

黄道光の測光観測 ～系外惑星検出に向けて～

石黒正晃^{*}，中村良介^{**}

^{*} 〈神戸大学 大学院自然科学研究科 構造科学専攻 宇宙惑星物質講座 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1〉

e-mail: ishiguro@komadori.planet.sci.kobe-u.ac.jp

^{**} 〈神戸大学 総合情報処理センター 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1〉

e-mail: ryosuke@kobe-u.ac.jp

太陽系内ダストによって散乱された太陽光を黄道光という。近年、恒星周囲のダストディスクが観測されるにつれて、太陽系外惑星を見つけるための手段の一つとして我々の太陽系の黄道光観測が注目されるようになってきた。ここでは、黄道光の観測の歴史を振り返りながら、太陽系外惑星検出における黄道光観測の重要性について述べる。

1. はじめに

IRAS (Infrared Astronomical Satellite) による数多くの成果の中でも、周囲にダストディスクを伴っている主系列星 (いわゆるヴェガ型星) の発見は、特に重大なもののひとつである。なかでも画架座 β 星は、長年にわたって可視光で直接ディスクを観測できる唯一の天体として知られていたが、最近、可視・近赤外線の散乱光による観測で、他の主系列星の周囲にもディスクが相次いで検出された^{1), 2)}。しかし、こうした可視・近赤外での観測では、最も興味のある惑星領域はコロナグラフによって隠されている。より内側を見ようとすれば、中心星が暗くなる長波長側で観測するしかない。

以前から SED (Spectral Energy Distributions) のモデル計算に基づき、ダストディスクは数十 AU 以内の領域では薄くなっていると考えられてきた。実際 JCMT (James Clerk Maxwell Telescope) でのダスト連続波の観測によって見つかったエリダヌス座 ϵ 星 (ϵ -Eri) 周囲のダストディスクはドーナツ状になっていた³⁾。ダストからの熱放射は、我々の太陽系で言うカイパーベルト領域 (> 30 AU) に集中しており、モデル計算の予測どおり内側の惑星領

域にはダストが存在しないように見える。ヴェガ型星が主系列星であること、ディスク中のダストの寿命がポインティグ・ロバートソン効果のためにせいぜい数百万年であることを考えると、ダストディスクの空間構造の最も単純な解釈は、「内側ではすでに惑星が形成されているのに対し、外側では現在もカイパーベルト天体同士の衝突が起こって、ダストが供給されている」というものであろう。だが、本当に内側にはダストが存在しないのだろうか？

ここで注意すべきは、サブミリで観測しやすいのは低温 (\sim 数十 K) の、つまりより外側に存在するダストであるという事実である。中心星に邪魔されずに、ある程度高温 (\sim 数百 K) のダストを見るためには、中間赤外観測が有効となる。

HR 4796 は、画架座 β 星よりも大きな赤外超過を伴う天体として知られている。最近 2 つのグループが、この天体を中間赤外で撮像した結果、内側の惑星領域にもダストが存在することが明らかとなった⁴⁾。この内側のダストは、外側のカイパーベルト領域のディスクと区別され系外黄道光 (Exo-zodiacal light) と呼ばれている。わざわざ系外というくらいだから、太陽系内にも黄道光が存在する。この「黄道光」の観測が、本稿のテーマである。



2. 黄道光とは

良く晴れた春の夕方に、太陽が沈んで十分時間が経つのにまだ西の空が明るくぼんやりとしていることがある。同様の現象は秋の早朝にも見られる(図1=表紙)。黄道面に沿った、この淡い光の帯が黄道光であり、その正体は惑星間空間に存在する固体微粒子(惑星間塵)によって散乱された太陽光である。黄道光は太陽から離れるにしたがって、どんどん暗くなるが、太陽からちょうど正反対になる方向では、再び明るくなる。これを対日照(Gegenschein)と呼ぶ。太陽に近づくとつれて明るく見えるのは、太陽に近いほどダストの空間個数密度が増えることと、塵による光散乱の効率が前方散乱でより強くなるからだ。一方、赤外線観測される黄道光は、惑星間塵自身による熱放射で、波長 $25\mu\text{m}$ あたりにピークを持つ。したがって衛星高度から、この波長域で全天観測を行うと、夜空は黄道放射が支配的となっている。つまり宇宙からの赤外線観測(特に $10\sim 60$ ミクロン)においては、いかに正確に黄道放射を差し引くかが観測全体の質を決定すると言える⁵⁾。

3. 黄道光観測の歩み

黄道光を観測することによって、惑星間塵の組成や空間分布を研究することができる。黄道光の観測は非常に古くから行われてきたが、定量的な観測が本格的に行われたのは、1960年頃からである。当時の観測者たちは、望遠鏡に光電子増倍管を取り付けることによって、長時間かけて夜空の狭い領域の黄道光の明るさや偏光度を観測した⁶⁾。ところが、地上から星のない夜空を観測した時、観測される明るさは黄道光によるものだけではない。地球上層大気(高度約100km)にある原子や分子が発光する大気光や、遠方の星・銀河の集積光なども含まれる。更には黄道光や大気光、星の集積光が地球の下層大気によって散乱された光も混じってくる。地上から黄道光を観測すると、観

測される明るさ(I(obs))は、以下のような式で表わされる。

$$I(\text{obs}) = [I(\text{ZL}) + I(\text{ISL}) + I(\text{AG})] \exp(-\tau) + I(\text{SCA})$$

I(ZL)は黄道光の明るさ、I(ISL)は星の集積光、I(AG)は大気光の明るさ、 τ は地球大気の光学的厚さ、I(SCA)は下層大気による散乱光である。このような面光源からやってくる光は互いに分離することが困難なために、黄道光の明るさの絶対値を求めることは難しい仕事である⁷⁾。このため、報告されている黄道光の明るさは、観測者によって大きくバラつく⁸⁾。Dumont 達は、大気起源の明るさを厳密に見積もることによって、10年以上に及ぶ地上観測から、黄道光の明るさの絶対値を求めた⁹⁾。

1970年代に入ると、飛翔体を用いた黄道光観測が盛んに行われるようになった。Leinert 達は、地球より内側に軌道をとる飛翔体ヘリオス1号・2号を用いて、地球より内側での黄道光の明るさを測定した(ヘリオスの近日点距離は0.3AU)¹⁰⁾。また、外惑星へと旅立ったパイオニア10・11号も黄道光を観測した。特に2台のパイオニアは、惑星間塵のほとんど存在しない外惑星領域での夜空の明るさを測定したために、上述の星や銀河の集積光の明るさ分布の貴重なデータをもたらした¹¹⁾。

80年代になると、黄道光観測の中心は可視域から赤外線へと移った。それとともに、今まで非常になめらかな分布をしていると考えられていた黄道光にも、細かな空間構造がある事がわかってきた。中でも特筆すべきは、IRASによる小惑星起源のダストバンドの発見である¹²⁾。ダストバンドの形成については、次のようなシナリオが提案されている。

小惑星の族(ファミリー)は、数百km以上の直径を持つ母天体が大規模衝突によって破壊された結果生じた、破片の集合であると考えられている¹³⁾。この大規模衝突の際、あるいはその後の同じファミリーに属する小惑星同士の衝突によって、多量のダスト(塵)が生成される。こうしたダストは、惑星(特に木星)の摂動を受けるため歳差運



動によって軌道面が回転する。ダストの軌道運動は、地球から見て黄道面から最も離れた時に黄緯方向の速度が極小になる。そのため、ダストが黄道面から最も離れた位置で、見かけ上ダストの空間個数密度が多くなったように見える(図2)。ダストバンドは、こうして発生した塵の空間集積に対応しており、平行な帯のように現れる。その後のCOBE(Cosmic Background Explorer)衛星の観測と合わせて、現在までに、Themis, Koronis, Eos, Mariaの各ファミリーに付随するダストバンドが確認されている。

また、IRASは彗星軌道上に分布するチューブ状の塵雲(ダストトレイル)を検出した。彗星核から放出された小さなダストは、太陽放射圧を受けて飛ばされてしまうが、大きなサイズのダスト($> 100 \mu\text{m}$)は、母天体とほとんど同じ軌道上に分布している。Tempel 2彗星やEncke彗星といったいくつかの短周期彗星の軌道に沿って、ダストトレイルが見つかった¹⁴⁾。こうしたダストバンドやダストトレイルの発見によって、惑星間塵の起源が小惑星や彗星といった小天体にあることがはじめて観測から直接示されたのである。

Dermott達は、小惑星の衝突によって生成されたダスト群の軌道進化のモデル計算を行った。その結果、ポインティング・ロバートソン効果によってゆっくりと太陽に落ち込むダストが、力学的共鳴のために地球軌道付近に長期間滞在し、太陽を取り巻くようなダストリングをつくることを見出した(レゾナンスリング)。彼らの計算によれば、このリング粒子の空間数密度は、地球進行方向の反対側でやや高くなるが、実際にIRASやCOBEの観測データから朝夕(地球の進行方向と、進行逆方向)の黄道放射の明るさが異なることがわかった¹⁵⁾。上述の ϵ -Eriのダストディスクに見られる非対称性も大型の惑星により形成されたレゾナンスリングである可能性が示唆されている。こうして現在では、黄道放射として赤外線領域で観測されている惑星間塵雲は、

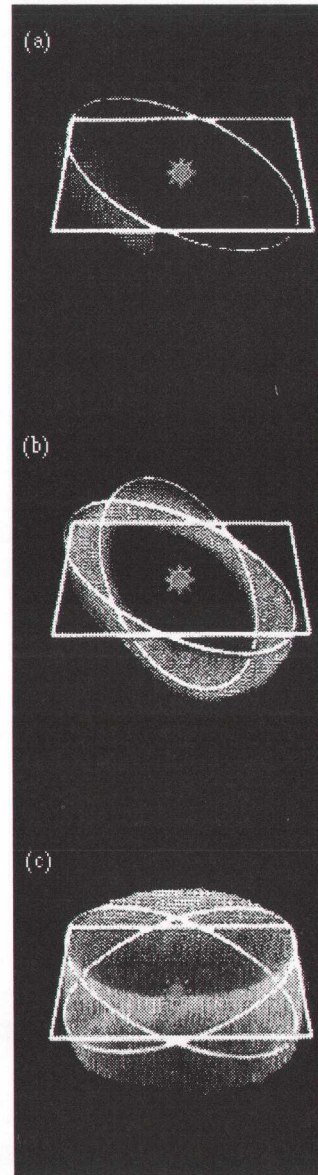


図2 ダストバンドの生成。(a) まず初めに小惑星同士の衝突によって母天体の付近に多量のダストが放出される。(b) このダストは100~1000年で母天体の軌道を一周するように広がる。(c) 木星の摂動により、その軌道面は歳差運動し、約100万年後にはあらゆる経度方向にわたってダストは分布する。このトーラス状に分布するダストを地上から観測すると、ほぼ黄道面を挟んで南北に1対のバンド構造として見える。



- ・ 供給源である小惑星や彗星の空間分布
- ・ 重力的摂動源としての惑星の軌道

を反映した複雑な空間分布をしていると考えられるようになってきた。逆に言うと、黄道光の輝度分布を精密に測定することで、供給源である小天体や惑星についての詳しい情報が得られる可能性がある。また赤外線を効率的に放射する塵のサイズは、可視光を散乱する塵よりも大きいと考えるのが自然である。惑星間塵雲の空間構造が、塵の大きさによって異っていても不思議ではない。こうして、神戸大学向井研究室を中心とする黄道光観測グループは、1995年に地上からの可視黄道光観測を開始した。

4. 冷却可視 CCD カメラによる 黄道光観測

観測に使用している測定器は、市販の一眼レフカメラ用の魚眼レンズまたは広角レンズに、電子冷却の CCD カメラを取り付けた非常にシンプルなものである。冷却 CCD カメラを用いた黄道光の観測は他には例がなく、手探り状態で始めた観測だった。冷却 CCD カメラは非常に量子効率がよいため、淡い黄道光を測光するのに適している。更に、2次元のデータが1回の測定で得られるために、細かな黄道光の構造を検出するには非常に強力な測定器である。観測は、国立天文台乗鞍コロナ観測所、東京大学木曾観測所、マウナケア（ハワイ）、ハレアカラ山（ハワイ）等で実施された。

1995年9月から97年3月にかけて合計3回の観測から、黄道光の明るさ分布が、黄道面をはさんで南北非対称であることがわかった^{16), 17), 18)}。また、対日照の形状は、一般に黄道面に細長く伸びた長楕円形だと言われているが、我々の観測から、対日照の明るさの分布は、秋には南側が、春には北側が明るくなっていることもわかった¹⁹⁾。モデル計算との比較は、惑星間塵雲の空間分布の対称面が、黄道面ではなく木星の軌道面に近いことを示

している。これは、前述したように、塵の軌道分布が木星の摂動を受けているためだと考えられる。画架座β星でも、ダストディスクの明るさ分布の対称面が、ディスクの内側と外側で異なっていることが、ハブル宇宙望遠鏡やチリでの観測から示唆されている²⁰⁾。

更に1997年10月から11月にかけてマウナケアで行った観測では、地上観測としては初めてダストバンドを検出することに成功した²¹⁾ (図3)。IRASによって検出されたダストバンドとの比較から、可視光で観測されるダストバンドは赤外線で見られるダストバンドよりも空間的に広く分布していることがわかった²²⁾ (図4)。このように可視と赤外線で見られた惑星間塵雲の観測データを比較することによって、ダストの軌道・サイズ分布に影響を与える様々な物理的プロセス（中心星からの放射圧、磁場からのローレンツ力、ダスト同士の衝突等）に強い制限を与えることができる。精密化されたモデルによってダストのサイズ・組成・軌道の進化の道筋が明らかになれば、他の星の周囲のダストディスク観測と、そこに存在するはずの惑星や彗星・小惑星・微惑星をリンクすることが可能になると期待される。

5. 太陽系外地球型惑星検出と 惑星形成論の拡張へ向けて

近年、中心星のドップラーシフトの精密な観測という手法で、木星型惑星の存在が予言された²³⁾。「すばる」をはじめとする8mクラスの望遠鏡が、木星型惑星を直接検出する日もそれほど遠くはないだろう。しかし次の段階、地球型惑星の検出となると、ハードルは突如高くなる。NASAのTerrestrial Planet Finder (TPF) やESAのDARWINは、中心星と地球型惑星のコントラストが最小となる中間赤外領域での観測を計画している。10メートルクラスの宇宙望遠鏡を複数上げることで干渉計を構成し、惑星の分離に必要なとされる分解能を得よ

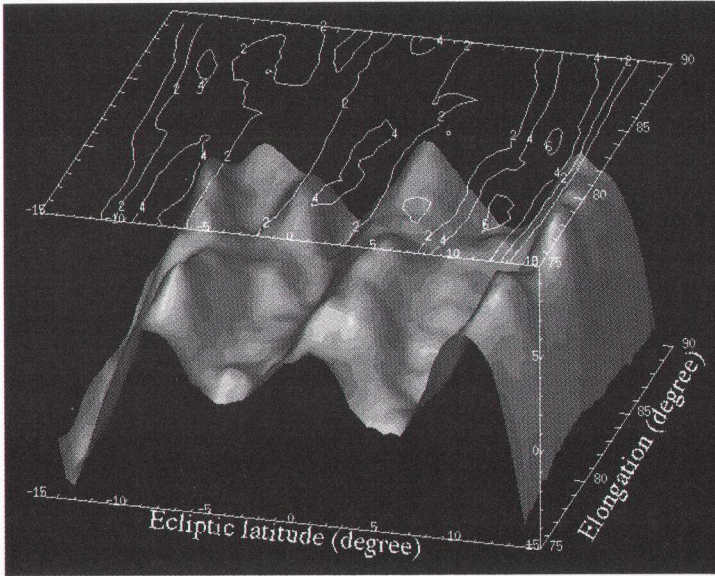


図3 地上観測で得られたダストバンド (1997年11月2日・マウナケア山頂にて観測)。3本に見えるバンド構造のうち、真中が Themis, Koronis ファミリー、両端が Eos ファミリー起源のダストバンドである。X 軸, Y 軸, Z 軸はそれぞれ黄緯, 太陽中心黄経, 明るさ (S10) を表している。

うというのである^{24), 25)}。あまりに規模が大きく、遠い未来の話のように思えるかもしれないが、「すばる」のお隣のケックでは、2つの望遠鏡を干渉計にして、系外黄道光の観測を行なう計画が着々と進行している²⁶⁾。系外黄道光が存在する星の周囲には、その供給源となる小天体(彗星, 小惑星, 微惑星)が存在するだろう。つまり、これは「TPFで観測する天体の候補探し」なのだ。また、先に述べたように、宇宙からの赤外線観測を行なう場合、最大の問題は黄道放射である。宇宙空間にでて、望遠鏡をヘリウムで冷却しても惑星間塵からの熱放射は避けられない。唯一可能な対処法は、できるだけ精密な惑星間塵のモデルをつくって、それを差し引くことである。このように系外/系内の黄道光観測は、まさに太陽系外地球型惑星検出のための鍵を握っているのである。

ヴェガ型星のカイパーディスクや系外黄道光の研究は、理論面でも重要な意味を持っている。そ

うというのである^{24), 25)}。あまりに規模が大きく、遠い未来の話のように思えるかもしれないが、「すばる」のお隣のケックでは、2つの望遠鏡を干渉計にして、系外黄道光の観測を行なう計画が着々と進行している²⁶⁾。系外黄道光が存在する星の周囲には、その供給源となる小天体(彗星, 小惑星, 微惑星)が存在するだろう。つまり、これは「TPFで観測する天体の候補探し」なのだ。また、先に述べたように、宇宙からの赤外線観測を行なう場合、最大の問題は黄道放射である。宇宙空間にでて、望遠鏡をヘリウムで冷却しても惑星間塵からの熱放射は避けられない。唯一可能な対処法は、できるだけ精密な惑星間塵のモデルをつくって、それを差し引くことである。このように系外/系内の黄道光観測は、まさに太陽系外地球型惑星検出のための鍵を握っているのである。

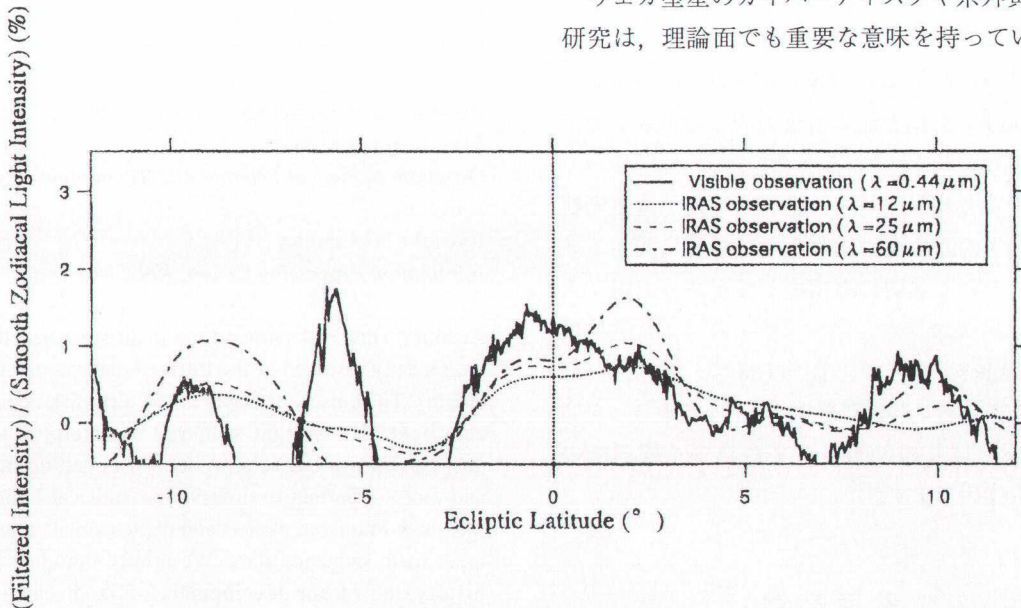


図4 可視光で観測したダストバンド(実線)と赤外線(点線が12 μm, 破線が25 μm, 一点破線が60 μm)の輝度分布の比較。横軸は黄緯、縦軸は黄道光全体の明るさに対するダストバンドの相対輝度(%)を表している。黄道面付近のダストバンドは赤外線では2本にわかれていたのに対して可視光では1本しか見えない。黄緯-5°のバンド構造は、可視光では顕著に見えている。



もそも、どうして同じ主系列星なのにダストディスクを持つ星と持たない星があるのだろうか？ 中心星の年齢²⁷⁾、星間物質との相互作用²⁸⁾などとの相関が唱えられているが、あまりにサンプル数が少なくはっきりしたことはなにもわかっていない。しかし、いずれにせよ ディスクの起源・進化の過程と、惑星形成過程が非常に深く関わっていることは確実である。従来の惑星形成論は、どうしても「我々の太陽系中心主義」を免れていない。すなわち、

- ・ 太陽質量程度の単独星の
- ・ 太陽系の惑星が存在する領域に
- ・ T-Tauri 型星の寿命程度の間

我々の太陽系に存在するような惑星をつくるのが、その目的だったのである。しかし最近検出された他の惑星系を見る限り、太陽と同程度の質量を持つ星でも惑星形成過程は非常に多様である。ヴェガ型星のディスクの研究は、中心星の質量や、対象とする時空の幅において、従来の惑星形成論の枠組を大きく広げてくれるだろう。こうした、惑星系起源論の観測学的実証の時代において、まずは、すでに我々の太陽系で見つかっているような塵雲の局所的な集積現象（ダストバンドやレゾナンス・リング）を他の恒星の周りのダストディスクで検出することを目指したい。

最後になりましたが、私達、神戸大学黄道光観測グループの立ち上げ段階から、観測に関するノウハウについて親切に御指導して下さった国立天文台の福島英雄氏と、元マンチェスター大学教授の J. F. James 氏に心から感謝します。また、ハワイ・マウナケアでの観測をサポートして下さった関口和寛氏をはじめ、国立天文台ハワイ観測所の方々にも感謝します。

参考文献

- 1) Kalas P., Jewitt D., 1997, Nature 386, 52
- 2) Trilling D.E., Brown R.H., 1998, Nature 395, 775
- 3) *NEWS OF THE WEEK*, Sci 281, 10 July 1998

- 4) Koerner D.W., et al., 1998, ApJ 503, L83
- 5) Kelsall T., et al., 1998, ApJ 508, 44
- 6) Dumont R., Sanchez, F., 1975, A&A 38, 397
- 7) Hong S.S., Kwon S.M., 1991, in Origin and Evolution of Interplanetary Dust, ed. Levasseur-Regourd A.C., Hasegawa H. (Kluwer Academic Publ.), p147
- 8) Leinert C., 1975, Space Science Reviews 18, 281
- 9) Levasseur-Regourd A.C., Dumont, R., 1980, A&A 84, 277
- 10) Leinert C., et al., 1981, A&A 103, 177
- 11) Leinert C., et al., 1998, A&A Supplement 127, 1
- 12) Low F.J. et al., 1984, ApJ 278, L19
- 13) Sykes M.V. et al., 1989, in Asteroids II, ed. Binzel R.P., Gehrels T, Matthews M.S. (University of Arizona Press, Tucson), p336
- 14) Sykes M.V., Walker R.G., 1992, Icarus 95, 180
- 15) Dermott S.F. et al., 1994, Nat 369, 719
- 16) James J.F. et al., 1997, MNRAS 288, 1022
- 17) Ishiguro M. et al., 1996, in Proc. of the 29th ISAS Lunar and Planetary Symp. 29, p64
- 18) Ishiguro M. et al., 1997, in Proc. of the 30th ISAS Lunar and Planetary Symp. 30, p142
- 19) Ishiguro M. et al., 1998, EPS 50, 477
- 20) Mouillet D., et al., 1997, MNRAS 292, 896
- 21) Ishiguro M. et al., 1999, ApJ 511, 432
- 22) Ishiguro M. et al., 1999, PASJ, in press
- 23) Marcy G. W. et al., 1997, ApJ 481, 926
- 24) <http://eis.jpl.nasa.gov/origins/missions/terrp1fndr.html>
- 25) <http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/mission.html>
- 26) http://www2.keck.hawaii.edu:3636/realpublic/gen_info/inter/overview.html
- 27) Jura M., et al., 1998, ApJ 505, 897
- 28) Artymowicz P., Clampin M., 1997, ApJ 490, 863

Photometric Observations of Zodiacal Light Masateru ISHIGURO

Graduate School of Science and Technology, Kobe University

Ryosuke NAKAMURA

Information Processing Center, Kobe University

Abstract: Dust disks around the main sequence stars are recently resolved in the infrared and radio wavelengths. The closest example of the dust disk is zodiacal light, the sunlight scattered by interplanetary dust particles in our solar system. It is getting more and more important to observe the zodiacal light as the tracer of unseen planets and planetesimals around other main sequence stars. We briefly introduce the history and recent development of zodiacal light observations and discuss the implication on the search for other terrestrial planets and generalization of the planet formation theory.