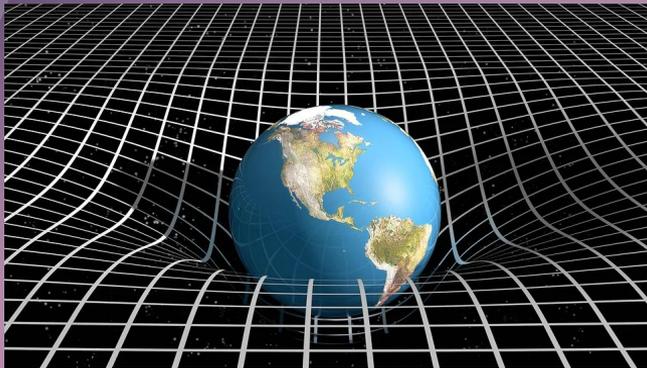




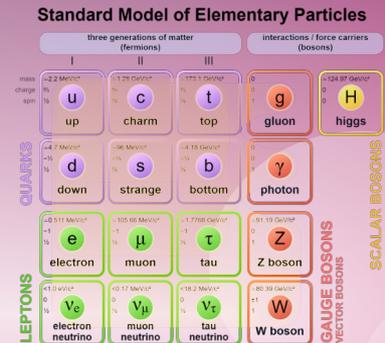
Dunkle Materie

Grundgerüst der Physik

- Allgemeine Relativitätstheorie
 - Beschreibt Raum und Zeit in der Wechselwirkung mit Materie



- Standardmodell der Teilchenphysik
 - Beschreibt die Elementarteilchen und ihre Interaktionen untereinander

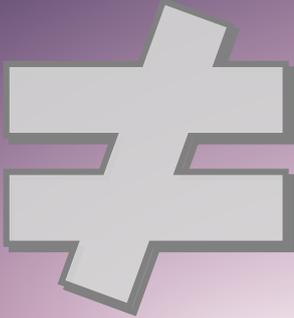


Leider falsch

Allgemeine Relativitätstheorie

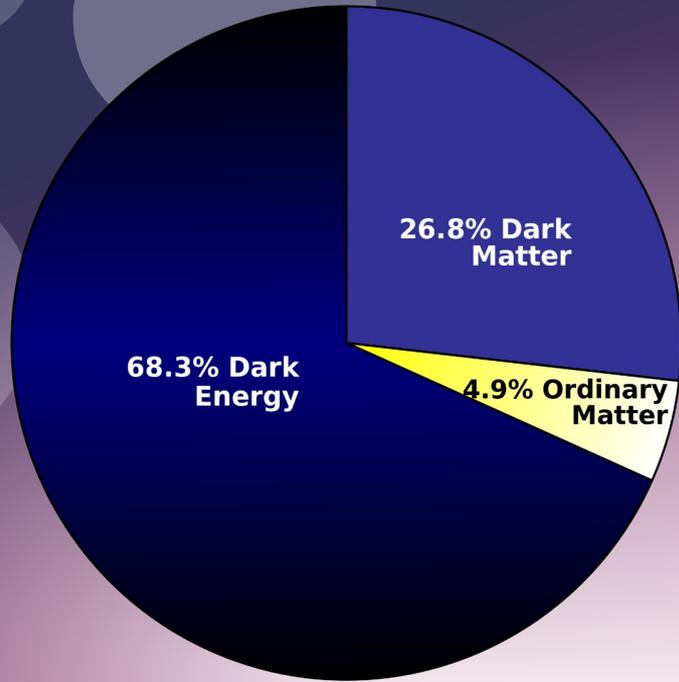


Standardmodell der Teilchenphysik



Beobachtungen im Kosmos

Was nicht passt wird passend gemacht



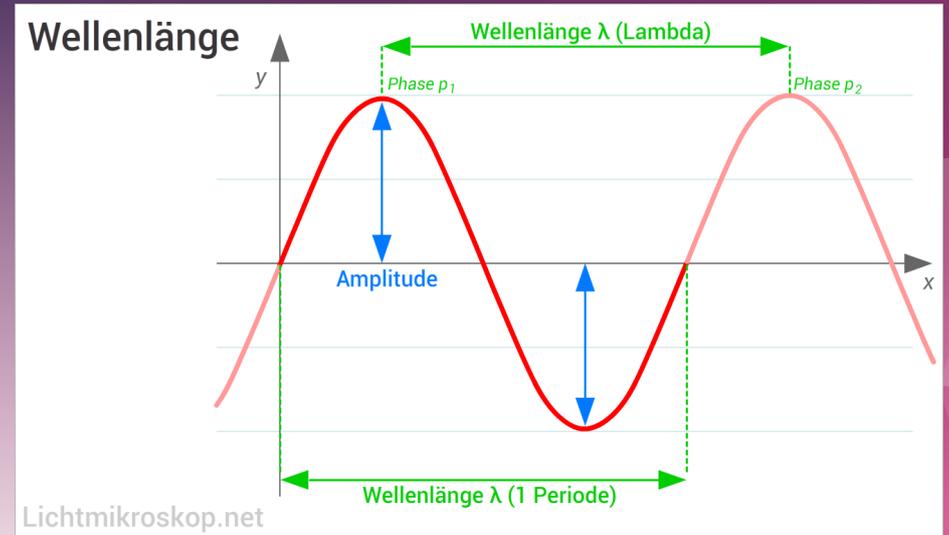
- Normale Materie
 - Größtenteils intergalaktisches Gas
- Dunkle Materie
 - Neue, unbekannte Materie
- Dunkle Energie
 - Treibt Expansion des Universums

Eigenschaften der dunklen Materie

- Was es ist
 - Dichte nimmt mit dem inversen Volumen ab
 - Murmeln in einer Box
 - Box hat doppeltes Volumen → Dichte ist halb so groß
- Was es nicht ist
 - Licht im expandierendem Universum
 - Expansion streckt Wellenlänge
 - Frequenz wird größer → Energie wird kleiner
 - Energiedichte sinkt schneller als das inverse Volumen

Eigenschaften der dunklen Materie

- Nimmt kein Licht auf und gibt kein Licht frei
 - Egal welche Frequenz
 - Eher Transparent
- Interagiert kaum bis gar nicht mit
 - Sich selbst
 - Materie

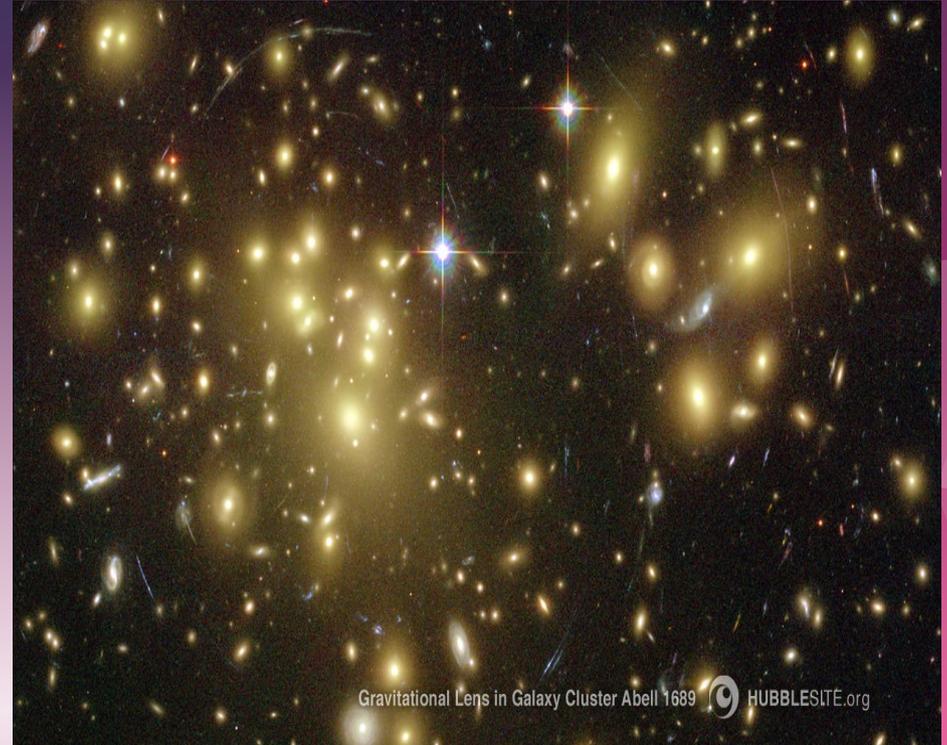


Warum sollte dunkle Materie existieren?

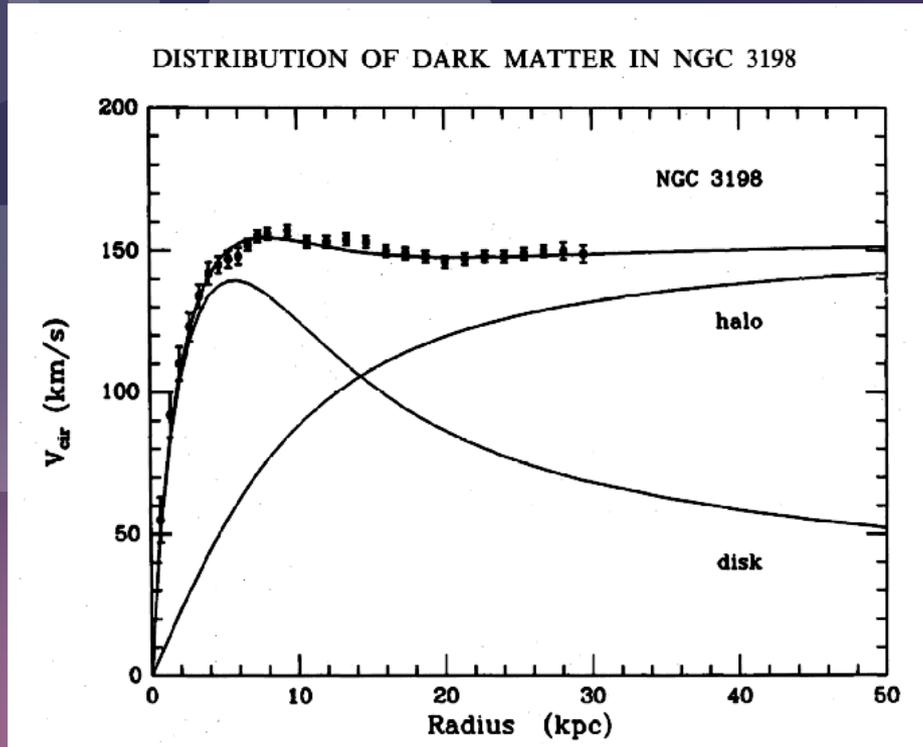
- Viele, verschiedene Forschungsbereiche haben seit über 80 Jahren extrem viele Beweise gefunden
 - Galaxienhaufen
 - Rotationskurve
 - Gravitationslinseneffekt
 - Hintergrundstrahlung
 - Strukturformation auf intergalaktischen Skalen

Galaxienhaufen

- Definition
 - 100 – 1000 Galaxien, die durch ihre eigene Gravitation zusammengehalten werden
- Virialsatz verwendet bei Galaxienhaufen
 - Je höher die Masse eines Galaxienhaufens, desto höher die durchschnittliche Geschwindigkeit der Galaxien
- Beobachtung zeigt
 - Durchschnittliche Geschwindigkeit ist viel zu hoch, wenn man nur observierte Materie mit einberechnet



Rotationskurve

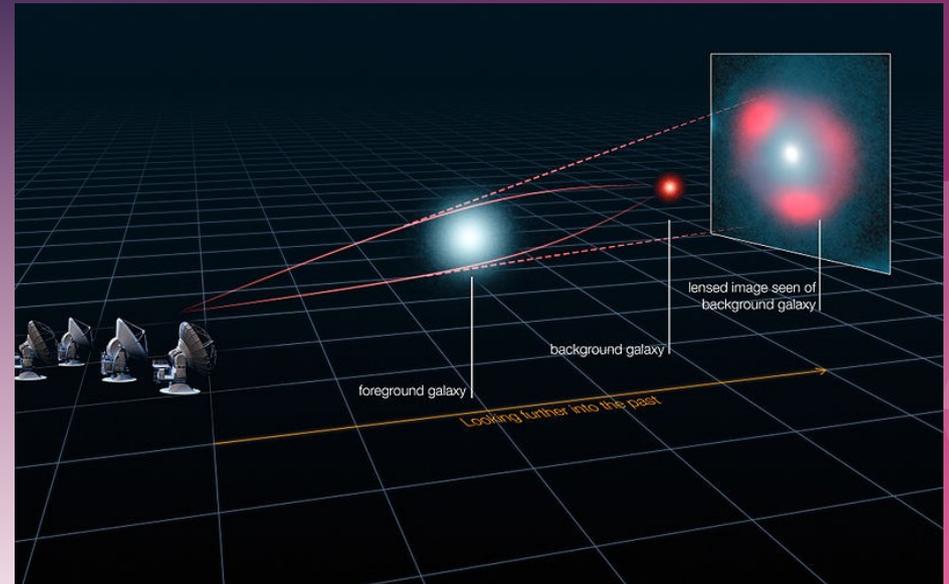
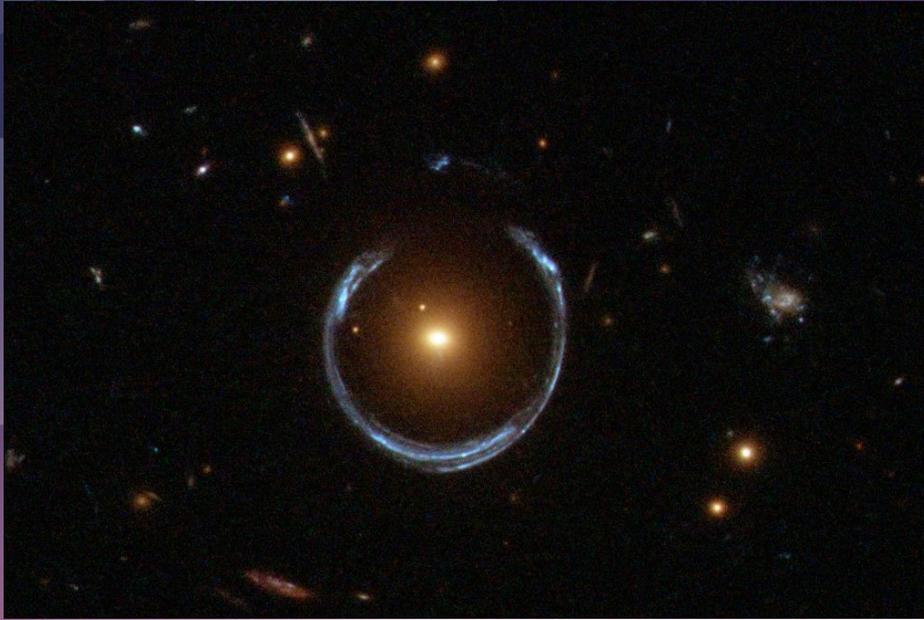


- Datenmessung
 - Rot- und Blauverschiebung von Sternen, beim Rotieren um den Galaxienkern
- Masse von bekannter Materie reicht nicht, um die flache Rotationskurve zu erklären

Gravitationslinseneffekt

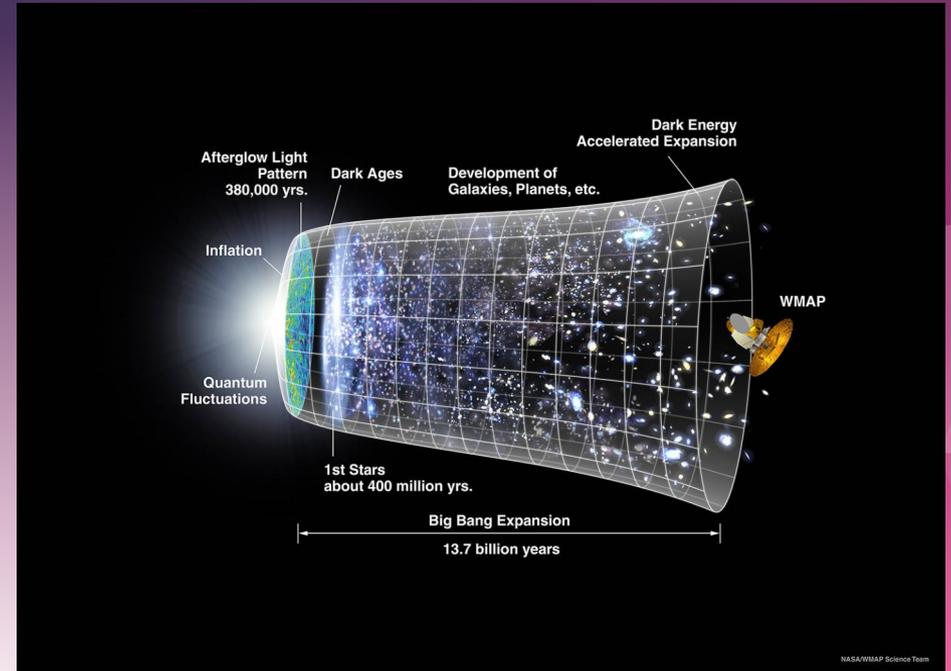
- Laut der allgemeinen Relativität krümmt Masse die Raumzeit und biegt somit Licht um sich
- Von der Stärke des Linseneffektes, lässt sich die Masse der „Linse“ bestimmen
 - Bekannte Materie reicht nicht aus

Gravitationslinseneffekt

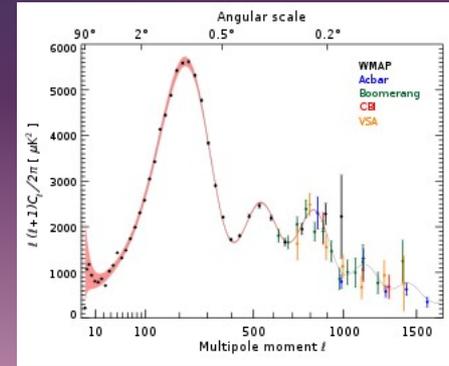
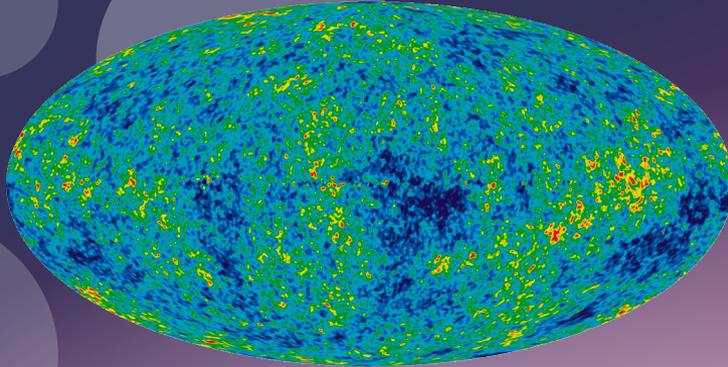


Hintergrundstrahlung

- Mikrowellenstrahlung, die das ganze Universum durchzieht
- Quarks → Neutronen und Protonen
- Elektronen und Atomkern → Atome
- Universum wurde größtenteils elektrisch neutral
- Licht konnte erstmalig frei durchs Universum reisen
- Freigesetzt 380.000 Jahren nach dem Urknall
 - Im sichtbaren Bereich
 - Durch Rotverschiebung länger geworden

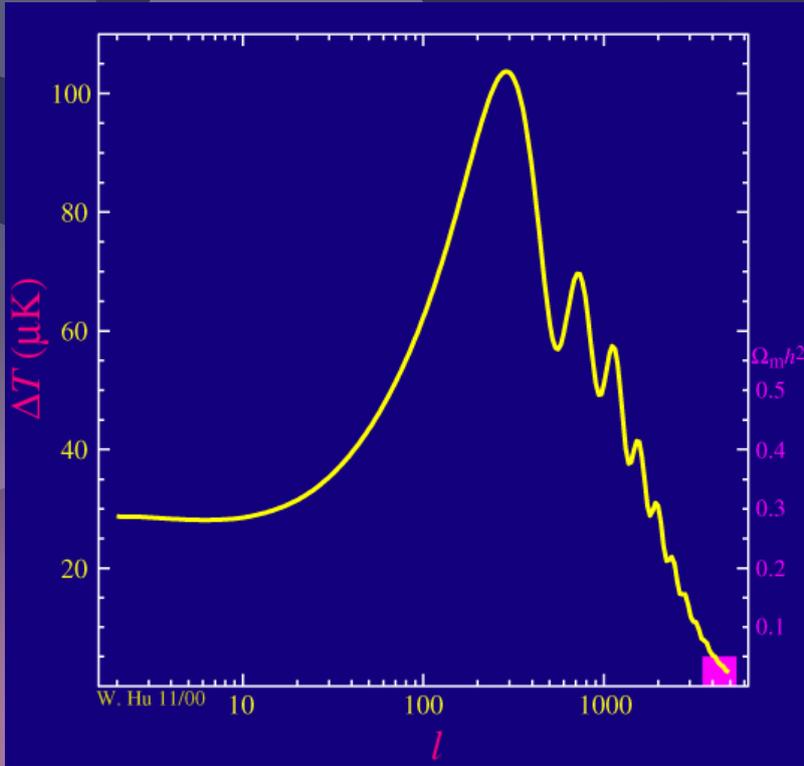


Hintergrundstrahlung



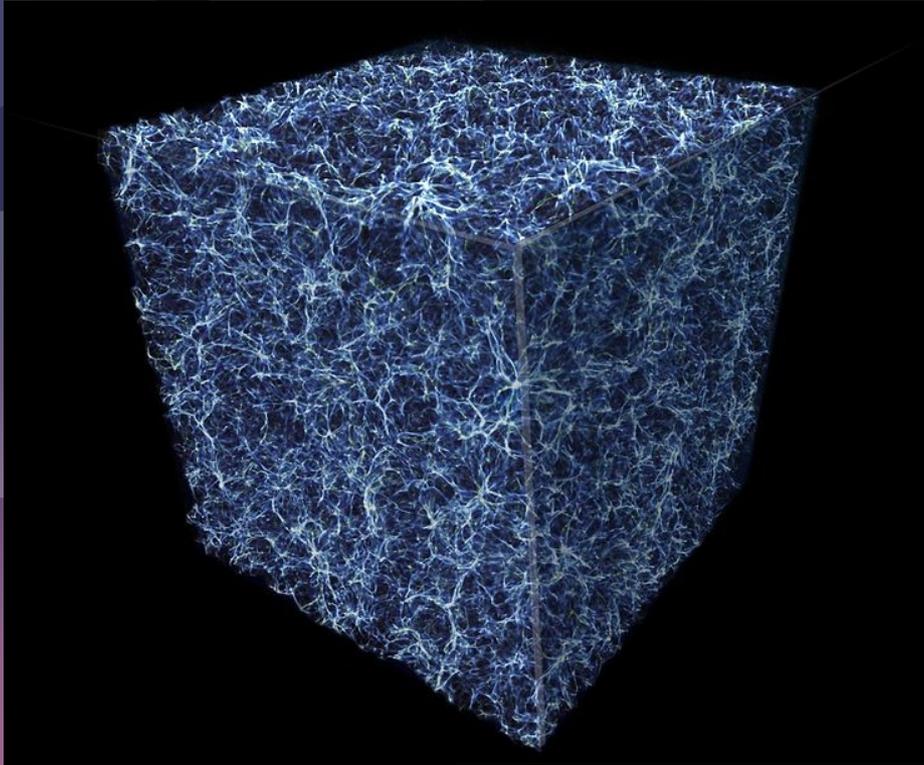
- X-Achse: große Punkte → kleine Punkte
- Y-Achse: kleine Anzahl → große Anzahl
- Wissen über junges Universum + variierende Menge an dunkler Materie → Voraussage über Graphen
- Menge dunkler Materie bestimmt relative Höhe der Extrema

Hintergrundstrahlung



- Graph verändert sich mit Änderung der dunklen Materie
- Nur mit dunkler Materie stimmt der Graph mit den Beobachtungen überein

Strukturformation auf intergalaktischen Skalen



- Fadenartige Verbindungen aus sichtbarer und dunkler Materie zwischen Galaxienhaufen und Superhaufen
- Dunkle Materie ist keinem Strahlungsdruck ausgesetzt
 - Fällt schneller Zusammen → zieht normale Materie hinterher
- Ohne dunkle Materie können die observierten Strukturen nicht schnell genug formen

Dunkle Materie löst...

- Zu schnelle Galaxien in Galaxienhaufen
- Zu schnelle Sterne in Galaxien
- Zu großen Gravitationslinseneffekt von Galaxien und Galaxienhaufen
- Observationen der kosmischen Mikrowellenstrahlung
- Zu schnelle Strukturformung

Wie löst dunkle Materie das Problem?

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = T_{\mu\nu} + X_{\mu\nu}$$

Function of (curvature) = (mass and energy) + X

- Seiten passen nicht zusammen → einfach was hinzufügen?
- Ist das gute Wissenschaft?
 - JA
 - Es ist die beste Erklärung, die wir gefunden haben
 - Vergleichsweise harmloser Eingriff
 - Eine Konstante
 - Wert von nur einem Moment in der Zeit gebrauchen

Könnte dunkle Materie normale Materie sein?

- Kein bekanntes Teilchen passt
 - Interagieren mit Licht
 - Beobachtbar
 - Neutrinos
 - Zu klein und zu schnell
 - Lange Zeit kein neues neues Teilchen erwartbar
 - LIGO könnte das ändern
- Schwarze Löcher, braune Zwerge
 - Nicht direkt sichtbar, aber indirekt über Gravitationslinseneffekt beobachtbar

Ungereimtheiten

- Mit dunkler Materie müsste der Kern von Galaxien eine höhere Dichte haben
- Dunkle Materie sagt mehr Zwerggalaxien hervor, als beobachtet werden
- Satellitengalaxien sind öfter auf einer Achse mit Primärgalaxie, als mit dunkler Materie erwartet wird

Alternativen

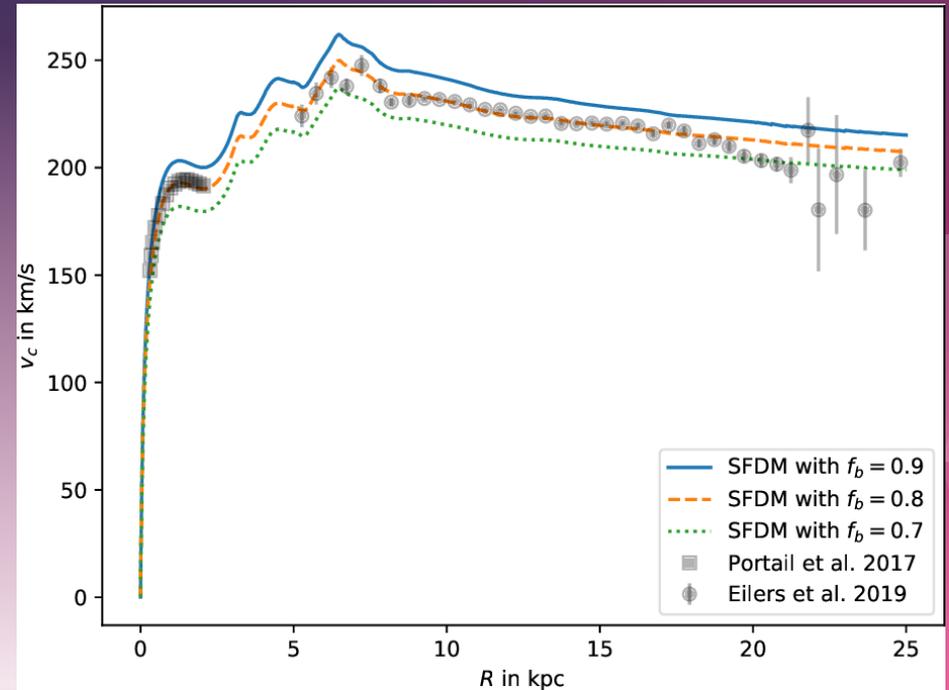
- Modified Gravity
 - Modified Newtonian Dynamics (MOND)
 - Pros
 - Flache Rotationskurve
 - Zwerggalaxien
 - Dichte der Galaxiezentren
 - Satellitengalaxien
 - Verbindungen zur Kosmologischen Konstante (warum auch immer)
 - Cons
 - CMB
 - Junges Universum
 - Galaxienhaufen
 - Newtonian

Alternativen

- Simulierte dunkle Materie
 - Computersimulationen machen dunkle Materie passend
 - Ergänzt viele weitere Parameter
 - Nicht vorhersagend

Alternativen

- Superfluide dunkle Materie
 - Kombiniert modifizierte Gravitation und herkömmliche dunkle Materie
 - Hohe Temperaturen
 - Teilchen Materie
 - Niedrige Temperaturen
 - Superfluid → neue Kraft → sieht aus wie modifizierte Gravitation
 - Sagt Rotationskurve der Milchstraße vorher
 - Macht testbare Voraussagen



Fazit

- Viele Jahre tappten wir im dunklen
- Jetzt gibt es wieder vielversprechende Theorien
- Gut möglich, dass wir kurz vor dem Durchbruch stehen

Quellen

- https://www.wikiwand.com/de/Allgemeine_Relativit%C3%A4tstheorie
- <https://www.wikiwand.com/de/Rotationskurve>
- https://www.wikiwand.com/de/Standardmodell_der_Teilchenphysik
- <https://physicsanduniverse.com/galaxy-rotation-curve-dark-matter/>
- https://www.youtube.com/watch?v=U4sw3-__pGo
- <https://www.wikiwand.com/de/Gravitationslinseneffekt>
- <https://www.wikiwand.com/de/Einsteinring>
- <https://www.wikiwand.com/de/Hintergrundstrahlung>
- <http://background.uchicago.edu/~whu/animbut/clmatter.gif>
- https://www.wikiwand.com/en/Structure_formation
- [https://www.wikiwand.com/de/Filament_\(Kosmos\)](https://www.wikiwand.com/de/Filament_(Kosmos))
- <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Milky-Way%E2%80%99s-rotation-curve-with-superfluid-dark-Hossenfelder-Mistele/6dade6569d855d404052c16e89e18a764b35d846/figure/3>