

Astrophysik

Jonas Spinner
26. Oktober 2021

Bitte nicht diese pdf weiterverbreiten,
sondern den Link <https://www.jspinner.de>.
Dort gibts die aktuelle Version!

Dies ist eine privat erstellte Zusammenfassung und richtet sich an einen Studenten, der das Thema bereits aus einer Einführungsvorlesung kennt. Übersichtlichkeit und Struktur sind mir besonders wichtig, deshalb schreibe ich in Stichpunkten. Ich kommentiere die Themen, die ich wichtig finde und zeige die Rechnungen, die ich lehrreich finde. Insbesondere versuche ich, Aussagen zu verallgemeinern und direkt zu formulieren, was sicherlich manchmal schief geht. Ich freue mich über Rückmeldungen!

Im Folgenden eine kleine Liste von Quellen, auf die ich beim Anfertigen dieser Zusammenfassung zurückgegriffen habe. Die Punkte sind nach abnehmender Relevanz geordnet.

- Particle Data Group Reviews
url <https://pdg.lbl.gov>: Verlässliche Grundlage
- Wikipedia: Grundlagen und Verweise auf weiterführende Literatur
- Bauer, Plehn - Yet another introduction to Dark Matter

Überblick

Inhaltsverzeichnis

1 Kosmologie	4
1.1 Grundlagen	4
1.1.1 Grundbegriffe	4
1.1.2 Forschungsgeschichte	4
1.1.3 Entwicklung des Universums	4
1.2 Thermodynamik-Basics für Kosmologie	5
1.2.1 Thermodynamik im Gleichgewicht	5
1.2.2 Thermodynamik mit Abweichungen vom Gleichgewicht	6
1.3 Beschreibung des expandierenden Universums	6
1.3.1 Vorbereitungen	6
1.3.2 Hubble-Gesetz	7
1.3.3 Parametrisierung der Energieverteilungen	7
1.3.4 Lösungen der Friedmann-Gleichung	8
1.4 Inflation	9
1.5 Strukturbildung	9
1.6 Thermische Entwicklung	9
1.6.1 Thermisches Gleichgewicht	9
1.6.2 Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)	9
1.6.3 Kosmischer Neutrinohintergrund ($\bar{\nu}$ B)	9
1.6.4 Nukleosynthese (BBN)	9
1.7 Dunkle Energie	9
2 Astrophysik	10
2.1 Grundlagen	10
2.1.1 Klassifikation stellarer Objekte	10
2.1.2 Klassifikationen stellarer Objekte nach spektralen Eigenschaften	12
2.1.3 Entwicklungsszenarien von Sternen	12
2.2 Beschreibung von stellaren Objekten	13
2.2.1 Energieverlustrate	13
2.2.2 Lebenszyklus von Sternen	13
2.3 Materie-Antimaterie-Asymmetrie	13
2.3.1 Baryogenese	13
2.3.2 Leptogenese	13
3 Dunkle Materie	14
3.1 Grundlagen	14
3.1.1 Grundbegriffe	14
3.1.2 Forschungsgeschichte Dunkle Materie	14
3.1.3 Evidenz für DM	14
3.1.4 Modellunabhängige Eigenschaften	14
3.2 Klassifikation von DM aus Teilchenphysik-Perspektive	15
3.2.1 Interessante Eigenschaften für Teilchenphysik	15
3.2.2 Teilchenphysik-Klassifikation von DM	16
3.3 Klassifikation von DM aus Kosmologie-Perspektive	17
3.3.1 Interessante Eigenschaften für Kosmologie	17
3.3.2 Cold DM (CDM)	17

3.3.3	Warm DM (WDM)	18
3.3.4	Hot DM (HDM)	18
3.3.5	Self-interacting DM (SIDM)	18
3.3.6	Fuzzy DM (FDM)	19
3.4	Exotische Ansätze zur Beschreibung von DM	19
3.4.1	Makroskopische DM	19
3.4.2	Modified gravity statt DM	19
3.5	Kosmologie-Zugänge zu DM	19
3.5.1	Anisotropien im CMB	19
3.5.2	Strukturbildung	19
3.5.3	Nukleosynthese	19
3.6	Astroteilchenphysik-Zugänge zu DM	19
3.6.1	Bewegung von Galaxien in Galaxienclustern	19
3.6.2	Temperaturverteilung in Galaxien und Galaxienclustern	19
3.6.3	Rotationskurven von Spiralgalaxien	19
3.6.4	Gravitationslinseneffekt	20
3.6.5	Kollision von Galaxienhaufen	20
3.6.6	Lyman- α -Linien	21
3.7	Produktion von DM-relics	21
3.7.1	Thermal freeze-out	21
3.7.2	Thermal freeze-in	21
3.7.3	Misalignment	21
3.7.4	Zerfall schwererer Teilchen	21
3.7.5	Zerfall topologischer Defekte	21
3.7.6	Asymmetrische DM	21
3.8	Experimentelle Suchen	21
3.8.1	Direkte DM-Suchen	21
3.8.2	Indirekte DM-Suchen	21
3.8.3	DM-Suchen am Collider	21

Kapitel 1

Kosmologie

1.1 Grundlagen

1.1.1 Grundbegriffe

- Kosmologie = Allgemeine Relativität \otimes Teilchenphysik \otimes Thermodynamik
- Natürliche Einheiten für Kosmologie: $\hbar = c = k_B = 1$
- Wichtige Parameter in der Kosmologie
 - Äquivalente Parameter zur Beschreibung von Expansion: Zeit t , Temperatur T , Skalenvariable a , Hubble-Parameter H
 - Naturkonstanten
 - * Gravitationskonstante G / Planck-Masse $m_P = \frac{1}{\sqrt{8\pi G}}$
 - * Vakuum-Energie Λ
 - * Krümmungsparameter k
 - Notation für zeitabhängige Parameter X : $X_0 := X(t_0)$ mit Gegenwarts-Zeit t_0

1.1.2 Forschungsgeschichte

1.1.3 Entwicklung des Universums

- Prinzip: Temperatur des Universums durchläuft Energieskalen der typischen Theorien \Rightarrow Bei der passenden Energieskala passiert etwas Interessantes in der passenden Theorie

1. Strahlungsdominierte Phase $0.75 \text{ eV} \lesssim T$

- (a) Urknall
- (b) Planck-Skala $T \sim 10^{19} \text{ GeV}$: Kann Gravitation als klassische Feldtheorie beschreiben
- (c) GUT-Skala $T \sim 10^{16} \text{ GeV}$: Vereinheitlichung von QCD und EW-Theorie
- (d) Inflationsphase $T \sim [10^9 \text{ GeV}, 10^{15} \text{ GeV}]$: Schnelle Ausdehnung/Abkühlung
 - Spekulativ: Baryogenese/Leptogenese
- (e) Elektroschwache Skala $T \sim 100 \text{ GeV}$: Vereinheitlichung von QED und schwacher WW
 - Spontane Symmetriebrechung $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_Q$ bei $T \sim v$ generiert Massen für schwache Eichbosonen W^\pm, Z für $T \lesssim v$
 - Spekulativ: Spontane Symmetriebrechung in Hierarchy-Problem-Modellen (zB SUSY, zusätzliche Higgs-Doublets) bei $T \sim 1 \text{ TeV}$
- (f) QCD-Skala $T \sim 100 \text{ MeV}$: QCD wird nicht-perturbativ
 - Anschaulich: Quarks bilden Hadronen (mit Dichteverhältnis $n_p \approx 7n_n$)
 - Neutrinos entkoppeln vom thermischen Gleichgewicht/kosmischer Neutrinohergrund ($C\nu B$) entsteht bei $T \sim 1 \text{ MeV}$
 - e^\pm entkoppeln vom thermischen Gleichgewicht bei $T \sim 500 \text{ keV}$

- Spekulativ: Produktion von primordial black holes bei $T \sim 1 \text{ MeV}$
 - Spekulativ: WIMP-Produktion durch freeze-out bei $T \sim 1 \text{ MeV}$
- (g) Kernphysik-Skala $T \sim 100 \text{ keV}$: Temperatur fällt unter Kern-Bindungsenergie
- Anschaulich: Nukleonen bilden Kerne ("Primordiale Nukleosynthese" / BBN)
 - Bei $T \sim 1 \text{ MeV}$ entspricht thermische Energie von Photonen der Bindungsenergie von Kernen
 \Rightarrow Für $T \lesssim 1 \text{ MeV}$ sind stabile Kerne möglich, da sie durch thermische Photonen nicht mehr ionisiert werden
- (h) Atomphysik-Skala $T \sim 1 \text{ eV}$: Temperatur fällt unter Atom-Bindungsenergie
- Anschaulich: Elektronen und Kerne bilden Atome
 - Bei $T \sim 1 \text{ eV}$ entspricht thermische Energie von Photonen der Bindungsenergie von Atomen
 \Rightarrow Für $T \lesssim 1 \text{ eV}$ sind stabile Atome möglich, da sie durch thermische Photonen nicht mehr ionisiert werden
 - Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB) entsteht bei $T \sim 0.1 \text{ eV}$: Photonen entkoppeln vom thermischen Gleichgewicht
2. Materiedominierte Phase $0.33 \text{ meV} \lesssim T \lesssim 0.75 \text{ eV}$
- (a) Strukturbildung $T \sim 1 \text{ meV}$
- Anschaulich: Sterne entstehen und bilden später Galaxien und Galaxienhaufen
3. Dunkle-Energie-dominierte Phase $T \lesssim 0.33 \text{ meV}$
- (a) Heute $T \sim 0.25 \text{ meV}$

1.2 Thermodynamik-Basics für Kosmologie

1.2.1 Thermodynamik im Gleichgewicht

- Anzahl- und Energiedichte
 - Anmerkungen zum Gültigkeitsbereich der Relationen
 - * Relationen gelten nur im thermodynamischen Gleichgewicht, müssen also mit Vorsicht verwendet werden
 - * Betrachte nur die Grenzfälle relativistischer und nichtrelativistischer Materie \rightarrow Chemisches Potential μ spielt keine Rolle (?)
 - * Notation \pm bedeutet $+/-$ für Fermionen/Bosonen
 - Besetzungszahlen $n = g \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{E/T} \pm 1} = g 4\pi \int_m^\infty \frac{EdE}{(2\pi)^3} \frac{\sqrt{E^2 - m^2}}{e^{E/T} \pm 1}$
 - * Nicht-relativistischer Grenzfall $T \ll m$: $n = g \sqrt{\frac{mT}{2\pi}}^3 e^{-m/T}$
 - * Relativistischer Grenzfall $T \gg m$: $n = \frac{\xi_3}{\pi^2} g T^3 \times \begin{cases} 1 & \text{Bosonen} \\ \frac{4}{3} & \text{Fermionen} \end{cases}$
 - Energiedichten $\rho = g \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \frac{E}{e^{E/T} \pm 1} = g 4\pi \int_m^\infty \frac{EdE}{(2\pi)^3} \frac{E\sqrt{E^2 - m^2}}{e^{E/T} \pm 1}$
 - * Nicht-relativistischer Grenzfall $T \ll m$: $\rho = mn = mg \sqrt{\frac{mT}{2\pi}}^3 e^{-m/T}$
 - * Relativistischer Grenzfall $T \gg m$: $\rho = \frac{\pi^2}{30} g T^4 \times \begin{cases} 1 & \text{Bosonen} \\ \frac{7}{8} & \text{Fermionen} \end{cases}$
 - (Reelle) Freiheitsgrade g zählen
 - * Freiheitsgrade bezüglich Darstellungen der Lorentzgruppe
 - Bsp: $1/2$ für reellen/komplexen Skalar, 1 für Majorana-Fermion, 2 für Dirac-Fermion, 2 für Eichbosonen
 - * Freiheitsgrade bezüglich Darstellungen der Eichgruppe
 - Bsp: n für $SU(n)$ -fundamental, $n^2 - 1$ für $SU(n)$ -adjungiert

- * Weitere Freiheitsgrade
 - Bsp: Flavor
- Chemisches Potential
- Klassifikation thermodynamischer Zustände über w in $P \equiv w\rho$
 - Größen: Massendichte ρ und Druck P im Energie-Impuls-Tensor $(T^{\mu\nu}) = \text{diag}(\rho, P\mathbb{1}_3)$
 - Materie (nicht-relativistisch): $P \ll \rho$ bzw $w = 0$
 - Strahlung (relativistisch): $P = \frac{1}{3}\rho$ bzw $w = \frac{1}{3}$
 - Dunkle Energie: $P = -\rho$ bzw $w = -1$
 - * Interpretation von $P < 0$ ist offene Frage in der Wissenschaft
- Entropie-Erhaltung

1.2.2 Thermodynamik mit Abweichungen vom Gleichgewicht

- Boltzmann-Gleichung

1.3 Beschreibung des expandierenden Universums

1.3.1 Vorbereitungen

- FRW-Metrik: $ds^2 = dt^2 - a^2 \left(\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$
 - Skalenfaktor $a(t) \in \mathbb{R}^+$
 - * Konvention: $a_0 \equiv 1$
 - Formal: Lege Freiheitsgrad durch Skalierungs-Symmetrie $a \rightarrow \lambda a, r \rightarrow r/\lambda, k \rightarrow \lambda^2 k$ fest
 - Krümmungsparameter $k \in \{-1, 0, 1\}$
 - * Anschaulich: $k = \begin{cases} -1 & \text{negative Krümmung (Hyperbel)} \\ 0 & \text{flache Raumzeit (Ebene)} \\ 1 & \text{positive Krümmung (Ellipse)} \end{cases}$
 - * Für $k = 0$ erhält man die Minkowski-Metrik $(g_{\mu\nu}) = \text{diag}(1, -\mathbb{1}_3)$
 - Matrixnotation: $(g_{\mu\nu}) = \text{diag}\left(1, -\frac{a^2}{1-kr^2}, -a^2, -a^2\right)$
- Friedmann-Gleichungen
 - Anschaulich: Friedmann-Gleichungen sind gekoppeltes DGL-System für $a(t)$ und $\rho(t)$, mit denen für gegebene Anfangswerte die kosmische Entwicklung der beiden Parameter berechnet werden kann
 - Grundlage: Einstein-Gleichung $G^{\mu\nu} = 8\pi T^{\mu\nu}$
 - * Energie-Impuls-Tensor $(T^{\mu\nu}) = \text{diag}(\rho_t, p_t\mathbb{1}_3)$
 - * $G^{\mu\nu}$ folgt direkt aus der FRW-Metrik
 - * Notiz: Kosmologische-Konstante Term wurde in Energie-Impuls-Tensor $T^{\mu\nu}$ absorbiert
 - Kontinuitätsgleichung $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$ bzw $\dot{\rho} + 3H(\rho + P) = 0$
 - * Interpretation: Finde Zusammenhang $\rho(a)$
 - 1. Friedmann-Gleichung $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{\rho_t}{3m_P^2}$
 - * Interpretation: Expansions-Parameter H^2 wird bestimmt durch Energiedichten-Parameter ρ_t
 - Formal: Umstellen liefert $\frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_t + \Omega_k$ mit den in 1.3.3 definierten Energiedichten Ω_i und dem "Krümmungsbeitrag zur Energiedichte" $\Omega_k := -\frac{k}{(aH_0)^2}$
 - * Herleitung: $(\mu, \nu) = (0, 0)$ -Komponente der Einstein-Gleichung für die FRW-Metrik
 - 2. Friedmann-Gleichung $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\rho_t + 3P_t}{6m_P^2}$

- * Interpretation: Nützliche Gleichung, um mit $\rho(a)$ aus der Kontinuitätsgleichung von $T^{\mu\nu}$ eine Lösung für $a(t)$ zu bestimmen
- * Herleitung: Kontinuitätsgleichung des Energie-Impuls-Tensors $T^{\mu\nu}$ mit 1. Friedmann-Gleichung kombinieren
- * Notiz: Bezeichne 2. Friedmann-Gleichung oft als “die Friedmann-Gleichung”

1.3.2 Hubble-Gesetz

- Hubble-Gesetz: $\dot{r} = Hr$
 - Anschaulich: Zu einem gegebenen Zeitpunkt ist $H = \frac{\dot{r}}{r}$ für alle Punkte im Universum gleich
 - * Größen: r/\dot{r} ist relativer Abstand/relative Geschwindigkeit zwischen zwei beliebigen Raumzeit-Punkten im Universum
 - Interpretation: Umso größer der Abstand r zwischen zwei Punkten, umso größer die relative Geschwindigkeit \dot{r}
 - $\dot{r} \propto r$ ist experimentell motiviert (?)
 - Achtung: Proportionalitäts“konstante” H ist zeitabhängig bzw $H = H(t)$
 - Heutiger Wert der Hubble-Konstante $H_0 := H(t_0) \approx 70 \frac{\text{km}}{\text{sMpc}} \approx 1.5 \times 10^{-33} \text{ eV}$
- Dimensionslose Redefinition der Hubble-Konstante $h := \frac{H_0}{100 \frac{\text{km}}{\text{sMpc}}} \approx 0.7$

1.3.3 Parametrisierung der Energieverteilungen

- Energiedichten ρ_i
 - Verwende Energiedichten statt absoluten Energien zur Beschreibung der Zusammensetzung von Materie im Universum
 - * Arbeiten mit absoluten Energien ist nicht sinnvoll, da das Universum unendlich ist
 - Gesamt-Dichte $\rho_t = \rho_r + \rho_m + \rho_\Lambda$
 - * Annahme: Materie ist entweder relativistisch oder nicht-relativistisch (?)
 - Strahlungs-Dichte ρ_r – Relativistische Materie
 - * Bsp: Photonen, Neutrinos
 - Materie-Dichte $\rho_m = \rho_b + \rho_\chi$ – Nichtrelativistische Materie
 - * Baryon-Dichte ρ_b – Baryonische Materie
 - Bsp: Stellare Objekte (Staub, Sterne, Planeten, ...)
 - Achtung Slang: Baryonische Materie meint gewöhnliche Materie (im Gegensatz zu Dunkler Materie) und enthält damit neben Baryonen auch Leptonen
 - * Dunkle-Materie-Dichte ρ_χ – Nicht-baryonische Materie = Dunkle Materie
 - Dunkle-Energie-Dichte $\rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G} = m_P^2 \Lambda$
 - * ρ_Λ ist quasi eine Redefinition der Vakuum-Energie Λ (fundamentaler Parameter)
 - * $\Lambda \propto \rho_\Lambda$ ist (im Gegensatz zu ρ_r, ρ_m) zeitlich konstant
- Dimensionslose Energiedichten $\Omega_i := \frac{\rho_i}{\rho_c}$
 - Motivation: Dimensionsloser Parameter enthält die relevanten Informationen
 - * Absolute Größenordnung von ρ_i nicht interessant, es geht nur um die Größe im Vergleich zu ρ_c
 - Kritische Energiedichte $\rho_c := 3m_P H^2$ definiert durch Friedmann-Gleichung
 - * Anschaulich: Aus Friedmann-Gleichung $1 + \frac{k}{H^2 a^2} = \Omega_t$ folgt
$$\begin{cases} \Omega_t > 1 & \Rightarrow k > 0 \\ \Omega_t = 1 & \Rightarrow k = 0 \\ \Omega_t < 0 & \Rightarrow k < 0 \end{cases}$$
- Redefinition g_{eff} von ρ_r : $\rho_r = \frac{\pi^2}{30} g_{\text{eff}} T^4$

- Motivation: g_{eff} hat einfachere Interpretation als ρ_r
- $g_{\text{eff}} = \sum_{\text{bosons } b} g_b \frac{T_b^4}{T^4} + \frac{7}{8} \sum_{\text{fermions } f} g_f \frac{T_f^4}{T^4}$
 - * Anschaulich: Mit diesem Ausdruck für g_{eff} gilt $\rho_r = \frac{\pi^2}{30} g_{\text{eff}} T^4$ für Beiträge durch unterschiedliche Teilchen (Bosonen oder Fermionen) mit beliebigen Temperaturen
 - * Fermion-Beiträge haben Faktor $\frac{7}{8}$ relativ zu Boson-Beiträgen (siehe 1.3.1)
 - * Berücksichtige Abweichungen vom TD-GG (bzw unterschiedliche Temperaturen) durch Faktoren $\frac{T_i^4}{T^4}$

1.3.4 Lösungen der Friedmann-Gleichung

- Lösung $a(t)$ der Friedmann-Gleichung für die Grenzfälle $\rho_t = \rho_i, i \in \{r, m, \Lambda\}$: $a \propto \begin{cases} t^{2/(3+3w_i)} & w_i \neq -1 \\ e^{\sqrt{\Lambda/3}t} & w_i = -1 \end{cases}$
- Interpretation: Falls ρ_t durch eine der drei Energieformen r, m, Λ dominiert wird, kann man eine einfache Lösung für $a(t)$ angeben
- 1. Kontinuitätsgleichung $\dot{\rho}_i + 3H(1+w_i)\rho_i = 0$ lösen: $\rho_i = \rho_{i,0} a^{-3(1+w_i)}$
 - Verwende Trennung der Variablen: $\frac{d\rho_i}{dt} \frac{1}{\rho_i} = -3 \frac{da}{dt} \frac{1}{a} (1+w_i) \Rightarrow \int \frac{d\rho_i}{\rho_i} = -3(1+w_i) \int \frac{da}{a} \Rightarrow \log \rho_i = -3(1+w_i) \log a + C \Rightarrow \rho_i = e^C a^{-3(1+w_i)} \propto a^{-3(1+w_i)}$
 - $\rho_i = \rho_{i,0} a^{-3(1+w_i)}$ folgt mit $a_0 \equiv 1$
- 2. Friedmann-Gleichung mit Relation $\rho_i(a)$ für $w_i \neq -1$ lösen: $a \propto t^{\frac{2}{3(1+w_i)}}$
 - Lösung der Kontinuitätsgleichung in 2. Friedmann-Gleichung einsetzen: $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1+3w_i}{6m_P^2} \rho_i \propto a^{-3(1+w_i)} \Rightarrow \ddot{a} \propto a^{-2-3w_i}$
 - Potenzansatz $a \propto t^\beta \Rightarrow \ddot{a} \propto t^{\beta-2} \stackrel{!}{\propto} t^{-\beta(2+3w_i)} \Rightarrow \beta = \frac{2}{3(1+w_i)}$
 - Vorgehen funktioniert nicht für $w_i = -1$, da $\frac{\ddot{a}}{a} \propto \rho_i = \text{const} \Rightarrow$ Potenzreihenansatz funktioniert nicht
- 3. Friedmann-Gleichung für $w_i = -1$ bzw $i = \Lambda$ lösen: $a \propto e^{\sqrt{\Lambda/3}t}$
 - Verwende $\rho_\Lambda = m_P^2 \Lambda \Rightarrow \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1+3w_\Lambda}{6m_P^2} \rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{3}$
 - Exponentialansatz $a \propto e^{\lambda t} \Rightarrow \ddot{a} = \lambda^2 a \stackrel{!}{=} \frac{\Lambda}{3} a \Rightarrow \lambda = \sqrt{\Lambda/3}$
- Lösung $a(t)$ der Friedmann-Gleichung in der Realität $\rho_t = \rho_r + \rho_m + \rho_\Lambda$
 - Ehrliche Lösung
 - 1. Bestimme $\rho_t(a) = \rho_{r,0} a^{-4} + \rho_{m,0} a^{-3} + m_P^2 \Lambda$
 - * Beziehungen $\rho_i = \rho_{i,0} a^{-3(1+w_i)}$ folgen aus der Kontinuitätsgleichung
 - * Parameter $\rho_{i,0}$ können experimentell bestimmt werden (...)
 - 2. Löse $0 = \ddot{a} + \frac{\rho_t + 3P_t}{6m_P^2} a = \ddot{a} + \frac{\rho_{r,0}}{3m_P^2} a^{-3} + \frac{\rho_{m,0}}{6m_P^2} a^{-2} - \frac{\Lambda}{3} a$
 - * Erhalte diese DGL durch Einsetzen von $\rho_t(a)$ in $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\rho_t + 3p_t}{6m - P^2}$
 - * Analytische Lösung?
 - Näherungsweise Lösungen
 - 1. Beobachtung: $\rho_t = \rho_{r,0} a^{-4} + \rho_{m,0} a^{-3} + m_P^2 \Lambda$ wird meist durch eine Energieform dominiert
 - * $a \in (0, 3 \times 10^{-4}]$: Strahlung $i = r$ dominiert
 - * $a \in [3 \times 10^{-4}, 1]$: Materie $i = m$ dominiert
 - * $a \in [1, \infty)$: Dunkle Energie $i = \Lambda$ dominiert
 - * Intervalle abgelesen aus $\rho_t = \rho_{r,0} a^{-4} + \rho_{m,0} a^{-3} + \rho_\Lambda$ mit experimentell bestimmten Werten für ρ_i
 - 2. Verwende die Lösungen für die Grenzfälle $\rho_t = \rho_i, i \in \{r, m, \Lambda\}$ für die entsprechenden Intervalle
- Parameter zur Beschreibung der Entwicklung des Universums: t, T, a, H

- Anwendungsbereiche der Parameter
 - * Zeit t : Fundamentalparameter der Raumzeit, intuitive Größe
 - * SkalenvARIABLE a : Parameter in der Metrik (Zusammenhang mit GR)
 - * Hubble-Parameter H : Nützlicher Parameter zur Beschreibung von Expansion
 - * Temperatur T : Nützlicher Parameter zum Verständnis von Teilchenphysik-Effekten
 - T hat wegen $k_B = 1$ Dimension Energie \Rightarrow Zusammenhänge mit Energieskalen aus Teilchenphysik einfach erkennbar
- Übergänge zwischen den Parametern
 - * Übergang zwischen a und t durch Lösungen der 2. Friedmann-Gleichung
 - Im Vergleich zu den anderen Übergängen ist dieser Zusammenhang am Aufwändigsten
 - * Übergang zwischen a und H durch Definition $H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$
 - Achtung: Dieses Argument funktioniert nur für $H(a)$, nicht für $a(H)$ (?)
 - * Übergang zwischen a und T durch Thermodynamik-Beziehung $a \propto \frac{1}{T}$ (?)

1.4 Inflation

1.5 Strukturbildung

1.6 Thermische Entwicklung

1.6.1 Thermisches Gleichgewicht

- Teilchenspezies i befindet sich im lokalen thermischen Gleichgewicht (TD-GG) mit seiner Umgebung $\iff \Gamma_i \gg H$ mit Hubble-Parameter H und Wechselwirkungsrate Γ_i mit den anderen Teilchen
 - $\Gamma_i = n_{\neq i} \sigma v$
 - Achtung: Universum kann sich nie im globalen TD-GG befinden
 - * Formales Argument: FRW-Raumzeit hat keinen zeitartigen Killing-Vektor (?)
 - * In der Praxis kein Unterschied zwischen lokalem und globalem TD-GG, da das Universum homogen auf großen Skalen ist

1.6.2 Kosmischer Mikrowellenhintergrund (CMB)

1.6.3 Kosmischer Neutrinohintergrund (C ν B)

1.6.4 Nukleosynthese (BBN)

1.7 Dunkle Energie

Kapitel 2

Astrophysik

2.1 Grundlagen

2.1.1 Klassifikation stellarer Objekte

- Einzelobjekte
 - Kleinkörper
 - * Definierende Eigenschaften
 - Objekt hat kleinere Masse als ein planetarer Himmelskörper \Rightarrow Nicht im hydrostatischen Gleichgewicht
 - * Bsp: Meteoroid, Asteroid, Komet
 - Planetarer Himmelskörper
 - * Definierende Eigenschaften
 - Objekt hat ausreichend große Masse, dass es sich im hydrostatischen Gleichgewicht befindet (kugelförmig)
 - Objekt dominiert auf seiner Umlaufbahn (alle anderen Objekte durch Gravitation eingezo-gen) (Kriterium nicht erfüllt \Rightarrow "Zwergplanet")
 - * Planet: Planetarer Himmelskörper im Sonnensystem
 - * Exoplanet: Planetarer Himmelskörper in einem anderen Planetensystem
 - * Planemo: Planetarer Himmelskörper, der nicht gravitativ an einen massereicheres Objekt ge-bunden ist
 - Brauner Zwerg (BD)
 - * Definierende Eigenschaft: Masse groß genug für ${}^2\text{H}$ -Fusion, aber nicht für H-Fusion
 - Hauptreihen-Stern (MS) / Zwerg
 - * Definierende Eigenschaft: H-Fusion möglich
 - * Namensgebung: Im Hertzsprung-Russell-Diagramm liegen Hauptreihen-Sterne entlang einer dicht bevölkerten Reihe
 - Reihe ist dicht bevölkert, da sich typische Sterne sehr lange in diesem Stadium befinden
 - * Bezeichnungen für Hauptreihensterne(von rechts unten nach links oben im Hertzsprung-Russell-Diagramm): Roter Zwerg, Gelber Zwerg(zB Sonne), Unterzwerg, ...
 - Riesenstern
 - * Definierende Eigenschaft: Deutlich größere Ausdehnung und größere Leuchtkraft als Hauptrei-hensterne
 - * Klassifiziere Riesensterne über ihre Leuchtkraft
 - Kompakter Stern
 - * Definierende Eigenschaft: Ausgebrannter Überrest eines ehemaligen Sterns (keine Kernfusion, hohe Dichte)
 - * Weißer Zwerg: Relativ leichter Kern eines ehemaligen Sterns($\frac{m}{m_S} < 1.44$) mit Radius $r \sim 10^7 \text{ km}$, der die Restenergie des Sterns abstrahlt

- * Neutronenstern: Mittelschwerer Kern eines ehemaligen Sterns ($1.44 < \frac{m}{m_S} < 2.5$) mit Radius $r \sim 10\text{km}$, enthält Neutronen-Plasma
 - Neutronensterne rotieren ($f \sim 100\text{ Hz}$) und haben ein starkes Magnetfeld ($B \sim 10^8\text{T}$)
 - Rotationsachse und Magnetfeldachse sind voneinander verschieden \Rightarrow Neutronenstern emittiert periodische EM-Strahlung (Prozess wird zunehmend schwächer durch Energieverlust)
 - Pulsar: Neutronenstern, bei dem Magnetfeld-Achse und Rotationsachse deutlich voneinander abweichen \Rightarrow Emittiert periodische EM-Strahlung
 - Magnetar: Neutronenstern mit sehr hoher anfänglicher Rotationsfrequenz \Rightarrow Rotationsenergie wird durch Konvektion schnell in Magnetfeld-Energie umgewandelt \Rightarrow Rotationsfrequenz verringert sich schnell
- * Quarkstern (hypothetisch): Wie Neutronenstern, aber mit höherer Temperatur \Rightarrow Quark-Gluon-Plasma statt Neutron-Plasma
- * Schwarzes Loch: Schwerer Kern eines ehemaligen Sterns ($2.5 < \frac{m}{m_S}$) mit Radius $r \sim 10\text{km}$ und so starker Gravitationskraft, dass Licht nicht entkommen kann
 - Supermassereiches schwarzes Loch: $\frac{m}{m_S} \sim \frac{r}{\text{km}} \sim [10^5, 10^{10}]$
 - Mittelschweres schwarzes Loch: $\frac{m}{m_S} \sim \frac{r}{\text{km}} \sim 10^3$
 - Stellares schwarzes Loch: $\frac{m}{m_S} \sim \frac{r}{\text{km}} \sim 10$
 - Primordiales schwarzes Loch: Im frühen Universum thermisch produziertes schwarzes Loch $\frac{m}{m_S} \sim \frac{r}{\text{km}} \sim 10^{-18}$

• Veränderlicher Stern / Ereignis

- Definierende Eigenschaft: Sterne mit Helligkeitsschwankungen auf kleinen Zeitskalen ($t \sim [1\text{h}, 10^2\text{y}]$)
- Bedeckungsveränderliche: In Systemen mehrerer Sterne ändert sich die auf der Erde wahrgenommene Helligkeit durch Überdeckungen der Sterne periodisch
- Rotationsveränderliche: Einzelner Stern, der seine Helligkeit im Laufe der Rotation ändert
 - * Stern hat ungleichmäßige Helligkeitsverteilung auf der Oberfläche oder ist als Komponente eines Doppelsternsystems ellipsoidisch verformt
- Pulsationsveränderliche: Sterne mit periodischer Änderung des Radius und damit der Helligkeit
- Eruptive Veränderliche: Sterne mit unperiodischen Helligkeitsänderungen durch Abgabe von Materie
- Kataklysmische Veränderliche: Sterne mit unperiodischen Helligkeitsänderungen durch thermonukleare Reaktionen an der Oberfläche
 - * Nova: Helligkeitsausbruch in einem Doppelsternsystem mit einem weißen Zwerg, da durch Materie vom anderen Stern H-Fusion beim weißen Zwerg kurzzeitig einsetzt
 - * Zwergnova: Wie Nova, die H-Fusions-Ausbrüche entstehen aber nicht beim weißen Zwerg, sondern auf der Scheibe um den weißen Zwerg, die Materie zum weißen Zwerg transportiert
 - * Rote Nova: Verschmelzung zweier Sterne in einem Doppelsternsystem
 - * Supernova: Stern, der am Ende seiner Lebenszeit explodiert und nur einen ausgebrannten Kern übriglässt, der je nach Masse zu einem weißen Zwerg, Neutronenstern oder schwarzen Loch wird
 - * Mini-Supernova/Kilo-Nova: Verschmelzung zweier Neutronensterne (zu Neutronenstern) oder eines Neutronensterns mit einem schwarzen Loch (zu schwarzem Loch)
 - * Quarknova (hypothetisch): Neutronenstern kann Gravitationsdruck nicht standhalten und kollabiert zu einem Quarkstern
 - * Makro-Nova (hypothetisch): Verschmelzung zweier Neutronensterne zu einem Magnetar

• Systeme aus Einzelobjekten

- Planetensystem: Gesamtheit von nicht selbst leuchtenden Himmelskörpern, die sich durch Gravitation um ein zentrales Objekt bewegen
- Doppelsternsystem (Mehrfachsternsystem): Gravitativ gebundenes System von 2 (3 oder mehr) Sternen
 - * Bestimmung der Masse von Sternen in Doppelsternsystemen aus deren Umlaufzeit ist wichtige Eichmethode in Astrophysik

- * Häufiges Phänomen: 70% der Sterne befinden sich in Doppelsternsystemen
- Sternhaufen: Hochkonzentrierte Sammlung von Sternen in einer Galaxie
 - * Sterne in einem Sternhaufen sind typischerweise gemeinsam entstanden
- Galaxie: Gravitativ gebundene Ansammlung von Sternen, Planetensystemen, Gasnebeln, Staubwolken und sonstigen astronomischen Objekten
 - * Halo einer Galaxie: Annähernd kugelförmiger Bereich, in dessen Zentrum die Galaxie liegt
 - * Klassifikation nach Form
 - Elliptische Galaxie: Keine besondere Unterstruktur
 - Spiralgalaxie: Spiralförmige Anordnung (sphärisch oder mit Balken im Zentrum)
 - Linsenförmige Galaxie: Im Kern elliptische Galaxie, außen Spiralgalaxie
 - Irreguläre Galaxie: Andere Form
 - * Klassifikation nach Leuchtkraft
 - Ultradiffuse Galaxie: Sehr geringe Leuchtkraft
 - Zwerggalaxie: Geringe Leuchtkraft (häufigster Galaxien-Typ) (typisch: irreguläre Galaxie)
 - Riesengalaxie: Ähnliche Leuchtkraft wie Milchstraße (typisch: Spiralgalaxie)
 - Aktive Galaxie: Hohe Leuchtkraft wegen aktivem Galaxienkern (AGN) (Hinweis auf schwarzes Loch)
 - * Klassifikation von aktiven Galaxienkernen
 - Blazar: Aktiver Galaxienkern, der relativistische Materie emittiert
 - Quasar (QSO): Extrem heller aktiver Galaxienkern, supermassives schwarzes Loch
- Galaxienhaufen/Cluster: Gravitativ gebundene Ansammlung von $\sim 10^3$ Galaxien
 - * Galaxienhaufen sind größte gravitativ gebundene Objekte im Universum
- Superhaufen: Ansammlung mehrerer Galaxienhaufen, die sich ähnlich bewegen und eine überdurchschnittliche Dichte aufweisen, die aber nicht gravitativ gebunden sind
 - * Superhaufen sind die größten erkennbaren Strukturen im Universum
- Wabenstruktur des Universums
 - Filamente: Fadenförmige Strukturen aus sichtbarer und dunkler Materie
 - Voids: Leere Bereiche (Inhalt der Waben), die von Filamenten eingerahmt werden

2.1.2 Klassifikationen stellarer Objekte nach spektralen Eigenschaften

- Klassifikation nach Spektralklasse
- Klassifikation nach absoluter Helligkeit / Leuchtkraft
 - Römische Buchstaben: Hyperriese (O), Überriese (I), heller Riese (II), normaler Riese (III), Unterriese (IV), Hauptreihenstern/Zwerg (V), Unterzwerg (VI), weißer Zwerg (VII)
- Graphische Darstellung: Hertzsprung-Russell-Diagramm

2.1.3 Entwicklungsszenarien von Sternen

- Entwicklungsszenarien in Abhängigkeit der Sternmasse relativ zur Sonnenmasse m_S
 - $\frac{m}{m_S} < 0.25$
 - $0.25 < \frac{m}{m_S} < 0.5$
 - $0.5 < \frac{m}{m_S} < 8$
 - $8 < \frac{m}{m_S}$
- Siehe Wikipedia "Riesenstern"

2.2 Beschreibung von stellaren Objekten

2.2.1 Energieverlustrate

2.2.2 Lebenszyklus von Sternen

2.3 Materie-Antimaterie-Asymmetrie

2.3.1 Baryogenese

2.3.2 Leptogenese

Kapitel 3

Dunkle Materie

3.1 Grundlagen

3.1.1 Grundbegriffe

3.1.2 Forschungsgeschichte Dunkle Materie

- (Zwicky, 1933)
- Rotationskurven von Galaxien ([Rubin, Ford, Freeman, 1980](#))
- Gravitationslinseneffekt(1980er)
- Temperaturverteilung in Galaxien und Galaxienclustern(1980er)
- Anisotropie des kosmischen Mikrowellenhintergrunds(1980er)

3.1.3 Evidenz für DM

- Bewegung von Galaxien in Galaxienhaufen
 - Argument: Galaxien bewegen sich zu schnell, als dass ihre beobachtbare Masse sie gravitativ binden kann
 - Historisch: Coma Cluster (Zwicky, 1930er)
 - * “Beobachtbare Masse” bestimmt aus Leuchtkraft der enthaltenen Sterne
- Rotationskurven von Sternen in Galaxien
 - Argument: Rotationskurven von Sternen in Galaxien kann durch die Gravitation der beobachteten Sterne nicht erklärt werden
 - Historisch: (Rubin, 1970er)
- Gravitationslinseneffekt
- Strukturbildung
- Nukleosynthese
- Fehlende Energiedichte im CMB

3.1.4 Modellunabhängige Eigenschaften

- Lebensdauer: Stabil auf kosmologischen Zeitskalen
- QED-Wechselwirkung: Keine (“dunkel”)
 - Starke Schranken an QED-Wechselwirkung
- QCD-Wechselwirkung: Keine

- Kollisionslos (geringe Selbstwechselwirkung)
 - Argument: Bullet-Cluster (?)
- Kosmische DM-Energiedichte Ω_χ
 - Argument: Vermessung des CMB
- Lokale Energiedichte $\rho_\chi \sim 0.3 \frac{\text{GeV}}{\text{cm}^3}$
 - Argument: Bewegungen von Sternen in der Milchstraße
- Lokale Geschwindigkeits-Dispersion $\sigma_v \sim 200 \frac{\text{km}}{\text{s}}$
 - Argument: Bewegungen von Sternen in der Milchstraße
- Sehr früh in kosmischer Entwicklung produziert
 - Argument: Beschreibung der Bildung von Galaxien
- Nicht-baryonisch
 - Argumente
 - * Kosmischer Mikrowellenhintergrund: Benötige zusätzliche nicht-baryonische Energiedichte
 - * Big-Bang Nucleosynthesis: Elementzusammensetzung nach BBN hängt stark von Baryon-Dichte ab
- Körnig auf kleinen Skalen
- Masse
 - Untere Schranken
 - * Fermionen: $m > 70 \text{ eV}$ aus Pauli-Prinzip (“Tremaine-Gunn bound”)
 - * Bosonen: $m \gtrsim 10^{-22} \text{ eV}$ aus Strukturbildung
 - Thermische Produktion $\Rightarrow m \gtrsim 2 \text{ keV}$
 - * Argument: Rechne kleinste Größenskala, auf der man Strukturen sieht, in entsprechende (minimale) DM-Masse um
 - Anschaulich: Kleinste Masse \Rightarrow Größte Geschwindigkeit \Rightarrow Größte Strecke zurückgelegt \Rightarrow Größte Skala, auf der Dichteschwankungen ausgewaschen wurden \Rightarrow Kleinste Skala, auf der man Strukturen erkennt
 - Obere Schranken
- Untere Schranken an Masse
 - Bosonen – Schranke aus Unschärferelation
 - Fermionen – Schranke aus Pauli-Prinzip (Tremain-Gunn Bound)

3.2 Klassifikation von DM aus Teilchenphysik-Perspektive

3.2.1 Interessante Eigenschaften für Teilchenphysik

- “Natürlichkeit” des DM-Modells
 - Natürliche DM-Kandidaten lösen nicht nur das DM-Problem, sondern noch weitere Probleme des SM
- Masse
- Wechselwirkungen
- Effektive Theorien vs UV-Theorien

3.2.2 Teilchenphysik-Klassifikation von DM

- WIMPs

- WIMP = Weakly interacting massive particle
 - * Weakly interacting = Schwache WW mit SM(mindestens so schwach wie die “schwache WW”)
 - * Massive = Schwer (im Vergleich zu anderen DM-Kandidaten), $m \in [1, 10^5] \text{ GeV}$ und bevorzugt $m \sim 100 \text{ GeV} \sim v$
- Eigenschaften
 - * Schwer $m \sim 100 \text{ GeV}$
 - * Schwache Wechselwirkung
 - * Thermisch produziert
 - * Natürlicher DM-Kandidat wegen WIMP miracle
- WIMP miracle
 - * Aussage: WIMP mit $m \sim 100 \text{ GeV}$ produziert ungefähr die benötigte DM-Dichte
 - * Konkret: $m \sim 100 \text{ GeV}$ liefert richtigen Wirkungsquerschnitt für Selbst-Wechselwirkung $\langle \sigma v \rangle \sim 3 \times 10^{-36} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
- Bsp: Neutralino (leichtestes SUSY-Teilchen), Kaluza-Klein-Photon (leichtestes Kaluza-Klein-Teilchen)
 - * Gemeinsame Eigenschaft: Leichtestes stabiles Teilchen aus Theorie mit NP an EW-Skala

- SuperWIMPs

- SuperWIMP = Superweakly interacting massive particle
- Eigenschaften
 - * Typischerweise nicht thermisch produziert
 - * SuperWIMPs erben das WIMP miracle auf irgendeine Art \Rightarrow Sind auch natürliche DM-Kandidaten
- Bsp: Gravitino, Graviton in extra dimension

- FIMPs

- FIMP = Feebly interacting massive particle

- WISPs

- WISP = Weakly interacting sub-eV particle
- Eigenschaften
 - * Bosonen
 - Fermion-DM hat $m \gtrsim 10 \text{ eV}$ (Tremaine-Gunn-Schranke) \Rightarrow WISPs müssen Bosonen sein
 - * Nicht thermisch produziert
 - Thermische Produktion nur möglich für $m \gtrsim 2 \text{ keV}$
- Pseudoskalare Goldstonebosonen – ALPs
 - * Erhalte Pseudoskalare Goldstonebosonen aus spontaner Brechung kompakter Gruppen (typisch: innere Symmetrien) (?)
 - * Bsp: QCD-Axion (Goldstoneboson aus $U(1)_{PQ}$ -SSB)
- Skalare Goldstonebosonen
 - * Erhalte Pseudoskalare Goldstonebosonen aus spontaner Brechung nicht-kompakter Gruppen (typisch: äußere Symmetrien) (?)
 - * Bsp: Radion (Goldstoneboson assoziiert mit metrischem Tensor), Dilaton (Radion in KK-Kompaktifizierung) (?)
- Eichbosonen – Dark photons
 - * Bsp: Dark photons aus Eichung der zufälligen SM-Symmetrien ($B - L, L_\mu - L_e, L_e - L_\tau, L_\mu - L_\tau$)

- Sterile Neutrinos

- Hidden-sector DM
 - Idee: Ganzer Sektor von DM-Teilchen, die nur über Masseneigenzustände-Mischung mit einem SM-Teilchen mit SM-Teilchen mischen
 - Higgs-Portal
 - * Anschaulich: Mischung DM/SM über Mischung mit SM-Higgs-Dublett
 - Vektor-Portal
 - * Anschaulich: Mischung DM/SM über Mischung mit SM-Eichbosonen
 - * Bsp: Dark photons
- Effektive Feldtheorie für schwere Mediatoren

3.3 Klassifikation von DM aus Kosmologie-Perspektive

3.3.1 Interessante Eigenschaften für Kosmologie

- Mittlere Wechselwirkungslänge: CDM vs WDM vs HDM
 - Mittlere Wechselwirkungslänge l = Mittlere Länge, nach der der DM-Kandidat im Universum wechselwirkt
 - Sinnvolle Vergleichsgröße: Durchmesser d_P eine Protogalaxy
 - CDM: $l \gg d_P$
 - WDM: $l \sim d_P$
 - HDM: $l \ll d_P$
- Produktionsmechanismus
- Selbst-Wechselwirkung

3.3.2 Cold DM (CDM)

- Eigenschaften
 - DM-Teilchen sind nicht-relativistisch
 - * Modelliere DM in Kosmologie als “Materie”
 - * Kann mit $v = 0$ arbeiten, sollte aber für relativistische Modelle $0 < v \ll 1$ verwenden
 - Praktischer Vorteil: Simulationen sind unkompliziert mit $v = 0$
- Bsp-Modelle aus Teilchenphysik
 - WISPs mit $m \gtrsim 10^{-22} \text{eV}$
 - WIMPs
 - FIMPs
- Relevanz
 - Anschaulich: Bestes DM-Modell für lange Zeit, aber noch nicht experimentell bestätigt
 - Gute Beschreibung von: Galaxien-Eigenschaften, CMB, Gravitationslinseneffekt
 - Problem: Experimentell trotz umfassender Suchen noch nicht entdeckt

3.3.3 Warm DM (WDM)

- Eigenschaften
 - DM-Teilchen sind nicht-relativistisch
 - * Anschaulich: Mittelding zwischen CDM und HDM
 - * Unterschied zu CDM: Fordere explizit $v \neq 0$
 - Wegen $v \neq 0$ kann WDM Galaxien-Bildung beeinflussen
- Bsp-Modelle aus Teilchenphysik
 - Sterile Neutrinos
 - Gravitinos
 - Evtl WIMPs
- Relevanz
 - Anschaulich: Verbesserung von CDM zu dem Preis, dass Simulationen komplexer werden
 - Es gibt Hinweise, dass WDM Galaxien-Eigenschaften besser erklärt als CDM

3.3.4 Hot DM (HDM)

- Eigenschaften
 - DM-Teilchen sind relativistisch
 - * Modelliere DM in Kosmologie als “Strahlung”
- Bsp-Modelle aus Teilchenphysik
 - SM-Neutrinos
 - Sterile Neutrinos
- Relevanz
 - Anschaulich: Naivstes DM-Modell, kann aber nur kleinen Beitrag zu DM liefern
 - HDM trägt sicher einen (kleinen) Anteil zu Gesamt-DM bei
 - * SM-Neutrinos haben $m \neq 0$ und sind daher HDM
 - Großteil der DM kann nicht aus HDM bestehen
 - * Für HDM-Simulationen erhält man deutlich gehäufte Galaxien-Verteilungen als beobachtet

3.3.5 Self-interacting DM (SIDM)

- Eigenschaften
 - DM-Teilchen haben starke Selbst-WW
 - * Achtung: Wegen Selbst-WW erhält man in SIDM-Modellen schnell deutlich andere Phänomenologie \Rightarrow Muss Parameter geschickt wählen
- Motivation
 - Erwarte SIDM für Modelle mit komplexem dark sector
- Bsp-Modelle aus Teilchenphysik
- Relevanz
 - Anschaulich: Nachweis von SIDM schwierig, da man viele DM-Teilchen erwartet

3.3.6 Fuzzy DM (FDM)

- Eigenschaften
 - Sehr leicht $m \sim 10^{-22}\text{eV}$
 - * Wellen-Bild sinnvoller als Teilchen-Bild
 - Wellenlänge von FDM ist von Größenordnung von Galaxien
- Motivation
 - String-Theorie liefert viele leichte DM-Kandidaten
- Bsp-Modelle aus Teilchenphysik
- Relevanz

3.4 Exotische Ansätze zur Beschreibung von DM

3.4.1 Makroskopische DM

- Primordial black holes
- Massive Compact Halo Object (MaCHO)
 - MaCHOs sind baryonisch und daher durch die Argumente in 3.1.4 ausgeschlossen
 - Bsp: Braune Zwerge, Überreste von Sternen

3.4.2 Modified gravity statt DM

- Modified Newtonian Dynamics (MoND)
- Tensor-vector-scalar gravity (TeVeS)
- Entropic gravity

3.5 Kosmologie-Zugänge zu DM

3.5.1 Anisotropien im CMB

3.5.2 Strukturbildung

3.5.3 Nukleosynthese

3.6 Astroteilchenphysik-Zugänge zu DM

3.6.1 Bewegung von Galaxien in Galaxienclustern

3.6.2 Temperaturverteilung in Galaxien und Galaxienclustern

3.6.3 Rotationskurven von Spiralgalaxien

- Beschreibung von Rotationskurven $v(r)$
 - Rotationskurve $v(r)$ = Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeit v von Sternen auf Kreisbahnen in einer Galaxie von ihrem Abstand r zum Zentrum der Galaxie
 - Einfache Beschreibung nur für Spiralgalaxien möglich, da die Sterne sich nur hier auf Kreisbahnen bewegen
 - Newton-Mechanik: $v^2(r) = \frac{GM(r)}{r}$
 - * $M(r)$ ist von der Rotationskurven eingeschlossene Masse bzw $M(r) = \int_0^r dx x^2 \rho(x)$ mit Massendichte $\rho(r)$ der Galaxie

* Herleitung: Betrachte $E = mv^2 = \frac{GMm}{r}$ für unterschiedliche r

– Spezialfälle für $v(r)$

* $\rho(r) = \frac{M}{4\pi r^2} \delta(r) \Rightarrow M(r) = 4\pi \rho_0 \Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{4\pi \rho_0 G}{r}} \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$

* $\rho(r) = \rho_0 \Rightarrow M(r) = \frac{4\pi}{3} \rho_0 r^3 \Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{4\pi}{3} \rho_0 G r} \propto r$

* $\rho(r) = \frac{\rho_0}{r^2} \Rightarrow M(r) = 4\pi \rho_0 r \Rightarrow v(r) = \sqrt{4\pi \rho_0} \propto \text{const}$

• Argument für DM

– Anschaulich: Diskrepanz zwischen Beobachtung und Theorie-Vorhersage \Rightarrow Muss Theorie modifizieren (DM-Effekte einfügen)

– Erwartung ohne DM: Galaxie besteht nur aus sichtbarer Materie $\rho = \rho_{\text{vis}}$, die sich bei $r < r_0$ befindet

* Modelliere Materie-Verteilung als $\rho_{\text{vis}}(r) = \begin{cases} \rho_0 & r < r_0 \\ 0 & r > r_0 \end{cases} \Rightarrow v \propto \begin{cases} r & r < r_0 \\ 1/\sqrt{r} & r > r_0 \end{cases}$

– Erklärung mit DM: Zusätzliche DM-Verteilung ρ_{DM} mit $\rho_{\text{DM}}(r) \neq 0$ auch für $r > r_0$

* Für $r < r_0$ dominiert weiterhin der Effekt sichtbarer Materie $\rho \approx \rho_{\text{vis}} \Rightarrow v \sim r$

* Für $r > r_0$ großer Beitrag durch DM $\Rightarrow v \sim \text{const}$

• Modelliere DM-Verteilung als $\rho_{\text{DM}}(r) = \frac{\rho_1}{r^2}$

• Folgerungen für DM-Eigenschaften

– DM-Teilchen haben geringe elektrische Ladung

* Baryonische Materie ordnet sich in Scheiben an wegen Emission von Photonen (?)

* DM formt keine Scheiben \Rightarrow DM-Teilchen haben geringe elektrische Ladung

– Lokale Energiedichte

* “Lokale Energiedichte” in Galaxien im Gegensatz zu globaler (mittlerer) Energiedichte des Universums

* Bestimme Verteilung $\rho(r)$ aus gemessenem $v(r)$ mit $v^2 = \frac{G}{r} 4\pi \int_0^r dx x^2 \rho(x)$

3.6.4 Gravitationslinseneffekt

3.6.5 Kollision von Galaxienhaufen

• Beobachtung

– Veranschaulichung: [Kollision des Bullet-Clusters](#)

– Benötige 3 Komponenten für gute Beschreibung der Beobachtungen: Sterne, Gas, DM

* Beobachtung der Komponenten der kollidierenden Galaxienhaufen: Sichtbares Licht (Sterne), Röntgenstrahlung (Gas), Gravitationslinsen-Effekt (DM)

* Kollision der Sterne: Geringe Wechselwirkung \Rightarrow Geringe Geschwindigkeitsänderung

* Kollision des Gases: Starke EM-WW \Rightarrow Gase der beiden Galaxienhaufen werden abgebremst

* Kollision der DM: Geringe Wechselwirkung \Rightarrow Geringe Geschwindigkeitsänderung

• Folgerungen für DM-Eigenschaften

– Schranken an DM-Selbstwechselwirkung ([2004](#))

– Einschränkungen an MoND-Modelle ([2006](#))

3.6.6 Lyman- α -Linien

3.7 Produktion von DM-relics

3.7.1 Thermal freeze-out

3.7.2 Thermal freeze-in

3.7.3 Misalignment

3.7.4 Zerfall schwererer Teilchen

3.7.5 Zerfall topologischer Defekte

3.7.6 Asymmetrische DM

3.8 Experimentelle Suchen

3.8.1 Direkte DM-Suchen

3.8.2 Indirekte DM-Suchen

3.8.3 DM-Suchen am Collider