

Dunkle Materie Teil I

Wolfgang Albrecht

1. Geschichte der Dunklen Materie

Am 3. Mai 2016 fand im Planetarium Münster eine Präsentation sowie ein Vortrag von Prof. Dr. Weinheimer (Uni Münster) zu einem Thema statt, das ganz viele Menschen fasziniert – von dem aber die wenigsten wissen, um was es eigentlich geht. Schon der Name „Dunkle Materie“ verbirgt Missverständnisse: „Dunkel“ ist weniger im allgemein üblichen Sinne als vielmehr in der Bedeutung von „Unbekannt“ zu verstehen. Kosmologen und Physiker in aller Welt bemühen sich, Hypothesen und daraus resultierend Modelle dieses unbekanntes Materials zu entwickeln und diese dann überprüfbar zu machen. Auch eine Arbeitsgruppe des kernphysikalischen Instituts der Universität Münster beteiligt sich im Projekt „XENON1T“ (und Vorgängerversionen) an der Suche nach der **Dunklen Materie**. Wie Prof. Weinheimer (der Leiter dieses Instituts) erläuterte, lässt sich die augenblickliche Situation vergleichen mit der verzweifelten Lage der Astronomen vor 1847, die den Planeten Uranus nie exakt an der Stelle des Himmels fanden, die sie vorausberechnet hatten. Es musste etwas Unbekanntes geben, das die genaue Bahnberechnung unmöglich machte. **Le Verrier**, ein französischer Astronom, stellte die Hypothese auf, dass es einen weiteren bisher unbekanntes Planeten geben müsse, dessen Anwesenheit zu Störungen der Uranusbahn führe. Er bat den damaligen Leiter der Sternwarte Berlin **Johann Gottfried Galle** an einer von ihm berechneten Stelle des Nachthimmels nach diesem unbekanntes Objekt zu suchen. Tatsächlich fand Galle exakt an der vorausberechneten Position den Planeten Neptun.

Weniger als 100 Jahre später – **Edwin Hubble** hatte festgestellt, dass die Milchstraße nur eine Galaxie unter vielen anderen ist – sprach **Jan Hendrik Oort** in einer 1932 veröffentlichten Arbeit [1] schon über „dunkle Materie.“

Ihm war bei seinen Untersuchungen über die Geschwindigkeitsverteilung von Sternen der Milchstraßenscheibe aufgefallen, dass viel mehr Masse erforderlich wäre, diese auf Dauer so „dünn“ zu halten. Er dachte dabei allerdings im wörtlichen Sinne an riesige dunkle Gaswolken oder an Sterne, deren Licht auf dem Weg zur Erde absorbiert worden sei.

Etwa zur gleichen Zeit bestimmte **Fritz Zwicky** die Rotverschiebungen in den Spektren von Galaxien des Coma-Galaxienhaufens. Diese waren jedoch größer, als nach der Hubble-Expansionsgeschwindigkeit des Universums erwartet. Zwicky folgerte daraus [2], dass neben der Hubble - Bewegung auch noch Eigenbewegungen der Galaxien innerhalb des Haufens vorlagen. Schon damals konnte er berechnen, wie viel Masse die Galaxien enthielten. Aus dem Virialsatz (in der hier gültigen vereinfachten Form) ermittelte

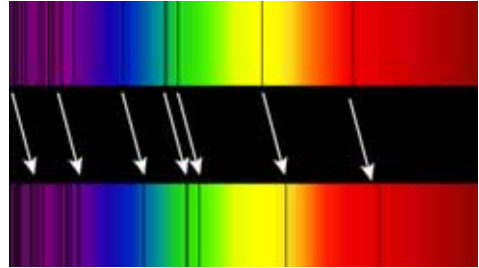
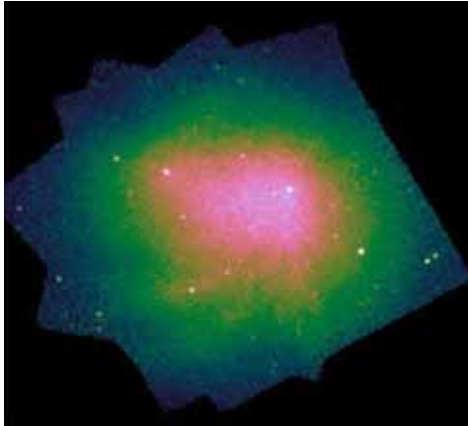
$$\overline{E}_{\text{kin}} = -\frac{1}{2} \cdot \overline{E}_{\text{pot}}$$

er, wie schnell nun die Eigenbewegung sein durfte, damit sich der Haufen nicht in kurzer Zeit selbst „zerlegte“, aber die Rotverschiebungen wiesen auf viel höhere Geschwindigkeiten hin – und der Coma-Haufen zerstört sich trotzdem nicht! So kam Zwicky zu der Schlussfolgerung, dass im Coma-Haufen mindestens zehnmal mehr an Masse vorhanden sein muss als das, was man als leuchtende Materie in Form von Sternen sehen konnte.



Neuere Untersuchungen zeigen außerdem: Das heiße Gas zwischen den Galaxien des Clusters ist zu heiß (Röntgenstrahlung) für die wenige sicht-

Beispiel für eine Rotverschiebung von Absorptionslinien (Wikipedia)

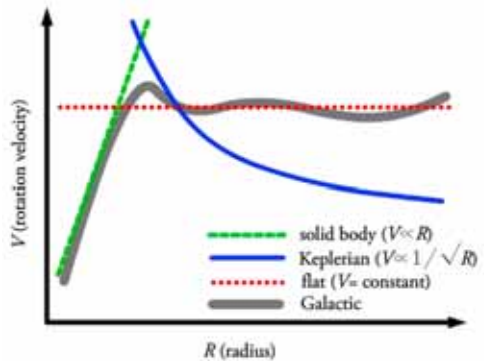


Erwartet wurde die Kepler-Kurve (differentielle Rotation - ähnlich der Geschwindigkeitsverteilung der Planeten).

Gemessen wurde bei allen Galaxien die graue Kurve (Galactic), die aufzeigt, dass die Geschwindigkeit nach außen hin nicht abnimmt (s. u.)!

bare Masse. Nur erhebliche Mengen unbekannter Materie können dieses Gas „festhalten“.

Vera Rubin vermaß in den 60- bis 80-er Jahren die Rotationsbewegung von Galaxien. Dabei stellte sie fest, dass die Rotationskurve nicht mit dem Abstand der Sterne vom Zentrum wie erwartet abnimmt (differentielle Rotation; Kepler mit $v \sim 1/\sqrt{R}$), sondern in etwa konstant bleibt. [3]



Zwei kleine Bemerkungen am Rande:

1. Interessant ist, dass die Rotationsgeschwindigkeit der (sichtbaren) Galaxienarme nicht gleichwertig ist mit der Rotationsgeschwindigkeit der darin befindlichen Objekte (Sterne, Gas, Staub). Was rotiert da eigentlich (Dichtewellen)?
2. Die Rotationskurven wurden dabei (insbesondere) für die Außenbereiche der Galaxien durch die Dopplerverschiebung der 21-cm Linie (Hyperfeinstrukturlinie/ Spinwechsel) des atomaren HI-Gases gemessen.

Überprüft wurde also die Rotationsgeschwindigkeit der Bestandteile der Galaxie, nicht die der Galaxie selber.

Eine unbekannte, sehr großräumig in und um die jeweilige Galaxie verteilte Masse, kann ein solches im Graphen sichtbares Ergebnis erklären. Aber was soll das für ein Material sein? Mengenmäßig müsste es weitaus mehr Materie sein als diejenige, aus denen die Galaxien bekannterweise bestehen (also hauptsächlich Sterne sowie Staub- und Gaswolken).

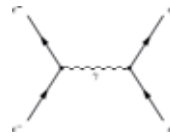
Auf jeden Fall wird man den fraglichen „Stoff“ nicht sehen können – „sehen“ beinhaltet eine elektromagnetische Wechselwirkung (Licht); und genau an dieser nimmt die dunkle Materie nicht teil. Man geht davon aus, dass sie nur gravitativ und allerhöchstens schwach wechselwirkt – falls

es nicht noch Wechselwirkungen gibt, die man (bisher) noch nicht kennt.

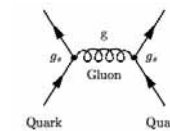
Im Text ist immer wieder die Rede von „**Wechselwirkungen**“. Gemeint sind damit die zwischen den Teilchen wirkenden Kräfte. In der Standardtheorie der Teilchenphysik gibt es davon drei:

1. Die elektromagnetische Wechselwirkung (Ww): Gemeint ist die Kraft zwischen zwei geladenen Teilchen (z.B. zwischen zwei Elektronen).
2. Die starke Ww: Gemeint ist die Kernkraft, die z.B. den Atomkern zusammenhält (schließlich enthält er nur positiv geladene Teilchen (Protonen) und Neutronen).
3. Die schwache Ww, die für viele radioaktive Zerfälle verantwortlich ist. Sie wirkt ursächlich auch bei der - Gott sei Dank - wegen der Schwäche dieser Kraft langsam ablaufenden Kernfusion ($H \rightarrow He$) in der Sonne (mit Umwandlung von Protonen in Neutronen) mit.
4. Die Gravitation, die irgendwie eine „Sonderrolle“ zu spielen scheint und hier noch nicht „reinspasst.“

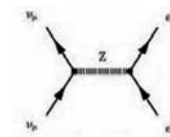
Die Wechselwirkung selber lässt sich mit Hilfe von Feldern oder durch den Austausch von „Kraftteilchen, sogenannten **BOSONEN** (auch mathematisch) darstellen. Zum Beispiel stoßen sich zwei einander begegnende Elektronen ab, weil zwischen ihnen ein elektromagnetisches Feld wirkt – oder – weil im Augenblick der Begegnung ein Photon „ausgetauscht“ wird. Der Physiker Richard P. Feynman hat das durch seine nach ihm benannten Diagramme (auch recht anschaulich dargestellt:



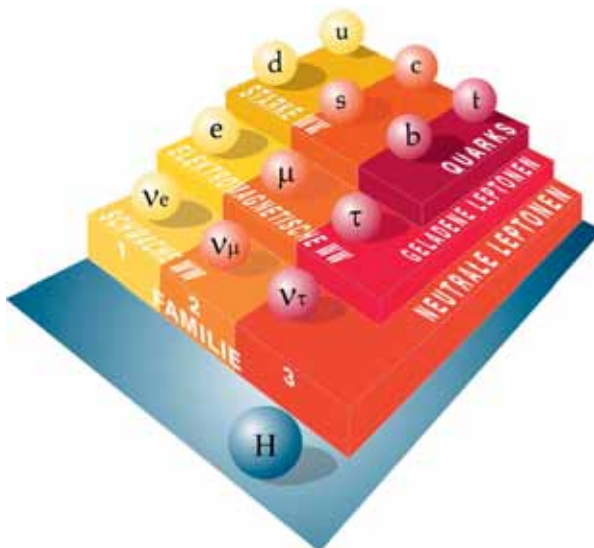
elektromagnetische Wechselwirkung (Bild: Wikipedia)



starke Wechselwirkung (Bild: MPI)



schwache Wechselwirkung (Bild: MPG)

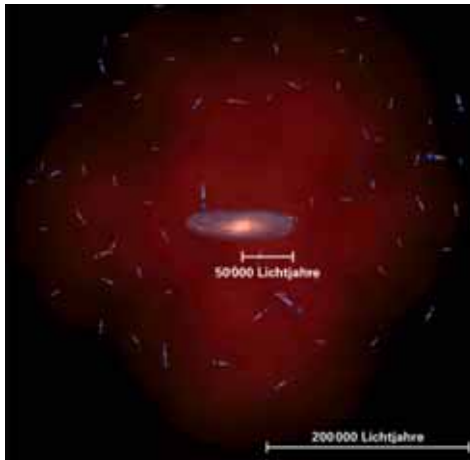


Die elektromagnetische Wechselwirkung findet durch den Austausch eines Photons (γ) statt. Die Wechselwirkungsteilchen der starken Wechselwirkung sind die „Gluonen“ (g), die zwischen den Quarks ausgetauscht und durch eine Spirale dargestellt werden (u bedeutet dabei „up-Quark“). Bei der schwachen Wechselwirkung gibt es je nach Begegnung drei verschiedene Bosonen – das Z^0 sowie das positive und negative W-Teilchen. Eine wirklich stimmige Theorie der Gravitationskraft existiert in diesem Rahmen noch nicht.

Erstaunlich ist nun insbesondere die festgestellte Menge an dunkler (unbekannter) Materie im Vergleich zur „normalen“ (baryonischen) Materie. Es gibt etwa fünf mal mehr dunkle als „normale“ (baryonische) Materie!



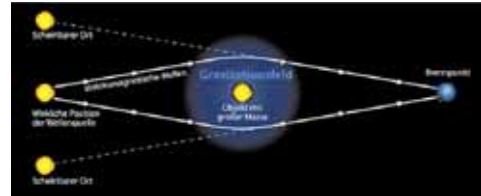
Eine Galaxie mit abgebildeter dunkler Materie müsste dann etwa so aussehen, wie im Bild angedeutet: die Galaxie selber ist eingebettet in einen riesigen Halo aus dunkler Materie.



Dunkler Halo und Galaxie scheinen also gravitativ gekoppelt zu sein.

Noch eine weitere Beobachtung führt zu der Aussage: „Da muss doch noch was sein!“. Auf Photonen, den mit dynamischer Masse behafteten Lichtteilchen, wirkt sich die Gravitation aus. Extrem große und weit entfernte Galaxienhaufen können auf die Photonen wie eine Linse wirken – Die Stärke dieser Lichtbrechung ist dabei von der Masse des brechenden Objekts (also des Galaxienhaufens) abhängig.

Bei der Berechnung der zum gemessenen Effekt erforderlichen Masse stellte man fest, dass der Galaxienhaufen erheblich mehr Masse haben müsste als man „sehen“ konnte. Es musste dort also zusätzlich eine ganz erhebliche Menge an nicht sichtbarer Masse vorhanden sein!



Die Masse eines Galaxienhaufens (sichtbare wie unsichtbare) wirkt dabei wie eine optische Sammellinse: Betrachtet man das Bild dreidimensional, so wird ein von der Erde aus gesehen hinter dem lichtbrechenden Objekt befindlicher Quasar (Galaxie mit „aktivem“ zentralen Bereich) im (symmetrischen) Idealfall zu einem (Einstein-) Ring „deformiert“.



Aus dem beobachteten Bild lässt sich dabei auf die Verteilung und die Menge der lichtbrechenden Massen schließen bzw. man kann diese errechnen. Die Existenz dieser Ringe wurde übrigens bereits von Albert Einstein vorhergesagt!

Genauere Untersuchungen solcher Einsteinringe könnten uns noch mehr verraten: Im oben erwähnten dunklen Halo einer Galaxie sollte es zur Bildung „dunkler Zwerggalaxien“ kommen, die sehr leuchtschwach sind und überwiegend aus dunkler Materie bestehen. In der Nähe unserer Milchstraße hat man optisch etwa 40 solcher Systeme nachgewiesen (eigentlich müssten es viel mehr sein! – außerdem weiß man von ihnen nur, dass sie extrem schwach leuchten, aber so ganz sicher ist man sich der dunklen Materie, die bis zu 99% ihrer Gesamtmasse ausmachen könnte, allerdings nicht). [4] [5]

Durch leichte „Störungen“ im Einsteinring um die (fast 4 Mrd LJ entfernten) Galaxie SDP.81 will man (April 2016) eine dunkle Zwerggalaxie nachgewiesen haben – diesmal allerdings nur den „dunklen“ Teil ihrer Masse. [6]

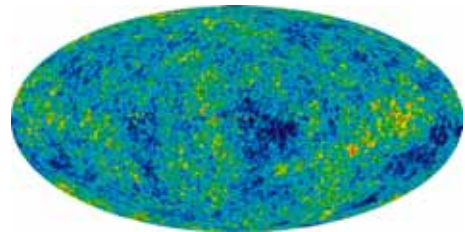
Genauer untersuchen lässt sich mit dem Phänomen der Gravitationslinsen die Verteilung der Dunklen Materie zum Beispiel im „Bullet-Cluster“ sowie den Galaxienhaufen Abell 520 und 3827.



Der Bullet-Cluster zeigt zwei Galaxienhaufen, die sich vor (aus unserer Sicht) langer Zeit gegenseitig durchdrungen haben. Dabei kollidierten wohl nur im extremen Ausnahmefall die Sterne – wohl aber die heißen Gase, die den weitaus größeren Anteil an der Masse einer Galaxie ausmachen. Letztere (rötlich) blieben nach der Begegnung der Galaxien aufgrund ihrer Wechselwirkung miteinander deutlich hinter

der Sternenmasse zurück. Die zwei über den Gravitationslinseneffekt berechneten Massenschwerpunkte (blau) lagen aber nicht beim Gas (wie man eigentlich erwarten sollte), sondern bei den im Bild sichtbaren Galaxien. Irgendetwas um diese Galaxien herum muss also ihre im Vergleich zum Gas deutlich geringere Masse mehr als wettmachen.

Ein weiterer Punkt deutet auf die schon sehr frühe Existenz der dunklen Materie hin: nämlich die Strukturen in der 3 K-Hintergrundstrahlung (CMB). Für verschiedenste Materiedichten Ω wurden Modellrechnungen durchgeführt und nur diejenigen, bei denen Ω_{DM} dem heute angenommenen Wert entspricht, ergaben sich Strukturen in dem errechneten Bild der Hintergrundstrahlung, die dem des gemessenen Bildes entsprachen. Dunkle Materie war für die Entstehung erster „Strukturen in der Ursuppe“ unbedingt erforderlich. Ähnliche Ergebnisse liefern übrigens auch die genaueren Untersuchungen der „Akkustischen Linien“ der räumlichen Spektralanalyse.



(Leistungsspektrum der Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung)

WIKIPEDIA formuliert es so: „Ohne Dunkle Materie würde die Entstehung großräumiger Strukturen, wie der Wabenstruktur aus Voids und Filamenten, ebenso wie die Entstehung eher kleinerer Strukturen, wie Galaxien, viel länger dauern als das Alter des Universums, das sich aus den Urknall-Modellen ergibt.“

<https://de.wikipedia.org/wiki/Urknall>

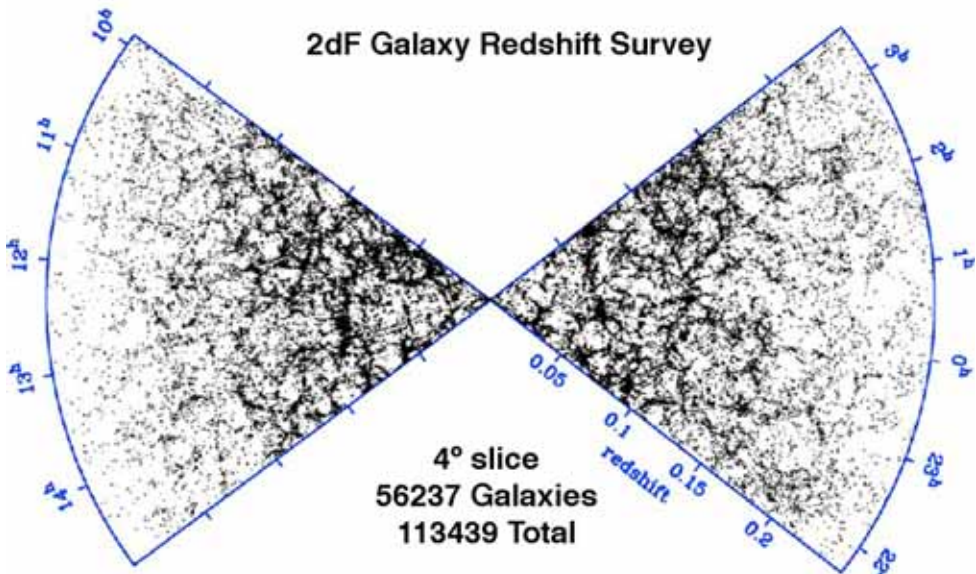
In der rechnerisch extrem aufwendigen „Millennium-Simulation“ des Max-Planck-Instituts wurde mit verschiedensten Vorgaben überprüft, für welche Massenverhältnisse sich eine großräumige (aus Galaxien gebildete) Filamentstruktur ergibt, die derjenigen möglichst ähnlich ist, die man für unser Universum als real existierend festgestellt hat (→ 2nd Redshift Survey). Es war keine wirkliche Überraschung, dass sich das oben erwähnte Verhältnis bekannter zu dunkler Materie nahezu exakt bestätigte.

Gehen wir doch in der nächsten ANDROMEDA einmal einige der (bisher in Betracht gezogenen) Möglichkeiten durch – für viele Überraschungen sollte man allerdings offen sein!

Weitere Literaturhinweise / Quellen

[1] Oort, J.H., „The Force Exerted by the Stellar System in the Direction Perpendicular to the Galactic Plane and Some Related Problems,“ Bull. Astron. Inst. Neth. 6, 249-87 (1932)

[2] Zwicky, F.: Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln, Helvetica Physica Acta, Vol. VI, S. 110 (1933)



Zusammengefasst heißt das also:

Da draußen gibt es eine enorme Menge an Materie von der man nur etwa 1/6 kennt (schwarze Löcher, kalte und heiße Gase, Staub, Sterne, braune Zwerge (das sind Sterne ohne Kernfusion), Planeten sowie frei durchs All vagabundierende planetengroße Objekte (von denen man im April 2016 das erste nur schwach IR-strahlende Exemplar (WISEA 1147) entdeckt hat)).

Man hat also jetzt ein ernstes Problem: Aus was um Himmels Willen besteht das unbekannte, dunkle Material (immerhin 5/6 aller wohl vorhandenen Materie)?

[3] V. C. Rubin, W. K. Ford, *Astrophys. J.* 159, 379 (1970)

[4] <http://www.scinexx.de/wissen-aktuell-18655-2015-03-11.html>

[5] <http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2015/02/10/eine-dunkle-begleitgalaxie-unserer-milchstrasse-wurde-entdeckt/>

[6] <http://www.astronews.com/news/artikel/2016/04/1604-022.shtml>

„In theory, theory and practice are the same thing, but in practice, they're not!“

--Unknown

Dunkle Materie - Teil II

Wolfgang Albrecht

I. Kurze Zusammenfassung der wesentlichen Punkte aus Teil I (ANDROMEDA 2/2016)

Zum Begriff: „Dunkle“ Materie wird so genannt, weil man (noch) nicht weiß, aus was sie besteht. Eigentlich müsste man sie „durchsichtige“ Materie nennen, weil sie nicht elektromagnetisch wechselwirkt – Photonen laufen einfach ungehindert hindurch.

Argumente, warum sie existieren muss, obwohl sie niemand sehen kann:

- Die Bewegung der Sternsysteme und die des dort vorhandenen heißen Gases in vielen Galaxienhaufen würde zur Zerstörung des Systems führen, wenn dort nicht wesentlich mehr Masse vorhanden wäre als man beobachten kann (Fritz Zwicky).
- Die hohe Rotationsgeschwindigkeit der Sterne und Gase/Stäube in den äußeren Bereichen der Galaxien lässt sich nur mit zusätzlicher Masse erklären (Vera Rubin).
- Die aus den Galaxien im Kosmos gebildeten großräumigen Strukturen (incl. der Galaxien selbst) hätten sich ohne den Einfluss zusätzlicher Masse nach dem Urknall nicht so „schnell“ bilden können wie sie es getan haben. Ohne den Einfluss dunkler Materie gäbe es uns vermutlich noch gar nicht.
- Berechnet man die Masse einer Galaxie, die das Licht einer Hintergrundgalaxie ablenkt, so kommt man aufgrund der Stärke der Ablenkung zu einem wesentlich größeren Ergebnis, als wenn man die Masse mit Hilfe ihrer Leuchtkraft berechnet.

2. Mögliche Formen dunkler Materie

Die möglichen Arten dunkler Materie könnte man grob in zwei Gruppen unterteilen: Entweder sind es wirklich dunkle - also kein oder nur

wenig Licht emittierende Objekte, die aus uns bekannter Materie bestehen - oder es ist Materie einer Form, die uns (bisher) unbekannt ist und die deshalb „dunkel“ ist, weil sie nicht mit Licht (also Photonen) wechselwirkt. Ganz hoffnungslos wäre unsere Suche, wenn die unbekannte Materie nur gravitativ wechselwirken würde. Man sucht also Materie(-teilchen), die sowohl per Gravitation als auch „schwach“ wechselwirken.

Jetzt nur das Wichtigste aus der Teilchenphysik (Standardtheorie):

Es gibt Materieteilchen, die entweder aus Quarks „zusammengesetzt“ sind: Baryonen (wie Proton und Neutron) sowie die (nur kurzzeitig existierenden) Mesonen - oder: - die elementaren Leptonen; das sind Teilchen wie das Elektron und das Neutrino.

Anders geartet sind die sogenannten Bosonen, mit denen man eine „Wechselwirkung“ beschreibt:

Durch den Austausch von Bosonen lässt sich die Wirkung der Naturkräfte beschreiben (siehe auch erster Teil des Artikels über die DM): Bekannt ist z. B. das Photon als WW-teilchen der elektromagnetischen Kraft.

Kommen wir zunächst zur „normalen“ Materie (Kosmologen bezeichnen sie, im Gegensatz zu den Teilchenphysikern, der Einfachheit halber durchgängig als „baryonisch“).

2.1 Schon Ort vermutete: Könnten nicht bisher unbekannte braune Zwerge, kalte Staubmassen, extrem leuchtschwache Galaxien (Low-Surface-Brightness-Galaxien) und andere bisher noch nicht bekannte „normale“ Massen die beobachteten Phänomene erklären?

Die Wissenschaftsseite „scinexx“ schreibt dazu kurz und knapp: „Ursprünglich hat man natürlich auch an dunkle baryonische Materie als unbekannte Quelle der zusätzlichen Gravitationskraft gedacht, die aus ausgebrannten Sternen wie Neutronensternen, schwarzen Löchern oder auch vielen unentdeckten Planeten oder ganz

schwach leuchtenden Sternen, so genannten braunen Zwergen, bestehen könnte.

Doch dieser Hypothese von „dunklen Baryonen“ stehen andere Beobachtungen entgegen, und sie konnte letztlich die zusätzlich benötigte Massenanziehung und insbesondere ihre Verteilung nicht erklären. So hätten ausgebrannte alte Sterne viel mehr schwerere chemische Elemente während ihres Kernbrennens erzeugen müssen, als man im Universum beobachtet, und auch die benötigte große Anzahl an braunen Zwergen hätte sich inzwischen durch ihre gravitative Wirkung nachweisen lassen müssen“.

(1)

2.2 Mittelgroße schwarze Löcher von etwa 30 Sonnenmassen - wie diejenigen, die bei ihrer Verschmelzung zum Nachweis von Gravitationswellen geführt haben – sollen, wie ein Artikel in den „Physical Review Letters“ vom Mai 2016 aufzeigt, so zahlreich sein, dass sie die „missing dark matter“ sein könnten. Schwarze Löcher dieser Größenordnung waren bis zu ihrer indirekten Entdeckung (im Rahmen des Gravitationswellennachweises) 2015/16 unbekannt. (2) In dem Kugelsternhaufen NGC 6101 fand man neuerdings Hinweise auf Hunderte (!) bisher unbekannter schwarzer Löcher. (3)

Vielleicht ist der Spruch der alten Dame aus einem Comic, den ich hier nicht abdrucken lassen kann, doch nicht so falsch: „Mein seliger Alfred hat schon immer gesagt, dass die dunkle Materie aus den schwarzen Löchern kommt.“

2.3 Neutrinos als Kandidaten für Dunkle Materie

Schwarze Löcher kann man nicht „sehen“, weil sie alles - auch die Photonen - im wahrsten Sinne des Wortes „verschlingen.“ Wenn Materie (-teilchen) nicht elektromagnetisch wechselwirken, werden die Photonen einfach „ignoriert“. Diese Objekte sind dann „dunkel“ im Sinne von „unsichtbar“.

Zu dieser Gruppe gehören zunächst die nur schwach und gravitativ wechselwirkenden Neutrinos. Erst seit kurzer Zeit ist man sicher, dass sie (eine äußerst geringe) Masse besitzen - also im

Prinzip gravitativ wechselwirken können. Trotz ihrer ungeheuren Anzahl dürfte diese Masse aber wohl nicht ausreichen, die Effekte hervorzurufen, die zur Entdeckung der DM beigetragen haben. Außerdem hätte sich im Strukturierungsprozess des frühen Universums ein „Top-Down-Szenario“ ergeben. Dichteschwankungen wären zuerst auf großen Skalen kollabiert – es hätten sich zuerst Galaxienhaufen, dann Galaxien, Sterne usw. gebildet. Das umgekehrt abgelaufene „Bottom-Up-Szenario“ gilt inzwischen aber als allgemein anerkannt.

Die auftretenden Probleme sind beim (bisher allerdings nur spekulativen) „sterilen Neutrino“ nicht ganz so gravierend, weil es eine erheblich größere Masse haben soll. Es gibt Hinweise darauf, dass bei etwa 5 MeV etwas mit den Umwandlungen im Rahmen der „normalen“ Neutrinooszillationen nicht stimmt. (3a)

Irgendwie sind im Oszillationsprozess der „normalen“ Neutrinos Lücken, die möglicherweise Platz lassen für die Umwandlung auch in solche exotischen Neutrinos. In der Regel werden diese sterilen Neutrinos jedoch im keV-Bereich gesucht.

Allerdings zeigen die zweijährigen Messungen des IceCube-Neutrino Detektors in der Antarktis keinerlei Hinweise auf die Existenz dieser Teilchen. (4)

2.4 Die WIMPs

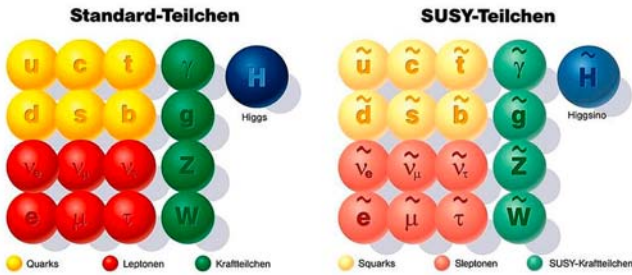
Die Neutrinos sind also Teilchen, die nur schwach und gravitativ wechselwirken.

Die „schwache Wechselwirkung“ hat nur eine extrem kleine Reichweite (10^{-19} m), und man stellt sie sich im „Standardmodell der Teilchenphysik“ so vor, dass sie durch den Austausch eines neutralen Z- oder geladenen W-Bosons verursacht wird. Typisches Beispiel für eine „schwache WW“ ist der β -Zerfall eines Neutrons $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ (Das Austauschteilchen γ taucht in der „Gleichung“ nicht auf).

Sie wären „ideale“ Bestandteile dunkler Materie, wenn, wie schon gesagt, ihre Masse nicht so klein wäre (< 3 eV). Gesucht sind also ähnliche Objekte mit größerer Masse. Man bezeichnet sie als

WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). Immerhin einen Namen haben sie schon. Aber welche Objekte könnten das sein? „Fündig“ wird man hier leider nur bei Teilchen, die (bisher?) nur hypothetisch sind:

Als Erweiterung der Standardtheorie der Elementarteilchenphysik gibt es die Theorie der „Supersymmetrie“ (SUSY). Dort wird jedem Teilchen ein (mit deutlich größerer Masse behaftetes) supersymmetrisches Teilchen zugeordnet:



Beim Wechsel auf die rechte Seite verringert sich der Teilchenspin von $\frac{1}{2}$ (Fermionen - also Quarks und Leptonen wie Elektron und Neutrino) auf 0 sowie von 1 (Bosonen - den kraftvermittelnden Teilchen) auf $\frac{1}{2}$ - das heißt: Wechselwirkungs- und „normale“ Teilchen wechseln auch ihre Bedeutung.

Dazu kommt, dass die Susy-Teilchen eine erheblich größere Masse haben sollen als ihre Standardpartner.

Das einfachste und zugleich mit bis zu mehreren hundert GeV/c^2 leichteste SUSY-Teilchen ist das „Neutralino.“ Es soll eine Masse von mehr als 300 GeV/c^2 besitzen (zum Vergleich: Das Proton hat eine Masse von knapp 1 GeV/c^2 , das Neutrino nur maximal 3 eV).

Das (bisher nur theoretisch existierende) Neutralino, setzt sich aus einer Linearkombination von vier SUSY-Teilchen mit so exotischen Namen wie Photino (Hauptbestandteil), Zino und zwei verschiedenen Higgsinos zusammen.

2.5 Auf weitere Kandidaten wie zum Beispiel die „Majorana-Fermionen“ sowie die „PIDM“ (Planckian Interacting Dark Matter) kann ich hier leider nicht eingehen. Es gibt aber noch weitere sehr interessante Ansätze - zum Beispiel sollte man hier kurz auf das „AXION“ eingehen: Eine Kooperation der Universitäten Wuppertal und Budapest haben in neuen Berechnungen (November 2016) mit Hilfe des jülicher Supercomputers „JUQUEEN“ eine Vorhersage

treffen können, in welchem Energiebereich man nach diesem exotischen Teilchen suchen sollte (50 - 1500 MeV). Die Existenz solcher Teilchen wird von einer Erweiterung der Quantenchromodynamik (der Quantentheorie der starken Wechselwirkung mit ihren „farbigen“ Quarks als Austauschteilchen) vorhergesagt.

(5)

Fassen wir zusammen: Wir haben viele, teils exotische Kandidaten für die unbekannte Substanz, die den weitaus größten Teil unseres Kosmos ausmacht. Keiner der Kandidaten ließ sich bisher nachweisen. Lediglich „DAMA“ ganz tief unten im Gran-Sasso-Massiv (Italien) behauptet, etwas ganz Systematisches (und zwar besonders jeweils im Sommer) nachgewiesen zu haben. Schauen wir also mal, wie man versucht, das Unbekannte nachzuweisen.

3. Nachweisexperimente

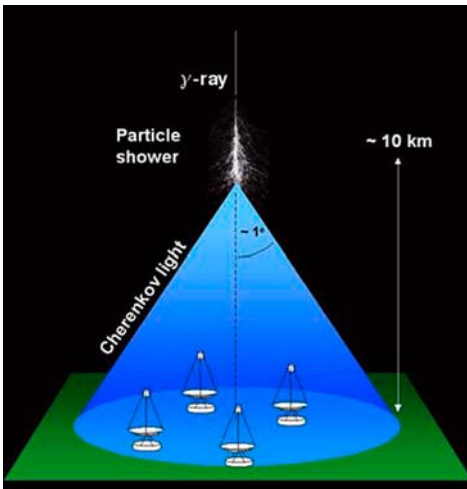
Man könnte hier auch den deutschen Begriff „Versuche“ verwenden. Das macht die Situation etwas klarer: Man versucht in sehr aufwendigen Experimenten etwas nachzuweisen, von dem man gar nicht weiß, ob es das überhaupt gibt. (Da hatte es Johann Gottfried Galle 1847 beim Aufsuchen des neuen Planeten Neptun einfacher: Er brauchte nur an der vorausberechneten Stelle durch sein Teleskop zu schauen!)

3.1 Indirekte Nachweisexperimente

Da nach der SUSY-Theorie Neutralinos ihr eigenes Antiteilchen sind, müssten sie bei Kollisions-

sionen miteinander unter Abgabe von Elektronen (e^-), Positronen (e^+) und Gammaquanten (γ) „zerstrahlen“. Wegen der hohen Masse der Neutralinos müsste es sich um eine sehr hochenergetische Gammastrahlung ($E > 100$ GeV) handeln.

Genau die Strahlung versucht man mit H.E.S.S., einem in Nabibia stehenden System aus vier abbildenden Cherenkov-Teleskopen zu finden. Dabei sollte die Strahlung aus der Nähe des Milchstraßenzentrums (wegen der dort höheren Massendichte) intensiver sein als in anderen Bereichen unserer Galaxie.



Cherenkov-Strahlung (UV) entsteht, wenn sich hochenergetische Teilchen durch ein Medium (z. B. Wasser) mit einer Geschwindigkeit bewegen, die über der des Lichts in diesem Medium liegt.

Ähnlich geht man bei der Messung der Positronenstrahlung durch das Weltrauminstrument AMS-2 (Alpha Magnetic Spectrometer) vor, das

sich an der Raumstation ISS befindet. Dort werden ankommende geladene Partikel wie e^- und e^+ durch einen Magneten auf verschiedene Detektoren geleitet, die dann Teilchenart, Energie, Ladung, Masse sowie die Richtung, aus der die Teilchen gekommen sind, ermitteln. Gemessen wurde ein deutlicher Positronenüberschuss mit einem Maximum bei 275 GeV. **(6)**

Beide Experimente verliefen positiv. Allerdings muss noch geklärt werden, ob die gefundene Strahlung wirklich aus der Annihilation von Neutralinos stammt oder ob andere (bisher noch nicht untersuchte) Prozesse als Ursache eine Rolle spielen.

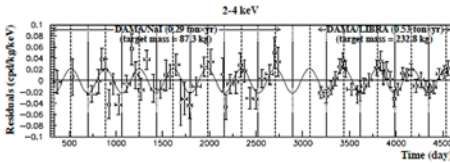
2012 glaubte man, durch Messungen die Nichtexistenz dunkler Materie in der Umgebung unserer Sonne gezeigt zu haben **(6a)**, 2014 hingegen versicherte man, die gesuchte Röntgenstrahlung in der Andromeda-Galaxie und im Perseus-Cluster bei 3,57 keV entdeckt zu haben **(7)** – genauere Messungen (2016) **(8)** deuten nun auf andere Ursachen als die Annihilation dunkler Materieteilchen hin – andere Quellen vermuten die Strahlungsursache bei Millisekundenpsaren. **(9)**

3.2 Direkte Nachweisexperimente

Im Autobahntunnel durch das Gran-Sasso-Massiv (Italien) gibt es eine Abfahrt zu einem Labor der besonderen Art. Durch dicke Gesteinsschichten vor Umgebungsstrahlung geschützt, befinden sich in großen Hallen zwei Experimente zur Untersuchung dunkler Materie: DAMA/LIBRA und XENON.

Die **DAMA**-Kollaboration (**D**ark **M**atter **E**xperiment) untersuchte Szintillationen in einem thalliumdotierten NaJ-Kristall, die durch schnelle Elektronen hervorgerufen wurden. Dabei ging man davon aus, dass Teilchen der dunklen Materie entweder mit dem Atomkern oder den Elektronen der Atomhülle des Detektormaterials (in seltenen Fällen) wechselwirken („Rückstoßereignisse“), was in beiden Fällen die schnellen Elektronen verursacht. Andere Strahlung wurde

so weit wie eben möglich eliminiert. Gemessen wurde über mehrere Jahre, um den zeitlichen Einfluss der Bewegung des Sonne-Erde-Systems durch den DM-Halo zu untersuchen (konstante Bewegung der Sonne bei jahreszeitlichem Wechsel der Geschwindigkeit der Erde im Vergleich zum Halo). Das Ergebnis gab (wenn auch nur mit sehr niedrigen Werten) genau diesen jahreszeitlichen Verlauf wieder. **(10)**



Diese Messungen konnten durch andere Nachweisexperimente allerdings bisher (?) nicht bestätigt werden. Kritiker fragen außerdem, ob die DAMA-Gruppe wirklich alle „normalen“ Effekte mit jahreszeitlicher Schwankung ausgeschlossen habe. Die Amplitude der Modulation beträgt zudem nur größenordnungsmäßig 1% der Gesamtmessrate.

Im Untergrundlabor des Gran-Sasso-Massivs „gleich nebenan“ läuft ein weiteres Nachweisexperiment: das **XENON100** und ab 2016 das größere **XENONIT** (dabei steht IT für die Xenon-Detektormasse | Tonne). Das Xenon (mit einer Temperatur von -100°C dient dabei als extrem lichtdurchlässiges Szintillationsmaterial, in dem die Stöße zwischen Xenon-Atomen und der dunklen Materie (Neutralinos) ablaufen sollen. Es entstehen dabei „Lichtblitze“, die mit 248 äußerst empfindlichen Lichtsensoren nachgewiesen werden können.

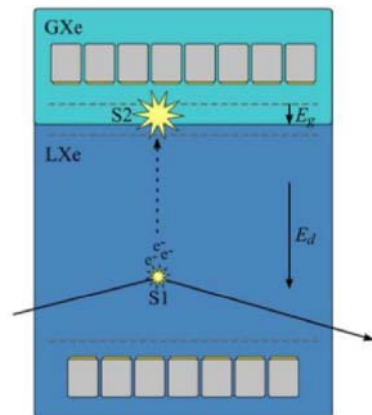
Für die „Reinheit“ des Xenons ist übrigens die Arbeitsgruppe um Prof. Christian Weinheimer (Universität Münster) zuständig.



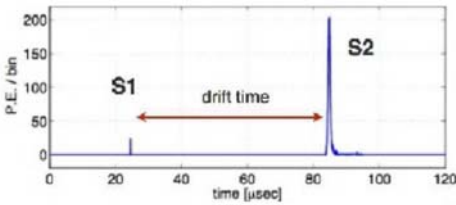
Ein Neutralino tritt in schwache WW mit einem Xenonkern. Beim Rückstoß werden Elektronen der Hülle frei, die durch ein im Detektor angebrachtes Feld stark (weg-) beschleunigt werden.

Genauer betrachtet laufen im Xenon bei einem solchen Stoßereignis folgende Vorgänge ab:

1. **Anregung** durch den Stoß und anschließender Übergang in den „normalen“ Zustand \Rightarrow Lichtemission (Signal S1): $\text{Xe} + \text{Stoßenergie} \rightarrow \text{Xe}^* \rightarrow \text{Xe} + h \cdot f$ (Photon der Wellenlänge 178 nm) - Bitte beachten Sie den Hinweis am Schluss des Artikels.
2. **Ionisation** des Xe-Atoms; das bei der Rekombination entstehende Licht soll aber an einem anderem Ort gemessen werden. Deshalb werden die durch die Ionisation freigewordenen Elektronen durch ein elektrisches Feld E_d (noch bevor sie rekombinieren können) weggezogen, um an anderer Stelle das Signal S2 hervorzurufen. Damit das Szintillationssignal stark genug ausfällt, wird auf dem Weg zum zweiten Messpunkt durch die starke Beschleunigung eine ganze Elektronenlawine erzeugt.



Das Experiment XENON100 zeigte allerdings während einer Laufzeit von 225 Tagen nur zwei Ereignisse (!), die man mit viel gutem Willen als Neutralino-Stoß interpretieren könnte;



auf gut deutsch: Dunkle Materie wurde **nicht** nachgewiesen!

Im Probelauf befindet sich das um den Faktor 100 empfindlichere XENONIT-Experiment. Warten wir also noch ein Weilchen!

Hinweis: Die Experimente zum Nachweis der (hypothetischen) Neutralinos sind nicht zu verwechseln mit der von Prof. Weinheimer in einem anderen Experiment (KATRIN) durchgeführten Untersuchung zur Neutrinomasse

(→ Tritium → β -Zerfall)!

Weitere Nachweisexperimente (z. B. CDMS – Cryogenic-Dark-Matter-Search in den USA) verliefen bisher ähnlich ergebnislos.

3.3 Erzeugung dunkler Materieteilchen durch Kollisionen

Auch beim LHC in Genf sucht man übrigens bereits nach diesem Teilchen, indem man Protonen mit extrem hohen Geschwindigkeiten aufeinanderprallen lässt, um dadurch „künstlich“ dunkle Materie zu erzeugen. **(11)**

Bisher blieben auch die Stoßversuche allerdings ohne den erhofften Erfolg.

4. Alternativen

Auf eine mögliche Alternative zur DM will ich hier nur andeutungsweise eingehen – die von Pavel Kroupka (Uni Bonn) vertretene „**MOND**“-Theorie (**M**odifizierte **N**ewtonsche **D**ynamik). Er geht dabei davon aus, dass die Newtonschen Gesetze (wie $F = m \cdot g$) in dieser Form nicht überall im Universum gültig sein müssen. Die Annahme, eine Galaxie verhalte sich nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie unser Sonnensystem, ist eben nur eine (wenn auch sinnvolle) Hypothese. Die in der „Mond-Theorie“ veränderten Gleichungen, mit denen sich einige der beobachteten Erscheinungen durchaus erklären lassen, lassen sich bei Wikipedia nachlesen. **(12)**

Natürlich meldet sich zum Thema DM auch Herr Unzicker wieder zu Wort – Ende 2014 schreibt er: „Die Interpretation von Beobachtungen als Dunkle Materie hat sich zu einem Verkaufsinstrument entwickelt. Die Ursache für dieses Entfachen von Strohfeuern liegt in der Forschungsorganisation. Wissenschaftler stehen unter permanentem Veröffentlichungsdruck, und eine prägnante Schlagzeile bringt manchmal mehr für die Mitteleinwerbung als eine nachhaltige Analyse“. **(13)**

Es gibt noch viele exotische Erklärungen für die beobachteten Phänomene. Schauen Sie doch z. B. mal in die Schriften des Herrn Joachim Stiller aus Münster **(14)**. Es ist erstaunlich, was das Internet so alles bietet.

Zurück zur klassischen Kosmologie: Mit der „Dunklen Materie“ ist es ja noch nicht erledigt! Schließlich besteht das Universum aus 5% „normaler“ (also baryonischer) Materie, 23% dunkler Materie und (wovon bisher überhaupt noch nicht die Rede war) 72% „dunkler Energie“! Es ist zum Verzweifeln – wir kennen (?) erst 5% dessen, was das Universum ausmacht. Und was ist mit dem Teil des Kosmos, der sich aufgrund der Expansion des Universums mit Überlichtgeschwindigkeit von uns entfernt (das ist übrigens kein Widerspruch zur RT, da sich nicht die Objekte bewegen, sondern der Raum dehnt sich so schnell aus)?

Auf jeden Fall, so finde ich, bleibt es spannend – unser „Neptun“ ist halt noch nicht gefunden!

(15)

Hinweis zur Lichtemission des Xenons (Seite 24): Das Xenon bleibt für die 178nm-Photonen durchsichtig, da das Szintillationslicht genau genommen durch die „Abregung“ eines „Dimers“ Xe_2^* erzeugt wird (Diese Moleküle existieren im Normalzustand - also als Xe_2 - überhaupt nicht). Ein solches angeregtes Molekül entsteht beim Nachweisprozess erst durch den Stoß des Xe^* mit einem anderen Xenonatom:



Ergänzung zur „MOND“-Theorie (Seite 25): Ganz neu ist eine Meldung aus Amsterdam, in der Prof. Verlinde sowohl die MOND-Theorie als auch die These vom „holographischen Prinzip“ (Susskind) aufgreift und die DM-Teilchen einfach überflüssig macht.

(16)

Quellen:

- (1) <http://www.scinexx.de/dossier-detail-420-6.html>
- (2) <http://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.116.201301>
- (3) <https://astronomynow.com/2016/09/08/new-research-reveals-hundreds-of-undiscovered-black-holes/>
- (3a) <http://arstechnica.com/science/2016/02/neutrinos-continue-run-of-odd-behavior-at-daya-bay/>
- (4) <http://www.scinexx.de/wissen-aktuell-20485-2016-08-09.html>
- (5) <http://news.vanderbilt.edu/2013/06/dark-matter/http://www.spektrum.de/news/dunkle-materie-teilchen-kompakt-wie-kleinste-schwarze-loecher/1405396>
http://www.desy.de/aktuelles/news_suche/index_ger.html?openDirectAnchor=1126&printversion=1
- (6) <http://www.rwth-aachen.de/cms/root/Die-RWTH/Aktuell/Pressemitteilungen/September/~gozc/Neue-Ergebnisse-des-AMS-Experiments-auf/>
- (6a) astronews.com/news/artikel/2912/04/1204-022.shtml
- (7) Physical Review Letters, 204; arXiv:1402.4119
- (8) <http://www.mpa-garching.mpg.de/332525/hl201604>
- (9) <https://astronomynow.com/2016/02/03/neutron-stars-not-dark-matter-may-explain-milkyways-gamma-ray-excess/>
- (10) <http://arxiv.org/pdf/0804.2741v1.pdf>
- (11) <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0404162v4.pdf>
- (12) https://de.wikipedia.org/wiki/Modifizierte_Newtonsche_Dynamik
- (13) <http://www.heise.de/tp/artikel/43/43433/1.html>
- (14) http://joachimstiller.de/download/sonstiges_wasserstoffhypothese2.pdf
- (15) <http://www.spektrum.de/thema/dunkle-materie-und-dunkle-energie/914798>
- (16) <https://astronomynow.com/2016/11/08/new-theory-of-gravity-might-explain-dark-matter/>

Stephans Quintett

Stephan Plaßmann

Wussten Sie schon...

Astronomie ist nicht wie Sie glauben die Lehre der Sterndeuter, sondern bezeichnet den Wirtschaftsbereich für das leibliche Wohl.

Aquarius ist nicht wie Sie glauben ein Behälter für Fische sondern ein Schnaps.

Halo ist nicht wie Sie glauben ein Begrüßungswort, sondern eine Stadt an der Saale.

Plössl ist nicht wie Sie glauben ein Pferd auf bayerisch, sondern ist ein Teil des Elefanten.

UHC ist nicht wie Sie glauben ein Sendebereich beim Radio sondern eine münstersche Klinik.

Bildnachweise

S. 4 Tommys 12 Zöller	JS
S. 5 Üben mit der drehbaren Sternkarte	JS
S. 6 I.o. Joshua am Computer	JS
I.u. Ronja und Tommy	JS
r.o. Jonas zündet die Feststoffrakete	JS
S. 8 Häuser als Horizont in Stellarium eingepflegt	PM
S. 9 Bäume als Horizont in Stellarium eingepflegt	PM
S. 11 Erstkontakt	KV
S. 14 Wo sind wir in der Milchstraße	WP
S. 15 I. Galaktische habitabe Zone	WP
r. HRD	WP
S. 17 o. S-Typ; u. P-Typ	FF
S. 18. I.o. Andi und Markus Ludes	MD
S. 18. I.u. Liane und Detlef Zemin, Rolf Klemme	MD
r. Bresser-Achros	MD
S. 19 Familienfoto	JH
S. 22 Standardteilchen SUSY-Teilchen	Desy
S. 23 HESS Namibia	MPI
Cherenkov-Strahlung	MPI
S. 24 http://arxiv.org/pdf/0804.2741v1.pdf	HR
WIMP	WH
S. 24 GXe	WH
S. 25 Doppelpeak	WH

MD - Michael Dütting; DH - Desy Hamburg; FF - Florian Freistetter; JH - Jörg Henkel; KV - Kosmos Verlag; PM - Peter Maasewerd; MPI - Max Planck-Insitut; JS - Jürgen Stockel, WH - Weinheimer; WP - Wikipedia;