



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Weighing the dark : cosmological applications of gravitational lensing

Köhlinger, F.

Citation

Köhlinger, F. (2016, September 28). *Weighing the dark : cosmological applications of gravitational lensing*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/43359>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License:

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/43359>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/43359> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Köhlinger, F.

Title: Weighing the dark : cosmological applications of gravitational lensing

Issue Date: 2016-09-28

Zusammenfassung

7.1 Moderne Kosmologie

Unser modernes kosmologisches Weltbild basiert auf Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, welche die Wechselwirkung zwischen Masse (was nach Einsteins $E = mc^2$ gleichbedeutend ist mit Energie) und der Raumzeit beschreibt. Darauf aufbauend entstand im Verlauf der letzten Hundert Jahre ein physikalisches Modell für den Ursprung, Verlauf und das Ende des Universums, ein sogenanntes kosmologisches Modell. Für unser heutiges kosmologisches Modell benötigt man nur ein paar Parameter, um eine große Spanne von verschiedenen kosmologischen Beobachtungen sehr erfolgreich zu beschreiben. Die physikalische Grundlage für die zwei wichtigsten Parameter des kosmologischen Modells, Dunkle Materie und Dunkle Energie, ist jedoch noch ein vollkommenes Rätsel.

Zur Zeit wissen wir nur sicher, dass Dunkle Materie allein gravitativ wechselwirkt und dass sie kein Licht aussendet (von daher ist “dunkel” durchaus passend in diesem Zusammenhang). Allerdings spielt Dunkle Materie eine fundamentale Rolle in der Bildung von kosmisch großräumigen Strukturen. Diese ziehen sich wie ein Netz durchs All, deshalb spricht man in diesem Zusammenhang auch vom “kosmischen Netz”. An den Knotenpunkten dieses Netzes befinden sich die größten, durch Gravitation gebundenen Strukturen: Ansammlungen von Hunderten von Galaxien, sogenannte Galaxienhaufen. Diese bestehen hauptsächlich aus Dunkler Materie, weshalb Galaxienhaufen ideale “Testlabore” sind, um die Wechselwirkung von dunkler und gewöhnlicher Materie genau zu untersuchen.

Eine bedeutende Erkenntnis unseres heutigen kosmologischen Modells ist, dass sich der Raum ausdehnt, allerdings nur auf kosmisch großen Skalen. Durch Gravitation gebundene Objekte werden dadurch jedoch nicht “auseinander gerissen”. Wenn man die Expansion des Raumes zeitlich zurück verfolgt, gelangt man zu dem Schluss, dass es einen Anfangspunkt für die Expansion gegeben haben muss, den sogenannten Urknall. Dieser fand wohl vor ungefähr 13,8 Milliarden Jahren statt. Am Anfang war das Universum extrem dicht und heiß und dadurch, dass sich der Raum weiter ausdehnt, kühlt das All zunehmend ab und dünnt immer weiter aus. Als es dann schließlich soweit abgekühlt war, dass sich aus dem extrem heißen Teilchen- und Strahlungsplasma die ersten neutralen (Wasserstoff-)Atome bilden konnten, wurde das Universum durchsichtig für elektromagnetische Strahlung (was ungefähr 380 000 Jahre nach dem Urknall geschah). Selbst heute noch können wir die Überreste dieser Wärmestrahlung beobachten. Dieses “Nachglühen” ist die sogenannte “kosmische Hintergrundstrahlung”. Immer präzisere Messungen der winzigen Temperaturschwankungen in dieser kosmischen Hintergrundstrahlung, zum Beispiel durchgeführt mit Satellitenobservatorien wie *WMAP* (englische Abkürzung für *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) oder *Planck*, liefern momentan die genauesten Werte für eine Vielzahl von kosmologischen Parametern.

Aktuelle Beobachtungen zeigen weiterhin, dass sich der Raum sogar beschleunigt ausdehnt. Die Ursache für diese beschleunigte Ausdehnung nennen wir Dunkle Energie, aller-

dings steht das ‐dunkel‐ darin eher f‐r unser Unwissen als f‐r eine echte physikalische Eigenschaft. Man sollte Dunkle Energie deshalb eher als abstrakten Begriff sehen, um verschiedene Theorien in einem ‐bergeordneten Rahmen zu sammeln. Einige dieser Theorien haben weitreichende Folgen und w‐rden sogar eine ‐nderung von Einsteins Allgemeiner Relativit‐tstheorie nach sich ziehen. Das macht das Studium der Dunklen Energie zu einem der wichtigsten Schwerpunkte in der heutigen kosmologischen Forschung. Obwohl wir nicht wissen, was genau Dunkle Energie eigentlich ist, k‐nnen wir ihren Einfluss auf die beschleunigte Ausdehnung des Raumes beobachten, zum Beispiel durch das genaue Studium der Entwicklung von kosmisch gro‐r‐umigen Strukturen.

Diese Entwicklung wird zudem auch noch von den uns besser bekannten Neutrinos beeinflusst. Diese Elementarteilchen bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit, interagieren aber nur sehr, sehr schwach durch die schwache subatomare Wechselwirkung (eine der vier Grundkr‐fte der Natur). In diesem Augenblick etwa fliegen pro Sekunde um die 70 Milliarden Neutrinos durch eine Fl‐che so gro‐ wie ein Daumennagel. Dass Neutrinos gravitativ wechselwirken, wurde in nobelpreisw‐rdigen Teilchenphysikexperimenten herausgefunden. Diese zeigten, dass Neutrinos eine (winzige) Masse besitzen. Allerdings kann man durch Teilchenphysikexperimente zur Zeit noch nicht den absoluten Wert der Neutrinomasse messen und die derzeit genauesten Bestimmungen f‐r die Obergrenze der Neutrinomasse erh‐lt man durch das Studium des kosmischen Netzes.

7.2 Der Gravitationslinseneffekt

Ein sehr hilfreiches Werkzeug f‐r das Studium von Dunkler Materie und Dunkler Energie ist der Gravitationslinseneffekt. Dieser beschreibt die Ablenkung des Lichts einer Quelle, zum Beispiel einer Galaxie, durch eine Masse im Vordergrund, die sogenannte Linse. Abh‐ngig von der genauen geometrischen Anordnung von Quelle, Linse und Beobachter und der genauen Massenverteilung der Linse k‐nnen die Lichtablenkungen so stark sein, dass extrem verformte oder sogar Mehrfachbilder derselben Quelle entstehen. Dies nennt man dann den ‐starken‐ Gravitationslinseneffekt und dieser tritt nur in kurzem (projiziertem) Abstand zur Linse auf. Weiter entfernt von der Linse kann man nur noch die Effekte von schwachen Lichtablenkungen beobachten. Das ist nur einer der Gr‐nde daf‐r, warum man einen statistischen Ansatz zum Studium des schwachen Linseneffekts braucht. Der andere Grund ist, dass man die wahre, intrinsische Form einer einzelnen Galaxie und die Verformung durch den Gravitationslinseneffekt prinzipiell nicht voneinander trennen kann. Allerdings kann man annehmen, dass sich f‐r hinreichend gro‐e Stichproben von Galaxien deren intrinsische Formen rausmitteln (da die intrinsischen Formen der Galaxien zuf‐llig verteilt sind). Deshalb bleibt nach einer solchen Mittelung nur die durch die Gravitationslinse hervorgerufene Bildverformung ‐brig. Dies nennt man den ‐schwachen‐ Gravitationslinseneffekt.

Man kann sowohl mit Hilfe des starken als auch des schwachen Gravitationslinseneffektes die Masse der Linse bestimmen. Dies macht den Gravitationslinseneffekt zu einem sehr wichtigen Werkzeug f‐r die Kosmologie, da die *Gesamtmasse* der Linse, inklusive der Dunklen Materie, die Lichtablenkungen verursacht. Daher erlaubt uns das Studium der Masse und ihrer Verteilung in Galaxienhaufen mit dem Gravitationslinseneffekt kosmologische Parameter zu bestimmen. Au‐erdem ist die Anzahl von Galaxienhaufen mit einer bestimmten Masse zu einer bestimmten kosmischen Zeit pro Volumen ein weiterer wichtiger kosmologischer Test, der pr‐zise Massenbestimmungen voraussetzt.

Anstatt den starken oder schwachen Gravitationslinseneffekt nur zur Bestimmung der Masse von einzelnen Linsen, wie Galaxien oder Galaxienhaufen, zu verwenden, kann man das Universum selbst als Linse benutzen: Licht, das sich durch die kosmisch gro‐r‐umigen

Strukturen ausbreitet, wird durch diese schwach abgelenkt. Durch Messung dieser schwachen Lichtablenkung zu verschiedenen kosmischen Zeiten können wir Rückschlüsse über die Entwicklung von Strukturen im kosmischen Netz ziehen. Da diese Entwicklung von der Dunklen Energie beeinflusst wird, können wir so etwas über die Eigenschaften der Dunklen Energie erfahren. Die schwache Lichtablenkung durch das kosmische Netz nennt man im Englischen “cosmic shear” (wörtlich “kosmische Scherung”), aber wir werden im Folgenden den Ausdruck “kosmischer Gravitationslinseneffekt” verwenden.

Zur Zeit werden große Himmelsdurchmusterungen durchgeführt, die schließlich mehrere Tausend Quadratgrad des Himmels umfassen werden, um den kosmischen Gravitationslinseneffekt zu messen. Diese dienen als Vorläufer für Durchmusterungen des nahezu gesamten Himmels, die noch im Verlauf des nächsten Jahrzehnts stattfinden werden.

7.3 Der Inhalt dieser Doktorarbeit

In dieser Doktorarbeit präsentieren wir Anwendungen des starken und schwachen Gravitationslinseneffekts in einem kosmologischen Kontext.

In **Kapitel 2** untersuchen wir die Masse und ihre Verteilung in einem der massereichsten Galaxienhaufen, die uns heute bekannt sind, dem Galaxienhaufen RX J1347.5–1145. Der Galaxienhaufen ist auch besonders leuchtstark im Röntgenbereich, was darauf hindeutet, dass er sehr viel heißes Gas besitzt. Dieses ist so heiß, dass es Röntgenstrahlung aussendet. Um die Masse des Galaxienhaufens zu untersuchen, benutzen wir den starken Gravitationslinseneffekt, da extrem verformte Bilder, wie zum Beispiel sogenannte helle, blaue Bogen und sogar Systeme von Mehrfachbildern um den Galaxienhaufen herum beobachtet werden können. Diese sehr detaillierten Beobachtungen wurden mit dem Weltraumteleskop *Hubble* gemacht und sind in einem Onlinearchiv frei verfügbar. Wir verwenden zwei unabhängige Modellierungsansätze um ein konsistentes und sehr detailliertes Modell des Galaxienhaufens als starke Gravitationslinse zu erstellen. Außerdem messen wir schließlich das Profil der Masse und ihre Verteilung im Kern des Galaxienhaufens.

In **Kapitel 3** wenden wir uns großen Stichproben von Galaxienhaufen zu, um zu untersuchen, was die Genauigkeit der Massenbestimmung mit Hilfe des schwachen Gravitationslinseneffektes begrenzt. Dabei konzentrieren wir uns im Besonderen auf die zukünftige Durchmusterung des fast gesamten Himmels mit dem *Euclid*-Satelliten. Wir bestimmen, wie präzise man die Masse von Stichproben von Galaxienhaufen in dieser Mission bestimmen werden kann und studieren weiter den Einfluss von mehreren systematischen Fehlerquellen auf diese Massenbestimmungen. Wie bereits zuvor erwähnt, sind diese präzisen Massenbestimmungen sehr wichtig, um die Anzahl von Galaxienhaufen einer bestimmten Masse zu einer bestimmten kosmischen Zeit pro Volumen zu messen. Diese Zahl wiederum hängt sehr stark vom kosmologischen Modell ab und erlaubt es uns deshalb kosmologische Parameter zu bestimmen. Im Besonderen untersuchen wir, welchen Effekt Galaxien des Galaxienhaufens haben, die irrtümlich als Quellen für den schwachen Gravitationslinseneffekt genommen werden, obwohl sie in Wahrheit Linsen sind. Diese “falschen” Quellen schwächen das durch den schwachen Gravitationslinseneffekt hervorgerufene Signal ab, wodurch man eine niedrigere als in Wirklichkeit vorhandene Masse misst. Für das kombinierte Signal von großen Stichproben von Galaxienhaufen ist dieser Effekt nicht zu vernachlässigen und muss sorgfältig berücksichtigt werden. Schließlich untersuchen wir noch die Auswirkung einer fehlerhaften Bestimmung des Zentrums des Galaxienhaufens auf die Massenbestimmung. Normalerweise nimmt man die Position der hellsten Galaxie im Galaxienhaufen als Zentrum oder die Position, an der die Röntgenstrahlung am höchsten ist. Diese Positionen müssen aber nicht notwendigerweise mit dem wahren Zentrum des Galaxienhaufens übereinstimmen, was dann wiederum die Mes-

sung des schwachen Gravitationslinseneffekts beeinflusst. Da wir für *Euclid* nur sehr kleine statistische Ungenauigkeiten in der Massenbestimmung erwarten, muss auch dieser systematische Effekt genau berücksichtigt werden. Komplementäre Missionen, wie zum Beispiel die geplante Himmelsdurchmusterung im Röntgenbereich durch *eROSITA* (englische Abkürzung für *extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array*), werden es jedoch ermöglichen den Effekt eines falsch angenommenen Zentrums des Galaxienhaufens zu korrigieren.

In den letzten beiden Kapiteln gehen wir über das Studium von Galaxienhaufen hinaus und studieren stattdessen die Strukturen des kosmischen Netzes mit Hilfe des kosmischen Gravitationslinseneffekts. Anstatt den Standardansatz zur Messung des kosmischen Linseneffekts zu folgen, benutzen wir eine mathematische Transformationstechnik, die eine Beschreibung des Signals in derselben mathematischen Formulierung der theoretischen Vorhersagen liefert (theoretische Vorhersagen werden benötigt, um die Messungen mit dem kosmologischen Modell zu vergleichen). Ein besonderer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass zum Beispiel die Effekte von massebehafteten Neutrinos in dieser mathematischen Formulierung klarer und eindeutiger studiert werden können. Um die Bestimmung von kosmologischen Parametern mit Hilfe dieser Technik noch genauer zu machen, erweitern wir den Algorithmus in **Kapitel 4**, sodass wir mit ihm auch Messungen des kosmischen Gravitationslinseneffekts zu unterschiedlichen kosmischen Zeiten machen können. Wir testen den erweiterten Algorithmus gründlich mit simulierten Daten, bevor wir ihn schließlich auf echte und frei zugängliche Daten der Himmelsdurchmusterung CFHTLS (englische Abkürzung für “Canada–France–Hawaii Telescope Legacy Survey”) anwenden.

Schließlich verwenden wir in **Kapitel 5** aktuellste Kataloge der Himmelsdurchmusterung KiDS (englische Abkürzung für “Kilo-Degree Survey”), die auf Beobachtungen des Himmels mit einer Fläche von ungefähr 450 Quadratgrad basieren. Mit diesen Daten messen wir wieder den kosmischen Gravitationslinseneffekt mit unserem erweiterten Algorithmus und extrahieren außerdem kosmologische Parameter. Unsere Resultate stimmen nicht mit den aktuellsten Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung durch *Planck* überein.