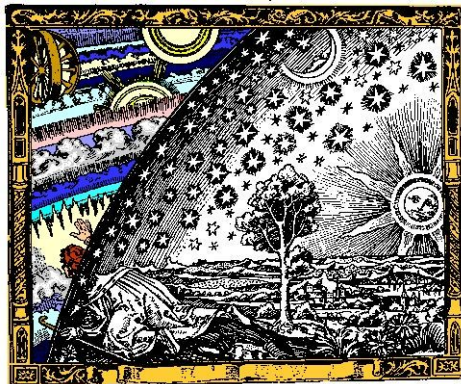


Karl-Otto Eschrich

Der Kosmos im Lichte elektromagnetischer Wellen

Einblicke und Ausblicke

2002



Der Kosmos im Lichte elektromagnetischer Wellen

Ausblicke und Einblicke

Inhalt

<u>Titel</u>	<u>Seite</u>
1. Elektromagnetische Wellen	1
1.1. Was sind Wellen?	1
1.2. Was sind elektromagnetische Wellen?	2
1.3. Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen	4
1.4. Licht	4
1.4.1. Strahlung des Schwarzen Körpers, Spektrallinien	4
1.4.2. Wie entsteht das Licht?	6
2. Beobachtungen	8
2.1. Sichtbares Licht – Optischer Bereich der elektromagn. Wellen	8
2.2. Infrarotstrahlung	13
2.3. Mikrowellen	14
2.4. Radiowellen	15
2.5. Ultraviolette Strahlung	17
2.6. Röntgen(X)–Strahlung, Akkretionsscheiben	21
2.7. γ –Strahlung	25



Elektromagnetische Wellen

Seit der Entdeckung und Anwendung des gesamten elektromagnetischen Spektrums hat sich unser Einblick in den Kosmos und haben sich die Vorstellungen über die Vorgänge, die in ihm ablaufen, enorm erweitert und in vielen Bereichen grundlegend verändert. Noch um 1970 hatten die Astronomen den Glauben, dass sich Galaxien gegenseitig durchdringen können, ohne sich zu verändern. Der Raum zwischen den weit auseinanderliegenden Sternen sei leer, und die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Sterne aufeinander treffen unwahrscheinlich. Ein gewaltiger Irrtum!

Derzeit (2002) gelingen bei Röntgen- und Gammastrahlen nur unscharfe Bilder – ein Feld für technische Entwicklungen. Die elektromagnetischen Wellen sind jedoch nicht die einzige Informationsquelle. Die Neutrinos, eine andere Art von Elementarteilchen, sind viel häufiger als Photonen. Sie haben eine geringe Masse und bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit, jedoch nahezu ungehindert durch die uns bekannte Materie, was sie aber auch äußerst schwer beobachtbar macht. Die Neutrinos der Sonne durchdringen nahezu vollständig die Erdkugel.

Seit über 30 Jahren wird versucht, Gravitationswellen zu registrieren. Vermutlich ist es gelungen einige Wellen nachzuweisen. Die Richtung ihrer Herkunft ist nur sehr grob festzustellen. Gravitationswellendetektoren mit hoher Richtungsanalyse erfordern ein System von Satelliten um die Sonne, deren Abstände auf Bruchteile von Millimetern genau bestimmt werden müsste. Ein Projekt der gesamten Menschheit, wenn sie nicht durch andere Probleme überfordert sein wird.

Was sind Wellen?

Jeder Mensch kennt Wasserwellen. Sie sind ein Zusammenspiel von Schwere und innerem Druck an der Wasseroberfläche.

Es gibt aber auch andere Arten von Wellen. Man kann sie nicht sehen, aber dennoch mit ihnen experimentieren.

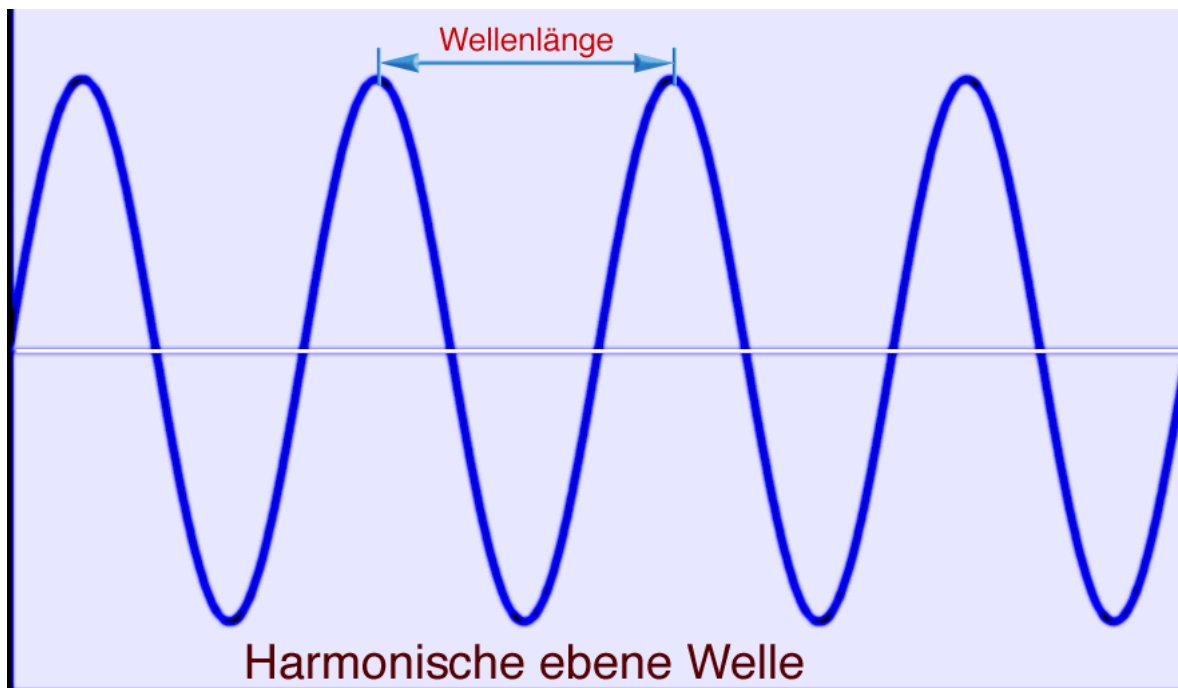
Der Schall ist eine solche Art von Wellen. Ebenso wie Wasserwellen, brauchen Schallwellen ein Medium, in dem sie sich ausbreiten. Schall kann sich in Luft, in Wasser, aber auch in Festkörpern ausbreiten; Stoffe, deren kleinste Bestandteile Atome oder Moleküle (verbundene Atome) sind. Diese Atome oder Moleküle übertragen den Schall, indem sie durch gegenseitige Bewegung Kräfte aufeinander ausüben. Deshalb gibt es hoch über der Erdoberfläche, wo es keine Lufthülle mehr gibt, keine Schallwellen; Astronauten können sich dort nicht ohne andere Hilfsmittel unterhalten.

Ganz anders ist es bei den elektromagnetischen Wellen. Sie existieren ohne Trägermedium, sie sind Medium und Welle in einem. Deshalb können sie sich im ansonsten leeren Raum ausbreiten. Sie können aber auch bestimmte Stoffe, ob gasförmig, flüssig oder fest, durchdringen. Radiowellen, aber auch das sichtbare Licht, sind ein Typ elektromagnetischer Wellen.

Was sind elektromagnetische Wellen?

Elektrizität kann statisch sein; so kann man Körper durch gegenseitige Reibung ihrer Oberflächen elektrisch aufladen. Kämmt man trockene Haare, so stehen sie infolge ihrer elektrischen Aufladung vom Kopf ab. Magnetismus kennen wir ebenfalls als statische Erscheinung beim Permanentmagneten. Werden elektrische Ladungen oder Magneten verändert oder gegeneinander bewegt, erzeugt man elektromagnetische Wellen.

Elektromagnetische Wellen sind eine Kopplung eines elektrischen und eines magnetischen Feldes, deren Stärke sich räumlich und zeitlich periodisch ändert. Der räumliche Abstand zweier benachbarter Maximalwerte des elektrischen Feldes (der gleich ist dem Abstand zweier benachbarter Maximalwerte des magnetischen Feldes) wird als Wellenlänge, λ , bezeichnet. Die Anzahl der periodischen Änderungen in einer Sekunde nennt man Frequenz, ν , und hat die Maßeinheit Hertz (Hz). Eine Million Schwingungen in einer Sekunde sind also ein Megahertz (ein MHz).

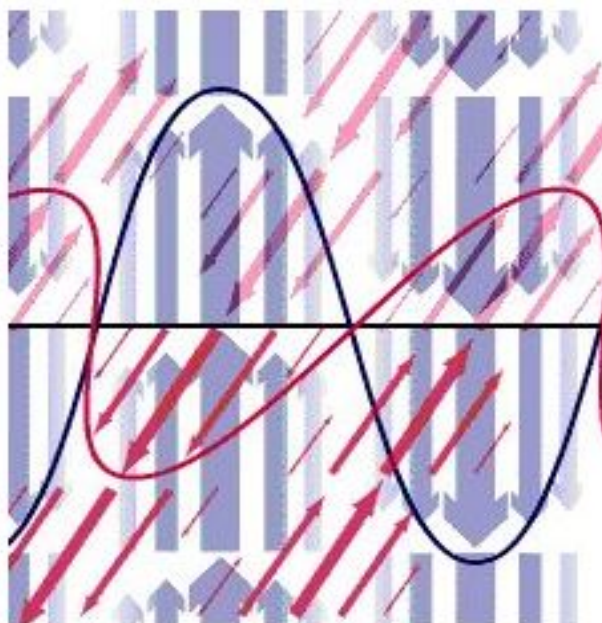


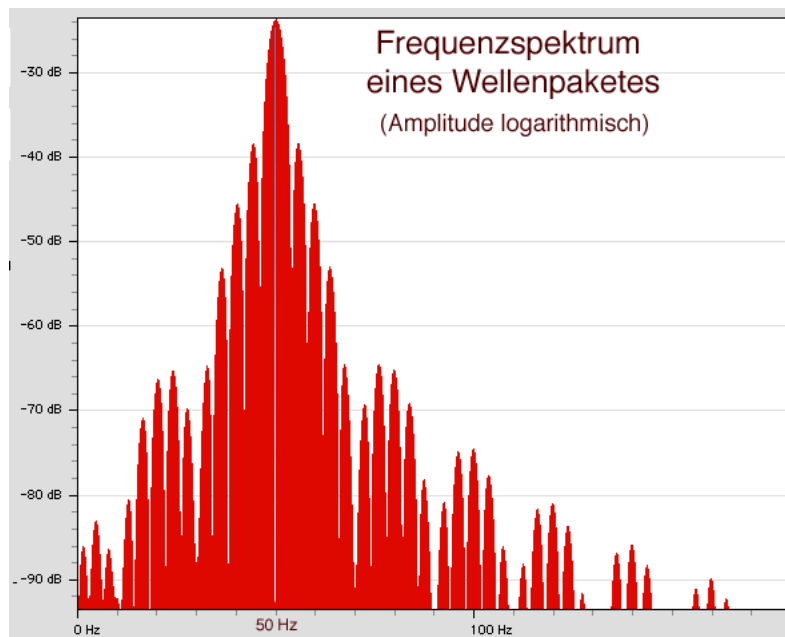
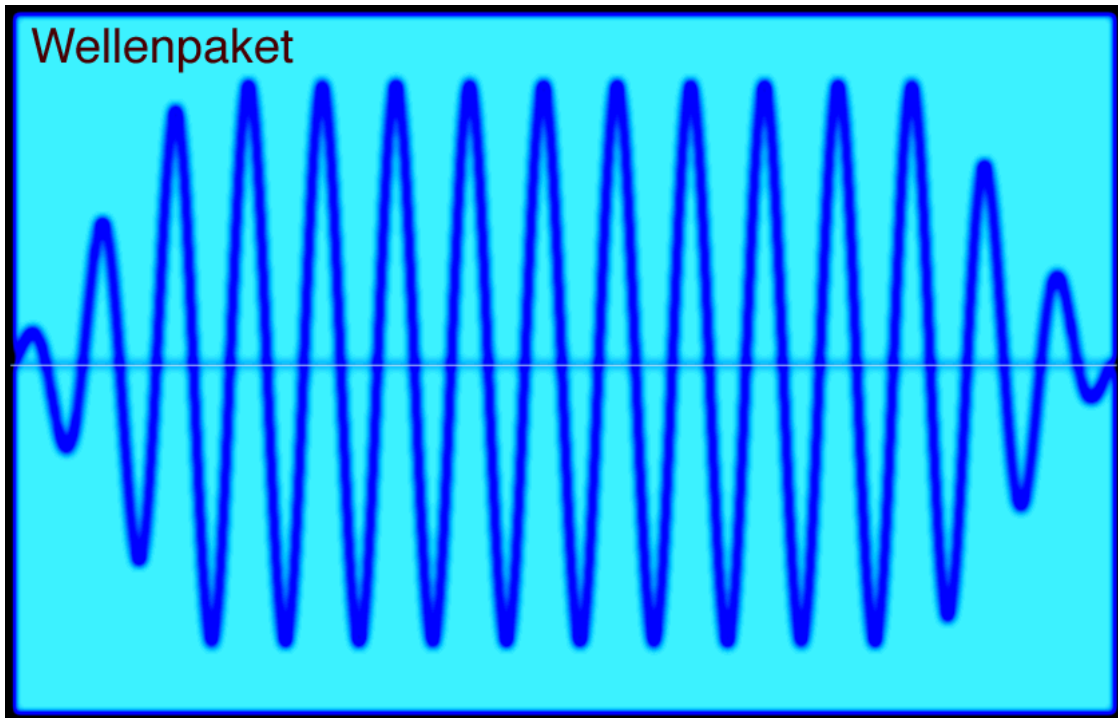
Infolge der räumlichen und der zeitlichen Änderung scheint sich ein Wellenberg zu bewegen. Die Geschwindigkeit dieser Bewegung ist die sogenannte Lichtgeschwindigkeit, mit dem Symbol c . Es gibt die Beziehung (Gleichung): der Betrag der Lichtgeschwindigkeit ist gleich dem Produkt aus Wellenlänge und Frequenz, $c = \lambda \cdot \nu$. Die Lichtgeschwindigkeit c ist eine Naturkonstante. Sie ist unabhängig von der Bewegung der Quelle und der des Empfängers der elektromagnetischen Welle. Der Wert ist rund 300.000 km/s.

Das elektrische und das magnetische Feld sind einander senkrecht, und beide senkrecht auf der Bewegungsrichtung der Welle.

In der Regel entstehen in den Geräten zur Erzeugung elektromagnetischer Wellen eine außerordentlich große Anzahl einzelner Wellen. Eine einzelne elektromagnetische Welle ist nicht beliebig lang, sie hat eine bestimmte Anzahl von Wellenbergen, die zu den Enden hin kleiner werden. Die Welle ist also ein Wellenpaket.

Es hat nicht wie eine ebene harmonische Welle eine einzige Frequenz, sondern ein Gemisch von Frequenzen, ein Frequenzspektrum. So ein Paket einer einzelnen Welle wird Photon genannt.





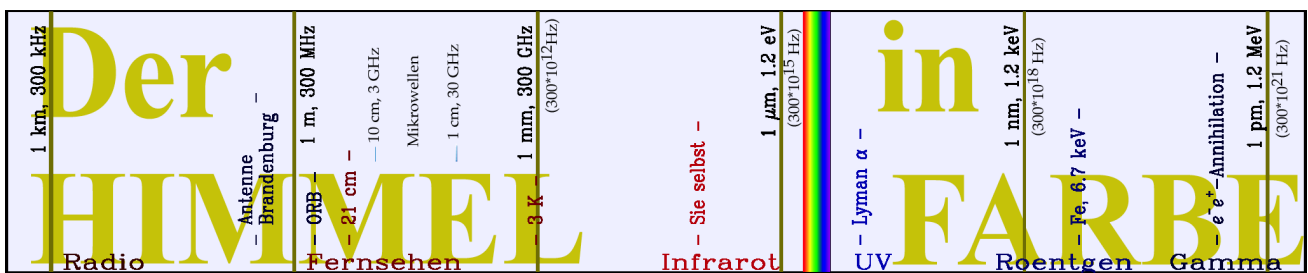
Die Energie eines Photons ist direkt proportional der Frequenz. Der Proportionalitätsfaktor ist eine weitere Naturkonstante, das PLANCKsche Wirkungsquantum h , mit dem außerordentlich kleinem Wert von rund $6,6 \cdot 10^{-34}$ erg*s (Watt*s*s). Es ist also $E=h \cdot \nu$.

Zur Charakterisierung einer (einzigen, ebenen) elektromagnetischen Welle braucht man nur eine Angabe, ihre Wellenlänge, oder ihre Frequenz, oder ihre Energie; die jeweils beiden anderen Werte sind dann ebenfalls festgelegt.

Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen

Das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Wellen reicht von 100 kHz ($1 \cdot 10^5$ Hz) bis zu - heute bekannt - $3 \cdot 10^{20}$ Hz. Dem entsprechen die Wellenlängen von 3 km bis zu 1 pm (10^{-12} m, millionstel mal millionstel Meter); und der Energie des einzelnen Photons von $0,4 \cdot 10^9$ eV bis $1,2 \cdot 10^{16}$ eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ erg}$).

Die Photonen solch unterschiedlicher Energie werden durch ganz verschiedene physikalische Prozesse erzeugt, da diese Photonen-Energie aus anderer Energie in einem einzigen Prozess umgewandelt werden muss. Auf Grund der unterschiedlichen Anwendung der elektromagnetischen Wellen in der Wissenschaft und der Technik unterteilt man den gesamten Bereich in: Radiowellen, Mikrowellen, Licht, mit den Teilbereichen Infrarot, sichtbar (optisch) und Ultraviolett, den Röntgenstrahlen (X-Strahlen) und letztlich den Gammastrahlen. Dabei überschneiden sich die Bereiche. Die Photonen dieser Teilbereiche haben auch unterschiedliche Eigenschaften. Nicht nur wie sie erzeugt und registriert werden können, auch wie sie sich ausbreiten und die verschiedensten Materialien durchdringen oder von ihnen aufgenommen, absorbiert, werden.



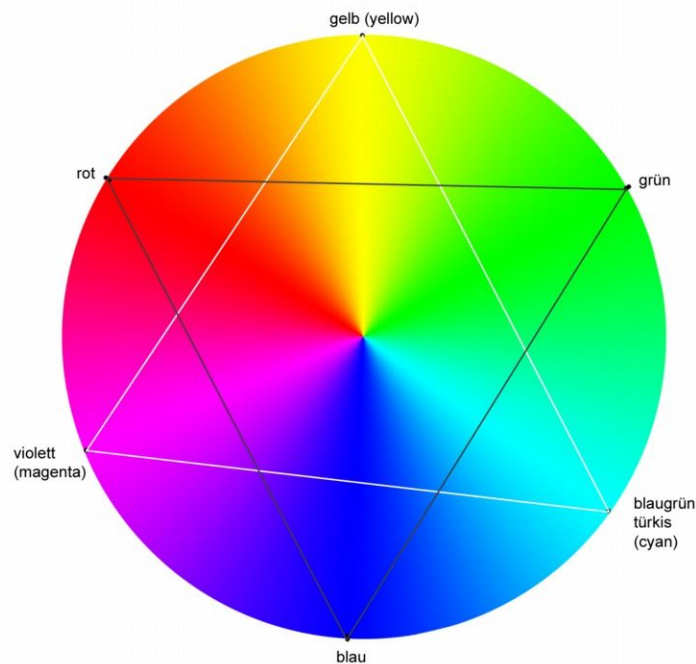
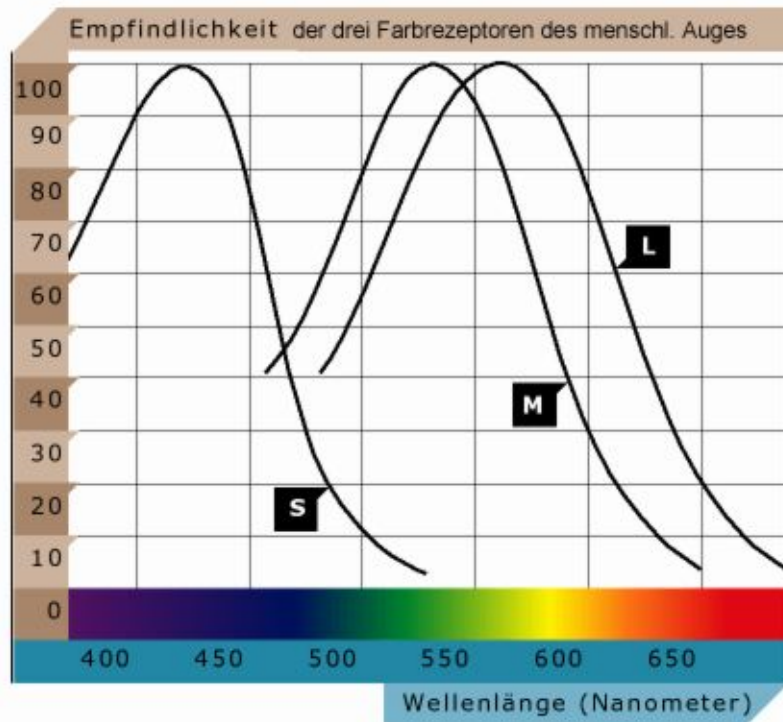
Licht Strahlung des Schwarzen Körpers Spektrallinien

Unter Licht verstand man ursprünglich, worauf das Auge reagiert; die Sinneszellen im Auge sind Lichtempfindlich. Die Sonne ist unsere natürliche Lichtquelle, und wir sehen das von den uns umgebenden Körpern reflektierte Licht. Doch so wertvoll die optischen Sinneseindrücke sind, unsere Sinneswahrnehmung ist in einer Hinsicht unvollkommen. Das Licht der Sonne sehen wir als die einheitliche Farbe Weiß. Man kann dieses weiße Licht jedoch auffächern und stellt fest, dass es ein ganzes Spektrum an Farben enthält.



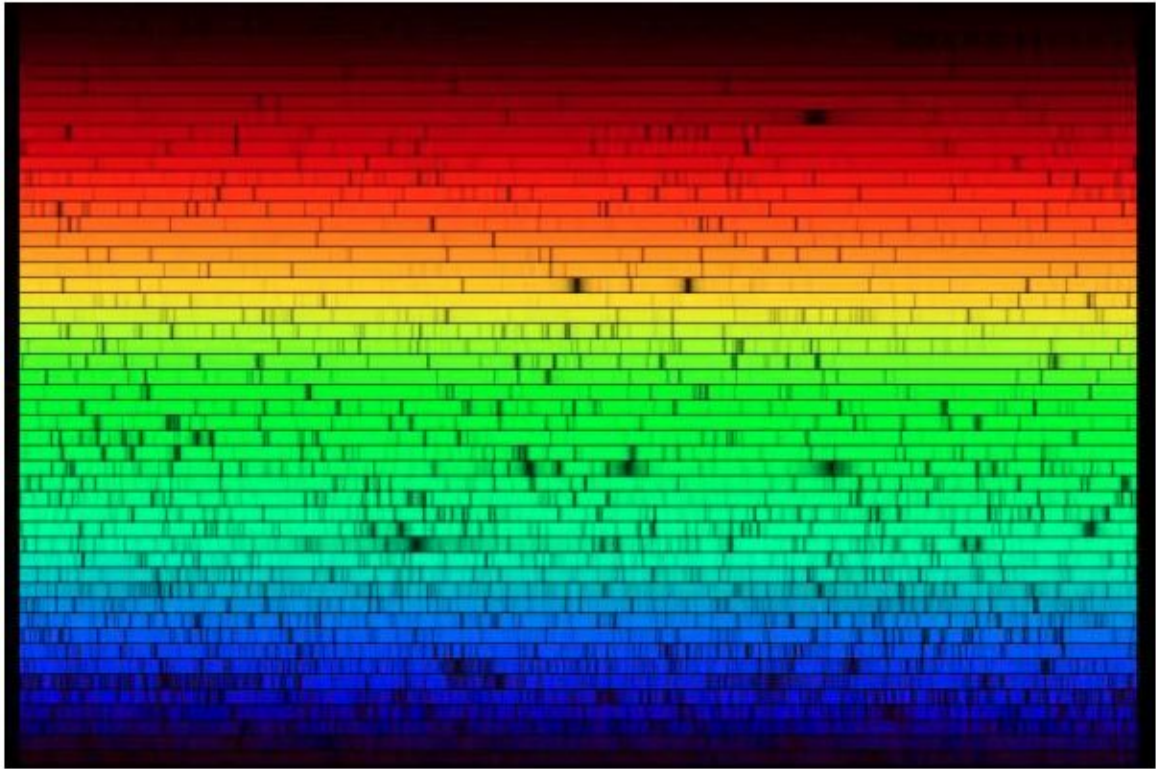
Wir sehen der Reihe nach ganz schwach violett, dann blau, blaugrün (cyan), grün, gelbgrün, gelb, orange, und rot.

Die Unvollkommenheit rührt daher, dass wir nur drei verschiedene Arten von Farbrezeptoren haben, und außerdem ihre Signale zu einem einzigen Farbeindruck eines Bildpunktes zusammengeführt werden.5.



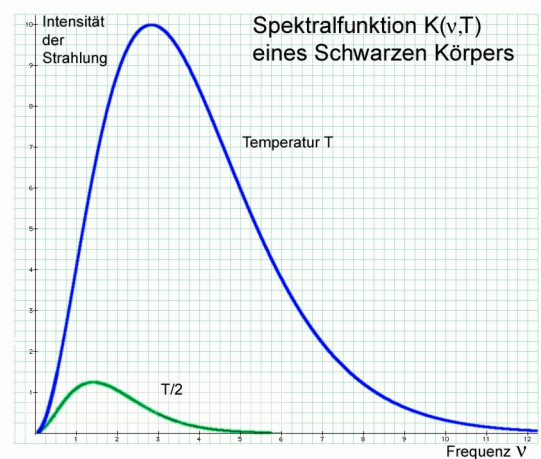
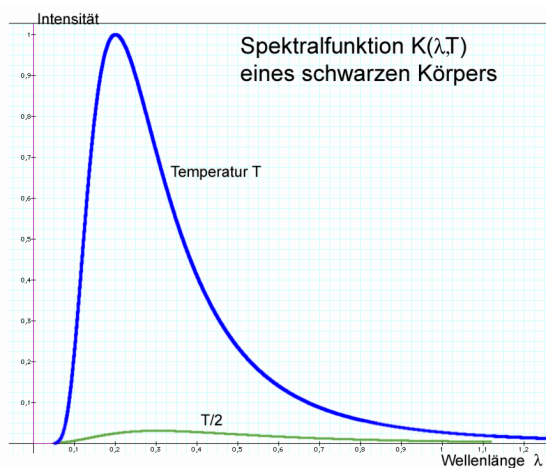
Daraus ergeben sich eine Reihe von Eigenschaften unseres optischen Sinnesapparates, die man zum Teil aus dem Farbkreis ableiten kann. Hier sei lediglich erwähnt, dass es für uns sog. Komplementärfarben gibt. Sie liegen im Kreis gegenüber und ihre additive Mischung ergibt den Sinneseindruck Weiß. Will man hingegen eine beliebige andere Farbe ermischen, braucht man in der Regel drei Farben; am günstigsten wählt man als diese Grundfarben solche, die die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks bilden

Zerlegt man das Sonnenlicht mit Hilfe eines Spektralapparates, so erhält man einen breiten Farbstreifen. Hier in der Abbildung ist er in gleichlange Teile zerschnitten, die dann übereinander gelegt worden sind. Auffällig sind die dunkleren Streifen. Es sind Spektrallinien einer Reihe von chemischen Elementen.



Wie entsteht das Licht?

Das natürliche Licht wird von heißen Körpern oder großen Gaskugeln, wie den Sternen, abgestrahlt. Am einfachsten zu behandeln ist der Fall eines sogenannten Schwarzen Körpers; das ist ein Körper, der an der Oberfläche alles darauffallende Licht aufnimmt, also keines reflektiert. Die spektrale Verteilung zeigt eine charakteristische Kurve mit einem Maximalwert, der Farbe, die am intensivsten abgestrahlt wird.



Von dem (schwarzen) Körper ist nur die Temperatur maßgebend, die die Eigenschaft der von ihm abgegebenen Strahlung bestimmt. Je höher die Temperatur ist, um so größer ist die Strahlungsintensität, und zwar für jede Wellenlänge und Frequenz. Im Frequenzspektrum ist die Lage des Maximalwertes der Temperatur direkt proportional, im Wellenlängenspektrum umgekehrt proportional zur Temperatur ($\lambda \cdot T = 0,2898 \text{ cm} \cdot \text{Grad Kelvin}$; WIENSches Verschiebungsgesetz). Bei einer Temperatur von 6000° K , das ist etwa die Temperatur an der Oberfläche der Sonne, erhält man $\lambda = 480 \text{ nm}$. Dem entspricht die Farbe an der Grenze zwischen blau und blaugrün.

Durch welchen Prozess werden die Photonen des Lichtspektrums ausgesendet? Die Temperatur ist ein Maß der kinetischen Energie (Bewegungsenergie) der Atome oder Moleküle eines Stoffes (Festkörper, Flüssigkeit, Gas). Da die Atome oder Moleküle sich gegenseitig beschleunigen und bremsen, werden dadurch Photonen ausgesendet. Die Verteilung der Energie der Photonen ist eine Folge der Verteilung der Bewegungsenergie der Atome oder Moleküle.

Es gibt aber noch einen anderen physikalischen Prozess. Atome oder Moleküle können Photonen einer bestimmter Energien aufnehmen, um sofort wieder Photonen bei genau diesen Energien abzustrahlen (Lichtstreuung). Es wird also nicht ein ganzes Spektrum mit Spektralverteilung abgestrahlt, sondern nur ganz schmale Energiebereiche, sogenannte Spektrallinien. Der physikalische Hintergrund ist nicht, dass Elektronen beschleunigt werden, sondern in der Elektronenhülle eines Atoms oder Moleküls einen anderen Zustand einnehmen, der auch mit einer Änderung der Energie einhergeht, die durch Aufnahme oder Abgabe eines Photons ausgeglichen wird.

Da die Sonne, ebenso wie andere Sterne, keine scharf begrenzte Oberfläche haben, und die Temperatur nach außen hin abnimmt, entsteht keine Schwarzkörperstrahlung. Vielmehr sind dem Schwarzkörperspektrum Absorptionslinien überlagert, d. h. die Spektralfunktion hat an vielen Stellen schmale Absenkungen. Der Lage der Absorptionslinien kann man entnehmen, welche chemischen Elemente in den strahlenden Schichten der Sonne vorhanden sind. Durch die Analyse der Form der Spektrallinien können einige physikalische Parameter, wie beispielsweise der dort herrschende Druck, abgeleitet werden. Auf diese Weise ist es auch möglich, die Stärke eventuell vorhandener Magnetfelder und die Rotation der Sonne zu berechnen.

Die Wellenlänge der Schwarzkörperstrahlung reicht, je nach Temperatur, von 10 nm bis 1mm. Das für den Menschen sichtbare Spektrum reicht von 360 nm (violett) bis 780 nm (rot), ist also ein sehr kleiner Teil des Strahlungsspektrums schwarzer Körper.

Der Bereich der optischen Strahlen entspricht etwa dem des sichtbaren Lichtes, erweitert um die nahe infrarote Strahlung. Die infrarote Strahlung (Wärmestrahlung) eines lebenden Menschen hat aufgrund einer Temperatur von rund 310° K die Wellenlänge von 9,92 Mikrometer (9920 nm, oder 0,00992 mm), ist allerdings nur angenähert eine Schwarzkörperstrahlung und je nach Körperstelle verschieden.

Es gibt jedoch außer der thermischen Bewegung eine Reihe anderer Möglichkeiten Elektronen zu beschleunigen oder zu bremsen, wobei Photonen abgestrahlt werden. Beispielsweise werden schnelle Elektronen gebremst, wenn sie auf andere Stoffe – Festkörper, Flüssigkeiten, Gase - treffen. Es entsteht die charakteristische Bremsstrahlung. Auf diese Weise werden in der Medizintechnik die Röntgenstrahlen erzeugt. Aber auch im Kosmos entsteht Bremsstrahlung verschiedenster Intensität, wenn die bei Explosionen hoch beschleunigten Elektronen auf langsame Gaswolken treffen.

Eine anderes Strahlencharakteristikum entsteht, wenn schnelle Elektronen auf Magnetfelder treffen. Dann werden den Elektronen zusätzliche kreisförmige Bewegungen um die Magnetfeldlinien aufgezwungen, was einer stetigen Beschleunigung entspricht und somit zur Ausstrahlung von Elektromagnetischen Wellen bzw. Photonen führt. Man bezeichnet sie als Synchrotronstrahlung.

Nicht nur bei Explosionen „sterbender“ Sterne werden hohe Geschwindigkeiten von Materie erreicht, die somit große Bewegungsenergie hat, sondern auch beim Einsturz von Materie auf hochkomprimierte, schwere Körper. Als solche Körper kommen Schwarze Löcher in Betracht, die vermutlich im Zentrum jeder Galaxie vorhanden und möglicherweise am Anfang der Entstehung des Kosmos bereits entstanden sind. Schwarze Löcher entstehen auch bei der Explosion „sterbender“ massereicher Sterne. Fällt Materie auf ein Schwarzes Loch, erreicht sie höchste Geschwindigkeiten, so dass Atomkerne oder freie Elementarteilchen mit ebenfalls hoher Geschwindigkeit aufeinander treffen und dadurch Teilchenreaktionen ablaufen, in deren Folge auch Elektromagnetische Wellen höchster Energie, die Gammastrahlung, entsteht (z.B. auch durch Paarverschmelzung). Kosmische Gammastrahlung wurde erstmals Anfang der 1960er Jahre entdeckt, durch Zufall von Aufklärungssatelliten zur Überwachung von Atombombenexplosionen auf der Erde. Der Nachweis von Gammastrahlung der Sonne gelang im Juli/August 2002, und zwar in Sonnenflecken mit starken Magnetfeldern.

Beobachtungen

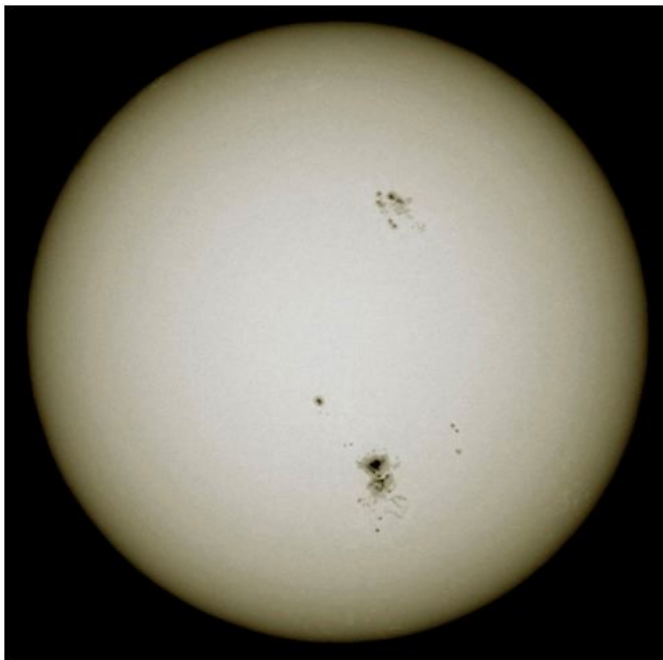
Sichtbares Licht

Optischer Bereich der elektromagnetischen Wellen

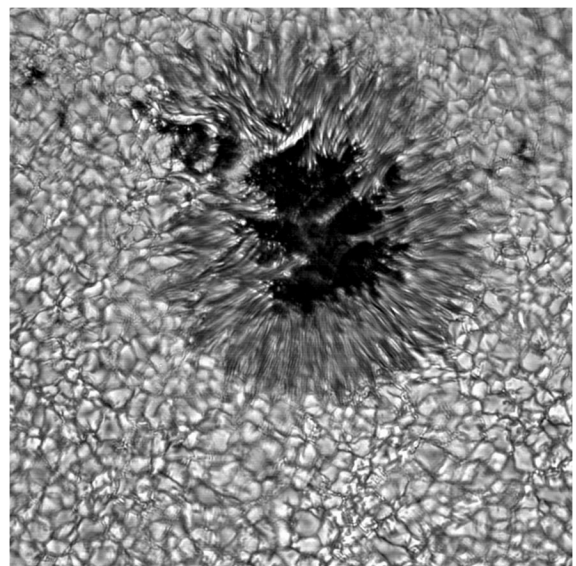
Da das sichtbare Licht für den Menschen der herausragende Bereich der elektromagnetischen Wellen ist und auch die ersten Aufnahmen von Himmelsobjekten auf fotografischen Platten dort gemacht wurden, soll es in dieser Abhandlung als erstes herausgegriffen werden.

So unschätzbar wichtig die Wahrnehmung von Licht für den Menschen ist, ist sie dennoch mit einem Mangel behaftet. Angepasst an die Wahrnehmung von Oberflächen von Festkörpern, aber auch von Flüssigkeiten, und einer begrenzten Auflösung des Auges, empfinden wir ein ganzes Spektrum als eine einzige Farbe (es soll Insekten geben, die ein Spektrum in mehrere Bereiche auflösen können).

Deshalb gehen uns bei der Betrachtung großer Gasbälle, also auch den Sternen, und komplexerer Gebilde des Kosmos quasi durch Überlagerung vieler Bilder viele Einzelheiten verloren. Erst die Verwendung von Filtern, die für einen schmalen Wellenlängenbereich durchlässig sind, offenbaren sonst überdeckte Strukturen. Dies kann deutlich bei den beiden Aufnahmen der Sonne erkannt werden.



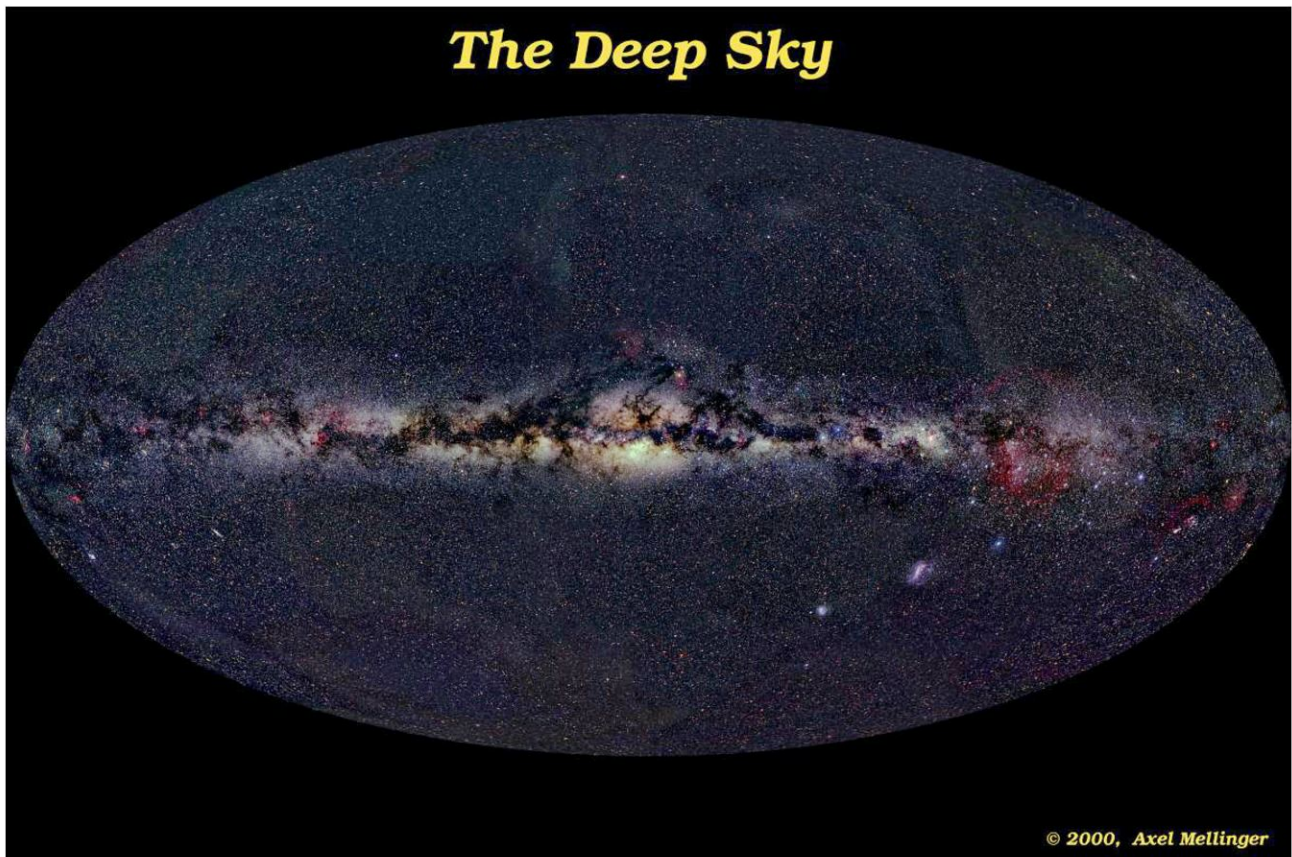
Das erste Photo links zeigt die Sonne im sichtbaren Licht, wie man sie mit einem Fernglas sehen würde. Man erkennt außer den kühleren und somit dunkleren Sonnenflecken und der Randverdunkelung keine Strukturen, auch nicht bei einer (mäßigen) Vergrößerung. Das zweite Photo rechts wurde unter Verwendung eines Filters mit ganz schmalen Durchlässigkeitsbereich aufgenommen. Zur Belichtung dient nur das Licht einer Spektrallinie (α -Linie, rot) des Wasserstoffs. Bereits in dieser Auflösung sind deutlich Strukturen auf der äußeren Sonnenschicht zu erkennen, ebenso zum Rand hin Sonneneruptionen. Die Sonnenflecken sind zur Zeit der Aufnahme klein, der größte hat etwa den Durchmesser des Erdmondes. Das Flugzeug fliegt natürlich über die Erde.



Bei höherer Auflösung und Vergrößerung sind Einzelheiten der Sonnenflecke und die helleren Granulen zu erkennen. Die Granulen sind aufgestiegene heißere Gasblasen, die nach wenigen Minuten

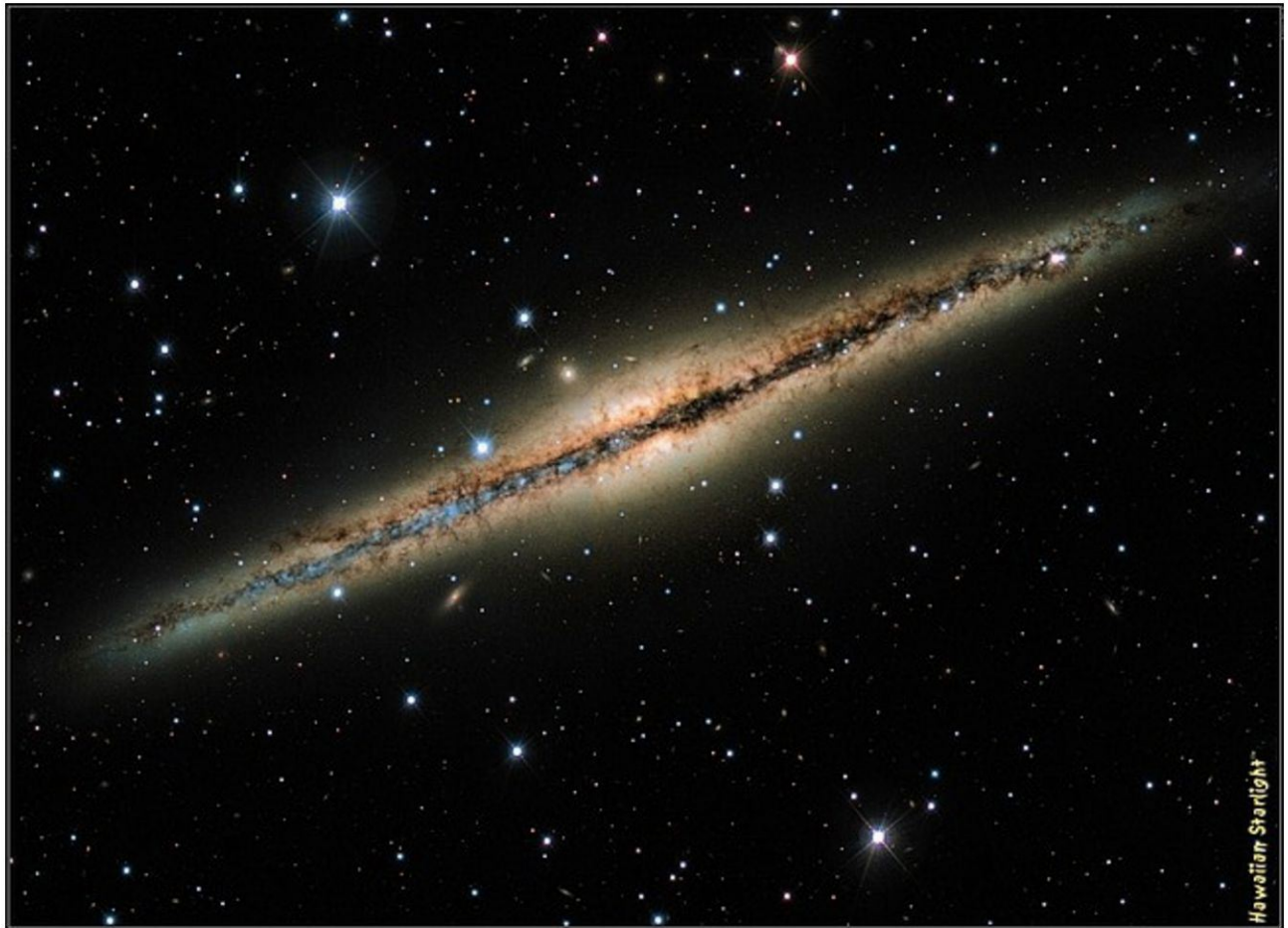
abkühlen und zerfließen.

Damit auf einer Abbildung mehr Information festgehalten werden kann, verwendet man einen Trick. Um auf den handelsüblichen Farbfilmen einen unserem Sehvermögen ähnlichen Eindruck zu erhalten, werden drei Bilder übereinandergelegt, die in drei Bereichen des optischen Spektrums, in Rot, Grün und Blau, belichtungsfähig sind. Da der gesamte optische Spektralbereich erfasst wird, anderenfalls gäbe es Farblücken, entstehen wie beim Auge Überlagerungen und somit Verluste. In der Astrofotografie wendet man das gleiche Prinzip an mit dem Unterschied, drei ganz schmale Spektralbereiche zu kombinieren. Man verzichtet auf weite Teile des Spektrums und vermeidet somit die unerwünschten Überlagerungen, hat aber den Eindruck eines üblichen Farbbildes. Außerdem wendet man eine andere Methode als in der Alltagstechnik an. Man macht die Aufnahmen in den einzelnen Spektralbereichen separat, heutzutage üblicherweise mit Halbleiter-Empfänger-Feldern (z.B. CCD- oder CMOS-Felder), um sie später am Computer zusammenzufügen.



Die Abbildung zeigt ein in drei engen optischen Spektralbereichen hergestelltes Bild des gesamten Kosmos. In dieser aus der Darstellung der gesamten Erdoberfläche bekannten Projektion liegt die sog. Milchstraße in der Hauptachse (waagrecht). Sind die dunklen Flecken der Milchstraße frei von Materie?

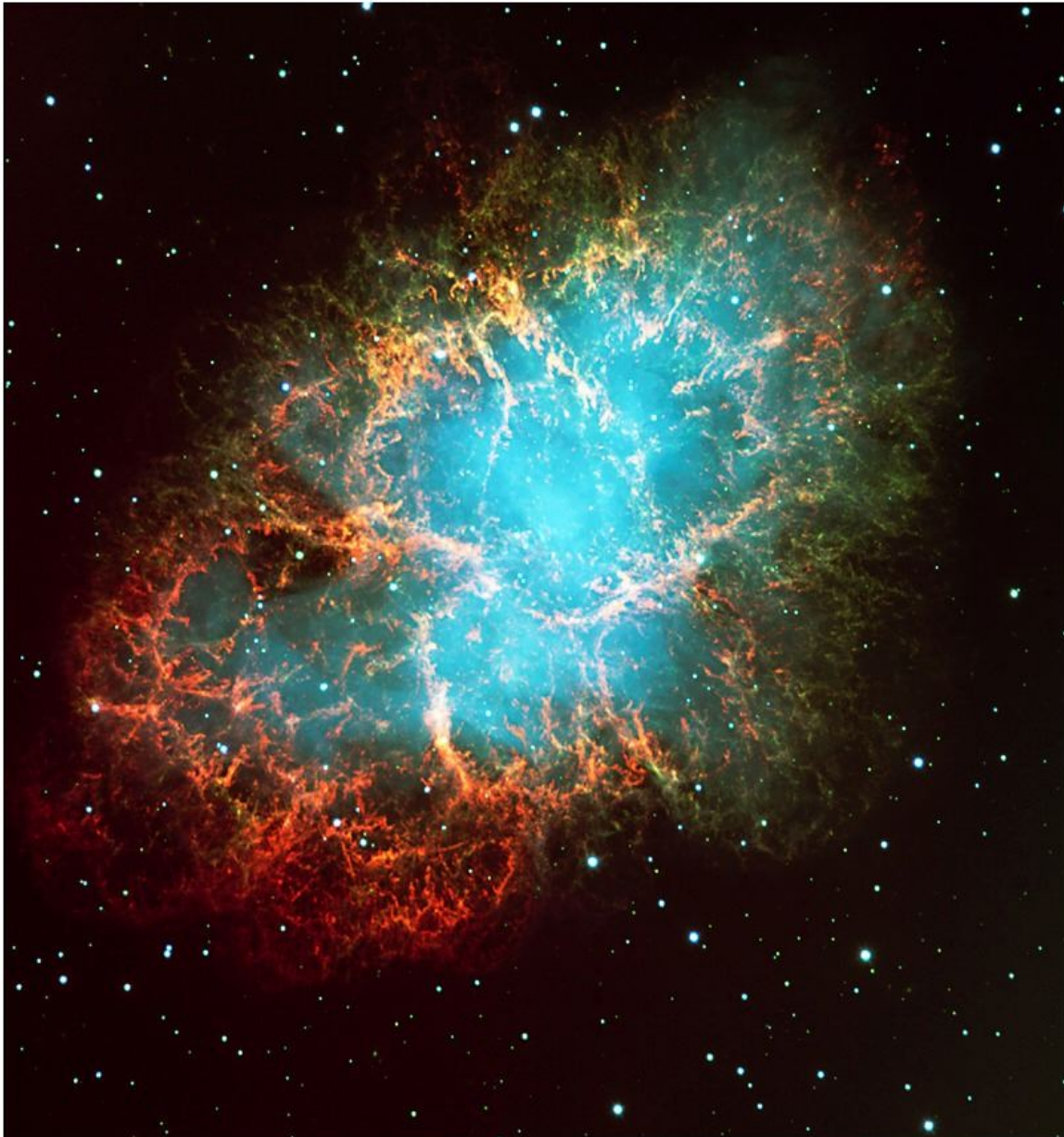
Das Band der Milchstraße ist kein irgendwie hell glimmendes Licht, wie man es sich früher vorstellte. Mit der Nutzung von Fernrohren wurde deutlich, dass sie aus einer Vielzahl kleiner leuchtender Punkte besteht. Jeder Punkt, bei lichtstärkeren Fernrohren ein heller Fleck, stammt von einem Stern, wie unsere Sonne einer ist. Bald stellte man fest, dass die Sterne unterschiedlich weit entfernt sind und in einer Scheibe sich um das dunkle Zentrum drehen. Die Sterne unterscheiden sich aber auch in Größe, Farbe (Farbspektrum), Strahlkraft und offensichtlich ihrer Masse. Auf der Suche der Zusammenhänge dieser Eigenschaften entdeckte man, dass sie eine Entwicklung durchlaufen. Es gibt auch ein Ende der Sterne, bei dem explosionsartig der äußere Teil weggestoßen, der innere Teil zusammengedrückt wird. Je nach Masse des ursprünglichen Sternes nimmt der nun komprimierte innere Teil verschiedene Zustände der Materie ein. Wenn Sterne „sterben“, müssen auch neue gebildet werden, oder der Kosmos würde sich mit der Zeit entleeren.



Hawaii Starlight



Hier die Bilder zweier Galaxien, NGC891 oben und NGC5194/M51 unten; einer idealen Seitenansicht und einer idealen Draufsicht. Die blauen Sterne sind sehr heiß und daher im jugendlichen Alter. Die Milchstraße ist also ein System von Sternen. Es gibt aber noch andere sichtbare Objekte am Himmel. Seit Jahrhunderten sind die Spiralnebel bekannt. Zu Anfang des 20. Jahrhunderts stellte man fest, dass sie nicht Bestandteil unserer Milchstraße sind, sondern weit außerhalb liegen. Diese scheinbar verwaschenen nebligen Objekte, so stellte sich heraus, sind ebenso wie die Milchstraße eine Ansammlung von Hunderten Millionen bis einer Milliarde von Sternen, mit Durchmessern von typisch 120.000 Lichtjahren. Blickt man einer solchen Galaxie nicht auf den Rand, sondern schräg oder direkt auf die Scheibe, so sieht man, dass das Zentrum nicht dunkel, sondern im Gegenteil, sehr hell ist. Die dunklen Bereiche sind also nicht leer. Es ist relativ kühler Staub, undurchdringlich für Licht.



Eine andere Art von mysteriösen Nebeln ist der Krebsnebel, M1. Er ist von uns nur 6500 Lichtjahre entfernt, und liegt ebenso wie wir in der Milchstraße. Er ist keine Ansammlung von Sternen, sondern der Rest einer weggeschleuderten Sternschicht. Der Rand dehnt sich mit einer Geschwindigkeit von 5 Mio km/h (1.400 km/s) aus und hat derzeit einen Durchmesser von etwa sechs Lichtjahren. Bei dieser Geschwindigkeit hätte der ursprüngliche Stern vor 600 Jahren explodieren müssen. Tatsächlich ist aus China (und von Anasazi Indianern) vom Jahre 1054 an diesem Ort eine kurzzeitige, sehr helle

Lichterscheinung überliefert. Sie war stärker als das Sonnenlicht. Das bedeutet aber auch, dass das Gas inzwischen noch beschleunigt wurde. Das ist auf dort vorhandene starke Magnetfelder zurückzuführen.

Inzwischen konnte auch der innere Bereich des Ursprungsternes, der komprimierte Rest identifiziert werden. Auf der Abbildung ist es im Zentrum der obere von den beiden helleren Punkten. Es ist ein Stern von der Masse der Sonne, aber mit einem Durchmesser von nur 20 Kilometern. Bei dieser Dichte besteht die Materie aus dicht gepackten Neutronen, nach neueren Vorstellungen (2002) im Zentrum möglicherweise aus einem noch dichteren Plasma, aus den Bestandteilen der Neutronen, den Quarks. Dieser Neutronenstern rotiert 30 mal in der Sekunde um seine Achse, wie man aus gepulsten Radiowellen erfährt, die bei der Rotation des „eingefrorenen“ starken Magnetfeldes ausgesendet werden. Dieser Neutronenstern ist also ein Pulsar. Er sendet hochenergetische Strahlung aus, die die umgebende Materie zum „glühen“ bringt.

Der Krebsnebel ist keine einmalige Erscheinung. Inzwischen hat man eine ganze Reihe solcher Objekte entdeckt. Sie sind die Überreste eines „gestorbenen“ Sternes.

Wie ist der Zustand eines alten Sternes? Nahezu alle leichteren Elemente, vom Wasserstoff bis maximal zum Eisen (Ordnungszahl 26, Atomgewicht 55,847), sind durch Kernfusion aufgebraucht. Er hat sich gegenüber der jugendlichen Größe auf das 200-fache aufgebläht (Sonne von Radius 0,75 Mio km auf 150 Mio km, d.h. Erdbahnradius). Sobald die Energiezufuhr durch Kernfusion erlischt, fallen im Inneren der Gas- und der Strahlungsdruck weg. In kürzester Zeit fällt der Stern zusammen, implodiert. Durch die frei werdende Gravitationsenergie wird er im kollabierten Zustand sehr heiß, und der Druck sehr hoch, viel höher als bei seiner Entstehung, so dass Kernreaktionen und im Zentrum Elementarteilchenreaktionen erfolgen. Aus Protonen und Elektronen entstehen Neutronen, Atomkerne werden zusammengedrückt, Elemente jenseits der Ordnungszahl von Eisen entstehen unter Energieverbrauch, ebenso schwerere Isotope der restlichen leichten Elemente. Im Sternzentrum gibt es schließlich nur noch Neutronen, weiter außen die ganze Palette der Elemente. Schließlich wird vom restlichen Druck die äußere Sternenschicht weggesprengt und die in der dichten Materie festgehaltenen Photonen können plötzlich entweichen. Ein gewaltiger Lichtblitz entsteht, eine Supernova (SN). Zurück bleiben ein sehr dichter Neutronenstern (Sonnenmasse auf 20 km Durchmesser), oder bei ursprünglich größeren Sternen (mehr als zehn Sonnenmassen) ein Schwarzes Loch, da unter der gewaltigen Gravitationskraft sogar die Neutronen zusammengedrückt werden, auf einen Sternendurchmesser unter 2 km, d.h. unter den Schwarzschildradius, und der auseinanderströmenden Restmasse. Magnetfelder beeinflussen diesen Vorgang.

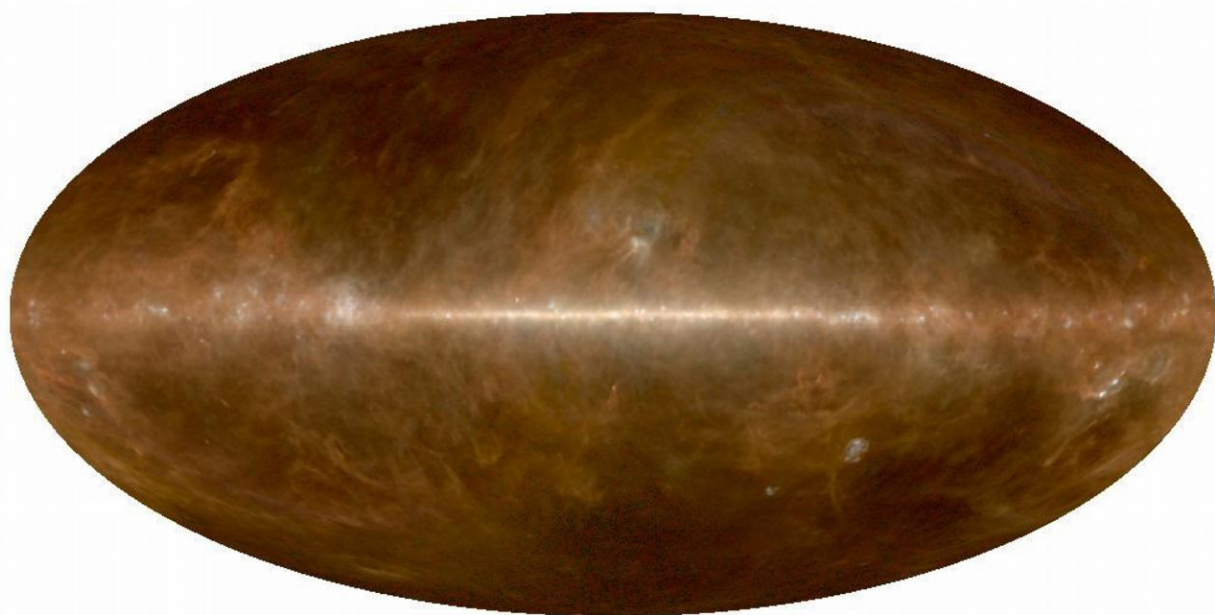
Nur bei diesem Prozess entstehen Elemente mit Ordnungszahlen über 26, zum Beispiel Kobalt, Kupfer, Nickel, Zinn, Silber, Gold, Blei, bis zum radioaktiven Uran (Kernladungszahl 92). Einige dieser Elemente sind zur Bildung komplexer Moleküle Voraussetzung, ohne die unser Leben nicht möglich wäre. Das bedeutet aber auch, dass aus den expandierenden Resten von Supernovas neue Sterne mit Planetensystem, wie das unsere, sich bilden.

Die Abbildung oben ist eine Komposition verschiedener Aufnahmen. Sie dient dem Verständnis der Vorgänge in so einem „Nebel“. Rot zeigt die Orte der Rekombination von Elektronen und Protonen zu neutralem Wasserstoff, und mit Blau ist Synchrotronstrahlung gekennzeichnet, die von Elektronen abgegeben wird, die um Magnetfelder kreisen. Im Zentrum ist der obere der beiden Punkte der Neutronenstern, dessen Strahlung erst die Gaswolke zum leuchten bringt.

Infrarotstrahlung

Bei der Schwarzkörperstrahlung schließt sich zu den längeren Wellenlängen als der des sichtbaren Lichtes das Infrarot an, also mit Wellenlängen größer als 780 nm. Dem entsprechen Temperaturen unter rund Tausend Grad Kelvin, rund 700° Celsius. Die im Kosmos tiefste auftretende Temperatur ist 3° K, entsprechend einer Wellenlänge einer Schwarzkörperstrahlung von 1 mm. Eine solche Strahlung erfüllt den ganzen Kosmos, jedoch anderer Herkunft (siehe Mikrowellenstrahlung), so dass kältere Materie auf mindestens diese Temperatur aufgeheizt wird; technisch kann man jedoch tiefere Temperaturen erreichen. Folglich reicht die Infrarotstrahlung bis 1 mm Wellenlänge und einer Frequenz von $3 \cdot 10^{11}$ Hz (300 GHz), in technischer Hinsicht auch Mikrowellen. Der Mensch empfindet mit Sinnesorganen in der Haut Infrarotstrahlung entsprechend seiner eigenen Temperatur von rund 300° K als Wärme, deshalb früher Wärmestrahlung genannt, die eine Wellenlänge von 10 μm (= 0,010 mm) hat. In der Technik werden zur Zeit keine längerwelligeren Infrarotstrahlen genutzt, so dass dies das „ferne“ Infrarot ist. Das „nahe“ am sichtbaren Bereich liegende Infrarot hat also Wellenlängen um 1 μm , der mittlere liegt natürlich dazwischen.

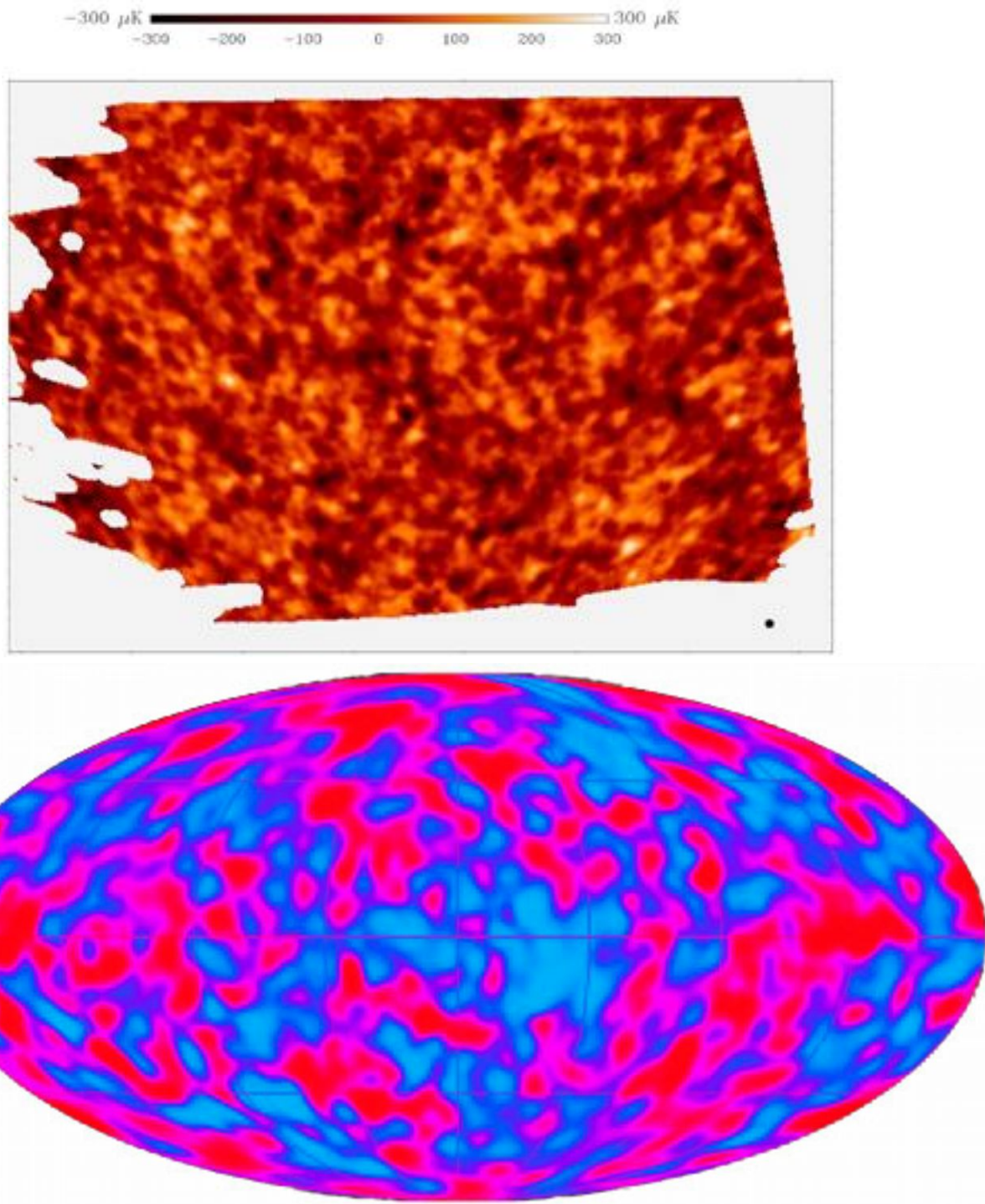
Hier zwei Darstellungen des Kosmos im infraroten Licht, oben aus dem nahen, unten dem fernen Bereich. Das galaktische Zentrum ist hier nicht mehr dunkel, im Gegenteil, es ist besonders hell. Diese Strahlung stammt von von Sternen aufgeheiztem Staub (10 ... 100 μm Korngröße).



Mikrowellen

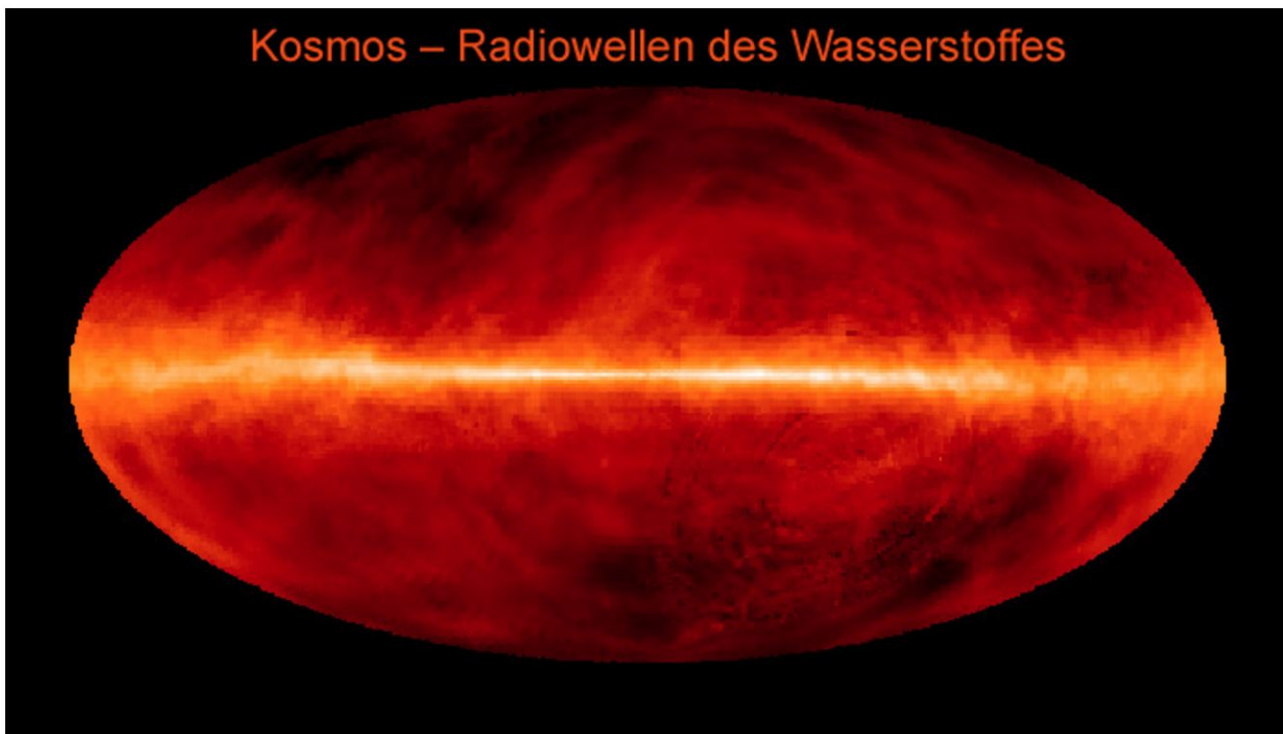
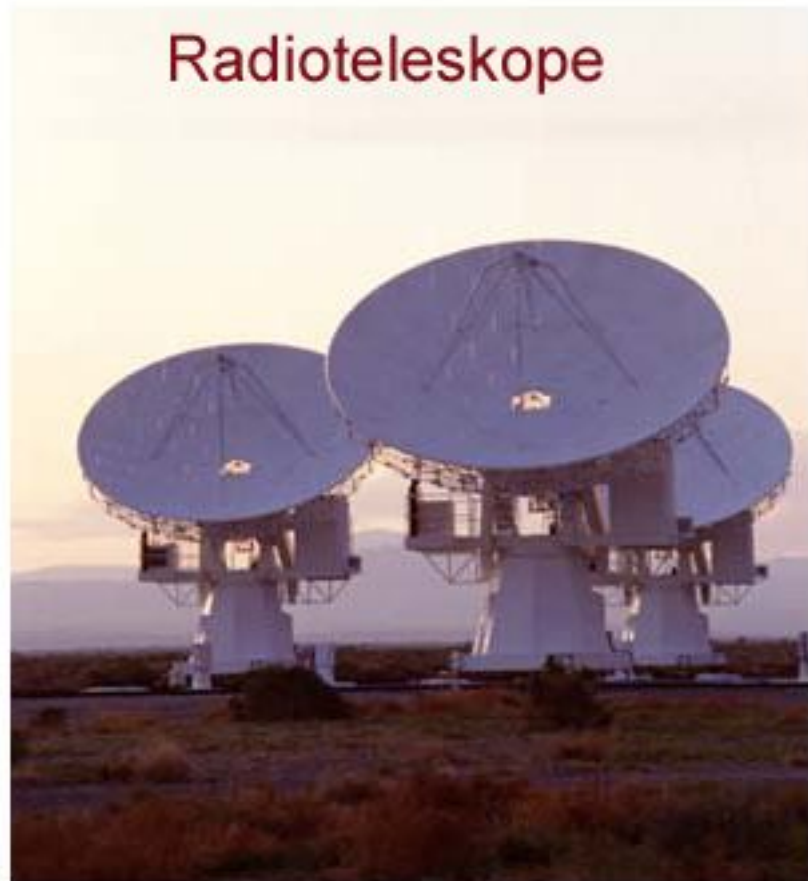
Der Bereich der Mikrowellen reicht von 0,1 cm bis 1 m. Inzwischen gibt es viele Anwendungen: die Ortung von Flugzeugen und Schiffen mithilfe des Radars, zur Wetterbeobachtung, zur Datenübertragung, zur Vermessung der Erdoberfläche und anderer Planeten (auch durch dichte Wolkenschichten, wie bei der Venus), im Haushalt der Mikrowellenherd.

Im Jahre 1960 wurden erstmals Mikrowellen aus dem Weltall empfangen. Es handelt sich um die 3° Kelvin Hintergrundstrahlung, mit einer Wellenlänge von 1 mm. Diese Strahlung erfüllt nahezu gleichmäßig den gesamten Weltraum. Sie ist ein Relikt aus der Frühphase des Kosmos (im Alter von 300.000 Jahren), als er hauptsächlich aus Strahlung bestand. Die damals sehr heiße Strahlung ist durch die Expansion des Kosmos „abgekühlt“. Die feinen Unterschiede in der Verteilung erlauben Rückschlüsse auf die Struktur des frühen Universums.

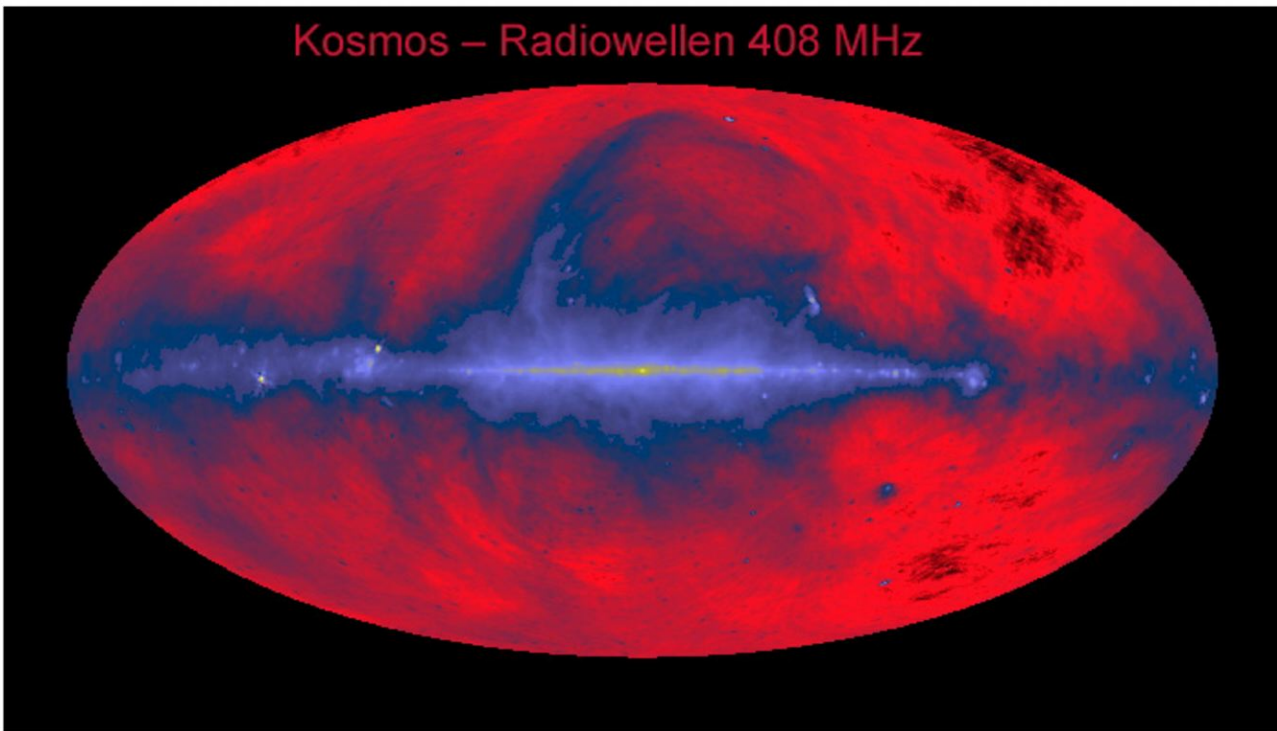


Radiowellen

Die Radiowellen haben die längsten Wellen des elektromagnetischen Spektrums. In der Haushaltstechnik werden die Wellenlängen um 5 cm für Mobiltelefone (cellular phones), von 0,1 m bis 10 m für UKW-Radio, und Fernsehen, und bis 30 km für Kurz-, Mittel- und Langwellen-Radio benutzt. Man kann Radiowellen erzeugen, indem man in einem Draht oder Stab einen Wechselstrom entsprechender Frequenz fließen lässt. Die elektrischen Ladungsträger darin werden wechselnd beschleunigt und senden deshalb Photonen aus.



Auch im Weltraum gibt es Radiowellen. Auf der Erde werden sie seit 1932 mit Radioteleskopen empfangen. Sie werden von verschiedenen kosmischen Objekten ausgestrahlt: von Planeten, Kometen, Sternen, Galaxien, vor allem aber großen Gas- oder Staubwolken. Durch die Analyse der Radiowellen kann man auf die Zusammensetzung, den Aufbau und die Bewegung der Strahlungsquelle schließen. Bei schmalen Frequenzbereich des Empfängers kann man sogar bestimmte Stoffe nachweisen. Beispielsweise den Hauptbestandteil der sichtbaren Materie, den Wasserstoff, aber auch Sauerstoff, Kohlenmonoxid, Alkohol und noch größere Moleküle. Bei 408 MHz werden Elektronen im Magnetfeld durch ihre Synchrotronstrahlung nachgewiesen.



Und schließlich, in einer anderen Projektion, die Verteilung des Kohlenmonoxides im Kosmos.



Wie in der modernen Astrofotografie werden im Radiobereich verschiedenen, nun nicht sichtbaren, Wellenlängen verschiedene Farben zugeordnet. Allerdings müssen die einzelnen Bilder erst aus einer Vielzahl von einzelnen Radiosignalen, die einzelnen Bildpunkten entsprechen, zusammengesetzt werden. Um die „Sehschärfe“ zu verbessern, werden sogar für die einzelnen Bildpunkte die Signale mehrerer Teleskopantennen einander verknüpft. Zuerst hat man Felder von Antennen angelegt, später sogar Antennen mit mehreren Tausend Kilometern Abstand verknüpft. Übrigens macht man sich diese Methode neuerdings auch bei optischen Teleskopen zu Eigen.

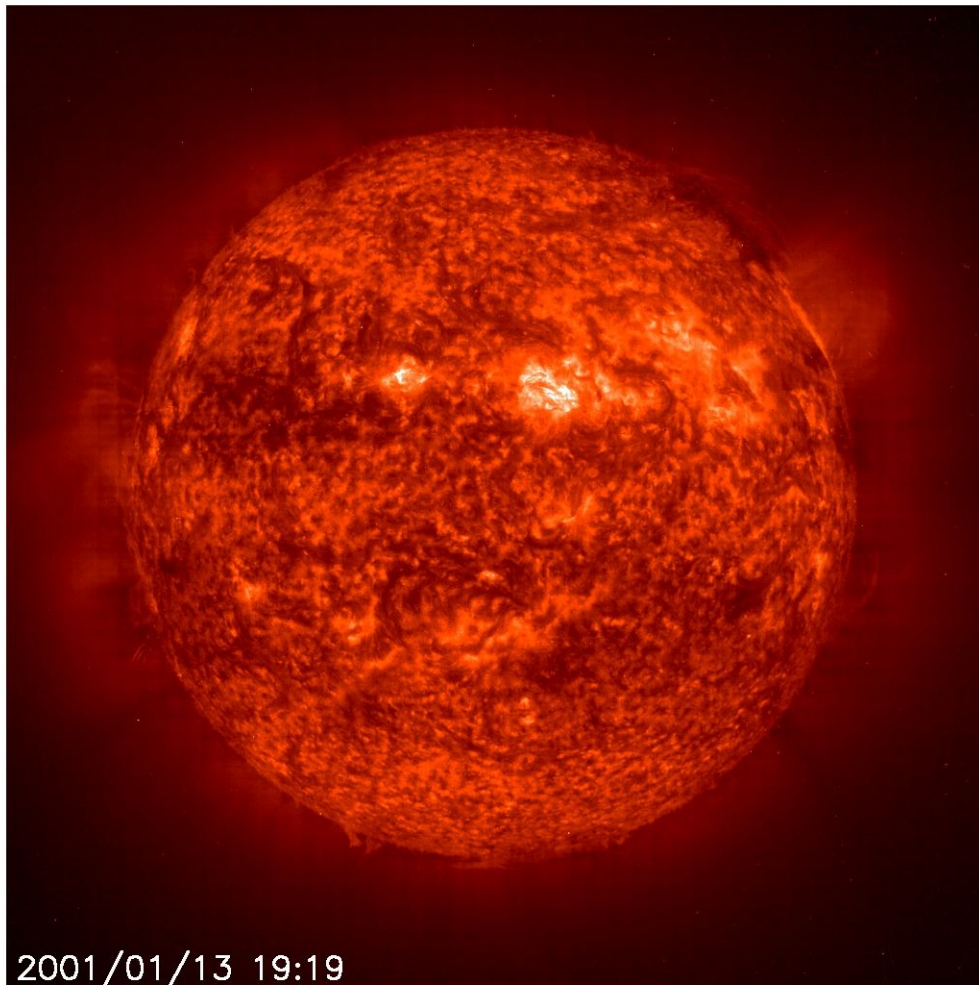


Ultraviolette Strahlung

Die Strahlung eines Schwarzen Körpers ist für nahezu unbegrenzt hohe Temperaturen möglich. Bisher wurden Temperaturen von mehreren Hundert Millionen Grad gemessen. Dann liegt das Strahlungsmaximum bei einer Wellenlänge von 0,01 nm (10 pm), das sind mittelharte Röntgenstrahlen. Die Ultraviolette Strahlung (UV) beginnt bei einer Wellenlänge an der Grenze zum sichtbaren Licht bei 360 nm (violett), und wird bei der kürzesten Wellenlänge 10 nm begrenzt (entsprechend 280.000° K). Die kürzere Wellenlängen sind Röntgenstrahlen, die technisch nicht durch heiße Gase, sondern durch Bremsstrahlung (Elektronen auf Metall) oder durch Synchrotronstrahlung in Beschleunigern erzeugt werden.

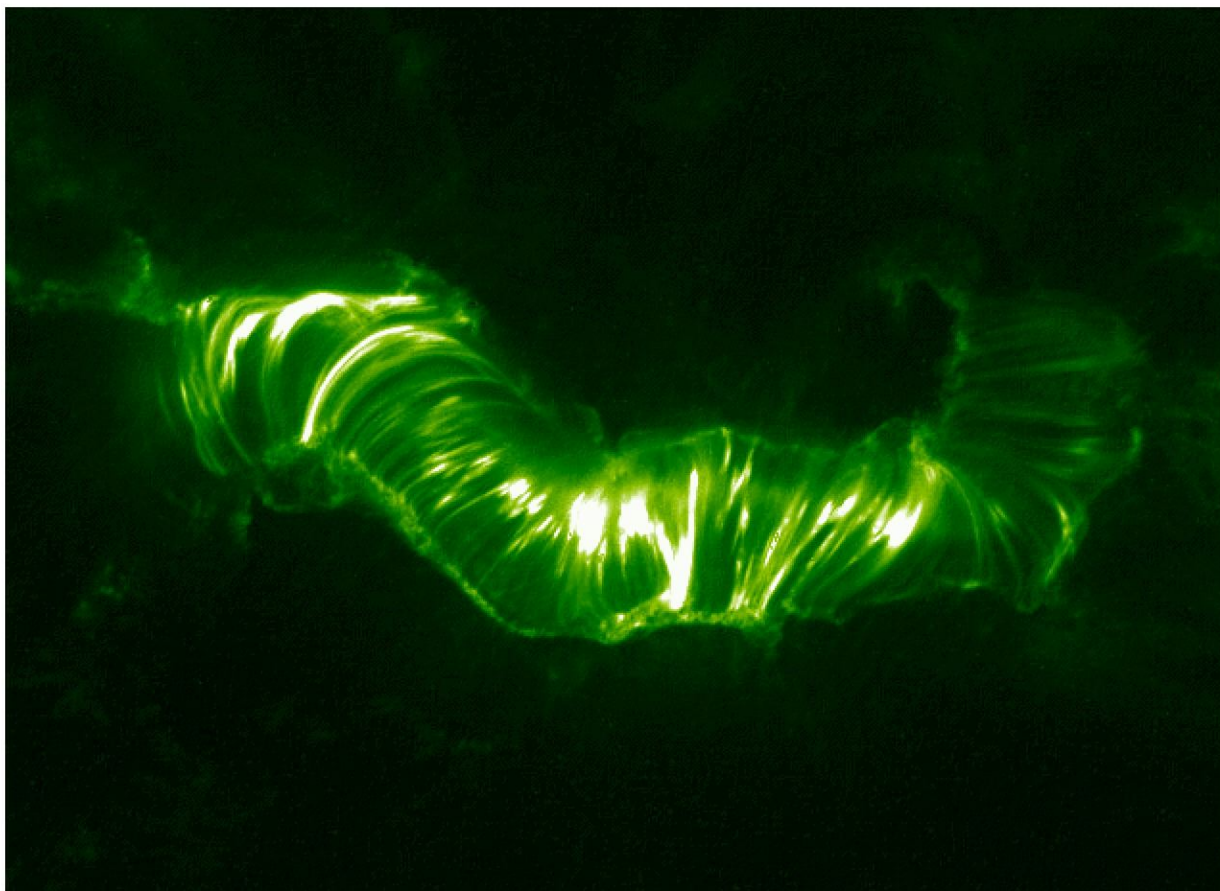
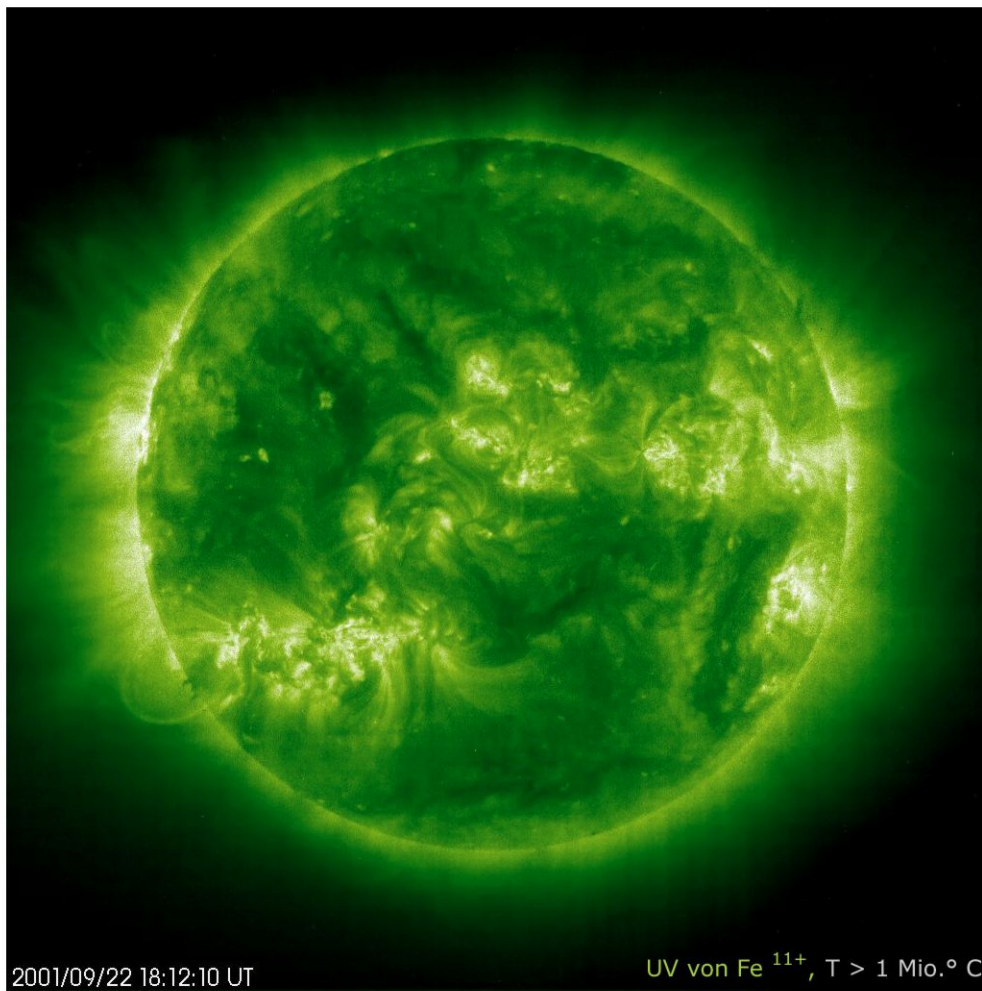
Auch die Sonne strahlt UV-Licht ab. Es entsteht in höheren Schichten über der Photosphäre, die heißer sind als diese.

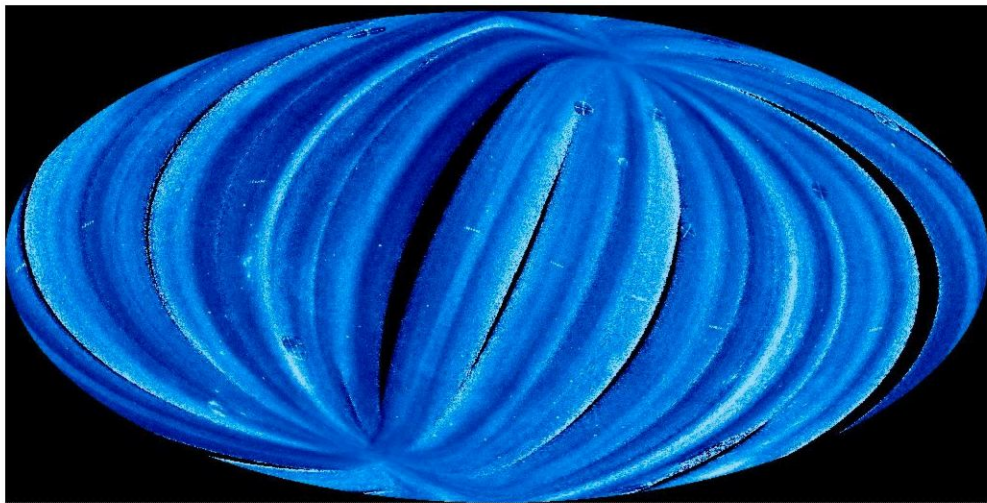
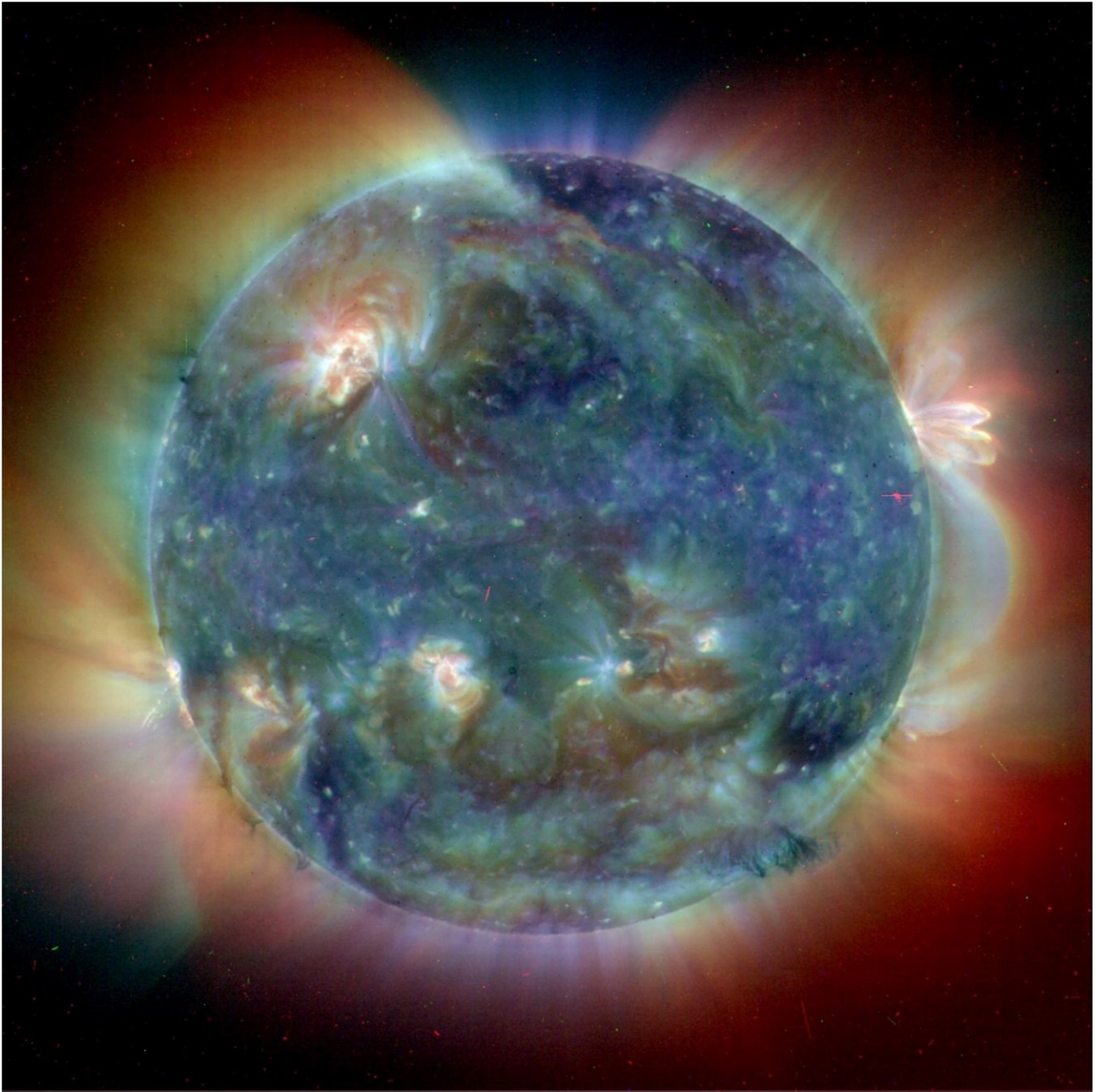
Hier eine Aufnahme bei der Wellenlänge des zweifach ionisierten Heliums.

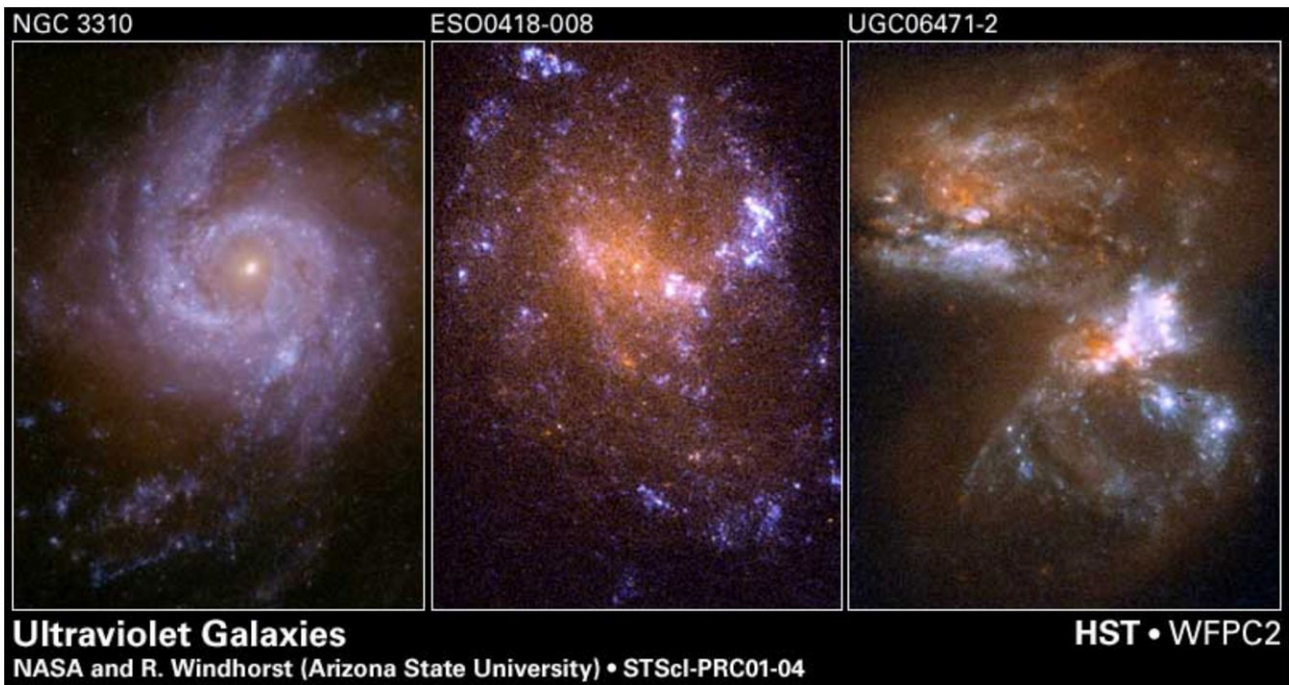


Man sieht deutlich, dass es sich um höhere Regionen handelt. Die Sonnenflecken sind hier nicht dunkler, sondern heller: über den kühleren Sonnenflecken ist es heißer. Dies wird durch Veränderungen des Magnetfeldes hervorgerufen.

Auf der nächsten Seite sind zwei Aufnahmen im extremen UV, an der Grenze zum Röntgenlicht. Oben die Sonne mit der Spektrallinie des 11-fach ionisierten Eisens bei einer Temperatur von über 1 Mio Grad, unten eine Detailaufnahme, bei der deutlich die Struktur eines Magnetfeldes zu erkennen ist; innerhalb des Schlauches muss ein starkes elektrisches Feld sein. Auf der folgenden Seite ist eine Bildmontage aus drei UV-Aufnahmen unterschiedlicher Wellenlängen. Anschließend ein Blick auf den gesamten Kosmos. Die schwarzen Streifen sind fehlende Stellen. Aber auch der Mond ist sichtbar, natürlich im von der Sonne reflektiertem Licht.

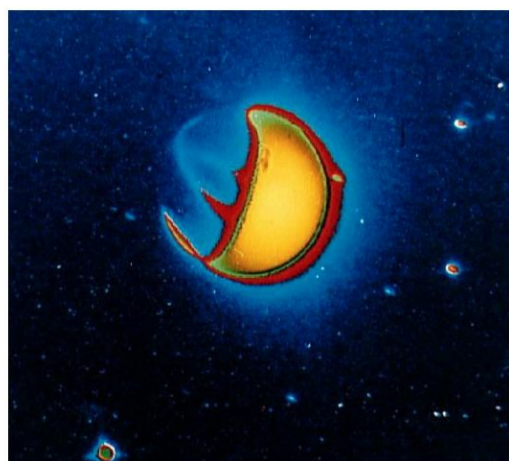






Aufnahmen von Galaxien im UV zeigen besonders die Entstehungsgebiete von Sternen mit ihren hohen Temperaturen. Die bei einer Gruppe von Galaxien gut sichtbaren Spiralarme sind durch wandernde Dichtewellen erzeugte Verdichtungen von Gas und Staub. Sind erst einmal solche Dichtehäufungen entstanden, ziehen sie sich auf Grund der Gravitation weiter zusammen und werden heiß. Aber erst wenn sich die Gasbälle etwas abgekühlt haben, können sie sich weiter verdichten und bilden dann Sterne. Das normale Sternenleben kann mit der Wasserstofffusion ab einem Mindestdruck und einer Mindestdichte beginnen. Sterne von der Masse der Sonne brauchen für ihren Zyklus etwa 10 Milliarden Jahre. In großen, massereichen Sternen verlaufen die Kernreaktionen viel schneller. Ein Stern mit der (maximalen) Größe von 100 Sonnenmassen existiert bis zum Kollaps knapp 100 Millionen Jahre.

Auch die Erde kann im UV-Licht aufgenommen werden. Auf der sonnenzugewandten Seite wird die von der Lufthülle reflektierte Strahlung registriert. Auf der sonnenabgewandten Seite ist es Polarlicht – Sonnengase, die wegen ihrer Ionisierung entlang der Magnetfeldlinie auf die Erde einströmen und die Luft zum Leuchten anregt.



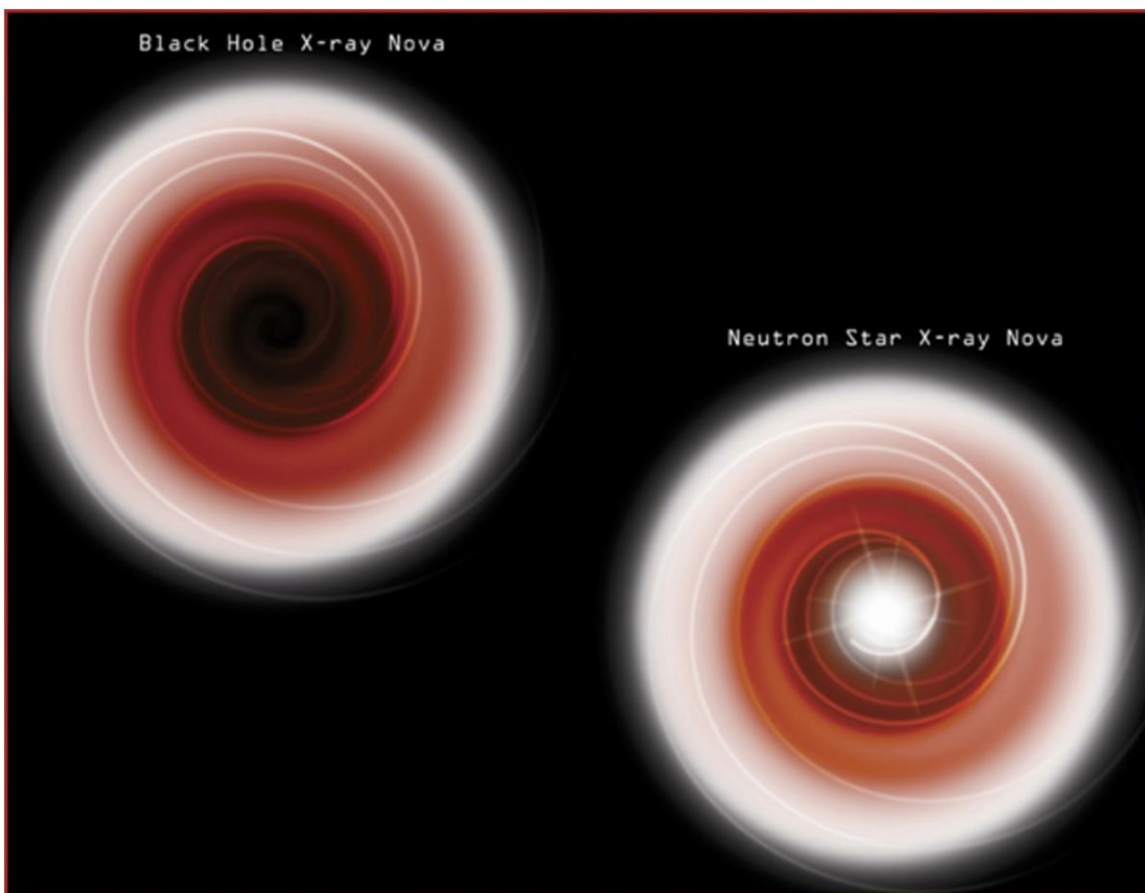
Röntgen(X)-Strahlung

Akkretionsscheiben

Röntgenstrahlung ist im Alltag aus der medizinischen und technischen Diagnostik (Materialprüfung) bekannt. Im Kosmos entsteht sie auf unterschiedliche Weise, als thermische Strahlung bei Temperaturen über eine Million Grad und als Spektrallinien hochionisierter schwerer Elemente infolge Stoßionisation bei hohen Geschwindigkeiten.

Es taucht dabei die Frage auf, wodurch Atome oder Teilchen so weit beschleunigt werden können, woher die Energie dazu kommt. Denkbar scheint hierfür die Anziehung interstellarer Materie oder von benachbarten Sternen durch kompakte massereiche Objekte, etwa Neutronensternen oder Schwarzen Löchern. An der Grenzfläche letzterer wächst die Energie über alle Grenzen. Dort haben der Raum und die Zeit aber auch eine Grenze erreicht, die Längen schrumpfen auf Null zusammen, die Zeit wird unendlich langsam (für einen außenstehenden Beobachter). Andererseits verlieren die Photonen, die nahe der Oberfläche des Schwarzen Loches in den Raum abgestrahlt werden, wieder einen großen Teil ihrer Energie; ihre Frequenz nimmt ab und die Wellenlänge zu (gravitative Rotverschiebung). So kommt es, dass nur ein bestimmter Anteil der Ruhmasse m_0 eines Teilchens, mit der gesamten Energie $E = m_0 \cdot c^2$, in Strahlung umgewandelt werden kann, die das Schwarze Loch verlässt.

Insgesamt ist der Vorgang des Einsturzes von Materie auf einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch komplexer. Es ist ja nicht nur ein einzelnes Teilchen, sondern ein über längere Zeit anhaltender Materiestrom, der angezogen wird. Da die einstürzende Materie ursprünglich eine, wenn auch sehr geringe, Drehbewegung hatte, wird sie bei der Annäherung immer schneller. Sie kann also nicht geradewegs einstürzen. Vielmehr sammelt sich die Materie in einer schnell rotierenden Scheibe, einer Akkretionsscheibe. Neben Reibung, d.h. Stößen, laufen in ihr eine Reihe verschiedener Prozesse ab. Dazu gehören, wegen großer Relativgeschwindigkeiten, Elementarteilchenreaktionen, wie sie auf der Erde mit ganz geringen Massen und bescheidenen Energien in den „riesigen“ Teilchenbeschleunigern technisch realisiert werden.



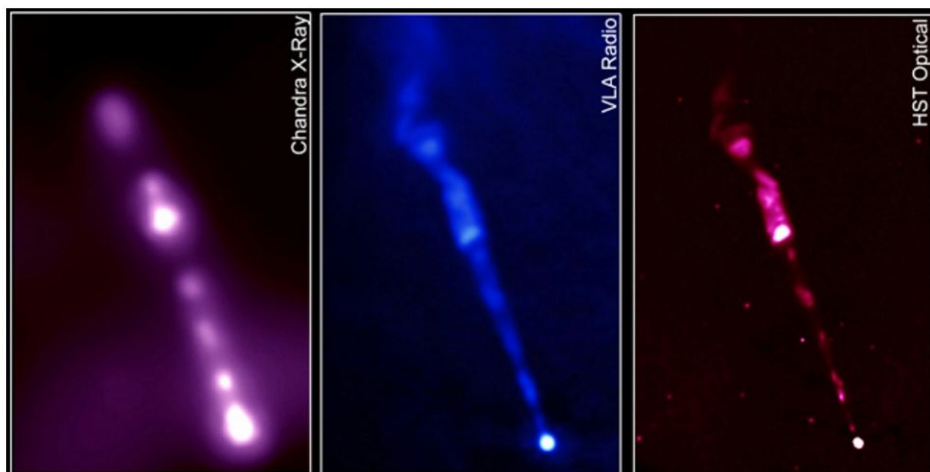
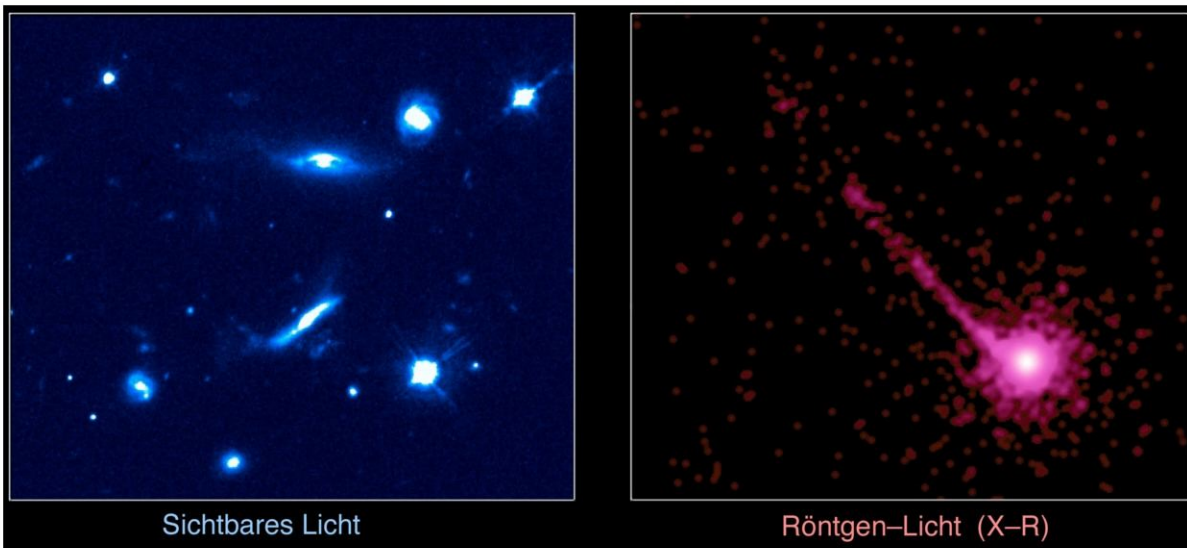
In der Abbildung ist der berechnete Intensitätsverlauf ausgestrahlter Röntgenwellen wiedergegeben; links für ein Schwarzes Loch, rechts für einen Neutronenstern. Mögliche Einsturzbahnen sind skizziert. In der Tat beobachtet man zwei Klassen solcher Röntgenstrahler, die sich vor allem durch ihre

unterschiedliche Helligkeit im Verhältnis 1:100 unterscheiden.

Es wird nicht nur Röntgenstrahlung, sondern nahezu das gesamte elektromagnetische Spektrum ausgestrahlt. Das hängt von den Eigenschaften der zentralen Masse ab, und dem Ursprung der akkredierten Materie. Es gibt aber auch, noch aus der Frühphase des Kosmos, sehr massereiche Schwarze Löcher, mit hunderten Millionen oder Milliarden Sonnenmassen. Ihre Akkretionsscheibe bildet eine ganze Galaxie, die jedoch wegen der enormen Leuchtkraft in der Nähe des Zentrums vom 10^{15} -fachen der Sonne oder dem 10.000 – fachen einer normalen Galaxie, überstrahlt wird. Zuerst wußten die Astronomen nichts über die Natur dieser frühen Galaxienkerne, und nannten sie Quasistellare Objekte, kurz Quasare. Aufgrund ihrer Helligkeit können sie bis zum Rand des sichtbaren Kosmos beobachtet werden – einer Entfernung von 10 Milliarden Lichtjahren.

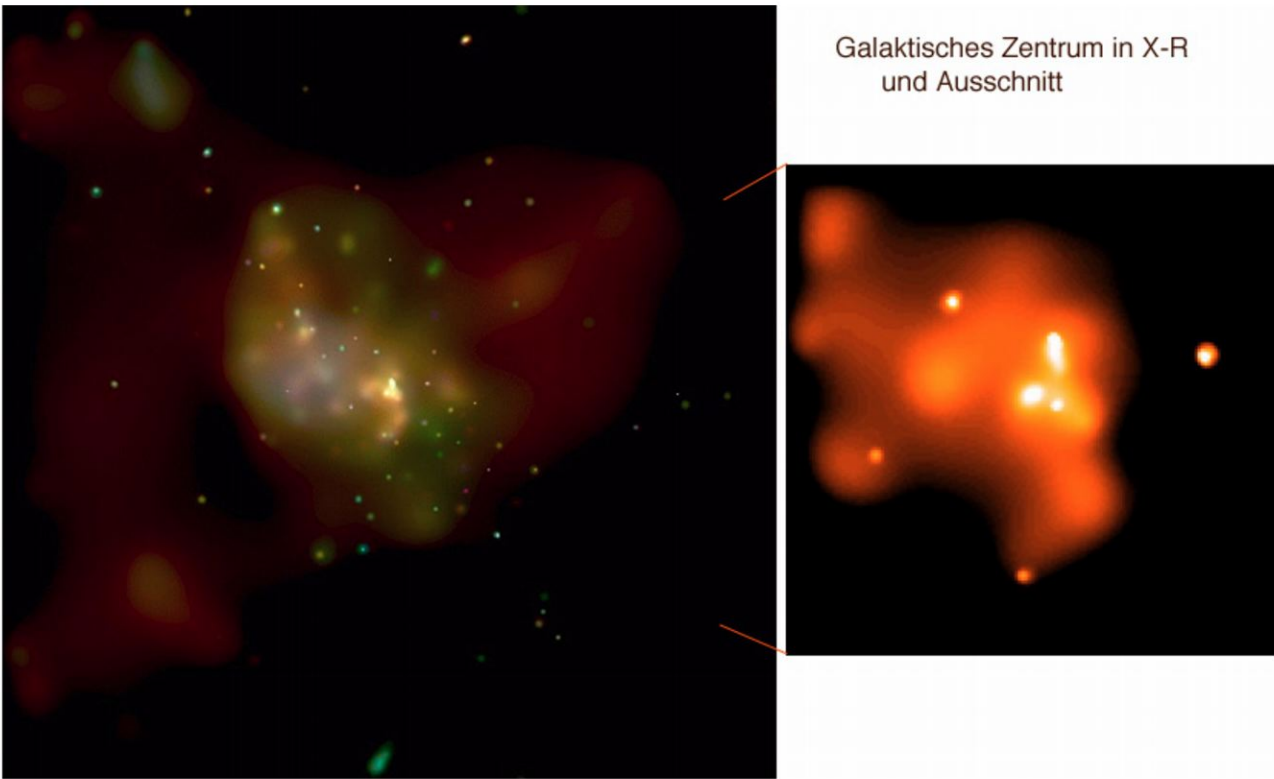
Es gibt im Kosmos bei den heißeren Objekten nahezu keine, die nicht ein Magnetfeld haben. Die heiße eingestürzte Materie ist ionisiert, also elektrisch geladen, und wird deshalb in ihrer Bewegung von den Feldlinien beeinflusst. Die hohe Temperatur am inneren Rand einer Akkretionsscheibe hat einen entsprechend hohen Druck zur Folge. Die Materie wird deshalb an einen direkten Einsturz behindert und weicht daraufhin, meist stoßweise, in Richtung der Rotationsachse aus. Dort sind, besonders bei Neutronensternen, ebenfalls in Richtung der Achse starke Magnetfelder. Diese bündeln die Materie und beschleunigt sie auf nahezu Lichtgeschwindigkeit; man spricht deshalb von Jets. In ihnen entsteht neben der thermischen auch Synchrotronstrahlung.

Die Abbildung zeigt einen Quasar im optischen und im Röntgenbereich mit Jet.



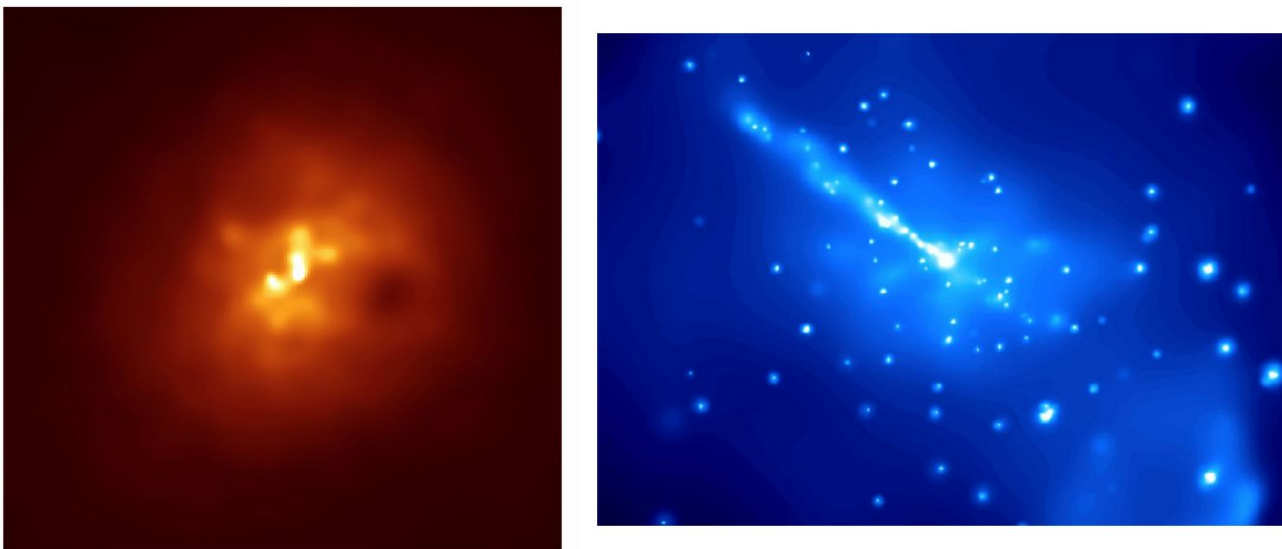
Hier ein Jet in drei Wellenlängenbereichen. Dabei ist zu beachten, dass die Darstellung im Röntgenbereich auf Grund der Aufnahmetechnik unscharf ist. In der Natur ist die Röntgenquelle sicherlich kompakter als die Radio- und die optische Quelle.

Galaktisches Zentrum in X-R
und Ausschnitt

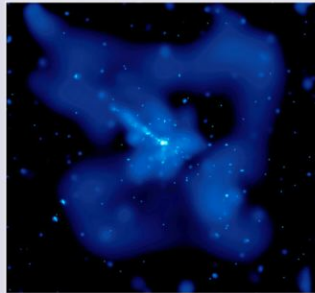


Die Abbildung links ist eine Komposition des Zentrums unserer Galaxis aus drei Aufnahmen im Röntgenlicht, rechts eine monochrome Vergrößerung.

Die linke Abbildung sieht unserem galaktischen Zentrum sehr ähnlich. Es handelt sich jedoch nicht um ein Galaktisches Zentrum, sondern um einen Galaxienhaufen aus mehreren Hundert Galaxien und ist einige Milliarden Lichtjahre entfernt (Abell 2597). Die rechte Abbildung zeigt das Zentrum der Galaxie NGC 5128, Centaurus A. Deutlich ist ein Jet aus dem Zentrum zu sehen. Auf der nächsten Seite ist diese Galaxie in mehreren Wellenlängenbereichen und der Komposition daraus abgebildet. Der Jet ist außer im Röntgenbereich auch im Radio-Kontinuum zu sehen, jedoch nicht bei einer Radio-Spektrallinie des Wasserstoffes und im optischen Bereich.



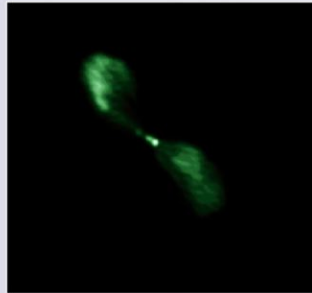
Die letzte Abbildung zeigt einen Überblick über die Röntgenstrahlung im Kosmos.



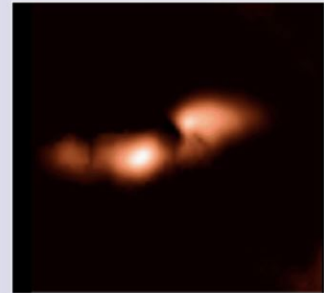
CHANDRA X-RAY



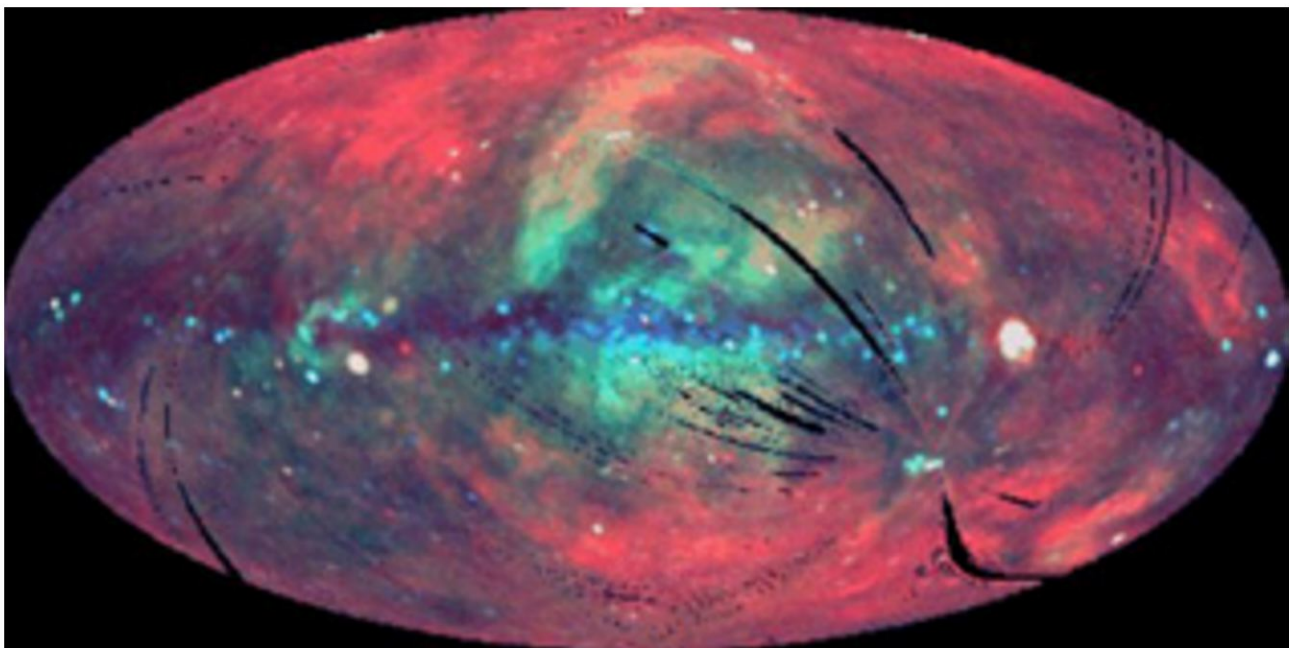
DSS OPTICAL



NRAO RADIO
CONTINUUM



NRAO RADIO
(21-CM)



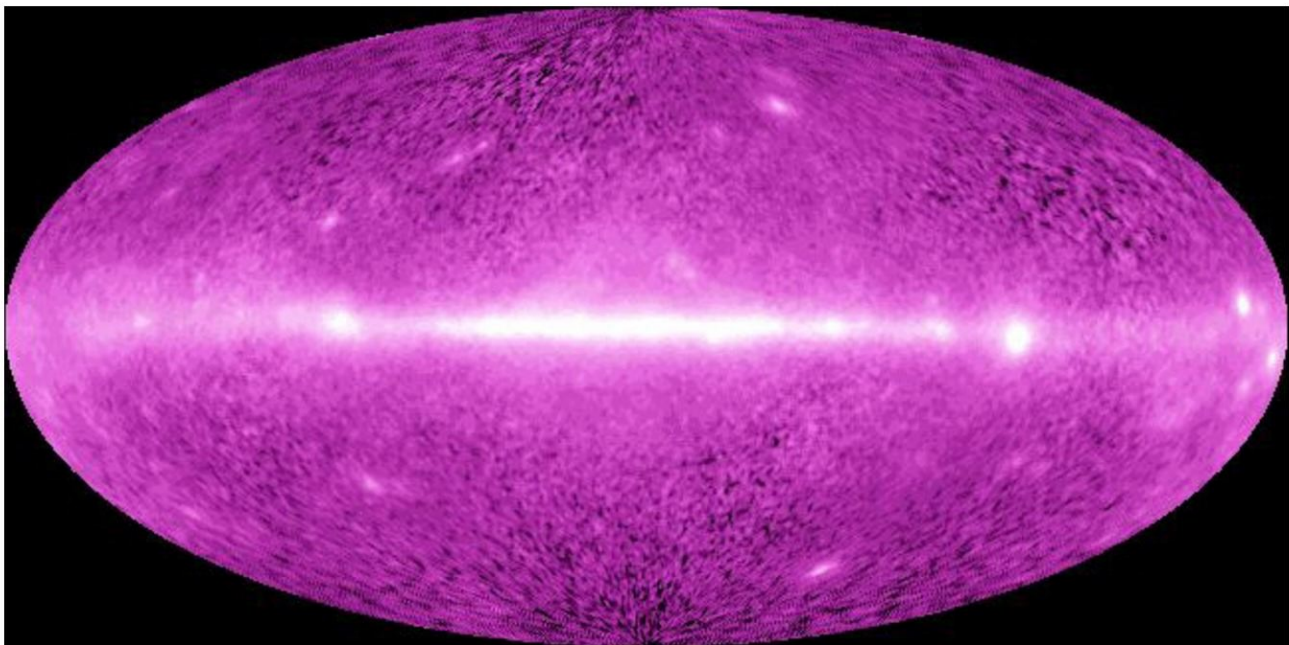
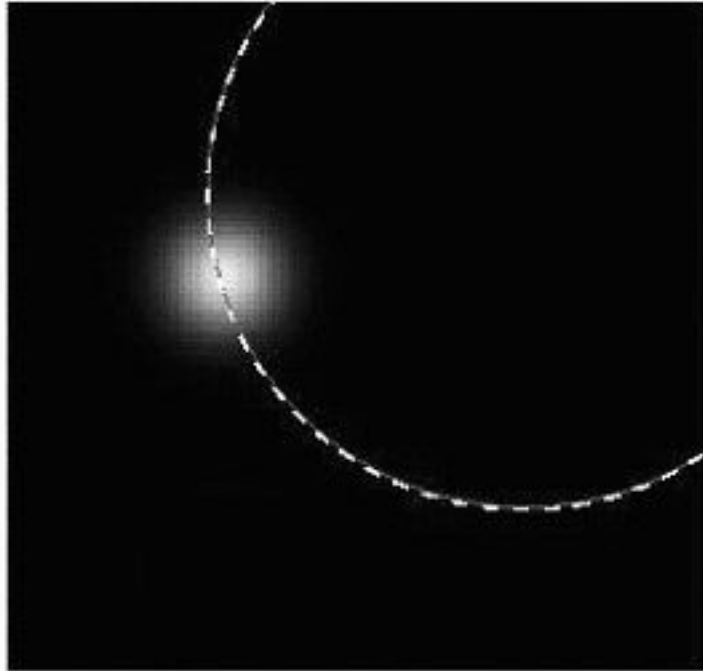
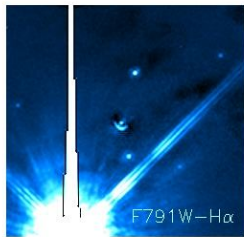
Gamma(γ) - Strahlung

Die γ -Strahlung mit Wellenlängen von 0,4 bis 10^{-4} nm Wellenlänge und Frequenzen von $8 \cdot 10^{17}$ bis $4,7 \cdot 10^{21}$ Hz liegt im Bereich der Röntgenstrahlen. Unter γ -Strahlen versteht man jedoch Photonen, die durch Elementarteilchenprozesse oder durch Übergänge von Atomkernniveaus entstehen. Sie werden zur Strahlentherapie und zur Materialuntersuchung verwendet.

Im Kosmos entsteht sie demzufolge überall dort, wo Elementarteilchen-Prozesse oder Kernreaktionen stattfinden. In der Lufthülle der Erde werden sie in den oberen Schichten (100 km Höhe) absorbiert. Deshalb kann man sie vom Erdboden aus nur indirekt (seit Juli 2002) oder von Satelliten aus registrieren. Für die hochenergetische γ -Strahlung ist auch der interstellare Raum trübe; die „Sichtweite“ beträgt nur einige Millionen Lichtjahre. Diese Photonen werden von den in viel größerer Anzahl vorhandenen anderen Photonen „ausgebremst“.

Die γ -Strahlen werden, bis auf Ausnahmen, nicht kontinuierlich ausgesendet, sondern es gibt immer wieder Strahlenausbrüche der Quellen, rechts ein Beispiel. Das S/W-Bild zeigt einen γ -Ausbruch über einem Sonnenfleck (Messung indirekt, Juli 2002, Konstruktion des Bildes August 2002). In den extrem inhomogenen Magnetfeldern über Sonnenflecken können

Elektronen und Protonen so weit beschleunigt werden, dass es zu Teilchenreaktionen kommt. Unten ein γ -Blick in den Kosmos.



Ende