

Kosmologie heute: Vom Urknall zum expandierenden Universum

Ferienakademie „Meet and Greet: Astrophysik trifft Religion“, 20.08.2026

Carlo Tasillo

Feodor-Lynen Fellow
Universitat de València



Alexander von
HUMBOLDT
STIFTUNG



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA



Kleine Vorbemerkung: Der Titel ist irreführend...

Die Urknall-Theorie beschreibt das expandierende Universum bis heute und gerade nicht den „Zeitpunkt null“.

„Urknall“ klingt nach einem Moment. Gemeint ist in der Physik aber ein **Prozess**: die Entwicklung eines expandierenden, abkühlenden Universums aus einem heißen, dichten Frühzustand.

~~Moment~~

Urknall



Was war vor „dem Urknall“?

Wie groß ist das Universum?

Wohin dehnt sich das Universum aus?

Woraus besteht das Universum?

Was ist „der Urknall“?

Wie hat man das alles herausgefunden? Wie könnte das Universum enden?

Sind wir alle aus Sternenstaub?

Die Leitfragen für Teil I

**Ist das Universum endlich oder unendlich?
Steht es still oder bewegt es sich?
Und wenn es stillsteht: ist das überhaupt stabil?**

Diese Frage taucht in der **Antike** auf, bei **Cusanus**, bei **Newton**, ...
und wird erst **1922** wirklich beantwortbar.

Kosmologie heute: Vom Urknall zum expandierenden Universum

Ferienakademie „Meet and Greet: Astrophysik trifft Religion“, 20.08.2026

Carlo Tasillo

Feodor-Lynen Fellow
Universitat de València



Alexander von
HUMBOLDT
STIFTUNG



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA



Eine doppelte Zeitreise zum Rand des beobachtbaren Universums

Ferienakademie „Meet and Greet: Astrophysik trifft Religion“, 20.08.2026

Carlo Tasillo

Feodor-Lynen Fellow
Universitat de València



Alexander von
HUMBOLDT
STIFTUNG



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA



INSTITUT DE
FÍSICA
CORPUSCULAR



EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA

Zeit für ein Gedankenexperiment

Die Zeit ist ein Fluss, der niemals stillsteht. Sie fließt von der Vergangenheit in die Zukunft, und wir sind nur Augenblicke in diesem Strom. In diesem Gedankenexperiment werden wir versuchen, die Natur der Zeit zu verstehen und zu erfahren, wie sie unsere Wahrnehmung und unser Leben beeinflusst.

Wir werden uns fragen: Was ist Zeit? Ist sie eine Illusion, oder ist sie eine fundamentale Eigenschaft der Realität? Wie kann sie gemessen werden, und was bedeutet das für unser Verständnis der Welt? Diese Fragen sind nicht nur philosophisch, sondern auch physikalisch, und wir werden versuchen, sie aus beiden Perspektiven zu betrachten.

Wir werden uns mit den verschiedenen Theorien der Zeit befassen, von der klassischen Physik bis zur Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Wir werden sehen, wie diese Theorien die Natur der Zeit beschreiben und wie sie sich gegenseitig beeinflussen. Wir werden auch die Rolle der Zeit in der Kosmologie und der Evolution betrachten.

Wir werden uns mit den verschiedenen Arten von Gedankenexperimenten befassen, die zur Erforschung der Zeit verwendet wurden. Wir werden sehen, wie diese Experimente unsere Vorstellung von der Zeit erweitert haben und wie sie zu neuen Entdeckungen geführt haben. Wir werden auch die Grenzen der Gedankenexperimente betrachten und sehen, wie sie mit anderen Methoden der Wissenschaft verbunden werden können.

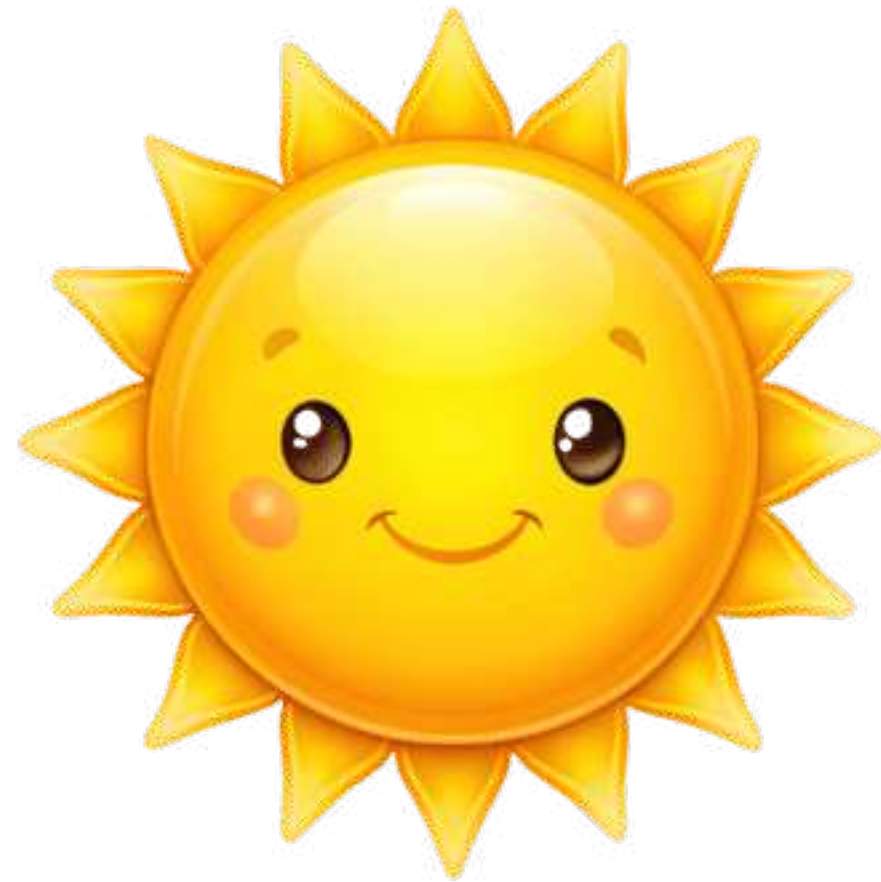
Wir werden uns mit den verschiedenen Philosophen der Zeit befassen, von den Antiken bis zur Moderne. Wir werden sehen, wie ihre Vorstellungen von der Zeit sich über die Jahrhunderte hinweg entwickelt haben und wie sie unsere heutige Sichtweise auf die Zeit beeinflusst haben. Wir werden auch die Rolle der Zeit in der Kunst und der Literatur betrachten.

Wir werden uns mit den verschiedenen Arten von Zeit befassen, von der physikalischen Zeit bis zur psychologischen Zeit und der Zeit der Kunst. Wir werden sehen, wie diese verschiedenen Arten von Zeit miteinander verbunden sind und wie sie unser Leben beeinflussen. Wir werden auch die Rolle der Zeit in der Zukunft betrachten und sehen, wie sie unsere Visionen der Zukunft beeinflussen wird.

Gedankenexperiment



Auflösung



8 Lichtminuten



Die Erde zieht erstmal seelenruhig weiter ihre Bahn und die Sonne scheint am Himmel weiter.

Licht und jede andere Information (auch die Gravitation) breitet sich maximal mit Lichtgeschwindigkeit aus. Ein Blick in die Ferne ist immer auch ein Blick in die Vergangenheit.

$$c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

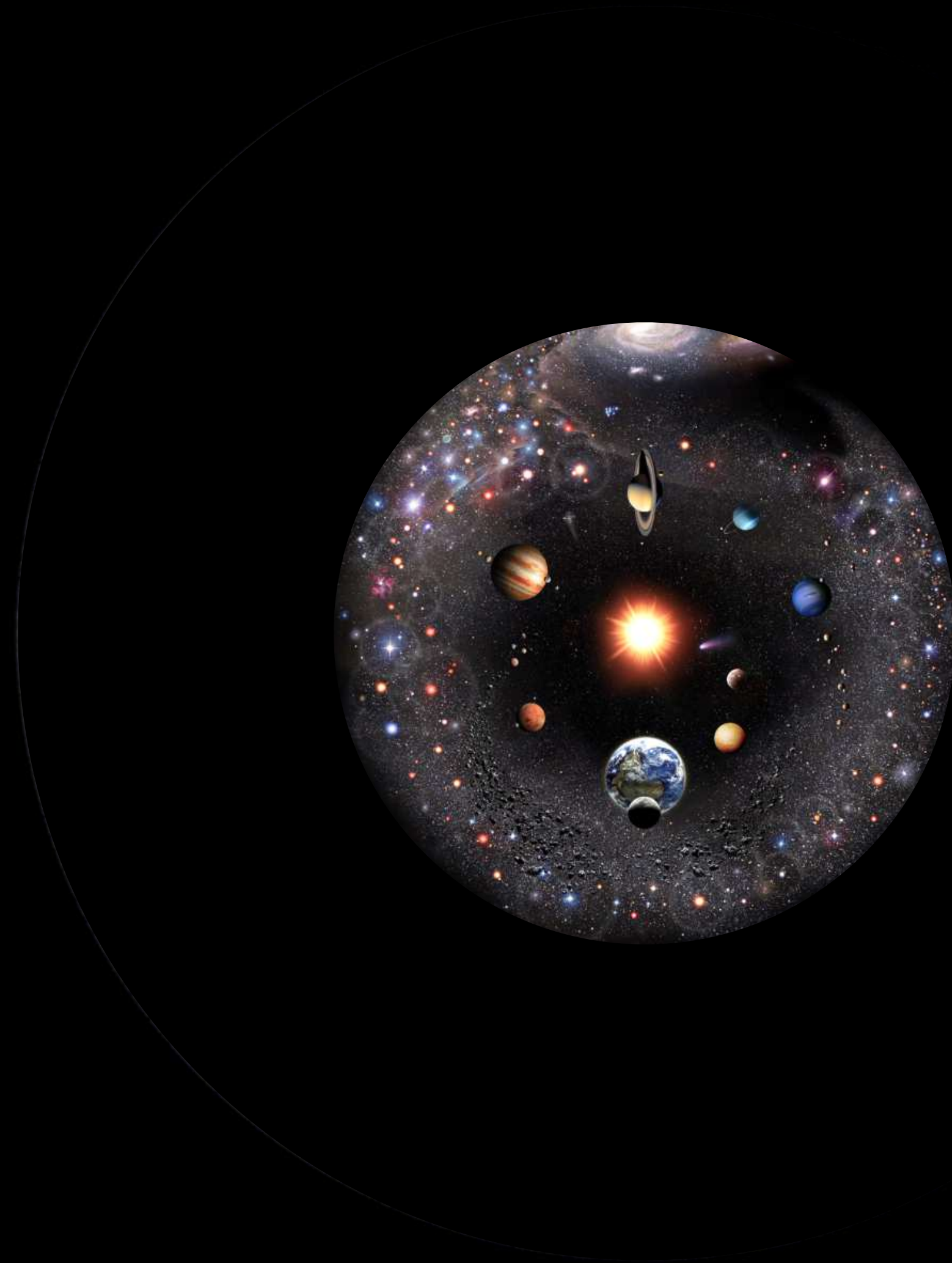
Das beobachtbare Universum



Unser Sonnensystem

PABLO
CARLOS
BUDASSI

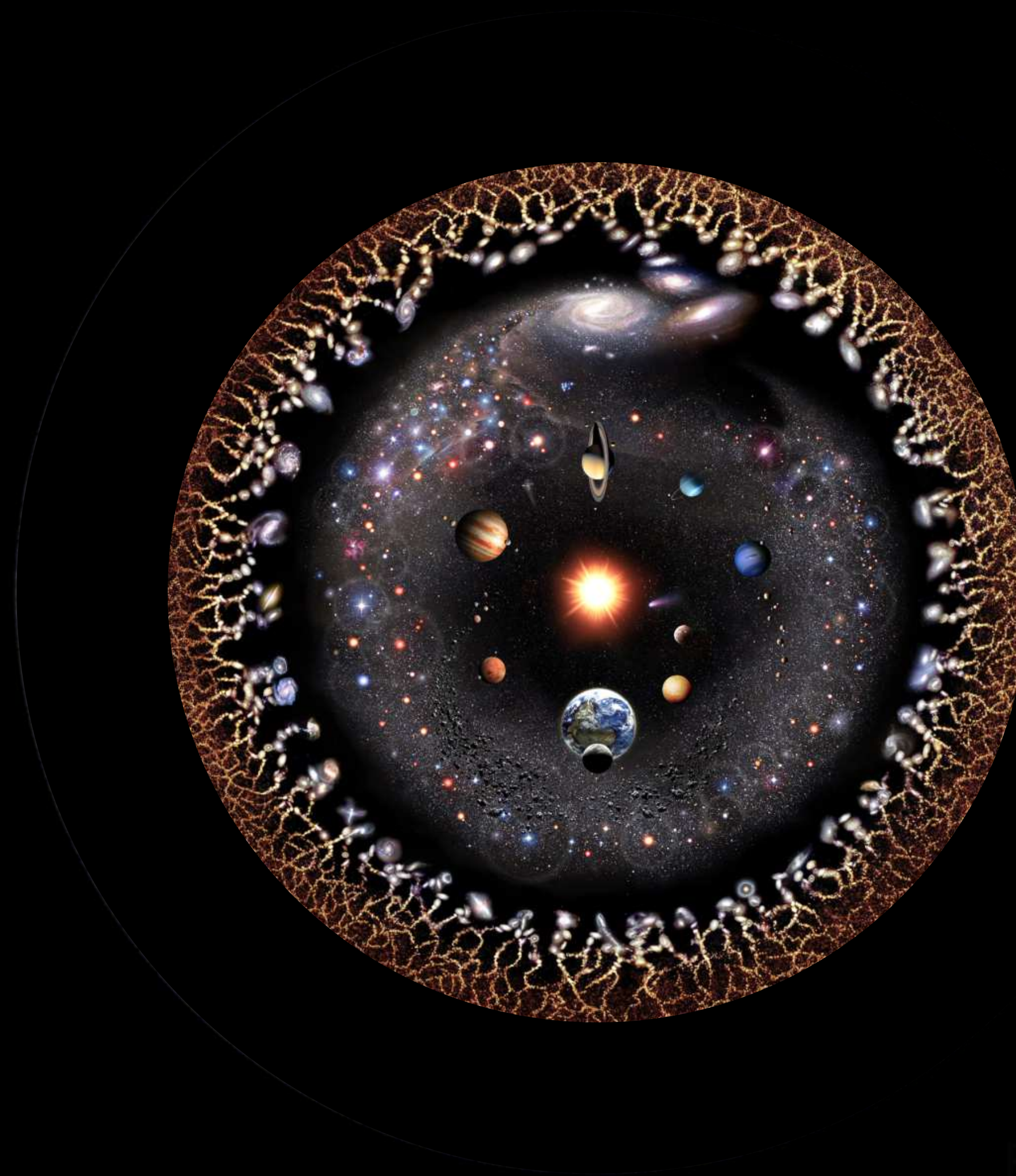
Das beobachtbare Universum



Die Milchstraße

PABLO
CARLOS
BUDASSI

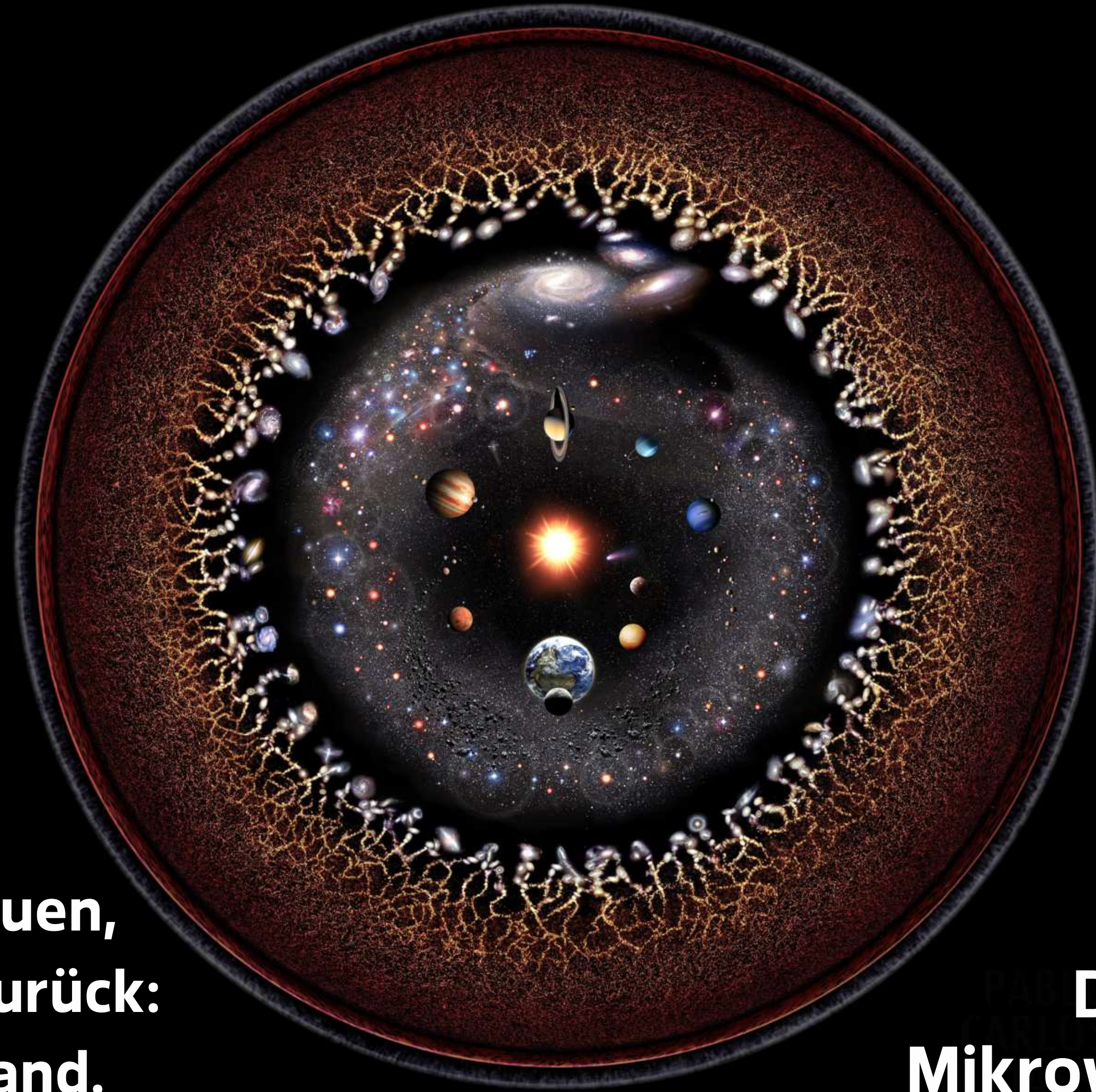
Das beobachtbare Universum



Andere Galaxien

PABLO
CARLOS
BUDASSI

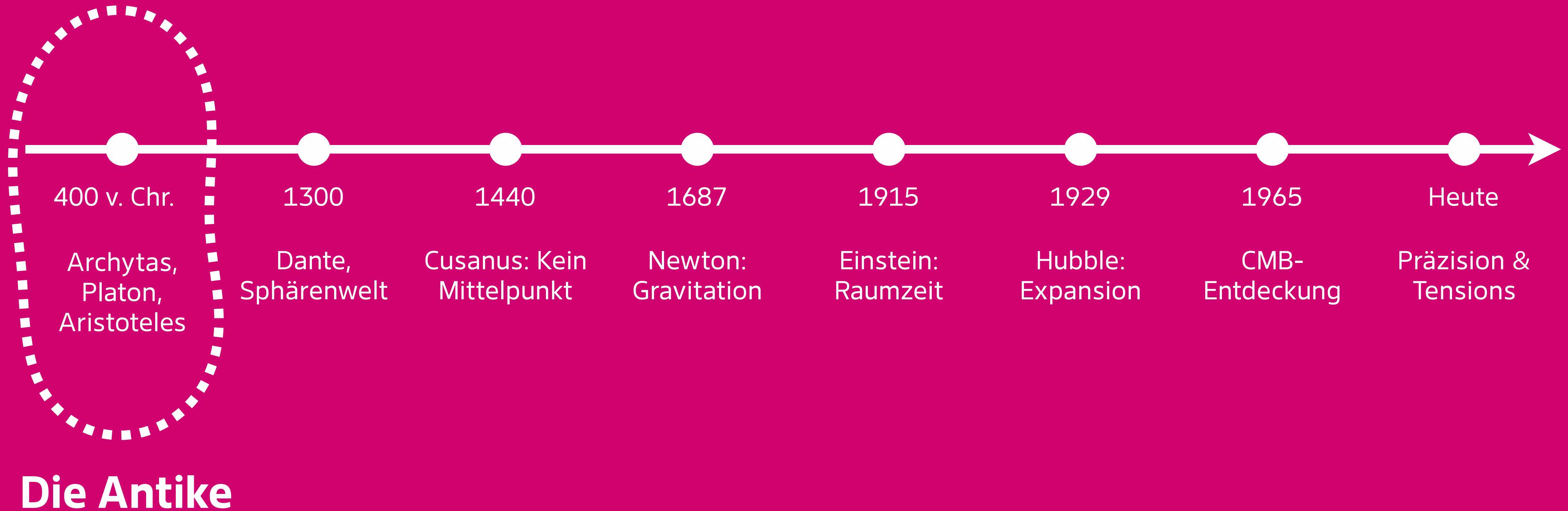
Das beobachtbare Universum



**Je weiter wir hinausschauen,
desto weiter blicken wir zurück:
Bis zu einer Art roter Wand.
Weiter geht es nicht.**

**Der kosmische
Mikrowellen-Hintergrund**

Wie sind wir zu diesem Bild gelangt?



Platon vs. Archytas: Der Kosmos als geometrische Harmonie



Platon, ca. 428–348 v. Chr.

Die Welt ist eine Kugel, von einer Weltseele durchdrungen. Die Gestirne bewegen sich auf konzentrischen Sphären um die Erde.

Ein endlicher, geschlossener, vollkommen geordneter Kosmos: Schön, symmetrisch, und damit für Platon zwingend richtig.



Archytas, ca. 435–350 v. Chr.

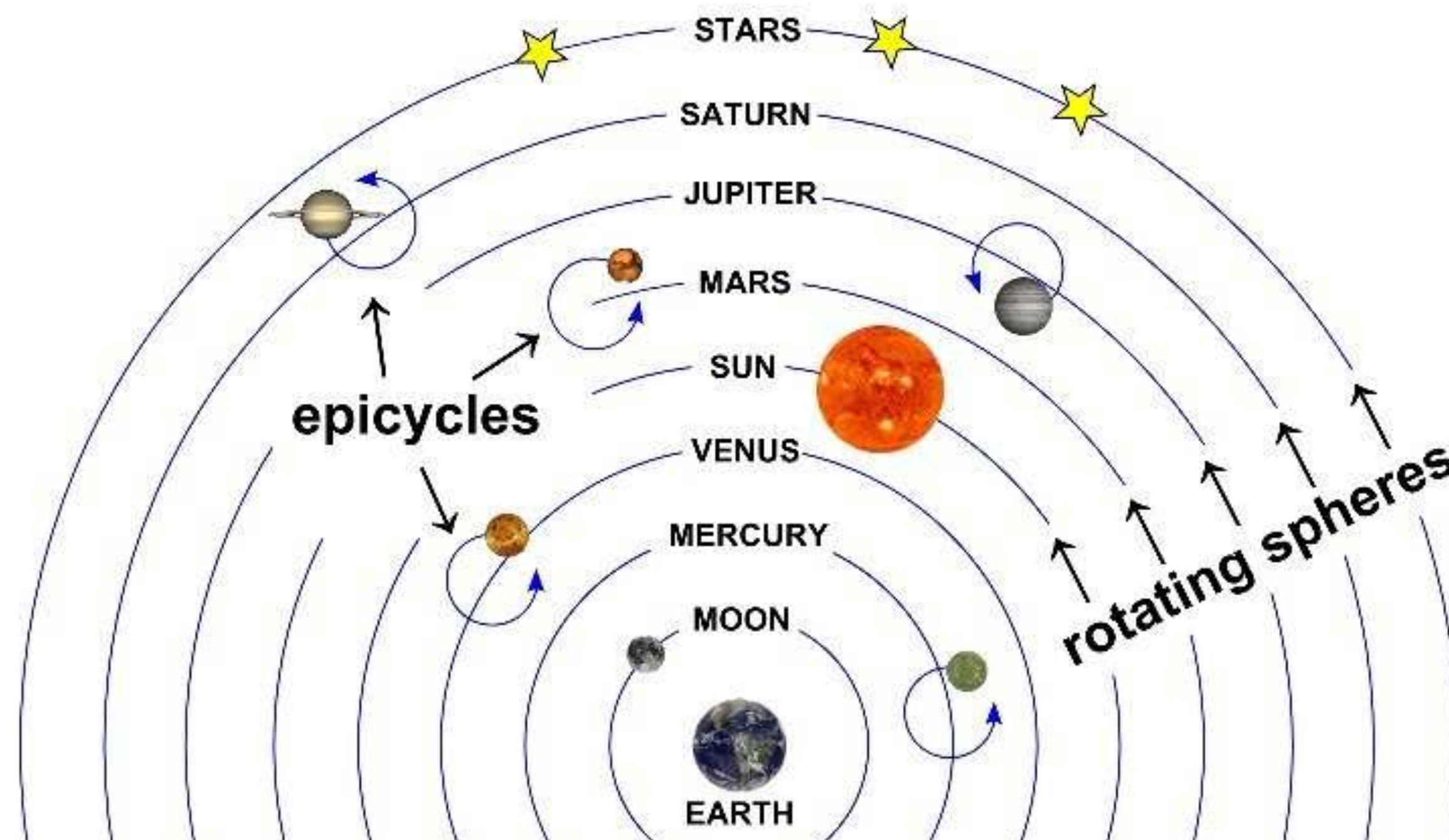
Wenn das Universum einen Rand hat, kann man an diesen Rand gehen und einen Stock hinausstrecken. Da ein Hindernis außerhalb des Randes unmöglich ist, muss der Raum unendlich weitergehen.

Aristoteles und Ptolemäus: 2000 Jahre geschlossene Sphären

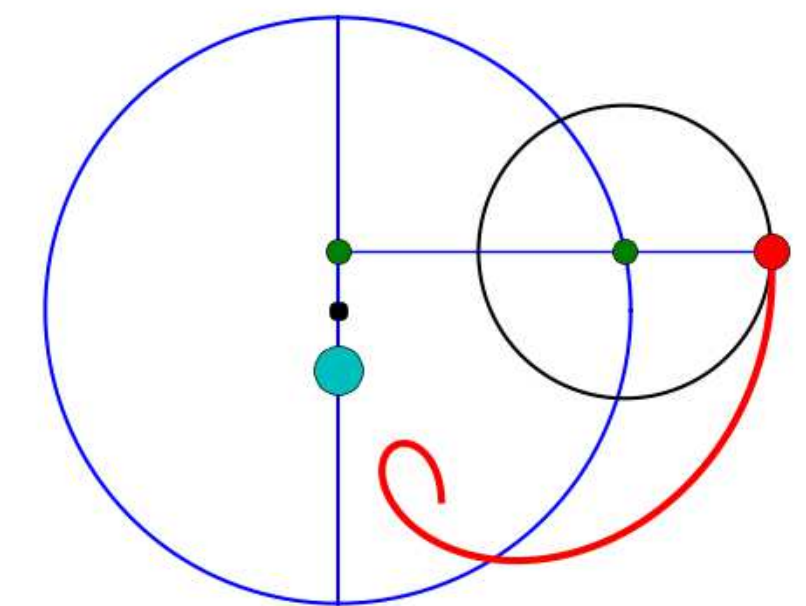


Aristoteles, 384–322 v. Chr.

Der Kosmos ist endlich und kugelförmig: Ganz außen der unbewegte Beweger.



Claudius Ptolemäus, ca. 100–160 n. Chr.

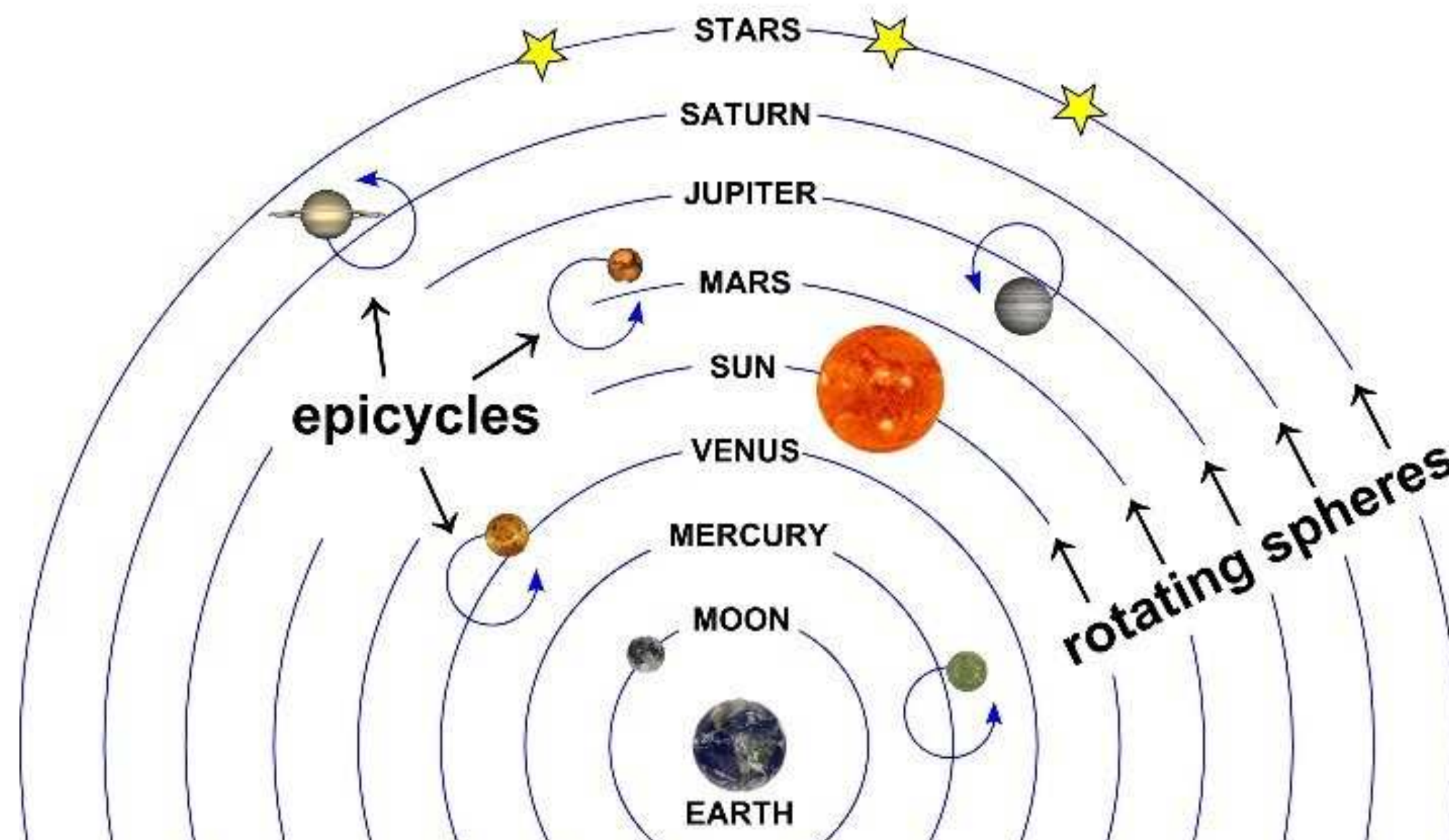


Aristoteles und Ptolemäus: 2000 Jahre geschlossene Sphären

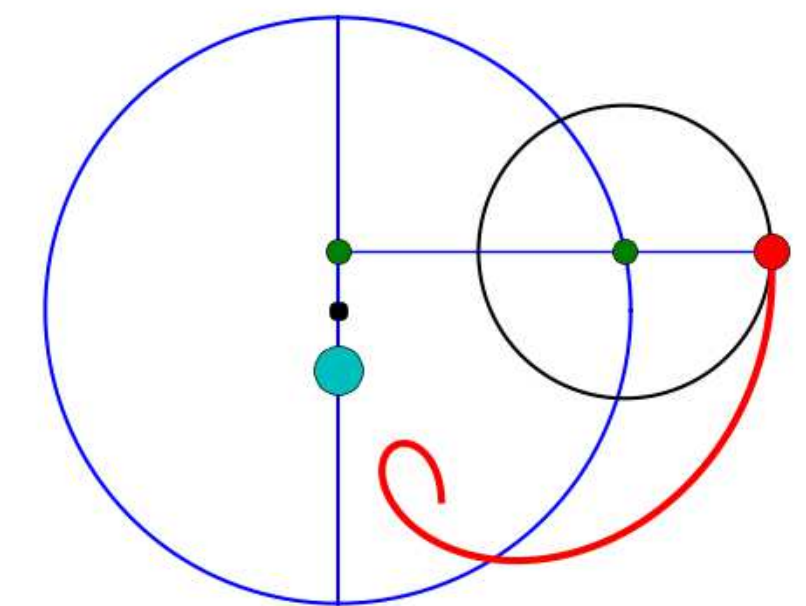


Aristoteles, 384–322 v. Chr.

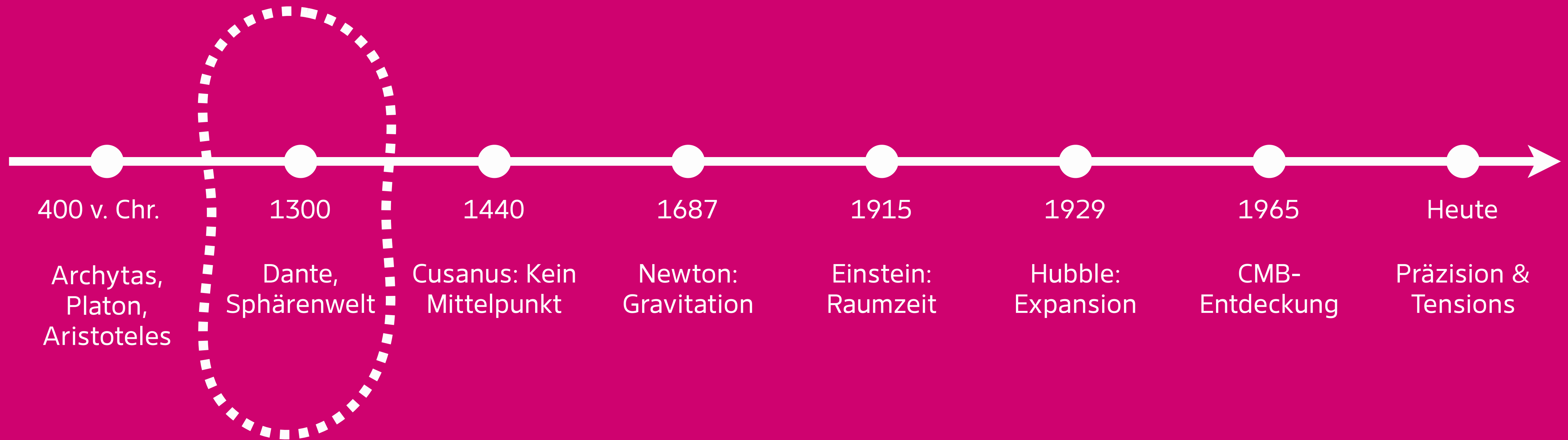
Der Kosmos ist endlich und kugelförmig: Ganz außen der unbewegte Beweger.



Claudius Ptolemäus, ca. 100–160 n. Chr.

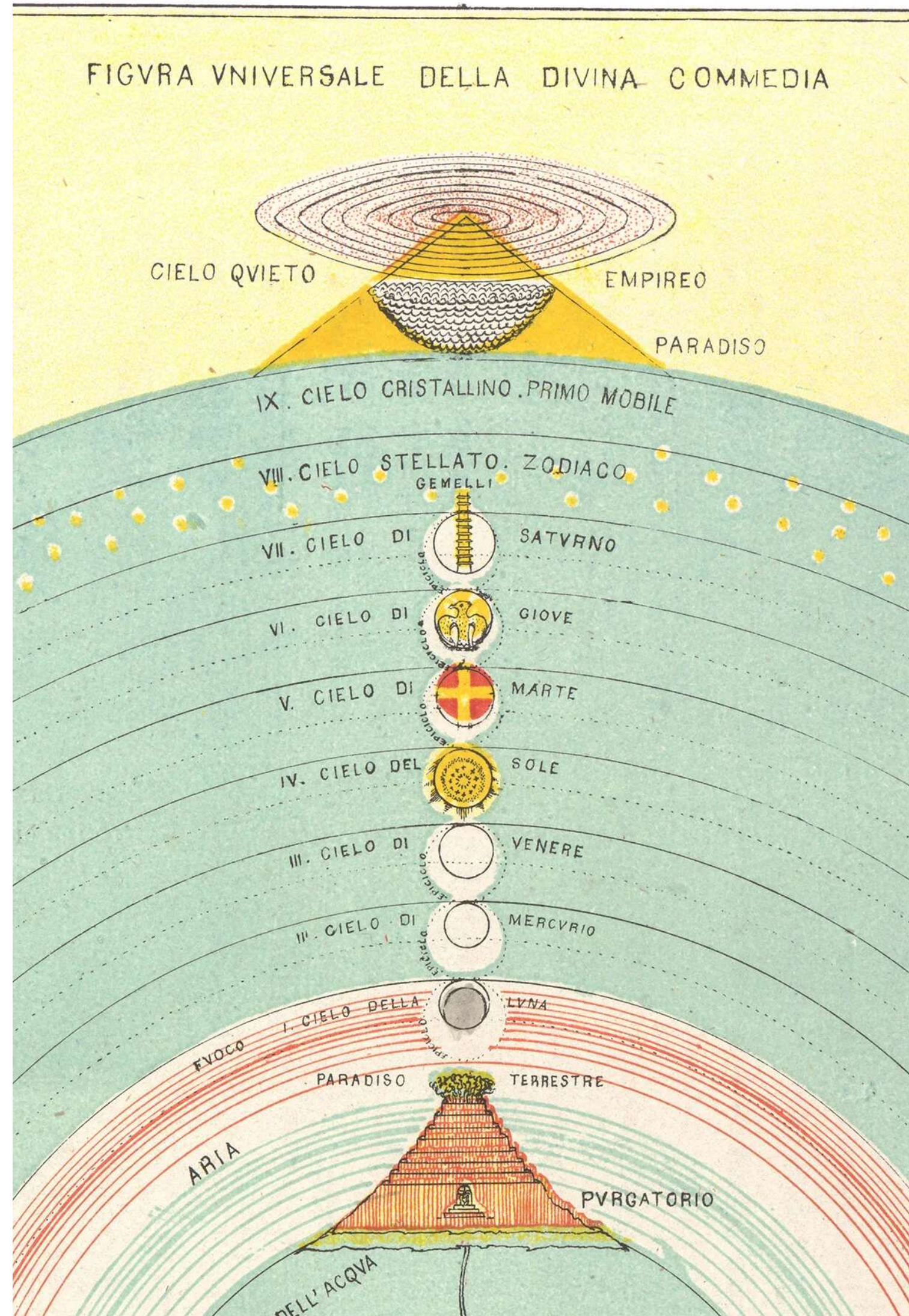


Wie sind wir zu diesem Bild gelangt?



**Die endliche, geschlossene
Sphärenwelt wird Kultur**

Mittelalter: Die Sphärenwelt als göttliche Ordnung und Reiseroute



Hildegard v. Bingen,
1098-1179



Thomas von Aquin,
1225-1274

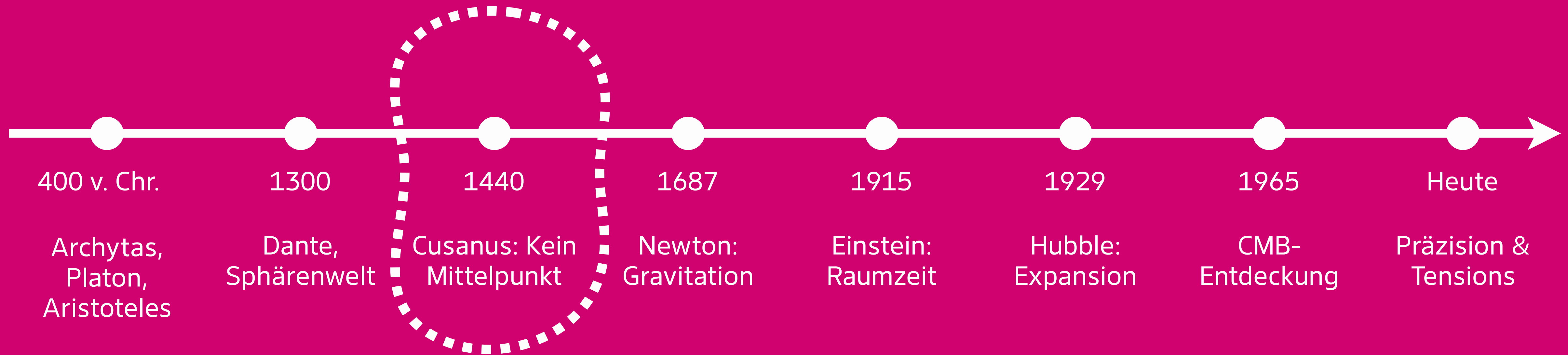
In den Visionsschriften *Scivias* erscheint der Kosmos als Sphärenstruktur, Ausdruck der göttlichen Ordnung. Aristoteles Kosmologie wird nicht hinterfragt sondern symbolisch-theologisch aufgeladen.

In der *Divina Commedia* durchwandert die Seele neun Himmelssphären: Mond · Merkur · Venus · Sonne · Mars · Jupiter · Saturn · Fixsternsphäre · Kristallhimmel bis zum Empyreum, jenseits von Raum und Zeit. Das ist im Kern Ptolemäus, poetisch und kulturell aufgeladen.



Dante Alighieri, 1265-1321

Wie sind wir zu diesem Bild gelangt?



**Renaissance: Die Frage
nach der Endlichkeit**

Cusanus und Giordano Bruno: Radikale Gedanken und Humanismus

Daher wird die Weltmaschine sozusagen ihren Mittelpunkt überall und ihren Umfang nirgends haben...

Unde erit machina mundi quasi habens ubique centrum et nullibi circumferentiam...

De docta ignorantia, 1440

Non è termine alcuno, né margine, né superficie...

De l'infinito, universo e mondi, 1584

Der Mittelpunkt des Universums ist überall und der Umfang nirgends.



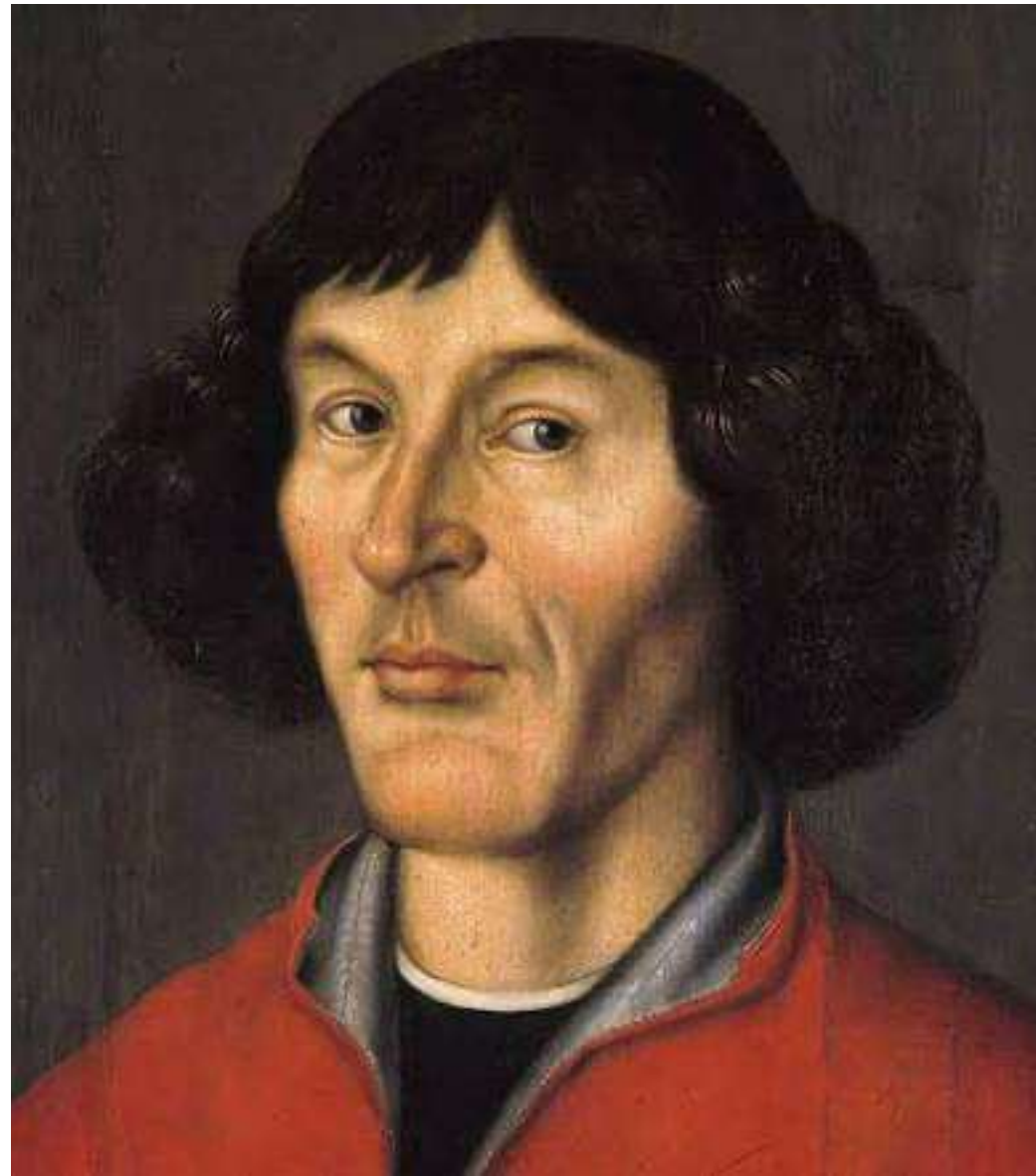
Nikolaus von Kues, 1401-1464

Kein Fernrohr, keine Messung. Reine Vernunftphilosophie. Und trotzdem ist die alte Frage damit wieder offen, gut 100 Jahre vor Kopernikus.



Giordano Bruno, 1548-1600

Die Naturwissenschaften holen auf



Nikolaus Kopernikus, 1473-1543

Heliozentrisch statt
geozentrisch, aber noch mit
Kreisbahnen und Epizykeln



Tycho Brahe, 1546-1601

Die genauesten vor-
teleskopischen Daten;
vertritt ein hybrides Modell



Johannes Kepler, 1571-1630

Wertet Brahes Daten aus und
findet Ellipsen statt Kreise;
formuliert Gesetzmäßigkeiten

Die Kombination aus Daten und guten Ideen bringt den Durchbruch

Galileo Galilei und die Inquisition



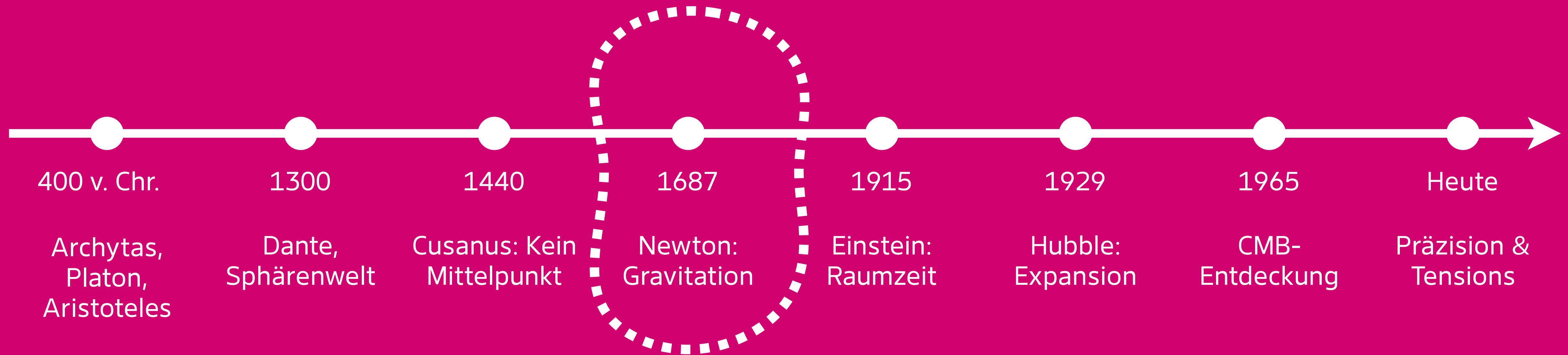
Galileo Galilei, 1564–1642

- ➔ Liefert die ersten beobachtungsbasierten Argumente für Kopernikus mit seinen Fernrohren
- ➔ Jupitermonde, Venusphasen, Berge auf dem Mond und Flecken auf der Sonne: Inkompatibel mit dem „vollkommenden“ Bild des Himmels der Kirche
- ➔ 1633 von der Inquisition wegen seines Dialoges verurteilt

„Darum, Signore Simplicio, bringt uns Ewere Beweise oder des Aristoteles Gründe und Beweise, nicht aber Zitate und bloße Autoritäten; denn unsere Untersuchungen haben die Welt der Sinne zum Gegenstand, nicht eine Welt von Papier“

Dialog über das ptolemäische und das kopernikanische Weltbild

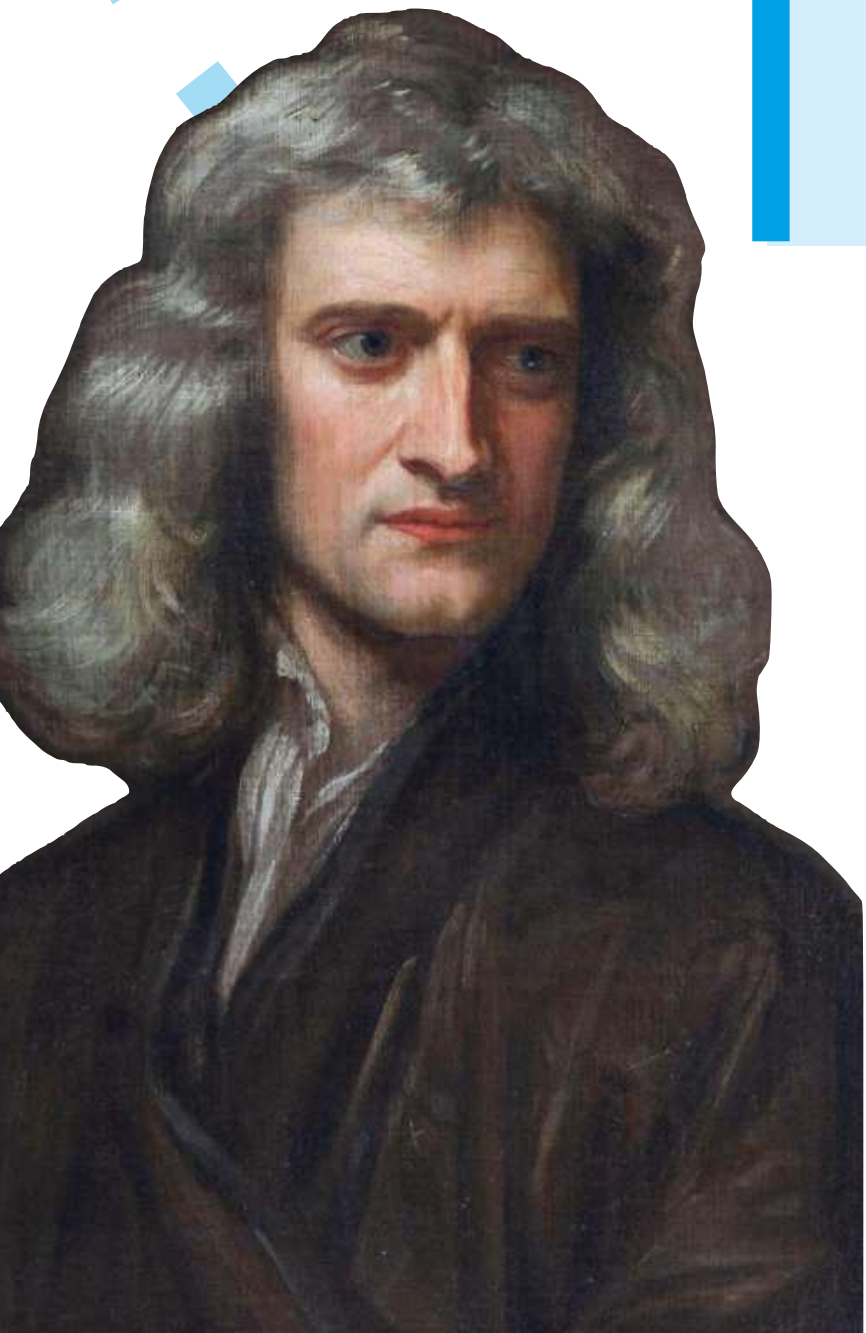
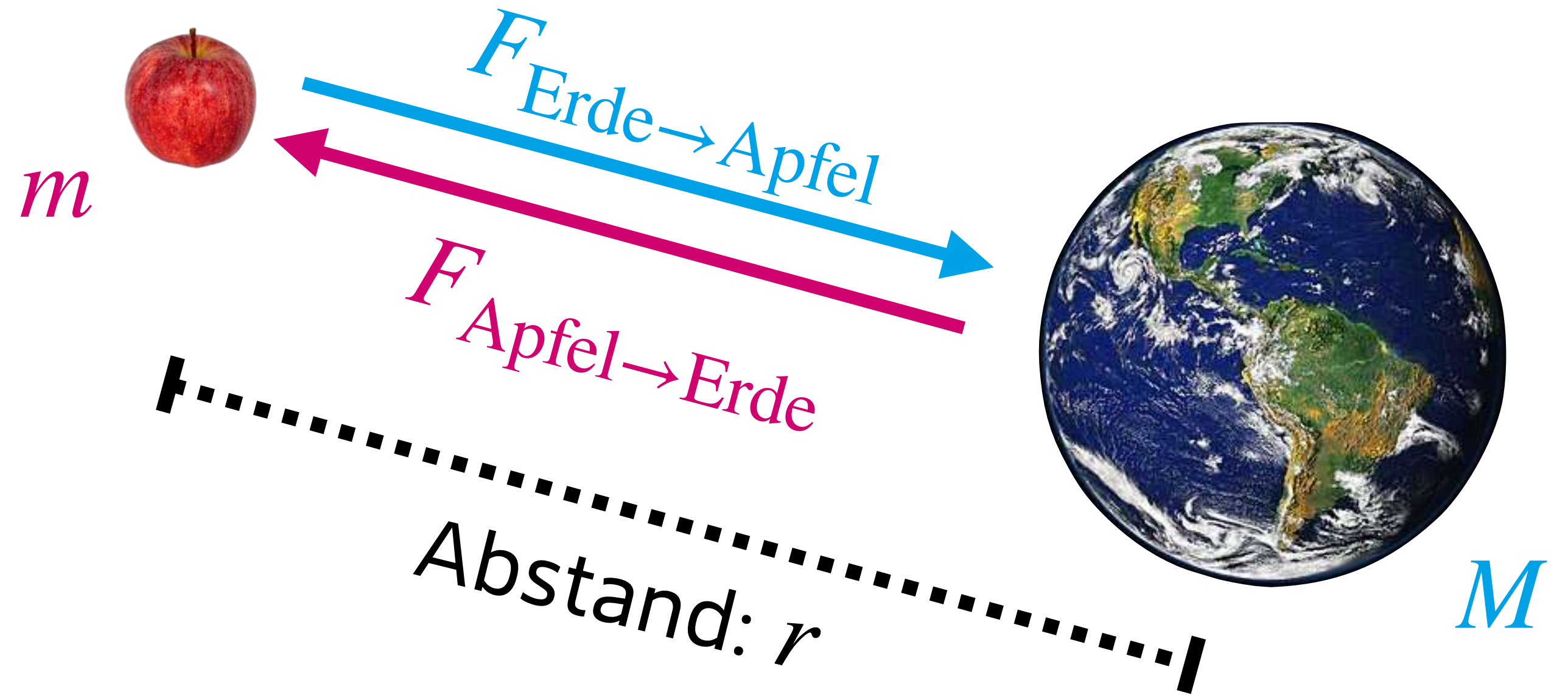
Wie sind wir zu diesem Bild gelangt?



**Quantitative Werkzeuge um die
Frage nach dem ganzen Universum
zu beantworten**

Newton, 1687: Das erste Gravitationsgesetz

$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$



Isaac Newton, 1642-1726

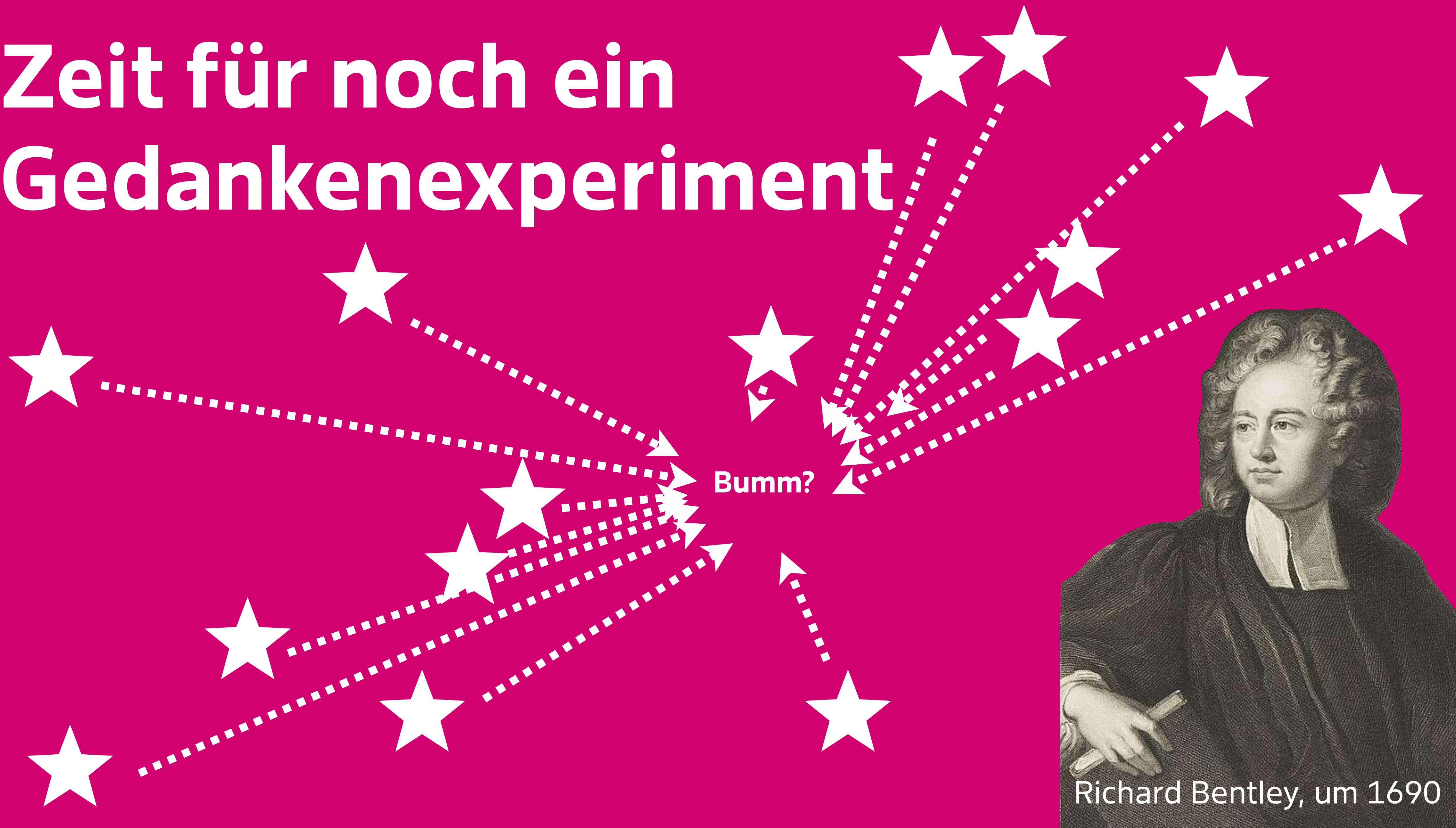
Zum ersten Mal gibt es ein quantitatives Werkzeug, um zu fragen: Wie verhält sich ein ganzes, selbst-gravitierendes Universum? Unsere Leitfrage wird physikalisch scharf.

Zeit für noch ein Gedankenexperiment



Richard Bentley, um 1690

Zeit für noch ein Gedankenexperiment



Richard Bentley, um 1690

Das Problem verschärft sich



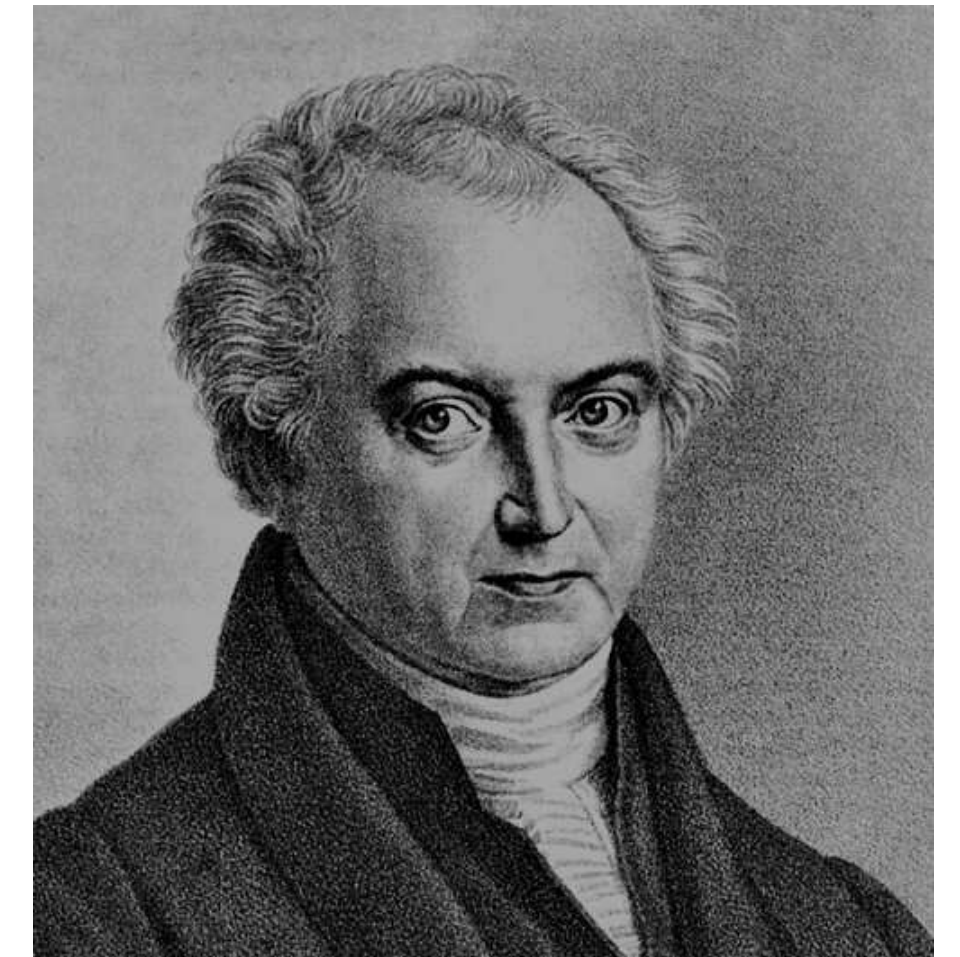
Immanuel Kant, 1724-1804

Spekuliert: Nebelflecken sind „Welteninseln“, also Galaxien.



Caroline Herschel, 1750-1848

Zusammen mit Bruder Wilhelm:
Systematische Kartierung und
Katalogisieren von Sternen und
Nebeln

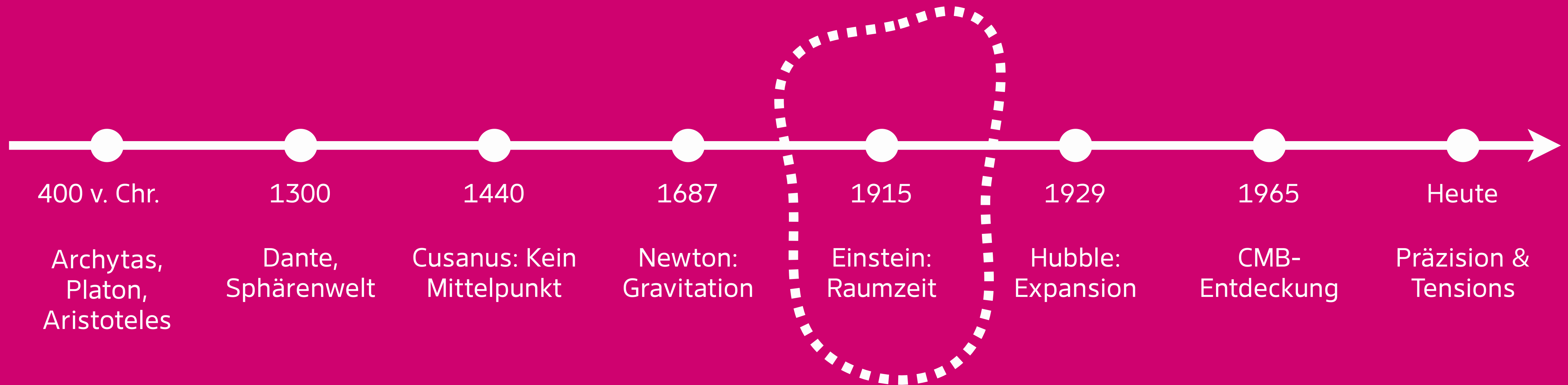


Heinrich Wilhelm Olbers, 1758-1840

Warum ist der Nachthimmel
dunkel, wenn das Universum
unendlich, statisch und mit
Sternen gefüllt ist?

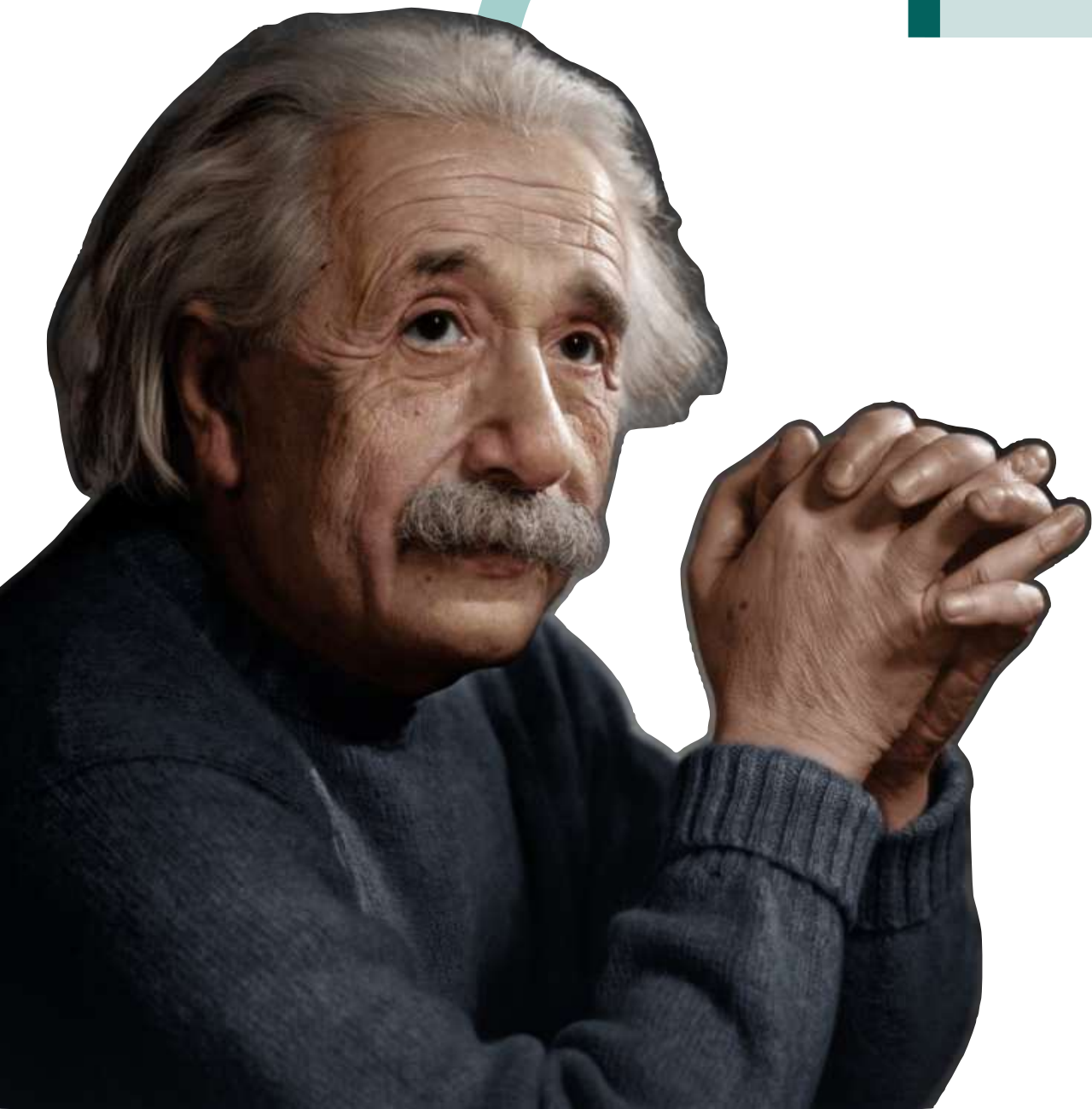
Die Daten und die Fragen werden besser. Noch: keine konsistenten Antworten.

Wie sind wir zu diesem Bild gelangt?



Die Frage nach der Stabilität des Universums wird zur Gleichung

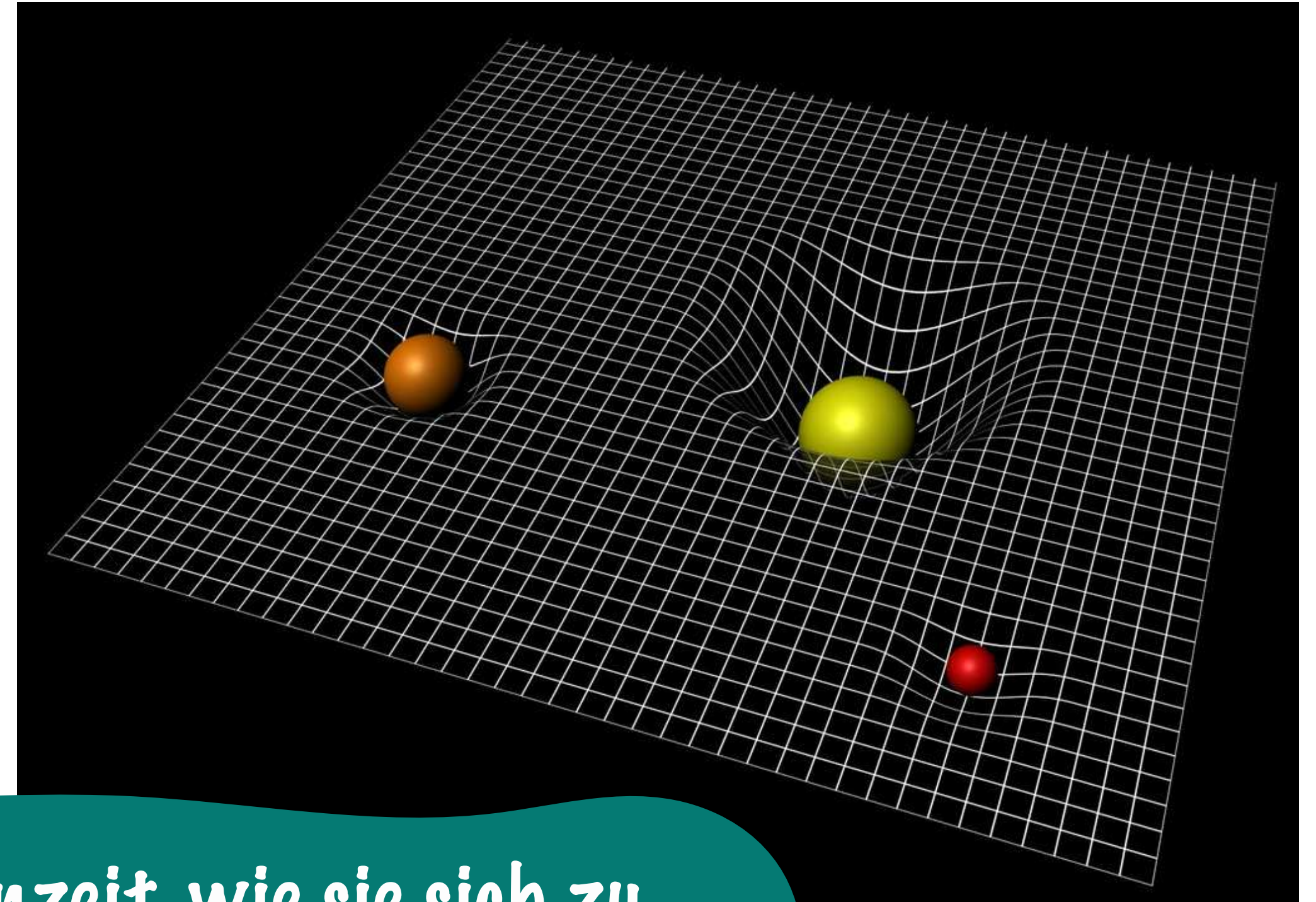
Albert Einstein, 1915: Die Allgemeine Relativitätstheorie



Albert Einstein, 1879-1955

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Die Masse sagt der Raumzeit, wie sie sich zu krümmen hat. Die Raumzeitkrümmung sagt der Masse, wie sie sich zu bewegen hat.



Aussage der
Einsteingleichungen,
frei nach J.A.Wheeler

Friedmann: Ein gleichmäßig gefülltes Universum expandiert

Die Masse sagt der Raumzeit, wie sie sich zu krümmen hat.

$$H^2 \propto \rho$$

„Je größer die Dichte im Universum ist, desto schneller dehnt es sich aus.“

Die Raumzeitkrümmung sagt der Masse, wie sie sich zu bewegen hat.

$$\dot{\rho} \propto -H\rho$$

„Je schneller sich das Universum ausdehnt, desto schneller sinkt die Dichte.“

H
← Expansionsrate →

Friedmann: Ein gleichmäßig gefülltes Universum expandiert

Die Masse sagt der
Raumzeitkrümmung, wie sie sich zu

Die Raumzeitkrümmung
sagt der Masse, wie sie
sich zu bewegen hat.

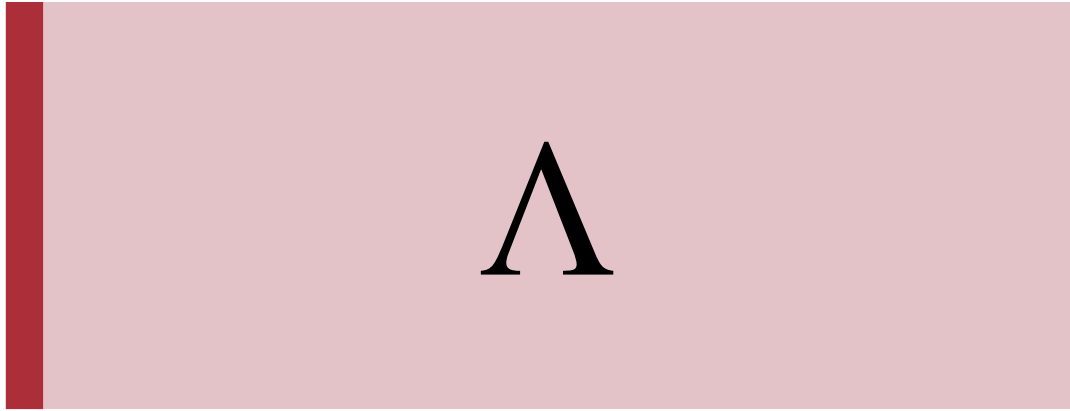
Newtons Nadel-Balance ist nach 228 Jahren endlich „gelöst“. Es gibt keine statische Lösung! Aber nicht alle sind damit zufrieden...

„Je größer die Dichte im
Universum ist, desto schneller
dehnt es sich aus.“

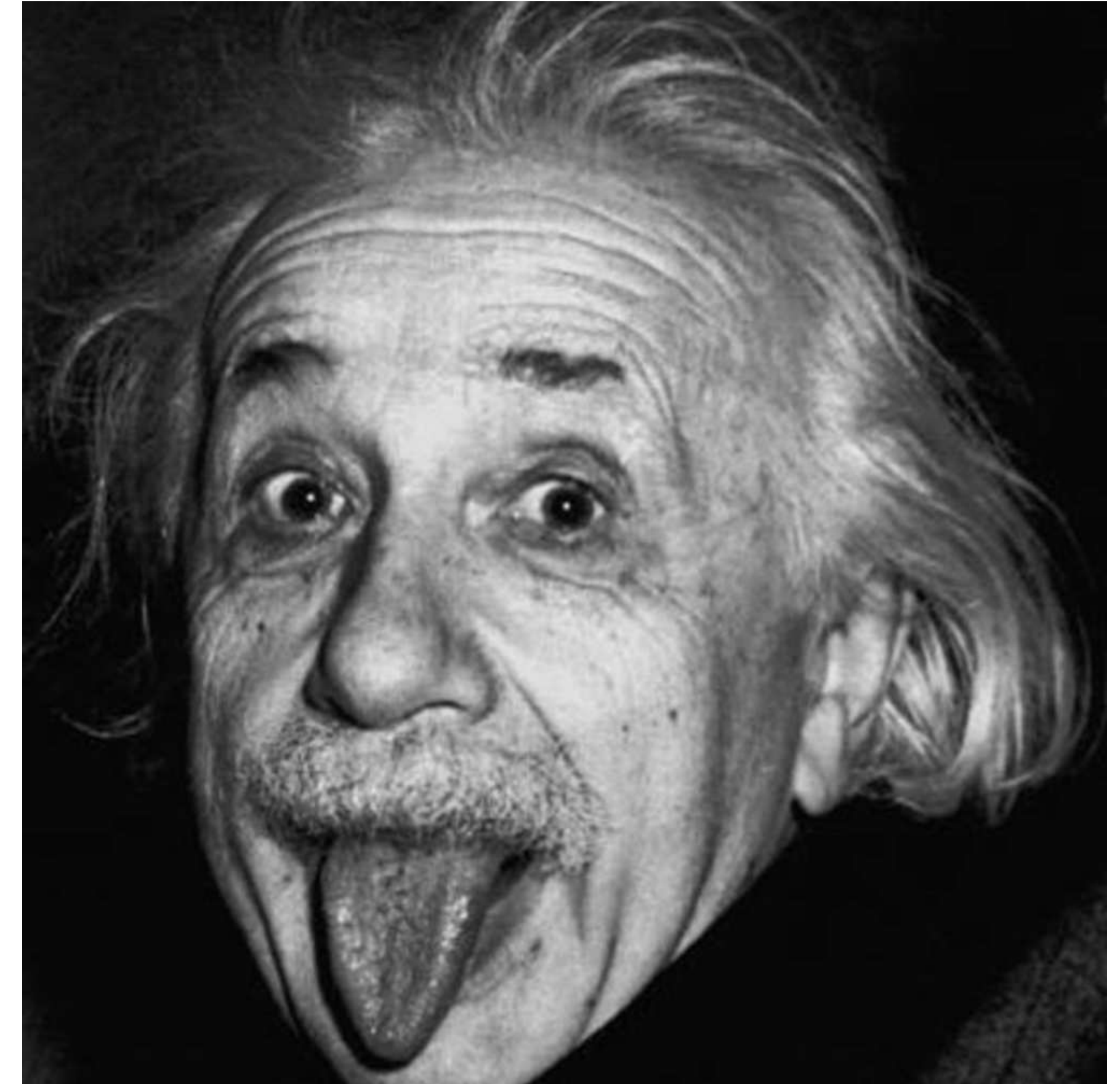
Universum
schneller sinkt die Dichte.“

Einstein, 1917: Seine „größte Eselei“

Einstein ist überzeugt, das Universum müsse statisch sein. Also fügt er seinen Gleichungen einen Term hinzu, der der Anziehung genau entgegenwirkt:


$$\Lambda$$

Newton brauchte Gott, um den Kollaps zu verhindern. Einstein braucht die kosmologische Konstante Λ zur Lösung desselben Problems.



1919: Eddington macht Einstein über Nacht weltberühmt

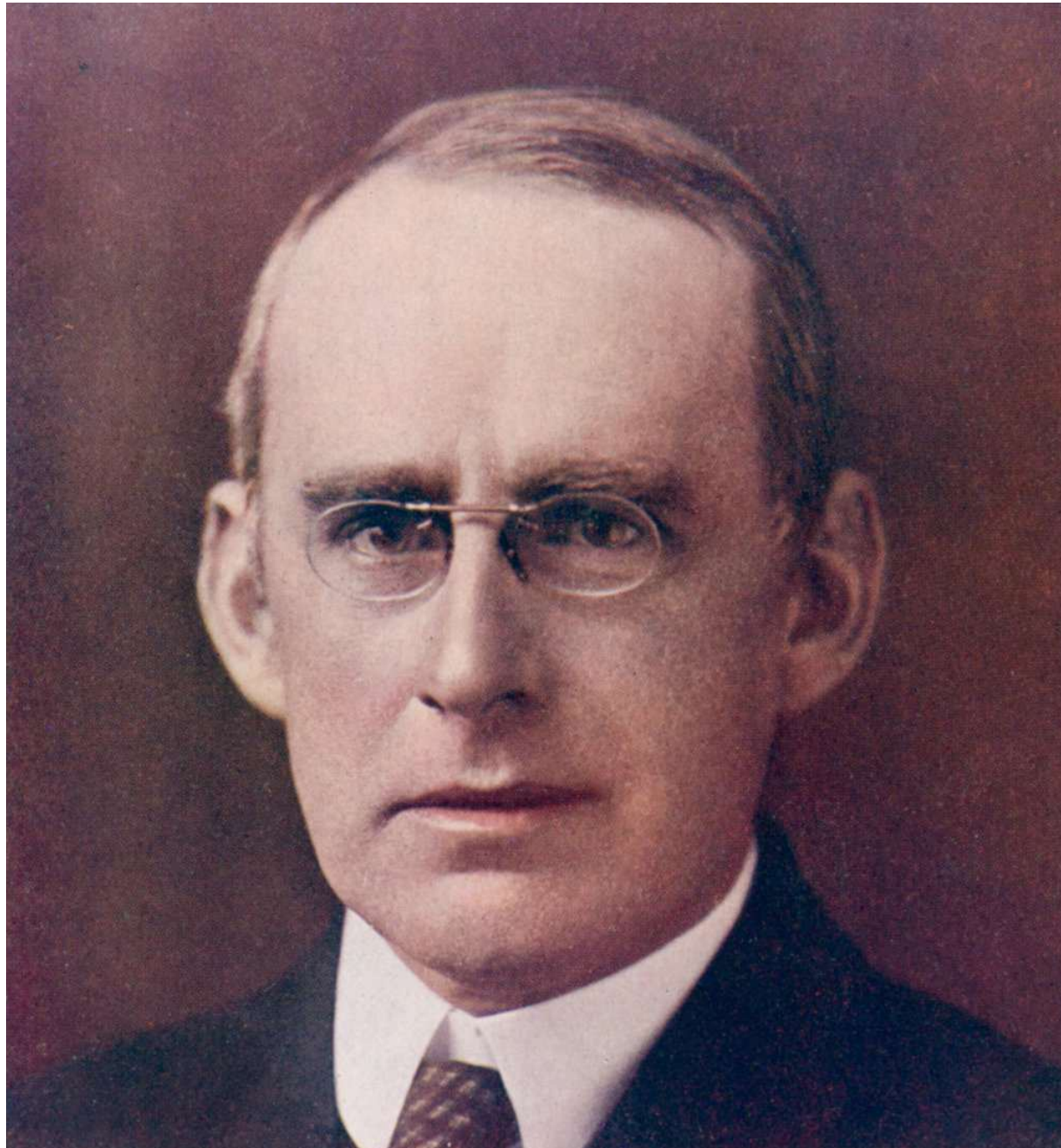


Während einer Sonnenfinsternis lässt sich messen, wie stark das Schwerefeld der Sonne das Licht dahinterstehender Sterne ablenkt.

Newton'sche Vorhersage: 0,87"

Einsteins Vorhersage: 1,75", doppelt so viel.

Gemessen: Einsteins Vorhersage.



Arthur Eddington, 1882-1944

Einstein wird über Nacht zum Weltstar und seine Theorie die ernstzunehmende Grundlage der Kosmologie.

1927, Georges Lemaître argumentiert gegen Einstein

„Ihre Berechnungen sind richtig, aber Ihre Physik ist scheußlich!“

„Einstein schien über die astronomischen Fakten nicht auf dem Laufenden zu sein... Für ihn war der Kosmos eine vorgefasste Idee, ein unantastbares Ganzes, das keine empirische Rechtfertigung brauchte.“



Monsignor Georges Lemaître (1894-1966)

1927, Georges Lemaître argumentiert gegen Einstein



Doch über welche astrophysikalischen Fakten war sich Einstein nicht im Klaren?

empirische

Monsignor Georges Lemaître (1894-1966)

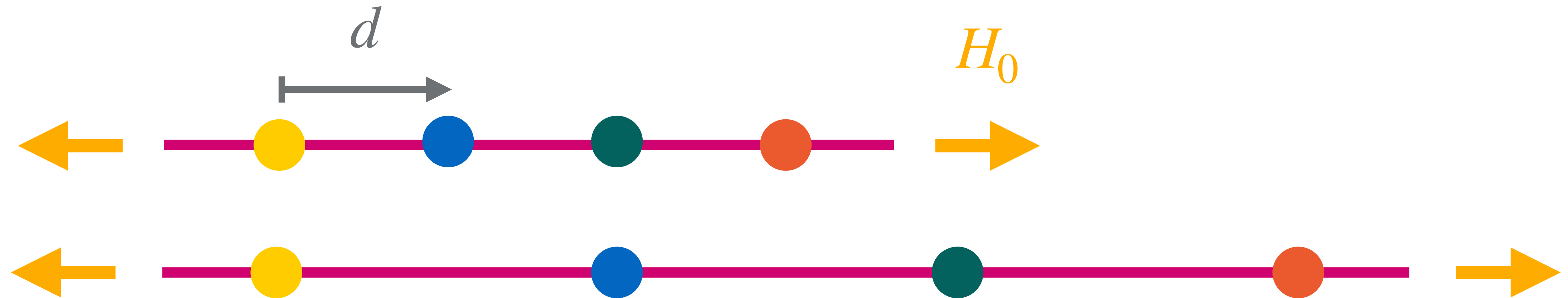
Zeit für ein *richtiges* Experiment

Galaxie



Das Gummiband-Universum

Vier Galaxien auf einem Gummiband, einmal auf die doppelte Länge gedehnt:

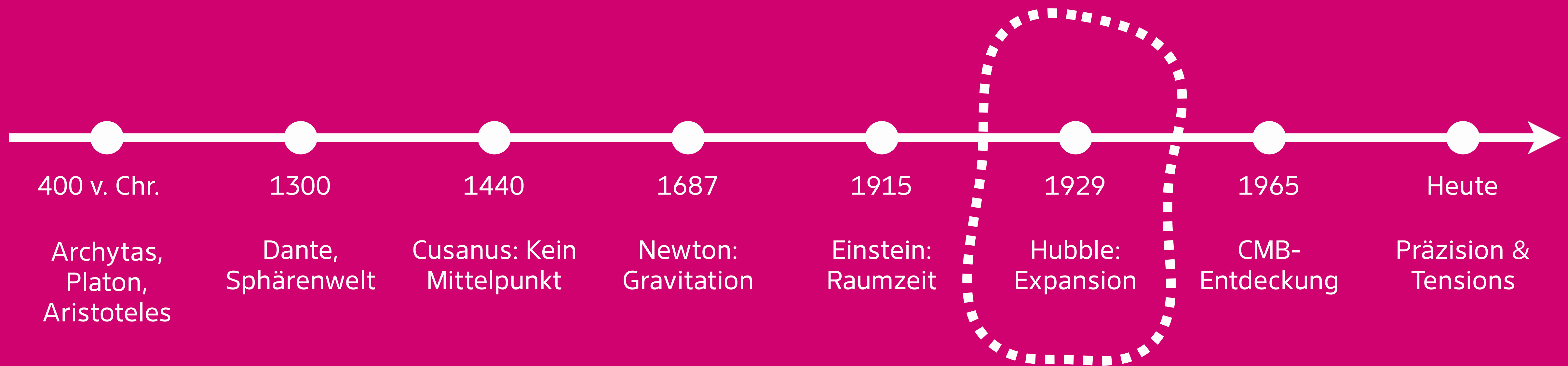


**Doppelt so weit weg =
doppelt so schnell weg.**

Galaxie bei 2 cm: wandert 2cm
Galaxie bei 4cm: wandert 4cm
Galaxie bei 6cm: wandert 6cm

...

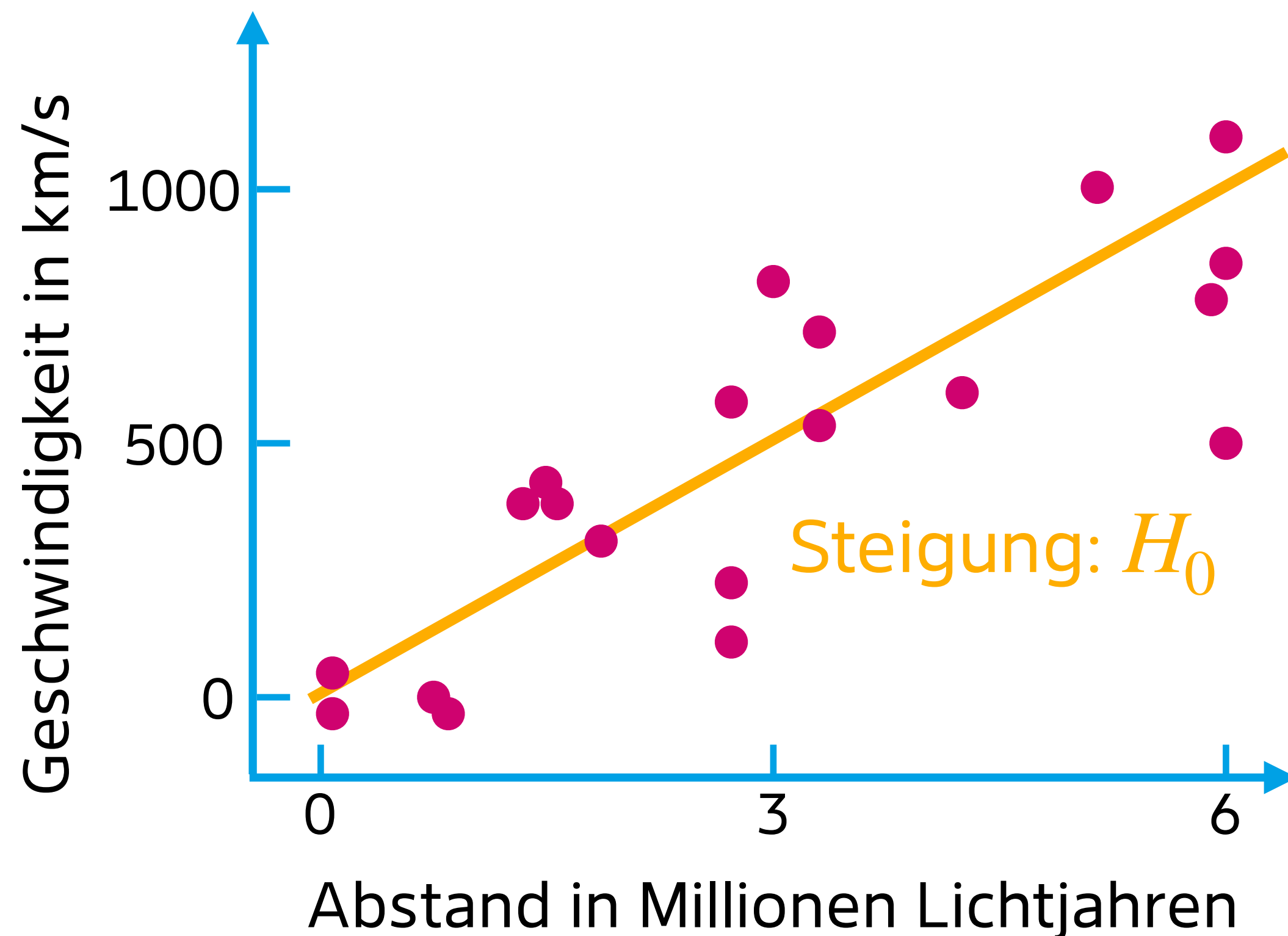
Wie sind wir zu diesem Bild gelangt?



**Direkte Evidenz für die dynamische
Entwicklung des Universums**

1929: Hubble misst genau das (nur mit Galaxien)

$$v = H_0 \cdot d$$



Je weiter eine Galaxie entfernt ist, desto stärker ist ihr Licht rotverschoben. Und: Desto schneller entfernt sie sich.

Heute wissen wir: $H_0 \approx 70 \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}}$



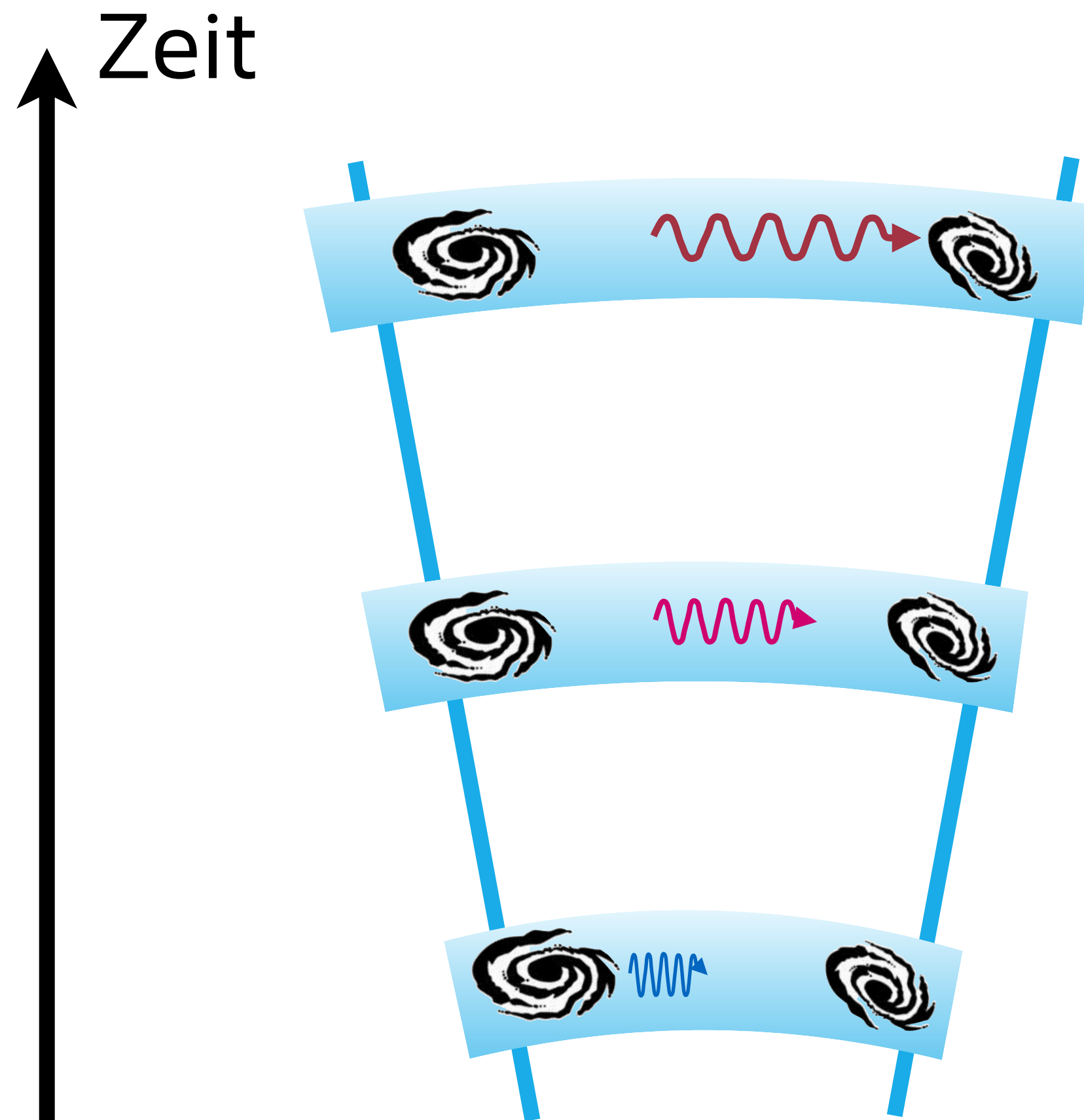
Edwin Hubble, 1889–1953

Die Leitfrage der ersten Vortragshälfte, beantwortet

**Das Universum ist dynamisch,
nicht statisch.**

Das **Instabilitätsproblem** von Newton und Einstein war kein Bug sondern ein **Feature der Theorie**: Ein Hinweis darauf, dass die „statische“ Grundannahme schlicht falsch war.

Zusammenfassung des Wissensstandes zum Urknall um 1950:



- ➔ Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Gravitation korrekt
- ➔ Sie sagt die Ausdehnung des Raumes voraus
- ➔ Sie erklärt die von Hubble gemessene Rotverschiebung des Lichts von Galaxien, desto mehr je weiter sie entfernt sind
- ➔ Aus der Extrapolation folgt: Zu Beginn der Zeit müsste die ganze Materie von einem Punkt ausgehen*

* Das ist heute widerlegt, mehr dazu gleich

Eine doppelte Zeitreise zum Rand des beobachtbaren Universums

Ferienakademie „Meet and Greet: Astrophysik trifft Religion“, 20.08.2026

Carlo Tasillo

Feodor-Lynen Fellow
Universitat de València



Alexander von
HUMBOLDT
STIFTUNG



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA

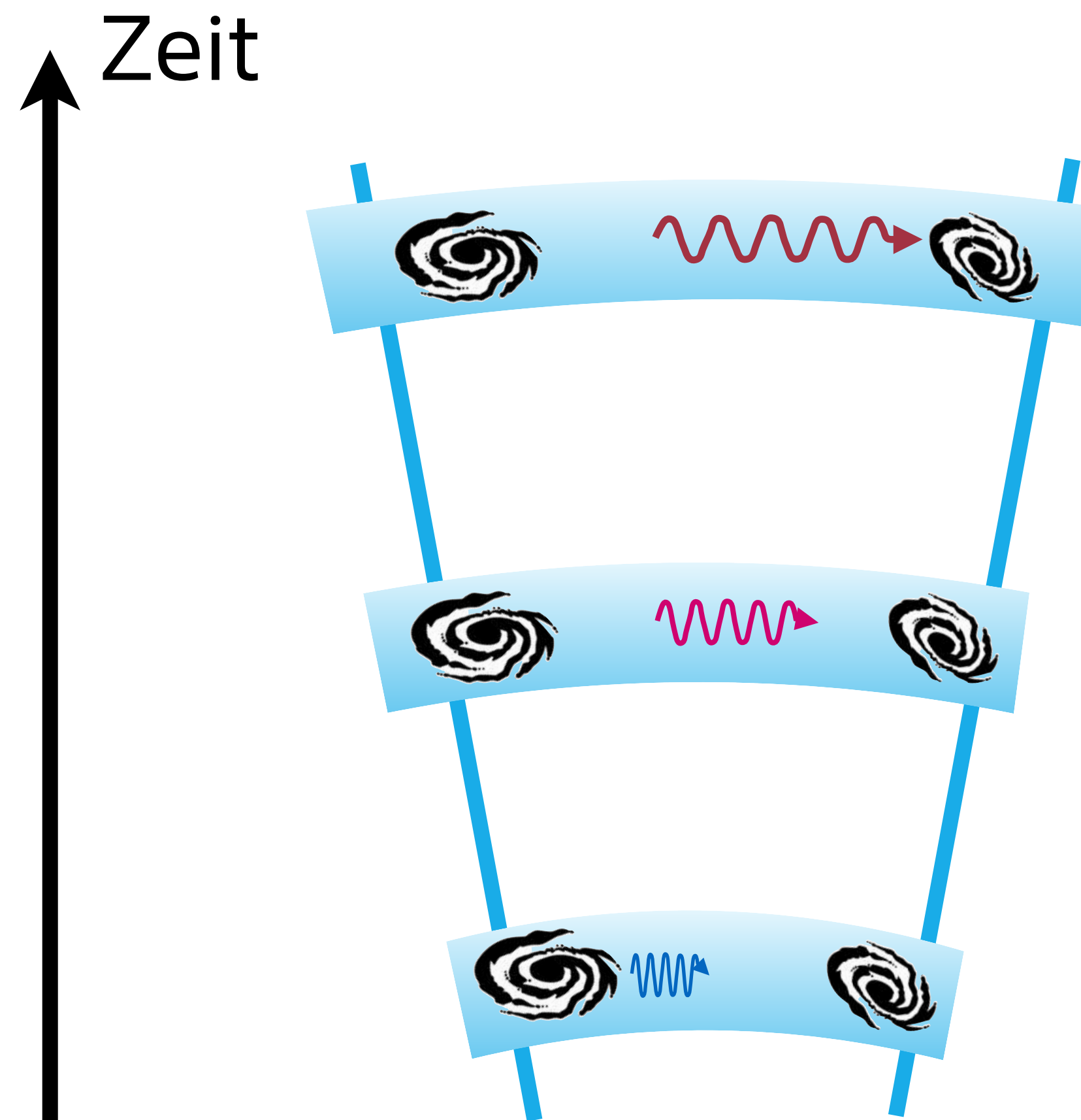


INSTITUT DE
FÍSICA
CORPUSCULAR



EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA

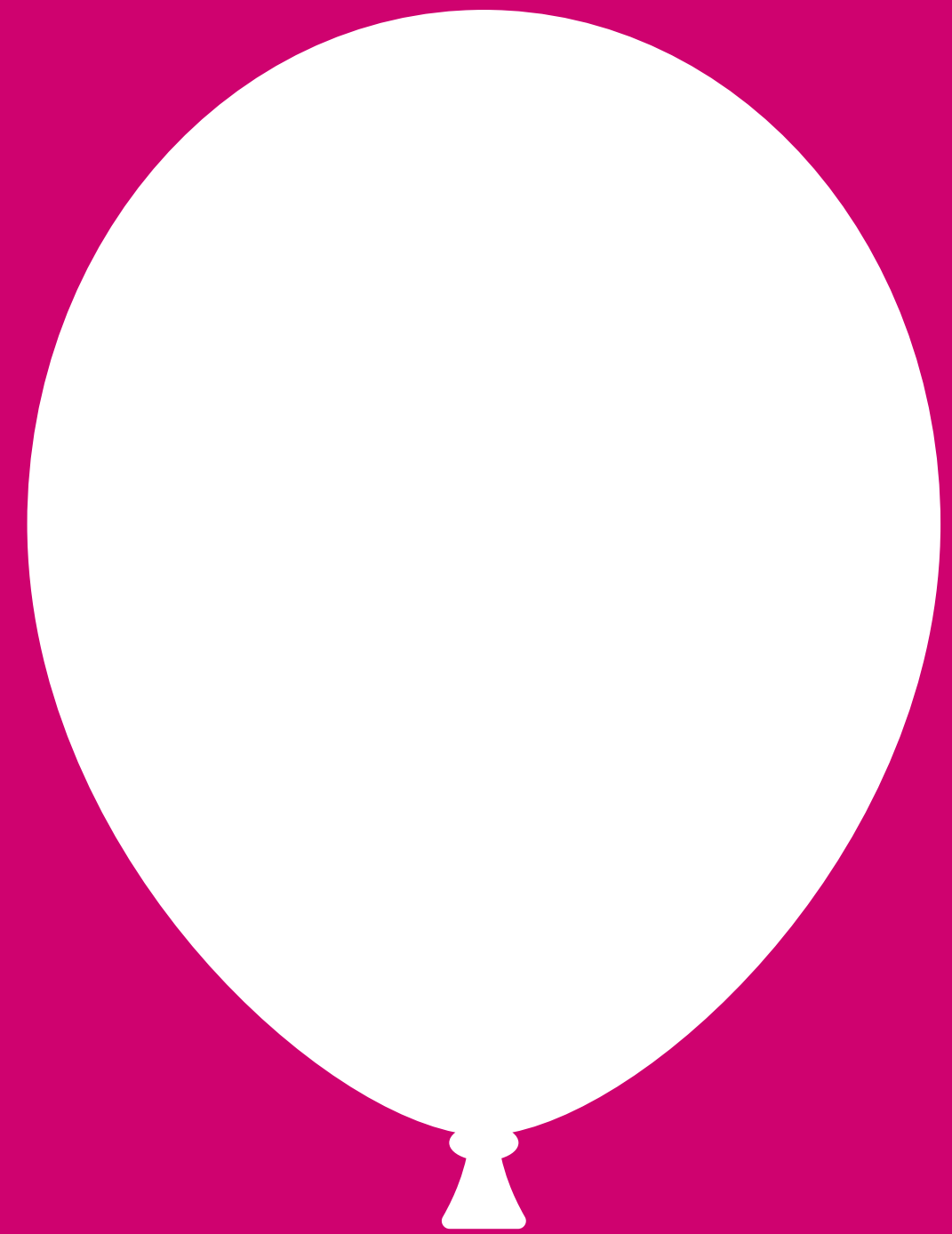
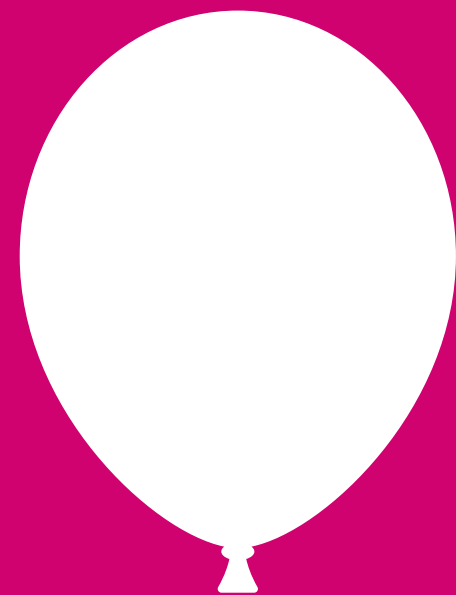
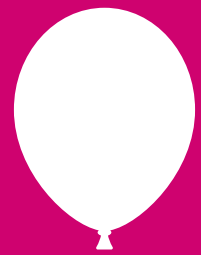
Zusammenfassung des Wissensstandes zum Urknall um 1950:



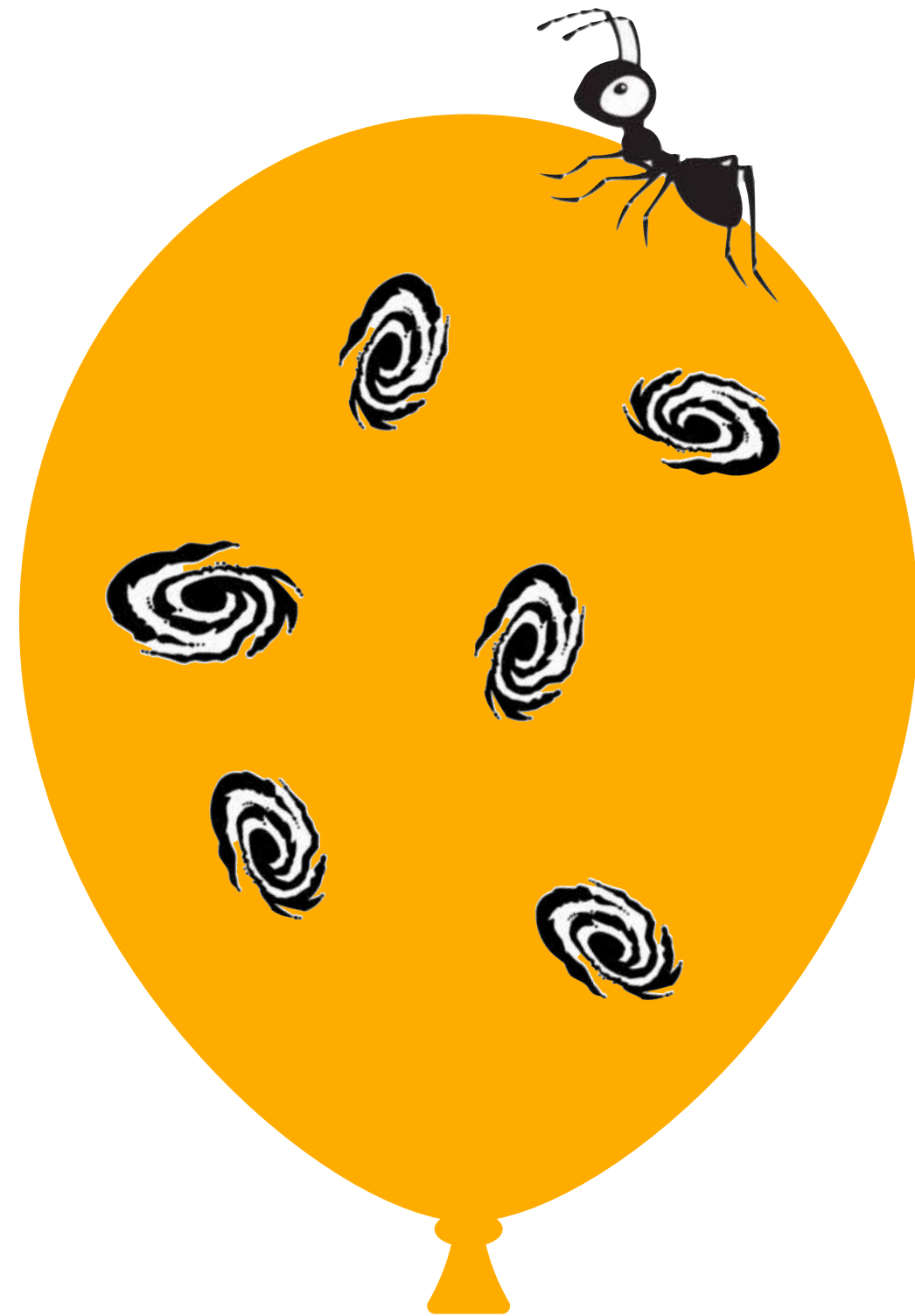
- ➔ Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Gravitation korrekt
- ➔ Sie sagt die Ausdehnung des Raumes voraus
- ➔ Sie erklärt die von Hubble gemessene Rotverschiebung des Lichts von Galaxien; desto mehr je weiter sie entfernt sind
- ➔ Aus der Extrapolation folgt: Zu Beginn der Zeit müsste die ganze Materie von einem Punkt ausgehen*

* Das ist heute widerlegt, mehr dazu gleich

Zeit für ein noch ein kleines Experiment



Das Ballonuniversum



Wenn ich mir die Expansion des Universums vorstelle, denke ich häufig an dieses Bild:

Wir leben wie Ameisen auf der 2D-Oberfläche, welche sich (ohne ein Zentrum zu haben) ausdehnt. Nur die 2D-Oberfläche ist für uns zugänglich. Die Frage nach der Expansionsrichtung ergibt keinen Sinn: Alle Abstände zwischen den Galaxien werden größer. Wir sind also in der Realität sozusagen auf der 3D-Oberfläche eines 4D-Ballons.

1. April 1948: Die Primordiale Nukleosynthese, das $\alpha\beta\gamma$ -Paper

Alpher und Gamow rechneten durch, was in einem heißen frühen Universum passiert: In den ersten drei Minuten entstehen die leichten Elemente, „die primordiale Nukleosynthese“.



Heute wissen wir: Nach der Nukleosynthese bestand das Universum zu 75% aus Wasserstoff und zu 25% aus Helium. Die schwereren Elemente entstanden in Sternen, Supernovae und Neutronenstern-Kollisionen.

Nebenprodukt: Es müsste eine Reststrahlung übrig geblieben sein, heute nur noch wenige Kelvin kalt.

PHYSICAL REVIEW VOLUME 73, NUMBER 7 APRIL 1, 1948

Letters to the Editor

PUBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*
Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland

AND

H. BETHE
Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW
The George Washington University, Washington, D. C.
February 18, 1948

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must

We may remark at first that the building-up process was apparently completed when the temperature of the neutron gas was still rather high, since otherwise the observed abundances would have been strongly affected by the resonances in the region of the slow neutrons. According to Hughes,² the neutron capture cross sections of various elements (for neutron energies of about 1 Mev) increase exponentially with atomic number halfway up the periodic system, remaining approximately constant for heavier elements.

Using these cross sections, one finds by integrating Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly for the lighter elements and remain approximately constant for the elements heavier than silver. In order to fit the calculated curve with the observed abundances³ it is necessary to assume the integral of $\rho_n dt$ during the building-up period is equal to 5×10^4 g sec./cm³.

On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe⁴ the density dependence on time is given by $\rho \propto 1/t^2$. Since the integral of this expression diverges at $t=0$, it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time t_0 , satisfying the relation:

$$\int_{t_0}^{\infty} (10^8/t^2) dt \approx 5 \times 10^4, \quad (2)$$

which gives us $t_0 \approx 20$ sec. and $\rho_0 \approx 2.5 \times 10^8$ g sec./cm³. This result may have two meanings: (a) for the higher densities existing prior to that time the temperature of the neutron

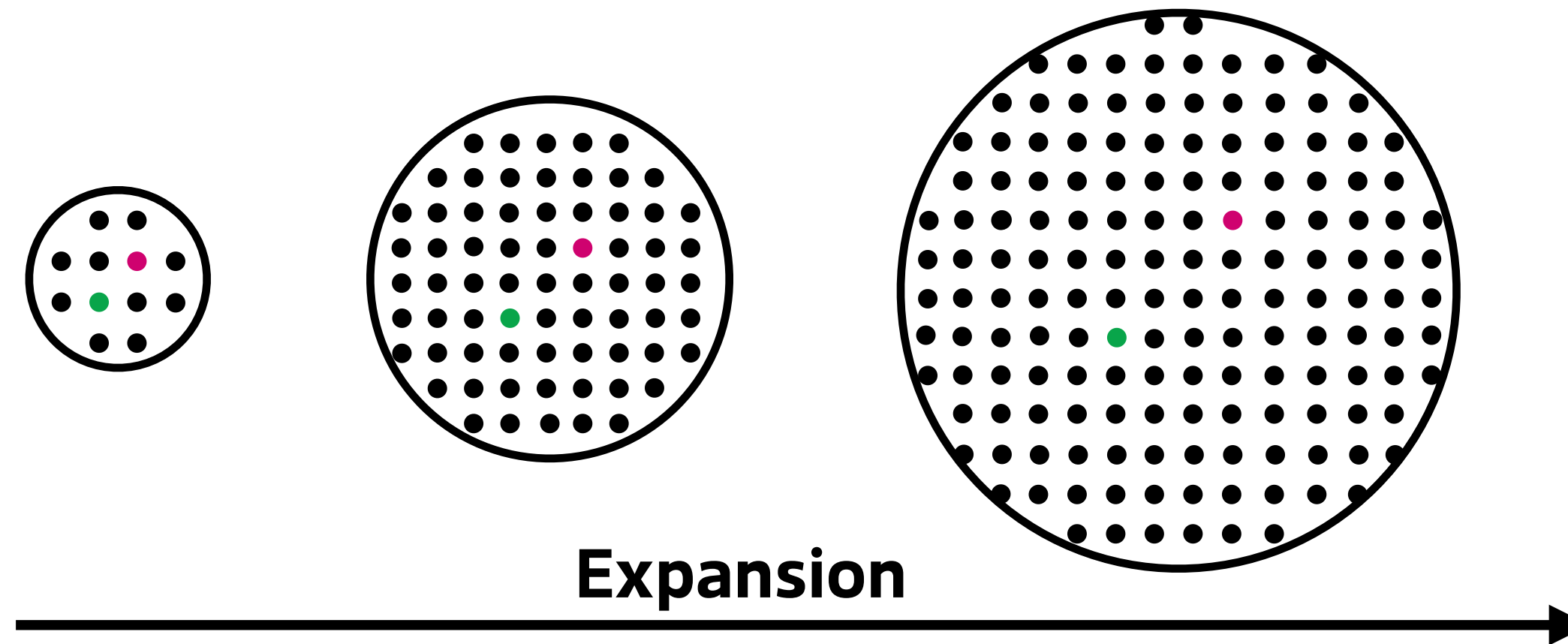


Ralph Alpher, Hans Bethe, George Gamow: α, β, γ

Fred Hoyle, 1949: Die Steady-state Theorie und „der Urknall“

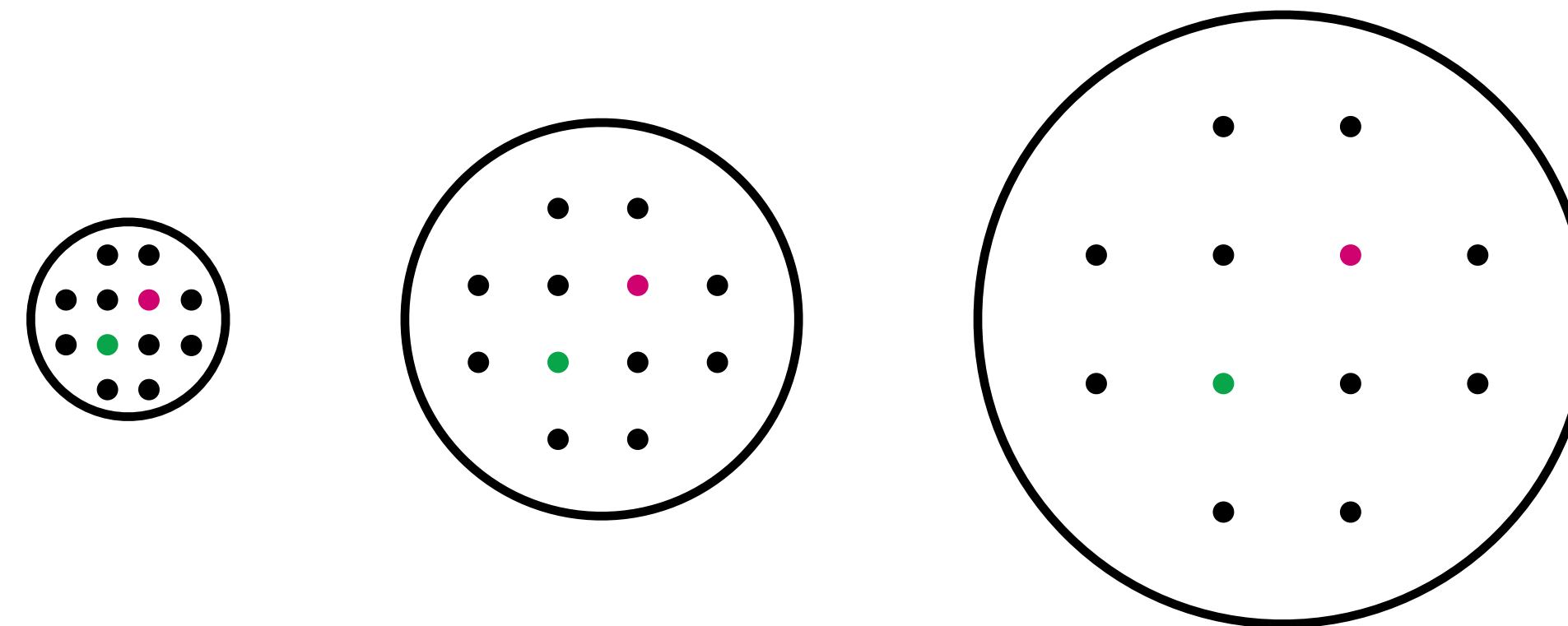
Steady-state-Theorie

Während der Raum expandiert, wird fortwährend neue Materie kreiert. Die Dichte bleibt konstant.



Urknall-Theorie

Die Dichte sinkt und die Abstände zwischen Galaxien wachsen kontinuierlich.



Fred Hoyle, 1915-2001

Fred Hoyle, 1949: Die Steady-state Theorie und „der Urknall“

Steady-state
expansion
Distant
Absorption
Wavelength



JETZT verstehe ich, warum Sie Katholik sind.



Fred Hoyle, 1915-2001

1951: Der Papst triggert Lemaître, dieser interveniert

„Die wahre Wissenschaft entdeckt in immer höherem Maße Gott, als ob Er hinter jeder Tür stünde, die von der Wissenschaft geöffnet wird ... Es scheint, dass es der heutigen Wissenschaft mit einem einzigen Blick zurück über die Jahrhunderte gelungen ist, Zeuge zu werden für jenen erhabenen Augenblick des uranfänglichen Fiat Lux.“

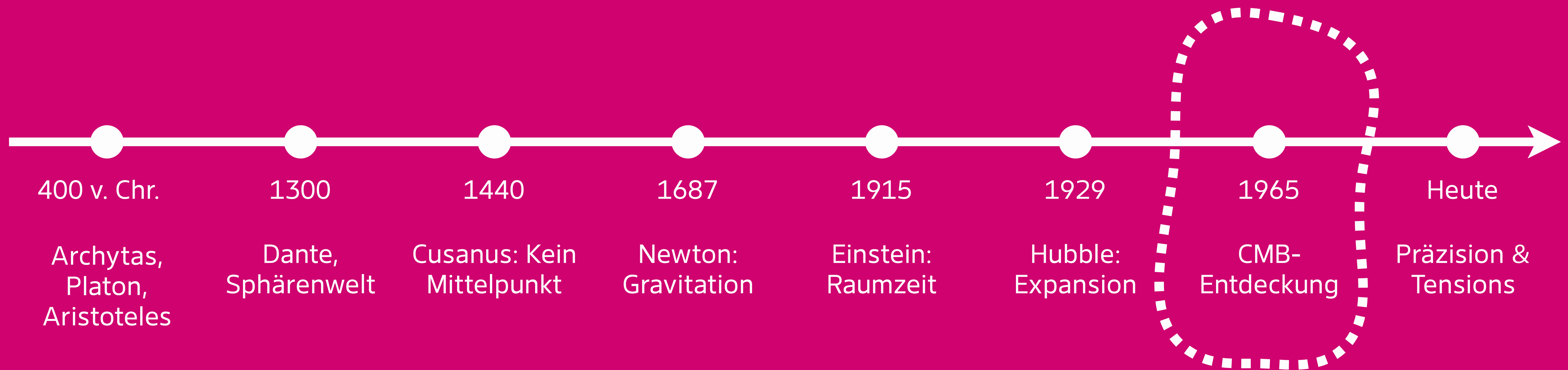
Papst Pius XII, 1876-1958



„Die Bibel versteht nichts von Physik und die Physik versteht nichts von Gott.“

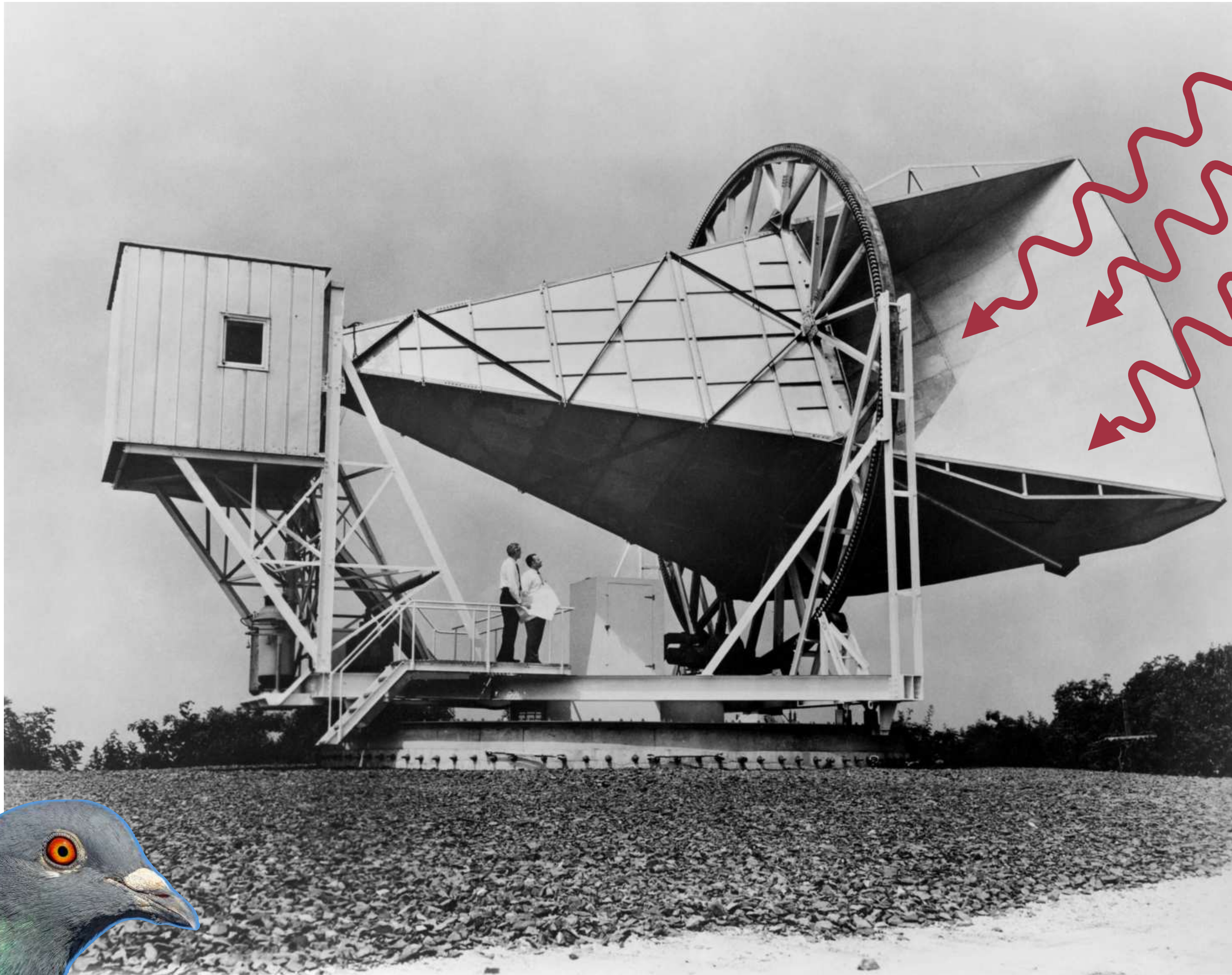
Georges Lemaître, 1894-1966

Wie sind wir zu diesem Bild gelangt?

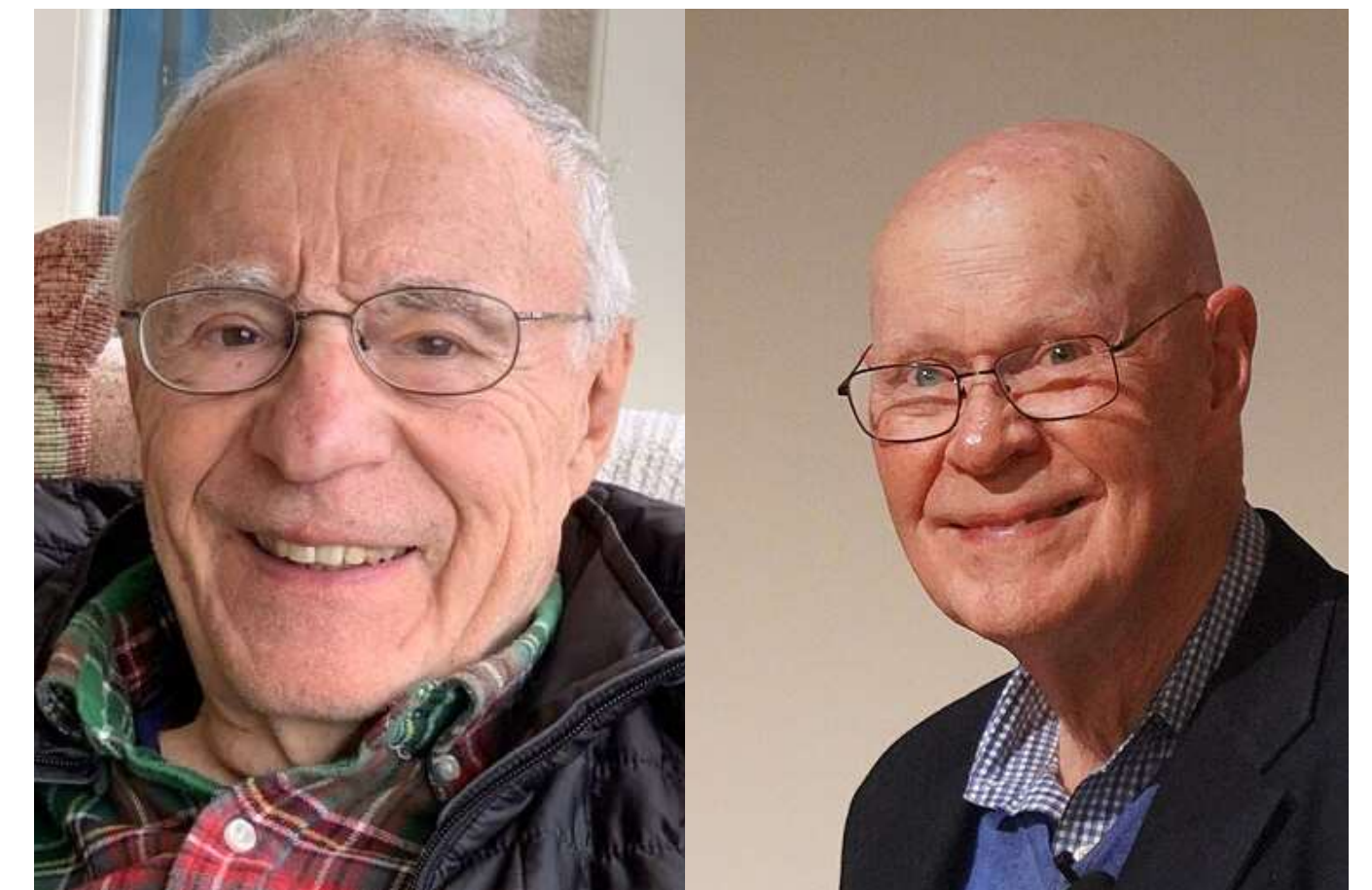


Tauben oder Urknall?

1965: Ein Rauschen, das nicht weggehen will



Infrarot-Strahlung,
„Millimeterwellen“



Arno Penzias und Robert Wilson

?

Ein weißes Dielektrikum...



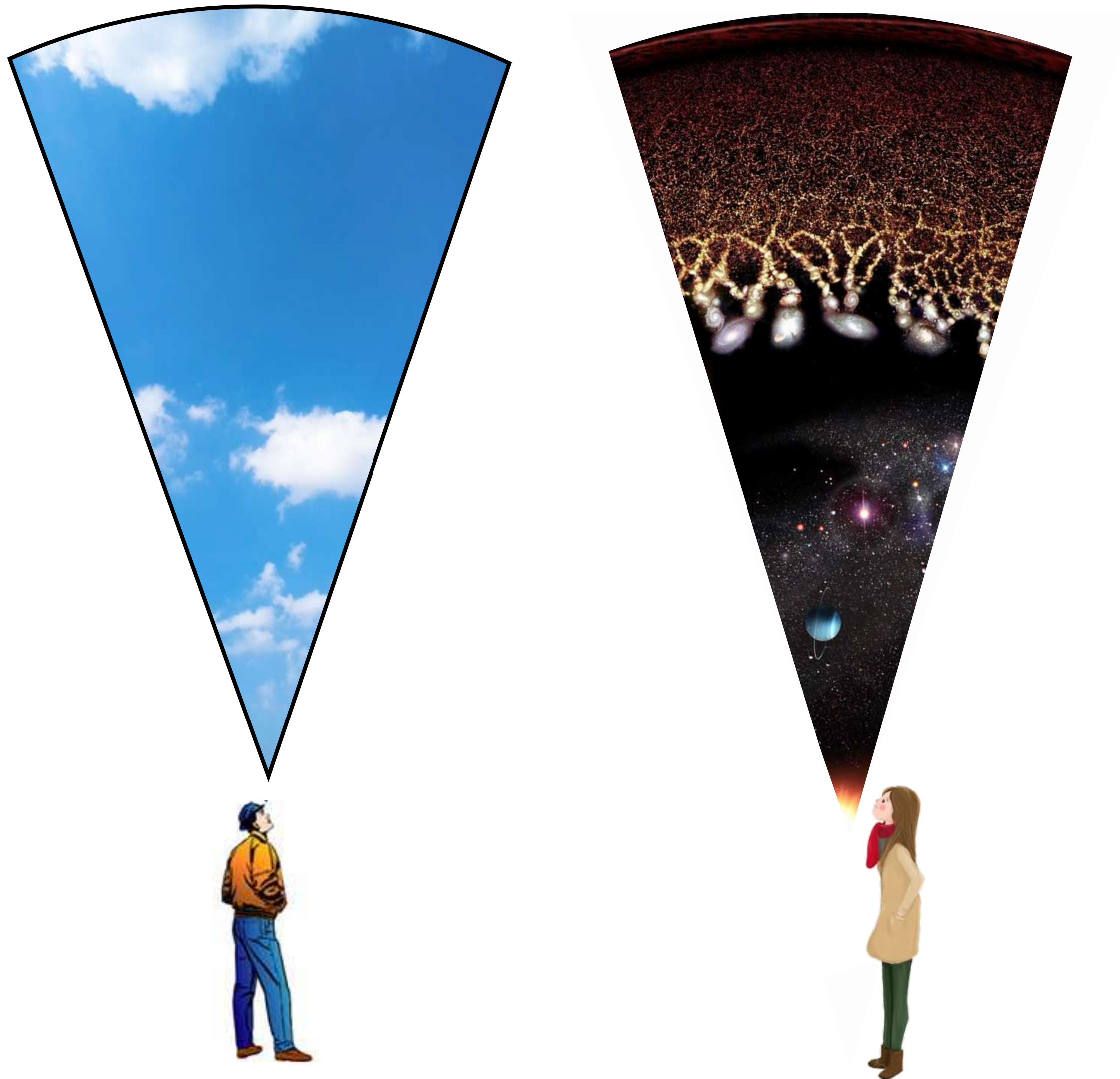
Aus dem Film „Hawking“ (2004)

Ein weißes Dielektrikum...



Aus dem Film „Hawking“ (2004)

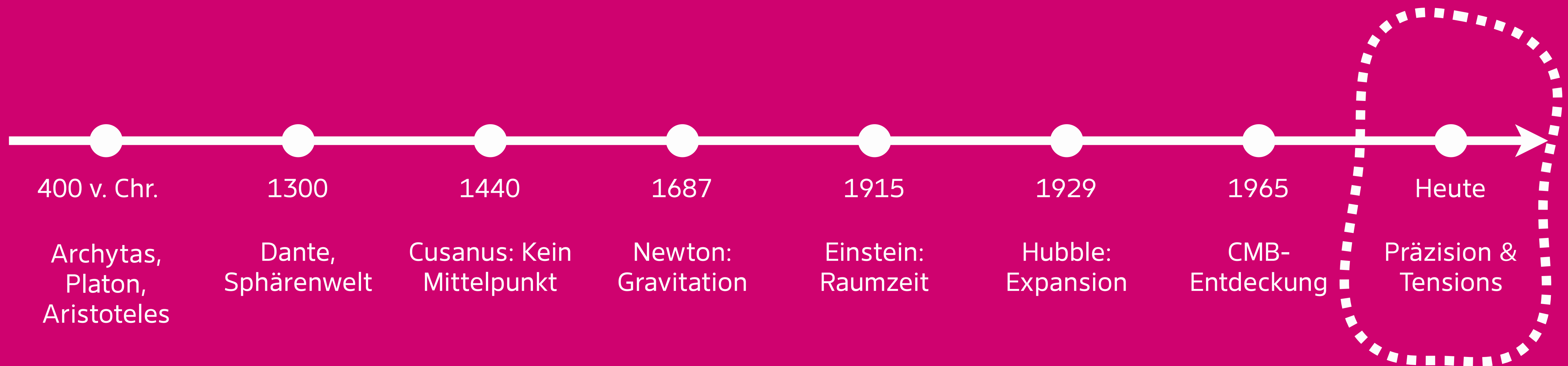
Was wurde 1965 beobachtet?



Der kosmische Mikrowellenhintergrund ist die Strahlung, die in dem Moment entstanden ist, als das Universum durchsichtig wurde. Das ist gerade die Strahlung, die $\alpha\beta\gamma$ 17 Jahre vorher vorhergesagt hatten.

Durch die Beobachtung wird klar: Die Steady-State-Theorie ist falsch und die Urknall-Theorie mit Evidenz gestützt. Lemaître erfährt noch kurz vor seinem Tod davon und stirbt 1966.

Wie sind wir zu diesem Bild gelangt?



**Der Traum unserer
Forschungsmittel-Anträge der
letzten 20 Jahre wird wahr**

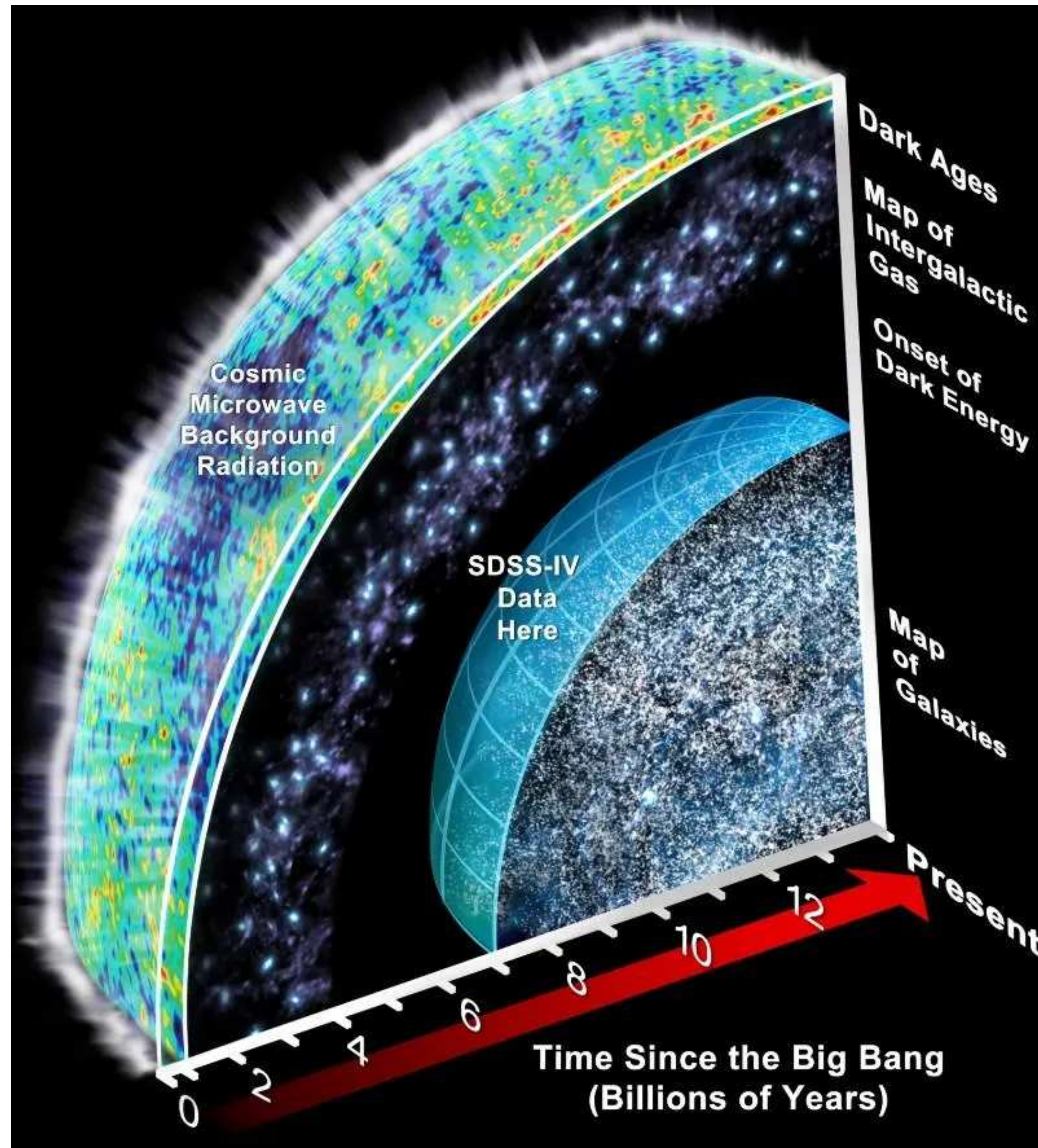
Wo stehen wir heute?



Wo stehen wir heute?



2013: Der Planck-Satellit erlaubt Präzisionsmessungen

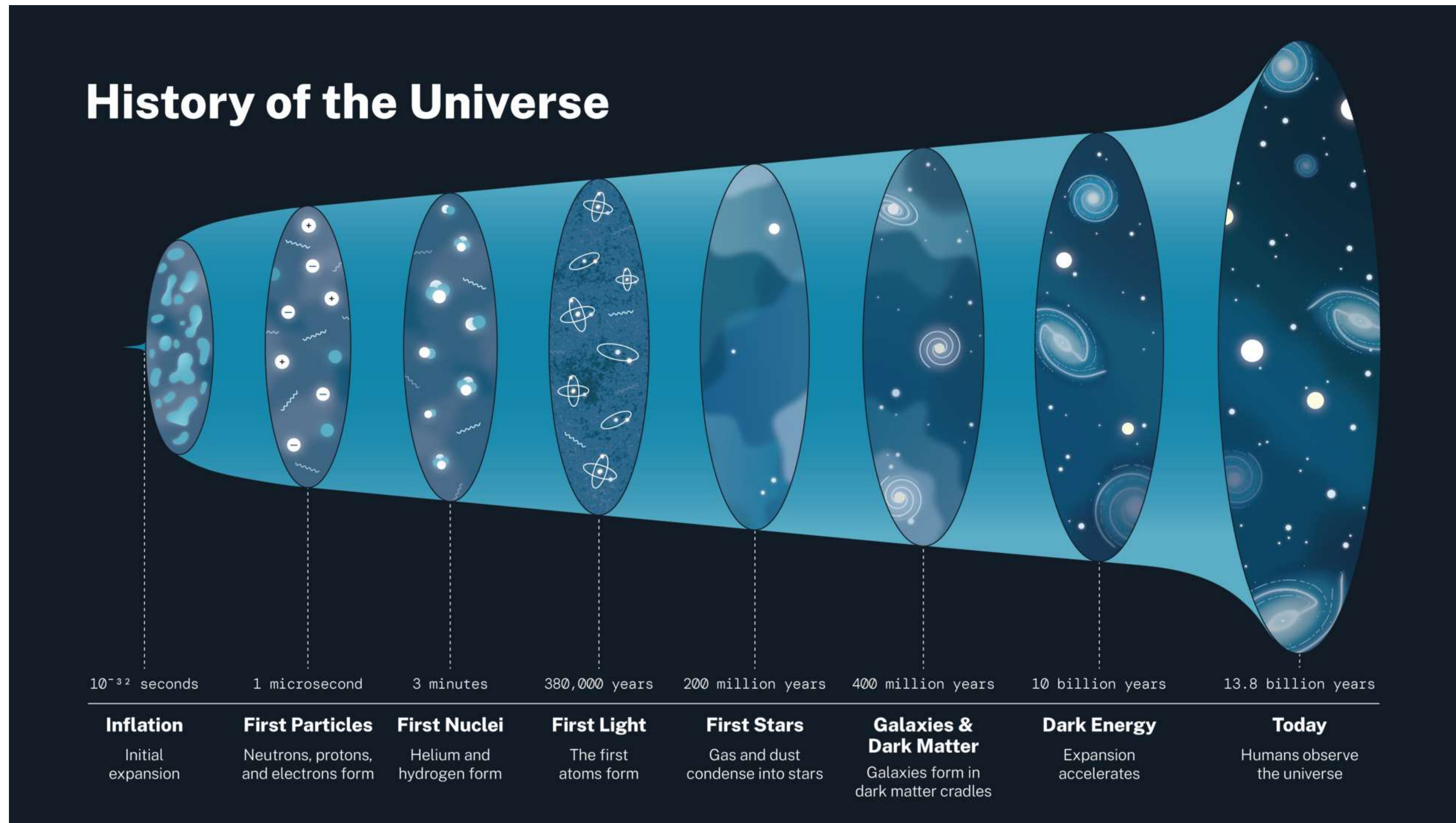


Der Planck-Satellit misst die Temperatur des Universums auf die fünfte Nachkommastelle genau.

$$T = 2,72548 \text{ K}$$

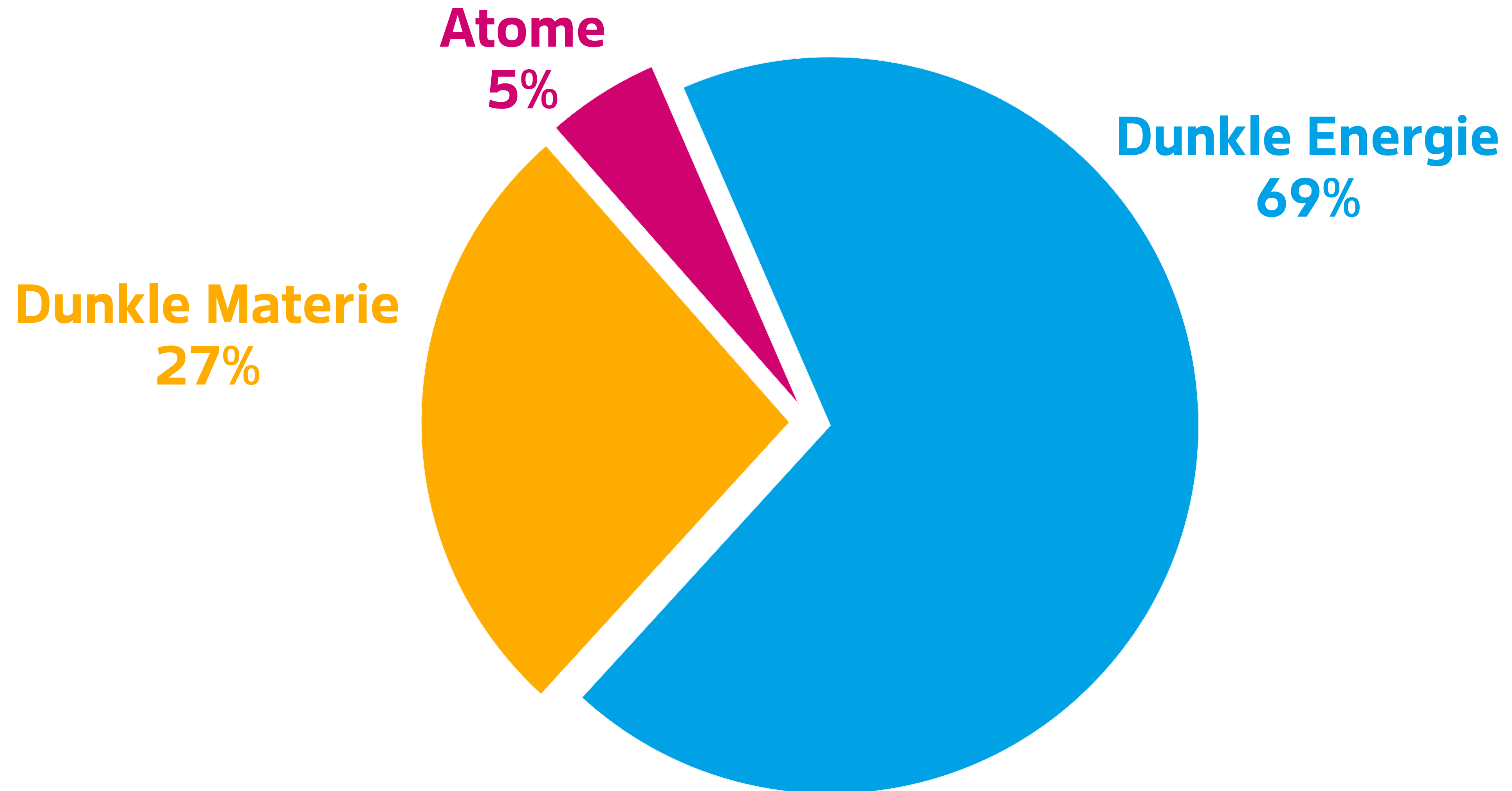
Die bunten Flecken stellen die Abweichungen in der fünften Nachkommastelle dar. An kalten Stellen klumpt die Materie schneller und bildet Strukturen, aus denen später die heutigen Galaxien werden

Das Standardmodell der Kosmologie: Λ CDM

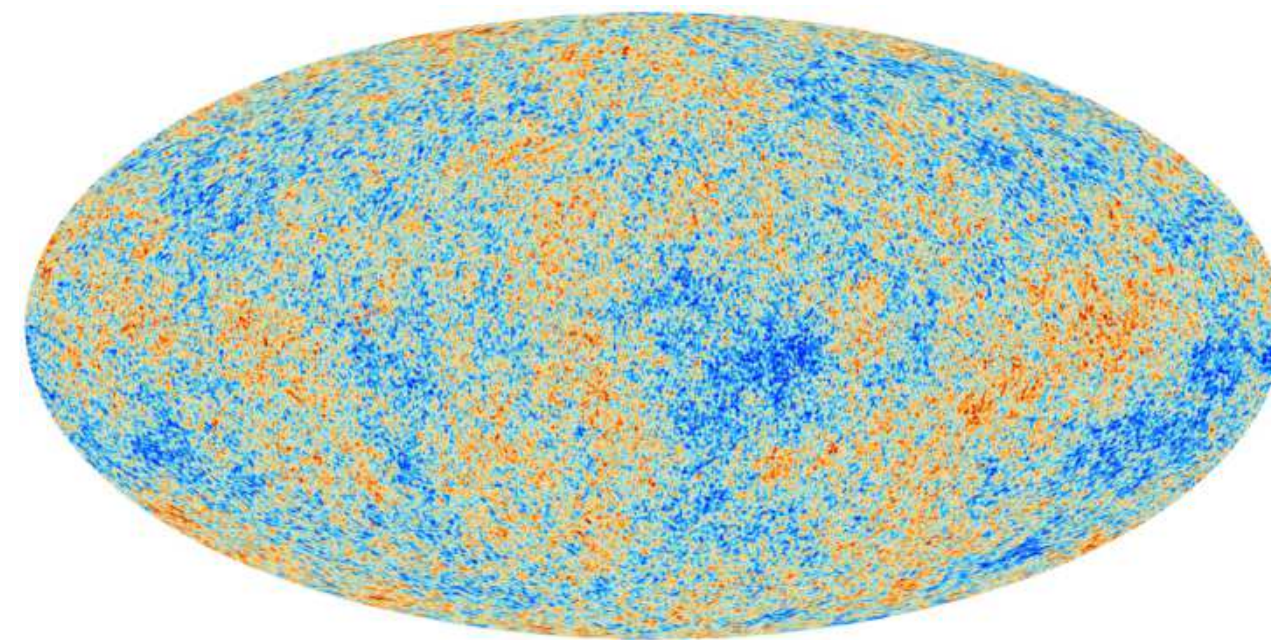
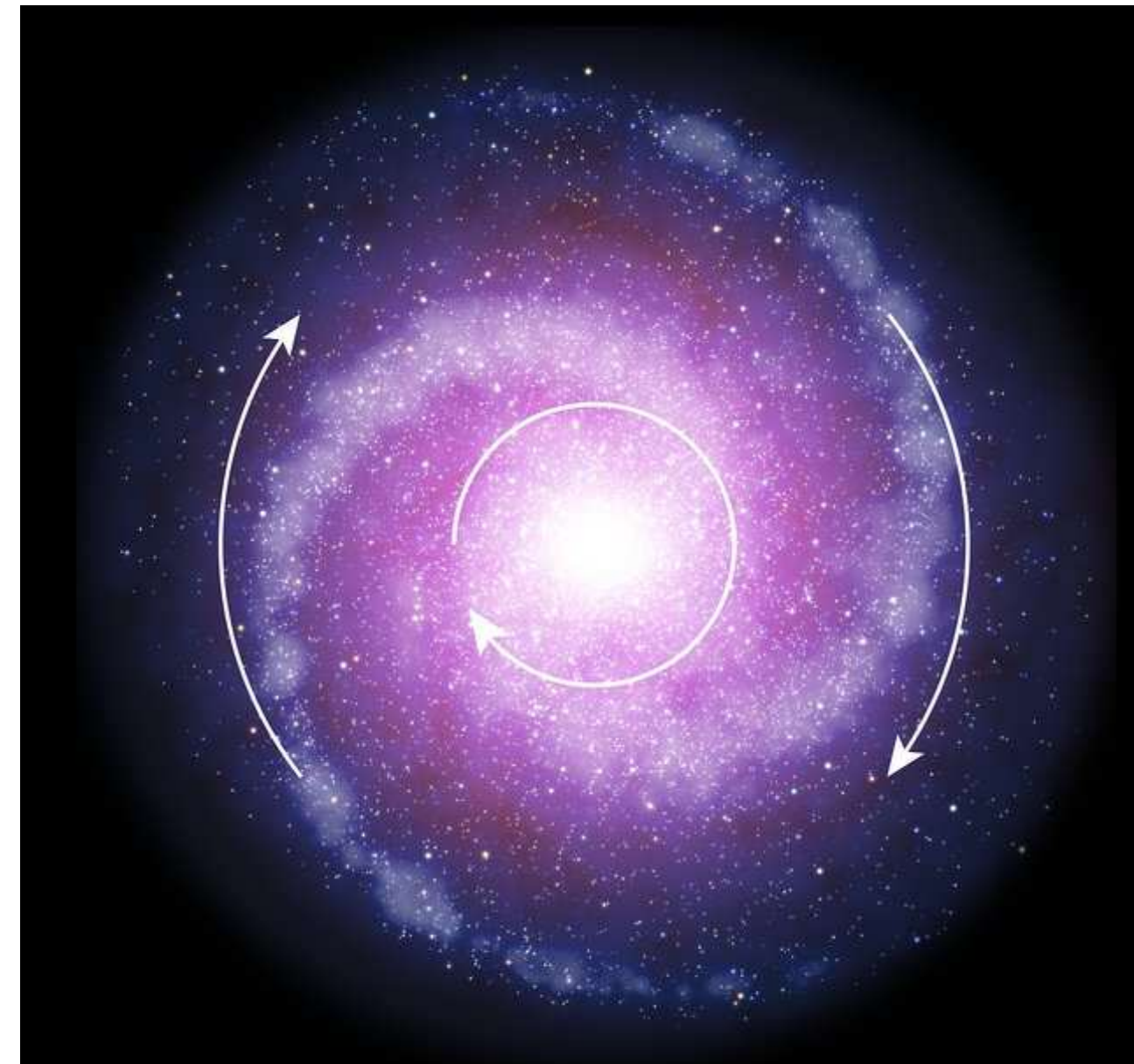
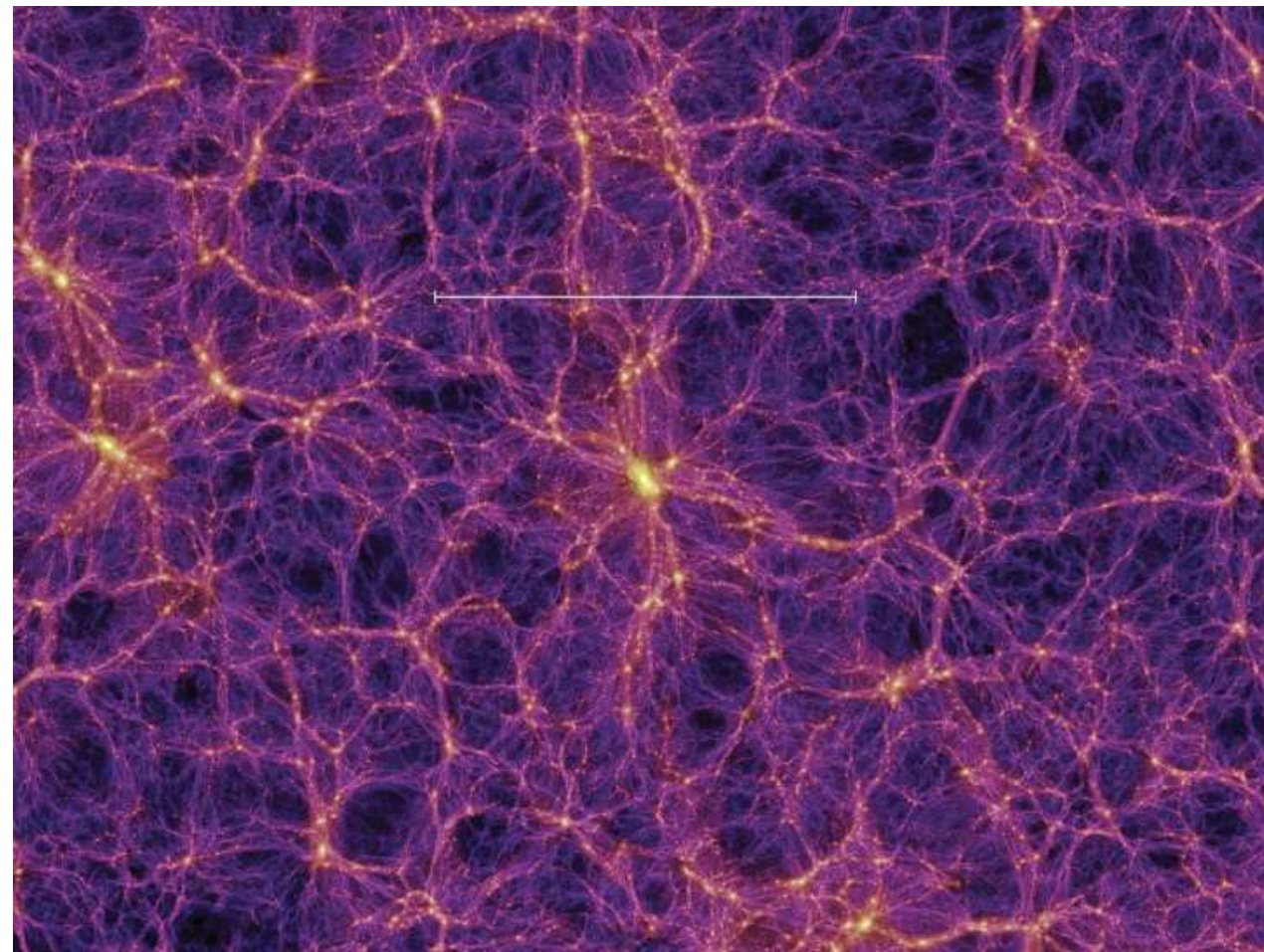


- ➔ Das Universum ist **13,8 Milliarden Jahre** alt
- ➔ Das beobachtbare Universum hat einen Radius von **46,5 Mrd. Lichtjahren**
- ➔ Nach **3 Minuten** entstanden die ersten Elemente
- ➔ Nach **300.000 Jahren** das erste Licht
- ➔ Nach **mehreren 100 Millionen Jahren** Sterne und Galaxien

Woraus besteht das Universum?



Warum glauben wir an Dunkle Materie (CDM)?

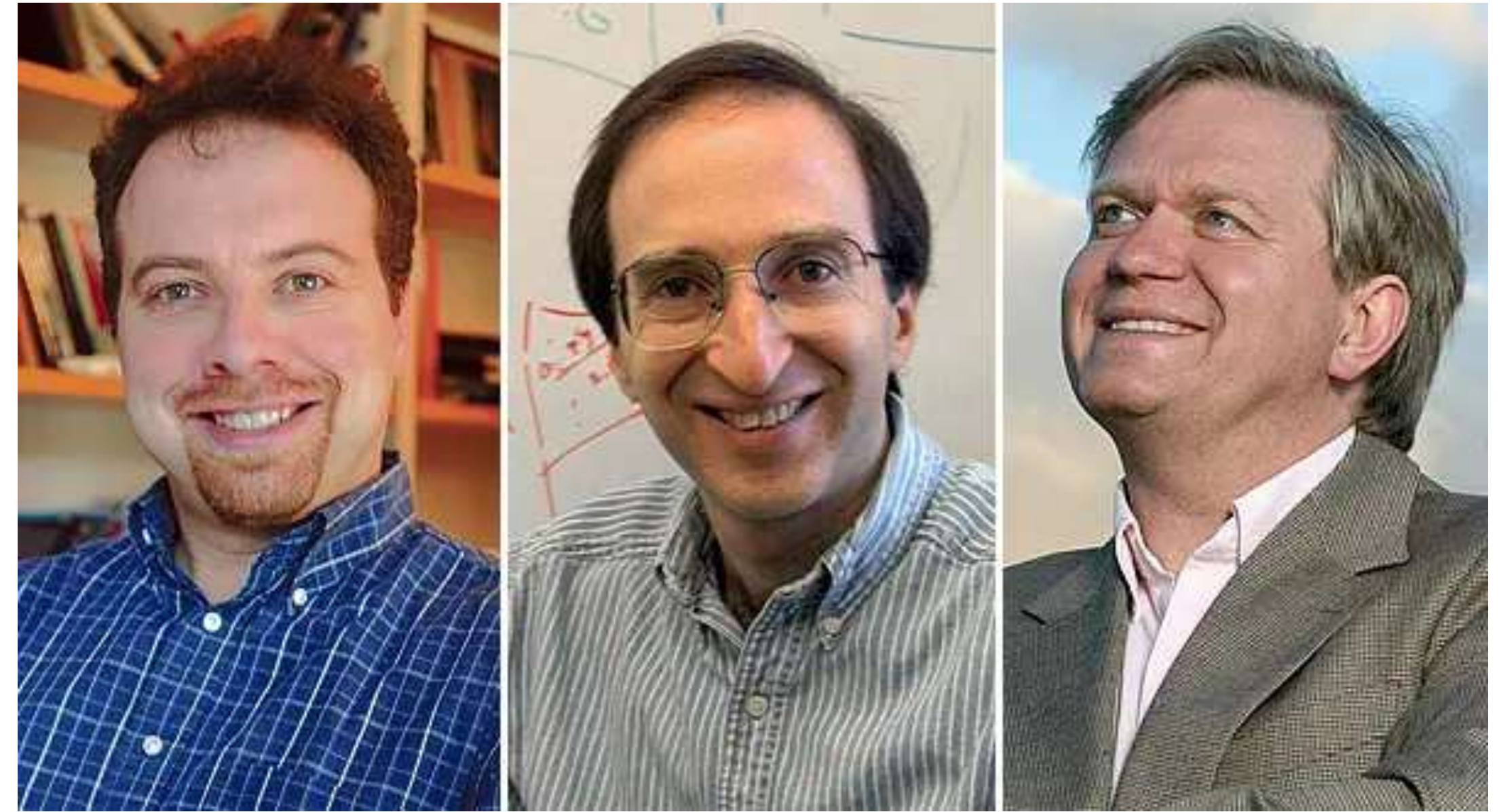
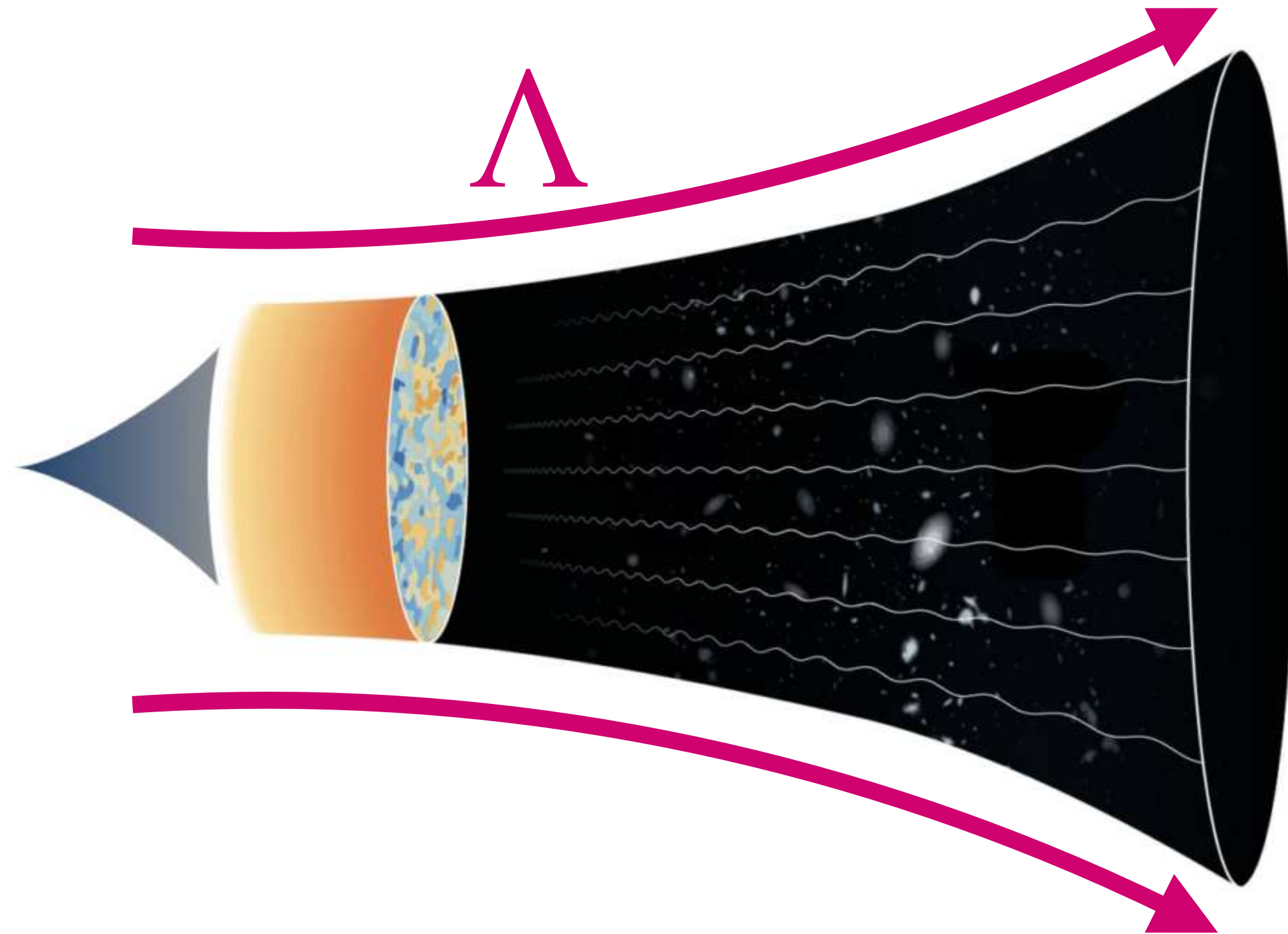


Es gibt eine ganze Reihe an Effekten, die auf verschiedenen Längenskalen stattfinden, die alle mit der gleichen „Zutat“ CDM erklärt werden können:

- ➔ Die Strukturentstehung im Universum
- ➔ Die optische Verzerrung von Galaxien
- ➔ Die Rotationskurven von Galaxien
- ➔ Die Struktur des kosmischen Mikrowellenhintergrunds
- ➔ Kollisionen von Galaxien-Clustern
- ➔ ...

Wir wissen aber auch nach über 100 Jahren nicht, was Dunkle Materie ist.

Warum glauben wir an dunkle Energie?

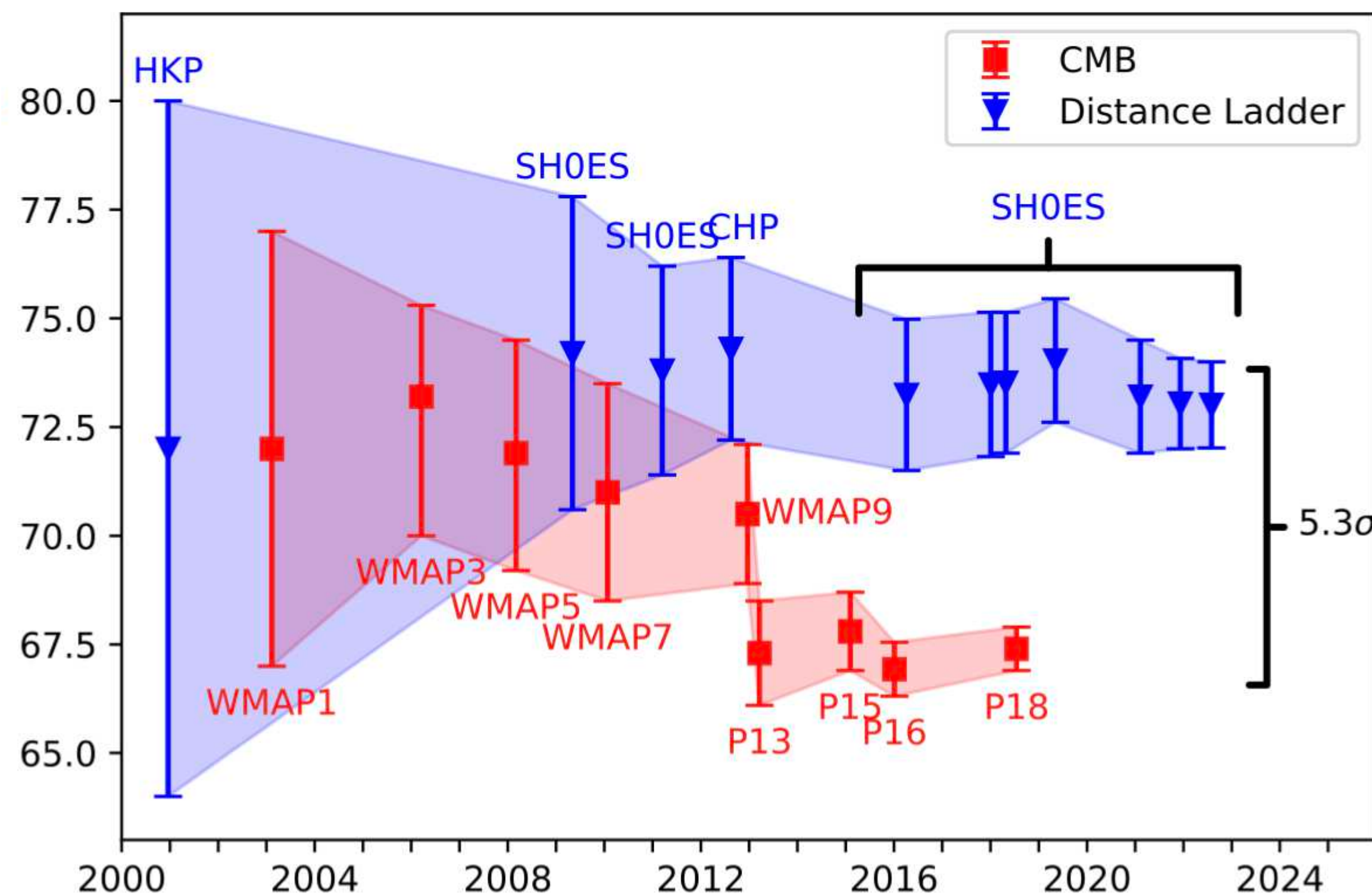


Nobelpreisträger 2011: Adam Riess, Saul Perlmutter, Brian Schmidt

Die Expansion beschleunigt sich messbar! Dafür braucht es eine besondere Energiequelle, wie die kosmologische Konstante Λ . Heute nennen wir die kosmologische Konstante dunkle Energie.

Präzisionsmessungen erzeugen neue Rätsel: Die Hubble Tension

Expansionsrate des
Universums H_0

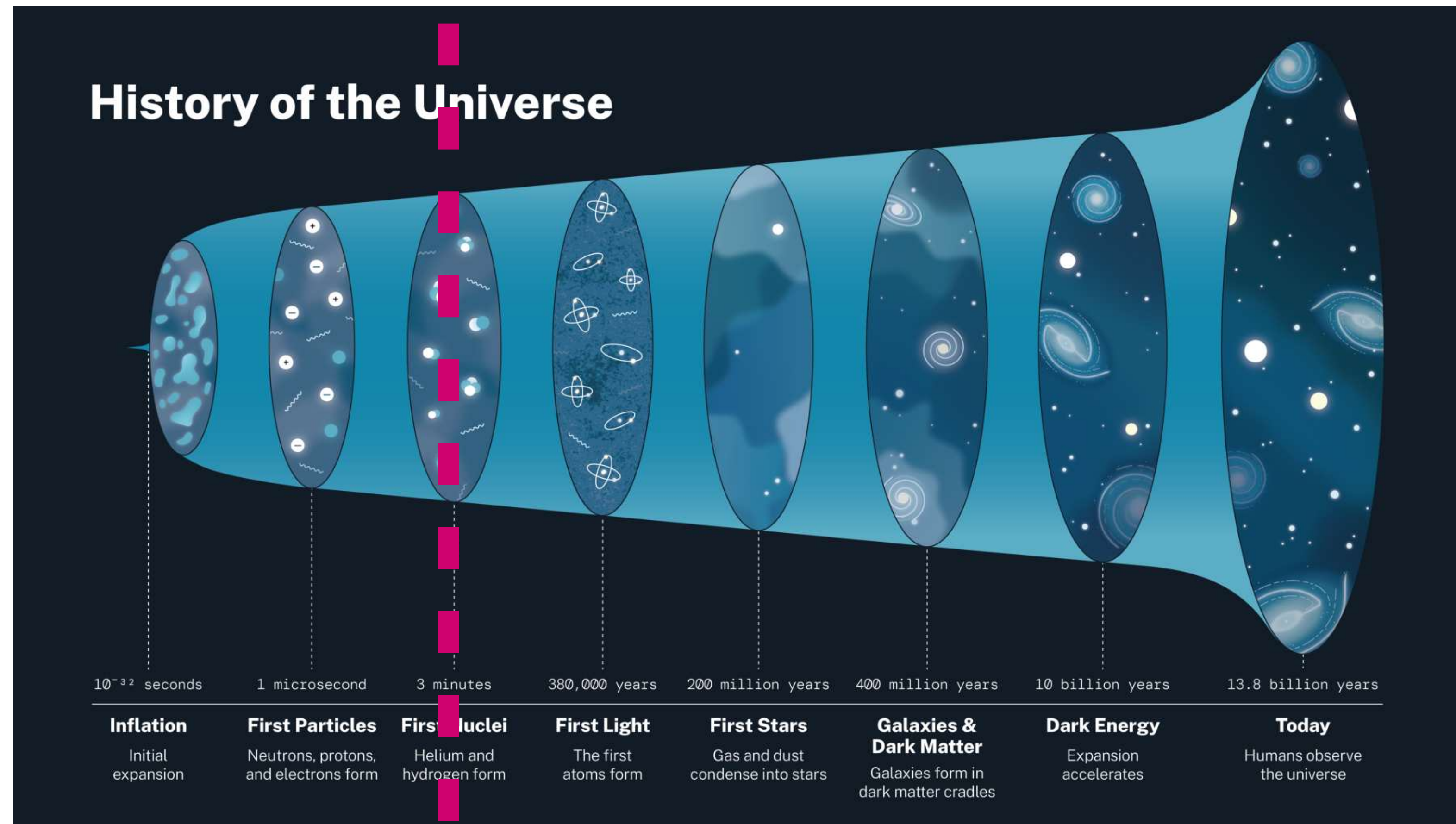


Erscheinungsjahr der Daten

Sowohl die Messungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds als auch der lokalen Expansionsrate, u.a. durch Supernovae-Daten wurden in den letzten 20 Jahre Präzisions-Beobachtungen. Sie zeigen **zwei verschiedene Hubble-Konstanten H_0 ?!**

Die Wahrscheinlichkeit, dass die „Hubble-Tension“ statistischer Natur ist, ist 1 : 3.500.000.

Was wissen wir sicher?



Spekulation

Empirisch belegt

Wobei sind wir uns noch unsicher?

Sehr gut gesichert:

- ➔ Das **Universum expandiert**: Tausendfach bestätigt
- ➔ Es gab eine **heiße Frühphase**: kosmischer Mikrowellenhintergrund und Nukleosynthese
- ➔ Die Struktur vom Mikrowellenhintergrund und der Galaxienverteilung wird exakt **durch Λ CDM erklärt**

Offen:

- ➔ Was ist **dunkle Materie**? Ein Teilchen? Modifiziertes Gravitationsgesetz?
- ➔ Was ist **dunkle Energie**? Eine echte Konstante oder zeitabhängig? Ein Quanteneffekt?
- ➔ Die **Hubble-Tension**: Messfehler oder neue Physik?
- ➔ Ob und wie die **Inflation** stattfand
- ➔ Die **Anfangssingularität**. Hier geben allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik widersprüchliche Aussagen. Vermutlich hat es sie nicht gegeben...

„Der Urknall war eine Explosion.“

„...ging von einem Punkt aus.“

„... begann bei unendlicher Dichte.“

Mythen und Trigger- Potential für Carlo

„Die Frage was davor war, ist wie die
Frage was nördlich vom Nordpol ist.“

„Raum und Zeit sind selbst entstanden.“

Drei meiner „Lieblings-Mythen“, schnell abgeräumt

„Der Urknall war eine Explosion“

Der Raum selbst expandiert.
Es gibt keine Druck-
Unterschiede. Es gibt kein
Zentrum. erinnert euch ans
Gummiband!

Drei meiner „Lieblings-Mythen“, schnell abgeräumt

„Der Urknall war eine Explosion“

Der Raum selbst expandiert. Es gibt keine Druck-Unterschiede. Es gibt kein Zentrum. erinnert euch ans Gummiband!

„Der Urknall ging von einem Punkt aus“

Das Universum kann schon zu jedem Zeitpunkt unendlich groß gewesen sein. Wenn es unendlich groß war, dann war es auch damals schon unendlich groß, nur eben dichter.

Drei meiner „Lieblings-Mythen“, schnell abgeräumt

„Der Urknall war eine Explosion“

Der Raum selbst expandiert. Es gibt keine Druck-Unterschiede. Es gibt kein Zentrum. erinnert euch ans Gummiband!

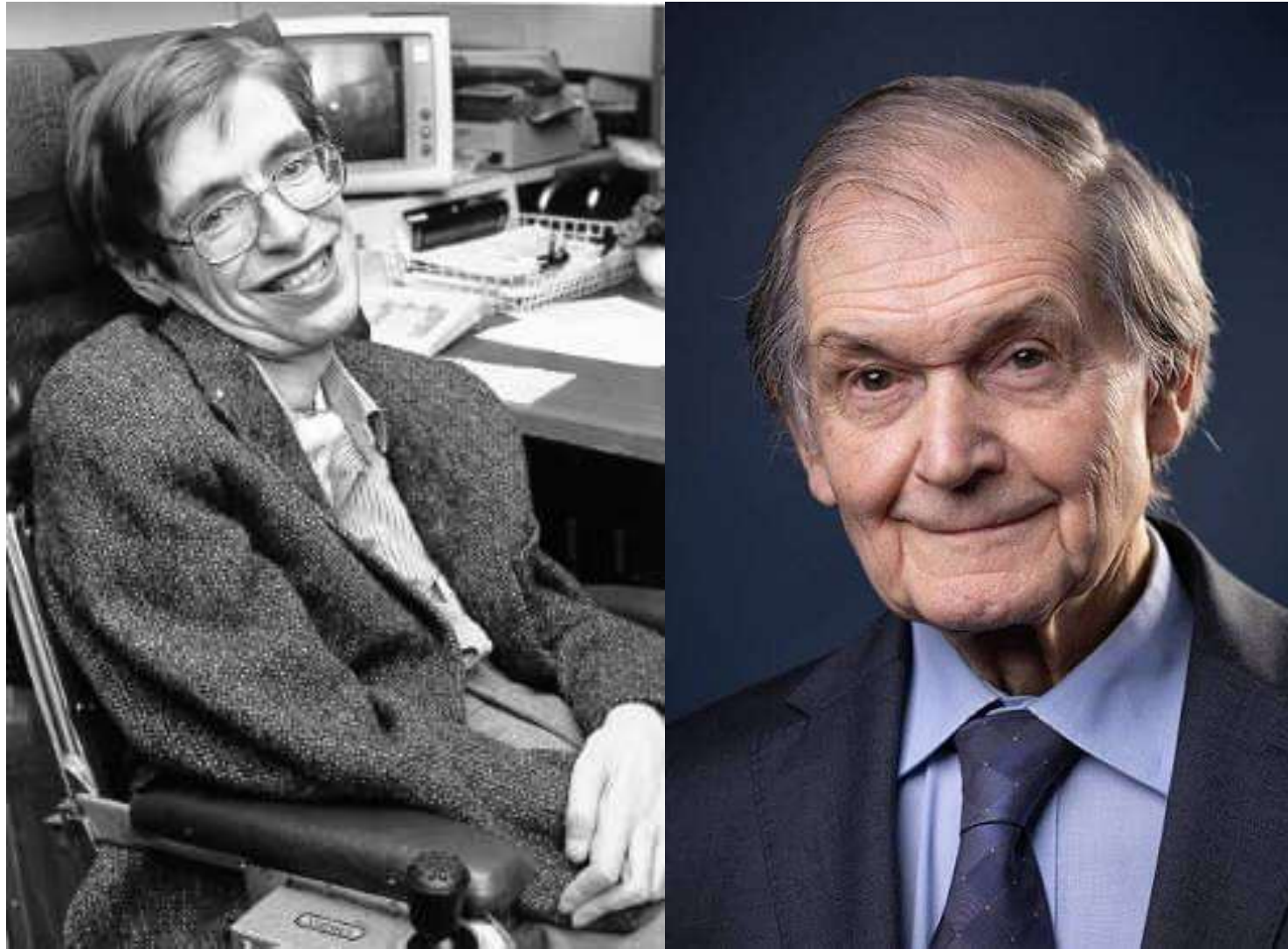
„Der Urknall ging von einem Punkt aus“

Das Universum kann schon zu jedem Zeitpunkt unendlich groß gewesen sein. Wenn es unendlich groß war, dann war es auch damals schon unendlich groß, nur eben dichter.

„Der Urknall war ein Zustand unendlicher Dichte“

Der Urknall war ein *Prozess*, kein Zustand. Die Anfangssingularität existiert nur in einer Extrapolation außerhalb der Grenzen unserer Naturgesetze. Sie brechen ab einer gewissen (großen) Energiedichte zusammen und werden widersprüchlich.

Woher kommt „die Frage nach davor ergibt keinen Sinn“?



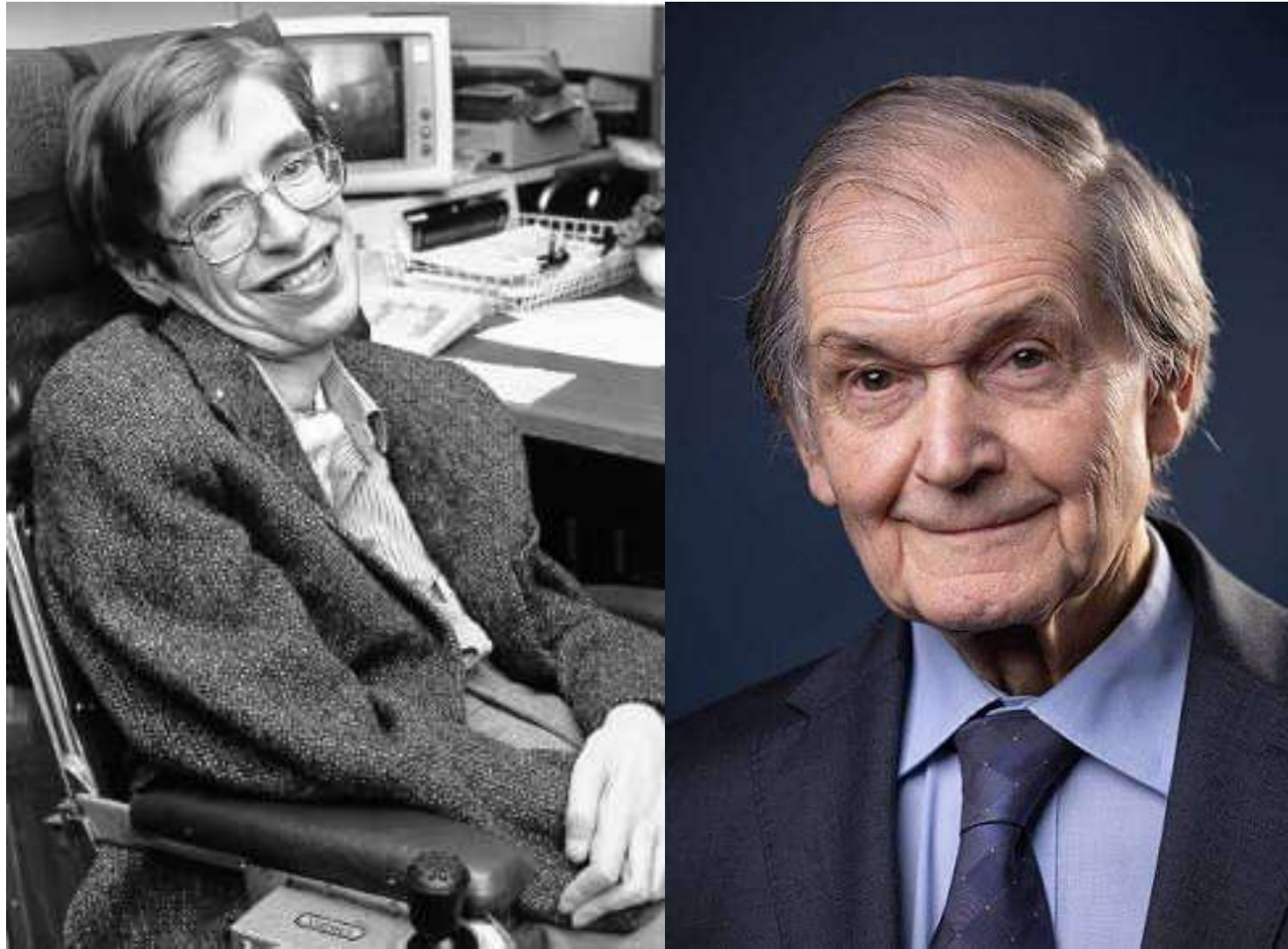
Stephen Hawking (1942-2018), Roger Penrose (*1931)

Was die Theoreme sagen: Unter bestimmten Annahmen lassen sich in der Relativitätstheorie Geodäten nicht beliebig weit in die Vergangenheit fortsetzen.

Was daraus wurde: Relativitätstheorie und Quantenfeldtheorie seien widerspruchsfrei bis exakt $t = 0$ gültig und deshalb dürfe man aus prinzipiellen Gründen nicht nach „davor“ fragen.



Woher kommt „die Frage nach davor ergibt keinen Sinn“?



Stephen Hawking (1942-2018), Roger Penrose (*1931)

Was die Theoreme sagen: Unter bestimmten Annahmen lassen sich in der Relativitätstheorie Geodäten nicht beliebig weit in die Vergangenheit fortsetzen.

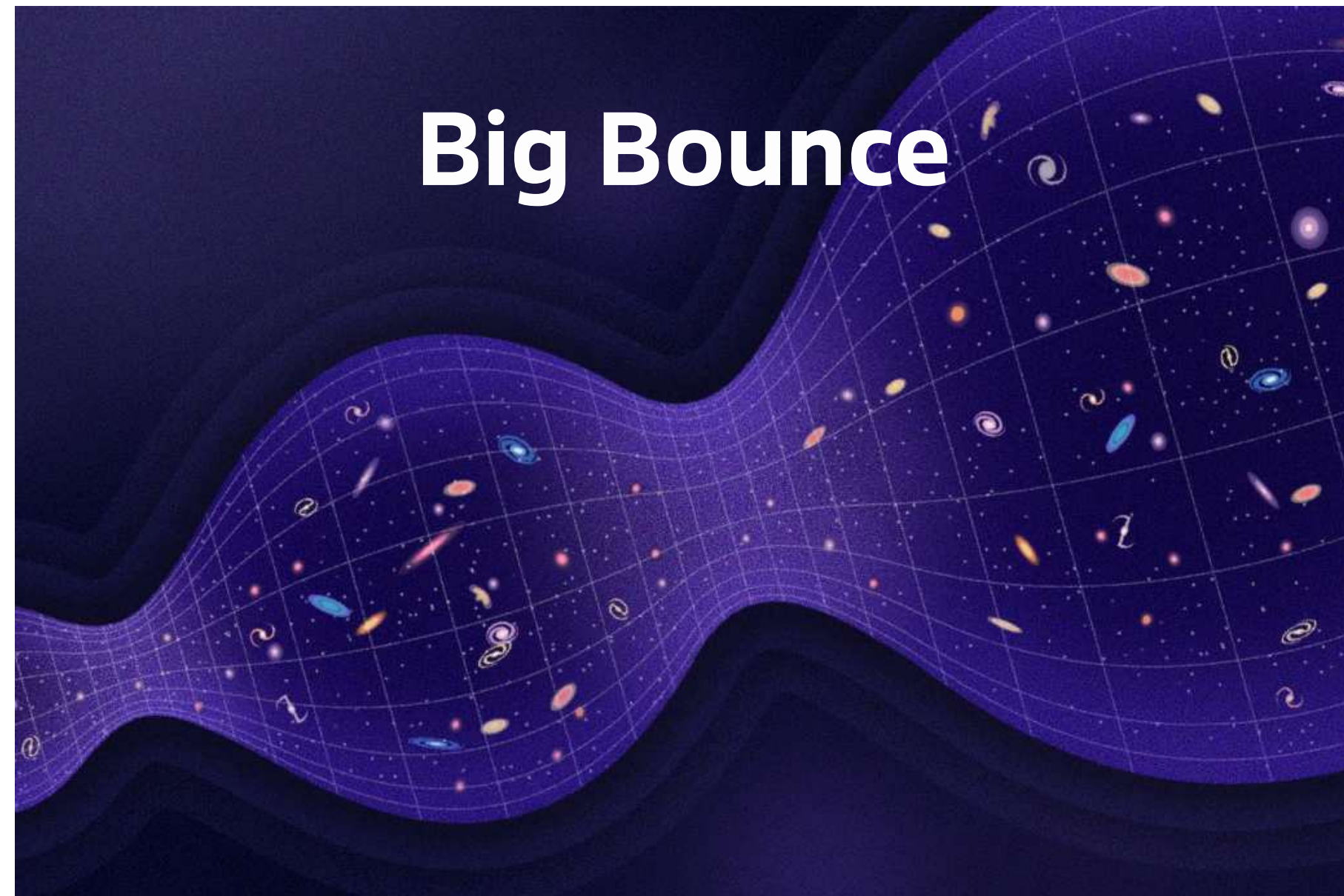
Was daraus wurde: Relativitätstheorie und Quantenfeldtheorie seien widerspruchsfrei bis exakt $t = 0$ gültig und deshalb dürfe man aus prinzipiellen Gründen nicht nach „davor“ fragen.



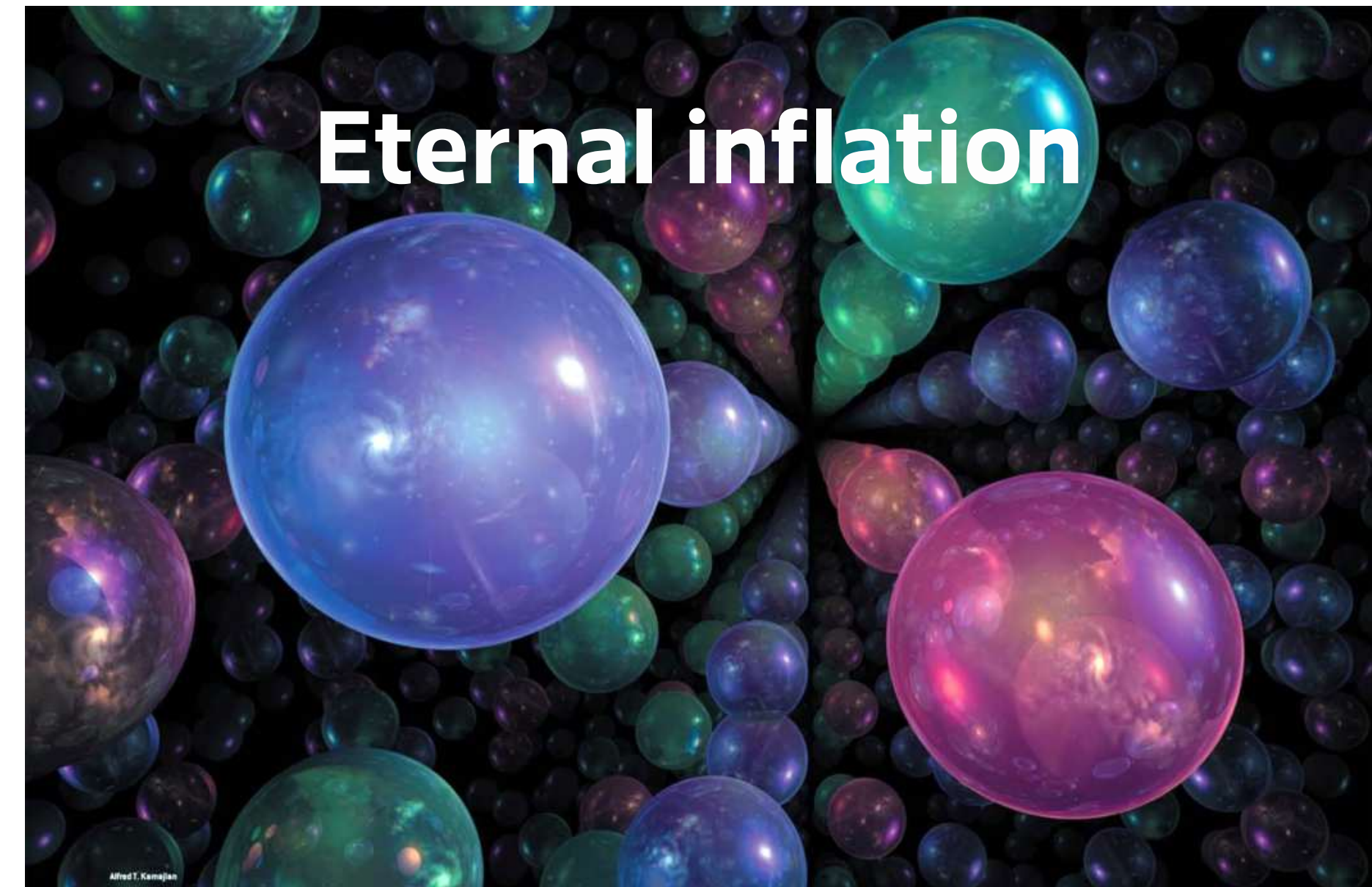
Das ist schlicht falsch! Bei diesen Krümmungen ist die Kombination aus Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenfeldtheorie längst ungültig. Sie widersprechen sich bei Temperaturen oberhalb von 10^{32}°C . Eine getestete Theorie der Quantengravitation haben wir nicht.

Empirisch getestet ist die Theorie ohnehin nur bis zur primordial Nukleosynthese als das Universum 3 Minuten alt und eine Milliarde Grad heiß war.

Was wir (noch) nicht ausschließen können



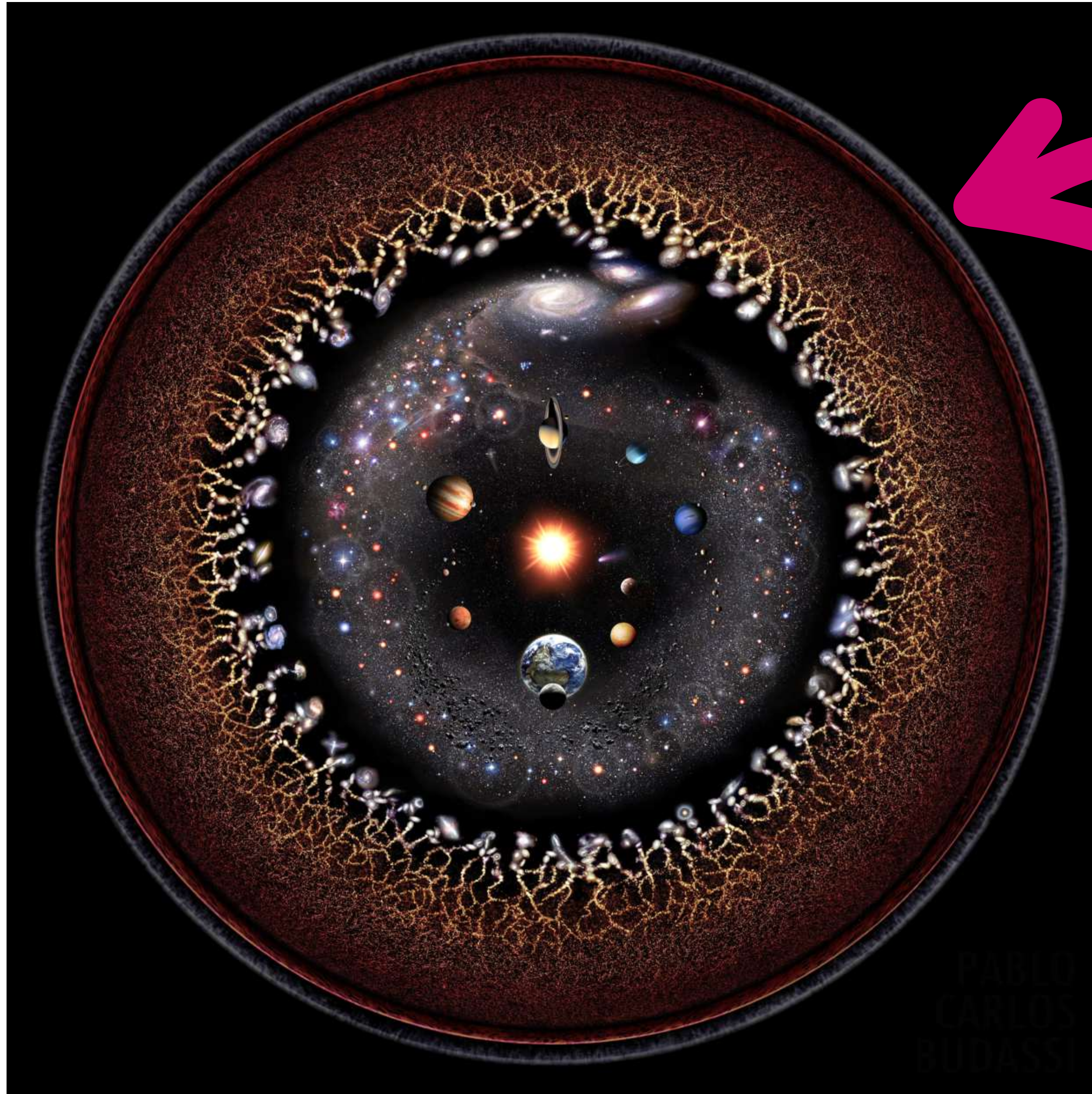
Statt einer Singularität ein „Abprallen“ bei maximaler, aber endlicher Dichte. Hier gibt es explizit ein „davor“.



Inflation endet nur lokal; anderswo entstehen ständig neue Blasen. Ein Multiversum aus vielen „Urknällen“.

Beide mögliche Szenarien widersprechen sich darin, *ob* die Frage nach dem „davor“ sinnvoll ist. Wer die Frage als erledigt verkauft, nimmt eine der möglichen Optionen als Fakt an.

Hinterm Horizont geht's weiter



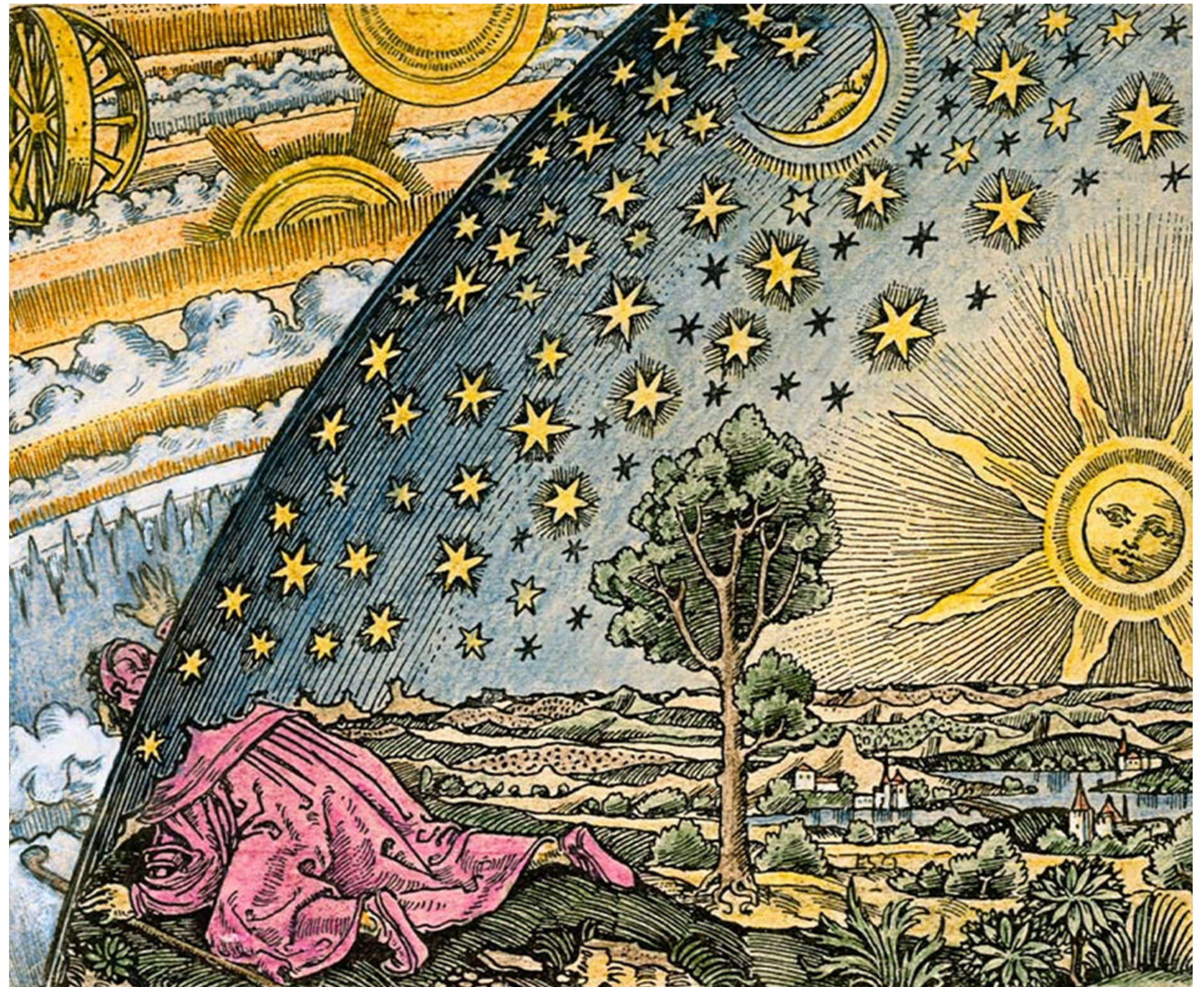
Ganz außen: nicht nur die **rote Wand** des Mikrowellenhintergrunds. Seit 2023 finden Pulsar-Timing-Arrays wie NANOGrav Evidenz für einen stochastischen **Gravitationswellen-Hintergrund** im Nanohertz-Bereich.

Diese Messung erlaubt uns den **Blick „durch die Wand“** als das Universum noch undurchsichtig für Licht war.

In meiner eigenen Forschung interpretieren ich die Gravitationswellen als **Signale aus dem frühen Universum**, als die dunkle Materie entstanden ist.

Zusammenfassung

- ➔ Der **Urknall ist kein Moment**, sondern ein Prozess. Die Expansion aus einem heißen, dichten Zustand bis heute.
- ➔ Ein Blick in die Ferne ist ein **Blick in die Vergangenheit**. Deswegen können wir überhaupt erst Kosmologie betreiben.
- ➔ Das Bild vom statischen Sphären-Universum hat **2000 Jahre lang Kultur** und Religion geprägt.
- ➔ **Λ CDM** beschreibt die Daten hervorragend, lässt aber die spannendsten Fragen offen.
- ➔ Die Unterscheidung „**gemessen oder logisch-schlüssig**“ ist seit jeher entscheidend.



Es ist schön, dem Cusanuswerk verbunden zu bleiben!



**Dankeschön für eure
Aufmerksamkeit!**

Gibt es Fragen?

