The background of the slide is a composite image of two galaxies. On the left is a blue and purple galaxy, and on the right is an orange and yellow galaxy. A semi-transparent dark grey rectangular box is overlaid in the center, containing the title and contact information.

Brennpunkte extragalaktischer Forschung

Silke Britzen

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

E-mail: sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de

Web: www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/

Heute im Detail

- 05.02.10 Zeitfragen

- Der Weltformel auf der Spur?

- E8 und Garrett Lisi

- Zeitfragen

- Die Zeit in der Physik
 - Die Richtung des Zeitpfeils: mikroskopisch und makroskopisch
 - Die Entropie
 - Die Entropie und die Entwicklung des Universums
 - Entropie: Alternative Universen



E8 und die Weltformel Theoretisch





A. Garrett Lisi

<http://sifter.org/~aglisi/>



Garrett Lisi

- Kalifornischer Physiker
- Verzichtet auf Universitätslaufbahn
- Surft im Sommer auf Hawaii, gibt im Winter in Kaliforniens Bergen Unterricht im Snowboard-Fahren
- Entwickelte eine „Theory of Everything“, die auf der E8-Struktur beruht
- „Die Stringtheoretiker arbeiten seit den 70iger-Jahren mit E8. Wir brauchen keinen Surferschnösel, um zu wissen, was Sache ist.“
- Lisi hatte einige Formeln für seine Theorie entworfen und bemerkt, daß einige davon mit der E8-Struktur übereinstimmten. „In diesem Moment explodierte mein Gehirn, als ich die Implikationen und die Schönheit dieses Dings sah“. „Ich dachte: Heiliger Bimbam, das ist es.“
- Er füllte die 248 Punkte der E8-Struktur mit mehreren Spielarten der bekannten Teilchen und Kräfte. 20 Punkte blieben unbesetzt, denen er *hypothetische Teilchen* zuordnete, darunter Überträger der Gravitation

E8

- E8-Struktur zählt zu den Lie-Gruppen:
 - Die einfacheren Gruppen beschreiben Objekte wie Zylinder oder Kegel, die rotationssymmetrisch sind
 - E8 ist viel komplexer – die Struktur umfasst ein Gebilde mit 248 Freiheitsgraden, um es zu visualisieren muß eine zweidimensionale Projektion der Struktur erzeugt werden (ihr Schatten).
 - Diese Figur enthält 248 Punkte sowie noch 8 Dimensionen. Die Punkte lassen sich auf mannigfache Weise miteinander verbinden.
 - Wieviele solcher Verknüpfungen möglich sind, wurde von einer internationalen Mathematikergruppe um Jeffrey Adams berechnet – der Supercomputer benötigte 77 Stunden. Die Liste besteht aus einer Matrix mit über 205 Milliarden Einträgen.
 - Jedes einzelne Verbindungsmuster repräsentiert eine bestimmte Struktur, die zur Beschreibung der Natur und ihrer physikalischen Komponenten dienen kann.
 - E8 knüpft an die Stringtheorie an – aber für die Stringtheorie fehlt bis heute jeder experimentelle Beweis.



Lie-Gruppe

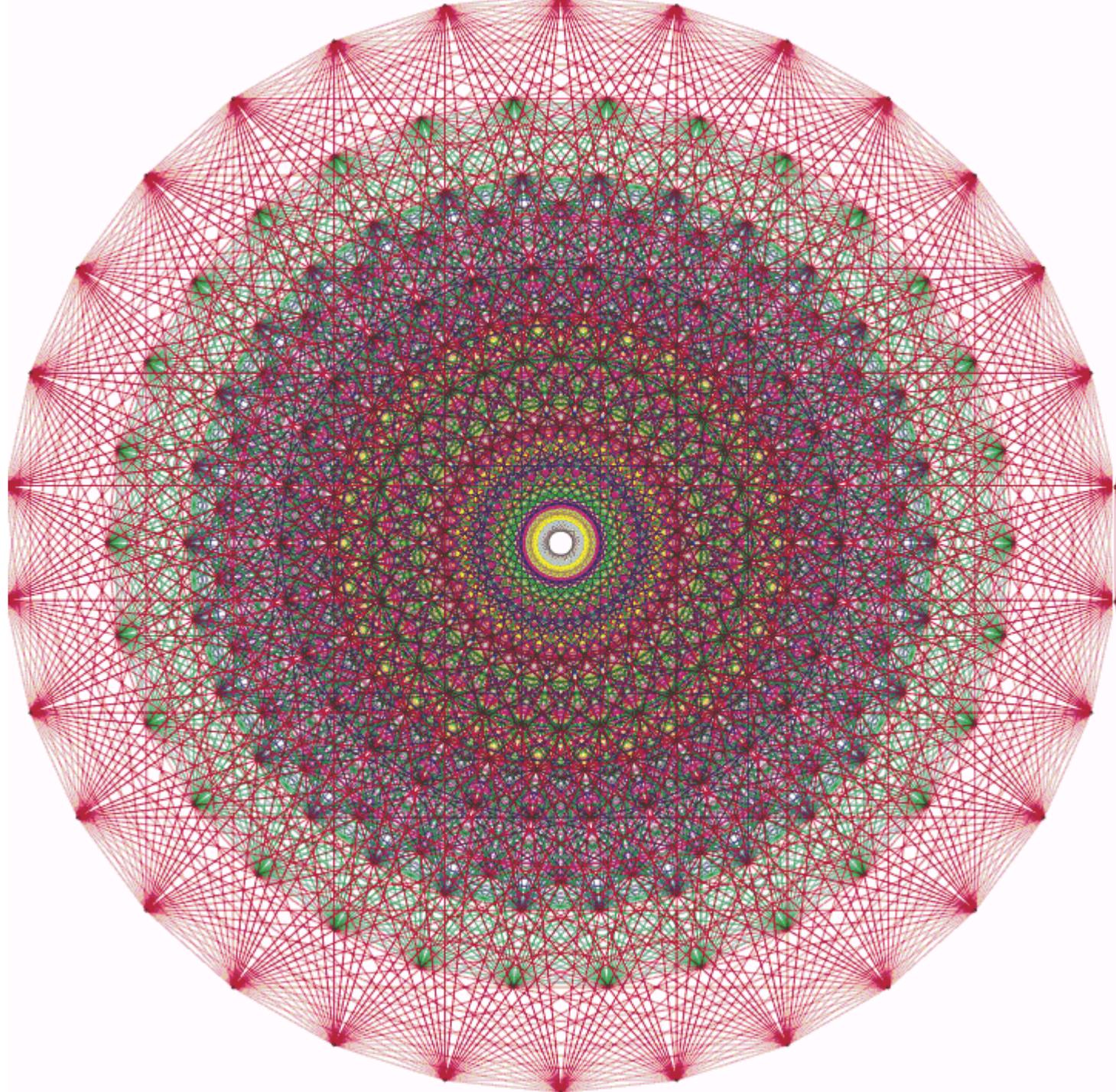
Eine *Lie-Gruppe* ist eine glatte reelle oder komplexe Mannigfaltigkeit, die zusätzlich die Struktur einer Gruppe besitzt, so dass die Gruppenverknüpfung und die Inversion beliebig oft differenzierbar sind. Die Dimension der Lie-Gruppe ist die Dimension der unterliegenden Mannigfaltigkeit. Ist diese endlich, so ist die unterliegende Mannigfaltigkeit automatisch analytisch und die Gruppenmultiplikation und Inversion sind analytische Funktionen.

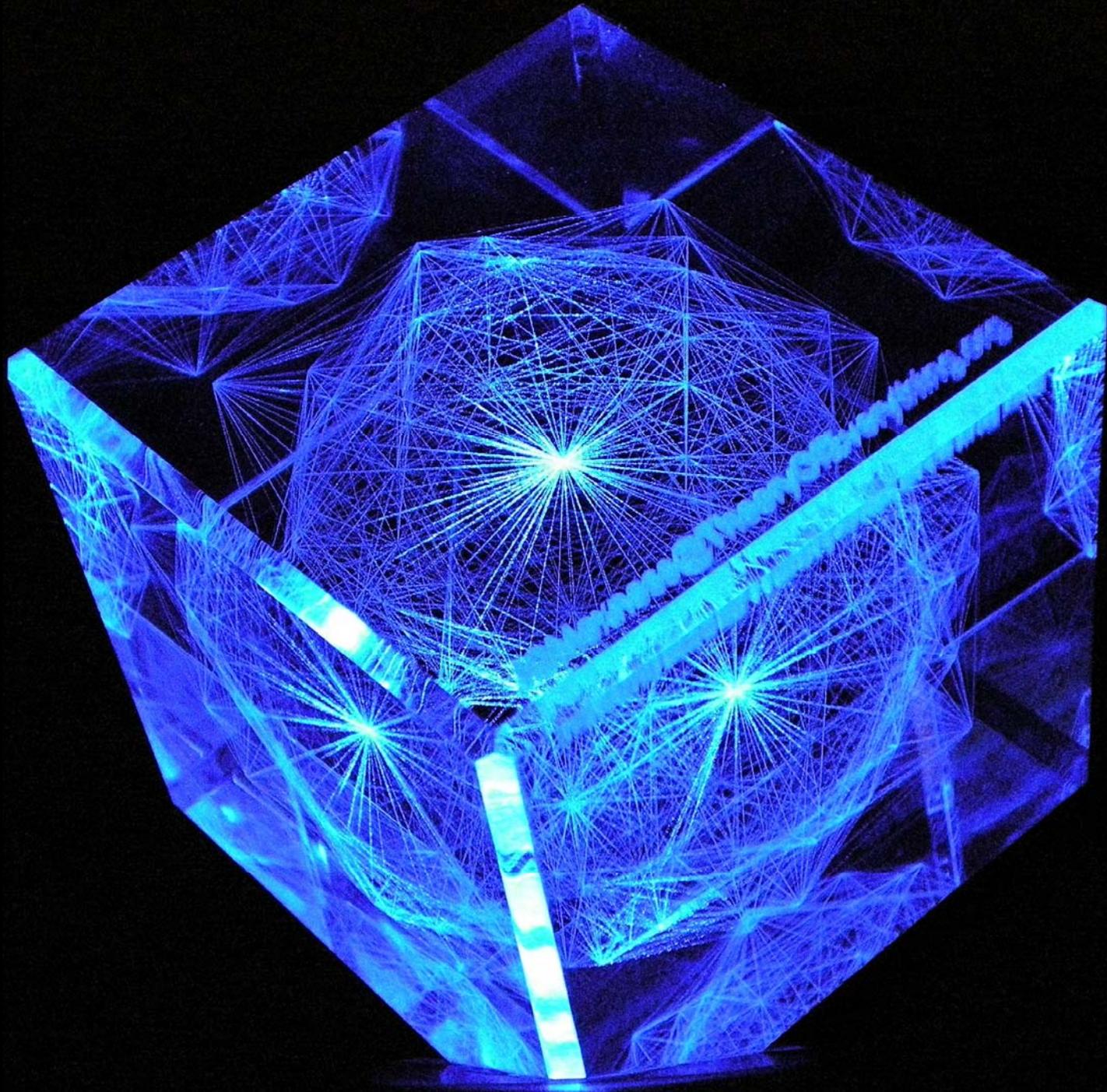
- Die Vektorfelder auf einer glatten Mannigfaltigkeit M bilden mit der Lie-Klammer eine (unendlich-dimensionale) Lie-Algebra. Die zu einer Lie-Gruppe G gehörende Lie-Algebra besteht aus dem Unterraum der links-invarianten Vektorfelder auf G . Es ist abgeschlossen unter der Lie-Klammer und isomorph zum Tangentialraum T_eG am neutralen Element e von G . Insbesondere gilt also .



Lie-Gruppe

- Ein *Homomorphismus* von Lie-Gruppen ist ein Gruppen-Homomorphismus, der zugleich eine glatte Abbildung ist. Man kann zeigen, dass dies bereits dann der Fall ist, wenn f stetig ist. Falls G und H endlichdimensional sind, ist f sogar analytisch.
- Ein Isomorphismus von Lie-Gruppen ist ein bijektiver Lie-Gruppen-Homomorphismus. Isomorphe Lie-Gruppen werden für alle praktischen Zwecke als gleich betrachtet.
- Das Differential eines Homomorphismus definiert einen Homomorphismus der zugehörigen Lie-Algebren. Ein Isomorphismus zwischen Lie-Gruppen induziert einen Isomorphismus zwischen den entsprechenden Lie-Algebren.





Garrett Lisi

- In einigen Konfigurationen konnte er die früheren **Verknüpfungen von Quarks und Gluonen sowie der elektromagnetischen und schwachen Kräfte mit der Gravitation reproduzieren**; bei fortgesetzter Rotation ergaben sich andere aufregende Muster:
 - so lagerten sich Quarks in ihren jeweiligen Farbgruppen um die gravi-elektromagnetischen Teilchen.
 - Dabei ordneten sich die Quarks in Familien von je drei Partikeln mit ähnlichen Eigenschaften, jedoch unterschiedlichen Massen – ganz so, wie auch das Standardmodell diese Partikel beschreibt. Für die Physik war es ein Rätsel, wieso sich Elementarteilchen in solchen Familien gruppieren. In der E8-Struktur ergeben sich diese Zuordnungen von selbst
- Lisi veröffentlichte seine Ergebnisse Ende 2007 unter dem Titel: „Eine außergewöhnlich einfache Theorie von allem“.
- Die in dem komplexen Beziehungsgeflecht in E8 aufgezeigten Wechselwirkungen zwischen Teilchen und Kräften (mehrere 10 000) decken sich mit den Messergebnissen der Physiker in der realen Welt

TheoryOfEverything.org

- T=(1,i0)|| (0,i1), i=√-1
- L=T²=(1,i1)|| (0,i2)
- M=L³T⁻¹=T⁵=(3,i2)|| (2,i3)|| (1,i4)|| (0,i5)
- Q=ML^{-1/2}=MT⁻¹=T⁴=(3,i1)|| ((2,i2)|| (1,i3)|| (0,i4))

Time = 1D Re(T¹)=t
 3D Space = 3D Re(L³)=l(x,y,z)
 8D Charge = 8D Im(T⁸=L³+SU5)=q²
 11D M-Theory

$$\hbar(T^8) = c = \frac{g_c^2}{4\pi H_0} = \frac{1}{\alpha^{-8} t_{Unit}}$$

where: $g_c^2 = \frac{\sqrt{1-2(\pi\alpha/2)^2}}{\cos\theta_w} = \sqrt{\frac{1-2(\pi\alpha/2)^2}{1-\sqrt[3]{\pi\alpha/2}}}$

- Charge-Space Acceleration ↔ Time
- Charge-Time Acceleration ↔ Space
- Space-Time Acceleration ↔ Charge

$$\bar{n}_i = \frac{g_i}{e^{g_i/\hbar\nu} + 1}$$

$$\bar{n}_i = \frac{g_i}{e^{g_i/\hbar\nu} - 1}$$

$$CPT = \left[\begin{matrix} \text{UnCharged (Neutrinos)} \\ \text{Charged} \end{matrix} \right] = [StaticParticles][DynamicMixing_ForceParticles] = [ParticleFermions - Spin_{\hbar[\frac{1}{2}, \frac{3}{2}]}] [ForceBosons - Spin_{\hbar[0,1,2]}]$$

$= \begin{bmatrix} \text{Leptons} \\ \text{Quarks} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \text{Force_ChargeType} \\ \text{Force_ChargeType} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \text{ElectroMagnetic}[\gamma[\epsilon_0, \mu_0]] \\ \text{CP} \leftrightarrow \text{T_WeakFlavor}[W^+ W^- Z^0] \end{bmatrix}$	$= \begin{bmatrix} \text{Leptons} \\ \text{Quarks} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \text{ElectroWeakForce}[QED - U_{MNS} P_{MNS}] \\ \text{StrongForce}[QCD - V_{CKM} P_{CKM}] \end{bmatrix}$
		$\begin{bmatrix} q_n = 0 \\ q_e = -1 \\ q_u = \frac{2}{3} \\ q_d = -\frac{1}{3} \end{bmatrix}$		

$= \text{Generations} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ [V_{Le} & V_{L\mu} & V_{L\tau}] \\ [e & \mu & \tau] \\ [u & c & t] \\ [d & s & b] \end{bmatrix}$	$\text{EM_Bosons}[\gamma[\epsilon_0, \mu_0]] \Rightarrow \text{Photons}[Radiation]$
	$\text{EW_Bosons}[W^+ W^- Z^0] \Rightarrow \text{ParticleDecay}[RadioActivity[\alpha, \beta, \gamma \text{ Particles}]]$
	$\text{Strong_Gluons}[R G B] \Rightarrow \text{Hadrons}$

Bosonic - 2QuarkMesons $\begin{bmatrix} \text{Pion}\pi^+ [u\bar{d}, \bar{u}d] \\ \text{Pion}\pi^0 [\frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}] \end{bmatrix}$

Fermionic - 3QuarkBaryons $\begin{bmatrix} \text{Proton}[uud] \\ \text{Neutron}[udd] \end{bmatrix}$

$\begin{bmatrix} g \\ \dots \end{bmatrix}$	$\theta_w = \sin^{-1}(\sqrt{x_w} = \sqrt{\frac{1-\sqrt[3]{4\pi\alpha}}{2}}) \quad e = m_{Weyl} \sqrt{\frac{4\pi\alpha}{2l_{CMB}}} = \sqrt{4\pi\alpha\hbar} = \sqrt{2\hbar\alpha}$	$\begin{bmatrix} \Lambda^2\sqrt{3} & \Lambda^2 & 0 \\ -\Lambda^2 & \Lambda^2\sqrt{3} & \Lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \Lambda^2 & -\Lambda^2\sqrt{3} & \Lambda \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} (\sigma_p = ?)e^{-\frac{1}{T}} & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_p = ?)e^{-\frac{1}{T}} & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_p = 1)e^{-\frac{1}{T}} \end{bmatrix}$
	$g = \frac{e}{\sqrt{x_w}} \quad g' = \frac{e}{\sqrt{1-x_w}} \quad a = \frac{gg'}{\sqrt{g^2+g'^2}} = g \sin\theta_w = g' \cos\theta_w$		

Baryons $\begin{bmatrix} \text{Stable} [m_p = \frac{m_p^2}{m_{Unit}}, \tau_p = 4\pi\alpha^{-8} t_{Unit}] \\ \text{Heaviest} [m_{\Omega^-} = ? M_p = \alpha^{-12} m_{Unit}, \tau_{\Omega^-} = ? T_p = \alpha^{20} t_{Unit}] \end{bmatrix}$ Mesons $\begin{bmatrix} \text{Lightest} [m_\pi \approx \sqrt{\frac{\hbar^2}{c}} = \alpha^{-8/3} m_{Unit}, \tau_\pi \approx 4\pi^2 \alpha^8 t_{Unit}] \end{bmatrix}$

Garrett Lisi

- Sein geometrisches Modell kommt ohne Strings und die mit ihnen verbundenen höheren Dimensionen aus
- Mathematik einfacher als die String-Formeln
- Einfachheit und Schönheit ...
- Lisi: Universum beruht auf reiner Geometrie, eine „wunderbare Form, die sich um die Raumzeit herum entwickelt und bewegt“. Und da E8 vielleicht die allerschönste Struktur der Mathematik ist, sei es sehr befriedigend, daß die Natur gerade diese Geometrie auserwählt habe.
- Komplementär zur Stringtheorie?

Garrett Lisi

- Experimenteller Test: tauchen am LHC die 20 Partikel auf, mit denen Lisi sein Punktemuster aufgefüllt hat?
- „Bei meiner Theorie geht es um alles oder nichts. Sie ist entweder exakt richtig oder fürchterlich falsch. Es wird ein langer Weg, dies herauszufinden. Wir werden es genauer wissen, wenn der LHC singt.“

E8 und die Weltformel Experimentell



29.01.2010: Erster Beweis für die Weltformel?

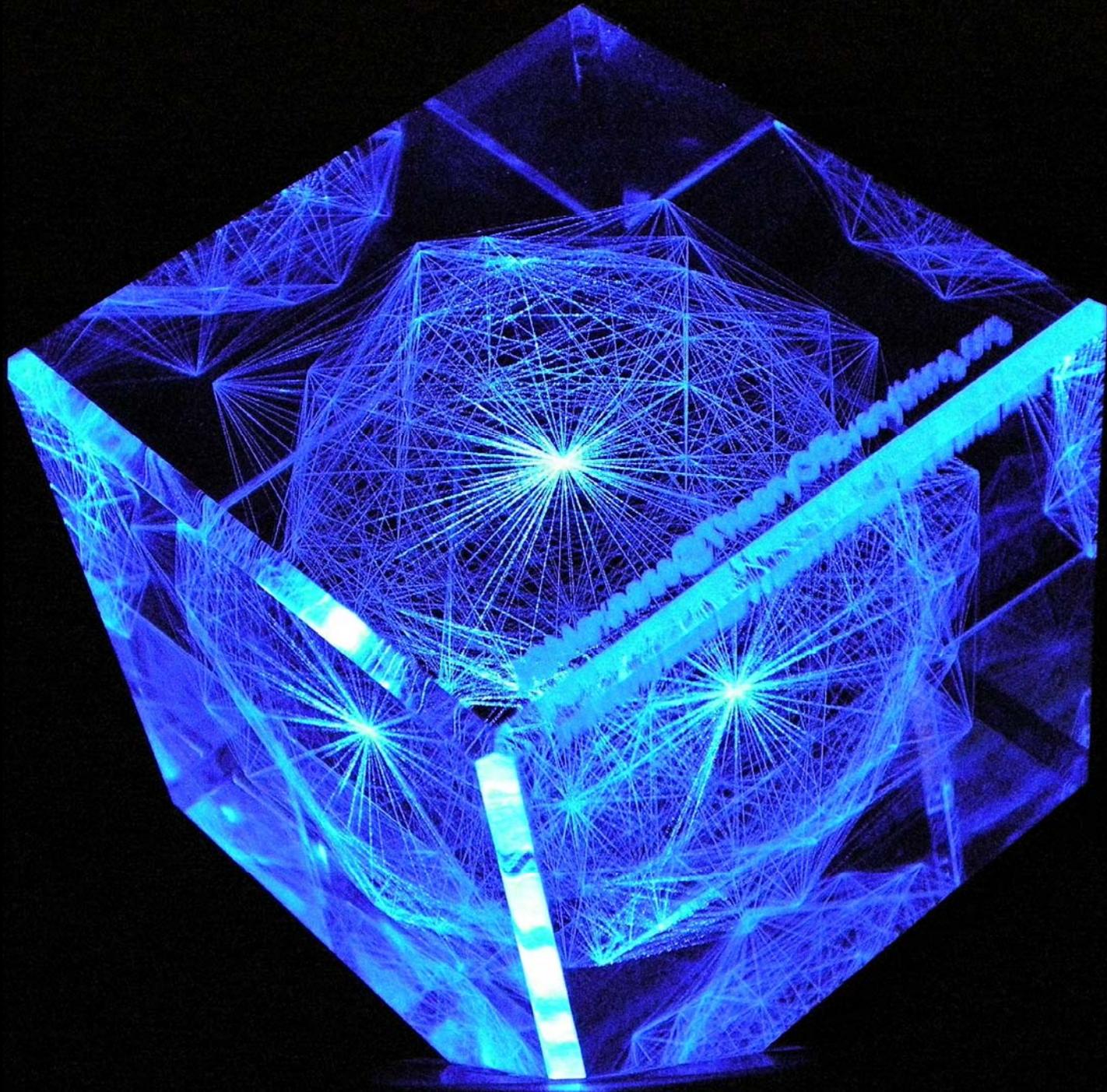
- In einem Experiment, mit dem Physiker der Universität Oxford Änderungen von Quantenzuständen von Materie in Magnetfeldern untersuchten, tauchten unerwartet **Quantenmuster auf, die einer schon länger bekannten mathematischen Struktur entsprechen.**
- Auf der Basis der sog. **E8-Struktur** hatten andere Forscher zuvor eine „Theory of Everything“ entwickelt (Garrett Lisi) – diese beschreibt alle Vorgänge und Zustände im Universum, sowohl im allerkleinsten Bereich (Quanten) als auch auf der Ebene der größten kosmischen Strukturen.
- Bis jetzt galt E8 als rein mathematisches Konstrukt ohne Bezug zur realen Welt!!
- Daß sich die E8-Struktur jetzt in real existierender Materie zeigte, läßt hoffen, mit der Weltformel auf der richtigen Spur zu sein.

E8 und die Stringtheorie

- Stringtheorie beschreibt Elementarteilchen als eindimensionale, schwingende Fäden
- Strings können aber nur in einem höherdimensionalen Raum in der erforderlichen Weise schwingen – je nach Modell könnten es 10, 11, oder 21 Raumdimensionen sein
- Stringtheorie geht über das Standardmodell der Materie hinaus und schließt alle Kräfte ein (incl. Gravitation). Ihre Formeln würden Quanten- und Relativitätstheorie zur „Quantengravitation“ vereinen, die damit zur Weltformel würde.
- Stringtheorie: da die Strings so winzig sind – ihre Größe liegt im Bereich der Planck-Länge von 10^{-33} cm werden zu ihrer Entdeckung viel höhere Energien benötigt als mit den heutigen Teilchenbeschleunigern erreicht werden kann

29.01.2010: Erster Beweis für die Weltformel?

- Experiment in Oxford:
 - Kristalle aus Kobalt und Niob wurden auf eine Temperatur von 0.04 Grad Celsius über dem absoluten Nullpunkt abgekühlt
 - Atome lagerten sich in langen, parallelen Ketten zusammen
 - Ihre Elektronen verhielten sich aufgrund ihrer Spins wie kleine Stabmagneten, die entweder nach oben oder unten zeigten
 - Die Forscher legten ein starkes Magnetfeld rechtwinklig zu den Spinachsen an: in den Elektronenspins in den Ketten **bildeten sich spontan Muster**; mit jeder dieser Spinanordnungen war eine bestimmte Energie verbunden – *die Spins hatten sich gemäß der mathematischen Beziehungen der E8-Symmetrie geordnet.*
- *Mechanismus ist ein Rätsel!!*
- Selbstorganisation der Natur ...
- Bemerkenswert, daß E8 nicht nur als mathematisches Konstrukt, sondern auch in der realen Welt auftaucht



The Times

The right place. The right Times.

Die Zeit in der Physik
Die Physik in der Zeit

KINGS OF LEON | Because Of The Times

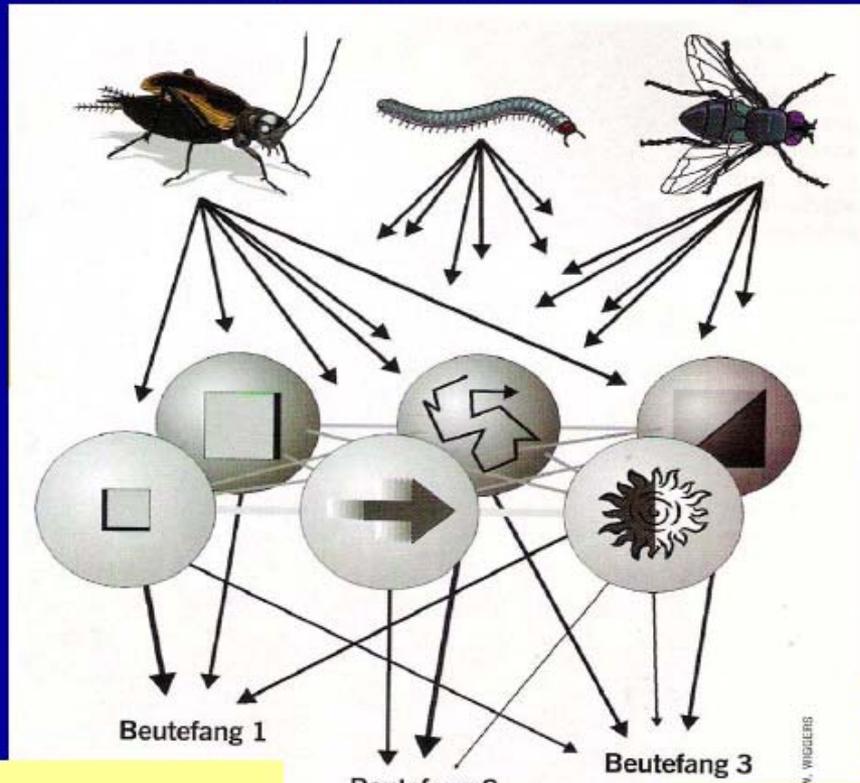


“The saddest aspect of life right now is that science gathers knowledge faster than society gathers wisdom.”

Isaac Asimov

Physik - eine Lehre von Raum, Zeit, Materie : Einleitung

10



Realität,
wie wir sie
„erleben“

Realität,
wie ein
Salamander
sie „registriert“

**Größe,
Kanten,
Orientierung**

**Geschwindigkeit
Bewegungsweise**

**Helligkeit
Lokale
Kontraste**

beim
Menschen
+ **Farbe**

Integration + Sinnggebung → Bedeutung
Raum = Wo - Information

nach G. Roth

Zeit: - Früher- Später -Beziehungen
von Ereignissen

Dauer von, Länge von Zuständen / Prozessen

Zeitpunkt eines Geschehens

„Wann?“, „Wie lange?“, „Vorher - nachher?“

Fragen → „Zeitbestimmung“

Das ist auch keine Erfindung der Physik!

Alle Gehirne kennen ein „Wann?“

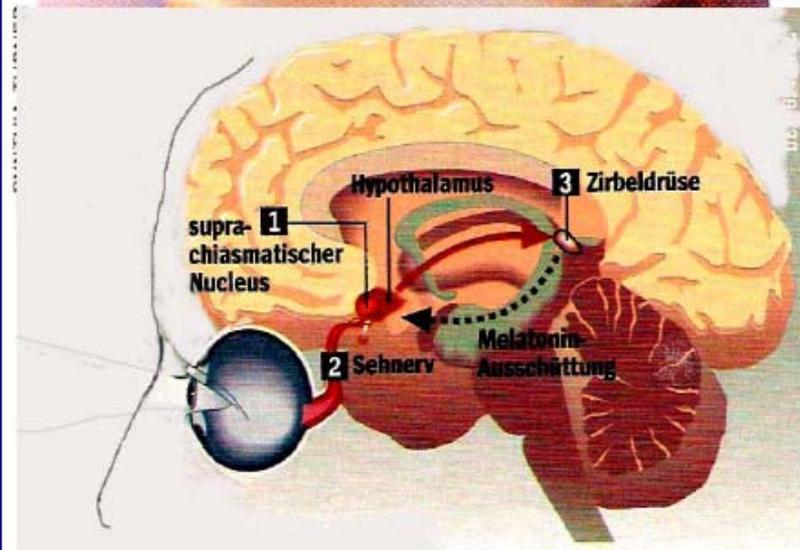
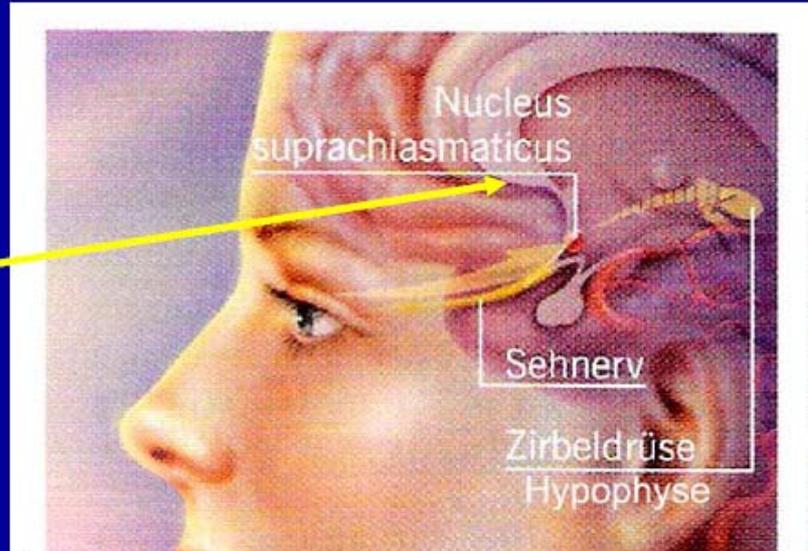
*eine Einordnung in ein **Episodengedächtnis**,*

die verschiedenen Erfahrung werden in einen

***zeitlichen Bezug** gebracht (**Kalender**),*

*dazu wird unser Körper von einer **inneren Uhr** gesteuert.*

Zeit:
unsere
innere Uhr



Wir – und alle Tiere - verarbeiten im Gehirn
Informationen der Sinne

nach „Wo?“ , „Wann?“
und auf der anderen Seite nach „Was?“ ;

wir haben ein Gedächtnis für „Orte“ – „Hippocampus“
und ein zeitlich organisiertes „Episodengedächtnis“;
das einem Kalender entspricht

dazu ist unser Organismus durch diverse (und eine zentrale)
„biologische Uhren“ organisiert und gesteuert

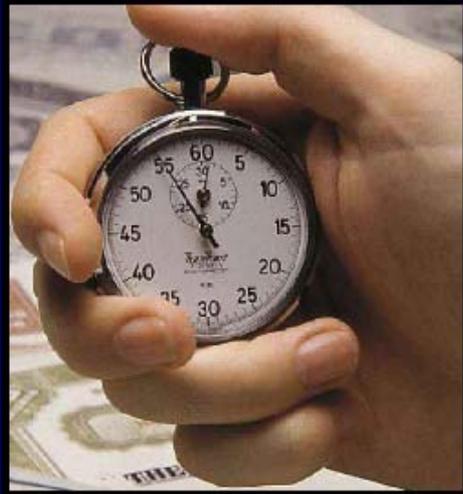
Sind Zeit und Raum Illusionen ?

A. Einstein (Physiker)

E. Pöppel (Neurobiologe / Gehirnforscher)

„Für uns gläubige Physiker hat die Scheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur die Bedeutung einer wenn auch hartnäckigen Illusion.“

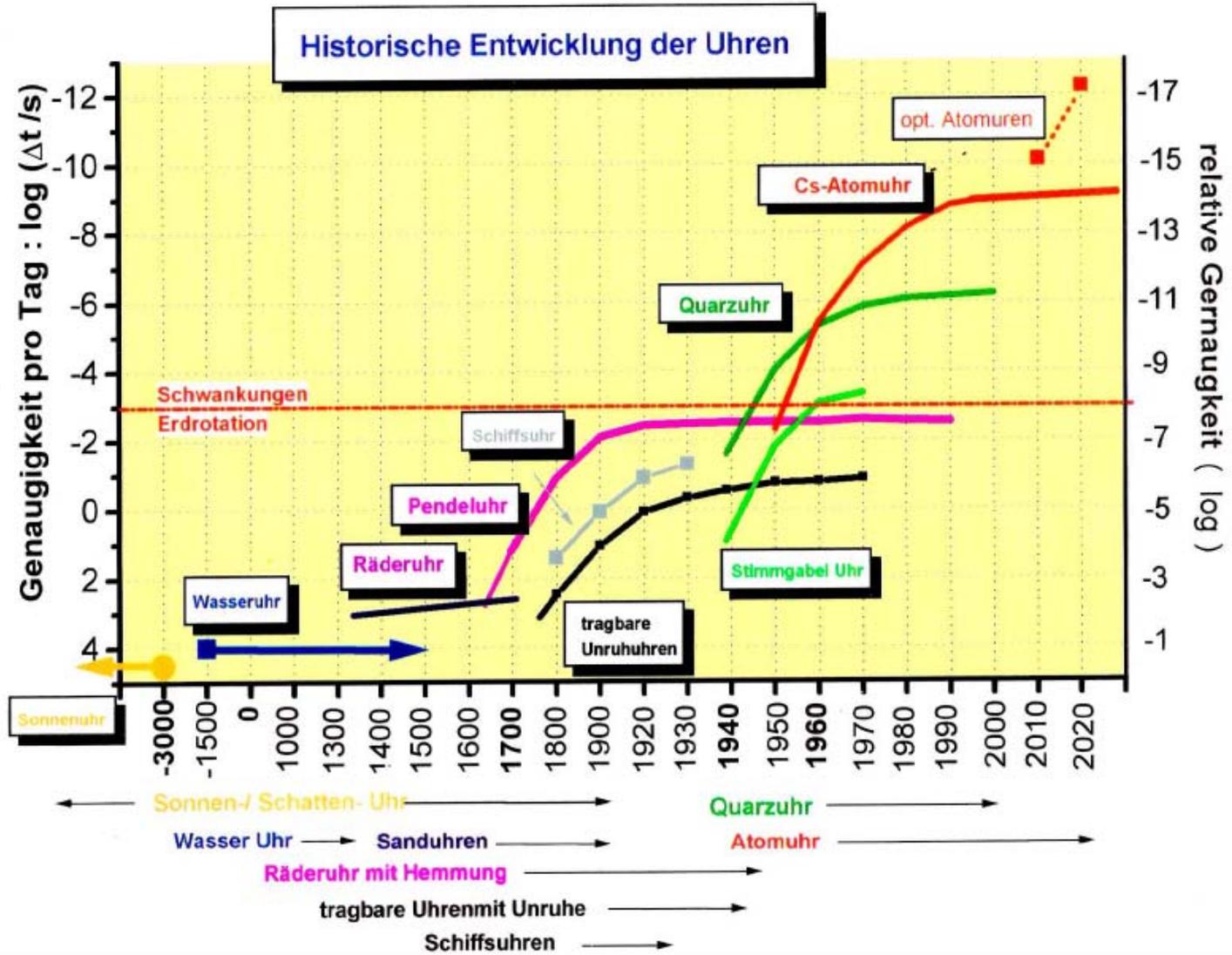
A. Einstein



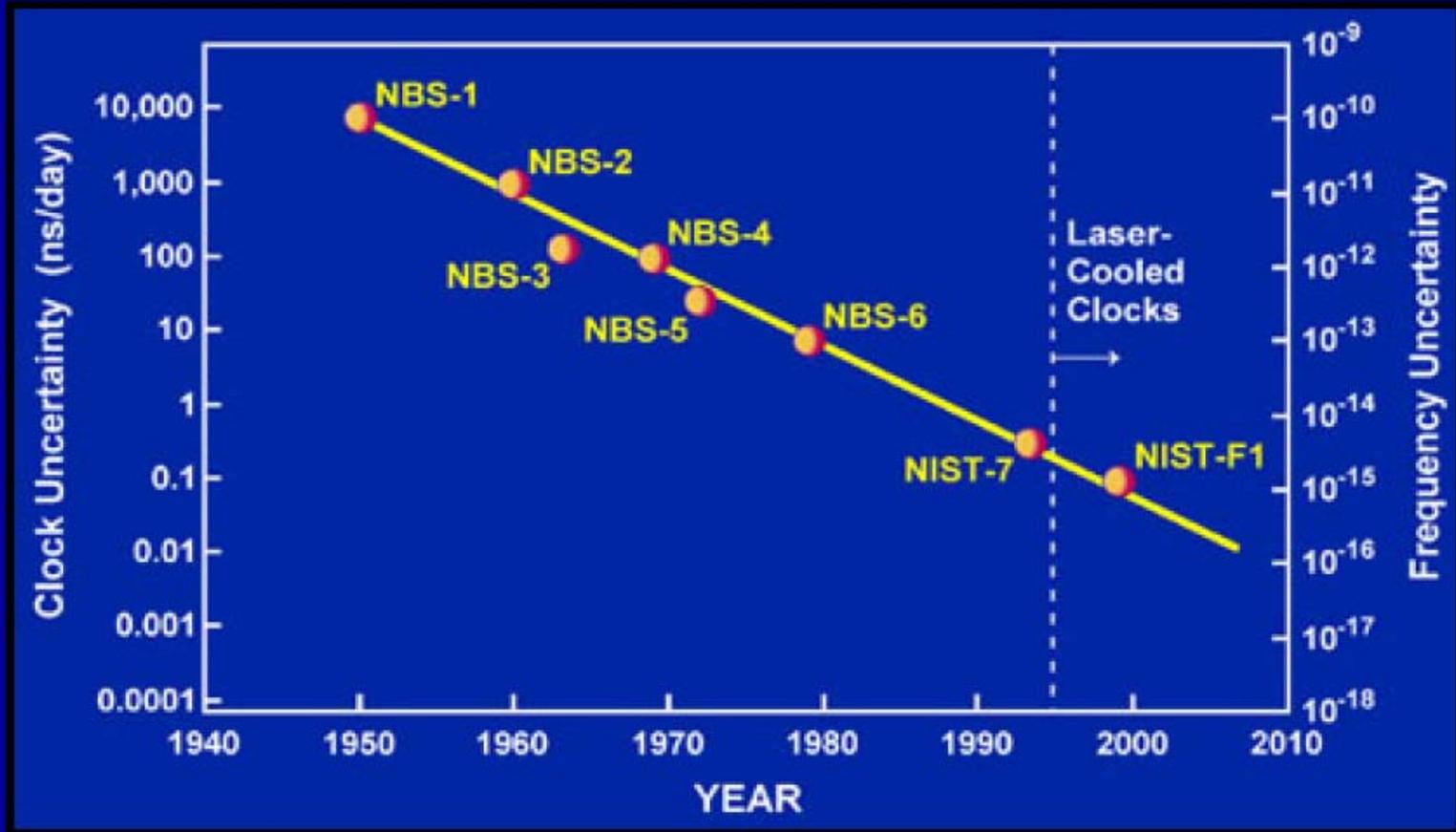
**Die Zeit der Physik
ist die mit
technischen Uhren
gemessenen Dauer**



F



Steigerung der Genauigkeit von Atomuhren



3. Raum u. Zeit / Dauer in der klassischen Physik

28

Axiome:

1. Es gibt eine „absolute“ Zeit:

alle Beobachter messen mit ihren Uhren diese Zeit

2. Es gibt eine „absoluten“ Raum:

alle Beobachter messen mit ihren Maßstäben gleiche Längen

3. Zeit und Raum sind unabhängige Größen

Trägheitsgesetz / „Lex prima“

Jeder kräftefreie Körper verharrt infolge seiner Trägheit

(träge Masse – m_t) im Zustand der Ruhe ($v=0$)

oder

in geradliniger- gleichförmiger Bewegung ($v=const$)

- **Newtons – Mechanik** impliziert immer:

Raum- Zeit - Denken

Kausalität u. Determinismus

und eine

Gerichtetheit der Wirkungen

sowie

Linearität - Homogenität u.

Kontinuität des Geschehens

4. Raum u. Zeit in der Vielteilchen – Physik

33

Klassische Physik der Stoffe auf atomarem Niveau:

Alle materiellen Körper / Systeme bestehen aus
nahezu unendlich vielen Atomen / Molekülen
→ Bausteinen / Teilchen

Beschreibung gelingt nur mit Hilfe
statistischer Methoden

praktische
Unkenntnis



Wahrscheinlichkeitsaussagen

5. Raum u. Zeit in der relativistischen Physik

38

- **Spezielle Relativitätstheorie (SRT)**
- **Allgemeine Relativitätstheorie (ART)**
(Theorie der Gravitation)

Postulate der Relativitätstheorie:

1. Das Relativitätsprinzip:

Die physikalischen Gesetze haben in allen
Inertialsystemen dieselbe Form

2. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

Die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit 'c' hat in jedem
Inertialsystem den selben Wert:

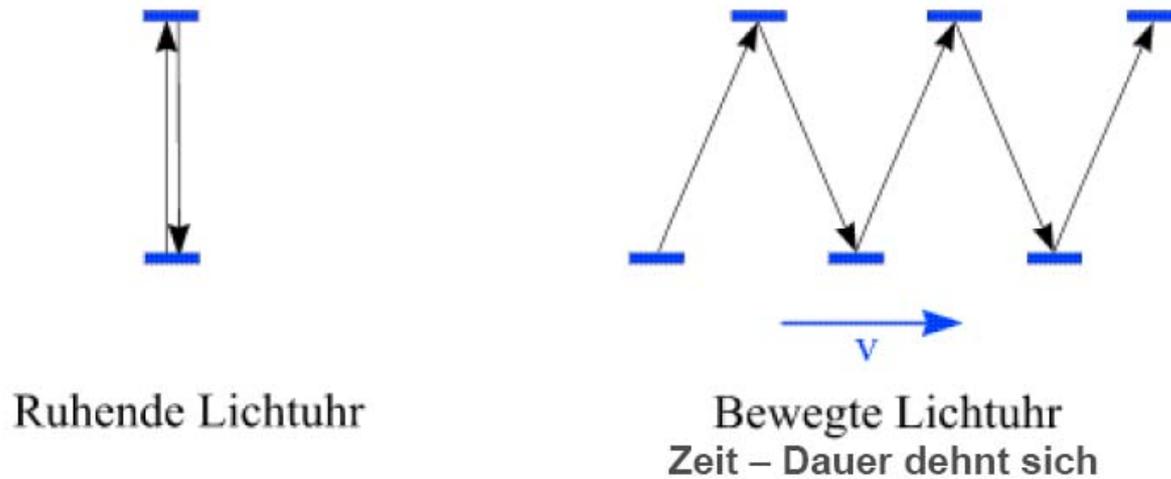
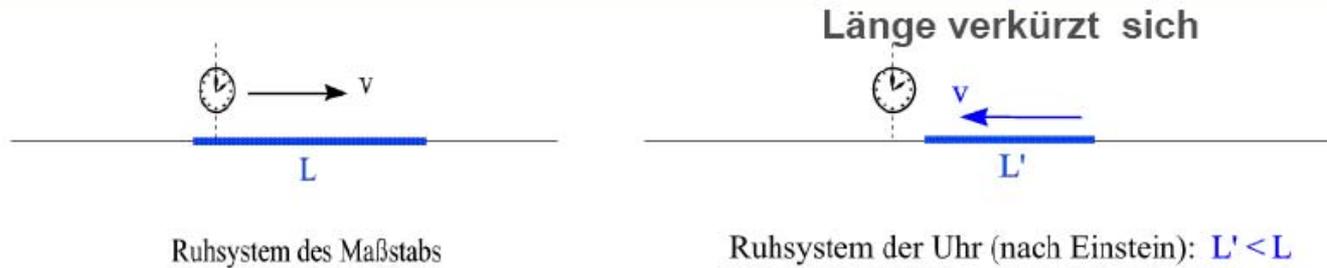
$$c_0 = 299\,792.458 \text{ km/s,}$$

und

ist also vom Bewegungszustand der Quelle

sowie

von dem des Beobachters unabhängig.



Uhren in Satelliten den Navigationssystemen GPS

GPS = Global Position System

Satellit: Höhe:	20 000 km
Geschwindigkeit:	14 000 km/h

SRT: „bewegte Uhr“

Satellit- Uhr geht am Tag „falsch“ - 7 ms (nach)

ART: „Ihr unter geringerer Erdanziehung“ ($F_{\text{grav}} \sim 1/r^2$)Satellit- Uhr geht am Tag „falsch“ + 45 ms (vor)

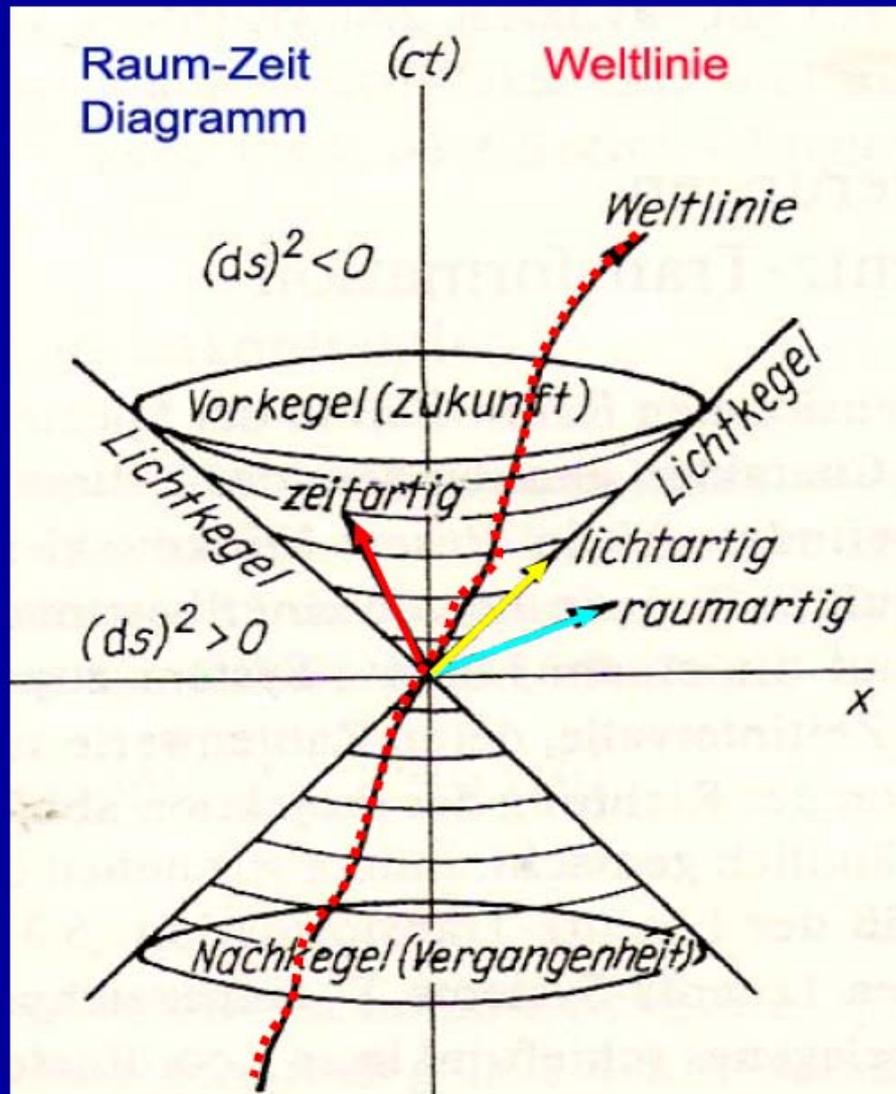
Gesamteffekt : + 38 ms / Tag

=====

 $\Delta t = 38 \text{ ms} = 0,000038 \text{ s}$ bzw. Rel. Fehler: $\Delta t/t = 4,4 \cdot 10^{-10}$ Positionsfehler : $\Delta x = c \cdot \Delta t = 11,4 \text{ km}$ um $\Delta x = 1 \text{ m}$: $\Delta t/t = 4 \cdot 10^{-14}$; $\Delta x = 1 \text{ cm}$: $\Delta t/t = 4 \cdot 10^{-17}$

Raum u. Zeit in der relativistischen Physik

46



Die relativistische Raum- Zeit - Welt

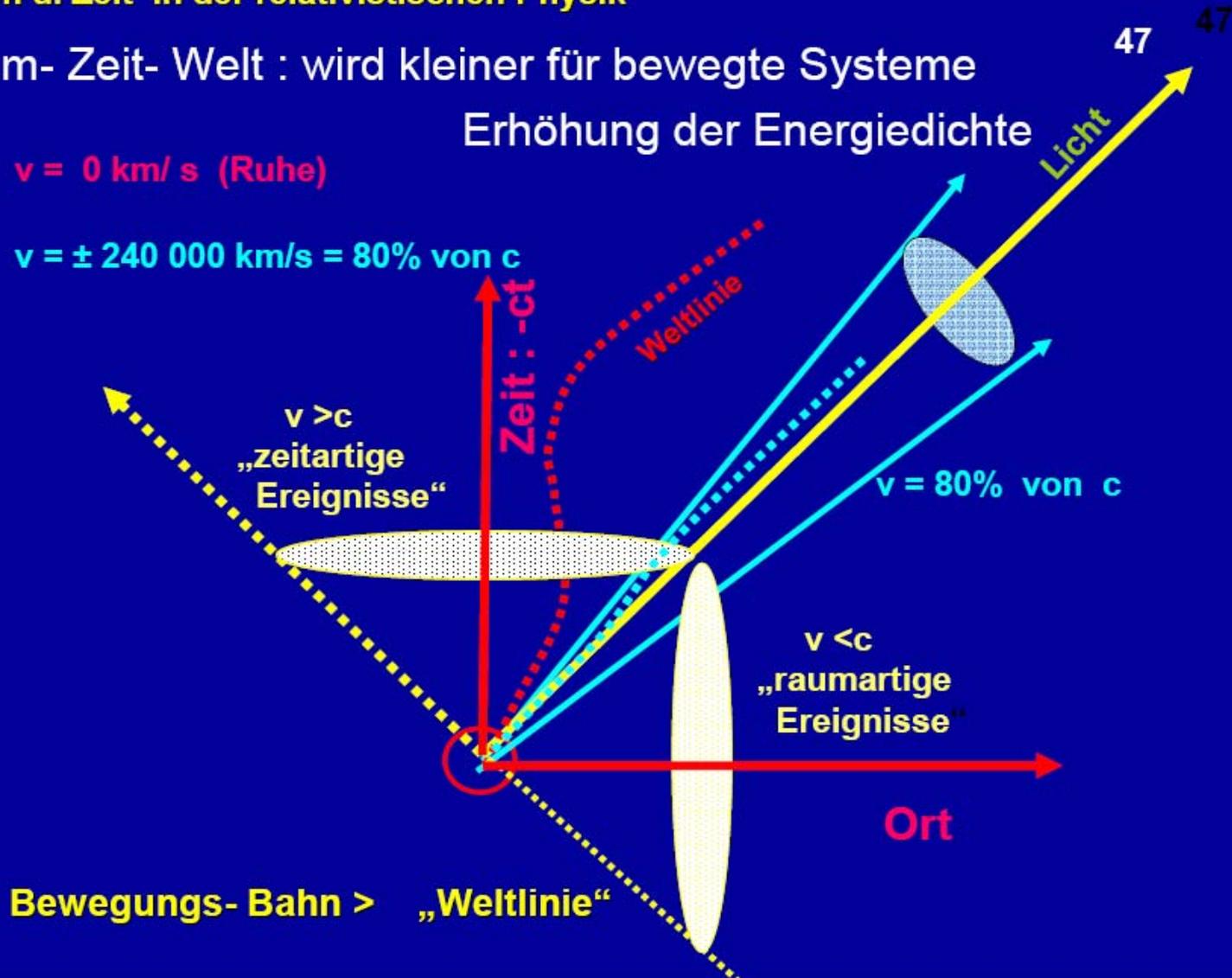
Raum u. Zeit in der relativistischen Physik

Raum- Zeit- Welt : wird kleiner für bewegte Systeme

Erhöhung der Energiedichte

$v = 0 \text{ km/s}$ (Ruhe)

$v = \pm 240\,000 \text{ km/s} = 80\% \text{ von } c$



Zwillingsparadoxon:

Im Raumschiff vergeht die Zeit langsamer

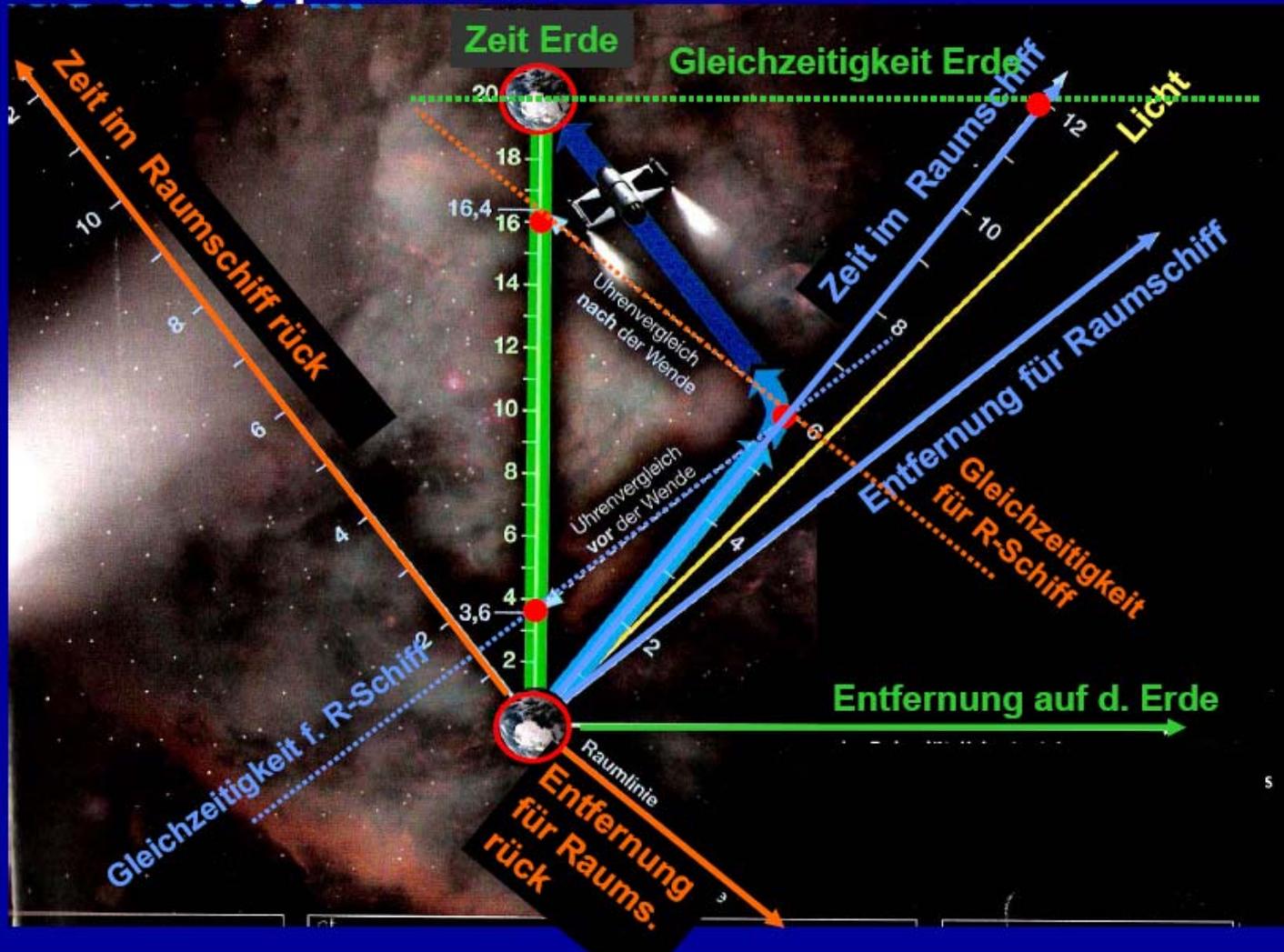
48



Raum u. Zeit in der relativistischen Physik

Zwillingsparadoxon:

$v = \pm 240\,000 \text{ km/s} = 80\% \text{ von } c$



Raum u. Zeit in der relativistischen Physik

Spezielle Relativitäts-Theorie : Verzerrung des Raumes

50



$v = 70\%$ von c



$v = 95\%$ von c
+ rel. Bündelungseffekt
der Lichtstrahlen

$v = 90\%$ von c



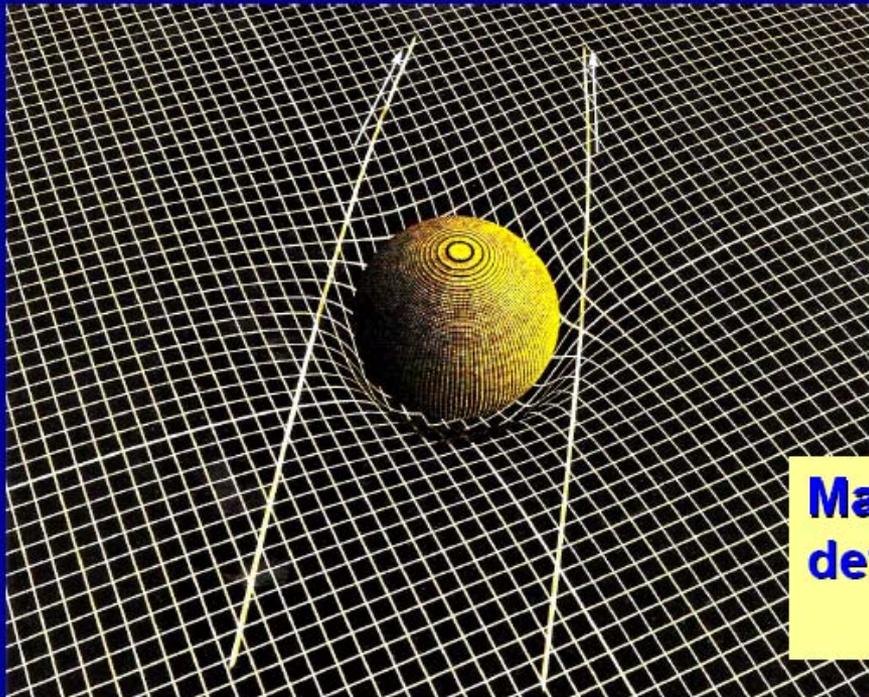
$v = 99\%$ von c



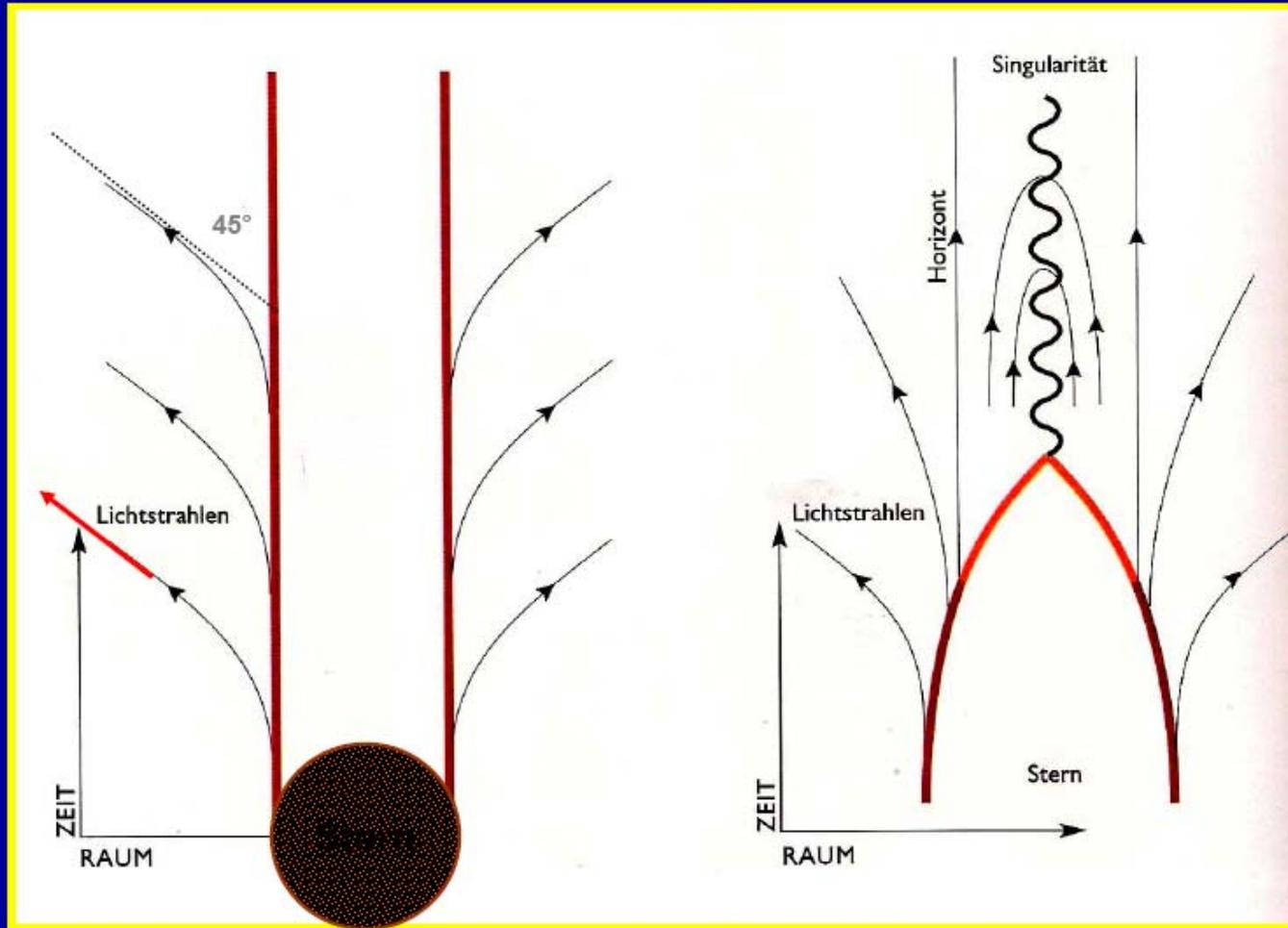
Die **Allgemeine Relativitätstheorie** (ART)

„Geometrische“ Theorie der Gravitation

Gravitation entsteht durch **Deformation des Raumes**



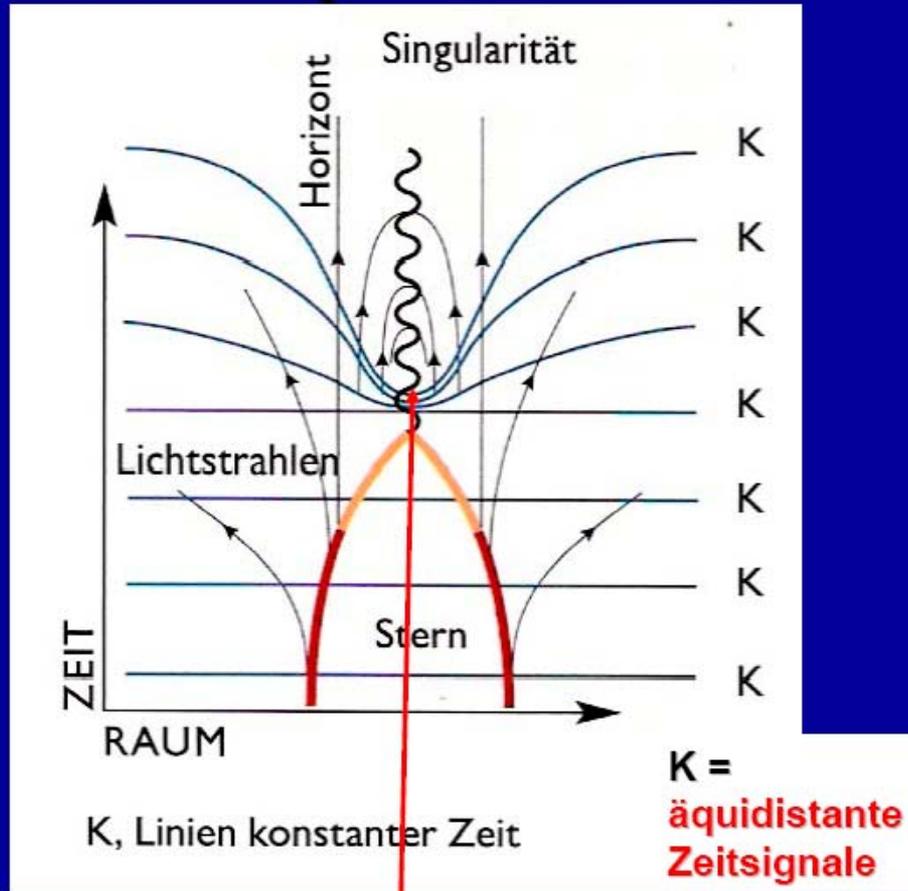
**Masse / Energie
deformiert die Raumzeit**
auch Licht wird abgelenkt



Stabiler Stern

Kollabierender Stern
zum Schwarzen Loch

„Wormloch“ verbindet verschiedene R-Z Gebiete



Im Schwarzen Loch „steht“ die Zeit

6. Raum u. Zeit in der Quanten - Physik

61

- *Raum und Zeit sind kontinuierliche Parameter auch in der QM*

quantenmechanische Zustandsfunktionen

$$\Psi(x, y, z, t)$$

Die Schrödinger- Gleichung

$$\partial \Psi / \partial t \approx - (\hbar^2 / 8\pi^2 m) \cdot \Delta \Psi(x, y, z, t) + U(x, y, z, t) \cdot \Psi$$

Δ -Laplace Operator

Quantisierung von Energie und Impuls

nicht gleichzeitige , beliebig genaue Bestimmbarkeit
von Ort und Geschwindigkeit

Heisenbergsche - Unschärfe Relation

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

Plancksches Wirkungsquantum

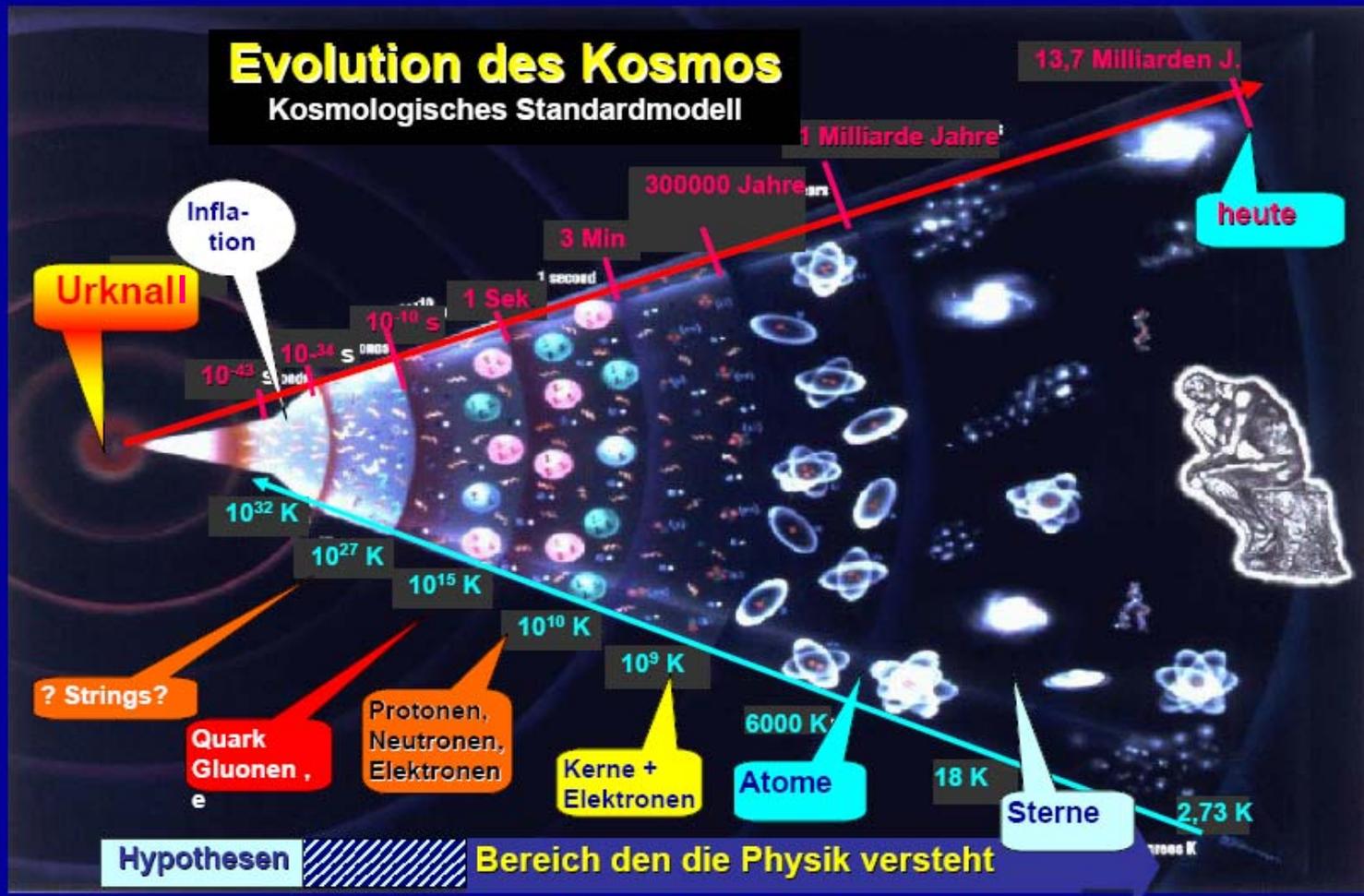
$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

prinzipielle Unbestimmtheit / fundamentale Unsicherheit

→ statistische Bilder

7. An den Grenzen von Raum u. Zeit

- *Was ist vor dem Urknall vor „unserer Zeit“ ?*
- *Was ist hinter dem Rand unseres Kosmos?*
- *Hören unsere Raum- Zeit – Vorstellungen in bestimmten Erfahrungsbereichen auf?*



- *Wir sehen 90% unseres Kosmos;
d.h. bis 12 Milliarden Jahre (Alter 13,4 Mill.) zurück,
aber was sehen wir alles nicht?*
- *In der Inflations-Periode
(ca. 10^{-9} Sek. nach dem Urknall)
expandierte unser Universum exponentiell mit
Überlichtgeschwindigkeit;
also, alles was davor passierte, bleibt uns verhüllt.*
- *Sind Raum und Zeit selber quantisiert?*

- *Quantengravitation ?*
Verbindung von ART und QM
(lokale mit nicht-lokale Theorie)
- *Gibt es verborgene Dimensionen der*
Raum – Zeit ?
- *String- Theorie -*
Bran / Membran Vorstellungen ?
unseres Kosmos

The Times

The right place. The right Times.

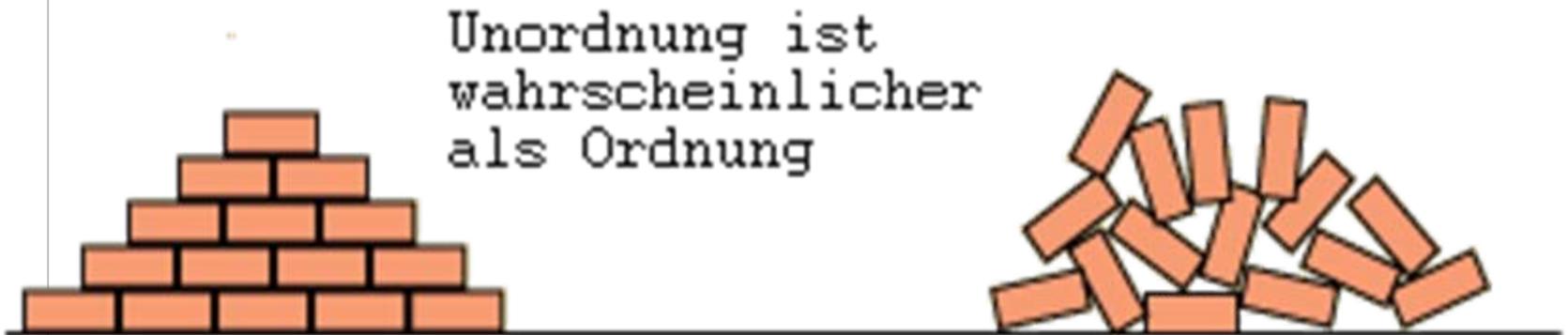
Der Zeitpfeil – Die Entropie

Zeitrichtung

- Alltägliche Abläufe: haben eine eindeutige Zeitrichtung:
 - Ein Stück Zucker löst sich im Kaffee.
 - Heißes und kaltes Wasser vermischen sich.
 - Wärme fließt vom Warmen zum Kalten.
 - Gegenstände zerbrechen.
- Mikrophysik: *Zeitumkehrinvariant*.
 - Newton-Mechanik.
 - Quantenmechanik

Entropie makroskopisch

Wenn man Ziegeln von einem Laster kippt, welche Anordnung ist wahrscheinlicher?



Maximale Ordnung



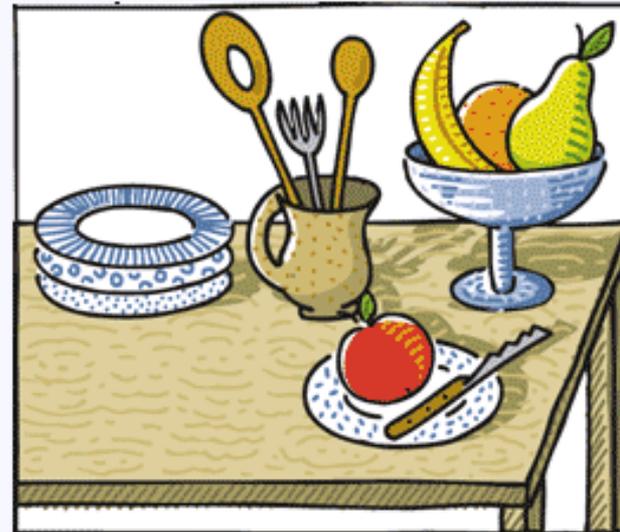
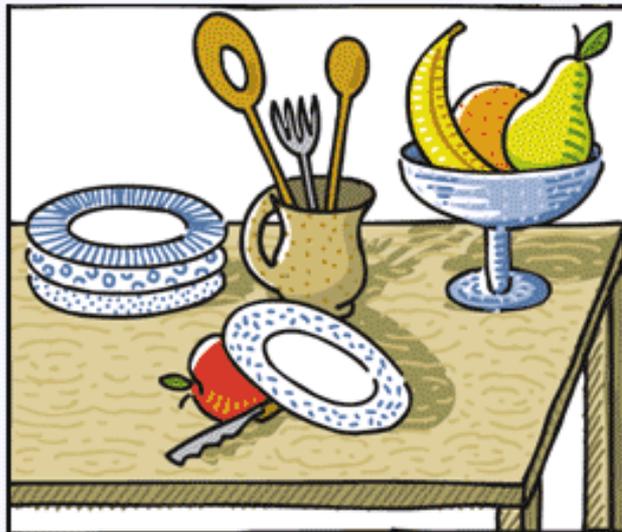
► **Maximale Ordnung** ist stets schön anzusehen. Jedes Ding auf Professor Boltzmanns Küchentisch hat seinen Platz. Es gibt kaum Möglichkeiten, etwas zu verändern, ohne daß dies auch dem flüchtigen Betrachter gleich auffiele. Das aber heißt: Die Anordnung hat praktisch keine Entropie.



Illustration: F.A.Z.-Valentine Edelmann

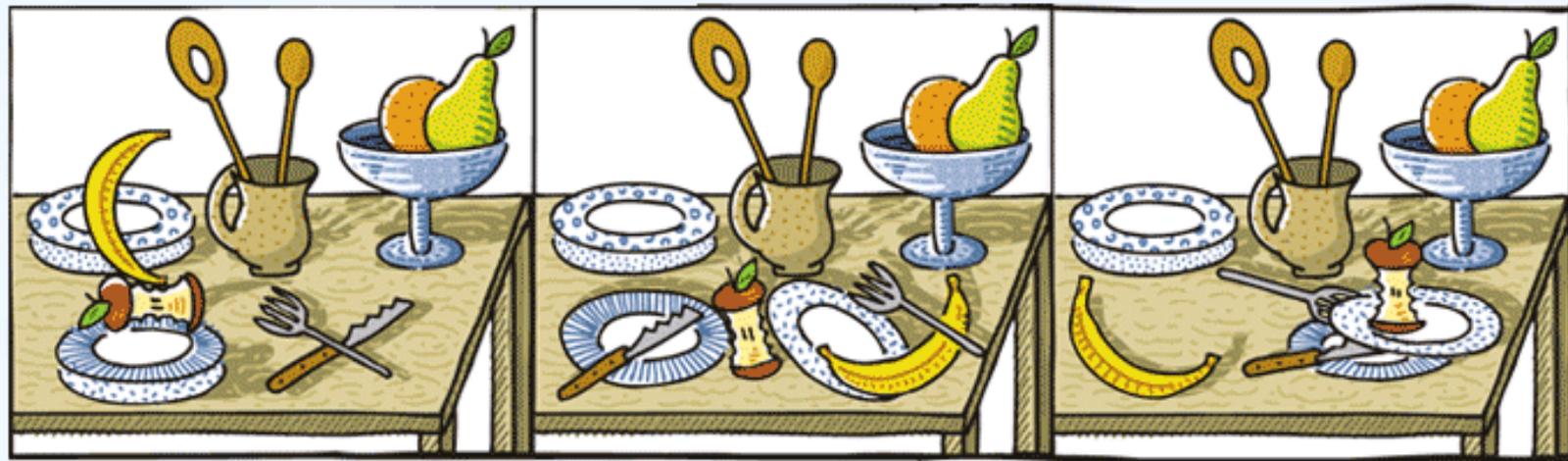
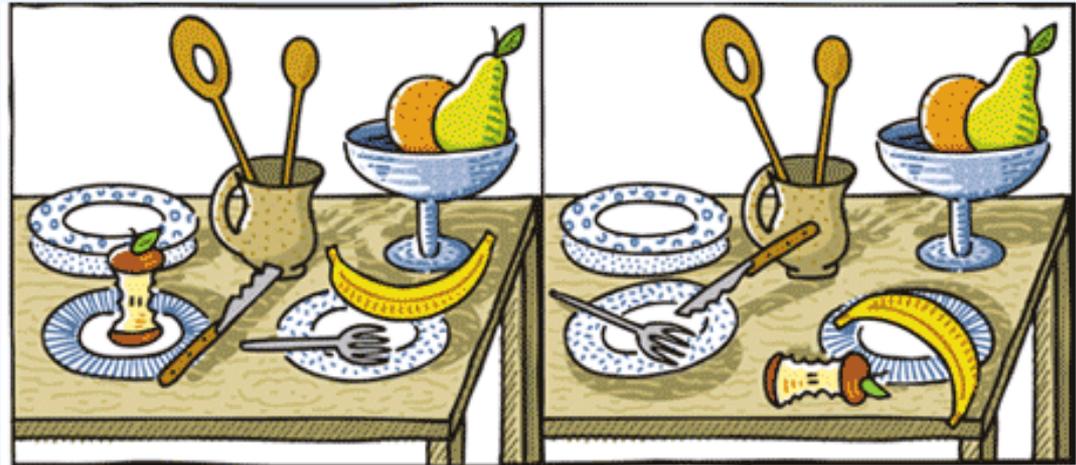
Etwas Unordnung

► **Etwas Unordnung** ist schnell angerichtet, indem man ein paar Utensilien nach Gebrauch nicht wieder an ihren ursprünglichen Platz zurückräumt. Sie haben nun eine ganze Reihe von Möglichkeiten, auf dem Tisch herumzuliegen (natürlich nicht nur die gezeigten drei), ohne daß sich etwas am Gesamteindruck ändert. Das aber heißt: Der Tisch besitzt Entropie.



Noch größere Unordnung

► **Noch mehr herumliegende** Gegenstände sorgen für einen Eindruck noch größerer Unordnung. Zugleich gibt es mit mehr Gegenständen aber auch mehr Möglichkeiten, Anordnungen mit gleich unordentlichem Eindruck zu erzeugen. Die Bilder zeigen daher Tische mit einer noch bößeren Entropie.



Problem der Zeitrichtung

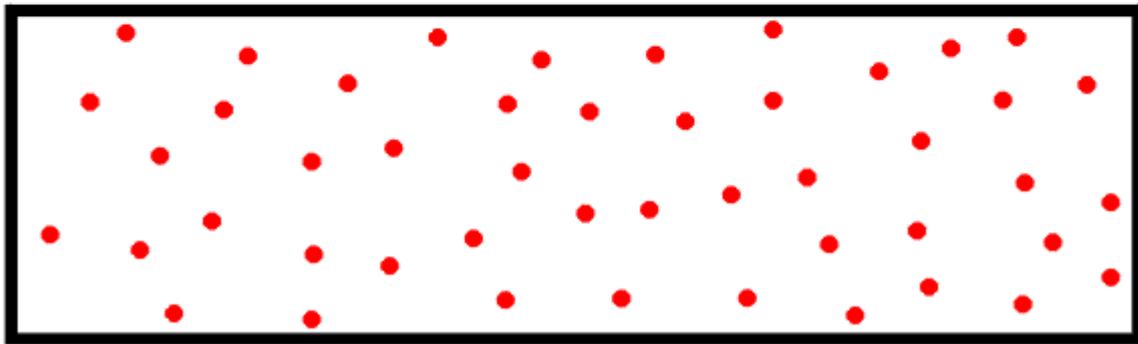
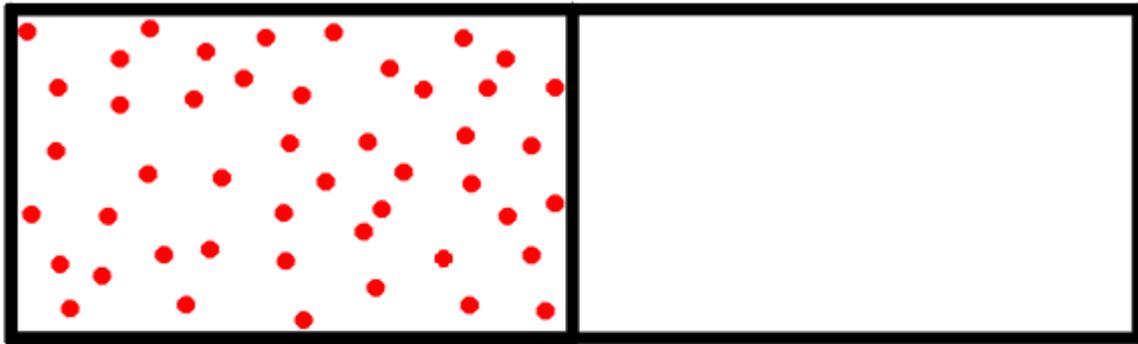
- a) Es gibt Vorgänge mit eindeutiger Zeitrichtung.
- b) Die physikalischen Gesetze, die die zeitliche Entwicklung von mikrophysikalischen Zustände beschreiben, sind zeitumkehrinvariant.
- c) Diese Gesetze beschreiben das Verhalten der entsprechenden Objekte vollständig.
- d) Woher kommt dann die Zeitrichtung? Ist die Natur zeitumkehrinvariant? Oder gibt es eine objektive Richtung der Zeit?



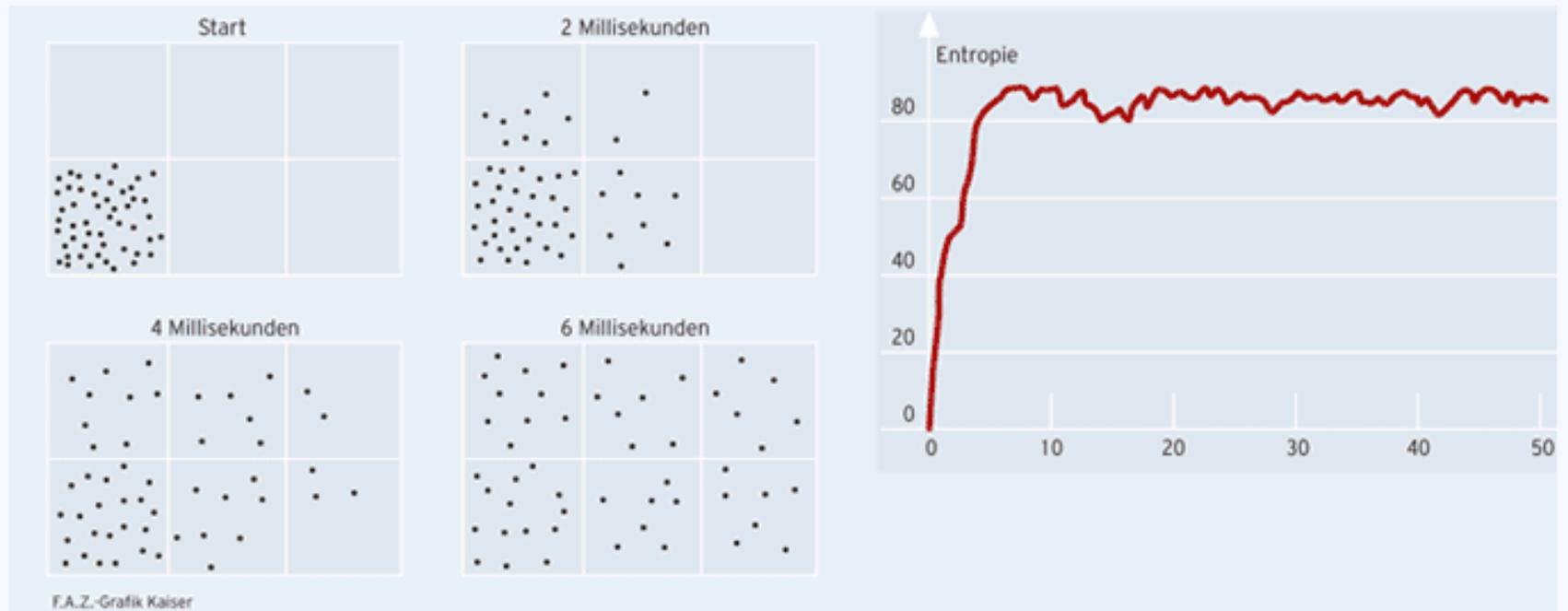
Entropie



...warum ein allein gelassenes System immer
unaufgeräumter wird...



Entropie



Gibt man Gasmolekülen Raum, nutzen sie ihn schnell aus. In dieser zweidimensionalen Simulation aus dem Buch „Entropie“ von H. Dieter Zeh starten 50 Atome mit Anfangsgeschwindigkeiten, mit denen sie eines der sechs Felder, in die ihr Aktionsraum hier unterteilt ist, in durchschnittlich zwei Millisekunden durchqueren. Bereits nach weniger als 10 Millisekunden ändert sich makroskopisch nichts mehr. Da das System abgeschlossen ist, vergrößert sich die Entropie (rote Kurve) praktisch nicht weiter. Man kann abschätzen, wie lange es dauern würde, bis alle 50 Atome sich rein zufällig in dem linken unteren Feld wiedertreffen: Es ist 200 Milliarden Mal die Zeit, die seit dem Urknall vergangen ist.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Die Gesetze der Wahrscheinlichkeit besagen also:

- Die Unordnung eines Systems wird von selbst immer größer. Im Idealfall bleibt sie gleich. Ein abgeschlossenes System wird aber so gut wie NIEMALS (von selbst) geordneter.
- Gasmoleküle verteilen sich gleichmäßig im Raum.
- Wärme verteilt sich gleichmäßig auf benachbarte Körper (Wärmeausgleich).

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Formal bedeutet das:

- $\Delta S = 0$... Bei reversiblen (umkehrbaren) Vorgängen
- $\Delta S > 0$... Bei irreversiblen (nicht umkehrbaren) Vorgängen

So gut wie alle Vorgänge des Alltags sind irreversibel!!!

Die Entropie – Boltzmannsche Deutung

- Die *Verteilung der mikroskopischen Zustände* eines thermodynamischen Systems kann sich, z. B., durch die von den Teilchen eingenommenen Orte im Raum unterscheiden
 - So könnten sich alle Teilchen nur in einem Teil des Volumens oder im ganzen Volumen befinden, in energetisch gleichen Zuständen *unterschiedlicher Ordnung*

Man beachte aber: Die Teilchen fliegen, die Angabe des Aufenthaltsbereichs sagt nichts über ihre dynamische Eigenschaft. Die Dynamik wird durch die Entropie berücksichtigt

Die Entropie – Boltzmannsche Deutung

$$S = k \cdot \ln w$$

- Entropie: Maß für die **Wahrscheinlichkeit eines Zustands**, Definition von Ludwig Boltzmann (20.2.1844-5.9.1906)
- Die Entropie eines Zustands ist der **Logarithmus der Wahrscheinlichkeit**, diesen Zustand anzutreffen
- Kriterium für sich selbst einstellende Gleichgewichte: **Das System stellt sich so ein, dass die Entropie maximal wird**

$$S = k \cdot \ln w$$

	Einheit	
$k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$	$\frac{\text{J}}{\text{K}}$	Boltzmannkonstante

Berechnung der Entropie für M Teilchen

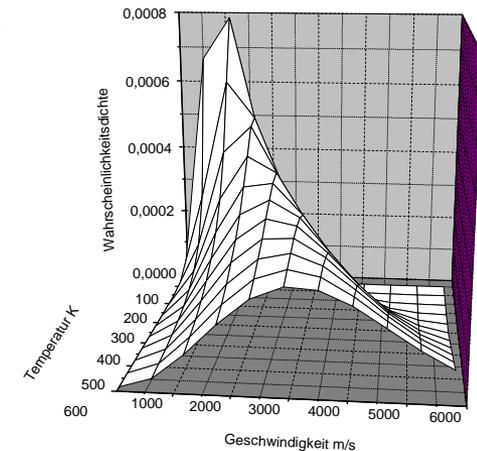
1. Aufteilung des Raumes in N Zellen
2. Verteilung der M Teilchen auf die Zellen
3. Berechnung der Dichte für jede Zelle: Quotient aus Anzahl pro Zelle und der Gesamtzahl der Teilchen
4. Berechnung der Entropie:

$$\rho_i = \frac{m_i}{M}$$

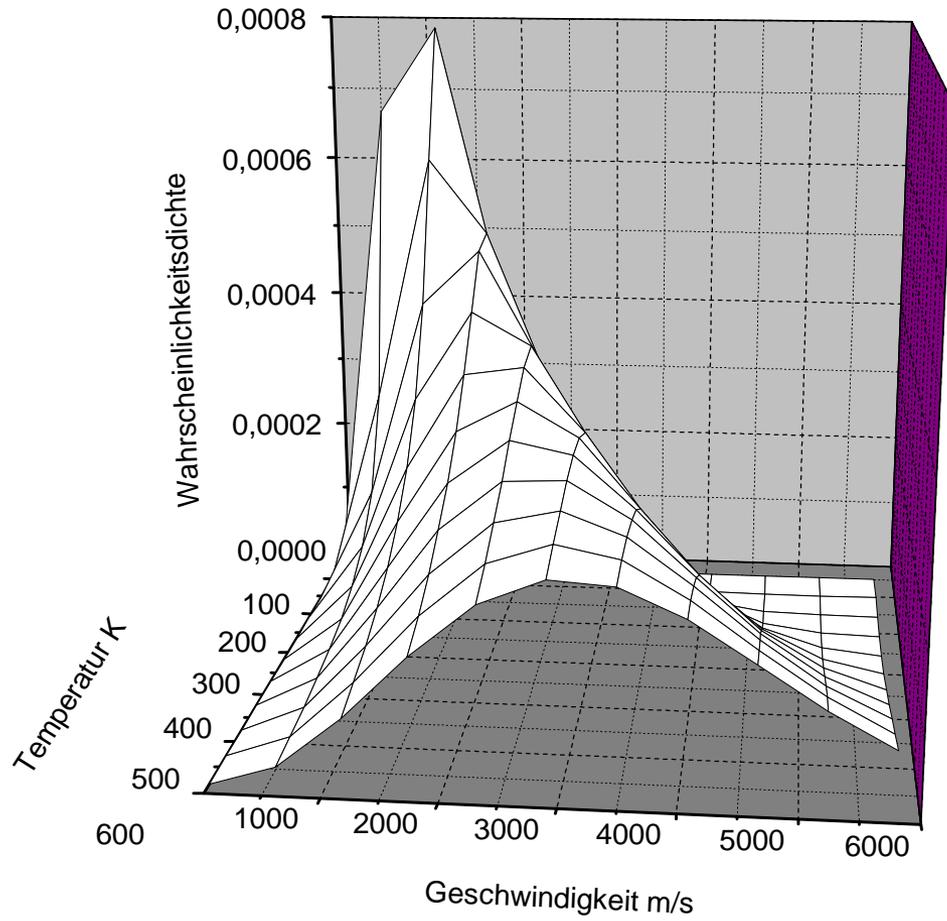
$$S = - \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot \ln \rho_i$$

Erweiterung der Entropie auf die Koordinaten des Phasenraums

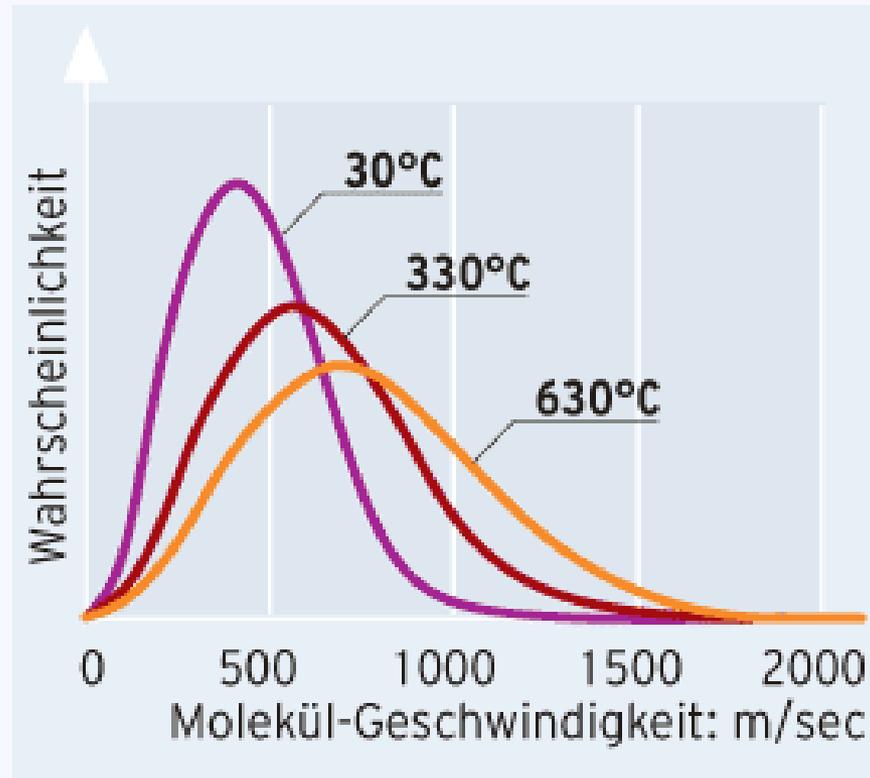
- Ortskoordinaten (Gleichverteilung)
- Geschwindigkeitsvektoren (\rightarrow Maxwell-Verteilung für v)
- Der Phasenraum enthält die Gesamtheit der Vektoren für Orte und Geschwindigkeiten der Teilchen
- Die Entropie ist das Maß für die Wahrscheinlichkeit, die Gesamtheit dieser Koordinaten ihren Verteilungen entsprechend zu finden



Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung



Die Maxwell-Kurven



Die Maxwell-Kurven zeigen, wieviel Moleküle sich wie schnell in Luft verschiedener Temperaturen bewegen.

Verknüpfung zwischen Entropie und Energie

- Veränderungen in der **Geschwindigkeitsverteilung** der Teilchen betreffen die kinetische Energie –
- Die Entropie wird daher zum Maß für die Energie bei **Änderungen der Verteilung** – z. B. bei chemischen Reaktionen:

$$\Delta U = T \cdot \Delta S$$

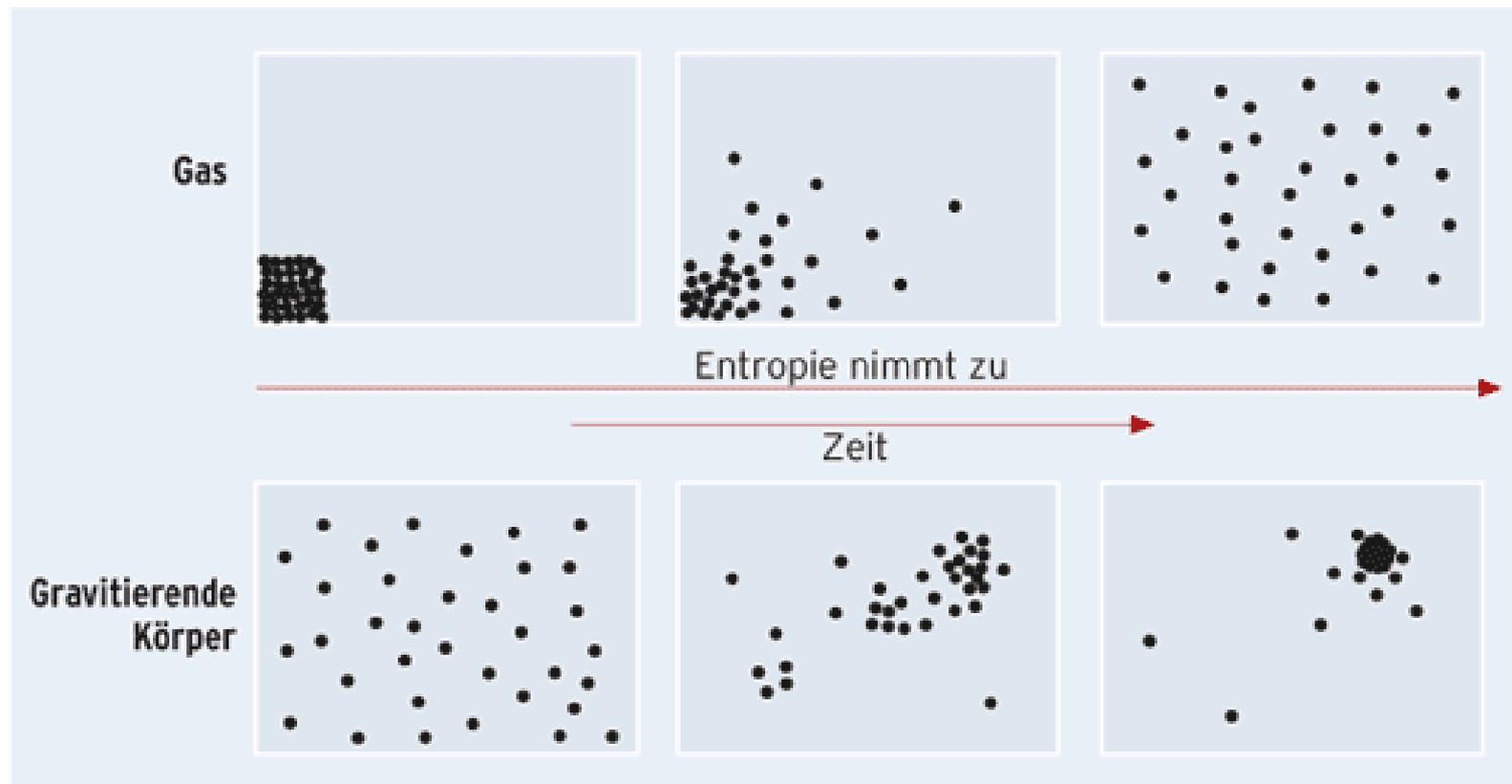
Das Gleichgewicht stellt sich so ein, daß der Gewinn an innerer Energie mit der Entropieabnahme im Gleichgewicht steht.

The Times

The right place. The right Times.

**Die Entropie und unser
Universum**

Gravitierende Körper



Gravitation ist anders Nur Teilchen, deren gegenseitige Schwereanziehung vernachlässigbar ist, treibt der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik in eine homogene Verteilung. Gravitierende Körper tendieren langfristig zum Verklumpen - und verschwinden am Ende aller Tage zumeist in einem Schwarzen Loch.

At issue: **microscopic laws of physics** are (basically) invariant under **time reversal**, defined as inverting both the direction of time and the momenta of every particle ($t \rightarrow -t, p_i \rightarrow -p_i$). For example, Newtonian gravity:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -\frac{GMm}{r^2} \hat{e}_r$$



But **macroscopic laws** are typically *not* reversible. For example, the 2nd Law of Thermodynamics:

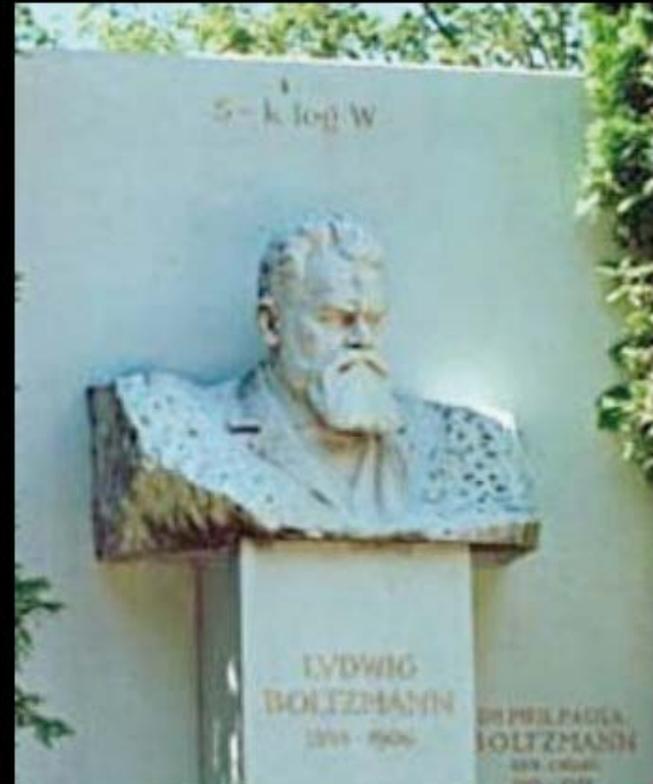
$$\frac{dS}{dt} \geq 0$$

What is the origin of this difference?



Ludwig Boltzmann provided a microscopic understanding of statistical mechanics.

Entropy counts the number of **microstates** (completely specifying the system) that correspond to the same **macrostate** (described by coarse-grained variables).



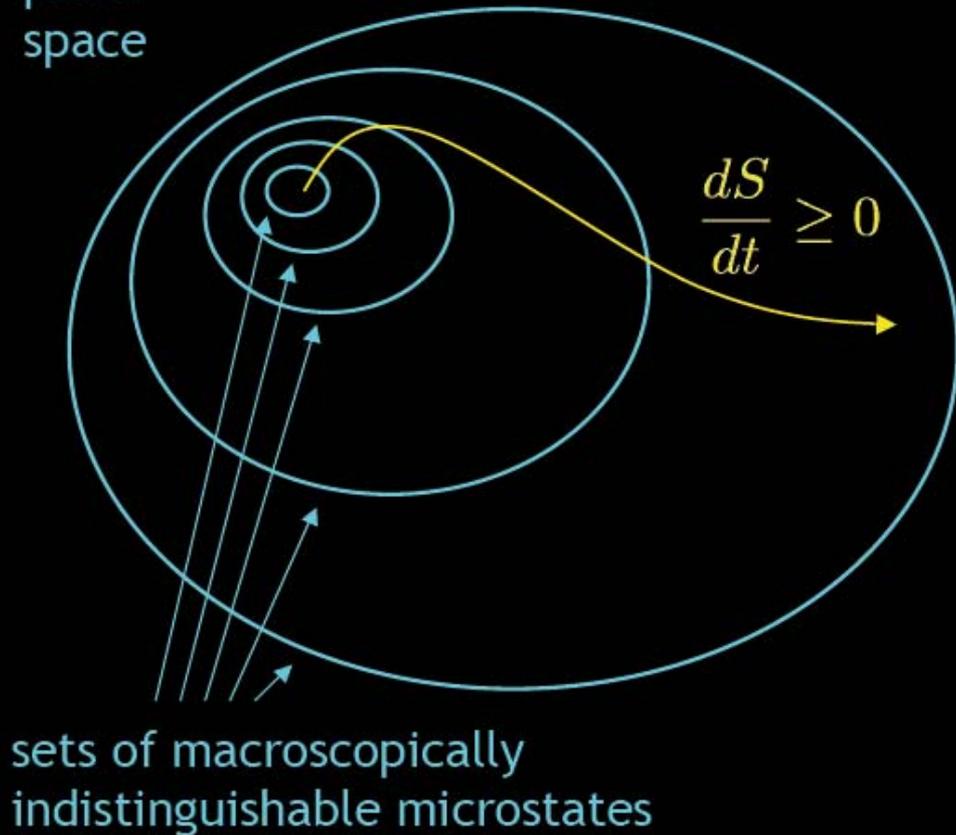
$$S = k \log W$$

entropy

Boltzmann's
constant

Volume of phase
space occupied
by equivalent
microstates

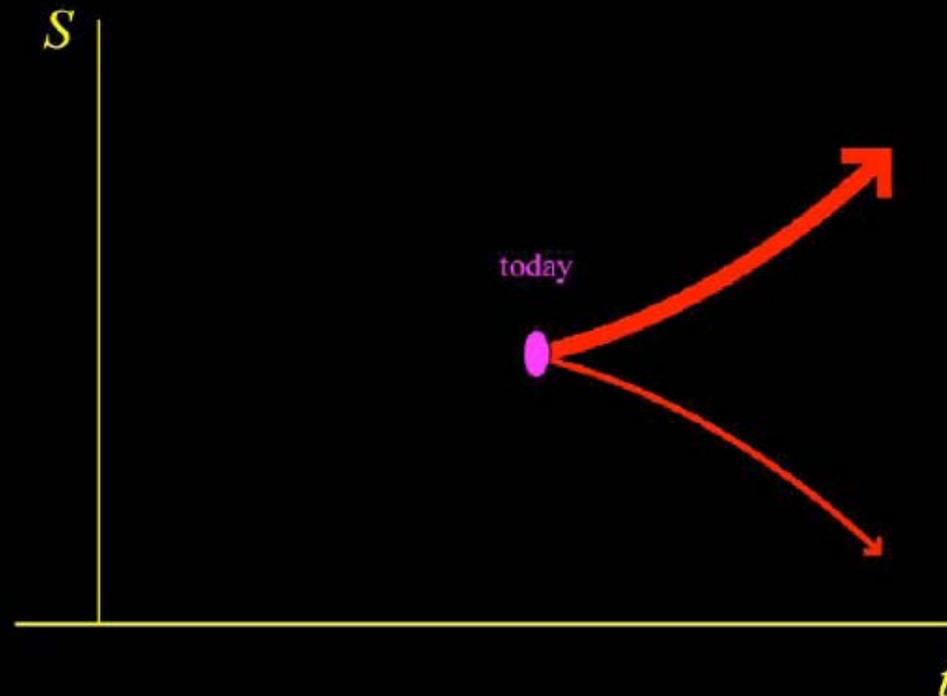
phase
space



Entropy counts
the number of
ways we can
rearrange
microstates to
get the same
macrostate.

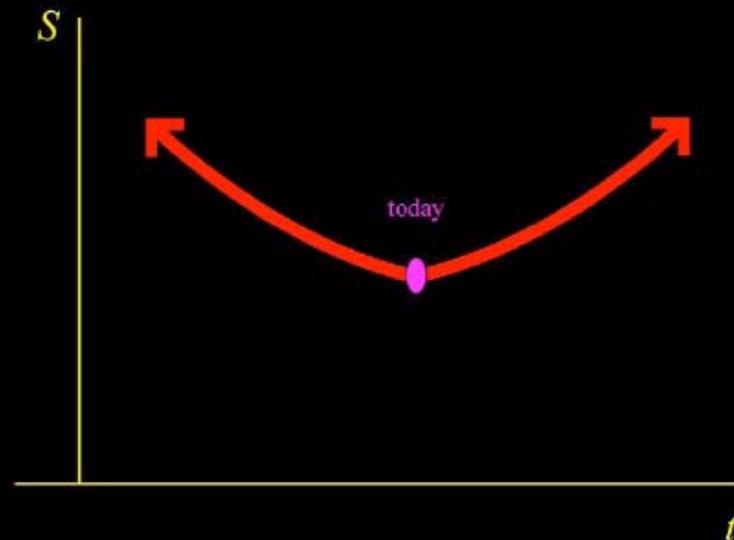
So it's no
surprise that
entropy tends to
increase; there
are many more
ways to be
high-entropy
than to be
low-entropy.

Boltzmann realized that the 2nd Law is therefore **statistical** in nature -- given a uniform distribution of microstates compatible with the observed macrostate, the entropy will **usually** increase, but it will occasionally go down.

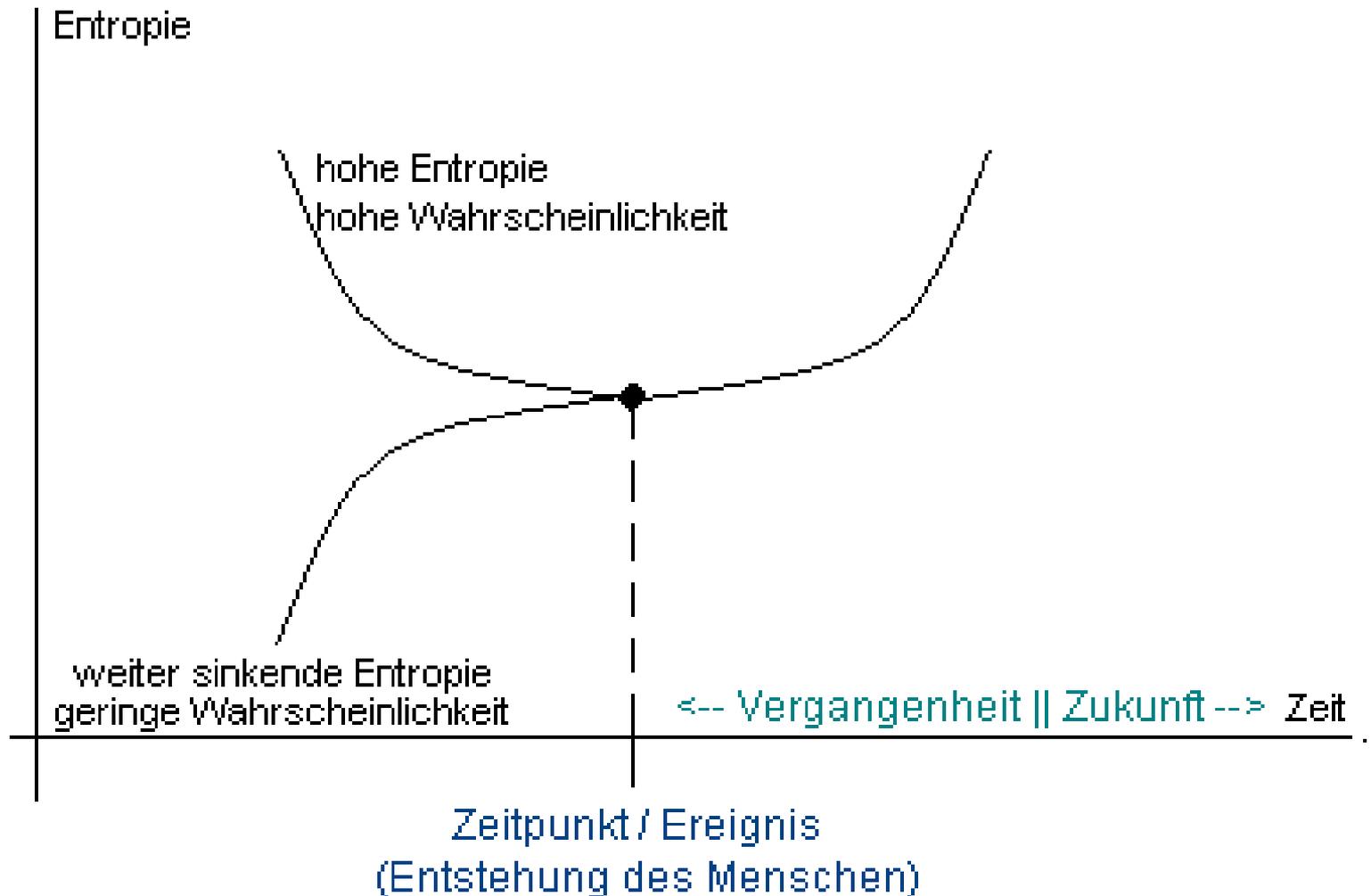


But he ran into the “**reversibility objections**” of Lohschmidt and Zermelo. How can you derive a time-asymmetric result from assumptions that are completely time-symmetric?

You can't. **Following Boltzmann's logic, you can also prove that the entropy must increase towards the past.** Really, molecular chaos implies that the entropy is a minimum.



Entropie und unser Universum



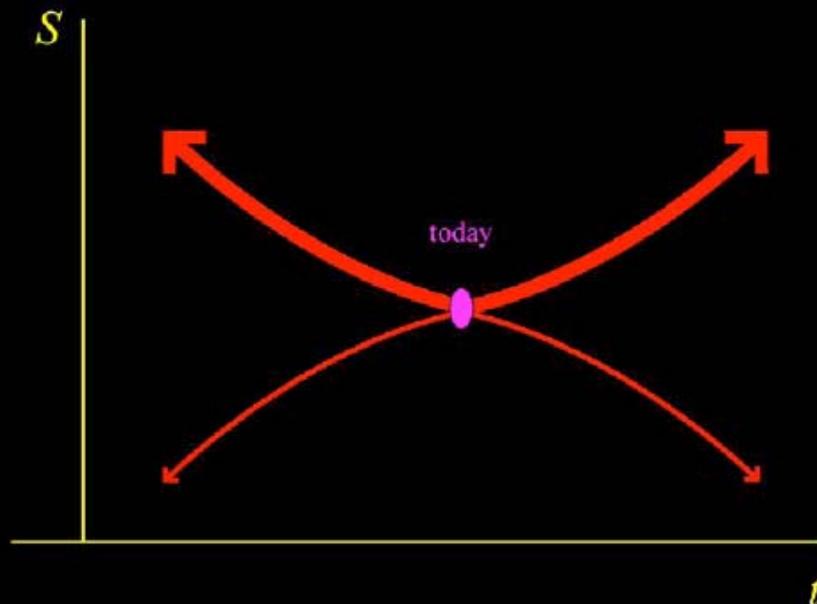
Wie hat sich die Entropie entwickelt?

- 2 Verläufe sind möglich:
 - Früher geringere Entropie
 - Früher höhere Entropie – das Universum hat eine bestimmte Entropie und nimmt ganz zufällig niederentropische Zustände an, die z.Bsp. Unser Leben begünstigen.
- 2. Möglichkeit ist günstiger – die Summe aller Punkte der oberen Kurve hat insgesamt eine höhere Wahrscheinlichkeit, da die Punkte gegenüber der zweiten unteren Kurve in höherentropischen Regionen liegen und diese wahrscheinlicher sind.
- Dann müsste aber die Urknalltheorie modifiziert werden: vor der Expansion des Universums aus einer winzigen Raumregion könnte ein anderes Universum existiert haben, was sich jedoch von dem Zustand erhöhter Entropie zu einem Zustand immer geringerer Entropie entwickelt hat, sich also zusammengezogen hat, um sich dann anschließend wieder auszudehnen.

Wie hat sich die Entropie entwickelt?

- Beschränkt man sich aber nur auf den 2. Hauptsatz der Thermodynamik, dann wäre ein sich zusammenziehendes Universum nicht möglich, da alles immer zu erhöhter Entropie strebt. Universen können sich demnach nur ausdehnen – unser Universum bestätigt das.
- Dann müßte die untere Kurve bevorzugt werden
 - Ok mit dem 2. Hauptsatz
 - Aber: aber weniger wahrscheinlich, aber möglich – Wahrscheinlichkeitsfluktuation, die niederentropische Zustände hervorrufen, inbegriffen
- Eine Zunahme der Entropie mit der Entwicklung des Universums sagt damit auch einen bestimmten Zeitpfeil voraus, der in Richtung Zukunft gerichtet ist! (sonst hätte Entropie auch in Richtung Vergangenheit zunehmen können)

Likewise, if we assume a uniform distribution over all microstates compatible with the current macrostate (complete indifference), entropy is overwhelmingly likely to be higher in the past.



In such a universe, everything we think we “remember” (or infer) about the past is almost certainly a mistake.

Dinosaur skeletons arose spontaneously out of the dirt.

In reality, **molecular chaos is essentially never true.** There are subtle correlations between the momenta of different particles -- namely, those arising from the fact that entropy was lower in the past!



If we reverse the momenta of all the water molecules, the ice cubes would gradually un-melt.

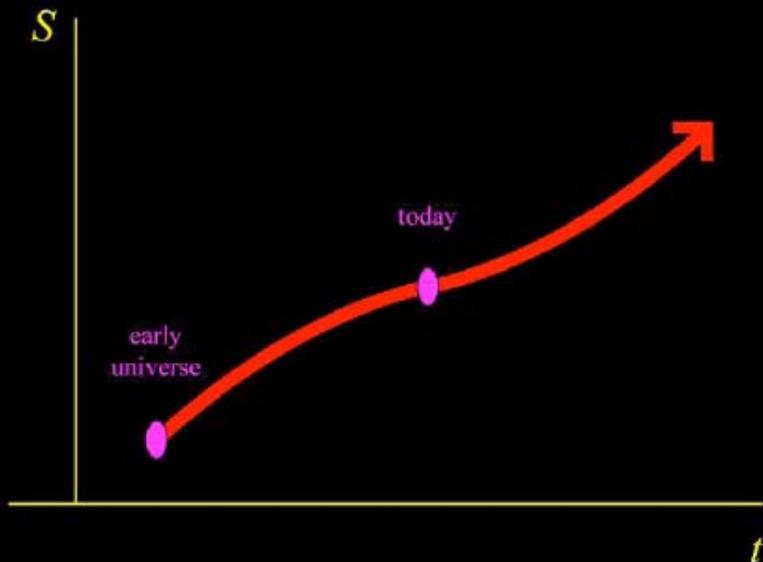
The fact that ice melts in warm water tells us something profound about the early universe.

We can only “derive” the 2nd Law from explicitly time-asymmetric assumptions.

In particular, we need to invoke the **Past Hypothesis**: the probability distribution is uniform over microstates that are consistent with both the current macrostate and some particular low-entropy initial condition.

Only then can we derive the 2nd Law and recover sensible thermodynamics.

The growth of entropy is a fundamentally cosmological fact.



- Entropie beim Urknall
- Nach allgemeiner Lehrmeinung entstand das Universum mit wenig Entropie, es war zunächst recht ordentlich. Im Laufe der Zeit wird es unordentlicher. Wieso beim Urknall eine so niedrige Entropie oder umgekehrt ein so hoch geordneter Zustand vorliegen konnte, ist ungeklärt. Dies mit einer Zufallsquantenfluktuation erklären zu wollen, ist schwierig, denn die Wahrscheinlichkeit für so einen hochgeordneten Zustand ist extrem gering

We don't know how to define the entropy of the universe. (Or in the presence of gravity generally.)

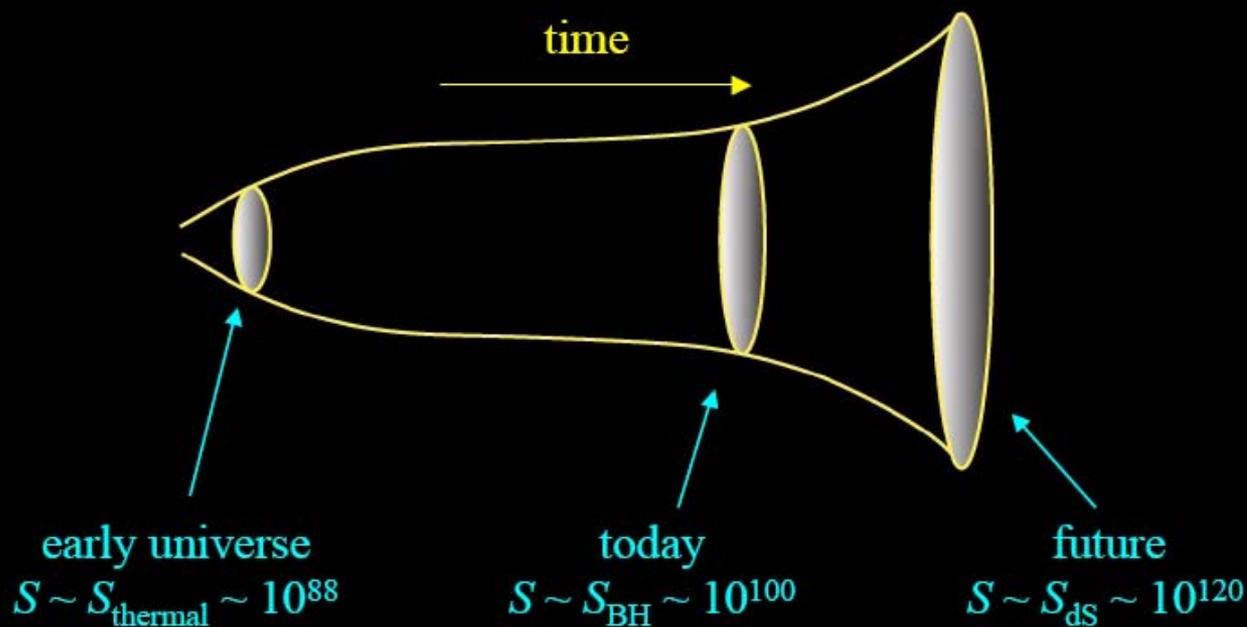
But we do understand some special cases:

Thermal gas: $S_{\text{thermal}} = \left(\frac{\rho + p}{T} \right) V \sim N$

Black holes: $S_{\text{BH}} = \frac{A}{4G} \sim 10^{90} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^6 M_{\odot}} \right)^2$

de Sitter space: $S_{\text{dS}} = \frac{A}{4G} \sim \left(\frac{L_{\text{dS}}}{M_{\text{P}}} \right)^2$

Entropy goes up as the universe expands -- the 2nd law works! Consider our comoving patch.



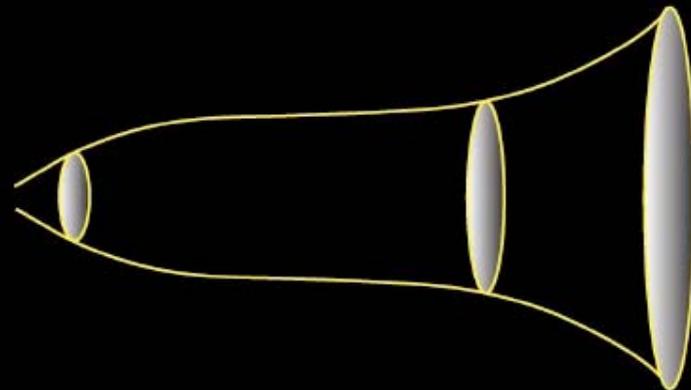
The question is, why was the initial entropy so small?
(A question Isaac Newton could never have answered.)

A better question would be: **Why is the entropy different at one end of time than the other?** We define “the past” to be the direction of lower entropy, *a posteriori*.

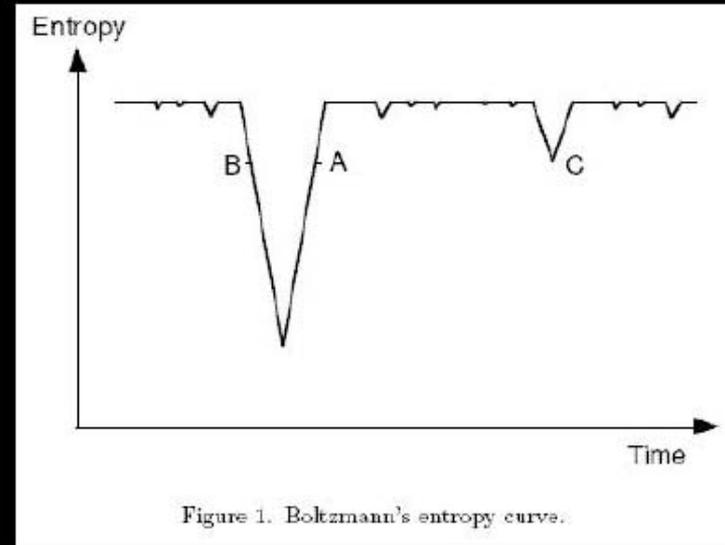
In other words: **Why aren't we in equilibrium all along?**

In yet other words: **Why are there subtle correlations in the momenta of particles in some future configuration, so that entropy decreases to the past?**

No double standards!
Conditions that would be “natural” in the past should be natural in the future, as well.



Boltzmann (and his assistant Schuetz) had an idea: in equilibrium, entropy is maximal, but it can occasionally fluctuate down. **Maybe the whole universe is just a thermal fluctuation.**

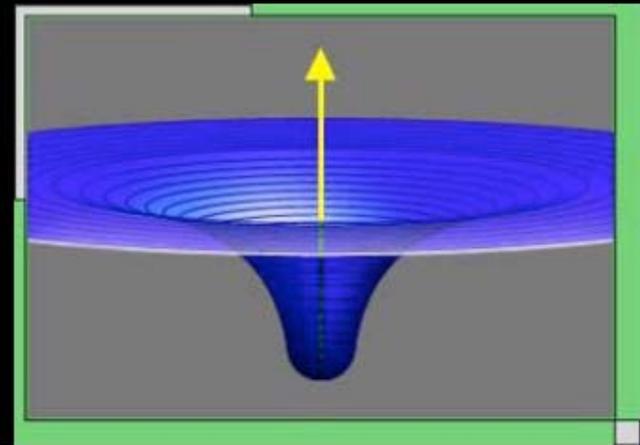


Problem: large fluctuations are exponentially unlikely. We should therefore be a minimal such fluctuation, given some anthropic conditions -- a “Boltzmann Brain.” But instead we are embedded in a profligately low-entropy universe.

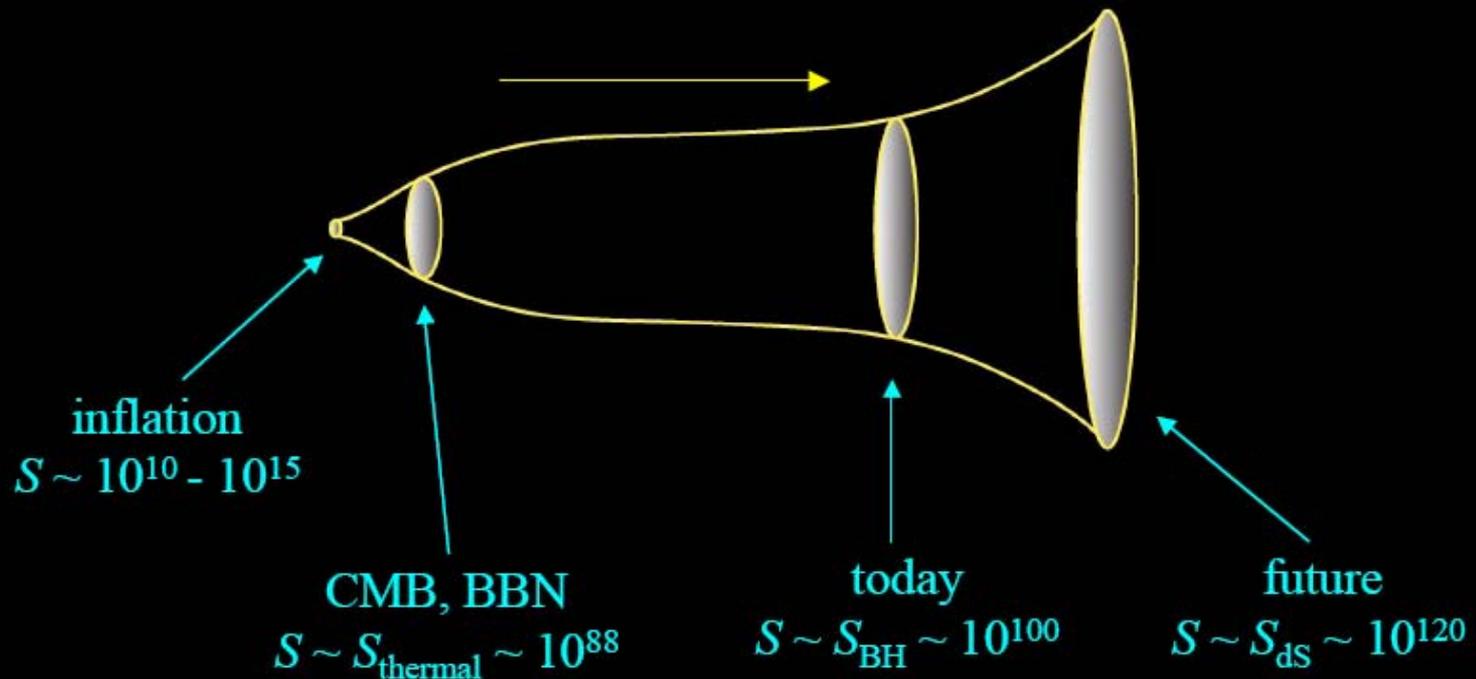
Conclusion: Our observable universe is not a fluctuation around an equilibrium configuration.

A more modern idea: **Inflation**. Purportedly explains our initial conditions in a robust, dynamical way. But it's not true. (Penrose.)

We tell the following fairy tale. The early universe was a chaotic, randomly-fluctuating place. But eventually some tiny patch of space came to be dominated by the potential energy of some scalar field. That led to a period of accelerated expansion that smoothed out any perturbations, eventually reheating into the observed Big Bang. **The point is: finding such a potential-dominated patch can't be that hard, so our universe is utterly natural.**



But a “randomly fluctuating” system is most likely to be in a high-entropy configuration. And the entropy of the proto-inflationary patch is extremely low!



The universe is less likely to inflate than just to look like what we see today. Inflation makes the problem worse.

This is counter-intuitive because we usually think about ice cubes, not the universe. In cosmology, quantities like volume, energy, and particle number are not held fixed.

Consider a toy battleship vs. a real (higher-entropy) ship.

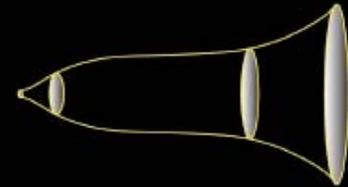
These are not the same degrees of freedom; not two different configurations of the same physical system. One cannot evolve into the other.



But the early universe and the late universe are two configurations of the same system!

We're left with three possibilities.

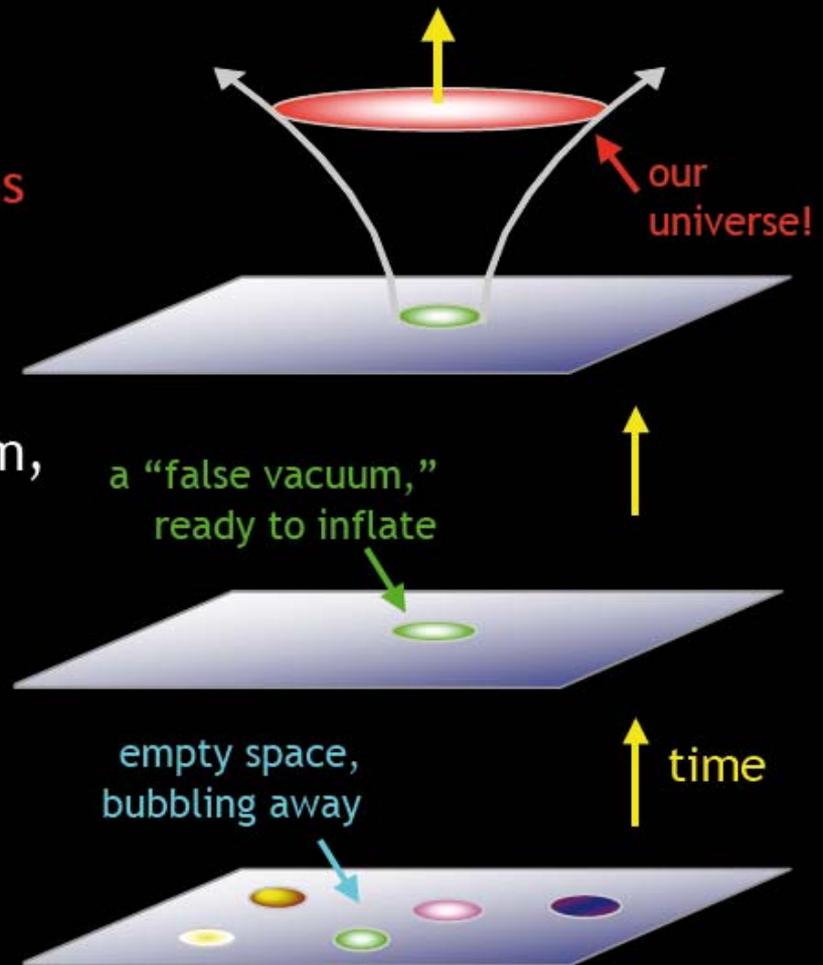
- The fundamental laws of physics are non-unitary in a profound way.
- There is no explanation; the initial conditions are what they are, we should accept them and move on. (No need to think about inflation.)
- Our observable universe is not the whole story. We are part of a bigger multiverse, in which:
 - There is no maximal-entropy equilibrium state.
 - Time reversal symmetry is spontaneously broken.
 - Entropy is produced via creation of universes like our own.



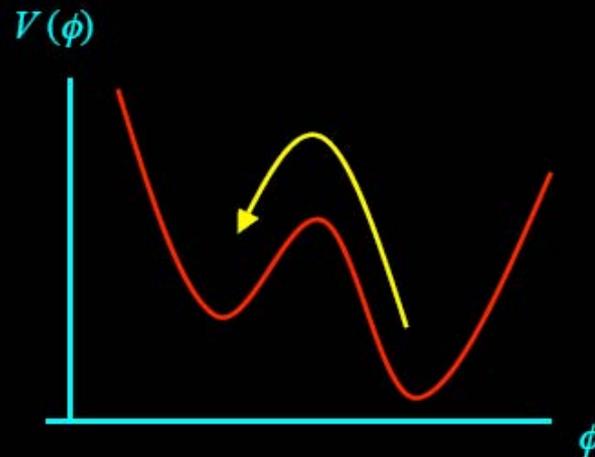
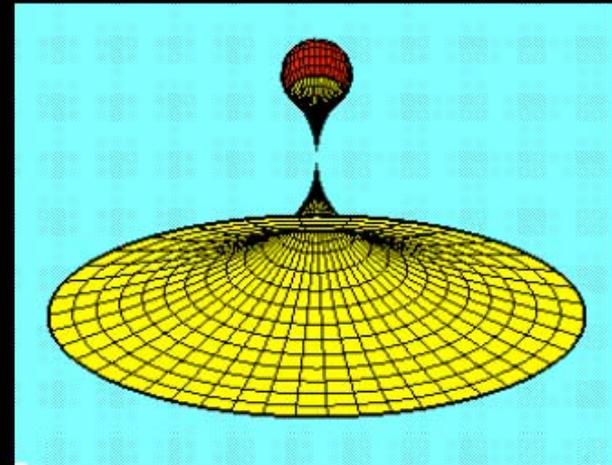
It's conceivable that such fluctuations occasionally assemble the right conditions to make a baby universe.

Need to make a small high-energy patch of false vacuum, sufficient to start **inflation**.

From the inside, we get an expanding false-vacuum bubble, which eventually reheats into something like what we observe as our Big Bang.



From the outside, we get a tiny black hole that ultimately evaporates away. The baby universe pinches off, and is inaccessible from the outside.

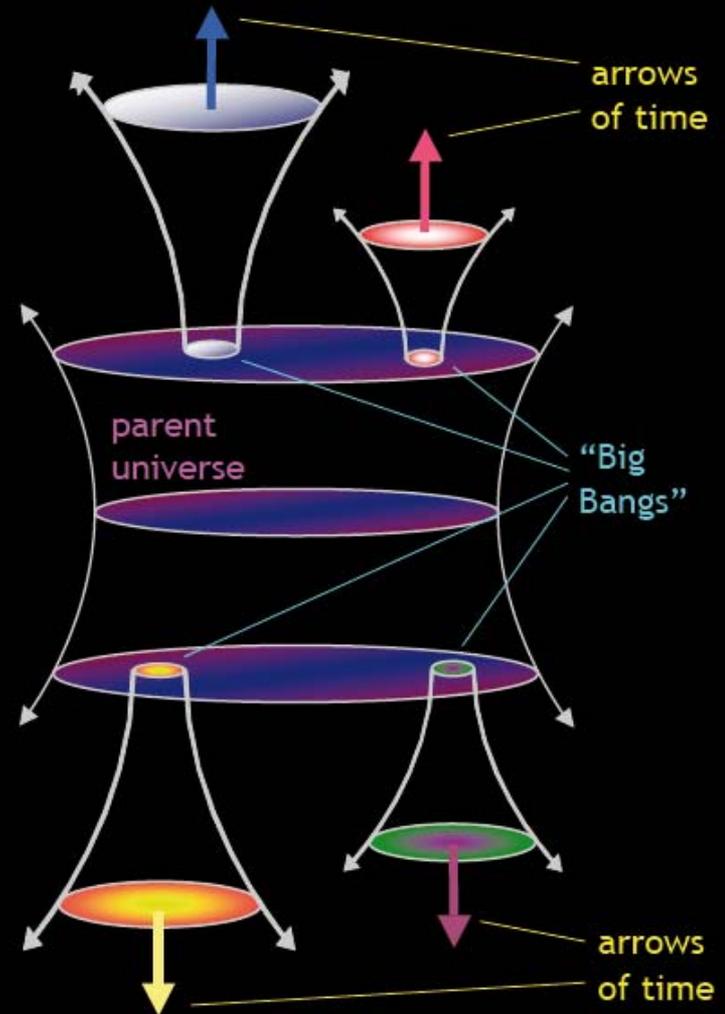


We need to understand **inverse vacuum decay**, with tunneling to a wormhole configuration. Not completely under control!

This story can be told many times, going both forward and backward in time.

Baby universes created perpetually into the future, and also in the deep past with a reversed arrow of time.

So perhaps our observable universe is just a tiny part of a much larger ensemble that is **overall time-symmetric**.

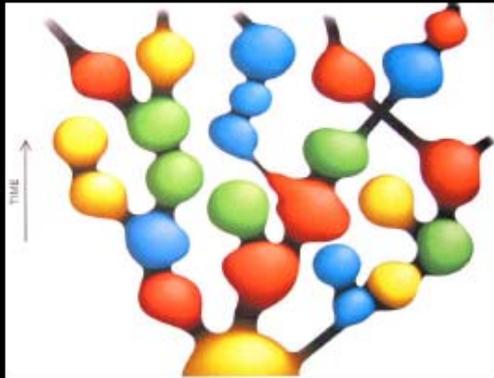


Recapping the possibilities:

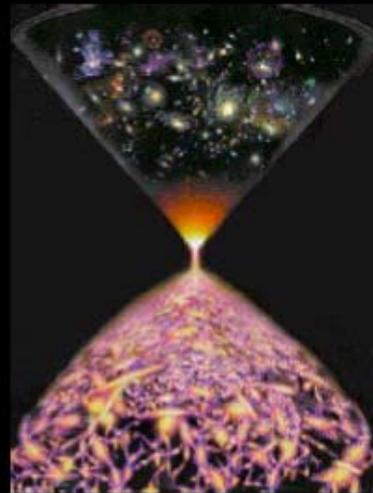
- If the universe has a past boundary (as in the conventional Big Bang), conditions there are finely tuned for reasons that remain utterly mysterious.
- If the universe is eternal and has an equilibrium state, we should be in that state. But we're not.
- If the universe lasts forever but has no equilibrium state, we naturally obtain an arrow of time.

It's crucial that the way in which the multiverse creates more entropy is to make universes like ours.

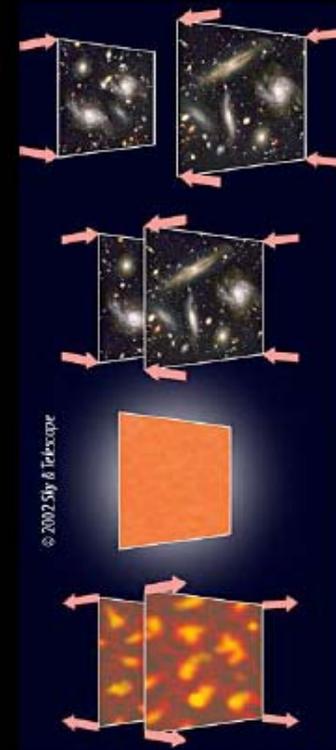
Compare to other “eternal” scenarios:



eternal inflation



pre-Big-Bang



cyclic universe

Each involves monotonic evolution of entropy for all time, and an incredible fine-tuning of the precise state of the universe on any generic slice. We could do better.

Entropie und unser Universum

- Entropie ist ein Maß für die Unordnung eines Systems. Und Unordnung ist viel wahrscheinlicher als Ordnung. Die Entropie kann im Durchschnitt nur zunehmen. Die Ausbildung von komplexen Strukturen, also Ordnung, ist zwar möglich, aber nur auf Kosten einer größeren Unordnung in der Umgebung.
- Der Zweite Hauptsatz markiert also eine Richtung der Zeit – oder der Entwicklungen in der Zeit, was nicht dasselbe sein muss. Doch er ist nicht die Lösung, sondern das Zentrum des Problems. Denn alle bekannten fundamentalen Naturgesetze enthalten keine bevorzugte Zeitrichtung: Sie unterscheiden nicht prinzipiell zwischen Zukunft und Vergangenheit: Zeitumkehr-Invarianz. Jeder Prozess könnte auch umgekehrt ablaufen. Sie tun dies nicht, weil es sehr unwahrscheinlich ist.

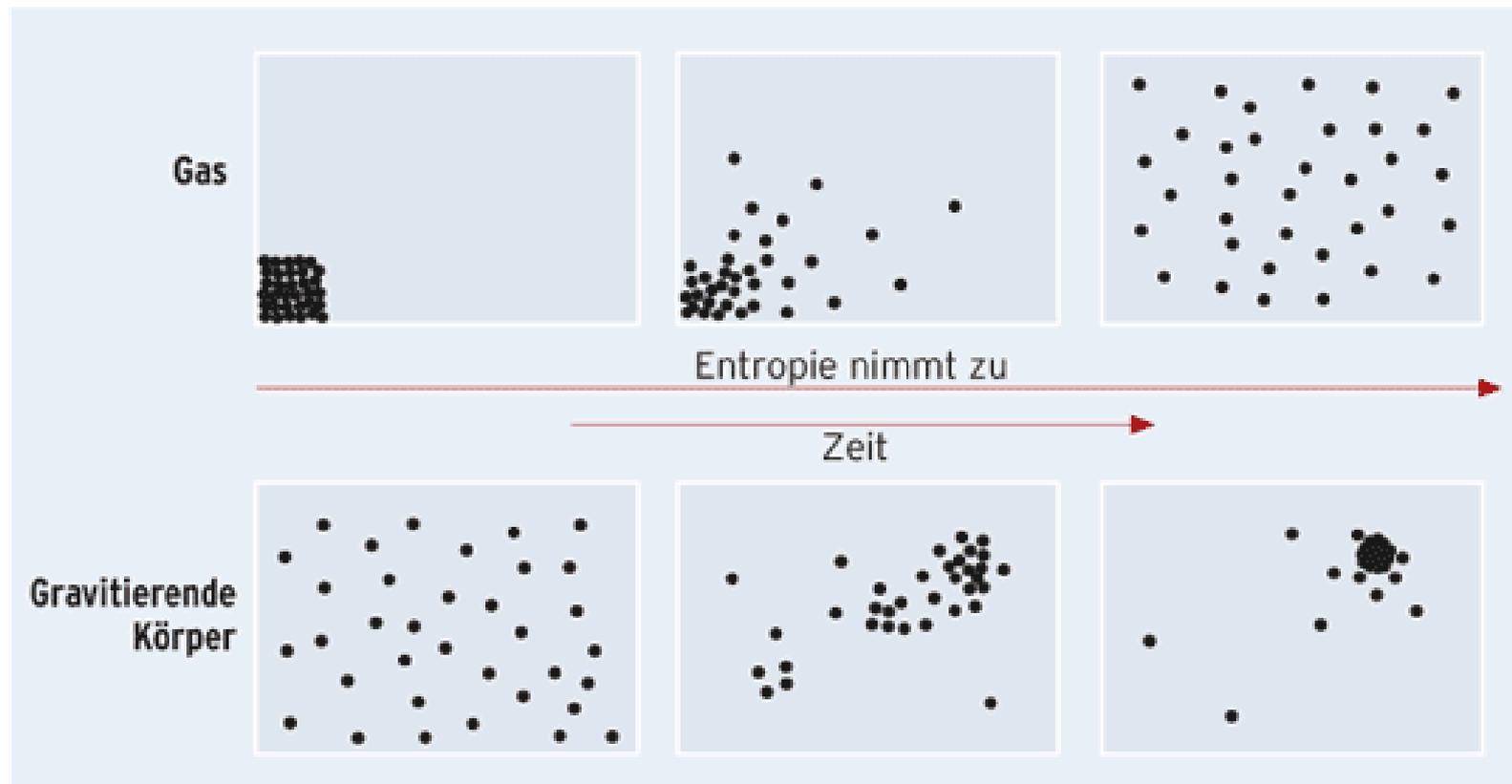
Entropie und unser Universum

- Dass die Prozesse nicht rückwärts ablaufen (Die Moleküle der Milch könnten sich im Kaffee wieder zu einem Tropfen zusammenballen), liegt nicht an den Gesetzen, sondern an den Rand- bzw. Anfangsbedingungen. Genau das ist das Welträtsel.
- Robert Wald: „**Warum existiert der thermodynamische Zeitpfeil? Weil die gegenwärtige Entropie so gering ist! Und warum ist sie so gering? Weil sie früher noch geringer war!**“
- So elegant wie unzureichend – verschiebt das Problem an den Anfang des Universums.
- Aus den winzigen Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (ein Hunderttausendstel Grad) schließen die Kosmologen, daß die Materie damals außergewöhnlich gleichförmig verteilt und mit der Strahlung im thermischen Gleichgewicht war.

Entropie und unser Universum

- Paradox? Ein solches Gleichgewicht wird eigentlich für das Maximum der Entropie gehalten Aber: der homogene Feuerball des frühen Universums besitzt keine hohe, sondern eine sehr niedrige Entropie! Denn die Schwerkraft darf nicht vernachlässigt werden. Sie hat die gegenläufige Tendenz: Verklumpung, nicht Homogenisierung

Gravitierende Körper



Gravitation ist anders Nur Teilchen, deren gegenseitige Schwereanziehung vernachlässigbar ist, treibt der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik in eine homogene Verteilung. Gravitierende Körper tendieren langfristig zum Verklumpen - und verschwinden am Ende aller Tage zumeist in einem Schwarzen Loch.

Entropie und unser Universum

- Auf **großräumigen Skalen zeigt Homogenität** also nicht eine große, sondern **sehr niedrige Entropie** an, weil der Entropie-Anteil der Gravitation so gering ist. **Die stärksten Konzentrationen der Schwerkraft, die Schwarzen Löcher, sind auch die größten Entropie-Ansammlungen.**
- **Der Gravitationskollaps führt zur höchstmöglichen Unordnung.**
- Homogenität der Kosmischen Hintergrundstrahlung zeigt, daß Schwarze Löcher im frühen Universum **nicht** dominiert haben – und das ist bis heute so geblieben.
- Daher erscheint die einstige extreme Gleichförmigkeit der Materieverteilung unseres Universums wie ein Wunder. R. Penrose: **im Vergleich zu allen möglichen Konfigurationen von Materie und Energie ist der tatsächliche Zustand des Alls extrem unwahrscheinlich. 1:10 hoch 10 hoch 123 (ein Heftstapel, dessen Volumen sehr viel größer als das Volumen unseres beobachtbaren Universums wäre)**

Entropie und unser Universum

- Ein Universum voll von Schwarzen Löchern ist sehr viel wahrscheinlicher als unseres.
- Wir existieren in einer lebensfreundlichen Welt voller Ordnung, im thermodynamischen Sinn, weil der Urknall extrem „ordentlich“ war. Genau deshalb läuft das Universum wie ein „Uhrwerk“ ab – mit einer eindeutigen Zeitrichtung.
- Aber was hat das Uhrwerk unseres Universums aufgezogen? Zufall? Naturgesetzliche Notwendigkeit? Grandioser Plan?
- Was verursachte die geringe Entropie des frühen Universums?????

Entropie und unser Universum

- L. Smolin: sich entwickelnde Gesetze. Die Zeit ist real!
- P. Davies: „Flexilaws“ anstelle der ehernen Naturgesetze
- M. Tegmark: hält fest am „platonischen Status“ der Naturgesetze. Existenz aller möglichen Universen: „Einige von ihnen besitzen Zeit, andere nicht. Aber sie sind nicht in der Zeit. Die Zeit existiert in ihnen, nicht umgekehrt.“ „Warum ist die Entropie so niedrig? Weil wir in einem Multiversum leben.“ Die Zeit läuft vorwärts und die Entropie ist niedrig, weil wir in einem Universum, in dem das nicht so wäre, schlicht nicht existieren könnten. (Schwach anthropisches Prinzip)

Entropie und unser Universum

- Weiteres Problem: Wenn unser beobachtbares Universum bloß zufällig entstandene Insel der Ordnung in einem viel größeren Ozean des Chaos wäre – eine statistische Fluktuation, wie Boltzmann bereits 1895 überlegt hatte – warum ist diese Fluktuation so langlebig?
- Es wäre wahrscheinlicher, daß die spontane Fluktuation erst letzten Donnerstag oder vielleicht sogar vor nur 10 Sekunden zustande kam – mit all den Pseudospuren einer vermeintlichen Vergangenheit: die Erinnerungen an vergangene Steuererklärungen, die Fossilien von Dinosauriern, die Meteoriten aus der Frühzeit des Sonnensystems und die Kosmische Hintergrundstrahlung vom Urknall selbst.
- Ein solches Schwindel-Universum sollte sich sehr, sehr viel häufiger zufällig bilden als ein hochstrukturiertes, geordnetes Weltall von mindestens 100 Milliarden Lichtjahren Durchmesser (1939: Carl Friedrich von Weizsäcker)

Entropie und unser Universum

- Wenn der Fluss der Zeit kein Zufall ist, dann muss er einer Quelle entspringen. Um die Richtung der Zeit zu verstehen, müssen die Physiker den Ursprung der Zeit ergründen.
- Das Universum könnte vieles aus seiner Vergangenheit „vergessen“ haben – durch die kosmische Inflation. Reicht aber nicht aus!
- Erneute Verschiebung des Problems
- Selektionsmechanismus, der nur solche Universen wachsen und gedeihen lässt, die eine niedrige Entropie besitzen? Voraussetzung ist die Existenz vieler physikalischer Möglichkeiten – die Landschaft der Stringtheorie?
- 10^{500} Lösungen – jeder Lösung könnte ein Universum entsprechen?
- Kampf zwischen Eigenschaften der Materie und der Schwerkraft?



Es geht weiter im April ...

Am 16. April !!

Gleicher Ort, gleiche Zeit,
neue Themen