

# Dunkle Materie

## Ein Klebstoff für Galaxien

von Matthias Borchardt, Bonn; Grafiken von: Dr. Wolfgang Zettlmeier



Die dunkle Materie stellt eines der großen Rätsel der modernen Astrophysik dar. Dieser Beitrag beschreibt, wie Sie sich diesem spannenden Thema in Klasse 10/11 nähern. Drei Computersimulationen bieten einen besonders handlungsorientierten und anschaulichen Zugang zu den grundlegenden Ideen dieser Theorie.

# Impressum

RAABE UNTERRICHTS-MATERIALIEN Physik

6/2019

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Es ist gemäß § 60b UrhG hergestellt und ausschließlich zur Veranschaulichung des Unterrichts und der Lehre an Bildungseinrichtungen bestimmt. Die Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH erteilt Ihnen für das Werk das einfache, nicht übertragbare Recht zur Nutzung für den persönlichen Gebrauch gemäß vorgenannter Zweckbestimmung. Unter Einhaltung der Nutzungsbedingungen sind Sie berechtigt, das Werk zum persönlichen Gebrauch gemäß vorgenannter Zweckbestimmung in Klassensatzstärke zu vervielfältigen. Jede darüber hinausgehende Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Hinweis zu §§ 60a, 60b UrhG: Das Werk oder Teile hiervon dürfen nicht ohne eine solche Einwilligung an Schulen oder in Unterrichts- und Lehrmedien (§ 60b Abs. 3 UrhG) vervielfältigt, insbesondere kopiert oder eingescannt, verbreitet oder in ein Netzwerk eingestellt oder sonst öffentlich zugänglich gemacht oder wiedergegeben werden. Dies gilt auch für Intranets von Schulen und sonstige Bildungseinrichtungen. Die Aufführung abgedruckter musikalischer Werke ist ggf. GEMA-mitgliedschaftlich.

Für jedes Material wurden Fremdrechte recherchiert und ggf. angefragt.

In unseren Beiträgen sind zum Teil Substanzen mit den entsprechenden Gefahrenhinweisen zu kennzeichnen. Dies ist ein zusätzlicher Service. Dennoch ist jeder Experimentator selbst angehalten, sich vor der Durchführung der Experimente genauestens über das Gefährdungspotenzial der verwendeten Stoffe zu informieren, die nötigen Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen sowie alles ordnungsgemäß zu entsorgen. Es gelten die Vorschriften der Gefahrstoffverordnung sowie die Dienstvorschriften der Schulbehörde.

Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH  
Ein Unternehmen der Klett Gruppe  
Rotebühlstraße 77  
70178 Stuttgart  
Telefon +49 711 62900-0  
Fax +49 711 62900-60  
meinRAABE@raabe.de  
www.raabe.de

Redaktion: Anna-Greta Wittnebel  
Satz: Röser MEDIA GmbH & Co. KG, Karlsruhe  
Illustrationen: Dr. Wolfgang Zettlmeier, Barbing  
Bildnachweis Titel:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/nl/deed.de>; Marcel Schmeier/Onderwijsgek  
Korrektorat: Mona Hitznauer, Regensburg; Stefan Völker, Jena; Johanna Stotz, Wyhl a. K.  
Druck: SDK Systemdruck Köln GmbH & Co. KG, Maarweg 233, 50825 Köln  
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

# Dunkle Materie – ein Klebstoff für Galaxien

## Oberstufe (weiterführend)

Matthias Borchardt, Bonn

Grafiken von Dr. Wolfgang Zettlmeier

<b>Überblick und Hinweise</b>	<b>1</b>
<b>M 1 Wie schnell umrunden unsere Planeten die Sonne</b>	<b>12</b>
<b>M 2 Spiralgalaxien – was ist das und wie sind sie aufgebaut?</b>	<b>15</b>
<b>M 3 Wie müssten Spiralgalaxien rotieren? – Überlegungen</b>	<b>14</b>
<b>M 4 Typische radiointerferometrische Messergebnisse</b>	<b>13</b>
<b>M 5 Wie rotieren Spiralgalaxien in Wirklichkeit? – Ein Rätsel</b>	<b>17</b>
<b>M 6 Dunkle Materie – des Rätsels Lösung?</b>	<b>19</b>
<b>Erläuterungen und Lösungen</b>	<b>21</b>

© RAABE 2019

## Die Schüler lernen:

in fünf Unterrichtsstunden die Idee der dunklen Materie kennen, welche ein Thema der aktuellen astronomischen Forschung ist. Es werden das Basiswissen über Rotationen in Planetensystemen und der Aufbau von Spiralgalaxien vermittelt. Die astronomische Längen- und Geschwindigkeitsmessung wird den Schülern nähergebracht und astrophysikalische Zusammenhänge werden mit Computersimulationen veranschaulicht.

## Überblick:

Legende der Abkürzungen:

AB: Arbeitsblatt

Fo: Folie

Thema	Material	Methode
Wie schnell umrunden unsere Planeten die Sonne?	M1	AB
Spiralgalaxien – was ist das und wie sind sie aufgebaut?	M2	AB
Wie müssten Spiralgalaxien rotieren? – Überlegungen	M3	AB
Typische radiointerferometrische Messergebnisse	M4	Fo
Wie rotieren Spiralgalaxien in Wirklichkeit? – Ein Rätsel	M5	AB
Dunkle Materie – des Rätsels Lösung?	M6	AB

### Zusatzdateien:

Computersimulation: Gravitationskräfte innerhalb einer Galaxienscheibe

Computersimulation: Messung der Rotationsgeschwindigkeiten der Galaxie NGC3198

Computersimulation: Die Rotationskurve der Galaxie NGC3198

Excel-Dateien

Kepler-Rotation (GeoGebra-Datei)

### Minimalplan

Lassen Sie die Schüler das Material **M 1** als Hausaufgabe bearbeiten. Anschließend erklären Sie in Form eines Lehrervortrages, was Spiralgalaxien sind, und ihren Aufbau. Teilen Sie den Schülern dazu das **Glossar** aus.

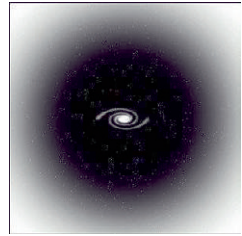
Die Materialien **M 3**, **M 5** und **M 6** bearbeiten Ihre Schüler selbstständig im Computerraum. Dies dauert circa 3 Stunden.

# Dunkle Materie – ein Klebstoff für Galaxien

Die **dunkle Materie** stellt eines der großen Rätsel der modernen Astrophysik dar.

Dieser Beitrag beschreibt, wie Sie sich diesem spannenden Thema in Klasse 10/11 nähern. Drei Computersimulationen bieten einen besonders handlungsorientierten und anschaulichen Zugang zu den grundlegenden Ideen dieser Theorie.

**Dunkle Materie – enorm anziehend, aber unsichtbar!**



© David P. Bennet/University of Notre Dame, Indiana

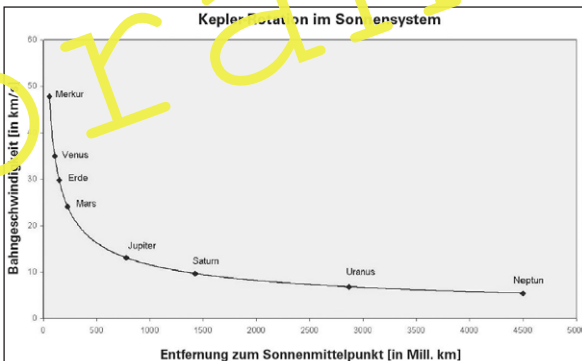
## Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

### Hintergrundinformation

#### Das Problem der flachen Rotationskurven

Trägt man die Umlaufgeschwindigkeiten der Planeten unseres Sonnensystems gegen die Entfernung von der Sonne in einem Diagramm auf, erhält man die typische Kurve einer Kepler-Rotation: Je weiter ein Planet von der Zentralmasse entfernt ist, desto langsamer umrundet er diese.

Die Kurve folgt der hyperbelartigen Funktion



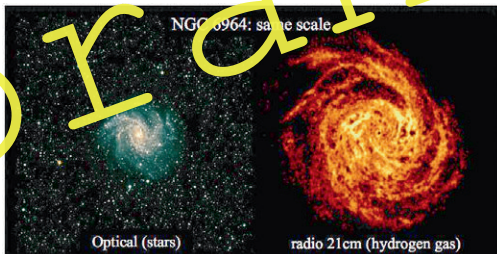
$$v(r) = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}} \quad \left[ \text{Ansatz: } F_z = F_G \Leftrightarrow \frac{m v^2}{r} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \Leftrightarrow v^2 = G \frac{M}{r} \right],$$

wenn wir die Planetenbahnen näherungsweise als kreisförmig annehmen und als Zentripetalkraft die Gravitationskraft einsetzen. Ein ähnliches Rotationsverhalten sollte man von Spiralgalaxien erwarten, denn vor allem die weit außen liegenden Sterne und Gasmassen spüren die Gravitationskraft der innen liegenden Galaxienmaterie so, als wäre sie im Zentrum konzentriert.

Bereits in den 1970er-Jahren wiesen Messungen im sichtbaren Wellenlängenbereich darauf hin, dass dies nicht so ist. Radioastronomische Messungen in den folgenden Jahren bestätigten diese Ergebnisse eindrucksvoll. Mit dem damals neu errichteten Radioteleskop WSRT (Westerbork-Synthese-Radioteleskop) in den Niederlanden, das aus 14 freistehenden 25-Meter-Parabolantennen besteht, wurden die Dopplerverschiebungen der 21-cm-Wellenlänge des mitrotierenden neutralen Wasserstoffgases zahlreicher Spiralgalaxien bestimmt. Dieses Gas ist in der Galaxienscheibe reichlich vorhanden und ragt weit über den Rand des sichtbaren Teils hinaus. So war die Berechnung der Rotationsgeschwindigkeit der Galaxie auch in ihrem nicht optischen Bereich möglich.



Westerbork-Synthese-Radioteleskop  
© Marcel Schmeier/Onderwijsge; Wikipedia, CC-BY-SA 2.5



Die Galaxie erscheint im „Licht“ der 21-cm-Strahlung wesentlich größer als im optischen Bereich.

© University of Virginia – Department of Astronomy

### Typische radiointerferometrische Messergebnisse

Zwei typische Ergebnisse solcher radiointerferometrischer Messungen zeigen die Diagramme der Galaxien NGC3198 und NGC6503:

**galaxrot\_2.exe:**

Mithilfe der Computersimulation galaxrot\_2.exe können Ihre Schüler dann selbst nachempfinden, wie man durch „Hineinpumpen“ von zusätzlicher Masse in den Galaxienhalo die Rotationskurve immer weiter anheben kann, bis sie die Messwerte optimal approximiert (Hochziehen des Reglers, der die Anfangsdichte des Galaxienhalos steuert).

Voreingestellte Beispiele helfen den Lernenden, realistische Einstellungen der wählbaren Parameterwerte zu finden. Die Computersimulation zeigt darüber hinaus auch das Verhältnis von Scheibenmasse (überwiegend sichtbare Materie) zur dunklen Materie an.

**Bezug zu den Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz**

Wir haben hier die Bildungsstandards für die Sekundarstufe I sinngemäß auf die Oberstufe übertragen, für die Bildungsstandards noch nicht verabschiedet sind.

Allg. physikalische Kompetenz	Inhaltsbezogene Kompetenzen Die Schüler ...	Anforderungsbereich
F 1–F 4 K 1, K 2, K 5	... rechnen mithilfe des Gravitationsgesetzes und der Zentripetalkraft die Kreisbahngeschwindigkeit von Satelliten aus ( <b>M 1</b> ),	I, II
F 1, F 2	... rechnen mit großen Zahlen (Zehnerpotenzen) ( <b>M 1–M 4</b> ),	I
F 1, F 2	... fertigen aus Tabellen per Hand oder mithilfe einer Tabellenkalkulation Diagramme ( <b>M 1, M 3, M 5</b> ),	I
F 1, F 2, F 4 K 1, K 5	... rechnen astronomische Längeneinheiten ineinander um ( <b>M 2</b> ),	I, II
F 2, F 4, E 2, K 1, K 2, K 5, B 1	... erlernen grundlegende Aspekte der radioastronomischen Geschwindigkeitsmessung ( <b>M 3</b> ),	II
F 1, F 4, E 10, K 1, K 2, K 5, B 1	... lernen die Anpassung von Modellfunktionen an reale Messergebnisse kennen ( <b>M 6</b> ).	II, III

Für welche Kompetenzen und Anforderungsbereiche die Abkürzungen stehen, finden Sie im Archiv in dem zum Beitrag gehörenden Ordner..

## Mediathek

### Simulationsprogramme zu den Materialien:

[http://www.mabo-physik.de/dunkle\\_materie.html](http://www.mabo-physik.de/dunkle_materie.html)

### Literatur

- **U. Klein, G. Józsa, F. Kenn, T. Oosterloo.** *Galaxien und dunkle Materie: neue Sichtweisen.* In: *Sterne und Weltraum*, September 2005.  
[http://www.astro.uni-bonn.de/~uklein/research/SuW\\_DM.pdf](http://www.astro.uni-bonn.de/~uklein/research/SuW_DM.pdf)
- **M. Bartelmann, M. Steinmetz.** *Dem dunklen Universum auf der Spur.* In: *Sterne und Weltraum*, August 2010.  
<http://www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1050067>
- **J. M. Wallasch.** *Rotationskurve einer Spiralgalaxie.*  
<http://www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051349>
- **T. S. van Albada, J. N. Bahcall, K. Begeman, R. Sancisi.** *Distribution of dark matter in the spiral galaxy NGC 3198.* *ApJ*, 295: 305–313, August 1985.  
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1985ApJ...295..305V>
- **V. C. Rubin, W. K. Ford, N. Thonnard.** *Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies.* *ApJ*, 225: L107–L111, November 1978.  
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1978ApJ...225L.107R>
- **G. Börner.** *Dunkle Materie.*  
In: *Astronomie und Raumfahrt im Unterricht*, 4/2002.
- **F. Froberg.** *Modellierungen von Spiralgalaxien am Beispiel von NGC 7331.* *Diplomarbeit*, Mai 2007.  
[http://www.astron.nl/~jozsa/publications/ffroberg\\_diplom.pdf](http://www.astron.nl/~jozsa/publications/ffroberg_diplom.pdf)
- *Woraus besteht die dunkle Materie?*  
*Ein Überblick auf den Seiten des Instituts für Lehrerfort- und -weiterbildung Mainz.*  
[http://www.ilf-mainz.de/projekte/Projektleitung1/kosmoFAQ/6\\_Kosmos/ad\\_materie/teile.htm](http://www.ilf-mainz.de/projekte/Projektleitung1/kosmoFAQ/6_Kosmos/ad_materie/teile.htm)



## M 1 Wie schnell umrunden unsere Planeten die Sonne?

**Ziel:** Hier sollen Sie ausrechnen, wie groß die Geschwindigkeiten sind, mit denen die Planeten die Sonne umkreisen. Wir nehmen vereinfachend an, dass sich die Planeten auf Kreisbahnen um die Sonne bewegen. Die Abweichungen der Ellipsenbahnen von einer Kreisbahn sind hier nämlich nicht sehr groß. Die Gravitationskraft wirkt dann als kreisbildende Kraft, also als Zentripetalkraft. Daher dürfen wir schreiben:  $F_Z = F_{\text{Grav}}$ .

### Aufgaben

1. Leiten Sie mithilfe dieses Ansatzes her: Die Umlaufgeschwindigkeit im Abstand  $r$

vom Zentrum der Sonne beträgt:  $v(r) = \sqrt{\frac{G \cdot M_{\text{Sonne}}}{r}}$

2. Die Masse der Sonne beträgt  $M_{\text{Sonne}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$  und die Gravitationskonstante hat den Wert  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$ .

Die folgende Tabelle enthält die mittleren Abstände  $r$  der Planeten vom Zentrum der Sonne. Berechnen Sie die Geschwindigkeiten der Planeten in km/s. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in die Tabelle ein.

**Tip:** Runden Sie Ihre Ergebnisse auf eine Stelle hinter dem Komma.

		$r$ [in 109 m]	Geschwindig- keit in [km/s]		$r$ [in 109 m]	Geschwindig- keit in [km/s]
Merkur	☿	59		Jupiter	♃	778
Venus	♀	108		Saturn	♄	1427
Erde	♁	150		Uranus	♅	2870
Mars	♂	228		Neptun	♆	4497

3. Fertigen Sie ein Diagramm an, bei dem die x-Achse den Abstand  $r$  und die y-Achse die Geschwindigkeit  $v$  darstellen. Tragen Sie die Tabellenwerte als Punkte ein.

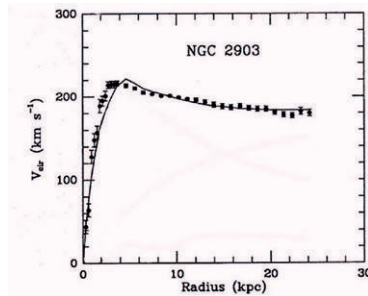
**Tip:** Führen Sie dies mit einer Tabellenkalkulation durch und drucken Sie das Ergebnis aus.

4. Legen Sie eine glatte Kurve durch die Punkte. Beschreiben Sie in einem „Je ... , desto“-Satz, wie sich die Umlaufgeschwindigkeiten der Himmelskörper mit zunehmendem Abstand von der Zentralmasse verhalten.
5. Um welchen Typ von mathematischer Funktion (Kurve) handelt es sich hierbei?

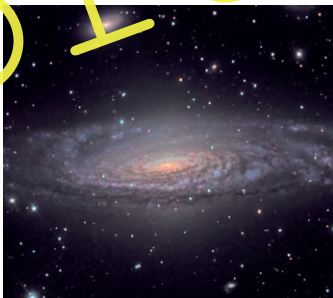
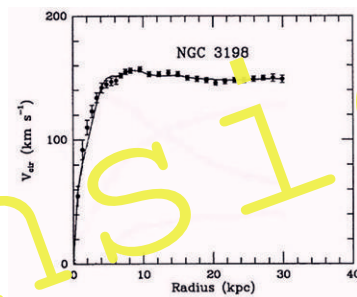
## M 4 Typische radiointerferometrische Messergebnisse



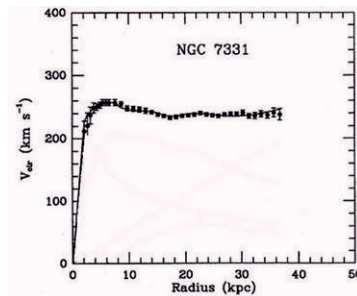
NGC 2903



NGC 3198



NGC 7331



© *ngc3198*: John Vickery and Jim Matthes/Adam Block/NOAO/AURA/NSF

*ngc7331*: Paul Mortfield and Dietmar Kupke/Flynn Haase/NOAO/AURA/NSF

*ngc2903*: Tracey and Russ Birch/Flynn Haase/NOAO/AURA/NSF

## Erläuterungen und Lösungen

### M 1 Wie schnell umrunden unsere Planeten die Sonne?

1. Die Gravitationskraft wirkt als Zentripetalkraft:  $F_Z = F_{\text{Grav}} \Leftrightarrow \frac{mv^2}{r} = G \cdot \frac{m M_{\text{Sonne}}}{r^2}$

Daraus ergibt sich durch Umformen (Multiplikation mit  $r$  und Division durch  $m \neq 0$ ):

$$v(r) = \sqrt{\frac{G \cdot M_{\text{Sonne}}}{r}}$$

2.

		r [in $10^9$ m]	Geschwindigkeit [in km/s]
Merkur	♁	59	47,6
Venus	♀	108	35,1
Erde	♁	150	29,8
Mars	♂	228	24,1
Jupiter	♃	778	13,1
Saturn	♄	1427	9,7
Uranus	♅	2870	6,8
Neptun	♆	4497	5,4

© RAABE 2019

