

Gravitationswellen und der Ursprung des Universums

Arthur Hebecker (Heidelberg)

Plan:

- Einfache Phänomene: Von Schwingungen zu Wellen
- Wellen in der Einsteinschen Theorie der Gravitation
- Das expandierende Universum
- Kosmologische Inflation und Gravitationswellen

Einfache Phänomene: Newtonsches Grundgesetz

- Wir wissen noch aus Schulzeiten:

Kraft = Masse x Beschleunigung

oder auch:

$$F = m \cdot a$$

oder noch besser:

$$a = F/m$$

- Dies ist besser, weil

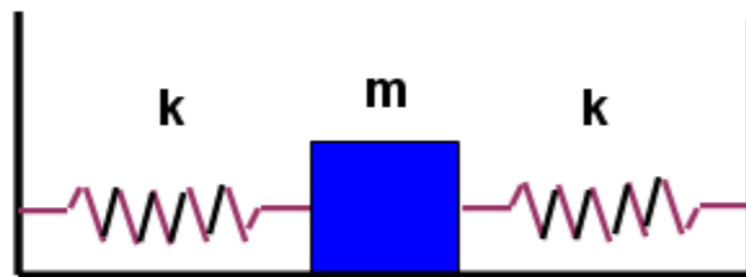
$$a = \frac{dv}{dt}$$

und wir damit ein Gesetz finden, wie sich die Geschwindigkeit mit der Zeit ändert:

$$\frac{dv}{dt} = F/m$$

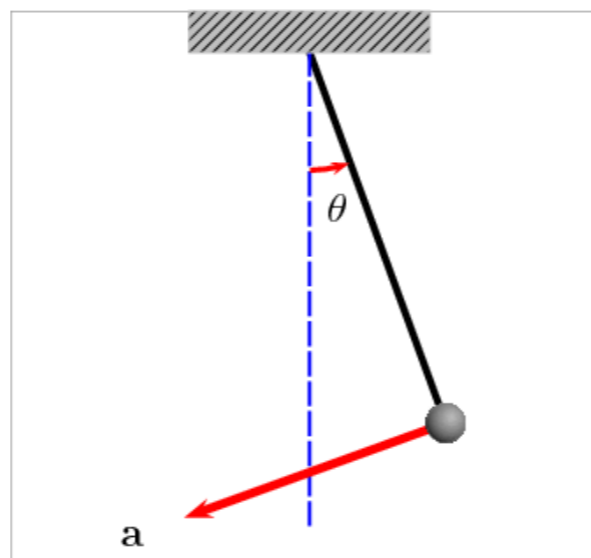
Einfache Phänomene: Schwingungen

- Wir kennen natürlich ein einfaches Beispiel: Die Auslenkung der Masse bestimmt die Federkraft ; diese wiederum ändert die Geschwindigkeit ; es kommt zur Schwingung:



MIT mechanics course (MAPS)

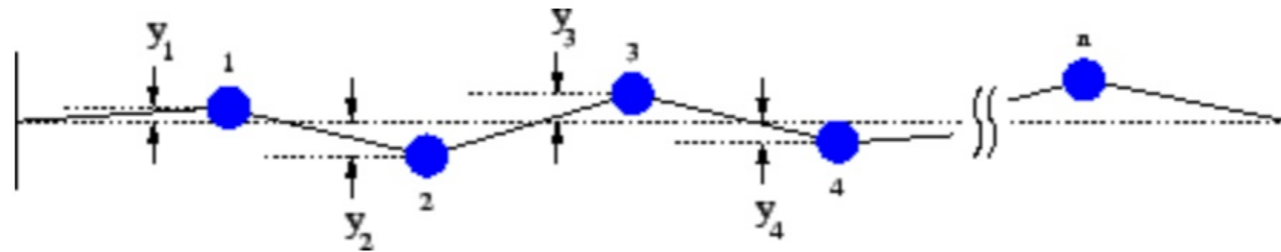
- Das Gleiche funktioniert auch mit der Schwerkraft statt der Federkraft (Pendel):



wikipedia.org (Ruryk)

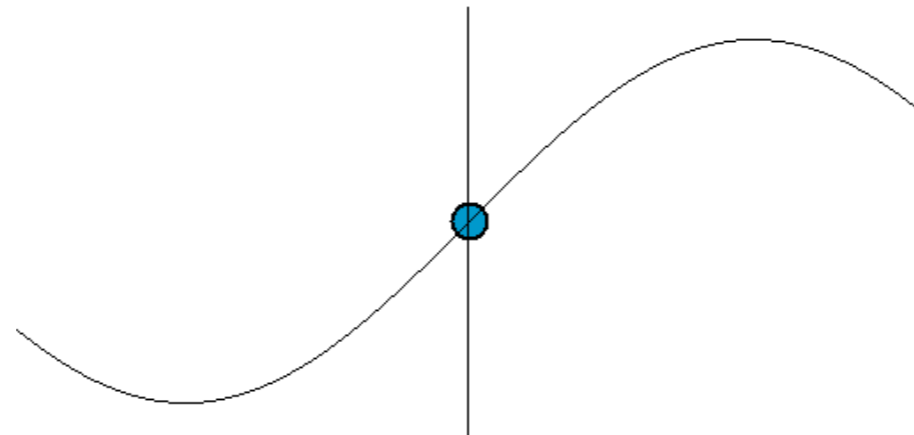
Von Schwingungen zu Wellen

- Die Gleichung $\frac{dv}{dt} = F/m$ kann auch für viele Teilchen gleichzeitig angewandt werden.



LA Riley, Ursinus College

- Es kommt zu vielen gekoppelten Schwingungen.



wikipedia.org (waves)

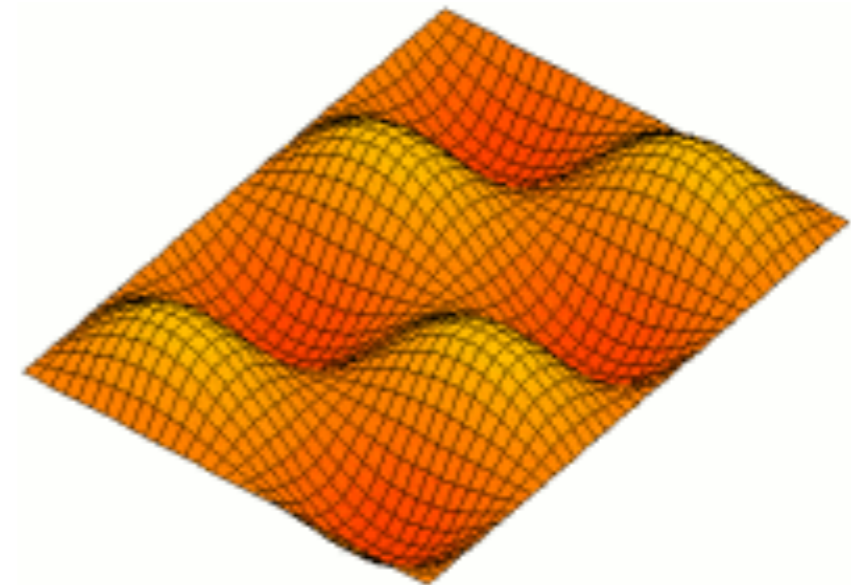
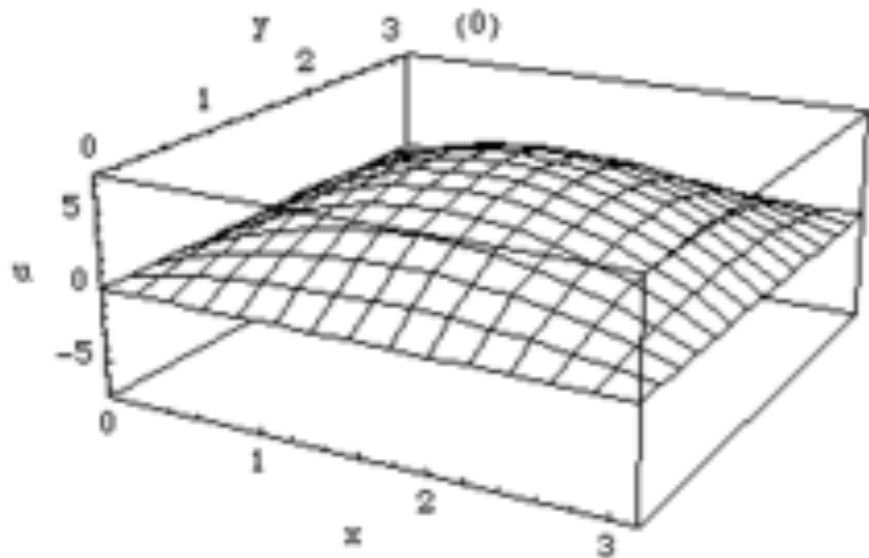
- Das ist aber nichts anderes, als das von uns hier interessierende **Wellenphänomen!**

Mechanische Wellen



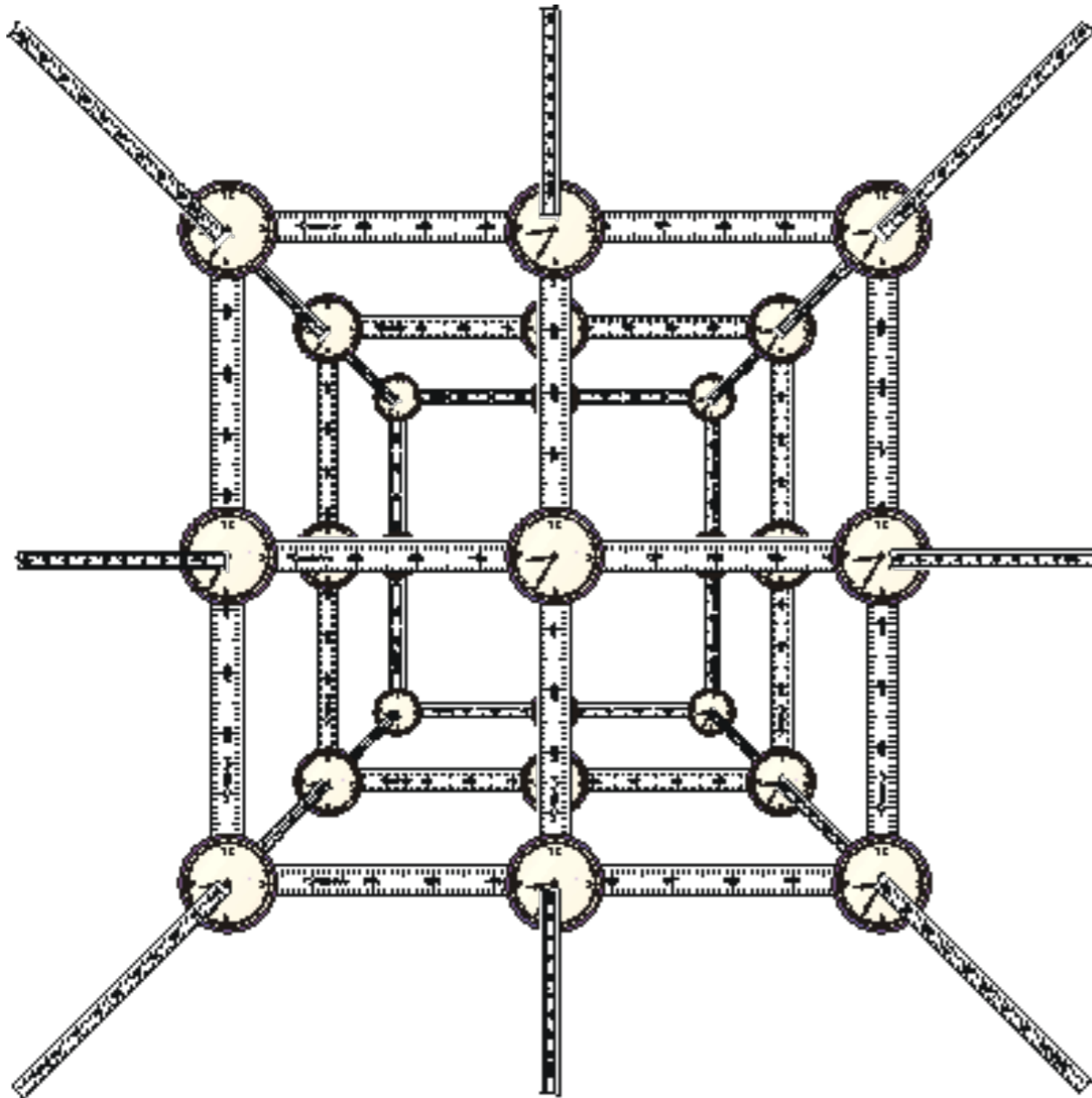
Einfache Phänomene - Wellen in Membran

- Die Dynamik der vertrauten Wasserwellen ist im Detail sehr kompliziert.
- Zum Glück ähneln Gravitationswellen viel mehr den Wellen, wie sie in einer elastischen Membran entstehen können.
- Diese wiederum sind (ziemlich präzise) nur eine Ansammlung vieler Oszillatoren — so wie eingangs gezeigt.

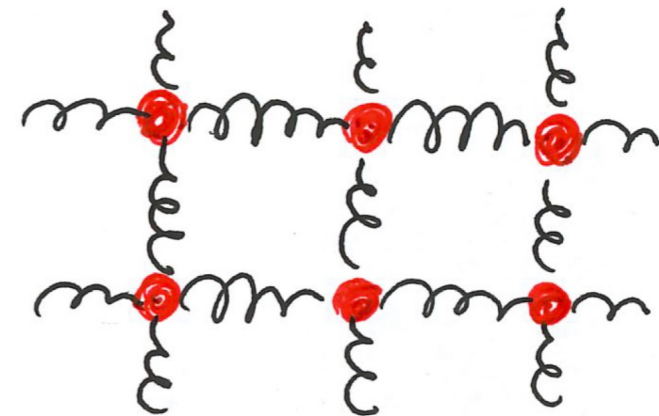


Von der Membran zur Raum-Zeit

- Die Einsteinsche Theorie sagt nun, dass unsere ganze Raum-Zeit eine solche elastische Membran ist. Das was schwingt, sind ihre intrinsischen Abstände.



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



Harrison, U. Toronto (Creative Commons)

Einsteins Notizen dazu:

$$\frac{\partial g_{ik}}{\partial x_\alpha} = \bar{\pi}_{i\alpha} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (\bar{\pi}_{i\sigma} \bar{\pi}_{k\tau} g_{\sigma\tau})$$

$$= \bar{\pi}_{i\alpha} \bar{\pi}_{i\sigma} \bar{\pi}_{k\tau}$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial g_{ik}}{\partial x_j} + \frac{\partial g_{kj}}{\partial x_i} + \frac{\partial g_{li}}{\partial x_k} \right) \text{ sei Tensor } \underline{v_{ikl}}$$

$$[{}^i{}_k] = v_{ikl} \frac{\partial g_{il}}{\partial x_k}$$

$$\{i\}^k = \gamma_{k\alpha} \left(v_{i\alpha l} + \frac{\partial g_{il}}{\partial x_\alpha} \right)$$

$$v_{ikl} = \sum_{\alpha\beta\gamma} \gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial x_\alpha}{\partial x_i} \frac{\partial x_\beta}{\partial x_k} \frac{\partial x_\gamma}{\partial x_l}$$

$$T_{il}^x = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\gamma_{k\alpha} \left(v_{i\alpha l} + \frac{\partial g_{il}}{\partial x_\alpha} \right) \right] - \frac{1}{v_{ikl}} \gamma_{k\alpha} \gamma_{\beta\gamma} \left(v_{i\alpha\beta} + \frac{\partial g_{i\alpha\beta}}{\partial x_\alpha} \right) \left(v_{l\beta\gamma} + \frac{\partial g_{l\beta\gamma}}{\partial x_\beta} \right)$$

$$\sum \frac{\partial \gamma_{kk}}{\partial x_k} \text{ sei } = 0 \text{ ist nicht wichtig.}$$

$$T_{il}^{xx} = - \gamma_{k\alpha} \frac{\partial^2 g_{il}}{\partial x_k \partial x_\alpha} + \gamma_{k\alpha} \frac{\partial v_{i\alpha l}}{\partial x_k} - \gamma_{k\alpha} \gamma_{\beta\gamma} \frac{\partial g_{i\alpha\beta}}{\partial x_\alpha} \frac{\partial g_{l\beta\gamma}}{\partial x_\beta} + \gamma_{\beta\gamma}^k \gamma_{\alpha\delta}^l \left(v_{i\alpha\beta} \frac{\partial g_{\beta\gamma\delta}}{\partial x_\alpha} + v_{l\beta\gamma} \frac{\partial g_{i\alpha\delta}}{\partial x_\beta} \right)$$

ist ebenfalls ein Tensor ebenso

$$\gamma_{k\alpha} \frac{\partial v_{i\alpha l}}{\partial x_k} = \left(\{k\}^i \{l\}^\alpha + \{k\}^l \{i\}^\alpha + \{k\}^\alpha \{i\}^l \right) \gamma_{k\alpha}$$

also auch

$$\gamma_{k\alpha} \frac{\partial v_{i\alpha l}}{\partial x_k} + \sum \gamma_{k\alpha} \gamma_{\beta\gamma} \left(\frac{\partial g_{i\alpha\beta}}{\partial x_\beta} v_{l\beta\gamma} + \frac{\partial g_{l\beta\gamma}}{\partial x_\beta} v_{i\alpha\beta} + \frac{\partial \gamma_{k\alpha}}{\partial x_\beta} v_{i\beta\gamma} \right)$$

ein Tensor

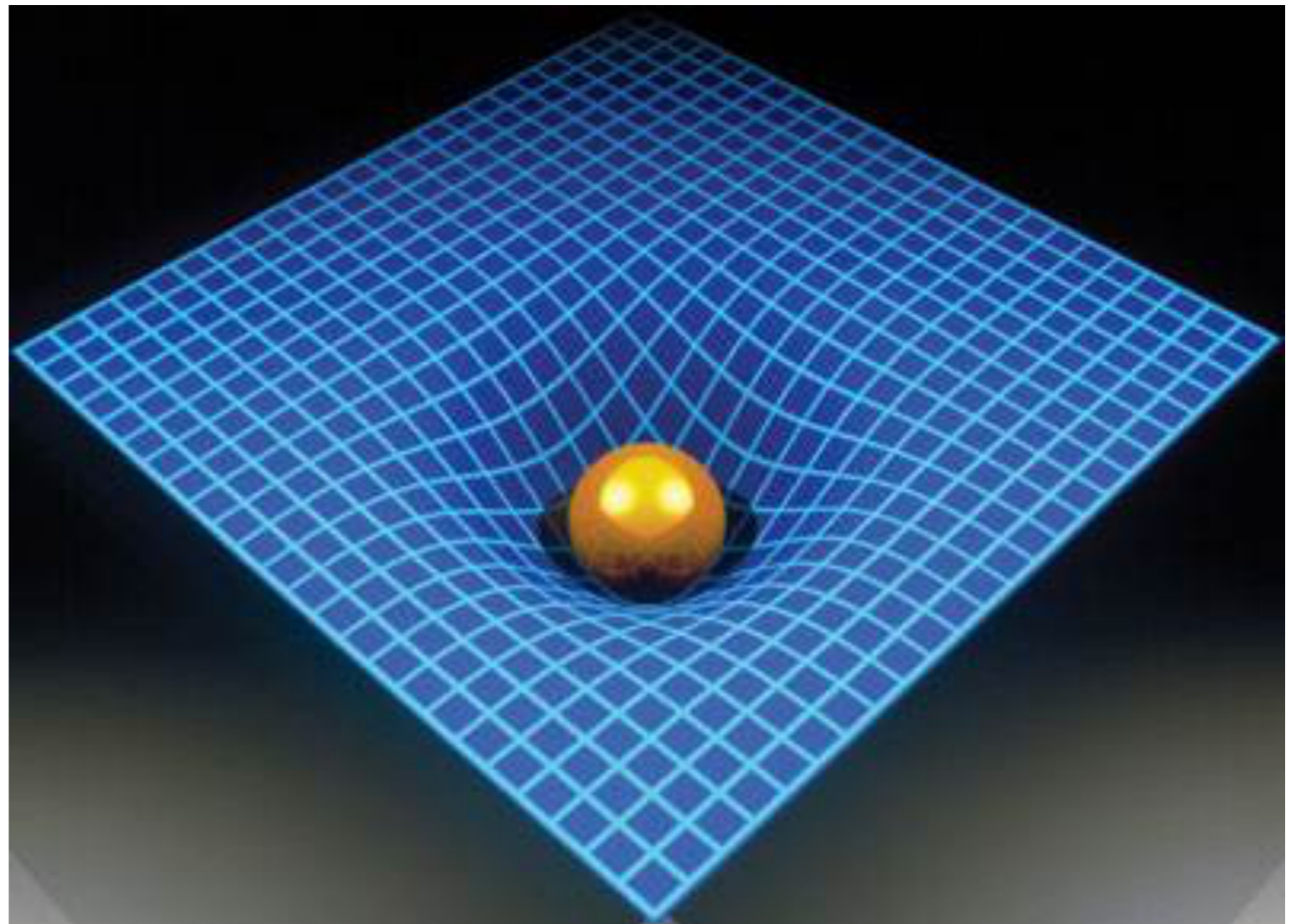
Subtraktion

$$\sum \left(\gamma_{k\alpha} \frac{\partial^2 g_{il}}{\partial x_k \partial x_\alpha} + \sum \gamma_{\beta\alpha} \gamma_{\beta\gamma} \frac{\partial g_{i\alpha\beta}}{\partial x_\alpha} \frac{\partial g_{l\beta\gamma}}{\partial x_\beta} \right)$$

ist Tensor.

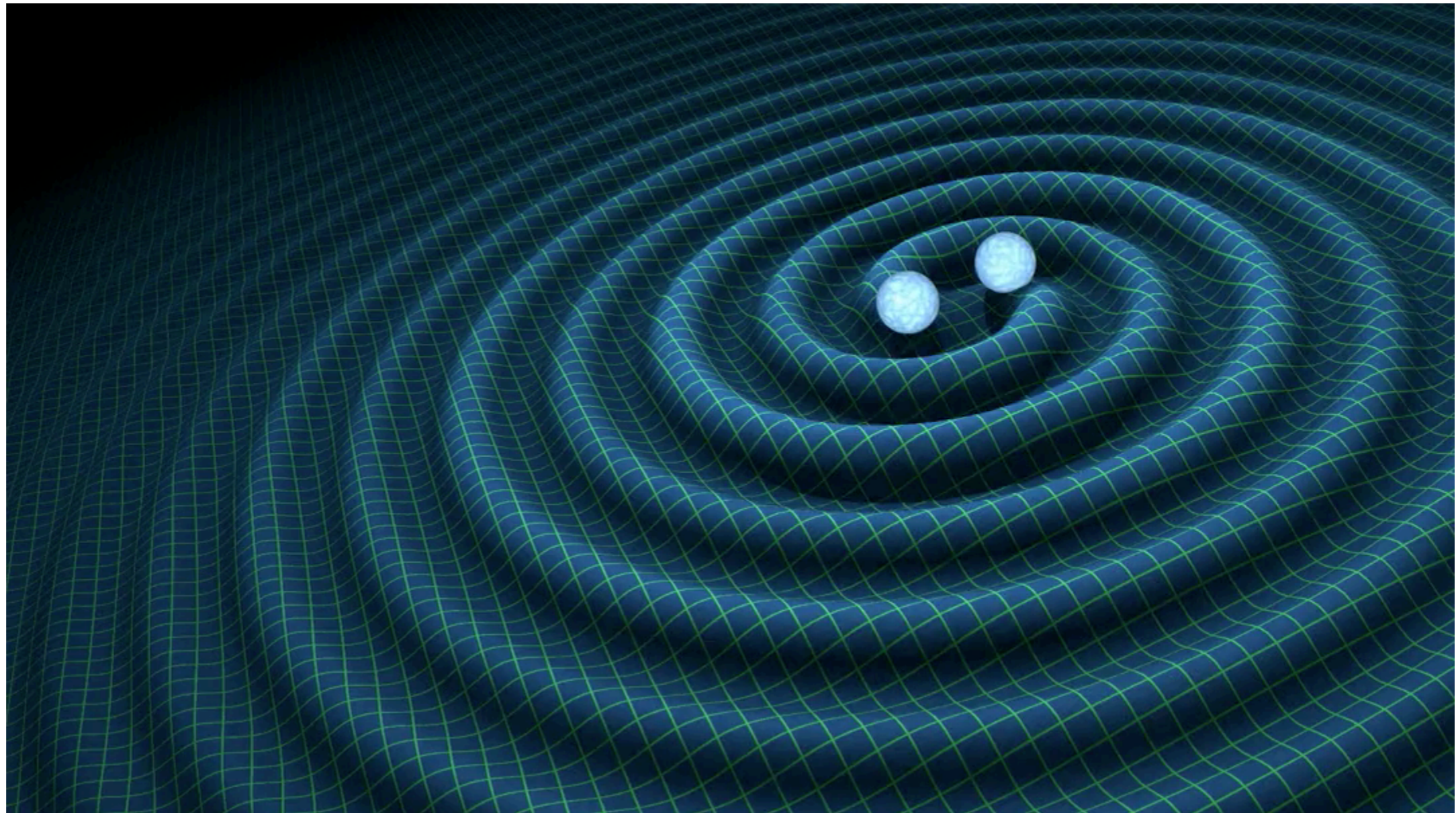
Die Raum-Zeit als Membran: Effekt von Massen

- Neben der eigenständigen Schwingung unserer Membran beschreiben die Einstein-Gleichungen aber noch mehr.
- Massen deformieren (krümmen) die Raum-Zeit in ihrer Nähe:



Astrophysikalische Gravitationswellen

- Gemeinsam mit dem oben beschriebenen Schwingungs/Wellen-Phänomen kann es so zur Abstrahlung von Gravitationswellen durch Paare von Sternen oder schwarzen Löchern kommen.
- Das LIGO-Experiment hat dies vor kurzem zum ersten Mal direkt gemessen.



LIGO
Collaboration
(Caltech and MIT)

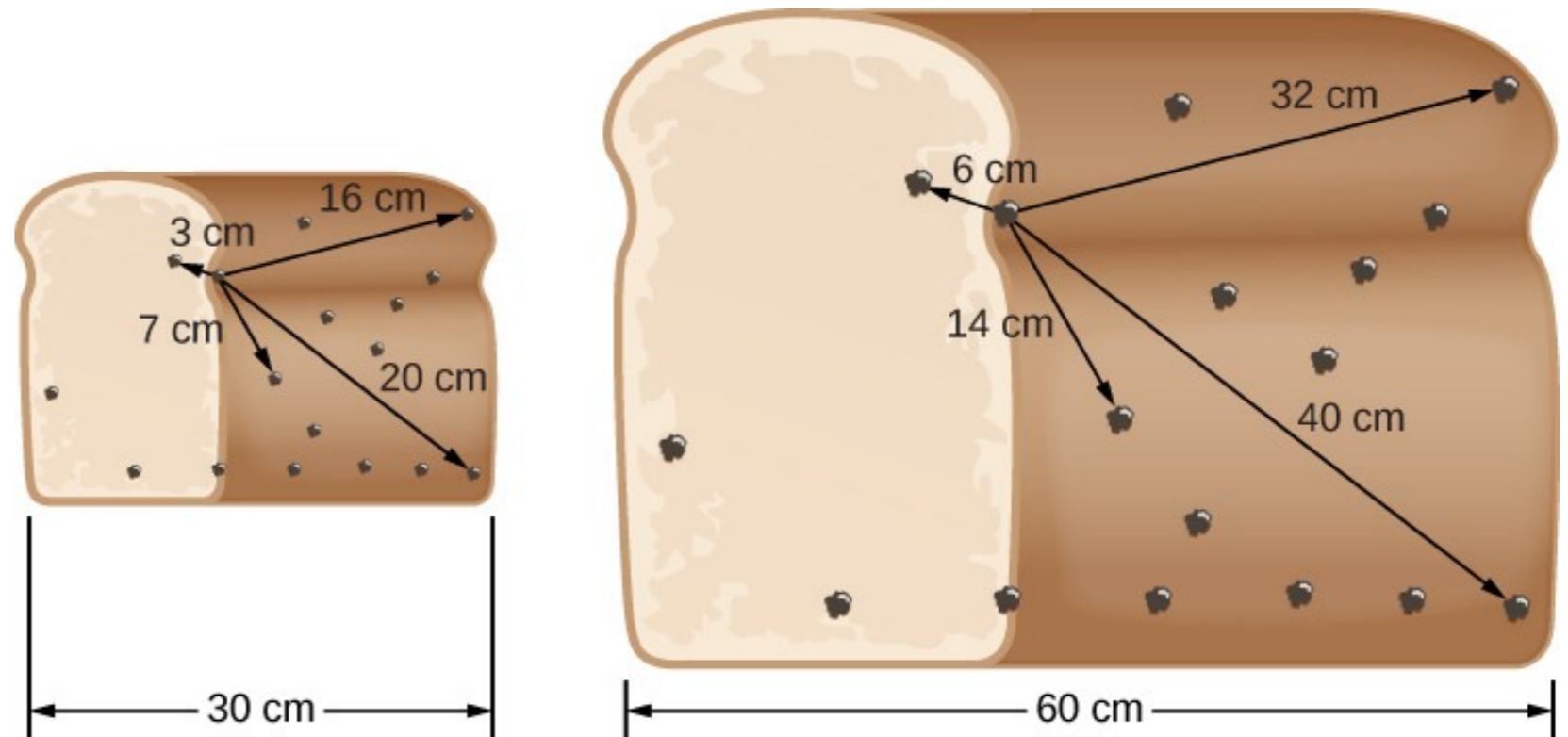
Astrophysikalische Gravitationswellen

- Genauer gesagt schickt LIGO einen Laser-Strahl zwischen zwei Spiegeln hin und her, und misst so sehr präzise deren Abstand.
- Wenn die Gravitationswellen die Erde erreichen, schwankt dieser Abstand ganz geringfügig ...



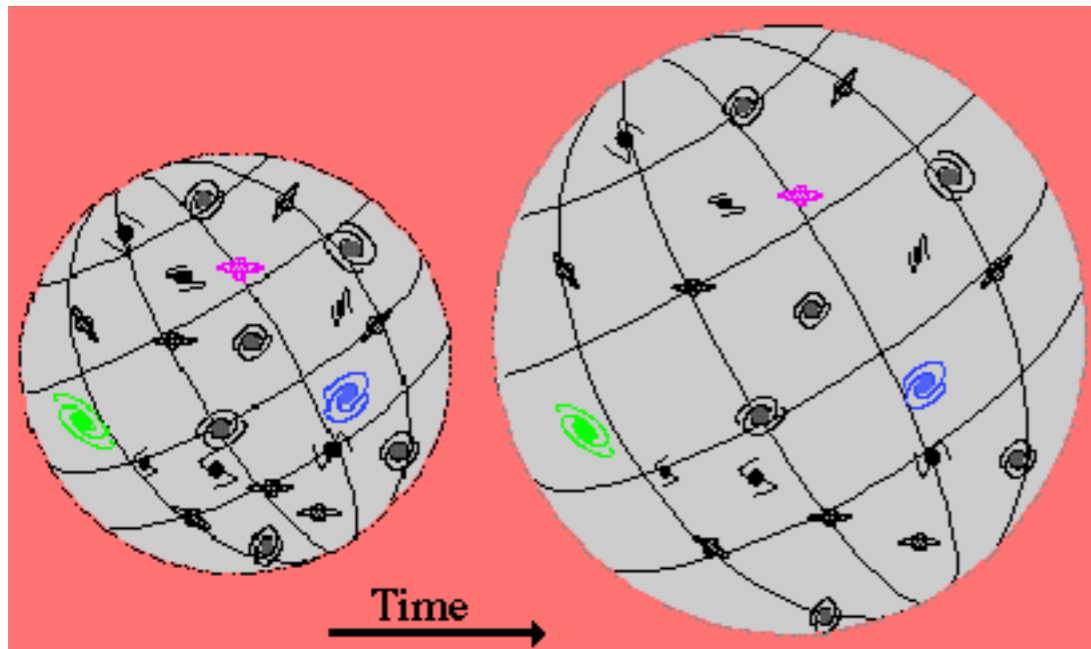
Das expandierende Universum

- In diesem Vortrag wollen wir uns nicht mit Astrophysik sondern mit Kosmologie befassen.
- Nach dem oben gesagten ist klar: Das ganze Universum ist eine gewaltige `elastische Membran', und diese expandiert.
- Wenn wir zurückrechnen, kommen wir zum sogenannten Urknall, einem gedachten Moment so großer Dichten, dass all unsere Theorien versagen.



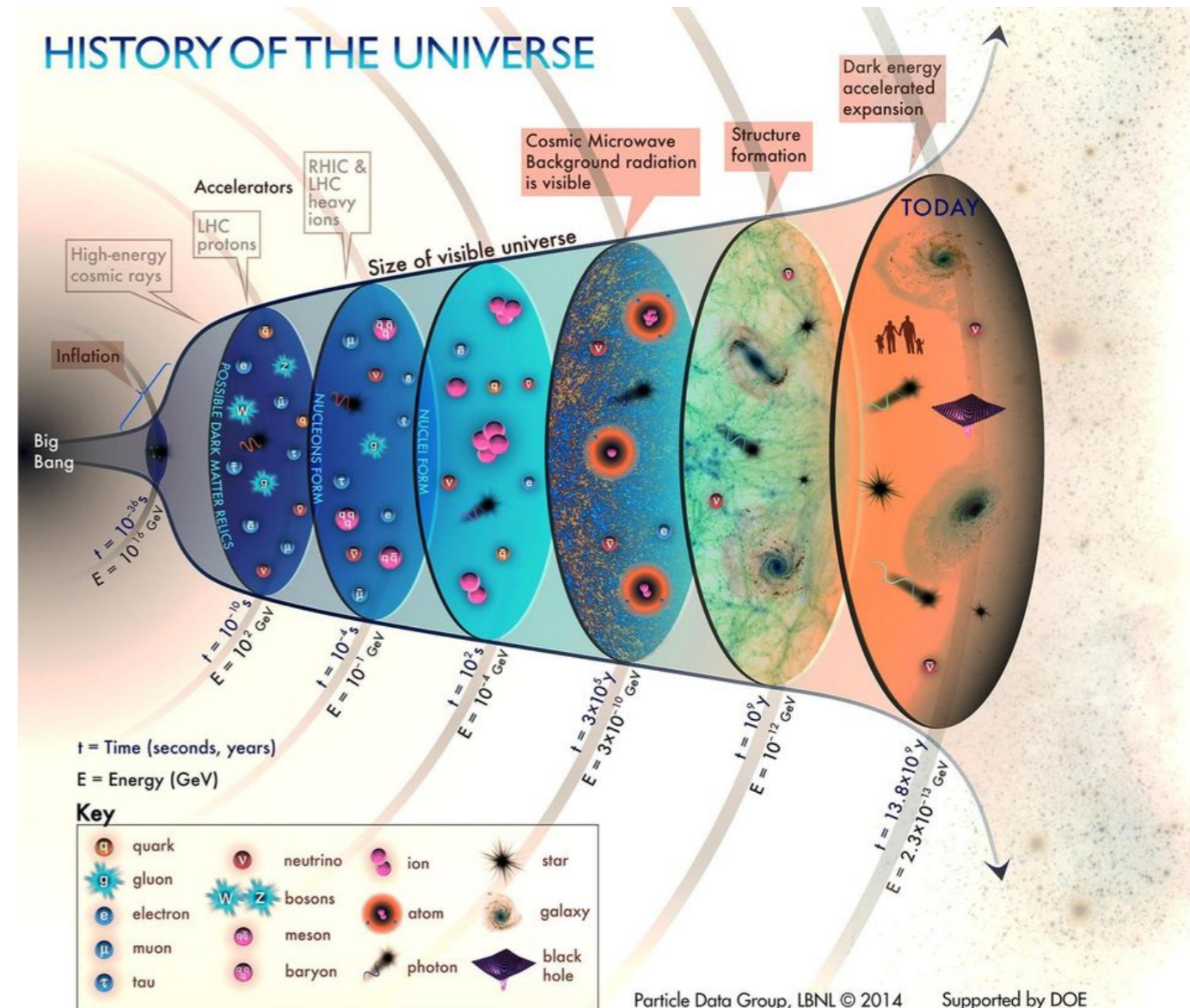
Das expandierende Universum

- Wir können auch an das Aufblasen eines Ballons denken...

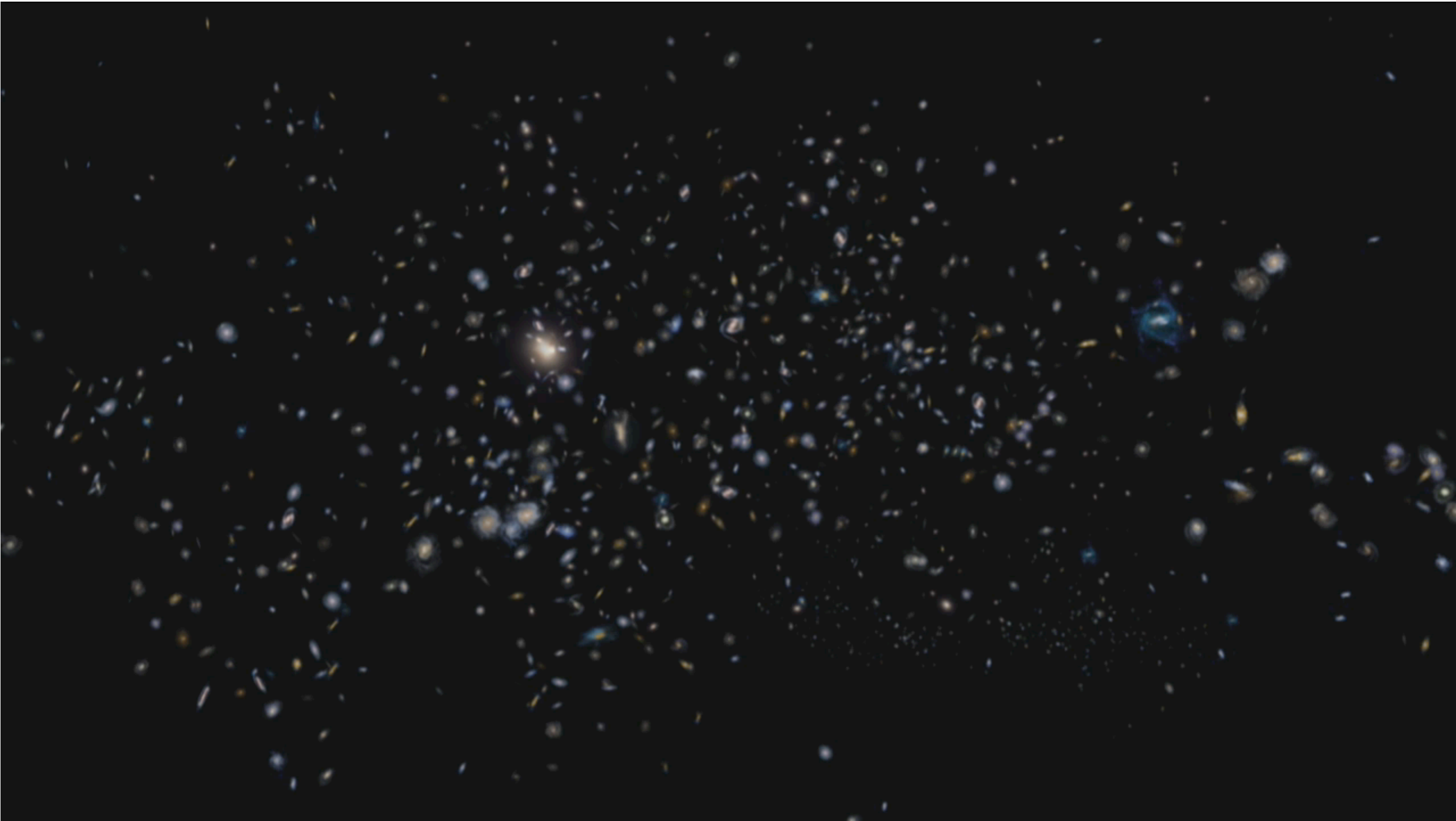


Molly Read, U. Wisconsin-Madison

- Und sogar eine genaue Zeitachse hinzufügen....



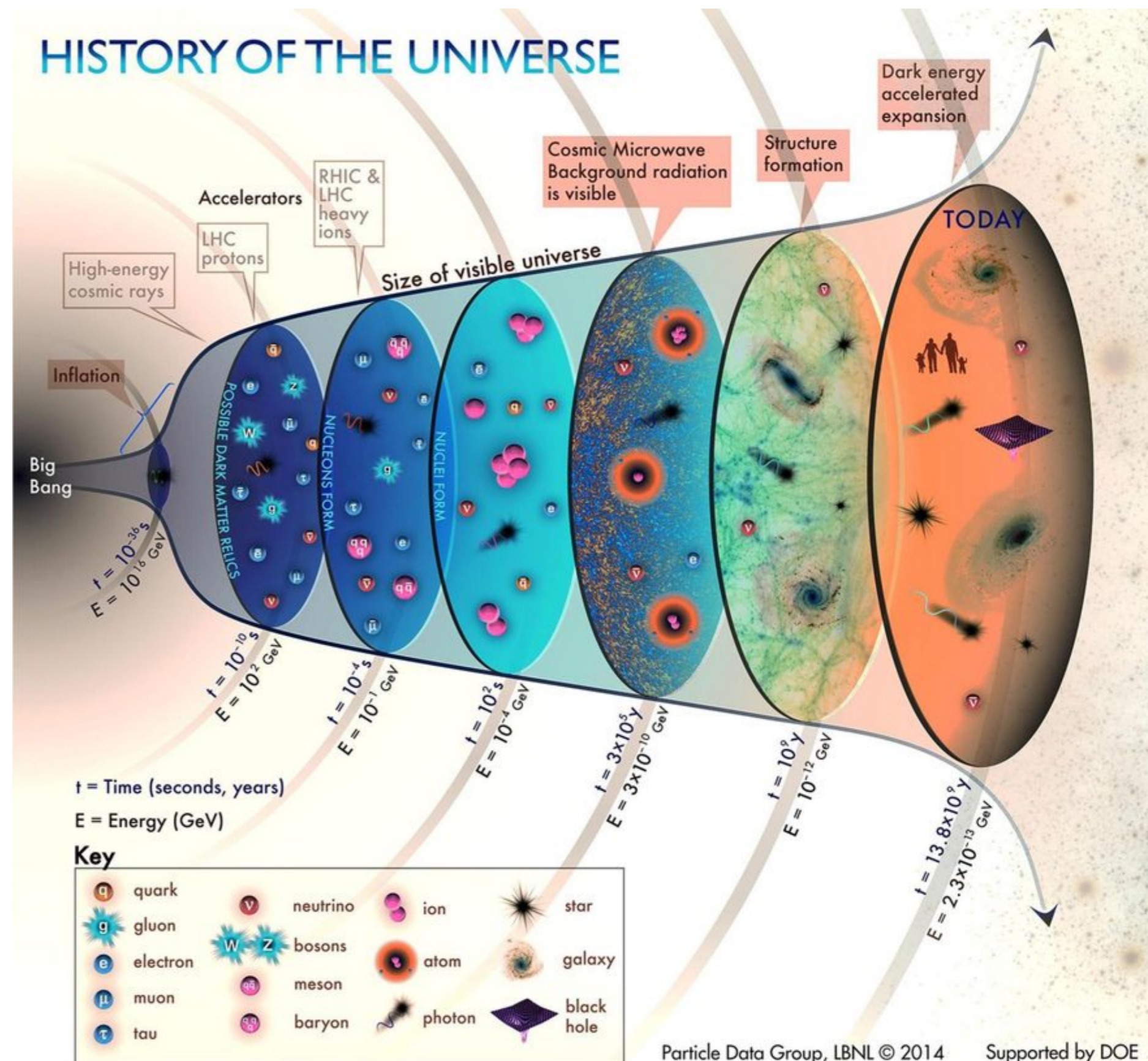
Das expandierende Universum



NASA, Goddard Media Studios

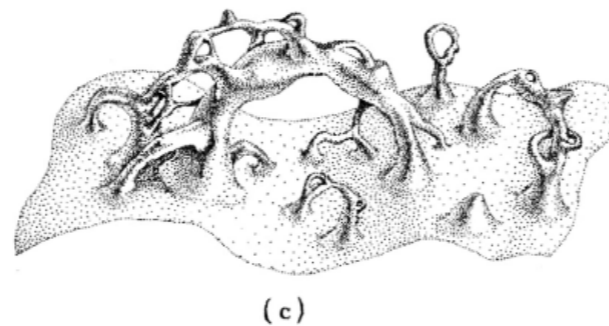
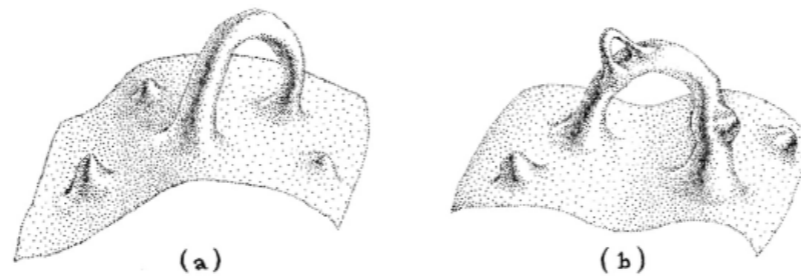
Das expandierende Universum

- Wir können relativ sicher zurückrechnen bis zu den Temperaturen und Dichten des 'Large Hadron Colliders' in Genf.
- Mit etwas Phantasie sogar darüber hinaus.
- Aber es gibt eine Grenze: Die **Planck-Skala** oder Temperatur der **Quantengravitation**.



Das naive Bild vom Urknall

- Die Planck-Skala, die Energieskala bei der alle etablierten Theorien versagen, ist ca. 10^{18} mal höher als die Energiedichte im Atomkern.
- Hohe Energien entsprechen nun auch immer kleinen Abständen (man denke an die Mikrowellen, die Atome leicht zum schwingen bringen und die viel kurzwelligeren Röntgenstrahlen, die sie aufbrechen können).
- Bei kleinen Abständen regiert nun bekanntermaßen die Quantenmechanik.
- Für uns ist entscheidend, dass bei der Planck-Skala die Raumzeit selbst quantenmechanisch wird: Sie schwingt (fluktuiert) mit großer Amplitude.



B. Mendez, Berkeley

Das Flachheits- oder Homogenitäts-Problem

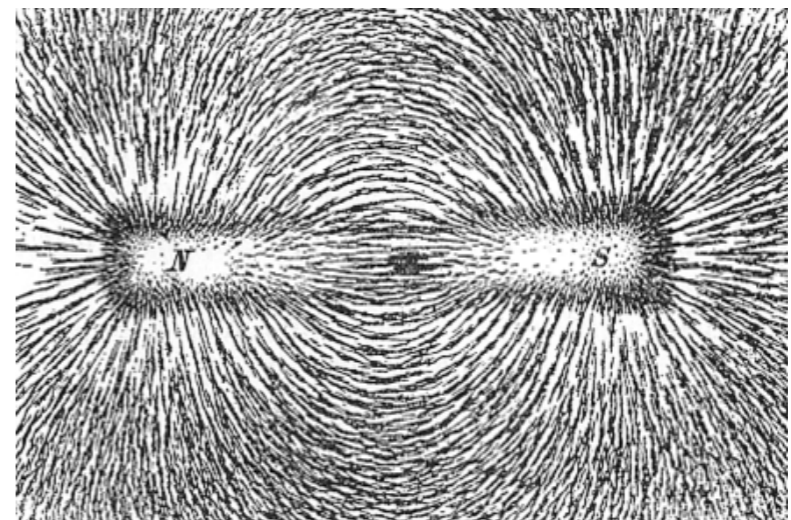
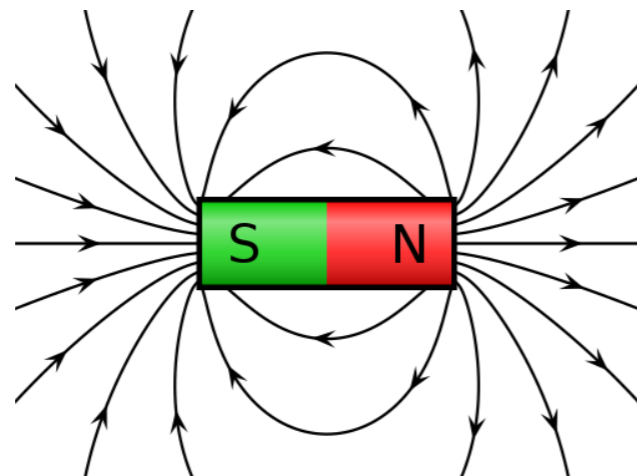
- Nach allem, was wir wissen, muss das Universum also am Anfang sehr inhomogen gewesen sein, der Raum sehr stark gekrümmt.
- Wie ein aufgewühltes Meer, brauchte es Zeit, sich zu beruhigen — und die hatte es auch.
- Allerdings bei Weitem nicht genug: Es gibt nämlich eine maximale Distanz, auf der das Universum flach werden konnte — die Distanz, die ein Lichtstrahl seit Beginn Planck-Ära zurücklegen konnte.
- Aber wir wissen, dass das Universum auf VIEL größeren Längenskalen flach ist.
- Dies ist ein sehr fundamentales Problem der “Big Bang Cosmology”.

Die Lösung des Problems: Kosmologische Inflation

- Es gibt nun seit ca. 35 Jahren eine geniale theoretische Idee zur Lösung des Problems:
- Man ersetze den eigentlichen Urknall durch eine Phase sehr schneller Expansion.
- Dies dehnt alle Unebenheiten enorm aus – unser Universum wird so flach, wie wir es sehen.
- Auch die Erklärung für diese Ausdehnung ist leicht gefunden: Man muss unsere Teilchenphysik-Welt nur um **ein** spezielles Feld (**eine** Teilchenart) ergänzen: Das **INFLATON**.

Felder in der Physik: Magnetfeld

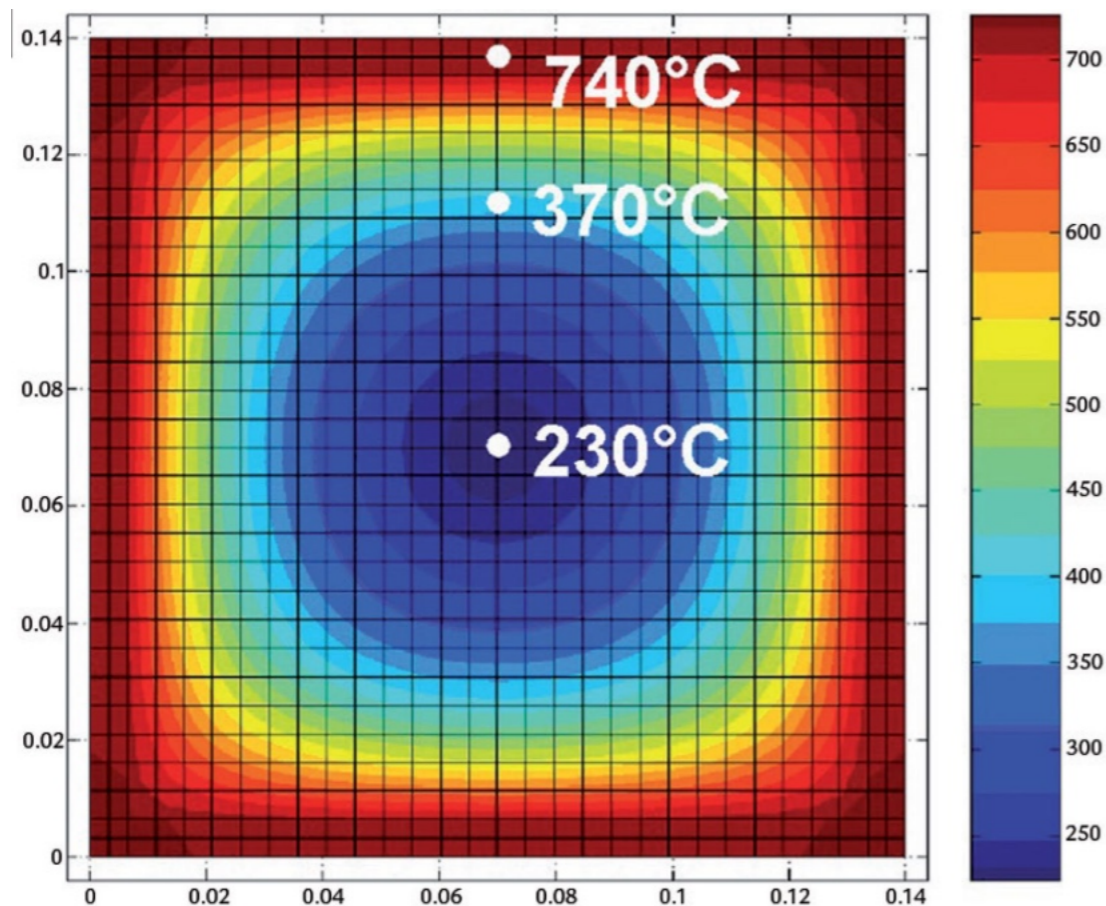
- Um das zu würdigen, wollen wir uns zunächst erinnern, was der Begriff **'ein Feld'** in der Physik bedeutet.
- Das vertrauteste Beispiel ist vielleicht das Magnetfeld.
- Es hat an jedem Ort eine Richtung (veranschaulicht durch die Ausrichtung der Linien) und einen Wert (die Dichte der Linien).



[wikipedia.org](https://de.wikipedia.org)

Felder in der Physik: Temperaturfeld

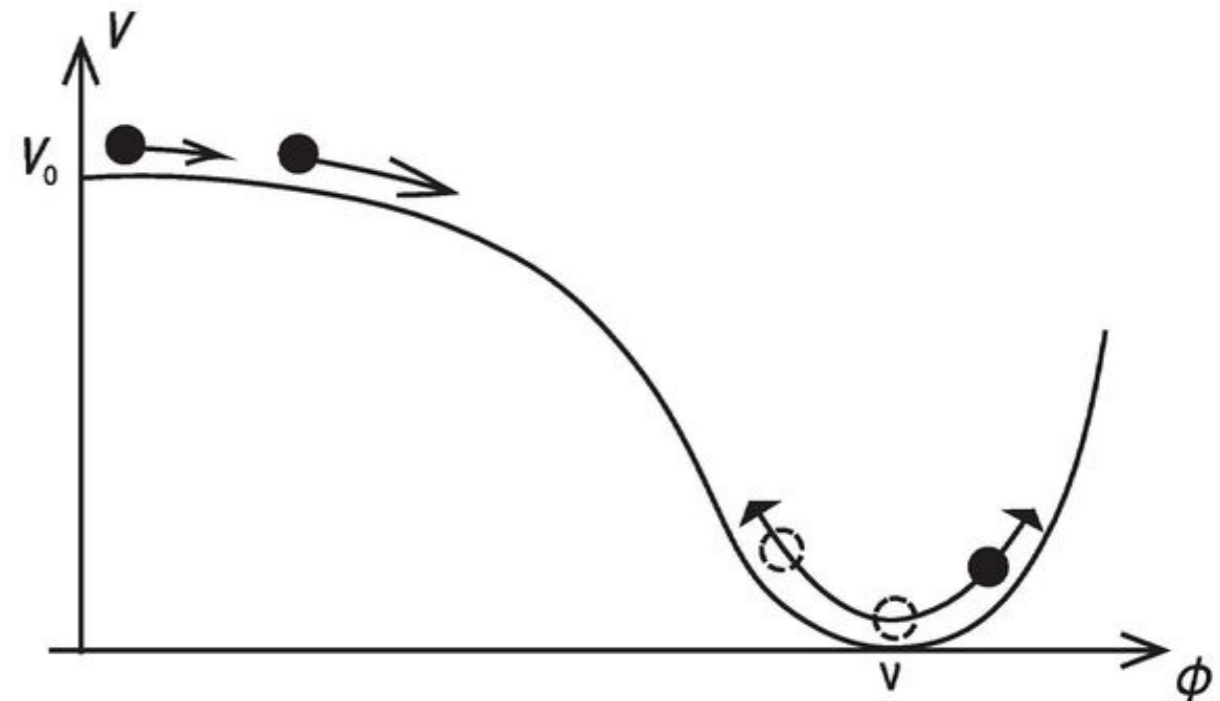
- Aber das Inflaton-Feld ist eigentlich noch viel einfacher: Es hat keine Richtung, nur einen Wert an jedem Ort.
- Ein vertrautes Beispiel dafür ist ein Temperaturfeld (unten z.B. das einer rechteckigen Säule, die einem Brand ausgesetzt ist).



Masini/Moreno, REM, Int. Eng. J. vol.70 no.2

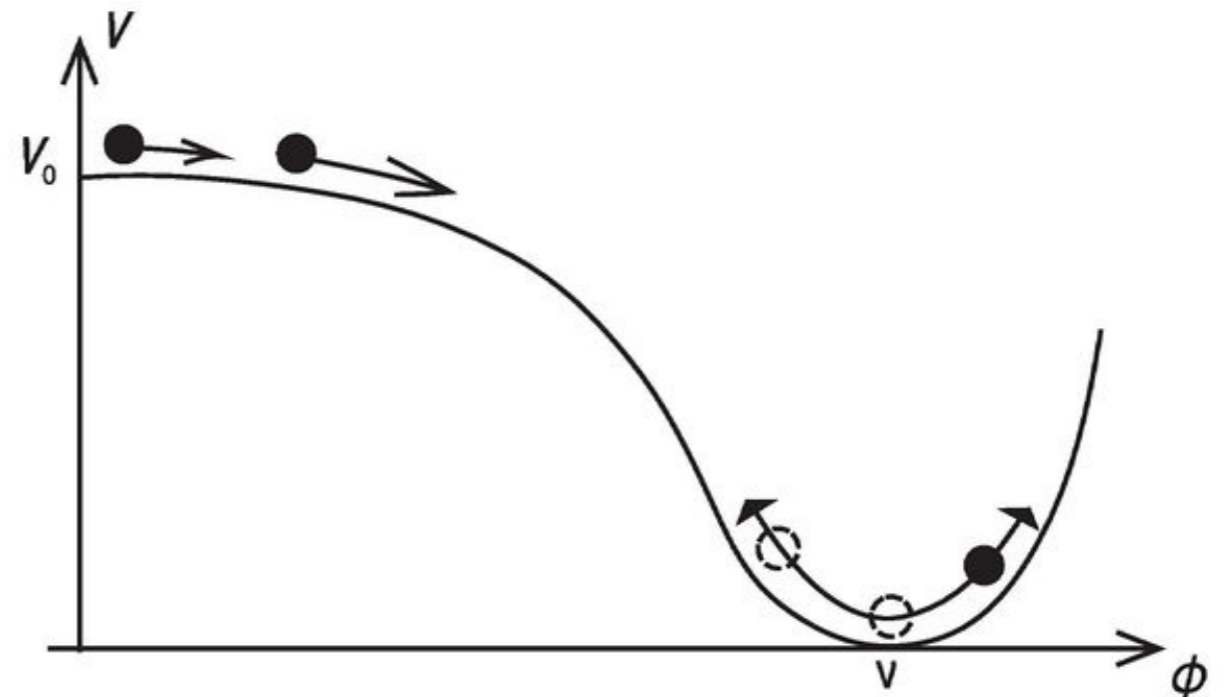
Das Inflaton-Feld ϕ

- Verschiedene Werte des Inflaton-Feldes entsprechen verschiedenen Energie-Dichten.
- Man veranschaulicht das durch eine Kugel, die in einem “Potentialtopf” rollt.
- Wenn das Inflaton ‘oben’ ist, rollt es zunächst langsam und die hohe Energiedichte treibt das Universum zu sehr schneller Expansion.
- Schließlich ‘stürzt es ab’, oszilliert in der Mulde und gibt dabei seine Energie ab.
- Das ist der eigentliche ‘Big Bang’.



Das Inflaton-Feld ϕ — Quanteneffekte

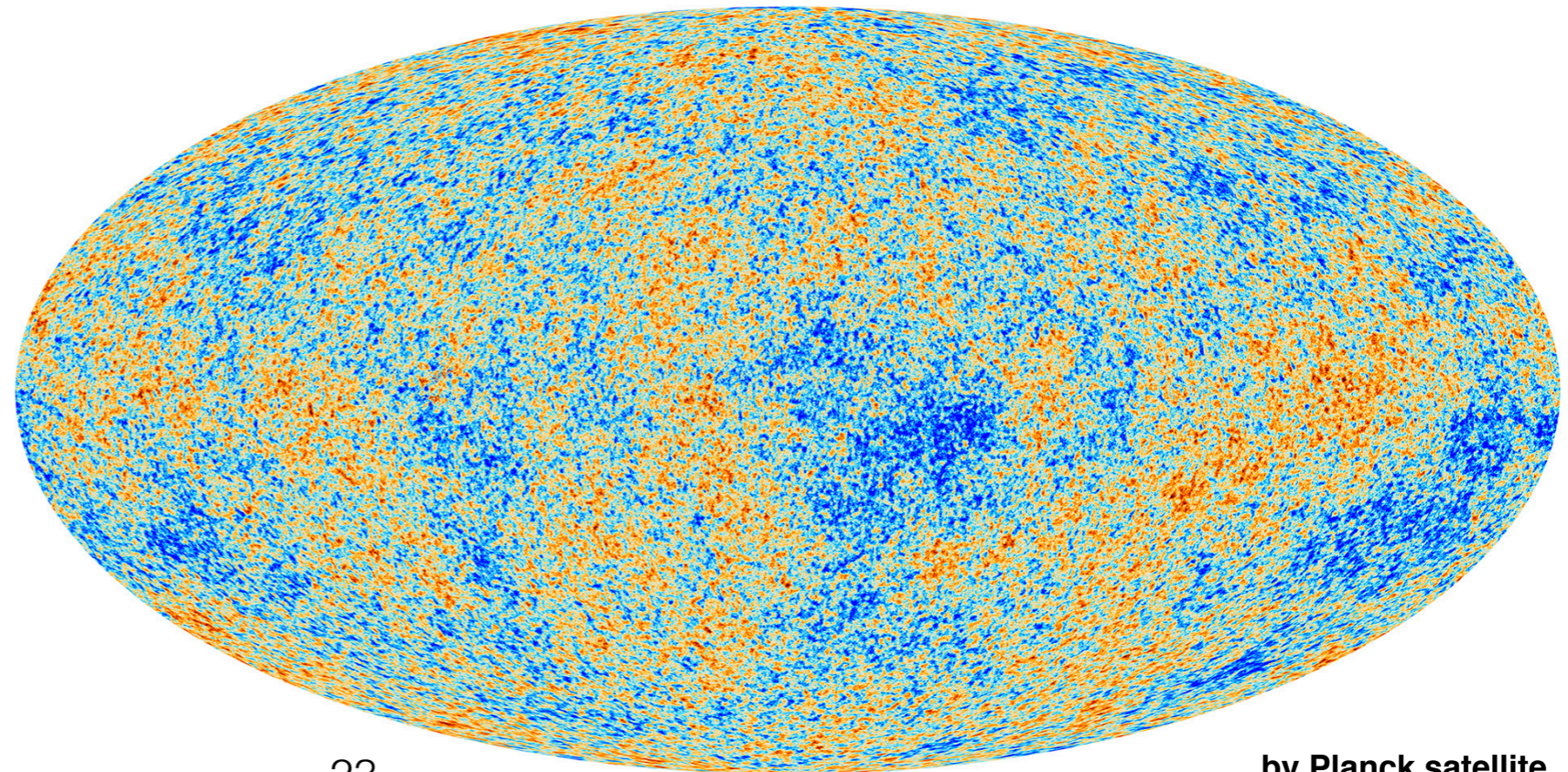
- Wir haben bisher so getan, als hätte das Inflaton im ganzen Universum den gleichen Wert — erst ‘auf dem Berg’, dann ‘im Tal’.
- Aber das muss nicht so sein — es ist ein Feld — es kann an jedem Ort einen anderen Wert haben.
- Diese (sehr kleinen) Fluktuationen des Inflatons können wir sogar berechnen — sie folgen unmittelbar aus der Heisenbergschen Unschärferelation.



Der nicht ganz perfekte Big Bang

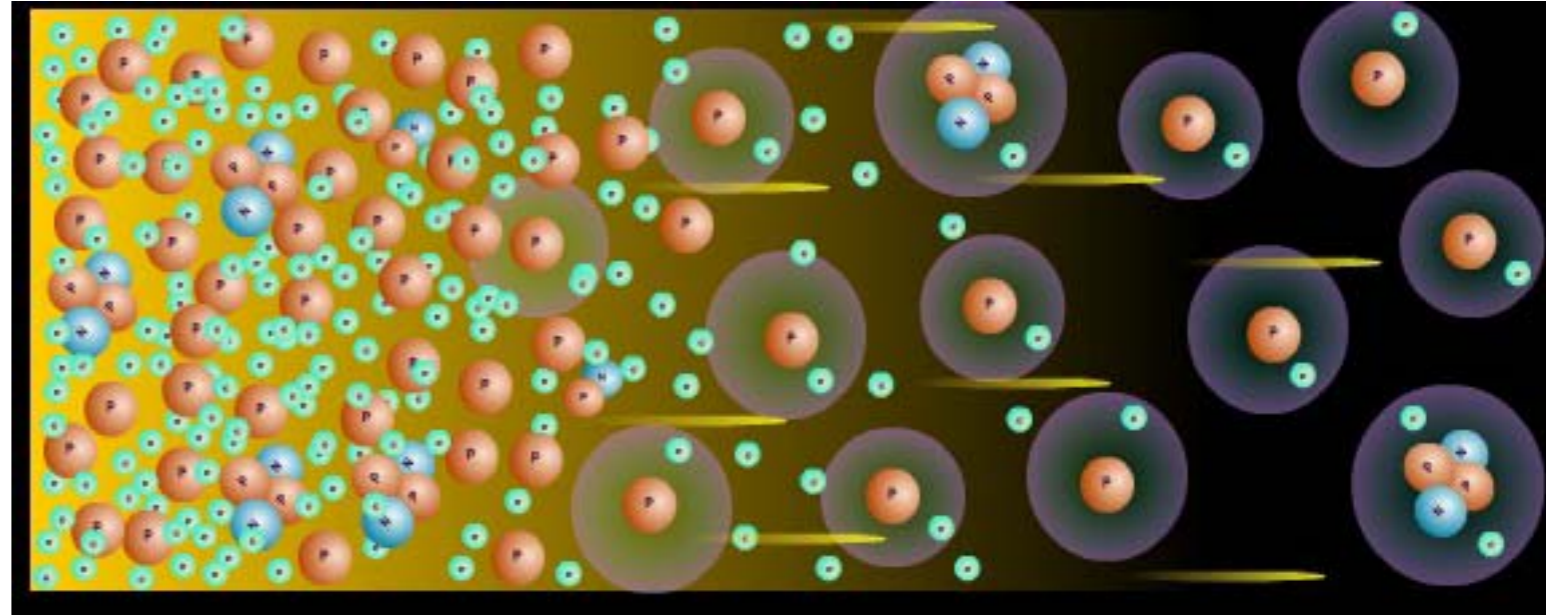
- Das Überraschende ist nun, dass wir diese kleinen Ungleichmäßigkeiten des ganz frühen, heißen Universums bis heute sehen können.
- Wenn wir nämlich im Mikrowellenbereich in den Himmel schauen, sehen wir eine fast perfekt gleichmäßige **‘kosmische Hintergrundstrahlung’**.

$$\frac{\Delta T}{T} \sim \frac{1}{100\,000}$$



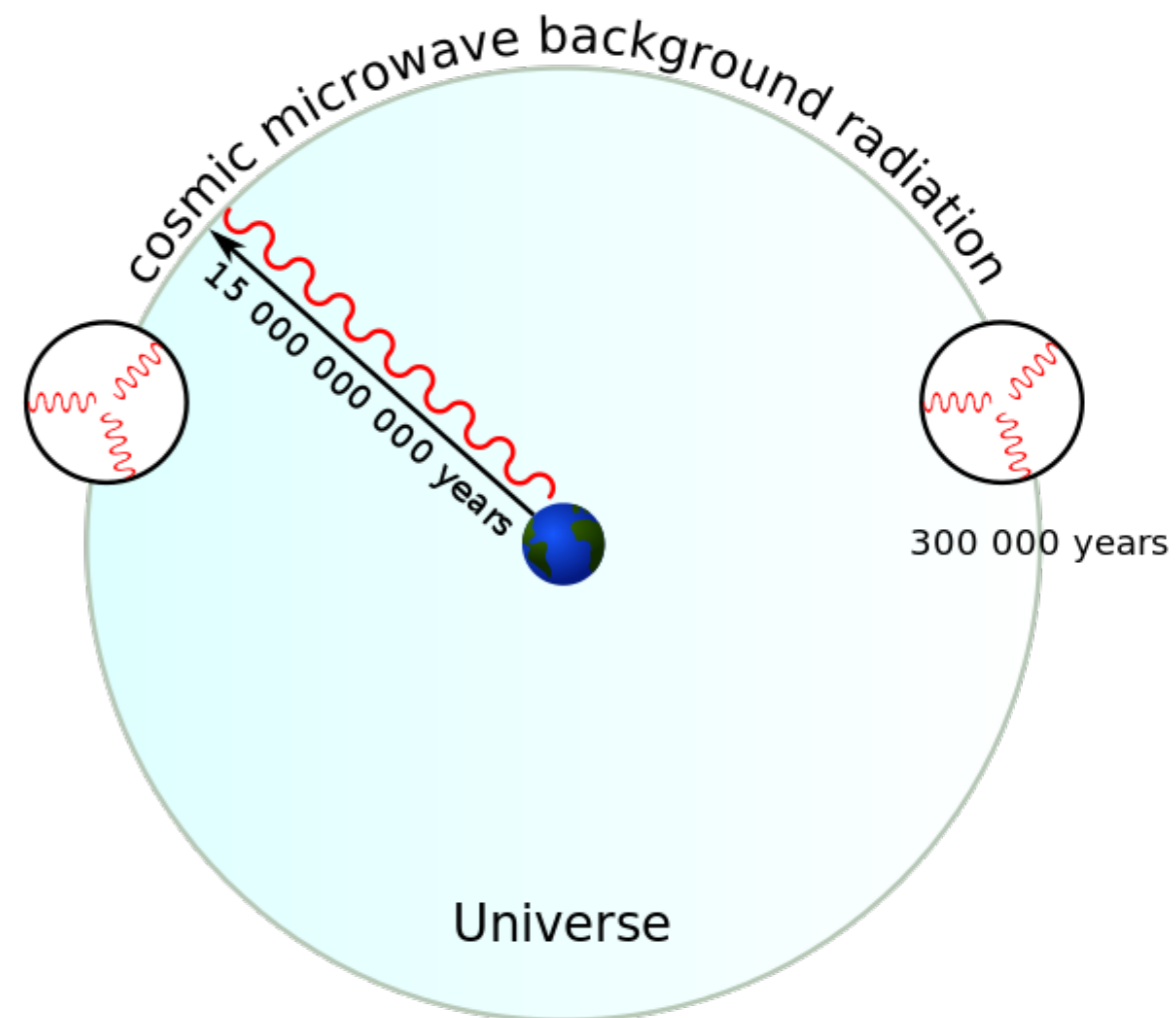
Der Ursprung der Hintergrundstrahlung

- Das ganz frühe Universum war ein heißes Plasma - Licht (Photonen) wurden ständig gestreut.



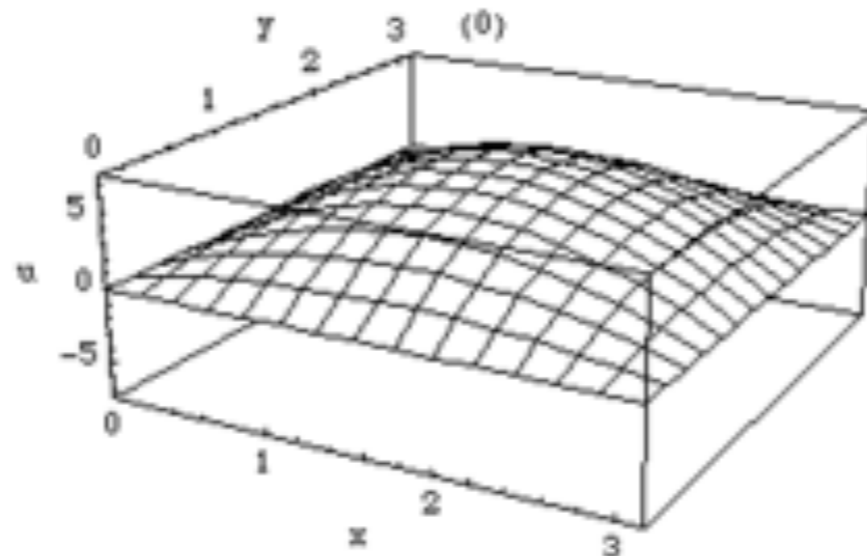
Berkeley Nat. Lab.

- Zu einem bestimmten Zeitpunkt (Recombination) wurden die Elektronen von den Kernen gefangen - neutrale Atome entstanden.
- Aus unserer Sicht entspricht dieser Moment einer sehr weit entfernten Sphäre am Himmel.
- Wir sehen die Unebenheiten dieser Sphäre



Primordiale Gravitationswellen

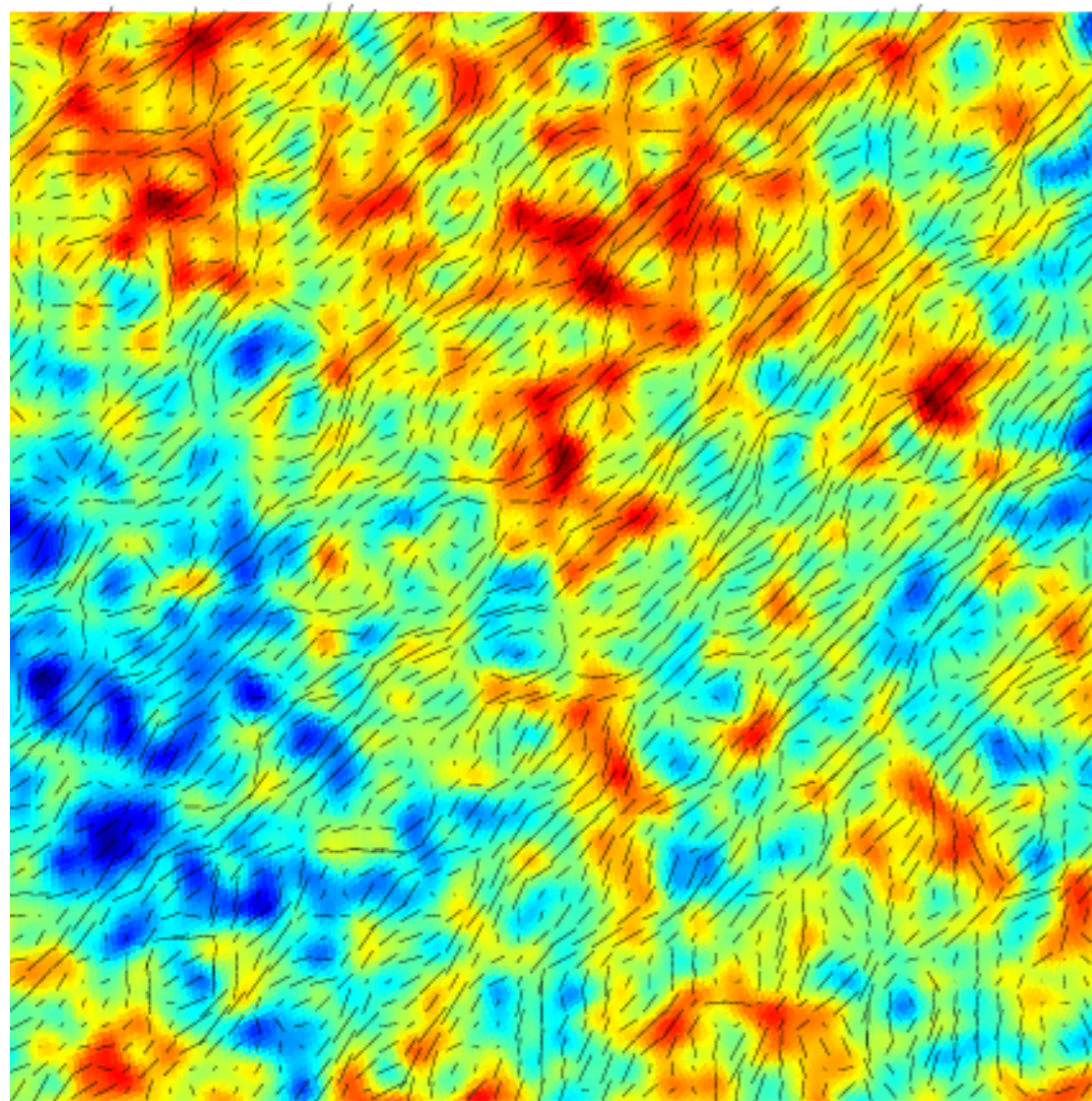
- Diese Temperatur-Fluktuationen stammen unmittelbar aus den Quanten-Fluktuationen des Inflaton-Feldes.
- Aber zu der Zeit des ‘rollenden Inflatons’ gab es natürlich schon den Raum ‘an sich’ — unsere ‘elastische Membran’.



- Auch diese Schwingungen sind der Quantenmechanik unterworfen und demnach immer ‘ein wenig’ angeregt.
- Dies sind sogenannte ‘**primordiale**’ Gravitationswellen.

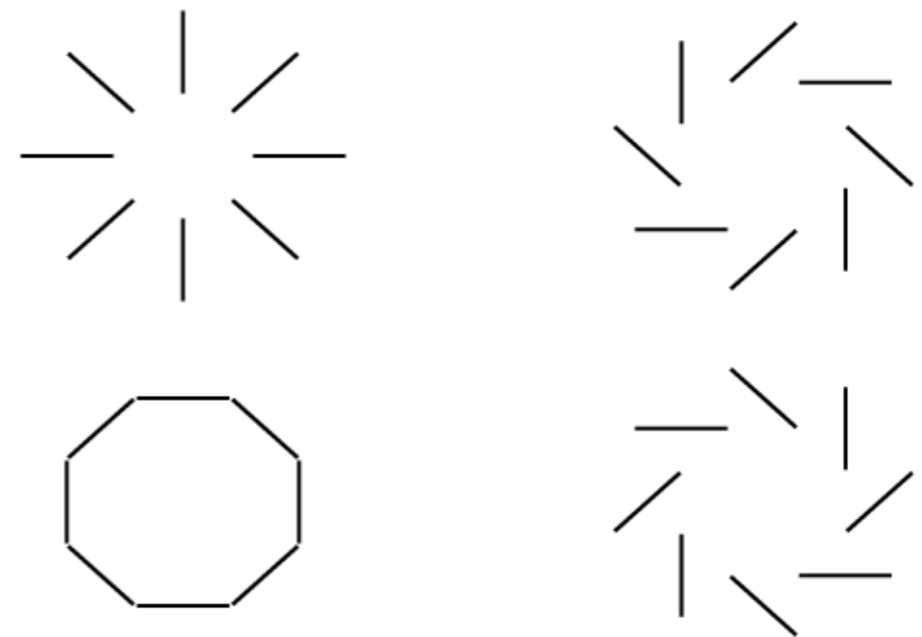
Der nicht ganz perfekte Big Bang — Polarisation

- Diese Gravitationswellen sind riesig im Vergleich zu denen, die von Paaren schwarzer Löcher kommen.



4.00 μK -230 230 μK

- Sie offenbaren sich in ‘Wirbeln’ der Polarisation der Hintergrundstrahlung.



B. Keating, arXiv:0806.1781 (Images by N. Miller, BICEP collaboration)

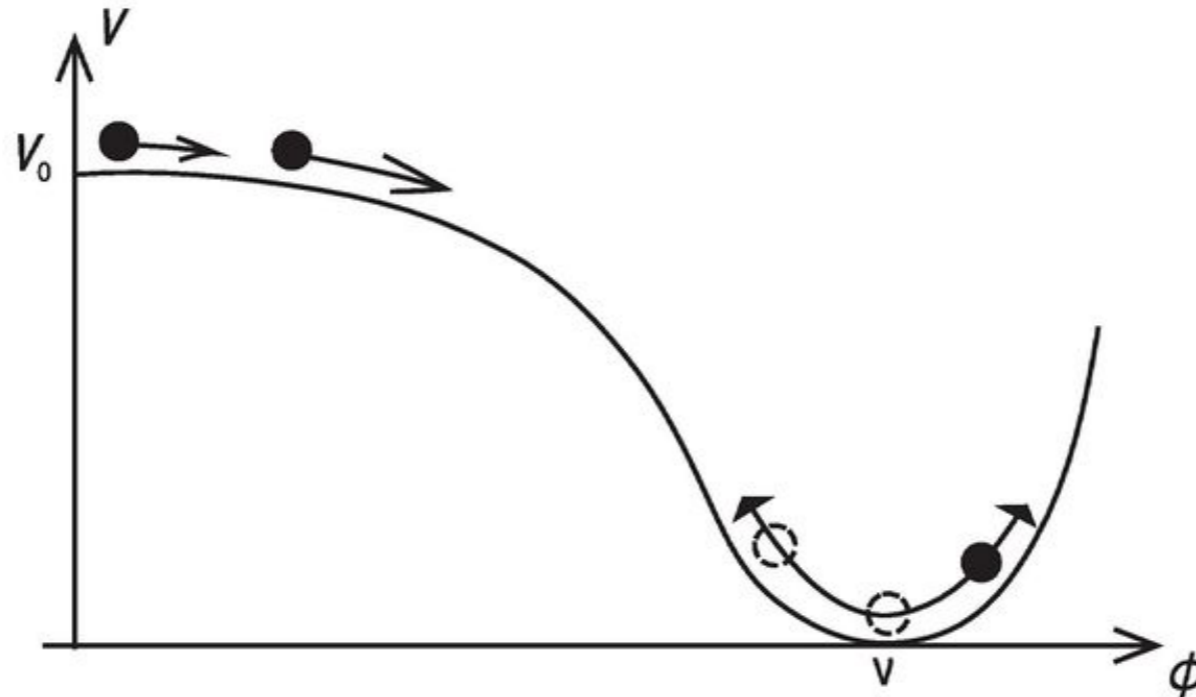
Primordiale Gravitationswellen

- Vor ein paar Jahren ging eine Meldung durch die Presse, dass man diese Art von Gravitationswellen entdeckt hätte.
- Dies hat in unserem Feld zu großer Aufregung geführt: Man hätte damit zum ersten Mal Quantenmechanik und Gravitation wechselwirken gesehen; man hätte die Energieskala der Inflation fixiert; man hätte etwas sehr Unerwartetes über Stringtheorie gelernt...
- Leider war es aber eine Fehlinterpretation der Daten: kosmischer Staub hatte den Polarisations-Effekt vorgetäuscht.
- Aber genauere Experimente sind in der Vorbereitung: Die Suche nach primordialen Gravitationswellen bleibt eines der spannendsten Unterfangen der aktuellen Forschung!

Gravitationswellen aus der heißen Phase des Universums

- Doch es gibt noch eine Art von Gravitationswellen, die auch aus dem ganz frühen, heißen Universum stammen.
- Dazu wollen wir uns erinnern, was unmittelbar nach der Inflation geschieht:

Bolton et al. , 'The Universe in Problems', arXiv0904.0382



- Das Inflation oszilliert um das Minimum seines Potentialtopfes und teilt dabei seine Energie mit allen anderen Teilchen/Feldern.
- Man nennt dies **Reheating**: Es entsteht ein sehr heißes Plasma.

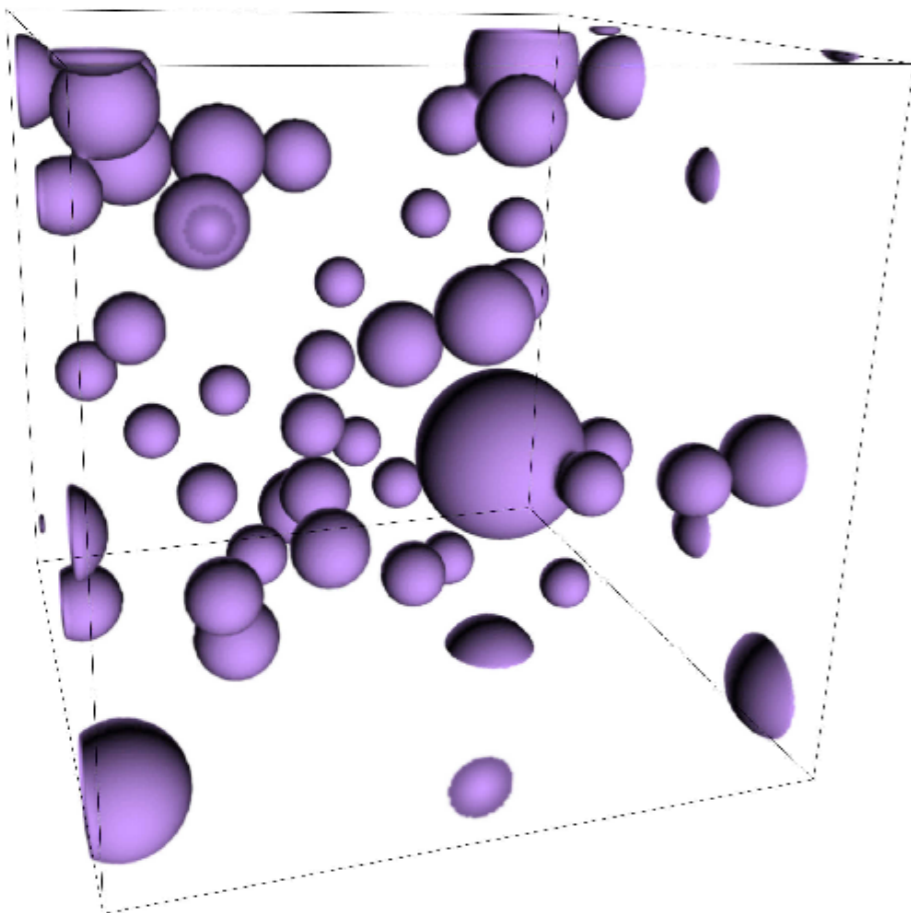
Gravitationswellen aus der heißen Phase des Universums

- Wenn nun dieses Plasma abkühlt (während sich das Universum langsam weiter ausdehnt), kann es zu **Phasenübergängen** kommen.
- Dies ist ganz analog zur Ausdehnung/Abkühlung eines Kolbens mit Wasserdampf, mit der entsprechenden Bildung kleiner Tropfen...



Gravitationswellen aus der heißen Phase des Universums

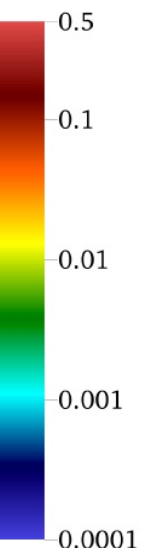
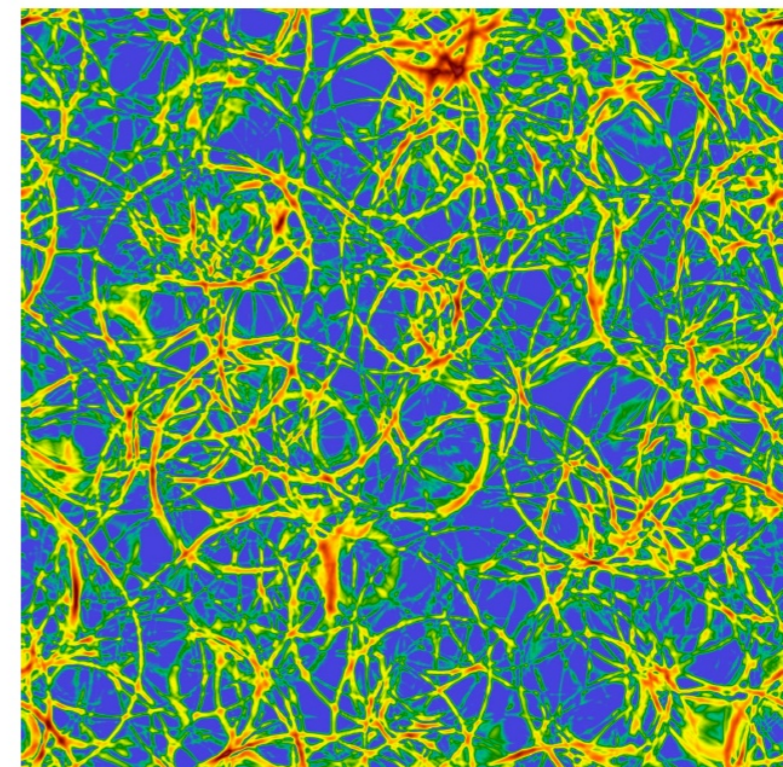
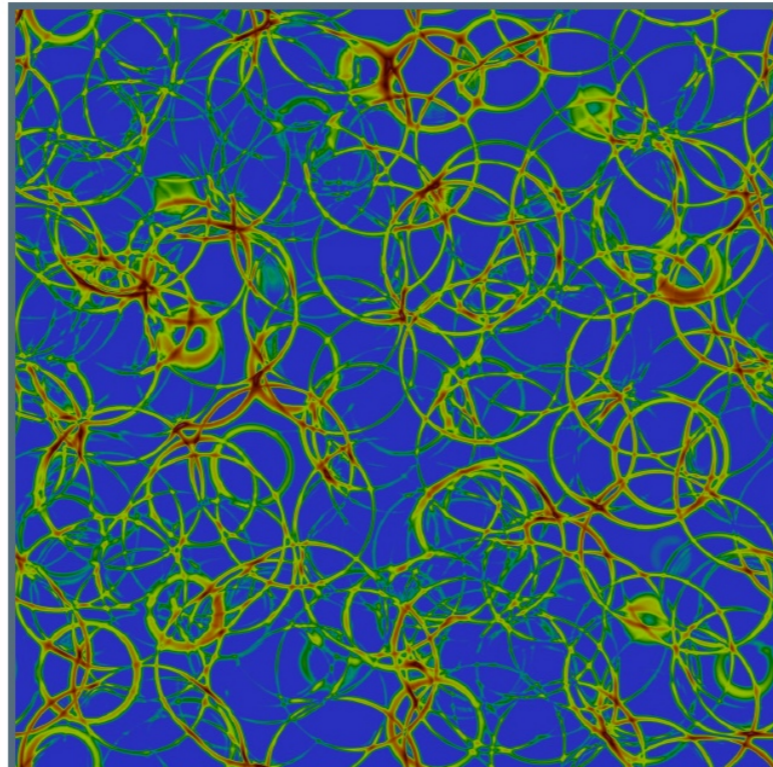
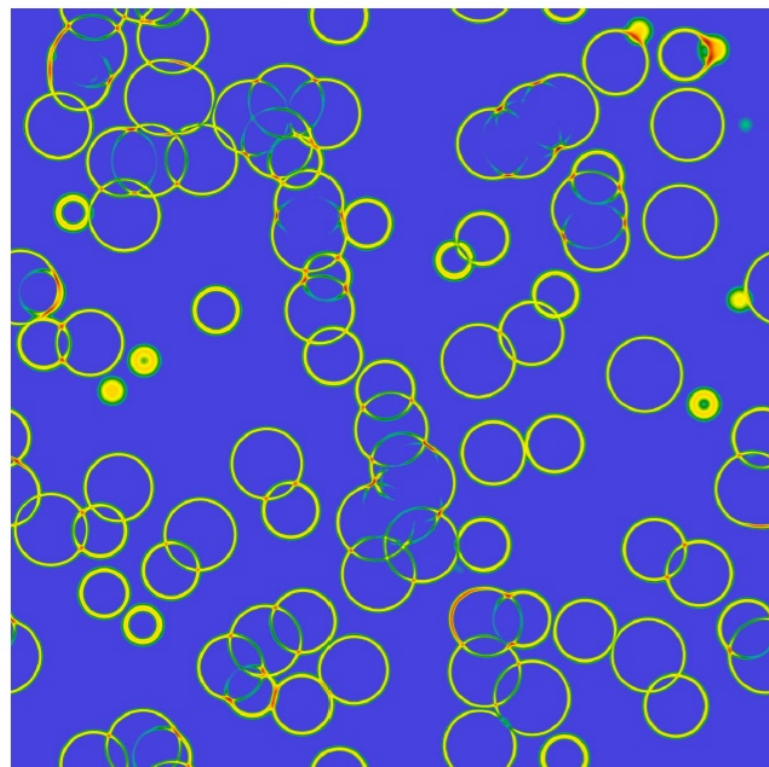
- Die heiße und kalte Phase sind natürlich in der Kosmologie nicht Dampf und Wasser.
- Vielmehr könnten es, um ein Beispiel zu nennen, eine Phase ohne Higgs-Kondensat (alle Teilchen masselos) und mit Higgs-Kondensat (fast alle Teilchen massiv - so wie wir es kennen) sein.



- Es hat sich in der Kosmologie eingebürgert, nicht von Tropfen sondern von Blasen zu sprechen.
- Blasen und Blasenwand haben eine andere Massendichte als die alte Phase - das krümmt den Raum.
- Aber zur Bildung von Gravitationswellen reicht das nicht — zu viel Symmetrie!

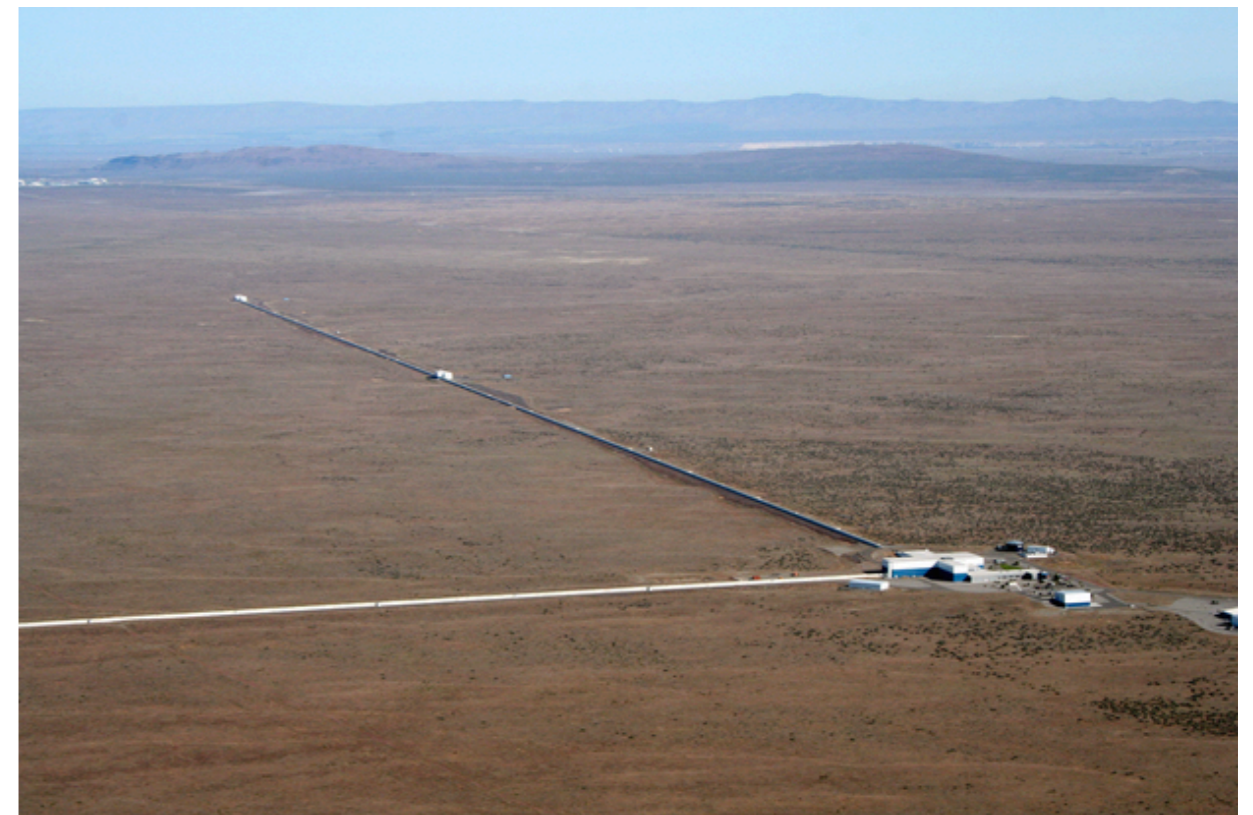
Gravitationswellen aus der heißen Phase des Universums

- Richtig spannend wird es erst, wenn die Blasen (speziell die Blasenwände) kollidieren.
- Die sphärische Symmetrie ist jetzt aufgehoben — die Blasenwände und die nach deren Kollision entstehenden Schockwellen senden Gravitationswellen aus.
- Das ist analog zu einem heißen Plasma von Elektronen und Protonen, dass Lichtwellen aussendet.



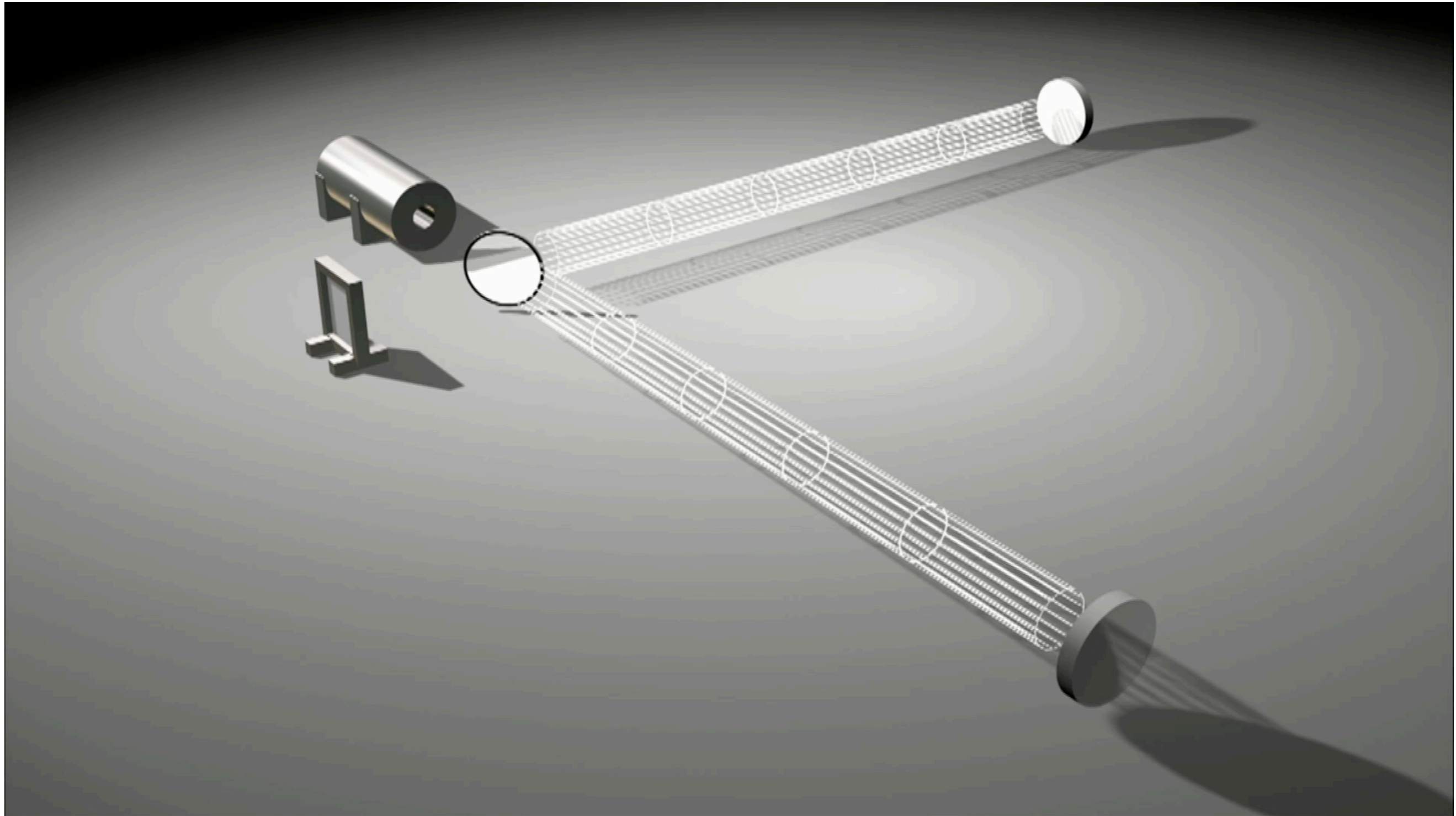
Messung der Gravitationswellen aus Phasenübergängen

- Die so entstehenden Gravitationswellen sind das einzige Signal aus dem ganz jungen Universum.
- Jedes andere Signal wird von dem frühen, sehr heißen Plasma absorbiert.
- Sie sind im Gegensatz zu den primordialen Wellen relativ kurzweilig und können durch Detektoren auf der Erde gemessen werden.
- Dies sind Detektoren von dem Typ, wie sie die Gravitationswellen von Paaren schwarzer Löcher gefunden haben (LIGO).



Caltech/MIT/LIGO Laboratory

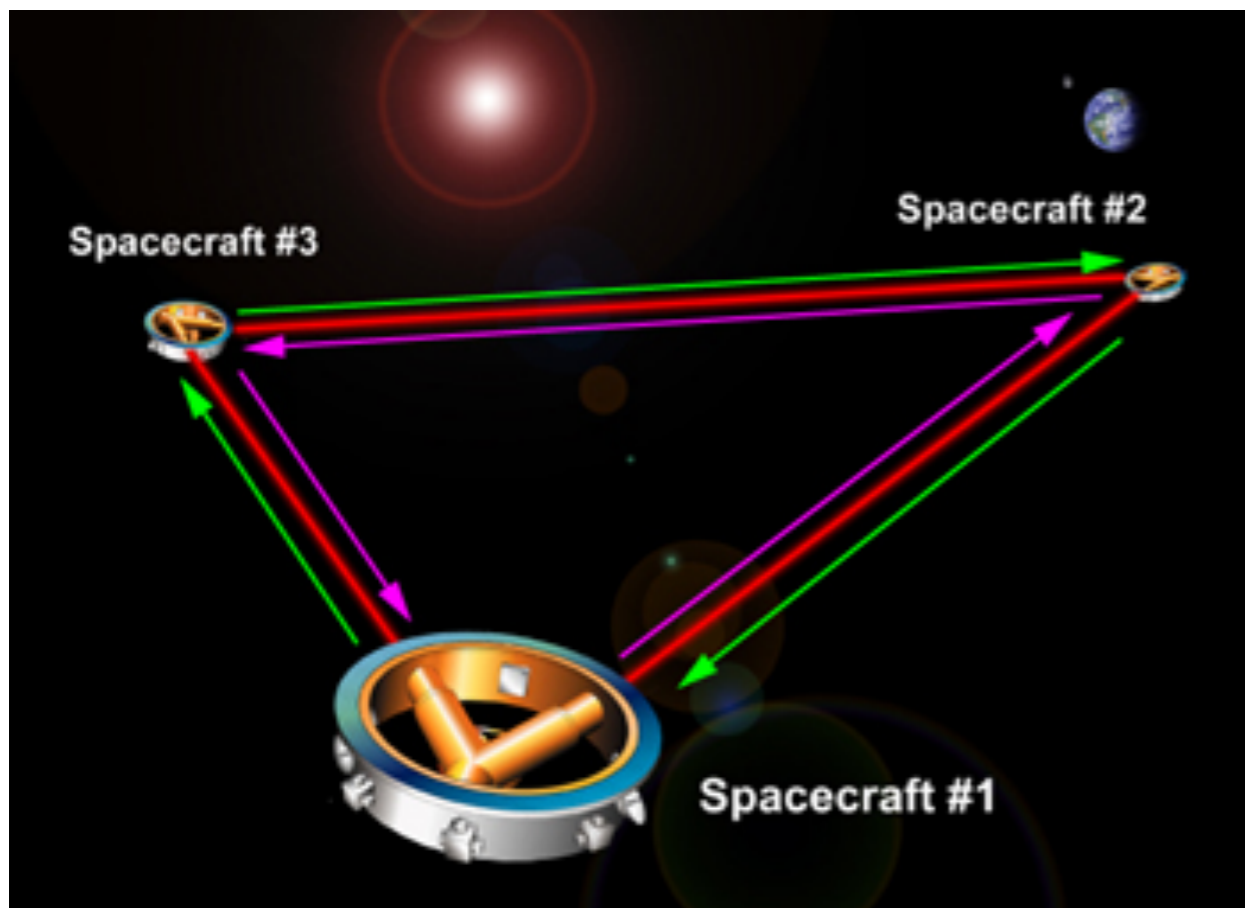
Interferometer zur Gravitationswellen-Messung (LIGO)



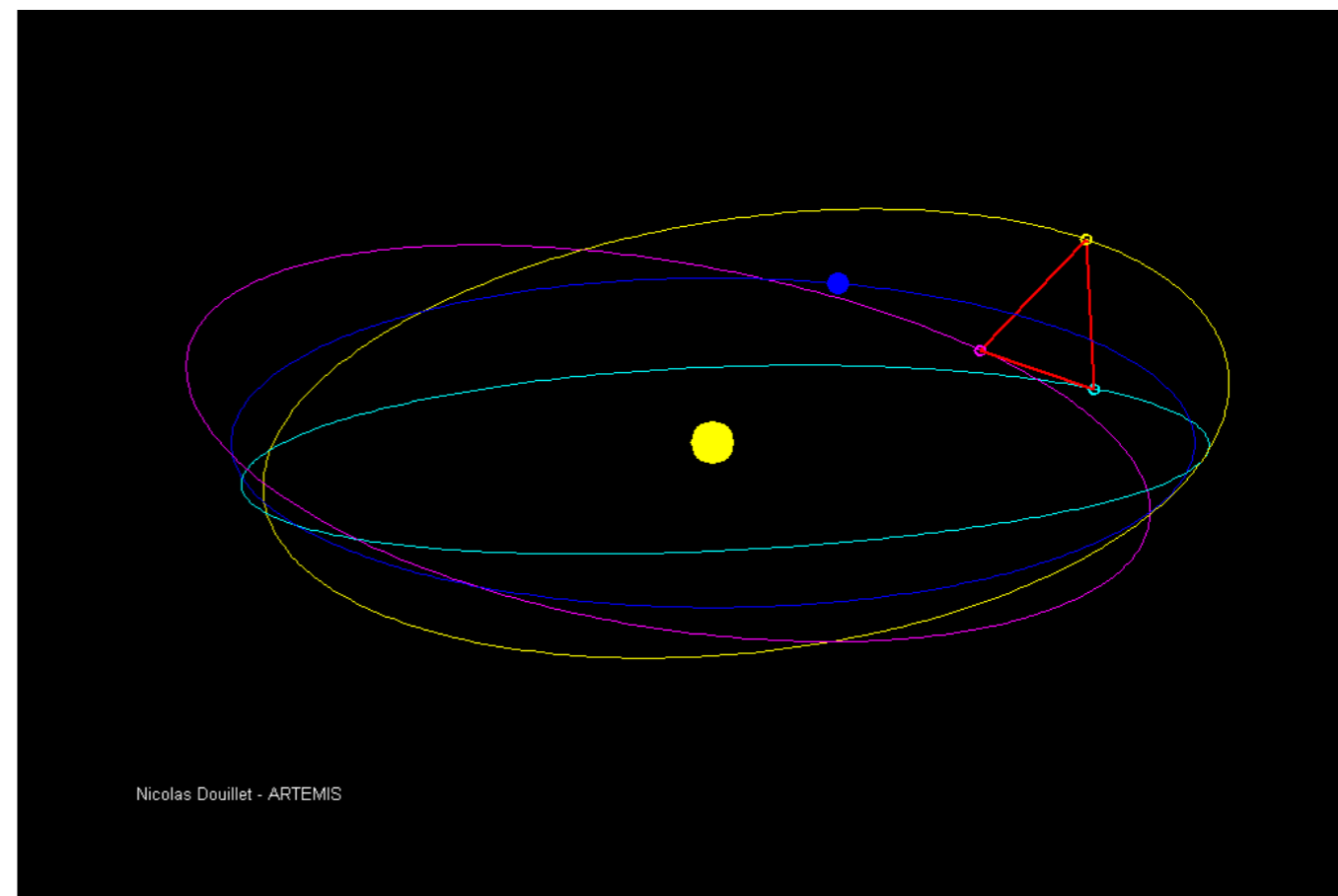
Caltech/MIT/LIGO Laboratory

Zukünftige Gravitationswellen-Detektoren

- Eines der Projekte für die Zukunft (LISA) wird u.a. von der European Space Agency geplant.
- Es besteht aus drei Satelliten mit Abständen von jeweils ca. 5 Millionen km, welche die Sonne umrunden.



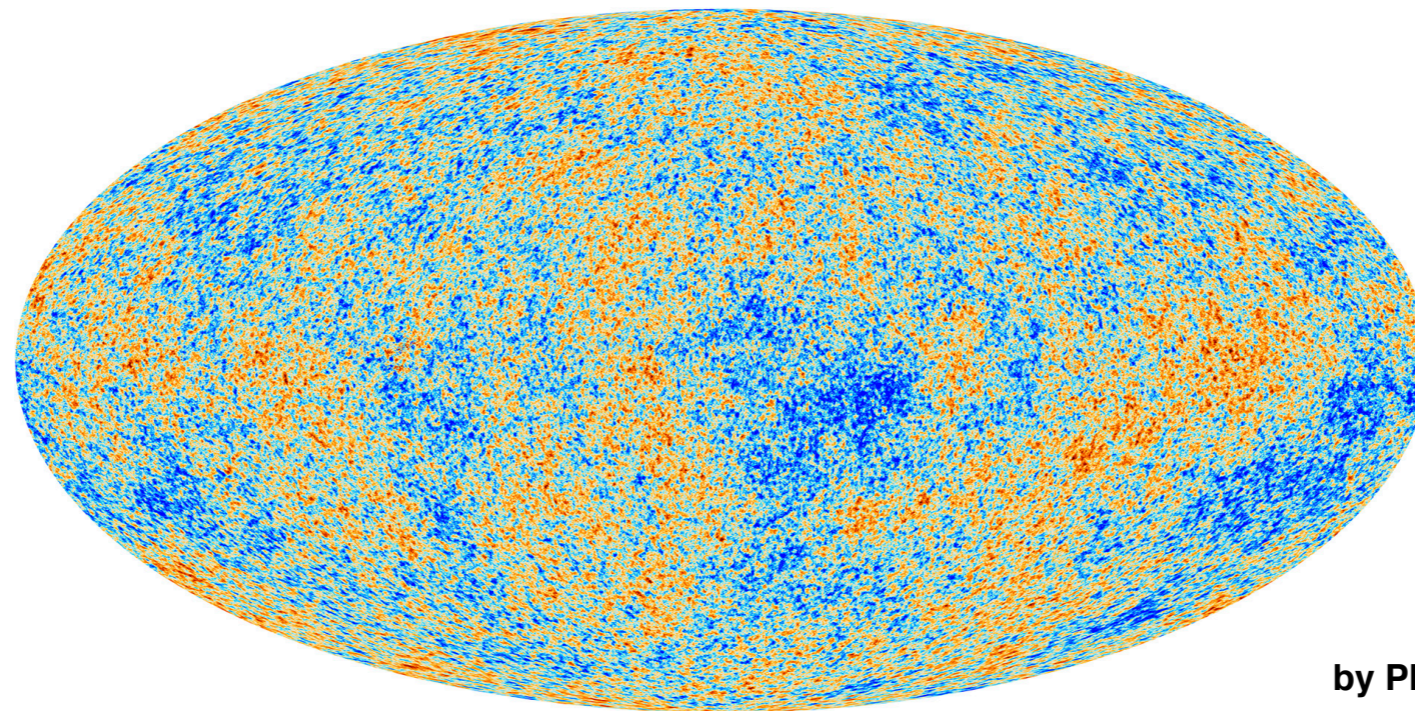
NASA, JPL



Nicolas Duillet, ARTEMIS ([wikipedia.org](https://www.wikipedia.org))

Zusammenfassung

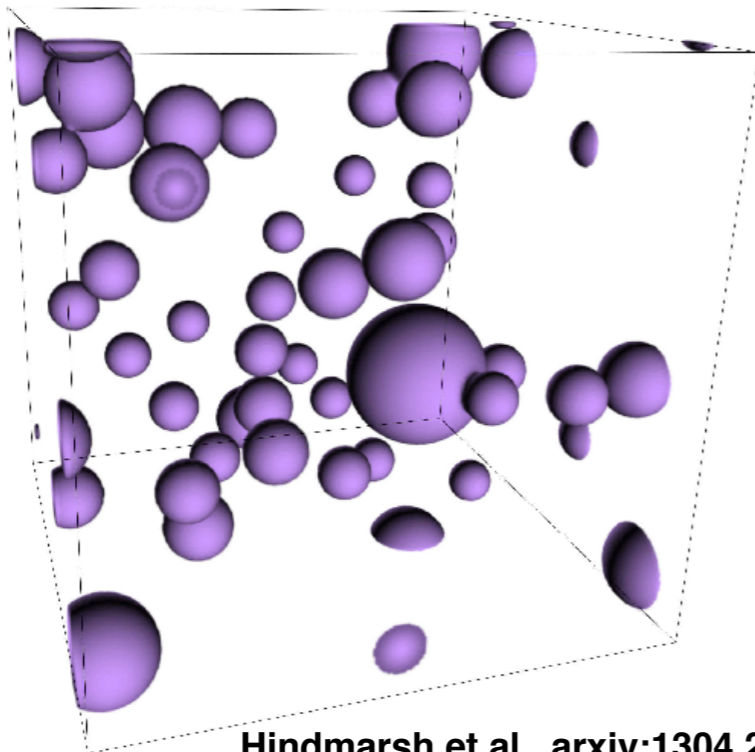
- Wir haben über zwei Arten von Gravitationswellen gesprochen.
- Die erste (primordiale Gravitationswellen) geben uns Auskunft über die kosmologische Inflation — eine Periode extrem schneller Ausdehnung ‘vor dem Big Bang’. Sie sind ein erster, einfacher Test der Quantengravitation und vielleicht der Stringtheorie.
- Man erkennt sie als ‘Muster’ in der kosmischen Hintergrundstrahlung.



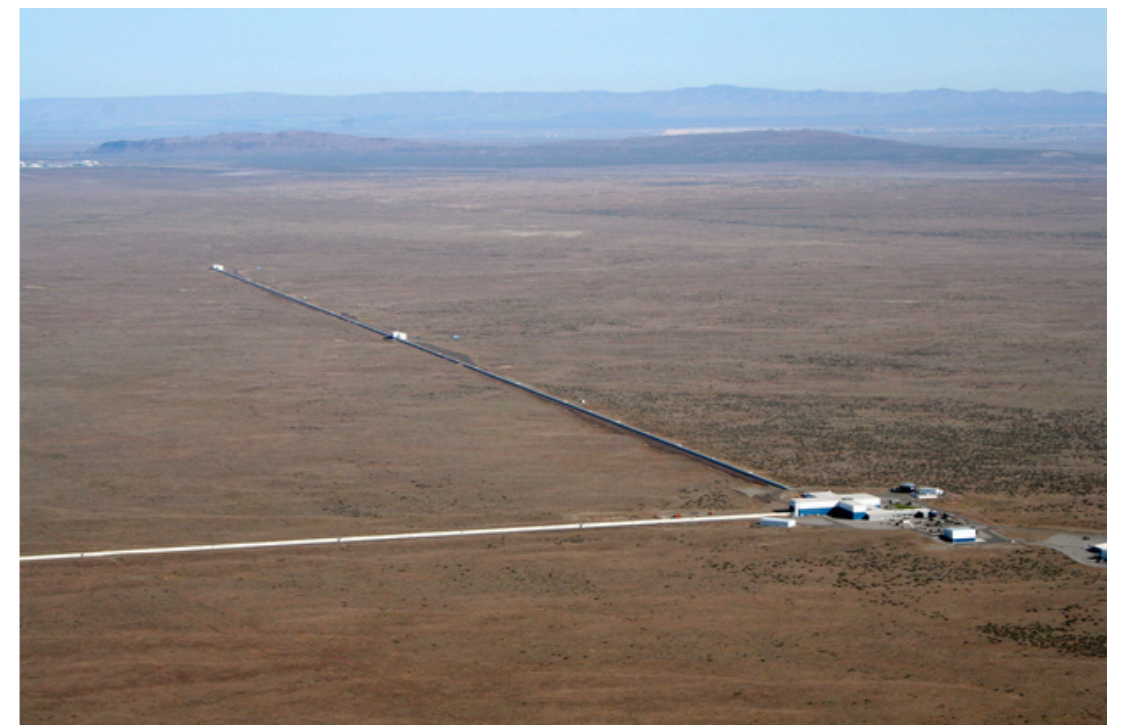
by Planck satellite

Zusammenfassung

- Die zweite Art von **Gravitationswellen** kommen von **Phasenübergängen** im frühen, heißen Universum.
- Sie kommen aus dem eigentlichen Big Bang und können über die Physik bei Energien Auskunft geben, die selbst das CERN nicht erreicht.
- Nach ihnen wird mit Interferometern auf der Erde gesucht (so wie nach den Gravitationswellen von schwarze Löchern).



Hindmarsh et al., arxiv:1304.2433



Caltech/MIT/LIGO Laboratory