

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊

**PRESS RELEASE**

2021 年 4 月 8 日

理化学研究所 東京大学宇宙線研究所 広島大学  
 国立彰化師範大学 宇宙航空研究開発機構  
 情報通信研究機構 アメリカ航空宇宙局

**宇宙の灯台「かにパルサー」に隠れていた X 線のきらめき  
 – 巨大電波パルスに同期した X 線増光の検出に成功 –**

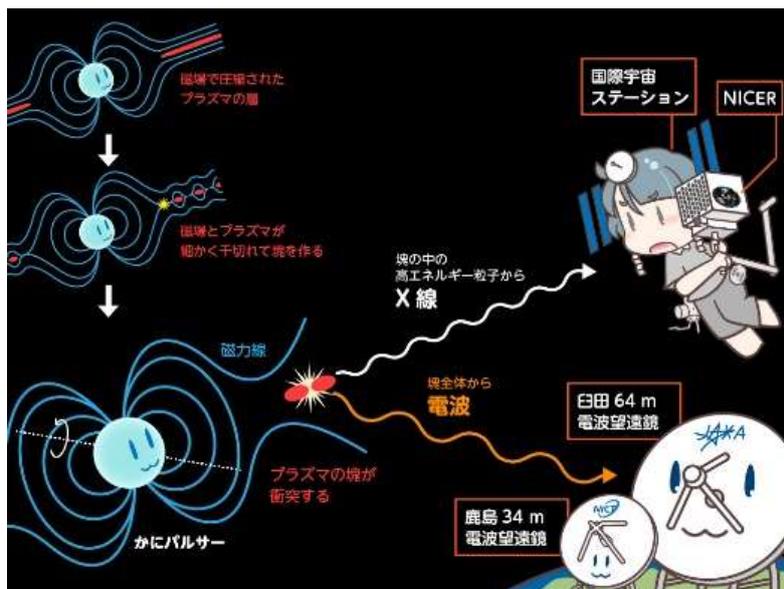
理化学研究所（理研）開拓研究本部の榎戸輝揚理研白眉研究チームリーダー、フー・チンピン客員研究員（国立彰化師範大学助教）、東京大学宇宙線研究所の寺澤敏夫名誉教授、浅野勝晃准教授、広島大学の木坂将大助教、宇宙航空研究開発機構の村田泰宏准教授、情報通信研究機構の関戸衛研究マネージャー、アメリカ航空宇宙局のキース・ジェンドルーNICER チーム代表、ザベン・アルゾメニアン NICER チーム共同代表らの国際共同研究グループ<sup>\*</sup>は、高速で自転する中性子星<sup>[1]</sup>「かにパルサー」で発生する「巨大電波パルス（GRP）<sup>[2]</sup>」に同期して増光する X 線を検出しました。

本研究成果は、過去 20 年にわたり複数のグループが挑戦してもなしえなかったものであり、宇宙遠方で発生する高速電波バースト（FRB）<sup>[3]</sup>の起源や発生メカニズムの解明にも貢献すると期待できます。

かにパルサーは、時折劇的に明るくなる GRP を発生します。このようなパルスの増光は電波でしか起こらないと考えられてきました。しかし近年、GRP に同期して可視光パルスがわずかに増光する現象が発見されたことから、よりエネルギーの高い X 線やガンマ線でも同様の現象が起こるのかどうかに大きな関心が寄せられていました。

今回、国際共同研究グループは、国際宇宙ステーションに搭載されたアメリカ航空宇宙局の X 線望遠鏡 NICER<sup>[4]</sup>（ナイサー）と日本の二つの電波望遠鏡を連携させ、2017 年から X 線と電波の同時観測を続けた結果、GRP が発生する瞬間に X 線パルスも 4%ほど増光することを突き止めました。これにより、GRP がこれまで考えられていたよりもはるかに大きなエネルギーを解放することが分かりました。

本研究は、科学雑誌『Science』（4 月 9 日号）の掲載に先立ち、オンライン版（4 月 8 日付：日本時間 4 月 9 日）に掲載されます。



「かにパルサー」の巨大電波パルスに同期した X 線増光の発見

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊

(credit：ひっぐすたん、画像は申請なしで自由に使用できます)

## ※国際共同研究グループ

理化学研究所 榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム

理研白眉チームリーダー 榎戸 輝揚 (えの と てるあき)

客員研究員 フー・チンピン (Hu Chin-Ping、胡 欽評)

(国立彰化師範大学 助教)

東京大学 宇宙線研究所

名誉教授 寺澤 敏夫 (てらさわ としお)

准教授 浅野 勝晃 (あさの かつあき)

広島大学大学院 先進理工系科学研究科

助教 木坂 将大 (きさか しょうた)

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系

准教授 村田 泰宏 (むらた やすひろ)

情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁波標準研究センター 時空標準研究室

研究マネージャー 関戸 衛 (せきど まもる)

アメリカ航空宇宙局 ゴダード宇宙飛行センター

NICER チーム代表 キース・ジェンドルー (Keith C. Gendreau)

NICER チーム共同代表 ザベン・アルゾメニアン (Zaven Arzoumanian)

ほか 31 人

## 研究支援

本研究は、理化学研究所の理研白眉制度、京都大学の白眉プロジェクト、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金新学術領域研究「超高時間分解能・大統計 X 線ミッション NICER との国際連携による中性子星観測 (研究代表者：榎戸輝揚)」、同基盤研究 (B) 「中性子星種族の多様性とそれを作り出す中性子星磁気圏の多様性・変動性の起源の解明 (研究代表者：柴田晋平)」、東北大学 PPARC 共同研究「大面積 X 線望遠鏡 NICER との連携による電波-X 線でのパルサー同時観測 (研究代表者：榎戸輝揚)」、日本学術振興会 (JSPS) 外国人特別研究員制度による支援を受けて行われました。

## 1. 背景

大質量の恒星がその一生を終えて超新星爆発<sup>[5]</sup>を起こすと、ブラックホールや中性子星が残されます。中性子星には、太陽質量の 1.4 倍もの物質が半径 10 km ほどの中に押し込められ、角砂糖 1 個の体積 (1cm<sup>3</sup>) で 1 億トンにも達する超高密度状態となっています。中性子星の外側には強い磁場とプラズマに満たされた磁気圏があり、そこから電波や X 線を放射しながら磁気圏とともに、1 回転あたり数ミリ秒から数十秒という高速で自転しています。そのため、中性子星からの放射が地球を向いているときに、自転に伴う周期的なパルスが観測されます。このようなパルスを発生する中性子星は「パルサー」ともいい、“宇宙の灯台”と呼ばれることもあります。

おうし座の方向、地球から約 6500 光年の彼方で美しく輝く「かに星雲」は 1054 年に起きた超新星爆発の名残であり、この爆発は藤原定家の『明月記』にも記されています。星雲の中心には「かにパルサー」が存在しており、1968 年

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊

かにが発見されて以来、電波、可視光、X 線、ガンマ線といった電磁波のほぼ全波長で観測が行われてきました（図 1）。



図 1 かに星雲とかにパルサーの多波長合成イメージ（提供：NASA）

かに星雲とかにパルサーの写真。X 線観測衛星チャンドラが観測した X 線（青）、ハッブル宇宙望遠鏡が観測した可視光（赤と黄色）、スピッツァー宇宙望遠鏡が観測した赤外線（紫）が合成されている。X 線で明るい中心の点源がかにパルサーで、そこから周辺に高エネルギーのプラズマが吹き出している。

しかし、かにパルサーの放射のメカニズムはいまだによく分かっておらず、周期的な電波パルスが散発的に通常より 10~1000 倍ほども明るくなる「巨大電波パルス (GRP)」も謎の一つです。ボース=アインシュタインの理論によると、電波の強度を上げるには放射源の実効的な温度を高くする必要があります。GRP の電波の強度を温度に換算すると  $10^{37}\text{K}$  以上になることもあり、現代物理が扱える温度の上限（プランク温度  $10^{32}\text{K}$ ）を超えることから、通常の放射メカニズムでは説明できません。

地球のある銀河系には 2,800 個ほどのパルサーが見つっていますが、そのうち GRP を発生するのは十数個だけです。これまで、GRP のようなパルスの増光現象は電波でしか発生しないと考えられてきました。しかし 2003 年、高速度カメラを使うことで GRP に同期して可視光のパルスが数%だけ明るくなる現象が発見され、天文学者を驚かせました<sup>注1)</sup>。というのも、その発見以前はパルサーにおける電波とそれ以外の波長（可視光、X 線、ガンマ線）の放射メカニズムは異なると考えられていたからです。そのため、よりエネルギーの大きい X 線やガンマ線でも同様の増光が見つかるのかどうか、大きな関心が寄せられていました。しかし過去 20 年間、複数のグループが大規模な観測プロジェクトを実施しても、X 線やガンマ線での増光は確認できませんでした。

注1) Shearer *et al.* Enhanced optical emission during Crab giant radio pulses. *Science*, 301(5632):493-5.(2003)

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊

## 2. 研究手法と成果

GRP に同期した X 線やガンマ線を探索する上で最も難しい点は、これまでの望遠鏡では十分な数の X 線光子やガンマ線光子を集められないことでした。中性子星内部の高密度な物質の状態を解明することを目的に、2017 年に国際宇宙ステーションに設置されたアメリカ航空宇宙局 (NASA) の新世代 X 線望遠鏡 NICER (ナイサー) は、中性子星の観測に最適化されたエネルギー領域でかつてない X 線の集光能力を誇り、高い時間分解能と、明るい天体でも検出器が飽和することなく測定可能という、GRP の探索に有利な性能を持ち合わせています (図 2)。



図 2 国際宇宙ステーションに搭載されている X 線望遠鏡 NICER の写真 (提供：NASA)

国際共同研究グループは、2017 年から 2 年ほどの間、X 線望遠鏡ナイサーと日本の二つの電波望遠鏡 (後述する) を連携させ、合計 15 回に上る X 線と電波の国際的な同時観測を実施し、これまでで最大となる量の X 線と電波の同時・多波長データを蓄積しました。解析の結果、GRP に同期して X 線パルスが 4% ほど増光していることが明らかになりました (図 3)。

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊

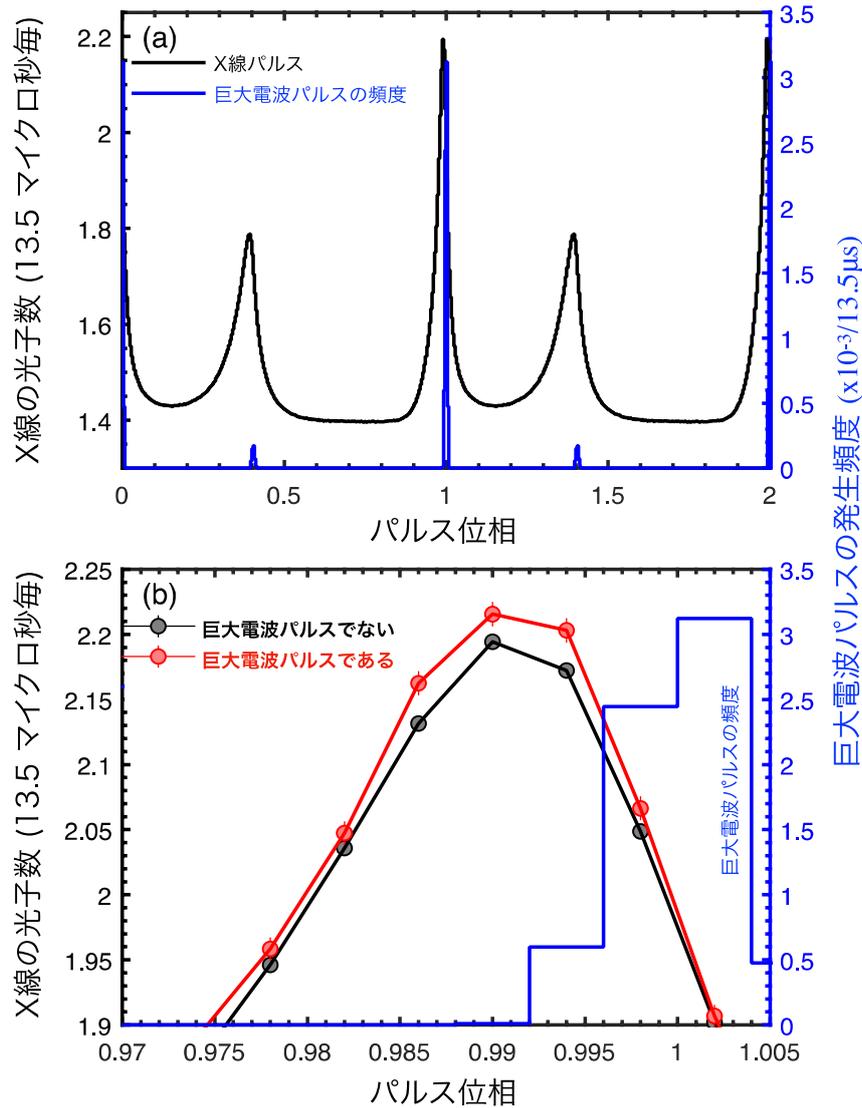


図3 かにパルサーのパルス波形と検出された X 線増光

上図: X 線望遠鏡ナイサーが観測したかにパルサーの X 線パルス波形(黒線)を 2 周期にわたって示した。同時観測で検出した巨大電波パルス (GRP) 発生タイミングを青線で示している。1 周期の中で、パルスにはメインパルス (パルス位相が 0 付近) と、インターパルス (パルス位相が 0.4 付近) の二つがある。

下図: 上図のメインパルス付近の拡大図。黒線は通常時の X 線波形で、赤線は GRP が起きたときのパルス。GRP が起きたときに、わずかだが明るくなっていることが分かる。

今回の X 線増幅率は可視光と同じくわずかだったものの、過去に行われた X 線やガンマ線での観測よりも高い感度を持つナイサーを用いることで、初めて検出に成功しました (図 4)。

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊

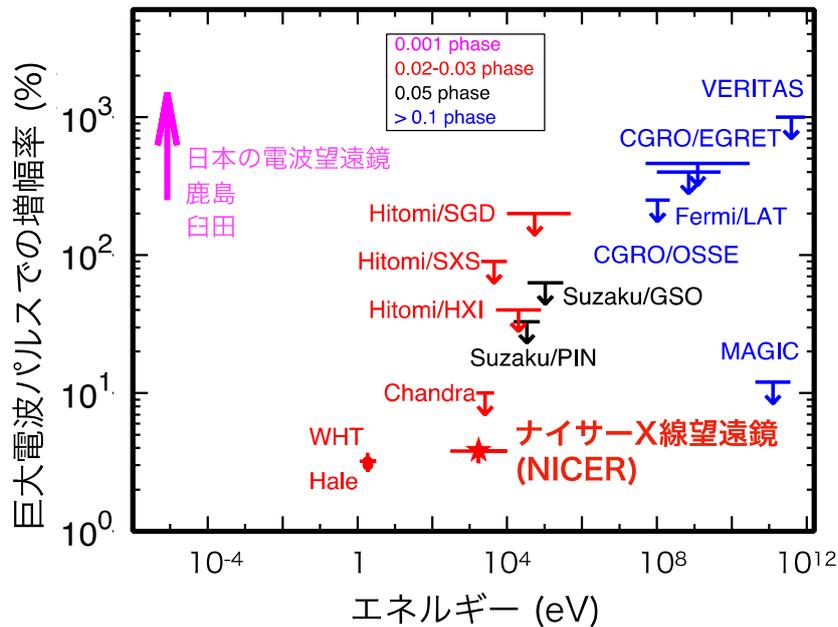


図 4 巨大電波パルス（GRP）に同期した可視光と X 線、ガンマ線の増幅率

電波帯域での GRP の増幅率は左上のピンク線で示す。WHT と Hale は可視光、ナイサー、Chandra、Hitomi、Suzaku は X 線、それ以外はガンマ線による観測結果である。可視光とナイサーの値は実際の検出値を、それ以外は上限値を示す。なお、上部四角中の phase はパルス位相を表す。

X 線での増光は 4% と小さくても、X 線は電波よりもはるかに大きなエネルギーを解放していることから、GRP の発生時に放出されるエネルギー量はこれまで考えられていたよりも数百倍以上大きいことが分かりました。現在、GRP の放射メカニズムとして、パルサー磁気圏における高速プラズマの激しい噴出などを起源とする理論モデルがありますが、今後は X 線の増光を説明できるようにする必要があります。今回の発見は、プラズマ噴出・電波放射に伴う、パルサーでの高エネルギー粒子生成などについても新たな知見を与えます。

なお、本研究で使用した電波望遠鏡は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が運用する臼田宇宙空間観測所（長野県佐久市）の 64m 電波望遠鏡（64m パラボラアンテナ）と、情報通信研究機構（NICT）が運用する鹿島宇宙技術センター（茨城県鹿嶋市）の鹿島 34m（34m パラボラアンテナ）電波望遠鏡の二つです（図 5-6）。二つの電波望遠鏡でのデータ取得には、JAXA と NICT が共同で開発した「広帯域デジタル信号記録装置」を活用し、高精度なデータ受信を実現しました。臼田 64m 電波望遠鏡は、宇宙探査機の運用支援の中核としても使用されており、この記録装置は小惑星探査機「はやぶさ 2」の軌道決定にも使用されています。また、鹿島 34m 電波望遠鏡は、電波天文学にとって重要な観測装置として使用されてきましたが、2019 年の台風 15 号により甚大な被害を受け、運用を終了しました。そのため本研究は、鹿島 34m 電波望遠鏡が最後に残した貴重な成果の一つとなりました。

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊



図 5 鹿島の 34m 電波望遠鏡（左、提供：NICT）と臼田の 64m 電波望遠鏡（提供：JAXA）

### かにパルサーを見るNICERと臼田・鹿島さん

NICER, Usuda, and Kashima are watching the Crab Pulsar



図 6 X線望遠鏡ナイサーと鹿島および臼田の電波望遠鏡の同時観測の様子

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊

(credit：ひっぐすたん、画像は申請なしで自由に使用できます)

### 3. 今後の期待

今回の発見は、宇宙遠方で発生している謎の高速電波バースト (FRB) の解明にも重要な知見となります。高速電波バーストは、天文学の歴史で徐々に発見された新種の天体現象で、ここ数年における天文学の最も注目度の高いテーマの一つです。GRP は FRB と似た現象であることから、FRB を説明する理論モデルの一つだと考えられてきました。しかし今回、GRP がこれまで考えられていたよりも莫大なエネルギーを X 線で放出することが明らかになったため、単純な GRP のモデルでは FRB の説明は難しいことが分かりました。

一方、中性子星の一種で、宇宙で最も強い磁場を持つ超強磁場中性子星 (マグネター) のバースト活動は、FRB の候補として有力になりつつあります。若く活発なマグネターで発生した GRP を、電波と X 線の多波長観測で調べていく上で、本成果は重要な知見を与えます。

### 4. 論文情報

&lt;タイトル&gt;

Enhanced X-ray Emission Coinciding with Giant Radio Pulses from the Crab Pulsar

&lt;著者名&gt;

Teruaki Enoto, Toshio Terasawa, Shota Kisaka, Chin-Ping Hu, Sebastien Guillot, Natalia Lewandowska, Christian Malacaria, Paul S. Ray, Wynn C.G. Ho, Alice K. Harding, Takashi Okajima, Zaven Arzoumanian, Keith C. Gendreau, Zorawar Wadiasingh, Craig B. Markwardt, Yang Soong, Steve Kenyon, Slavko Bogdanov, Walid A. Majid, Tolga Guver, Gaurava K. Jaisawal, Rick Foster, Yasuhiro Murata, Hiroshi Takeuchi, Kazuhiro Takefuji, Mamoru Sekido, Yoshinori Yonekura, Hiroaki Misawa, Fuminori Tsuchiya, Takahiko Aoki, Munetoshi Tokumaru, Mareki Honma, Osamu Kameya, Tomoaki Oyama, Katsuaki Asano, Shinpei Shibata and Shuta J. Tanaka

&lt;雑誌&gt;

*Science*

&lt;DOI&gt;

10.1126/science.abd4659

### 5. 補足説明

#### [1] 中性子星

太陽よりも十分重い星が、その寿命を迎えると、超新星爆発を起こす。星の外側部分が吹き飛ぶ一方で、その中心部分は爆縮し、中性子星となる。これは質量が太陽と同程度、半径が 10 km 程の高密度天体で、強い磁場を持っている。自転に伴い、周期的な電磁波のパルス放射が観測される場合、パルサーと呼ばれる。

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊

## [2] 巨大電波パルス (GRP)

周期的に観測される電波パルスが、時折その電波強度を数桁以上明るくする現象。かにパルサーの他、いくつかのパルサーから検出されている電波バースト現象。通常のパルスとは異なる観測的特徴を持つが、まだ多くのことが分かっていない。GRP は Giant Radio Pulse の略。

## [3] 高速電波バースト (FRB)

突然、宇宙の一方向から 1 ミリ秒程度、強い電波が放たれる現象。我々の住む銀河の外の、宇宙論的な距離から到来していることが分かっている。電波で極めて明るく、その起源は分かっておらず、近年の天文学でのホットな研究対象になっている。これらのバースト現象のいくつかは、繰り返し同一天体から発生している場合も報告され、対応する母銀河が同定されているものもある。2020 年には銀河系内の超強磁場の中性子星(マグネター)から、高速電波バーストと類似した電波放射が検出されている。FRB は Fast Radio Burst の略。

## [4] X 線望遠鏡 NICER

2017 年に国際宇宙ステーションに搭載された大面積の X 線望遠鏡。中性子星の質量と半径を精密に測定し、超高密度の中性子星内部の物質の状態(状態方程式)を観測的に解明することを目指すプロジェクトに用いられている。56 個の X 線望遠鏡が組み合わされており(軌道上では 52 個が稼働している)、1.5 keV 付近では過去最高の 1,900 cm<sup>2</sup> という有効面積を持ち、高い集光能力を持つ。NICER は Neutron star Interior Composition ExploreR の略で、ナイサーと読む。

## [5] 超新星爆発

質量の大きい恒星が、星内部での核融合反応の燃料を使い果たし、重力崩壊を起こして潰れると超新星爆発が起きる。超新星は可視光で明るく輝くだけでなく、X 線や電波まで多波長での観測が行われ、超新星 SN1987A では超新星ニュートリノも検出された。超新星爆発の後には、中性子星やブラックホールが残されることがあり、周囲には超新星残骸が形成される。

## 6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。  
 理化学研究所 開拓研究本部 榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム  
 理研白眉チームリーダー 榎戸 輝揚(えの と てるあき)  
 客員研究員 フー・チンピン(Hu Chin-Ping、胡 欽評)  
 (国立彰化師範大学 助教)  
 TEL: 048-467-4022 (榎戸) FAX: 048-467-4118 (榎戸)  
 E-mail: teruaki.enoto[at]riken.jp (榎戸)

東京大学 宇宙線研究所  
 名誉教授 寺澤 敏夫(てらさわ としお)  
 准教授 浅野 勝晃(あさの かつあき)  
 TEL: 04-7136-3187 (浅野) E-mail: asanok[at]icrr.u-tokyo.ac.jp (浅野)

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊

広島大学大学院 先進理工系科学研究科 物理プログラム  
 助教 木坂 将大 (きさか しょうた)  
 TEL : 082-424-7369 E-mail : kisaka[at]hiroshima-u.ac.jp

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系  
 准教授 村田 泰宏 (むらた やすひろ)

情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁波標準研究センター 時空標準研究室  
 研究マネージャー 関戸 衛 (せきど まもる)  
 TEL : 042-327-6662 FAX : 042-327-5809 E-mail : sekido[at]nict.go.jp

アメリカ航空宇宙局 ゴダード宇宙飛行センター  
 NICER チーム代表 キース・ジェンドルー (Keith C. Gendreau)  
 NICER チーム共同代表 ザベン・アルゾメニアン (Zaven Arzoumanian)



関戸 輝揚



フー・チンピン



寺澤 敏夫



浅野 勝晃



木坂 将大



村田 泰宏



関戸 衛

<機関窓口>

\* 今般の新型コロナウイルス感染症対策として、理化学研究所では在宅勤務を実施しておりますので、メールにてお問い合わせ願います。

理化学研究所 広報室 報道担当  
 E-mail : ex-press[at]riken.jp

東京大学 宇宙線研究所 広報室  
 TEL : 090-4869-4539 FAX : 04-7136-3115  
 E-mail : icrr-pr[at]icrr.u-tokyo.ac.jp

広島大学 財務・総務室広報部広報グループ  
 TEL : 082-424-3749 FAX : 082-424-6040  
 E-mail : koho[at]office.hiroshima-u.ac.jp

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 広報担当  
 E-mail : isas-kouho[at]ml.jaxa.jp

情報通信研究機構 広報部 報道室  
 TEL : 042-327-6923 FAX : 042-327-7587  
 E-mail : publicity [at] nict.go.jp

報道解禁：日本時間 2021 年 4 月 9 日午前 3 時・9 日朝刊

---

※上記の[at]は@に置き換えてください。

---