

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 52 (1994)
Heft: 262

Artikel: Gravitationslinien
Autor: Jetzer, Ph.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-898789>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 28.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



Gravitationslinsen

PH. JETZER

Einleitung

Die einzige Informationsquelle über kosmische Objekte ist, abgesehen von Neutrinos, das Licht und überhaupt jede Form von elektromagnetischer Strahlung, welche aus diesen Himmelskörpern strömt und bis zu uns dringt. Wird das Licht auf seinem Weg zu uns verändert, sei es in seiner spektralen Zusammensetzung oder auch «nur» in seiner Bahn, so ziehen wir unsere Schlussfolgerungen über die betrachteten Objekte auf Grund veränderter Informationen.

Eine wichtige Quelle von Veränderungen ergibt sich aus der Tatsache, dass die Trajektorie eines Lichtstrahls durch Massen, wie z.B. Sterne oder Galaxien, abgelenkt wird. Die Lichtablenkung durch Gravitationsfelder hat zur Folge, dass, von der Erde aus betrachtet, gewisse Himmelskörper uns in einer anderen Richtung erscheinen als dies tatsächlich der Fall ist oder dass ihre Helligkeit verändert wird. Natürlich können wir dies im allgemeinen nicht aus der direkten Beobachtung des betreffenden Himmelskörpers feststellen.

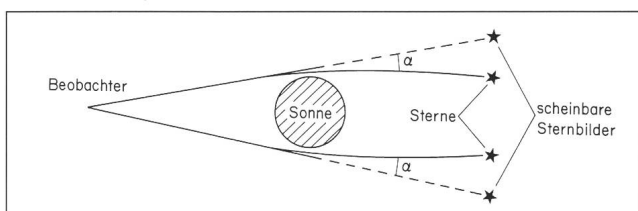
Geschichtliche Vorkommnisse

Heute wissen wir, dass das Verhalten von Licht in einem Gravitationsfeld mittels der Allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein aus dem Jahre 1915 beschrieben werden muss. Jedoch wurde schon lange vorher die Vermutung geäussert, dass die Gravitation das Verhalten des Lichtes beeinflussen könnte. Schon Newton warf in der ersten Auflage seines Buches über Optik im Jahre 1704 die Frage auf, ob Himmelskörper Lichtstrahlen ablenken können.

Merkwürdigerweise veröffentlichte 1804 der Münchner Astronom Soldner eine Schrift, in welcher er den Fehler bei der Ortsbestimmung der Sterne auf Grund der verursachten Lichtablenkung abschätzte. Dabei kam er zu dem Schluss, dass ein Lichtstrahl, der den Sonnenrand gerade noch streift, unter Berücksichtigung der klassischen Gravitationstheorie von Newton nur gerade um 0.85 Bogensekunden abgelenkt wird.

Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie beträgt der tatsächliche Wert des Ablenkungswinkels das Doppelte. Die ersten Messungen der Ablenkung des Lichtes im Schwerefeld der Sonne wurden anlässlich der Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919 durchgeführt. Dabei wurde Einsteins theoretisches Resultat in glänzender Weise bestätigt.

Abbildung 1.
Lichtablenkung durch die Sonne.



Der Effekt der Lichtablenkung besteht darin, dass die Sterne während der Sonnenfinsternis nach aussen verschoben erscheinen, wie es aus der Abb. 1 ersichtlich ist. Diese Verschiebung wird bestimmt, indem man einmal die Sterne der Sonnenumgebung während der Sonnenfinsternis und später dasselbe Sternfeld bei Nacht fotografiert und danach die beiden fotografischen Platten übereinander legt.

Einstein veröffentlichte 1936 eine Arbeit, in der er darauf hinwies, dass Sterne als Gravitationslinsen wirken können. Befinden sich zwei Sterne direkt hintereinander auf unserer Sichtlinie, so verformt sich das Bild des in grösserer Entfernung gelegenen Sterns zu einem Ring. Sind die beiden Sterne gegeneinander versetzt, so spaltet sich der Ring in ein oder mehrere Bilder auf. Die Winkelabstände zwischen den Bildern sind jedoch sehr gering. Einstein hielt diese Konfiguration für so unwahrscheinlich, dass er keine Hoffnung hatte, eine solche «kosmische Fata Morgana» könnte jemals zu beobachten sein.

Der Schweizer Astrophysiker Zwicky griff Einsteins Idee im folgenden Jahr auf und wies darauf hin, dass solche Konfigurationen jedoch erst dann beobachtet werden können, wenn als Linsen nicht Sterne wirken, sondern Galaxien, deren Masse enorm viel grösser ist.

In seiner Schrift gab Zwicky auch eine Reihe von Gründen an, weshalb die Beobachtung der durch Galaxien verursachten Gravitationslinseneffekte von Interesse sein dürfte. Insbesondere erwähnte er, dass man damit weiter entfernte Galaxien beobachten könnte, die sonst auch unter Benützung der grössten vorhandenen Teleskope nicht sichtbar wären. Dies wäre natürlich von Interesse für das Verständnis verschiedener kosmologischer Probleme. Ausserdem hätten wir somit eine neue Methode, um die Gesamtmasse der Galaxien zu bestimmen, da die Lichtablenkung von der Masse aller vorhandener Materie abhängt.

Entdeckung der ersten Gravitationslinse

Es dauerte dann fast vierzig Jahre, bis Zwickys Ideen bestätigt wurden. Entscheidend war die 1963 erfolgte Entdeckung der Quasare. Diese quasi-stellaren Objekte entfernen sich von uns mit sehr hohen Geschwindigkeiten. Dies ergibt sich aus der Messung der Rotverschiebung in den Spektren. Mit dem Hubbleschen Gesetz, welches besagt, dass die Geschwindigkeit proportional zur Entfernung ist, lässt sich letztere bestimmen. Es stellte sich heraus, dass die Quasare die am meisten entfernten Objekte im Universum sind.

Je weiter ein Himmelskörper von der Erde entfernt ist, desto grösser ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwischen ihm und uns zufällig eine Galaxie oder ein Galaxienhaufen befindet, die sein Licht ablenken. Die Quasare sind also die geeignetsten Kandidaten als Quelle für Gravitationslinsensysteme. Bis Ende der siebziger Jahre waren schon mehr als 1500 Quasare bekannt, die gleichmässig über den gesamten Himmel verteilt sind. Das entspricht im Mittel einem Quasar innerhalb des Bereiches einer Winkelausdehnung von etwa 6 Grad.



Die Entdeckung zweier Quasare in der Konstellation des Grossen Bären, die nur 6 Bogensekunden auseinander liegen, kam daher völlig unerwartet. Am 29. März 1979 erhielten die amerikanische Astronomen Walsh, Carswell und Weymann Spektren, die anzeigten, dass beide Quasare die gleiche Rotverschiebung vorweisen.

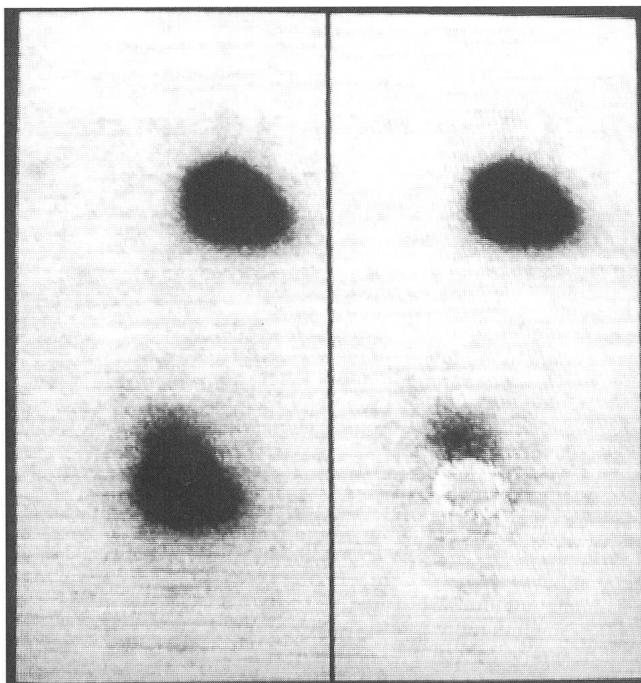


Abbildung 2.
Links sind die beiden Linsenbilder des Quasars 0957+561 abgebildet. Um die Linsengalaxie sichtbar zu machen, wurde im Bild rechts das obere Linsenbild vom unteren subtrahiert. Jetzt ist im unteren Teil der Aufnahme die Galaxie klar zu erkennen. Die Form der Quasarbilder ist durch die fehlerhafte Justierung der Teleskopoptik verursacht. (Photographie von A. Stockton, Hawaii Observatory).

Im Jahre nach dieser Entdeckung mussten sowohl im optischen als auch im Radio-Bereich zahlreiche Beobachtungen durchgeführt werden, bevor vollständig klar war, dass es sich tatsächlich um zwei Bilder desselben Quasars handelte, die durch den Gravitationslinseneffekt verursacht werden. Entscheidend war das Aufspüren der Linsengalaxie, die etwa auf halbem Wege zwischen uns und dem Quasar liegt. (Siehe Abbildung 2.)

Weitere Gravitationslinsensysteme

Nur ein Jahr später wurde ein zweites Gravitationslinsensystem entdeckt. In weniger als 3 Bogensekunden Entfernung eines Quasars fand man zwei weitere sternähnliche Objekte, die eine bedeutend schwächere Helligkeit aufweisen. Es stellte sich heraus, dass bei allen drei Objekten die Rotverschiebung innerhalb der Messgenauigkeit die gleiche ist. Das heisst also, dass die Entfernung dieselbe ist und somit die Vermutung nahelag, dass es sich um drei Bilder desselben Quasars handeln muss. Genauere Untersuchungen zeigten dann weiter, dass das hellere Bild sogar aus zwei nur 0.5 Bogensekunden getrennten Bildern zusammengesetzt ist. Auch die Galaxie, welche in diesem System als Gravitationslinse wirkt, wurde 1986

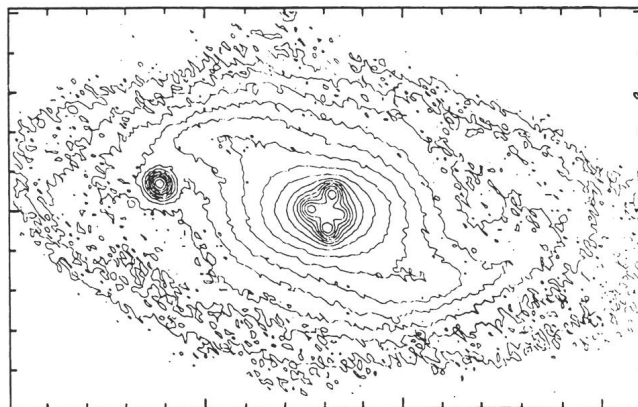


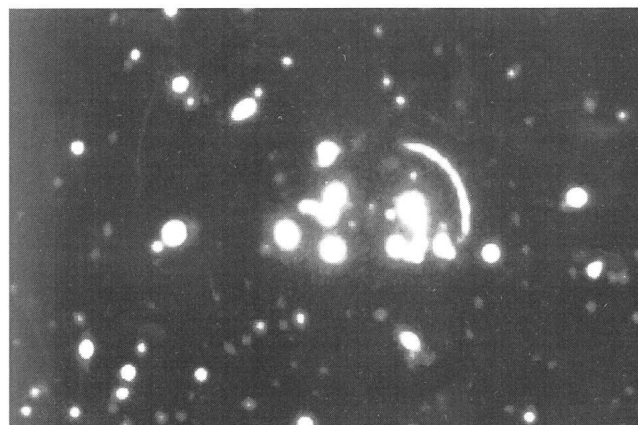
Abbildung 3.
Optische Isophoten der Galaxie 2237+0305. In der Mitte ist das kleblattförmige Bild des Quasars sichtbar (Bild von H. Yee, Universität Toronto).

entdeckt. Die Tatsache, dass nicht alle Bilder dieselbe Helligkeit aufweisen, hängt jeweils von der speziellen Anordnung der Quelle, des Beobachters und der Linse ab.

Ein weiteres, sehr bemerkenswertes Gravitationslinsensystem wurde 1985 gefunden (Abb. 3). Im zentralen Bereich einer uns relativ nahe gelegenen Spiralgalaxie wurden vier Punktquellen beobachtet, bei denen dieselbe Rotverschiebung gemessen wurde. Es handelt sich also um die Bilder eines weit entfernten Quasars, der sich fast genau auf der Sichtlinie Erde-Zentrum der Spiralgalaxie befindet. Dieses eigenartige System wird als Einstein-Kreuz bezeichnet.

Schon 1986 fand man die ersten Gravitationslinsensysteme mit einer gewöhnlichen Galaxie als Quelle. Im Unterschied zu den Quasaren sehen wir die Galaxien als ausgedehnte Objekte. Deshalb erscheinen uns die Bilder als ein oder mehrere ausgedehnte Bögen. Die Linse besteht auch nicht mehr aus einer einzelnen Galaxie, sondern aus einem viel massenreichen Galaxienhaufen. (Siehe Abbildung 4.)

Abbildung 4.
Der Bogen ist das verzerrte Bild einer sehr weit entfernten Galaxie mit einer Rotverschiebung von $z=2.2$. Der als Linse wirkende Galaxienhaufen CI 2244-02 weist eine Rotverschiebung von $z=0.329$ auf. Die Aufnahme wurde von G. Soucail mit dem Kanadischen-Französischen-Hawaiianischen 3,6-Meter-Teleskop auf dem Mauna Kea gemacht. (ESO Messenger, 69, September 1992).





Im Jahr 1988 wurde dann sogar ein Gravitationslinsensystem im Radiobereich entdeckt. In diesem Fall wurde das Bild einer weit entfernten Radiogalaxie zu einem fast vollständigen Einstein-Ring deformiert.

Dies sind einige typische Beispiele von Gravitationslinsensystemen, die seit der Entdeckung des ersten im Jahr 1979 beobachtet wurden. Seither hat man schon viele solche Systeme gefunden, jedoch hat man bis jetzt nicht bei allen einwandfrei abklären können, ob es sich tatsächlich um Gravitationslinsen handelt. Es wird inzwischen sehr intensiv nach solchen Gravitationslinsensystemen gesucht.

Anwendungen der Gravitationslinsensysteme

Das Universum ist gegenwärtig in Expansion, d.h. wir beobachten, dass die Galaxien sich von unserer Milchstrasse mit einer Geschwindigkeit entfernen, die proportional zu ihrem Abstand ist. Die genaue Bestimmung der Proportionalitätskonstante, die als Hubble-Konstante bezeichnet wird, ist eine zentrale Aufgabe der Kosmologie. Aus der Kenntnis der Hubble-Konstanten lassen sich nämlich die Dimensionen und das Alter des Universums bestimmen. Diese Konstante ist heute innerhalb eines Unsicherheitsfaktors von zwei bekannt.

Die Hubble-Konstante lässt sich durch die Gravitationslinsensysteme indirekt bestimmen. Die Idee basiert auf der Tatsache, dass die Ankunftszeiten des Lichtes für die verschiedenen Bilder unterschiedlich sind, weil die Weglängen verschieden sind. Falls also die Helligkeit der Quelle, Quasar oder Galaxie, aus inneren Gründen veränderlich ist, so wird man es nicht gleichzeitig in den verschiedenen Bildern feststellen können, sondern mit einem gewissen Zeitunterschied. Es lässt sich zeigen, dass dieser Zeitunterschied von der Gesamtmasse der Linse und von der Entfernung Linse – Beobachter und somit von der Hubble-Konstanten abhängt.

Im Falle des Quasars des zuerst entdeckten Gravitationslinsensystems stellte man fest, dass seine Helligkeit im optischen Bereich veränderlich ist. Dies erlaubte die Messung des Ankunftszeitunterschiedes zwischen den beiden Bildern. Man konnte auch die Gesamtmasse der Linsengalaxie bestimmen. Daraus ergibt sich für die Hubble-Konstante ein Wert von $H_0 = 50 \pm 17$ km pro Sekunde pro Megaparsec. Dieser Wert ist in guter Übereinstimmung mit dem Resultat der anderen «konventionellen» Methoden, die H_0 -Werte im Bereich von etwa 40 bis 100 geben. Man muss allerdings diese vorläufige Bestimmung mit Vorsicht aufnehmen, da die Unsicherheiten noch recht gross sind.

Dunkle Materie

Die wichtigste Anwendung der Gravitationslinsensysteme ist jedoch die Bestimmung der dunklen Materie. Die leuchtende Materie von Sternen und Galaxien hat im Mittel eine Dichte, die nicht mehr als etwa 1% der kritischen Dichte des Universums beträgt. Zahlreiche astronomische Beobachtungen im letzten Jahrzehnt haben gezeigt, dass mindestens 90% der Materie dunkel ist.

Die Lichtablenkung hängt von der Gesamtmasse der Linse ab, also inklusive dunkler Materie. Aus der Beobachtung eines Gravitationslinsensystems, d.h. der Anzahl Bilder, ihrer räumlichen Anordnung, lässt sich im Prinzip die Materieverteilung und die Gesamtmasse der Linse, wenn auch nicht immer eindeutig, berechnen. Die bisherigen Resultate bestätigen die Anwesenheit von einem Halo dunkler Materie, welcher die

Galaxien umgibt. Man findet, dass dunkle Materie ebenfalls in den Galaxienhaufen vorhanden ist. Die Ergebnisse stimmen gut mit den Resultaten überein, die man mittels der dynamischen Methoden findet.

Dunkle Materie im Halo der Milchstrasse

Die dunkle Materie, welche die Spiralgalaxien und insbesondere unsere Galaxie umgibt, könnte aus einer grossen Menge von Sternen mit niedriger Masse, sogenannten Braunen Zwergen oder grossen Planeten wie Jupiter bestehen, die die Milchstrasse auf keplerschen Bahnen umkreisen. Die Helligkeit solcher Himmelskörper ist zu schwach, um mit den Teleskopen direkt sichtbar zu sein. Eine mögliche Methode, um sie nachzuweisen, beruht auf dem Gravitationslinseneffekt. Das Licht von Sternen der Grossen Magellanschen Wolke – einer benachbarten Zwerggalaxie der Milchstrasse – wird von dunklen Halo-Objekten unserer Galaxis gelegentlich längs der Sichtlinie zu uns gebündelt.

Die Lichtablenkung durch Jupiter-ähnliche Körper ist zwar unmessbar klein, aber die Helligkeit des Sternes müsste sich dabei merklich ändern. Die Dauer dieser Helligkeitsschwankungen hängt insbesondere von der Masse der Gravitationslinse ab.

Je eine Gruppe in Frankreich und in den USA ist gegenwärtig daran, die Lichtkurven von einigen Millionen Sternen der Grossen Magellanschen Wolke zu verfolgen. Die Beobachtungen werden mit Teleskopen der ESO in La Silla in Chile und auf dem Mount Stromlo in Australien durchgeführt. Bis heute kündigten beide Gruppen an, dass sie insgesamt sechs mögliche Mikrolinsenereignisse beobachtet haben, alle mit einer Dauer von etwa 10 bis 30 Tagen, die auf etwa 0.1 Sonnenmasse für die Braunen Zwerge schliessen lässt. Mit Spannung wird auf die weitere Auswertung der Messungen sowie auf die neuen Beobachtungen gewartet, die es sicher erlauben werden, die Mikrolinsenhypothese endgültig zu prüfen.

Abschliessende Bemerkungen

Dank dem Effekt der Verstärkung der Helligkeit der Quelle ermöglichen die Gravitationslinsensysteme, sehr weit entfernte Galaxien zu studieren. Die Gravitationslinsen wirken also wie gigantische kosmische Teleskope. Für Galaxien, welche uns als Bögen erscheinen, liegt der Verstärkungsfaktor zwischen 10 und 20. Ohne diese Verstärkung wären sie mit den heutigen Teleskopen nicht sichtbar.

Die Theorie und die Beobachtung von Gravitationslinsen hat im letzten Jahrzehnt, enorme Fortschritte gemacht. Es werden noch viele weitere Beobachtungen und theoretische Untersuchungen nötig sein, um einige Fragestellungen endgültig beantworten zu können. Es steht jedoch jetzt schon fest, dass es sich um eine vielversprechende Methode handelt, die uns erlauben wird, das Wissen über das Universum zu vertiefen.

Literatur

P. Jetzer, Gravitationslinsen, Vierteljahrsschrift Naturforsch. Ges. Zürich, 139, 5 (1994). P. Schneider, J. Ehlers und E.E. Falco, Gravitational Lenses, Springer, Berlin, 1992.

Adresse des Verfassers:

PD DR. PHILIPPE JETZER

Institut für Theoretische Physik der Universität Zürich,

Winterthurerstrasse 190

8057 Zürich

Weil die Sterne nicht am Himmel stehen

Wenn Sie mit hochwertigen Objektiven den Himmelskörpern auf ihren Bahnen folgen wollen, sollten Sie nicht auf eine gute Montierung verzichten. Denn mit der neuen PaMont II von Carl Zeiss für Tuben bis zu 20 kg Masse können Sie jetzt die Leistungskraft Ihres Teleskops voll ausschöpfen. Die quarzstabilisierte Steuerung der 12 V Schritt-

motoren in beiden Achsen sorgt für bequeme Positionierung und professionelle Nachführungsgenauigkeit. Ausgefeilte Technik, Robustheit und Präzision garantieren die notwendige Stabilität. So können Sie mit Vergnügen beobachten und Nachführproblemen selbst bei langen Belichtungszeiten ein Schnippchen schlagen.

Technische Daten:

Belastbarkeit:

20 kg (Refraktoren bis ca. 150 mm Öffnung bzw. Reflektoren bis ca. 300 mm Öffnung)

Masse:

12,5 kg
zzgl. Gegengewichte

Spannung:

12V DC

Leistungsaufnahme:

max. 10W

Antriebe in α und δ :

12 V Schrittmotoren,
hochauflösend

Nachführung:

siderisch, lunar,
synodisch

periodischer Fehler:

$\leq \pm 5''$

Positionier-

geschwindigkeit:

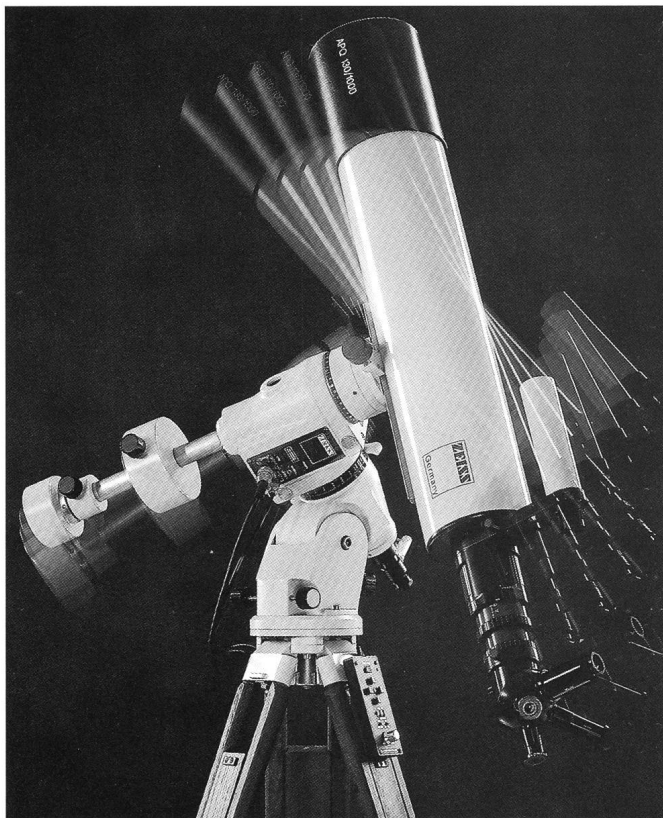
2x, 8x, 16x (15"/sec.)

Polsucher:

optional

Startracking:

vorbereitet



Carl Zeiss AG
Postfach
8021 Zürich
Telefon 01/465 91 91
Av. Juste-Olivier 25
1006 Lausanne
Téléphone 0 21/320 62 84