

X線天文衛星で探る超高層大気

勝田 哲 (埼玉大学)

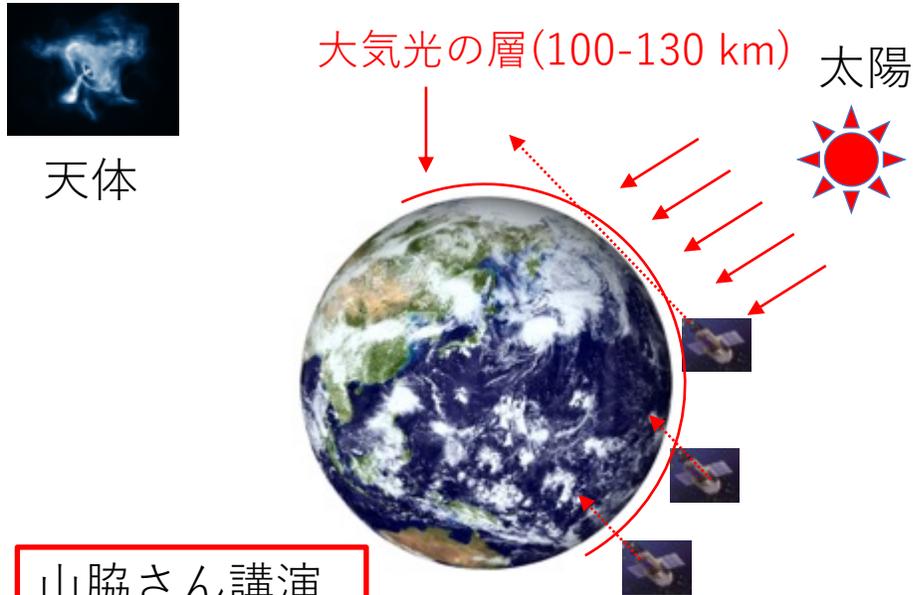
目次

- 昼地球データの解析
 - 「すぎく」による大気蛍光 X 線の観測 --- 山脇君のトーク 
 - XRISM衛星への期待
 - (大気に反射された太陽 X 線の観測：太陽と地球大気の相互作用)
- 大気掩蔽現象の解析
 - 今年出した長期トレンドの論文の追解析の報告
 - XRISM衛星への期待
- 地没データから探す Terrestrial Gamma-ray Flash
 - 「すぎく」 GSOによる探査結果

X線天文衛星で超高層大気を探る方法

1. 地没

太陽 X線 → 大気吸収 → 蛍光 X線放出



原理は非破壊分析と同じ
(地球のリモートセンシングに近い)

2. 大気えんぺい現象

天体の X線 → 大気吸収 → 減光



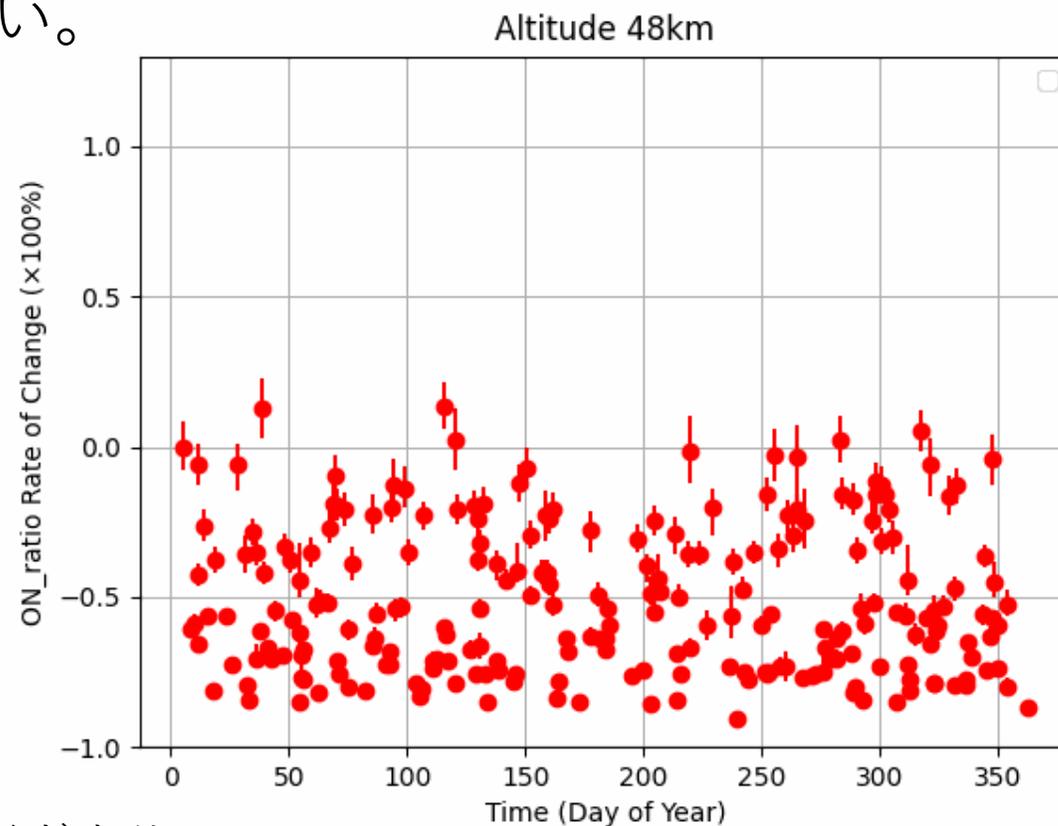
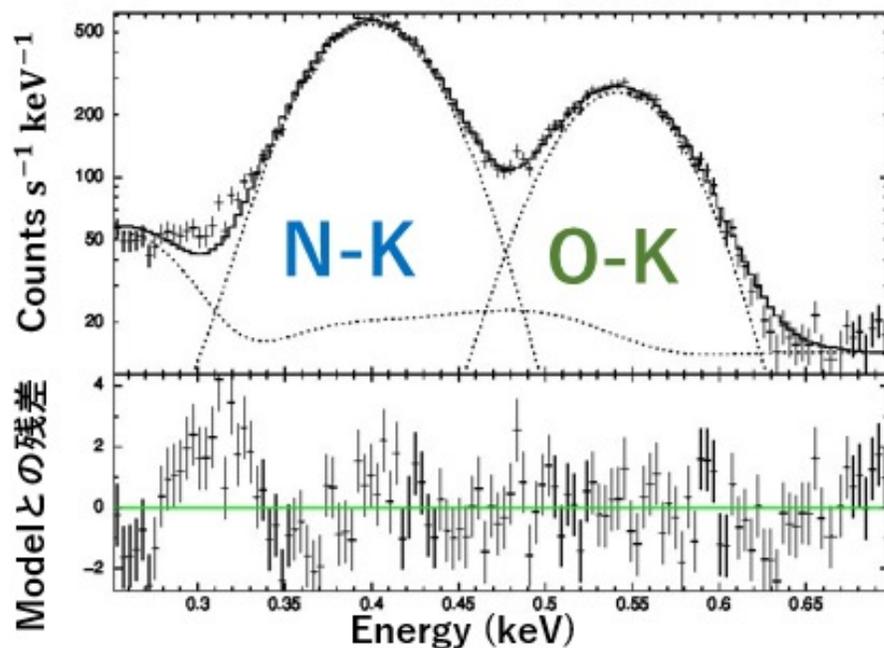
原理はレントゲン写真と同じ
(大気をレントゲン撮影する)

「すざく」の残した課題

- O/N 輝線強度比

- ばらつき(系統誤差)が大きく、現時点ではサイエンスを引き出しにくい。
(キャリブレーションの不定性か?)
- 輝線強度比を組成比まで変換できていない。

2014/07/04 132~156kmの窒素・酸素輝線スペクトル

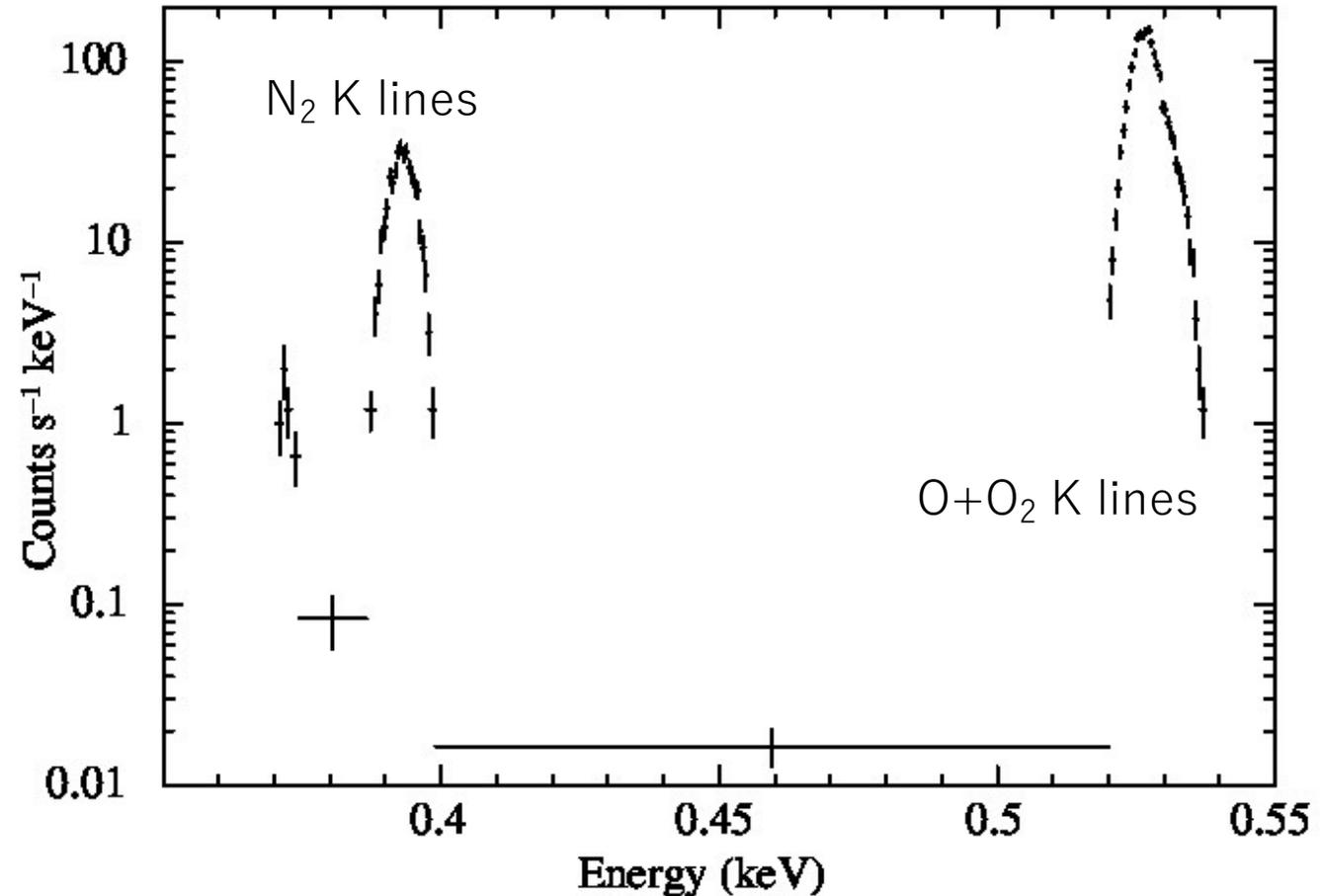


山脇君のスライドより

XRISMはN, O輝線の形状まで計測できる

- N, O K lines は従来の X線衛星も分離できていた(山脇さん講演)。しかし分光力が限られており、酸素、窒素それぞれ太いガウシアン1本ずつ。微細構造までわからない。フラックス計測の系統誤差になりうる。
- XRISMはN, O輝線の分離はもちろん、輝線プロファイルまで正確に測れる。
- これにより、キャルの不定性を抑え、O/N輝線強度比の測定精度を上げる。

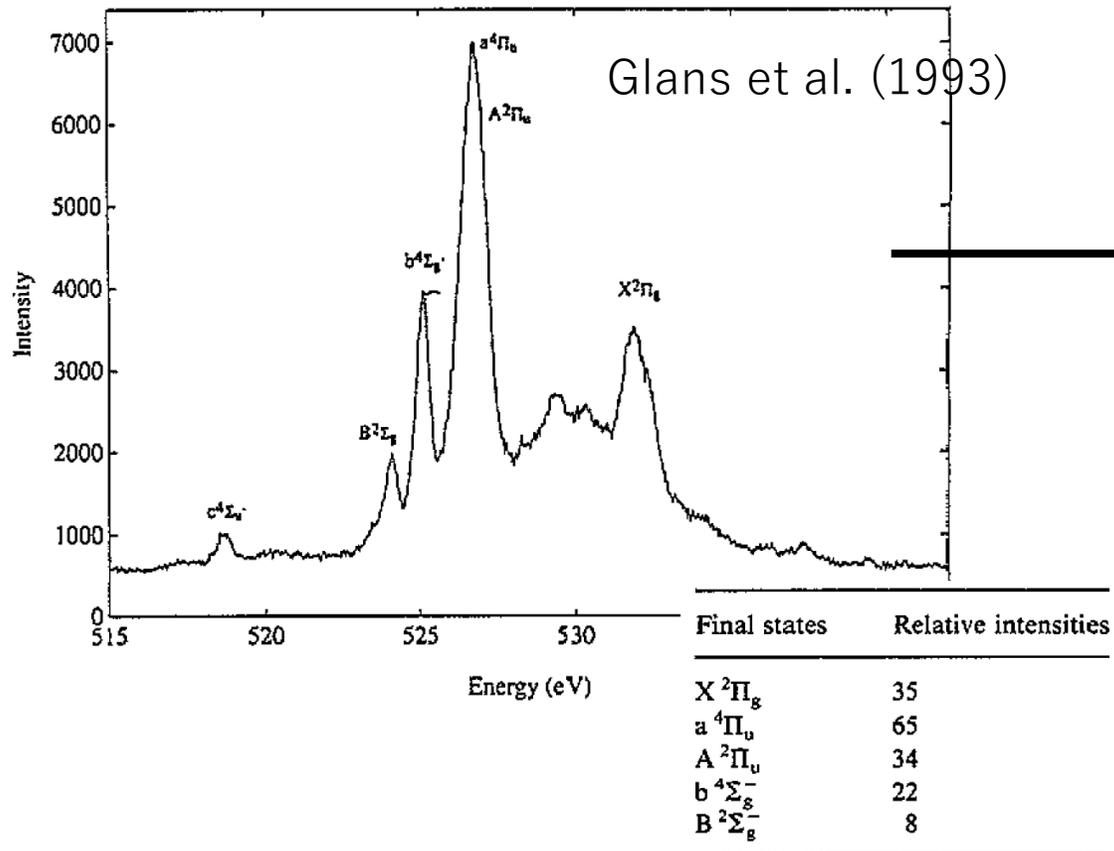
XRISM simulation of Day Earth for 10 ks



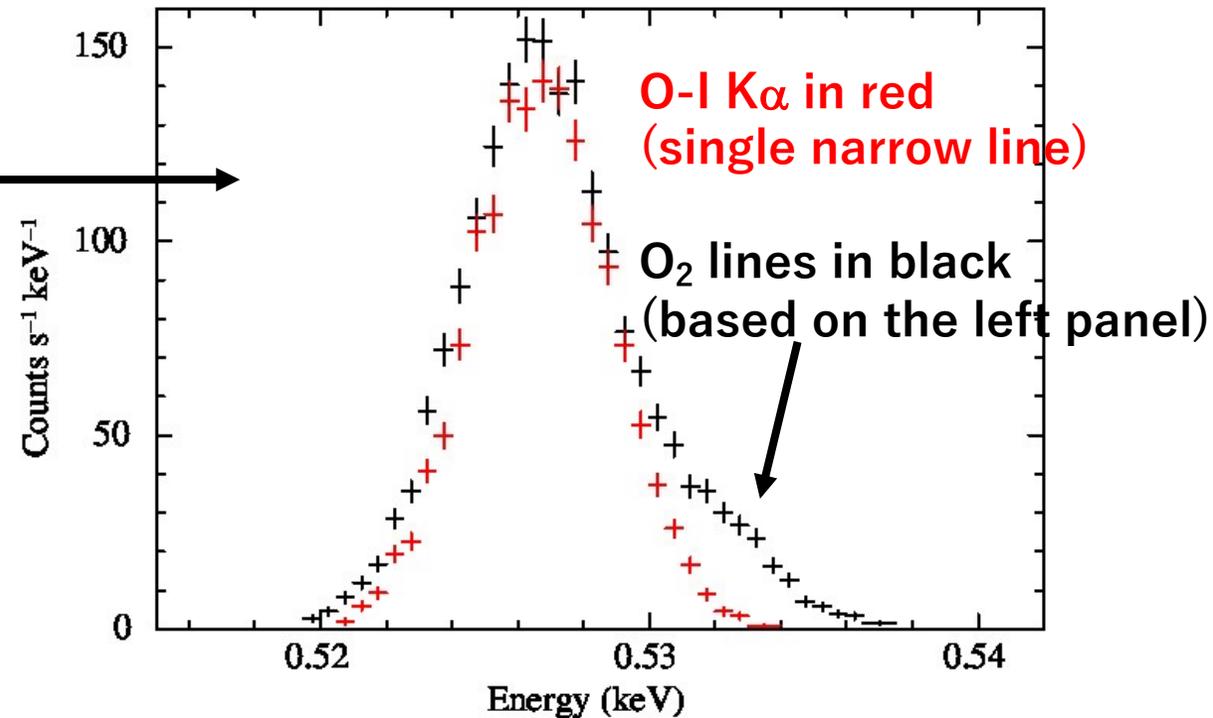
XRISMが取得する昼地球スペクトル: O_2 $K\alpha$

- XRISM は酸素の原子輝線と分子輝線をなんとか分離できる。
分子からのX線輝線の検出は珍しい。
(火星大気の CO_2 X線輝線はXMM/RGSで検出例あり。)

O_2 からの輝線群(実験データ)

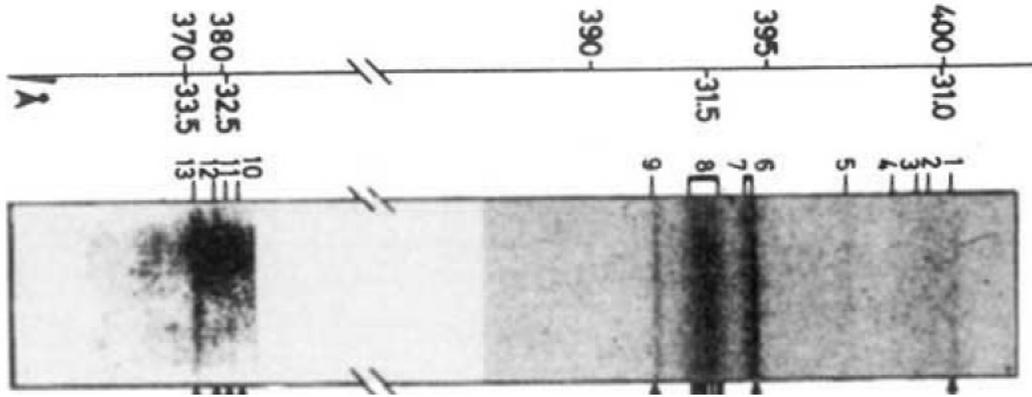


XRISM simulations



XRISMが取得する昼地球スペクトル: $N_2 K\alpha$

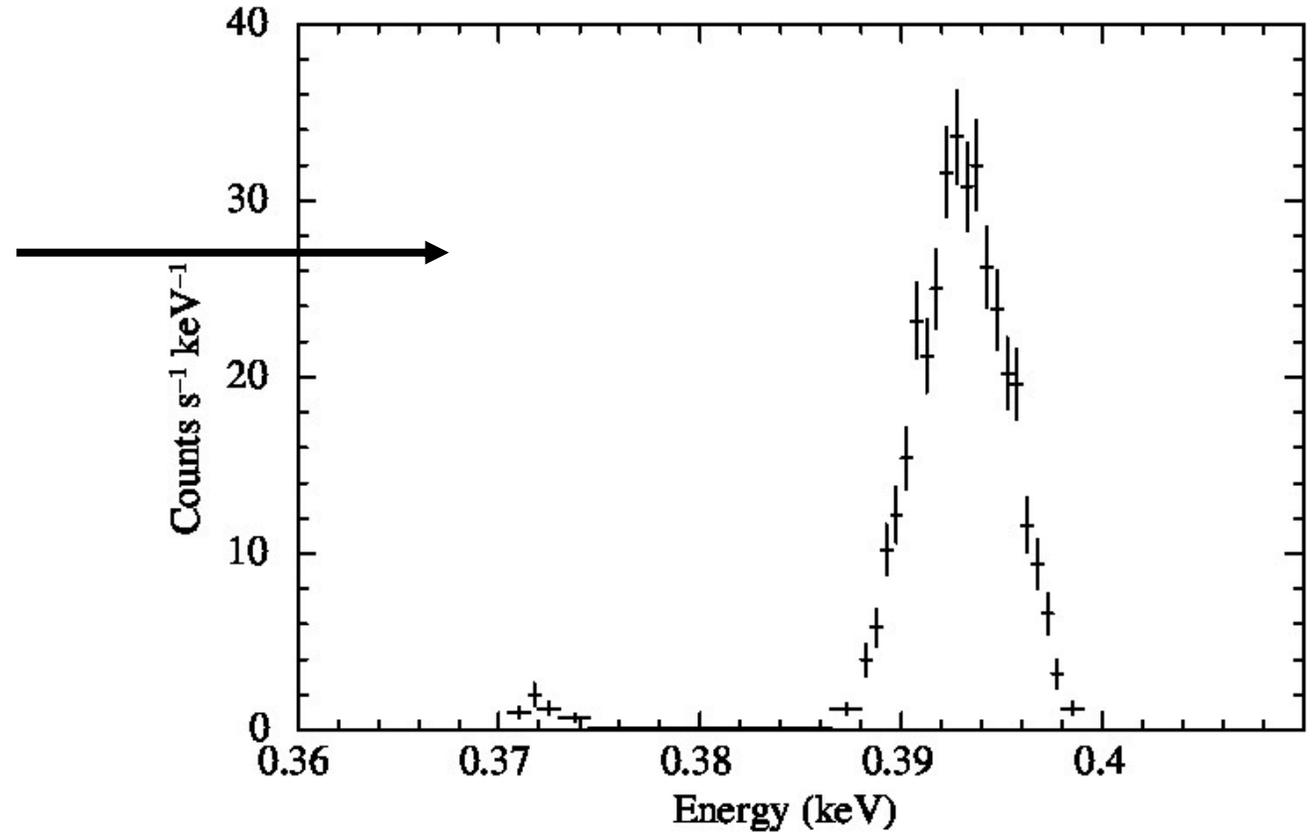
Werme et al. (1972)



Gel'mukhanov & Agren (1994)

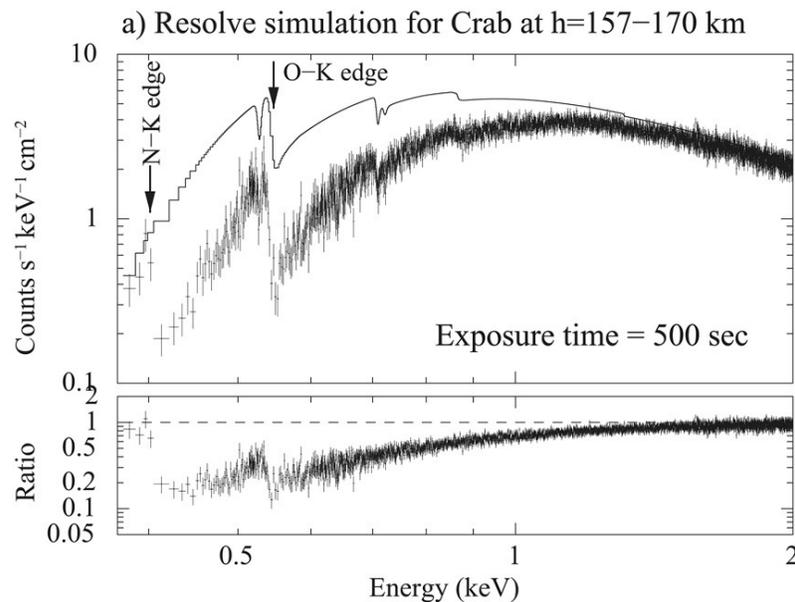
Quantity	MO	x-ray-emission data			
		$2\sigma_g$	$2\sigma_u$	$1\pi_u$	$3\sigma_g$
Energy ^a		372.1	391.33	393.34	394.40
Intensity ^a		0.075	0.09	1.00	0.47

XRISM simulations

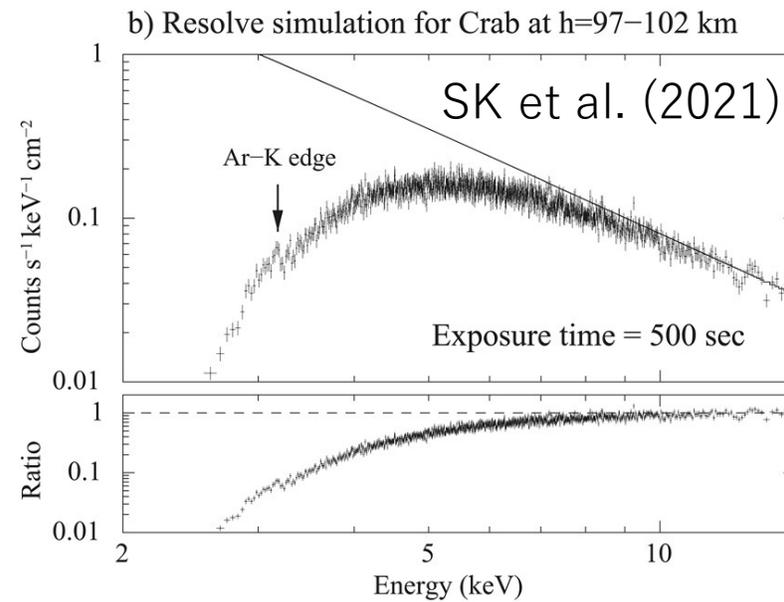


大気掩蔽でO/N₂を直接計測する

- これまで、この手法ではO/Nなど組成比までは計測できなかった。XRISMはN, O, Arの吸収端構造を検出できるので、組成まで直接測定できる。これを元に蛍光X線と組成比の対応関係も導出する。
- 観測対象：
 - かに星雲：星間吸収で N edge は見えにくい。Ar edge は非常に浅い。
 - Cygnus Loop などソフトな天体が良さそう。明るさは十分か？



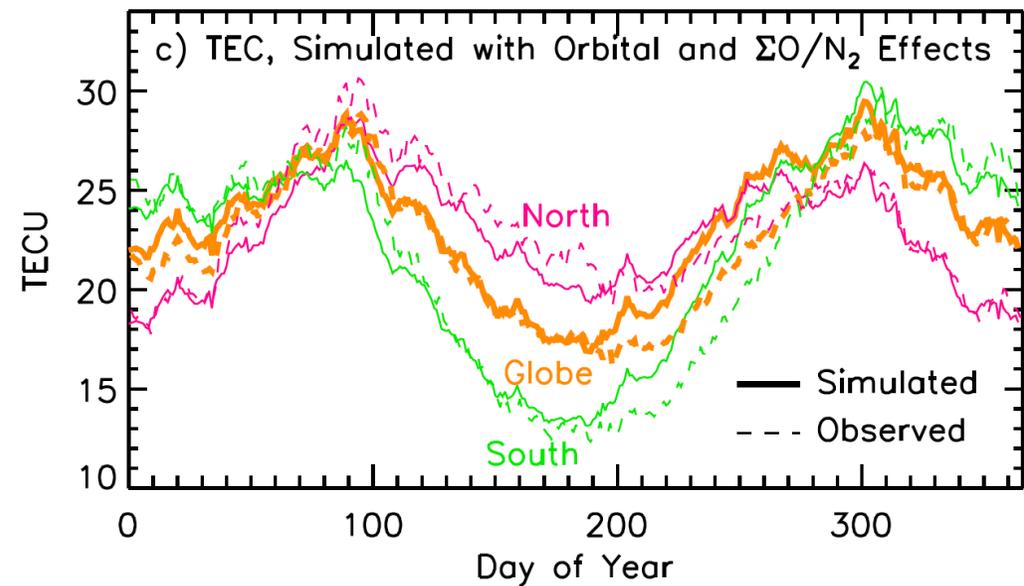
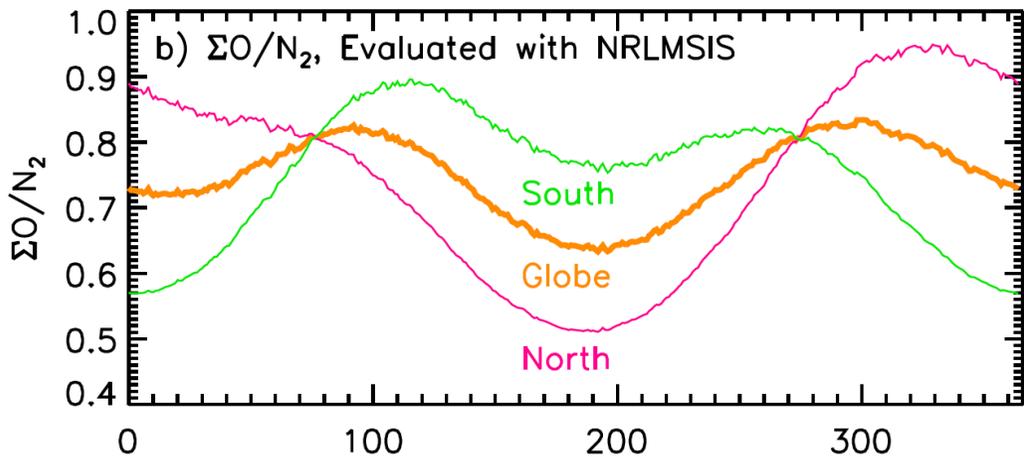
~100 occultations summed



~250 occultations summed

O/N₂ を使ったサイエンス

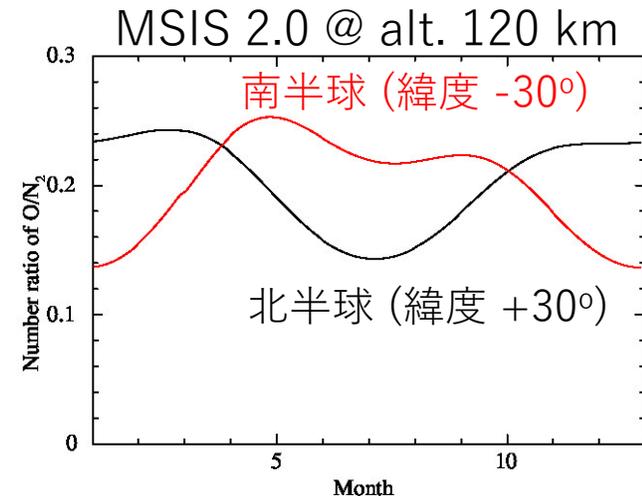
Lean et al. (2011)



藤原 & 陣 2021, open textbook

<O/N₂と大気循環>

上昇気流 ⇒ O/N₂低下
下降気流 ⇒ O/N₂上昇



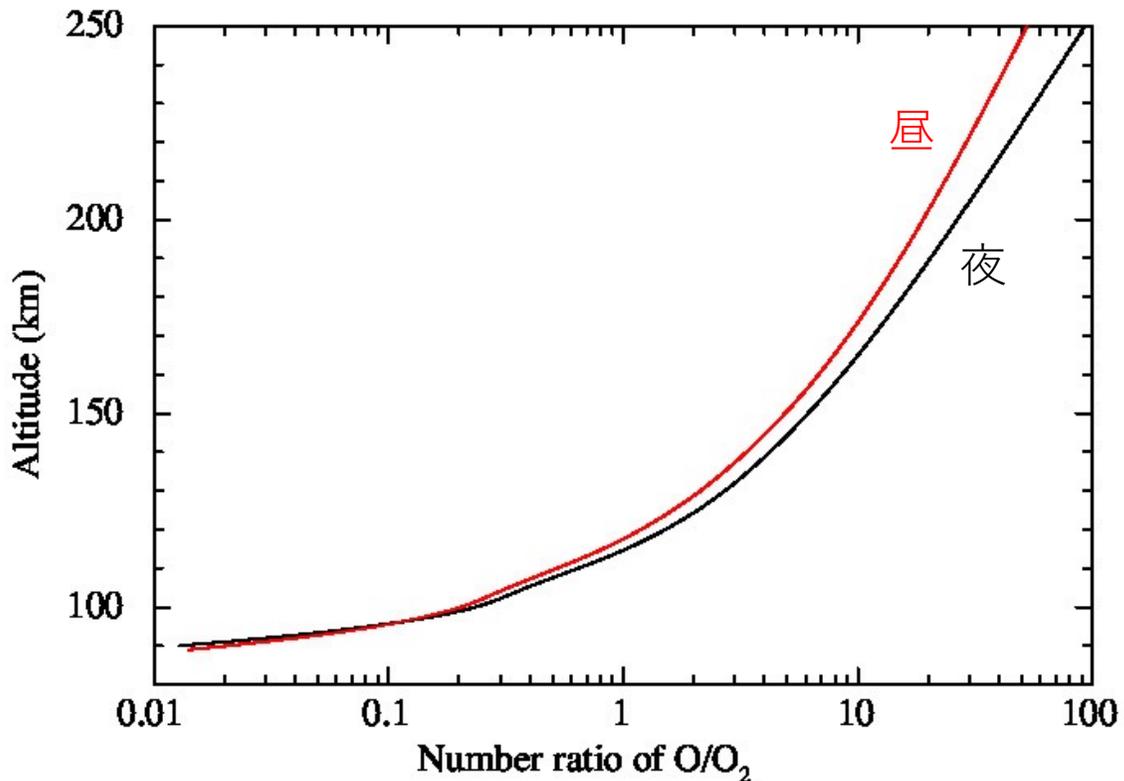
<O/N₂とTEC(total electron content)>

N₂が増えるとNO⁺などO₂⁺のイオンが生成され、これらはO⁺よりも再結合速度が早い
ため、電離度(TEC)を下げる。
⇒ O/N₂はTECと相関する。

O/N₂は大気循環とTEC(電離度)の良い指標になる。XRISMで調査できるだろう。

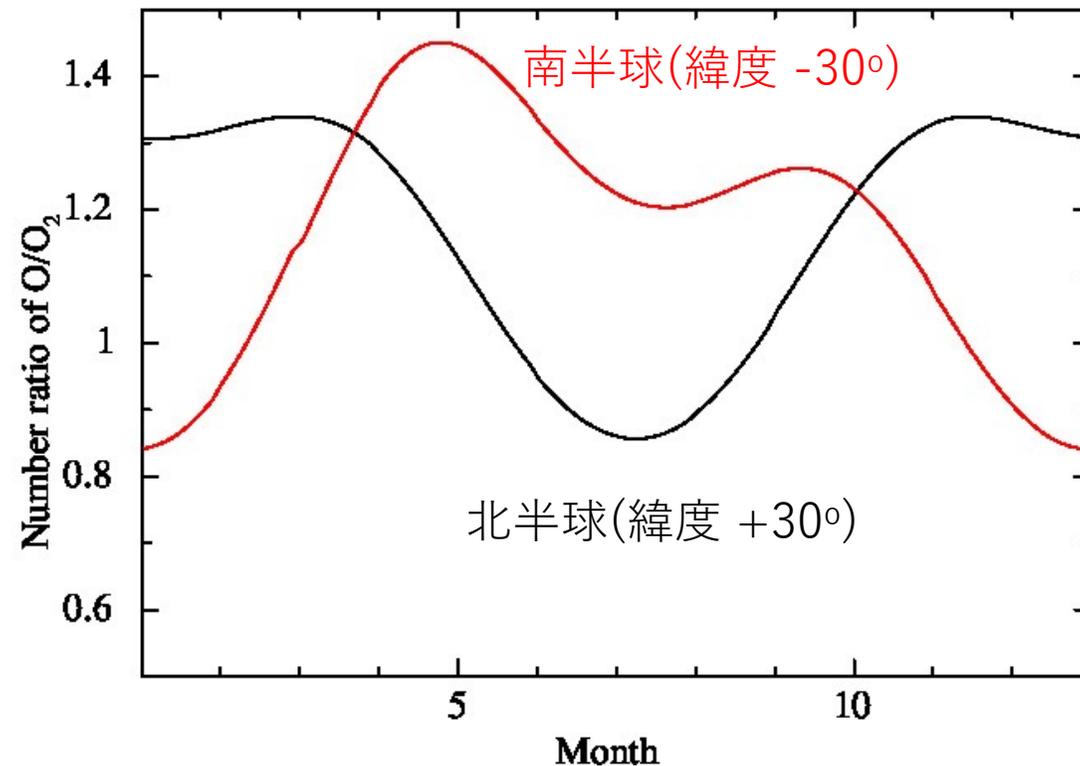
O/O_2 の変動 (NRLMSIS 2.0)

日々変動



昼と夜で O/O_2 比が変動する

季節変動 @ 高度 120 km



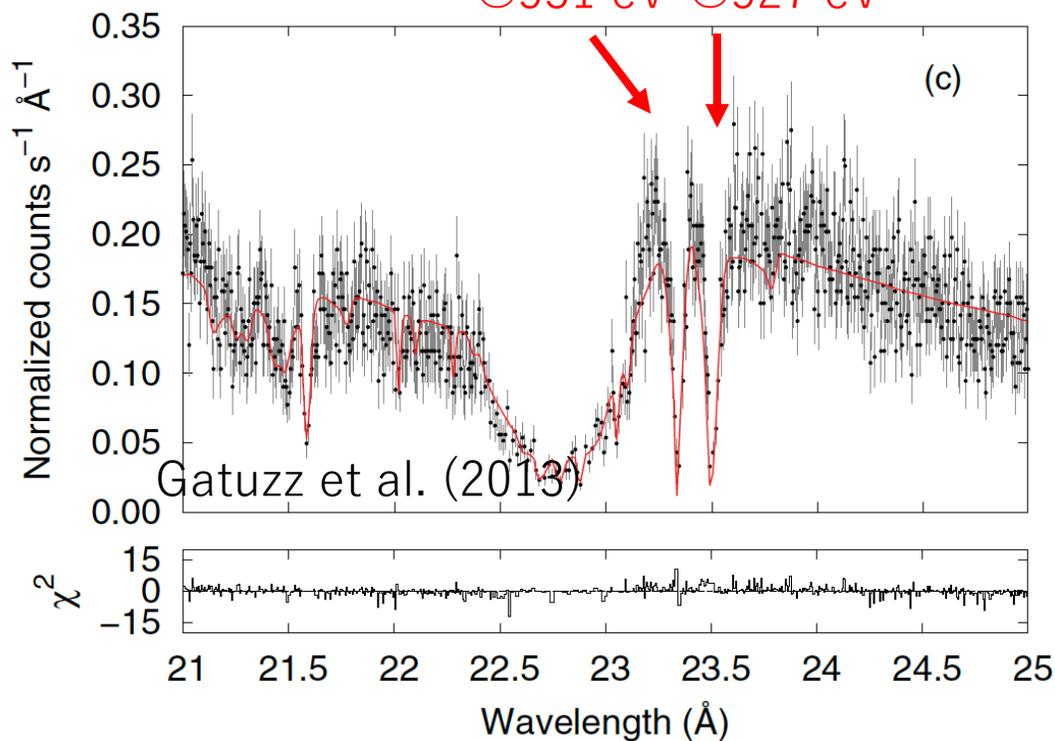
季節の移ろいで O/O_2 比が変動する

XRISMでMSISモデルを検証する (その科学的意義は・・・)

大気中のイオン輝線を検出できるか？

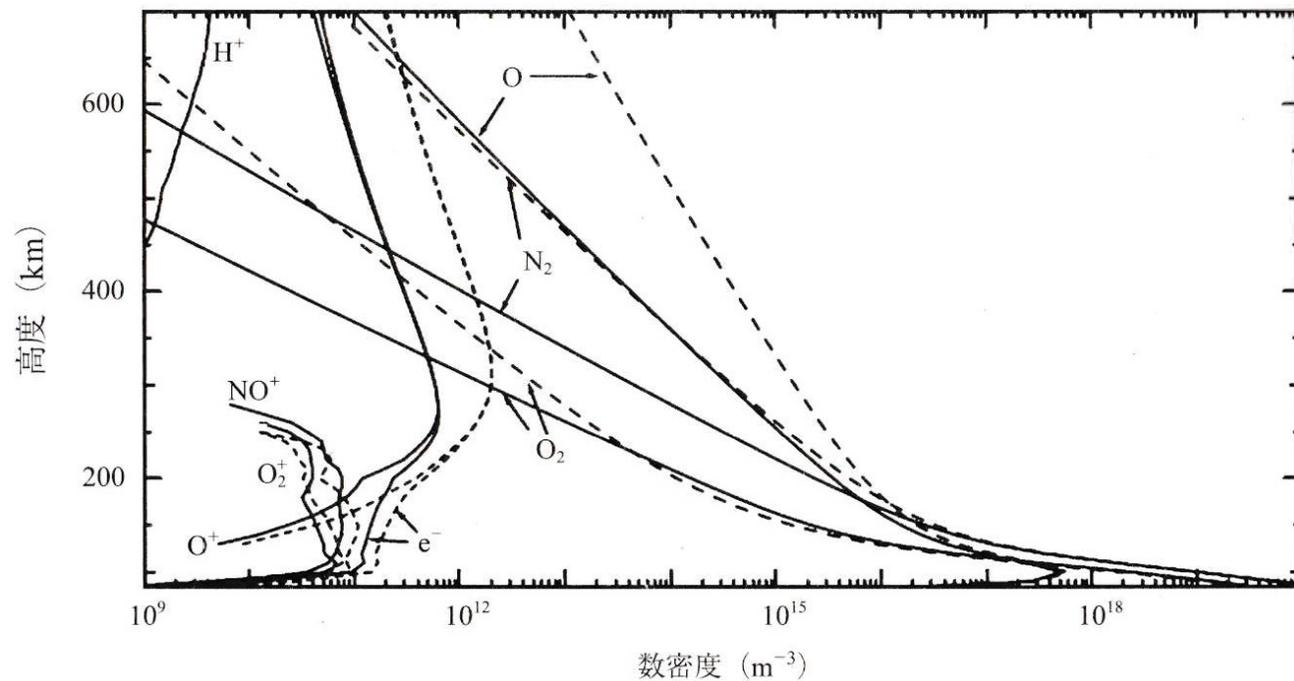
- 星間ガス：中性ガスと1回電離ガスがよく観測される。

O II K α O I K α
@531 eV @527 eV



XRISMは O I, O II 輝線(吸収線)を区別可能！

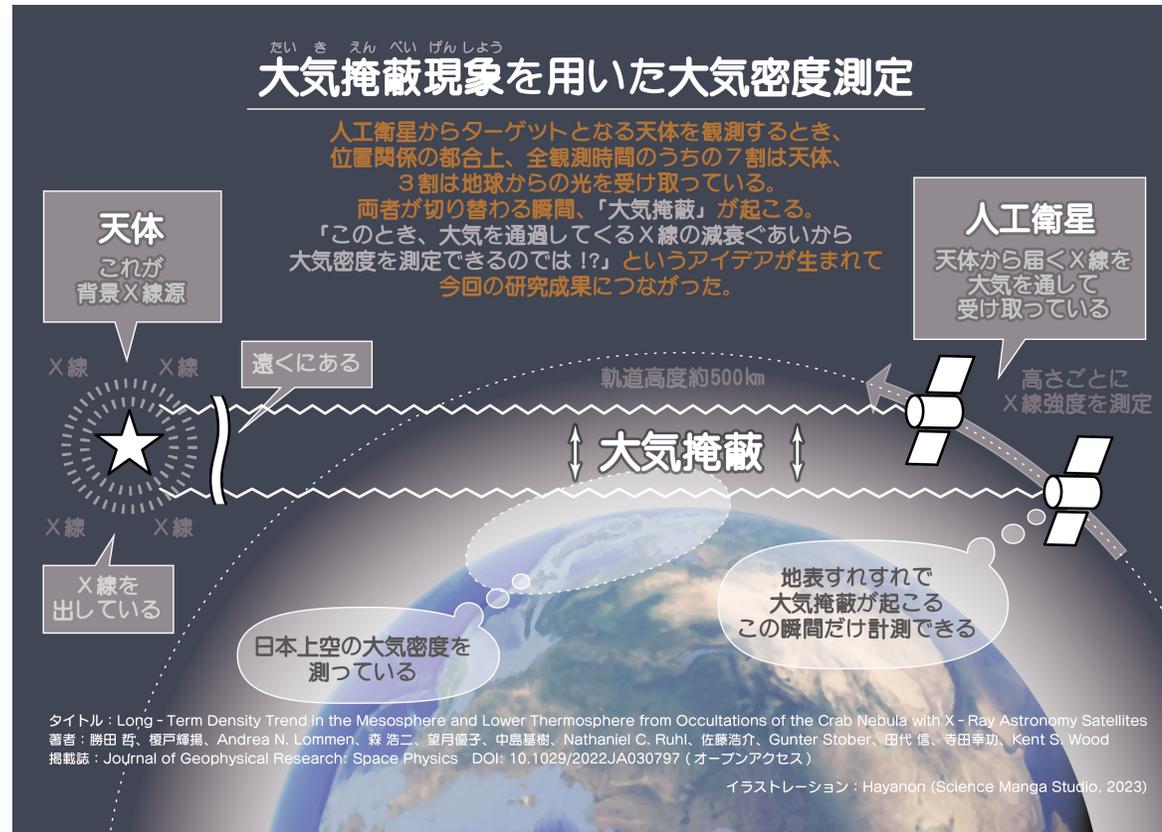
- 超高層大気中にも1回電離ガスは存在する。しかし200 km以下だと、中性ガスの0.01%と極めて微量。→ 検出は難しいだろう。



プラズマ原子分子過程ハンドブック(藤原さん)より

大気掩蔽現象を用いた超高層大気の密度測定

背景天体 X 線強度: $I = I_0 \exp(-\tau)$ ($\tau = \sum N_i \sigma_i, N_i = n_i d$)
天体と検出器の間の物質質量(τ)の増加とともに指数関数的に低下する。



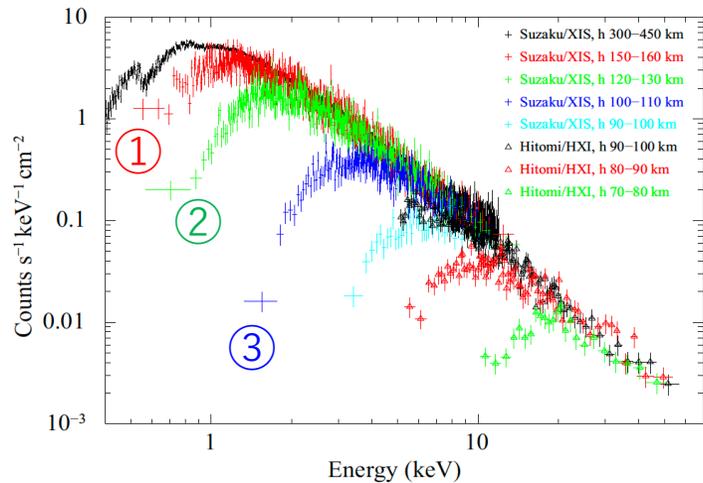
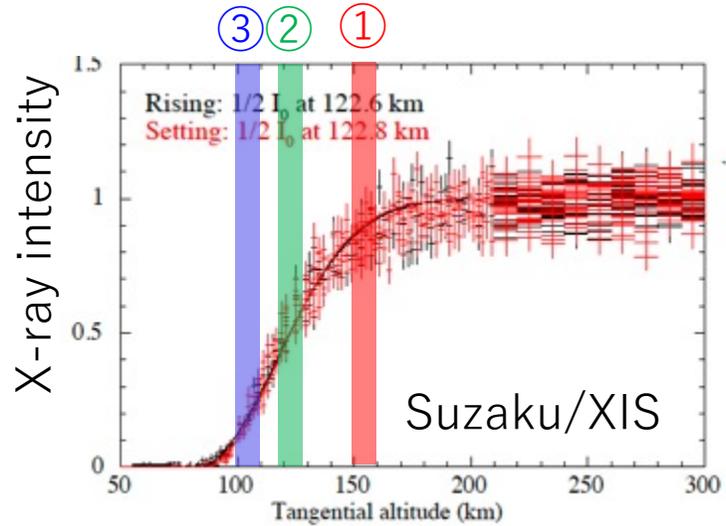
1 周回(95min)のうち 30 秒 x 2 回、天体の大気掩蔽が生じる。この時、背景光(天体)の光度変化から大気の密度プロファイルが描ける。

埼玉大学ほか複数機関よりプレスリリース(2023/2/14)

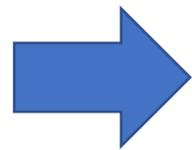
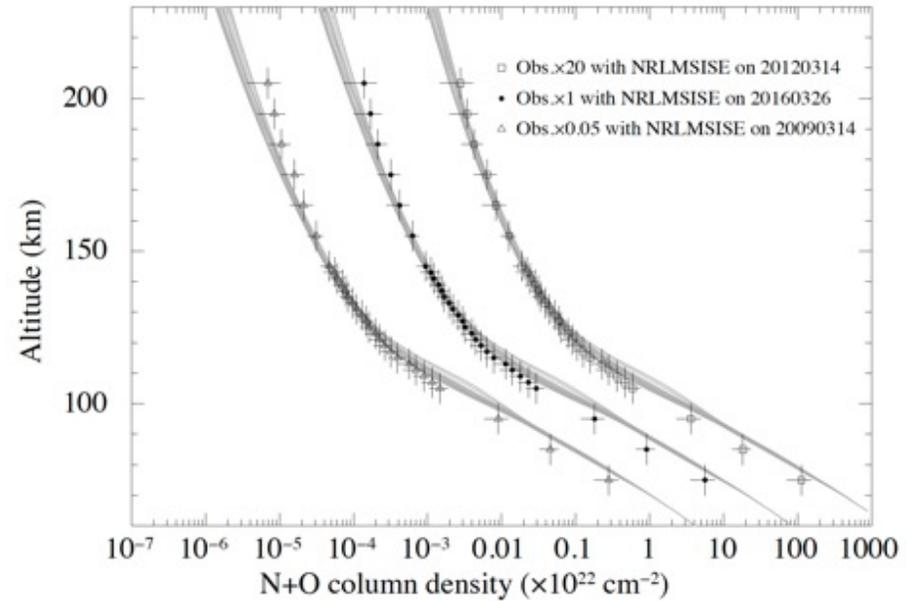
https://www.saitama-u.ac.jp/topics_archives/2023-0214-1406-16.html

大気掩蔽時の光度変化 → 大気密度構造

生データ



解析結果：大気密度の鉛直構造



多数の X 線天文衛星データを組み合わせ、長期トレンドを調査。

● ASCA
1993-2000

● Suzaku
2005-2015

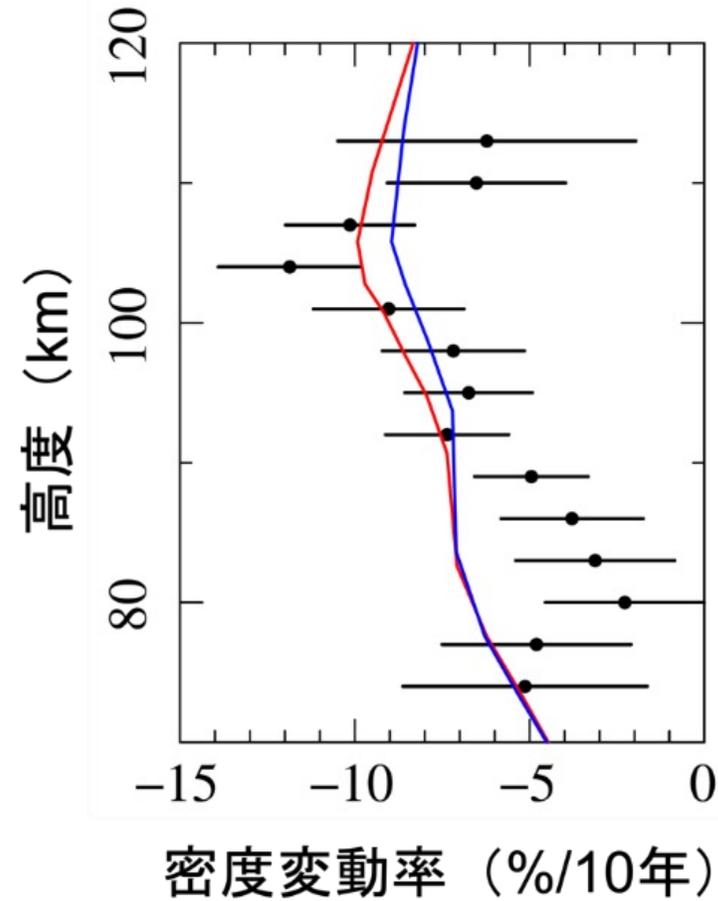
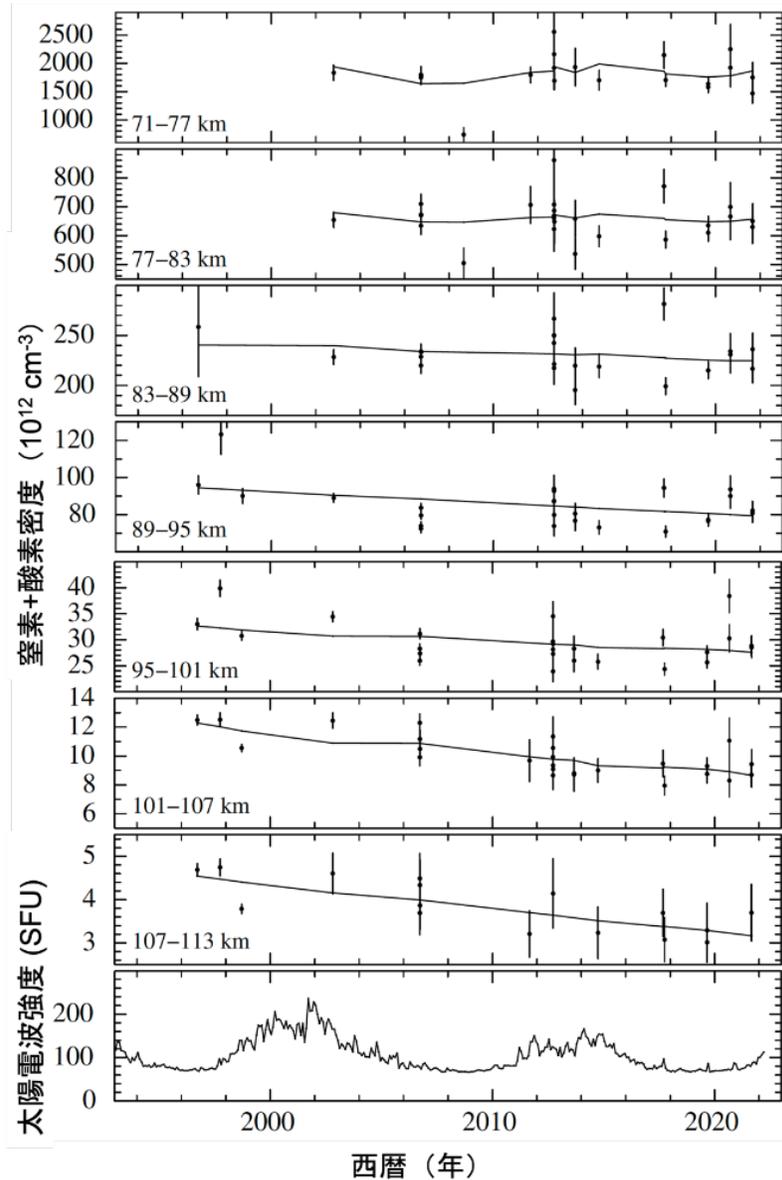
● Hitomi
2016

🇺🇸 RXTE
1995-2012

🇺🇸 NuSTAR
2012-

🇺🇸 NICER
2017-

長期トレンド調査の結果



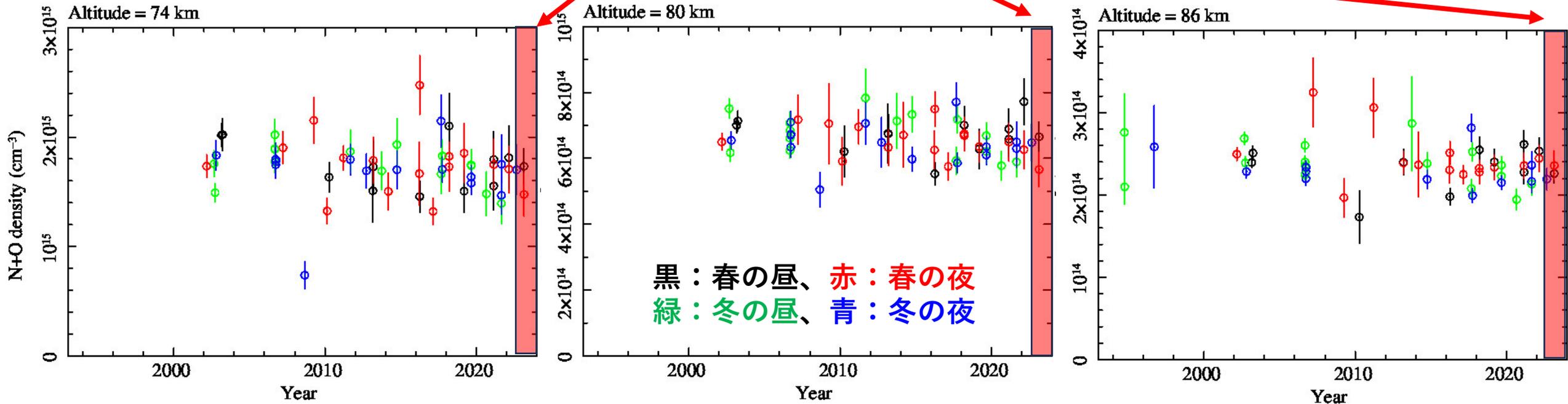
- 数値計算結果と概ね一致
同じ手法で長期変動を調べたのは世界初！
- 高度 90 km 以下では不一致
→ オゾン層がこの 30 年で回復したため？

解析のアップデート

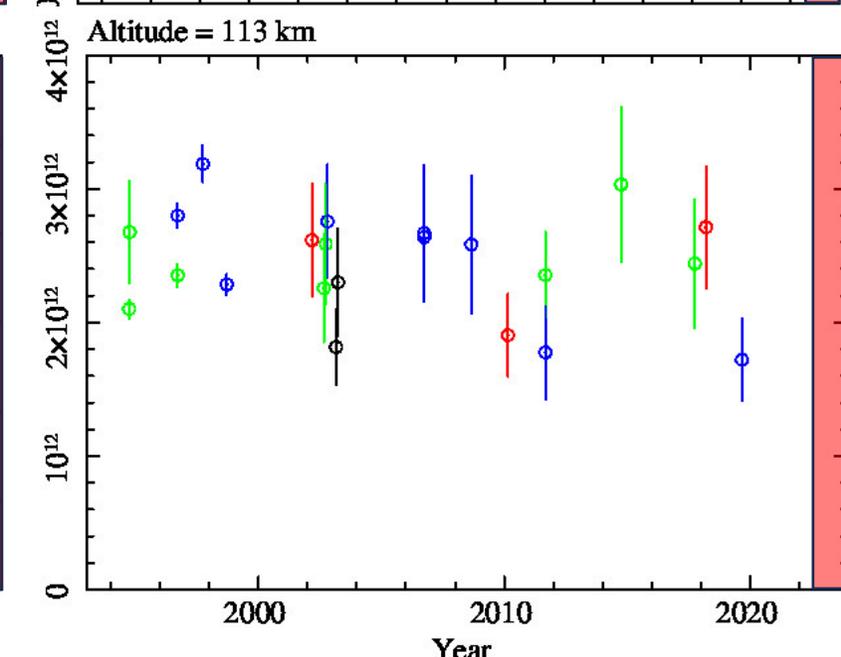
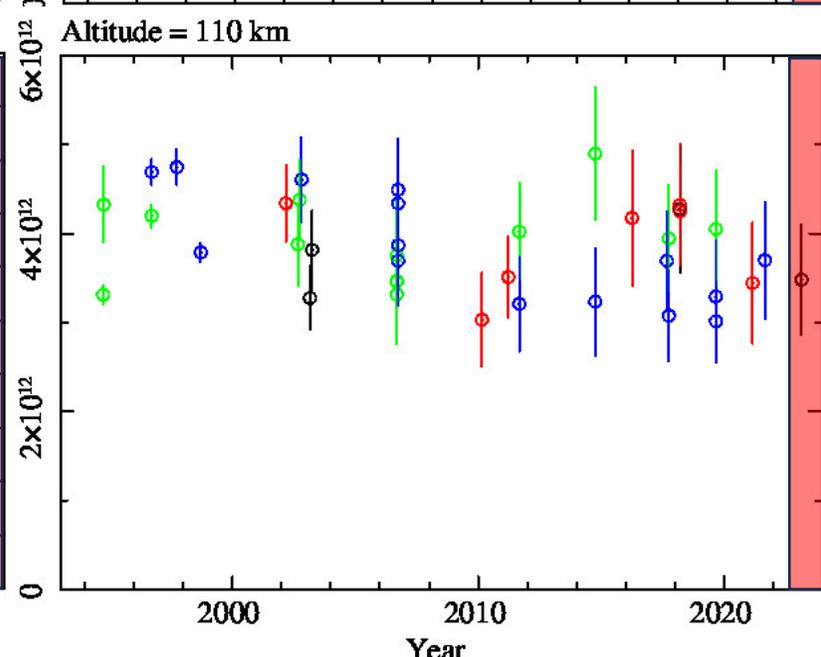
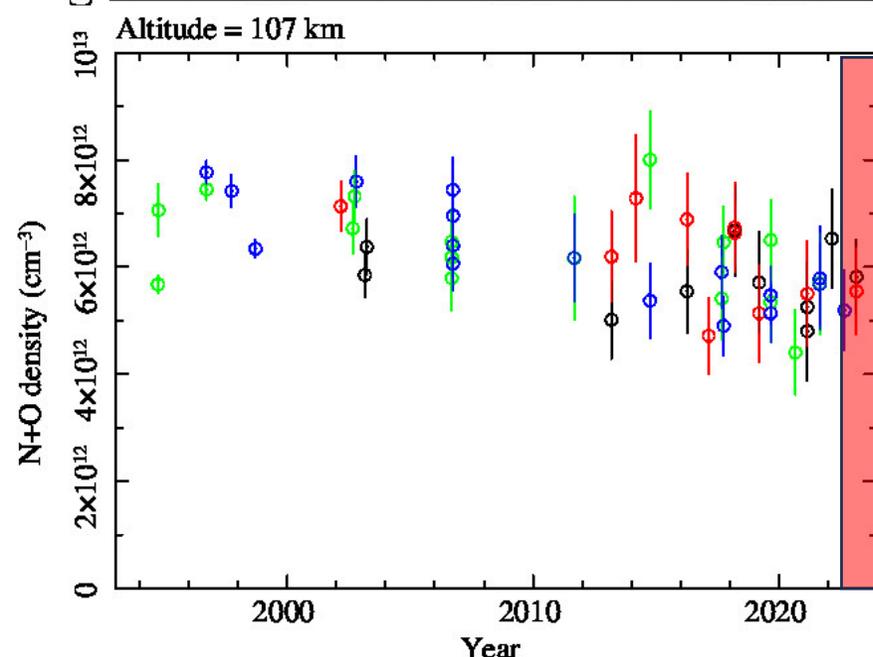
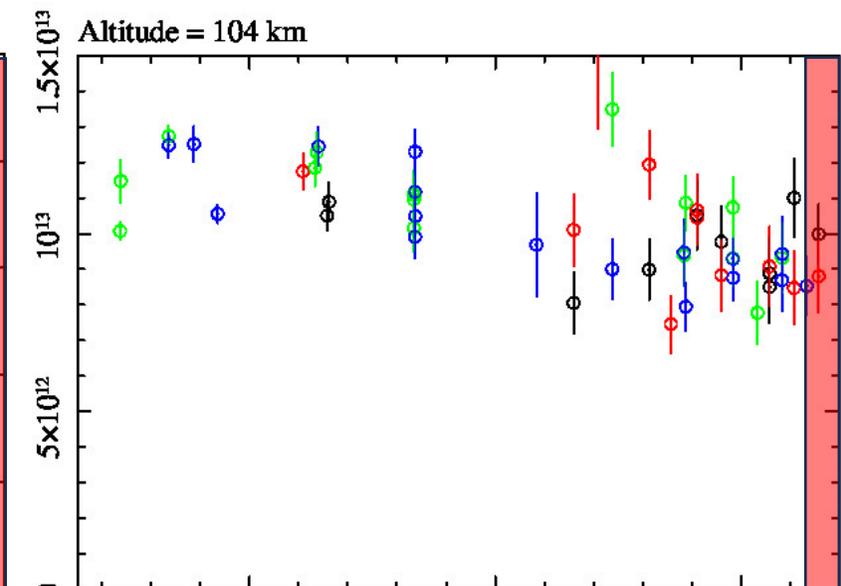
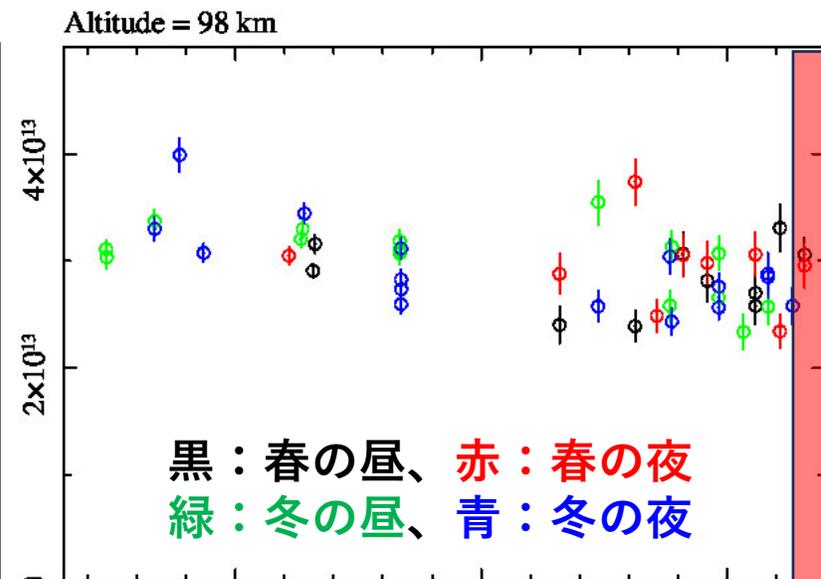
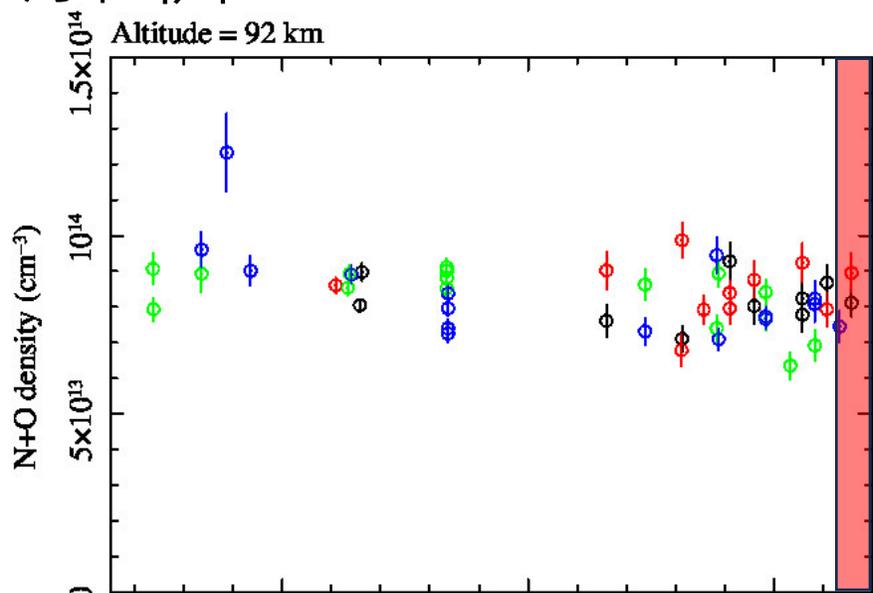
NuSTARの「かに星雲」のキャリブレーション観測

観測日	観測時間 (ks)	# of Setting	# of Rising
2022-08-30	6.4	2	3
2022-09-29	5.8	0	3
2023-02-24	10.2	3	5

追加データ領域

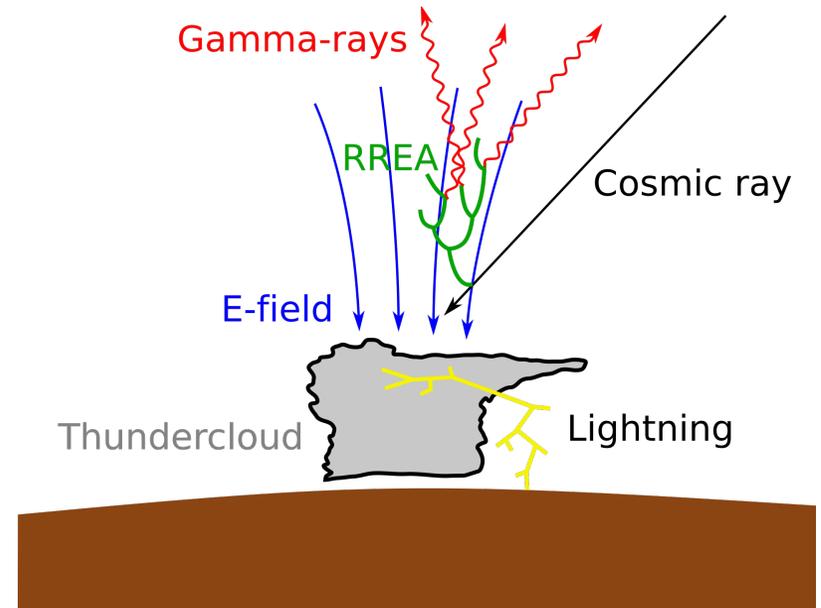


解析のアップデート



地球ガンマ線現象 (Terrestrial Gamma-ray Flash: TGF)

- 雷に伴うガンマ線フラッシュ (上向き)
- 継続時間が極めて短い: 0.01—3.5 ms

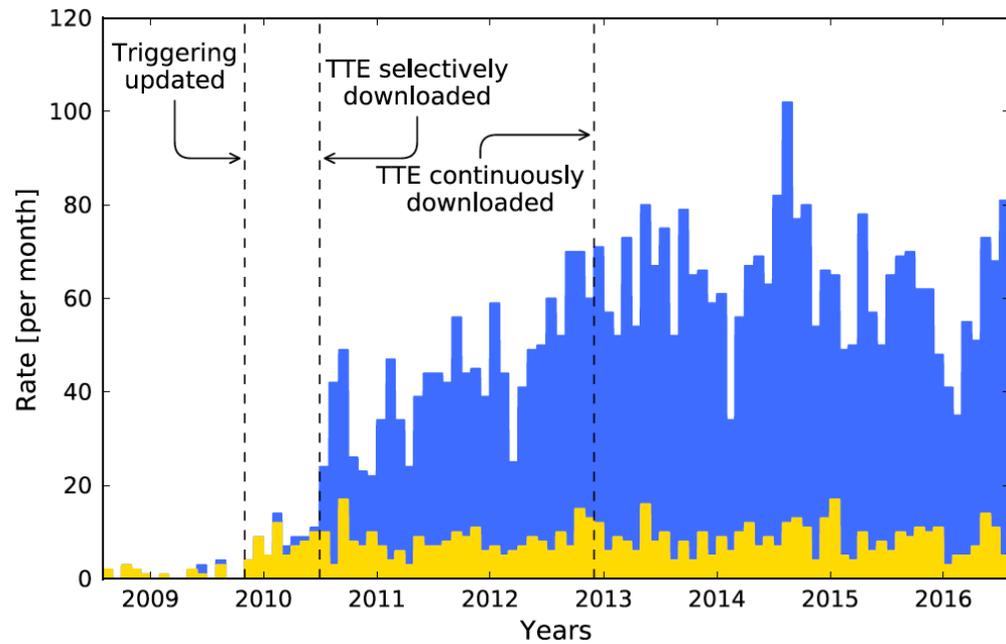


© Wikipedia

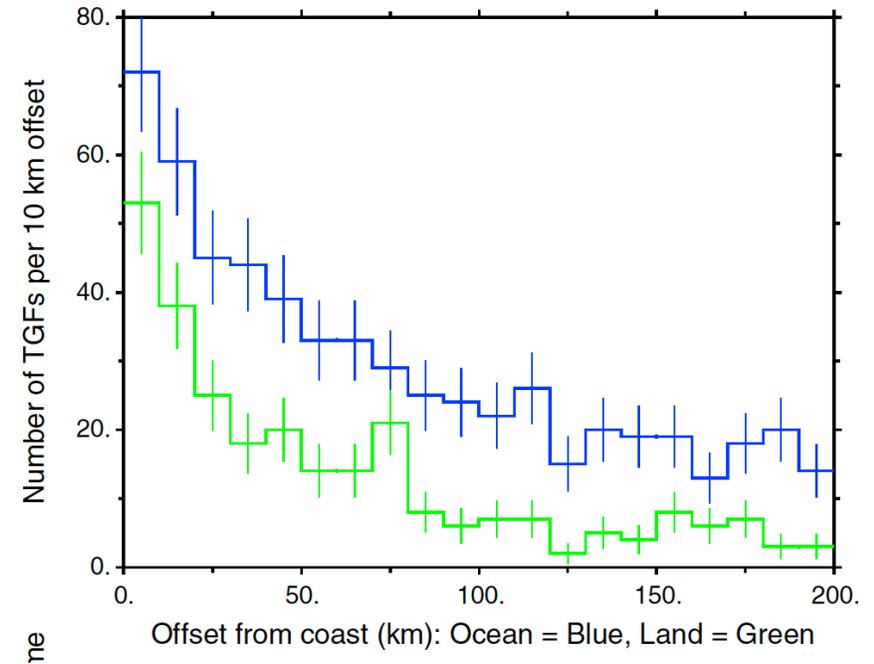
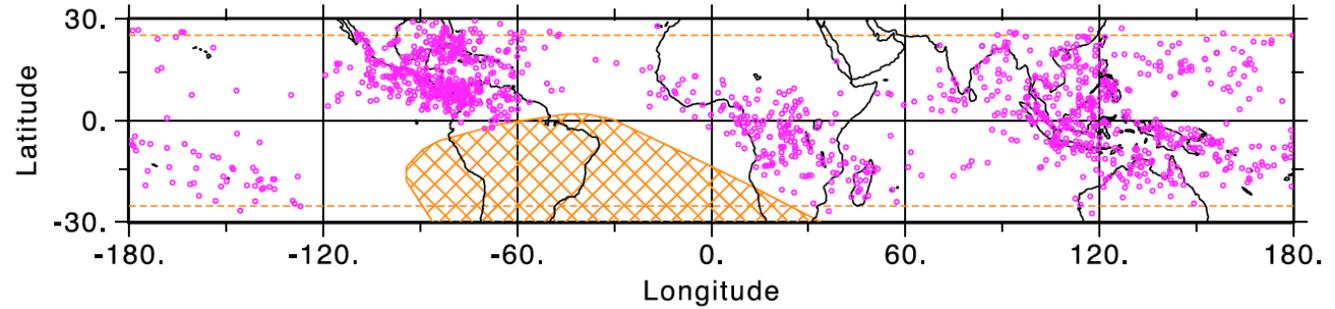
- BATSEが発見 (Fishman et al. 1994)
- RHESSI, Fermi, AGILE, BeppoSAX, ASIMが多数観測

発生場所と頻度

Fermi/LAT が検出した TGF



発生頻度: 2 回/日!



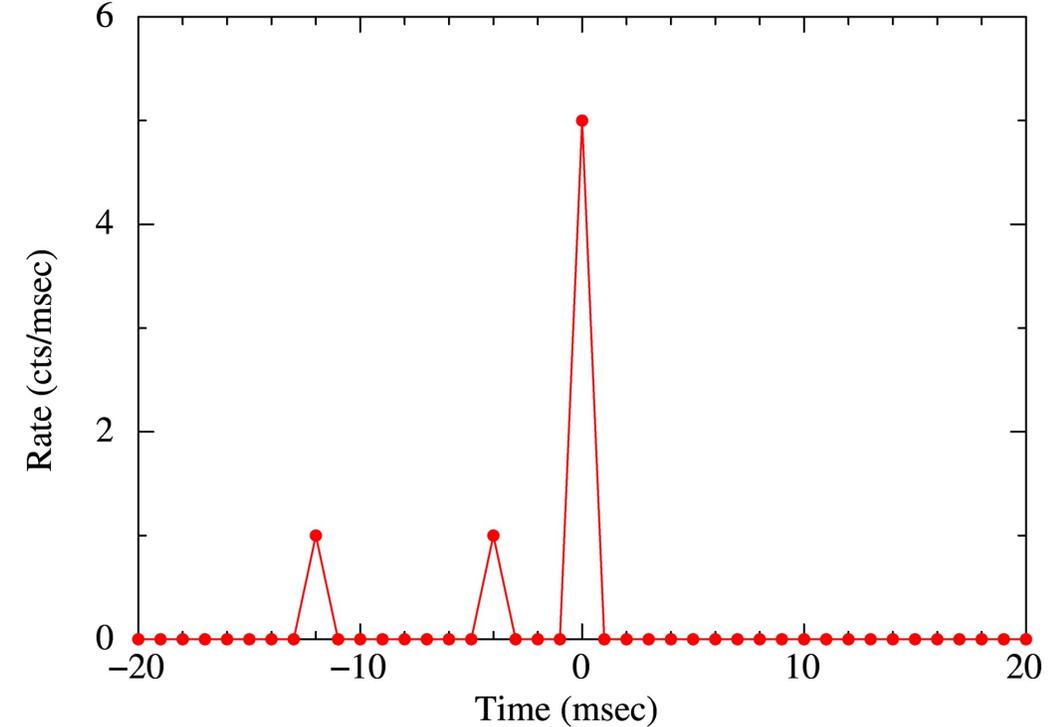
海岸沿いに集中する → 雷の発生領域に一致

Suzaku/GSOのデータ解析手順

- Unfiltered events からライトカーブを描く。
- Filtering 条件は gso_mkf.sel。但し、 $ELV < 0$ で地没のみ抽出した。昼地球と夜地球は区別しない。
- 時間ビン 1 ms、70-250 keV 帯域でライトカーブを出す。
- Count rate => 5 cts/ms のビンを含むデータを探査。
- 「すざく」の全データ(~2300 sequences)を解析。生成ファイル含め 8TB ほどのデータ容量。
- チェックしたライトカーブ(including target observations)のトータル時間は 170 Msec。観測時間 60 ksec/day とすれば、7.8 yr 相当。概ね全データをカバーできていそう。

結果

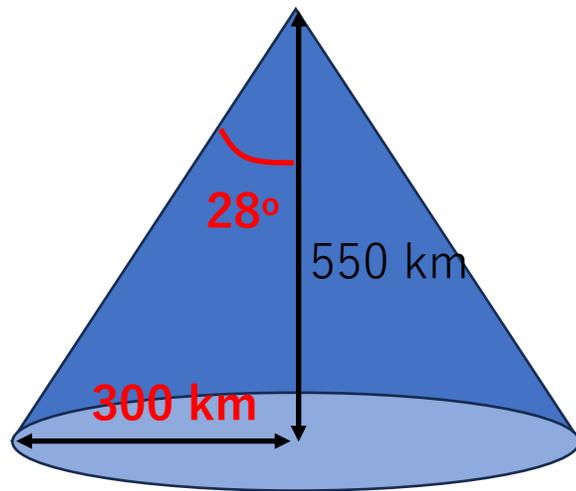
- 5回引っかかった。ただし全て5 cts/ms とギリギリ。前後 100 ms もチェックしたが、周辺にまたがっているわけでもない。
- Suzaku/WAM のトリガー・リスト <https://darts.isas.jaxa.jp/astro/suzaku/data/wam/wam.html> を見ても同期するイベントはなかった。結局、Suzaku/GSO では1発も検出できず。その確率はかなり低い。
- なぜ？
→ 反同時計数でTGFがBG判定を受けた。また、時間分解能が足りず、パイラルアップしている可能性もある。by 中澤さん、和田さん。



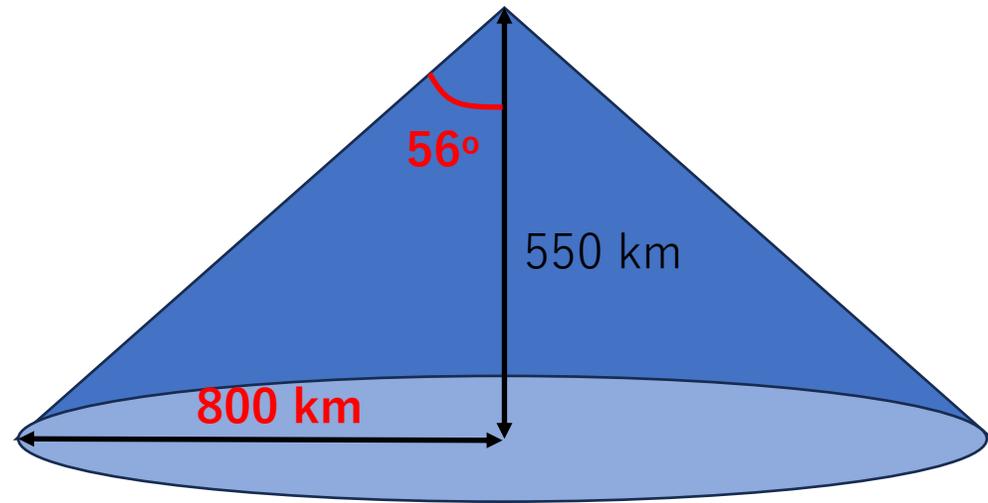
Backup slides

Suzaku/GSOとRHESSI, Fermiの視野比較

RHESSI, Fermi は全天サーベイ型。地球方向を完全カバーしているが、実際には大気吸収のため遠くのイベントは見えない。観測可能範囲は、衛星直下点から 300 km とか 800 km とか言われている。



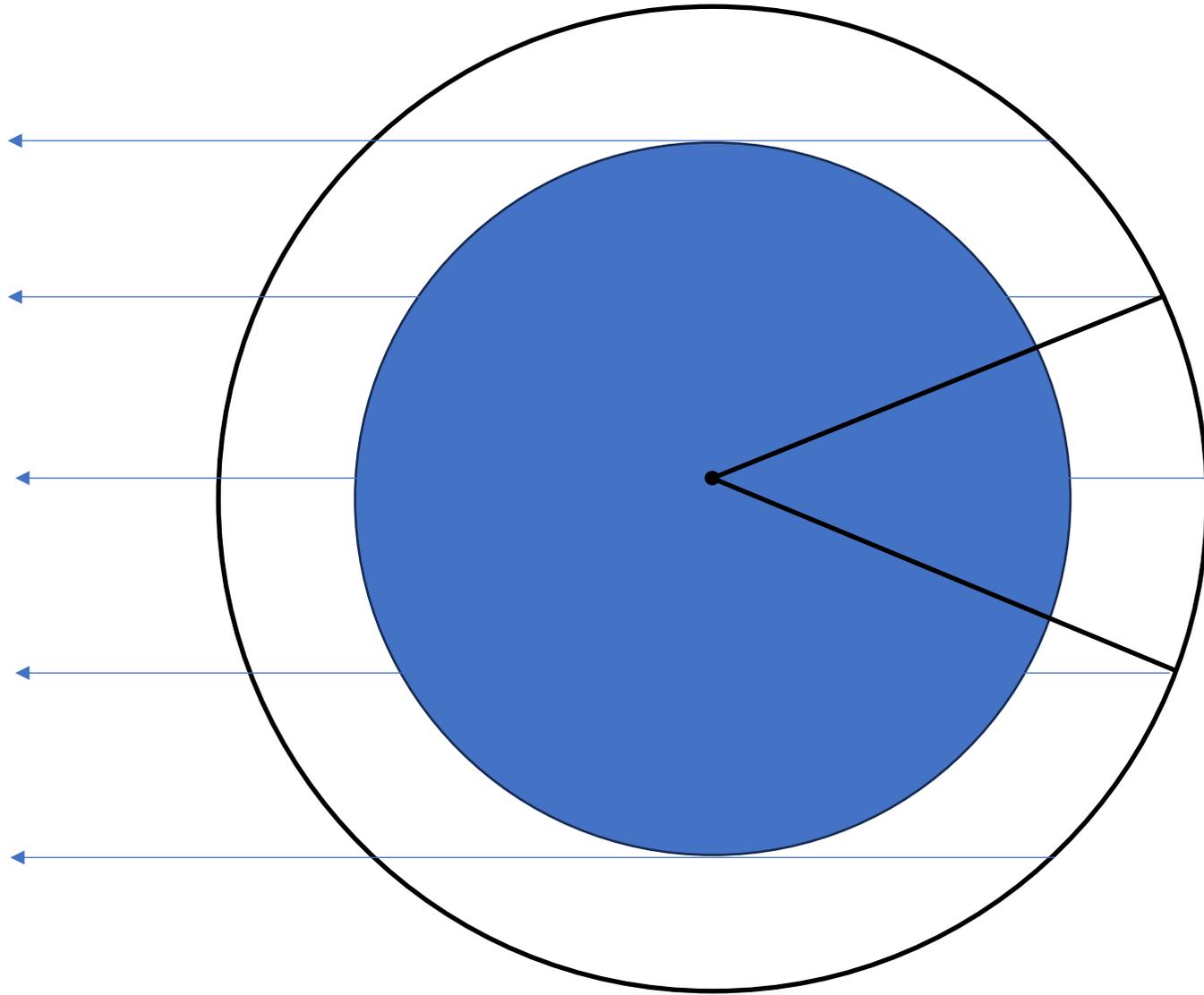
$$d\Omega = 0.73 \text{ str}$$



$$d\Omega = 2.77 \text{ str}$$

Suzaku/GSO の視野: $4.5^\circ \times 4.5^\circ \sim 0.0062 \text{ str}$
 $\Rightarrow 0.0085 \text{ wrt. the case for } 300 \text{ km}$
 $\Rightarrow 0.0022 \text{ wrt. the case for } 800 \text{ km}$

Suzaku/GSOのTGF観測効率



衛星直下点とポイティング方向のなす角が
~30°以下となる領域
が観測可能範囲だろう。

=> 1周回の1/6程度のみ、
TGFを検出する可能性がある。

Suzaku/GSOが TGF を検出する頻度見積もり

- Rate $\sim 0.3 (R_{\text{TGF_Fermi}}/800 \text{ yr}^{-1}) (F_{\text{FOV}}/0.0022) (F_{\text{orbit}}/0.167) \text{ yr}^{-1}$
or
- Rate $\sim 1.1 (R_{\text{TGF_Fermi}}/800 \text{ yr}^{-1}) (F_{\text{FOV}}/0.0085) (F_{\text{orbit}}/0.167) \text{ yr}^{-1}$
or
- Rate $\sim 0.15 (R_{\text{TGF_RHESSI}}/400 \text{ yr}^{-1}) (F_{\text{FOV}}/0.0022) (F_{\text{orbit}}/0.167) \text{ yr}^{-1}$
or
- Rate $\sim 0.5 (R_{\text{TGF_RHESSI}}/400 \text{ yr}^{-1}) (F_{\text{FOV}}/0.0085) (F_{\text{orbit}}/0.167) \text{ yr}^{-1}$

いずれにせよ、Suzaku 10 年間の全観測データを使えば十分検出できそう！

火星大気中のCO₂輝線

XMM-Newton RGS による高分散スペクトル

Dennerl et al. (2006)

