

Phi Colloquium

Space-based measurement of the neutron lifetime using data from the neutron spectrometer on NASA's MESSENGER mission

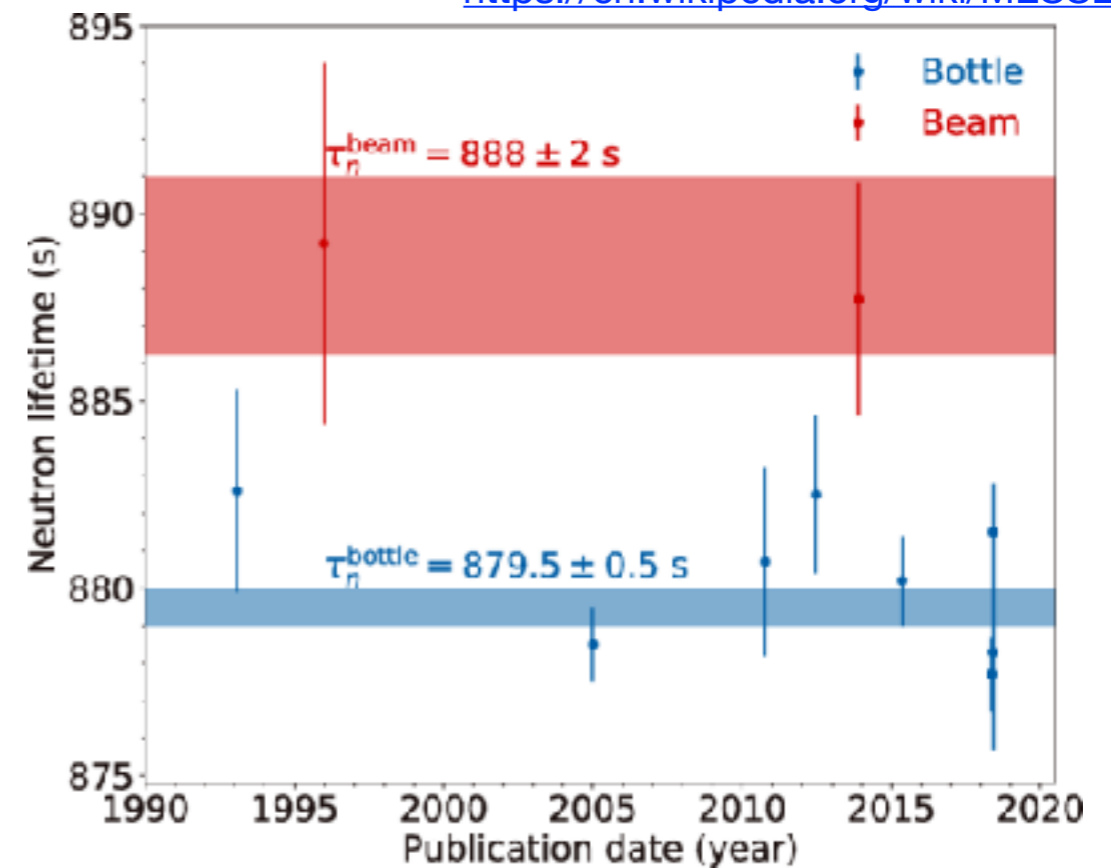
M1 Takuro HASEGAWA

概要

- 銀河宇宙線 (Galactic Cosmic Rays; GCR) が惑星大気と核破砕反応を起こし中性子が発生
- 中性子数が惑星からの距離に応じて減少する様子から中性子寿命を測定
- 水星探査衛星が金星と水星でスイングバイした際に中性子数をスペクトロメータで合計70分間測定
- 中性子寿命はBeam法とBottle法の間で9 sの乖離が見られる (Neutron Lifetime Puzzle)
- 2種類の従来手法とは異なる系統誤差を持つ宇宙での測定が有効であることを実証した



<https://en.wikipedia.org/wiki/MESSENGER>



水星探査

- 1970年代に打ち上げられたMariner10による探査が最後

- 水星探査は,

- 水星の公転速度が大きい
- 太陽からの電磁波が強力

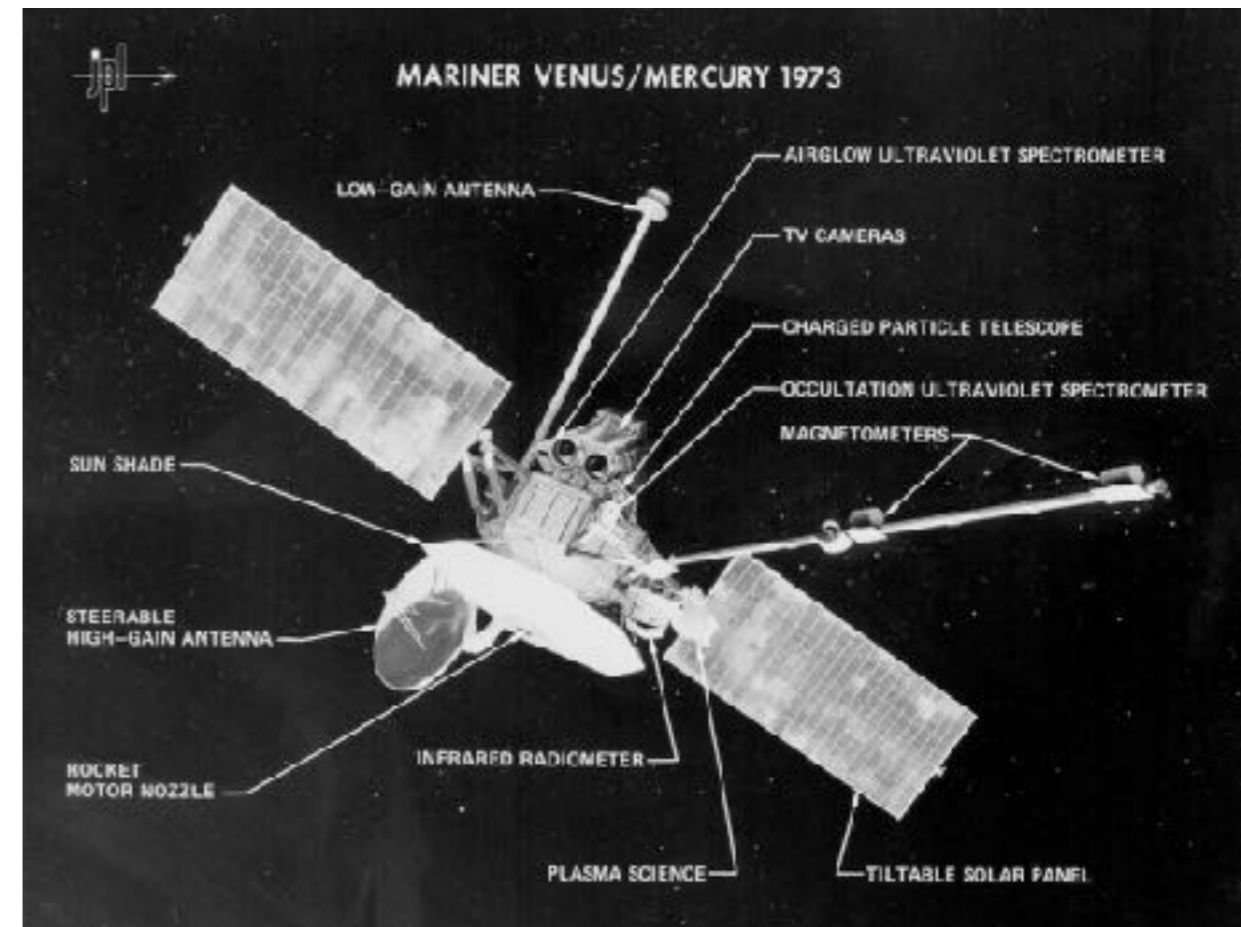
などの理由から探査が困難とされてきた

- MESSENGERの目的は,

- 水星表面の化学組成を調査
- 水星磁気圏の性質を解明する
- 水星のコアの大きさと状態を調査
- 極域の揮発性物質の分布を調査

- 北極点における氷の発見

- 大気中に電離したマグネシウムを発見



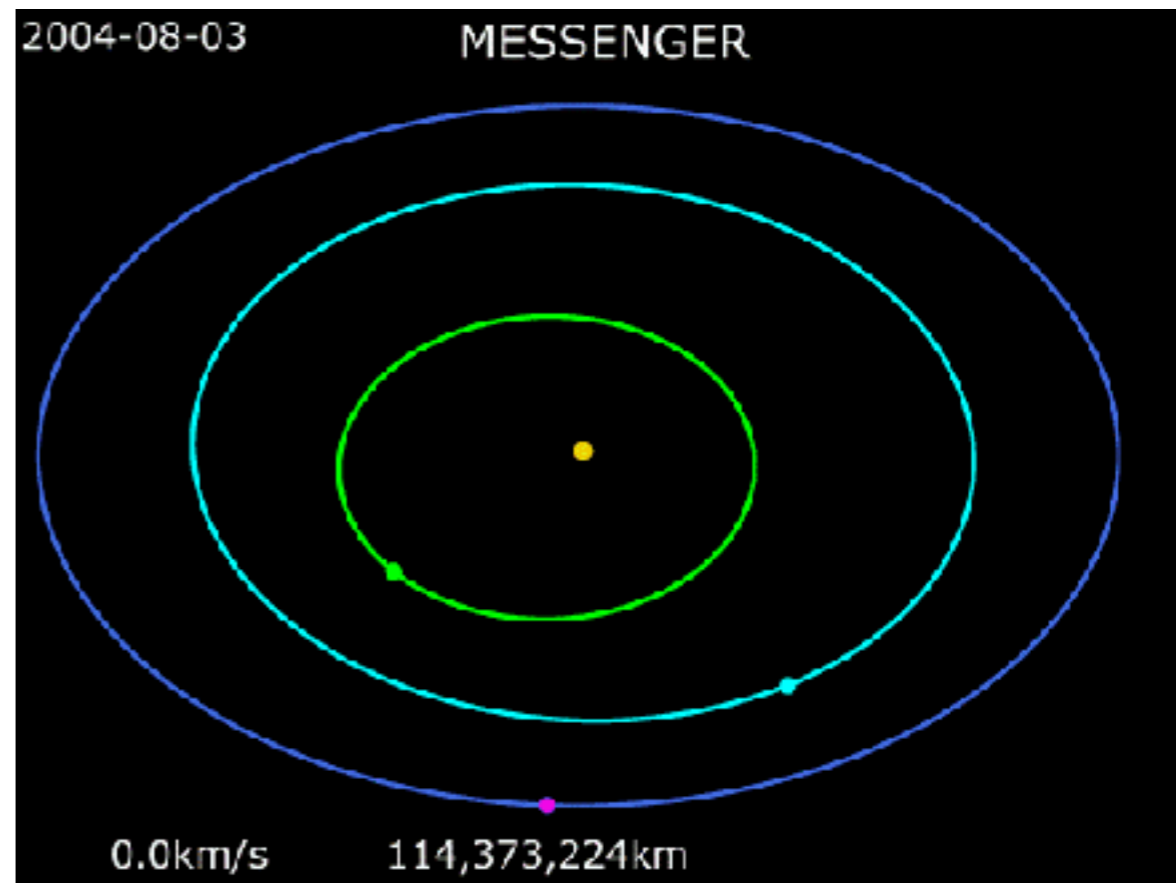
https://en.wikipedia.org/wiki/Mariner_10#/media/File:Mariner10.jpg

MESSENGER計画

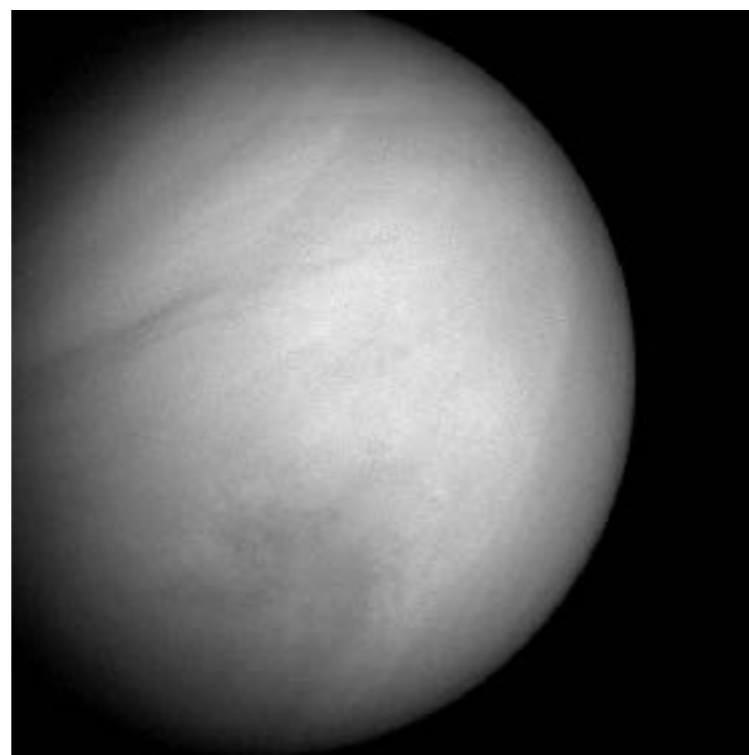
- 2004年8月3日 : 打ち上げ
- 2011年3月18日 : 水星の周回軌道に投入
- 2015年5月1日 : 水星表面に落下, ミッション終了



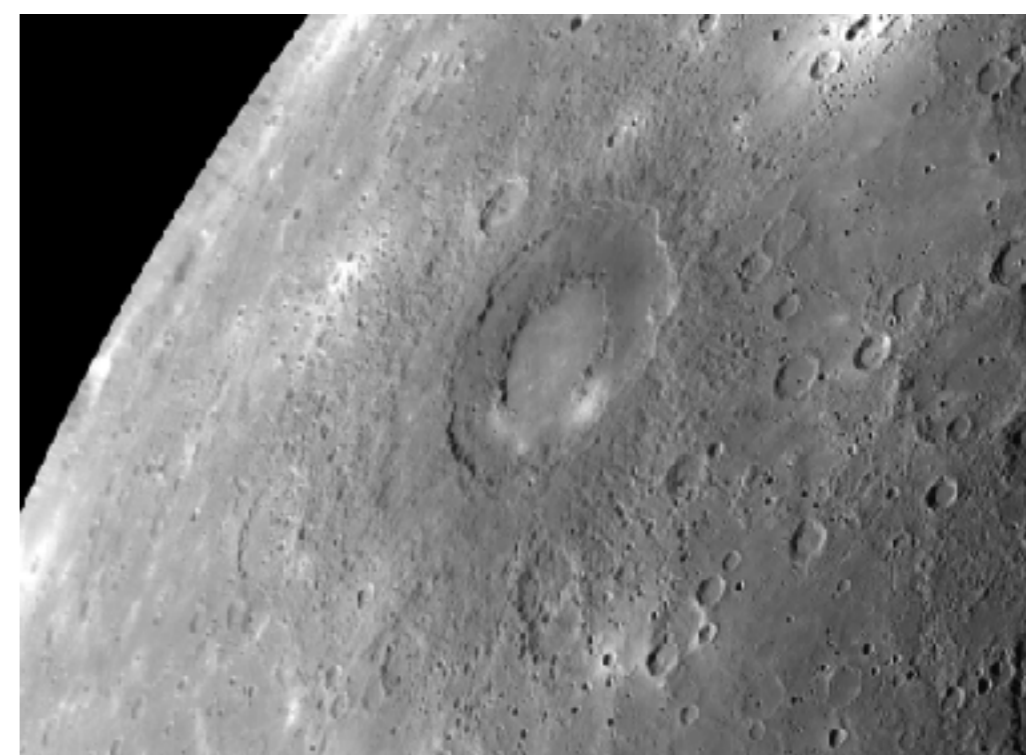
太陽系家族写真



地球



火星

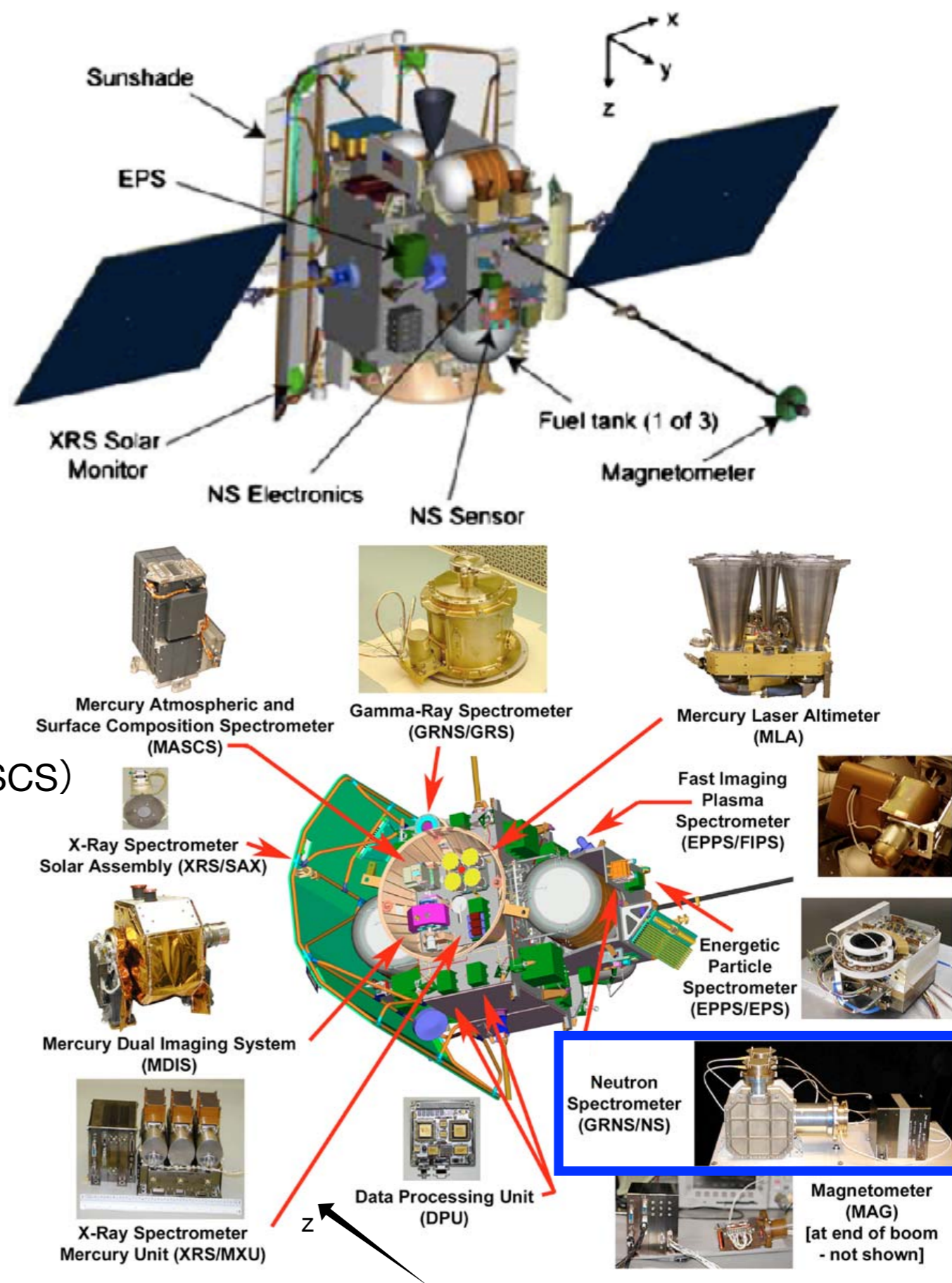


水星 (Rachmaninovクレーター)

<https://en.wikipedia.org/wiki/MESSENGER>

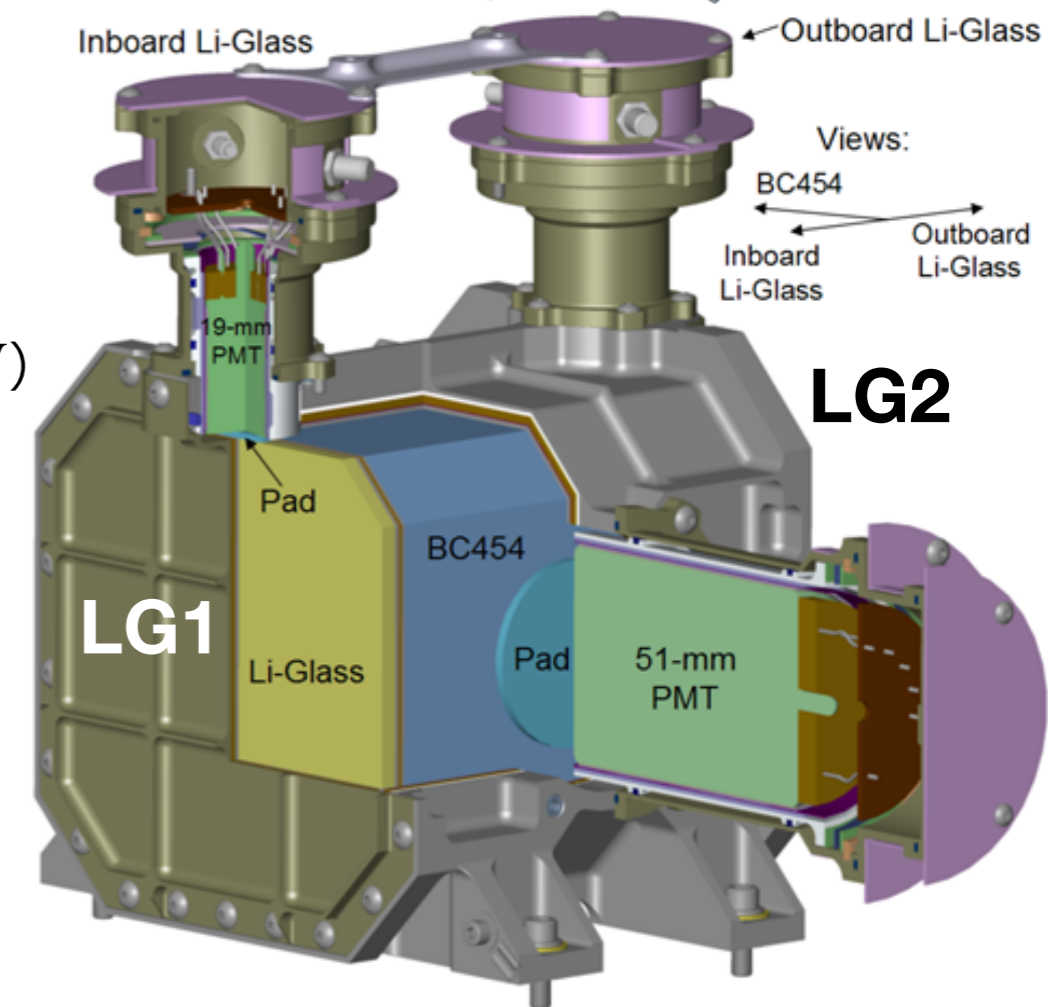
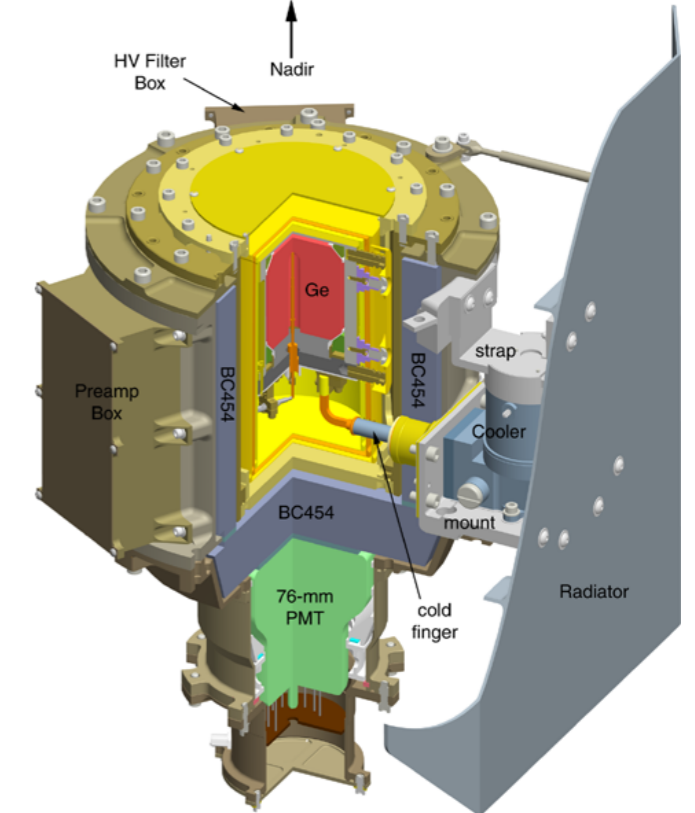
MESSENGER衛星

- 本体サイズ：1.27 m × 1.42 m × 1.85 m
- 重量：1093 kg
- 太陽光を遮るための日よけ
- 観測装置
 - γ 線・中性子スペクトロメータ (GRNS)
 - 水銀撮影用のカメラ (MDIS)
 - X線検出器 (XRS)
 - 水星磁気圏測定用の磁力計 (MAG)
 - 水星表面観測用の紫外可視分光計 (MASCS)
 - イオン・プラズマ検出器 (EPPS)
- 今回の解析に用いたのはGRNSで
検出した中性子



γ 線・中性子スペクトロメータ

- γ 線検出器
 - 高純度Ge検出器
 - ホウ酸を添加したプラスチックシンチレータで周囲を遮蔽
anti-coincidenceによって宇宙線BGを落とす
- 中性子検出器
 - $10 \times 10 \times 10$ cmの角を落とした立方体型
 - Liガラスシンチレータ $\times 2$ とホウ酸プラシン
 - 個別のPMTで読み出し
 - 熱中性子 (0 – 1 eV) , 熱外中性子 (1 eV – 500 keV)
高速中性子 (500 keV – 7 MeV) のカウントを個別に測定可能
 - Liガラスシンチレータは主に熱中性子に対して高感度
 - 右図手前が内側検出器, 奥が外側検出器
 - ホウ酸プラシンは周囲を0.25mm厚のGdで遮蔽
熱外中性子と高速中性子にのみ感度



中性子の検出

- 宇宙空間の物体には、銀河宇宙線（Galactic Cosmic Rays; GCR）が降り注ぐ
- GCRの大半は高エネルギーの陽子で、惑星表面・大気との核破砕反応によって大量の中性子が発生
- 他の原子核と反応を繰り返しながらエネルギーを失い、周囲の物質と熱平衡に達する
- 中性子は惑星の周囲を漂い、一部は重力に逆らい衛星で検出できる

- エネルギーごとのカウントを調べることで、どのような核反応で生成された中性子かがわかる
→異なる高度での元素組成を調べることが可能
（これがMESSENGER計画の本来の目的）
- 中性子の寿命によって衛星まで到達する以前に崩壊してしまう
→（原理的に）中性子寿命を見積もることができる

- 太陽の方向に応じて、衛星の方向を変える必要があるため
中性子のフラックスは測定できない（方向の情報は得られない）

- 金星の2回目のスイングバイと水星の最初のスイングバイ時の測定データを使用
- 金星・水星とも高度 10^4 km以下のデータに限定して解析

金星での測定

- 金星の大気は、 CO_2 が約96%を占め、残りはほぼ完全に N_2
- $^{14}\text{N} + \text{n} \rightarrow ^{15}\text{N}$ と $^{14}\text{N} + \text{n} \rightarrow ^{14}\text{C} + \text{p}$ 反応によって窒素が中性子を吸収するため窒素濃度は検出される中性子数に大きく影響

- 中性子が主に発生する大気の高さは50 km
- 対して、金星の均質圏界面高さは120 km
 - 均質圏とは、
拡散と対流のために大気組成が均一な領域
均質圏界面の外側は高度が上がるにつれて分子量の大きい成分から順に減っていく

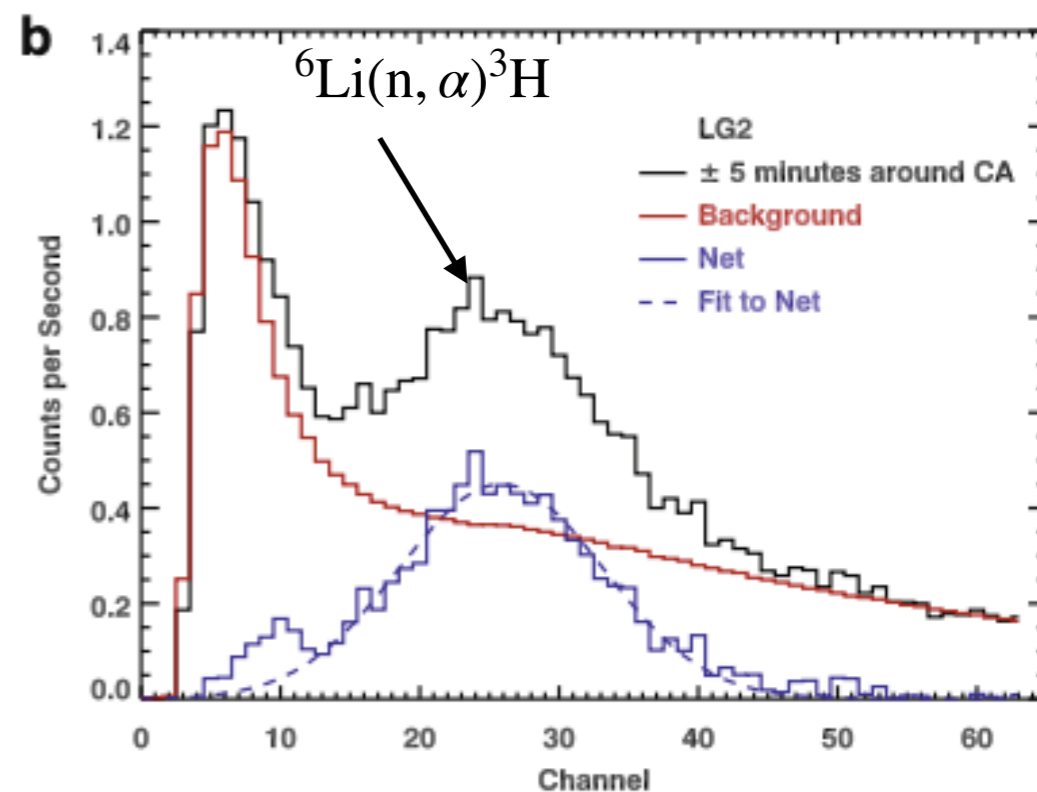
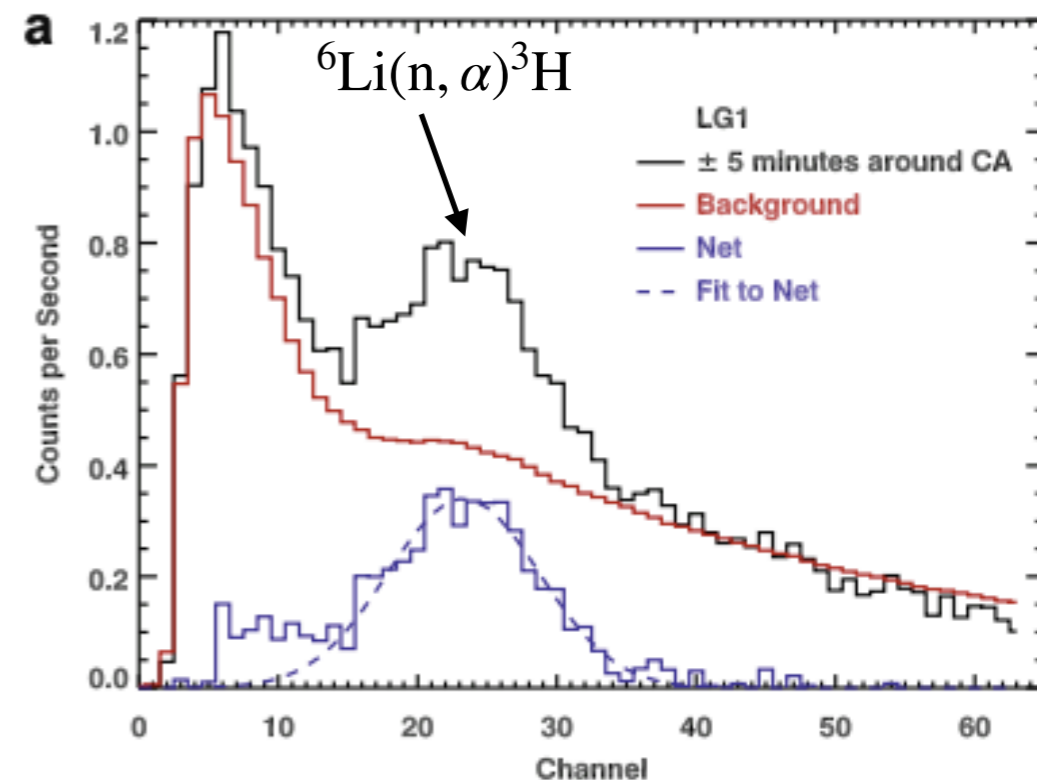
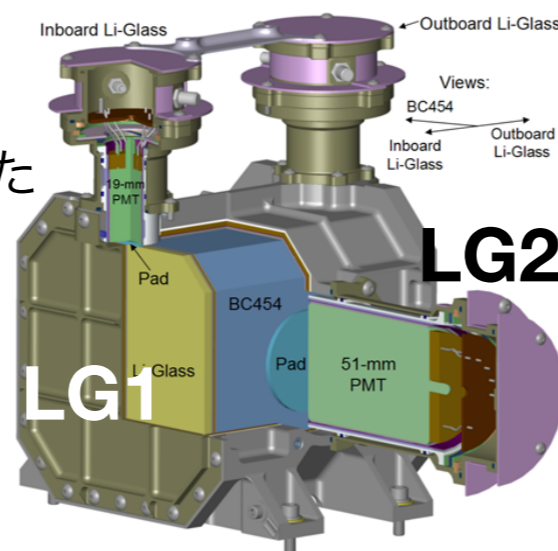
- 高度100km以下では、金星大気の様度は、時間的・高度的・緯度的に（スイングバイした領域では）変化がほとんど見られない
→大気の様度が中性子のエネルギー分布には影響しないことを確認

検出した信号

- ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応からの478 MeVのピークが信号
- BGとして,
 - 銀河宇宙線 (GCR), 惑星由来の高速中性子 (連続的な分布)
- 黒: 惑星に最接近した際のスペクトル (低高度)
- 赤: 高度 10^4 km以上のスペクトル (高高度)
- 青: 黒 - 赤
 - 吸収ピークから離れたスペクトルが, **低高度と高高度**で一致するように, スケールしてBGを差し引き

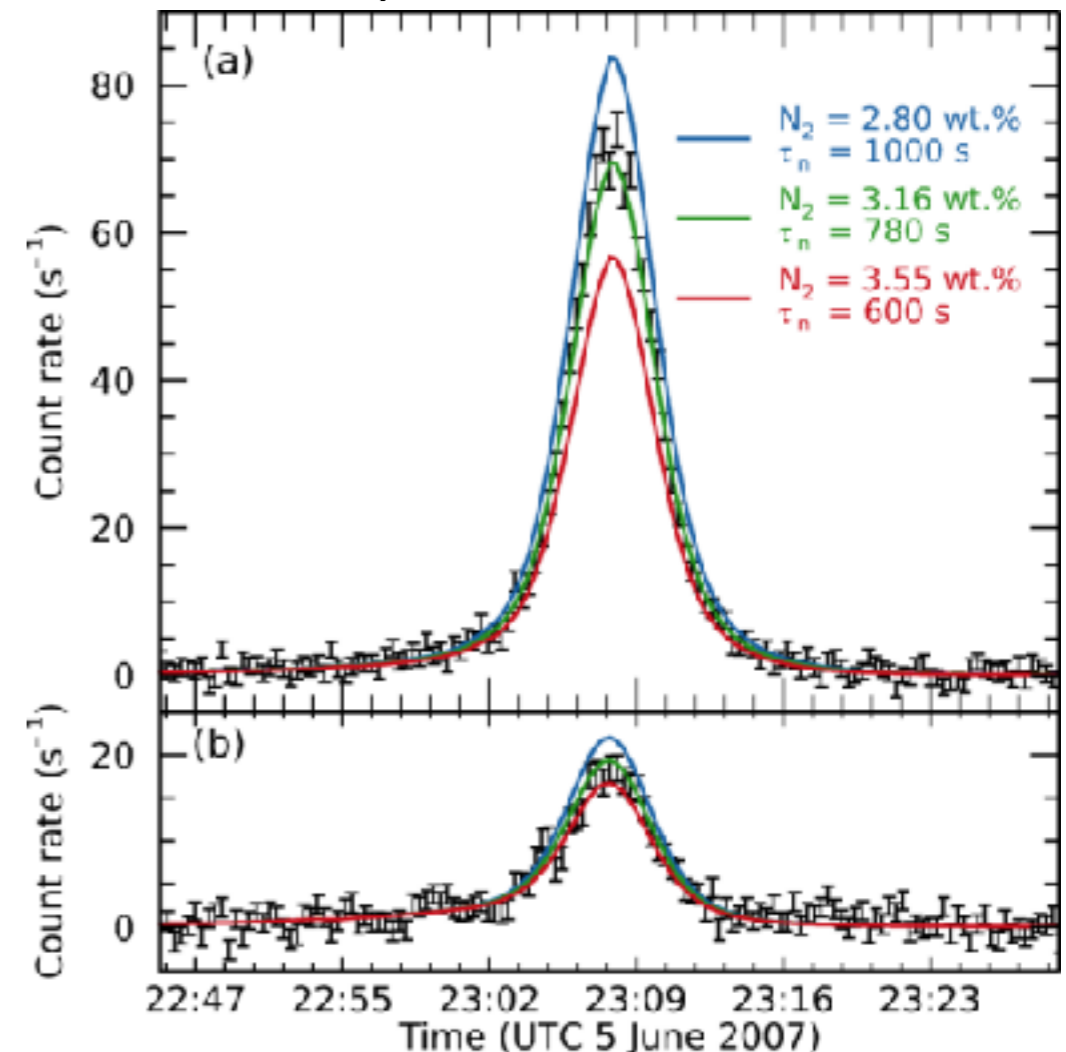
- **差し引いたスペクトル**のピークを積分して中性子カウントを求めた

- a: 内側検出器(LG1)
- b: 外側検出器(LG2)



解析手法

- 中性子寿命と金星大気中の窒素濃度を仮定した計数率モデルとLiガラスから得られた測定データを比較することで寿命を決定
- 3段階の計算によって惑星からの中性子カウント数を推定
 1. 粒子輸送コードMCNPXを用いて惑星表面や惑星大気からの中性子フラックスをモデル化
(MCNPX...Monte Carlo N-Particle eXtended version of MCNP4C)
 2. 検出器に対してMCNPX計算を行い、中性子エネルギーごとの応答を計算
 3. 表面でのフラックスを衛星高度でのフラックスに解析的に拡張
衛星と中性子の相対運動によるドップラーシフトを考慮に入れて、検出されるカウント数を計算
- 上：衛星進行方向前面のLiガラス検出器
下：衛星進行方向背面のLiガラス検出器

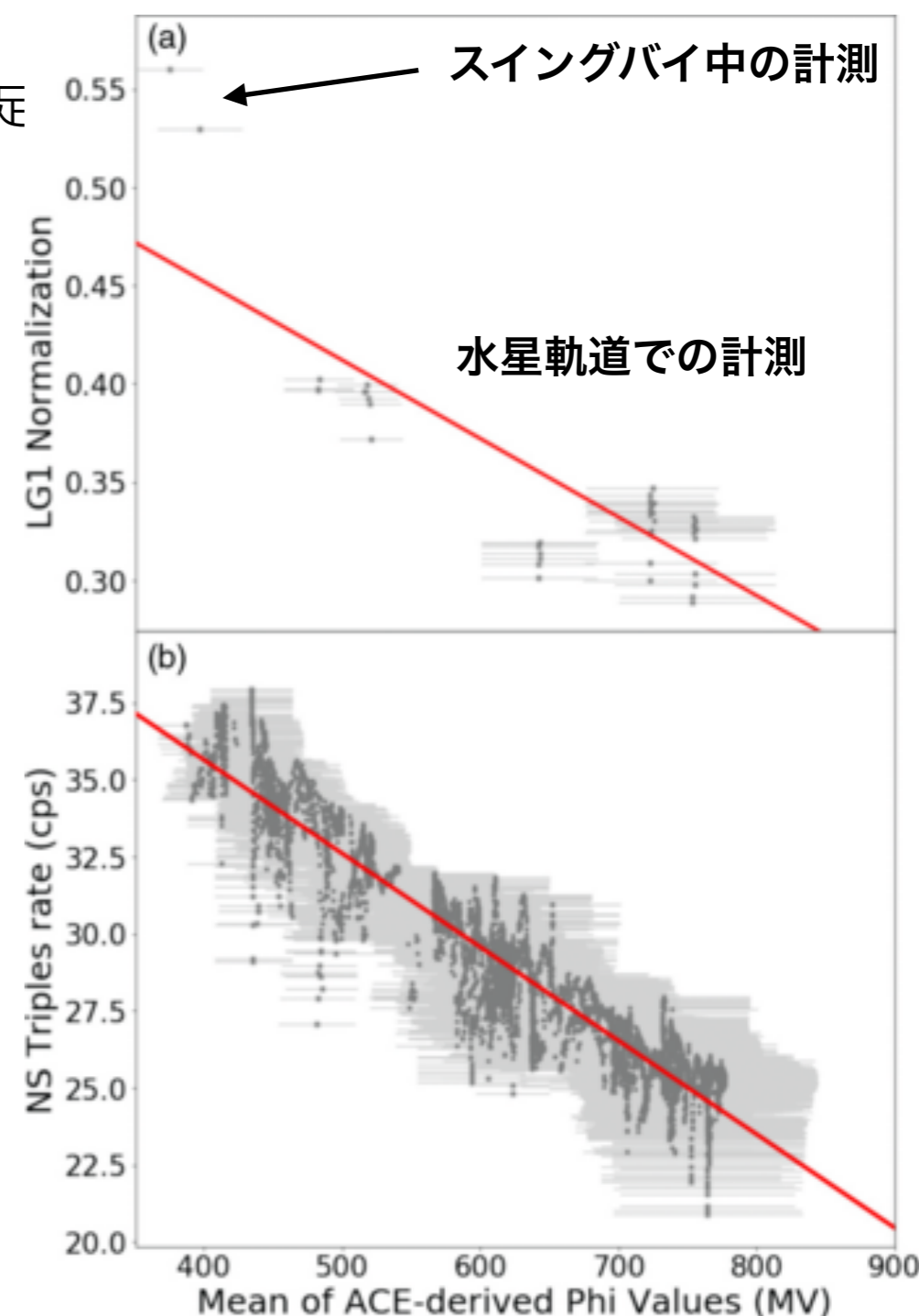


解析手法

- GCRのエネルギースペクトルの形だけではなく、カウント数の絶対値の情報を考慮するために水星での測定データを用いた
- 金星のみのデータでは、カウント数の規格化には統計量が不足
- GCRのカウント数は太陽活動の活発度合い Φ に依存する
- GCRはMESSENGER衛星の3つの中性子検出器 (LG1,2, ホウ酸プラシン) のcoincidenceから計測 (右下(b) : NS Triples rate)
- 太陽活動の活発度合い Φ はACE衛星で測定, 算出
- 太陽が活発なほど, 太陽磁場によって惑星に飛来するGCRが減少する
- 中性子数のカウントは, NS Triples rateに比例することを利用しカウント数を規格化



https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Composition_Explorer



結果

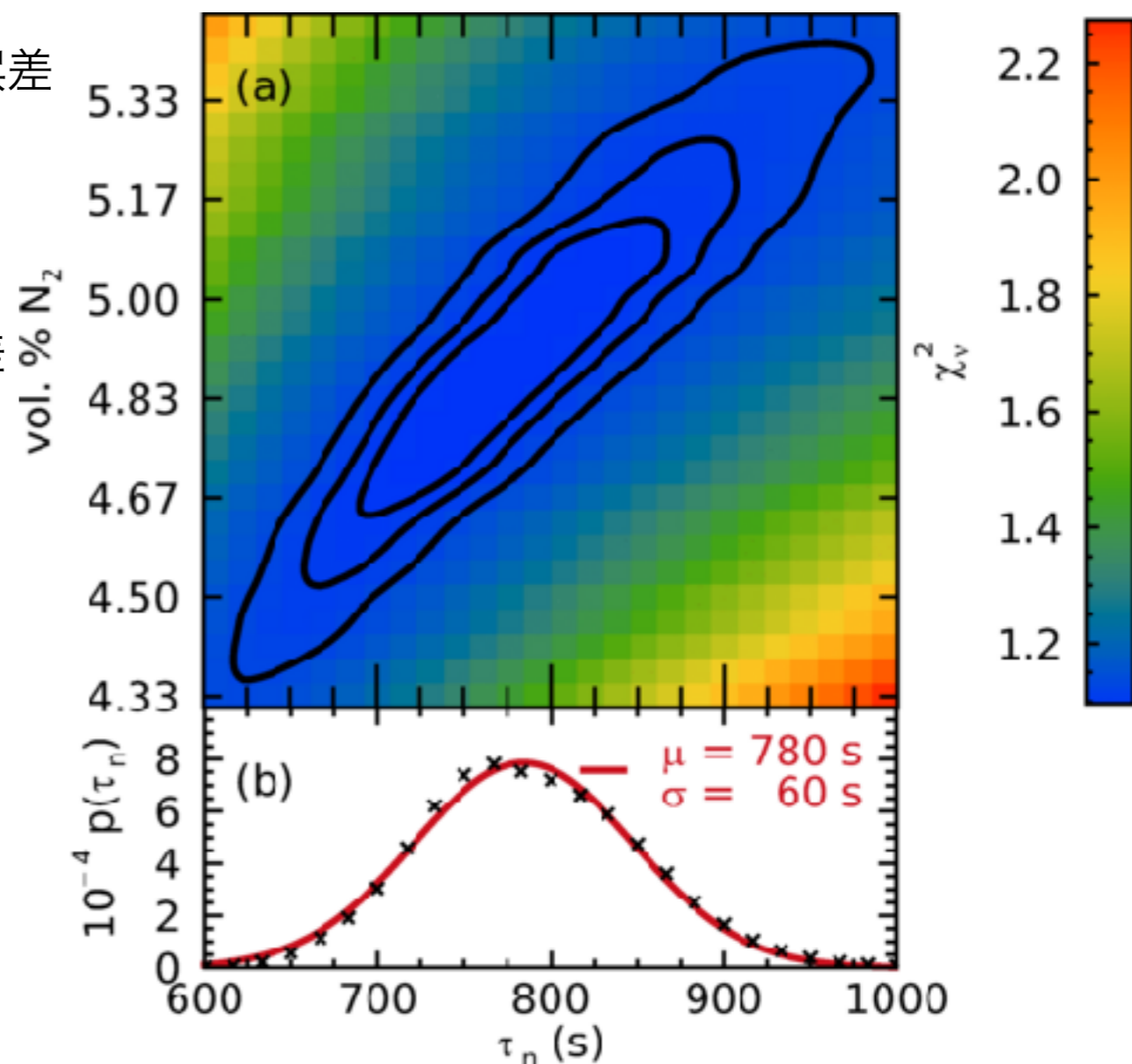
- N_2 濃度について積分することで、中性子寿命だけの確率分布を計算
→ $\tau_n = 780 \pm 60_{\text{stat}} \pm 70_{\text{syst}} \text{ s}$
- (地上実験での τ_n の値を用いることで、最高精度で金星大気中の N_2 濃度を決定できた)

1. 今回の測定方法 (金星, 水星併用) 固有の系統誤差

- 金星と水星間のGCRフラックスの変動
- 水星の表面組成の不確かさ

2. 金星由来の中性子を用いた測定手法での系統誤差

- 緯度や時間帯による大気組成変動
- 大気の熱変動
- 金星大気中の CO_2 , N_2 以外の気体
- モデル化された検出器応答関数の不確かさ
- モンテカルロ粒子輸送モデルの不確かさ
- 粒子輸送計算に用いた断面積の不確かさ



まとめ

- 本論文の主張
 - 惑星表面や大気と銀河宇宙線による核破碎反応によって発生した中性子を検出、宇宙において中性子寿命を測定する手法の確立可能性を示した
 - 宇宙での測定は、従来手法（Beam法, Storage法）とは異なる系統誤差を持ち、neutron lifetime puzzle解決の新たな道となる可能性
- 今後の展望
 - 金星での測定の統計を改善すれば、金星のデータセットだけを使用することが可能に
 - 統計精度が悪いのは、金星での飛行時間が短く（高度104km以下で合計70分）データ量が少ないことに起因（最終目的地が水星のため）
 - 金星のみでの測定が実現できれば、最大の系統誤差である、水星のデータによるGCRフラックス規格化に由来する系統誤差をなくせる
- 個人的な感想
 - 中性子寿命測定専用のミッションを計画してみるの面白そう（地球でも、金星でも）