

Die Erforschung des dunklen Universums: Einschränkung des Skalarfeldmodells für dunkle Materie und Erklärung der Hubble-Spannung sowie der räumlichen Krümmung, wie sie in den letzten Planck-Daten gemessen wurde

Horst Foidl

In den letzten 20 Jahren hat sich das Λ -kalte dunkle Materie (Λ CDM) Konkordanz-Modell aufgrund seiner Übereinstimmung mit vielen Beobachtungen, insbesondere auf großen kosmischen Skalen, zum Standardmodell der Kosmologie entwickelt und ist durch die folgenden zwei Komponenten gekennzeichnet: kalte dunkle Materie (CDM) und Λ , die kosmologische Konstante, die oft als die einfachste Realisierung der dunklen Energie (DE) interpretiert wird. Die physikalische Natur beider Komponenten, die das „dunkle Universum“ umfassen, sind zwei tiefgreifende offene Fragen in der Kosmologie.

Der erste Teil, bestehend aus den Kapiteln II und III, untersucht Skalarfeld-Dunkle-Materie (SFDM), und deren Auswirkungen auf die Strukturbildung, als alternatives Modell für DM. Zu diesem Zweck betrachten wir Λ SFDM-Kosmologien, die sich von Λ CDM darin unterscheiden, dass CDM durch SFDM ersetzt wird, wobei wir die Entwicklung des Hintergrunduniversums sowie lineare Störungen, mit Schwerpunkt auf skalare Moden, berechnen. Wir betrachten Modelle mit komplexem Skalarfeld mit einer abstoßenden, quartischen Selbstwechselwirkung (SI) im Thomas-Fermi-Regime, auch bekannt als „SFDM-TF“ und Modelle ohne SI, die als Fuzzy-Dunkle-Materie (FDM) bezeichnet werden und vergleichen sie mit der Λ CDM-Kosmologie.

Wir modifizieren den Boltzmann-Code Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS), um die Physik komplexer SFDM zu inkludieren. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass ihre Zustandsgleichung im sehr frühen Universum maximal steif ist und damit über alle anderen kosmischen Komponenten, sogar über die Strahlung, dominiert. Wir berechnen die Leistungsspektren des kosmischen Mikrowellenhintergrunds (CMB) und der Materie, sowie die Press-Schechter-Halo-Massenfunktionen für verschiedene Modelle und erweitern damit die bisherige Literatur, die sich entweder auf den Hintergrund oder auf einen semi-analytischen Ansatz für SFDM-Dichtestörungen beschränkte, bei dem die frühe Epoche mit starrer Zustandsgleichung vernachlässigt wurde.

Unsere Berechnungen bestätigen frühere Ergebnisse der aktuellen Literatur und deuten darauf hin, dass SFDM-Modelle im Thomas-Fermi-Regime, in denen eine starke, abstoßende 2-Partikel-SI enthalten ist und welche das Potenzial haben das „cusp-core“-Problem von CDM zu lösen, eine wertvolle Alternative zu CDM-Modellen darstellen, welche gegen $\gtrsim 1$ kpc große Halo-Kerne sprechen, was ihre Fähigkeit, die kleinräumigen Probleme auf Zwerggalaktischen Skalen zu erklären, in Frage stellt.

Anschließend präsentieren wir DM-only 3D-Simulationen der Halo-Bildung und -Entwicklung in Λ SFDM-Kosmologien, wobei wir hydrodynamische Näherungen für SFDM verwenden. In der bisherigen Literatur wurden zwei Fluid-Approximationen für SFDM sowie Simulationen der Halo-Bildung vorgestellt, bei denen jedoch Diskrepanzen berichtet wurden. Daher führen wir gezielte kosmologische 3D-Simulationen für das SFDM-Modell durch, wobei wir für diese sowohl beide Fluid-Approximationen der SFDM als auch CDM verwenden. Unsere Ergebnisse stehen in sehr guter Übereinstimmung mit früheren Arbeiten und erweitern diese, indem wir die berichteten Diskrepanzen erklären können.

Wir stellen fest, dass die Entwicklung von SFDM- und CDM-Halos in einem zweistufigen Prozess erfolgt. Im frühen Stadium nähert sich das Dichteprofil im Zentrum einem ($n = 1.5$)-polytropischen Kern an. Anschließend geht der Kern bei CDM-Halos in eine zentrale Spitze über. Bei SFDM-Halos bestimmt der zusätzliche Druck, aufgrund von SI, das zweite Stadium der Entwicklung, in dem der zentrale Bereich sehr gut einem ($n = 1$)-polytropischen Kern folgt. Beide Kerne sind in eine nahezu isotherme Hülle eingebettet. Wir stoßen auch auf einen neuen Effekt, nämlich eine Ausdehnung sowohl des polytropischen Kerns als auch der Hülle in der späteren Phase der Entwicklung, da die Größe der nahezu isothermen Halo-Hülle durch die abnehmende durchschnittliche Dichte des Hintergrunduniversums beeinflusst wird.

Die Kapitel IV und V widmen sich der Erforschung von DE, indem sie sich zunächst mit den großskaligen Problemen von Λ CDM, insbesondere mit dem Problem der Hubble-Spannung, befassen. Kosmologische Beobachtungsprogramme vergleichen ihre Daten häufig nicht nur mit Λ CDM, sondern auch mit Erweiterungen, die dynamische Modelle dunkler Energie (DDE)-Modelle mit einem zeitabhängigen Zustandsgleichungs (EoS)-parameter w anwenden. Wir haben eine Entartung im üblichen Rechenverfahren für die Expansionsgeschichte festgestellt, sofern DDE-Modelle verwendet werden. Diese Entartung liefert eine unendliche Anzahl kosmologischer Modelle, die das von Planck gemessene CMB-Spektrum reproduzieren.

Wir präsentieren einen komplementären Rechenansatz, der diese Entartung aufhebt: der „Ansatz mit vorgegebenen frühen Dichten (EDs)“ entwickelt kosmologische Modelle vom frühen Universum bis zur Gegenwart, im Gegensatz zum üblichen „Ansatz mit vorgegebenem H_0 “, welcher kosmologische Modelle in umgekehrter Richtung entwickelt. Wir implementieren ein verfeinertes Verfahren, bei dem beide Ansätze in einer geänderten Version des Codes CLASS umgesetzt werden. Unsere Ergebnisse zeigen, dass das Chevallier-Polarski-Linder-Modell (CPL) $w(a) = -0.9 + 0.1(1-a)$ eine Lösung für das Problem der Hubble-Spannung bieten könnte.

Darüber hinaus stellen wir fest, dass die Kombination beider Ansätze, die konsistente Ergebnisse und Übereinstimmung mit Beobachtungen über die gesamte kosmische Zeit hinweg fordert, als eine Art Konsistenzprüfung für kosmologische Modelle dienen kann und die Genauigkeit der abgeleiteten kosmologischen Parameter erheblich erhöht, insbesondere für Λ CDM-Erweiterungen.

In Kapitel V setzen wir mit der Untersuchung der beobachteten beschleunigten Expansion des Universums, die DE zugeschrieben wird, fort, indem wir die Interpretation des flachen Universums von Λ CDM neu bewerten. Dabei berücksichtigen wir, dass die Friedmann-Gleichung die Expansionsgeschichte von FLRW-Universen im lokalen Bezugssystem mitbewegter Beobachter beschreibt, die in ihrem lokalen Inertialsystem, in dem die spezielle Relativitätstheorie (SRT) gilt, einen flachen, homogenen und isotropen Raum wahrnehmen, was eine Konsequenz des Äquivalenzprinzips ist. Folglich bestätigt die Beobachtung der Flachheit des Raums durch die Messungen der CMB, dass wir das Kriterium eines mitbewegten Beobachters erfüllen.

Wir nutzen diese Tatsache, um eine Erweiterung von Λ CDM vorzustellen, die wir zur Diskussion stellen möchten und welche die Anfangsbedingungen des Hintergrunduniversums in das Modell integriert. Die Anfangsbedingungen bestehen aus dem anfänglichen Materie- und Strahlungsinhalt des Universums sowie der anfänglichen Expansionsrate. Die beobachtete beschleunigte Expansion im späteren Verlauf der Expansionsgeschichte wird einem kinematischen Effekt zugeschrieben, der dem Beitrag einer DE-Komponente ähnlich ist. Wenn wir dasselbe $\Omega_{m,0} \simeq 0.3$ wie bei Λ CDM wählen, ist seine Zustandsgleichung $w_{de} \simeq -0.8$. Darüber hinaus berücksichtigen wir den Einfluss des kosmischen Netzes, des „cosmic webs“, im späten Universum auf die Expansionsgeschichte, sobald Voids das Volumen des Universums dominieren.

Dabei stellen wir fest, dass die anfänglich konstante Zustandsfunktion w_{de} zeitabhängig wird und sich zu einem Wert von $w_{de} \simeq -0,9$ in der Gegenwart entwickelt. Obwohl der Einfluss durch Voids gering ist, reicht er aus, um eine Lösung für das Problem der Hubble-Spannung zu liefern, wie wir bereits in Kapitel IV festgestellt haben. Wir verwenden CLASS, um die Expansionsgeschichte und die Leistungsspektren unserer Λ CDM-Erweiterung zu berechnen und untersuchen unsere Ergebnisse auf Übereinstimmung mit Λ CDM und mit Beobachtungen. Wir stellen fest, dass unser Modell gut mit den aktuellen Daten übereinstimmt, insbesondere mit der finalen Datenveröffentlichung PR4 der Planck-Mission, wo es die von PR4 bestimmte räumliche Krümmung $\Omega_{k,0} = -0.012 \pm 0.010$ erklärt.