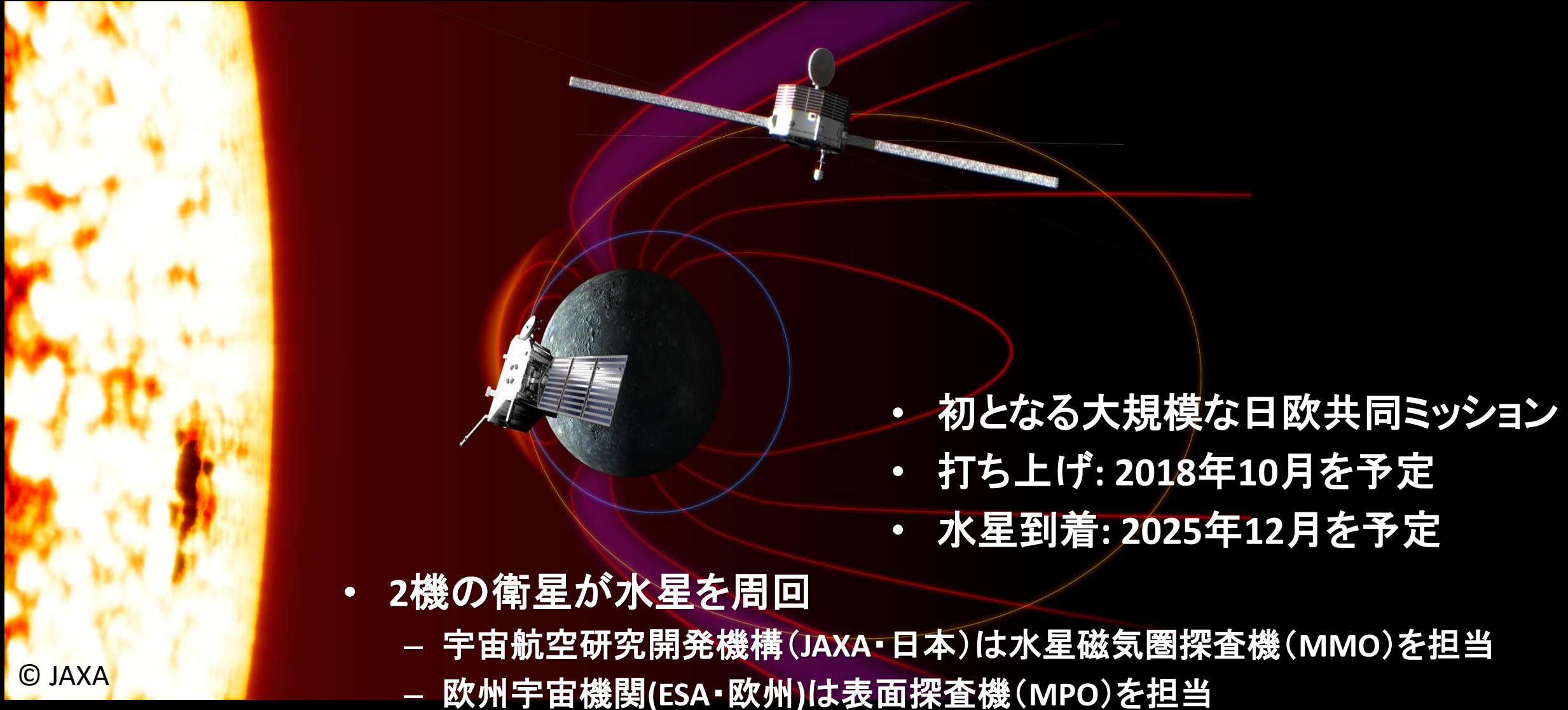


# ベピコロombo (BepiColombo) 国際水星探査計画



- 初となる大規模な日欧共同ミッション
- 打ち上げ: 2018年10月を予定
- 水星到着: 2025年12月を予定
- 2機の衛星が水星を周回
  - 宇宙航空研究開発機構 (JAXA・日本) は水星磁気圏探査機 (MMO) を担当
  - 欧州宇宙機関 (ESA・欧州) は表面探査機 (MPO) を担当

# アウトライン

## 1. 「ベピコロンボ」ミッションの概要

- 名前の由来「ベピコロンボ」って？
- ミッションシナリオ
- 水星までの道のり
- 水星周回軌道投入予定
- MTM(電気推進モジュール)概要
- MPO(水星表面探査機)概要
- MMO(水星磁気圏探査機)概要
- MMOとMPOの観測機器
- 過酷な環境にも耐えるための工夫:熱設計
- 直近2年間の開発状況および今後の予定

## 2. ベピコロンボミッションが目指すサイエンス

### 2.1 太陽系最内縁の惑星

- 3千個以上の太陽系外惑星
- 惑星系の多様性がわかってきた
- 標準モデルが再検討の対象に
- 太陽系の形はもう「当たり前」ではない
- ベピコロンボミッションでフォーカスすべき問題—地質—

### 2.2 磁場をもつ惑星

- 水星が持つ固有磁場
- 地球の磁場
- 北に偏った水星の磁場
- ベピコロンボミッションでフォーカスすべき問題—磁場—

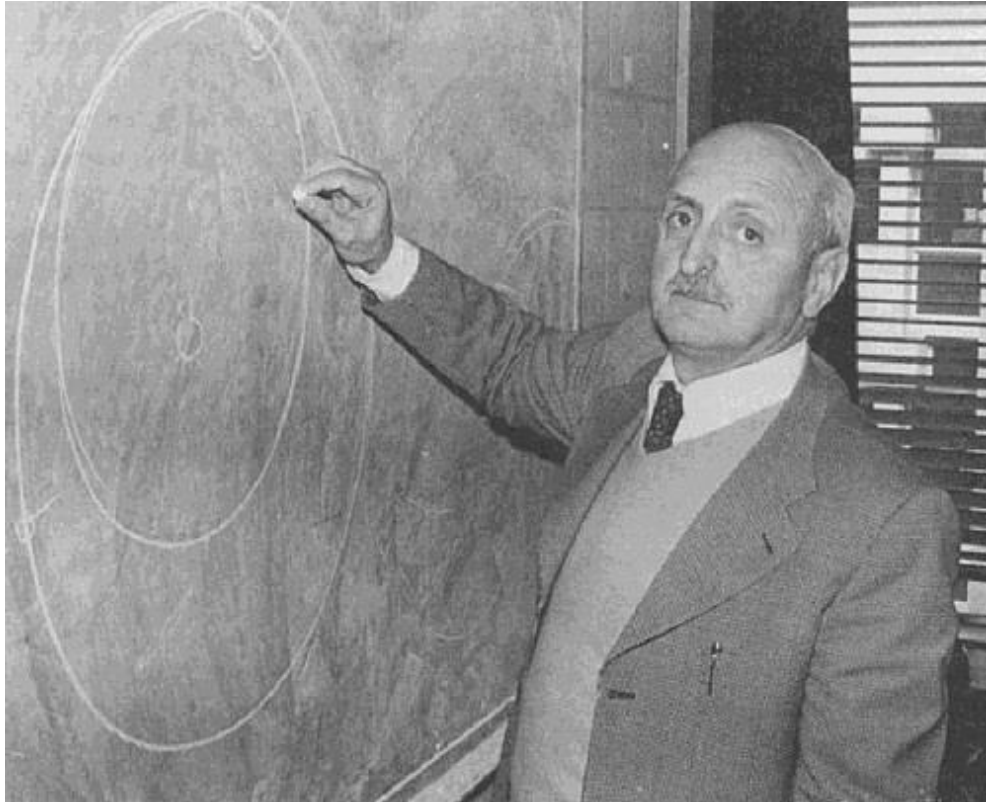
### 2.3 太陽に最も近く、磁場を持つ惑星

- 惑星はつねに太陽風にさらされている
- キーとなるのは…惑星のもつ磁場
- 地球では…
- 太陽に最も近い水星では？
- 地球磁気圏とは「質的に」異なる水星磁気圏
- 宇宙空間と直接つながる水星表面
- ベピコロンボミッションでフォーカスすべき問題—水星周辺の宇宙環境—
- 将来展望:低温星まわりのハビタブル惑星
- 日欧協力の将来展望: MMO から JUICE へ

## 3. 次期国際協力大型ミッションJUICE

# 1. 「ベピコロンボ」ミッションの概要

# 名前の由来「ベピコロombo」って？



Courtesy: BepiColombo Study Report]

ベピコロombo計画の名前は  
ジュゼッペ・コロombo  
Giuseppe Colombo(1920-1984)  
に由来

イタリアの数学者(天体力学)

- ・天体運行の共鳴理論

- ・水星の自転周期と公転周期が正確に2:3であることを数学的に示した

- ・宇宙探査機の航行に惑星の重力を利用した先駆者

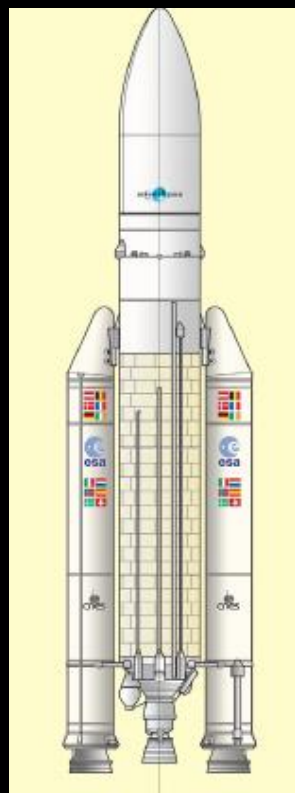
- ・水星探査機マリナー10号(米国)の軌道を設計

- ・"Bepi" (ベピ)は彼のニックネーム

覚えにくければ...私たちは略して「ベッピー」と呼んでます

# ミッションシナリオ

打ち上げ: 2018年度  
@フランス領ギアナ



アリアン5  
ロケット ©ESA

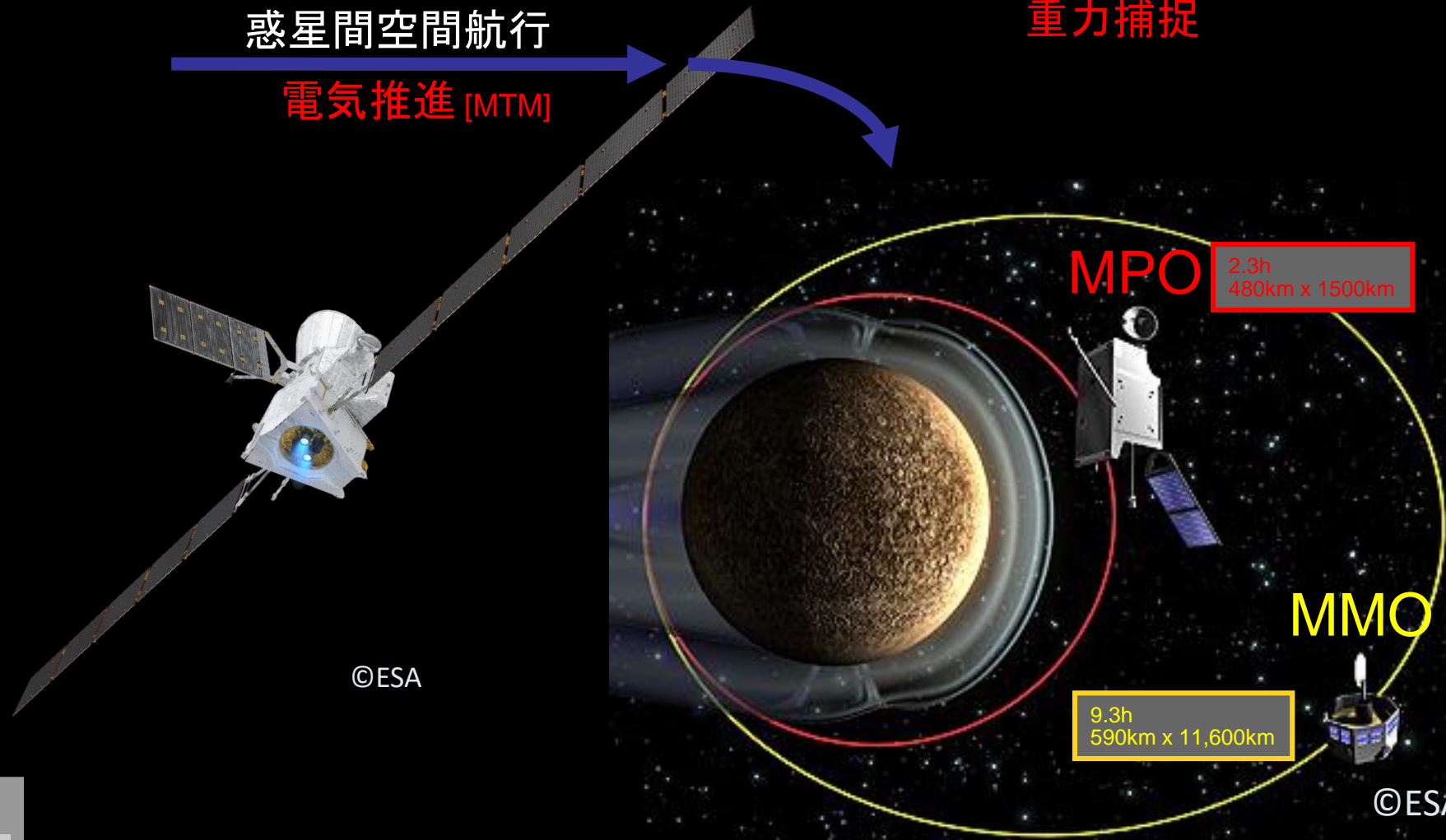
地球フライバイ x 1  
金星フライバイ x 2  
水星フライバイ x 6

惑星間空間航行

電気推進 [MTM]

到着: 2025年12月予定

水星周回軌道投入  
重力捕捉



Yellow: JAXA  
Red: esa

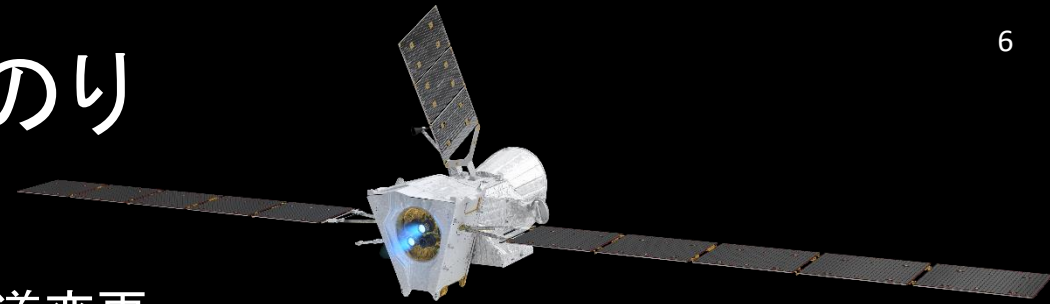
観測期間: 1(+1) 地球年

©ESA

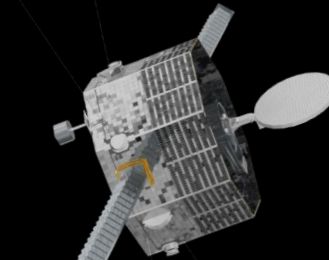
# 水星までの道のり

水星到達後に4つに分離される

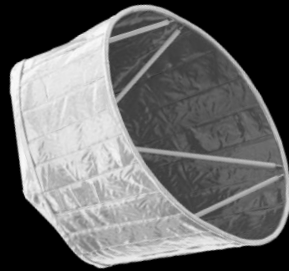
- ・まず電気推進モジュールを分離
- ・水星表面探査機(MPO)の軌道装置で水星周回軌道へ投入・軌道変更
- ・水星磁気圏探査機(MMO)を分離
- ・MMOサンシールド(水星にたどり着くまで、MMOを太陽光から守る)を分離



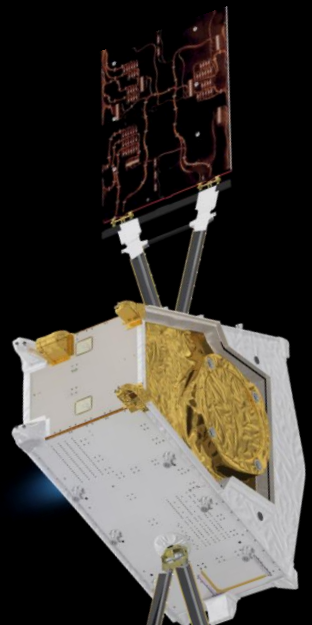
©ESA



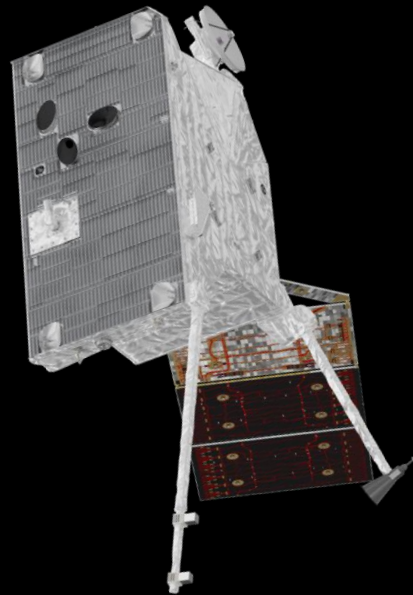
水星磁気圏探査機  
Mercury Magnetospheric  
Orbiter (MMO)



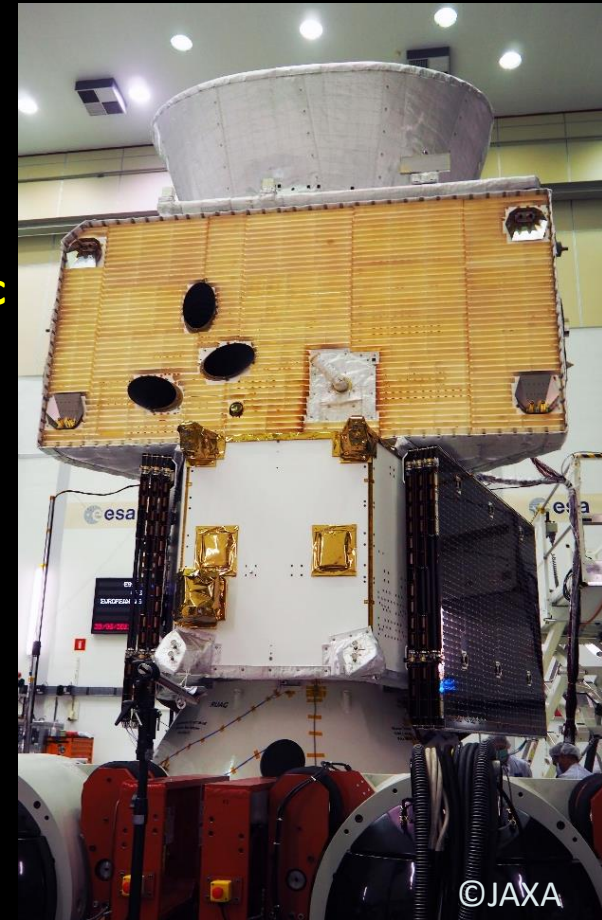
MMOサンシールド  
Magnetospheric Orbiter  
Sunshield and Interface  
Structure (MOSIF)



電気推進モジュール  
Mercury Transfer Module  
(MTM)・イオンエンジン搭載



水星表面探査機  
Mercury Planetary Orbiter  
(MPO)



©JAXA

©ESA

# 水星周回軌道投入予定～2025年に水星へ到着～

平成28 年(2016)	平成29 年(2017)	平成30 年(2018)	平成31 年(2019)	平成32 年(2020)	平成33 年(2021)	平成34 年(2022)	平成35 年(2023)	平成36 年(2024)	平成37 年(2025)
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------



打上



地球フライバイ



金星フライバイ



水星フライバイ



水星周回軌道投入



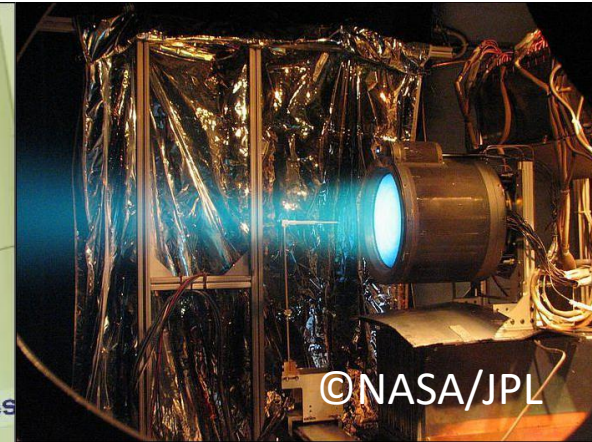
# 水星周回軌道投入予定～2025年に水星へ到着～



# MTM (電気推進モジュール: Mercury Transfer Module) 概要

- 地球から水星周回軌道までMMOとMPOを運ぶ

重量: 約 1870kg (wet)



イオンエンジン: 145mN x 2  
(maximum operation)

太陽電池: 片翼14m



# MPO (水星表面探査機 : Mercury Planetary Orbiter) 概要

- ・ESA担当の3軸制御衛星
  - ・太陽と水星に対して常に同じ角度を保つ姿勢
  - ・水星の表面地形、鉱物・化学組成、重力場の精密計測を目的とする。

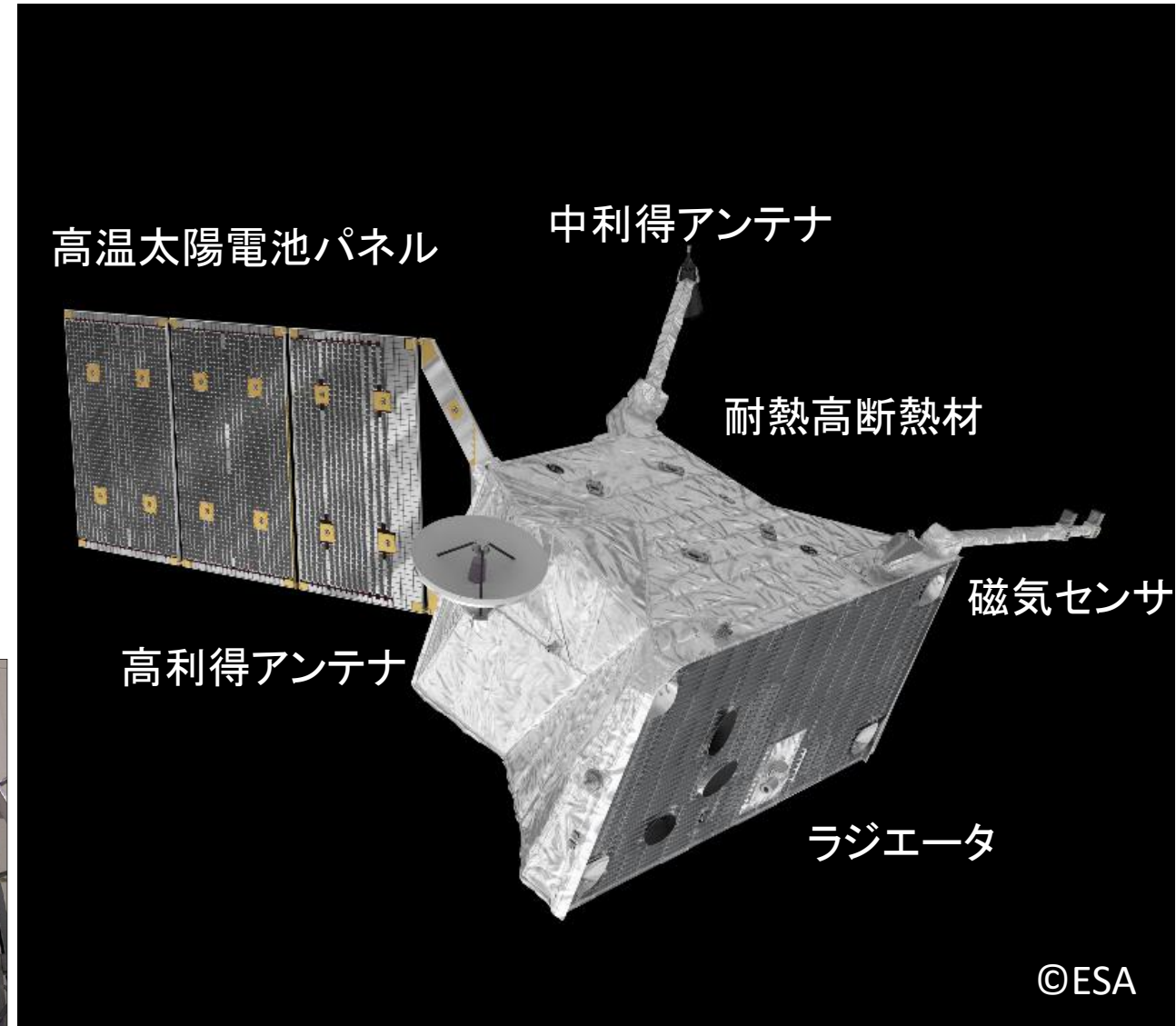
磁気センサが取り付けられた3.2mのマストを持つ。

重量 : 約1,840kg (wet)

太陽電池 : 7.5 m

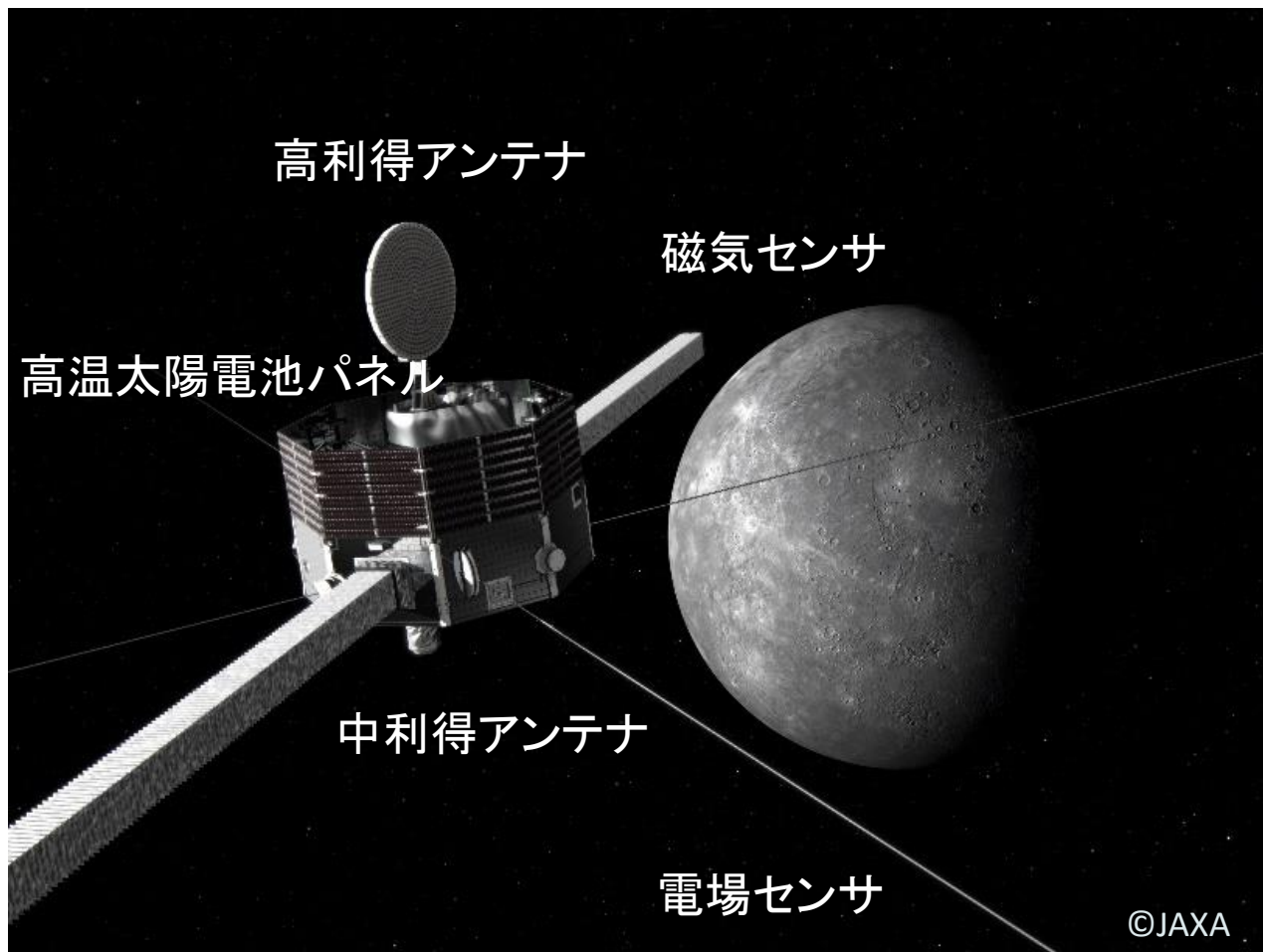


©ESA



©ESA

# MMO (水星磁気圏探査機Mercury Magnetospheric Orbiter) 概要



- ・JAXA担当のスピン衛星(4秒で1回転)  
⇒水星の赤道面にほぼ垂直の姿勢
- ・水星の固有磁場、周辺環境(磁気圏・太陽風との相互作用)、大気の観測を目的とする。

直径1.8mの円に内接する8角柱形状  
高・中利得アンテナを含め高さ約2.4m  
(側面パネルの高さは1.06m)  
2組の5m伸展マスト(磁場観測用)、2対の  
15mアンテナ(電場観測用)を持つ

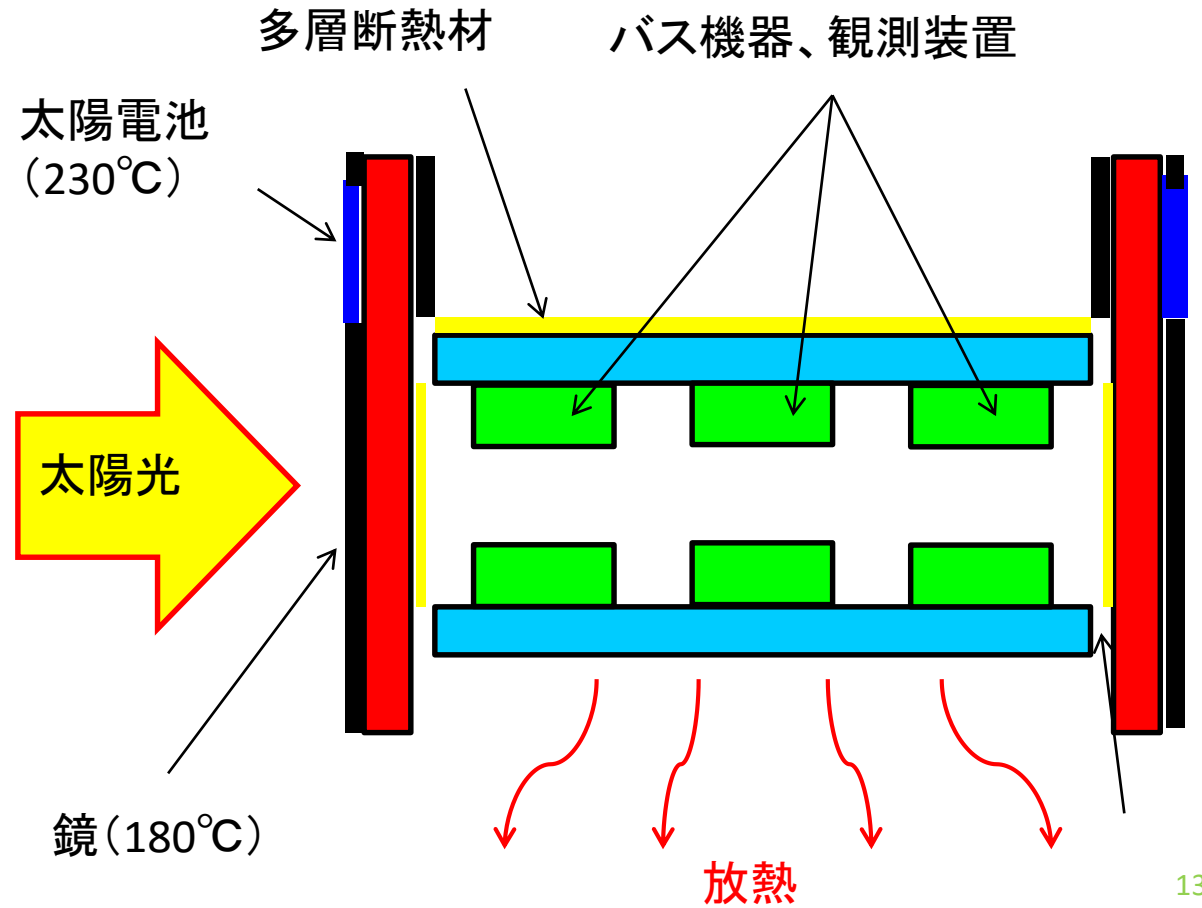
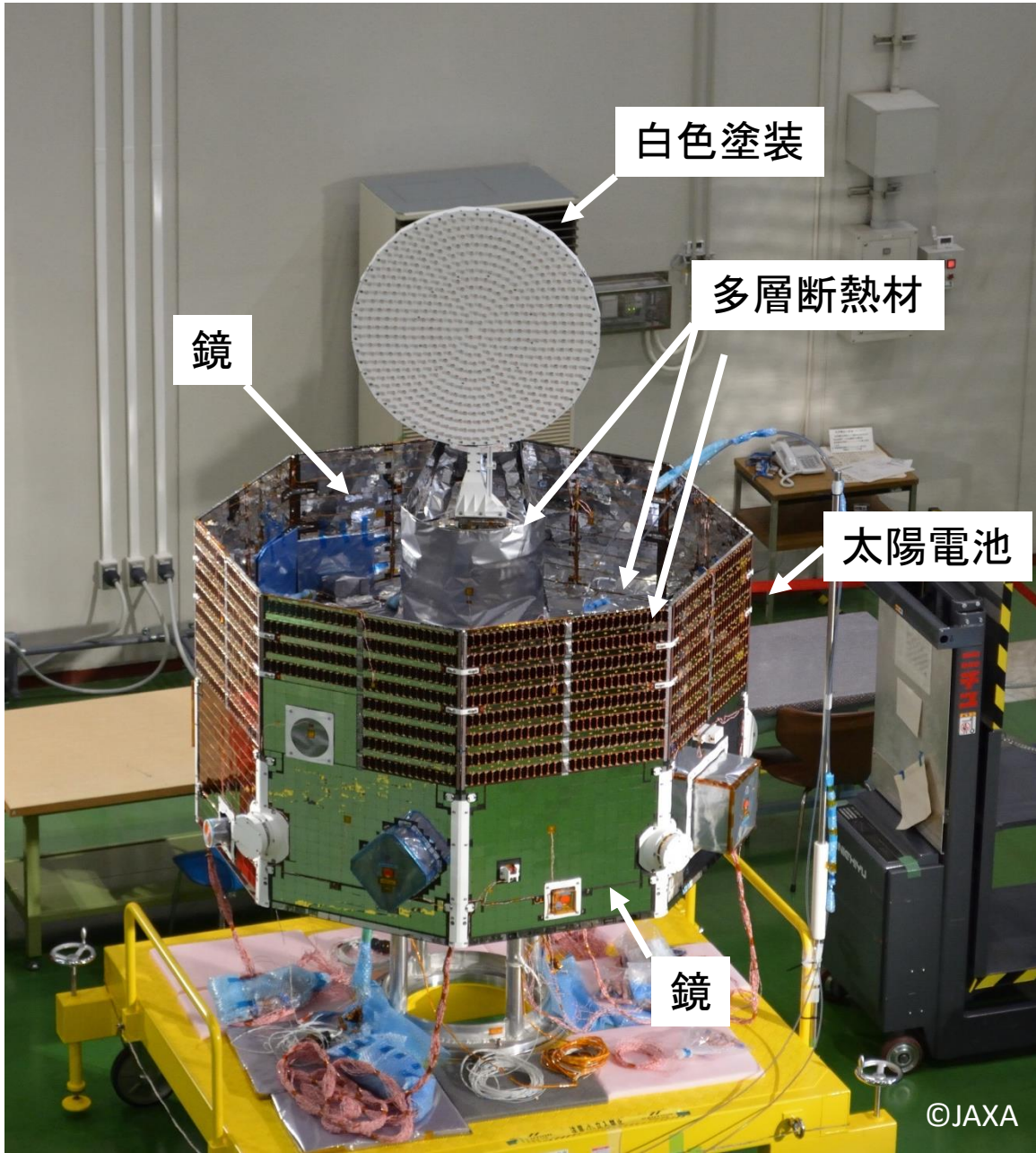
重量: 約280kg

# 過酷な環境にも耐えるための工夫：熱設計

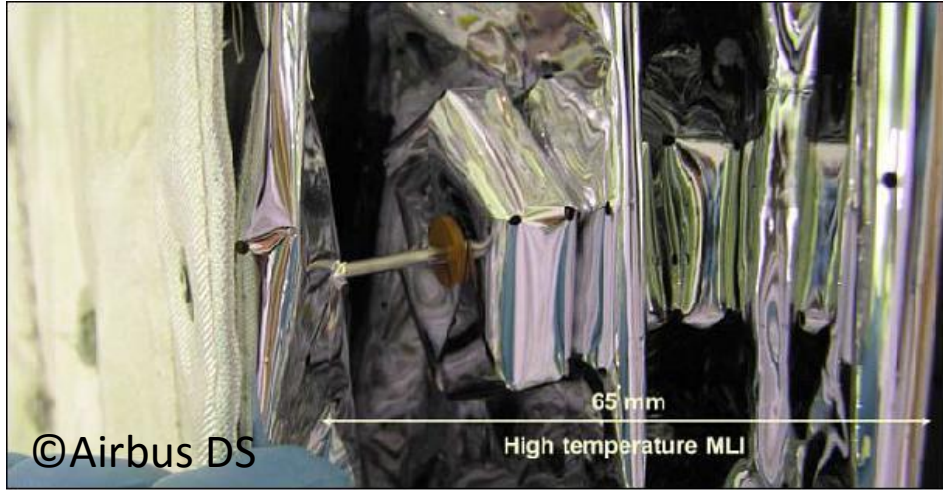


- ・鏡を多用して太陽光の熱入力を小さくすると共に、宇宙空間への放熱効率を上げる
- ・外部露出機器は日よけをつける  
→ 衛星内部への熱の流入を防ぐ
- ・鏡が使えない場所：特別に開発した導電性の白色塗料を用い、温度上昇を抑える
- ・高利得アンテナ(常に地球指向)の裏面(予想最高温度摂氏400度)に、チタンを用いた特別な高温多層断熱材を使用

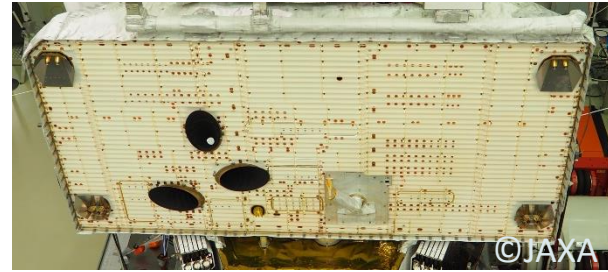
# 過酷な環境にも耐えるための工夫：熱設計



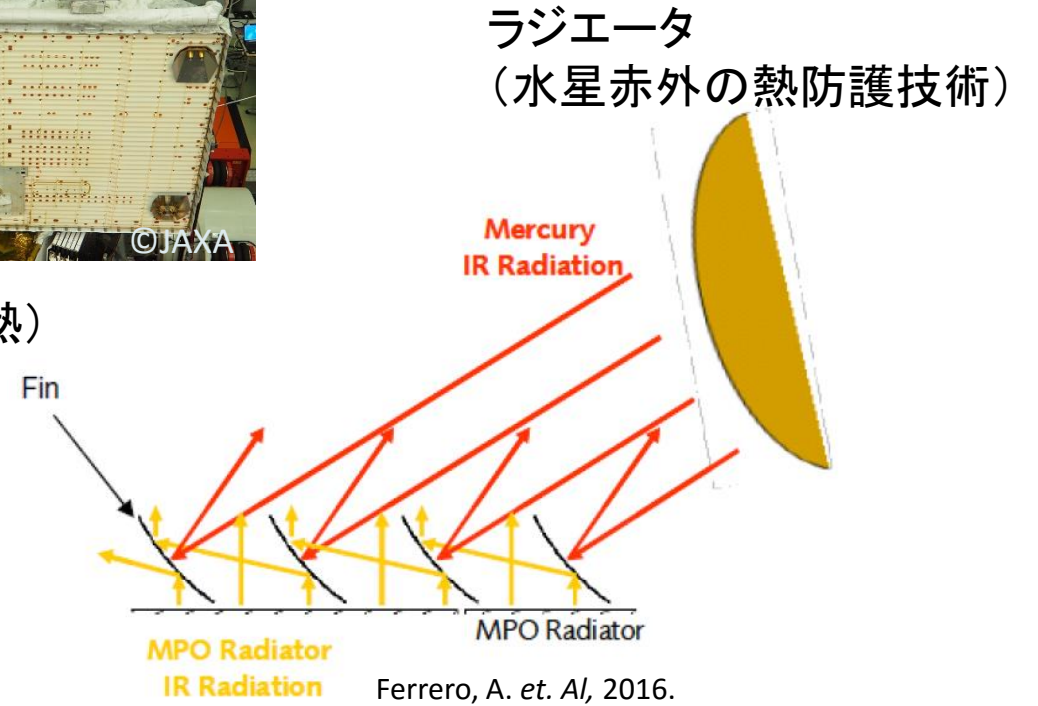
# 過酷な環境にも耐えるための工夫：熱設計 (MPO)



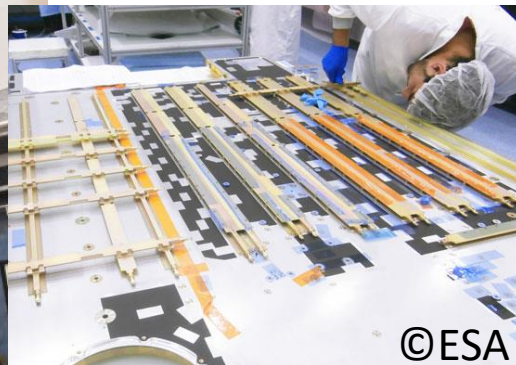
セラミック断熱材 / 2重層MLI(ふく射断熱材)



宇宙側(放熱)



ラジエータ  
(水星赤外の熱防護技術)



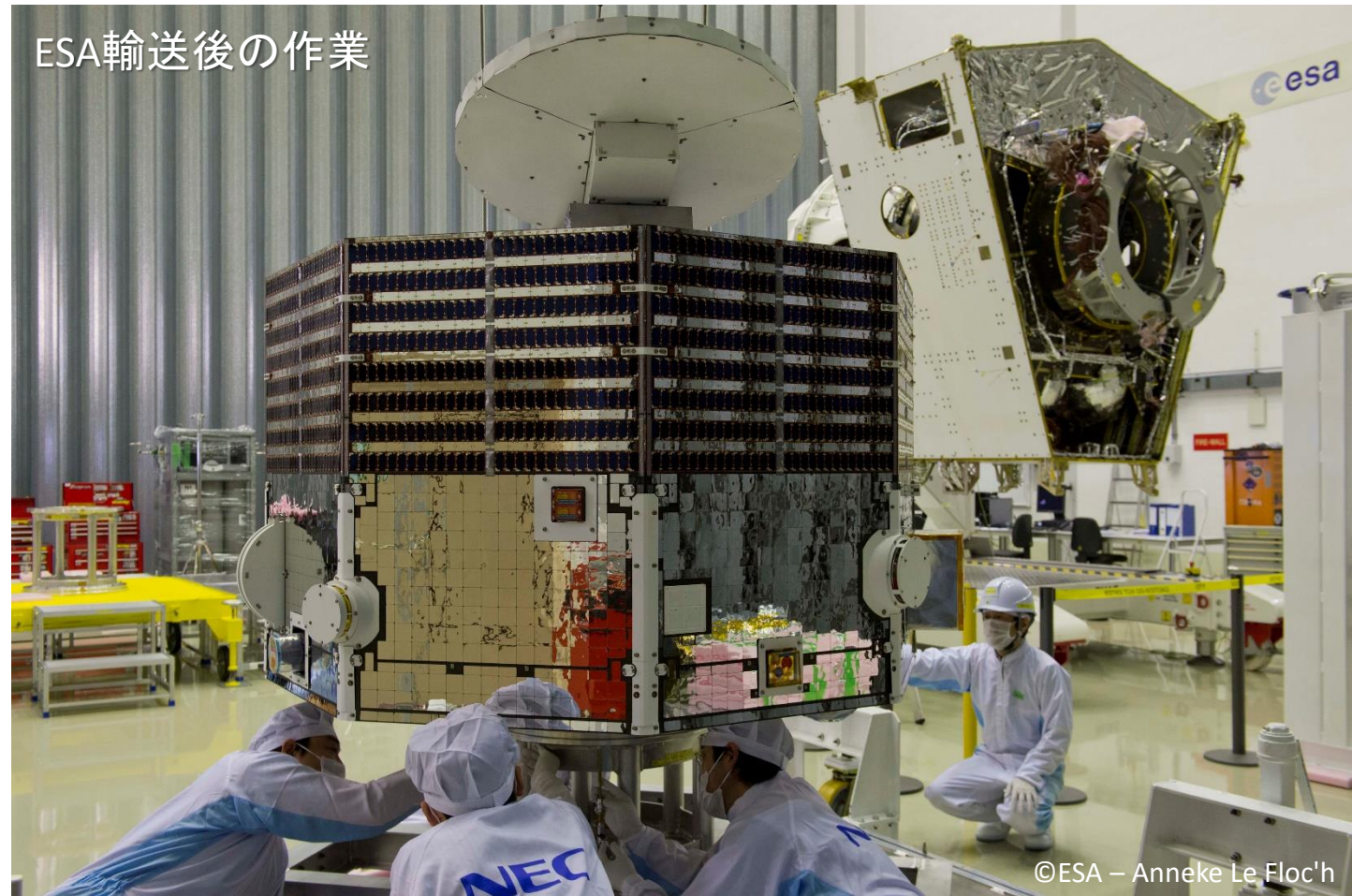
ヒートパイプ



水星側(赤外線を反射)

# 直近2年間の開発状況および今後の予定

- 2015年3月：日本での開発完了、報道公開
- 2015年4月：ESA(オランダ)へ輸送
- 2016年6月：MMO-MPO接続試験
- 2017年2月：初期運用模擬試験
- 2017年3月～：全機結合試験
  - 2017年4月：End-to-end 電気試験
  - 2017年5月：音響試験
  - 2017年6月：振動試験
- 2017年10月～：機械環境試験後のMMO単体健全性確認
- 2018年：射場(フランス領ギアナ)へ輸送
- 2018年：射場キャンペーン
- 2018年10月：打ち上げ



# 直近2年間の開発状況および今後の予定

- 2015年3月：日本での開発完了、報道公開
- 2015年4月：ESA(オランダ)へ輸送
- 2016年6月：MMO-MPO接続試験
- 2017年2月：初期運用模擬試験
- 2017年3月～：全機結合試験
  - 2017年4月：End-to-end 電気試験
  - 2017年5月：音響試験
  - 2017年6月：振動試験
- 2017年10月～：機械環境試験後のMMO単体健全性確認
- 2018年：射場(フランス領ギアナ)へ輸送
- 2018年：射場キャンペーン
- 2018年10月：打ち上げ

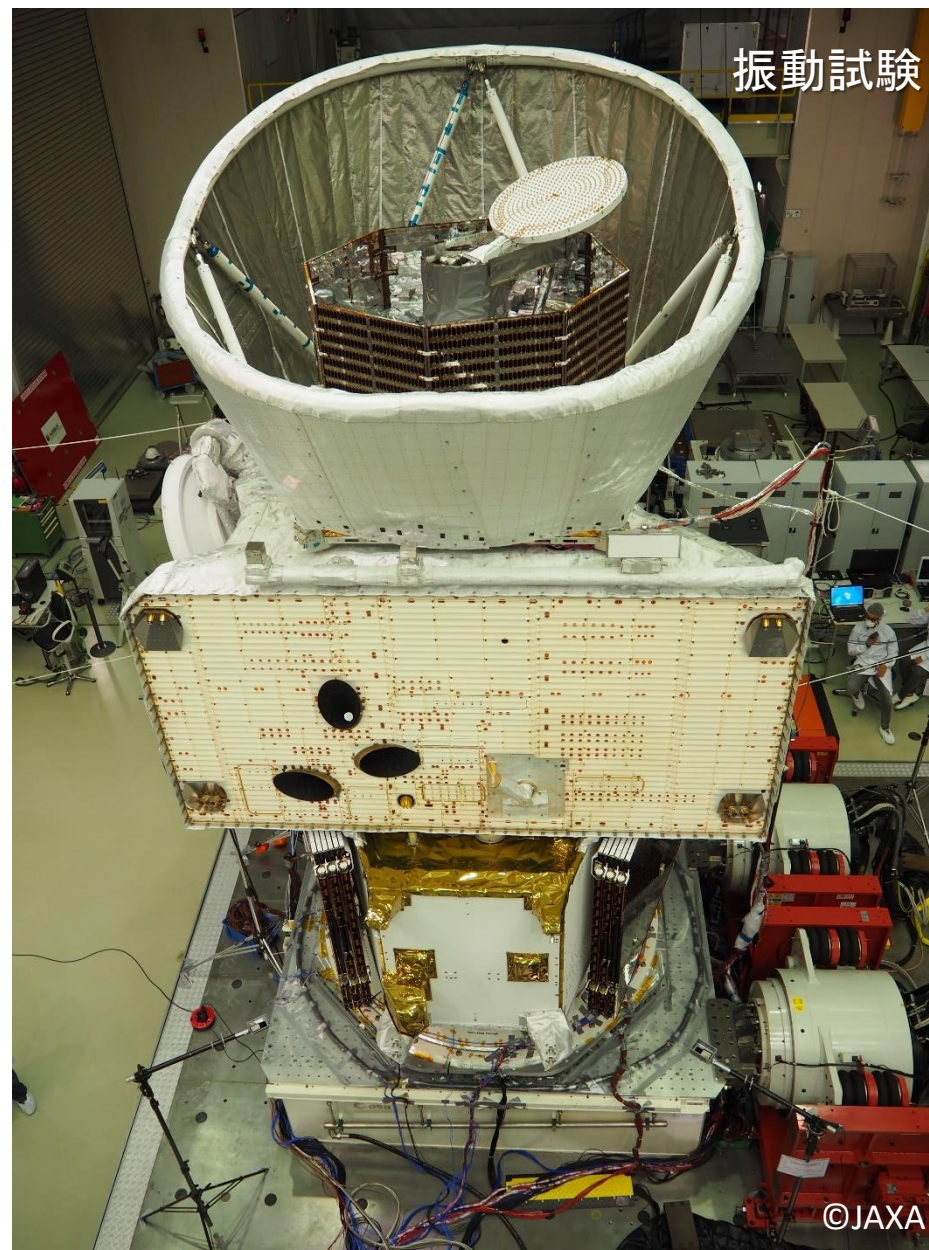


©ESA-C. Carreau, CC BY-SA 3.0 IGO



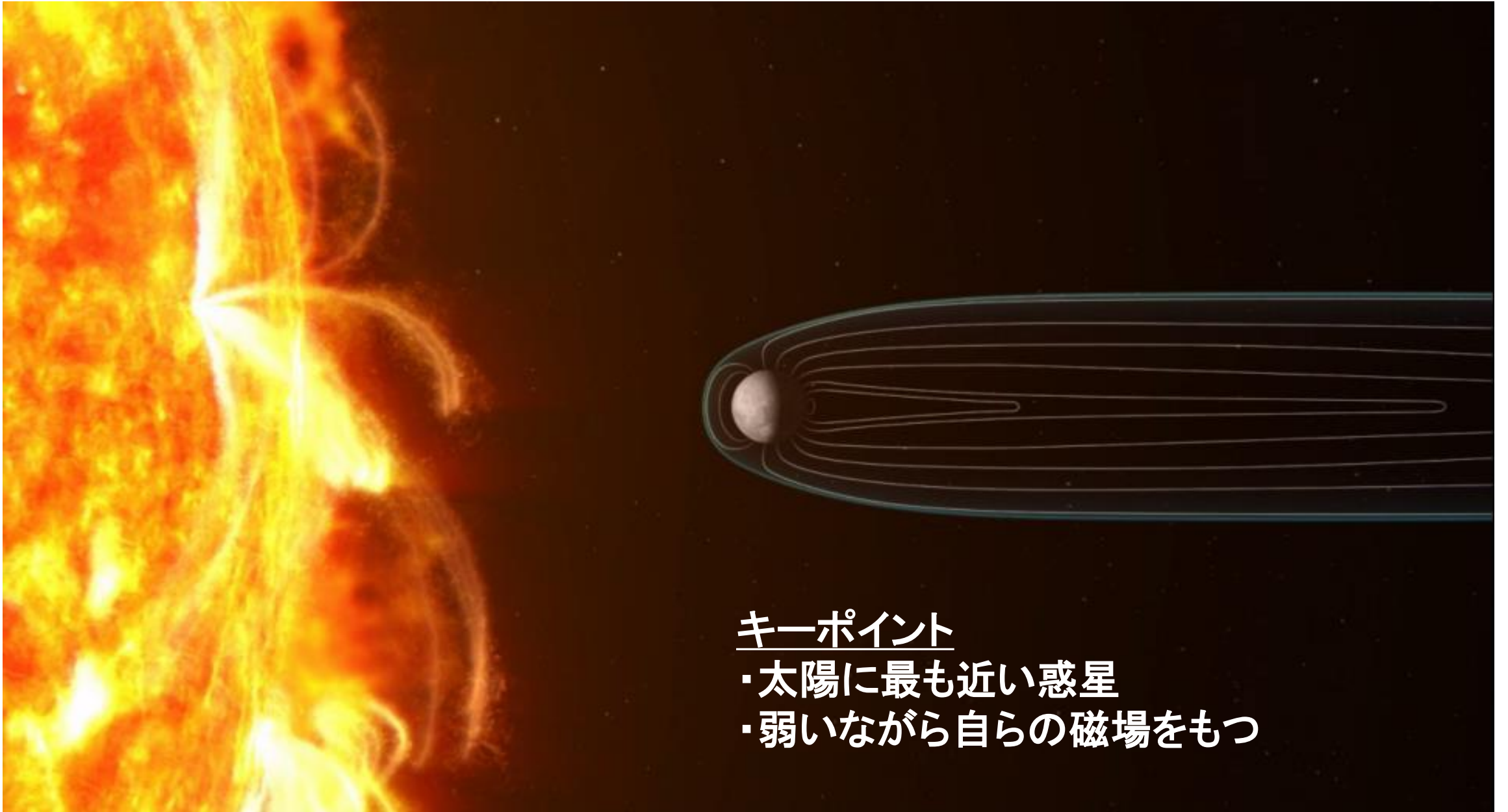
# 直近2年間の開発状況および今後の予定

- 2015年3月：日本での開発完了、報道公開
- 2015年4月：ESA(オランダ)へ輸送
- 2016年6月：MMO-MPO接続試験
- 2017年2月：初期運用模擬試験
- 2017年3月～：全機結合試験
  - 2017年4月：End-to-end 電気試験
  - 2017年5月：音響試験
  - 2017年6月：振動試験
- 2017年10月～：機械環境試験後のMMO単体健全性確認
- 2018年：射場(フランス領ギアナ)へ輸送
- 2018年：射場キャンペーン
- 2018年10月：打ち上げ



## 2. ベピコロンボミッションが 目指すサイエンス

# 水星から読み解くサイエンス



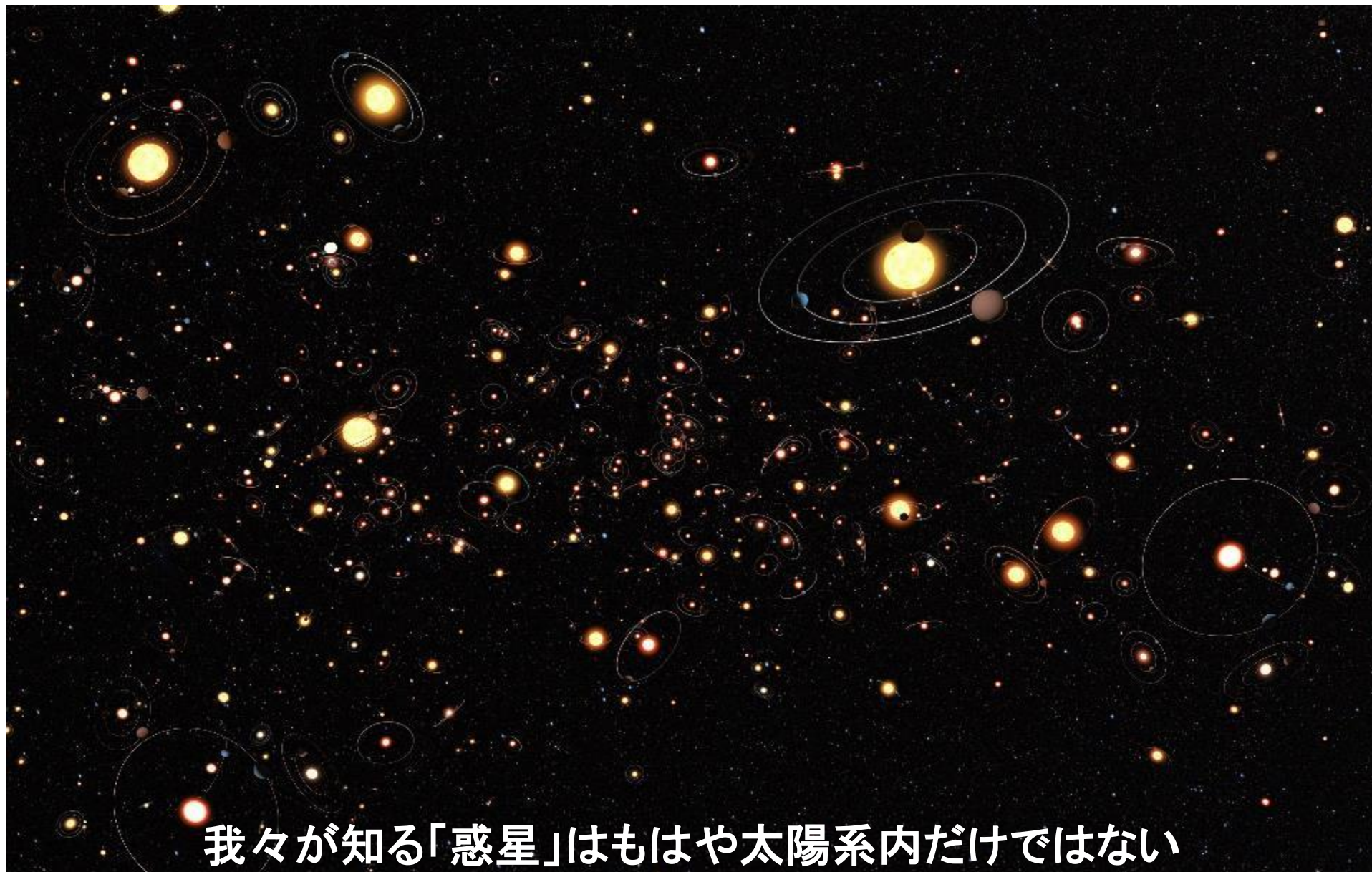
## キーポイント

- ・太陽に最も近い惑星
- ・弱いながら自らの磁場をもつ

**2. 1**

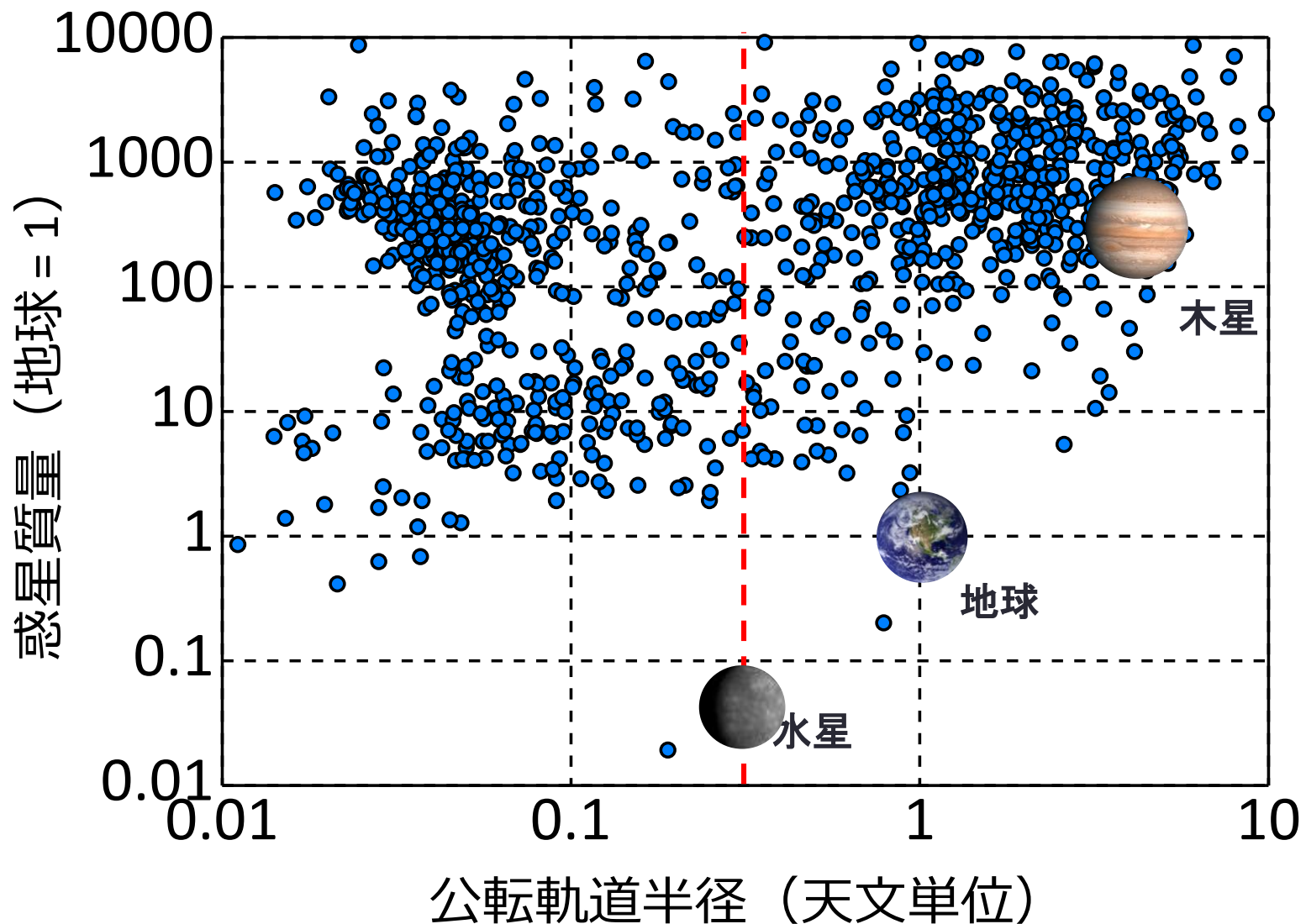
**太陽系最内縁の惑星**

# 3千個以上の太陽系外惑星



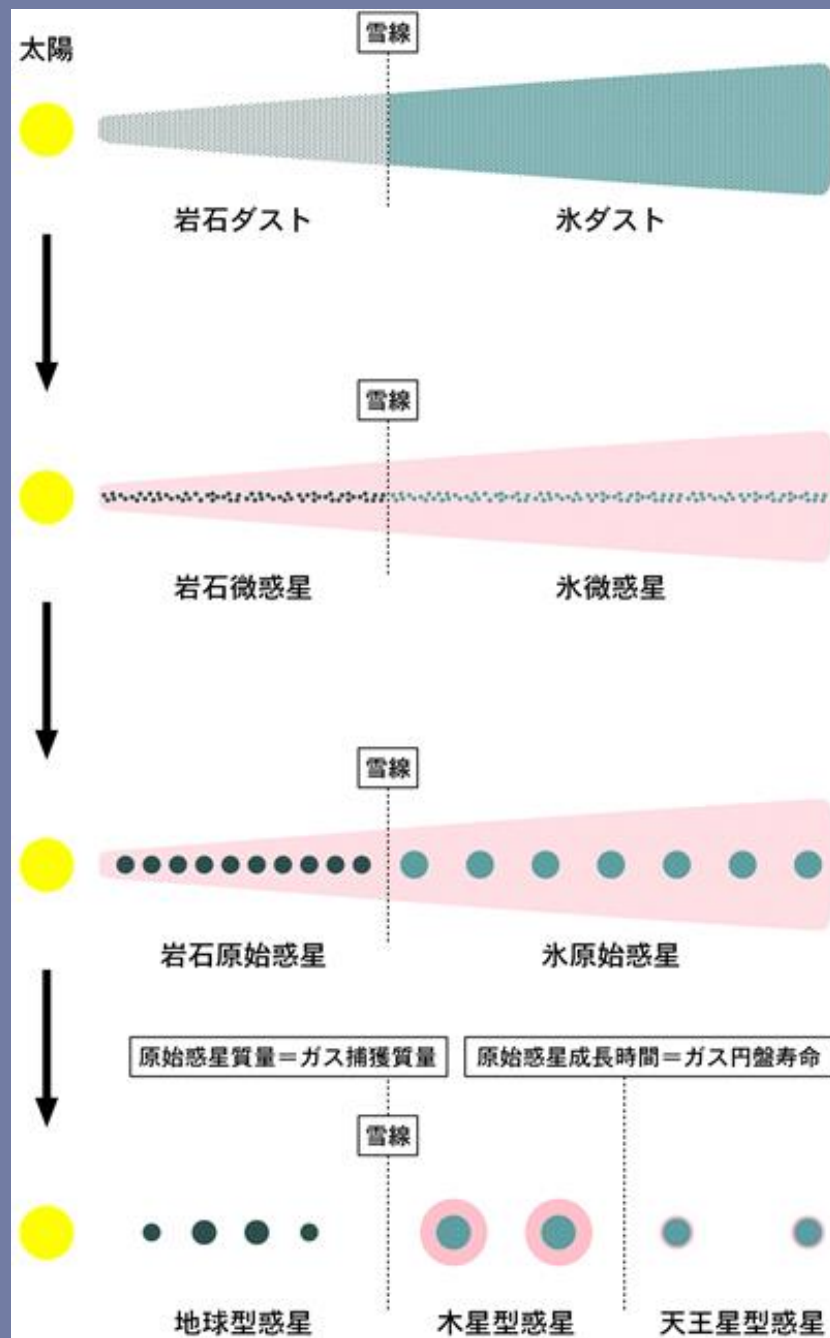
我々が知る「惑星」はもはや太陽系内だけではない

# 惑星系の多様性がわかってきた



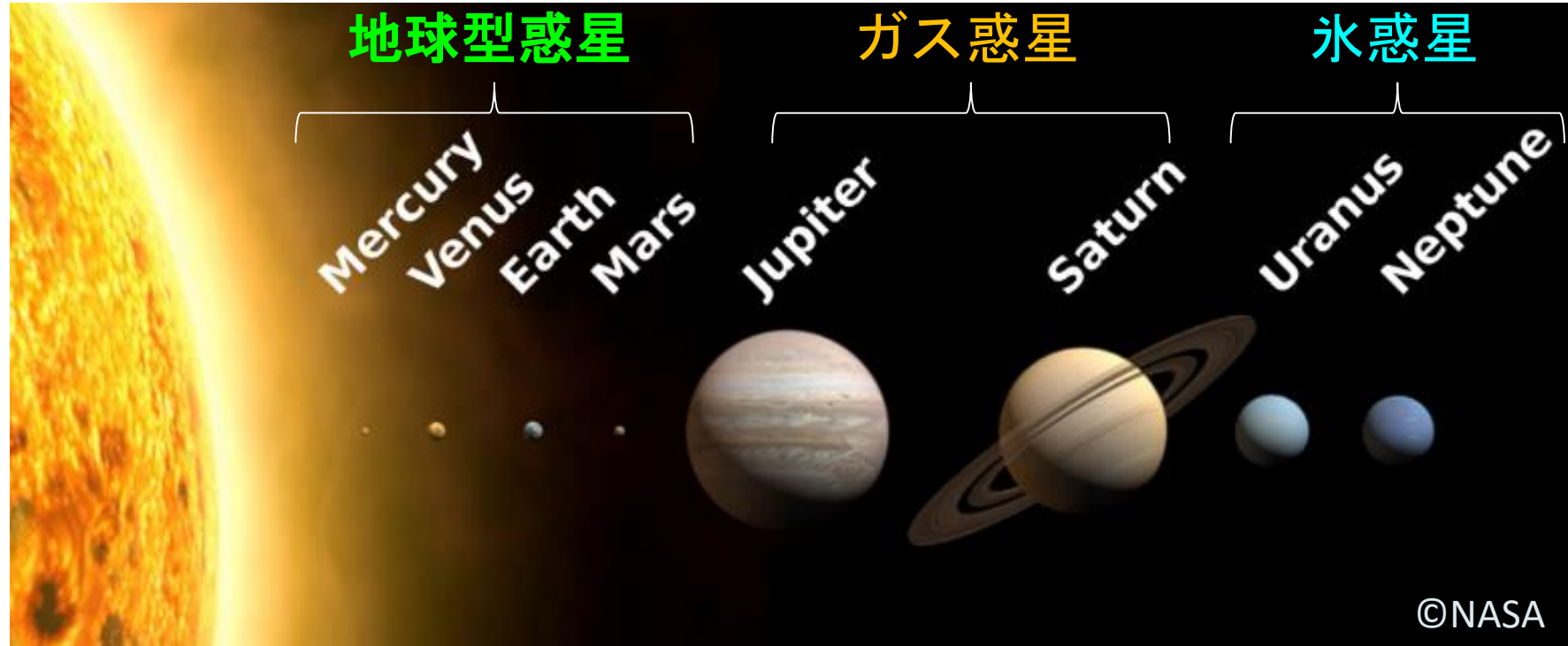
水星よりはるか内側に、水星よりはるかに大きな惑星も多数発見

# 標準モデルが 再検討の対象に



©理科年表オフィシャルサイト  
(国立天文台・丸善出版)

# 太陽系の形はもう「当たり前」ではない



## ハビタブル惑星形成の鍵を握る水星

- ・水星はどのように出来たのか？
- ・水星より内側に惑星がないのはなぜか？

水星から地球型惑星の形成を探る





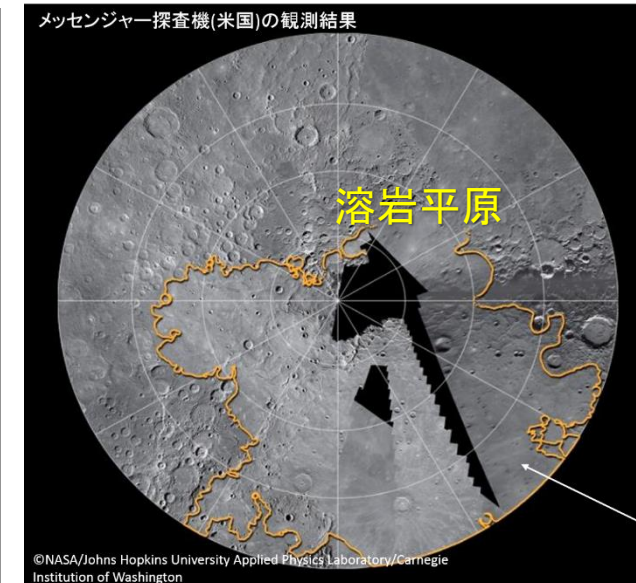
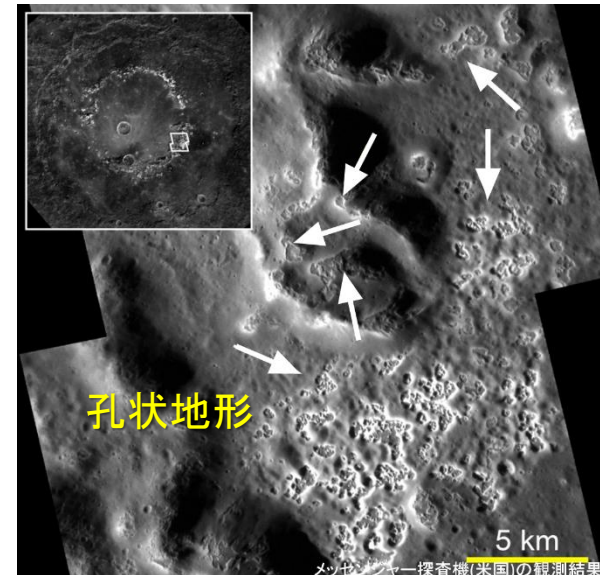
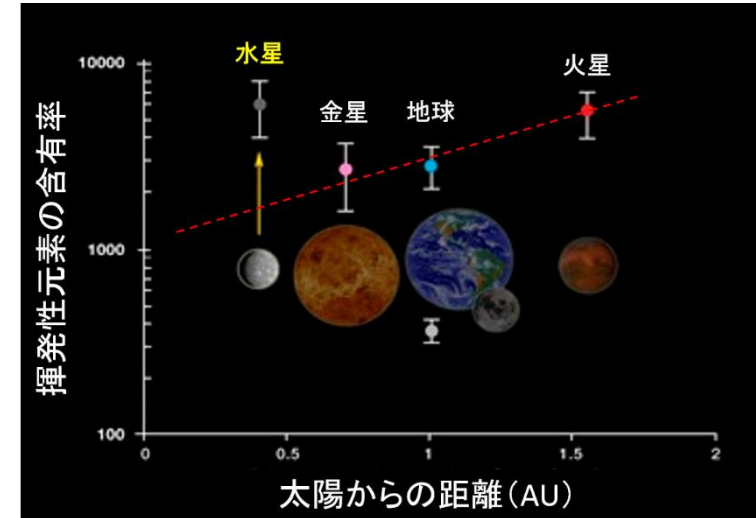
# ベピコロンボミッションでフォーカスすべき問題

## —地質—

- 揮発性元素が予想より多い
- 不思議な孔状地形の発見：揮発性物質が抜けた跡？
  - 「**出生地**」問題：水星はもっと外側で形成？
- 月とは異なる鉍物元素組成
  - 「**生まれ方**」問題：月と同じではない？
- 大規模な溶岩平原の発見
  - 「**育ち方**」問題：すぐに冷えるはずの小さな惑星になぜつい10億年前まで火山活動が？

水星表層の情報から水星の「形成」と「進化」を読み解く

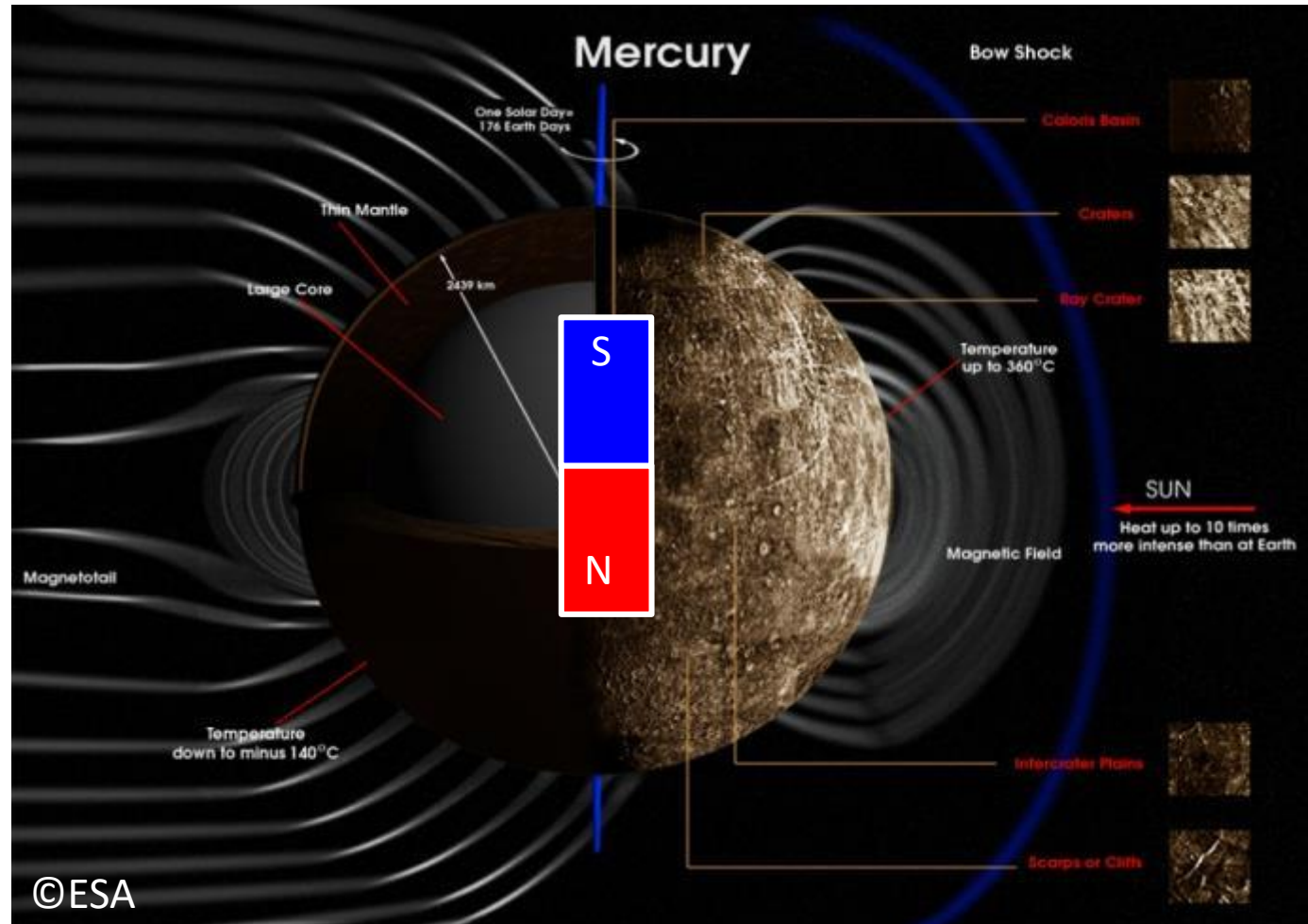
→地球型惑星の形成論を再検討



**2. 2**

**磁場をもつ惑星**

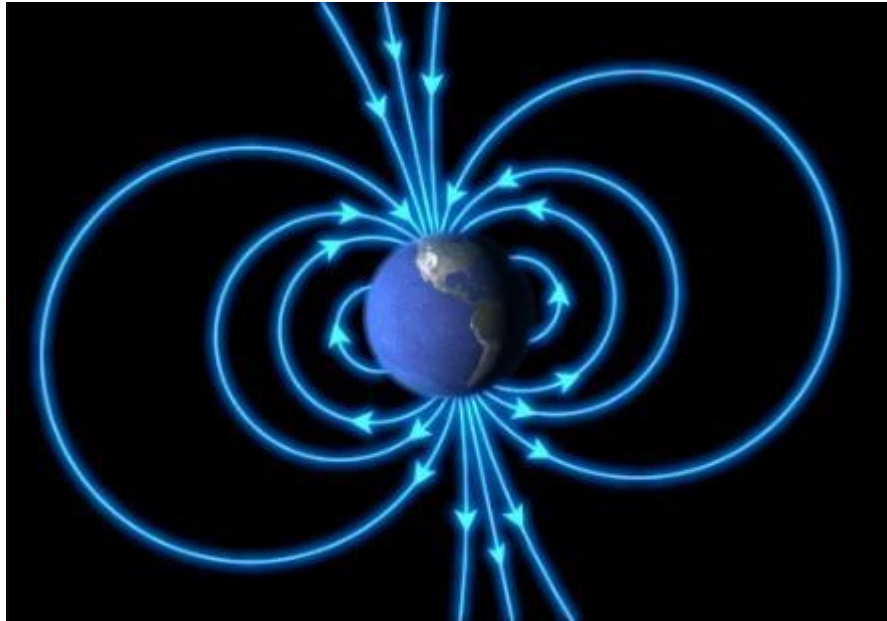
# 水星がもつ固有磁場



地球型惑星の中で磁場をもつ唯一の仲間

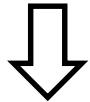
# 地球の磁場

惑星内部から漏れ出す貴重な情報源



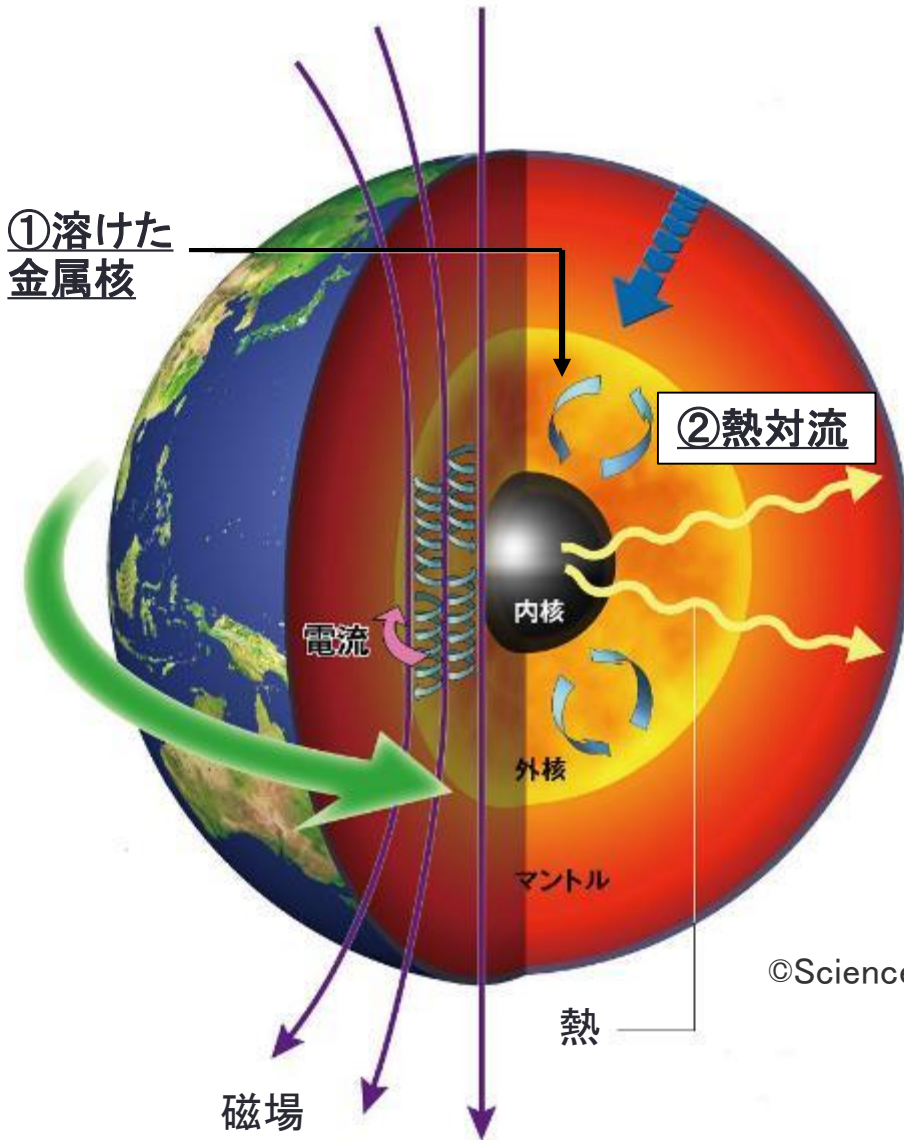
©the COMET program and Windows to the Universe original artwork.

電流が流れれば周囲に磁場ができる

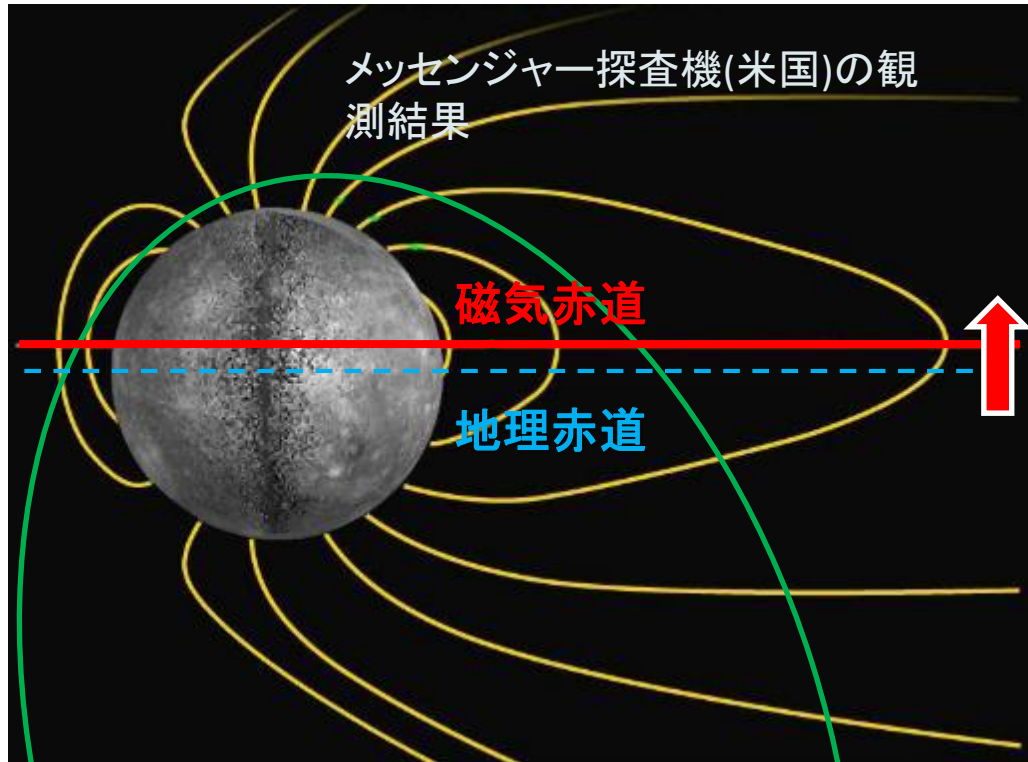


惑星が磁場を生むには

- ①内部に溶けた金属核(溶融鉄)
- ②電気を生み出す熱対流が必要



# 北に偏った水星の磁場 どんな内部構造がこの非対称性を作り出すのか？

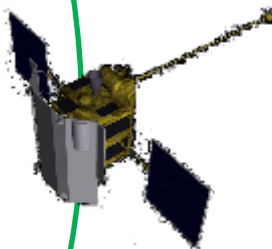


©NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington



©Nicolle Rager Fuller, National Science Foundation

メッセンジャー探査機(米国)の問題点  
・南半球の詳細観測が不可能

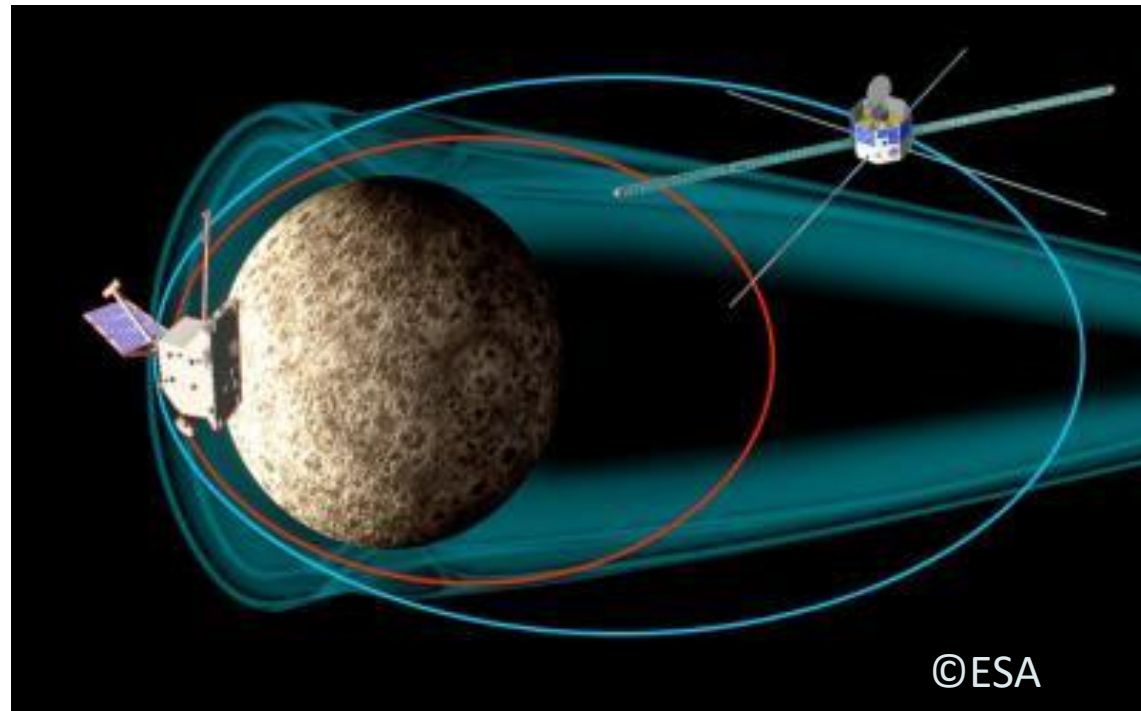


# ベピコロンボミッションでフォーカスすべき問題 —磁場—

北に偏った水星磁場

→「内部構造」問題: すぐに冷えるはずの水星になぜ磁場が?

どのような内部構造があれば、このような固有磁場が出来るのか?



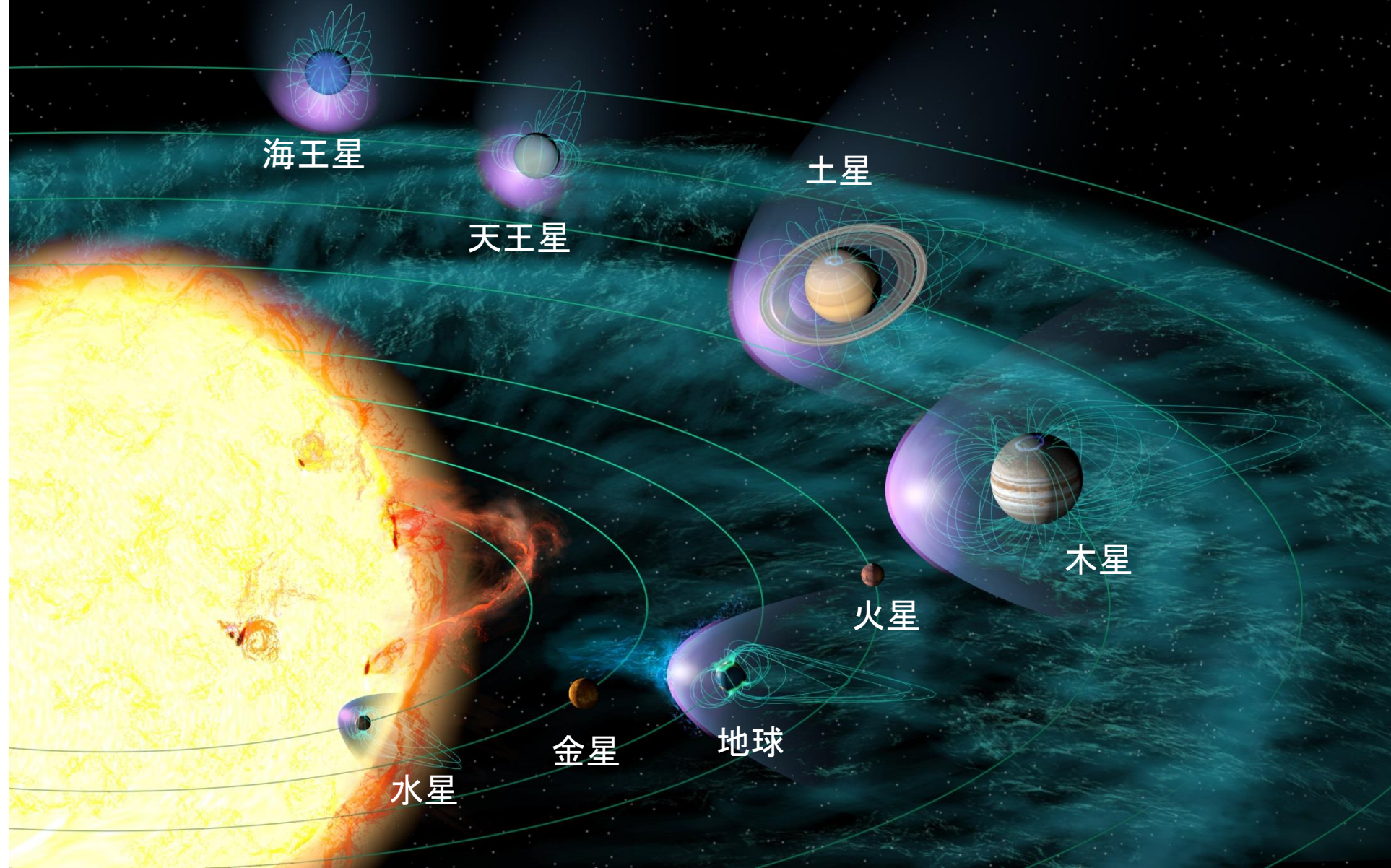
- 磁場形状を全球で特定
- 宇宙起源の磁場を除去し、水星磁場だけを知りたい  
→ 二点観測 (MPO+MMO) の独壇場

詳細な磁場データから内部を暴き、「進化」を読み解く

## **2. 3**

# **太陽に最も近く、磁場をもつ惑星**

# 惑星はつねに太陽風にさらされている

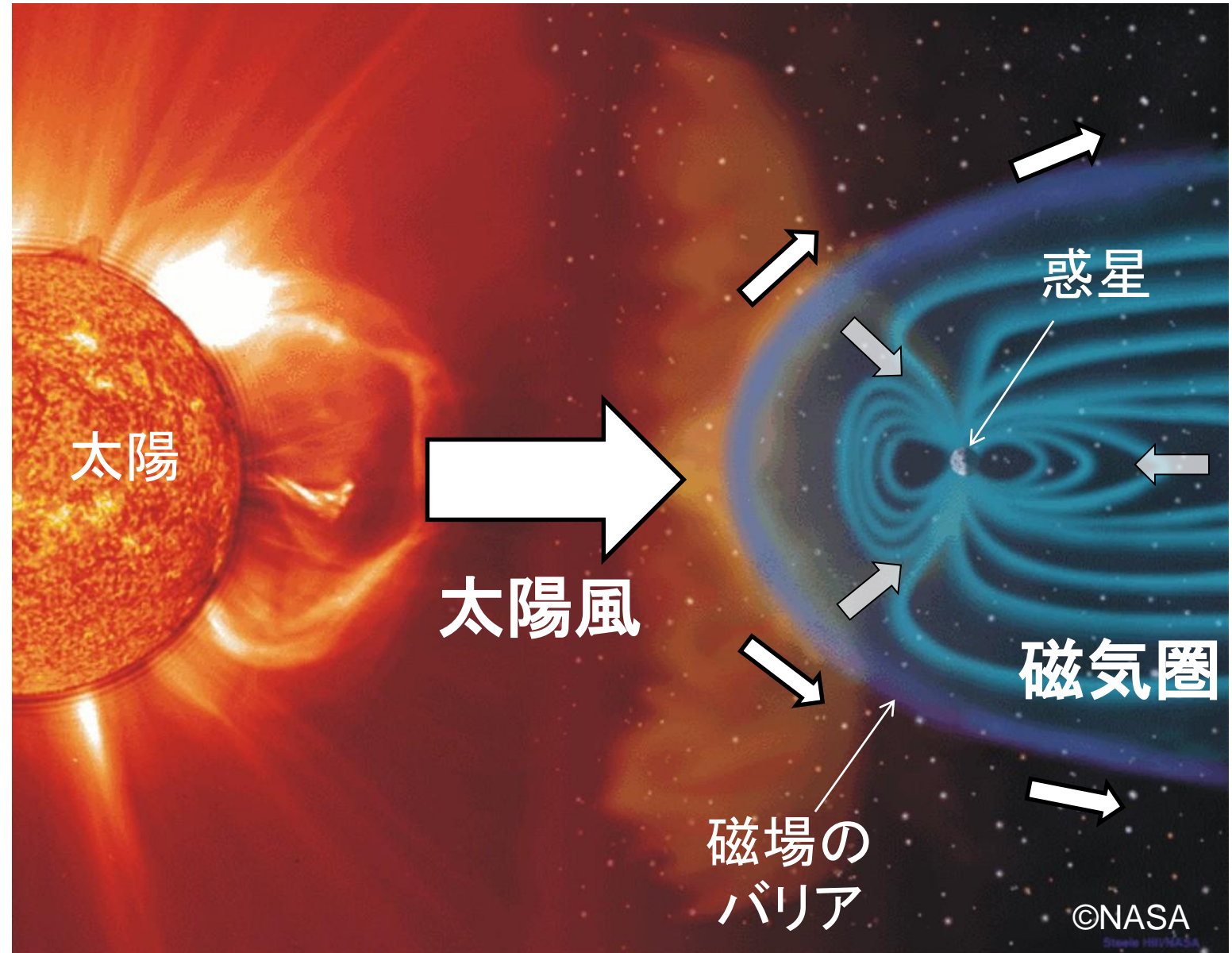




# キーとなるのは...惑星のもつ磁場

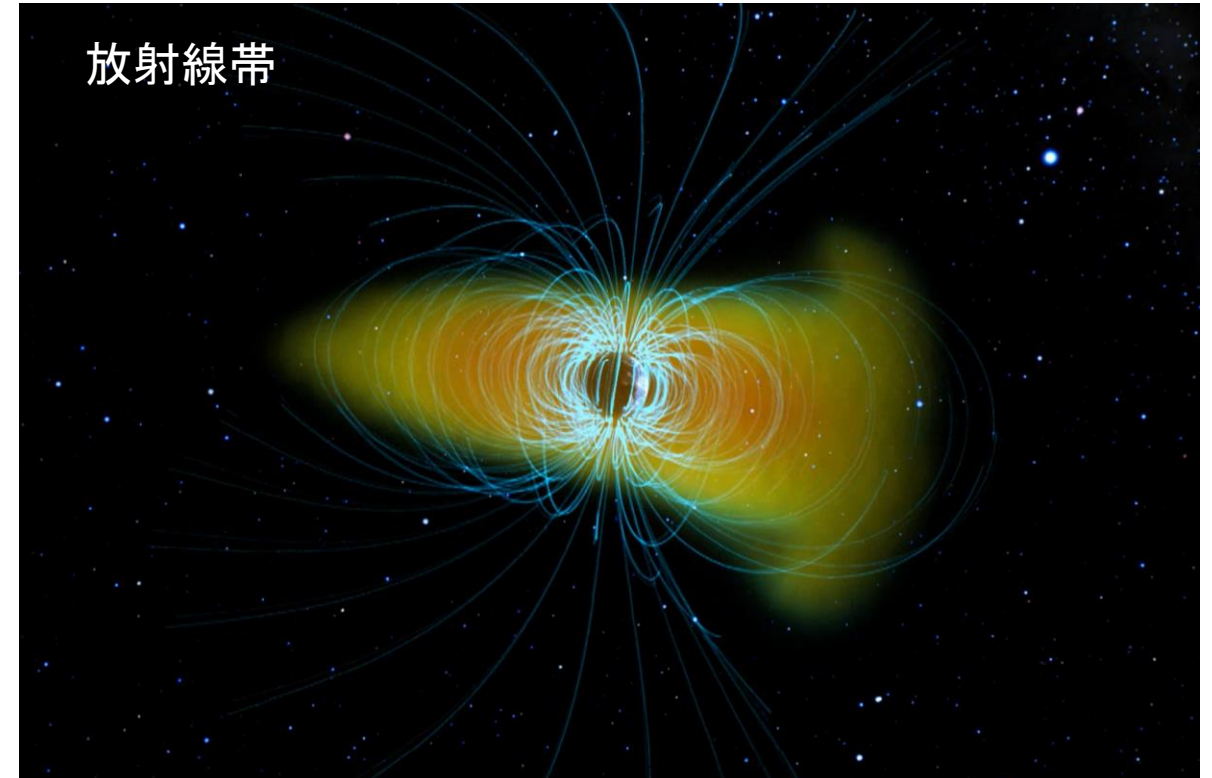
太陽から吹き出される秒速数百kmもの高速ガスの流れ = 太陽風

惑星のもつ磁場により太陽風から守られる領域 = 磁気圏

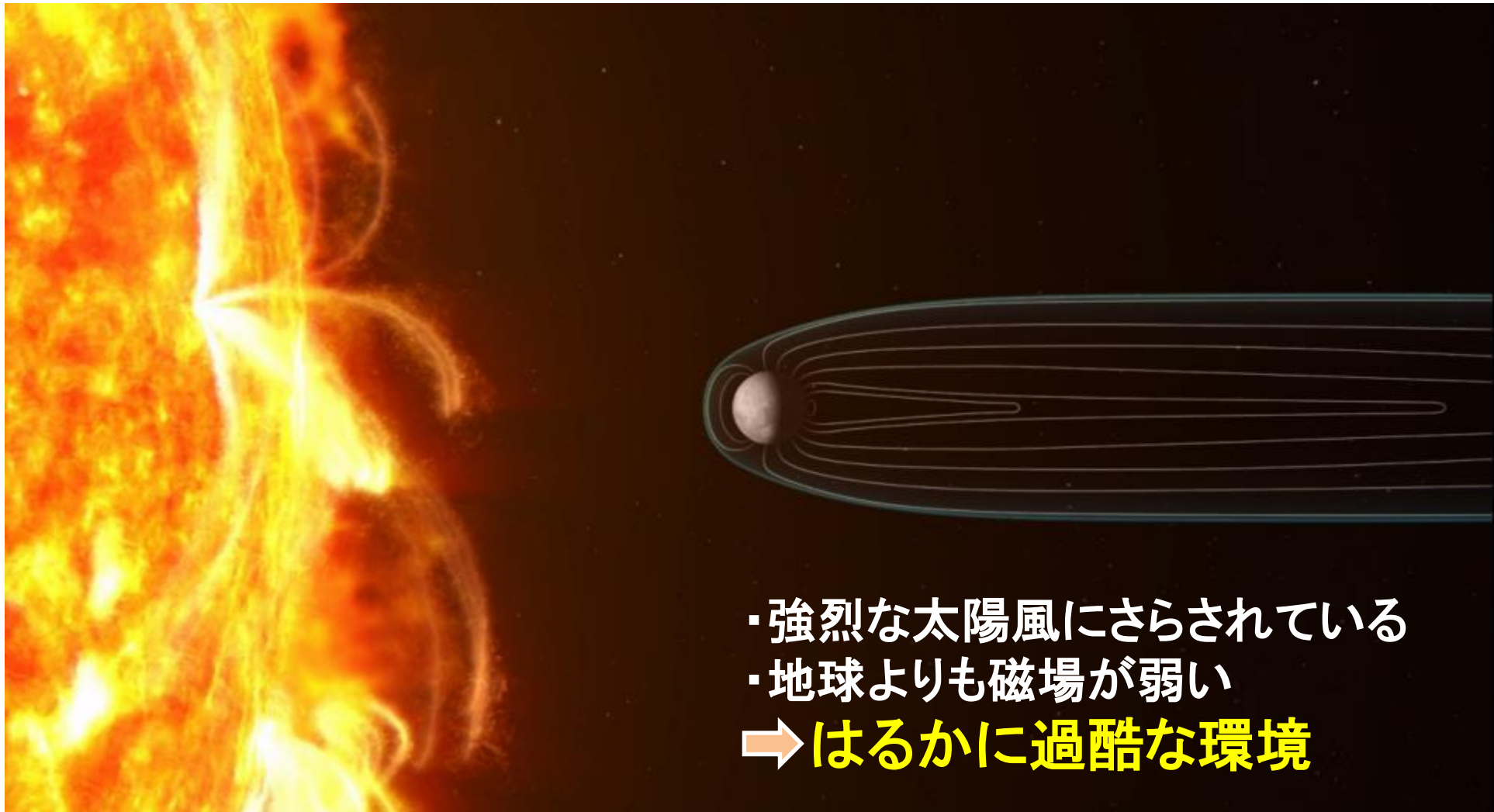


# 地球では...

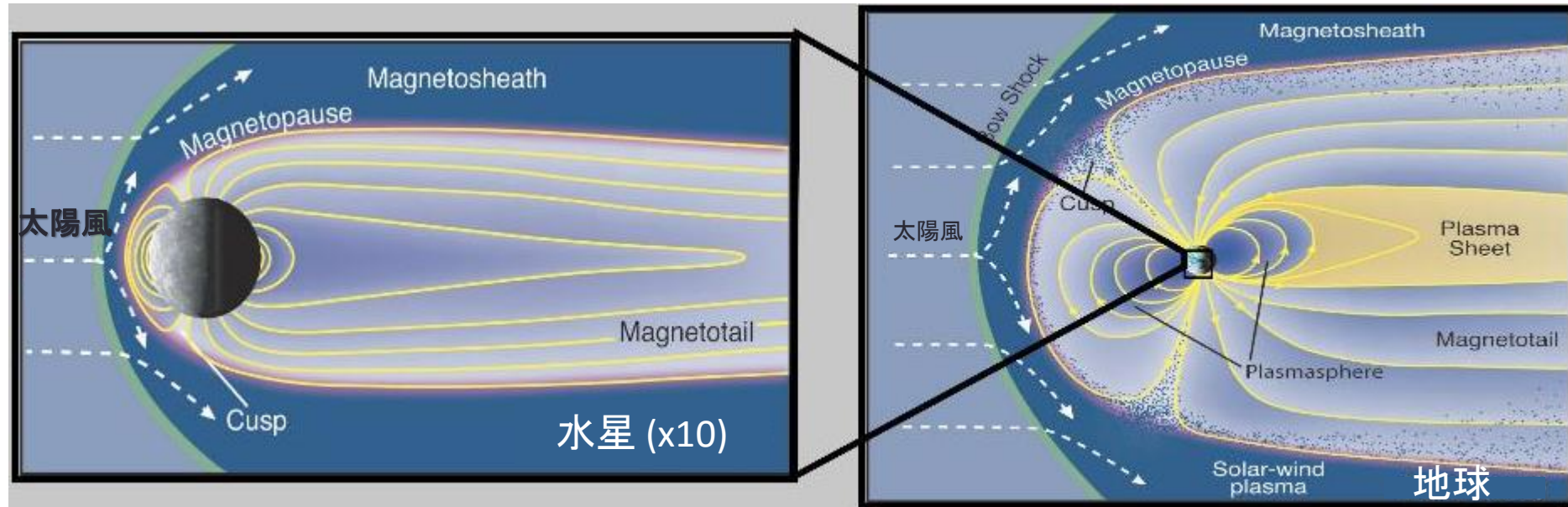
- ・磁気圏バリアのおかげで太陽風の直撃は免れている
- ・しかしそれでも一部のエネルギーは磁気圏内に侵入  
→オーロラ、放射線帯



# 太陽に最も近い水星では？



# 地球磁気圏とは「質的に」異なる水星磁気圏

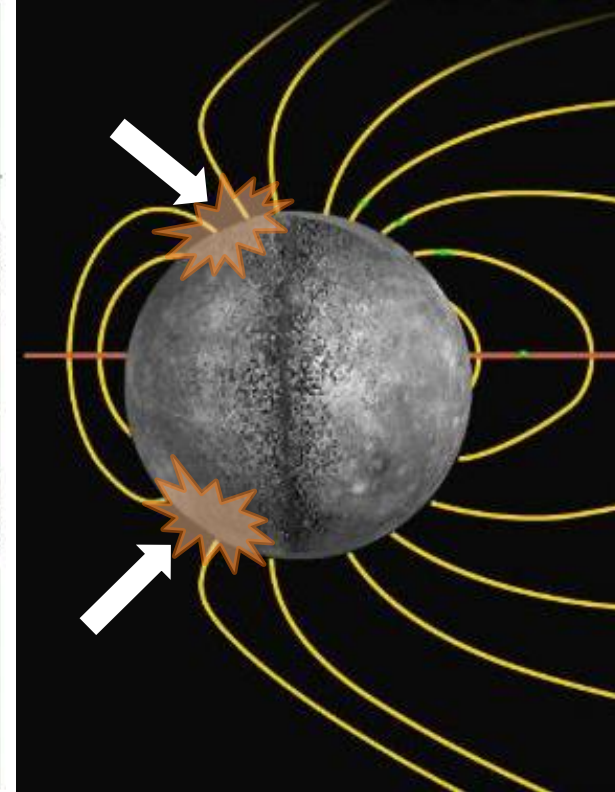
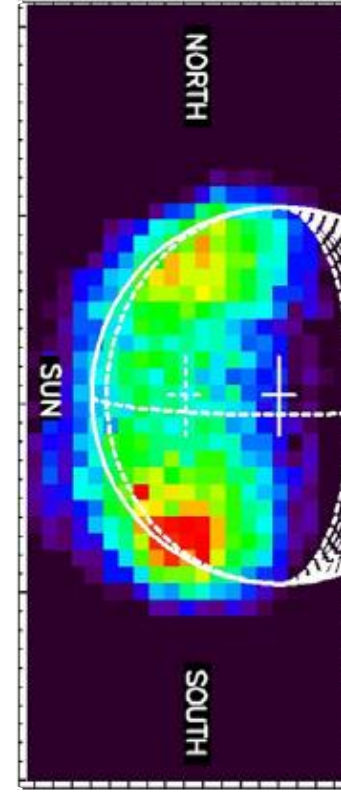
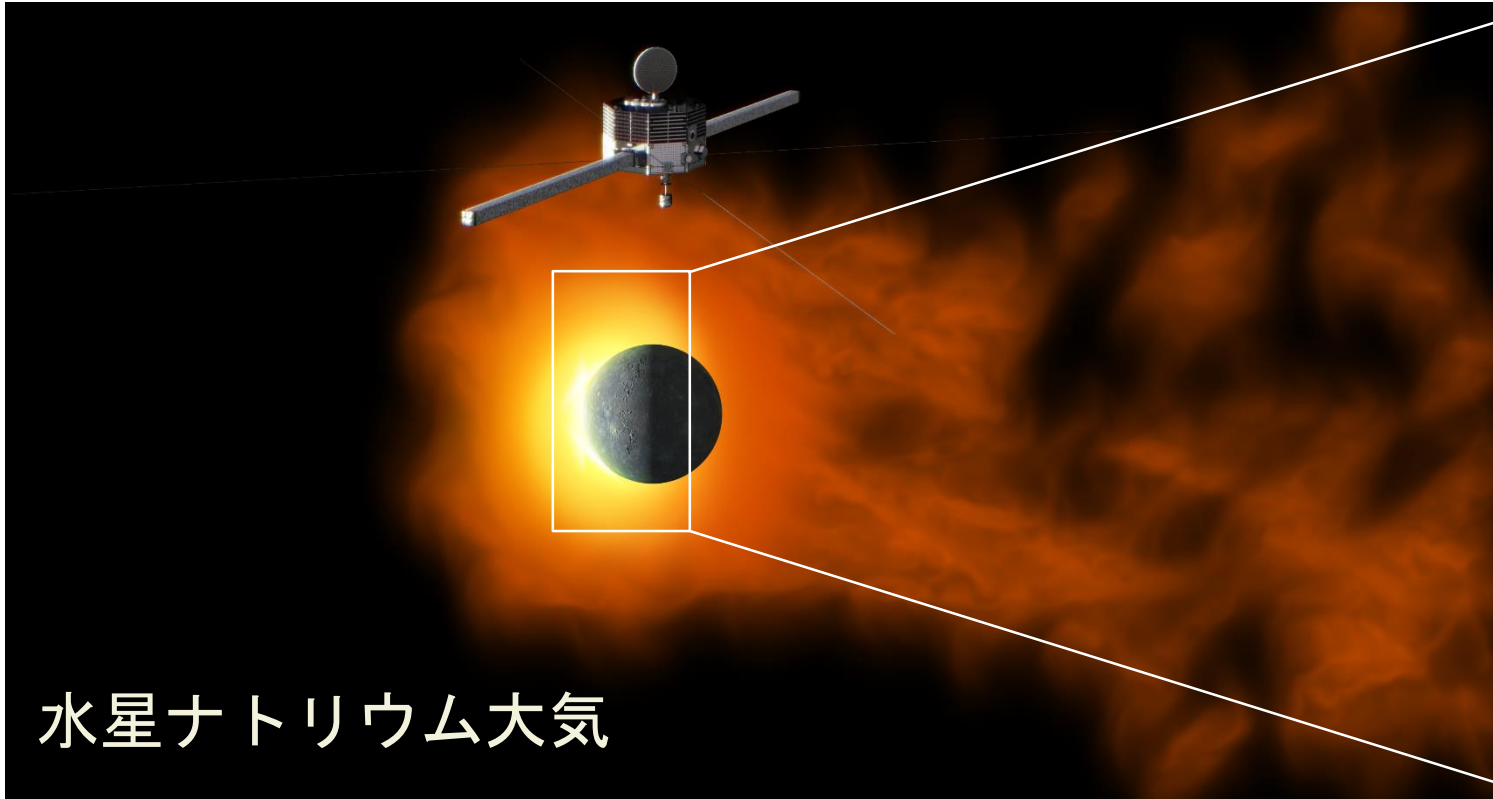


- 形や構造はよく似ている
- 大きさは地球の1/10程度

©International Space Science Institute

- 予想をはるかに超える高エネルギー電子を発見
- ダイナミックな磁気圏現象  
→地球と異なるメカニズム？強い太陽の影響が関与？

# 宇宙空間と直接つながる水星表面



水星の周りを覆う重い粒子成分: どうやって生成されているのか?

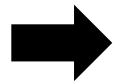
太陽風が地表の粒子を直接叩き出している?

水星大気の振る舞いと太陽風や周辺環境を同時にモニタ

# ベピコロンボミッションでフォーカスすべき問題

## —水星周辺の宇宙環境—

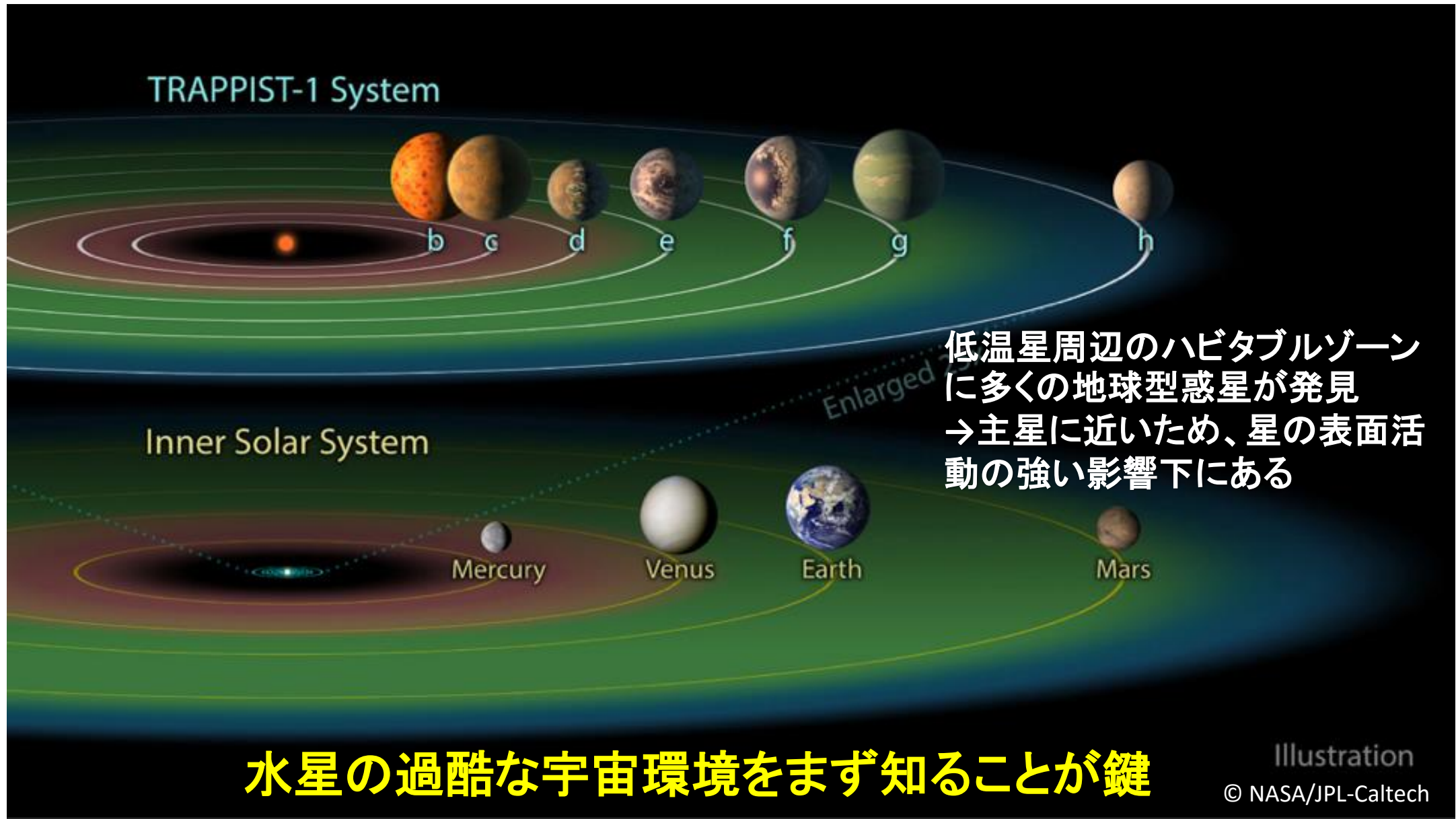
- ・地球よりもダイナミックな磁気圏活動
- ・予想をはるかに超える高エネルギー電子の発見
  - 「**加速メカニズム**」問題：小さい水星磁気圏において、いかにして電子を加速するのか？強い太陽風の寄与は？
- ・水星表面起源の重イオン粒子の検出
  - 「**重元素の大気生成**」問題：どうやって地表から宇宙空間に離脱？  
これらが磁気圏ダイナミクスに及ぼす影響の全貌は？



メッセンジャーでは観測できないイオンや電場などあらゆるプラズマ環境を同時に計測

最も過酷な水星周辺の環境を探り、太陽が及ぼしてきた影響を読み解く

# 将来展望：低温星まわりのハビタブル惑星

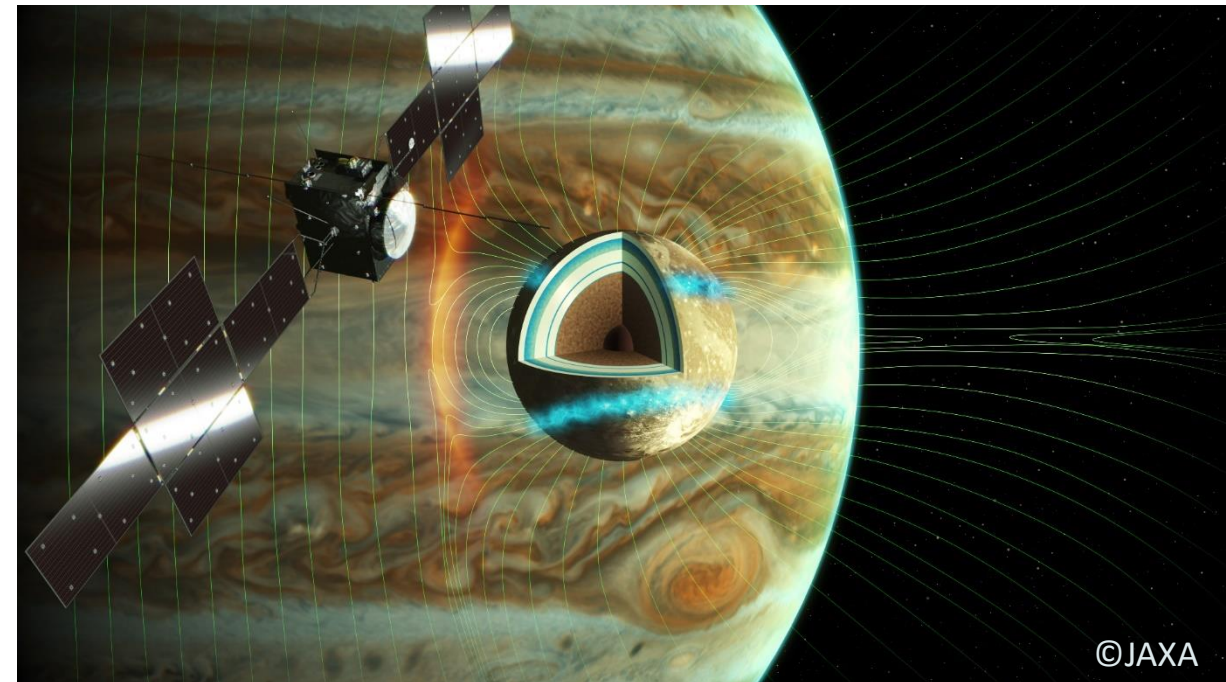
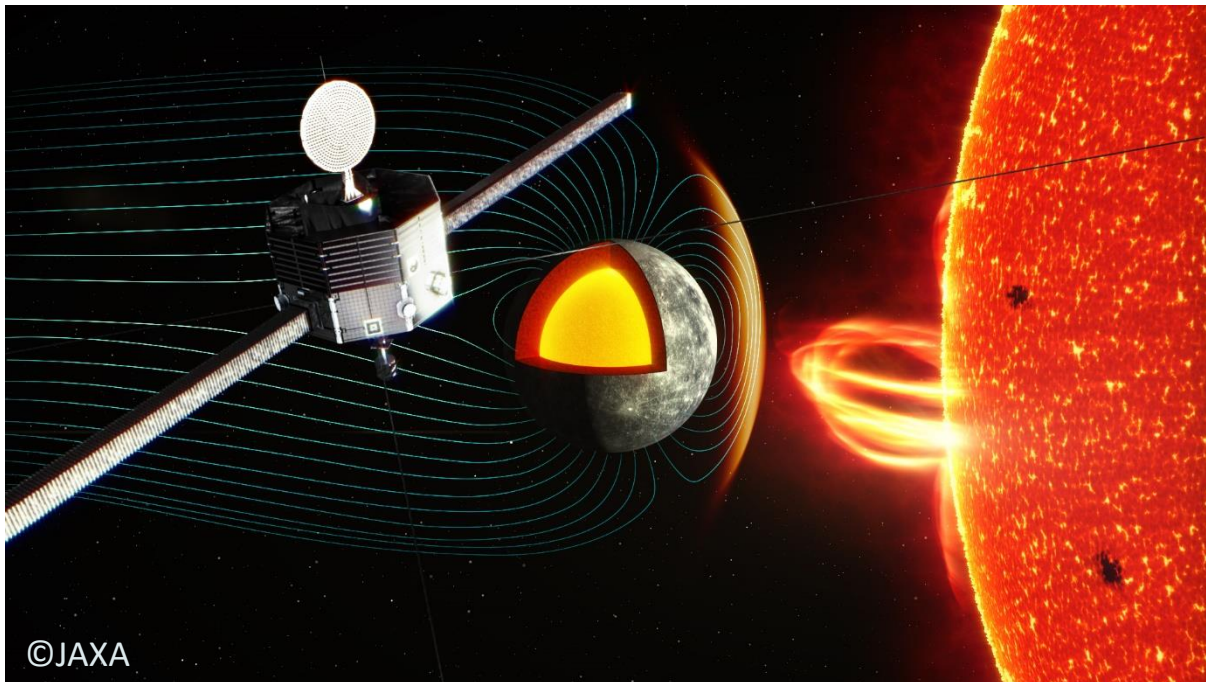


# 日欧協力の将来展望：MMOからJUICEへ

BepiColombo で築いた信頼関係が  
次期国際協力大型ミッション JUICE につながる

ベピコロンボ (BepiColombo)  
国際水星探査計画

ジュース (JUICE)  
木星氷衛星探査計画





# 次期国際協力大型ミッション： JUICE

- ベピコロンボに続く欧州との協力
- 打ち上げ: 2022年を予定
- 木星到着: 2030年を予定
- ガニメデ軌道投入: 2032年を予定

## 経緯(JUICE)

JUICEは、2008年 ESA CosmicVision2015-2025計画として提案/選定されたESA主導の木星氷衛星探査ミッションで、計画提案にあたり日本はGALA、RPWI、PEP/JNA(JAXA)、SWI(NICT) 4つの機器で開発協力を検討することとなった。

日本では、2013年に理学委員会にWGが設置され、ESAでの計画採択に併せて本格検討を開始、2014年に小規模プロジェクトに応募、小規模プロジェクト選定審査委員会にてミッション定義審査(MDR)、 $\Delta$ MDRなど慎重な審査を複数回行い、ミッション目的の科学的な意義・価値に重点を置き、ミッション目的を達成するためのシステムの実現可能性等について評価を実施した結果、委員会から宇宙科学研究所へ実施について推薦され、検討を進めている。

惑星の成り立ちと生命の可能性をもとめて木星へ

**JUICE** Jupiter Icy Moons Explorer

木星氷衛星探査計画 ガニメデ周回衛星

—ESAが主導する全世界的木星探査ミッションへの参加—

惑星はいかにして  
作られたのか？

地球の外に水の海  
はあるか？

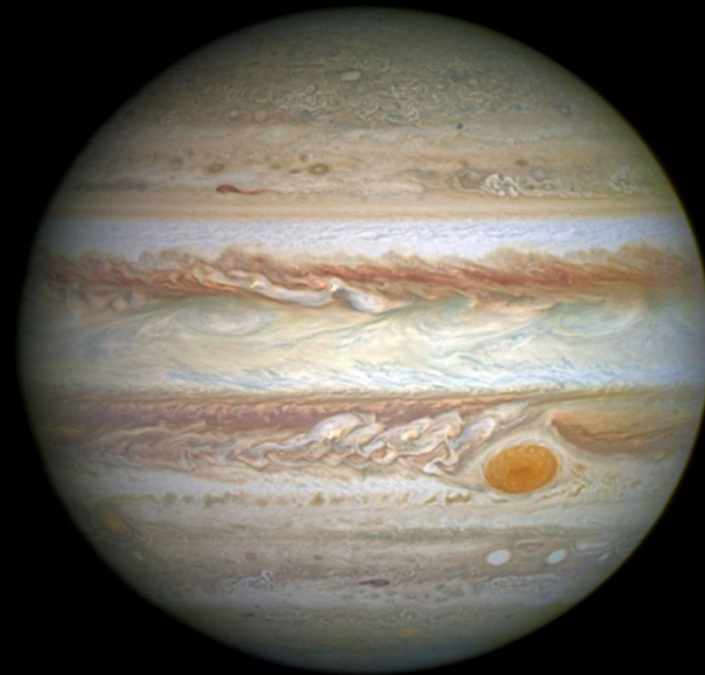
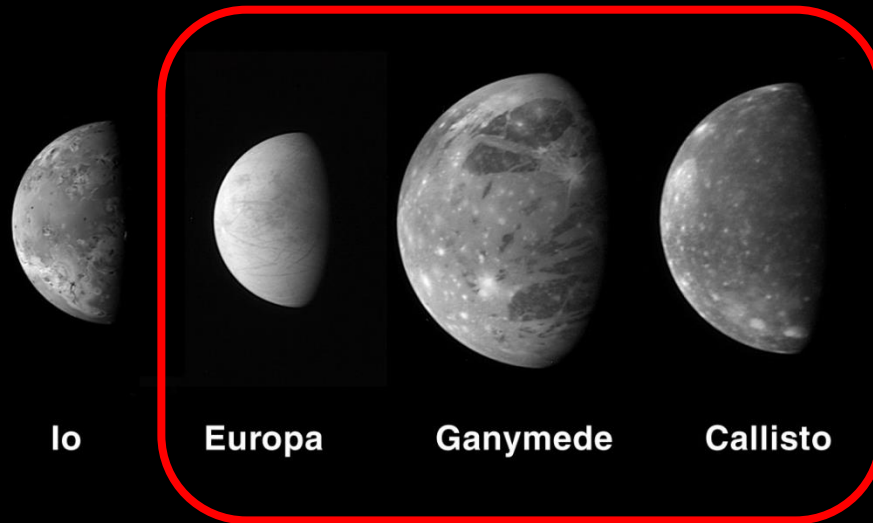
太陽系で起きている環境の変動には  
どのようなものがあるのか？

Courtesy Airbus D&S

**RBUS**  
ANCE & SPACE

# 木星とガリレオ衛星

今から400年前、天体望遠鏡を木星に向けたガリレオ・ガリレイは、木星の周囲を巡る4つの天体を発見しました。今では木星のガリレオ衛星として知られているイオ・エウロパ・ガニメデ・カリストの発見は「天動説」から「地動説」への大転換へとつながることになりました。木星氷衛星探査計画 ガニメデ周回衛星 JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer)は、ESA(欧州宇宙機関) が主導する大型木星氷衛星探査計画で、木星の成り立ちや宇宙における生命存在可能性に迫ることを目指した史上最大級の国際外側太陽系探査ミッションです。



## 氷衛星

# 2017年4月14日 NASAの重大発表

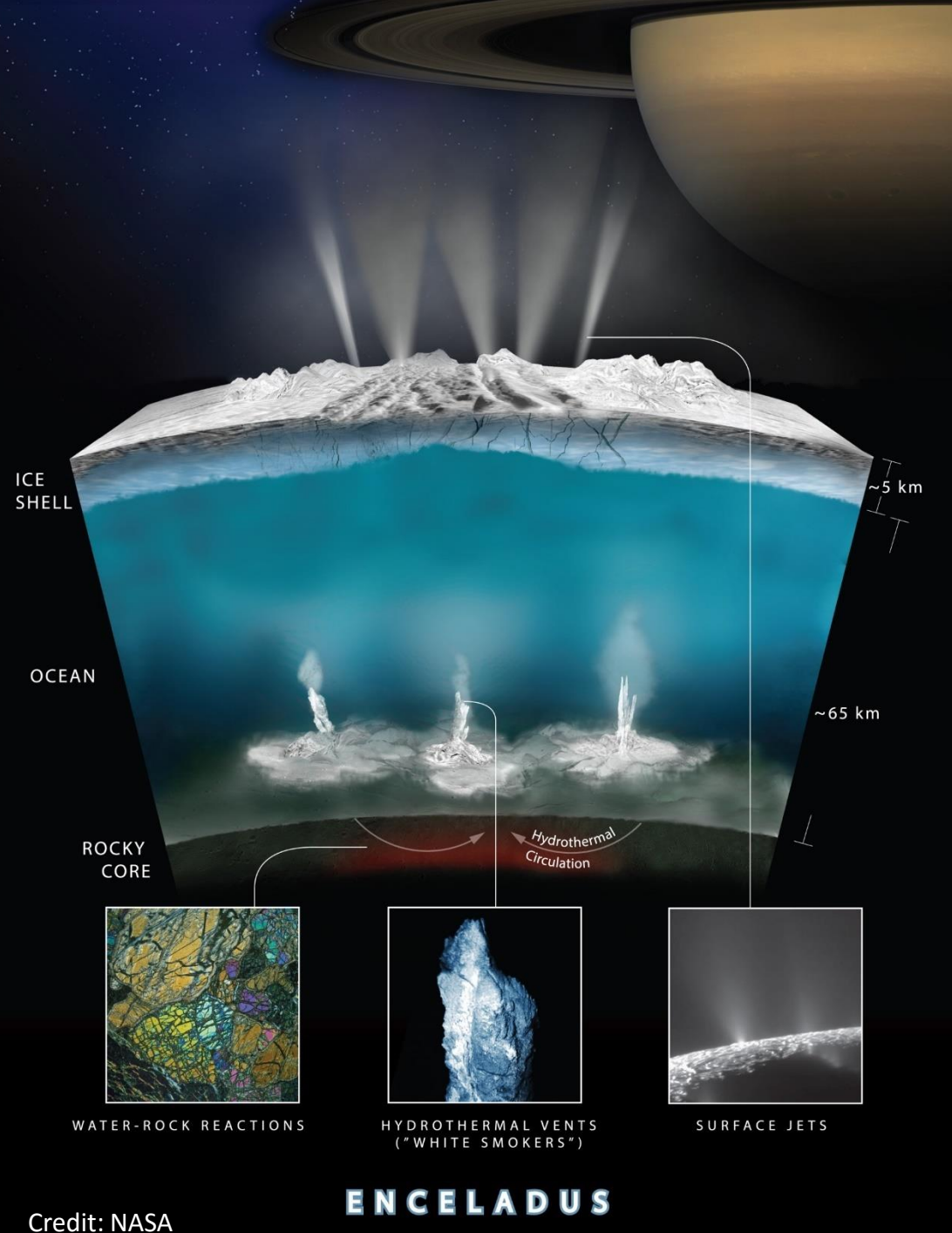
NASA Missions Provide New  
Insights into 'Ocean Worlds' in  
Our Solar System

“...Cassini scientists announce that a form of chemical energy that life can feed on appears to exist on Saturn's moon Enceladus, and Hubble researchers report additional evidence of plumes erupting from Jupiter's moon Europa.”

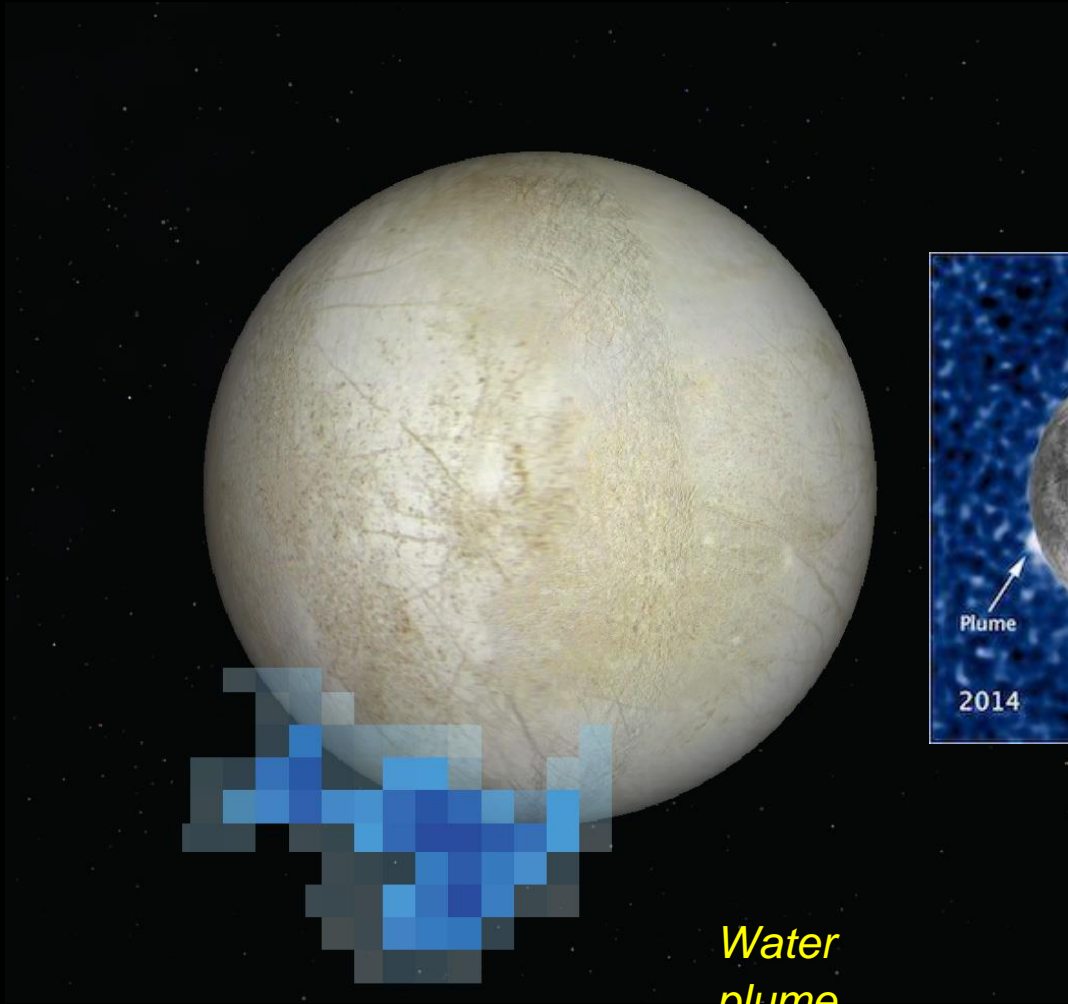
土星の氷衛星の地下には  
液体の海が広がっている

— 生命の可能性 —

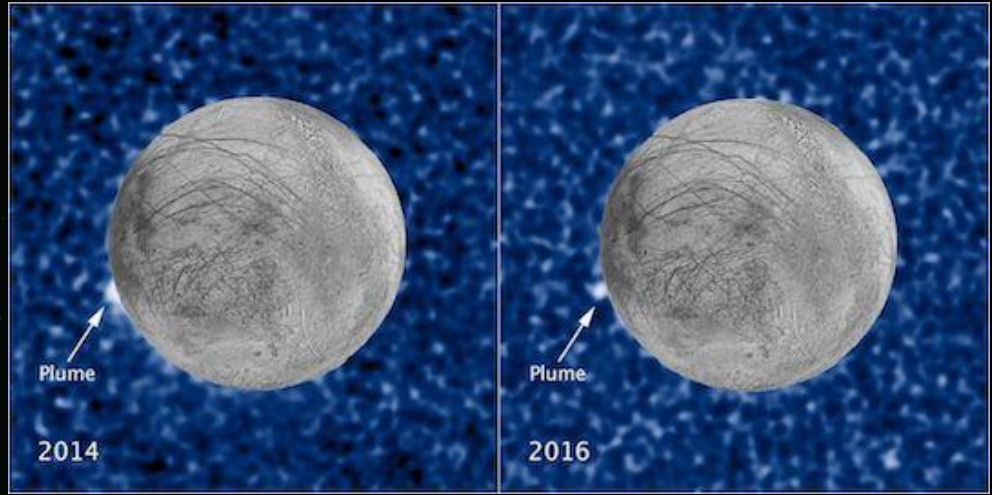
木星も？



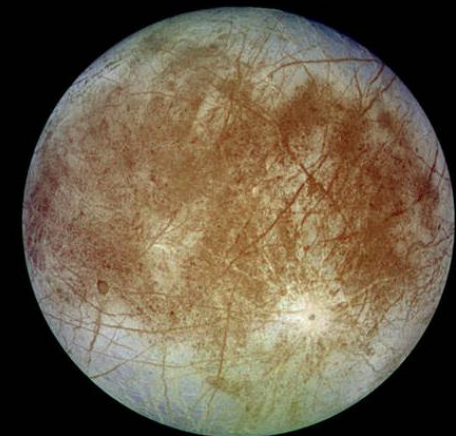
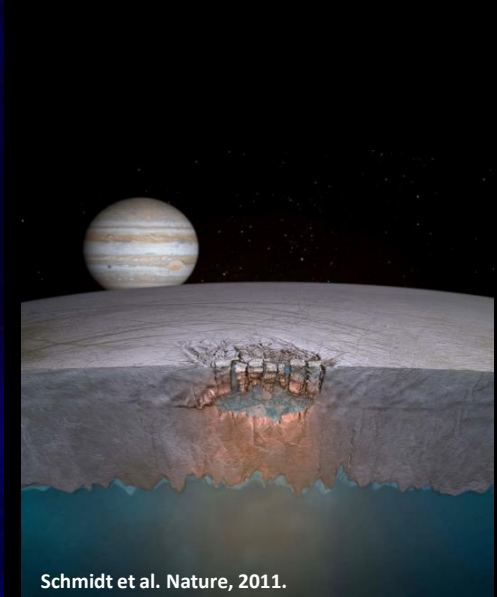
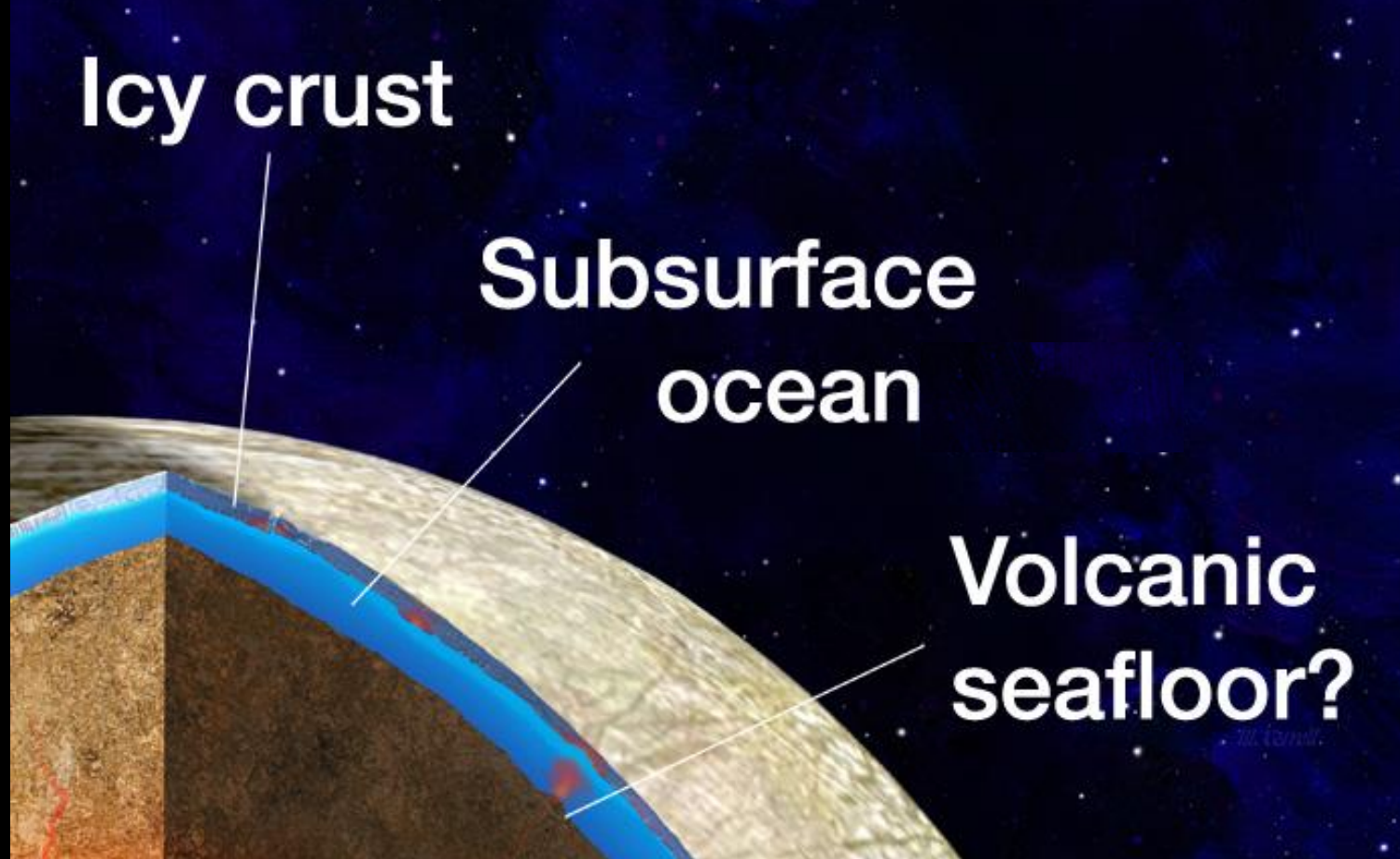
# ハッブル宇宙望遠鏡で観測されたエウロパ表面から吹き出す水



*Water plume*



# 氷衛星の内部はあたたかい？



木星は太陽から遠く寒いはずだが  
氷衛星が木星の周りを周ることで  
歪みが生じて衛星内部が加熱される：潮汐加熱

# 惑星探査における木星の重要性

木星は土星と共に巨大なガス惑星である。巨大ガス惑星は太陽以外の星の周囲にも見つかっている。

ガリレオ(木星)、カッシーニ(土星)のデータの集積により、巨大なガス惑星の周囲にある氷衛星における地下海への興味が高まっている。

氷衛星内部は海が存在し得る環境として、地球のように天体表層にある場合よりも安定な条件にあることがわかってきた。

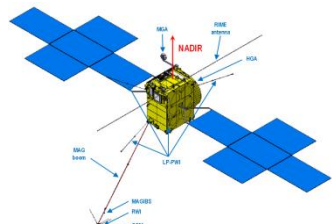
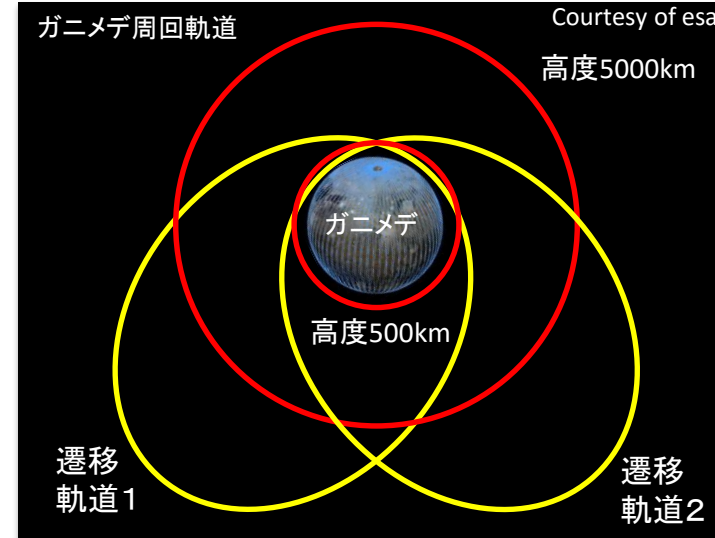
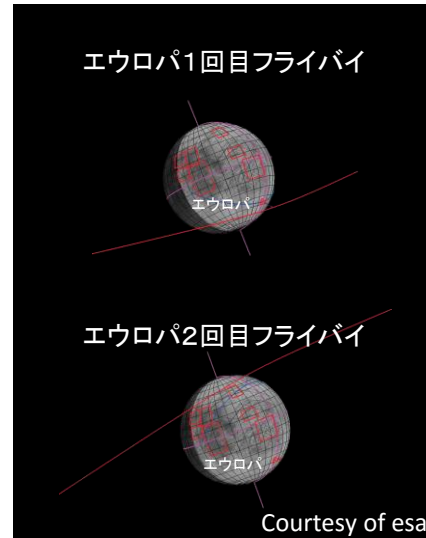
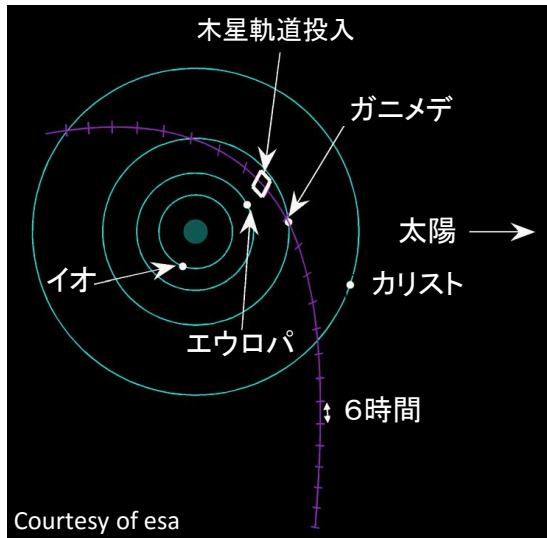


系外惑星にも氷衛星は期待されることから、太陽系において氷衛星の世界を理解することが重要で、まずは、地下海があるという仮説を検証するべきである。



# JUICE ミッション・タイムライン

2022年にアリアン5にて打ち上げ、2030年に木星系到着、2032年にガニメデ周回軌道に投入し、約8か月後の2033年6月にミッションを完了する。**世界初の氷衛星の周回機。**



探査機開発

地球→金星  
→地球→火星→  
地球→木星

木星周回→  
エウロパフライバイ

ガニメデ周回  
→高度5000km  
→高度500km

2022.6

アリアン5にて打上  
(バックアップ2023.8)

2030.1

木星軌道投入

2032.9

ガニメデ  
周回軌道投入

2033.6

ミッション終了  
(バックアップ2034.12)

# JUICE 探査機の主要諸元



項目	諸元
姿勢制御方式	3-axis stabilised
電力	Solar Panels : 800W(EOM)
ハイゲインアンテナ	3.2 m Body fixed X & Ka Band
ダウンリンク	1.4Gbit/day 以上
軌道変換能力	約2700m/s
放射線レベル	240 krad/10mm Al solid sphere
ドライ質量	約2200kg
推進薬質量	約2900kg
全ペイロード質量	219kg
ペイロード電力	約180W

## <JUICE 探査機の設計制約>

- 太陽からの距離が大きい
- 太陽電池の電力を使用する
- 木星の厳しい放射線環境に曝される

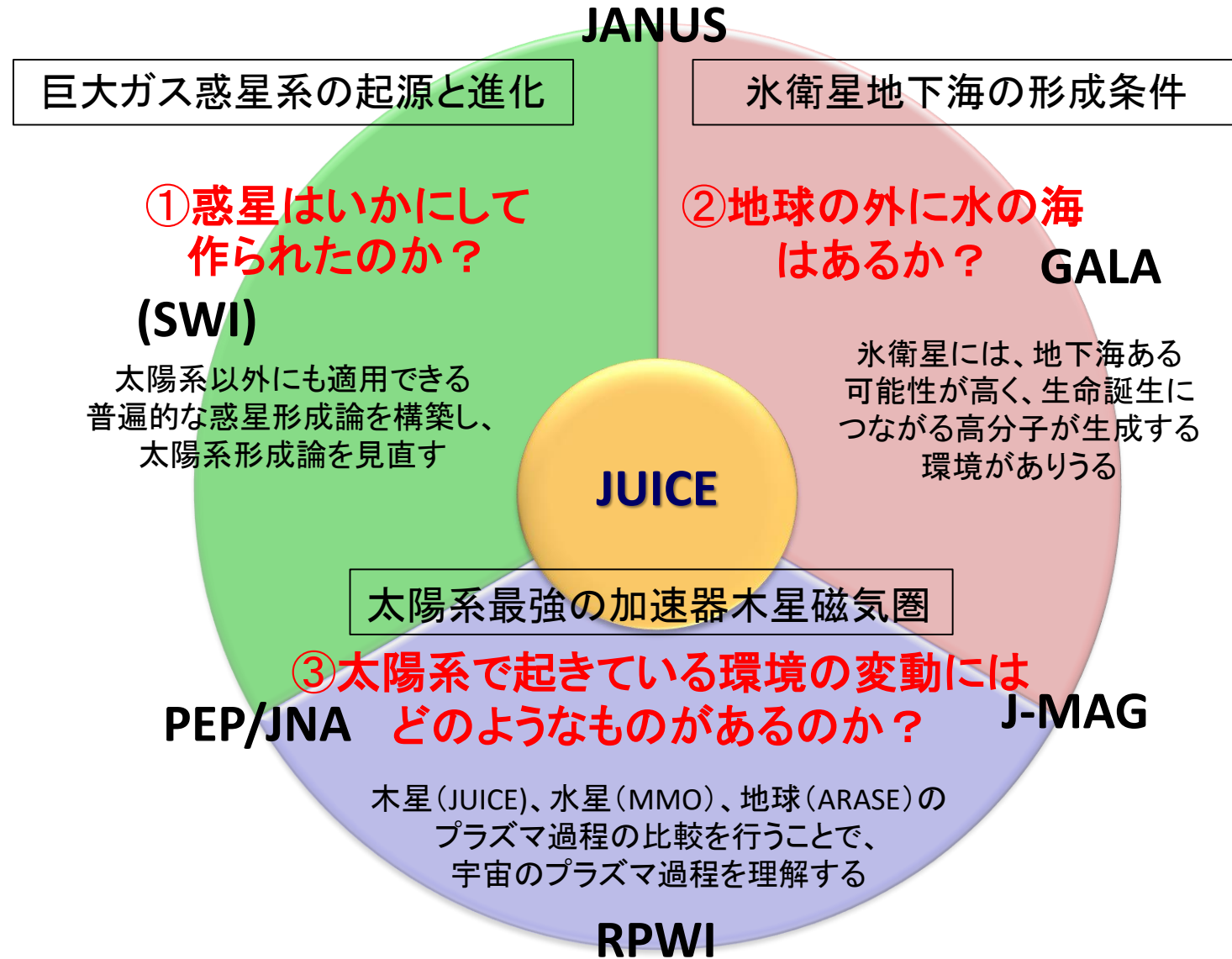
# JUICE 搭載の観測機器とISASの参加検討項目

JUICE搭載の全11の観測機器の内、ISASは3機器にハードウェア提供して参加し、2機器にサイエンス参加することを検討中。

	観測機器	内容	担当国	日本参加
1	<b>JANUS</b>	Camera system (カメラ)	イタリア	Science参加
2	<b>MAJIS</b>	Moon and Jupiter Imaging Spectrometer (可視・赤外分光)	フランス	なし
3	<b>UVS</b>	UV Imaging Spectrograph (紫外線分光器)	アメリカ	なし
4	<b>SWI</b>	Submillimeter wave Instrument (サブミリ波観測機器)	ドイツ	なし
5	<b>GALA</b>	GAnymede Laser Altimeter (レーザ高度計)	ドイツ	H/W提供 & Science参加
6	<b>RIME</b>	Radar for Icy Moons Exploration (氷衛星探査レーダー)	イタリア	なし
7	<b>J-MAG</b>	A magnetometer for JUICE (磁力計)	イギリス	Science参加
8	<b>PEP</b>	Particle Environment Package (粒子環境パッケージ)	スウェーデン	H/W提供 & Science参加
9	<b>RPWI</b>	Radio and Plasma Wave Investigation (プラズマ波動および電波観測機器)	スウェーデン	H/W提供 & Science参加
10	<b>3GM</b>	Gravity & Geophysics of Jupiter and Galilean Moons (木星およびガリレオ衛星の重力および地球物理学探査)	イタリア	なし
11	<b>PRIDE</b>	Planetary Radio Interferometer & Doppler Experiment (惑星電波干渉計およびドップラー実験)	オランダ	なし

ISASの参加項目:  H/W提供 & Science参加  Science参加  
 NICTがH/W提供 & Science参加

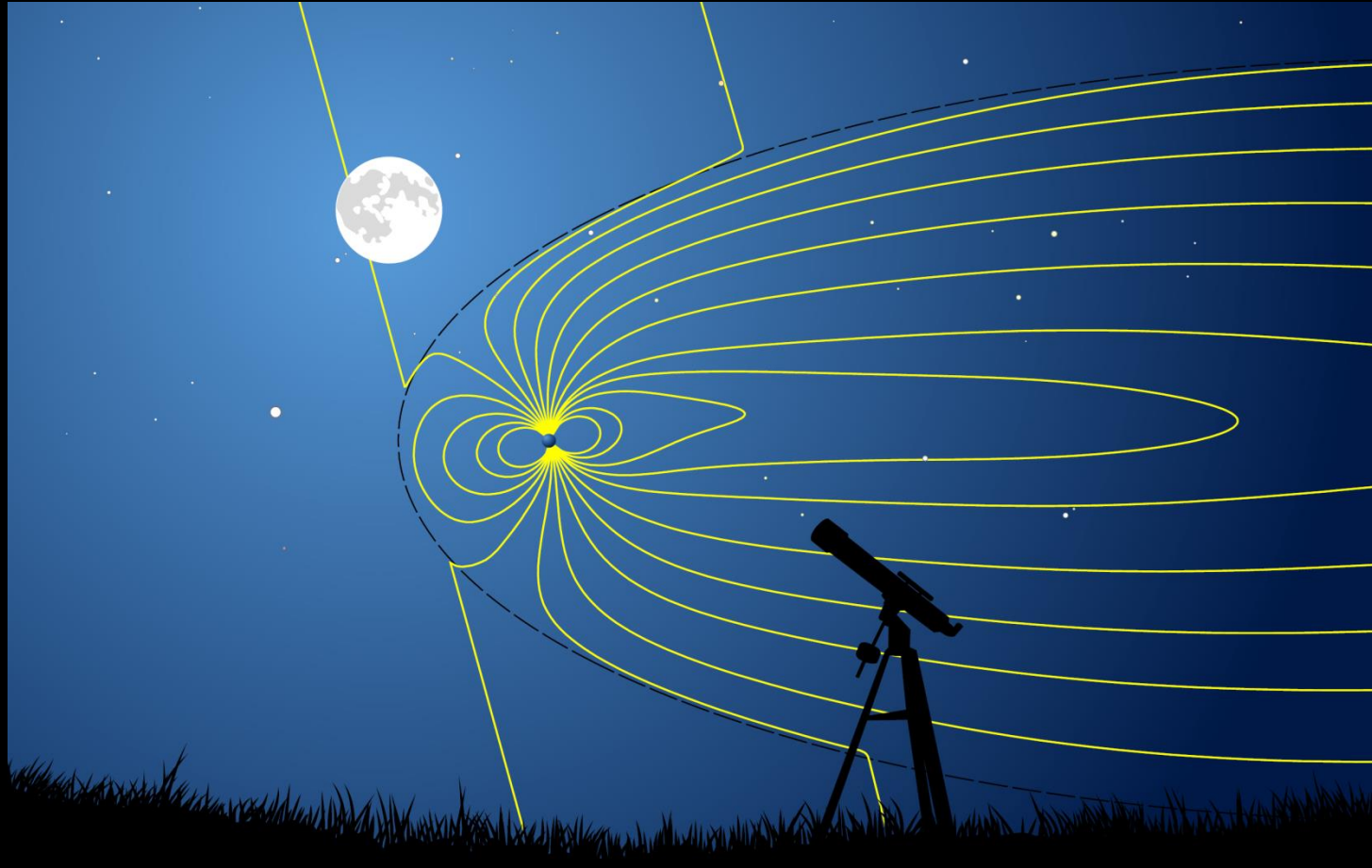
# JAXAがJUICEミッションに参加する科学的意義



<太陽系で起きている環境の変動にはどのようなものがあるのか？>

## 巨大な木星磁気圏

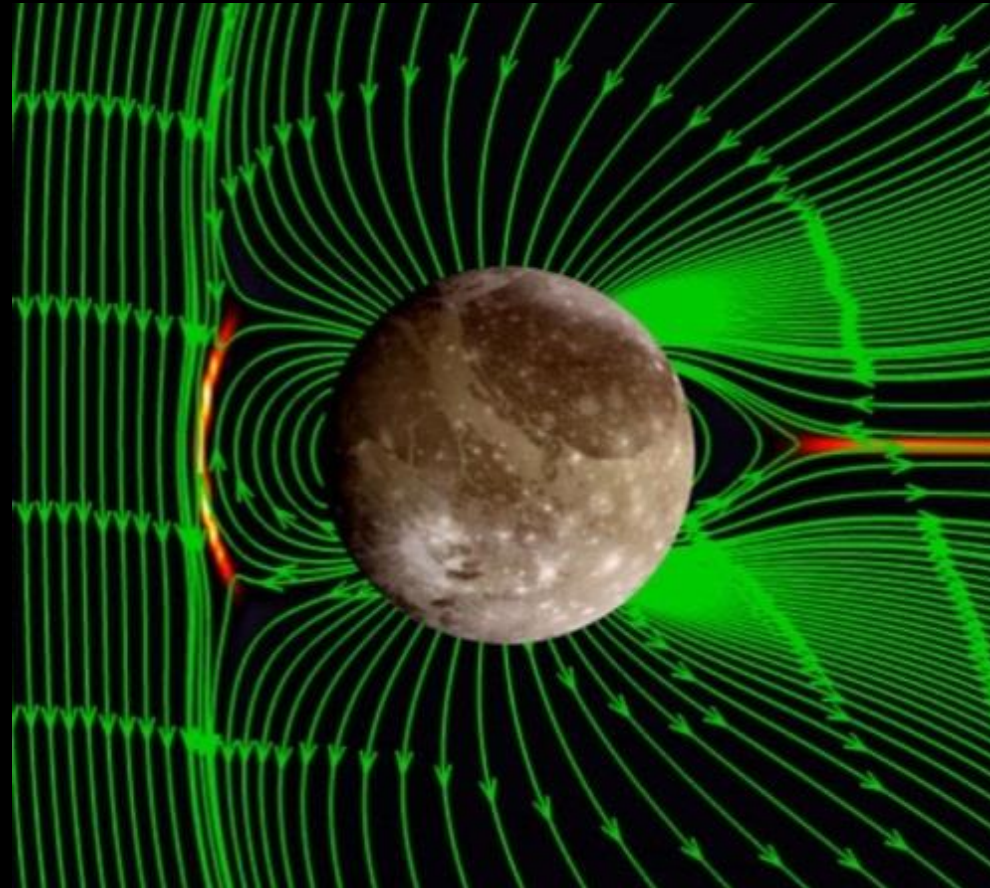
木星の周りには巨大な磁気圏が形成されている



< 太陽系で起きている環境の変動にはどのようなものがあるのか？ >

## ガニメデの固有磁場

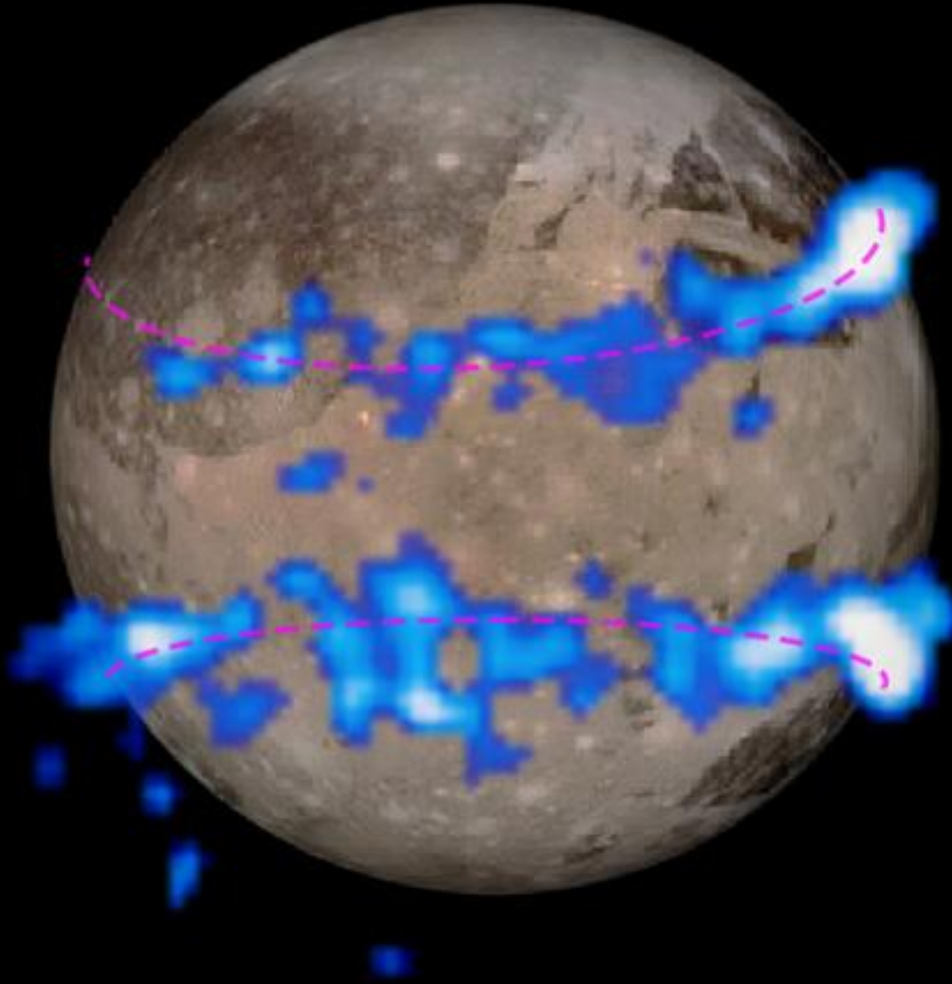
JUICE の目的地であるガニメデは  
太陽系の衛星で唯一固有の磁場を持っている



Credit: NASA/ESA

<太陽系で起きている環境の変動にはどのようなものがあるのか？>

## ガニメデのオーロラ



Credit: NASA/ESA

ガニメデは磁場を持つ唯一の衛星。磁場に沿って木星の高いエネルギー粒子が衝突してガニメデにもオーロラが発生する。

< 太陽系で起きている環境の変動にはどのようなものがあるのか？ >

2025年  
ベピコロンボは  
太陽風プラズマが  
吹き付ける  
水星磁気圏を訪れます



< 太陽系で起きている環境の変動にはどのようなものがあるのか？ >

2032年  
JUICEは  
木星磁気圏プラズマが  
吹き付ける  
ガニメデ磁気圏を  
訪れます

# 日欧協力：BepiColombo/MMO から JUICE へ

異なる環境におかれた同程度の大きさの磁気圏の比較

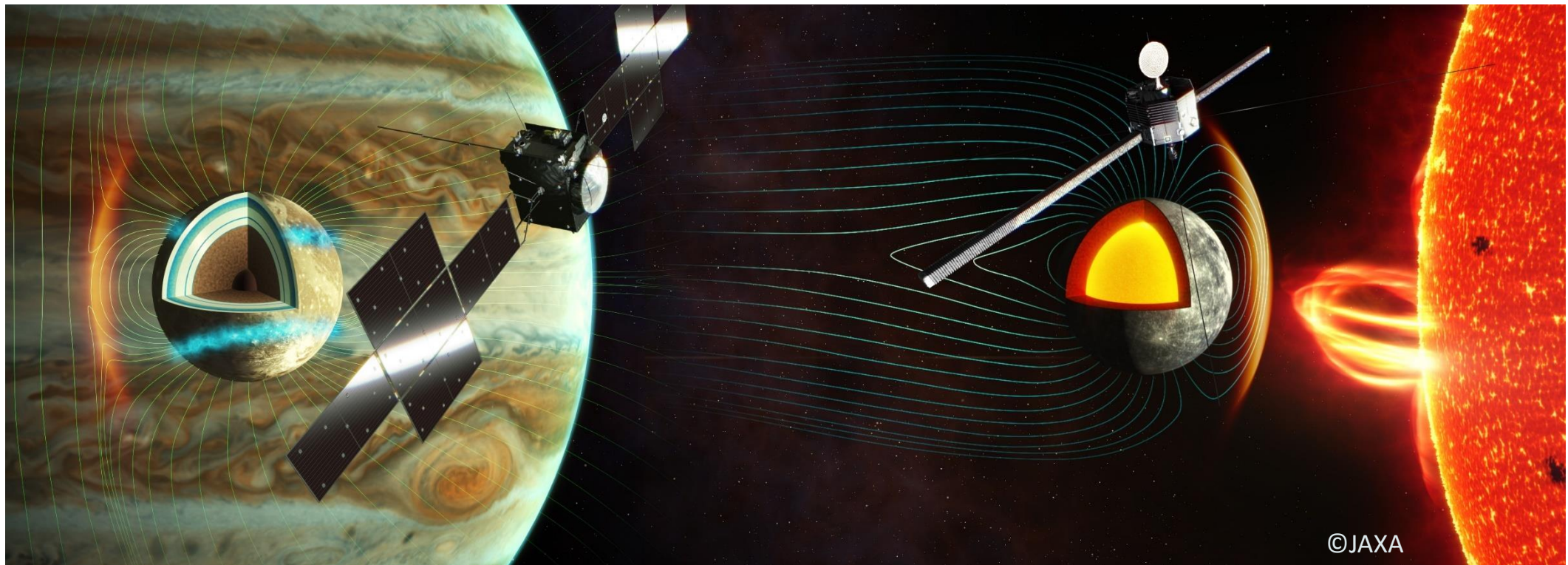
→ 磁気圏・宇宙プラズマ過程の理解

ジュース (JUICE)

木星氷衛星探査計画

ベピコロombo (BepiColombo)

国際水星探査計画



<https://juice.stp.isas.jaxa.jp> (「JUICE 木星」で検索)

