

Astrophysikalische Bilder: das Maßlose des Maßhaltigen

RAINER GRUBER

Die Astrophysik wird den Naturwissenschaften, das heißt den quantifizierenden Wissenschaften zugerechnet. Und insofern das metrische Anmessen zu deren charakteristischen Vorgehensweisen zählt, erscheint die Frage nach einer Maßlosigkeit der astrophysikalischen Bilder vermessen. Ob und was gegebenenfalls an Maßlosem in diesen Bildern anzutreffen sei, lässt sich allenfalls erschließen aus der Beantwortung der Frage, worin denn das Maßhaltige dieser Bilder besteht. Und so mag am Ende eine Dialektik auch in den astrophysikalischen Bildern aufscheinen: eines Maßhaltigen, das auf dem Maßlosen beruht, und des Maßlosen, das des Maßhaltigen bedarf, um sich zu artikulieren.

Beginnen wir mit einem konkreten Beispiel: der Beobachtung eines Doppelsternsystems mit einem Röntgenteleskop. Hat ein Neutronenstern sich einen Roten Riesen – einen Stern, wie ihn unsere Sonne kurz vor ihrem Ende bilden wird – eingefangen, so kreist dieser nicht nur wie der Trabant Mond um die Erde oder wie der Planet Erde um die Sonne. Die gravitative Anziehungskraft des Neutronensterns ist so groß, dass ein kontinuierlicher Strom von Materie dem Roten Riesen entrissen wird und wie im Schlauch einer Windhose auf den Neutronenstern zustürzt. Das *akkretierende* Material sammelt sich in einer wild rotierenden Akkretionsscheibe, aus der die Materie schließlich mit dem Milliardenfachen der Erdbeschleunigung auf den Neutronenstern stürzt.

Wir begegnen hier zum ersten Mal einem Bild, nämlich in Gestalt einer Vorstellung. Neutronensterne und Schwarze Löcher, Supernova-Explosionen, Doppelsternsysteme, Galaxien und ihre Anhäufung in Clustern – solche Vorstellungen sind es, an deren kontinuierlicher Verfeinerung die Astrophysik arbeitet. Von dem feinen mathematischen Nervengewebe, das sie durchzieht, ist an dieser Stelle nichts zu bemerken. Sie sind maßlose Bilder, die sich in keiner mathematischen Formel wieder finden, obwohl sie Resultat mathematischer Vorstellungen und Berechnungen sind, eingebettet in ein mathematisches Gespinnst von Konsistenzen, ohne das sie sich als Bilder weder hätten entwickeln noch halten können.

Umwege

Wäre die stürzende Materie elektrisch neutral, würden wir von diesem Vorgang nichts zu sehen bekommen. Das Doppelsternsystem konstituiert sich allein als Resultat der gravitativen Anziehungskraft der beiden Doppelstern-Komponenten, und obwohl diese riesig ist, ist sie doch zu schwach, um auf der Erde registriert werden zu können. In der Kosmologie und der Astrophysik ist es diese gravitative Anziehung, die interessiert. Aber nur über einen Umweg ist es möglich, Auskunft über ihr Wirken zu bekommen: über die parallele Existenz der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Da die stürzende Materie glücklicherweise aus elektrisch geladenen Teilchen besteht, wird elektromagnetische Strahlung emittiert. Die entstandenen Photonen – aufgrund der Wucht des Prozesses, dem sie entstammen, mit einer Energie versehen, die in der Größenordnung des Röntgenbereichs oder darüber liegt – reisen Milliarden von Jahren durch den Weltraum, potenzielle Künder des Prozesses, dem sie entstammen. Trifft eines von ihnen auf den von einem Astrophysiker bereitgestellten Detektor, so wird dieses Photon kurzerhand vernichtet.

Sehen

Das könnte bereits das Ende der Geschichte sein, nach dem Motto: vernichtet ist vernichtet. Es ist der Raffinesse des Physikers zu verdanken, dass er seinen Detektor – nicht anders, als das menschliche Auge – so konstruiert hat, dass zwar das Photon, nicht aber seine Information vernichtet wird. Ist dieser Detektor ein CCD, so schlägt das auftreffende Photon, bevor es verschwindet, eine Kaskade von Elektronen aus dem Halbleiter, die in so genannten Potentialmulden aufgefangen werden. Diese regelmäßig wie ein Gitter in Reihen und Spalten über den Detektor verteilten Sammelstellen bilden ein Koordinatensystem, das es erlaubt, jeder durch ein Photon erzeugten Ladungswolke einen Platz auf dem Detektor zuzuweisen. Dieser erlaubt nun zu bezeichnen, in welchem *Pixel* das Photon auftraf – sofern man der Ladungswolke habhaft wird, das heißt: den Detektor *auslesen* kann. Die Kunst dieses Auslesens ist es, die den Experten ausmacht.

Wie der Fischer seine Netze einzieht, werden die Elektronenhäufchen – zeitlich im Gleichschritt getaktet – entlang einer Zeile durch die Reihe der Mulden geschleust und eins nach dem anderen am Rand entgegengenommen und notiert: die Anzahl seiner Elektronen, die als *Amplitude* ein kompliziertes Maß für die Energie des auslösenden Photons ist, sowie Reihe und Spalte des Potentialmulden-Pixels, in dem das Häufchen ursprünglich entstanden ist. Was einer naiven Anschauung als Bild erscheinen mochte, das sich durch den Weltraum in unsere Richtung bewegt und nur aufgefangen werden muss, verflüchtigt sich in ein Bild kleiner, sprudelnder Elektronenbäche, die in einer Art Entwässerungssystem aus den innersten Schichten des Detektors aufgesammelt werden.

Mathematische Kondensation

Egal, welche Bilder von Bildern wir benutzen wollen, sie alle kondensieren in eine Liste von Zahlen. Vier Zahlen, nämlich zwei Detektor-Ortskoordinaten, die Amplitude, aus der später auf die Energie des Photons zurückzuschließen ist, und der Zeitpunkt des Einschlags konstituieren je einen Eintrag auf dieser Liste. Diese Einträge werden vorerst gezielt als *event* und noch nicht als Photonen bezeichnet, da ihre Zuordnung zu Photonen erst noch bestimmt werden muss. Diese Liste enthält alle Information, die am Detektorausgang zur Verfügung steht und auf der jede spätere Verarbeitung basiert. Während noch die perlenden Elektronenbäche so maßlos wirkten, wie es das Dahinplätschern eines Bergbaches ist, liegen nun in der Liste nur noch Zahlen vor, der Gipfel alles Maßhaltigen. Im Maß der reinen Zahlenliste ist auch jedes offenbare geometrische Maß eines Ursprungsbildes wie verschwunden.

Den Sehvorgang eliminieren

Diese Zahlen repräsentieren in eng verzahnter Weise gleichermaßen das Objekt der Begierde – das Licht aussendende Doppelsternsystem –, aber auch den Detektor. Um die Vorgänge im Doppelsternsystem rekonstruieren zu können, muss der Einfluss des Detektors ausgeschaltet werden. Dies geschieht experimentell mittels aufwändiger, als Kalibration bezeichneter Verfahren, deren Resultat in Form mathematischer Matrizen unter anschaulichen Stichworten wie *charge transfer efficiency*, *detector response matrix*, *instrument map* bereitgestellt wird.

Die mathematischen und folglich mathematisch manipulierbaren Einträge der Liste erlauben es, mithilfe dieser Matrizen den Einfluss des Detektors zu eliminieren und gleichzeitig eine Zuordnung der *Ereignisse* zu *Photonen* zu treffen. Die Detektoren der Röntgenastronomie befinden sich auf Satelliten, die oberhalb der Atmosphäre um die Erde kreisen, weil die aus dem Universum kommende Röntgenstrahlung nicht in der Lage ist, die Atmosphäre zu durchdringen. Sie sind montiert im Brennpunkt von Teleskopen, die die Röntgenstrahlen zu einem Bild bündeln, ähnlich (und doch grundverschieden von) der Funktion einer Linse im Fotoapparat. ROSAT, dessen vorrangiges Ziel ein Survey des gesamten Himmels war, umkreiste die Erde einmal in 96 Minuten auf einer nahezu kreisförmigen Bahn in 580 km Höhe. Für die Röntgensatelliten XMM oder CHANDRA wurde eine stark exzentrische Bahn gewählt, die beispielsweise CHANDRA bis zu 114.000 km in den Weltraum treibt und Phasen langer, durch die Erde ungestörter Beobachtung einzelner Objekte erlaubt. Bei dieser *pointierten* Beobachtung, dem Normalfall astronomischer Beobachtungen, wird das Teleskop – trotz seiner rasenden Geschwindigkeit – punktgenau auf sein Zielobjekt ausgerichtet.

Um Rückschlüsse auf ihren Ursprung ziehen zu können, müssen die rekonstruierten Photonen an den Himmel zurück projiziert werden. Komplizierte Vermessungen der mehrfach ineinander geschachtelten Teleskopwände noch am Boden ermöglichen es, den Strahlenverlauf einzelner Photonen und ihrer Reflexionen an

den mehrfach ineinander geschachtelten Teleskopwänden zu rekonstruieren. Sie bestimmen das Abbildungsverhalten des Teleskops auf den Detektor und liefern Hilfsdatensätze, die später unter Stichworten wie *Vignetting* und *Pointspread function* in die Berechnungen eingehen. Mithilfe eines so genannten *Boresighting* wird die Abweichung des Detektormittelpunkts von seiner idealen Lage auf der zentralen Achse des Teleskops bestimmt sowie mögliche, durch die Vibrationen beim Raketenstart verursachte Verdrehungen seiner Lage.

Bilder und Zeitlichkeit

Dreh- und Angelpunkt aber einer Rekonstruktion der Emissionsorte der Photonen am Himmel ist die Zeit. Jedes Bild konserviert Zeitlichkeit, in je eigener Art. Sei es das Landschaftsbild, das das Licht des Abendhimmels konserviert, sei es das abstrakte Bild, das zwar enthält, aber nicht mehr erschließen lässt, dass doch sein Maler, als er tags darauf das Bild fortsetzte, ein Anderer war, als der er tags zuvor das Bild begann. In der Erstellung einer Photographie wird diese Zeitlichkeit technisch explizit: Das Bild ist seiner Natur nach die Summation zeitlich indexierter Einzeldrucke. Ist die Belichtungszeit zu groß, verschwimmt das Bild des Originals zu Überlagerungen, die eine – womöglich beabsichtigte – Unschärfe bewirken. ROSAT während der Phase des Surveys glich einem Photoapparat, der mit stets offener Blende in rasender Fahrt über sein rundum ausgedehntes Objekt fährt.

In der Astronomie ist Zeitlichkeit der Schlüssel, um aus dem unscharfen Chaos der Eindrücke *Bilder* des Himmels rekonstruieren zu können. Eine von der Bodenstation gelieferte, *Attitude* genannte zeitliche Auflistung der Stellen am Himmel, auf die das Teleskop von Sekunde zu Sekunde orientiert war, ermöglicht es, für jedes Photon aus dem Zeitpunkt seines Auftreffens den Punkt am Himmel zu rekonstruieren, auf den das Teleskop in diesem Moment gerichtet war. Mithilfe der Abbildungsfunktion des Teleskops lässt sich daraus der Ursprungsort des Photons errechnen. Resultat all dieser Anstrengungen ist eine Liste aller registrierten Photonen, die neben ihrem rekonstruierten Eintreffort auf dem Detektor, ihrer Amplitude und ihrem Zeitpunkt die rekonstruierten sphärischen Himmelskoordinaten ihres Ursprungsortes aufweist. Diese *Master-Liste* birgt das Bild der Himmelskugel im Röntgenlicht. Sie ist die Basis aller weiteren Untersuchungen.

Das Verschwinden der Zeitlichkeit in der Projektion

Bilder, wie sie im Weiteren erzeugt werden, sind ebene Flächen. Der Himmel jedoch, wie wir ihn sehen, ist eine Kugeloberfläche. Bekanntlich ist es nicht möglich, die Oberfläche eines Luftballons auf einer ebenen Fläche auszubreiten, ohne gewaltsame Verzerrungen, Risse und Überdeckungen in Kauf zu nehmen. Für die Projektion des Himmels auf ein ebenes Bild stehen zahlreiche Projektionsarten zur Verfügung, deren Wahl dadurch bedingt wird, auf welche Treue (Winkeltreue,

Flächentreue etc.) Wert gelegt wird und welche Art Verzerrung in Kauf genommen wird. Alles zusammen treu zu erhalten ist grundsätzlich nicht möglich. Jedes derartige Bild ist notwendig ein Zerrbild.

Für die Bilder, die dem relativ kleinen Gesichtsfeld eines Röntgenteleskops entsprechen, ist es üblich, die *senkrechte Projektion* auf die Tangentialebene im Feldmittelpunkt zu wählen. Beachtenswerte Verzerrungen treten so erst am Bildrand auf. Bei zusammengesetzten Bildern des gesamten Himmels ist es üblich, die flächentreue *Hammer-Aitoff-Projektion* zu benutzen. Im Computer setzen sich die Bilder aus (in der Regel) quadratischen Pixeln zusammen, die jeweils eine bestimmte Fläche des Himmels repräsentieren. Zur Erstellung des Bildes werden alle Photonen in demjenigen Pixel aufsummiert, deren Entstehungsort in der von diesem Pixel repräsentierten Fläche liegt. Wahlweise werden alle Photonen aufsummiert oder nur die Photonen eines bestimmten Energiebereichs – nur *weiche* oder nur *harte* Photonen.

Obwohl für die Konstruktion all dieser Bilder die Zeitlichkeit eine entscheidende Voraussetzung war, konstituieren sich diese Bilder über das Eliminieren von Zeitlichkeit. Jeder Hinweis auf die zeitliche, aber auch auf die spektrale Codierung der Photonen, die entscheidend sind für die Bestimmung der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse, verschwindet in der Summation. Lediglich ein am Namen des Bildes angebrachter Index hält gegebenenfalls fest, ob das Bild *alle* oder nur die *weichen* oder nur die *harten* Photonen enthält.

Erwartungen: Distanz und Auflösung

Spätestens an dieser Stelle muss von Erwartungen gesprochen werden. Von den Objekten der Sehnsucht, die das Herz des Astrophysikers höher schlagen lassen: den Neutronensternen, Schwarzen Löchern, Doppelsternsystemen, Supernova-Überresten, Galaxien und Galaxienhaufen – kurz: den bekannten und unbekanntesten Objekten, die als Quellen der beobachteten Photonen in Frage kommen. Was davon wird in den Bildern zu sehen sein?

Die Antwort hängt einerseits vom Auflösungsvermögen von Teleskop und Detektor ab, andererseits von der Distanz und der Größe der Objekte. Praktisches Maß für das Auflösungsvermögen ist der Winkel, innerhalb dessen eine Struktur noch erkennbar wird. CHANDRA, das von der NASA betriebene Röntgenteleskop, auf dessen Bilder wir uns im Folgenden stützen werden, ermöglicht eine Auflösung von einer halben *Bogensekunde*, das ist der 7.200te Teil eines Grades. Neuentwicklungen im Röntgenbereich schaffen Millibogensekunden, die Radioastronomen sogar Mikrobogensekunden. Maßgeblich für die tatsächliche Auflösung ist infolgedessen das Verhältnis der Größe eines Objektes zu seiner Distanz. Astronomische Distanzen werden zweckmäßigerweise in Lichtjahren gemessen, jener unvorstellbar großen Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt.

Die gut beobachtbaren *Supernovae* stammen aus unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße. Die unter einem Winkel von 5 Bogenminuten erscheinende, schon

von Kepler beobachtete Supernova liegt in einer Entfernung von 13.000 Lichtjahren. Die 1987 in unserer nachbarlichen Zwerggalaxie, der Grossen Magellanschen Wolke (LMC), erschienene Supernova SN1987A erreicht mit einem Abstand von 160.000 Lichtjahren einen Durchmesser von 12 Bogenminuten. Die uns nächstgelegene Galaxie, Andromeda, beginnt erst in einer Entfernung von 2.5 Millionen Lichtjahren. Die 2007 und 2008 beobachteten Supernovae SN 2007on und SN 2008D in einer Entfernung von 65 und 90 Millionen Lichtjahren erscheinen nurmehr punktförmig. Auch wenn wir zu den nächstgrößeren Objekten, den *Galaxien*, übergehen, schaffen wir es lediglich, uns im allernächsten Küstenbereich umzusehen. Centaurus A, die uns nächst gelegene Galaxie mit einem aktiven Zentrum – eine Monstergalaxie, die ein Schwarzes Loch von wahrscheinlich 70 Millionen Sonnenmassen beherbergt –, erscheint aus einer Entfernung von 11 Millionen Lichtjahren unter einem Winkel von 26 Bogenminuten. 11 Millionen Lichtjahre, das ist nicht einmal ein Tausendstel des Maßstabs von 13 Milliarden Lichtjahren, den das Universum vorgibt.

Wenn wir darauf bestehen, in die kosmischen Weiten von Milliarden Lichtjahren vorzudringen, so sind mit der heutigen Generation von Teleskopen lediglich riesige *Galaxienhaufen* in der Lage, dem Auge ein Bild im Bild anzubieten. Die überwältigende Mehrheit der in den Bildern sichtbaren Quellen dagegen wird uns *punktförmig* erscheinen. Die *Doppelsternsysteme*, die von Neutronensternen oder Schwarzen Löchern gebildet werden – selbst die uns nächsten, wie Cygnus X-1 in einer Entfernung von 8.000 Lichtjahren –, gehören allemal zu den *punktförmig* erscheinenden Quellen. Bevor wir uns der Frage zuwenden, wie denn nun diese punktförmigen Quellen entziffert werden können, insbesondere die räumliche Struktur eines Doppelsternsystems erkannt werden kann, wollen wir an einigen Beispielen sehen, wie die *anschaulichen* Bilder im Bild dazu gebracht werden, ihren Nutzen zu entfalten.

Das Bild im Bild

Im Hinblick auf die Erschließung des physikalisch-dynamischen Gehalts anschaulicher Bilder gehört die Ausdehnung der Messmethoden vom sichtbaren auf *alle* Wellenlängenbereiche des Lichts – von denen das Sichtbare nur einen winzigen Ausschnitt darstellt (Abb. 1) – zu den wichtigsten Entwicklungen der Astrophysik. Diese hat sich in eine Vielzahl von Disziplinen aufgespalten – die Gruppe der

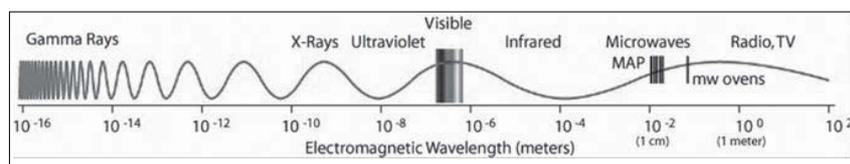


Abb. 1: Das Spektrum der elektromagnetischen Wellenlängen.



Abb. 2: Derselbe Bildausschnitt im optischen und im Röntgenlicht (rechts).

Gamma-, Röntgen-, UV-, Optischen, Infrarot-, Mikrowellen- und Radiowellenastronomen –, die mit jeweils fundamental anderen Meßmethoden operieren. Da die verschiedenen Wellenlängen verschiedenen Energien entsprechen, beobachten die Teleskope sehr verschiedene physikalische Prozesse, auch wenn sie dasselbe Objekt beobachten. Die Fruchtbarkeit dieser Aufspaltung offenbart ihren ganzen Reiz, wenn durch Vergleich der Aufnahmen verschiedener Wellenlänge sich unvermittelt ein anschauliches Bild der zugrunde liegenden Dynamik erschließen lässt. Das ist in etwa so, wie wenn die Photographie eines Menschen im sichtbaren Licht ergänzt wird durch ein Röntgenbild, eine Kernspintomographie und ein Ultraschallbild. Jede werdende Mutter weiß Letzteres zu nutzen, um sich über die Fortschritte ihres Fetus zu unterrichten.

Abbildung 2 zeigt links ein optisches Bild des Galaxienhaufens 3C438, das wie ein normales Bild des Sternenhimmels aussieht. Das Bild rechts zeigt denselben Bildausschnitt, offenbart jedoch im Röntgenlicht, dass der Galaxienhaufen aus einer riesigen Kugel von Gas besteht, in der bis zu Tausend Galaxien *schwimmen*. Die Temperatur des Gases von bis zu 100 Millionen Grad ermöglicht seine Sichtbarkeit im Röntgen-, nicht aber im optischen Licht – so, wie auch unser Skelett nur im Röntgenlicht sichtbar wird. Eine ungefähr 2 Millionen Lichtjahre ausgedehnte Struktur im heißen Gas gibt den Hinweis, dass es sich bei diesem Gebilde in etwa 4.8 Milliarden Lichtjahren Entfernung um das Resultat eines der energiereichsten Ereignisse im lokalen Universum handeln muss. Als plausibles Szenario gilt der Zusammenprall zweier sehr massereicher Galaxienhaufen, die schließlich miteinander verschmolzen.

In Abbildung 3 zeigt die eingefügte Radiobeobachtung, dass im innersten Kern der zentralen Galaxie zwei Jets existieren, stark fokussierte Strahlen äußerst energiereicher Teilchen, wie sie von Schwarzen Löchern im Kern von aktiven Galaxien



Abb. 3: Die Radiobeobachtung zeigt, dass im Kern des Galaxienhaufens zwei Jets hochenergetischer Teilchen ausgestoßen werden.

ausgestoßen werden. Ein großer Fortschritt in der anschaulichen Wahrnehmbarkeit physikalischer Prozesse wurde durch das direkte Überlagern der Bilder aus verschiedenen Wellenlängenbereichen erzielt. Voraussetzung ist, dass die einzelnen Bilder in der Überlagerung noch erkennbar sind. Das wird erreicht, indem die Bilder mit den Farben des sichtbaren Spektrums verschieden eingefärbt werden. In dieser Verwendung werden die Farben des sichtbaren Spektrums als *Falschfarben* bezeichnet. Sie dienen als dem menschlichen Auge angemessene Marker und haben nichts mit dem physikalischen Spektrum zu tun, das untersucht wird.¹ Abb. 4 zeigt den Galaxienhaufen 1E 0657-56, dem der Name *Bullet-Cluster* gegeben wurde, weil er aus der Kollision zweier Galaxienhaufen entstanden ist, deren einer den anderen auf dem Bild von links nach rechts wie ein Geschoss durchpflügt. Unterlegt ist ein optisches Bild aus Daten des Magellan und des Hubble Space Telescope, das die einzelnen, nur noch mehr oder weniger punktförmig erschei-

¹ Der Vorteil einer solchen Einfärbung lässt sich hier, wo die Bilder nur in Grautönen vorliegen, leider nur ex negativo erschließen: aus der Schwerfälligkeit der nachfolgenden Beschreibung, der die Farben nicht zur Verfügung stehen. Hier ist das Vorstellungsvermögen des geeigneten Lesers gefordert.



Abb. 4: Die Kollision zweier Galaxienhaufen lässt die Existenz von dunkler Materie evident werden.

nenden Galaxien in Weiß und Orange zeigt. Der Bildausschnitt umfasst $7.5' \times 5.4'$. Die Großräumigkeit des Zusammenpralls der Riesencuster ermöglicht die bildliche Darstellung, obwohl das Gebilde 3.4 Milliarden Lichtjahre von den Detektoren entfernt ist.

Das farbige Bild, zusammengesetzt aus drei verschiedenen Beobachtungen, liefert spektakuläre Nachweise für die Existenz von *dunkler* Materie, einer bisher nicht entschlüsselten Materieform, die sich elektromagnetisch nicht äußert. Es zeigt (im Original in Pink) das von CHANDRA entdeckte heiße Gas der beiden Cluster: der rechte als projektilartiges Dreieck erkennbar, der linke spiegelbildlich dazu, aber nach oben und unten ausgedehnter und weniger klar konturiert. Beide repräsentieren normale, so genannte *baryonische* Materie. Jeweils rechts und links davon – im Originalbild blau markiert und hier nur als heller Halo erkennbar – befinden sich die Gebiete größter Massenkonzentration, wie sie aus Gravitationslinsen-Effekten berechnet wurden. Demnach erscheint die Gesamtmaterie jeden Clusters räumlich getrennt von seiner *normalen* Materie, die sich im heißen Gas manifestiert. Dieses Bild, das aus einer engen Verflechtung von Beobachtungen und ihrer theoretischen Veranschaulichung entstanden ist, liefert anschauliche Evidenz dafür, dass der größte Teil der Materie dieser beiden Cluster aus *dunkler* Materie besteht. Da die *normale* Materie beim Durchdringen des Clusters einer stärkeren Reibung unterliegt als die *dunkle* Materie, bleibt sie im Zusammenprall hinter dieser zurück. Beide treten im Bild auseinander.

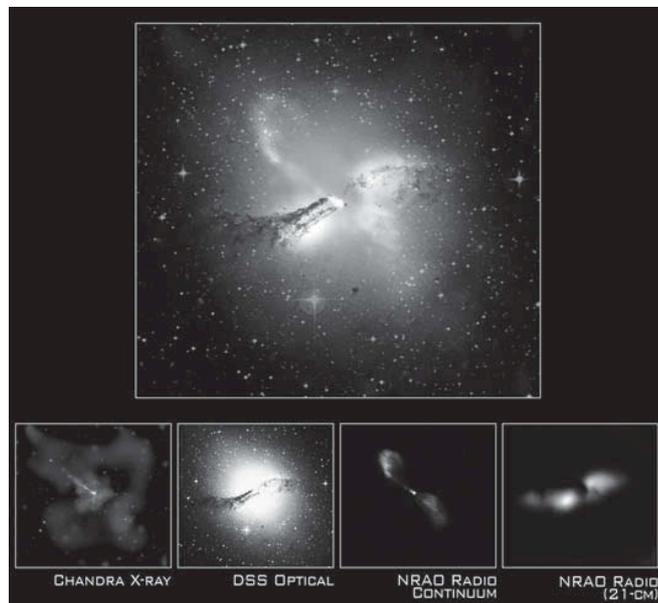


Abb. 5: Die Riesengalaxie Centaurus-A im Röntgen-, im optischen und im Radiolicht. Siehe auch Farbtafel XII.

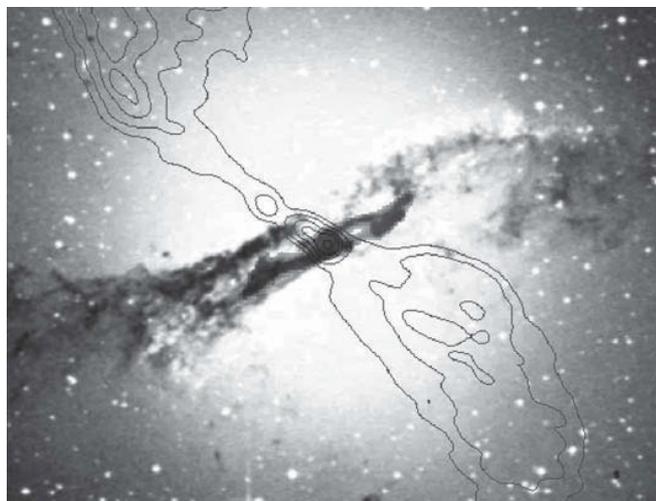


Abb. 6: Das Infrarot-Licht enthüllt die Existenz einer versprengten Galaxie nahe dem Zentrum von Centaurus-A (innerster dunkler Bereich). Die Radiodaten sind als Höhenlinien eingeflochten.

Im Bild von Centaurus-A (Abb. 5), der uns am nächsten gelegenen Galaxie mit einem aktiven Kern, sind drei Beobachtungen – farblich unterschieden nach Röntgenlicht (blau), Radiolicht (pink und grün) und optischem Licht (orange und gelb) (siehe untere Leiste) – überlagert. Wo die Röntgenastronomen Strukturen sehen, die sich um einen gewaltigen Jet gruppieren, der 30.000 Lichtjahre in das Universum ausgreift (unten links), sehen die Radioastronomen gewaltige Ausfaltungen von Magnetfeldern (unten, 3. Bild von links), in denen energiereiche Teilchen nahe Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Und während die Optischen Astronomen durch einen dicken Staubring vom Innern der Energieschleuder abgeschirmt sind (unten, 2. Bild von links), sehen die Infrarot-Astronomen im Kern der Riesengalaxie eine zweite, kleinere Galaxie (Abb. 6 innerster dunkler Bereich), die mit der großen Galaxie kollidierte. Sie ist vermutlich die Ursache der riesigen, für die meisten Wellenlängenbereiche nahezu undurchdringlichen Staubwolken (mit denen sie in dieser Graudarstellung nahezu verschmilzt). In letzterem Bild sind die optischen Daten überlagert und die Radiodaten als Höhenlinien eingeflochten.

Soweit zu den evidenten Bildern von astrophysikalischen Objekten. Obwohl der Abbildcharakter dieser Bilder sehr ausgeprägt erscheint, bleibt zu warnen: Wie für Bilder der Kernspintomographie ist auch für die Interpretation astrophysikalischer Bilder großes technisches Know-how erforderlich.

Punktförmige Quellen: Inbegriff des Maßlosen

Die große Mehrzahl der astrophysikalischen Objekte stellt sich uns jedoch punktförmig dar. Die Dimension einer Fläche ist in Quadratcentimetern angebbar, die Dimension einer Strecke in Zentimetern; ein Punkt dagegen hat die Dimension Null: Punkte sind maßlos. Dementsprechend stellen sich uns alle punktförmigen Quellen – darunter fallen alle Doppelsternsysteme – als *maßlos* dar. Komplizierte Verfahren ermöglichen, die Photonen dieser Punktquellen zu extrahieren. Zwei Probleme sind dabei zu lösen: Zum einen bewirkt die technische Unschärfe des Teleskops, dass die ihrem Wesen nach punktförmigen Quellen im Bild als ausgehnter Fleck erscheinen. Da Größe und Gestalt des Flecks durch die *Point Spread Function* des Teleskops bestimmt werden, kann und muss dieser Effekt durch Kalibrierung eliminiert werden, bevor die Eigenschaften der Quelle bestimmt werden können.

Zum anderen sind die Photonen der *Quellen*, an denen die Astrophysiker so interessiert sind, mit den Photonen des *Hintergrunds*, der nicht weiter aufgelöst werden kann, wild durcheinander gewürfelt. Die Bestimmung des Hintergrunds ist bei Punktquellen tatsächlich der wichtigste und einzige Anlass für die Erstellung von Bildern. Bei der Untersuchung der Punktquellen selbst spielen die Bilder keine Rolle. Dementsprechend enthalten astrophysikalische Bilder nur das Nötigste, um die pure Existenz einer Quelle bestimmen und ihre Scheidung vom

Hintergrund bewerkstelligen zu können: nämlich die *Anzahl* der in einem Pixel detektierten Photonen, nicht aber ihre Eigenschaften. Computeralgorithmen suchen in diesen, durch Anzahlen bestimmten Bildern nach *wahrscheinlichen* Orten für *Quellen*. Diese heben sich durch ein Mehr an Photonen vom *Hintergrund* ab. Eine Vielzahl von Listen möglicher Quellorte wird so erstellt. Damit ist die Rolle des Bildes für die analytische Untersuchung der Quellen beendet. Die weitere Bearbeitung läuft nur noch und ausschließlich über diese Listen, die Orte für *mögliche* Quellen angeben sowie die originalen Photonenlisten.

Ob eine Quelle letztlich als Punktquelle akzeptiert wird oder nicht, welche ihre korrekte Position ist und welche der Photonen dieser Quelle zuzurechnen sind, entscheiden schließlich statistische Verfahren der Informationstheorie, die sich alleine auf die *Photonenlisten* selbst stützen. Die durch zahlreiche Tests belegte und entwickelte Trennschärfe dieser mathematischen Verfahren – der *Maximum Likelihood* Methode oder der Methode der *Maximalen Entropie* – ist enorm. So kommt es, dass die mathematische Methode allein entscheidet, ob eine Quelle vorliegt oder nicht. Das menschliche Auge ist angesichts der mathematisch-statistisch erreichbaren Signifikanz hoffnungslos überfordert. Lediglich in morphologischen Sonderfällen wird das menschliche Auge hinzugezogen. Auf diese Weise wird für jede Quelle ihr genauer Ort bestimmt und eine Liste der ihr zugeordneten einzelnen Photonen erstellt. Diese *Liste* ist die einzige Quelle der Information, die über ein punktförmiges astrophysikalisches Objekt im Röntgenbereich vorliegt. Das Doppelsternsystem, durch die Entfernung zum maßlosen Punkt geschrumpft und im Bild zum Fleck geweitet, befindet sich nunmehr als abstrakte Vorstellung in dieser Liste herausdestillierter Photonen.

Spektren: der Umweg über die andere Dimension

Wie also kommt das *räumliche* Bild eines Doppelsternsystems zustande, das doch für uns räumlich nicht auflösbar ist? Der Schlüssel liegt in der Existenz der Spektrallinien. Nicht nur ermöglichen diese, Informationen über die atomare Zusammensetzung der beteiligten Objekte zu erhalten. Der Vergleich der gemessenen Lage des für ein Atom charakteristischen Musters von Spektrallinien mit der Lage des Musters, falls das Atom in Ruhe ist, erlaubt mithilfe des *Doppler-Effekts*, Aufschluss über die relative Geschwindigkeit des emittierenden Atoms zu gewinnen. Es ist die *zeitliche* Variation der Spektrallinien, die die räumliche Rekonstruktion von Gebilden wie Doppelsternsystemen erlaubt. Die Spektrallinien eines um einen Zentralkörper rotierenden leuchtenden Objekts werden, sobald es sich vom Beobachter wegbewegt, zu größeren Wellenlängen verschoben und entsprechend zu kleineren Wellenlängen, wenn es wieder auf ihn zukommt. Dieses periodische Oszillieren der Spektrallinien einer Punktquelle erlaubt es, auf ein rotierendes Objekt zu schließen und Informationen über seine Bahnperiode und Bahngeschwindigkeit zu bekommen. Im Falle von Doppelsternsystemen lassen sich daraus mithilfe der Keplerschen Gesetze Rückschlüsse auf die Bahnparameter ziehen.

Der Umweg über die elektromagnetischen Phänomene ist also nicht nur ein notwendiges Übel aufgrund der Nichtmessbarkeit der gravitativen Phänomene, sondern liefert gratis die räumlichen Informationen und Parameter der gravitativ bestimmten Objekte.

Ein feines Netz von Schlussfolgerungen physikalischer Natur erlaubt darüber hinaus, charakteristische Merkmale solcher Doppelsternsysteme auszuloten. Stürzt beispielsweise die Materie auf einen *Neutronenstern*, so wird es einen Aufprall auf der Oberfläche geben, der energetisch sichtbar wird. Für ein *Schwarzes Loch*, das keine feste Oberfläche besitzt, fehlt dieses Signum. Der Unterschied ist allerdings nur bemerkbar, wenn vergleichsweise wenig Materie angesaugt wird, da er sonst hoffnungslos von der Leuchtkraft der stürzenden Materie überstrahlt wird. Rotiert die Materie der Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch genügend hoher Masse, so zeigen die Spektrallinien etwa vorhandener Eisenatome eine für die Allgemeine Relativitätstheorie charakteristische *Profilverbreiterung*, deren Form Rückschlüsse auf den von dieser Theorie vorhergesagten niederstmöglichen Orbit zulässt. Das Schwarze Loch, das seinen Namen daher hat, dass es sich uns über keine elektromagnetische Strahlung zu erkennen gibt, wird also kenntlich aus dem Verhalten seiner Umgebung.

Das räumliche Bild eines Doppelsternsystems, das sich aus diesen Schlussfolgerungen ergibt, ist in allererster Linie ein theoretisch konzipiertes Modell. Und das gilt sehr allgemein: Ob es das Verhalten der Elektronen im CCD betrifft, das Reflexionsverhalten von Photonen an Metalloberflächen im Teleskop, die Projektionsgesetze sphärischer Geometrien oder den weiten Weg der Photonen durch ein Universum, dessen Raum- und Zeitverhalten nach den Gesetzen der Allgemeinen Relativitätstheorie modelliert wird: alles Bildliche in der Astronomie beruht auf einem Geflecht theoretisch-experimenteller Zusammenhänge. Da Visualisierung ein wichtiges Hilfsmittel der menschlichen Denkkapazität ist, kommt es, dass Bilder dieser Doppelsternsysteme als schematische Skizzen und – zunehmend bei PR-Aktionen im Internet – *as seen by an artist* auftauchen. Die zugrunde liegenden Spektraldaten sind weit weniger spektakulär.

Vom Erscheinen und Verschwinden des Maßlosen

Tatsächlich durchdringen sich auf subtile Weise die *maßhaltigen* Aspekte der Bilder – wie sie sich nicht nur in ihrer äußeren Pixelgeometrie und geometrischen Abgegrenztheit zeigen, sondern auch in ihrem innersten, mathematisch bestimmten Netzwerk von Maßrelationen, die wie ein Nervengeflecht das Bild durchziehen – mit ihren *maßlosen* Aspekten: zuallererst dem Bezug auf ein vorgestelltes Objekt, dem weder durch Nähe noch durch die Ferne der Instrumente anders näher zu kommen ist als durch selbstreferenzielle Konsistenzschleifen.

Wir messen manchen *Jets*, die aus dem Kern aktiver Galaxien hervorbrechen, Ausdehnungen von bis zu 100 Millionen Lichtjahren zu. Ein Lichtjahr sind 9.5 Billionen Kilometer. Der Jet besitzt also in Kilometern gerechnet eine Ausdeh-

nung von einer Eins mit 21 Nullen. Nichts in unserer Vorstellung ist dieser Zahl angemessen. Sie erscheint und ist dieser Vorstellung maßlos groß. Unser Geist und dieser Strahl, so tragen wir diesem Umstand in unserer Rede Rechnung, verlieren sich in einer *unermesslichen* Weite. Aber so, wie mit dem Begriff *unermesslich* die Eingliederung des Unermesslichen in unsere Vorstellung schon längst stattgefunden hat, so erlaubt der Maßstab des Lichtjahres den Vergleich mit seinesgleichen. Wofür das Licht 100 Millionen Jahre braucht, um es zu durchheilen, ist klein verglichen mit der Distanz von 13 Milliarden Lichtjahren, die uns vom Beginn des Universums trennt.

Auch ein *Neutronenstern*, obwohl doch sein Durchmesser mit zwischen 10 und 20 Kilometern relativ genau bestimmt werden kann, ist eine Form der makroskopischen Materie, die sich der Anschauung entzieht. Unser Sehen beruht auf der Anwesenheit von Atomen und Molekülen, deren Elektronenhülle erlaubt, mit Licht in Wechselwirkung zu treten. Neutronensterne, deren äußerste Schicht der Theorie nach die reinen Kerne von Eisenatomen sind, erlauben keine derartige Wechselwirkung. Sie zeigen keine Kontur. Mehr noch: Sehen setzt einen bis zu einem gewissen Grad stabilen Standpunkt voraus, während jeder Beobachter, der sich in die Nähe eines Neutronensterns begäbe, in Folge der Wucht der Anziehungskraft augenblicklich das Bewusstsein verlöre.

Mit den Bildern deuten wir auf das Maßlose, als ob es im Maß des Bildes einzufangen sei. Das Bild deutet und lässt das Maßlose verschwinden, so wie ein Beschreiben in Termini des Maßhaltigen das Maßlose verschwinden lässt. Es ist die Dialektik des maßlos *neu* erscheinenden Objekts, das im Nu das Maß seiner selbst und zur Grundlage neuer Klassifizierung wird. Die astrophysikalischen Bilder, insoweit sie Faszination ausüben, aktivieren immer das seinerseits bildhafte Vorwissen des Beobachters um ihre Objekte: die Galaxien, die Neutronensterne, die Sternentstehungsgebiete, die Supernovae und tief im Innern, den Blicken unsichtbar, die Verkörperung des Maßlosen, die Schwarzen Löcher. Schwarze Löcher, die als maßloser Abgrund erscheinen, in dem Materie in eine umkehrlose, im Endlichen angesiedelte Unendlichkeit stürzt, in der Raum zu Zeit und Zeit zu Raum geworden ist und die doch gleichzeitig reinster mathematischer Ausdruck unserer metrischen Auffassung von Raum und Zeit sind, des Inbegriffs maßhaltiger Betrachtung. Schwarze Löcher repräsentieren das Unangemessene als Inbegriff des Angemessenen. Es ist diese Dialektik, die ihre Faszination ausmacht. Sie und nicht die Kitschfarbigkeit eines immer mehr in die Notwendigkeit der Public Relations getriebenen Wissenschaftsbetriebs verleiht den astronomischen Bildern ihre Attraktion.

Das Verschwinden der Rekonstruktion

Wir haben von Erwartungen geredet. Vielleicht verlangt kein anderes Bild so sehr, den Blick vom Bild weg auf den Autor und seine Methode zu richten, als das astrophysikalische, das doch gerade vom Autor zu abstrahieren sucht. Fragen wir uns

also: Was unterscheidet den Astrophysiker vom Maler, spezieller: dem klassischen Landschafts- oder Porträtmaler. Beide sind so verschieden nicht. Nicht nur erzeugen beide Bilder, für beide existiert auch ein Jenseits des Dargestellten. Aber: Sie schauen in entgegengesetzte Richtung.

Für den Naturwissenschaftler gilt: Wenn die Welt so wäre, wie sie erscheint, gäbe es keine Naturwissenschaft. Raum und Zeit sind Maße, die über eine Welt gespannt werden, die maßlos ist. Nur noch in den Ritzen der Maßverhältnisse blickt uns das Maßlose an. Die astrophysikalischen Bilder sind so gesehen die maßhaltige Art, sich der maßlosen Welt zu nähern. Diese maßlose Welt, die sich dem Menschen entzieht, ist dem Denken in der Figur des Eigentlichen präsent. Alle Naturwissenschaft will sich einem – nie einholbaren – Eigentlichen nähern.

Andererseits aber ist die maßlose Welt dem Körper präsent, in all seinen haptischen, sinnlichen und motorischen Bezügen. In dieser anderen, der Körperwelt, ist der Mensch sich selber Maßstab. In diesem Bereich operiert der *klassische* Maler. Für beide, den Astrophysiker wie den klassischen Maler, ist das Licht der Überbringer des Bildes. Aber der Physiker interessiert sich für das *emittierte* Licht. Es verspricht ihm Aufschluss über die Materie am Ort seiner Entstehung. Den Maler hingegen interessiert das *reflektierte* Licht, das von einem Gesicht, von Körpern und ihren Kleidungen oder von einer Landschaft zurückgeworfen wird.

Ihn interessiert nicht der Prozess der Destruktion, der fast alle Anteile des weißen Lichtes auslöscht – ihn interessiert das, was übrig bleibt: das Rot der Weste. Der Unterschied zwischen einem Feuer und seinem Widerschein auf Gesichtern ist ihm nur insofern wichtig, als das Feuer dem beleuchteten Gesicht eine andere Stimmung verleiht als die Tagesbeleuchtung oder die untergehende Sonne. Der Maler baut hierbei auf ein dem Sehen vorgängiges Bewusstsein, das mental mit Feuer oder Abendsonne andere Eindrücke verbindet als mit dem Tageslicht. Für den Physiker ist es verbindlich, diese auf den Beobachter verweisenden Umstände möglichst zu eliminieren. Der klassische Maler hingegen zielt darauf ab, lebensweltliche mentale Bezüge des menschlichen Beobachters zu aktivieren, die außerhalb des Bildobjekts angesiedelt sind. Insofern ist auch dem klassischen Maler die Darstellung eines Eigentlichen inhärent.

Dem Maler ist die Netzhaut, was dem Physiker die Detektoroberfläche. Vermutlich gibt es kein konstruierteres Bild als dasjenige, das sich hinter der Netzhaut in unserem Gehirn befindet, wenn wir ein Bild ansehen – von den kompliziert zurechtgebogenen Distanzverhältnissen über die physiologisch bestimmten Farbzusammensetzungen bis hin zu den mentalen Erregungen, die vielleicht den Hauptpunkt bei der Betrachtung eines Bildes ausmachen. In dieser Kompliziertheit der Konstruktion übertrifft es das rekonstruierte Bild der Astrophysiker. Im Resultat jedoch erscheint bei beiden diese Konstruiertheit nahezu verschwunden, so dass Vorstellungen einer naiven Abbildtheorie greifen können. Die Gründe hierfür könnten verschiedener nicht sein.

Während das astrophysikalische Bild für den naiven Beobachter – vielleicht aus Unkenntnis – als reines Postulat seiner Abbildlichkeit daherkommt (die empörte Aufdeckung der Falschfarben spricht Bände), gründet sich das Ver-

schwinden der Konstruiertheit in der Landschaftsmalerei darauf, dass der Mensch sich selber Maßstab ist. Die Bildverarbeitung im Gehirn sowohl des klassischen Malers als auch des Betrachters seiner Bilder funktioniert auf dieselbe Weise. Das ist der Grund, weshalb sie nicht in Erscheinung tritt. Der Blick wird vielmehr in der Materialität des Bildes, der Auswahl der Leinwand, der Wahl der Pigmente und der Pinseltechnik aufgefangen – ein Aspekt, der den astrophysikalischen Bildern essentiell fehlt. Diesen Aspekt haben die Künstler der Moderne betont, die das geheime Einverständnis der Bildverständigung aufkündigten. Obwohl man also sagen kann, dass beiden, dem klassischen Maler und dem Astrophysiker, eine eigentümliche Suche nach dem Eigentlichen zu eigen ist, so ist doch bei diesem das Eigentliche im Lebensweltlichen angesiedelt, während es bei jenem außerhalb der Lebenswelt liegt. Die Grenzen dessen jedoch, was der Lebenswelt als zugehörig begriffen wird, sind Gegenstand stetiger Verschiebung in einem maßlosen Eingemeindungsprozess.

Landgewinnung

Dem Menschen erscheint maßlos, was keine lebensweltliche Fundierung hat. Alles, was sich dem menschlichen Körper und seiner Sinnlichkeit entzieht, ist dieser Lebenswelt und ihren in praktisch-gesellschaftlichem Vollzug entwickelten Vorstellungen maßlos. Es ist nun aber gerade die auf dem Maßvollen, dem Gemessenen beruhende Methode, die den vom europäisch-rationalen Denken geprägten Menschen weit jenseits seiner Lebenswelt in abstrakte Regionen führt, deren Benennung als *objektiv* ihm einprägt, dass seine Lebenswelt eine Erweiterung besitzt, die Gültigkeit beansprucht. Abstrakte Denkformen, die zu Modellen und Bildern gerinnen, bekommen eine Gültigkeit zugeschrieben, die auf Realitätsbezug, Erklärungskraft, Vorhersagekraft und auf dem Anspruch innerer Konsistenz beruht. Die Methode des konsistenten Realitätsbezugs, die sich über die quantitativen Messmethoden stets weiterpflanzt, schafft neue Realität, die jenseits der durch die Sinne vermittelten Lebenswelt liegt: In der Astrophysik ist es die Realität der Supernovae, der Galaxien, der Schwarzen Löcher. Über die astronomischen Bilder gewinnen sie Eingang in die Lebenswelt.

Alle Skepsis gegenüber diesen astrophysikalischen Modellen, wie sie durch die Enttäuschung über den Disney-Charakter der Falschfarben hindurchschimmert, beruht selbst auf einem Trugschluss. Sie antizipiert ein Eigentliches. Ein Eigentliches aber existiert in unserer Lebenswelt so wenig wie im Universum. Im einen wie im anderen Fall existieren nur verkettete Bilder als Vorstellungen, die nur im Grad der Gewöhnung unterschieden sein mögen. Die hinter unserer Netzhaut einsetzende Verarbeitungsfähigkeit des Gehirns hat einen Abstraktionsgrad, der jeden Bildeindruck zu einem hochkomplexen Geflecht ineinander greifender Operationen macht, das in nichts dem mathematischen Geflecht nachsteht, das die Konstruktion der astronomischen Objekte durchzieht. Die Konstruktion eines vermissten Eigentlichen verlangt hartnäckig nach der haptischen, motorischen, sinnlichen Bestätigung, die die Basis des menschlichen Maßes darstellt.

Die auf Abstraktion beruhende, durch Quantifizierung ihr eigenes neues Maß setzende Methode, die den Naturwissenschaften zugrunde liegt, entzieht sich diesen haptischen Bestätigungen, ist selbst maßlos. Dass eben dieses Maßlose sein je eigenes Maß konstituiert, macht die Dynamik dieser Welterfassung aus. Die Schwarzen Löcher sind längst vom maßlos Exotischen zum gewohnten Nachbarn geworden. Das Maß frisst seine maßlosen Kinder und die Bilder rahmen sie.