

ELECTRONIC IMAGING IN ASTRONOMY

Detectors and Instrumentation

4 The discovery power of modern astronomical instruments

櫛引洸佑

理学部天文学科 4 年

2017/4/19

- 4.1 Imaging the sky; more than pictures
 - 4.1.3 Drift scanning and the Sloan Digital Sky Survey
 - 4.1.4 The Two Micron All Sky Survey
 - 4.1.5 Deep imaging in selected fields
 - 4.1.6 Diffraction-limited imaging
 - 4.1.7 Interferometers; expanding the baseline
- 4.2 Spectroscopy; atomic fingerprints
 - 4.2.1 Introduction

- 4.1 Imaging the sky; more than pictures
 - 4.1.3 Drift scanning and the Sloan Digital Sky Survey
 - 4.1.4 The Two Micron All Sky Survey
 - 4.1.5 Deep imaging in selected fields
 - 4.1.6 Diffraction-limited imaging
 - 4.1.7 Interferometers; expanding the baseline
- 4.2 Spectroscopy; atomic fingerprints
 - 4.2.1 Introduction

4.1.3 Drift scanning and the Sloan Digital Sky Survey : Drift scanning

- CCD の特徴
 - 溜まった電荷が横に移動していく。
 - 望んだ速さで動かせる。
- CCD を "sidereal rate" (15.4 arcsec) で動かし、望遠鏡は一つの領域に向けたまま。
 - ⇒ 実際の星の位置と CCD 上の星の位置が対応しながら共に動く。
 - ⇒ 装置を動かすことなく深いサーベイが機械的に可能に。
- これを "drift scanning" と呼ぶ。 ⇒ SDSS やその他のサーベイで用いられる。

4.1.3 Drift scanning and the Sloan Digital Sky Survey : SDSS

- 北天の 50% 程度のサーベイを完了。
- SDSS vs digitized photographic plate
 - SDSS の方が深い (21-22 mag 程度)。← 望遠鏡が大きいから (2.5m vs 1.2m)。
 - SDSS は色々な波長の 5 つのフィルター (u,g,r,i,z) で幅広く撮る。
- SDSS が受けた恩恵
 - CCD の線形性 ⇒ 良い測光。
 - computing power の進歩 ⇒ 自動データリダクション。
- 最終的にはフォローアップ分光器が搭載された。
- データリリースは 13(July 2015)
⇒ 14,555 square degrees、4,355,200 spectra
(<http://www.sdss.org/dr13/scope/>)

- 4.1 Imaging the sky; more than pictures
 - 4.1.3 Drift scanning and the Sloan Digital Sky Survey
 - 4.1.4 The Two Micron All Sky Survey
 - 4.1.5 Deep imaging in selected fields
 - 4.1.6 Diffraction-limited imaging
 - 4.1.7 Interferometers; expanding the baseline
- 4.2 Spectroscopy; atomic fingerprints
 - 4.2.1 Introduction

4.1.4 The Two Micron All Sky Survey: 2MASS

- 北半球と南半球の二つの望遠鏡を使用。
- J($1.25\mu\text{m}$)H($1.65\mu\text{m}$)K_s($2.17\mu\text{m}$) バンドでの同時観測。
- カメラは 2arcsec の分解能、望遠鏡は赤緯方向に 1 秒で 1arcmin だけスキャン。
- 望遠鏡がスキャンしている時、副鏡が同じ速度で逆に傾き像を検出器に"freeze" させる。⇒ 1/10 秒以内に、1.3 秒の露光が終わると副鏡が元に戻りそれまでとはずれた像を freeze させる。
↑ TDI(Time Delay and Integration)、drift-scanning と等しい。
- 視野の 1/6 ずつずらすので、最終的には 7.8 秒積分。

4.1.4 The Two Micron All Sky Survey: 2MASS

- 1997 の 6 月に北天、1998 の 3 月に南天がスタート。2001 の 2 月にどちらも完了。
- 色々な機関が協力 (UMass、IPAC)、資金援助 (NASA、NSF)。
- data release
 - Point Source Catalog: 4.7 億の天体の位置と明るさ。
 - Extended Source Catalog: 160 万の光源の位置、等級、基本的な形。
 - Image Atlas: 500 万の J、H、K_s 画像。
 - J、H、K_s で 15.8、15.1、14.3 等級より暗いものが写り、位置は 0.1arcsec 程の正確性。

4.1.4 The Two Micron All Sky Survey: 2MASS の観測

- 2MASS の重要性
 - 近赤外では星間ダストの影響 (減光、赤化) を受けない。
⇒ 天の川銀河の前例のない姿を示してくれる。
- 全天の銀河分布
 - $K_s < 14.5\text{mag}$ のもの。
 - "Zone of Avoidance" (銀河面のダストで見えなかった領域) も含む。
 - 100 万以上の銀河についてのカタログ ⇒ 測光測定、環境の違う銀河の構造パラメータを与えてくれる。
 - これらは luminous mass が支配的なものに感度の高い波長で測定されている。
- 低温でとても赤い、可視でひどく隠されたもの
 - 何百ものとても冷たい準恒星 "brown dwarf" の発見 ⇒ 新たに二つの恒星のスペクトルタイプの追加。
 - 新たな星形成領域や知られていなかった銀河の発見 ⇒ 近傍宇宙の多くの銀河の正確な分布。

4.1.4 The Two Micron All Sky Survey: 類似したその他サーベイ

- DENIS(European Deep Near-Infrared Survey)
 - 1996~2001、南半球。
 - 赤外バンド J、K と可視バンド I を用いる。望遠鏡は 1m の反射式。
 - 3.55 億の点光源が 3,662 枚の画像 (declination: 30° , right ascension: 12arcmin) から検出。
 - 赤外バンドと可視バンドの併用は SDSS と 2MASS の組み合わせ。
- 宇宙空間での赤外線観測 IRAS(Infrared Astronomical Satellite)
 - $12\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ での低解像度の全天サーベイ。
 - interstellar cirrus と呼ばれる暗い放射雲が銀河系の大部分を覆っていること、いくつかの遠方銀河は遠赤外で非常に明るい方がより短波長ではダストによって暗くなっていること。
- 現在では電波 (73.5cm) からガンマ線 ($<1.2 \times 10^{-12}\text{cm}$) までの全天サーベイを持っている。

- 4.1 Imaging the sky; more than pictures
 - 4.1.3 Drift scanning and the Sloan Digital Sky Survey
 - 4.1.4 The Two Micron All Sky Survey
 - 4.1.5 Deep imaging in selected fields
 - 4.1.6 Diffraction-limited imaging
 - 4.1.7 Interferometers; expanding the baseline
- 4.2 Spectroscopy; atomic fingerprints
 - 4.2.1 Introduction

4.1.5 Deep imaging in selected fields: HDF の観測

- Hubble Deep Field (HDF)
 - 可能な限り暗いものまで写すためにかなり長時間 (10 日間)、空の一部 (HDF) を撮る。
 - Bob Williams によるもの。1995 年 12 月 18-28 日に WFPC2 を用いて撮られた 342 の CCD の露光データを集めて作られた。
 - HDF は foreground star がないこと、foreground dust extinction がないことから選択。
 - 深く撮るためには HST の連続視野 (declination で 62° 付近) の中にあることも必要。
 - フィルターは F300W、F450W、F606W、F814W の四つ (数字は中心波長 nm)(三色合成のため赤い二つはまとめた)。
⇒ それぞれのフィルターに 35 時間 (300nm だけ 50 時間)

4.1.5 Deep imaging in selected fields: HDF の観測

- HDF の細いペンシルビームは宇宙全体を代表していると考える。
- 1,500 もの銀河は非常に遠くにあるので、それらの昔の姿を見ている。
- HDF の多くの天体は Keck などの非常に大きな望遠鏡の分光器を使って追観測可能。
- 新たな Deep field について同様のことをできることを期待する。

- 4.1 Imaging the sky; more than pictures
 - 4.1.3 Drift scanning and the Sloan Digital Sky Survey
 - 4.1.4 The Two Micron All Sky Survey
 - 4.1.5 Deep imaging in selected fields
 - 4.1.6 Diffraction-limited imaging
 - 4.1.7 Interferometers; expanding the baseline
- 4.2 Spectroscopy; atomic fingerprints
 - 4.2.1 Introduction

4.1.6 Diffraction-limited imaging: AO の出現

- 回折限界での画像は宇宙望遠鏡でのアドバンテージ (近紫外から遠赤外) ⇒ AO の出現によって地上の大望遠鏡でも可能。地上の方が望遠鏡が大きい (角分解能は λ/D)
- 近赤外での回折限界画像の影響
 - 太陽系外惑星と衛星の人工衛星を使わない研究
 - 天の川銀河中心のブラックホール近くの星の軌道運動
 - もっとも印象的なものは二つのグループによって行われた銀河系の力学中心での位置天文学。

4.1.6 Diffraction-limited imaging 赤外 AO での観測例

- Andrea Ghez(UCLA, Keck) と Reinhard Genzel(Max Plank Institute for Extraterrestrial Physics, ESO/VLT)
- 銀河中心 (太陽から 8000pc) は可視だとガスやダストで 30 等級もの減光 ⇒ 赤外ならほんの数等級
- 銀河中心は混み入っている ⇒ AO と大望遠鏡によって太陽系の 5 倍の大きさを分解可能に。
- 観測結果
 - 銀河の幾何中心には明るい天体はなく、Sgr A* という点状の電波源。
 - 見えない質量の周りを高速でまわる多くの星。
 - これらの星の軌道から中心の質量計算
 - ⇒ 太陽の 400 万倍、とても暗い変光光源しかない。
 - ⇒ ブラックホールがある。

- 4.1 Imaging the sky; more than pictures
 - 4.1.3 Drift scanning and the Sloan Digital Sky Survey
 - 4.1.4 The Two Micron All Sky Survey
 - 4.1.5 Deep imaging in selected fields
 - 4.1.6 Diffraction-limited imaging
 - 4.1.7 Interferometers; expanding the baseline
- 4.2 Spectroscopy; atomic fingerprints
 - 4.2.1 Introduction

4.1.7 Interferometers; expanding the baseline

- 可視赤外の干渉計
 - 星の直径、連星軌道の研究に貢献してきた
 - 次世代 (大望遠鏡でのもの) では若い星周りの原始惑星系円盤のマッピング、近傍活動銀河のブラックホール降着円盤の構造調査など非恒星科学。
 - まだ初期段階。2003 までのレビューは Monnier (2003)。
- 電波の干渉計
 - 多くのアンテナアレイが稼働中 (VLBI など)。
 - 驚くべき角分解能 ($\sim \lambda/b$ ($b = \text{baseline}$)) で、位置天文学に大きなインパクト。

- 4.1 Imaging the sky; more than pictures
 - 4.1.3 Drift scanning and the Sloan Digital Sky Survey
 - 4.1.4 The Two Micron All Sky Survey
 - 4.1.5 Deep imaging in selected fields
 - 4.1.6 Diffraction-limited imaging
 - 4.1.7 Interferometers; expanding the baseline
- 4.2 Spectroscopy; atomic fingerprints
 - 4.2.1 Introduction

4.2.1 Introduction: Spectrometer とは

- Spectrometer は化学組成、温度、密度、速度などを与える。
- ほぼすべての Spectrometer は CCD を使っている。
- "Spectrometer" は一般的な言葉
 - Spectrograph: スペクトルを記録するイメージングデバイスを持つもの。
 - Imaging Spectrometer, 3-D spectrometer: 普通の二次元画像と一次元波長スペクトルを両方とれるもの。
 - Scanning monochromator: イメージングデバイスでない光電子増倍管などが使われ、スペクトルに沿って小さなステップで検出器をスキャンしていくことでスペクトルが記録されるもの。
- 分解能 ($R = \lambda/\Delta\lambda$) でいくつかに分類。
 - faint object spectrographs, low resolution ($R \sim 500$)
 - intermediate dispersion spectrograph ($R \sim 5,000$)
 - high-resolution spectrograph ($R > 25,000$)
 - imaging spectrometers (技術による)

4.2.1 Introduction: 光の分散と S/N

- 光を分散させるためにほとんどの分光器は回折格子を利用。
- 光を分散させたときに、スペクトルの各所が暗くなると正確な測定は難しくなる。
 - S/N は \sqrt{N} による。記録される光電子数 N はスペクトルの幅 ($\Delta\lambda$) による。
 - $\lambda/\Delta\lambda = 5$ のものと $\lambda/\Delta\lambda = 5,000$ のものでは分割が 1000 倍違うので、S/N が $\sqrt{1,000} = 31.6$ だけ異なる。

4.2.1 Introduction: 観測されるスペクトル

- 天文学的スペクトルは三つのタイプ
 - 連続光
黒体輻射。イオン化された太陽内部は連続放射源。ピークは温度で決まる。
 - 吸収線
密度がより低く冷たいプラズマを輻射が通過すると、化学物質に特有の波長が吸収される。太陽の外層。スペクトル中の暗線。
 - 輝線
吸収された輻射がその特定の波長で再放出されるもの。太陽コロナ、惑星状星雲、反射星雲など広がったもの。
- スペクトル線は本来狭いが、原子のランダム熱運動、星全体の回転、恒星大気の圧 (衝突)、強い磁場の影響などで広がる。
⇒ 波長分解能 R が小さいと輝線が分解できない。可視光の太陽スペクトルで $R = 10,000$ が必要。

4.2.1 Introduction: 分光による温度の決定

- 分光が初めて天文学に導入されたとき
⇒ 特定の線の有無と線の見掛け上の太さで分類。
- スペクトルの見た目は温度とイオン化状態による ⇒ O(50,000K) B A F G K M(3,000K) の分類。
- 褐色矮星の発見 ⇒ L T の追加。
褐色矮星は過熱蒸気による強い吸収、メタンによる吸収が赤外にある。

4.2.1 Introduction: 分光による視線速度の決定

- 測定されたスペクトルの波長は放射原子の速度に依存。
- 光速より十分小さい原子の速さに対して
 - ドップラー効果による。
 - 放射源の速度 V は $V/c = (\lambda_{obs} - \lambda_{em})/\lambda_{em}$
 - 検出できる最小の速度は理論上 $V/c = \Delta\lambda/\lambda = 1/R$ 、実際は $0.1\Delta\lambda$
- 遠方銀河に対して
 - 空間が膨張することによる。
 - "redshift": $z = (\lambda_{obs} - \lambda_{em})/\lambda_{em}$
 - 小さな距離 d に対して、 $z = H_0(d/c)$
 - 宇宙のサイズは $1/(1+z)$ に比例。
 - ドップラー効果ではないので注意。
- z を 0.1% の正確性で測るには $R \sim 1,000$ で十分。

4.2.1 Introduction: 分光で分かること

- 分光の三つの機能
 - 化学組成や存在度
 - 温度
 - 視線方向速度
- これらを測定するために装置はどのような形であるべきか？