

Der Urknall und das expandierende Universum

Von Melanie Höschele

Inhaltsverzeichnis

1. Vorstellungen von unserem Universum

1. Vorstellung im Hinduismus
2. Geozentrisches Modell in der Antike
3. Heliozentrisches Modell nach Kopernikus
4. Weiterentwicklung des Kopernikanischen Modells
5. Moderne Kosmologie

2. Urknall und Expansion

1. Hubble und seine Entdeckung
2. Steady-State-Theorie
3. Urknalltheorie
4. Alexander Friedmann
5. Mikrowellenhintergrundstrahlung
6. Unser Standort im Universum
7. Friedmannmodelle
8. Beschleunigte Expansion und Dunkle Energie
9. Zusammenfassung: Entwicklung des Universums nach der Urknalltheorie

3. Probleme der Urknalltheorie

1. Probleme der Urknalltheorie
2. Theorien zur Vereinheitlichung von Quanteneffekten und Relativitätstheorie
3. Ausblick

The image features a background of thin, vertical, light blue lines on a grey gradient. A solid blue horizontal bar spans the width of the image, containing the main title and subtitle. Below this bar is another grey gradient section.

Vorstellungen von unserem Universum

Von alten religiösen bis zu modernen Annahmen

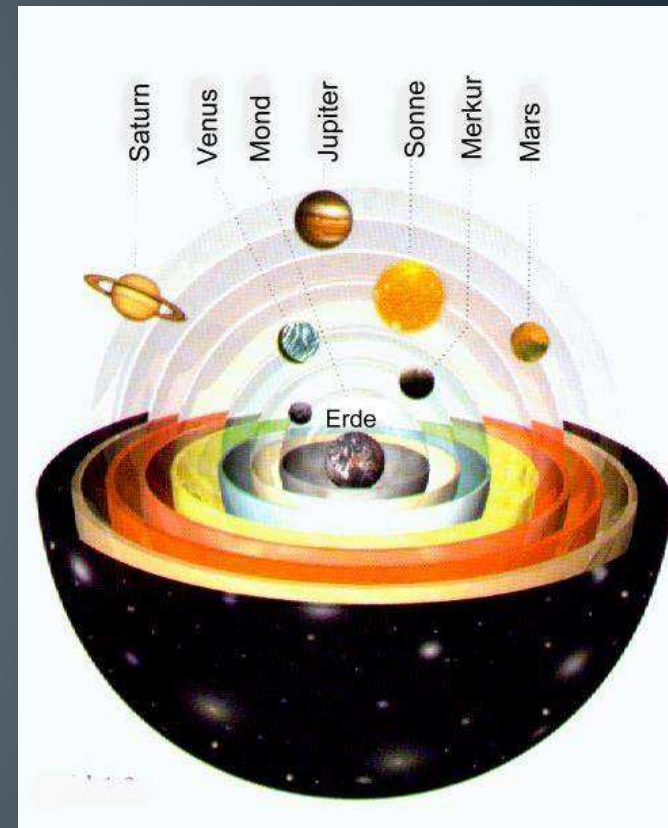
Vorstellung im Hinduismus

- Erdoberfläche wird von sechs Elefanten getragen
- Unterwelt ruht auf dem Rücken einer Schildkröte
- Diese steht auf einer Schlange



Geozentrisches Modell in der Antike

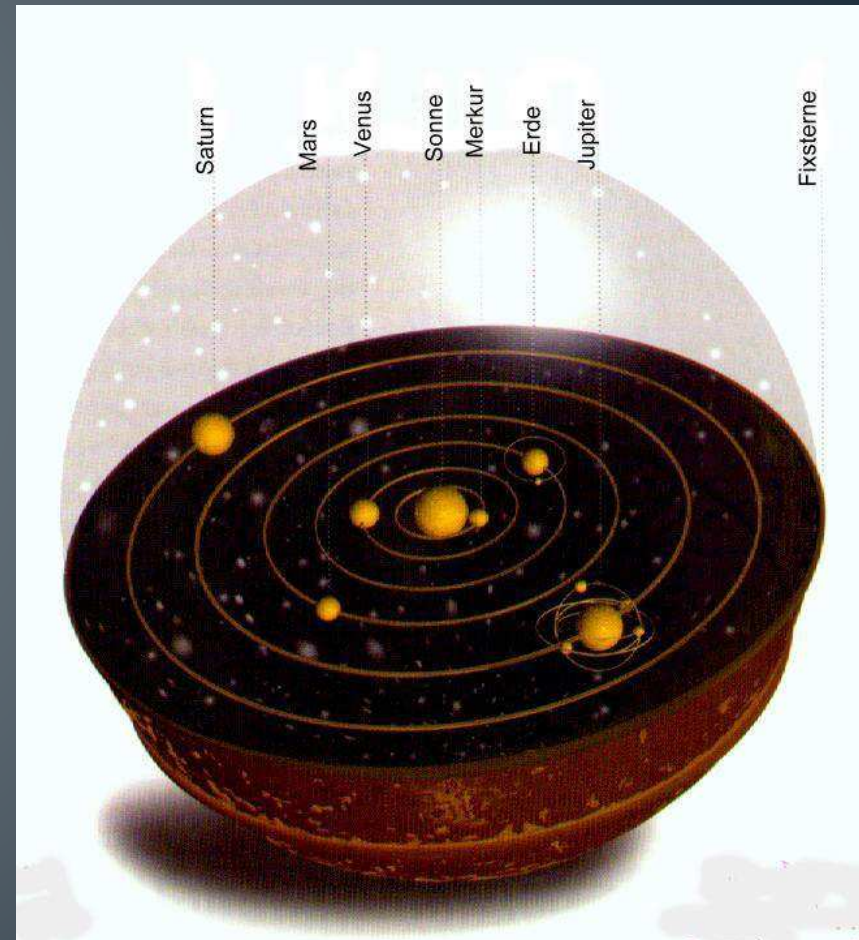
- **Aristoteles:** Erde keine Scheibe, sondern kugelförmig
- Erde Mittelpunkt; Sonne, Mond und Planeten umkreisen sie
- **Ptolemäus:** gestaltete vollständiges Modell daraus
- Erde Mittelpunkt, umgeben von 8 Sphären
- Planeten verbunden mit ihrer Sphäre
- Äußerste Sphäre trägt Fixsterne



Ptolemäus' Modell

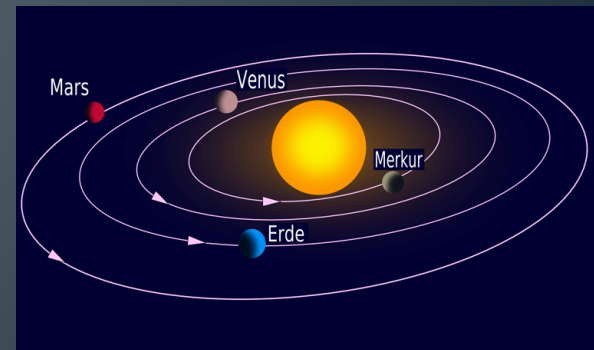
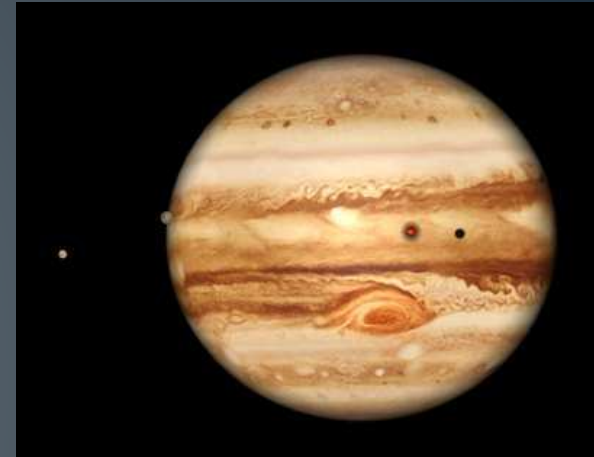
Heliozentrisches Modell nach Kopernikus

- Sonne ruht im Mittelpunkt
- Planeten und Erde bewegen sich auf kreisförmigen Bahnen um sie
- Modell wurde erst nach einem Jahrhundert ernst genommen



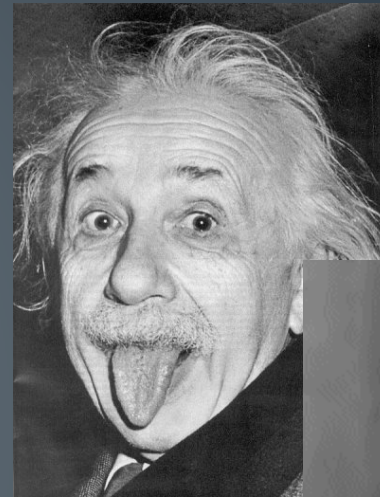
Weiterentwicklung des Kopernikanischen Modells

- **Galileo Galilei** entdeckte Jupitermonde
 - Nicht alles kreist um die Erde
- **Johannes Kepler**: Planeten bewegen sich in Ellipsen, nicht in Kreisen, um die Sonne
- **Newton** postulierte Gravitationsgesetz
 - Jeder Körper im Universum wird von einem anderen angezogen
 - Mond kreist elliptisch um Erde; die Planeten elliptisch um die Sonne



Moderne Kosmologie

- **Albert Einstein** zeigte im Jahr 1917, wie die allgemeine Relativitätstheorie auf Universum anzuwenden ist
- Aber er ging dabei von einem statischen Universum aus
- **Georges Lemaître** veröffentlichte 1927 in einer seiner Arbeiten die Idee des expandierenden Universums
- **Edwin Hubbles** Beobachtungen konnten diese Ausdehnung bestätigen



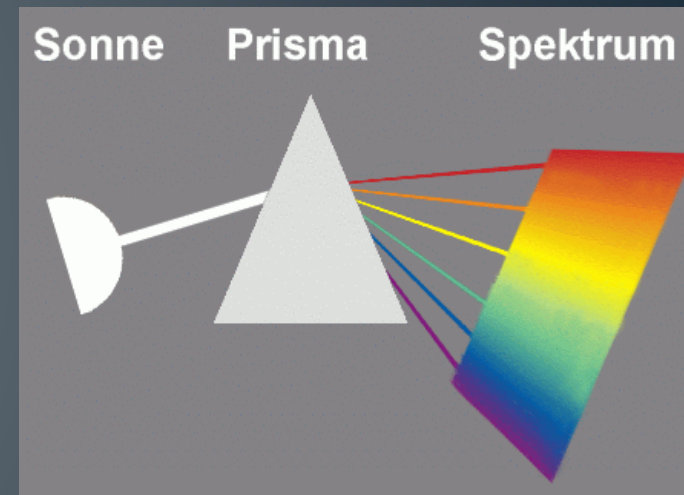
The image features a background of numerous thin, vertical, slightly wavy lines in a light blue-grey color, set against a darker grey gradient. A solid blue horizontal bar spans the width of the image, containing the main title and subtitle. Below this bar is a solid grey horizontal bar.

Expansion des Universums

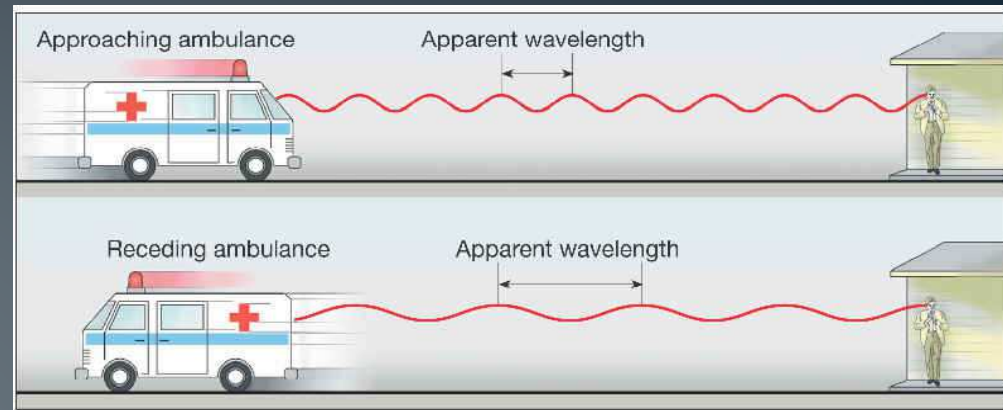
Vom statischen zum beschleunigt expandierenden Universum

Hubbles Vorgehensweise

- Zeigte, dass es viele andere Galaxien neben unserer gibt
- Zerlegte das Licht der Galaxien bzw. das ihrer Sterne in ihr Spektrum (vgl. Prisma)
- In den Spektren gibt es spezifische dunkle Linien; dieser kleine Farbbereich wird von der Atmosphäre des Sterns absorbiert und erreicht uns daher nicht
- **Entdeckung:** Bei Sternen anderer Galaxien fehlen dieselben typischen Farblinien wie bei Sternen unserer Galaxie, aber zum roten Ende des Spektrums verschoben
 - **Dopplereffekt**



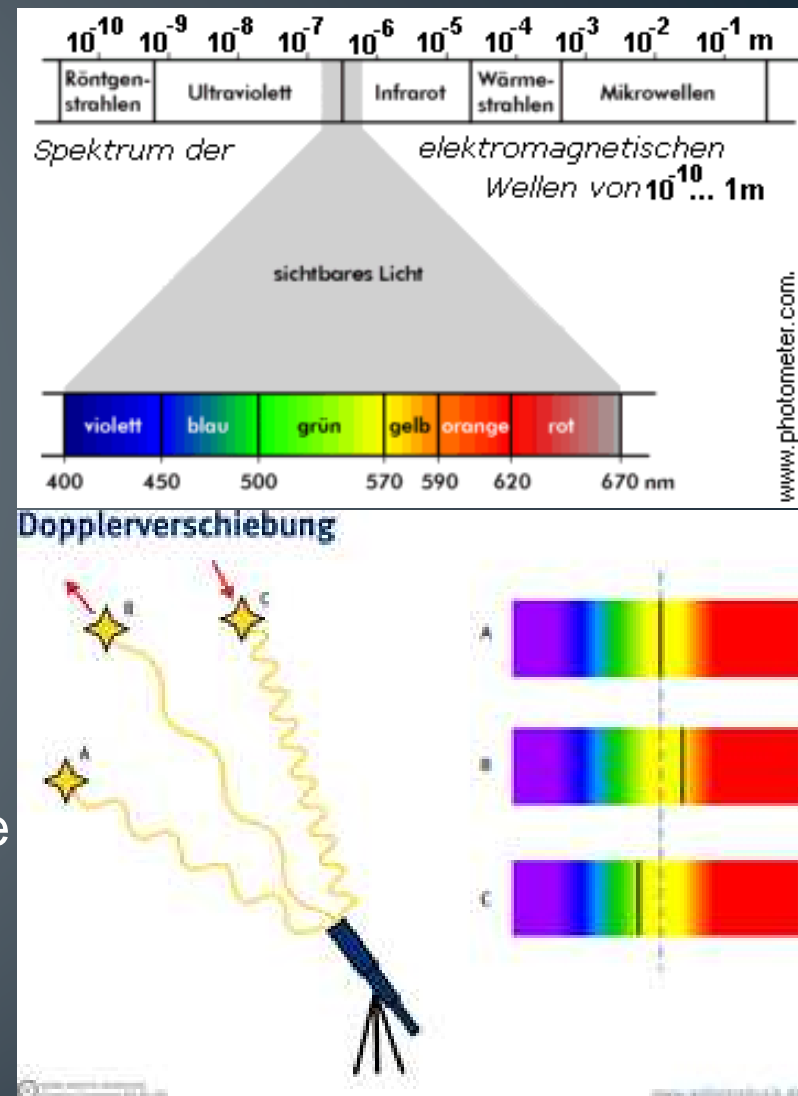
Dopplereffekt



- Eigenschaft aller Wellenarten
- **Alltägliches Beispiel:** Sirene eines vorbeifahrenden Krankenwagens
- Bewegt sich der Sender auf den Beobachter zu, wird der nächste Wellenkamm ausgesendet, wenn der Sender schon näher ist und braucht daher weniger Zeit zum Erreichen des Beobachters → Die Wellen verschieben sich zu einer höheren Frequenz (Sirene klingt höher)
- Entfernt er sich, so verschieben sie sich umgekehrt zu einer niedrigeren Frequenz (Sirene klingt tiefer)

Dopplereffekt bei Sternen

- Sterne senden Licht aus
- Licht besteht aus Wellen
- Für uns sichtbar zwischen rot (niedrige Frequenz, große Wellenlänge) und blau (hohe Frequenz, kleine Wellenlänge)
- Bewegt sich ein Stern, tritt der Dopplereffekt auf:
 - A: ruhender Stern sendet Licht mit unveränderlicher Wellenlänge ab
 - B: fortbewegender Stern: niedrigere Frequenz → Rotverschiebung
 - C: herannahender Stern: höhere Frequenz → Blauverschiebung

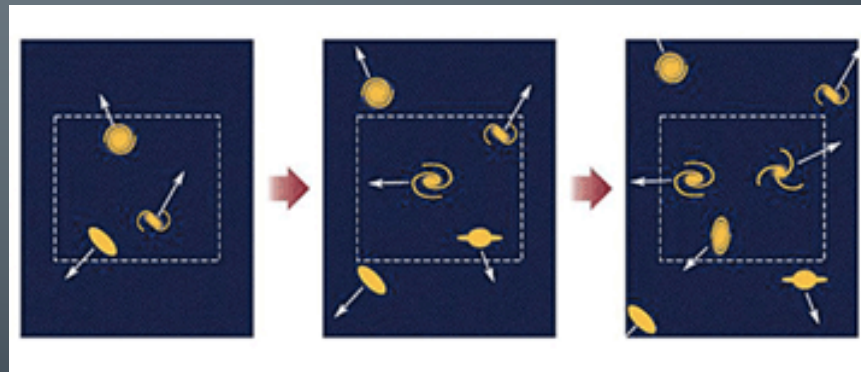


Erkenntnis aus Hubbles Beobachtung

- Hubble katalogisierte Entfernung und Spektren
- **Erwartung:** gleich viele rot- und blauverschobene Galaxien
- **Feststellung:** die meisten Galaxien sind rotverschoben und Ausmaß der Rotverschiebung ist proportional zur Entfernung
 - je weiter die Galaxie entfernt, desto schneller bewegt sie sich fort (Hubble-Gesetz)
 - Universum kann nicht statisch sein, sondern dehnt sich aus
- In der Folge wurden zwei Weltmodelle entwickelt: die **Steady-State-Theorie** und die **Urknall-Theorie**

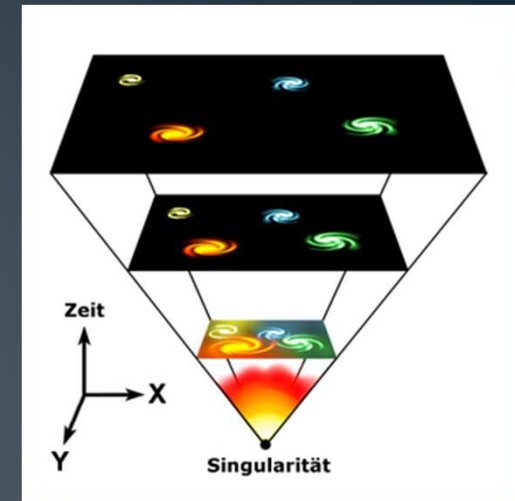
Steady-State-Theorie

- Theorie des stationären Zustandes
- **Idee:** in Lücken, die beim Auseinanderdriften der Galaxien entstehen, bilden sich aus neu entstehender Materie immer neue Galaxien
- Universum ist im Durchschnitt unveränderlich
- Hat weder Anfang noch Ende
- Entwickelt von Hermann Bondi, Thomas Gold und Fred Hoyle



Urknall

- Universum entstand aus einem stark verdichteten, energiereichen „Uratom“, das abrupt zu expandieren begann
- Keine Explosion sondern Entstehung von Materie, Raum und Zeit aus Singularität (Punkt in der Raumzeit, an dem die Raumzeitkrümmung unendlich wird)
- Mit dem Urknall begann die Zeit → was vorher war, ist irrelevant
- Danach Expansion und Abkühlung aller Materie und Strahlung
- Geht zurück auf Lemaître und **Alexander Friedmann**

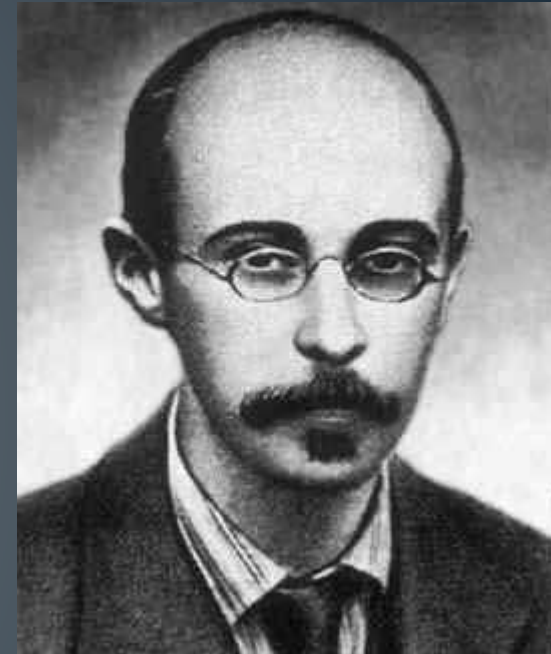


Vorstellungen vom Urknall



Alexander Friedmann

- Bewies bereits 1922, dass das Universum sich ausdehnen muss
- Dabei ging er von zwei Grundannahmen über das Universum aus:
 1. Es sieht stets gleich aus, in welche Richtung auch immer man blickt (im großen Maßstab gesehen)
 2. Die erste Voraussetzung gilt auch, wenn wir es von einem beliebigen Punkt betrachten
- Beleg für 1. lieferten Arno Penzias und Robert Wilson mit der **Mikrowellenhintergrundstrahlung**



Mikrowellenhintergrundstrahlung

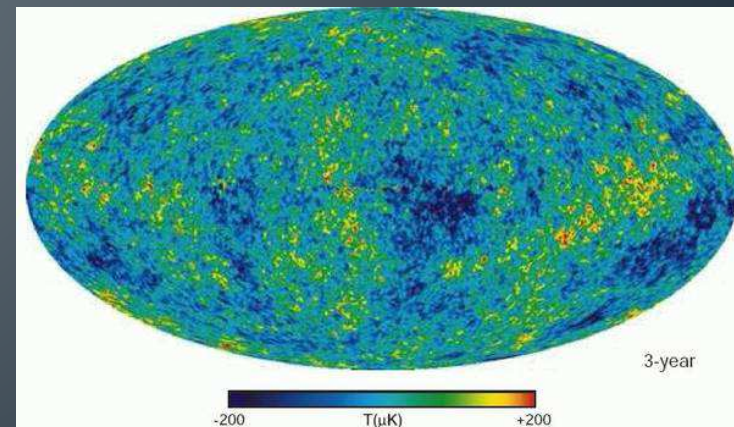
- Zufällig entdeckt von Arno Penzias und Robert Wilson
- Testeten empfindlichen Mikrowellendetektor
- Dabei empfing der Detektor ständig ein Rauschen, dessen Quelle die beiden nicht ausmachen konnten
- Aus jeder Richtung war das Rauschen gleich



Mikrowellenhintergrundstrahlung

- Zur selben Zeit waren Bob Dicke und Jim Peebles auf der Suche nach genau dieser Strahlung
- **Grund:** Aussage von Georg Gamov, der Urknall habe **Schwarzkörperstrahlung** im Universum hinterlassen
- Wilson und Penzias entdeckten diese Strahlung und erhielten Nobelpreis dafür
- Heute bekannt, dass Strahlung doch geringe Unterschiede zeigt

Neue Messungen der NASA zeigen Unterschiede in der Strahlung. Diese liegen in einer Größenordnung von 1:100 000

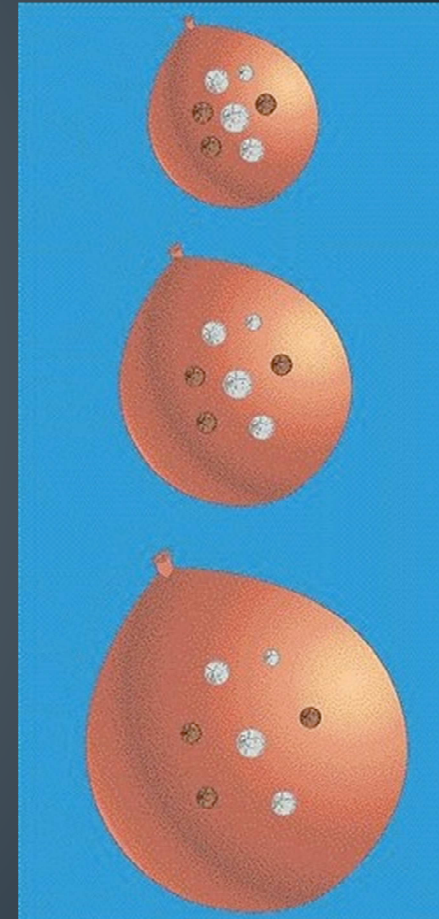


Schwarzkörperstrahlung und Bedeutung für die Urknalltheorie

- **Schwarze Körper:** idealisierte Körper im thermischen Gleichgewicht. Sie emittieren eine kontinuierliche Strahlung, die in Intensität und Spektralverteilung nur von Naturkonstanten und ihrer Temperatur abhängt
- Wilson und Penzias entdeckten diese Strahlung
- Messungen von John Mather und George Smooth zeigten mit dem Satelliten Cobe, dass keine andere bekannte Strahlungsquelle so genau einem schwarzen Körper entspricht
- **Bestätigung des Urknallmodells und Widerlegung der Steady-State-Theorie**

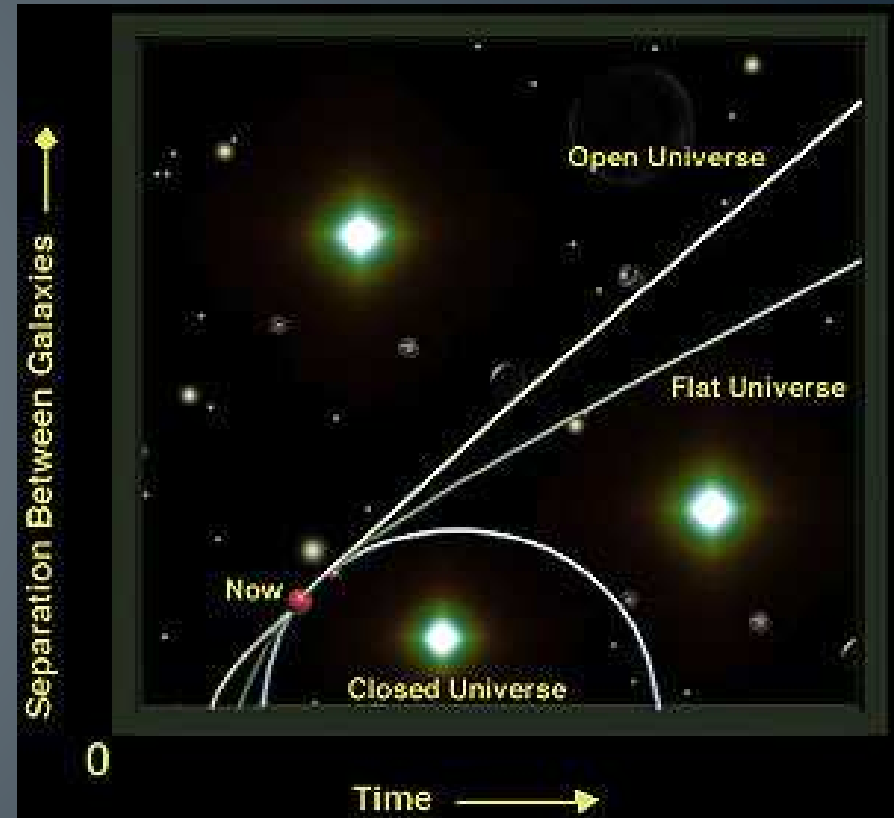
Unser Standpunkt im Universum

- Aus **Friedmanns 2. Annahme** folgt, dass wir keinen besonderen Standpunkt im Universum haben, also uns auch nicht im Zentrum befinden
- Vergleichbar mit einem Luftballon mit Punkten, der aufgeblasen wird:
 - Abstand zwischen Punkten wächst, ohne, dass ein Punkt Mittelpunkt sein kann
 - Bestätigt auch Hubbles Beobachtung: je weiter die Punkte voneinander entfernt sind, desto rascher bewegen sie sich auseinander → Geschwindigkeit ist proportional zur Entfernung (Hubble-Gesetz)



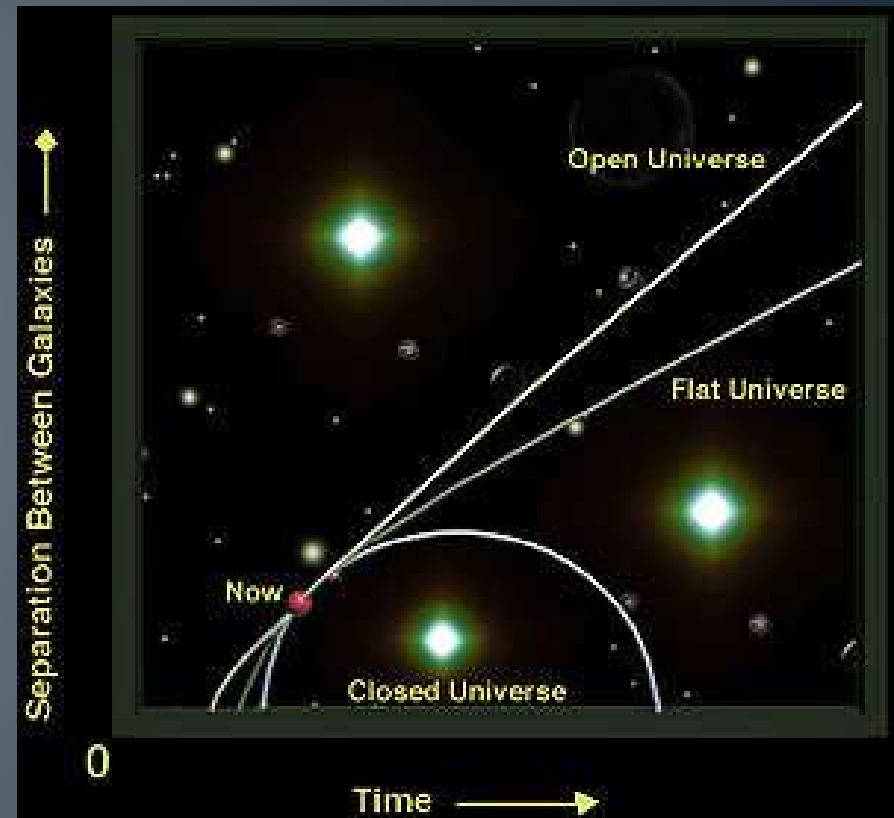
Friedmannmodelle

- Aus Friedmanns Annahmen lassen sich **drei Modelle** entwickeln, die mit diesen übereinstimmen:
 1. Geschlossenes Universum
 2. Offenes Universum
 3. Flaches Universum



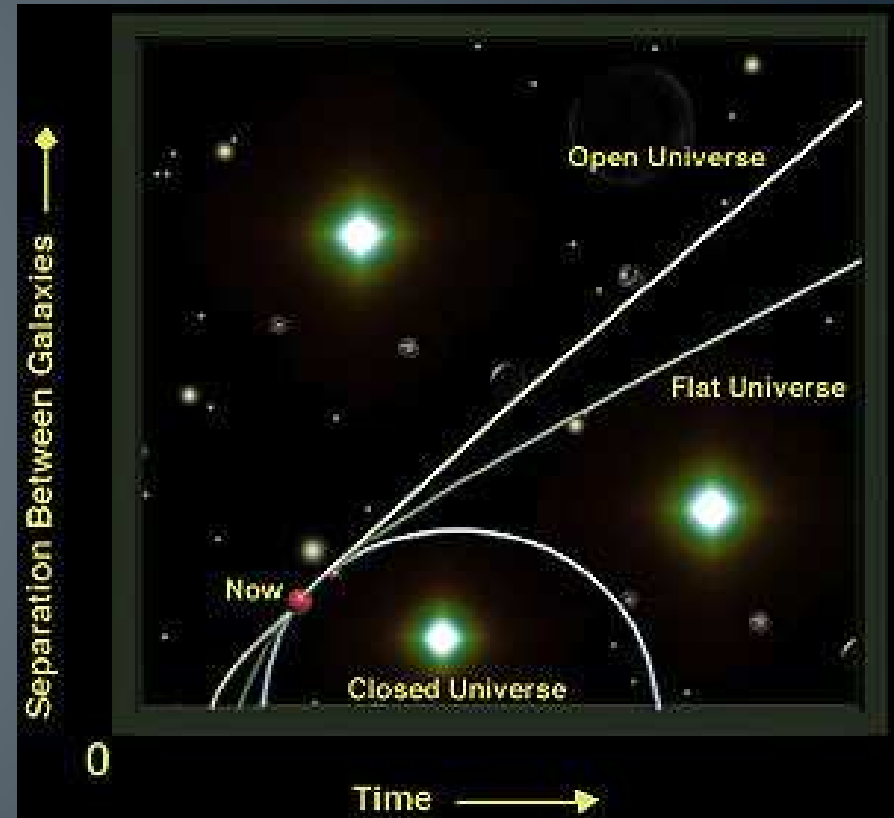
Geschlossenes Universum

- Closed Universe
- Universum expandiert so langsam, dass Massenanziehungskraft Expansion bremst
 - Stillstand
 - Zusammenziehen des Universums
 - Endknall
- Raum nicht unendlich, besitzt aber auch keine Grenzen



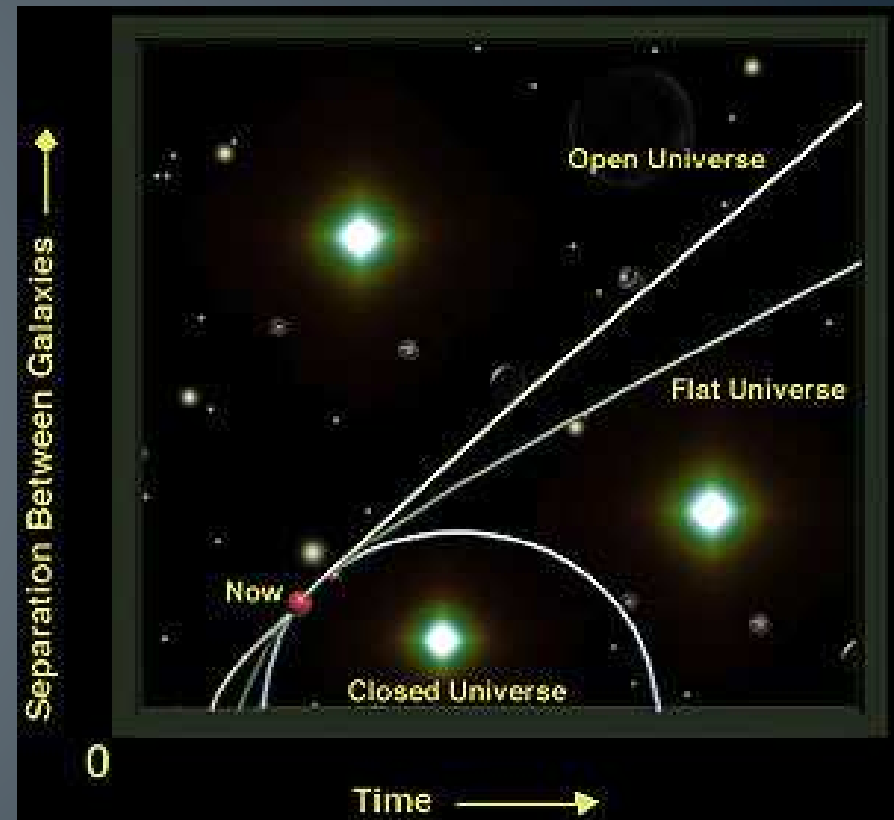
Offenes Universum

- Open Universe
- Universum dehnt sich so rasch aus, dass Schwerkraft keinen Einhalt gebieten kann
- Universum expandiert endlos weiter
- Raum unendlich



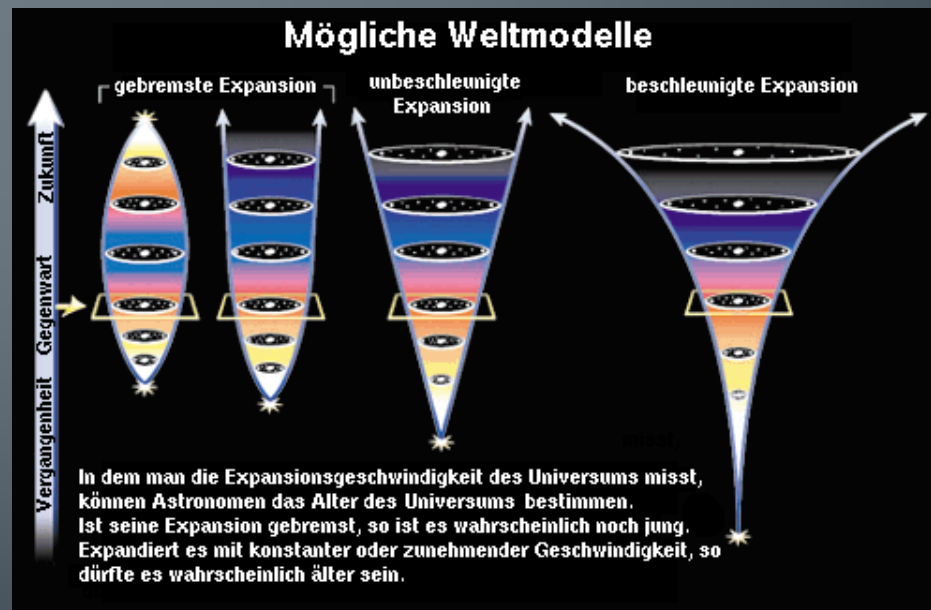
Flaches Universum

- Flat Universe
- Galaxien bewegen sich grade so schnell auseinander, dass Kollaps vermieden wird
- Geschwindigkeit wird kleiner ohne jemals 0 zu werden
- Massenanziehung und Geschwindigkeit befinden sich in einem exakten Gleichgewicht
- Raum flach und unendlich



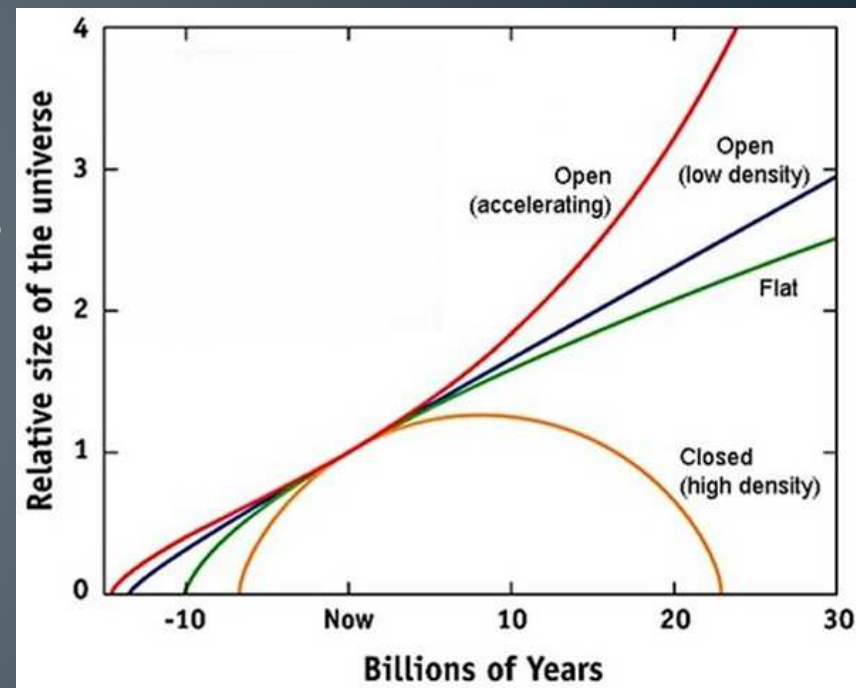
Welches Modell?

- Erforderlich zur Klärung: Expansionsgeschwindigkeit und aktuelle Dichte des Universums
- Beides nur sehr ungenau bestimmt → keine exakte Antwort
- Aber beim Überprüfen der Modelle stieß man auf ein neues: die **beschleunigte Expansion**
- Sie gilt heute als das wahrscheinlichste Modell



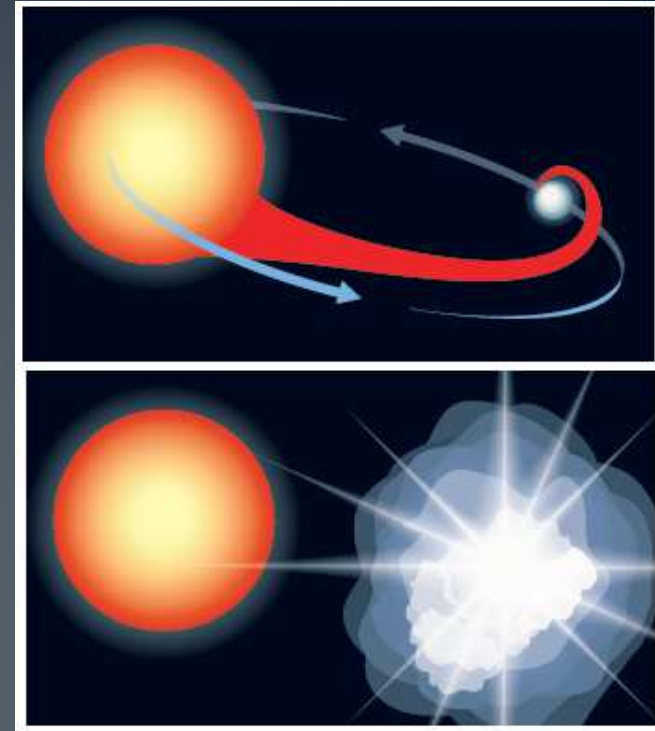
Beschleunigte Expansion

- Neues Weltmodell (accelerating Universe)
- Entdeckt von Sean Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess, die dafür den Nobelpreis erhielten
- Universum wird ewig mit immer größerer Geschwindigkeit ausdehnen
- Ausdehnung wird bald Materiezusammenballung verhindern, also werden keine neuen Sterne entstehen
- Universum endet als dunkler, kalter, toter Raum



Vorgehensweise

- Bestimmen für weitentfernte Galaxien die Fluchtgeschwindigkeit und die Entfernung
 - **Fluchtgeschwindigkeit:** spektrale Rotverschiebung (Dopplereffekt)
 - **Entfernung:** mittels **Supernovae Typ Ia** als Standardkerzen (Lichtquelle mit bekannter und unveränderlicher tatsächlicher Helligkeit); scheinbare Helligkeit nimmt gegenüber tatsächlicher Helligkeit mit dem Quadrat der Entfernung ab
 - Aus Vergleich der Helligkeiten erhält man die Entfernung
- Das Experiment zeigte, dass sich das Universum nicht abgebremst sondern beschleunigt ausdehnt
- Verantwortlich für diese Beschleunigung soll die **Dunkle Energie** sein

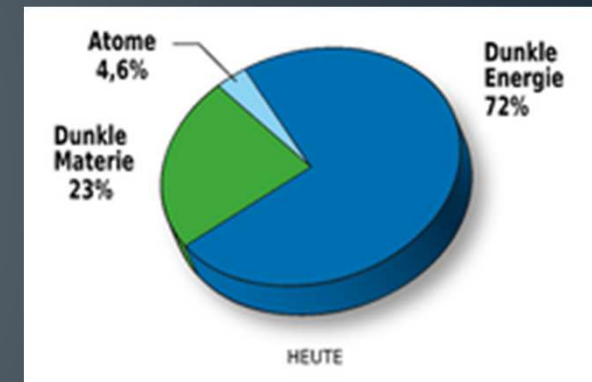


Supernovae Typ Ia:

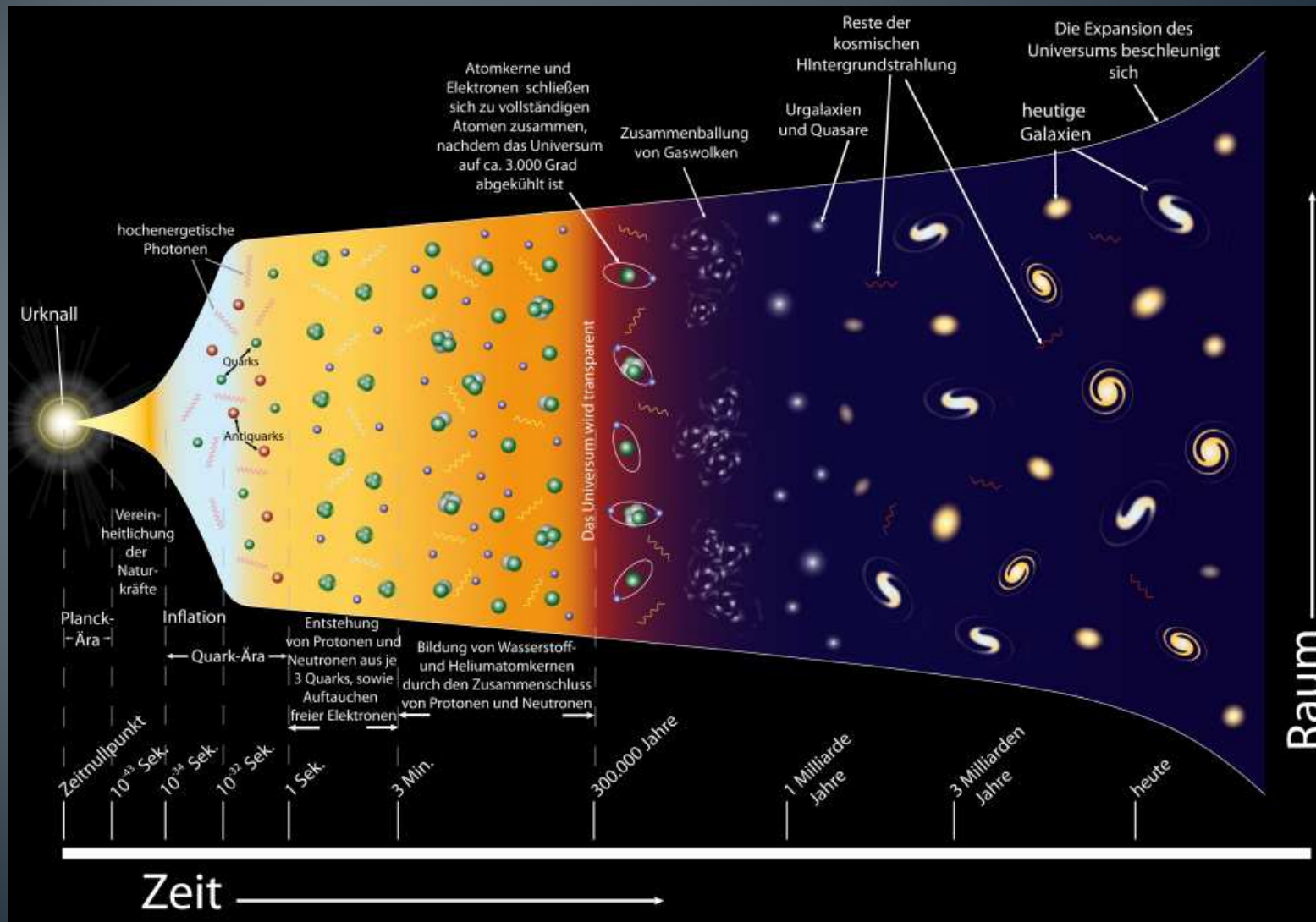
- **Doppelsternsystem** aus einem massereichen Stern und einem weißen Zwergstern
- Materie strömt vom massereicheren zum Zwergstern → bei Überschreitung eines kritischen Wertes folgt Kernexplosion mit extrem hellen Aufleuchten

Dunkle Energie

- Großes Rätsel der heutigen Kosmologie
- Soll Verantwortlich für die Beschleunigung der Universums sein
- Soll etwa 72% der gesamten Materie im Kosmos ausmachen
- Dunkle Energie und auch die Dunkle Materie wurden noch nicht beobachtet
 - Dunkle Materie: Unbekannte Form der Materie, eingeführt um beobachtete Gravitation im Weltall zu erklären, deren Wirkung mit der „normalen“ Materie nicht beschreibbar wäre



Zusammenfassung: Entwicklung des Universums nach der Urknalltheorie





Probleme der Urknalltheorie

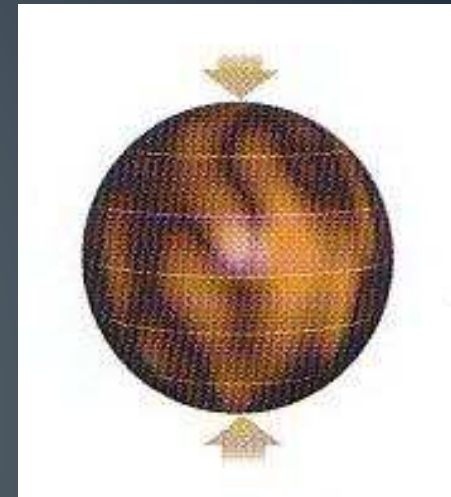
Grenzen der Astrophysik und Lösungsansätze

Probleme der Urknalltheorie

- Bekannte Naturgesetze können bis in eine Zeit vor der ersten milliardstel Sekunde angewandt werden, versagen aber an der Singularität davor
- **Grund:** Relativitätstheorie lässt Quanteneffekte, die bei mikroskopischen Größenskalen und hohen Energien auftreten, außer Acht
 - Benötigt ist eine Theorie, die Relativitätstheorie und Quanteneffekte berücksichtigt
 - Verschiedene Modelle
 - Keine Grenzen Hypothese
 - Stringtheorie
 - Loop Quantum Gravity

Keine Grenzen Hypothese

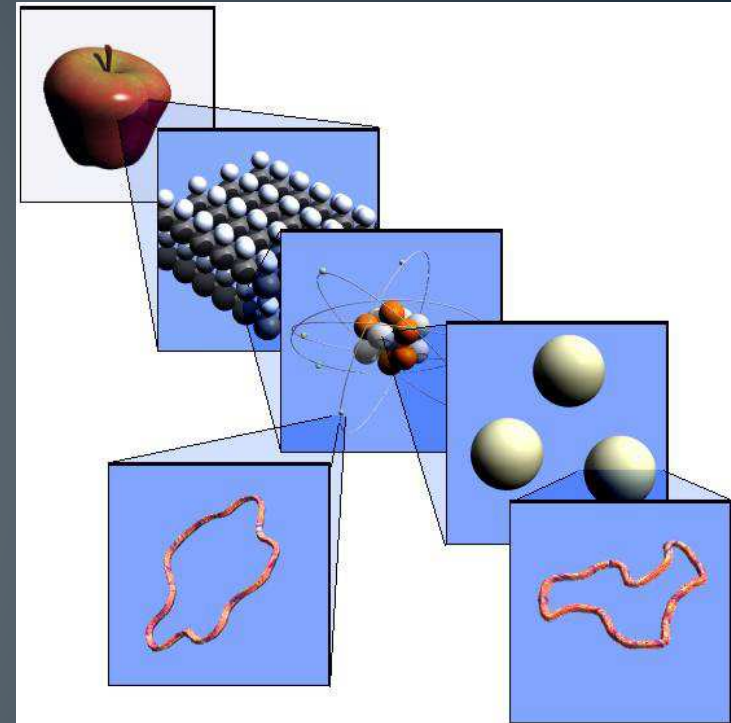
- Entwickelt von James Hartle und Stephen Hawking
- Heutiger Zustand des Universums ergibt sich aus der Summe aller möglichen „Geschichten“ (alle möglichen Entwicklungen, die zu diesem Zustand hätten führen können)
- Zeit nimmt hierbei die Eigenschaft einer Raumdimension an
- Dadurch kein Rand oder Anfang identifizierbar, wie auf einer Kugel → es gibt keine Singularitäten
- Umstrittener Ansatz



Wie bei der Oberfläche einer Kugel lässt sich in diesem Modell kein Anfang oder Ende feststellen

Stringtheorie

- Atome bestehen aus Elektronen und dem Atomkern mit Protonen und Neutronen
- Letztere sind aufgebaut aus je 3 Quarks, die sich nicht weiter zerlegen lassen und daher elementar sind
- Standardmodell: Quarks als nulldimensionale, punktförmige Objekte aufgefasst
- In der Stringtheorie: Teilchen besitzen räumliche Ausdehnung, in Form von unendlich dünnen, schwingenden Saiten



Modelle des Universums nach der Stringtheorie

- Dreidimensionaler Kosmos als Untermenge eines Universums mit mehr als drei Dimensionen
 - Die anderen Dimensionen sind so stark gekrümmt, dass sie nicht wahrnehmbar sind
 - mögliches Szenario: unser Universum kollidiert mit einem anderen und leitet so dichte und heiße Anfangsphase ein
- Gegen die Stringtheorie sprechen fehlende Beweise, z.B. die Existenz zusätzlicher Raumdimensionen

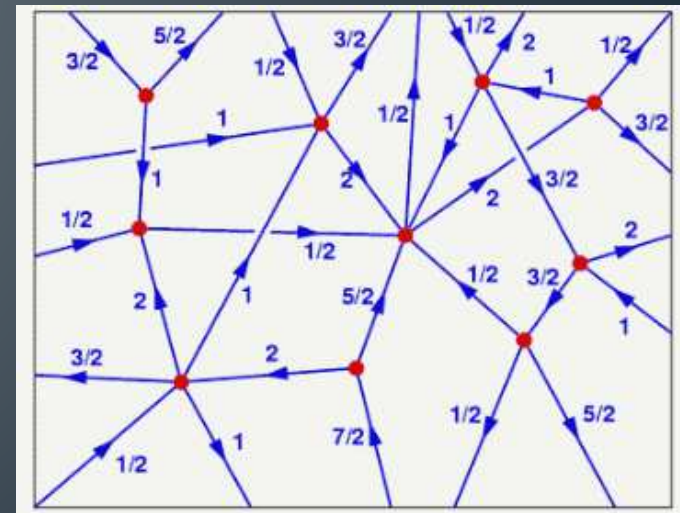


Ähnlich wie ein Blatt Papier als zweidimensionaler Körper im dreidimensionalen Raum könnte unser Kosmos Untermenge eines Universums mit mehr als drei Dimensionen sein

Loop Quantum Gravity

- Schleifen als mikroskopische Grundbausteine des Raumes → Spin-Netzwerke
- Ränder von den sich bildenden Flächen sind verklebt → dreidimensionale Wabenstruktur
- Spin-Netzwerk ist nicht im Raum sondern es **ist** der Raum

Spin-Netzwerk mit Knoten (rot) und Linien (blau). Jeder Linie und jedem Knoten ist ein Spin-Wert zugeordnet (immer ein ganzzahliges Vielfaches von $\frac{1}{2}$)



Modell des Universums nach der Loop Quantum Gravity

- Vorgeschlagen von Martin Bojowald, weiterentwickelt von Abhay Ashtekar
- **Modell:** Kosmos existierte schon immer, kontrahierte aber vor 14 Mio. Jahren so weit, dass Temperatur und Dichte alle je gemessenen Werte überstiegen
- Volumen und Dichte fallen auf 0 → Expansion beginnt → Standardmodell eines ausdünnenden und abkühlenden Universums
- Anstelle des Urknalls „Quantenfedern“ (abstoßende Kraft, die ab der Planckdichte 10^{94} extrem stark wird); davor kontrahierendes Prä-Urknall-Universum



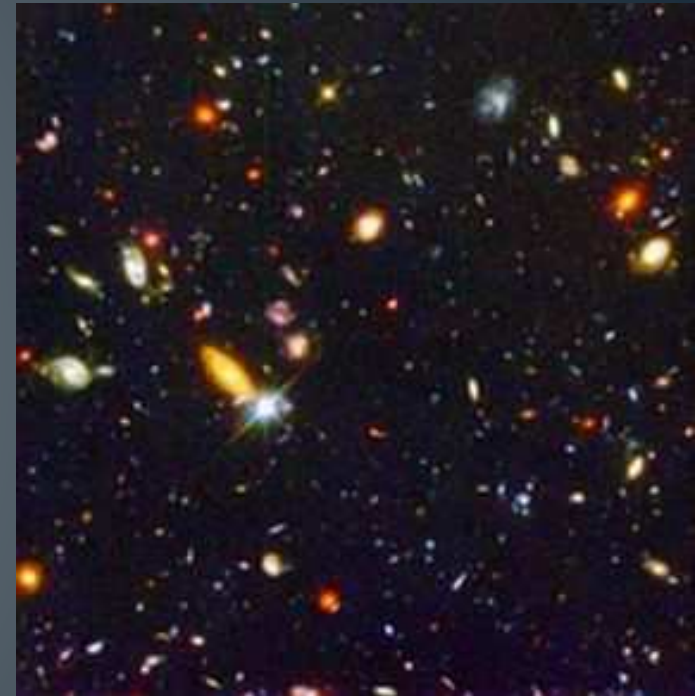
Martin Bojowald



Abhay Ashtekar

Ausblick

- Großer Fortschritt in der Kosmologie in den letzten 100 Jahren
- Aber auch viele große Probleme und Rätsel, unter anderem:
 - Dunkle Energie und Dunkle Materie
 - Vereinheitlichung von Quanteneffekten und Relativitätstheorie
- Geplante Projekte
 - Weltraumteleskop Euclid zur Erforschung der Dunklen Energie; Start 2019
 - Satelliten WMAP (seit 2001) und Planck (vmtl. 2013) zur Beobachtung der Hintergrundstrahlung
 - Und viele weitere
- Vielleicht sind wir mit Hilfe dieser Projekte bald in der Lage auf die Fragen, wie das Universum entstand und wie es sich entwickeln wird, Antworten zu geben



Quellen

- Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit, Stephen Hawking, 2010, Rowohlt Verlag GmbH, Reinbeck
- Spektrum der Wissenschaft Highlights, 2/2012
- http://de.wikibooks.org/wiki/Die_Stringtheorie_-_Eine_popul%C3%A4rwissenschaftliche_Einf%C3%BChrung
- <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/dunkle-materie-und-dunkle-energie/dunkle-materie-und-dunkle-energie/>
- <http://www.spektrum.de/alias/nobelpreise-2011/das-beschleunigte-universum/1124665>
- <http://unendlicheweiten.wordpress.com/2011/10/08/physik-nobelpreis-2011-die-beschleunigte-expansion-des-weltalls/>

Bildquellen

- <http://www.kidsville.de/media/books/images/seit-wann-ist-die-erde-rund1.jpg>
- <http://home.arcor.de/gkuessner/Welt/dedw.html>
- <http://www.waa.at/apo/jumo/k8.html>
- <http://www.kometenreise.de/TanjaBio/Umlaufbahnen.gif>
- <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/history/BigPictures/Hubble.jpeg>
- <http://ericfdiaz.files.wordpress.com/2010/03/lemaitresmall.gif>
- <http://www.maniacworld.com/albert-einstein-1.jpg>
- <http://lehrerfortbildung-bw.de/kompetenzen/gestaltung/farbe/physik/spektrum/>
- <http://www.geography.hunter.cuny.edu/~tbw/wc.notes/10.thunderstorms.tornadoes/doppler.effect.diagram.jpg>
- <http://mitglied.multimania.de/Autoelektrik/igaa.gif>
- http://www.weltderphysik.de/typo3temp/GB/2011_Dopplereffekt2-strahlung_wdp_b01601b2b6_87867ab9ea.png
- <http://media.web.britannica.com/eb-media/83/19183-004-033404B4.jpg>
- <http://www.awhamburg.de/typo3temp/pics/ef817a425b.jpg>
- <http://apprendre-math.info/history/photos/Friedmann.jpeg>
- <http://www.scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2010/09/wie-gross-ist-das-beobachtbare-universum.php>
- http://cas.sdss.org/dr6/de/astro/universe/images/evol_model.jpg
- http://www.avgoe.de/StarChild/DOCS/STARCH00/questions/universe_expansion.gif
- <http://www.spektrum.de/fm/912/thumbnails/Weltmodelle.jpg.1025529.jpg>
- <http://unendlichweiten.files.wordpress.com/2011/10/supernova-ia.png>
- http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:WMAP_2008_universe_content_de.png&filetimestamp=20110825165505
- http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8c/Universe_expansion-de.png/330px-Universe_expansion-de.png
- <http://www.astrofoto.de/pics/bigbang/un032-06.jpg>
- <http://home.arcor.de/sebastian.schmidtke/urknall2.jpg>
- <http://free.pages.at/manhuydo/ffu.jpg>
- http://de.wikibooks.org/wiki/Datei:Apfel_partikel.jpg
- http://www.avantgarde-fotosatz.de/pics/blatt_papier.jpg
- http://www.einstein-online.info/images/spotlights/spin_networks/sn_ind.gif
- http://www.aei.mpg.de/bildobjekte/hl_quantum_lqg/Web_Zoom.jpg
- <http://ctoc.igc.psu.edu/research/images/bojowald.jpg>
- <http://ctoc.igc.psu.edu/research/images/ashtekar.jpg>
- http://www.ajoma.de/assets/images/Das_Universum.jpg