



Prof. dr hab. Marek Sarna

ORCID: 0000-0003-4745-3923

E-mail: sarna@camk.edu.pl

Von Kopernikus bis zur ESO – Wie Astronomen heute das Universum beobachten

Abstract

Die astronomischen Beobachtungstechniken haben seit Kopernikus bis in die Gegenwart einen langen und komplizierten Entwicklungsweg durchlaufen. Für Nikolaus Kopernikus und seine Zeitgenossen sowie später für Galileo oder Hevelius war das Auge das grundlegende optische Beobachtungsinstrument und zugleich der Detektor. Heutzutage bauen wir immer größere und komplexere Teleskope, entwickeln hochpräzise Aufzeichnungstechniken und sammeln in Datenbanken Terabytes an Informationen über das uns umgebende Universum. Unsere Beobachtungen reichen von unserem Planetensystem über das Zentrum der Galaxie bis zu den entferntesten Grenzen des Universums. Die grundlegende Frage bleibt jedoch unverändert: Woher stammen wir, wie sind wir in dieser unermesslichen Welt entstanden, und verstehen wir sie wirklich?

Kopernikus und seine Instrumente

Für viele mag es überraschend sein, dass ein Gelehrter zur Zeit Kopernikus sowohl den „Analysator“ als auch das grundlegende optische Instrument stets bei sich trug. Sein „Verstand-Analysator“ war nach den Regeln des Triviums und Quadriviums geschult, wie es an den mittelalterlichen Universitäten üblich war. Sein wichtigstes Beobachtungsinstrument war jedoch – wie schon zu Zeiten des Ptolemäus – das Auge.

Der Verstand wurde durch Wissen und Logik gestützt und war eingebettet in die damals

gültigen Forschungsstandards sowie in das aristotelische Weltbild. Die Geräte, die wir als das Instrumentarium Kopernikus' bezeichnen, waren Hilfsmittel, die Auge und Verstand unterstützten. Man muss sich dabei vergegenwärtigen, dass Kopernikus ein Spezialist auf einem klar umrissenen Fachgebiet war: der mathematischen Astronomie. Das Hauptanliegen seiner Arbeit als Astronom bestand darin, die von Ptolemäus überlieferten astronomischen Tabellen, die zur Bestimmung der Planetenpositionen dienten, zu verbessern und zu vereinfachen.

Mit welchen Instrumenten arbeitete Kopernikus zu diesem Zweck? Es handelte sich um einfache, handgefertigte Geräte, die in erster Linie zur Winkelmessung dienten. Sie unterschieden sich nicht von den damals gebräuchlichen Instrumenten und wurden von Kopernikus in seinem Werk *De revolutionibus orbium coelestium* beschrieben. Dabei handelte es sich um Nachbildungen der im *Almagest* des Ptolemäus dargestellten Geräte. Zu ihnen zählten der Quadrant, das Triquetrum (Dreistab) sowie das Astrolabium. Ergänzt wurde dieses Set durch eine Sonnenuhr. Im Folgenden werden sie kurz erläutert.

Quadrant

Eine rechteckige Platte mit einer Winkelskala, die zur Messung der Höhe der Himmelskörper über dem Horizont diente. Das Instrument musste genau in der Ebene des lokalen Meridians ausgerichtet werden, basierend auf einer sorgfältig nivellierten und genau in der Horizont-Ebene liegenden Grundlage. Mit Hilfe des Quadranten konnte der Astronom die

Neigung der Ekliptik zum Äquator bestimmen, also den Abstand der Wendekreise vom Äquator. Außerdem war es möglich, die geografische Breite des Beobachtungsortes – in Kopernikus' Fall Frauenburg (poln. Frombork) – zu ermitteln (Abb. 1).



Abb. 1 Sonnenquadrant: verwendet zur Messung der Sonnenhöhe und der Inklination (Neigung) der Ekliptik – der Erdbahn – gegenüber dem Himmelsäquator.

Triquertum (Dreistab)

Kopernikus verwendete das Triquetrum zur Bestimmung der Parallaxe des Mondes, also zur Messung seiner Entfernung von der Erde. Das Instrument besteht aus drei Tannenholzleisten, die mit Schrauben so verbunden sind, dass sie ein gleichschenkliges Dreieck bilden. Auf der ersten Leiste sind zwei Metaldurchsichten angebracht, auf der zweiten eine Skala. Die dritte Leiste, an deren Enden die beweglichen Teile befestigt sind, ist auf einem Holzpfosten montiert und über Scharniere so gelagert, dass die Leisten um den Pfosten gedreht werden können (Abb. 2).



Abb. 2 Parallaktischer Linealstab oder Triquetrum: ein Instrument zur Messung der astronomischen Höhe der Sonne (der scheinbaren Veränderung ihrer Position infolge der Bewegung der beobachtenden Person auf der Erde).

Astrolabium

Das Astrolabium, auch Armillarsphäre genannt, war das komplizierteste Beobachtungsinstrument Kopernikus'. Es diente der Bestimmung der Positionen des Mondes und der Planeten am Himmel, insbesondere ihrer Höhenwinkel. Das Instrument besteht aus konzentrischen Holzringen, die mit Winkelskalen und Durchsichten versehen sind. Der äußerste Ring wird fest auf einem Pfosten in der Meridianebene ausgerichtet. Die übrigen Ringe repräsentieren die Ekliptik, den Himmelsäquator, den Stundenkreis und die Meridiane. Mit Hilfe dieses Instruments lassen sich die ekliptikalischen Breiten- und Längenkoordinaten der beobachteten Himmelskörper bestimmen. (Abb. 3).



Abb. 3 Sphärisches Astrolabium: das fortschrittlichste astronomische Instrument der Antike, verwendet zur Bestimmung der ekliptischen und äquatorialen Koordinaten von Himmelskörpern.

Wie das Universum zu Kopernikus' Zeiten aussah

Zur Zeit von Kopernikus galten die Grundsätze der Naturphilosophie des Aristoteles, der Geometrie des Euklid und der Bibel. Die Bewegungen der Himmelskörper sollten vollkommen sein, sich auf Kreisbahnen vollziehen (als Bewegungen ohne Anfang und Ende) und gleichmäßig, ohne Beschleunigungen oder Verzögerungen, ablaufen. Das Zentrum der Schöpfung war die Erde, um die sich alle Himmelskörper bewegten. Kopernikus stellte die theologischen Wahrheiten nicht in Frage, verlagerte jedoch das Zentrum vom Standort der Erde zur Sonne. Erde und Planeten kreisen

nach seiner Auffassung auf kreisförmigen Bahnen um die Sonne. Durch diese Annahme wurde die Beschreibung der Planetenbewegungen zwar einfacher, doch um alle Beobachtungen zu erklären, verzichtete er nicht auf die Konzepte der Deferenten und Epizyklen.

Mit einfachen Hilfsinstrumenten war Nikolaus Kopernikus nicht in der Lage, sein vorgeschlagenes Modell eindeutig zu überprüfen. Er vereinfachte das ptolemäische Weltbild erheblich, doch blieb dies lange Zeit nur eine Hypothese, die einer beweisbaren Überprüfung bedurfte. Seine Messungen deuteten auf das Modell hin, widerlegten jedoch weder das geozentrische Modell noch bewiesen sie die Richtigkeit des heliozentrischen Modells (Abb. 4).

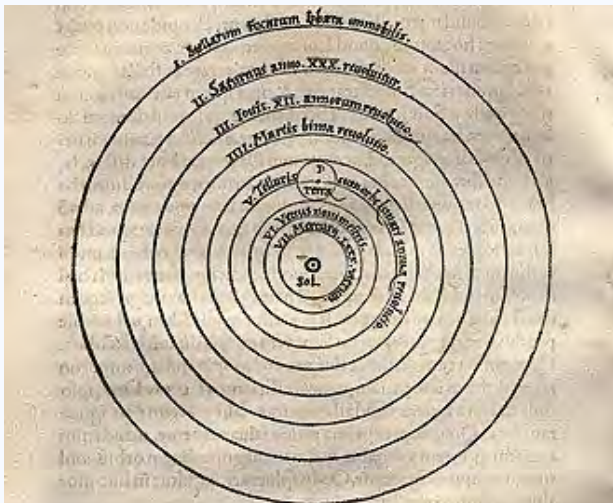


Abb. 4 Das heliozentrische Modell von Nikolaus Kopernikus – De revolutionibus orbium coelestium.

Andere Wissenschaftler zwischen Kopernikus und der Gegenwart?

Das 17. Jahrhundert brachte zahlreiche technische Neuerungen, darunter das Fernrohr. Galileo Galilei entdeckte mithilfe des Fernrohrs die Mondberge, beobachtete die Phasen der Venus und zeigte damit, dass dieser Planet die Sonne und nicht die Erde umkreist. Außerdem entdeckte er die vier größten Monde des Jupiter und erkannte, dass die Milchstraße aus einer Vielzahl von Sternen besteht. Dies war ein bedeutender Durchbruch im Verständnis des Himmels.

Den nächsten Meilenstein setzte Johannes Kepler, der vorschlug, dass sich die Planeten auf elliptischen Bahnen mit veränderlicher Geschwindigkeit bewegen. Dies bestätigte er anhand der Beobachtungen der Marsbewegung durch Tycho Brahe. Isaac Newton schließlich formulierte das Gesetz der universellen Gravitation und verankerte so diese Bewegungen in der Sonne. Die heliozentrische Hypothese Kopernikus' führte zu einer Revolution und einem Paradigmenwechsel: **Die Position der Erde im Universum ist in keiner Weise privilegiert – die kopernikanische Wende hatte stattgefunden.**

Aktuelles Paradigma und Methoden der Überprüfung

Auch heute bilden Auge und Verstand weiterhin die Grundlage der Erkenntnis. Die Situation hat sich über die Jahrhunderte kaum verändert, wenngleich der analytische Verstand heute durch Computer unterstützt wird und moderne astronomische Instrumente – unter anderem an der Europäischen Südsternwarte (ESO) – als Erweiterung unserer Augen dienen.

Die Barriere der festen Sternensphäre ist gefallen, und das Universum begann sich bedrohlich auszudehnen und zu verdünnen. Die Informationsübermittlung wird nun durch die Lichtgeschwindigkeit begrenzt, während aus lokalen Nebeln Galaxien und Quasare entstanden sind. Die moderne Kosmologie brachte uns den Urknall und die Hintergrundstrahlung als Beweis, erzeugte jedoch gleichzeitig neue Fragen: anfängliche Instabilität, dunkle Materie und dunkle Energie. Daher erwies sich die Entwicklung neuer Beobachtungstechniken und -technologien als unerlässlich.

Das „Abtasten“ des Universums

Geht man zurück zum grundlegenden Beobachtungsapparat des Menschen, dem Auge, so fällt auf, dass der Bereich, in dem das Auge elektromagnetische Strahlung wahrnimmt, äußerst begrenzt ist. Dies ist der sogenannte optische Bereich, also das Spektrum aller Regenbogenfarben. Jenseits davon erstrecken sich weitere Bereiche: Gammastrahlung,

Röntgenstrahlung und Ultraviolett einerseits sowie ferner Infrarot, Mikrowellen und Radiowellen andererseits. Ohne technische „Prothesen“ können wir diese nicht erfassen.

Die Zeiten Herschels oder Hevelius', als ein einzelner Beobachter ein Teleskop oder Fernrohr selbst konstruierte und benutzte, gingen schnell zu Ende. Im 19. und 20. Jahrhundert begann man, Kräfte zu bündeln: Es entstanden Observatorien, die von Universitäten finanziert wurden, und mit der Zeit – aufgrund der steigenden Kosten immer komplexerer Instrumente – wurden Konsortien gegründet, die zahlreiche wissenschaftliche und technische Einrichtungen vereinten. Bald erkannte man auch, dass die ausschließlich auf der Erdoberfläche stationierte Apparatur nicht ausreichen würde, sondern dass man den Schritt hinaus ins All, oberhalb der Erdatmosphäre, wagen musste. So entstanden zwei Arten von Organisationen: die Europäische Südsternwarte (ESO), deren wichtigste Beobachtungsinstrumente in den chilenischen Anden stehen, sowie die Europäische Weltraumorganisation (ESA), die sich mit der Konstruktion und dem Betrieb von Satelliten in der Erdumlaufbahn befasst. Polen ist in beiden Organisationen Vollmitglied und nutzt die gesamte wissenschaftliche Infrastruktur.

In der vorliegenden Darstellung konzentrieren wir uns ausschließlich auf die ESO, der Polen im Jahr 2015 beigetreten ist. Der Hauptsitz der Organisation befindet sich in der deutschen



Abb. 5 Aufnahme der **Paranal-Plattform**. Ihre vier Teleskope sind bereit für den Beginn der Beobachtungen. (Quelle: ESO / H.H. Heyer)

Stadt Garching bei München. Der vollständige Name lautet: Europäische Organisation für astronomische Forschung in der südlichen Hemisphäre. Sie bildet das wissenschaftliche, technische und administrative Zentrum der ESO. Darüber hinaus unterhält die Organisation ein Büro in Santiago de Chile. Die meisten Beobachtungsanlagen befinden sich in den Anden. (Abb. 5)

Zur ESO gehören drei in Betrieb befindliche Observatorien sowie ein weiteres, das sich im Bau befindet, im Gebiet der dortigen Atacamawüste:

- i) La-Silla-Observatorium** (Teleskope mit 2,2 m, 3,6 m sowie das 3,58 m große New Technology Telescope –NTT);
- ii) Paranal-Observatorium** (2,5 m, 4 m sowie das Very Large Telescope Interferometer – VLTi);
- iii) Atacama Large Millimeter Array – ALMA** (Anlagen aus Radioteleskopen);
- iv) Extremely Large Telescope – ELT**, derzeit im Bau, das mit einem Spiegel von 39,3 m Durchmesser das größte optische/infrarote Teleskop der Welt sein wird.

Die Hauptmission der ESO besteht in der Schaffung eines Europäischen Forschungsraums (European Research Area) für Astronomie und Astrophysik. Jedes Jahr führen zahlreiche polnische Astronomen Forschungen durch, die auf den in den ESO-Observatorien gesammelten Daten basieren. Häufig arbeiten die Astronomen in internationalen Teams zusammen, und die erzielten Ergebnisse werden in wissenschaftlichen Artikeln veröffentlicht. Vergleicht man dies mit den Arbeitsformen vergangener Jahrhunderte, so zeigt sich deutlich der Charakter der Teamarbeit. Kopernikus hingegen arbeitete allein und hatte lediglich einen einzigen Schüler – Rheticus.

Der Einsatz zahlreicher Spezialisten, die bei der ESO tätig sind, hat maßgeblich zur raschen Entwicklung moderner Beobachtungstechniken beigetragen, darunter:

- 1. Aktive Optik:** Diese Technik wird in modernen Teleskopen angewandt und besteht in der kontinuierlichen Korrektur der Form eines dünnen Spiegels in Echtzeit während der Beobachtung.
- 2. Adaptive Optik:** Sie dient der Korrektur der Bildschärfe. Je größer der Spiegeldurchmesser, desto mehr Photonen können gesammelt werden. Dennoch lässt sich selbst an den aus astronomischer Sicht besten Beobachtungsstandorten im sichtbaren Spektrum keine höhere Bildschärfe erzielen als mit einem Teleskop von 20–40 cm Öffnung. Ursache dafür sind atmosphärische Bewegungen, insbesondere Turbulenzen. Die adaptive Optik kompensiert diese Störungen.
- 3. Optische und Mikrowelleninterferometrie:** Durch die Kombination des von zwei oder mehr Teleskopen registrierten Lichts wird ein hochauflösendes Bild erzeugt, das mit einem einzelnen Instrument nicht zu erreichen wäre. Die ESO gilt auf diesem Gebiet als Pionierin und hat diese Technologie erfolgreich im Very Large Telescope Interferometer (VLTI) in Paranal implementiert.

Mithilfe dieser Beobachtungstechniken und der Teleskope der ESO wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche bedeutende Entdeckungen gemacht.

Protoplanetare Scheiben

Bereits Ende des 18. Jahrhunderts schlug Pierre Simon de Laplace vor, dass das Sonnensystem aus einer rotierenden, kugelförmigen Gaswolke entstanden sei, die sich unter dem Einfluss der Gravitation nach innen zusammenzog und – gemäß dem Prinzip der Erhaltung des Drehimpulses – immer schneller rotierte und sich entlang ihrer Rotationsachse abflachte. Aus dem größten Teil der Materie sollte sich im Zentrum ein Stern bilden, während in dessen Umgebung rotierende Materieringe verblieben. Aus diesen Ringen wiederum sollten sich – auf kleinerer Skala – Planeten und ihre Monde formen. Beobachtungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop ebenso wie mit den ALMA-

Teleskopen haben gezeigt, dass dieses Szenario zutrifft. Dabei wurde das Objekt HL Tau entdeckt – eine protoplanetare Scheibe mit einer Ausdehnung von etwa 180 Astronomischen Einheiten (AE), in einer Entfernung von rund 140 Parsec von der Erde. (Abb. 6 – HL Tau)

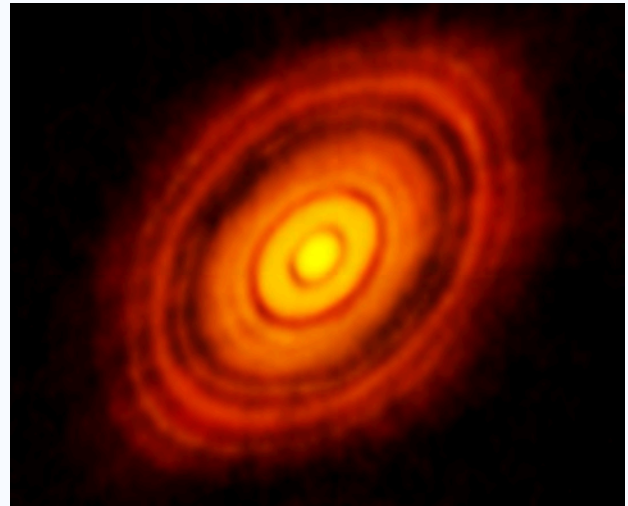


Abb. 6 Von ALMA aufgenommenes Bild der **protoplanetaren Scheibe** um HL Tauri.
(Quelle: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO))

Protoplanetare Scheiben

Ein weiterer großer Erfolg der Astronomie, der die Vorstellung widerlegte, dass unser Sonnensystem einzigartig sei, war die Entdeckung von Exoplaneten. Die ersten Planeten außerhalb des Sonnensystems, die einen Pulsar (PSR 1257+12) umkreisen, wurden 1992 von dem polnischen Astronomen Aleksander Wolszczan entdeckt. Im Jahr 1995 gelang der Nachweis des ersten Planeten um einen sonnenähnlichen Stern, 51 Pegasi, durch die Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz. Für diese bahnbrechende Entdeckung wurden sie 2019 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Beide sind Mitglieder der Kopernikanischen Akademie.

Nach aktuellen Angaben der NASA sind mittlerweile mehr als 5000 Exoplaneten bekannt, sowie über 880 Sterne mit mehreren Planeten.

Schwarzes Loch in unserer Galaxie

Die Spiralgalaxie, an deren Rand sich das Sonnensystem befindet, können wir unsere eigene nennen. Sie besteht aus Milliarden von Sternen unterschiedlichen Alters und Masse, die eine abgeflachte Scheibe bilden. Im zentralen Bereich, eingebettet in ein Gewimmel aus Sternen und Staub, befindet sich ein supermassives zentrales Objekt, bezeichnet als Sgr A*. Mithilfe der Teleskope der ESO mit aktiver und adaptiver Optik konnte die Eigenbewegung von über 6.000 Sternen innerhalb eines Radius von 1 Parsec untersucht werden. Unter Anwendung des Keplerschen Gesetzes und auf Basis der Bewegungen der 28 am besten untersuchten Sterne im zentralen Bereich wurde die Masse des zentralen Schwarzen Lochs auf $4,31 \pm 0,06$ Millionen Sonnenmassen bestimmt (Abb. 7).

Sind wir dem Verständnis des Universums näher gekommen? Die obigen Beispiele zeigen, dass wir vielleicht bereits mehr verstanden haben als zu Kopernikus' Zeiten.

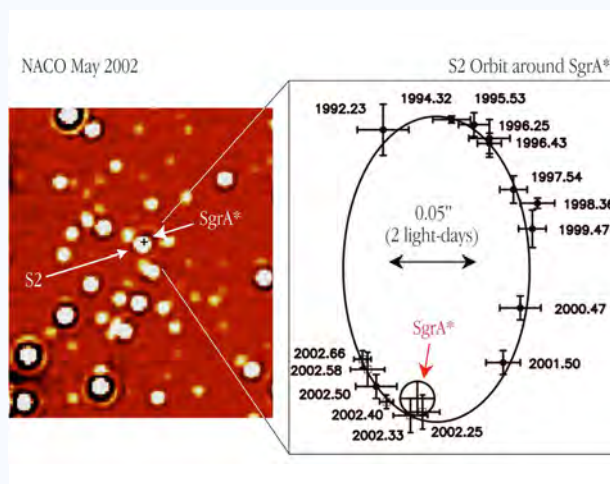


Abb. 7 Bewegung eines Sterns um **Sgr A*** – das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße. (Quelle: ESO)

Die wissenschaftliche Entwicklung im 20. und 21. Jahrhundert zeigt, dass das deterministische Modell seine Gültigkeit verloren hat. Aber ist das derzeit von uns entworfene Modell tatsächlich dynamisch? Sind wir in der Lage, den „Ereignishorizont des Universums“ zu überschreiten? Werden wir die anfängliche Instabilität verstehen und ist dieses Verständnis für uns ein „kategorischer Imperativ“?