

Dunkle Energie: Neues aus dem Lyman-alpha-Wald?

Die Durchmusterung »Sloan Digital Sky Survey« geht in die nächste Runde. Im Rahmen des neuen Projektabschnitts erstellten Forscher die bislang umfangreichste 3-D-Karte des Universums. Nun hoffen die beteiligten Wissenschaftler auf den großen Wurf: Die Karte soll dabei helfen, die Natur der Dunklen Energie zu enträtseln.

Im Jahr 1997 sollte die Stunde des *Super-Inova Cosmology Projects* schlagen. Ziel des ambitionierten Unternehmens war es, mit Hilfe von extrem weit entfernten Standardkerzen, sehr leuchtkräftigen Supernovae, die Expansionsrate des jungen Universums zu messen. Eigentlich war das Ergebnis zumindest qualitativ schon vorher klar. Gleich einem in die Höhe geworfenen Ball sollte das Universum permanent Bewegungsenergie einbüßen, während es sich aufbläht. Die Rate der Expansion, charakterisiert durch den Hubble-Parameter, sollte demnach in früherer Zeit höher gewesen sein als heute – jedenfalls nach dem kosmologischen Standardmodell der 1990er Jahre.

Saul Perlmutter vom Lawrence Berkeley National Laboratory hatte die Leitung des Projekts inne. Er und seine Kol-

von einer Kraft durchzogen sein muss, die der Gravitation entgegenwirkt. Sie konnte nur von einer unbekannten, alles überragenden Substanz im Universum herrühren, die der US-amerikanische Astrophysiker Michael S. Turne von der Universität Chicago im Jahr 1998 »Dunkle Energie« taufte.

Soweit die bekannte Geschichte. Bekannt ist auch, dass die Astronomen in der Frage nach dem, was die Dunkle Energie denn eigentlich sei, heute so klug sind wie eh und je. Einsteins kosmologische Konstante, stets interpretiert als raumfüllende Vakuumenergie, sah von Beginn an wie ein naheliegender Kandidat für die Dunkle Energie aus. Doch ihr lasten gleich zwei grobe Makel an: Stünde tatsächlich die Energie des Quantenvakuums hinter der dunklen Kraft, so wäre das Universum

diglich einen Ausweg: Wäre die Dunkle Energie eine veränderliche Größe und abhängig von der Rotverschiebung, so ließe sich die Ähnlichkeit der Werte erklären. Auch Theorien, die sich vom rechten Pfad der allgemeinen Relativitätstheorie entfernen, finden Zustimmung unter den Wissenschaftlern. Bei der Suche nach dem wahren Wesen der Dunklen Energie gehen die Forscher nun einen neuen Weg, den der dritten Dimension, wenn man so will.

Der Klang des jungen Kosmos

Um zu verstehen, welchen Ansatz David Schlegel vom Lawrence Berkeley National Laboratory und sein Team dabei verfolgen, lohnt es, weit zurück zu gehen in die Kindheit des Universums, in jene Epoche, aus der die so genannten baryonischen Oszillationen stammen – Schallwellen im heißen kosmischen Plasma vor der Entkopplung von Strahlung und Materie (siehe Kasten »Der akustische Horizont«).

In den ersten 380 000 Jahren nach dem Urknall war die Temperatur im Kosmos so hoch, dass die überwiegende Zahl der Wasserstoff- und Heliumatome dauerhaft ionisiert vorlag. Die von den elektrischen Feldern der Ionen und freien Elektronen beeinflussten Photonen breiteten sich deshalb nicht frei aus, sondern standen quasi permanent in Wechselwirkung mit den Materieteilchen. Das Universum war daher undurchsichtig, Strahlung und Materie eng aneinander gekoppelt.

Schallwellen, die das frühe Universum durchwanderten, froren bei der Entkopplung von Strahlung und Materie ein.

legen staunten nicht schlecht, als sie das Ergebnis ihrer Analysen auf dem Monitor sahen (siehe SuW 6/2011, S. 36). Die Beobachtungsdaten ließen keine Zweifel: Entgegen aller Erwartung schien die Expansion des Universums mit der Zeit nicht langsamer, sondern immer schneller zu verlaufen. Ein wesentliches Faktum der damals geltenden Kosmologie war damit auf den Kopf gestellt. Physikalisch konnte dies nur bedeuten, dass das Universum

schon kurz nach seiner Entstehung schier explodiert. Sterne und Galaxien hätte es dann nie gegeben.

Außerdem ist die Dichte der Dunklen Energie – gleich welchen Ursprungs – im heutigen Universum ihrem Wert nach vergleichbar mit der Energiedichte der Dunklen und baryonischen Materie. Warum ist sie nicht um einen Faktor zehn oder auch 10^{20} größer oder kleiner? Für diese Übereinstimmung gibt es keine Erklärung, le-

Sloan Digital Sky Survey



Jeder Punkt in dieser Karte des Universums entspricht einem Quasar (blau) oder einer Galaxie. Rund 14 000 Quasare (blau) mit Rotverschiebungen z größer als 2,1 des Projekts BOSS ergänzen die bereits existierende Galaxienkarte (weiß, gelb und rot) der Durchmusterung *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Die neue Karte des Universums reicht bis zur maximalen Entfernung von zwölf Milliarden Lichtjahren mit dem Milchstraßensystem und der Erde im Zentrum. Weil das Licht der Quasare das intergalaktische Medium durchläuft, enthalten die Quasarspektren wertvolle Informationen über die Verteilung des Wasserstoffgases im frühen Universum. Die Wissenschaftler erhalten so ein quasikontinuierliches, dreidimensionales Bild des jungen Universums.

Die Saat für die Entstehung der Galaxien war bereits gelegt durch winzige Dichteschwankungen im Gemisch aus Strahlung und Materie. Wegen der strikten Kopplung von Strahlung und Materie waren jedoch die Bedingungen für ein »Aufgehen« der Saat, also für das Wachstum der Dichteschwankungen und die Entstehung von Galaxien, noch nicht gegeben. Stattdessen verbreiteten sich die Störungen, angetrieben von ihrem inneren Druck, wie Schallwellen durch den Raum.

380 000 Jahre nach dem Urknall war die Temperatur auf etwa 3000 Kelvin gesunken und damit kühl genug, um die Vereinigung der freien Elektronen und Protonen zu neutralen Wasserstoffatomen zu erlauben. Diesen Moment in der Geschichte des Kosmos bezeichnen die Kosmologen als Entkopplung, da von nun an Strahlung und Materie unabhängige Wege gehen. Die Schallgeschwindigkeit sank dabei rapide: von etwa halber Lichtgeschwindigkeit auf praktisch null. Statt weiter durch das All zu rasen, froren die Dichteschwankungen der Materie gleichsam ein und prägen damit eine grundlegende Eigenschaft der späteren Materieverteilung: Jede von einem ursprünglichen Dichtezentrum ausgehende Dichtewelle hatte bis dahin Zeit, etwa 150 Megaparsec (rund 500 Millionen Lichtjahre) zurückzulegen. Jedes Dichtezentrum sollte also von einem kugelförmigen Dichtewall, dem Schallho-

rizont, von 150 Megaparsec Radius umgeben sein. Wegen ihrer überhöhten Dichte stellen die Wände dieser Kugeln bevorzugte Orte für die Entstehung von Galaxien dar.

Die Konsequenz ist noch heute sichtbar, wie man aus den statistischen Analysen großer Himmelsdurchmusterungen wie dem Sloan Digital Sky Survey (SDSS) weiß (siehe Bild links). Das Prinzip: Man nehme je zwei Galaxien aus dem gesamten Galaxien-Katalog einer solchen Himmelsdurchmusterung und notiere ihren gegenseitigen Abstand (schon das ist leichter gesagt als getan). Dies wiederhole man für alle Galaxienpaare und analysiere die Häufigkeit der gemessenen Abstandswerte. Auf diese Weise lässt sich eine so genannte Korrelationsfunktion berechnen. Sie beschreibt die Beziehung zwischen statistischen Variablen, in dem Fall des Abstands.

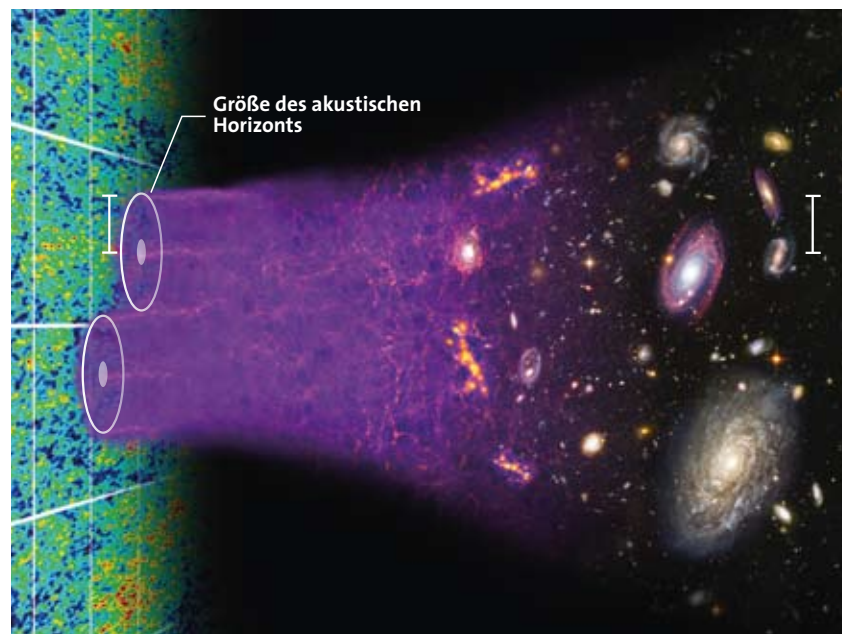
Wie sich zeigt, kommen die theoretisch erwarteten 150 Megaparsec als Abstand zweier zufällig gewählter Galaxien in der Tat auffallend häufig vor. Mit anderen Worten: Die großskalige Dichteverteilung im Universum zeigt einen leichten, aber deutlich messbaren Spitzenwert auf einer Längenskala von 150 Megaparsec. Dem Universum ist damit ein natürliches Längenmaß aufgeprägt, das bei der Entschlüsselung der Dunklen Energie eine zentrale Rolle spielen wird.

Ein Meterstab für das Universum

Entstanden ist diese Größenstruktur also in der frühen Kindheit des Universums. Doch das Weltall expandiert seither. Galaxien, die heute einen Abstand von 150 Megaparsec einnehmen, waren im jungen Universum entsprechend näher benachbart. Um wie viel näher, lässt sich im Rahmen des kosmologischen Standard-

Der akustische Horizont: 150 Megaparsec

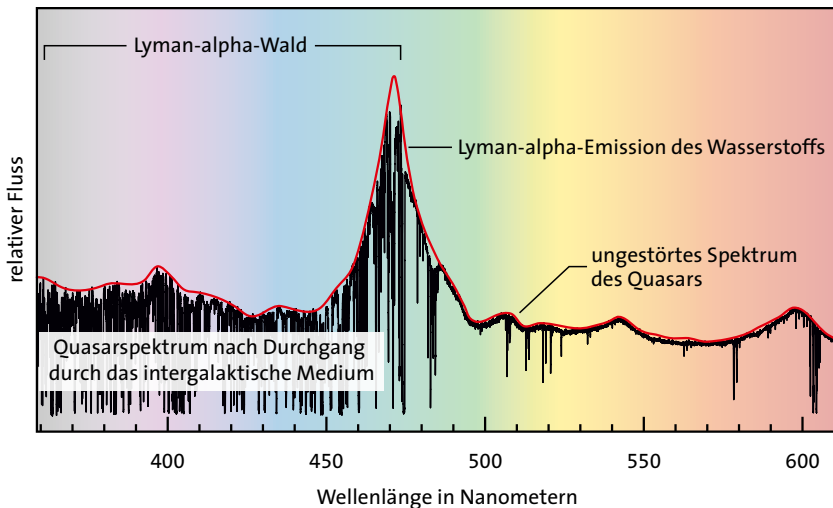
Die Grafik veranschaulicht den Einfluss der baryonischen akustischen Oszillationen des heißen Urknallplasmas auf die Strukturen des heutigen Kosmos. Baryonen sind Elementarteilchen wie das Proton und das Neutron. Jene Schallwellen, die durch das frühe Universum wanderten, froren bei der Entkopplung von Strahlung und Materie ein. Sie hinterließen ein Netz aus dichten und weniger dichten Bereichen im Universum (links) und bildeten die Saat für die künftige Entstehung großer Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen. Auf diese Weise blieben sie der späteren großskaligen Verteilung der Materie im Universum aufgeprägt. Aus theoretischen Überlegungen folgt die Länge des akustischen Horizonts zu etwa 150 Megaparsec, rund 500 Millionen Lichtjahre (siehe Balken). Diese Kenntnis könnte sich als wertvolles Mittel zur Entschlüsselung der Dunklen Energie entpuppen.



Sam Moorfield, Chris Blake / Swinburne University

Lyman-alpha-Wald

In den Spektren ferner Quasare reihen sich in der Nachbarschaft der Emissionslinie Lyman alpha zu kürzeren Wellenlängen hin zahlreiche Absorptionslinien dicht an dicht. Bevor das Licht der Quasare über Milliarden von Lichtjahren zu uns gelangt, durchquert es zahlreiche intergalaktische Wasserstoffwolken, die sich über die gesamte Reisedistanz verteilen. Jedes Mal, wenn das Licht durch eine Wolke dringt, absorbiert der dortige Wasserstoff einen Teil des Lichts, insbesondere die bekannte Lyman-alpha-Linie bei 121,6 Nanometer Laborwellenlänge. Während das Licht Wolke um Wolke durchläuft, verändert sich mit wachsender Reisedauer die Rotverschiebung der Strahlung. Deswegen »zapfen« die Wasserstoffwolken die Lyman-alpha-Linie des Quasarlichts bei vielen unterschiedlichen Wellenlängen an. Das Spektrum wirkt daher wie ein Speicher, es »merkt« sich jede der Wolken durch eine Einkerbung an entsprechender Stelle. Die Lyman-alpha-Linie des hier gezeigten Spektrums des Quasars HE2347–4342 liegt bei der Wellenlänge 470 Nanometer. Dies entspricht einer Rotverschiebung von $z = \lambda / \lambda_0 - 1 = 2,87$ und einer Distanz von rund 13,8 Milliarden Lichtjahren. Das Licht ging dabei rund 2,76 Milliarden Jahre nach dem Urknall auf die Reise. Im Kasten rechts ist der Bereich zwischen 420 und 430 Nanometer zu sehen.



Rob Simcoe, MIT / Joseph F. Hennawi, MPIA / SuW-Grafik

modells, das inzwischen um einen mathematischen Term für die Dunkle Energie erweitert wurde, leicht berechnen. Die meisten Parameter dieses Modells sind heute gut bekannt. Offen ist immer noch die Frage nach jenem Parameter Ω , der die zeitliche Veränderung der Dunklen Energie repräsentiert. $\Omega = -1$ steht für einen ewig konstanten Wert der Dunklen Energie, also für Einsteins kosmologische Konstante. Werte für Ω zwischen -1 und $-1/3$ würden dagegen das so genannte Quintessenz-Modell bestätigen, das eine zeitlich veränderliche Dunkle Energie vorhersagt.

Wie lässt sich die zeitliche Veränderung der Dunklen Energie herausfinden? Das Prinzip ist wiederum einfach. Gelänge es, eine detaillierte Karte des frühen Universums zu erstellen, so ließe sich mit Hilfe einer statistischen Analyse der Galaxienverteilung messen, unter welchem Winkel am Himmel uns der Schallhorizont je-

ner Epoche erscheint. Dessen tatsächliche Länge in Lichtjahren ergibt sich aber aus den Rotverschiebungen der beobachteten Galaxien. Dies legt eindeutig fest, um welchen Faktor das Universum – und mit ihm der Schallhorizont – damals kleiner war als heute. Daraus, und aus dem beobachteten Winkel des Horizonts lässt sich dann mittels einfacher Geometrie (und einiger kosmologischer Korrekturen) der Abstand der beobachteten Strukturen berechnen.

Nun gilt es, daraus dem Ω -Parameter zu extrahieren: Eine feste Kombination der kosmologischen Parameter ordnet im kosmologischen Modell jeder Rotverschiebung einen bestimmten Abstand zu. Wir kennen sowohl die Rotverschiebungen der Kartenobjekte als auch ihren tatsächlichen Abstand. Der Ω -Parameter ist schließlich so zu wählen, dass diese Rotverschiebungs-Abstands-Relation aus dem Modell korrekt hervorgeht.

Was dem Prinzip nach einfach anmutet, bereitet den Astronomen dennoch Probleme. In der Tat wurden bereits ambitionierte Karten zurückliegender Epochen des Universums erstellt. Allerdings beschränkten sich diese Karten bislang auf vergleichsweise wenige »Messpunkte«, nämlich besonders helle rote Galaxien aus früheren Durchmusterungen des SDSS.

Durchbruch mit BOSS?

An dieser Stelle tritt das Projekt BOSS (*Baryonic Oscillation Spectroscopic Survey*) der neuen Durchmusterung SDSS III auf den Plan. Mit ihm werden sich die statistische Zuverlässigkeit – und damit die Genauigkeit der charakteristischen Längenskala – radikal verbessern. Die Forscher des BOSS-Projekts beziehen nämlich leuchtkräftige, weit entfernte Quasare in ihre Beobachtung ein. Schon dies verbessert die Qualität der Karte enorm und lässt eine Rückschau in weit frühere Epochen als bisher zu. Außerdem – und das ist eine wesentliche Neuerung gegenüber bisherigen Untersuchungen – liefert das Licht jedes einzelnen Quasars zusätzliche Informationen über die gesamte Materieverteilung auf der Sichtlinie zwischen der Erde und dem Quasar.

Jede Wasserstoffwolke, die zwischen einem Quasar und einem irdischen Beobachter liegt, stellt für das Licht des Quasars ein Hindernis dar, und zwar ein sehr spezielles. Denn das Wasserstoffgas absorbiert nur diejenigen Photonen, deren Energie gerade ausreicht, ein neutrales Wasserstoffatom zu ionisieren. Photonen geringerer Energie durchdringen die Wolke mühelos. Für das Spektrum des Quasars bedeutet das: Nur jene Wellenlänge des Lichts, das der Ionisierungsenergie des Wasserstoff entspricht (der Lyman-alpha-Übergang bei 121,5 Nanometer) wird aus dem Spektrum des Quasars getilgt oder zumindest stark unterdrückt.

Eine Wasserstoffwolke, die in dieser Weise ihren Fingerabdruck im Quasar-Spektrum hinterlassen hat, kann jedoch beispielsweise 0,5, 3 oder 8 Milliarden Lichtjahre vom Quasar (oder von der Erde) entfernt sein. Weil das Licht also auf seiner Reise vom Quasar zur Wasserstoffwolke bereits eine gewisse Rotverschiebung erfahren hat, liegt die neu eingeprägte Absorptionslinie in der Regel nicht bei den erwähnten 121,5 Nanometern, sondern um einen gewissen Betrag in den langwelligen Bereich verschoben.

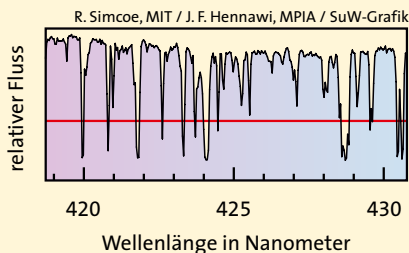
ZUM NACHDENKEN

Der Lyman-alpha-Wald

Große Wolken aus intergalaktischem Wasserstoff bevölkern das Universum. Sie sind nicht leicht zu finden und erst seit der Erklärung des Lyman-alpha-Walds Mitte der 1980er Jahre bekannt. Stehen sie zwischen der Erde und einer Lichtquelle, wie etwa dem Quasar HE2347-4342, so schneiden sie entsprechend ihrer unterschiedlichen Rotverschiebung verschiedene schmale Bereiche aus dem Spektrum des Quasars.

Aufgabe 1: Der Wechsel zwischen zwei Energiezuständen des Wasserstoffatoms mit den beiden Hauptquantenzahlen $n = 1$ und $n = 2$ erzeugt die Lyman-alpha-Linie. Dabei erhält das emittierte bzw. absorbierte Photon die Energie $\Delta E = h \nu = h c / \lambda = E_2 - E_1$ mit den Energiezuständen $E_n = -E_R / n^2$. E_R die zur Ionisation erforderliche Rydbergenergie $E_R = m_e e^4 / (8 \epsilon_0^2 h^2) = 13,6 \text{ eV} = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J}$. Man bestimme die Wellenlänge $\lambda_{L\alpha}$ der Lyman-alpha-Linie.

Aufgabe 2: Die Rotverschiebung des Quasars HE2347-4342 wurde zu $z = 2,885$ bestimmt. Mit Hilfe der Defini-



tion $z = \Delta \lambda / \lambda_0$ mit $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0$ ermittle man die beobachtete Wellenlänge λ_z der Lyman-alpha-Linie.

Aufgabe 3: Für die kräftigsten Absorptionslinien im obigen Spektrum (tiefer als der rote Strich) messe man die Wellenlänge, bestimme daraus die Rotverschiebung und schließlich die Distanz $D = c z / H_0$ zur Erde ($H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). Wie groß ist der mittlere Abstand zwischen diesen Wasserstoffwolken? AMQ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **15. August 2011** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528246.

Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern **Preise** verlost: siehe S. 109



Niemals wird nur eine einzige Wolke zwischen uns und einem beliebigen Quasar stehen. Jede Wolke verpasst aber dem Spektrum ihre Visitenkarte in Form einer Absorptionslinie, deren Lage im Spektrum von der genauen Position der Wolke zwischen uns und dem Quasar abhängt. So wird das Quasarspektrum mit einem charakteristischen Muster versehen: einem ganzen Bündel eng beieinander gelegener Absorptionslinien, das die Astronomen als Lyman-alpha-Wald bezeichnen (siehe Kasten »Lyman-alpha-Wald«). Die Analyse des Lyman-alpha-Walds liefert den Forschern also detaillierte Kenntnis darüber, wie das Wasserstoffgas – immerhin das häufigste Element im Universum! – zwischen der Erde und dem untersuchten Quasar verteilt ist.

Bis zum Jahr 2014 wollen die Wissenschaftler des BOSS-Projekts insgesamt 1,5 Millionen Galaxien bis zu Rotverschie-

bungen von $z = 0,7$ analysieren, und weitere 160 000 Quasare mit Rotverschiebungen zwischen $z = 2,2$ und $z = 3$ samt ihrer Lyman-alpha-Linien.

Aus den gewonnenen Daten wird es möglich sein, eine dreidimensionale Karte der kosmischen Materieverteilung von bislang unerreichter Dichte zu erstellen. Aus allen Messpunkten, Galaxien, Quasaren und Wasserstoffwolken, lässt sich am Ende schließlich eine genaue Korrelationsfunktion ermitteln, aus der die Länge des Schallhorizonts sichtbar wird. Eine wilde Epoche der kosmologischen Forschung könnte damit zum Ende kommen: die anhaltende Spekulation über das Wesen der Dunklen Energie.

HELMUT HETZNECKER ist promovierter Astronom und Autor mehrerer Bücher. Er arbeitet heute als Wissenschaftsjournalist vor allem im TV-Bereich.



NEU bei Astroshop.de
Die neuen TeleVue Delos Okulare bieten Ihnen ein großes Gesichtsfeld von 22° und einen Augenabstand von 20mm. Entscheiden Sie sich für eine Qualität auf dem optischen Niveau der Ethos-Okulare. Auch für Brillen-träger geeignet!
Sichern Sie sich jetzt die ersten Exemplare mit 6mm oder 10mm Brennweite!
Artikel-Nr. 22A4, 22A2

NEU

Empfehlungen

Omegon pro Carbon APOs Neues für die Himmelsbühne

Die neuen Omegon Aporefraktoren lassen jedes Astrofotografen-Herz höherschlagen. ED-Apo Objektiv im Doublet oder Triplet Design, leichte und stabile Carbon Tuben und herausziehbare Taukappen sind die wichtigsten Features. Okularauszüge der neuen Generation: sehr tragkräftig, 1:11 Untersetzungs- und mit 2", 2,7" oder 3" groß dimensioniert.

Damit tritt selbst bei großen Chips keine Vignettierung auf. Die neuen Omegon Carbon-Apos bieten High-End Qualität für Astrofotografen und Amateurastronomen, die Wert auf ein exzellentes Teleskop legen.

Die Leistung dieser vier ED-Aporefraktoren wird Sie garantiert überzeugen.
NEHMEN SIE MIT UNS KONTAKT AUF UND ERFAHREN SIE MEHR!



	Artikel-Nr.	Preis
80/500 ED-APO	14738	898,-
100/600 ED-APO	21266	1.450,-
126/880 ED-Triplet	21267	2.980,-
150/1000 ED-Triplet	21268	7.490,-

i weitere Infos unter:
www.Astroshop.de

Personliche Beratung

Service@Astroshop.de

+49 8191 94049-1

+49 8191 94049-9

Astroshop.de
c/o nimas GmbH
Otto-Lilienthal-Str. 9
86899 Landsberg am Lech
Direkt an der A95 und B17,
ca. 30min von Augsburg
und München.

Damit wir uns genug Zeit für Sie nehmen können, bitten Sie bitte immer vor Ihrem Besuch bei uns an und reservieren einen Termin.
»Danke«

Wir sind Mo-Fr von 8-20 Uhr und Sa von 10-16 Uhr für Sie da!