



$^{26}\text{AlF}$  die erste Entdeckung  
eines radioaktiven Moleküls  
im Weltraum

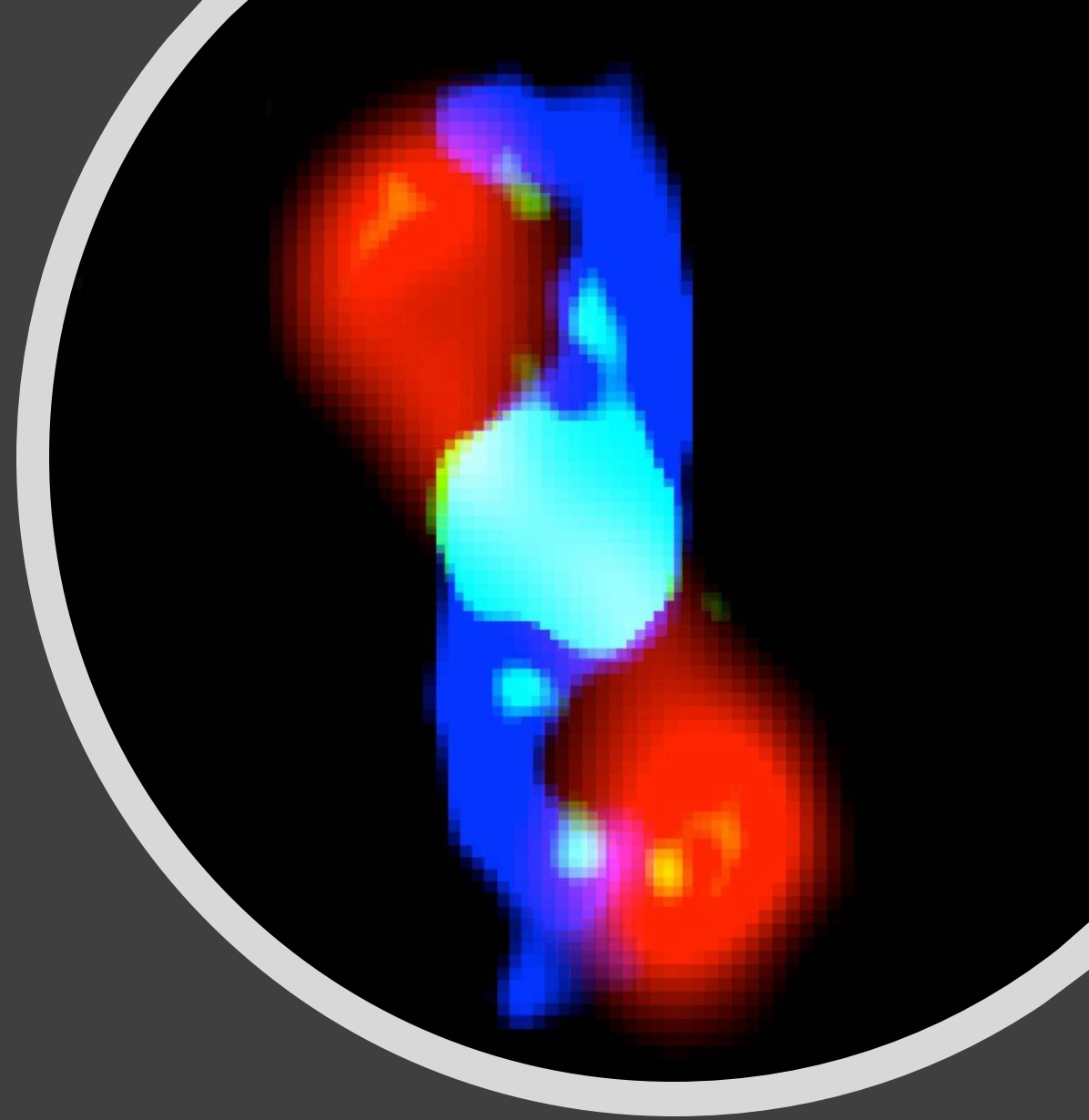
Von Oskar Engelfried

# Inhaltsangabe

- Was ist das  $^{26}\text{AlF}$ - Molekül?
- Wo wurde es entdeckt?
- Wie wurde es entdeckt?
  - Nachweis von Molekülen im Weltraum:
    - Spektroskopie
    - Radiointerferometrie
      - Einschub: Wie entstehen Gammawellen aus Betazerfall?
  - Was wurde beim AlF-Isotop gemacht?
- Warum konnte man das Molekül nachweisen?
- Warum wurde das  $^{26}\text{AlF}$  in CK Vul entdeckt?
- Wie entsteht das Isotop?
  - Verschiedene Möglichkeiten
    - Entstehung durch Verschmelzung eines roten Riesens
      - Was ist ein roter Riese?
      - Was geschieht dort genau?
- ALMA: Das Teleskop, mit dem  $^{26}\text{AlF}$  entdeckt wurde

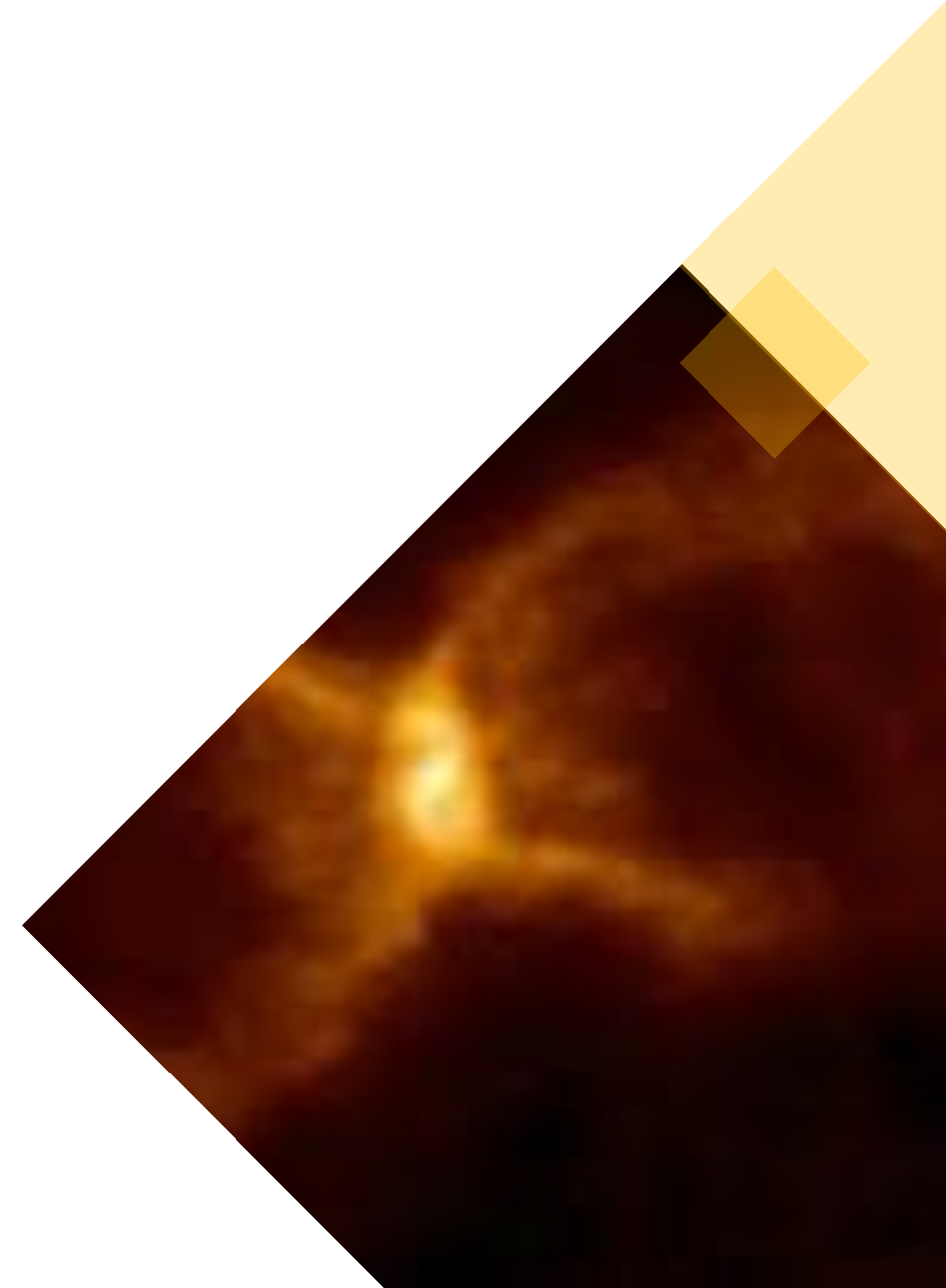
# Was ist das $^{26}\text{AlF}$ -Molekül?

- Das  $^{26}\text{AlF}$  ist ein Molekül, bestehend aus dem  $^{26}\text{Al}$ -Isotop und Fluor.
- Es ist radioaktiv und besitzt eine Halbwertszeit von  $7,17(24) \times 10^5$  Jahren.
- Beim Zerfall des Isotops entstehen u.a. Gammastrahlen mit 1,8 MeV, und das  $^{26}\text{Mg}$ -Isotop.
- Das Besondere an dem Molekül ist, dass es das erste eindeutig nachgewiesene radioaktive Molekül im Weltraum ist.



# Wo wurde dieses Molekül entdeckt?

- Es wurde in einem Low-mass-Binary-System nachgewiesen, bei dem zwei Sterne miteinander verschmolzen sind, wobei eine dieser Komponenten ein roter Riese in einem späten Entwicklungsstadium mit einer Masse von ca. 0,8- 2,5 Sonnenmassen war. Die Quelle heißt CK Vulpeculae (CK Vul).
- Das Objekt fiel erstmals 1670 auf, als man einen Helligkeitsausbruch bei dem Stern wahrnahm. Zunächst ging man davon aus, dass dieser Ausbruch eine Nova wäre, doch seit 2015 ist bekannt, dass der Ausbruch durch die Kollision und Verschmelzung zweier Sterne zustande kam.
- Kürzlich wurde entdeckt, dass CK Vul auch mit einer erheblichen Menge an Staub und molekularem Gas in Verbindung gebracht werden kann. Was die Quelle selbst unter den roten Novae auszeichnet, ist eine hohe Häufigkeit von Isotopen, die in Bezug auf die normale kosmische Zusammensetzung eher selten sind.





Wie wurde das  $^{26}\text{AlF}$   
entdeckt?

# Spektroskopie: Entdeckung von Molekülen im Weltraum 1

- Um Spektrallinien zu verstehen, muss man wissen, dass Elektronen in der Lage sind, Photonen zu absorbieren und zu emittieren (die Quantenelektrodynamik legt sogar nahe, dass die Elektronen das nicht zwingend in dieser zeitlichen Abfolge machen müssen). Das heißt, dass Elektronen ein Photon aufnehmen, dadurch in Kernen ein höheres Energieniveau erreichen, um das Photon dann in eine zufällige Richtung abzugeben. In einem Atom oder Molekül nehmen die Elektronen nur Photonen auf, die sie energetisch auf ein höheres Niveau und damit auf ein weiter vom Kern entferntes Orbital heben. Ein Elektron nimmt also nur Photonen auf, die genau die richtige Energie besitzen.

# Spektroskopie: Entdeckung von Molekülen im Weltraum 2

- Nun ist diese Energie aber vom Atom abhängig, da die Elektronen in Eisenatomen weiter vom Kern entfernt sind als in Heliumteilchen, und die elektrostatische Anziehungskraft daher schwächer wirkt, ist es leichter, sie auf ein neues Energieniveau zu bringen. Deshalb benötigen sie weniger energetische Photonen, also Photonen mit größerer Wellenlänge bzw. mit geringerer Frequenz (Energie =  $h \cdot \mu$ ). Das bedeutet, dass Atome immer genau Licht spezieller Wellenlängen absorbieren. Nun gehen angeregte Elektronen aber danach wieder auf das geringste Energieniveau, wobei sie Photonen in eine beliebige Richtung emittieren. Da es unwahrscheinlich ist, dass die Richtung identisch bleibt, fällt einem beim Betrachten des Lichtspektrums auf, dass Licht bestimmter Wellenlängen fehlt (Fraunhoferabsorptionslinien). Da diese Wellenlängen von Atom zu Atom unterschiedlich sind, kann man anhand von typischen Spektrallinien auf das oder die Teilchen, die sich zwischen Lichtquelle und Beobachter befinden, schließen. Guckt man sich das Molekül einzeln an, so emittiert es genau auf der Wellenlänge Elektronen; man sieht im Spektrum also ganz bestimmte Spektrallinien.

# Entdeckung von Molekülen im Weltall: Spektrallinien durch Rotation

- Es gibt weitere Methoden, um Moleküle im Weltall zu untersuchen. Häufig untersuchen Wissenschaftler das Spektrum der Moleküle im Radiobereich. Dabei wird nicht die Absorption oder Emission von Molekülen beobachtet, sondern eine durch energetisch schwächere Prozesse erzeugte für das Molekül typische Radiostrahlung.
- Ist die Rotation von Atomen in einem Molekül entgegengesetzt, sprich: die Atome drehen sich gegenläufig, so laufen die durch die Ladung erzeugten Magnetfelder ebenfalls gegenläufig, weshalb Radiowellen ausgestrahlt werden.



# Was kann man aus den Radiowellen folgern?

- Frequenz und Wellenlänge sind charakteristisch für die einzelnen Moleküle; man kann also aufgrund der Strahlung auf bestimmte Moleküle schließen.
- Die Breite der Linien im Radiospektrum gibt außerdem Aufschluss darüber, wie hoch die Temperatur innerhalb der Gaswolke (bzw. des Ortes der Moleküle) ist. Je heißer das Gas, desto schneller schwingen die Moleküle. Einige dieser Moleküle bewegen sich auf uns zu, andere von uns weg.
- Aus dem Dopplereffekt folgt, dass die Frequenz der Strahlung von Objekten, die sich auf uns zu bewegen, höher und von Objekten, die sich wegbewegen, niedriger wird. Schwingen also einige stärker in unsere Richtung, und andere stärker von uns weg, so wird die gemessene Spektrallinie breiter, da sich eine Vielzahl von Frequenzen überlagert.

## Wie war das bei dem Aluminiumisotop?

- Es war bereits seit zwei Jahrzehnten bekannt, dass es ca. zwei Sonnenmassen des Isotops  $^{26}\text{Al}$  verteilt über die ganze Milchstraße geben muss, da man immer wieder Gammastrahlung entdeckte, die auf dieses radioaktive Isotop hinwies.
- Man konnte auf der Erde Gammastrahlen mit einer Energie von 1,809 MeV registrieren. Diese Gammastrahlung, so vermutete man, stammte von dem Betazerfall dieses Aluminiumisotops.
- Man konnte außerdem aus dem beobachteten Spektrum, welches mit den berechneten übereinstimmt, und aufgrund von Licht im Millimeterwellenlängenbereich, welches ebenfalls vom  $^{26}\text{Al}$  stammt, auf das Vorkommen des Isotops in CK Vul schließen.

# Einschub: Wie entsteht Gammastrahlung aus Betazerfall?



Nach Alphazerfall (dem Zerfall unter Abspaltung eines Heliumkerns) oder Betazerfall (dem Zerfall eines Protons in ein Neutron, unter Freisetzung Positron und ein Neutrino oder der Zerfall eines Neutrons in ein Proton, was zur Freisetzung eines Antineutrinos und Elektron führt), liegt das neugebildete Atom häufig im angeregten Zustand vor.



Dieser angeregte Zustand ist für das Atom nicht erstrebenswert, denn es sucht immer den energetisch niedrigsten Zustand. Um diesen zu erreichen, strahlt es die überschüssige Energie in Form von Gammastrahlen ab.



Anhand der charakteristischen Wellenlänge bzw. Energie der Gammastrahlung kann man zuückschließen, von welchem Isotop es stammt.

Warum konnte  
man die  
Strahlung des  
Isotops  
überhaupt  
messen?

- Die 1,8 MeV-Emission aus  $^{26}\text{Al}$ -Zerfällen wird kaum von interstellarer oder zirkumstellarer Materie absorbiert und kann leicht aus der kompakten  $^{26}\text{AlF}$ -Region entweichen, obwohl diese stark von Staub und Gas verdeckt wird.

## Wie war das beim Aluminiumisotop?

- Man konnte Signaturen in Form von zwei Strömen aus den passenden Gammastrahlen registrieren (in Form von 1,8-MeV-Linien) und nach der Auswertung, durch Untersuchung der Spektrallinien, wusste man, dass  $^{27}\text{Al}$  und  $^{26}\text{Al}$  in einem kleinen Bereich im Zentrum von CK Vul vorliegen.
- Man konnte mit ALMA aber zusätzlich auch Millimeterwellen registrieren.
- Diese Entdeckung war wichtig, denn nun weiß man, dass moderne Radiointerferometer wie ALMA bei Millimeterwellenlängen zur Suche nach dem Ursprung des radioaktiven  $^{26}\text{Al}$  in der Milchstraße eingesetzt werden können.
- Sie stellen eine Verbesserung gegenüber den Gammastrahlobservatorien dar, da sie ein wesentlich höheres Winkelauflösungsvermögen besitzen.

# Wie entsteht das radioaktive Isotop? 1

- Man vermutet, dass sich das Molekül in der Photosphäre des bei der Kollision vernichteten Sterns gebildet hat. Es wurde nachgewiesen, dass innerhalb von CK Vul das in unserer Sonne praktisch gar nicht vorhandene  $^{26}\text{Al}$ -Isotop nur ca. sieben Mal seltener vorkommt als das häufigere  $^{27}\text{Al}$ . Generell sind Beobachtungen des AlF-Moleküls in interstellaren Medien selten; sie deuten jedoch darauf hin, dass sich AlF in der Nähe von stellaren Photosphären bildet. Bei der Bildung stellt wahrscheinlich eher das seltenere Fluor und nicht das Aluminium die Begrenzung dar. Um das zu beweisen, untersuchte man CK Vul noch auf weitere wahrscheinliche Moleküle, in denen Aluminium vorkommt (z.B. AlCl, AlO, AlOH und AlCN). Diese konnten jedoch nicht nachgewiesen werden. Deshalb vermutet man, dass Aluminium hauptsächlich in Form AlF oder atomarem Zustand vorhanden ist.
- Anhand der Beobachtungen schließt man auf eine ungefähre Masse von  $^{26}\text{AlF}$ , die mehr als ein Viertel der Masse von Pluto betragen soll.

# Wie entsteht das radioaktive Isotop? 2

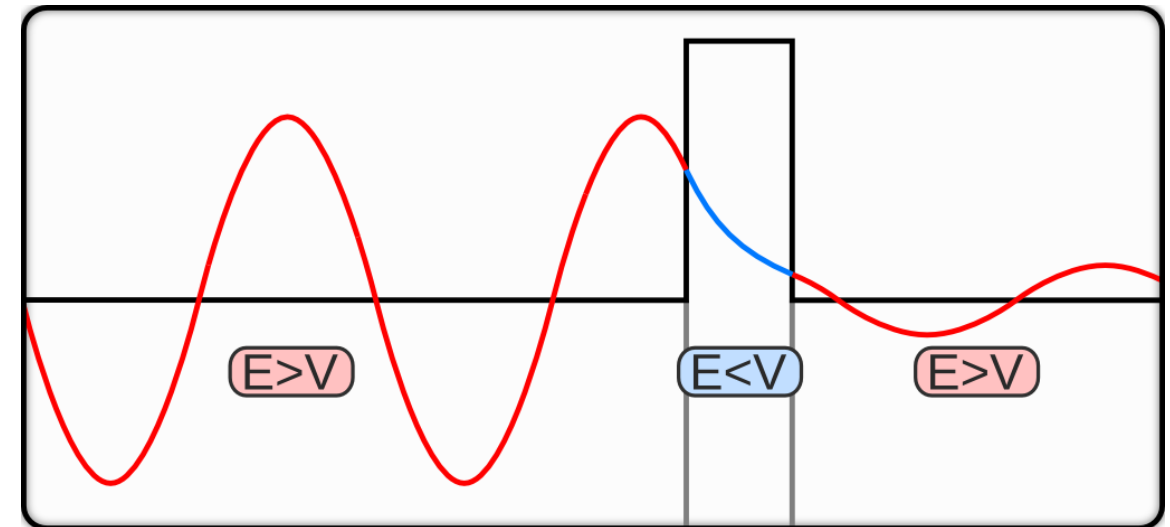
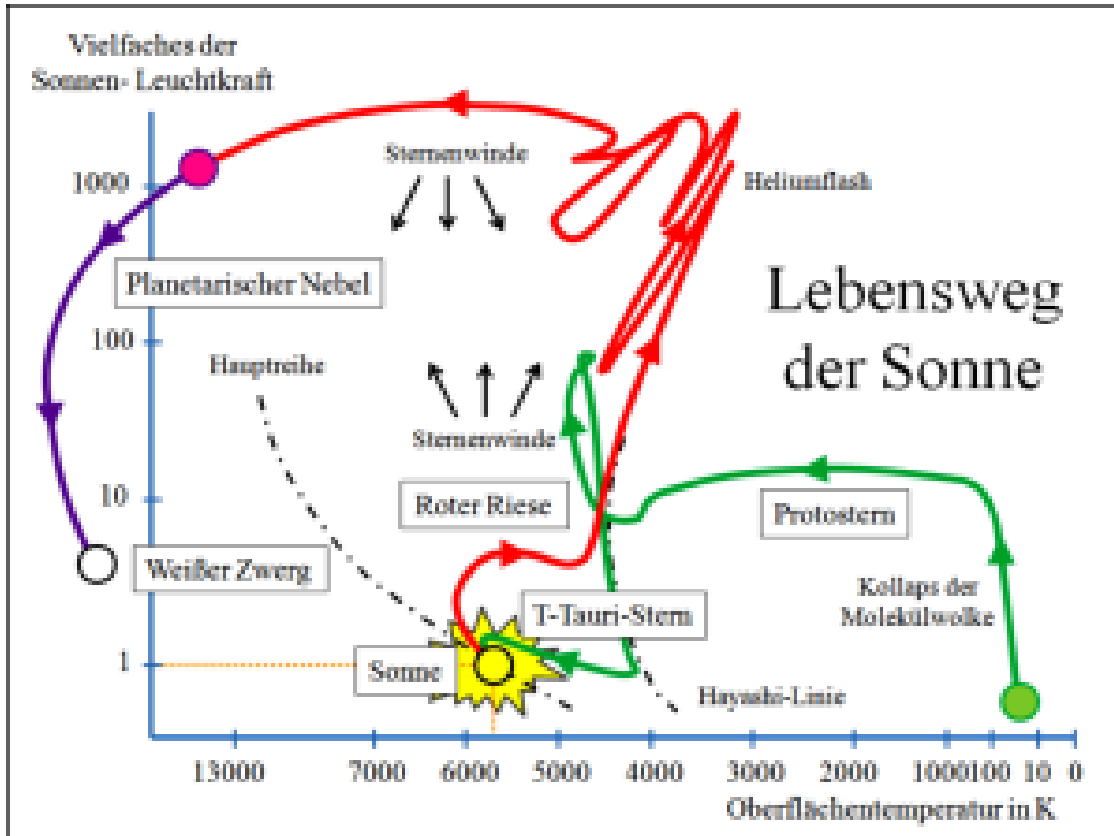
- Das  $^{26}\text{Al}$ -Isotop entsteht im Mg-Al-Kreislauf. Hierbei reagiert Wasserstoff über die  $^{26}\text{Mg}$   $^{26}\text{Al}$ -Reaktion, für die hohe Temperaturen notwendig sind.
- Man geht davon aus, dass es vielen Sterne gibt, die  $^{26}\text{Al}$  in größerer Menge produzieren können. Dazu zählen Wolf-Rayet-Sterne, das sind freigelegte Kerne von sehr massereichen Sternen. Diese Sterne besitzen Massen zwischen 10 und 265 Sonnenmassen und schleudern Materie mit bis zu 4000 km/s aus. Aufgrund ihrer enorm hohen Temperatur sind sie im Hertzsprung-Russell-Diagramm keiner der üblichen Spektralklassen [O,B,A,F,G,K,M[,L,T]] zugeteilt.  $^{26}\text{Al}$  entsteht weiterhin bei Kernkollaps-Supernovae, bei denen ein Neutronenstern oder ein schwarzes Loch hervorgeht. Hier wird durch das Entstehen von Neutrinos aus Protonen und Elektronen ein enorm starker Druck nach außen ausgeübt, so dass es zu einer Supernova kommt. Auch klassische Novae mit Weißen Zwergen und asymptotische Riesenaststerne (AGB) können  $^{26}\text{Al}$  produzieren.
- CK Vul gehört zu keiner der beschriebenen Arten. Doch auch Sterne geringer Masse können das Isotop erzeugen. Dafür müssen sie rote Riesen werden.

# Was sind rote Riesen?

- Nach der Hauptphase des Wasserstoffbrennens im Kern zieht sich der Kern zusammen, da nicht mehr genug Wasserstoff da ist, um einen Tunneleffekt zu bewirken. Damit kann die Coulomb-Abstoßung nicht mehr überwunden werden, weshalb Wasserstoff nicht mehr fusioniert wird und daher der Strahlungsdruck als Ausgleich für die Gravitation wegfällt. Da der Kern nun schrumpft, steigen in ihm Druck und Temperatur, bis die Temperatur so groß wird, dass außerhalb des Kerns Wasserstoff fusioniert wird (Wasserstoffschalenbrennen). Dieses Schalenbrennen ist näher an den äußeren Schichten dran und daher schwillt der Stern an. Seine äußere Temperatur sinkt, weshalb das abgestrahlte Licht rötler wird. Bis zum Heliumflash wächst er weiter, dann reicht die Temperatur aus, um auch Helium zu Kohlenstoff zu fusionieren. Deshalb schrumpft er wiederum, bis auch das Helium im Kern zu wenig wird und ein zweites Schalenbrennen entsteht. Bei massereichen Sternen geht das weiter bis zum Eisen. Da Eisen jedoch die höchste Bindungsenergie pro Nukleon besitzt, erhält man oberhalb von Eisen nur noch Energie durch Kernspaltung.

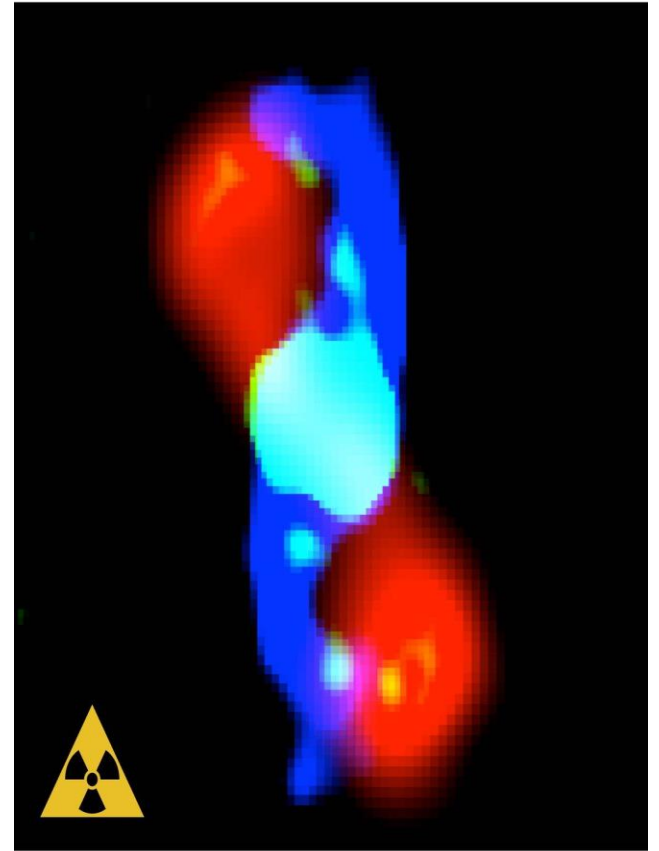
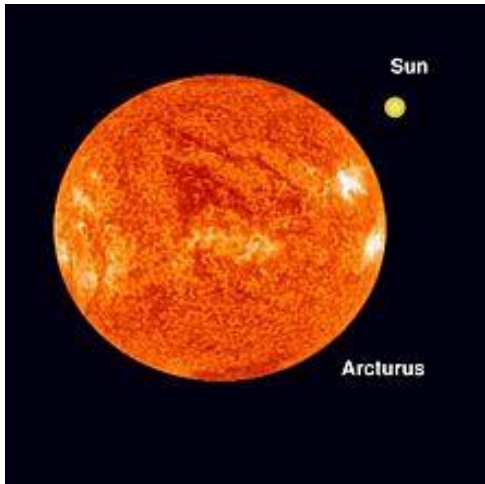


# Tunneleffekt und Lebensweg eines Sterns (Beispiel Sonne) im HRD



# Entstehung von $^{26}\text{Al}$ aus einem roten Riesen

- Die günstigsten Bedingungen für die Erzeugung von  $^{26}\text{Al}$  stellen rote Riesen aus Vorgängersternen mit 0,8 bis 2,5 Sonnenmassen dar. Das  $^{26}\text{Al}$ -Isotop wird dann in einer schmalen, äußeren Schicht des Heliumkerns gelagert. Normalerweise erreicht die Konvektion der äußeren Schichten des Sterns nicht den Kern, weshalb es keine Möglichkeit gibt, das Isotop bis nach außen in das interstellare Medium zu transportieren. In einem Binär-System jedoch, wenn zwei Sterne kollidieren, kann Materie aus dem Inneren beider Sterne gemischt und in das interstellare und zirkumstellare Medium ausgestoßen werden und bildet so ein Objekt wie CK Vul.



# Problem

- Diese These erklärt nicht, wie ungefähr zwei Sonnenmassen des Aluminium-Isotops in der Milchstraße existieren können. Da die meisten Sterne im Vergleich zu ihren Radien sehr große Abstände untereinander haben, kommt es nicht allzu oft zu Sternkollisionen. Meist geschieht das in Kugelsternhaufen, wo die Sterndichte wesentlich größer ist als im Durchschnitt. Man vermutet, dass in der Milchstraße nur 1-2 dieser Kollisionen pro Jahrzehnt vorkommen. Um die zwei Sonnenmassen, verteilt über die Milchstraße, zu erklären, bräuchte man jedoch 1100 davon pro Jahr. Selbst wenn die Annahme stark unterschätzt wäre, ist es unwahrscheinlich, dass die Sternkollisionen allein alle  $^{26}\text{Al}$ -Moleküle erzeugen können.

# Eventuelle Lösung

- Wenn die Masse von  $^{26}\text{Al}$  in CK Vul um einen Faktor von 1.100 unterschätzt wäre (z.B. weil  $^{26}\text{Al}$  in der atomaren Phase nicht berücksichtigt wird), könnte CK Vul einen wichtigen Beitrag zur galaktischen Produktion dieses Isotops beitragen.

# Mit was $^{26}\text{AlF}$ entdeckt wurde: ALMA

- Alma steht für "Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array"
- Das ALMA-Teleskop besteht aus 66 Antennen und befindet sich auf der Chajnantor-Hochebene (Atacama-Wüste in Chile). Dort ist es zum einen hoch oben in der Atmosphäre (5000m über NN), zum anderen ist die Luftfeuchtigkeit extrem gering, weshalb ALMA einen der besten Standorte auf der ganzen Erde darstellt.
- Die Konfiguration der Antennen kann bis auf 16 km ausgedehnt werden und bietet damit eine extrem hohe Winkelauflösung (Winkelauflösung =  $1,22 \cdot \lambda$  [Wellenlänge]/D [Durchmesser des Teleskops]), von ca. 0,0047 Bogensekunden (1 Bogensekunde =  $1/3600^\circ$ ), bei einer Wellenlänge von 0,3 mm. Das entspricht einer Größe von ca. fünf Metern im Abstand des Mondes.

# ALMA: Wer, was, wie teuer?

- Bei ALMA arbeiten aktuell ca. 250 Wissenschaftler, deren Ziel es ist, über Radiointerferometrie Kenntnisse über Materie, Sterne, Moleküle oder Planeten im All zu erhalten.
- ALMA stellt gleichzeitig ein internationales Projekt vieler Nationen dar. An der Forschung mit dem Teleskop sind u.a. Belgien, Chile, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Irland, Italien, Japan, Kanada, Niederlande, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, Südkorea, Taiwan, Tschechien, USA und das Vereinigte Königreich beteiligt.
- Die Baukosten von 1,2 Milliarden Euro (und auch die Betriebskosten) werden auf die verschiedenen Länder verteilt (deutscher Anteil: 120 Millionen Euro); damit ist es das bisher teuerste bodengebundene astronomische Observatorium.

# Lohnt sich der Preis?

- Mit seinen 66 Antennen ist ALMA erheblich leistungsfähiger als andere Einzelantennen-Submillimeterteleskope der Erde, wie z.B. das Submillimeter-Array (SMA) auf Hawaii mit seinen acht Antennen oder das NOEMA-Antennenfeld des Instituts für Radioastronomie im Millimeterbereich (IRAM) in den französischen Alpen mit seinen zur Zeit 10 Antennen.



# Bildquellen

- ALMA Observatorium S.1: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/4227658/original-1532701802.jpg?t=eyJ3aWR0aCI6NTQwLCJvYmpfaWQiOjQyMjc2NTh9--5b81c18c6b72b079ad086f82cbd02277c51fa316>
- <sup>26</sup>AIF S.3: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/4227620/original-1532701802.jpg>
- CK Vulpeculae  
S.4: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/43/Through\\_the\\_Hourglass\\_CK\\_Vulpeculae.tif/lossy-page1-1200px-Through\\_the\\_Hourglass\\_CK\\_Vulpeculae.tif.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/43/Through_the_Hourglass_CK_Vulpeculae.tif/lossy-page1-1200px-Through_the_Hourglass_CK_Vulpeculae.tif.jpg)

# Bildquellen

- Tunneleffekt  
S.16: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1d/TunnelEffektKling1.png>
- Arktur  
S.18: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/31/Arcturus-star.jpg/220px-Arcturus-star.jpg>
- Sonne  
S.18: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/Sun920607.jpg>
- Der Lebensweg der Sonne im HRD  
S.16: <https://kosmischemagnetfelder.files.wordpress.com/2013/12/hrd-sonne.png?w=300&h=225>

# Textquellen

- Spektrum.de  
"Spektroskopie": <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/spektroskopie/13557>
- Scinexx das Wissenmagazin "Erstes radioaktives Molekül im All nachgewiesen": <https://www.scinexx.de/news/kosmos/erstes-radioaktives-molekuel-im-all-nachgewiesen/>
- Welt der Physik "Rätsel um Betazerfall gelöst": <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/news/2019/raetsel-um-betazerfall-geloest/>
- Wikipedia "Gammastrahlung": <https://de.wikipedia.org/wiki/Gammastrahlung>

# Textquellen

- Originalveröffentlichung: <https://www.nature.com/articles/s41550-018-0541-x>
- Internetchemie "Aluminium Isotope": <https://www.internetchemie.info/chemische-elemente/aluminium-isotope.php>
- Wikipedia "Wolf-Rayet-Stern": <https://de.wikipedia.org/wiki/Wolf-Rayet-Stern>
- innovations report "<sup>26</sup>AlF die erste Entdeckung eines radioaktiven Moleküls im Weltraum": <https://www.innovations-report.de/html/berichte/physik-astronomie/26alf-die-erste-entdeckung-eines-radioaktiven-molekuels-im-weltraum.html>

# Textquellen

- ALMA-Blick hinter die Kulissen des Kosmos: <https://fis-landschaft.de/universum/alma/>
- Weitere inhaltliche Aspekte entnommen aus einem Gespräch mit Dr. Sven Thorwirth (I. Physikalisches Institut, Universität zu Köln)