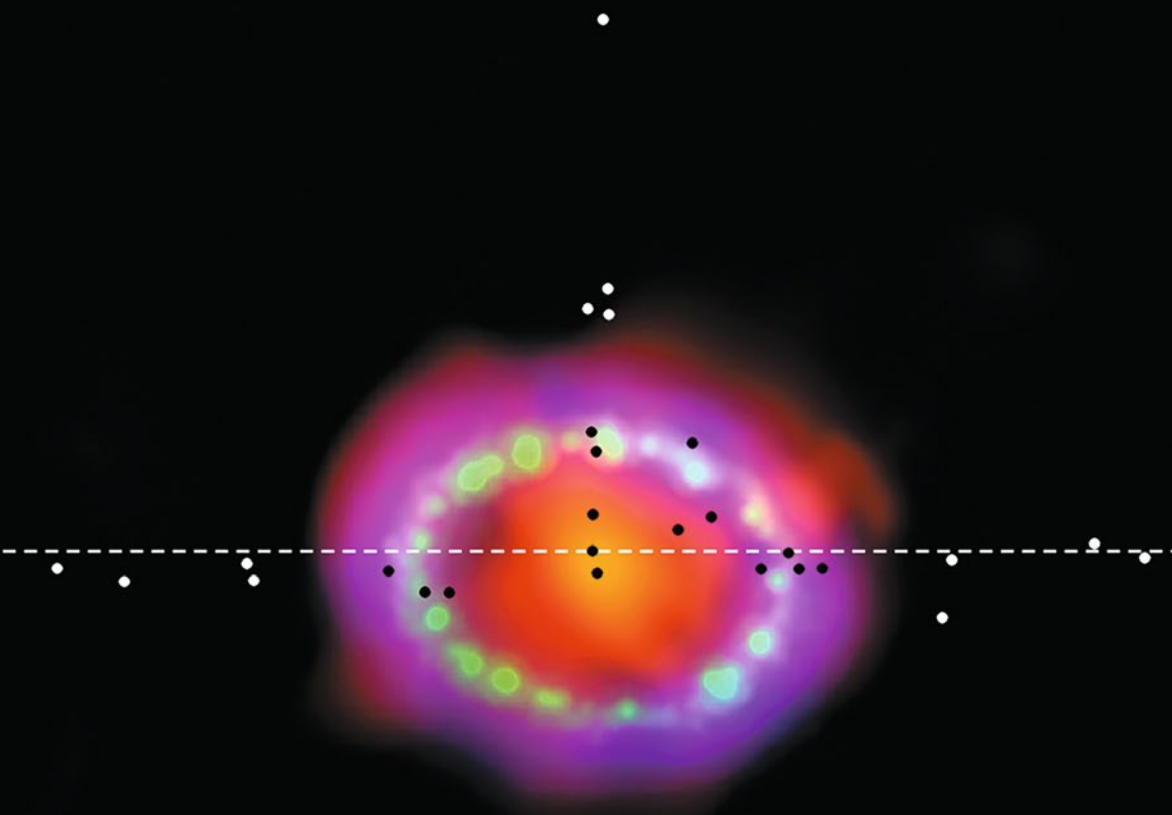


John Etienne Beckman

Multimessenger Astronomie



 Springer

Multimessenger Astronomie

John Etienne Beckman

Multimessenger Astronomie

 Springer

John Etienne Beckman
Instituto de Astrofísica de Canarias
San Cristóbal de la Laguna, Spanien

ISBN 978-3-031-36038-1 ISBN 978-3-031-36039-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-36039-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Übersetzung der englischen Ausgabe: „Multimessenger Astronomy“ von John Etienne Beckman, © Springer Nature Switzerland AG 2021. Veröffentlicht durch Springer International Publishing. Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Buch ist eine Übersetzung des Originals in Englisch „Multimessenger Astronomy“ von John Etienne Beckman, publiziert durch Springer Nature Switzerland AG im Jahr 2021. Die Übersetzung erfolgte mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (maschinelle Übersetzung). Eine anschließende Überarbeitung im Satzbetrieb erfolgte vor allem in inhaltlicher Hinsicht, so dass sich das Buch stilistisch anders lesen wird als eine herkömmliche Übersetzung. Springer Nature arbeitet kontinuierlich an der Weiterentwicklung von Werkzeugen für die Produktion von Büchern und an den damit verbundenen Technologien zur Unterstützung der Autoren.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Nature Switzerland AG 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Ramon Khanna

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Switzerland AG und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland

Gewidmet Leocadia Pérez González und Jaime Beckman Pérez.

Geleitwort

John und ich trafen uns zum ersten Mal in der National Scientific Ballooning Facility in Palestine, Texas. Wir versuchten beide, Experimente durchzuführen, die das Spektrum des kosmischen Mikrowellenhintergrunds messen sollten, der einige Jahre zuvor entdeckt worden war. Das Entscheidende für uns beide war, ob das Spektrum wirklich das eines schwarzen Körpers bei etwa 3 Grad Kelvin ist. In jenen Tagen war diese Messung wirklich schwierig; die Technologie für Beobachtungen bei einer Wellenlänge von etwa einem Millimeter war nicht gut entwickelt. Man musste seine eigenen Instrumente von Grund auf entwickeln, und darüber hinaus mussten die Detektoren sowie die Instrumente bei kryogenen Temperaturen arbeiten, die vergleichbar oder sogar niedriger waren als die Temperatur der Hintergrundstrahlung selbst. Der größte Feind war die Strahlung von allem bei Raumtemperatur (300 Grad Kelvin). Schon ein kleines Loch oder eine Nebenkeule des Strahls, der eine warme Oberfläche berührte, reichte aus, um die Messung zu ruinieren. Man konnte nicht vom Boden oder von einem hohen Berg aus beobachten, also entschieden wir uns beide, unsere Instrumente auf Ballons zu fliegen, die eine Höhe von 40 km erreichten und typischerweise 6 Stunden nächtliche Beobachtungszeit am Rande der Atmosphäre boten.

John und seine Gruppe hatten ein elegantes polarisierendes Interferometer entwickelt, das auf einem Entwurf seines Kollegen Derek Martin basierte, während meine Gruppe einen einfachen Satz von Bandpassfiltern verwendete; wir beide benutzten die gleiche Art von Detektor. Johns erster Versuch erbrachte keine Daten aufgrund eines zerstörerischen Ballonversagens, während unser Flug funktionierte, aber ein falsches Ergebnis aufgrund von Hochfrequenzleckagen im kritischen Kanal lieferte, der dazu bestimmt war,

den thermischen Peak des 3 K-Hintergrunds zu messen. Beide Teams setzten ihre Flüge fort. Bei einem späteren Flug sah John einen Peak im CMB-Spektrum, war sich aber der Kalibrierung nicht sicher. In unserem Fall mussten wir eine erhebliche Menge atmosphärischer Strahlung subtrahieren, um den Peak zu zeigen. Nach mehreren Jahren mit Flügen von vielen weiteren Gruppen und Instrumenten mit langsam verbesserten Ergebnissen war der Grundstein gelegt, um die NASA davon zu überzeugen, tatsächlich eine spezielle Raummission durchzuführen, um das Spektrum und die Winkelverteilung des kosmischen Hintergrunds zu messen sowie eine Untersuchung des Himmels im Infrarotbereich durchzuführen. Dies war die COBE-Mission, die erstmals 1972 von John Mather vorgeschlagen, aber erst 1989 durchgeführt wurde. Das Instrument, das zur Messung des Spektrums bei dieser Mission verwendet wurde, stammte von dem Interferometer, das John geflogen hatte.

John und ich trafen uns vor einigen Jahren wieder, als er mich einlud, an der Almeria Astronomy Week teilzunehmen, die im Juni 2018 in Almeria, Spanien, stattfand und Teil einer Feier der ersten direkten Entdeckung von Gravitationswellen war. Wir hielten gemeinsam einen Vortrag vor einer Gruppe von Amateurastronomen, die hauptsächlich Spanier waren und sich mit einem Vortrag in Spanisch wohler fühlten als in Englisch. Ich war etwas skeptisch gegenüber der Idee, aber es funktionierte gut. Ich zeigte eine Folie und beschrieb ihren Inhalt für ein paar Minuten auf Englisch, woraufhin John mit der richtigen Betonung und äquivalenten Begeisterung, einschließlich der ironischen Kommentare und Randbemerkungen, übersetzte. Was mich am meisten beeindruckte, war seine Tiefe des Verständnisses und seine Fähigkeit zu erklären. Während dieses Besuchs erzählte mir John von seinem ehrgeizigen Plan, dieses Buch zu schreiben.

Der Grund, warum ich Ihnen das alles erzähle, ist, dass das, was John durch diese Erfahrung mit dem 3 K-Hintergrund gelernt hat, zusammen mit der Breite seines Wissens, in diesem Buch allgegenwärtig ist und es zu einem einzigartigen Buch über Astronomie macht. (Wenn Sie sich für sein Interferometer interessieren, finden Sie es im Abschnitt über Infrarotastronomie, wo er es auf dem Überschallflugzeug Concorde einsetzte, um die Sonnenchromosphäre zu betrachten.) John erzählt Ihnen von der Astronomie, aber er erklärt auch die Physik und andere Wissenschaften, die mit den Quellen verbunden sind. Sie erfahren auch etwas über die Instrumente, die zur Durchführung der Beobachtungen verwendet werden, und genug über die Physik und Technik, um zu einzuschätzen, wie sie funktionieren und welche menschliche Erfindungsgabe in ihrem Design steckt.

Ich habe viel aus diesem Buch gelernt, insbesondere über einige der großen Rätsel in der aktuellen Astronomie und Astrophysik; genug, um gut genug gerüstet zu sein, sich in einige der technischen Arbeiten über diese Themen in der Literatur einzulesen, falls Sie dies wünschen. Vor allem zeigt John auf elegante Weise das Ausmaß der Wissenschaft die zum Verständnis unseres Universums und seiner Inhalte beiträgt. In der nächsten Ausgabe dieses Buches wird es wahrscheinlich ein Kapitel über Biologie und mögliche Beweise für Leben an vielen Orten im Universum geben. Viel Spaß beim Lesen.

Rainer Weiss, Emeritus Professor für Physik, MIT
Nobelpreisträger für Physik, 2017

Newton, Massachusetts, USA
November 2020

Rainer Weiss

Vorwort

Astronomie hat die Kraft, Wissenschaft, Kunst, Religion und populäre Kultur zu inspirieren. Sie ist eine der wenigen Wissenschaften, in denen Amateure bedeutende Beiträge leisten können und dies auch kontinuierlich tun, und sie ist der Ursprung der Bürgerwissenschaft, bei der die breite Öffentlichkeit mit Hilfe computergestützter Techniken zu Entdeckungen beitragen kann. Sie ist eine der ältesten und traditionellsten Wissenschaften, aber gleichzeitig erweitert sie ständig die Grenzen neuer Technologien, aufgrund der technischen Fähigkeiten, die erforderlich sind, um die unglaublich schwachen Signale zu erkennen, die uns aus dem gesamten Universum erreichen. Von der Zeit, als Galileo das erste moderne astronomische Instrument, das Teleskop, benutzte, bis fast zur Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts wurde all unser astronomisches Wissen im sichtbaren Licht erworben, obwohl der sichtbare Wellenlängenbereich nur einen kleinen Bruchteil des gesamten Spektrums der elektromagnetischen Strahlung ausmacht. Im neunzehnten Jahrhundert wurden der Astronomie zwei leistungsstarke Werkzeuge hinzugefügt: die Spektroskopie, die zur Erforschung der Zusammensetzung und der physikalischen Zustände von weit entfernten Objekten führte, und die Fotografie, die es Astronomen ermöglichte, Photonen von astronomischen Quellen zu sammeln und so Bilder von Objekten zu erhalten, die viel schwächer sind als es jemals mit dem bloßen Auge, selbst durch ein Teleskop, möglich ist, und daher immer mehr in die Tiefen des Raums einzudringen. Innerhalb der ersten drei Jahrzehnte des zwanzigsten Jahrhunderts wussten Astronomen, die nur sichtbares Licht verwendeten, bereits, dass es Galaxien außerhalb der Milchstraße gibt und dass das Universum auf den größten Skalen expandiert.

Die Radioastronomie war die erste der sogenannten „neuen Astronomien“. In den Vereinigten Staaten der 1930er Jahre hatten Radioexperten, die auch Amateurastronomen waren, Radiowellen von außerhalb der Erde entdeckt und können als Begründer der Radioastronomie betrachtet werden, aber diese Wissenschaft wurde erst durch die technischen Fortschritte während des Zweiten Weltkriegs zur Schaffung des Radars Wirklichkeit. Ich war in den 1940er und 1950er Jahren ein Junge und schon früh an Astronomie interessiert. In England lebend, lernte ich in diesen Jahren dieses neue Fenster zum Universum kennen und besuchte das Jodrell Bank Radio-Observatorium, das nicht weit von Sheffield entfernt war, wo ich lebte. Die neue Generation von Radioastronomen, zusammen mit einer klugen Gruppe von Theoretikern, gab das Tempo vor und betrachtete die optischen Astronomen als „altmodisch“. In vielerlei Hinsicht hatten sie recht, und ihr Einfluss war der Schlüssel zur anschließenden Wiederbelebung der britischen optischen Astronomie, als wichtige optische Teleskope auf Standorten weit entfernt von den bewölkten britischen Himmeln gebaut wurden. In der Zwischenzeit kartierten Radioastronomen in den Niederlanden, den Vereinigten Staaten, Australien und dem Vereinigten Königreich erstmals große Teile der Milchstraße in der Radioemission von atomarem Wasserstoff und durchdrangen nicht nur die bewölkten Himmel, sondern auch den Staub, der viele der interessantesten astronomischen Quellen in der galaktischen Ebene verhüllt. Sie erstellten auch eine Reihe wichtiger Himmelskataloge im Radio-Bereich. Dazu gehörte die berühmte Serie der Cambridge-Gruppe unter Ryle die ‚7C‘ erreichte, aber deren bekanntester 3C-Katalog viele Quellen enthielt, die in nichts dem Bekanntem im Sichtbaren Bereich entsprachen. In den frühen Tagen der Radioastronomie, Anfang der 1950er Jahre, wurden diese oft als „Radiosterne“ bezeichnet, aber im Laufe der Zeit und mit der Einführung anderer Techniken stellte sich heraus, dass fast alle von ihnen etwas ganz anderes waren als Sterne.

Zwei Jahrzehnte lang waren Radioastronomie und optische Astronomie die Hauptakteure des Fortschritts auf diesem Gebiet. In dieser Zeit machten die Radioastronomen zwei bemerkenswerte Entdeckungen: Quasare und Pulsare. Quasare waren „quasi-Sterne“, helle Punktquellen von Radioenergie, die in ihrer Position keinen bekannten Sternen entsprachen, nicht einmal schwachen Sternen. Bei Radio-Wellenlängen war es schwierig, die Position einer Quelle genau zu bestimmen, da die Winkelauflösung eines einzelnen Radioteleskops bei weitem nicht ausreichte. Ein Durchbruch gelang, als 1962 eine der starken Quellen 3C273 (Nummer 273 im dritten Cambridge-Katalog) beobachtet werden konnte, als sie vom Mond bedeckt wurde, und durch die genaue Zeitmessung des Verschwindens und Wieder-

auftauchens der Quelle konnte ihre Position mit nur einer kleinen Ungewissheit am Himmel gemessen werden. Die optischen Beobachter konnten diese Quelle dann mit einem ziemlich schwachen sternähnlichen Objekt identifizieren, dessen Fluchtgeschwindigkeit von uns jedoch bei einer Rotverschiebung von 0,16 lag; es entfernte sich anscheinend mit 16 % der Lichtgeschwindigkeit von uns. Dies war ein erstaunliches Ergebnis, denn aus diesem Wert der Rotverschiebung ergab sich unter Verwendung des Hubble-Lemaître-Gesetzes für das expandierende Universum eine Entfernung von über 2000 Millionen Lichtjahren, und die von ihm abgestrahlte Leistung musste der einer Galaxie ähneln, anstatt der eines Sterns. Wir sind heute daran gewöhnt, diese Objekte als supermassive Schwarze Löcher zu betrachten, die sich im Zentrum von Galaxien befinden und aufgrund der Umwandlung von Gravitationsenergie in andere Energieformen gewaltige Energien in einem kompakten Volumen erzeugen. Dies war eines der Anzeichen dafür, dass das Öffnen eines neuen Fensters zum Universum, in diesem Fall das Radiofenster, zu wichtigen Entdeckungen führen würde. Fünf Jahre später entdeckten die Radioastronomen mit den Pulsaren einen weiteren neuen Typ astronomischer Objekte, und diese schnell rotierenden, hochkompakten Sterne stellten sich als Neutronensterne heraus, die zentralen Kerne von viel massereicheren Sternen, die als Supernovae explodiert sind. Pulsare haben eine besondere Rolle dabei gespielt zu zeigen, dass die allgemeine Relativitätstheorie bisher die beste Beschreibung der Schwerkraft ist, und sie bildeten die besten Demonstrationen der Auswirkungen der allgemeinen Relativitätstheorie, bis 2015 erstmals Gravitationswellen gemessen wurden.

Nach der Radioastronomie begannen sich die elektromagnetischen Fenster zum Universum nacheinander zu öffnen. Da die Erdatmosphäre in allen Wellenlängenbereichen außer dem schmalen optischen Wellenband und einem großen Teil des breiteren Radiowellenbands vollständig oder teilweise undurchsichtig für Strahlung ist, wurden viele Fortschritte erzielt, als es möglich wurde, den Einflüssen der Atmosphäre zu entkommen (es ist natürlich kein Zufall, dass die Atmosphäre im optischen, d. h. im sichtbaren Wellenlängenbereich transparent ist; die Evolution hat dafür gesorgt, dass die Augen der Tiere in diesem Bereich am empfindlichsten sind). Dies wurde durch den Einsatz von Ballons, Flugzeugen, Raketen und vor allem Satelliten als Observatorien erreicht. Die Ära der Astronomie aus dem Weltraum, die in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts begann, ist nach allen Maßstäben das goldene Zeitalter der Astronomie. Die neuen Möglichkeiten regten die Erfindung neuer Techniken an, die insbesondere den Infrarot-, Röntgen- und Gammastrahlenbereich abdeckten. Auch das Sichtbare

und Ultraviolette profitierten von der Entwicklung elektronischer Detektoren, die die fotografische Platte ersetzen und eine um Größenordnungen verbesserte Empfindlichkeit ermöglichten. Um die Jahrtausendwende waren Astronomie und Astrophysik technisch in der Lage, einige der interessantesten Probleme der gesamten Physik anzugehen und Informationen über das Universum, seine Anfangsphasen und seine Entwicklung mit den Rätseln zu verbinden, die Teilchenphysiker faszinierten. Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung, die 1964 bei kurzen Radiowellenlängen entdeckt wurde, erwies sich als das direkt beobachtbarste Relikt des Urknalls, und ihre Untersuchung, kombiniert mit optischen und infraroten Studien von Sternen, Galaxien und dem intergalaktischen Medium im größten Maßstab, setzte die Kosmologie auf eine wissenschaftliche Grundlage, im Gegensatz zu den weitgehend spekulativen Modellen die im vorigen halben Jahrhundert vorherrschten, die sich auf gute Theorie (allgemeine Relativitätstheorie) stützten, aber nur auf begrenzte Arten von Beobachtungen. Dennoch stammten alle Informationen, die aus dem Kosmos gesammelt wurden, aus elektromagnetischen Wellen, wenn auch über einen Bereich von mehr als 20 Größenordnungen Wellenlängen (auch in der Frequenz und in der Energie). In gewisser Weise verließen wir uns immer noch fast ausschließlich auf eine einzige Art von Boten, um die Informationen über das Universum zu liefern. Ein großer Teil dieses Buches soll die praktischen Möglichkeiten beschreiben, wie diese neuen Astronomien funktionieren.

Tatsächlich gibt es noch einen anderen Informationsstrom von außerhalb der Erde, der seit dem ersten Jahrzehnt des zwanzigsten Jahrhunderts aktiv beobachtet wurde. Dies waren die kosmischen Strahlen, die eine falsche Bezeichnung für die hochenergetischen Teilchen sind, die aus dem Weltraum auf die Erde treffen. Diese Teilchen wurden erstmals mit relativ einfachen Geräten entdeckt, die während der Anfänge der neuen Wissenschaft der Radioaktivität entwickelt wurden, die zur Kernphysik werden sollte. Diese Teilchen haben Energien, die weit über denen liegen, die selbst in den größten Teilchenbeschleunigern erzeugt werden können, und bis Mitte der 1950er Jahre wurden sie verwendet, um neue Entdeckungen in der Teilchenphysik zu machen, anstatt astronomische Objekte zu erforschen. Sie waren viel billiger in der Anwendung als der Bau von Beschleunigern, und daher von großem Interesse für Teilchenphysiker, aber ihre Quellen konnten nicht leicht identifiziert werden, und sie waren daher von weniger direktem Interesse für Astrophysiker. Die Bahnen von Teilchen wie Protonen (Wasserstoffkerne), Elektronen und Alphateilchen (Heliumkerne) werden durch Magnetfelder gestört, wenn sie durch den interstellaren und intergalaktischen Raum fliegen, so dass es fast unmöglich ist, ihre Quellen direkt zu entdecken. Diese

Teilchen machen den größten Teil der kosmischen Strahlen aus, und wie wir sehen werden, stammen sie aus einigen der energiereichsten Prozesse im Universum und geben uns einzigartige Einblicke in diese Prozesse. Sie machen auch einen großen Teil dessen aus, was auf der Erde als Radioaktivität gefunden wird, und ihre Namen – Alphateilchen, Betateilchen (die Elektronen sind) und Gammastrahlen – spiegeln die experimentelle Entdeckung und Klassifizierung im späten neunzehnten Jahrhundert wider, bevor ihre Natur und detaillierten Eigenschaften verstanden wurden. Wir wissen jetzt, dass Gammastrahlen die höchste Frequenz mit der höchsten Energie der elektromagnetischen Strahlung haben. Das bedeutet, dass sie sich genauso wie Licht durch den Raum bewegen, ohne Abweichung durch Magnetfelder. Wir wissen auch, dass sie in ähnlichen Prozessen entstehen wie diejenigen, die kosmische Strahlen erzeugen, und in gewisser Weise sind sie die einzigen wahren kosmischen Strahlen, während die anderen Typen eigentlich kosmische Teilchen genannt werden sollten. Daher können wir Gammastrahlen- und kosmische Strahlendetektionen kombinieren, um mehr über Hochenergieprozesse wie Supernovaexplosionen und Akkretion auf schwarze Löcher zu erfahren, da die Gammastrahlen es uns ermöglichen, die Positionen der Quellen am Himmel zu bestimmen.

Zu den am schwersten fassbaren subatomaren Teilchen gehören die Neutrinos. Sie wurden erstmals in den 1930er Jahren vorhergesagt, um die fehlende Energie und den fehlenden Impuls in bestimmten Kernreaktionen zu erklären, aber ihre Wechselwirkung mit Materie ist im Allgemeinen so schwach, dass es sehr schwierig war, sie zu finden. Sie wurden erst in den 1950er Jahren als Produkte eines Kernreaktors entdeckt, der Neutrinos in solch riesigen Mengen produzierte, dass einige von ihnen mit der Apparatur der Physiker, die sie suchten, interagierten. In der gleichen Zeit konnte die Kernphysik eine detaillierte Erklärung für die Prozesse liefern, die die Energie der Sterne erzeugen. Für stabile Sterne wie die Sonne ist dieser Prozess die Fusion von vier Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern. Dies setzt Energie in Form von Gammastrahlen und auch Neutrinos im Kern der Sonne frei; für jeden gebildeten Heliumkern werden zwei Neutrinos erzeugt. Diese entkommen leicht aus der Sonne und bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit auf die Erde zu. Die Anzahl der Fusionen pro Sekunde im Zentrum der Sonne liegt nahe bei 10^{38} , was bedeutet, dass die Anzahl der Neutrinos, die durch einen Quadratmeter auf der Erde dringen, etwa 10^{15} pro Sekunde beträgt. Es ist ein Glück für uns, dass Neutrinos so schwach mit allen anderen Teilchen wechselwirken, denn diese Zahl liegt auch nahe bei der Anzahl der Neutrinos, die jede Sekunde durch Ihren Körper hindurchdringen. Der erste Schritt in der Neutrinoastronomie wurde in den

1960er Jahren unternommen, als eine kleine Anzahl von solaren Neutrinos mit einem „Neutrino-Teleskop“ in einer tiefen Mine detektiert wurde. Seitdem hat die Untersuchung von solaren Neutrinos uns viel über Neutrinos und etwas über das Innere der Sonne erzählt. Auf diese Weise wurde eine weitere Art von Boten etabliert. Hochenergetische Neutrinos aus Supernovaexplosionen wurden ebenfalls detektiert, und Neutrino-Teleskope befinden sich nun tief im Mittelmeer und unter dem antarktischen Eisschild.

Das Ereignis, das den Begriff „Multimessenger-Astronomie“ ins Blickfeld der Medien rückte, war die Entdeckung von Gravitationswellen im Jahr 2015. Im neunzehnten Jahrhundert hatte Maxwell die Theorie des Elektromagnetismus formuliert, welche die Bewegungen elektrischer Ladungen (später als Elektronen identifiziert) mit Energiewellen verband, die als Strahlung durch den Raum übertragen werden. Oszillierende Elektronen erzeugen elektromagnetische Wellen, und es sind diese Wellen, die Astronomen in ihrer großen Vielfalt von Radiowellen bis Gammastrahlen nutzen, um die Phänomene im Universum zu untersuchen. In Analogie dazu verknüpft Einsteins Gravitationstheorie bewegte Massen mit der Emission von Gravitationswellen. Die Gravitationskraft ist jedoch im Vergleich zur elektromagnetischen Kraft sehr schwach, und um nachweisbare Gravitationswellen zu erzeugen, sind enorme Massen in schneller Bewegung erforderlich. Einstein selbst, der zunächst an seiner eigenen Vorhersage zweifelte, kam schließlich zu der Überzeugung, dass Gravitationswellen ein reales Phänomen sein sollten, aber im Vergleich zu elektromagnetischen und nuklearen Phänomenen zu winzig, um jemals nachweisbar zu sein. In den Jahrzehnten seit seinem Tod wurden jedoch entscheidende Schritte unternommen, um zu zeigen, dass Gravitationswellen Realität und keine bloße theoretische Konstruktion sind. Einige dieser Schritte sind beobachtend, nämlich die Entdeckung durch herkömmliche Methoden von sehr kompakten Objekten mit großen Gravitationsfeldern wie Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Der andere Schritt ist technisch, nämlich der Bau von Detektoren, die empfindlich genug sind, um auf die winzigen Signale zu reagieren, die ausgesendet werden, wenn solche kompakten Objekte verschmelzen, wobei sie einen großen Puls von Gravitationswellen aussenden. Ich denke, dass die technische Leistung, die die Entdeckung von Gravitationswellen ermöglichte, voll und ganz auf dem Niveau der intellektuellen Leistung steht, die die allgemeine Relativitätstheorie hervorbrachte. Nach der ersten Entdeckung hat die Gravitationswellenastronomie ihren Platz als leistungsfähige Forschungsmethode eingenommen, um unser Verständnis der Gebiete im Universum zu vertiefen, in denen extreme Gravitationsfelder extrem energiereiche Phänomene erzeugen.

Aber in der weitreichenden und vollkommen gerechtfertigten Begeisterung über die neuen Möglichkeiten, das Universum mit Neutrinos und Gravitationswellen zu untersuchen, haben die meisten Menschen eine andere Möglichkeit vergessen, die wir haben, um das Universum zu untersuchen, und zwar direkt im Labor. Dies ist die Verwendung von meteoritischem Material. Meteoriten sind größtenteils die staubigen und felsigen Überreste von Kometen, die aus der Oberfläche eines Kometen in den interplanetaren Raum geschleudert wurden, wenn er sich bei Annäherung an die Sonne erwärmt. Diese Überreste verbleiben in den Bahnen der Kometen, und wenn die jährliche Bahn der Erde um die Sonne eine dieser Bahnen schneidet, fallen die Partikel durch die Atmosphäre, und die Größeren landen auf dem Boden. Die Lichtspuren, die durch das Verglühen der Partikel entstehen, sind Meteore, und die auf dem Boden landenden Gesteine sind Meteoriten. In den letzten fünfzig Jahren wurde die Kernchemie auf Meteoriten angewendet, um ihr Alter zu bestimmen, und die konventionelle Chemie hat ihre Zusammensetzung analysiert. Die gewonnenen Informationen geben uns viele Aufschlüsse über die Geschichte des Sonnensystems, einschließlich des Materials, das die Scheibe aus Partikeln bildete, aus denen die Planeten entstanden, und sogar über Partikel, deren Alter älter ist als das der Sonne. In jüngerer Zeit haben Raumfahrtmissionen Wissenschaftlern ermöglicht, ähnliche Proben direkt vom Mond, von Kometen und von Asteroiden zu sammeln. Auf der Erde wurden Meteoriten gefunden, die eindeutig von marsianischem Ursprung sind, und die Mars-Rover-Serie der NASA hat die *in situ* Analyse von marsianischem Gestein und Boden ermöglicht. Ich habe all diese Techniken in einen Korb gelegt, den ich „Hands-on-Astronomie“ genannt habe, und dies ist sicherlich ein sehr effektiver Bote von außerhalb der Erde und aus der Vergangenheit.

Als ich darüber nachdachte, dieses Buch zu schreiben, wollte ich dem Begriff „Multimessenger“ eine breite Bedeutung geben, die nicht nur die astronomischen Methoden einschließt, die keine elektromagnetische Strahlung verwenden, sondern auch das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Strahlungen. Die ursprüngliche Idee war, den Schwerpunkt auf die Techniken und die Art und Weise zu legen, wie die Messungen durchgeführt wurden, und die zweite Idee war, einige kurze historische Entwicklungsstränge darzustellen. Aber mir wurde schnell klar, dass ein vollständiges Buch, das auf diesen beiden Prinzipien basiert, enzyklopädisch wäre und weit über meinen Rahmen hinausginge. Daher musste ich Kriterien finden, um nur einen kleinen Bruchteil dessen auszuwählen, was möglich gewesen wäre. Ich fürchte, ich habe das Kriterium gewählt, Themen und Details einzubezie-

hen, die ich persönlich interessant finde. Das bedeutet, dass ich große Mengen an Informationen weglasse, die ebenfalls sehr interessant sind. Diese Auswahlweise bedeutet auch, dass ich den Feldern, in denen mein eigenes Wissen am geringsten ist, weniger gerecht werde. Obwohl ich ein eklektisches Interesse an Astronomie habe, wäre es absurd zu behaupten, dass ich in bestimmten Bereichen mehr als ein dünnes Wissen habe. Dies trifft insbesondere auf drei der Kapitel in diesem Buch zu, die über Ultraviolett(UV)-Astronomie, Gammastrahlen und „Hands-on“-Astronomie. Zwei dieser Kapitel habe ich auf spezifischen Übersichtsartikeln basiert, deren Autoren ich in den Danksagungen gewürdigt habe. Für das dritte Kapitel hatte ich das Glück, einen Experten zu finden, der bereit war, mir detaillierte Hilfe zu geben, die ich ebenfalls gewürdigt habe.

Es hätte keinen Sinn gemacht, nur über die Techniken und ihre Entwicklung zu schreiben, ohne einige der Entdeckungen einzubeziehen. Während ich jedes Kapitel schrieb und Illustrationen der beobachteten Objekte fand, wurde mir klar, dass viele der Objekte, die durch die neuen Boten in den Fokus gerückt werden, keine „normalen“ Sterne oder Planeten sind und viele von ihnen nicht einmal Galaxien. Die Tendenz besteht darin, sehr energiereiche Objekte hervorzuheben, die sich besonders im interstellaren Medium zeigen. Dies können Supernova-Überreste sein, die Zonen, in denen Supernovae in der jüngeren Vergangenheit explodiert sind und leuchtendes Gas hinterlassen haben, das sich mit Hunderten, sogar Tausenden von Kilometern pro Sekunde ausdehnt. Dieses Gas kann im optischen Bereich durch die Emissionslinien seiner ionisierten Elemente nachgewiesen werden, aber es sendet auch starke Radiowellen aus, die auf einen Prozess namens Synchrotronemission zurückzuführen sind an dem Magnetfelder beteiligt sind, sowie Röntgen- und Gammastrahlen; und der Staub, der aus den in der Supernova entstandenen schweren Elementen besteht, welcher im Infrarotbereich strahlt. Die Milchstraße hat eine beträchtliche Anzahl dieser Supernova-Überreste, aber auch Regionen aktiver Sternentstehung, die über einen weiten Wellenlängenbereich leuchten, insbesondere über den gesamten Infrarot- und Submillimeterbereich, ebenfalls aufgrund des im interstellaren Staub erzeugten Staubes. Die Milchstraße ist in vielerlei Hinsicht der Star, und wird in Anzahl und Vielfalt seiner Abbildungen nur von der Sonne übertroffen, die im Laufe der Jahre als Testobjekt für hochenergetische Bildgebung in der Astrophysik gedient hat. Ich hoffe, dass einige der in den verschiedenen Kapiteln des Buches abgebildeten Objekte als Verbindungsglieder dienen, um Einheit in der Vielfalt zu zeigen. Nicht alle Astronomie-Arten eignen sich für schöne Fotografien, wie sie regelmäßig im NASA Astronomy Picture of the Day (APOD) präsentiert werden, und ich habe nicht

gezögert, einige ziemlich technische Grafiken zu verwenden, um die Bedeutung von Ergebnissen zu erklären, insbesondere im Kapitel über Kosmologie, aber auch im weiteren Buch. Ich habe jedoch keine Gleichungen und nur relativ wenige Symbole verwendet, in der Hoffnung, dass interessierte Nicht-Wissenschaftler ihr Interesse aufrechterhalten können.

Während meiner wissenschaftlichen Laufbahn war ich ein aktiver Zeuge für die Erschließung vieler der hier beschriebenen neuen Wege durch das Universum. Dieses Buch kann ein erster Leitfaden sein, und für diejenigen Leser, die jung sind und die Herausforderung annehmen möchten, hoffe ich, dass sie in der Lage sein werden, einige dieser Wege intellektuell oder sogar physisch zu beschreiten und die immensen Felder zu entdecken, die der Menschheit im Weltraum bevorstehen.

San Cristóbal de la Laguna
Sta. Cruz de Tenerife
Dezember 2020

John Etienne Beckman

Danksagung

Bei der Vorbereitung dieses Buches habe ich viele Informations- und Bildquellen verwendet, und die jeweiligen Referenzen befinden sich in den Bildunterschriften. Die Abbildungen, die aus den wichtigsten Zeitschriften entnommen wurden: *The Astrophysical Journal*, *Astronomy & Astrophysics* und *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* werden alle mit ausdrücklicher Genehmigung dieser Zeitschriften und ihrer Trägerorganisationen sowie ihrer Autoren verwendet. Einiges an Hilfe verdient jedoch den besonderen Dank an Einzelpersonen. Zunächst möchte ich der LIGO-Kollaboration für die Erlaubnis danken, Abbildungen aus ihrer Arbeit zu verwenden; Martin Hendry für die Hilfe bei der Suche nach hochwertigen Abbildungen aus ihrem Archiv und vor allem Rainer Weiss für seine Hilfe bei historischen und technischen Inhalten.

Für das Kapitel, das sich mit der Analyse von Meteoritenmaterial befasst, freue ich mich sehr, die Hilfe von Larry Nittler anzuerkennen, der mein bisheriges eher dünnes Wissen mit dem Nutzen seiner tiefen und breiten Erfahrung ergänzt hat und mir auch Abbildungen zur Verfügung gestellt hat. Ich muss den Antares-, Ice Cube-, Kamiokande-, SNOLab-, dem AMS-Experiment, den MAGIC-Teleskopen, den CTA-Observatorien und dem Pierre Auger-Observatorium für die Erlaubnis danken, Bilder zu verwenden. Ich habe mich für die Kapitel, in denen mein bisheriges Wissen eine Steigerung benötigte, an zwei Übersichtsartikel gewandt, und ich bin den Autoren dieser Artikel dankbar, dass sie mir großzügig erlaubt haben, von ihrem Material zu lernen und es zu verwenden. Die Artikel sind: für Kapitel 4 über UV-Astronomie die Übersicht von Jeffrey Linsky „*UV astronomy throughout*

the ages: a historical perspective“ veröffentlicht in *Astronomy and Space Science*, Band 363, Seite 101, im Jahr 2018, und für Kapitel 6 über Gammastrahlen-Astronomie die Übersicht von Stefan Funk, „*Ground- and Space-based Gamma-Ray Astronomy*“ veröffentlicht in *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science*, Band 65, Seite 245, 2015. In beiden Fällen gibt es in diesen Übersichten viel mehr, als ich für das Kapitel in diesem Buch auswählen konnte; daher sind sie empfohlenes Lesematerial für Interessierte.

Ich habe von der Hilfe bei der Erstellung von Abbildungen durch Inés Bonet profitiert, von der Abteilung für Wissenschaftskultur und Öffentlichkeitsarbeit am Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Mein Freund und Kollege Terry Mahoney, ebenfalls vom IAC, gab mir viele nützliche Ratschläge aus seiner klugen Verlagserfahrung und er half mir erheblich, das Buch zusammenzufügen. Ich möchte auch Rebecca Roth, Image Coordinator und Social Media Specialist im NASA Goddard Space Flight Center, für ihre Hilfe bei allem NASA-Material danken, das zur Illustration des Buches benötigt wurde. Ich bin auch dankbar für die Erlaubnis, das ESA Image Gallery-Fotoarchiv zur Ergänzung der Illustrationen zu verwenden. Bei Springer erhielt ich ständige Hilfe und Ermutigung von den Herausgebern Ramon Khanna, Rebecca Sauter und Christina Fehling, während ich von Straive in Chennai die benötigte technische Hilfe beim Veröffentlichen von Dhivya Geno Savariraj erhielt.

Meine Kollegen am Instituto de Astrofísica de Canarias haben mir eine anregende Umgebung in der Beobachtungs- und experimentellen Astronomie geboten, in der es schwer wäre, nicht zu lernen. Ich möchte meinen Doktoranden und Postdocs herzlich danken, die mich im Laufe der Jahre unterrichtet und auf dem Laufenden gehalten haben, während die Astronomie immer schneller voranschritt.

Schließlich muss ich Leo, meiner Frau, dafür danken, dass sie Geduld hatte zu erkennen, dass die Astronomie zwar immer um ihre Zuneigung konkurriert hat, aber ohne ihre ständige Unterstützung wäre ich verloren, und Jaime, meinem Sohn, dafür, dass er mein Leben interessant gemacht hat, als ich vielleicht in Selbstzufriedenheit verfallen wäre.

Inhaltsverzeichnis

1	Optische Astronomie	1
1.1	Die Instrumente der optischen Astronomie	1
1.1.1	Teleskope	1
1.1.2	Spektrographen	10
1.1.3	Detektoren	18
1.2	Einige wesentliche Ergebnisse der optischen Astronomie	27
1.2.1	Fotometrische Messungen	27
1.2.2	Die Bedeutung der Cepheiden-Variablen	28
1.2.3	Optische spektroskopische Beobachtungen	45
	Weiterführende Literatur	50
2	Radioastronomie	51
2.1	Die Anfänge der Radioastronomie	51
2.2	Radioteleskope: ‚Single Dish‘-Teleskope und Interferometer	57
2.2.1	Frühe Interferometer und ihre Ergebnisse	64
2.3	Synchrotronstrahlung	68
2.3.1	Der Krebsnebel	69
2.4	Radio-Galaxien	70
2.4.1	Die Entdeckung von Quasaren	71
2.4.2	Die Entdeckung der Pulsare	73
2.4.3	Pulsare und die allgemeine Relativitätstheorie	77
2.5	CO und die drei Phasen des interstellaren Mediums	79
2.5.1	Molekulare Radioastronomie	80

2.6	Der kosmische Mikrowellenhintergrund	83
2.7	Very Long Baseline Interferometrie	84
2.8	Das Square Kilometre Array	87
	Weiterführende Literatur	89
3	Infrarot-Astronomie	91
3.1	Pioniere der Infrarotastronomie	91
3.2	Warum Astronomen das Infrarot nutzen möchten	93
3.3	Das Problem des interstellaren Staubs	95
3.4	Der Beginn der modernen Infrarotastronomie	98
3.5	Beobachtungsplattformen für die Infrarotastronomie	100
	3.5.1 Infrarotastronomie von Flugzeugen aus	101
	3.5.2 Infrarot-Astronomie-Satelliten	107
	Weiterführende Literatur	134
4	Ultraviolett-Astronomie	135
4.1	Warum Astronomie im Ultraviolett?	135
4.2	Ultraviolettbeobachtungen von Raketen und Satelliten	137
	4.2.1 Frühe UV-Beobachtungen von Raketen und Satelliten	137
	4.2.2 IUE	138
	4.2.3 Der Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE)	138
	4.2.4 Der Galaxy Evolution Explorer (GALEX)	139
	4.2.5 Das Hubble-Weltraumteleskop (HST) im UV	141
4.3	Spezifische Untersuchungen und Ergebnisse der UV-Astronomie	142
	4.3.1 Die Sonne	142
	4.3.2 Kometen, Planeten und Exoplaneten	143
	4.3.3 Vorhauptreihensterne und Kühle Sterne	147
	4.3.4 Heiße Sterne	148
	4.3.5 UV aus Schockregionen im interstellaren Medium	150
	4.3.6 Das interstellare Medium und die kosmische Deuteriumhäufigkeit	152
	4.3.7 Galaxien im UV	154
	4.3.8 Supernova 1987A	156
	4.3.9 Der Lyman- α -Wald, Quasare und die Reionisation des Universums	156
	Weiterführende Literatur	163

5	Röntgenastronomie	165
5.1	Erste Schritte in der Röntgenastronomie: Raketen, Ballons und frühe Satelliten	165
5.2	Röntgendetektoren und -teleskope	170
5.2.1	Streifende Inzidenzoptik: Einstein- und Rosat-Röntgensatelliten	172
5.2.2	Das Chandra-Röntgen-Observatorium	173
5.2.3	XMM-Newton	173
5.3	Was wir aus der Röntgenastronomie lernen	176
5.3.1	Welche Arten von Objekten erzeugen Röntgenstrahlen	176
5.3.2	Heiße Sterne, junge Sterne	184
5.3.3	Röntgendoppelsterne	185
5.3.4	Pulsare und Supernova-Überreste	187
5.3.5	Röntgenemission von Galaxien	191
5.3.6	Röntgenemission von Galaxienhaufen	193
5.3.7	Spectr-RG kartiert den gesamten Himmel in Röntgenstrahlen	197
	Weiterführende Literatur	198
6	Gammastrahlen-Astronomie aus dem Weltraum	199
6.1	Warum wird das Universum in Gammastrahlen beobachtet?	199
6.2	Was können wir konkret von der Gammastrahlen- Astronomie lernen?	200
6.3	Eine kurze Zeitachse der Gammastrahlen- Beobachtungen aus dem Weltraum	202
6.4	Gammastrahlen-Teleskope	204
6.5	Was uns die Gammastrahlen-Astronomie sagt	208
6.5.1	Der Gammastrahlen-Himmel	208
6.5.2	Gammastrahlen zur Rückverfolgung des Ursprungs kosmischer Strahlen: Supernova- Überreste	210
6.5.3	Gammastrahlen aus Pulsarwinden	214
6.5.4	Gammastrahlen-Detektion aus anderen Galaxien: Entweichen von kosmischen Strahlen ins intergalaktische Medium	215
6.5.5	Die Fermi-Blasen	217
6.5.6	Gammastrahlenausbrüche	217

6.5.7	Suchen nach Dunkle-Materie-Teilchen-Annihilation	221
	Weiterführende Literatur	223
7	Neutrino-Astronomie	225
7.1	Was ist ein Neutrino?	225
7.2	Sonnenneutrinos	230
7.2.1	Der Gesamtausstoß von Sonnenneutrinos	230
7.2.2	Einige Details zur Entstehung von Sonnenneutrinos	231
7.2.3	Detektion von Sonnenneutrinos	231
7.2.4	Das Rätsel der solaren Neutrinos	234
7.2.5	Kamiokande	236
7.2.6	Superkamiokande	238
7.3	Neutrinos von der Supernova 1987a	240
7.3.1	SNEWS, das Supernova-Frühwarnsystem	244
7.4	Neutrinos, Antineutrinos und die Asymmetrie des Universums	245
7.5	Hochenergie-Neutrino-Astronomie	246
	Weiterführende Literatur	251
8	Gravitationswellen-Astronomie	253
8.1	Gravitationswellen und Einstein	253
8.2	Indirekte Hinweise auf Gravitationswellen: Pulsare in Doppelsternsystemen	255
8.3	Theoretiker geben Gründe für die Nachweisbarkeit von Gravitationswellen	257
8.4	Experimente zur Detektion von Gravitationswellen	258
8.4.1	Joseph Webers Experimente	258
8.4.2	Auf dem Weg zu einem geeigneten Detektor	259
8.4.3	Der Michelson-Interferometer	260
8.4.4	Das LIGO-Konzept	262
8.4.5	Projekte, die den Einsatz von Laserinterferometern testeten	264
8.5	Das LIGO-Projekt: Konzeption und Umsetzung	265
8.5.1	Einige Details zu LIGO	267
8.6	Die erste Detektion von Gravitationswellen	272
8.6.1	Die Beobachtung	272
8.6.2	Die Interpretation	274
8.7	Der Strom der GW-Erkennungen beginnt	277

8.7.1	GW170817 Eine Quelle mit über 4000 „Messengers“	278
8.8	Die Zukunft der Gravitationswellenforschung	286
8.9	Anmerkung vor Drucklegung	290
	Weiterführende Literatur	292
9	Kosmische Strahlen? Kosmische Teilchen	293
9.1	Die Entdeckung der kosmischen Strahlung	293
9.2	Was sind kosmische Strahlen?	297
9.2.1	Zusammensetzung der kosmischen Strahlung und Häufigkeit der Elemente	297
9.3	Als kosmische Strahlen eine Schlüsselrolle in der Teilchenphysik spielten	301
9.3.1	Die Entdeckung des Positrons	301
9.3.2	Kosmische Strahlen führen zur Entdeckung einer Reihe von subatomaren Teilchen	303
9.4	Die Energieverteilung kosmischer Strahlen	304
9.5	Woher kommen kosmische Strahlen?	306
9.6	Kosmische Strahlenteleskope und Observatorien	307
9.6.1	Bodenbasierte Teleskope	307
9.6.2	Das Pierre-Auger-Observatorium	310
9.7	Lenkbare Teleskope für hochenergetische Gammastrahlen	312
9.7.1	Das MAGIC-Teleskop	313
9.7.2	Das Cherenkov-Teleskop-Array: Zukünftige Aussichten	317
	Weiterführende Literatur	319
10	Kosmologie und Teilchenphysik	321
10.1	Nukleosynthese im Urknall	321
10.2	Die Baryonendichte des Universums und Kandidaten für Dunkle Materie	330
10.3	Neutrino-Flavours	332
10.4	Der kosmische Mikrowellenhintergrund und Präzisionskosmologie	334
10.5	Wie Theoretiker die CMB-Anisotropien erklären	339
10.6	Der Urknall und die Asymmetrie von Teilchen und Antiteilchen	344

10.7	Suchen nach Dunkler Materie	345
	Weiterführende Literatur	350
11	Astronomie zum Anfassen: Meteoriten und Kosmochemie	351
11.1	Die Verwendung von Material aus dem Weltraum für die Astronomie	351
11.2	Meteoriten und was sie uns sagen können	352
11.2.1	Arten von Meteoriten	352
11.2.2	Präsolare Körner	354
11.3	Spezifische Proben extraterrestrischen Materials	359
11.3.1	Große Meteoriten	359
11.4	Kometenmaterial	363
11.4.1	Von einem Kometen zur Erde gebracht: Material vom Komet Wild 2	363
11.4.2	Andere Kometenmissionen	366
11.5	Missionen um Asteroidenmaterial zu erhalten	370
11.5.1	Vom Asteroiden Itokawa zur Erde gebrachtes Material	370
11.5.2	Hayabusa 2: Asteroid Ryugu	373
11.5.3	OSIRIS-REx: Asteroid Bennu	373
11.6	Mondgesteine	375
11.6.1	Sind die Tektite lunarer Herkunft?	378
11.7	Die Genesis Mission: Sauerstoffisotope im Sonnenwind	379
11.8	Mars-Meteoriten auf der Erde	381
11.9	In situ Messungen der Marszusammensetzung	384
	Weiterführende Literatur	387
12	Vergleich der Botschaften	389
12.1	Jupiter	389
12.2	Die Sonne	393
12.3	Die Milchstraße	393
12.4	Supernova-Überreste	397
12.4.1	Der Krebsnebel	397
12.4.2	Der Schleiernebel	404
12.4.3	Kassiopeia A	406
12.5	Die Andromedagalaxie	408
12.6	Epilog	413
	Anhang: Astronomische Distanz- und Energieeinheiten	415



1

Optische Astronomie

1.1 Die Instrumente der optischen Astronomie

1.1.1 Teleskope

Optische Astronomie, also die Astronomie im sichtbaren Wellenlängenbereich, ist die ursprüngliche Form dieser Wissenschaft, die ein Paradigma für die gesamte beobachtende Astronomie mit elektromagnetischen Wellen darstellt. Obwohl der Mensch seit Jahrtausenden den Himmel beobachtet und interpretiert, kam der Wandel zur modernen Wissenschaft erst mit der Erfindung des Teleskops. Das Konzept eines Instruments zur Verbesserung unserer Sicht über große Entfernungen wurde erstmals von dem deutsch-niederländischen Linsenmacher Hans Lippershey in praktischer Form umgesetzt, der 1608 ein Patent für seine Kombination aus einer konvergierenden und einer divergierenden Linse in einem Paar von gleitenden konzentrischen Röhren beantragte, die ein Bild von entfernten Objekten erzeugten und sie scheinbar viel näher an das Auge heranbrachten. Eine Beschreibung dieses Instruments erreichte Galileo Galilei, damals Professor an der Universität Pisa, der schnell sein eigenes herstellte und dann Teleskope mit zunehmender Leistung baute. Er benutzte sie, um den Mond zu beobachten und dessen Berge, Krater und Ebenen zu entdecken. Er beobachtete Jupiter, dessen vier Hauptmonde (die galileischen Monde) er als solche erkannte; Venus, deren Phasen er ebenfalls entdeckte; und die Sonne, wo er die Anwesenheit von Sonnenflecken bestätigte, die zuvor von Christoph Scheiner bemerkt

worden waren. Abb. 1.1 zeigt ein optisches Diagramm eines galileischen Teleskops.

Eine von Johannes Kepler im Jahr 1611 eingeführte Designänderung bestand darin, die konkave Okularlinse durch eine zweite konvexe Linse zu ersetzen. Dies erweitert das Sichtfeld und kann ein Bild außerhalb des Teleskops erzeugen, das auf eine Fläche zur Inspektion fokussiert werden kann. Der Nachteil dieser Teleskope ist die Inversion ihrer Bilder, was sie für terrestrische Anwendungen weniger wünschenswert macht, aber für die Astronomie kein wirkliches Problem darstellt.

Refraktoren, also Teleskope, die Linsen verwenden, spielten zwei Jahrhunderte lang eine Schlüsselrolle in der Astronomie, und viele kleine Refraktoren werden weiterhin weltweit eingesetzt. Sie haben jedoch mehrere Nachteile. Erstens hat Glas für verschiedene Wellenlängen des Lichts einen unterschiedlichen Brechungsindex, sodass eine einfache Linse Licht unterschiedlicher Farben auf unterschiedliche Brennpunkte fokussiert. Dieser Fehler wurde teilweise durch die Herstellung von „achromatischen“ Linsen aus mindestens zwei verschiedenen Glasarten überwunden (das gleiche Problem bei Kameras wurde auf ähnliche Weise gelöst). Zweitens muss eine Linse in einem Teleskop an ihren Rändern unterstützt werden, sodass eine große Linse dazu neigt, sich zu verformen,

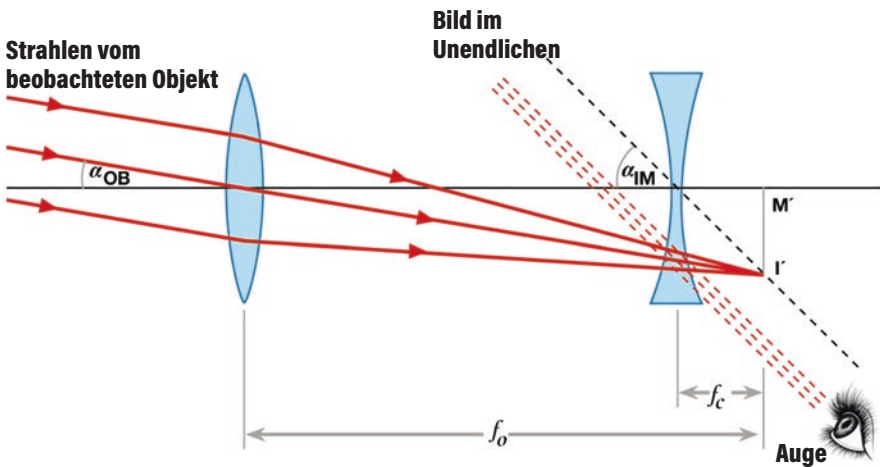


Abb. 1.1 Diagramm der Optik eines galileischen Teleskops. Die konvexe Objektivlinse würde ein invertiertes Bild $M'-I'$ erzeugen, aber die konkave Okularlinse erzeugt ein virtuelles Bild, das aufrecht, „unendlich weit entfernt“ und im Vergleich zum Objekt vergrößert ist, im Verhältnis α_{IM}/α_{OB} . Es könnte nicht verwendet werden, um Fotos zu machen! Credit: The Open University/IAC-UC3

wenn das Teleskop seine Ausrichtung am Himmel ändert. Dies setzt eine Grenze für die Größen von Refraktoren. Der größte jemals für den professionellen Gebrauch gebaute Refraktor befindet sich am Yerkes-Observatorium der University of Chicago. Er wurde in den frühen Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts in Betrieb genommen und stellte den Betrieb im Oktober 2018 ein. Viele der größten Astronomen der Welt stützten ihre frühen Forschungen auf dieses Teleskop, darunter Edwin Hubble, Subrahmanyan Chandrasekhar (ein Nobelpreisträger, dessen Name dem großen Röntgensatelliten Chandra gegeben wurde), der niederländisch-amerikanische Astronom Gerard Kuiper und der herausragende Popularisierer der Astronomie Carl Sagan. Abb. 1.2 zeigt den Yerkes-Refraktor im Jahr 1921.

Reflektierende Teleskope oder Reflektoren haben heutzutage Refraktoren in allen professionellen Observatorien ersetzt, und fast alle Amateurastronomen verwenden sie ebenfalls. Der erste Reflektor wurde von Isaac Newton



Abb. 1.2 Der 40-Zoll-Refraktor am Yerkes-Observatorium, U. Chicago, mit Mitarbeitern und Besucher Albert Einstein im Jahr 1921. Credit: University of Chicago Photographic Archive, [apf 6-00415], Special Collections Research Center, University of Chicago Library

entworfen und gebaut. Das Hauptfokuselement, der Primärspiegel, ist konkav und bringt das Licht auf den zentralen Achse des Teleskoprohrs in den Fokus. Newton platzierte einen kleinen flachen Sekundärspiegel im Rohr, der den Strahl ablenkt und den Fokus an der Seite des Rohrs herausbringt. Das Schema eines Newtonschen Reflektors ist in Abb. 1.3 dargestellt.

Dies funktioniert sehr gut für ein relativ kleines Teleskop, bei dem der Beobachter neben dem Instrument stehen und in das seitliche Rohr schauen kann. Bei größeren Teleskopen und vor allem bei der Beobachtung mit Instrumenten ist es jedoch viel bequemer, die Optik entlang der zentralen Achse auszurichten. Das grundlegende Design dafür wurde 1672 von Laurent Cassegrain vorgeschlagen, obwohl, wie bei fast allen Ideen, frühere Wissenschaftler ähnliche Vorschläge hatten. In seiner einfachsten Form hat ein Cassegrain-Reflektor einen konkaven Primärspiegel, der das Licht entlang der Achse des Teleskoprohrs zurück zum Fokus sendet, aber bevor es diesen Fokus erreicht, wird es von einem kleinen konvexen Spiegel abgefangen, der das Licht zurück zum Primärspiegel sendet. Ein kreisförmiges Loch im Primärspiegel lässt das Licht hindurch, um direkt dahinter in den Fokus zu gelangen, wo bei einem modernen professionellen Teleskop ein Instrument platziert wird, wobei bei kleineren Teleskopen dort auch ein Okular für direktes Betrachten angebracht werden kann. Ein Schema für einen Cassegrain-Reflektor ist in Abb. 1.4 dargestellt. Um die Aberrationen im Bild zu minimieren, ist der Primärspiegel normalerweise eine Parabel und der Sekundärspiegel eine Hyperbel, von denen beide nicht stark von einfachen

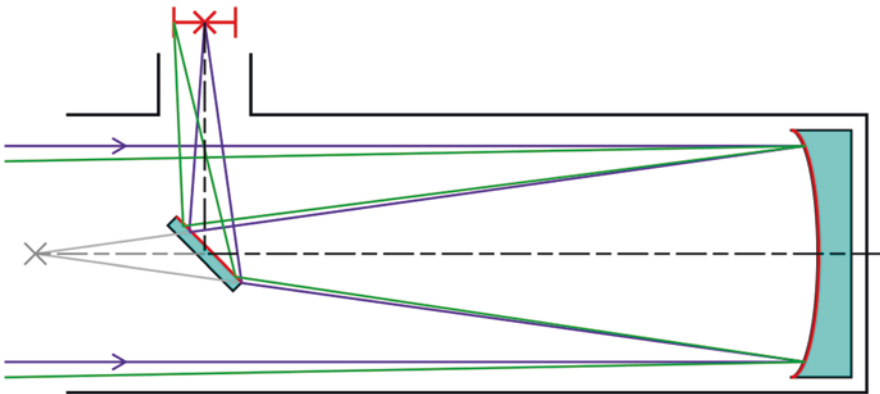


Abb. 1.3 Optisches Schema eines Newtonschen Reflektorteleskops. Das Licht tritt durch das Hauptrohr ein und wird durch den parabolischen Primärspiegel rechts und den kleinen flachen Spiegel in der Mitte auf einer Seite fokussiert. Credit: Newton-Teleskop.svg: Kizar derivative work: Kizar, CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>), über Wikimedia Commons

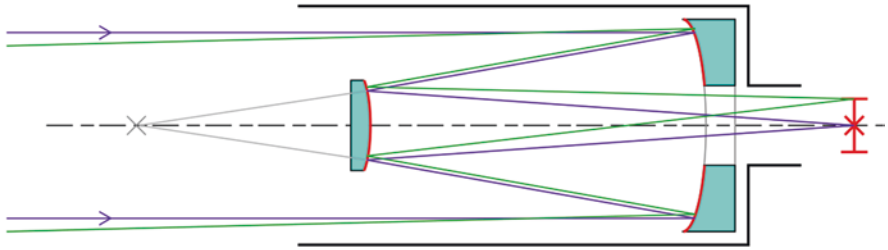


Abb. 1.4 Optisches Schema eines Cassegrain-Reflektorteleskops. Das Licht tritt von links ein und trifft zuerst auf den Primärspiegel am Ende des Rohrs. Es wird dann zurück zum Sekundärspiegel fokussiert, der es wieder reflektiert, um hinter dem Primärspiegel in den Fokus zu gelangen, wo Instrumente platziert werden können. Credit: Upload: Wikibob, Original: ArtMechanic on de.wikipedia, CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>), über Wikimedia Commons

sphärischen Oberflächen abweichen. Seit dem ursprünglichen Cassegrain-Design wurden eine Reihe von Verfeinerungen eingeführt, von denen das Ritchey-Chrétien-Format, das im frühen zwanzigsten Jahrhundert erfunden wurde, am weitesten verbreitet ist, bei dem sowohl Primär- als auch Sekundärspiegel hyperbolisch sind.

Reflektierende Teleskope waren in ihren Anfangstagen durch die Notwendigkeit eingeschränkt, die Spiegel aus Speculum-Metall herzustellen, einer Legierung aus zwei Teilen Kupfer und einem Teil Zinn, die eine angemessen reflektierende Oberfläche aufweist, aber leicht anläuft. Zu den frühesten großen Teleskopen, die Speculum-Metall verwendeten, gehörte das 1749 von William Herschel, dem Entdecker des Planeten Uranus, hergestellte Teleskop, das einen Primärspiegel mit einem Durchmesser von 49,5 Zoll hatte. Ein weiteres berühmtes Teleskop dieses Typs war das 72-Zoll-Teleskop, das 1845 von Lord Rosse hergestellt wurde und in Abb. 1.5 dargestellt ist.

Der Prozess des Versilberns der Vorderfläche eines Glasspiegels, der von Steinheil und auch von Foucault in den 1850er Jahren entwickelt wurde, machte Reflektoren effizienter, da Silber 90 % des einfallenden Lichts reflektiert, verglichen mit 65 % für Speculum-Metall. Aber Glasspiegel sind auch viel einfacher zu bearbeiten um ihnen die erforderliche präzise Form zu geben. Dies war der Auslöser, der zur universellen Verwendung von Spiegeln in großen Teleskopen führte, obwohl seit den 1930er Jahren Silber im Allgemeinen durch Aluminium ersetzt wurde, das weniger anfällig für Anlaufen bei Kontakt mit Luft ist. Trotzdem aluminisieren die meisten großen astronomischen Observatorien ihre Spiegel regelmäßig und haben dazu eine spezielle Vakuumkammer vor Ort. Vom späten neunzehnten Jahrhundert bis zum späten zwanzigsten Jahrhundert wurden Einzelspiegelre-