

Mit einem Supercomputer auf den Spuren der dunklen Materie

Supercomputer predicts local dark matter distribution

Vogelsberger, Mark; Springel, Volker; White, Simon

Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching

Korrespondierender Autor

E-Mail: vogelsma@mpa-garching.mpg.de

Zusammenfassung

Forscher des Max-Planck-Instituts für Astrophysik (MPA) haben die bisher größte Simulation zur Entstehung eines Milchstraßen-ähnlichen Halos aus dunkler Materie durchgeführt. Damit gelang es ihnen erstmals, detaillierte theoretische Vorhersagen über die Verteilung der dunklen Materie in der Umgebung der Erde zu treffen.

Summary

Scientists at the Max Planck Institute for Astrophysics (MPA) have carried out the largest simulation thus far of the formation of a Milky Way-like dark matter halo. This allowed the first detailed theoretical predictions of the dark matter distribution in the vicinity of the Earth.

In den letzten Jahren hat sich ein kosmologisches Standardmodell für die Entstehung und Zusammensetzung des Universums etabliert. Demnach besteht der Löwenanteil der Energie im Universum zu 72% aus dunkler Energie und zu 23% aus dunkler Materie; zwei derzeit unbekannte Komponenten. Dagegen machen gewöhnliche Atome nur 5% aus. Bei der dunklen Energie handelt es sich um ein das Universum durchsetzendes Kraftfeld dessen Ursprung derzeit kontrovers diskutiert wird. Auch die Teilchen der dunklen Materie, die den entscheidenden „Kitt“ für die Strukturbildung unseres Universums bilden, wurden bisher noch nicht entdeckt. Es muss sich dabei um Teilchen handeln, die fast ausschließlich über die Schwerkraft mit anderen Teilchen wechselwirken. Für die Erklärung der dunklen Materie gibt es derzeit verschiedene vielversprechende Theorien. Ein so genanntes Neutralino hat nach heutigem Wissensstand die besten Chancen, das gesuchte dunkle Materieteilchen zu sein. Dieses circa 100 Protonenmassen schwere Teilchen wird von der supersymmetrischen Erweiterung der Teilchenphysik vorausgesagt und hat alle nötigen Eigenschaften, um als dunkle Materie in Frage zu kommen. Eines der Hauptziele des Large Hadron Colliders (LHC) am CERN ist es, Hinweise für diese Supersymmetrie zu finden. Sollte dies gelingen, so würden die Chancen für ein Neutralino als dunkles Materieteilchen gewaltig steigen. Allerdings gibt es auch noch eine ganze Reihe alternativer Kandidaten, wie zum Beispiel das Axion. Die Existenz dieses Teilchens wurde ursprünglich postuliert, um das Problem des verschwindenden elektrischen Dipolmomentes des Neutrons innerhalb der Quantenchromodynamik zu lösen.

Die Suche nach der dunklen Materie

Selbst wenn der LHC Supersymmetrie nachweisen sollte, wäre damit noch nicht gesichert, dass das Neutralino wirklich das gesuchte dunkle Materieteilchen ist. Die einzige Möglichkeit, dies eindeutig zu beweisen, besteht darin, dunkle Materie direkt auf der Erde zu detektieren. Nach dem kosmologischen Standardmodell ist unsere Milchstraße in einen riesigen Halo aus dunkler Materie eingebettet. Dieser Halo ist rund 10-mal ausgedehnter als die sichtbare Spiralstruktur der Galaxis. Da die Erde sich inmitten dieses Halos befindet, schwimmt sie sozusagen durch einen See dunkler Materieteilchen. Auch wenn das Neutralino mit gewöhnlicher Materie nur extrem schwache, nicht-gravitativ Wechselwirkungen aufweist, so sollte es prinzipiell möglich sein, das Teilchen aufgrund dieser Wechselwirkungen mit entsprechend empfindlichen Detektoren nachzuweisen. Das Detektionsprinzip für Neutralinos beruht dabei auf einem elastischen Streuprozess mit Atomkernen. Diese Streuung deponiert ein wenig Energie in einzelnen Kernen des Detektormaterials. Mit verschiedenen Techniken ist es dann möglich, diese Rückstoßenergie zu messen. Derartige Experimente müssen extrem gut von anderen störenden Hintergrundquellen, wie etwa natürlicher Radioaktivität und kosmischer Höhenstrahlung, abgeschirmt werden. Darum werden die Laboratorien mitsamt Detektor unterirdisch betrieben, beispielsweise in alten Minen. Derzeit gibt es weltweit mehr als 20 solcher Experimente. Typischerweise erwartet man allerdings nur einige wenige Detektionsereignisse pro Tag.

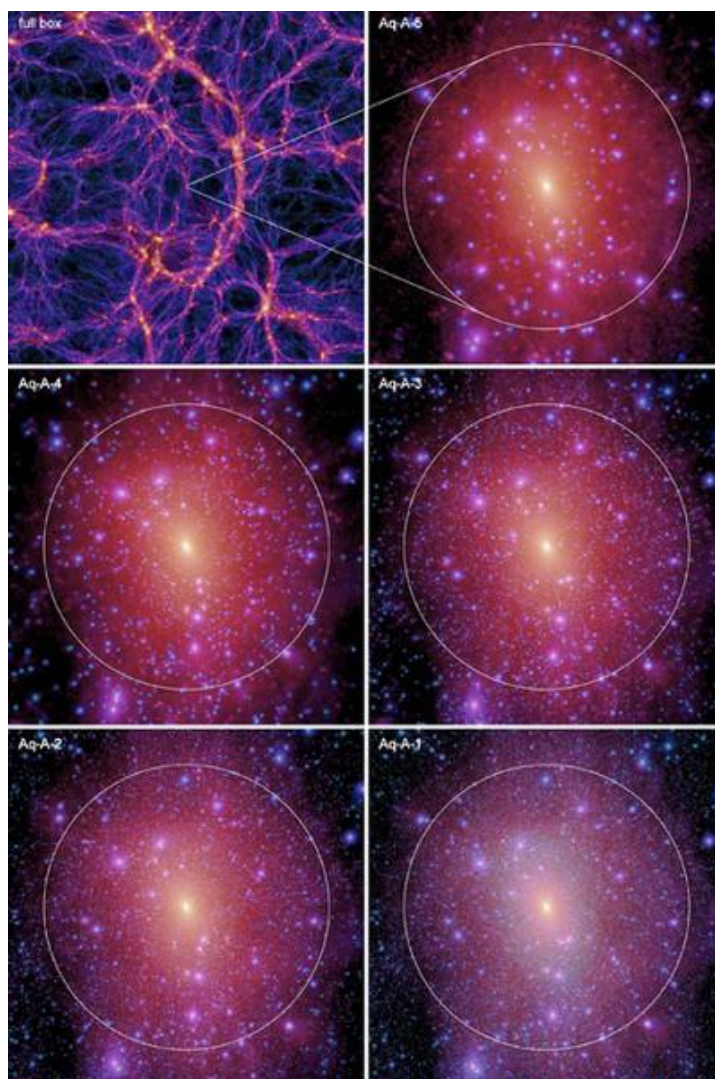
Zur Interpretation und Analyse dieser Detektorexperimente ist es notwendig, die Verteilung der dunklen Materie nahe der Erde möglichst genau zu kennen. Das meistverwendete Modell hierfür geht von einer gleichmäßigen Verteilung der dunklen Materieteilchen in der Umgebung der Erde aus und nimmt an, dass die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen gut durch eine Maxwell-Verteilung beschrieben werden kann. Bisher verwendet die Mehrheit der Experimentatoren diese Annahmen, um aus ihren Experimenten Rückschlüsse auf Neutralinos zu ziehen. Auch wenn noch in keinem dieser Experimente der eindeutige Nachweis eines dunklen Materieteilchens geglückt ist, so liefert auch das Nicht-Finden wichtige Erkenntnisse über die Eigenschaften des gesuchten Teilchens. Bestimmte Massen- und Wirkungsquerschnittsbereiche können dann nämlich ausgeschlossen werden. Allerdings greifen diese Schlussfolgerungen auf die oben genannten Annahmen über die dunkle Materie zurück. Sollten diese ungenau sein, sind die Interpretationen der Ergebnisse der Experimente fragwürdig und möglicherweise mit großen systematischen Fehlern behaftet.

Das Aquarius-Projekt

Es stellt sich also die Frage, wie gut das angenommene Verteilungsmodell ist. Doch wie kann man etwas über die Verteilung der dunklen Materie lernen, wenn es sich doch um eine bislang unbekannte Materieform handelt? Hierzu bemüht man Computersimulationen, die die Entwicklung des Universums berechnen. Die Anfangsbedingungen für diese Rechnungen entnimmt man der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung, die gewissermaßen das Nachglühen des heißen Urknalls darstellt. Aus den winzigen Fluktuationen in dieser Strahlung kann man recht präzise ablesen, wie das Universum circa 400.000 Jahre nach dem Urknall aussah. Diese Anfangsbedingungen verwendet man dann, um mithilfe des Standardmodells der Kosmologie zu berechnen, wie sich das Universum seitdem entwickelt hat. Dabei ist es nicht notwendig zu wissen, was dunkle Energie oder dunkle Materie genau sind; es genügt, ihre Eigenschaften hinreichend genau zu kennen und in den Berechnungen zu berücksichtigen. In dem so simulierten Universum kann man dann Galaxien suchen, die der Milchstraße in ihren wichtigsten Eigenschaften ähneln. Durch die Analyse der Verteilung der dunklen Materie in diesen simulierten Halos sind dann Rückschlüsse auf die Verteilung der dunklen Materie in unserer Milchstraße möglich. Was hier wie ein einfaches Rezept klingt, stellt sich in der Praxis allerdings als eine große Herausforderung dar. Die notwendigen Simulationen erfordern einen enormen Rechenaufwand und

sind auf modernste Hochleistungscomputer angewiesen.

Einem internationalen Forscherteam unter Leitung von Volker Springel und Simon White (MPA) ist es nun gelungen, eine solche Simulation mit bisher unerreichter Genauigkeit durchzuführen. Die dafür notwendige enorme Rechenleistung vollbrachte der HLRB-II-Supercomputer des Leibniz-Rechenzentrums in Garching. Zusätzliche, etwas kleinere Simulationen wurden auf verschiedenen anderen Superrechnern in Europa durchgeführt. Insgesamt beinhaltet das Aquarius-Projekt Simulationen für sechs verschiedene Milchstraßen-ähnliche dunkle Materie Halos. Die Simulation mit der höchsten Genauigkeit verwendete mehr als 4,3 Milliarden Simulationsteilchen, um die dunkle Materie darzustellen. Für diese Berechnung brauchte der HLRB-II mehr als 3,5 Millionen CPU-Stunden; eine Aufgabe, die einen handelsüblichen PC fast 400 Jahre beschäftigen würde. Die Zahl der Simulationsteilchen ist von essentieller Bedeutung: Je mehr Teilchen zum Beschreiben der dunklen Materie verwendet werden, umso präziser sind die daraus ableitbaren Vorhersagen. In **Abbildung 1** ist das Dichtefeld des höchst aufgelösten Halos in verschiedenen numerischen Auflösungen zu sehen. Deutlich zu erkennen ist, dass der Halo von zahlreichen kleinen Klumpen dunkler Materie, so genannten Subhalos, bevölkert wird.



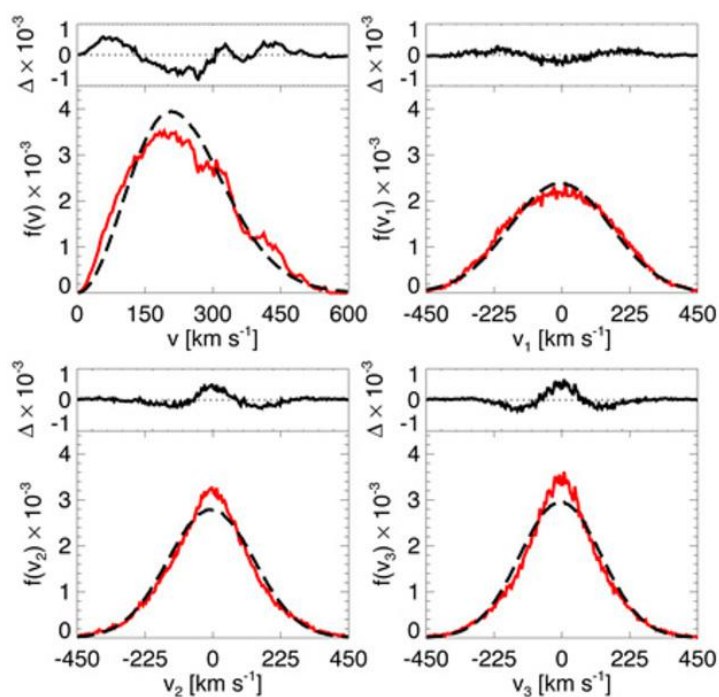
Projizierte Dichtefelder der dunklen Materie. Oben links ist die gesamte simulierte kosmologische Region gezeigt. Aus dieser wurde ein Halo ausgewählt und mit sukzessiv höheren Auflösungen resimuliert. In der gesamten Region, die eine Kantenlänge von circa einer halben Milliarde Lichtjahre hat, ist deutlich eine netzartige Struktur zu erkennen; das so genannte kosmische Netz. Die Kreise in den anderen Bildern markieren den virialisierten Bereich des resimulierten Halos und haben einen Durchmesser von circa 1,6 Millionen Lichtjahre. Der Halo enthält zahlreiche kleinere Halos, so genannte Subhalos.

© Max-Planck-Institut für Astrophysik

Ein Blick auf die dunkle Materie nahe der Erde

Basierend auf dieser Simulation haben Mark Vogelsberger, Volker Springel, Simon White (alle MPA), Amina Helmi (Groningen) und andere Wissenschaftler des internationalen Virgo- Konsortiums erstmals eine detaillierte Analyse der Verteilung der dunklen Materie in der Nähe der Sonne durchgeführt. Zunächst stellten sich die Wissenschaftler die Frage, wie gleichmäßig die dunkle Materie an der Position der Sonne, circa 25.000 Lichtjahre vom Zentrum der Milchstraße entfernt, verteilt ist. Im Prinzip könnte die Dichteverteilung auch sehr kleinskalige fraktale Eigenschaften besitzen. **Abbildung 1** legt darüberhinaus nahe, dass die Erde vielleicht gerade durch einen Subhalo hindurchfliegen könnte, was eine viel höhere Dichte der dunklen Materie bedeuten würde, als üblicherweise angenommen.

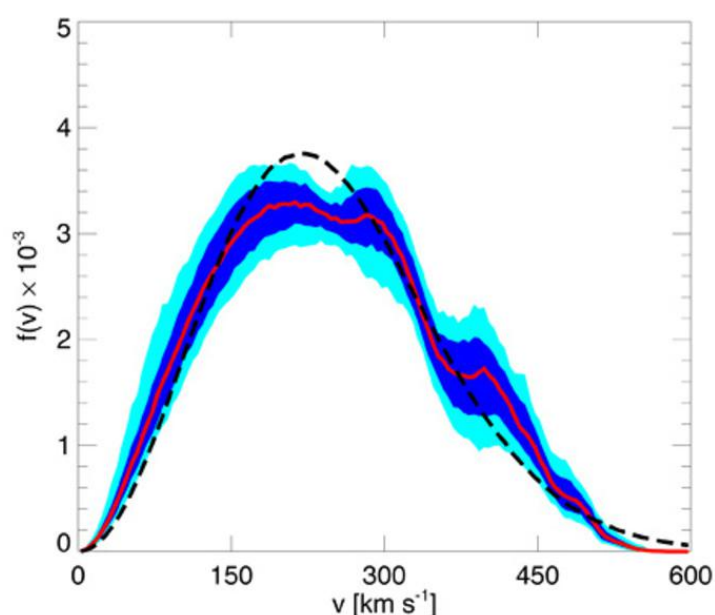
Basierend auf den Daten des Aquarius-Projekts konnten Vogelsberger und seine Kollegen nun aber zeigen, dass die Verteilung der dunklen Materie nahe der Sonne tatsächlich sehr gleichmäßig ist. Weiter fanden sie, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich die Sonne in oder nahe einem Subhalo befindet bei verschwindend geringen 0,01% liegt. Diese Befunde stimmen mit den typischen Modellannahmen der meisten Experimentatoren, die nach dunkler Materie suchen, überein. Neben der Dichtestruktur spielen aber auch die Geschwindigkeiten der dunklen Materieteilchen eine große Rolle für Detektionsexperimente. Man kann sich beispielsweise vorstellen, dass die Geschwindigkeitsverteilung der dunklen Materieteilchen ein charakteristisches Profil besitzt, in welchem bestimmte Geschwindigkeiten bevorzugt auftreten. Wäre dies der Fall, könnte man in Experimenten direkt danach Ausschau halten. Die meisten Wissenschaftler vermuteten bisher allerdings, dass die Geschwindigkeit gut durch eine Maxwell-Verteilung beschrieben sein sollte, die keine markanten Eigenschaften besitzt. Mithilfe der Aquarius-Simulation ist es nun erstmals gelungen, die Geschwindigkeitsverteilung der dunklen Materie sehr genau zu berechnen und damit zu überprüfen, ob die Annahme einer einfachen Maxwell-Verteilung gerechtfertigt ist. Ein Resultat dieser Untersuchung ist in **Abbildung 2** dargestellt, welche die Geschwindigkeiten von Teilchen am Ort der Sonne analysiert.



Geschwindigkeitsverteilung der dunklen Materie, wie sie von der Aquarius-Simulation nahe der Sonne vorhergesagt wird. Die rote Linie zeigt das Simulationsergebnis, während die schwarze, gestrichelte Linie eine angepasste multivariate Gaußverteilung zeigt. Über den eigentlichen Figuren ist jeweils die Differenz zwischen Gaußverteilung und Simulationsdaten gezeigt. Oben links ist der Betrag des Geschwindigkeitsvektors dargestellt. Die anderen Figuren zeigen die drei Komponenten der Geschwindigkeitsverteilung. Während die einzelnen Komponenten der Geschwindigkeit recht gut durch eine multivariate Gaußverteilung beschrieben werden können, zeigt der Betrag (oben links) deutliche Abweichungen in Form von Höckern und Senken
© Max-Planck-Institut für Astrophysik

Die vier Figuren zeigen die Verteilungen des Geschwindigkeitsbetrages und seiner Komponenten. Die roten Linien stehen für das Simulationsresultat, während die schwarze gestrichelte Linie eine multivariate Gaußverteilung darstellt, die an die Simulationsdaten angepasst wurde. Diese Verteilung ist eine

Verallgemeinerung der Maxwell-Verteilung, bei der die Breite der Verteilung in den einzelnen Komponenten (die so genannte Dispersion) unterschiedlich ist. Für eine Maxwell-Verteilung haben alle Geschwindigkeitskomponenten die gleiche Dispersion. Wie **Abbildung 2** allerdings zeigt, würde eine solche Verteilung das Resultat der Simulation nicht korrekt beschreiben, denn diese zeigt klar, dass die Dispersion in den verschiedenen Komponenten unterschiedlich ist; man spricht von einer anisotropen Geschwindigkeitsverteilung. Daraus folgt sofort, dass das Modell der Maxwell-Verteilung nicht vollständig korrekt sein kann und eine multivariate Gaußverteilung die Daten grundsätzlich besser beschreibt. Noch interessanter ist das Verhalten des Betrags der Geschwindigkeiten, das oben links gezeigt ist. Da die Komponenten durch die Gaußverteilung gut beschrieben werden, würde man erwarten, dass letztere auch den Betrag gut beschreibt. Aber dies ist offensichtlich nicht der Fall. Es zeigen sich deutliche Abweichungen in Form von Höckern und Senken in den Simulationsdaten. Um zu überprüfen, ob diese Höcker/Senken-Struktur stark von der Position relativ zum Zentrum abhängt, wurde in **Abbildung 3** die Geschwindigkeitsverteilung aller möglichen Positionen der Sonne in dem simulierten Halo überlagert. Die rote Linie zeigt den Median während die blauen Konturen 68% und 95% aller Verteilungen enthalten. Die schwarze gestrichelte Linie ist der Median der jeweils angepassten multivariaten Gaußschen Verteilung. Wieder sind die Höcker und Senken klar zu erkennen. Und interessanterweise treten sie an allen Positionen bei ungefähr den gleichen Geschwindigkeiten auf. Dies bedeutet, dass es sich hierbei nicht um ein lokales Phänomen handelt, sondern um eine Eigenschaft des gesamten inneren Halos. In der Tat fanden Vogelsberger und seine Kollegen heraus, dass auch die Energieverteilung der Teilchen im inneren Halo signifikante Merkmale besitzt, die für die Charakteristika in der Geschwindigkeitsverteilung verantwortlich sind. Es zeigte sich weiter, dass diese Merkmale für die am stärksten gebundenen Teilchen sogar über Zeiträume von einer Milliarde Jahre und mehr konstant sind.



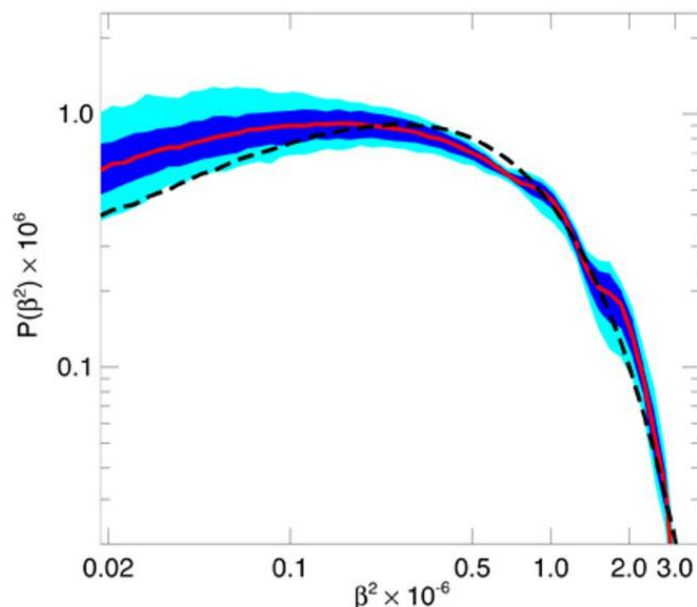
Verteilung des Betrags der Geschwindigkeit, wie in **Abbildung 2** (oben links) für mehrere verschiedene Positionen in 25.000 Lichtjahren Entfernung zum Zentrum des Halos. Die rote Linie zeigt den Median, während die blauen Bereiche 68% und 95% Konturen aller Verteilungen darstellen. Die schwarze Linie ist der Median der angepassten multivariaten Gaußverteilung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Abweichungen von dieser Verteilung zu den Simulationsdaten an allen Positionen ungefähr bei der gleichen Geschwindigkeit auftreten. Es handelt sich hierbei also nicht um lokale Phänomene sondern um eine Eigenschaft des gesamten inneren Halos.

© Max-Planck-Institut für Astrophysik

Verräterische Signale im Detektor

Natürlich stellt sich sofort die Frage, wo diese Merkmale herkommen und was ihre Stärke und Ausprägung bestimmt. Um diese knifflige Frage zu beantworten, analysierten die Wissenschaftler, wie sich der Halo zeitlich entwickelt. Dies geschieht prinzipiell so, dass sich zunächst kleine Strukturen in der dunklen Materie zusammenklumpen, und diese dann unter dem Einfluss der Gravitation zu immer größeren Gebilden verschmelzen. Die Wissenschaftler stellten nun fest, dass der genaue Ablauf dieses hierarchischen Aufbaus die Verteilung der Energien der Teilchen bestimmt. Sie konnten explizit zeigen, dass bestimmte Ereignisse in der Entstehungsgeschichte des Halos die beobachteten Spuren in der heutigen Energie- und Geschwindigkeitsverteilung hinterlassen.

Um zu überprüfen, wie sich die in der Geschwindigkeitsverteilung gefundenen Merkmale auf die Detektionsexperimente auswirken, hat das Wissenschaftlerteam die erwarteten Detektorsignale mit hoher Genauigkeit berechnet. Dabei wurden Vorhersagen für Neutralino- und Axion-Suchexperimente gemacht. Die so erhaltenen theoretischen Signale sind gewissermaßen Schablonen für die Suche nach der dunklen Materie. Experimentatoren können sie verwenden, um in ihren Detektordaten nach einem Signal der dunklen Materie zu fahnden. **Abbildung 4** zeigt beispielsweise ein Axion-Spektrum, wie es auf Basis der Simulation vorhergesagt wird. Wie bereits in **Abbildung 3** wurden auch hier mehrere Positionen in 25.000 Lichtjahren Entfernung überlagert. Das Detektionsprinzip für Axionen ist deutlich anders als das für Neutralinos, denn der Nachweis basiert auf einem Umwandlungsprozess von Axionen in Photonen. Tritt ein Axion in ein starkes Magnetfeld ein, so kann es sich in Mikrowellenstrahlung umwandeln. Die Energie dieser Strahlung hängt dabei von der Bewegungsenergie des Axions ab. Einen entsprechenden Detektor kann man nun wie ein Radio auf verschiedene Frequenzen einstellen und so versuchen, die Axion-Signale zu entdecken. **Abbildung 4** zeigt ein entsprechendes Frequenzspektrum für die Simulation. Die x-Achse ist direkt proportional zur Frequenz, während die y-Achse die Stärke des Signals angibt. Deutlich zu erkennen sind Unterschiede zwischen dem multivariaten Gaußmodell (schwarze gestrichelte Linie) und dem Axion-Spektrum, das von der Simulation vorausgesagt wird (rote Linie). Beispielsweise sagt die Simulation ein stärkeres Signal bei niedrigen Frequenzen voraus. Weiter zeigen sich die bereits in der Geschwindigkeitsverteilung aufgetretenen Merkmale im Spektrum der Axionen in Form von kleinen Höckern und Senken.



Ein Axion-Detektorspektrum wie es basierend auf der Simulation für verschiedene Positionen berechnet wurde. Das Farbschema ist das gleiche wie in **Abbildung 3**. Die x-Achse zeigt $\beta^2=(v/c)^2$ und ist damit direkt proportional zur kinetischen Energie des Axions bzw. zur Frequenz des Photons. Die y-Achse zeigt die Leistung, die im Detektor bei der entsprechenden Frequenz zu erwarten ist.
© Max-Planck-Institut für Astrophysik

Ein neues Fenster in den Kosmos

Falls dunkle Materie entdeckt wird und die Detektionsmethoden entsprechend empfindlich sind, könnte dies das Fenster zu einer neuen Disziplin der Astronomie eröffnen, der Astronomie mit dunkler Materie. Durch Analyse der Detektorsignale wäre es dann nach Vogelsberger und seinen Kollegen möglich, die Entstehungsgeschichte unserer Milchstraße in dem Signal zu erkennen. Neben der beobachtenden Astronomie in den verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums, wie beispielsweise optischer oder Radiostrahlung, käme so ein neues Fenster in den Kosmos hinzu, das tiefe Einblicke in die Entstehungsgeschichte unserer Milchstraße erlaubt.

Originalveröffentlichungen



[Nach](#) [Erweiterungen](#) [suchen](#)[Bilder](#)[erweiterung](#)[Channel](#)[ticker](#)[Datei](#)[liste](#)[HTML-](#)[Erweiterung](#)[Job](#)[ticker](#)[Kalender](#)[erweiterung](#)[Link](#)[erweiterung](#)[MPG.PuRe-Referenz](#)[Mitarbeiter](#) (Employee Editor)[Personen](#)[erweiterung](#)[Publikation](#)[erweiterung](#)[Teaser](#) mit [Bild](#)[Text](#)[blocker](#)[erweiterung](#)[Veranstaltung](#)[sticker](#)[erweiterung](#)[Video](#)[erweiterung](#)[Video](#)[listen](#)[erweiterung](#)[YouTube-](#)[Erweiterung](#)

[1] **M. Vogelsberger, A. Helmi, V. Springel et al.:**

Phase-space structure in the local dark matter distribution and its signature in direct detection experiments.

submittiert an Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (www.mpa-garching.mpg.de/aquarius).

[2] **V. Springel, J. Wang, M. Vogelsberger *et al.*:**

The Aquarius Project: the subhaloes of galactic haloes.

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **391**, 1685-1711 (2008).

[3] **V. Springel, S. White, C. Frenk *et al.*:**

Prospects for detecting supersymmetric dark matter in the Galactic halo.

Nature **456**, 73-76 (2008).