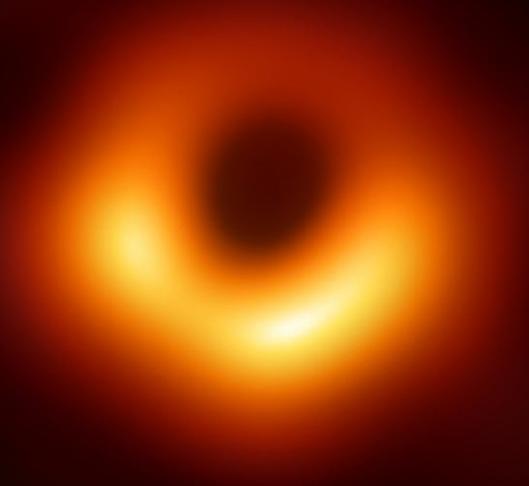
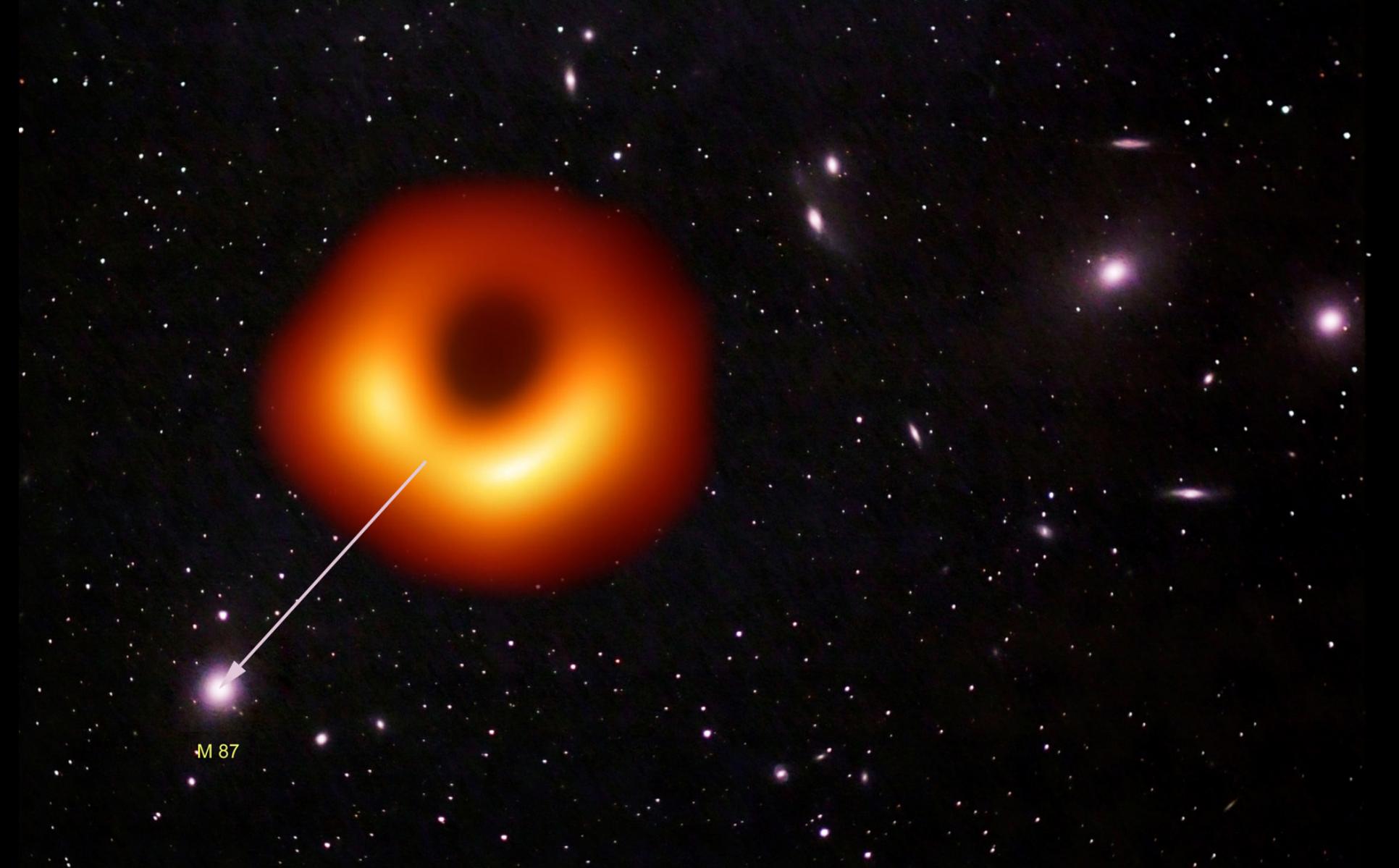


Das erste Bild von einem Schwarzen Loch



Astrostammtisch 03.05.2019

Reiner Guse



M 87

Das Schwarze Loch in M87



M87

Elliptische Galaxie mit ausströmendem Jet aus dem Zentrum. Aufnahme mit dem Meade Teleskop 12 Zoll, f/8 und der ALccd9 Kamera, 2 Stunden bel.; Peine, 22.04.2019, Reiner Guse

Wir wollen ein Schwarzes Loch fotografieren!!

Welche Eigenschaften haben Schwarze Löcher?

Die Auswahl eines geeigneten Schwarzen Lochs

Die Anforderungen an die Teleskope

- Auflösung

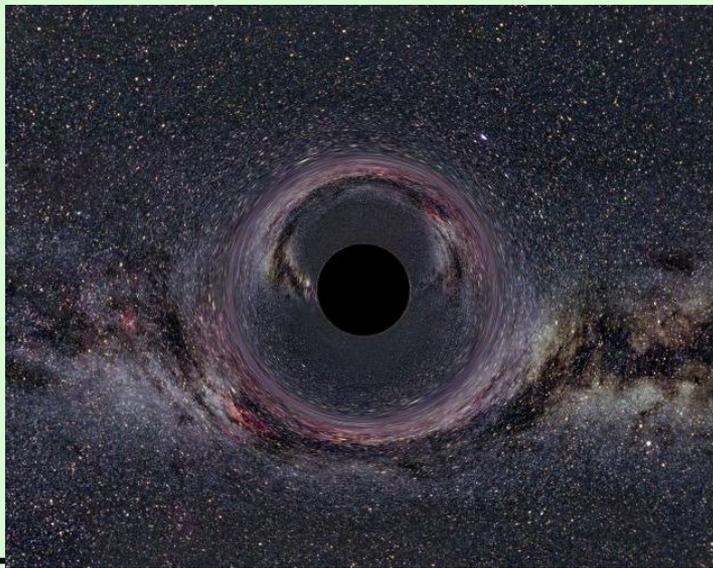
- Wellenlänge (Licht, Radio, Röntgen usw.)

Die Aufnahme der Daten

Die Auswertung der Daten

Wie könnte das Schwarze Loch aussehen?

Welche Eigenschaften
haben Schwarze Löcher?



Ein „Schwarzes Loch“ ist ein Objekt, dessen Gravitation so groß ist, dass kein Licht entweichen kann.

Der Begriff wurde erst 1967 von John Archibald Wheeler (black hole) eingeführt.

Eigenschaften

- Ein Schwarzes Loch ist gekennzeichnet durch seine Masse und meistens einem Drehmoment (Spin)
- Aus der Ferne verhält sich ein SL gravitativ genauso wie ein Stern mit gleicher Masse.
- Der Ereignishorizont ist nicht die Oberfläche des SL!!! Er umhüllt das Schwarze Loch und ist die Grenze des Bereiches, in dem nichts entkommen kann, nicht einmal das Licht.

$$R_s = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$$

R_s Schwarzschildradius

G Gravitationskonstante

M Masse des Körpers

c Lichtgeschwindigkeit

Nachteile für das Foto:

- Schwarzes Loch kann gar nicht fotografiert werden, weil es keine Strahlung aussendet.
- Schwarze Löcher sind aufgrund ihrer starken Gravitation verhältnismäßig klein.

Schlussfolgerung:

- Wir geben uns mit dem Schatten eines Schwarzen Loches zufrieden und suchen nach dem scheinbar größten.

Ist die Umgebung eines Schwarzen Loches massereich, dann kann folgender Prozess ausgelöst werden, bei dem sich die Anwesenheit eines Schwarzen Loches bemerkbar macht.

- Es bildet sich eine Akkretionsscheibe.
- Diese kreist um das Schwarze Loch und fällt zum Teil in das Loch hinein.
- Dabei entstehen hohe Geschwindigkeiten und Temperaturen.
- Es wird Strahlung über den gesamten Wellenlängenbereich und u. a. Synchrotronstrahlung ausgesandt.



Auswahl eines geeigneten Schwarzen Lochs

Möglichst großen scheinbaren Durchmesser:

- BH unserer Milchstraßengalaxie „Sgr A*“
 $D = 24$ Millionen km, ca. 20 mikro_as

- BH von M87 „M87*“
 $D = 39$ Milliarden km, ca. 10 mikro_as

Der Schatten des Schwarzen Loches ist ca.
2,5x größer als der Durchmesser des
Ereignishorizonts.

Table 1
Assumed Physical Properties of Sgr A* and M87 Used to Establish Technical Goals^a

		Sgr A*	M87
Black Hole Mass	$M (M_{\odot})$	4.1×10^6 (1)	$(3.3\text{--}6.2) \times 10^9$ (5), (6)
Distance	D (pc)	8.34×10^3 (2)	16.8×10^6 (7)
Schwarzschild Radius	$R_s (\mu\text{as})$	9.7	3.9–7.3
Shadow Diameter ^b	$D_{\text{sh}} (\mu\text{as})$	47–50	19–38
Brightness Temperature ^c	T_B (K)	3×10^9 (3)	10^{10} (8)
Period ISCO ^d	P_{ISCO}	4–54 minutes	2.4–57.7 days
Mass Accretion Rate ^e	$\dot{M} (M_{\odot} \text{ yr}^{-1})$	$10^{-9}\text{--}10^{-7}$ (4)	$<10^{-3}$ (9)

Notes.

^a Sgr A*: $\alpha_{\text{J2000.0}} = 17^{\text{h}}45^{\text{m}}40^{\text{s}}.0409$, $\delta_{\text{J2000.0}} = -29^{\circ}00'28''.118$ (10); M87: $\alpha_{\text{J2000.0}} = 12^{\text{h}}30^{\text{m}}49^{\text{s}}.4234$, $\delta_{\text{J2000.0}} = 12^{\circ}23'28''.044$ (11).

^b The shadow diameter is within the range 4.8–5.2 R_s depending on black hole spin and orientation to the observer's line of sight (Johannsen & Psaltis 2010).

^c Brightness temperatures are reported for an observing frequency of 230 GHz.

^d P_{ISCO} range is given in the case of maximum spin for both prograde (shortest) and retrograde (longest) orbits (Bardeen et al. 1972).

^e Mass accretion rates \dot{M} are estimated from measurements of Faraday rotation imparted by material in the accretion flow around the black hole.

References. (1) GRAVITY Collaboration et al. (2018a), (2) Reid et al. (2014), (3) Lu et al. (2018), (4) Marrone et al. (2007), (5) Walsh et al. (2013), (6) Gebhardt et al. (2011), (7) Blakeslee et al. (2009), EHT Collaboration et al. (2019e), (8) Akiyama et al. (2015), (9) Kuo et al. (2014), (10) Reid & Brunthaler (2004), (11) Lambert & Gontier (2009).

Quelle s. oben

Anforderungen an die Teleskope

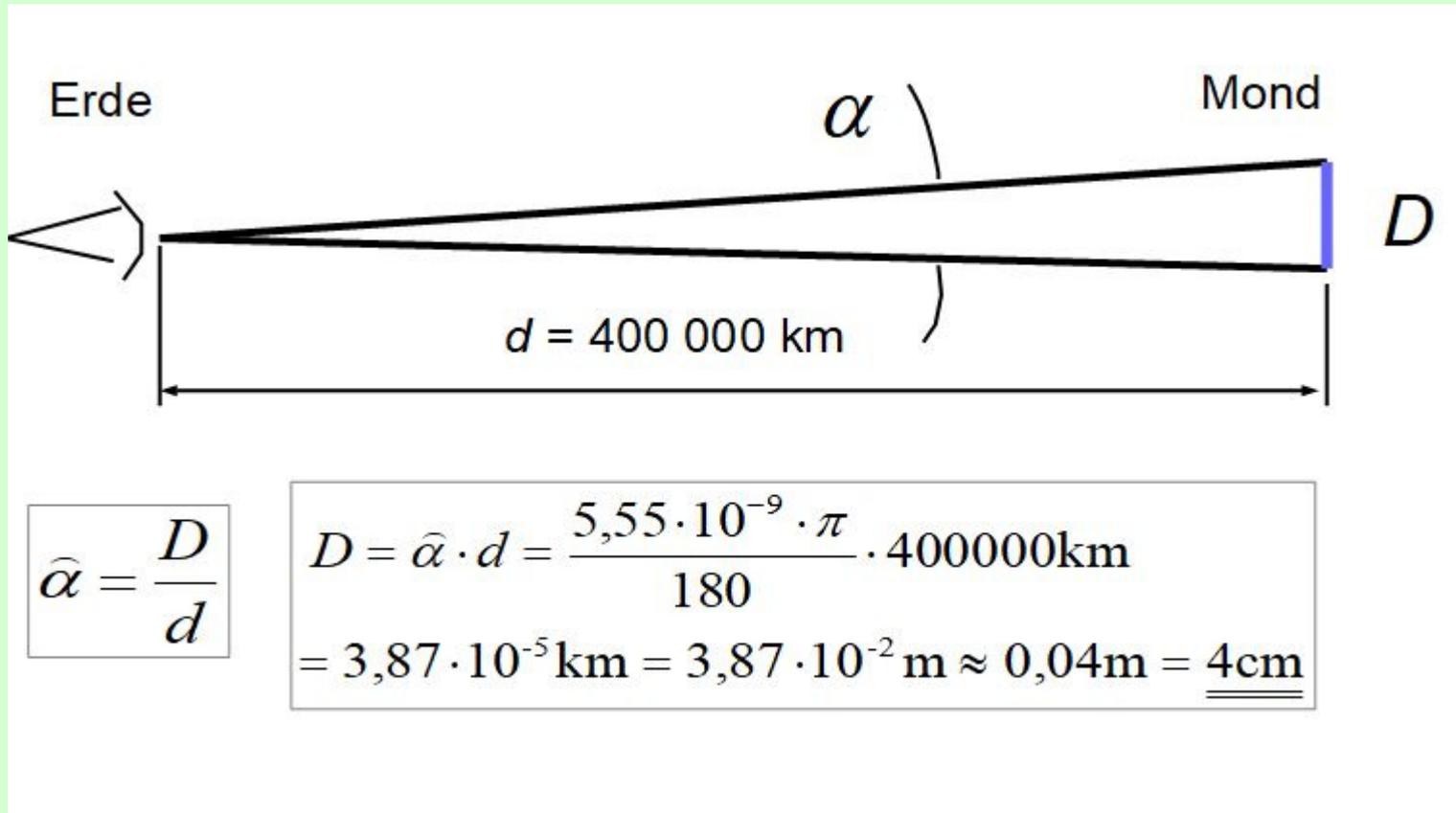
- Auflösung

- Wellenlänge

Bei der Schattengröße von ca. 20 bis 40 mikro_as sollte die Auflösung mindestens ca. 20 mikro_as betragen. mikro_as = Mikrobogensekunde

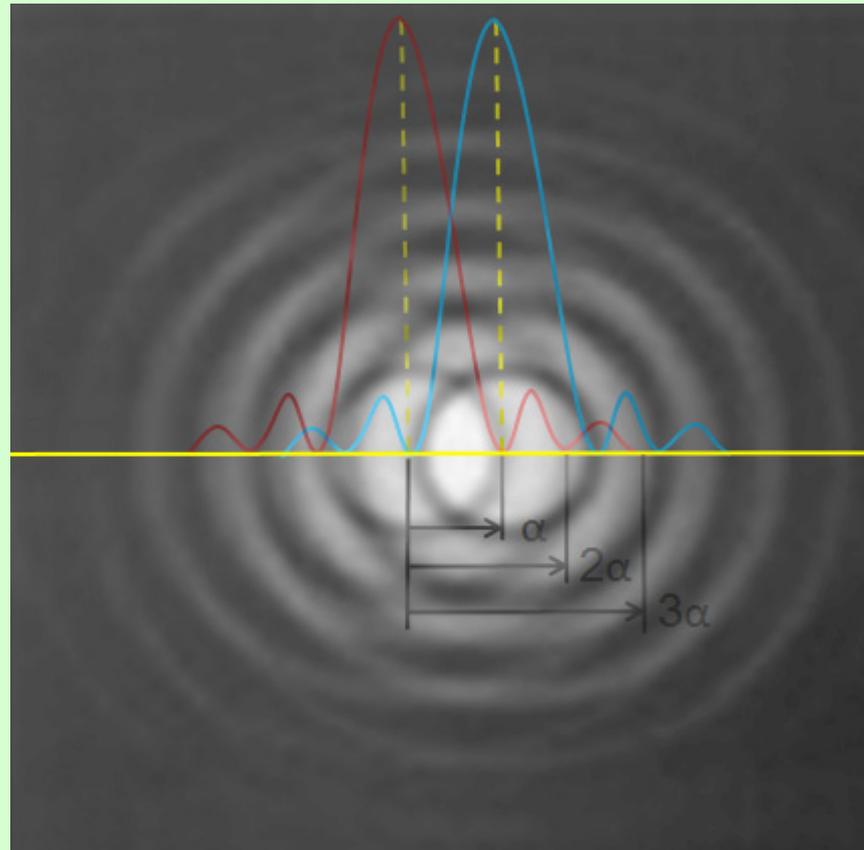
$$20\mu\text{as} = 20 \cdot 10^{-6}'' = \frac{20}{10^6}'' \quad \text{Bogensekunden}$$

$$20 \cdot 10^{-6}'' = \left(\frac{20 \cdot 10^{-6}}{3600} \right)^0 = (5,55 \cdot 10^{-9})^0 \quad \text{Grad}$$



Mit dieser Auflösung sehen wir ein Objekt mit 4 cm Größe auf dem Mond. Mit unseren optischen Teleskopen können wir heute auf dem Mond Objekte nicht unter 200 m beobachten. (Faktor 5000)

Auflösungsvermögen von Teleskopen



Für das Auflösungsvermögen wird der Winkel angegeben, mit dem 2 Punkte gerade noch getrennt werden können. Winkelangabe in ° (Grad), ' (Minuten), " (Sekunden) usw.

Je größer die Öffnung D des Teleskops und je kleiner die Wellenlänge des Lichtes, desto kleiner der Winkel und damit besser die Auflösung.

$$\hat{\alpha}_A = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D_T}$$

$$\alpha_A = \frac{\hat{\alpha} \cdot 180}{\pi}$$

$$\alpha_{\text{Bogensekunden}} = 251643'' \cdot \frac{\lambda}{D_T}$$

λ Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung
 D_T Teleskopdurchmesser (Spiegel oder Linse)

Welchen Durchmesser muss ein optisches Teleskop zum Auflösen von M87* haben?

$$D_T = 251643'' \cdot \frac{\lambda}{\alpha} = 251643'' \cdot \frac{555 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{20 \cdot 10^{-6}''} = 6983 \text{ m} \approx \underline{\underline{7 \text{ km}}}$$

Mit dem größten Sterneninterferometer (VLT) erreicht man durch analoge Überlagerung eine Auflösung, die einem Spiegeldurchmesser von 200 m entspricht.

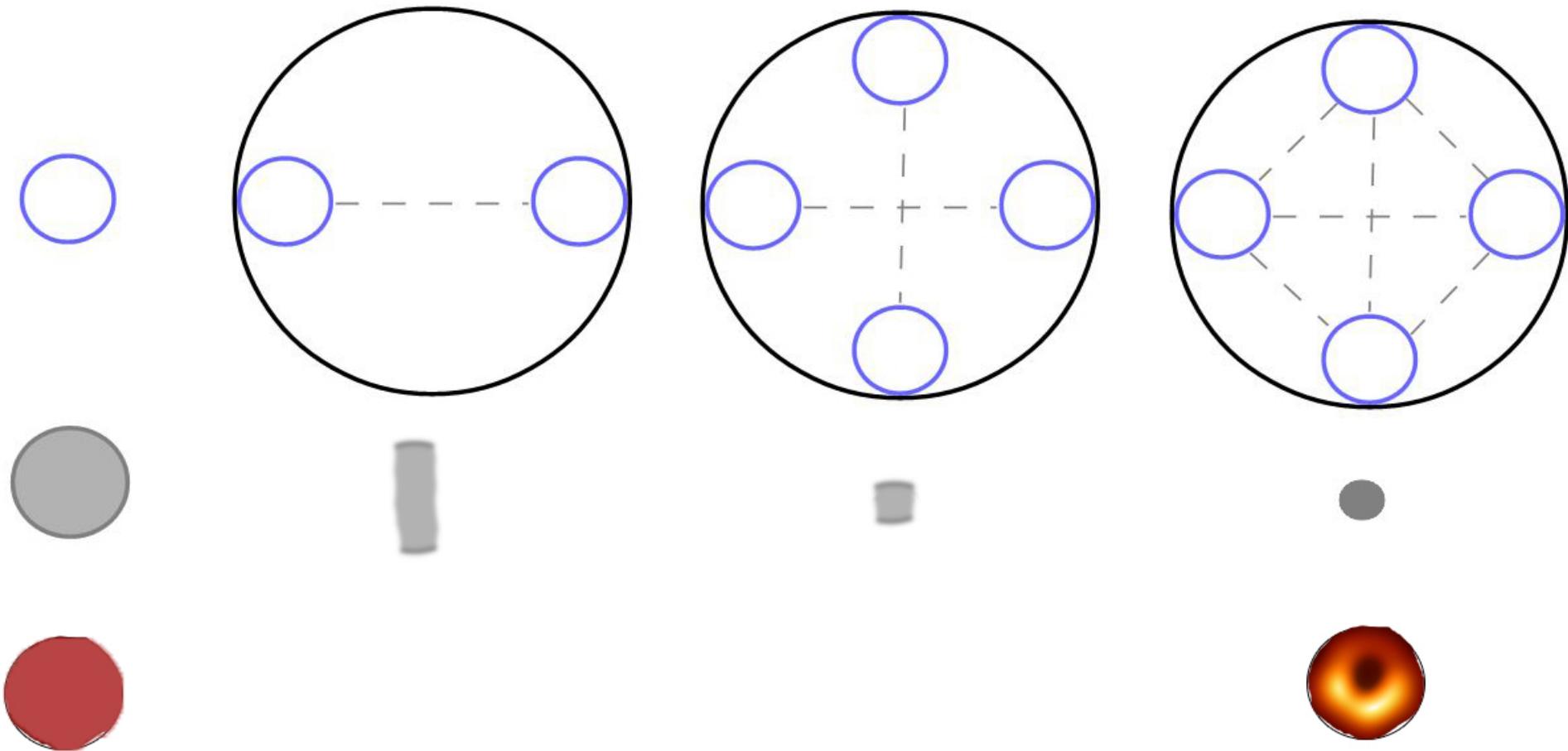
Zusammenschaltungen weit entfernter optischer Teleskope wegen der kurzen Schwingungsdauer des sichtbaren Lichtes nicht sinnvoll.

Einschub: Interferometrie

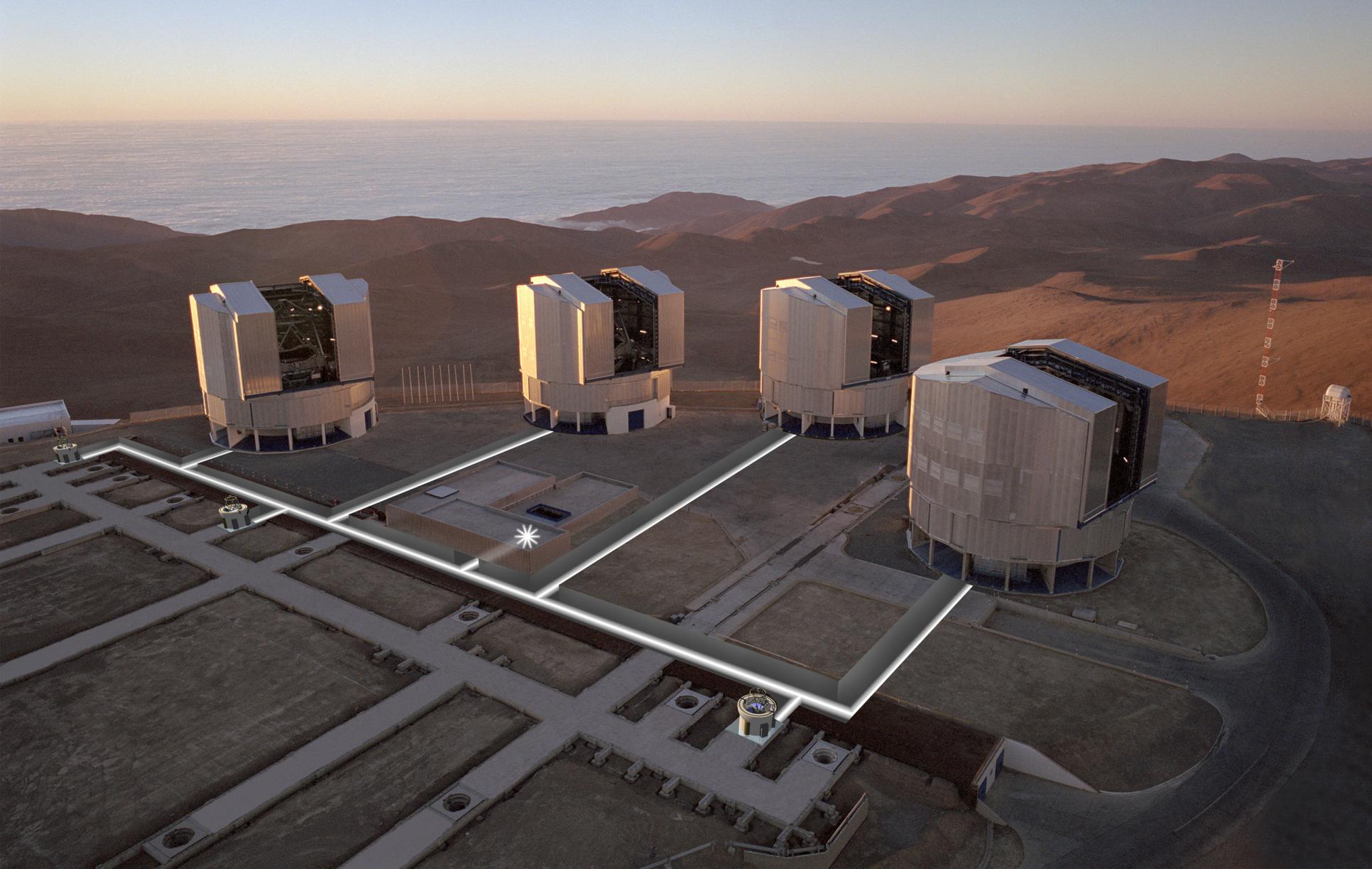
Um die Auflösung durch das Zusammenschalten von Teleskopen zu erhöhen, nutzt man die Interferometrie. Dabei werden die Wellen von mehreren Teleskopen überlagert, wodurch Interferenzmuster entstehen (enge schmale Linien). Diese Muster lassen sich speichern und weiterverarbeiten. Aus ihnen kann dann ein Bild mit der gewünschten Auflösung angefertigt werden. Die Vollständigkeit des hoch aufgelösten Bildes richtet sich nach der Anzahl und Anordnung der Teleskope.

Lichtwellen: Zur Erstellung der Muster werden die Lichtwellen der Teleskope direkt analog überlagert.

Radiowellen: Die Radiowellen werden digital bei jedem Teleskop getrennt nach Zeitsynchronisierung gespeichert und später überlagert.



Die Erhöhung der Auflösung erfolgt in Richtung der gestrichelten Linien (Verbindungslinien der Teleskope).
 Je mehr Teleskope und Verbindungslinien, desto besser das Bild.



VLT (Very Large Telescope) in Paranal Chile. Die Bilder der 8,2 m großen Spiegelteleskope werden im * überlagert.(Quelle ESO)

Auswahl einer geeigneten Wellenlänge

Licht und kürzere Wellenlängen sind nicht geeignet:

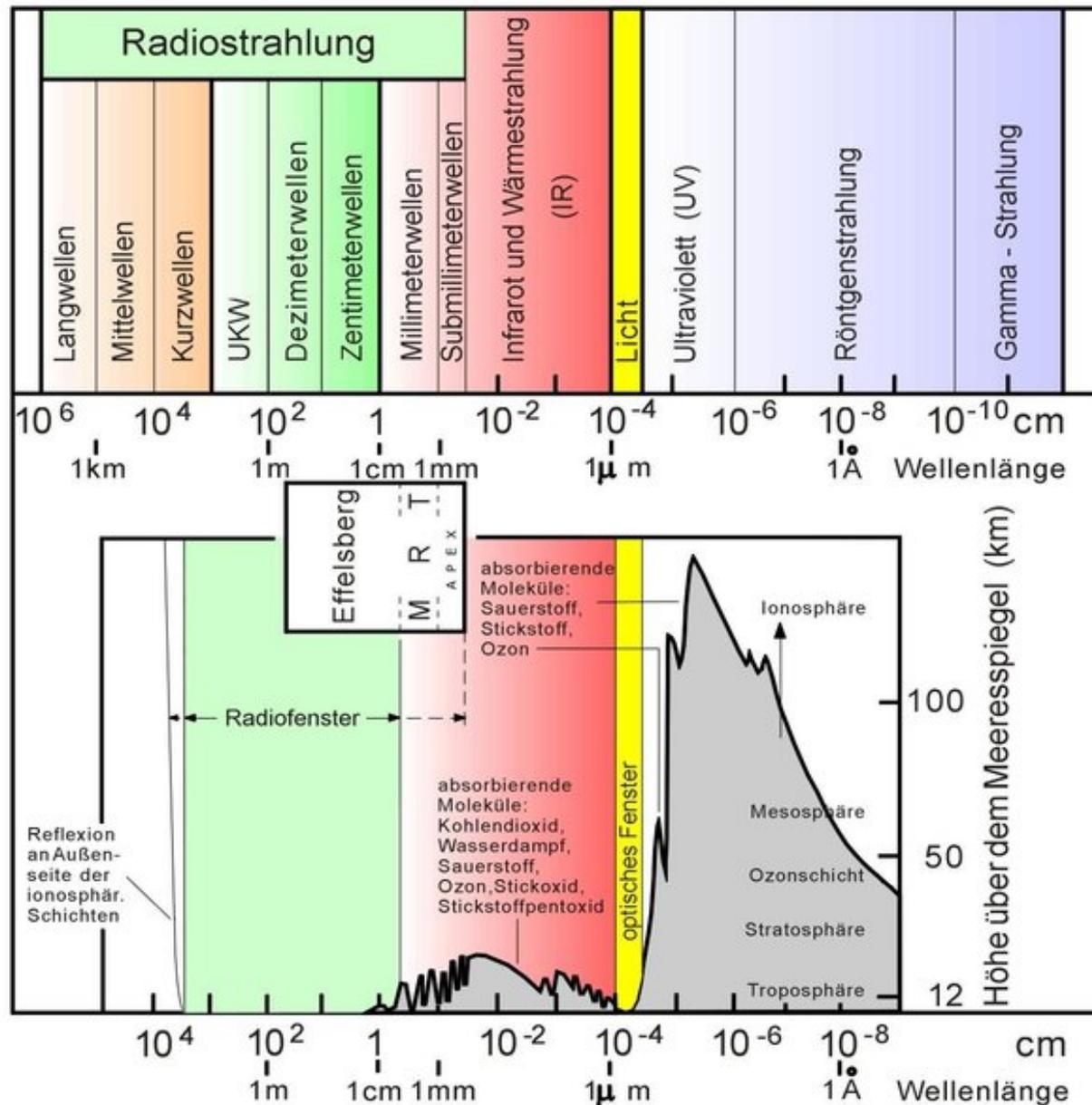
- Auflösung nicht realisierbar
- keine Durchsicht durch Atmosphäre (Röntgen und Gamma) und durch interstellarem Staub (Licht)

Bei Radiowellen kann die offline-Interferometrie angewendet werden, d. h. Daten werden jedem Teleskop nach Zeitabgleich aufgenommen und später kombiniert und ausgewertet.

Art	Prinzip	Beispiel
offline-Interferometer	Phaseninformation wird nachträglich ausgewertet	LOFAR, VLA, VLBI, ALMA
live-Interferometer	Licht wird direkt überlagert, Intensität ausgewertet	VLTi

zu groß

zu klein



- Radiowellen dürfen nicht zu langwellig sein,
- da dadurch die Auflösung verschlechtert wird und
- Verzerrungen zu erwarten sind.

Gewählte Wellenlänge: 1,3 mm; $f = 230\text{Ghz}$

Abschätzung des erforderlichen Teleskopdurchmessers:

$$D_T = 251643'' \cdot \frac{\lambda}{\alpha} = 251643'' \cdot \frac{1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{25 \cdot 10^{-6}''} = 1,3 \cdot 10^7 \text{ m} \approx \underline{\underline{13000\text{km}}}$$

Das entspricht in etwa dem Erddurchmesser

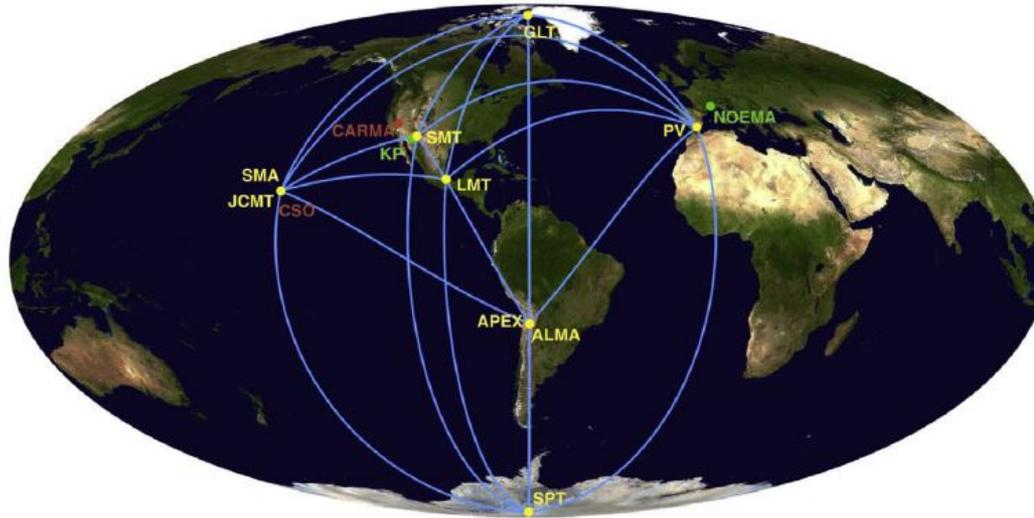
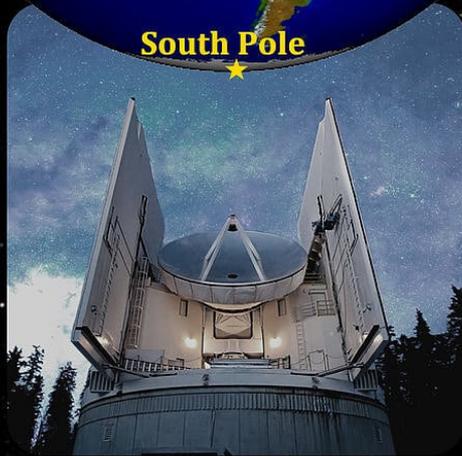


Figure 1. Map of the EHT. Stations active in 2017 and 2018 are shown with connecting lines and labeled in yellow, sites in commission are labeled in green, and legacy sites are labeled in red. Nearly redundant baselines are overlaying each other, i.e., to ALMA/APEX and SMA/JCMT. Such redundancy allows improvement in determining the amplitude calibration of the array (Paper III).

Table 2
EHT Station Information

Facility	Diameter (m)	Location	X^a (m)	Y^a (m)	Z^a (m)	Latitude	Longitude	Elevation ^a (m)
Facilities that Participated in the 2017 Observations								
ALMA ^b	12 ($\times 54$) and 7 ($\times 12$)	Chile	2225061.3	-5440061.7	-2481681.2	-23°01'45"1	-67°45'17"1	5074.1
APEX	12	Chile	2225039.5	-5441197.6	-2479303.4	-23°00'20"8	-67°45'32"9	5104.5
JCMT	15	Hawaii, USA	-5464584.7	-2493001.2	2150654.0	+19°49'22"2	-155°28'37"3	4120.1
LMT	50	Mexico	-768715.6	-5988507.1	2063354.9	+18°59'08"8	-97°18'53"2	4593.3
PV 30 m	30	Spain	5088967.8	-301681.2	3825012.2	+37°03'58"1	-3°23'33"4	2919.5
SMA ^b	6 ($\times 8$)	Hawaii, USA	-5464555.5	-2492928.0	2150797.2	+19°49'27"2	-155°28'39"1	4115.1
SMT	10	Arizona, USA	-1828796.2	-5054406.8	3427865.2	+32°42'05"8	-109°53'28"5	3158.7
SPT ^c	10	Antarctica	809.8	-816.9	-6359568.7	-89°59'22"9	-45°15'00"3	2816.5
Facilities Joining EHT Observations in 2018 and Later								
GLT	12	Greenland	541547.0	-1387978.6	6180982.0	+76°32'06"6	-68°41'08"8	89.4
NOEMA ^d	15 ($\times 12$)	France	4524000.4	468042.1	4460309.8	+44°38'01"2	+5°54'24"0	2617.6
KP 12 m ^d	12	Arizona, USA	-1995954.4	-5037389.4	3357044.3	+31°57'12"0	-111°36'53"5	1894.5





Event Horizon Telescope (EHT)

A Global Network of Radio Telescopes

2018 Observatories



- ALMA**  Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- APEX**  Atacama Pathfinder EXperiment
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- 30-M**  IRAM 30-M Telescope
PICO VELETA, SPAIN
- JCMT**  James Clerk Maxwell Telescope
MAUNAKEA, HAWAII
- LMT**  Large Millimeter Telescope
SIERRA NEGRA, MEXICO
- SMA**  Submillimeter Array
MAUNAKEA, HAWAII
- SMT**  Submillimeter Telescope
MOUNT GRAHAM, ARIZONA
- SPT**  South Pole Telescope
SOUTH POLE STATION
- GLT**  The Greenland Telescope
THULE AIR BASE, GREENLAND, DENMARK
- Kitt Peak**  Kitt Peak 12-meter Telescope
KITT PEAK, ARIZONA, USA
- NOEMA**  NOEMA Observatory
PLATEAU DE BURE, FRANCE

Observing
in 2020



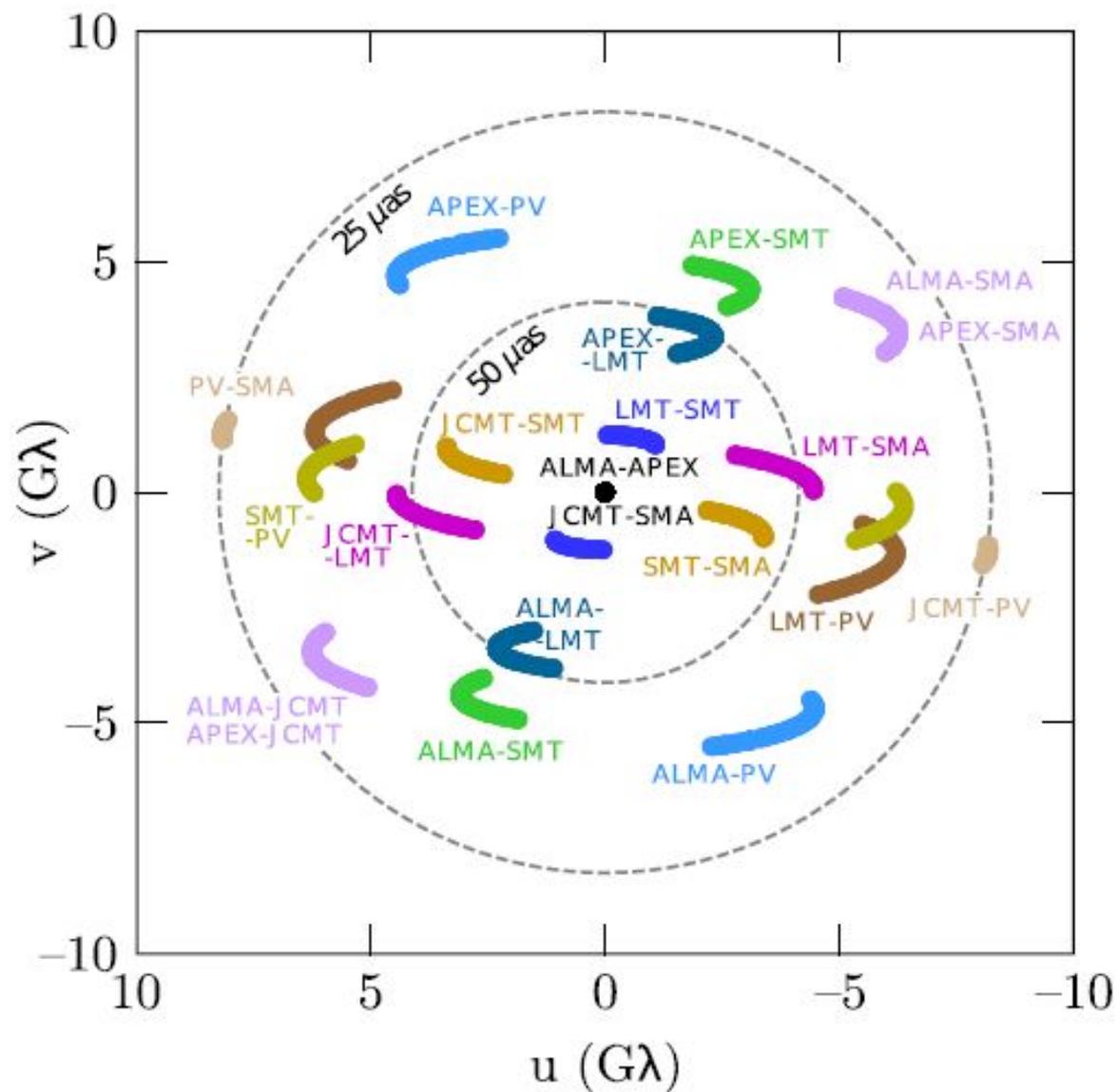
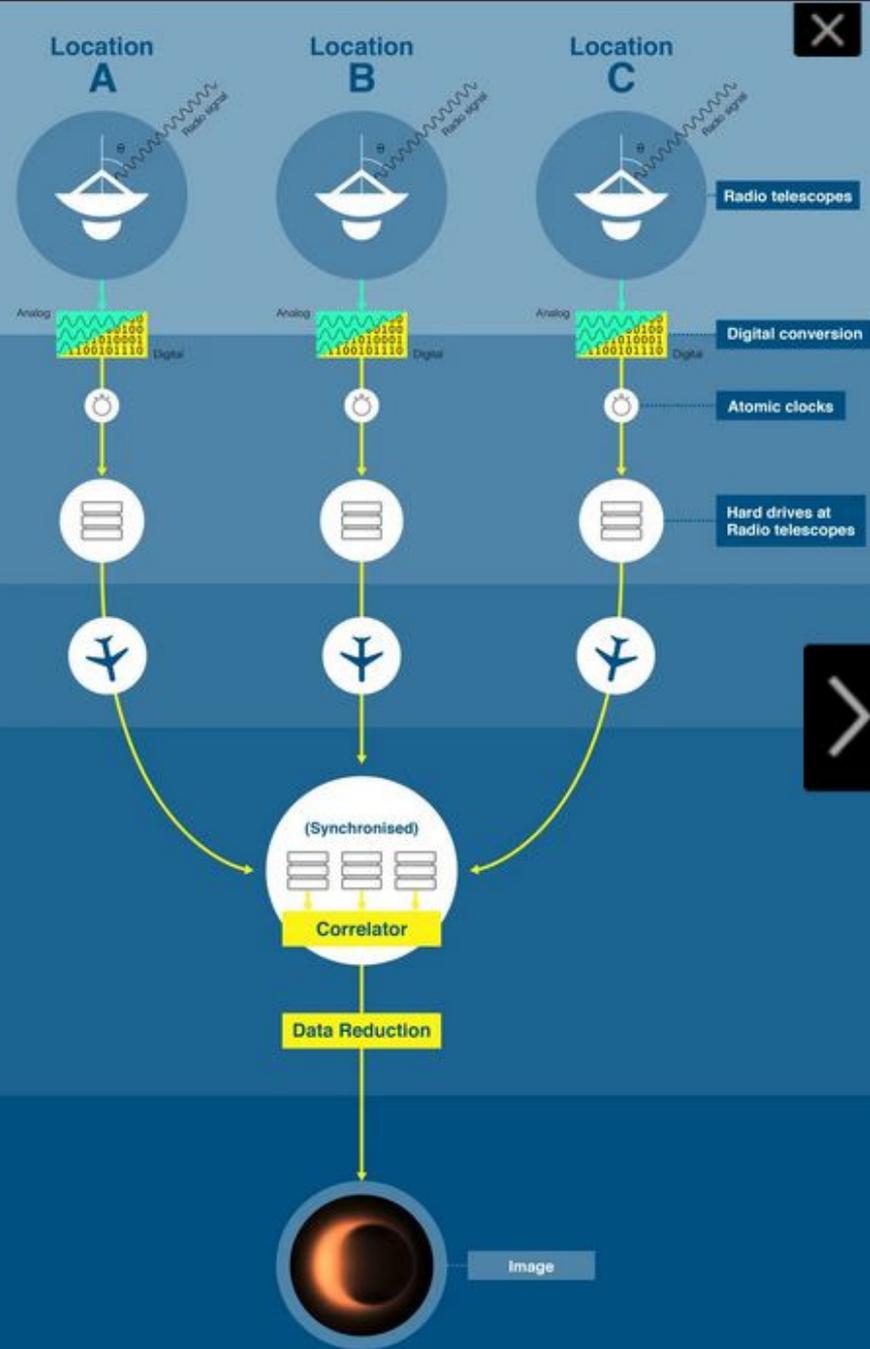


Figure 11. Aggregate EHT baseline coverage for M87 over four nights of observing with the 2017 array. Only detections are shown. The dashed circles show baseline lengths corresponding to fringe spacings of 25 and 50 μas . See Paper III for details.



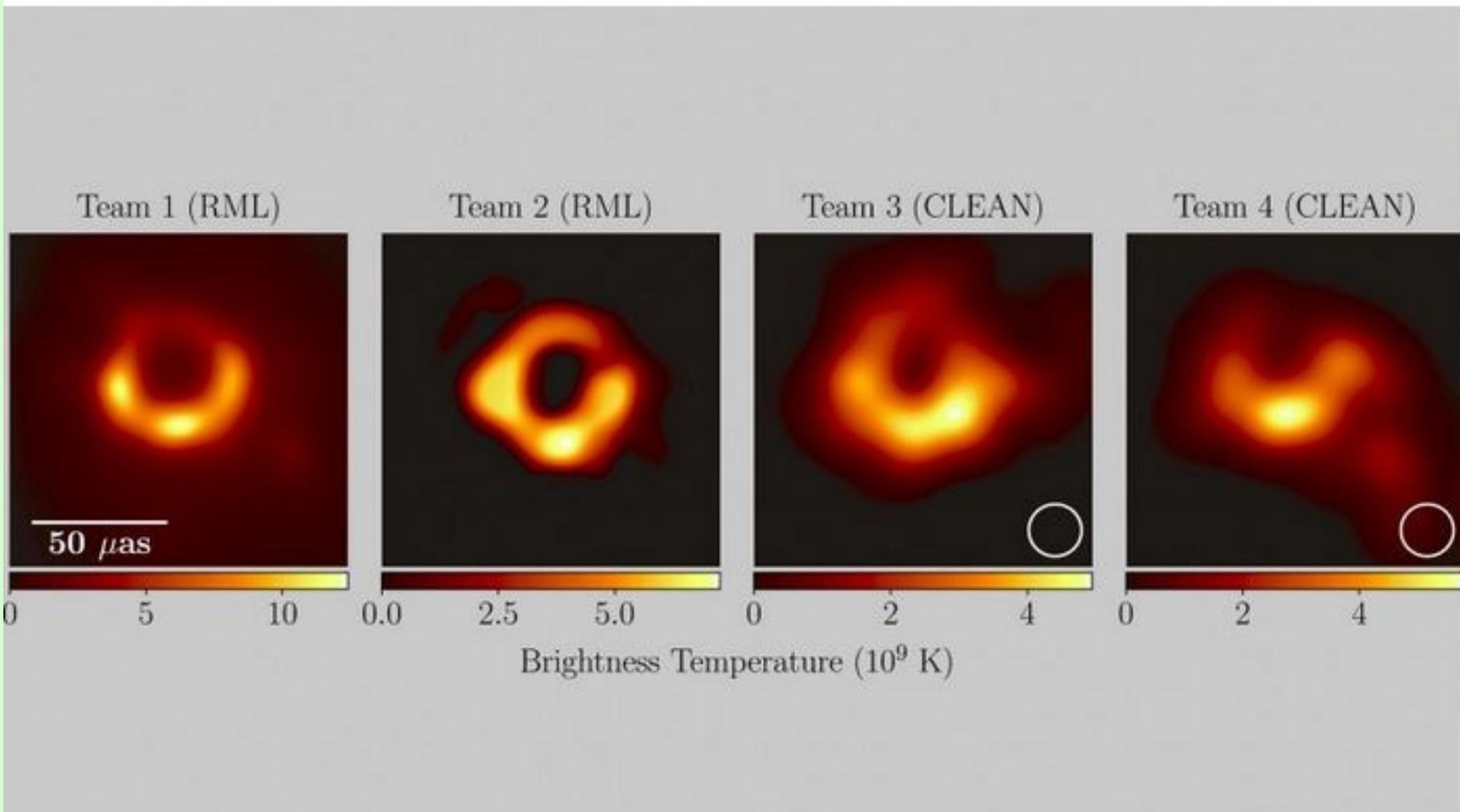
Speichern der Daten vor Ort nach genauer Zeitsynchronisierung (einige 10 ns) auf Festplatten.

Sammeln der Daten durch Festplattentransport nach Bonn und Boston.

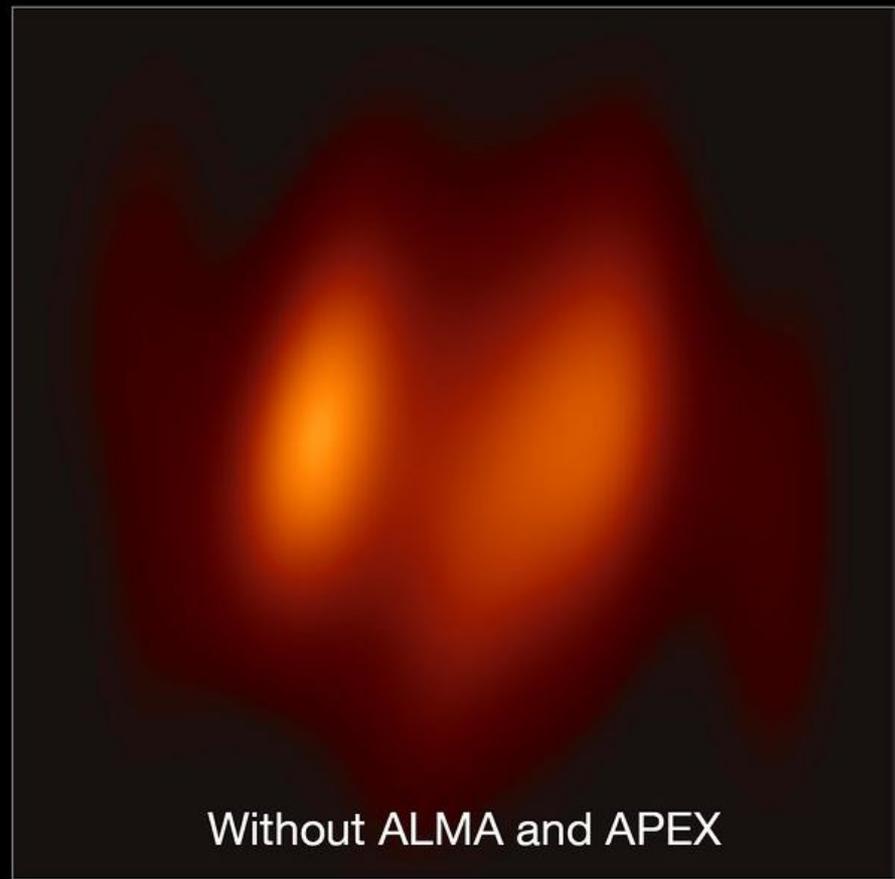
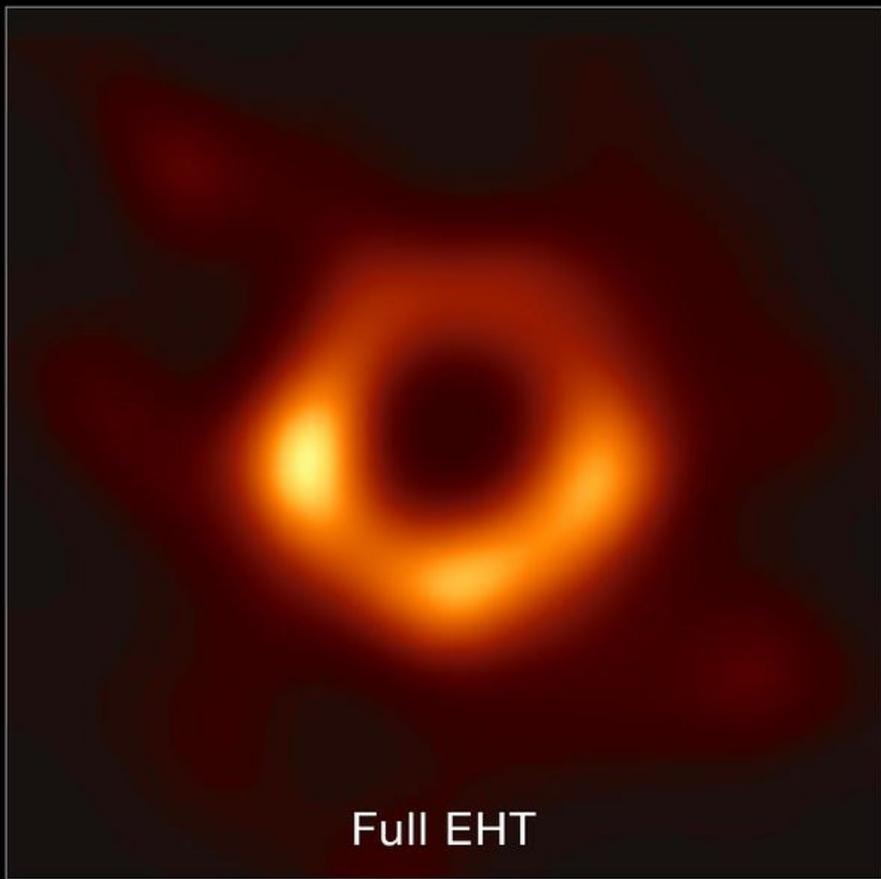
3500 TByte Daten,
6 Kubikmeter Festplatten,
Ausflug vom Südpol erst zur Sommerzeit möglich.

Verarbeitung der Daten mit aufwändigen Programmen

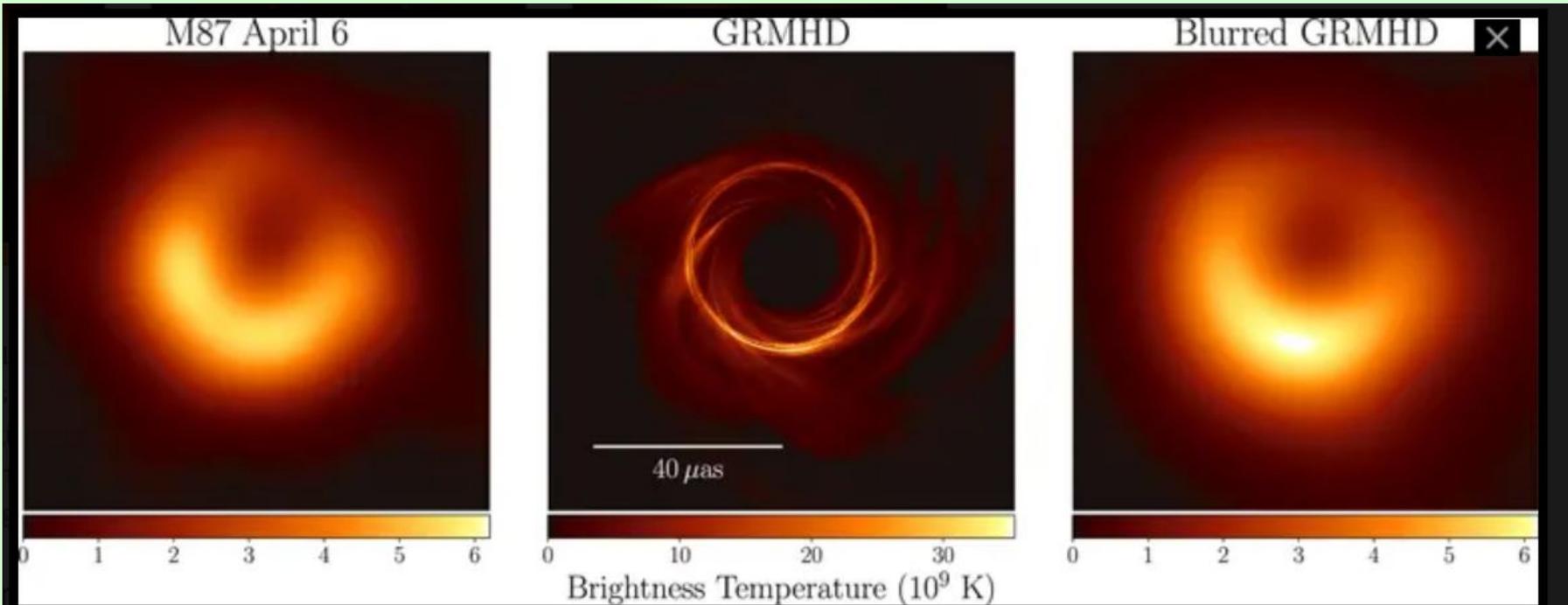
Auswertung mit zwei unterschiedlichen Programmen (RML und CLEAN) von 4 unabhängigen Gruppen:



Es gibt mehr als nur ein mögliches Bild vom schwarzen Loch.



Welches ist das richtige Bild? Oder besser gefragt:
Welches Bild gibt wahrscheinlich die Realität
am Besten wider?



Links das am 6. April 2017 aufgenommene Bild von M87*, in der Mitte eine Simulation auf der Basis eines magneto-
hydrodynamischen Modells unter Berücksichtigung der Allgemeinen Relativitätstheorie (general relativistic
magnetohydrodynamic model GRMHD) und rechts eine auf die Auflösung des EHT von $20 \mu\text{as}$ weichgezeichnete Version des
Bildes in der Mitte. Die Übereinstimmung von Beobachtung und Theorie ist überzeugend. (Bild: The Event Horizon Telescope
Collaboration, ESO.)

Das Licht stark abgelenkt wird (starke

Gravitationswirkung) und somit nicht auf geradlinigem Weg von der

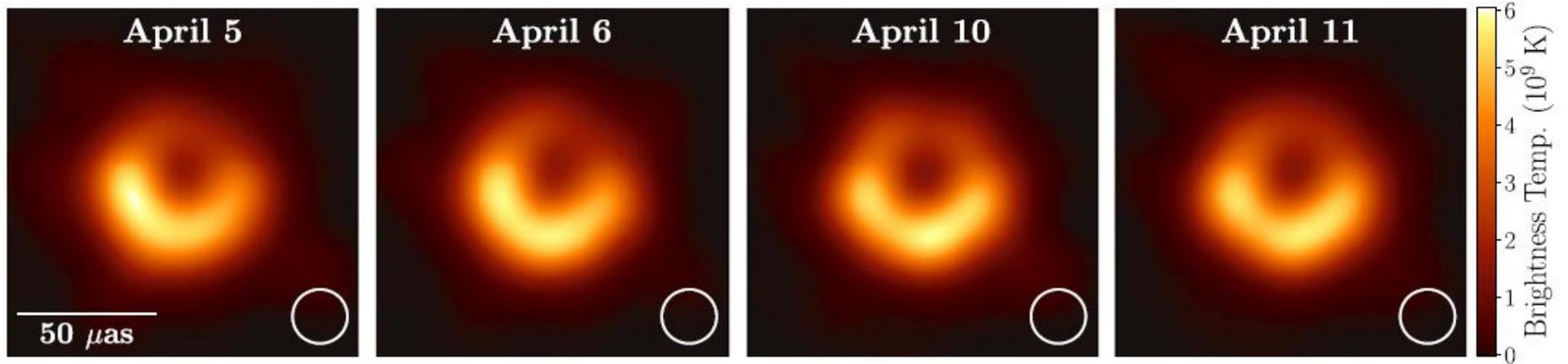
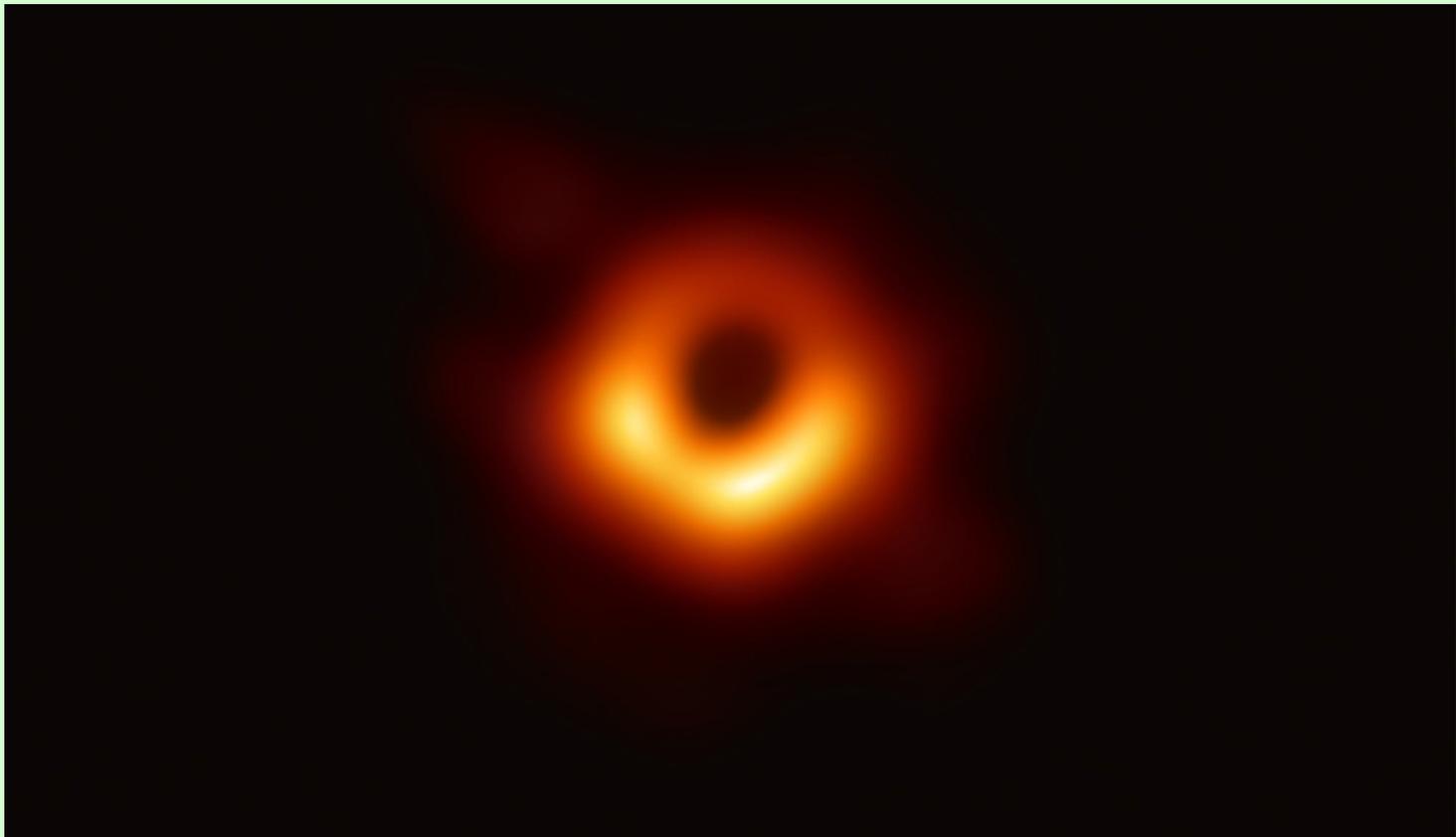


Figure 15. Averages of the three fiducial images of M87 for each of the four observed days after restoring each to an equivalent resolution, as in Figure 14. The indicated beam is 20μ s (i.e., that of DIFMAP, which is always the largest of the three individual beams).



Unprecedented image could revolutionise our understanding of black holes

Elements of a black hole

Accretion disc

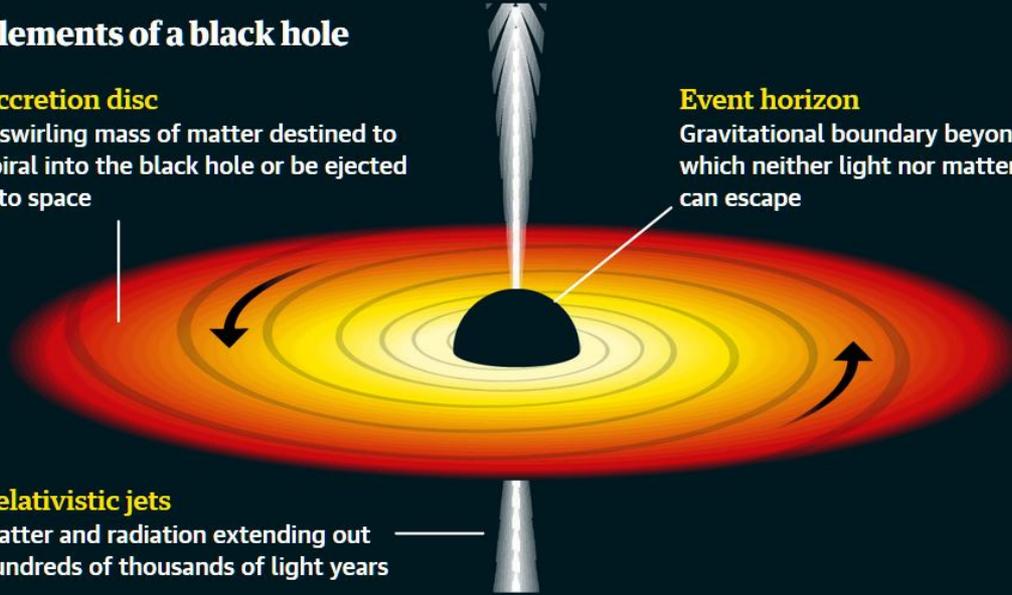
A swirling mass of matter destined to spiral into the black hole or be ejected into space

Event horizon

Gravitational boundary beyond which neither light nor matter can escape

Relativistic jets

Matter and radiation extending out hundreds of thousands of light years



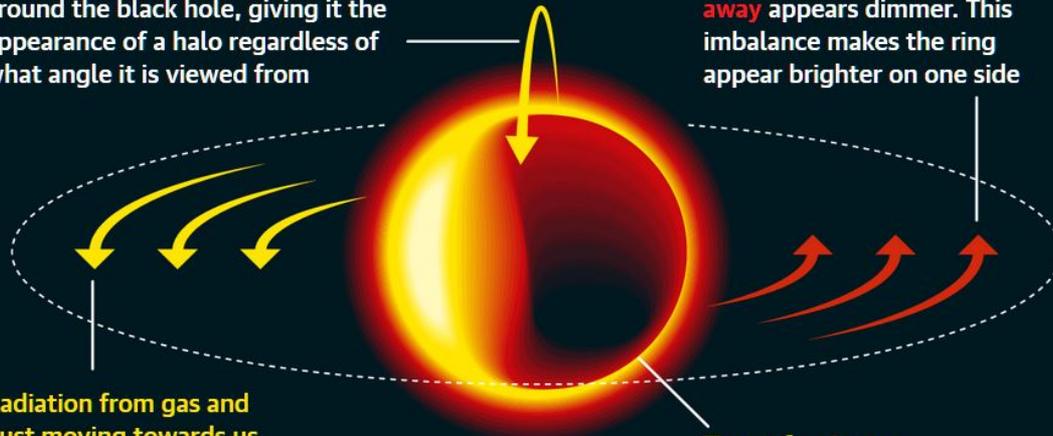
What the Event Horizon Telescope image shows us

Gravity bends light from the disc around the black hole, giving it the appearance of a halo regardless of what angle it is viewed from

Radiation from particles moving away appears dimmer. This imbalance makes the ring appear brighter on one side

Radiation from gas and dust moving towards us appears brighter

Event horizon





So könnte ein Foto in ein paar Jahren aussehen!