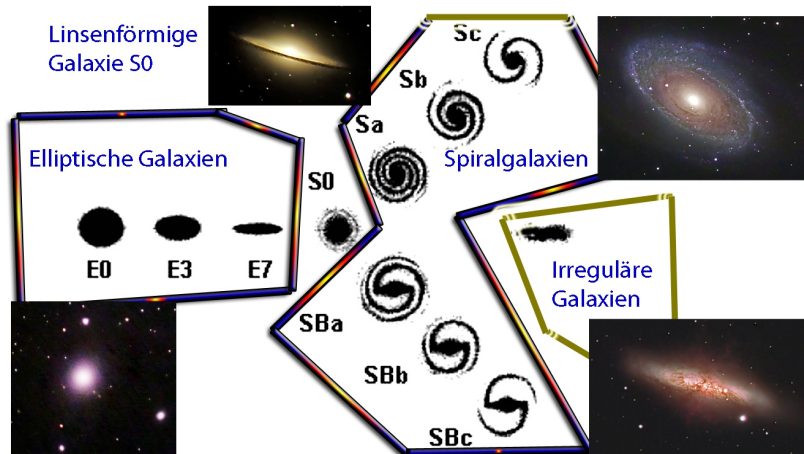


1. Eigenschaften von Galaxien

Galaxien sind Inseln im Universum, die im Durchschnitt dichter sind als ihre Umgebung. Die Dichte der einzelnen Objekte in einer Galaxie ist jedoch sehr unterschiedlich. Sie ist z. B. bei Sternen und Planeten wesentlich höher als bei Gasnebeln. Je nach ihrem Aussehen, teilt man Galaxien nach dem



Hubble Stimmgabelmuster in verschiedene Typen ein.

Spiralgalaxien haben Spiralarme und werden auch als blaue Galaxien bezeichnet, da in ihnen viele junge Riesensterne blau leuchten. Sie enthalten außerdem Gas- und Staubwolken, aus denen immer wieder neue Sterne hervorgehen.

Elliptische Galaxien haben keine Spiralarme, sie enthalten nur wenig Gas und Staub und sie werden als rote Galaxien be-

zeichnet, da es in ihnen meistens nur ältere Sterne geringer Größe gibt, die rot leuchten. Es entstehen keine neuen Sterne und im Gegensatz zu Spiralgalaxien, deren Sterne geordnet in der Scheibe um das Zentrum kreisen, führen die Sterne ungeordnete Bewegungen in verschiedenen Ebenen durch.

Irreguläre Galaxien haben unregelmäßige Formen ohne Symmetrie und sind häufig als **Zwerggalaxien**, d. h. besonders kleine Galaxien, anzutreffen.

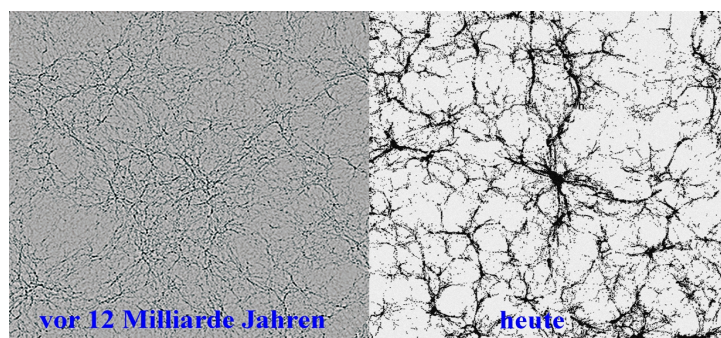
Neben Sternen, Planeten, Gas- und Staubwolken enthalten Galaxien noch zu 87% **Dunkle Materie**.

Das ist Materie, deren Gravitationskraft wirksam ist, die ansonsten aber in keiner Form ausgemacht werden kann, sie ist für uns „unsichtbar“. Das nebenstehende Bild zeigt in blau die Verteilung der dunklen Materie um eine Galaxie. Durch sie kreisen die Sterne in einer Spiralgalaxie unabhängig von der Entfernung zum Zentrum mit gleicher Geschwindigkeit um dieses. Außerdem befindet sich vermutlich in fast allen Galaxien im Zentrum ein **Schwarzes Loch**, d. h. ein Objekt auf engstem Raum mit sehr großer Masse (teilweise Millionen bis Milliarden Sonnenmassen) und daher einer extremen Gravitationskraft.



2. Von der Ursuppe zu Verdichtungen

Kurz bevor das Universum durchsichtig wurde, d. h. bevor sich atomarer Wasserstoff (ca. 75%) und Helium ca. 380 000 Jahre nach dem Urknall gebildet haben, bestand das Universum aus einem 3000 K heißen Brei aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Diese Ursuppe kann heute durch die Hintergrundstrahlung analysiert werden und aus ihr müssen irgendwann Galaxien entstanden sein. Eine genaue Analyse zeigt, dass diese Hintergrundstrahlung geringe Dichte- und Temperaturschwankungen im Bereich von 1/100000 zeigt. Allein mit diesen Schwankungen und der baryonischen Materie, mit der man die für uns zugängliche Materie aus Protonen, Neutronen und Elektronen bezeichnet, kann



man nicht erklären, dass sich aus dieser Suppe größere Gebiete mit höherer Dichte gebildet haben. Eine Erklärung ist nur durch die Anwesenheit von Dunkler Materie möglich. Computersimulationen zeigen, dass Dunkle Materie entsprechend nebenstehendem Bild durch ihre starke gravitative Wirkung im Laufe der Zeit eine netzartige Struktur mit Knoten hoher Dichte bildet. Die baryonische Materie in Form von Gas

folgt aufgrund der Gravitation dieser Dunklen Materie, was ebenfalls zu einer Verdichtung führt. Sie ist in die Knoten eingebettet und hier können sich Sterne und Galaxien bilden.

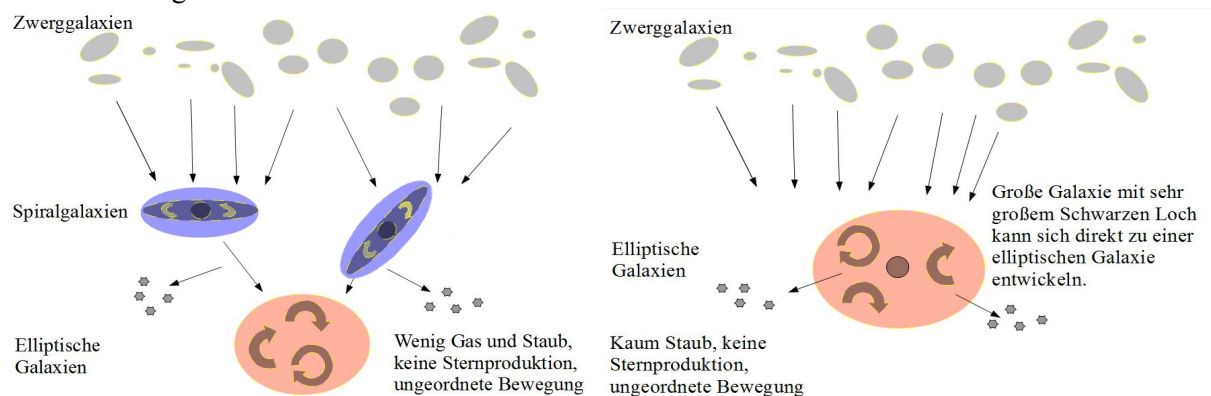
3. Von der Verdichtung zu den Galaxien

Galaxienentwicklung			
Galaxientyp	Elliptische G. + S0	Spiralgalaxien	Irreguläre G.
Vor 6 Milliarden Jahren	17,00%	31,00%	52,00%
Nahe Galaxien	18,00%	72,00%	10,00%

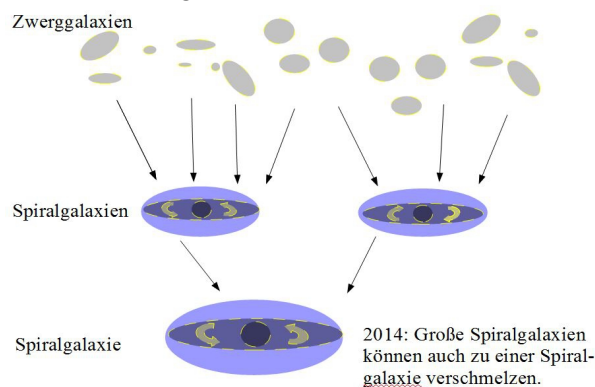
Betrachtet man die Entwicklung der Galaxien im Laufe der Jahre, dann stellt man entsprechend nebenstehender Tabelle fest, dass es heute im Vergleich zur Zeit vor 6 Milliarde Jahren, mehr Spiralgalaxien gegen-

über Irregulären Galaxien gibt. Da es sich bei den Irregulären Galaxien vorwiegend um Zwerggalaxien handelt, wird mit dieser Auswertung die Theorie unterstützt, dass Spiralgalaxien durch Verschmelzung von kleinen Zwerggalaxien entstanden sind. Dieses sog. Hierarchische Modell (von klein nach groß) wird auch durch Computersimulationen bestätigt.

Elliptische Galaxien können entstehen, wenn sich zwei etwa gleich große Spiralgalaxien begegnen und verschmelzen. Durch Gezeitenkräfte werden die geordneten Bahnen der Sterne in der Scheibe gestört, wodurch die Sterne schließlich den Kern in beliebigen Bahnebenen umkreisen. Außerdem führt die Verschmelzung zu einer verstärkten Sternentstehungsrate und dazu, dass Gas und Staub auch herausgeschleudert werden. Beides führt dazu, dass am Ende nur wenig Gas und Staub in der Galaxie vorhanden sind. Verschmelzungen fanden aufgrund der Galaxiendichte im früheren „kleineren Universum“ häufig statt.



Das Bild links zeigt eine Prinzipskizze zu diesem Sachverhalt. Es gibt allerdings noch ein zweites Modell zur Entstehung von elliptischen Galaxien, das rechts dargestellt ist. Dabei entsteht direkt aus vielen kleinen Galaxien eine elliptische, wobei die Größe des schwarzen Loches in der Galaxie dafür sorgt, dass durch ihre Rückwirkung in Form intensiver Strahlung aufgrund beschleunigter Materie die Sternentstehung unterbrochen wird und Gas und Staub herausgeschleudert wird.



Simulationen aus dem Jahr 2014 zeigen, dass die Verschmelzung von zwei gleich großen Spiralgalaxien nicht unbedingt zu einer elliptischen führen muss, auch das Entstehen einer großen Spiralgalaxie entsprechend dem nebenstehendem Bild ist möglich. Insgesamt gesehen wird die hier erfolgte Beschreibung zur Galaxienentstehung als Standardmodell angesehen. Man bezeichnet es bezüglich des Einflusses von Dunkler Materie auch als CMD (cold dark matter) Modell. Trotzdem sind aber noch viele Sachverhalte bezüglich der Galaxienentstehung nicht eindeutig geklärt.

4. Das Illustris - Projekt

Galaxien sind durch ihre Komplexität und Vielfalt Gebilde, deren Entstehung und Entwicklung daher nicht mehr allein mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten und entsprechenden Gleichungen, wie es z. b. bei der Sternentstehung und -entwicklung noch möglich ist, erklärt werden kann. Hier kommt man mit Computersimulationen und entsprechenden Programmen weiter. Das bisher umfangreichste Projekt diesbezüglich ist das Illustris - Projekt, bei dem mit 18 Milliarden Teilchen simuliert wird und ein Ausschnitt des Universums mit einer Kantenlänge von 350 Millionen Lichtjahren zugrunde gelegt wird. 8000 Computer rechneten rund 6 Monate, was einer Computerrechenzeit von 2000 Jahren entspricht, um die Entwicklung des Universums zu verdeutlichen. Diese Simulation zeichnet sich besonders dadurch aus, dass im Zeitrahmen von 12 Millionen Jahren nach dem Urknall bis zur heutigen Zeit die Entwicklung einschließlich der Entstehung der Galaxien berücksichtigt wurde. Am Ende entstanden 50000 Galaxien.

Nach Aussagen von Astrophysikern bestätigt die Simulation des Illustris - Projekt prinzipiell das hier beschriebene CMD Modell.

Erläuterungen und Simulationen zum Illustris – Projekt findet man unter:

<http://www.illustris-project.org/>

Eine ausführliche Beschreibung unter:

<http://arxiv.org/abs/1405.2921>