

# 巨大衛星網による 天文観測への影響と 今後に向けた対策

国立天文台 周波数資源保護室

大石雅寿

[masatoshi.ohishi@nao.ac.jp](mailto:masatoshi.ohishi@nao.ac.jp)

# 本日のアウトライン

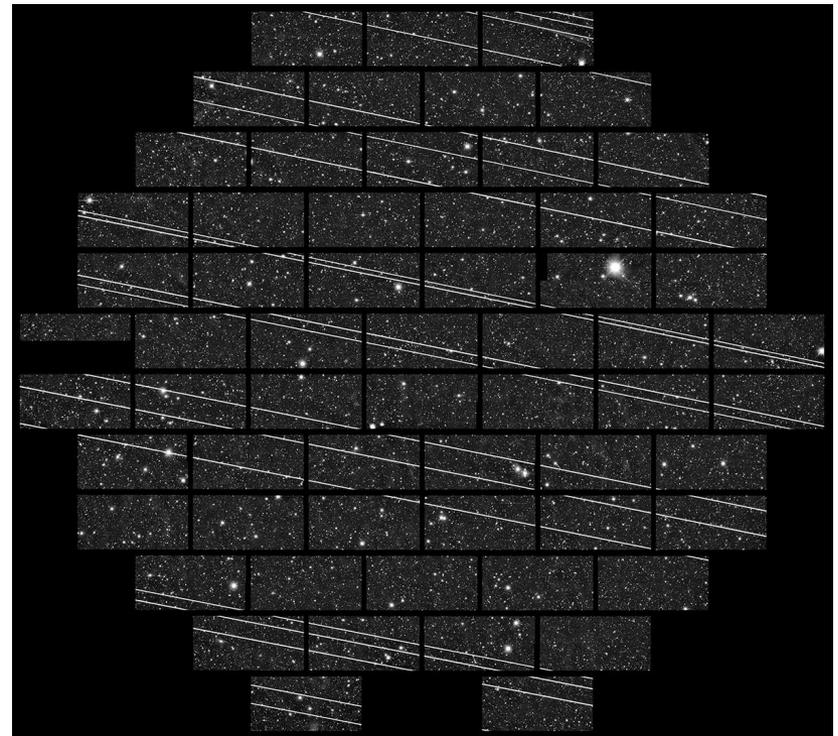
1. メガコンステレーションの概要（Starlink、OneWeb、Project Kuiperなど）
2. メガコンステレーションが天文学に与える影響とその評価
3. 影響軽減に向けた各種努力の現状
4. 国際調整の課題

# 本日のアウトライン

1. メガコンステレーションの概要（Starlink、OneWeb、Project Kuiperなど）
2. メガコンステレーションが天文学に与える影響とその評価
3. 影響軽減に向けた各種努力の現状
4. 国際調整の課題

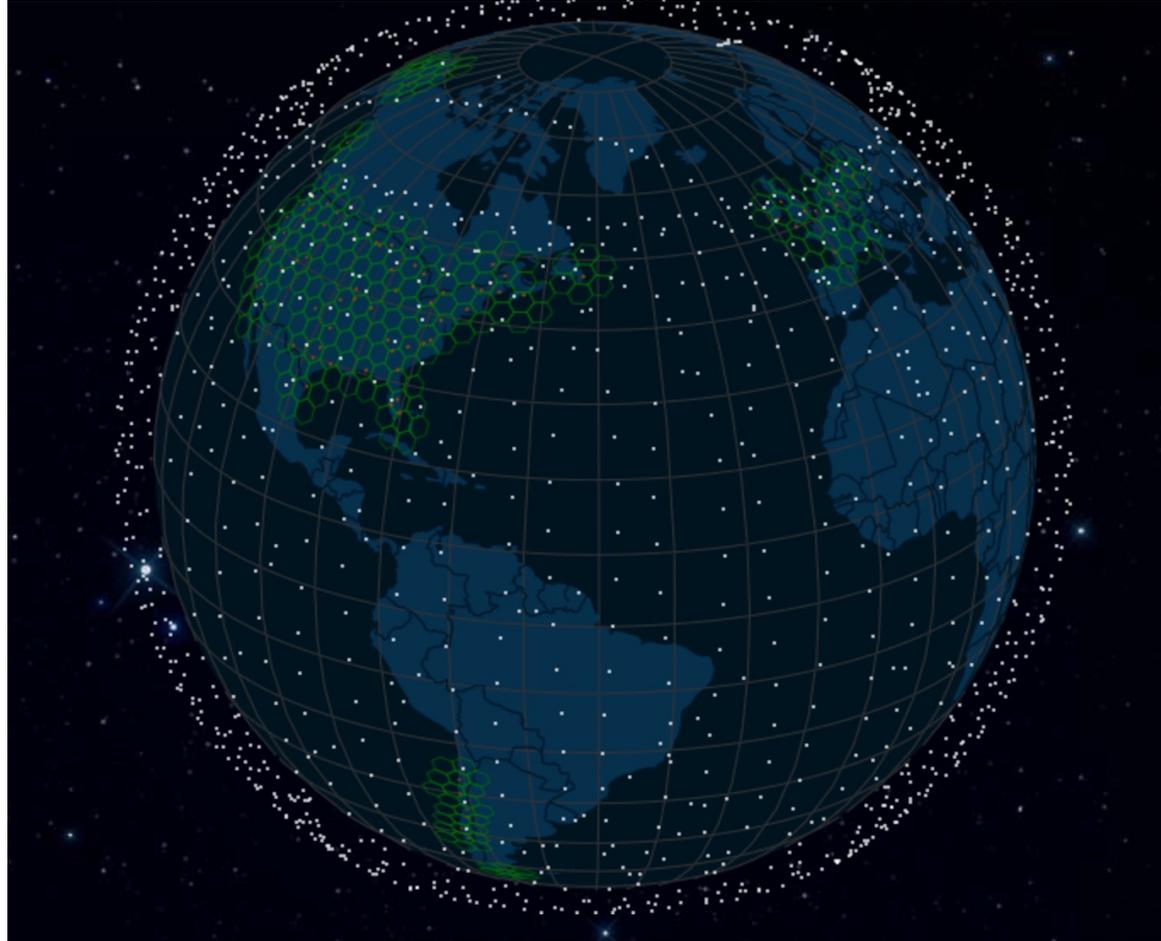
# Mega-Constellations

- Fast internet connection service via >10k satellites
- OneWeb, Starlink, Project Kuiper, ...
- 可視・赤外 & 電波天文に影響を与える
- 問題解決に向け SpaceX と協議



Credit: NSF's National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory/CTIO/AURA/DELVE

# Starlink network in service



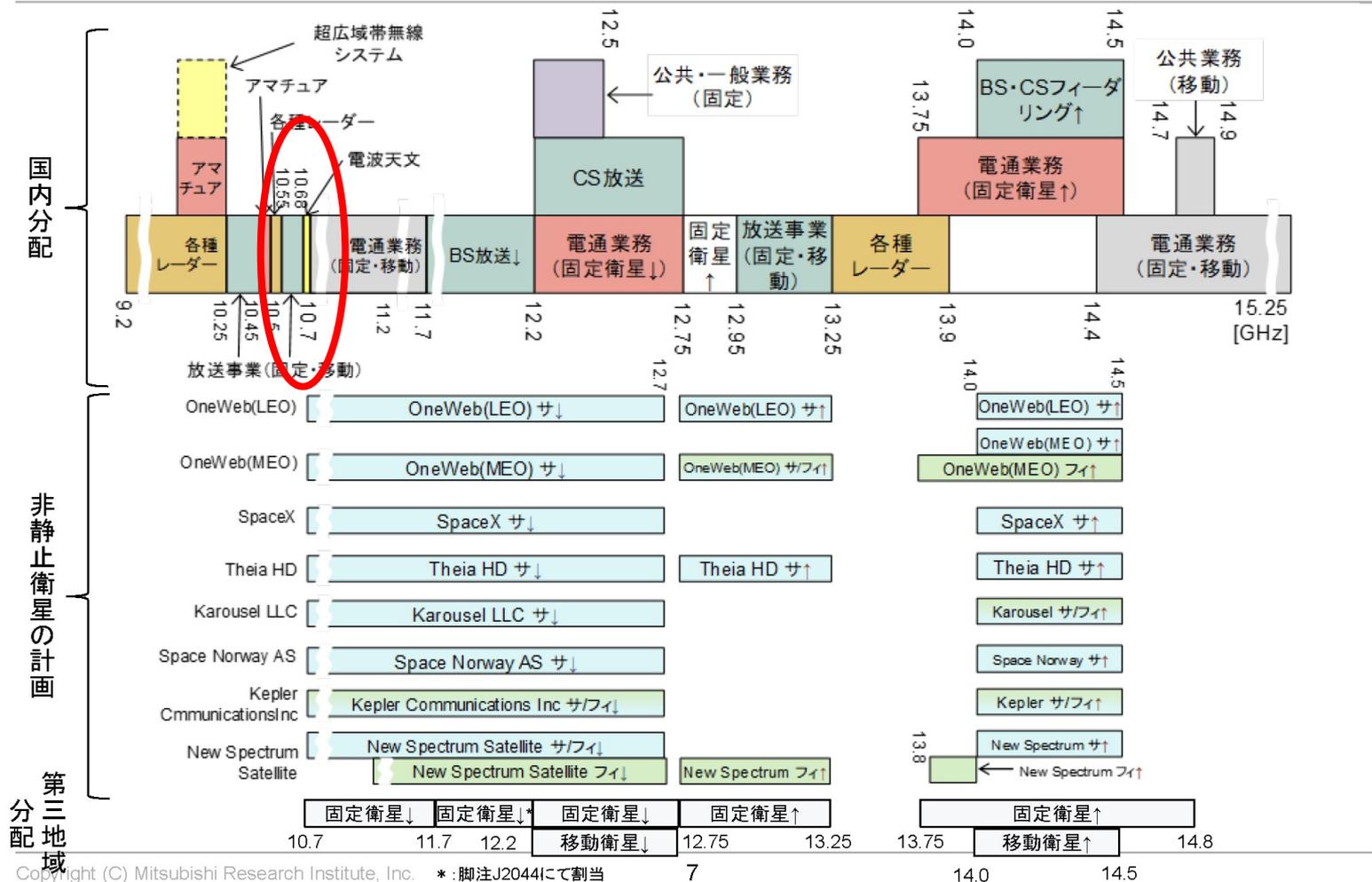
<https://satellitemap.space>

# Project Kuiper by Amazon

- 3,236機を高度590-630kmの軌道に配置
- 2022年第4四半期に2機の試験機を打ち上げ予定(米国FCCに申請中)
- 使用周波数帯は、17-30 GHz
- Space XのVisorsatと同様な庇を搭載し、反射光軽減を狙う

# Megaconstellationの通信バンド

## Ku帯非静止衛星との周波数共用状況(1/2)

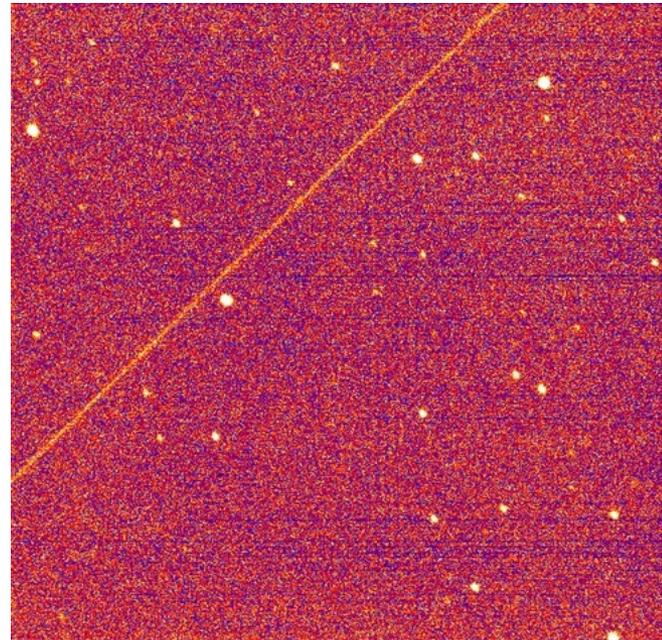


# 本日のアウトライン

1. メガコンステレーションの概要 (Starlink、OneWeb、Project Kuiperなど)
2. **メガコンステレーションが天文学に与える影響とその評価**
3. 影響軽減に向けた各種努力の現状
4. 国際調整の課題

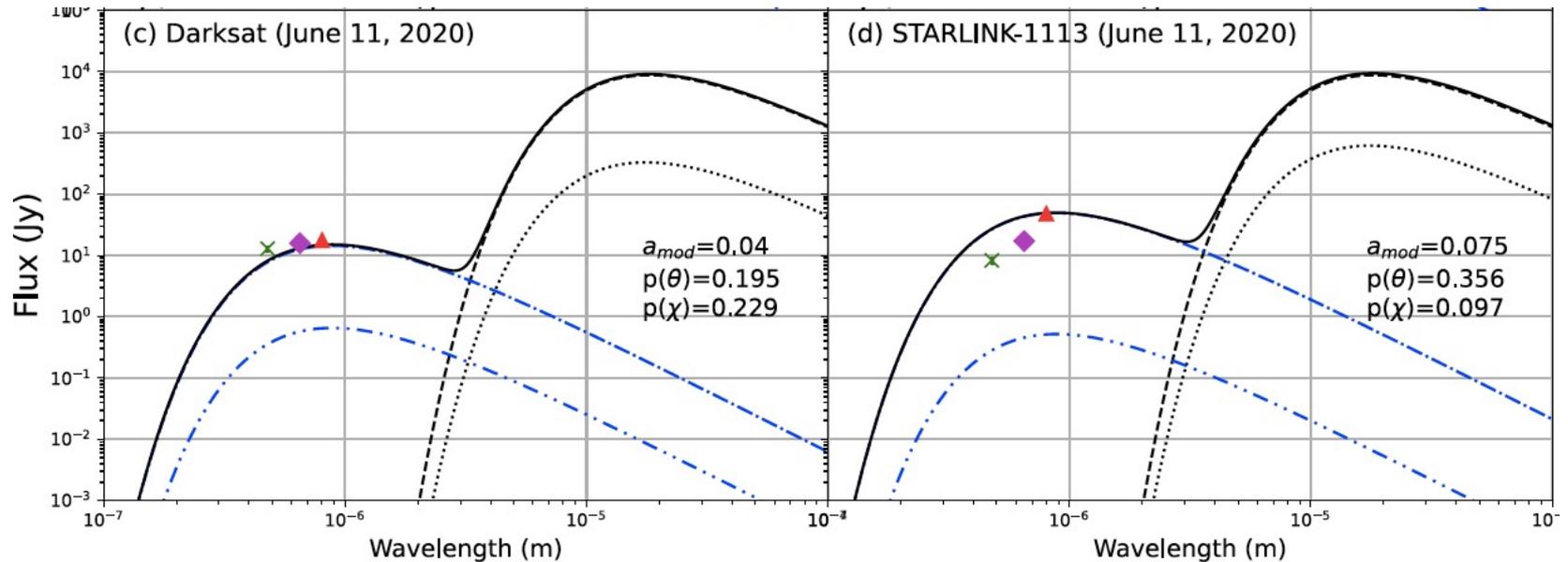
# 影響評価のための基礎データ： 衛星の等級測定

- Starlink:  
高度 ~ 550 km  
→ 移動速度は極めて速い  
~ 2000 arcsec/sec
- TLEを用いて観測時刻での精密な位置予報  
→ 望遠鏡をその位置に向けて固定し、待ち受け観測



# 多色測定

黒体放射をフィット → 衛星表面の反射率を推定

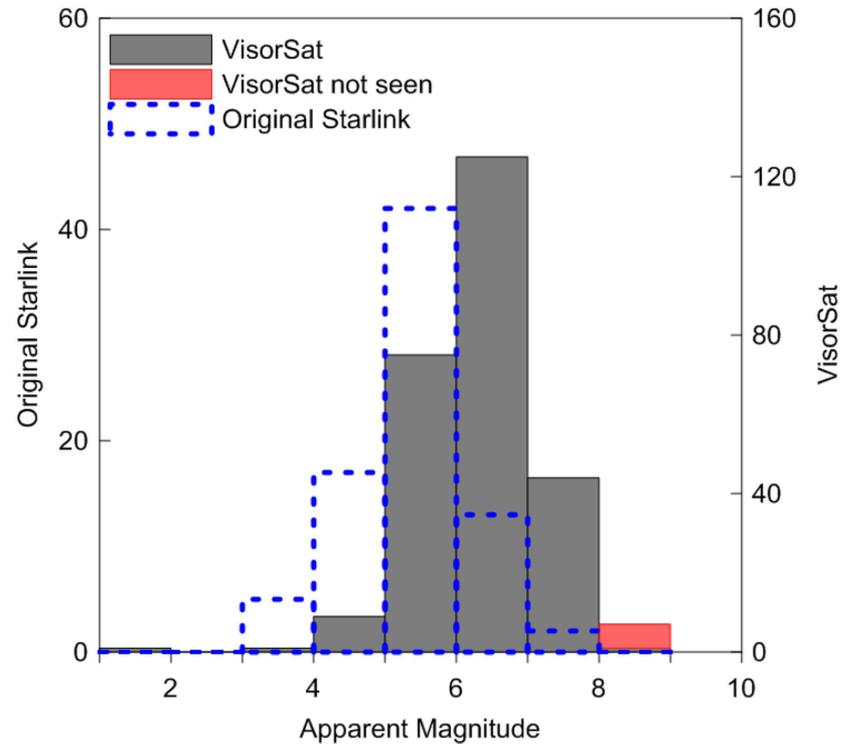
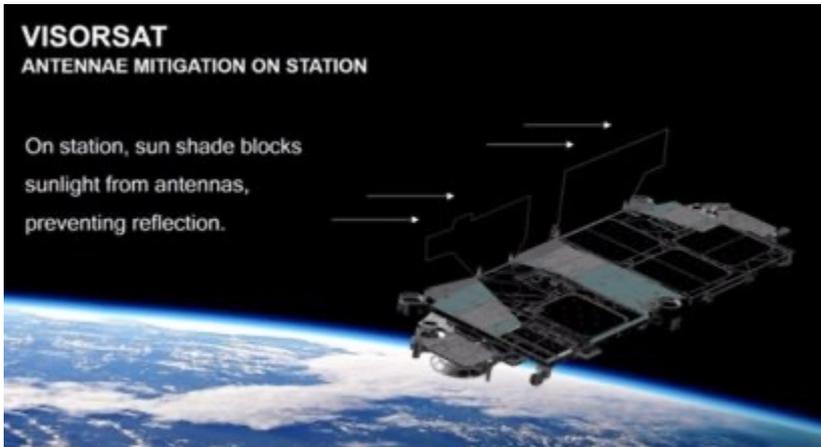


Coated: 4%

Uncoated: 7.5%

OISTERの協力によりより広い波長域で観測 → 詳しくは堀内氏の講演を参照

# 反射光軽減度合いはまだ不十分



Mallama (2020)

# 解決すべき課題(光赤外)

- 衛星等級はまだ明るすぎる ( $> 7$  mag)  
→ 反射光をさらに軽減するための新技術が必要 (e.g., より反射率の低い塗装剤の開発)
- 光赤外域において衛星等級や衛星総数を規制する国際機関がない  
→ 衛星数が多すぎると衝突→デブリ発生の可能性が高まる

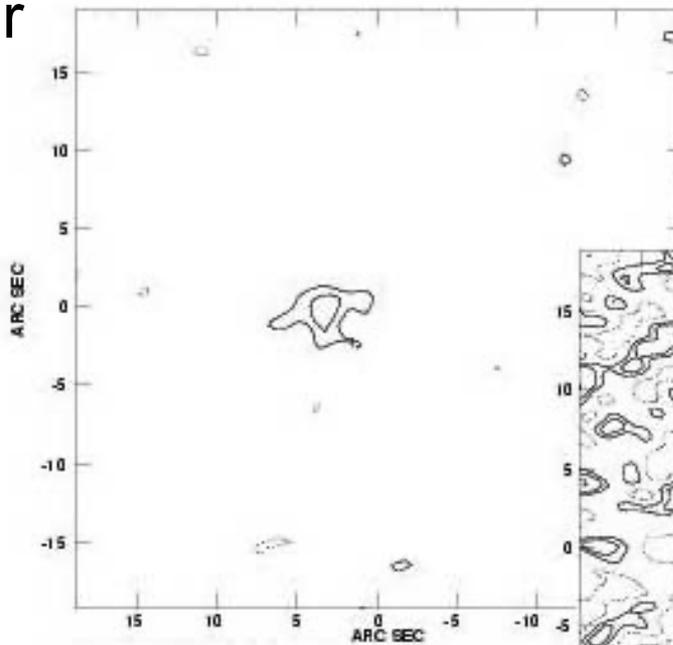
# 本日のアウトライン

1. メガコンステレーションの概要 (Starlink、OneWeb、Project Kuiperなど)
2. メガコンステレーションが天文学に与える影響とその評価
3. **影響軽減に向けた各種努力の現状**
4. 国際調整の課題

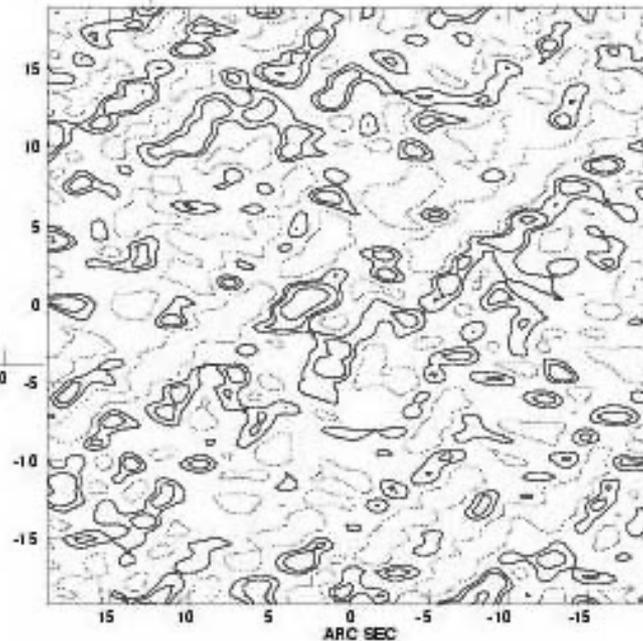
# Interfered image at VLA

Credit: G.B. Taylor, NRAO/AUI/NSF.

star

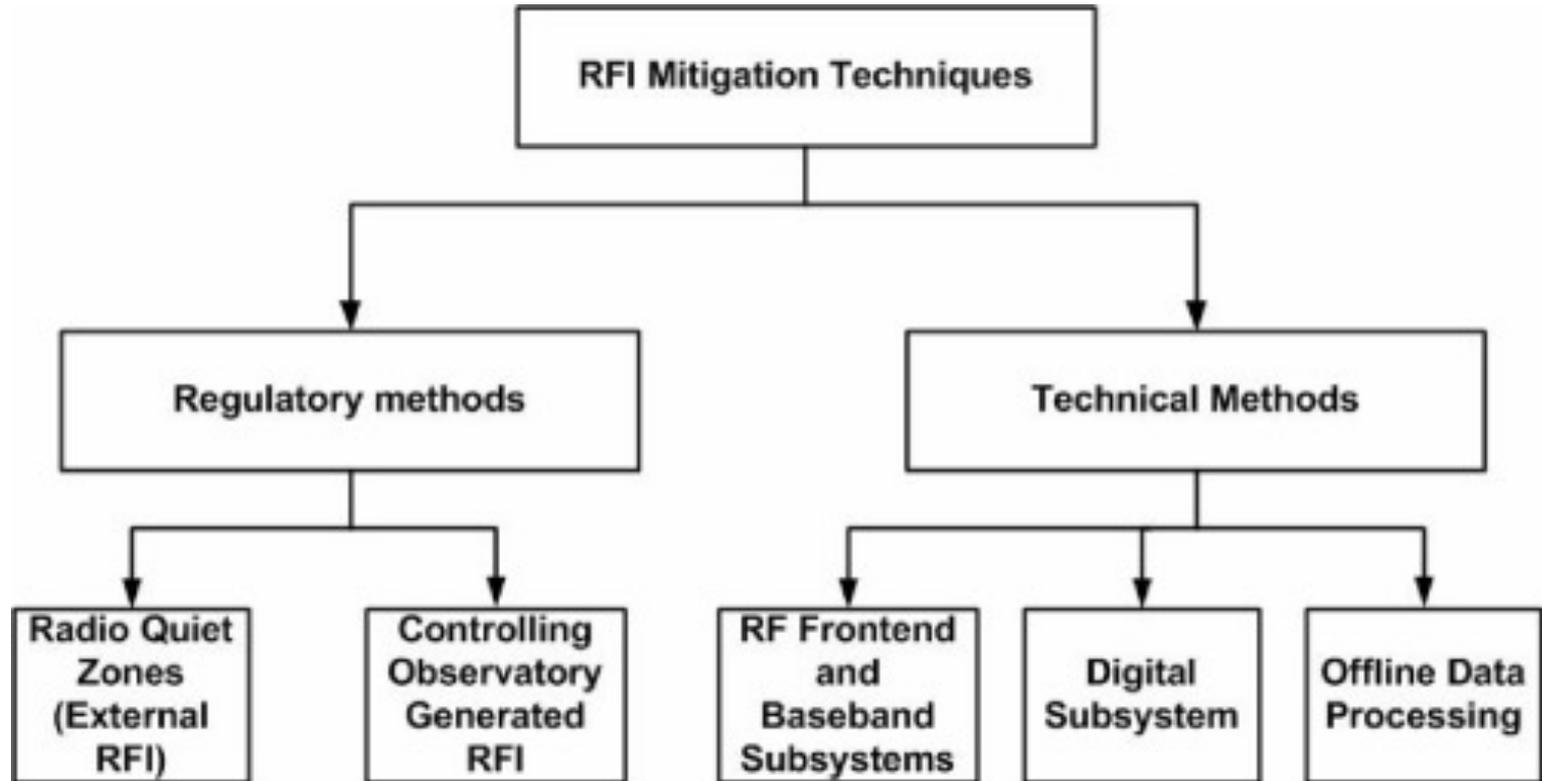


Satellite interference  
25 deg away from the star



No interference

# Radio Frequency Interference Mitigation



J. M. Ford and K. D. Buch, "RFI mitigation techniques in radio astronomy," 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014, pp. 231-234

# 電波域の国際調整機関

- 国際電気通信連合  
(International  
Telecommunication  
Union) @ Geneva
- 国連の特別機関
- 設立以来150年
- 電波天文を扱うようになって約60年



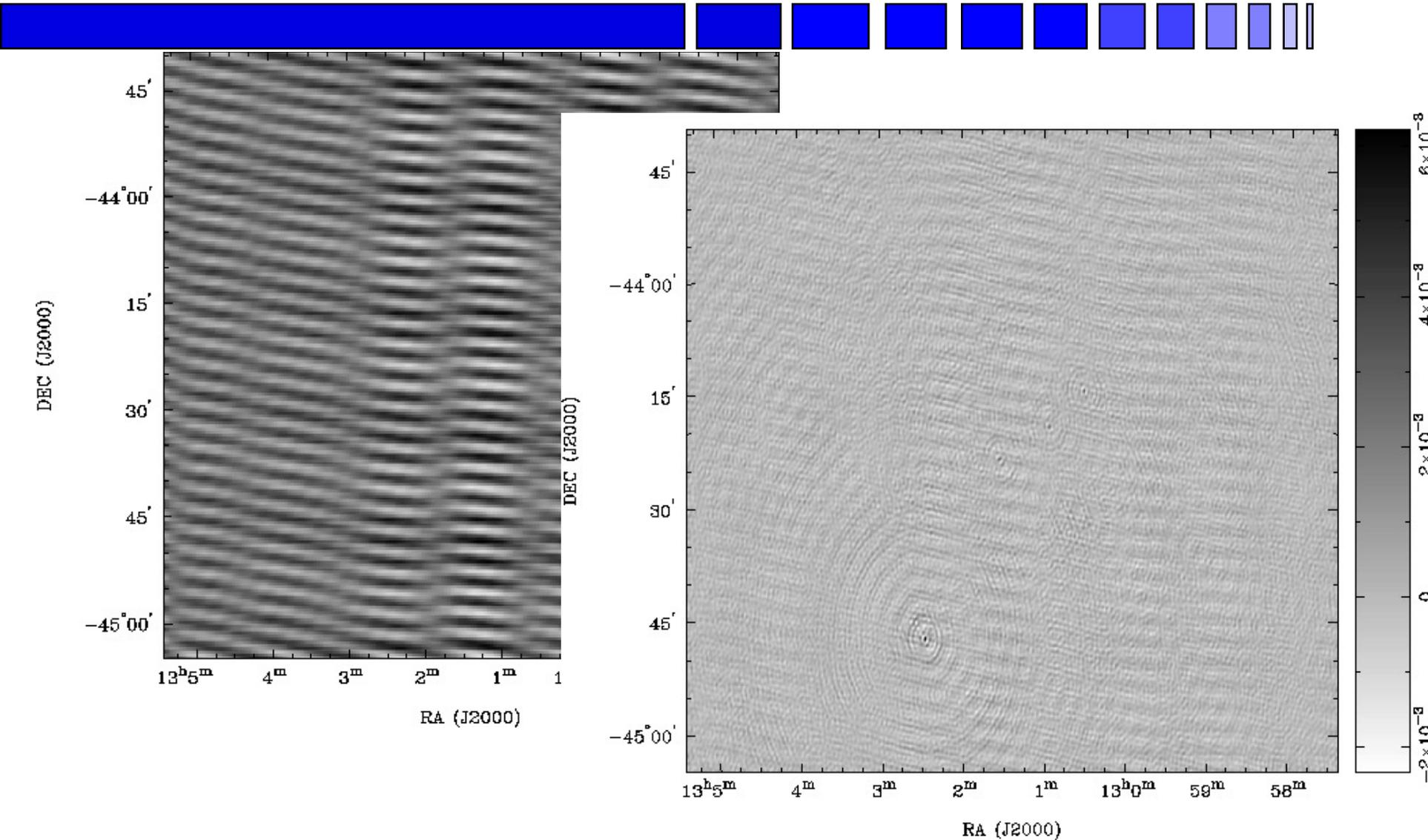
# Coordination with Starlink

- **Satellite → Earth**  
10.7-12.7 GHz  
(service link)  
17.8-18.6 / 18.8-19.3  
GHz (feeder link)
- **Earth → Satellite**  
14.0-14.5 GHz  
(service link)  
27.5-29.1 / 29.5-30.0  
GHz (feeder link)
- 電波天文バンド10.6-10.7 GHzに重大な干渉を与えうる  
  
→ 衛星が電波天文台を「見る」時は、電波天文バンドに隣接するチャンネル (10.7-10.95 GHz) を停止する

# Mitigation Techniques

- RFI excision -- “cutting out” RFIs
  - blanking data
  - array beam-forming to null the direction of RFI sources
- RFI cancellation – “subtracting” RFIs
  - Use of a reference antenna together with post-processing
- Anti-coincidence – RFIs are not coherent in widely-spaced arrays; good for VLBI

# Before and after images



# 光赤外での影響軽減に向けた 衛星事業者との対話

- AAS meeting @ Honolulu, 2020 Jan  
“Challenges to Astronomy from Satellites”  
SpaceXの副社長も参加
- Satcon1/Satcon2  
Elon Muskも登場
- Dark and Quiet Skies Workshop 1/2  
→ レポートを国連宇宙平和利用委員会に提出

より詳しい情勢は、<https://aas.org/posts/advocacy/2021/08/impacts-large-satellite-constellations-astronomy-live-updates>

# 本日のアウトライン

1. メガコンステレーションの概要（Starlink、OneWeb、Project Kuiperなど）
2. メガコンステレーションが天文学に与える影響とその評価
3. 影響軽減に向けた各種努力の現状
4. **国際調整の課題**

# 国連宇宙平和利用委員会

- 宇宙空間をどの国も利用するための調整ルールを策定（政府代表＋オブザーバ）
- **2021 Feb: IAU**からの代表者が、天文観測環境を保護するための勧告を含んだ**DQS WS**レポートを報告
- 各国に問題認識してもらったことはできたものの、勧告がそのまま承認されることはなかった  
→ さらなる検討を要請された

# IAUの動き

- 2021 Jan:  
DQS WS報告書をIAUがアナウンス  
<https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann21002/>
- 2021 June:  
IAU Centre for the Protection of the Dark Sky from  
Satellite Constellation Interference  
<https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann21039/>  
主として光赤外を対象。電波天文はITUで対応可能。

# New IAU Centre

- Work together in partnership to coordinate the observation and measurement of the optical interference caused by satellite constellations.
- Establish contacts with the space companies and industries involved in the construction and deployment of LEO satellites and eventually with their national regulation authorities, in order to discuss and converge on relevant mitigation measures.
- Foster and coordinate the study and testing of hardware solutions aimed at reducing reflected sunlight by the satellites as well as thermal emissions from the satellite surfaces.
- Interface with space agencies in order to get access to accurate and up-to-date orbital parameters of all LEO satellites.
- Work together in partnership to coordinate the development of “smart” scheduling and/or detector operation software as well as specific artifact removal algorithms and distribute them.
- Provide suggestions for possible international regulations governing LEO satellites to the IAU Officers, in support of their pursuing the matter at COPUOS level.
- ...

# IAU 新センターの課題

- 光赤外ではこれまで国際調整経験がほとんどない ←→ 電波天文はITUで60年以上苦勞してきた
- 衛星等級の軽減  
可視域：反射率の低減 – 超低反射率素材の開発  
赤外域：表面温度の低減 – 表面の（受動）冷却
- 衛星事業者によるグローバルサービスへの敬意を払ってこそ共存の道が開ける

# 我々に何ができるのか？

- 地道な等級測定
  - モニター観測 → 位相角と等級との関連を明らかにする（衛星の形状と関係する？）
  - 新しい等級軽減策を施した衛星の等級測定 → 結果を衛星事業者と共有してさらなる改善に資する
- 航跡を消去するデータ処理方法の開発
- 社会からの支持を得る
  - 天文学 vs 衛星ではなく、両方とも社会に必要なであることを社会から支持してもらうための広報・アウトリーチ活動

# 最近出た（る）関連論文

- Astrosat: forecasting satellite transits for optical astronomical observations  
Osborn, J., et al., MNRAS, 509, 1848-1853 (2022)  
<https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/1848/6406501>
- Visibility Predictions for Near-Future Satellite Megaconstellations: Latitudes near 50 Degrees will Experience the Worst Light Pollution  
Lawer, Boley & Rein,  
<https://arxiv.org/pdf/2109.04328.pdf>
- Characterizing the All-Sky Brightness of Satellite Megaconstellations and the Impact on Astronomy Research  
Krantz, Pearce & Block,  
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2110/2110.10578.pdf>

# 国立天文台周波数資源保護室

<https://prc.nao.ac.jp/fregras/index.html>

