



Dick Vos

Heino Falcke ist Radioastronom und seit 2007 Professor für Astroteilchenphysik und Radioastronomie an der Radboud-Universität Nijmegen in den Niederlanden. Der gebürtige Deutsche promovierte 1994 an der Universität Bonn und forschte danach am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn sowie in den USA.

»Das wurde über Nacht ein ikonisches Foto!«

Anlässlich der ersten radioastronomischen Aufnahme eines Schwarzen Lochs mit dem »Event Horizon Telescope« sprach »Sterne und Weltraum« mit dem deutschen Radioastronomen Heino Falcke, der federführend an der Entdeckung beteiligt war.

Sterne und Weltraum: Herr Professor Falcke, wie kamen Sie zur Astronomie und insbesondere zum Thema Radioastronomie und Schwarze Löcher?

Falcke: Ich weiß noch, wie ich als Kind, mit etwa fünf Jahren, die letzte Mondlandung gesehen habe. Das hat mich fasziniert. Ich hing vor dem Schwarz-Weiß-Fernseher, während die anderen Kinder draußen spielten. Außerdem hatte mich meine Großmutter häufig zur Volkssternwarte in Köln mitgenommen. Ich wollte zunächst zur Müllabfuhr oder Tierarzt werden. Doch dann reizten mich die Physik und die Theologie, weil mich die fundamentalen Fragen interessierten. Ich war sehr neugierig und stellte viele Fragen, zum Beispiel, was hinter dem Himmel ist oder ob das Weltall unendlich ist. Dann dachte ich, dass Pfarrer vielleicht keine so gute Idee ist, weil ich mir keine Namen merken kann. Außerdem war ich nicht so gut in alten Sprachen. Also blieb ich bei der Physik. Ich habe populärwissenschaftliche Zeitschriften wie »Spektrum der Wissenschaft« gelesen und merkte, dass in der Astronomie die Post abgeht. Mir wurde klar, dass eines der großen Rätsel die Gravitation ist und es da noch etwas zu entdecken gibt. Das ist ja bis heute noch so, weil es nicht gelungen ist, die Quantentheorie und die Gravitation zu vereinigen. So startete ich mit der Physik zunächst in Köln und wechselte dann zur Uni Bonn mit ihrer großen astronomischen Kompetenz. Dort lernte ich meinen späteren Betreuer, Professor Peter Biermann vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie, kennen, der unter anderem über Schwarze Löcher forschte und der mich faszinierte. Mir wurde klar, dass die Schwarzen Löcher genau das Richtige sind, wenn ich die Schwerkraft erforschen wollte. Das war mein Einstieg in die Gravitationsphysik und in die Radioastronomie.

Wie formierte sich die »Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration« und welche Rolle spielen Sie darin?

Das ist eine lange Geschichte. Schon nach der Doktorarbeit merkte ich, dass die Millimeterstrahlung des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße aus der Nähe des Ereignishorizonts kommen muss. Ich fragte mich: Könnte man so ein Schwarzes Loch vielleicht sehen? Die VLBI-Technik wurde an dem Institut weiterentwickelt, an dem ich mich aufhielt. Da musste man nur eins und eins zusammenzählen. Zum Glück war ich der Erste, der das dann getan und es aufgeschrieben hat. Anschließend musste ich die Community überzeugen. Im Jahr 2004 traf ich Kollegen, auch aus den USA, und wir fragten uns, wie man das Projekt aufbauen könnte. Ich hatte damals schon die Idee, das wir es so machen müssen wie die Teilchenphysiker, in einer Kollaboration. Es wäre gut, sich auf die Millimeter-Astronomie zu fokussieren, inklusive Beobachtung und Theorie. Allerdings war ich damals ein armer Schlucker und hatte kein Geld. Die Amerikaner haben erstmal ohne mich weitergemacht, auch mit der Entwicklung der Technik. Ich hatte mich dann zunächst auf das LOFAR-Projekt konzentriert, also Radioastronomie bei niedrigen Frequenzen – aber immer mit dem Hintergedanken, etwas aufzubauen, um wieder mit den Amerikanern mithalten zu können. Im Jahr 2011 erhielt ich in den Niederlanden den mit 2,5 Millionen Euro dotierten Spinoza-Preis. Wir führten dann auch wieder Beobachtungen am galaktischen Zentrum und Simulationen durch. Später bewarb ich mich mit Michael Kramer (Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn) und Luciano Rezzolla (Universität Frankfurt) um europäische Fördermittel des ERC Synergy Grant. Die Ausichten schienen schlecht, denn die Runde davor hatte eine Er-

folgsrate von nur 1,5 Prozent. Unser Projektvorschlag umfasste Instrumentierung, Radioastronomie, Pulsare, Schwarze Löcher und Tests der allgemeinen Relativitätstheorie. Am Ende erreichten wir die Ausschreibungsrunde und hatten eine 50-prozentige Chance die Förderung zu gewinnen. Da waren wir sehr nervös; wie damals in der Prüfung zum mündlichen Abitur. Tatsächlich gewannen wir 2013 diese Fördermittel in Höhe von 14 Millionen Euro! Das reichte aus, um mit den Amerikanern wieder zu verhandeln. Es dauerte weitere drei Jahre, bis wir gemeinsam als Partner die »Event Horizon Telescope Collaboration« gegründet hatten. Das entwickelte sich schön, weil die Zusammenarbeit international und sehr breit geworden war. Dabei ist die Theorie neben der Beobachtung gleichwertig vertreten.

Die Technologie »Very Long Baseline Interferometry« (VLBI) gibt es ja schon seit Jahrzehnten. Wie funktioniert sie und warum konnte man ein solches Foto eines Schwarzen Lochs nicht schon vor 20 Jahren schießen?

Vor zwanzig Jahren sagten wir noch, es dauert zehn Jahre bis das Foto vom Schwarzen Loch gelingt. Eigentlich gab es schon Mitte der 1990er Jahre Hinweise darauf, nämlich bei Beobachtungen des Zentrums der Milchstraße, die mit Radioteleskopen in Spanien und Frankreich unter der Führung von Bonner Radioastronomen erfolgten. Aber die Resultate waren noch nicht signifikant genug und keiner wollte sie glauben. Das Problem damals war, dass noch nicht genügend große Radioteleskope für den VLBI-Verbund existierten und auch die Bandbreite noch nicht vorhanden war. Das breitbandige Aufnehmen der Daten wurde am Haystack Observatory in den USA entwickelt. Die Daten rauschen mit 32 Gigabit pro Sekunde auf Festplatten. Die enorme Datenmenge von 4000 Terabyte wurden auf Festplatten in Flugzeugen von A nach B zur Auswertung geflogen – das ging deutlich schneller als über das Internet.

Im Jahr 2017 kam das Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) im VLBI-Netzwerk dazu, das von einer europäisch-amerikanisch-japanischen Kollaboration geführt wird. ALMA ist ein wichtiges Teleskop im VLBI-Verbund, weil es ein außergewöhnlich hohes Signal-Rausch-Verhältnis hat.

Die Beobachtungen erfolgten bei einer Wellenlänge von 1,3 Millimetern, was einer Frequenz von 230 Gigahertz entspricht. Weshalb wählten Astronomen gerade diese?

Ursprünglich wählten wir als Zielobjekt das Zentrum der Milchstraße (siehe Bild S.38). Nach unserer Vorhersage sollte wegen optischer Tiefeneffekte das Schwarze Loch im galaktischen Zentrum, Sagittarius A* (Sgr A*), erst oberhalb von 230 Gigahertz sichtbar werden. Es war ein reines Glück, als wir herausfanden, dass dies auch für das extrem massereiche Schwarze Loch in Messier 87 (M87) galt. Beide Schwarze Löcher in diesen Quellen erscheinen am Himmel fast gleich groß, weil das Schwarze Loch in M87 – in Analogie zu Sgr A* wird es M87* genannt – 1500-mal so viel Masse hat, aber auch rund 2000-mal so weit entfernt ist wie Sgr A*. Ein Schwarzes Loch größerer Masse – wie M87* – wird eigentlich bei niedrigeren Frequenzen schon sichtbar. Aber wenn die Akkretionsrate höher ist, wandert auch die Frequenz nach oben, bei der das Loch sichtbar wird. Genau das ist bei M87* der Fall: Die Akkretionsrate ist 100 000-mal so groß wie im galaktischen Zentrum, so dass die optimale Beobachtungsfrequenz zur

Beobachtung des Schattens bei beiden ähnlich ist und im Millimeterbereich liegt. Ein weiterer Zufall ist, dass die Erde gerade groß genug ist, um in einem transkontinentalen VLBI-Verbund bei dieser Frequenz die beiden Quellen gut auflösen zu können. Die Masse des extrem massereichen Schwarzen Lochs im Zentrum von M87 war ja nur bis auf einen Faktor zwei genau bekannt. Wäre seine Masse kleiner gewesen, so hätten wir nichts gesehen. Schließlich gesellte sich außerdem großes Glück mit dem Wetter hinzu. Denn an allen Standorten des VLBI-Netzwerks gab es an den vier Beobachtungstagen im April 2017 einen klaren Himmel. Der Wasserdampf in den Wolken stört nämlich die Beobachtungen, weil er die Radiowellen bei dieser Wellenlänge absorbiert. Das war wahrscheinlich das beste Wetter in den letzten 15 Jahren der Millimeter-VLBI-Radioastronomie!

Wie wurde mit Computern das nun veröffentlichte Foto eines Schwarzen Lochs erstellt und was genau sehen wir darauf?

Dieser Prozess gestaltete sich sehr intensiv. Er wurde durch eine relativ junge Gruppe von Wissenschaftlern, Postdocs und Doktoranden betrieben. Sie haben sehr sorgfältig gearbeitet und Algorithmen gegeneinander getestet. Die Teams haben Bilder aus simulierten Daten gewonnen und die Datenpipelines getestet. Am Ende ist es nicht so gewesen, dass einer das erste Bild vom Schwarzen Loch sah. Zunächst kalibrierten wir die Messungen an anderen Quellen, nicht an M87. Erst als wir diese Daten verstanden hatten, schauten wir uns die Messdaten von M87 genau an. Schon vor dem Imaging, also noch bevor ein Bild produziert war, wurde anhand der reinen Kalibrationsdaten klar: Da ist etwas! Wir erkannten bereits an der Fouriertransformierten des Bildes, dass das Bild selbst ein Ring sein muss. Das Herz begann schnell

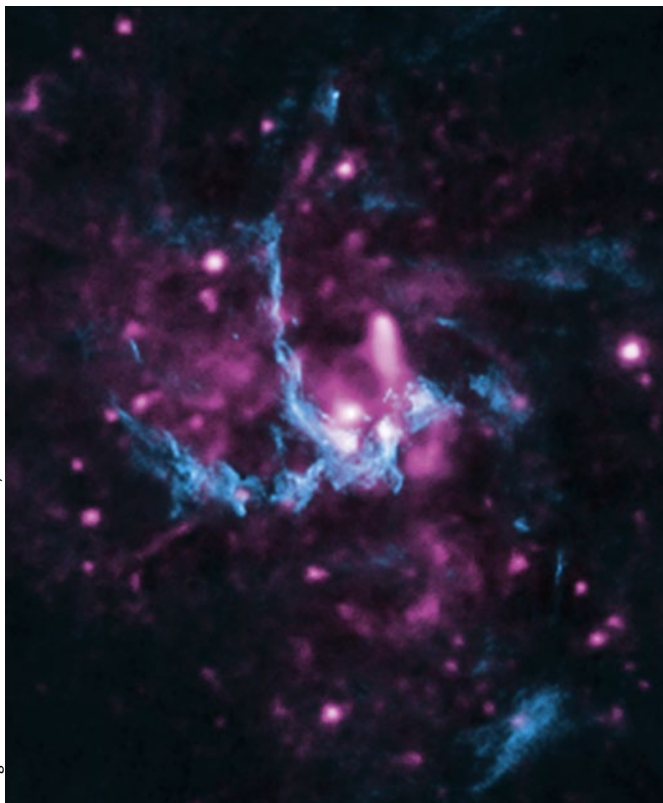
zu schlagen! Vier Imaging-Teams erhielten die Daten, um daraus mittels verschiedener Auswertungsmethoden Bilder herzustellen. Sie arbeiteten in

Blindstudien unabhängig voneinander. Jedes Team kam zum gleichen Ergebnis und fand beim Imaging einen leuchtenden Ring, in dessen Mitte sich ein Schatten befand. Dieses erste Bild vom Schwarzen Loch war Anfang Juni 2018 verfügbar. Das war natürlich unglaublich! Im Juli folgte dann ein Imaging-Workshop mit rund 40 Teilnehmern, bei dem wir die ersten Bilder diskutierten. Danach haben wir eine systematische Parameterstudie der besten Imaging-Algorithmen anhand von simulierten Daten gemacht und die Bilder automatisch generiert. Einer der Algorithmen war schon 50 Jahre alt, aber immer noch genauso gut wie die anderen. Aus den Ergebnissen der Imaging-Teams wurden Durchschnittswerte ermittelt, um ein einziges Bild zu erhalten. Ich glaube, dass kein Bild in der Radioastronomie so intensiv diskutiert und überprüft worden ist wie dieses.

Bitte erklären Sie uns, was der beobachtete »Schatten« mit dem Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs zu tun hat.

Das EHT-Bild ist konsistent mit dem Schatten eines Schwarzen Lochs inmitten eines leuchtenden Plasmarings. Der Ring zeigt keine gleichförmige Helligkeit, sondern ist in einer Hälfte heller. Das erwarten wir auf Grund von relativistischer Strahlbündelung, wenn der Ring leicht geneigt ist und rotiert. Der Schatten des Schwarzen Lochs ist größer als sein Ereignishorizont, weil Licht bereits bei etwas größeren Abständen vom Loch verschluckt wird. Das berechnete bereits David Hilbert in einer Vorlesung im

»Ich glaube, dass kein Bild in der Radioastronomie so intensiv diskutiert und überprüft worden ist wie dieses.«



Hier blicken wir in das Herz unseres Milchstraßensystems, auf die kompakte Radioquelle Sagittarius A* in einer Entfernung von 26 000 Lichtjahren. Die Aufnahme kombiniert Röntgendaten des Weltraumteleskops Chandra (violett) mit Radiodaten des erdegebundenen Very Large Array (blau). Im Radiobereich gut zu sehen ist die Minispirale von in das Zentrum einströmendem Gas. Im Röntgenbereich verrät sich oberhalb der Bildmitte ausströmende Materie, der Jet. Er kollidiert mit Gas in der Umgebung und beschleunigt dabei Elektronen, die daraufhin Röntgenstrahlen abgeben.

Jahr 1916 für die Schwarzschild-Lösung, also für nicht rotierende Punktmassen. Licht kann dabei in einem Photonenorbit eingefangen werden und um das Schwarze Loch rotieren. Dieser ist immer als leuchtender, vergrößerter Ring zu sehen und unabhängig davon, wo die Lichtquelle sitzt.

Wie sicher ist es, dass der »Schatten« tatsächlich von einem Schwarzen Loch verursacht wird, und nicht von einem kompakten Bosonenstern, Gravastern oder einem anderen Objekt?

Man kann sich nicht sicher sein, dass dort, wo man auf dem EHT-Bild Schwärze sieht, auch wirklich nichts herauskommt. Weil der Kontrast bei 10:1 liegt, haben wir die Simulationen gemacht. Der beobachtete Kontrast ist in Übereinstimmung mit den Simulationen für ein Schwarzes Loch. Es sieht genauso aus, und das ist schon beeindruckend! Schon vor den Beobachtungen machten unsere Gruppe und eine andere Vorhersagen, wie M87* aussehen sollte – und es hat gepasst. So eine gelungene Vorhersage ist beeindruckend und auch selten in der Astronomie. Die Natur müsste schon sehr grausam sein, wenn sie uns da in die Irre führen würde. Wir simulierten auch Alternativen zu Schwarzen Löchern, aber man kann natürlich nicht alles berücksichtigen, was sich jemals jemand ausgedacht hat. Wichtig sind auch die Synergien mit dem Instrument GRAVITY der ESO, das auch Flares im Nahinfrarot sehen kann. Die Beobachtungen sind konsistent mit einem klassischen Schwarzen Loch. Im Falle eines Fundes, der gar nicht unseren Erwartungen entspricht, hätten wir nicht gewusst, was wir damit anfangen sollten. So waren wir froh, dass wir auf sicherem Boden standen. Nun wissen wir, dass unsere Modelle stimmen, und wir können sie benutzen, um etwas über Schwarze Löcher auszusagen. Aber vielleicht entdecken wir später noch etwas Neues.

Was wissen wir nun durch das Foto des Zentrums von M87, was vorher unbekannt war?

Die Masse des extrem massereichen Schwarzen Lochs in M87 war nicht genau bekannt. Astronomen bestimmten mit Hilfe der

Gasdynamik eine Masse von etwa 3,5 Milliarden Sonnenmassen, während die Bewegung von Sternen um das Galaxienzentrum auf eine etwa doppelt so große Masse von 6,5 Milliarden Sonnenmassen hindeutete. Wir konnten mit dem EHT-Bild die Masse unabhängig bestimmen, weil ein massereicherer Loch einen größeren Schatten hervorruft. Unsere Messungen sprechen für die größere Masse. Wir werden versuchen, dies mit neuen Messdaten zu erhärten.

Welche Bedeutung hat das erste Foto eines Schwarzen Lochs für die Astronomen und die allgemeine Öffentlichkeit?

Zum ersten Mal sehen wir ein Schwarzes Loch. Wir Astronomen können nun die unmittelbare Umgebung erforschen und mit den Bildern versuchen herauszufinden, wie und wo genau der Jet von aktiven Galaxien entsteht. Wir werden etwas über die Rotation der Schwarzen Löcher lernen. Außerdem ist es möglich, die Gravitation zu testen und mit Hilfe der Bilder Einsteins allgemeine Relativitätstheorie zu überprüfen. Mit dem Ausbau des EHT-Netzwerks gelingt uns das künftig immer besser.

Und für die allgemeine Öffentlichkeit: Das EHT-Bild ist über Nacht ein ikonisches Foto geworden! So etwas geht über die Wissenschaft hinaus. Es hat etwas Räsonierendes: Das Ende von Raum und Zeit, das Angst einjagende. Das hat vielleicht auch etwas mit dem Tod zu tun, mit einer Grenze, die man überschreitet, zu einem Ort, von dem man nicht mehr zurückkommt. Es ist immer gut, wenn man dem Feind ins Auge schauen kann. Jetzt weiß ich, wie es aussieht. Wenn ich etwas sehe, dann kann ich damit umgehen. Ich kann mir das Bild an die Wand hängen – und es hängt schon in vielen Zimmern und Büros. Das ist ein Bild, das wir mit der Welt gemacht haben, und es gehört der Welt. Sie hat es auch so angenommen. Das ist eigentlich das Schöne.

Das einzig Künstliche daran ist die Farbe. Darauf bin ich ein bisschen stolz, weil es diejenige Farbskala ist, die wir in unserem Paper im Jahr 2000 gewählt hatten, um den Schatten des Schwarzen Lochs darzustellen. Das stellten wir in allen Simulationen so dar, und die Farbe drückt auch etwas aus: Es sieht aus wie ein Feuerring, der auch den Nerv der Betrachter trifft. Wir hätten ebenso gut eine ganz andere Farbe wählen können, aber damit wohl einen anderen Effekt.

Reizvoll ist die Kombination aus der Schönheit der Physik mit der Schönheit des Bildes. Wir sahen ja das Bild nun schon fast ein Jahr intern und fragten uns: »Erwarten die Leute nicht etwas Schönes?«. Ich hatte noch getweetet: »Das ist nicht der Film Interstellar, Leute!«. In Brüssel probte ich die Eröffnungssequenz vor Publikum. Als ich das Bild zeigte, saßen die Leute da wie angewurzelt, waren gerührt und nahmen das emotional auf. Hinterher sagten Wissenschaftlerkollegen, dass sie echt erleichtert und froh waren, dass es so gut aussah. Die ganze Welt fieberte mit und freute sich – ein bisschen wie bei der Mondlandung.

Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße, assoziiert mit der kompakten Radioquelle Sagittarius A, ist uns ja viel näher. Weshalb hat man von diesem Schwarzen Loch kein Foto gemacht?*

Dieses Schwarze Loch war eigentlich von Anfang an das Zielobjekt unserer Bemühungen. Wir formulierten auch unsere Forschungsanträge für diese Quelle im galaktischen Zentrum, weil die Lochmasse mit rund vier Millionen Sonnenmassen ziemlich exakt bekannt war. Die im Vergleich zu M87* kleinere Masse führt jedoch dazu, dass die Variabilität des Akkretionsflusses im Bereich von nur 20 Minuten liegt. Bei M87* ist diese Zeitskala im Bereich von Tagen, weil das Loch 1500-mal so viel Masse hat. Im galaktischen Zentrum müssen wir wahrscheinlich mehrere Jahre messen, um ein gutes Bild vom Schwarzen Loch zu erhalten. Ich habe da immer vor verfrühter Euphorie gewarnt.

Was sind die nächsten Ziele der EHT Collaboration?

Das nächste Ziel ist das Zentrum der Milchstraße, aber wir müssen erstmal ausschlafen. Die EHT-Messdaten sind ja vorhanden und wurden 2018 aufgenommen. Im Jahr 2019 erfolgt leider keine Datennahme, aber hoffentlich 2020 wieder. Es ist gut, die Erfahrungen mit M87* gemacht zu haben, weil wir nun wissen, was bei der Auswertung der Daten vom galaktischen Zentrum zu beachten ist. Wir haben darüber hinaus die Polarisation der Radiowellen gemessen, aber diese Daten müssen noch ausgewertet werden.

Bei Sagittarius A* ist die Herausforderung seine Variabilität. Bei der Datenanalyse wird über lange Zeiträume gemittelt, so dass die kurzzeitigen Schwankungen verschwinden. Wenn man diese Variabilität hingegen untersuchen will, sind Algorithmen erforderlich, die das verarbeiten können. Die gibt es zum Teil schon, aber sie müssen noch getestet und mit Simulationen verglichen werden. Weitere Zielobjekte des EHT-Teams sind andere aktive Galaxien wie Centaurus A, 3C 273 und 3C 279. Ich glaube, dass wir in den nächsten zehn Jahren viele Fortschritte machen werden, auch mit den Simulationen. Denn wir werden

»Das nächste Ziel ist das Zentrum der Milchstraße, aber wir müssen erstmal ausschlafen.«

daraus noch mehr Resultate gewinnen, um sie in einem großen Datenarchiv aufzunehmen. Die einzelnen Simulationen können wir mit den Beobachtungen vergleichen. Unsere Modelle sagen voraus, dass man dem Schwarzen Loch mit Hilfe von Magnetfeldern Energie entziehen kann. Das ist etwas, was wir in den nächsten Jahren testen können. Wir möchten herausfinden, wo die Jetbasis liegt und ob er im schnell rotierenden Bereich des Schwarzen Lochs, also innerhalb der Ergosphäre, entsteht. Ich denke, wir werden dann verstanden haben, wie sich Jets bilden.

Neue Teleskope werden zum EHT hinzukommen. So möchten wir auf dem Gamsberg in Namibia ein

neues Radioteleskop platzieren, um bessere Bilder zu ermöglichen. Als fernes Ziel planen wir, mit der europäischen Weltraumorganisation ESA das VLBI-Netzwerk in den Weltraum zu bringen. Das Projekt heißt »Event Horizon Imager« (EHI) und besteht aus drei Satelliten, die um die Erde kreisen. Wenn man lange genug wartet, decken die drei Satelliten alle möglichen Basislinien ab, weil sie alle Kombinationen möglicher Abstände durchlaufen. Denken wir uns zu den Basislinien einen synthetisierten Spiegel, der sich aus dem VLBI-Netzwerk speist, so füllen die drei Satelliten nach und nach alle Punkte der Spiegeloberfläche: das perfekte VLBI-Superteleskop.

Für die Gravitationswellen gab es 2017 den Physik-Nobelpreis. Rechnen Sie mit dem Nobelpreis, und wer sollte den bekommen?

Nein. Das ist eine Frage, die man uns nicht stellen darf. Das muss das Nobelpreiskomitee entscheiden. Es ist eine fundamentale Sache, das ist schön. Wir müssen allerdings erst noch ein bisschen Wissenschaft machen. Ein schönes Bild reicht noch nicht. Wir werden weitermachen, und dann schauen wir mal.

Ich drücke Ihnen auf jeden Fall die Daumen und würde mich freuen, wenn der Physik-Nobelpreis 2020 dem EHT-Team zugesprochen würde. Vielen Dank für das Gespräch, Herr Falcke, und alles Gute für Sie. Wir sind auf die nächsten EHT-Bilder sehr gespannt!

Das Interview führte Andreas Müller.



Tapetenwechsel?
Wir stellen ein!

Das Team von Astroshop sucht Verstärkung in verschiedenen Bereichen. Schauen Sie in unsere Stellenangebote und bewerben Sie sich - **wir freuen uns auf Sie!**

→ **Fachberater
Astronomie** m/w/d
(Vollzeit)

→ **Category Manager
Astronomie** m/w/d
(Vollzeit)

→ **Category Manager
Sportoptik** m/w/d
(Vollzeit)

→ **Category Manager
Mikroskopie** m/w/d
(Voll-/Teilzeit)

Mehr Infos unter www.nimax.de/karriere!

 **Astroshop.de**