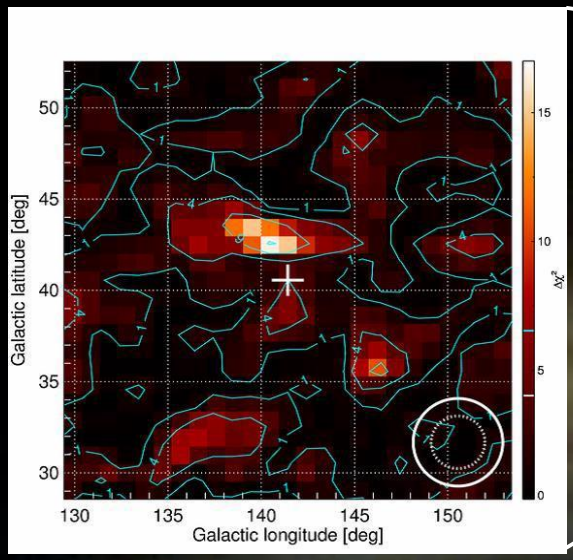
元素の起源を探る

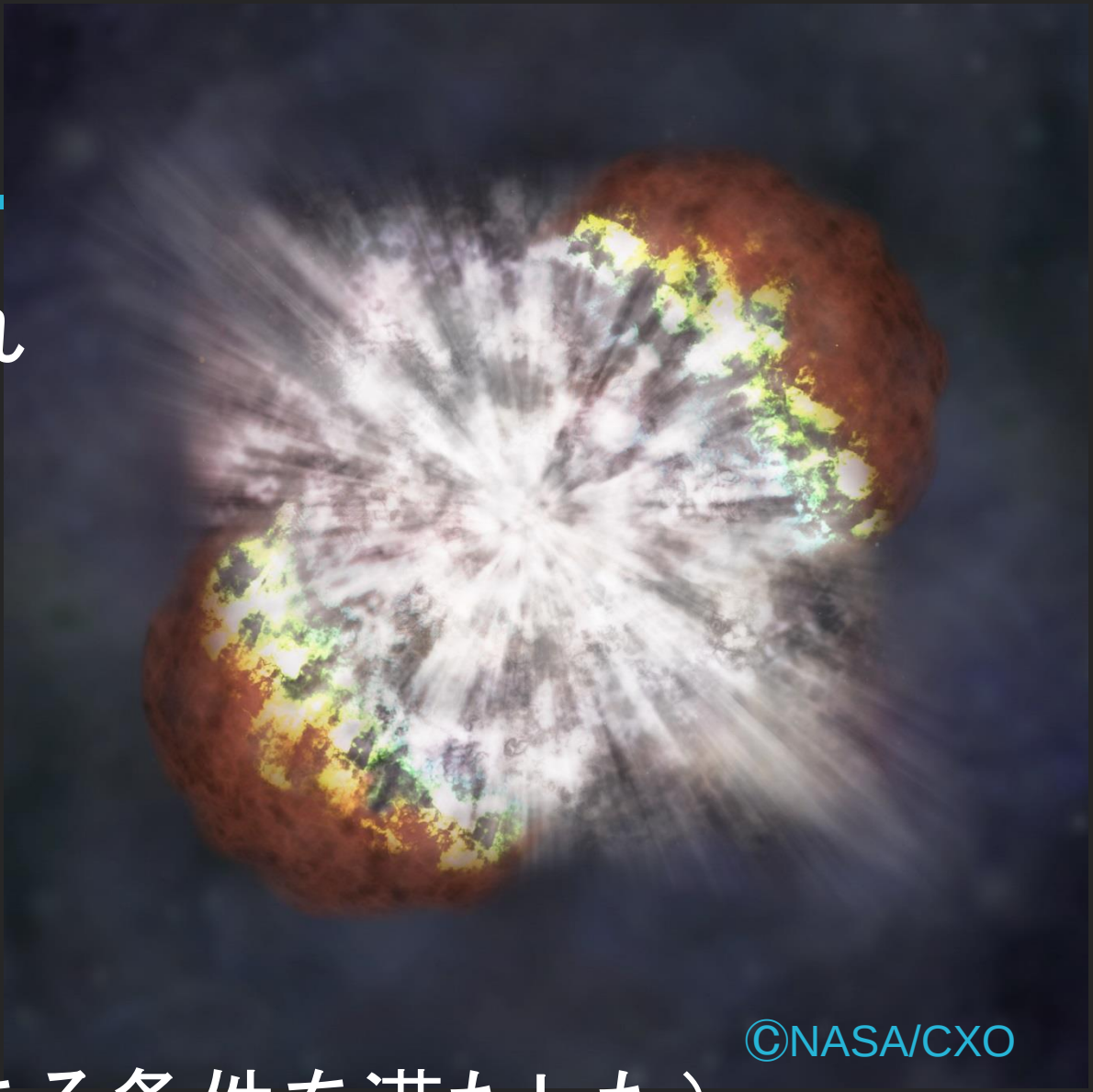


前田　啓一

京都大学　理学研究科　宇宙物理学教室

超新星爆発

夜空に突然現れる天体(「星」)



現在の理解:(ある条件を満たした)星の生涯最期の大爆発

なぜ星・超新星の研究？

- 星の終末の進化はわかっていない。
  - 宇宙の”最小成単位”。
  - 星の理解なしに宇宙は理解できない。
- 超新星爆発は地上で実現できない極限的状況。
  - 地上実験ではできない物理法則の検証。
- 元素などの宇宙の構成要素の起源。
  - 超新星がなければ現在の宇宙はあり得ない。
  - 回り巡って生命の起源。
  - 超新星の理解なしに宇宙の進化は理解できない。
- 明るいので宇宙遠方でも見える。宇宙論・進化。

人間をつくる元素（60キログラムの人）

元素	記号	量	元素	記号	量
酸素	O	38 kg	ナトリウム	Na	95 g
炭素	C	12 kg	塩素	Cl	92 g
水素	H	6 kg	マグネシウム	Mg	39 g
窒素	N	1.8 kg	鉄	Fe	4.5 g
カルシウム	Ca	1.2 kg	フッ素	F	4.2 g
リン	P	720 g	亜鉛	Zn	2.1 g
硫黄	S	145 g	ケイ素	Si	1.2 g
カリウム	K	130 g	その他		1 g以下

厚生労働省：日本人の食事摂取基準（2010年版）

6　ミネラル

6．1．多量ミネラル　p189～217

ナトリウム：p189～191(PDF:308KB)、カリウム：p192～194(PDF:306KB)

カルシウム：p195～198(PDF:311KB)、

マグネシウム：p199～200(PDF:379KB)、リン：p201～203(PDF:406KB)

参考文献：p204～212(PDF:327KB)、表：p213～217(PDF:308KB)

6．2．微量ミネラル　p218～275

鉄：p218～226(PDF:549KB)、亜鉛：p227～230(PDF:454KB)

銅：p231～233(PDF:431KB)、マンガン：p234～236(PDF:431KB)

ヨウ素：p237～241(PDF:436KB)、セレン：p242～246(PDF:642KB)

クロム：p247～249(PDF:432KB)、モリブデン：p250～252(PDF:529KB)

参考文献：p253～267(PDF:476KB)、表：p268～275(PDF:487KB)

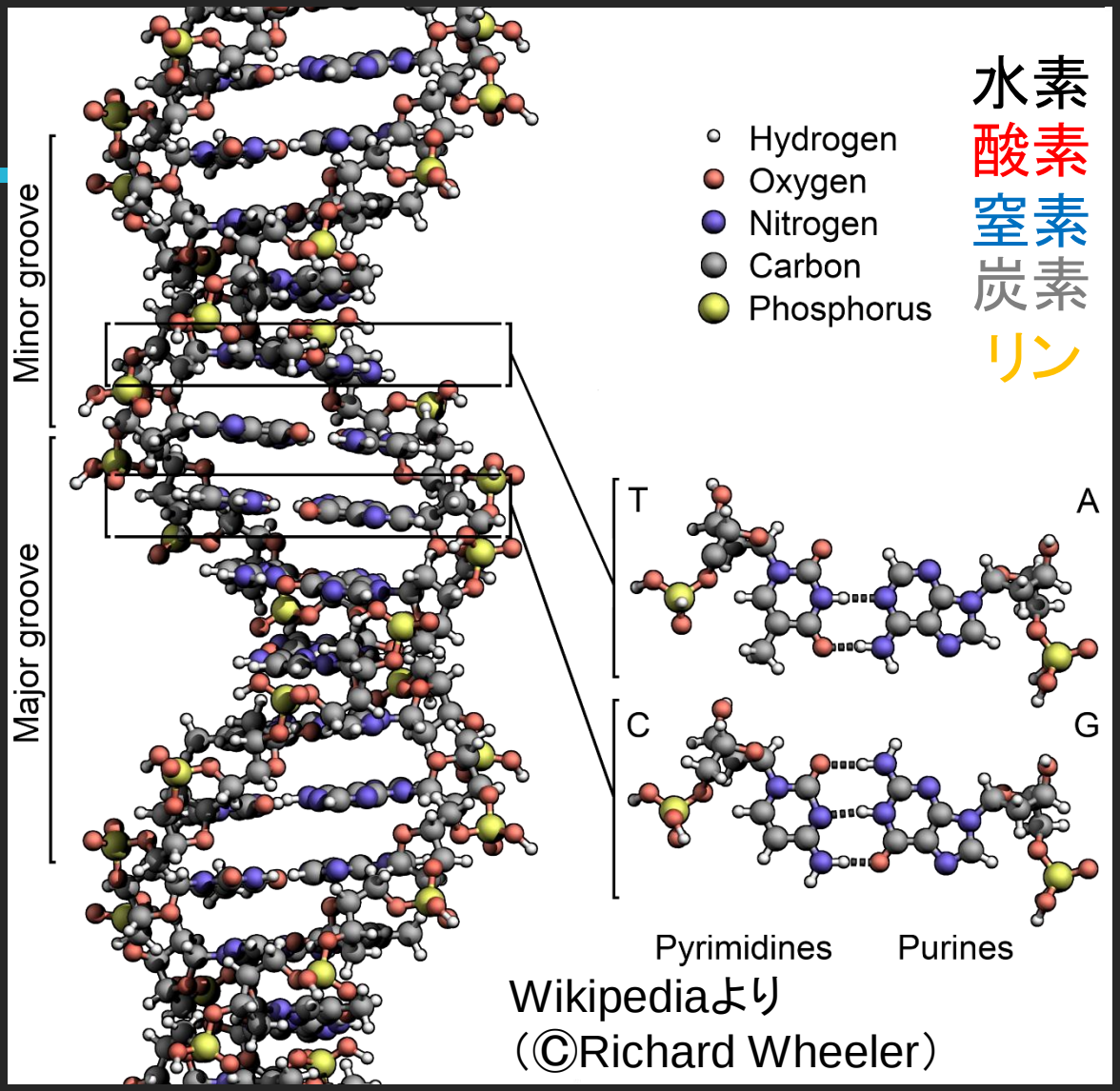
例えば

鉄（Fe）欠乏：貧血や運動機能、認知機能等の低下など。

亜鉛（Zn）欠乏：皮膚炎、味覚障害、慢性下痢など。

ただし、とりすぎも良くない。

生命のもと



Wikipediaより
（©Richard Wheeler）

様々な元素⇒さまざまな元素の組み合わせ
⇒複雑な機能をもつ生命

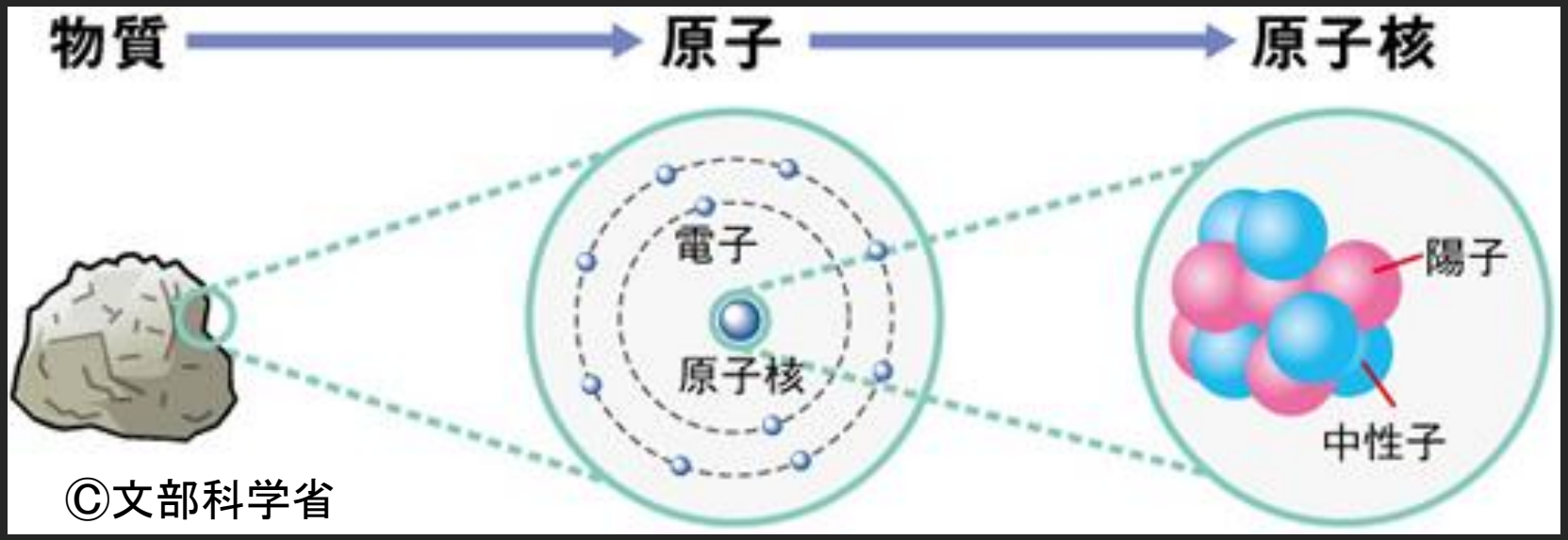
地球をつくる元素（6×10^{24}kg=6億×億×億kg）

元素	記号	量（質量比）
酸素	O	46.6 %
ケイ素	Si	27.7 %
アルミニウム	Al	8.1 %
鉄	Fe	5.0 %
カルシウム	Ca	3.6 %
ナトリウム	Na	2.8 %
カリウム	K	2.6 %
マグネシウム	Mg	2.1 %

⇒さまざまな元素が人間の生活に不可欠

元素とは？

（古くは）それ以上分割できない、物質の最小構成単位。



中性子（中性）と陽子（＋の電荷）からなる原子核。

異なる陽子の数⇒異なる元素。中性子数~陽子数。

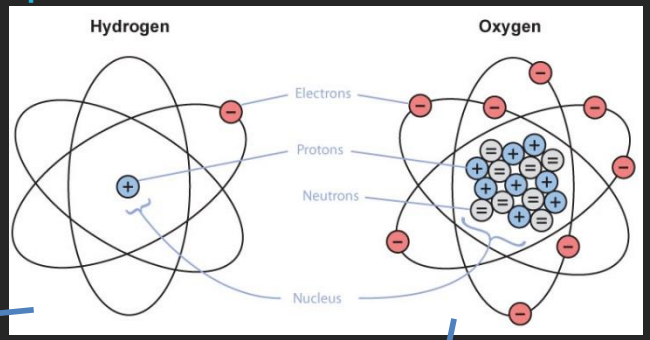
陽子1個＝水素、陽子26個＝鉄

「通常の状況では」変化しない（作れない、壊れない）。

水素原子（陽子1個）が億×億×億個で1グラムの水素。

http://www.createtodiscover.com/

様々な元素（周期表）



水素

酸素

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 --	111 --	112 --		114 --		116 --		118 --

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

© NASA

宇宙の進化

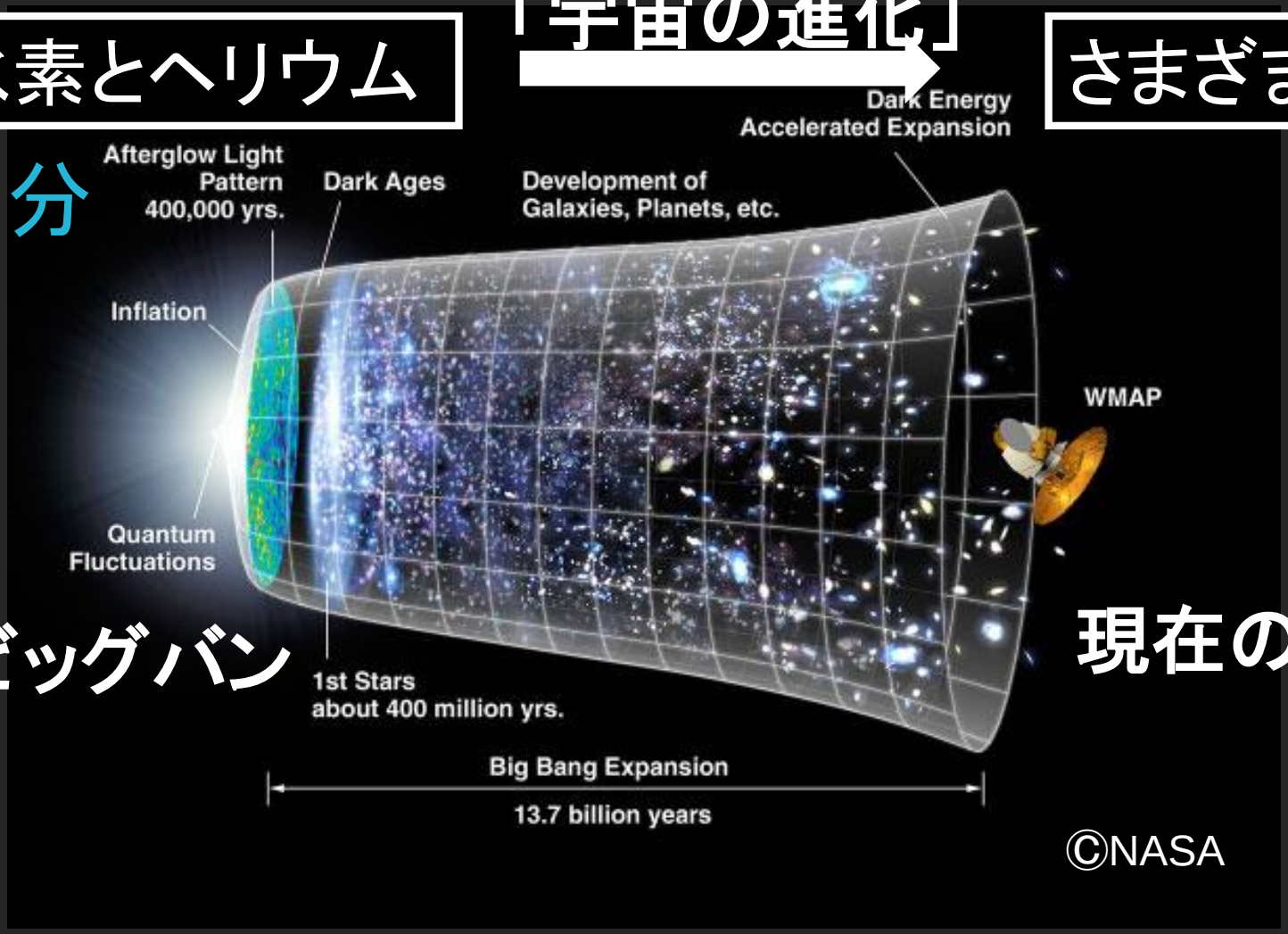
水素とヘリウム

「宇宙の進化」

さまざまな元素

3分

138億年



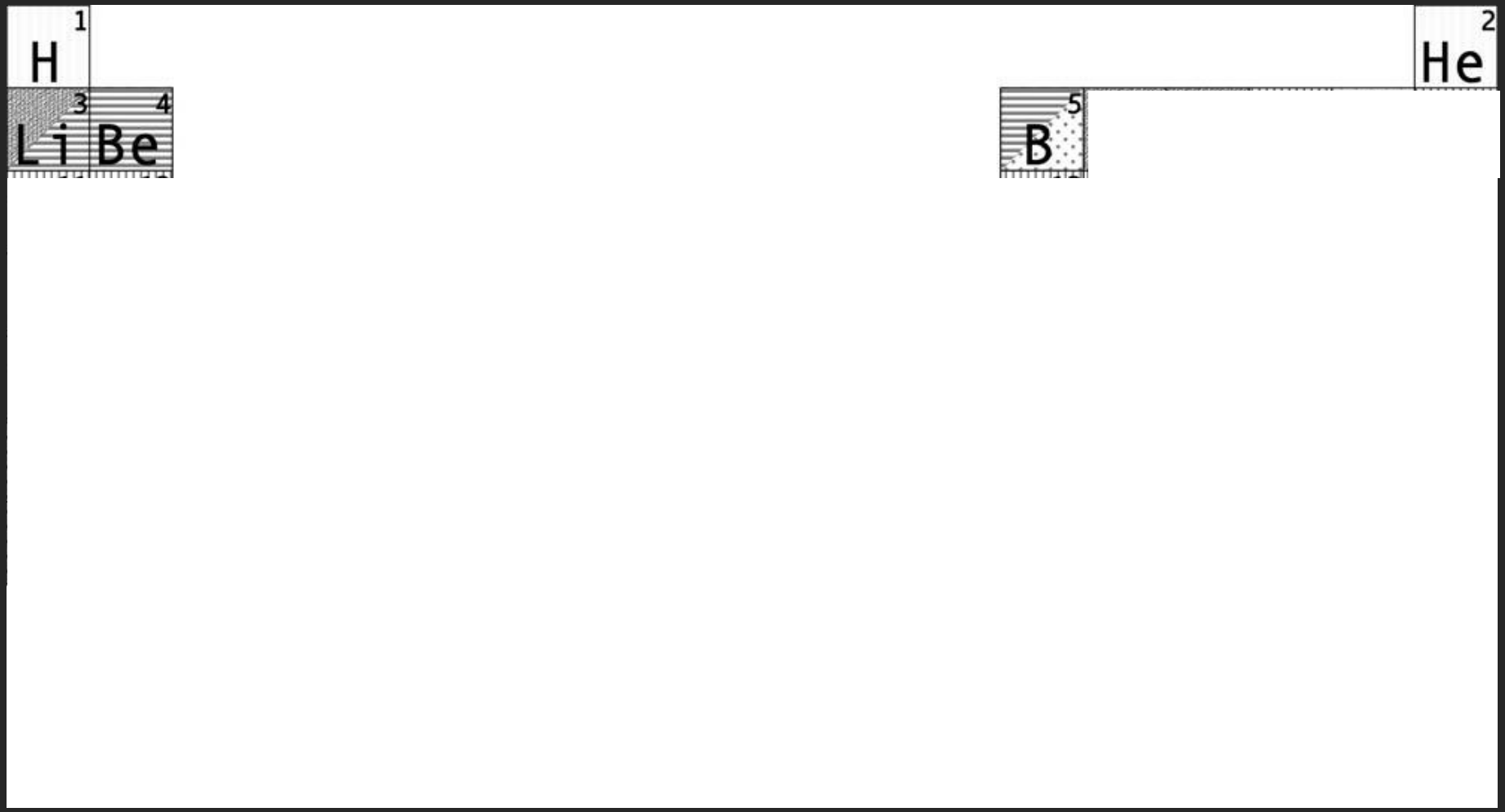
ビッグバン

現在の宇宙

©NASA

時間

ビッグバン直後の元素周期表



現在の元素周期表

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 --	111 --	112 --		114 --		116 --		118 --

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

元素の起源と宇宙・銀河の進化

金…

中性子星
ブラックホール

星間ガス

分子雲

鉄…

超新星爆発

原始星

炭素、酸素…

白色わい星

星（主系列星）

この循環を繰り返して
様々な元素が宇宙に
満ちていく。

進化した星
（巨星など）

Spiral Galaxy NGC 6946

Suprime-Cam (B, V, IA651)
August 27, 2008

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

Copyright© 2009 National Astonomical Observatory of Japan. All rights reserved.

星は「生まれる」

ハッブル宇宙望遠鏡による画像
星がたくさん作られている場所

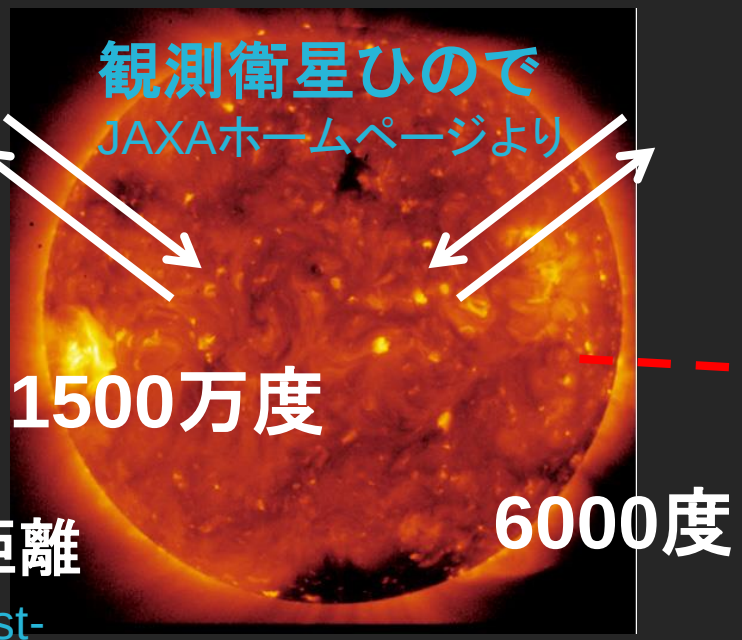
ガスのたくさんある（重い）場所は、自分自身の重み（重力）でつぶれる⇒巨大なガスの塊（「星」）

恒星＝自ら光を放つ巨大なガスの塊

- 太陽の質量＝2×10^{30} kg（地球の30万倍）
  - 重力⇒つぶれようとする⇒温度が上がる⇒圧力が上がる⇒広がろうとする。

力のつり合いのとれた状態＝恒星

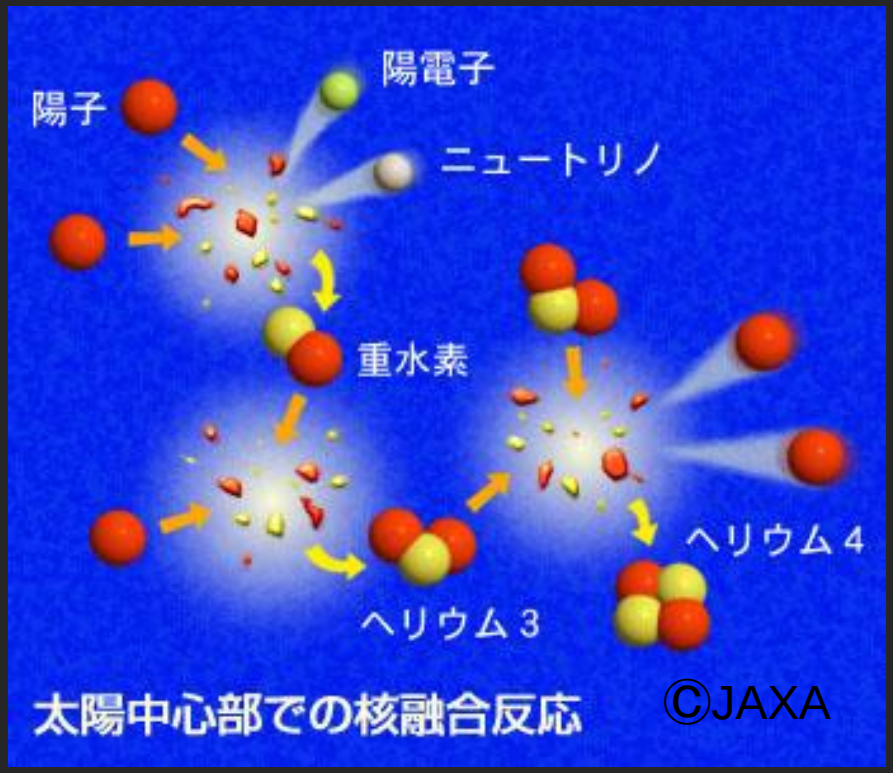
ニュートン
重力∝(質量)^2÷距離
http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Newton.html



約4×10^{26}ワット
(1秒で世界の電力消費200万年分)

恒星のエネルギー源＝核反応

- エネルギーのつりあい。
  - 核融合によるエネルギーの発生
    ＝光として逃げていくエネルギー（4×10^{26}W）。



宇宙・太陽の主成分は水素。

水素×4⇒ヘリウム

１秒当たり約6億トン。

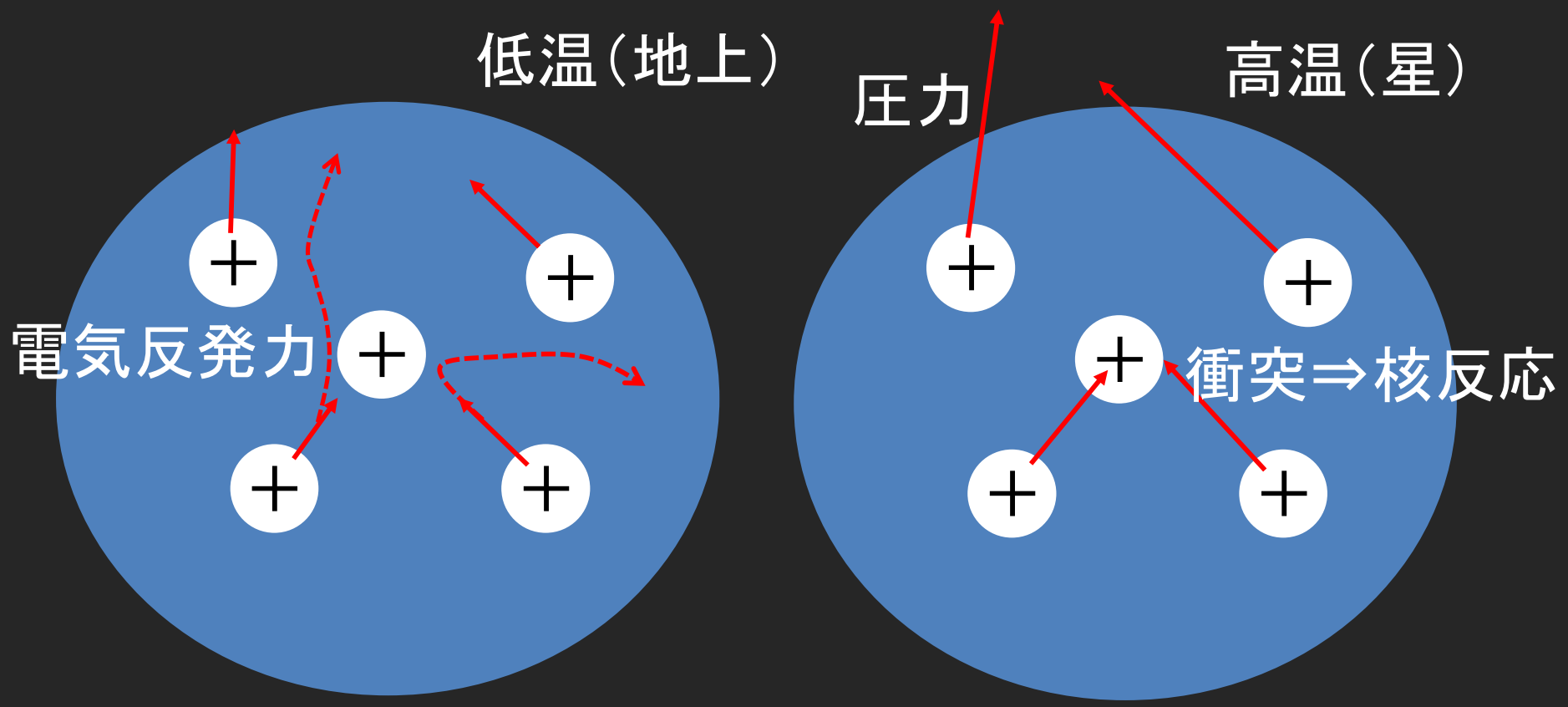
”主系列星”

100億年で中心付近（1割）の水素が無くなる。

⇒太陽の寿命（現在50億歳）

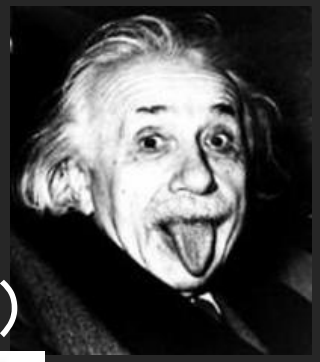
元素の起源＝核反応

- 「通常の状況では」元素は不変。
- 原子核同士の衝突⇒**核反応⇒元素の変化。**

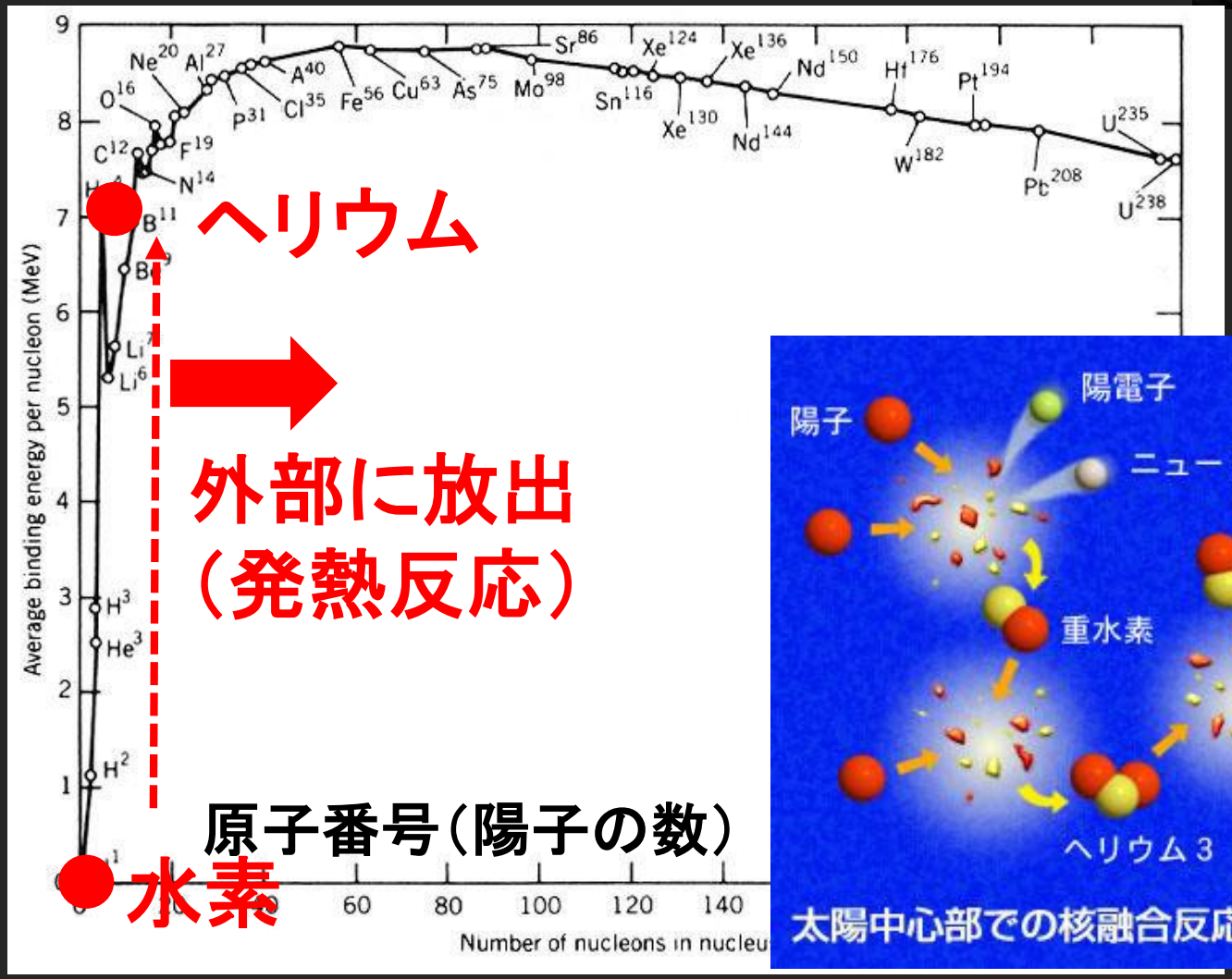


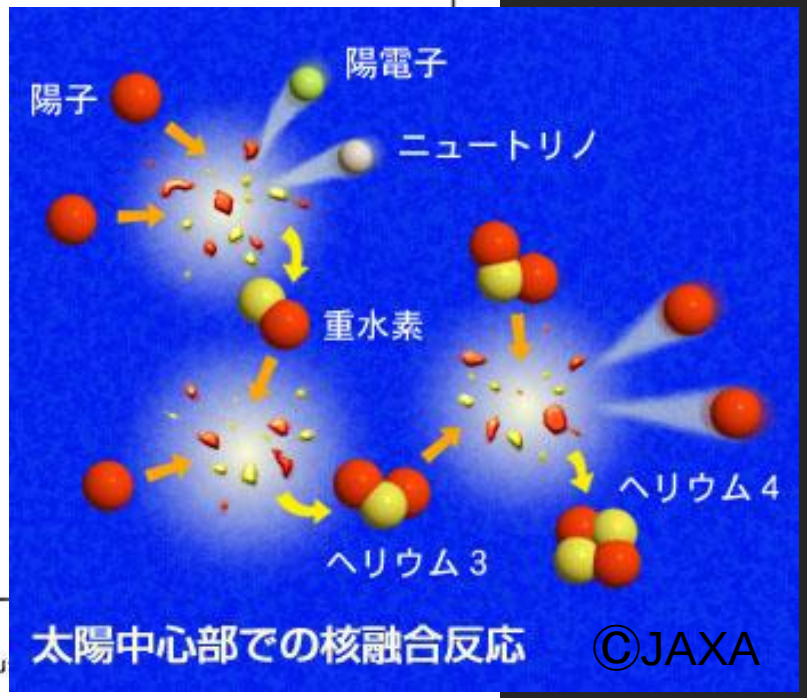
核反応エネルギー

$E = m \times c^2$



原子核に固有のエネルギー（質量エネルギー＝安定度）



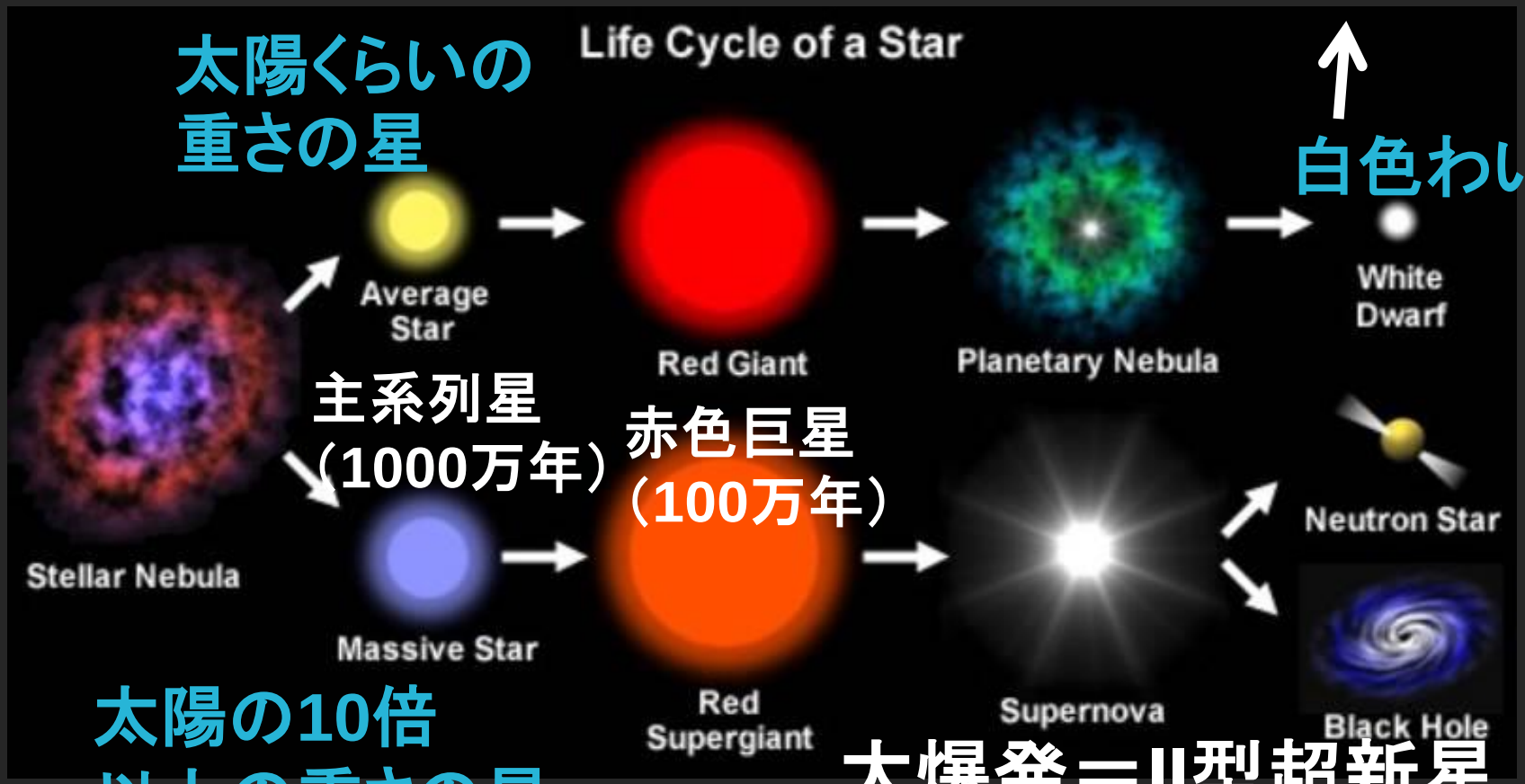


星は「進化（成長）して」、「爆発する」

- 水素⇒ヘリウム⇒炭素⇒酸素⇒ケイ素⇒鉄。

（太陽：水素→ヘリウム）

大爆発＝Ia型超新星



太陽の10倍
以上の重さの星

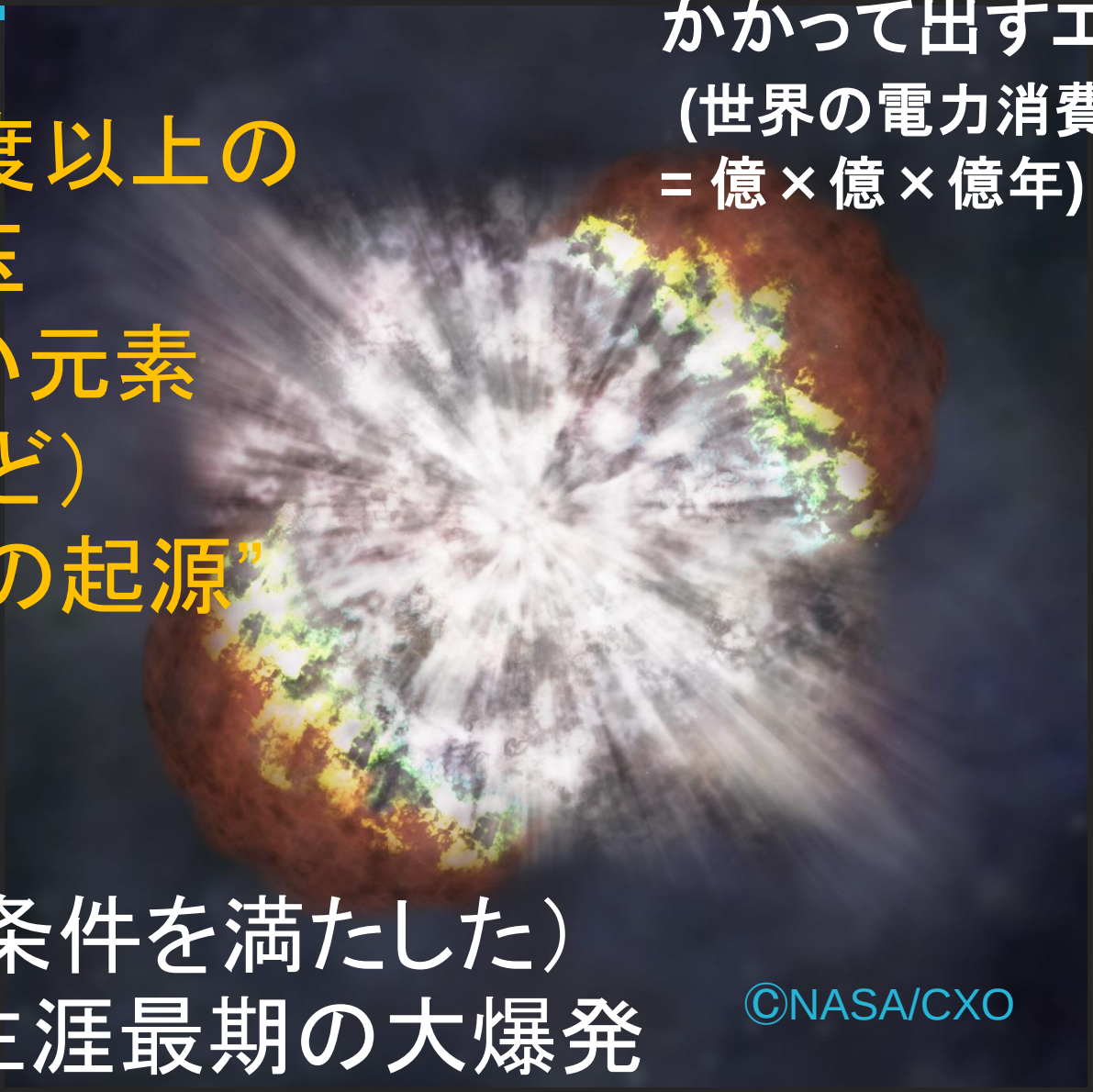
大爆発＝II型超新星

http://scioly.org/wiki/index.php/Astronomy/Stellar_Evolution

超新星爆発

約10^{44}ジュール
= 太陽が一生（約100億年）
かかって出すエネルギー
(世界の電力消費10^{24}年分
= 億×億×億年)

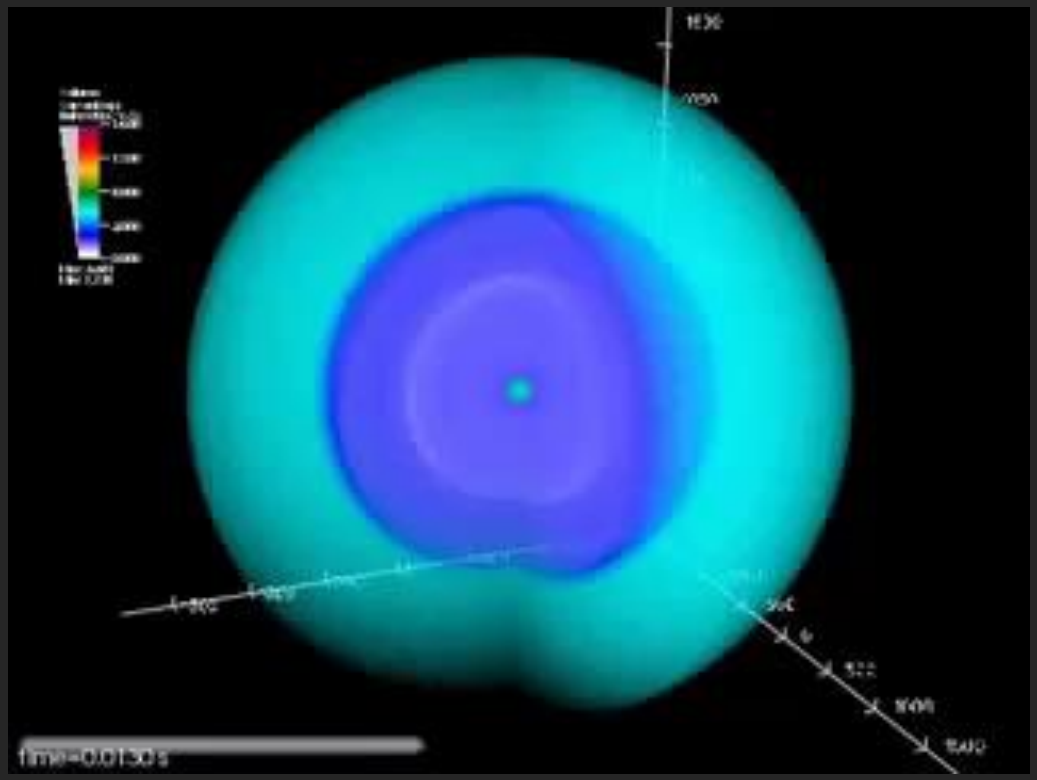
10億度以上の
火の玉
→重い元素
（鉄など）
“元素の起源”

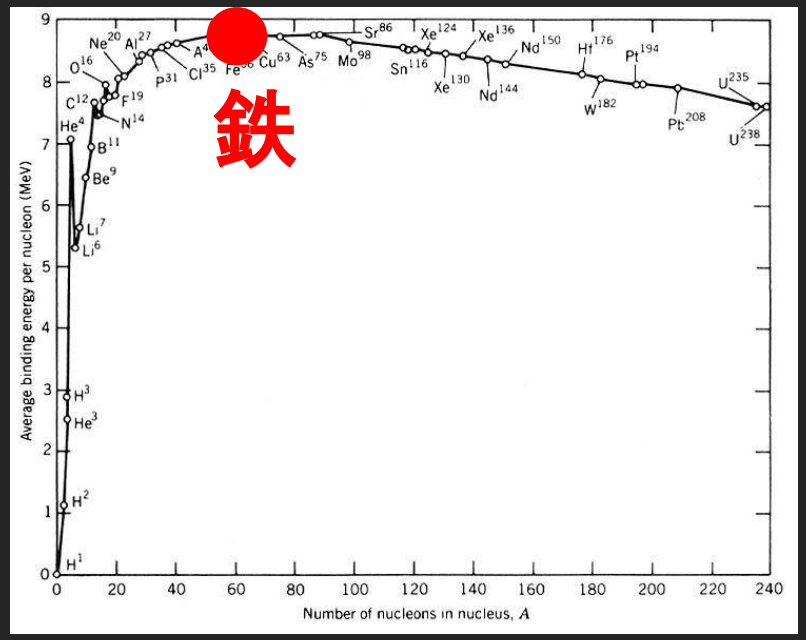


（ある条件を満たした）
星の生涯最期の大爆発

©NASA/CXO

コンピュータシミュレーション例：II型





重い星の爆発：マックスプランク研究所による計算
（京大基礎物理学研究所も世界的な拠点）

鉄の生成⇒核反応エネルギーの枯渇（鉄は最も安定）
⇒重力でつぶれる⇒硬い中性子星⇒跳ね返り＋ニュートリノ

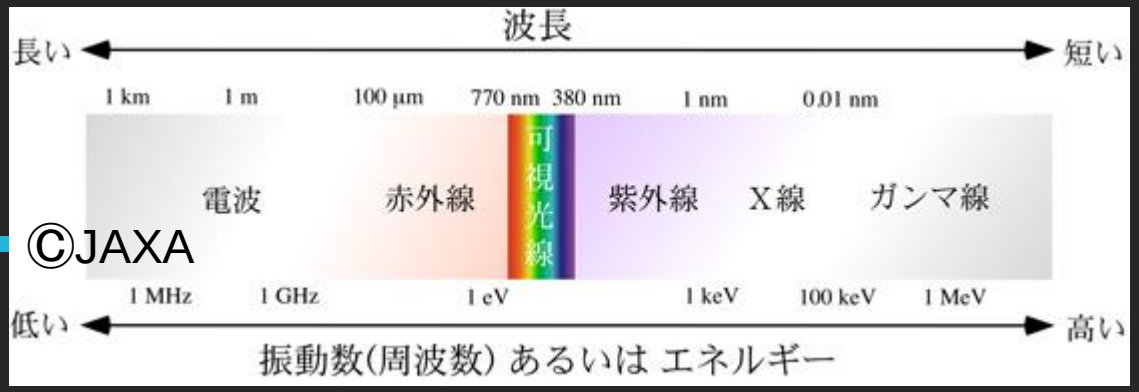
コンピュータシミュレーション例：Ia型

白色わい星の最大質量
=1.4太陽質量
（チャンドラセカール博士）

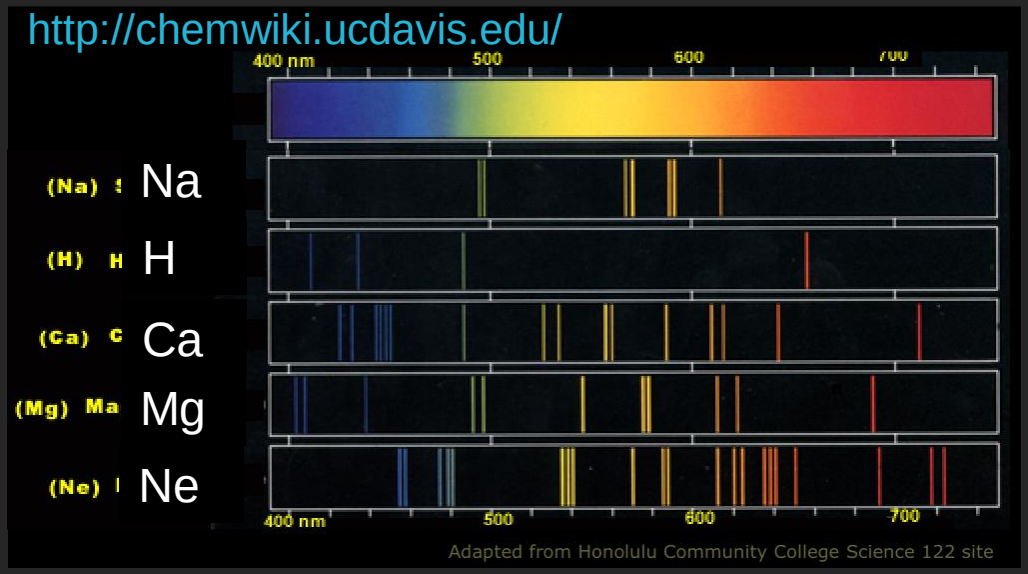
白色わい星の爆発：マックスプランク研究所との共同研究

連星相手から物質流入⇒白色わい星の質量増加
⇒潰れる、密度・温度増大⇒核反応暴走爆発

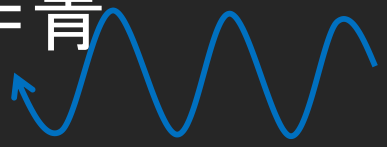
元素を視る



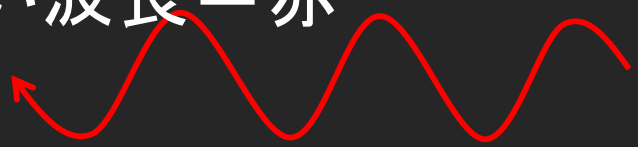
- 電磁波を波長(色)ごとに分解(スペクトル)。
  - 目で見える電磁波＝可視光
  - 波長の短い電磁波＝X線、ガンマ線



短い波長＝青



長い波長＝赤



元素ごとに特有の波長

- 可視光は地上・宇宙望遠鏡、X・ガンマ線は宇宙望遠鏡。

銀河系（数千光年）でおこった過去の超新星

ティコの超新星（想像図）

現在

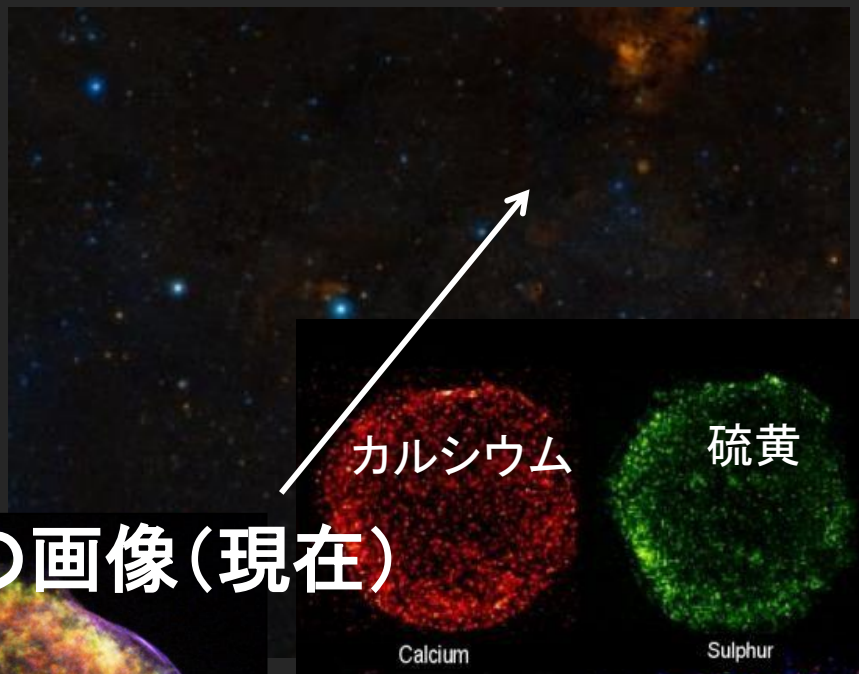
http://www.wikisky.org/

銀河系（数千光年）でおこった過去の超新星

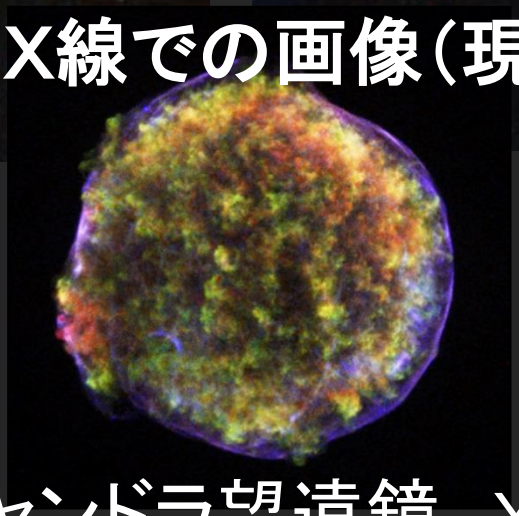
ティコの超新星（想像図）

現在

http://www.wikisky.org/

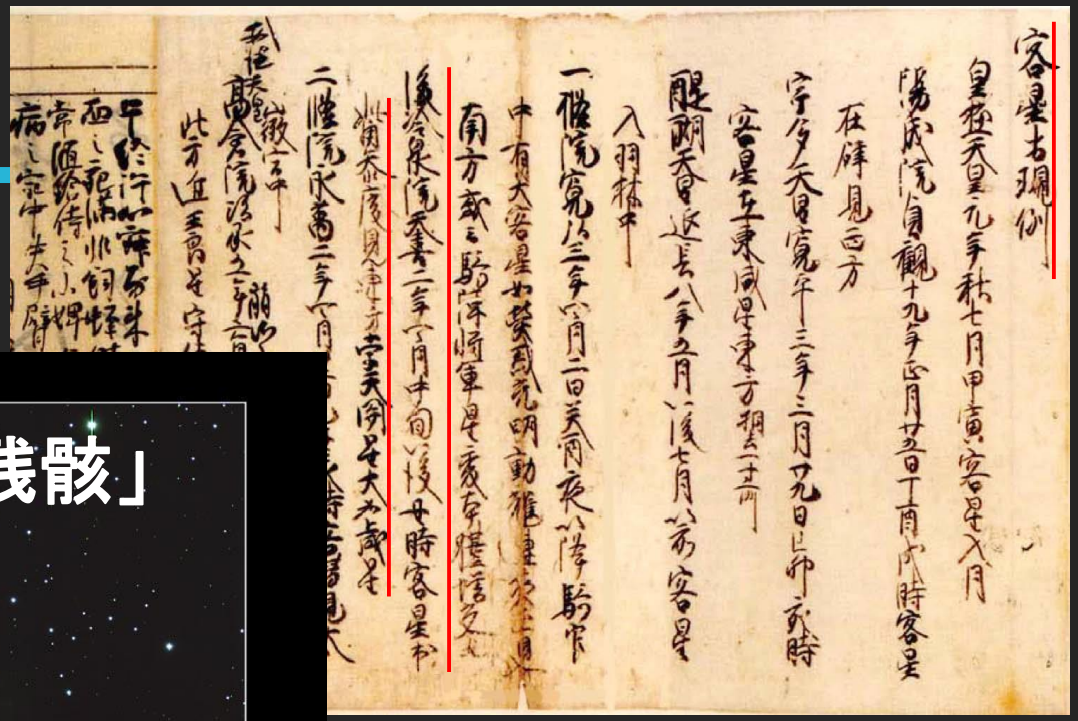


X線での画像（現在）



チャンドラ望遠鏡　XMMニュートン望遠鏡

歴史上の超新星

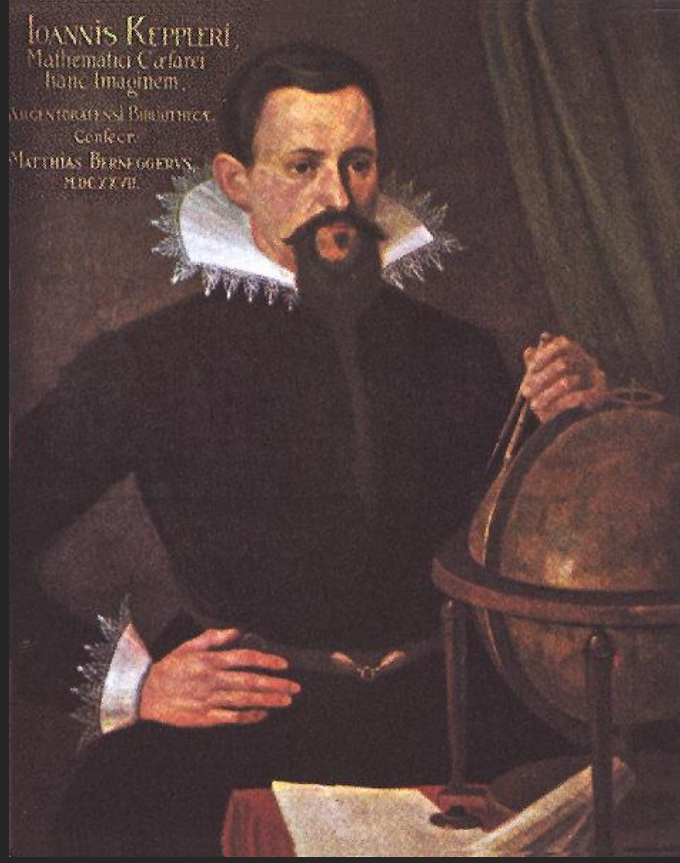


「明月記」冷泉家時雨亭文庫

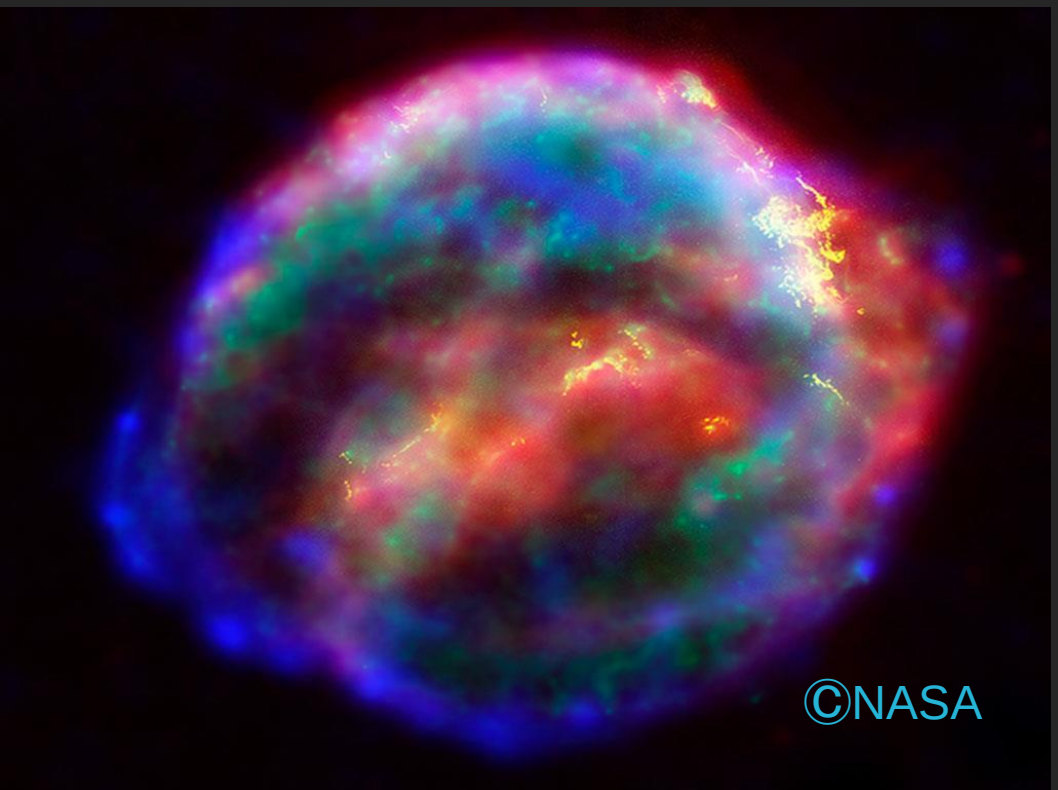
Figure of Supernova Remnant: Crab Nebula (Messier 1)
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan
Suprime-Cam (V, NB497, B)
Copyright © 2007 National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.
March 12, 2007

かに星雲。

- 1054年。
- 藤原定家「明月記」。



現在の姿 「超新星残骸」（赤外線、光、X線の合成画像）



- ケプラーの超新星。
  - 1604年。

主な超新星 [編集]

Wikipediaより抜粋

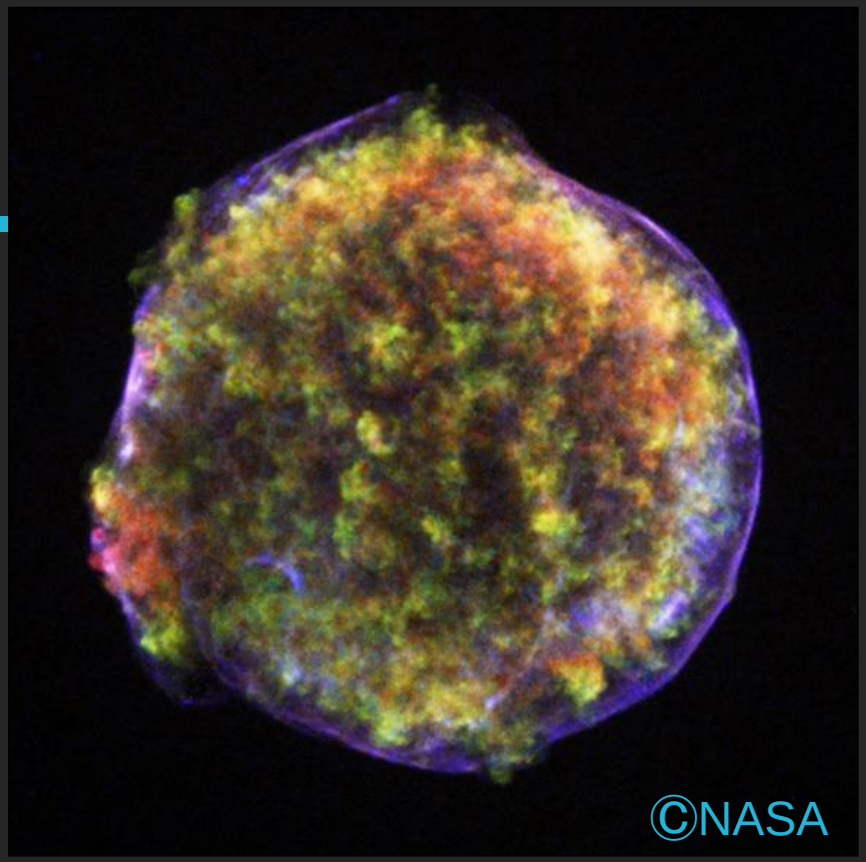
超新星	年	星座	銀河	距離	最大光度	型	残骸・別名	備考
SN 185	185年	ケンタウルス座	銀河系	3,300光年	-8		RCW 86	最古の観測記録
SN 393	393年	さそり座	銀河系		-1		RX J1713.7-3946 ?	
SN 1006	1006年	おおかみ座	銀河系	7,200光年	-9	I		
SN 1054	1054年	おうし座	銀河系	7,000光年	-6	II?	かに星雲	
SN 1181	1181年	カシオペア座	銀河系	> 26,000光年	0	II	3C 58	
SN 1572	1572年	カシオペア座	銀河系	8,000～9,800光年	-4	I	チコの星	
SN 1604	1604年	へびつかい座	銀河系	20,000光年以内	-2.5	I	ケプラーの星	銀河系で最後
SN 1885A	1885年	アンドロメダ座	アンドロメダ銀河	254万光年	5.8	Ia	アンドロメダ座S星	他銀河で初の発見
SN 1987A	1987年	かじき座	大マゼラン雲	157,000光年	2.9	II		肉眼で見えた最後

1960年：岡山観測所（1.9m望遠鏡）

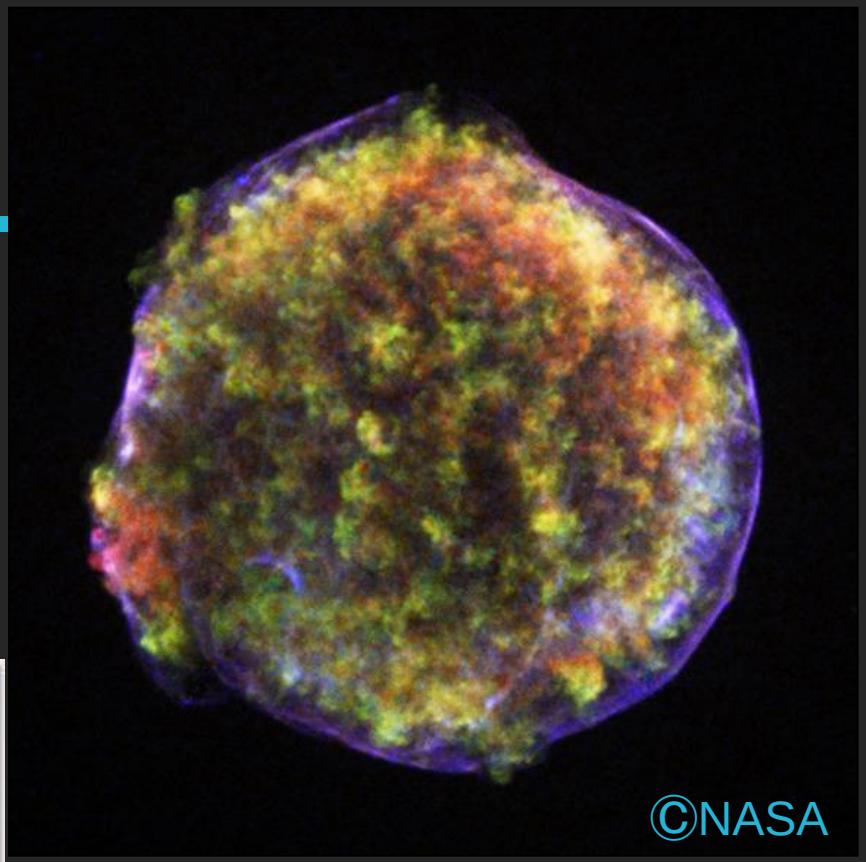
1999年：ハワイすばる望遠鏡（8.2m）

2015年度（予定）：岡山3.8m望遠鏡（アジア最大）

元素生成から500年後の姿。



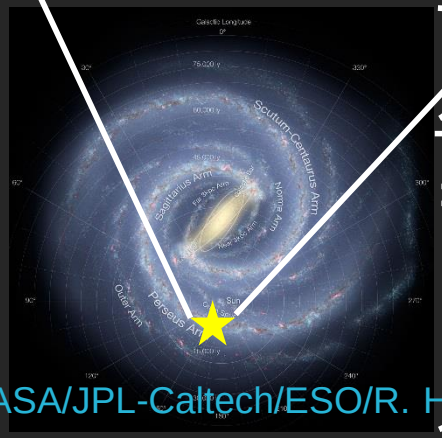
元素生成から500年後の姿。



現場を見たい。

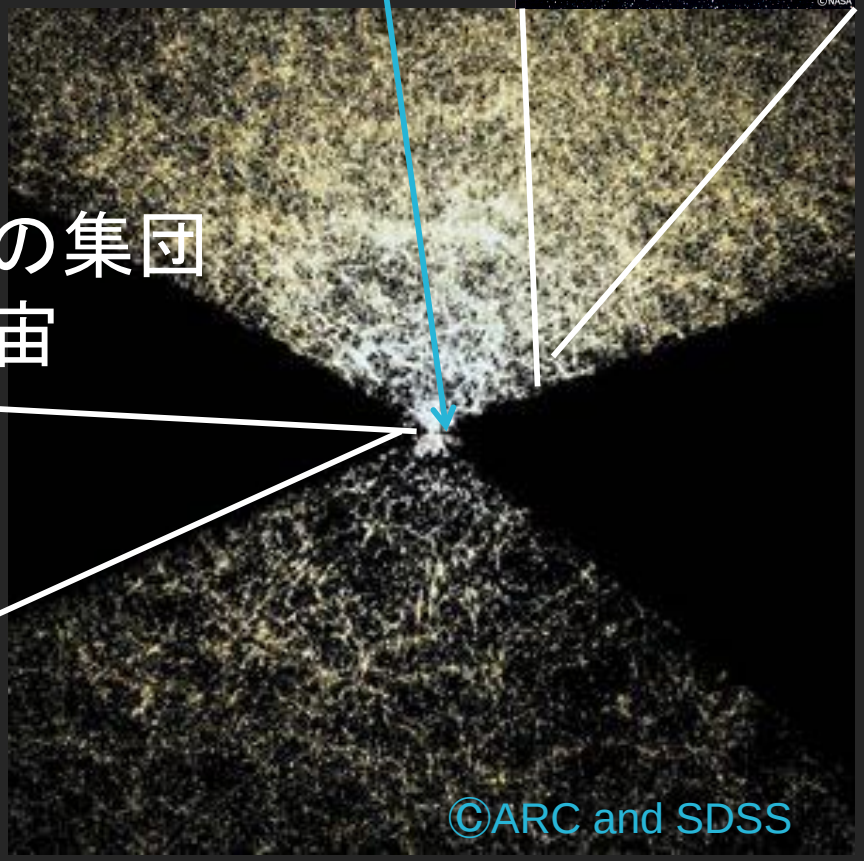
銀河系を超えて

138億光年



銀河の集団
＝宇宙

星の集団
＝銀河
（天の川）



10万光年

光の速さ＝秒速30万km
＝ 1秒間に地球を7周半

1光年＝光が1年に進む距離
＝約10兆km

超新星を見つけるには？

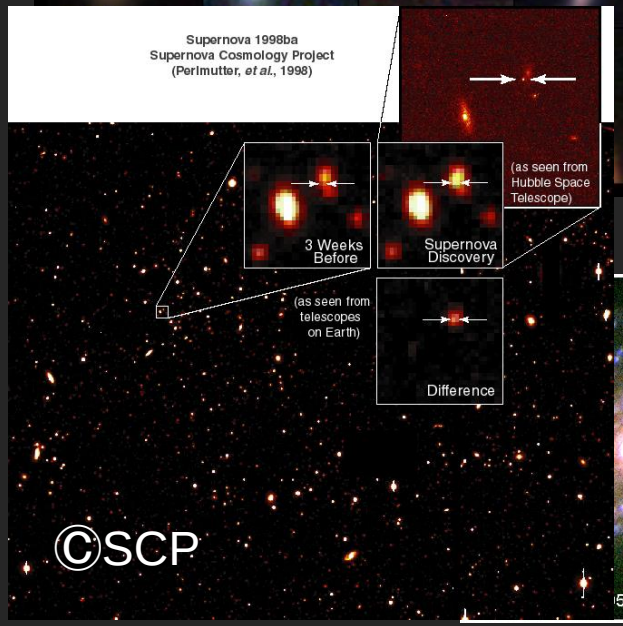
- 夜空の同じ場所を定期的に探す。
- 我々の銀河系では約100年に一回。
- 遠くの銀河をたくさん見ればよい。
  - 100個の銀河で探せば一年に1個見つかるはず。
  - 遠いので暗い。望遠鏡が必要。
    - 大学などでは1メートルくらいの望遠鏡で探す。

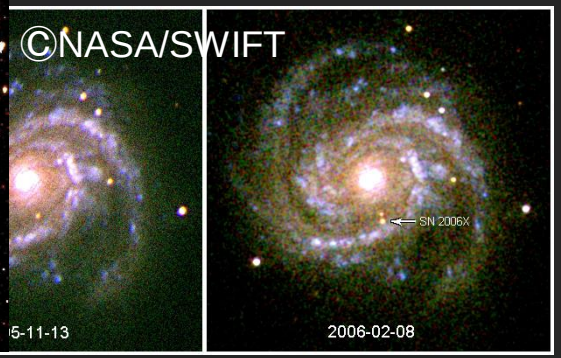
→年間1000個以上見つかっている。

遠くの銀河の超新星

http://snap.lbl.gov/science/how.php

©SDSS
2005ed
2005ef
2005ei
2005ez
2005fa
2005fd
2005ff
2005fv
2005gj
2005hc
2005ij
2005ir
2005js
2005ku
2005lk
2006fs
2006gf
2006hr
2006nz
2006ob
2007jh
2007al
2007om
2007pd


Supernova 1998ba
Supernova Cosmology Project
(Perlmutter, et al., 1998)
(as seen from Hubble Space Telescope)
3 Weeks Before
Supernova Discovery
(as seen from telescopes on Earth)
Difference
©SCP


©NASA/SWIFT
SN 2006X
2006-02-08

国立天文台石垣島天文台

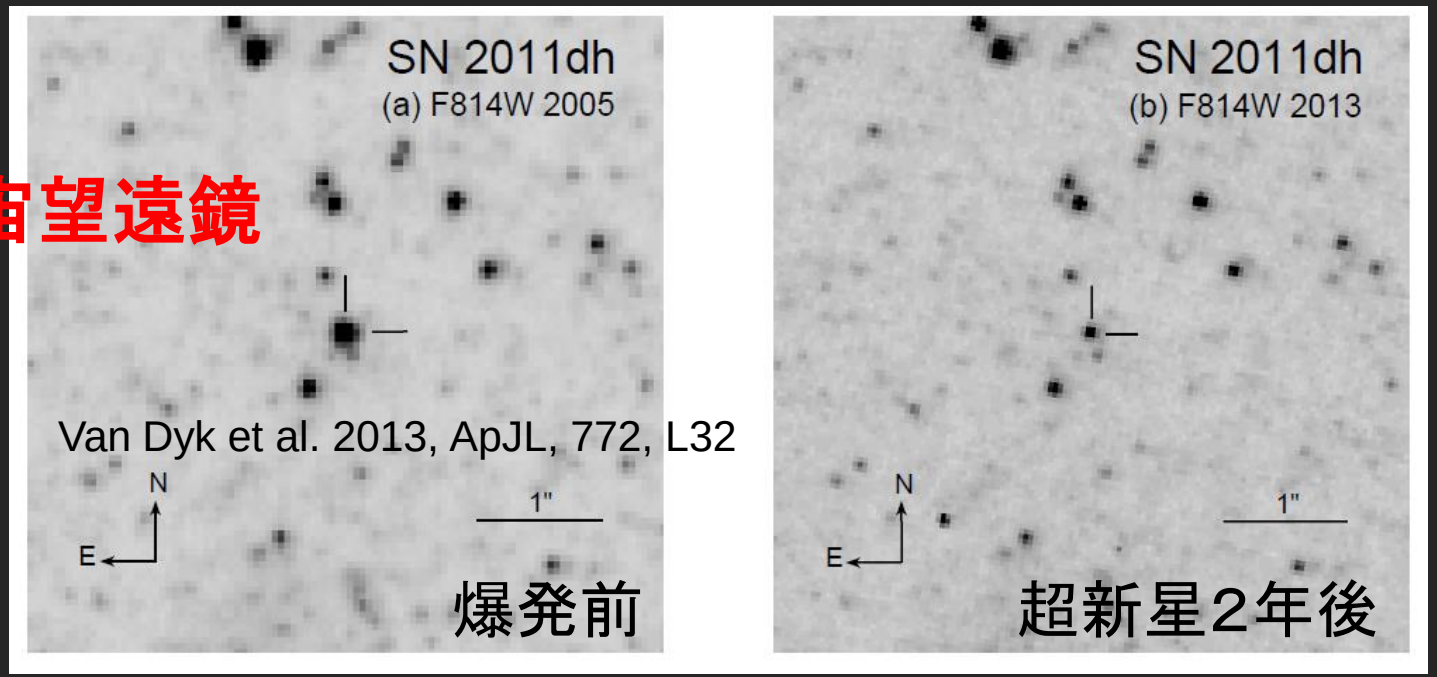
本当に星の爆発？

爆発前の画像をさがす
（「監視カメラ」）

超新星1987A
大マゼラン星雲（15万光年）

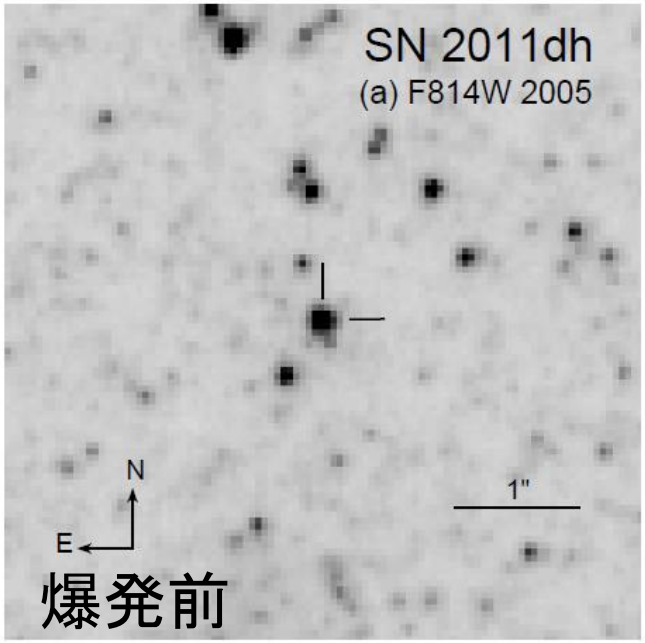
超新星2011dh
M51（2400万光年）

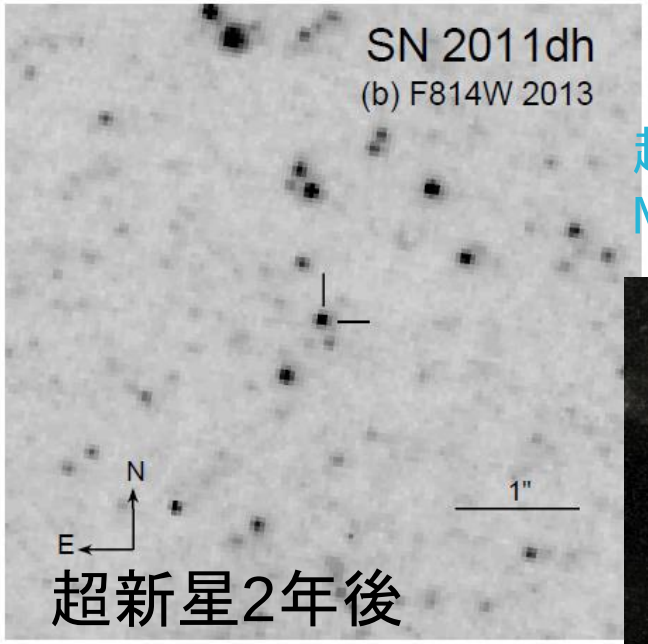
ハッブル宇宙望遠鏡



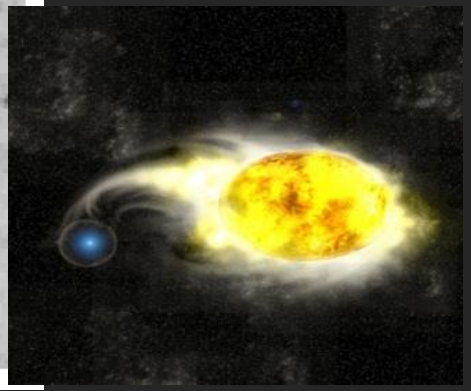
Van Dyk et al. 2013, ApJL, 772, L32

深まる謎:爆発前の星、超新星の多様性



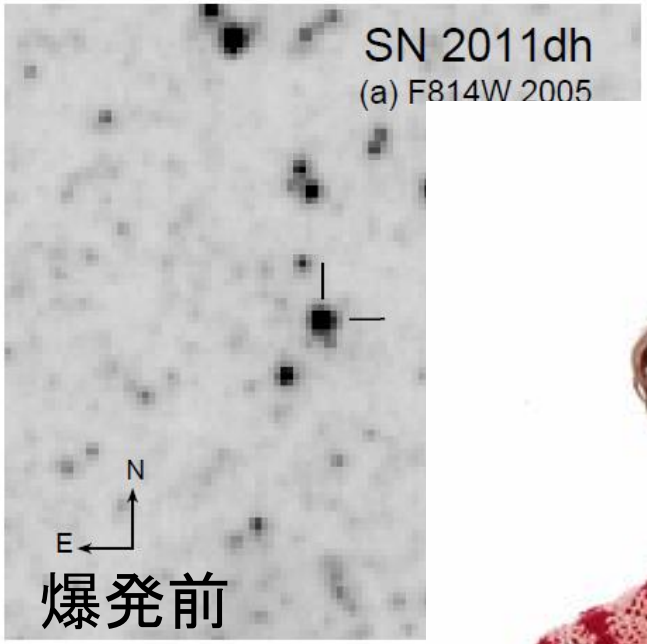


超新星2011dh
M51(2400万光年)



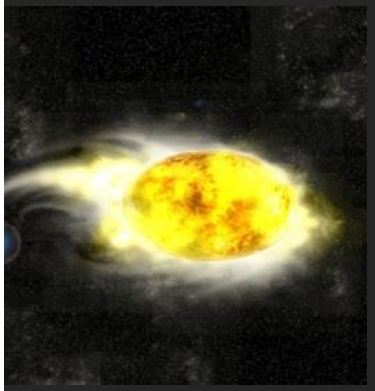
- 超新星2011dh:"黄色"巨星(~ 200太陽半径)。
  - 理論で予測された赤色巨星(~1000太陽半径)ではなかった。
  - 連星の相手の星の影響?ほとんどの星は連星をなす。
  - 理論:さまざまな連星相手⇒様々なタイプの超新星。
  - 観測:連星相手を直接とらえた例はこれまで一例。

深まる謎：爆発前の星、超新星の多様性



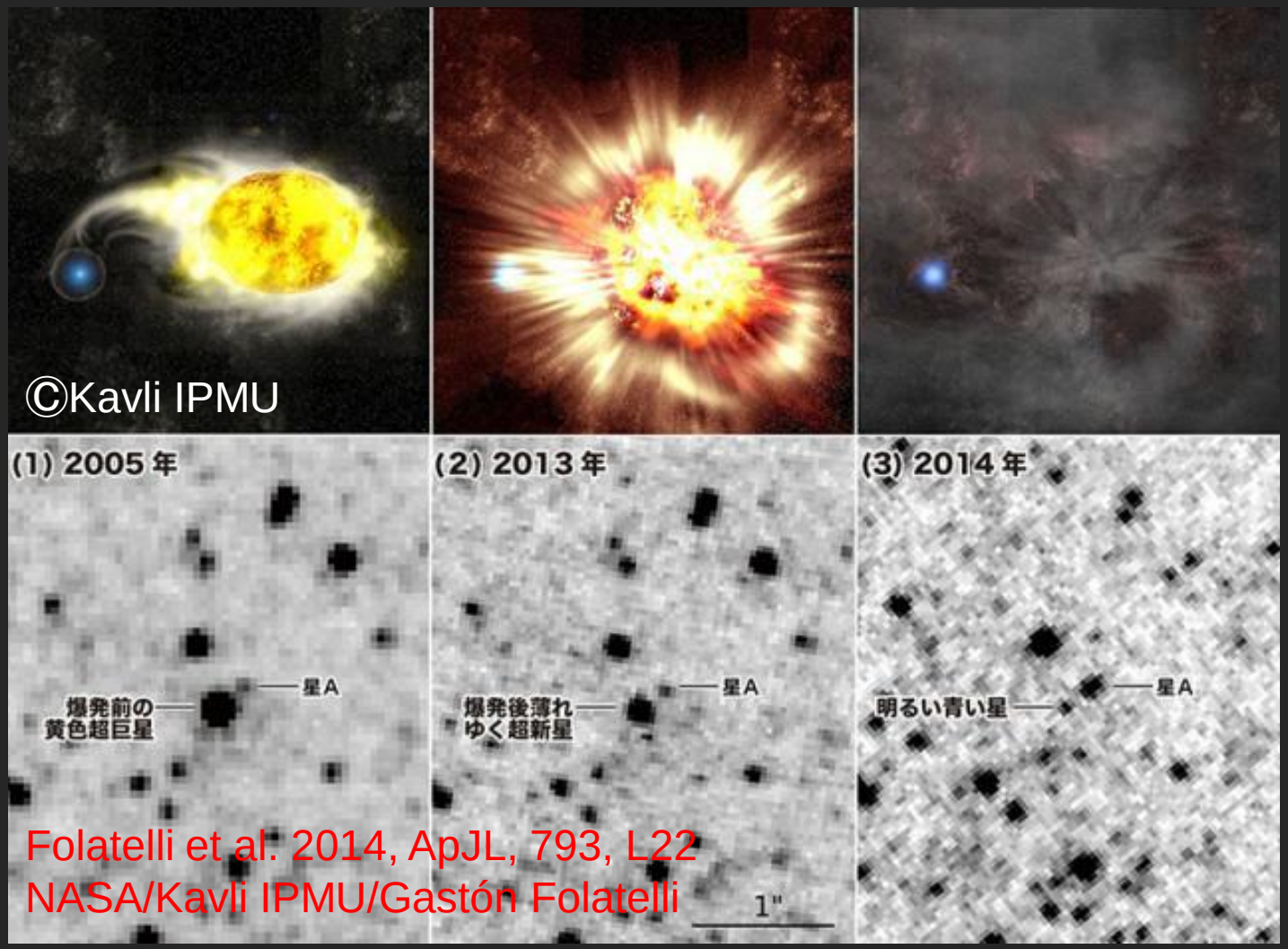
相方により人生は変わる

新星2011dh
1（2400万光年）



- 超新星201 半径）。
  - 理論で予測 なかった。
  - 連星の相手
  - 理論：さまざまな連星相手⇒様々なタイプの超新星。
  - 観測：連星相手を直接とらえた例はこれまで一例。

超新星を起こした星の連星相手を見つけた！

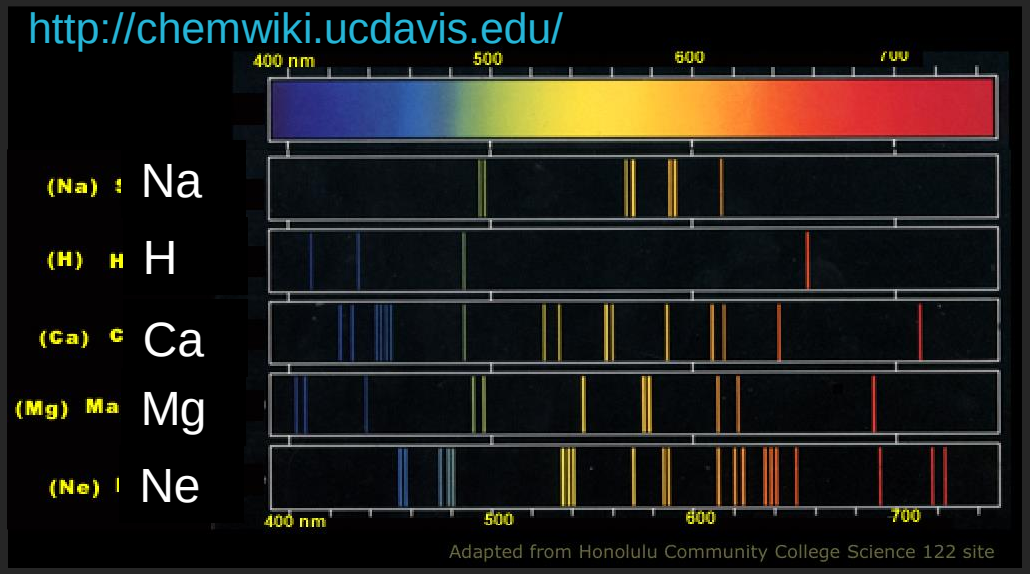


Folatelli et al. 2014, ApJL, 793, L22
NASA/Kavli IPMU/Gastón Folatelli

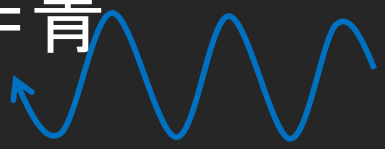
ハッブル望遠鏡による観測提案（Folatelli, Maeda et al.）

超新星の観測

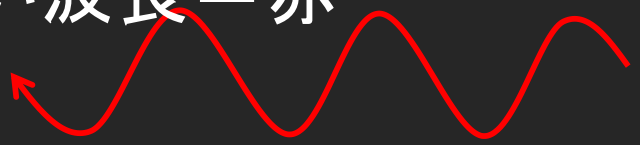
- 光を波長（色）ごとに分解（スペクトル）。



短い波長＝青



長い波長＝赤



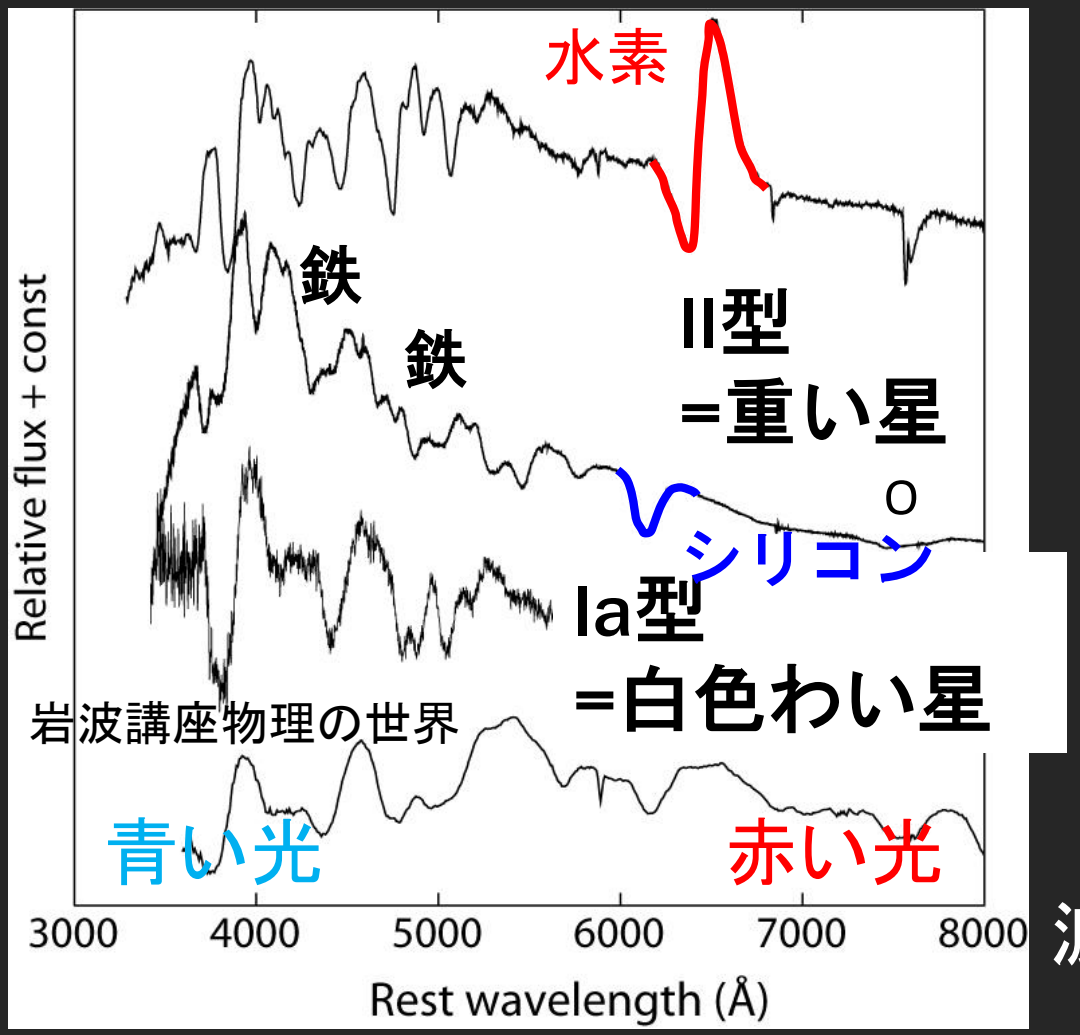
元素ごとに特有の波長

- 明るい期間は口径1-2メートルの望遠鏡。
- 爆発直後（増光）、後期（減光）には大きな望遠鏡が必要（すばる望遠鏡、3.8m望遠鏡など）。

- すばる望遠鏡などでの観測。
  すばる望遠鏡：8.2m反射鏡
  ハワイ島、マウナケア山頂（~4000m）
- 観測提案書を書く→倍率は3倍くらい。
  - 半年に1-2晩観測できればラッキー。

さまざまな元素が飛び散っている

波長ごとの明るさ

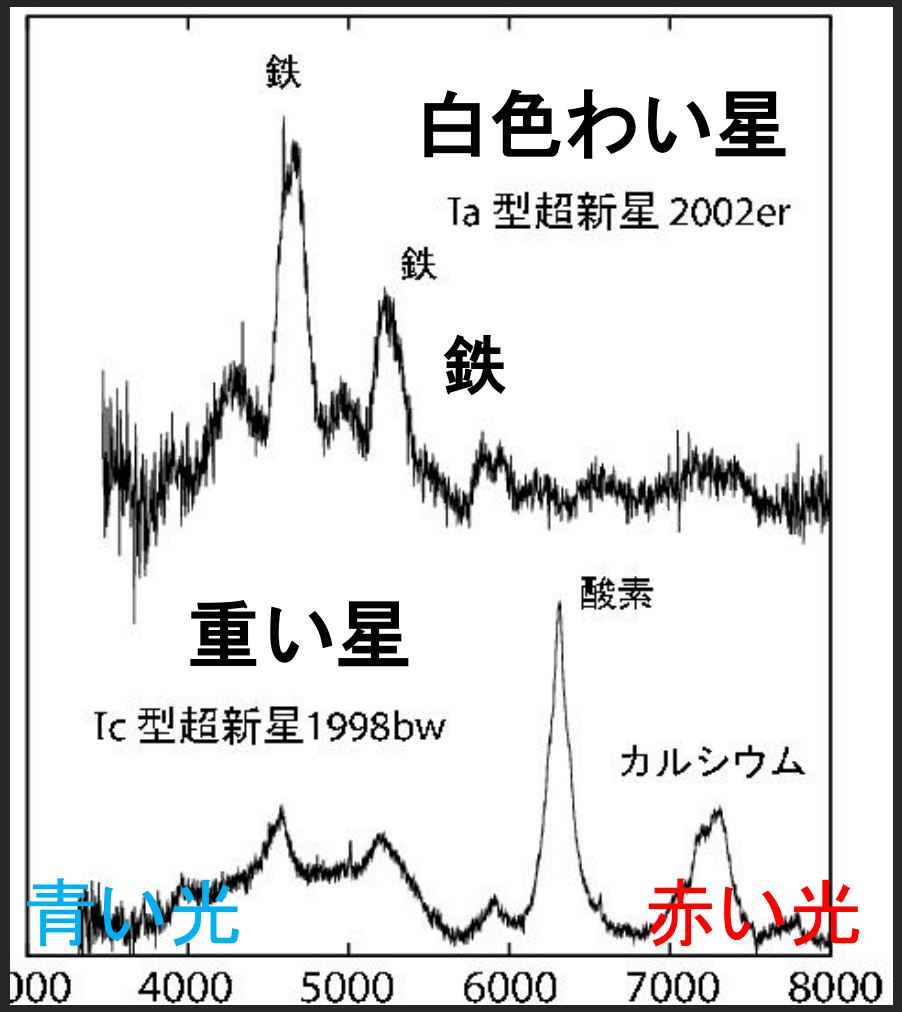


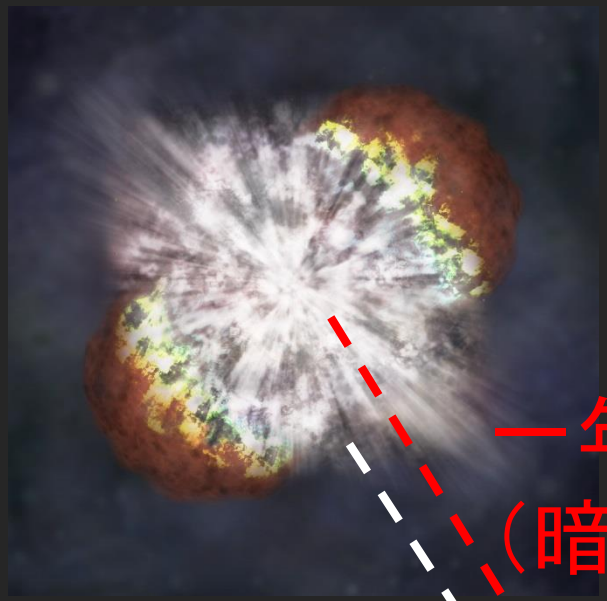
確かに様々な元素を放出している！

波長（色）

見える元素は時間とともに変わる

波長ごとの明るさ（一年後）





一年後
（暗い）

一週間後
（明るい）

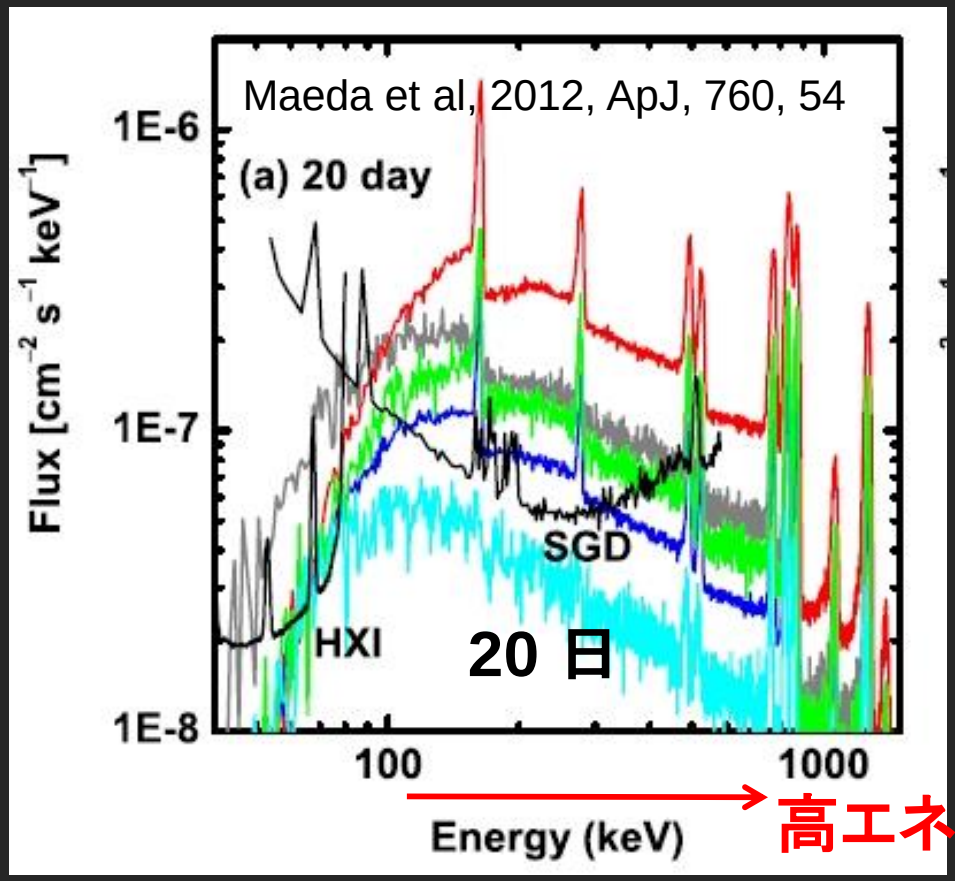
波長（色）

岡山3.8m望遠鏡

2015年度に稼働開始。
3.8m = アジア最大。
即応性＋占有時間
⇒超新星観測に適する。

今後もご支援よろしく
お願いします。

超新星「爆発」で作られた元素を見る



高エネルギー（短波長）

理論予測：
3000万光年先の超新星

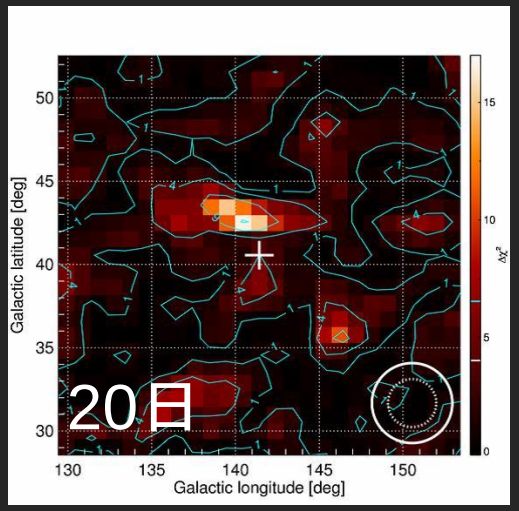
核反応
⇒不安定な放射性元素
⇒ガンマ線が放出されるはず

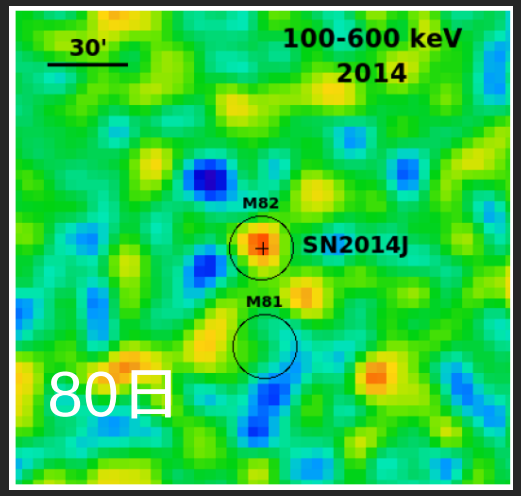
ガンマ線は地球大気に
侵入しない
⇒宇宙望遠鏡。

Ia型超新星：鉄の起源（一発で太陽質量程度）。
「ニッケル⇒コバルト⇒鉄」 ガンマ線は生成直後に出る！

半減期：1週間　　100日

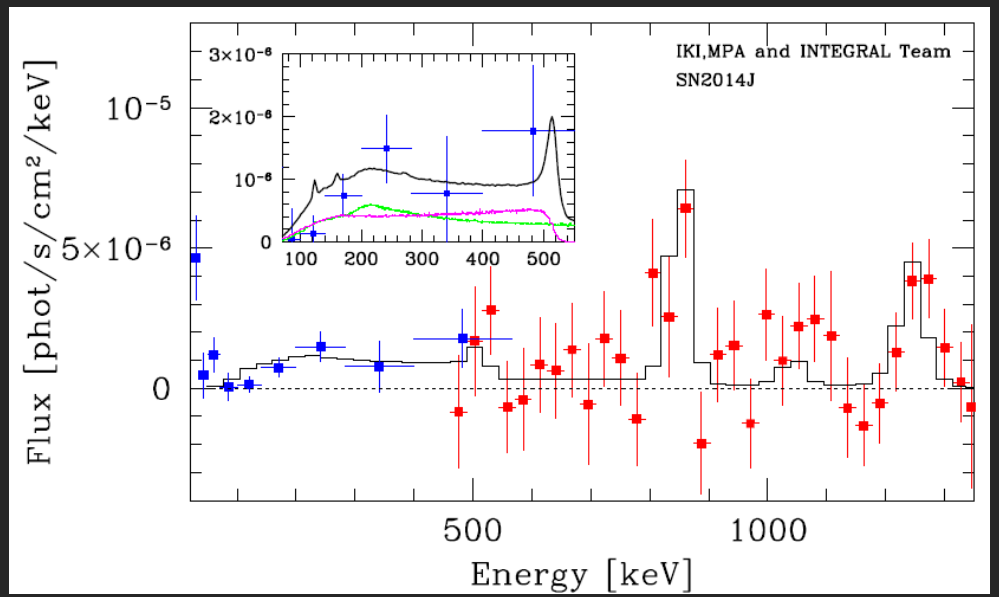
鉄の生成現場が直接見えた！





@ 20 日:
Diehl et al., Science, 345, 1162

@ 60 – 80 日:
Churazov et al., Nature, 512, 406



Ia型超新星からの初の
核ガンマ線検出。

京大プレスリリース, 2014年8月1日

京都大学 KYOTO UNIVERSITY

Events　News　お問い合わせ　大学施設案内　アクセス

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2014/140801_1.html

京大について | 入試関連情報 | 教育・学生支援 | 研究・産官学連携 | 国際交流・留学支援 | 社会連携 | 学部・大学院等

ホーム > News > 研究・産官学連携 > 「目に見えない光」でIa型超新星の爆発機構を探る －予想外に早かったガンマ線放出をとらえた－

研究成果 - 研究・産官学連携

研究成果

日経（8/1）

8/1 日経(夕刊)

超新星爆発、仕組み解明

京大など 星の表面でも核反応

巨大な星が最期を迎えた時に起きる超新星爆発の詳しい仕組みを京都大の前田啓一准教授らが解明した。従来は星の中心部で核反応による爆発が起きると考えられていたが、表面近くでも起きていた。星が消滅するメカニズムを解明する手掛かりになる。独マックスプランク研究所との共同研究成果で、米科学誌サイエンス（電子版）に8月1日掲載された。

前田准教授らは宇宙空間に浮かぶ「インテグラル」という欧州の望遠鏡を使って、爆発時の核反応で出るガンマ線をとらえた。地球から約1千万光年離れた恒星が燃え尽きてできる「白色わい星」を観測した。

これまでは星の中心部で核反応が起きるため、ガンマ線の観測は爆発から数カ月後と考えられていたが、わずか18日後に検出した。これは星の表面近くで核反応が起きたためとみられる。研究チームは白色わい星の近くにある「連星」と呼ぶ別の天体から核反応を引き起こすヘリウムが流れ込み、表面で爆発が起きたとみている。

「目に見えない光」でIa型超新星の爆発機構を探る －予想外に早かったガンマ線放出をとらえた－

2014年08月01日 | 理工

Diehl et al., Science, 345, 1162

2014年8月1日

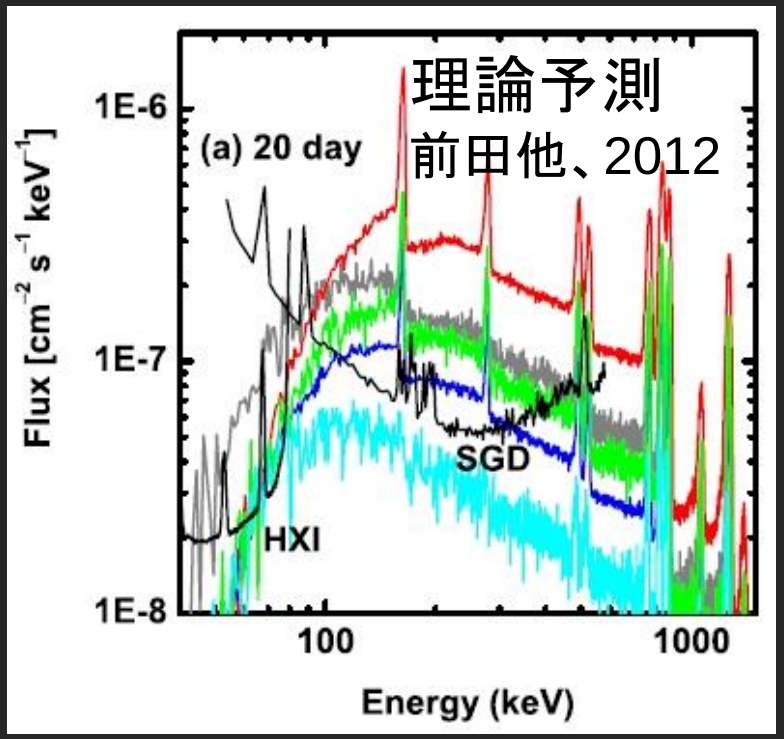
前田啓一 理学研究科准教授、Roland Diehl マックスプランク研究所教授らの研究チームは、超新星放出物質の表面近くからガンマ線が放出されているという驚くべき観測結果を得ました。この発見は既存のIa型超新星の爆発理論に疑問を投げかけるものです。これまで考えられていたように、星の奥深くのみで核反応が暴走するのではなく、表面付近で先に核反応が開始され、これが星全体の核爆発の引き金になっていることが示唆されました。

本研究成果は、米国科学振興協会 (AAAS) 発行の論文誌「Science」に掲載されました。また、「Science express」（Scienceのホームページ掲載）の2014年7月31日号に掲載されました。

研究者からのコメント

実は今回、二度目の挑戦になります。2011年の夏、超新星からのガンマ線放射の理論計算をまとめてすぐに、比較的近くの銀河M101に超新星が発生しました。しかし研究はなかなかうまくいかないもので、この時は結局ガンマ線は検出できず。捨てる神あれば拾う神あり（？）、今回2014年1月にさらに地球に近い距離にある銀河M82で超新星SN 2014Jが発生。ついに初めてガンマ線で超新星を視ることに成功しました。

次世代X線・ガンマ線望遠鏡：Astro-H

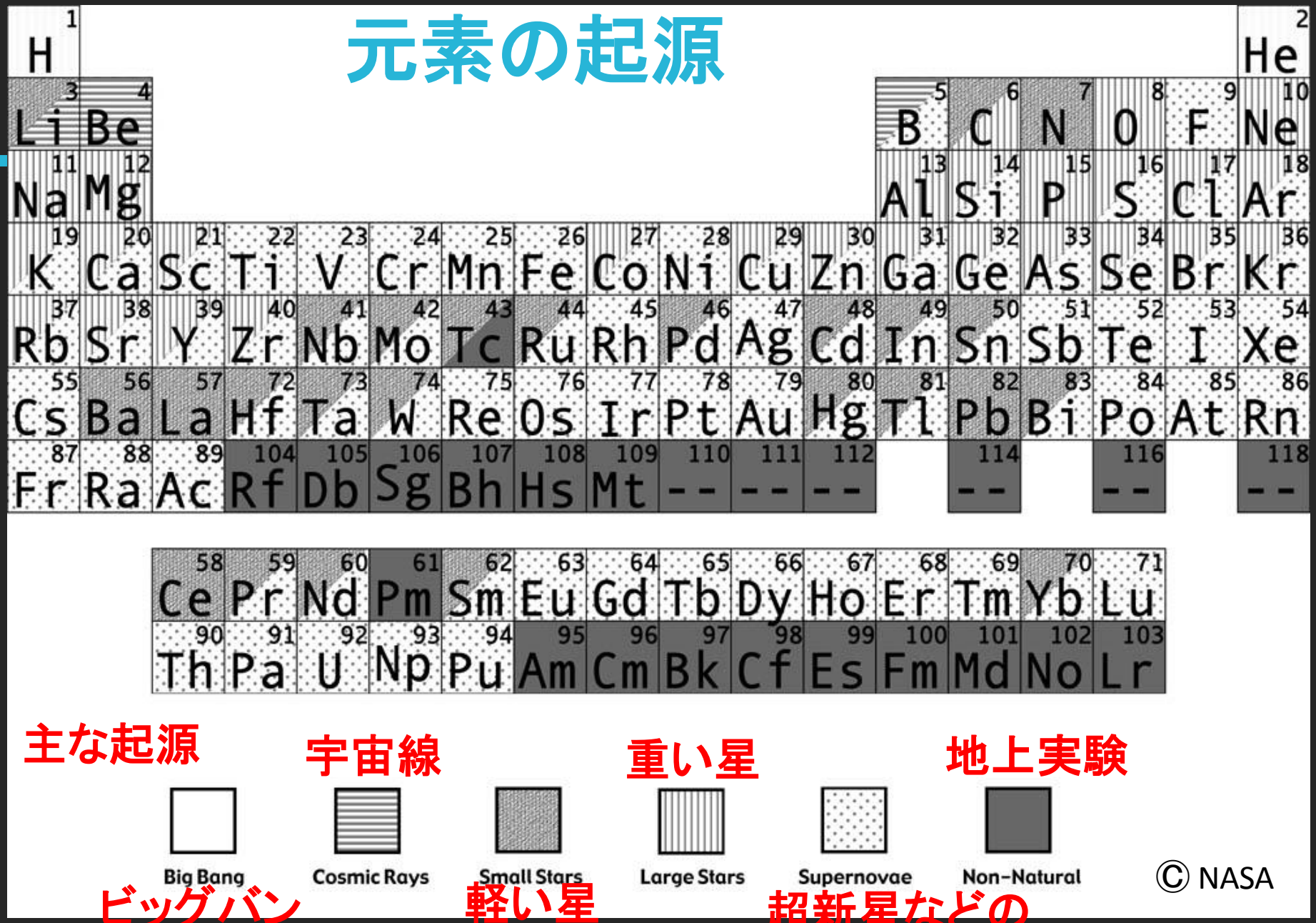


日本のX線天文学グループ・NASAを中心として、2015年打ち上げを目指す。

Ia型超新星からのガンマ線が年に一回はとらえられる？

観測的”原子核天文学”の夜明け。

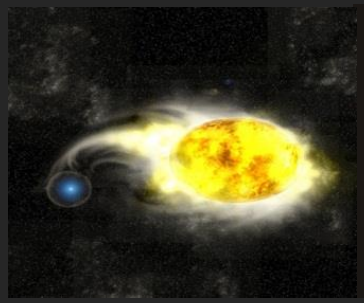
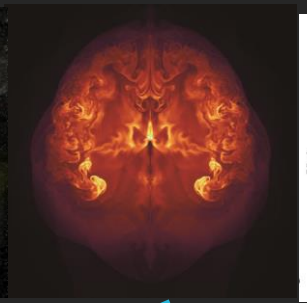
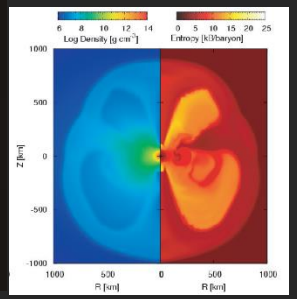
元素の起源


主な起源
宇宙線
重い星
地上実験
Big Bang
Cosmic Rays
Small Stars
Large Stars
Supernovae
Non-Natural
ビッグバン
軽い星
超新星などの
爆発現象
© NASA

まとめにかえて

理論：新しいアイデア、
大規模シミュレーション

観測：様々な波長で
の新しい観測機器。

超新星に至る進化の解明。

超新星爆発メカニズムの解明。

元素の起源＝生命の起源の完全な理解。