

Kepler を用いた恒星の光度変動の統計的調査に向けて

三舛 慧人 (九州大学大学院 理学府物理学専攻)

Abstract

恒星の光度変動は変動の原因によって振幅や周期の大きさがさまざまであるが、このような光度変動の性質を統計的に解析するためには、大量の恒星サンプルを持ち、長い観測期間を有する光度データが必要である。系外惑星探査衛星 Kepler の光度データはこれらの条件を満たしており、恒星の光度変動を統計的に解析できることが期待される。本発表では、Kepler の性能と光度データの特徴を紹介するとともに、Kepler の光度データに含まれるノイズに関連した論文を紹介する。

1 Introduction

1.1 恒星の光度変動

恒星の光度変動は、変動する原因によって振幅や周期の大きさがさまざまである。変光の大きなものとしては、膨張・収縮を繰り返すことにより変光する脈動変光星(ミラ型、セファイド型など)、突発的に明るくなり、その後もとの明るさに戻るようなフレア星(UVCet、スーパーフレア)、連星が互いに食を起こしあう食連星などが存在する。その一方で変光の小さなものとしては、星の形状の変化によって起こる非動径脈動(脈動変光星とはモードが異なる)、星の自転に伴い黒点などが移動することで起こる spot が存在する。

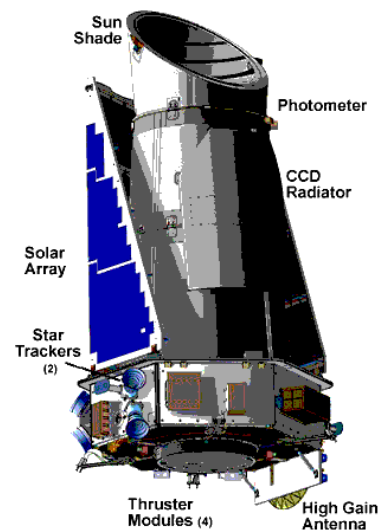


図 1: 探査機 Kepler 画像

<http://kepler.nasa.gov/Mission/QuickGuide/>

1.2 Kepler

Kepler は太陽系外惑星のトランジット(恒星の前を惑星が通過したときに起こる減光)を観測する宇宙望遠鏡で、NASA ディスカバリー計画の 10 番目の人工衛星として 2009 年 3 月 6 日に打ち上げられた。地球と同じように太陽を周回する軌道を回り、黄緯の高い方角に観測視野を設定することで太陽の影響を受けることなく常時観測が可能である。

2 Light Curve and Characteristics Data of Target Stars

Kepler の光度データは MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes) から取得することができる。時間分解能の異なる 2 つのデータがあり、観測対象とする全ての恒星について 1766 秒(約 29 分)間隔で測光された Long Cadence (LC) と、 Kp (後述) が 12 等級より明るい 512 個の恒星に対して 58.85 秒間隔で測光された Short Cadence (SC) が存在する。

また取得できる光度曲線には機器によって生じた

ノイズ等を消去した PDCSAPflux (Pre-search Data Conditioning Simple Aperture Photometry) とこのノイズの消去を行う前の SAPflux の 2 種類がある。

さらにそれぞれの恒星に関して別の衛星の観測から、表 1 の物理的性質が公開されており (恒星の中には物理的性質が確定していないものもある)、これらの物理的性質と恒星の光度データを同時に利用することができる。ここで 3 列目と 4 列目では、ターゲットに含まれる恒星の各物理的性質での最小値と最大値を示した。また K_p は Kepler のバンドパス (波長の半値幅で 435 ~ 845nm) での視等級であり、AB 等級で決定している。

物理的性質	単位	最小値	最大値
K_p	等級	5.995	20.252
有効温度 T_{eff}	K	3139	19337
表面重力 $\log(g)$	cm/s^2	0.05	6.158
半径	R_{\odot}	0.062	189.65
色指数 ($J - K$)	等級	0.001	7.241

表 1: 恒星の物理的性質

3 Performance of Kepler

- ターゲット

はくちょう座方向の約 16 万個の恒星を観測する。図 2 は星図上に観測領域を示したものである。

- 観測期間とシーズン

約 93 日を 1 シーズンとして、観測が始まった 2009 年 5 月 12 日から約 93 日ごとに、Q1、Q2... とシーズン順に名前が付けられており (Q0 は調整期間)、2013 年 1 月に Q15 を終えた (2013 年 6 月現在、MAST で Q15 まで入手可能)。これは 1340 日 (3 年と 244 日) に相当し、Kepler は非常に長い期間にわたって同じ恒星を測光し続けている。図 3 は Kepler のタイムラインを表したものである。

- 分解能

Kepler は惑星の起こす小さなトランジットを

探すために非常に高い分解能を持っている。時間分解能が大きいほど、より小さな光度変動の周期を求めることができるようになる。また角分解能が大きいほど近くの恒星どうしをよりはっきり区別できるようになる。Kepler が対象としている観測領域にはたくさんの恒星が存在し、中には連星系を成しているものもあるため、角分解能が大きければ近接した恒星どうしを 1 つの天体だと誤認する可能性がより小さくなる。し

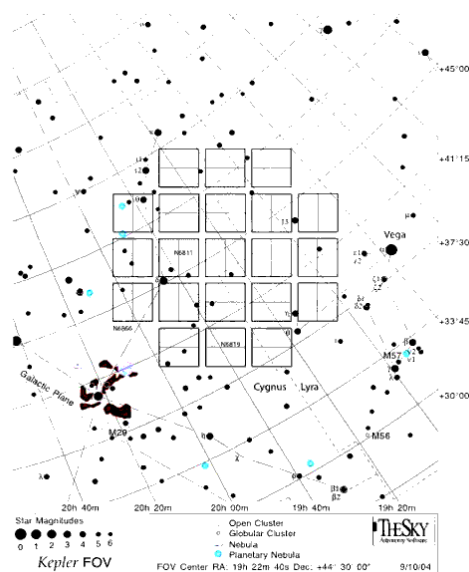


図 2: Kepler の観測領域 (S. E. Thompson & D. Fraquelli. 2012. Kepler Archive Manual)

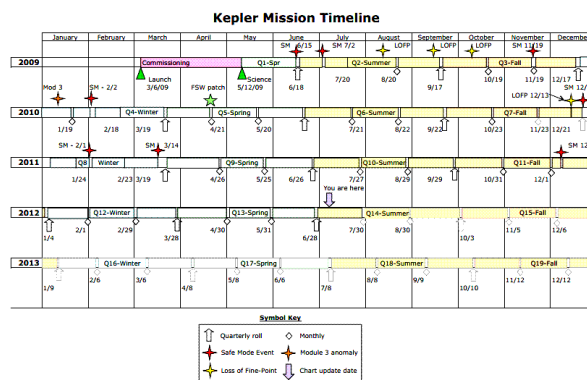


図 3: Kepler の time line (S. E. Thompson. 2013. Kepler Data Release 18 Notes Q13)

たがって、これらの分解能の大きさは恒星の光度変動を調べる上で非常に重要である。表 2 には時間分解能と角分解能をまとめた。

角分解能については Kepler の口径の大きさ (1.4m) と観測している波長帯の中間の大きさ (約 640nm) からレイリーの判定条件を用いて計算した。

時間分解能	Long Cadence(LC)	1766 秒 (約 29 分)
	Short Cadence(SC)	58.85 秒
角分解能	0.115 秒角	

表 2: 分解能

4 Discussion

4.1 測定可能な周期

- 最小

3 点で周期が表せるとすれば、時間分解能から、
 LC : 約 87 分
 SC : 約 3 分

- 最大

Q1 ~ Q15 の光度データを合わせることで、その観測期間から、
 LC : 1340 日 (3 年と 244 日)
 SC : LC と同じ

4.2 光度データ (LC) に含まれるノイズ (Jenkins et al. 2010)

Kepler の測光データから機器によるノイズ等を取り除いた PDCSAPflux にはショットノイズが残っている。ショットノイズとは、やってくる光子の数が時間的にゆらぐために起こるノイズで、測光する際に光子の数が少ないほどこのノイズの影響が大きくなる。そこで PDCSAPflux データに対するこのショットノイズの影響を考えたい。

図 4 は縦軸にその恒星の光度に対する光度変動の

振幅の比の大きさ (以下振幅比と呼ぶ)、横軸に K_p をとって、Q1 シーズンに含まれる全恒星についてプロットしたものである。黒い点は主系列星、赤い点は巨星または準巨星を表している。図 4 にショットノイズの大きさの影響を受ける上限と下限のラインを引いたのが 2 本の緑の線である。これを見ると、明るさの暗い星ほどショットノイズの影響が大きくなっていることが分かり、始めに述べたショットノイズの性質に予想される通りであることが確認できる。

ノイズの議論とは異なるが、図から巨星 (赤い点) に注目してこの図を見ると、 $K_p \geq 14$ の恒星の明るさが暗い領域には巨星がほとんど存在せず、Kepler の観測対象から外されていることが分かる。

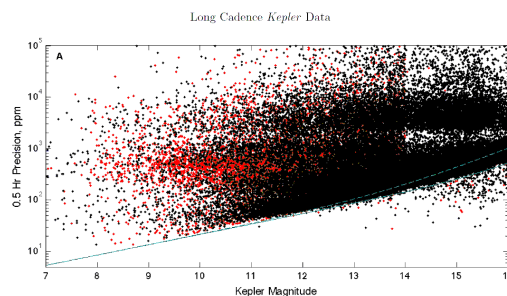


図 4: 恒星 (Q1) の LC データにおけるノイズのばらつきと実視等級の関係 (Jenkins et al. 2010)

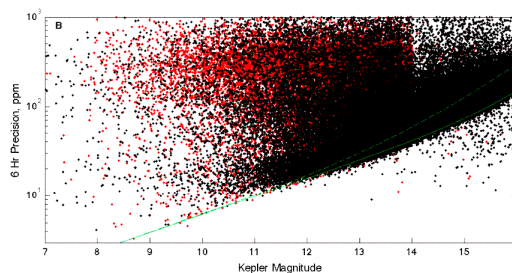


図 5: 恒星 (Q1) の LC データ (6 時間の補正あり) におけるノイズのばらつきと実視等級の関係 (Jenkins et al. 2010)

次に恒星の光度に補正を加えることを考える。Kepler は $K_p = 12$ の太陽程度の恒星が持つ地球サイズの太陽系外惑星が起こす、6 時間以上の長さのトランジットを探すことを目的としているため、この程度

の長さのトランジットが検出できるような補正をかけた場合に、同様にショットノイズの影響はどう変わるのか考える。光度曲線の補正は次のような手順で行う。

1. 2 日以上長さの光度変動を取り除く
2. 6 時間の大きさの箱関数 (boxcar function) をたたみこむ (6 時間より小さな光度振幅が滑らかになる)

補正後に再び図 4 と同じようにプロットしたものが図 5 である。ショットノイズの上限と下限を示す 2 本の緑のラインは、図 4 と同じものである (ただし規格化定数をかけている)。

これを見ると、図 4 と同様に明るさの暗い星ほどショットノイズの影響が大きくなっていることが分かる。しかし、Kepler は $Kp = 12$ の明るさ程度の恒星で起きるトランジット観測を目的としているため、 $Kp = 12$ 付近ではほとんどの恒星がショットノイズの影響を受けないことが分かり、Kepler の目指すトランジット観測においてはショットノイズの影響は少ないと言える。

図 4 に比べて主系列星の点が全体的に下に下がった (振幅比が小さくなった) が、これは補正をかけて光度変動が元のデータに比べてなめらかになったためである。

以上の Jenkins et al.(2010) の議論から、光度変動の調査で Kepler の PDCSAPflux データを用いるときには、ターゲットのうち明るさが暗く振幅比が小さいものはショットノイズの影響があることを考慮しなければならないことが分かる。

5 Conclusion

本発表では、恒星の光度変動の統計的な調査をするに当たって、Kepler のデータが非常に有用であることを以下に挙げる 4 つの Kepler の性能面から述べた。

- 約 16 万個のターゲット
- 1340 日の観測期間

- LC : 1766 秒, SC : 58.85 秒の時間分解能
- 0.115 秒角の角分解能

また周期を解析する際には、最小の周期が LC で約 87 分, SC で約 3 分, 最大の周期が LC・SC とともに 1340 日の測定可能な上限値と下限値があることが分かった。

さらに Jenkins et al.(2010) の PDCSAPflux データのショットノイズに関する議論から、振幅を解析する際にはターゲットのうち明るさが暗く振幅比の小さいものはショットノイズの影響があることを考慮しなければならないことが分かった

最後に恒星に関しては、 Kp , 有効温度, 表面重力, 半径, 色温度などの物理的性質が他の観測から分かっていることから、これらと光度データから得られる振幅比や周期を組み合わせることで、光度変動の統計的な解析をさらに深めることができると考えられる。

Reference

- [1] Jenkins, J. M., et al. 2010. ApJ, 713, 120
- [2] Gilliland, R. L., et al. 2010. ApJ, 713, 160
- [3] Koch, D. G., et al. 2010. ApJ, 713, L79
- [4] Kepler Archive Manual (S. E. Thompson & D. Fraquelli. 2012)
- [5] Kepler Instrument Handbook (J. E. Van Cleve & D. A. Caldwell. 2009)
- [6] Kepler Data Characteristics Handbook (J. Christiansen. 2013)
- [7] Kepler Data Release 20 Notes Q15 (S. E. Thompson. 2013)
- [8] Kepler Science Center (<http://keplergo.arc.nasa.gov/>)
- [9] Mikulski Archive for Space Telescopes (<http://archive.stsci.edu/>)