

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 49 (1991)
Heft: 246

Artikel: Wie dunkel ist dunkle Materie?
Autor: Pretzl, Klaus
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-898951>

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: 05.02.2026

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

Wie dunkel ist dunkle Materie?

KLAUS PRETZL

Aus den Bewegungen der Sterne um das Zentrum von Spiralgalaxien und der Galaxien im Koma-Haufen kann man schliessen, dass weit mehr unsichtbare als sichtbare Materie im Universum vorhanden sein muss. Die spannende Frage, woraus diese dunkle Materie bestehen könnte, beschäftigt Astro- und Elementarteilchenphysiker gleichermaßen.

Den ersten Hinweis auf die Existenz von dunkler Materie gab 1933 der Schweizer Astronom Fritz Zwicky [1]. Mittels der Dopplerverschiebung von Spektrallinien hat er die Geschwindigkeit von Galaxien im Koma-Haufen bestimmt und dabei festgestellt, dass die kinetischen Energien der Galaxien sehr viel grösser sind als man das nach dem Virialsatz (mittlere kinetische Energie = $1/2$ potentielle Energie in einem abgeschlossenen System) für ein gravitativ gebundenes System von Galaxien erwarten würde. Er schloss daraus, dass die mittlere Materiedichte im Koma-System um ein Vielfaches grösser sein muss als die beobachtete Dichte leuchtender Materie. Zwicky's Messungen wurden in jüngster Zeit an vielen Kugelhaufen wiederholt und seine damaligen Schlussfolgerungen voll bestätigt.

1978 haben Vera Rubin und Mitarbeiter eine interessante Entdeckung gemacht [2]. Durch den Einsatz von Bildverstärkerröhren gelang es ihnen, Bahngeschwindigkeiten von leuchtender Materie in Spiralgalaxien als Funktion des radialen Abstands r vom galaktischen Zentrum aus der Dopplerverschiebung charakteristischer Spektrallinien zu bestimmen. Aus den Messungen, welche sie an mehr als 60 Spiralgalaxien durchführten, erhielten sie ein überraschendes Ergebnis. Die Bahngeschwindigkeiten haben nicht mit $1/\sqrt{r}$ abgenommen, wie man das nach dem Kepler'schen Gesetz erwarten würde, sondern sie sind bis an den äussersten noch sichtbaren Rand der Galaxien konstant geblieben. Wenn man nicht an der Gültigkeit der Kepler'schen Gesetze zweifeln möchte, dann bedeuten diese Ergebnisse, dass die im Radius r eingeschlossene Gesamtmasse mit r zunehmen muss. Aus den gemessenen Bahngeschwindigkeiten liess sich ermitteln, dass die Gesamtmasse der Galaxien etwa das zehnfache der leuchtenden Masse sein muss. Um auch die äusseren mit Wasserstoff angereicherten Ränder der Galaxien erfassen zu können, wurden die Bahngeschwindigkeitsmessungen von Renzo Sancisi und Mitarbeitern auf den Bereich der 21 cm Linie ausgedehnt [3]. Ihre Resultate haben nicht nur die von Vera Rubin und Mitarbeitern bestätigt, sondern auch gezeigt, dass die Bahngeschwindigkeiten des Wasserstoffs weit über die optisch sichtbaren Randzonen der Galaxien hinaus konstant bleiben (Fig.1). Die Evidenz für dunkle Materie in den Spiralgalaxien war so überzeugend, dass man sich gefragt hat, ob nicht alle Galaxien, also auch elliptische Galaxien, dunkle Materie beinhalten. Da bei den elliptischen Galaxien die obengenannten Messmethoden nicht ohne weiteres anwendbar sind, hat man die Röntgenstrahlen der Gaswolken, welche die elliptischen Galaxien umgeben, untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die Gasteilchen sehr hohe Geschwindigkeiten besitzen. Um die gravitative Bindung dieser Gasteilchen an die elliptischen Galaxien erklären zu können, sind ebenfalls grosse Mengen dunkler Materie nötig.

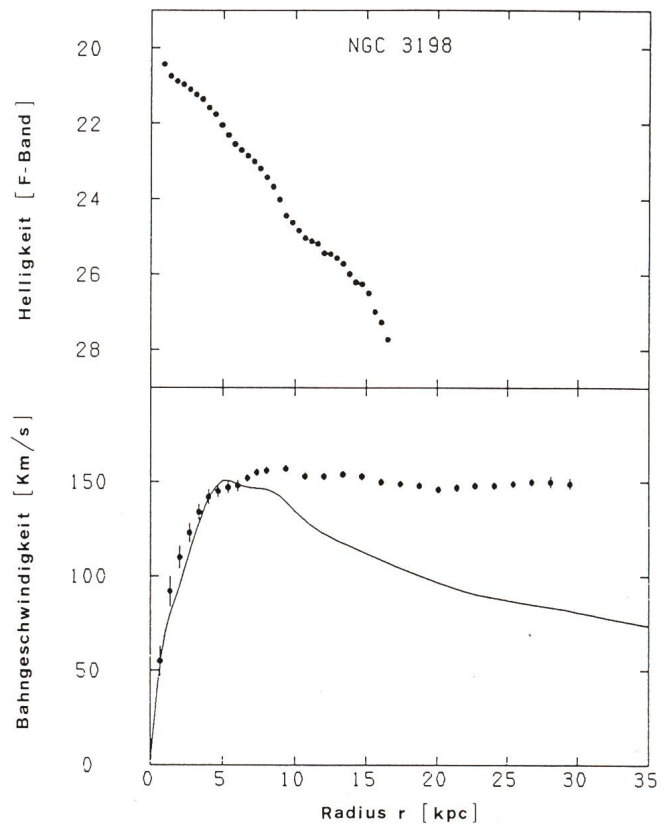


Fig. 1: Zeigt die Helligkeit der leuchtenden Materie und die gemessene Bahngeschwindigkeit von Wasserstoff in der Galaxie NGC 3198 als Funktion des radialen Abstandes r vom galaktischen Zentrum. Aus den Kurven erkennt man, dass mit zunehmendem radialen Abstand zwar die leuchtende Materie abnimmt, die Bahngeschwindigkeit aber konstant bleibt. Die nach den Keplergesetzen erwarteten Bahngeschwindigkeiten, hier als durchgezogene Linie gezeigt, weichen von den gemessenen ab. Man kann daraus schliessen, dass mehr als nur leuchtende Materie vorhanden sein muss.

Experimentelle Hinweise und theoretische Argumente sprechen dafür, dass sich die dunkle Materie haloförmig um die Galaxien ausdehnt. Die genauen Ausmasse dieser Halos konnten bisher nicht bestimmt werden, jedoch sind Ausdehnungen von etwa dem zehnfachen des sichtbaren Durchmessers der Galaxien gemessen worden.

Hinweise für die Existenz von grossen Mengen dunkler Materie basieren also auf den Geschwindigkeitsmessungen der leuchtenden Materie in gravitativ gebundenen Systemen und auf der Gültigkeit des Newton'schen Gravitationsgesetzes. Zweifler, wie M. Milgrom und J. Bekenstein [4], haben dies zum Anlass genommen, nach Modifikationen des Newton'schen Gravitationsgesetzes zu suchen. Will man jedoch an der Gültigkeit der Newton'schen Gesetze festhalten, dann stellen sich folgende wichtige Fragen:

1.) Wieviel dunkle Materie gibt es insgesamt im Universum? Würde die dunkle Materie etwa ausreichen, um das

Universum zu schliessen, d.h. könnte damit die kritische Dichte des Universums erreicht werden?

2.) Woraus besteht die dunkle Materie? Ist sie von baryonischer Natur (bekannte Materie, welche aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt ist) oder nichtbaryonischer Natur (exotische Elementarteilchen oder Neutrinos mit Masse)?

3.) Wie verteilt sich die dunkle Materie im Universum? Hat sie etwas mit der Anhäufung von Galaxien in grossen zellartigen Strukturen und den dazwischenliegenden leeren Räumen zu tun? Welche Rolle spielt sie bei der Entstehung von Galaxien?

In diesem Zusammenhang ist es interessant, nach den experimentell ermittelten Massendichten im Universum zu fragen und diese mit der aus dem Standard-Modell der Nukleosynthese berechneten Massendichte zu vergleichen. Üblicherweise wird dabei der Parameter Ω benützt, welcher das Verhältnis der Materiedichten zur kritischen Dichte $\rho_c = 1.9 \cdot 10^{-29} h_0^2 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ des Universums angibt. Wobei h_0 ein Parameter ist, welcher der Unsicherheit der Hubble-Konstante ($H = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$) Rechnung trägt und die Werte $0.4 < h_0 < 1.0$ annehmen kann. Massendichten mit den Werten $\Omega = 1, >1, <1$ würden bedeuten, dass das Universum flach, geschlossen, bzw. offen ist. Experimentell konnten folgende obere Grenzen der Materiedichten ermittelt werden: $\Omega_L \leq 0.014$ für die sichtbare oder leuchtende Materie aus der Masse-Leuchtkraft Beziehung, $\Omega_G \leq 0.14$ für die Galaxien plus dunkler Materie aus den Bahngeschwindigkeitsmessungen à la Vera Rubin, $\Omega_H \leq 0.3$ für galaktische Koma-Haufen plus dunkler Materie aus den Virialgeschwindigkeitsmessungen à la Fritz Zwicky. Aus dem Standard Modell der Nukleosynthese und den gemessenen kosmischen Häufigkeiten von ^4He , ^3He , D und Li ergibt sich eine obere Grenze für die Massedichte baryonischer Materie von $\Omega_B \leq 0.035 \cdot h_0^2$ oder $\Omega_B \leq 0.10$ für einen Hubble Parameter $h_0 = 0.6$. Ein Vergleich der Materiedichten zeigt, dass die dunkle Materie in den Galaxien zum grossen Teil baryonischer Natur sein könnte, während nichtbaryonische dunkle Materie nötig ist, um die Massedichten in den galaktischen Haufen zu erklären. Die beobachteten oberen Grenzen der Massendichten sind sehr viel kleiner als eins und lassen vermuten, dass wir in einem offenen Universum leben. Kosmologische Argumente und die von Alan Guth 1981 vorgeschlagene Inflationstheorie des frühen Universums sprechen jedoch für ein flaches Universum, was bedeuten würde, dass mehr als 90 % unseres Universums aus nichtbaryonischer dunkler Materie bestehen würde [5].

Als mögliche Kandidaten für baryonische dunkle Materie kommen schwach oder nicht leuchtende Objekte, wie zum Beispiel weisse oder braune Zwerge, Materiebrocken von Planetengrösse, Neutronensterne und schwarze Löcher in Frage. Bisher hat man jedoch zu wenige von diesen Objekten entdeckt. Man hofft in naher Zukunft über Satellitenexperimente, welche mit Infrarot-Teleskopen ausgerüstet sind, mehr über die Häufigkeit von lichtschwachen Sternen in unserer Galaxie zu erfahren. Mit dem kürzlich gestarteten Hubble-Teleskop will man femer auch nach massiven Objekten wie Neutronensternen und schwarzen Löchern suchen. Diese Objekte können dadurch aufgespürt werden, dass sie aufgrund der Lichtbeugung in ihrem Gravitationsfeld die Abbildung und Leuchtkraft entfernter Sterne in charakteristischer Weise verändern, wenn sie sich zwischen dem Beobachter und den anvisierten Sternen befinden. Diesen Gravitationslinseneffekt wollen sich auch zwei Forscher-

teams in den USA und in Frankreich zu Nutze machen, um nach dunklen Halo-Objekten in unserer Galaxie zu suchen. Dabei will man mit erdgebundenen Teleskopen unter Verwendung moderner CCD-Technik (charge coupled devices) die Leuchtkraftschwankungen von vielen Millionen von Sternen in der Magellan'schen Wolke beobachten. Auf diese Weise hofft man sogar auch dunkle Materie in Form von planetengrossen Materiebrocken erfassen zu können.

Mögliche Kandidaten für nichtbaryonische dunkle Materie sind schwach wechselwirkende Teilchen, wie zum Beispiel massive Neutrinos, welche kurz nach dem Urknall entstanden sind und jetzt unser Universum bevölkern. Die Dichte dieser Neutrinos beträgt etwa $300/\text{cm}^3$. Falls sie eine Masse von etwa 35 eV hätten, könnten sie sogar die kritische Dichte des Universums erreichen. Die Frage, ob die Neutrinos Masse haben, ist bis heute noch nicht geklärt. Bisher konnten experimentell nur obere Massengrenzen bestimmt werden ($<9 \text{ eV}$ für das Elektronneutrino, $<250 \text{ KeV}$ für das Muonneutrino und $<35 \text{ MeV}$ für das Tauoneutrino).

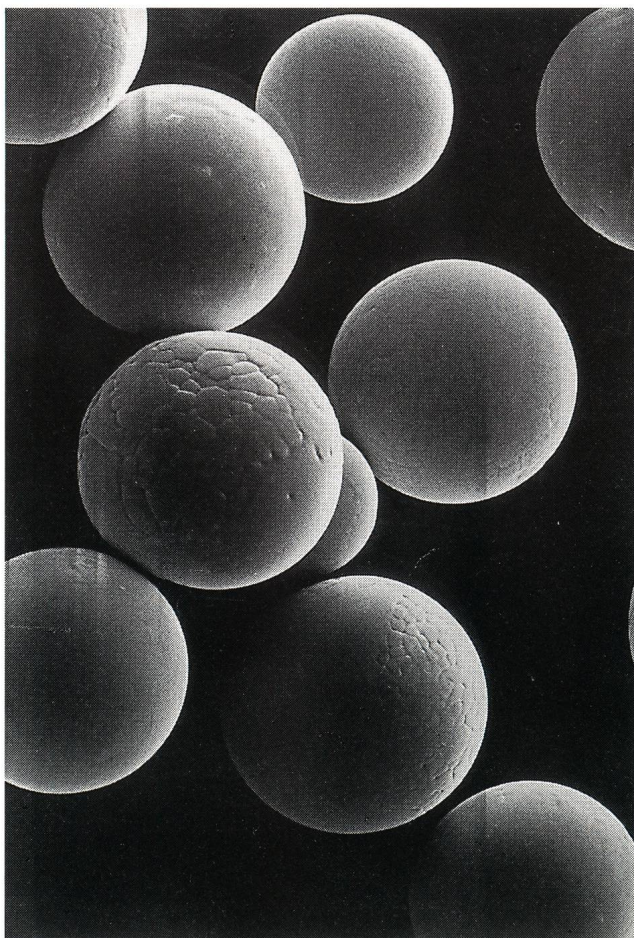
Es kommen aber auch exotische Teilchen in Frage, welche von den Theorien der Super-Symmetrie vorhergesagt werden (Photinos, Sneutrinos, Neutralinos, Axions etc...). Sie spielen eine grosse Rolle bei der Vereinheitlichung der starken, der elektromagnetischen und der schwachen Kraft in den sogenannten «Grand Unified Theories». Nach den heutigen Erkenntnissen aus der theoretischen Elementarteilchenphysik und der Kosmologie soll es kurz nach dem Urknall eine Epoche einer solchen Vereinheitlichung aller Kräfte gegeben haben. Jedoch schon 10^{-35} Sekunden nach dem Urknall, als sich das Universum inflationär auszudehnen begann, wurde diese Symmetrie gebrochen und die Kräfte begannen sich in ihrer heute bekannten Erscheinungsform und Stärke deutlich voneinander zu unterscheiden. Bei einem solchen Phasenübergang von einem symmetrischen zu einem unsymmetrischen Universum könnten nun die exotischen Teilchen entstanden sein und bis heute unentdeckt überlebt haben. Im Prinzip können diese Teilchen auch mit den grossen Beschleunigeranlagen, wie sie zum Beispiel am CERN in Genf existieren, produziert werden. Die neuesten Resultate der Beschleunigerexperimente zeigen jedoch, dass sie, wenn es sie überhaupt gibt, sehr hohe Massen von über 35 GeV besitzen müssen. Erst die nächste Generation von Teilchenbeschleunigern, wie der geplante LHC (Large Hadron Collider) am CERN und der sich im Bau befindende SSC (Superconducting Super Collider) in Texas, ermöglichen es, nach den Exoten im höheren Massenbereich zu suchen.

Es liegt nun nahe, die Frage der dunklen Materie mit der Frage nach der Entstehung der Galaxien und den beobachteten grossen Strukturen in Zusammenhang zu bringen. Mit Hilfe von Modellrechnungen an Grosscomputern hat man die Bildung von grossen gravitationsbedingten Verdichtungen in einem von nichtbaryonischer Materie dominierten Universum studiert. Dabei hat man zwei Fälle unterschieden: die sogenannte «heisse» dunkle Materie bestehend aus relativistischen Teilchen, wie zum Beispiel leichte Neutrinos, und die «kalte» Materie bestehend aus nicht relativistischen schweren exotischen Teilchen. Die Rechnungen haben ergeben, dass sich in einem von heisser dunkler Materie dominierten Universum die ersten Verdichtungen auf der Grössenskala von Galaxienhaufen oder Superhaufen bildeten. Damit könnten die beobachteten grossen Strukturen gut erklärt werden. Allerdings hat in diesem Szenario die Bildung von Galaxien erst vor kurzer Zeit stattgefunden, was wiederum

nicht unseren Beobachtungen entspricht. Anders sehen die Resultate mit der kalten dunklen Materie aus. Wegen der langsamen schweren Teilchen konnten Verdichtungen von der Grösse von Galaxien und Zwerggalaxien schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt entstehen. Die normale Materie würde dann in die Gravitationspotentialtöpfe der Verdichtungen hineingesogen und die Entstehung der Galaxien zu einem frühen Zeitpunkt erfolgen, was mehr den Beobachtungen entspricht. Die Superhaufen haben sich dann später aus den Ansammlungen von Galaxien gebildet. Es stellt sich also die Frage: wer war zuerst da? Viele Elementarteilchenphysiker und Kosmologen bevorzugen die kalte Version der dunklen Materie, da sie sowohl das Problem der Entstehung der Galaxien als auch das der Vereinheitlichung aller Kräfte nach dem Urknall lösen könnte.

Diese Betrachtungen sind natürlich sehr spekulativ. Weitere experimentelle Fakten sind nötig, um Licht in die dunkle Materie zu bringen. Weltweit wurde deshalb ein umfassendes Forschungsprogramm gestartet, was alle Möglichkeiten durchleuchten soll. Dazu werden auch neuartige unkonventionelle Detektoren entwickelt, die sich von den bisher benützten Nachweisgeräten durch eine wesentlich verbesserte Energieauflösung bei niedrigen Energieschwellen auszeichnen sollen.

Fig. 2: Supraleitende Zinn-Kügelchen mit Durchmessern von einigen μm , aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop.



Am Laboratorium für Hochenergiephysik wird zur Zeit ein solcher Detektor entwickelt. Er besteht aus kleinen, supraleitenden Kügelchen (mit einem Durchmesser von einigen μm , siehe Fig. 2), welche in einem Helium³-Helium⁴ Mischkryostaten auf Temperaturen von 25mK gekühlt werden. Die Kügelchen befinden sich in einem Magnetfeld. Wird zum Beispiel ein schwach wechselwirkendes Teilchen an einem Atomkern des Kügelchenmaterials gestreut, so erhält der Kern eine Rückstossenergie. Diese Energie wird durch Phononen in Wärme umgewandelt, sodass das Kügelchen eine Temperaturerhöhung erfährt. Dieser Temperaturanstieg kann nun zu einem Phasenübergang des Kügelchens aus dem supraleitenden in den normalleitenden Zustand führen. Verwendet man als Kügelchenmaterial Supraleiter vom Typ I, dann erfolgt der Phasenübergang innerhalb von Nanosekunden. Die Kügelchen durchlaufen dabei eine sogenannte metastabile Ueberhitzungsphase. Das Eindringen des externen magnetischen Feldes beim Phasenübergang vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand einzelner Kügelchen (Meissner-Effekt) kann mittels geeigneter Induktionsspulen in ein elektrisches Signal verwandelt und nachgewiesen werden. Falls die Entwicklung zum Erfolg führt, kann dieser Detektor auch zum Nachweis von solaren Neutrinos, Monopolen, doppeltem Beta-Zerfall, Neutrino-Massen und niederenergetischen Reaktoneutrinos verwendet werden.

Literaturverzeichnis:

- [1] F. Zwicky: *Helv.Phys.Act* 6 (1933) 110
- [2] V. Rubin: *Dark matter in spiral galaxies*, *Scientific American*, June, 1983
- [3] T.S. van Albada, J.N. Bahcall, K. Begeman und R. Sancisi: *Astrophysical Journal*, 295 (1985) 305
- [4] M. Milgrom: *Astrophysical Journal*, 270 (1983) 365; and J.D. Bekenstein, M. Milgrom: *Astrophysical Journal*, 286 (1984) 7
- [5] L.M. Krauss: *Dark matter in the universe*, *Scientific American*, December 1986

PROF. DR. KLAUS PRETZL
Laboratorium für Hochenergiephysik
Universität Bern
Sidlerstrasse 5, 3012 Bern

ASTRO-MATERIALZENTRALE SAG

Selbstbau-Programm SATURN gegen fr. 1.50 in Briefmarken. SPIEGELSCHLEIFGARNITUREN enthalten sämtliche Materialien zum Schleifen eines Parabolspiegels von 15 cm Durchmesser oder grösser. SCHWEIZER QUALITÄTSSPEKTROS: Spezialvergütete Okulare, Filter, Helioskope, Fangspiegel, Achromate **Okularschlitten**, Okularauszüge, Fangspiegelzellen, Suchersensoren, Hauptspiegelzellen...

Unser Renner: SELBSTBAUFERNROHR SATURN für Fr. 168.-
Quarz-Digital-Sternzeituhr ALPHA-PLUS 12/220 Volt.

SAM-Astro-Programm Celestron + Vixen gegen Fr. 2.- in Briefmarken: Attraktive SAM-Rabatte für SAG Mitglieder GRATIS TELESKOPVERSAND!

Schweizerische Astronomische Materialzentrale SAM, Fam. Gatti,
Postfach 251, CH-8212 Neuhausen a/Rhf 1.

Neue Telefonnummer: 053/22 54 16