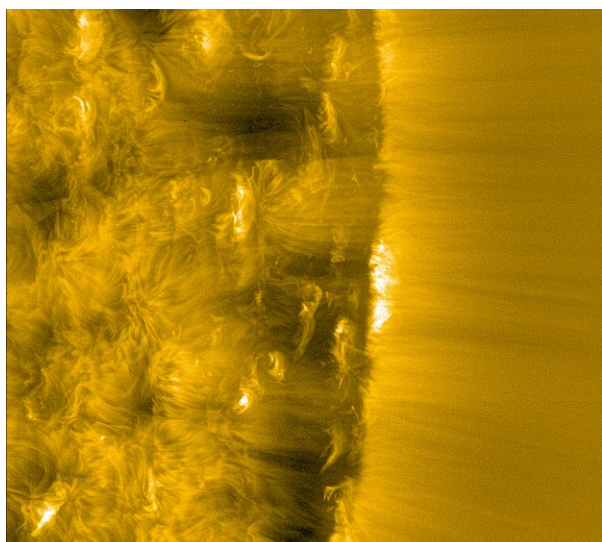


## SONNENFORSCHUNG

## Mini-Plasmaströme als Quelle des Sonnenwindes

*Aufnahmen der Raumsonde Solar Orbiter der ESA und NASA bieten den bisher detailliertesten Blick auf eine Quellregion des Teilchenstroms von der Sonne. Das legt nahe, dass der Sonnenwind nicht als gleichmäßiger Teilchenstrom ausgestoßen wird.*



**Abb. 1** Blick auf ein koronales Loch in der Nähe des Südpols der Sonne (Bild: ESA/Solar Orbiter/EUI/Chitta et al./AAAS).

Die Sonne sendet nicht nur elektromagnetische Strahlung ins All, sondern auch einen Strom geladener Teilchen wie Protonen und Elektronen [1]. Dabei ist unsere Erde nicht nur den spontan auftretenden Sonnenstürmen ausgesetzt, deren Ursache in explosiven Eruptionen wie Flares und koronalen Massenauswürfen liegt, sondern auch einem kontinuierlichem Sonnenwind. Dieser Teilchenstrom fällt je nach Aktivität der Sonne mal stärker und mal schwächer aus, kommt jedoch nie vollständig zum Erliegen. Das legt die Vorstellung nahe, dass der Sonnenwind aus einer Quellregion kontinuierlich gespeist wird.

Der sogenannte schnelle Sonnenwind erreicht Geschwindigkeiten von mehr als  $500 \text{ km s}^{-1}$ . Die Quellregionen sind bereits lange bekannt. Es sind koronale Löcher, die vorzugsweise in der Nähe der Sonnenpole auftreten. Manchmal ragen sie auch bis zum Äquator. In Aufnahmen der Sonnenkorona im Extremultraviolet-

ten zeigen sich diese „Löcher“ als relativ dunkle Bereiche, weil das Plasma in diesen Bereichen dünner und kühler ist. Das Plasma der Korona ist eng an das Magnetfeld der Sonne gebunden. In Koronalöchern jedoch weisen die Feldlinien des Sonnenmagnetfeldes nicht bogenförmig zurück zur Sonne, sondern ragen in den interplanetaren Raum. Somit sind die Koronalöcher als Quellregionen identifiziert, aus denen der Sonnenwind der Gravitationsanziehung entkommen kann (Abbildung 1).

Eine kontinuierliche Heizung des Plasmas, die solch eine Beschleunigung möglich machen würde, ist bisher nicht nachweisbar gewesen. Die Aufnahmen der Raumsonde Solar Orbiter, die unser Team nun ausgewertet hat, zeigen ein solches koronales Loch in bisher unerreichter Detailschärfe und mit der schnellsten dagewesenen Bildfolge. Die einzigartigen Aufnahmen bieten uns die Möglichkeit, genauer als je zuvor auf die Quellregionen des Sonnenwindes zu schauen und so diesen Prozess besser zu verstehen [2].

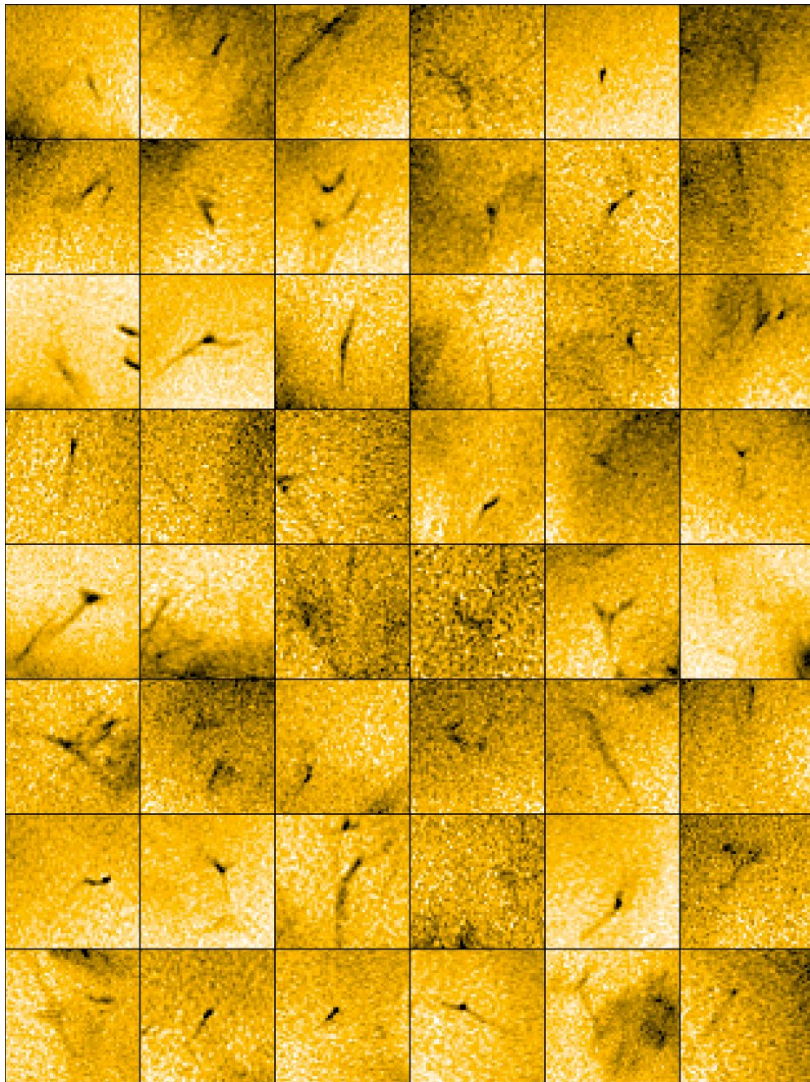
Diese Daten wurden am 30. März 2022 mit dem Extreme Ultraviolet Imager (EUI) [3] des Solar Orbiter [4] aufgenommen. Das koronale Loch zeigt sich als etwa halbkreisförmiger, dunkler Bereich am unteren linken Rand der Sonne. Innerhalb des koronalen Lochs ist eine Vielzahl hell aufleuchtender Gebiete zu sehen. Zum Zeitpunkt der Aufnahmen hatte Solar Orbiter den sonnennächsten Punkt seiner stark elliptischen Umlaufbahn um die Sonne erreicht.

Aus dem Abstand von nur etwa 50 Millionen Kilometern, und damit bei weniger als einem Drittel der

Entfernung von der Sonne zur Erde, hatte Solar Orbiter erstmals ein Auflösungsvermögen auf der Sonnenoberfläche von rund 200 km. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit des EUI-Teleskops ist eine besonders hohe zeitliche Auflösung möglich, so dass Bilder im Sekundentakt aufgenommen werden können. Die Daten von einer halben Stunde genügen für unsere Studie, um kleine, schnell ablaufende Phänomene zu untersuchen.

In den Aufnahmen findet sich eine Vielzahl kleinster Plasmaströme (Jets), die sich strahlförmig mit Geschwindigkeiten von einigen hundert Kilometern pro Sekunde von der Sonne fortbewegen, siehe Abbildung 2. Sie sind etwa 100 km breit, von langgezogener oder I-förmiger Gestalt und recht kurzlebig: Nach etwa 20 bis 100 s verblassen sie. Auch die Energie, die jeder einzelne Jet transportiert, ist verhältnismäßig klein: etwa der billionste Teil der Energie, welche die größten Explosionen im Sonnensystem, Flares der Kategorie X, freisetzen. Deshalb nennen wir diese Ereignisse Piko-Flares. Für irdische Verhältnisse ist diese Energiemenge dennoch gewaltig: Sie entspricht etwa dem jährlichen Elektrizitätsverbrauch von 10 000 Haushalten in einem Industrieland.

In der Summe dürften die „Mini-Ströme“ dennoch einen Großteil der Energie bereitstellen, die erforderlich ist, um die Sonnenwindteilchen auf ihre Überschallreise durchs All zu schicken. Diese Ereignisse, die wir nun entdeckt haben, sind zwar klein und treten nur sporadisch auf. Sie sind aber offenbar ein häufiges Phänomen und in dem betrachteten koronalen Loch geradezu allgegenwärtig. Auslöser der Piko-Flares könnten lokale Umstrukturierungen des Sonnenmagnetfeldes sein. Von größeren, ähnlich geformten Ereignissen ist bekannt, dass sie dort entstehen, wo sich offene und geschlossene Feldlinien des Sonnenmagnetfeldes treffen, neu anordnen und dadurch magnetische Feldenergie freisetzen.



**Abb. 2** Aufnahmen verschiedener Piko-Flare-Ströme, die dem Solar-Orbiter-Instrument EUI am 30. März 2022 gelungen sind. Der Bildausschnitt jedes einzelnen Bildes beträgt 6000 km auf 6000 km. Damit die Ströme besser sichtbar sind, wurde die Helligkeit dieser Aufnahmen invertiert. Sie erscheinen dadurch dunkel (Bild: ESA/Solar Orbiter/EUI/Chitta et al./AAAS).

In bisherigen Vorstellungen ist der Sonnenwind ein über große Zeiträume betrachtet zwar an- und ab-schwellender, ansonsten aber homogener Teilchenstrom. Diese Sicht scheint nicht länger haltbar zu sein. Wie die Auswertungen zeigen, sind die Piko-Flares zwar ein ständig wiederkehrendes und häufiges Phänomen, jeder einzelne reißt jedoch nach kurzer Zeit ab. Dies legt den Schluss nahe, dass der Sonnenwind bei näherer Betrachtung nicht als gleichmäßiger Teilchenstrom ausgestoßen wird, sondern zu Beginn und auf kleinen Skalen unregelmäßig

fluktuiert. Wie die zeitlich und räumlich hochaufgelösten Messungen von Solar Orbiter zeigen, nimmt der Sonnenwind seinen Ursprung offenbar in Gestalt vieler winziger Ströme.

#### Literatur

- [1] E. N. Parker, *Astrophys. J.* **1958**, 128, 664.
- [2] L. P. Chitta et al., *Science* **2023**, 381, 867.
- [3] P. Rochus et al., *Astron. Astrophys.* **2020**, 642, A8.
- [4] D. Müller et al., *Astron. Astrophys.* **2020**, 642, A1.

*Lakshmi Pradeep Chitta,  
Udo Schühle, Hardi Peter,  
Max-Planck-Institut für  
Sonnensystemforschung, Göttingen*

## PHYSICS NEWS

**Antimaterie fällt nach unten** und gehorcht ebenso der Gravitation wie normale Materie. Damit ist auch das schwache Äquivalenzprinzip der Allgemeinen Relativitätstheorie wieder einmal bestätigt. Die Alpha-Kollaboration am CERN konnte dies mit Hilfe von Antiwasserstoff-Atomen nachweisen, die sie zunächst in einer magnetischen Falle eingefangen und dann fallen gelassen haben. (E. K. Anderson et al., *Nature* **2023**, 621, 716, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06527-1>)

+++

**Der bislang fernste schnelle Radioblitz** ist mit einer Entfernung von acht Milliarden Lichtjahren rund um die Hälfte weiter von uns entfernt als der bisherige Rekordhalter. Der Ausbruch namens FRB 20220610A dauerte weniger als eine Millisekunde, wie das Askap-Radioteleskop in Australien messen konnte. Der Prozess dahinter ist noch immer unklar. Aber solche Ereignisse helfen, die Materieverteilung im All zu vermessen. (S. D. Ryder et al., *Science* **2023**, 382, 294, <https://doi.org/10.1126/science.adf2678>)

+++

**Die Genauigkeit von Atomuhren steigt**, wenn man elektronische Zustände mit negativer Energie berücksichtigt. Bei der Wechselwirkung von Strontium-Atomen mit Licht führte die Vernachlässigung dieses Effekts bislang zu einem kleinen Fehler, wie zwei Forschungsgruppen unabhängig voneinander zeigen konnten. Die Genauigkeit solcher Uhren könnte nun auf über 1 zu  $10^{18}$  steigen. (F.-F. Wu et al., *Phys. Rev. A* **2023**, 108, L051101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.108.L051101>; S. G. Porsev et al., *Phys. Rev. A* **2023**, 108, L051102, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.108.L051102>)

+++

**Einen neuen Typ von Ferromagnetismus** hat ein Team der ETH Zürich in einem Moiré-Material aus einem Dreiecksgitter gefunden. Dabei bildeten sich Paare von Elektronen aufgrund der Ausrichtung ihrer Spins, was zu kinetischem Magnetismus führte. (L. Ciorciaro et al., *Nature* **2023**, 623, 509, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06633-0>)

+++

**Einen Einzelphotonen-Detektor mit 400 000 Pixeln** hat eine amerikanische Kollaboration entwickelt. Er beruht auf supraleitenden Nanodrähten und liefert rund 400-mal mehr Pixel als vergleichbare Detektoren. Mögliche Einsatzgebiete sind Astronomie, Quantenkommunikation und medizinische Bildgebung. (G. G. Oripov et al., *Nature* **2023**, 622, 730, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06550-2>)