

宇宙はどこまで解明されたか

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

眞貝 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.

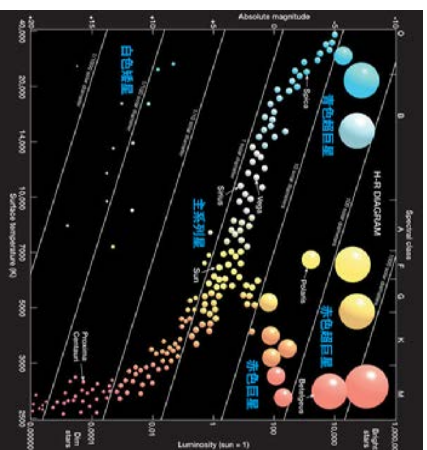
2019 June 17



Milky Way over Pyramid of the Feathered Serpent

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

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

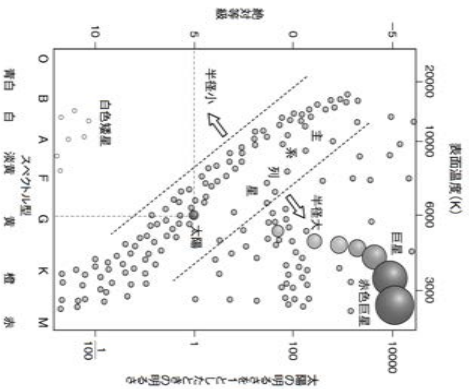


星の表面温度 (高い→低い)

<http://img-cdn.jp.jugem.jp/>
<https://kotobank.jp/> <https://ja.wikipedia.org/>

眞貝 寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第3回】銀河系の話 2019/6/27 毎日文化センター(編田)

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



星の例	温度	最も明るい波長
オリオン3つ星	>3000 K	<500nm (紫外線)
シリウス	30000-10000 K	約200nm (紫外線)
シリウス	10000-7000 K	約300nm (紫外線)
北極星	7000-6000 K	390-490nm (紫)
太陽	6000-5000 K	480-580nm (青)
アルファケンタウリ	5000-3000 K	580-830nm (赤)
ベテルギウス	<3000 K	700-900nm (赤外線)
カペラ	約5000 K	約450nm (青)

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.

眞貝 寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第3回】銀河系の話 2019/6/27 毎日文化センター(編田)

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。物理学がそぞろ始めた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はいた。(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」という説を考えただが、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、太陽内部での元素からヘリウムへの核融合の可能性を指摘している。太陽が元素でみだされることが1925年におかり、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。

このユウムのダイトルにした疑問はよく科学館に答せられる質問だそうだが、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

星が燃える話

$$E=mc^2$$

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、

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

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！

星が燃える話

アインシュタイン：特殊相対性理論(1905年)

- 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。

- 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.....

- 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ぬ。

3次元空間+時間=4次元時空 で物理を考えよう



星が燃える話：原子核反応(1)

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

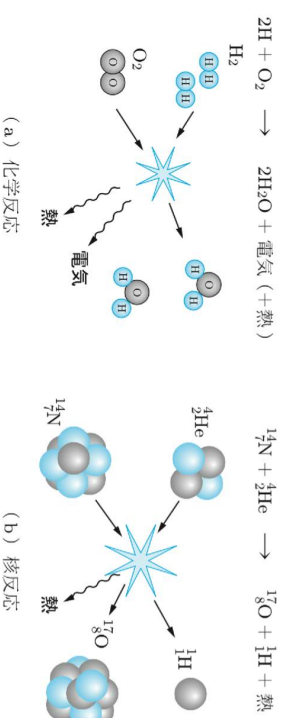
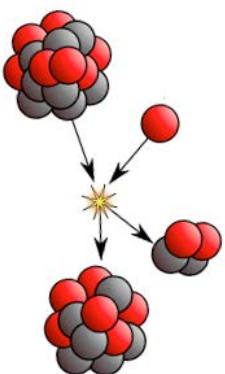
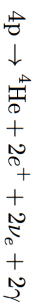
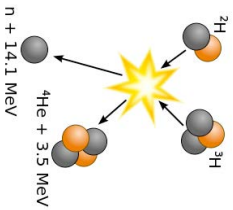


図3.14: 化学反応は実験室レベル、核反応は、原子爆弾や水素爆弾、原子力発電や太陽の中心、エネルギーレベルがまったく異なる。

核融合 と 核分裂



核融合

(nuclear fusion)

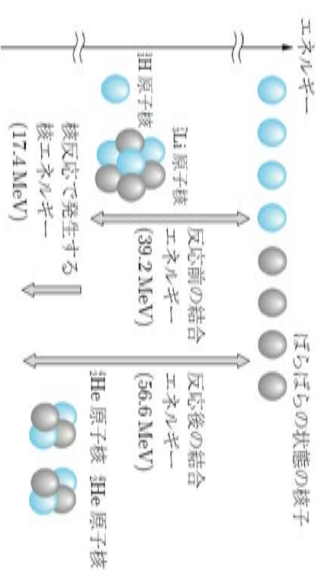
合体した方が安定
(エネルギー放出)

核分裂

(nuclear fission)

分裂した方が安定
(エネルギー放出)

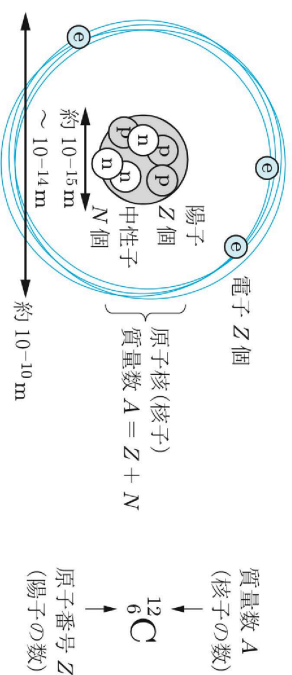
結合エネルギー



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

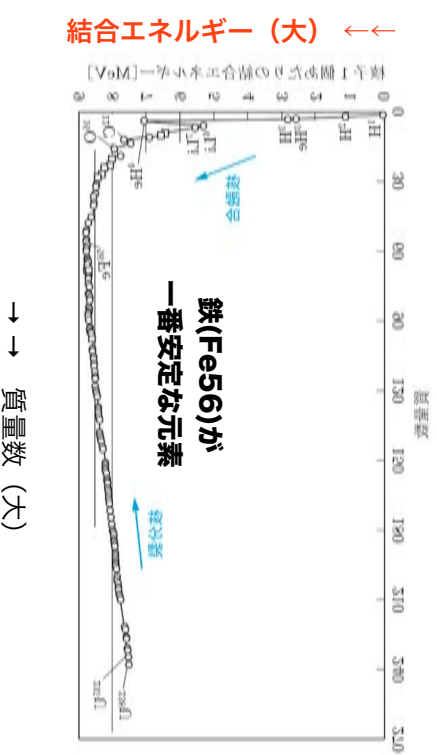
復習

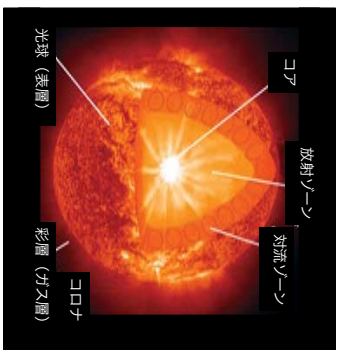
原子 = 原子核 (中性子 + 陽子) + 電子



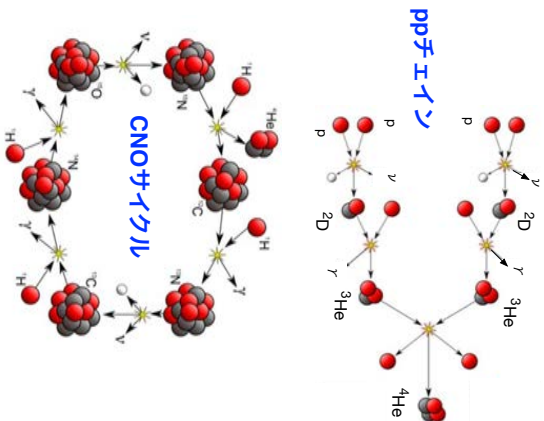
	記号	電荷	質量	質量比
陽子	p	+1	$1.67262158 \times 10^{-27}$ kg	1836.15
中性子	n	0	$1.67492735 \times 10^{-27}$ kg	1838.68
電子	e	-1	$9.10938188 \times 10^{-31}$ kg	1

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？





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



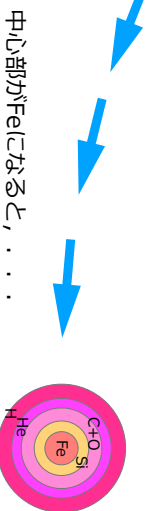
周期表 (periodic table)

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から炭素C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)

宇宙の始まりは素粒子。

だんだんと冷えるにしたがって水素 (H)が形成。

集まって星ができ、核融合で恒星になる。

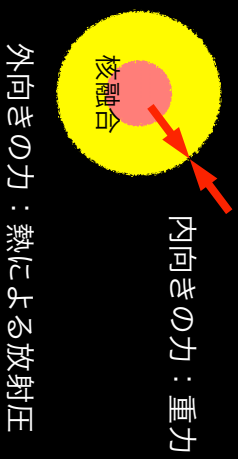
しかし、核融合は、鉄(Fe)までしか進まない。

現在、周期表に Fe より重い元素があるのは何故か？

超新星爆発で作られた！

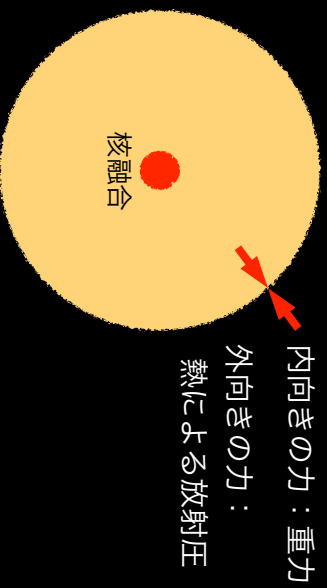
連星中性子星の合体で作られた！

超新星爆発のしくみ (1) 星の燃焼



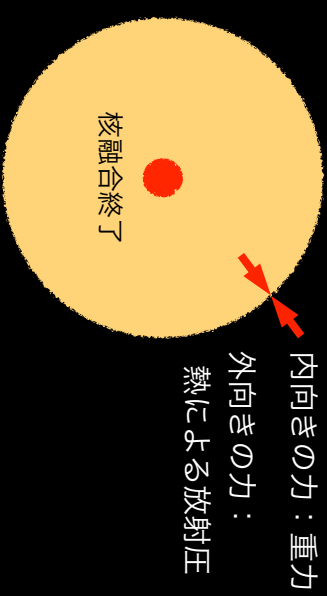
*現在の太陽：水素がヘリウムに核融合
*放射圧=重力 となるので星の半径が決まる

超新星爆発のしくみ (2) 星の燃焼の最期



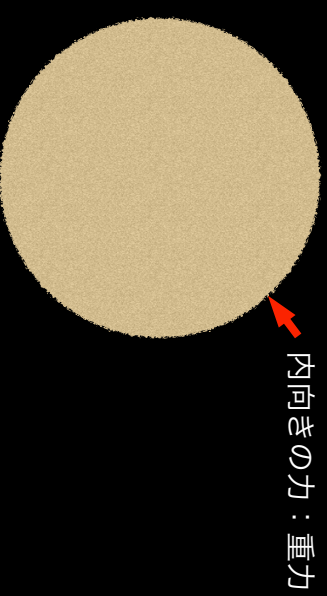
*核融合反応で質量をエネルギーに変換し続けると、
軽くなるので重力が弱くなる。
*放射圧=重力 となるので星の半径が決まる

超新星爆発のしくみ (3) 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

超新星爆発のしくみ (4) 収縮する



*収縮が始まる

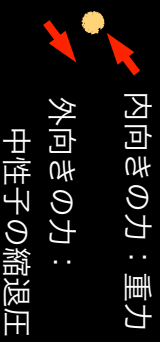
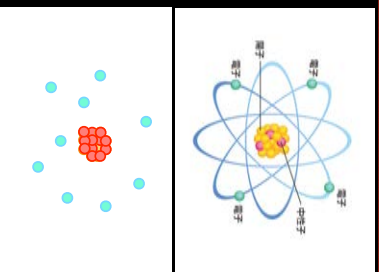
超新星爆発のしくみ (5) 収縮後の運命1



*密にな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

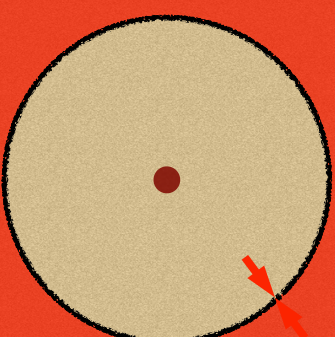


超新星爆発のしくみ (5) 収縮後の運命2



*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年ツヴァイツキーの考え

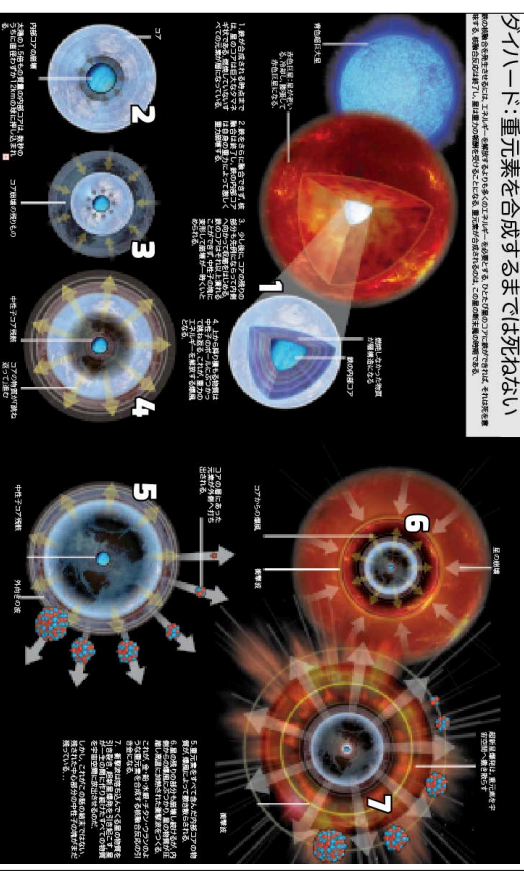
超新星爆発のしくみ (6) さらに降り積ると...



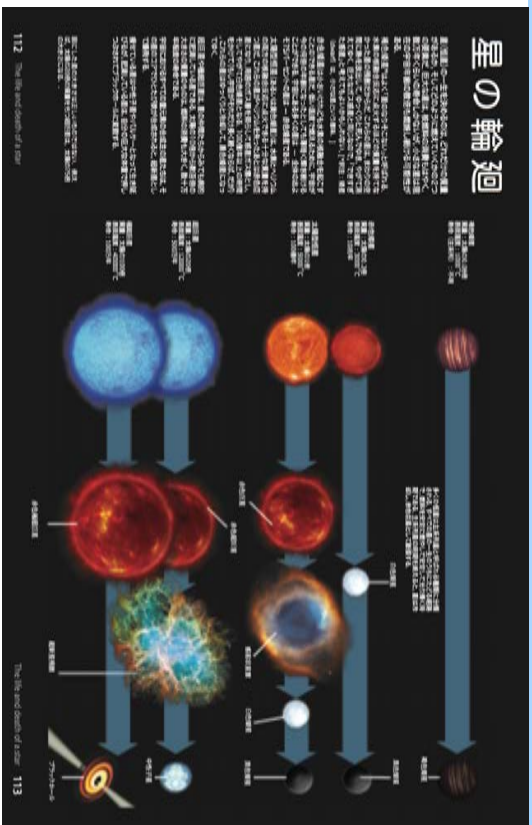
内向きの力：重力
 外向きの力：中性子の縮退圧
 硬い殻ができる

*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



星の輪廻



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

眞貝啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第3回】 構造形の名

26

周期表 (periodic table)

宇宙の始まりは素粒子。
だんだんと冷えるにしたがって水素 (H) が形成。
集まって星ができ、核融合で恒星になる。
しかし、核融合は、鉄 (Fe) までしか進まない。

現在、周期表に Fe より重い元素があるのは何故か？

超新星爆発で作られた！

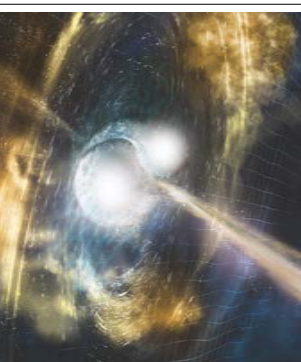
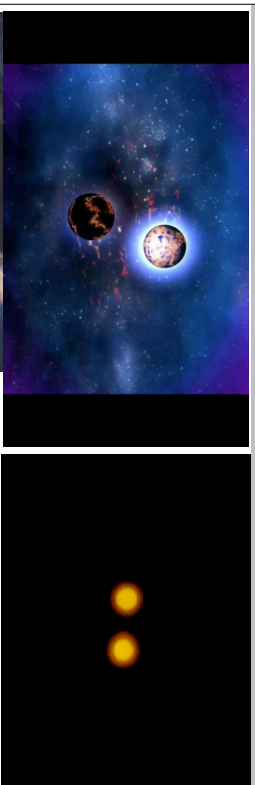
連星中性子星の合体で作られた！

眞貝啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第3回】 構造形の名

27

GW170817

連星中性子星合体 重力波検出、多くの天文台が同時観測



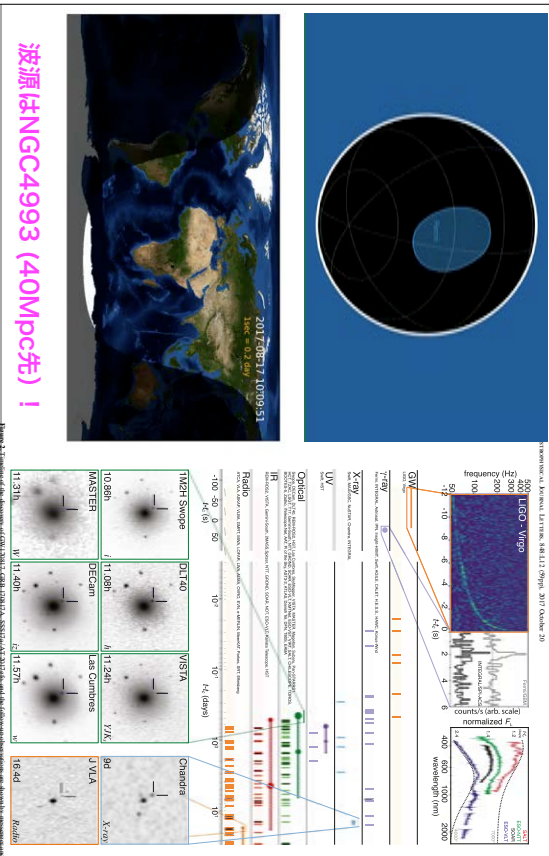
眞貝啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第3回】 構造形の名

2019/6/27 毎日文化センター（編）

28

GW170817

連星中性子星合体 重力波検出、多くの天文台が同時観測

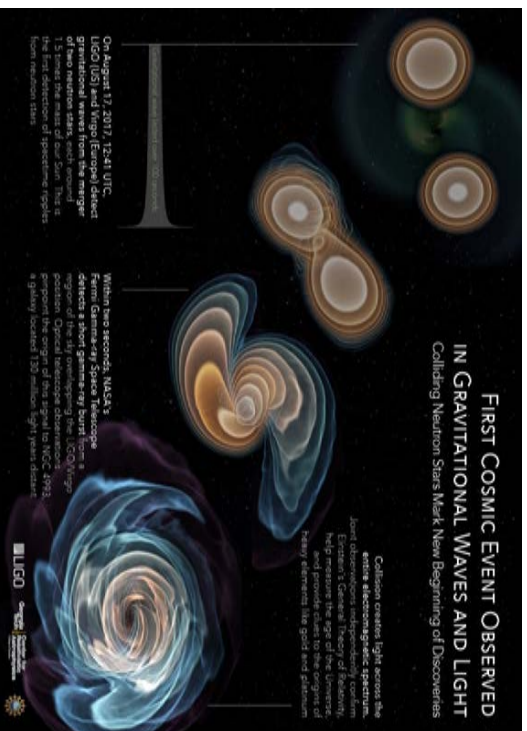


眞貝啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第3回】 構造形の名

2019/6/27 毎日文化センター（編）

29

連星中性子星合体 重力波検出、多くの天文台が同時観測



真田啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第30回】構造形成の話 2019/6/27 毎日文化センター(株)

30

構造形成の話

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。

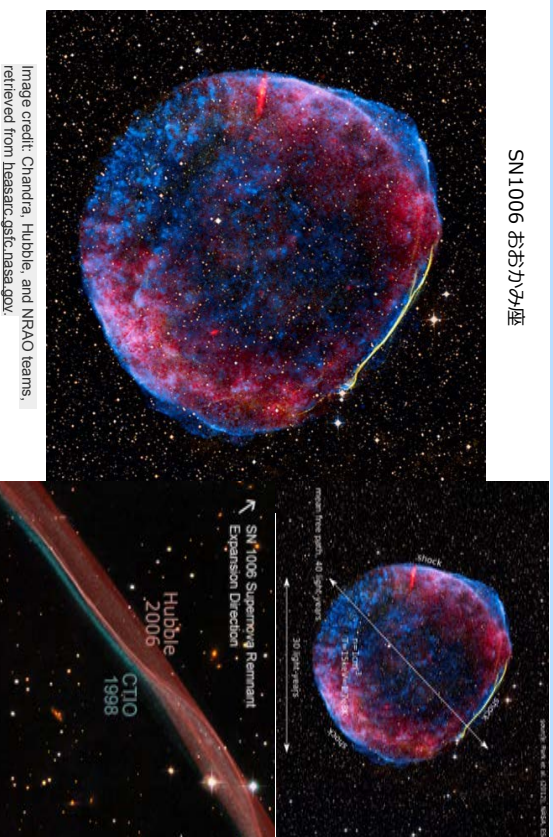
真田啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第30回】構造形成の話 2019/6/27 毎日文化センター(株)

32

構造形成の話

超新星爆発の後

SN1006 おおかみ座



真田啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第30回】構造形成の話 2019/6/27 毎日文化センター(株)

31

一般相対性理論

「空間が歪むことが重力の正体である」
強い重力場での時空の力学

特殊相対性理論

「時間の進み方は観測者によって異なる」
光の速さに近い場合の力学

ニュートン力学

$$F = ma$$

真田啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第30回】構造形成の話 2019/6/27 毎日文化センター(株)

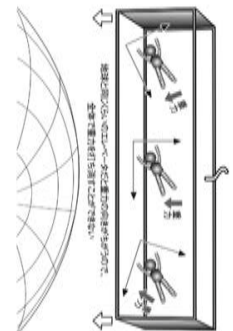
33

アインシュタイン：一般相対性理論 (1915年)

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いいたろうか。

エレベーターとなった考え：

自由落下するエレベーター内では、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。



結論：重力の正体は、時空の歪みである。



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)

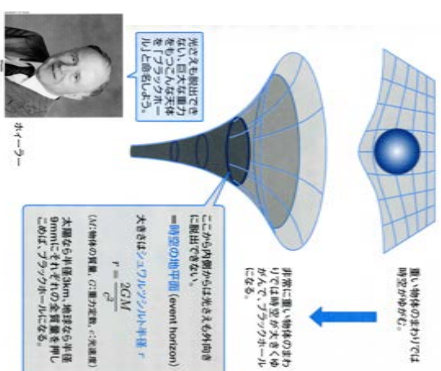
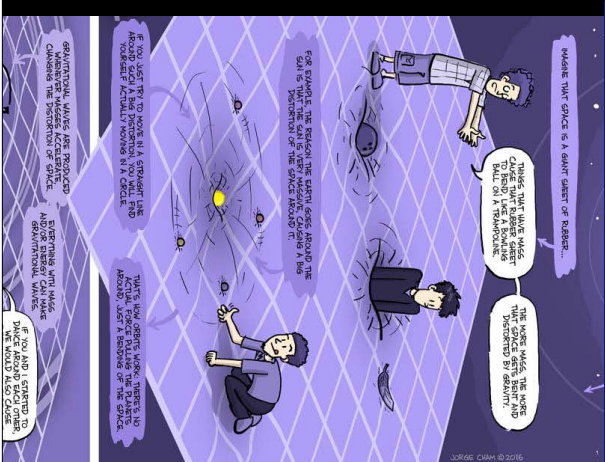


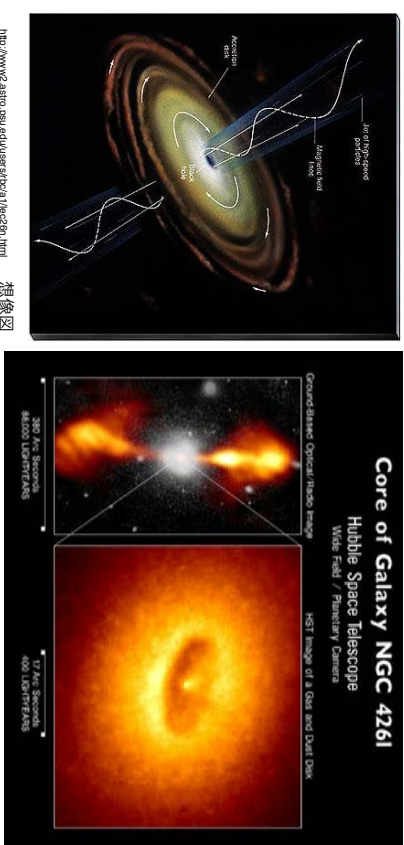
表 4.1: シュワツシルト半径 (別記するブラックホールの大きさ)、質量 M の物体がどの位の半径 R_{Sch} に押し込まれたらブラックホールになるか、という目安。Sgr A* は我々の銀河中心の超巨大ブラックホール。

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

フラクタルホール

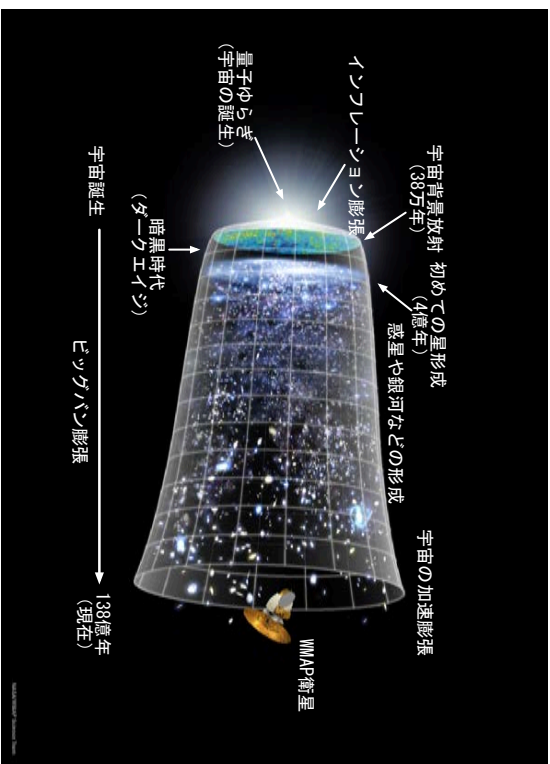


天文学的には、ブラックホールは光源



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)



真岡啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第30回】構造形成の話 2019/6/27 毎日文化センター(編田)

初代星の形成モデルはまだ不明

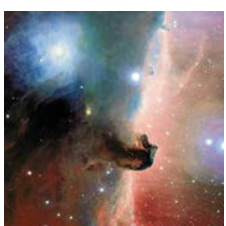
原始惑星円盤内: 塵 → 微惑星 → 原始惑星 → 惑星

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.



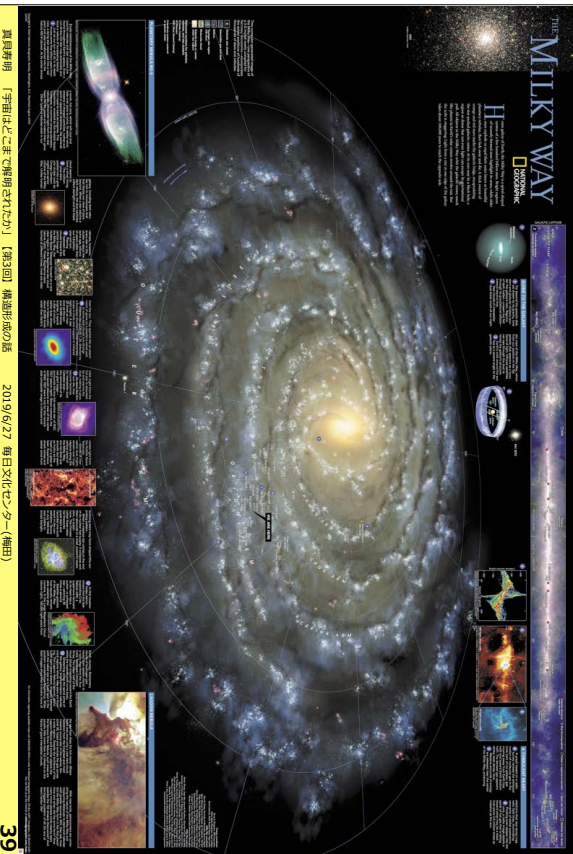
観測されていない. 本当にあるのか?

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.

真岡啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第30回】構造形成の話 2019/6/27 毎日文化センター(編田)

銀河系形成の謎



真岡啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第30回】構造形成の話 2019/6/27 毎日文化センター(編田)

最遠の電波銀河を発見 128億光年先

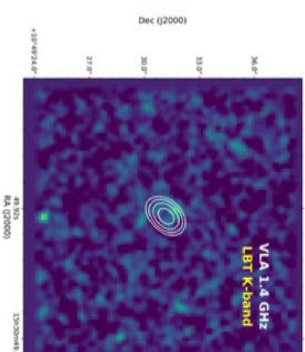
【ニューズ報道から】 Discovery of a radio galaxy at $z=5.72$

2018/8/13

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、イントの巨大メーソル波電波望遠鏡 (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 JTGSS 11530+10491 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・アリゾナ州の大双筒望遠鏡 (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.astronarts.co.jp/article/h/a/10104_1gss



Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Advance Access publication 2018 August 6

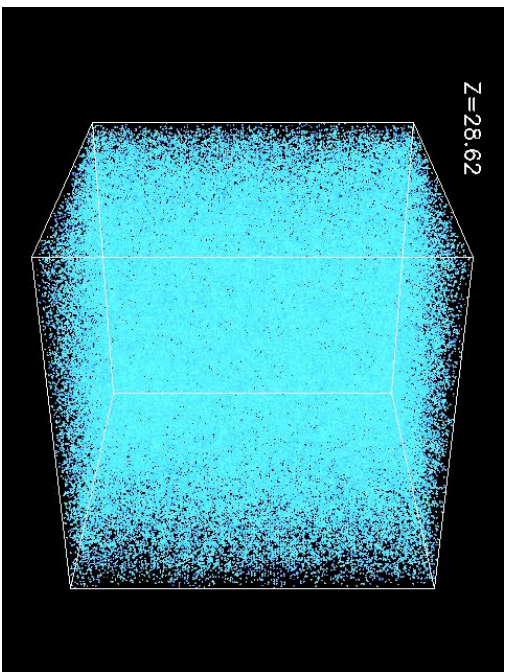
Discovery of a radio galaxy at $z = 5.72$

A. Scaife,^{1*} M. Matthee,^{1,2} R. A. Overzier,³ P. N. Best,¹ H. J. A. Rottgering,¹ K. J. Duncan,¹ J. P. Farnham,¹ L. J. Greenhill,¹ M. Maguire-Smith,¹ D. Park, F. Owsano,² F. Marchi,¹ H. T. Intema, and G. K. Mooley

<https://academic.oup.com/mnras/article/480/2/2727/3506727>

真岡啓明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第30回】大規模外銀河系 2019/9/28 毎日文化センター(編田)

宇宙の大規模構造の形成・クイラメントの形成



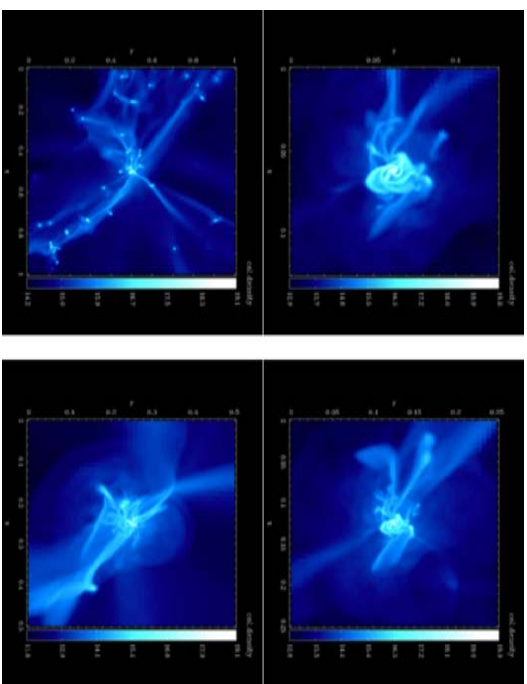
<http://cosmicweb.uchicago.edu/filaments.html>

眞原 寿明 「宇宙はどこまで構形成はわたり」 (第30回) 構造形成の底

2019/6/27 毎日文化センター(株田)

9sec

宇宙の大規模構造の形成・銀河の形成



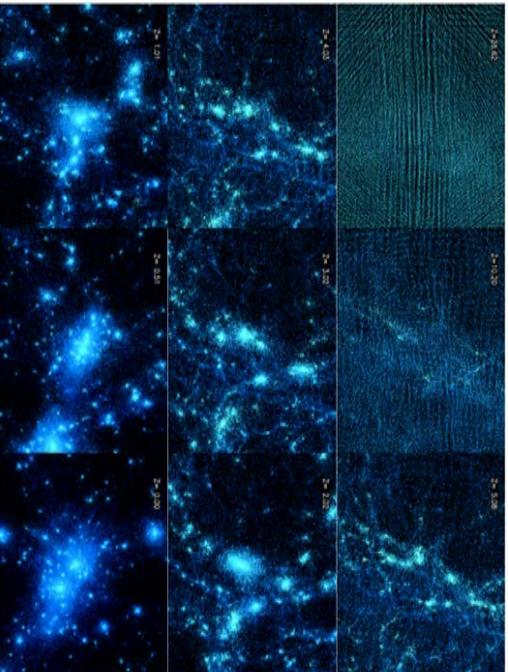
<http://cosmicweb.uchicago.edu/gal.html>

眞原 寿明 「宇宙はどこまで構形成はわたり」 (第30回) 構造形成の底

2019/6/27 毎日文化センター(株田)

12 sec

宇宙の大規模構造の形成・銀河群の形成



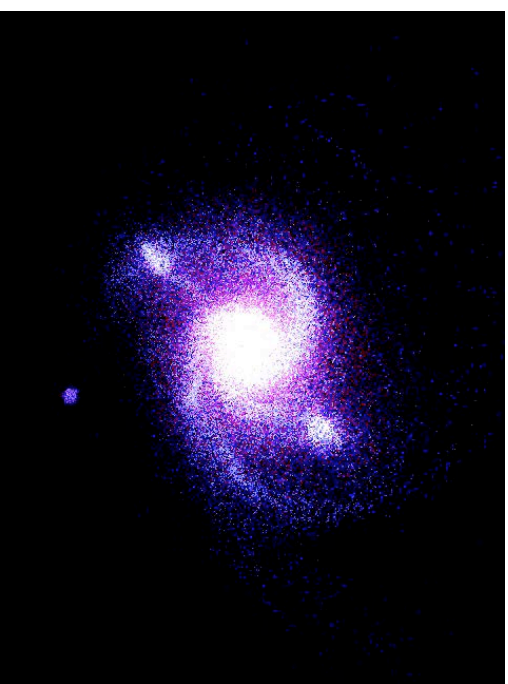
<http://cosmicweb.uchicago.edu/group.html>

眞原 寿明 「宇宙はどこまで構形成はわたり」 (第30回) 構造形成の底

2019/6/27 毎日文化センター(株田)

9sec

宇宙の大規模構造の形成・銀河の形成



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

眞原 寿明 「宇宙はどこまで構形成はわたり」 (第30回) 構造形成の底

2019/6/27 毎日文化センター(株田)

12 sec

