

## Astrophysik mit radioaktiven Isotopen

Roland Diehl und Camilla Juul Hansen

### Zum Thema

Im Universum ist der Wandel normal und es gibt nur Weniges was verlässlich und konstant ist. Gewaltige Ereignisse fordern unser Vorstellungsvermögen heraus, so die Explosion von Sternen, oder mysteriöse Energieblitze in Gamma- oder Radio-Quellen (GRBs, FRBs). Die Bausteine für Atomkerne hingegen, die das Universum anfangs als Folge des auskühlenden heißen Urknalls mitgegeben bekam, werden seither weder zerstört noch neu erzeugt, sie bleibt trotz der teilweise stürmischen kosmischen Entwicklung eine Konstante. Die Zusammensetzung kosmischer Materie allerdings verändert sich dramatisch, von der anfänglichen Dominanz des Wasserstoffs in die heutige Vielfalt unserer Welt mit Kohlenstoff, Sauerstoff, Eisen (den Elementen des Lebens), ebenso Gold, Platin, Blei, Uran (den seltenen Elementen unseres Luxuslebens und auch der Hochtechnologie). Dies wird „chemische Entwicklung“ genannt, obwohl keine chemischen Reaktionen hier beteiligt sind: Ein Umsortieren der Nukleonen zu den unterschiedlichen chemischen Elementen und ihrer diversen Isotope ist dafür verantwortlich.

Kernreaktionen sind verantwortlich für dieses Umsortieren, also z.B. Kernfusion. Diese laufen im Innern von Sternen ab, sowie in Sternexplosionen. Die dichten und heißen Regionen, die kosmische Fusionsöfen darstellen, definieren das Innere dieser Objekte. Sie sind durch die massive Sternhülle der direkten Beobachtung von Aussen entzogen. In der Wirkung der Fusionsreaktionen lässt sich dieses Innere aber indirekt studieren: Die kosmische Nukleosynthese erzeugt in der grossen Vielfalt an neuen Atomkernen auch viele, die instabil sind. Einige dieser Isotopenarten zerfallen erst nachdem sie in den interstellaren Raum geschleudert wurden.

Radioaktiver Zerfall mit seiner für jedes Isotop charakteristischen Zerfallszeit stellt uns also kosmische Uhren zur Verfügung, die deren Reiseweg seit ihrer Erzeugung kennzeichnen. Eine Astronomie mit radioaktiven Isotopen öffnet einen direkten Zugang zum Studium kosmischer Nukleosynthese und ihren Quell-Objekten. Dieses Forschungsfeld wird als „Nukleare Astrophysik“ bezeichnet, da es interdisziplinär zwischen Astrophysik und Kernphysik angesiedelt ist. In diesem Artikel beschreiben wir diese Astronomie mit ihren astrophysikalischen Grundlagen, ihrer Beiträge und Erkenntnisse, sowie die künftigen Herausforderungen.

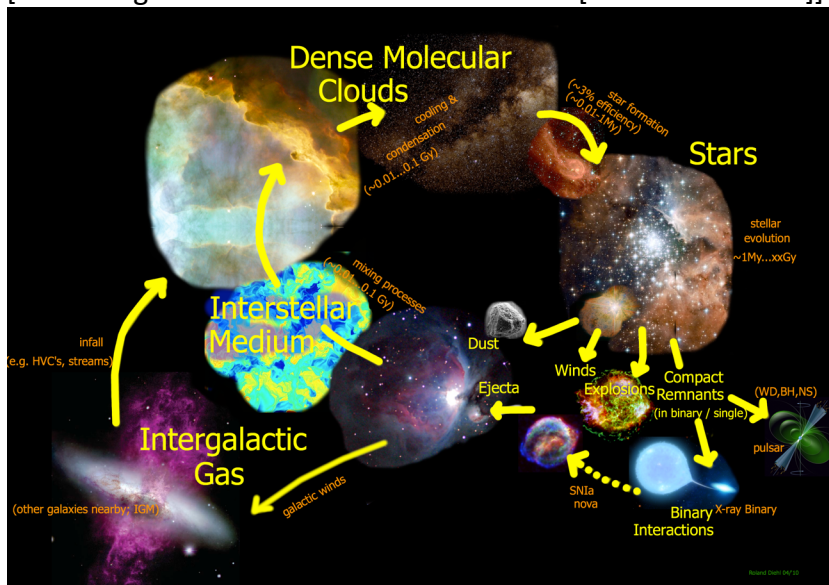
### Grundlagen und Kontext

#### Kernfusions-Reaktionen im Universum

Kernfusions-Reaktionen benötigen extreme Bedingungen, so wie sie nur im Innern der Sterne oder in Stern-Kollisionen und -Explosionen herrschen. Aufgrund der Coulomb-Abstossung der positiv geladenen Atomkerne ist es aufwendig, genügend kinetische Energie in thermischer Bewegung zu konzentrieren um diese Abstossung zu überwinden: Im Sonnen-Innern herrschen als Bedingung zur Fusion von Wasserstoff zu Helium 15 Millionen Grad bei einer Dichte von  $150 \text{ g cm}^{-3}$ , in Sternexplosionen sind Milliarden Grad und  $10^4$  Tonnen pro  $\text{cm}^3$  charakteristische Werte. Kosmisches Gas wird in diesen eher seltenen und in Raum und Zeit sehr konzentrierten Bereichen nachhaltig verändert, indem aus den Atomkern-Sorten des

Sternmaterials teilweise neue Nukleonen-Kombinationen zusammengesetzt werden, also neue Atomkern-Sorten und Isotope als Produkt entstehen, die vorher nicht oder nur in geringer Menge vorhanden waren. Aus vier Helium-Kernen kann so Kohlenstoff entstehen, aus sechs He-Kernen der Sauerstoff, und aus zwei Silizium-Kernen kann Eisen entstehen. Durch aufeinanderfolgende derartige Umgebungs-Erfahrungen wird so im Laufe kosmischer Zeiten aus dem anfänglich wasserstoffdominierten kosmischen Gas eine Gas-Zusammensetzung in der uns heute bekannten Vielfalt. Von den lebensnotwendigen Basiselementen Kohlenstoff, Sauerstoff, Calcium, Eisen, usw. über Edelgase und Edelmetalle und auch z.B. radioaktives Uran, ist unsere Umwelt geprägt von dem Durchlaufen kosmischer Materie durch Sterne und Explosionen (siehe Abb. 1).

[Abbildung 1: Kosmischer Materie-Kreislauf [zu überarbeiten!]]



Diese Vielfalt ist also Resultat eines komplexen Zusammenwirkens von Gastransport im interstellaren Raum (bei ganz geringer Dichte von wenigen Atomen pro  $\text{cm}^3$ ), dem Entstehen interstellarer Gaswolken (in denen sich Moleküle bilden) und danach der eigentlichen neuen Stern-Bildung (als kosmische Kernreaktoren). Im weiteren Verlauf entwickeln sich diese Sterne unter Fusion und Verbrauch des nuklearen Brennstoffs, die hierbei freigesetzte Kern-Bindungs-Energie hält Sterne als Objekte über längere Zeiträume stabil, und liefert uns so nebenbei das lebensnotwendige Sonnenlicht.

In ihren späten Entwicklungsstadien werden Sterne instabil. Massereichere Varianten implodieren nach Aufzehrung des nuklearen Fusionsbrennstoffs (d.h. wenn der Kern zu Eisen, dem Element höchster Kernbindung, fusioniert ist); daraus entsteht auf komplexe Weise oft, aber nicht immer, eine Supernova-Explosion, die viel Sternen-Material ausschleudert (diese massereicheren Sterne setzen so viel Energie um, dass starke Sternwinde entstehen, die ebenfalls Sternenmaterie in bedeutender Menge zurück ins interstellare Gas liefern). [Falls die Explosionsenergie nicht ausreicht, um alles Material herauszuschleudern, kann ein Teil dessen zurückfallen und einen Neutronenstern bilden.] Die masseärmeren Sterne enden in einem kompakten Reststern, genannt Weisser Zwerg, der unendlich langsam erkaltet und eine Art Friedhof für kosmische Materie bildet. Aber auch diese kompakten Reststerne, die typische Massen ähnlich unserer Sonne haben, können noch zur chemischen Entwicklung beitragen, falls sie zusammenstossen, oder wenn sie mit einem nahen Begleitstern in einen

Masseaustausch-Prozessen kommen: Dies führt zu Supernova-Explosionen eines anderen Typs, genannt Supernova Ia. Diese haben den überwiegenden Anteil an kosmischem Eisen erzeugt.

Eisen ist die stabilste Konfiguration eines Gebildes aus den Atomkernbausteinen Proton und Neutron, den Nukleonen, mit 28 Protonen: Die kurzreichweitige Kernbindungskraft („starke Wechselwirkung“) zwischen den Nukleonen steht im Wettbewerb mit der Coulomb-Abstossung, die mit der Distanz proportional kleiner wird und proportional zur Ladung ist. Mit wachsender Protonen-Anzahl für schwerere Elemente steigt letztere. Schwerere Atomkerne sind stabilisiert indem der Anteil an Neutronen vermehrt ist; diese erfahren ebenfalls Kernbindung, sind aber als elektrisch neutrale Hadronen nicht der Coulomb-Abstossung unterworfen. Elemente schwerer als etwa Calcium sind bereits typisch reicher an Neutronen als an Protonen, und dieses Verhältnis ( $n:p$ ;  $2:2=1$  für Heliumkerne) erreicht für Blei  $126:82=1.5$ .

[Freie Neutronen haben eine Halbwertszeit von nur 15 Minuten. Aber wenn sie in Kerne eingebunden sind können sie Milliarden von Jahren überleben.]

Anlagerung von Neutronen umgeht als Kernfusionsreaktion die immer stärker werdende elektrostatische Abstossung. Wiederholt ausgeführt resultieren immer schwerere Isotope des betreffenden Elements. Eine anschließende Umwandlung eines der Neutronen zum Proton im gebundenen Atomkern ein Isotop des nächsthöheren Elements. Die „schwache Wechselwirkung“ der Nukleonen ist ursächlich für einen derartigen radioaktiven Zerfall (siehe Abb.), also die Umwandlung von Proton in Neutron und umgekehrt. Hierbei werden auch jeweils die Leptonen Elektron und Neutrino bzw. ihre Antiteilchen mit erzeugt; Ladungs- und Impuls-Bilanzgleichungen bestätigen unser Verständnis radioaktiven Zerfalls und dieser „schwachen Wechselwirkung“ als eine der vier physikalischen Grund-Wechselwirkungen. So stellen wir uns die Synthese praktisch aller schweren Elemente und Isotope jenseits der Eisen-Gruppe vor. Das Universum hält offenbar Orte bereit, in denen Neutronen-Bestrahlung erfolgt. Hier unterscheiden wir Bestrahlung über lange Zeiten, im s(low)-Prozess, oder sehr intensive, rasche Neutronenanlagerung, in einem r(apid)-Prozess.

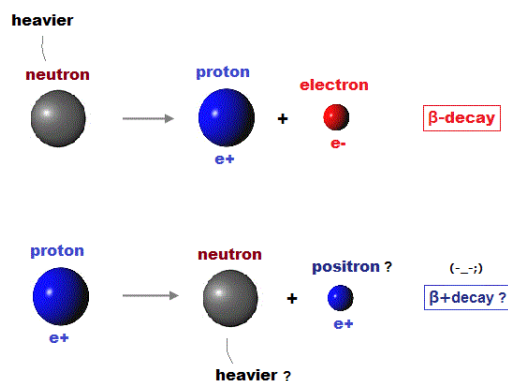


Abb. 2: Beta-Zerfall: Umwandlung von Protonen in Neutronen

Es leuchtet ein, dass die Bedingungen sowohl für die Fusionsreaktionen geladener Atomkerne als auch die für Neutronen-Anlagerungs-Reaktionen unterschiedlich sein können, je nach kosmischem Objekt, das dafür jeweils infrage kommt – dies ist der astrophysikalische Anteil der Nukleosynthese. Zusätzlich ist plausibel, dass die Bindungsfähigkeit der Nukleonen für unterschiedliche Isotope eine Rolle spielt bei den Reaktionspfaden der Kernreaktionen, die ein jedes Isotop erzeugen. Dies ist der kernphysikalische Anteil, den wir studieren können, indem wir die Kernbindung in ihrer Vielfalt im Labor untersuchen. Indem wir astronomisch

neu erzeugte Atomkerne vermessen, und ihre Synthese in kombinierten Modellen aus Kernreaktionsnetzwerken in den Umgebungsbedingungen spezifischer kosmischer Objekte nachzustellen versuchen, können wir den Erfolg unserer Vorstellungen bemessen. Dieses inter-disziplinäre Studium kosmischer Nukleosynthese stellt die Nukleare Astrophysik dar.

### Kosmische Orte von Nukleosynthese

Kernfusionsreaktionen hatten unmittelbar nach dem Urknall nur wenig Zeit ihre Wirkung zu entfalten. Aufgrund der raschen Ausdehnung waren die Produkte der Wasserstoff-Fusionskette kaum in der Lage, noch durch hinreichend energiereiche Kollisionen die weiteren Schritte hin zu schwereren Isotopen zu erlangen. Da es kein stabiles Isotop aus zwei Helium-Kernen gibt, also der Nukleonenmasse 8 und als Element  ${}^8\text{Be}$ , ist die  $3\alpha$ -Reaktion eine zusätzliche Hürde im expandierenden Medium, denn hier müssen sich 3 Heliumkerne zusammenfinden um  ${}^{12}\text{C}$  zu bilden. Erst mit der Entstehung von Sternen 400.000 Mio. Jahre nach dem Urknall wird im Sterninneren Helium so konzentriert bereitgestellt, dass bedeutende Mengen an Kohlenstoff durch Kernfusion erzeugt und dann in den starken Winden eines solchen Riesensterns ins interstellare Medium geblasen werden. Mit C, N, O als Beimischung laufen dann in der folgenden, aus mit diesen „Metallen“ angereichertem Gas gebildeten Sterneneration neben der Wasserstoff-Fusion noch weitere Kernreaktionen ab, die die elementare Vielfalt bis zu mittelschweren Elementen wie Na, Mg bereichern. Grundlage dafür sind katalytische Reaktionen wie der CNO-Zyklus der Wasserstoff-Fusion. Auch Neutronen-Anlagerungsreaktionen (siehe Infokasten) spielen in Sternen eine Rolle, z.B. infolge der durch die  ${}^{13}\text{C}(\alpha,n){}^{16}\text{O}$  Reaktion freigesetzten Neutronen. Durch Einfang dieser Neutronen in Sternen mit 1.3 – 8 Sonnenmassen, können schwere Elemente wie Blei entstehen.

Sterne mit Massen oberhalb des 8–10-fachen der Sonnenmasse durchlaufen Kernfusionsketten in ihrem Kern jenseits des Heliumbrennens, also die Kernfusion von C, O, Ne, Si, bis das Eisen als Element mit der höchsten Kernbindungsenergie pro Nukleon dem ein Ende setzt; dies wurzelt in den Eigenheiten der Kernkraft und Kern-Struktur.

Die Fusion leichter Atomkerne zu schwereren und fester gebundenen Atomkerne treibt die Entwicklung eines Sterns, indem nukleare Bindungsenergie freigesetzt wird; diese nukleare Heizung des Sterninneren wirkt der Komprimierung durch die Gravitation entgegen. Mit den höheren Fusionstemperaturen bei der Fusion von O, Ne, Si sind häufiger Neutrino-erzeugende Reaktionen an der Fusion beteiligt. Diese Neutrinos tragen einen Teil der Kernbindungsenergie aus dem Sterninneren heraus ohne Heizwirkung, da sie kaum mit Materie wechselwirken. Damit wird dann der zur Fusion erforderliche Brennstoff rascher aufgebraucht, die Fusionsstadien O, Ne, Si-Brennen verlaufen sukzessive rascher. Der finale gravitative Kollaps mündet meist und auf noch etwas mysteriöse Weise in einer Supernova-Explosion. Diese Explosion schleudert das von Kernfusionen gezeichnete Gas bis auf einen kompakten kleineren Rest in den interstellaren Raum.

Ist die im kompakten Rest-Stern verbliebene Materie nun quasi verloren? Bekannt ist seit vielen Jahrzehnten, dass die kompakten Reststerne der Sternentwicklung leichterer Sterne, genannt „weisse Zwergsterne“, sehr bedeutend für kosmische Anreicherung mit neuen Atomkernen sind: Ein solcher weisser Zwerg besteht vorwiegend aus den Elementen C und O, und kann durch die Wirkung eines nahen Begleitsterns dazu gebracht werden, dass er durch extrem rasch verlaufende Fusion von  ${}^{12}\text{C}$  vollständig zerrissen wird. Die dabei in den interstellaren Raum geschleuderten Reaktionsprodukte bestehen vorwiegend aus Elementen der Eisengruppe. Die grosse Menge an frisch synthetisiertem radioaktivem  ${}^{56}\text{Ni}$  (von ca.  $\frac{1}{2}$  Sonnenmasse) erzeugt so viel radioaktiv befeuertes Nachleuchten, dass diese Variante von

Supernova-Explosionen sehr hell ist: Sie dienen als kosmische Leuchtfeuer mit einer berechenbaren, d.h. standardisierbaren, Helligkeit. Diese Supernovae des Typs Ia haben zur Entdeckung der beschleunigten Ausdehnung des Universums geführt, die mit dem Phänomen „dunkler Energie“ als Ursache eines der neueren Rätsel der Astrophysik und Kosmologie darstellt. Diese Anwendung derartiger Supernova-Explosionen des „Typs Ia“ wurde im Jahr 2011 mit dem Nobelpreis bedacht.

Weniger bekannt ist, dass für diese Stern-Kollisionen und -Explosionen eine Beschreibung in Form von wohldefinierten physikalischen Prozessen noch aussteht, mit der die beobachtete Variationsvielfalt der teils detailgenau gemessenen Ereignisse erklärt bzw. vorhergesagt werden kann. Dies gilt insbesondere für die Supernova-Varianten aller Typen, wo die gewaltigen astronomischen Anstrengungen der letzten Jahrzehnte viele empirisch erkennbare Unterklassen offensichtlich gemacht haben, die mit den empirischen/heuristischen Explosions-Modellen nicht dargestellt werden können. So werden u.a. auch Kollisionen zweier solcher kompakter weißer Zwergsterne als plausible Ereignisse verstanden, die eine Supernova des Typs Ia hervorbringen.

Ähnlich werden seit ~15-20 Jahren die Kollisionen von Neutronensternen, die kompakten Überreste von Gravitations-Kollaps-Supernovae, als interessante Nukleosynthese-Quellen betrachtet: Hier sollte es nicht an Neutronen mangeln, so dass ein „r Prozess“ plausibel ist, eine rasche Neutronen-Einfangs-Reaktionskette. Konventionell hielt man die nahe Umgebung des kompakten Neutronenstern-Überrestes einer Supernova für die plausible Quelle dieses „r Prozess“: Hier herrscht ungewöhnlich intensive Neutrino-Emission durch die Neutralisierung der einstürzenden Stern-Materie; unter diesen Bedingungen vermutete man extrem hohe Neutronenflüsse wie für den „r Prozess“ charakteristisch.

So wird interstellares Gas mit Elementen und Isotopen aus diesen diversen Quellen diverser Fusionsreaktionen angereichert. Ziel astrophysikalischer Forschung ist, in den Kernfusionsprodukten die Signaturen der Reaktionsumgebung freizulegen und kosmischen Objekten zuzuordnen, um so die jeweiligen Ursprungsorte der Elemente zu erkennen.

## Chemische Entwicklung des Universums

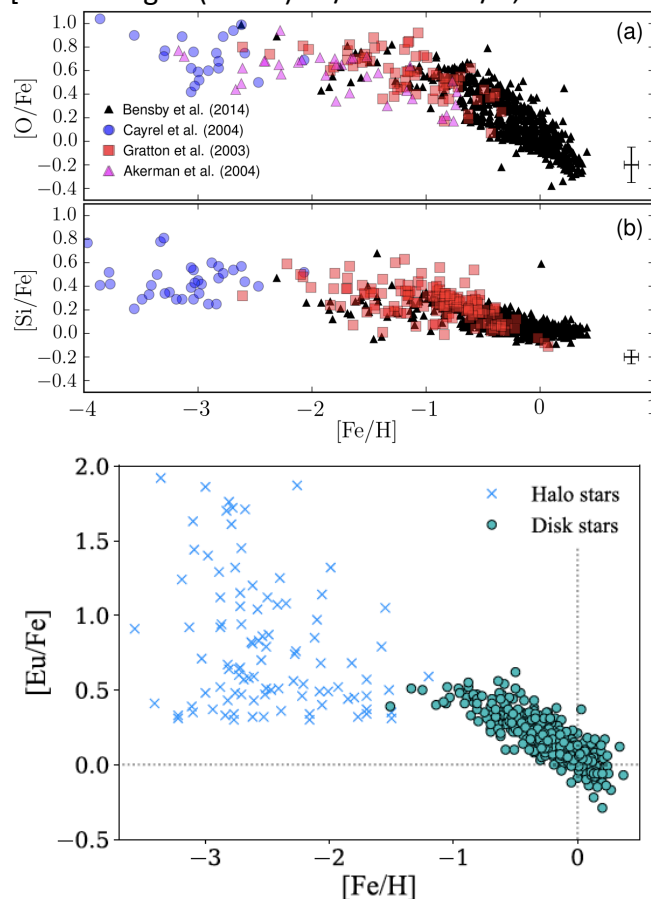
Nukleosynthese-Quellen schleudern neu fusionierte Atomkerne in den interstellaren Raum; über lange Zeit werden diese Ejekta durch Turbulenzen teilweise mit der vorhandenen interstellaren Materie durchmischt. Wenn diese sich endlich abgekühlt hat, entstehen neue Sterne, die nun bereits mit einer Elemente- und Isotopen-Vielfalt behaftet sind, in der so manche Kernreaktions-Kette etwas anders verlaufen kann als in Sternen der früheren, metallärmeren, Zusammensetzung. Diese sich wiederholende Entwicklung der Zusammensetzung kosmischen Gases wird auch „Chemische Entwicklung“ genannt; hier bezieht man sich auf die Entwicklung der Häufigkeit der verschiedenen chemischen Elemente, keine chemischen Reaktionen, sondern Kernreaktionen sind hierzu am Werk. „Isotopen-Häufigkeits-Entwicklung“ wäre daher eine genauere Bezeichnung dieser Veränderung in der Zusammensetzung kosmischen Gases durch den in Abbildung 1 illustrierten kosmischen Materie-Kreislauf.

Die oben diskutierten Quellen neu fusionierter Atomkerne sind im Verlauf der kosmischen Entwicklung zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedlich wirkungsvoll. So kann man am Verlauf der Anreicherung von Mg im Vergleich zur Anreicherung von Fe (Abb. 2 oben) erkennen, dass Fe eine andere wichtige Nukleosynthese-Quelle haben muss als Mg, da das Verhältnis dieser Elementhäufigkeiten sich im Verlauf der kosmischen Entwicklung offenbar ändert. Dies wird dem verzögerten Beitrag von Supernovae des Typs Ia zugewiesen, die erst

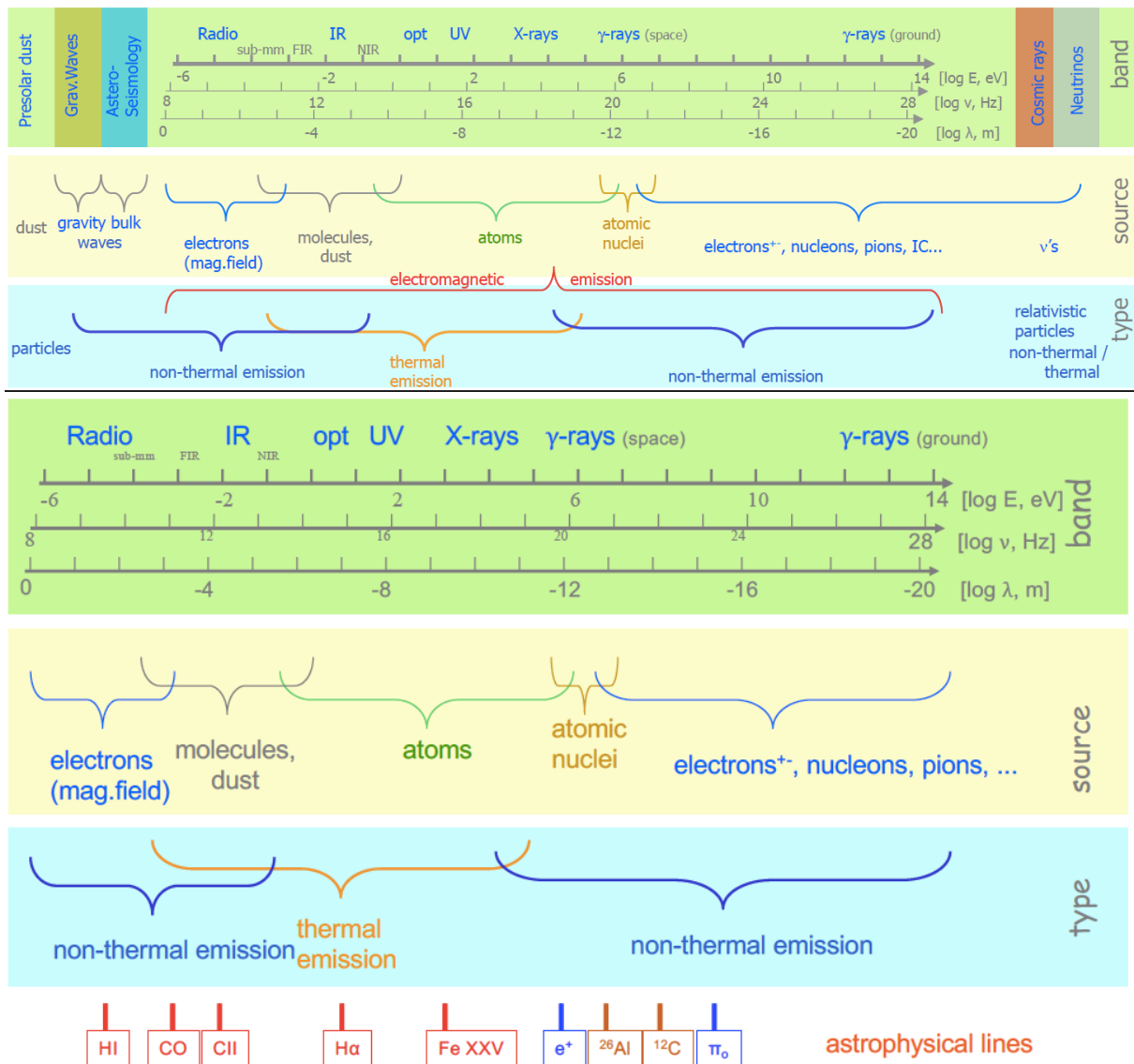
ihre grossen Fe-Beiträge liefern, nachdem die (langsamere) Sternentwicklung der (masseärmeren) Sterne diese Reststerne "weiser Zwerg" erzeugt haben. Derartige Diagramme erlauben den Vergleich aller Elemente und Isotope untereinander, und liefern so erste deutliche Hinweise auf die Quellen über unterschiedliche zeitliche Präferenzen, die astrophysikalisch den Entwicklungen der jeweiligen Quell-Populationen zugeordnet werden.

[ Abbildung 3: (oben) O/Fe over Fe/H, illustrating cosmic chemical evolution from massive stars up to  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$ , and from SNIa towards more recent times; this illustrates the delay of SNIa occurrences after beginnings of star formation]

[ Abbildung 3: (unten) Eu/Fe over Fe/H, illustrating r-process contributions across time]



## Astronomie radioaktiver Isotope



[ Abb 4: Astronomie mit elektromagnetischer Strahlung, und die „neuen Astronomien“ ]

Die Möglichkeiten astronomischer Beobachtungen haben sich seit der Nutzung erster astronomischer Teleskope vor etwa 400 Jahren gewaltig entwickelt. In der Spektroskopie elektromagnetischer Strahlung im Optischen Bereich seit ihrer Entdeckung durch Fraunhofer Anfang des 19. Jahrhunderts gab es enorme technische Fortschritte in Auflösung und Empfindlichkeit, die uns nun erlaubt „stellare Archäologie“ zu betreiben: Die Häufigkeiten unterschiedlicher Elemente können in zum Teil sehr seltenen und teilweise sogar ausserhalb unserer Milchstrasse gelegenen Sternen bestimmt werden; damit kann die Geschichte der Häufigkeitsentwicklungen aufgezeigt werden, sofern ein Basis-Element wie Fe oder O als Zeitmass verwendet wird. Diese Krücke muss man benutzen, um die Entwicklung in der Zeit zu kennen, im Bezug auf die Häufigkeitsentwicklung eines Referenzelements; wir werden darauf zurückkommen. Isotopen-Trennung gelingt allerdings im Optischen selbst mit spektralen Auflösungen von  $10^5$  nur für wenige leichte oder exotische Elemente, z.B. Lithium; meist ist die Verschiebung der Linien durch eine Neutronenmasse zu klein oder zu ungenau berechenbar.

Die Erschließung der Radio-, sub-mm- und Infrarot-Astronomie im vergangenen Jahrhundert bereitete den Zugang zu Molekülen im interstellaren Raum. Seit wenigen Jahren ist eine Auflösung erreicht, die sogar die Trennung von Spektrallinien unterschiedlicher Isotope wie  $^{36}\text{ArN}$  und  $^{26}\text{AlF}$  möglich macht. Im Röntgenbereich finden spektral aufgelöste Messungen mit Weltraumteleskopen die Linien hoch-ionisierter, H- oder He-ähnlicher Atome im heißen Plasma von Supernova-Überresten. Um Faktoren erhöhte Häufigkeiten gegenüber normalem interstellarem Gas signalisieren Beiträge der Nukleosynthese in der Supernova und ihrem Vorläuferstern.

Die ebenfalls weltraumbasierte Spektroskopie im Gammastrahlen-Bereich ist eine noch jüngere Entwicklung der letzten Jahrzehnte. Hier allein lässt sich die charakteristische Strahlung aus dem Atomkern messen, die eindeutig spezifischen Isotopen und ihrem radioaktiven Zerfall zuzuordnen ist. Obwohl nur eine Handvoll Isotope mit derzeitigen instrumentellen Empfindlichkeiten gemessen werden können, sind der vom Zustand des Gases unabhängige nukleare Ursprung und die Verfolgung des radioaktiven Zerfalls Qualitäten, die komplementäre Messungen von Nukleosynthese und damit Eingrenzung systematischer Effekte mit der Gamma-Spektroskopie ermöglichen.

Ungewohnt ist in diesem astronomischen Zusammenhang, dass der Einfang von Proben kosmischen Materials auch als eine Art Astronomie zu begreifen ist: Dieser macht direkt massenspektroskopische Untersuchungen in einzigartigem Detail im Labor möglich. Durch Nachweis der Zerfallsprodukte aus radioaktivem Zerfall in Meteoriten und deren Sternenstaub-Einschlüssen kann man die radioaktiven Vorkommen im Sonnensystem zum Zeitpunkt seiner Entstehung aus interstellaren Wolken herauslesen; dies erlaubt einen Blick in den sonnennahen interstellaren Raum wie er sich 4600 Millionen Jahre vor der Jetztzeit darstellte. Ähnlich erkannte man in Proben von Mondmaterial, und in Sedimenten und Krusten der Tiefsee, charakteristische Ablagerungen kosmischen radioaktiven Materials. In diesen Untersuchungen ermöglichen Messungen von radioaktiven Referenz-Substanzen die eine Datierung des Probenmaterials. Partikel der kosmischen Strahlung können in geeigneten Detektoren eingefangen werden; ihre direkte Untersuchung auf radioaktive Bestandteile ist ebenfalls als eine neue „Astronomie“ hinzugekommen. Auch hier liefert die radioaktive Beimischung eine kosmische Uhr, und damit über bekannte Ausbreitungseigenschaften eine kosmische Entfernungsbestimmung.

Das astronomische Instrumentarium der nuklearen Astrophysik besteht daher seit langem aus unterschiedlichen kosmischen Botschaftern; heute wird so etwas gerne unter zusätzlicher Einbeziehung von Neutrinos und Gravitationswellen auch „multi-messenger astrophysics“ genannt (siehe Abb. 4).

## Astrophysikalische Erkenntnisse und Fragen

### Neue Entwicklungen

Im Februar 2014 wurde eine Supernova des Typs Ia in einer Galaxie erkannt, die hinreichend nahe für die noch junge Gammastrahlen-Astronomie war. Nach vier Jahrzehnten der Hoffnung gelang damit bei der SN2014J genannten Supernova erstmals die astronomische Bestätigung der dominanten Rolle des  $^{56}\text{Ni}$  Isotops und seines Zerfalls als Energiequelle des Supernova-Leuchtens. Supernovae des Typs Ia werden als standardisierbare „kosmische Leuchtkerzen“ verwendet, und führten zu der Erkenntnis beschleunigter Expansion des Universums; die unverstandene Ursache dieser Expansions-Beschleunigung wird „dunkle Energie“ genannt. Diese Erkenntnis und ihre Basis in Supernova-Messungen wurde 2011 mit dem Nobelpreis



bedacht. Da ein konsistentes physikalisches Modell für Supernova-Leuchten noch nicht erarbeitet werden konnte, ist der direkte Beweis des  $^{56}\text{Ni}$ -Zerfalls ein Meilenstein in dieser Forschungsrichtung.

Im August 2017 gelang der spektakuläre Nachweis von Gravitationswellen anlässlich einer Neutronenstern-Kollision. Das spektroskopisch analysierte Nachleuchten dieses ‚Kilonova‘ genannten Ereignisses in elektromagnetischer Strahlung führte zu der Überzeugung, dass in diesem Ereignis offenbar schwere Elemente ausgeschleudert wurden, die typisch für r-Prozess-Nukleosynthese sind (siehe Informationskasten „kosmische Nukleosynthese“). Diese astronomisch-astrophysikalische Sensation wurde mit dem Physik-Nobel-Preis 2017 gewürdigt.

Damit ist offensichtlich, dass die in Neutronensternen als kompakte Reststerne der Sternentwicklung gelandete Materie noch nicht dem kosmischen Materiekreislauf entzogen sein muss. Durch deren Kollision kann ein bedeutender Teil der Nukleonen in Form neu erzeugter Atomkerne das interstellare Gas bedeutsam anreichern. Von Vielen wurde dies gefeiert als Entdeckung der Hauptquelle der durch r-Prozess erzeugten schweren Elemente. In Simulationsrechnungen der letzten Jahre war schon eher zweifelhaft geworden, ob bei einer Gravitationskollaps-Supernova die Bedingungen für den r-Prozess erreicht werden. Bei den Neutronenstern-Kollisionen erscheint die derzeitige Modellbeschreibung schon recht überzeugend; allerdings sind diese Ereignisse so selten präzise genug zu vermessen, dass uns möglicherweise eine ähnliche Erkenntnis unzureichenden Verständnisses in einigen Jahrzehnten bevorsteht, wenn die astronomischen Anstrengungen ihre Früchte anhand vieler verschiedener Kilonovae darbieten. Selbst bei GW170817 ist die Diskussion um Ungereimtheiten auch nach 2 Jahren in vollem Gange.

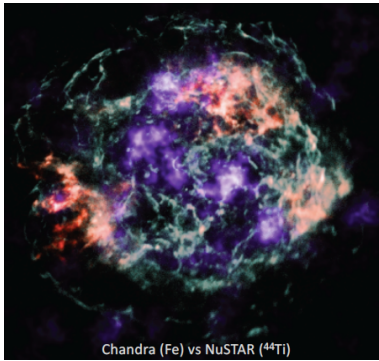
## Sternexplosionen

Der gravitative Kollaps eines massereichen Sterns führt nach empirischer Erkenntnis zur Explosion einer Supernova, eindrucksvoll im Detail breit astronomisch erfasst bei SN1987A in unserer Nachbargalaxie. Allerdings ist der eigentliche Vorgang von Kollaps und sich daraus entwickelnder Explosion der Beobachtung weitgehend entzogen durch einige Sonnenmassen an darüberliegendem Gas der Sternhülle: die Explosion findet im zentralen Bereich der innersten 3-4 Sonnenmassen (von insgesamt 22 Sonnenmassen im Fall von SN1987A) statt. Nur Neutrinos entweichen aus diesem inneren Bereich, alle elektromagnetische Strahlung wird von der Sternhülle absorbiert. Hier eröffnet die Messung von charakteristisch in diesem Zentralbereich neu erzeugten Atomkernen den direktesten der indirekten astronomischen Zugänge. Der kollabierende innere Teil des Vorläufersterns besteht überwiegend aus Eisen, alle weiter aussen befindlichen Teile des Sterns entgehen dem Kollaps und werden durch die Supernova-Explosion herausgeschleudert, liefern also ihre stellaren Nukleosyntheseprodukte ins interstellare Gas. Im Innern finden Kernreaktionen unter extremer Dichte und Temperatur statt, die nahelegen, dass Nukleonen sich ihrer am besten gebundenen Konfiguration, dem Eisen, annähern. Tatsächlich ist radioaktives  $^{56}\text{Ni}$  auch bei diesem Supernova-Typ wesentlich für die Helligkeit des Leuchtens der Supernova verantwortlich. Bei SN1987A wurden mit eilig zusammengebauten Ballon-Instrumenten die charakteristischen Linien des ebenfalls radioaktiven Zerfallsproduktes  $^{56}\text{Co}$  gemessen, allerdings mit einer unbefriedigenden Präzision. Aufregender noch war das Signal des  $^{56}\text{Co}$ -Zerfalls in charakteristischer Gammastrahlung, das ein Gammastrahlen-Instrument eines im Orbit befindlichen Sonnenspektrometers zu einem unerwartet frühen Zeitpunkt messen konnte, an dem man

eigentlich erwartete dass die Sternhülle solches im Innern erzeugte  $^{56}\text{Co}$  auch im Gammabereich noch sicher verdecken sollte.

Ähnliches ist vor wenigen Jahren bei einer Supernova des Typs Ia geschehen: Bei SN2014J fand das Gamma-Spektrometer SPI des INTEGRAL Satellitenteleskops sogar wenige Tage nach der Explosion die charakteristischen Gammalinien des Zerfalls von  $^{56}\text{Ni}$ , mit 9 Tagen Zerfallszeit; nach Modellrechnungen erwarte man die aus dem Inneren nach aussen dringende Gammastrahlung frühestens nach etwa 3 Monaten. Mit dem gleichen Instrument wurden von SN2014J wenig später auch die charakteristischen  $^{56}\text{Co}$  Zerfalls-Linien deutlich gemessen. Dies war das erste Mal, dass von einer Supernova des Typs Ia (der in der Kosmologie als Helligkeits-Standard genutzt wird) die eigentliche Energiequelle des Supernova-Lichts direkt bestimmt werden konnte. Obwohl die aus den Gamma-Intensitäten bestimmte  $^{56}\text{Ni}$ -Menge mit den Modellrechnungen gut in Einklang ist, gibt doch die Art und Weise, wie die Supernova-Hülle nach der Explosion eben nicht so ganz gleichmässig transparent zu werden scheint, einige Rätsel auf. Die Modellrechnungen gehen nämlich weitestgehend von einem sphärisch-symmetrischen, d.h. 1-dimensionalen Explosionsmodell aus, das nun zunehmend hinterfragt wird. Sollte das gleichförmige Erscheinungsbild dieser Explosionen damit zusammenhängen, dass man bisher das von der Sternhülle absorbierte und zu millionenfach niederenergetischen Photonen heruntergestreute Licht als einzige astronomische Informationsquelle hatte, und die Modellrechnungen des Strahlungstransports eventuell eine unregelmässige Morphologie der Explosionswolke nicht recht erfasst haben?

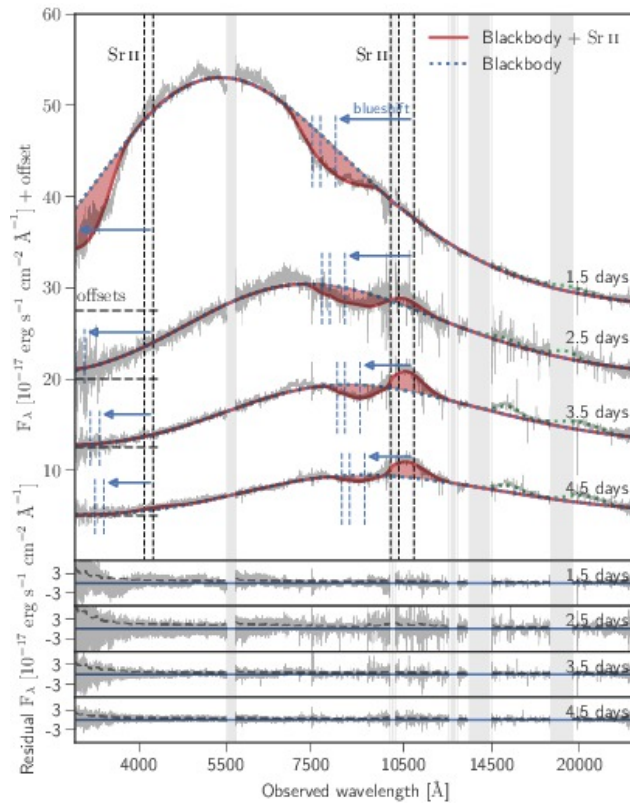
Interessant ist hierzu auch die Messung eines anderen radioaktiven Isotops, des  $^{44}\text{Ti}$ . Dieses Isotop erwartet man möglicherweise aus den Supernovae vom Typ Kern-Kollaps, falls die Explosion im Innern recht turbulent und eher unsymmetrisch verläuft. 1994 von einem Gamma-Teleskop der ersten Generation entdeckt im 350 Jahre alten Supernova-Überrest Cas A, ist  $^{44}\text{Ti}$  mit seiner charakteristischen Zerfallszeit von 89 Jahren mittlerweile zu einem spannenden Boten der Supernova-Explosionsphysik geworden. Messungen der beiden niederenergetischen Gammalinien der  $^{44}\text{Ti}$  Zerfallskette bei 68 und 78 keV Energie von Cas A mit einem abbildenden Teleskop für diesen Energiebereich (Abb. 5) zeigte, dass die radioaktiven inneren Ejekta, durch  $^{44}\text{Ti}$  Gammalinien markiert, in etwa 5 größeren Klumpen angeordnet waren. Dies ist eine völlig andere Erscheinung als eine (bisher allgemein als plausibel angenommene) zwiebelschalenähnliche Struktur (Abb. 5), bei der weit innen erzeugte Produkte wie  $^{44}\text{Ti}$  garnicht oder in viel geringerer Menge ausgeschleudert werden sollten. Dies beweist astronomisch dass die Vorstellung einer kugelsymmetrischen Supernova irrt. Dies gilt zumindest für die Cas A Explosion; interessant ist, dass auch bei SN1987A mittlerweile dieses  $^{44}\text{Ti}$  Isotop in erstaunlich grosser Menge über seine Gammalinien nachgewiesen wurde. Die beiden am Besten vermessenen Gravitations-Kollaps-Supernova-Explosionen zeigen also ein anderes Bild als die bis vor einigen Jahren üblichen Modellrechnungen. Gerade sind Astrophysiker in der Weiterentwicklung ihrer Modelle den symmetrie-brechenden Effekten auf der Spur, die vermutlich sogar das Zünglein an der Waage sind, das bestimmt, ob aus der gravitativen Implosion überhaupt eine Explosion entstehen kann [references explodability].



[Abb 5: Der Cas A Supernova-Überrest. *Purple=Emission from all newly-produced  $^{44}\text{Ti}$ ; red: Iron recombination-line emission. The latter is different and has been misleading, as it depends on where the atoms have the proper ionisation level to allow such atomic transition*]

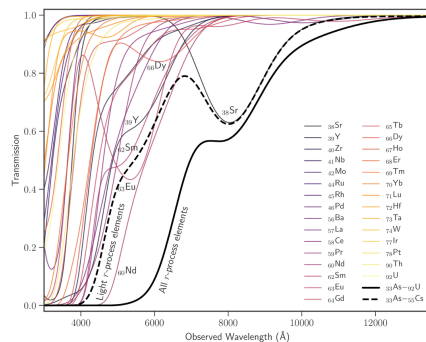
Eine überraschende Möglichkeit ergab sich im Jahr 2017, eine sehr viel exotischere Art einer kosmischen Nukleosynthese-Quelle, einer Neutronenstern-Kollision und ihrer Kernfusionen direkt zu untersuchen. Das neue astronomische Fenster des Nachweises von Gravitationswellen hat dies eröffnet, mit den LIGO (USA) und VIRGO (Italien) Messanlagen. Im August 2017 wurde das charakteristische Gravitationswellenmuster einer Verschmelzung von zwei Neutronensternen nachgewiesen, zeitgleich beobachteten die Gamma-Instrumente der INTEGRAL- und der Fermi-Satellitenmission einen Gammablitz. Aufgrund dieses astronomischen Alarms gelang es das erste Mal, eine spektroskopische Beobachtung des radioaktiven Nachglühens eines derartig exotischen Nukleosynthese-Ereignisses mit großen bodengebundenen Teleskopen und Spektrographen durchzuführen. Über einen Zeitraum von  $\sim 1 - 5$  Tagen nach dem durch Gravitationswellen und Gammablitz markierten Ereignis war zu beobachten, wie das Nachleuchten schwächer wurde und das Licht sich vom blauen optischen Licht bis ins Infrarot verlagerte. Dies ermöglichte eine detaillierte Analyse und einen Vergleich mit Modellrechnungen der Neutronensternkollision mit dabei auftretenden Kernfusionsprozessen und anschließender Abstrahlung der in einer Hülle absorbierten radioaktiven Energie. Letzteres hat den Namen ‚Kilonova‘ erhalten, da die Helligkeit im Bereich zwischen einer Nova- und einer Supernova-Explosion liegt.

Eine erste berichtete Kilonova-Messung vom Jahr 2013 war noch recht ungenau. Aber die dadurch neu stimulierten Simulationsrechnungen hatten vorhergesagt, dass die Neutronenfusionen große Mengen an Lanthaniden ergeben würden. Das wäre ein natürliches Ergebnis der großen Anzahl von Neutronen, die die Kernprozesse zur Bildung schwerer (instabiler) Isotope antreiben würden. Solche Lanthanide können nicht auf der Erde, sondern nur im Weltraum entstehen. Anschließend zerfallen die radioaktiven Isotope der Lanthanide, und werden zu uns bekannten stabilen Isotopen dieser Elemente. Dieser Zerfall schien zu beobachteten Infrarotbildern zu passen, da der Zerfall der Lanthanide ein Nachglühen abgibt, das im Laufe von zirka drei Wochen abnehmen sollte.



[Abb 6: Spektrum der Kilonova, Sr Signal in

rot]



Die Spektren der Kilonova von 2017 ergaben jedoch eine andere Geschichte. Dieses Ereignis war im Vergleich zum Ereignis vom 2013 überraschend blau. Das OVOT-Teleskop des SWIFT Satelliten zeigte auch einen hellen UV-Impuls, und nicht das erwartete starke Röntgensignal. Um zu verstehen, was bei dieser Kilonova im Jahr 2017 geschah, modellierten die Wissenschaftler das elektromagnetische Signal, und erkannten, dass es fast wie ein perfekter Schwarzkörper strahlen würde, allerdings mit einem starken Absorptionsmerkmal im visuellen Teil. Um zu entschlüsseln, was dieses Merkmal war, machten sie sich daran, alle schweren Neutroneneinfang-Elemente von Ga bis U einzeln zu modellieren. Auf drei unabhängige Arten fanden sie immer wieder, dass das Absorptionsmerkmal auf eine große Menge ( $>5 \cdot 10^{-5}$  Sonnenmassen) frisch gebildetes Sr schließen lässt, welches leuchtete, und das Licht aus der sich schnell ausdehnenden Hülle, die nach der Kilonova-Explosion folgte, absorbierte. Das Team konnte außerdem sehen, dass die Explosion sich mit 20% der Lichtgeschwindigkeit von der Verschmelzung ausbreitete. Dies war überraschend: Solch ein leichtes Element zu finden (Sr ist leichter als die erwarteten Lanthanide), passt aber hervorragend zu dem blauen Licht der Kilonova 2017.

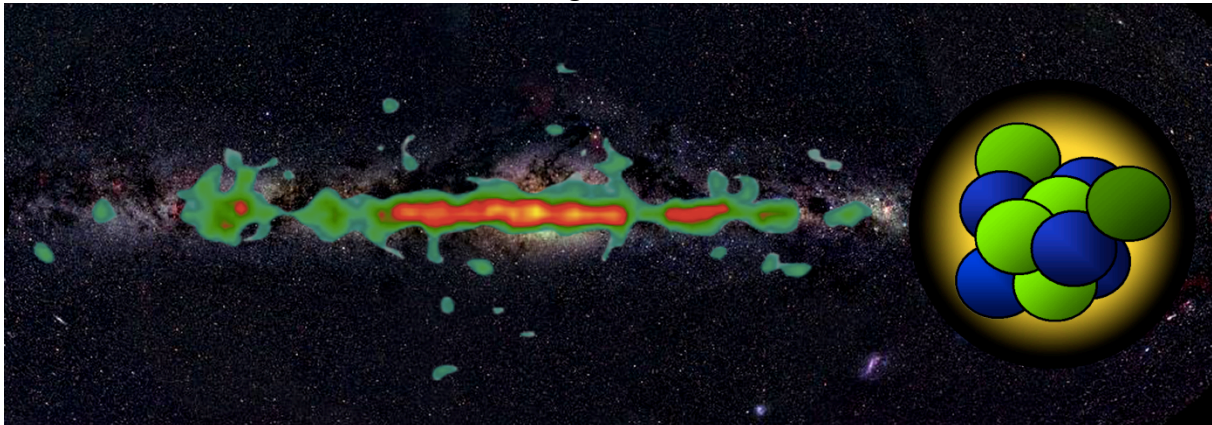
[Abb. 4-6: SN2014J Gammalinien, Cas A 44Ti Bild; Kilonova mit Sr Signatur]

### Ejekta und ihr kosmischer Transport

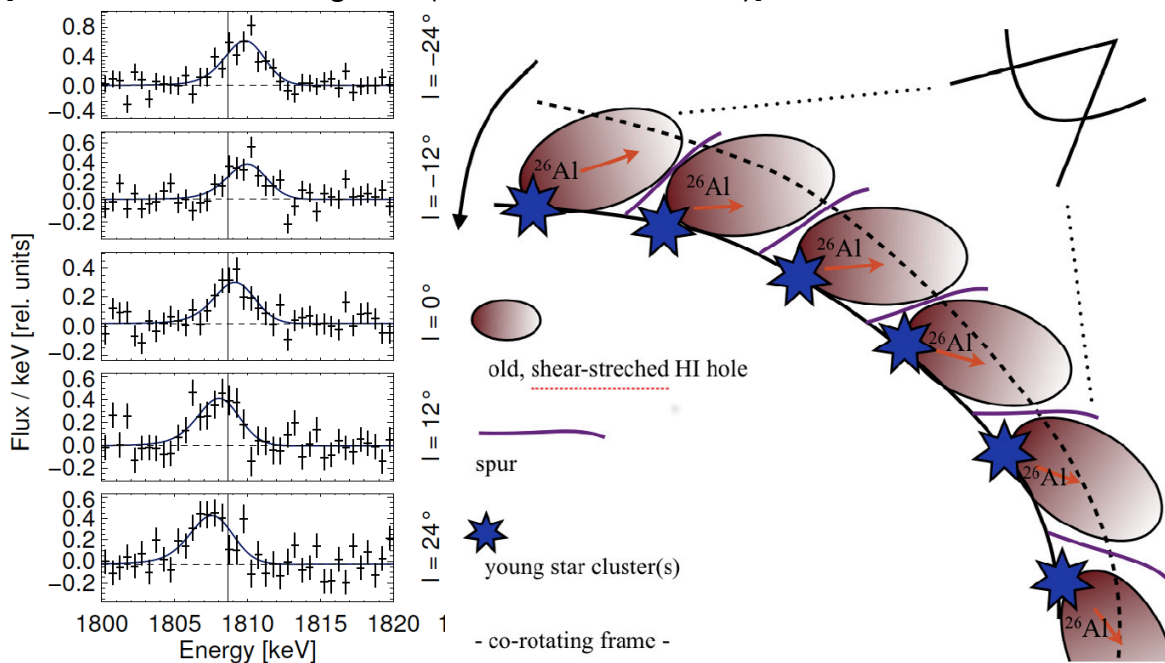
Was geschieht im interstellaren Raum mit den neu erzeugten Atomkernen, wie finden sie ihren Weg zu uns? Dazu müssen wir das turbulente interstellare Medium verstehen, wie es speziell durch Supernova-Explosionen und starke Sternwinde zu heftiger Dynamik angeregt wird. Im heissen Auswurfmaterial einer Supernova-Explosion herrschen Temperaturen im Röntgenbereich ( $10^7\text{K}$  und mehr). Da ist es ein weiter Weg zum 10-20 K kalten Gas, das die Gravitation genügend dicht sammeln kann zur Bildung neuer Sterne und Planeten. Dies geschieht in Zeiträumen von etwa 100 Millionen Jahren; wie kann man das vermessen?

Hier kommt uns Radioaktivität zuhelfe. Sie markiert neu entstandene Atomkerne, nach deren Zerfall ist radioaktive Strahlung nicht mehr sichtbar, hingegen kurz nach der Erzeugung schon. Interessante derartige radioaktive Uhren sind der Zerfall von  $^{26}\text{Al}$  und  $^{60}\text{Fe}$  (1 bzw. 3.7 Millionen Jahre Zerfallszeit) oder  $^{244}\text{Pu}$  (120 Millionen Jahre): diese reichen weit jenseits der Beobachtung von Supernova-Überresten, deren Röntgen- und Radiostrahlung nach wenigen 10000 Jahren im Untergrund verschwindet.

[ Abb 7:  $^{26}\text{Al}$  Radioaktivität zeigt in der Gammalinie bei 1809 keV dass in der gesamten Milchstrasse aktuell neue Atomkerne erzeugt und im interstellaren Raum verteilt werden]



Die radioaktive Gamma-Linienstrahlung von  $^{26}\text{Al}$  ist aus der gesamten Milchstrasse mit derzeitigen Gamma-Teleskopen vermessen [references]. Eine Karte in dieser Linien-Emission mit einer Energie von 1808.6 keV ist in Abb. 7 dargestellt: Die gesamte Ebene der Milchstrasse strahlt radioaktiv. Dies bezeugt, dass in den letzten Jahrtausenden galaxienweit Nukleosynthese stattfand, und neue Atomkerne in den interstellaren Raum verteilt. Man sieht auch dass diese Emission diffuser um die bekannten Objekte und Sterngruppen verteilt ist: Die Skalenhöhe der  $^{26}\text{Al}$  Gamma-Emission ist einige 100 parsec. Dies ist erstaunlich, da die Molekülwolken, in denen sich Sterne bilden, durch eine Skalenhöhe von 50 pc charakterisiert werden. Man kann also die Ausbreitung der Nukleosynthese-Ejekta unmittelbar in der Gamma-Emission durch diese im Vergleich grosse Skalenhöhe sehen.

[ Abb 8:  $^{26}\text{Al}$  Kinematik-Signatur (mehr Detail von Roland)]

Hochauflösende Spektroskopie der Gamma-Emission von interstellarem  $^{26}\text{Al}$  Zerfall ergab einen wichtigen weiteren Hinweis: Die kinematische Dopplerverschiebung der Gamma-Emission ist weitaus grösser als bei anderen Objekten in der Galaxis, um etwa  $200 \text{ km s}^{-1}$  bewegt sich das  $^{26}\text{Al}$ -tragende Ejekta-Material im Mittel schneller. Das lässt darauf schliessen, dass die Umgebung der Nukleosynthese-Orte eine geringere Dichte hat als das ansonsten typische interstellare Medium, so dass die Auswurfgeschwindigkeit länger beibehalten wird bevor dichteres interstellares Gas zu einer Abbremsung führt. Dies ist unerwartet, denn bei einer Zerfallszeit von 1 Million Jahren und solchen Geschwindigkeiten entspricht dies interstellaren Hohlräumen grossen Ausmasses, bis zu kpc (siehe Illustrationen in Abb. 8). Damit legen Ejekta signifikant grosse Distanzen zurück auf dem Weg ihrer Abkühlung und Mischung mit interstellarem Gas bis zur Bildung der nächsten Stern-Generation.

Wenn die Nukleosynthese eine typische aktuell ablaufende Aktivität ist, fragt man sich ob so etwas auch in unserer galaktischen Nachbarschaft vorkommt, und wie sehr dies unser irdisches Leben beeinflussen könnte. In zivilisationsfernen Tiefen des pazifischen Ozeans wurde nach empfindlicher massenspektroskopischer Analyse (Accelerator Mass Spectrometry, AMS) das Vorkommen radioaktiven  $^{60}\text{Fe}$  nachgewiesen. Aufgrund dessen Zerfallszeit hat also vor wenigen Millionen Jahren Ejekta-Material frischer Nukleosynthese das Sonnensystem und unsere Erde erreicht; die Datierungen des Krustenmaterials mit der Ablagerungstiefe ergaben einen Zeitpunkt vor etwa 3 Millionen Jahren. Diese Ablagerung erfolgte offensichtlich über einige 100000 Jahre hinweg. Damit ist eine einzige Supernova-Explosionswolke als Ursache eigentlich unplausibel, da deren Front das Sonnensystem innerhalb viel kürzerer Zeit passieren würde. Auch in Mondproben wurde  $^{60}\text{Fe}$  gefunden; wegen der durch Meteoriteneinschläge ständig beackerten Mondoberfläche ist hier allerdings keine Datierung möglich. Was bedeutet das? Es wird aufgrund theoretischer Ausbreitungsstudien und der Objekte und Gasstrukturen in Sonnenumgebung vermutet, dass nahegelegene Sterngruppen vormals Supernova-Aktivität innerhalb der „solaren Blase“

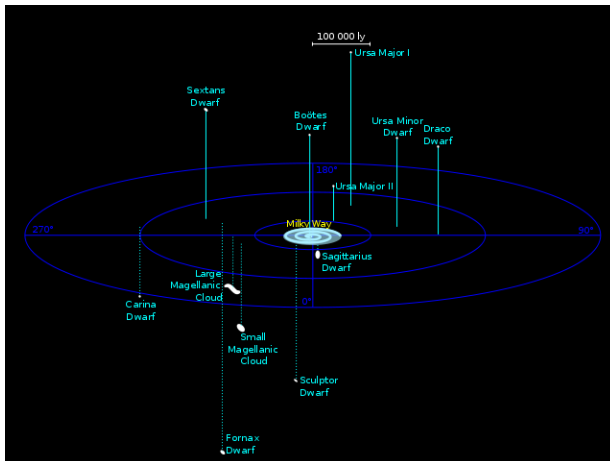
hervorriefen. Diese könnten auch ursächlich diesen Hohlraum um die Sonnenregion erzeugt haben. Unsere galaktische Umgebung ist offenbar alles andere als „ruhig“.

In derzeit im interplanetaren Raum strömender kosmischer Strahlung wurde kürzlich durch Massenspektrometrie in einem darauf spezialisierten Satelliten-Instrument ebenfalls das radioaktive  $^{60}\text{Fe}$  Isotop nachgewiesen. Dies ist ein spannender Beleg dafür dass uns sogar aktuell frisches Nukleosynthese-Material mit der kosmischen Strahlung erreicht. Aus den modellmäßig berechneten Transporteigenschaften ergab sich eine geschätzte Distanz dieser Nukleosynthesequellen von maximal etwa 800 kpc; die Sonne befindet sich in 10-fach grösserer Distanz vom Zentrum unserer Galaxis, also ist dieser Ursprungsort des  $^{60}\text{Fe}$  in kosmischer Strahlung nicht sehr weit weg.

Es ist weiterhin eine plausible Hypothese dass auch sehr schwere Elemente über Neutronenanlagerungen nach dem r Prozess in Supernova-Explosionen erzeugt werden (siehe Informationskasten „kosmische Quellen“). Wenn man also  $^{60}\text{Fe}$  in der Ozeankruste fand, warum nicht auch andere, noch schwerere Elemente und Isotope? Gesucht wurde spezifisch nach dem Isotop  $^{244}\text{Pu}$ . Bisher fanden selbst die empfindlichen AMS-Untersuchungen nur ein einziges Atom, also um ein Vielfaches weniger als sich aus der abgeschätzten Supernova-Explosions-Häufigkeit ergibt, die ja in der  $^{26}\text{Al}$  Gamma-Emission indirekt bezeugt wird. Daraus lässt sich schliessen dass eine gleichmäßige Produktion von  $^{244}\text{Pu}$  in Supernovae nicht plausibel gemessen wird; vermutlich sind ungewöhnlichere Supernova-Explosionen oder gar andere Quellen für Isotope wie  $^{244}\text{Pu}$  und damit sehr schwere Elemente erzeugend. Sind also vielleicht die Kollisionen von Neutronensternen doch die wichtigeren Produzenten von r-Prozess Ejekta?

Der Gedankengang hinter der "Galaktischen Archäologie" durch Spektroskopie von Sternenlicht ist: Sterne konservieren an ihrer Oberfläche die Gaszusammensetzung, aus der sie gebildet wurden, und wir können wiederum die Zusammensetzung und Physik der längst vergangenen Nukleosynthesequellen erforschen, die diese Materie gebildet und ausgestoßen haben (siehe Info-Kasten „Chemische Entwicklung“). Dank neuer bodengebundener Teleskope, die in den 90er Jahren mit immer größeren Öffnungsdurchmessern und besseren Spektrographen in Betrieb gingen, können wir heute eine große Anzahl von Elementen (zirka 70 von den 120 Elementen im Periodensystem) in kleinen/massearmen und weit entfernten Sternen astronomisch vermessen. Nur in wenigen Fällen (Li, C, N, O, Mg, Ba, Eu) können wir leider ihre Isotopenverhältnisse messen und damit direkt auf die Kernprozesse der Nukleosynthese schließen (siehe Info-Kasten „kosmische Kernreaktionen“).

Darüberhinaus ist es möglich, Spektrallinien in massearmen Sternen anderer Galaxien jenseits unserer (die Milchstrasse) zu vermessen. In der Umgebung der Milchstrasse befinden sich zahlreiche kleine Galaxien, die sogenannten Zwerggalaxien. Auch in diesen kleinen Galaxiensystemen findet eine chemische Entwicklung statt, die aber anders verläuft als in grossen Galaxien wie der Milchstrasse, da Zwerggalaxien weniger Gas haben, und deswegen meistens nur kleinere Sterne bilden. So ist z.B. die Menge an O und Mg geringer in Zwerggalaxien als in massereichen Galaxien. Eine sehr interessante Zwerg-Galaxie ist Sagittarius, zu sehen auf der Südlichen Hemisphäre als ausgedehnten Arm. Vor mehr als 9 Milliarden Jahre ist die Sagittarius Zwerggalaxie wohl mit der Milchstrasse durch eine gigantische Verschmelzung vereinigt worden. Die Sterne, die zu Sagittarius gehören, können wir immer noch klar erkennen, weil sie eine andere charakteristisch chemische Zusammensetzung als die Sterne der Milchstrasse haben.



[Abb 10: Galaxien in unserer Nachbarschaft

Image credit: Wikipedia, Richard Powell, [Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic](#)]

Durch Hochauflösungsspektroskopie in sichtbarer und ultravioletter Strahlung können ungefähr 70 Elemente im Periodensystem in alten, massearmen Sternen studiert werden. Unter diesen chemischen Elementen ist Thorium, mit Ordnungszahl 90, eines der schwersten Elemente, die in Sternen analysiert werden können.  $^{232}\text{Th}$  ist radioaktiv und zerfällt sehr langsam: die Halbwertszeit ist  $\sim 14$  Milliarden Jahre, ungefähr das Alter des Universums. Dadurch ist Th eine optimale 'Kosmische Uhr' für sehr alte Sterne, die kurz nach dem Urknall entstanden sind. Eine Spektralanalyse von drei derartigen Sterne in der Sagittarius-Galaxie zeigte Th und Eu in ihren Spektren. Angesichts der Halbwertszeit von Thorium und der Menge dieses Th and Eu konnte das Alter der Sterne festgelegt werden auf mehr als 9 Milliarden Jahre. So ist klargeworden, dass dieses Th, das durch einen r-Prozess in einer Supernova oder Kilonova Explosion vor mehr als 9 Milliarden Jahren erzeugt wurde, in diesen drei Sternen über die Jahre hinweg weiter zerfallen ist, und währenddessen vor zirka 9 Milliarden Jahren eine Galaxienverschmelzung von Sagittarius und der Milchstrasse erfahren hat. In den allerkleinsten Galaxien (den „ultraleuchtschwachen“ Zwerggalaxien) erscheint es sogar möglich, Spuren von nur einer einzelnen Supernova oder einer Kilonova zu finden. Das wäre sehr interessant, um kosmische chemische Entwicklung besser durch astronomisch eindeutigeren Daten zu verstehen. Die Analyse der astronomischen Daten dieser drei Sterne zeigen uns damit ein weiteres Beispiel, wie schwere Elemente durch kernphysikalische Prozesse entstehen und ganze Galaxien in ihrer Zusammensetzung prägen.

## Ausblick

Die in der Radioaktivität enthaltene „Uhr“ liefert ein wertvolles Werkzeug zu neuartiger astronomischer Beobachtung: Ungewöhnliche Atomkern-Sorten treten als eigenständiges Signal hervor, und kündigen von den Kernfusions-Prozessen ihrer Erzeugung, teils in exotischen Orten kosmischer Nukleosynthese. Die Vergänglichkeit, die dem radioaktiven Zerfall innewohnt, öffnet so ein Fenster in die kernphysikalischen Prozesse in kosmischen Objekte, die entscheidend dafür sind, die großartige Vielfalt der Atomkern-Sorten mit ihren 118 Elementen und über 7000 Isotopen zu realisieren. Eine Vermessung der jeweiligen



Vorkommen an unterschiedlichen Orten im Universum erzählt uns damit die kosmischen Geschichten der Genese der Elemente wie wir sie kennen auf eine neue Art und Weise: Die Kernreaktionen lenken den Blick auf das heiße Innere von Sternen und Explosionen, das wir ansonsten nicht zu Gesicht bekommen, und markiert wie kosmische Materie über astrophysikalisch interessante Zeiträume ihren Weg findet von diesen Quellen zu den Orten, an denen aus solcher Vielfalt komplexes Leben entstehen konnte. Diese „nukleare“ Astrophysik ist eines der jüngsten, schwierigen, und spannenden Bereiche derzeitiger Forschung im Kosmos.