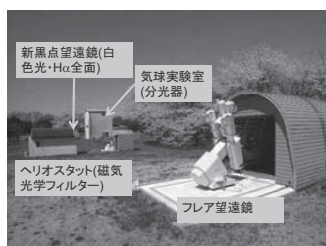


太陽のデジタルカメラ画像でできる天文学

花岡 庸一郎(国立天文台)

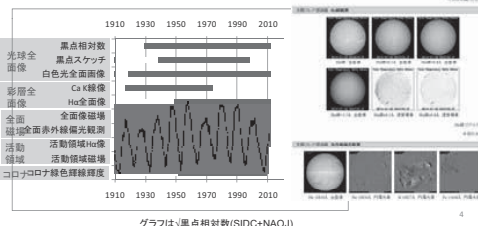
私の所属: 太陽観測所

- 現在の国立天文台三鷹キャンパスにおける太陽観測装置
 - 太陽観測所では太陽全体をとらえるシノプティック観測を継続中

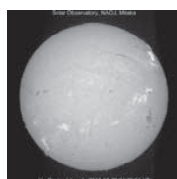
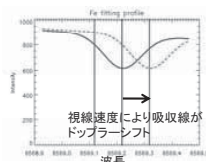


新黒点望遠鏡(白色光・H α 全面)
 気球実験室(分光器)
 ヘリオスタット(磁気光学フィルター)
 フレア望遠鏡

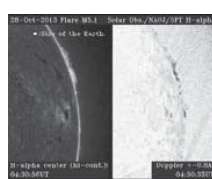
- 日々の観測結果とともに、1917年以降の過去のデータもデジタル化して公開中



- いろいろな波長での太陽の明るさだけではなく、画像間の比較から得られる二次的情報の計測も行っている
- 波長シフト(ドップラー速度)

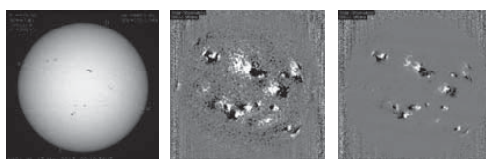


H α 吸収線中心での太陽像



H α 両翼の画像による速度場

- 偏光も測定している(磁場)
 - 太陽では磁場によって生ずる偏光が重要
 - 偏光という量自体は直接測れないので、複数の情報から二次的に値を得る



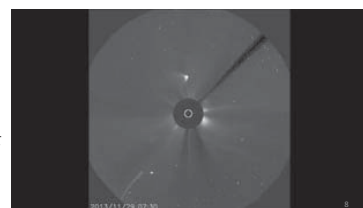
光球太陽像 光球での偏光 彩層での偏光

デジタルカメラのデータからこんなことが(なら)できる、というお題

- 天文学のための環境は専門家だけのものではない
 - 画像取得のデジタル化
 - ・ 特に太陽の観測では比較的小さいCCD等が使用される(情報量が限られている一方、画像を速く大量に撮るため)
 - インターネットによるデータ流通
 - 計算機によるデータ処理の一般化

SOHO/LASCO(C2/C3)のCCDカメラはデジカメ並み

- SOHOは地球から150万kmに位置する太陽観測機、LASCOは可視光コロナグラフ
- 約21mm四方の検出器と口径1~2cmの対物レンズを使用



SOHO/LASCOによって観測されたISON彗星(NASA)

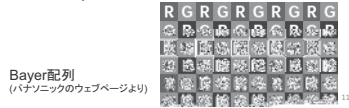
- デジタル(カメラ)のデータからこんなことが(なら)できる — 基本的に何でもできるが...
- やはり一から自分でやって見るのも重要
- 最も単純な観測でもできることは何か?

今回紹介する内容: 太陽を白色光で撮影してわかること

- 自分でデータを簡単に取ることができる
- カラーカメラを使用する
 - 通常天文学の観測では使わない
- 以上の条件で
 - ・ 例1: 普通の太陽写真からわかること
 - デジタル一眼レフカメラによる太陽白色光観測とその教育への応用の研究(2009年度明星大学卒業研究、本間達哉、廣瀬魅カ、香嶋浩之)/天文学会発表(花岡他、2011年3月)
 - ・ 例2: 皆既日食の白色光コロナ観測

カラーのカメラ

- 欠点
 - RGB各色を同時に撮るため、Bayer配列を採用するのが一般的
 - 各色の画像はそれぞれ一部のピクセルしか使わないので、分解能が落ちる
 - 同一場所の各色の輝度の比較は厳密には困難
- 利点
 - 入手しやすい、使いやすい、手軽
 - 遠隔地で限られた時間に大量のデータを簡単に得られる(皆既日食観測など)



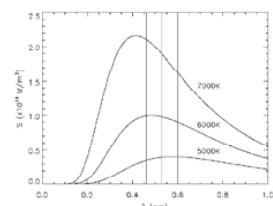
Bayer配列
(ハテナニックのウェブページより)

実践可能な内容

- 周縁減光と輻射輸達理論に基づく、太陽(恒星)表面近くの深さと温度の関係の導出
 - 周縁減光や黒点の輝度と、温度・黒体放射スペクトルの関係の導出
- 大気による吸収とその波長による違いの分析と解釈
- 教育的な意味では、解析の過程で基本的なデジタル画像の定量解析のための処理(ダーク・フラット処理など)を経験できる

- 定量的には、一応黒体放射で温度と輝度の関係を扱える
 - カメラのRGB波長での相対的な輝度から温度の違いを出すことができる

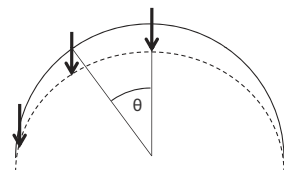
いろいろな温度の黒体が放つ光の波長分布



黒体放射とRGBでの輝度の関係。高温度ほど短波長側が相対的に明るい

なぜ周辺ほど低温に見えるのか？

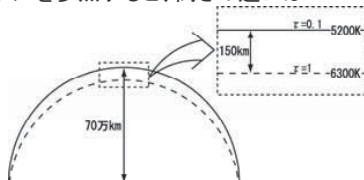
- 太陽大気は半透明
 - 周辺ほど実は浅くまでしか見通せない
 - 太陽が外側ほど低温なら、見かけ上周辺ほど低温に見える



17

周縁減光と太陽の大気構造

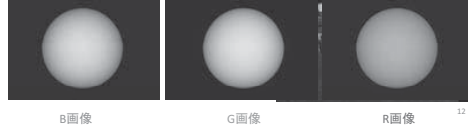
- カメラで測定したRGBの色の違い→太陽面中心が6300Kなら周辺($\tau \sim 0.1$)では5200Kと計算できる
- 大気モデルを参照すると、高さの違いは150km



19

例1: 普通の太陽写真からわかること

- 天文学の基礎的な教育に使えるか？
 - デジタル一眼レフ(カラー)+小望遠鏡、特別な設備不要
 - 簡単だが解析に耐えるデータが得られる
 - 定量解析によるデータ取り扱いの実践が可能(必ずしも太陽物理には限らない)



B画像

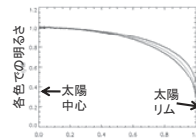
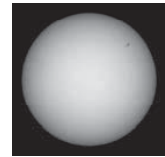
G画像

R画像

12

1. 周縁減光と太陽の大気構造

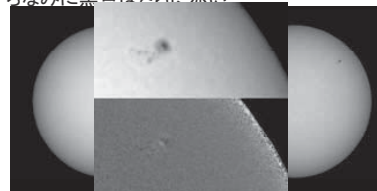
- 一見白黒に見える画像であるが、波長により周縁減光が異なる
 - 周縁減光の定量的解析が3色でできる
 - 場所によって温度が違って見える
- 輻射輸達の知識を媒介にして温度と光学的深さを関係づけられる



動径方向の周縁減光の様子。短波長ほど減光が顕著

1. 定性的に見ると: 色との関係

- RGBで得られる色の情報は温度と関係がある
 - 周辺ほど赤く、温度が低い
 - 星の色も同じ
 - ちなみに黒点はさらに赤い

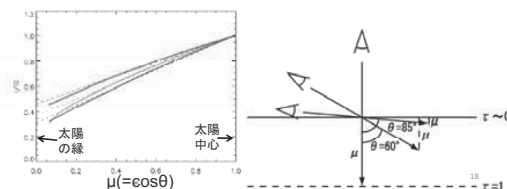


カラー写真なので、色を強調すると...

16

周縁減光と太陽の大気構造

- 周縁減光の解析から、恒星表面の温度構造(光学的深さと温度の関係)を導くことができる
- 周辺減光は、 $\mu(\mu = \cos\theta)$ を横軸にとると直線的
- 光学的深さ(τ)と μ は同じと考えてみる



18

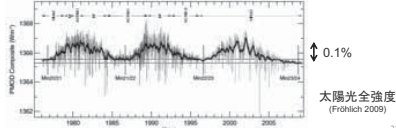
- たいてい教科書で習うだけで終わる輻射輸達を、自ら撮った白色光写真をもとに実天体に応用して見ることができる例
- ただし大変地味
 - 周辺減光を理解することは、学問的には(空間分解できない)星からの光を理解する上で重要

- 余談: 太陽の単なる白色光画像は学問的には特に価値が無いものなのか？

20

太陽からの放射(ほとんど白色光が担う)

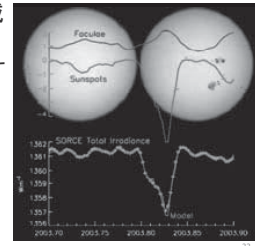
- 大変安定している
 - 太陽フレアではX線強度が100倍とかになるが、全放射エネルギーにはほとんど影響ない
- しかし太陽活動周期でわずかに変化する
 - 活動が活発だと太陽も明るい



21

なぜ輝度が変化するのか？

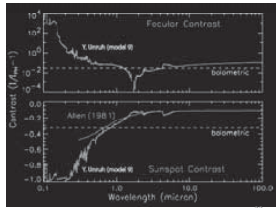
- 太陽活動が活発な時に現れる黒点(減光)と白斑(増光)により明るさが変化する
 - 白斑 > 黒点



Lean 2012より

太陽輝度変動の波長特性

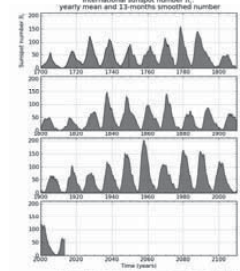
- 黒点、白斑の輝度コントラストは短波長(紫外～可視短波長)で強く、近赤外以降では小さい



22

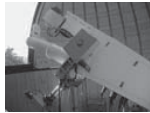
- 今、太陽活動が大きな変動の中にある可能性がある

- 黒点・白斑の輝度は太陽放射と密接にかかわる。太陽放射量変動は気候変動とも関係し、重要
- 個別の黒点・白斑の輝度は、波長ごとどのような変化をしているのか？



SIDCIによる黒点相対数変動

- 太陽白色光像(いろいろな波長)の精密測光が行われるようになった
 - 以前から黒点の暗さが減ってきているとの指摘(太陽活動の低下と関係か)
- 太陽表面磁気活動と太陽放射量の関係は？
 - より大きな太陽放射量変動がある場合、磁気活動が気候に影響を与える可能性
- 他の星ではどうなっているのか
 - より大きな変動が存在し、それが惑星環境に影響を与える可能性は
- 太陽の白色光の変動が、重要な観測テーマとなっている

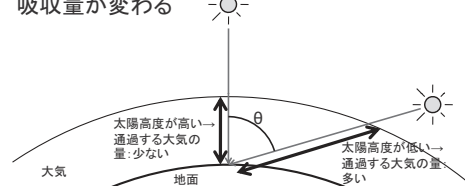


ローマにあるPSPTという装置。太陽表面の精密測光を行っている

25

2. 大気による天体の光の吸収

- 天体の光は、大気通過時に吸収を受ける
- 気象条件等により、また天体の高度によって吸収量が変わる



通過する大気量: air mass
天頂ではair mass = 1、天頂距離θでは~sec θ

26

大気の吸収: その原因と変動要因

- 空気があるだけで光は散乱される
 - レイリー散乱、短波長側ほど顕著で、散乱された光が青空として見える
 - 気圧(標高)によって散乱量が決まる
- 空気中のゴミも光を散乱・吸収する
 - 波長依存性は大きくない
 - 空気の汚れ方(汚染源からの距離や気象条件)による

27

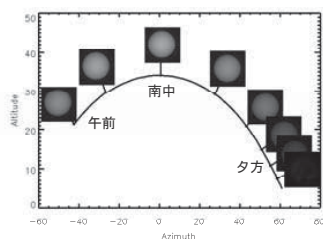
地上観測での星の測光

- 星の明るさを比較する時、高度の違いによる吸収の違いの影響を受ける
- 様々な高度の大気吸収を測定することで、測定対象の星の正しい明るさを求める
 - 天体観測では基本的手法
- 太陽の明るさの測定によりその原理を確かめてみる
 - 本来はある瞬間の大気吸収を様々な高度で求めるが、便宜的に太陽の高度変化を利用する

28

太陽画像から知る大気吸収

- 1日の間の太陽像の明るさの変化
 - 太陽高度と見かけの太陽の明るさの関係が顕著

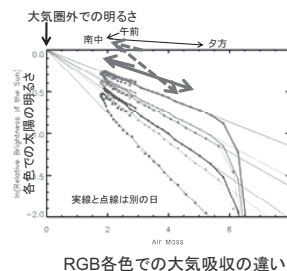


1日のうちの太陽高度の変化と太陽像(デジタル一眼レフによる)

29

太陽カラー画像から知る大気吸収

- RGBでの明るさの変化
 - カラー画像なので波長による吸収量の違いの情報がいっぺんに得られる)
- 別の日との比較
 - 実線で示した日は大気中の塵が少なく、点線の日は大気中の塵の増加が著しい



RGB各色での大気吸収の違い

30

- 大気吸収は、天文の立場からは除くべきものだが、気象では観測対象
 - 太陽の直達輻射の測定
 - 富士山などが見える日の数
- 天文に限らない応用があるのでは
 - 単なる太陽の写真をもとにして

31

白色光コロナの広ダイナミックレンジ・高S/N画像撮像

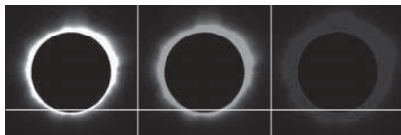
- 観測方法: 多段階露出でコロナの画像を撮影
 - アマチュアによる多点での観測が、天候によらず確実にデータを得る上できわめて有用
 - デジタル一眼レフの使用が最も現実的(機動性)
- アマチュアにも呼びかけ、2008/2009/2012年の日食でデータが得られた (Hanaoka+2012/2014, in press)

33

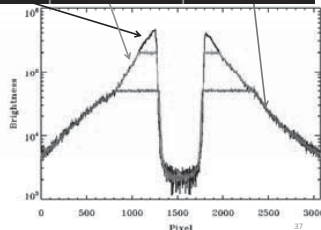
多段階露光画像のコンポジット処理等データ処理の内容

1. ダーク・フラット処理
2. 位置合わせ
 - 太陽像が動くような場合(特に船上)でも、画像を正しく重ねるため
3. 露出時間と非線形性の補正
 - いろいろな露出時間の画像それぞれについて正しいコロナ画像を再現
4. 画像の重ね合わせ
5. コロナの正しい明るさを求める

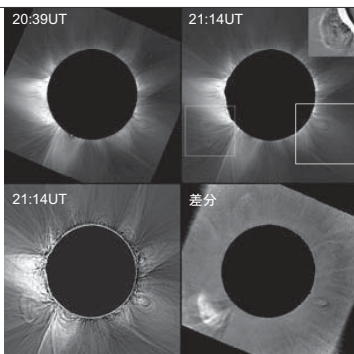
35



- 較正を行うことで露出時間が異なる画像を重ね、ダイナミックレンジを広げられる



37



- 科学的結果の例: 東西リムでCMEに関連する

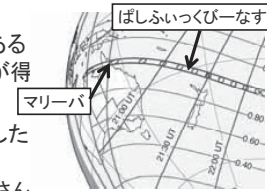
例2: 皆既日食の白色光コロナ観測

- 一般的なデジタルカメラによる研究の例
- 日食観測テーマのひとつ: 白色光コロナの広ダイナミックレンジ・高S/N画像
- 研究用の目的: コロナの正しい明るさの分布を求める
 - コロナ物質の量とその分布を求める
 - 白色光コロナは電子による散乱光であり、物質量に比例する
 - 衛星でのX線・紫外線観測は特定の温度のコロナの観測であり、白色光コロナ観測は相補的

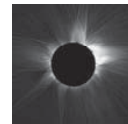
32

2012年11月13日日食のデータ解析

- 約35分の差のある2点でのデータが得られた
- データをお借りした方
 - マリーバ 坂井さん
 - ばしふいっくびーなす 大越さん、中澤さん、塩田さん



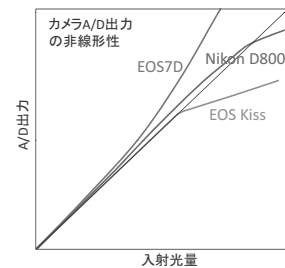
NASA日食ウェブサイトより



34

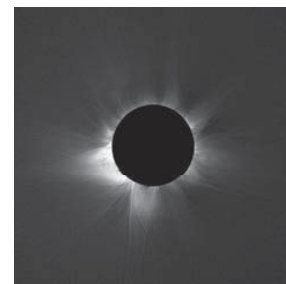
非線形性の補正

- 計測用のカメラでは無いの、それぞれ固有の非線形性を示す
 - ISO感度設定によっても変わるようである
- 別途露出時間の誤差も求めた



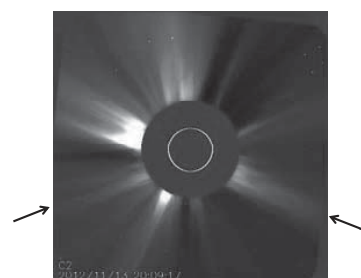
36

最終的に、ダイナミックレンジの広い高精度白色光画像が得られた



38

SOHO/LASCO



40

