

太陽系以外の惑星を検出するナル干渉計

西 川 淳

Nulling Interferometer for Direct Detection of Exo-Planets

Jun NISHIKAWA

Michelson's stellar interferometer has been developed to the ones with multiple large telescopes at long baselines, while nulling interferometer is currently in rapid progress, which is a possible method to achieve direct detection of extra-solar planets (exo-planets) by reducing the central star intensity. A required dynamic range for the detection of Earth-like planets is larger than 10^9 which can be attained with a wavefront accuracy of $\lambda/10000$ rms. A combination of an unbalanced nulling interferometer (UNI) and an adaptive optics for phase and amplitude correction (PAC) can achieve a virtual wavefront compensation beyond the capability of the adaptive optics. A coronagraph system with the UNI-PAC can achieve a dynamic range of 10^9 with an optical quality of $\lambda/1000$ rms.

Key words: interferometer, null, adaptive optics, coronagraph, exo-planet

天体望遠鏡の2つの部分開口を用いた干渉計測によって、フィゾーやマイケルソンらが恒星の測定にかかわったのは1900年前後のことである¹⁾。約100年を経過し、マイケルソンの天体干渉計も、基線長が300 m以上のものや口径10 mの大型望遠鏡による干渉計にまで発展した^{2)*}。一方、Bracewell³⁾が1978年に提唱したナル(またはヌル: null)干渉などを使った第2の地球探査望遠鏡は、回折光・偏光の制御や補償光学による波面制御を取り入れた高いダイナミックレンジを達成する新しい手法の理論や実験において、最近の発展が著しい。太陽系以外の惑星(系外惑星とよぶ)は、間接的手法により1992年から現在までに300個弱見つかっている^{**}。本稿では、天体観測における干渉計測を概観し、近年高度に発展してきた系外惑星直接観測手法、特に非対称ナル干渉計と位相振幅補正補償光学を使用したコロナグラフシステムについて述べる。

1. 天体観測における干渉計測

地上にある天体望遠鏡に入射する光の波面の形状は、大気ゆらぎの影響を受けて1波長以上凸凹している。その波面の位相の空間的な一様性(r_0)は20 cm程度である。現在では、いくつかの大型望遠鏡では補償光学が導入され、リアルタイムで波面をほぼ平面に戻し、望遠鏡の回折限界の角度分解能(～波長/口径)による観測が行える⁴⁾。波面補正をしない場合の焦点像は、シーイングサイズ(～波長/ r_0)に広がり、像の内部は口径による回折限界サイズの斑点模様(スペックル)で構成され、波面の変化に応じて数msのタイムスケールで変化する⁵⁾。

マイケルソンの天体干渉計では、大気ゆらぎの影響を避けて本来の回折限界による角度分解能を引き出すために望遠鏡の2つの部分開口のみを使い、干渉縞の可視度から、恒星の視直径や連星の位置などを求めている。いろいろな開口間隔と方向の2開口による干渉縞の可視度(位相も含めた複素数で)のデータを集めれば、フーリエ変換の関係

国立天文台光赤外研究部(〒181-8588 三鷹市大沢2-21-1) E-mail: jun.nishikawa@nao.ac.jp

* <http://olbin.jpl.nasa.gov/>, 文献²⁾の入手可能。

** <http://planetquest.jpl.nasa.gov/>, <http://exoplanet.eu/>, などを参照。

によって任意の強度分布の画像を再生できるが⁶⁾、電波干渉計による開口合成法・画像再生法としても発展した⁷⁾。単一望遠鏡を使う干渉計としては、全開口を使うスペックル干渉計⁸⁾、複数の部分開口を使うアパーチャーマスキング法⁹⁾に発展している。

2台の望遠鏡を使うマイケルソンの天体干渉計が成功したのは1974年で⁹⁾、強度干渉計¹⁰⁾、ヘテロダインを使った10 μm 干渉計¹¹⁾に続いてのことであった。現在では、13機の光干渉計が世界で稼動しており^{2,6)*}、大型望遠鏡の光ファイバー結合にも成功している¹²⁾。

2. 系外惑星探査

1995年、MayorとQuelozが、恒星のスペクトル中にある吸収線のドップラーシフトの周期的変化から、ある恒星のまわりに惑星が存在することを発見した¹³⁾。木星の約半分の質量をもつ巨大ガス惑星が、太陽-地球間距離の20分の1という恒星に非常に近い軌道を4.2日で公転しており(Hot Jupiterとよばれている)、太陽系とは様相が異なっていた。この発見は、惑星形成理論とともに系外惑星探査手法が多様に展開する口火となった。2008年5月の時点では**、287個の系外惑星発見報告のうち271個がドップラー法で、木星の60分の1(地球質量の5倍程度でSuper Earthとよばれる)まで検出されている。それらのうち46個は惑星が恒星との前面を通過するときの減光が観測され(Transit法)、惑星の直径や密度も導かれている。そのほかにも、重力レンズに付随したものの6個、パルサータイミング法などで5個検出され、恒星の位置の変化を測るAstrometry法も試行されている。これらはすべて恒星の光を観測して惑星の存在を間接的に知る方法である。日本勢も、理論研究はもとより、岡山天体物理観測所188 cm望遠鏡やすばる望遠鏡によって系外惑星や原始惑星系円盤などの発見にも貢献している^{14,15)}。

惑星が食を起こすときの恒星のスペクトルの変化から惑星大気の情報抽出したり、直接撮像による探査も進んでおり、褐色矮星やその伴星などが撮影される例は増えている¹⁶⁾。しかし、恒星を周回する惑星の光を直接分離観測した例はまだなく、系外惑星、特に地球型惑星の直接検出は現代天文学の最大の課題のひとつとなっている。直接検出が難しいのは、可視光では惑星が恒星よりも非常に暗いため、恒星の回折光や波面誤差によるスペックルノイズ(散乱光)に埋もれてしまうからである(図1)。

3. 系外惑星の直接観測法

系外惑星は、中心の恒星と比較して、可視光・近赤外線

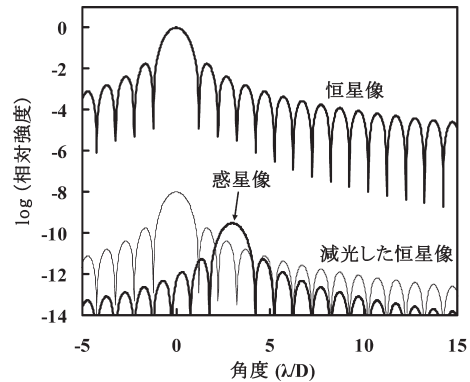


図1 恒星像と惑星像のコントラスト。円形開口の回折パターンで描いてある。

で 10^{-9} より暗く見える¹⁷⁾。太陽を5等星に見える距離(10 pc(パーセク)=32.6光年)に置けば地球は約29等星で、大型望遠鏡で1時間露出すれば写る程度の暗さである。地球型の系外惑星探査は、30 pc以内の太陽に似た恒星約250個で考えられている**。このような太陽-地球系の地球の光だけを取り出すには、望遠鏡の3つの性質をクリアする必要がある。

1つは恒星と惑星を分離する解像力である。口径3mの可視光望遠鏡の回折限界による角度分解能は0.03秒角である。10 pcの距離から見た太陽-地球は0.1秒角だけ離れて見えるので、この場合は分解能の約3倍でぎりぎり分離できる。より遠い恒星や内側の惑星の探査では条件が厳しくなる。

2つ目は、恒星像のまわりのできる回折光である。無収差の円形開口の望遠鏡では、中心の恒星によってできるエアリーパターンは、角度分解能の数倍の位置では中心の約1000分の1の強度で残っており、惑星は回折光より6桁ほど暗い。そのため、ナル干渉計やコロナグラフによって回折光を減光する必要がある。

最後の問題は、波面誤差による散乱光(スペックル)ノイズである。スペックルレベルを 10^{-9} まで暗く抑えるには、 $\lambda/10000$ rmsの波面精度が必要とされる。現在の地上望遠鏡の補償光学では、 $\lambda/100$ rms程度で 10^{-5} が限界である。

以上のことから、できるだけ口径の大きい宇宙望遠鏡をベースに、回折光を消す方法と高精度の補償光学を装備し、惑星の位置に重なるこれらの強い光を除去し、9桁のダイナミックレンジを達成することが課題となる。

3.1 ナル干渉計

Bracewellは1978年に、2台の望遠鏡によるナル干渉計で恒星の光が打ち消し合うようにすることを提案している³⁾。2つの光の間に半波長の位相差をつけて干渉させる

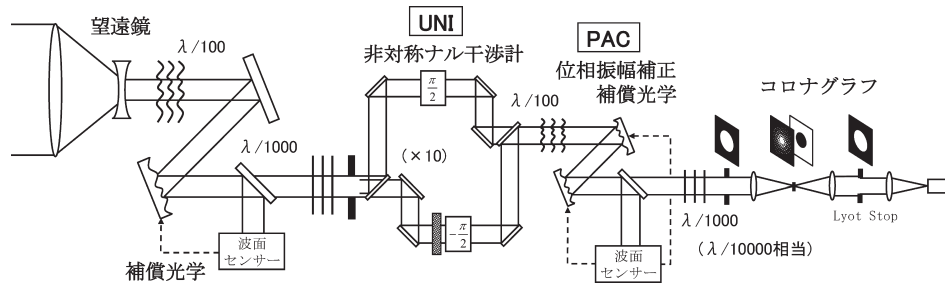


図2 非対称ナル干渉計 (UNI) と位相振幅補正補償光学 (PAC) を使用したコロナグラフシステム。

と、光軸上の光は消え、光軸から角度 θ だけ傾いて入射する光は、2 台の望遠鏡の間隔 (基線長) が B の干渉計では $B \sin \theta$ の光路長の差をもつために、微小角では光の消え方が θ^2 に比例する形となる。Bracewell のナル干渉計は、恒星との強度比が 6 桁程度に緩和される $10 \mu\text{m}$ 帯の赤外線¹⁷⁾ を選定し、角度分解能を上げて惑星を強め合う干渉の方向にするために 2 台の望遠鏡に数十 m の基線をもたせている。Darwin 計画、TPF-I 計画などは、その原理を発展させた 4 台の望遠鏡による赤外線ナル干渉計となっている**。また、最近では、単一望遠鏡の光路中にナル干渉計を用いて、可視光のコロナグラフとする応用が広がっている。

3.2 コロナグラフ

単一望遠鏡において、恒星の光を除去して周囲の暗い天体構造を映し出すものを総称して (ステラー) コロナグラフという。語源の太陽のコロナを観測する装置では、焦点面の太陽像を円盤で隠し、再結像した瞳の周縁部に円盤の回折で発生するエネルギーを少し小さな絞り (Lyot stop という) を置いて除去してから、太陽像を再結像している。ステラーコロナグラフでは、焦点面に遮蔽円盤を置くだけでなく、多種多様であり、以下の 4 つに大別される。

- (1) 焦点面マスク型
- (2) 瞳面ナル干渉型
- (3) 瞳関数改良型 (アポダイゼーションと変形開口)
- (4) 波面制御型 (ダークホール型)

前二者では恒星像全体を減光する働きがある。(1) 焦点面マスク型は、エアリーディスクの一部の領域で遮蔽または位相を (π) ずらし、再結像された瞳におけるエネルギー分布を外周に偏らせて Lyot stop で除去する¹⁸⁻²¹⁾ (図 2 の最後部参照)。(2) 瞳面ナル干渉型は、ビームを一度 2 つに分け、位相を π ずらし、瞳反転干渉計^{22,23)}、横ずらし干渉計²⁴⁾、または、部分開口による干渉計²⁵⁾、によりナル干渉を起こす (図 2 の UNI 部参照)。(3) 瞳関数改良型²⁶⁻²⁸⁾ と、(4) 波面制御型²⁹⁾ は、瞳面の透過率分布または波面の位相を操作して、恒星像の中心強度に比較して点像分布関数の

裾野の一部を大幅に低減するもので、像中心の明るい部分は円盤で隠すか (1) の方法で抑制して検出器のオーバーフローを避ける。

対象となる恒星は、広帯域光を発するインコヒーレントな面光源である。太陽の半径は、地球の軌道半径の 200 分の 1 という比較的大きな値をもっており、干渉を使って恒星の回折光を消す (1) (2) の方法では、恒星の端から来る光の消え残りを十分に減らすため、入射角の 4 乗に比例して消える工夫が必要である。これは、赤外線ナル干渉計で望遠鏡を 4 台にした理由のひとつでもある。

そのような事情も含めて、多くのコロナグラフは理論的に 10 桁以上のダイナミックレンジが得られるが、波面誤差が大きいとその性能は得られない。

3.3 補償光学

補償光学は、波面センサーと可変形鏡から構成され、波面誤差を除去する。波面誤差が $\lambda/10$ より小さければ、円形開口の焦点像は大気ゆらぎで起こるようなスペックルではなく、一見、特に中心付近は理想的なエアリーパターンのように見える。しかし、ナル干渉などでエアリーパターンを消すと、その下にあったスペックルが現れるため、 10^9 のダイナミックレンジを得るためには $\lambda/10000$ rms の波面精度が必要とされている²⁰⁾。ところが、可変形鏡で $\lambda/10000$ rms の波面制御を行ったとしても、波面センサーと非共通なコロナグラフの光路 (図 2 参照) に $\lambda/1000$ rms の波面誤差があればそれを補正したことにはならず、最終像面におけるスペックルは下がらない。波面制御型コロナグラフでは、最終像面に発生するスペックルをもとに波面誤差を推定 (焦点面波面センサーという) してスペックルが減るように可変形鏡を制御する方法で非共通光路誤差を回避できるが、惑星並みに 9 桁近く暗くなったスペックルによる測定に時間がかかることが問題である。

4. UNI-PAC 法

UNI-PAC 法は、望遠鏡からの光を、初段補償光学、非対称ナル干渉計 (UNI)、位相振幅補正 (PAC) 補償光学、

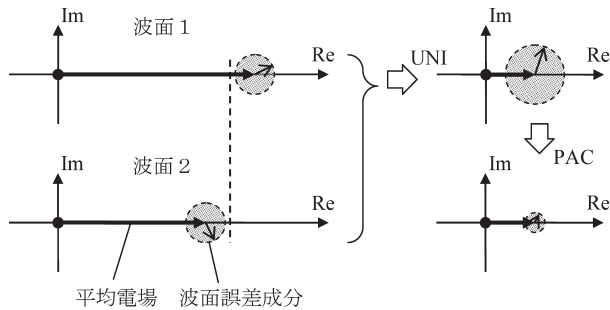


図3 UNI-PAC法における波面の複素電場振幅の変遷。

コロナグラフ、の4ステージを通すときの中間に配置する光学系で(図2)、この構成では波面誤差の補正と恒星光の消去を交互に2回ずつ行うことができる³⁰⁾。

本法の本質は、UNI (unbalanced nulling interferometer) の採用である。初段補償光学では、望遠鏡本体のもつ波面誤差(例えば $\lambda/100$ rms)を比較的高精度に補正できる($\lambda/1000$ rms)が、限界精度以下の波面誤差が残っているとする。UNIでは、電場振幅に差をつけた2つの波面により不完全なナル干渉を起こし、恒星光を控えめに(例えば電場で1/10、強度で1/100)に消去する。これは、残った平均電場振幅が波面誤差の電場振幅より常に十分に大きく、瞳面では強度むらも小さく位相特異点のない波面を残すためである。その際、平均電場振幅の減少に伴い相対的な物理量である波面の位相誤差と振幅誤差が(例えば10倍:初段補償光学後の波面誤差が $\lambda/1000$ rmsならばUNI後は $\lambda/100$ rmsに)拡大されて見える(図3)。大きな波面誤差は測定補正しやすい。

そこで続いて、PAC (phase and amplitude correction) 補償光学により、拡大された波面誤差の測定補正を行い、初段と同程度の波面精度($\lambda/1000$ rms)に再補正する。PAC補償光学では、位相誤差と振幅誤差両方の補正が必要なため2つの可変形鏡を用いる。UNIの直後にPACを行うことも本質的であり、UNIで波面誤差が拡大されたために、初段補償光学では補正し切れなかった成分が補正可能となっている。波面誤差の電場振幅を初期波面と比較すると、単一の補償光学系の限界を(10倍)超えて($\lambda/10000$ rmsまで)補正されたことに相当する。

像面で評価すると、UNIによりまず恒星光だけが(2桁)減衰し、PACによりスペックルノイズレベルが(2桁)下がって、惑星の強度に近づいていることが理解できる(図4)。その結果として、終段のコロナグラフがクリアすべきダイナミックレンジが(2桁)減ることにより、そこに必要な波面精度も($\lambda/1000$ rmsに)下がる効果が得られる。最後に全体を見渡すと、初段補償光学、UNI+PAC、

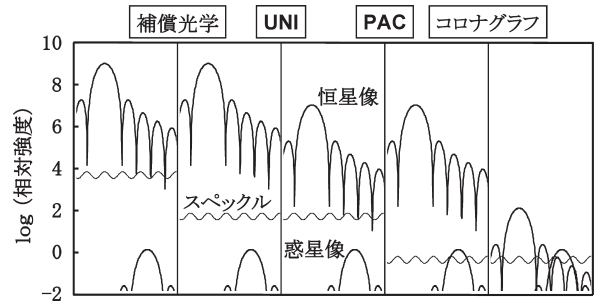


図4 像面で評価した各プロセスの効果。

コロナグラフの全光学系において、要求される波面精度が($\lambda/1000$ rmsとなって1桁)緩和されたことになっている。このように、UNI+PAC法を前置光学系として採用したコロナグラフシステムは、 $\lambda/10000$ rmsのような波面精度がなくとも9桁のダイナミックレンジを達成できるすぐれた性質をもっている。

ここでは、干渉させた2つの波面の相対的な差についてのみ計測制御できる。UNIにおける片方の波面の誤差を何らかの方法で求めることができれば、もう一方を使って非常に高精度の波面測定ができる可能性はある。

2006年から注目を集めているのが、掩蔽衛星 (Occulter) 法³¹⁾である。約50000 km先の宇宙空間に直径40 mの遮蔽円盤を浮かべ、恒星光を隠すものである。円形の遮蔽板では、恒星光が回折で回り込み、それほど有効ではなかったが、円盤外周部に花形のアポダイゼーションを施すと濃い影が長く続き、円盤の縁から惑星が見えるまで後方に下がっても恒星光が影の中に入らないようになった。

このように、コロナグラフの改良版や新種の提案も途切れることがなく、実験的成果は毎月更新され、熾烈な競争が続いている。また、系外惑星直接検出ミッションの早期実現を目指して、規模の再検討や世界協力の活動も常時行われている。UNI-PAC法などの有力候補の実証実験を早期に進め、日本発祥の技法がミッションの中核に使われることを目指したい。

文 献

- 1) A. A. Michelson and F. G. Pease: "Measurement of the diameter of alpha Orionis with the interferometer," *Astrophys. J.*, **53** (1921) 249-259.
- 2) P. Lawson ed.: *Principles of Long Baseline Stellar Interferometry* (JPL Publication, Pasadena, CA, 2000).
- 3) R. N. Bracewell: "Detecting nonsolar planets by spinning infrared interferometer," *Nature*, **274** (1978) 780-781.
- 4) 大屋 真, 渡邊 誠: "すばる望遠鏡における新補償光学システム", *光技術コンタクト*, 5月号 (2007) 227-235.

- 5) A. Labeyrie: "Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analysing speckle patterns in star images," *Astron. Astrophys.*, **6** (1970) 85-87.
- 6) 家 正則, 岩室史英, 舞原俊憲, 水本好彦, 吉田道利 編: 宇宙の観測 I (日本評論社, 2007).
- 7) A. R. Thompson: *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy* (Reprint 版, Krieger Pub. Co., Malabar, FL., 1991).
- 8) P. G. Tuthill, J. D. Monnier, W. C. Danchi, E. H. Wishnow and C. A. Haniff: "Michelson interferometry with the Keck I telescope," *Publ. Astron. Soc. Pac.*, **112** (2000) 555-565.
- 9) A. Labeyrie: "Interference fringes obtained on VEGA with two optical telescopes," *Astrophys. J.*, **196** (1975) L71-L75.
- 10) R. H. Brown and R. Q. Twiss: "Correlation between photons in two coherent beams of light," *Nature*, **177** (1956) 27-29.
- 11) M. A. Johnson, A. L. Betz and C. H. Townes: "10-micron heterodyne stellar interferometer," *Phys. Rev. Lett.*, **33** (1974) 1617-1620.
- 12) G. Perrin, J. Woillez, O. Lai, J. Guerin, T. Kotani, P. L. Wizinowich, D. Le Mignant, M. Hrynevych, J. Gathright, P. Lena, F. Chaffee, S. Vergnole, L. Delage, F. Reynaud, A. J. Adamson, C. Berthod, B. Brient, C. Collin, J. Cretenet, F. Dauny, C. Deleglise, P. Fedou, T. Goeltzenlichter, O. Guyon, R. Hulin, C. Marlot, M. Marteaud, B.-T. Melse, J. Nishikawa, J.-M. Reess, S. T. Ridgway, F. Rigaut, K. Roth, A. T. Tokunaga and D. Ziegler: "Interferometric coupling of the Keck telescopes with single-mode fibers," *Science*, **311** (2006) 194.
- 13) M. Mayor and D. Queloz: "A Jupiter-mass companion to a solar-type star," *Nature*, **378** (1995) 355.
- 14) 井田 茂, 佐藤文衛, 田村元秀, 須藤 靖: 宇宙は地球であふれている (技術評論社, 2008).
- 15) 田村元秀, 佐藤文衛: "太陽系外惑星と惑星の誕生に迫るすばる", *日本物理学会誌*, **63** (2008) 99-105.
- 16) G. Chauvin, A.-M. Lagrange, C. Dumas, B. Zuckerman, D. Mouillet, I. Song, J.-L. Beuzit and P. Lowrance: "Giant planet companion to 2MASSW J1207334-3932254," *Astron. Astrophys.*, **438** (2005) L25-L28.
- 17) W. A. Traub and K. W. Jucks: "A possible aeronomy of extrasolar terrestrial planets," *AGU Monograph Series, v. 130: Atmospheres in the Solar System: Comparative Aeronomy*, eds. M. Mendillo, A. Nagy and J. H. Waite (American Geophysical Union, Washington D.C., 2002) pp. 369-380.
- 18) O. Guyon, C. Roddier, J. E. Graves, F. Roddier, S. Cuevas, C. Espejo, S. Gonzalez, A. Martinez, G. Bisiacchi and V. Vuntsemeri: "The nulling stellar coronagraph: Laboratory tests and performance evaluation," *Publ. Astron. Soc. Pac.*, **111** (1999) 1321-1330.
- 19) N. Baba, N. Murakami, T. Ishigaki and N. Hashimoto: "Polarization interferometric stellar coronagraph," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1373-1375.
- 20) M. J. Kuchner and W. A. Traub: "A coronagraph with a band-limited mask for finding terrestrial planets," *Astrophys. J.*, **570** (2002) 900-908.
- 21) G. Foo, D. M. Palacios and G. A. Swartzlander, Jr.: "Optical vortex coronagraph," *Opt. Lett.*, **30** (2005) 3308-3310.
- 22) E. Serabyn, J. K. Wallace, G. J. Hardy, E. G. H. Schmidtlin and H. T. Nguyen: "Deep nulling of visible laser light," *Appl. Opt.*, **38** (1999) 7128-7132.
- 23) A. Tavrov, J. Nishikawa, M. Tamura, L. Abe, K. Yokochi, T. Kurokawa and M. Takeda: "Common-path achromatic interferometer-coronagraph: Images from a breadboard demonstrator," *Appl. Opt.*, **46** (2007) 6885-6895.
- 24) M. Shao, J. K. Wallace, B. M. Levine and D. T. Liu: "Visible nulling interferometer," *Proc. SPIE*, **5487** (2004) 1296-1303.
- 25) J. Nishikawa, T. Kotani, N. Murakami, N. Baba, Y. Itoh and M. Tamura: "Combination of nulling interferometer and modified pupil for observations of exo-planets," *Astron. Astrophys.*, **435** (2005) 379-384.
- 26) N. J. Kasdin, R. J. Vanderbei, D. N. Spergel and M. G. Littman: "Extrasolar planet finding via optimal apodized-pupil and shaped-pupil coronagraphs," *Astrophys. J.*, **582** (2003) 1147-1161.
- 27) O. Guyon: "Phase-induced amplitude apodization of telescope pupils for extrasolar terrestrial planet imaging," *Astron. Astrophys.*, **404** (2003) 379-387.
- 28) K. Enya, L. Abe, S. Tanaka, T. Nakagawa, K. Haze, T. Sato and T. Wakayama: "High contrast experiment of an AO-free coronagraph with a checkerboard pupil mask," *Astron. Astrophys.*, **480** (2008) 899-903.
- 29) J. T. Trauger and W. A. Traub: "A laboratory demonstration of the capability to image an Earth-like extrasolar planet," *Nature*, **446** (2007) 771-773.
- 30) J. Nishikawa, N. Murakami, L. Abe, T. Kotani, M. Tamura, K. Yokochi and T. Kurokawa: "Nulling and adaptive optics for very high dynamic range coronagraph," *Proc. SPIE*, **6265** (2006) 62653Q.
- 31) W. Cash: "Detection of Earth-like planets around nearby stars using a petal-shaped occulter," *Nature*, **442** (2006) 51-53.

(2008年5月27日受理)