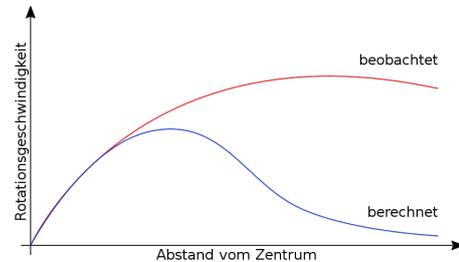


Kosmologie: Dunkle Energie, die Form des Universums und die Hubble-Spannung

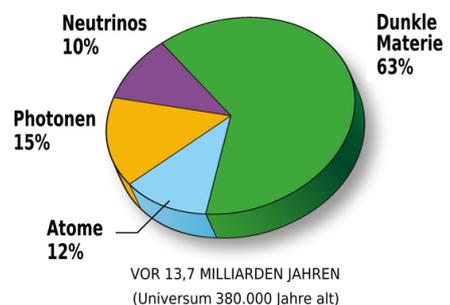
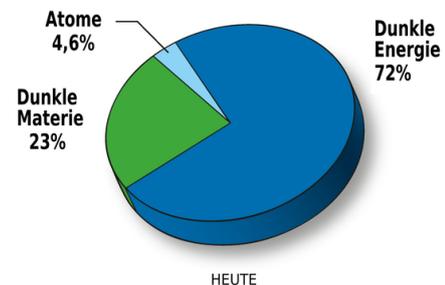
Recap: Dunkle Materie

Dunkle Materie lässt sich nur durch Wechselwirkungen mit _____ «beobachten». Experimentelle Nachweise gibt es viele, aber die Natur der dunklen Materie ist immer noch unbekannt. Die wichtigste Theorie ist die der _____ (Cold Dark Matter), wobei die Materie aus sogenannten _____ (Weakly Interacting Massive Particles) besteht.



Recap: Dunkle Energie

Als Dunkle Energie wird diejenige «Kraft» bezeichnet, die dafür verantwortlich ist, dass sich das Universum _____ ausdehnt. Die dunkle Energie nachzuweisen wird noch deutlich schwieriger sein als bei der dunklen Materie. Die wichtigste Theorie ist die der «Kosmologischen Konstante» Λ (gr. _____). Zusammen mit der _____-Theorie der dunklen Materie erhalten wir das heute akzeptierte kosmologische Standardmodell: Λ CDM.

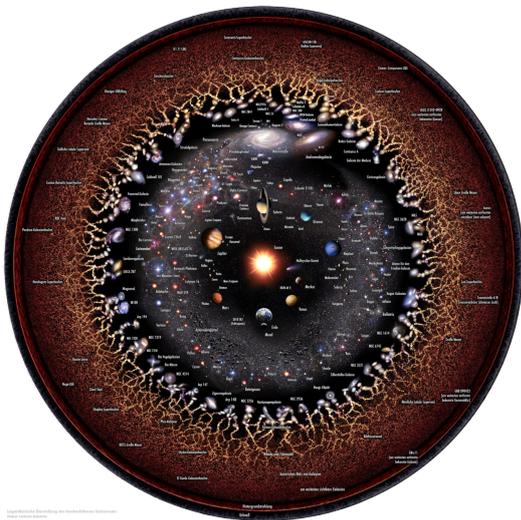
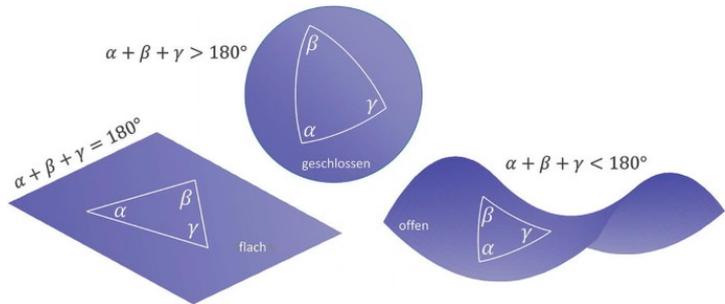


1 Universums-Geometrie

Eine allgemein bekannte Regel besagt: Die Innenwinkelsumme in einem Dreieck ist immer _____°. Das gilt aber nur solange das Dreieck flach ist. Sobald die Seiten des Dreiecks keine Geraden mehr sind, gelten andere Gesetze:

- Flaches Dreieck: $\alpha + \beta + \gamma = \text{_____}^\circ$
- Dreieck auf einem «geschlossenen» Raum: $\alpha + \beta + \gamma \text{ _____}^\circ$
- Dreieck auf einem «offenen» Raum: $\alpha + \beta + \gamma \text{ _____}^\circ$

Wenn wir jetzt im Universum sehr grosse Dreiecke messen, kommen wir mit dieser Methode der Innenwinkelsumme darauf, dass unser Universum _____ ist. Dabei gibt es jedoch eine relativ grosse Ungenauigkeit von 2%, welche tatsächlich wichtig sein könnte: Im Λ CDM-Modell ist die Annahme, dass unser Universum exakt _____ ist, und wir deshalb von einer kosmologischen «Konstante» (Λ) sprechen können. Wenn unser Universum aber nicht ganz _____ ist, dann ist es möglich, dass sich die «Konstante» verändert und dann eben nicht mehr konstant ist.



Eine andere interessante Folge der Krümmung des Universums ist seine Grösse: Wenn unser Universum flach ist, dann muss es zwingendermassen auch _____ gross sein. Wenn es aber tatsächlich gekrümmt sein sollte, dann ist es mathematisch auch möglich, dass es nicht _____ gross, sondern einfach nur _____ gross ist; nämlich mindestens _____ Durchmesser.

Ganz überspitzt dargestellt ist das mit geschlossener oder «positiver» Krümmung links im Bild. Da unser Universum also eine Mindestgrösse hat und aber nur _____ Jahre alt ist, heisst das, dass wir ohne physikalische Revolution nie herausfinden werden, wie gross

unser Universum wirklich ist: Entweder müssen wir deutlich genauer messen können, ganz andere Methoden zur Bestimmung der Raumkrümmung entwickeln oder endlich mal den WARP-Antrieb erfinden.

2 Hubble-Spannung

Der Wert der Ausdehnung des Universums heutzutage wurde vor der dunklen Energie entdeckt und auch benannt. Deshalb heisst dieser Wert auch heute noch Hubble-«Konstante», obwohl er nicht konstant ist, sondern in den letzten Milliarden Jahren dank der dunklen Energie _____ geworden ist.

Um die Hubble-Konstante zu messen, gibt es mehrere Methoden, die unterschiedliche Dinge ausnutzen:

- Cepheiden: Standard-Kerzen-Perioden
- «Spätes Universum»: Distanzletermessungen
- «Frühes Universum»: Mikrowellenhintergrund

Diese verschiedenen Methoden führen aber aus irgend einem Grund zu unterschiedlichen Messwerten: Die Cepheiden-Methode wurde vor allem Anfang des 20. Jahrhunderts verwendet und hat einen Wert von ca. _____ geliefert. Man misst die _____ der Cepheiden, die als Standardkerzen gelten. Daraus kann man direkt die _____ berechnen, welche mit der _____ zusammenhängt. Dadurch erhält man die _____, wovon man die Geschwindigkeit des Cepheiden relativ zu uns berechnen kann. Die Methode wurde aber als zu ungenau empfunden und wird heute nicht mehr so verwendet.

Stattdessen misst man heute viele verschiedene Objekte anhand der Distanzleiter mit denselben Berechnungen und erhält da einen genaueren Wert von _____. Eine andere moderne Methode misst die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, woraus ein Wert von _____ berechnet wird.

Dass diese Werte nicht übereinstimmen, ist weit bekannt und auch mehrfach belegt. Eine Begründung dazu gibt es nicht, auch ein allgemein akzeptierter Erklärungsversuch existiert noch nicht.

Hubble constant
calculated using different survey methods

