

---

## Wie viel Information enthält das Universum?

---

Judith Gnade  
**17. Dezember 2020**

arXiv:quant-ph/9603008v1 7 Mar 1996

*Foundations of Physics Letters*, Vol. 9, No. 1, 1996, pages 25-42

**DOES THE UNIVERSE IN FACT CONTAIN  
ALMOST NO INFORMATION?**

Max Tegmark

Max-Planck-Institut für Physik  
Föhringer Ring 6  
D-80805 München, Germany  
max@mpgmu.mpg.de

Received June 2, 1995; revised November 10, 1995

At first sight, an accurate description of the state of the universe appears to require a mind-bogglingly large and perhaps even infinite amount of information, even if we restrict our attention to a small subsystem such as a rabbit. In this paper, it is suggested that most of this information is merely apparent, as seen from our subjective viewpoints, and that the algorithmic information content of the universe as a whole is close to zero. It is argued that if the Schrödinger equation is universally valid, then decoherence together with the standard chaotic behavior of certain non-linear systems will make the universe appear extremely complex to any self-aware subjects that happen to inhabit it now, even if it was in a quite simple state shortly after the big bang. For instance, gravitational instability would amplify the microscopic primordial density fluctuations that are required by the Heisenberg uncertainty principle into quite macroscopic inhomogeneities, forcing the current manifestation of the universe to contain such Byzantine superpositions as our planet being in many macroscopically different places at once. Since decoherence bars us from experiencing more than one macroscopic reality, we would see seemingly complex constellations of stars etc., even if the initial wavefunction of the universe was perfectly homogeneous and isotropic.

Key words: complexity, chaos, symmetry-breaking, decoherence.

Online at <http://www.spcgarching.mpg.de/~max/tebids.html> (hosted from Europe)  
and at <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/tebids.html> (hosted from the US).



<sup>0</sup> (M. Tegmark, *Does The Universe In Fact Contain Almost No Information?*, *Foundations of Physical Letters* 9:1 [1996] 25)

## Inhaltsverzeichnis

- 1) Einleitung
- 2) Algorithmischer Informationsgehalt
- 3) Chaos und Symmetrie
- 4) Universelle Quantenmechanik
- 5) Dekohärenz
- 6) Entropie
- 7) Fazit

## Wie viel Information braucht man, um den Zustand des Universums zu beschreiben?

### Intuitiv:

- extrem viel Wissen nötig
- nahezu unendlich viele Informationen nötig
- allein ein einzelnes Element (Baum, Katze, ...) scheint unmöglich genauestens beschreibbar zu sein
- Universum scheint unheimlich komplex
- Bsp.: Niagarafälle



1

<sup>1</sup>Niaagara Falls, 2018, URL: <http://www.ruhrhopper.de/Reisebilder/inhalt/niagarafalls.htm>.

## Wie viel Information braucht man, um den Zustand des Universums zu beschreiben?

### Tatsächlich:

- algorithmischer Informationsgehalt (IG) könnte nahezu 0 sein
- Komplexität des Universum könnte höchst subjektive Annahme sein

## Der algorithmische Informationsgehalt

### Algorithmischer IG eines Bit-Strings $s$ :

- Länge (in Bits) des kürzesten Programms eines universellen Computers, der den String  $s$  als Output generiert

### Beispiel:

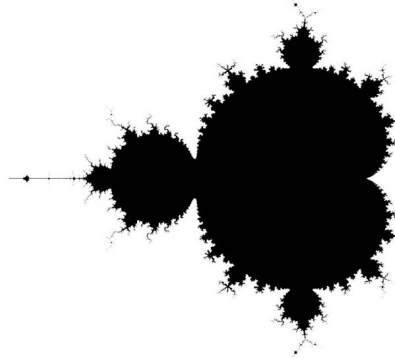
- String aus  $10^9$  zufälligen Bits:  $IG = 10^9$
- String aus  $10^9$  Nullen:  $IG \ll 10^9$

## Der algorithmische Informationsgehalt

### Algorithmischer IG einer Wellenfunktion $\Psi$ :

- Länge (in Bits) des kürzesten Programms eines universellen Computers, das  $\Psi$  zu einer bestimmten, vorgeschriebenen Genauigkeit  $\epsilon$  auswertet

## Beispiel: Mandelbrot-Menge



2

<sup>2</sup>Springer Verlag GmbH Deutschland, *Lexikon der Mathematik: Mandelbrot-Menge*, 2017, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/mathematik/mandelbrot-menge/6155>.



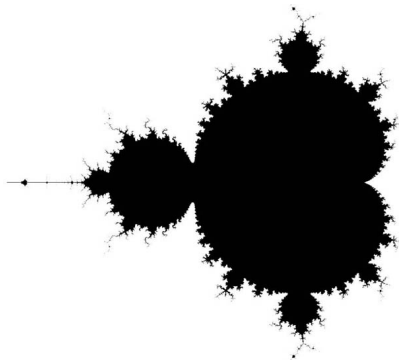
## Beispiel: Mandelbrot-Menge

- skalaras Feld in komplexer Ebene
- je nach Wert einer komplexen Zahl: Pixel schwarz oder weiß
- Zuordnungsvorschrift für eine komplexe Zahl  $c$ :

$$z_{n+1} = z_n^2 + c \text{ mit } z_0 = 0$$

- $c$  ist Teil der Mandelbrot-Menge, wenn Reihe nicht divergiert
- komplexes Bild, aber einfache Zuordnungsvorschrift

⇒ Der algorithmische IG des Bildes ist tatsächlich sehr gering!

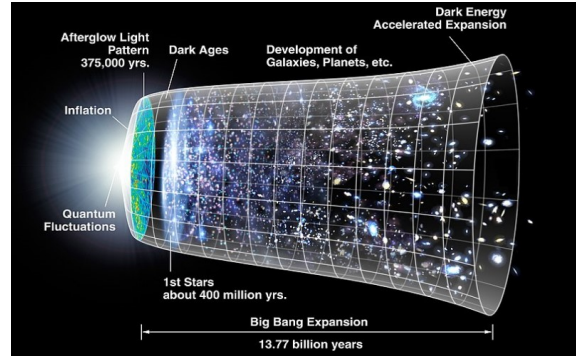


3

<sup>3</sup> (Springer Verlag GmbH Deutschland, Lexikon der Mathematik: Mandelbrot-Menge, 2017, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/mathematik/mandelbrot-menge/6155>)

## Der Anfangszustand im Universum

- $\delta(\vec{r})$ : Feld zufälliger Dichtefluktuationen
- vakuumähnlicher Zustand
- Vakuum: homogen und isotrop
- Universum mit hoher Symmetrie
- endlicher algorithmischer IG



4

<sup>4</sup> (Need For Science, Vacuum energy – special case of zero-point energy, 2020, URL: <https://www.needforscience.com/physics/vacuum-energy-special-case-of-zero-point-energy/>)

## Chaos

- Beispiel: gravitative Instabilität
- beschreibe Anfangszustand durch  $\Psi$
- darin beschreibe  $\delta(\vec{r})$  das Feld der Dichtefluktuationen
- Unsicherheitsprinzip: Ausbreitung der Impulskomponenten von  $\delta(\vec{r})$

$$\Delta\chi\Delta\rho \geq \frac{\hbar}{2}$$

## Chaos

- $\Psi$  befindet sich nun in Superposition aufgrund verschiedener  $\delta(\vec{r})$
- $\delta(\vec{r})$  verändern sich aufgrund der nicht-linearen Dynamik der gravitativen Kräfte
- chaotisches Verhalten
- leichte Unterschiede in den Anfangsbedingungen führen zu sehr unterschiedlichen Endzuständen

## Symmetriebruch

- anfänglich nahezu symmetrische Verteilung der Masse in den Feldern "verklumpt"
- $\Psi$ : Superposition aus den verklumpten Zuständen
- Symmetriebrechung in jedem Element von  $\Psi$
- $\Psi_{\text{selbst}}$  behält Symmetrie

## Symmetriebruch

- $\Psi$  im Anfangszustand translationsinvariant?

⇒ dann auch  $\Psi$  im heutigen Zustand translationsinvariant

- Wo kommt dann die Verklumpung der Gravitation her?

⇒ komplizierte, langreichweitige Korrelationen, die im Anfangszustand noch nicht existierten

⇒ versteckte Komplexität in den einzelnen, über die Zeit entwickelten Elementen von  $\Psi$

⇒ Symmetrie von  $\Psi$  insgesamt wird aber beibehalten

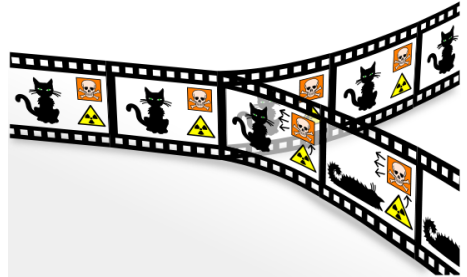
## Universell gültige Quantenmechanik

### Die "no collapse"-Interpretation:

- scheinbar zufällige Messergebnisse in der QM
- Kollabiert die Wellenfunktion?
- Kollaps kann nicht durch Schrödingergl. beschrieben werden
- Everett: kein kollabieren von  $\Psi$

⇒ "Viele-Welten-Interpretation"

⇒ dann Schrödingergl. universell gültig



5

<sup>5</sup> (Christian Schirm,)

## Universell gültige Quantenmechanik

### Subjektiv:

- sich bewusstes Subset von  $\Psi$  erfährt Anstieg von Komplexität
  - Beobachter sieht nur einen bestimmten Ausgang des Experiments
- ⇒ algorithmische Information scheint anzusteigen

### Objektiv:

- betrachte Wellenfunktion  $\Psi$  "von außen"
  - kein bestimmter Ausgang des Experiments, alle Möglichkeiten werden realisiert
- ⇒ algorithmische Information von  $\Psi$  bleibt konstant



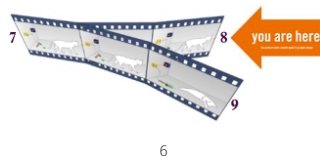
## Warum eine universell gültige Quantenmechanik?

- Was, wenn Wellenfunktionen tatsächlich kollabieren?

⇒ vorangegangene Diskussion wäre hinfällig

- Kollabieren der Wellenfunktion liefert rein zufälliges Ereignis
- Kausalität wäre nicht mehr gegeben
- zufällige Ereignisse erhöhen den algorithmischen IG

⇒ algorithmische Information von  $\Psi$  würde ansteigen



<sup>8</sup> (Alternate Paths of History, 2011, URL: <http://vannevar.blogspot.com/2011/09/alternate-paths-of-history.html>)

## Dekohärenz

- QM, mikroskopisch: Superpositionen
  - klassisch, makroskopisch: genaue Lokalisierung von Gegenständen
- ⇒ im Alltag keine Katzen, die gleichzeitig tot und lebendig sind

### Erklärung:

- makroskopische Objekte wechselwirken unausweichlich mit Umgebung
  - feste Phasenbeziehung zwischen den beteiligten Einzelzuständen wird zerstört (Dekohärenz)
- ⇒ klassische Welt ist räumlich sehr genau definiert

## Dekohärenz

### Konsequenz:

- bspw. nicht-lineare gravitative Evolution verwandelt translationsinvarianten Anfangszustand  $\Psi$ 
  - ⇒ wird zu Zustand, in dem sich makroskopische Objekte (Planeten, Sterne... ) an vielen verschiedenen Orten in Superposition befinden
  - ⇒ Objekte sind nur in den einzelnen Elementen von  $\Psi$  lokalisiert

### Zusätzlich:

- nicht nur gravitative Evolution im Universum
  - ⇒ schwache/starke WW, em-WW...
  - ⇒ sehr viele nicht-lineare Zeitentwicklungen
  - ⇒ Realität erscheint unglaublich komplex

## Informationsgehalt und Entropie

- Entropie  $\leftrightarrow$  Information ("Shannon-Entropie")
- beschreibe wahrgenommene Komplexität durch "Tiefe"
  - $\Rightarrow$  Unterschied zwischen grob- und feinkörniger Entropie
- feinkörnige Entropie: konstant
- grobkörnige Entropie: wird erhöht durch nicht-lineare Dynamik und scheinbare Symmetriebrüche
- Tiefe bzw. scheinbare Komplexität erhöht sich
  - $\Rightarrow$  grobkörnige Entropie eines jeden offenen Systems wird entsprechend dem 2. HS erhöht

## Fazit

- Realität könnte tatsächlich sehr simpel sein
- keine neue Physik vonnöten
- Diskrepanz zwischen scheinbarem und tatsächlichem IG
- Zusammenspiel bekannter Effekte:
  - ⇒ nicht-lineare Dynamik
  - ⇒ Dekohärenzeffekte
  - ⇒ gesamtes  $\Psi$  besteht aus Superpositionen (wenig IG)
  - ⇒ einzelne Elemente von  $\Psi$  sehr komplex (viel IG)

## Wie viel Information braucht man nun, um den Zustand des Universums zu beschreiben?

"Das Ensemble aller Zweige der aktuellen Makrosuperposition [des Universums] ist einfach zu beschreiben, aber ein einzelnes Element aus diesem Ensemble zu beschreiben, (...) erfordert eine enorme Menge an Informationen."<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup>M. Tegmark, *Does The Universe In Fact Contain Almost No Information?*, *Foundations of Physical Letters* **9.1** (1996) 25.

## Was bedeutet das?

### Einserseits:

- Realität sehr viel banaler als es scheint
- komplexe Strukturen (Bäume, Katzen, Parkscheine...) nichts als Illusion
- höchst eingeschränkte Sicht auf unser Universum



## Was bedeutet das?

### Andererseits:

- gute Aussichten für die Wissenschaft
- kein Verzweifeln angesichts schier unendlich komplexer Strukturen
- Hoffnung, das Universum eines Tages zu verstehen
- unsere komplexe Realität bleibt uns dennoch erhalten

*"No amount of philosophizing will make those parking tickets go away."*<sup>8</sup>



<sup>8</sup>M. Tegmark, *Does The Universe In Fact Contain Almost No Information?*, *Foundations of Physical Letters* **9.1** (1996) 25.