

位置天文衛星 Gaia の抱える問題と今後の展望

酒井伊織 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻)

Abstract

Gaia とは、銀河系内部の 10 億個もの星々を $10 \mu\text{as}$ レベルという精度で観測する ESA の可視光位置天文衛星計画である。この超高精度での観測を実現するには極めて厳密な装置の機構の管理を行わねばならないのだが、衛星打ち上げ後、予期せぬ問題により 1 mas の精度でしか観測を行えない事態に陥ってしまった。本講演では、その問題とそれらの原因が具体的にどのようなものなのかを取り上げて最新の Gaia についての報告を行う。

Gaia には二つの望遠鏡が搭載されていて、観測には二方向同時観測という手法を用いている。この観測手法での天体の位置や速度などの決定には 2 つの望遠鏡の主鏡が成す相対角 (basic angle) をいかに安定させるかが重要となってくる。しかし、BAM (The Basic Angle Monitoring) を用いると、basic angle についての問題が明らかになってきた。太陽の影響による basic angle の変化があること、BAM の信号に不連続な点が見られること、BAM の信号に中-長期的変化があること、干渉縞の間隔に変化が見られること、の 4 つである。ただ中-長期的変化は basic angle の変化を反映しているものではないことが分かっている。引き起こす要因についてはすでに特定されていて、信号の不連続は衛星の姿勢擾乱、basic angle の不連続変化の 2 つが、太陽の影響による変化は Gaia の構造的な不備が、干渉縞の間隔の変化は BAM に用いるレーザーの温度の変化や光学系の収差が要因とされている。太陽の影響による変化についてはモデリングが成されているので、現時点ではこれと BAM の信号の中-長期的変化については解決済みで、信号の不連続と干渉縞の間隔の変化が未解決ということになっている。

1 序論

1.1 位置天文学の重要性

位置天文学は「星の天球上の位置とその時間変化を測定する」天文学である。年周視差を元に三角測量を用いて測定を行い、この観測情報に分光観測から得られた視線速度の情報を加えることで天体の三次元的な位置や運動を知ることができる。これは天文学において重要な基本情報であり、宇宙における天体の運動・力学を決定する元となる重要な分野である。また遠方に存在する天体の距離測定を行う場合、直接その天体までの距離を測定する方法がなければ宇宙の距離梯子を用いることとなる。従って年周視差で求められないような天体の距離に関しても年周視差で求められた星の距離を元にしていて、年周視差による距離測定はすべての距離測定の出発点であり、その精度が遠方の天体までの距離の精度を決める。

地上観測中心の時代は大気の影響により数十光年以内の近傍の星までしか年周視差によって距離が求められていなかった。そこで宇宙空間で位置天文観測を行おうと ESA が打ち上げたのが Hipparcos である。これは 1 mas の精度で距離決定を行ったのだが、これは太陽から半径 100 pc 程度に相当し、太陽から銀河中心までが 8 kpc 程なのを考えると銀河系内のほんの一部に過ぎない。そこでより高精度の観測を目的として ESA が計画したのが Gaia 計画である。この計画では $10 \mu\text{as}$ レベルの精度での観測を行うので、太陽から半径 10 kpc 程度内の星を、つまりは銀河中心に至るまでの星を精度よく観測できる。

1.2 Gaia 衛星の観測手法

Gaia の観測手法には、二方向同時観測という手法を用いる。これは異なる視野を同時観測する方法で、衛星の姿勢運動と星の分布の区別のために行う。一

方向のみの観測の場合、データ上の星の分布の疎密が衛星のスピンの不均一に起因するのか、実際の分布の疎密そのものを表しているのか、今求めたい μas の精度では区別がつかない。しかし図 1 のように二方向同時観測を行うことでその区別を付けうることができる。これにより観測データから衛星の各時刻での回転のずれを正確に知ることによって精密な星の位置情報を得ることができる。

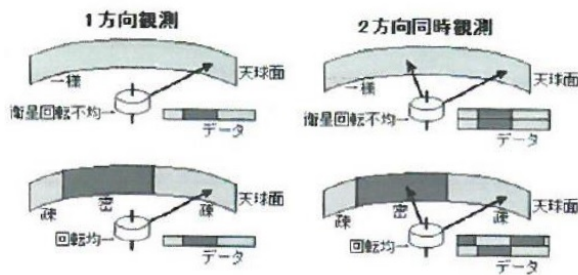


図 1: 一方向と二方向同時観測の比較

これを成し遂げるにあたって重要なパラメータが二視野の、つまりは二つの主鏡の相対角 (basic angle) である (図 2)。Gaia 衛星では basic angle が 106.5° に定められている。この角度は星の位置情報の決定に深く関わり、これが突き詰めた精度以上に大きく変動してしまえば欲しい精度で位置を決めることはできない。この basic angle の変化量を観察するために Gaia に導入されているのが BAM (Basic Angle Monitoring) システムである。

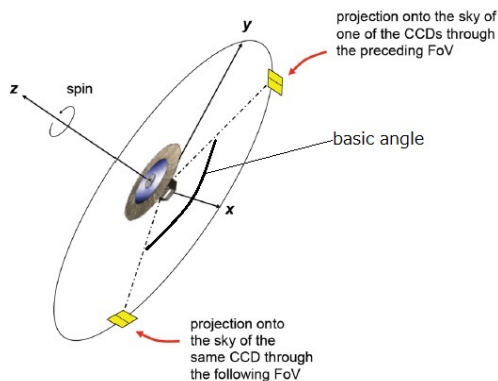


図 2: Gaia の basic angle , [1]Figure 1 改変

2 BAMの動作原理

BAM (Basic Angle Monitoring) システムは、Gaia の 2 つの望遠鏡の視線方向の変化を測定する、つまりは basic angle の変化量を測定する役割を担っている。このシステムは原理的には干渉計であり、ここではその干渉方法及び basic angle の変化量の測定方法を説明する。

BAM は Gaia 内の円環設備上に取り付けられた、2 つの主鏡方向を向いた全部で 4 本の bar から成り立っている (図 3)。このうち図 4 の M1-ASTRO2 の向かい側にある bar(以下 bar2) の土台に備え付けられているレーザーダイオードを光源とし、それを同じく bar2 の土台に備え付けられているビームスプリッターで 4 本のビームに分割し、内 2 本を bar2 を通し M1-ASTRO2 へ、残り 2 本を M1-ASTRO1 の向かい側にある bar(以下 bar1) へ送る。bar1 から出たビームはそのまま M1-ASTRO1 へ向かう。各主鏡 M1 で反射した後は図 5 のように各第二鏡、第三鏡と反射していき最終的に共通の焦点面にたどり着く。2 本のビームは干渉し、各主鏡について図 6 のような干渉縞を焦点面上に作る。つまり干渉縞の像は焦点面上に 2 つできる。この干渉縞をそれぞれ別の CCD で検出、画像中心を決定し、その差異から図 7 に示すようにして basic angle の変動を測定する。つまり光学系内の鏡が変動すると、レーザーの光路が変化してそれに伴い干渉縞の像の位置が変化するという仕組みである。

星像ではなく干渉縞を持った像を用いる理由は、画像中心の決定精度が星像の場合より圧倒的に高いことにある。Gaia で求められる basic angle の変化量測定精度は星像を用いた画像中心決定精度では力不足なのである。

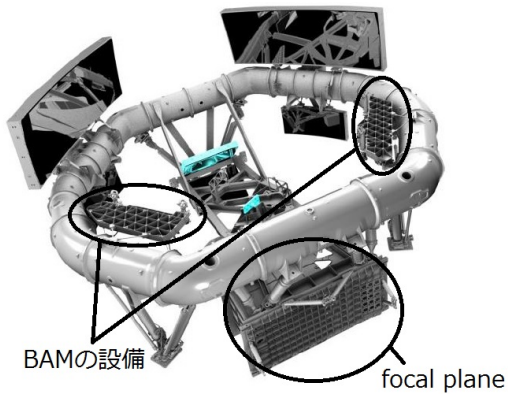


図 3: Gaia のペイロード , [3]Figure 2 改変

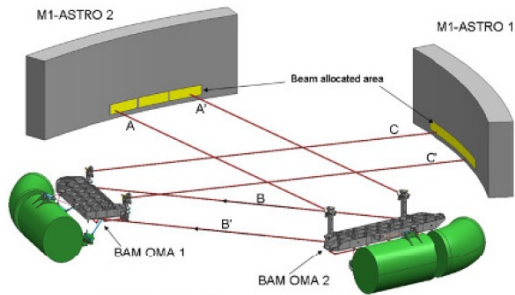


図 4: bar から出る光線の図.M1-ASTRO1,2 は各望遠鏡の主鏡を指す. [1]Figure 1 改変

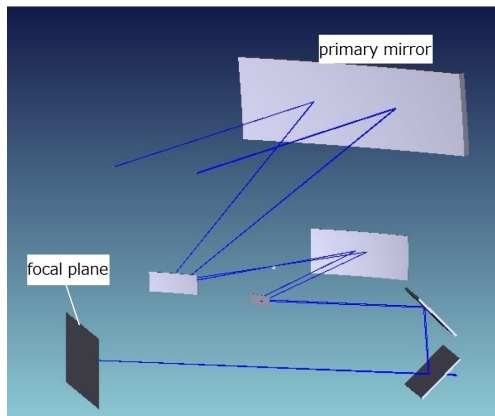


図 5: 1 組のレーザービームがたどる光路.[4]Figure 8 改変

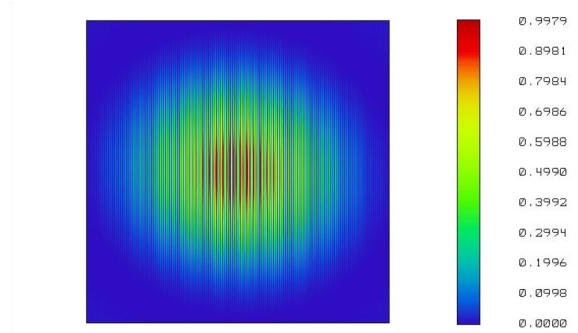
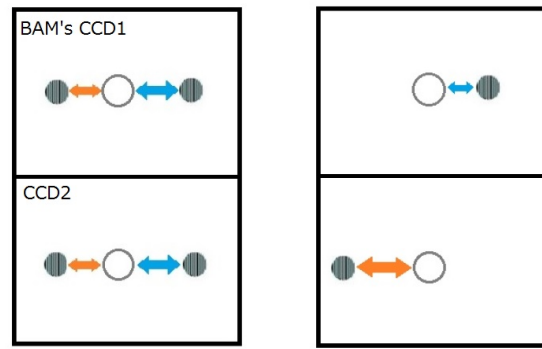
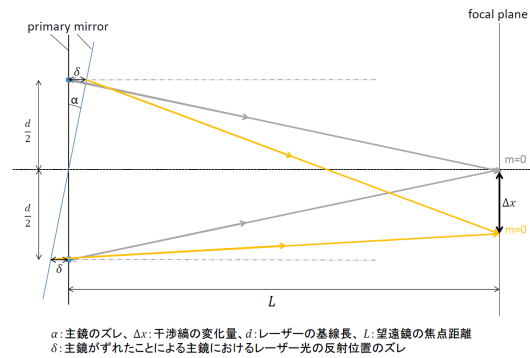


図 6: 生成される干渉縞のモデル. 色は光の強度を示す.[4]より引用



○はズレ無しの時の像の位置.図左のように上と下の像の元の位置からのズレが等しく差異が無いならbasic angleにズレは無いが、図右のように差異があるとbasic angleにズレがある。

図 7: 干渉縞の像の差異



α : 主鏡のズレ, Δx : 干渉縞の変化量, d : レーザーの基線長, L : 望遠鏡の焦点距離
 δ : 主鏡がずれたことによる主鏡におけるレーザー光の反射位置のズレ

図 8: α と Δx の模式図

各主鏡の角度の変化量 α と焦点面上での像の変化量 Δx については以下のような計算で求められる。
 Gaia は主鏡の他に第二鏡、第三鏡... と複数の鏡が

あるが、今干渉の物理を考える際には図 8 のような簡単な図に書き直すことができる。ただし実際の主鏡は歪曲しているが、今は簡単のため完全な平面としている。

干渉縞は 2 本の光線の光路差が波長の整数倍になれば強め合い、半整数倍になれば弱め合うことで生成される。図 8 においては光路差が 0、つまり

$$(\text{光路差}) = m\lambda ; m = 0, 1, 2, 3, \dots (\text{強め合う条件})$$

$$(\text{光路差}) = (m + \frac{1}{2})\lambda ; m = 0, 1, 2, 3, \dots (\text{弱め合う条件})$$

の関係式における強め合う条件の $m = 0$ の位置、すなわち干渉縞の中心位置のズレを Δx としている。従って図 8 より

$$\sqrt{\left(\frac{d}{2} + \Delta x\right)^2 + (L - \delta)^2} = \sqrt{\left(\frac{d}{2} - \Delta x\right)^2 + (L + \delta)^2}$$

整理して、

$$2d\Delta x = 4L\delta$$

$$\Delta x = \frac{2L\delta}{d}$$

$$\delta = \frac{d}{2} \tan \alpha \simeq \frac{1}{2}d\alpha (\alpha \ll 1) \text{ より}$$

$$\Delta x = \frac{2L}{d} \times \frac{1}{2}d\alpha = L\alpha \propto \alpha$$

Δx は α に比例するのが分かる。この関係と、今は近似を用いたので、具体的な数値関係として実際の $\alpha = 0.5\mu\text{as}$ のときの光路差が 1.5 pm になる¹ という関係及び Gaia 望遠鏡の合成焦点距離が $L = 35\text{m}$ 、射出時のレーザーの間隔（基線長）が $d = 0.6\text{m}$ であることを用いると、 α と Δx の関係は、

$$(\text{光路差}) = \frac{d\Delta x}{L} = 1.5 \text{ pm}/0.5\mu\text{as}$$

$$\Delta x = \frac{2L}{d} \times \frac{1.5}{0.5} \simeq 1.8 \times 10^2 \text{ pm}/\mu\text{as}$$

$$\Delta x \simeq 1.8 \times 10^2 \times \frac{\alpha}{1\mu\text{as}} \text{ (pm)}$$

となる。Gaia は最小検出精度を $0.5 \mu\text{as}$ としているが、このときの干渉縞の位置のズレ約 100pm は Gaia の CCD における約 10 万分の 1 ピクセルに相当する。

3 露わになった問題

地上実験では、basic angle の変化量は $7 \mu\text{as}$ 以内に抑えられると予想されていた。因みにこれを basic angle の誤差比較ができるように書くと $106.5 \pm 0.0000000019^\circ$ となり、いかに厳密なのかが分かる。しかし Abstract で述べたとおり、実際 BAM システムを用いて basic angle を測定してみると干渉縞、ひいては basic angle とその変化量について予想していなかった問題が 4 つ明らかになった。それは BAM の信号の不連続、中-長期的変化、太陽の影響による basic angle の変化、干渉縞の間隔の変化である。

3.1 信号の不連続

図 9 は横軸に時間をとった干渉縞の変動を表しているグラフで、上下はそれぞれ各望遠鏡についてのグラフである。横軸の単位 rev は revolution のことで、Gaia のスピン周期（6 時間）を 1 rev としている。縦軸は検出器である CCD のピクセルを単位としている。前述した通り、これら 2 つの変化を考慮して basic angle の変化量が求められる。

図 9 から、ところどころ線が不連続になっている点が見受けられると思う。しかしこの BAM の信号における不連続が実際の衛星の姿勢擾乱によるものなのか望遠鏡の視線方向の変化によるものなのかがこれだけでは分からない。そこで用いるのが One Day Astrometric Solution (ODAS) である。これは 1 日で得られた星のデータを解析することで、図 10 のように衛星の姿勢擾乱を診断する方法である。

ODAS は basic angle を一定として、得られた星像データから姿勢情報を求める。一方で Gaia はベイロード内の検出器で計測された姿勢情報を常に送信している。従って両姿勢情報が一致していたら basic

¹<http://sci.esa.int/gaia/50207-gaia-basic-angle-monitor-delivered-for-integration/>内文章より

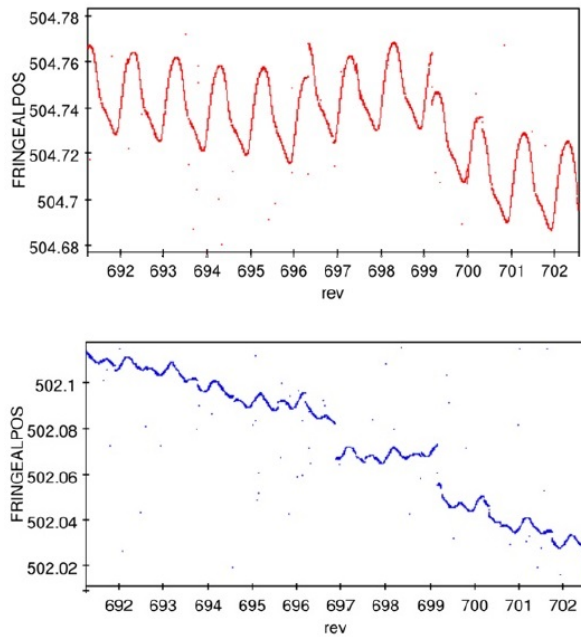


図 9: とある 3 日間の各望遠鏡での干渉縞の位置の変動の様子. 横軸は時間、縦軸は干渉縞の変化量を示している.[1] Figure5 改変

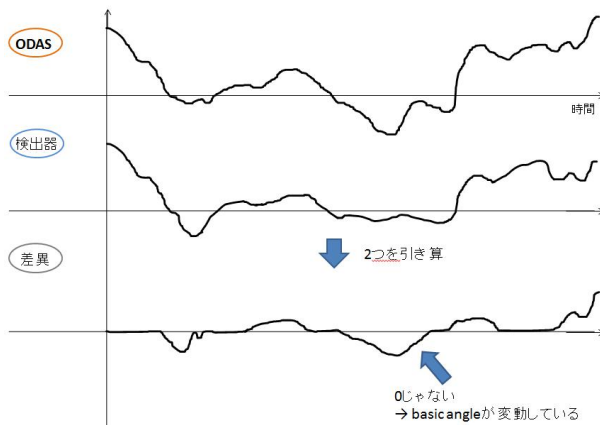


図 10: ODAS の判断法. 縦軸はその時刻で観測された星像の系統的な位置変化、横軸は時間.

angle は変動していない。逆に差異が生じていたらそれは basic angle が変動しているを意味する。これを BAM の信号と比較することで、BAM の信号における不連続が実際の衛星の姿勢擾乱によるものなのか望遠鏡の視線方向の変化によるものなのか判別できる。

図 11 は ODAS を用いて検出された差異（赤い三角形）と BAM の信号（黒の実線）を比較したもので、横軸が約 5 分を 1 目盛とした時間、縦軸が basic angle のズレである。図から干渉縞の不連続点において ODAS の値が連動して変化している箇所と変化していない箇所があるのが分かる。従って BAM 信号内の不連続には実際の basic angle の変動を反映している箇所が存在している。姿勢擾乱と関連している不連続もあるので、干渉縞の位置の不連続変化には basic angle の変化を反映しているもの、姿勢擾乱を反映しているもの両方が存在することになる。

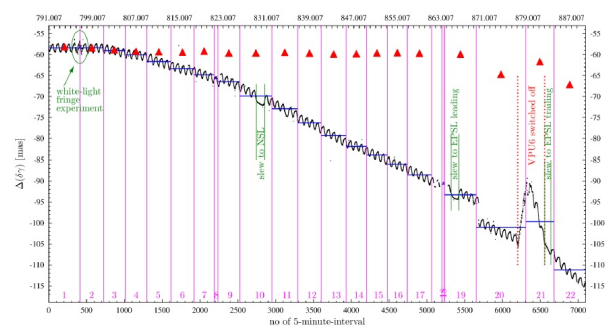


図 11: ODAS と BAM の信号の比較.[1] より引用

3.2 信号の中-長期的変化

図 9 や図 11 から、信号が中-長期的変化をしているのが分かる。これは平均して 1 日数 mas ずつ変化していつている。干渉縞の不連続同様、これについても ODAS による診断が行われた。図 9 から分かる通り、中-長期的な干渉縞の位置の変化は ODAS との相関は見られない。したがってこの変化は姿勢擾乱によるもので、basic angle の変化を反映しているものではない。

3.3 太陽の影響による basic angle の変化

Gaia にはサンシールドという設備がある。これは図 2 における円盤状の部分で、スピンの回転軸である z 軸を常に太陽に向けることで太陽方向を向いている面にあるシールドで太陽の熱はすべてはじかれる仕組みになっている。つまり太陽による熱的な変

化は無いはずである。よって熱的不平衡の起因は内部からのみで、それを含めた basic angle の変化量がこの章の冒頭で述べた $7 \mu\text{as}$ 以内、というものであった。しかし実際の Gaia では 1 rev というタイムスケールの中で 1 mas のオーダーで変化してしまっていた。図 9 における周期的な干渉縞の位置の変化に対応しているのがこの変動である。つまり両グラフの変化を考慮した結果、basic angle が 1 mas のオーダーで変化していることが分かったのだ。常に 1 rev を周期として変化しており、最終的には何かしらの構造的不備により太陽の熱を遮断しきれていないことによる変動と結論付けられた。

図 9 のように、干渉縞の位置は周期的に変化している。そしてこれについてはフーリエ解析が施されており、これが図 12 となる。

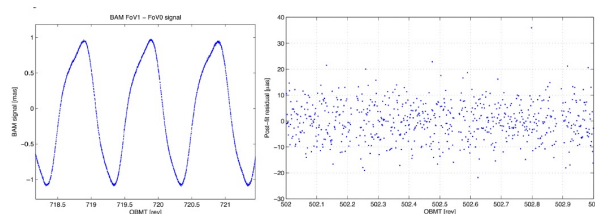


図 12: 左：周期的信号のフーリエ解析の結果. 右：フィッティング後の残差.
横軸は時間、縦軸は干渉縞の変化量を示している.[1]より引用

周期を 1rev にし、12 次の項まででフーリエ級数展開を用いて basic angle の周期的時間変動のモデル化を行っている。その結果、測定値との残差は $10 \mu\text{as}$ レベルに抑えられ、系統的な傾向も見られない。このように周期的信号については正確にモデリングされている。

3.4 干渉縞の間隔の変化

3.4.1 時間的变化

干渉縞の間隔とは、干渉縞の隣り合う明線あるいは暗線の間隔のことである。調べてみると、図 13 のようにこの変化はレーザーの温度の準周期的変化とシンクロしていることが分かった。温度変化は 0.005K

レベルで起こっており、これにより間隔が $1/250,000$ ピクセル分変化している。

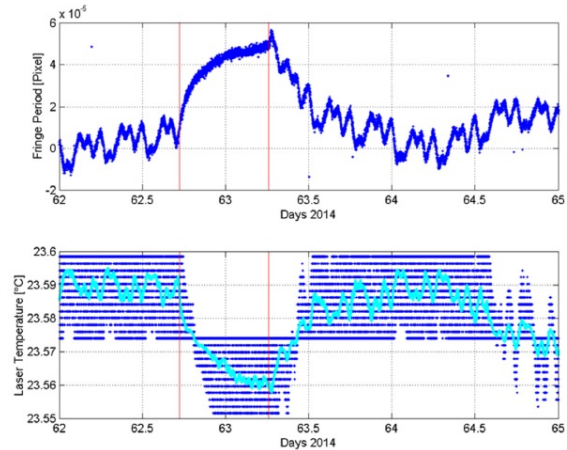


図 13: 上：横軸を時間とした干渉縞の間隔の変化、下：レーザーの温度変化. 変化がシンクロしている.[1]より引用

温度変化の起源は焦点面上の分光 CCD の操作に関係している。分光 CCD は視野内の星の密度が増加した際に低解像度モードと高解像度モード間の切り替えがより頻繁に行われる。この切り替えの際に機内のコンピュータやその他機器の作動に起因した発熱により Gaia の熱環境が変わり、それでレーザー光の温度が変化し、波長が変化し、干渉縞間隔の変化へと結びつく。モードを高解像度のみにし、この切り替えを排斥することで状況は暫定的に改善された。

3.4.2 空間的变化

また解析によって、図 14 のように光学系の収差により平行な干渉縞が生成されない問題が起こっていることも明らかになっている。先に述べたのが時間的な変化であるのに対し、こちらは空間的な変化になる。

Gaia Astrometric Global Iterative Solution、通称 AGIS という星像データと衛星の姿勢データを用いて年周視差などの未知パラメータを解くデータ解析の手法があるのだが、このパラメータ決定の際に収差のモデルも決定される。つまりこの解決は Gaia の星データの取得待ちということになる。

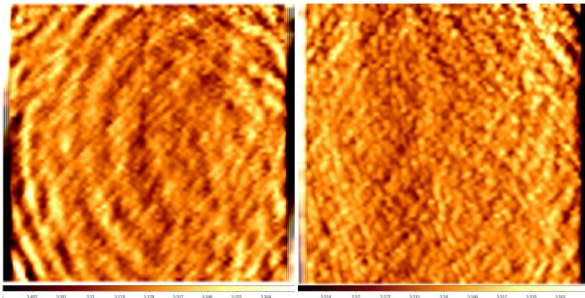


図 14: 左右はそれぞれ各望遠鏡の BAM の干渉縞. 位置によって縞の様子が異なっているのが分かる.[1] より引用

4 まとめ・今後の展望

以上をまとめると、basic angle については位置の中長期的変化は問題ではなく、太陽の影響による干渉縞の位置の変化はモデリングがなされている。従って依然として残っている問題は basic angle の不連続変化と干渉縞の間隔の変化の 2 つである。

basic angle の不連続的变化は目下解決策を模索中であるが、太陽の影響による干渉縞の位置の変化のように想定外のものが原因である場合もあるのであらゆる場合を考えなくては行けない。例えば宇宙を漂う岩石の粒子が偶然衝突したのが原因かもしれない。最悪の場合 basic angle が不連続な場合のデータの切り捨ても視野に入れる必要があるだろう。

干渉縞の間隔については、時間変化はすなわち basic angle が変動していなくても干渉縞の画像中心が時間変化することになるので、これが安定しないと basic angle の変動を正確に測定することができなくなる。また空間的变化も、図 14 のように乱雑では画像中心決定精度に影響が出てくる。つまり縞の間隔が安定しないと頼みの BAM すらも信用できないことになるのでこれは深刻な問題であると思われる。しかし間隔の変化の段落でも述べたように時間的变化についてはある程度の軽減策が成され、空間的变化については AGIS を通して収差のモデリングが成されれば大きく改善することを考えると、長い目で見れば不連続的变化よりも希望はあるのかもしれない。

得られたデータの第一次解析が終了し、データのファーストリリースが来年夏行われるが、それによ

り basic angle についてのより深い知識が得られる。そこが非常に重要なターニングポイントとなってくだらう。

また日本でも JASMINE (Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration) という赤外線位置天文衛星計画がある。この計画では複数の衛星を打ち上げることになっているのだが、特に Nano-JASMINE という衛星は Gaia と協力関係にある。Gaia と独立に全天サーベイを行い、その観測結果を Gaia が出した結果に対する妥当性検査に用いたり、Gaia が観測できない 6 等以上の明るい星を観測し不足分を補ったりする。今回 basic angle について問題が発覚した Gaia にとって、ここの連携も大いに重要なカギとなることだろう。

参考文献

- [1]Mora, A., et al. 2014, “Gaia on-board metrology: basic angle and best focus,” in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series 9143.
- [2]Mora, A., et al. 2015, “THE GAIA BASIC ANGLE: MEASUREMENT AND VARIATIONS,” EAS Publications Series.
- [3]Gielesen, W., de Bruijn, D., van den Dool, T., Kamphues, F., Meijer, E., Calvel, B., Laborie, A., Monteiro, D., Coatantiec, C., Touzeau, S., Erdmann, M., and Gare, P., “Gaia basic angle monitoring system,” in [Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series], Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series 8442 (Sept. 2012).
- [4]Riva A., Gardiol D., 2011 , Technical report , “BAM Fringes Optical simulation”.