



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Max-Planck-Institut
für Radioastronomie



Die Geschichte der Sternentstehung im frühen Universum

F. Bertoldi, E. Kreysa, K.M. Menten

mit

C. Carilli, NRAO, Socorro/USA

Wann haben sich die Galaxien im frühen Universum gebildet, und wann sind in ihnen die Sterne entstanden? Diese sind fundamentale, offene Fragen der Kosmologie, deren Beantwortung wir uns mit grossen Schritten nähern.

Mit Hilfe leistungsstarker Teleskope vermögen wir heute Galaxien zu beobachten, deren Licht vor über 10 Milliarden Jahren abgestrahlt wurde, zu einer Zeit, als das Universum erst einige Milliarden Jahre alt war. In dieser Frühphase unserer Welt entstanden die ersten Galaxien und in diesen die ersten Sterne und massereichen Schwarze Löcher. Die hohe Galaxiendichte des noch kleinen Weltraums führte zu häufigen Kollisionen, durch welche kleine Galaxien zu grösseren Objekten wuchsen. Bei solchen Verschmelzungen und bei nahen Vorbeiflügen der Galaxien verursachen die Gezeitenkräfte im interstellaren Gas hohe Verdichtungen, und dadurch einen jeweils kurzen aber starken Anstieg der Sternentstehungsrate. Unklar ist, ob die meisten Sterne im Universum in solchen "Starbursts" wechselwirkender Galaxien, oder über lange Zeiträume in weniger spektakulärer Weise entstanden sind.

Um die Sternentstehungsgeschichte des Universums zu rekonstruieren, müssen in den beobachtbaren raum-zeitlichen "Scheiben" des Kosmos die dort vorhandenen Galaxienpopulationen repräsentativ erfasst werden, und zwar durch Beobachtungen in Spektralbereichen die Aufschluss über die instantane Sternentstehungsrate erlauben.

Neueste Beobachtungen mit wärmestrahlungsempfindlichen Bolometer-Kameras erlauben heute erstmalig einen ungetrübten Blick auf Starburst Galaxien und Quasare im frühen Universum. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse revolutionieren unser Verständnis seiner Sternentstehungsgeschichte.

Die extragalaktische Infrarot-Hintergrundstrahlung. — Die mit dem *Hubble Space Telescope* im Bereich des optischen ($0.2 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$) und nah-infraroten (NIR: $1 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m}$) Lichts gewonnenen tiefen Beobachtungen zeigen ein dichtes Meer entfernter Galaxien. Hätten wir einen ungetrübten Blick auf die Sternentstehungsgebiete dieser Galaxien, dann wäre die von den kurzlebigen, massereichsten und leuchtkräftigsten Sternen emittierte blaue und ultraviolette Strahlung ein gutes Mass für die dortige Sternentstehungsrate. Jedoch liegen die intensivsten Sternentstehungsgebiete meist tief eingebettet in von Staub verdunkelten Molekülwolken, die besonders die ultraviolette und optische Strahlung effektiv absorbieren. Die hellsten Sternentstehungsgebiete bleiben uns darum in optischen Aufnahmen weitgehend verborgen.

Tiefe Kartierungen im Mittel-Infrarot (MIR: $5 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$) Bereich mit dem *Infrared Space Observatory* (ISO), bei Millimeter und Submillimeter ($850 \mu\text{m} - 1200 \mu\text{m}$) Wellenlängen mit der SCUBA Bolometer Kamera am *James Clerk Maxwell Telescope* (JCMT) auf Hawaii und mit dem *Max-Planck Millimeter Bolometer* ("MAMBO" **Abb. 1**) am IRAM 30m Teleskop in Süd-Spanien zeigen ein Bild, das sich von den optischen Bildern wesentlich unterscheidet: weit weniger Objekte dominieren hier die erstmals räumlich aufgelöste Hintergrundstrahlung, die überwiegend von warmem Staub in entfernten Galaxien emittiert wird. Die fern-infrarote (FIR: $30 \mu\text{m} - 300 \mu\text{m}$) Hintergrundstrahlung, in der sich die thermische Emission warmen Staubs am deutlichsten zeigt, wurde erstmals 1996 in einer grossflächigen Durchmusterung des Himmels mit dem COBE Satelliten-Teleskop gemessen. Die nun mit weit besserer räumlicher Auflösung bei etwas längeren Wellenlängen produzierten SCUBA/MAMBO Karten zeigen, dass der von COBE nur diffus detektierte FIR Hintergrund aus einzelnen, unaufgelösten Quellen besteht, die meist mit weit entfernten und optisch extrem schwachen Galaxien identifiziert werden können.

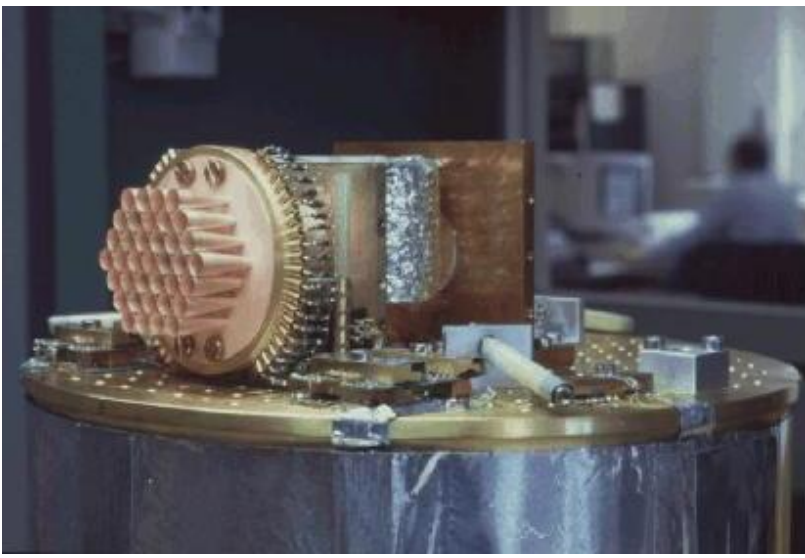


Abbildung 1: Das Max-Planck Millimeter Bolometer "MAMBO", eine am MPIfR entwickelte 37-Element Bolometer Kamera, die empfindlich ist für Strahlung mit Wellenlängen zwischen 1.0 und 1.4 mm. Der für die Aufnahmen geöffnete Kryostat zeigt die Hörner (5 mm Durchmesser), die die einfallende Strahlung zu den auf 0.3 K gekühlten Halbleiterdetektoren führen.

Wenn der FIR/mm Hintergrund von Sternentstehungsgebieten im frühen Universum stammt, dann ist der Energiefluss dieser Strahlung so gewaltig, dass sie der Entstehung eines grossen Teils aller je im Universum entstandenen Sterne zuzuschreiben wäre. Die FIR/mm Hintergrundstrahlung ist somit das Echo der Sternentstehungsgeschichte unseres Universums.

Entfernung der FIR/mm Hintergrundquellen. — Ziel intensiver astronomischer Beobachtungen ist es heute eine signifikante Anzahl von FIR/mm Hintergrundquellen zu lokalisieren, um dann ihre spektralen Eigenschaften und Rotverschiebungen zu bestimmen. Bislang sind etwa zwei Dutzend Hintergrundquellen bekannt, deren Rotverschiebung, z , näherungsweise aus dem Verhältnis der mm zu Radio ($\lambda = 20$ cm) Flüsse abgeschätzt werden kann, darunter 4 Quellen, deren Rotverschiebungen auch genauer durch spektroskopische Messungen bestimmt wurden.

Bei der Abschätzung von z aus dem Flussverhältnis bei 1.2 mm oder 850 μm ($\nu = 250 - 350$ GHz) und 20 cm ($\nu = 1.4$ GHz) wird ausgenutzt, dass das typische Spektrum einer von Sternentstehung dominierten Galaxie einen flachen, abfallenden Verlauf bei niedrigen Radiofrequenzen zeigt, $F_\nu \propto \nu^{-0.7}$, und einen steilen Anstieg bei $\nu > 100$ GHz, wo typischerweise $F_\nu \propto \nu^{3.5}$ (**Abb. 2**). Das Flussverhältnis $F_\nu(350 \text{ GHz})/F_\nu(1.4 \text{ GHz})$ nimmt daher stark mit steigender Rotverschiebung zu, und somit kann z aus dem gemessenen Flussverhältnis abgeschätzt werden.

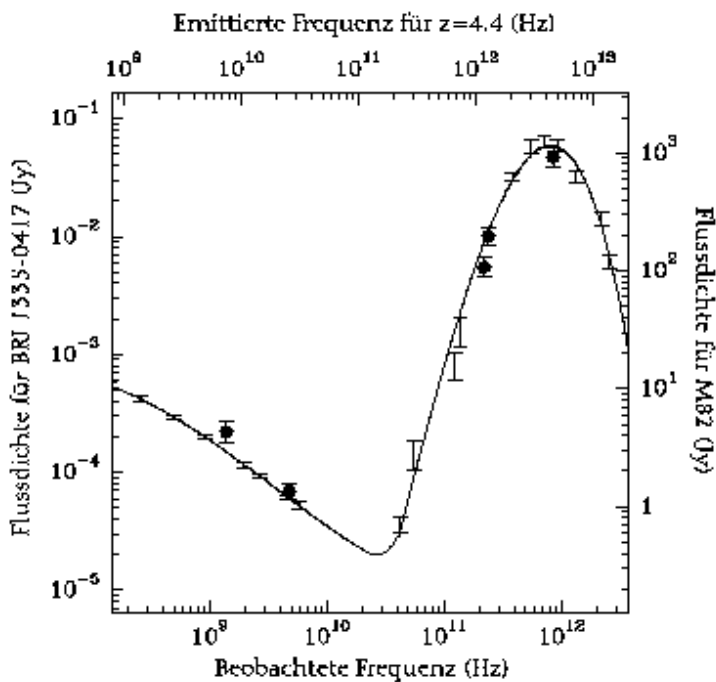


Abbildung 2: Spektrale Energieverteilung einer typischen nahen ($z \approx 0$) Starburst Galaxie, M82. Bei niedrigen Frequenzen dominiert die nicht-thermische Emission heissen, ionisierten Gases das relativ flache Spektrum, wohingegen im mm bis FIR-Bereich die thermische Emission des warmen Staubs ein Schwarzkörper-ähnliches Spektrum erzeugt. Die untere Abzisse zeigt die Frequenz des auf $z = 4.4$ verschobenen Spektrums des Objekts 1335-0417.

Obwohl diese Methode der Bestimmung von z von der angenommenen "typischen" spektralen Energieverteilung abhängt, erlauben die gewonnenen Werte eine erste Bestimmung der Entfernungsverteilung der FIR/mm Hintergrundquellen (**Abb. 4**).

Das mit abnehmender Wellenlänge steil ansteigende Spektrum im mm und sub-mm Bereich führt dazu, dass der bei einer Wellenlänge gemessene Fluss eines Objekts gegebener Leuchtkraft fast unabhängig von seiner Entfernung ist (**Abb. 3**). Die Verschiebung des thermischen Spektrums zu längeren Wellenlängen und die damit verbundene Erhöhung der Flussdichte kompensiert die durch zunehmende Entfernung geometrisch verdünnte Strahlungsintensität. Diese Eigenschaft erlaubt bei mm und sub-mm Wellenlängen eine

nahezu komplette Bestandsaufnahme zwischen $z \approx 1$ und $z \approx 5$ aller Objekte die heller sind als das jeweils gegebene Detektionslimit.

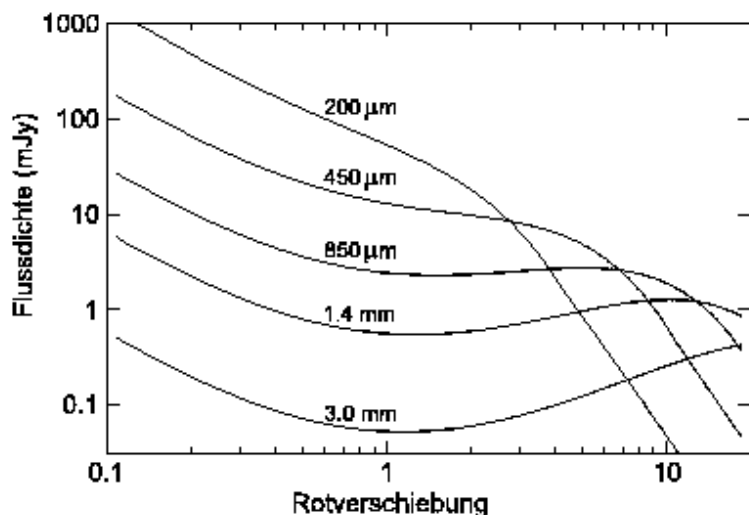


Abbildung 3: Die Flussdichte als Funktion der Rotverschiebung einer Galaxie mit einer FIR Leuchtkraft vergleichbar der hellsten Starburst Galaxien im lokalen Universum, $2 \cdot 10^{12}$ Sonnenleuchtkräfte. Die einzelnen Kurven messen die Flussdichte bei verschiedenen Wellenlängen. Bei mm und sub-mm Wellenlängen ist der Quellenfluss fast unabhängig von der Rotverschiebung zwischen $z \approx 1$ und 5 (Abb. aus Hughes 2000).

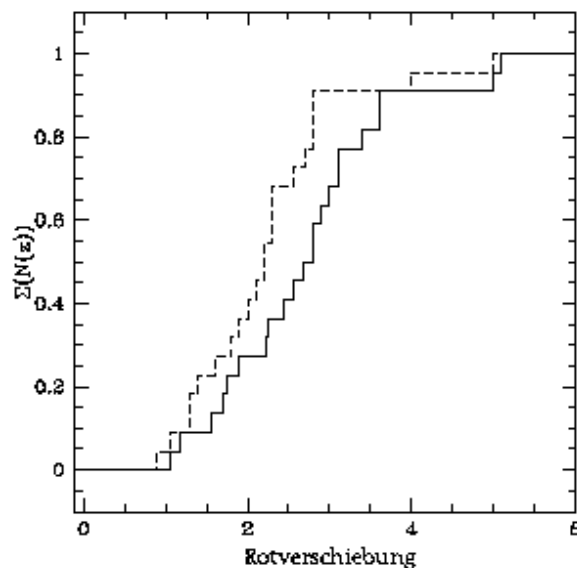


Abbildung 4: Die kumulative Rotverschiebungsverteilung von 22 FIR/mm Hintergrundquellen, für die Rotverschiebungen spektroskopisch oder vom mm-zu-Radio Flussverhältnis abgeleitet werden können. Die beiden hier dargestellten Verteilungen unterscheiden sich im zur Kalibrierung gewählten Satz von Daten naher Galaxien. Der Unterschied beider Kurven zeigt die Unsicherheit dieser indirekten Bestimmung der Rotverschiebung.

Unter der Annahme, dass Sternentstehung - und nicht leuchtende Schwarze Löcher in Aktiven Galaxienkernen (AGN) - die Emission der FIR/mm Hintergrundquellen dominiert, zeigt die abgeleitete Rotverschiebungsverteilung (**Abb. 4**), dass die Mehrzahl der FIR/mm Hintergrundquellen bei $z \approx 2$ bis 4 liegen. Ein grosser Teil aller Sterne im Universum scheinen somit ca. 1 bis 3 Milliarden Jahre nach dem Urknall in Objekten entstanden zu sein, die enorm hohe Sternentstehungsraten zeigen und damit auch sehr massereich sein müssen.

Die gemessene Verteilung der Rotverschiebungen dieser hellen, massereichen Objekte mag auch Aufschlüsse auf den Ablauf der Strukturentstehung im Universum geben. Erstaunlicherweise stimmt die in **Abbildung 5** dargestellte Verteilung sehr gut mit einfachsten analytischen Entstehungsszenarien von ca. 10^{12} Sonnenmassen grossen Objekten - also den massereichsten Galaxien - in einem von kalter dunkler Materie dominierten Universum überein.

Helligkeitsverteilung der FIR/mm Hintergrundquellen. — **Abbildung 5** zeigt die Helligkeitsverteilung der bekannten FIR/mm Hintergrundquellen. Um eine gute Statistik auch der helleren Objekte zu erhalten, müssen möglichst grosse, repräsentative Himmelsabschnitte tief kartiert werden. Die ersten solchen "blank field surveys" wurden mit SCUBA bei $850 \mu\text{m}$ erstellt. In einer beobachteten Fläche von insgesamt ca. 100 Quadratbogenminuten wurden dadurch einige Dutzend Quellen entdeckt. Viele der SCUBA Beobachtungen zielten auf dichte Galaxienhaufen, um die Helligkeitsverstärkung auszunutzen, die durch den Gravitationslinseneffekt dieser massiven Massenhäufungen verursacht wird: die Helligkeit von schwachen, hinter dem Galaxienhaufen liegenden Quellen, wird durchschnittlich um einen Faktor 2 bis 3 verstärkt. Galaxienhaufen wirken somit wie Lupen, die einen tieferen Blick in den schwachen FIR/mm Hintergrund erlauben. Für die Quellenstatistik sind die Flüsse solcher Quellen allerdings unsicher, da der Linsenverstärkungsfaktor nur ungenau bestimmbar ist.

Diese Beobachtungen zeigten, dass die Helligkeitsverteilung der FIR/mm Quellen bis zu einer $850 \mu\text{m}$ Flussdichte von ca. 5 mJy ($1 \text{ mJy} = 10^{-29} \text{ W m}^{-2} \text{ Hertz}^{-1}$) näherungsweise einem Potenzgesetz folgt, dass sich bei grösseren Flüssen aber ein Abknicken der Verteilung andeutet (**Abb. 5**). Jedoch sind die von SCUBA abgedeckten Flächen zu klein um Flächendichten von Quellen heller als 5 mJy signifikant messen zu können. Neuere tiefe Beobachtungen mit MAMBO bei 1.2 mm zeigen, dass der aus SCUBA Daten angedeutete Knick bei 10 mJy nicht so ausgeprägt sein kann wie die in **Abbildung 5** dargestellten bisherigen Messungen vermuten lassen.

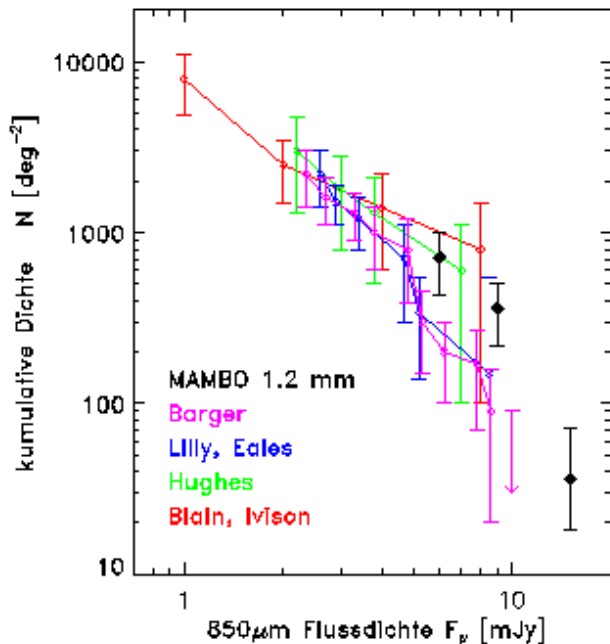


Abbildung 5: Die kumulative Helligkeitsverteilung (Zahl der Objekte pro Fläche heller als ein gegebener Fluss) der Quellen aus SCUBA 850 μm und MAMBO 1.2 mm Kartierungen, wobei die Flüsse der MAMBO Quellen mit einem Faktor 3 multipliziert wurden unter der Annahme eines typischen spektralen Verlaufs $F_\nu \propto \nu^{3.5}$ zwischen 850 μm und 1.2 mm.

Die hellsten Hintergrundquellen: Starbursts oder Quasare? — Besonders die hellsten Quellen geben wichtige Aufschlüsse über die Geschichte der Struktur- und Sternentstehung im frühen Universum. Galaxien bei Rotverschiebungen zwischen 2 und 4 mit 850 μm Flussdichten von 10 bis 20 mJy (entsprechend 3 bis 6 mJy bei 1.2 mm) haben eine gesamte Infrarot-Leuchtkraft von ca. 10^{13} Sonnen-Leuchtkräften, was Sternentstehungsraten von über 1000 Sonnenmassen pro Jahr implizieren würde, käme diese Helligkeit ausschliesslich von jungen Sternen. Solche Sternentstehungsraten sind zehn mal grösser als die in den hellsten Starburst-Galaxien im nahen Universum auftretenden und zudem über 10 mal höher als die Raten, die aus den blauen Helligkeiten optisch beobachteter Galaxien abgeleitet werden. Die ungewöhnlich hellen FIR/mm Quellen reflektieren scheinbar die speziellen Bedingungen der Stern- und Galaxienentstehung im frühen Universum. Wegen der bislang kleinen Zahl der beobachteten hellsten FIR/mm Quellen ist es jedoch bislang unklar, ob diese Objekte starke Starburst Galaxien sind, linsenverstärkte schwächere Starbursts, oder Quasare, in denen ein akkretierendes massereiches Schwarzes Loch die grossen Energien liefert. Bestimmungen der Häufigkeit sowie der spektralen und morphologischen Eigenschaften der hellsten FIR/mm Quellen sind die wichtigsten fehlenden Elemente im Puzzle der Sterne- und Galaxienentstehungsgeschichte des Universums.

Tiefe MAMBO Kartierungen. — Beobachtungen mit MAMBO am IRAM 30 m Teleskop zielen darauf, Häufigkeit und Eigenschaften der hellsten mm-Hintergrundquellen zu messen. Im Unterschied zu SCUBA können mit MAMBO relativ grosse Flächen am Himmel mit einer Empfindlichkeit kartiert werden, die es erlaubt eine grössere Anzahl der helleren mm-Hintergrundquellen zu entdecken.

In den Wintern 1998/1999 und 1999/2000 wurden von Wissenschaftlern des MPIfR mit MAMBO drei Felder kartiert mit einer Gesamtfläche von ca. 300 arcmin² bei einem Detektionslimit von ~ 2 mJy, was einem Fluss von ca. 6 mJy bei 850 μm entspräche. Eines dieser Felder beinhaltet den $z = 4.7$ Quasar BR1202-0725, den hellsten bekannten Quasar bei $z > 3$. Eine vorläufige Auswertung dieser ca. 100 arcmin² grossen, im Winter 1999/2000 erstellten MAMBO Karte (**Abb. 6**) zeigt neben BR1202-0725 über ein Dutzend signifikante Quellen, wovon die zwei hellsten einen 1.2 mm Fluss von ca. 6 mJy aufweisen.

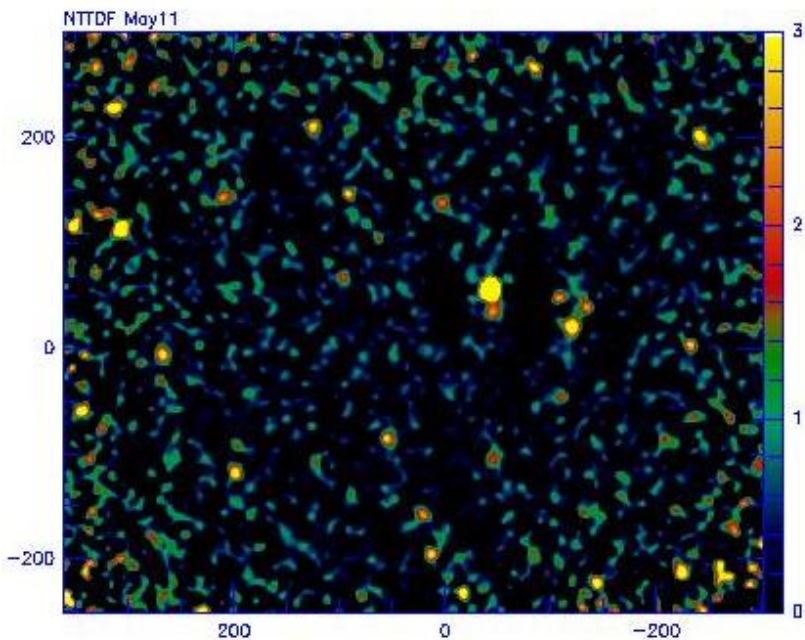


Abbildung 6: MAMBO 1.2 mm Kartierung um den 16 mJy hellen $z = 4.7$ Quasar BR1202-0725. Die Flussdichte ist farblich kodiert, mit mJy als Einheit der Farbskala und Bogensekunden als Koordinateneinheit. Das Rauschniveau steigt von der Mitte der Karte (RMS ≈ 0.4 mJy) zum Rand hin (RMS ≈ 0.8 mJy). Über ein Dutzend helle Quellen sind erkennbar.

Auch wenn Quellen mit 1.2 mm Flüssen von über 3 mJy selten sind, zeigen die MAMBO Beobachtungen, dass diese hinreichend häufig sind um signifikante Quellenstatistik bei äquivalenten 850 μm Flüssen von 5 bis 20 mJy zu erlangen (siehe **Abb. 5**). Die drei MAMBO Felder werden die bisherige Anzahl von FIR/mm Hintergrundquellen mindestens verdoppeln und verbessern damit insbesondere die Statistik am hellen Ende der Leuchtkraftverteilung.

Die Geschichte der Sternentstehung. — Aus der bei Millimeterwellenlängen gemessenen Helligkeit einer Quelle kann bei Annahme einer typischen Staubtemperatur (ca. 40 K) eine Gesamtleuchtkraft und mittels einer typischen Sternmassenverteilung eine Sternentstehungsrate berechnet werden, die dieser Leuchtkraft entspricht. Für ein gegebenes Rotverschiebungsintervall lässt sich dann aus der Zahl und Helligkeit der hierin beobachteten Galaxien eine räumlich gemittelte Sternentstehungsrate bestimmen. Die so berechnete Rate als Funktion der Rotverschiebung skizziert die zeitliche Entwicklung der Sternentstehung im Universum (**Abb. 7**).

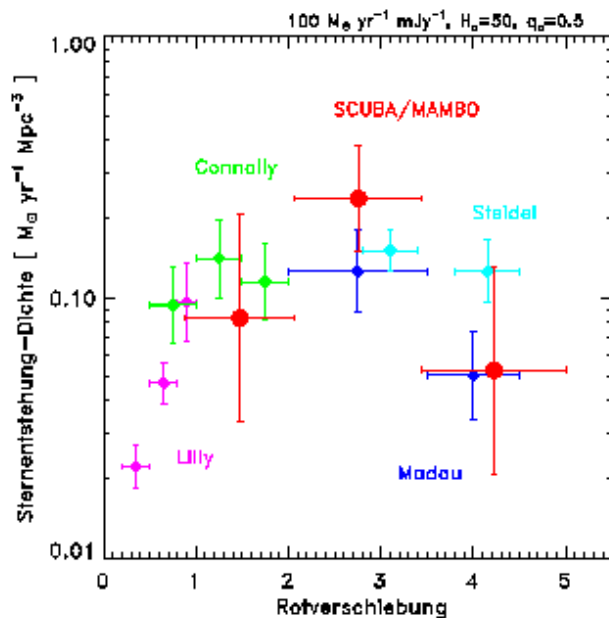


Abbildung 7: Die Geschichte der Sternentstehung im Universum: die räumlich gemittelte Sternentstehungsrate als Funktion der Rotverschiebung, die der Distanz und somit dem Alter der Objekte entspricht. Bis auf die SCUBA/MAMBO Punkte basieren alle Messpunkte auf optischen Beobachtungen, die mit einem unsicheren Extinktions-Korrekturfaktor 5 multipliziert wurden. Das Alter der Universums bestimmt sich aus der Rotverschiebung zu $\approx 13 (1+z)^{-1.5}$ Milliarden Jahre.

Die ersten Versuche, diese Kurve bei hohen ($z > 1$) Rotverschiebungen zu bestimmen, basierten auf Abschätzungen der Sternentstehungsraten aus den (in ihrem Ruhesystem) blauen Helligkeiten der Galaxien, die bei vernachlässigbarer Extinktion gut die jungen Sternpopulationen reflektieren würden. Die Bestimmung der Flächendichte entfernter Galaxien im Hubble Deep Field beispielsweise liess ein Maximum der mittleren Sternentstehungsrate des Universums bei $z \approx 1.5$ vermuten. Die ersten Messungen des sub-mm Hintergrunds durch SCUBA zeigten jedoch, dass die leuchtkräftigsten Galaxien den optischen Aufnahmen vollkommen entgehen. Die nun durch SCUBA und MAMBO Messungen bestimmte Sternentstehungsgeschichte zeigt einen Anstieg der Sternentstehungsrate mit zunehmender Rotverschiebung bis mindestens $z = 3$, und eine mittlere Sternentstehungsrate bei $z = 3$, die einen Faktor >3 über der optisch bestimmten Rate liegt. Erst wenn die optisch bestimmten Raten auf Extinktion korrigiert werden zeigen sich diese mit den mm Messungen konsistent. Da der optische Korrekturfaktor jedoch nicht für einzelne Galaxien individuell bestimmbar ist, sind alle Bestimmungen der Sternentstehungsgeschichte des Universums aus optischen Daten problematisch. Diese ist präziser durch mm und FIR Beobachtungen messbar. Da die Zahl der dazu verfügbaren FIR/mm Quellen noch sehr klein ist, sind hier in den nächsten Jahren grosse Fortschritte zu erwarten.

Vorstoss in die Vergangenheit. — Eine genaue Auswertung der im letzten Winter gemessenen MAMBO und SCUBA Karten wird die Zahl der insgesamt bekannten sicheren FIR/mm Hintergrundquellen auf über 50 verdoppeln. Nachfolgebeobachtungen mit den dazu nötigen grossen Teleskopen, z.B. dem Keck 10 m oder dem 8 m Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO), sowie tiefe 20 cm Radiobeobachtungen mit dem Very Large Array (VLA) dürften die Zahl der optischen und nah-infrarot Identifikationen signifikant erhöhen und anschliessende genaue Bestimmungen der Rotverschiebung ermöglichen. Damit könnte sich in naher Zukunft klären, um welche Art von Objekten es sich bei den FIR/mm Quellen handelt, wie sich die mittlere Sternentstehungsrate im Universum bei sehr hohen Rotverschiebungen ($z > 3$) ändert, und auch ob die räumliche Verteilung der Quellen Aufschlüsse über die gross-skalige Strukturevolution im Frühen Universum erlaubt.

Im Winter 2000/2001 wird ein erweitertes 117-Element MAMBO am IRAM 30 m Teleskop noch grossflächigere Kartierungen erlauben und damit eine wesentliche Verbesserung der Statistik der stärksten FIR/mm Hintergrundquellen ermöglichen. In zwei bis fünf Jahren dürfte die Verfügbarkeit neuer oder verbesserter Instrumente der Erforschung der entferntesten Galaxien schliesslich einen signifikanten Schub geben. Das VLA wird nach der Erneuerung seiner Empfänger erheblich empfindlicher und damit in der Lage sein, die Radioemission aller entdeckten FIR/mm Quellen zu detektieren und somit deren Positionen genau zu bestimmen und die Rotverschiebungen abzuschätzen. Das in Kürze auf 6 Antennen erweiterte IRAM Plateau de Bure Interferometer wird die FIR/mm Hintergrundquellen auf einen Bruchteil einer Bogensekunde lokalisieren, und zudem die Detektion von Molekülen darin erlauben. Ein vom MPIfR geplantes 12 m Submillimeter Teleskop auf dem 5000 m hohen Chajnantor Plateau in der chilenischen Atacama Wüste wird tiefe Kartierungen im atmosphärischen 350 μ m Fenster erlauben, bei einer Wellenlänge wo die FIR/mm Hintergrundquellen zehn mal stärker sind als bei 1.2 mm. Und ab ca. 2005 wird das ALMA 64-Antennen Submillimeter Interferometer auf dem gleichen Standort weit tiefer und mit höchster Auflösung in die Frühgeschichte der Galaxien- und Sternentstehungsgeschichte unseres Universums dringen.

Max-Planck-Gesellschaft Jahrbuch 2000. Copyright © 2000 Max-Planck-Institut f. Radioastronomie.

▲ MPIfR-Home

ute_at_mpifr-bonn.mpg.de