

Welche Rolle spielen Higgs-Teilchen im frühen Universum?

Mikko Laine

(ITP, Universität Bern)

Was ist das Higgs-Teilchen?¹

Masse: $m_{\text{Higgs}} = 2.18 \times 10^{-25} \text{ kg} = 1.03 m_{\text{Xenon}}$.

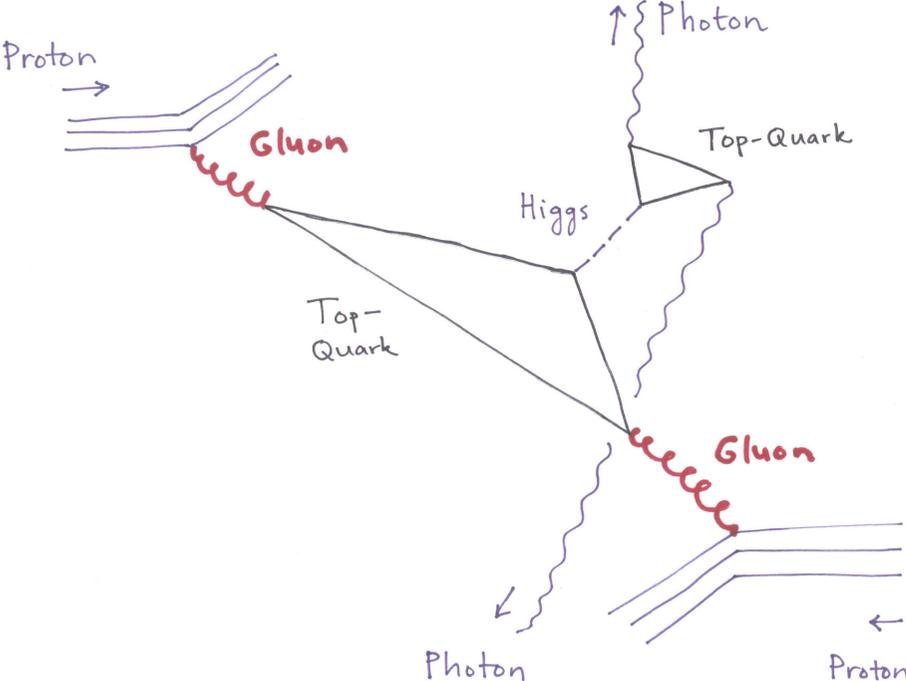
Elektrische Ladung: $Q_{\text{Higgs}} = Q_{\text{Xenon}} = 0$.

Radius: $r_{\text{Higgs}} \approx 10^{-17} \text{ m}$, $r_{\text{Xenon}} \approx 2 \times 10^{-10} \text{ m}$.

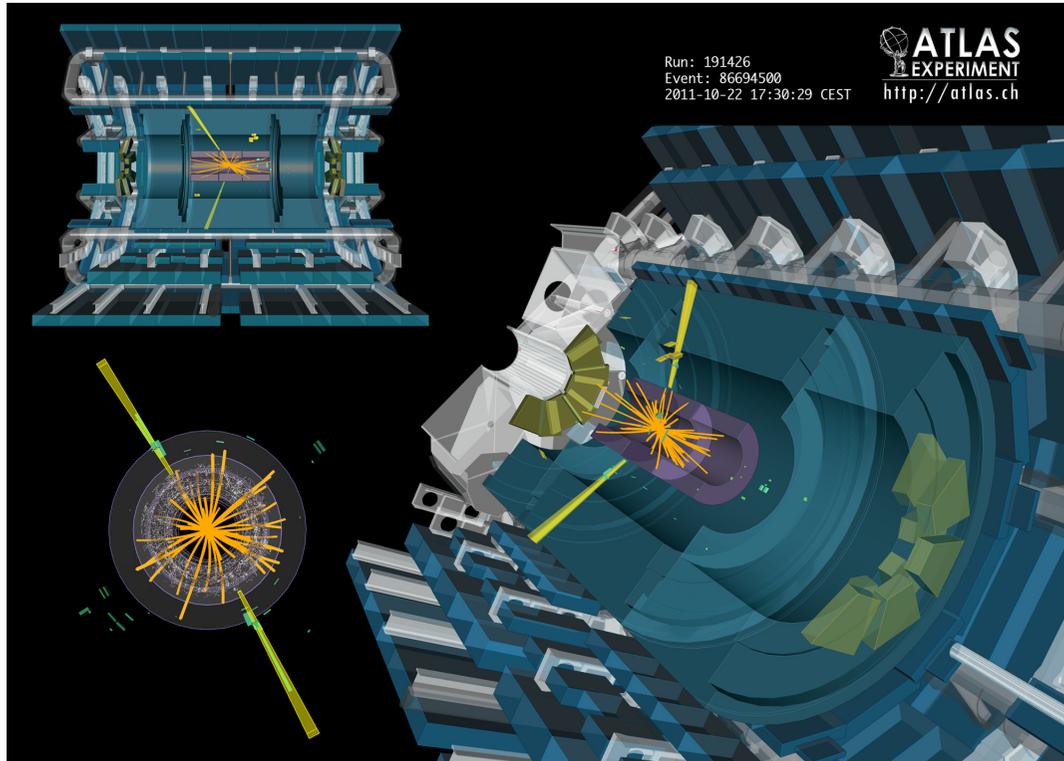
Lebensdauer: $\tau_{\text{Higgs}} \approx 10^{-22} \text{ s}$, $\tau_{\text{Xenon}} > 10^{35} \text{ s}$.

¹Vorgeschlagen 1964 — entdeckt 2012.

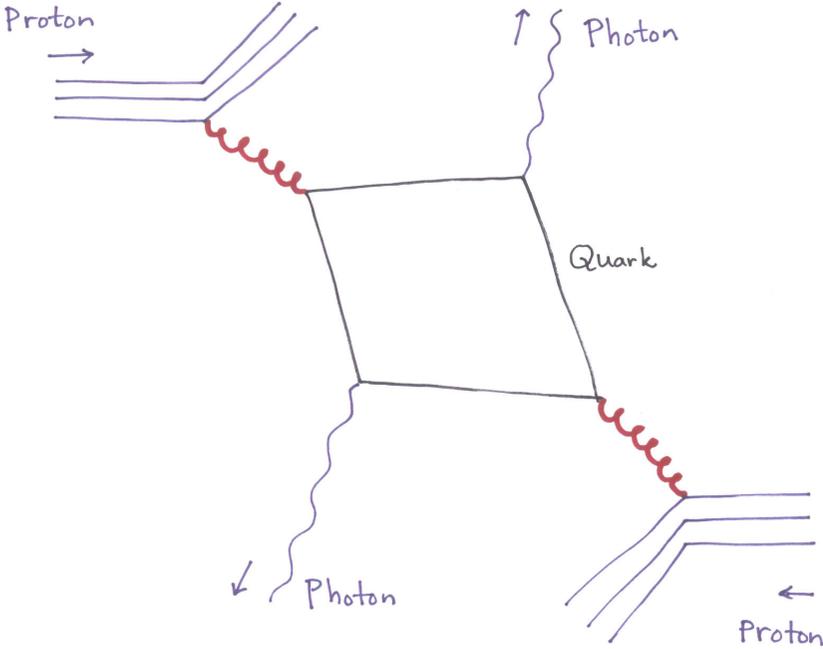
In der Praxis:



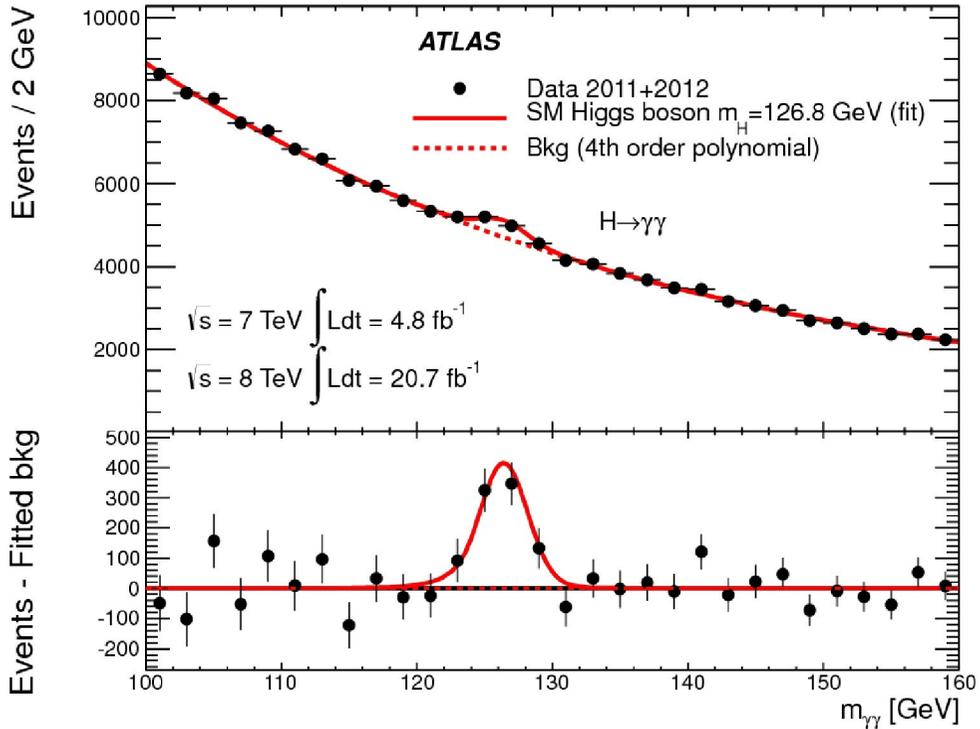
In LHC-Experimenten wird etwas Ähnliches gesehen.



Es gibt aber auch andere mögliche Prozesse.



Für eine wissenschaftliche Beurteilung:



Was ist das Higgs-Feld?

A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, *Annalen der Physik* 17 (1905) 132 [⇒ Nobel 1921].

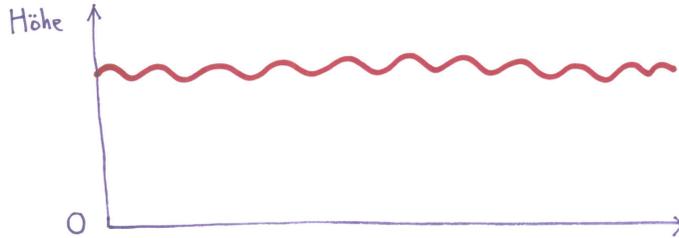
⇒ Elektromagnetische Wellen sind auch Teilchen.

L. de Broglie, *Ondes et quanta*, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 177 (1923) 507 [⇒ Nobel 1929].

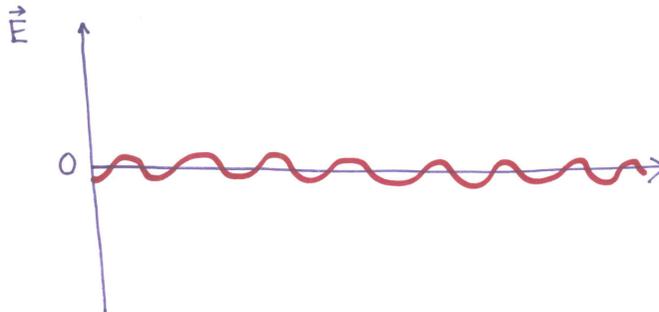
⇒ Teilchen sind auch Wellen.

Wellen in Alltagserfahrung

Auf Thuner
See:

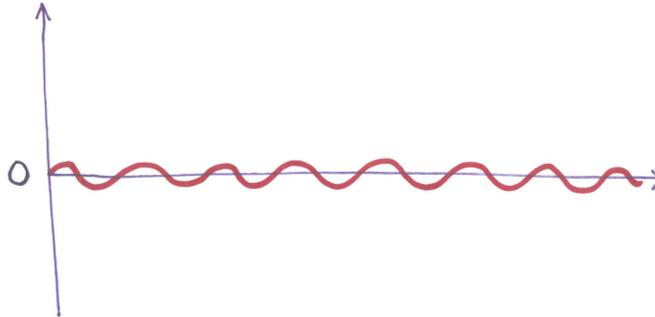


Beim
Handy:

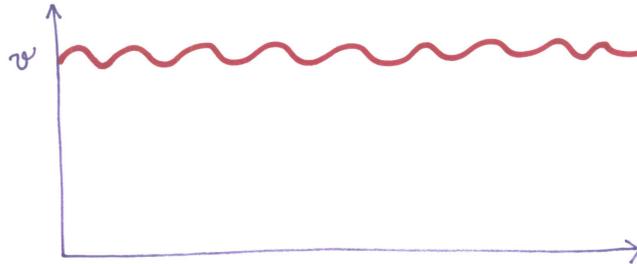


Wellen in der Teilchenphysik

Normal im
Standardmodell:



Beim
Higgs-Teilchen:



Was passiert im frühen Universum?

Aus der allgemeinen Relativitätstheorie:

$$t = \frac{0.301}{\sqrt{g_*}} \frac{m_{\text{Pl}}}{T^2} .$$

t = Alter des Universums

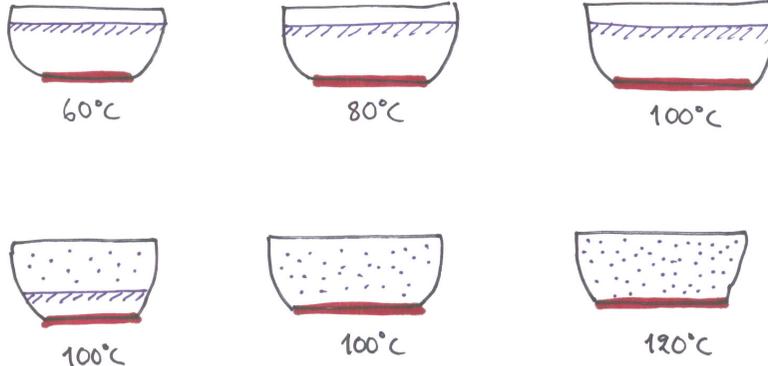
T = Temperatur des Universums

$g_* \approx 100$ = Anzahl Teilchenarten

$m_{\text{Pl}} = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}/c^2$ = "Planck-Masse"

\Rightarrow kleines t entspricht grossem T .

Was passiert beim Wasser wenn die Temperatur wächst?



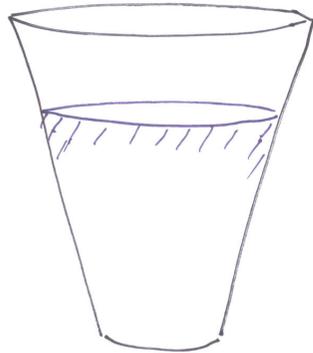
Es gibt einen **Phasenübergang** beim $T = 100^{\circ}\text{C}$.

Könnte das Higgs-Feld auch einen Phasenübergang erleben?

Es wurde schon fast 40 Jahren vor der experimentellen Entdeckung vorgeschlagen, dass dies passieren könnte.

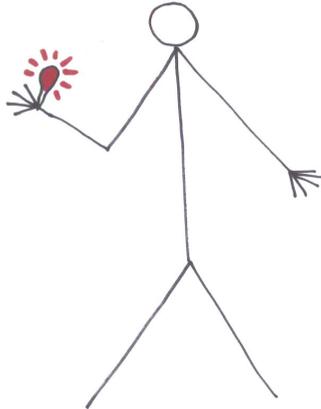
L. Dolan and R. Jackiw, *Symmetry Behavior at Finite Temperature*, Physical Review D 9 (1974) 3320; S. Weinberg, *Gauge and Global Symmetries at High Temperature*, Physical Review D 9 (1974) 3357; D.A. Kirzhnits and A.D. Linde, *Symmetry Behavior in Gauge Theories*, Annals of Physics 101 (1976) 195.

Aber: Thermisches Gleichgewicht hat kein Gedächtnis.

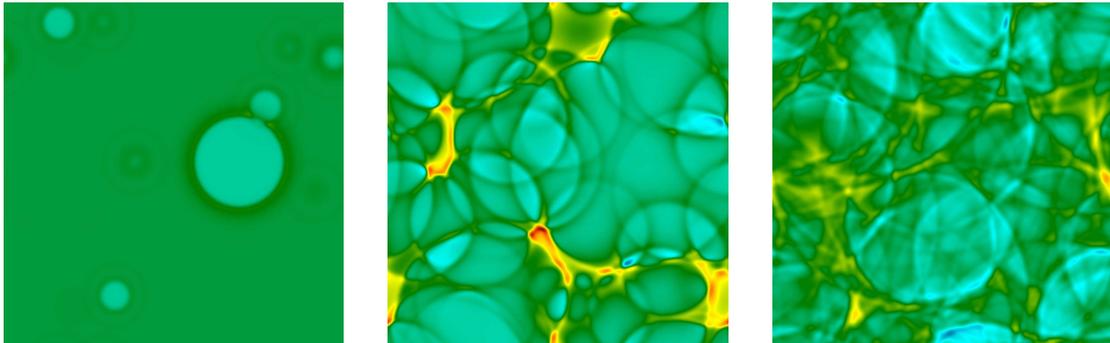


Wurde dieses Wasser gestern gekocht oder gefroren?

Obwohl das Kochen/Frieren keine direkte Spuren hinterlässt, könnten es indirekte Folgen geben.



Phaseübergänge in der Kosmologie sind ein wenig wie beim Kochen, aber viel gewaltiger!

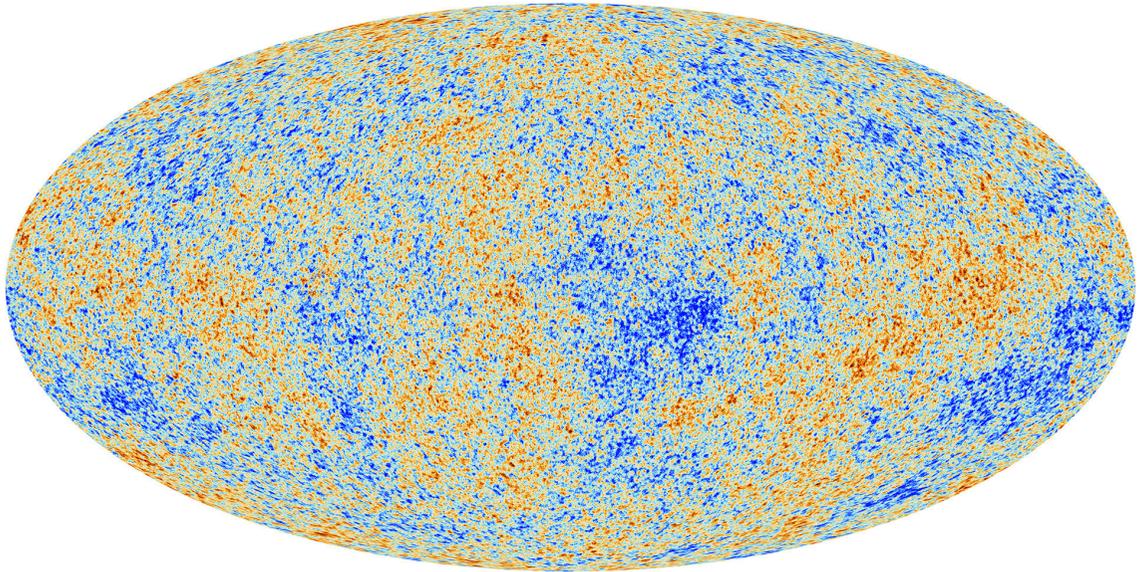


M. Hindmarsh, S. Huber, K. Rummukainen and D. Weir, *Gravitational waves from the sound of a first order phase transition*, Physical Review Letters 112 (2014) 041301.

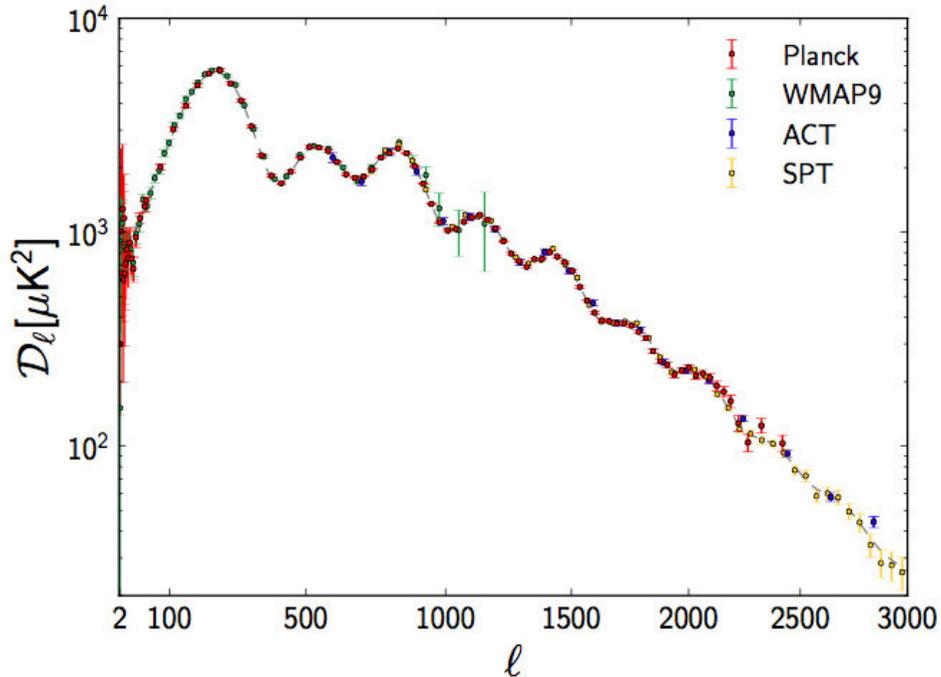
Wie könnten wir die Folgen sehen?



Kosmische Hintergrundstrahlung enthält viele Informationen.



Die Informationen können durch eine “Korrelationsfunktion” dargestellt werden.



Winkel $\sim 360^\circ/l$, d.h. grosses l entspricht kleinen Abständen.

Aber auch die kleinsten Abstände sind viel “zu gross”.

“Radius” des Universums (d.h. kausal zusammenhängendes Gebiet) am Zeitpunkt des Higgs-Phasenübergangs entspricht heute

$$L_{\text{Higgs}} \approx 10^{12} \text{ m} \approx 10 \times \text{Entfernung von Sonne und Erde} .$$

$$\text{Lichtjahr} = 10^{16} \text{ m}.$$

$$\text{Milchstrasse} = 10^{21} \text{ m}.$$

$$\text{Galaxiehäufen} = 10^{23} \text{ m}.$$

$$\text{Die kleinsten Winkeln in der Hintergrundstrahlung} = 10^{24} \text{ m}.$$

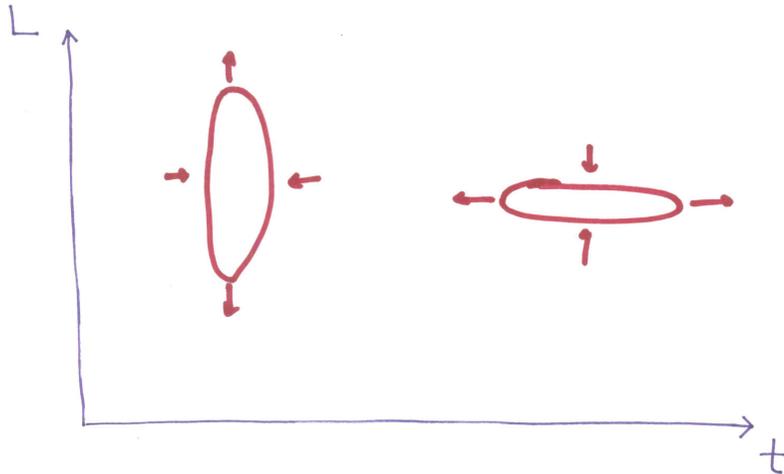
Andere Möglichkeiten: schwachere Wechselwirkungen \Rightarrow Information bleibt besser erhalten.

(i) Neutrinos

- Neutrinos aus astrophysikalischen Quellen (Sonne, Supernovä) sind schon beobachtet worden.
- Eine kosmische Hintergrund von Neutrinos, mit $T = 1.95$ K, wird auch vorhergesagt, und es gibt indirekte Beweise dafür.
- Eine direkte Messung der Hintergrundneutrinos und ihrer Eigenschaften liegt weit in der Zukunft (wird aber sicher einen Nobelpreis wert sein).

(ii) Gravitationswellen

Was sind Gravitationswellen?



Vorhergesagt von der allgemeinen Relativitätstheorie; indirekt nachgewiesen durch den Energieverlust des Hulse-Taylor-Doppelpulsars (Nobelpreis 1993).

Größenordnungen

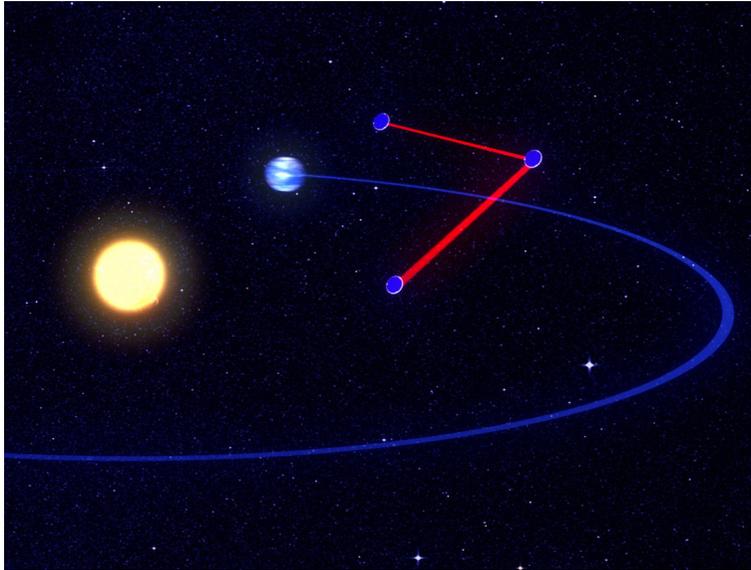
$L_{\text{Higgs}} \approx 10^{12} \text{ m} \approx 10 \times \text{Entfernung von Sonne und Erde.}$

Physik des “Kochens” sollte zu kleineren Wellenlängen führen, vielleicht $10^9 \text{ m} \approx 3 \times \text{Entfernung von Mond und Erde.}$

Man braucht eine Antenne mit entsprechender Ausdehnung!

Erstaunlicherweise ist dies nicht unmöglich.

“evolved Laser Interferometer Space Antenna” (elisascience.org):



LISA Pathfinder 2015; eLISA \geq 2028?

Für Experten: Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie ist auch eine mögliche Konsequenz eines Phasenübergangs.

Die Gesetze des Standardmodelles sind fast symmetrisch in der Vertauschung von Materie und Antimaterie.

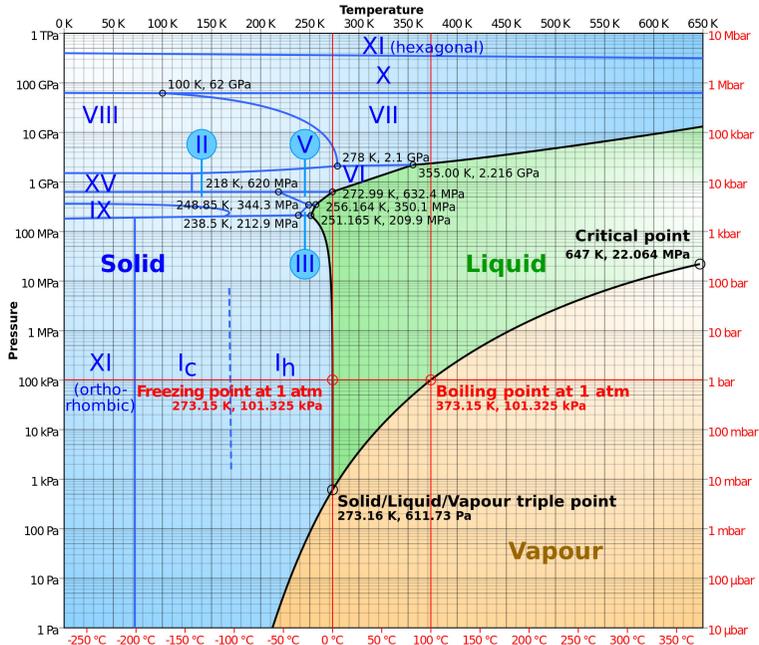
Einen Unterschied machen nur Prozesse mit “CP-Verletzung”, diese sind aber sehr seltene Prozesse.

Es könnte sein, dass alles was wir heute beobachten einen aus CP-Verletzung folgenden kleinen Überschuss darstellt, welcher durch einen Phasenübergang entstanden ist.

Diese sind Möglichkeiten, aber werden die in der Natur realisiert?

R.P. Feynman an M.E. Fisher, 15.11.1977: The next day at the meeting I presented my paper, in which I claimed to explain everything except, I made clear apologetically, there was the serious flaw that I did not understand adequately the detailed nature of behaviour of the thermodynamic functions right at the transition. In the period for questions Onsager spoke first: “Mr. Feynman is new in our field, and there is evidently something he doesn't know about it, and we ought to educate him.” I was petrified; this was even worse than the grunt last night — what had I left out — what stupid mistake had he found? He continued, “so I think we should tell him that the exact behavior of the thermodynamic functions near a transition is not yet adequately understood for **any real transition in any substance whatever.**”

Phasendiagramm des Wassers



Es gibt einen Phasenübergang beim Kochen, es sei denn, $p > 200$ bar.

Was tut man um dasselbe für die Teilchenphysik zu berechnen?

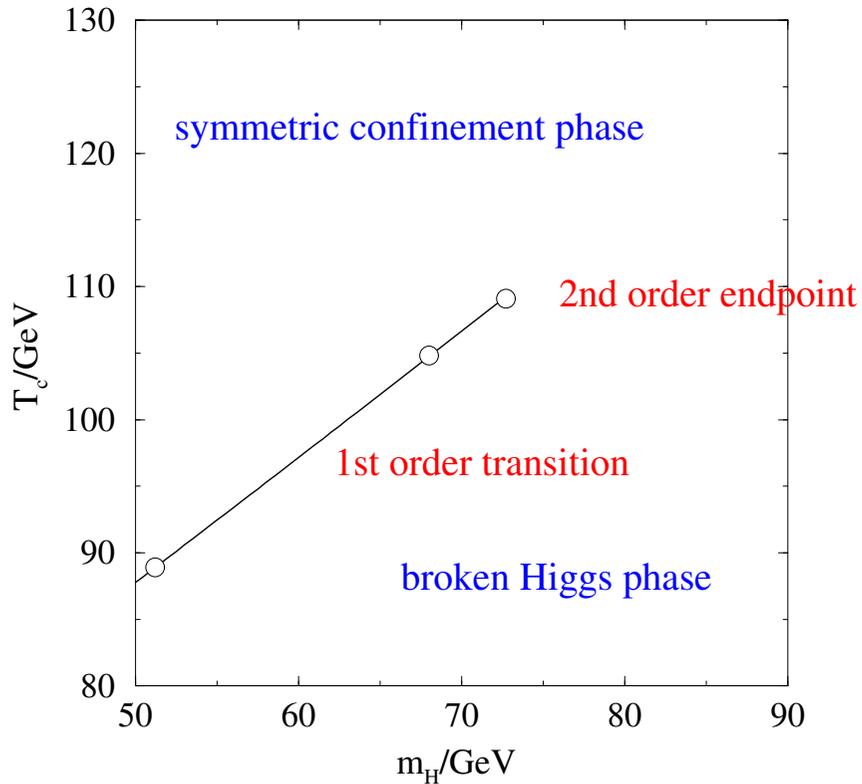
Aus dem LHC: $S = \int_{-\infty}^{\infty} dt \int_V d^3\mathbf{x} \mathcal{L}$.

Statistische Physik: $Z = \int \mathcal{D}\phi \exp[-\int_0^{1/T} d\tau \int_V d^3\mathbf{x} \mathcal{L}]$.

Bestimmung: $\phi = \hat{\phi} + \tilde{\phi} \Rightarrow Z = \int \mathcal{D}\hat{\phi} \{ \int \mathcal{D}\tilde{\phi} \exp[\dots] \}$.

Das innere Integral wird analytisch berechnet, das äussere numerisch.

Phasendiagramm des Standardmodelles:



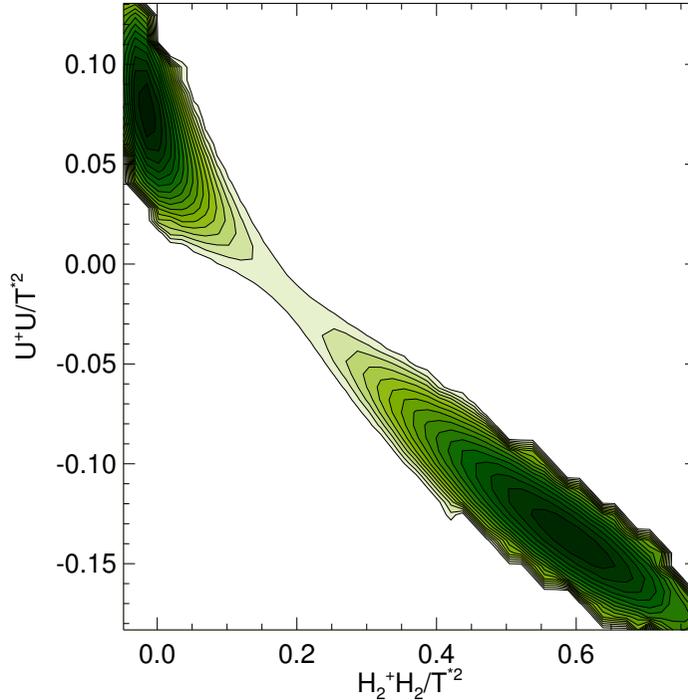
Schlussfolgerung

Im Standardmodell mit Higgs-Masse von 125 GeV gibt es keinen Phasenübergang, und deshalb auch keine Gravitationswellen :(

Aber wir wissen noch nicht, ob das Standardmodell *wirklich* richtig ist, oder bloss eine sehr gute Näherung.

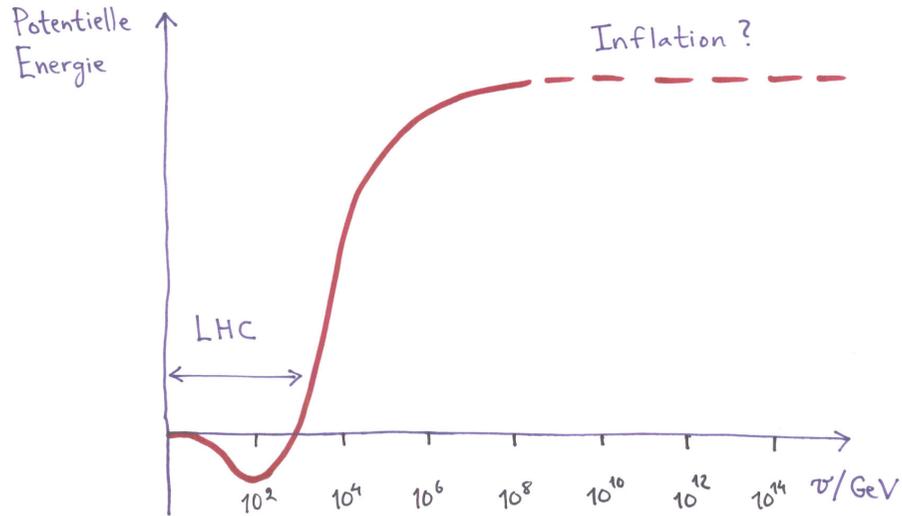
(Es gibt auf jeden Fall eine Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie, und auch dazu wird eine Erklärung gebraucht.)

Mit kleinen Änderungen sind Phasenübergänge möglich.



Die Suche nach neuen Teilchen geht weiter!

Noch mehr spekulativ: Higgs-Inflation



Schlusswort

Es ist sehr schwierig, einzelne Higgs-Teilchen am LHC zu erzeugen.

Im frühen Universum gab es aber Unmengen davon.

Unter Umständen könnten sie auch eine wichtige Rolle in der Kosmologie gespielt haben.

Um entscheiden zu können, ob dies der Fall war, müssen die genaueren Eigenschaften des Higgs-Teilchens durch weitere Experimente bestimmt werden.