

# II Strahlung, Instrumente und Beobachtungs- verfahren



# Entwicklung astronomischer Beobachtungsverfahren

## Historische Einführung in die Erschließung des elektromagnetischen Spektrums

Die großen Fortschritte der Forschung sind oft geknüpft an die Erfindung oder Einführung neuartiger *Instrumente*. Das Teleskop, die Uhr, die photographische Platte, Photometer, Spektrograph und schließlich das gesamte Arsenal der modernen Elektronik und die Weltraumfahrt kennzeichnen je eine Epoche astronomischer Forschung. Ebenso wichtig aber – dies wollen wir nicht vergessen – ist die Schaffung neuer *Begriffe* und Ansätze zur Analyse der Beobachtungen. Geniale wissenschaftliche Leistungen beruhen eigentlich immer auf einem Ineinandergreifen neuer Begriffsbildungen und instrumenteller Entwicklungen, die nur miteinander den Vorstoß in bisher unbekannte Bereiche der Wirklichkeit bewerkstelligen können. „Wonder en is gheen wonder“ möchte man mit Simon Stevin (1548–1620) dazu bemerken.

Die Erfindung des *Fernrohrs* (G. Galilei 1609, J. Kepler 1611) eröffnete der Astronomie eine neue Epoche mit ungeahnten Beobachtungsmöglichkeiten durch die enorme Steigerung der Vergrößerung und der Lichtstärke.

Ausgehend von Galileis Linsenfernrohren mit nur etwa 2 cm Öffnung wurden immer größere Fernrohre entwickelt bis hin zu den Teleskopen des 20. Jahrhunderts mit Spiegeln (in einem Stück) von 3.5 bis 6 m Durchmesser. Die 1990er Jahre brachten dann den Bau und z. T. auch den Einsatz einer neuen Generation von *Großteleskopen*, die aus mehreren Teilen zusammengesetzt und durch aktive und adaptive Optik unterstützt sind und deren Spiegelflächen äquivalenten Durchmessern von 10 bis 20 m entsprechen.

Der zugängliche Spektralbereich bei *visueller* Beobachtung ist durch die Empfindlichkeit des Auges bedingt: das sichtbare Licht nimmt nur einen kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums von etwa 400 bis 750 nm Wellenlänge ein, vom Violett über Blau, Grün und Gelb zum Rot. Erst im 19. Jahrhundert kam mit der *photographischen Platte* für die astronomische Beobachtung ein Empfänger auf, der gegenüber dem Auge zum einen das einfallende Licht aufintegriert und „speichert“, zum anderen über den sichtbaren Bereich hinaus empfindlich ist. Schließlich gelang in

den 1970er Jahren die Entwicklung hochempfindlicher *Festkörperdetektoren* – wie des CCD, eines „ladungsgespeicherten“ Detektors (Charge-Coupled Device) – mit fast vollständiger Quantenausbeute und damit eine weitere Steigerung bei der Beobachtung extrem schwacher, vor allem extragalaktischer Lichtquellen.

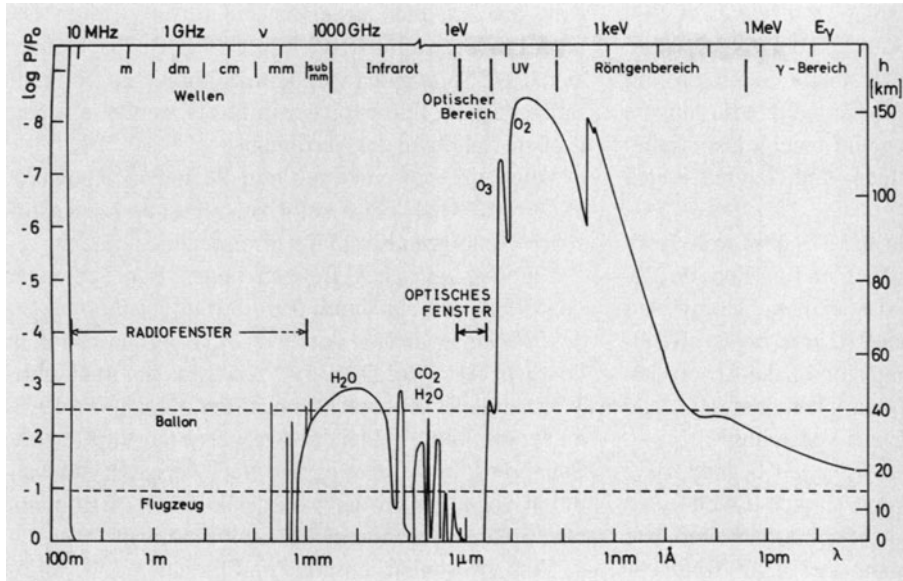
Der zugängliche Wellenlängenbereich für astronomische Beobachtungen vom Erdboden aus wird durch die Durchlässigkeit der *Erdatmosphäre* bestimmt (Abb. II.1).

Das „optische Fenster“ umfaßt außer dem sichtbaren Bereich noch das nahe Ultraviolett und das nahe Infrarot. Es wird auf der kurzwelligen Seite durch die Absorption des atmosphärischen Ozons  $O_3$  bei etwa  $\lambda = 300$  nm begrenzt, auf der langwelligen Seite durch die Absorption des Wasserdampfes  $H_2O$  bei etwa  $\lambda = 1 \mu\text{m}$ ; bis etwa  $20 \mu\text{m}$  sind noch Beobachtungen in einigen schmalen Fenstern möglich.

Erst im Radiofrequenzbereich wird die Erdatmosphäre wieder durchlässig. Das „*Radiofenster*“ wird auf der kurzwelligen Seite bei  $\lambda \simeq 1$  bis 5 mm bzw.  $\nu \simeq 300$  bis 60 GHz begrenzt durch die Absorption des atmosphärischen Wasserdampfes und Sauerstoffs, auf der langwelligen Seite bei  $\lambda \simeq 50$  m bzw.  $\nu \simeq 6$  MHz durch die Reflexion in der Ionosphäre.

Obwohl H. Hertz bereits 1888 die Ausbreitung der langwelligen elektromagnetischen Wellen im freien Raum entdeckte, waren die Empfänger noch lange Zeit zu unempfindlich, um Radiostrahlung von kosmischen Quellen nachzuweisen. Erst 1932 entdeckte K. G. Jansky bei seiner Suche nach Rundfunkstörungen durch atmosphärische Gewitterentladungen zufällig die Radiostrahlung der Milchstraße im Meterwellenbereich ( $\lambda = 12$  bis 14 m). G. Reber führte ab 1939 mit einem 9.5 m-Parabolspiegel (im Garten seines Hauses!) eine Himmelsdurchmusterung bei  $\lambda = 1.8$  m durch. Während des 2. Weltkrieges (1942) fanden mit den inzwischen verbesserten Empfängern der Radargeräte J. S. Hey und J. Southworth die Radiostrahlung der gestörten und der ruhigen Sonne.

1951 entdeckten – nachdem H. C. van de Hulst sie vorhergesagt hatte – verschiedene Forscher in



**Abb. II.1.** Durchlässigkeit der Erdatmosphäre gegenüber elektromagnetischer Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  (untere Skala) und der Frequenz  $\nu$  bzw. der Photonenenergie  $E_\gamma = h\nu$  (obere Skala). Eingezeichnet ist die Höhe  $h$  [km] (bzw. der entsprechende Druck  $P$  in Einheiten des Bodendrucks  $P_0 \approx 1$  bar), bei welcher die einfallende Strahlung um die Hälfte geschwächt wird, sowie die ungefähre Maximalhöhe für die Beobachtung von Flugzeugen und Ballonen aus

Holland, USA und Australien fast gleichzeitig die 21 cm-Linie des interstellaren Wasserstoffs, deren Dopplereffekt enorme Möglichkeiten zur Erforschung der Bewegungen der interstellaren Materie in unserem Milchstraßensystem und anderen kosmischen Gebilden bot. Seit den 1950er Jahren führte die Konstruktion von Einzelteleskopen und verschiedenartigsten Antennensystemen nach dem Prinzip der Interferometrie und der Apertursynthese (M. Ryle) mit ständig verbesserter Winkelauflösung und die Steigerung der Nachweisempfindlichkeit durch besonders rauscharme Verstärker zu einer geradezu explosiven Entwicklung der Radioastronomie. Durch die Langbasisinterferometrie mit transkontinentalen Basislängen wird inzwischen eine Winkelauflösung von weniger als  $10^{-4}$  Bogensekunden erreicht, welche die Genauigkeit optischer Beobachtungen bei weitem übertrifft.

Etwa ab 1970 konnten aufgrund der Fortschritte vor allem der Verstärkertechnik die radioastronomischen Beobachtungen auf den Bereich der Millimeter- und schließlich der Submillimeterwellen ausgedehnt werden.

Die Beobachtungen außerhalb der Lufthülle unserer Erde mit Raketen und vor allem mit Satelliten und Raumsonden erschließt der Astronomie zunächst alle die Spektralgebiete, welche von der Erdatmosphäre vollständig absorbiert werden: Das durch atmosphäri-

sche Wasserdampf- und Sauerstoffbanden absorbierte mittlere und ferne Infrarot zwischen 20 und  $350 \mu\text{m}$  sowie das kurzwellige Ultraviolett jenseits der Durchlässigkeitsgrenze des atmosphärischen Ozons  $O_3$  bei  $\lambda = 285 \text{ nm}$ , das anschließende Lymangebiet, wo hauptsächlich der atmosphärische Sauerstoff  $O_2$  absorbiert, dann die Röntgenstrahlen und schließlich die Gammastrahlen. Während wir das Sonnenspektrum von den Wellenlängen im Radiobereich bis zum Röntgengebiet stetig verfolgen können, müssen wir im galaktischen und extragalaktischen Bereich an das Lymankontinuum der interstellaren Wasserstoffatome (Abschn. 10.2) denken, dessen Absorption bei  $\lambda = 91.2 \text{ nm}$  sehr kräftig einsetzt und erst wieder im Röntgengebiet unterhalb von etwa  $\lambda = 1 \text{ nm}$  einen „Durchblick“ erlaubt.

Am Anfang der „Weltraumastronomie“ gleich nach Ende des 2. Weltkrieges stehen Beobachtungen mit Raketen, die während des Krieges in Deutschland entwickelt wurden, und später mit stabilisierten Forschungsraketen: 1946 gewann H. Friedman und seine Gruppe das erste Ultraviolettpektrum, 1948 T. R. Burnight das erste Röntgenbild der Sonne. Nach dem Start des ersten künstlichen Erdsatelliten Sputnik 1 (1957) setzte eine stürmische Entwicklung der Erkundung des Planetensystems und der astronomischen Beobachtungen durch Satelliten und Raumfahrzeuge ein, die wir zum Teil bereits in Abschn. 2.5 beschrieben haben.

Mit den Serien Orbiting Solar Observatory (OSO) und Orbiting Astronomical Observatory (OAO) standen ab den 1960er Jahren erstmals Satelliten mit ausreichender Positionsstabilisierung ( $\lesssim 1''$ ) für längere Beobachtungsreihen der Sonne und anderer kosmischer Quellen im Ultraviolett, Röntgen- und Gammabereich zur Verfügung.

Im *Ultraviolett* ermöglichte ab 1979 über viele Jahre der IUE-Satellit mit einem 0.45 m-Teleskop erfolgreiche Beobachtungen. Für das *extreme* Ultraviolett unterhalb der Lymanante bei 91.2 nm, dessen Beobachtung in vielen Blickrichtungen durch die Absorption des interstellaren Wasserstoffs stark behindert ist, stand 1992–2003 der Satellit EUVE zur Verfügung.

Die (nichtsolare) *Röntgenastronomie* begann 1962 mit der Zufallsentdeckung der starken Quelle Sco X-1 durch R. Giacconi und seine Mitarbeiter von einer Rakete aus. 1970 begann der erste Röntgensatellit UHURU seine Himmelsdurchmusterung; an größeren Satelliten waren dann ab 1978 das Einstein-Observatorium, ab 1990 ROSAT und ab 1999 Chandra sowie XMM Newton verfügbar.

In den 1970er Jahren erreichte auch die *Gammastrahlenastronomie* genügend hohe Winkelauflösung, um einzelne kosmische Quellen aufzulösen. Nach dem 1975 gestarteten Satelliten COS-B ermöglichte ab 1991 das Compton-Observatorium CGRO detaillierte Beobachtungen im Gammabereich. Die Astronomie im Bereich hochenergetischer Photonen hat sich somit mit ihrem neuartigen und ungewohnten Instrumentarium innerhalb weniger Jahre zu einem der interessantesten Forschungsgebiete entwickelt.

Im *Infrarot* müssen die meist schwachen Quellen gegenüber dem starken Hintergrund der Wärmestrahlung der Instrumente selbst und der Erdatmosphäre nachgewiesen werden. Durch die Entwicklung der gekühlten Halbleiterdetektoren erfuhren seit den 1960er Jahren die Beobachtungsmöglichkeiten der Infrarotastronomie zunächst von Stratosphärenballons und -flugzeugen,

dann von Satelliten aus einen steilen Aufschwung. Der erste Infrarotsatellit IRAS führte 1983 Beobachtungen aus; 1995/98 standen mit dem ISO und seit 2003 mit Spitzer Space Telescope der Infrarotastronomie wieder größere Satelliten zur Verfügung.

Auch im mm- und sub-mm-Wellenbereich wurde 1989 mit COBE ein Satellit zur Messung der kosmischen Hintergrundstrahlung erfolgreich eingesetzt.

Für den *optischen* Bereich bieten Beobachtungen vom Weltraum aus durch den Fortfall der Begrenzung der Winkelauflösung durch die Luftunruhe ebenfalls deutliche Vorteile. Das 1990 gestartete 2.4 m-Hubble-Weltraumteleskop brachte nach der Reparatur (1993) eines Abbildungsfehlers im Spiegelsystem eine enorme Steigerung der Auflösung und Nachweisgrenze und dadurch vor allem in der extragalaktischen Astronomie eine Fülle aufregender neuer Beobachtungen.

Zum Abschluß unseres einführenden Überblicks sollten wir noch einige astronomische Beobachtungsverfahren erwähnen, die nicht auf dem Nachweis elektromagnetischer Strahlung beruhen. Bereits 1912 entdeckte V. F. Hess bei einem Ballonaufstieg die Höhenstrahlung oder *Kosmische Strahlung*, die heute ein wichtiges Forschungsgebiet der Hochenergie-Astronomie bildet. Während die Sekundärteilchen dieser überwiegend aus energiereichen Protonen und schwereren Kernen bestehenden Strahlung nach Wechselwirkung in der oberen Atmosphäre vom Erdboden aus untersucht werden können, muß die primäre Strahlung außerhalb der Atmosphäre beobachtet werden.

Die Suche nach *Gravitationsstrahlung* kosmischer Quellen ist bisher ergebnislos verlaufen.

Das interessante Gebiet der *Neutrinoastronomie*, deren Anfänge auf R. Davis Jr. (1964) zurückgehen, ist zur Zeit noch auf die Sonne und auf besondere Ereignisse, wie den Ausbruch der Supernova SN 1987A in der benachbarten Großen Magellanschen Wolke, beschränkt.