick disk of interstellar dust. A thick disk of interstellar dust blocks much of our light.

2 Why stars of the Milky Way, which look our galaxies in the far past, are so bright, is a mystery. The stars are so bright because they are so young. The stars are so young because they are so young. The stars are so young because they are so young.

PLANETARY NEBULA NGC 604

Earth's atmosphere of the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode on repeat their outer layers as beautiful planetary nebulas, then fade away and die. A thick reservoir of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may be a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.

MOON NEBULA

Earth's atmosphere of the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode on repeat their outer layers as beautiful planetary nebulas, then fade away and die. A thick reservoir of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may be a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.

WE ARE HERE

Our location in the Milky Way galaxy is shown in this diagram. The Sun is located in the Orion Arm, about two-thirds of the way from the center of the galaxy.

LEGEND

- Orange star cluster
- Interstellar gas and dust
- Galactic core
- Galactic disk
- Galactic arms
- Galactic bulge
- Galactic center
- Galactic halo

REFERENCES

Galactic core: NASA/JPL-Caltech
Galactic disk: NASA/JPL-Caltech
Galactic arms: NASA/JPL-Caltech
Galactic bulge: NASA/JPL-Caltech
Galactic center: NASA/JPL-Caltech
Galactic halo: NASA/JPL-Caltech

PLANETARY NEBULA NGC 604

Earth's atmosphere of the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode on repeat their outer layers as beautiful planetary nebulas, then fade away and die. A thick reservoir of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may be a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.

MOON NEBULA

Earth's atmosphere of the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode on repeat their outer layers as beautiful planetary nebulas, then fade away and die. A thick reservoir of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may be a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.

WE ARE HERE

Our location in the Milky Way galaxy is shown in this diagram. The Sun is located in the Orion Arm, about two-thirds of the way from the center of the galaxy.

LEGEND

- Orange star cluster
- Interstellar gas and dust
- Galactic core
- Galactic disk
- Galactic arms
- Galactic bulge
- Galactic center
- Galactic halo

REFERENCES

Galactic core: NASA/JPL-Caltech
Galactic disk: NASA/JPL-Caltech
Galactic arms: NASA/JPL-Caltech
Galactic bulge: NASA/JPL-Caltech
Galactic center: NASA/JPL-Caltech
Galactic halo: NASA/JPL-Caltech

初代星の形成モデルはまだ不明

原始惑星円盤内: 塵 → 微惑星 → 原始惑星 → 惑星



今の星 (種族I, population I)

金属 (He 以上) を含む. (今の太陽)
寿命100億年程度. 銀河系のディスク部分に多い.

前の世代の星 (種族II, population II)

金属量が少ない. 宇宙誕生後最初の長寿命星.
寿命数億年程度. 銀河系のハロー部分に多い.

観測されていない.
本当にあるのか?

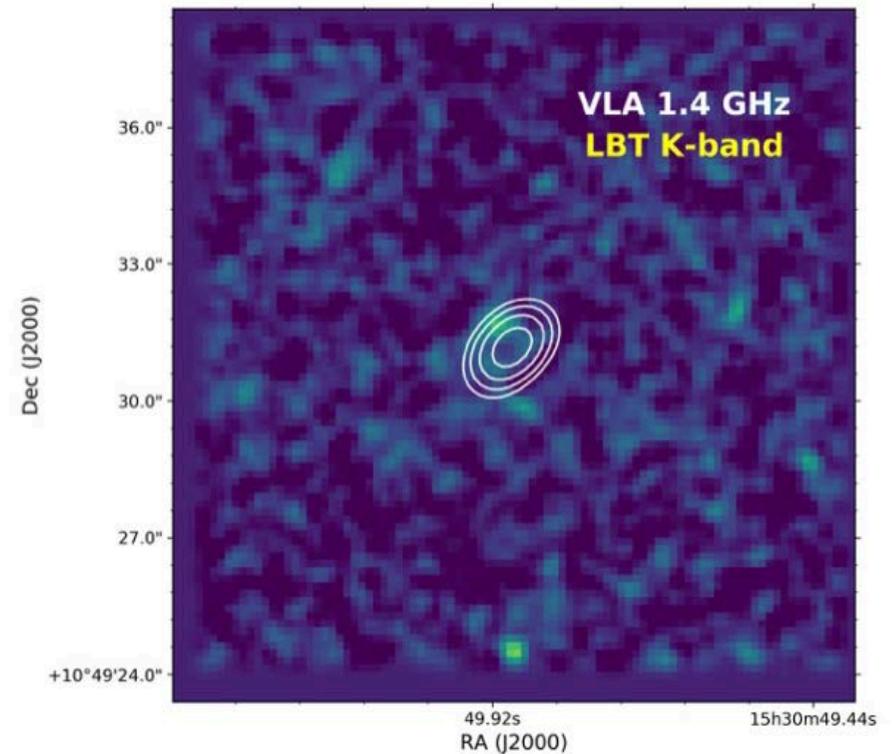
初代の星 (population III)

金属量ゼロの仮説段階の星. 寿命数万年~数百万年
程度. 大きくて重くてすぐに燃え尽きた.

最遠の電波銀河を発見 128億光年先

オランダ・ライデン天文台を中心とする国際研究チームが、インドの巨大メートル波電波望遠鏡（GMRT）で行われた全天の電波サーベイ観測のデータから、へび座の方向に位置する電波銀河「TGSS J1530+1049」を発見した。銀河までの距離を求めるために米・ハワイのジェミニ北望遠鏡と米・アリゾナ州の大双眼望遠鏡（Large Binocular Telescope; LBT）で分光観測が行われ、銀河の赤方偏移の値が5.72と求められた。電波銀河としては、1999年に発見された赤方偏移5.19（約127億光年）という記録を更新した。

https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/10104_tgss



Monthly Notices
of the
ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS **480**, 2733–2742 (2018)
Advance Access publication 2018 August 6

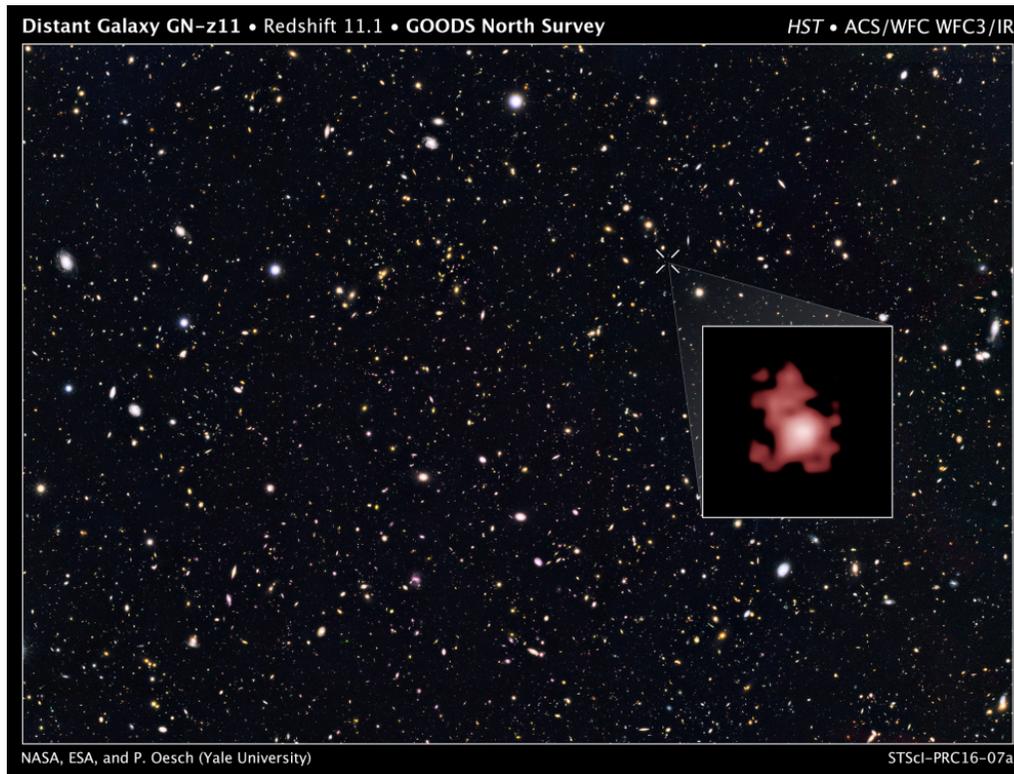
doi:10.1093/mnras/sty1996

Discovery of a radio galaxy at $z = 5.72$

A. Saxena,^{1*} M. Marinello,^{1,2} R. A. Overzier,² P. N. Best,³ H. J. A. Röttgering,¹
K. J. Duncan,¹ I. Prandoni,⁴ L. Pentericci,⁵ M. Magliocchetti,⁶ D. Paris,⁵ F. Cusano,⁷
F. Marchi,⁵ H. T. Intema¹ and G.K. Miley¹

<https://academic.oup.com/mnras/article/480/2/2733/5067277>

ハッブル望遠鏡が最遠銀河を発見 134億光年先



https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/746_gnz11

ハッブル宇宙望遠鏡HSTによる観測で、史上最も遠い銀河「GN-z11」（おおぐま座の方向）が発見された。小さいながらも活発な星形成を行っており、驚くほど明るい。従来GN-z11までの距離は、HSTと赤外線天文衛星「スピッツァー」との観測から得られた天体の色から見積もられていたが、今回、HSTによってGN-z11を分光観測したところ、天体の距離の指標となる「赤方偏移」の値が11.1と求められた。

GN-z11の大きさは天の川銀河の25分の1、質量は天の川銀河の1パーセントである。このような小ささにもかかわらず、GN-z11の成長は早く、現在の天の川銀河の約20倍以上という率で星を形成している。そのおかげで、明るく見えている。

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 819:129 (11pp), 2016 March 10
© 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/0004-637X/819/2/129



CrossMark

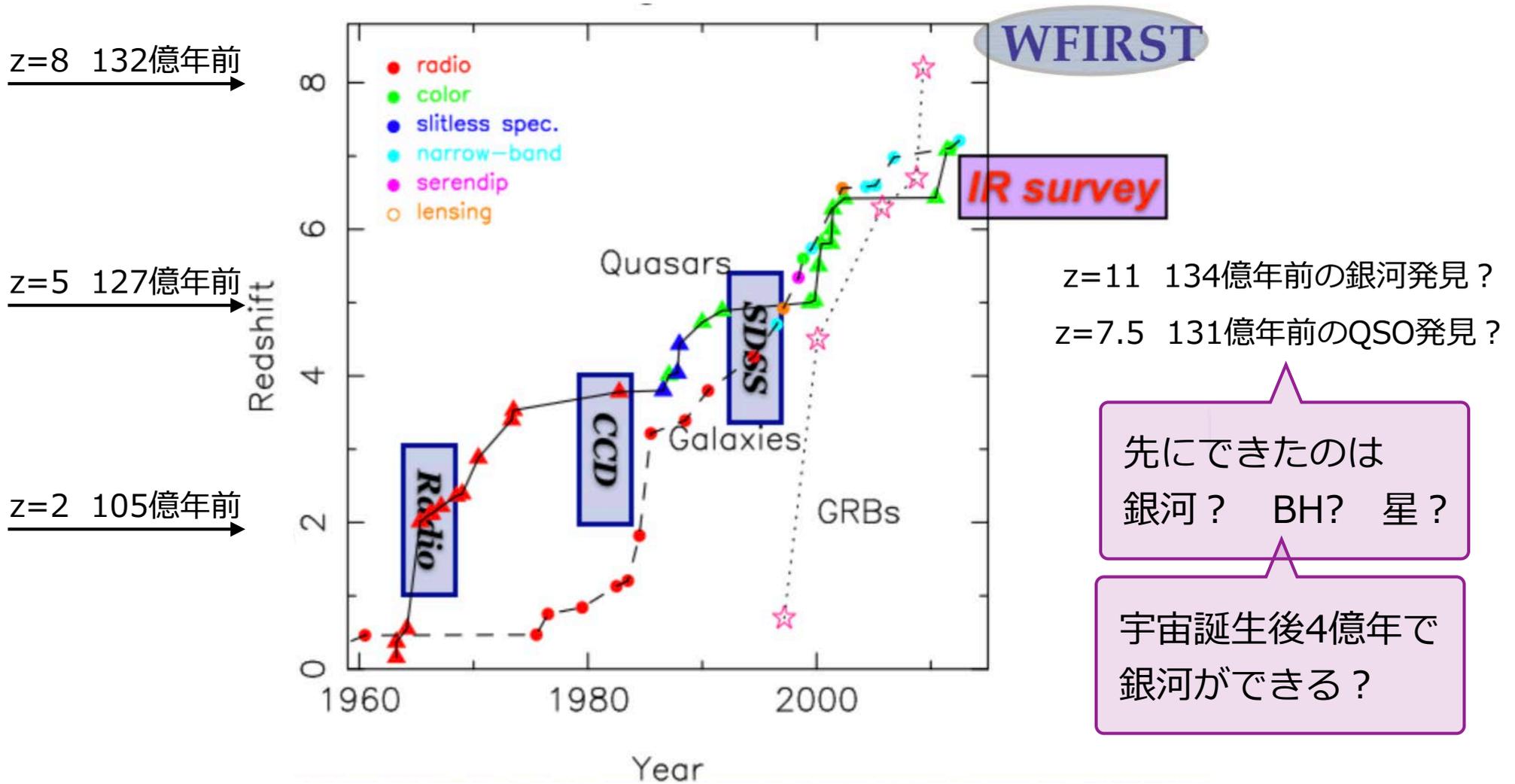
A REMARKABLY LUMINOUS GALAXY AT $Z = 11.1$ MEASURED WITH *HUBBLE SPACE TELESCOPE* GRISM SPECTROSCOPY

P. A. OESCH^{1,2}, G. BRAMMER³, P. G. VAN DOKKUM^{1,2}, G. D. ILLINGWORTH⁴, R. J. BOUWENS⁵, I. LABBÉ⁵, M. FRANX⁵,
I. MOMCHEVA^{2,3}, M. L. N. ASHBY⁶, G. G. FAZIO⁶, V. GONZALEZ^{7,8}, B. HOLDEN⁴, D. MAGEE⁴, R. E. SKELTON⁹, R. SMIT¹⁰,
L. R. SPITLER^{11,12}, M. TRENTI¹³, AND S. P. WILLNER⁶

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/0004-637X/819/2/129>

最も遠くの天体は 銀河？ クェーサー？ ガンマ線バースト？

Xiaohui Fan



クェーサー (準星, quasi-stellar)

= 活動銀河中心核のブラックホール？

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst)

= 中性子星の合体？

地球・月 ▶ 太陽系 ▶ 銀河系 ▶ 銀河群 ▶ 銀河団 ▶ 大規模構造

(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)

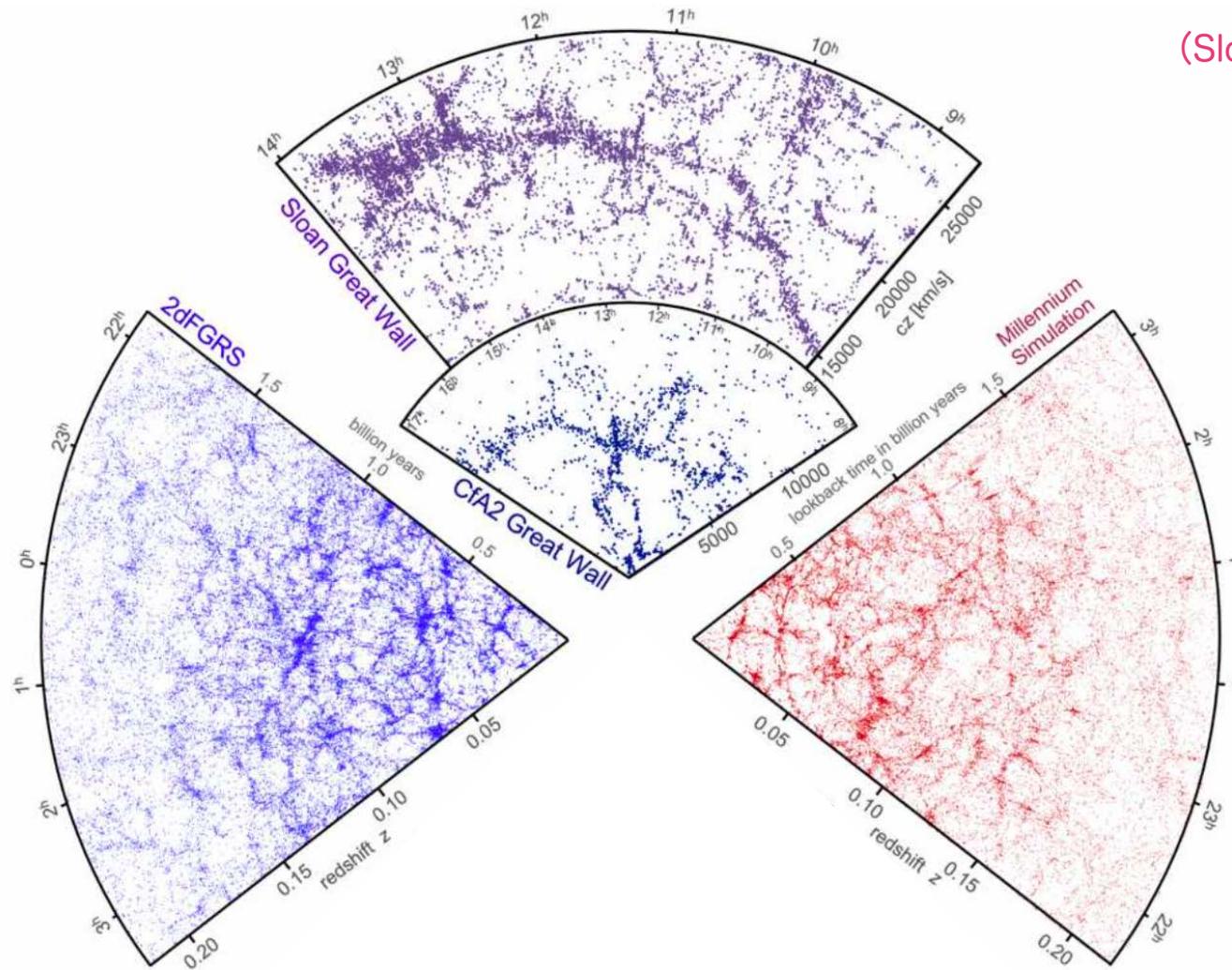
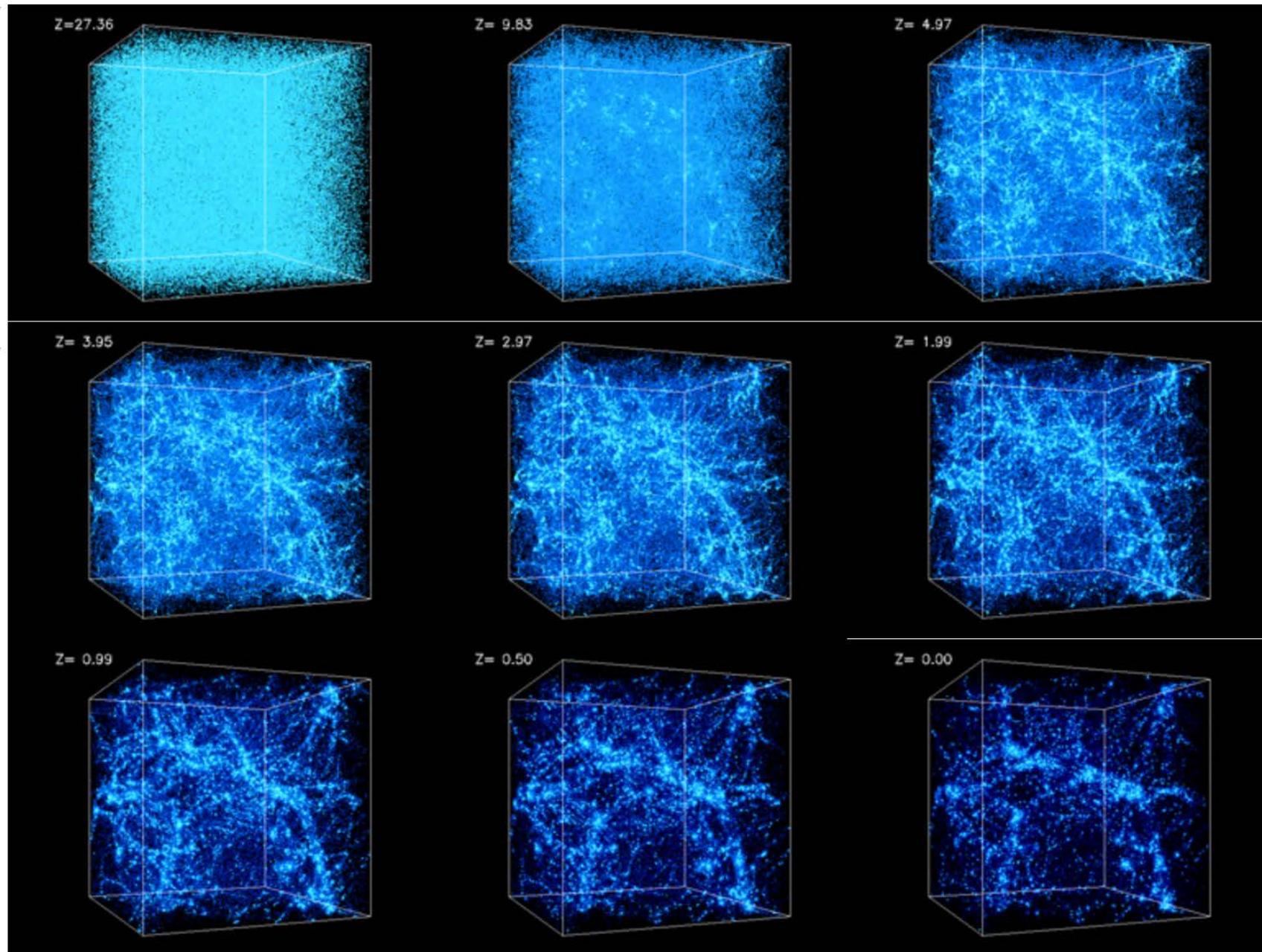
65万個の銀河分布を
観測 (2006)

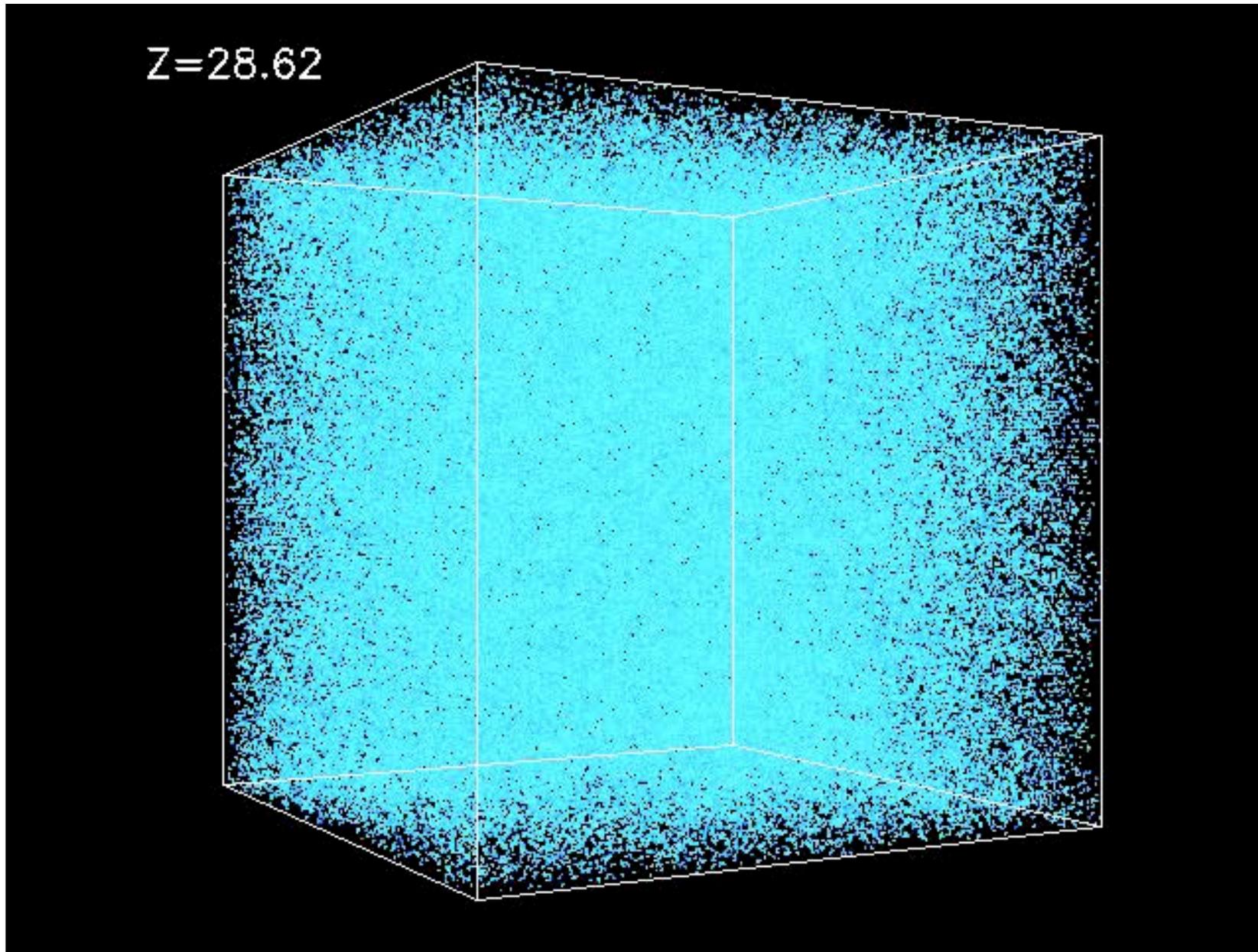
図 1.35 銀河の分布観測とシミュレーションによる疑似分布を並べたもの。〔上〕SDSS サーベイによる銀河の分布図と図 1.34 を重ねたもの。SDSS は、北天から見える 65 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している。1.3 億光年の距離に及ぶ 1 万個以上のグレートウォール（万里の長城）も新たに発見された。〔左〕2dFGR サーベイによる銀河の分布図。南天の 22 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している。〔右〕ミレニアム・シミュレーションという数値計算結果を似せて示したもの。[Springel, Frenk, White の論文 (2006) を加工]

宇宙の大規模構造の形成・フィラメントの形成



<http://cosmicweb.uchicago.edu/filaments.html>

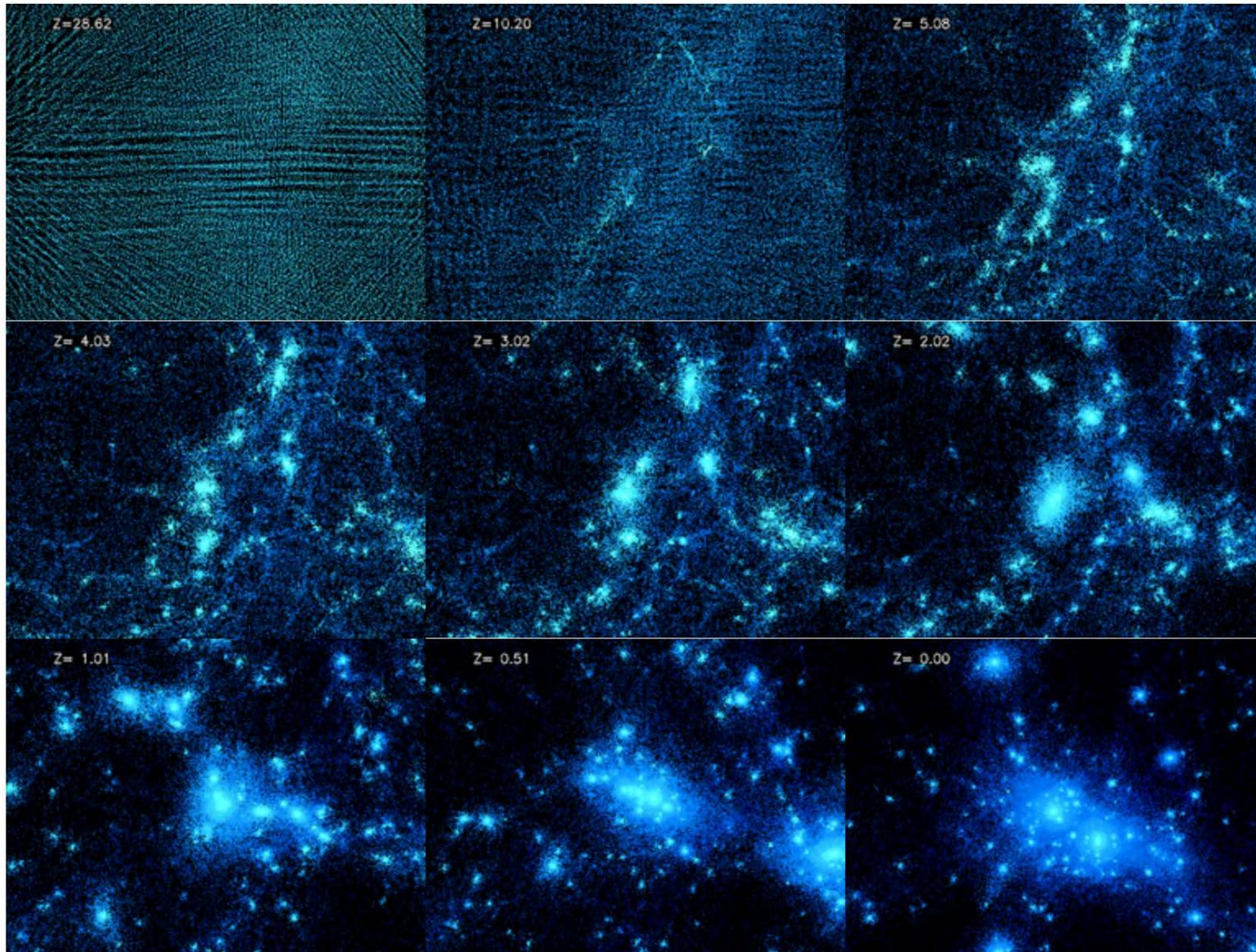
宇宙の大規模構造の形成・フィラメントの形成



<http://cosmicweb.uchicago.edu/filaments.html>

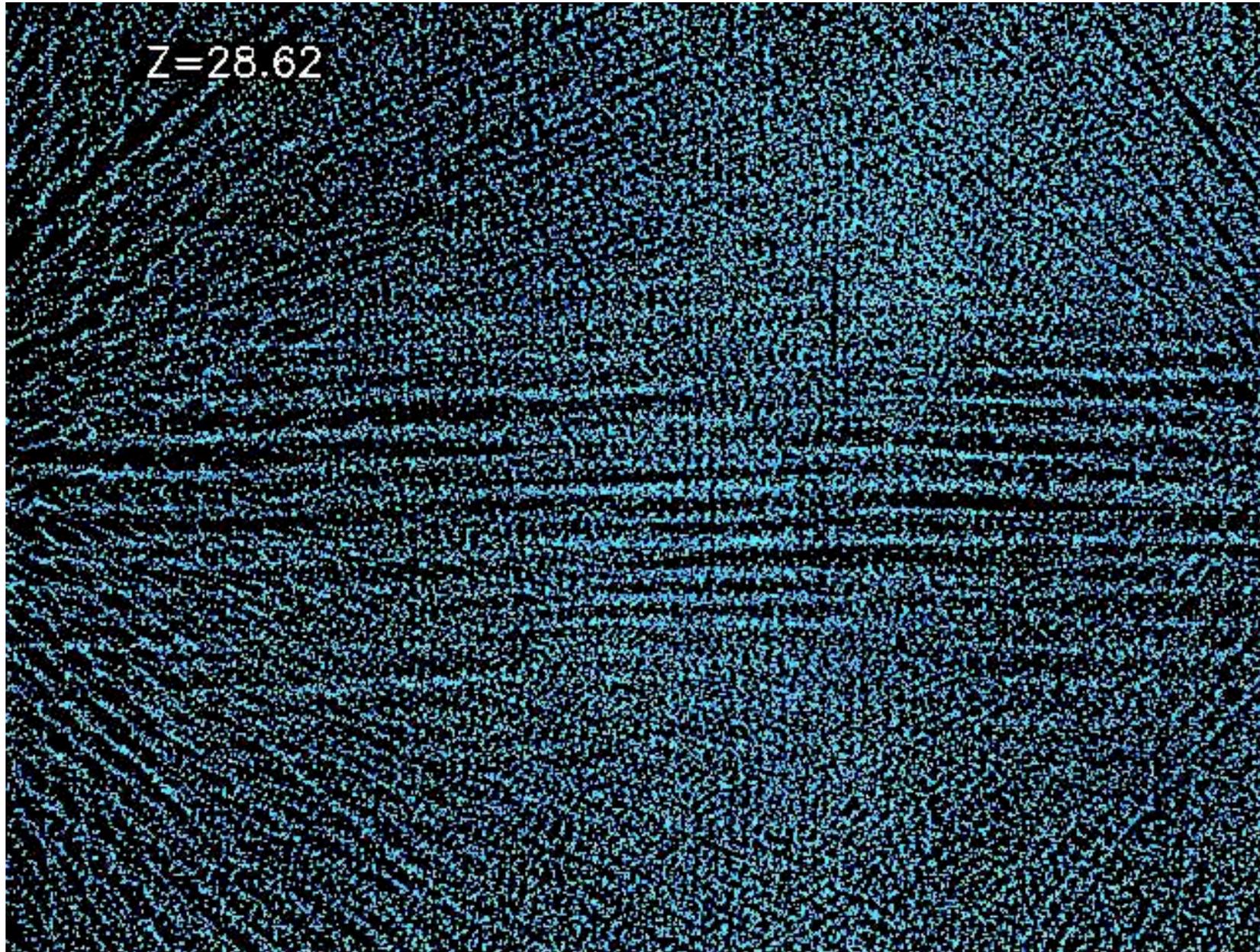
9 sec

宇宙の大規模構造の形成・銀河群の形成



<http://cosmicweb.uchicago.edu/group.html>

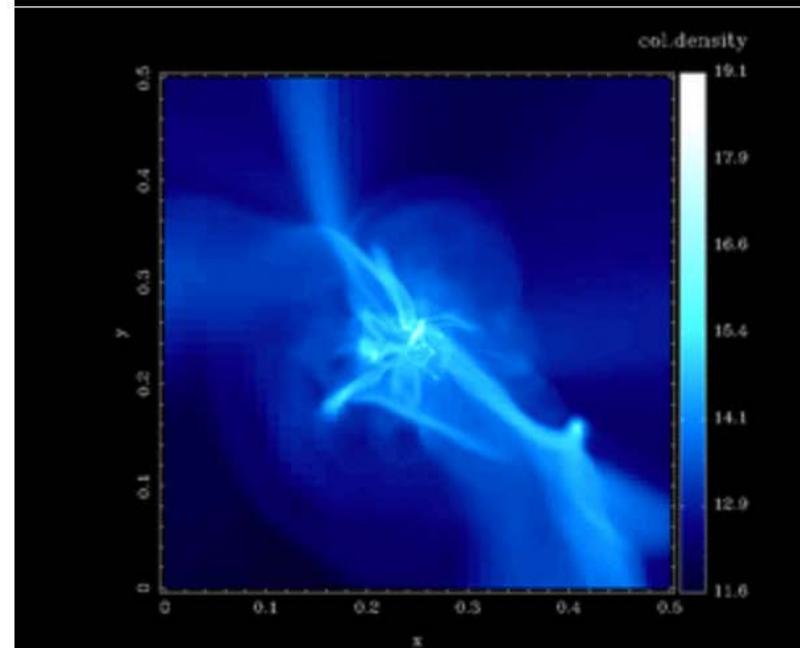
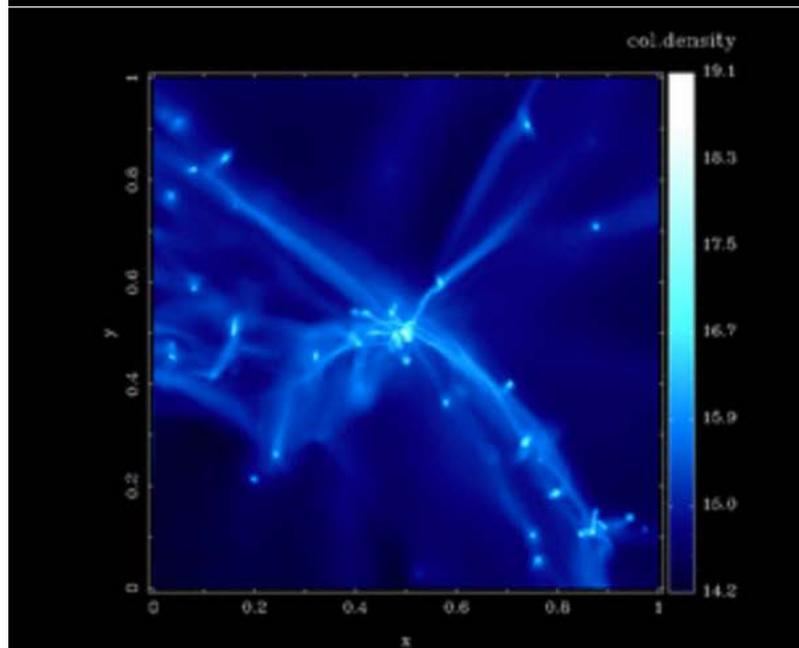
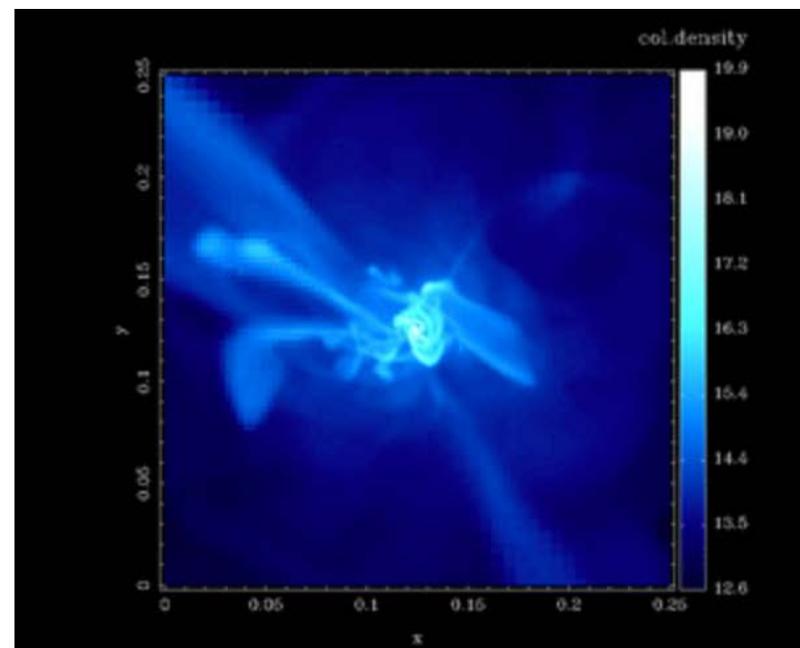
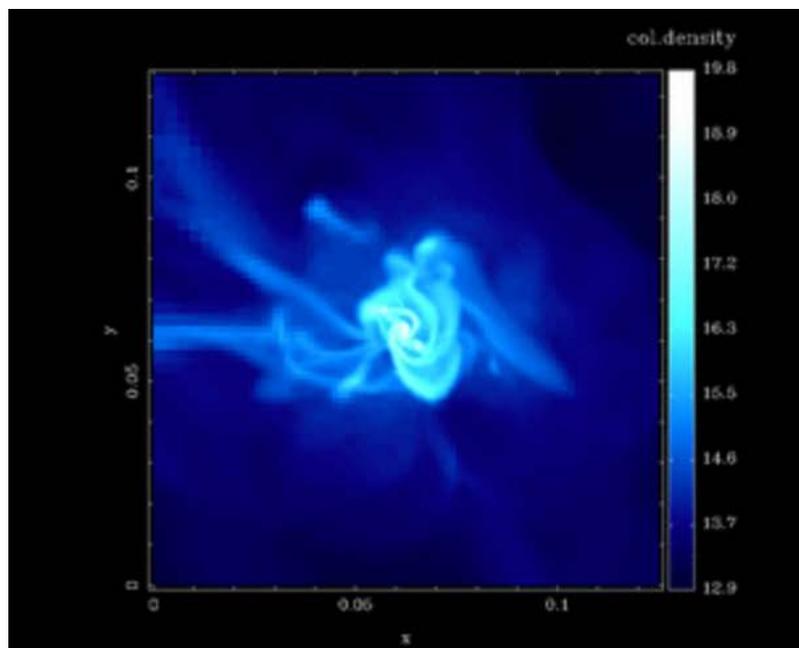
宇宙の大規模構造の形成・銀河群の形成



<http://cosmicweb.uchicago.edu/group.html>

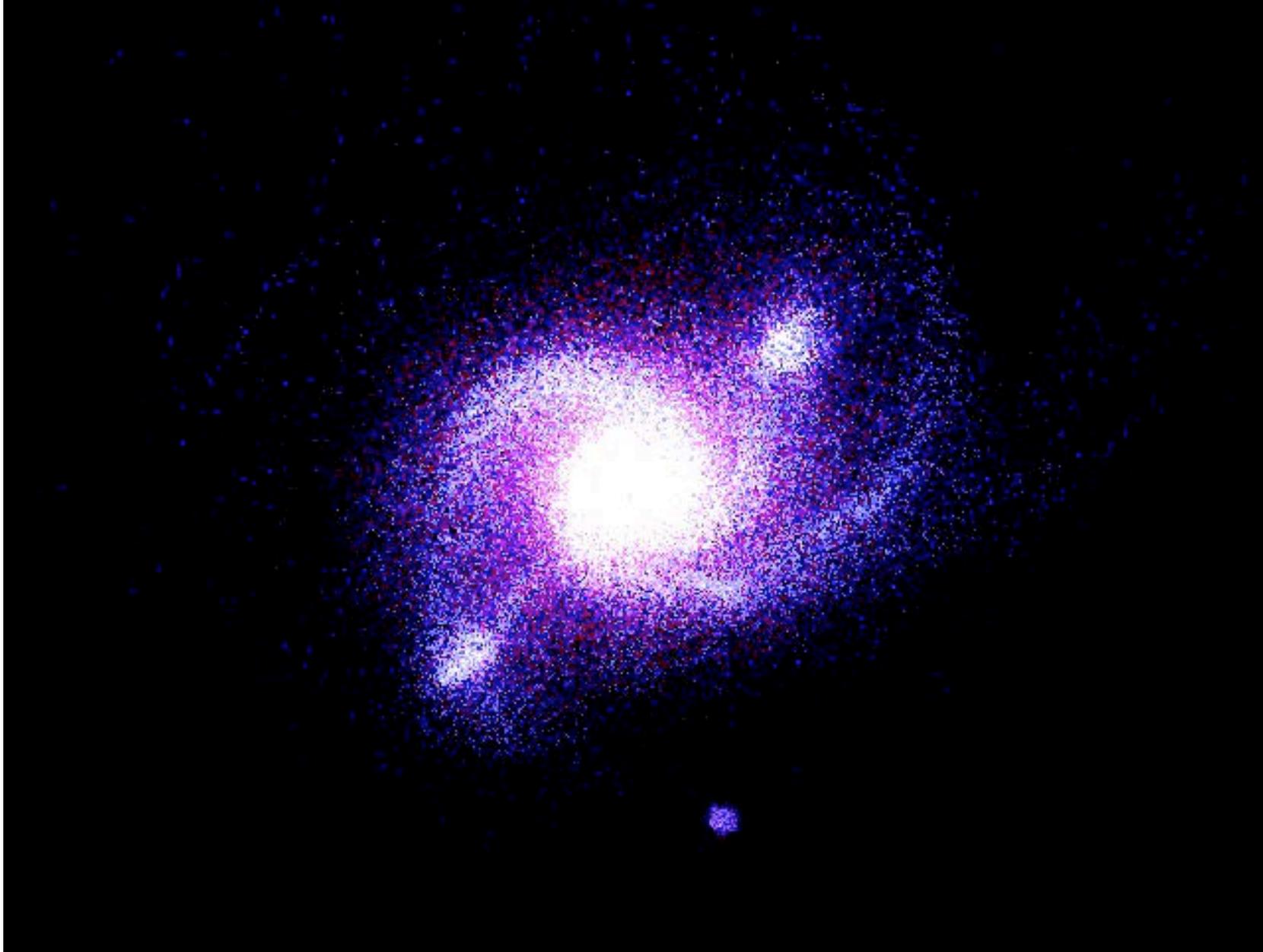
6 sec

宇宙の大規模構造の形成・銀河の形成



<http://cosmicweb.uchicago.edu/gal.html>

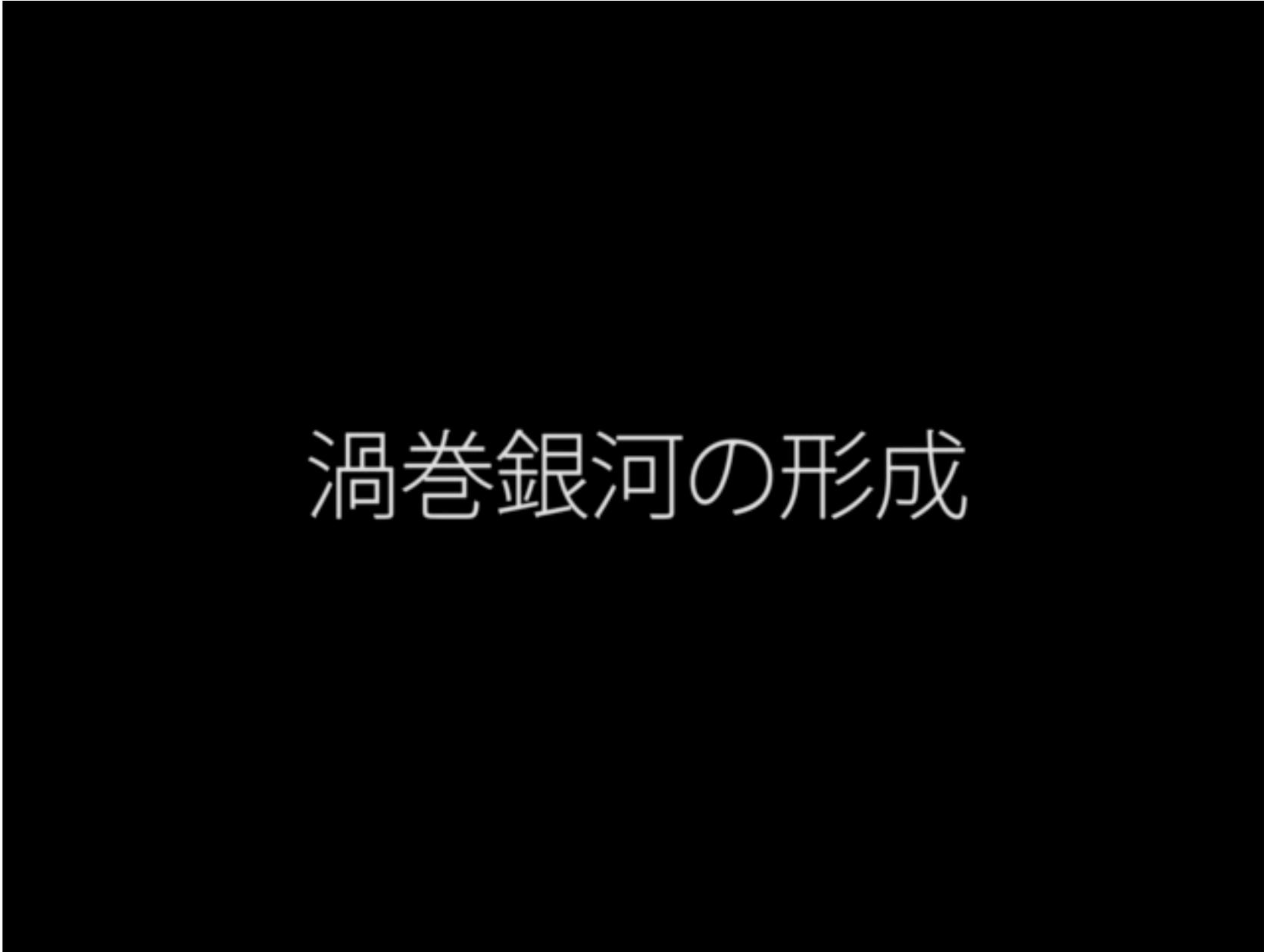
宇宙の大規模構造の形成・銀河の形成



<http://cosmicweb.uchicago.edu/gal.html>

12 sec

渦巻銀河の形成



<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/spiral1.html>

3 min

銀河系中心のブラックホール形成も謎

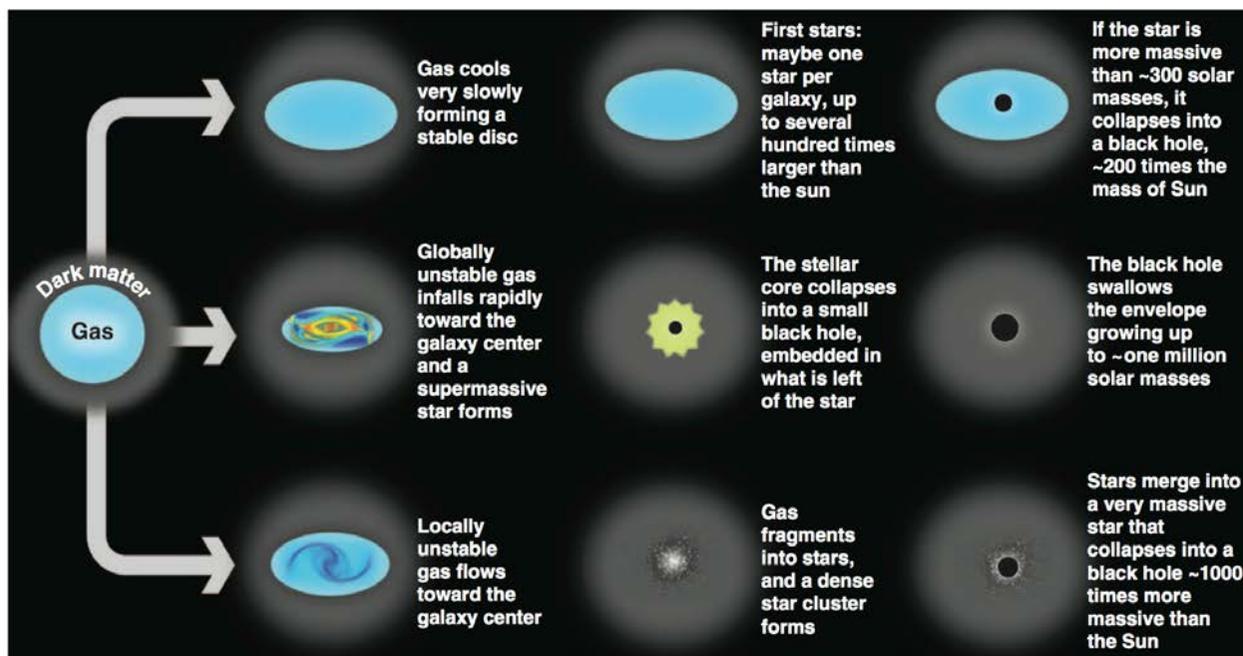


Fig. 1. Illustration showing three pathways to MBH formation that can occur in a distant galaxy (56). The starting point is a primeval galaxy, composed of a dark matter halo and a central condensation of gas. Most of this gas will eventually form stars and contribute to making galaxies as we know them. However, part of this gas has also gone into making a MBH, probably following one of these routes.

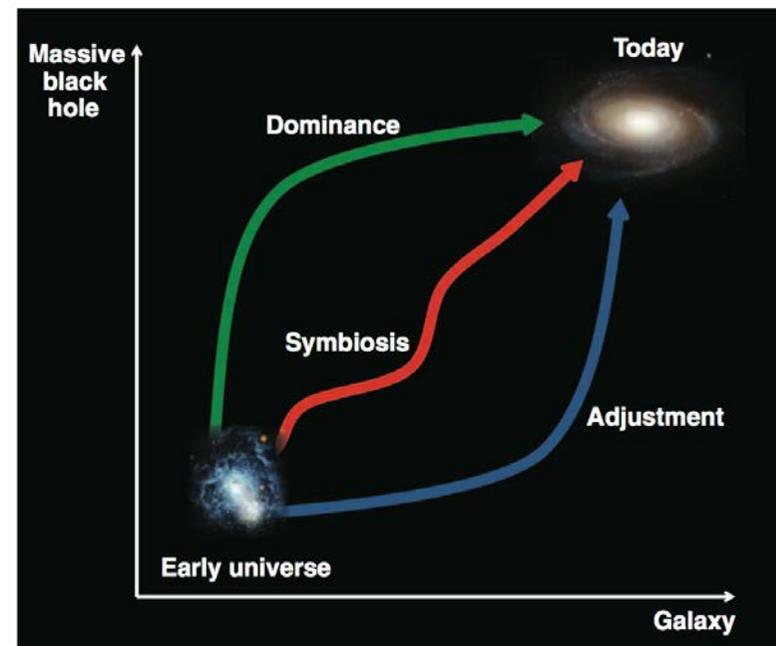


Fig. 3. Possible routes to MBH and galaxy coevolution, starting from black holes forming in distant galaxies in the early universe. [Image credits: NASA, European Space Agency (ESA), A. Aloisi (Space Telescope Science Institute and ESA, Baltimore, MD), and The Hubble Heritage Team (Space Telescope Science Institute/ Association of Universities for Research in Astronomy)]

REVIEW

The Formation and Evolution of Massive Black Holes

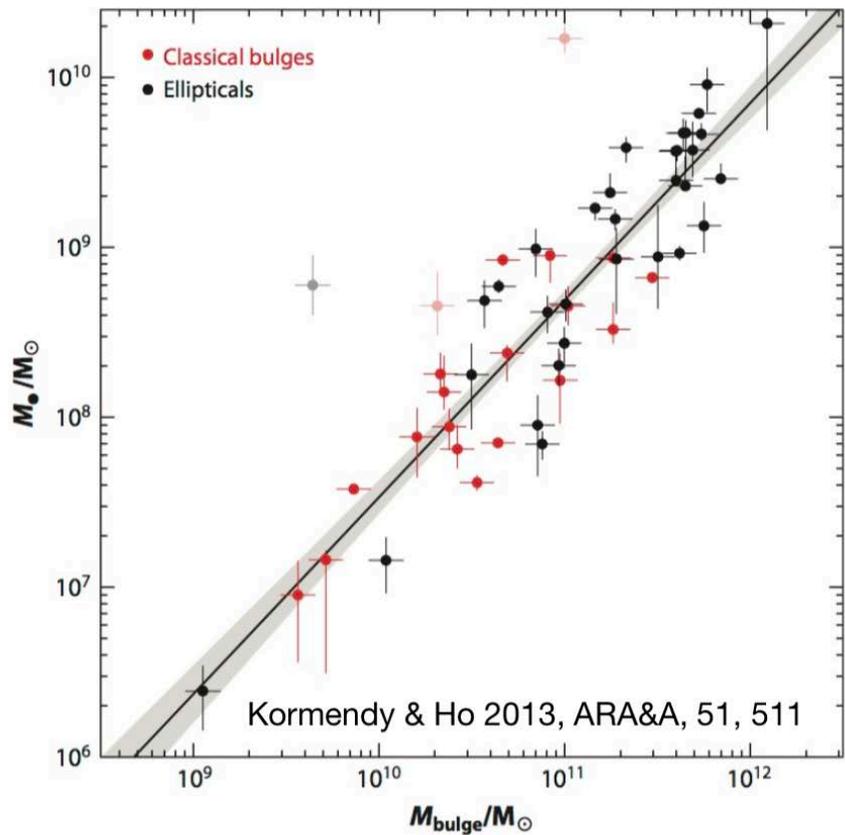
M. Volonteri^{1,2}

The past 10 years have witnessed a change of perspective in the way astrophysicists think about massive black holes (MBHs), which are now considered to have a major role in the evolution of galaxies. This appreciation was driven by the realization that black holes of millions of solar masses and above reside in the center of most galaxies, including the Milky Way. MBHs also powered active galactic nuclei known to exist just a few hundred million years after the Big Bang. Here, I summarize the current ideas on the evolution of MBHs through cosmic history, from their formation about 13 billion years ago to their growth within their host galaxies.

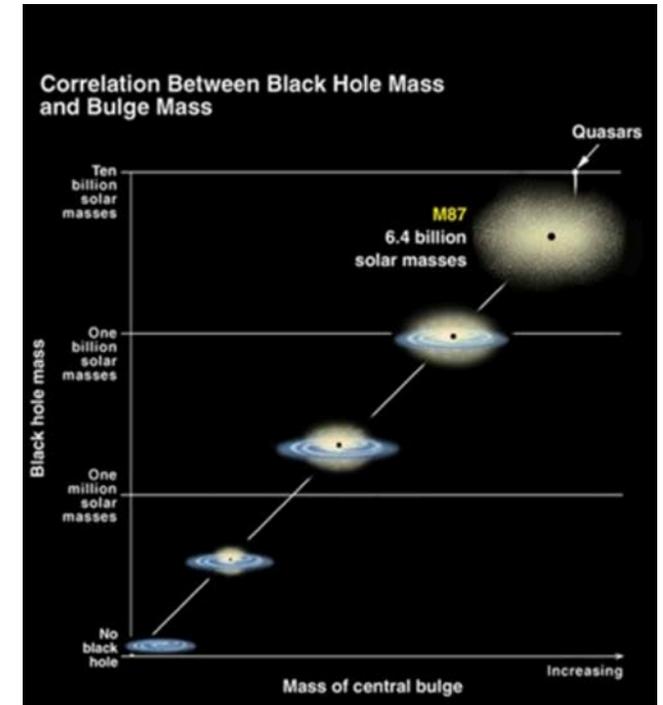
銀河が先で、中心BHが後？
中心BHが先で、銀河が後？

Volonteri, Science 337 (2012) 544

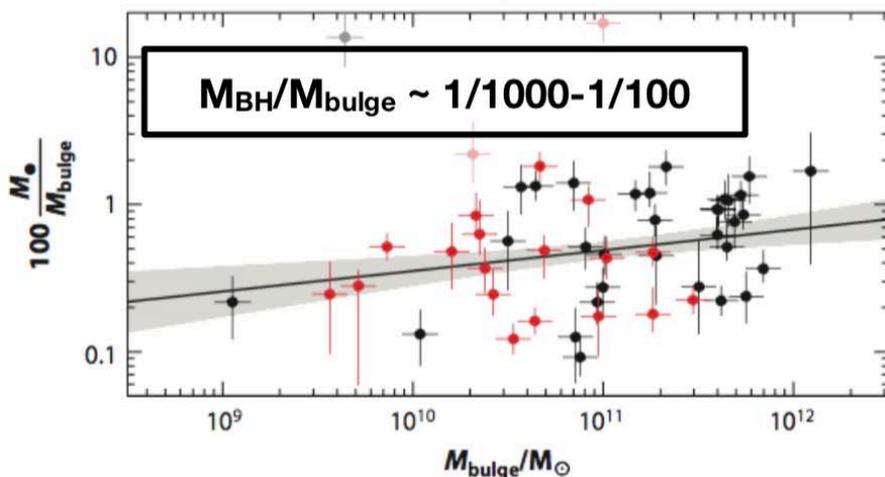
銀河系とブラックホールの共進化？



天の川 (Milky Way)



中心BHの質量 x 1000
 = バルジ部分の質量



銀河系とブラックホールの共進化？

→ 新たに星が誕生 → 明るく輝く → クェーサー (準星)

合体する



群が
できる



ディスク
できる
渦巻銀河

(c) Interaction/"Merger"



- now within one halo, galaxies interact & lose angular momentum
- SFR starts to increase
- stellar winds dominate feedback
- rarely excite QSOs (only special orbits)

(b) "Small Group"



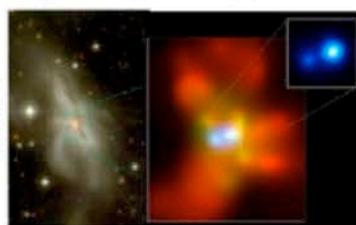
- halo accretes similar-mass companion(s)
- can occur over a wide mass range
- M_{halo} still similar to before: dynamical friction merges the subhalos efficiently

(a) Isolated Disk



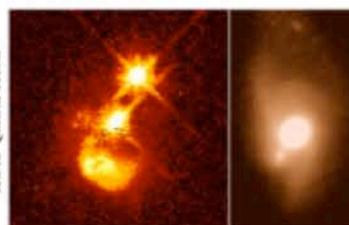
- halo & disk grow, most stars formed
- secular growth builds bars & pseudobulges
- "Seyfert" fueling (AGN with $M_{\text{BH}} > 23$)
- cannot redden to the red sequence

(d) Coalescence/(U)LIRG



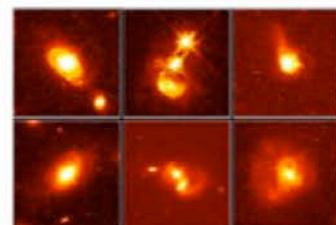
- galaxies coalesce: violent relaxation in core
- gas inflows to center: starburst & buried (X-ray) AGN
- starburst dominates luminosity/feedback, but, total stellar mass formed is small

(e) "Blowout"



- BH grows rapidly: briefly dominates luminosity/feedback
- remaining dust/gas expelled
- get reddened (but not Type II) QSO: recent/ongoing SF in host; high Eddington ratios; merger signatures still visible

(f) Quasar



- dust removed: now a "traditional" QSO
- host morphology difficult to observe: tidal features fade rapidly
- characteristically blue/young spheroid

(g) Decay/K+A

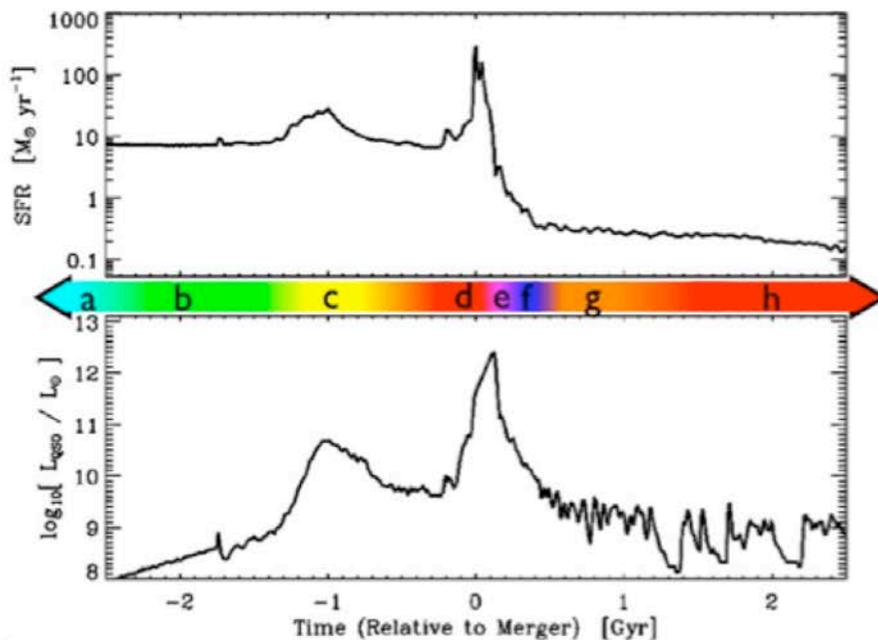


- QSO luminosity fades rapidly
- tidal features visible only with very deep observations
- remnant reddens rapidly (E+A/K+A)
- "hot halo" from feedback
- sets up quasi-static cooling

(h) "Dead" Elliptical



- star formation terminated
- large BH/spheroid - efficient feedback
- halo grows to "large group" scales: mergers become inefficient
- growth by "dry" mergers



Hopkins+, ApJS 175 (2008)356

燃え尽き



楕円銀河



銀河系中心のブラックホール形成も謎

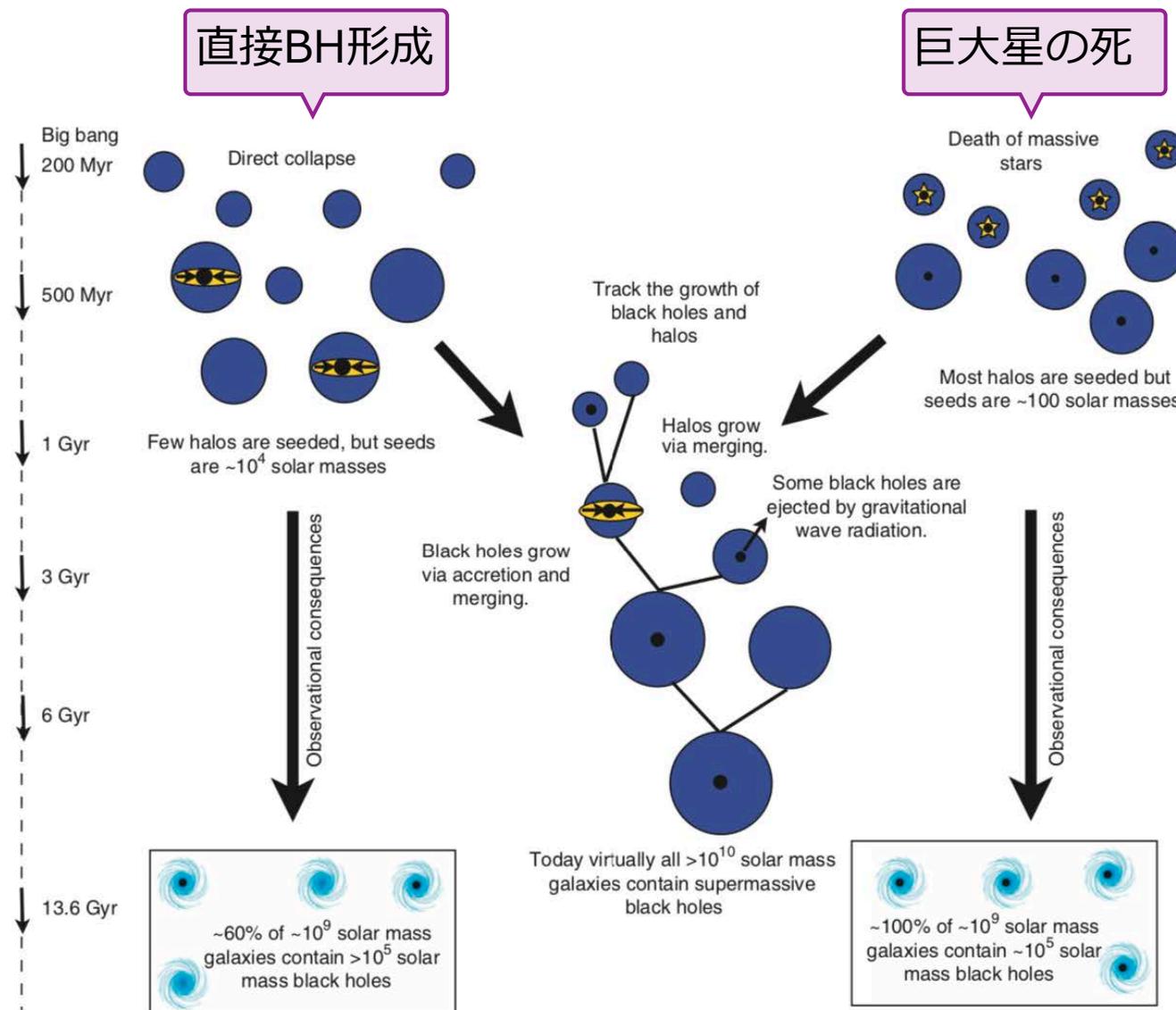
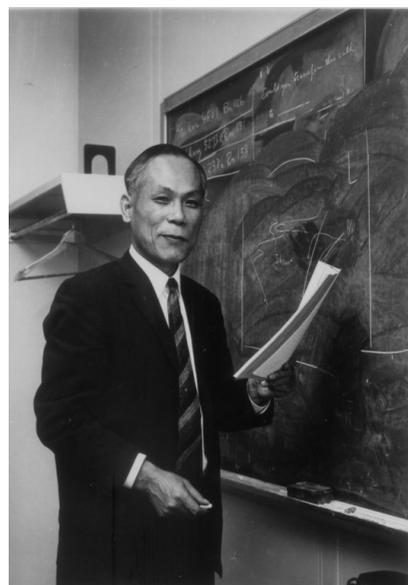


Figure 1 | Evolution of seed black holes. Schematic of the evolution of seed black holes assuming two different formation mechanisms (the death of the first generation of massive stars versus the direct collapse of gas into a black hole). Dark matter halos and the galaxies in them grow through merging. Black holes grow both via merging and by accreting gas. One additional complication is that after merging, gravitational radiation ‘recoil’ (see text for details) may send the black hole out of the galaxy. At present, we can distinguish between the two scenarios based on the fraction of small galaxies that contain massive black holes (we call this the ‘occupation fraction’).

Greene, Nature Comm. 3 (2012) 1304, DOI: 10.1038/ncomms2314

太陽系形成モデル



林忠四郎(1920-2010)
京都モデル

ほかの太陽系が説明
できない！

毎日新聞2019年3月28日

惑星はどうやってできる？

標準シナリオ(京都モデル)
1970~80年代に林忠四郎・京都大教授らが提唱

①新しく生まれた恒星の周囲をガスとちりが円盤状に取り巻く

恒星 原始惑星系円盤

②ちりが赤道面に集まり、微惑星を形成

微惑星

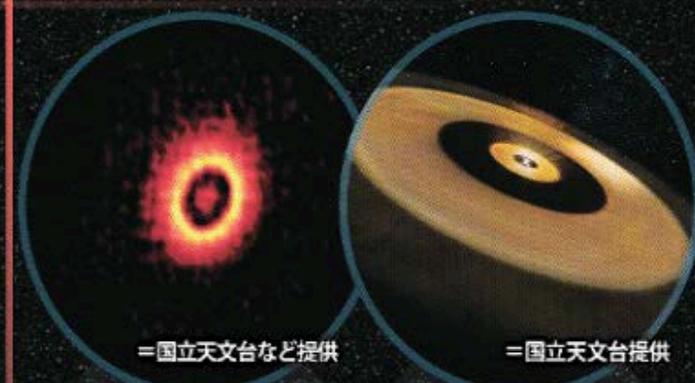
③微惑星の衝突、合体で岩石質の惑星が誕生

岩石質惑星

④質量の大きな惑星がガスを集め、巨大なガス惑星に

ガス惑星

⑤ガスが散逸



=国立天文台など提供

=国立天文台提供

アルマ望遠鏡が撮影した
おうし座DM星の原始惑星
系円盤

おうし座DM星の想像図

これまでわかってきた外側の
リングに加え、内側にぼんやり
としたリングが新たに見つ
かった

太陽系に当てはめると、中心
が太陽、内側のリングが小惑
星帯、外側のリングが天王星
の軌道に相当する

変わった惑星も
見つかり始めた



=米航空宇宙局提供

恒星のすぐ近くにある
巨大なガス惑星
「ホットジュピター」
の想像図

エキセントリック
プラネット
たぶん
細長い楕円軌道の惑星

グラフィック・松本隆之

ダストの合体成長 0.1 mm から 10 cmへの成長が難

4D2U

ダストの衝突合体成長
Collisional Growth of Dust

©2018 Koji Wada, Toru Suyama, Hidekazu Tanaka, Satoki Hasegawa, 4D2U Project, NAOJ

<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/DustGrowth.html>

https://www.youtube.com/watch?time_continue=11&v=kNNyuB4VzoM

3 min

結局，まだまだわかっていない

宇宙のはじまり = 素粒子

星の形成

塵がつもって岩石惑星になれない？

惑星系の形成

太陽系外惑星系もさまざま

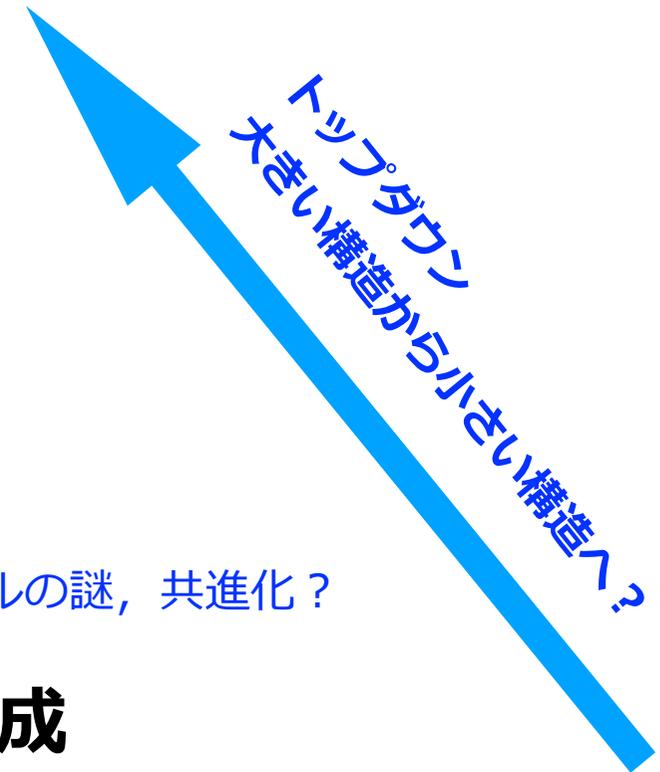
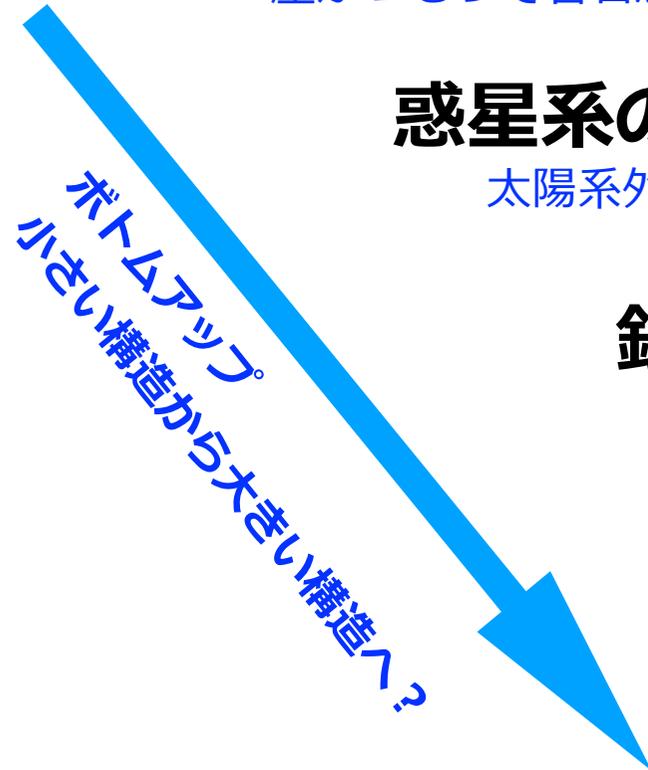
銀河系の形成

銀河中心ブラックホールの謎，共進化？

銀河団の形成

宇宙誕生後4億年で銀河？

大規模構造の形成



宇宙はどこまで解明されたか

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

真貝寿明（しんかい ひさあき）

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員



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