

2019年(秋金4) ①

宇宙地球と生命



第02回目
「宇宙を観る眼」
～天体観測と観測装置の基礎～

東京学芸大学 自然科学系
広域自然科学講座 宇宙地球科学分野
(教育学部・理科・地学教室)
講師・西浦 慎悟


1

2.1 電磁波(広い意味での光)とは何か? ④

19世紀: マイケル・ファラデー(英)が電気と磁気の関係を研究。ジェームズ・クラーク・マクスウェル(英)によって、電気と磁気が互いを生み出しながら空間を伝わる波、**電磁波**の存在が予言された(マクスウェル方程式)。さらに、光が電磁波の一種であることが示された。

電流が流れる導線に生じる磁気 磁気変動で生じる電気(電磁誘導)

1888年: **ハインリヒ・ヘルツ**(独)の実験によって電磁波の存在が証明された。



波の進行方向 →
E: 電場成分 M: 磁場成分
(↑電磁波の簡単なイメージ: wikipediaより)

「広い意味での」光=電磁波 電波、X線、γ(ガンマ)線も電磁波の一種

4

2. 天体観測と観測装置 ②

● 天体観測とは何か?

- 天体観望: 天体望遠鏡などを使って、天体の姿や色彩などを楽しむこと。
- 天体観察: 天体望遠鏡などを使って、天体の姿や色彩などを詳しく観ること。
- 天体観測: 天体望遠鏡などを使って、詳しく調査することを前提に、天体の姿や色彩などを客観的に記録すること。

(より専門的に) 天体から放射される「電磁波」を捕まえる作業
実験室などで、研究者の都合に合わせて、積極的に実験条件を変えることはできない。

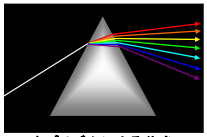
↓
現代の観測天文学

天体観測で得た情報を元に、宇宙や天体の実像を解明する学問分野。
注) 観測天文学者とは、自分の都合を、天体の都合に合わせなくてはならない職業。

2

2.1 電磁波(広い意味での光)とは何か? ⑤

● 電磁波: 空間中を光速(秒速約30万km)で伝わる波



↑プリズムによる分光

波長長い 750nm 660nm 550nm 440nm 350nm

赤 橙 黄 緑 青 紫

長 波長 短

エネルギー弱 波長長

電波 赤外線 可視光 紫外線 X線 γ線

エネルギー強 波長短

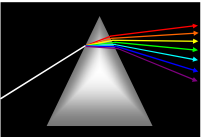
$E = h\nu$ E: エネルギー (J)
h: プランク定数 (Js)
 ν : 周波数 (Hz = s⁻¹)

$c = \nu \times \lambda$ c: 真空中の光速 (m s⁻¹)
 ν : 周波数 (Hz = s⁻¹)
 λ : 波長 (m)


5

2.1 電磁波(広い意味での光)とは何か? ③

● 太陽光はプリズムなどによって様々な色の光に分けられる(分光)。



↑プリズムによる太陽光の分光



虹: 空気中の水滴が、プリズムのような働きをして、太陽光を分光したものだ。
(デカルト, 1637年, 方法序説および試論案)
(←東大木曾観測所HPより)

17世紀: ニュートン(英)、フック(英)、ホイヘンス(蘭)などが光を研究。
1800年: ウィリアム・ハーシェル(英)によって、赤色光の外側での温度上昇が発見される → **赤外線**の発見
1801年: ヨハン・ヴィルヘルム・リッター(独)によって、紫色光外側での塩化銀の変化が発見される → **紫外線**の発見

● 目に見える光 = 可視光 → 光は可視光だけではない

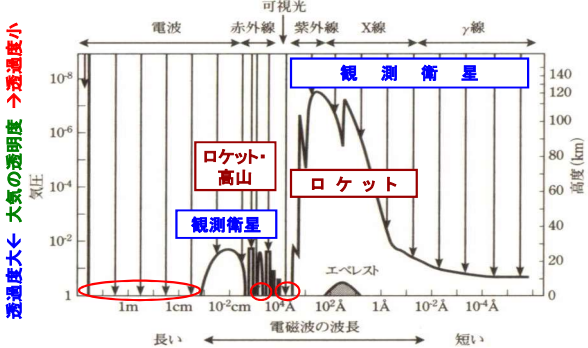
3

2.1 電磁波(広い意味での光)とは何か? ⑥

● 大気の窓

透視度大 ← 大気の透明度 → 透視度小

電波 赤外線 可視光 紫外線 X線 γ線



観測衛星
ロケット 高山
ロケット
エベレスト

地上で観測可能なのは「可視光」と「赤外線の一部」と「電波」のみ

6

2.2 天体望遠鏡 (7)

●天体望遠鏡の役割 ① より多くの光を集める(集光力)。

↑ 国立天文台ハワイ観測所すばる望遠鏡(口径8.2m)

↑ 市販製の8cm屈折望遠鏡

集光力 $\propto (\text{口径})^2$

高い集光力 = 暗い天体を写す能力

例) 口径 8 m と 8 cm

$$\frac{(8\text{m})^2}{(8\text{cm})^2} = 100^2$$

単純計算では、口径8mの望遠鏡は、口径8cmの望遠鏡の10000倍の集光力がある。

↓

8cm望遠鏡で10000分(=167時間=21晩)露光で得られる天体画像が、8m望遠鏡では1分で得られる。

7

2.2 天体望遠鏡 (10)

●可視光/近赤外線望遠鏡：

日本が保有する望遠鏡としては最大口径。結像性能は8-10mクラス望遠鏡の中でもトップを誇る。多くの可視光・近赤外線・中間赤外線用カメラや分光器を搭載できる。

1985年：計画の本格的開始
1991年：建設開始
1999年1月：ファーストライト

↑ 国立天文台ハワイ観測所すばる望遠鏡(口径8.2m)

鏡筒

主鏡8.2m(1枚鏡)

261本のアクチュエータと呼ばれる伸縮する支持棒

驚異的な解像度を実現

レーザー・ガイドスター(人工星)

大気の乱れを高速に解析

望遠鏡の姿勢による鏡のたわみを高速に解析する。

アクチュエータで、たわみと大気の乱れを相殺する。 = Adaptive Optics

10

2.2 天体望遠鏡 (8)

② より細かい構造を観る(角[度]分解能、空間分解能)。

角度分解能：接近している二つの星を「二つの星」と判別できる能力。

例) 系外銀河M81南東の天域の可視光画像(西浦取得)

↑ 角度分解能1/10

角度分解能が低い
= 細かい構造が不鮮明になる
= 暗い恒星が検出できなくなる

角度分解能(空間分解能)[rad]
= $1.22 \times (\text{観測波長}) / (\text{口径})$

角度分解能は、口径を大きくすると高くなる

可視光域から赤外線域では、大気の乱れと水蒸気による吸収で観測が制限される。

8

2.2 天体望遠鏡 (11)

国内口径第1位

↑ 京都大学理学研究科附属天文台 / 宇宙物理学教室
国立天文台岡山天体物理学観測所(岡山県浅口市/矢掛町)
せいめい望遠鏡:口径3.8m

- 分割鏡(扇形鏡×18枚)
→ 一般的な分割鏡は六角形
- 超高精度研「削」加工
→ 通常の主鏡加工は研「磨」
- 軽量架台(トラス構造)
→ 遺伝的アルゴリズムを用いた設計

(観測装置計画)：高分散分光器、広視野カメラ、高速測光カメラ、面分光装置

2018年11月より本格的観測を開始予定

11

2.2 天体望遠鏡 (9)

●世界のベスト・サイト

『マウナ・ケア天文台』(米, ハワイ島, 4,200m) 宿泊施設の運営は、地元のハワイ大学が中心になって行っている。

UH24(米:ハワイ大学, 80cm) JCMT(英・蘭・カナダ:15m) すばる(日:国立天文台, 8.2m)
CSO(米:キャルテック, 10.4m) SMA(米:台:スミソニアン, 6m×8) IRTF(米:NASA, 3.0m)

↑ スピッツァー宇宙望遠鏡 口径85cm (米:NASA, 赤外線) 2003年~

↑ 天文衛星「あかり」(JAXA) 口径2.5m 2027-28年 打ち上げ予定

↑ 天文衛星「SPICA」(JAXA) 口径68.5cm 2006年~2011年

VLBA(米:25m) Gemini(米・他:8.1m) ケックI & II(米:キャルテック, 10m×2)
UKIRT(英:3.8m) UH88(米:ハワイ大学, 2.2m) CFHT(カナダ・フランス・米:3.6m)

9

2.2 天体望遠鏡 (12)

●赤外線望遠鏡：

特に遠赤外線観測では、地球大気や望遠鏡自身が遠赤外線を放射するため、大気圏外に打ち上げ、観測装置自身を冷却する必要がある。

↑ スピッツァー宇宙望遠鏡 口径85cm (米:NASA, 赤外線) 2003年~

↑ 天文衛星「あかり」(JAXA) 口径2.5m 2027-28年 打ち上げ予定

↑ 天文衛星「SPICA」(JAXA) 口径68.5cm 2006年~2011年

12

2.2 天体望遠鏡

● 電波望遠鏡： 可視光・近赤外線とは別の「大気窓」を使った観測天文学



↑ 国立天文台野辺山宇宙電波観測所45mミリ波電波望遠鏡
↑ ALMA(アルマ)、アメリカ国立電波天文台+ヨーロッパ南天文台+国立天文台など(12m×54台+7m×12台)

ミリ波帯の単一電波望遠鏡としては世界最大級

複数の電波望遠鏡を同時に用いることで、巨大な電波望遠鏡を使うのと同じ高い解像度を得る「電波干渉計」。

13

2.3 電磁波を捉える手段～検出装置の基礎～

● 検出装置(カメラ)に関する諸原理

・ 写真乾板の原理： 化学反応を利用して、天体からの光を記録する。

← ハロゲン化銀を混ぜ込んだ感光天質(写真乳剤)

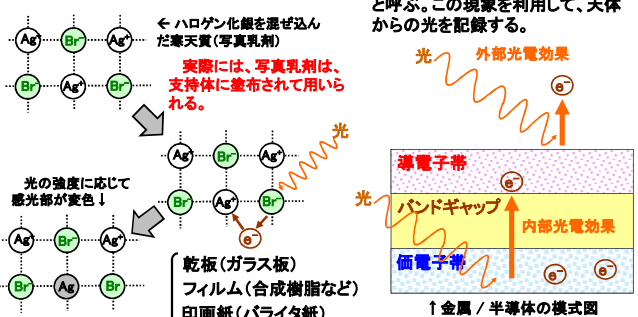
実際には、写真乳剤は、支持体に塗布されて用いられる。

光の強度に応じて感光部が青色↓

乾板(ガラス板) フィルム(合成樹脂など) 印画紙(パライタ紙)

・ 光電効果：
半導体(や金属)に光を当てると、電子が励起される現象を光電効果と呼ぶ。この現象を利用して、天体からの光を記録する。

外部光電効果
内部光電効果



↑ 金属 / 半導体の模式図

16

2.2 天体望遠鏡

● 紫外線望遠鏡：
↑ GALEX衛星(米: NASA, 紫外線) 口径 50 cm、2003年～2013年

● X線望遠鏡：口径 1.2 m, 1999年
↑ チャンドラ衛星(米: NASA, X線)

↑ XMM-ニュートン衛星(欧: ESA, X線) 1999年～

↑ 天文衛星「すざく」(JAXA, X線) 口径 40 cm、2005年～2015年
日本のX線天文学は、高精度のX線スペクトルを得ることで世界のトップを走る。

14

2.3 電磁波を捉える手段～検出装置の基礎～

● 光電子増倍管の原理
Photo-multiplier tube = PMT

外部光電効果によって生じた電子を、電界で加速・衝突を繰り返させることで増倍させて検出する。
集束電極(電子を加速させる)

真空

入射光 → 電子 → 陽極(アノード: 電子を電流として取り出す。)

光電面(金属・半導体)
入射光を受けて、外部光電効果によって1次電子を生じさせる。

↑ 光電子増倍管
↑ スーパーカミオカンデの光電子増倍管

17

2.3 電磁波を捉える手段～検出装置の基礎～

● 検出装置(カメラ)の発達史

観測能力 ↑

時代 → 紀元前3000年? 1600年頃 1820-1840年頃 1930年代 1980年頃 現在

眼視観測 → 記録は観測者のスケッチだった → 光を貯め込む → CCD(電荷結合素子) CMOS = Charge Coupled Device

光電効果: 半導体などに光が入射した時に、半導体内部から電子が飛び出てくる現象(後述)。

光電効果を用いて光を貯めて記録。高感度(可視光観測では写真乾板の100倍近い) → デジタルカメラとして社会に広く普及

光電子増倍管(フォトマル)
光電効果を用いて光を増幅させる。

写真乾板
化学反応を利用した観測記録方法

天体望遠鏡

15

2.3 電磁波を捉える手段～検出装置の基礎～

● CCD/CMOSの原理

内部光電効果： 金属や半導体に光が入射すると、価電子帯の電子が伝導帯に励起される現象。

伝導帯(電流流れる) → 価電子帯(電流流れない)

↑ 電圧をかけると電子の数に応じた電流が流れる。
→ 光電効果で生じた電子を電流として読み取る

・ Charge-Coupled Device = CCD = 電荷結合素子
・ Complementary Metal-Oxide-Semiconductor = CMOS = 相補的金属酸化物半導体

18

2.3 電磁波を捉える手段～検出装置の基礎～ (19)

● CCD

電圧を制御して、電荷を隣のピクセルに順次転送していく。(wikipediaより)

フルフレーム型CCD

垂直読み出し

水平読み出し

読み出し回路は1チップに対して1つ。

● CMOS (wikipediaより)

読み出し回路は画素に対して1つ。

CCDよりも、安価、消費電力が少ないなどの長所があるが、素子が不安定、ノイズが高いなどの致命的な短所があった。

→ 近年、克服されてきた。

19

2.3 電磁波を捉える手段～検出装置の基礎～ (22)

● スケッチ、写真乾板、CCDによる子連れ銀河M51の観測例

↑ 1.8m鏡によるロス卿のスケッチ

↑ 写真乾板

↑ 木曾105cmシュミット鏡および2K-CCDカメラ

(ロス卿のM51スケッチ、写真乾板によるM51、は出典を失念)

22

2.3 電磁波を捉える手段～検出装置の基礎～ (20)

● CCDカメラ

↑ 東京大学木曾観測所(長野県木曾郡木曾町)105cmシュミット望遠鏡

↑ 国立天文台ハワイ観測所(米・ハワイ)すばる望遠鏡(口径8.2m)→

↑ すばる主焦点カメラ(Suprime-Cam)

現在はHyper-Suprime-Camにグレードアップしている。

↑ Kiso Wide Field Camera = KWFC (国立天文台HPおよび東京大学木曾観測所HPより)

20

2.4 天体観測で何が見えるのか? (23)

● 「電磁波」はどのようにして放射されるのか?

- 連続波(連続光): 波長に対して、光の強度が連続的に変化する電磁波の放射過程。
 - ① 黒体放射
 - ② 熱制動放射
 - ③ シンクロトロン放射
- 輝線(線スペクトル): 特定の波長だけに放射される電磁波。
 - ④ イオン・原子からの輝線
 - ⑤ 分子からの輝線
 - ⑥ 吸収線

● 電磁波の「放射」以外の作用・現象

- 反射 → 「偏光」を生じる
- 散乱 → 「減光」「偏光」を生じる
- 屈折
- 吸収 → 「減光」を生じる

23

2.3 電磁波を捉える手段～検出装置の基礎～ (21)

● CMOSカメラ 東京大学木曾観測所 Tomo-e Gozen ● 現代の天体観測

↑ CMOSセンサー

↑ Tomo-e 試験機

↑ CMOSセンサー × 84チップ

視野: 20平方度

最大2フレーム/1秒

超々広視野撮像

高時間分解能観測 (東京大学木曾観測所HPより)

観測データは、CCD や CMOS によるデジタル画像として得られる。

天体からの電磁波だけでは無く、半導体素子の個性や電気回路から発生するノイズなども含まれているため、観測データにデジタル的な画像処理を施さねばならない。

→ 観測天文学者の仕事は、PCIに向かって画像処理を行ったり、そのためのプログラミングを行う地道な作業が基本となっている。

21

2.4 天体観測で何が見えるのか? (24)

● 黒体放射

熱平衡状態にある黒体(全波長域にわたって電磁波を吸収できる仮想的な物質)から放射される連続的な電磁波。放射強度分布は、温度のみで決まる。

恒星や星間塵(ダスト)は近似的に黒体と見なすことができる。

黒体放射の強度は、プランク(Planck)の放射式に従う。

磯崎ほか11名(平成28年), "地学", 啓林館

24

2.4 天体観測で何が見えるのか? (25)

● プランク(Planck)の放射式

$$u(\lambda, T)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad I(\lambda, T)d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k} - 1} d\lambda$$

u : エネルギー密度(単位時間・単位体積あたりのエネルギー量) I : 放射輝度(単位時間・単位面積あたりのエネルギー量)

前ページの図のような分布でエネルギーが放射される。

● ウィーンの変位則 $\lambda_{max}T = const. (一定)$
 黒体の温度が高くなるほど、放射強度が最大となる波長が短波長側に変位する。

● シュテファン・ボルツマンの法則 $I = \sigma T^4$
 黒体の温度の4乗に比例して、放射強度が強くなる。

25

2.4 天体観測で何が見えるのか? (28)

● 輝線と吸収線

量子力学に基づく、原子やイオン・分子などの電子軌道のエネルギーはイオンや原子で決まっているため、特定の波長(周波数)のみに対する電磁波放射。「線スペクトル」などと呼ばれることもある。

電子軌道のエネルギーはイオンや原子で決まっているため、特定のエネルギー、つまり、特定の波長の電磁波のみを放射する。

● イオンや原子の中の電子による放射・吸収:
 イオンや原子の中の電子が、低エネルギーの電子軌道に遷移する際に、そのエネルギー差に相当する電磁波を放射する。

軌道のエネルギー差に相当するエネルギーを電磁波で放射

電磁波 エネルギー

水素イオン (陽子) → 電子が通過 → 水素原子 (陽子+電子) → 低エネルギー状態へ遷移 → 水素原子 (陽子+電子) + 電磁波

特定の波長の電磁波を吸収して、高い電子軌道に遷移すると、吸収線が生じる。

28

2.4 天体観測で何が見えるのか? (26)

● 制動放射

加速度(減速)運動する荷電粒子からは、制動放射による連続光が放射される。

● 熱制動放射

熱運動する荷電粒子が制動を受けることで放射される連続光。

電磁波

電磁気力によって荷電粒子が加速度運動を行う

(熱制動放射のイメージ図-1)

(熱制動放射のイメージ図-2)

(熱制動放射のスペクトルの例)

26

2.4 天体観測で何が見えるのか? (29)

<<主な水素イオンの輝線・吸収線>>

ライマン系列 (紫外線波長域)

Ly ϵ 95 nm, Ly δ 94 nm, Ly γ , Ly β , Ly α

H α 656 nm, H β 486 nm, H γ 434 nm, H δ 410 nm

バルマー系列 (可視光波長域)

Pa α 1875 nm, Pa β 1282 nm, Pa γ 1094 nm

パッシェン系列 (近赤外線波長域)

29

2.4 天体観測で何が見えるのか? (27)

● 磁気制動放射(シンクロトロン放射)

光に近い速度で運動する荷電粒子が磁場から制動を受けることで放射される連続光。

荷電粒子が磁場によってローレンツ力を受けるため、磁場に巻き付くような円運動、もしくは、らせん運動をする。

磁場

シンクロトロン放射

(シンクロトロン放射のイメージ)

(単一の電子からのシンクロトロン放射のスペクトル)

(電子のエネルギー分布を考慮したシンクロトロン放射のスペクトル。周波数に対してベキ乗分布になる)

27

2.4 天体観測で何が見えるのか? (30)

● 水素原子起源の電波21cm線:

水素原子中の陽子と電子のスピンに基づくエネルギー遷移によって、電波域の波長 21 cm に生じる輝線。

エネルギー

up ↑ 原子核(陽子) | up ↓ 電子

遷移

波長 21 cm

up ↑ 原子核(陽子) | down ↓ 電子

30

2.4 天体観測で何が見えるのか? (31)

分子の振動や回転状態の遷移による放射・吸収:

分子の振動や回転の量子状態の遷移によって輝線放射が生じる。回転遷移では電波域、振動遷移では赤外線域に輝線を放射することが多い。

エネルギー ↑

輝線(赤外線域)

輝線(電波域)

31

2.5 電磁波で宇宙を観る (34)

可視光線: 380nm ~ 750 nm

Johnson-Cousins

透過率(%)

波長(Å) $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}, 10 \text{ \AA} = 1 \text{ nm}$

↑ジョンソン・カズンスのフィルター・システム (Bessell 2005より引用)

特定の輝線や吸収線に狙いを絞ったフィルターも多数存在する。このようなフィルターを使用すると、特定のイオンの空間分布などを調べることができる。

34

2.4 天体観測で何が見えるのか? (32)

●電磁波の「反射」「吸収」「散乱」:

- 反射 → 「偏光」を生じる
偏光の状態は、電磁波の波長や反射物質の性質による。
- 吸収 → 「減光」を生じる
長波長の電磁波は吸収され難い、また、短波長の電磁波は吸収されやすい。
- 散乱 → 「偏光」と「減光」を生じる
電磁波の波長よりも十分に小さい粒子による散乱はレイリー散乱、波長と同程度かそれよりも大きいサイズの粒子による散乱はミー散乱となる。
レイリー散乱: 波長の4乗に反比例して散乱の効率が大きくなる。つまり、短波長の電磁波ほど大きく散乱される。
→ 例) 青い空
ミー散乱: 散乱の効率が波長依存性がない。
→ 例) 白い雲

32

2.5 電磁波で宇宙を観る (35)

●星間物質による反射・吸収・散乱

ケズミ(C主体)や砂粒 (Si主体)のようなもの。 主に水素原子ガス

星間塵(チリ、ダスト) 星間ガス

星間塵による散乱は、可視光の波長に無関係。
星間ガスによる散乱は短波長(青い色)ほど強く、長波長(赤い色)ほど弱い。

恒星大気は、恒星内部よりも温度が低いいため、恒星のスペクトルには、恒星大気中の物質による吸収が生じる。

35

2.5 電磁波で宇宙を観る (33)

●可視光観測におけるフィルター

●ジョンソン・カズンスシステム

U(370nm帯)バンド、B(440nm帯)バンド、Vバンド(550nm帯)
Rc(660nm帯)バンド、Ic(800nm帯)バンド

フィルター	波長中心 (nm)	波長幅 (nm)	備考
U	365	53	人の目には紫色に見えるor見えない。近紫外線。
B	445	101	人の目には青色に見える。
V	551	83	人の目には緑色から黄色に見える。
Rc	659	157	人の目には赤色に見える。
Ic	806	154	人の目には見えない。近赤外線。

青色(B画像) + 緑色(V画像) + 赤色(Rc画像) → カラー画像
→ スペクトルは得られないが、スペクトルの傾向(色)を知ることができる

33

2.5 電磁波で宇宙を観る (36)

●恒星(黒体放射)と電離ガス(輝線放射)

放射強度(相対値)

波長(Å)

↑オリオン大星雲(M42)のスペクトル

恒星の可視光スペクトル: 所々に吸収線が見られるが、波長に対して連続的。
電離ガスの可視光スペクトル: 連続光に比べて、特定の波長に現れる輝線が非常に強い。

↑様々な恒星のスペクトル

36

・可視光でみた網状星雲 2.5 電磁波で宇宙を観る (37)

B+V+Rバンド画像 Iバンド画像

BVRバンドでは見えているが、Iバンド(800nm帯)画像では星雲状天体が全く見えない。これは、網状星雲が連続光(恒星)ではなく、輝線(イオンガス)で輝いていることを示している。

37

2.5 電磁波で宇宙を観る (40)

● 不規則銀河M82を可視光とX線で観る

何からX線が放射されるのか？

- ・ 数100万度から数億度という高温プラズマ。
- ・ 高速運動する電子と強力な磁場による放射(シンクロトロン放射)。

105cmシュミット鏡(東大:日本) チャンドラ衛星(NASA:米)

↑噴出しているのは電離水素
中性子星やブラックホール
高温プラズマの激流

M82中心部の中性子星やブラックホールからのX線を直接検出。これらブラックホールは中質量ブラックホールという新しい種類のB.H.

40

・可視光輝線でみたバラ星雲 2.5 電磁波で宇宙を観る (38)

N487(Hβ輝線)+N499([OIII]輝線)+Ha6577(Hα輝線)画像

Hα輝線に対して、相対的に[OIII]輝線が強い領域を識別できる。

38

2.5 電磁波で宇宙を観る (41)

● 可視光と近赤外線

近赤外線は、可視光よりもダスト(チリ)を透過する

名古屋大学1.4m望遠鏡(南アフリカ) わし星雲中心部:ハッブル宇宙望遠鏡

近赤外線(1.2, 1.7, 2.2 μm) 可視光(青+緑+赤)

41

・可視光輝線でみたバラ星雲 2.5 電磁波で宇宙を観る (39)

若い恒星は表面温度が数万度と非常に高く、紫外線を大量に放射する。すると、恒星の周辺の物質(多くは水素)が電離(イオン化)して、Hαと呼ばれる輝線などを放出する。水素イオンが多く分布する星生成領域を特にHII領域と呼ぶ。

青色: Uバンド(330nm) 青色: Bバンド(440nm)
緑色: Vバンド(550nm) 緑色: Vバンド(550nm)
赤色: Iバンド(800nm) 赤色: 659nm(Hα輝線)

特に若い恒星が多い部分は青く見える 水素イオンガスが多い部分は赤く見える
渦巻腕の若い恒星が多い場所と水素イオンガスが多い場所は一致している

39

2.5 電磁波で宇宙を観る (42)

● 赤外線観測

- ・ 近赤外線: 波長が0.8~5マイクロン
 - ① 表面温度が3000K以下の低質量・低温度の恒星。
 - ② 電離ガスや分子からの輝線。
- ・ 中間赤外線: 波長が5~30マイクロン
 - ① 低質量・低温度の恒星とチリ(ダスト)。
 - ② 分子(芳香族化合物?)からの輝線。
- ・ 遠赤外線: 波長が30~300マイクロン
 - チリ(ダスト)。
 - チリ(ダスト)=珪素(S)や炭素(C)を中心とした物質の塊。砂粒のようなもの。
 - 可視光や近赤外線などを吸収する。
 - 恒星の末期に生成・放出される?
 - 芳香族化合物 = 詳しい構造は不明。

可視光(ハッブル宇宙望遠鏡:NASA) 遠赤外線(スピッツァー宇宙望遠鏡:NASA)

例) M104(ソンプレロ銀河): チリによる吸収で可視光では暗黒帯になっている場所が、遠赤外線(赤い領域)では明るく見える。 → 銀河円盤にはチリが多く存在している。

42

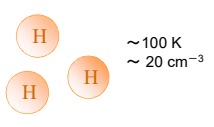
2.5 電磁波で宇宙を観る (43)

● 電波観測

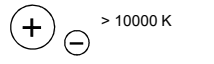
・ 原子ガス(低温ガス)の輝線

電離(イオン)ガスよりも低温なガス

例) 水素原子: 波長21cm



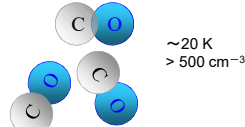
・ シンクロトロン放射



・ 分子ガスの輝線

原子ガスよりも低温で高密度なガス

例) 一酸化炭素分子: 波長2mm



他にもアンモニア(NH₃)、青酸(HCN)、メタノール(CH₃OH)など多様な分子。

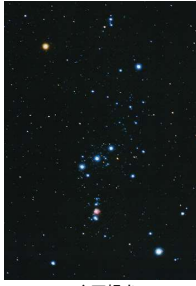
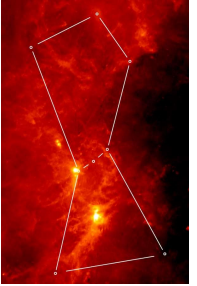
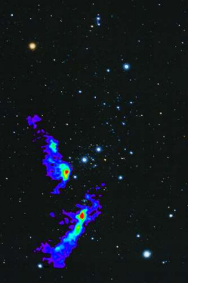
可視光や赤外線で見えるよりも、物質が**低温度・高密度**な領域から放射される。

43

2.5 電磁波で宇宙を観る (44)

● オリオン座を可視光と電波と遠赤外線で見ると

電磁波の波長 →

↑ 可視光

分子の多い場所には、チリも多く存在していることが分かる。

↑ 遠赤外線

天文衛星「あかり」

↑ 電波(ミリ波)

東大60cm電波望遠鏡(VST)

→ 分子の形成とチリの形成は関係している。

44

(45)

【参考文献】

- 1) 家監修(2002), "21世紀の宇宙観測", 誠文堂新光社。(画像: 大気窓)
- 2) 江里口(2006), "宇宙の科学", 東京大学出版会。
- 3) 岡村代表編者(2012), "天文学辞典", シリーズ現代の天文学 別巻, 日本評論社。
- 4) 東京大学木曾観測所HP (<http://www.ioa.s.u-Tokyo.ac.jp/kiso/hp/>), 画像: 望遠ドームと虹木曾105cmシュミット鏡, KWFC, CMOSセンサー, Tomoe-Gozen 試作機, Tomoe-Gozen 完成図, 2kCCDによるM51, 星団カラー画像, M42カラー画像, M83 [2種]
- 5) 国立天文台HP (<http://www.nao.ac.jp/>), 画像: すばる望遠鏡, 45mミリ波望遠鏡, ALMA, S-Cam [2種]
- 6) ビクセンHP (<https://www.vixen.co.jp/>), 画像: 口径8cm屈折望遠鏡)
- 7) 京都大学理学研究科HP (画像: せいめい望遠鏡[2種])
- 8) NASA HST HP (画像: スピッツァー, GALEX, チャンドラ, わし星雲中心部HST画像, M104 [2種])
- 9) JAXA HP (<http://isaa.jaxa.jp/>), 画像: あかり, SPIGA, すざく)
- 10) ESA HP (<http://www.esa.int/>), 画像: XMM-Newton)
- 11) 赤羽ほか(1988), "宇宙電波天文学", 共立出版。(画像: 熱制動放射のスペクトル)
- 12) 塩谷・谷口(2009), "銀河進化論", プリアデス出版。(画像: シンクロトロン放射 [3種])
- 13) 野本・佐藤・定金(2009), 「恒星」, シリーズ現代の天文学, 日本評論社。(画像: 恒星のスペクトル)
- 14) 栗立ぐんま天文台HP (<http://www.astron.pref.gunma.jp/>), M42のスペクトル・データ)
- 15) 板良房氏[現・東北大・理・天文] 提供 (画像: わし星雲中心部近赤外線画像)
- 16) 一家に1枚 天体望遠鏡400年 (画像: 多波長で観たオリオン座)
- 17) wikipedia (画像: 電磁波の簡単なイメージ, 電波からγ線の概念図, マウナ・ケア望遠鏡群, 光電子増倍管, カミオカンデの光電子増倍管, CCD読み出しの概念図, CMOSの概念図, 水素のエネルギー準位と輝線)

45