

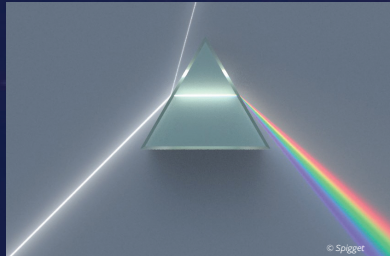
COLD HARMONIES



Die Wissenschaft hinter dem Projekt

DIE SPEKTRALE DIMENSION

Weißes Licht besteht aus Strahlung mit verschiedenen Wellenlängen des sichtbaren Bereiches. Mit Hilfe eines Prismas kann man die unterschiedlichen Wellenlängen wie in einem Regenbogen räumlich trennen. Dann erkennen wir nebeneinander einzelne Farben, die sonst überlagert sind. Es entsteht ein Spektrum.



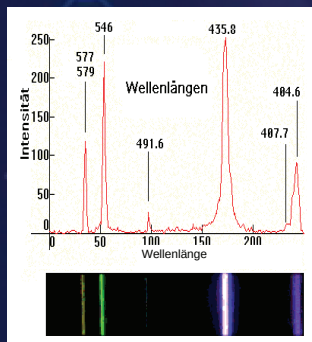
Aufspaltung von weißem Licht in Spektralfarben durch ein Prisma

Das Spektrum, das heißt die unterschiedliche Helligkeit der verschiedenen Farben, ist dabei abhängig von der Lichtquelle. Im Sonnenlicht sind alle sichtbaren Spektralfarben enthalten und der grüne Anteil ist am hellsten. Andere Sterne senden uns zum Beispiel Licht, bei dem kürzere Wellenlängen heller sind; sie erscheinen uns blauer, oder bei dem längere Wellenlängen heller sind; sie erscheinen uns rötler. Heute wissen wir, dass uns dies Auskunft über die Temperatur der Sterne gibt. Das Spektrum liefert der Wissenschaft damit einen Zugang zu Eigenschaften der Lichtquelle, die klar über die Helligkeitsinformation hinausgehen.

WIE WIRD EIN SPEKTRUM GEMESSEN?

Ein Spektrum kann man nicht nur mit einem Prisma erzeugen. Selbst die Natur kann das. Die Reflektion des Sonnenlichtes in vielen Wassertropfen erzeugt einen Regenbogen. Eine Technik, die in vielen astronomischen Instrumenten benutzt wird, sind Reflexionsgitter.

Die Funktion können wir mit einer einfachen CD nachvollziehen. Sie wirkt aufgrund der Metallbeschichtung mit schmalen Rillen (0,0016 mm) wie ein Reflexionsgitter. Licht wird an diesen Rillen reflektiert und wellenlängenabhängig gebeugt, wodurch es zu einer Überlagerung der Lichtwellen kommt. Je nach Blickrichtung wird dabei Licht einer bestimmten Wellenlänge verstärkt, während die anderen Wellenlängen sich gegenseitig auslöschen. Dort sehen wir wieder die Farbe dieser Wellenlänge. Die CD trennt weißes Licht in Spektralfarben.

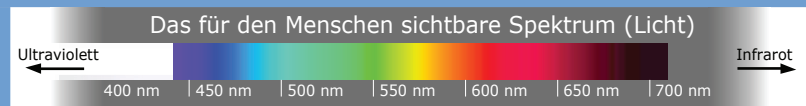


Laborspektrometer arbeiten häufig nach dem gleichen Prinzip. Die aufgefächerten Wellenlängen des einfallenden Lichts können dabei detailliert analysiert werden. Als quantitative Darstellung wird dann die Helligkeit als Funktion der Wellenlänge ausgegeben.

Helligkeitsspektrum einer Quecksilberdampf-Gaslampe im Bereich des sichtbaren Lichtes. Das Spektrum von Quecksilber besteht aus mehreren Spektrallinien im sichtbaren Bereich.

“ANDERES” LICHT

Sonnenlicht enthält auch Wellenlängen, die wir nicht mit unserem Auge wahrnehmen können. Im langwelligeren Bereich liegt die Infrarotstrahlung, welche wir als Wärme wahrnehmen. Kurzwelliger ist die UV-Strahlung, welche in Hautzellen Sonnenbrand und Krebs verursachen kann. Das gesamte Spektrum enthält noch viele andere Wellenlängenbereiche.



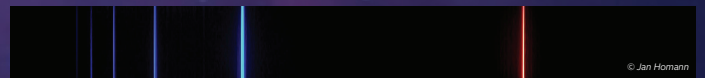
Quelle/Anwendung/Vorkommen	Höhenstrahlung	Gammastrahlung	harte-Röntgenstrahlung	mittlere-Röntgenstrahlung	weiche-Röntgenstrahlung	UV-C/B/A	Infrarotstrahlung	Terahertzstrahlung	Radar	MW-Herd	UHF	UKW	Mittelwelle	hoch- und niederfrequente Wechselströme
						Ultraviolettstrahlung								
Wellenlänge in m	1 fm	1 pm	1 Å	1 nm			1 µm		1 mm	1 cm	1 m		1 km	1 Mm

Elektromagnetisches Spektrum

Aber nicht nur Sterne wie die Sonne senden Licht aus, sondern jedes Objekt im Universum. Heißes intergalaktisches Gas sendet zum Beispiel hochenergetische Röntgenstrahlung aus und auch Moleküle in Wolken mit Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt strahlen noch – allerdings bei Radiowellenlängen. Kaltes Gas kann man am besten im fernen Infrarot und Mikrowellenbereich beobachten.

DAS LEUCHTEN DER GASE

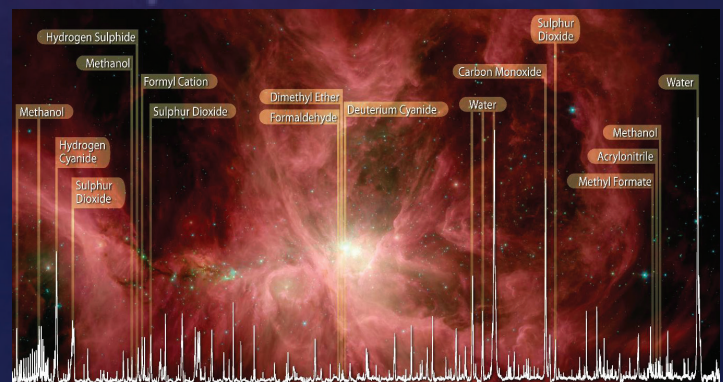
Während das Licht der Sonne oder einer traditionellen Glühlampe fast alle Spektralfarben enthält, strahlen Gase nur bei wenigen Wellenlängen. Das Spektrum besteht aus diskreten Linien. Diese Linien wurden im Jahre 1814 von Joseph Fraunhofer entdeckt. Jedes chemische Element weist ganz charakteristische Linien auf, bei denen es Licht absorbieren und emittieren kann. Die Wellenlängen dieser Spektrallinien sind charakteristisch für das jeweilige Element. Sie liefern einen spektralen “Fingerabdruck” anhand dessen man es identifizieren kann.



Linienpektrum im Bereich des sichtbaren Lichtes (300-700 nm) Die Spektrallinien bei 389, 397, 410, 434, 486 und 656 nm zeigen, dass die untersuchte Probe ausschließlich Wasserstoffatome enthält.

SPEKTROSKOPIE IN DER ASTROPHYSIK

In den Spektren von interstellaren Wolken ist die Emission verschiedenster Gas-moleküle überlagert. Sie können aus hunderttausenden Linien bestehen. Daraus alle Bestandteile des Gases zu identifizieren ist ein riesiges Puzzle. Nach der Zuordnung können wir dann aus den gemessenen Helligkeiten der Linien auch die Menge und Temperatur des Gases bestimmen.



Das Mikrowellenspektrum aus Orion-KL zeigt eine Überlagerung von Linien vieler verschiedener Moleküle.



COLD HARMONIES



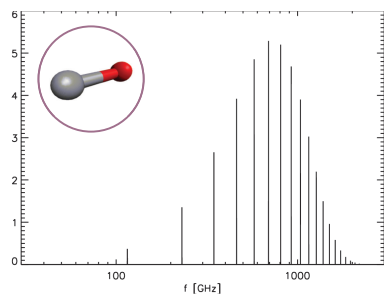
Die Wissenschaft hinter dem Projekt

DER "KLANG" DER MOLEKÜLE

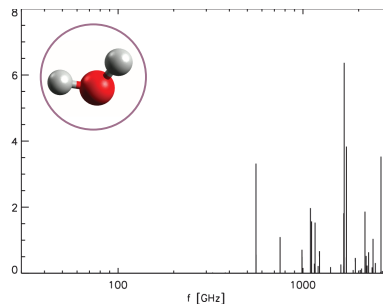
Jedes Molekül besitzt ein charakteristisches Spektrum diskreter Frequenzen, bei denen es strahlen und absorbieren kann. Umgekehrt kann man aus dem Verhältnis der Frequenzen zueinander die Molekülstruktur bestimmen. So besitzen einfache lineare Moleküle z.B. ein harmonisches Spektrum im Radiobereich.

Dies ist vergleichbar mit der musikalischen Akustik, die auch durch diskrete Frequenzen gekennzeichnet ist. Aus dem Verhältnis der Frequenzen zueinander können wir Akkorde und Instrumente unterscheiden.

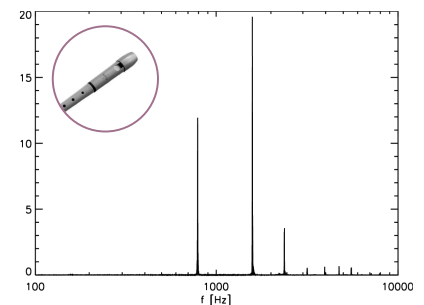
Daraus entstand die Idee, die Radiofrequenzen der Moleküle in hörbare Frequenzen zu übersetzen, um aus dem Klang intuitiv die Art, Anzahl und Temperatur der Moleküle zu bestimmen.



Radio-Spektrum von Kohlenmonoxid (CO) bei einer Temperatur von 120K. Die regelmäßigen Abstände zeigen ein harmonisches Spektrum.



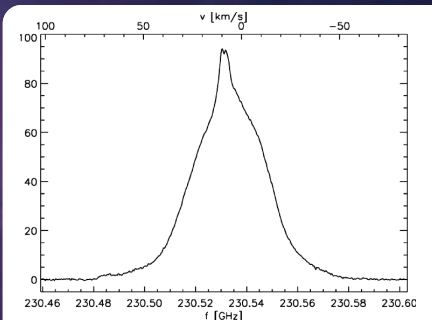
Das Radio-Spektrum von Wasser (H₂O, auch 120K) erscheint durch die geknickte Struktur des Moleküls sehr unregelmäßig.



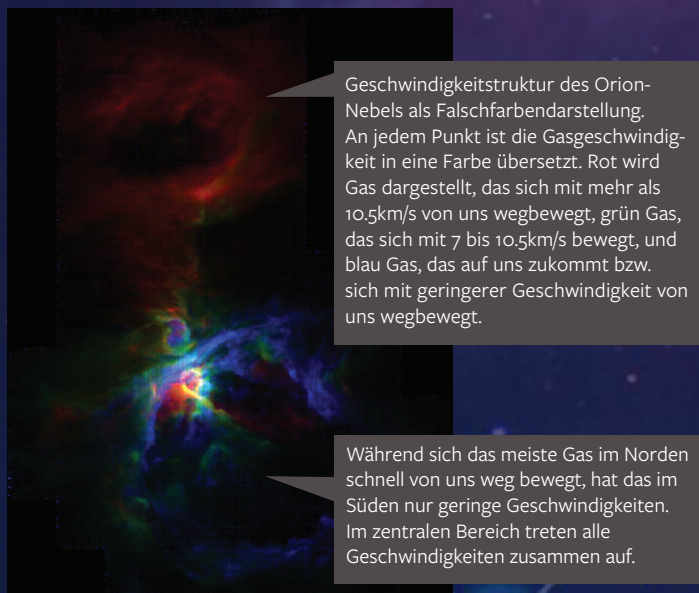
Das Spektrum eines "g" auf der Blockflöte. Man erkennt harmonische ganzzahlige Vielfache der Frequenzen des Grundtons wie beim Kohlenmonoxid.

DIE GASGESCHWINDIGKEIT

Neben der Molekülstruktur kann aus dem beobachteten Spektrum auch die Geschwindigkeit der Moleküle abgeleitet werden. Dabei hilft der Doppler-Effekt. 1842 erklärte Christian Andreas Doppler Farbänderungen von Sternen mit deren Bewegung. Vor einem bewegten Sender werden alle Wellen gestaucht, die Wellenlänge wird kürzer, ein ruhender Empfänger empfängt ein Signal höherer Frequenz. Hinter dem bewegten Sender wächst die Wellenlänge, so dass die beobachtete Frequenz tiefer ist. Das Radiosignal unserer Moleküle erlaubt es damit, die Geschwindigkeit des Gases im Nebel zu berechnen. Da die Strahlungsfrequenz jeder Moleküllinie genau bekannt ist, können alle Abweichungen davon direkt in Gasgeschwindigkeiten übersetzt werden. In den *Cold Harmonies* wird der gleiche Effekt benutzt, indem die Lautsprecher mit einer veränderlichen Geschwindigkeit bewegt werden. In diese geht die Gasgeschwindigkeit im Orion-Nebel direkt ein.



Hochaufgelöstes Spektrum der zweiten CO-Linie bei Orion-KL. Hier sieht man statt einer scharfen Linie eine Überlagerung vieler Frequenzen. Auf der oberen Achse sind diese in Geschwindigkeiten übersetzt. An einer Stelle des Nebels gibt es damit sowohl Gas, das sich mit fast 50km/s von uns wegbewegt, als auch solches, das mit ähnlicher Geschwindigkeit auf uns zukommt. Dies weist auf eine Explosion hin, deren Ursprung wir leider noch nicht kennen.



Geschwindigkeitsstruktur des Orion-Nebels als Falschfarbendarstellung. An jedem Punkt ist die Gasgeschwindigkeit in eine Farbe übersetzt. Rot wird Gas dargestellt, das sich mit mehr als 10,5km/s von uns wegbewegt, grün Gas, das sich mit 7 bis 10,5km/s bewegt, und blau Gas, das auf uns zukommt bzw. sich mit geringerer Geschwindigkeit von uns wegbewegt.

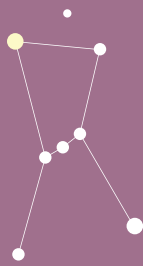
Während sich das meiste Gas im Norden schnell von uns weg bewegt, hat das im Süden nur geringe Geschwindigkeiten. Im zentralen Bereich treten alle Geschwindigkeiten zusammen auf.

DIE GROSSEN FRAGEN

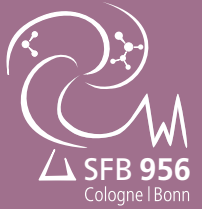
Im Sonderforschungsbereich 956 „Bedingungen und Auswirkungen der Sternentstehung“ an der Universität zu Köln wird durch Beobachtungen der interstellaren Moleküle an der Beantwortung dieser Fragen gearbeitet:

- Welche chemischen Reaktionen sind eigentlich im Weltall möglich?
- Bilden sich die organischen Moleküle und das Wasser, die Leben auf der Erde ermöglicht haben, schon in interstellaren Wolken?
- Sind aus bestimmten Molekülen bestimmte Bedingungen in den Wolken ablesbar?
- Kollabiert das Gas im Nebel derzeit unter seinem Eigengewicht zu neuen Sternen oder wird es von den schon vorhandenen weggeblasen?
- Wie entstehen Gaswolken wie der Orion-Nebel?
- Unter welchen Bedingungen könnte sich heute so etwas wie das Sonnensystem wieder bilden?

Das Projekt *Cold Harmonies* wird im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 956 im Teilprojekt Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt und gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 184018867.



COLD HARMONIES



Die Wissenschaft hinter dem Projekt

GROSSRÄUMIGE KARTIERUNG

Erst in den letzten Jahren wurde es möglich, ganze Spektren in größeren Bereichen des Himmels aufzunehmen. Einer der größten existierenden Datensätze, an dem hunderte Wissenschaftler mitgearbeitet haben, deckt den Orion-Nebel, eine bekannte Sternentstehungsregion im Sternbild des Orion ab. Bei optimalen Beobachtungsbedingungen kann man Teile des Nebels selbst mit bloßem Auge am Nachthimmel erkennen, die ganze Ausdehnung des Nebels entfaltet sich aber erst im Teleskop und bei Wellenlängen jenseits des sichtbaren Lichtes.

Kartiert wurde der Nebel in zahlreichen Spektrallinien einzelner Atome, Moleküle und Ionen. Daneben gibt es inzwischen Aufnahmen von Kontinuumsstrahlung in einzelnen Wellenlängenbereichen, die sich vom sichtbaren Licht über Infrarotstrahlung bis in den Radiobereich erstrecken. Die Kontinuumsstrahlung im Infrarotbereich wird dabei von interstellarem Staub ausgesandt, der zusammen mit den Molekülen im Nebel eingebettet ist. Aus dem Verhältnis der Strahlung bei verschiedenen Wellenlängen kann man die Temperatur von Gas und Staub bestimmen.



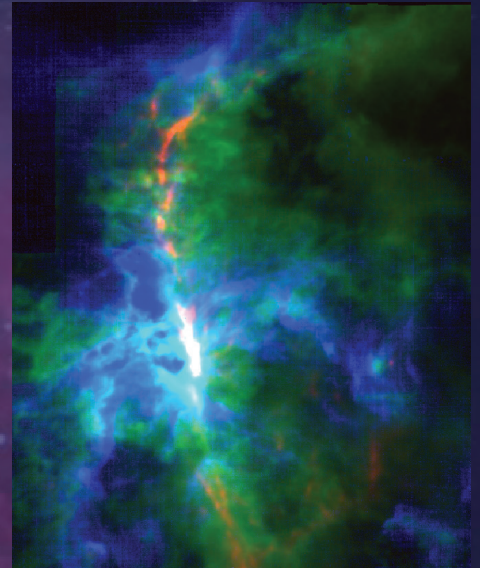
Das Stratosphärenobservatorium SOFIA musste allein 42 Stunden beobachten, um eine einzelne Spektrallinie ionisierten Kohlenstoffs in der Orion-Wolke zu kartieren.



Die untersuchte Region des Orion-Nebels im sichtbaren Licht, aufgenommen am NOAO der University of Toledo, Tucson, Arizona. Der Nebel erscheint teils hell durch Strahlung ionisierten Wasserstoffs und teils dunkel durch die Absorption von interstellarem Staub.



Die gleiche Region im Nah-Infrarot-Licht, aufgenommen vom Spitzer-Weltraumteleskop der NASA. Die Abbildung ist aus Aufnahmen bei Wellenlängen von 3,5 (blau), 4,5 (grün), 5,8 (orange) und 7,9µm (rot) zusammengesetzt. Wir sehen gestreutes Licht und die Emission ultrakleiner Staubteilchen.



Die gleiche Region im Fern-Infrarot-Licht. Hier ist blau die Strahlung ionisierten Kohlenstoffs bei 158µm, grün die Strahlung von Kohlenmonoxid bei 2,6mm, und rot die Strahlung von Staub bei 250µm Wellenlänge, aufgenommen von SOFIA, dem CARMA-Interferometer in Kalifornien und dem Herschel-Weltraumteleskop der ESA.

VERTEILUNGSFUNKTIONEN

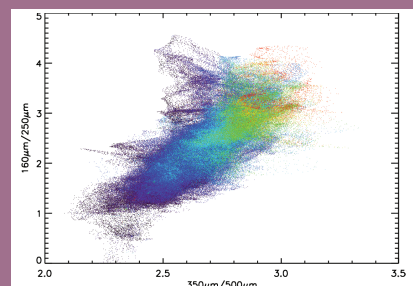
Um die riesige Menge von Informationen in all diesen Karten zu organisieren, werden statistische Korrelationen untersucht. Diagramme wie das nebenstehende sind eine komprimierte wissenschaftliche Darstellung, um möglichst viel Information in einer Grafik unterzubringen. Sie können Abhängigkeiten darstellen und damit einen Schlüssel für die Untersuchung von Ursache und Wirkung liefern.

Im Sonderforschungsbereich 956 „Bedingungen und Auswirkungen der Sternentstehung“ wird versucht, aus diesen herauszulesen, welche Moleküle unter welchen Bedingungen in den Wolken strahlen und wie diese Information genutzt werden kann, um die Wechselwirkung zwischen jungen Sternen und den sie umgebenden Gaswolken zu verstehen.

Damit soll es möglich werden, das Schicksal der Gasnebel, in denen neue Sterne entstehen, zu modellieren und vorherzusagen, um Aufklärung zu erhalten, welches Gas neue Sterne bildet und welches von den schon entstandenen weggeblasen wird.

Darstellung von 5 Parametern der gesamten Karte in einer Verteilungsfunktion. Der Ort jedes Punktes ist durch das Verhältnis der Helligkeiten verschiedener Fern-Infrarot-Wellenlängen gegeben. Er charakterisiert damit die Temperaturverteilung des interstellaren Staubes.

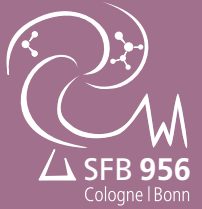
Die Farbe jedes Punktes steht für die Helligkeit der Linie ionisierten Kohlenstoffs. Wir können so z.B. ablesen, dass bei kaltem Staub Kohlenstoff kaum strahlt, während heißer Staub kein Garant für hellen Kohlenstoff ist.



In den *Cold Harmonies* wird die Multidimensionalität der Information nicht durch komprimierte visuelle Diagramme erfasst, sondern die Annäherung an das Problem erfolgt mit unserem Hörsinn, der eine ganz neue Perspektive auf die astrophysikalischen Daten ermöglicht. Die Strahlung des Orion-Nebels ist dann gewissermaßen die Partitur für *Cold Harmonies*.



COLD HARMONIES

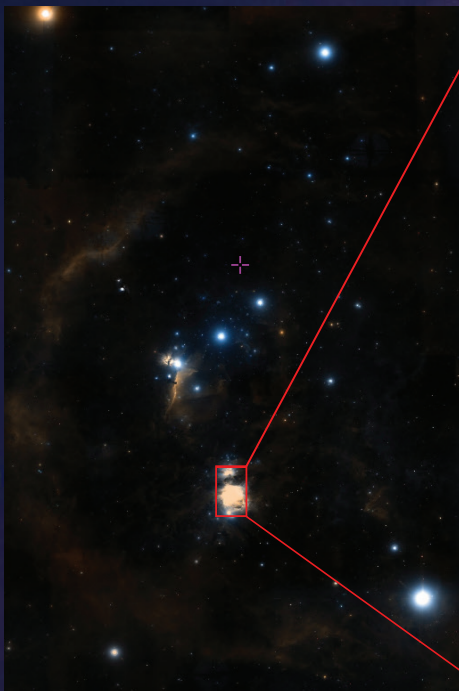


Die Wissenschaft hinter dem Projekt

STERNENTSTEHUNG UND DAS INTERSTELLARE MEDIUM

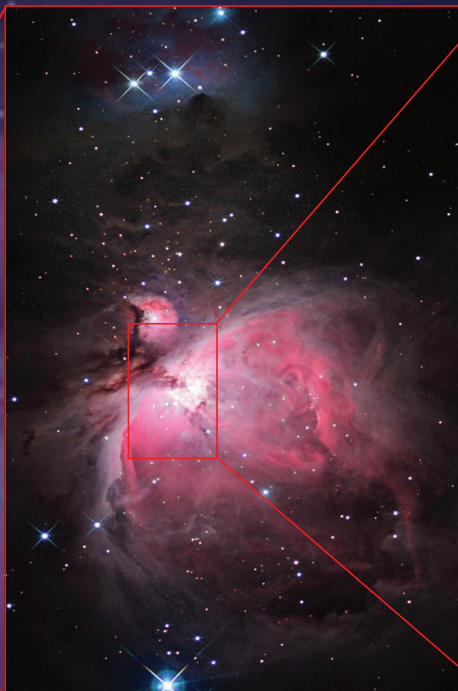
Der Raum zwischen den Sternen ist keineswegs leer, sondern überall findet sich auch fein verteiltes Gas und interstellarer Staub. Beide zusammen bilden das interstellare Medium. Dieses ist nicht gleichmäßig verteilt, sondern klumpt zu Wolken zusammen, die historisch als Nebel bezeichnet werden. Die Masse des Gases in den Wolken kann tausende Sonnenmassen betragen. Trotz der geringen Dichte führt die Gravitation in den Wolken dann zu einem Kollaps und der Bildung neuer Sterne. Auf diese Weise entstehen auch heute noch überall in der Milchstraße neue Sterne. Viele Details in diesem Prozess der Sternentstehung sind aber immer noch nicht verstanden. Sie werden im Sonderforschungsbereich 956 „Bedingungen und Auswirkungen der Sternentstehung“ untersucht.

Auf dem Weg zur Sternentstehung werden die Wolken so dicht, dass sich in ihnen Moleküle bis hin zu komplexen organischen Verbindungen bilden können. Sie stellen quasi ein interstellares Reagenzglas dar. Wenn dann neu entstandene Sterne dieses „Reagenzglas“ mit ultraviolettem Licht bestrahlen, werden auf der einen Seite völlig neue Reaktionen ausgelöst und auf der anderen Seite die Gas- und Staubteilchen selbst zum Leuchten angeregt. Dabei strahlen die Atome und Moleküle im Gas in diskreten Linienspektren, während der Staub kontinuierliche Strahlung abgibt. Beobachtet man beide Parameter bei vielen Wellenlängen, können daraus sowohl die Temperatur, als auch die Zusammensetzung der Wolken bestimmt werden.



Im Sternbild des Orion ist der auch im sichtbaren Licht erkennbare Orion-Nebel die dichteste Region, in der heftige Sternentstehung abläuft und dadurch Gas und Staub in der Umgebung zum Leuchten gebracht werden. Auf diesen Bereich konzentrieren wir uns in den *Cold Harmonies*.

(ESA/sky.cosmos.esa.int)



Dies untersuchte Region des Orion-Nebels enthält kaltes Material, das wir als dunkle Flecken durch die Absorption von interstellarem Staub sehen, warmes molekulares Gas und heißen ionisierten Wasserstoff, der die charakteristische rote Farbe produziert.

(NOAO der University of Toledo, Tucson, Arizona.)



Im Zentrum lassen sich die Details der Sternentstehung verfolgen. Das Hubble-Space-Teleskop konnte dort viele junge Sterne und die sie umgebenden Staubstrukturen fotografieren. Der Staub bildet abgeplattete Strukturen als Vorläufer der Planetenentstehung. Die Strahlung benachbarter Sterne zerstört diese aber gleichzeitig.

(NASA/ESA/M. Robberto)

IRDISCHE TECHNOLOGIE FÜR DIE ASTROPHYSIK

Für die Untersuchung der Sternentstehung ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Laborphysikern und Astronomen unverzichtbar. Laboruntersuchungen an Molekülen in der Gasphase sind für das Verständnis astronomischer Beobachtungen von grundlegender Bedeutung. In speziell entwickelten Speicher- und Düsenstrahl-Apparaturen werden Moleküle, Radikale und Ionen bei extrem tiefen Temperaturen untersucht. Die spektroskopische Untersuchung der Gase erlaubt dann den direkten Vergleich von Labor- und Astronomiedaten mit hoher Genauigkeit.

Die Instrumentierungsabteilung des I. Physikalischen Instituts der Universität zu Köln entwickelt dafür Empfänger auf dem neuesten Stand der Technik. Damit werden weltweit astronomische Beobachtungen auf boden- und luftgestützten Teleskopen ermöglicht. Dies beinhaltet hochempfindliche supraleitende Detektoren für Submillimeter- und Terahertz-Spektroskopie sowie laserbasierte Terahertz-Referenzoszillatoren.



Neu entwickelte Strahlungsquelle für die Labor-Laserspektroskopie von Molekülen

© I. Physikalisches Institut | Universität zu Köln

Das aktuelle Flaggschiff ist der Empfänger GREAT (German REceiver for Astronomy at Terahertz Frequencies) auf der fliegenden Sternwarte SOFIA (Stratosphären-Observatorium für Infrarot-Astronomie).

Das Projekt *Cold Harmonies* wird im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 956 im Teilprojekt Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt und gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projektnummer 184018867.