

1 Alternative kosmologische Modelle

Die Kosmologie gehört zu einem der sich am schnellsten entwickelnden Teilgebiete der Physik. Hervorgerufen durch eine Flut neuer Beobachtungsdaten ist man zum ersten Mal in der Lage, die Parameter innerhalb verschiedener kosmologischer Modelle stark einzuschränken. Zu der verbesserten Beobachtungslage haben mehrere z. T. satellitengestützte Experimente zur Vermessung der Hintergrundstrahlung (COBE, BOOMERANG, MAXIMA), Beobachtungen weit entfernter Supernovae vom Typ Ia (SCP, HIGH-z Search Team) und Messungen der Verteilungen von Galaxien (SDSS, XMM-LSS, 2dF QSO) beigetragen.

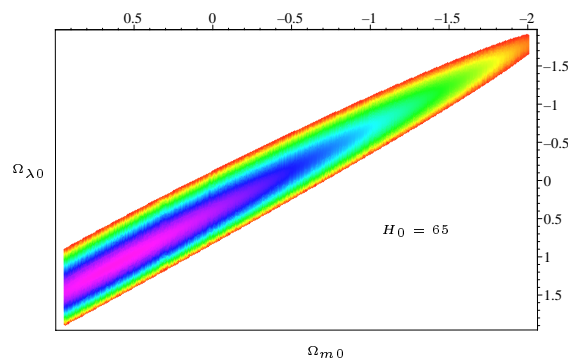


Abbildung 1: Beispiel für die Bestimmung von kosmologischen Parametern mithilfe von Typ Ia Supernovae, hier für einen einfachen Fall des kosmologischen Standardmodells. Farblich kodiert sind die Parameterbereiche in welchen das dimensionslose Dichteparameterpaar $(\Omega_{m0}, \Omega_{\lambda0})$ die Beobachtungen besonders gut beschreibt. Die beste Übereinstimmung mit den Beobachtungen liefern Parameterwerte die im pinkfarbenen Bereich liegen. Der Hubbleparameter H_0 ist hier in $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ angegeben ($1 \text{ parsec} \approx 3.26 \text{ Lichtjahre} \approx 3.08 \times 10^{16} \text{ m}$).

Auf theoretischer Ebene sucht man zur Zeit intensiv nach einem Modell, das möglichst alle Beobachtungen hinreichend gut beschreibt. Die beste Beschreibung liefert dabei ein Modell auf Basis der allgemeinen Relativitätstheorie, das mittlerweile als *kosmologisches Standardmodell* bezeichnet wird. Dabei handelt es sich um ein Modell, das im gravitativen Bereich auf Ideen von Friedmann, Lemaître, Robertson und Walker zurückgreift und dessen Ursprünge bis in die zwanziger Jahre zurückreichen. Wesentliches Merkmal dieses Modells ist ein sich ausdehnendes nicht-statisches Universum, das sich aus einer sehr heißen Frühphase heraus entwickelt und dabei auf die heutigen Temperaturen abkühlt. Die am Anfang stehende explosionsartige Ausdehnung eines punktförmigen Raumgebietes ist allgemein unter dem Namen *Urknall* oder *Big Bang* bekannt. Ausschlaggebend für die allgemeine Akzeptanz dieses Modells war die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung durch Penzias und Wilson im

Jahr 1965, die schon 1949 von Alpher und Herman, aufgrund der Arbeiten von Gamov zur Nukleosynthese im Jahr 1942, vorhergesagt wurde.

Trotz der großen Erfolge des Standardmodells ist dessen Entwicklung noch lange nicht abgeschlossen. Insbesondere machten die 1998 von Perlmutter et al., Riess et al. und Schmidt et al. veröffentlichten Messungen der scheinbaren Helligkeiten weit entfernter Supernovae vom Typ Ia klar, dass man noch über zu wenige Kenntnisse einer wesentlichen Komponente des Universums, der sogenannten dunklen Energie, verfügt. Dem Standardmodell zufolge besteht nämlich das Universum zu ca. 70% aus einer bisher unbekanntem Energieform, eben der dunklen Energie. Diese Entdeckung führte zu einer großen Anzahl von Veröffentlichungen die u. a. auch die Wiedereinführung der kosmologischen Konstanten behandeln, einem schon von Einstein in seinen frühen Arbeiten zur Kosmologie vorgeschlagenen, bald darauf aber wieder verworfenem Konzept, welches damals zur Konstruktion eines statischen Modells des Kosmos diente. Eine überraschende Konsequenz des hohen Dunkleenergieanteils ist, zumindest im Rahmen des kosmologischen Standardmodells, dass sich das Universum zum heutigen Zeitpunkt beschleunigt ausdehnt.

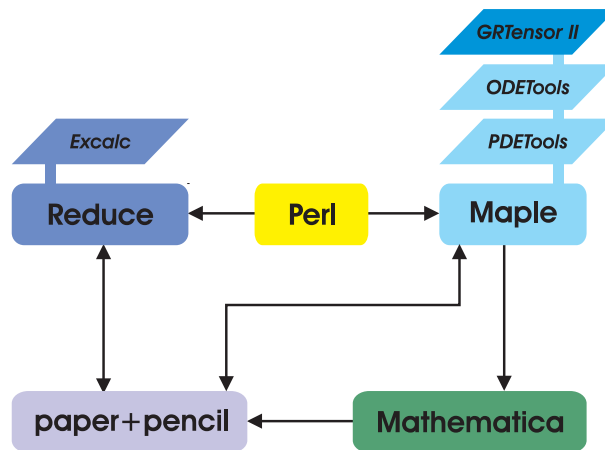


Abbildung 2: Beispiele für verschiedene Computeralgebrasysteme und Zusatzpakete innerhalb dieser Systeme, die bei der Konstruktion von kosmologischen Modellen und der Suche nach exakten Lösungen eingesetzt werden. Pfeile deuten die Richtungen des Datenaustauschs zwischen den verschiedenen Systemen an.

Auf theoretischer Seite führten die beschriebenen Entdeckungen zu einem regelrechten Erklärungsnotstand. Fragen in diesem Zusammenhang sind: *Was* ist die dunkle Energie? Ist ein hoher Dunkelmaterieanteil wirklich zwingend? Sind Annahmen, die innerhalb des kosmologischen Standardmodells gemacht werden falsch? Gibt es kosmologische Modelle, welche vielleicht besser die neue Beobachtungssituation beschreiben? Ist es vielleicht sogar notwendig die zugrundelie-

gende Theorie der Gravitation, in diesem Fall die allgemeine Relativitätstheorie, abzuändern?

Bei der Entwicklung alternativer kosmologischer Modelle ist man heutzutage auf die Hilfe von Computern angewiesen. Gerade im Bereich von Gravitationstheorien, die über die allgemeine Relativitätstheorie hinausgehen, wäre die Entwicklung von neuen Modellen aufgrund der Komplexität der zugrundeliegenden Feldgleichungen undenkbar. Dabei macht man insbesondere Gebrauch von Computeralgebrasystemen wie z. B. Maple und Reduce, um die zu einem Modell gehörenden Feldgleichungen und geometrischen Größen exakt zu berechnen. Neben den Rechnungen auf algebraischer Ebene sind im Kontext der Kosmologie auch aufwendige numerische Rechnungen durchzuführen. Insbesondere die Beschränkung von Modellparametern aufgrund von Beobachtungsdaten erfordert einen hohen Rechenaufwand. Durch die von den oben erwähnten Experimenten gelieferten Daten ist man erstmals in der Lage, kosmologisch relevante Größen quantitativ einzuschränken. Außerdem ist man stark daran interessiert, alternative Szenarien möglichst schnell auf ihre Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten zu prüfen, um dadurch Rückschlüsse auf die zugrundeliegende Gravitationstheorie zu ziehen. Eine Vielzahl in der Planung befindlicher Experimente (SNAP, Planck) wird die Beobachtungslage noch weiter verbessern und zu einem immensen Zuwachs an Daten und damit auch zu einem Zuwachs der zur Parameterbestimmung benötigten Rechenleistung führen.

(Dirk Pützfeld, E-Mail: dp@thp.uni-koeln.de, Arbeitsgruppe Prof. Dr. F.W. Hehl)