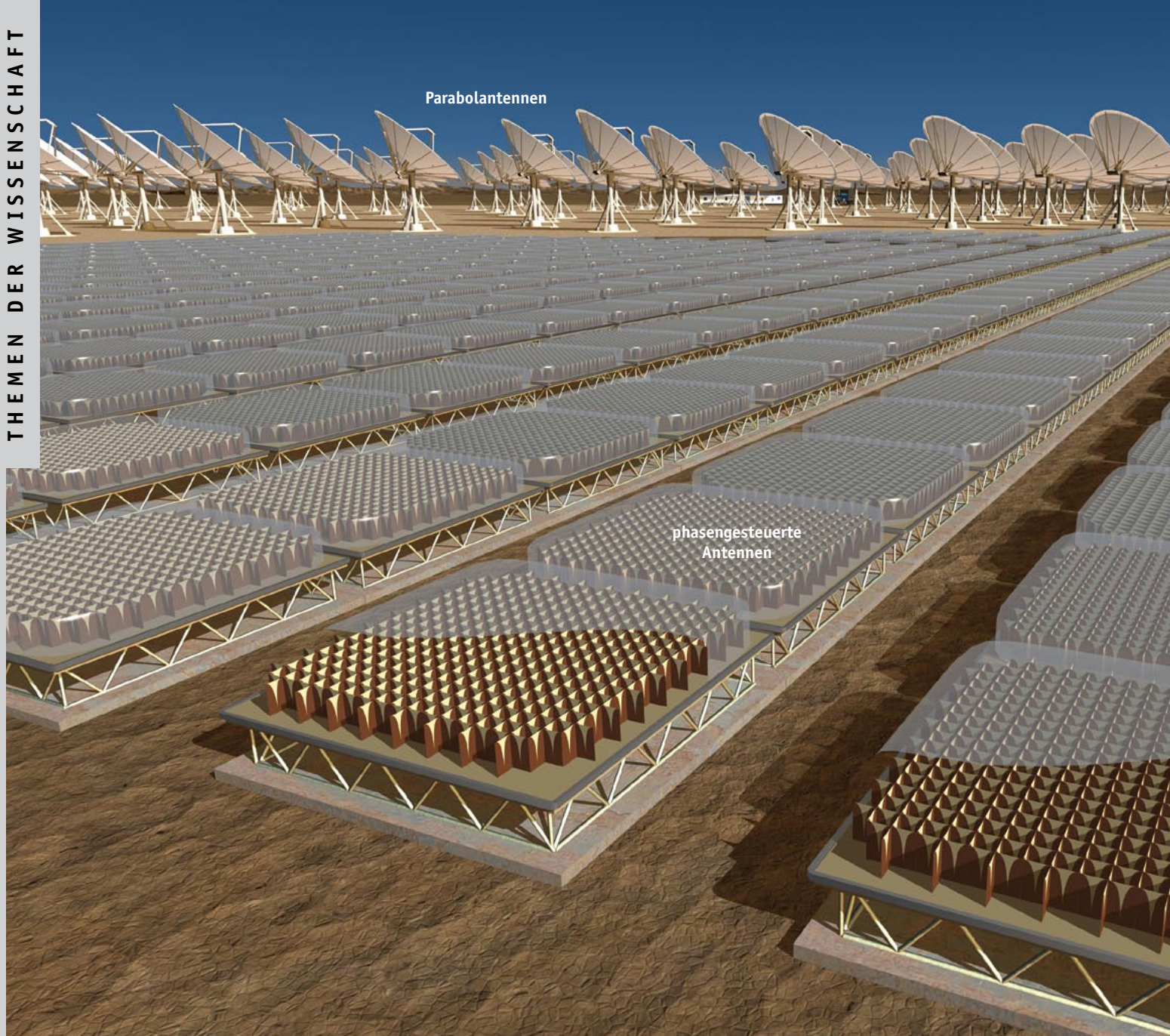




Parabolantennen

phasengesteuerte
Antennen

Das Square Kilometre Array

Ein Radioteleskop der Superlative

Das geplante Square Kilometre Array (SKA) soll das internationale Radioteleskop für das 21. Jahrhundert werden. Ein Quadratkilometer Sammelfläche bedeutet eine rund hundertfache Steigerung der Empfindlichkeit gegenüber heutigen Radioteleskopen. Das SKA soll nach den ersten Strukturen im Universum suchen, die Natur der Dunklen Energie erkunden, den Ursprung des Magnetismus im Kosmos finden, Gravitationswellen nachweisen und die Allgemeine Relativitätstheorie mit bislang unerreichter Präzision testen. Daneben sind Entdeckungen vieler neuartiger Phänomene zu erwarten.

▲ Abb. 1: Der Kern des Square Kilometre Array mit einem Quadrat-kilometer Antennenfläche wird dem Referenz-Design zufolge aus phasengesteuerten Radioteleskopen bestehen (im Vordergrund). Umgeben sind sie von mehreren hundert konventionellen Parabolantennen. (Bild: Xilostudios und SKA Project Office)

VON RAINER BECK



sum verhalf dem Urknall-Modell zum Durchbruch. Aus den Radiokarten des Satelliten WMAP ließen sich die wichtigsten Parameter der Kosmologie mit hoher Präzision ableiten [8, 9].

Heute stellen sich neue wichtige Fragen: Was ist die Dunkle Energie? Hat sie sich zeitlich verändert? Gilt die Allgemeine Relativitätstheorie auch bei extremen Raumkrümmungen, oder treten hier die Effekte beispielsweise versteckter Raumdimensionen zu Tage? Welche Rolle spielt der Magnetismus bei der Entwicklung der Galaxien? Wann traten die ersten materiellen Strukturen auf? Wie entstehen Planeten? Radiowellen könnten bald die Antworten bringen.

Ein Radioteleskop der Superlative

Erste Ideen für ein großes Radioteleskop zur Vermessung des Universums mit Hilfe der 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs (HI) in Galaxien stammen aus dem Jahr 1990. Die International Union for Radio Science setzte 1993 eine Arbeitsgruppe ein, aus der vier Jahre später die Projektstudie »Very Large Radio Telescope« entstand; 1998 erhielt das Projekt den Namen »Square Kilometre Array«. Im Jahr 2000 wurde das International SKA Steering Committee (ISSC) gegründet, dem inzwischen 21 Mitglieder angehören (jeweils sieben aus Europa, den USA und den anderen Ländern). 34 Institute aus 15 Ländern tragen heute das Projekt. Die Zahl der aktiv beteiligten

Wissenschaftler und Ingenieure steigt von Jahr zu Jahr. Die Entscheidungen des ISSC werden durch eine wissenschaftliche und eine technische Arbeitsgruppe sowie durch eine Arbeitsgruppe für die Prüfung möglicher Standorte vorbereitet. Das SKA ist ein von Beginn an konsequent international organisiertes Großprojekt. Die technologischen Herausforderungen sind gewaltig.

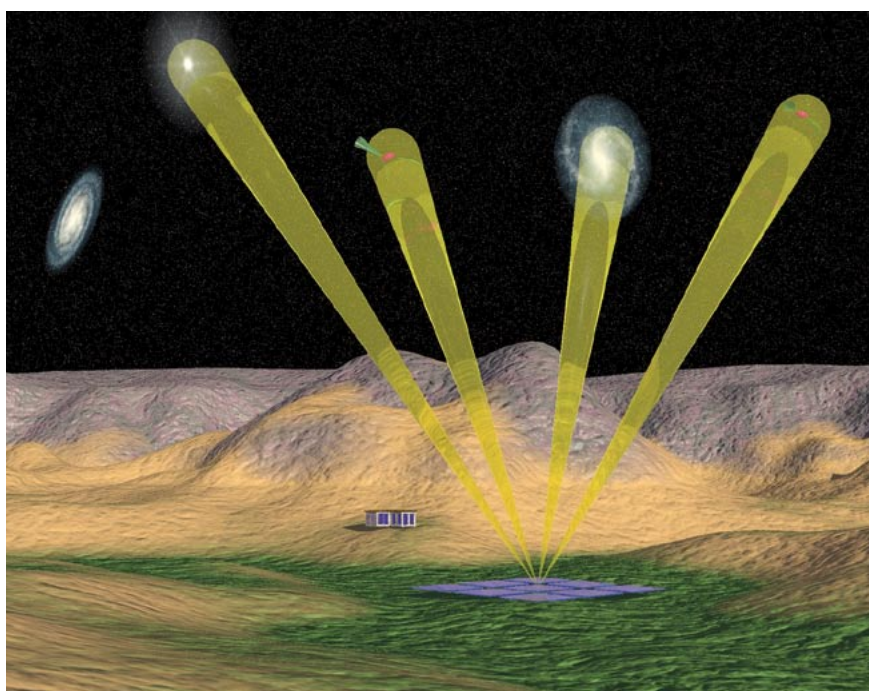
Spezifikationen

Das SKA soll den Frequenzbereich von 100 Megahertz (3 m Wellenlänge) bis 25 Gigahertz (1.2 cm) durch mehrere breitbandige Empfangssysteme abdecken. Die wichtigste Forderung an das SKA ist seine Sammelfläche; die Empfindlichkeit eines Radioteleskops hängt aber auch von der Rauschtemperatur seiner Empfänger ab: Werden sie relativ einfach in Massenproduktion hergestellt und ohne Kühlung betrieben, so ist mit Rauschtemperaturen von kaum unter 50 Kelvin zu rechnen, und die Sammelfläche muss einen Quadratkilometer betragen, um die angestrebte Empfindlichkeit zu erreichen.

Die Winkelauflösung des SKA soll bei 1.4 Gigahertz (21 cm) besser als 0.02 Bogen Sekunden sein, also müssen die äußersten Antennen in einem Abstand von mehr als 3000 Kilometern vom Kern der Anlage stehen – für Radiosynthesoteleskope nichts Besonderes. Die Herausforderung liegt im geforderten Gesichtsfeld von mindestens einem Quadratgrad bei 1.4 Gigahertz und sogar einigen Hundert Quadratgrad bei 300 Megahertz, um schnelle Durchmusterungen zu ermöglichen. Das lässt sich nicht mit klassischen Hornantennen bewerkstelligen, sondern erfordert eine Radiokamera (Focal Plane

▼ Abb. 2: Die Phasensteuerung ermöglicht das simultane Beobachten verschiedener Himmelsareale. (Bild: Michael Kramer)

Radiowellen werden im interstellaren und intergalaktischen Raum kaum absorbiert und können sich daher fast ungestört ausbreiten. Viele Objekte sind nur oder am besten im Radiobereich zu sehen. Den Radiowellen sind daher viele wichtige Entdeckungen in der Astrophysik und Kosmologie (und bisher vier Nobelpreise) zu verdanken. Aktive galaktische Kerne mit ihren Jets und Radioblasen (vgl. das Titelbild von SuW 7/2006) haben uns auf die Spur der Schwarzen Löcher in den Zentren der Galaxien geführt. Durch polarisierte Radiostrahlung wurden gigantische Magnetfelder überall im Kosmos entdeckt. Die Radiosignale der Pulsare sind die präzisesten natürlichen Uhren, die wir kennen: Sie ermöglichten, die Allgemeine Relativitätstheorie zu testen und Gravitationswellen nachzuweisen. Die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung aus dem frühen Univer-



Array, FPA) oder ein Phased Array (siehe Glossar). Revolutionär ist das SKA bei der Forderung, bei Frequenzen unterhalb von 1.4 Gigahertz in mindestens vier Himmelsrichtungen gleichzeitig schauen zu können, also als ein Vierfachteleskop für mehrere Beobachter gleichzeitig zu arbeiten (Abb. 2) – die neue Technik eines elektronisch erzeugten Antennen-Beams macht's möglich.

Der dynamische Bereich, also der Kontrast zwischen schwächster und hellster nachweisbarer Quelle in der fertigen Radiokarte, soll eins zu einer Million betragen. Das erfordert eine präzise Korrektur aller instrumentellen und ionosphärischen Störungen, sowie die Weiterentwicklung der Selbstkalibration (siehe Glossar).

Der Weg zur Realisierung

Eine große Sammelfläche lässt sich durch wenige große oder viele kleine Antennen realisieren. Zum Beispiel stellt das chinesische Konzept mit unbeweglichen sphärischen Spiegeln mit aktiver Oberfläche eine Weiterentwicklung der bewährten Technik des Arecibo-Spiegels auf Puerto Rico dar: Die Karstlandschaft im Südwesten Chinas bietet eine natürliche Unterstützung der Spiegelform (Abb. 3). Allerdings ist in einem so großen Spiegel das Gesichtsfeld einer einzelnen Hornantenne sehr klein, sodass eine Radiokamera zum Einsatz kommen muss, um ein großes Gesichtsfeld zu erreichen. Die Kosten für

einen großen Spiegel, dessen Oberfläche für Beobachtungen bis 25 Gigahertz hinreichend genau ist, sprengen jedoch den gesetzten Kostenrahmen des SKA. Schließlich bedeutet die geringe Zahl großer Spiegel eine schlechte Ausfüllung der Fläche des Gesamtteleskops («UV-Ebene»), wodurch bei ausgedehnten Quellen die Bildqualität eingeschränkt wird.

Kleine Antennen haben den Vorteil, dass sie ein großes Gesichtsfeld bereits ohne den Einsatz von Radiokameras bieten. Ein 15-m-Spiegel erfasst bei 21 Zentimeter Wellenlänge ein Winkelgrad, so wie es die Mindest-Spezifikation des SKA vorsieht. Um die Sammelfläche von einem Quadratkilometer zu erreichen, sind allerdings einige tausend Spiegel notwendig. Nachteilig sind die entsprechend große Zahl von Empfangssystemen und die vielen Basislinien, die korreliert werden müssen, wobei die Zahl der Korrelationen quadratisch mit der Zahl der Antennen ansteigt. Erfahrungsgemäß sinken die Kosten für Elektronik und Rechenleistung aber mit der Zeit, während Mechanik teurer wird. Das SKA-Konzept sieht daher eine Massenproduktion von möglichst einfachen Spiegeln vor.

Das indische Konzept mit Parabolspiegeln von zwölf Metern Durchmesser spart zum Beispiel Materialkosten durch eine Vorspannung der Stützkonstruktion. Parabolspiegel mit seitlich versetztem Fokus, basierend auf Satellitenschüsseln, werden zur Zeit in Massenproduktion für das Allen Telescope Array (ATA) in den USA gefertigt (Abb. 4) und können mit einer einzigen Hornantenne von 0.5 bis elf Gigahertz genutzt werden. Das australische Konzept (Abb. 5) sieht ebenfalls einfache 15-m-Spiegel vor, die mit Radiokameras (FPAs) für Frequenzen bis

Glossar

Beam oder Antennenkeule: der Raumwinkelbereich, in dem die Antenne Radiostrahlung sammelt. Die Halbwertsbreite ist der doppelte Winkel vom Maximum der Empfindlichkeit bis zur halben Empfindlichkeit. Der Beam einer Hornantenne auf der optischen Achse eines Parabolspiegels ähnelt einer zweidimensionalen Gaußkurve. Die Halbwertsbreite des Beams eines Parabolspiegels mit dem Durchmesser D bei der Wellenlänge λ beträgt rund $57^\circ \lambda/D$. Durch Beugung treten bei größeren Winkelabständen Nebenkeulen (Sidelobes) auf. Der elektronisch erzeugte Beam eines Focal Plane Arrays oder einer Station von Phased Arrays kann erheblich von der Form einer Gaußkurve abweichen und starke Nebenkeulen haben. Bei einem interferometrisch arbeitenden Teleskop bestimmt der Beam der einzelnen Spiegel bzw. der Station eines Phased Arrays das Gesichtsfeld des Gesamtteleskops.

Faraday-Effekt: beschreibt die Rotation der Polarisationsrichtung polarisierter Radiostrahlung beim Durchgang durch das interstellare und intergalaktische

drei Gigahertz ausgerüstet sind. Die erste Antenne soll 2007 bei Mileura in der westaustralischen Wüste in Betrieb gehen. Die deutsche Industrie hat ebenfalls neue Konzepte für leichte, preiswerte Parabolspiegel entwickelt, zum Beispiel für das Gamma-Experiment HESS in Namibia (SuW 8/2006, S. 36) und für den SKA-Prototypen in Südafrika. Der erste 15-m-Spiegel des Karoo Antenna Array (KAT) in Südafrika soll 2007 fertig sein. Die Erfah-

▼ Abb. 3: Die Karstlandschaft der chinesischen Provinz Guizhou eignet sich als Standort für große, unbewegliche Radioteleskope vom Arecibo-Typ. (Bild: SKA-Konsortium China)



Medium. Der Rotationswinkel nimmt zu mit der Magnetfeldstärke und Elektronendichte im durchlaufenen Medium sowie mit dem Quadrat der Wellenlänge. Seine Messung bei verschiedenen Wellenlängen erlaubt die Bestimmung der Magnetfeldstärke.

Focal Plane Array (FPA) oder Radiokamera: Anordnung von Halbleiterelementen in der Brennebene eines Radioteleskops. Ähnlich wie mit einem CCD-Chip für den optischen Bereich kann somit ein großes Himmelsareal gleichzeitig »im Radiolicht abgebildet« werden. Vorläufer des FPAs sind die Mehrfachhorn-Systeme, die seit vielen Jahren am 100-m-Teleskop in Effelsberg und am 64-m-Teleskop in Parkes/Australien eingesetzt werden [4]. Jedes Horn hat jedoch eine feste Blickrichtung relativ zum Teleskop, während das Gesichtsfeld und der Beam eines FPA wie beim Phased Array digital gesteuert werden können.

Hornantenne: befindet sich in der Brennebene eines Spiegels und leitet die Radiowellen in einen Hohlleiter. An dessen Ende wird in einem Dipol ein elektrischer Wechselstrom induziert, der dann im Empfänger verstärkt wird. Das Gesichtsfeld der

Hornantenne wird dem Hauptspiegel angepasst. Größe und Form der Hornantenne bestimmen den nutzbaren Frequenzbereich: große Hörner für lange Wellen und kleine Hörner für kurze Wellen. Die vom Horn gesammelte Radiostrahlung stammt überwiegend aus einem Gebiet am Himmel von der Größe der Halbwertsbreite. Mehrere Hornantennen können mehrere Gebiete gleichzeitig am Himmel beobachten, deren Winkelabstand durch den physikalischen Abstand der Hornantennen in der Brennebene des Teleskops festgelegt ist.

LOFAR, das zur Zeit in den Niederlanden gebaut wird, mit zusätzlichen Stationen in Deutschland, wird demnächst das größte Radioteleskop der Welt sein [3, 5]. Es ist ein Phased Array für die Frequenzbereiche 30–80 MHz und 110–240 MHz. Im UKW-Band (87–108 MHz) sind in Europa keine radioastronomischen Messungen möglich (s. Abb. 8).

Phased Array, Aperture Array oder phasengesteuertes Teleskop: Elektronisches Radioteleskop, das aus einer großen Zahl von einfachen Elementen besteht, fest auf dem Boden montiert ist und ganz ohne

bewegliche Teile auskommt. Die Antennenkeulen einer Station werden durch Phasenverzögerungen zwischen den Elementen elektronisch erzeugt [5]. Mit dem Phased Array kann in mehreren Richtungen gleichzeitig und unabhängig beobachtet werden. Bei niedrigen Frequenzen (unterhalb von etwa 100 MHz) besteht ein Phased Array (wie z. B. LOFAR) aus einem Feld von einfachen Dipolantennen aus Metalldraht oder Metallstangen. Jeder Dipol empfängt Radiostrahlung des gesamten Himmels. Die Beams einer Station werden elektronisch in der Zentraleinheit der Station erzeugt und vom Zentralrechner des Gesamtteleskops gesteuert. Die Radiokarte jedes Beams entsteht durch Korrelation der Signale dieses Beams von allen Stationen, ähnlich wie beim Radio-Interferometer oder (genauer) Syntheseteleskop [4].

Selbstkalibration: Methode, die Eigenschaften aller Antennen eines Arrays und der Ionosphäre sowie deren zeitliche Änderung im Rechner so zu modellieren, dass in der erzeugten Radiokarte ein konsistentes Bild der Quellen mit maximalem Dynamikbereich entsteht.

rungen mit den Prototypen werden in das endgültige SKA-Konzept einfließen.

Parabolspiegel haben ihren optimalen Einsatzbereich bei mittleren bis hohen Frequenzen (über etwa 1 GHz). Bei einem Verhältnis von Spiegeldurchmesser zu Wellenlänge von weniger als etwa zehn sinkt die Antennenleistung, da der Spiegel kleiner ist als der Ausleuchtungswinkel der Hornantenne. Ein 10-m-Spiegel lässt sich daher unterhalb von etwa 300 Megahertz nicht mehr sinnvoll einsetzen. Hier beginnt die Domäne der Phased Arrays (s. Glossar), Felder aus einfachen Antennen, die fest auf dem Boden montiert sind. Die digitalen Daten aller Stationen werden über Hochleistungs-Glasfaserleitungen an den zentralen Rechner weitergeleitet, der durch Phasenvergleich der eingehenden Signale ein Bild in einer vorgegebenen Richtung oder auch Bilder in mehreren Richtungen gleichzeitig berechnet. Störsignale lassen sich elektronisch ausblenden.

Der europäische Prototyp eines phasengesteuerten Radioteleskops ist be-

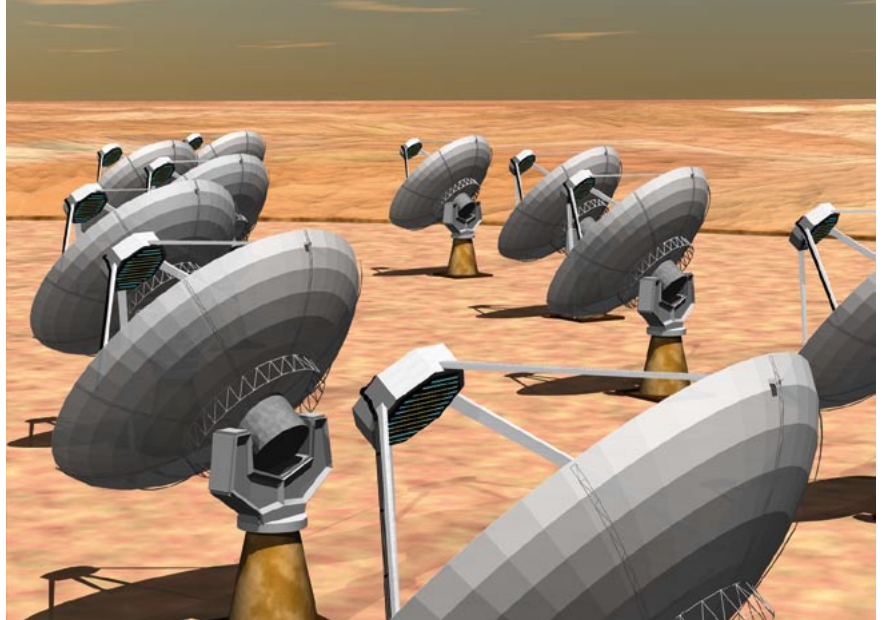
reits in den Niederlanden im Bau: LOFAR, das Low Frequency Array [5]. Die erste internationale Station wird nach Effelsberg kommen, weitere deutsche Stationen sind in Planung [3]. LOFAR arbeitet zwischen 30 und 240 Megahertz und wird bis zur Inbetriebnahme des SKA das größte Radioteleskop der Welt sein. Der nächste Schritt ist die von der EU geförderte SKA Design Study (SKADS), an der 29 Institute beteiligt sind, darunter das

Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) Bonn. Der Prototyp mit der Bezeichnung »Electronic Multi-Beam Radio Astronomy Concept« (EMBRACE) soll mit einem Frequenzbereich von 0.6 bis 1.7 Gigahertz das LOFAR-Konzept zu deutlich höheren Frequenzen erweitern. Dazu werden in den Niederlanden und in Großbritannien aufwändige Phased Arrays aus Halbleiter-Elementen (»Kacheln«) gebaut (Abb. 6).

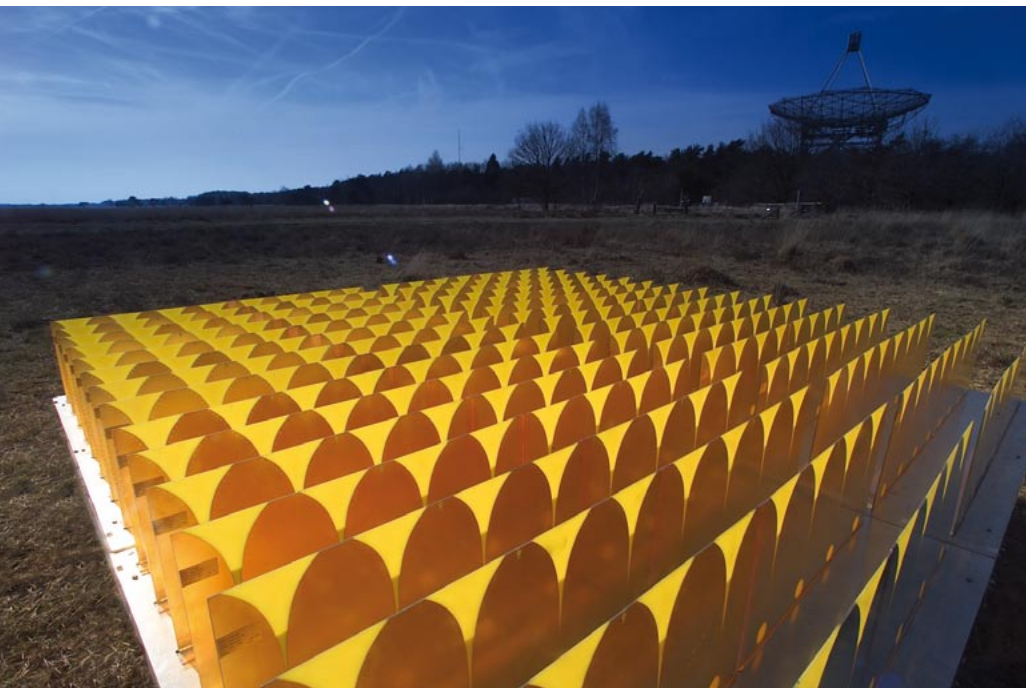
► Abb. 4: Das Allen Telescope Array (ATA), das zur Zeit am Hat Creek Observatorium (Kalifornien) gebaut wird, besteht aus 6-m-Parabolantennen mit seitlich versetztem Fokus. (Quelle: SETI Institute)



► Abb. 5: Das australische Konzept New Technology Demonstrator (NTD) sieht 15-m-Parabolspiegel mit Radiokameras (Focal Plane Arrays) vor. (Bild: Chris Fluke, Swinburne University of Technology, Hawthorn/Australia)



▼ Abb. 6: Ein Prototyp aus Halbleiter-»Kacheln« zur Messung von Radiowellen bei Frequenzen um 1 GHz ist das Thousand Element Array (THEA). (Quelle: ASTRON)



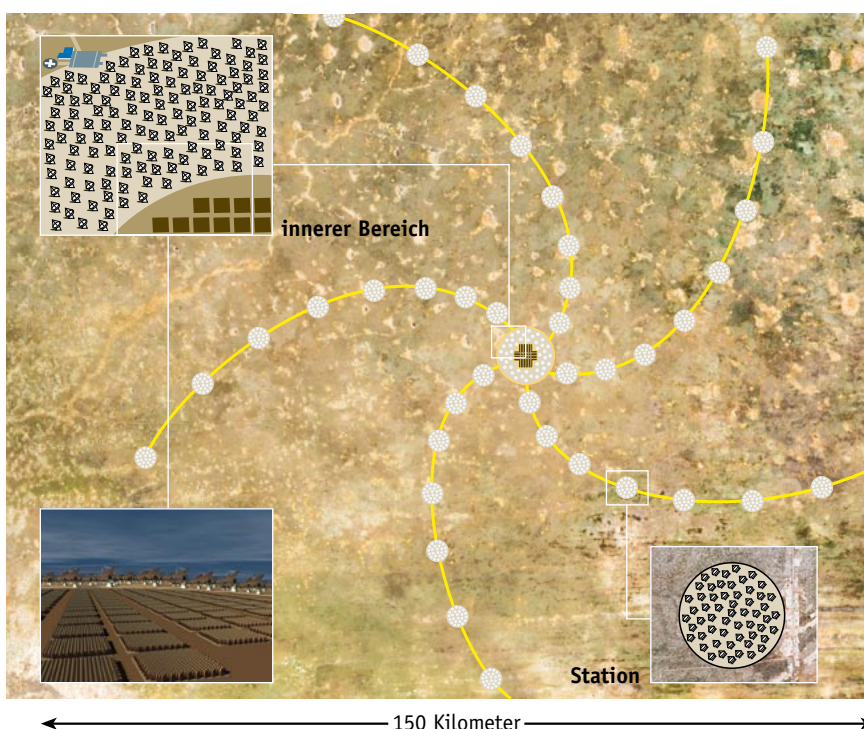
Realisierung des SKA

Um den enormen Frequenzbereich des SKA von mehr als zwei Zehnerpotenzen abdecken zu können, ist eine Kombination aus Phased Arrays für den Niederfrequenzbereich und Parabolspiegeln für den Hochfrequenzbereich notwendig. Das Referenz-Design zeigt, wie das SKA im Prinzip aussehen wird (Abb. 1). Es ist so optimiert, dass die weiter unten beschriebenen Schlüsselprojekte durchgeführt werden können, und besteht aus drei Komponenten, die klassische Parabolspiegel mit neuer Technologie kombinieren:

■ Ein Phased Array aus einfachen Dipol-Antennen für Meterwellen (Frequenzen von unterhalb 0.1 bis 0.3 Gigahertz mit einem Gesichtsfeld von mindestens 200 Quadratgrad zur Messung der Signale aus der Epoche der Reionisation: eine Weiterentwicklung des europäischen LOFAR

■ Ein Phased Array aus Halbleiterkacheln für mittlere Frequenzen (0.3 bis ein GHz), das gleichzeitig als »Radio-Fischauge« zur Überwachung des gesamten Himmels und in einem Multibeam-Beobachtungsmodus genutzt werden kann, basierend auf dem europäischen Prototypen EMBRACE

■ Ein Array aus Parabolspiegeln von etwa zehn Metern Durchmesser, ausgestattet mit Radiokameras für mittlere Frequenzen (0.3 bis drei GHz) mit einem großen Gesichtsfeld, ähnlich dem australischen NTD (Abb. 5), sowie mit Breitband-Hornantennen für die hohen Frequenzen (drei bis 25 GHz), ähnlich dem ATA in den USA (Abb. 4).



◀ Abb. 7: Im Referenz-Design (kleines Bild unten links und Abb. 1) des Square Kilometre Array sind die außenliegenden Stationen auf vom Kern ausgehenden logarithmischen Spiralen angeordnet. (Quelle: Xilostudios und SKA Project Office)

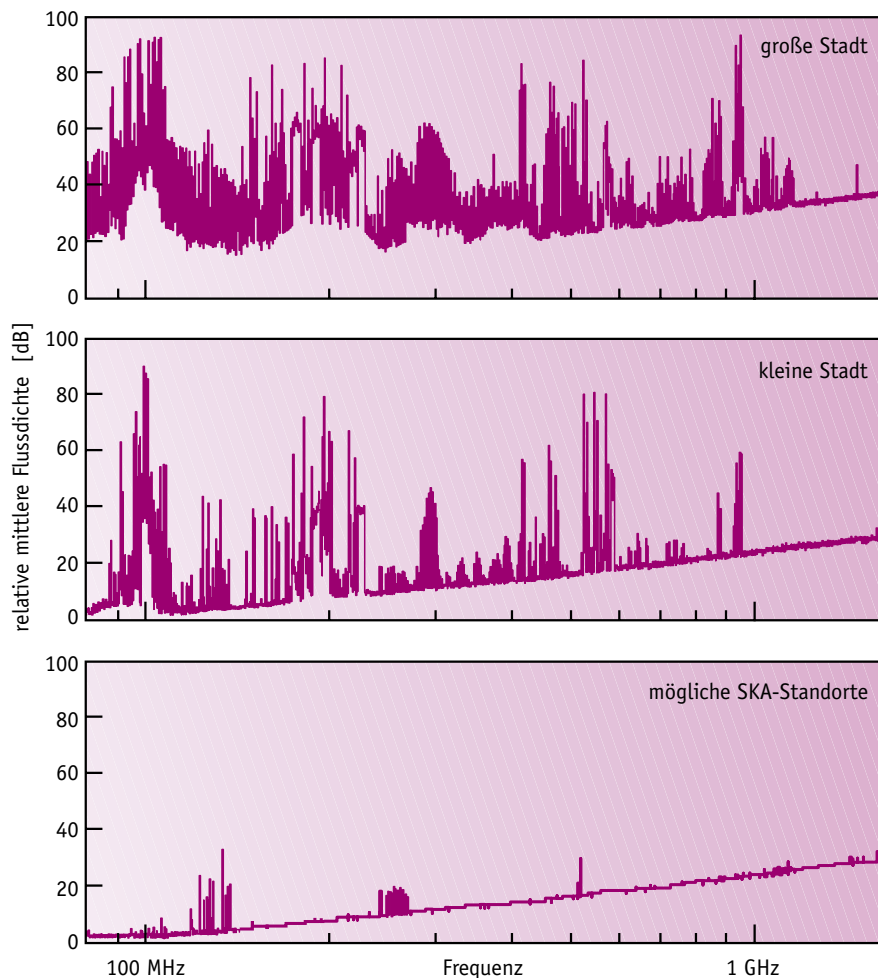
Die beiden Phased-Array-Komponenten bilden den Kern des SKA mit einem Durchmesser von fünf Kilometern. Die Hälfte der Parabolspiegel befindet sich ebenfalls im Kern, die anderen in Stationen mit jeweils einigen hundert Spiegeln, die entlang einer fünfarmigen Spirale angeordnet sind (Abb. 7). Die Abstände der inneren Stationen nehmen jeweils um einen festen Faktor zu (logarithmische Anordnung); damit wird eine optimale Abbildung ausgedehnter Radioquellen bei zugleich hoher Winkelauflösung erreicht. Die Position der äußeren Stationen bis zu einigen tausend Kilometern Abstand vom Kern ist relativ freizügig und kann sich nach der Infrastruktur richten (oder politisch instabile Länder aussparen, s. Abb. 9).

Der Standort des SKA muss eine Reihe von Anforderungen erfüllen. Vor allem muss das Gebiet um den Kern des SKA mit einem Radius von mindestens hundert Kilometern radoruhig sein, das heißt die Störsignale von Hörfunk, Fernsehen, Mobilfunk, Radar und Richtfunk müssen möglichst schwach sein (Abb. 8). Verlangt wird ein gesetzlicher Schutz des Kernbereichs des SKA vor Störsignalen über die gesamte Betriebsdauer von mindestens fünfzig Jahren. Die Atmosphäre muss für hohe Radiofrequenzen transparent sein, ebenso die Ionosphäre für niedrige Frequenzen. Vorschläge für Standorte wurden 2004 aus Argentinien/Brasilien, Australien/Neuseeland, China und Südafrika/Namibia/Botswana/Madagaskar/Mauritius/Kenia/Ghana (Abb. 9) eingereicht. Im Jahr 2005 wurden an allen Standorten Messungen der Störsignale im Radiobereich vorgenommen.

Australien bietet den radio-ruhigsten Standort in der Wüste Westaustraliens, der bereits als »Radioastronomie-Park« geschützt ist, somit Autonomie über die nationale Frequenznutzung und eine exzellente Unterstützung aufgrund der bestehenden jahrzehntelangen Erfahrung mit radioastronomischer Technologie. Andererseits wäre eine Entscheidung zum Beispiel für den Standort Afrika für die technologische und wissenschaftliche Entwicklung dieses Kontinents von enormer Bedeutung.

Kosten und Zeitplan

Die Gesamtkosten für das SKA werden auf eine bis anderthalb Milliarden Euro geschätzt, für ein internationales Großprojekt eine moderate Summe. Der Hauptteil der Kosten entfällt auf Antennen und Empfangssysteme (geschätzt 55 Prozent), etwa 20 Prozent werden für Infrastruktur und Datenleitungen benötigt und 25 Prozent für Datenverarbeitung und Software. Die Betriebskosten be-



▲ Abb. 8: Störsignale im Bereich von 80 MHz bis 2 GHz in einer großen Stadt (oben), einer kleinen Stadt (Mitte) und an einem der möglichen SKA-Standorte (unten) (Quelle: Australia Telescope National Facility)

▼ Abb. 9: Ein Standortvorschlag sieht Stationen (rot) in mehreren Ländern Afrikas mit dem Kern (grün) in Südafrika vor. (Quelle: Bernard Fanaroff, Bild: TerraForma/SuW)



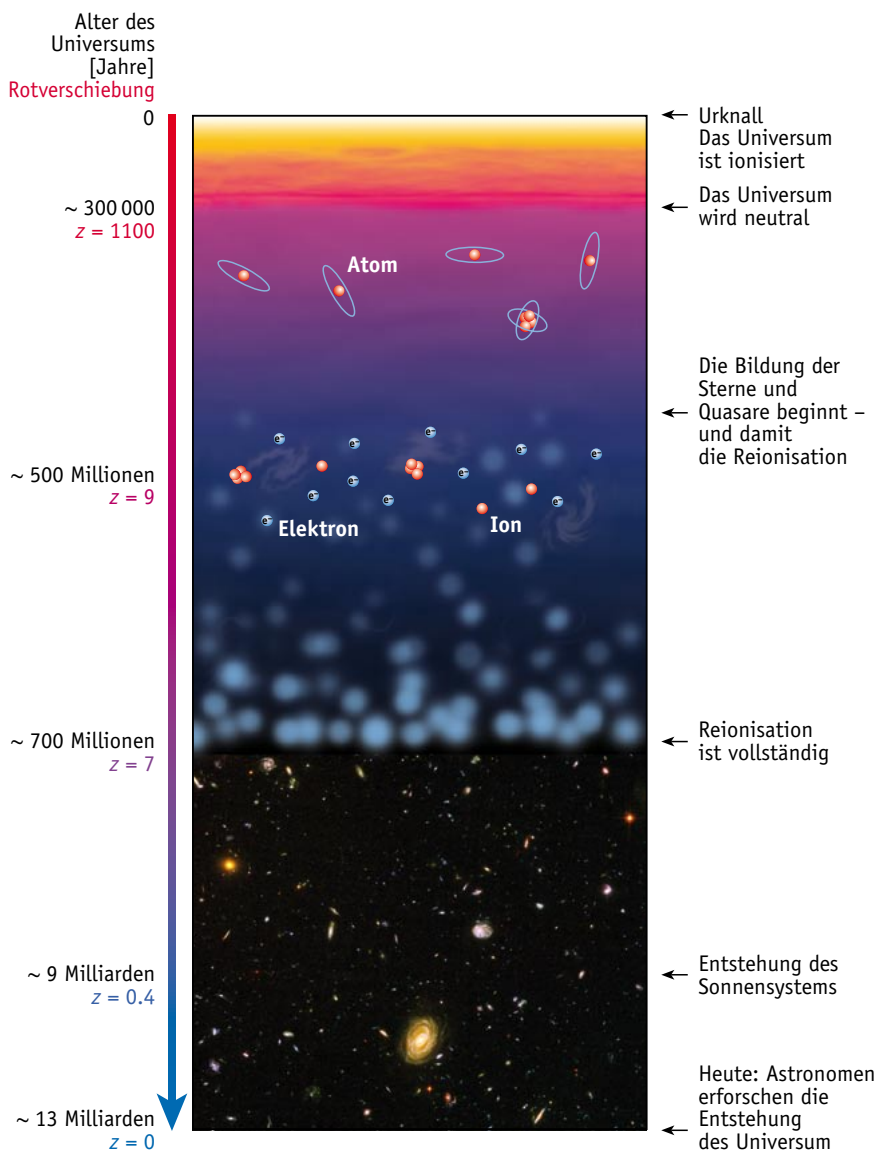


Abb. 10: Modell der Entwicklung des Universums. Die Epoche der Reionisation fand etwa eine Milliarde Jahre nach dem Urknall statt, bei Rotverschiebungen etwa zwischen $z = 15$ und $z = 7$.

nicht gibt (LOFAR benötigt »nur« drei Gigabit pro Sekunde), zeigt eine Extrapolation des Fortschritts bei der Datenübertragung, dass eine solche Leistung im Jahr 2015 realistisch ist. Das gleiche gilt für die Rechenleistung des zentralen Computers von zehn bis hundert Peta-Flops, also 10^{16} bis 10^{17} Rechenoperationen pro Sekunde, wesentlich höher als die Leistung der LOFAR BlueGene mit 27 Tera-Flops (2.7×10^{13} Rechenoperationen pro Sekunde).

Wissenschaftliche Schlüsselprojekte

Das SKA bietet der Erforschung des Kosmos völlig neue Perspektiven. Verschiedene Beobachtungsmethoden (un aufgelöste Quellen, Pulsare, diffuse Emission, Polarisation, Linienstrahlung) stellen unterschiedliche Anforderungen an das Design. Daher wählte die SKA Science Working Group (SWG) aus den vielen möglichen wissenschaftlichen Projekten sechs Schlüsselprojekte aus. Diese sollen in der Lage sein, fundamentale Fragen der Astrophysik, Astrobiologie, Kosmologie oder Teilchenphysik zu beantworten, die von großem Interesse für die wissenschaftliche und auch für die breite Öffentlichkeit sind. Sie begründen gleichzeitig die für das SKA geforderten Spezifikationen. Die Schlüsselprojekte wurden 2004 zusammen mit vielen anderen Ideen für das SKA in dem Buch »Science with the SKA« [17] veröffentlicht, an dem mehr als hundert Autoren mitgewirkt haben.

Die Entwicklung von Galaxien, großen Strukturen und der Dunklen Energie. Die ersten Ideen für ein wirklich großes Radioteleskop, die um 1990 diskutiert wurden, drehten sich um die Messung der Linie des neutralen Wasserstoffs (HI) in einer großen Zahl von Galaxien, bis in möglichst große Entfernungen. Dieses primäre Ziel des SKA ist in einem Schlüsselprojekt aufgegangen. Die Empfindlichkeit des SKA wird es erlauben, die HI-Linie noch bei einer Rotverschiebung von etwa $z = 5$ nachzuweisen. Damit kann die Entwicklung normaler Galaxien (Gasinhalt, Rotation, Wechselwirkungen, Umgebung) von der Frühzeit des Universums bis heute untersucht werden.

Von noch größerer Bedeutung ist jedoch ein Katalog von mehreren Milliarden Rotverschiebungen von Galaxien, weit umfangreicher als alle gegenwärtigen und geplanten Durchmusterungen

laufen sich auf 70 bis 100 Millionen Euro pro Jahr. Den Betrieb soll ein internationales radioastronomisches Zentrum übernehmen.

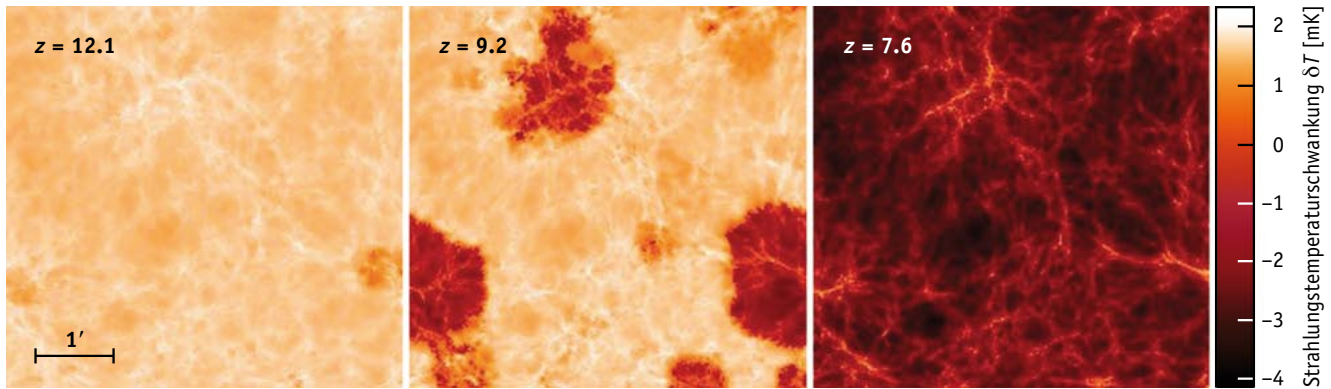
Ende 2006 soll die Rangliste der möglichen SKA-Standorte vorliegen, und bis 2008 soll die Entscheidung auf politischer Ebene fallen. Der Bau des SKA soll im Jahr 2012 beginnen, zunächst die »Phase 1« mit dem inneren Kern und zehn Prozent der Sammelfläche. Der volle Kern und die äußeren Stationen sollen schrittweise bis 2020 folgen.

Technologische Herausforderungen

Das SKA stellt extreme Anforderungen an technologische Entwicklungen, die zum Erreichen der gesteckten wissenschaftlichen Ziele erforderlich sind. Damit ist das SKA ein Motor für Innovationen, die in Kooperation mit der Industrie in aller Welt entwickelt werden sollen. Das SKA bietet die Chance der engen Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie auf vielen unterschiedlichen Gebieten.

Um die Gesamtkosten im vorgesehenen Rahmen zu halten, dürfen die Kosten der Parabolspiegel 1000 Euro pro Quadratmeter Antennenfläche nicht überschreiten – das liegt eine Größenordnung unterhalb der Kosten heutiger Radioteleskope. Die Empfangssysteme für die Parabolspiegel mit der angestrebten Breitbandigkeit und geringen Rauschtemperatur müssen ebenfalls zu deutlich geringeren Kosten gebaut werden als heute. Massenproduktion allein hilft nicht, hier sind Neuentwicklungen erforderlich. Die Empfänger müssen außerdem robust und wartungsfrei sein, um die Betriebskosten niedrig zu halten. Eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff oder gar Helium, wie heute bei Radioteleskopen üblich, kommt nicht in Frage.

Die größte technologische Herausforderung ist die Verarbeitung der gewaltigen Datenflut. Zum Erreichen der vollen angestrebten Leistung müssen die Stationen des SKA mit Breitband-Glasfaserkabeln mit einer Kapazität von hundert Gigabit pro Sekunde verbunden werden. Obwohl es solche Leitungen bisher noch



zusammen. Der Satellit WMAP lieferte eine Momentaufnahme der kosmischen Schwingungen aus der Epoche der Hintergrundstrahlung bei $z = 1100$ [7, 8], die noch nicht völlig verstanden sind [13]. Das SKA wird die Materieverteilung fast des gesamten Universums, sowie dessen Geschwindigkeitsfeld und seine Schwingungen dreidimensional von $z = 5$ bis heute vermessen. Damit lassen sich die großräumigen Schwingungen der baryonischen Materiedichte in Abhängigkeit von der Rotverschiebung bestimmen und untersuchen, ob sich die Dichte der Dunklen Energie zeitlich änderte – die entscheidende Messung, um die Modelle für die Dunkle Energie zu testen [10, 11]. Außerdem wird die HI-Durchmusterung lokale Massekonzentrationen wie den »Großen Attraktor«, der die lokale Galaxiengruppe anzieht, oder Blasenstrukturen in der Verteilung der Galaxien aufzeigen.

Das Dunkle Zeitalter. Vor der Bildung der Galaxien herrschte das Dunkle Zeitalter, aus dem keine optische Strahlung zu uns gelangt und zu dem uns nur die Radiowellen Zutritt verschaffen können. Bis etwa $z = 20$ war die Materie im Universum vollständig neutral, dann begannen die ersten Sterne und Quasare das sie umgebende Gas zu ionisieren. Die Epoche der Reionisation dauerte nach Modellen, die auf den WMAP-Ergebnissen beruhen, bis etwa $z = 7$ (Abb. 10). Durch die abnehmende Größe der Regionen mit neutralem HI (Abb. 11) entstand ein Muster von HI-Linien, das in der entsprechend rotverschobenen HI-Linie (bei 70 bis 200 MHz) als Schwankungen der Radiostrahlung auf Skalen von einigen Bogenminuten nachweisbar sein sollte. Beginn und Dauer der Epoche der Reionisation sind allerdings noch unsicher. Diese Messungen sind ein kritischer Test für die gegenwärtig diskutierten kosmologischen Modelle.

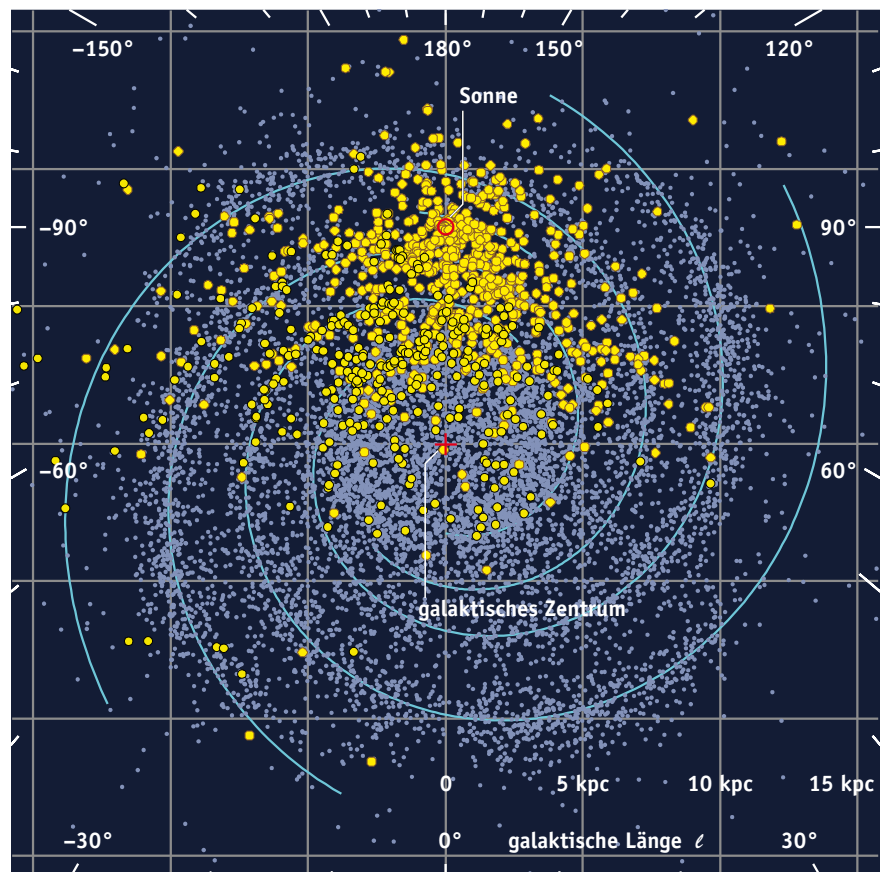
LOFAR wird bereits vor Inbetriebnahme des SKA nach Signalen aus der Epoche der Reionisation suchen. Die Empfindlichkeit von LOFAR reicht allerdings nicht für die direkte Beobachtung der Fluktuationen aus, sondern nur für einen

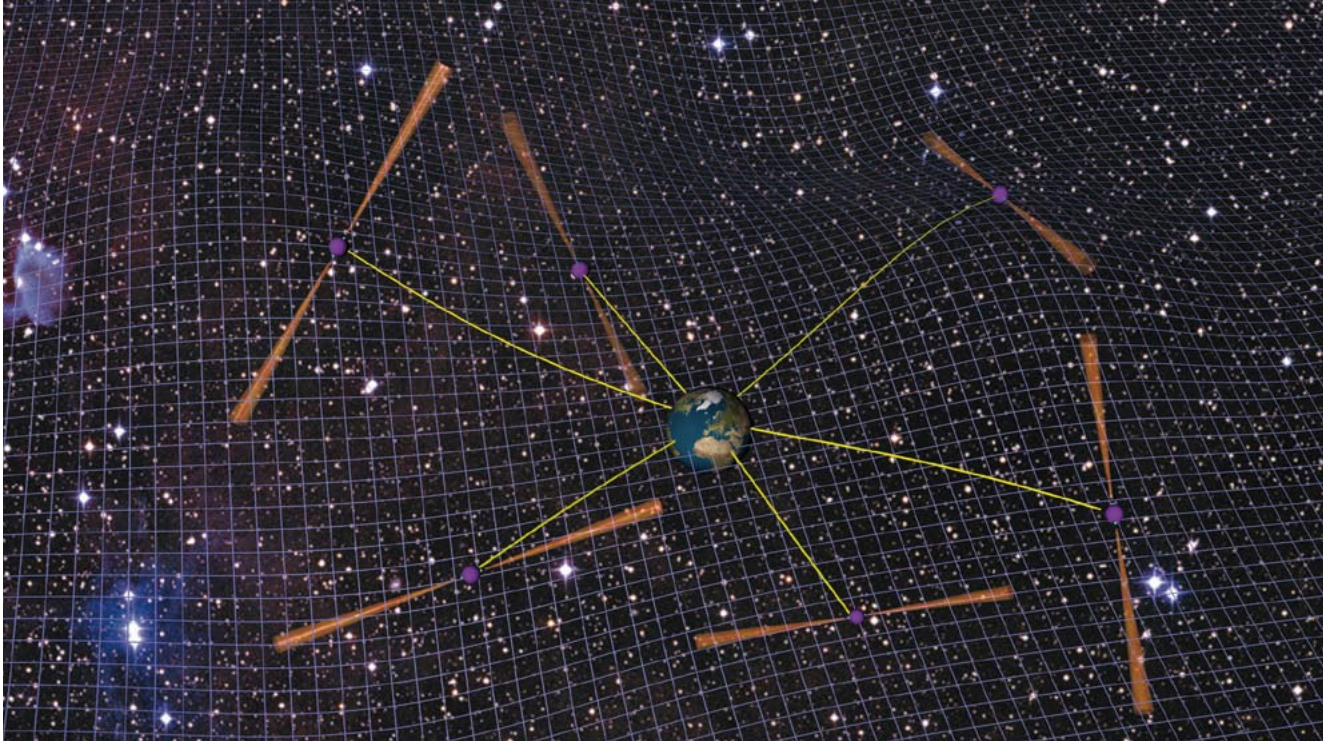
statistischen Nachweis in mehreren Beobachtungsfeldern am Himmel. Gelingt dieser, so sind die Erfolgsaussichten groß, dass das SKA Bilder aus dem frühen Universum wie in Abb. 11 direkt aufnehmen wird. Sollten die stärksten Signale aus der Epoche der Reionisation allerdings bei Rotverschiebungen um $z = 15$, also im UKW-Band, auftreten, so können diese nur vom SKA gemessen werden.

Das Muster des übrig gebliebenen neutralen HI-Gases am Ende der Epoche der Reionisation wird das »Cosmic Web« genannt (Abb. 11 rechts). Daraus entstanden die Galaxien. Die ersten Protogalaxien sind etwa bei $z = 10$ zu erwarten. Das SKA wird die Radiokontinuumsstrahlung der ersten aktiven galaktischen Kerne in den Protogalaxien nachweisen können und damit herausfinden, wann, wo und mit welcher Häufigkeit die ersten Schwarzen Löcher in Galaxien entstanden sind.

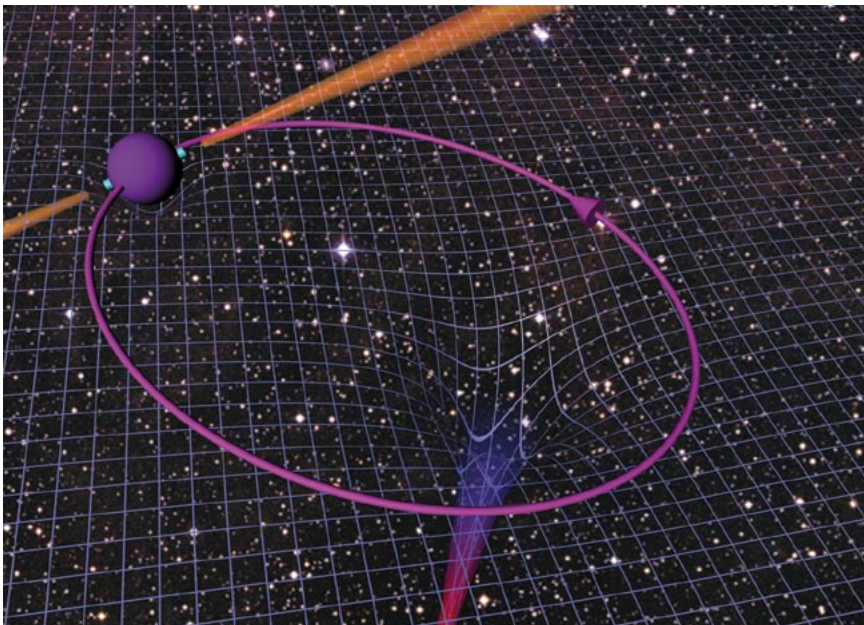
▲ Abb. 11: Simulation des Gases in der Epoche der Reionisation bei den Rotschiebungen $z = 12.1$, 9.2 und 7.6 . Das neutrale Gas (HI) ist hell, das ionisierte Gas dunkel gezeigt. Galaxien entstanden vermutlich aus den HI-Filamenten, die nach dieser Epoche übrig geblieben sind. (Bild: S. Furlanetto)

▼ Abb. 12: Mit dem SKA sind etwa 20 000 Pulsare in unserem Milchstraßensystem zu entdecken. Sie sind in dieser Simulation als blaue Punkte gezeigt, projiziert in die Milchstraßenebene. Gelb markiert sind die heute bekannten Pulsare. (Quelle: Jim Cordes)





▲ Abb. 13: Mit einem Netz von Pulsaruhren sollten sich lange Gravitationswellen nachweisen lassen. (Quelle: David Champion)



◀ Abb. 14: Ein System aus Schwarzem Loch und Pulsar wäre das ideale Laboratorium zum Test von Gravitationstheorien. (Quelle: Michael Kramer)

Das neue Millimeterteleskop ALMA mit etwa fünfzig 12-m-Spiegeln [12] wird die Staubstrahlung und rotverschobene Linien des kalten Kohlenmonoxids (CO) in den ersten Galaxien messen. Die Grundlinien des kalten CO-Gases, die von 115, 230, 345, 460, ... Gigahertz nach etwa 12 bis 46 Gigahertz rotverschoben sind, kann ALMA (mit einem Frequenzbereich ab 80 GHz) allerdings nicht beobachten. Hier wird das SKA mit seiner zudem erheblich höheren Empfindlichkeit zum Einsatz kommen.

■ **Test der Gravitationstheorien mit Pulsaren.** Heute sind in unserem Milchstraßensystem rund 1800 Pulsare bekannt. Das SKA wird 20000 Pulsare in unserer Milchstraße (Abb. 12) und einige hundert in anderen Galaxien finden. Einige tausend davon sind Millisekunden-Pulsare, die genauesten bekannten Uhren

im Universum (relative Genauigkeit 10^{-14}). Mit ihnen lässt sich ein gigantisches Netz von Uhren installieren, die jede kleine Veränderung registrieren, zum Beispiel das Vorbeilaufen einer Gravitationswelle. Das SKA-Pulsarnetz (Abb. 13) kann extrem lange Gravitationswellen mit Frequenzen zwischen 10^{-8} und 10^{-5} Hz nachweisen und ergänzt damit ideal die geplanten Satellitenexperimente LISA und LIGO zum Nachweis kürzerer Gravitationswellen (10^{-5} bis 10^{-3} Hz). Lange Gravitationswellen können von Strings im frühen Universum oder bei der Vereinigung zweier extrem massereicher Schwarzer Löcher ausgesendet werden.

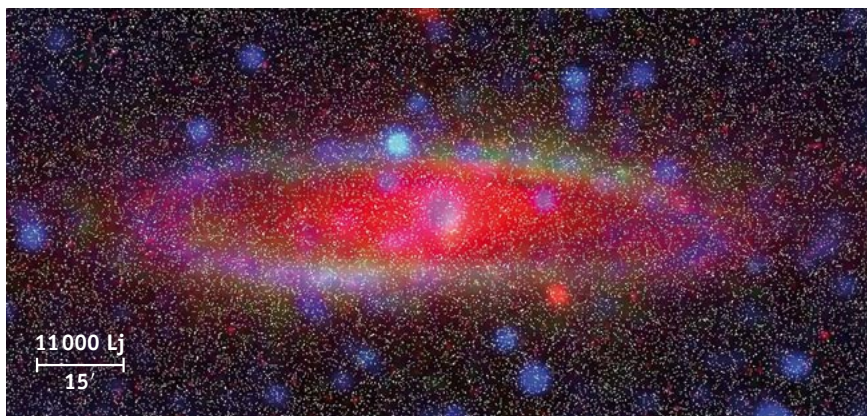
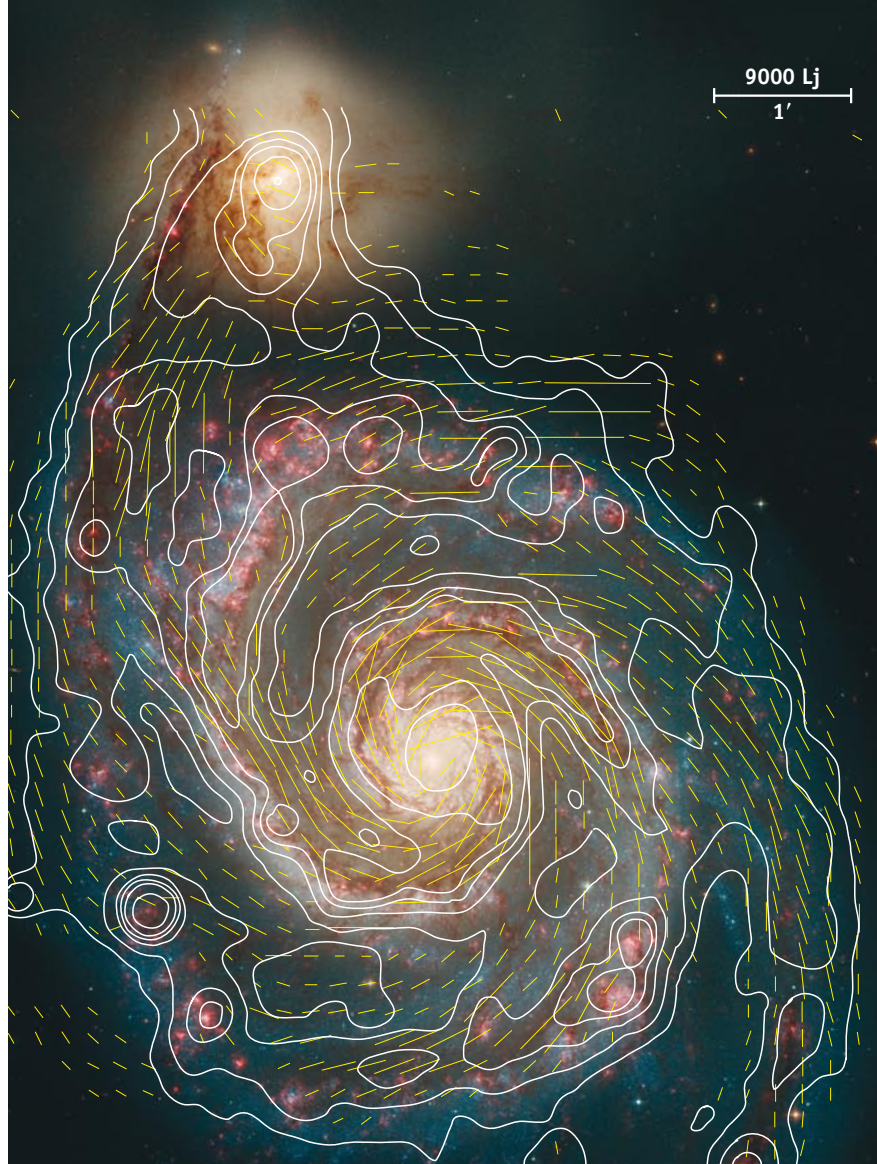
Bisher wurden ein Pulsar-Pulsar-Paar und sieben Pulsar-Neutronenstern-Paare entdeckt, aber noch kein Pulsar, der um ein Schwarzes Loch kreist (Abb. 14). Solche Paare sind extrem selten, sollten aber hoffentlich unter den 20000 mit dem

SKA zu entdeckenden Pulsaren zu finden sein. Die Entdeckung eines solchen Paares ist der Traum jedes Astronomen, denn es ist ein Laboratorium für physikalische Vorgänge unter extremen Bedingungen, wie sie niemals auf der Erde simuliert werden können. Die wichtigste Anwendung ist der Test der Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins und alternativer Theorien der Gravitation unter extremer Raumkrümmung (s. z. B. [1]). Die Allgemeine Relativitätstheorie hat bisher alle Tests (vor allem mit Hilfe der Pulsare, Nobelpreis-prämiert) glänzend bestanden. Trotzdem ist ihre Gültigkeit für extreme Raumkrümmung noch nicht bewiesen, und Überraschungen sind nicht auszuschließen.

■ **Kosmischer Magnetismus.** Magnetismus ist eine der fundamentalen Kräfte im Universum, aber wir wissen noch

► Abb. 15: Magnetfelder in der Spiralgalaxie M51, kombiniert aus Messungen bei 6 cm Wellenlänge am 100-m-Teleskop in Effelsberg und am Very Large Array (USA). Die Konturlinien geben die gesamte Radiostrahlung an, die ein Maß für die Magnetfeldstärke ist, die Striche zeigen die Richtung der Magnetfelder. Das optische Bild wurde vom Weltraumteleskop HUBBLE in mehreren Feldern aufgenommen. (Bild: Andrew Fletcher/Rainer Beck/NASA/ESA/Steven Beckwith (STScI)/The Hubble Heritage Team (STScI/AURA))

▼ Abb. 16: Simulation der mit dem SKA sichtbaren, linear polarisierten Radioquellen (weiße Punkte) hinter der Andromedagalaxie (M31). Zu jeder Quelle lässt sich die Faraday-Rotation in M31 und damit die detaillierte Magnetfeldstruktur in M31 messen. Das farbige Hintergrundbild ist eine Kombination der Strahlung von M31 im Radiokontinuum, gemessen mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg bei 6 cm Wellenlänge (blau: Gesamtstrahlung, grün: polarisierte Strahlung) und eines optischen Bildes (rot). (Bild: Bryan Gaensler)



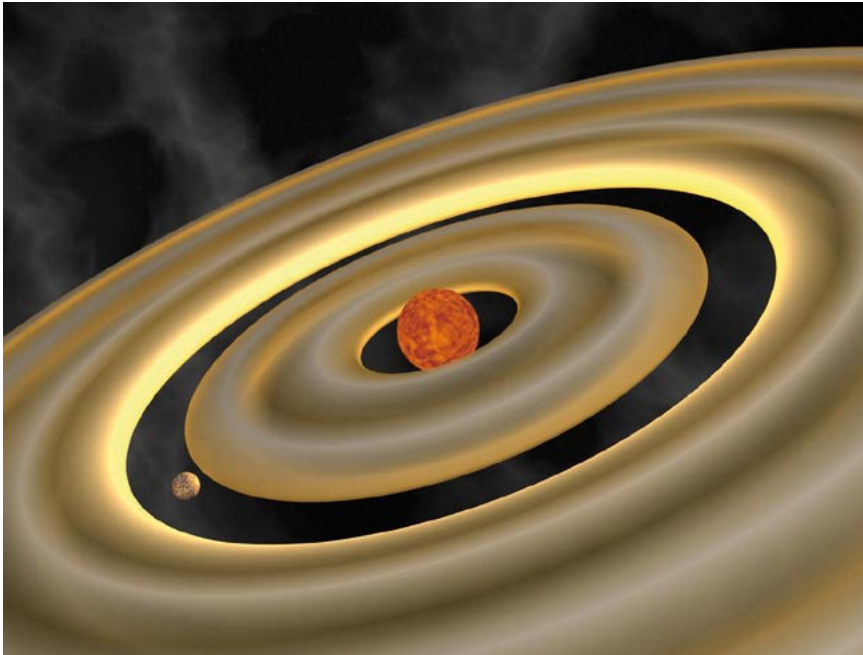
sehr wenig über seine Bedeutung, zum Beispiel bei der Bildung von Sternen und Galaxien. Mit Messungen der linear polarisierten Radiostrahlung am 100-m-Radioteleskop Effelsberg und anderen Radioteleskopen konnten Magnetfelder in unserem Milchstraßensystem und in fast allen anderen Galaxien nachgewiesen werden [2]. Die Spiralstruktur der Magnetfeldlinien (Abb. 15) lässt sich als Feldverstärkung durch den Dynamo-Effekt verstehen. Der Dynamo benötigt allerdings ein Saatfeld, das bei der Bildung der Protogalaxien oder noch davor entstanden sein muss.

Die Polarisationsebene wird durch den Faraday-Effekt gedreht, wenn die Radiowelle ein magnetisiertes Plasma durchdringt. Messungen der Faraday-Rotation zeigen, dass Magnetfelder über die optischen sichtbaren Teile einer Galaxie hinaus existieren und möglicherweise mit einem schwachen intergalaktischen Magnetfeld verbunden sind. Die Empfindlichkeit der heutigen Radioteleskope reicht allerdings zum Nachweis solcher schwacher Felder nicht aus.

Das SKA eröffnet die Möglichkeit, die Ursprünge des kosmischen Magnetismus aufzuspüren. Kern dieses Schlüsselpro-

jektes ist eine Durchmusterung der Faraday-Rotation linear polarisierter Quellen des gesamten Radiohimmels bei 21 Zentimeter Wellenlänge, gleichzeitig mit der Durchmusterung der HI-Linie des ersten Schlüsselprojekts. Die große Empfindlichkeit des SKA wird etwa zehn Millionen Messpunkte liefern (Abb. 16).

Mit Hilfe der Faraday-Rotation können Magnetfelder mit dem SKA auch noch in weit entfernten Objekten bis mindestens zu Rotverschiebungen von $z = 3$ nachgewiesen werden. Sollten die Magnetfelder in den ersten Galaxien besonders stark sein, so wird die Reichweite des SKA noch größer sein. Auch das Gas im intergalaktischen Raum und in Galaxien, die sich zufällig auf der Sichtlinie befinden, tragen zur Faraday-Rotation bei. Die gigantische Zahl von Messungen wird eine Trennung der verschiedenen Komponenten und damit ein dreidimensionales Bild der Magnetfelder im Universum ermöglichen. Intergalaktische Magnetfelder sind bisher nur in Galaxienhaufen bekannt. Sollte das SKA Magnetfelder überall im intergalaktischen Raum finden, so hätte das Konsequenzen für die kosmologischen Modelle, die bisher den Einfluss magnetischer Kräfte vernachlässigten.



◀ Abb. 17: Durch Protoplaneten, die das Material in der Nähe ihrer Umlaufbahnen aufsaugen, entstehen Lücken in protoplanetaren Scheiben. (Bild: Michael Kramer)

Das SKA wird außerdem erheblich schärfere Bilder der galaktischen Magnetfelder in unserem Milchstraßensystem und in nahen Galaxien machen, die den Einfluss magnetischer Kräfte auf Sternbildung und Gasbewegungen direkt veranschaulichen. Das SKA wird durch gleichzeitige Beobachtung in Hunderten von Frequenzkanälen die magnetischen Strukturen in verschiedenen tiefen Schichten erfassen und damit eine »Tomographie« des interstellaren Mediums ermöglichen.

Pulsare sind hoch polarisierte Radioquellen. Messungen der Faraday-Rotation sowie der Entfernung (abgeleitet aus dem Dispersionsmaß der Pulsar-Signale, also der zeitlichen Verzögerung der Ankunftszeiten in Abhängigkeit von der Frequenz) ergeben ein dreidimensionales Bild der Richtung und Stärke der Magnetfelder im gesamten Milchstraßensystem, das heute noch ungenau ist, weil nur wenige hundert Messpunkte vorliegen. Mit dem SKA und etwa 20 000 beobachtbaren Pulsaren (Abb. 12) werden noch kleinste magnetische Details sichtbar werden.

■ **Die Wiege des Lebens.** Protoplanetare Scheiben lassen sich mit dem SKA durch die thermische Radioemission des Staubes bei hohen Frequenzen (10 bis 25 GHz) abbilden. Staubeilchen bis zu etwa einem Millimeter Größe sind die Domäne von ALMA, während das SKA wegen der längeren Wellenlängen auch zentimetergroße Teilchen nachweisen kann. Scheiben mit hoher Dichte, die im Frequenzbereich von ALMA undurchsichtig sind, lassen sich mit dem SKA finden. Der entscheidende Vorteil des SKA ist jedoch die im Vergleich zu ALMA hundertmal bessere Winkelauflösung. Bei zwanzig Gigahertz zeigt das SKA zum Beispiel in 300 Lichtjahre entfernten Scheiben noch Details mit einer Größe von 0.1 Astronomischen Einheiten. Damit lassen sich die vermuteten Lücken, die durch erdähnliche Protoplaneten in den Protoscheiben entstehen [14], auch in den inneren Scheiben finden und im Detail beobachten (Abb. 17).

In dem vom SKA abgedeckten Frequenzbereich sind Hunderte von Moleküllinien aus dem interstellaren Medium oder aus zirkumstellaren Hüllen bekannt, davon mehr als dreißig organische Moleküle. Viele Kandidaten für Bausteine des Lebens, wie Aminosäuren und andere komplexe Kohlenstoffmoleküle, können mit dem SKA aufgespürt werden.

Literaturhinweise

Es gibt zur Zeit keine allgemeinverständlichen Bücher über Radioastronomie in deutscher Sprache. Antiquarisch sind bisweilen die Bücher »Radioastronomie« von Kristen Rohlf (Darmstadt 1980) und von Gerrit L. Verschuur (Basel 1988) erhältlich.

- [1] **Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos und Georgi Dvali:** Die unsichtbaren Dimensionen des Universums. In: Spektrum der Wissenschaft Dossier 1/2003, Vom Quant zum Kosmos, S. 56–63
- [2] **Rainer Beck und Richard Wielebinski:** Galaxien im Radiolicht. In: SuW-Special 2/2004, Lebendige Galaxis, S. 50–59
- [3] **Rainer Beck und Wolfgang Reich:** LOFAR: Startschuss für deutsche Stationen. SuW 9/2006, S. 19–21
- [4] **Michael Dahlem und Elias Brinks:** Radiobeobachtungen. SuW 5/1994, S. 350–357, 6/1994, S. 446–452, 7/1994, S. 524–531 sowie 10/1994, S. 692–702
- [5] **Heino Falcke:** LOFAR – das Low Frequency Array. SuW 5/2004, S. 24–34, sowie www.lofar.org
- [6] **Martin Harwit:** Die Entdeckung des Kosmos. Piper, München 1983
- [7] **Wayne Hu und Martin White:** Die Symphonie der Schöpfung. Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 48–55
- [8] **Martin Neumann:** Neues vom Rand des Kosmos. SuW 4/2003, S. 20–21
- [9] **Götz Hoeppe:** »In diesen sechs Zahlen steckt eine neue Physik«. SuW 11/2004, S. 24–31

- [10] **Jeremiah P. Ostriker und Paul J. Steinhardt:** Die Quintessenz des Universums. In: Spektrum der Wissenschaft Dossier 1/2003, Vom Quant zum Kosmos, S. 74–81

- [11] **Adam G. Riess und Michael S. Turner:** Das Tempo der Expansion. Spektrum der Wissenschaft 7/2004, S. 42–47

- [12] **Peter Shaver:** ALMA. In: SuW-Special 3/2003, Europas neue Teleskope, S. 74–85

- [13] **Glenn D. Starkman und Dominik J. Schwarz:** Missklänge im Universum. Spektrum der Wissenschaft 12/2005, S. 30–37

- [14] **Sebastian Wolf und Hubert Klahr:** Planetenentstehung. SuW 2/2006, S. 22–30.

SKA-Broschüren und Bücher:

- [15] **The Square Kilometre Array** (2005), erhältlich vom MPIfR, Bonn oder als Download von [19]
- [16] **SKA South Africa – Exploring Our Origins** (2003), erhältlich von der National Research Foundation, PO Box 2600, Pretoria, 0001, South Africa
- [17] **C. Carilli und S. Rawlings (Hrsg.):** Science with the SKA. New Astronomy Reviews 48, Elsevier 2004, erhältlich vom SKA Project Office
- [18] **P. Hall (Hrsg.):** The SKA: an Engineering Perspective. Experimental Astronomy 17, Springer, Berlin 2005
- [19] Homepage des Square Kilometre Array: www.skatelescope.org

Auch SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligence) gehört zu diesem Schlüsselprojekt. Der Radiobereich zwischen einem und zehn Gigahertz ist optimal zur Suche nach künstlichen Radiosignalen, da dort das Kontinuum der natürlichen kosmischen Signale am schwächsten ist. Auf der Grundfrequenz des Universums, der 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs (HI) bei 1.4 Gigahertz, sind Kommunikationsversuche entwickelter Zivilisationen am wahrscheinlichsten. Das SKA wird außerdem nach technischen Radiosignalen suchen. Flughafen-Radar könnte noch bis 100 Lichtjahre und Mobilfunkstationen mit einem Megawatt Leistung noch bis in drei Lichtjahre Entfernung nachgewiesen werden. Mit einer in Zukunft zehnfach verbesserten Empfindlichkeit würde das SKA sogar Fernseher, wie die heute auf der Erde üblichen, bis in 1000 Lichtjahren Entfernung nachweisen können.

■ **Die Erforschung des Unbekannten.** Die astronomische Beobachtung kann durch einen Phasenraum von Parametern beschrieben werden: Wellenlänge, Winkelauflösung, Zeitauflösung, spektrale Auflösung, Polarisierung. Fast mit jeder Erweiterung des beobachtbaren Phasenraums durch ein neuartiges oder wesentlich empfindlicheres Teleskop

wurde ein neues Phänomen entdeckt, das vorher nicht bekannt und in den meisten Fällen noch nicht einmal theoretisch vorhergesagt worden war [6]. Dazu gehören im Bereich der Radiowellen die kosmische Hintergrundstrahlung, Radiogalaxien, Jets, Pulsare und Gravitationswellen. Solche Entdeckungen sind das Spannende an der beobachtenden Astronomie und ein wichtiger Antrieb für die Planung neuer Teleskope. Nobelpreise winken!

Ausblick

Das SKA wird für die gesamte Astronomie von großer Bedeutung sein. Zu den anderen Großprojekten im optischen Bereich (OWL bzw. ELT, siehe SuW-Special 3/2003, »Europas neue Teleskope«) und im Röntgenbereich (z.B. XEUS), die zu ähnlichen Entfernungen vorstoßen werden, ist das SKA eine ideale Ergänzung, denn der Kosmos erschließt sich nur durch Beobachtungen in allen Wellenlängenbereichen. Die hier vorgestellten wissenschaftlichen Schlüsselprojekte zeigen die Vielzahl der fundamentalen Fragen, die mit dem SKA angegangen werden können, dazu kommen noch die zufälligen Entdeckungen. Viele der für das SKA notwendigen Neuentwicklungen werden von allgemeinem Nutzen sein, beispielsweise schnelle Signalübertragung, preiswerte

und zuverlässige Verstärker oder leichte Metallspiegel. Die frühzeitige Einbindung der technologischen Aufsteigerländer China und Indien erhöht die Erfolgchancen des Projekts. Bis zur Vollendung des SKA müssen noch viele enthusiastische Wissenschaftler und Techniker gewonnen werden, von denen die meisten heute ihr Studium noch gar nicht begonnen haben. Das SKA und sein aktueller europäischer Vorgänger LOFAR bieten neue Perspektiven für unseren wissenschaftlichen und technischen Nachwuchs. □

Ich danke Robert Braun, Norbert Junkes, Michael Kramer, Jan Noordam, Wolfgang Reich und Richard Schilizzi für Informationen, Bilder und die kritische Durchsicht des Manuskripts.



Rainer Beck erforscht am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn (MPIfR) hauptsächlich die Magnetfelder von Galaxien. Er ist an den Vorbereitungen internationaler Großprojekte wie LOFAR und SKA beteiligt.

»STERNE UND WELTRAUM« FÜR SCHULEN

Die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung übernimmt erstmalig im Rahmen der Aktion »Wissenschaft in die Schulen!« für 100 Schulen die Kosten eines Online-Zugangs zum Archiv von »Sterne und Weltraum« für ein Jahr!

Wenn Sie Lehrer sind und mit Ihrer Schule teilnehmen möchten, wenden Sie sich bitte innerhalb von sechs Wochen nach Erscheinen dieser Anzeige an:

Wissenschaft in die Schulen!

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Deutschland

E-Mail: wis@wissenschaft-schulen.de

Voraussetzung für eine Teilnahme ist die Begründung der Bewerbung (max. eine Seite Text), die Angabe von Namen und Anschrift der Schule sowie Ansprechpartner inklusive E-Mail-Adresse.



»Wissenschaft in die Schulen!« bietet monatlich praxisnahes didaktisches Material zu ausgewählten naturwissenschaftlichen Themen und kann in den regulären Unterricht einbezogen werden. Für das Gebiet Physik ist dies dank einer Kooperation des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg, der Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen, Donaueschingen, und der Klaus-Tschira-Stiftung gGmbH möglich. Das Material finden Sie bei www.wissenschaft-schulen.de.

Die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung ist eine gemeinnützige Stiftung des bürgerlichen Rechts. Ihr Zweck ist die Förderung von Forschung und Ausbildung in den Naturwissenschaften, insbesondere der Physik. Die Stiftung arbeitet eng mit der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zusammen.

Eine Initiative von Spektrum der Wissenschaft mit den Schirmherren Max-Planck-Institut für Astronomie und Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie e. V.

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler

