Zeitschrift: Bulletin / Vereinigung Schweizerischer Hochschuldozenten = Association Suisse des Professeurs d'Université

Herausgeber: Vereinigung Schweizerischer Hochschuldozenten

Band: 32 (2006)

Heft: 4

Artikel: Vom Kleinsten und Grössten

Autor: Straumann, Norbert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-894070

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: 16.07.2025

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

Die Differenz zwischen Naturwissenschaft und Glauben ist jetzt nicht mehr notwendig ein Gegeneinander, sondern kann zu einem Miteinander werden. Ein Miteinander des Glaubens, der, betroffen durch die eigene Endlichkeit, durch das Hineingehalten-Sein in das Nichts, durch geschenkte Hoffnung und Erfahrung neuer Zukunft Antworten sucht auf die Frage nach dem Menschen und darin nach Gott als dem Grund des Seins, und der disziplinierten Empirie, die sich um empirische, mathematische und logische Nachprüfbarkeit von Erkenntnis müht, aber eine Antwort auf die Frage nach uns selbst kaum zu beantworten vermag.

Jedem mag deutlich geworden sein, dass wir beim Nachdenken über Gott und die Physik nicht über den Streit zwischen Naturwissenschaft und Schöpfungsglaube zu handeln haben, der bis in unsere Zeit hinein Bibliotheken füllt.

Was soll auch ein Streit zwischen einem Bekenntnis des Volkes Israel, das sich im Überlebenskampf gegen Natur und feindliche Völkerwelt und mitten im Meer der Vergänglichkeit und des Todes als Volk Gottes, und jeder Einzelne als Sein Geschöpf glaubt, und diesem Glauben mit den Sprachmitteln des altorientalischen Mythos in Sprache bringt auf der einen Seite, und einer wissenschaftlichen Erforschung des Werdens und Gewordenseins der Natur auf der anderen? Oder zwischen dem Glauben an die in Jesus Christus offenbarte Liebe, von der auch der Tod nicht trennen kann, und einer Behauptung der Unbeweisbarkeit Gottes?

Anmerkung

1) Diese Gedanken verdanken sich vielen Autoren aus verschiedenen Disziplinen und verstehen sich als Denkanstoss für ein eigenes Nach-Denken über sich selbst und "unsere" Welt, die wir forschend und nach-denkend zu verstehen trachten und über deren Grund und Ziel wir immer wieder neu Klarheit suchen.

   Anstoss für den Aufsatz war für mich ein Blick an den Sternenhimmel über mir und ein Nach-Denken über Menschen neben mir, welche diese Welt erforschen und nach ihrem Sinn und Grund fragen.

Vom Kleinsten und Grössten

Norbert Straumann

Astro-Teilchenphysik

In den letzten Jahrzehnten hat eine zunehmend intensivere Durchdringung von Elementarteilchenphysik und Astrophysik - zweier traditionell recht verschiedener Disziplinen der Physik - stattgefunden. Äusserlich zeigte sich dies schon früh in gemeinsamen Konferenzen von Hochenergiephysikern, Astrophysikern und Kosmologen. So fand bereits im Herbst 1983 am CERN in Genf das erste ESO-CERN Symposium statt, das dem Thema *"Large-Scale Structure of the Universe, Cosmology and Fundamental Physics"* gewidmet war. Heute ist die *Astro-Teilchen Physik* ein gängiger Begriff, es gibt darauf spezialisierte Journale, und manche Universitäten suchen in Ihren Ausschreibungen Astro-Teilchen Physiker. In dieser Gemeinschaft findet man zu ähnlichen Teilen Fachleute, die entweder von der Elementarteilchenphysik kommen oder ihre Grundausbildung in Astrophysik und Kosmologie erhielten. Arbeitsgruppen, besonders auf dem experimentellen Sektor, sind in der Regel sehr durchmischt, da die unterschiedlichsten Kenntnisse gefragt sind. Natürlich ist diese gegenseitige Befruchtung durch gemeinsame Inhalte angestossen worden. Das frühe Universum war ein Ort von Hoch- und Höchstenergieprozessen, die im Laboratorium nur an den leistungsfähigsten Beschleunigern studiert werden können. Von den frühen Phasen der kosmischen Evolution erwarten wir heute beobachtbare Relikte, die sowohl für die Grundlagenphysik als auch für ein Verständnis des Kosmos von grösstem Interesse sind. Wichtige Beispiele werde ich später kurz diskutieren.

Natürlich ist diese interessante und erfreuliche Entwicklung nicht ganz neu. Newtons universelle Gravitationstheorie ist ohne die vorausgegangenen Beobachtungen durch Astronomen wie Tycho Brahe undenkbar. Im 19. Jahrhundert eröffnete die Entwicklung der Spektroskopie erstmals die Möglichkeit, die Physik der Sterne zu ergründen. Damit hatte kaum jemand gerechnet. Der Philosoph Auguste Comte verkündete in den 1830er Jahren, nicht Erforschbares sei es nicht wert, erforscht zu werden, und führte als Beispiel dafür die Zusammensetzung der Himmelskörper an. Er schrieb: *"Wir können uns nun vorstellen, dass wir irgendwann die Formen, Entfernungen und die Bewegungen [der Sterne] bestimmen können, doch wir werden niemals und mit keinen Mitteln ihre chemische Zusammensetzung oder ihre mineralogische Struktur aufklären können."* Später hat er ähnliche Aussagen mit noch grösserem Nachdruck wiederholt.

Inzwischen sind Atomphysik, Kernphysik und Elementarteilchenphysik hinzugekommen. Im Verein mit einer gewaltigen Entwicklung der Instrumentierung, bodengestützten Grossteleskopen, Satelliten für die verschiedensten Wellenlängen, haben Astronomie und Astrophysik in jüngerer Zeit eine Entwicklung durchgemacht, die in der Geschichte einzigartig ist. Mit Recht sprechen viele von einem Goldenen Zeitalter.

Neutrinophysik und die Sonne

In den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts waren die physikalischen Grundlagen, insbesondere der Kernphysik, soweit entwickelt, dass es möglich wurde, die Entwicklung der Sterne während der Wasserstoff-Fusion zu Helium - der längsten Phase im "Leben" eines Sterns - recht genau zu berechnen. Insbesondere für die Sonne wusste man gut Bescheid über den inneren Aufbau, die Dichte- und Temperaturverteilungen. In dieser Situation entschloss sich der Teilchenphysiker Ray Davis, die bei der Kernfusion im innersten Bereich der Sonne erzeugten Neutrinos hier auf der Erde in einem riesigen Detektor tief unten in einem alten Bergwerk mit radiochemischen Methoden nachzuweisen. Wie mir Ray Davis anlässlich einer Besteigung des Titlis erzählte, nahmen manche seiner Kollegen dieses Projekt mit Zurückhaltung auf. Sie meinten, der grosse Aufwand lohne sich kaum, er werde sowieso nur den berechneten Fluss bestätigen. Seine ironische Reaktion: Dann werde ich ins Reinigungsgeschäft gehen; der Inhalt seines grossen Tanks bestand nämlich aus 400'000 Litern Perchloräthylen, einem bekannten Reinigungsmittel.

Das Experiment von Davis war ausserordentlich anspruchsvoll. Obschon von der Sonne pro Sekunde und Quadratzentimeter rund 60 Milliarden Neutrinos ankommen, wurden im Tank pro Monat nur wenige absorbiert. Davis schaffte es, über viele Jahre die allermeisten Absorptionen, die eine Umwandlung eines Chloratoms in ein Argonatom bewirken, nachzuweisen. Ab ungefähr 1970 wurden die ersten Resultate bekannt. Zur grossen Überraschung erhielt Davis einen Wert der etwa drei mal kleiner war als vorausgesagt. So ergab sich das vieldiskutierte *Sonnenneutrino-Problem.* Es dauerte lange, bis andere Experimente durchgeführt wurden, die alle den Befund von Ray Davis bestätigten. Wo lag die Ursache für die bestehende Diskrepanz? Vor allem Teilchenphysiker vermuteten, dass die Sonnenmodelle eben doch nicht so zuverlässig waren und nicht die Neutrinophysik verantwortlich zu machen sei. In der Folge wurden die Modellrechnungen dauernd verbessert, aber die Diskrepanz blieb. Mit neuen komplementären Experimenten kam es schliesslich zum Umschwung: Die Neutrinophysik ist doch nicht so einfach.

Nach ihrer Entstehung in der Sonne oszillieren die vom Beta-Zerfall bekannten Neutrinos in andere Sorten (sog. Müon- und Tau-Neutrinos), auf die z.B. der Detektor von Davis nicht ansprach. Diese interessante Möglichkeit wurde schon früh diskutiert, auch bei unserer Wanderung auf den Titlis. Besonders wichtig ist, dass Neutrinooszillationen nur möglich sind, wenn die Neutrinos eine Masse haben, was im heutigen Standardmodell der Teilchenphysik nicht der Fall ist.

Die letzten Zweifel dieser Interpretation wurden ausgeräumt, als es kürzlich in Japan gelang, die Umwandlung der Neutrinos einer ganzen Kette von Atomreaktoren auf ihrem Weg zu einem weit entfernten Untergrundlaboratorium zu bestätigen. Aber die für Grundlagenphysik ausserordentlich wichtige Entwicklung wurde unerwartet durch die Astrophysik der Sonne eingeleitet. Die Neutrinophysik ist jetzt eines der Hauptgebiete der Hochenergiephysik. Gleichzeitig ist sie von zentraler Bedeutung in der Astrophysik der Sterne, bei Supernovaexplosionen, den höchstenergetischen Prozessen in den Kernen von aktiven Galaxien mit supermassiven Schwarzen Löchern, bis hin zur Kosmologie. Zur Zeit sind Neutrinoteleskope im Aufbau, welche das Wasser der Tiefsee und die Eismassen am Südpol als Detektormaterial verwenden. Mit seiner Pionierleistung hat Ray Davis den Nobelpreis für Physik im Jahre 2002 wohl verdient.

Dunkle Materie

Seit ungefähr 1980 haben astronomische Beobachtungen mannigfaltiger Art mit zunehmender Deutlichkeit gezeigt, dass ein weitaus überwiegender Teil der Materie aus noch nicht bekannten Formen besteht. Obschon diese rätselhafte Materie völlig dunkel ist, wissen wir, dass sie vorhanden sein muss. Dies deshalb, weil ihre Gravitationsfelder deutliche Wirkungen auf die Bewegung von Sternen und Galaxien ausüben.

Der erste, der das Problem der *Dunklen Materie* schon sehr frühzeitig erkannt hat, war der Schweizer Astrophysiker Fritz Zwicky. In einer Pionierarbeit, die er bereits 1933 in der Zeitschrift *Helvetia Physica Acta* publizierte, schätzte er aus den Bewegungen der Galaxien im reichen COMA-Haufen dessen Gesamtmasse ab. Unter Benutzung eines allgemeinen Satzes der Mechanik (Virialsatz) kam er zum erstaunlichen Schluss, dass sich die Galaxien im Mittel zu schnell bewegen, um den COMA-Haufen mit der Masse der sichtbaren Materie allein zusammenzuhalten. Zwickys Analyse zum damaligen Zeitpunkt basierte auf einer mageren Statistik, einem unsicheren Haufen-Radius und auf einer Distanzskala, welche deutlich zu klein war. Sie war deshalb natürlich sehr grob. Erstaunlicherweise haben sich aber seine Zahlen als gute Schätzungen erwiesen.

Ab etwa 1980 gelang es Vera Rubin und Mitarbeitern, die Rotationsgeschwindigkeiten von Spiralgalaxien bis zu schwach leuchtenden Randgebieten auszudehnen. Zur grossen Überraschung stellte sich heraus, dass die Rotationsgeschwindigkeiten bis an den äussersten noch sichtbaren Rand für fast alle Galaxien konstant bleiben. Messungen von Dopplerverschiebungen der 21-cm-Linie von Wasserstoff-Gaswolken haben gezeigt, dass sich dieses unerwartete Verhalten noch zu grösseren Abständen fortsetzt. Daraus folgt, dass jenseits der Grenze der leuchtenden Scheibe noch viel Materie vorhanden ist, sonst müssten die Rotationsgeschwindigkeiten - wie im Planetensystem - gemäss den Kepler'schen Gesetzen mit der reziproken Wurzel des Abstandes abnehmen. Ohne unsichtbare Materie würden die Sterne an der Peripherie wegfliegen.

Bei reichen Galaxienhaufen, wie dem von Zwicky verwendeten COMA-Haufen, gibt es verschiedene Methoden, den Anteil der Dunklen Materie zu bestimmen. In neuerer Zeit nützt man auch aus, dass ein Galaxienhaufen als Gravitationslinse für Hintergrundgalaxien wirkt. Dies beruht auf der von Einstein vorausgesagten und später bestätigten Lichtablenkung durch Gravitationsfelder aller Art. Deshalb werden Lichtstrahlen von Galaxien, die durch einen Haufen zu uns gelangen, verzerrt. Aus dem beobachteten Muster der Verzerrungen können wir auf die gesamte Massenverteilung des Haufens schliessen. Diese Methode ist besonders wichtig, weil - im Unterschied zu anderen Methoden - keine Annahmen über den dynamischen Zustand oder die Beziehung zwischen Massen- und Galaxienverteilung eingehen. Das Fazit solcher und anderen Untersuchungen ist, dass ein Löwenanteil der Materie im Universum gänzlich unbekannter Natur ist. (Das Verhältnis zu uns bekannten Formen ist etwa 5:1).

Es gibt viele Spekulationen darüber, woraus die Dunkle Materie bestehen könnte. Favoriten sind gewisse theoretisch gut motivierte, aber hypothetische schwere Elementarteilchen, die mit der uns bekannten Materie nur sehr schwach wechselwirken (ähnlich wie die Neutrinos). Vielleicht werden wir diese mit dem im Bau befindlichen CERN-Beschleuniger LHC (Large Hadron Collider) erzeugen können. Daneben weden auch andere Experimente vorangetrieben, mit dem Ziel, die Dunkle Materie bei ihrem Durchgang durch die Erde mit hochempfindlichen Detektoren nachzuweisen. Ganz selten werden die unbekannten Teilchen mit einem Atomkern eines Detektors zusammenstossen und diesem einen Rückstoss erteilen. Der angestossene Atomkern trifft danach auf Atome der Umgebung, wodurch Energie in Form von Licht und Wärme freigesetzt wird.

Die technologischen Anforderungen an die Detektoren sind aber enorm. Nach Jahren der Forschung und Entwicklung wird es vielleicht in wenigen Jahren gelingen, die Dunkle Materie endlich direkt nachzuweisen und ihre Natur zu studieren. Dies wäre auch für ein Verständnis der Entstehung von Sternen und Galaxien von grösster Wichtigkeit.

Dunkle Energie

Ich komme nun zu einer noch merkwürdigeren Entdeckung. Astronomische Beobachtungen der letzten Jahre zeigen überzeugend, dass das Universum in einer *beschleunigten Expansion* begriffen ist. Das klingt sehr erstaunlich, sind wir doch daran gewöhnt, dass die Gravitation immer anziehend ist und deshalb auch die grossräumige Fluchtbewegung der Galaxien abbremsen sollte. Tatsächlich lässt sich eine Abstossung weder bei den Planetenbahnen in unserem Sonnensystem noch in den Bewegungen von Galaxiengruppen feststellen. Wie kann es zu der beobachteten kosmischen Abstossung auf grossen Skalen kommen?

Am 8. Februar 1917, eine Woche nach der Erklärung des uneingeschränkten B-Boot-Krieges durch die deutsche Heeresführung, hielt Einsteinvor vor der Preussischen Akademie der Wissenschaften einen Vortrag über die Anwendung seiner Allgemeinen Relativitätstheorie auf das gesamte Universum. Dabei stiess er auf eine grundsätzliche Schwierigkeit, die bereits frühere Generationen im Rahmen der Newton'schen Theorie erkannt hatten: Seine Feldgleichungen liessen kein statisches Universum zu; entweder musste dieses in sich zusammenfallen oder expandieren. Das war bereits Newton klar, der nach einer Intervention von Bishop Bentley in einem Brief (vom 25. Februar 1693) deutlich zum Ausdruck brachte, dass die universell anziehende Gravitation kein statisches Universum zulässt. Der Zusammensturz der Fixsterne schien ihm unvermeidlich.

Schon lange vor Einsteins erster kosmologischer Arbeit wurden deshalb Abänderungen des Newton'schen Gravitationsgesetzes diskutiert. In Analogie dazu ergänzte Einstein seine ursprünglichen Feldgleichungen so, dass sie auch eine zusätzliche Abstossung implizierten. Dabei muss betont werden, dass diese Modifikation keineswegs willkürlich ist, denn sie steht im Einklang mit den Prinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Ergänzung in den Feldgleichungen, von Einstein als *kosmologisches Glied* bezeichnet, ist zudem die einzig mögliche Komplikation.

Über dieses Glied führte Einstein eine neue Naturkonstante, die "kosmologische Konstante" ein. Damit war nun ein statisches Universum möglich. Völlig neu am Einstein-Kosmos war, dass dieser zwar unbegrenzt ist, aber doch ein endliches Volumen hat.

Seine Geometrie ist dieselbe wie die Oberfläche einer Kugel im vier-dimensionalen Euklidischen Raum. (Man darf sich zur Veranschaulichung die Oberfläche einer Kugel im gewohnten drei-dimensionalen Raum vorstellen). Diese neuartige Eigenschaft seines kosmologischen Modells befriedigte Einstein auch aus ganz anderen Gründen, welche mit Ideen des Naturforschers und Philosophen Ernst Mach zu tun haben.

Ich will hier nicht schildern, wie im Verlaufe der zwanziger Jahre des letzten Jahrhunderts sich schliesslich nichtstatische Modelle von Alexander Friedmann und Abbé Georg Lemaitre durchsetzten. Neben theoretischen Gründen (Einsteins statisches Modell ist instabil) gaben vor allem die epochemachenden Beobachtungen von Edwin P. Hubble den Ausschlag. Diese zeigten, dass sich alle Sternsysteme von uns wegbewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie von uns entfernt sind.

Nach einem Besuch des Observatoriums auf dem Mount Wilson im Jahre 1931 liess sich Einstein davon überzeugen, dass das wirkliche Weltall sich anders verhält als sein zeitlich unveränderlicher Kosmos. Damit entfiel auch sein ursprüngliches Motiv für das kosmologische Glied, weshalb er es bald in einer zweiten kosmologischen Arbeit zurückzog.

Seit ein paar Jahren ist das kosmologische Glied ernsthaft zurückgekehrt. Den Anstoss dazu gaben Beobachtungen einer bestimmten Art von explodierenden Sternen, so genannte Supernovae vom Typ Ia. Diese sind sehr genaue "Standardkerzen", und deshalb hervorragende Meilensteine im Raum. Zudem sehen wir sie bis zu sehr grossen Entfernungen, aber im Bewegungszustand, als sie das Licht aussandten, das uns heute erreicht. Da sich diese explodierenden Sterne je schneller von uns entfernen, je weiter ihr Abstand von uns ist, sehen wir sie nicht so, wie sie sich heute bewegen. Dies erlaubt uns, die Expansionsrate des Universums zu verschiedenen Epochen der Entwicklung bestimmen. Die astronomischen Daten sind in letzter Zeit so genau geworden, dass das folgende Ergebnis feststeht: Anfangs bremste die wechselseitige Anziehung der Schwerkraft der Galaxien die Expansion, doch dann begann sich die Expansion zu beschleunigen. Auch heute hält die Beschleunigung an und dies dürfte für sehr lange Zeit so bleiben. Das Weltall verhält sich also so, wie es Einsteins Gleichungen mit dem kosmologischen Glied verlangen.

Es muss an dieser Stelle betont werden, dass eine Reihe ganz anderer Beobachtungen diesen Befund stützen. Ursprünglich berechtigte Zweifel sind gerade in jüngster Zeit weitgehend ausgeräumt worden.

Aber was bedeutet physikalisch die kosmologische Konstante, oder gibt es vielleicht eine ganz andere Deutung der Beobachtungen?

Dazu wäre manches zu sagen, aber letztlich stehen wir vor einem grossen Rätsel. Hier nur folgendes: Nach moderner Auffassung beruht die kosmologische Konstante auf einer Energiedichte des leeren Raumes. Quantentheoretisch ist das Vakuum ein komplexer Zustand, durchzogen von fluktuierenden Quantenfeldern und Kondensaten mannigfaltiger Art. Leider ist die heutige Physik nicht imstande, die Vakuumenergie wirklich zu berechnen. Schlimmer noch: scheinbar vernünftige Schätzungen liegen alle so weit daneben, wie dies in der Physik noch nie der Fall war. Manche von uns sind überzeugt, dass sich dahinter eines der tiefsten Probleme der heutigen Physik verbirgt.

Eine Vakuumenergiedichte ist nach wie vor die einfachste Möglichkeit für die homogen verteilte Energie mit extrem negativem Druck - generell *Dunkle Energie* genannt - die das Universum beschleunigt auseinander treibt. (Ich finde diesen Terminus unglücklich, da inzwischen allgemein bekannt ist, dass Masse und Energie äquivalent sind. Dunkle Materie und Dunkle Energie sind aber völlig verschiedene Dinge. Während die Dunkle Materie sich zusammenballen kann, ja für die grosskalige Strukturbildung hauptsächlich verantwortlich ist, ist die Dunkle Energie strukturlos und gleichmässig über das ganze Universum verteilt.) Es gibt aber auch Vorschläge, nach denen die Dunkle Energie unbekannten Feldern zuzuordnen ist und sich zeitlich verändern würde. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, durch Beobachtungen zwischen verschiedenen Vorschlägen zu entscheiden. Das wird aber nicht einfach sein. Sicher ist bis heute nur, dass die Dunkle Energie etwa 70% der gesamten Energie des Universums ausmacht.

Das Fazit der beiden letzten Abschnitte ist, dass wir heute nur etwa 1/20 der gravitativ nachweisbaren Energie in Materie von uns heute bekannter Natur lokalisieren können. Die Physik ist wahrlich nicht ans Ende gekommen. Wie auch immer die Lösung der angesprochenen Probleme ausfallen mag, sie wird sowohl für die Grundlagenphysik als auch für die Astrophysik und Kosmologie enorme Auswirkungen haben. Antworten auf diese und verwandte Fragen können wir uns nur von einem einheitlichen Verständnis der fundamentalen Wechselwirkungen erhoffen. Interessante Bemühungen in dieser Richtung, bekannt unter dem Namen "Stringtheorien", gibt es schon seit längerer Zeit. Leider ist aber bis jetzt z.B. nicht ersichtlich, weshalb bei den uns zugänglichen Energien gerade das Standardmodell mit seiner Familienstruktur gültig sein soll und nicht eine von sehr vielen anderen denkbaren Varianten. Stösst hier der menschliche Geist vielleicht doch an seine Grenzen?