

# 天体測定学 II 2007-1

## 1 電波天文学入門

### 1.1 なぜ電磁波観測か？

天体を観測する (= 天体からの情報を受け取る) ためには、天体から放出された何らかの粒子を検出する必要がある。ここで「粒子」とは、自然界に存在する4つの力を媒介する粒子から、陽子や電子、ニュートリノ、さらには隕石まで、様々な種別がある。それらの種別を以下の表にまとめる。天体観測に際して特に重要なのは、1) 十分遠方から到達する、2) 天文学的距離を伝播する際に直進する、3) 観測可能な十分な強度がある、という点である。

表 1: 天体からの情報をもたらす可能性のある様々な粒子

粒子の種別	粒子名	到達距離	直進性
場の媒介粒子			
電磁気力	光子 (photon)	無限	
重力	重力子 (graviton)	無限	
強い力	グルーオン	有限	
弱い力	ウィークボゾン	有限	( )
バリオン	陽子	無限	× (荷電粒子)
	隕石	太陽系内	× (重力の影響大)
レプトン	電子	無限	× (荷電粒子)
	ニュートリノ	無限	

上記の様々な「粒子」のうち、無限距離に到達しうるのは遠距離力である電磁気力および重力の媒介粒子と、安定な(寿命の長い)粒子である。しかし、荷電粒子は磁場によって進行方向が曲げられ、結果としてどの天体からやってきたのかが判らなくなり、また、隕石のような多粒子からなる物質は到達距離が極めて小さい。よって、1) 無限の到達距離と2) 直進性を持った併せ持つ粒子は、光子、重力子、ニュートリノに限られることがわかる。

3) の観測可能な強度については、技術の進歩に大いに依存するので、この3つの粒子はどれも天体観測の有効な手段となりうる。しかし、重力子(重力波)は現在のところ未検出である。また、ニュートリノが検出されている天体は、太陽、地球、そして超新星 1987A の3天体のみである。従って、現在のところ、光子(電磁波)の観測が一般的な天文観測としては唯一のものである。一方、重力波やニュートリノで観測される天体が増加すれば、天体に関する新たな知見をもたらすことが期待され、現在も活発な研究が続けら

れている。

## 1.2 電磁気力と重力

電磁波と重力波では観測の難易度が格段に異なる。これは、クーロン力と重力の大きさを比較すれば容易に理解できる。実際、電荷  $e$ 、重さ  $m_e$  の2個の電子が相互作用する状況を考えると、クーロン力  $F_{\text{em}}$  は、

$$F_{\text{em}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}, \quad (1)$$

一方、重力  $F_{\text{gr}}$  は

$$F_{\text{gr}} = \frac{Gm_e^2}{r^2}, \quad (2)$$

と書き表される。ここで、 $r$  は2粒子間の距離であり、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $G$  は重力定数である。両者の比を取ると、

$$\frac{F_{\text{em}}}{F_{\text{gr}}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 Gm_e^2} \sim 4 \times 10^{42}, \quad (3)$$

であり、圧倒的に電磁気力が大きいことがわかる。電磁波も重力波も粒子が加速を受けるときに放出されるので、電磁波が重力波よりもはるかに放出されやすく、従って観測が容易である。

## 2 電磁波と電波

### 2.1 電磁波の基礎的性質

量子力学的な考えによれば、電磁波は粒子（光子）であると同時に波であり、両者の性質を併せ持っている。電磁波の基礎的な性質を以下にまとめる。

- 真空中の光速  $c$  :  $c=299792458 \text{ m s}^{-1}$  （これは長さの定義数、時間間隔の1秒は別に定義される）
- 電磁波の波長と周波数の関係 :  $c = \nu\lambda$
- 光子のエネルギー  $E$  :  $E = h\nu = hc/\lambda$
- 電磁波は横波であり、直交2偏波成分が存在する。

### 2.2 電波

電磁波は周波数（波長）により電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、線などに分類される。電波は波長が最も長く（周波数が最も低く）、ガンマ線

表 2: 電磁波の分類

波長 $\lambda$	周波数	名称
$\infty - \sim 0.3 \text{ mm}$	$0 \text{ Hz} - 10^{12} \text{ Hz}$ (1 THz)	電波
$\sim 0.3 \text{ mm} - \sim 0.8 \mu\text{m}$	$10^{12} \text{ Hz} - 3 \times 10^{14} \text{ Hz}$	赤外線
$\sim 0.8 \mu\text{m} - \sim 0.3 \mu\text{m}$	$3 \times 10^{14} \text{ Hz} - 10^{15} \text{ Hz}$	可視光
$\sim 0.3 \mu\text{m} - \sim 10 \text{ nm}$	$10^{15} \text{ Hz} - 3 \times 10^{16} \text{ Hz}$	紫外線
$\sim 10 \text{ nm} - \sim 1 \text{ pm}$	$3 \times 10^{16} \text{ Hz} - 3 \times 10^{20} \text{ Hz}$	X線
$\sim 1 \text{ pm} -$	$3 \times 10^{20} \text{ Hz} -$	線

表 3: 電波の波長や周波数による分類

波長	周波数	名称	用途 (天文学以外)
1 - 10 km	30 kHz - 300 kHz	キロメートル波 (長波)	電波時計、船舶無線
100 m - 1 km	300 kHz - 3 MHz	中波	ラジオ、無線通信
10 m - 100 m	3 MHz - 30 MHz	短波	短波放送、無線通信
1 - 10 m	30 - 300 MHz	メートル波 (VHF)	FM ラジオ、テレビ
10 cm - 1 m	300 MHz - 3 GHz	デシメートル波 (UHF)	テレビ、携帯
1 cm - 10 cm	3 GHz - 30 GHz	センチ波	衛星通信
1 mm - 10 mm	30 GHz - 300 GHz	ミリ波	レーダー
0.1 mm - 1 mm	300 GHz - 3 THz	サブミリ波	

は波長が最も短い (周波数が最も高い)。通常、電磁波における「電波」帯は、以下の波長や周波数で定義されるが、赤外線との区別は明確には定義されていない。

$$\text{周波数 } \nu \leq 1 \text{ THz} (= 10^{12} \text{ Hz})$$

$$\text{波長 } \lambda \geq 0.3 \text{ mm}$$

波長や周波数と別の観点としては、観測方式の違いがあげられる。一般的に言って、電波は波として受信され、赤外線は粒子 (光子) として受信されることが多い。しかし、電波を光子として受信するボロメータや、赤外線や可視光を波として扱う光赤外線干渉計も存在しており、観測方式による区分も、かならずしも厳密なものではない。ちなみに、現行の電波法では、電波の周波数上限は 3 THz になっている。

また、電波は波長や周波数によって、以下のようにさらに細分化した名称で呼ばれることも多い。

## 2.3 電波観測の特徴

様々な波長の電磁波の中で電波帯域で観測を行うことの利点として、次の 2 つがあげられる。

- 観測できる天体の種類が圧倒的に多い
- 波として受信するので、干渉計が構成可能であり、最も高い分解能の装置が達成される。

一点目に関しては、電波帯では3 K背景放射が観測可能であり、これより温度の高いありとあらゆる天体が（原理的には）すべて電波観測可能である。他方、可視光では恒星に相当するような温度（数千度）以下の熱放射は見えず、また、X線領域になると放射に必要な温度はさらに上昇する。

2点目に関しては、光子を波として可干渉性を保ったまま扱うことがポイントである。これにより、干渉計が実現でき、すべての波長帯の観測装置の中で最も高い分解能を達成することができる（光赤外線でも近年技術が進歩し、干渉計が観測で使われている例もあるが、現在のところイメージング能力は電波に比べて大きく劣っている）。

## 2.4 望遠鏡の分解能

望遠鏡の分解能（回折限界ともいわれる）は以下の式で与えられる。

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

ここで、 $\lambda$  は観測する電磁波の波長、 $D$  は望遠鏡の口径である。高い分解能を達成するには、より波長の短い電磁波を観測するか、より大きな望遠鏡を使えばよい。電波の場合波長  $\lambda$  は他の電磁波に比べて長い、電波干渉計の技術により  $D$  を非常に（具体的には地球サイズかそれ以上に）大きくできる。これによって、ありとあらゆる望遠鏡の中で最も高い空間分解能が達成される。

表 4: いろいろな望遠鏡の分解能の例

装置	$D$	$\lambda$	$\theta$
人間の目（瞳孔）	5 mm	$0.5 \mu\text{m}$	0.34 arcmin
すばる	8.2 m	$2 \mu\text{m}$	50 mas
100m 電波望遠鏡	100 m	1 cm	0.34 arcmin
VSOP-2	300000 km	7 mm	$48 \mu\text{as}$

## 2.5 大気の窓

我々は地球表面上で生活しており、いわば大気という「海」の底から宇宙を観測している。大気中の原子や分子によって電磁波が吸収されるため、波

長によっては地上からは観測できない電磁波が存在する。大気の透過率を波長（周波数）の観測として表したとき、透過率が高いのは電波帯域と可視光帯域のみであり、これらの透過率が高い領域を「大気の窓」という。一方、赤外線やX線、γ線の観測は地上からは行えないので、衛星を打ち上げて大気圏外から観測する必要がある。

電波帯の大気の窓は、地表近くでは約 100 MHz から数 100GHz 程度である。電波帯の大気の窓は低周波側は電離層（地表から 50～500 km の電離した高層大気）による反射によって制限されている。また高周波側は主に水蒸気による吸収によって制限されており、地上 4000m～5000m 級の高地では気象条件が良ければ 1THz 程度まで電波観測が可能である。このような例として、サブミリ波を観測する装置である、SMA（米国ハワイ マウナケア山、標高 4000m）、ALMA（チリ アタカマ高地、標高 5200m）などがあげられる。