

JEAN-PIERRE PETIT

DIE ABENTEUER DES ANSELM WÜßTEGERN

DER URKNALL



Die Vereinigung « Wissen ohne Grenzen », gegründet und unter dem Vorsitz von Professor Jean-Pierre Petit, Astrophysiker, hat zum Ziel, wissenschaftliches und technisches Wissen in der größtmöglichen Zahl von Ländern und Sprachen zu verbreiten. Zu diesem Zweck hat Professor Jean-Pierre Petit sein gesamtes populärwissenschaftliches Werk aus dreissig Jahren, und im besonderen die illustrierten Alben, frei zugänglich gemacht. Dementsprechend ist ein jeder frei, die vorliegende Datei zu vervielfältigen, entweder in digitaler Form oder in Form gedruckter Kopien und sie in Bibliotheken oder im Rahmen von Schule, Universität oder Vereinen zu verbreiten, deren Ziel die gleichen sind wie von « Wissen ohne Grenzen », unter der Bedingung, daraus keinen Profit zu erzielen und ohne dass ihre Verbreitung eine politische, sektiererische oder religiöse Konnotation beinhaltet. Diese Dateien im Format pdf können auch ins Computernetzwerk von Schul- oder Universitätsbibliotheken gestellt werden.



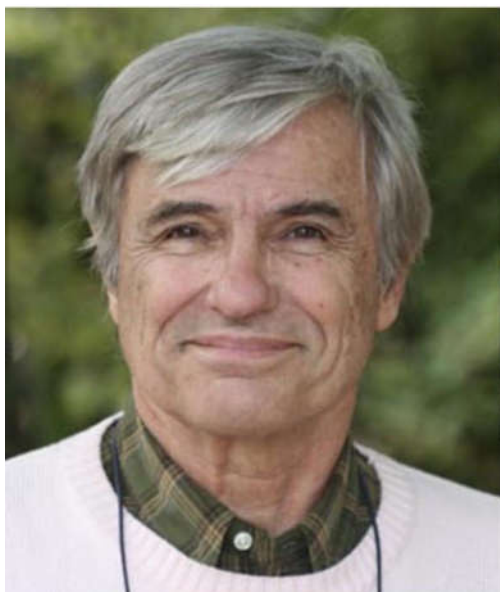
Jean-Pierre Petit plant zahlreiche weitere Werke, zugänglich für ein noch größeres Publikum. Einige werden selbst von Analphabeten gelesen werden können, dadurch, daß die Textepartien "zu sprechen beginnen" sobald ein Klick auf sie erfolgt. Diese Werke werden also als Stütze zur Alphabetisierung verwendet werden können. Andere Alben werden « zweisprachig » sein, indem man durch einen einfachen Klick von einer Sprache zur anderen wechseln kann, nachdem die Sprachkombination zuvor gewählt wurde. So entsteht eine neue Stütze zum Erlernen von Fremdsprachen.

Jean-Pierre Petit ist 1937 geboren. Er hat seine berufliche Laufbahn in der französischen Wissenschaft gemacht. Er ist Plasmaphysiker gewesen (plasma physicist), hat ein Informatikzentrum geleitet, Programme entwickelt, hunderte von Artikeln der unterschiedlichsten Wissensgebiete in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht, von der Mechanik der Flüssigkeiten bis zur theoretischen Kosmologie reichend. Er hat ungefähr dreissig Werke veröffentlicht, die in eine Vielzahl von Sprachen übersetzt wurden.

Kontakt zu « Wissen ohne Grenzen » kann über die Website <http://www.savoir-sans-frontieres.com> aufgenommen werden.

Wissen ohne Grenzen

Gemeinnützige Vereinigung, die 2005 gegründet wurde und von zwei französischen Wissenschaftlern geleitet wird. Ziel: Verbreitung wissenschaftlicher Erkenntnisse mit Hilfe des Bandes, das durch kostenlos herunterladbare PDFs gezogen wird. Im Jahr 2020: 565 Übersetzungen in 40 Sprachen wurden so erreicht. Mit mehr als 500.000 Downloads.



Jean-Pierre Petit



Gilles d'Agostini

Die Vereinigung ist vollkommen freiwillig. Das Geld wird vollständig den Übersetzern gespendet.


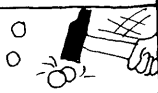


Um eine Spende zu tätigen, verwenden Sie die PayPal-Schaltfläche auf der Startseite:

<http://www.savoir-sans-frontieres.com>




DAS KOSMODRAMA



| ZEIT | TEMPERATUR | DICHTE | EREIGNISSE |
|-----------------------|--|---|---|
| VORHER | $T > 10^{13}$ GRAD | $> 10^{17}$ g/cm ³ | ? ... |
| 1 MILLIONSTEL SEKUNDE | 15 BILLIARDEN GRAD |  | UNDIFFERENZIERBARE SUPPE AUS PHOTONEN, NEUTRINOS, ANTINEUTRINOS (DAS PHOTON IST SEIN EIGENES ANTEILCHEN), PROTONEN, ANTI-PROTONEN, NEUTRONEN, ANTI-NEUTRONEN, ELEKTRONEN UND ANTIELEKTRONEN (POSITRONEN) |
| 1/100 SEKUNDE | 150 MILLIARDEN GRAD | 1,5 MILLIARDEN g/cm ³ | VERNICHTUNG DER HADRONEN (PROTONEN, ANTI-PROTONEN; NEUTRONEN, ANTI-NEUTRONEN). NUR EINS VON EINER MILLIARDE BLEIBT ÜBRIG. DER REST HAT SICH MIT DEN ANTIHADRONEN PAARWEISE VERNICHTET UND DABEI PHOTONEN ERZEUGT. |
| 1/10 SEKUNDE | 50 MILLIARDEN GRAD |  | NICHTS BESONDERES. ZU HEIß FÜR DIE ERZEUGUNG VON ATOMKERNEN. |
| 1 SEKUNDE | 15 MILLIARDEN GRAD | 150 000 g/cm ³ | DIE NEUTRINOS FÜHREN IHR EIGENES LEBEN. SIE WECHSELWIRKEN NICHT MEHR MIT DER MATERIE. |
| 13 SEKUNDEN | 4 MILLIARDEN GRAD | 1000 g/cm ³  | VERNICHTUNG DER ELEKTRONEN UND POSITRONEN. AUCH HIER BLEIBT NUR EINS VON EINER MILLIARDE ÜBRIG. |
| 3 MINUTEN | 1 MILLIARDE GRAD | 5 g/cm ³ | NUKLEOSYNTHESE: BILDUNG VON HELIUMKERNEN. VERSCHWINDEN DER FREIEN NEUTRONEN (LEBENSDAUER: 10 ¹³ SEKUNDEN) |
| 35 MINUTEN | 300 MILLIONEN GRAD | 0,03 g/cm ³ | DIE NUKLEOSYNTHESE IST ABGESCHLOSSEN: 27% HELIUM, 73% WASSERSTOFF |
| 800 000 JAHRE | 3000 GRAD |  | NACH DER VERNICHTUNG FAST ALLER MATERIE UND ANTIMATERIE DURCHLEBTE DAS UNIVERSUM EINE STRAHLUNGSÄRA, IN DER DIE ENERGIE-MASS E HAUPTSÄCHLICH IN FORM VON STRAHLUNG VORLAG. WENN DIE TEMPERATUR AUF 3000 GRAD ABGESUNKEN IST, BILDEN SICH NEUTRALE ATOME, UND DIE PHOTONEN HÖREN AUF, MIT DER MATERIE ZU WECHSELWIRKEN: „DURCHSICHTIGES“ UNIVERSUM |
| 100 MILLIONEN JAHRE | $T_S = -150^\circ\text{C}$ $T_M = -268^\circ\text{C}$ | 10^{-26} g/cm ³ | DA DIE NEUTRALEN WASSERSTOFF- UND HELIUM-ATOME DURCH DIE PHOTONEN NICHT MEHR AUFGEHEIßT WERDEN, FÄLLT DIE TEMPERATUR DER MATERIE SCHNELLER. BILDUNG DER GALAXIEN UND DER ERSTEN STERNE. |
| 13 MILLIARDEN JAHRE | | | ENTSTEHUNG DER ERDE |
| 14 MILLIARDEN JAHRE | | | ENTSTEHUNG DES LEBENS |
| HEUTE (18 MRD. JAHRE) | $T_S = -270^\circ\text{C}$ (3K) | $5 \cdot 10^{-31}$ g/cm ³ | ERFINDUNG DER ATOMBOMBE... |

PROLOG

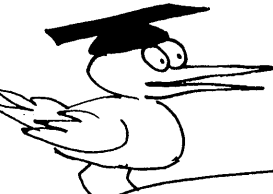


Weißt Du, Sophie, ich frage mich oft, woher die Dinge kommen... wie das Universum entstanden ist...

War alles schon immer so? Die Erde, der Himmel?


War der Himmel schon immer blau?

Leuchteten die Sterne schon immer vor einem schwarzen Hintergrund?



Am Anfang war das Universum ganz klein und sehr heiß: eine winzige Hölle

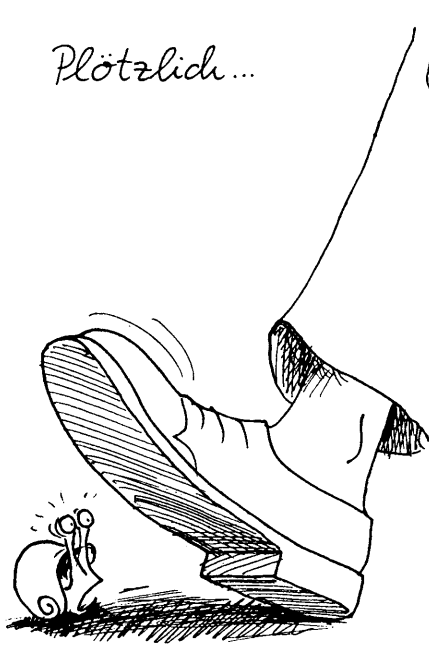
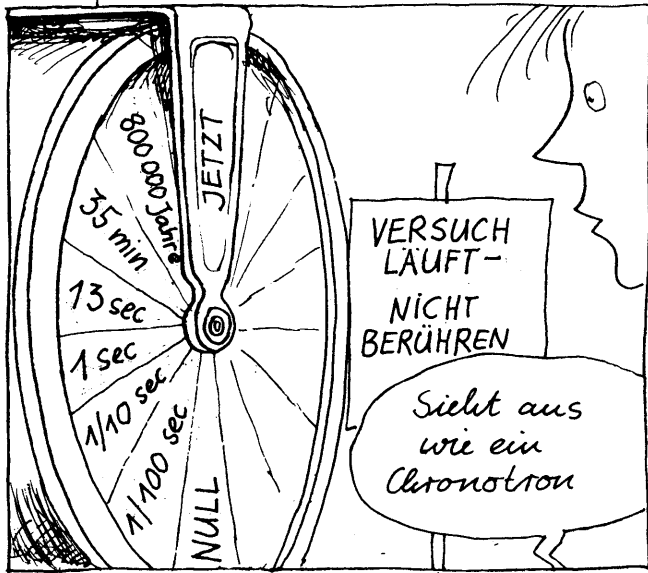
und dann ist alles in die Luft geflogen?



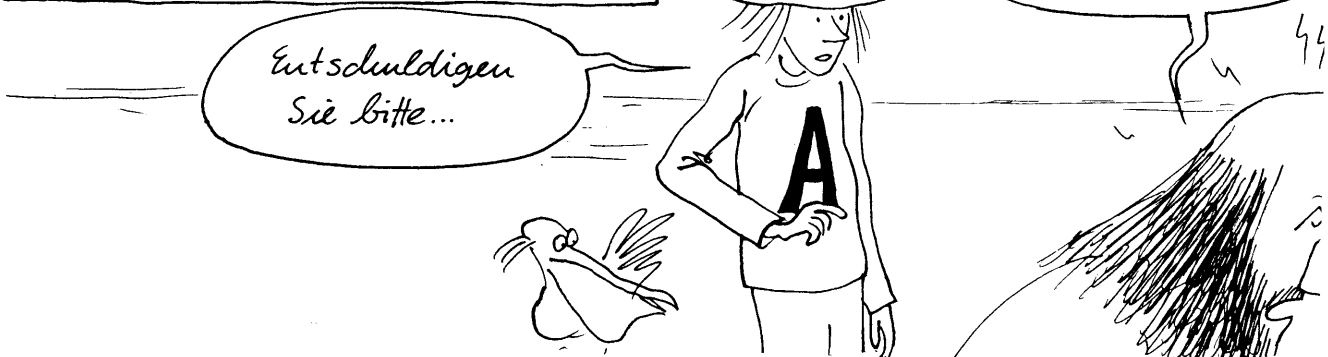
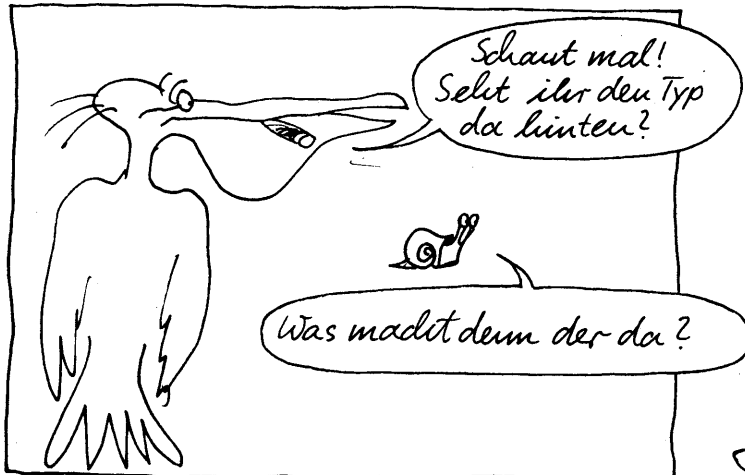
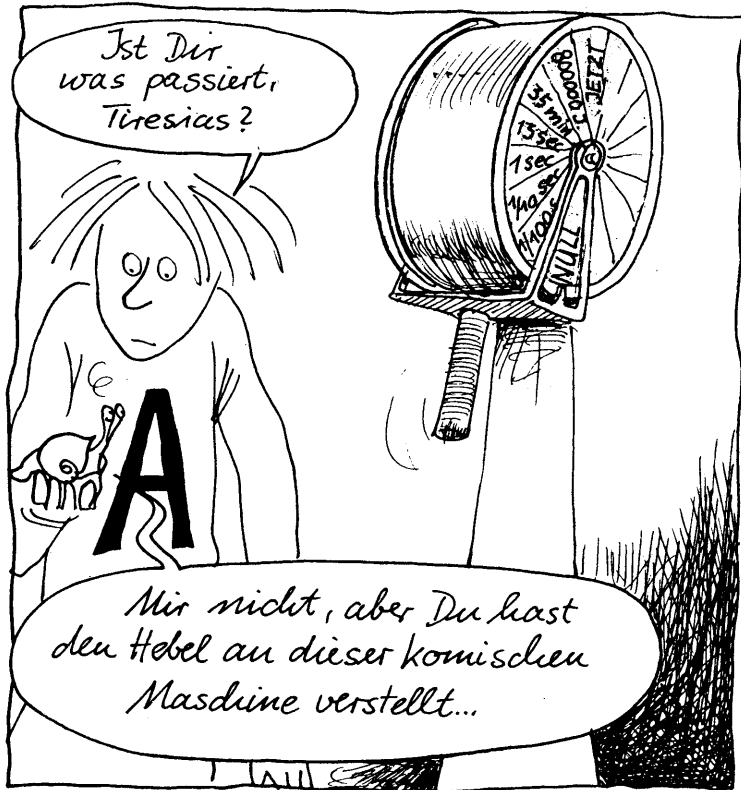
Ja, aber das ist eine lange Geschichte. Um sie zu erzählen, müssen wir die Zeit sehr, sehr weit zurückdrehen.



Oh, seht mal da!



WIE ALLES ANFING





Wieder nichts!

Man hat mich reingelegt...

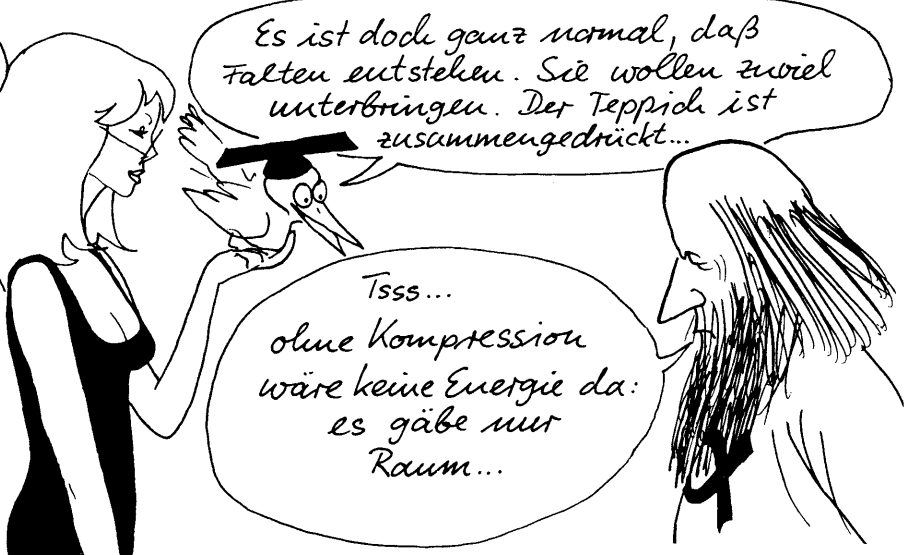


Wenn Sie einen Teppichboden verlegen wollen, stellen Sie sich etwas ungedrückt an!

Der Typ scheint Schwierigkeiten mit seinem Teppich zu haben.

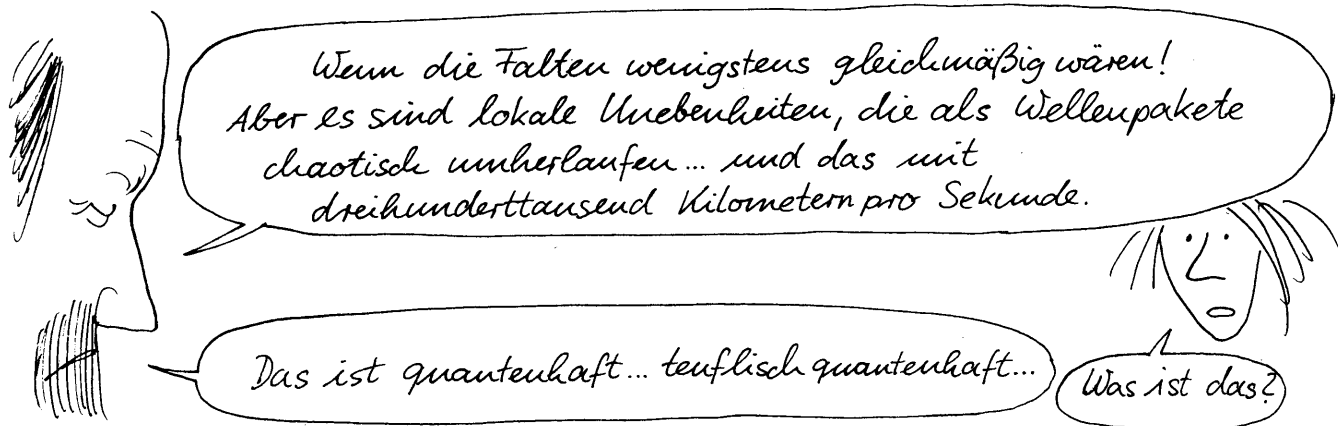


Entsetzlich... überall Falten!



Es ist doch ganz normal, daß Falten entstehen. Sie wollen zuviel unterbringen. Der Teppich ist zusammengedrückt...

Tsss... ohne Kompression wäre keine Energie da: es gäbe nur Raum...



Wenn die Falten wenigstens gleichmäßig wären! Aber es sind lokale Unebenheiten, die als Wellenpakete chaotisch umherlaufen... und das mit dreihunderttausend Kilometern pro Sekunde.

Das ist quantenhaft... teuflisch quantenhaft...

Was ist das?

Viele Dinge gibt es in diesem Universum ja nicht!

Doch!
Die herumwan-
dernden Falten
sind die
Dinge.

Das hier dargestellte Universum hat nur zwei Dimensionen. Es ist also eine Fläche, in der sich Materie und Strahlung als Relief bemerkbar machen. Würdest Du in diesem zweidimensionalen Universum leben, sähest Du so aus.

Das gefällt mir nicht, das gefällt mir gar nicht...

Auch in unserer dreidimensionalen Welt sind Massen lokale Änderungen der Krümmung.

Das war beim letzten Mal besser.

Beim letzten Mal?!?

Naja, macht nichts... ich neime die umherwandernden Falten Photonen.

Ach Gott, ach Gott!
Da ist ja noch was...

Was denn?

Sehen Sie sich das an! Die sind ja überall!!!

Die flocken nicht nur aus,
die wirbeln auch. Eine schöne
Bescherung!

Die sehen wie kleine Strudel
aus... als würde man mit der
Hand ein Bettlaken so
verdrehen.

Merkwürdig. Manche
drehen sich rechts, manche
links herum.

Sie laufen mit 300 000 km/s,
genau wie Ihre Photonen.

Ich nenne diese wandernden
Wirbel Neutrinos, wenn sie sich
so herum drehen,

und Antineutrinos wenn sie sich
andersherum drehen.

Das ist ja ein irres Treiben auf Ihrem
Teppichboden, nirgends ist er mehr flach.
Die Falten berühren sich
gegenseitig (*).

Dieses Universum ist
sehr, sehr instabil...
völlig mißlungen!

Wenn das ganze wenigstens noch geordnet wäre! Wie
Kraut und Rüben! Die Verteilung ist völlig zufällig.

Ich finde Glücksspiele entsetzlich.

Der Zufall,
junger Freund, das
ist der Teufel!

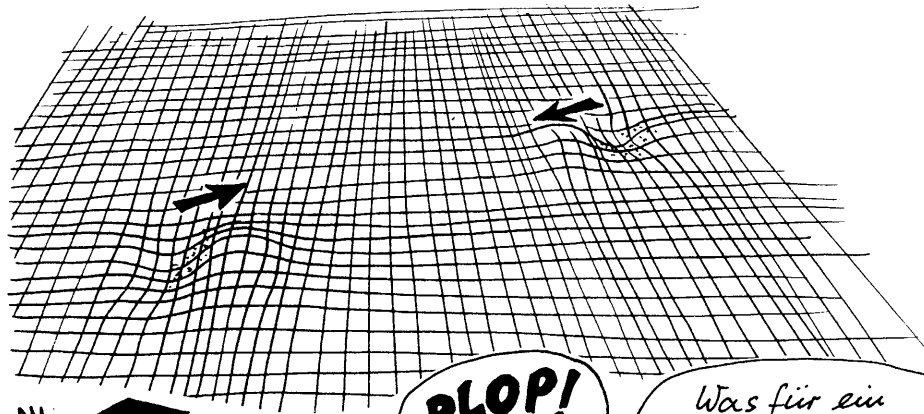
Ah...

Ich mag
nicht mal
Würfelspiele...

Oh, sehen Sie mal!
Da hinten passiert
jetzt was...

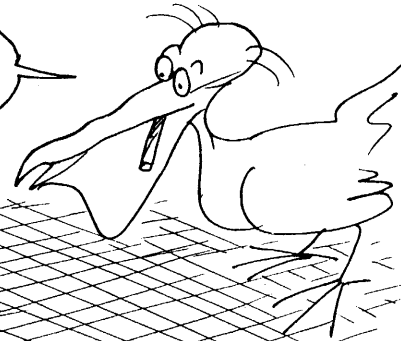
(*). Diese Eigenschaft nennt man Strahlung
des schwarzen Körpers (weiß der Teufel warum...)

Zwei wandernde Falten
werden sich gleich treffen.
Sie stoßen gleich
zusammen.

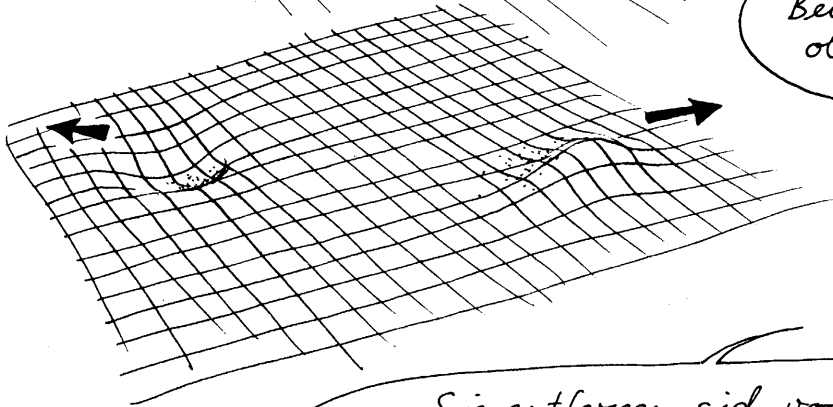


PLOP!

Was für ein
Tollwabooh!

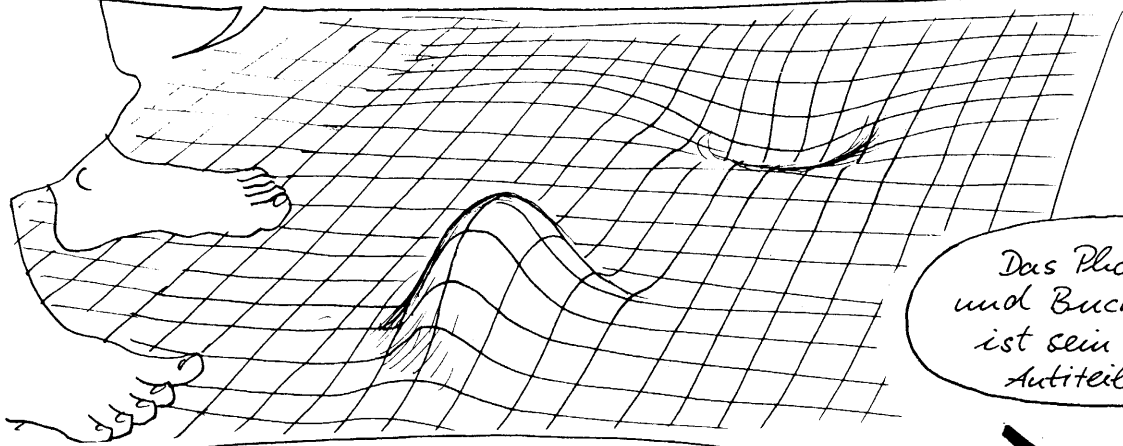


Das sind zwei
Beulen geworden: eine nach
oben und eine nach
unten.



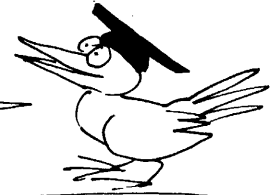
Sie entfernen sich voneinander mit
nahezu 300 000 Kilometern pro Sekunde.

Na schön. Ich nenne die Buckel Materie und die Dellen Antimaterie. Wir sehen eine lokale Krümmung, also ist dort Masse.

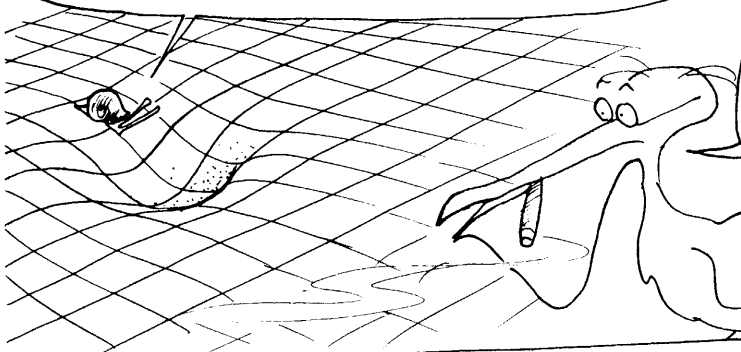


Das Photon, Delle und Buckel zugleich, ist sein eigenes Antiteilchen.

Materie und Antimaterie werden durch den Zusammenstoß von Photonen erzeugt und erhalten relativistische Geschwindigkeiten.



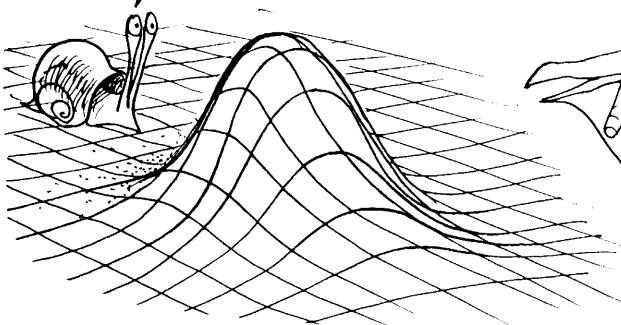
Buckel, Delle - das ist doch alles willkürlich.



Was soll diese tiefgründige Bemerkung, mein lieber Tiresias? Manche Dinge erscheinen als Delle, andere als Buckel. Das ist doch wohl offensichtlich...

Aber doch nur, weil wir auf dieser Seite des Teppichs sind. Wären wir auf der anderen Seite, so wären die Buckel Dellen und die Dellen Buckel.

Aber ich sehe nur die eine Seite!!!



Tiresias!!!

Mau darf nicht
mal mehr Witze
machen...

?...

Immer diese
akademischen
Sittenwächter!

Warten Sie mal! Da... wenn ein Buckel und eine Delle
langsam genug aufeinandertreffen, entstehen wieder zwei wandernde
Falten. Das ist der umgekehrte Vorgang.

Hm... einfach die
Zerichtung eines Teilchens
und seines Antiteilchens.
Das ergibt zwei
Photonen.

So ein
Tohuwabolu!

Hm...

Die Entstehung und Vernichtung von Teilchen vollzieht sich in einem unbändigen Wechsel. In dieser chaotischen Welt, dieser Welt der Veränderung, gibt es keine Strukturen. Nur ein Gewimmel von Photonen, Neutrinos und Antineutrinos, von zahlreichen flüchtigen Teilchen und Antiteilchen: Das ist das Tohuwabohu (*).

Das erinnert mich an die Sexonen.

Was sind Sexonen?

Das sind Teilchen, die ihre Zeit damit verbringen, sich zu vermehren.

Anscheinend haben die wandernden Falten sehr verschiedene Breiten, genauso wie es Buckel gibt, die schmal und hoch, und solche, die breit und flach sind.

(* Siehe DIE BIBEL

Die Breite der wandernden Falten, der Photonen, nenne ich Wellenlänge λ .

Ich will einmal eine wandernde Schwingung erzeugen, indem ich dieses Seil bewege. Zuerst bewege ich es langsam, ich stecke wenig Energie hinein, die Wellenlänge λ ist groß.

Jetzt bewege ich es schneller, ich führe ihm mehr Energie zu, und die Wellenlänge λ ist deutlich kürzer.

Hilfe!

Je mehr Energie eine Welle transportiert, desto kleiner ist also ihre Wellenlänge.

Sagen wir, die von einem Photon, d.h. von einem Lichtkörnchen transportierte Energie sei umgekehrt proportional zu seiner Wellenlänge λ : E ändert sich mit $1/\lambda$.

So wird's wohl gehen...

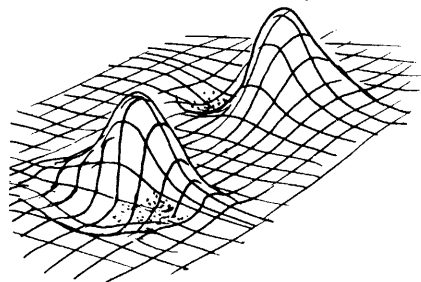
JE KLEINER, DESTO SCHWERER

Was die Photonen, die wandernden Falten, betrifft, bin ich einverstanden. Aber worin unterscheiden sich die schmalen, hohen Dellen und Buckel von den breiten, flachen?

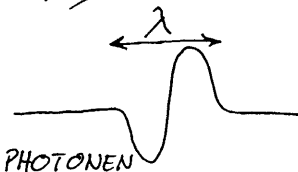
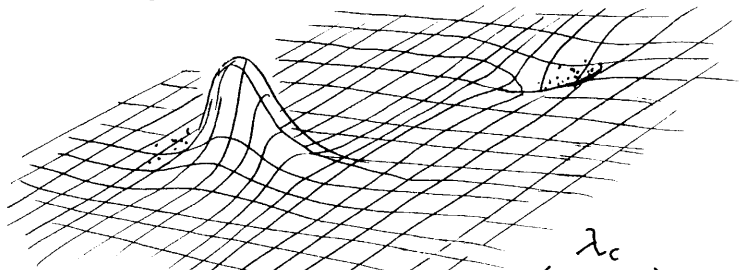
Ich nenne die Breite dieser Buckel und Dellen die Comptonwellenlänge λ_c ; die Masse m wird ihr umgekehrt proportional sein, m ändert sich wie $1/\lambda_c$.

Sehr energiereiche Photonen mit kurzer Wellenlänge bringen Teilchen (und Antiteilchen) großer Masse m hervor, also schmale, hohe Buckel (und schmale, tiefe Dellen).

λ klein



λ_c klein: kurze Comptonwellenlänge



Masse m groß

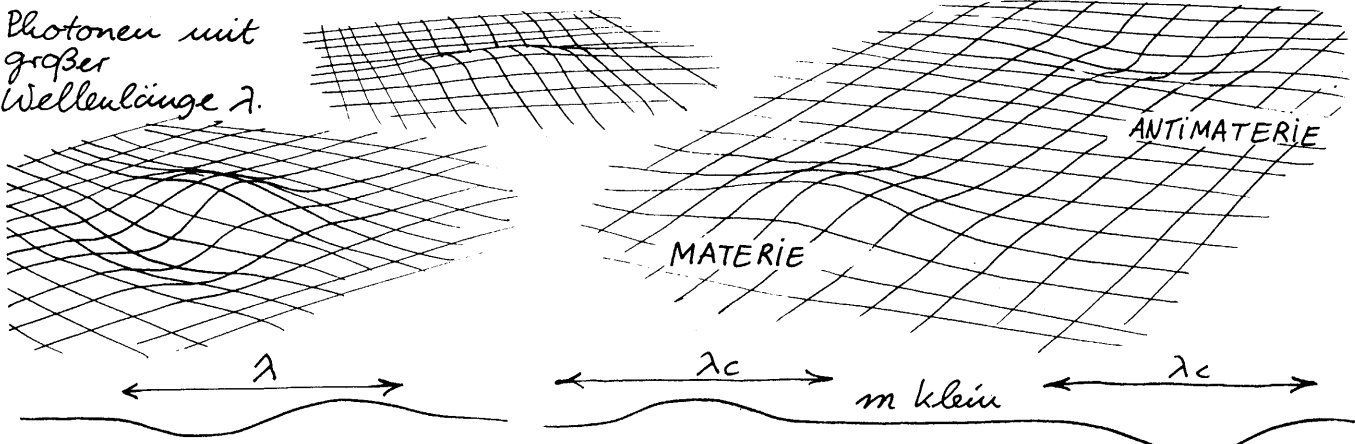
ANTIMATERIE

MATERIE

λ_c

λ_c

Photonen mit
großer
Wellenlänge λ .




Photonen großer Wellenlänge \rightarrow Teilchen großer Comptonwellenlänge

Dagegen erzeugen Photonen relativ niedriger Energie ein
Teilchen-Antiteilchen-Paar großer Comptonwellenlänge,
d. h. kleiner Masse: λ_c groß, m klein.

Eigentlich ist das noch viel
einfacher. Wenn ich das richtig sehe, ist $\lambda = \lambda_c^{(*)}$;
die Teilchen (und Antiteilchen) haben dieselbe
Größe wie die Photonen, aus denen sie
entstanden sind.

Das bedeutet, daß man mit
der Masse eines beliebigen Teilchens auch
die Wellenlänge der Strahlung kennt, aus
der es hervorgegangen ist.

(*) Im Band „ALLES IST RELATIV“ hatten wir gesehen, daß Energie und Masse
äquivalent sind.

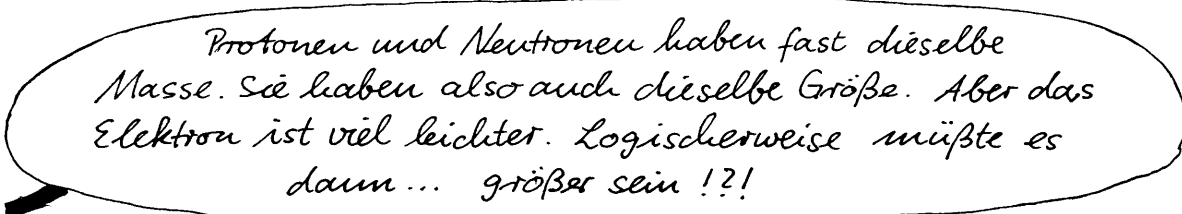


He! Warten Sie! In dieser Geschichte ist noch der Wurm drin. Das geht doch überhaupt nicht.

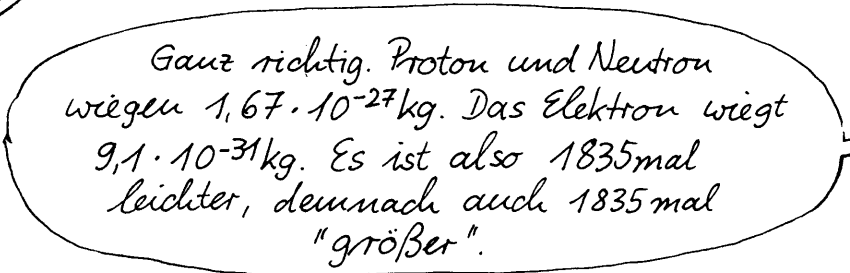
BING

Oh, Verzeihung!

!!!



Protonen und Neutronen haben fast dieselbe Masse. Sie haben also auch dieselbe Größe. Aber das Elektron ist viel leichter. Logischerweise müsste es dann ... größer sein !?!



Ganz richtig. Proton und Neutron wiegen $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Das Elektron wiegt $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. Es ist also 1835mal leichter, demnach auch 1835mal "größer".

Ich ...
äh ...
oh ...

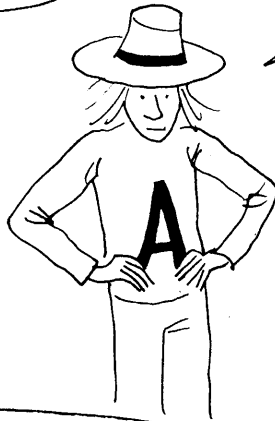
Hast Du schon mal ein Proton gesehen?

Äh...
nein...

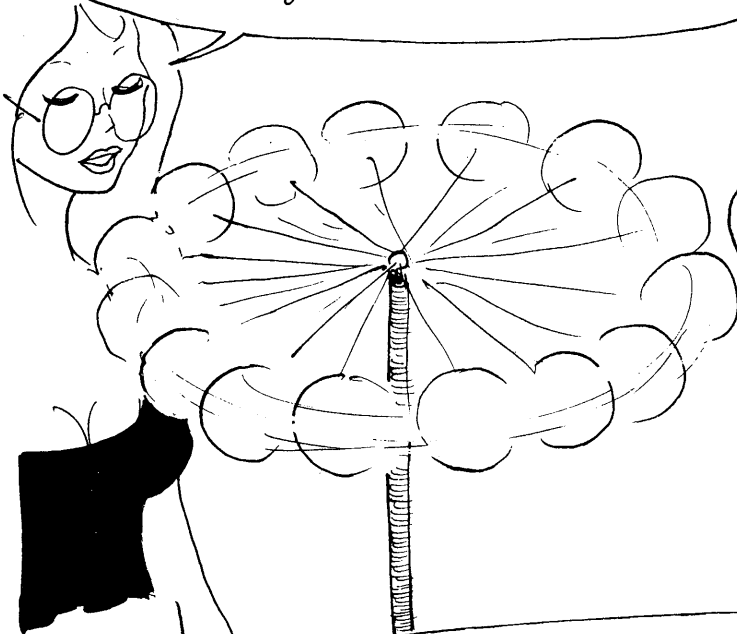
Na also!

Ja, ja,
die Schöpfung von heute.

Was soll das
werden?



Ich bastle ein einigermaßen
realistisches Wasserstoffatom, mit
einem dicken Elektron und einem
winzigen Proton als Kern.



Ach Gott, ach Gott! Was für ein Chaos...
na ja Kinder, ihr helft mir wenigstens
Ordnung in dieses Durcheinander
zu bringen.



DIE TEMPERATUR DER STRAHLUNG

T_s



In der Menge der Photonen kommen die unterschiedlichsten Wellenlängen vor. Ich werde deshalb eine mittlere Wellenlänge und eine mittlere Energie der Photonen definieren.

Die Strahlungstemperatur T_s sei das Maß dieser mittleren Photonenenergie.

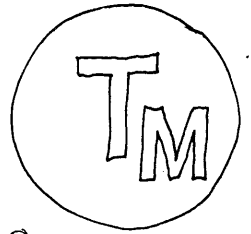
Eine Katastrophe...

ZUSTAND DES THERMO-

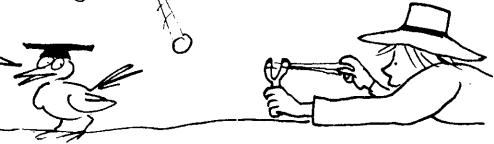
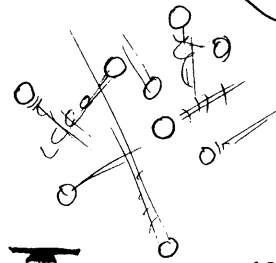


Ja, aber dazu kommen wir auf Seite 46. Vorläufig tauschen die Teilchen, wenn sie untereinander oder mit den Photonen zusammenstoßen, Energie aus. Dieser Mechanismus führt zum Ausgleich der Temperaturen, er bringt das System in den Zustand des thermodynamischen Gleichgewichts.

DIE TEMPERATUR DER MATERIE



All diese Materieteilchen haben unterschiedlichste Massen m und Geschwindigkeiten v . Die kinetische Energie eines einzelnen Teilchens ist $\frac{1}{2}mv^2$. Man kann für eine solche Population eine mittlere kinetische (thermische) Energie definieren.



Und die Temperatur der Materie T_M ist dann das Maß für die mittlere Energie dieser thermischen Bewegung.



DYNAMISCHEN GLEICHGEWICHTS

Wenn ein Teilchen zu viel Energie hat, d. h. wenn es zu „heiß“ ist, wird es beim Stoß mit einem anderen Teilchen abgebremst. Ist es zu langsam, so wird es durch den Stoß beschleunigt. Wenn die energetische Kopplung der Teilchenarten durch Stöße hinreichend stark ist, werden die Temperaturen gleich; und sie bleiben gleich, wenn man das Gemisch entspannt oder komprimiert.



He, paß doch auf...

Mach hin!

Nicht so schnell!



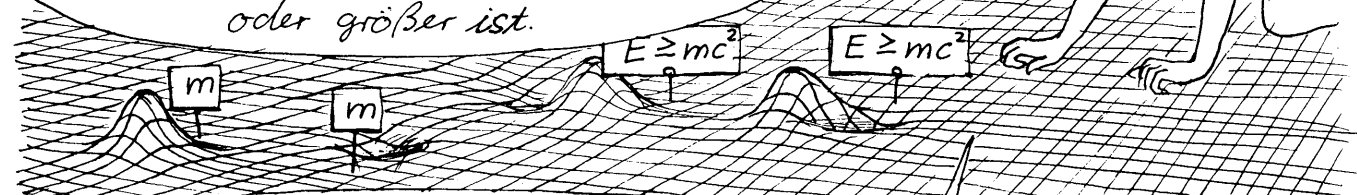
Mensch, bist Du lahm!



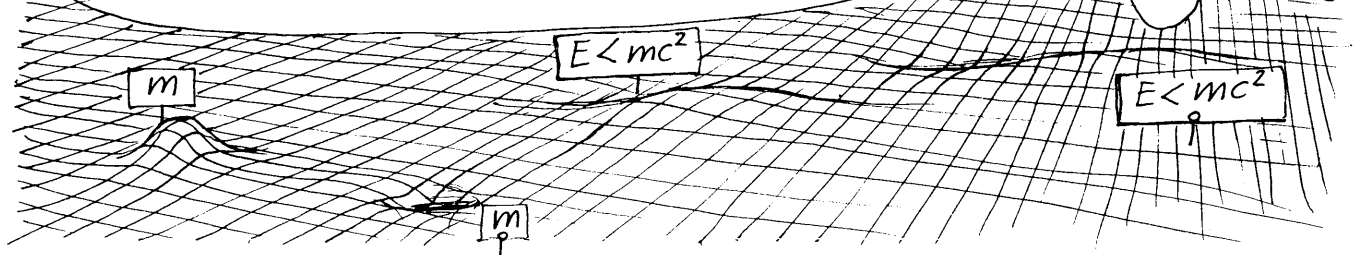


DIE SCHWELLEN-TEMPERATUR

Um ein Paar aus Teilchen und Antiteilchen zu erzeugen, von denen jedes die Masse m hat, wird die Energie $2mc^2$ gebraucht. Sie wird von einem Photonenpaar geliefert, dessen Energie gleich oder größer ist.



Ist die mittlere Energie der Photonen kleiner als der Schwellenwert mc^2 , dann ist die Strahlungstemperatur T_s zu niedrig, und die Teilchen können nicht mehr entstehen.



DIE ENTSTEHUNG DER ARTEN

Um das Überleben einer Art zu sichern, ist eine hohe Produktionsrate erforderlich.

Das bedeutet, daß die Strahlungstemperatur T_s größer als die Schwellentemperatur der Spezies sein muß.

Ist die Strahlungstemperatur niedriger, sind mehrere Ursachen für das Aussterben denkbar.

Die bedrohlichste Vernichtung ist die mit einem Antiteilchen.

Schließlich haben die Teilchen ihre eigene Lebensdauer (*). Wenn diese abgelaufen ist, zerfallen sie spontan in andere Teilchen und in Strahlung.

(*)... ihre CHRONOL-Reserve.
(Siehe ALLES IST RELATIV.)

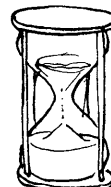


Sieh mal an, Sexonen!



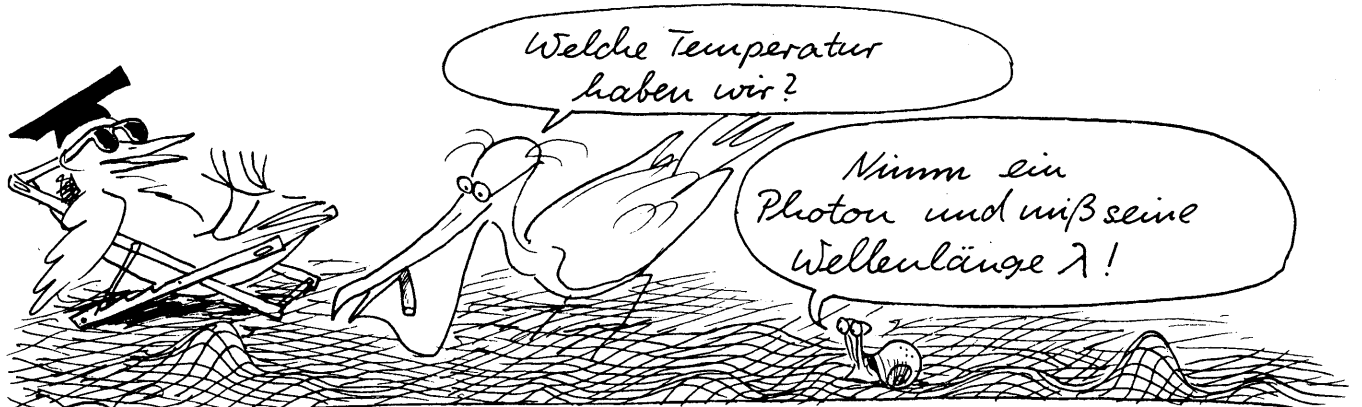
Dann kommen alle möglichen verhängnisvollen Begegnungen.

Der Kosmos ist ein gefährliches Pflaster.



Überdauern ist das Problem...



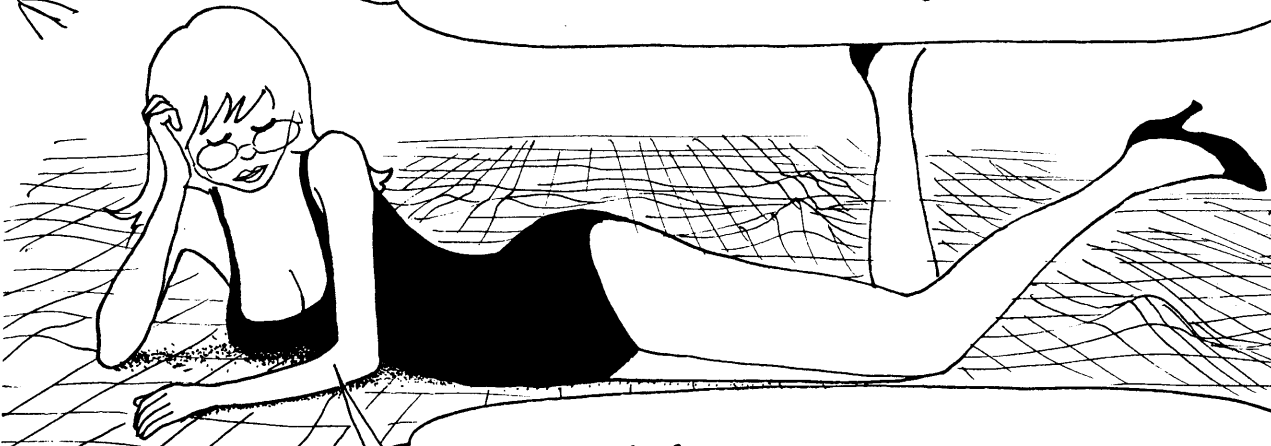


Welche Temperatur haben wir?

Nimm ein Photon und miß seine Wellenlänge λ !

Meusch, zwanzig Billionen Grad ($2 \times 10^{13} \text{K}$)!

Es scheint ungefähr gleichviele Photonen, Neutrinos, Protonen, Neutronen, Elektronen und ihre Antiteilchen zu geben.



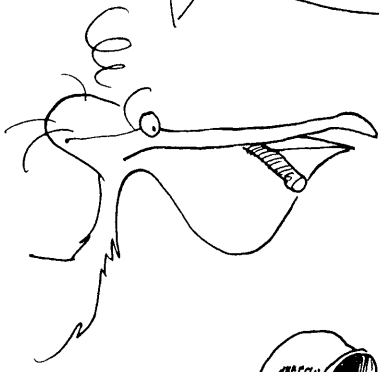
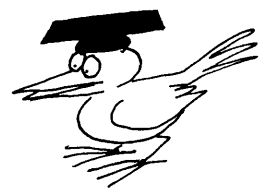
Bei so hohen Temperaturen ist jeder relativistisch. Selbst Materieteilchen bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit.

In ALLES IST RELATIV hatten wir gesehen, daß die Eigenzeit eines Teilchens langsam erstarbt, wenn sich seine Geschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nähert.



Moment mal, das verstehe ich nicht ganz...
Wenn alle mit Lichtgeschwindigkeit rumsausten, dürfte doch die Zeit(*) gar nicht vergehen!?! Keiner könnte die Zeit erleben...

Niemand geht so langsam, daß er genießt, daß die Zeit vergeht.



Oh!

Eine Welt ohne Zeit ist eine Welt ohne Sinn.



Vielleicht ist die Zeit ein Luxus, den sich nicht jedes Universum leisten kann?

Teuflisch!



Ach..., bei allem, was wir bisher gehört und gesehen haben... Raum, Zeit, Universum... streut man uns nur Sand in die Augen.


Der universale Baustoff aller Dinge?



(*) Eine kosmische Zeit. Sie könnte das Mittel der Eigenzeiten sein.

DIE ELEMENTARTEILCHEN

Stellt nicht so herum. Helft mir lieber, etwas Ordnung in dieses Durcheinander von Elementarteilchen zu bringen.




Die hier haben eine sehr kurze Comptonwellenlänge λ_c .

Das sind Hyperonen. Sie gehören zu den Hadronen und haben die größte Masse von allen.

Dann kommen die anderen Hadronen. Das Proton und das Neutron (sowie das Antiproton und das Antineutron) gehören dazu. Ich nenne sie auch Nukleonen. Um diese Teilchen zu erzeugen, ist eine Strahlungstemperatur von mehr als 10^{13} K nötig, d.h. zehn Billionen Grad.

Eine irre Schwellen-
temperatur!



Die Comptonwellenlänge von Protonen und Neutronen ist $1,32 \cdot 10^{-13}$ cm, ein Achttausendstel eines Milliardstel cm.

ES IST VERBOTTEN, IN
DEN NEUTRONEN
HERUMZUSCHNÜFFELN

Hadron kommt von dem griechischen Wort „hadros“, groß und stark.

Sie sind ein alter Grieche, Tiresias?

Selbstverständlich gibt es genauso viele Antihadronen wie Hadronen.

Und hier schließlich die Leptonen(*)

LEPTON

ANTILEPTON

Die bekanntesten Leptonen sind das Elektron und sein Zwillingbruder das Antielektron oder Positron.

Zum Erreichen ihrer Schwellentemperatur genügt eine Strahlungstemperatur von 6 Milliarden Grad, $1/1835$ der Schwellentemperatur von Protonen und Neutronen.

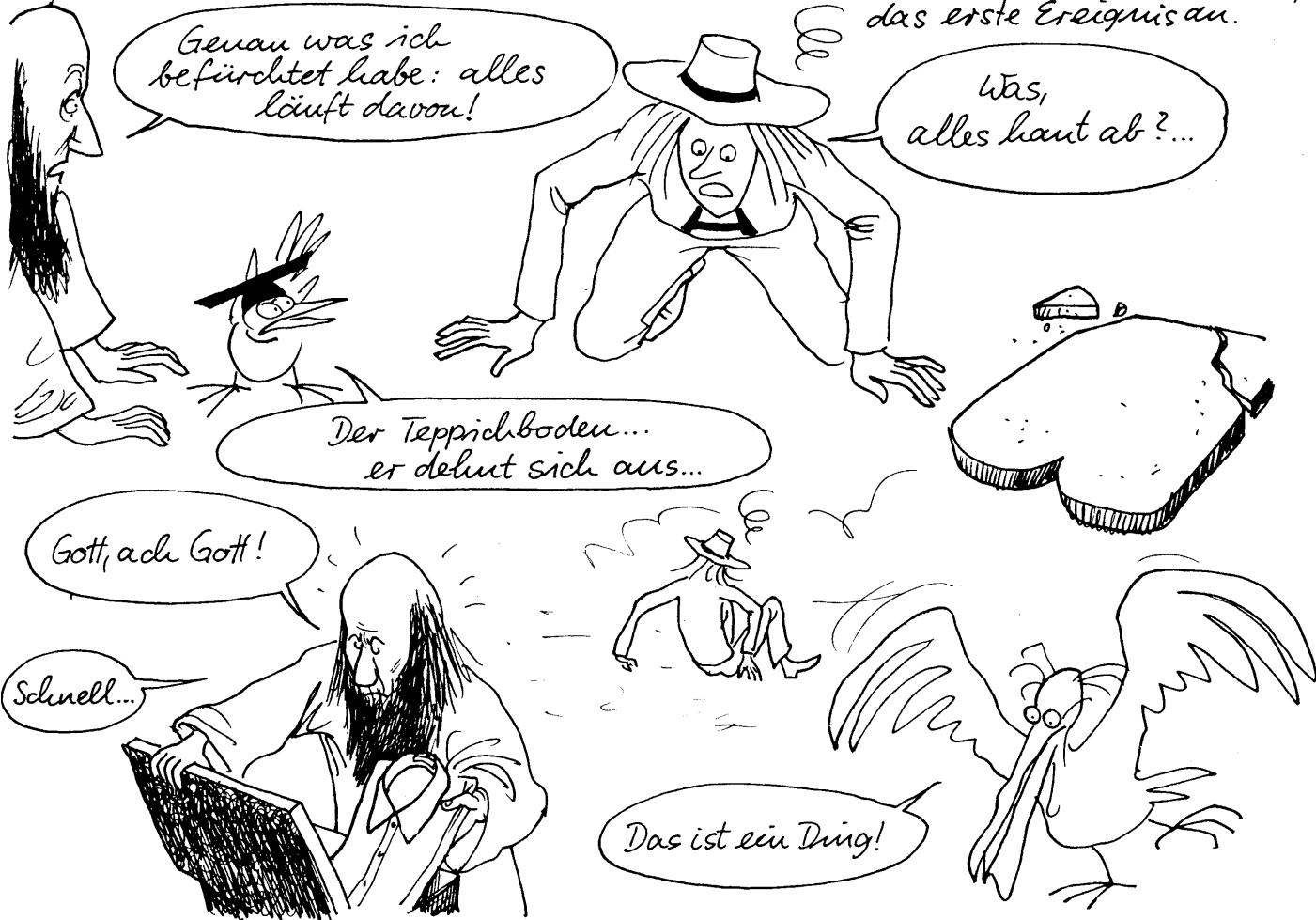
Das ist ganz normal, denn ihre Masse ist ja 1835 mal geringer.

(*) Aus dem griechischen „leptos“ = schwächlich

ALLES MACHT SICH DAVON



Der große Knall (*) war nun nicht mehr aufzuhalten. Die Situation war furchtbar chronogen: Das Chronotron lief los und zeigte den ersten Augenblick, das erste Ereignis an.



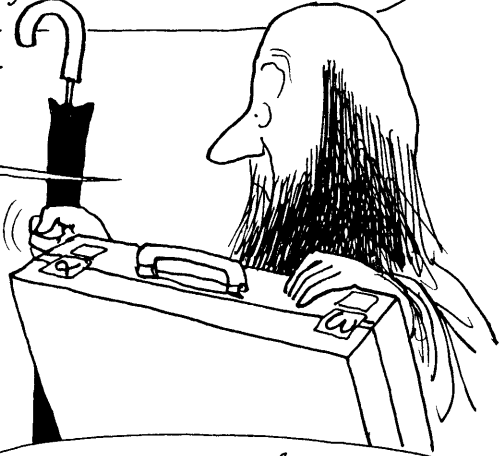
(*) BIG BANG: der Urknall

Wo seid Ihr?
Was ist los?



Die Expansion!...
Das Universum dehnt sich aus.
Sie entschuldigen mich bitte...

Ich gehe ins
Anderswo.



Diese Veränderungen
kann ich nicht
ertragen.



He!!!

Ihr werdet sehen,
es wird sich bald wieder
etwas beruhigen.

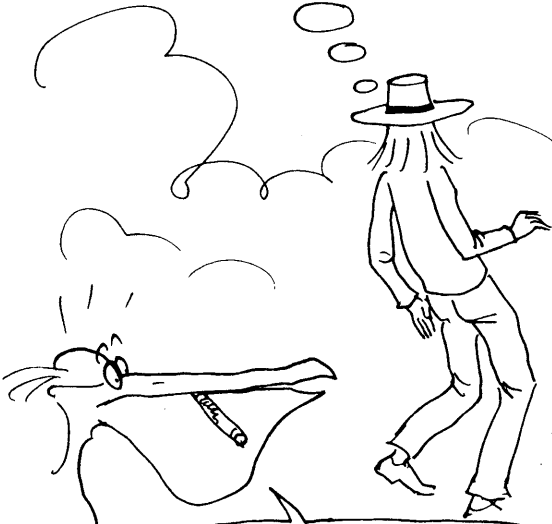


Heh, der läßt uns
im Stich!

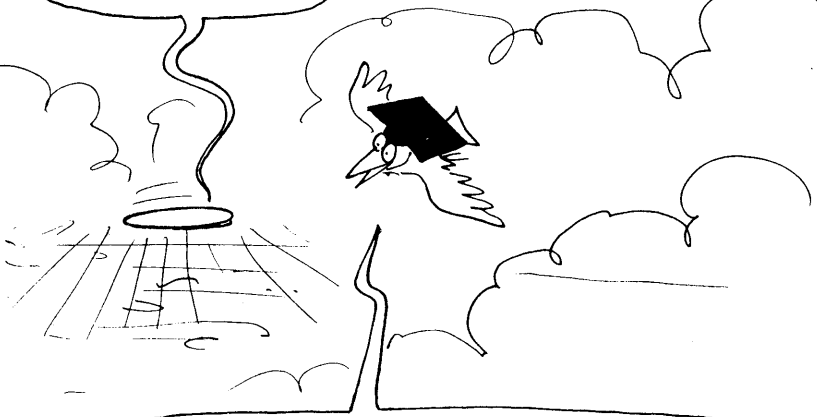


Adieu,
macht schön
weiter.

Wieder nichts!



Wo ist er hin?...



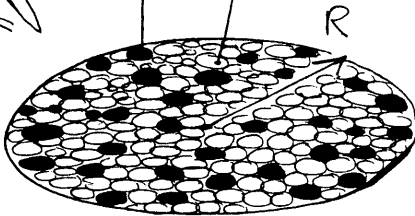
Sieht aus wie ein Kanaldeckel.
Sind das die Katakomben des
Universums?

DIE ERHALTUNG DER MASSE

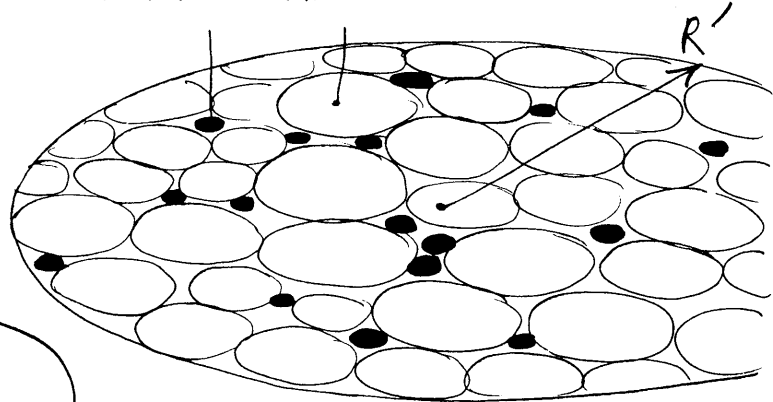
Schaut mal hier, die Photonen dehnen sich aus, aber nicht die Materieteilchen.



MATERIE PHOTON



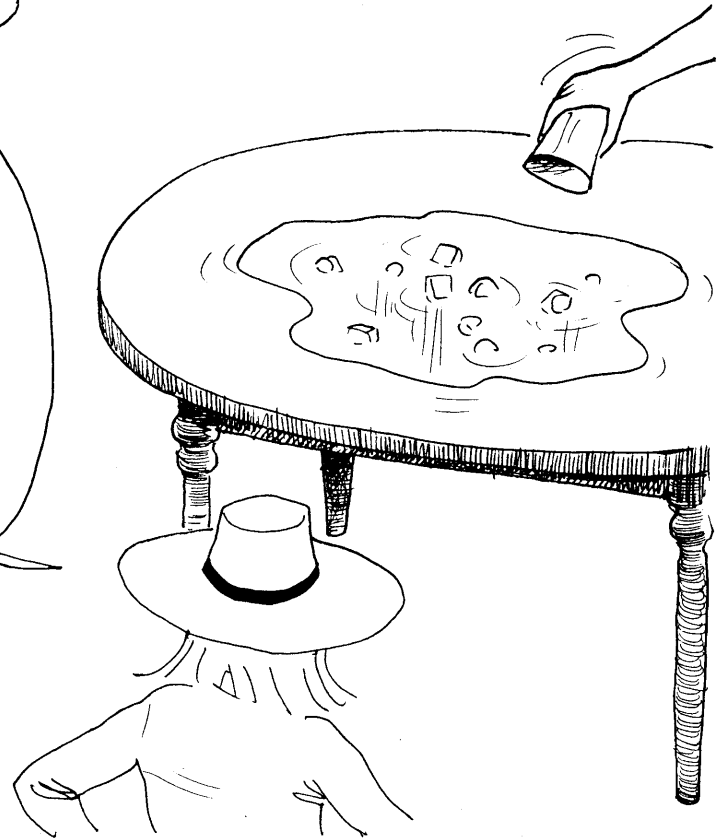
MATERIE PHOTON



Materie ist eingefrorener Raum.



Das erinnert mich daran, was passiert, wenn man ein Glas mit Wasser und Eiswürfeln auf den Tisch gießt. Während sich das Wasser ausbreitet, folgen die Eiswürfel der Expansion, ändern aber ihre Größe nicht.



Da die Größe der Materieteilchen ihre Masse widerspiegelt, schließe ich daraus, daß die Masse erhalten bleibt.

Das Ensemble der Photonen dagegen, das sich ja ausdehnt, verliert Energie.

Da die Photonenwellenlänge λ der Expansion folgt (λ ist proportional zum Radius R des Universums), wird die Strahlungstemperatur, die mit $1/\lambda$ geht, auch mit $1/R$ abnehmen.

Das Universum schafft sich ausdehnend seinen eigenen Raum, sein "Kosmotop"(*), indem es... Vakuum ... ausstößt.

Materie und Licht sind nur zwei verschiedene Formen derselben Einheit: Energie - Materie. Die Photonen behalten ihre Geschwindigkeit von 300 000 km/s verlieren aber Energie.

(* von "kosmos": Universum und "topos": Ort, Gegend (der Lebensraum des Universums)

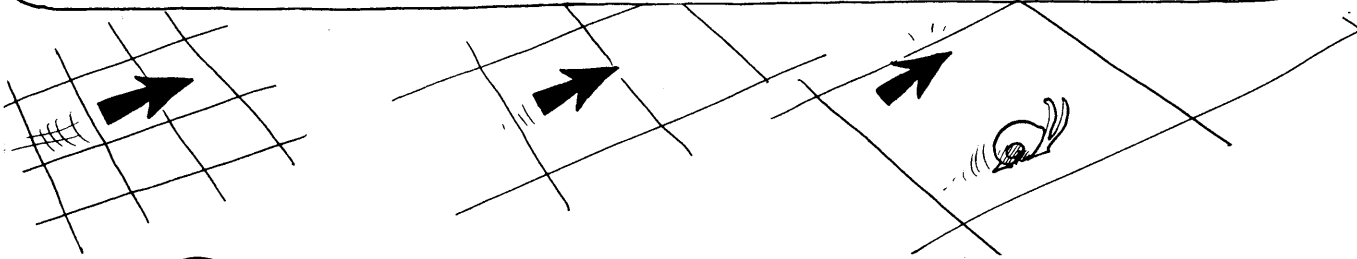
PHOTONEN

Schau mal, ein Bild, das das Auseinanderlaufen eines Photons und den damit verbundenen Energieverlust schön veranschaulicht.



Aber wie verhält sich die Materie bei dieser Expansion?

Das Universum vergrößert den Raum wie ein Luftballon beim Aufblasen seine Oberfläche. Je mehr Zeit vergeht, desto größer ist der Weg, den ein Teilchen zwischen zwei Punkten durchlaufen muß. Wenn sich die Ausdehnung des Universums verdoppelt, nimmt die Geschwindigkeit der Teilchen auf die Hälfte ab. Die kinetische Energie ist also nur noch $1/4$: Die Geschwindigkeit ändert sich wie der Kehrwert des Radius R des Universums, die Temperatur T_M wie $1/R^2$.

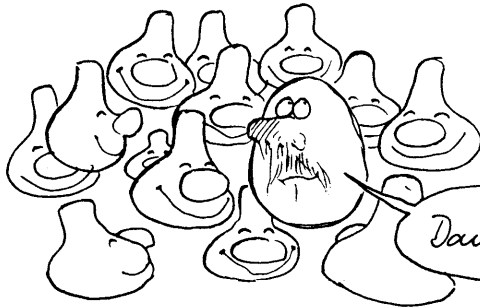


Ah...
ich werde
müde...



Aber wir haben doch gerade gesehen, daß die Strahlungstemperatur mit $1/R$ abnimmt. Wird etwa die Materie schneller kalt?

In der Tat. Allerdings wärmen die Stöße mit den Photonen die Materie immer wieder auf. Weil die Stöße sehr häufig sind, besteht eine Zeitlang thermisches Gleichgewicht ($T_S = T_M$).



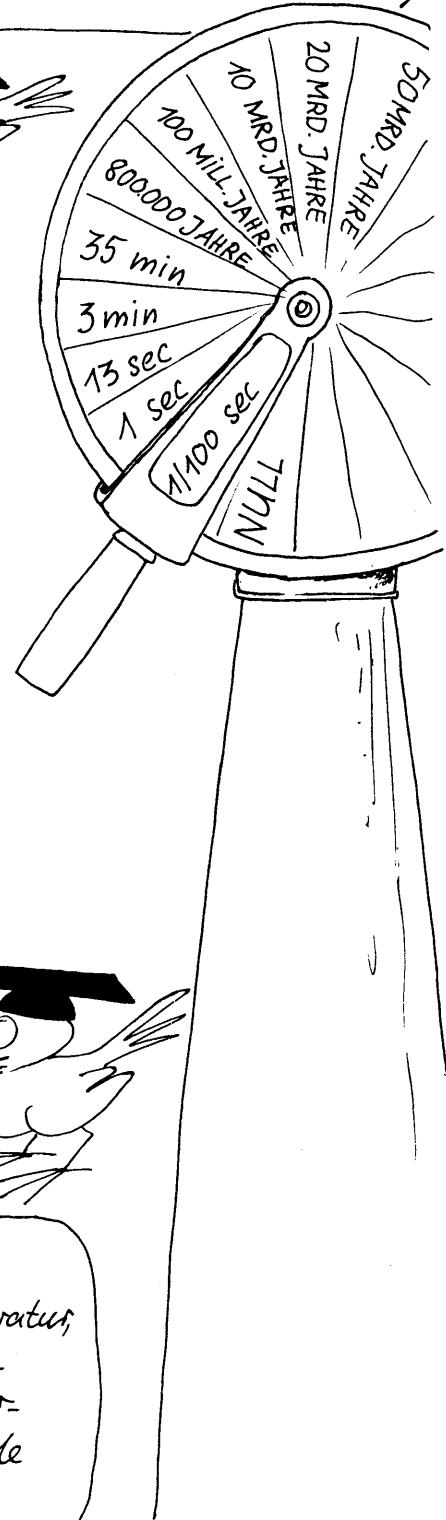
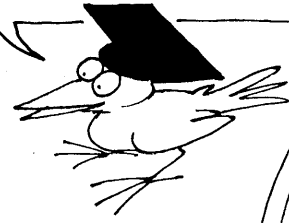
Danke, Freunde


Eine hundertstel Sekunde

Die Protonen, Neutronen, Antiprotonen und Antineutronen bewegen sich nur noch mit $1/10$ Lichtgeschwindigkeit.



Die Temperatur ($T_S = T_M$) ist auf 150 Milliarden Grad gefallen, d. h. weit unter die Schwellentemperatur, die 10 000 Milliarden Grad beträgt. Sie haben sich in einem irrsinnigen Tempo paarweise vernichtet, und nur noch eins von einer Milliarde ist übriggeblieben. Dies ist das Ende der Hadronenära.





Sophie, die meisten Protonen, Neutronen, Antiprotonen und Antineutronen sind verschwunden. Warum sind denn noch immer so viele Elektronen und Positronen (Antielektronen) da?

Die Schwellentemperatur der Elektronen beträgt doch nur sechs Milliarden Grad.

Hören Sie, nur sechs Milliarden Grad.

Es scheint frisch zu werden.

Es ist sonderbar: Die Temperatur ist 150 Milliarden Grad. Die übriggebliebenen Nukleonen bewegen sich mit $1/10$ Lichtgeschwindigkeit. Aber die Elektronen sind immer noch relativistisch.

Ja, warum?

Das Medium ist noch immer im thermischen Gleichgewicht: Die Kopplung zwischen den einzelnen Spezies und der Strahlung ist immer noch intensiv, und die kinetischen Energien der Materieteilchen sind im Mittel gleich: $\frac{1}{2}m_{\text{Proton}} (v_{\text{Proton}})^2 = \frac{1}{2}m_{\text{Elektron}} (v_{\text{Elektron}})^2$.



Warte mal... Die Masse des Elektrons ist 1835 mal kleiner als die des Protons. Also ist die Geschwindigkeit des Elektrons bei einer gegebenen Temperatur zwangsläufig viel größer.

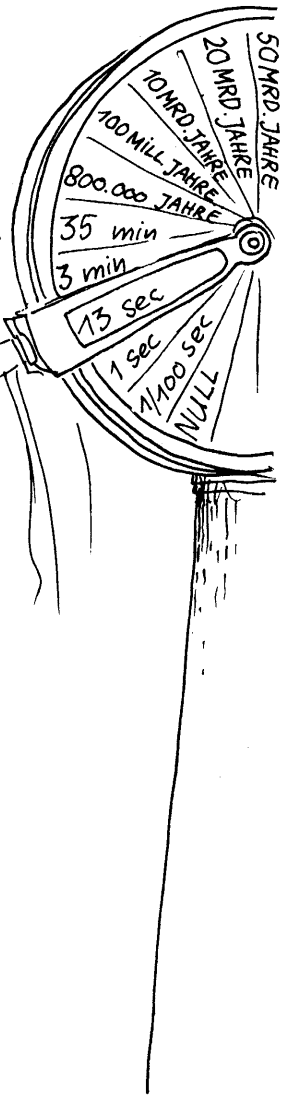
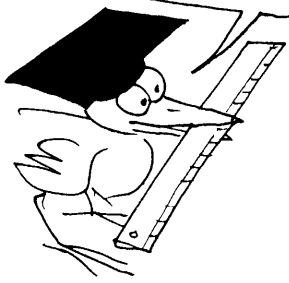
In der Tat. Da die Schwellenenergie für die Erzeugung eines Teilchens der Masse m einfach mc^2 ist, hört die Erzeugung dieser Teilchen auf, sobald sich das Medium soweit abgekühlt hat, daß die Geschwindigkeit v deutlich kleiner als c ist: die Entvölkerung beginnt.

Anders ausgedrückt: Sobald eine Population von Materieteilchen aufhört relativistisch zu sein, wird sie dezimiert.



Dreizehn Sekunden

Die Temperatur ist auf vier Millionen Grad gesunken.



Oh, sehen Sie mal, die Elektronen und Antielektronen verschwinden.



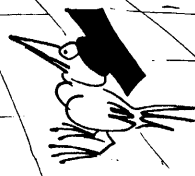
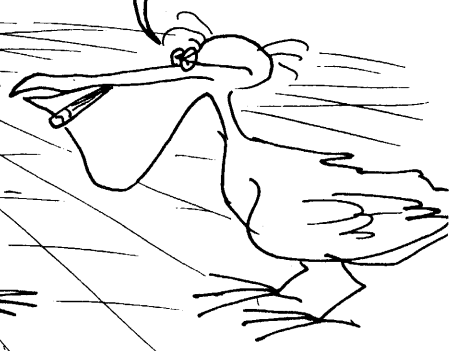
Klar, wir sind unterhalb ihrer Schwellentemperatur.

Das Ende der Leptonenära - ein kosmologisches Massaker!



Auch hier bleibt nur eins von einer Milliarde übrig.

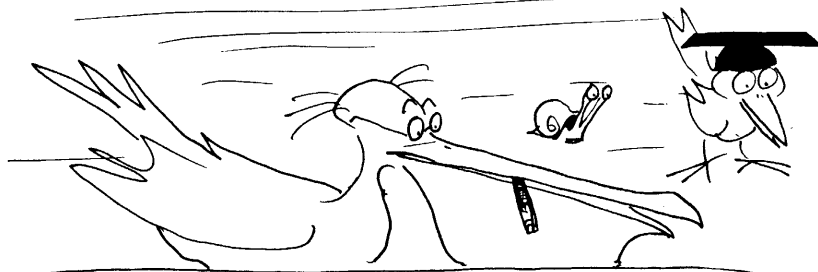
So eine Verschwendung...



Um ein Haar wären nur noch
die Photonen übriggeblieben.
Noch mal Glück gehabt...

Vielleicht gibt
es im Anderswo ein
Universum, das nichts
geworden ist...

Es ist eines der größten Rätsel
in der Kosmologie, warum sich
Materie und Antimaterie nicht
gegenseitig ganz vernichtet
haben.



Es ist immer dasselbe an dieser
Stelle der Geschichte: Das Problem der
Antimaterie wird unter den Tisch
gekehrt.
Ssst! und weg ist sie...

Tiresias, ich erinnere
Sie an unsere Vereinbarung:
Nur Tatsachen!
Keine wilden Spekulationen!

Ich habe die Nase
voll von diesen akademischen
Sittenwächtern.

Pssst!...

DIE STRAHLUNGSÄRA

Die Teilchen sind rar geworden.

Außer Licht gibt es nicht mehr viel in diesem Universum.

Die Energie-Masse, die zu gleichen Teilen in Form von Materie, Antimaterie, Photonen und Neutrinos vorlag, steckt jetzt fast ausschließlich in den Photonen und den Neutrinos, d. h. in der Strahlung. In dem Maße, wie sich das Universum ausdehnt, nimmt die Dichte der Materie ab: sie wird verdünnt.

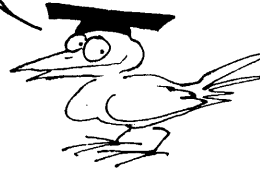
Wenn sich auf dem Teppichboden R verdoppelt, wird die Dichte durch $2 \times 2 = 4$ geteilt. In unserem dreidimensionalen Universum jedoch müssen wir durch $2 \times 2 \times 2 = 8$ dividieren.

Die Dichte der Materie ändert sich mit dem Kehrwert der dritten Potenz des Radius R

Für uns Photonen ist es viel dramatischer. Durch die Expansion wird nach und nach die ganze Energie, die wir transportieren, aus uns herausgesaugt, denn sie nimmt mit dem Kehrwert des Radius R des Universums ab.

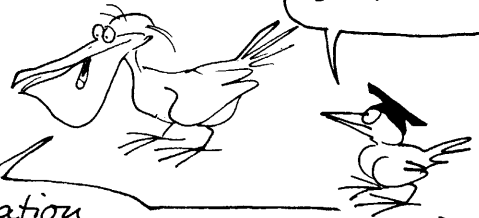
Daraus folgt, daß sich die Dichte der Photonenenergie mit dem Kehrwert der vierten Potenz von R ändert.

Solange die Materie an die Photonen gekoppelt ist, wird sie von den Photonen ständig erwärmt. Dieser Zustand hält an, bis nach 800000 Jahren die gemeinsame Temperatur $T_S = T_M$ auf 3.000 K gefallen ist.



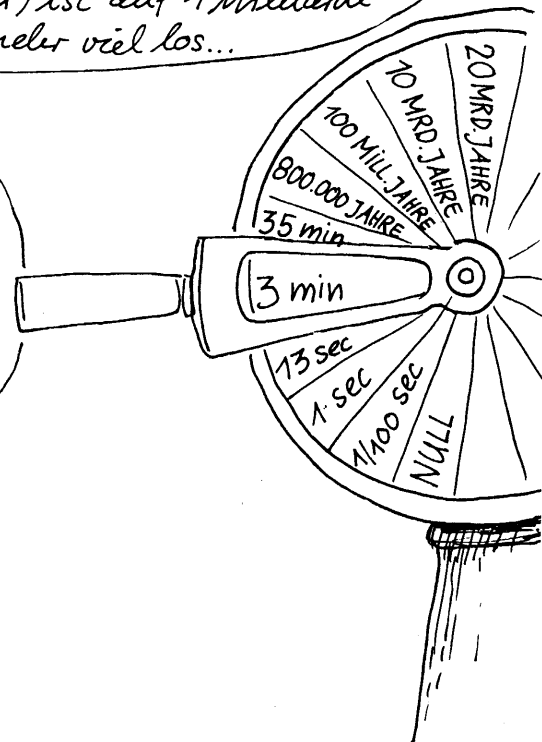
DIE NUKLEOSYNTHESE

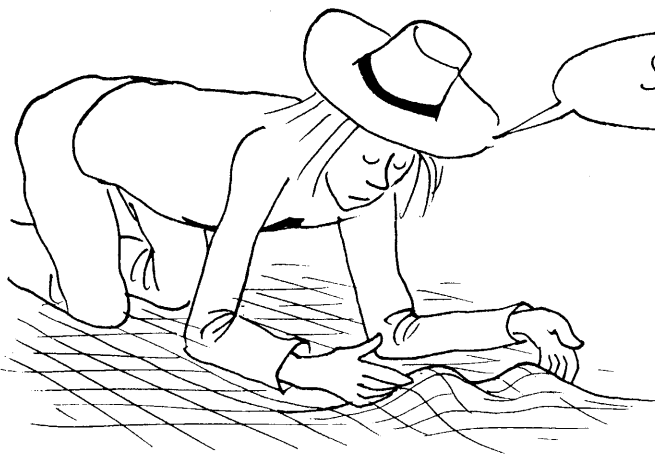
Drei Minuten



Na schön... im Vergleich zur Situation in der ersten hundertstel Sekunde, wie sie auf Seite 31 beschrieben wurde, hat sich das Universum um einen Faktor 150 vergrößert und die Temperatur ($T_S = T_M$) ist auf 1 Milliarde Grad abgesunken. Jetzt ist nicht mehr viel los...

Da sind zwei Buckel. Ich werde versuchen, sie zusammenzuschieben.





Sie stoßen sich ab.

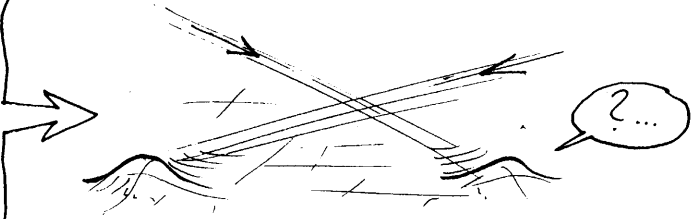


Jetzt ziehen sie sich an und bilden ein einziges Objekt.

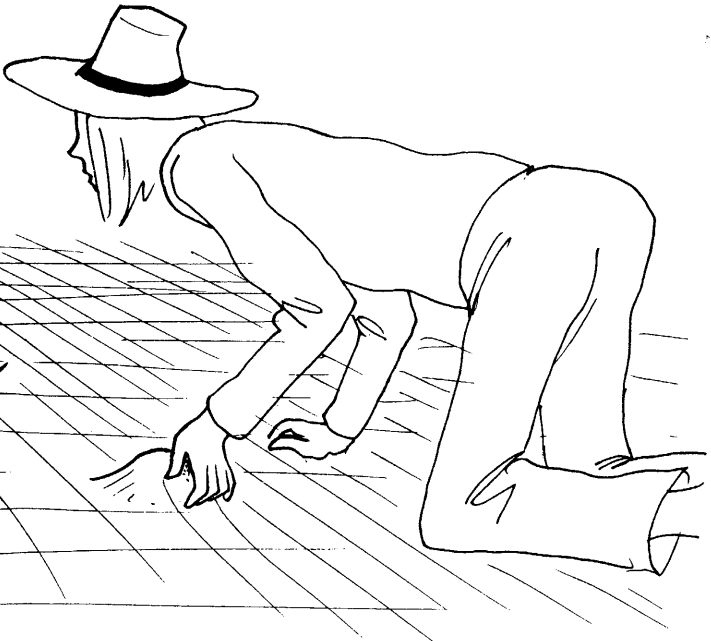
Wenn zwei Buckel zusammenstoßen, können drei verschiedene Fälle eintreten:
Bewegen sie sich langsam, werden sie abgelenkt und laufen voreinander weg.



Bewegen sie sich sehr schnell, durchkreuzen sie sich so rasch, daß keine Zeit zur Wechselwirkung bleibt.



Innerhalb eines sehr engen Bereiches der Geschwindigkeiten jedoch, kommt es zu einer Vereinigung.



Und ein Zusammenstoß mit einem dritten Element zerstört die so gebildete Struktur wieder.



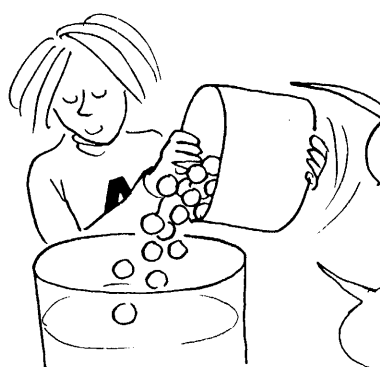
In diesen Fusionsreaktionen entstehen die ersten Atomkerne. Es ist eine Art Morphogenese, die die ersten Formen und Strukturen des Universums hervorbringt.

Sehr lustig, diese Geschichte. Man braucht eine anziehende und eine abstoßende Kraft. In großer Entfernung überwiegt die abstoßende und in direkter Nähe die anziehende.

Ich will ein Experiment machen. Ich nehme Magnete und setze sie in Schaumstoffkugeln ein.



Der Schaumstoff läßt sich leicht zusammendrücken; wenn ich daher zwei Kugeln gegeneinanderdrücke, haften sie zusammen.



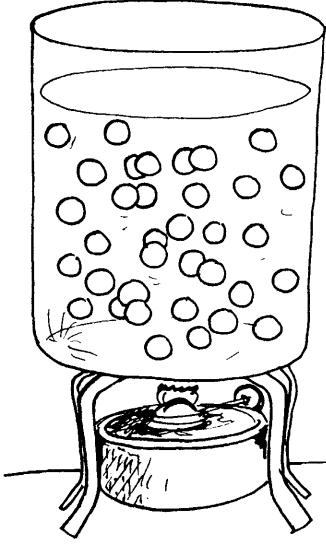
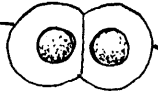
Ich schütte die Kugeln in einen großen Behälter Wasser...

... so daß sie sich frei bewegen können.

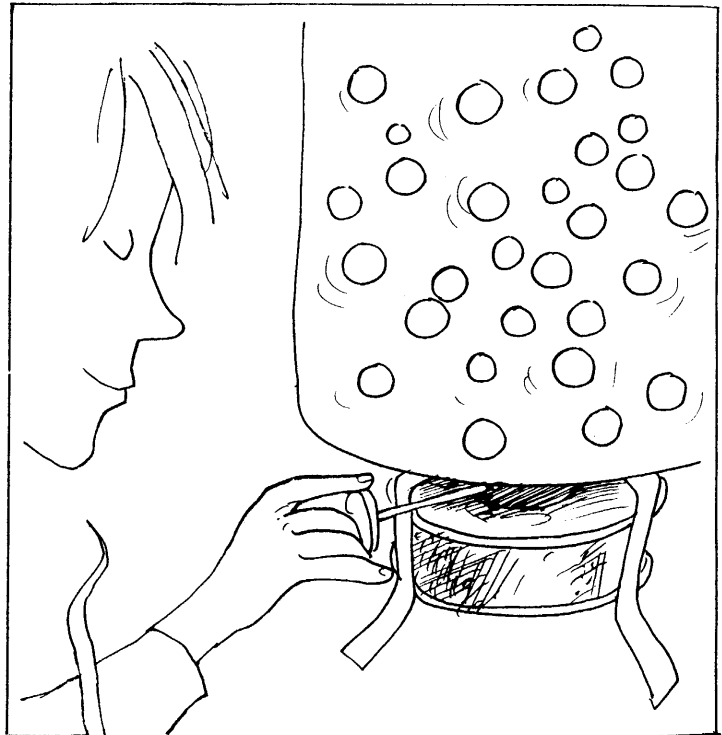
Hier sind zwei Kräfte am Werk: eine anziehende, die von den Magneten herrührt, und eine abstoßende, die wegen der Elastizität des Schaumstoffes beim Aufeinandertreffen der Kugeln wirksam wird. Die Reichweite der magnetischen Kraft ist so klein, daß sie sich erst bemerkbar macht, wenn der Schaumstoff hinreichend stark zusammengedrückt wird. Bei einem bestimmten Abstand der Magnete halten sich die Kräfte das Gleichgewicht.



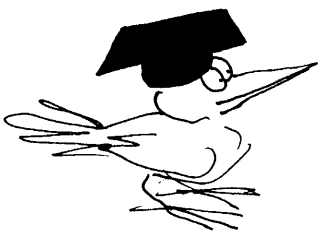
Wegen des Schaumstoffes ist die mittlere Dichte der Kugeln praktisch gleich der des Wassers. Ich bringe die Kugeln jetzt in Bewegung, indem ich das Wasser erhitze.

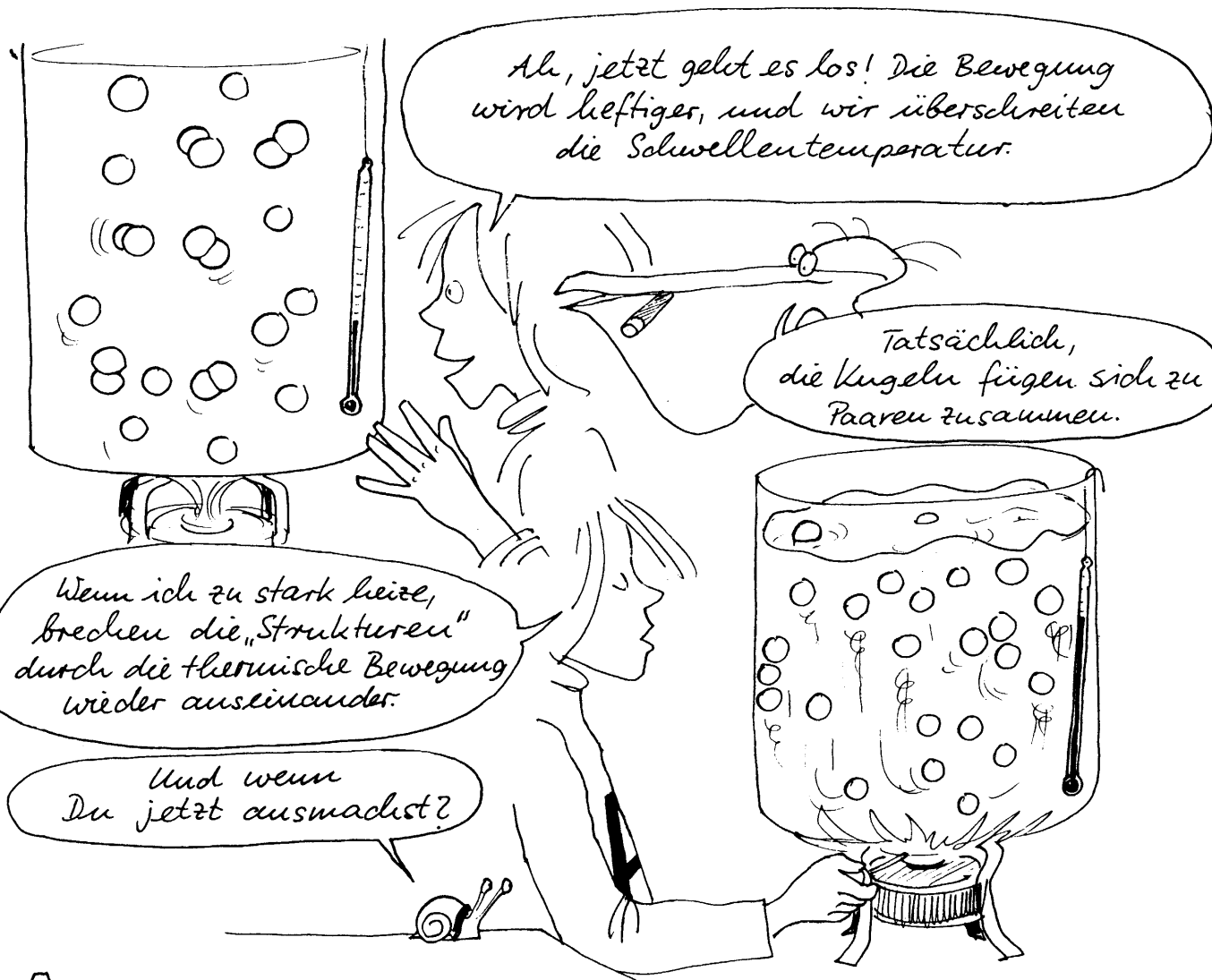


Solange ich nur wenig heize, stoßen die Kugeln sanft aufeinander und prallen ab. Es passiert nichts Besonderes. Selbst bei einem frontalen Zusammenstoß reicht die Energie nicht aus, um den Schaumstoff soweit zusammenzudrücken, daß die magnetische Kraft überwiegt.



Schön, ich heize jetzt stärker.





Ah, jetzt geht es los! Die Bewegung wird heftiger, und wir überschreiten die Schwellentemperatur.

Tatsächlich, die Kugeln fügen sich zu Paaren zusammen.

Wenn ich zu stark heize, brechen die „Strukturen“ durch die thermische Bewegung wieder auseinander.

Und wenn Du jetzt ausmachst?

Anselm läßt das Wasser abkühlen. Die Turbulenz läßt nach, und eine gewisse Zeit lang bilden die Kugeln Paare. Aber die Nukleosynthese hört nach einer Weile wieder auf.

Nichts mehr zu machen. Es ist zu kalt geworden. Die Kugeln bewegen sich nicht mehr heftig genug, um sich aneinander zu binden.

Wir sind unterhalb der Schwelle.

Der gleiche Prozeß setzt ein, wenn die Temperatur des Universums unter eine Milliarde Grad absinkt. Das ist nach einigen Minuten. Es bilden sich Strukturen aus zwei, drei oder vier „Kugeln“:

PROTON



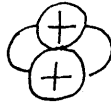
NEUTRON



1 PROTON



1 PROTON

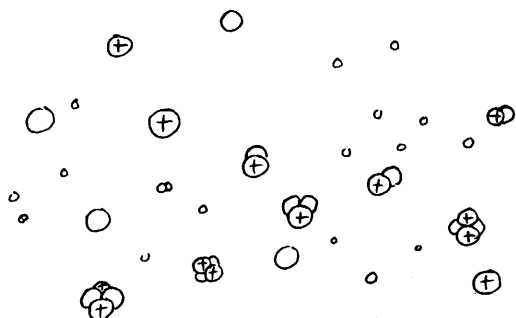


2 PROTONEN

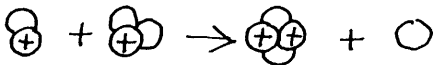
DEUTERIUM

TRITIUM

HELIUM



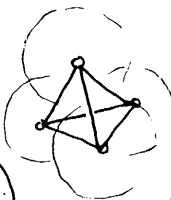
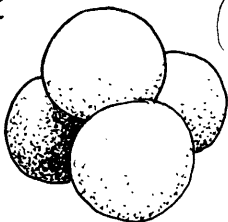
Das Deuterium und das Tritium verschmelzen sofort in einer weiteren Kernreaktion:



Deuterium + Tritium ergibt Helium und ein freies Neutron. In diesem Stadium ist das Universum eine Wasserstoffbombe.



Also verwandelt sich alles in Helium?



Der Heliumkern ist sehr symmetrisch, kompakt und fest. Blicke die Temperatur, wie sie ist, würde sich die ganze Materie in Helium verwandeln.

Aber nach 35 Minuten fällt die Temperatur auf 300 Millionen Grad, und die

Nukleosynthese hört auf.

Die Nukleonen können die elektrostatische Abstoßung nicht mehr überwinden („+“ stößt „+“ ab) und damit ist Schluss.

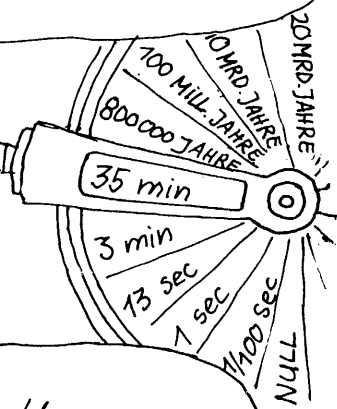


Die letzten freien Neutronen sind verschwunden, denn sie sind von Natur aus instabil und zerfallen nach 10^{13} Sekunden in Proton-Elektron-Paare.



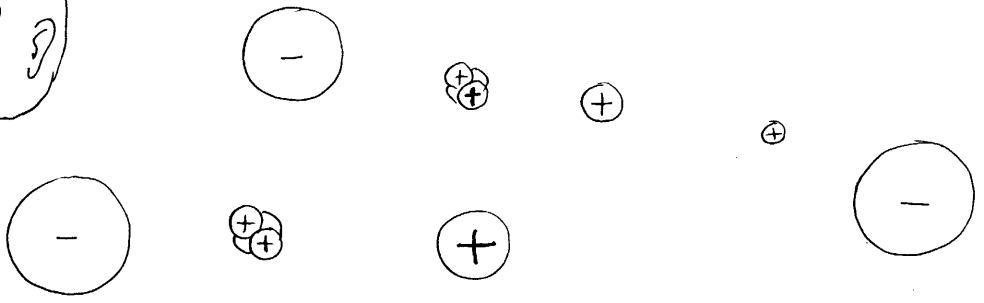
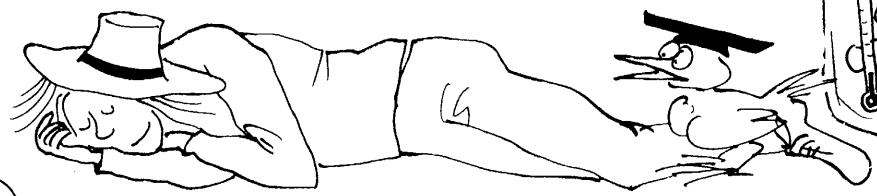
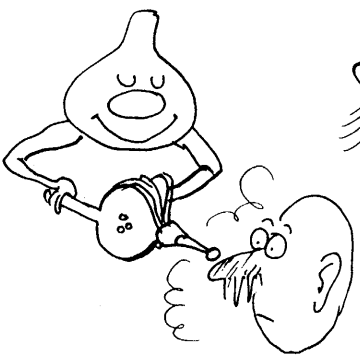
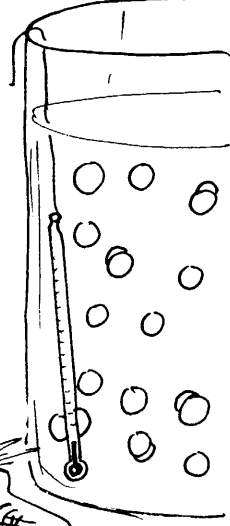
35 Minuten sind seit dem Anfang vergangen.

Und jetzt?



Am Ende dieser Phase haben wir eine Ursuppe aus Photonen, Neutrinos, Protonen, Elektronen und Heliumkernen. Gewichtsmäßig teilt sich die Materie so auf:
 27% Helium und
 73% Wasserstoff (freie Protonen).

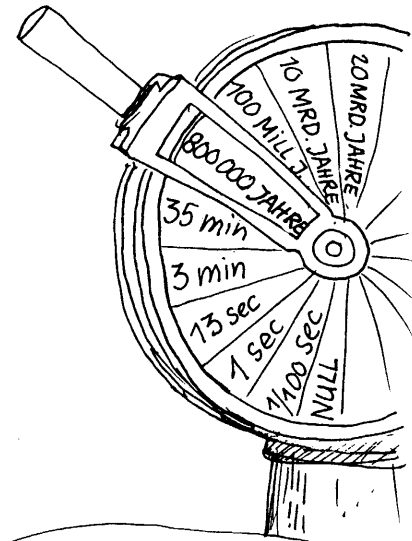
800 000 Jahre lang passiert gar nichts. Das Universum dehnt sich weiter aus und mit ihm die Photonen. Das Photonegas liefert der Materie weiterhin Energie, so daß die beiden Systeme im thermischen Gleichgewicht bleiben ($T_S = T_M$).



Und die Temperatur fällt bis auf 3.000 KELVIN

DAS DURCHSICHTIGE UNIVERSUM

Ein anderer „morphogenetischer“ Mechanismus kommt nun ins Spiel. Die elektrischen Kräfte beginnen, die Elektronen an die Kerne zu binden, so daß neutrale Atome entstehen. Die thermische Bewegung hat so weit abgenommen, daß die Strukturen durch Stöße mit anderen Atomen oder Komponenten des Gemisches nicht gleich wieder zerbrechen.



Nach und nach werden alle freien Elektronen durch die Kerne eingefangen.

Diese komischen Atome... mit ihren dicken Elektronen. Daran kann ich mich gar nicht gewöhnen!

Und das Universum wird durchsichtig.

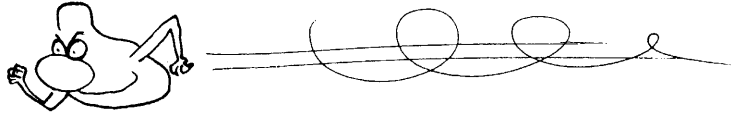
Was meinst Du mit durchsichtig?
War es denn vorher undurchsichtig?

Vorher gab es eine ständige Wechselwirkung der Photonen mit der Materie. Kein Photon schaffte es, sich in diesem Milieu einen Weg zu bahnen.

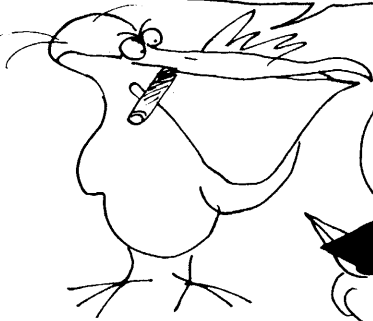
Pffff

UND DIE ENTKOPPLUNG

Das ist jetzt vorbei. Die Photonen können das ganze Universum durchqueren, ohne etwas von der Existenz der Materie zu merken: Photonen und Materie sind entkoppelt. Denn erstens gibt es nun mehr Platz, und zweitens wechselwirken die Photonen weniger mit neutraler Materie als z.B. mit freien Elektronen.



Mit einem Teleskop empfangen wir daher Bilder, die sozusagen direkt aus der Vergangenheit kommen.



Ja, aber selbst mit einem phantastisch guten Teleskop wird man nie ein Phänomen beobachten können, das vor dem 800 000 sten Geburtstag des Universums stattfand.



Die Jugendjahre des Universums werden darum zwangsläufig im Nebel verborgen bleiben.

Also keine Chance, das Universum zu psychoanalysieren!



Da Materie und Photonen nicht mehr wechselwirken, d. h. keine Energie mehr austauschen, geraten Materie und Strahlung aus dem Gleichgewicht. Die Temperatur der Materie nimmt schneller ab ($T_M \sim 1/R^2$) als die Temperatur der Photonen, die Strahlungstemperatur ($T_S \sim 1/R$).

Griß Gott!

Von jetzt ab jeder für sich.

Nanu, was ist los? Es scheint dunkel zu werden... und wir wird auf einmal verdammt kalt...

Über das Universum fällt eine Art Dämmerung. Die Farbe des Himmels ändert sich von violett zu dunkelrot. Schließlich bricht eine kalte Nacht herein. Pro Helium- oder Wasserstoffatom gibt es zwar noch wie vor 1 Milliarde Photonen, aber sie sind durch die fortgeschrittene Expansion stark ausgehungert worden.

Der Urknall klingt aus. Die einzelnen Szenen des Programms waren großartig. Um ein Haar wäre nichts übriggeblieben (Ein Teilchen von 1 Milliarde!). Es ist dunkel wie in einem Tunnel.



Eine
bestialische
Kälte

Die Photonenwellen-
länge beträgt im Mittel
0,04 mm, das entspricht
einer Strahlungstemperatur
von $T_s = -150^\circ\text{C}$.


Die Atome
bewegen sich mit rund
300 m/s. Dem entspricht
eine Materietemperatur
von -268°C .

Na schön, ich glaube, ich habe
z einigermaßen verstanden, wie das Universum
funktioniert.

Aber eine wichtige
Frage bleibt noch:
Wozu das ganze?

Ja, Anselm hat
recht. Wozu dient
das alles?


Hat es
irgendeinen
Nutzen?



Wißt Ihr noch?
Am Anfang war die
größte Unordnung.

Ja, das
Tohuwabolu


Und dann hat das Universum
begonnen, komplexe
Strukturen zu bilden:
Kerne, Atome ...



Ich habe das
kosmologische Grundprinzip
gefunden.

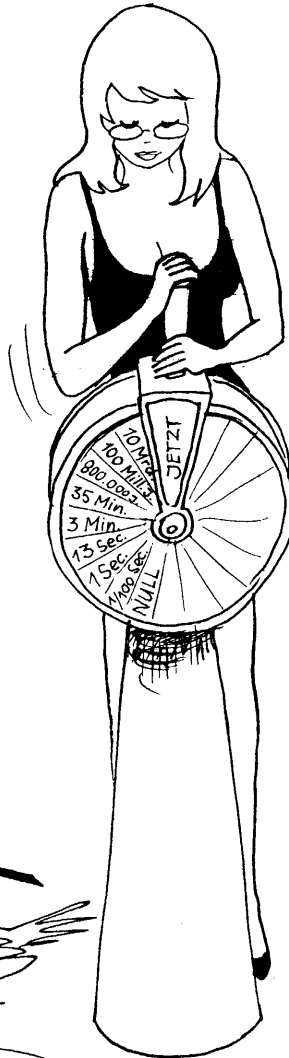
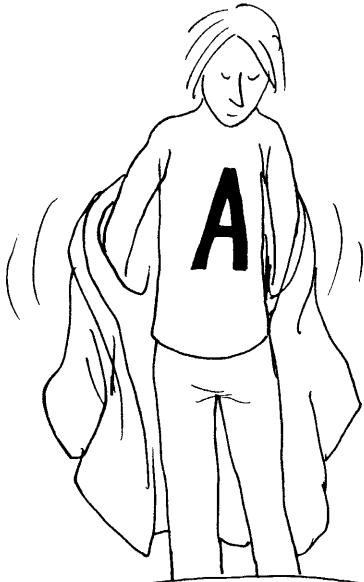
So?
... und das
wäre?

WARUM EINFACH,
WENN ES AUCH
UMSTÄNDLICH GEHT?!



Naja...
nicht schlecht Eure
kleine Geschichte. Aber
sind das nicht alles
Spekulationen, Phantasmen
eines Theoretikers? Wer sagt
dein, daß es sich wirklich
so abgespielt hat?

Um diese Frage zu beantworten,
verlassen wir dieses Teppichbodenuniversum
und kehren in die Gegenwart zurück.



Paß' auf, Sophie,
daß Du den Hebel nicht
zu weit drehst!

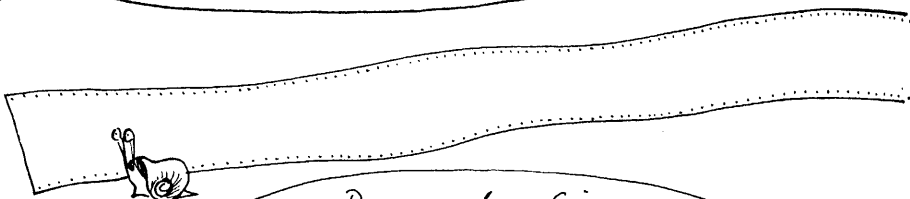


Sie sollten diesmal
besser nicht zu nahe kommen,
mein lieber Tiresias.


DER DOPPLER-EFFEKT



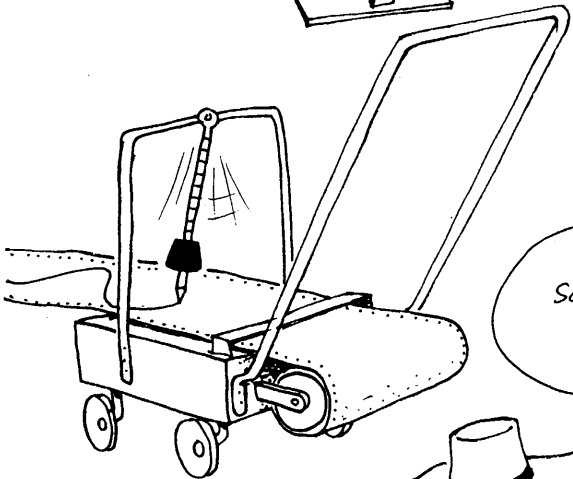
Was haben Sie vor?




Das werden Sie gleich sehen; wir spielen Nachrichtenübermittlung.



Das Papierband wird von einem Antriebssystem mit konstanter Geschwindigkeit c gezogen.

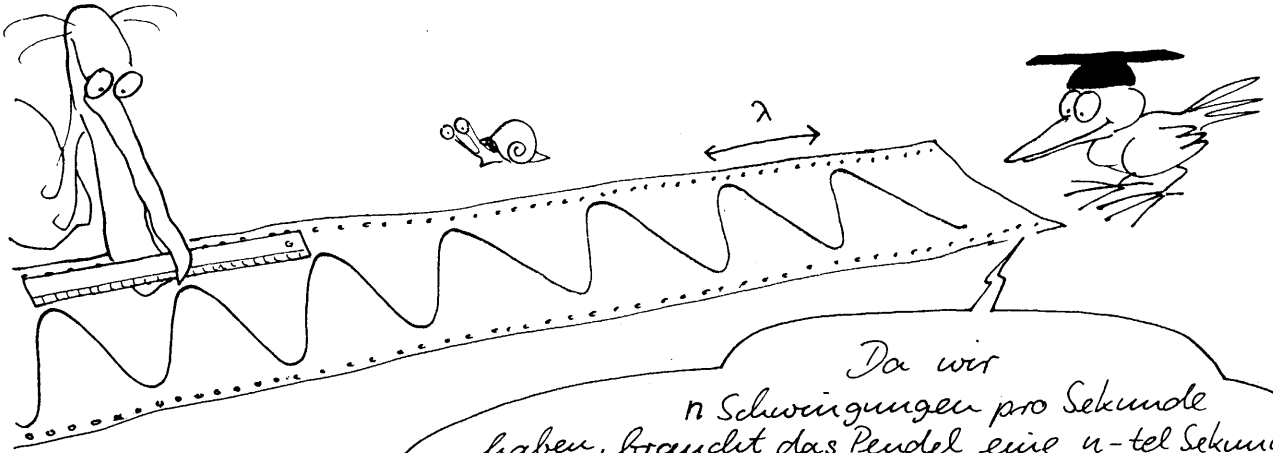


Hier hinten zeichnet ein schwingendes Pendel als Sender eine Sinuskurve auf das Papier.

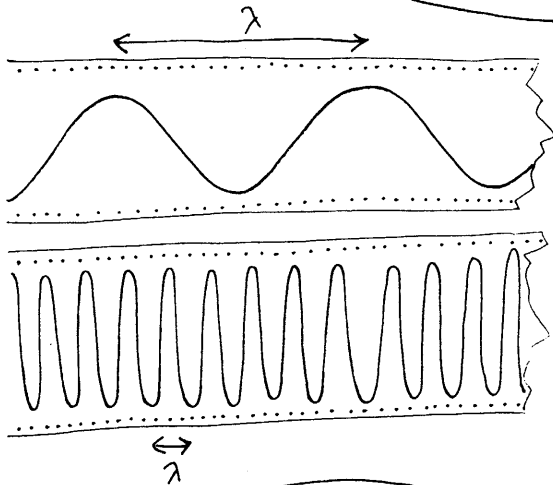


Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, d. h. die Frequenz n , kann ich durch Verschieben des Pendelgewichts einstellen.

Ah, dann werde ich hier vorne als Empfänger die Wellenlänge messen.



Da wir n Schwingungen pro Sekunde haben, braucht das Pendel eine n -tel Sekunde, um einmal hin- und herzuschwingen. Das ist die Schwingungsdauer. Während dieser Zeit läuft das Band um $\lambda = c/n$, d.h. um eine Wellenlänge weiter.



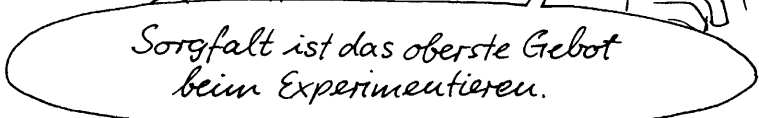
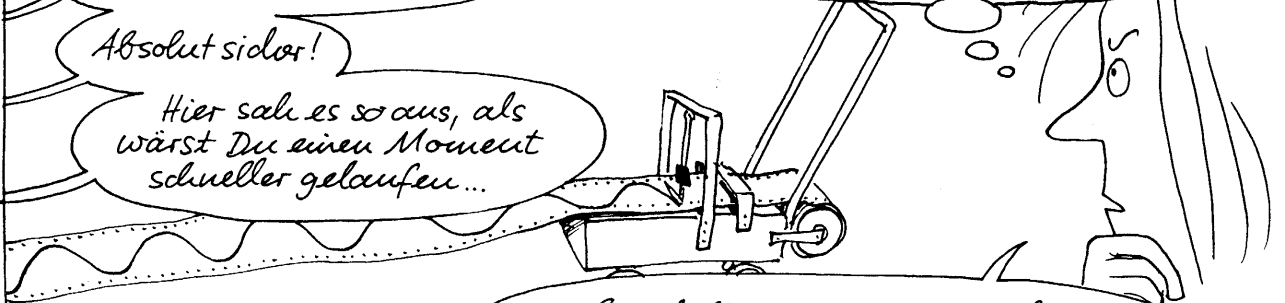
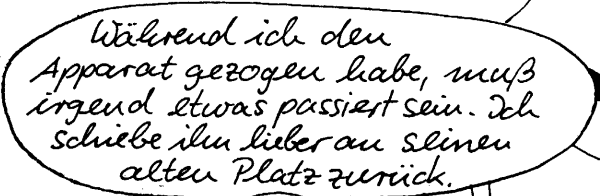
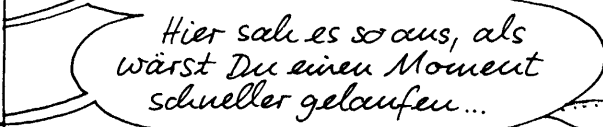
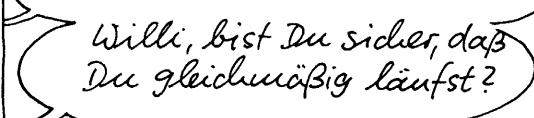
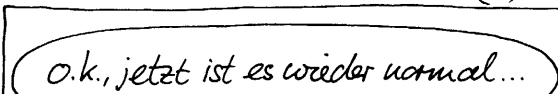
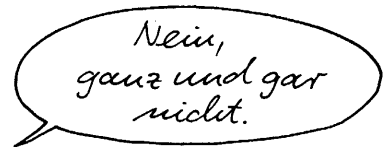
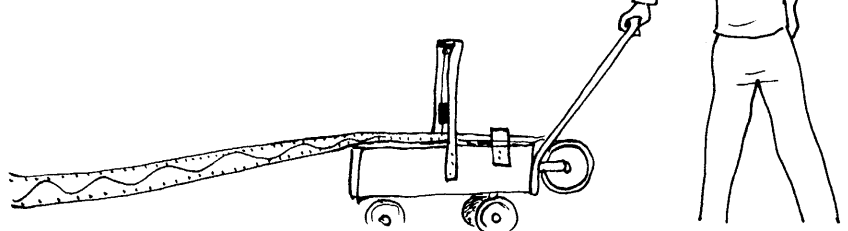
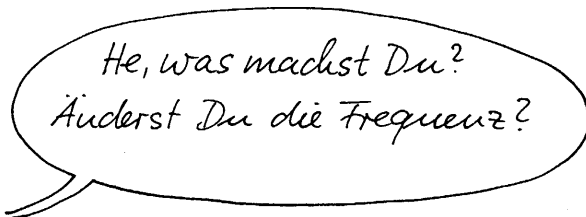
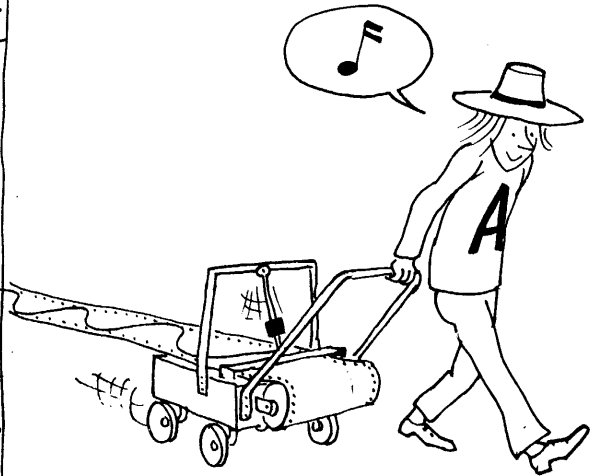
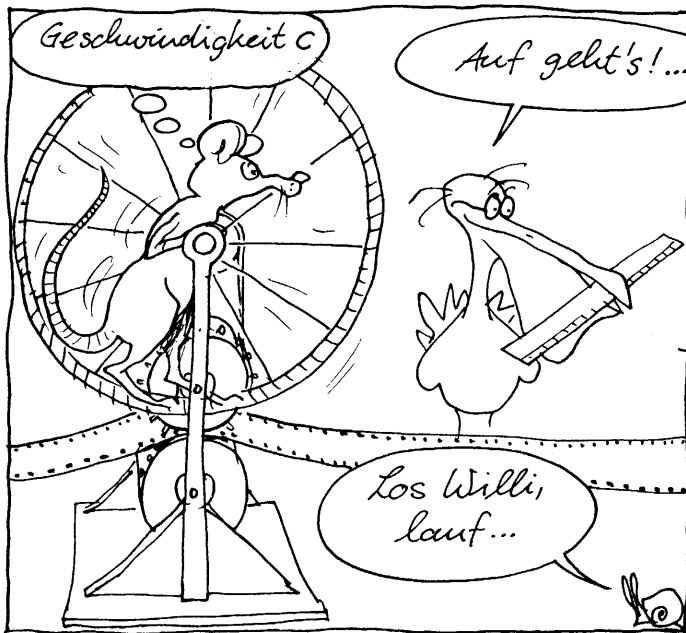
Niedrige Frequenz bedeutet große Schwingungsdauer und große Wellenlänge. Hohe Frequenz kurze Schwingungsdauer und kleine Wellenlänge.

Damit kann man Nachrichten übertragen.

Ja, Kommunikation ist wichtig.

Schön. Ich versuche eine Übertragung über eine größere Entfernung.

Fertig?

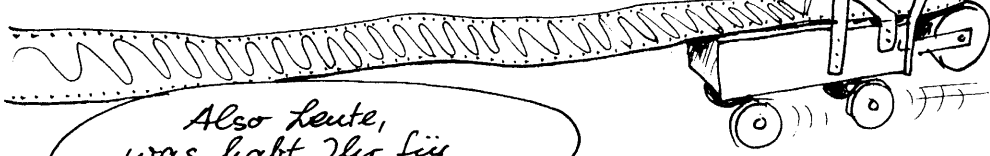
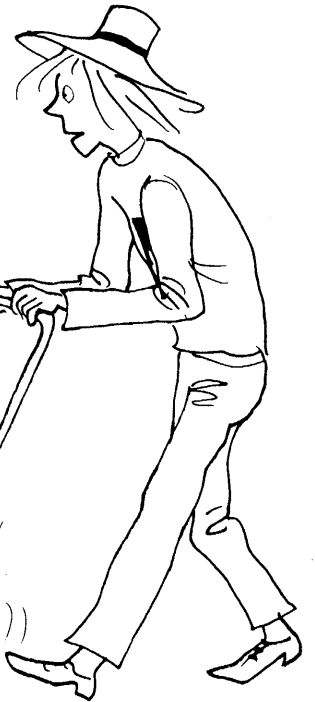




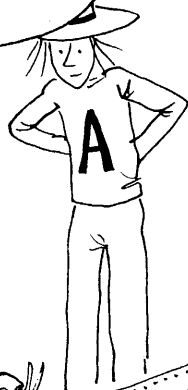
Willi, läufst Du nun richtig oder nicht?!?

Was wollt Iler denn?!

Macht's doch selbst, wenn Iler nicht zufrieden seid!



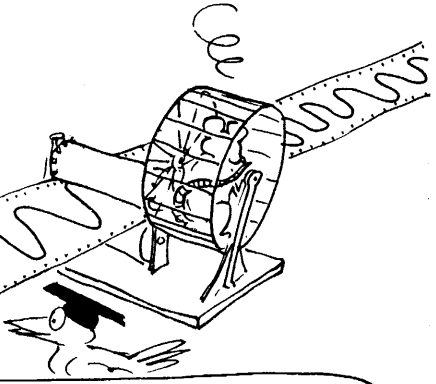
Also heute, was habt Iler für Schwierigkeiten?



(A)

(B)

Jetzt ist es wieder normal, aber eben nahm die Wellenlänge plötzlich zu (A), d. h. wir hatten beim Empfang eine scheinbare Frequenzerniedrigung. Zwischendurch war es eine Weile normal (B), dann wurde die Wellenlänge kürzer (C), d. h. wir empfingen eine höhere Frequenz als vorher.



He, kann ich aufhören?

Ja, Willi, halt au.

Willi sagt, er sei gleichmäßig gelaufen.

Vielleicht hat sich das Papier gedehnt oder zusammengezogen?

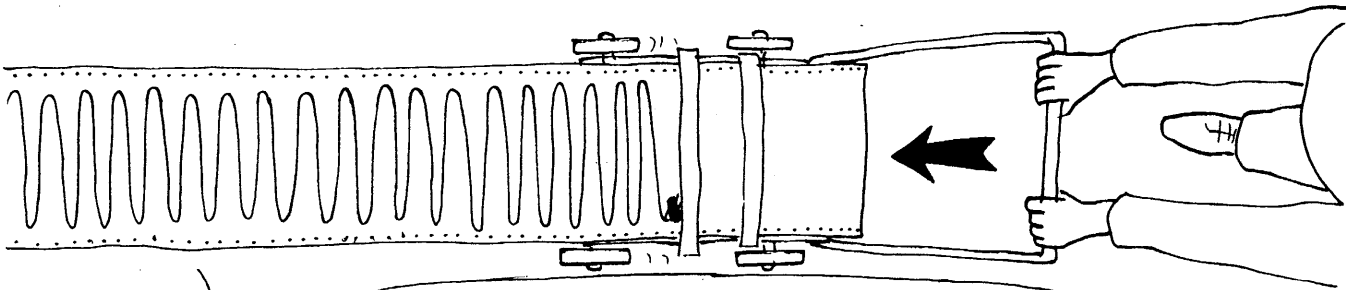
Nein, Anselm, das ist der Doppler-Effekt.

Der was ???

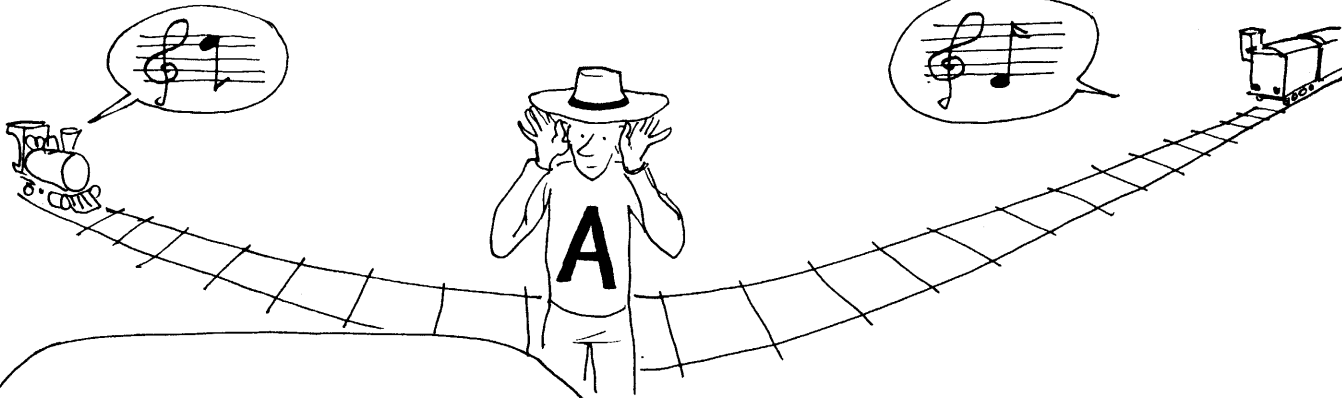
Wenn Du den Wagen bewegst, ändert sich die Frequenz, die Ihr empfängt.

Entfernt sich der Wagen, wird die Sinuskurve auseinandergezogen, und deshalb erscheint die Frequenz niedriger.

Wenn sich der Wagen nähert, sich also in Richtung des Bandes bewegt, wird die Sinuskurve gestaucht, und die Frequenz erscheint höher.



Dasselbe passiert, wenn Du eine vorbeikomende Lokomotive pfeifen hörst. Solange sie sich nähert, ist der Ton höher als gewöhnlich. Wenn sie an Dir vorbeigefahren ist, ist er plötzlich tiefer.




Wenn ich die Wellenlänge des Signals kenne, das die Quelle emittierte, als sie in Ruhe war, kann ich die Geschwindigkeit berechnen, mit der sich die Quelle nähert oder entfernt.

Ja, und was für den Schall zutrifft, gilt auch für das Licht. Ein Gegenstand, der sich entfernt, erscheint rötler, einer der sich nähert, blauer.



Schön, machen wir weiter mit unseren Übertragungsversuchen.



Willi, nimm
Deinen Platz ein.

Er hat die Frequenz
geändert!?




... oder er
entfernt sich!

Dasselbe Theater
wie eben.

Ja, er
muß sich wohl
entfernen.

Nein, Ihr
Schwachköpfe, ich entferne
mich nicht, denn
ich bin hier!...



... und der
Oszillator ist da
hinten geblieben!

DIE FLUCHT DER GALAXIEN

Ach so, ich verstehe!

Das heißt...

... daß sich der Raum bewegt.



Beängstigend!!!

Alles läuft davon...

Das ist die Geschichte mit dem Teppichboden, der sich ausdehnt...



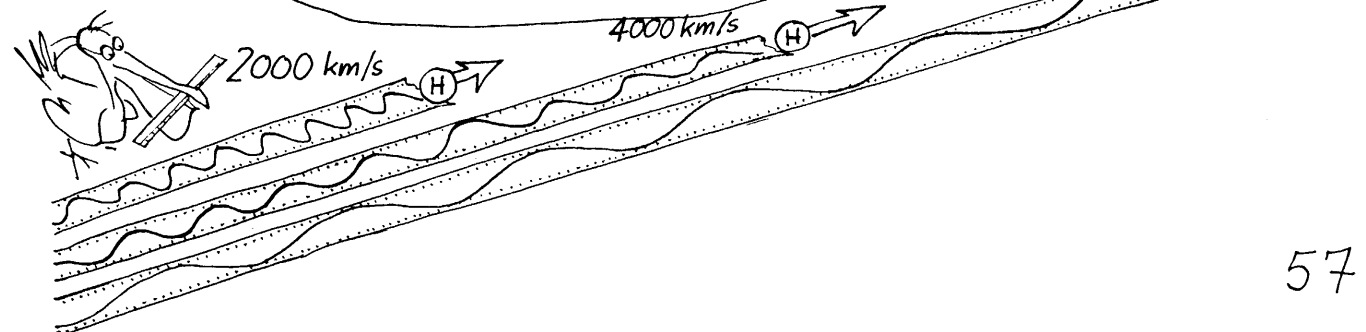
Ja, ja, genauso hat Edwin Hubble 1929 die Expansion des Universums entdeckt. Aus seinen Entfernungsbestimmungen erkannte er, daß die Galaxien umso röter erscheinen, je weiter sie von uns weg sind. Er führte dies auf den Doppler-Effekt zurück. Die Galaxien entfernen sich von uns, und zwar umso schneller, je weiter weg sie sind.

Ich weiß, daß die Wasserstoffatome einer Galaxie normalerweise mit einer Wellenlänge von 21cm strahlen. Der Doppler-Effekt sagt mir, daß die Fluchtgeschwindigkeiten hier 2000, 4000 und 6000 km/s betragen.

Hubble berechnete die Entfernung der Galaxien aufgrund der scheinbaren Helligkeit eines bestimmten Typs ihrer Sterne. Er zog daraus die Schlußfolgerung, daß ihre Fluchtgeschwindigkeit einfach proportional zur Entfernung ist.



6000 km/s



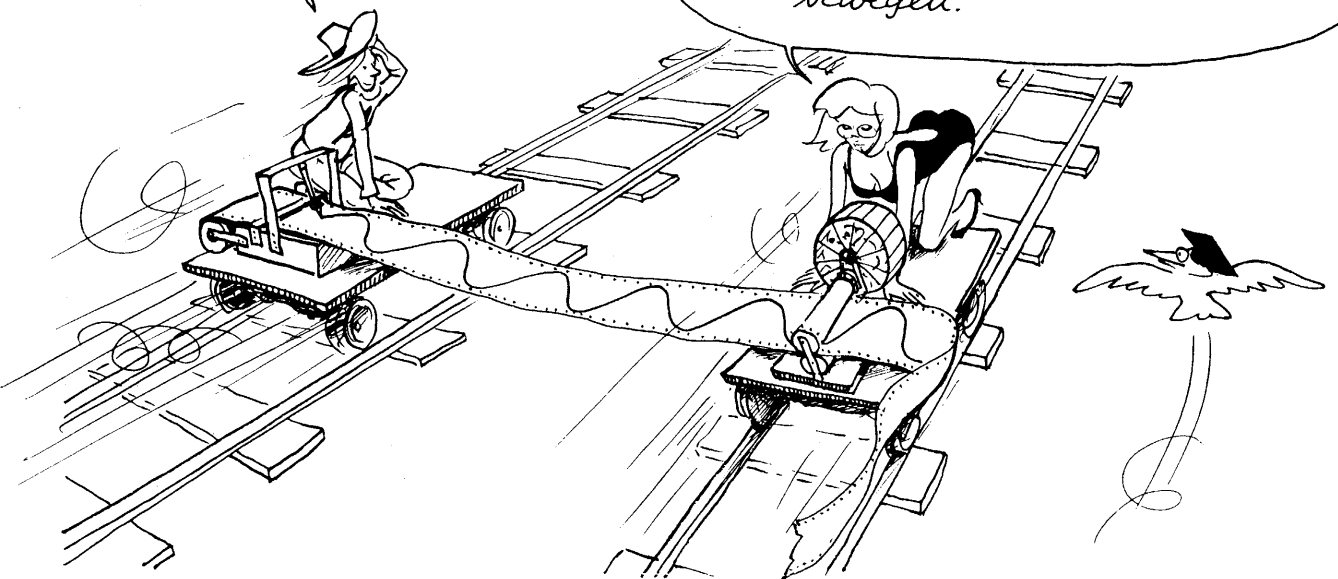
Wartet mal, was soll das heißen?
Werden denn die Objekte beschleunigt,
wenn sie sich von uns entfernen?

Nicht ganz! Der Teppichboden
dehnt sich nach allen Seiten aus.
Stell Dir einen Punkt A vor, der
zur Zeit $t=0$ einen Meter von Dir
entfernt ist. Nach einer Sekunde
ist er bei 1 Meter 20 (A').
Seine Fluchtgeschwindigkeit
ist also 20 cm/s.

Im selben Zeitintervall
bewegt sich ein Punkt B, der am
Anfang 2m von Dir entfernt war,
nach B' in einem Abstand
2 Meter 40. Seine Geschwindigkeit
relativ zu Dir ist demnach
40 cm/s.

Der Doppler-Effekt
zeigt also die Relatio-
geschwindigkeit an.

Die Wellenlänge ändert sich
nicht, wenn sich Sender und
Empfänger mit derselben Geschwin-
digkeit parallel zueinander
bewegen.



Unser Universum
dehnt sich also aus?

Moment mal, ich habe
eine andere Idee. Angenommen die
Zeit wird beschleunigt...

Aber das hat doch
keinen Sinn!?! :

Die Schwingungen der Atome, z.B. des Wasserstoffatoms, sind eine Art
Pulsschlag des Universums. Stell Dir ein Universum vor, dessen
Pulsschlag sich beschleunigt. Je älter man wird, desto schneller
schlägt der Puls. Die Bilder der Vergangenheit kommen zu uns wie
ein Zeitlupenfilm, und der Doppler-Effekt ist nur eine Illusion.

Ja, ja, Tiresias, die Phantasie kennt
keine Grenzen. Was Du sagst, bedeutet, daß sich
die physikalischen Gesetze im Laufe der Zeit
ändern - das hat auch schon Fred Hoyle
vorgeschlagen.

DER HINTERGRUND DES HIMMELS IST KALT

Es gibt da noch ein
Argument zugunsten der
Expansion und damit zugun-
sten des Urknalls.

Ja?

Vorhin haben wir gesehen, daß sich nur jedes milliardste Photon in Materie verwandelt hat.

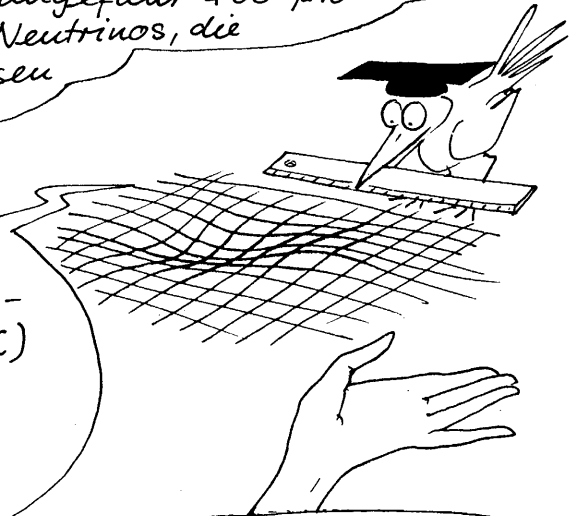


...und in Antimaterie!



Es müßte also noch eine Riesemenge dieser Urphotonen vorhanden sein, ungefähr 400 pro Kubikzentimeter (und ebenso viele Neutrinos, die aber nur sehr schwer nachzuweisen sind).

Ihre Wellenlänge müßte ihrer Strahlungstemperatur T_3 von 3 K ($= -270^\circ\text{C}$) entsprechend im Mittel 2 Millimeter betragen.



Diese energiearmen Photonen wurden 1965 von Penzias und Wilson entdeckt. Sie stellen sozusagen den Nachhall des Urknalls dar und sind der greifbare Beweis dieses großen kosmischen Spektakels.



Hilfe!!!

Hui...

DER KOSMOLOGISCHE HORIZONT

Sophie, nach dem Hubble - Gesetz nimmt die Fluchtgeschwindigkeit der Objekte mit der Entfernung zu...



Logischerweise muß es demnach Objekte geben, die sich von uns mit Lichtgeschwindigkeit entfernen... oder sogar noch schneller?!

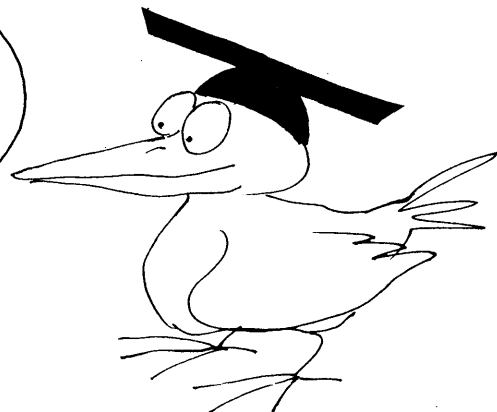
Das heißt, dieses Licht kann man nicht mehr empfangen?!



Wieso?
Wenn sich ein Flugzeug mit Überschallgeschwindigkeit von uns entfernt, hören wir trotzdem den Lärm, oder nicht?



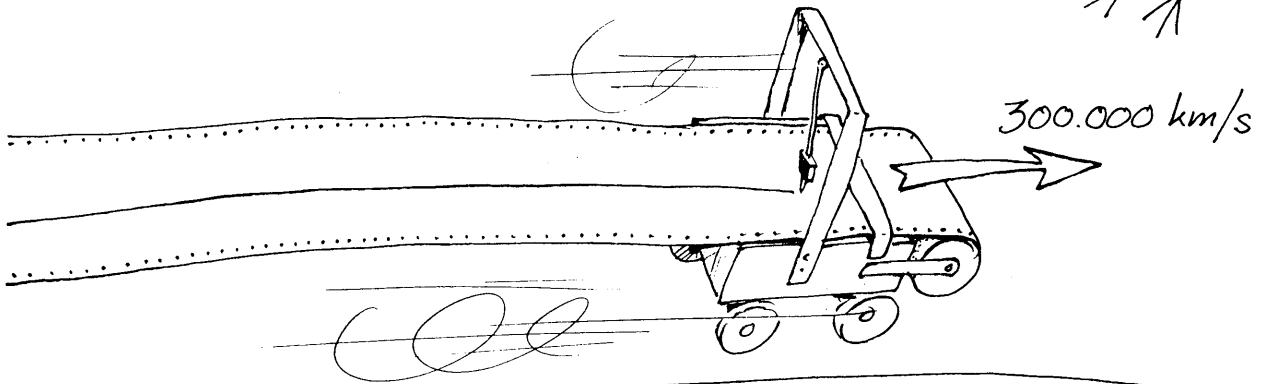
So müßt ihr das nicht sehen, meine Lieben.



Die Tatsache, daß man sich bewegt, hat einen Einfluß auf die Zeit. Ein Objekt, das sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegt, befindet sich, im Vergleich zu uns als Beobachter, in einer anderen „Zeitblase“. Wir nehmen Nachrichten von dort wie in Zeitlupe wahr. (*)



Und wenn sich das Objekt in Bezug auf uns mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, verschiebt sich die Zeit total. Sie scheint dann regelbreit zu erstarren.



Wegen der Verzerrung über einen Zeit gegen die andere, wird die Frequenz der Wellen beim Empfang niedriger. Dieses dem Wesen nach relativistische Phänomene kommt zum Doppler-Effekt hinzu. Erreicht die Fluchtgeschwindigkeit des Senders den Wert c , so fällt die Frequenz der empfangenden Wellen auf Null:

Keine Energie mehr - keine Wellen - keine Signale!

Wellen mit der Frequenz Null sind keine Wellen mehr!

(*) Um diese merkwürdigen Dinge ging es im Band ALLES IST RELATIV.

Diejenigen Objekte, die eine relative Geschwindigkeit von 300.000 km/s erreichen, liegen auf einer Kugel, die man Horizont nennt. Dieser Horizont ist nicht die Grenze der existierenden Dinge, sondern die maximale Entfernung der Ereignisse, die bis heute zu uns gelangen konnten. Das uns zugängliche Universum ist nur ein Teil eines noch größeren Universums. Der Horizont befindet sich in einer Entfernung von einigen - zig Milliarden Lichtjahren. (Die Reichweite des größten Teleskops auf dem Mount Palomar dagegen ist eine Milliarde Lichtjahre.)

Die Direktion

Aber was bedeutete denn vorhin der Radius R des Universums?



R ist ein Skalenfaktor. Die Geschichte fing an, als das Universum $1/100$ Sekunde alt war. Stell Dir einfach vor, man hätte in diesem Augenblick einen Kreis, oder besser eine Kugel, mit dem Radius R gezeichnet und die Expansion dieser Vergleichskugel im Laufe der Zeit verfolgt. Das ist alles...

Dabei sagt man nichts darüber aus, ob der Raum endlich oder unendlich ist (*).

Sie hat bezaubernde Augen.

He, ihr beide!


Dieser Comic ist noch nicht zu Ende!

Hi Hi Hi

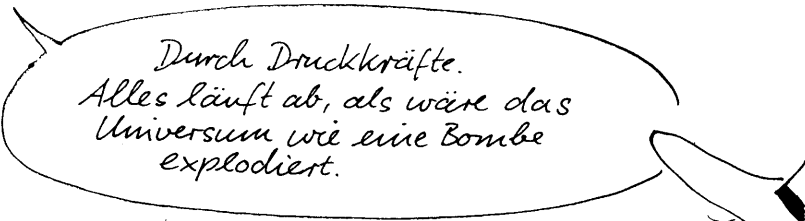
Ihr werdet noch gebraucht.

(*). Siehe DAS GEOMETRIKON aus dieser Reihe von Anselm Wüßteger's Abenteuerern.

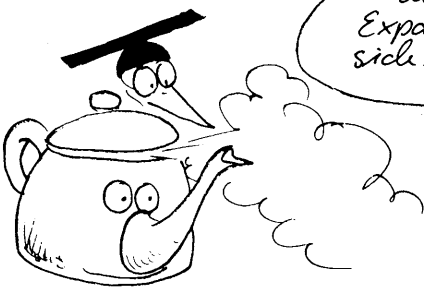
DIE FRIEDMANN-MODELLE




Sophie, wodurch wird eigentlich die Expansion des Universums hervorgerufen?




Durch Druckkräfte. Alles läuft ab, als wäre das Universum wie eine Bombe explodiert.



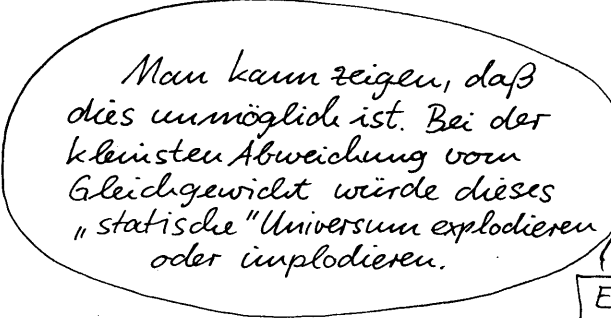
Und dieser Expansion stellt sich nichts entgegen?




Durch die Gravitationskräfte hat das Universum das Bestreben zu kontrahieren, zu implodieren.



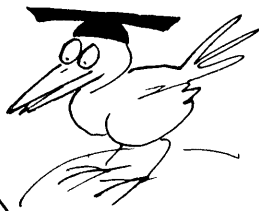
Ist denn kein Universum denkbar, bei dem sich Druck- und Gravitationskräfte das Gleichgewicht halten?



Man kann zeigen, daß dies unmöglich ist. Bei der kleinsten Abweichung vom Gleichgewicht würde dieses „statische“ Universum explodieren oder implodieren.



EXPLOSION

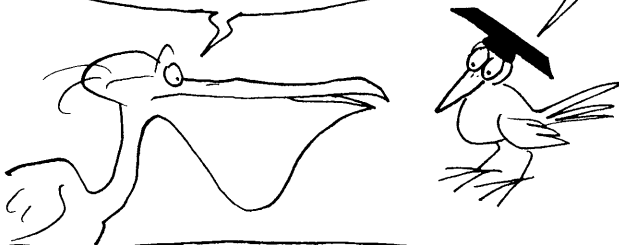


IMPLOSION

Sagen Sie mal,
hätte unser Universum
auch implodieren,
statt explodieren
können?

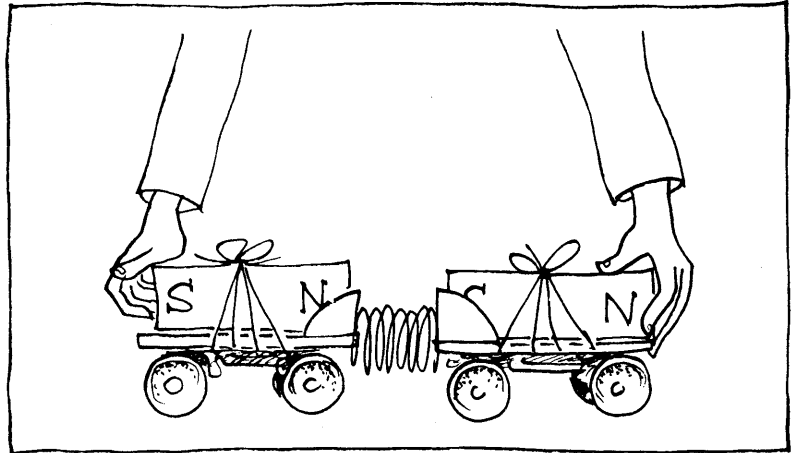
Im gewissen
Sinne ist
es Zufall...

Wer sagt Ihnen,
daß dann die Zeit
nicht rückwärts
gelaufen wäre...



Tsss! ...

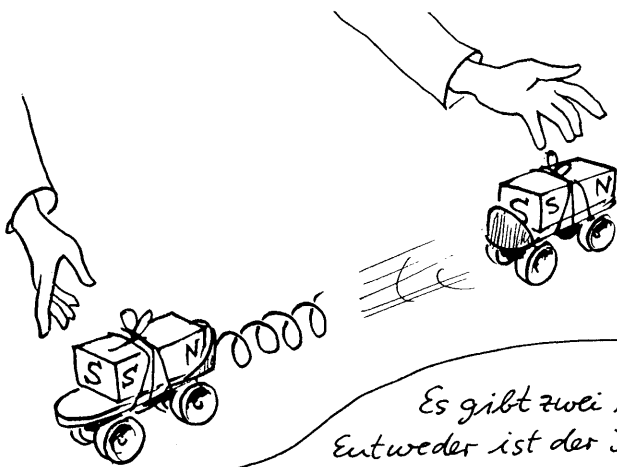
Was machst
Du da, Anselm?



Anselm hat zwei Magnete auf
Rollschuhe montiert. Sie ziehen sich an,
aber eine gestauchte Feder
hält sie auseinander.

Paßt auf, die Magnete
simulieren die
Gravitationskraft, und
die Feder stellt für die
Druckkräfte.





Lasse ich das ganze los, schießen die Rollschuhe auseinander.

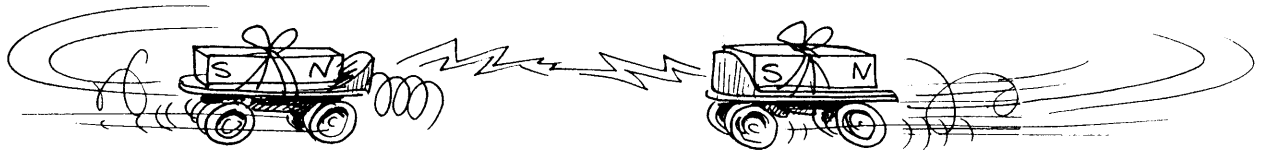
Es gibt zwei Möglichkeiten:
Entweder ist der Impuls, den die Rollschuhe bekommen haben, so groß, daß sie sich für alle Zeiten voneinander entfernen, denn je weiter sie sich entfernt haben, desto schwächer ist die Anziehungskraft (sie ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes)...



Gäbe es keine Reibung, würden sie sich schließlich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen.

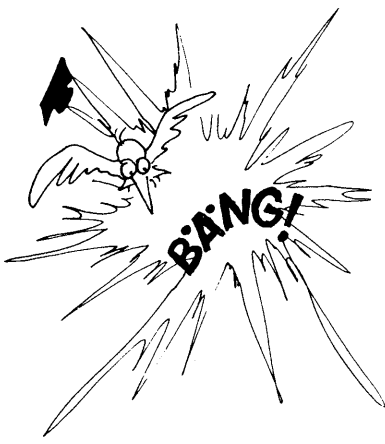


... oder der Impuls von der Feder ist zu klein, bzw. die Magnete zu stark. Dann kommen die Rollschuhe zurück und „fallen“ mit zunehmender Geschwindigkeit aufeinander zu.



Das deutet auf zwei mögliche Typen des Universums hin:

Im ersten Szenario geht die Expansion für alle Zeiten weiter. Wenn die letzten Sterne erlöschen, wird es Nacht, und die absolute Kälte führt zum „thermischen Tod“.



Im zweiten Szenario gewinnen die Gravitationskräfte schließlich die Oberhand. Die Expansion hält inne, und das Universum fällt wieder in sich zusammen. Galaxien und Sterne werden pulverisiert, selbst die Atome werden zerstückelt. Der Urknall läuft rückwärts ab, bis er in einem erneuten Rückprall ein neues expandierendes Universum schafft.

Der russische Mathematiker FRIEDMANN hat 1922 die ersten nichtstatischen Modelle des Universums erfunden.

Wenn ich gewußt hätte, daß das Universum instationär ist, dann hätte ich die Idee vor Friedmann gehabt (*).



Herr Albert, der 1917 mit gewaltigen mathematischen Klümmzügen sein stationäres Modell gebastelt hatte, war darüber sehr erbittert. Friedmann hatte ihm den Sieg genommen. Einstein schnollte und rührte die Allgemeine Relativitätstheorie jahrelang nicht mehr an.



Nach Friedmanns Modellen expandiert das Universum für alle Zeiten, falls die gegenwärtige Massendichte kleiner als $5 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ ist. Es wäre dann außerdem unendlich ausgedehnt.

(*) Authentische Bemerkung von Einstein.

DIE GEOMETRIEN DES UNIVERSUMS

Welche Form
hat eigentlich
das Universum?

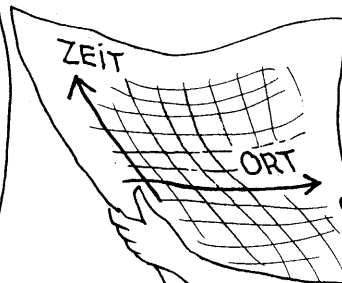
Das Universum ist eine vierdimensionale Hyperfläche, in der sich Raum und Zeit vermengen. Die auf den vorangehenden Seiten zitierten Ideen entsprechen verschiedenen Darstellungen dieser Einheit, der sogenannten Raum-Zeit.

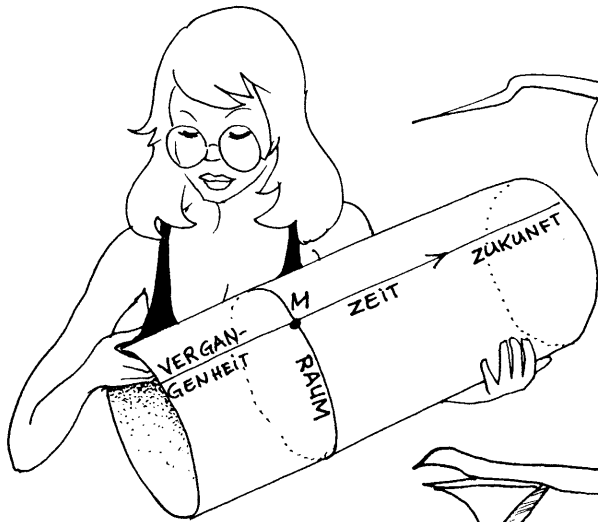
Oh je...

Wir erinnern uns, daß die Dimension eines Raumes die Zahl der Größen ist, die man angeben muß, um die Position eines Punktes festzulegen.

Rendezvous ^① Dienstag um 11h an der Ecke der ^② sechsten Avenue und der ^③ fünften Straße im ^④ dritten Stock : vier Größen.

In einer Zeichnung kann man nur zweidimensionale Räume, d.h. Flächen darstellen. Wir untersuchen daher einmal zweidimensionale Raum-Zeiten. Die eine Dimension ist der Ort, die andere die Zeit.



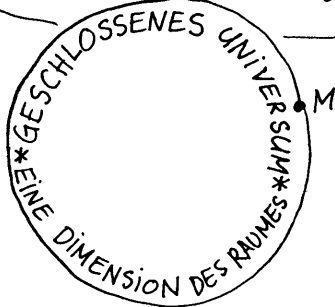


So kann man das erste Modell eines geschlossenen Universums, das statische Modell von Einstein, als Zylinder darstellen.

Warte mal, soll das heißen, wir sind in diesem Zylinder drin?

Nein, drauf!

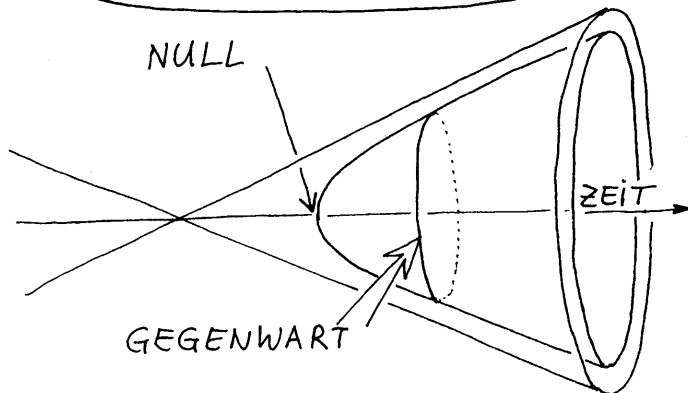
In einem bestimmten Zeitpunkt besteht das ganze Universum nur aus diesem Kreis, und der Punkt M ist irgendein Objekt.

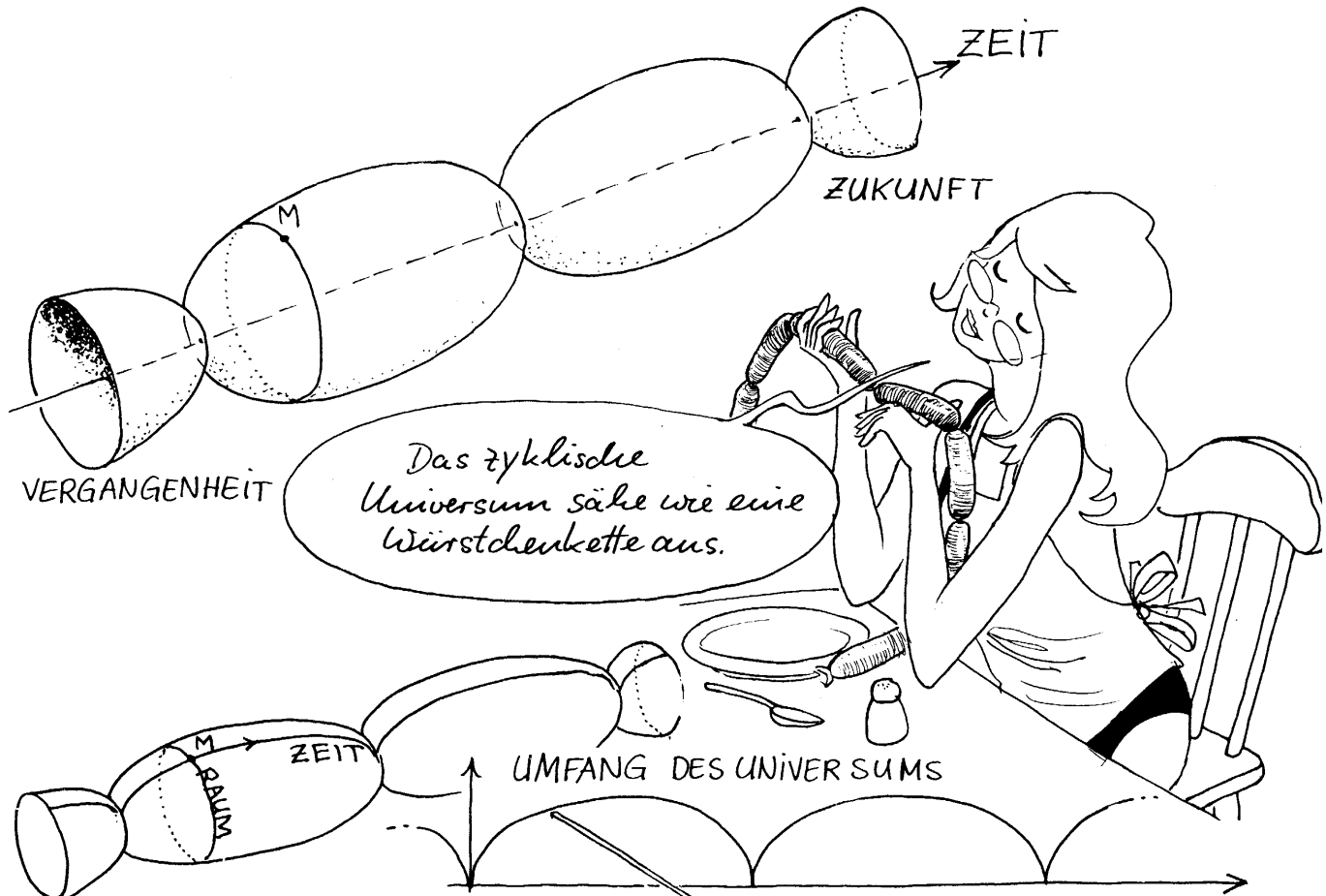


Bewegt sich das Objekt nicht, so beschreibt es mit der Zeit eine Gerade auf der Fläche, eine Erzeugende des Zylinders.

Man kann die Expansion eines geschlossenen Universums leicht als Funktion der Zeit darstellen. Hier ist das Modell eines solchen nichtstationären Universums.

Das zweidimensionale Bild einer Raum-Zeit, die sich für alle Zeiten ausdehnt.

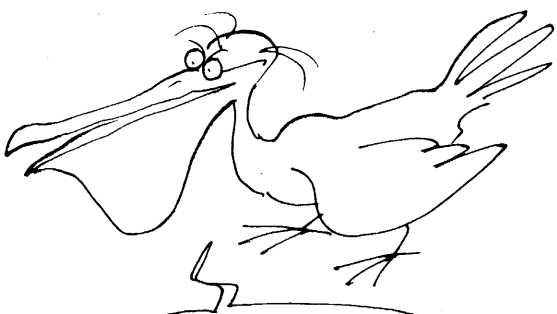




Das zyklische Universum sähe wie eine Würstchenkette aus.

Aber sag mal, warum soll denn die Zeit unbedingt „offen“ sein, also sowohl in der Zukunft als auch in der Vergangenheit unendlich?

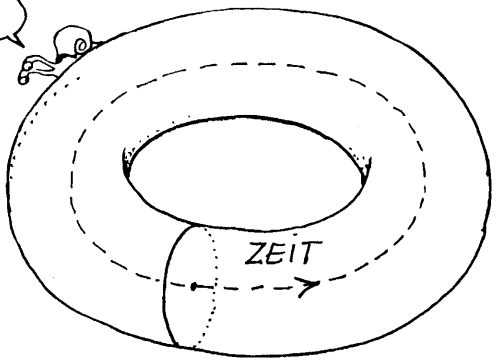
Wir wären hier.



Meist hier, man könnte... die Zeit schließen?!?

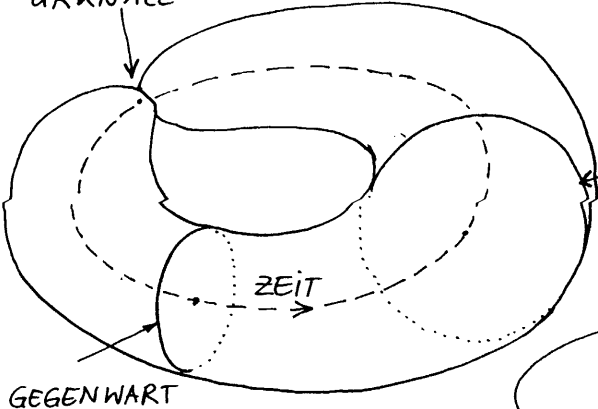
Kein Problem...
Wenn man das Einstein-
Modell mit sich selbst
verbindet, erhält man
einen Torus.

Schon
wieder!...



In dieser sonderbaren, in sich
geschlossenen Raum-Zeit wiederholen sich jeweils nach
Ablauf einer bestimmten Zeit T immer wieder
dieselben Ereignisse.

SINGULARITÄT
URKNALL



Auch ein
zyklisches Universum kann
man mit sich selbst
verbinden.

ZEITPUNKT
MAXIMALER
AUSDEHNUNG



Das ergibt eine geschlossene
Würstchenkette aus einem einzigen
Würstchen ... wie eine Ringwurst!

Er ist
ausgeflipt, das
war voraus-
zusehen...

Oh, seht mal Leo !!!



EPILOG

Das ist es also,
was man über den Anfang
des Universums weiß...



...oder was man zu
wissen glaubt. Die An-
sichten haben sich
allerdings öfter geän-
dert in den letzten
5000 Jahren!

„Das Bestreben, das Universum
zu verstehen, hebt das menschliche
Leben ein wenig über eine Farce
lucians und verleiht ihm einen
Hauch von tragischer Würde.“

STEVEN WEINBERG,

„Die ersten drei Minuten“



ENDE