

# Das Standard Modell

## I. Physik – was ist das?

## II. Physik der fundamentalen Wechselwirkungen.

1. Die heutige Theorien.
2. Raum, Zeit, Bewegung, Raumzeitliche Symmetrien.
3. Fundamentale Wechselwirkungen.
4. Erhaltungsgesetze.
5. Die “gängige” Teilchen.
6. Teilchen- und Hochenergie-Experimente.
7. Die Quarks und die Struktur der Kernteilchen.
8. Das Standardmodell der Elementarteilchen.
9. Prozesse.

## III. Das Urknall-Modell (das “Standard Kosmologisches Modell”).

1. Geschichte
2. Perspektive
3. Die Grundlagen des Standard Kosmologischen Modells.
4. Der Inhalt des Kosmos
5. Entfernungen in Kosmos.
6. Das Urknall Modell.

Anhang A.      Physikalische Konstanten.

Anhang B.      Umgehen mit Zehnerpotenzen.

NB: Alle vorgeführte Beschreibungen sollen mit den bisherigen Kenntnissen verständlich sein. Sie verlangen durchaus Anstrengung: Weil diese Kenntnisse in Beziehung zu einander gebracht werden müssen, und: Weil wir ohne Mathematik – sprich Formeln und Rechnungen – nicht auskommen können. Das ist aber die “Seele“ der Physik. Die Formeln enthalten keine Terme, die wir nicht schon kennen. Wir brauchen nur Mut, das, was wir kennen, anzuwenden.

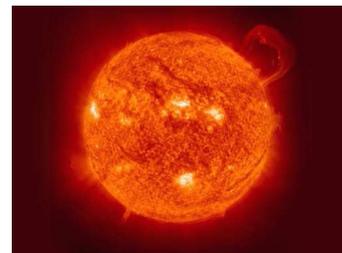
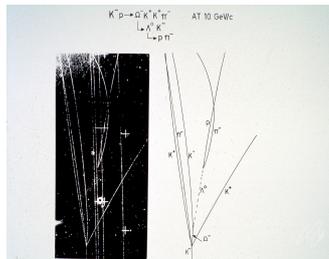
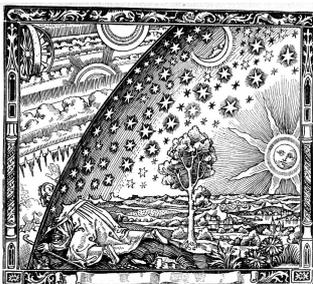
Die *Magenta* umrandeten Kästen enthalten Details, die man beim ersten Lesen auslassen kann.

Die *Rot* umrandeten Kästen enthalten Bemerkungen zum Text.

Die *Blau* umrandeten Kästen sind Übungen, die das Verstehen erleichtern sollen.

Ich habe keine Literatur angegeben. Einige Angaben kommen aus: H.-G. Dosch, “Das Standard Modell”, in E. Seiler/I.-O. Stamatescu Eds. *Approaches to Fundamental Physics*, Springer, 2006; C.W. Misner/K.S. Thorne//J.A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, 1970; U. Ellwanger, *Vom Universum zu den Elementarteilchen*, Springer 2008; R.P. Feynman/R.B. Leighton/M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley 1965; E. Harrison, *Kosmologie*, 1980.

Einige Figuren sind aus Internet und eventuell Copyright geschützt: der Text ist daher nur für unser Hector-Modul und nicht zum verbreiten freigegeben!      C Ion Stamatescu 2010



# Das Standard Modell.

## I. Physik – was ist das?

Physik fängt mit Beobachtung an und endet mit Beobachtung. Dazwischen liegt Erkenntnis.

Jeder Schritt in der Physik, vom einfachsten Experiment bis hin zur abstraktesten Theorie, ist begleitet von dem Versuch zu verstehen. Verstehen in der Physik bedeutet Gesetzmäßigkeiten zu finden, wodurch viele Phänomene auf wenige Gründe zurückgeführt (“reduziert”) werden können. So fallen unzählige Äpfel auf die Erde und kreisen unzählige Planeten und Asteroiden um die Sonne und trotzdem steht dahinter ein einziges Naturgesetz: Die Gravitation. Und wenn wir das gefunden haben, haben wir verstanden, wie diese Phänomene zustande kommen, und noch viel mehr: wie wir neue, unbekannte Phänomene realisieren können.

Das geht nicht auf einmal. Zuerst versuchen wir, Regelmäßigkeiten zu beobachten und sie in empirischen Gesetzen zusammenzufassen. Dafür müssen wir die Beobachtungen mit Zahlen ausdrücken: reellen Zahlen. Und diese Zahlen müssen wir multiplizieren, addieren, etc können. Wir drücken unsere Beobachtungen mit Hilfe von Konzepten aus – Ladung, Abstand – für die wir dann Zahlen einsetzen können. Die Sprache der Physik ist die Mathematik (sinngemäß nach Galilei).

So beobachten wir z.B. dass 2 Ladungen sich anziehen oder abstoßen mit einer Kraft, die von Abstand und Größe der Ladungen abhängt. Das ist empirische Erkenntnis



(durch Beobachtung der Phänomene gewonnen). Wir messen und finden folgende Regelmäßigkeit:

$$\text{Kraft} \propto \frac{\text{Ladung}_1 \cdot \text{Ladung}_2}{(\text{Abstand})^2}, \text{ kurz (und damit übersichtlicher) } K = \text{const} \times \frac{Q_1 Q_2}{D^2} \quad (1)$$

Das ist das empirische Coulomb Gesetz (*const* ist eine von der Wahl der Einheiten abhängige Zahl). Aber schon hier sind wir über die reine Beobachtung hinaus gegangen (die nur die Änderung der Lagen betrifft), haben ein neues Konzept, *Kraft*, eingeführt und mit seiner Hilfe eine Gesetzmäßigkeit ausgedrückt. So haben wir einen ersten Schritt in Richtung Verständnis gemacht.

### *Bemerkung:*

Was wir konkret beobachten und messen sind Entfernungen und Bewegungen. “Ladung” ist eine Erfindung, die wir allerdings im Zusammenhang mit einer Aktion, etwa Reibung eines Bernsteinstücks etc bringen können. “Kraft” ist noch mehr eine “Erfindung”. Um so abstrakter diese Erfindungen sind, um so “mächtiger” sind sie. Das Konzept Kraft, z.B., bewährt sich nicht nur im Zusammenhang mit Elektrizität, sondern auch mit Magnetismus, und darüber hinaus mit Gravitation und anderen Phänomenen.

Übrigens: die Physiker streben nach saubere mathematische Betrachtungen – dafür sind sie häufig etwas schlampig in den Worten, weil sie meinen, man wisse schon um was es eigentlich geht. So spricht man z.B. häufig von Kraft und Wechselwirkung in einem Atemzug. Dabei ist in den meisten Situationen das 2. Konzept korrekt, denn Kraft *wirkt auf* etwas, während wir eigentlich wissen, dass jede Wirkung mit einer Gegenwirkung verbunden ist.

Wurden einmal viele empirische Gesetze gefunden, versucht man sie in einem zusammenhängenden Gesamtschema zu verbinden. So entdeckte z.B. Maxwell im XIX Jahrhundert, dass die empirischen Gesetze der elektrischen und der magnetischen Phänomene in einem wunderschönen mathematischen Schema zusammengefasst werden können, der **Theorie der Elektrodynamik**. Aber ein solcher Schritt ist eine enorme Leistung. Denn die empirischen Gesetze werden nicht einfach aneinander gereiht, sondern müssen sich in einem exakten *mathematischen Schema* verzahnen. Und dabei werden auch neue Konzepte eingeführt – etwa, die *elektrischen* und *magnetischen Felder* -, es werden neue Beobachtungen vorausgesagt – z.B. die Radiowellen – und weitere Erkenntnisse erzeugt – etwa, dass das Licht selbst eine *elektromagnetische Welle* ist.

Die Schritte sind also: *Beobachtung von Regelmäßigkeiten* -> *empirischen Gesetzen* -> *Theorie*. Allerdings findet das in einem Umfeld von weiteren Kriterien und Erkenntnissen statt: Prinzipien, allgemeine Gesetze, etc, und im Rahmen eines historischen Prozesses. Dieser Prozess erscheint aber keineswegs willkürlich sondern als stetiger Ausbau von Erkenntnis, und um so mehr unsere Theorien sich bewähren, um so mehr haben wir den Eindruck, dass sie etwas mit der Wirklichkeit zu tun haben.

Im folgenden werden wir uns mit der Physik der fundamentalen Wechselwirkungen beschäftigen. Dieser Name bedeutet, dass es sich hier um die Wechselwirkungen handelt, die die Grundlage aller Phänomene bilden. Wenn man die klassische Gravitationstheorie vorerst nicht mit einbezieht spricht man auch von der *Physik der Elementarteilchen*, oder *Hochenergiephysik*. Der Name Elementarteilchenphysik (oder Physik der Teilchen und Felder) kommt davon, dass das theoretische Schema auf Teilchen und Felder als Grundbegriffe aufgebaut ist. Und der Name Hochenergiephysik weist nur darauf hin, dass die Phänomene, die hier von Bedeutung sind, bei hohen Energien stattfinden. Physik der Elementarteilchen ist immer in Entwicklung und viele Sachen ändern sich.

Die Gravitation wird in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie im Zusammenhang mit der Struktur des Raum-Zeit-Gefüges gebracht. Diese Theorie erlaubt auch Modelle für den Kosmos aufzustellen, die die Struktur und Entwicklung des uns bekannten Universums darstellen.

Die heutige Physik ist durch die sog. “standard Modelle” definiert:

### **Das Standard Modell der Elementarteilchen**

und

### **Das kosmologische Standard Modell.**

Diese zwei Modelle sind stark miteinander verbunden, sowohl was die Inhalte betrifft als auch vom Gesichtspunkt der Forschung. Eine Darstellung des einen ohne Referenz an das andere ist nicht möglich, in der Tat basiert das *kosmologische Standard Modell* auf der Gravitationstheorie *und* auf dem *Standard Modell der Elementarteilchen*. Viele der Erkenntnisse in jedem dieser Modelle wurden im Rahmen des anderen Modells erzielt! Auch wenn unser Hauptinteresse das **Standard Modell der Elementarteilchen** ist, werden wir auch das **kosmologische Standard Modell** kurz besprechen und auf die Zusammenhänge zwischen den beiden hinweisen.

#### *Caveat:*

Um eine Äußerung Einsteins “leicht” geändert wider zu geben (das nennt man “paraphrasieren”): wenn Darstellungen der Sachverhalte in der modernen Physik einfach und verständlich sind, sind sie meist inkorrekt, und wenn sie korrekt sind, sind sie meist unverständlich. Es wird hier versucht, nicht allzu unverständlich und nicht allzu falsch zu sein und auch auf die Grenze der Aussagen hinzuweisen.

*Noch einige Bemerkungen:*

Sie werden Bilder sehen und Vergleiche hören. Dabei ist folgendes zu sagen:

Bilder und Worten helfen, und die Vorstellungskraft ist eine der wichtigsten Werkzeuge in der Wissenschaft – sie müssen aber alle durch die Mathematik unter Kontrolle gehalten werden, denn sie können auch irreführen. Ich kann nur die Worte von Richard Feynman zur “wissenschaftlichen Vorstellung” zitieren:

“Die ganze Frage der wissenschaftlichen Vorstellung ist, dass was auch immer wir uns in der Wissenschaft vorstellen dürfen mit allem anderen, was wir kennen konsistent sein muss; dass die elektrische Felder und Wellen von denen wir sprechen nicht irgend welche glücklichen Gedanken sind, ... sondern Ideen, die mit allen uns bekannten physikalischen Gesetze zusammenstimmen müssen, ... unsere Gedanken sind in ein striktes Netzwerk gebunden ... ”

Formeln sind kein Luxus, sondern Notwendigkeit und physikalische Aussagen müssen streng abgeleitet werden. Bilder können keine Formeln ersetzen und Formeln müssen korrekt sein. Aber wir können Bilder benutzen, um Aussagen, die streng gewonnen wurden, zu illustrieren und so einsichtiger zu machen. Dasselbe trifft für Metaphern, Vergleiche, etc zu. Wenn man sagt “eine elektromagnetische Welle ist wie eine Wasserwelle” stimmt das genau so viel wie zu sagen “mein Freund ist wie ein Tiger”: damit suggerieren wir einige Eigenschaften, aber keine Gleichsetzung. Dagegen, ist die Aussage “Licht ist eine elektromagnetische Welle” in der Tat eine Gleichsetzung, so, als zu sagen “mein Freund ist ein Mensch”.

Ein weiteres Instrument in Erklärungsversuchen sind die sog. “Gedanken Experimente”: man stellt sich eine vereinfachte physikalische Situation vor, und man überlegt, was man auf Grund der theoretischen Aussagen in dieser Situation erwarten kann. Berühmte Gedankenexperimente sind “das Zwillinge Paradox” in der speziellen Relativitätstheorie oder die sog. “Schrödingers Katze” in der Quantenmechanik. Das erste (das kein Paradox ist) macht die Zeitdilatation einsichtig, das zweite das sog. Superpositionsprinzip (die Grundlage der QM) und seine klassische “Unheimlichkeit”. Wir werden auch hier Gedankenexperimente darstellen.

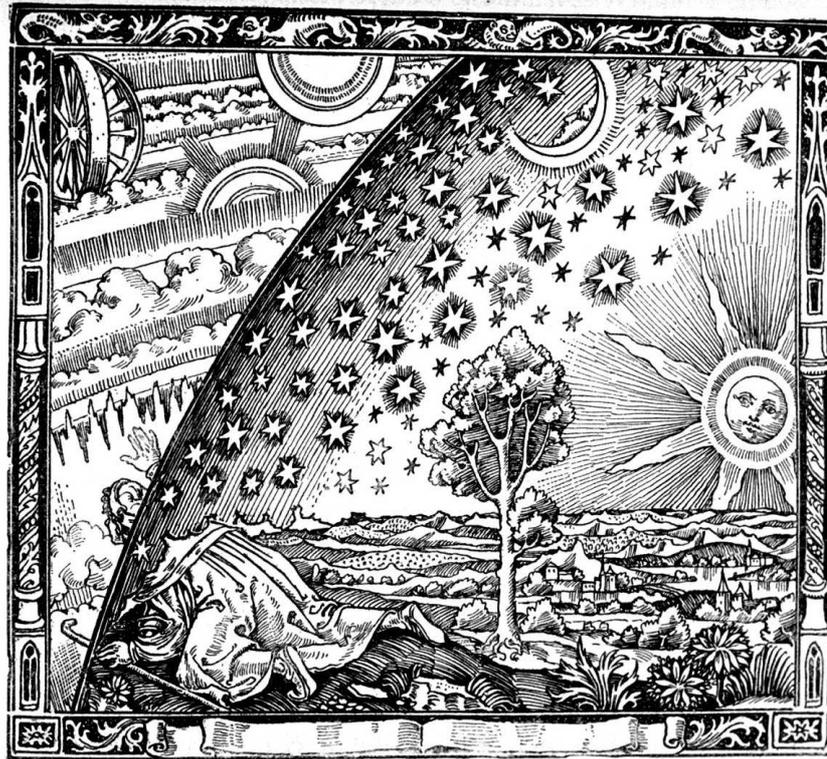
Schließlich sind alle diese Vorgehensweisen Versuche, die Erkenntnisse der Physik “verständlich” zu machen, und das heißt, im Rahmen unserer Alltagserfahrungen verständlich. Aber das ist nicht immer möglich. Quantenmechanik ist nicht Newton-sche Mechanik mit ein paar neuen Worten dazu. Wir müssen bereit sein, die Alltagserfahrungen auch zu überschreiten, bzw. sie zu bereichern.

Das haben wir aber bisher ständig gemacht! Dass die Erde rund ist, z.B., wussten schon Pythagoras (6. JH. BC) oder Aristoteles (4. JH BC), und ein heliozentrisches System wurde von Aristarchos (3. JH. BC) entwickelt. Es hat zwar lange gedauert, aber spätestens seit Magellan und Kopernicus (15./16. JH AD) hat unsere direkte Anschauung einer Scheibe der einer Kugel Platz gemacht, und die eines geozentrischen Sonnensystems dem jetzigen Bild.

Quantenmechanik und Relativität sind allgegenwärtig in unserem Leben, und nicht nur in grundsätzlichen Aspekten wie der Existenz der Welt überhaupt. Wir wenden sie überall an – ob Computerchips, Transistoren, Röntgenstrahlen, Satelliten, Handy oder GPS. Unsere Anschauung ist aufgefordert, die neuen Erkenntnissen zu übernehmen.

Alle hier geführte Beschreibungen sollen mit den Kenntnissen, den wir haben, nachvollziehbar sein. Die Formeln enthalten keine Terme, die wir nicht schon kennen und angewandt haben. Allerdings brauchen wir Anstrengung und Mut um diese Kenntnisse in Beziehung zu einander zu bringen, und um das, was wir kennen, anzuwenden.

Die *Magenta* umrandete Textteile enthalten Details oder Weiterführungen, die – obwohl auch nachvollziehbar – beim ersten Lesen ausgelassen werden können. Die *rote* Kasten enthalten Bemerkungen und Kommentare. Die Übungen sollen das Verstehen erleichtern.



Übung 1:

In  $R$  wird eine negative Ladung  $Q_1 = -4C$  ( $C$ : Coulomb) und in  $S$  eine positive Ladung  $Q_2 = 1C$  fest eingebracht im Abstand  $d = 2\text{mm} = 0,002\text{ m}$ . Die Kraft wird in  $N$  (*Newton*) gemessen, und mit diesen Einheiten ist in Gl. (1)  $const = 8,99 \times 10^9 \frac{N\text{ m}^2}{C^2}$  (die Einheiten sind konsistent gewählt, das heißt, wenn man Ladungen in  $C$  und Abstände in  $m$  misst, kommt das Resultat automatisch in  $N$ ).

Ein Urkern wird in einem Punkt  $T$  im Abstand  $D$  hinter  $S$  angebracht. Welche Gesamtkraft  $K$  wirkt auf dem Kern für:

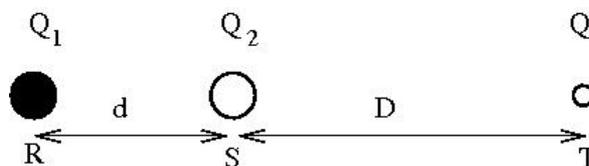
$$D = 1\text{mm} , 2\text{mm} , 3\text{mm} , \dots , 10\text{ mm} ?$$

Erstelle eine Tabelle  $\frac{D : 0,001 \quad 0,002 \quad \dots \quad 0,010\text{ m}}{K : \dots\dots\dots \dots\dots \dots \dots\dots N}$

und zeichne den Graph  $K$  gegen  $D$  (oder verwende einen GTR).

Vergleiche mit der Kraft  $K_2$  die auf dem Urkern wirkt wenn die Ladung in  $R$  weggenommen wird (also,  $Q_1 = 0$ ). Beschreibe die Kräfte  $K$  und  $K_2$ .

Hinweis: die Ladung von  $S$  wirkt mit einer positiven (abstoßenden) Kraft auf dem Kern in  $T$  und die vom  $R$  mit einer negativen (anziehenden) Kraft, die Gesamtkraft ist die Summe der beiden (mit ihren Vorzeichen).



## II. Physik der fundamentalen Wechselwirkungen.

### 1. Die heutige Theorien.

Unser heutiges Wissen über die *Physik der fundamentalen Wechselwirkungen* drückt sich in zwei Theorien- oder theoretischen Rahmen - aus:

- Die *relativistische Quantenfeldtheorie (Grundlage des Standardmodells der Elementarteilchen)*
- Die klassische *Gravitationstheorie - Allgemeine Relativitätstheorie (Grundlage des kosmologischen Standardmodells)*

Die *Quantenfeldtheorie* ist eine Theorie der Materie (Teilchen und Felder), so wie auch ihre Vorgänger-Theorien:

- nichtrelativistische, klassische Mechanik,
- relativistische, klassische Elektrodynamik,
- nichtrelativistische Quantenmechanik,

wo das Wort "relativistisch" bedeutet, dass die Gesetze der Theorie in Einklang mit der Einsteinschen *speziellen Relativität* sind, und "nichtrelativistisch", dass sie der sog. Galilei-sche Relativität gehorchen, die nur bei kleinen Geschwindigkeiten und Energien eine gute Näherung ist.

Man kann vereinfacht sagen, dass alle diese Theorien über den selben Gegenstand sprechen – Teilchen und Felder – aber zunehmend bessere Beschreibungen liefern.

So wird ein Teilchen in der *klassischen Mechanik* als kleiner Klumpen mit fester Masse und mit exakten Eigenschaften (Ort und Impuls) beschrieben. Für Phänomene bei mittleren und großen Abständen und kleinen Geschwindigkeiten passt dieser Beschreibungsrahmen sehr gut.

Bei größeren Geschwindigkeiten allerdings müssen wir die Spezielle Relativitätstheorie berücksichtigen. Das geschieht in der *klassischen Elektrodynamik*, in der Tat war es die Maxwell-sche, klassische Elektrodynamik die die Motivation und Grundlage der speziellen Relativitätstheorie gegeben hat. Die klassische Elektrodynamik beschreibt Teilchen (z.B., Elektronen) und Felder (elektromagnetische). Diese Felder stehen in Wechselwirkung mit den Teilchen, sind aber glatt im Raum verteilt und nicht mit den Teilchen verwandt.

Das alles passt nicht mehr bei kleineren Skalen, wo größere Energien herrschen, etwa in den Atomen. Um Atome beschreiben zu können mussten wir eine neue Theorie entwickeln, die *Quantenmechanik*. Aber dafür mussten wir ein neues Beschreibungsprinzip (*Quantelung*) einführen und diese Theorie erlaubt uns nicht mehr Teilchen durch exakten Ort und Impuls zu identifizieren. Hier treffen wir eine Theorie, die durch exakte Gleichungen gegeben ist, die aber ein Zufallselement einführt in ihren Aussagen über den Phänomenen.

Schließlich sind die Phänomene bei noch kleineren Abständen und größeren Energien, z.B. im Kern, erst in der *Quantenfelderttheorie* beschreibbar, wo wir neben dem *Quantelungsprinzip* auch die *spezielle Relativitätstheorie* berücksichtigen, einschließlich der Äquivalenz von Masse und Energie:

$$E = m_0 c^2, \quad E : \text{Energie}, \quad m_0 : \text{Ruhemasse}, \quad c : \text{Lichtgeschwindigkeit} \quad (2)$$

Jetzt allerdings sind die Teilchen nicht mehr erhalten, sondern können ineinander umgewandelt werden, wobei Masse in Energie und umgekehrt übergehen kann. Felder sind nun eng mit den Teilchen verbunden. Eine *Quantenfelderttheorie* ist eine vereinheitlichte Theorie von *Teilchen und Feldern* in flacher, (nicht gekrümmten) Raum-Zeit, so lange also *Allgemeine Relativitätseffekte* unwichtig bleiben. Die Konzepte von Teilchen und Feldern sind nun *vereint*, jedes Feld hat sein Teilchen und jedes Teilchen sein Feld, so ist z.B. das Photon das Teilchen des Elektromagnetischen Feldes.

Quanten Theorien fordern die “Anschaulichkeit” heraus! Nach 100 Jahren seit ihrer Entstehung streitet man immer noch darüber, wie man Quanten Mechanik interpretieren soll!

Beobachten wir eine Fliege, so meinen wir, sagen zu können: Sie hat *dort, diese Geschwindigkeit*. Vielleicht können wir das nicht gut bestimmen, weil es noch so viele, zufällige Faktoren wirken, Luftbewegungen u.s.w. Wir können aber mindestens “in Mittel” eine Aussage machen und sonst Informationsmangel beklagen. Das ist der statistische Charakter der klassischen Physik.

In Quanten Mechanik ist das alles viel schlimmer. Können wir den Ort eines Gegenstandes präzise anzugeben, so können wir *prinzipiell* seine Geschwindigkeit nicht bestimmen! Wenn wir einigen Angaben machen, bleiben andere unpräzise. Ein Elektron in einem Atom hat eine präzise Energie und Drehimpuls, dafür nur *im Mittel* eine bestimmte Bahn und Geschwindigkeit! Mögliche Sprechweise: es kann zugleich überall sein, aber wenn ich ihn suche, dann finde ich ihn mal *hier*, mal *da* und meist *dort*.

Sind die Gegenstände größer, wie z.B. die Fliege, dann haben sie ständig viele Wechselwirkungen mit der Umgebung. Diese mitteln sich und die Fliege erscheint, in einer bestimmten Näherung, einen Ort *und* eine Geschwindigkeit zu haben. Das vertraute, klassische Verhalten und damit die alltägliche Anschaulichkeit bekommt man also in QM als eine gute Näherung in bestimmten Situationen.

Die *Gravitationstheorie (Allgemeine Relativitätstheorie)* ist eine Theorie des Raum-Zeit-Gefüges und der Gravitation. Ihr Vorgänger ist:

- Die *Newton-sche Gravitationstheorie*: klassische Mechanik mit Newton's Gravitationsgesetz. Sie beschreibt die Wirkung der Gravitation auf Körper in einem Euclid-schen, unabänderlichen Raum-Zeit-Gefüge.

Sie beschreibt Phänomene bei allen Entfernungen! (Galaxien, Sonnensystem, Bewegung auf die Erde, Bewegung der Moleküle, etc) .

Sie ist nicht mehr gültig, wenn große Geschwindigkeiten und/oder große Massen auftreten und spezial relativistische Effekte oder Raumzeit- Krümmung eine Rolle spielen.

Die *Gravitationstheorie (Allgemeine Relativitätstheorie)* ist eine vereinheitlichte Theorie *der Gravitation und des Raum-Zeit-Gefüges*. Sie stellt die Gravitation als Eigenschaft von Raum und Zeit, die sich in deren Krümmung zeigt. Sie beschreibt Phänomene bei allen Entfernungen: kosmische Ereignisse, die Evolution des Universums, aber auch bei kleinen Abständen – etwa die Uhrensynchronisierung im Erdsatelliten! - so lange keine Quanteneffekte wichtig werden.

Die im *Standardmodell* der Elementarteilchen gebundene *Quantenfeldtheorien* sind Theorien der Materie *in* Raum und Zeit. Sie beschreiben alle bekannten Wechselwirkungen (bis auf die Gravitation), die Prozesse zwischen den Teilchen und die Zusammensetzung der Materie.

Die *Gravitationstheorie (Allgemeine Relativitätstheorie)* ist eine *klassische* (nicht Quanten-) Theorie *von* Raum-Zeit. Sie ersetzt die in den anderen Theorien wirkende Annahme eines festen, unveränderlichen Raum-Zeit-Gefüges mit der eines von der beinhalteten Materie beeinflussten Raum-Zeit-Gefüges und identifiziert Gravitation als Eigenschaft von Raum und Zeit.

Im *kosmologischen Standardmodell* wird die Struktur und Entwicklung der Raum-Zeit aus der *Allgemeinen Relativitätstheorie* abgeleitet, der materielle “Inhalt” des Kosmos (Sterne, Galaxien, Gas) durch das *Standardmodell der Elementarteilchen* und die darauf basierenden Effekte (Kern- und Atom-Bildung) beschrieben. Weil die *Quantenfeldtheorie* die Prinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht beinhaltet, und andererseits die *Allgemeine Relativitätstheorie* das Quantelungsprinzip nicht erfüllt, sind diese Theorien nicht vereinbar und jede gilt nur für die Phänomene für die die andere unwichtig ist. So lange Energiedichten und Raum-Zeit-Krümmung klein bleiben, können wir die Zuständigkeiten aus einander halten. Allerdings gibt es Phänomene, die diese Bedingungen nicht erfüllen und für die man nur einzelne Vorstellungen zur Zeit hat.

## 2. Raum, Zeit, Bewegung, Raumzeitliche Symmetrien:

Wir beschreiben die Phänomene in Raum und Zeit: Ort und Zeit von Ereignissen, Bewegung von Körpern, Fortpflanzung von Wellen, etc. Um Angaben machen zu können, müssen wir uns immer auf ein Bezugssystem beziehen – ruhendes oder sich gleichförmig bewegendes Koordinatensystem. So gilt z.B. für einen Körper, der sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit  $v$  bewegt, die Strecke-Zeit Relation in einem gegebenen Bezugssystem:

$$s = v t \quad (3)$$

Die Phänomene hängen nicht von der Beschreibungsweise ab – insbesondere nicht vom gewählten Koordinatensystem. Man spricht von Symmetrien, wenn die Gesetze der Physik unter bestimmten Transformationen gleich bleiben. So ist z.B. eine Uhr eine Uhr und in ihr läuft dieselbe Physik, gleichgültig wo und wann sie sich befindet, so lange sich die äußere Bedingungen nicht ändern – wir müssen nur die Koordinaten umrechnen, Geschwindigkeiten addieren, etc.

Wir kennen u.a.:

- *Symmetrie unter Raumverschiebungen*: Invarianz der physikalischen Gesetze zur Änderung der Position in einem gleichförmigen (homogenen) Raum.

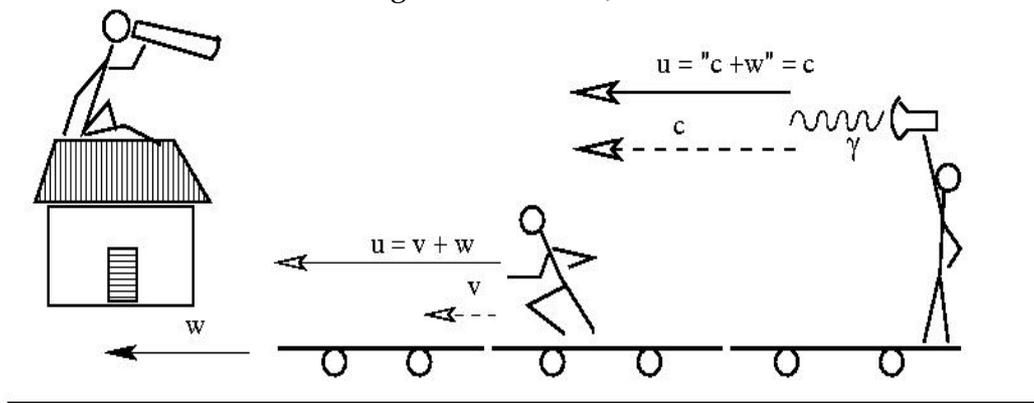
- *Symmetrie unter Zeitverschiebungen*: Unabhängigkeit von der Zeit der Betrachtung in einer gleichmäßig laufenden (homogenen) Zeit.

- *Symmetrie unter räumlichen Drehungen*, wenn der Raum in allen Richtungen die selben Eigenschaften hat (isotrop ist).

- *Symmetrie zwischen sich gleichmäßig bewegendem Bezugssystemen*: *Spezielle Relativitätstheorie*. Symmetrie unter sogen. *Lorentz-Transformationen*, mit dem charakteristischen Geschwindigkeitsaddition Gesetz:

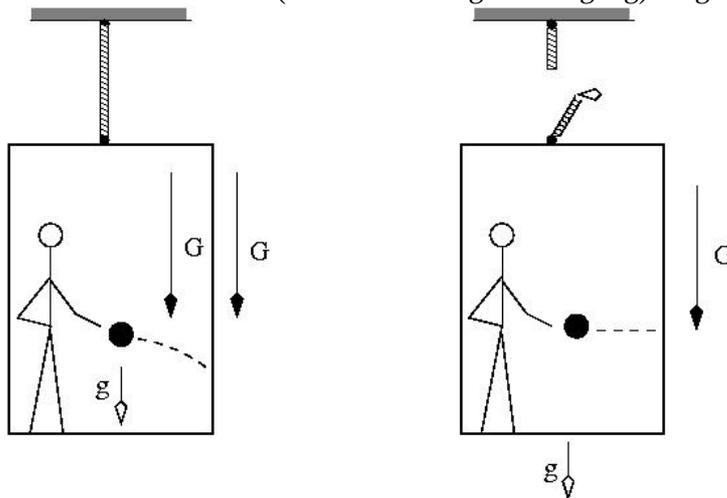
$$u = \frac{v + w}{1 + \frac{v w}{c^2}} \quad \begin{array}{l} c : \text{ Lichtgeschwindigkeit} \\ u : \text{ unsere Geschwindigkeit gegenüber dem Bahnhof,} \\ v : \text{ unsere Geschwindigkeit innerhalb des Zugs,} \\ w : \text{ Geschwindigkeit des Zugs gegenüber dem Bahnhof,} \end{array} \quad (4)$$

im Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten  $u \ll c, w \ll c : u = v + w \quad (5)$

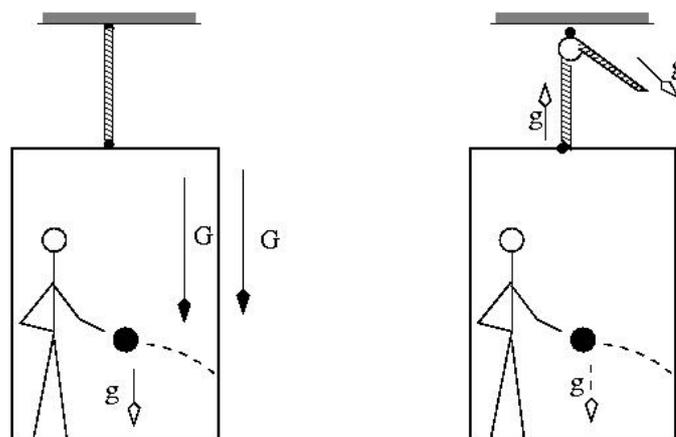


- *Symmetrie zwischen Bezugssystemen im Schwerfeld und unter Beschleunigung* (“Äquivalenz Prinzip”): *Allgemeine Relativitätstheorie*: Phänomene in einer kleinen Umgebung in freiem Fall im Schwerfeld verhalten sich so, als ob weder Beschleunigung noch Schwerfeld vorhanden wären. Damit werden die Effekte der Gravitation mit denen von Beschleunigung verglichen.

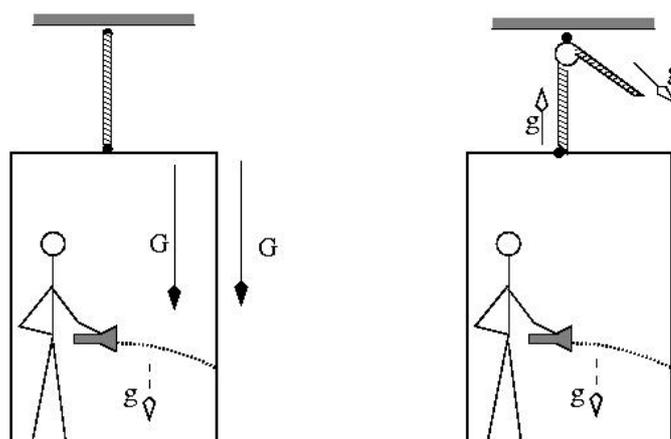
Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzips in einer kleinen Kabine:  
 Gravitationseffekte werden im freien Fall (eine beschleunigte Bewegung) ausgeschaltet.



Daher muss man auch umgekehrt Gravitationseffekte durch Beschleunigung erzeugen können:



Das gilt eben so für Lichtstrahlen: in einem beschleunigten System erscheinen Lichtstrahlen gekrümmt, das heißt, auch in einem Gravitationsfeld müssen ihre Bahnen gekrümmt laufen.



Die Lichtstrahlen aber folgen die Struktur des Raumes  $\implies$  Die Ablenkung der Lichtstrahlen im Schwerfeld bedeutet also, dass Gravitation Krümmung des Raumes bewirkt. (Die Zeichnung ist leicht irreführend: weil  $c$  sehr groß ist, ist die Lichtkrümmung innerhalb der Kabine kaum wahrnehmbar; für alle Vergleiche muss man auch die Zeit berücksichtigen.)

Diese Darstellung des Äquivalenzprinzips ist nur korrekt wenn man eine sehr, sehr kleine Kabine nimmt, so dass das Gravitationsfeld darin praktisch *homogen* ist und die Gravitationskraft überall gleich. Man spricht von "lokaler" Äquivalenz. Offensichtlich trifft das z.B. für die Erde als Ganzes nicht zu, weil an verschiedenen Orten die Gravitationskraft in verschiedene Richtungen zeigt (immer zum Zentrum hin, also etwa am Nordpol und am Äquator geradezu senkrecht zu einander!). Es kommen daher zusätzliche (sog. "Gezeiten") - Effekte hinzu. Diese Bemerkung trifft auch auf das dargestellte Gedankenexperiment zu! Die "lokale" Auffassung (von kleinen Umgebungen ausgehend) ist grundsätzlich für das Vorgehen in der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Darüber hinaus haben wir mit der Raum-Zeit zu tun und es treten hier weitere Effekte auf, die den Ablauf der Zeit betreffen. So kann man auf ähnliche Weise wie vorher zeigen, dass Uhren, die sich in verschiedenen Höhen im Gravitationsfeld der Erde befinden, unterschiedlich laufen (das ist wichtig für GPS!). Alle diese Effekte müssen berücksichtigt werden, wenn man solche Effekte wie die Lichtablenkung in der Nähe großer Massen berechnet, und die Übereinstimmung mit den Beobachtungen ist dann sehr gut.

Um die Rechnungen zu vereinfachen, greift man häufig zur sog. *Post-Newton-schen Näherung*: wenn die Krümmung nicht allzu groß ist, verfasst man das Problem in flacher (d.h.: nicht gekrümmten) Raum-Zeit als Newton-sche Anziehung zwischen zwei Massen, mit relativistischen Photonmassen und *mit bestimmten, zusätzlichen Korrekturen*. Das ist *nicht* ein zusätzlicher Effekt, sondern eine andere – und zwar angenäherte - Berechnung des selben Effekts. In dieser Näherung kann man auch von "Lichtverzögerung" sprechen, das ist eine andere Interpretation der selben Effekte. Das ist ein Beispiel dafür, dass im Fortschritt der Theorien die alte Theorie immer noch einen Gültigkeitsbereich erhält wo sie als Basis für gute, angenäherte Analysen dienen kann.

### Übung 2:

Eine Rakete fliegt mit halber Lichtgeschwindigkeit von der Erde weg,  $w = \frac{1}{2} c$ , und schießt Projektile mit Geschwindigkeiten  $v = 0,1 c ; 0,2 c ; 0,3 c ; \dots , 0,9 c ; 1,0 c$  (gemessen im Bezugssystem der Rakete). Welche Geschwindigkeiten  $u$  haben diese Projektile im Bezugssystem der Erde? Erstelle einen Graph  $u$  gegen  $v$ . Verwende das relativistische Gesetz Gl. (4) und vergleiche mit den nichtrelativistischen, Gl. (5).

### Übung 3:

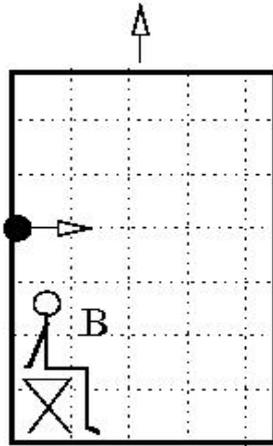
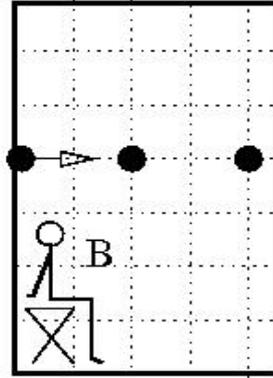
Betrachte eine Aufzugkabine im gravitationsfreien Raum, irgendwo im Weltall (siehe die Bilder auf der nächsten Seite !).

Im Bild *a*) ist die Kabine in Ruhe und der äußere Beobachter *A* und der innere Beobachter *B* sehen dasselbe: Ein mit Geschwindigkeit  $2 \text{ m/s}$  in  $4 \text{ m}$  Höhe in der Kabine waagrecht geworfener Ball bewegt sich waagrecht gerade aus und kommt nach  $1, 2, \dots \text{ Sek.}$   $2, 4, \dots \text{ m}$  weit (das Gitter ist in Einheiten von  $1 \text{ m}$ ).

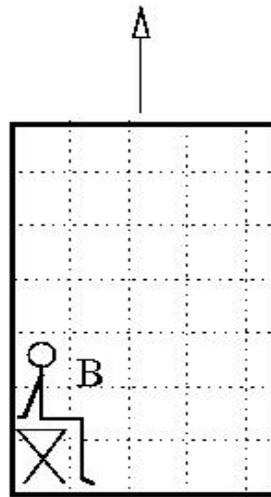
Im Bild *b*) startet die Kabine *beschleunigt* nach oben wenn der Ball waagrecht geworfen wird, und erreicht nach  $1 \text{ Sek.}$  die Stellung *c*) und nach  $2 \text{ Sek.}$  *d*). Zeichne in *c*) und *d*) die jeweilige Stellung des Balls (also, so wie *A* sie sieht).

Zeichne in *e*) die Bahn des Balls, so wie sie *B* sieht (nach  $0, 1$  und  $2$  Sekunden).

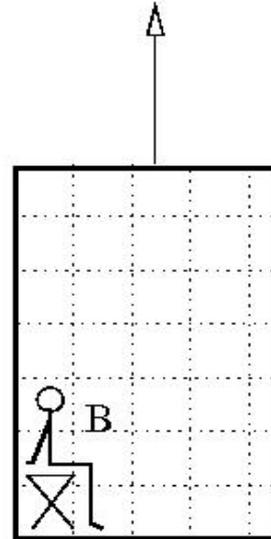
a) In Ruhe



b) Startet!



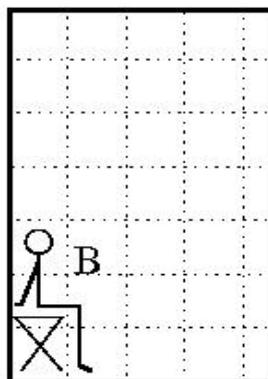
c) Nach 1 Sek.



d) Nach 2 Sek.

Was A sieht (also, von draussen)

e) Gesehen von B  
(in der Kabine)



### 3. Fundamentale Wechselwirkungen:

Wir kennen bisher 4:

*gravitationelle:* Merkmale: hält die Erde, das Sonnensystem, die Galaxien, ... zusammen.  
*Langreichweitig, immer anziehend.*  
Sehr schwach, proportional mit dem Produkt der Massen.

*elektromagnetische:* Merkmale: hält die Atome zusammen.  
*Langreichweitig, anziehend/abstoßend.*  
Mittelstark, proportional mit dem Produkt der Ladungen.

*starke:* Merkmale: hält die Kerne zusammen, bewirkt Teilchen-Transmutationen.  
*Kurzreichweitig* zwischen den beobachtbaren Teilchen, führt aber zum *Confinement* der Konstituenten innerhalb der Teilchen. Sehr stark.

*schwache:* Merkmale: wirkt in Teilchen-Transmutationen mit und in den Kernen.  
*Kurzreichweitig.* Schwach.

Teilchen, die **keine starke** Wechselwirkungen haben können, nennt man

**Leptonen:**  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\nu$ ,  $\mu$ , ...

Teilchen, die **auch starke** Wechselwirkungen haben können, nennt man

**Hadronen:** *Baryonen* (z.B., die Kernteilchen,  $p$  und  $n$ ) und *Mesonen* ( $\pi$ ,  $K$ , ...).

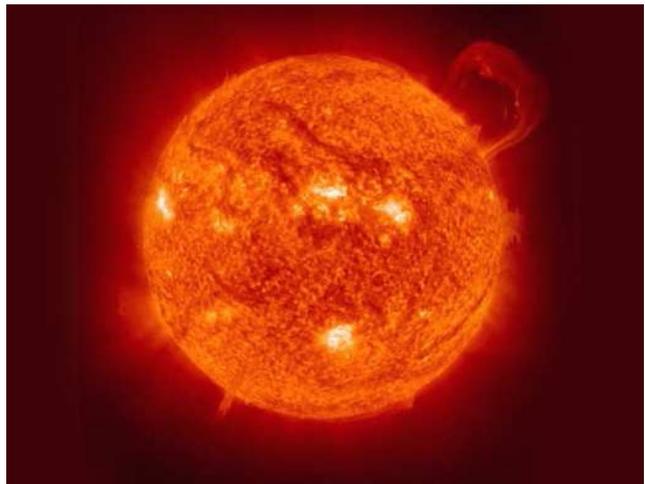
Die Wechselwirkungen führen zu verschiedenen Prozessen: Bildung von Sternen, Bildung von Atomen, Ausstrahlung, Bildung von Kernen, Teilchen-Umwandlungen (Transmutationen), etc.

Die Phänomene bei großen Abständen sind von der Gravitation beherrscht, weil sie nicht nur langreichweitig ist sondern auch die Eigenschaft hat, dass sie *immer anziehend* ist: um so mehr sich Materie angehäuft hat, um so stärker zieht sie weitere Materie an.

Zwischen und innerhalb von Molekülen, Atomen und Kernen herrschen dagegen die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkungen.

*Beispiel:* Sonne.

Wie alle Sterne hat sich die Sonne durch *Gravitation* in einer kosmischen Staubwolke (vor allem, Wasserstoff) gebildet: Wo auch immer sich zufällig eine Verdichtung von Staub gebildet hat, zieht diese weiter Staub an, und das immer mehr je größer sie wird, bis sie den ganzen verfügbaren Staub angesammelt hat. Dabei verdichtet sie sich, schrumpft und wird heißer in Zentrum, bis *kernphysikalische Prozesse* (*starke* Wechselwirkungen, mit begleitenden *elektromagnetischen* und *schwachen* Wechselwirkungen) dort entstehen und Energie und Druck *gegen*



die Anziehung erzeugen. Der Stern fängt an zu leuchten und schrumpft nicht mehr. Das hat bei der Sonne vor etwa 4,5 Milliarden Jahren angefangen und wird voraussichtlich noch so lange dauern.

#### 4. Erhaltungsgesetze:

Für die Prozesse der Physik gelten bestimmte Erhaltungsgesetze, die alle in Zusammenhang mit Symmetrien gebracht werden können. Für alle Wechselwirkungen gilt:

Als Folge der Raum-Zeitlichen Symmetrien, einschließlich Spezieller Relativität:

*Energieerhaltung:* Die Gesamtenergie, die Summe aller an einem Prozess teilnehmenden Energien (Kinetische- oder Bewegungsenergie, Potential- oder Lageenergie, Bindungsenergie, Ruheenergie:  $m_0 c^2$ ) ist erhalten.

*Impulserhaltung:* Der Gesamtimpuls ist erhalten.

*Drehimpulserhaltung:* Der Gesamtdrehimpuls ist erhalten.

*Spinerhaltung:* Der Gesamtspin ist erhalten.

Als Folge weiterer Symmetrien der Quanten Theorien:

*Ladungserhaltung:* Die Summe der Ladungen (mit ihren Vorzeichen) ist erhalten.

*Baryonenzahlerhaltung:* Anzahl der Baryonen minus Anzahl der Antibaryonen ist erhalten.

*Leptonenzahlerhaltung:* Anzahl der Leptonen minus Anzahl der Antileptonen ist erhalten.

*Spin* ist eine Art Drehimpuls, der aber nicht die *Situation* eines Teilchens kennzeichnet sondern dem Teilchen selbst zukommt. So hat jedes Teilchen einen bestimmten Spin, das Teilchen kann sich aber in verschiedenen Drehimpuls-Zuständen befinden. Übrigens, *Drehimpulserhaltung* wirkt sich auch beim Fahrrad-Fahren aus! Die Addition von Drehimpulsen und von Spins ist "komplizierter", deshalb werden wir hier den Drehimpuls- und den Spinersatz nicht besprechen oder anwenden.

Der Spin eines Teilchens kann halb- ( $1/2, 3/2, \dots$ ) oder ganzzahlig sein ( $0, 1, \dots$ ). Teilchen mit halbzahligen Spin heissen *Fermionen*, die mit ganzzahligen Spin *Bosonen*.

Darüber hinaus gibt es noch bestimmte Symmetrien und Erhaltungsgesetze, die nur für einige Wechselwirkungen gelten, während sie von anderen *gebrochen* werden. So stimmt, z.B. die "Parität" ( $P$ : Symmetrie unter Spiegelung, rechts-links) für alle Wechselwirkungen bis auf die Schwache. Weitere Symmetrien (mit entsprechenden Erhaltungssätzen) sind:

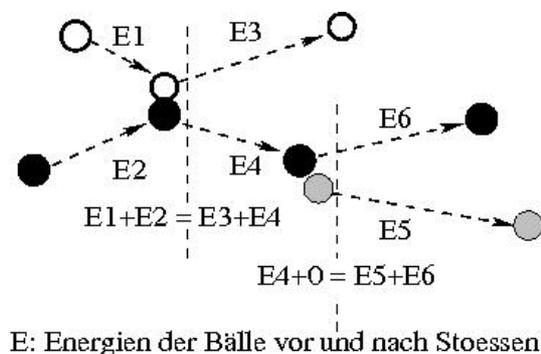
$C$ : Ladungsumkehrung ("Ladungskonjugation") und  $T$ : Zeitumkehrung.

$C$  Symmetrie scheint allgemein gültig zu sein, während es Prozesse gibt, die eine (kleine) Verletzung der  $CP$ -Symmetrie zeigen.

Die Erhaltungsgesetze gelten *lokal*: eine Ladung, z.B., kann nicht an einem Punkt verschwinden und an einem anderen auftauchen. In einem mehrstufigen Prozess gelten die Erhaltungssätze auf jeder Stufe.

Die Erhaltungssätze lassen schnell erkennen, ob ein Prozess möglich ist oder nicht. Beispiele:

- In den Kern Zerfallsreihen.
- In Teilchen Transmutationsprozessen:  $\beta$  - Zerfall, Paar-Vernichtung und -Erzeugung.
- In der Chemie (sie basieren auf den physikalischen Erhaltungssätzen in nicht-relativistischer Näherung).



## 5. Die “gängige” Teilchen:

In der Quantenfeldtheorie wird jedem Typ von Feld ein Teilchen assoziiert, und umgekehrt. Die Teilchen (bzw. Felder) mit denen wir meistens zu tun haben, sind:

**Tabelle 1: die “gängige” Teilchen**

<i>Teilchen</i>	<i>Baryonenzahl</i>	<i>Leptonenzahl</i>	<i>Ladung</i>	<i>Spin</i>	<i>Masse</i>	<i>Typ</i>	<i>Wechselwirkung</i>
$p$ <b>Proton</b>	1	0	1	1/2	1,007276 $u$	Hadron	alle
$n$ <b>Neutron</b>	1	0	0	1/2	1,008665 $u$	Hadron	alle
$e^-$ <b>Elektron</b>	0	1	-1	1/2	0,000549 $u$	Lepton	El., Schw.
$\nu_e$ <b>Neutrino</b>	0	1	0	1/2	$\sim 0$	Lepton	Schwache
$\gamma$ <b>Photon</b>	0	0	0	1	0	Vermittler	Electr.

Für jedes Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit denselben  $S$  und  $m_0$  und umgekehrter Ladung (das Antiteilchen von  $\gamma$  ist  $\gamma$  selbst). Die übliche Notation ist  $^-$ , also  $e^+ = e^-$ . Aus einem Grund, den wir noch erforschen gibt es in der Welt anscheinend nur Materie: Antimaterie wird nur in Zerfall- und andere Prozessen erzeugt und verschwindet schnell durch Annihilation mit Materie.

Die Materie-Teilchen (Materiefelder)  $p$ ,  $e^-$ ,  $n$  und  $\nu_e$  bilden die Materie. Protonen und Neutronen können starke Wechselwirkungen haben und bilden dadurch die Kerne. Die Kerne mit den Elektronen bilden die Atome mittels elektromagnetischer Wechselwirkung.

Die geladenen Teilchen stehen in Wechselwirkung mit den Photonen (die Teilchen des elektromagnetischen Feldes). Man sagt, *die Photonen vermitteln die elektromagnetische Wechselwirkung*. Auch für die anderen Wechselwirkungen gibt es “*Vermittlerteilchen*” (“*Vermittlerfelder*”).

Strukturlos (elementar) sind:  $e^-$ ,  $\nu_e$ . Protonen und Neutronen weisen eine innere Struktur auf, die im Standardmodell als “*Quarkszusammensetzung*“ beschrieben werden kann.

Stabile Teilchen sind  $p$ ,  $\nu_e$ ,  $e^-$  und  $\gamma$ . Das Neutron ist nur in bestimmten Kernen stabil, frei zerfällt es zu Proton ( $\beta^-$ -Zerfall). Es gibt viele weitere Teilchen, sie sind aber instabil und zerfallen in diesen. Deshalb sind diese fünf die Teilchen, mit denen wir am meisten zu tun haben.

### *Bemerkung:*

Jedes physikalische System strebt den niedrigsten Energiezustand an, und wird ihn durch Übergänge erreichen so weit die Erhaltungsgesetze es erlauben. So wie beim radioaktiven Zerfall der Kerne zerfallen auch die Teilchen bis zu stabilen Teilchen:  $p$ ,  $e^-$ ,  $\nu_e$ .

Es gibt keinen leichteren Baryon als das Proton, dieses kann daher nicht zerfallen wenn die Baryonenzahlerhaltung gilt. Die Gültigkeit dieses Gesetzes sichert daher die Stabilität des Protons. Das Neutron ist dagegen instabil, weil es schwerer als das Proton ist und darf zu diesem zerfallen ohne Verletzung eines Erhaltungsgesetzes:  $\beta^-$ -Zerfall.

Jedem Teilchen werden **feste Ruhemasse**, *Spin* und andere *Quantenzahlen* zugeordnet: *Ladung*, *Baryonenzahl*, *Leptonenzahl* u.a. . Jedes Teilchen kann **verschiedene Energien, Impulse** und *Drehimpulse* annehmen. Diese kennzeichnen dann seinen **Zustand**.

Charakteristisch für ein *reales Teilchen* ist die sog. *Energie-Impuls Relation*:

- Für massive Teilchen 
$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} \quad . \quad (6)$$

- Für masselose Teilchen (z.B., Photon) 
$$E = c |p| \quad (\text{bzw. } E = h f = \frac{h c}{\lambda} ) \quad (7)$$

Hier  $E$  : Energie,  $p$  : Impuls,  $m_0$  : Ruhemasse,  $f$ ,  $\lambda$  : Frequenz, Wellenlänge des Lichts.  
*Ein Teilchen kann nur dann als frei existieren, wenn die Energie-Impuls Relation erfüllt ist!*

Die gängigen Einheiten in der Elementarteilchenphysik sind:

- für Energie :  $MeV$  , für Impuls :  $MeV/c$  , für Masse :  $MeV/c^2$  .

Wir haben  $m_p \simeq 1 GeV/c^2$  ,  $m_e \simeq 0,5 MeV/c^2$  und die Energie der Photonen etwa in der Sonnenstrahlung  $E_\gamma \sim 0,5 eV$  . Siehe Anhang für die Übersetzung in SI .

Die Relation zwischen *Impuls* und *Geschwindigkeit* ist (entsprechend spezieller Relativitätstheorie):

$$p = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} v = m v \quad \text{und dementsprechend} \quad v = c \frac{p c}{\sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}} \quad (8)$$

Hier hat man eine sog. "relativistische Masse"  $m$  eingeführt, um diese Relation ähnlich der üblichen, nichtrelativistischen zu machen.  $m$  ist aber keine feste Eigenschaft des Teilchens, weil sie vom dessen Impuls abhängt (z.B., für Photon  $m = |p|/c$  ). Wenn von der Masse eines Teilchens gesprochen wird, wird normalerweise die *Ruhemasse* gemeint, weil diese eine feste Eigenschaft des Teilchens ist und nicht von dessen Situation abhängig.

Für Photonen gilt darüber hinaus  $|p| = \frac{h}{c} f = \frac{h}{\lambda}$  mit  $f$  : Frequenz,  $\lambda$  : Wellenlänge des Lichts.

Einfachheitshalber wählt man häufig die Länge und Masse Einheiten so, dass die Lichtgeschwindigkeit

$c = 1$  (also, z.B.,  $1 m = \frac{1}{3 \times 10^8} \text{Lichtsekunden (Ls)}$  ) und auch die Planck Konstante

$h = 1$  . Dann lautet die Energie-Impuls Relation:

- Für massive Teilchen 
$$E = \sqrt{m_0^2 + p^2} \quad . \quad (9)$$

- Für masselose Teilchen (z.B., Photon) 
$$E = |p| = f \quad . \quad (10)$$

d.h., mit  $c = 1$  , messen wir Energie, Impuls und Masse nur in  $MeV$  , mit Gl. (9), (10).

#### Übung 4:

Berechne die Energie  $E$  eines Protons (  $m_0 = 0,938 GeV/c^2$  ) mit einem Impuls  $p$  von:

$0, ; 100 MeV/c ; 500 MeV/c ; 1 GeV/c ; 2 GeV/c ; 5 GeV/c ; 10 GeV/c$

mit Hilfe von Gl. (6). (Behalte dabei  $c$  als Buchstaben, ohne seinen Wert einzusetzen, es wird sich kürzen!) Trage die Resultate in einer Tabelle ein und erstelle den Graph  $E$  gegen  $p$  . Vergleiche mit der selben Rechnung für ein Photon – verwende Gl. (7). Berechne die Geschwindigkeit des Protons (in % von  $c$  ) für jeden dieser Impulse mit Hilfe der 2. Gl. (8) (z.B., für  $p = 1 GeV/c$  findest Du  $v = 0,729355 c$  , d.h. 72,9355 %  $c$  ).

#### Übung 5:

Wie viel Energie wird freigesetzt bei der Vernichtung eines Elektron-Positron Paares

(  $m_0 = 0,511 MeV/c^2$  ) mit entgegengesetzten Impulsen  $1 MeV/c$  ,  $-1 MeV/c$  ?

Wenn 2 Photonen diese Energie aufnehmen sollen, welche Impulse würden sie haben?

## 6. Teilchen- und Hochenergie-Experimente

Es gibt viele Steine, große und kleine, trotzdem haben manche sonst ähnliche Eigenschaften, z.B. Härte und Dichte, und sie brechen manchmal auseinander. Es ist dann natürlich, sich zu fragen, woraus sie bestehen. So haben wir den Sand, die Moleküle, die Atome entdeckt und dabei Ziegel und Zement gemacht und Häuser gebaut, Energie erzeugt, Radiowellen erfunden, u.s.w. Manche Erfindungen waren gut, manche schlecht – aber das hängt weniger vom Wissen als vom Umgehen mit dem Wissen ab – ob Steine oder Kerne.

Die Hochenergiephysik untersucht die Struktur der Materie. Viele Erkenntnisse haben wir aus der Beobachtung natürlicher Prozesse gewonnen – wie Pierre und Marie Curie um 1900, die radioaktive Stoffe untersucht haben und die Transmutation der Elemente entdeckt (was Marie Curie wahrscheinlich auch das Leben gekostet hat).

Auch die kosmischen Strahlen, schon wenige Jahre später entdeckt, haben uns vieles gelehrt, und tun es weiterhin, weil sie a) sehr hohe Energien haben und b) nicht nur etwas über sich aussagen, sondern auch über das, woher sie kommen: Sterne, Galaxien, Schwarze Löcher, den Kosmos. Hohe Energien brauchen wir, um tief in die Struktur der Materie einzudringen. Natürliche Ereignisse haben entweder nicht genug Energie – wie die Kernzerfälle – oder sind rar und unkontrollierbar – wie die kosmische Strahlen. Deshalb machen wir kontrollierte Experimente.

Streuexperimente erlauben uns, die Struktur der Materie zu erforschen. So, wie man im Rutherford Versuch mit Hilfe der Streuung von  $\alpha$ -Teilchen auf Atome die innere Struktur dieser ermitteln konnte, erlauben uns Streuexperimente bei unvergleichbar höheren Energien in Teilchenbeschleunigern die Struktur der Teilchen zu erkunden. Dabei beobachten wir mit Hilfe von Detektoren, wie die Teilchen gestreut und welche anderen Teilchen produziert werden.

Die Detektoren benutzen vor allem Elektromagnetische Effekte um die erzeugten Teilchen zu identifizieren. Am Anfang war die Ionisationskammer, die Photoplatte oder die Nebelkammer, später mit der Zunahme der Energien kamen die Blaskammer und andere Geräte, heutzutage werden sehr komplizierte, sehr große Detektoren gebaut und verwendet. Die Vorgänge sind allerdings im wesentlichen immer die selben, die Teilchen erzeugen "Spuren" aus deren Form man schließen kann, welche Teilchen sie waren, welche Energie und Impuls sie hatten, etc – auch wenn heute diese "Spuren" nicht direkt zu sehen sind und alles weitgehend komputert ist.

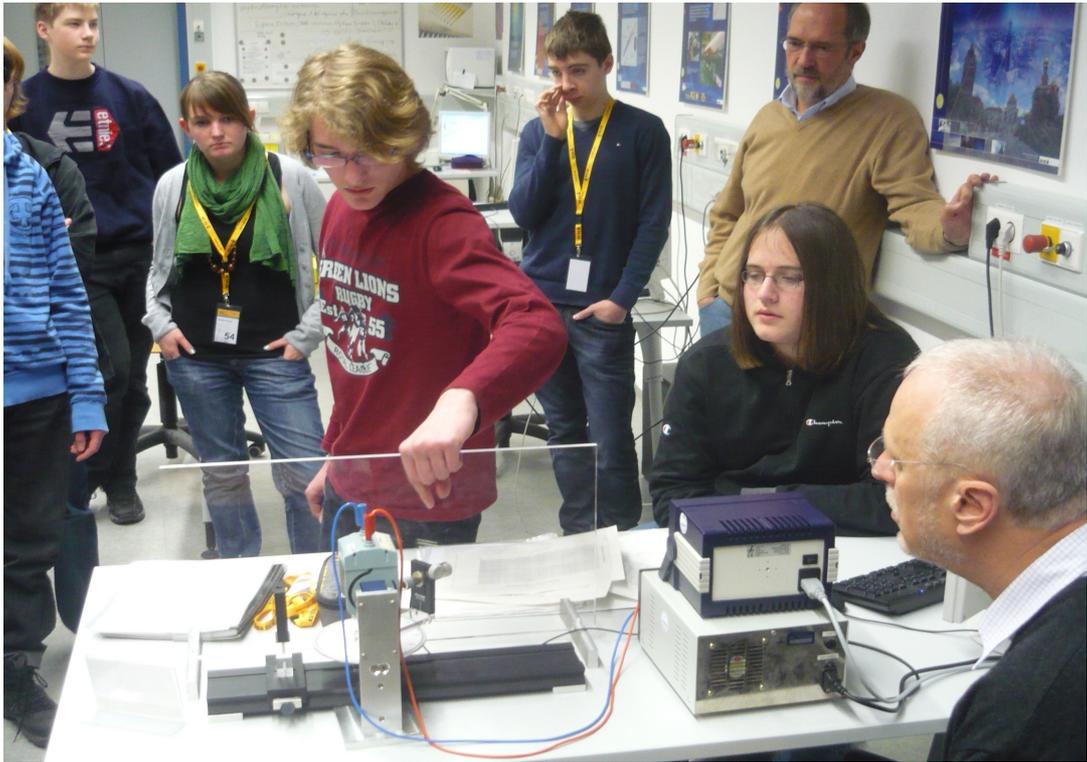
### Übung 6:

Beim jetzt durchgeführten Experiment am LHC in CERN werden Protonen mit der Energie von jeweils  $3,5 \text{ TeV} = 3500 \text{ GeV}$  auf einander gejagt.

a) Welchen Impuls hat ein so beschleunigtes Proton? Verwende Gl. (6). Die Protonen kommen in Paketen von etwa  $10^{11}$  Protonen, und im LHC sollen gleichzeitig etwa 3000 solcher Pakete laufen. Welcher Gesamtimpuls werden alle diese Pakete zusammen haben?

Welche Geschwindigkeit hat das Proton? Verwende Gl. (8). Welche Masse  $M$  sollte ein Körper haben, um bei einer Geschwindigkeit  $V = 100 \text{ Km/h}$  denselben Impuls zu entwickeln? (Verwende für diesen Körper die nichtrelativistische Gleichung  $p = M V$ .)

b) Bei diesen Experimenten entstehen beim Stoß der 2 Protonen (mit genau entgegengesetzten Impulsen) viele Teilchen. Welcher Gesamtimpuls, welche Gesamtenergie, Gesamtladung, Gesamtbaryonenzahl und Gesamtleptonenzahl haben die erzeugten Teilchen?

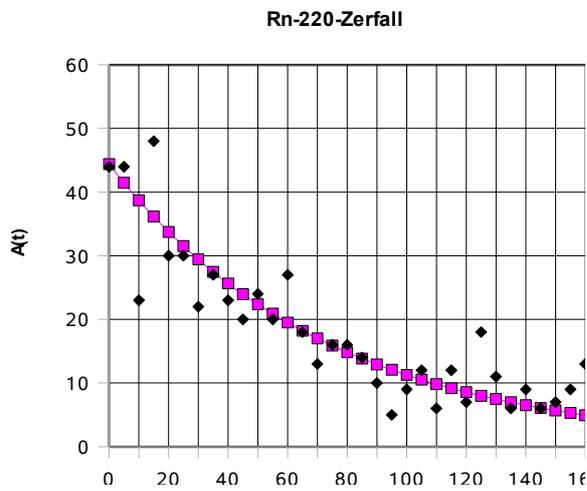




Rutherford Versuch.



Nebelkammer und Spuren von  $\alpha$  - Teilchen.

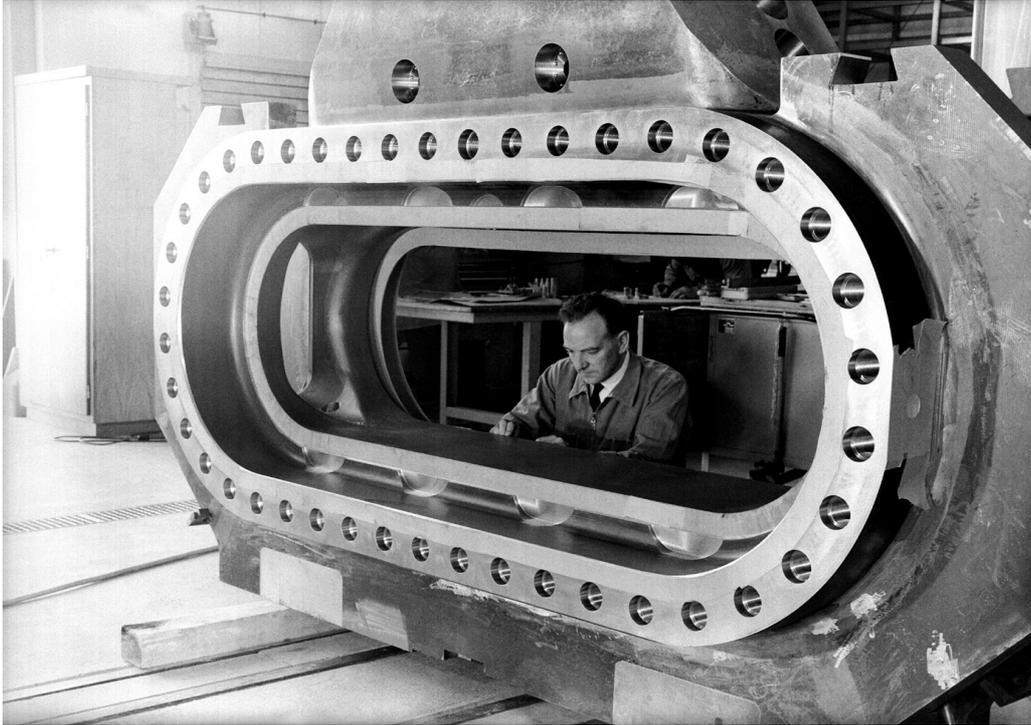


Fit der Zerfallsraten mit dem Exponential-Gesetz

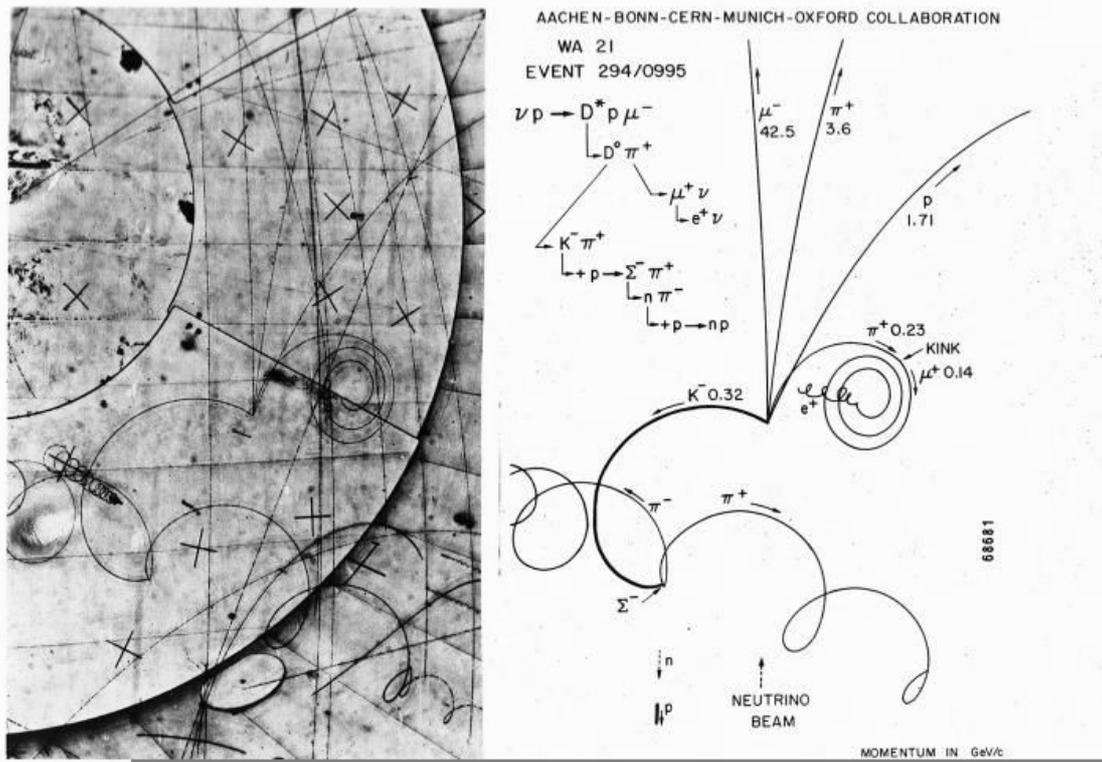
$$A(t) = A(0) \times 2^{-t/t_{1/2}} \quad (11)$$

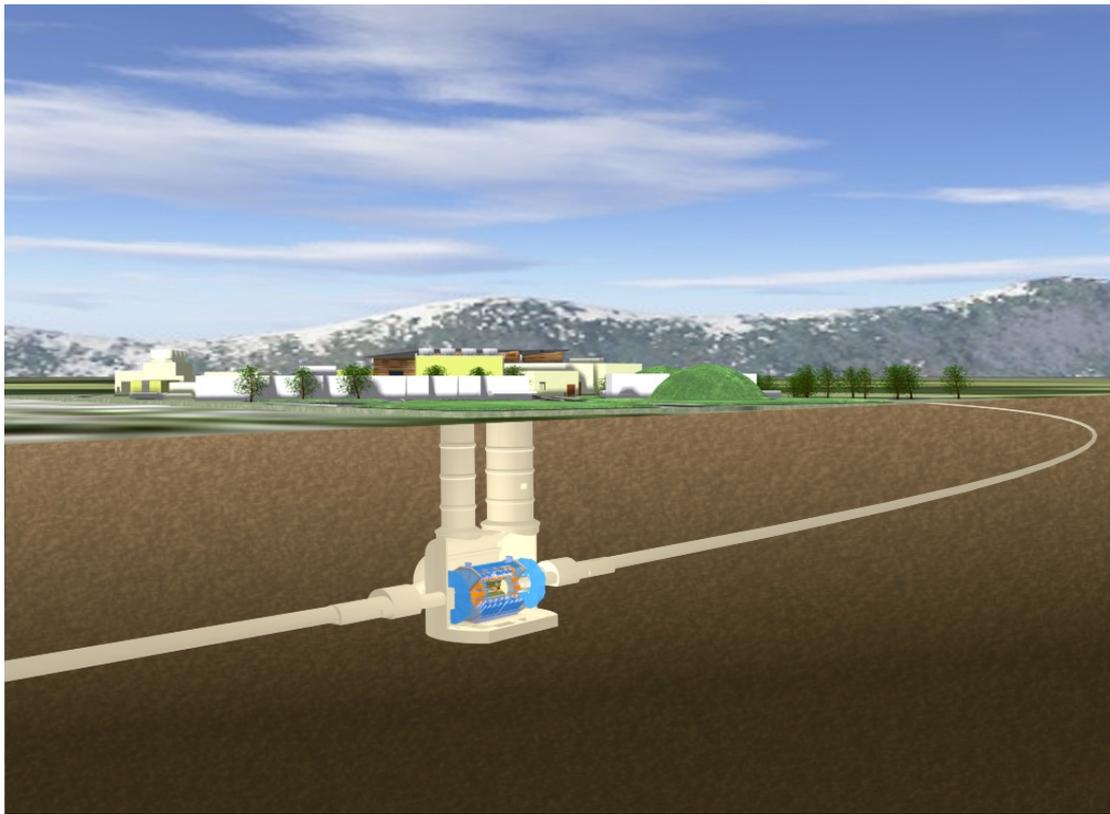
und Bestimmung der Halbwertszeit  $t_{1/2}$ .

Der Fit erfolgt durch *Minimierung der Summe der Quadrate der Abweichungen*, was die beste Abschätzung von  $t_{1/2}$  liefert..



CERN Blasenkammer (1965?), und Teilchenspuren im Blasenkammer, zusammen mit ihren Deutung.

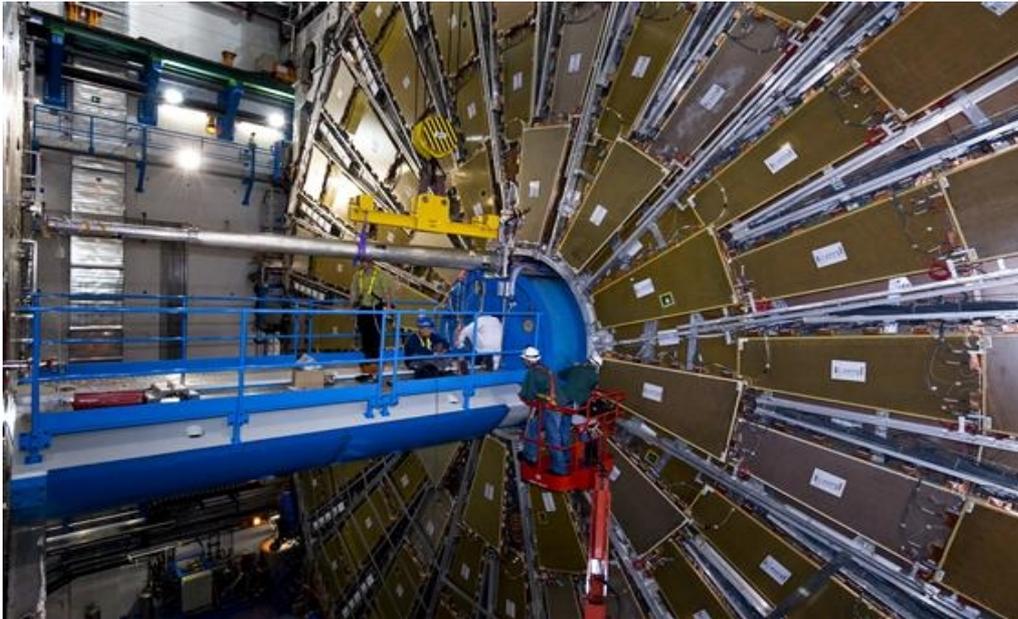




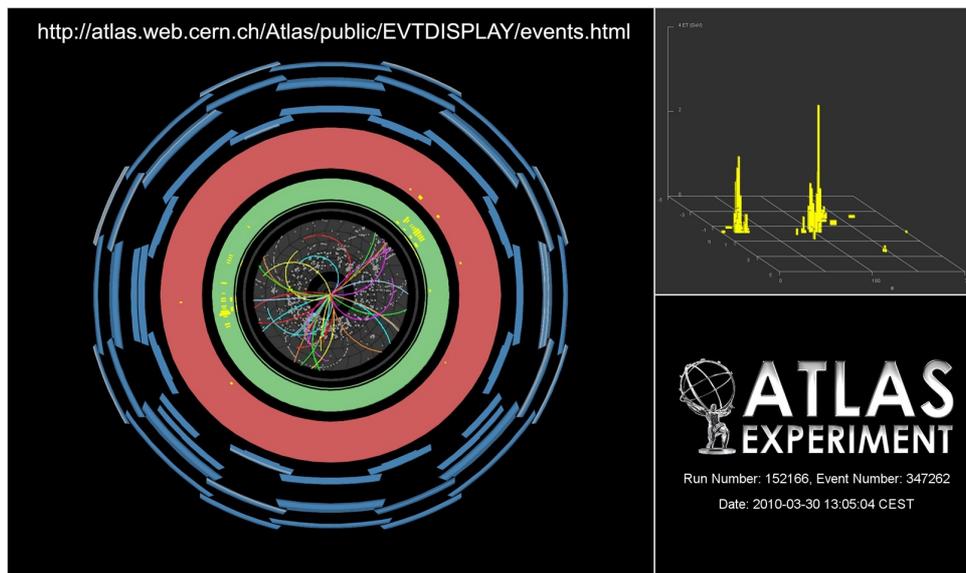
Der ATLAS Detektor im LHC Ring am CERN. Hier werden die Resultate der Streuung von Protonen auf Protonen untersucht.



Der LHC Tunnel: Beam-Rohr und Magneten.



Der Atlas Detektor (45 m lang, 25 m hoch, 7000 t schwer), und erste Resultate am 30.03.2010





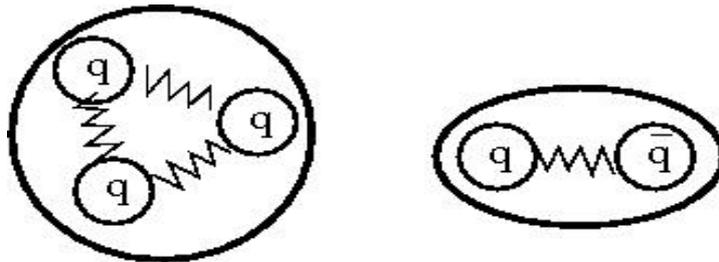
## 7. Die Quarks und die Struktur der Kernteilchen

Aus Streuexperimenten hat es sich noch in den 60-er Jahren des 20. JH herausgestellt, dass sowohl das Proton als auch das Neutron eine innere Struktur haben müssen, also nicht “elementar” sind (strukturlos). Nach guter alter Tradition hat man versucht, ihre Konstituenten zu finden, so wie bei Atomen und Kernen.

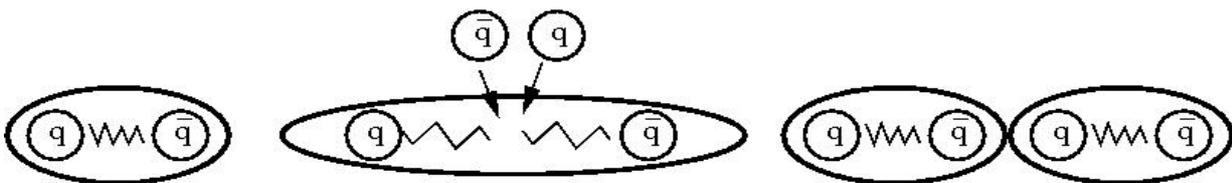
Nun ist schon der Übergang von Atomen zu Kernen nicht so einfach: ein Atom hat einen Kern und viele Elektronen, *sehr weit vom Kern entfernt*. Wenn man die Atome auseinander nimmt bekommt man die Kerne (z.B., die  $\alpha$  Teilchen aus dem Heliumatom) und die Elektronen frei.

Ein Kern hat viele Protonen und Neutronen, *dicht bei einander*, und wenn man die Kerne auseinander nimmt findet man stabile freie Protonen, kurzlebige freie Neutronen und eventuell *noch andere Teilchen* – Elektronen, Positronen und Neutrinos.

Die Konstituenten, die laut unseren Experimenten und Überlegungen *in den Hadronen* (Protonen, Neutronen, etc) sein sollen, kann man allerdings *gar nicht raus nehmen*: sie können nicht unter normalen Umstände frei existieren: diesen Sachverhalt nennt man “*confinement*”. Diese Konstituenten nennt man “*Quarks*” ( $q$ ) und sie bilden zu dritt die Baryonen ( $qqq$  oder  $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ ) und zu zweit die Mesonen ( $q\bar{q}$ ). Die Quarks bleiben darin gefangen, zusammen mit anderen Feldern, die “*Gluonen*”, die die Rolle “elastischer Bänder” zwischen den Quarks spielen.



Wenn wir durch Stöße versuchen, die Quarks aus einander zu nehmen dehnt sich das “Band”, bis es so viel Energie in sich staut, dass ein Quark-Antiquark-Paar entstehen kann: dann bricht das “Band” und zwei Mesonen aus den alten entstehen!

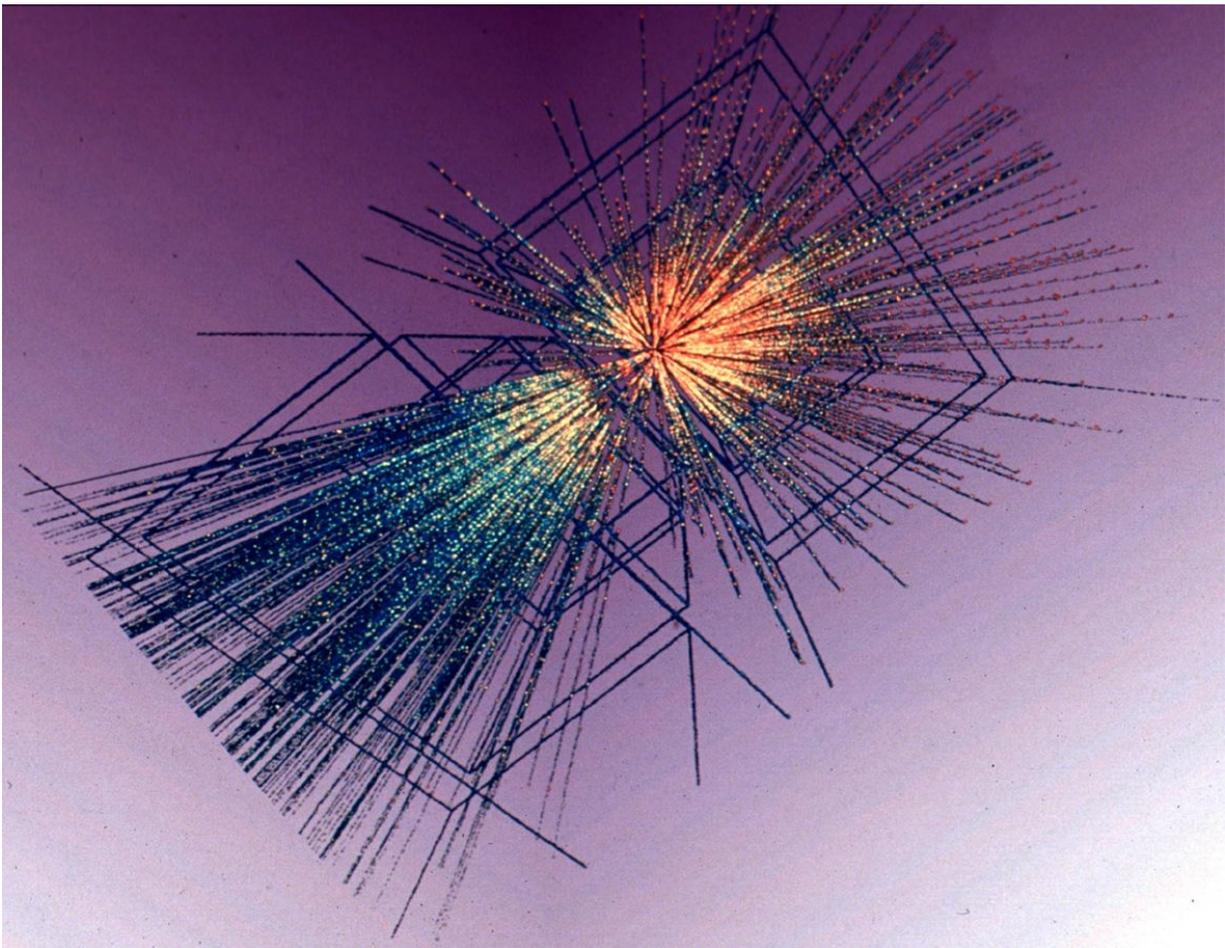


Der Prozess ist korrekt; das hier angegebene Bild ist allerdings nicht als solches korrekt. *Confinement* ist ein komplizierter Effekt und unsere Theorien können ihn nicht richtig beschreiben, obwohl er Bestandteil dieser Theorien ist!

Die Grundlage der *starken Wechselwirkung*, die die Teilchen und Kerne bildet ist die Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen. Diese ist dadurch bewirkt, dass die Quarks und die Gluonen eine Art “Ladung” tragen, die sog. “*Farbe*”, und sie arrangieren sich so, 3 Quarks (oder 3 Antiquarks) oder 1 Quark und 1 Antiquark, um diese Ladung zu neutralisieren. So wie Elektronen und Kerne elektrische Ladung tragen, aber sich in Atomen so zusammensetzen, dass die Atome elektrisch neutral sind, so sind die aus “farbigen” Quarks zusammengesetzten Hadronen farbneutral.

Obwohl elektrisch neutral, können Atome einander anziehen und z.B. Moleküle binden: ein Atom sieht die Ladungen im anderen Atom, aber nur *wenn es sehr nah kommt*. Ähnliches scheint mit den Kernteilchen zu passieren: wenn sie *nah zu einander kommen*, in Kernen, spüren sie eine *Rest-Farbwechselwirkung*. Diese Restwechselwirkung ist *kurzreichweitig*, weil sie nur dann gespürt wird wenn die Kernteilchen sehr nah zu einander sind, sie ist aber sehr stark.

Aber die Analogie mit Atomen und Kernen endet hier! Man kann die Quarks aus den Hadronen nicht herausnehmen. Nur bei den immensen Temperaturen und Dichten, die kurz nach dem Urknall geherrscht haben sollen, und die wir auch etwa beim LHC erzeugen können, schmelzen die Kernteilchen und die Mesonen und lassen ein sehr dichtes, sehr heißes *Plasma* aus *Quarks und Gluonen* entstehen. Dieses Plasma zu produzieren und untersuchen ist eine der Aufgaben jetziger Beschleuniger und das soll z.B. durch Stöße von schweren Ionen erzeugt werden.



Zusammenstoß von Blei Ionen mit Erzeugung einer Unmenge von Teilchen aus dem heißen Plasma am Zentrum des Stoßes. Die Aufgabe des ALICE Detektor am LHC ist das Studium der Eigenschaften dieses "*Quark-Gluon-Plasmas*".

#### Übung 7:

Prüfe die Ladungs-, Baryonenzahl- und Leptonenzahlerhaltung auf jeder Stufe des Prozesses im Blasenkammerbild auf Seite 19 an Hand der dort angegebenen Skizze. Was für eine Ladung, Baryonenzahl und Leptonenzahl muss das  $D^*$ -Teilchen haben, so dass diese Erhaltungsgesetze erfüllt werden? Ist es ein Hadron oder ein Lepton, ein Baryon oder ein Meson? Beachte, dass auf den 4. und 6. Stufe (linke Zweig) jeweils ein Proton (aus der Blasenkammer) in Anfangszustand hinzu kommt.

## 8. Das Standardmodell der Elementarteilchen:

Das Standardmodell fasst unsere Erkenntnisse über die Elementarteilchen in einer Reihe von Quantenfeldtheorien zusammen, die teilweise vereint sind (miteinander *verstrickt*). Das Standardmodell beschreibt wie die üblichen, uns bekannten Teilchen gebildet sind.

Strikt elementar (“strukturlos”) sind im Standard Modell:

- die *Quarks*,
- die *Leptonen*,
- das *Photon* und die anderen Vermittler der Wechselwirkungen.

Die *Vermittlerfelder(-teilchen)* für die im Modell vertretenen Wechselwirkungen sind:

- die “*Gluonen*” für die *Starke Wechselwirkung*,
- die  $W^\pm$  und  $Z$  *Bosonen* für die *Schwache Wechselwirkung*,
- das *Photon*  $\gamma$  für die *Elektromagnetische Wechselwirkung*.

Die *Materiefelder* sind *Quarks* und *Leptonen*. Sie treten in 3 “Familien” (“Generationen”) auf.

**Tabelle 2: Die Elementarteilchen (Materiefelder) der 1. Familie**

<i>Elem. Teilchen</i>	<i>Name</i>	<i>Baryonen-zahl B</i>	<i>Leptonen-zahl L<sub>e</sub></i>	<i>Spin</i>	<i>Ladung Q</i>	<i>Masse</i>
$u$ $\bar{u}$	Up-Quark -Antiquark	$\pm \frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{2}$	$\pm \frac{2}{3}$	1 - 4 $MeV/c^2$
$d$ $\bar{d}$	Down -Quark -Antiquark	$\pm \frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{2}$	$\mp \frac{1}{3}$	3 - 8 $MeV/c^2$
$e^-$ $e^+$	Elektron Positron	0	+1 -1	$\frac{1}{2}$	-1 +1	0.5 $MeV/c^2$
$\nu_e$ $\bar{\nu}_e$	Neutrino Antineutr.	0	+1 -1	$\frac{1}{2}$	0 0	< 3 $ev/c^2$

**Tabelle 3: Die 3 Familien (mit entsprechenden Antiteilchen)**

<i>Teilchen</i>	<i>Name</i>	<i>Masse</i>	<i>Teilchen</i>	<i>Name</i>	<i>Masse</i>	<i>Teilchen</i>	<i>Name</i>	<i>Masse</i>
$u$	Up	1 – 4 $MeV/c^2$	$c$	Charm	1-1,5 $GeV/c^2$	$t$	Top	170-180 $GeV/c^2$
$d$	Down	3 – 8 $MeV/c^2$	$s$	Strange	80 – 150 $MeV/c^2$	$b$	Bottom	4-4,5 $GeV/c^2$
$e$	Electron	0.5 $MeV/c^2$	$\mu$	muon	106 $MeV/c^2$	$\tau$	tau	1,77 $GeV/c^2$
$\nu_e$	$e$ - Neutrino	< 3 $ev/c^2$	$\nu_\mu$	$\mu$ - Neutrino	< 190 $ev/c^2$	$\nu_\tau$	$\tau$ - Neutrino	< 18 $MeV/c^2$

Die Ladungen der Materiefelder sind dieselben wie bei der ersten Familie. Die Leptonenzahl ist für jede Familie definiert (und erhalten):  $L_e, L_\mu, L_\tau$ . Für Quarks gibt es noch andere (i.A. nicht erhaltene) Quantenzahlen. Die Vermittlerfelder wirken in allen Familien. Die Teilchen der 1. Familie sind stabil, alle andere zerfallen in diesen unter Berücksichtigung der Erhaltungssätze.

**Tabelle 4: Die Vermittler-Teilchen**

<i>Teilchen</i>	<i>Name</i>	<i>Spin</i>	<i>Ladung</i>	<i>Masse</i>	<i>Wechselwirk.</i>
$\gamma$	Photon	1	0	0	Electromg.
$W^\pm$	W-Boson	1	$\pm 1$	$80 \text{ GeV}/c^2$	El.-Schwach
$Z$	Z-Boson	1	0	$91 \text{ GeV}/c^2$	Schwach
$G$	Gluon	1	0	0	Stark

Die Quarks sind nicht als frei direkt beobachtbar. Die beobachtbare Teilchen sind  
 - *Hadronen* (starke Wechselwirkung): *Baryonen* (schwer) und *Mesonen* (mittelschwer)  
 - *Leptonen* (keine starke Wechselwirkung; leichte Teilchen - das stimmt eigentlich nicht mehr für die 2. und 3. Familie!). Manchmal wird das  $\mu$  Lepton auch "Meson" genannt.

Die *Leptonen*, die *Quarks* und die *Vermittlerteilchen* sind *elementar* (strukturlos). Die *Baryonen* und die *Mesonen* sind nicht elementar, sie setzen sich zusammen aus Quarks, z.B.:  
 $p = uud$ ,  $n = udd$ ,  $\bar{p} = \bar{u} \bar{u} \bar{d}$  (Baryonen),  $\pi^+ = u \bar{d}$ ,  $\pi^0 = u \bar{u} + ' d \bar{d}$  (Mesonen).  
 (Hier bedeutet '+' eine quantenmechanische Überlagerung, eine Art "sowohl als auch".) Die bekannteste Teilchen setzen sich aus der  $u, d, s$  Quarks (und Antiquarks) zusammen.

**Übung 8:**

Betrachte Quarksysteme mit *bis zu 3* Quarks und/oder Antiquarks aus der ersten Familie.

Wie kann man die Quarks kombinieren, um  $B = 0$  zu bekommen? Welche Quarksysteme mit Baryonenzahl  $B = 0$  sind also möglich? Welche Ladungen  $Q$  können sie haben?

Welche Quarksysteme mit Baryonenzahl 1 oder -1 sind möglich, welche Ladungen können sie haben? Erstelle eine Liste dieser Systeme mit deren  $B$  und  $Q$ .

Schließlich verlangt das mathematische Schema des Standardmodells noch ein Teilchen, das sog. Higgs Boson, um die Eigenschaften der schwachen Wechselwirkungen zu erklären. Alle Teilchen des Standardmodells sind "gefunden" worden, das heißt sie wurden in Experimenten erzeugt und nachgewiesen, mit Ausnahme des Higgs-Boson. Es ist eine Herausforderung an die jetzige Experimente, die Frage des Higgs-Bosons zu lösen.

Im Standardmodell nicht eingebaut ist die Gravitation. Dazu verfügen wir zur Zeit nur über eine klassische Theorie, die *Allgemeine Relativitätstheorie*. Allgemeinrelativistische Effekte werden nicht nur bei großen Massen wichtig (etwa, galaktische schwarze Löcher) sondern überhaupt, wenn die Krümmung des Raum-Zeit-Gefüges groß wird: also wenn große *Energiedichten* vorhanden sind. Wir erwarten daher, dass bei sehr kleinen Abständen (sog. Planckslänge  $l_p \approx 10^{-35} \text{ m}$ ) Quanteneffekte in der Gravitation und dementsprechend Gravitationseffekte in der Quantentheorie *nicht vernachlässigbar* sind. Diese Situationen können wir zur Zeit nicht beschreiben. Die heutige Forschung versucht einen Nachfolger des Standardmodells zu finden und auch eine Vereinheitlichung mit der Gravitation zu schaffen.

## 9. Prozesse:

Alle Änderungen, Umwandlungen, Stöße, Zusammensetzungen oder Zerfälle von Teilchen und Kernen bezeichnet man als Prozesse. Sie werden durch "Gleichungen" beschrieben, oder auch graphisch, durch "Diagramme" - man denke an die Spuren in einer Blasenkammer.

Wir betrachten hier die Diagramme *nur als Kurzdarstellungen der Prozesse*. Im Gegensatz dazu sind die sog. Feynman Diagramme, die in solchen Zusammenhängen verwendet werden, nicht nur Kurzdarstellungen, sondern durch präzisen Regeln an die Theorie gebunden und können deshalb nicht nur als Kurznotation und Hilfe zum Prüfen der Erhaltungsgesetze, sondern auch für Berechnungen verwendet werden.

Die verschiedenen Prozesse beinhalten physikalische Aussagen: entweder beschreiben sie beobachtete Phänomene und verlangen eine theoretische Interpretation, oder werden durch eine Theorie vorausgesagt und sollen in Beobachtungen nachgeprüft werden.

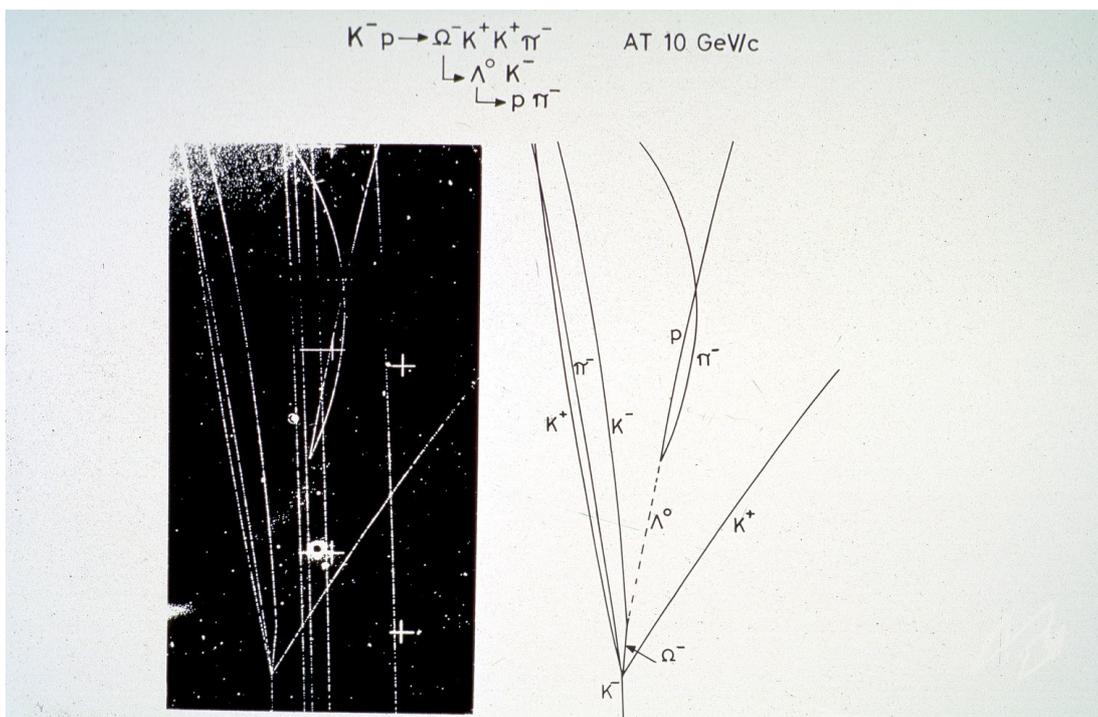
Ein wichtiges Instrument in Deutung und Aufstellung von Prozessen sind die Erhaltungsgesetze.

Man kann immer ein geeignetes *Bezugssystem* wählen, so dass man leichter die Impuls- und Energieerhaltung nachprüfen kann. Die Impulse der Teilchen *relativ zu einander* (= derer Differenz) ändern sich nicht wenn man den Bezugssystem ändert! Zwei besondere Bezugssysteme sind:

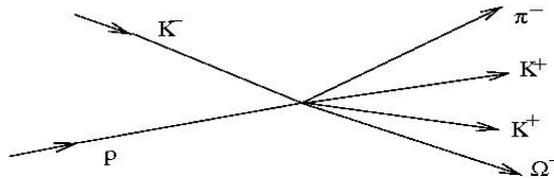
- Das *Schwerpunktsystem*: die ankommenden 2 Teilchen haben gleiche, entgegengesetzte Impulse (also, Gesamtimpuls = Summe der Impulse = 0),
- Das *Laborsystem*: ein der zwei Teilchen ist in Ruhe (sein Impuls = 0).

### Beispiele:

a) Berühmtes Blasenkammer "event" (CERN, 1973) mit dem Nachweis des  $\Omega^-$  Baryon, ein wichtiger Schritt in der Aufstellung des Quarks Modells, was später zum Standardmodell geführt hat. Der erste Teil dieses Prozesses (ein  $K^-$  Meson stößt auf einen ruhenden Wasserstoffkern



im Kammer) ist:

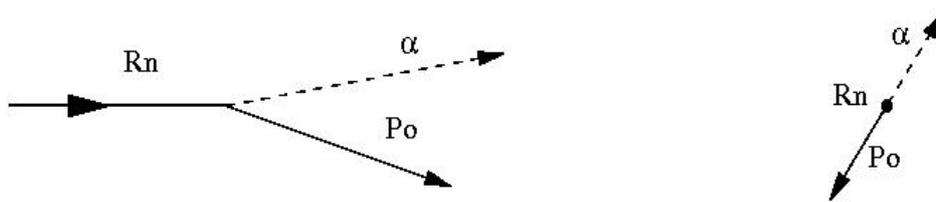


Hier sind  $K$ ,  $\pi$  Mesonen,  $\Omega^-$  ein Baryon, alle instabil. Das letztere zerfällt in einem weiteren Baryon,  $\Lambda^0$  das weiter in das stabile  $p$  (Proton) und das  $\pi^-$  zerfällt. Die Mesonen sind auch instabil, sie zerfallen aber viel langsamer, außerhalb des Bildes.

**Bemerkungen:**

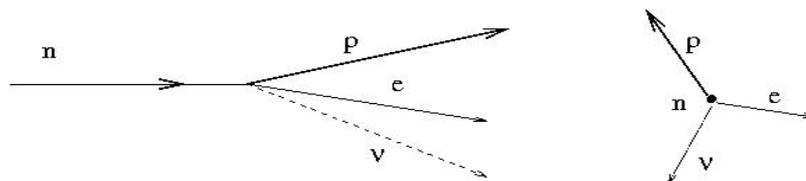
*Zur Deutung:* Die Spuren der  $K$ ,  $\pi$  Mesonen und des Protons werden durch ihr Verhalten im magnetischen Feld identifiziert: positiven Teilchen werden nach rechts, negativen nach links abgelenkt, leichteren mehr ( $\pi$ ), schwereren weniger ( $K$ ,  $p$ ); aus der Krümmung lässt sich der Impuls der Teilchen berechnen. Wir sehen auch eine Spur (mit  $\Omega^-$  gekennzeichnet) die ein  $K^-$  produziert, und irgendwo höher das Auftauchen eines  $\pi^-$ ,  $p$  Paares. Nach Auswertung der Impuls-Daten wird klar, dass dazwischen ein schweres, neutrales Teilchen (Ladungserhaltung!) geflogen ist, das, weil neutral, keine Spur hinterlassen hat; welche Massen (aus Energie-Impuls-Erhaltung) dieses (das  $\Lambda^0$ ) und das  $\Omega^-$  haben; und dass sie Baryonen sein müssen (Baryonenzahl-Erhaltung).  
*Zu den Erhaltungsgesetze:* In einem mehrstufigen Prozess müssen die Erhaltungssätze *in jeder Stufe* stimmen! Siehe die vorangehende Figur (der Graph stellt nur eine Stufe des Prozesses dar).

b) Kernzerfälle sind auch solche Prozesse, z.B.:  ${}_{86}^{222}\text{Rn} \rightarrow {}_{84}^{218}\text{Po} + {}_2^4\text{He}$

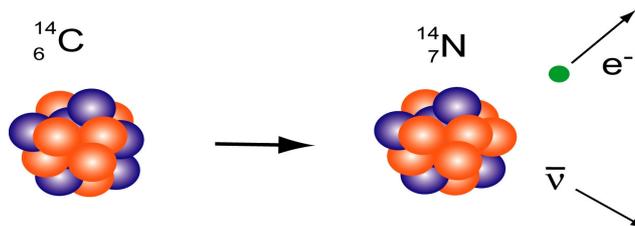


wobei rechts derselbe Prozess im Ruhesystem des Radons dargestellt wird.

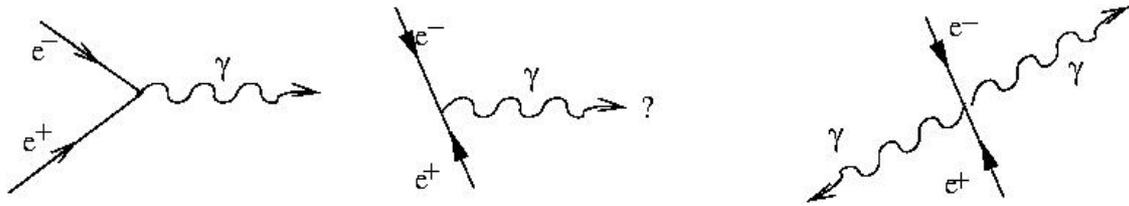
c)  $\beta^-$  - Zerfall des Neutrons:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



Hier wäre auch ohne  $\bar{\nu}_e$  die *Ladungserhaltung* gewährleistet, aber sowohl die *Spinenerhaltung* als auch die *Leptonenzahlerhaltung* verletzt. Allerdings wurde seinerzeit auf die Anwesenheit des Neutrinos aus dem Verhalten des Energiespektrums geschlossen, weil man den Prozess nur in Kernzerfällen beobachtet hat (man hatte noch keine freie Neutronen-Quelle):



d) Elektron-Positron Paar Vernichtung in einem oder in 2 *realen Photonen*

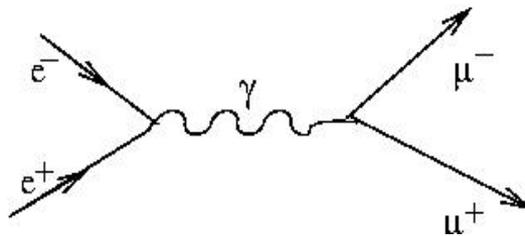


In diesem Fall sagt uns die Energie-Impuls-Bilanz, ob die Prozesse stattfinden können!

**Übung 9:**

Prüfe die Energie und Impuls Erhaltung für die Prozesse d), unter der Bedingung dass alle Teilchen real sind, also die Energie-Impuls-Relationen Gl. (6) und (7) gelten. Verwende den 2., bzw. den 3. Graph, wo man das *Schwerpunkt-Bezugssystem* gewählt hat.

e) Elektron-Positron Paar Vernichtung mittels eines sog. *virtuellen Photons*:

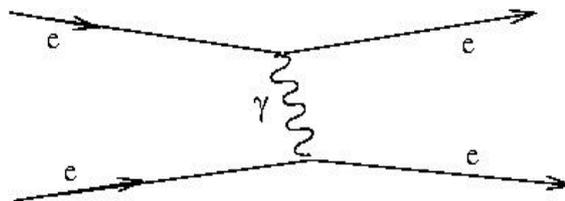


In diesem Fall *stimmt die Energie-Impuls Relation für das dazwischen geschaltete Photon nicht*, es ist kein reales Photon und deshalb heißt es *virtuell*. Er zerfällt gleich – hier in ein  $\mu^+, \mu^-$  Paar.

**Übung 10:**

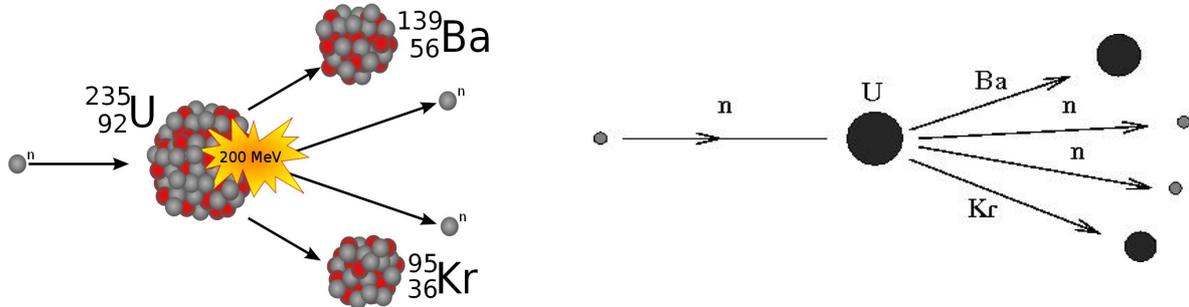
Ein Elektron-Positron Paar ( $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ ) mit entgegengesetzten Impulse  $p, -p$  annihiliert, mit Erzeugung eines muonen Paares  $\mu^+, \mu^-$  ( $m_\mu = 105,638 \text{ MeV}/c^2$ ) - Diagramm e). Wie viel muss  $p$  mindestens sein, so dass ein reales  $\mu^+, \mu^-$  Paar produziert werden kann? Welche Energie und Impuls hat dann das *virtuelle* Photon, welche Impulse die zwei muonen?

f) Wechselwirkung zwischen Elektronen *vermittelt* durch Photonaustausch.



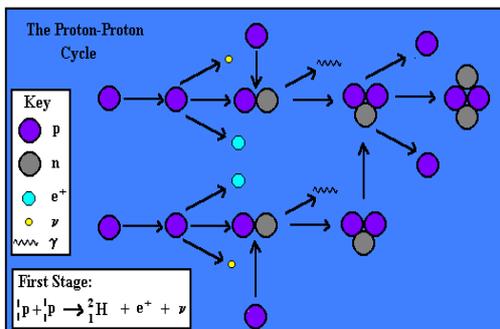
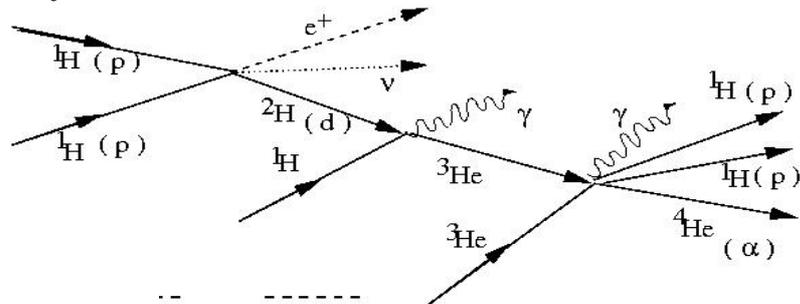
Dieser Prozess stellt die Wechselwirkung zweier Elektronen (oder Positronen, oder Positron und Elektron) mittels "Austausch" eines *virtuellen* Photons dar. Das ist ein grundlegender Prozess in der Quantenfeldtheorie und dieses Diagramm ist in der Tat ein Feynman Diagramm, das heißt, es ist nicht nur eine Illustration, sondern ein theoretisches Instrument. Im klassischen Limes trägt dieser Prozess zu der Coulomb Kraft bei.

g) Die *Spaltung* größerer Kerne erzeugt Energie. Bestimmte Kernspaltung-Prozesse werden durch Neutronen Beschuss provoziert und produzieren ihrerseits mehrere Neutronen, die wiederum Kerne spalten können. Das führt zu einer *Kettenreaktion*, die unkontrolliert in einer Bombe läuft, kontrolliert aber Energieproduktion in einem Kernkraftwerk leistet. Die Kontrolle erfolgt dadurch, dass man die mittlere Anzahl der Neutronen, die einen Kern finden und spalten, auf genau 1 aufrechterhält. Die Energie erhält man als Bewegungsenergie der Zerfallsprodukte.



h) Bei kleinen Kernen dagegen, wird Energie durch *Fusion* erzeugt: kleine Kerne schmelzen zusammen und setzen Energie frei. Diese sind die Prozesse, die etwa in der Sonne laufen und denen die Sonne ihre Existenz verdankt – und wir deren Licht! Sie brauchen hohe Temperaturen zum Anzünden (weil die Kerne müssen gegen der Coulomb-Abstoßung zusammen gebracht werden), einmal gestartet sind sie aber unter der wirkungsvollsten Energieproduktionsprozesse (wir haben das leider bisher nur in der H-Bombe realisiert). Einer dieser Prozesse schmelzt 4 Wasserstoffkerne ( $p$ ) zu einem Heliumkern ( $\alpha$ -Teilchen) zusammen.

Der folgende Prozess erzeugt Helium aus Wasserstoff. Dafür braucht man also 4 Teilchen: 2 Protonen  $p$  (Wasserstoff-Kerne) und 2 Neutronen  $n$ . Die Wahrscheinlichkeit, dass sich 4, extrem schnelle Teilchen gleichzeitig treffen ist praktisch null. Darüber hinaus müssen die Neutronen erst erzeugt werden (hier als Teil von  $d = pn$ : "umgekehrten  $\beta$ -Zerfall"). Der Prozess kann deshalb nur in mehreren Schritten stattfinden, wo jedes mal nur 2 Teilchen auf einander stoßen.

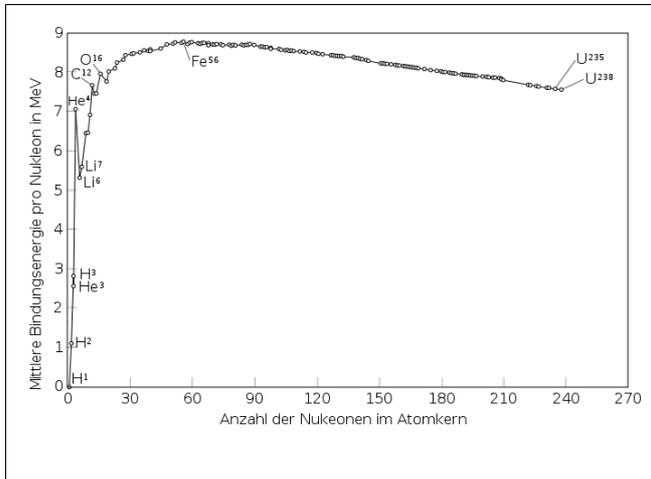


Im Diagramm ist die Hälfte des Prozesses dargestellt, der obere Zweig kommt noch einmal unten gespiegelt vor (siehe nebenstehendes Bild). Hier:

$${}^2H = d = np, \quad {}^3He = ppn, \quad {}^4He = ppnn = \alpha$$

Dieser Prozess ist eine der Grundlagen für die Existenz der Sterne.

Die Struktur der Kerne weist eine Besonderheit auf: bei kleinen Kernen nimmt die *Bindungsenergie per Nukleon* mit der Anzahl von Nukleonen zu, bei größeren ab. Das Maximum (Hochpunkt der Kurve) liegt beim Eisen.



Wenn die gesamte Bindungsenergie am Ende eines Prozesses größer ist als am Anfang, so liefert der Prozess Energie. Das bedeutet, dass man bei der *Fusion* kleinerer Kerne Energie gewinnt, nämlich der Unterschied zwischen der Bindungsenergie des entstandenen Kernes und der *Summe* der Bindungsenergien der 2 Kerne **vor** der Fusion, die insgesamt kleiner ist. Bei größerer Kernen setzt dagegen die *Spaltung* Energie frei, weil jetzt die Summe der Bindungsenergien der 2 Kerne **nach** der *Spaltung* größer ist. Der Umkehrpunkt liegt bei Eisen!

Das ist auch für Astrophysik von Bedeutung: Ein Stern fängt an zu leuchten wenn durch gravitationellem Zusammenfallen die Temperatur im innere hoch genug wird, dass Fusionsprozesse starten können, wodurch Wasserstoff “verbrannt” und Helium produziert wird. Nachdem der Wasserstoff aufgebraucht wird, folgen die nächste Fusion-Stufen, von Helium zum Kohlenstoff, Stickstoff, u.s.w *bis hin zu Eisen*.

Da ab Eisen die Fusion keine Energie mehr freisetzt fehlt nun der Druck im Inneren des Sterns, der bisher den gravitationellen Kollaps aufgehalten hat, und der Stern fällt in sich zusammen. Je nach Größe des Sterns kann das ein mehr oder weniger gewaltige Ereignis sein, ein Stern mit mehreren Sonnenmassen kann zu einer Supernova werden, und strahlt für eine kurze Zeit so viel wie eine ganze Galaxie (100 Milliarden Sterne). In einigen Millisekunden während dieser Explosion werden alle schwerere Kerne erzeugt, und damit die Grundlagen des Lebens. Der Endzustand eines Sterns hängt vor allem von seiner Masse ab, z.B.: ein Zwerg, ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch.

### Übung 11:

Untersuche folgende Prozesse in Bezug auf die  $Q$ ,  $B$  und  $L_e$  Erhaltungsgesetze.

Welche Prozesse können allein aufgrund dieser Gesetze nicht stattfinden (sind “verboten”)?

- $p + n \rightarrow e^+ + e^+ + \bar{p} + n + n$
- $p + d \rightarrow n + d + e^+ + \bar{\nu}_e$
- $p + e^- \rightarrow n + e^+ + e^- + \nu_e$  .

### Übung 12:

Bei einem  $p p$  Ereignis (“event”) findet man als Resultat ein  $n$  und Hinweis auf einem sehr kurzlebigen, schweren Teilchen  $X$  das gleich in einem  $p$  und einem  $\pi^-$  Meson zerfällt.

a) Welche Ladung, Baryonenzahl und Leptonenzahl muss  $X$  haben?

Findest Du ein solches Teilchen in der in Übung 8 erstellten Tabelle? Welcher Quarkinhalt hat es?

b) Welche Ladung hat das  $\pi^-$  Meson in diesem Ereignis?

### III. Das Urknall-Modell (das “Standard Kosmologische Modell”):

Das Standard Kosmologische Modell beschreibt den Kosmos, es ist daher eine Theorie der Materie und des Raum-Zeit-Gefüges. Es bezieht daher die Allgemeine Relativitätstheorie und das Standardmodell der Elementarteilchen mit ein. Obwohl diese Theorien nicht in einem einzigen theoretischen Schema vereint sind, sie stellen sich gegenseitig Bedingungen und ihre Resultate müssen in Anklang gebracht werden. Im speziellen für die Elementarteilchenphysik bringt das kosmologische Standardmodell somit sowohl Fragen als auch Erkenntnisse bezüglich der Weiterentwicklung der Theorie jenseits des gegenwärtigen Standardmodells der Elementarteilchen.

#### 1. Problemstellung und Geschichte

Das Universums als “alles was es gibt” ist ein philosophischer Begriff, verbunden mit der Frage des was wir unter “alles” und “Existenz” verstehen. Sie kann nicht in der Physik behandelt werden.

Für die Physik ist Universum – oder der Kosmos - das größte zusammenhängende Gebiet, das wir untersuchen können, das wir beeinflussen oder aus dem Einflüsse auf uns kommen können, mit dem wir also irgend einen Kontakt hatten, haben oder werden haben können - direkt oder indirekt.

#### Bemerkung:

Die Frage ist, ob ein Gebiet, Gegenstand, etc unsere Schlussfolgerungen oder Beobachtungen bezüglich andere Gebiete oder Gegenstände beeinflussen kann. So ist es grundsätzlich unmöglich, Information aus dem Inneren eines *Schwarzen Lochs* zu bekommen. Schwarze Löcher sind aber in unseren Theorien beinhaltet und können nicht willkürlich davon entfernt werden – somit sind sie indirekt Gegenstände der Physik (woraus sich auch die Möglichkeit von indirekte Beobachtungen ergibt – etwa Einfluss durch Gravitation auf Sternen, Licht, etc).

Eine ähnliche Situation trat im Standardmodell der Elementarteilchen auf: die Quarks sind unter normalen Umständen nicht direkt beobachtbar, aber als Grundelemente der Theorie, indirekt, sowohl als notwendige theoretische Bausteine als auch durch experimentellen Effekten bemerkbar.

Der besonderer Charakter der Gravitation versteht man am besten in der Allgemeinen Relativitätstheorie, weil sie sich in dieser Theorie als eine Eigenschaft von Raum-Zeit selbst erweist und damit universell ist. Die Einstein-schen Gleichungen verbinden, vereinfacht gesagt, die Struktur des Raum-Zeit-Kontinuums, insbesondere seine Krümmung, mit der Materie- und Energiedichte. Die Gravitation ergibt sich als Resultat dieser Verknüpfung. Es ist nahe liegend, dass damit Modelle für das Universum, also kosmologische Modelle entwickelt werden können.

Anfang des 20. JH passieren viele aufregende Sachen:

- Nach der Veröffentlichung 1916 der ART durch Einstein folgen die Versuche, Lösungen der Gleichungen zu finden, die als Modelle für das Universum dienen könnten.
- 1917 folgt Einstein's erste Versuch ART auf Kosmologie anzuwenden. Einstein sucht nach einem statischen, unveränderlichen Universumsmodell, dieses erweist sich aber als instabil.
- 1922 veröffentlicht Friedmann eine Lösung der Gleichungen die ein expandierendes Universums beschreibt – was Einstein nicht zu akzeptieren vermag!
- Diese Lösungen wurden trotzdem weiter studiert, aber der Durchbruch kommt erst nach der 1925 Präsentation der Hubble-schen Resultate, die die richtigen Abstände zu den Galaxien (“Nebel”) feststellt, der Publikation 1927 von Lemaitre eines expandierenden Kosmosmodells und der Entdeckung der Rotverschiebung, die mit der Expansion in Zusammenhang gebracht wurde.
- Nachdem die Annahme einer Expansion akzeptiert wurde (Einstein, de Sitter, Gamow, u.a.) war es nahe liegend, die Expansion zurück zu ihrem Ursprung zu verfolgen. So ergab sich das Urknall Modell, das seitdem weiter entwickelt und heute das Standardmodell der Kosmologie wurde.

In diesem Modell dehnt sich der Raum selbst und nimmt alle Sterne und Galaxien mit sich, die in ihm "schwimmen". Damit wachsen die Entfernungen zwischen diesen ständig, und die Geschwindigkeit, mit der diese Entfernungen wachsen, ist mit der Entfernungen selbst proportional:

$$v = H d \quad (12)$$

Das ist die sog. *Hubble-sche*, oder *Geschwindigkeit-Entfernung-Gesetz*. Hier ist  $d$  der Abstand zwischen 2 Galaxien,  $v$  ihre "*Fluchtgeschwindigkeit*" (die Geschwindigkeit, mit der  $d$  wächst) und  $H$  die sog. *Hubble-Konstante* ist. Für Abstände im Kosmos ist die adequate Einheit das *Lichtjahr (LJ)*: der Abstand, den das Licht in einem Jahr hinter sich legt. Eine andere übliche Einheit ist das *parsec (pc)*. Wir haben:

$$1 \text{ LJ} \simeq 0,947 \times 10^{13} \text{ Km} \quad , \quad 1 \text{ pc} \simeq 3,26 \text{ LJ} \quad (13)$$

Die neueste Bestimmung von  $H$  ist:

$$H \simeq 70 \text{ km/sec} \times \text{Mpc} \simeq \frac{1}{14 \text{ Milliarden Jahre}} \quad (14)$$

Das Alter des Kosmos ergibt sich in Rückverfolgung der Expansion als etwa *14 Milliarden Jahren*.

Ein wichtiger Aspekt in der Kosmologie ist die *Homogenität* und *Isotropie* des Kosmos. Das bedeutet, grob gesagt, dass das Universum überall und in allen Richtungen dasselbe ist. Diese Aussage, häufig auch als "*kosmologisches Prinzip*" zitiert, trifft *für das Universum bei großen Skalen* zu: Ab etwa  $10^8$  LJ erscheint das Universum flach (nicht gekrümmt!), homogen und isotrop. Bei kleineren Skalen - Galaxien-Clusters, Galaxien, Sterne, Erde, Atome gibt es dagegen die Unregelmäßigkeiten, denen auch das Leben entspringt.

Dementsprechend ist das Bild des Universums das eines Gummiballons auf den *cent* Stücke geklebt sind. Der Ballon bläht sich ständig auf, die Galaxien (die cents) bleiben unverändert weil sie durch Gravitation und andere Kräfte zusammengehalten sind, entfernen sich aber immer mehr voneinander. Wenn wir von Beobachtungen sprechen beziehen wir das natürlich auf uns – z.B. wenn wir das *Hubble-sche Gesetz* nachprüfen. Das heißt nicht, das wir uns in der Mitte des Universums sehen! - das selbe Bild gilt für einen Alien in irgend einer anderen Galaxie!

Präziser gesagt bedeutet *Homogenität* räumliche Gleichmäßigkeit zu jeder gegebenen Zeit. In Relativitätstheorien muss man allerdings erst definieren, was "ein Zeitpunkt" für das ganze Universum ist. Etwas leichter lässt sich *Isotropie* erklären: in jeder Umgebung eines *Raum-Zeitpunkts* ("*Ereignis*") sind die räumlichen Richtungen nicht unterscheidbar. Daraus folgt dann auch die Homogenität.

#### *Bemerkung:*

Der Durchmesser der Sonne ist etwa *1,4 Millionen Km* groß, und wir sind etwa *150 Millionen Km* von ihr entfernt: das sind etwa *8 Lichtminuten* oder  $1,6 \times 10^{-5} \text{ LJ}$  .

Der nächste Stern befindet sich in etwa *4 LJ* Entfernung. Unsere Galaxie, die *Milchstraße*, hat etwa *100-300 Milliarden* Sterne, ist scheibenförmig, mit einem Durchmesser von etwa *100000 LJ* und eine Dicke von etwa *3000 LJ*.

Die nächste Galaxie, *Andromeda* hat ähnliche Ausmaße und ist etwa *2,3 Millionen LJ* entfernt. Die am weitesten beobachteten Objekte befinden sich in etwa *13 Milliarden LJ* Entfernung.

Der Kosmos ist relativ leer: Die Abstände zwischen den Sternen, verglichen mit deren Abmessungen sind sogar größer, als der Abstand der Elektronen zum Kern, verglichen mit dessen Abmessung.

Die Fluchtgeschwindigkeiten können größer als  $c$  sein, weil sie beschreiben nicht eine Bewegung *in* Raum sondern die Zunahme der Abstände durch Ausdehnung *des* Raumes selbst.

## 2. Perspektive.

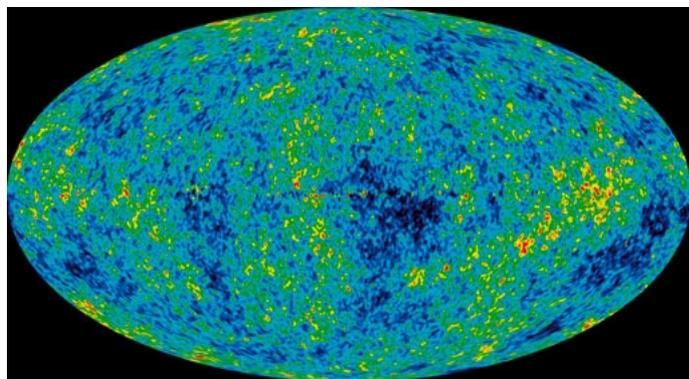
Wir haben nur die “insider” Perspektive. Das erlaubt uns, einige Sachen zu erfahren, z.B. über die Struktur der Raum-Zeit, wie Krümmung. Andere Fragen können wir nicht angehen, wie etwa “was war davor?“, “was gibt es draußen?“, so lange sie sich nicht in Effekten *bei uns* ausdrücken.

Für eine Illustration stellen wir uns die Welt “*Flachland*” vor, die Oberfläche einer Kugel, etwa der Erde: wir sind 2-dimensionale Wesen in einer 2-dimensionalen Welt. Nicht nur, dass wir nicht in die Höhe oder Tiefe springen können, wir können nicht einmal dorthin blicken: diese Dimension gibt es für uns gar nicht. (Hier ist *Flachland* nicht als ungekrümmt, sondern als Fläche, gemeint.)

Eine erste “insider Erfahrung” ist *Krümmung*. Wir können im Flachland ohne weiteres Geraden definieren: sie sind die kürzesten Wege zwischen 2 Punkten. Aus der “außen” Perspektive sind diese die großen Kreise auf der Kugel. Nun stellen wir uns vor, wir sind am Äquator beim Meridian  $280^\circ$  (irgendwo in Ecuador) und wollen gerade aus nach Norden senkrecht zum Äquator, auf diesem Meridian, gehen. Sobald wir den Nordpol erreicht haben, drehen wir uns mit  $90^\circ$  nach rechts, nehmen den Meridian  $10^\circ$  und gehen wieder gerade aus in Richtung Süden an Heidelberg vorbei, bis wir irgendwo in Gabun den Äquator wieder treffen. Dort drehen wir uns wieder  $90^\circ$  nach rechts und gehen gerade aus auf dem Äquator bis wir zurück am Anfang der Reise sind. Wir haben auf diese Weise ein Dreieck bespannt und dabei 3 Winkel von je  $90^\circ$  gemessen, also insgesamt  $270^\circ$ . Aber in der Euklidischen Geometrie in der Ebene konnten wir *beweisen*, dass die Winkelsumme in jedem Dreieck  $180^\circ$  ist. Was wir in unserem Flachland-Spaziergang erreicht haben war zu *erfahren*, dass unsere Flachland krumm ist, und zwar ausschließlich aus Messungen *im* Flachland, ohne es je von draußen zu betrachten. Wir können sehr präzise “insider” Messungen in jeder kleinen Umgebung durchführen und die Struktur unseres Flachlands vollständig bestimmen.

Wir können im Flachland auch das Bild der *Expansion* vorführen: stellen wir uns vor, Flachland ist die Oberfläche eines sich aufblähenden Gummiballons. Jede zwei “Flachstädte” entfernen sich von einander, und die Entfernung wächst um so schneller, um so größer sie schon ist. Dabei bleiben die Umstände *in* den Flachstädte unverändert, damit auch wir und unsere Messstäbe!

Wir müssen an unser Universum und an die Ereignisse in ihm auf eine ähnliche Weise denken: wir sind innerhalb des Kosmos und ein “Draußen” gibt es für uns nicht. Was Raum und Zeit “ist” können wir nur aus der inneren Perspektive denken. Der Urknall ist nicht eine Explosion an einem Punkt eines größeren Raumes, sondern unsere Vorstellung von den Ereignissen so, wie wir sie aus der inneren, einzigen uns zur Verfügung stehenden Perspektive, kennen können.



Die Erdoberfläche gesehen von außen, und der Kosmos gesehen von innen (das WMAP Satellit-Bild der Hintergrundstrahlung: *CMB = Cosmic Microwave Background*).

### 3. Die Grundlagen des Standard Kosmologischen Modells

Das Standard Kosmologische Modell, auch Urknall-Modell genannt ist ein Modell des Kosmos und dessen Evolution. Es beinhaltet:

- Die *Gravitationstheorie (Einstein's Allgemeine Relativitätstheorie)* : eine *klassische (nicht Quanten-) Theorie von Raum und Zeit*. Sie beschreibt Gravitation als Raumkrümmung.
- Den *Standardmodell der Elementarteilchen* : eine Quantentheorie von Teilchen und Felder in flacher (nichtgekrümmten) Raum-Zeit.

Diese zwei Theorien sind eigentlich unvereinbar, da die Grundlagen jeder davon durch die jeweilig andere widersprochen sind! Ihre Zusammensetzung ist nur akzeptabel näherungsweise, solange die Zuständigkeiten getrennt werden können.

In der Tat erscheint das Universum flach bei großen Skalen und auch die typischen Energiedichten sind nicht allzu gross. Deshalb können einerseits die Materieinhalte, Sternprozesse, etc als Quantenprozesse in flachem Raum durch das Standardmodell der Elementarteilchen beschrieben werden. Andererseits kann aus den selben Gründen das Raum-Zeit-Gefüge selbst als klassisch betrachtet werden und die Gravitation braucht nicht quantisiert zu werden.

Das alles stimmt allerdings nicht am Urknall selbst, und auch bei besonderen Gebilden wie Schwarzen Löchern. Wir haben zur Zeit nur einzelne Vermutungen über den Phänomene, die in diesen Fällen stattfinden sollen, aber noch keine zusammenhängende Theorie.

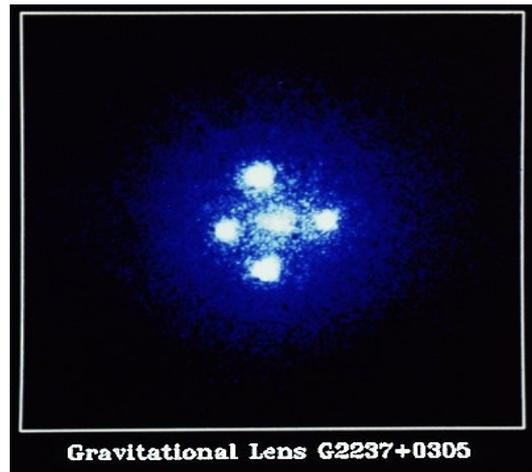
Effekte der Krümmung können bei großen Skalen beobachtet werden, wo Quanteneffekte normalerweise nicht wichtig sind.

Ein besonderer Effekt der Gravitation ist die *Gravitationslinse*: die durch großen Massen bewirkte Raumkrümmung wirkt wie eine Linse für dahinter stehende Objekte, die deshalb vervielfacht erscheinen. Die Beobachtung dieses Effekts bestätigt die Allgemeine Relativitätstheorie.

Ein anderer besondere Effekt ist die Bildung von *Schwarzen Löchern*. Wenn, z.B. in einem großen Stern die Fusionsprozesse aufhören und der Stern in einer Supernova Explosion endet, setzt im Reststern ein häufig unaufhaltsamer gravitationeller Kollaps ein. Der Stern schrumpft, und wenn er unter einem Radius:

$$R^S \simeq (1,48 \times 10^{-27} \text{ m / Kg}) \times M \quad (15)$$

fällt wird er zu einem Schwarzen Loch.  $R^S$  heißt "Schwarzschild-Radius" und wird hier in *Metern (m)* gemessen,  $M$  ist die Masse des Sterns in *Kilogramm (Kg)*. Ein schwarzes Loch kann weitere Materie anziehen und wird immer größer, keine Materie und auch kein Licht kommt aber mehr heraus. Diese sind sehr vereinfachte Aussagen, es kommen noch andere Effekte hinzu, z.B. Drehung und schließlich Quanteneffekte. Geschickte Prozesse können Energie aus dem Schwarzen Loch extrahieren!



#### *Übung 13:*

Berechne den Schwarzschildradius  $R_{Erde}^S$  und  $R_{Sonne}^S$  für Erde und Sonne und vergleiche sie mit dem Radius der Erde  $R \simeq 6400 \text{ Km}$  (Masse der Erde  $M_{Erde} \simeq 5,98 \times 10^{24} \text{ Kg}$ , Masse der Sonne  $M_{Sonne} \simeq 1,99 \times 10^{30} \text{ Kg}$ ).

#### 4. Der Inhalt des Kosmos

Außer einen sich ausdehnenden Raum beinhaltet der Kosmos Materie in verschiedenen Sorten:

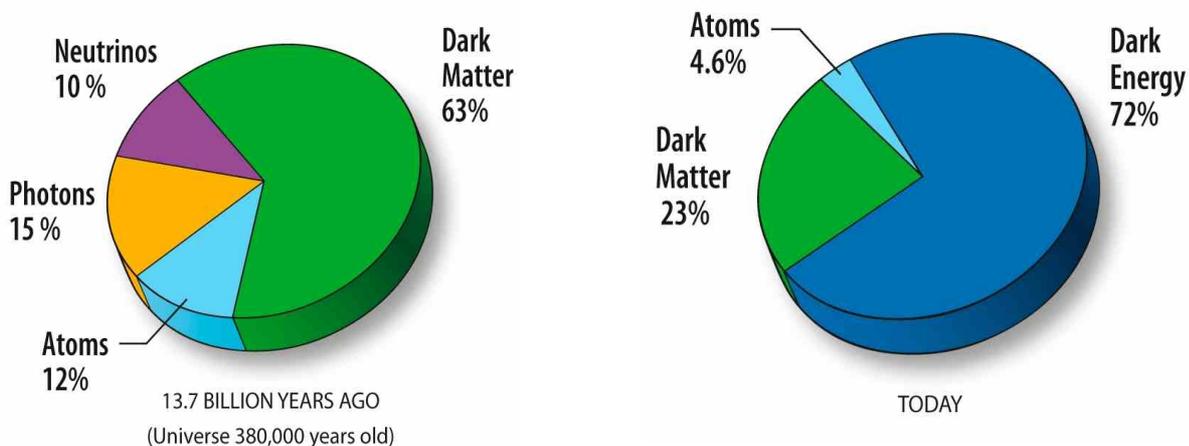
- Licht,
- Neutrinos,
- Gas,
- Sterne, \ | Teilchen, Atome, Moleküle
- Galaxien, /
- exotische Objekte (Quasars, Schwarze Löcher, etc),
- exotische (dunkle) Materie und Energie:

Dunkle Materie und Energie wurden nicht direkt beobachtet, man schließt nur auf deren möglichen Existenz um das besondere Verhalten der Galaxien (dunkle Materie) und des Kosmos (dunkle Energie) zu erklären. Die Bezeichnung "dunkel" weist nur darauf hin, dass man sie nicht sehen kann!

Der Inhalt des Kosmos hat sich während der Zeit geändert:

- Wenige Sekunden nach der Urknall fangen bei der noch sehr hohen Temperatur "Nukleosynthese" (*Fusion*)-Prozesse statt, wodurch die ursprünglichen Protonen und Neutronen vor allem Helium bilden. Ein eingehende Studium der verschiedene Prozesse führt zu der Aussage, dass nach der Abkühlung durch der Expansion die Dichte des Heliums auf etwa 25% eingefroren wird (Wasserstoff: etwa 75%, andere leichte Kerne unter 1%; diese Aussage ist sehr gut bestätigt und ist somit ein der wichtigsten Argumente für das Urknall Modell).
- So lange die Temperatur noch sehr hoch ist besteht das Universum aus geladenen Kernen und aus Elektronen und ist für Licht undurchsichtig, weil die Photonen absorbiert werden.
- Etwas später, nach etwa 300000 Jahre ist die Temperatur so weit gesunken, dass sich Atome bilden können. Die Materie wird neutral und das Universum wird für die Photonen durchsichtig.
- Die Materie bildet Sterne und Galaxien.
- Die Photonen kühlen sich während der Expansion ab und bilden heute die berühmte *Kosmische Mikrowellen Hintergrundstrahlung* (*CMB*: von Gamov vorausgesagt). Ihre Entdeckung 1965 durch Penzias und Wilson hat das Urknall Modell etabliert. Die *CMB* ist heute ein der wichtigsten Instrumente um die Struktur des Kosmos zu erforschen (Homogenität, Strukturen, etc).

Die Verteilung der Energie im Kosmos nach der verschiedenen Materietypen (dunkle Materie und dunkle Energie sind nur Vermutungen) ist:

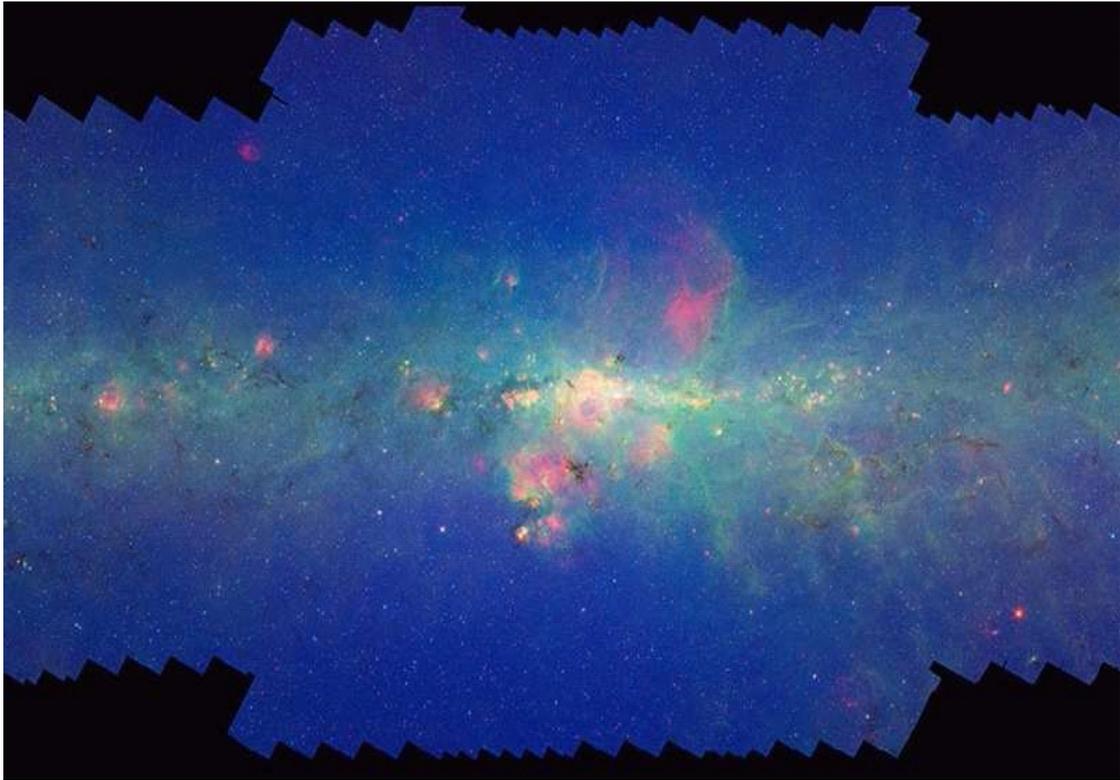




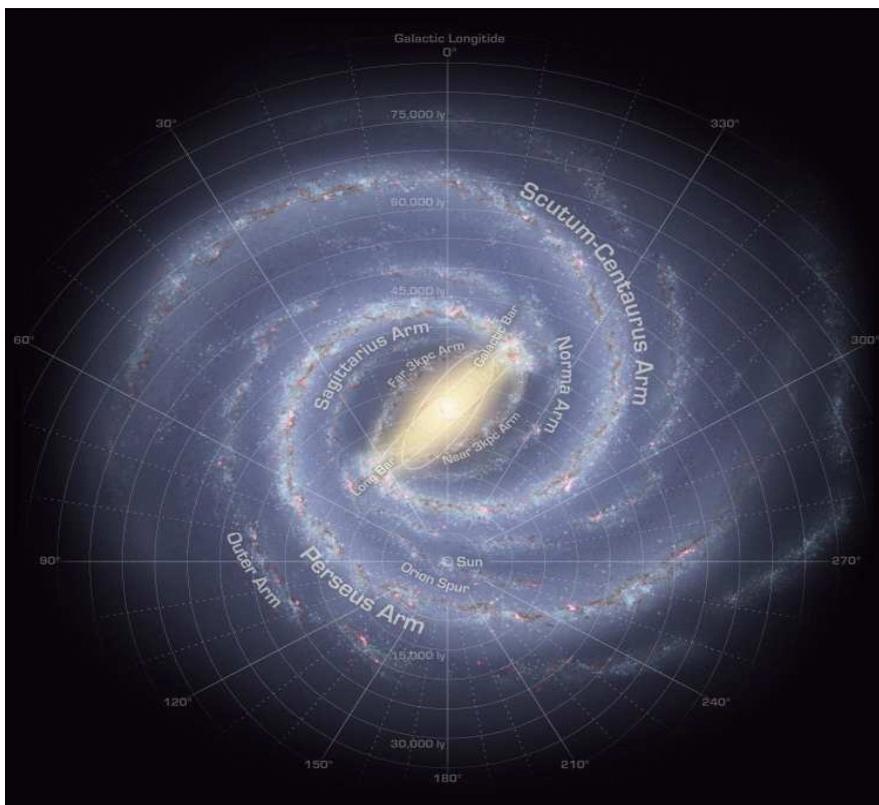
Unsere Galaxie, die Milchstraße am nächtlichen Erdhimmel.



Sonnenuntergang auf Mars.



Die Milchstraße, insider view (gesehen von der Erde).



Die Milchstraße, äußere Sicht (Computer Rekonstruktion aus insider-Daten).



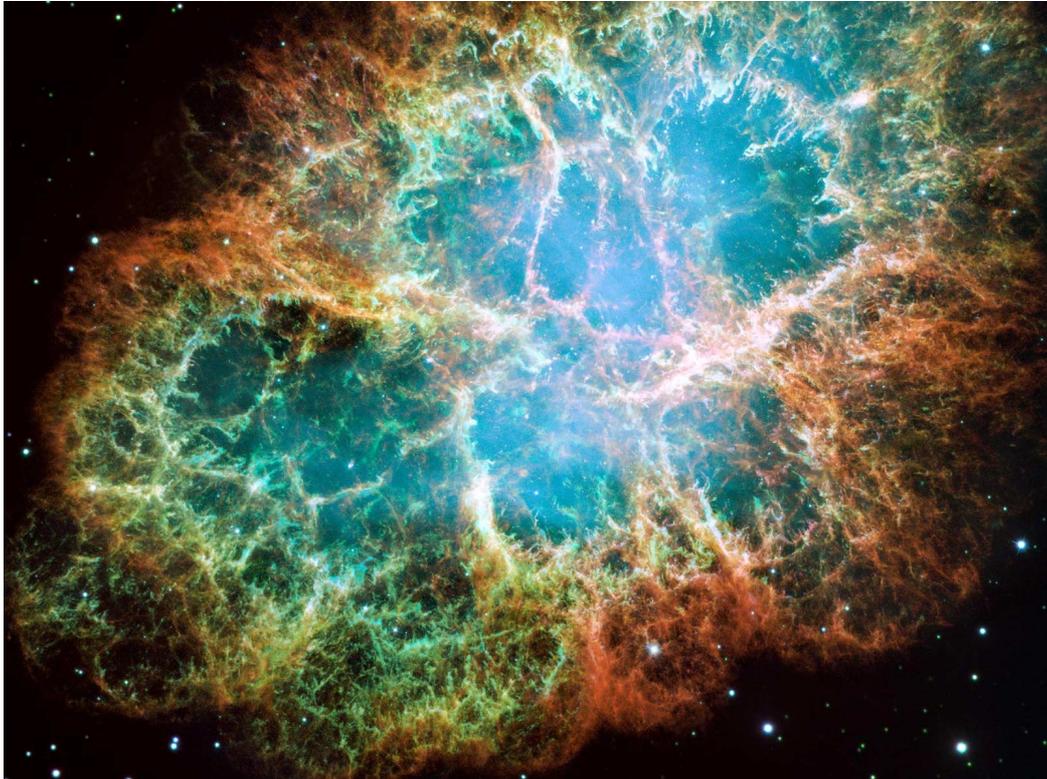
Die Andromeda Galaxie, 2,3 Millionen *LJ* entfernt.



“Tief-Raum” Bild: in Zentrum ist ein Quasar zu sehen (rechts von einem kleinen senkrechten Balken), das etwa 13 Milliarden *LJ* entfernt ist.



Sternbildung in interstellaren Staubwolken.

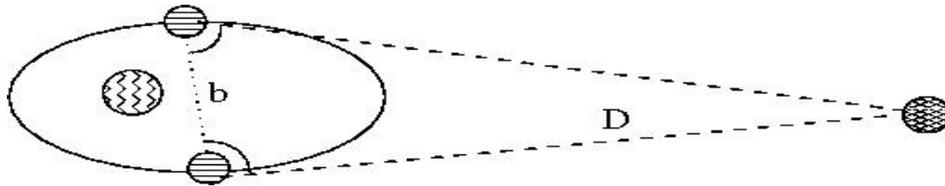


Das Ende eines Sterns: die Krebs Nebula, entstanden aus der 1054 AD Supernova (etwa 5000  $LJ$  entfernt). Im Zentrum der Nebula liegt ein winziger Neutronenstern, der Rest des Sterns.

## 5. Entfernungen in Kosmos.

Die Abstände zur Sonne und zum Mond wurden schon in der Antiquität ziemlich gut abgeschätzt. Die erstere ist etwa 8 *Lichtminuten*, die zweite etwa 1 *Lichtsekunde*.

Die Abstände zu den nahestehenden Sterne kann man geometrisch bestimmen (“*Paralaxe-Methode*”) in dem man aus 2 entfernten Punkten die Winkel zu dem Stern misst. So kommt man auf tausend bis zehntausenden *LJ*. Damit kann man die Sterne in unserer Galaxis erreichen.

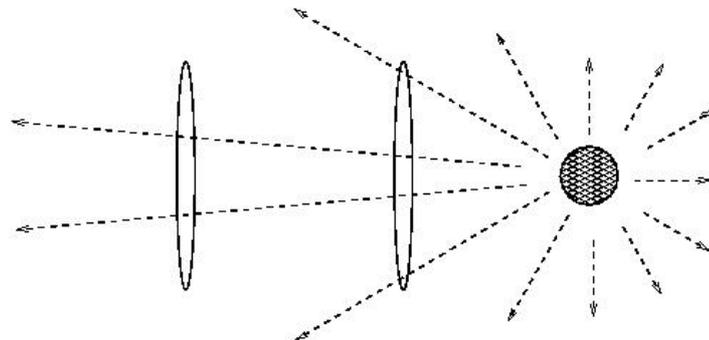


Die wahre Ausmaß des Kosmos konnte erst nach der Entdeckung Hubbles der sog. “Variable Sterne” erschließen werden. Wenn man weiß, wie hell ein Stern eigentlich ist (sog. *absolute Helligkeit*) kann man durch Vergleich damit, wie hell er uns erscheint (*relative Helligkeit*) die Entfernung messen:

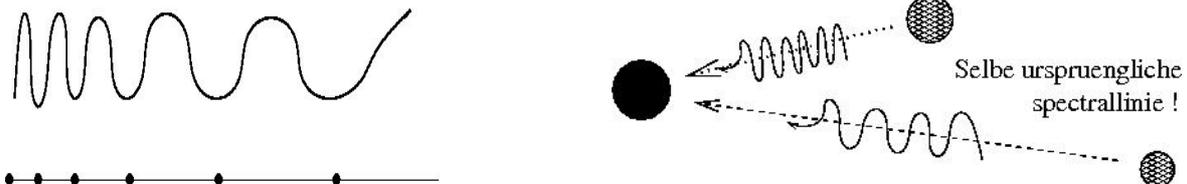
$$D = \sqrt{\frac{\text{absolute Helligkeit}}{\text{relative Helligkeit}}} \quad (16)$$

weil die Lichtmenge, die uns erreicht, mit der Quadrat der Entfernung abnimmt.

Die Aufgabe ist es daher sog. “standard Kerzen” zu finden, Sterne von denen man aus anderen Gründen wissen kann, wie hell sie eigentlich sind. Hubble fand heraus, das bestimmte Sterne *pulsieren* (blinken), und zwar um so langsamer, je größer sie waren. Aus dem “Blinken” konnte man also schließen, wie groß sie eigentlich waren und damit wie hell. Diese Methode reicht bis zu mehrere Millionen *LJ* – zu den Galaxien die nicht allzu weit von unserer sind.



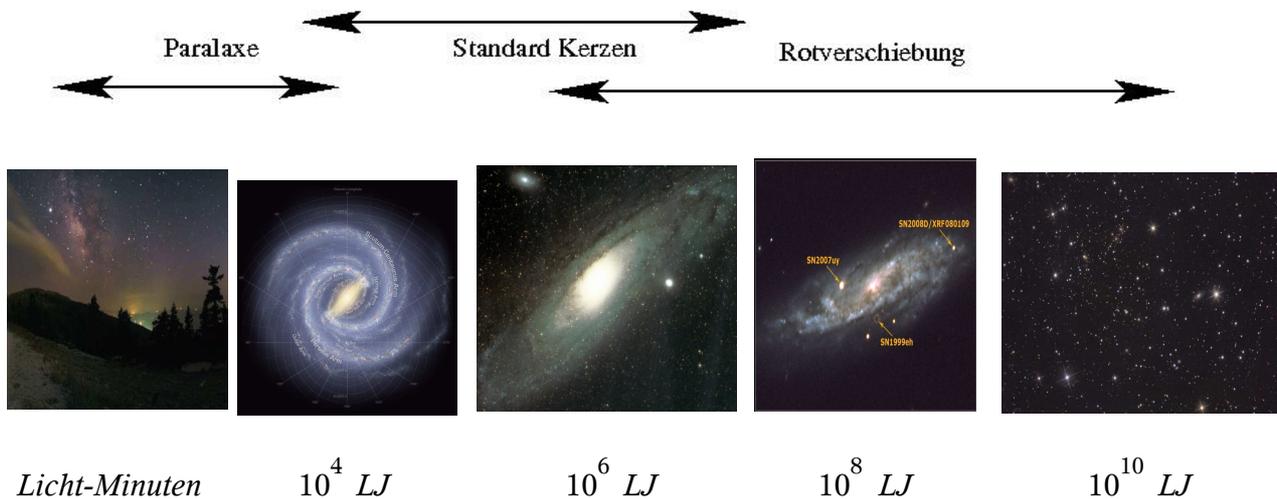
Schließlich für die ganz große Abstände wird die Entfernung aus der Expansionsrotverschiebung des Lichts abgeschätzt. Diese Rotverschiebung ist ein Resultat der Expansion: der Raum selbst dehnt sich und die Wellenlänge des Lichts wird dadurch größer, und so das Licht roter. Und das um so mehr, je schneller sich der Stern von uns entfernt, was wiederum heißt, je weiter er ist – Gl. (12).



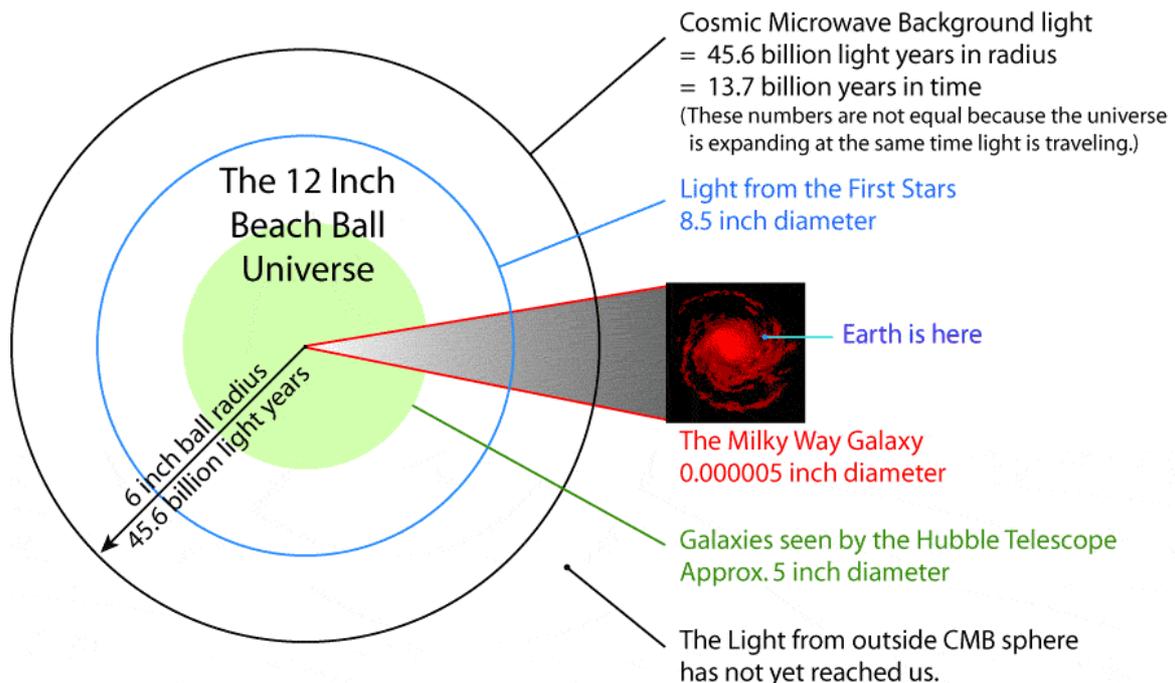
Das ist alles sehr vereinfacht: es kommen viele weitere Faktoren in Spiel, und es gibt viele andere Methoden. Das letztere ist sehr wichtig, weil wir keine Experimente in Kosmos machen können!

Bei der Parallaxe Messung war nur Geometrie in Anspruch genommen. Bei den Standard Kerzen musste man theoretische Überlegungen über dem Verhalten solcher Sterne mit einbeziehen. Schließlich bei der Rotverschiebung Methode wird die ganze Theorie des Standardmodells in Anspruch genommen.

Es ist daher wichtig, dass man Bereiche finden kann wo diese Methoden (und andere) sich teilweise abdecken und damit gegen einander überprüft werden können. Es ergibt sich so die *kosmische Entfernungsleiter*, vereinfacht hier dargestellt:



Unsere Kenntnisse über den Kosmos – Inhalt, raumzeitliche Struktur, Entwicklung - hängen von unserer Bestimmung der Entfernungen ab. So entsteht das Bild eines expandierenden Kosmos, der relativ leer ist, homogen und “flach” bei großen Skalen, mit Strukturen bei “kleineren” Skalen (Galaxien, Sterne, Planeten), mit einer ziemlich dramatischen Geschichte - und noch voll von Unbekanntem, wie dunkle Materie und dunkle Energie. Das ist das jetzige Bild des Urknallmodells.



Ein Eindruck der Verhältnisse in Kosmos.

#### Übung 14:

Die Sonne ist  $D_S \approx 1,6 \times 10^{-5} LJ$  von uns entfernt, der Stern  $\alpha$ -Centauri etwa  $D_\alpha \approx 4,3 LJ$  (geometrisch gemessen mit der Paralaxe Methode). Er erscheint uns etwa  $10^{11}$  (hundert Milliarden) mal schwächer als der Sonne. Wir notieren mit  $H_S, H_\alpha$  die absolute, mit  $h_S, h_\alpha$  die relative (scheinbare) Helligkeit. Dann muss stimmen – siehe Gl. (16):

$$h_S = \frac{H_S}{D_S^2} \quad \text{und} \quad h_\alpha = \frac{H_\alpha}{D_\alpha^2}, \quad \text{und wir haben} \quad \frac{h_\alpha}{h_S} \approx 10^{-11}.$$

welche absolute Helligkeit hat  $\alpha$ -Centauri verglichen mit der Sonne:  $\frac{H_\alpha}{H_S} = ?$

Rotverschiebung ist definiert als:

$$z = \frac{\lambda_{empf(angen)} - \lambda_{em(itiert)}}{\lambda_{em(itiert)}} \quad (17)$$

und gibt an, um wie viel ist die Wellenlänge des Lichts, das wir sehen (also, beim Empfang  $\lambda_{empf}$ ) vergrößert im Vergleich mit der emittierten Wellenlänge  $\lambda_{em}$ , das der beobachtete Stern ausstrahlt (ein negativer Wert für  $z$  bedeutet dann Blauverschiebung). Da Atome Licht von ganz präzisen Wellenlänge ausstrahlen, und zwar in unverwechselbaren Gruppen von Spektrallinien, kann man bei der Beobachtung eines Lichtstrahles diese Gruppen erkennen, und damit welche Spektrallinien es sind. Soll nun eine Rotverschiebung des gesamten Spektrum stattfinden, kann man immer noch die Gruppen gut erkennen – so etwa wie man Gesichter auch in verschiedenen Entfernungen erkennt – und dabei auch herausfinden, um wie viel wurden die Spektrallinien verschoben, also den Wert von  $z$  bestimmen.

Es gibt in der Kosmologie drei Arten von Rotverschiebung:

- Doppler Rotverschiebung, die davon abhängt, dass der Beobachter und die Quelle sich gegenüber einander bewegen: entfernen sie sich, so vergrößert sich die Wellenlänge, so wie wir aus dem täglichen Leben beim Schall wissen (pfeifender Zug, Andreas-Horn) – und umgekehrt.
- Die Gravitationsrotverschiebung: wenn ein Photon sich von einem Stern entfernt muss er gegen dem Gravitationsfeld des Sterns “kämpfen“, weil seine Energie  $E$  sich, grob gesagt, wie eine Masse  $E/c^2$  verhält und die Schwerkraft des Sterns spürt. Das Photon verliert dabei Energie, so etwa wie ein nach oben geworfene Ball. Da aber die Energie eines Photons umgekehrt proportional mit seiner Wellenlänge ist - siehe Gl. (7) – bedeutet das, dass seine Wellenlänge größer wird, das Licht also roter.
- Die Expansionsrotverschiebung ist in groben Zügen einfach zu verstehen – wenn man das Bild am Seite 41 unten anschaut: weil der Raum sich ständig ausdehnt, während die Lichtwelle vom Stern zu uns kommt, dehnt sich auch ihre Wellenlänge und das Licht wird roter (alles wieder sehr vereinfacht).

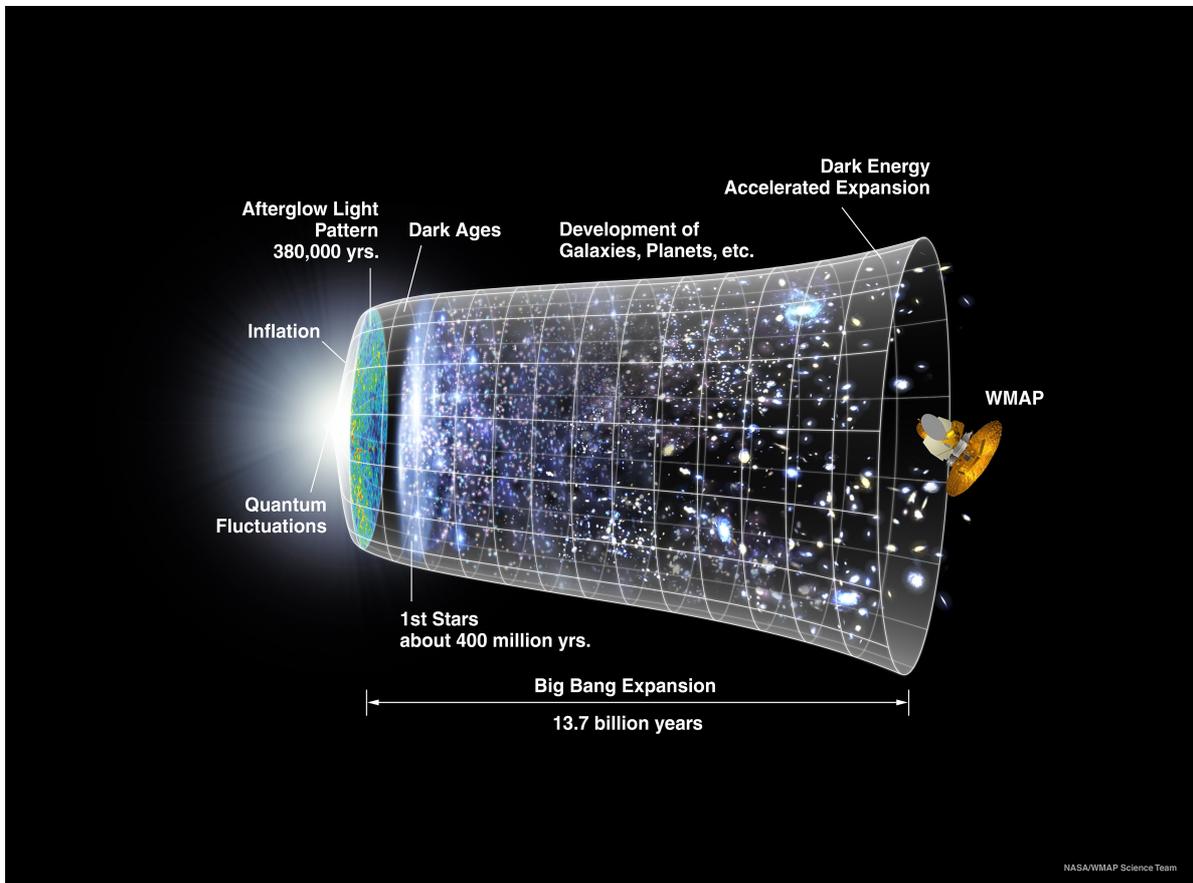
Die Expansionsrotverschiebung kann daher direkt in Zusammenhang mit der Expansion gebracht werden. Sie gibt an – grob gesagt – die relative Ausdehnung des Raumes während der Zeit, die das Licht gebraucht hat, um uns zu erreichen, und damit die relative Geschwindigkeit, mit der sich der Raum ausdehnt. Deshalb kann man die Expansionsrotverschiebung mit der “Fluchtgeschwindigkeit“ im Hubble-schen Gesetz Gl. (12) näherungsweise verbinden:

$$v = H d \approx c z \quad (18)$$

Die Doppler- und die Gravitationsverschiebungen spielen dagegen in anderen Phänomenen eine Rolle: in den Bewegungen der Sterne in Galaxien, Veränderung des Lichts supermassiver Sterne, etc.

## 6. Das Urknall Modell.

Laut dieses Modells entwickelt sich der Kosmos aus einer sehr kleinen, sehr dichten und sehr heißen Energieblase. Der Kosmos entwickelt sich nicht *im* Raum sondern schafft das, was wir Raum nennen, in seiner Expansion. Was wir als Raum und Zeit erkennen ist "insider" Kenntnis: sie hat nur *innerhalb* des Universums einen Sinn.



Man nimmt an, dass sehr früh nach dem Urknall der Kosmos eine plötzliche, unvorstellbar schnelle und unvorstellbar große *Inflation* erfahren hat, die alle ursprünglichen Unregelmäßigkeiten geglättet. Das kann also erklären, warum der Kosmos bei großen Skalen sehr homogen und flach (ohne Krümmung) erscheint.

Die Prozesse, die während und gegen Ende der Inflation laufen sind nur teilweise verstanden. Hier muss der Übergang von einem Quark-Gluon-Plasma zu Hadronen und anderen Teilchen stattfinden, unter anderem auch die Baryogenese und das Entstehen des Ungleichgewichts Materie-Antimaterie.

Um einen kleinen Überschuss an Materie zu produzieren, der nach der Annihilation überleben soll, müssen die 3 von Zacharow erkannte Bedingungen erfüllt werden:

- Verletzung der Baryonenzahlerhaltung,
- Verletzung der C und CP Symmetrien,
- Rasche Expansion, so dass es keinen Gleichgewicht zwischen dem Prozess und seiner

Umkehrung entstehen kann. Ein erzeugter Überschuss an Materie wird so "eingefroren" und überleben.

Davon ist nur die 3. Bedingung anscheinend erfüllt. Eine Verletzung von C und CP Symmetrien wird beobachtet, sie ist aber viel zu klein. Auf Effekten vom 1. Typ gibt es zur Zeit keinen Hinweis. *Das ist ein Beispiel dafür, wie die Kosmologie Fragen an der Teilchenphysik stellt, und umgekehrt!*

Kurz nach dem Ende der *Inflation* bilden sich Atome und die undurchsichtige Plasma der *dunklen Zeit* ("dark age") wird transparent. Jetzt können Photonen sich frei bewegen, sie kühlen sich während der weiteren Expansion ab (werden roter) und sind heute als die 2,3 K CMB wahrnehmbar ("afterglow"). In den letzten Jahren hat man Anzeichen einer beschleunigten Expansion beobachtet. Da die Materie in Kosmos durch gravitationeller Anziehung die Expansion nur bremsen kann, wird die Existenz einer "dunklen Energie" vorgeschlagen, die "Druck" innerhalb des Kosmos bilden soll und dadurch ihn expandieren. So, wie auch über die dunkle Materie (die die Bewegung und Zusammenhang der Galaxien erklären soll) weißt man nur wenig über die dunkle Energie.

Die detailliertere Abfolge ergibt sich aus unseren Kenntnisse der Elementarteilchenphysik:

- Die erste  $\sim 10^{-33} \text{ sec}$  nach der Urknall sind nicht sehr gut verstanden. In der sehr frühe *Planck-Era*, regieren Zustände, die nur im Rahmen einer Quantentheorie der Gravitation beschrieben werden könnten, die wir noch nicht entwickelt haben. Hier sind die Abmessungen des Kosmos mit der Plancklänge  $l_p \simeq 1,62 \times 10^{-35} \text{ m}$  vergleichbar, und dementsprechend sollen Dichten von  $\sim 10^{94} \text{ g/cm}^3$  und Temperaturen von  $10^{32} \text{ K}$  geherrscht haben. Die 4 Wechselwirkungen haben sich noch nicht ausdifferenziert. In den darauffolgende GUT-(Grand Unified-Theory)-Era trennt sich die Gravitation von den andere 3 Wechselwirkungen, die vereint bleiben. Es wird angenommen, dass nach etwa  $10^{-36} \text{ sec}$  und bei Temperaturen von  $\sim 10^{27} \text{ K}$  eine Inflation des Kosmos stattfindet, während derer der Kosmos um einen Faktor  $\sim 10^{50}$  zu einem etwa  $10 \text{ cm}$  großen Ball in etwa  $10^{-33} \text{ sec}$  expandiert. Zu dieser Zeit soll auch das Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie zustande gekommen sein. Alle diese Zahlen sollen einen Eindruck über die ungeheuren Verhältnissen am Anfang der Welt vermitteln und der spekulative Charakter der Aussagen erklären.
- Mit der Abkühlung des Kosmos auf  $\sim 10^{25} \text{ K}$  und seine weitere, jetzt "gemäßigten" Expansion können sich Quarks bilden (aber noch keine Hadronen, dafür ist der Kosmos noch viel zu heiß und dicht). Das Universum kühlt sich ab auf etwa  $10^{25} \text{ K}$ . Die Grundkräfte differenzieren sich weiter in der starken, schwachen und elektromagnetischen Kräften.
- Die Uhr zeigt  $10^{-6} \text{ sec}$ , das Universum ist auf  $10^{13} \text{ K}$  abgekühlt, es bilden sich Hadronen, später Leptonen. Bei Dichten von  $10^{13} \text{ g/cm}^3$  wird das Universum für Neutrinos transparent.
- $10 \text{ sec}$  nach Big-Bang fängt die Nukleosynthese, das Bilden von leichten Kernen an (Deuterium und Helium). Der Kosmos ist noch Strahlungsdominiert. In Laufe der Expansion kühlen sich die Photonen aber weiter ab, nach  $10\,000 \text{ Jahren}$  fängt die Materiedominanz an.
- $400\,000 \text{ Jahren}$  nach der Big-Bang ist die Temperatur unter  $3000 \text{ K}$  gesunken, es bilden sich Atome (vorwiegend Wasserstoff und Helium) und das Universum wird transparent für die Photonen. Das heutige  $2,3 \text{ K}$  CMB ist das Relikt dieses "Afterglow".
- Es fangen an sich jetzt größere Strukturen zu bilden, aus denen dann die Galaxien und Sterne hervorgehen werden. Hier soll sich auch die Dunkle Materie auswirken, ihre beschaffenheit und Rolle sind allerdings noch ziemlich "in Dunkel".
- Die Entstehung der, und die Prozesse in Sternen sind relative gut verstanden, einschließlich der besonderen Ereignissen am Ende des Lebens von Sternen, wie Supernovas, Neutronensterne, usw. und die Synthese aller uns bekannten Elemente. Allerdings bleiben noch eine Reihe noch nicht gut verstandene Phänomene, wie Quasaren, AGN (aktive galaktische Kerne), u.a., und wo man das Wirken schwarzer Löcher vermutet.
- Relativ rezente Daten über die Expansion deuten auf einer Beschleunigung derselben hin, wofür eine ebenso unbekannte "Dunkler Energie" verantwortlich sein könnte.

Es soll bemerkt werden, dass im Standardmodell der Kosmologie, auch wenn nicht in einer einzigen, zusammenhängenden Theorie vereint, sich sowohl die Gravitation als auch das Standardmodell der Elementarteilchen zusammenfinden. Deshalb, über das eigene Interesse – Beschreibung des Kosmos – hinaus, bietet das Urknall Modell eine große theoretische Herausforderung für die Physik der Elementarteilchen selbst. Nicht nur die noch offenen Fragen des Standardmodells der Elementarteilchen (die Massen der Quarks, das Higgs-Boson) sondern – und vor allem – die Fragen der weiteren Entwicklung der Elementarteilchentheorie stellen sich zugleich in der Kosmologie, z.B. die sog. “Grand Unification“ Theorien, in denen die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung nur drei Facetten einer und derselben, vereinheitlichten Wechselwirkung darstellen und damit vollständig mit einander verbunden sind. Darüber hinaus stellt die Kosmologie neue Fragen an die Physik der Elementarteilchen (der fundamentalen Wechselwirkungen), z.B. über die Beschaffenheit und dem Charakter der dunklen Materie und der dunklen Energie.

#### Übung 15:

Nach der Quark Era und der Baryogenese enthält der Kosmos Protonen und Neutronen in Verhältnis 7:1 (das ergibt sich aus der Differenz der Ruhemassen der 2 Kernteilchen, die dazu führt, dass die etwas schwerere Neutronen seltener sind). Der Kosmos kühlt sich weiter ab mit der fortschreitenden Expansion und Kerne fangen an sich zu bilden, vorwiegend Helium, der am stabilsten ist. Angenommen, es bildet sich so viel Helium als möglich, welches ist dann das Masse- (oder Dichte)-Verhältnis von Helium zum verbliebenen Wasserstoff? Hinweis: betrachte einen “Eimer“ mit 1000 Nukleonen (Protonen und Neutronen im Verhältnis 7:1) und versuche daraus so viele Helium Kerne zu bilden als möglich.

#### Übung 16:

Die Anzahl von Nukleonen (Kernteilchen: Protonen und Neutronen) in Universum ist auf  $N \simeq 10^{80}$  geschätzt, und zwar in den Kernen von Atomen gebunden. Welcher Masse (in Sonnenmassen,  $M_{\text{Sonne}} \simeq 1,99 \times 10^{30} \text{ Kg}$ ) entspricht diese Zahl? Unsere Galaxie hat etwa  $n \simeq 10^{11}$  “Sonnen“.

Wenn sich alle Nukleonen in Sternen befänden, wie viele Galaxien, vergleichbar mit der Milchstraße würden den Kosmos bewohnen? (Die Annahme ist eigentlich nicht korrekt: es gibt auch interstellare Gaswolken, Schwarze Löcher, unsichtbare, kollabierte Sterne, etc.)

Welche Masse (in Sonnenmassen) würde die *Dunkle Materie*, (rechte Diagramm auf Seite 36), haben?

## Anhang A: physikalische Konstanten und Einheiten

$$h = 6,6262 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s} = 4,1357 \times 10^{-15} \text{ eV} \times \text{s} \quad (\text{Planck Konstante})$$

$$e = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (\text{Elektron Ladung})$$

$$c = 2,997925 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (\text{Lichtgeschwindigkeit})$$

$$m_e = 9,1096 \times 10^{-28} \text{ g} = 0,5110 \text{ MeV}/c^2 \quad (\text{Elektron Masse})$$

$$m_p = 1,0072766 \text{ amu} = 938,25 \text{ MeV}/c^2 \quad (\text{Proton Masse})$$

$$m_n = 1,0086652 \text{ amu} = 939,55 \text{ MeV}/c^2 \quad (\text{Neutron Masse})$$

$$G = 6,6732 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2 / \text{Kg}^2 \quad (\text{Gravitationskonstante})$$

$$k_B = 1,38062 \times 10^{-23} \text{ J/K} \quad (\text{Boltzmann Konstante})$$

$$l_p \simeq 1,62 \times 10^{-35} \text{ m} , \quad m_p \simeq 1,22 \times 10^{19} \text{ GeV}/c^2 = 2,176 \times 10^{-8} \text{ Kg} \quad (\text{Planck Länge, Masse})$$

$$1 \text{ amu} = 1 \text{ u} = 1,66053 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$1 \text{ eV} = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ LJ (Lichtjahr)} \simeq 0,947 \times 10^{13} \text{ Km} \quad 1 \text{ pc (parsec)} \simeq 3,26 \text{ LJ}$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Kg} \times \text{m}^2 / \text{s}^2 = 1 \text{ C} \times \text{V} = 1 \text{ W} \times \text{s} , \quad 1 \text{ N} = 1 \text{ Kg} \times \text{m} / \text{s}^2 , \quad 1 \text{ A} = 1 \text{ C} / \text{s}$$

(*C* : *Coulomb*, Ladungseinheit ; *V* : *Volt*, Spannungseinheit ; *A* : *Ampère*, Stromstärkeeinheit ;  
*W* : *Watt*, Leistungseinheit ; *K* : *Kelvin*, Temperatureinheit ; *eV* : *Electronvolt*, Energieeinheit ;  
*J* : *Joule*, Energieeinheit ; *N* : *Newton*, Kräfteinheit)

## Anhang B: Umgehen mit Zehnerpotenzen

$$10^3 = 1000 ; 10^5 \times 10^3 = 10^{5+3} = 10^8 ; 10^5 \times 10^{-3} = \frac{10^5}{10^3} = 10^{5-3} = 10^2 ; \text{i.A. } 10^n \times 10^k = 10^{n+k}$$

$$(10^3)^2 = 10^{3 \times 2} = 10^6 ; (10^3)^{-2} = 10^{-6} ; \text{i.A. : } (10^n)^k = 10^{n \times k}$$

Auf dem Rechner wird z.B.  $1,2 \times 10^{23}$  als 1.2e23 dargestellt (*scientific modus*), auf den Ti82 kannst Du eingeben: 1.2 , dann *gelb EE* (also, *shift EE*), dann 23 (erst *sci modus* anwählen).

p	n	μ	m		K	M	G	T
pico	nano	micro	mili		kilo	mega	giga	tera
$10^{-12}$	$10^{-9}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	$1 = 10^0$	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12}$