#### 天文学 理工・総合情報学部講義 月曜5限

#### マゼラン雲で起きた超新星1987A credit: Australian Astronomical Observatory





#### 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-





2

# 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10回: 超新星爆発と元素の起源

#### ・大質量星の進化の果て

- 星の爆発とその残骸
- ・元素合成と銀河の化学進化



#### 大質量星の進化

#### ヘルツシュプルング=ラッセル図

- · 主系列
- ・赤色巨星
- 白色矮星

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





#### 大質量星の進化

- ・大質量星:初期質量が8-10M●よりも重 い星
- ・中小質量星(<8-10M
  </li>
   )とは進化が異な るので分けて議論されることが多い
- ・ 主系列段階を終えた星の進化: 赤色巨星 の方へ進んでいく
- ・そのあとは?

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





#### 大質量星の進化

- ・大質量星:初期質量が8-10M●よりも重 い星
- ・中小質量星(<8-10M<sub>●</sub>)とは進化が異な るので分けて議論されることが多い
- ・ 主系列段階を終えた星の進化: 赤色巨星 の方へ進んでいく
- ・中では何が? そしてその後は?

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





## 大質量星の進化(前主系列段階)





## 大質量星の進化(主系列段階の始まり)



### 大質量星の進化(主系列段階の終わり)



## 大質量星の進化(赤色巨星段階)

![](_page_11_Figure_1.jpeg)

![](_page_11_Picture_2.jpeg)

## 大質量星の進化(ヘリウム燃焼)

![](_page_12_Figure_1.jpeg)

![](_page_12_Picture_2.jpeg)

### 大質量星の進化(炭素燃焼-酸素燃焼)

![](_page_13_Figure_1.jpeg)

![](_page_13_Picture_2.jpeg)

#### 大質量星の進化(酸素燃焼-ネオン燃焼)

![](_page_14_Figure_1.jpeg)

### 大質量星の進化(ケイ素燃焼)

![](_page_15_Figure_1.jpeg)

![](_page_15_Picture_2.jpeg)

#### 大質量星の進化(鉄コア形成-重力崩壊)

![](_page_16_Figure_1.jpeg)

#### 大質量星の最終進化段階」核子あたりの質量エネルギー(12C=0を基準とする)

- 大質量星はどこまでも重い元素を合成していく?
- No.
- ・<sup>56</sup>Feが1核子あたり最も軽い=それ以上 エネルギーを取り出せない: E=mc<sup>2</sup>

![](_page_17_Figure_4.jpeg)

1核子あたりの質量の質量数依存性 data source: AME2003 atomic mass evaluation https://www-nds.iaea.org/masses/

#### 大質量星の最終進化段階」核子あたりの質量エネルギー(12C=0を基準とする)

- 大質量星はどこまでも重い元素を合成していく?
- No.
- ・<sup>56</sup>Feが1核子あたり最も軽い=それ以上 エネルギーを取り出せない: E=mc<sup>2</sup>

![](_page_18_Figure_4.jpeg)

1核子あたりの質量の質量数依存性 data source: AME2003 atomic mass evaluation https://www-nds.iaea.org/masses/

#### 発熱反応と吸熱反応

- ・例えば、**3 4He** → 12**C**
- $\Delta mc^2 = [3x m(^4He) m(^{12}C)]c^2 = (3x4.00260 12)m_uc^2 = 0.00780 m_uc^2 > 0$
- ・逆反応: <sup>12</sup>C → 3 <sup>4</sup>He
- $\Delta mc^2 = -0.00780 m_u c^2 < 0$
- エネルギーが負になる:最終的にその系からはエネルギーが奪われる(吸熱反応)

mu: 原子質量単位(≒1.66x10<sup>-27</sup>kg)

1核子あたりの質量エネルギー (<sup>12</sup>C=0を基準とする)

![](_page_19_Figure_8.jpeg)

#### 発熱反応と吸熱反応

- ・ 例えば、3 4He  $\rightarrow$  12C + 0.0078m<sub>u</sub>c<sup>2</sup>
- $\Delta mc^2 = [3x m(^4He) m(^{12}C)]c^2 = (3x4.00260 12)m_uc^2 = 0.00780 m_uc^2 > 0$
- ・逆反応: <sup>12</sup>C → 3 <sup>4</sup>He 0.0078m<sub>u</sub>C<sup>2</sup>
- $\Delta mc^2 = -0.00780 m_u c^2 < 0$
- ・エネルギーが負になる: 最終的にその系か らはエネルギーが奪われる(<mark>吸熱反応</mark>)

mu: 原子質量単位(≒1.66x10<sup>-27</sup>kg)

21

1核子あたりの質量エネルギー (<sup>12</sup>C=0を基準とする)

![](_page_20_Figure_8.jpeg)

#### 発熱反応と吸熱反応

- ・太陽では軽い原子核(陽子)を重い原子
   核(ヘリウム)に変換してエネルギーを取り出していた(発熱反応)
- ・鉄よりも重い原子核を合成しようとするとエネルギーを与えなければならない(吸熱反応)
- ・原子核物理から決まっている運命: 恒星 内部の元素合成は"鉄(Fe)"が終着点

1核子あたりの質量エネルギー (<sup>12</sup>C=0を基準とする)

![](_page_21_Figure_5.jpeg)

1核子あたりの質量の質量数依存性 data source: AME2003 atomic mass evaluation https://www-nds.iaea.org/masses/

#### 大質量星の最終進化段階」核子あたりの質量エネルギー(12C=0を基準とする)

- ・大質量星進化の最終段階:鉄の中心核 (コア)ができる
- ・鉄コアは周りでの核燃焼により質量を 増やしていく
- ・質量を増していった鉄コアはどこかで 自分自身の重力を支えきれなくなり、 崩壊する(**鉄コアの重力崩壊**)
- ・最終的に爆発する

![](_page_22_Figure_5.jpeg)

1核子あたりの質量の質量数依存性 data source: AME2003 atomic mass evaluation https://www-nds.iaea.org/masses/

# コンパクト天体の形成

- ・中小質量星が内部で燃料を使い果たしたと きには白色矮星を残した
- 一方で、大質量星(初期質量>8-10M<sub>●</sub>)は超 新星爆発(supernova)を起こし、その中心 に中性子星・ブラックホールを残す
- ・白色矮星・中性子星・ブラックホールを総
   称して、コンパクト天体という(第11回)

![](_page_23_Figure_8.jpeg)

# 第10回: 超新星爆発と元素の起源

#### ・大質量星の進化の果て

- 星の爆発とその残骸
- ・元素合成と銀河の化学進化

![](_page_24_Picture_4.jpeg)

#### 重力崩壞型超新星爆発

- 超新星爆発(supernova explosion): 星 の爆発とそれに伴う発光現象
- ・主に2種類ある超新星のうちの一つ
- ・大質量星の星としての最後の姿
- ・鉄コアの崩壊によって解放される重力エネ ルギーによって、鉄コアより外側が吹き飛 31

![](_page_25_Picture_5.jpeg)

![](_page_25_Figure_6.jpeg)

![](_page_25_Figure_7.jpeg)

#### 重力崩壞型超新星爆発

- ・超新星爆発の観測
- ・銀河系内での歴史的な観測例: SN 1054(かに星雲), SN 1604(ケプラー)
- ・マゼラン雲での超新星SN 1987A: 人類が 現代的な天体観測技術を獲得してから初め ての超新星
- ・人間の生きてる時間スケールで変動する

![](_page_26_Picture_5.jpeg)

1984

![](_page_26_Picture_8.jpeg)

マゼラン雲で発生した重力崩壊型超新星 1987A credit: Australian Astronomical Observatory

### 日本の歴史文献に残る天体現象

#### ・藤原定家「明月記」(冷泉家所蔵): 1054年の超新星が「客星」として記されて いる(中国等での観測記録の引用)

![](_page_27_Picture_2.jpeg)

#### 藤原定家「明月記」(中日新聞ウェブサイトより) https://plus.chunichi.co.jp/blog/asada/article/282/3327/

![](_page_27_Picture_4.jpeg)

### 日本の歴史文献に残る天体現象

#### · 藤原定家「明月記」(冷泉家所蔵): 1054 いる(中国等での観測記録の引用)

![](_page_28_Picture_2.jpeg)

#### 藤原定家「明月記」(中日新聞ウェブサイトより) https://plus.chunichi.co.jp/blog/asada/article/282/3327/

![](_page_28_Picture_4.jpeg)

かに星雲のハッブル宇宙望遠鏡での観測画像 credit: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA) 29 https://hubblesite.org/image/3885/category/35-supernova-remnants

![](_page_28_Picture_6.jpeg)

#### 重力崩壞型超新星爆発

- SN 1987A: マゼラン雲で発生した重力崩 壞型超新星
- 爆発した星(親星; progenitor)が確認され ている: Sanduleak -69° 202
- 初期質量20M
  ●程度の青色巨星
- 大質量星が確かに超新星爆発を起こす

![](_page_29_Picture_5.jpeg)

![](_page_29_Picture_8.jpeg)

![](_page_29_Picture_9.jpeg)

マゼラン雲で発生した重力崩壊型超新星 1987A credit: Australian Astronomical Observatory

#### 重力崩壞型超新星爆発

- SN 1987A: マゼラン雲で発生した重力崩 壞型超新星
- 爆発した星(親星; progenitor)が確認され ている: Sanduleak -69°202
- 初期質量20M
  ●程度の青色巨星
- ・大質量星が確かに超新星爆発を起こす

![](_page_30_Picture_5.jpeg)

![](_page_30_Picture_8.jpeg)

Hubble宇宙望遠鏡によるSN 1987Aの画像 credit: C. S. J. Pun (GSFC) & R. Kirshner (CfA), WFPC2, HST, NASA https://apod.nasa.gov/apod/ap970124.html

![](_page_30_Picture_11.jpeg)

# 超新星からの光とエネルギー源

- ・超新星爆発の明るさの変化(光度曲線: light curve)
- ・だいたい数週間-数ヶ月くらい可視光で明 るい状態(銀河と同じくらい)が続き、減光 していく
- ・ 明るい電磁波放射のエネルギー源は?

![](_page_31_Figure_5.jpeg)

![](_page_31_Figure_6.jpeg)

### 爆発による核反応と56Ni

- ・重力崩壊型超新星で爆発に使われるエネル ギーは約1044[J]
- ・これは今の太陽が一生(100億年)かかって 放出する放射エネルギーと同じくらい
- ・それだけのエネルギーが星の内部に注入さ れると、高温(数10<sup>9</sup>K)の領域ができる
- 新たな核反応による元素合成 (Nucleosynthesis)

![](_page_32_Figure_5.jpeg)

### 爆発による核反応と56Ni

- ・超新星爆発での元素合成
- 最も重要な生成物は56Ni
- ・Niの不安定な同位体で、 <sup>56</sup>Ni→<sup>56</sup>Co→<sup>56</sup>Feと放射性崩壊する
- ・崩壊の際にでてくるガンマ線や陽電子によ って爆発の噴出物が加熱され、熱放射をす る

![](_page_33_Figure_6.jpeg)

### 放射性同位体の崩壊と半減期

- ${}^{56}\text{Ni} \rightarrow {}^{56}\text{Co} + \gamma + \gamma$
- エネルギー: [m(<sup>56</sup>Ni)-m(<sup>56</sup>Co)]c<sup>2</sup> ≒ 2.14 [MeV]
- ${}^{56}Co \rightarrow {}^{56}Fe + \gamma + \nu \text{ or } {}^{56}Fe + e^+ + \gamma + \nu$
- ・エネルギー: [m(<sup>56</sup>Co)-m(<sup>56</sup>Fe)]c<sup>2</sup> ≒ 4.57 [MeV]

MeV (メガ電子ボルト): エネルギーの単位  $=1.6 \times 10^{-13} [J]$ 

![](_page_34_Figure_6.jpeg)

## 放射性同位体の崩壊と半減期

- ・半減期(half-life): 自然界で不安定な原子 核が放射線を出して崩壊し、元の量の半分 の量になるまでにかかる時間
- 例: て 1/2(<sup>56</sup>Ni)=6.075 [days],
  - $\tau_{1/2}({}^{56}Co)=77.23$  [days],
- $\tau_{1/2}(44\text{Ti})=60$  [years]
- $56Ni \rightarrow 56Co \rightarrow 56Fe$

![](_page_35_Picture_6.jpeg)

<sup>56</sup>Niが<sup>56</sup>Co,<sup>56</sup>Feに崩壊していく様子

![](_page_35_Figure_9.jpeg)

# 超新星からの光とエネルギー源

- <sup>56</sup>Niの崩壊熱による超新星からの噴出物の 加熱
- SN 1987Aの中心で<sup>56</sup>Niが0.07-0.08M 合成されたとすると…
- ・ <sup>56</sup>Ni, <sup>56</sup>Coによるエネルギーで光度曲線の 120日以降の減光がぴったり説明できる
- 超新星での56Niの元素合成がもっともらし い

![](_page_36_Figure_5.jpeg)

## 超新星のスペクトルと化学組成

- ・太陽のスペクトルをよく見ると、吸収線か ら化学組成が分かった(第2回参照)
- ・超新星のスペクトルはどんな形だろうか?
- ・熱的放射(プランク関数)と様々な元素の吸 収線と輝線
- H, He, Si, O などなど

![](_page_37_Figure_6.jpeg)

![](_page_37_Figure_7.jpeg)

![](_page_37_Figure_8.jpeg)

![](_page_37_Picture_10.jpeg)

## 超新星のスペクトルと化学組成

#### ・超新星のスペクトル分類

![](_page_38_Figure_2.jpeg)

![](_page_38_Picture_3.jpeg)

![](_page_38_Figure_4.jpeg)

39

![](_page_38_Picture_6.jpeg)

## 超新星のスペクトルと化学組成

#### ・超新星のスペクトル分類

![](_page_39_Figure_2.jpeg)

![](_page_39_Picture_3.jpeg)

![](_page_39_Picture_4.jpeg)

# 超新星のスペクトルとダイナミクス

- ・吸収線の形が特徴的(P-Cygniプロファイ) ル)
- 超新星の膨張速度を反映している

8 нα SN II 6 SN IIb Scaled  $f_{\lambda}$  + Constant SN lb SN Ic Sill 2 SN Ic-bl SN la 4000 5000 6000 7000 8000 Rest Wavelength (Å) 超新星のスペクトルの例 credit: Modjaz et al. (2014) ApJ, 147, 99 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014AJ....147...99M/abstract

![](_page_40_Picture_5.jpeg)

# 光のドップラー効果(復習)

- 動いているものからの電磁波の波長が 動いていないものに対してずれる効果
- ・ 天体の(視線方向に沿った)運動を知る 上で重要な役割を果たす (非相対論極限: v<sub>los</sub> ≪ *c* = 3 × 10<sup>8</sup>m/s)
- ずれの程度:  $\lambda_{obs} = \left(1 + \frac{v_{los}}{c}\right)\lambda = \lambda + \frac{v_{los}}{c}\lambda$
- ・光の速度がどの慣性系でも変わらない ことによって起こる(特殊相対性理論)

![](_page_41_Figure_5.jpeg)

![](_page_41_Figure_7.jpeg)

# 光のドップラー効果(復習)

- 動いているものからの電磁波の波長が 動いていないものに対してずれる効果
- ・ 天体の(視線方向に沿った)運動を知る 上で重要な役割を果たす
- ・観測者へ<u>向かってくる</u>光源・吸収源の 波長は<u>短くなる(青方偏移: blueshift</u>)
- 観測者から<u>遠ざかる</u>光源・吸収源の波  $\bullet$ 長は<u>長くなる(赤方偏移: redshift</u>)

![](_page_42_Picture_5.jpeg)

#### 観測者に対して 静止した放射源

観測者の方へ 向かってくる放射源

![](_page_42_Figure_8.jpeg)

![](_page_42_Picture_9.jpeg)

# 光のドップラー効果(復習)

- 動いているものからの電磁波の波長が 動いていないものに対してずれる効果
- ・ 天体の(視線方向に沿った)運動を知る 上で重要な役割を果たす
- ・観測者へ<u>向かってくる</u>光源・吸収源の 波長は<u>短くなる(青方偏移: blueshift</u>)
- 観測者から<u>遠ざかる</u>光源・吸収源の波  $\bullet$ 長は<u>長くなる(赤方偏移: redshift</u>)

![](_page_43_Picture_5.jpeg)

#### 観測者に対して 静止した放射源

観測者から 遠ざかる放射源

![](_page_43_Figure_8.jpeg)

# 超新星のスペクトルとダイナミクス

- ・吸収線の形が特徴的(P-Cygniプロファイ) ル)
- 超新星の膨張速度を反映している
- ・波長の変化は $\Delta \lambda / \lambda = -3\%$ 程度
- ・光速の3% ≒ 10,000km/s
- つまり超新星は10,000km/sの速さで恒星 の中で作られた元素がばらまかれる現象

![](_page_44_Figure_6.jpeg)

![](_page_44_Figure_7.jpeg)

45

![](_page_44_Figure_9.jpeg)

# 超新星のスペクトルとダイナミクス

- ・吸収線の形が特徴的(P-Cygniプロファイ
   ル)
- 超新星の膨張速度を反映している
- ・波長の変化は $\Delta \lambda / \lambda = -3\%$ 程度
- ・光速の3% ≒ 10,000km/s
- ・つまり超新星は10,000km/sの速さで恒星の中で作られた元素がばらまかれる現象

![](_page_45_Figure_6.jpeg)

#### 超新星のその後

#### 超新星残骸(supernova remnant)

- ・噴出物が徐々に周りの星間ガスを掃き 集め減速していく
- 1-10万年程度の間、X線で明るく光る
- ・やがては冷えて、星間ガスの一部とな 3

![](_page_46_Picture_5.jpeg)

超新星残骸Cassiopaire AのX線と可視光の複合画像 Credits: X-ray: NASA/CXC/RIKEN/T. Sato et al.; Optical: NASA/STScl https://chandra.harvard.edu/photo/2019/firstlight/

![](_page_46_Picture_8.jpeg)

# 第10回: 超新星爆発と元素の起源

- ・大質量星の進化の果て
- 星の爆発とその残骸
- ・元素合成と銀河の化学進化

![](_page_47_Picture_4.jpeg)

### 星間空間での物質循環

#### 惑星状星雲

![](_page_48_Picture_2.jpeg)

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

#### 超新星残骸

![](_page_48_Figure_6.jpeg)

![](_page_48_Picture_8.jpeg)

credit: X-ray: NASA/CXC/RIKEN/ T. Sato et al.; Optical: NASA/STScl

![](_page_48_Picture_10.jpeg)

![](_page_48_Picture_11.jpeg)

![](_page_48_Figure_12.jpeg)

分子雲コア

![](_page_48_Picture_14.jpeg)

![](_page_48_Picture_15.jpeg)

![](_page_48_Picture_16.jpeg)

credit: C.Burrows, J.Hester, .Morse, NASA

credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO) credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO) /E. O'Gorman/P. KervellaMA

#### 星間空間での物質循環 中性水素ガス 惑星状星雲 20 ပို 10 с. С. Offset 0 -20 M57 ring nebula 20 -20 -1010 Credits: NASA, ESA and the Hubble Heritage Offset from G.C. [kpc] (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration Nakanishi&Sofue(2016), PASJ, 68, 5 重元素の拡散 超新星残骸 重元素の合成 カシオペア 白色矮星 credit: X-ray: NASA/CXC/RIKEN/ T. Sato et al.; Optical: NASA/STScl 中性子星 ベテルギウス ブラックホール

![](_page_49_Figure_1.jpeg)

credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO) credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO) /E. O'Gorman/P. KervellaMA

- 大質量星ができ超新星として爆発する度に 星間物質へ金属(metal)または重元素 (heavy elements)を供給してきた
- ・何世代も経ることで、様々な金属量の星が 生まれてきた
- 一方で小質量星は昔に形成したものも現在 に残っている
- ・銀河系の星はどうなっている?

![](_page_50_Figure_8.jpeg)

![](_page_50_Figure_10.jpeg)

## 太陽スペクトルの吸収線

・太陽の可視光スペクトルには暗い部分(暗線) が見える: その波長だけ光が弱い

#### ・フラウンホーファー線(Fraunhofer lines)

 太陽大気に含まれる原子(Na,Ca,...) + 地球 大気に含まれる分子が特定の波長の光を吸 収する

The American Society for Testing and Materials (ASTM) G-173 spectra

![](_page_51_Picture_5.jpeg)

![](_page_51_Figure_6.jpeg)

![](_page_51_Figure_7.jpeg)

![](_page_51_Figure_8.jpeg)

## 太陽スペクトルの吸収線

太陽の可視光スペクトルには暗い部分(暗線)
 が見える: その波長だけ光が弱い

#### ・フラウンホーファー線(Fraunhofer lines)

- 太陽大気に含まれる原子(Na,Ca,...) + 地球
   大気に含まれる分子が特定の波長の光を吸
   収する
- 特定の吸収線が見つかると星の成分が分かる(地球大気吸収を除く)

![](_page_52_Figure_5.jpeg)

- ・金属欠乏星(metal-poor star):太陽より も金属の含有量が極めて少ない星
- ・金属量が少なかった昔の銀河系で形成され たと考えられる

![](_page_53_Figure_5.jpeg)

金属欠乏星HE1317-2326と太陽のスペクトルの比較 Credit: 国立天文台 分光宇宙アルバム http://prc.nao.ac.jp/extra/uos/ja/no13/

![](_page_53_Picture_8.jpeg)

- ・金属欠乏星(metal-poor star): 太陽より
   も金属の含有量が極めて少ない星
- ・金属量が少なかった昔の銀河系で形成され
   たと考えられる
- 現在の銀河系ではハローに含まれる星は全体的に金属の含有量が少ない→古い星

![](_page_54_Figure_4.jpeg)

- ・金属欠乏星(metal-poor star): 太陽より も金属の含有量が極めて少ない星
- ・金属量が少なかった昔の銀河系で形成され たと考えられる
- ・現在の銀河系ではハローに含まれる星は全 体的に金属の含有量が少ない → 古い星

![](_page_55_Picture_4.jpeg)

#### 銀河の成長

![](_page_55_Figure_9.jpeg)