

# 生命存在惑星大気から放射される中性酸素輝線のX線天文衛星による検出可能性推定

宇宙物理実験研究室 16RP039 青木美波

## 概要

初めて系外惑星が発見されてから約25年が経ち、近年、第二の地球を発見することへの期待が高まっている。これまでの系外惑星探査は可視光や赤外線が主流であったが、X線を用いた生命存在惑星検出の可能性を推定することを試みた。生命が存在する惑星の特徴として惑星大気に軟X線帯域で検出可能な中性酸素輝線が含まれるものとし、観測地点より1pc離れた宇宙空間に位置する生命存在惑星をX線天文衛星を用いて検出可能であるかシミュレーションを行った。

## 1. 系外惑星の観測

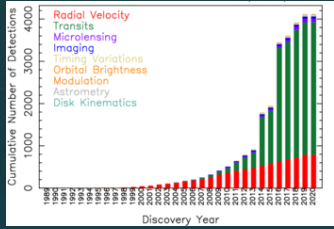


図1: 系外惑星の累計発見数[1]

1995年・・・系外惑星初観測  
4日周期でベガス座51番星の周りを公転する木星型惑星

系外惑星の主な観測方法

- ・ドップラー法
- ・トランジット法
- ・重力マイクロレンズ法
- ・アストロメトリ法
- ・直接観測法

## 2. ハビタブル惑星

定義: 水(液体)が惑星表面に安定して存在できる軌道範囲に存在する惑星[2]

バイオマーカー

定義: 生命活動の痕跡と考えられ、ハビタブル惑星上に生命が存在するかを判断する指標となるもの[3]

- ・中性酸素(O<sub>2</sub>)
- ・オゾン(O<sub>3</sub>)
- ・メタン(CH<sub>4</sub>)と酸素

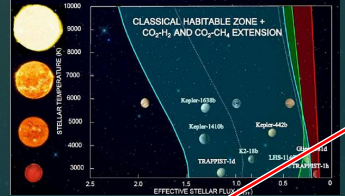


図2: ハビタブルゾーン[4]

## 3. X線天文衛星による地球大気の観測

地球の超高層大気は太陽から放射された荷電粒子やX線の影響を強く受ける。直接観測は難しい領域であるが、日本のX線天文衛星であるASCA衛星とSuzaku衛星は地球の高度約550km付近を周回しており望遠鏡の視野内に地球の一部が写り込んだX線の分光観測データが存在する。これらの観測データを用いた地球大気の研究によって、生命が活動する惑星のテンプレートとして、中性酸素を含む地球大気の高電離度やX線輝度などが計測された。[5]

中性酸素をバイオマーカーとし、地球に似た生命の息する惑星が系外に存在したときにX線天文衛星で検出可能な条件を推定する

## 4. XRISM衛星[6] と Athena衛星 [9]

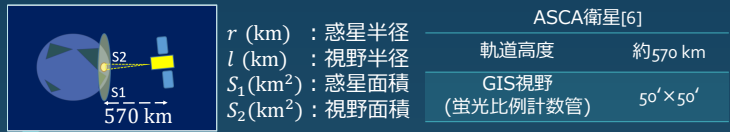
中性酸素はエネルギースペクトルで特定の位置に「輝線」として表れ、輝線への感度は検出器のエネルギー分解能に逆比例する。これまでの検出器の中で最も感度の高いCCDカメラを上回る将来の検出器として、フォノンで分光するマイクロカロリメーターが開発されている。近い将来、マイクロカロリメーターを搭載するのは、2021年度打ち上げ予定のXRISM衛星と2031年打ち上げ予定のAthena衛星である。

衛星	XRISM (Resolve)	Athena (X-IFU)
エネルギー分解能	7 eV (@6 keV)	2.5 eV (<7 keV)
角度分解能	~1.2 arcmin	5 arcsec
有効面積	300 cm <sup>2</sup> (@6 keV)	2 m <sup>2</sup> (@1 keV)

⇒有効面積の広いAthena衛星を想定したシミュレーションを行う

## 5. 系外惑星からのX線強度の推定計算

- ▶ 生命息する惑星は地球と同じ大気組成・大気反射率をもつ惑星であるとする
- ▶ 惑星の中心星は太陽と同じG2V型であるとする
- ▶ 観測対象とする系外惑星と中心星は観測地点から1pcの距離にあるとする



ASCAS衛星[6]

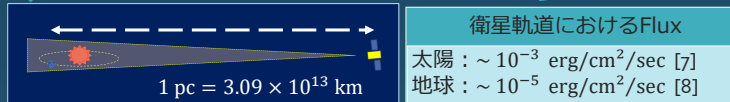
軌道高度 約570 km  
GIS視野 (蛍光比例計数管) 50'×50'

惑星を円盤と見立て面積倍

$$S_1 = \pi r^2 \quad (\text{km}^2)$$

$$S_2 = \pi l^2 \quad (\text{km}^2)$$

$$S_1/S_2 \approx \frac{r^2}{l^2} \approx 1.7 \times 10^7$$



恒星

$$Flux' = 10^{-3} \times \frac{4\pi \times (1.5 \times 10^8)^2}{4\pi \times (3.09 \times 10^{13})^2} \approx 2.4 \times 10^{-14} \text{ erg/cm}^2/\text{sec}$$

惑星

$$Flux' = 10^{-5} \times \frac{4\pi \times (570)^2}{4\pi \times (3.09 \times 10^{13})^2} \times \frac{S_1}{S_2}$$

$$= 8.1 \times \left(\frac{r}{r_E}\right)^2 \times 10^{-21} \text{ erg/cm}^2/\text{sec}$$

※r<sub>E</sub> = 地球半径(6,378 km)

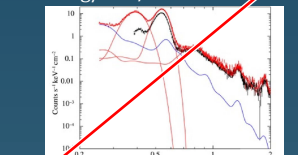
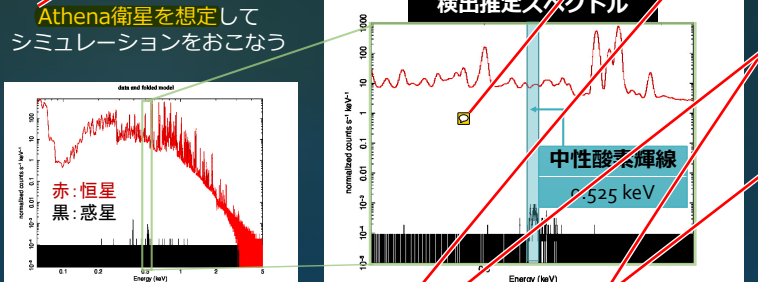


図3: 地球の反射スペクトルの一例 (勝田氏提供)

## 6. シミュレーション結果と考察

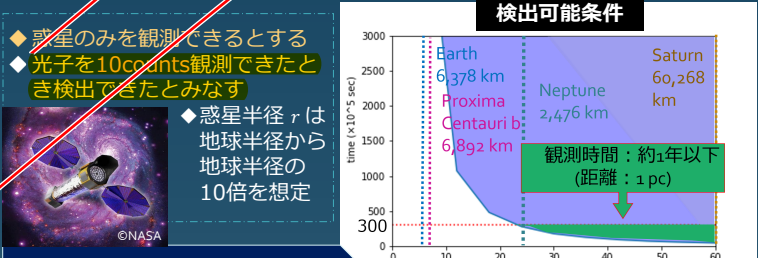


- ◆ G2V型恒星と、地球半径の10倍の惑星を観測対象とする
- ◆ 輝線幅(0.522keV-0.530keV)に入射した恒星由来の光子の数を N<sub>star</sub>, 惑星由来の光子の数を N<sub>planet</sub> とし、 $\sqrt{N_{star}} < N_{planet}$  のとき検出できたとみなす

光子数と観測時間:  $N(\text{counts}) = R \times \text{Exposure time (s)}$  ... 比例関係

$$\sqrt{N_{star}} < N_{planet} \iff R_{star}/R_{planet}^2 \cdot 500 \text{ year} < \text{Exposure time (s/counts)}$$

結果・500年観測すると惑星からの光子をひとりで検出できる  
考察・100倍の有効面積をもつ望遠鏡であれば5年以内に検出可能である  
・恒星と惑星を分けて観測できる高い空間分解能が必要 ⇒ LYNX



◆ 惑星のみを観測できるとする  
◆ 光子を10counts観測できたと検出できたとみなす

◆ 惑星半径 r は地球半径から地球半径の10倍を想定

次世代X線天文衛星 LYNX  
マイクロカロリメーターを搭載し、広い有効面積に加え、優れた空間分解能を持つ

エネルギー分解能	< 3 eV
角度分解能	0.5 arcsec
有効面積	2 m <sup>2</sup> (@1 keV)

全体の結果と考察  
・青色の条件を満たすとき  
中性酸素輝線を検出可能  
・1pcの距離にあるハビタブル惑星の Proxima Centauri bは検出困難

## 7. まとめ

- 観測地点から1pcの距離にある太陽と地球の同型天体をAthena衛星で観測した場合、バイオマーカーである中性酸素輝線を検出するには約500年を要する
- 次世代X線天文衛星LYNXにより恒星と惑星を空間分解できるとすると、1年間以下の観測期間で1pcの距離にある惑星の中性酸素輝線を検出できるのは、およそ海王星半径以上の惑星である

### 参考文献

[1] NASA EXOPLANET ARCHIVE, Exoplanet Plots  
https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/ February 2017.  
[2]海部宜男・星元紀・丸山茂徳、『宇宙生命論』東京大学出版会,2015.  
[3] Nancy Y. Kiang, 『The Color of Plants on Other Worlds』, Scientific American, 2008.  
[4] Ramses M. Ramirez et al. 2019.  
[5]小川風大, 学士論文, 埼玉大学, 2019.  
[6]科学衛星・探査機 | 宇宙線研究所 http://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/, December, 2019.  
[7]COES X-Ray Flux Archive https://www.polarlicht-vorhersage.de/goes\_archive, December 2019. [8]Tohy et al. 2002. [9]The Athena\_Mission\_Proposal.pdf

# 注釈の一覧 : 生命存在惑星の大気から放射される中性酸素輝線の X線天文衛星による検出可能性推定

ページ : 1

- 
-  作成者 : Yukikatsu Terada      タイトル : ハイライト表示      日付 : 2020/02/11 22:13:03  
XRISMを紹介して使用しないのは不自然なので、「要求される観測時間は、有効面積の比の分大きくなる」事を書いておくとよいと思います。
- 
-  作成者 : Yukikatsu Terada      タイトル : ノート注釈      日付 : 2020/02/11 22:07:14  
・このシミュレーションは何秒の計算でしょうか。記載すべき。  
・カウントレート  $R_{star}$ ,  $R_{planet}$  も記載すべき。 ( $R_{star} \sim 6 \times 10^{-2}$  cnt/s,  $R_{planet} \sim 2 \times 10^{-6}$  cnt/s)
- 
-  作成者 : Yukikatsu Terada      タイトル : ハイライト表示      日付 : 2020/02/11 22:08:16  
いや、1 photon 検出は、 $1/R_{planet} \sim 500$  ksec できるはずなので、「恒星の統計の揺らぎよりも有意な検出となる」という表現になります。
- 
-  作成者 : Yukikatsu Terada      タイトル : ハイライト表示      日付 : 2020/02/11 22:11:56  
「前述の条件(1pc, G2V型星の惑星)の惑星ならば」という条件がつくと思います。明示すべき。
- 
-  作成者 : Yukikatsu Terada      タイトル : ハイライト表示      日付 : 2020/02/11 22:10:07  
この記述と上記の「検出」との関係が分かりませんが、「10 cnts 観測した場合、3 sigma detection となる」という表現になるとおもいます。
- 
-  作成者 : Yukikatsu Terada      タイトル : ハイライト表示      日付 : 2020/02/11 22:04:10  
「すぎく」X線CCD、と記載すべき