

Fragen zum Radioteleskop Effelsberg

Eine Reihe von Fragen, die im Vorgriff auf einen Besuch des Astroclubs der VHS Düren im Besucherpavillon am Radioteleskop Effelsberg gestellt und von Norbert Junkes, Alex Kraus (AK), Eduardo Ros (ER) und Olaf Wucknitz (OW), alle vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR), beantwortet werden.

Zahlreiche Abbildungen aus allen Bereichen der Astronomie gibt es auf der Webseite „Astronomy Picture of the Day“ (APOD) der NASA, auf der seit 1995 jeden Tag ein neues Bild aus der Astronomie zu sehen ist:

[Astronomy Picture of the Day \(APOD\)](#)

Ein Online-Vortrag zum 50jährigen Jubiläum des 100-m-Radioteleskops Effelsberg aus dem Jahr 2021 ist über die folgende Adresse abrufbar:

[50 Jahre Radioteleskop Effelsberg](#) (HdA #FasziAstroOnline)

Ein ca. 10minütiger Beitrag aus dem Online-Programm „Sternstunde“ unter dem Titel „*Das Radioteleskop in Effelsberg - Der Blick hinter die Kulissen*“ ist via Youtube abrufbar:

[Das Radioteleskop in Effelsberg - Der Blick hinter die Kulissen](#) (Sternstunde 2016)

Zum 50jährigen Jubiläum wurde auch der „Baufilm“ des Radioteleskops Effelsberg (vom ersten Spatenstich bis zur feierlichen Einweihung am 12. Mai 1971) nochmals via „Youtube“ zugänglich gemacht:

[Baufilm](#), Die ersten 1316 Tage des Radioteleskops Effelsberg (vom ersten Spatenstich bis zur feierlichen Einweihung am 12. Mai 1971)

Radioastronomie wird an vielen Stellen der Welt betrieben und ist eine von mehreren Sparten in der beobachtenden Astronomie.

Das Spektrum der beobachtenden Astronomie hat sich im Lauf der Jahre sehr stark erweitert. Bis zum Beginn des 17. Jahrhunderts konnte man den Himmel nur mit bloßem Auge (und einer Reihe ausgefeilter Instrumente wie Mauerquadranten, Sextanten etc.) studieren. Dann kam das Fernrohr dazu und im Lauf der Jahrhunderte gab es immer größere und ausgefeiltere optische Instrumente, bis hin zum „Extremely Large Telescope“ (ELT) mit seinen 39 m Durchmesser, das zur Zeit in Chile aufgebaut wird.

Ab den 1930er Jahren eröffnete die Radioastronomie mit den Radioteleskopen von Karl Jansky (1932) und Grote Reber (1939) ein zweites Fenster ins Weltall. Auch hier gibt es immer größere und leistungsfähigere Instrumente. Zur Zeit sind das GBT (West

Virginia/USA) und das Radioteleskop Effelsberg mit jeweils 100 m Durchmesser die größten voll beweglichen Teleskope, das FAST in China mit sogar 500 m Durchmesser das größte fest eingebaute Einzelinstrument (die größte „Schüssel“). Durch Radiointerferometrie bei sehr großen Basislängen (VLBI) lassen sich virtuelle Radioteleskope mit der Winkelauflösung eines Teleskops bis zur Größe der Erde realisieren. Erst mit dieser Methode wurde es möglich, auch Bilder von der unmittelbaren Umgebung des Ereignishorizonts von supermassereichen Schwarzen Löchern (die „Schatten“ dieser Schwarzen Löcher) zu gewinnen.

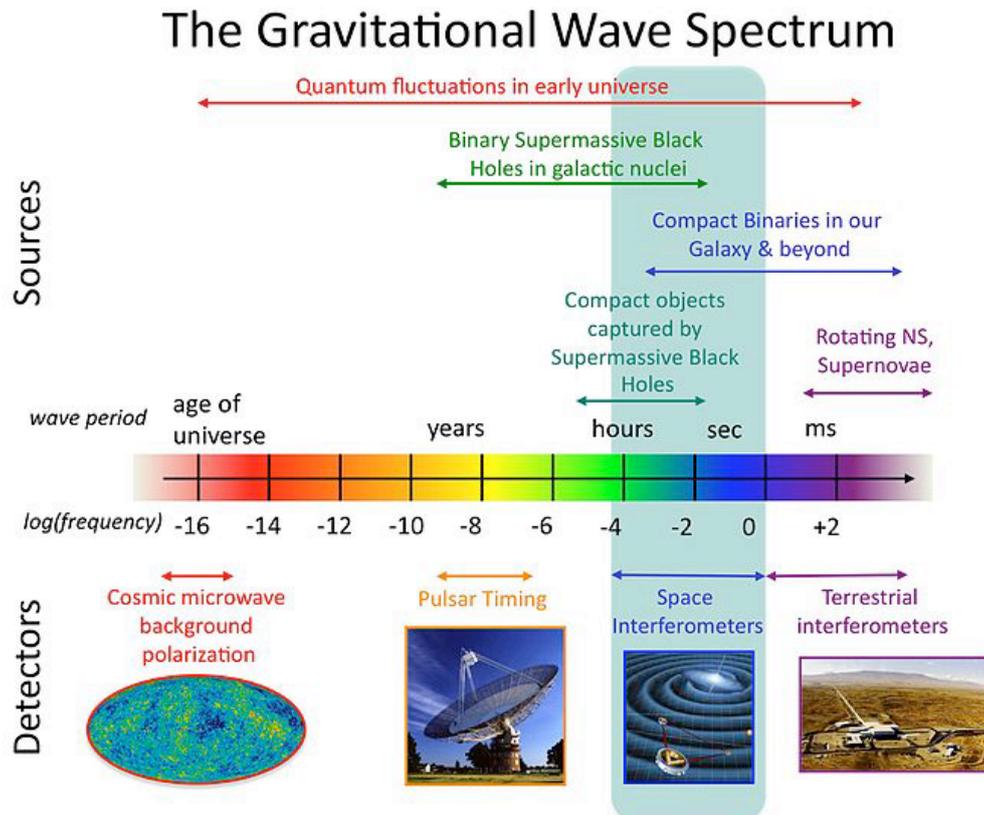


Abb. 1: Spektrum der Gravitationswellenstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen einigen Kilometern (terrestrisch: LIGO-Observatorien) über Weltraum-Interferometer, Pulsar Timing Arrays (PTAs) bis zu den Dimensionen des gesamten Universums. **Bild:** NASA/GSFC.

Seit den 1960er Jahren sind auch astronomische Untersuchungen in weiteren Bereichen des elektromagnetischen Spektrums möglich, so dass inzwischen nahezu der komplette Bereich von niederfrequenter Radiostrahlung über Submillimeterwellen, Infrarotstrahlung und sichtbares Licht bis hin zu immer kurzwelligerer und energiereicherer Strahlung von Ultraviolett- bis zu Röntgen- und Gammastrahlung abgedeckt wird. Ein Teil dieser Strahlung ist allerdings nicht mehr vom Erdboden aus zugänglich, so dass hier Ballons oder Flugzeuge (für den Infrarotbereich) oder sogar Satelliten (für den Röntgen- und Gammabereich) zum Einsatz kommen.

Inzwischen wurde der Begriff der „Multifrequenz-Astronomie“ (quer durch das gesamte elektromagnetische Spektrum) sogar zur „Multimessenger-Astronomie“ erweitert, bei der zusätzlich die Detektion kosmischer Teilchen wie z.B. Neutrinos oder von Gravitationswellen zum Tragen kommen. Neutrinos von der Sonne oder auch von der Supernova 1987a in der

Großen Magellanschen Wolke haben zum Verständnis von Vorgängen im Kosmos beigetragen. Im Jahr 2015 wurde es zum ersten Mal möglich, Gravitationswellen von der Kollision zweier Schwarzer Löcher mit irdischen Detektoren aufzuspüren. Das wurde mit dem Nobelpreis für Physik im Jahr 2017 ausgezeichnet.

[Multimessenger- Astronomie](#) (Nelly Jacobs), 2024, Schülerpraktikumsprojekt am MPIfR

[Radio-Observatorien der Welt](#) (Daniela Dübendorf), 1999, Schülerpraktikumsprojekt am MPIfR

SKAO - Das Radioteleskop der Zukunft

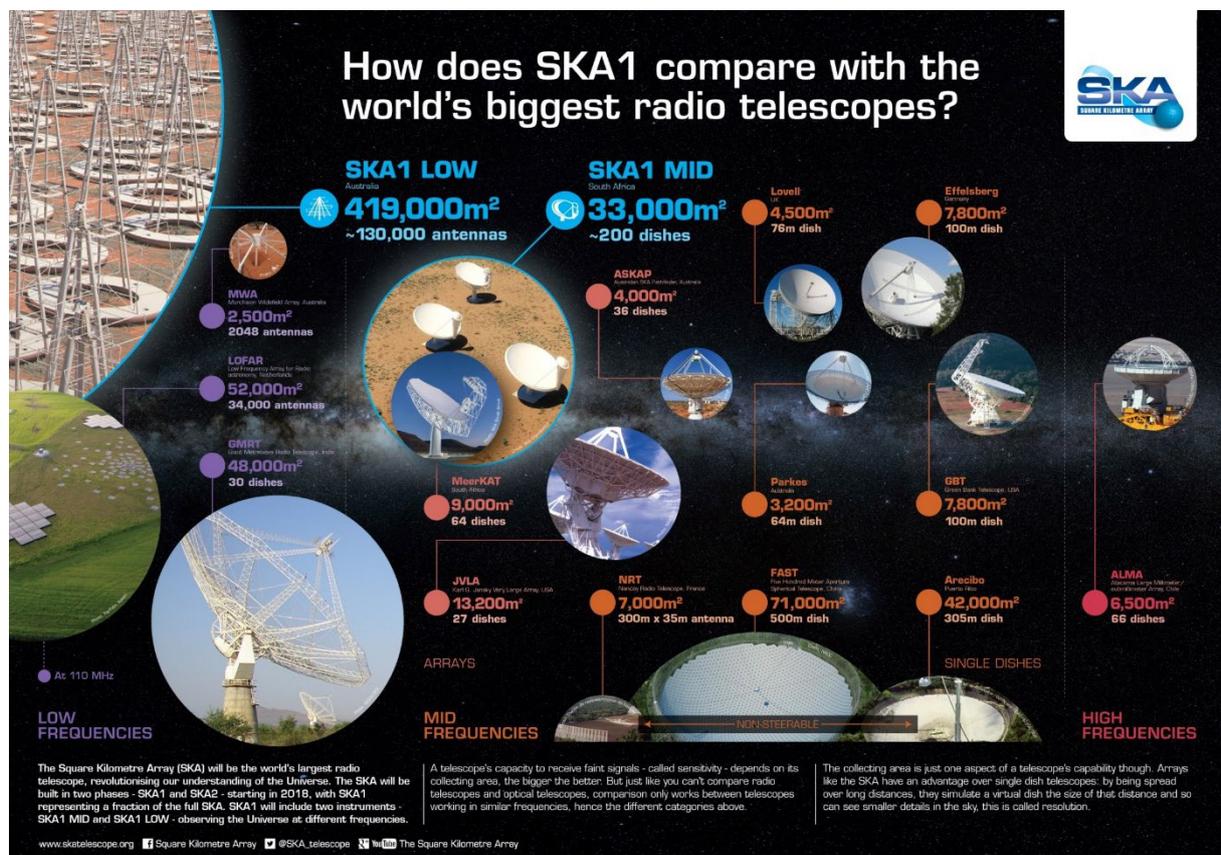


Abb. 2: Vergleich der Sammelflächen unterschiedlicher existierender Radioteleskope mit der ersten Ausbaustufe des Square Kilometre Arrays (SKA1). **Bild:** SKA-Organisation

Das Square Kilometre Array Observatory (SKAO) wird als großes Radioteleskopprojekt der Zukunft an zwei verschiedenen Standorten der Erde aufgebaut. Der niederfrequente Teil (SKA-LOW) für einen Frequenzbereich zwischen 50 und 350 MHz (das entspricht 86 cm bis 6 m Wellenlänge) wird dabei im Murchisongebiet in Westaustralien errichtet und eine Gesamtzahl von gut 130.000 einzelnen Dipolantennen umfassen. Sie werden in 512 Einzelstationen zusammengefasst, deren maximaler Abstand 74 km beträgt. Der mittelfrequente Teil (SKA-MID) für einen Frequenzbereich zwischen 350 MHz und 15 GHz (das entspricht 2 bis 86 cm Wellenlänge) wird in der Karooregion in Südafrika errichtet und eine Gesamtzahl von 197 Parabolspiegeln von je ca. 15 m Spiegeldurchmesser umfassen, die

über einen maximalen Abstand von 150 km verteilt sind. Die bereits funktionstüchtigen 64 Antennen des MeerKAT-Arrays werden dabei in die Gesamtanlage integriert. Das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn beteiligt sich am Bau von Empfängern für die MeerKAT-Teleskope (S-Band-Empfänger), bei der Erweiterung des MeerKAT-Arrays um weitere 14 Antennen (MeerKAT+) sowie dem SKA-MPIfR-Teleskop (SKAMPI) als Prototypantenne für SKA-MID.

Wie ist der Austausch zwischen den Radioteleskopen und wie kommuniziert man mit den anderen Forschungsrichtungen?



Abb. 3: Acht Radioteleskope für die ersten Messungen im Rahmen des EHT-Projekts. Im Uhrzeigersinn von oben links: APEX/Chile, Pico Veleta/Spanien, LMT/Mexico, JCMT/Hawaii, ALMA/Chile, SMT/Arizona, SMA/Hawaii, SPT/Südpol. **Zusammenstellung:** EHT-Kollaboration.

Das lässt sich sehr schön am Projekt „Event Horizon Telescope“ zur Erzeugung der Bilder vom Schatten eines Schwarzen Lochs darstellen. Seit den ersten Beobachtungen im Frühjahr

2017 hat in fast jedem der folgenden Jahre eine weitere Beobachtungswoche entweder im März oder im April des jeweiligen Jahres stattgefunden. Bei der ersten Beobertungskampagne wurden insgesamt acht Radioteleskope eingesetzt, an ganz unterschiedlichen Standorten der Erde, von der chilenischen Atacamawüste in über 5000 m Höhe (APEX, ALMA) über den Mouna Kea in Hawaii (JCMT & SMA), Spanien (Pico Veleta), Mexiko (LMT), Mt. Graham/Arizona (SMT) bis zum geographischen Südpol (SPT). Später sind noch NOEMA in Frankreich, Grönland-Teleskop bei Thule und das Kitt-Peak-Teleskop in Arizona dazugekommen. Ein weiterer Ausbau des Beobachtungsnetzwerks ist geplant.

In der Vorbereitung muss sichergestellt werden, dass die Messungen im Netzbetrieb (VLBI-Modus) durchgeführt werden können, dass also z.B. an jeder der Stationen ein Wasserstoffmaser als hochgenaues Zeitmaß zum Einsatz kommt. Am APEX-Teleskop in Chile ist Alan Roy/MPIfR der dafür verantwortliche Wissenschaftler; er war auch in der 2024er Beobertungskampagne vor Ort in Chile.

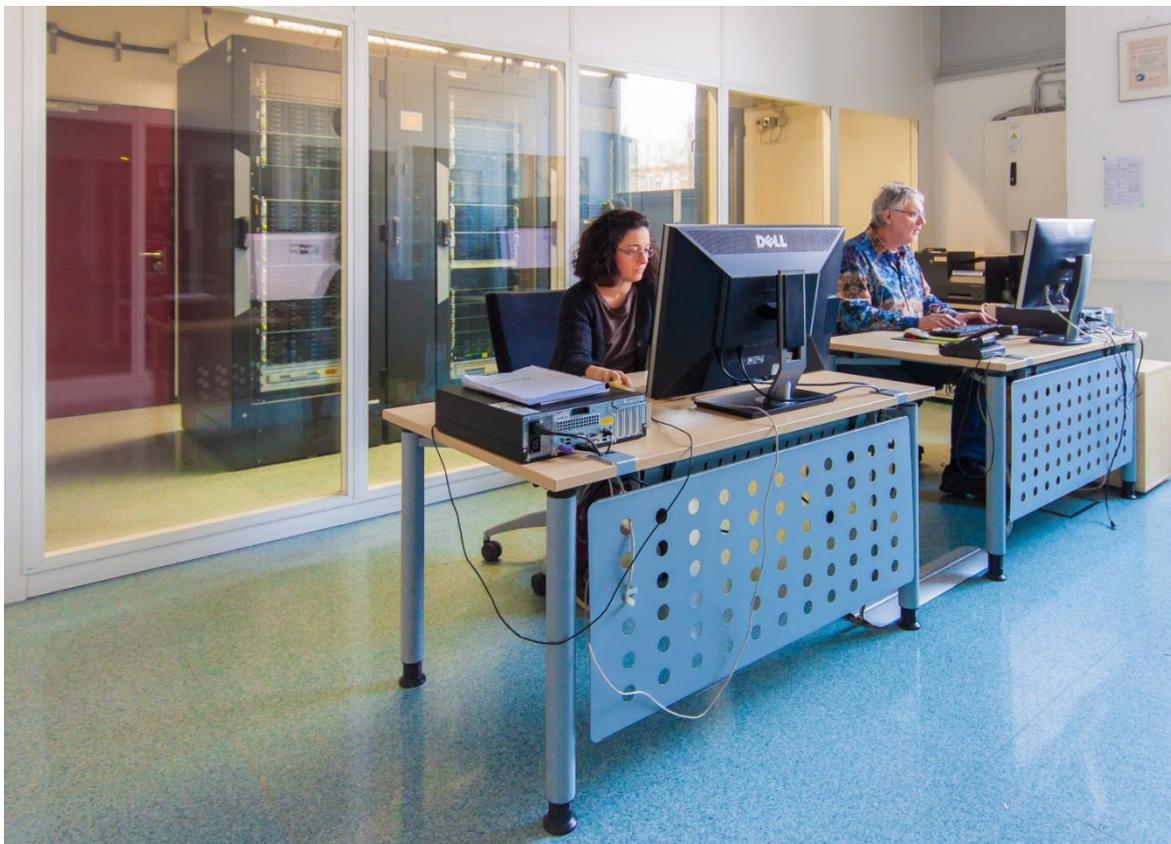


Abb. 4: Der Korrelator am MPIfR. Hier wurden 50% der EHT-Daten für das Bild vom Schatten des Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie M87 verarbeitet. **Foto:** MPIfR (8. April 2019).

Während der Messungen selbst spielt das Wetter eine nicht zu unterschätzende Rolle. Für Beobertungen bei 1,3 mm Wellenlänge (Frequenz: 230 GHz) sind exzellente hochgelegene Standorte und gute Wetterbedingungen an den beteiligten Teleskopen unabdingbare Voraussetzung. Die Koordination erfolgt wie auch bei anderen VLBI-Beobertungsprogrammen: ein gemeinsames Beobertungsprogramm (welche Quelle in

welchem Zeitfenster?) ist vorgegeben. Die Messungen erfolgen dann separat an jedem Teleskop und werden auf umfangreiche Festplatten gespeichert (jeweils einige Petabyte an jedem der Teleskope für die einwöchige Beobachtungskampagne). Die Auswertung (Korrelation) der Daten erfolgt zu jeweils 50% an den beiden Korrelatoren am Haystack-Observatorium und am MPIfR in Bonn.

Welche Erkenntnisse können gewonnen werden aus den beeindruckenden Bildern, bei denen diverse Wellenlängen von mehreren Astronomie-Abteilungen zusammengeführt werden?

Das grundlegende Problem ist ja, dass unser Untersuchungslabor, der Weltraum, aufgrund der gewaltigen Entfernungen leider nicht für Experimente direkt vor Ort zur Verfügung steht. Wir sind also auf die Informationen angewiesen, die per Boten, d.h. zu einem guten Teil per elektromagnetischer Strahlung in ganz unterschiedlichen Wellenlängen hier auf der Erde eintreffen. Ihre Beobachtung und anschließende Analyse liefert uns ein Bild des Universums in ganz unterschiedlichen Facetten. Ganz grob könnte man das z.B. auch über die Temperatur strukturieren. Dabei vermittelt die Radioastronomie einen Blick ins kalte n Universum; das sind nicht so sehr die Sterne selbst als vielmehr das Material zwischen den Sternen.

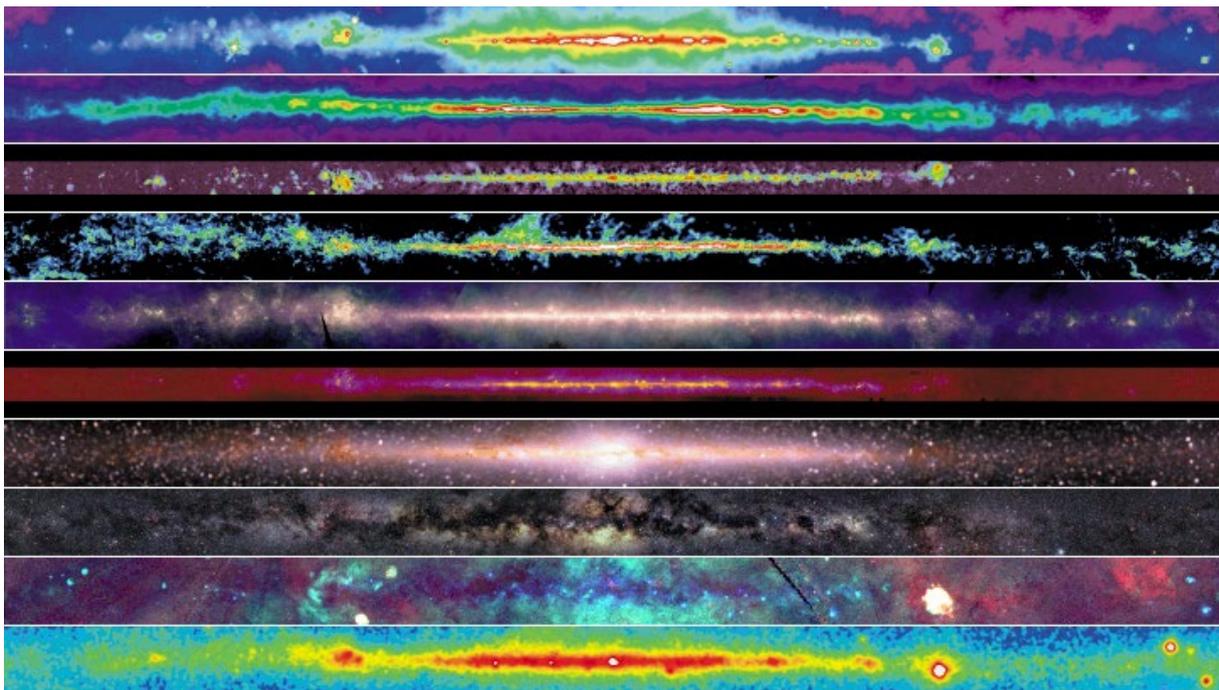


Abb. 5: Multifrequenzbild der Ebene der Milchstraße vom Radiobereich (408 MHz, oben) bis zur Röntgen- und Gammastrahlung (die beiden unteren Teilbilder). **Zusammenstellung:** NASA/GSFC.

Radioastronomie ermöglicht einen Blick tief hinein in kosmische Staubwolken, in denen sich in Verdichtungen und Klumpen neue Sterne bilden, also die nächste Generation von Sternen heranwächst. Oder auch „Sternleichen“, d.h. die Überreste gewaltiger Supernova-Explosionen, in denen massereiche Sterne ihr Leben beenden und die zu den stärksten Radioquellen gehören, die wir in der Milchstraße vorfinden. Mit sehr hoher

Frequenzaufösung wird es auch möglich, individuelle Spektrallinien einzelner Atome und Moleküle zu identifizieren, ähnlich wie individuelle Personen anhand ihrer Fingerabdrücke.

Andere Wellenlängenbereiche ergänzen das Bild: im optischen Bereich leuchten die Sterne, von kühlen roten Sternen mit weniger als 3000 Grad an der Oberfläche bis zu extrem heißen wolf-Rayet-Sternen, die bläulich/ultraviolett jenseits der 100.000 Grad strahlen.

Elektromagnetische Wellen höchster Energie im Röntgen- und Gammabereich werden schließlich von den Zentralbereichen von Galaxien emittiert, den sogenannten AGNs (Active Galactic Nuclei oder Aktive Galaxienkerne). Dabei handelt es sich um supermassereiche Schwarze Löcher im Zentrum der jeweiligen Galaxie, deren Akkretionsscheiben und Jets mit extrem hoher Energie abstrahlen.

Ein sehr schönes, wenn auch bereits etwas älteres Buch der beiden englischen Autoren Nigel Henbest und Michael Marten hat diesen „Multifrequenzansatz“ für unterschiedliche Arten von Himmelsobjekten vom Sonnensystem bis zu fernsten Galaxien in beeindruckenden Bildern der jeweiligen Objekte in unterschiedlichen Wellenlängen dargestellt. Es ist seinerzeit unter dem Titel „Die neue Astronomie“ auch in deutscher Sprache erschienen und könnte noch antiquarisch erhältlich sein.

[The New Astronomy](#) (Nigel Henbest, Michael Marten), Cambridge University Press 1983, 240 Seiten.

Die Dunkle Materie ist ein gut begründetes Postulat, das überzeugender wirkt als die Alternativen wie z.B. MOND. Gleichwohl zeigt die Wissenschaftsgeschichte, dass nicht jedes Postulat sich bestätigte (Äther, Phlogiston). Wird darüber diskutiert und wenn ja, wie?

Klar, darüber finden intensive Diskussionen statt. „Lambda-CDM“, das Postulat der Dunklen Materie, ist durchaus Mehrheitsmeinung unter vielen Fachleuten, aber durchaus nicht unumstritten. Einige der neuen Beobachtungsergebnisse des JWST zu massereichen Galaxien in einem sehr frühen Stadium des Universums sind mit den bisherigen Standardtheorien zur Galaxienentstehung nur schwer vereinbar.

Tatsächlich verläuft eine ausgesprochene Bruchlinie zwischen den Welten quer über den dritten Sock in unserem Nachbarinstitut, dem Argelander-Institut für Astronomie (AIfA) an der Universität Bonn. Dort findet man zwei Experten mit ziemlich konträren (Forschungs-) Ansichten nur über wenige Meter voneinander getrennt.

Vor einer Reihe von Jahren gab es sogar einen formalen Disput in Form einer öffentlichen Diskussion im Rahmen des Bethe-Kolloquiums an der Uni Bonn, bei dem Vertreter beider Richtungen ihre jeweilige Ansicht verfochten.

[Dark Matter - a debate](#), (Simon White, Pavel Kroupa), Bethe-Kolloquium an der Universität Bonn, 2011 (Youtube Video, 7:41)

[Lambda-CDM-Modell](#) (Wikipedia-Seite)

[Pavel Kroupa](#) (Wikipedia-Seite)

[Dunkle Materie - Das große Rätsel der Kosmologie](#) (Sibylle Anderl), Beck-Verlag, 128 Seiten

Bei dem gesamten Frequenzbereich, welcher mit dem Teleskop abgedeckt werden kann, sind sicherlich verschiedene auf einzelne Frequenzbereiche optimierte Antennenmodule notwendig. Wie viele gibt es und können diese fernbedient umgeschaltet bzw. gewechselt werden oder geschieht dies manuell?



Abb. 6: Primär- (PFK) und Sekundärfokuskabine (SFK) des 100-m-Radioteleskops Effelsberg. Die PFK markiert den Brennpunkt in 30 m Höhe über dem Parabolspiegel. Der dort positionierte Empfänger kann elektrisch zurückgefahren werden; dann wird der Strahlenweg über den Sekundärspiegel von 6,50 m Durchmesser in die SFK im Zentrum des Hauptspiegels umgelenkt. **Foto:** Norbert Tacken/MPIfR.

Am 100-m-Radioteleskop Effelsberg kommt eine ganze Reihe unterschiedlicher Empfangssysteme zum Einsatz. Sie decken einen Frequenzbereich von 300 MHz bis nahezu 100 GHz ab, das entspricht einem Wellenlängenbereich zwischen 1 m und 3,5 mm. Zur Zeit sind es insgesamt 22 unterschiedliche Empfänger, die allerdings nicht alle gleichzeitig zum

Einsatz kommen können. Ein Teil der Empfänger wurde speziell für den Primärfokus entwickelt, der sich mit einer Brennweite von 30 m an der Spitze von vier Stützbeinen befindet. In der Primärfokuskabine kann jeweils nur ein Empfangssystem zum Einsatz kommen, das durch ein zentrales Loch in der Mitte des Sekundärspiegels (Subreflektor) hervorschaut. Neben Empfängern für eine bestimmte Frequenz kommen dort auch Multiboxen zum Einsatz, bei denen sich in einem gemeinsamen Aufbau Empfänger für mehrere unterschiedliche Frequenzen befinden.

Der Wechsel auf einen anderen Empfänger im Primärfokus erfolgt jeweils manuell, wobei die Mitarbeiter der Systemgruppe den Empfängerwechsel mit Hilfe eines Krans im Inneren der Fokuskabine durchführen. In der Sekundärfokuskabine im Zentrum des großen Reflektors befindet sich eine Reihe unterschiedlicher Empfangssysteme für einen Frequenzbereich von 2,2 bis 50 GHz (entsprechend 14 cm bis 6 mm Wellenlänge). Das Umschalten zwischen diesen Empfängern kann ferngesteuert vom Kontrollraum aus erfolgen, wie übrigens auch der Wechsel zwischen Beobachtungen im Primär- und im Sekundärfokus. Dabei wird der Primärfokusempfänger hydraulisch in die Fokuskabine zurückgefahren und die zentrale Öffnung des Sekundärspiegels geschlossen. In dieser Stellung wird das Radiosignal erst am Hauptspiegel, dann am Sekundärspiegel reflektiert und gelangt so in den jeweiligen Empfänger im Sekundärfokus.

[Receivers for the Effelsberg 100-m Telescope](#) (MPIfR, in englischer Sprache)

Für welche Messungen wird der primäre Fokus bzw. der sekundäre Fokus eingesetzt und welche Gründe spielen dabei eine Rolle.

Der Primärfokus wird in erster Linie für die längeren Wellenlängen (> 12 cm) eingesetzt. Der Grund dafür ist die Dimension der Optik - die Empfangshörner im Sekundärfokus müssten für diese Wellenlängen sehr groß sein, um den Umlenkspiegel gut auszuleuchten (und nicht zu „überleuchten“).

Der Vorteil beim Sekundärfokus ist, dass zwischen den Empfängern (für Wellenlängen von 11 cm bis 6 mm) innerhalb von 30 Sekunden umgeschaltet werden kann - das erhöht die Flexibilität des Teleskops.

Ein Wechsel zwischen Primär- und Sekundärfokus ist „ferngesteuert“ (also vom Steuerraum aus) möglich und dauert ca. 30 Minuten. Ein Wechsel der Empfängerboxen im Primärfokus braucht zwei Techniker aus der Systemgruppe am Radio-Observatorium. Er dauert ebenfalls ca. 30 Minuten. Drei Boxen können in der Fokuskabine vorgehalten werden. Wenn eine neue Box von „unten“ per Kran in den Primärfokus gebracht werden muss, dauert das ca. 2 Stunden und braucht 3-4 Techniker (AK).

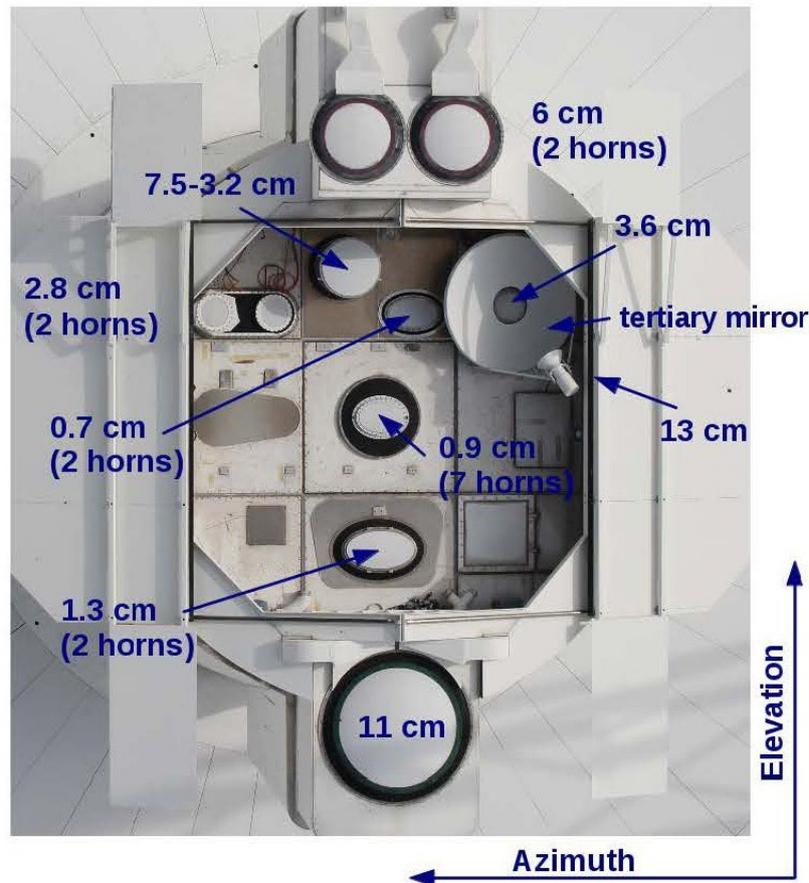


Abb. 7: Sekundärfokuskabine (SFK) von oben. Die Empfänger in der SFK überdecken einen Wellenlängenbereich von 7 mm bis 11 cm. **Foto:** MPIfR (September 2018).

Wie wird die Beugung der HF-Signale aus dem Raum durch die verschiedenen Atmosphäreschichten in Abhängigkeit der Uhrzeit, der Jahreszeit des Frequenzbereiches usw. berücksichtigt?

Was in der Atmosphäre stattfindet, ist eine Brechung (nicht Beugung) der Radiosignale. Hier die Antwort, bezogen auf das Niederfrequenz-Radioteleskop LOFAR: Die Brechung in der Lufthülle beträgt maximal ca. 0,5 Grad (am Horizont). Das kann von einer einzelnen LOFAR-Station nicht aufgelöst werden, so dass keine Korrektur nötig ist. Bei niedrigen Frequenzen spielt tatsächlich die Ionosphäre eine stärkere Rolle, aber auch diese Effekte sind für Einzelstationen irrelevant. Im Verbund (bei interferometrischer Verbindung zwischen den LOFAR-Stationen) müssen diese Effekte aber durch Kalibrationsmessungen an bekannten Quellen bestimmt und dann korrigiert werden (OW).

[Galaxienweg am Radioteleskop Effelsberg.](#) Die Stationen des Galaxienwegs umfassen eine ganze Reihe von Galaxien und Quasaren, die als Eichquellen (Kalibratoren) bei den Messungen mit dem 100-m-Teleskop zum Einsatz kommen.

Wie wird die Beobachtungsrichtung (phasenabhängige 3-dimensionale Einstellung) der einzelnen LOFAR Module vorgenommen?

Zunächst einmal ist bekannt, in welche Richtung beobachtet wird (Koordinaten der Quelle am Himmel), zum anderen die genaue Position einer jeden Antenne. Daraus berechnet der sogenannte Beamformer die entsprechenden Verzögerungen, um die die Signale die einzelnen Antennen früher oder später erreichen. Diese Verzögerungen müssen kompensiert werden, bevor die Signale addiert werden können.



Abb. 8: LOFAR-Station Effelsberg, aufgenommen aus 50 m Höhe vom Turmlabor des 100-m-Teleskops. Vorne: LOFAR-LOW für 25 bis 85 MHz (4-10 m Wellenlänge); hinten: LOFAR-HIGH für 120-240 MHz (1-3 m Wellenlänge). **Foto:** James Anderson.

Dabei muss man zwischen „High Band Array“ (HBA) und „Low Band Array“ (LBA) unterscheiden. In jeder der 96 HBA-Abteilungen („tiles“) befinden sich 4x4 Einzelantennen, deren Signale analog kombiniert werden. Dafür gibt es in der Tat Delay lines, die entsprechend der Geometrie geschaltet werden. Die Signale aus allen 96 HBA-Tiles bzw. allen 96 LBA-Antennen werden dann digitalisiert, und die Delays werden in den digitalen Daten korrigiert. Für besonders Interessierte: Die Daten werden Fourier-transformiert (eigentlich ein polyphasiger Filter), um Frequenzkanäle zu erzeugen. Diese sind fein genug, damit die Korrektur als Phasenfaktor in jedem Frequenzkanal korrigiert werden kann.

Nach der Addition der so korrigierten Einzelsignale bekommen wir im Ergebnis einen Beam, der dem eines virtuellen aus Segmenten bestehenden großen Spiegels entspricht, der in die

richtige Richtung zeigt. Beim 100-m-Teleskop haben wir hingegen ein Maximum im Zentrum, umgeben von Beugungsringen, da die Oberfläche der Schüssel vollständig mit Paneelen belegt ist. Aufgrund der vielen Lücken zwischen den LOFAR-Antennen wird das Antennendiagramm („Beam“) etwas unschön. Insbesondere gäbe es viele große Nebenmaxima, wenn die Anordnung der Antennen sehr regelmäßig ist. Deshalb sind die LBA-Antennen so irregulär angeordnet (vgl. Abbildung). Bei den HBA-Antennen geht das aus Platzgründen nicht; dadurch haben wir aber auch immer etwas Empfindlichkeit in Richtungen, die wir eigentlich nicht sehen wollen (OW).

Fragen zum Event Horizon Telescope (EHT)

Drei Links mit Hintergrundinformationen zum EHT-Projekt:

[Hintergrundinformation zu Sgr A*](#), Material zur Veröffentlichung des EHT-Bilds vom 22. Mai 2022

[Hintergrundinformation zur 2017er EHT-Messkampagne](#)

[Hintergrundinformation zur 2022er EHT-Messkampagne](#)

Hat das Radioteleskop Effelsberg beim EHT mitgewirkt? (Frage wegen der Wellenlänge: Effelsberg ab 3 mm, das Bild basiert auf Daten bei 1,3 mm?)

Die Antwort ist in der Frage bereits vorweggenommen: das Radioteleskop Effelsberg ist nicht an den EHT-Messkampagnen beteiligt, da eben jenseits einer Grenzfrequenz von 90 GHz (entsprechend 3,5 mm Wellenlänge) aufgrund der Absorption durch den Wasserdampf in der Atmosphäre vom Standort Effelsberg (317 m über NN) keine Messungen der Radiostrahlung aus dem Weltall mehr möglich sind. Das ebenfalls vom MPIfR in Zusammenarbeit mit ESO und OSO betriebene APEX-Teleskop an einem Standort in über 5000 m Höhe über NN (dazu in einer der trockensten Wüsten der Erde) war hingegen an allen bisherigen EHT-Messkampagnen mit zunächst acht und zur Zeit 11 Stationen beteiligt.

Was sagen diese Bilder einem Astronomen, was der Laie nicht sieht/sehen kann, und welche zusätzlichen Informationen gibt das durch KI verbesserte Bild.

Das Event-Horizon-Teleskop (EHT) ist der Name für ein weltweites Radioteleskop-Netzwerk mit dem Ziel, die ersten direkten Bilder von Schwarzen Löchern zu erhalten. Da Schwarze Löcher kein Licht aussenden, ist statt dessen das Ziel, ihren "Schatten" oder ihre "Silhouette" abzubilden, die durch die Beugung des Lichts unter extremer Schwerkraft entsteht.

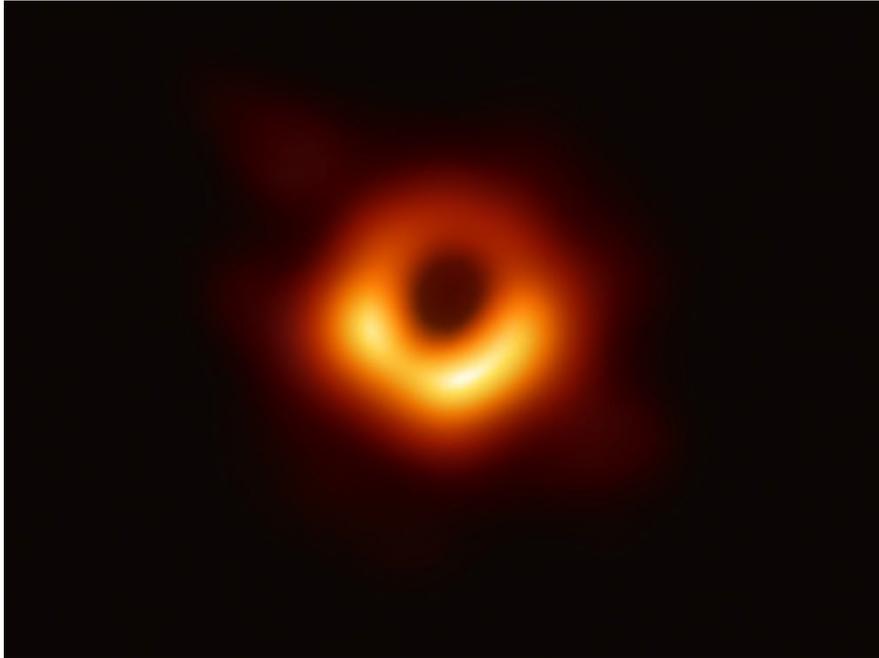


Abb. 9: Das erste Bild von M87*, dem supermassereichen Schwarzen Loch im Zentrum der Galaxie Messier 87, gemessen mit dem Event Horizon Telescope (EHT). **Bild:** EHT-Kollaboration (10. April 2019).

Dies ist nur mit einem sehr scharfen Bild des Schwarzen Lochs im Mikrowellenbereich des Spektrums möglich, wobei die über die ganze Erde verteilten Teleskope praktisch zu einem einzigen Teleskop von der Größe unserer Erde verbunden werden. Die einzelnen Teleskope befinden sich an abgelegenen Orten in großer Höhe und trockener Atmosphäre, um den Einfluss von Wasserdampf zu vermeiden. Ihre aufgezeichneten Signale werden kombiniert und verarbeitet, um das endgültige Bild zu erhalten. Für dieses anspruchsvolle Unterfangen müssen verschiedene Gruppen von Wissenschaftlern zusammenarbeiten. Insgesamt waren mehr als 350 Wissenschaftler daran beteiligt, zum ersten Mal ein Schwarzes Loch abzubilden.

Eine mit Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) unterstützte Re-Analyse der ursprünglichen Beobachtungsdaten von M87*, die im April 2023 veröffentlicht wurde, erbringt keine grundlegend neuen Erkenntnisse, wohl aber eine Bestätigung der bereits im April 2019 erhaltenen Ergebnisse.

[Neuer Blick auf das Schwarze Loch M87*](#), scinexx.de, 14. April 2023

[A Sharper Look at the First Image of a Black Hole](#), noirlab.edu, 13. April 2023

[Astronomen zeigen erstes Bild eines schwarzen Lochs](#), MPIfR-Pressemitteilung vom 10. April 2019

Was ist der leuchtende "Donut"? Die Akkretionsscheibe? Zeigt das Bild einen Blick von oben?

Schwarze Löcher selbst sind für uns unsichtbar, da sie kein Licht aussenden. Nur wenn ein Schwarzes Loch heißes Material aus der direkten Umgebung in sich aufnimmt, können wir eine Andeutung davon sehen: eine Scheibenform mit einer dunklen zentralen Region, in der sich das Schwarze Loch befindet. Der Prozess des "Fressens" wird Akkretion genannt. Die Bilder des Schwarzen Lochs vom Event Horizon Telescope (EHT) zeigen nicht nur einen dunklen Schatten, sondern auch einen ausgeprägten Lichtring („Donut“), der es umgibt. Ein Schlüsselfaktor, der hier eine Rolle spielt, ist die Tatsache, dass in der Nähe eines Schwarzen Lochs die Lichtbahnen so stark gekrümmt werden können, dass sie das Schwarze Loch vollständig umkreisen. Tatsächlich können Lichtstrahlen das Schwarze Loch sogar mehrfach umkreisen. Dies führt zu einer Verstärkung der Helligkeit in dieser Region. Betrachtet man diesen Teil des Schwarzen Lochs, sieht man nicht nur das glühende Gas auf einer Seite, sondern tatsächlich das Glühen des Gases rund um das Schwarze Loch auf einmal. Dieser Effekt wird als Linsenbildung bezeichnet. Solche Linseneffekte sind relativ unabhängig von der Ausrichtung des Schwarzen Lochs oder dem Blickwinkel des Beobachters. Wir würden immer noch eine ringförmige Struktur aufgrund der Schwerkraft sehen, egal ob wir das Schwarze Loch von der Seite oder von oben betrachten würden (ER).

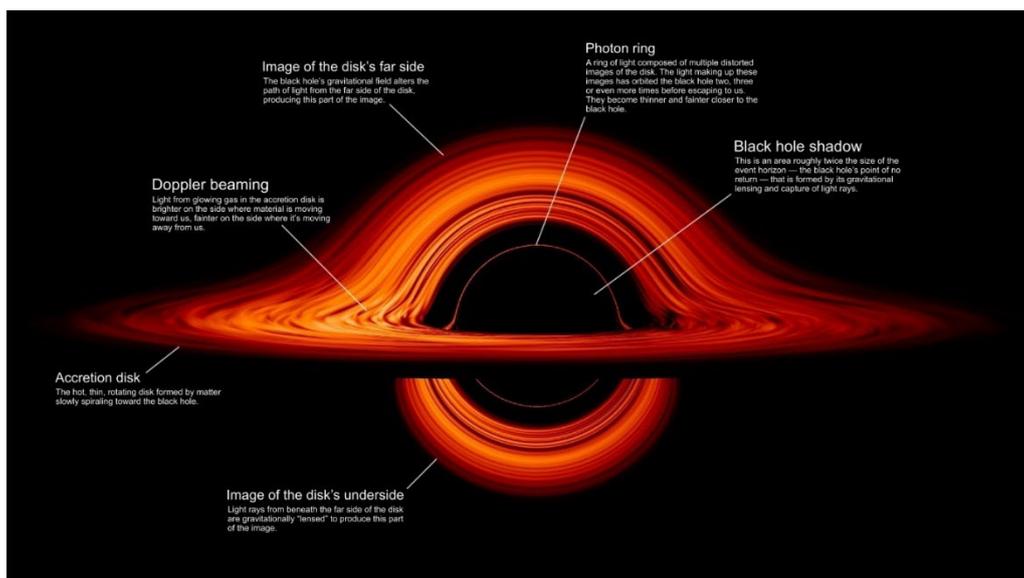


Abb. 10: Idealisierte Darstellung des „Schattens“ eines Schwarzen Lochs ohne die Grenzen der möglichen Auflösung. Diese Art von Darstellung wurde auch für das Schwarze Loch „Gargantua“ im Film „Interstellar“ verwendet. **Bild:** Jeremy Schnittman, NASA GSFC.

Die mit den EHT-Beobachtungen erhaltenen Bilder sind an der Grenze des Beobachtbaren durch die immer noch (zu) geringe Auflösung. Nur die beiden Quellen M87* und Sgr A* in den Zentren der jeweiligen Galaxie ermöglichen die Abbildung des Schattens eines Schwarzen Lochs.

Zeigt der Umfang des Donuts im Gegensatz zur schwarzen Fläche die „echte“ relative Größe?

Die Größe des Ereignishorizonts geht aus der über Infrarotbeobachtungen abgeleiteten Masse des Schwarzen Lochs hervor. Die von der Gruppe um Andrea Ghez an der University of California at Los Angeles (UCLA) und um Reinhard Genzel am MPE Garching vorgelegten jüngsten Beobachtungen von Sternen im galaktischen Zentrum, die das zentrale Schwarze Loch umkreisen, ergeben eine Masse von etwa vier Millionen Sonnenmassen für Sgr A*. Bei dieser Masse beträgt der Radius des Ereignishorizonts etwa 6 Millionen Kilometer (was einer Winkelgröße am Himmel von 5 Mikrobogensekunden entspricht; 6 Millionen km sind etwa das 15-fache der Entfernung Erde-Mond). Bei einer solchen Größe des Schwarzen Lochs hat die Materie, die das Schwarze Loch umkreist, eine innerste stabile Kreisbahn mit Umlaufbahnen zwischen vier und 30 Minuten, so dass sich alle Schwankungen in der Gasemission um das Zentrum herum auf diesen Zeitskalen ändern können. Tatsächlich sind diese Zeitskalen für Sgr A* viel kürzer sind als eine normale Beobachtungsnacht mit dem Event Horizon Telescope, die mehrere Stunden dauert.

Zum Vergleich: Das Schwarze Loch im Zentrum der Galaxie Messier 87 ist etwa 1600 Mal massereicher (6,5 Milliarden Sonnenmassen), die Umlaufzeiten der Materieteilchen liegen hier in der Größenordnung von Wochen (ER).

Warum ist der Umfang des Schattens größer als der Schwarzschildrand. Normalerweise vergrößert eine (Gravitations-) Linse doch das Sichtbare.

Zusammen mit der technischen Entwicklung des mm-VLBI wurde die Idee verwirklicht, den dunklen Bereich um ein Schwarzes Loch abzubilden, von dem erwartet wird, dass er bei Vorhandensein einer Hintergrundquelle beobachtet werden kann, den so genannten "Schatten eines Schwarzen Lochs". Lichtbeugung und Linsenbildung um Schwarze Löcher wurden von David Hilbert in den späten 1910er Jahren und von James M. Bardeen und Christopher T. Cunningham an der University of Washington sowie von Jean-Pierre Luminet am Observatoire de Paris in den 1970er Jahren berechnet.

Der Begriff "Schatten" und die detaillierte Berechnung des Erscheinungsbilds der Quelle, eingebettet in ein hell strahlendes, aber transparentes heißes Gas, stammten von einem Team unter der Leitung von Heino Falcke am MPIfR in den späten 1990er Jahren. Weitere Beobachtungen wurden in den 2000er Jahren durchgeführt, um Schwarze Löcher tatsächlich zu "sehen", und ebneten den Weg für das heutige Event Horizon Telescope (ER).

Ein wesentliches Ziel des EHT-Projekts war die Beobachtung des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße. Die am 12. Mai 2022 veröffentlichten Ergebnisse zeigten zum ersten Mal ein Bild von Sgr A* und bestätigten damit, dass dieses Objekt ein Schwarzes Loch enthält. Ähnlich wie bei dem bereits zuvor veröffentlichten Bild des Schwarzen Lochs im Zentrum von M87 zeigt es einen zentralen Schatten mit einem hellen umgebenden Ring von ca. 52 Mikrobogensekunden (μs) Durchmesser, der, in guter Übereinstimmung mit den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), durch Ablenkung des Lichts aus der Umgebung entsteht. Das deckt sich mit den Vorhersagen der ART, die sich aus der bereits durch Infrarotbeobachtungen bekannten Masse ergeben. Die EHT-Beobachtung zeigt den „Schatten“ des Schwarzen Lochs, der nach den Berechnungen der ART auf die Größe des

Ereignishorizonts zurückschließen lässt. Dieser beträgt $12 \mu\text{s}$ entsprechend einer Masse von gut vier Millionen Sonnenmassen.

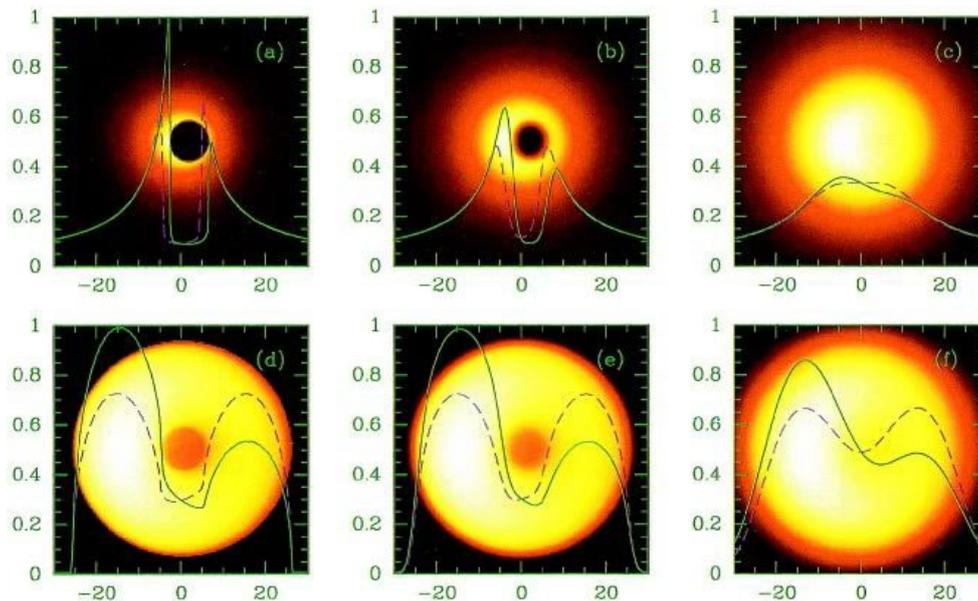


Abb. 11: Computersimulierte Bilder des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße. **Bild:** Falcke, Melia, Agol, 2000, *Astrophysical Journal*.

[Der Schatten eines Schwarzen Lochs](#), MPIfR-Pressemitteilung vom 17. Januar 2000.

Wenn Heino Falcke in seinem Buch schreibt, „...das Licht muss gegen den Strom der Raumzeit fliegen und wird weit draußen eingefangen. So ein schwarzes Loch hat ein weites Fangnetz, wenn Licht versucht, an ihm vorüberzufliegen.“, was unterscheidet dann das „Fangnetz“ vom Ereignishorizont?

Das ist eine nette, belletristische Formulierung (vielleicht der Zusammenarbeit mit dem Koautor geschuldet), sollte aber nicht zwangsläufig einen exakten physikalischen Sachverhalt ausdrücken.

Als Folgerung von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (ART) „verbiegen“ Massen im Universum die Struktur der Raumzeit. Auf dieser Basis erfolgte bereits im Jahr 1919 die erste Bestätigung der ART durch Beobachtung der Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne während einer totalen Sonnenfinsternis.

Dass ein Schwarzes Loch ein „Fangnetz“ zum Einfangen von Licht auswirft, ist ein etwas gewagtes Bild, aber tatsächlich stellt der Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs den „Point of No Return“ dar, aus dessen Inneren keine Information mehr nach außen gelangt.

[Eine Sonnenfinsternis erhellt die Physik](#), MPG-Pressemitteilung vom 29. Mai 2019

[Licht im Dunkeln](#) (Heino Falcke), Klett-Cotta-Verlag 2020

M87* rotiert - kann man das am Bild erkennen?

Das ist nur durch Vergleich mit einer Modellierung möglich und geht nicht aus der Abbildung alleine hervor. Wenn die Materie das Schwarze Loch umkreist, kann man sich fragen, wie groß dann die innerste stabile Kreisbahn ist. Dieser Wert hängt von der Masse und der Rotation des Schwarzen Lochs ab und dient als ungefähre dynamische Zeitskala für alle Variationen, die bei der Emission in der direkten Umgebung eines Schwarzen Lochs auftreten. Für Bahnen in der gleichen Ausrichtung wie der Schatten des Schwarzen Lochs liegt das zwischen Werten von $4\pi t_g$ (maximale Rotation, Schwarzes Loch mit Kerr-Metrik) bis zu ca. $30 \pi t_g$ (keine Rotation, Schwarzes Loch mit Schwarzschild-Metrik). Dabei ist $t_g = GM/c^3$ die sogenannte Gravitationszeitskala, wobei die Masse M des Schwarzen Lochs, die Gravitationskonstante G und die Lichtgeschwindigkeit c berücksichtigt werden. Für Sgr A* beträgt die Spanne nur 4 bis 30 Minuten, und in diesem Sinne kann sich die Struktur der Quelle innerhalb einer einzigen Nacht verändern, während diese Größe bei Messier 87* zwischen fünf Tagen und einem Monat liegt (ER).

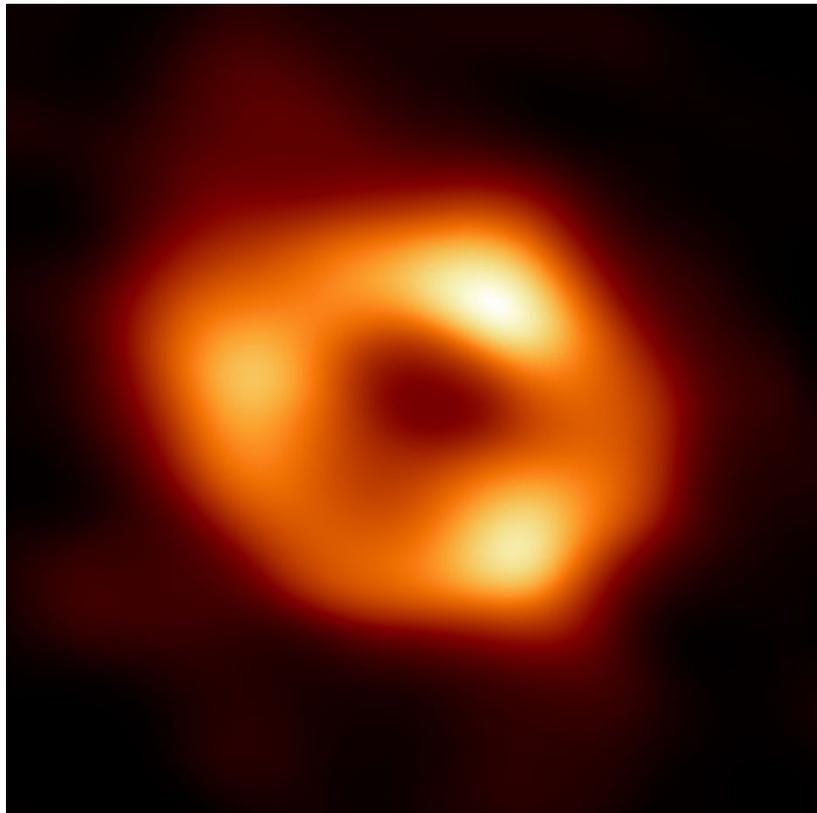


Abb. 12: Das erste Bild von Sagittarius A* (kurz: Sgr A*), dem supermassereichen Schwarzen Loch im Zentrum unserer Milchstraße, gemessen mit dem Event Horizon Telescope (EHT). **Bild:** EHT-Kollaboration (22. Mai 2022).

Dadurch ist auch begründet, wieso die Auswertung der Daten bei Sgr A* um so vieles aufwändiger war als bei M87*; die zeitliche Dauer der Veränderungen bei Sgr A* liegt in der Größenordnung der Dauer der zu korrelierenden Messungen in der EHT-Beobachtungskampagne. Während das Bild der Zentralquelle von M87 bereits im April 2019

veröffentlicht werden konnte, hat die Veröffentlichung des ersten Bildes von Sgr A* bis zum Mai 2022 gedauert.

[Astronomen enthüllen erstes Bild des supermassereichen Schwarzen Lochs im Herzen der Milchstraße](#), MPIfR-Pressemitteilung vom 22. Mai 2022

Wo ist der Jet?

Die Zentralquelle unserer Milchstraße, Sgr A*, hat seit ihrer Entdeckung im Jahr 1974 keinen deutlich sichtbaren Jet mehr gezeigt. Das steht in Gegensatz zu M87*. Die Zentralquelle dieser Galaxie stößt einen starken Jet aus, der sich über Tausende von Lichtjahren erstreckt. Obwohl die Wissenschaftler noch nicht wissen, ob Sgr A* ebenfalls einen Jet ausstößt, sagen theoretische Modelle vorher, dass das der Fall sein sollte. Sollte der Jet existieren, müsste er jedoch viel schwächer sein als der Jet von M87*. EHT-Beobachtungen im Jahr 2017 waren nicht empfindlich genug, um die sehr schwache Emission zu entdecken, die von einem solchen Jet ausgehen würde. Diese Frage wird voraussichtlich beantwortet durch bessere Bilder von Sgr A*, die in naher Zukunft mit dem EHT aufgenommen werden (ER).

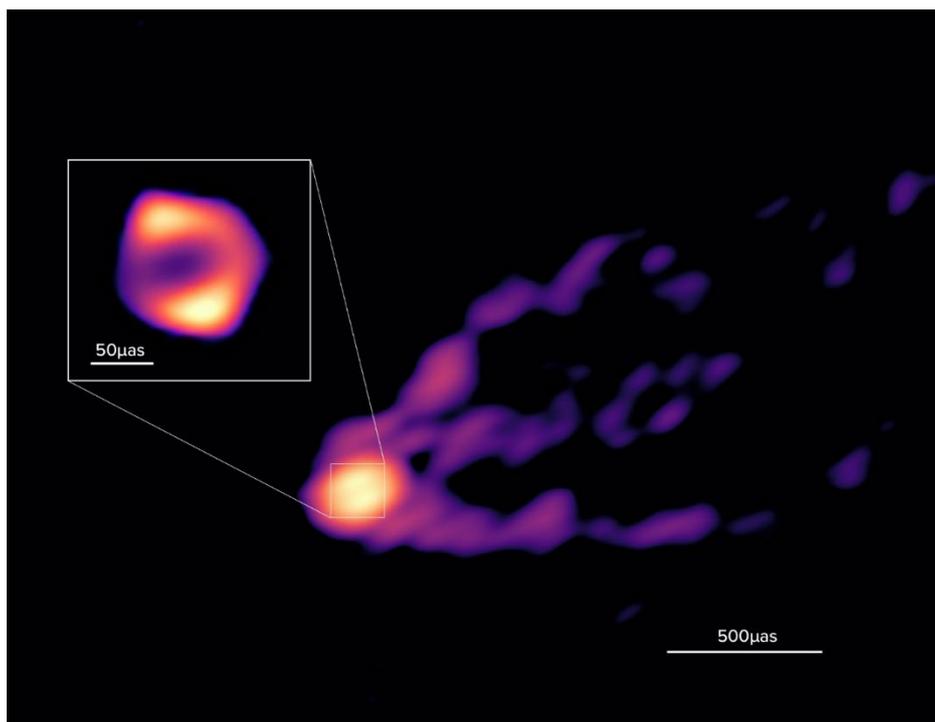


Abb. 13: GMVA+ALMA-Bild der zentralen Region des Schwarzen Lochs in Messier 87 bei 3,5 mm Wellenlänge. Das große Bild zeigt den Jet und den zentralen Ring, der Inset zeigt eine Vergrößerung der inneren Region als Ring mit 64 Mikrobogensekunden Durchmesser. **Bild:** Ru-sen Lu et al, Nature 2023.

Bei den EHT-Messungen von M87* bei 1,3 mm Wellenlänge ist der Jet aufgrund der begrenzten Dynamik nicht sichtbar, wohl aber bei Beobachtungen von 3,5 mm Wellenlänge im Rahmen des weltweiten GMVA-Netzwerks („Global mm-VLBI Array“) und ebenfalls

bereits bei früheren Messungen von Yuri Kovalev und Kollegen aus dem Jahr 2007. Die im April 2023 veröffentlichten GMVA-Beobachtungen zeigen sowohl den Schatten des Schwarzen Lochs als auch den Startpunkt des Jets im Zentrum der Galaxie M87.

[Wie das Schwarze Loch in der Galaxie M87 einen Jet startet](#), MPIfR-Pressemitteilung vom 26. April 2023

[Scharf beobachtet - Jets im All. Max-Planck-Forschern ist das bisher beste Radiobild der Galaxie M87 gelungen](#), MPIfR-Pressemitteilung vom 5. Oktober 2007.