
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

<http://www.mpe.mpg.de/~amueller>

April 2007

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 21.1 | Der Teilchenzoo. | 2 |
| 21.2 | Tensor: Gestalt und Symmetrie eines Tensors zweiter Stufe. | 12 |
| 21.3 | Ausschnitt des Tierkreises von der Erde aus betrachtet. | 24 |
| 21.4 | Topologie: 2D-Analoga der drei Geometrien des Universums mit simpler Topologie. | 26 |
| 21.5 | Tunneln einer Welle durch einen Potentialwall. | 35 |

21 Lexikon T

21.1 Tachyon

Tachyonen (grch. *tachys*: 'schnell') sind hypothetische Teilchen (engl. auch *FTL particle* genannt für *Faster-Than-Light particle*), die sich schneller bewegen können als mit Lichtgeschwindigkeit! Dies ist nach der Speziellen Relativitätstheorie **nicht explizit verboten**, nur das Überschreiten der Vakuumlichtgeschwindigkeit c (knapp 300 000 km/s) ist nicht möglich. Tachyonen hingegen sollen *von Anfang an* eine Geschwindigkeit größer als c besitzen.

21.1.1 Tachyonen - gefangen in einer anderen Welt?

Dies ist theoretisch dann möglich, wenn Tachyonen eine **imaginäre Masse** besitzen, $m^2 < 0$. Sinkt ihre Geschwindigkeit jedoch ab und wird vergleichbar mit der Lichtgeschwindigkeit, so wächst ihre Energie gegen unendlich, so dass sie die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum nie unterschreiten können. Somit dringen Tachyonen - sollten sie existieren - nie in den Bereich der Unterlichtgeschwindigkeit ein. Betrachtet man den **Lichtkegel**, ein übliches Raum-Zeit-Diagramm der Relativitätstheorie, so bewegen sich die Tachyonen auf **raumartigen** Geodäten, während sich Photonen auf lichtartigen (Nullgeodäten) und Materie auf zeitartigen Geodäten bewegen.

21.1.2 Tachyonen vertauschen Ursache und Wirkung

Tachyonen widersprechen dem **Kausalitätsprinzip!** Zwischen Ereignissen mit *raumartiger Abstand* kann es gemäß Einstein keinen Signalaustausch geben. Würden Tachyonen tatsächlich existieren, so wäre es möglich, dass die Wirkung zeitlich **vor** der Ursache käme. Das würde die Physik, im Speziellen die Thermodynamik (Stichwort: thermodynamischer Zeitpfeil auf der Grundlage des 2. Hauptsatzes), in ernst zu nehmende Schwierigkeiten bringen. Außerdem wäre eine Reihe unlösbarer Paradoxa möglich. Aus diesen Gründen wird die Existenz solcher Teilchen und die Wahrhaftigkeit von Theorien, die sie postulieren oder ableiten, von den meisten Physikern negiert.

21.1.3 Tachyonen in nicht-supersymmetrischen Stringtheorien

In den Stringtheorien treten Tachyonen auf, wenn man auf die Supersymmetrie zwischen Bosonen und Fermionen verzichtet. Erst die Superstringtheorie garantiert, dass keine Tachyonen involviert sind und gewährleistet die Erhaltung des wertvollen und bisher immer verifizierten **Kausalitätsprinzips** ('Ursache kommt vor der Wirkung'). Andererseits bieten nicht-supersymmetrische Stringtheorien interessante Phänomene, wie die **Tachyonen-Kondensation**. In bosonischen Stringtheorien kann ein skalares Teilchen bzw. Feld auf diese Weise einen tachyonischen Zustand annehmen.



Abbildung 21.1: Der Teilchenzoo.

21.1.4 Tachyonen verboten?

Die experimentelle Suche nach Tachyonen, nach **Cerenkov-Strahlung**, die bei Tachyonenabbremung bei der Propagation durch dichte Medien erwartet wird oder das negative (!) Massenquadrat in Energiebilanzen verschiedener Reaktionen waren bisher erfolglos. Allerdings ist die Existenz von Tachyonen auch nicht vollständig widerlegt worden. Trotzdem gibt es gute Gründe (wie hier dargestellt), weshalb sie *nicht existieren dürfen*, ohne die Physik in eine Krise zu stürzen.

21.2 Tagbogen

Der Tagbogen wird unter den Jahreszeiten erläutert.

21.3 Tardyon

Als Tardyonen bezeichnet man alle Teilchen, die langsamer sind als Photonen im gleichen Medium. Die Geschwindigkeit der Tardyonen ist damit kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit c , die etwa 300 000 km/s beträgt. Der Begriff Luxon fasst alle Teilchen zusammen, die sich mit c bewegen. Auf der 'anderen Seite der Lichtbarriere' findet man die (hypothetischen) Tachyonen.

21.4 Teilchen

Die kaum zu überschauende Zahl der Teilchen in der Physik könnte man als 'Teilchenzoo' bezeichnen (siehe Grafik 21.1). Eine augenzwinkernde Bezeichnung, sprachlich gesehen eine Metapher ist: ebenso bunt und vielfältig wie die Fauna im Zoo ist, sind Zahl und Eigenschaften der Teilchen. Im strengeren Sinne unterscheiden Physiker **Elementarteilchen**, die keine weitere Substruktur haben, von zusammengesetzten Teilchen. Weiterhin gibt es zahlreiche Termini, die Teilchen unter einem bestimmten Charakteristikum zusammenfassen.

21.4.1 Welle und Teilchen

Die **echten Elementarteilchen** in der Teilchenphysik sind die Leptonen und die Quarks. Sie sind nach allem, was wir heute wissen und was das Standardmodell der Teilchenphysik aussagt, *punktförmig*. Diese Punktförmigkeit mag der ein oder andere Zeitgenosse mit Widerwillen zur Kenntnis nehmen; letztendlich ist sie eine Eigenschaft im Teilchenbild. Die Quantentheorie entlarvte die Teilchen als Wolf, der manchmal im Schafspelz daherkommt und manchmal nicht: der **Welle-Teilchen-Dualismus** besagt, dass man Teilchen auch als Welle beschreiben kann. Mit der Welle wird auch die Aussage zur Punktförmigkeit hinfällig, denn Wellen sind ausgedehnte Gebilde.

21.4.2 Hadronen, Mesonen, Baryonen, Nukleonen - alles nicht ohne

Der Baukasten aus elementaren Quarks und Leptonen bringt nun die Vielfalt des Teilchenzoos mit sich. Die sechs Quarks können als Bausteine für zusammengesetzte Teilchen dienen. Diese Hauptgruppe nennt man die Hadronen. Hadronen werden in Untergruppen klassifiziert: Exakt zwei Quarks setzen sich zu Mesonen zusammen. Baryonen hingegen bestehen immer aus genau drei Quarks. Die Nukleonen (Kernteilchen) sind die beiden Teilchentypen im Atomkern, Proton und Neutron (und deren Antiteilchen). Beide gehören zu den wohl bekanntesten Baryonen.

Die Mesonen werden weiter unterteilt, nach bestimmten Teilcheneigenschaften, also nach **Quantenzahlen**. Die bekanntesten Mesonen sind die Pionen und die Kaonen, aber es gibt noch weit exotischere Teilchen, wie charmante (die nennt man wirklich so!) Mesonen (die c-Quarks enthalten) oder seltsame Mesonen (die s-Quarks enthalten), das J/Psi-Teilchen, Charmonium, Bottomium etc.

21.4.3 weitere Teilcheneigenschaften

Diese Teilchen kann man durch Quantenzahlen wie Spin, Isospin, schwachen Isospin, Parität, elektrische Ladung, Farbladung, schwache Ladung, Hyperladung, Seltsamkeit etc. sehr gut voneinander unterscheiden.

21.4.4 Hyperonen sind seltsam

Bei den Hyperonen handelt es sich um besonders schwere, seltsame Baryonen, die demnach vollkommen neue Konstituenten aufweisen, als die gewöhnliche Materie, nämlich seltsame Quarks (*s-Quarks*). Daneben gibt es noch Delta-Baryonen und Bottom-Baryonen (enthalten b-Quarks).

21.4.5 Die drei Leptonenfamilien e, μ, τ

Lässt man von Quarkmaterie ab und wendet sich der zweiten fundamentalen Elementarteilchenklasse zu, den Leptonen, so findet man auch hier Unterklassen. Sie werden in **drei Generationen** unterteilt. Es handelt sich um die Elektron-, die Myon- und die Taufamilie. Die bekanntesten Leptonen sind wohl das Elektron und dessen Antiteilchen, das Positron. Daneben kennt man die Myonen, die im Prinzip 'schwere Elektronen' sind und die Tauonen (Tau-Teilchen), die noch schwerer sind. Die Trichotomie (Dreiteilung) kann mithilfe des *schwachen Isospins* gruppentheoretisch erklärt werden. Die drei Familien wurden

auch experimentell anhand des Zerfalls des neutralen Z-Bosons mit einer 95%igen Sicherheit verifiziert. Denn das Z-Teilchen kann in ein Paar zweier Leptonen zerfallen, nämlich Lepton und Antilepton. Im Experiment wurden *nur drei* Zerfallskanäle gefunden: Elektron und Positron, Myon und Antimyon, Tauon und Antitauon. Das ist der wichtigste, experimentelle Nachweis für die drei Leptonengattungen.

21.4.6 Fast ein Nichts von Teilchen: Neutrinos

Die Neutrinos zählen ebenfalls zu den Leptonen und können in die drei Familien eingeordnet werden: Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino. Zwischen diesen Familien können sie sogar wechseln und sich ineinander umwandeln, man spricht von **Neutrinooszillation**. Diesem Prozess unterliegen die Neutrinos, die von der Sonne kommen und im Sonneninnern als Nebenprodukt bei der thermonuklearen Fusion (genauer: pp-Kette) entstehen.

21.4.7 Teilchenhochzeiten

Auch Leptonen können sich paaren: Bei sehr tiefen Temperaturen finden sich in bestimmten Festkörpern, den **Supraleitern**, zwei Elektronen zusammen. Sie bilden einen gebundenen Zustand, den man nach einem der Pioniere der Supraleitung *Cooper-Paare* nennt. Der Zusammenschluss dieser zwei Fermionen ist von bosonischer Natur und ändert schlagartig die Leitungseigenschaften des Materials. Ein Analog zur Supraleitung der Elektronen ist die Supraleitung der Quarks, die so genannte Farbsupraleitung. Hier paaren sich fermionische Quarks zu bosonischen Diquarks. Bei hohen Dichten wird dieser Materiezustand relevant und wird im Zusammenhang mit Neutronensternen diskutiert. Die Zustandsgleichung der Neutronensternmaterie würde sich durch die Quarkpaarung verändern.

21.4.8 Kraftteilchen und Standardmodell

In den Quantenfeldtheorien kennt man die **Eichbosonen**, bosonische Teilchen, die die jeweilige Wechselwirkung (elektromagnetisch, gravitativ, stark, schwach) vermitteln. Dies sind

- ◇ das masselose, elektrisch neutrale Photon der QED,
- ◇ die massebehafteten, geladenen W-Bosonen und das elektrisch neutrale Z-Boson der schwachen Wechselwirkung,
- ◇ die acht masselosen, farbgeladenen Gluonen der QCD
- ◇ und das nur hypothetische, also nicht nachgewiesene Graviton der Quantengravitation (beispielsweise in den Stringtheorien).

Zusammengerechnet sind das $1 + 3 + 8 + 1 = 13$ Eichbosonen, von deren Existenz die Physiker ausgehen. Im Standardmodell der Teilchenphysik gibt es noch ein weiteres wichtiges Teilchen, das ebenfalls noch nicht experimentell verifiziert werden konnte: das Higgs-Teilchen. Es ist besonders massereich und daher noch nicht in Teilchenbeschleunigern nachgewiesen worden. Die Teilchenphysiker hoffen mit jeder neuen Beschleunigergeneration auf die Verifikation (ab 2007: LHC am CERN). Das Higgs-Teilchen ist erforderlich, um aus masselosen Eichbosonen massebehaftete zu machen, wie im Falle der W-Teilchen und des

Z-Teilchens. Das Higgs-Boson gehört wiederum zur Klasse der *Nambu-Goldstone-Bosonen*, die immer an einer spontanen Symmetriebrechung beteiligt sind. Die Zahl der Eichbosonen wird in den Großen Vereinheitlichten Theorien signifikant erweitert: hier leitet man weitere 12 X-Bosonen ab, die natürlich ob des immens hohen Energieregimes ($E \sim 10^{16}$ GeV) weit von einem experimentellen Nachweis entfernt sind.

21.4.9 Nach diesem Antipasti: Antiteilchen und Antimaterie

Die **Antiteilchen** wurden bereits angesprochen. Zu jedem Teilchen gibt es das korrespondierende Antiteilchen mit *invertierter elektrischer Ladung*. Ist das Teilchen sein eigenes Anti-Teilchen nennt man es *Majorana-Teilchen*. Es ist möglich, die Konstituenten zusammengesetzter Teilchen ohne Ausnahme zu invertieren. Auf diese Weise kann man Antimaterie herstellen, die jedoch von der umgebenden gewöhnlichen Materie gut abgeschirmt werden muss, damit sie nicht ausschließlich in elektromagnetische Energie (Gammastrahlen) zerstrahlt. Dieser Prozess heißt Paarvernichtung oder Paarannihilation. Am CERN ist es 1995 gelungen Antiwasserstoff herzustellen: ein positiv geladenes Positron ('Antielektron') bildet ein Atom mit einem negativ geladenen Antiproton als Atomkern.

21.4.10 Atome & Moleküle

Dies leitet zum sicherlich bekanntesten Teilchenverbund über: dem **Atom**. Die Atomisten um *Demokrit* (460 - 371 v.Chr.) bezeichneten in der antiken Philosophie die unteilbare (grch. *atomos*) Einheit der Materie als Atome. Die Physik konnte erst im 20. Jahrhundert belegen, dass das, was als Atome bezeichnet wurde, keineswegs so elementar war, wie angenommen. Der Pionier war *Ernest Rutherford*, der 1911 in seinen Streuversuchen von α -Teilchen an Goldfolie zeigen konnte, dass Atome aus einem kleinen, dichten Atomkern und einer umgebenden Elektronenhülle bestehen. Die darauf folgende, Jahrzehnte andauernde Ausarbeitung der Quantentheorie zeigte schließlich, dass die Elektronen nicht als massive Punktteilchen den Atomkern umkreisen (*Bohrsches Atommodell*), sondern die Elektronen in 'Wolken' (präzise: dem Absolutquadrat der **Wellenfunktion** des Elektrons) um den Atomkern 'verschmiert' sind (*Orbitalmodell*). Miteinander verbundene Atome, die **Moleküle**, verdanken ihre Existenz chemischen Bindungen, die ebenfalls quantentheoretisch verstanden werden können. Die damit assoziierten Gebiete der Atom- und Molekülphysik sind das Orbital-Modell, die Hybridisierung, die Elektronenbindung, die Hartree-Fock-Theorie, die homöopolare Bindung etc.

21.4.11 α -, β - und γ -Teilchen

In der **Radioaktivität** kennt man *Alpha-Teilchen*, die mit dem Alpha-Zerfall assoziiert sind, *Beta-Teilchen*, die mit dem Beta-Zerfall zusammenhängen und Gamma-Strahlen, die bei Gamma-Zerfällen emittiert werden. Alle diese Teilchen senden radioaktive Atomkerne (*Radionuklide*) aus. Die Bezeichnung mit den Anfangsbuchstaben des griechischen Alphabets war zunächst in der Unkenntnis begründet, um welche Teilchen es sich handele. Experimente (die die ionisierende Wirkung der Radioaktivität ausnutzen; Nebel- und Blasenkammer, Ablenkung in elektrischen/magnetischen Feldern, Massenspektrometer etc.) enthüllten die wahre Natur dieser Teilchen:

- ◇ **Alpha-Teilchen** sind Heliumatomkerne, also ein Verbund aus zwei Protonen und zwei Neutronen.
- ◇ **Beta-Teilchen** sind je nach Beta-Zerfallstyp Elektronen oder Positronen (die zur Gruppe der Leptonen gehören).
- ◇ **Gamma-Strahlen** sind hochenergetische, elektromagnetische Wellen oberhalb die sich an den Bereich der Röntgenstrahlung anschließen.

21.4.12 Bosonen, Fermionen und statistische Physik

In der **statistischen Physik** unterteilt man sämtliche Teilchen in zwei Gruppen: in Bosonen, Teilchen mit ganzzahligem Spin, und in Fermionen, Teilchen mit halbzahligem Spin. Das Unterscheidungskriterium ist also der **Spin**. Das Spin-Statistik-Theorem grenzt beide Teilchengruppen scharf voneinander ab (identische versus unterscheidbare Teilchen) und postuliert eine jeweils adäquate quantentheoretische Beschreibung. Die Konsequenzen für die Struktur der Materie sind beträchtlich und von fundamentaler Bedeutung für die Physik und den Aufbau der Materie (Periodensystem der Elemente, Bose-Einstein-Kondensate, Quantengase, BCS-Supraleitung, Farbsupraleitung, Stabilität kompakter Objekte durch fermionischen Entartungsdruck uvm.).

21.4.13 Quanten

In der Quantentheorie hat man auch den **Quanten** bestimmte Namen gegeben und so Teilchengruppen definiert: die **Photonen** wurden bereits besprochen und sind die Quanten des elektromagnetischen Feldes. Der Quantisierungsapparat anderer Wechselwirkungen führt auch auf weitere Quantentypen: Die **Phononen** sind die Schwingungsquanten des Kristallgitters in der Festkörperphysik. Die **Magnonen** sind die Quanten im Ferromagneten. **Fluxonen** bezeichnen die Flussquanten des magnetischen Flusses in der Theorie der Supraleitung. **Vibronen** sind allgemeine, quantisierte Schwingungsfreiheitsgrade, während **Rotonen** quantisierte Rotationsfreiheitsgrade bezeichnet. Beides wird in der Molekülphysik angewendet, wo ein Molekül seinen Energiezustand durch Austausch (Emission oder Absorption) dieser Quanten ändern kann. Im Prinzip wird jedoch beim banalen Anstoßen eines Fadenpendels eine Vielzahl von Vibronen erzeugt, die das Pendel in einen angeregten Schwingungszustand bringen.

21.4.14 kosmologische Teilchen

In der **Kosmologie** hat man ebenfalls Teilchennamen für Felder eingeführt. Quantentheoretisch betrachtet macht es keinen Sinn, zwischen Teilchen und Feld zu unterscheiden, weil sie 'zwei Seiten derselben Medaille sind'. Einen Grundstein dazu legte der *Welle-Teilchen-Dualismus*.

So wird die Inflation mit dem **Inflaton** verknüpft; ein Skalarfeld in der Theorie der Quintessenzen wird mit dem **Cosmon** identifiziert und die Dunkle Energie bzw. die kosmologische Konstante wird mit dem **Radion** in Verbindung gebracht.

21.4.15 WIMPs

Als WIMPs bezeichnet man alle Teilchen, die - wie die Leptonen auch - nur der schwachen Wechselwirkung unterliegen, aber eine relativ große Masse tragen. Sie sind Kandidaten für die nicht baryonische Dunkle Materie im Universum. Neutrinos gehören nicht zu den WIMPs, weil sie zu leicht sind.

21.4.16 Teilchen als Fäden oder Flächen

Eine Erweiterung des Teilchenbegriffs wurde durch die Stringtheorien etabliert. Sämtliche Teilchen, aber auch andere Objekte, werden hier als schwingfähige Gebilde angesehen. Im eindimensionalen Fall heißen sie **Strings**, im zweidimensionalen Fall sind es die Membranen, kurz **Bran** genannt und im allgemeinen Fall nennt man sie **p-Bran** mit der Dimension p . Verschiedene Teilchen werden dadurch generiert, dass unterschiedliche Schwingungszustände der p-Branen vorliegen: ein Oberton ist gewissermaßen ein neues Teilchen. Ob sich die Stringtheorien bzw. ihr übergeordnetes Konstrukt, die M-Theorie, als leistungsfähige Alternative zur konservativen Teilchenphysik entpuppt, muss noch gezeigt werden. Nach wie vor gelten die Stringtheorien als Schlüssel, um eine Quantengravitation, eine Theorie der Gravitation der starken Felder und kleinen Raumzeit-Skalen, zu formulieren. Mittlerweile hat sie in Form der Loop-Quantengravitation eine konkurrierende Theorie bekommen.

21.4.17 Geschwindigkeit als Kriterium zur Teilchenklassifikation

Eine Teilchenklassifikation anhand ihrer Geschwindigkeit v relativ zur Lichtgeschwindigkeit c im gleichen optischen Medium wurde auch unternommen. Hier kennt man die Tardyonen mit v kleiner c , die Luxonen mit v gleich c und die Tachyonen mit v größer c . Das Auftreten von Tachyonen würde gegen das **Prinzip der Kausalität** (Reihenfolge von Ursache und Wirkung) verstoßen (aber nicht gegen die Spezielle Relativitätstheorie!), daher versuchen Physiker tachyonische Theorien zu vermeiden.

21.4.18 supersymmetrische Teilchen

Als ob dieses Sammelsurium an Teilchen nicht schon genug wäre, denken sich die Physiker in der Supersymmetrie (SUSY) neue Teilchen aus: die **SUSY-Teilchen**. In einer wohl definierten Nomenklatur tauchen hier supersymmetrische Partner zu etablierten Teilchen auf: so spricht man beispielsweise von Squarks, Neutralinos und Higgsinos. Bislang wurde keines dieser SUSY-Teilchen experimentell entdeckt. Daher handelt es sich bei der SUSY bisher nur um eine zusätzliche Theorie, die sich erst noch bewähren muss.

21.4.19 Übung

Sie haben nun eine Reihe von Teilchen kennen gelernt, häufig charakterisiert durch das Suffix *-onen*, z. B. Hadronen, Bosonen, Photonen, Gluonen, Tachyonen, Selektrenen, Tauonen und Cosmonen. Klären Sie in Abgrenzung dazu die Begriffe Schoschonen, Kronen und Verschonen.

21.5 Teilchenbeschleuniger

Ein Teilchenbeschleuniger ist eine große Anlage zur Erforschung der **Hochenergie- und Teilchenphysik**. In dieser Forschungsanlage werden geladene Teilchen (Ionen) auf hohe Geschwindigkeiten mittels elektrischer und magnetischer Felder beschleunigt. Ist eine geeignete Geschwindigkeit erreicht, wird mit den Teilchen ein Ziel beschossen. In diesem Zusammenstoß entsteht eine Vielzahl neuer Teilchen, die mit diversen Messgeräten detektiert werden. Aus der Untersuchung dieser Teilchenreaktionen folgern die Physiker, welche Teilchen am Zusammenstoß beteiligt waren, wie sie sich umgewandelt und welche Kräfte gewirkt haben.

21.5.1 relativistische Effekte

Die Teilchengeschwindigkeiten sind so hoch, nämlich nahe an der Vakuumlichtgeschwindigkeit von rund 300000 km/s, dass die Effekte der Speziellen Relativitätstheorie berücksichtigt werden müssen: Zeitdilatation und Lorentz-Kontraktion sind tägliches Geschäft der Hochenergiephysiker. Die Längenkontraktion äußert sich darin, dass schwere Ionen, die viele Nukleonen enthalten, in Bewegungsrichtung kontrahiert sind: sie haben dann keine Kugelgestalt mehr, sondern ähneln im Laborsystem eher einem Pfannkuchen! (siehe Abbildung unter Lorentz-Kontraktion)

21.5.2 Felder steuern Teilchenbahnen

Zur Beschleunigung und Führung der Teilchenstrahlen (engl. Fachbegriff *beam*) benutzen die Experimentatoren elektrische und magnetische Felder. Aus diesem Grund müssen die Teilchen im Strahl geladen, also ionisiert (Fachbegriff: *stripped*), sein. Die Lorentz-Kraft $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ mit der elektrischen Ladung q , dem Vektor des elektrischen Feldes \mathbf{E} , dem Vektor des magnetischen Feldes \mathbf{B} und dem Vektor der Teilchengeschwindigkeit \mathbf{v} (hier in nicht-relativistischer Formulierung) sorgt - bei richtiger Orientierung der Felder - im Wesentlichen im ersten Term für die **Beschleunigung** in Bewegungsrichtung und im zweiten Term für die **Ablenkung**, also die Führung der Teilchenstrahlen. Magnetische *Dipolfelder* nutzt man zur Ablenkung des Strahls, während magnetische *Quadrupolfelder* für dessen Fokussierung sorgen. Ohne Ladung der beschleunigten Spezies verschwinden die Lorentz-Kräfte und weder Führung noch Beschleunigung wären möglich.

21.5.3 Wozu schnelle Teilchen?

Der Sinn von Teilchenbeschleunigern ist es, Teilchen auf hohe kinetische Energien zu beschleunigen und in einer finalen Kollision mit einem Ziel neue Teilchen freizusetzen. Je größer die kinetischen Energien der Teilchenstrahlen, umso komplexere Teilchenschauer (Sekundärteilchen) können die Experimentatoren im Kollisionsereignis erzeugen, in der Regel entstehen dabei völlig neue Teilchenspezies.

Man kann sagen, dass Teilchenbeschleuniger die modernste Form eines Mikroskops ist. Weil die Längenskala deutlich kleiner ist und in den subatomaren Bereich hinein geht. Die charakteristische Skala liegt im Bereich von Femtometern (10^{-13} cm), daher könnte man Teilchenbeschleuniger '**Femtoskope**' nennen. Mit Teilchenbeschleunigern kann man die Vielfalt der Teilchen, den 'Teilchenzoo', experimentell untersuchen.

21.5.4 Aufbau eines Teilchenbeschleunigers

Teilchenbeschleuniger sind im Prinzip lange, evakuierte Röhren (Fachbegriff: *Kavitäten*), in denen sich Teilchenstrahlen ausbreiten. Ohne Vakuum wäre die Beschleunigung durch vorzeitige Kollisionen nicht möglich. Die Physiker benutzen zwei Methoden, um Teilchen miteinander kollidieren zu lassen: Der Experimentator schießt entweder die Teilchenbündel auf ein statisches Ziel (engl. *target*); oder benutzt eine spezielle Bauweise von Teilchenbeschleunigern, den *Collider*, in dem er zwei Teilchenbündel separat beschleunigt und sie schließlich auf Kollisionskurs bringt. Collider haben den Vorteil, dass die **Schwerpunktenergie** (engl. *center-of-mass energy*, kurz *com energy*) deutlich größer ist, weil sich die kinetischen Energien *beider* Teilchenbündel addieren.

Es gibt inzwischen diverse **Beschleunigerarchitekturen** mit unterschiedlichen Größen, Geometrien, Effizienzen und Kosten. Die ersten Beschleuniger waren Linearbeschleuniger (engl. *linear accelerator*, kurz LINAC), bei denen die Beschleunigungsstrecke eine Gerade ist. In Kreisbeschleunigern (Zyklotron), Synchrozyklotron und Synchrotron sind die Beschleunigungsstrecken gekrümmt (Spiral- oder Kreisbahn). Der Vorteil ist die **mehrfache Beschleunigung** des Beams in mehrfachen Umläufen; der Nachteil ist die Ablenkung des Beams aus der Sollbahn durch Zentrifugalkräfte. Dies gleichen die Physiker mit (immer stärker werdenden) magnetischen Führungsfeldern aus.

21.5.5 CERN - Die bekannteste Teilchenbeschleunigeranlage der Welt

Das Akronym CERN steht für *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, was im Deutschen **Europäische Organisation für Kernforschung** genannt wird (wörtlich übersetzt eigentlich: Europäischer Rat für Kernforschung). CERN ist das größte und bekannteste Teilchenphysiklabor der Welt. Es wurde bereits 1954 gegründet, hat derzeit 20 Mitgliedstaaten und beschäftigt knapp 3000 Menschen der unterschiedlichsten Berufe. Am CERN wurde 1989 das Internet von *Tim Berners-Lee* erfunden!

Moderne Teilchenbeschleunigungsanlagen wie CERN sind große Komplexe, die aus vielen LINACs und Synchrotrons bestehen. Mit Spannung erwarten die Forscher und die Weltöffentlichkeit die Fertigstellung des neuen Beschleunigers namens *Large Hadron Collider* (**LHC**) Ende 2007. Aufregend wird die Inbetriebnahme des LHC in jedem Fall werden, wie die unten genannten, brisanten Forschungsthemen nahe legen. Neben den Ionenkollisionsexperimenten produziert man CERN auch

- ◇ Neutronenstrahlen zur Strukturanalyse,
- ◇ Neutrinostrahlen, die durch das *Gran-Sasso-Massiv* bis nach Rom geschossen werden, um dort mit Neutrinodetektionsexperimenten den Strahl zu untersuchen (Stichwort: Neutrino-Oszillation)
- ◇ Antiprotonenstrahlen, die auf so genannten Dezelerationsstrecken abgebremst werden, um **Antiwasserstoffatome**, eine Form von Antimaterie, herzustellen.
- ◇ uvm.

21.5.6 Teilchenstrahlen

Gemäß der Teilchenspezies, die beschleunigt werden, kann man **leptonische Beschleuniger** und **hadronische Beschleuniger** unterscheiden. Leptonische Teilchenbündel bestehen

vornehmlich aus Elektronen und Positronen (die Antiteilchen der Elektronen), während hadronische Teilchenspezies in der Regel schwere Ionen (typischerweise gestripptes Gold oder Blei) sind.

21.5.7 Erforschung fundamentaler Naturkräfte

Teilchenbeschleuniger sind die Laboratorien der Hochenergiephysik und sind diejenige experimentelle Anordnung, um die **vier fundamentalen Wechselwirkungen der Physik**, nämlich schwache Wechselwirkung, starke Wechselwirkung, elektromagnetische und gravitative Wechselwirkung zu studieren. Die Quantenfeldtheorien machen viele Aussagen, die in Teilchenbeschleunigern verifiziert oder falsifiziert werden können. Das Unifikationsbestreben bei hohen Energien wurde erfolgreich bei der elektroschwachen Theorie und den Großen Vereinheitlichten Theorien umgesetzt. Die **Entdeckung des Z-Teilchens** 1973 am CERN durch *Donald Perkins* und Kollegen war eine wissenschaftliche Sensation, wurde es doch von den Theoretikern *Weinberg*, *Salam* und *Glashow* prognostiziert (Nobelpreis 1979). Erst zehn Jahre nach der Entdeckung des Z-Teilchens, 1983, wurden schließlich auch die beiden **W-Teilchen am CERN entdeckt**: Am Synchrotron schossen *Carlo Rubbia* und *Simon Van der Meer* Protonen auf Antiprotonen und entdeckten die verbleibenden 'Weakonen'.

21.5.8 Brisante Forschungsthemen

Die wichtigsten Forschungsgebiete der Hochenergiephysik haben auch astrophysikalische Relevanz, weil der Kosmos auf natürliche Weise die höchsten Energien produziert (siehe z. B. kosmische Strahlung, Blazare oder Big Bang).

Eine wichtige Entdeckung steht im Rahmen des Standardmodells noch aus: die Hochenergiephysiker versuchen das **Higgs-Boson** zu entdecken. Die Teilchenbeschleuniger der neusten Generation sind an der kritischen Energieschwelle, um dieses schwere Teilchen produzieren zu können. Hier entbrennt ein Wettlauf zwischen den Forschern der USA (Fermilab) und Europa (CERN). Das Higgs-Teilchen erklärt Vorgänge im frühen Universum. Im Higgs-Mechanismus werden die Teilchen mit Masse ausgestattet.

Fieberhaft wird auch nach experimentellen Signaturen der **Supersymmetrie** gesucht. Bisher konnte keines der geforderten SUSY-Teilchen in Teilchenbeschleunigern nachgewiesen werden. Dieser Aspekt ist auch von großem Interesse für Kosmologen, weil diese Teilchen eventuell zur Dunklen Materie im Kosmos beitragen.

Ein anderes Forschungsgebiet befasst sich mit dem intensiven Studium des **Quark-Gluonen-Plasmas** (QGP). Mittlerweile konnte dieser Zustand aus freien Quarks und Gluonen im Experiment hergestellt werden. Dieses Forschungsthema interessiert Astrophysiker hinsichtlich der Frage nach der Zustandsgleichung der Materie in Neutronensternen und Quarksternen.

In den hochenergetischen Stößen versuchen die Physiker auch Quanteneffekten der Gravitation auf die Spur zu kommen. Teilchenbeschleuniger erweisen sich als Testlaboratorien für die Vorstellungen, die auf Modellen der **Quantengravitationen** beruhen. Die Stringtheorien mit ihren Extradimensionen können getestet, die Grenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie ausgelotet und die Anregung von Gravitonen überprüft werden. Sollte die Planck-Skala tatsächlich durch vorhandene Extradimensionen reduziert werden, so kann die so

genannte *TeV-Quantengravitation* bereits mit den neusten Teilchenbeschleunigern untersucht werden.

Für die Kosmologie hat die Beschleunigerphysik auch insofern eine Bedeutung, weil vergleichbare physikalische Zustände wie im **Urknall** im Teilchenphysiklabor erzeugt werden könnten. Die Hoffnung ist, dass mit immer besseren Beschleunigern immer höhere Schwerpunktsenergien bzw. Energiedichten produziert werden können, um sich stufenweise diesem Bereich zu nähern. Dabei könnten zukünftig möglicherweise Leptoquarks und X-Kraft im GUT-Regime studiert werden.

Eine besonders faszinierende Aussicht ist, dass in besonders energiereichen Kollisionen Schwarze Löcher im irdischen Labor hergestellt werden könnten. Bei Richtigkeit des TeV-Quantengravitationsszenarios stehen wir auch hier an der Schwelle, um den Traum von der **Laborphysik mit Schwarzen Löchern** wahr werden zu lassen. Quantitative Überlegungen vieler Hochenergiephysiker zeigen, dass sie keine Gefahr für die Erde darstellen würden, weil sie um ein Vielfaches kleiner sind als die kosmischen Schwarzen Löcher. Die meisten Wissenschaftler sind sich einig darüber, dass solche Mini-Löcher auf extrem kurzen Zeitskalen (fm/c) durch die Emission von Hawking-Strahlung verdampfen müssen. Eventuell gelingt der Nachweis dieser noch hypothetischen Strahlungsform in Teilchenbeschleunigern. Weitere Einzelheiten zu diesem Thema gibt es in einem Web-Artikel unter Schwarze Löcher in Teilchenbeschleunigern.

21.5.9 Websites der bekanntesten, internationalen und deutschen Teilchenbeschleunigeranlagen

- ◇ CERN in der Schweiz,
- ◇ FERMILAB, *Fermi National Accelerator Laboratory* (USA),
- ◇ RHIC, *Relativistic Heavy Ion Collider* (USA),
- ◇ DESY, *Deutsches Elektronen Synchrotron*, in Hamburg und Zeuthen,
- ◇ GSI, *Gesellschaft für Schwerionenforschung* in Darmstadt,
- ◇ Max-Planck-Institut für Physik in München,
- ◇ Forschungszentrum Karlsruhe,
- ◇ Forschungszentrum Jülich.

21.6 Tensorboson

Bezeichnung für ein Boson mit Spin 2, zum Beispiel ist das hypothetische Graviton ein Spin-2-Teilchen.

21.7 Tensoren

Tensoren sind mathematische Größen, die auf geometrischen Objekten, dem n-dimensionalen Raum oder auf **Mannigfaltigkeiten**, durch ihre Transformationseigenschaften definiert sind. Tensoren sind in vielen Bereichen der mathematischen Physik von großer Wichtigkeit. Die

$$\mathbf{T}_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \blacksquare & \color{red}\square & \color{blue}\square & \color{green}\square \\ \color{red}\square & \color{yellow}\square & \color{cyan}\square & \color{purple}\square \\ \color{blue}\square & \color{cyan}\square & \color{magenta}\square & \color{pink}\square \\ \color{green}\square & \color{purple}\square & \color{pink}\square & \color{green}\square \end{pmatrix}$$

Abbildung 21.2: Tensor: Gestalt und Symmetrie eines Tensors zweiter Stufe.

Elastomechanik kennt den **Spannungstensor**, die Hydrodynamik den **Viskositätstensor** und die klassische Mechanik den **Trägheitstensor**. Besonders wichtig werden die Tensoren vor allem in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), einer Gravitationstheorie, die *Albert Einstein* 1916 veröffentlicht hat. Nach einer kurzen Einführung in die Tensorterminologie, die Tensoralgebra und die Tensoranalysis wollen wir uns in diesem Eintrag besonders den Tensoren der ART zuwenden.

21.7.1 Tensorstufe und Tensordefinition

Genauso wie Treppen haben Tensoren eine **Stufe**, nur meint es die 'Anzahl ihrer Indizes' (in der Indexschreibweise). Tensoren unterscheiden sich von Stufe zu Stufe durch ihr *Koordinatentransformationsverhalten*. Was damit gemeint ist, kann kaum prosaisch ausgedrückt werden, sondern nur präzise in der mathematischen Sprache, nämlich in Form der folgenden Gleichungen:

$$X'^{\mu} = \frac{\partial x'^{\mu}}{\partial x^{\nu}} X^{\nu} \quad \text{contravariant tensor 1. rank}$$

$$X'_{\mu} = \frac{\partial x^{\nu}}{\partial x'^{\mu}} X_{\nu} \quad \text{covariant tensor 1. rank}$$

$$Y'^{\mu\nu} = \frac{\partial x'^{\mu}}{\partial x^{\kappa}} \frac{\partial x'^{\nu}}{\partial x^{\lambda}} Y^{\kappa\lambda} \quad \text{contravariant tensor 2. rank}$$

$$Y'_{\mu\nu} = \frac{\partial x^{\kappa}}{\partial x'^{\mu}} \frac{\partial x^{\lambda}}{\partial x'^{\nu}} Y_{\kappa\lambda} \quad \text{covariant tensor 2. rank}$$

$$Z'^{\lambda}_{\mu\nu} = \frac{\partial x'^{\lambda}}{\partial x^{\sigma}} \frac{\partial x^{\kappa}}{\partial x'^{\mu}} \frac{\partial x^{\rho}}{\partial x'^{\nu}} Z^{\sigma}_{\kappa\rho} \quad \text{mixed tensor 3. rank}$$

Anhand von Beispielen wird klarer, was gemeint ist: Tensoren 0. Stufe sind **Skalare** ('Zahlen'), Tensoren 1. Stufe sind die **Vektoren**, Tensoren 2. Stufe können als **Matrizen** mit Zeilen und Spalten dargestellt werden, wie man sie aus der Linearen Algebra kennt. Alle diese Gebilde sind **Zahlentupel** ('Anordnungen von Zahlen'), und so ist allgemein ein Tensor der Stufe k in einem n -dimensionalen Raum als ein n^k -Tupel darstellbar.

21.7.2 Beispiel: Tensor 2. Stufe

Physikalische Tensoren in der ART haben häufig 2. Stufe. Daher sind sie immer als **quadratische, symmetrische Matrizen** darstellbar. Die Raumzeit der ART ist vierdimensional ($n = 4$, eine Zeit- und drei Raumdimensionen), so dass Tensoren 2. Stufe als 4×4 -Matrizen darstellbar sind. Schon ein Tensor 2. Stufe besteht deshalb aus $4 \times 4 = 16$

Komponenten. Im einfachsten Fall sind die Komponenten Zahlen (z. B. bei der Minkowski-Metrik), im Allgemeinen aber koordinatenabhängige Variablen (z. B. beim metrischen Tensor der Schwarzschild-Metrik). Auf jeden Fall kann man die Komponenten als Anordnung aus vier Spalten und vier Zeilen notieren. Eine solche Anordnung hat eine **Hauptdiagonale**, die in der ersten Zeile oben links beginnt, über das zweite Element von links in der zweiten Zeile und das dritte Element von links in der dritten Zeile geht und am rechten Element in der vierten Zeile endet. Die Symmetrie besagt nun, dass man an der Hauptdiagonalen spiegeln kann und somit z. B. das Element unten links mit demjenigen oben rechts übereinstimmen muss. In der Abbildung 21.2 sind farbige Quadrate als Platzhalter für die Tensorkomponenten eingetragen worden. Dabei bedeutet, dass gleiche Farbe den gleichen Tensoreintrag hat. So wird Symmetrie eines Tensors zweiter Stufe unmittelbar anschaulich klar. Denn spiegelt man sorgfältig alle Elemente, so wird klar, dass von den 16 Elementen der symmetrischen Matrix **nur 10** übrig bleiben, die wirklich unabhängig voneinander sind.

21.7.3 kovariante und kontravariante Tensoren

Im *Tensorkalkül* kann man die Stufe eines Tensors verallgemeinern und zwischen **kovarianten** (Index unten), **kontravarianten** (Index oben) und **gemischten** Tensoren (Indizes oben und unten) unterscheiden. Bei gegebenem Tensor unterscheidet sich seine kovariante Form von der kontravarianten darin, dass die *Transformationsmatrizen invertiert* sind.

Was bedeuteten kovariante und kontravariante Tensoren anschaulich? Betrachten wir eine beliebig gekrümmte Mannigfaltigkeit, die in der ART vierdimensional ist, z. B. eine gekrümmte Raumzeit. Vierdimensional heißt, dass wir die Mannigfaltigkeit durch vier Größen parametrisieren können (z. B. Koordinatenzeit, Radius, zwei Winkel in sphärischen Koordinaten). Dabei handelt es sich also um ein mögliches *Koordinatensystem* von vielen. Auf diese Weise kann man die Mannigfaltigkeit eindeutig durch ein **Linienelement** beschreiben. Einfacher vorstellen kann man sich eine zweidimensionale Fläche im dreidimensionalen Raum, z. B. die gekrümmte Fläche eines Globus, den man vor sich ins Zimmer hinstellt. Die zwei Parameter, die die Oberfläche des Globus aufspannen, sind dann beispielsweise zwei Winkel (Längen- und Breitengrad).

Fixieren wir nun einen Punkt P auf dieser Fläche/Mannigfaltigkeit, so kann man sich in jede Koordinatenrichtung durch Bildung der partiellen Ableitung den Tangentenvektor beschaffen. Im Beispiel des Globus zeigen die Tangentenvektoren entlang der Großkreise. Man nennt nun sämtliche kontravariante Vektoren im Punkt den **Tangentenraum** an P . Im Allgemeinen liegt dieser Raum **nicht** mehr *in* der zugrunde gelegten Mannigfaltigkeit. Die Tangentenvektoren im Punkt bilden eine so genannte *kontravariante Basis*. Demgegenüber besteht die *kovariante Basis* aus darauf senkrecht stehenden Vektoren (inverse Jacobi-Matrix). Beide Basen eignen sich zur Darstellung von Tensoren und sind gleichwertig. Der metrische Tensor kann benutzt werden, um von einer Darstellung auf die andere zu transformieren.

21.7.4 Tensorterminologie

In der Tensorterminologie nennt man einen Tensor, der i kontravariante Indizes und j kovariante Indizes hat, einen Tensor vom Typ (i,j) , seine Stufe ist $i+j$, also die Summe aller vorhandenen Indizes. Der Tensor Z in den Gleichungen oben so beispielsweise den Typ $(1,2)$ und ist Stufe 3.

21.7.5 Einsteinsche Summenkonvention

Die Stellung von Indizes kann man je nach Anforderung des tensoralgebraischen Problems durch Multiplikation mit dem **metrischen Tensor** anpassen. Hier einige Beispiele:

$$\begin{aligned} X_{\mu\nu} &= g_{\mu\lambda} X^{\lambda}_{\nu}, \\ X^{\lambda}_{\mu\nu} &= g_{\mu\kappa} X^{\lambda\kappa}_{\nu}, \\ X^{\lambda\kappa}_{\nu} &= g^{\kappa\mu} X^{\lambda}_{\mu\nu}. \end{aligned}$$

Dabei ist immer die **Einsteinsche Summenkonvention** zu beachten:

Über wiederholt auftretende Indizes wird summiert.

Und zwar durchlaufen üblicherweise griechische Indizes **alle vier Dimensionen** der Mannigfaltigkeit (0,1,2,3; 0: Zeit) und lateinische Indizes **nur die drei Raumdimensionen** (1,2,3). In der Literatur gibt es für die Handhabung der griechischen und lateinischen Buchstaben aber auch Unterschiede, die jedoch zu Beginn vereinbart werden. Die Summenkonvention allerdings ist fundamental und erspart die aufwendige Notation mit Summensymbolen.

21.7.6 Kontraktion oder Verjüngung

Die Stufe eines Tensors kann man auch erniedrigen: dies nennt man *Kontraktion*. Darüber hinaus existiert im Tensorkalkül auch ein *indexfreier* Zugang, der in der Anwendung auf ein konkretes Problem weniger praktisch ist.

21.7.7 Weshalb brauchte Einstein Tensoren?

Die Verwendung von **Tensoren in der ART** ist kein Zufall, denn gemäß des **Prinzips der Kovarianz** müssen die relativistischen Gleichungen *notwendigerweise tensoriell* sein. Die Transformationsgesetze der Tensoren (siehe erste Abbildung) lassen schnell erkennen weshalb: Angenommen zwei Tensoren stimmen in einem bestimmten Koordinatensystem (ohne Beschränkung der Allgemeinheit im ungestrichenen System) überein. Dann zeigen die Transformationsgesetze sofort, dass auch die Tensoren im gestrichenen System übereinstimmen! D.h. die Tensoren stimmen dann auch *in jedem beliebigen anderen Koordinatensystem* überein!

Tensorgleichungen sind koordinatenunabhängig.

Die Wahl eines Koordinatensystems erleichtert nur konkrete Rechnungen. In der Praxis sind Tensorgleichungen eine sehr kompakte Notation in der mathematischen Physik, aber für konkrete Rechnungen muss man meist ein bestimmtes Koordinatensystem (man könnte auch sagen: einen Beobachter, eine Tetrade) auswählen.

21.7.8 Tensoren vs. Tensorfeld

Im allgemeinen Sprachgebrauch der Physiker werden Tensoren synonym mit den **Tensorfeldern** gebraucht. Der subtile, semantische Unterschied besteht darin, dass Tensorfelder auf einem Gebiet definiert sind, in der ART auf einer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit. Die Unterscheidung ist die konsequente Verallgemeinerung von Vektor und

Vektorfeld der Vektoranalysis. So sind Tensorfelder Zuordnungen von Tensoren gleichen Typs zu jedem Punkt der Mannigfaltigkeit, ebenso wie bei einem Vektorfeld jedem Punkt eines Gebietes ein Vektor zugeordnet wird (Beispiel: Geschwindigkeitsfeld in der Hydrodynamik).

21.7.9 kompakte Gleichungen mittels Tensorschreibweise

Ebenso wie die Vektoren eine sehr kompakte Formulierung in der Newtonschen Theorie der Gravitation erlauben, gestatten die Tensoren der ART eine sehr kompakte, tief sinnige Darstellung der Einsteinschen Gravitationstheorie: ein ganzer Satz von Differentialgleichungen (zehn gekoppelte, nichtlineare, partielle Differentialgleichungen) kann so als **eine Gleichung** geschrieben werden, die einen tiefen, physikalischen Gehalt birgt: die **Einsteinschen Feldgleichungen** offenbaren eine direkte Verbindung von Raumkrümmung, repräsentiert durch den Einstein-Tensor, und Energie bzw. Materie, repräsentiert durch den Energie-Impuls-Tensor!

21.7.10 physikalische Tensornamen in der ART

Tensoren in der relativistischen Physik haben maximal 4. Stufe, wie der Riemannsche Krümmungstensor und Weyl-Tensor. Viele Tensoren können physikalisch anschaulich interpretiert werden. Näheres ist bei den einzelnen Tensoren selbst nachzulesen:

- ◇ Einstein-Tensor
- ◇ Energie-Impuls-Tensor
- ◇ Killing-Tensor
- ◇ Maxwell-Tensor
- ◇ metrischer Tensor
- ◇ Ricci-Tensor
- ◇ Riemann-Tensor
- ◇ Torsionstensor
- ◇ Weyl-Tensor

21.8 Tetraden

Als Tetrade bezeichnet man ein **Vierbein** in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), das aus einem zeitlichen und drei räumlichen Einheitsvektoren aufgespannt wird. Diese lokalen Lorentzsysteme stellen geeignete Bezugssysteme dar, um die allgemein relativistische Physik zu beschreiben. Anstelle von Tetrade kann man auch anschaulicher von einem Beobachter sprechen.

21.8.1 Beispiel: Tetrade beim Kerr-Loch

Ein besonders bekanntes Bezugssystem bei rotierenden Schwarzen Löchern (Kerr-Lösung) ist der ZAMO (*zero angular momentum observer*), dessen Bezugssystem auch LNRF (*locally non-rotating frame*) heißt. Die physikalischen Gesetze werden aus der Sicht dieser speziellen Beobachter formuliert und erhalten so eine einfache Gestalt. Es ist ein grundsätzliches Problem in der relativistischen Physik, eine geeignete Tetrade/einen geeigneten Beobachter zu finden, die/der die Lösung des Problems vereinfacht.

21.8.2 Nulltetraden

Wichtig ist der Fall, wenn die aufspannenden Vektoren **Nullvektoren** (siehe Geodäten) sind. Die Tetrade heißt dann **Nulltetrade**. Der **Newman-Penrose-Formalismus** nutzt exzessiv dieses Tetradenkalkül aus, um zahlreiche Anwendungen, wie z. B. Gravitationswellen zu untersuchen. Eine wesentliche Anwendung der Nulltetraden ist die Ableitung der Kerr-Lösung aus einer **komplexen Transformation**.

Im Tetradenkalkül nutzt man die Tetradenvektoren als Basis, die einen Zusammenhang zwischen **Tetradenmetrik** und metrischen Tensor herstellen. Die Metrik kann dann in Summen von Produkten aus Nulltetradenvektoren zerlegt werden. Bei Verwendung von komplexen Nullvektoren folgt das Linienelement der Kerr-Metrik aus der Summe dieser Produkte. Das Linienelement ds^2 ist gerade die wesentliche Größe, die eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit - die so genannte Raumzeit - eindeutig festlegt und aus der man als gleichwertige Darstellung den metrischen Tensor ableiten kann.

21.9 Tetraquark

Über die Entdeckung von Tetraquarks wurde kurze Zeit nach dem Nachweis von Pentaquarks im Jahr 2003 gemutmaßt. Beides sind Teilchen, die aus mehr als drei Quarks (Baryonen) bestehen: das Tetraquark aus vier und das Pentaquark aus fünf Quarks.

21.9.1 Mehr-Quark-Systeme

Der experimentelle Nachweis von Mehr-Quark-Systemen war eine kleine Sensation in der Teilchenphysik, weil man bislang nur Mesonen (Zwei-Quark-Systeme) und Baryonen (Drei-Quark-Systeme) kannte. Das Standardmodell der Teilchenphysik verbietet solche Mehr-Quark-Systeme nicht. Es wurde sogar schon vor zwei Jahrzehnten darüber spekuliert und beispielsweise 1997 in theoretisch enger gefasste Form gebracht (*Diakonov, Petrov & Polyakov*, hep-ph/9703373), welche Eigenschaften (Quantenzahlen) bestimmte Mehr-Quark-Systeme haben sollten.

21.9.2 das erste Tetraquark?

Die erste **baryonische Resonanz** wurde Mitte 2003 von der BABAR-Kollaboration entdeckt (*Aubert et al.*, hep-ex/0304021). Sie trägt die Bezeichnung **Ds(2317)** und ist assoziiert mit einem Teilchen der Masse von 2.32 GeV. Diese Beobachtung folgt aus hochenergetischen Stößen von Elektronen mit ihren Antiteilchen, den Positronen (*Paarannihilation*). Bis heute ist es nicht klar, ob es sich bei Ds(2317) um ein Meson handelt, das aus einem c-Quark und einem anti-s-Quark besteht oder ob man tatsächlich das **erste Tetraquark** entdeckt hat.

21.9.3 noch ein Tetraquark?

Die Belle-Kollaboration um *Choi et al.* konnte nur wenige Monate nach der Entdeckung des Pentaquarks Θ^+ und des mutmaßlichen Tetraquarks $D_s(2317)$ die baryonische Resonanz **X(3872)** nachweisen (hep-ex/0309032). Auch hier gibt es ähnliche Spekulationen wie bei $D_s(2317)$, ob es sich um ein Meson handelt, das aus einem c-Quark und einem anti-c-Quark (*Charmonium*, wie z. B. J/Psi) zusammengesetzt ist oder ob es auch ein Tetraquark ist. Ein neues Papier legt die Eigenschaften von X(3872) dar (*Choi et al.* 2004, hep-ex/0405014). Das 'X' in der Bezeichnung der Resonanz trägt der Unkenntnis über die Natur des Teilchens Rechnung. In jedem Fall eröffnen die Mehr-Quark-Systeme ein spannendes, neues Teilgebiet der Teilchenphysik.

21.10 TeVeS

Das Akronym TeVeS steht für *Tensor-Vektor-Skalar-Gravitationstheorie*. Es handelt sich dabei um eine alternative Gravitationstheorie, einem Konkurrenten zu Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (ART). In den 1980er Jahren wurde zunächst eine Alternative zur Newtonschen Gravitation vorgeschlagen, die unter der Bezeichnung **MOND** bekannt geworden ist. Aus den Versuchen, diese Ansätze relativistisch kovariant zu machen, erwuchs 2004 TeVeS. Diese neue Theorie wird zurzeit ständig weiterentwickelt und getestet. Mehr Einzelheiten gibt es unter dem Lexikoneintrag MOND.

21.11 Thermodynamik

Die Thermodynamik (auch *Wärmelehre*) ist eine sehr alte, klassische Disziplin der Physik, die phänomenologisch makroskopische Größen, wie Temperatur, Dichte, Druck, Entropie etc. zueinander in Beziehung setzt.

Im Rahmen der **statistischen Physik** ist eine Verbindung des Mikrokosmos und des Makrokosmos möglich, indem man statistische Ensembles von Teilchen betrachtet und die Gesetze der Quantenstatistik berücksichtigt. Das Spin-Statistik-Theorem fordert eine fundamentale Unterscheidung von Teilchen in Bosonen und Fermionen. Wichtige Anwendungen sind Zustandsgleichungen von Gasen wie die Quantengase (Bosegas und Fermigas) oder auch Bose-Einstein-Kondensation und Supraleitung.

21.11.1 Thermodynamik Schwarzer Löcher

Wichtig im Zusammenhang mit Schwarzen Löchern wird die Thermodynamik, weil sich eine analoge Behandlung zu den thermodynamischen Hauptsätzen herausgestellt hat, wenn man entsprechende Größen der Theorie Schwarzer Löcher mit den klassischen thermodynamischen Größen identifiziert. Diese Analogie haben *Bardeen, Carter & Hawking* 1973 gefunden. Eine wesentliche Größe, die man studieren kann, ist die **Fläche des Ereignishorizontes**, die mit der Masse des Schwarzen Loches ansteigt und mit der Rotation des Loches abfällt. Eine bemerkenswerte Eigenschaft ist, dass, wenn zwei Schwarze Löcher verschmelzen, die Fläche des neuen Horizontes größer ist, als die Summe der Flächeninhalte der einzelnen, kollidierenden Schwarzen Löcher, ähnlich der Dreiecksungleichung aus der Geometrie. Dieses Phänomen kann man mit dem **Konzept der Entropie** aus der Thermodynamik in Verbindung bringen: Nach dem **Zweiten Hauptsatz** der Thermodynamik steigt die Entropie (Maß für Unordnung in

einem System, fehlende Information) immer an! Genauso verhält es sich mit der Fläche des Horizontes:

$$\delta A_H \geq 0,$$

d.h. die Bekenstein-Hawking-Entropie ist proportional zur Fläche des Horizontes und hängt sonst nur von Naturkonstanten ab! Das Analogon zur thermodynamischen Temperatur ist die so genannte **Oberflächengravitation**, eine Größe, die ein Maß für die Stärke des Gravitationsfeldes am Horizont ist. Ein FIDO würde in der Nähe des Loches eine divergierende Kraft messen. Renormiert man diese Kraft, so erhält man die Oberflächengravitation. Eine kurze Rechnung zeigt, dass Oberflächengravitation und Rotation konstant auf dem Horizont sind, d. h. unabhängig vom Polarwinkel:

$$g_H = \text{const für } r = r_H.$$

Dies ist der **Nullte Hauptsatz**. Die Formulierung des **Ersten Hauptsatzes** gewinnt man, indem man die intensiven Zustandsgrößen Oberflächengravitation und Rotation mit den entsprechenden extensiven Größen Oberfläche und Drehimpuls verknüpft, die schließlich die Gesamtenergie des Systems, also die Masse des Schwarzen Loches liefern:

$$dM_H = T_H dS_H + \Omega_H dJ_H.$$

Das Analogon zum klassischen Temperaturbegriff heißt in der Theorie Schwarzer Löcher Hawking-Temperatur.

Schließlich lautet das Pendant zum **Dritten Hauptsatz**, die Unerreichbarkeit des **absoluten Nullpunkts** (bei exakt null Kelvin), dass bei Schwarzen Löchern die Oberflächengravitation nie Null werden kann:

$$g_H = 0 \text{ nicht möglich.}$$

Die thermische Strahlung von Schwarzen Körpern besitzt ihr Pendant in der Hawking-Strahlung. *Hawking* konnte 1974 zeigen, dass die Oberflächengravitation der thermodynamischen Temperatur entspricht und eine ähnliche Formulierung wie für Plancksche Strahler möglich ist.

21.11.2 Bedeutung für die Astrophysik

Wenn auch viele Aspekte dieser Betrachtung sehr theoretisch anmuten, so besitzt sie dennoch eine unmittelbare Relevanz für die Astronomie: Schwarze Löcher verfügen neben der Akkretionsenergie über einen zweiten Energiekanal: Etwa 30% der Gesamtenergie stecken in der Rotation! Ein Abbau dieser Rotationsenergie (ähnlich wie bei Pulsaren) liefert nochmals eine vergleichbare Leuchtkraft wie die Akkretionsleistung. Für Aktive Galaktische Kerne (AGN), die im Innern ein supermassereiches Schwarzes Loch beherbergen, bedeutet dies, dass eine **Zweiteilung** vorliegen sollte: die eine Klasse gewinnt Energie aus der Akkretion (*radio-leise Objekte*), die andere gewinnt auch Energie aus der Rotation (*radio-laute Objekte*), die in Jets umgewandelt wird! Die Beobachtung kann diese These stützen.

21.11.3 Literatur

- ◇ *Bardeen, J.M., Carter, B. & Hawking, S.W.:* The Four Laws of Black Holes Mechanics, Commun. Math. Phys. 31, 161, 1973

21.12 thermonukleare Fusion

Warum geben die Sterne am Himmel Licht ab? Diese scheinbar banale Frage - eine der Urfragen der Astronomie - hat es in sich und wird in diesem Abschnitt beantwortet.

Eine Definition des Begriffs *Stern* im engeren Sinne ist, dass ein Stern aus der Verschmelzung von Atomkernen Strahlungsenergie gewinnt. Der Fachgriff für diesen Prozess lautet *thermonukleare Fusion*. Der Wortbestandteil *thermo*, grch. 'Wärme' deutet darauf hin, dass hohe Temperaturen benötigt werden. *Nuklear* leitet sich vom lateinischen Wort *nucleus*, dt. 'Kern', ab. Es handelt sich nämlich um einen kernphysikalischen Vorgang. Schließlich kommt das Wort *Fusion* ebenfalls aus dem Lateinischen und bedeutet 'Gießen, Schmelzen'. Unter Hitzeeinwirkung werden demnach Atomkerne verschmolzen. Ein Fachbegriff, der dasselbe meint wie thermonukleare Fusion, lautet stellare Nukleosynthese.

21.12.1 Je schwerer der Stern, umso schwerer die erzeugten Elemente

Das heiße Innere von Sternen ist für die Fusion ein ideales Milieu. Schon in der Sonne, einem verhältnismäßig kleinen Stern, werden im Zentrum etwa 15 Mio. Grad erreicht. Die verschiedenen thermonuklearen Fusionsprozesse wurden ab etwa 1930 vor allem von den Pionieren der Stellarphysik *H.A. Bethe*, *C.F. von Weizsäcker* und *E.E. Salpeter* entdeckt. Aus den **Strukturgleichungen der Sterne**, die einen Stern gastheoretisch beschreiben, folgt: Je massereicher der Stern ist, umso heißer ist sein Inneres. Die zur Fusion von Atomkernen benötigte Energie steigt mit der Schwere der Atomkerne (Atommasse) an. Das bedeutet in Verbindung mit dem zuvor Gesagten, dass massereichere Sterne schwerere Elemente fusionieren können.

21.12.2 Fusion mikroskopisch betrachtet

In der **nuklearen Astrophysik** unterscheidet man verschiedene Energieumwandlungsreaktionen, die wesentlich von der Temperatur abhängen. Mikrophysikalisch kann man sich die Fusionsprozesse folgendermaßen vergegenwärtigen: Für die Verschmelzung von positiv geladenen Atomkernen muss man den *Coulomb-Wall* der sich abstoßenden elektrischen Ladungen überwinden. Die dafür nötige Energie steigt mit der Ladungszahl. Thermische Energie auf der Mikroebene kann man sich als Teilchenbewegungen vorstellen, die klassisch mit der *Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung* beschrieben werden. Diese Verteilung besagt schlichtweg, wie viele Teilchen es zu jeder Geschwindigkeit gibt. Das Maximum dieser Verteilung steigt mit der Temperatur, d. h. heißere Gase enthalten im Mittel schnellere Teilchen. Es ist daher klar, dass für die Verschmelzung schwererer Teilchen eine höhere Gastemperatur (**Zündtemperatur**) nötig ist. Deshalb steigen die Zündtemperaturen mit den zu fusionierenden, schwerer werdenden Elementen (Wasserstoff *H*, Helium *He*, Kohlenstoff *C*, Sauerstoff *O* etc.) an. Ist das Objekt zu massearm, unterbleiben thermonukleare Fusionsreaktionen. Diese Objekte sind eher planetenartig und werden in der Astronomie Braune Zwerge genannt.

21.12.3 Es ist nicht alles Feuer, das brennt

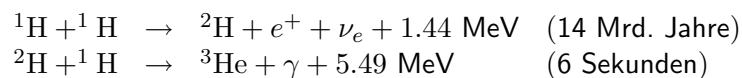
Mit Anleihen aus der Poesie spricht man bisweilen vom 'nuklearen Feuer', was eine Assoziation zur chemischen Verbrennung auslöst. Sogar Astronomen sprechen vom **Brennen** (engl. *burning*) im Innern von Sternen. Fakt ist, dass diese Redeweise streng genommen falsch

ist. Eine chemische Verbrennung ist eine Reaktion unter Beteiligung von Sauerstoff - das ist mitnichten bei der thermonuklearen Fusion der Fall. (Dass es Astronomen nicht immer so genau mit der Chemie nehmen, zeigt auch die Verwendung des Begriffs Metall.)

21.12.4 Übersicht aller thermonuklearen Fusionreaktionen

Wasserstoffbrennen

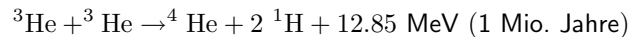
Das *Wasserstoffbrennen* oder auch pp-Reaktion genannt, die im Temperaturbereich zwischen **1 und 15 Millionen Kelvin** abläuft. Für diese Zündtemperatur ist eine Sternmasse von **mindestens 0.08 Sonnenmassen** nötig. Das ist gerade die Massengrenze, die den Unterschied zwischen Stern und Braunem Zwerg ausmacht.



(Die Zeitangaben sind mittlere Zeiten für das Eintreffen der jeweiligen Reaktion.)

Die erste Reaktion ist die Fusion aus zwei Protonen (daher die Bezeichnung pp), wo bereits eine Energie von 1.44 MeV und Elementarteilchen (Positron und Elektron-Neutrino) frei werden. Diese Fusion startet erst ab einer Zündtemperatur von 10 Million Kelvin. Hierbei wird schwerer Wasserstoff, Deuterium ${}^2\text{H}$, freigesetzt. Deuterium ist ein Wasserstoffisotop, das im Atomkern ein Proton und ein Neutron hat.

An der zweiten Reaktion ist anstelle des einfachsten Wasserstoffisotops ${}^1\text{H}$ (nur ein Proton im Atomkern) Deuterium beteiligt. Hier liegt die Zündtemperatur wesentlich niedriger, bei nur 1 Million Kelvin. In der letzten Reaktion der pp-Kette verwandelt sich das Heliumisotop He-3 in das schwerere Isotop He-4, wobei wiederum einfache Wasserstoffkerne für die Primärreaktion gebildet werden:



Diesmal sogar 12.85 MeV frei werden. Die freiwerdende Energie überträgt sich entweder als **kinetische Energie** auf die neu gebildeten Teilchen (und erhöht damit die mittlere Gastemperatur) oder wird als Strahlung freigesetzt. Neutrinos sind schwach wechselwirkende Teilchen mit kleiner Masse, die daher das Sonnenplasma verlassen und somit kühlen können. Die Energiebilanz der pp-Reaktion liefert $26.2 \text{ MeV} = 4.2 \times 10^{-12} \text{ J}$ pro Heliumkern. Die 'Asche' dieser Fusionsreaktionen ist demnach Helium.

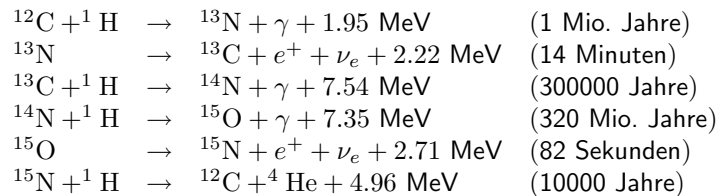
Wasserstoffbrennen ist die **wichtigste thermonukleare Reaktion in der Sonne**, die eher ein leichter Stern ist. Nur im Zentrum erreicht die Sonne besagte Temperatur von etwa 15 Millionen Kelvin, so dass auch nur dort die pp-Reaktion abläuft. Nebenbei gesagt, erzeugt demnach die Sonne in ihrem Innern **Antimaterie** (nämlich z. B. das Positron, das Antiteilchen des Elektrons), das jedoch kurz nach der Entstehung mit einem Elektron annihiliert, also zu Gammastrahlen zerstrahlt. Weiter außen befinden sich die *Wasserstoffkonvektionszonen*, wo das heiße Plasma der Sonne in vertikaler Richtung 'umgewälzt' wird, und so die Wärme an die Sonnenoberfläche befördert. Hierbei entsteht die typische **Granulation** der Sonne, eine körnige Struktur mit Konvektionszellen von etwa 100000 km Ausdehnung. Zum anderen findet *Strahlungstransport* von innen nach außen statt, so dass die Strahlung schließlich in der Photosphäre die Sonne verlässt.

CNO-Zyklus

Die nächste, wesentliche Fusionsreaktionskette ist der **Bethe-Weizsäcker-** oder CNO-Zyklus, benannt nach den wesentlichen, beteiligten Elementen Kohlenstoff (*C*), Stickstoff (*N*) und Sauerstoff (*O*). Dieser Kernprozess läuft neben der pp-Reaktion **oberhalb von 10 Millionen Kelvin** ab.

Schwerere Kerne wie Kohlenstoff unterliegen **Resonanzreaktionen**, weil die kinetische Energie eingefangener Nukleonen (hier Wasserstoff) gerade der Anregungsenergie eines schwereren Kerns

entspricht. Die Reaktionen dieses Zyklus sind komplexer und vielfältiger. In der Summe werden hier jedoch auch vier Protonen zu Helium-4 (Atomkern mit zwei Protonen und zwei Neutronen) fusioniert: Auch im CNO-Zyklus wird aus Wasserstoff Helium. Kohlenstoff (genauer *C-12*) übernimmt in der Reaktionskette die Rolle eines 'nuklearen Katalysators', weil es an den Reaktionen immer beteiligt ist und verbraucht wird, aber zum Ende des Zyklus wieder in der Ausgangsmenge vorhanden ist. Die anderen Elemente Stickstoff und Sauerstoff tauchen im Zyklus als Zwischenprodukte auf, verschwinden aber wieder in der endgültigen Bilanz. Ein ganzer Zyklus besteht aus folgenden Reaktionen:

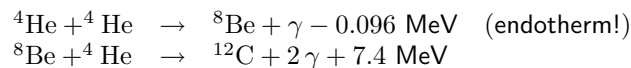


Der CNO-Zyklus ist bei der Sonne nicht besonders relevant und spielt erst bei massereicheren Sternen eine bedeutendere Rolle.

Die Energiebilanz ist exotherm, so dass auch hier etwa $25 \text{ MeV} = 4 \times 10^{-12} \text{ J}$ pro Heliumkern frei werden. Endprodukt dieser Fusionskette ist also im Wesentlichen **Kohlenstoff**.

Heliumbrennen

Die nächste Brennstufe ist das *Heliumbrennen*, besser gesagt der **Triple-Alpha-Prozess** oder *Salpeter-Prozess*, benannt nach drei α -Teilchen (Helium-4-Kerne), die für diesen Reaktionszyklus nötig sind. Er läuft **oberhalb von etwa 100 Millionen Kelvin bzw. 0.25 Sonnenmassen** ab, jedoch **nur bei sehr hohen Plasmadichten** ab. Hier wird Kohlenstoff 'gebrütet', und zwar nach folgendem Schema:

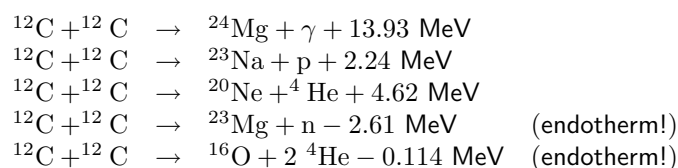


Das Übergangsprodukt Beryllium (*Be*) ist sehr instabil. Wegen der geringen Lebensdauer (10^{-16} Sekunden) dieser Substanz ist die Wahrscheinlichkeit der zweiten Reaktion nur $1:10^9$! Bei der zweiten Reaktion handelt es sich um einen *Resonanzeinfang*, bei dem zunächst der instabile Übergangskern (*Compoundkern*) O^+ entsteht, der aber rasch zu C-12 und zwei Gammaquanten zerfällt. Die Energiebilanz beträgt 7.3 MeV pro gebildeten Kohlenstoffkern. 'Asche' dieser Prozesse ist ebenfalls Kohlenstoff.

Bei der primordialen Nukleosynthese im frühen Universum konnte über diesen Prozess **kein Kohlenstoff** gebildet worden sein, weil das Universum einfach noch **nicht dicht genug** war.

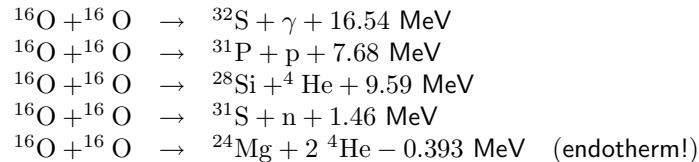
Kohlenstoffbrennen

Eine weitere Brennstufe ist der C-Prozess oder das *Kohlenstoffbrennen*, der ab einer Temperatur von **etwa 500 Millionen Kelvin** zündet. Ab einer Masse von **vier Sonnenmassen** ist der Stern so schwer, dass die Kohlenstoffkerne die Coulomb-Barriere überwinden können und zu zahlreichen schwereren Elementen fusionieren (fünf Kanäle, d. h. fünf mögliche Reaktionsgleichungen):



Sauerstoffbrennen

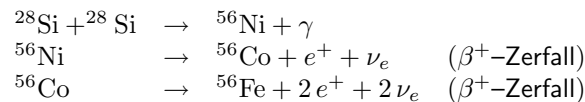
Nun schließt sich der **O-Prozess** oder das *Sauerstoffbrennen* an, der oberhalb einer Temperatur von **etwa 10 Milliarden Kelvin** abläuft. Dabei fusionieren Kerne des Sauerstoffisotops O-16 zu verschiedenen, schwereren Elementen:



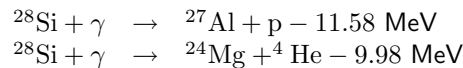
Die Energiebilanz ist zwar noch positiv, aber sukzessive mit der Fusion schwererer Elemente abnehmend.

Siliziumbrennen

Das *Siliziumbrennen* ist schließlich diejenige Fusionsreaktion, die die schwersten Elemente im Innern eines Sterns hervorbringen kann: nämlich Eisen (*Fe*) und Nickel (*Ni*). Die beteiligten Reaktionen sind die Folgenden:



Daneben hat sich durch die anderen Fusionsprozesse eine große Menge an Strahlung - ein signifikantes **Photonenbad**, wie Physiker sagen - gebildet, so dass sich andere Elemente auch über **Photodisintegration** bilden können:



21.12.5 Eisenbrennen is nich

Mit dem Siliziumbrennen enden die thermonuklearen Brennprozesse, weil die Energiebilanz aus der **Fusion von Eisen nicht mehr positiv** ist: Die Reaktionen sind dann ausschließlich endotherm! Die kernphysikalische Ursache dafür ist, dass Eisen die **größte Bindungsenergie pro Nukleon** hat und daher Fusionsreaktionen ausreichender Energiezufuhr benötigen. Für so schwere Kerne ist die **Fission** (Spaltung) der geeignete Prozess, um eine positive Energiebilanz zu erhalten. Diese Spaltprozesse schwerer Kerne finden im Innern von irdischen Kernreaktoren statt.

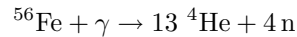
21.12.6 Woher kommt mein Goldkettchen?

Vom Juwelier, klar. Interessanter ist diese Frage in einem astronomischen Kontext: Wenn Eisen nicht fusioniert werden kann, woher kommt dann die Vielzahl schwerer Elemente *nach Eisen*, z. B. Schwermetalle wie Blei, Gold und Platin, Lanthanoide, Actinoide, schwere Radionuklide etc.?

Sie werden einerseits in bestimmten Entwicklungsphasen von Roten Riesensternen erzeugt. Die so genannte AGB-Phase (AGB: *Asymptotic Giant Branch*, dt. *asymptotischer Riesenast*) ist im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) der Sterne einzuordnen. AGB-Sterne erzeugen die schweren Elemente in den **s-Prozessen**. Dabei werden auf der Zeitskala von Jahren Neutronen von den Atomkernen im Stern eingefangen und zu schweren Elementen bis zum Element Wismut (*Bi*, Ordnungszahl 83). Die Langsamkeit (engl. *slowness*) dieses Prozesses gab ihm den Namen.

Andererseits können auf deutlich kürzeren Zeitskalen von Millisekunden in den **r-Prozessen** (engl. *rapid neutron capture*) ebenfalls Neutronen eingefangen werden. Dieser Prozess ist besonders relevant am Ende der Entwicklung massereicher Sterne, wenn sie in katastrophalen Sternexplosionen, den Supernovae oder sogar als Hypernovae, ihr Dasein als 'normaler' Stern beenden. Die auslaufende

Schockfront in der Explosion kann dabei so hohe Neutronendichten im interstellaren Medium erzeugen, dass der r-Prozess stattfindet. Typischerweise fangen mittelschwere Kerne in wenigen Sekunden bis Minuten mehrere hundert Neutronen ein! Die so neu gebildeten Kerne sind mit Neutronen stark übersättigt und in der Regel instabil: Sie zerfallen daher radioaktiv in α -, β - oder γ -Zerfällen. Auf diese Weise bilden sich verschiedenste Elemente (gemäß den so genannten *Soddy-Fajans-Verschiebungsgesetzen*), vor allem die schwereren Elemente mit Ordnungszahlen größer 26. Supernovae haben nahe am kollabierenden Sternkern ein neutronenreiches Milieu, das durch **Kernphotospaltung** des Eisens entsteht:



Durch die Neutronenanlagerungsprozesse formieren sich bevorzugt Atomkerne mit abgeschlossenen Neutronenschalen: Dies sind Kerne mit **magischen Neutronenzahlen**, wie 50, 82, 126,...

21.12.7 Die Sternenzwiebel

Da im Sterninnern der Temperaturgradient von innen nach außen abnimmt, brennen in massereichen Sternen in verschiedenen Schichten unterschiedliche Elemente, was man als **Schalenbrennen** bezeichnet. Daraus resultiert das prominente **Zwiebelschalenmodell**, wonach wie im Innern einer Zwiebel eine Blätterung unterschiedlicher fusionierter Elemente entsteht. Schwere Sterne haben deshalb im Innern einen **Eisenkern**, der den Gravitationskollaps am Ende der stellaren Entwicklung als Neutronenstern oder Quarkstern 'überleben' kann oder - bei sehr hohen Restmassen des Vorläufersterns - zu einem stellaren Schwarzen Loch kollabiert. Aktuell werden alternativ zum Schwarzen Loch die Gravasterne und Holosterne erforscht. Über sie ist noch relativ wenig bekannt, und es ist nicht klar, welchen kompakten Endzustand die Natur für die massereichsten Sterne vorsieht. Das klassische Schwarze Loch (Schwarzschild-Lösung, Kerr-Lösung) wird derzeit favorisiert.

21.12.8 Die Sonne auf die Erde holen

Das Fusionsfeuer brannte bereits auf der Erde. Für die Dauer von **etwa zwei Sekunden** gelang es, die *kontrollierte Fusion* von Wasserstoff in Gang zu halten. Viel früher wurde die *unkontrollierte Fusion* in der Wasserstoffbombe umgesetzt - mit fatalen Folgen.

Kernfusion soll kontrolliert und zum Wohl der Menschheit genutzt werden. Die hoffnungsvolle Eigenschaft der *Fusionskraftwerke* ist, dass sie äußerst effiziente Energieressourcen sind und der Brennstoff in ausreichender Menge - nämlich gebunden im Wasser - zur Verfügung steht. Das multinationale **ITER-Projekt** wird derzeit in Südfrankreich auf den Weg gebracht, um die Machbarkeit der Energieressource Fusion zu klären. Sollte das Gelingen, wären unsere Energieprobleme auf der Erde gelöst!

21.13 Tiefenfeldbeobachtung

Dieser Begriff ist eine deutsche Übersetzung des wesentlich gebräuchlicheren Fachwortes Deep Fields - siehe dort für eine detaillierte Erklärung.

21.14 Tierkreis

Der Tierkreis (*Zodiak*; von grch. 'zodiakos kyklos') ist eine Bezeichnung für zwölf bestimmte Sternbilder, die weder dem Südhimmel, noch dem Nordhimmel zugeordnet werden können. Sie sind sowohl von nördlichen, als auch von südlichen Breiten sichtbar - jedoch nicht alle zur gleichen Zeit.

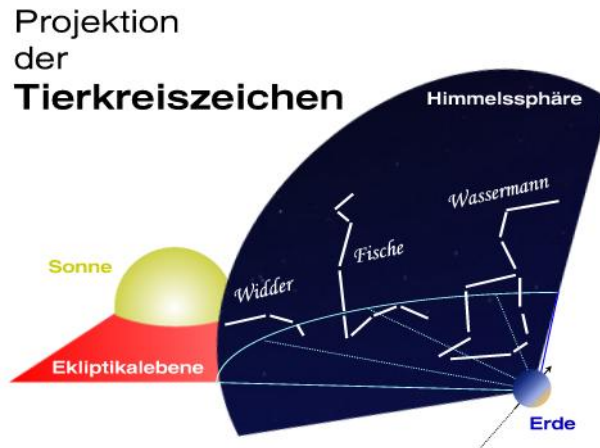


Abbildung 21.3: Ausschnitt des Tierkreises von der Erde aus betrachtet.

21.14.1 Und so heißen sie

Die Tierkreiszeichen, das sind Steinbock (*Capricornus*), Wassermann (*Aquarius*), Fische (*Pisces*), Widder (*Aries*), Stier (*Taurus*), Zwillinge (*Gemini*), Krebs (*Cancer*), Löwe (*Leo*), Jungfrau (*Virgo*), Waage (*Libra*), Skorpion (*Scorpius*) und Schütze (*Sagittarius*).

21.14.2 Was zeichnet den Tierkreis aus?

Das Besondere am Tierkreis ist seine relative Orientierung zur Bahnebene der Erde, der **Ekliptik**. Wenn wir als irdische Beobachter **entlang dieser Ebene** schauen, so sehen wir Sterne, die Teil sind von bestimmten Sternbildern. Dies sind gerade die Tierkreiszeichen! Abbildung 21.3 illustriert, wie man sich diese Anordnung von Erde, Ekliptik und Tierkreiszeichen geometrisch vorstellen muss: Der Beobachter kann nie alle zwölf Tierkreiszeichen gleichzeitig sehen, weil sie sich in einem Bogen um den Globus schlingen. Tagsüber, wenn die anderen Tierkreiszeichen auftauchen, die man nachts nicht sehen konnte, werden sie von der Sonne überstrahlt. Aber im Wechsel der Jahreszeiten darf der irdische Beobachter schließlich stolz behaupten, alle Tierkreiszeichen gesehen zu haben - falls er das Jahr über fleißig geschaut hat.

21.14.3 Ein 13. Tierkreiszeichen?

Wenn man wirklich genau entlang der Bahnebene schaut, entdeckt man auch Sterne, die nicht zu den zwölf genannten gehören, sondern zu einem Sternbild namens **Schlangenträger** (*Ophiuchus*). Der Schlangenträger befindet sich zwischen den Tierkreiszeichen Schütze und Skorpion. Er hat es leider nicht geschafft, zum elitären Kreis der zwölf Tierkreiszeichen zu gehören. Ein hypothetischer Grund für diesen Ausschluss könnte der Folgende sein: Auf die Frage 'Und was bist Du für ein Sternzeichen?' wollte niemand mit 'Schlangenträger' antworten.

Der Schlangenträger trägt tatsächlich eine Schlange, die ebenfalls ein Sternbild mit der internationalen Bezeichnung *Serpens* ist. In der griechischen Mythologie ist der Schlangenträger *Äskulap* (Asclepios, Aesculapius), der griechische und römische Gott der Heilkunst. Er wird symbolisiert durch eine Schlange, die sich um einen Stab windet. Dieses Symbol ist uns heute noch sehr gut aus der Medizin oder von dem Zeichen für Apotheken bekannt. Das ist ein schönes Beispiel dafür, wie tief verwurzelt die Astronomie in unserer Kultur und unserem Alltag ist.

21.14.4 Astrologie & Horoskope

Ein anderes Beispiel für die Verbindung von Astronomie und Alltag ist der Tierkreis selbst. In Gestalt des **Horoskops** sind uns die Tierkreiszeichen sehr vertraut. Unser Geburtstag legt unser **Sternzeichen** fest, weil sich die Sonne zum Zeitpunkt der Geburt in einem der zwölf Tierkreiszeichen befand. Denn auch die Sonne befindet sich immer in der Ekliptikalebene - genau wie die Planeten (siehe Abbildung oben).

Die **Astrologie**, die *Sterndeutung*, befasst sich gerade mit dem Einfluss der Himmelskörper im Sonnensystem auf das Schicksal eines jeden Menschen. Die Astrologie ist jedoch *keine* Naturwissenschaft, sondern eine rein empirische Disziplin. Es gibt sicherlich Einflüsse der Himmelskörper auf die Erde und allem, was sich auf ihr befindet, z. B. über die Gravitation. Jedoch ist der Einfluss der kosmischen Körper auf ein spezifisches, menschliches Wesen und die Persönlichkeit nicht naturwissenschaftlich zu begründen.

21.14.5 Licht im Tierkreis

Auch das **Zodiaklicht** ist nach dem Tierkreis benannt, weil dieses Licht seinen Ursprung in der Ekliptikalebene hat.

21.14.6 Buchtipp für mythologisch Interessierte

◇ *Fasching, G.*: Sternbilder und ihre Mythen, Springer-Verlag (1993); meine Rezension

21.15 TNO

Das Akronym TNO steht für **Trans-Neptunische Objekte** (engl. *trans-Neptunian objects*). Es bezeichnet planetenartige Himmelskörper jenseits der Plutobahn. Der seit 2006 zu Zwergplaneten zählende Pluto ist der TNO-Prototyp. Siehe auch Planet.

21.16 Topologie

Die Topologie ist ein Teilgebiet der Mathematik (grch. *τόπος*, *topos*: Ort). Sie hat die Klassifizierung von geometrischen Objekten nach ihren **Verknüpfungen** (engl. *connections*) in sich selbst und zu anderen geometrischen Objekten zum Gegenstand. Sie behandelt hingegen **nicht** die Form, Größe oder Krümmung von geometrischen Körpern. Objekte haben gleiche Topologie, wenn man sie kontinuierlich ineinander nur durch Deformationen überführen kann. Sie dürfen bei dieser Transformation nicht zerrissen oder neu miteinander verknüpft werden.

21.16.1 Klarheit durch Beispiele

Das klingt nun bis hierhin sehr abstrakt und missverständlich, wird aber anhand von Beispielen klar: Kugel, Ellipsoid, Zylinder und Quader gehören derselben topologischen Klasse an, weil man sie durch Drücken und Verbiegen ineinander überführen kann. Verbiegt man nun den Zylinder zu einem offenen Ring und schließt seine Flächen einander an, entsteht **etwas topologisch Neues**: der schlauchförmige Torus. Die Verknüpfungen wurden geändert und der Torus besitzt nun ein Loch wie ein Fahrradschlauch. Diese neue Eigenschaft fehlt dem Zylinder, aus dem der Torus hervorging. Deshalb sind Zylinder und Torus topologisch verschieden.

21.16.2 Aufgabe der Topologie

Die Topologie teilt Punktmengen (Kurven, Flächen, Räume) gemäß ihrer Verknüpfungseigenschaften in topologische Klassen. Wesentliche Attribute sind die Begriffe **offen** und **geschlossen**, die man sich leicht am Torus klarmachen kann.

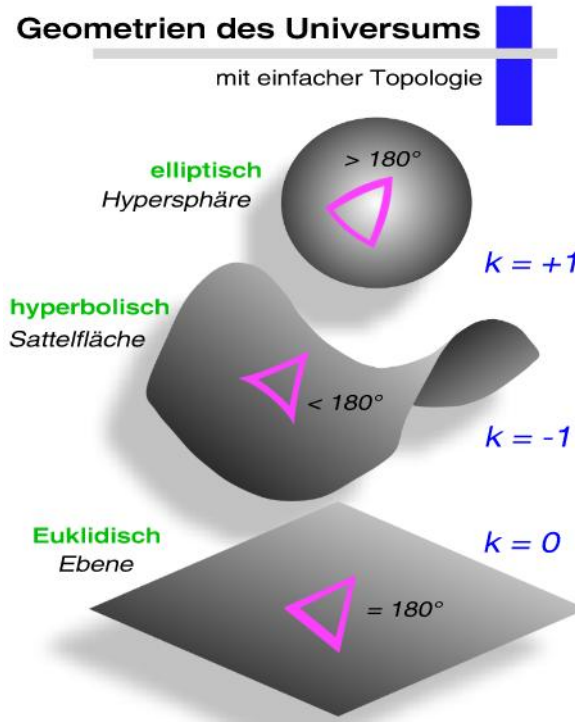


Abbildung 21.4: Topologie: 2D-Analoga der drei Geometrien des Universums mit simpler Topologie.

21.16.3 Topologie in der Astronomie

In der modernen Kosmologie stellt sich die Frage nach der **Topologie des Universums**. Die Formulierung der relativistischen Kosmologie basiert auf der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). In den Friedmann-Weltmodellen kann man verschiedene Universen klassifizieren, die sich im Krümmungsparameter, der kosmologischen Konstante und vorhandenen Energieformen (Dichteparametern) unterscheiden. In den FLRW-Modellen ist die globale Krümmung des Universums konstant, wie bei einer Kugeloberfläche. Das legt dem Riemannschen Krümmungstensor Beschränkungen auf. Sämtliche Krümmungseigenschaften des Universums werden dann vom Krümmungsparameter k absorbiert. Er entscheidet über die **Geometrie des Universums**:

- ◇ $k = -1$ hyperbolische Geometrie (oder *Bolyai-Lobatschewski-Geometrie*)
- ◇ $k = 0$ Euklidische Geometrie
- ◇ $k = +1$ elliptische Geometrie (oder *Riemannsche Geometrie*)

Die Euklidische Geometrie ist im Prinzip die Geometrie, die man aus der Schulmathematik kennt. Es ist die **ebene Geometrie**, in der das *Parallelenaxiom* (Euklids 5. Axiom) gilt. Unter dieser Voraussetzung beträgt die Winkelsumme im Dreieck exakt 180° . In der **sphärischen Geometrie**, wo man Dreiecke auf Kugeloberflächen beschreiben kann, gilt das nicht mehr; hier liegt die Winkelsumme zwischen 180° und 540° (*sphärischer Exzess*). Auf einer **Sattelfläche**, die eine negative Krümmung aufweist, ist hingegen die Winkelsumme eines Dreiecks kleiner als 180° . Die Abbildung 21.4 illustriert nun die zweidimensionalen Analoga zur Geometrie mit jeweiliger Krümmung. Die dargestellten Flächen stellen **nur eine topologische Variante** von vielen dar.

21.16.4 Wissen aus der Hintergrundstrahlung

Die astronomische Beobachtung fixiert kosmologische Parameter, wie die Hubble-Konstante, die Beiträge einzelner Energieformen des Universums (baryonische Materie, Dunkle Materie, Dunkle Energie) und eben auch den Krümmungsparameter des Universums. Bei der Messung wird sehr genau die Intensitätsverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung am gesamten Himmel analysiert. Die Hintergrundstrahlung stellt eine Art 'Urstrahlung' dar, die als erste elektromagnetische Emission den Kosmos durchflutete, als dieser weniger dicht und damit transparent genug war. Ihre Isotropie und Form eines Planck-Strahlers (mit einer Temperatur von knapp 3 Kelvin, daher auch Drei-Kelvin-Strahlung) bezeugen den Urknall. Die Hintergrundstrahlung wurde in der Rekombinationsära bei einer Rotverschiebung von $z = 1100$ ausgesandt. Sie enthält **zahlreiche Strukturinformationen des Universums** in Form von Anisotropien, also geringfügigen Intensitätsschwankungen, die in jeder Raumrichtung anders sind. Eine Messung dieser Unregelmäßigkeiten (deshalb übrigens der Akronymbestandteil *anisotropy probe* in WMAP) der Hintergrundstrahlung im Bereich von Mikrokkelvin kommt daher einer Bestimmung von Dichteschwankungen gleich, die sich wellenförmig im Universum ausgebreitet haben. Sie befinden sich wie ein Abdruck in der kosmischen Hintergrundstrahlung, als geringfügige Abweichung vom Planck-Strahler. Jede dieser Dichtewellen weist **Obertöne** auf, genauso wie eine schwingende Klavier- oder Gitarrensaite. Die relative Gewichtung der einzelnen Obertöne ist charakteristisch für die Saite und legen ihre physikalischen Eigenschaften fest. Diesen Umstand macht man sich in der experimentellen Kosmologie zunutze, um aus der relativen Gewichtung der Obertöne die Eigenschaften des Universums zu messen.

mathematische Randbemerkung zu Multipolen

Die Strahlungsverteilung wird dabei durch geeignete Funktionen angenähert, die auf einer Kugeloberfläche (nämlich der komplett beobachtbaren Himmelssphäre) definiert sind. Die **Kugelflächenfunktionen** (engl. *spherical harmonics*) sind eine geeignete Basis, um beliebige Verteilungen auf einer Kugelfläche wiederzugeben. Denn sie bilden ein vollständiges, orthonormales System (VONS) auf der Sphäre. D.h. so wie man jeden beliebigen 3er-Vektor in die kartesischen Einheitsvektoren (e_x, e_y, e_z) zerlegen kann, kann man jede beliebige Verteilung auf einer Kugelsphäre in unterschiedlich gewichtete Kugelflächenfunktionen zerlegen. In der Physik heißen die Obertöne **Multipole**. Sie werden eindeutig durch die Wellenzahl l charakterisiert. Die niedrigen Multipol-Ordnungen, kleine Werte von l , haben Namen bekommen: $l = 0$ nennt man den Monopol ($2^0 = 1$), $l = 1$ den Dipol ($2^1 = 2$), $l = 2$ den Quadrupol ($2^2 = 4$), $l = 3$ den Oktupol ($2^3 = 8$), $l = 4$ den Hexadekapol ($2^4 = 16$) etc.

Die Daten des Mikrowellen-Satelliten **WMAP** (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) geben die Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung sehr präzise wieder. Die einzelnen Gewichte der Obertöne (mit bestimmten Wert von l) sind also sehr gut bekannt.

Ergebnis: das Universum ist flach

Daraus kann man den Satz kosmologischer Parameter inklusive Krümmungsparameter ableiten und findet ziemlich genau einen Wert von $k = 0$. Die Diagnose lautet also, dass wir in einem **flachen Universum** leben. Damit ist die Geometrie festgelegt: Sie ist Euklidisch. Aber die Relativitätstheorie lässt die **Frage nach der Topologie** noch offen. Sie ist *nicht* durch Einsteins Feldgleichungen festgelegt. Oft wird dieser topologische Aspekt der Kosmologie vernachlässigt und unterschätzt - auch von Kosmologen.

Man kann zu den genannten k -abhängigen Geometrien geometrische Figuren assoziieren: Für $k = +1$ stellt sich heraus, dass man es mit einer Verallgemeinerung der zweidimensionalen Kugelsphäre zu tun hat: der dreidimensionalen Sphäre oder **Hypersphäre**. Für $k = 0$ findet man das bekannte Linienelement der Euklidischen 3-Metrik. Diesen Raum kann man sich vorstellen, wie eine **unendlich ausgedehnte, ebene Fläche** in der Form eines Blatts Papier. Für $k = -1$ findet man einen **dreidimensionalen Hyperboloid**. Dieser kann *nicht* mehr in einen Euklidischen Raum eingebettet

werden, aber in einen Minkowski-Raum der Signatur $+2$ (also $-+++$, siehe dazu Metrik). Das Volumen des Hyperboloids ist unendlich.

21.16.5 Bedeutung der kosmischen Topologie

Mit der Topologie verbindet sich die spannende Frage, ob das **Universum geschlossen** (endlich) oder **offen** (unendlich) ist. Man kann mathematisch zeigen, dass unterschiedliche Topologien im Allgemeinen verschiedene Volumina haben. Ein einfaches Beispiel ist der Torus. Er hat endliches Volumen und eine **räumlich geschlossene Topologie**. Schneidet man ihn entlang seiner Symmetrieachse auf und verbiegt das schlauchförmige Gebilde, so erhält man einen Zylinder (Umkehrung des Beispiels vom Beginn dieses Eintrags). Dieser könnte nun ebenso ein unendliches Volumen haben, wenn er sich unendlich weit entlang seiner Symmetrieachse erstreckte. Dann hätte er eine **räumlich offene Topologie**.

21.16.6 Wie misst man die Topologie des Universums?

Zu jedem Wert des Krümmungsparameters k existiert eine unendliche Anzahl möglicher Topologien! Räume positiver Krümmung, $k = +1$, sind alle geschlossen. Für andere Werte von k sind sowohl geschlossene, als auch offene Topologien möglich. Ein erstes Kriterium ist die Endlichkeit bzw. Unendlichkeit des Volumens des Universums. In einem unendlich ausgedehnten Universum sollten alle Wellenzahlen l vertreten sein.

21.16.7 Das Universum - ein Fußball?

Die Diagnose von WMAP ist jedoch, dass besonders lange Dichtewellen fehlen! Dies spricht demnach für ein endliches Universum. Der Astrophysiker *Jean-Pierre Luminet* und sein Team gingen nun den direkten Weg und leiteten die Topologie aus den gemessenen Obertönen ab. Das Resultat ist das geschlossene, elliptische **Dodekaeder-Universum**. Die charakteristischen Intensitäten von Quadrupol und Oktupol, sowie den kleinskaligen Temperaturschwankungen deutlich höherer Ordnungen ($l = 900$), kann man dieses Universum zuordnen. Das Dodekaeder-Universum setzt sich aus 12 Pentagon-Dodekaedern zusammen, die eine Hypersphäre bilden. Die Hypersphäre ist die 3D-Oberfläche einer 4D-Kugel. Das Pentagon-Dodekaeder ist ein fußballähnliches Gebilde, dass sich aus 12 Pentagonen (Fünfecken) zusammensetzt. Es gehört zu den fünf **Platonischen Körpern**, konvexen, geometrischen Körpern, die sich aus regelmäßigen Polygonen (Vielecken) konstituieren. Die Verhältnisse im Dodekaeder-Universum sind etwas komplexer. Dort erzeugen 120 Pentagon-Dodekaeder die Hypersphäre. Im Dodekaeder-Modell wurde also **kein flaches Universum** angenommen, sondern $k = +1$, ein 3D-Analog zur 2D-Kugeloberfläche. Diese Geometrie wurde von *Luminet et al.* vorgeschlagen, weil sie bisher **von WMAP-Daten nicht ausgeschlossen** werden kann. Die Abweichung vom flachen Universum ist allerdings gering: der totale Dichteparameter beträgt im Dodekaeder-Universum etwa 1.013. Erst noch genauere Messungen mit dem Mikrowellen-Satelliten **PLANCK** (geplanter Start Juli 2008) werden erlauben, die Dodekaeder-Topologie des Universums zu bestätigen oder zu widerlegen. Vielleicht etabliert sich dann endgültig das alternative Euklidische Universum.

21.16.8 Das Universum - doch eher ein Schultüte?

Es sind jedoch nach wie vor auch hier unterschiedliche Topologien möglich. Im Jahr 2004 kam eine weitere nicht triviale Topologie hinzu, die auch die WMAP/COBE-Beobachtungen erklären kann: Das hyperbolische Horn-Universum von *Aurich et al.* Leben wir vielleicht in einer riesigen, verbogenen 'Schultüte'?

21.16.9 verrückte Effekte bei komplizierteren Topologien

Unterschiedliche Topologien führen zu ganz erstaunlichen Eigenschaften des Universums. Nehmen wir einmal vereinfachend an, unser Universum sei ein 3D-Würfel, also endlichen Volumens. Nun möge die Topologie so festgelegt sein, dass immer, wenn ein Objekt das Universum an einer Berandungsfläche des sechseckigen Würfels verlässt, es an dessen gegenüberliegenden Berandungsfläche eintreten möge. Das Universum wäre gar nicht so leicht als eines endlichen Volumens zu erkennen. Lichtstrahlen würden das kubische Universum an einer Seite verlassen und auf der anderen wieder hineinkommen. Die Folgen wären '**kosmische Fata Morganen**' oder 'Phantombilder'. Es ist vergleichbar mit dem Effekt von Gravitationslinsen, nur dass die Trugbilder durch unterschiedliche topologische Anschlussbedingungen (*Identifikationen*) resultieren. Dies kann man deshalb als '**topologisches Linsen**' bezeichnen.

21.16.10 Wie bemerkt man topologische Linsen?

Auf solche Weise könnte das Universum tatsächlich kleiner sein, als man bei einfachen Topologien annimmt. Wir lebten in einer riesigen optischen Täuschung! Die Trugbilder wären gar nicht so einfach zu entlarven, weil die Strahlung aus unterschiedlichen Entfernungen (verschiedene Rotverschiebung z) über unterschiedliche Lichtwege (verschiedene Extinktionen des intergalaktischen Mediums) zu uns gelänge. Die Bilder ein und desselben beobachteten kosmischen Objektes könnten unterschiedliche Farbe, Form und Orientierung - unterschiedliche spektrale Eigenschaften - haben, die **perfekte Täuschung!**

Gravitationslinsen haben Beobachter bereits in vielfältiger Weise verifiziert (Abell-Katalog). Möglicherweise findet man bald Kandidatenobjekte, die aus topologischem Linsen folgten. Ihre Unterscheidung von Gravitationslinsen dürfte dabei sicher eine Hürde darstellen. Die Diskussion topologischer Aspekte des Universums zeigt, dass die beobachtende Kosmologie hier einer großen Herausforderung gegenübersteht. Die Frage nach der offenen oder geschlossenen Topologie des Universums, nach Unendlichkeit versus Endlichkeit muss vertagt werden.

21.16.11 Literatur und Webtipps

- ◇ Publikation: *Luminet et al.* 2003, Papier zum Dodekaeder-Universum, astro-ph/0310253 (erschieden in Nature 425, 593, 2003)
- ◇ Software: Computergraphik in gekrümmten Räumen, eignet sich zur Visualisierung des Dodekaeder-Universums (kostenfrei!)
- ◇ Buch: *Hubert Goenner*, Einführung in die Kosmologie (1994), Spektrum Akademischer Verlag
- ◇ Buch: *Kip S. Thorne*, Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy (1994), Papermac London
- ◇ Website: Mikrowellen-Satellit Planck

21.17 topologische Defekte

Topologische Defekte sind Phänomene, die immer mit der **spontanen Brechung einer Symmetrie** zusammenhängen. Diese findet man in ganz unterschiedlichen Teilbereichen der Physik, wie der Festkörperphysik, Teilchenphysik und Kosmologie. Als alternative, deutsche Bezeichnung verwendet man auch 'Fehlstellen'.

21.17.1 Einsatzbereiche des Higgs-Mechanismus

In der theoretischen Physik beschreibt man spontane Symmetriebrechungen mit dem **Higgs-Mechanismus**. Im Speziellen suchen die Teilchenphysiker nach dem letzten Teilchen des Standardmodells, dem Higgs-Teilchen, dass gerade die Symmetrie der X-Kraft bricht. Daraus gehen

die drei uns vertrauten Naturkräfte hervor: die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung (Gravitation gab es schon vorher in Koexistenz mit der X-Kraft).

Der Higgs-Mechanismus kann jedoch auch auf andere spontane Symmetriebrechungen angewendet werden. Je nach Ansatz für das Skalarfeld, finden sich unterschiedliche Topologien für die **Vakuum-Mannigfaltigkeit**. So generieren

- ◇ eindimensionale, reelle Higgs-Felder **Vertizes** (Punkte);
- ◇ dreidimensionale, reelle Higgs-Felder **Domänengrenzflächen** (Domänenwände, *domain walls*);
- ◇ komplexe Higgs-Felder **eindimensionale Vertex-Linien**, die im kosmologischen Kontext kosmische Strings heißen;
- ◇ und vierdimensionale, komplexe Higgs-Felder **Texturen**.

21.17.2 Defekte zeigen volle Symmetrie!

Das Faszinierende an topologischen Defekten ist, dass *in ihrem Innern die Symmetrie erhalten* geblieben ist, die außerhalb der Defekte gebrochen ist. So sollte in Defekten, die mit der Brechung der GUT-Symmetrie einhergehen, die X-Kraft mit der Gravitation vorherrschen.

21.17.3 Defekte beeinflussen Kosmologie?

Der kosmologische Einfluss von topologischen Defekten wurde erstmals von *Tom Kibble* im Jahre 1976 untersucht (**Kibble-Mechanismus**). Sie mögen von kosmologischer Relevanz sein, weil sie eine wesentliche Rolle in der Entstehung der **großräumigen Strukturen** im Universum (engl. *large-scale structure*) gespielt haben könnten. In der Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung sollten sie als Anisotropien gemessen werden können.

Bislang gibt es **keinerlei Beobachtungsevidenz** für die Existenz kosmischer topologischer Defekte wie Domänenwänden oder kosmischen Strings, weder in den COBE- noch in den WMAP-Daten. Aber die Beobachtungsdaten beschränken Eigenschaften topologischer Defekte, und selbst falls es sie definitiv nicht geben sollte, gibt es wichtige Implikationen: Topologische Defekte könnten durch die Symmetriebrechung einerseits entstanden sein und aufgrund ihres negativen w -Parameters die Inflation getrieben haben (nämlich zu Beginn der Inflationsära, auf der GUT-Skala von 10^{16} GeV bzw. 10^{29} Kelvin). Andererseits könnten sie aber auch im Zuge der Expansion und der damit verbundenen Ausdünnung zerstört worden sein. Das ergibt das interessante Szenario, dass das (zumindest unser) Universum ein **Autoregulativum** sei, das sich durch die Erzeugung topologischer Defekte aufblähe und der Kondensation von Materie an topologischen Defekten vielleicht wieder zusammenziehen könne, wenn die kritische Dichte (siehe Friedmann-Weltmodell) überschritten werde.

21.17.4 Spekulationen um ein Netzwerk kosmischer Strings

So postuliert man bei den kosmischen Strings ein ganzes, interagierendes Netzwerk, das durch die so genannte *Interkommutation* (Austausch von Stringteilen) sich ständig neu formierte, aber durch die Dissipation der in den Strings enthaltenen Feldenergie auch langsam zerfiel.

Für kosmische topologische Defekte kann man einen eos-Parameter von $w = -2/3$ ableiten. Damit kommen sie als eine mögliche Quelle der Dunklen Energien in Betracht, die die kosmische Repulsion vorantreiben. Anmerkung: Nur die Phantom-Energie unterbietet diesen negativen w -Parameter und endet in einem Extrem der Ausdehnung: dem Big Rip.

Topologische Defekte könnten auch eine Quelle kosmischer Strahlung im UHE-Bereich sein. In Frage kommen zum Beispiel **Hybrid-Defekte** aus Monopol und Kosmischem String oder **magnetische Monopole**, die in intergalaktischen Magnetfeldern beschleunigt werden. Dies würde den GZK-cut-off verhindern und seine bisherige Nicht-Verifikation erklären.

21.17.5 spekulativ: kosmische Strings zünden GRBs?

Eine alternatives (nicht konservatives) Modell zur Beschreibung von Gamma Ray Bursts (GRBs) sieht ebenfalls einen Zusammenhang zu kosmischen Strings. In ihrer supraleitenden Erweiterung geht man davon aus, dass es zur gebündelten, kurzzeitigen Emission hochenergetischer, elektromagnetischer Strahlung kommen muss. Eine anschauliche Erklärung ist, dass sich kosmische Strings auf dem Hintergrund interstellarer und intergalaktischer Magnetfelder bewegen und dabei Photonen emittieren. An den 'Spitzen' (*cusps*) der Strings muss diese Emission besonders hochenergetisch sein. Dieses alternative GRB-Modell hat jedoch keinen nennenswerten Zulauf unter den Astrophysikern erhalten.

Ebenso kann man auch eine niederenergetische, aber scharf gebündelte Strahlungsemission an den *cusps* ansetzen. Diese Photonen werden über Compton-Streuung (vergleiche Comptonisierung) noch weicher, übertragen aber ihre Energie auf das Plasma in der Umgebung. Dabei können so hohe Lorentz-Faktoren erreicht werden, dass sich eine Schockwelle ausbilden kann. Dann läuft die Argumentation analog zum klassischen Feuerball-Modell der GRBs (siehe dazu unter GRBs). Offensichtlich scheint dieses Modell nicht in Widerspruch zu den Beobachtungen zu sein. Die gemessene Häufigkeit der GRBs und deren räumliche Verteilung muss mit der theoretisch erwarteten kosmischen Verteilung des (supraleitenden) String-Netzwerks verglichen werden.

21.17.6 Literaturquellen

- ◇ *Y. V. Dumin*, hep-ph/0308184 (2003),
- ◇ *A. Gangui*, astro-ph/0303504 (2003),
- ◇ *M. Sakellariadou*, hep-ph/0212365 (2002),
- ◇ *T. W. B. Kibble*, cond-mat/0111082 (2001), und sein erstes Papier zum Thema *Topology of cosmic domains and strings*, *J. Phys. A* 9, 1387 (1976)
- ◇ *V. Berezhinsky, B. Hnatyk & A. Vilenkin*, astro-ph/0001213 (2000),

21.18 Torsionstensor

Der Torsionstensor ist allgemein definiert als die Differenz zweier metrischer Zusammenhänge, die gerade vertauschte kovariante Indizes haben:

$$T_{\mu\nu}^{\lambda} = \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} - \Gamma_{\nu\mu}^{\lambda}.$$

Ist diese Differenz endlich, also verschieden von null, so ist eine Torsion ('Verdrillung') der Mannigfaltigkeit vorhanden.

21.18.1 ART ist torsionsfrei

In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) entsprechen die metrischen Zusammenhänge gerade den Christoffel-Symbolen (oder *Levi-Civita-Zusammenhänge*, Γ s in der Gleichung). Gravitationstheorien, die auf dem **Äquivalenzprinzip** basieren sind, haben **symmetrische** Christoffel-Symbole. Demzufolge verschwindet der Torsionstensor in der ART, und Relativisten sprechen dann von **Torsionsfreiheit** der Theorie.

21.18.2 Tensoreigenschaften

Der Torsionstensor ist ein Tensor vom Typ (1,2), also ein Tensor dritter Stufe, während die Christoffel-Symbole selbst **keine Tensoren** sind. Der Torsionstensor darf nicht mit dem Energie-Impuls-Tensor verwechselt werden, der ebenfalls mit dem Buchstaben *T* bezeichnet wird. Die unterschiedlichen Tensorstufen mögen als Unterscheidungskriterium dienen. Normalerweise besteht in der ART auch deshalb keine Verwechslungsgefahr, weil der Torsionstensor kaum betrachtet wird, weil er verschwindet.

21.18.3 Hat die Gravitation eine Torsion?

Die Differentialgeometrie kennt sicher Mannigfaltigkeiten, wo das nicht der Fall ist, sie finden aber keine Anwendung in der Relativitätstheorie.

Es gibt aber auch Forscher, die versuchen eine **Gravitationstheorie mit Torsion** aufzuziehen. Diese Gravitation ist komplizierter, weil neue Zusatzterme auftauchen, die in der ART verschwinden. Bisher gibt für eine Gravitation mit Torsion keine Anhaltspunkte in der Natur.

21.19 Trägheit

Die Trägheit ist eine Eigenschaft von **Massen**. Trägheit bedeutet, dass jeder Körper versucht in seinem Bewegungszustand zu verharren und einer Bewegungsänderung einen Widerstand entgegensetzt: Ruhende Objekte setzen einer Bewegung Widerstand entgegen; bewegte Objekte setzen der Abbremsung oder Ablenkung einen Widerstand entgegen. Das ist gerade die Aussage des *Trägheitsgesetzes*, dem ersten der drei Newtonschen Gesetze. Aber warum ist das so, dass Massen träge sind?

21.19.1 Newtonsche Gravitationskraft

Massen ziehen sich über Gravitationskräfte an. Dies konnte schon der englische Physiker und Mathematiker *Sir Isaac Newton* im 17. Jahrhundert mit seinem **Newtonschen Gravitationsgesetz** belegen. Die Gleichung für die **Gravitationskraft** lautet:

$$F = G \frac{Mm}{r^2}.$$

Hierin sind G die Gravitationskonstante mit einem Zahlenwert von $6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, M und m zwei Massen, die sich in einem Abstand r befinden mögen. Die Kraft hat den typischen Abfall mit r^{-2} (wie das Coulomb-Gesetz der Elektrostatik). Physiker sprechen auch von einem **1/r-Potential**. Die Kraft ist gerade der negative Gradient dieses Potentials.

21.19.2 Der lange Arm der Schwerkraft

Diese gravitative Wechselwirkung hat eine **unendliche Reichweite**. Für große Zahlenwerte von r wird die Gravitationskraft zwar sehr klein, bleibt aber endlich. Vor allem kann die Gravitationskraft nicht nur Ladungen anderer Polarität abgeschirmt werden: es gibt keine 'negativen Massen'! Das ist der wesentliche Unterschied zwischen Gravitation und elektromagnetischer Kraft. Die unendliche Reichweite spiegelt sich auch darin wider, dass das (hypothetische) Graviton der Quantenfeldtheorien **Ruhemasse null** habe.

Diese lange Reichweite hat zur Konsequenz, dass sich letztendlich *alle Massen* im Universum (theoretisch) spüren. Man kann deshalb sagen, dass die träge Eigenschaft einzelner Massen eine Folge davon ist, dass sie mit allen anderen Massen in Wechselwirkung steht.

21.19.3 Gravitationskraft braucht Zeit zum Ausbreiten

Die Wechselwirkung ist aber **nicht instantan**, wie Newton annahm, sondern breitet sich mit endlicher Geschwindigkeit, der **Vakuumlichtgeschwindigkeit** c , aus. So breiten sich Gravitationswellen, wie sie in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) beschrieben werden, mit Lichtgeschwindigkeit aus.

21.19.4 Äquivalenzprinzip

Das Äquivalenzprinzip fordert, dass **träge und schwere Masse äquivalent** seien. Man kann also in einem abgeschlossenen Kasten nicht entscheiden, ob er sich ruhend in einem Gravitationsfeld befindet oder durch eine konstante Kraft gleichmäßig beschleunigt wird. Das Prinzip ist einer der Pfeiler der ART.

21.19.5 Trägheitskräfte

Als Trägheitskräfte (engl. *inertial forces*) bezeichnet man Kräfte, die auftreten, wenn ein Bezugssystem beschleunigt wird. So sind Zentrifugalkraft und Corioliskraft zwei Trägheitskräfte, die in rotierenden Bezugssystemen (die nicht inertial sind) auftreten. Trägheitskräfte nennt man auch *Scheinkräfte*, weil ihr Auftreten vom Bezugssystem abhängt. Trägheitskräfte korrigieren gewissermaßen die Newtonsche bzw. relativistische Mechanik, wie sie aus verschiedenen Systemen betrachtet wird: Das eine System sei ein Inertialsystem und habe einen inertialen Beobachter darin. Das andere System rotiere und ist deshalb ein Nicht-Inertialsystem mit einem rotierenden, nicht-inertialen Beobachter. Der rotierende Beobachter spürt nun Trägheitskräfte, beispielsweise wenn er in einem Karussell sitzt und ihn die Zentrifugalkraft nach außen drängt. Aber der inertielle Beobachter, der beispielsweise von außen das Karussell betrachtet, spürt keine Trägheitskräfte. Aus seiner Sicht versuchen die Trägheitskräfte die Bewegung des nicht-inertialen Beobachters inertial, nämlich geradlinig, zu machen.

21.20 transient

In der Astronomie verwendet man einige Eigenschaftswörter, um das zeitliche Verhalten der Strahlungsemission oder der Helligkeit einer kosmischen Quelle zu charakterisieren.

21.20.1 Definition von transient

Das Attribut *transient* bezeichnet eine Helligkeitsvariation, die **nur gelegentlich und unregelmäßig auftritt**. Dieser Helligkeitsvariation kann **keine Periodendauer** zugeordnet werden.

21.20.2 Eine Frage der Perspektive

Die Beurteilung, welchen Charakter die Helligkeitsvariation hat, ist **abhängig vom Beobachter**. Die Ursache dafür ist die Relativität des Zeitbegriffs, denn die Relativitätstheorie führt zu Effekten wie der Zeitdilatation. Das kann im Extremfall dazu führen, dass beispielsweise die Transienz einer Quelle in eine Persistenz umschlägt.

Die Klassifikation ist ebenfalls eine **Frage der Zeitskala**. Transiente Phänomene sind typischerweise kurzzeitig und dauern Minuten bis Tage. Der Begriff wird vor allem in der Stellarphysik gebraucht.

21.20.3 Beispiele

In der Astronomie sind z. B. die Helligkeitsvariationen von einigen Veränderlichen sowie Novae, von einigen Röntgendoppelsternen (z. B. *soft X-ray transients*, SXTs) und von bestimmten X-ray burstern transient.

21.20.4 weitere Bezeichnungen

Andere Bezeichnungen für die Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens sind periodisch, quasi-periodisch und persistent.

21.21 Transit

Bei der Bedeckung der Sonne durch einen inneren Planeten (Merkur, Venus) oder einen anderen Himmelskörper (z. B. Kometen) oder auch bei der Bedeckung eines Sterns durch einen extrasolaren Planeten sprechen Astronomen von einem **Transit**, im Deutschen auch *Durchgang* genannt. Dabei nimmt die Helligkeit der Sonne bzw. des Sterns für einige Zeit ab.

21.21.1 Praktisch! Das passiert auch extragalaktisch

Dieses Phänomen tritt im Prinzip auch bei weit entfernten (galaktischen oder extragalaktischen) **Doppelsternsystemen** auf, z. B. bei Röntgendoppelsternen. Bei geeigneter Orientierung zum irdischen Beobachter kommt es vor, dass sich der eine Stern vor den anderen schiebt und dabei die Gesamthelligkeit beider Sterne abnimmt. Solche Systeme heißen **Bedeckungsveränderliche** - Transit ist dann kein gebräuchlicher Ausdruck.

21.21.2 Eklipsen

Transits sind zu unterscheiden von den Eklipsen (Sonnen- und Mondfinsternisse). In gewisser Weise ist eine Sonnenfinsternis ein extremer Transit, bei dem die Mondscheibe die Sonnenscheibe abdeckt.

21.22 Triple-Alpha-Prozess

Der Triple-Alpha-Prozess oder auch *Salpeter-Prozess*, meist **Heliumbrennen** genannt, ist ein wichtiger Mechanismus zur Energieumwandlung (Energie'gewinnung') aus thermonuklearer Fusion (siehe dort für Details) in massearmen bis mittelschweren Sternen. Eine wichtige Voraussetzung ist eine **hohe Gasdichte**. Die Bezeichnung 'Triple-Alpha' bezieht sich auf die **drei** beteiligten Helium-4-Kerne (α -Teilchen, siehe auch α -Zerfall) in diesem Prozess.

21.23 T Tauri Sterne

T Tauri Sterne sind ein Typus von jungen, stellaren Objekten, den YSOs. Es handelt sich um junge Sterne (nur 10^5 bis 10^7 Jahre alt), die sich zu 'normalen Sternen' entwickeln. Im normalen Stadium werden sie dann zu Hauptreihensternen, die demnach die Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms bevölkern.

21.23.1 T Tauris flackern

Sie bewegen sich noch senkrecht zur Hauptreihe, d. h. variieren in der Helligkeit, was durch den Akkretionsprozess verursacht wird. Durch Akkretion können diese Protosterne einen protostellaren Jet speisen. Dann tritt die Umgebung des T Tauri Sterns als Herbig-Haro-Objekt in Erscheinung.

21.23.2 T Tauris blasen

T Tauri Sterne beginnen gerade durch **starke Sternenwinde** ihre Umgebung 'leerzufegen'. Dabei wird die **akkretierende Staubscheibe** nach und nach abgebaut. Dieser Prozess des Staubabbaus wird auch durch die **Planetenbildung** in der protoplanetaren Scheibe (engl. *protoplanetary disk*, kurz **Proplyd** genannt) unterstützt. Unter dem Eintrag Ekliptik gibt es Details dazu und zur Entstehung der Sonne nachzulesen.

21.23.3 Linien schwächeln

Am Ende steht ein entwickelter T Tauri Stern, ein so genannter *Weak-lined T Tauri Star*, also ein T Tauri Stern mit schwachen Emissionslinien. Die starken Wasserstoff- und Kalziumemissionslinien, wie man sie von klassischen T Tauri Sternen kennt, sind durch den Verlust des Staubes nur noch sehr schwach.

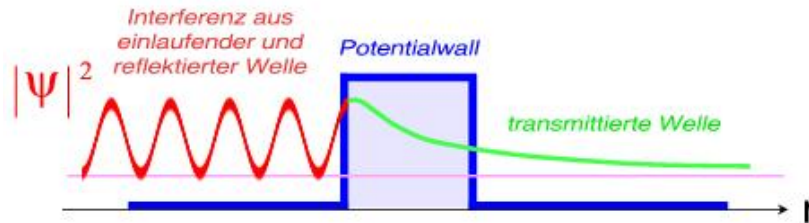


Abbildung 21.5: Tunneln einer Welle durch einen Potentialwall.

21.23.4 Spektraltyp, Prototyp

Vom Spektraltypus her belegen T Tauri Sterne den unteren Bereich der Spektralsequenz: G, K und M. Der Prototyp *T Tauri* im Sternbild *Taurus* (dt. Stier) hat Spektraltyp G5e und wurde als Klasse veränderlicher Sterne 1945 von dem US-Astronomen *A. Joy* etabliert.

21.24 Tunneleffekt

Dieser Effekt ist nur durch die **Quantentheorie** zu erklären und besitzt **kein klassisches Analogon**. Deshalb bereitet der Tunneleffekt - wie viele Aspekte der Quantenwelt - häufig Verständnisprobleme. Eines sei vorweggenommen: der Tunneleffekt hat nichts mit dem Tunnelblick zu tun.

21.24.1 Wellenfunktion und Aufenthaltswahrscheinlichkeit

In der quantentheoretischen Beschreibung stellt man Teilchen als **Wellenfunktion** dar. Die Lösungen der fundamentalen **Schrödinger-Gleichung** des Problems liefern die möglichen *Energiezustände* (oder Eigenfunktionen, repräsentiert durch die Wellenfunktionen) und die *Energieeigenwerte* (das **Spektrum**). Die Energie eines Quantensystems ist **nicht kontinuierlich**, sondern in diskreten Portionen, den Energiequanten, gepackt. Die Absolutquadrate der Wellenfunktionen sind von besonderer Relevanz, weil sie die **Aufenthaltswahrscheinlichkeiten** des beschriebenen Teilchens in einem Raumbereich angeben. Das typische Beispiel sind die **Orbitalwolken** des Wasserstoffproblems, die gerade die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für Elektronen angeben.

21.24.2 endliche Wahrscheinlichkeit an verbotenen Orten

Wenn man nun die Schrödinger-Gleichung für verschiedene Bereiche eines **Potentials** (beispielsweise einer Stufenfunktion, wo das Potential von null auf einen konstanten Wert springt) löst, stellt man fest dass die Wellenfunktion bzw. deren **Absolutquadrat im klassisch verbotenen Bereich endlich werden kann!**. Was bedeutet das anschaulich? Das Diagramm 21.5 zeigt eine Wellenfunktion (rot) links von einem Potentialwall, die sich von links nach rechts ausbreiten möge. Die Koordinate r parametrisiert den Ort der Welle (hier: eindimensionales Problem). Ein vergleichbares, klassisches (unquantisiertes) Problem wäre beispielsweise eine von links einlaufende Wasserwelle, die auf ein Hindernis rechts, z. B. einen Deich, trifft. Der Potentialwall entspricht dem Deich. Klassisch ist klar: Wenn die Wasserwelle zuwenig kinetische Energie mitbringt, bleibt das Gebiet jenseits des Deichs trocken. Ein quantenmechanisches Teilchen jedoch schafft es über den Deich bzw. durch die Potentialstufe! Das Teilchen **tunnelt** durch die Barriere, wie Physiker sagen. Jenseits der Barriere kommt ein Teil der Wellenfunktion (grün) an. Es ist nur ein abgeschwächter Teil der ursprünglichen Amplitude der Welle, weil die Schrödinger-Gleichung in der Barriere eine exponentielle Dämpfung diktiert. Doch Fakt ist, dass die Aufenthaltswahrscheinlichkeit (= Absolutquadrat $|\Psi|^2$) jenseits der Barriere größer als Null ist. Im Allgemeinen berechnen

Quantenphysiker Transmissionswahrscheinlichkeiten und -koeffizienten, die es dem Teilchen erlauben, einen Potentialwall zu passieren. Dabei kommt umso weniger von der Welle auf der anderen, klassisch verbotenen Seite an, je dicker das Hindernis ist.

Weiterhin gibt es auch Reflexionskoeffizienten, weil ja der andere Teil der Welle am Hindernis reflektiert wird - so wie es uns klassisch vertraut ist: Die Wasserwelle prallt auf den Deich und läuft wieder zurück nach links. Die Überlagerung der einlaufenden (links nach rechts) und reflektierten Welle (rechts nach links) ergibt gerade die hier dargestellte, variierende Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Dieses Interferenzmuster ist typisch für quantenmechanische Kastenprobleme (vergleiche auch Casimir-Effekt).

21.24.3 Beispiel 1: α -Zerfall

Das traditionelle Anwendungsbeispiel des Tunneleffekts ist der α -Zerfall. Die Alphateilchen dieser Form der Radioaktivität stammen aus dem Atomkern bestimmter Nuklide und sind nichts anderes als Heliumatomkerne (Verbund aus zwei Protonen und zwei Neutronen). Die Alphateilchen tunneln durch das klassisch unüberwindbare Coulombpotential und können so den Kern (der dann Alpha-Strahler heißt) verlassen.

21.24.4 Beispiel 2: Elektronenmikroskopie

Ein weiteres Beispiel, das sogar spektakuläre Anwendung gefunden hat ist das **Rastertunnelelektronenmikroskop**. Mit diesem Mikroskop, das die Beobachtung (bzw. besser gesagt Abtastung) einer Oberfläche nicht mit Lichtteilchen sondern mit Elektronen ermöglicht, kann man noch kleinere Strukturen abbilden, sogar Atome! Die Funktionsweise beruht darauf, dass eine haarfeine, positiv geladene Nadel (Anode) eine Materialoberfläche im Vakuum abtastet. Dabei können Elektronen, des Materials, die sich im klassisch verbotenen Bereich aufhalten (siehe oben: Aufenthaltswahrscheinlichkeit ungleich null) mit der positiv geladenen Elektrode abgesaugt werden: es fließt ein so genannter **Tunnelstrom**. Die Verstärkung und Visualisierung dieses Stroms offenbart dann kleinste Strukturen im Bereich von Nanometern (ein Milliardstel Meter), wie Molekulanordnungen und sogar einzelne Atome!

Kontakt

Dr. Andreas Müller

Technische Universität München (TUM)
Exzellenzcluster Universe
Boltzmannstraße 2
D-85748 Garching
Germany

<http://www.universe-cluster.de>

andreas.mueller@universe-cluster.de

+49 (0)89 - 35831 - 71 - 04