

天体からのX線と可視光光度曲線のタイムラグ解析

池田 思朗 数理・推論研究系

共同研究者: 大間々 知輝 (総研大, 宇宙科学専攻), 植村 誠 (広島大), 森井 幹雄 (Datum Studio)

1 X線と可視光光度曲線

GX 339-4 は恒星と高密度星(中性子星やブラックホール)の近接連星系と考えられる天体であり, X線と可視光の時系列(光度曲線)が同時に観測されている. 光度曲線は非定常であり, 共通信号成分をもつと考えられる. 共通信号成分は連星からの放射の物理現象を反映しているはずである. 2つの光度曲線(図1)を解析することによって, 放射のメカニズムの理解が進むと考えられる,

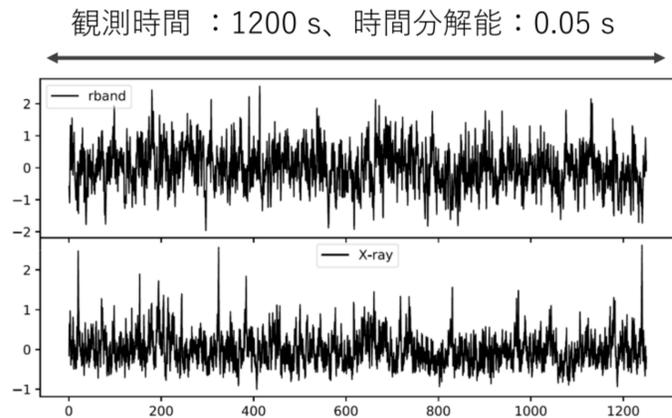


図 1: 可視光(上)とX線(下)の光度曲線.

これまで, 相互相関関数や OU (Ornstein-Uhlenbeck) 過程を用いたベイズ的な解析が行われていたが, 本研究では時間周波数領域での信号処理とスパースモデリングを用いた解析を行った.

2 提案方法

以下のような時系列のモデルを考える.

$$\text{可視光}(t) = u(t) + a_o x(t - \tau_0) + b_o y(t) \quad (1)$$

$$\text{X線}(t) = v(t) + a_x x(t) + b_x y(t - \tau_1) \quad (2)$$

このモデルでは, X線のほうが先行する $x(t)$ と可視光のほうが先行する $y(t)$ という共通な信号成分が存在すると考えている. さらに, これらの共通な信号成分 $x(t), y(t)$ がノイズ的な信号ではなく, 周波数的に構造をもった信号であると仮定する.

得られている可視光の光度曲線は 20 Hz でのサンプリングである. X線のほうは光子の到達時刻が得られているが, これを 20 Hz の観測にそろえる. その後, それぞれに low-pass filter をかけて 10 Hz 以上の信号成分を取り除く. 次にハミング窓をかけてそれぞれの光度曲線から同じ時刻の一部の光度曲線を切り出し, $O(t), X(t)$ として, 次の式にしたがって信号を処理する.

$$\begin{pmatrix} O(t) \\ X(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F^{-1} & 0 \\ 0 & F^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} O(f) \\ X(f) \end{pmatrix} \quad (3)$$

F^{-1} は逆フーリエ変換行列, $O(f), X(f)$ はそれぞれの光度曲線のフーリエ変換である. 我々の興味は共通成分なので, $O(f), X(f)$ から, 共通する f に対する成分が同時に存在する場合に, その成分だけを取り出したい. そこで, group lasso を用いて選択する[2].

双方の信号から同じ周波数成分が存在するかを group lasso を用いて判定し, 同時刻に両方の信号に含まれる共通の周波数成分を取り出した. さらに, それぞれの信号成分の位相を調べる. 周波数成分の位相は時間

遅れに対応するので, 同じ時間遅れを持つ周波数成分を取り出した. 特に, 先行論文で示された時間遅れに注目し, X線が先行する $x(t)$, 可視光が先行する $y(t)$ の成分を取り出した.

以上の操作は, 光度曲線の一部を切り出して行った. これを切り出す時刻をずらしながら行い, 取り出された周波数成分を時間信号に戻して時系列信号を復元した.

3 結果

図2はこうして共通成分を取り出した結果である. 橙色はX線が先行していると思われる信号成分, 青は可視光が先行していると思われる信号成分である.

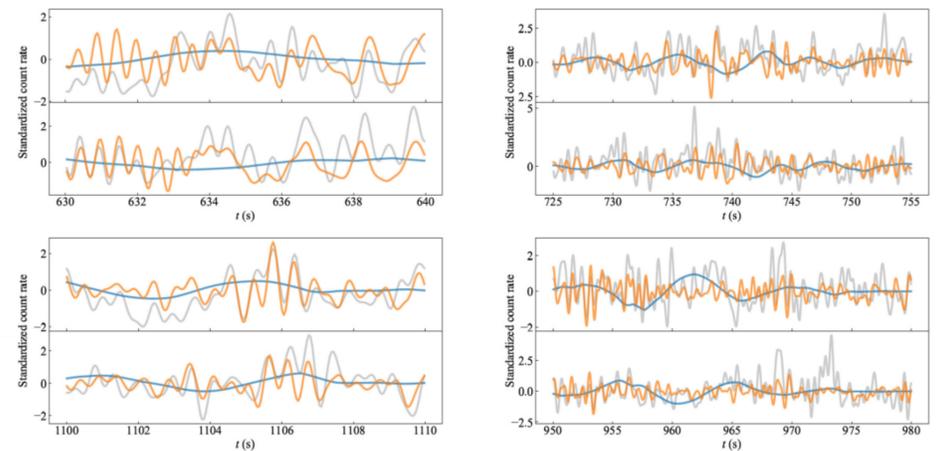


図 2: 共通成分.

先行研究では, 青の成分を4秒の遅れをもつ反相関信号として結論付けていた. 我々の結果, この共通成分は周期的な信号であることから, 反相関ではなく, 1秒先行している順相関として解釈できることを示した.

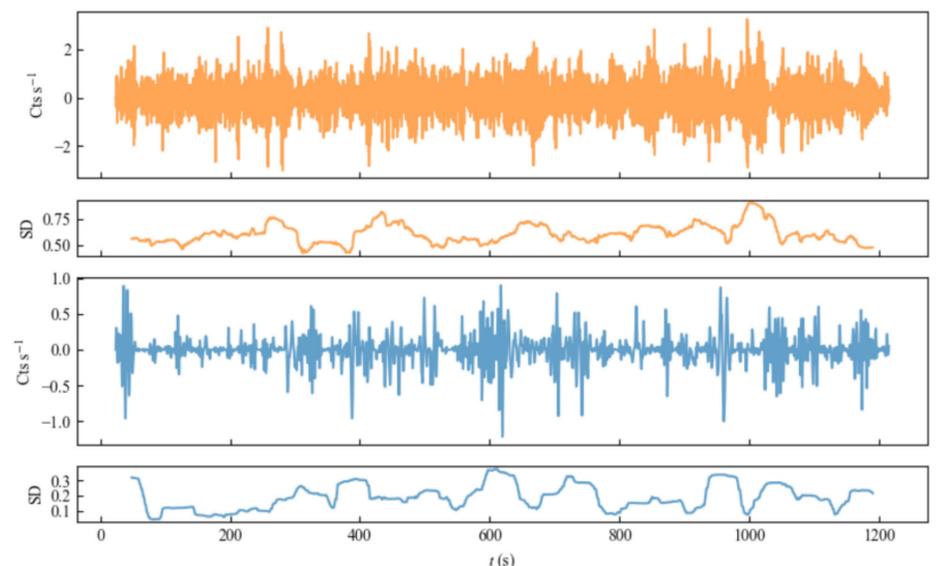


図3: 1200秒全体におけるそれぞれの信号成分. 上の2つはX線が先行している成分, 下の2つは可視光が先行している成分. それぞれの上側は時系列, 下側は信号強度をしめしている.

図3は1200秒の間の共通成分を示している. 観測時間の間, これらの信号が非定常であることがわかる. 以上の結果は最近, 論文誌に掲載された[1]. 今後, 本研究の結果を宇宙物理的な結果と結び付けていきたい.

参考文献

- [1] Tomoki Omama, Makoto Uemura, Shiro Ikeda, and Mikio Morii. Extracting common signal components from the X-ray and optical light curves of GX 339 - 4: New view for anti-correlation. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 05 2021.
- [2] Ming Yuan and Yi Lin. Model selection and estimation in regression with grouped variables. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 68(1):49-67, 2006.