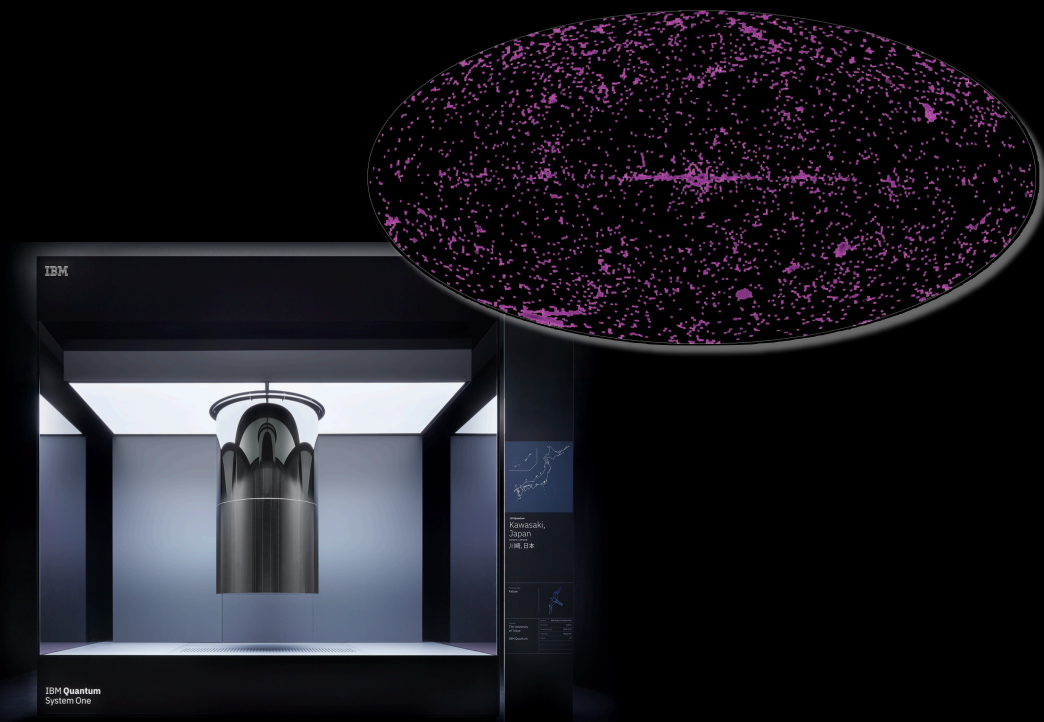


量子機械学習を用いた XMM-Newton カタログからの異常 X 線変動天体の検出

(Kawamuro+25, ApJ, 987, 105)

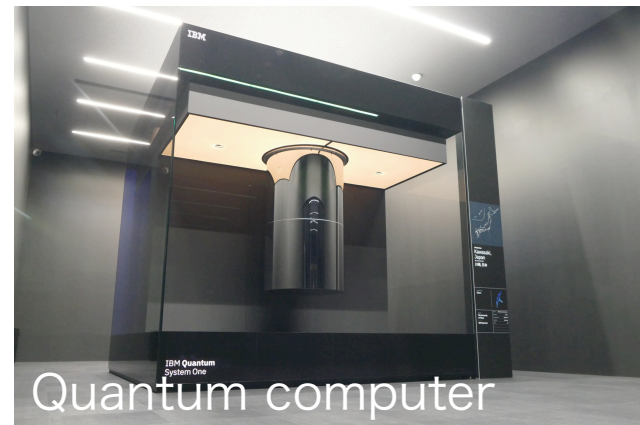
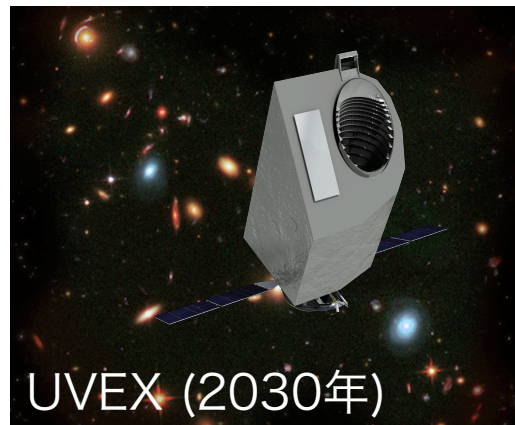
川室 太希 (阪大)

山田真也、酒井優輔 (立教大学)、
長瀧重博、松浦俊司 (理研)、
山田智史 (東北大)



時間領域天文学と量子機械学習

- 2030 年代にかけて、大量の時系列データが出てくる
 - 超巨大ブラックホールに関わる降着現象を含め様々な突発現象が検出される予定
 - e.g., LSST $\rightarrow \sim 10^3$ TDEs / 1 yr (Bricman+20)
- 突発天体検出・分類手法の開発が急務
 - 機械学習を用いた手法が盛んに議論される (e.g., ALeRCE; Perez-Carrasco+23)
 - 我々も模索中：量子計算機を用いた量子機械学習 (QML) の可能性を研究



量子計算機について: 実データと量子状態

- ▶ 量子計算機でのデータの表し方 (1例)

1 bit  or  ▶ どちらか 1 状態

量子計算機について: 実データと量子状態

▶ 量子計算機でのデータの表し方 (1例)

1 qubit



▶ 同時に 2 状態

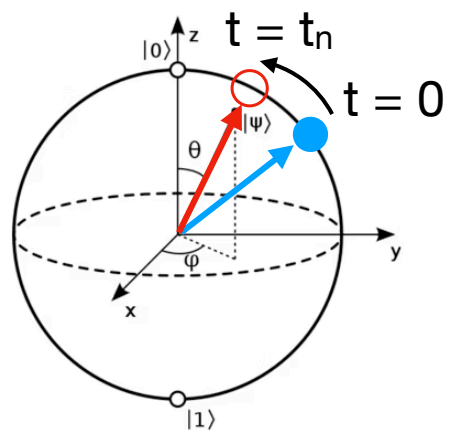
└ 重ね合わせ状態

$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$



$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

▶ 量子状態 $|\Psi\rangle$ は(複素)球面上のベクトル



量子計算機について: 実データと量子状態

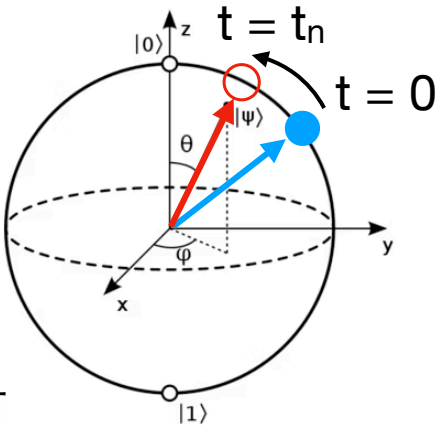
量子計算機でのデータの表し方 (1例)

1 qubit 

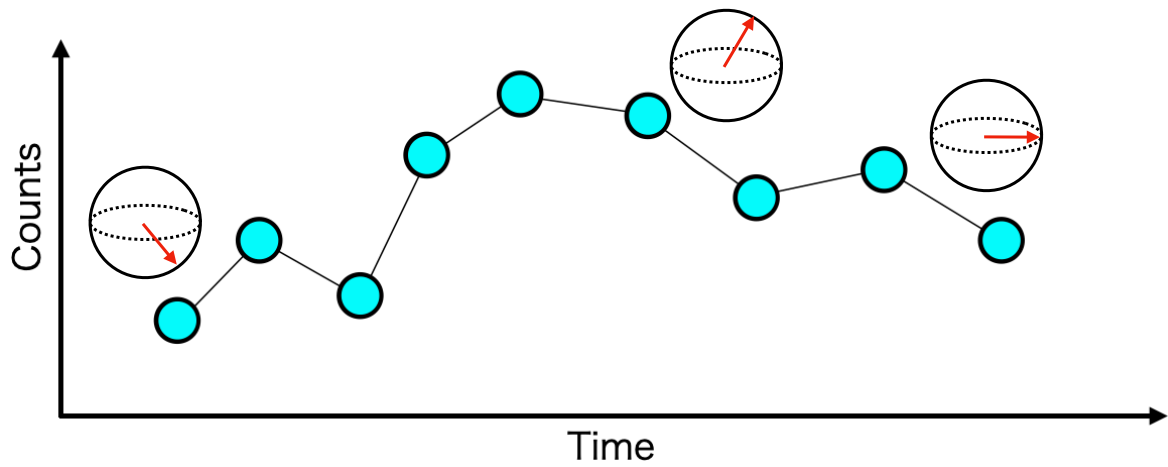
▶ 同時に 2 状態
└ 重ね合わせ状態
 $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$



$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

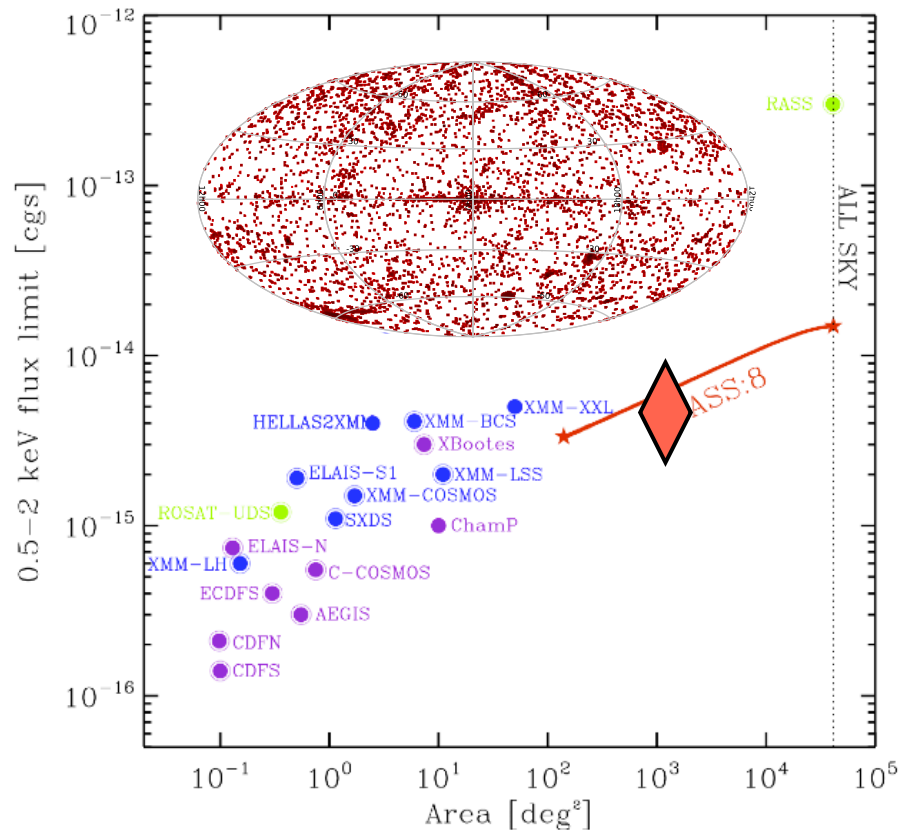


- ▶ 量子状態 $|\Psi\rangle$ は(複素)球面上のベクトル
- ▶ 例えば、角度として表現、時間変化も球面上の回転で表現可



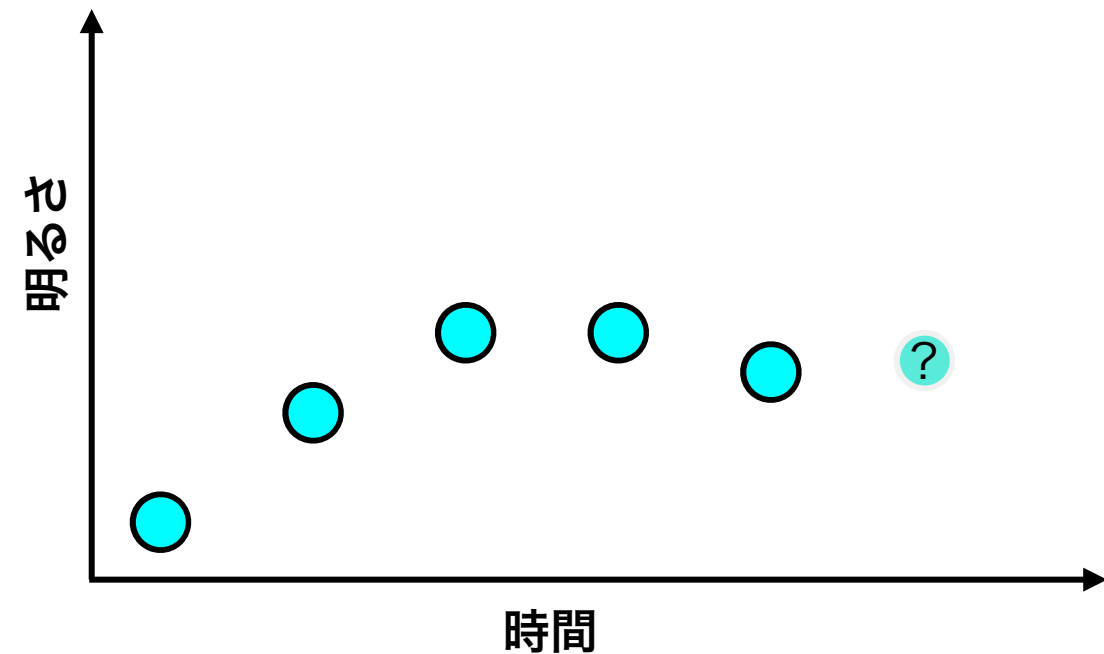
本研究：XMM の光度曲線データベースからの異常検知

- XMM の過去 ~ 24 年のデータから、異常な変動を量子機械学習を用いて検出
- 最新 4XMM-DR14 カタログ (Webb+20)
 - 広い領域を (結果的に) サーベイした結果
- 全検出数 $\rightarrow$ ~ 104 万 (!= ユニーク天体数)
- 検出が確からしく光度曲線が作成された検出数 $\rightarrow$ ~ 30 万
- 観測時間 > 30 ks & 平均 cts (0.2--12 keV) > 0.01 cts $\rightarrow$ ~ 4 万



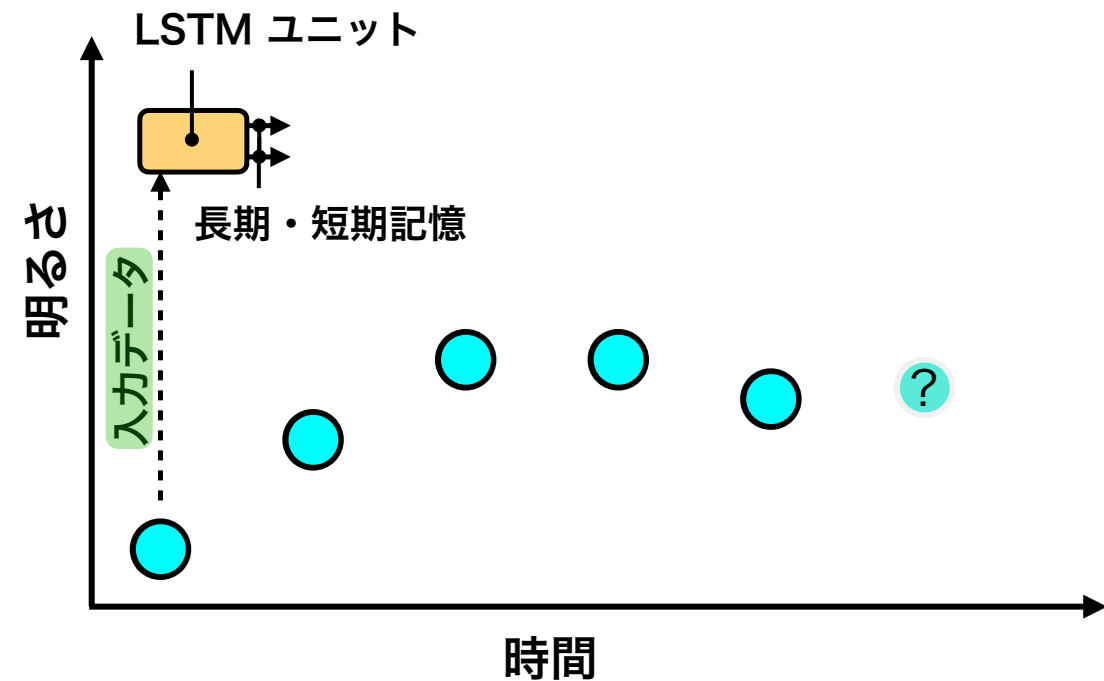
異常検知モデル: 古典 ver.

- 過去のデータから未来のデータを予測し、実際のデータと比較し異常を検知する
 - アルゴリズム Long-short term memory (LSTM: 長・短期記憶) を採用



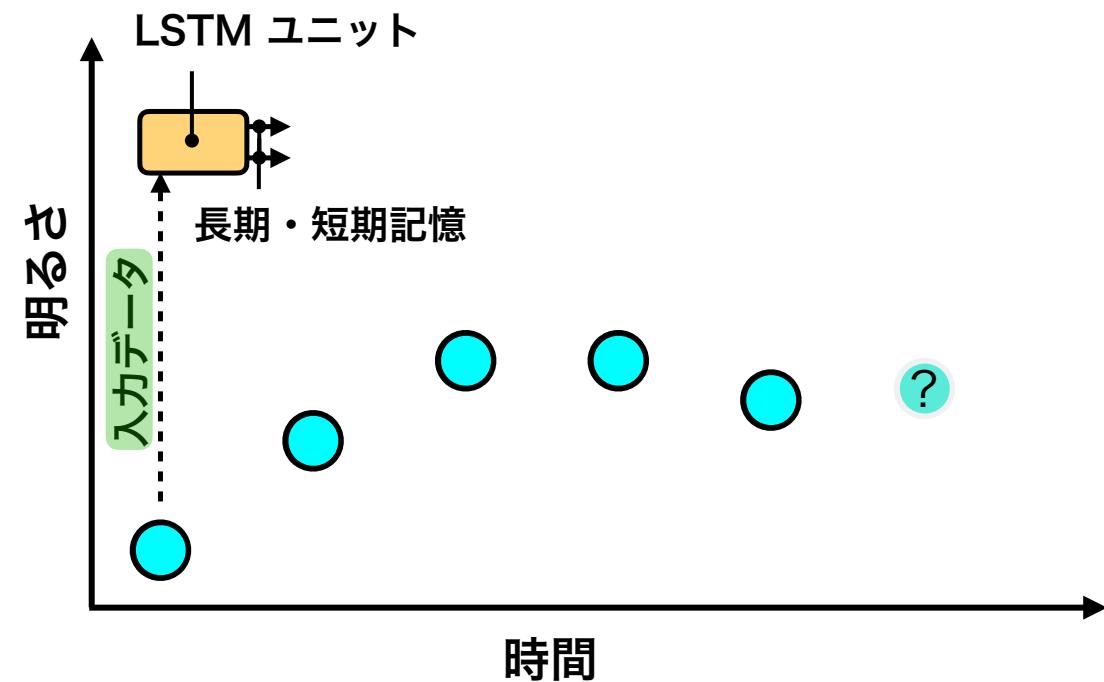
異常検知モデル: 古典 ver.

- 過去のデータから未来のデータを予測し、実際のデータと比較し異常を検知する
 - アルゴリズム Long-short term memory (LSTM: 長・短期記憶) を採用



異常検知モデル: 古典 ver.

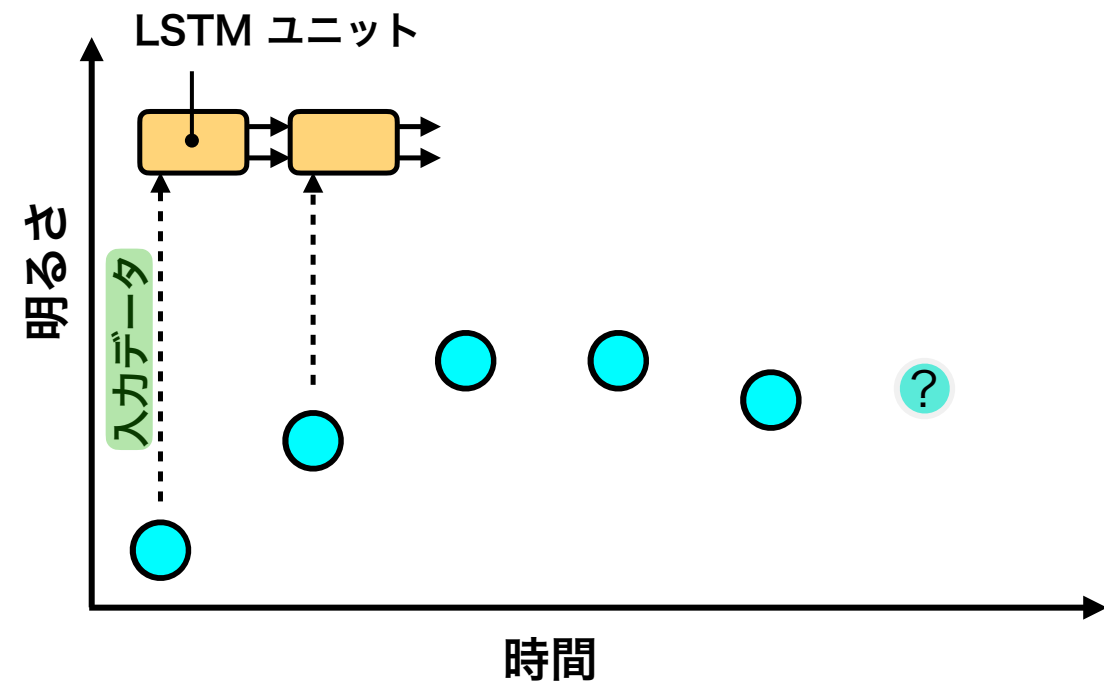
- 過去のデータから未来のデータを予測し、実際のデータと比較し異常を検知する
 - アルゴリズム Long-short term memory (LSTM: 長・短期記憶) を採用



$$\begin{pmatrix} h_{i,0} \\ h_{i,1} \\ \vdots \\ h_{i,n} \end{pmatrix} = A \times \begin{pmatrix} h_{i-1,0} \\ h_{i-1,1} \\ \vdots \\ h_{i-1,n} \end{pmatrix} + B \times (x_{i-1})$$

異常検知モデル: 古典 ver.

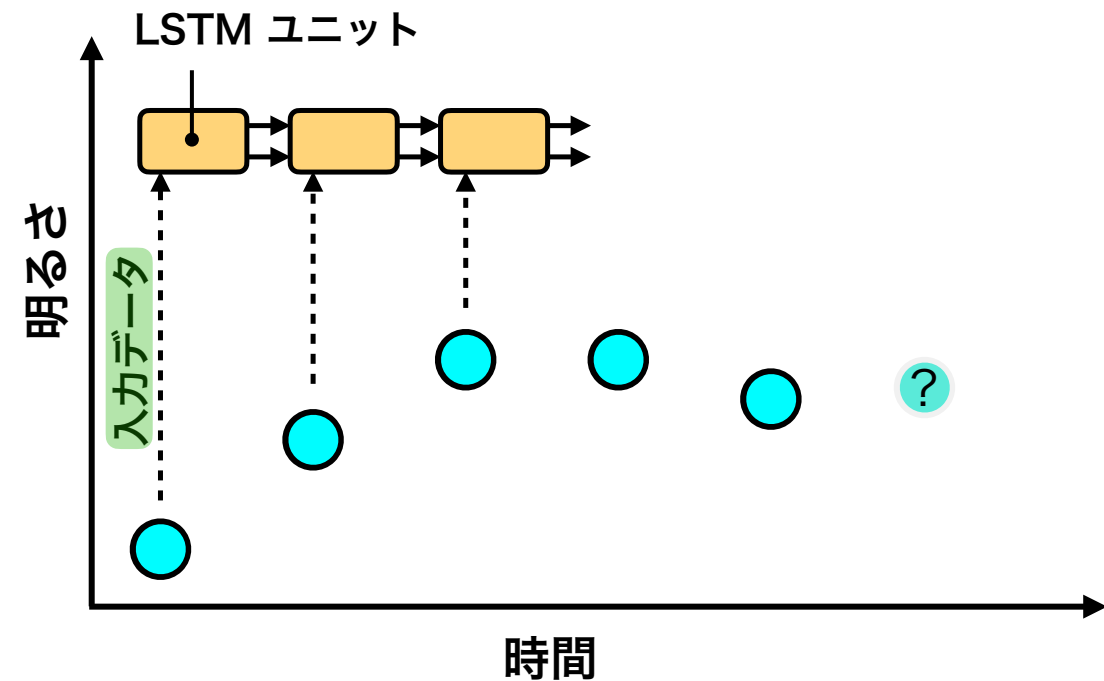
- 過去のデータから未来のデータを予測し、実際のデータと比較し異常を検知する
 - アルゴリズム Long-short term memory (LSTM: 長・短期記憶) を採用



$$\begin{pmatrix} h_{i,0} \\ h_{i,1} \\ \vdots \\ h_{i,n} \end{pmatrix} = A \times \begin{pmatrix} h_{i-1,0} \\ h_{i-1,1} \\ \vdots \\ h_{i-1,n} \end{pmatrix} + B \times (x_{i-1})$$

異常検知モデル: 古典 ver.

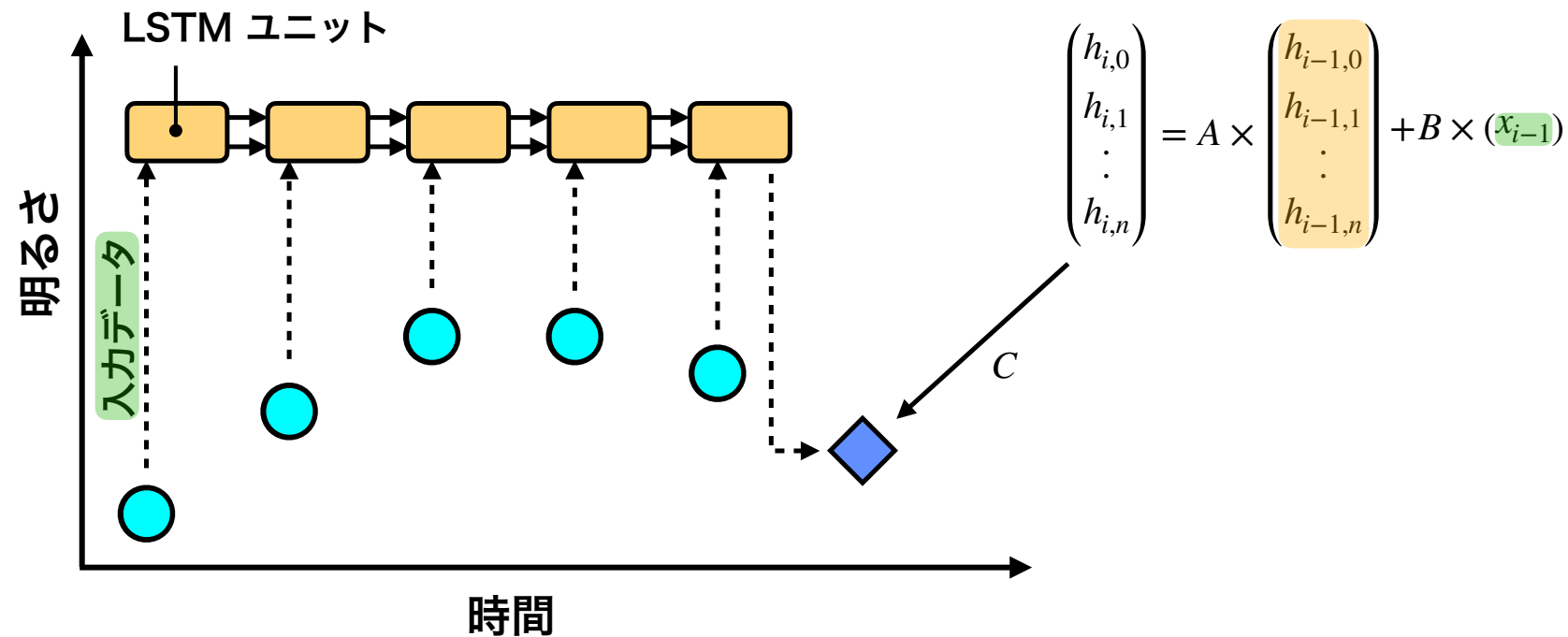
- 過去のデータから未来のデータを予測し、実際のデータと比較し異常を検知する
 - アルゴリズム Long-short term memory (LSTM: 長・短期記憶) を採用



$$\begin{pmatrix} h_{i,0} \\ h_{i,1} \\ \vdots \\ h_{i,n} \end{pmatrix} = A \times \begin{pmatrix} h_{i-1,0} \\ h_{i-1,1} \\ \vdots \\ h_{i-1,n} \end{pmatrix} + B \times (x_{i-1})$$

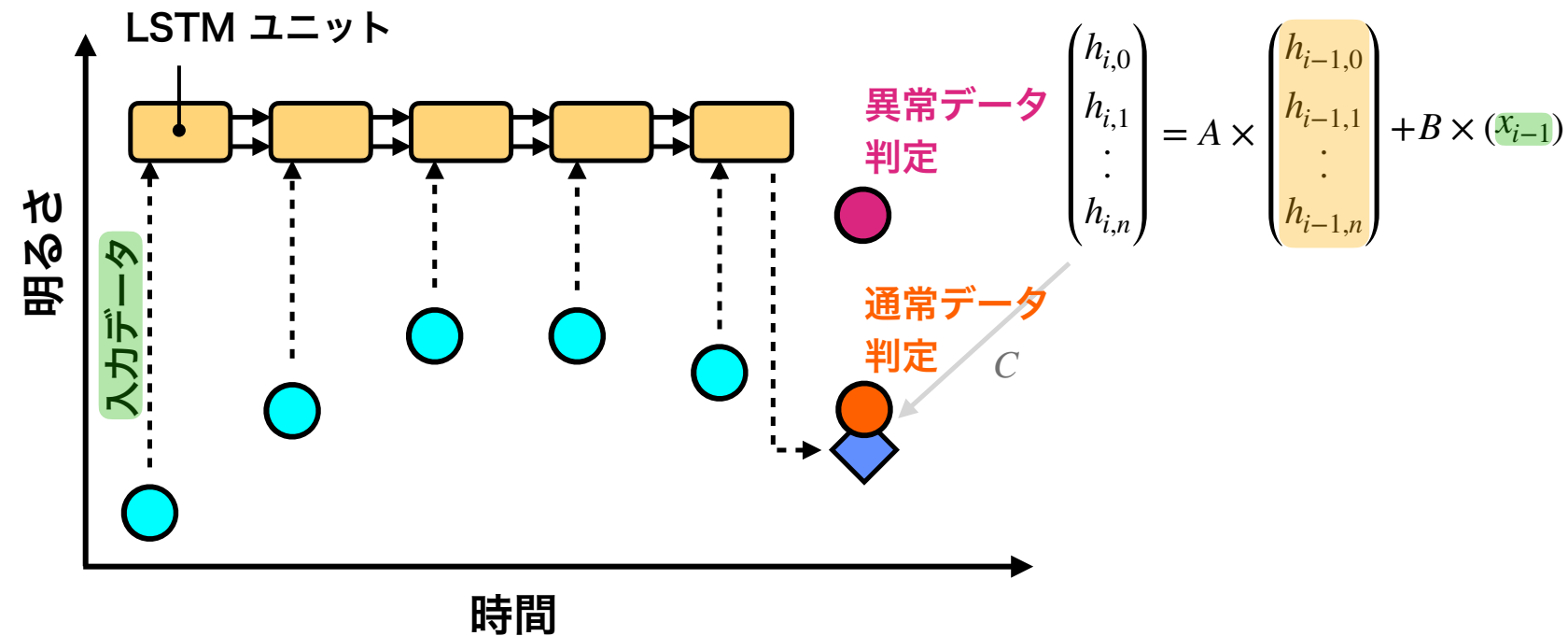
異常検知モデル: 古典 ver.

- 過去のデータから未来のデータを予測し、実際のデータと比較し異常を検知する
 - アルゴリズム Long-short term memory (LSTM: 長・短期記憶) を採用



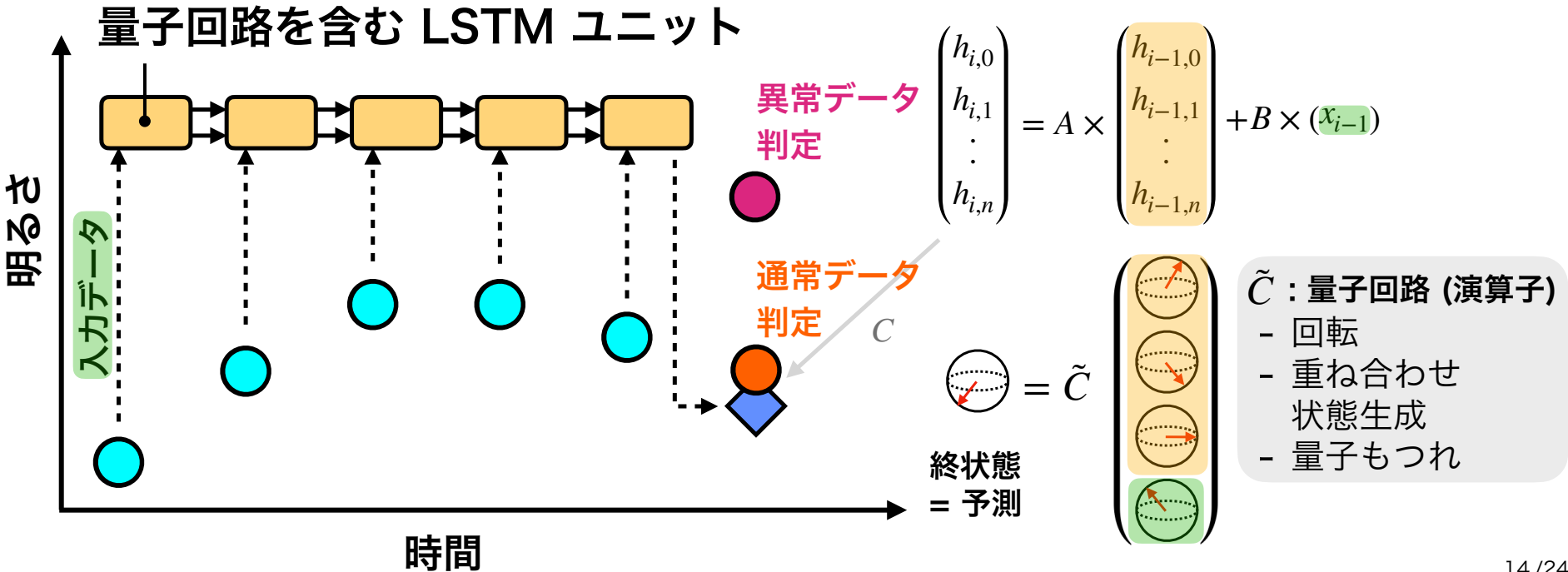
異常検知モデル: 古典 ver.

- 過去のデータから未来のデータを予測し、実際のデータと比較し異常を検知する
- アルゴリズム Long-short term memory (LSTM: 長・短期記憶) を採用



異常検知モデル: 量子 ver.

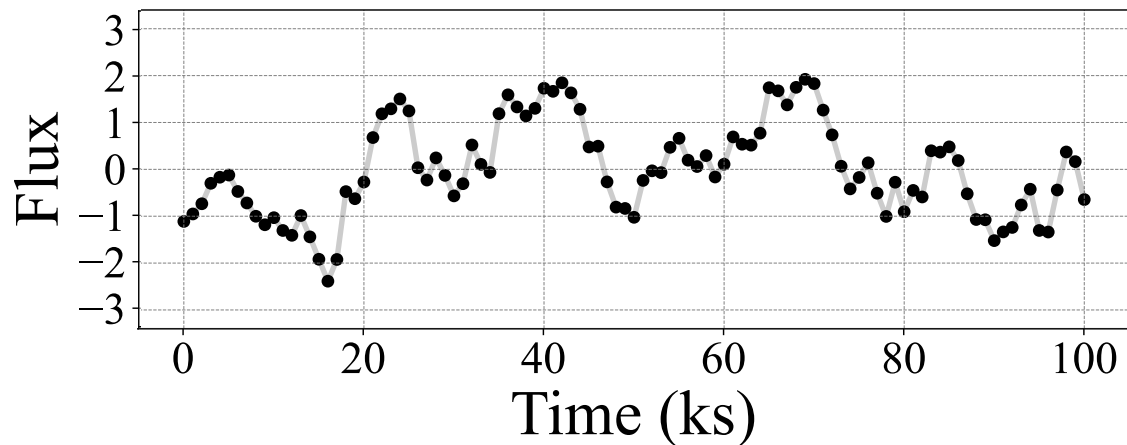
- 過去のデータから未来のデータを予測し、実際のデータと比較し異常を検知する
- アルゴリズム Long-short term memory (LSTM: 長・短期記憶) を採用



学習 (通常) データと異常データ

- 教師 (通常) データ

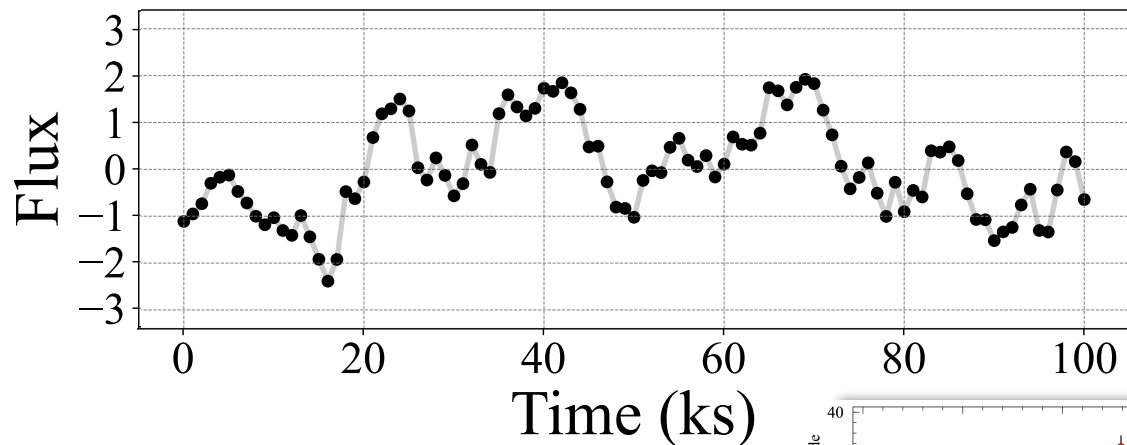
- AGN の典型的な PSD を仮定し、逆フーリエで生成 (~ 1000 data 相当)
(Timmer & Koenig 95)



学習 (通常) データと異常データ

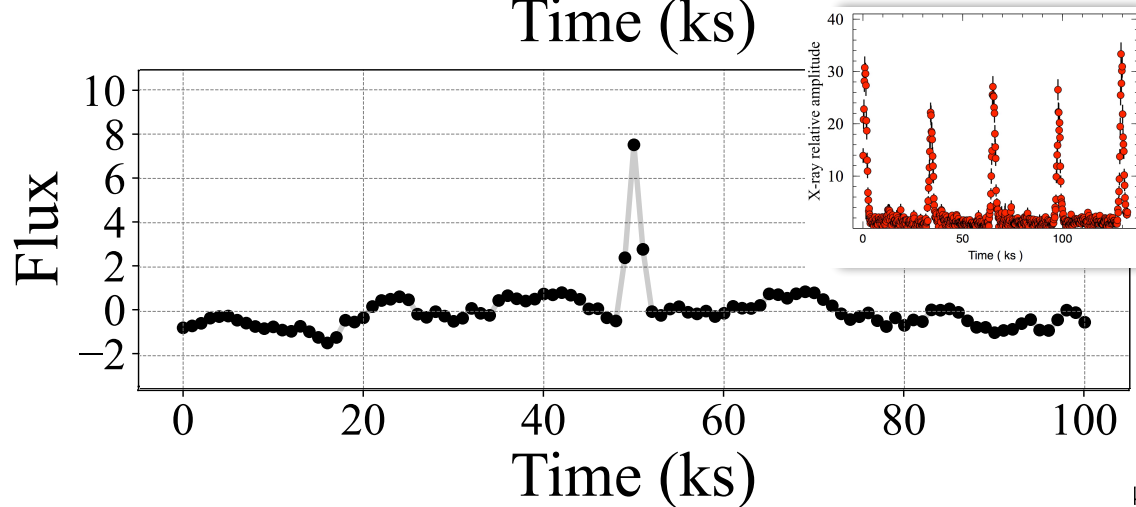
- 教師 (通常) データ

- AGN の典型的な PSD を仮定し、逆フーリエで生成 (~ 1000 data 相当)
(Timmer & Koenig 95)



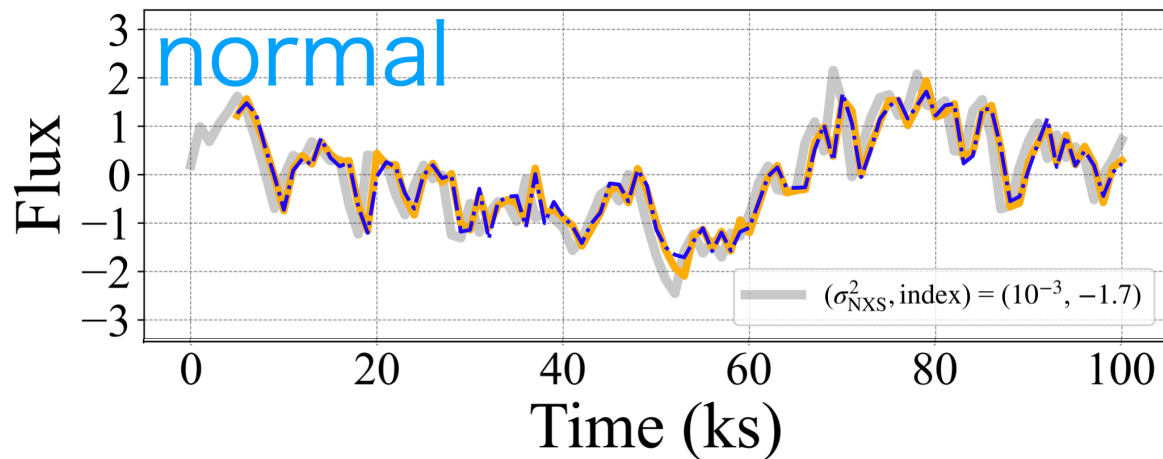
- 異常 (検出テスト) データ

- 既存の QPEs を強度、継続期間、デューティ比で特徴付け
- それらを元にした確率分布から、ランダムに QPE を生成し、教師データに印加



再現例と異常検知例

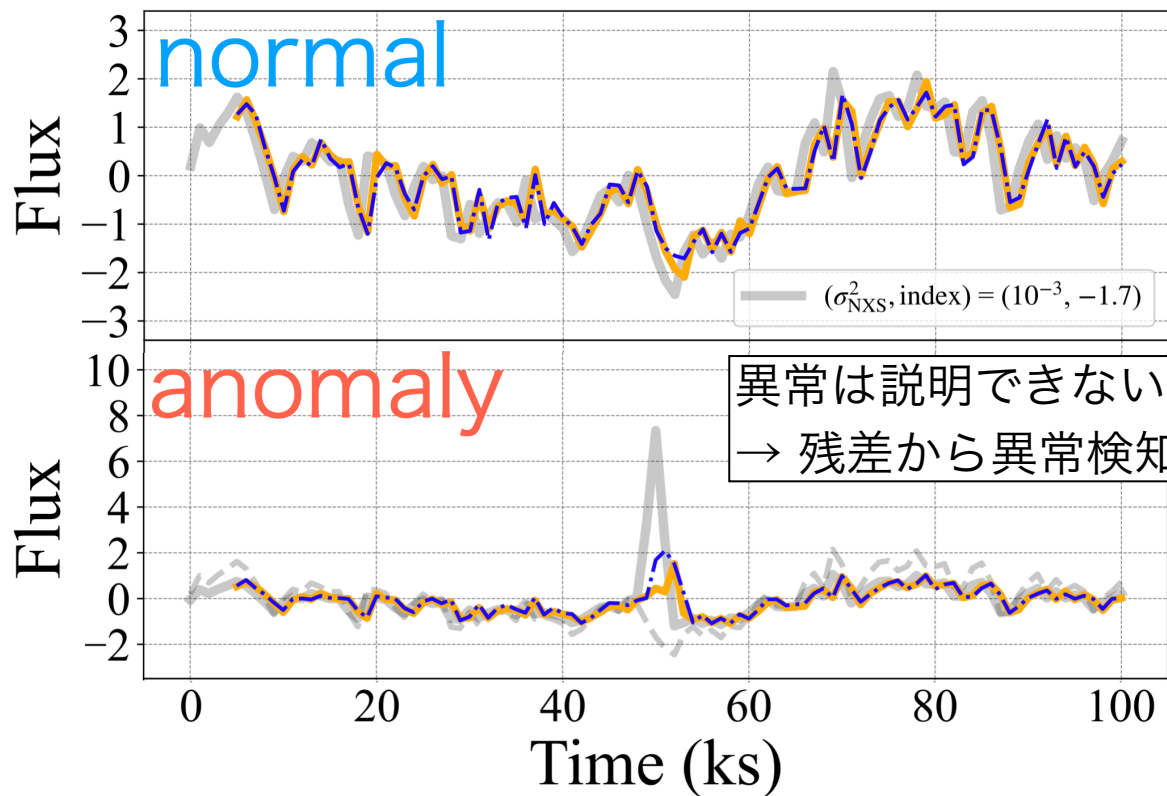
- シミュレーションした光度曲線に対する、量子 LSTM モデルで再現と異常な振る舞い (= フレア) の検知



※ 5 ks 事に予言して比較 (= 一度に予言しているわけではない)

再現例と異常検知例

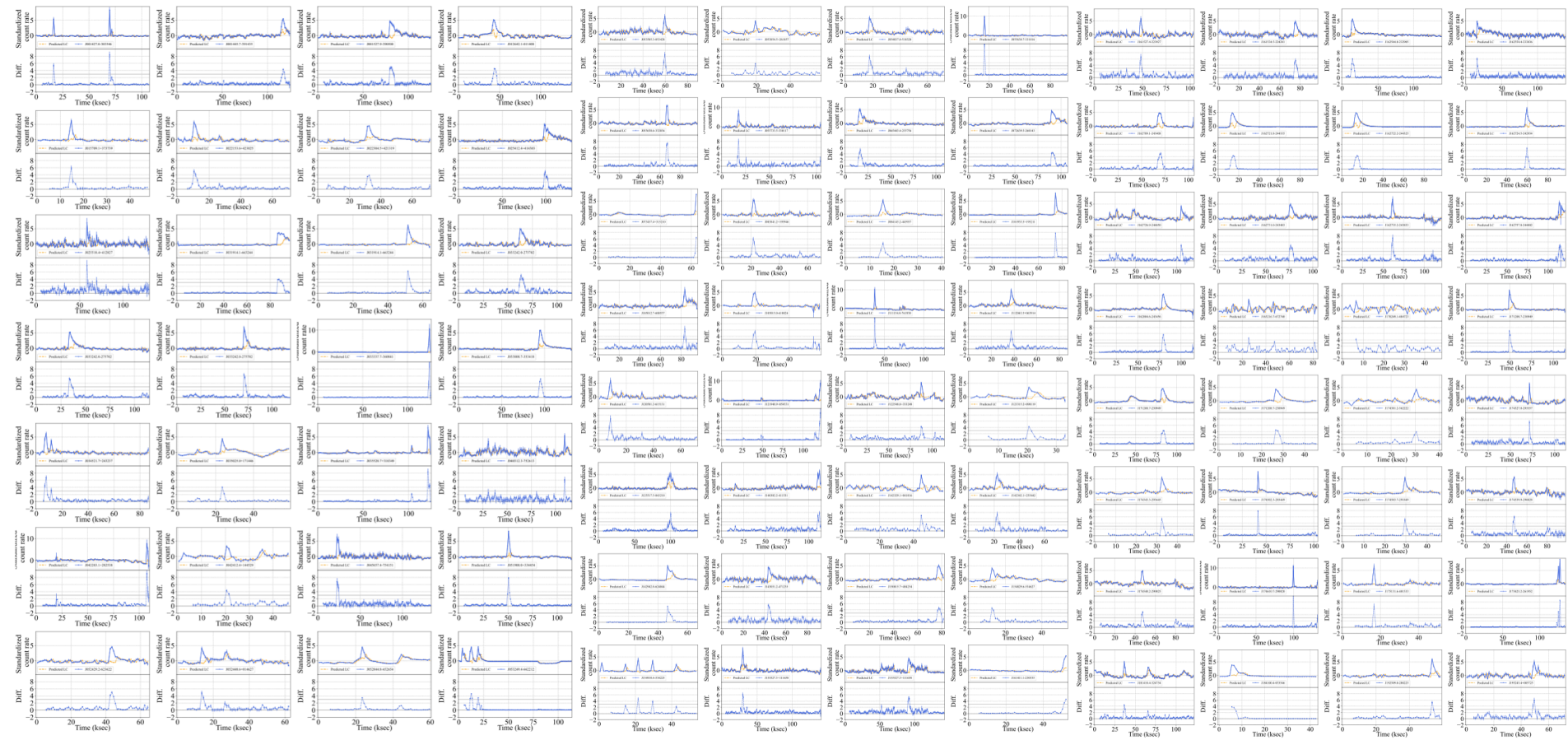
- シミュレーションした光度曲線に対する、量子 LSTM モデルで再現と異常な振る舞い (= フレア) の検知



- シミュレーションデータ
- 予測データ w/o quant. noise
- 予測データ w/ quant. noise

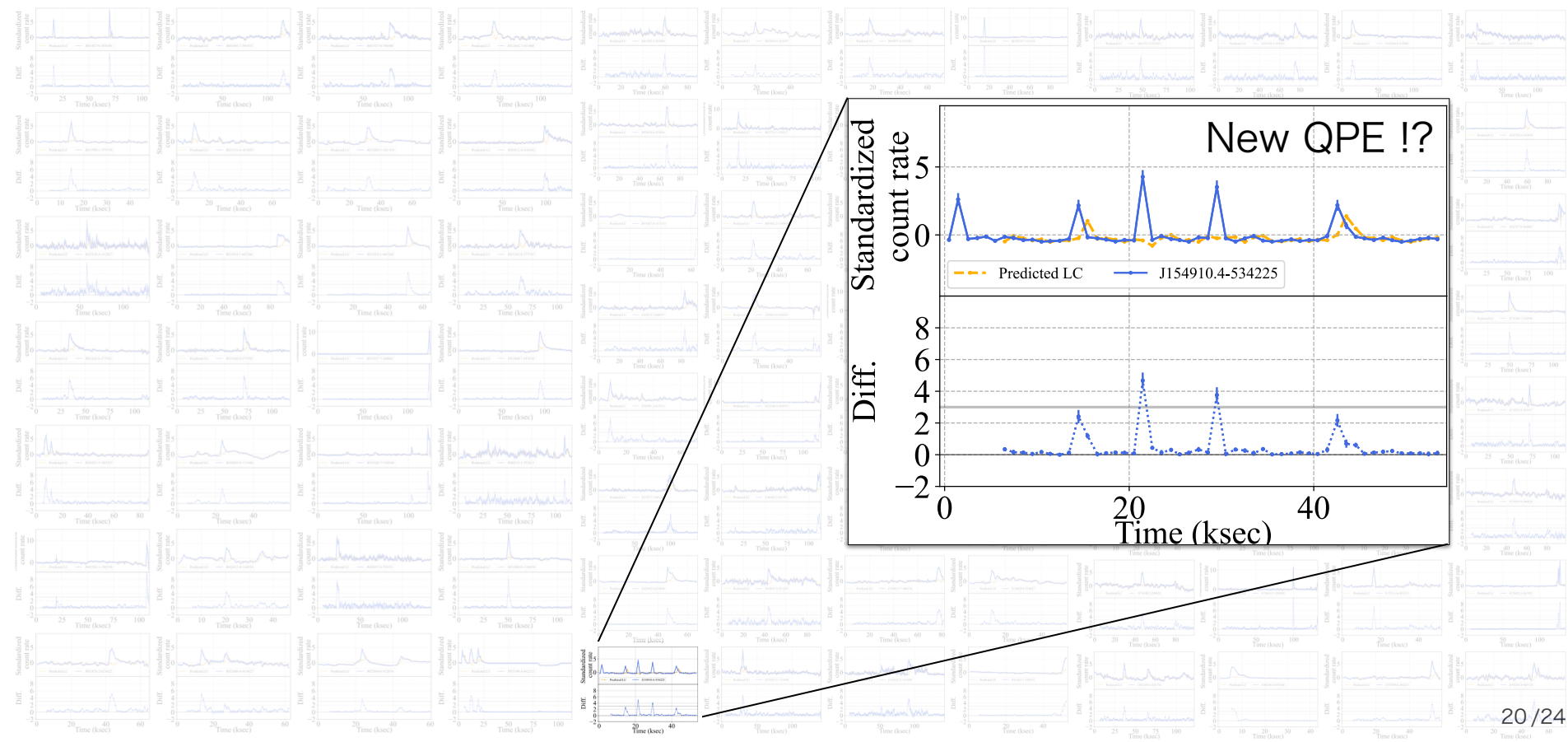
4XMM-DR14 光度曲線からの異常検知

- 約 4 万の光度曲線から、113 個の異常変動の検出に成功 (古典だと ~ 85 個)



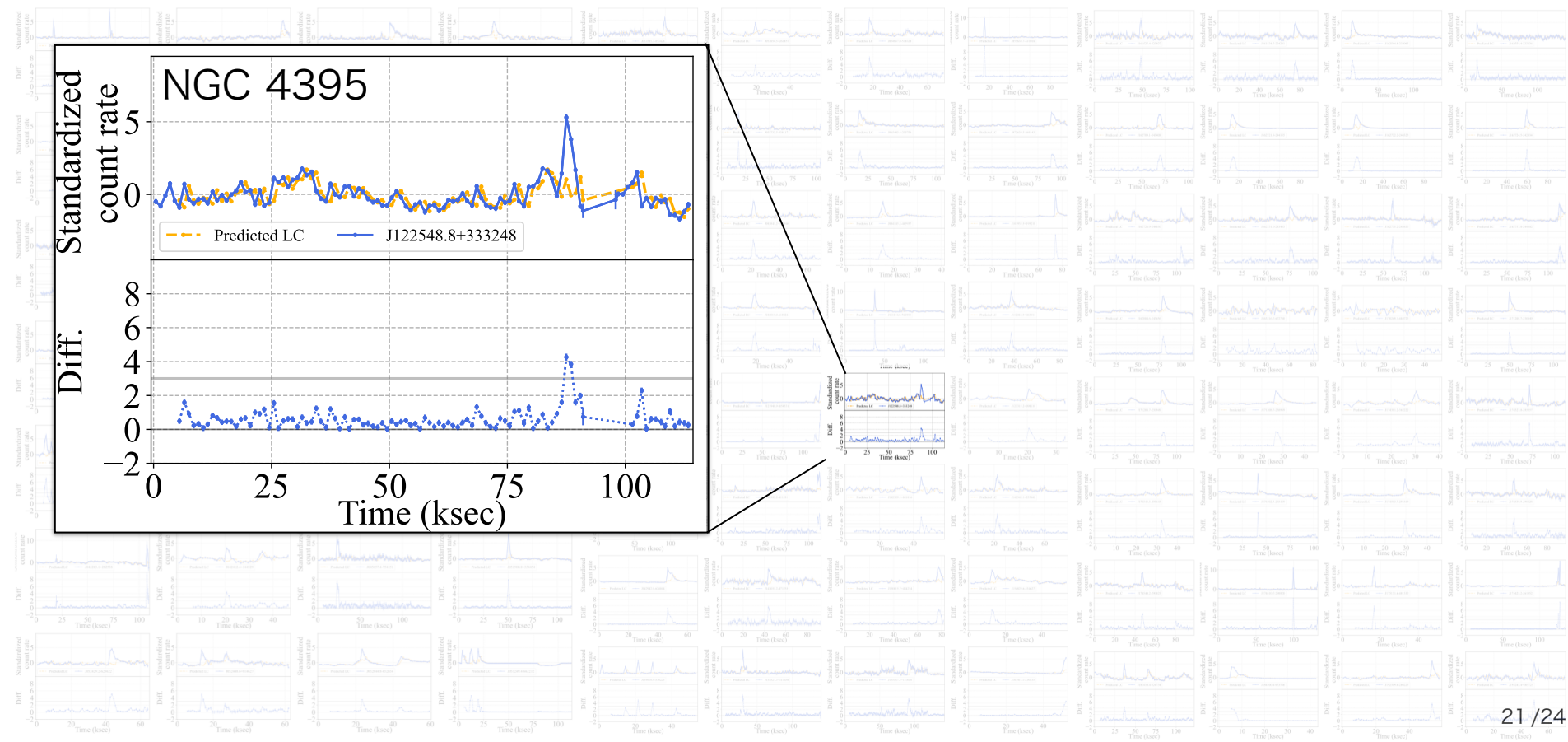
4XMM-DR14 光度曲線からの異常検知

- 約 4 万の光度曲線から、113 個の異常変動の検出に成功 (古典だと ~ 85 個)



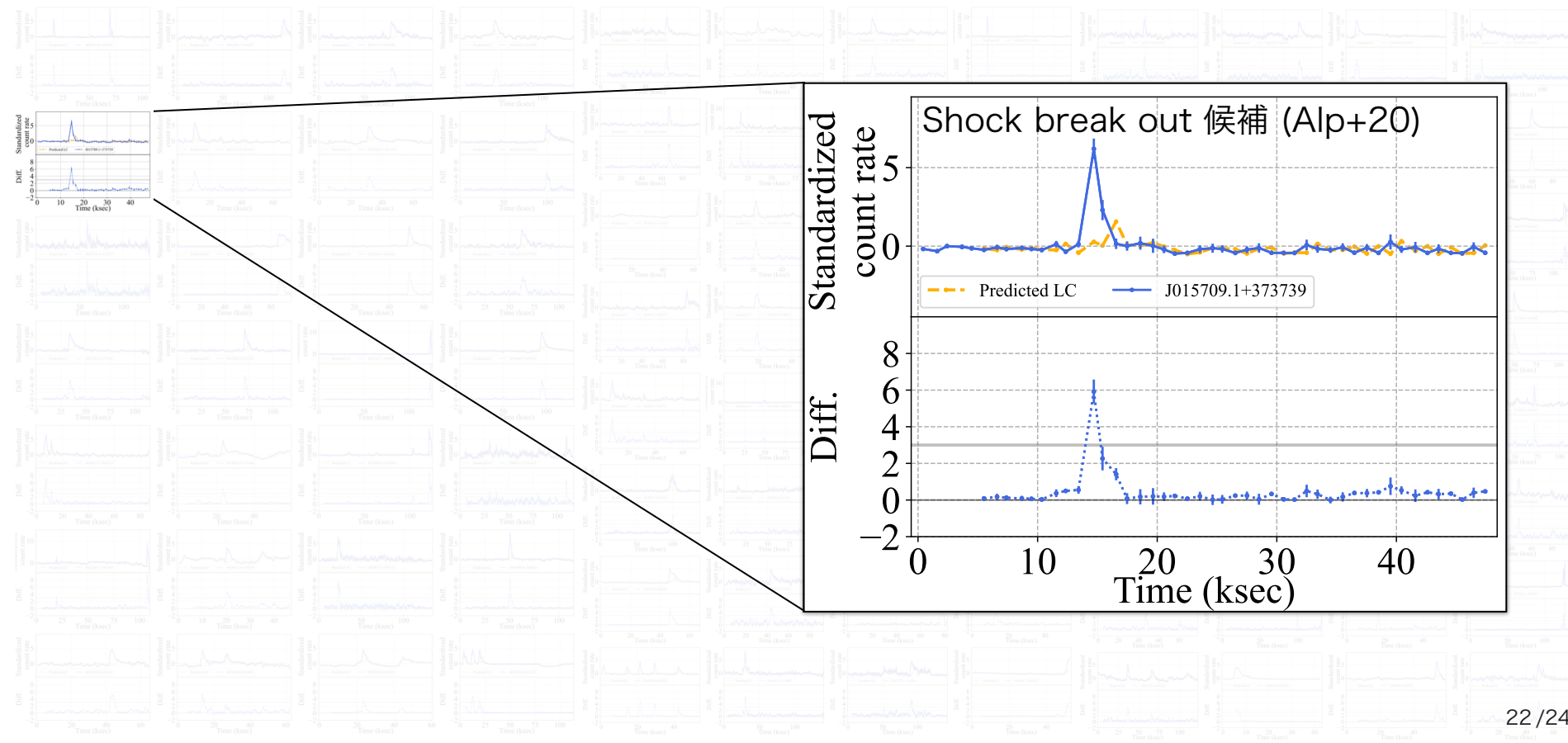
4XMM-DR14 光度曲線からの異常検知

- 約 4 万の光度曲線から、113 個の異常変動の検出に成功 (古典だと ~ 85 個)



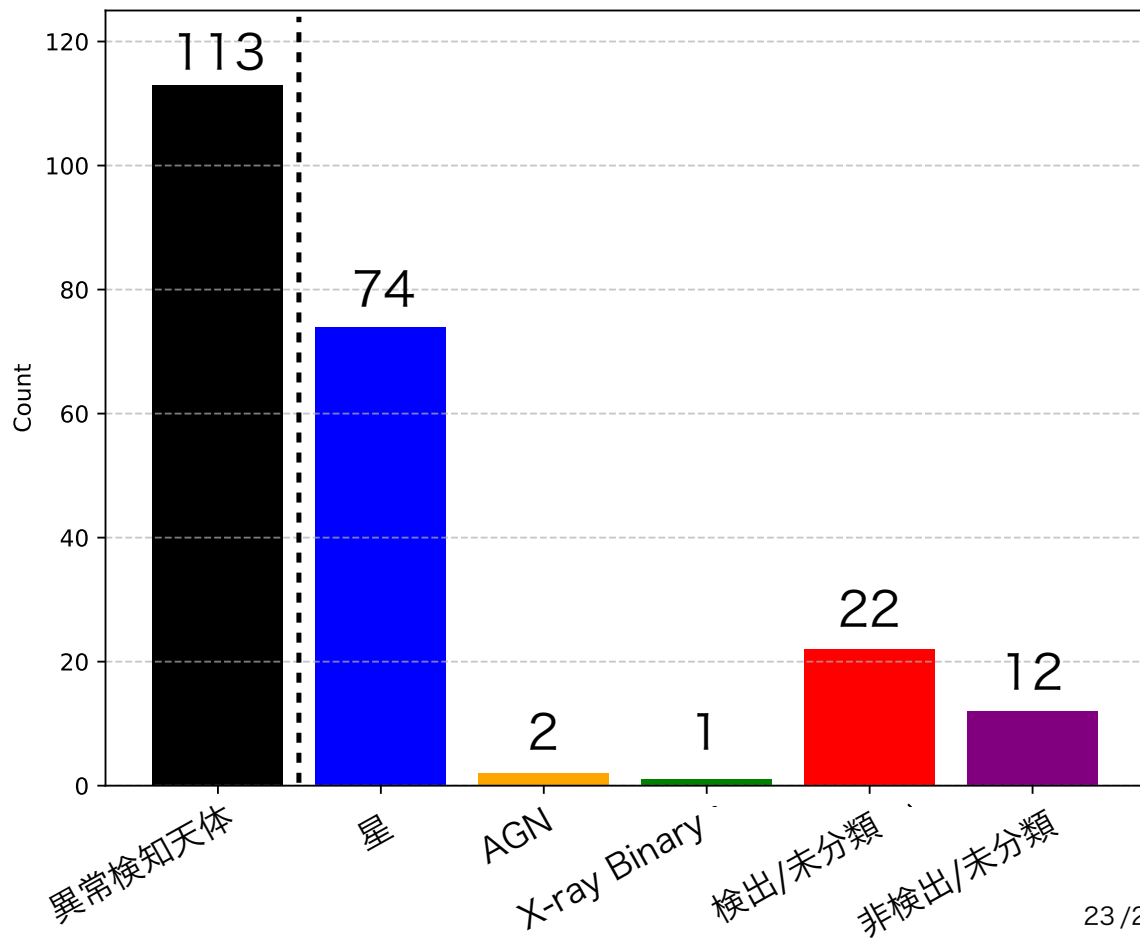
4XMM-DR14 光度曲線からの異常検知

- 約 4 万の光度曲線から、113 個の異常変動の検出に成功 (古典だと ~ 85 個)



対応天体の探査

- 多波長(全天)カタログから対応天体候補の探査
 - ROSAT (X線)
 - SkyMapper (可視光)
 - Pan-STARRS (可視光)
 - WISE (赤外)
- 大部分は星が対応
- 約 30% は、未分類
 - 興味のある人へカタログ公開



まとめ

- 大規模データの中から突発現象探査や検出された天体の分類手法の探査は急務
- 機械学習が採用されるなか量子機械学習の可能性を模索 (TK+25, ApJ)
 - 量子版 LSTM (未来を予測し、比較から異常を検出) を採用
 - ※ 今回はシミュレーションベース (→ 量子計算機が busy)
- 4XMM-DR14 の ~ 4 万光度曲線の中から、113 個の異常光度曲線を検知
 - QPE 候補、AGN、(shock break out) に加えて、多くの星 (フレア?) から検知か
 - 33 イベントについては ROSAT/WISE/Pan-STARRS/WISE で不明な対応天体・事象
- 展望：検出天体の精査、異なる量子機械学習手法の模索や、長期変動 (~ 異なるデータセットで) の探査 ...
 - (一緒に議論して頂ける人の募集)