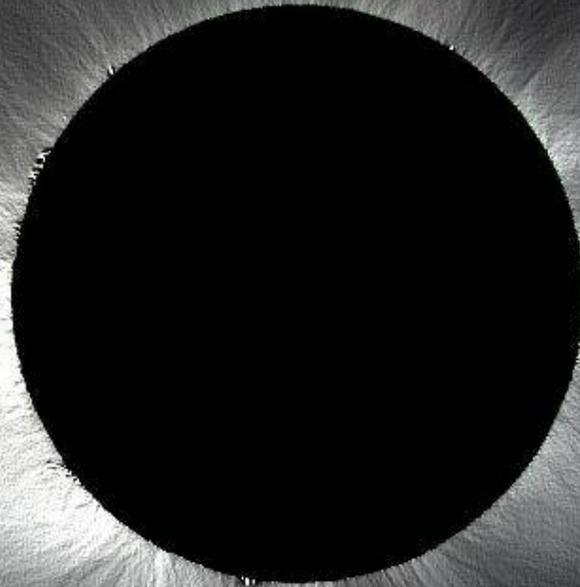


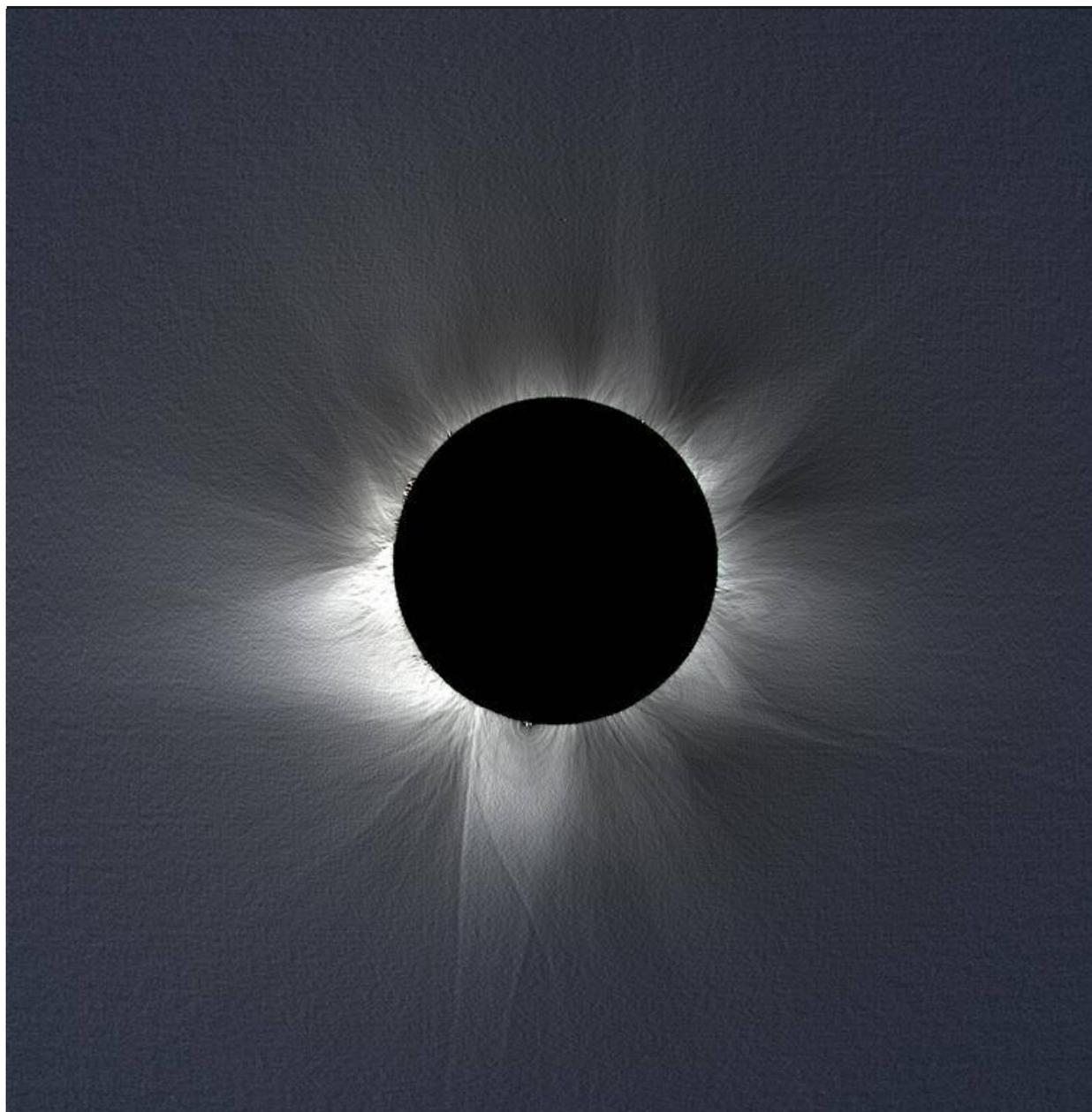
白色光コロナ画像のデータ処理

～アマチュアによるコロナ測光観測の成果と課題＋画像を
どのように重ねて画像処理の元画像を作るか～



花岡 庸一郎 (国立天文台)

2012年11月日食のパームコーブでの様子

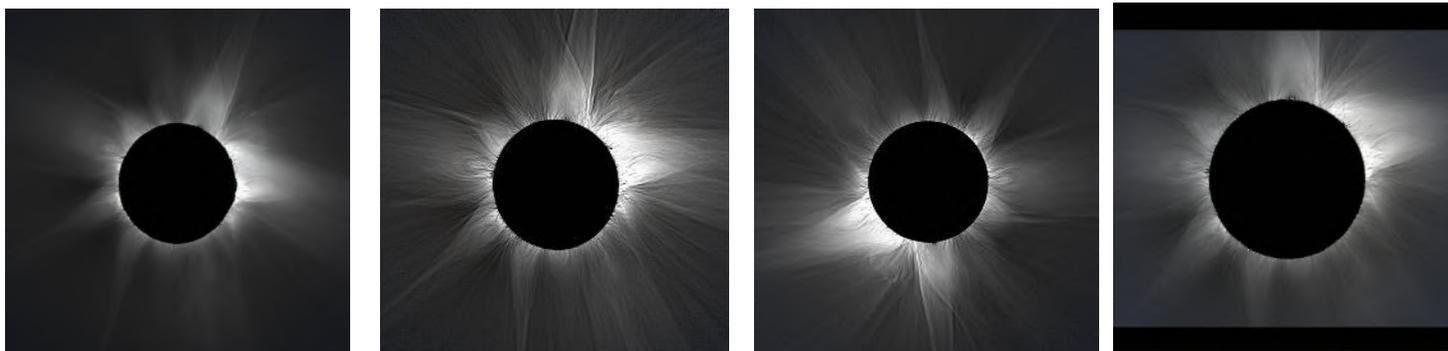


白色光コロナの広ダイナミックレンジ・高S/N画像

- 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
- 必要なデータ: 多段階露光画像のコンポジット
 - 「目を見たコロナ」を再現するにも必要
- 観測方法: 多段階露出でコロナの画像を撮影
 - デジタル一眼レフの使用が最も現実的
 - アマチュアによる観測が有用

データの取得

- 2009年以来、白色光コロナの輝度を求めるため、アマチュアの皆さんにも観測を呼びかけ
 - 普通の撮影に加え、校正用データを合わせて撮ってもらい、科学的解析に使えるデータとする
 - 2009年の結果は論文発表済
- 2012年11月日食のデータをお借りした方
 - マリーバ 坂井さん
 - ぱしふいっくびーなす
大越さん、中澤さん、塩田さん



いずれも多段階露光の多数の画像を重ねて処理したもの

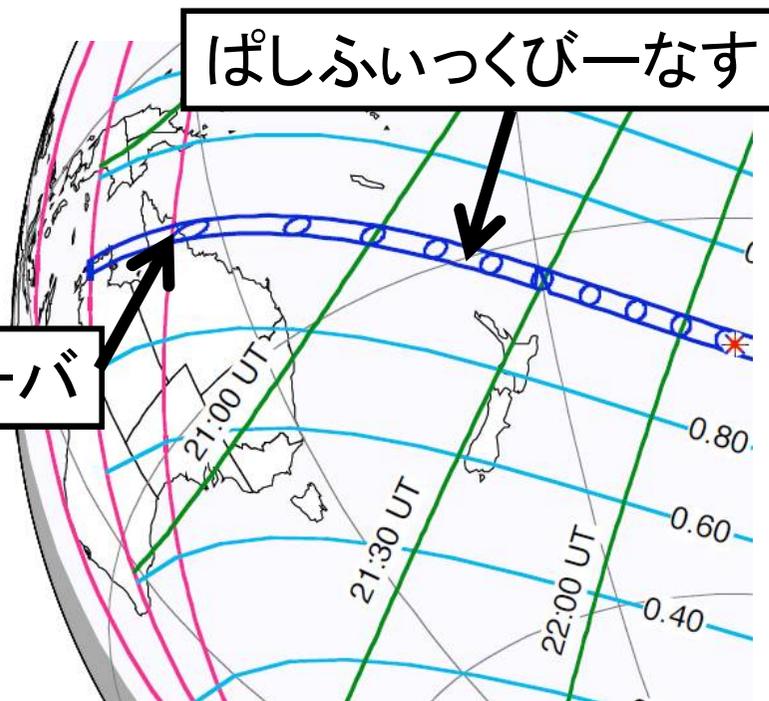
- 基本データ処理の手順、2012年日食等における実際のデータ処理についてお話しします

マリーバ・ぱしふいっく
びーなすの比較

マリーバ

ぱしふいっくびーなす

約35分の差



NASA日食ウェブページより

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
 - 後でスケール・方向合わせも
- 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

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
 - 後でスケール・方向合わせも
- 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

1. ダーク・フラット処理

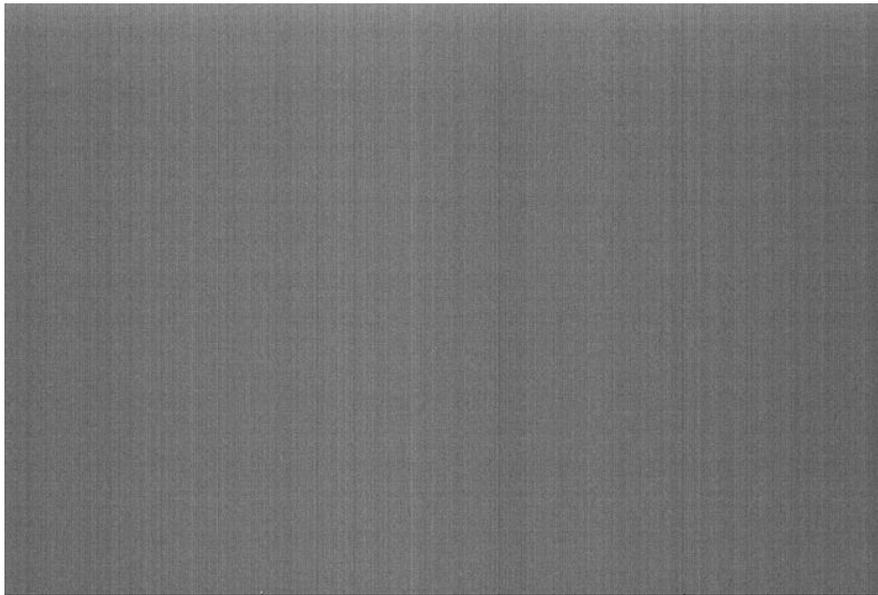
- 画像を重ねるために各撮像画像をカメラへの入射光量に戻す
- 画像はRAWで記録されていることが前提
 - カメラによる自動処理を極力避ける
- RAWデータ = **非線形応答関数**(係数 × 入射光量 × **露出時間** × **フラット**) + **ダーク**
 - 係数は空の状態・装置の特性(光学系透過率やISO感度設定など)などで決まるデータセットごとに固有の値

ダークとフラット

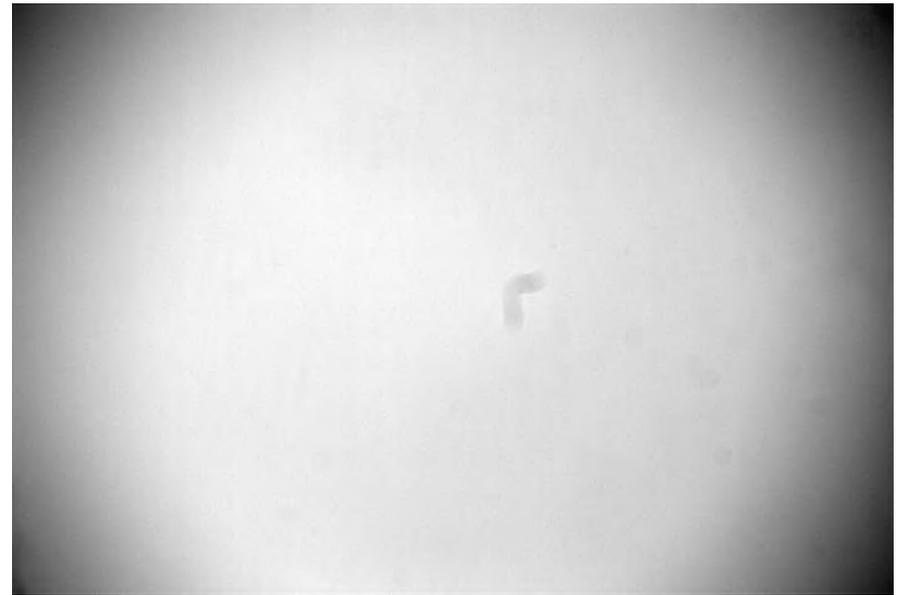
- ダーク: 入射光量0で得られる画像
 - RAWデータでは光量=0でも必ずしもデジタル値=0ではない
 - 特にキヤノンはデジタル値1000~2000のオフセットがある
 - 実際の観測では、遮光した状態でいろいろな露出で多数撮影
- フラット: カメラ自体の感度ムラ、光学系のけられ、ホコリに起因するむら
 - 実際の観測では、均一な光源を撮影する必要があるが、同じ光学系で空を多数枚写すのが現実的

ダーク・フラットの例

- 坂井さんのCanon EOS KissX2



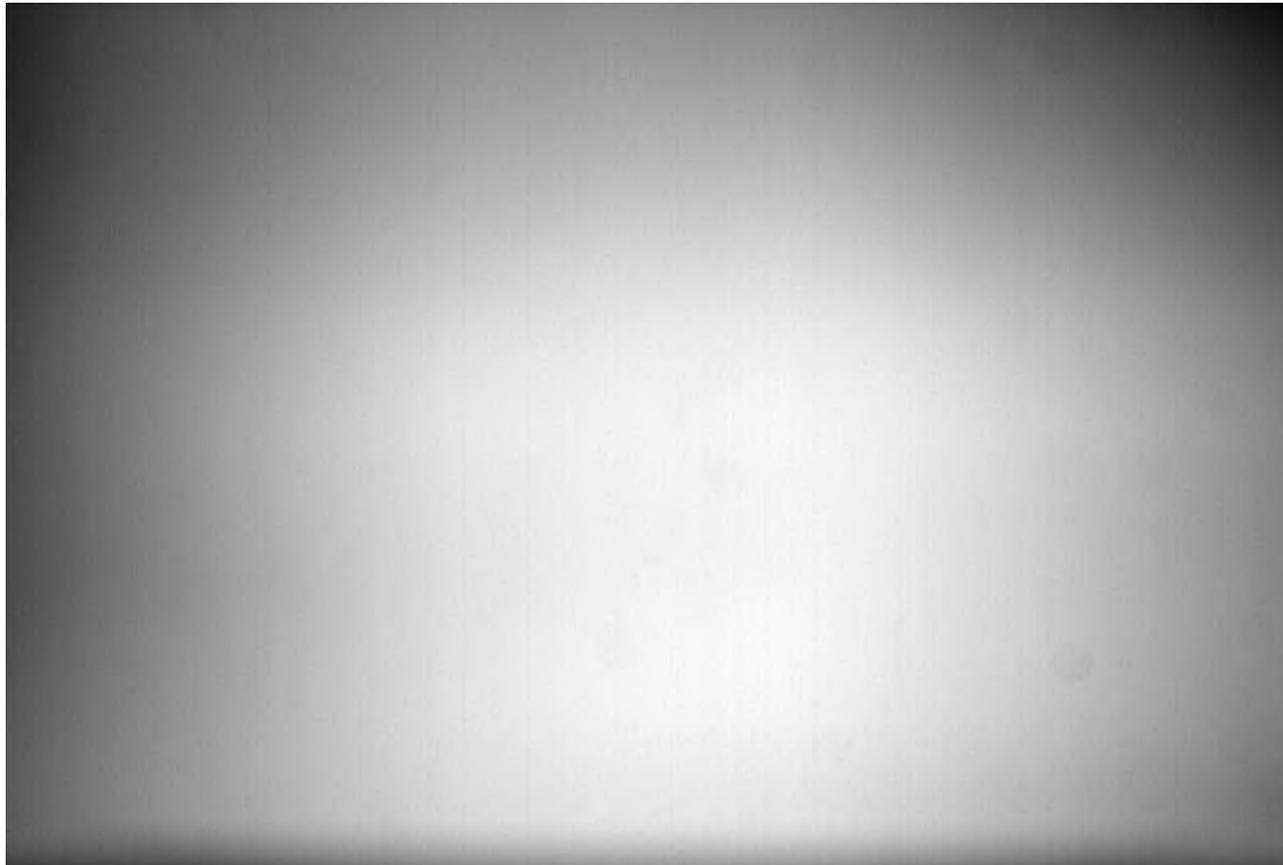
ダーク



フラット

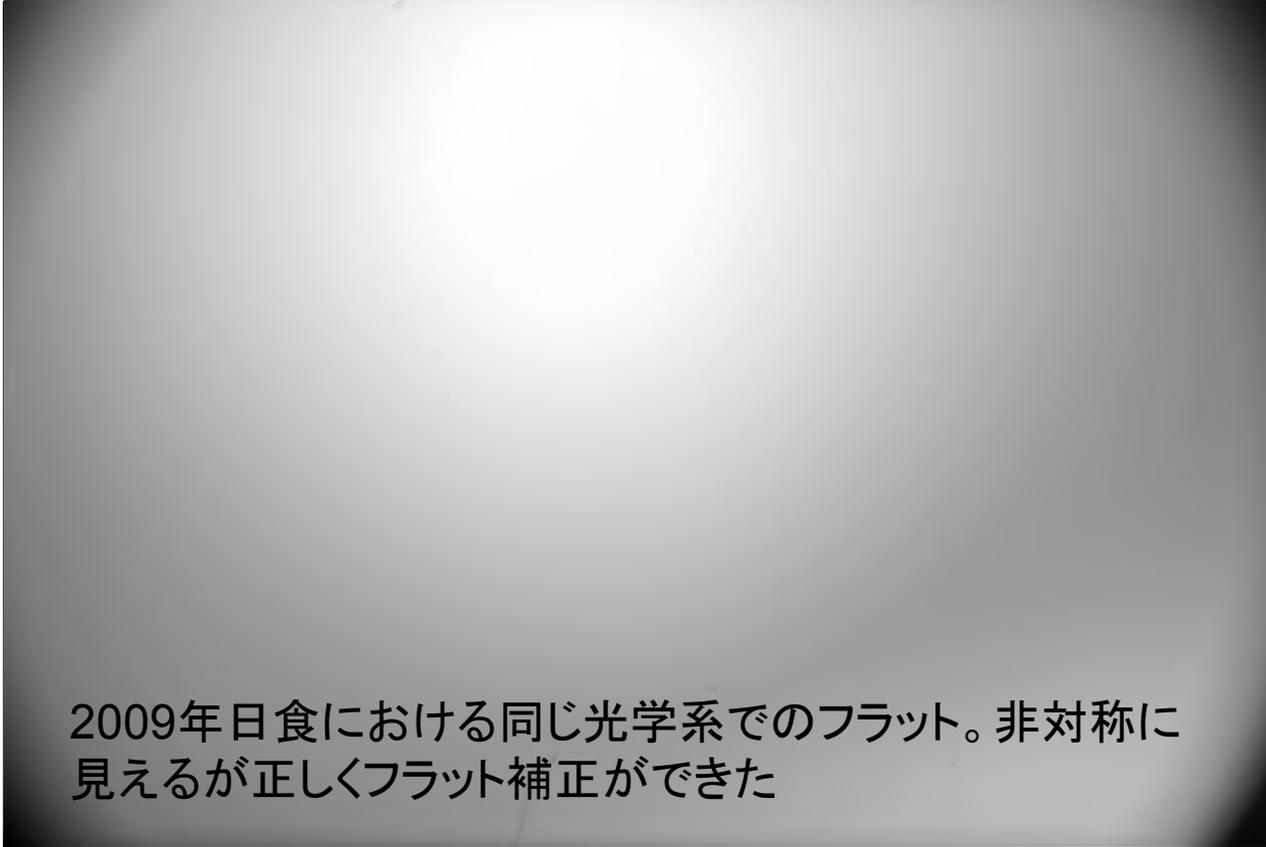
別のパターンのフラット

- 偏心したフラットの例(大越さんCanon EOS Kiss X3)



フラットフィールド補正ができなかった例

- 反射望遠鏡における問題(中澤さんCanon EOS 5DMkII・高橋16cm反射)



2009年日食における同じ光学系でのフラット。非対称に見えるが正しくフラット補正ができた

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
 - 後でスケール・方向合わせも
- 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

2. 位置合わせ

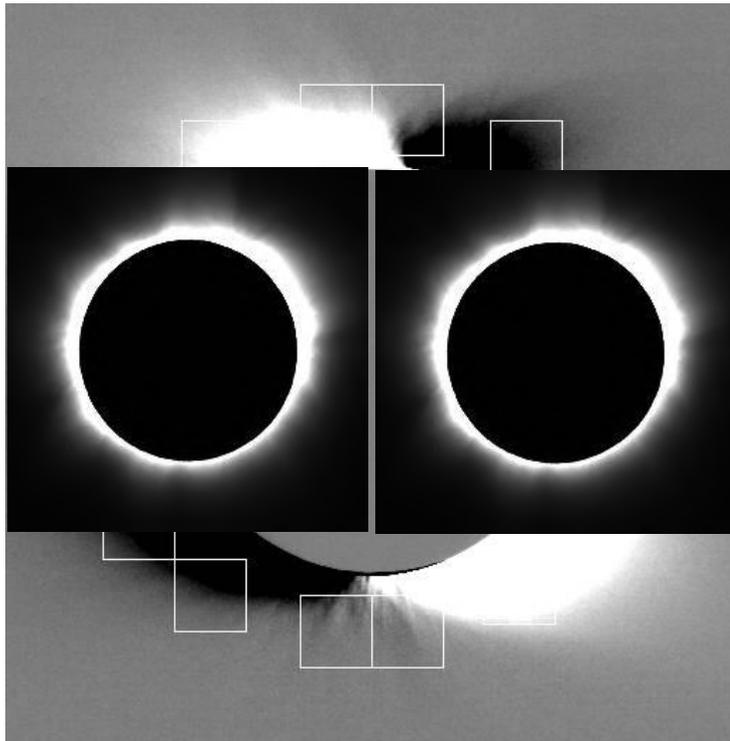
- カメラ画像上で皆既中に太陽像が動く
 - 画像を正しく重ねるためには、像の動きを補正する必要がある
- 船上での観測で画像が動く場合だけでなく、地上の観測でも必要
 - トラッキングが不完全
 - 極軸合わせやトラッキング速度の誤差
- RAWデータ = $\text{非線形応答関数}(\text{係数} \times \text{入射光量} \times \text{露出時間} \times \text{フラット}) + \text{ダーク}$
 - の非線形応答関数や露出時間の誤差も求める必要があるが、このためにも露出の異なる画像の比較が必要なので、まず位置合わせを行う

位置合わせの手法

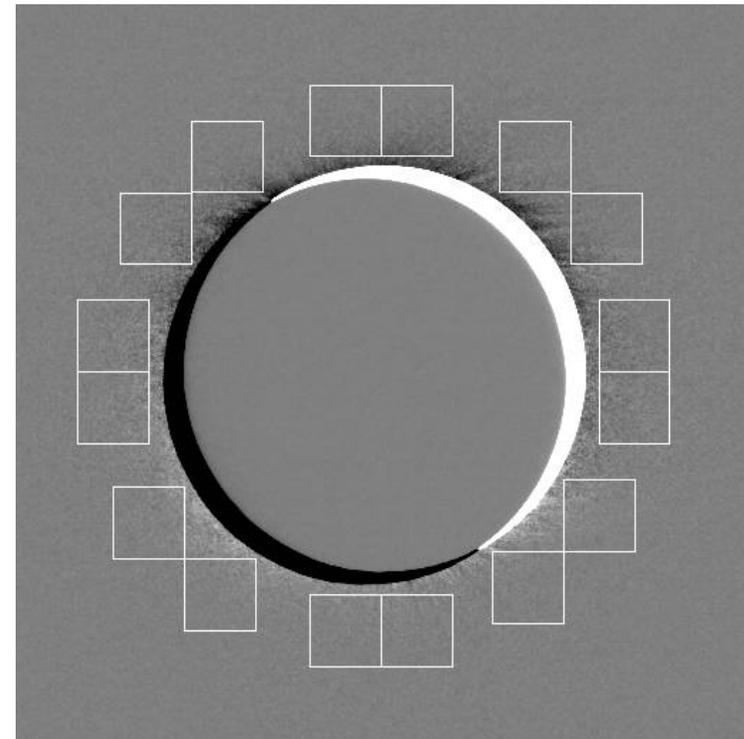
- まず月の位置を自動検出し、その位置合わせを初期状態とする
- その後でコロナ部分の構造を使って位置ずれ・方向(回転)ずれを検出
 - 基準画像との差分が0に近くなるずれ量を探す

位置合わせ

- 基準画像と位置合わせをする画像の差
 - 指定領域(四角)内の差が最も小さくなるようなずらし方を探す



月を基準に大体の位置合わせをした状態



コロナの構造の位置が合うようにずらして重ねた状態

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
 - 後でスケール・方向合わせも
- 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

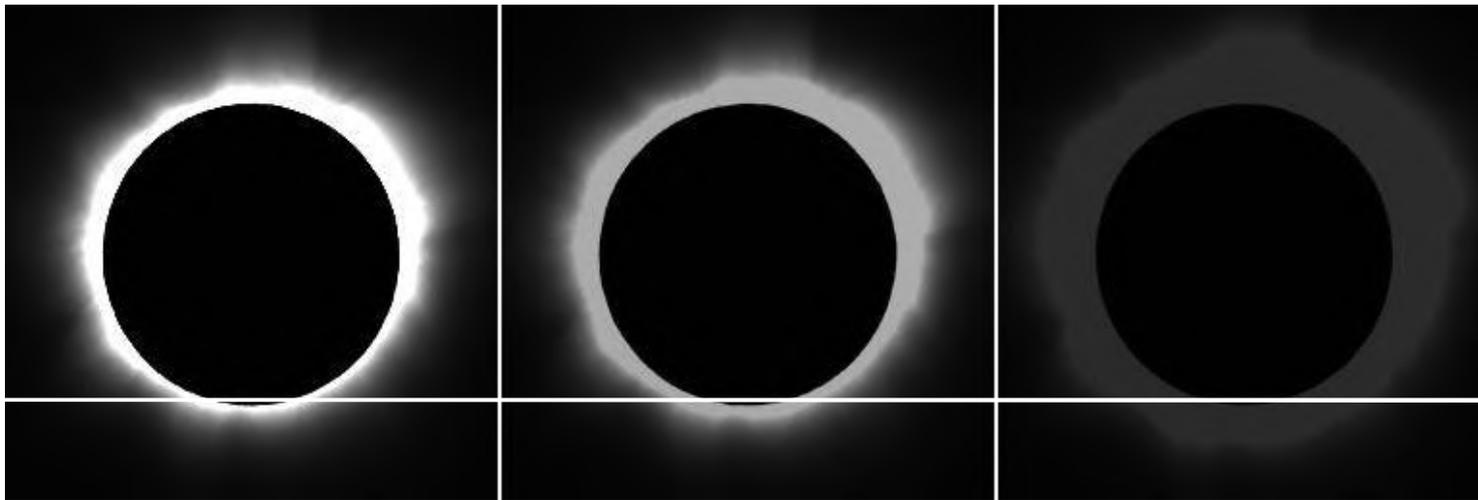
3.露出時間と非線形性の補正

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

- RAWデータ = **非線形応答関数**(係数 × 入射光量 × **露出時間** × **フラット**) + **ダーク**
- 非線形応答と露出時間の誤差はあらかじめわからないので、データそのものから推定する
- 位置合わせを行うと、同じコロナを写しているはずの異なる画像間の比較が可能になる

非線形応答関数と露出時間の誤差

- 異なる露出時間の画像(ダーク・フラット処理済み)を、1秒あたりの入射光量に直すため露出時間を補正する(坂井さんの画像/Canon EOS7D)
 - 露出が長すぎて飽和しているところは見かけ上暗く見える

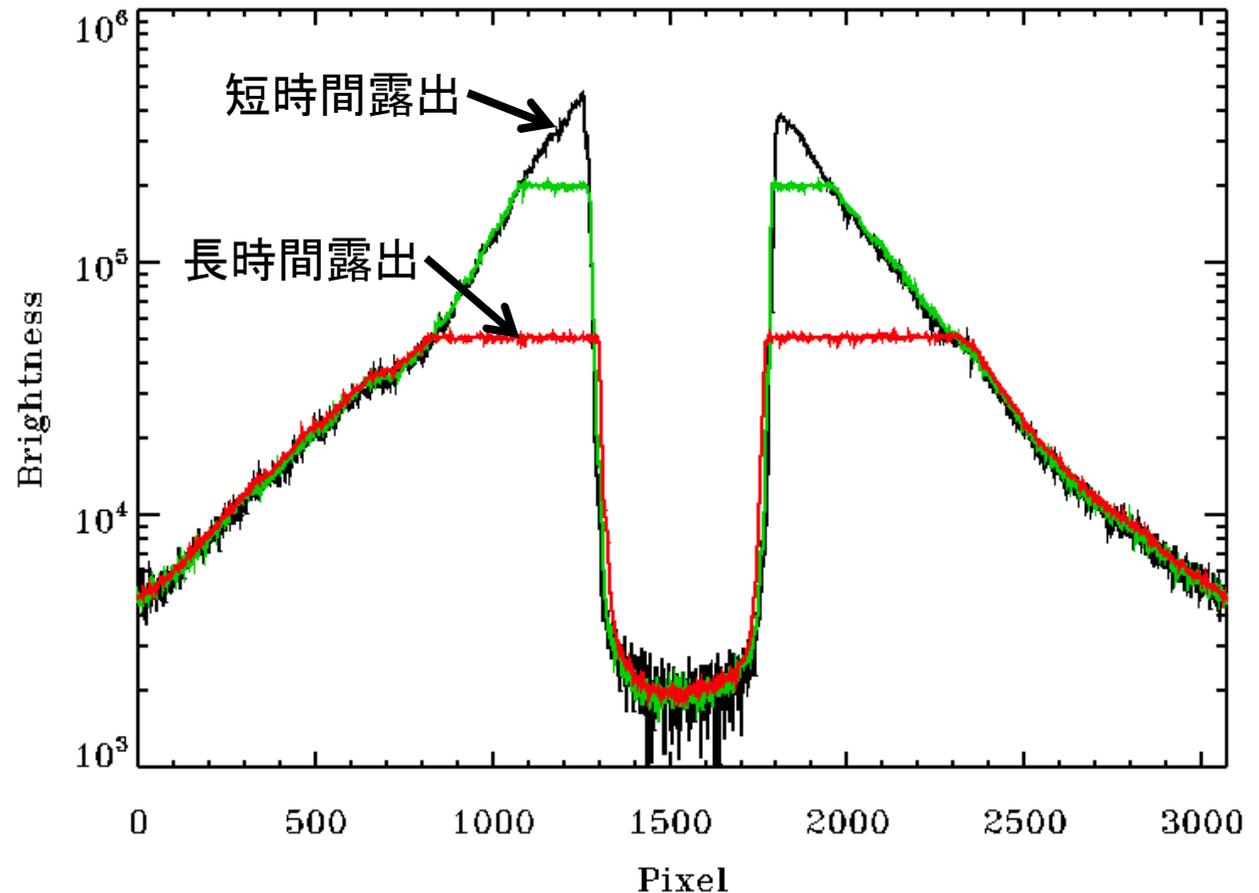


短時間露出←

→長時間露出

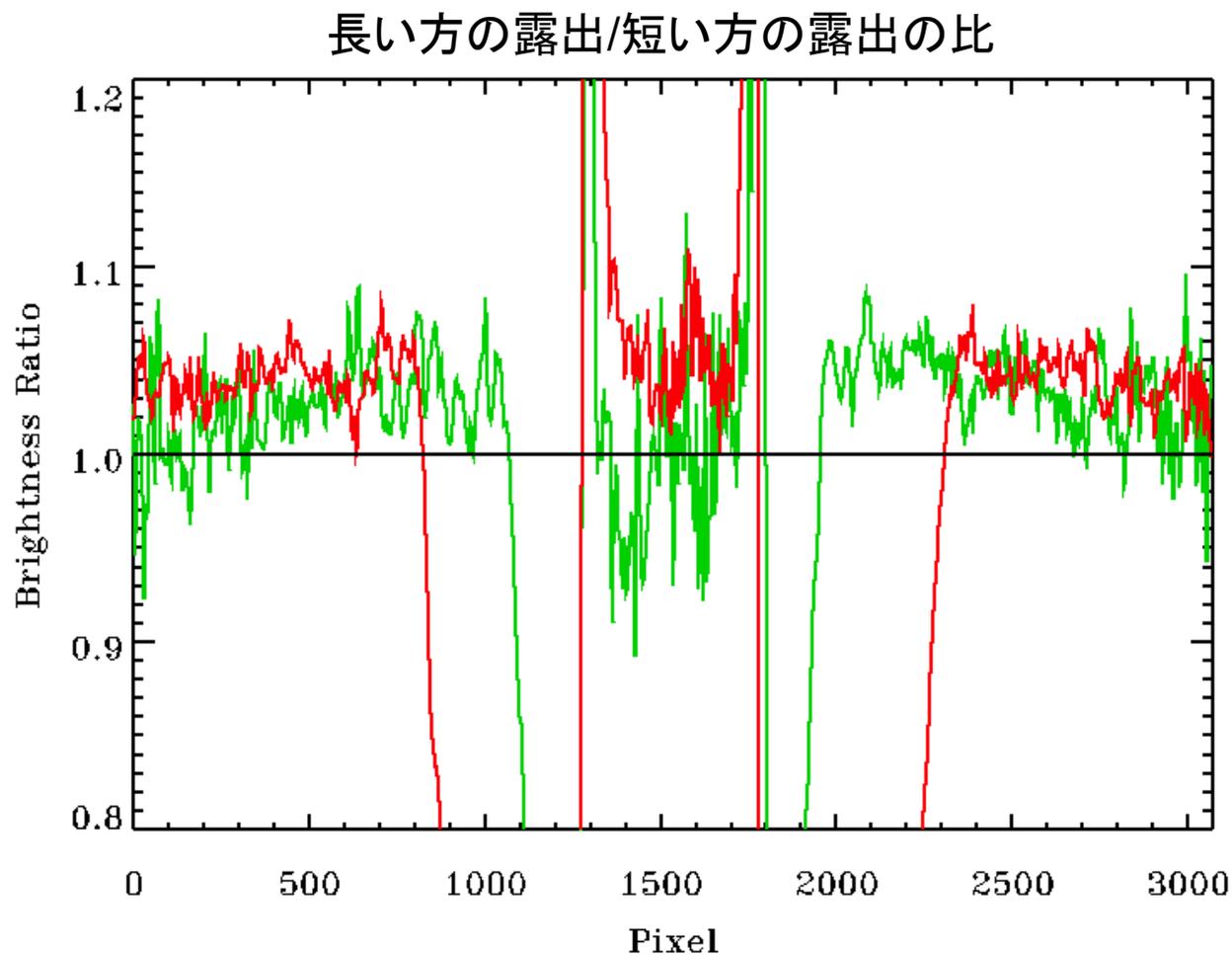
名目上の露出時間を使って単純に補正した結果

- 飽和していない部分ではだいたい重なっているが、少しずれている
 - このまま画像を重ねると境目に段差ができる



異なる露出時間の画像間の比

- 比が1にならず、誤差が生じている
- 露出が長いほど明るく写っている
- 入射光量が正しく再現されていない

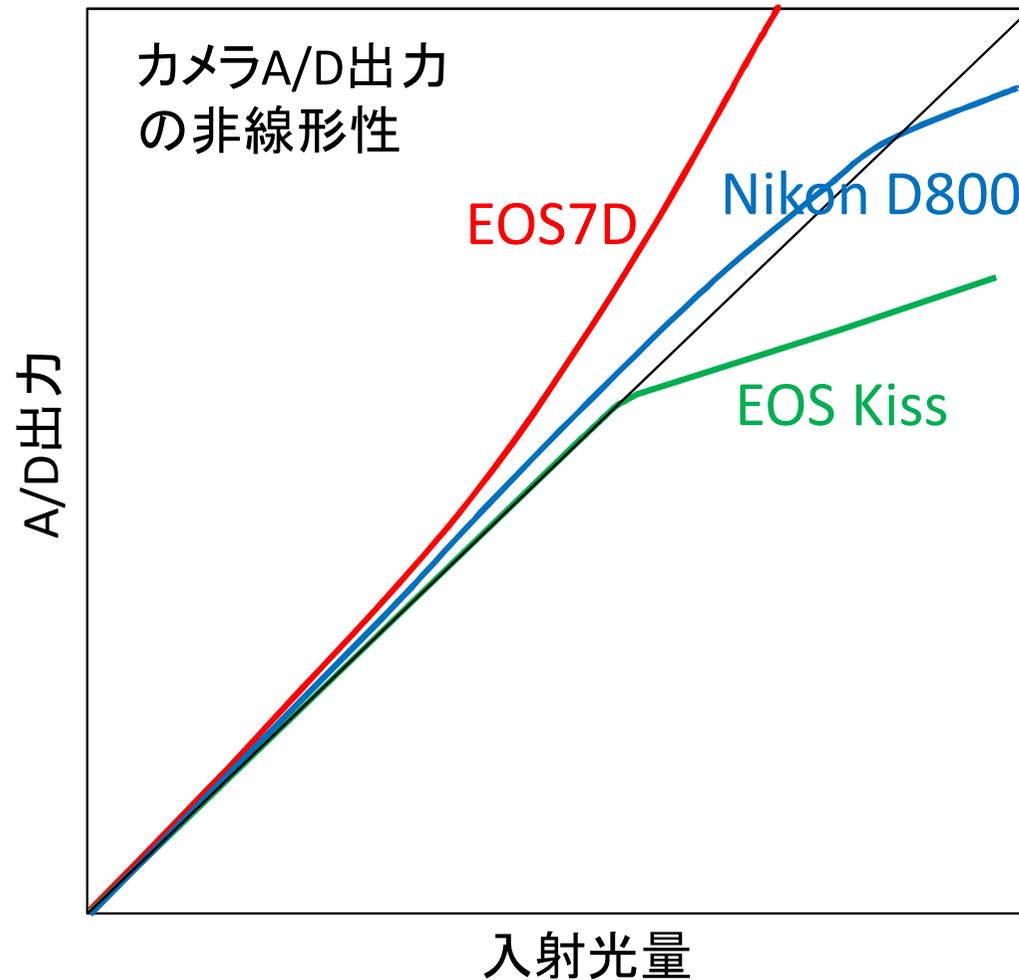


誤差の原因

- カメラ内の入射光量→デジタル値変換の非線形性
- 露出時間の誤差
 - 一般に速いシャッター速度で名目の露出時間からの誤差が出やすい(短時間露出ほど明るく見える)
- いろいろな露出時間での誤差をもとに、露出時間の誤差と非線形性を分離してそれぞれを求める

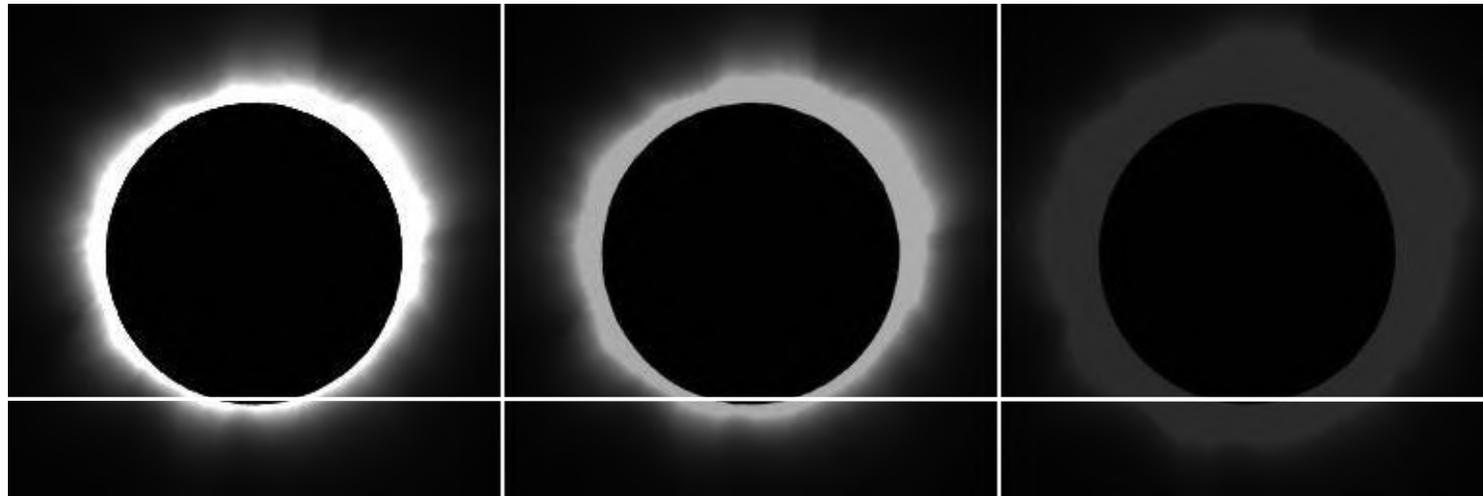
求められた非線形性の例

- カメラによって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

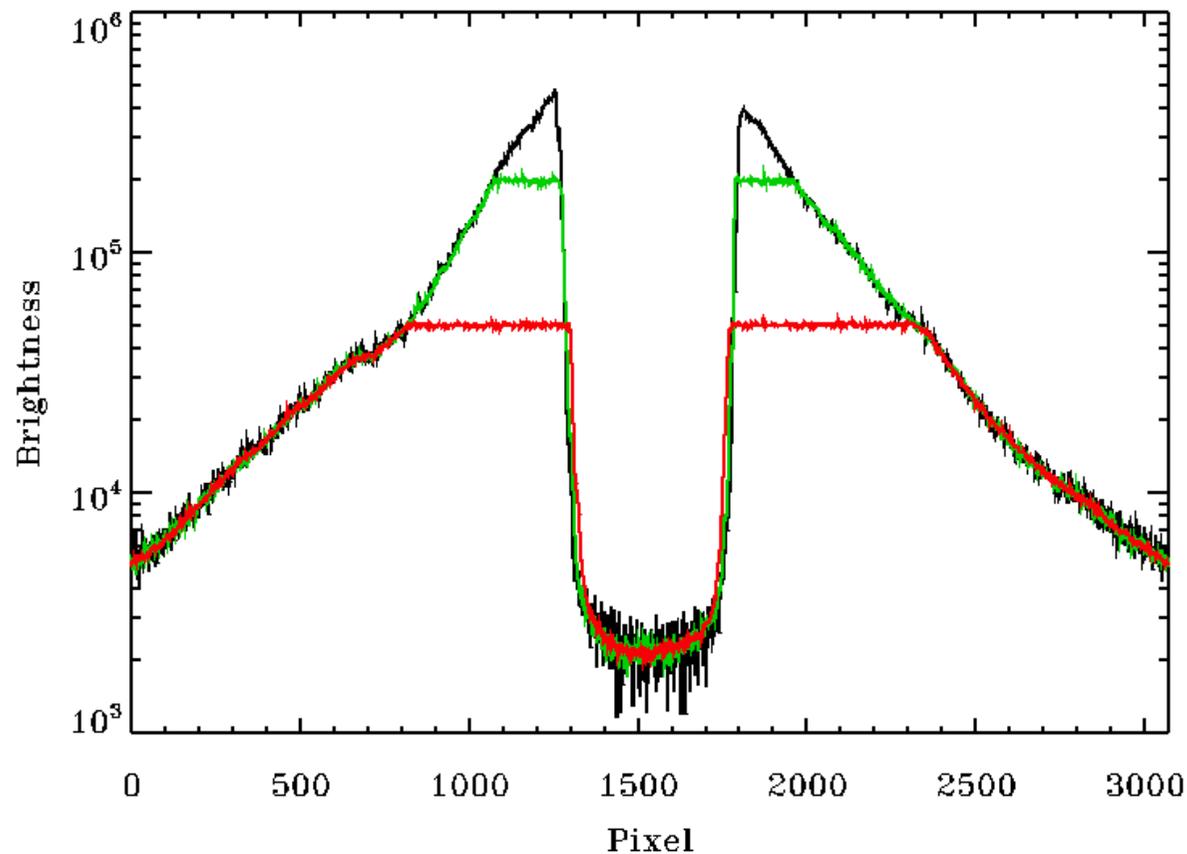


非線形性と露出時間誤差の補正

- 各画像で以下の換算を行う
 - 係数 × 入射光量 = **非線形応答関数**¹ (RAWデータ **ダーク** / **フラット** / **露出時間**)
- 実際には、(ダーク)・フラットの求め直しも行う
 - フラット画像も非線形効果の影響を受けているため



- 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が再現された



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
 - 後でスケール・方向合わせも
- 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

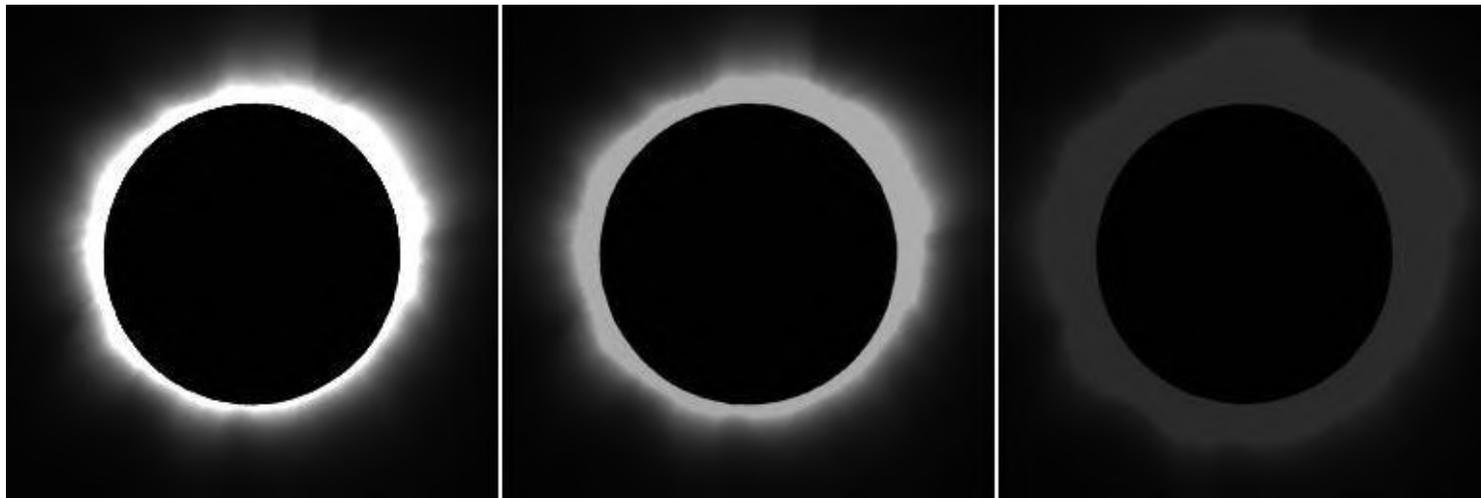
4. 画像の重ね合わせ

- 1枚の画像では得られない広いダイナミックレンジ、高いS/Nを実現する

多くの画像を重ねるのがよいが:

- ダイヤモンドリングに近すぎる画像は採用しない
 - 明るい彩層による散乱光を避ける
- 船で撮られた画像の場合
 - 月が視野からはみ出す、あるいは視野の端にあまりに近い画像は採用しない
 - 明らかにぶれている画像は採用しない

- コロナの明るい部分は短時間露出画像上で見えている
- コロナの暗い部分は長時間露出画像でノイズが少ない
- 単純な積算ではなく、適正露出部分のみ取り出して重ねる

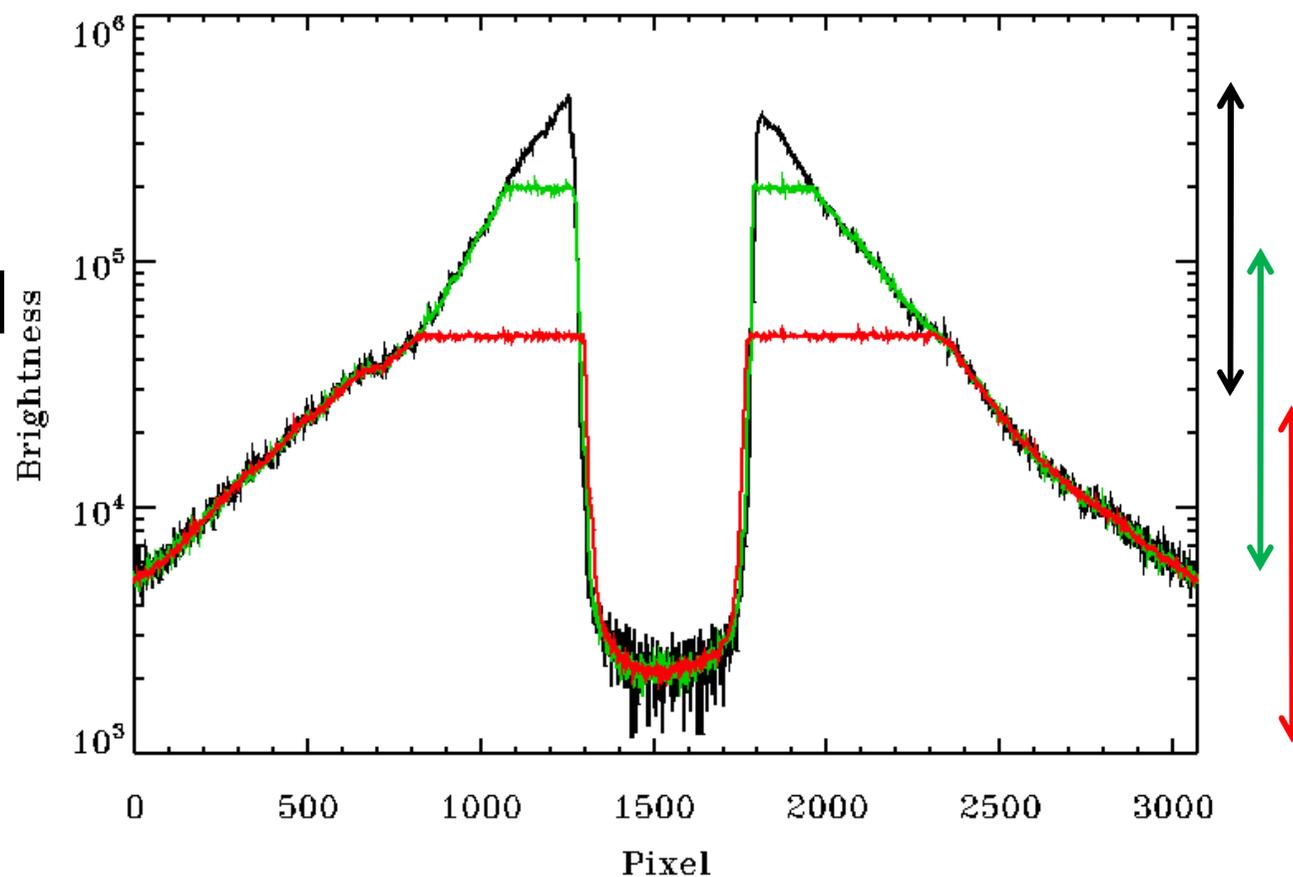


短時間露出←

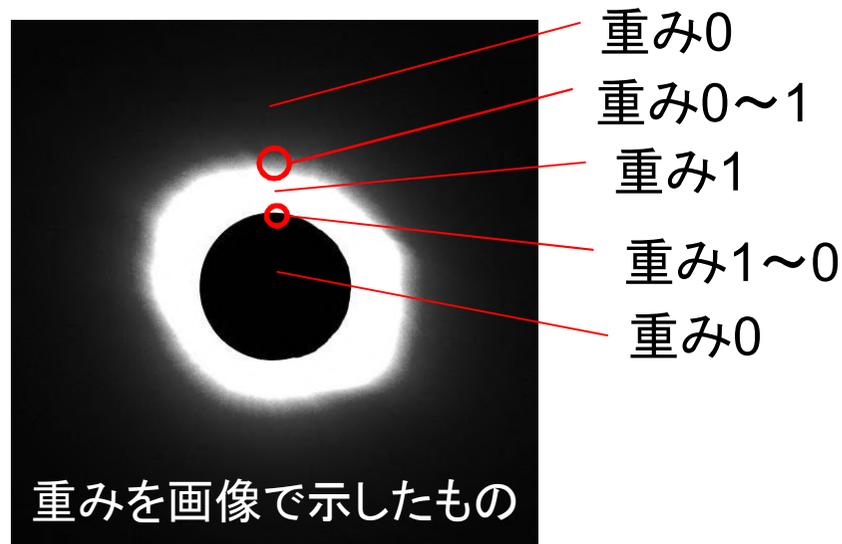
→長時間露出

- 各露出時間の画像の有効範囲を設定

- 実際にはRAW画像のA/D値で範囲を設定する

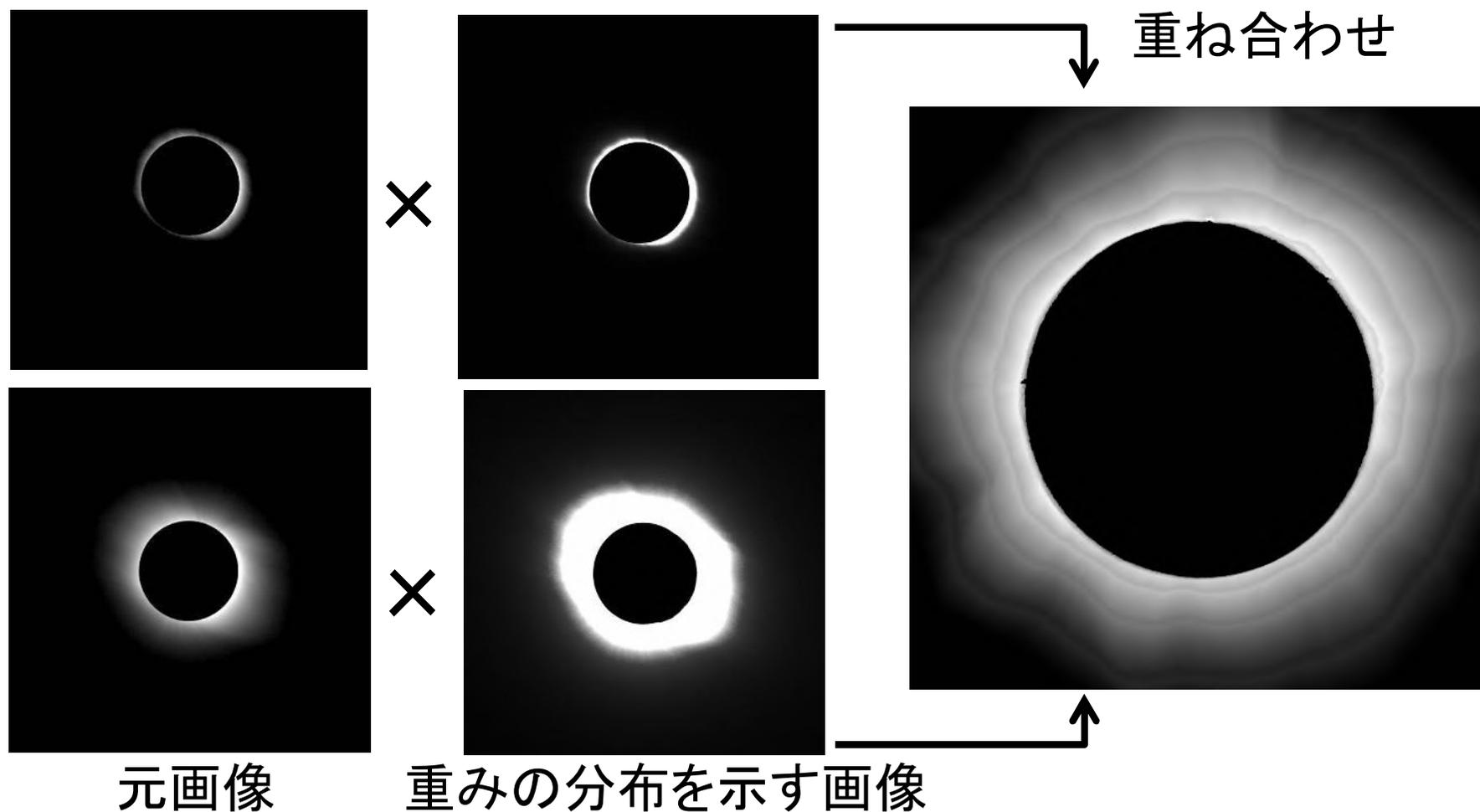


- 各露出時間の画像の有効範囲を設定
 - 適正露出の範囲は重み1
 - ある程度以下の明るさの部分は重み0(ノイズ)
 - ある程度以上の明るさの部分は重み0(飽和)
 - 境界付近は重みを0から1に連続的に変化させる
 - 月の部分は重み0
- 月の部分やプロミネンスは別途処理した方がよい
 - 特に月はコロナに対して動くので



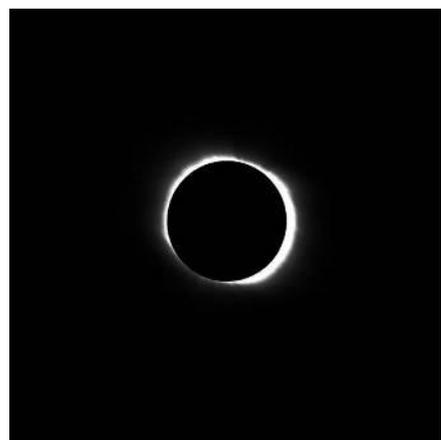
重みを入れて画像を重ねる

- 重みつき重ね合わせ画像

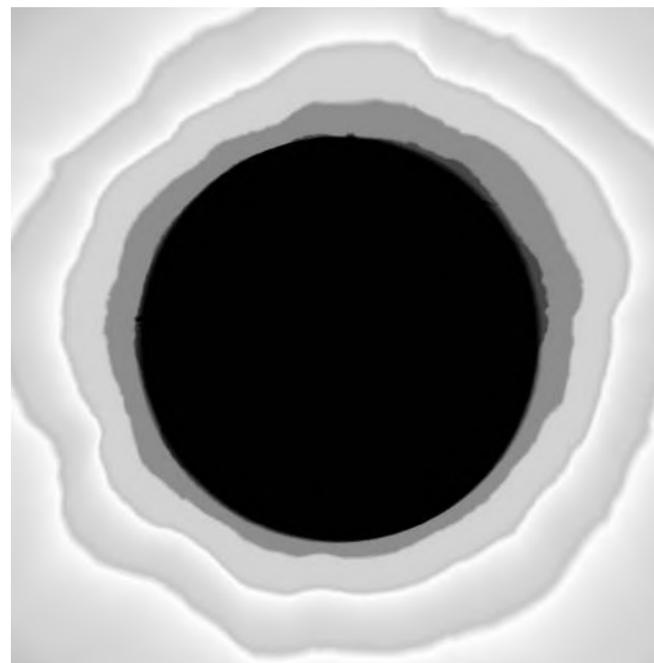


重みを入れて画像を重ねる

- 重みのみの積算画像

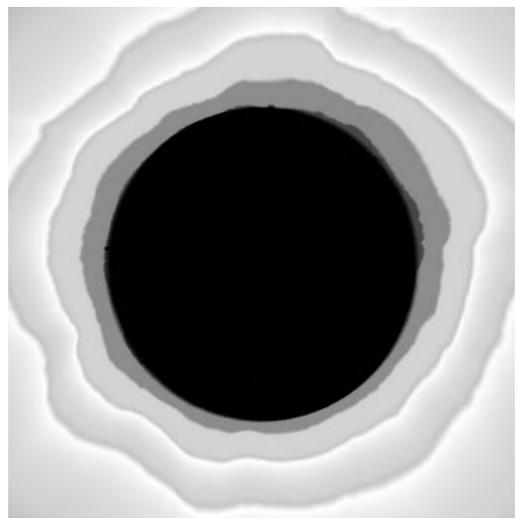
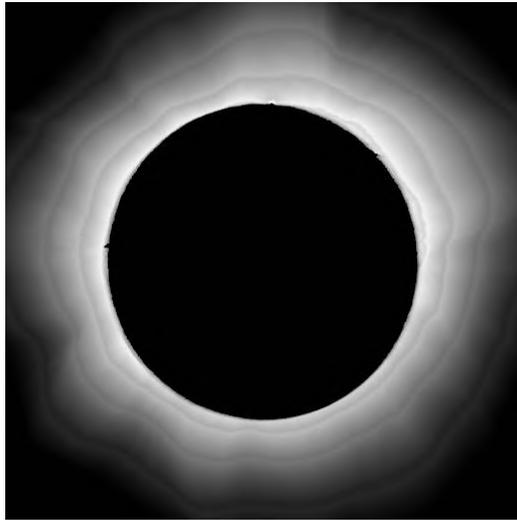


重ね合わせ



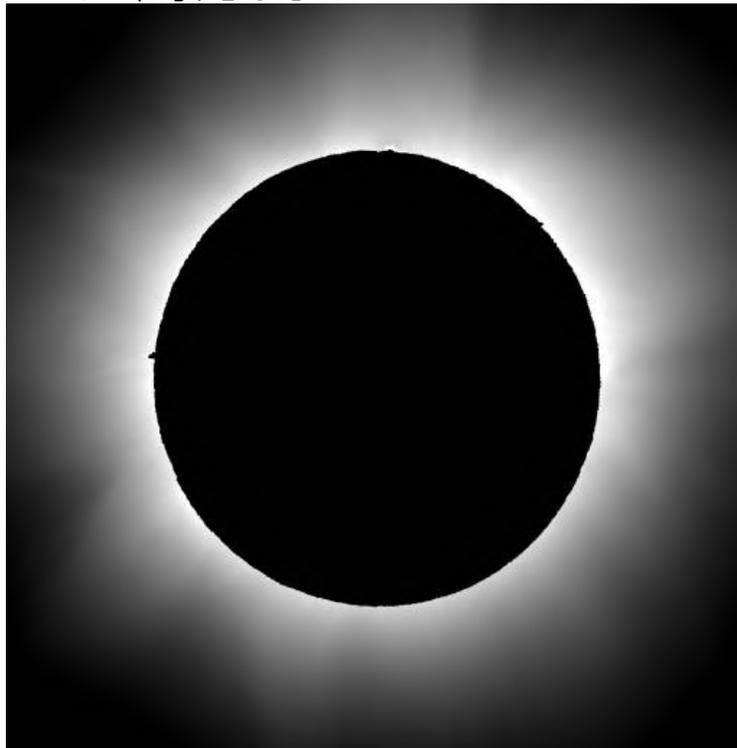
重みの分布を示す画像

- コンポジット画像 = 重みつき積算画像 / 重みのみの積算画像

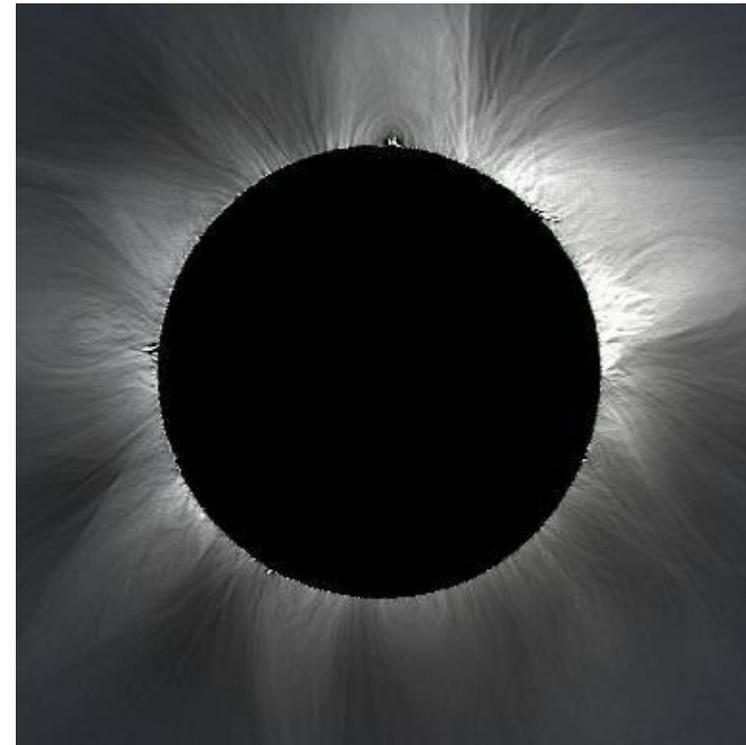


強調処理

- コンポジットが終われば一応強調処理を行うことが可能
- 可視化のため細かい構造を強調する方法の例
 - アンシャープマスク
 - 円周方向のみ



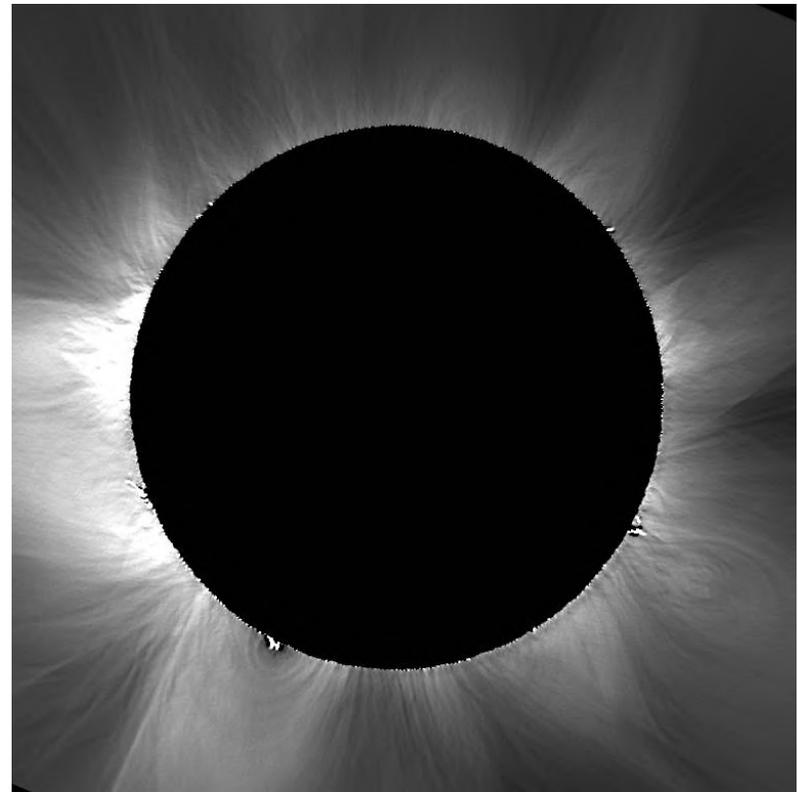
もともとの合成画像



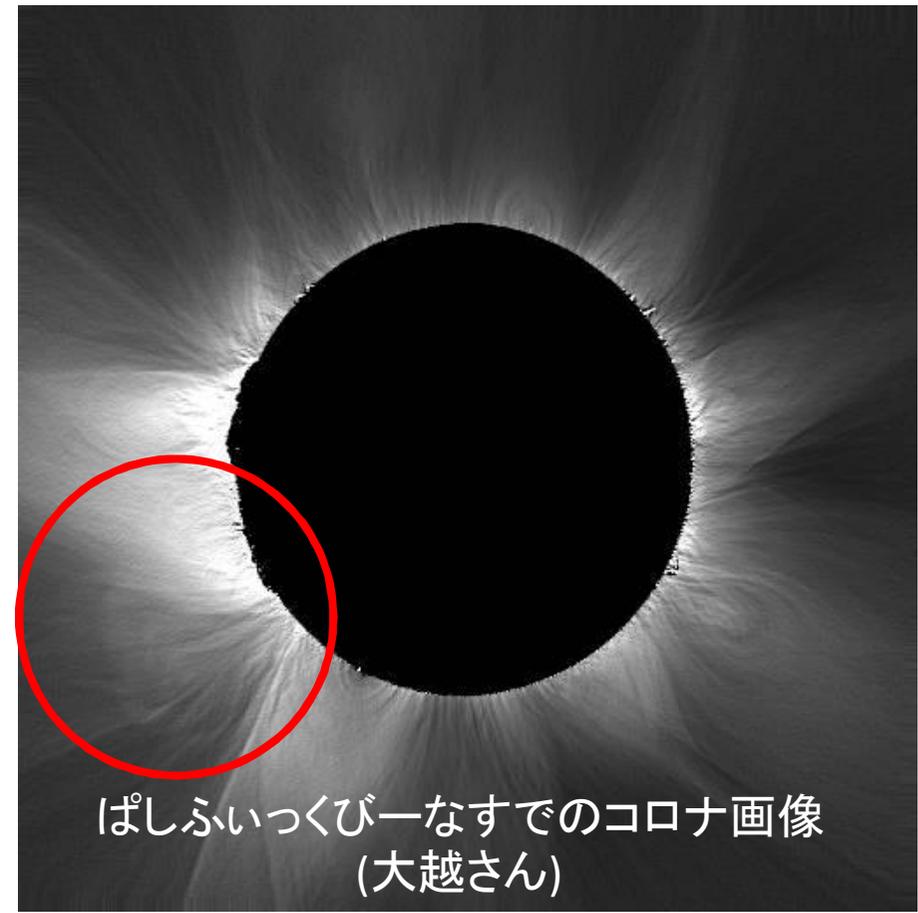
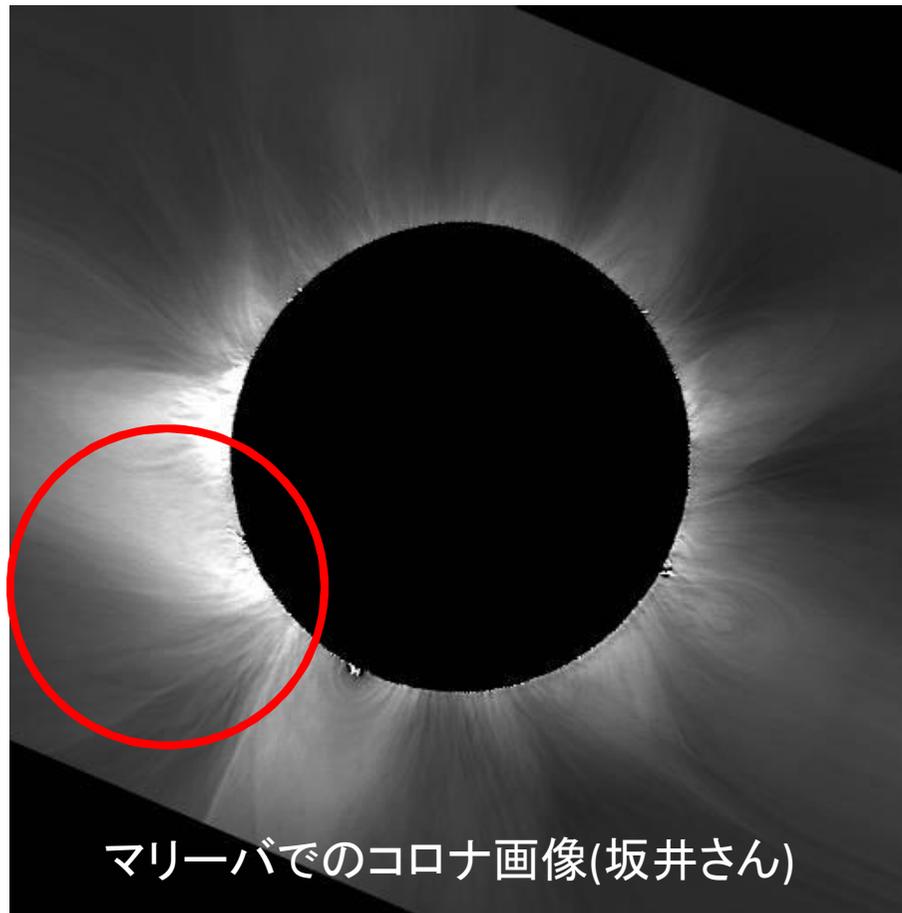
動径方向のコントラストを落とす
円周方向にアンシャープマスク

天体画像としてのスケール・方向 合わせ

- 方向とスケールのわかった画像は、マリーバとばし
ふいっくびーなすの観測の
詳細比較のような、異なる
観測地の結果比較において
必須
 - 北の方向、画像の正しいスケールは星を使って調べる
 - 明るい星でない限り、コンポジット画像上でないと星はなかなか見つけにくい
 - 低高度の画像の大気差補正(マリーバ)

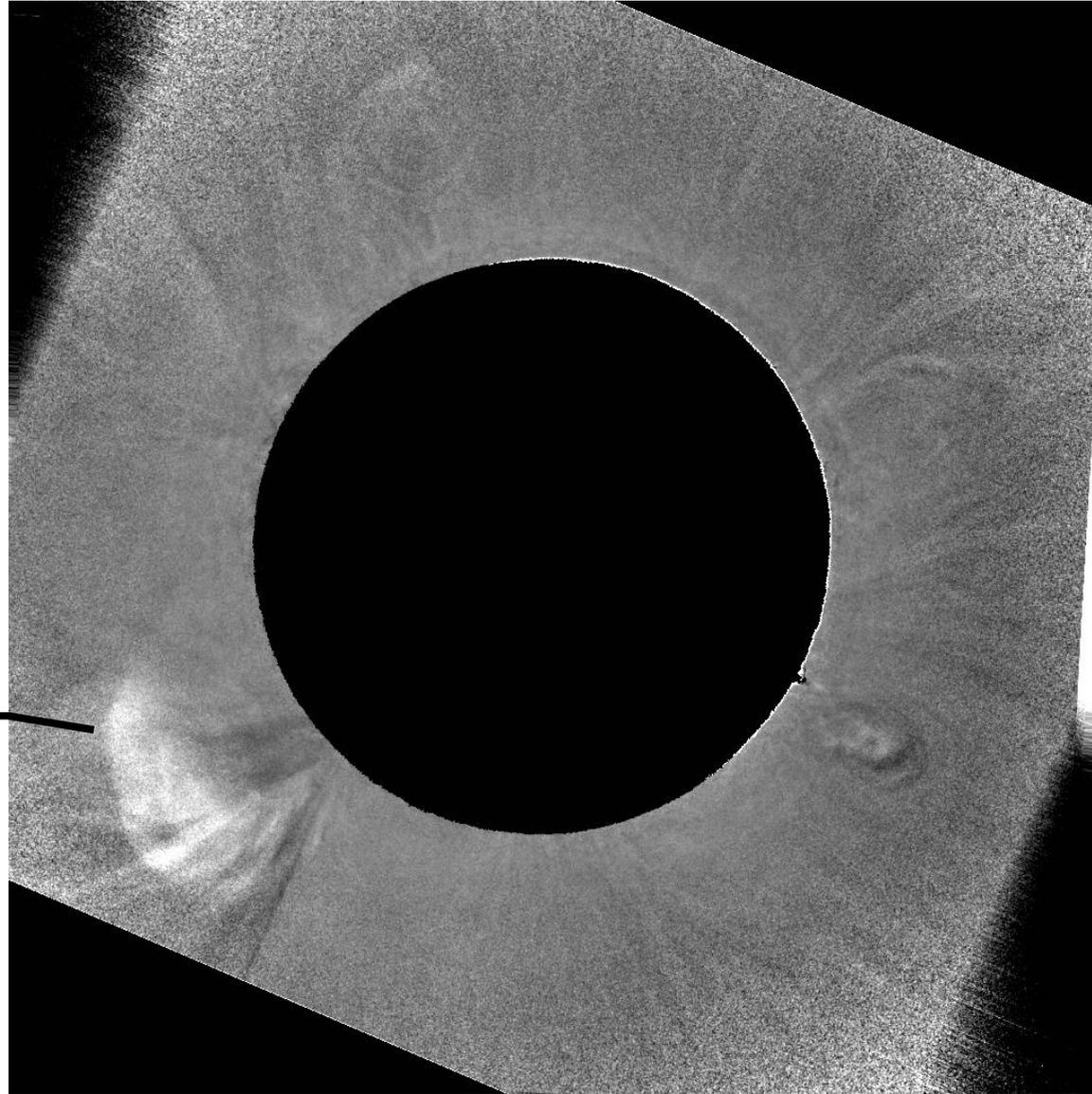


マリーバ・ぱしふいっくびーなすの比較



マリーバ→ぱしふいっくびーなすの相対変化

CME



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
 - 後でスケール・方向合わせも
- 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

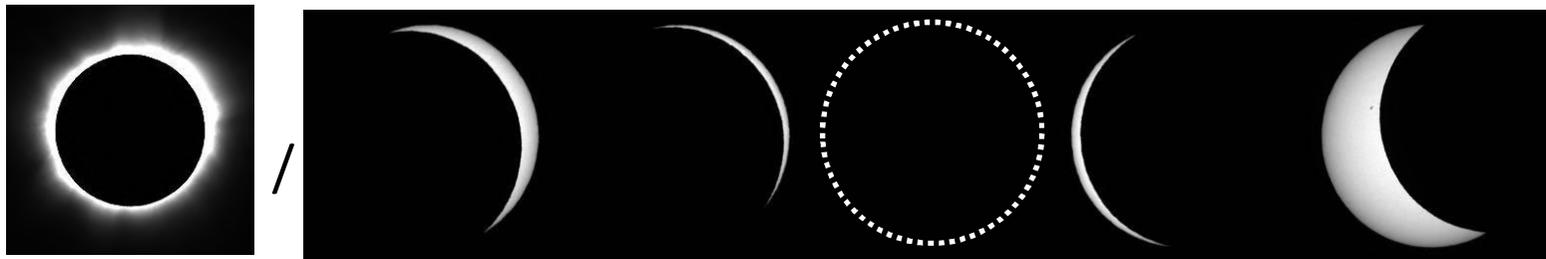
5. コロナの正しい明るさを求める

- 光球を基準にしたコロナの真の明るさを求める
 - 光球(食外の太陽像や部分食の像)はNDフィルターを付けて撮影する
 - コロナのRAWデータ = 非線形応答関数(係数 × 入射光量 × 露出時間 × フラット) + ダーク
 - 光球のRAWデータ = 非線形応答関数(NDフィルター透過率 × 係数 × 入射光量 × 露出時間 × フラット) + ダーク
 - 係数が不明でもフィルターの濃度さえ分かればよい
 - コロナの真の明るさ(光球基準) = コロナの(相対的な)明るさ × NDフィルターの透過率

コロナの正しい明るさを求める

- コロナの真の明るさ(光球基準) = コロナの相対的な明るさ × NDフィルター透過率
- コロナの相対的な明るさ = コロナの画像上の明るさ / 皆既時の光球をNDフィルターを付けて撮影したときの明るさ
- もちろん皆既時には光球は見えないので、食前後及び部分食の太陽の画像上の明るさで代用する
- 部分食中の光球輝度の変化をもとに皆既時の光球輝度を推定

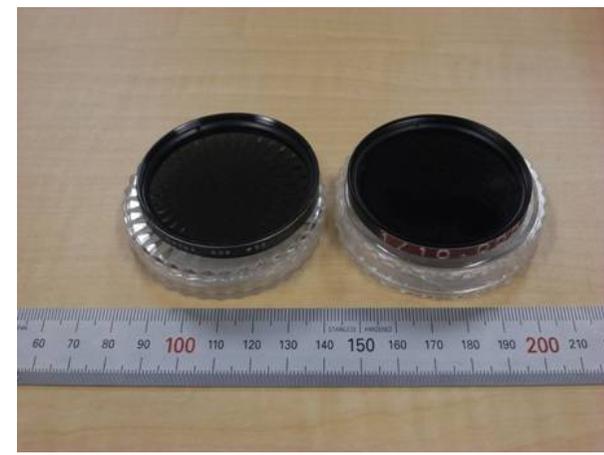
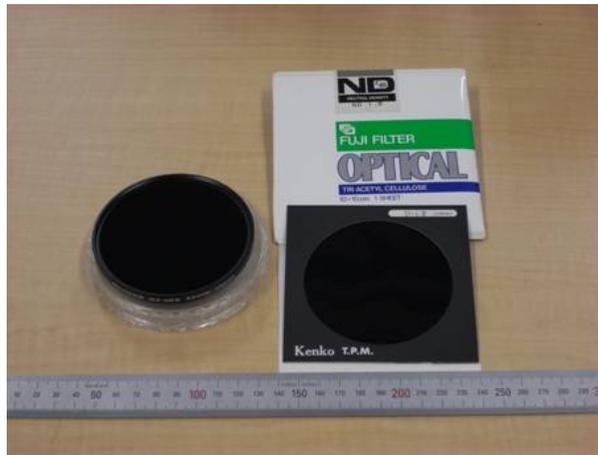
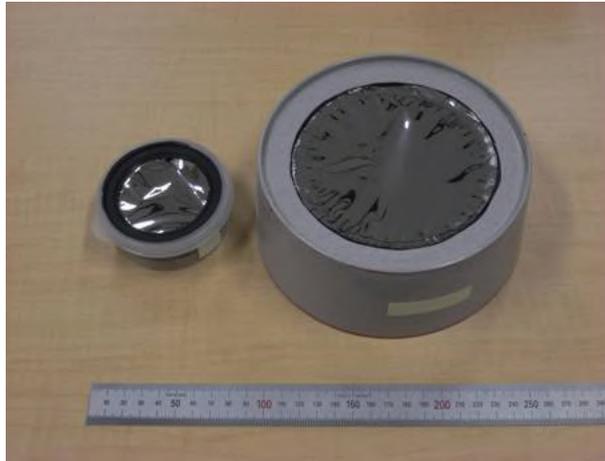
- コロナの真の明るさ(光球基準) =



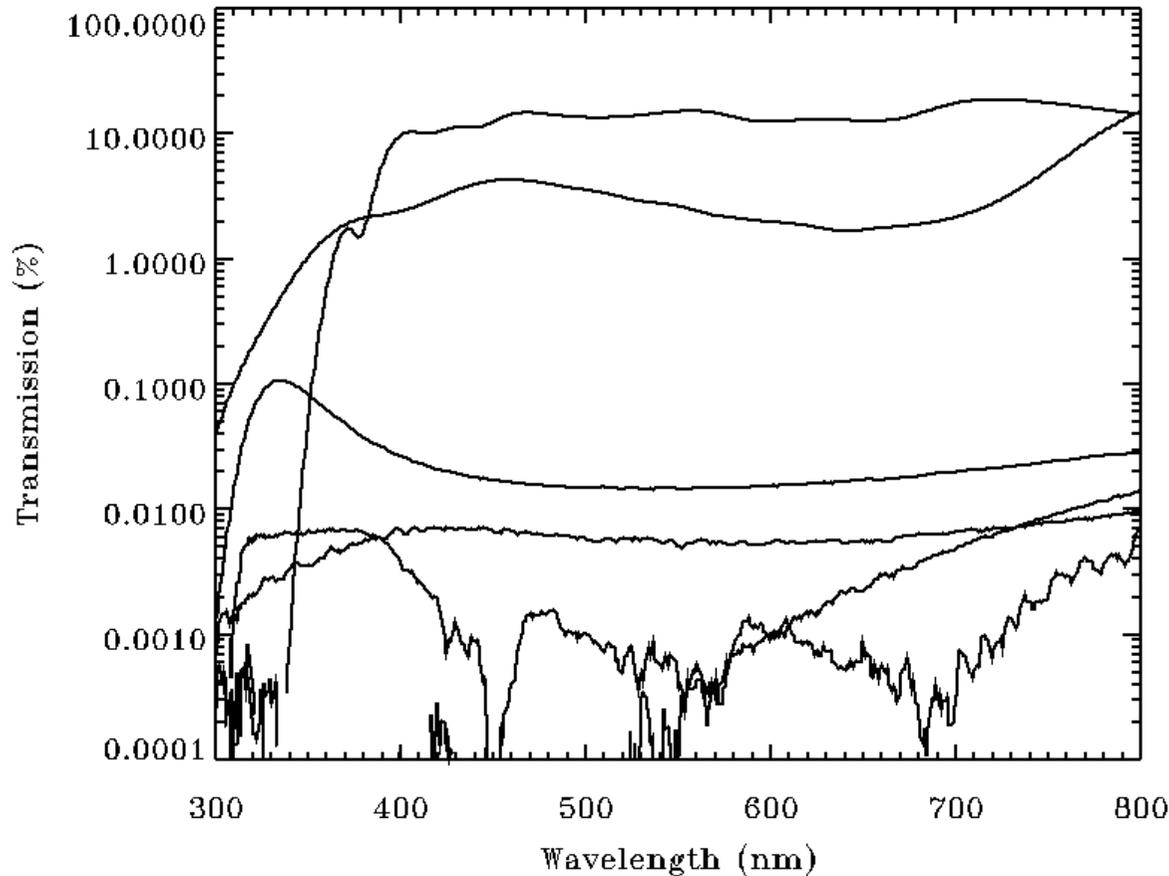
× NDフィルター透過率

NDフィルターの濃度を求める

- 2012年日食で使用されたフィルターを借用して測定



NDフィルターの分光透過率分布の例



いろいろなNDフィルターの透過率の例。
透過率が低いと測定ノイズも大きい

・ NDフィルターの
実効透過率 =
NDフィルター透
過率の波長分
布 ×

太陽光の波長
分布 ×

カメラのRGB各
チャンネルの感
度特性

NDフィルターの諸問題

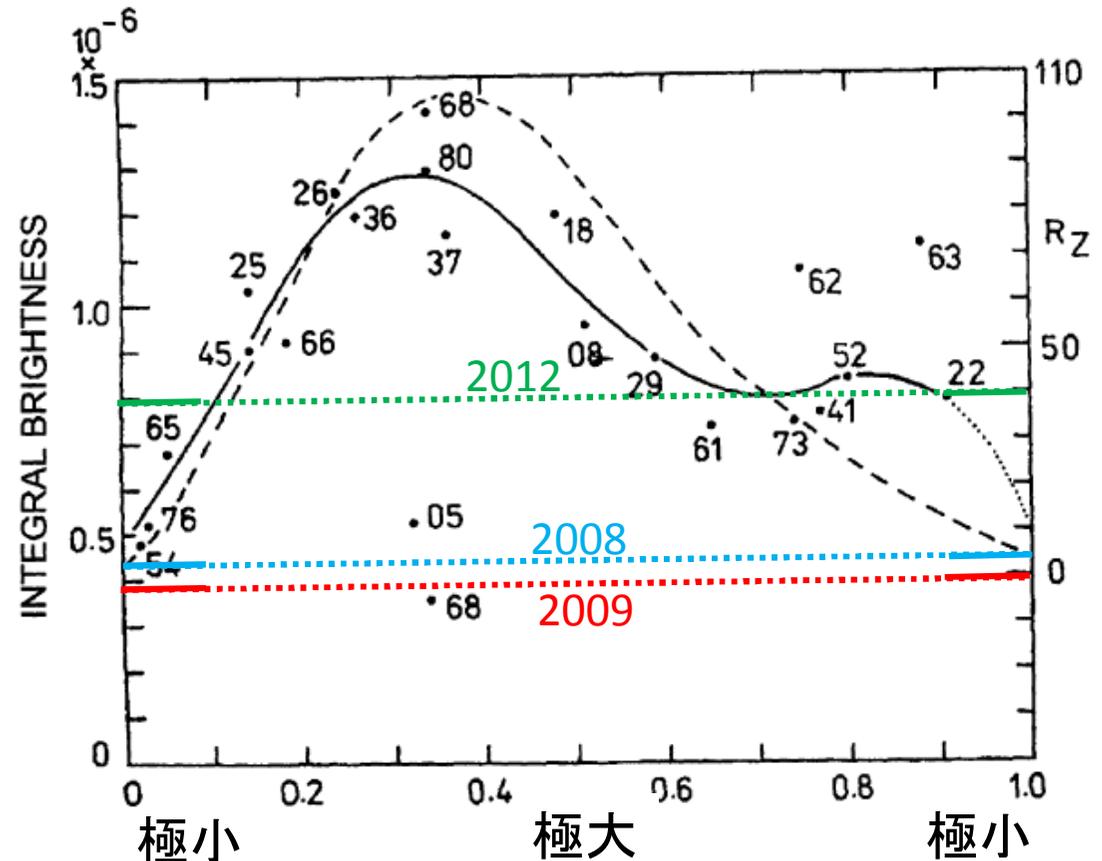
- 現実には、濃度測定結果には問題が多い
 - 測定器で透過率を測る場合、濃すぎると誤差が大きい
 - 低光量に起因する大きなノイズと0点のふらつき
 - あまりに濃度が大きいと測定不可
 - AstroSolar眼視用はぎりぎり、Thousand Oaksは短波長で濃すぎて測定不能
- 測定まで考慮した時に適当なNDフィルターは、濃度4程度以下の2枚合わせ
 - 2枚使用時の像劣化が気になる場合は最低1組はND2枚とAstroSolarと両方で写す(私自身が採用した方法)
 - AstroSolarはキズがつきやすいので、その意味でもガラスフィルター等と両方で写した方が安全
- 直接測定が難しくても、太陽を実際に写して相対透過率を求めることもできる

NDフィルターの諸問題：太陽実写

- 測定器による透過率測定結果と実写での太陽の明るさの比率が合わない
 - 散乱光が原因か
 - AstroSolar：散乱光が多い
 - ガラスNDフィルター：一般に散乱光は小さいがものにもよる
- 最終的には
 - 「薄いフィルターの測定器による絶対透過率」
 - + 「実写での濃いフィルターの相対透過率」で濃度を決定

光球輝度で較正した白色光コロナの全輝度の全輝度

- 部分食画像と比較して求めたコロナ全体の明るさ
- 極大近い時期としてはやや暗い



20世紀におけるコロナ全輝度(1.03-6Rsun)のcycle variation Rusin 2000

データ処理の環境

- IRISで可逆圧縮RAWデータを読み出し、fits(flexible image transport system)形式に変換
 - カメラメーカーのRAWデータ読み出しは輝度そのままではなく変換が入るので不適當
 - 新しいカメラのRAWデータに順次対応している
- IDLで処理 プログラミング必要
 - なお、RAW fitsデータはBayer配列なので、RGBそれぞれの画像を別に処理する場合は補間してR/G/B独立の配列に直してから使用した

- IRIS
 - C. Buil氏による天文用実用的データ処理等のソフトウェアアプリケーション、Windows用、フリー
 - 定型処理にはかなり便利
- IDL (Interactive Data Language)
 - 汎用データ・画像処理ソフト
 - 基本的にプログラミング言語、インタープリタだがコンパイルも可
 - Exelisという会社の商用ソフト、十数万円～?
 - 定型処理用アプリケーションの形を使うだけなら無料
 - Windows/Mac/Unixで使用可
 - 天文業界で20年以上使われ、特に太陽業界ではsolarsoftというソフトウェアライブラリーが使える
 - 商用ではPV-Wave、フリーではGDL(Linux)・Fawlty Language(Windows/Mac/Unix)という互換ソフトあり

最後に

- 皆既日食では、較正用データ(ダーク、フラット、食外・部分食の光球画像)を合わせて撮ることで、画像処理が行えるデータが得られ、眼で見たコロナを再現することも、研究用にデータを使うこともできます
- 画像処理にも挑戦してみてください