

## Die astronomischen Fenster der Anschauung

ERWIN SEDLMAYR

Wie keine andere Wissenschaft hat *Astronomie* das Denken der Menschen und ihr Bild von der Welt, – ihr Weltbild – beeinflußt und geprägt. Durch alle Zeitalter war es ein Bedürfnis der Menschen, den Sternenhimmel zu betrachten und seine Gesetzmäßigkeiten zu erforschen, um die Welt zu verstehen und in ihr einen Standpunkt zu finden. In diesem Jahrtausende währenden Bemühen, Beobachten und Erforschen hat sich das heutige astronomische Weltbild herausgebildet, das im echten Sinne universell ist, d.h. Gemeingut aller modernen Kulturen, unabhängig von Nationalität, Rasse, politischer Einstellung und Religionszugehörigkeit. Um an Schiller zu denken, ist so Astronomie in ihrer Perspektive, ihrem Werdegang und in ihrem Anspruch konkrete Universalgeschichte, eine Sichtweise auf die meines Wissens nach zuerst Hans Elsässer aufmerksam gemacht hat.

Das heute landläufige Weltbild der Astronomie basiert auf allgemein vertrauten Tatsachen: jeder einigermaßen Gebildete weiß, dass die Erde Kugelgestalt besitzt und nicht, wie früher als selbstverständlich angenommen, im Zentrum des Universums ruht, sondern auf einer Ellipsenbahn um die Sonne wandert; dass aber auch die Sonne keine Zentralstellung einnimmt und gleichermaßen um die Mitte der Milchstraße kreist, welche ihrerseits wiederum nur eine von Myriaden von Galaxien darstellt, die das Weltall erfüllen und das konsequenterweise ungeheuer groß sein muß. Allein diese Größe, die alles menschliche Maß überschreitende räumliche und zeitliche Dimension der Welt, entmutigt die Einen, sich tiefer darauf einzulassen, stellt aber für die Anderen gerade eine besondere Faszination und Herausforderung für ihr Denken dar.

Zum heutigen populären Weltbild gehört aber auch so etwas wie der *Urknall*, die Metapher von einem abrupten Ins-Sein-Treten der Welt durch ein mysteriöses Urereignis, gestützt durch das Bild einer allseitigen kosmischen Expansion, fälschlicherweise häufig als Explosion aufgefaßt, von deren Mittelpunkt aus die materiellen Objekte in alle Richtungen auseinanderfliegen und so dem irdischen Beobachter eine Zentralstellung zuzuweisen scheint. Der hierin liegende Trugschluß wird erst durch die Theorien der modernen Kosmologie aufgelöst, welche die beobachtete allseitige Fluchtbewegung der fernen Objekte unmittelbar durch ein dem kosmischen Raum selbst inhärentes Expansionsverhalten erklärt, ähnlich z.B. der sich vergrößernden Oberfläche beim Aufblasen eines Luftballons, auf der sich auch beliebig markierte Punkte voneinander entfernen, um eine in diesem Zusammenhang oft benutzte zweidimensionale Veranschaulichung zu gebrauchen.

Als aufregend oder beunruhigend empfunden wird auch die Spekulation oder das Wissen um Schwarze Löcher, meistens aufgefaßt als Grenzvorstellungen aus Science-fiction Geschichten, als Raum-Zeit-Tore und Anderswelten; Sujets, welche viele Menschen in ihren Bann ziehen und gerade ob ihrer anhaftenden geheimnisvollen mythischen, psychologischen oder fantastischen Aspekte Allgemeingut des populären Interesses darstellen. So gesehen stellt Astronomie nicht nur eine wichtige Säule unseres heute verbindlichen naturwissenschaftlich-technischen Weltbilds dar, sondern ist seit jeher auch Urgrund und Inspirationsquelle mannigfacher künstlerischer oder religiöser Ausstrahlungen. Die Sicht und Begeisterung der Wissenschaftler, der Astronomen und Astrophysiker ist nüchterner, aber nicht weniger faszinierend: ihr Weltbild wurde geschaffen durch Beobachtung und Theorie, d.h. durch das Studium der Erscheinungsformen und Verhaltensweisen der kosmischen Objekte sowie deren quantitative naturgesetzthafte Beschreibung mittels geeigneter physikalischer Theorien.

Unser heutiger wissenschaftlicher Blick auf den Kosmos und seine Objekte ist somit bestimmt vom allgemein akzeptierten Paradigma einer naturwissenschaftlich-technischen Sicht. Diese Perspektive, in der viele den Beginn unserer europäischen Neuzeit sehen – Blumenbergs treffendes Wort<sup>1</sup>, wonach der Mensch erkannte: »dass man sehen konnte, was man wissen wollte« – und die mit den Umwälzungen durch Johannes Kepler, Galileo Galilei und Isaac Newton etabliert wurde, und mit der eine entsprechende Entwicklung der verfügbaren Beobachtungstechnik einherging, hat von da an in unvergleichlich erfolgreicher Weise das menschliche Denken und Wissen über den Himmel und seine Objekte beherrscht und bestimmt heute, im Kontext der Astrophysik, mehr denn je wissenschaftliches Arbeiten und die Interpretation der dadurch gewonnenen Ergebnisse und Einsichten.

Die Grundlagen sind die Erkenntnisse, Methoden und Theorien der heutigen Naturwissenschaften, besonders der Physik, sowie der Mathematik, durch deren Anwendung auf astronomische Fragestellungen wir in der Lage sind, nicht nur die Himmelsobjekte, sondern sogar das Universum selbst, als physikalische Systeme zu begreifen, deren raumzeitliche Organisation, deren Struktur und lokaler oder globaler Zusammenhang, quantitativ berechnet und dadurch physikalisch interpretiert und verstanden werden können.

Von einer philosophischen Warte aus mag geklärt werden, inwiefern ein so umfassender Zugriff auf die Natur des Universums, wie ihn uns Physik und Mathematik ermöglichen, allgemeine und grundsätzliche

---

<sup>1</sup> H. Blumenberg, *Das Lachen der Thrakerin: eine Urgeschichte der Theorie*, Frankfurt a.M. 1987 (= 2001).

Bedeutung hat oder eben auch nur eine, wenn auch ungemein erfolgreiche, »Interpretationswelt« im Kontext anderer Perspektiven darstellt<sup>2</sup>, also nur einen durch die gemachten Annahmen und verwendeten besonderen Methoden eingegengten Projektionscharakter besitzt und somit grundsätzlich vom gewählten »Fenster unserer Anschauung« abhängt, worin wir nicht nur unser begründetes Vorurteil einbringen, sondern auch bereits unsere Ergebniserwartung in gewisser Weise präjudizieren.

Moderne Astronomie ist also in ihrem Wesen, wie heute jede Naturforschung, eine *beobachtende*, d.h. seit Beginn der Neuzeit eine *messende* Wissenschaft, deren Erkenntnisse nicht mehr, wie z.B. in der antiken Astronomie, durch deduktive Schlüsse im Kontext einer allgemein akzeptierten Weltvorstellung gewonnen werden, sondern ausschließlich durch gezielte Beobachtung der Himmelsobjekte oder -phänomene und deren möglichst widerspruchsfreie Interpretation im Rahmen einer theoretischen Beschreibung. Dies weist den Beobachtungsmöglichkeiten, und damit den verfügbaren Teleskopen, Auswerte- und Analysetechniken eine zentrale Rolle für das zeitgemäße wissenschaftliche Arbeiten und Forschen zu, und indirekt auch für die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Einsichten, wie sie zu allen Zeitaltern die menschliche Vorstellung vom Kosmos und seiner Objekte geprägt haben. Betrachtet man diesen hieraus nahegelegten Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Stand der Astronomie und dem ihrer verfügbaren Technik genauer, kann man mit einem gewissen Recht feststellen, dass Sprünge in der Technik fast immer auch Sprünge in der grundlegenden Erkenntnis, d.h. im Hinblick auf die Astronomie, neue Weltvorstellungen – neue *Weltbilder* – nach sich gezogen haben.

Dieser enge Zusammenhang zwischen der praktischen Fähigkeit und den theoretischen Möglichkeiten erfolgreicher Forschung einerseits und ihrem technischen Stand andererseits, ist seit jeher für jede Gesellschaft zentraler Bestandteil ihres wissenschaftlichen Fortschritts und ihrer kulturellen Entwicklung. Darum hat Astronomie zu allen Zeiten eine besondere Bedeutung für das Selbstverständnis und die Entwicklung der Menschheit gehabt. Alle Hochkulturen widmeten ihr ein hohes Maß an geistigen und wirtschaftlichen Kräften und betrachteten sie als Spiegel ihres Entwicklungsstandes. Als besonders eindrucksvolle Beispiele seien hier nur der steinzeitliche, etwa 7000 Jahre alte Sonnenkalender bei Meisterthal in Niederbayern oder die sogenannte Himmelscheibe von Nebra erwähnt, aber auch die gewaltige urzeitliche Steinanlage von *Stonehenge* in Südengland oder auch die Pyramiden Ägyptens oder der

---

2 Siehe G. Abel, *Interpretationswelten. Gegenwartsphilosophie jenseits von Essentialismus und Relativismus*, Frankfurt a.M. 1993 und G. Abel, *Sprache, Zeichen und Interpretation*, Frankfurt a.M. 1999.

Mayas, in deren Konstruktions- und Positionsmerkmalen offensichtlich astronomische Bezüge zu erkennen sind.

Wie eine neue Beobachtungsmöglichkeit, hier ein neues Instrument, ein ganzes Weltbild verändern kann, ist besonders deutlich beim ersten astronomischen Einsatz des Fernrohrs durch Galileo Galilei zu sehen, mit dem es ihm gelang, vier bahnbrechende, unerwartete Beobachtungen zu machen, von denen jede für sich jeweils einen Eckstein für das kommende astronomische Weltbild der Neuzeit bildete: die Entdeckung der Jupitermonde, der Venusphasen, der Mondkrater und die Auflösung des hellen Bandes der Milchstraße in Myriaden von Einzelsternen.

Gerade die Aufklärung der tatsächlichen Struktur der Milchstraße und damit einhergehend der wahren Natur der sogenannten Spiralnebel vor etwa einhundert Jahren, welche auch den Schritt zur extragalaktischen Astronomie bedeutete, war nur mit einer neuen Klasse von Teleskopen, für die für mehr als ein halbes Jahrhundert lang zuvorderst die amerikanischen Sternwarten Mount Wilson und Mount Palomar standen, möglich. Auf dieser hier gelegten Grundlage wurde durch die rasanten Weiterentwicklungen der letzten Dekaden, mit dem Betrieb der Großsternwarten und Satellitenteleskope, das heute akzeptierte astronomische Weltbild eines expandierenden Kosmos geschaffen, der uns erlaubt, sowohl die raum-zeitliche Dynamik des Universums als auch die damit einhergehende Entwicklung der materiellen Strukturen und Organisationsformen als evolutionären Prozess im Sinne einer hierarchischen Ordnung zu verstehen, wo die jeweils unterschiedlichen Stufen der Materieorganisation als mehr oder weniger langlebige Zustände in Erscheinung treten, wie wir im Weiteren des Beitrags noch sehen werden.

Astronomie ist die Wissenschaft, die vom Licht lebt. Licht ist die kosmische Botschaft aus den Tiefen von Raum und Zeit an die irdischen Beobachter, das zeitlose Medium der Übermittlung, das über die unvorstellbaren Entfernungen des Weltalls das Hier und Heute mit dem Dort und Damals in einer Entwicklungskette verbindet und so das sichtbare Universum als ein einheitliches evolutionäres System zu erkennen erlaubt. Licht bildet eine Brücke zwischen den isolierten Himmelsobjekten und schließt das Universum zu einer Informationseinheit zusammen, welche es dem menschlichen Geist zugänglich macht und zu umfassen ermöglicht.

Der Lichtfluss astronomischer Objekte besitzt im allgemeinen eine sehr differenzierte Struktur in seiner Energieabhängigkeit – wir nennen das sein Spektrum – welche vielfältige Informationen über die spezifischen physikalischen Zustände und die dort ablaufenden Prozesse enthält. Direkt ersichtlich ist uns ausschließlich der sogenannte visuelle Bereich zwischen 400 bis 700 nm, der der Empfindlichkeit des mensch-

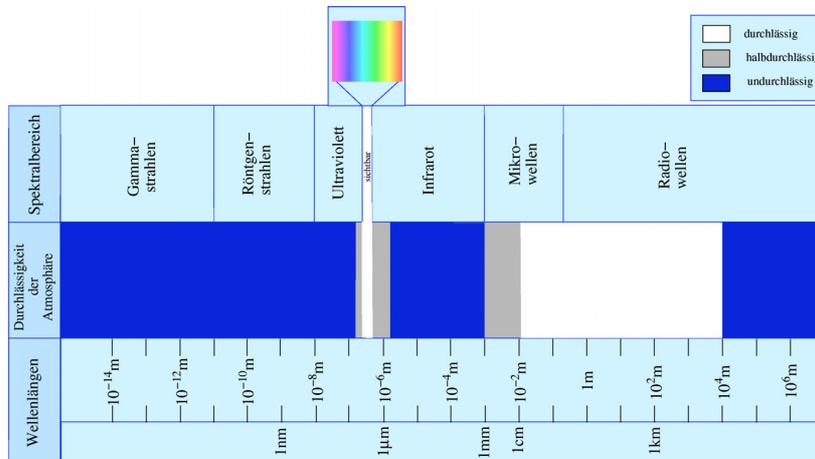


Abb. 1: Optisches Fenster der Erdatmosphäre (Aus Brockhaus: Mensch. Natur. Technik: Vom Urknall zum Menschen, Hrsg.: Gernot Gruber, F.A. Brockhaus, Leipzig-Mannheim, 1999.

lichen Auges entspricht und daher das »natürliche Fenster unserer Anschauung« definiert. Im Vergleich zum physikalischen Spektralbereich, vom höchstenergetischen Ende der  $\gamma$ -Quanten bis zum anderen Extrem der niederenergetischen Radiowellen, welche jeweils nur durch geeignete Instrumente detektiert werden können, ist dies im Energiespektrum ein nahezu verschwindender Ausschnitt.

Spezifisch ist diesen Bildern, dass uns die unterschiedlichen Spektral Fenster auch jeweils unterschiedliche physikalische Prozesse auf ihrerseits unterschiedlichen Theorieebenen enthüllen, die im Gesamtkontext eines Objekts zusammengedacht und zu einer geschlossenen Beschreibung und Interpretation physikalisch zusammengeführt und konsistent behandelt werden müssen. Das vorhin angesprochene »natürliche Fenster« vermittelt also nur einen kleinen, meistens nicht einmal den wichtigsten Ausschnitt der tatsächlichen Verhältnisse. Diese zu erfassen, bedienen wir uns physikalischer Theorien – Mechanik, Thermodynamik, Hydrodynamik, Quantentheorie, Atomphysik, Kernphysik, Strahlungstheorie, spezielle und allgemeine Relativitätstheorie, ... – die, je nach spezifischer Wichtigkeit ausgewählt, bei der Beschreibung eines Objektes oder Prozesses als relevant erachtet werden und so eigene »theoretische Fenster der Anschauung« definieren. Lassen sie mich das anhand der Sonne an wenigen Beispielen näher erklären:

1. *Fenster (zeitlose Sicht):* Aus astronomischer Sicht ist die *Sonne* ein relativ kleiner, ganz normaler Stern bestimmter Masse, bestimmter Leuchtkraft und bestimmter chemischer Zusammensetzung, welcher wegen

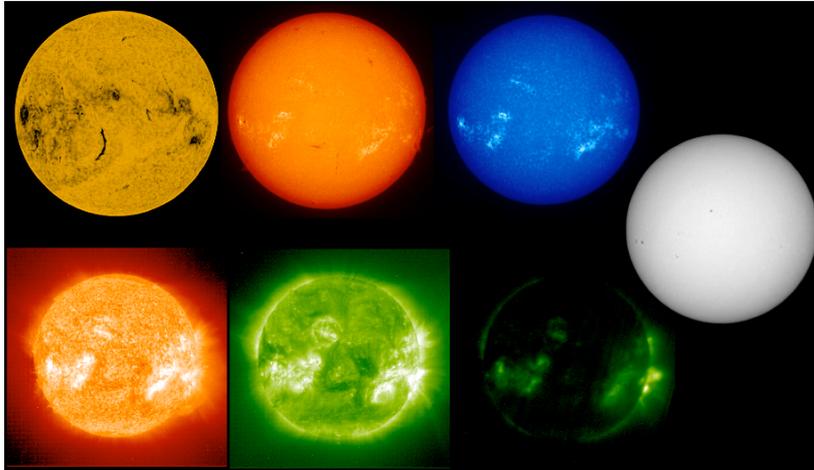


Abb. 2: Aussehen der Sonne in verschiedenen Wellenlängenbereichen: [obere Reihe] He I bei 1083 nm (Infrarot), H $\alpha$  bei 676,7 nm (Rot), Ca II  $\kappa$  bei 393,4 nm (Blau); [untere Reihe] He II bei 30,4 nm (extremes UV), Fe XII bei 19,5 nm (extr. UV) und weiche Röntgenstrahlung; [rechter Rand] die Sonne im gesamten sichtbaren Licht (weiß) (Quelle: Solar Data Analysis Center at NASA Goddard Space Flight Center, Maryland USA, <http://umbra.nascom.nasa.gov/>).

seiner Langlebigkeit (heutiges Alter etwa 4,6 Milliarden Jahre) zeitlos erscheint. Dieser stabile Zustand wird physikalisch wesentlich durch zwei Gleichgewichte bestimmt: das mechanische Gleichgewicht und das energetische Gleichgewicht. Beachten wir weiter, dass diese Gleichgewichte nur durch ein entsprechend großes Energiereservoir über lange Zeit aufrecht erhalten werden können und hierfür die Verfügbarkeit von Kernenergie die einzige bekannte Möglichkeit darstellt, werden wir von der Physik notwendig dazu geführt, dass die Sonne ein sehr stabiler, gasförmiger Fusionsreaktor ist, der in seinem Inneren Wasserstoff zu Helium verbrennt und dessen Aufbau und Abstrahlung durch vier einfache Strukturgleichungen aus Thermodynamik, Hydrostatik und Kernphysik beschrieben werden können. Gleiches gilt für eine Vielzahl von Sternen (etwa 90%), welche die sogenannte Hauptreihe des Hertzsprung-Russel-Diagrammes bevölkern. Sterne sind also in dieser ersten Ansicht sehr langlebige Strahlungsquellen, wie sie sich landläufig im Kosmos manifestieren. In diesem Sinne dürfen wir die Sonne geradezu als Paradigma für das, was wir landläufig mit dem Begriff Stern verbinden, auffassen.

2. *Fenster (zeitaufgelöste Sicht)*: Auf einen zweiten, zeitaufgelösten Blick ist die Sonne zwar ein im Mittel stabiler und relativ unveränderlicher Stern, ihre Leuchtkraft, d.h. ihre Lichtemission, zeigt aber deutlich kurzfristige und langfristige Variationen. Am auffälligsten ist hier der

22-Jahre-Zyklus, der durch die Veränderung der Sonnenaktivität (Sonnenflecken, Ausbrüche) gekennzeichnet und dessen Ursache in ihrer Magnetfeldstruktur – genauer in der Dynamik des sogenannten Sonnendynamos – zu verorten ist. In dieser Sicht ist die Sonne also eine gewaltige Dynamomaschine, welche durch Turbulenz und Rotation getrieben, die beobachteten Aktivitätsphänomene generiert. Derartiges gilt selbstverständlich ebenfalls für eine große Klasse von Sternen.

3. *Fenster (mikrophysikalische Sicht)*: Die Energiequelle der Sterne ist Kernfusion, d.h. Sterne sind Fusionsreaktoren, wo leichtere Atomkerne zu schwereren Atomkernen fusioniert werden. Da Wasserstoff, und auch der weit überwiegende Teil von Helium, bereits in den frühesten Phasen des Universums entstanden, der weitere Aufbau aber bei Helium abbricht, ist man heute der Meinung, dass alle vorkommenden chemischen Elemente schwerer als Helium in Sternen gebrütet werden. Sterne sind also in dieser mikrophysikalischen Sicht die Quellen aller schweren Elemente und liefern somit auch die materielle Grundbedingung aller organischen Verbindungen (C, O, ...), d.h. auch allen Lebens.

4. *Fenster (evolutionäre Sicht)*: Aufgrund ihres immensen Energievorrats sind Sterne zwar sehr langlebig, können aber wegen ihrer Abstrahlung nicht ewig existieren. Wie lange ihre »Lebenszeit« auch immer ist, Sterne entstehen, existieren und sterben. Sie sind deshalb in großen Zeiträumen konsistente Gebilde, deren Werden und Vergehen in einer definierten Generationsfolge die kosmische Evolution der Materie in Richtung schwerer Elemente, zu chemischen Strukturen, zu wachsender Komplexität und schließlich, wenn auch vielleicht nur singular, zur Selbstorganisation und Leben durch den sogenannten kosmischen Materiekreislauf vorantreibt. Auch in diesem evolutionären Sinn – und nicht nur durch das Sonnenlicht – sind Sterne notwendige Bedingungen unserer menschlichen Existenz.

Jedes dieser Fenster impliziert einen spezifischen theoretischen Kontext, mit dem je nach Sicht – objekthaft oder prozesshaft – das in Rede stehende »Wesen« eines astronomischen Objekts einzufangen versucht wird. Nehmen wir z.B. »Sterne« und versuchen die an sich einfache Frage »Was sind für den Astrophysiker Sterne?« zu beantworten. Je nach der spezifischen fachlichen Orientierung des angesprochenen Wissenschaftlers oder dem Kontext seines aktuellen Denkens und Interesses werden wir sehr verschiedene Antworten erwarten können:

- Langlebige metastabile leuchtende Gaskugeln,
- natürliche Kernfusionsreaktoren zur Bildung schwerer Elemente,
- turbulente Dynamomaschinen zur Erzeugung großer Magnetfelder,
- effektive Neutrino-Quellen,

- Realisierung von Zuständen höchster Magnetfeldstärken und komplexen Quantenzuständen,
- Lieferanten von prozessierter Materie für das interstellare Medium,
- Quellen des Sternenstaubs,
- Motoren des kosmischen Materiekreislaufs und der chemischen Entwicklung der Materie,
- Hauptkonstituenten von Galaxien und Induktoren von mannigfachen kollektiven Phänomenen,
- notwendige Voraussetzung für Planetensysteme und Leben,
- etc.

Unter all diesen spezifischen Fragestellungen werden Sterne betrachtet und theoretisch beschrieben. Zu einem endgültigen Gesamtbild müssen alle diese Aspekte und ihre Konsequenzen auf einer gemeinsamen Basis der unterschiedlichen Beschreibungsebenen konsistent zusammengeführt werden, um schließlich modellhaft das Wesen der Sterne und ihre Rolle in der Astronomie angemessen zu verstehen.

Dies stellt seinem Ziel und seiner Natur nach ein in vielen Schleifen rückgekoppeltes, iteratives Problem dar. Für alle ins Auge gefassten Systeme hängen die Begriffe »Beschreiben«, »Modellieren«, »Verstehen« von den eingebrachten geeigneten Methoden und insbesondere dem gewählten Niveau des physikalischen und technischen Zugriffs ab, begründet durch die spezifischen, praktischen und theoretischen Erfordernisse der in Rede stehenden Fragestellungen, Phänomene, Prozesse etc., d.h. durch ihre in dieser Perspektive definierten »Fenster der Anschauung«, die für jede Klasse von Objekten, Phänomenen und Problemstellungen den Rahmen ihrer jeweiligen Beschreibung konstituieren.

Dieser Rahmen kann z.B. definiert sein durch die grundlegenden Annahmen über das globale und lokale Erscheinungsbild sowie die Eigenschaften eines Objekts oder durch die seine wesentlichen Phänomene bestimmenden ersichtlichen Längen- und Zeitskalen, aber natürlich auch durch den als angemessen erachteten Satz von physikalischen Grundgleichungen, welche für eine adäquate Beschreibung hinsichtlich einer ins Auge gefassten Fragestellung erforderlich sind, und nicht zuletzt durch die Auswahl dazu geeigneter mathematischer Methoden und die Konstruktion ihrer numerischen Lösungsstrategien. In dieser Sicht fokussiert jeder Beschreibungsansatz spezielle Aspekte des Gesamtproblems und liefert nur Projektionen gewisser Eigenschaften, d.h. partikuläre Erkenntnisse, welche ihrerseits unabdingbare Voraussetzung für die endgültige quantitative Modellierung eines Objekts und dessen umfassendes Verstehen sind. Auf diese Weise werden die wichtigen Bausteine erarbeitet,

aus welchen letztendlich der Gesamtbau unserer Objekte materiell und erkenntnismäßig zusammengefügt ist, und dessen Architektur somit wissenschaftlich offenbar wird.

Die hier anhand der Sterne exemplarisch vorgestellte wissenschaftliche Sicht und prinzipielle Herangehensweise gilt grundsätzlich auch im Hinblick auf alle anderen astronomischen Objekte und Vorgänge, wie Sternhaufen, Galaxien, Galaxienhaufen u.s.w., deren raumzeitliche Organisation und Evolution in sehr verschiedenen Perspektiven Gegenstand und Interesse praktischer Untersuchung und theoretischer Beschreibung sind – und in größter Ausweitung auch für unseren wissenschaftlichen Zugriff auf das Ganze des Universums selbst, welches in dieser Perspektive als evolutionäres System verstanden und interpretiert wird.

Unter dem Paradigma einer wissenschaftlich technischen Weltinterpretation sind wir als Astrophysiker im tiefsten überzeugt, für alle lokalen und globalen astronomischen Probleme und Fragenkomplexe hauptsächlich zuständig zu sein und die passenden Schlüssel für hier zu öffnende Türen, wenn nicht schon zu besitzen, so sie doch im voranschreitenden Wachsen unseres physikalischen »body of knowledge« irgendwann zur Verfügung zu haben. Zu beanspruchen, nicht nur die Teile, sondern stets auch das Ganze der physikalischen Wirklichkeit in den großen Rahmen ihrer Zuständigkeit zu nehmen und auf die hier zentralen Fragen Antworten zu erarbeiten, ist für fast alle Naturwissenschaftler seit jeher ausgesprochener Anspruch und somit kein unziemlicher Ehrgeiz, sondern tief im intensionalen Wesen der Naturwissenschaft, besonders der Physik und ihrer visionären Zielsetzung, begründet. Physik kann von daher grundsätzlich auch als Anstrengung verstanden werden, die einschlägigen Eigenschaften, in der Beschreibung ihrer Sachverhalte und Phänomene begrifflich, theoretisch und mathematisch so zu konzipieren, dass sie sich nicht nur am speziellen Teil, sondern bezogen aufs Ganze als leistungsstark, erkenntnisfördernd und aufschlussreich neustrukturierend erweisen.

Die atemberaubende Entwicklung der Astrophysik in den vergangenen 150 Jahren hat, begründet durch die Erkenntnisse und Theorien der Physik und die Verfügbarkeit höchster technischer Hilfsmittel, die Überzeugung gestärkt, dass die Wirklichkeit der Welt in menschlicher Sicht wesentlich physikalisch ist. In dieser Perspektive stellt sich das ganze Universum, von den kleinsten Bausteinen der Materie bis zu den größten beobachteten Ansammlungen von Galaxien, vorrangig als eine Domäne der Physiker, speziell der Astrophysiker, dar; es erscheint von diesem Fenster aus betrachtet als ein unermeßliches Laboratorium, in dem sich die Gegebenheit der Welt in Raum und Zeit naturgesetzlich vollzieht und in dieser Sicht studiert werden kann.

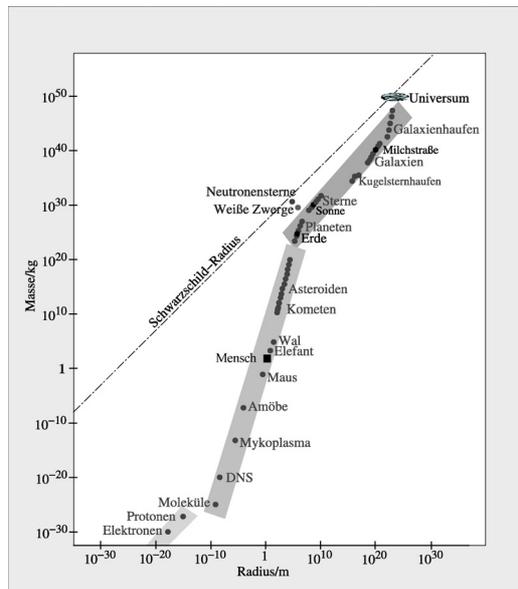


Abb. 3: Größen-Massen-Relation kosmischer Objekte.

Die bemerkenswertesten Ergebnisse dieser Untersuchungen sind:

1. Die im System der Physik formulierten und in irdischen Laboratorien geprüften Naturgesetze gelten in allen der astronomischen Beobachtung zugänglichen Bereichen des Kosmos und scheinen somit ubiquitärer Natur zu sein. Der Kosmos stellt sich uns, zumindest in all seinen uns zugänglichen Teilen, als *naturgesetzliche Einheit* dar, welche letztlich die Rechtfertigung und den großen Rahmen seiner physikalischen Beschreibung und Interpretation darstellt.

2. In allen Bereichen des Universums, über die sich unsere Beobachtungen erstrecken, ist die Materie aus den gleichen physikalischen und chemischen Grundbausteinen aufgebaut, wie sie auch auf der Erde oder in der Sonne vorkommen. Alle Materie im Kosmos bildet daher eine *stoffliche Einheit*, welche auf einen gemeinsamen Ursprung verweist, der mit dem großräumigen Aufbau des Universums und seiner Entwicklung zusammenhängen muss.

Gesetzliche und stoffliche Einheit des Kosmos sind in physikalischer Perspektive Grundtatsachen, die auf allen Größenskalen eine physikalische Erfassung der unterschiedlichen Systeme, nicht nur als isolierte individuelle Gegebenheiten, sondern als realisierte Teile eines Ganzen rechtfertigen, um sie im großen Zusammenhang zu beschreiben und in ihrem funktionellen Zusammenwirken zu erkennen.

Tabelle 1: Wechselwirkung/Grundkräfte

Wechselwirkung	starke Kraft	schwache Kraft	Elektromagnetismus	Gravitation
Reichweite	$\sim 10^{-15}\text{m}$	$< 10^{-17}\text{m}$	(unendlich) < 1km	unendlich
relative Stärke	1	$10^{-13}$	$10^{-2}$	$10^{-38}$
Wirkung auf	Quarks, indirekt auf Hadronen	Leptonen, Quarks	elektrisch geladene Teilchen	alle Teilchen

Um die kosmische Materieorganisation in diesem Sinne zu verstehen, betrachten wir die Abbildung 3, in der, von den kleinsten bis zu den größten Einheiten, die Objekte, abhängig von ihrer Masse und Größe, eingetragen sind.

Wir sehen, wider Erwarten, eine sehr einfache Anordnung. Ist dies ein Zufall oder ein Auswahlereffekt (zurückzuführen auf die Natur unserer Beobachtung!) oder offenbart sich hier ein universelles physikalisches Bauprinzip? Astronomische Objekte und ihre Bausteine müssen, damit sie von uns mit einer gewissen Häufigkeit beobachtet werden können, eine längerlebige Stabilität besitzen. Ihre aktuellen Zustände müssen somit realisierte Gleichgewichtszustände der sie bestimmenden Kräfte sein. Ein Stern ist beispielsweise in dieser Sicht ein (meta-)stabiler Gleichgewichtszustand, bewirkt durch die an jeder Stelle auftretende kontraktive Gravitationskraft und der entsprechenden expansiven Druckkraft, eine Galaxie ein Gleichgewicht zwischen der Gravitationskraft und den expansiven Zentrifugal- und Turbulenzkräften. Atome und Festkörper werden durch Gleichgewichte der elektromagnetischen Kräfte, Atomkerne durch entsprechende Kernkräfte stabilisiert.

In der Physik sind vier sogenannte *fundamentale Wechselwirkungen*, d.h. Kräfte, bekannt, auf deren Wirken die ganze beobachtete Materieorganisation ursächlich zurückgeführt wird. Betrachten wir die jeweilige Reichweite dieser Wechselwirkungen und ihre relative »Stärke«, sehen wir, dass *starke* und *schwache Wechselwirkung* für den subatomaren, *elektromagnetische Wechselwirkung* für den atomaren, molekularen und mesostopischen, die *gravitative Wechselwirkung* für den astronomischen Bereich relevant sind. Himmelsobjekte und noch mehr das Universum selbst werden also hauptsächlich von der Gravitation als strukturierender Kraft bestimmt.

Nach allgemeiner Auffassung versteht man heute unter dem Begriff Universum das prinzipiell größtmögliche System, als welches versucht wird, die »Welt als Ganzes« zu denken, sich objekthaft vorzustellen und abstrakt begrifflich zu fassen, und so im Sinne der antiken Kosmologen die Ur-Sache zu benennen, aus der die uns zugängliche Welt der Wahrnehmung hervorgegangen und gemäß der sie gestaltet ist.

In diesem Anspruch, in dem sich grundlegende Vorstellungen und Theorien der modernen Naturwissenschaft, Philosophie, religiöse Überlegungen sowie vielfältige spekulative Erwägungen berühren, liegt die auch für den Außenstehenden spürbare besondere Faszination derartiger Fragen, welche in ihrer Bedeutung weit über den engen Bereich der Wissenschaft hinauszielen. Aus diesem Grund taten sich Astronomie und Physik, trotz der Fülle von in Jahrhunderten akribisch zusammengetragenen Beobachtungsbefunden, schwer, eine akzeptable Formulierung der kosmologischen Fragestellung auf dem Boden ihres ureigenen Wissenschaftsverständnisses zu entwickeln und sie als wissenschaftlich im Rahmen der Kosmologie als Gravitationstheorie beantwortbar zu begreifen.

Kosmologie stellt die Frage nach dem »Universum als Ganzem«, seiner globalen Struktur, seinem Werden, seiner Zeitentwicklung und schließlich seinem finalen Schicksal. Im Rahmen der Physik ist diese Fragestellung nur sinnvoll, wenn nicht nur die Erscheinungsformen der Materie, sondern auch die fundamentalen Entitäten der realen Welt, *Raum* und *Zeit*, – etwa im Unterschied zu Anschauungsformen a priori bei Kant –, selbst als physikalische Objekte begriffen werden können, deren lokale und globale Struktur durch physikalische Gesetze und Zusammenhänge – genauer durch Gravitation – bestimmt ist.

Die heute allen kosmologischen Betrachtungen zu Grunde liegende Gravitationstheorie ist die 1916 von Albert Einstein geschaffene Allgemeine Relativitätstheorie, in der die Gravitation als geometrische Eigenschaft (Krümmung!) der vierdimensionalen Raum-Zeit verstanden wird, welche einerseits durch die Materieerfüllung des Raumes bestimmt ist, andererseits aber gerade dadurch eben auch die räumliche Organisation der Materie und ihre Dynamik (Gravitation!) festlegt. In dieser gegenseitigen Bedingtheit von Raum-Zeit-Struktur und Materieorganisation liegt der Schlüssel, der uns erlaubt, nicht nur das materielle Verhalten der kosmischen Objekte, sondern auch die damit induzierte Raum-Zeit-Dynamik geschlossen zu beschreiben.

Da die hier maßgeblichen Einsteinschen Gravitationsgleichungen nur lokal gelten, erfordert deren Anwendung auf das »Universum als Ganzes« eine zusätzliche Generalisierungsannahme, welche man als *kosmologisches Prinzip* bezeichnet. Das kosmologische Prinzip ist ein durch die Beobachtungen motiviertes (Isotropie der Hubble-Expansion, Homogenität und Isotropie der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, Homogenität der großräumigen Materieverteilung), aber letztlich physikalisch nicht weiter begründbares Postulat. Es besagt, dass der unseren Beobachtungen zugängliche Ausschnitt des Universums für das Ganze repräsentativ ist, genauer; dass das Universum über entsprechend große Volumina ge-

mittelt, sowohl hinsichtlich der mikroskopischen Bewegungsgesetze als auch dem beobachteten Zustand der fernen Umgebung gleich aussieht; das Universum soll also »im Großen« homogen und isotrop sein.

Ein solches Postulat wurde in seinem Kern bereits von Nikolaus von Kues in einem »theologischen Fenster der Anschauung« ausgesprochen, nach dessen Begründung die Welt überall ein Zentrum und nirgends einen Rand haben sollte, weil Mittelpunkt und Umfassung Gott selbst ist, der sich überall und nirgends befindet<sup>3</sup>.

Erst die im kosmologischen Prinzip formulierte Extrapolationsaussage, welche ihrem Wesen nach weder durch Beobachtungen noch sonst in irgend einer Weise global physikalisch zu begründen ist und die deshalb ein nicht weiter wissenschaftlich zu rechtfertigendes Weltanschauungselement in die Wissenschaft »Kosmologie« einführt, ermöglicht einerseits die Ausweitung des Anwendungsbereichs der gesicherten Erkenntnisse der lokalen Physik auf das ganze Universum, und damit die Konstruktion globaler kosmologischer Modelle, und andererseits deren Test an den Beobachtungen der zugänglichen Bereiche.

Das kosmologische Prinzip, als Grundannahme zur globalen Beschreibung der Welt, ist historisch gesehen das letzte Glied einer Reihe von Weltpostulaten, die ausgehend vom anthropozentrischen Standpunkt der mythenhaften Weltbilder der alten Kulturen über die geozentrische Auffassung der griechischen Astronomie und des Mittelalters zur heliozentrischen Weltansicht bei Copernicus und Kepler führten, um schließlich in unserem Jahrhundert, welches den gesamten Kosmos als physikalisches System begreift, den dazu adäquaten Ausdruck zu finden. Es enthält in seinem Wesen nicht nur die maximal mögliche Ausweitung des Gültigkeitsbereichs der Naturgesetze, sondern insbesondere auch die explizite Verneinung der Existenz sowohl eines definierbaren Mittelpunkts der Welt, als auch eines sonst irgend ausgezeichneten kosmischen Standortes, wie z.B. den der menschlichen Beobachter oder den der Erde bei Newton. Dies ist der Preis, der gezahlt werden muss, damit im Kontext der heutigen Physik die Frage nach der globalen Struktur des Universums und seiner Geschichte sinnvoll formuliert und beantwortet werden kann.

Die Frucht dieser Bemühungen sind sogenannte *Weltmodelle*, in welchen die zeitliche Evolution der Raumstruktur des Kosmos simultan mit den in ihm enthaltenen Energiefeldern (Materie, Strahlung, etc.) beschrieben werden. Mit dem kosmologischen Prinzip sind grundsätzlich drei Lösungstypen unterschiedlicher Geometrie der Raum-Zeit-Struktur verträglich, die jeweils einem hyperbolisch offenen, euklidisch offenen bzw. sphärisch geschlossenen Kosmos entsprechen. Welche dieser Mög-

3 Nicolaus de Cusa, *De Docta Ignorantia*, liber secundus, ed. P. Wilpert, Berlin 1967.

lichkeiten für unser Universum tatsächlich realisiert ist, kann nur durch Beobachtungen entschieden werden; nach dem heutigen Stand der Beobachtungen muss deutlich ein ewig expandierendes Modell favorisiert werden.

Die mit der kosmischen Expansion einhergehende zeitliche Abnahme der lokalen Energiedichte bestimmt zu jeder Epoche und an jeder Stelle die physikalischen Bedingungen, die für die Existenz und die Häufigkeit der jeweils vorkommenden unterschiedlichen Materie- und Feldkomponenten verantwortlich sind. Im frühen Universum überwiegt die Energiedichte der Strahlung bei weitem die Energiedichte der materiellen Teilchen. Man bezeichnet es deshalb als strahlungsdominiert. Energiedichte und Temperatur wachsen bei hinreichender Annäherung an den hypothetischen mathematischen Anfangspunkt, der dem Limes Weltalter entspricht, über alle Grenzen. Da es in der Physik aber keinen Sinn macht, von unendlichen Werten der physikalischen Größen zu sprechen, drückt sich in diesem Verhalten die Frage aus, bis wie tief in die Vergangenheit uns die bekannten Modelle verlässlich führen, wo zeitliche Grenzen liegen, jenseits derer Erweiterungen und Modifikationen unserer physikalischen Beschreibungen unumgänglich sind, ja ob es nicht eine letzte Grenze, d.h. einen frühesten Zeitpunkt gibt, jenseits dessen keine wissenschaftliche Erfassung mehr denkbar und damit jedes konkrete Sprechen über solche Zustände sinnlos ist. In dieser Phase des Anbeginns verlieren sich die Konturen einer rationalen Kosmologie, wodurch allen diesbezüglichen, gegenwärtigen physikalischen Extrapolations- und Beschreibungsversuchen dieser frühesten kosmischen Zustände unvermeidbar ein vorläufiger und hochgradig spekulativer Charakter anhaftet. Manche Autoren bezeichnen deshalb diese früheste Epoche des Universums nicht ganz unzutreffend als *Mythenära* der Kosmologie. Sie endet nach der sogenannten Planck-Zeit  $t_p$ , die dem unvorstellbar kurzen Zeitraum von  $10^{-43}$  s entspricht, nach dem man glaubt, wieder auf einigermaßen physikalisch gesichertem Boden zu stehen.

Darauf folgend lassen sich in der Entwicklung des Universums drei aufeinander aufbauende Zeitalter erkennen, welche sich hinsichtlich der jeweils herrschenden Bedingungen und Zustände, der maßgeblichen physikalischen Prozesse, sowie der hierfür erforderlichen konzeptionellen Beschreibungen unterscheiden, in der sich stufenhaft die Entwicklung des Kosmos und seiner Materieorganisation vollzieht:

- die Ära der Elementarteilchen ( $t_p < t < 10^{-10}$  s)<sup>4</sup>,

---

4 Zeitangaben nach dem kosmologischen Standardmodell, d.h. für  $\Lambda = 0$ .

- die Ära der Nukleonenbildung, der primordialen Kernsynthese und des Wasserstoff-Helium-Plasmas ( $10^{-10} \text{ s} < t < 300\,000 \text{ Jahre}$ ),
- die Materie-Ära, d.h. der Zeitraum der Galaxien, Galaxienhaufen und Sterne ( $300\,000 \text{ Jahre} < t < \text{heute}$ ).

In dieser letzten Ära des kalten Universums findet im kosmischen Materiekreislauf der Galaxien die Herausbildung von komplexen chemischen Strukturen statt und schließlich das Entstehen lebendiger Formen, als dessen höchste Stufe sich der Mensch betrachtet. Dieser Sachverhalt erfordert aber seinerseits eigene »Fenster der Anschauung« auf Bereiche, welche jedenfalls heute, noch außerhalb des astronomisch-physikalischen Kontexts liegen und hier nicht behandelt werden sollen, obwohl wir überzeugt sind, dass auch solche Fragen, wie die nach »Leben im Weltall« wesentlich astronomische Fragen sind.

Im umfassendsten »Fenster der kosmologischen Anschauung«, in dem letztlich alle partikulären astronomischen Fenster als referentieller Hintergrund und wenigstens im Prinzip falsifizierbarer Faktenzusammenhang enthalten sind, stellt sich uns das Universum als ein in vielen Aspekten und in weiten Zeiträumen physikalisch verständliches evolutionäres System dar, das entlang seiner Zeitpfeile von Determinismus und kausaler Prozesshaftigkeit, aber ebenso auch von Nichtlinearität, Chaos und momentaner und lokaler Unvorhersagbarkeit bestimmt ist.

In der ersten Phase des Anbeginns verliert sich die Beschreibungskraft unserer gesicherten Theorien, so dass heute darüber keine verlässlichen wissenschaftlichen Aussagen möglich sind. Hier lösen sich die physikalischen Theorien in mathematische Konzepte auf (Supergravitation, Stringtheorie), mit welchen, bisher jenseits jeder Möglichkeit einer experimentellen Überprüfung oder astronomischen Beobachtung, versucht wird, hinter den Vorhang der Planckzeit zu blicken. Solche Anstrengungen werfen ein Schlaglicht auf die Rolle der Mathematik als Grundingredienz aller unserer physikalischen Theorien, auf die alte, vielleicht ewig unbeantwortbare Frage, warum Mathematik so ungemein erfolgreich auf die Beschreibung der Natur passt, ja die Natur auf alle gestellten physikalischen Fragen wesentlich mathematisch antwortet. Es ist nicht entschieden, ob Mathematik ein wie auch immer in der Welt bereits vorhandenes und daher von den Mathematikern zu findendes Ingredienz ist, oder ein immanentes, spezifisches Element des Baus und der Struktur unseres Gehirns und unseres Bewußtseins selbst, in dem sich die kosmischen Gegebenheiten spiegeln und damit im Urgrund unseres Denkens – und somit auch unserer Theorien – die astronomischen Fen-

ster der Anschauung evozieren, eingedenk von Goethes Maxime: »Das Höchste wäre zu erreichen, dass alles Faktische schon Theorie ist.«<sup>5</sup>

---

5 J.W. von Goethe, Einzelne Betrachtungen und Aphorismen über Naturwissenschaft im Allgemeinen, Weimarer Ausgabe II, 131.