

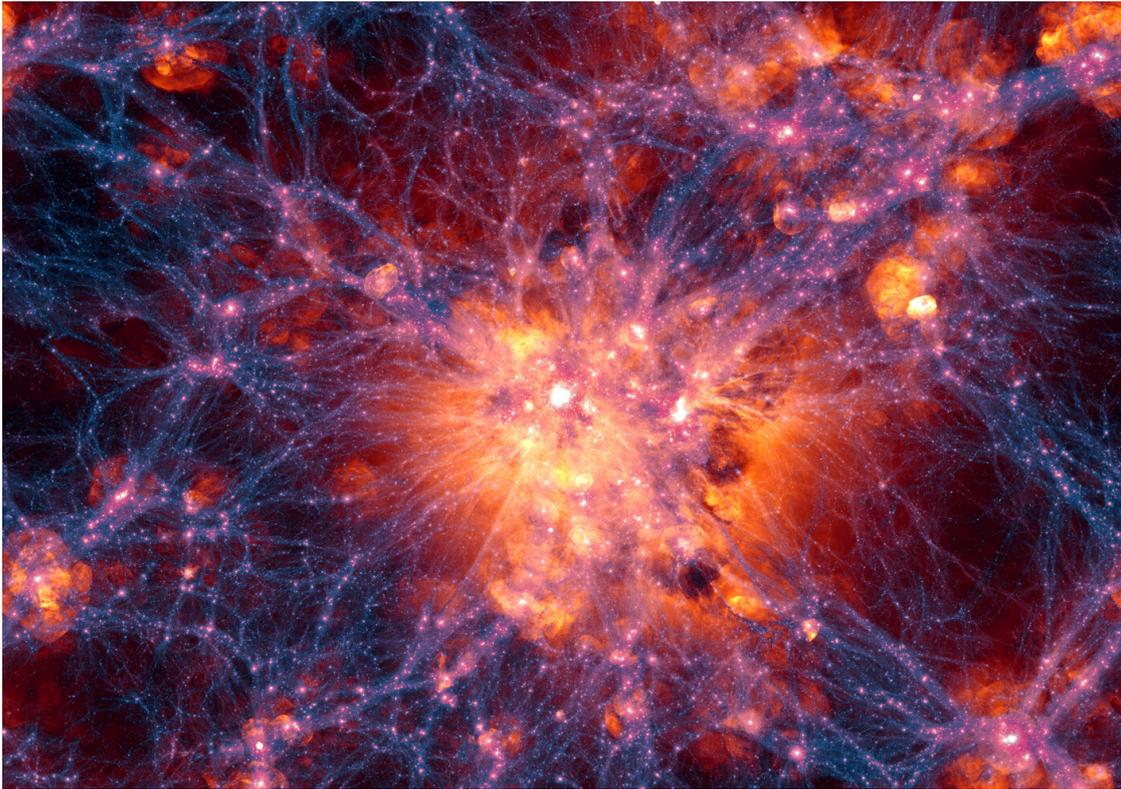
## Forschungsschwerpunkte – Prof. Dr. Volker Springel

---

In meiner Arbeit beschäftige ich mich mit dem wohl größten aller Forschungsgegenstände, dem Universum als Ganzem. Wir wissen heute, dass das Universum etwa 13,6 Milliarden Jahre alt ist, dass es beschleunigt expandiert, dass große Galaxien wie unsere Milchstraße gewaltige superschwere Schwarze Löcher enthalten und es vermutlich um die meisten Sterne extrasolare Planeten gibt. Vielleicht die größte Zumutung der modernen Kosmologie für unsere menschliche Erfahrungswelt ist aber die Entdeckung, dass der Kosmos vor allem „Dunkle Materie“ und „Dunkle Energie“ enthält, während die normale Materie, aus der wir Menschen bestehen, nur für etwas mehr als 4 Prozent der kosmischen Energiedichte verantwortlich ist.

Beobachtung und Theorie liefern eine recht genaue Beschreibung davon, wie das Universum 400 000 Jahre nach dem heißen Urknall beschaffen war. Materie und Strahlung waren zu dieser Zeit fast gleichmäßig verteilt, abgesehen von winzigen Schwankungen, die letztlich auf Quantenfluktuationen in einer frühen, inflationären Epoche des Kosmos zurückgehen. Aber damals gab es noch keinerlei Sterne und Galaxien. Wie sind diese Strukturen über die Zeit entstanden? Welche Rolle spielte dabei der seltsame Mix aus Dunkler Materie und Dunkler Energie? Warum gibt es Galaxien in unterschiedlichen Größen und Gestalten? Woher kommt das supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße, welches fast 4 Millionen Sonnenmassen verschlungen hat?

Um diese und weitere Fragen zu beantworten, berechnen wir die Entwicklung des Universums vorwärts in der Zeit, über einen Zeitraum von mehr als 13 Milliarden Jahren, ausgehend von dem einfachen Zustand kurz nach dem Urknall. Computersimulationen erlauben es dabei, die grundlegenden physikalischen Gleichungssysteme der kosmischen Entwicklung zu lösen und damit die Dynamik der verschiedenen Materieformen sowie die Strahlungsprozesse im diffusen Gas, Magnetfelder, Sternentstehung, das Wachstum der Schwarzen Löcher und die Energieeinspeisung durch Supernova-Explosionen zu verfolgen. Das Zusammenspiel dieser nicht linearen Physik macht die Galaxienentstehung zu einem ausgesprochen komplexen Phänomen, das eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Längenskalen verknüpft.



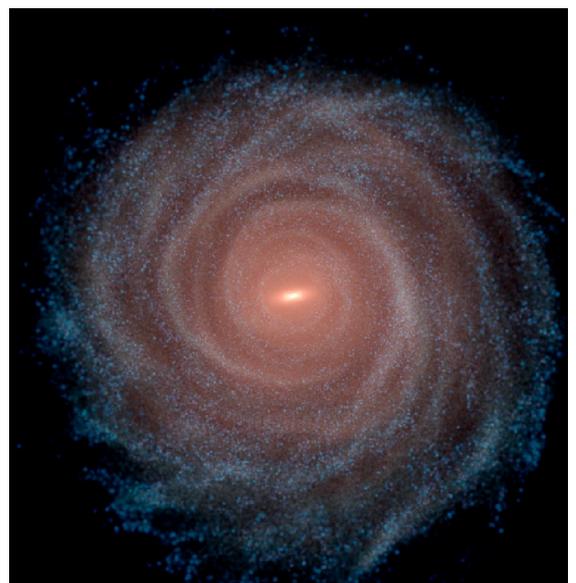
*Visualisierung der Dunklen Materie (blau) und des Geschwindigkeitsfelds des kosmischen Gases (rot) in unserer „Illustris“.  
Simulation der kosmischen Strukturentstehung. Die gezeigte Region umfasst mehrere 100 Millionen Lichtjahre.*

Wenig überraschend ist daher, dass der Rechenaufwand für diese Simulationen enorm groß ist. Wir versuchen daher, die geballte Leistung moderner Supercomputer mit ihrer Vielzahl an Prozessoren für unsere Wissenschaft einzusetzen. Dazu muss das Problem aber auf die Schultern von Hunderttausenden von Rechenkernen verteilt werden, die dann gemeinsam, parallel, an dem eng gekoppelten Problem der kosmischen Strukturentstehung arbeiten. Die Entwicklung entsprechend leistungsfähiger Simulationsprogramme und numerischer Verfahren nimmt einen nicht unwesentlichen Teil meiner Forschungsarbeit ein. Die von mir entwickelten Simulationswerkzeuge GADGET und AREPO werden weltweit eingesetzt und sind die bisher erfolgreichsten Programme zur kosmischen Strukturentstehung.

Auch die zu bewältigenden Datenmengen sind dabei enorm. Aktuelle Simulationsrechnungen meiner Gruppe erfordern etwa 150 Terabyte Hauptspeicher und produzieren weit mehr als 500 Terabyte Ausgabedaten, die dann wissenschaftlich mit von uns entwickelten Verfahren analysiert werden. Auf einem einzelnen PC würde eine solche Simulation bis zu

10 000 Jahre benötigen, aber dank der Parallelisierung schaffen wir es mit ein bis zwei Monaten Laufzeit.

Die Ergebnisse solcher Simulationen haben sich als eine Schatzkiste für die Theorie der Galaxienentstehung erwiesen, weshalb sie nun auch zu einem der wichtigsten Werkzeuge der theoretischen Astrophysik geworden sind. So konnten wir etwa zeigen, dass die Dunkle Materie zur heutigen Zeit in einem feingespinnenen kosmischen Netz verteilt ist, an dessen Kreuzungspunkten jeweils Galaxien unterschiedlicher Größe entstehen. Die vorausgesagte Verteilung der Galaxien im Raum stimmt dabei sehr gut mit der beobachteten Verteilung in großräumigen Himmelsdurchmusterungen überein, was eine wichtige Bestätigung des Standardmodells der Kosmologie darstellt.



*Spiralgalaxie von der Größe der Milchstraße aus unserem „Auriga“-Simulationsprojekt.*

In hydrodynamischen Simulationsrechnungen zur Galaxienentstehung, wie den „Illustris“- , „Auriga“- und „IllustrisTNG“-Projekten, konnten wir erstmals die Entstehung von Galaxien mit der richtigen Verteilung von Größen und Morphologie zeigen. Unsere Modelle sagen dabei u. a. voraus, dass supermassereiche Schwarze Löcher die Entwicklung insbesondere von großen Galaxien entscheidend beeinflussen. Sie sorgen nämlich dafür, dass Galaxien nicht beliebig groß werden können, da die Schwarzen Löcher ab einer bestimmten Größe so viel Energie einspeisen, dass noch vorhandenes Gas stark aufgeheizt wird und nicht mehr für weitere Sternentstehung zur Verfügung steht. Es entsteht dann eine rote, „tote“ Galaxie, deren Sternpopulation im Wesentlichen nur noch passiv altert.

In aktuellen Arbeiten beschäftige ich mich vor allem mit dem immer noch rätselhaften Ursprung von Magnetfeldern in Galaxien, mit der sogenannten kosmischen Strahlung, die aus relativistischen geladenen Teilchen besteht und für einen erheblichen Druckbeitrag in der Milchstraße sorgt, und mit einer Verfeinerung der Modelle für das Wachstum und die Energieeinspeisung der Schwarzen Löcher. Zwar können die aktuellen theoretischen Modelle zur Galaxienentstehung schon viele ihrer Eigenschaften in den Grundzügen erklären, einige grundlegende Aspekte bleiben aber weiter unverstanden, das heißt, es gibt noch viel zu tun.