

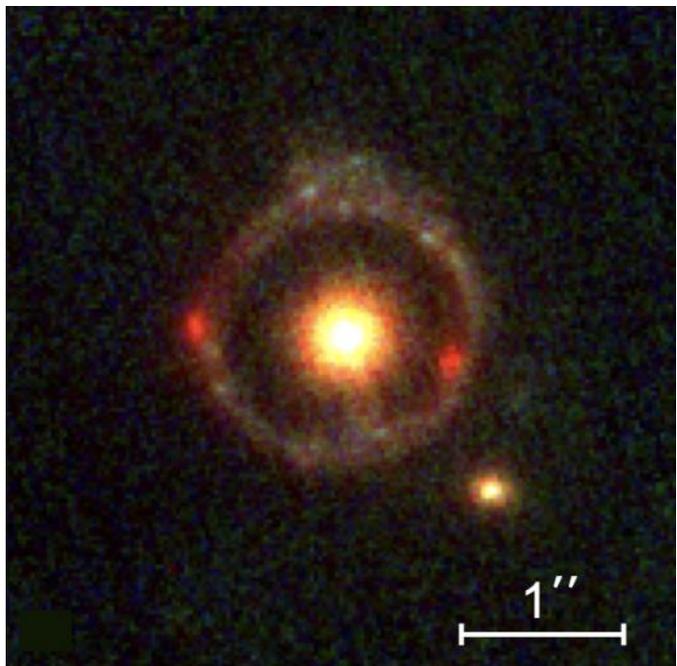
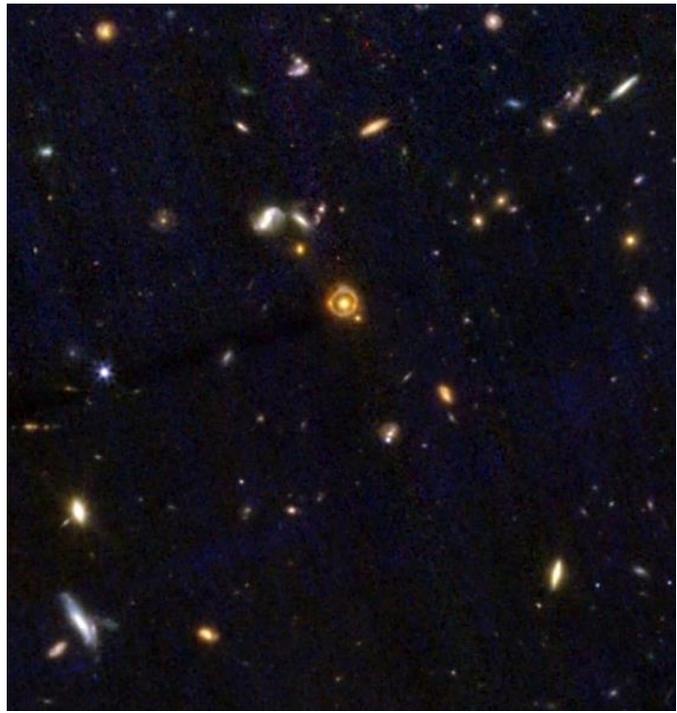
## Eine runde Sache – die Gravitationslinse JWST-ER1

Matthias Borchardt, Oktober 2023

Gravitationslinsen gehören zu den faszinierendsten Erscheinungen in den Tiefen des Universums. Nun wurde jüngst ein ganz besonderes Exemplar dieser Spezies in Aufnahmen des *James Webb Teleskops* entdeckt – bemerkenswert deshalb, weil die Linse einen nahezu geschlossenen Einsteinring erzeugt und weil das Objekt extrem weit von uns entfernt liegt.

10,4 Milliarden Jahre ist das Licht der Gravitationslinse unterwegs, bevor es mit einer Rotverschiebung von  $z=1,94$  bei uns eintrifft. Die gelinste Galaxie, die sich uns in Form eines perfekten Einsteinrings präsentiert, bringt es sogar auf eine Lichtlaufentfernung von 11,6 Milliarden Lichtjahren ( $z=2,98$ ). Somit gilt dieser neu entdeckte Einsteinring JWST-ER1 bis dato als der am

weitesten Entfernte seiner Klasse. Es sind aber nicht nur diese Rekorde oder die besondere Ästhetik der Leuchterscheinung, die diese Gravitationslinse für die astronomische Forschung so interessant machen. Mithilfe der Entfernungen der beiden Galaxien sowie dem Radius des Einsteinrings lässt sich die Masse der Linsen-Galaxie abschätzen, was in diesem Fall zu überraschenden Ergebnissen führt. So berichtet das Forscherteam um den niederländische Astronomen *Pieter van Dokkum* (Yale University, USA) in ihrer jüngsten Veröffentlichung, dass der Einsteinring eine Masse von etwa 650 Milliarden Sonnenmassen einschließt, wobei die Galaxie aber nur einen effektiven Durchmesser von etwa 12400 Lichtjahren aufzeigt. Galaxien mit Rotverschiebungen um  $z=2$  erweisen sich allgemein als sehr kompakte Objekte – die Dichte dieser neu entdeckten Galaxie ist indes so massiv, dass die Astronomen tatsächlich in Erklärungsnot geraten. Lässt sich die extreme Kompaktheit mit einem anders garteten Dichteprofil der Dunklen Materie im Halo der Galaxie erklären? Oder enthält die Galaxie eine sehr große Anzahl besonders leichter, aber dafür sehr schwach leuchtender Sterne in ihrem Zentralbereich? Fragen dieser Art sind wichtig, wenn man die Entstehung und Entwicklung von Galaxien in der Frühzeit des Universums aber auch die von lokalen, also jungen Galaxien verstehen möchte.

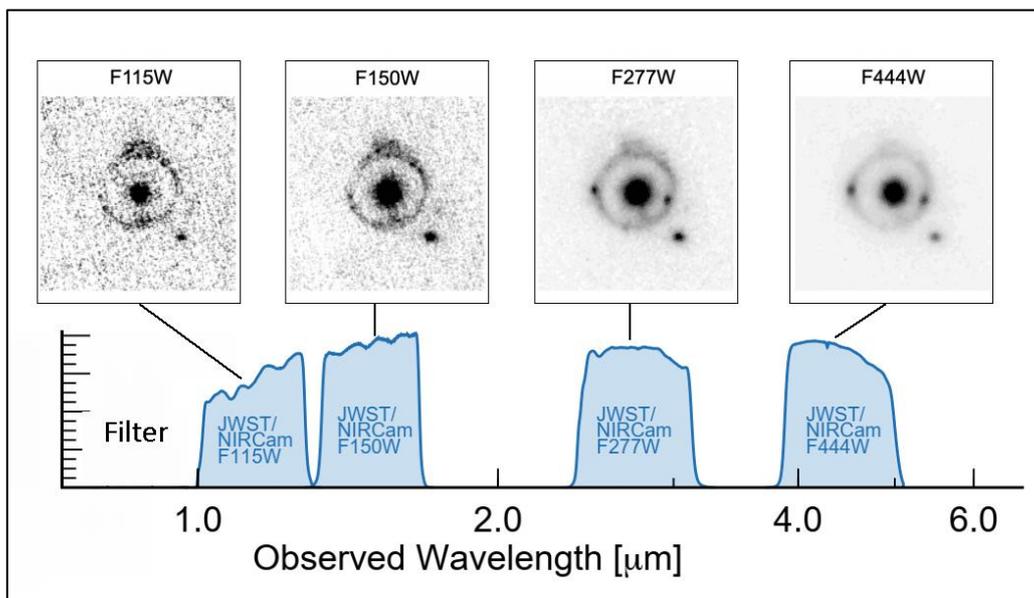


## Didaktische Zugänge

Für Astronomiebegeisterte eröffnet das neu entdeckte Objekt JWST-ER1 interessante Themenfelder. Neben der Frage, wie Einsteinringe überhaupt entstehen und wie sich die Masse der Gravitationslinse berechnen lässt, spielen bei diesem konkreten Objekt auch kosmologische Fragen eine wichtige Rolle, denn wir sehen die beiden Galaxien in einem Stadium, in dem das Weltall lediglich 34% seiner heutigen Ausdehnung erreicht hatte. Welche Abstände und Entfernungen gehen also in die Linsenformel ein? Für einen anschaulichen und interaktiven Zugang zur Thematik bieten sich zwei Computersimulationen des Verfassers an, die sich als didaktische Helfer in der Schule sehr bewährt haben. Das kleine Programm *Gravitationslinse.exe* berechnet die Lichtablenkung in der Nähe einer kompakten Masse und bildet eine Hintergrundgalaxie entsprechend ab. Die Position der Linse gegenüber dem Hintergrundobjekt ist frei wählbar. Bei richtiger Wahl der Parameter ergibt sich ein Bild, das dem Objekt JWST-ER1 durchaus ähnlich sieht. Das zweite Programm *Expansion.exe* ist komplexer – es stellt die Bewegung von Licht und Materie in einem Raum-Zeit-Diagramm entsprechend dem geltenden kosmologischen Standardmodell (**Lambda Cold Dark Matter**) dar.

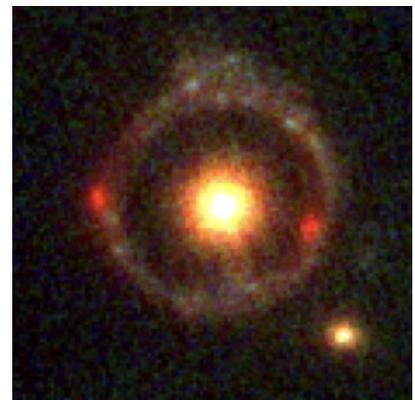
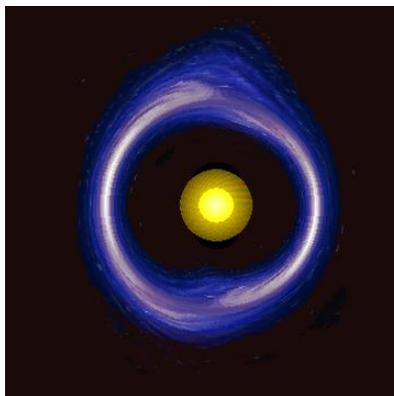
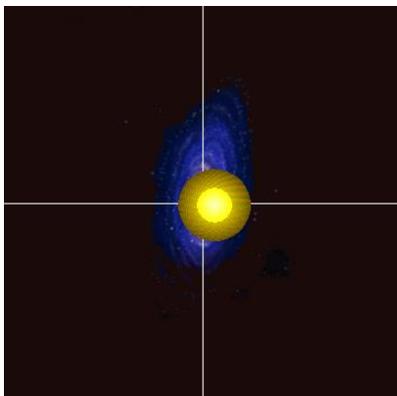
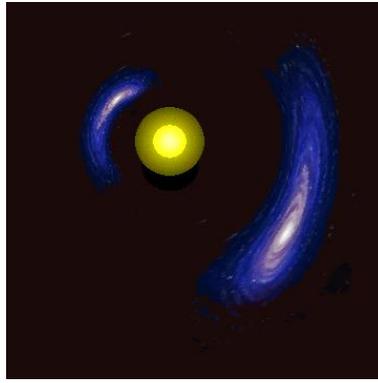
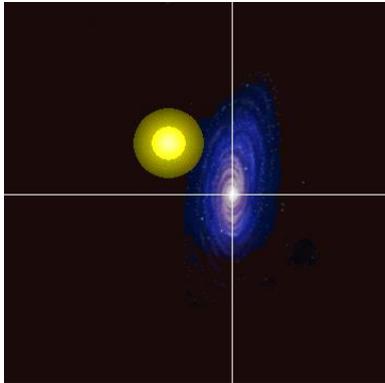
## Die Wirkung der Gravitationslinse

Die Linsengalaxie erzeugt aufgrund ihrer Gravitationswirkung ein verzerrtes Bild des hinter ihr liegenden Objekts. Im Falle von JWST-ER1 ist dies ebenfalls eine Galaxie, die offenbar einen roten Zentralbereich (Bulge) und eine blaue Scheibe aufweist. Dies lässt sich aus den Bildern schließen, die das Teleskop mit vier verschiedenen Wellenlängen-Filtern aufgenommen hat.



Da das Licht der gelinsten Galaxie (Einsteinring) mit  $z=2,98$  stark rotverschoben ist, würde die Galaxie einem nahen Beobachter im ersten Bild ultraviolett (290 nm), im zweiten blau (385 nm), im dritten tief rot (700 nm) und im letzten Bild infrarot (1100 nm) erscheinen. Der Ring scheint also eher blau gefärbt zu sein und stellt das Abbild der Galaxienscheibe dar. Die letzten beiden Bilder lassen vermuten, dass die zwei symmetrisch angeordneten roten Knotenpunkte, die zudem über den Ring auseinandergezogen erscheinen, den Zentralbereich der Galaxie abbilden. Dies lässt sich mit dem erwähnten kleinen Computerprogramm anschaulich

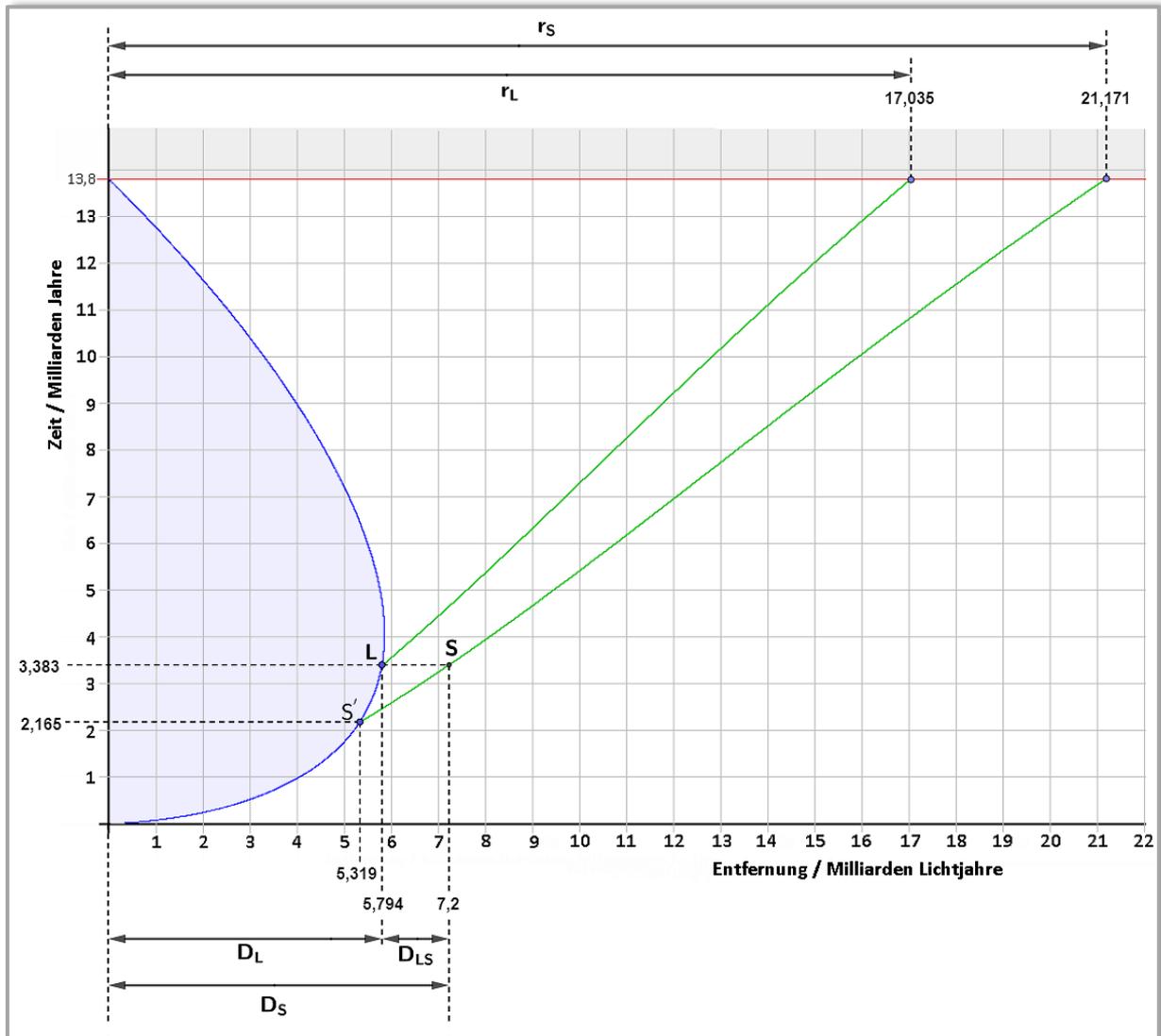
nachstellen, wie die folgenden Bilder zeigen. Zunächst wurde die Linsen-Galaxie deutlich versetzt zum Hintergrund angeordnet, was zu einer Aufspaltung des Bildes führt. Setzt man die Linse aber zentraler (leicht nach rechts versetzt), erzeugt die Computersimulation einen Einsteinring, der dem des realen Beispiels ähnelt. So können die Lernenden anschaulich und selbsttätig durch Verlagerung der Gravitationslinse ein Gefühl für die Wirkung der Lichtablenkung erhalten.



### Die Masse innerhalb des Einsteinrings

Liegen Beobachter, Linse und die Lichtquelle auf einer Linie, erscheint der Stern oder die Galaxie als heller Lichtring. Der Radius dieses Rings wird Einsteinradius  $r_E$  genannt, der Winkel, unter dem der Radius von der Erde aus gemessen wird, heißt Einsteinwinkel  $\Theta_E$ . Für die Berechnung der im Einsteinring versammelten Masse benötigen wir außer diesem Winkel den Abstand  $D_L$  der Linse zum Beobachter und den Abstand  $D_S$  der gelinsten Galaxie zum Beobachter. Der Einsteinwinkel  $\Theta_E$  wurde aus den Bildern des James Webb Teleskops zu  $\Theta_E = 0,77$  Bogensekunden bestimmt. Problematischer erweist sich die Bestimmung der Abstände  $D_L$  und  $D_S$  aus den Rotverschiebungen der beiden Galaxien. Wir müssen bedenken, dass sich die Quelle S („Source“) und die Linse L aufgrund der Expansionsdynamik des Weltalls auseinanderbewegen, während das Licht der Quelle zur Linse unterwegs ist.

Diese Dynamik von Licht und Materie lässt sich gut mit dem Programm *Expansion.exe* anschaulich nachbilden. Mithilfe dieses Programm ergeben sich die folgenden Ergebnisse.



Die beiden Galaxien L und S' liegen auf dem Lichtkegel und weisen Rotverschiebungen von  $z=1,94$  und  $z=2,98$  auf. Das von dort ausgesendetem Licht erreicht uns nach 10,4 bzw. 11,6 Milliarden Jahren. Die Emissionsentfernungen betragen 5,319 und 5,794 Milliarden Lichtjahre. Im Punkt S' betrug die Größe des Universums 25,1 % und im Punkt L (bzw. im Punkt S) 34% des heutigen Wertes (Skalenfunktion). Die Galaxien bewegten sich dann längs der grün gezeichneten Bahnen durch die Raumzeit und weisen heute Empfangsentfernungen von 17,035 und 21,171 Milliarden Lichtjahren auf. Das Gravitationslinsen-Ereignis fand statt, als das Universum 3,383 Milliarden Jahre alt war und eine Ausdehnung von 34% hatte. Multiplizieren wir die beiden Empfangsentfernungen nun mit dem Skalenfaktor  $a=0,34$ , erhalten wir die Abstände  $D_S = 7,2 \text{ GLJ}$  und  $D_S = 5,794 \text{ GLJ}$ , sowie  $D_{LS} = D_S - D_L = 1,406 \text{ GLJ}$ . Wenn wir diese Werte in Meter und den Einsteinwinkel  $\Theta_E$  ins Bogenmaß umrechnen, erhalten wir mithilfe der Linsenformel (siehe Info-Box) eine Masse innerhalb des Einsteinrings von  $M_L = 1,317 \cdot 10^{42} \text{ kg}$ . Das entspricht einer Masse von **662 Milliarden Sonnenmassen**. Dieser Wert kann übrigens leicht schwanken – je nach dem, welche Parameter für das kosmologische Standardmodell verwendet wurden.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Die Simulation des Verfassers verwendet: Hubblekonstante  $H_0=67,74$ , Dichteparameter der Materie 0,3089 und Dichteparameter der Dunklen Energie 0,6911.

### INFO-Box

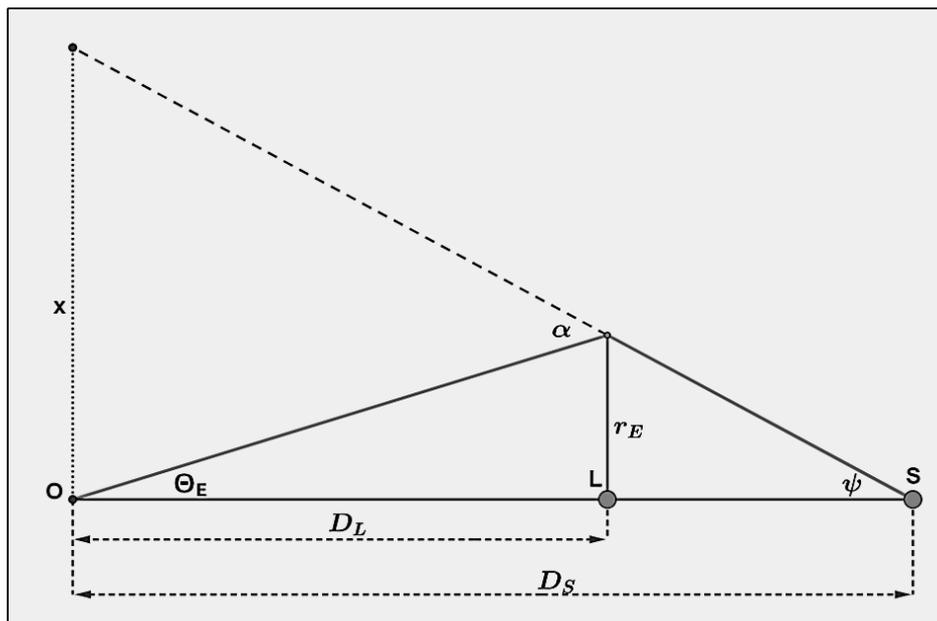
#### Die Linsenformel

Wir betrachten einen Lichtstrahl, der um den Winkel  $\alpha_E$  abgelenkt wurde, sodass wir ihn auf der Erde wahrnehmen können. Für diesen Winkel liefert die Allgemeine Relativitätstheorie die

Formel:  $\alpha_E = \frac{4 \cdot G \cdot M_L}{r_E \cdot c^2}$ , wobei  $G$  die Gravitationskonstante,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und

$M_L$  die Masse der Linse sind. Mithilfe des Winkels  $\alpha_E$  und der Geometrie der Anordnung lassen sich Formeln für den Einsteinradius  $r_E$  und den Einsteinwinkel  $\Theta_E$  herleiten. Eine detaillierte Herleitung der Linsenformel finden Sie auf der Homepage des Verfassers. Es ergibt sich die

Formel  $\Theta_E = \sqrt{\frac{4 \cdot G \cdot M_L \cdot (D_S - D_L)}{c^2 \cdot D_L \cdot D_S}}$ , die wir nach  $M_L$  umstellen:  $M_L = \frac{\Theta_E^2 \cdot c^2}{4 \cdot G} \cdot \frac{D_L \cdot D_S}{D_S - D_L}$ .



#### Literatur und Quellen:

- van Dokkum, P. et al. (2023). A massive compact quiescent galaxy at  $z=2$  with a complete Einstein ring in JWST imaging. Preprint: <https://arxiv.org/abs/2309.07969>
- Computersimulationen des Verfassers
  - Simulation von Gravitationslinsen und Herleitung der Linsengleichung: <https://mabo-physik.de/gravitationslinsen>
  - Expansion des Weltalls (LCDM-Standardmodell): [https://mabo-physik.de/lcdm\\_standardmodell](https://mabo-physik.de/lcdm_standardmodell)