

## Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung kosmologischer Parameter, insbesondere der Hubble-Konstanten, mittels Beobachtungen von Gravitationslinsen. Diese Methode hat den Vorteil, nur von wenigen astrophysikalischen Vorstellungen abhängig zu sein. Dadurch werden sehr zuverlässige Resultate ermöglicht, deren restliche Unsicherheiten relativ einfach abgeschätzt werden können. Der wichtigste Beitrag zu möglichen Fehlern ist auf die verwendeten Linsenmodelle zurückzuführen. Es ist deshalb nötig, diese Fehlerquellen genau zu untersuchen und sie so weit wie möglich zu reduzieren. Es werden Ergebnisse analytischer Untersuchungen einer sehr allgemeinen Familie von Linsen mit radialem Potenzgesetz und beliebiger Winkelabhängigkeit präsentiert. Störungen von außen werden durch eine externe Scherung beschrieben. Um alle Beobachtungseinschränkungen eines optimalen Systems mit kompakten mehrfach abgebildeten Quellen untersuchen zu können, betrachten wir Vierfachsysteme, bei denen die Bildpositionen und alle drei unabhängigen „time-delays“ als Einschränkungen für die Linsenmodelle wirken. Es ist lange bekannt, dass der radiale Dichteverlauf der Linsen einen wichtigen Effekt auf die ermittelten Werte der Hubble-Konstante  $H_0$  haben kann. In unseren Rechnungen finden wir eine allgemeingültige Skalierung des gemessenen  $H_0$  in Abhängigkeit vom Exponenten des Radialanteils des Potentials  $\beta$ . Diese Skalierung ist für alle derartigen Linsensysteme exakt gleich. Systematische Fehler des angenommenen  $\beta$  werden deshalb in ebensolchen systematischen Fehlern in  $H_0$  resultieren. Um den Effekt der externen Scherung zu beschreiben, verwenden wir das neue Konzept der „kritischen Scherung“. Für eine externe Scherung, die diesem Wert exakt gleich ist, verschwinden alle time-delays.

Um die Situation zu verbessern, müssen externe Scherung und radialer Dichteverlauf exakt vermessen werden. Systeme mit mehrfach abgebildeten unaufgelösten Bildern können immer nur eine begrenzte Anzahl von Einschränkungen liefern. Es ist deshalb wichtig, auch ausge dehnte mehrfach abgebildete Quellen zu verwenden, die die Linsenmodelle deutlich besser einschränken können. Für unsere Untersuchungen verwenden wir das System JVAS B0218+357 als exemplarischen Testfall. Für dieses System ist der time-delay bekannt, so daß die Bestimmung von  $H_0$  prinzipiell ermöglicht wird. Es zeigt sich, dass „klassische“ Linsenmodellierung, die nur Informationen der beiden kompakten Bilder verwendet, nicht ausreichend ist um die Position der Linsengalaxie zu bestimmen. Solche Modelle können deshalb nicht zur Bestimmung der Hubble-Konstanten verwendet werden.

Um zusätzlich die Strukturen des hier ebenfalls vorhandenen Einsteinrings ausnutzen zu können, verwenden wir den LENS CLEAN Algorithmus. Dies macht den Hauptteil dieser Arbeit aus. Es wird eine Anzahl von deutlichen Verbesserungen von LENS CLEAN besprochen, die nötig waren, um daraus ein nützliches Verfahren für Systeme wie B0218+357 zu machen. Hiermit können die Parameter eines elliptischen isothermen Massenmodells mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden um ein konkurrenzfähiges Ergebnis für die Hubble-Konstante von  $H_0 = (71 \pm 5) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  für ein Einstein-de Sitter-Universum zu erhalten. Die Fehlergrenzen geben einen  $2\sigma$  Vertrauensbereich an. In ihnen sind die Unsicherheiten aus time-delay und Linsenmodell enthalten. In diesem speziellen Fall sind keine wesentlich unterschiedlichen Resultate zu erwarten, wenn nicht-isotherme Modelle verwendet werden.

Zudem präsentieren wir neue VLBI Beobachtungen von B0218+357, die zum ersten Mal doppelt abgebildete Bereiche des Jets dieser Quelle zeigen. Diese Daten können die radiale Masseverteilung mit bisher unerreichter Genauigkeit festlegen. Zusammen mit den Ergebnissen von bereits genehmigten HST Beobachtungen wird B0218+357 das System mit dem am genauesten bekannten Linsenmodell und dem besten Ergebnis für die Hubble-Konstante werden. B0218+357 ist damit auf dem besten Weg, seine Versprechen als „goldene Linse“ einzulösen.

## Abstract

This work discusses the determination of cosmological parameters, especially the Hubble constant, from observations of gravitational lenses. The lens method has the advantage that it depends on the understanding of only very little astrophysics. This allows very robust results and makes estimates of the remaining uncertainties relatively simple. The most important contribution to possible errors is given by the mass models for the lensing galaxies. It is thus necessary to obtain good estimates of these uncertainties and to reduce them as much as possible. We present analytical calculations for a general family of power-law lens models with arbitrary angular shape plus external perturbations. The latter are parametrized as external shear. To include all constraints for optimal unresolved multiple image lens systems, we examine quadruple systems using the image positions and the three independent time-delays as constraints. It is well known that the radial mass distribution has important effects on the determination of the Hubble constant. Our calculations result in a generic and exact scaling relation for the dependence of the Hubble constant  $H_0$  on the power-law exponent of the potential's radial part  $\beta$ . This scaling is the same for all lens systems in this family of models. Systematic errors in the assumed  $\beta$  will therefore lead to a systematic error in  $H_0$ . The effect of external shear is quantified by the new concept of a 'critical shear'. For an external shear exactly equal to this value, all time-delays vanish.

To improve the situation, the parameters of shear and radial mass distribution have to be measured accurately. Multiply imaged unresolved sources, which are commonly used for this purpose, can provide only a limited number of constraints. It is therefore important to study lens systems with extended sources, which can constrain the lens models much better. We use the lens system JVAS B0218+357 as an example and test case. This system has a measured time-delay and can thus be used to determine  $H_0$ . We show that 'classical' model fits, using only the two compact images in this system, are not sufficient to determine the position of the lensing galaxy and cannot be used to determine the Hubble constant. To exploit the extended structure of the Einstein ring which is part of this system, the LENS CLEAN algorithm can be used. The main part of this thesis is devoted to this method. We discuss a number of significant improvements of LENS CLEAN which were necessary to turn it into a useful tool for systems like B0218+357. The parameters of an isothermal elliptical mass model can now be constrained with sufficient accuracy to obtain a competitive result for the Hubble constant of  $H_0 = (71 \pm 5) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  for an Einstein-de Sitter universe. The error bar is a  $2\sigma$  confidence limit including uncertainties of time-delay and lens model. Only slightly different results are expected for non-isothermal models in the case of B0218+357.

We also present new VLBI observations of B0218+357 which for the first time show parts of the jet in the doubly imaged region. We argue that these data can be used to constrain the radial mass distribution with unprecedented accuracy. Together with the results from scheduled HST observations, B0218+357 will soon be the system with the best constrained lens model and the most robust result for the Hubble constant. It can then fulfill its expectations as a 'golden lens'.