

An aerial photograph of a large radio telescope dish, likely the Arecibo telescope, situated on a forested hillside. The dish is white and mounted on a complex metal structure. The surrounding area is densely wooded with trees showing autumn colors. In the foreground, there are some buildings and a paved area.

Fast Radio Bursts (FRBs)

Von Oskar Engelfried

Inhaltsangabe

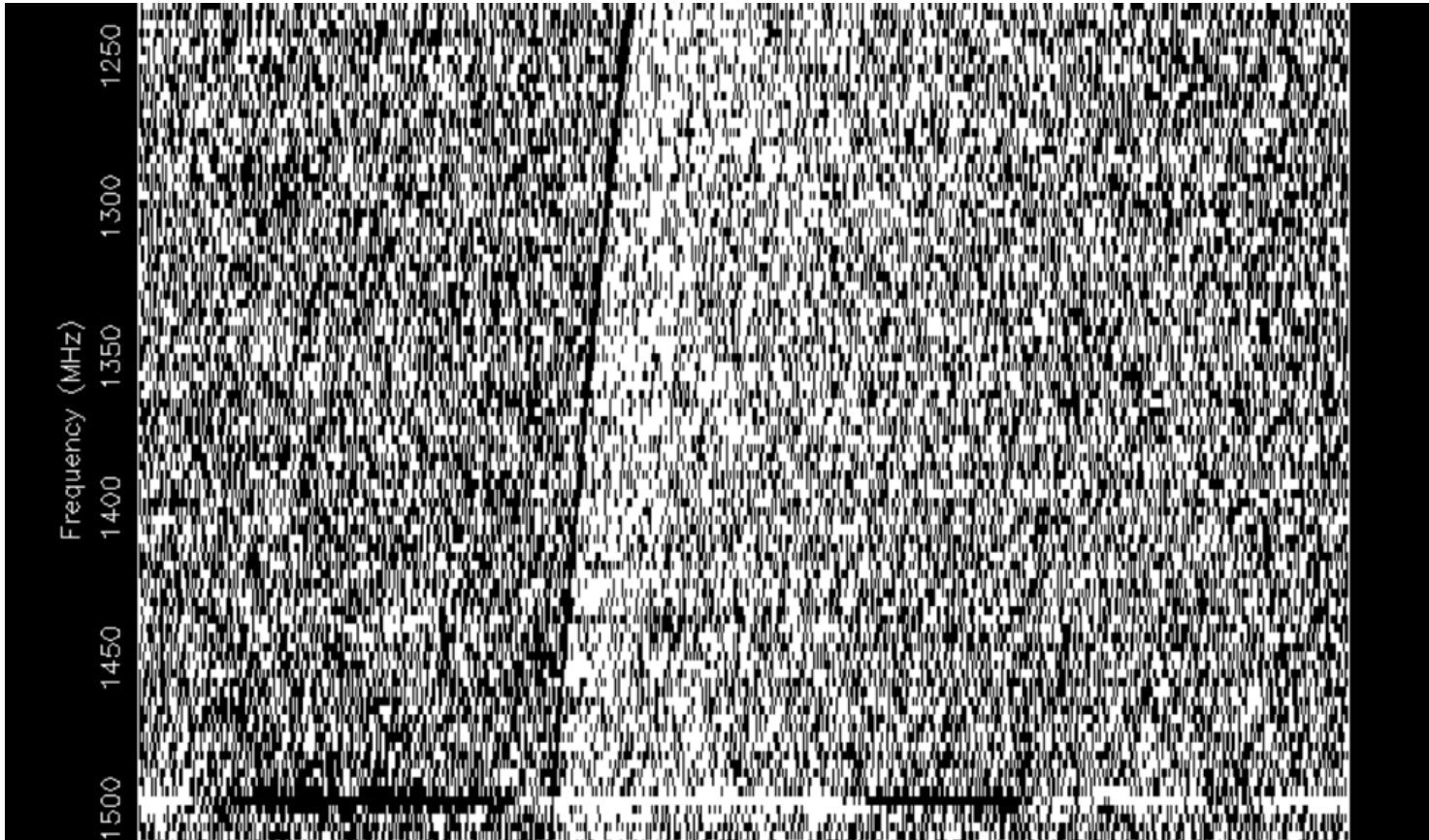
- ❑ Was sind Fast Radio Bursts (FRBs)?
- ❑ Entdeckung der FRBs
- ❑ Wie lokalisiert man FRBs?
 - Es hat sich was getan bei der Lokalisierung
- ❑ Unterteilung der Radioblitze
- ❑ Woher kommen FRBs?
- ❑ Wie entstehen FRBs?
 1. Thesen
 2. These 1: Entstehung während einer Supernova
 1. Was ist eine Supernova?
 1. Unterschiedliche Typen
 1. Typ Ia: Explosion von weißen Zwergen
 1. Wie entsteht ein weißer Zwerg
 2. Einschub: Wie funktioniert Kernfusion?
 3. Wie explodiert ein weißer Zwerg?
 2. Typ II: Entstehung von Neutronensternen

Inhaltsangabe

3. Zweite und dritte These: Entstehung während der Verschmelzung zweier Neutronensterne
 4. Sind diese Thesen schlüssig?
 5. Vierte These:
 1. Pulsare: Schwachstelle dieser Hypothese
 2. Stimmt diese Hypothese?
 6. Ist irgendeine der Hypothesen korrekt?
- Für was brauchen wir FRBs?
 - Forschung an den Radioausbrüchen am Max-Planck-Institut für Radioastronomie
 - Quellenangaben

Was sind FRBs?

- Fast Radio Bursts sind sehr kurze (meist nur für Millisekunden detektierbare), starke Blitze von Radiowellen. Man kann sie aus großer Entfernung (z.B. über Galaxien hinweg) noch messen.



Entdeckung der FRBs

- Im Jahr 2006 fanden der Astrophysiker Duncan Lorimer und sein Student David Narkevic in dem Archiv des australischen Parkes-Observatoriums zufällig die Signaturen eines 2001 aufgenommenen Phänomens. Das Radioteleskop mit 64 Meter Durchmesser hatte einen Radioblitz registriert, ohne dass jemand etwas bemerkt hatte. Die Wissenschaftler konnten dieses Phänomen nicht erklären, doch diese, später als Lorimer-Blitz bezeichnete, Beobachtung blieb nicht der einzige Radioausbruch. Mittlerweile sind zwar mehr als hundert bekannt, doch nur fünf davon wurden genau lokalisiert.

Wie lokalisiert man einen "Fast Radio Burst"?

- Bis 2017 konnte man die Entfernung von FRBs nicht genau messen, sondern nur aus dem Dispersionmaß des Radioblitzes abschätzen (Dispersionmaß: durchqueren die Radiowellen ionisierte Materie im Raum, so kommen auf der Erde zunächst jene an, die höhere Frequenzen haben, dann jene mit niedrigeren Frequenzen). Aus diesem Dispersionsmaß kann man die Anzahl der Elektronen messen, die zwischen der Quelle und dem Beobachter liegen. Kennt man die Materiedichte, kann man dann auf die Entfernung schließen. Diese Methode ist jedoch stark modellabhängig und fehleranfällig.

Es hat sich was getan bei der Lokalisierung

- FRBs können seit neuesten mit Radioteleskopen des europäischen VLBI-Netzwerks (hier: sieben Radioteleskope in Europa n und eines in China) lokalisiert werden, da diese als einzige empfindlich genug sind, um die Ursprungsgalaxie und die genaue Umgebung des Strahlungsausbruch zu identifizieren.
- Problem: Es blitzen statistisch nur 7 FRBs pro Minute am Himmel auf. Entweder man beobachtet einen großen Raum, um mehr zu sehen; die Messergebnisse sind dann allerdings zu ungenau, um die Herkunft des FRBs zu bestimmen. Oder man beobachtet einen sehr kleinen Teil des Himmels in hoher Auflösung; dann ist es jedoch sehr unwahrscheinlich, dass man einen FRB sieht.
- Eventuelle Lösung: Internationale Zusammenarbeit. Während die Radioteleskope aus Europa genau bestimmen können, wo ein FRB herkommt, hat die CHIME-Radioanlage aus Kanada einen großen Teil des Himmels im Blick und konnte so bereits in der Testphase 13 neue Bursts registrieren.





Unterteilung der Radioblitze

- non-repeating

- Einmalige Strahlenausbrüche
- Bisher lokalisiert sind: FRB 180924, FRB 181112 und FRB 190523

- repeating

- Quellen mit mehreren Strahlungsausbrüchen
- Bisher lokalisiert: FRB 180916 und FRB 121102

Woher kommen die Radioausbrüche?

- Durch eine Messung mit dem Arecibo-Teleskop konnte man klar belegen, dass die Bursts von außerhalb der Milchstraße stammen. Aufgrund der Plasmadisersion, die dreimal größer war, als man es maximal von einer Quelle in unserer Galaxie erwarten würde, konnte man dies nachweisen.
- Die 5 bisher lokalisierten Orte von FRBs (drei einmalige, zwei sich wiederholende) stammen aus unterschiedlichen Galaxien. Die non-repeater FRB 180924, FRB 181112 und FRB 190523 stammen aus großen Galaxien. Der repeater FRB 121102 konnte auf eine Bogensekunde genau bestimmt werden. Er liegt in einer nur 13 000 Lichtjahren großen Zwerggalaxie, inmitten einer Region, wo sich viele (evtl. auch sehr große) Sterne bilden. Der neu entdeckte repeater FRB 180916 ist der bisher nächstgelegene; er stammt aus einer nur 500 Millionen Lichtjahren entfernten Spiralgalaxie mit ebenfalls hoher Sternentstehungsaktivität.

Wie entstehen FRBs?

- These 1: Fast Radio Bursts entstehen während einer Supernova.
- These 2: FRBs entstehen bei einer Verschmelzung von zwei Neutronensternen in einem Doppelsternsystem.
- These 3: Kollabiert ein Neutronenstern weiter zu einem schwarzen Loch, so könnte ebenfalls ein Blitz erzeugt werden.

These 1: Entstehung während einer Supernova.

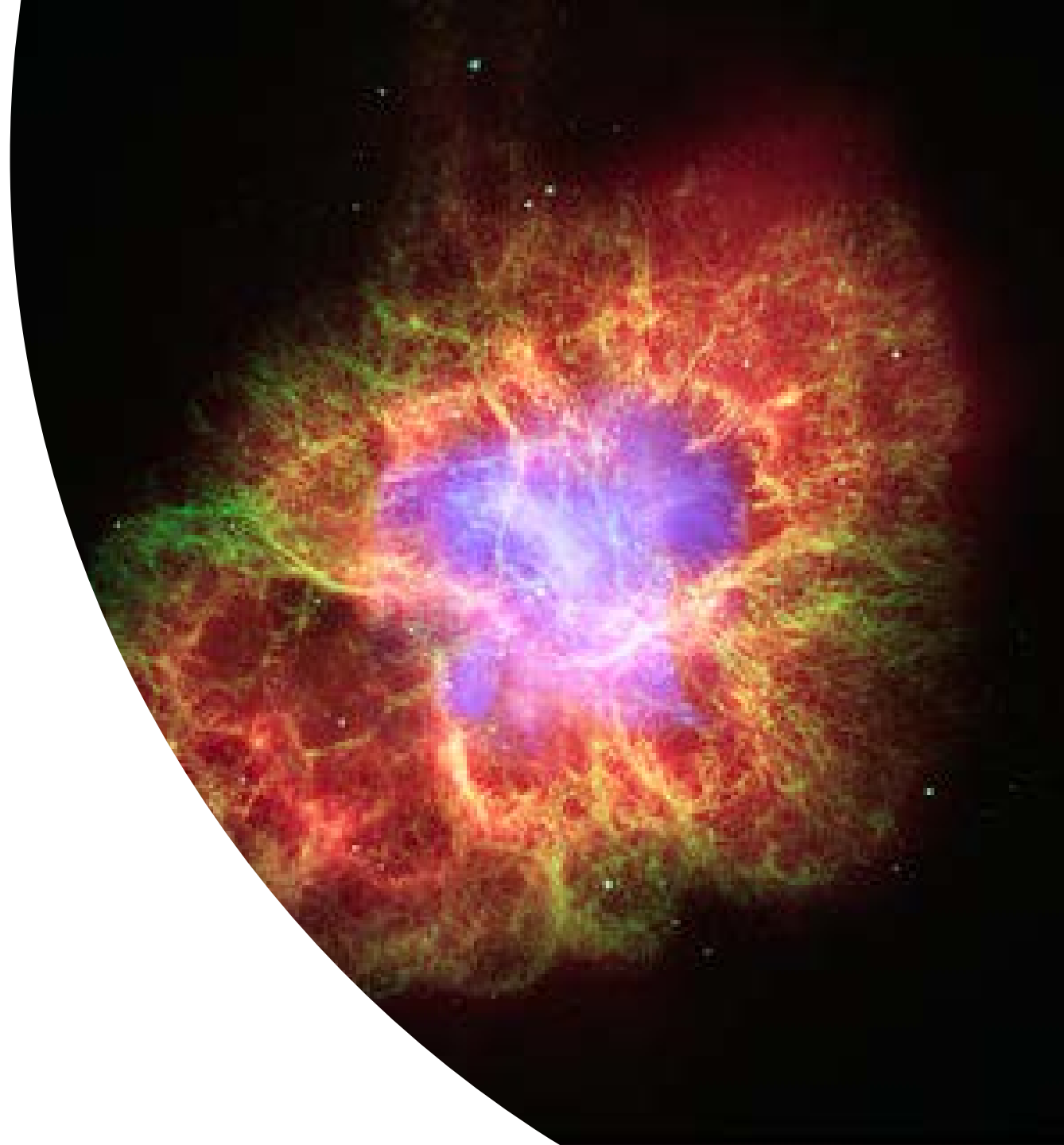
- Was ist eine Supernova?

Was ist eine Supernova?

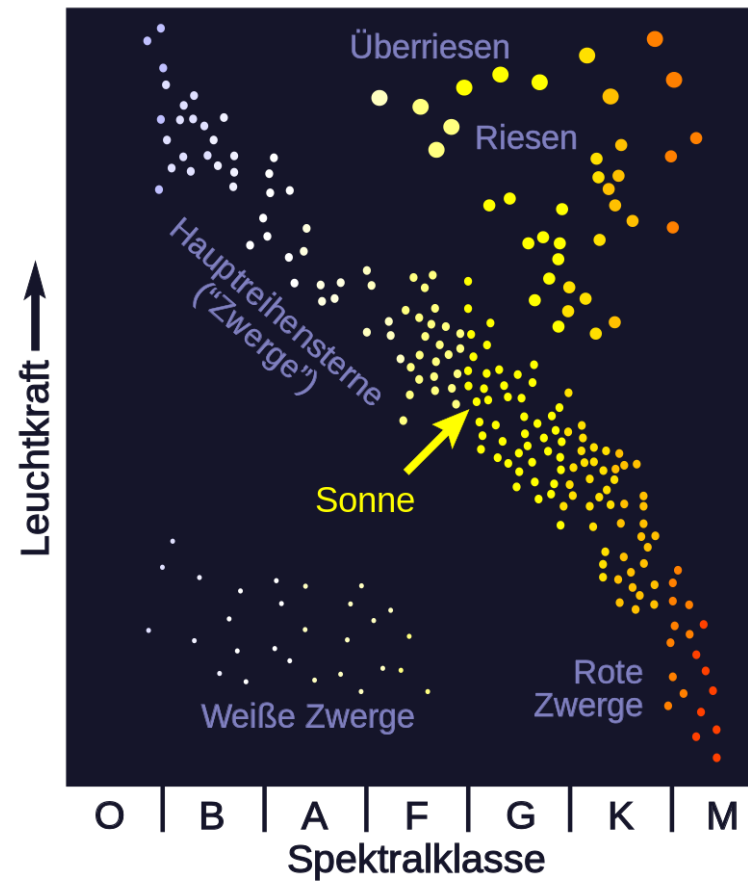
- Der Name Supernova beruht auf einem Irrtum, da man zunächst annahm, dass sie die Steigerung des bereits bekannten Nova-Phänomen bei Sternen darstellt (lat. nova = neu). Sie ist jedoch das letzte Aufbäumen vor der Vernichtung eines Sterns.
- Man unterteilt in Supernova Typ I (Ia, Ib und Ic)und Typ II (IIP, IIL, IIIn)
 - Typ I: Die Explosion eines weißen Zwergs.
 - Typ II: Die Explosion eines Vorgängersterns und die Entstehung eines hochkompakten Sterns, eines sogenannten Neutronensterns oder eines schwarzen Lochs.

Supernova Typ Ia (thermonukleare Supernova)

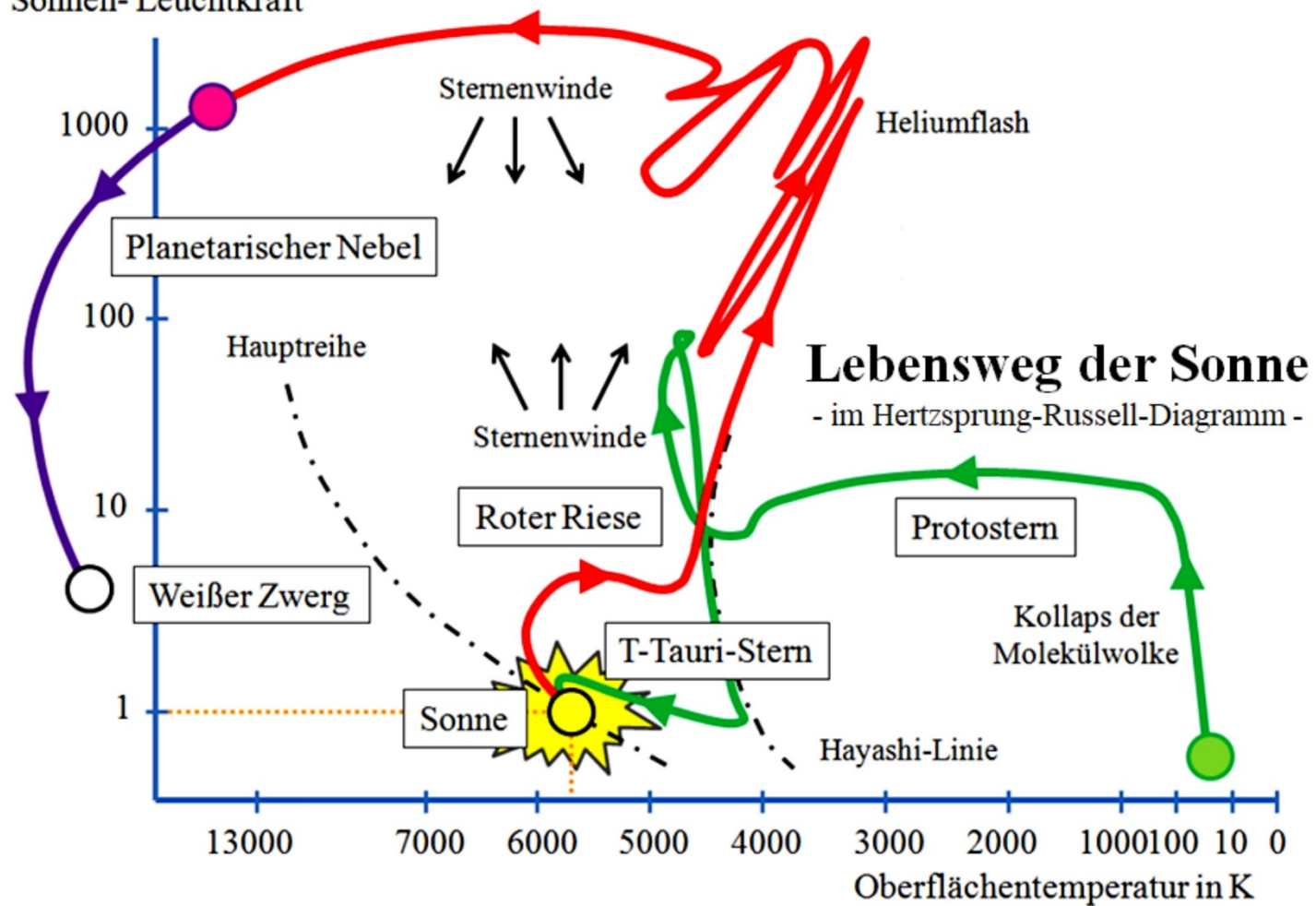
- Ein weißer Zwerg, in einem Doppelsternsystem gelangt über einen zweiten Stern an Masse, bis er die Chandrasekhar-Masse überschreitet und explodiert.
 1. Wie entsteht ein weißer Zwerg?
 2. Warum explodiert der Stern bei dem Überschreiten der Chandrasekhar-Masse?
 3. Was ist die Chandrasekhar-Masse?



Wie entsteht ein weißer Zwerg? Hertzsprung-Russell-Diagramm



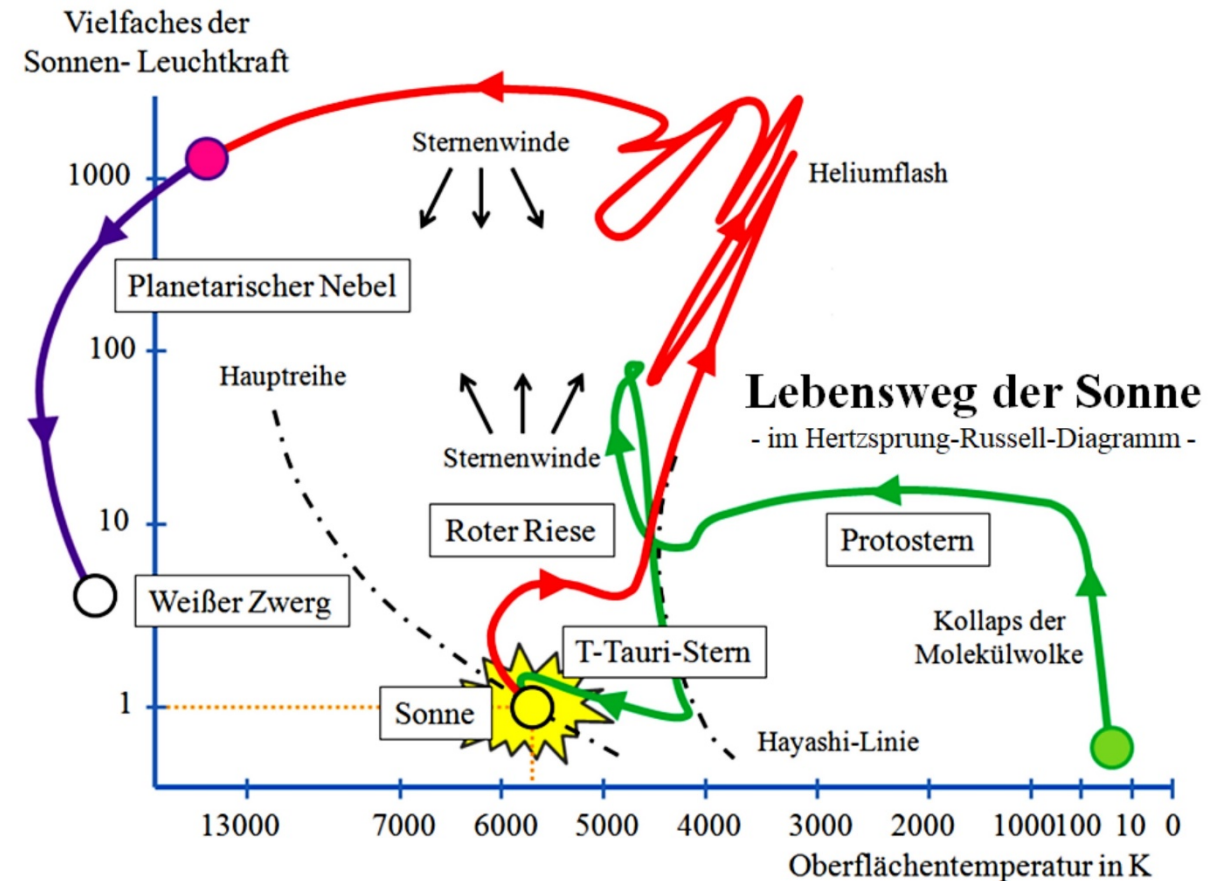
Vielfaches der
Sonnen- Leuchtkraft



Wie entsteht
ein weißer
Zwerg? Am
Beispiel der
Sonne

Der Lebensweg der Sonne: Entstehung (grüner Pfad)

1. Die Moleküle, aus denen später die Sonne entsteht (zusammen mit weiteren Sternen), liegen in einer Gaswolke vor.
2. Die Wolke kollabiert und es entsteht ein Kern, der sich immer weiter aufheizt.
3. Ein Protostern (Kernfusion hat noch nicht eingesetzt) wird gebildet und eine planetare Scheibe entsteht, auf der sich später, je nach Abstand zur Sonne (Frosthorizont), terrestrische und jovianische bzw. Gasplaneten ansiedeln können.
4. Kernfusion setzt ein, die Sonne überquert die Hayashi-Linie und wird damit stabil.

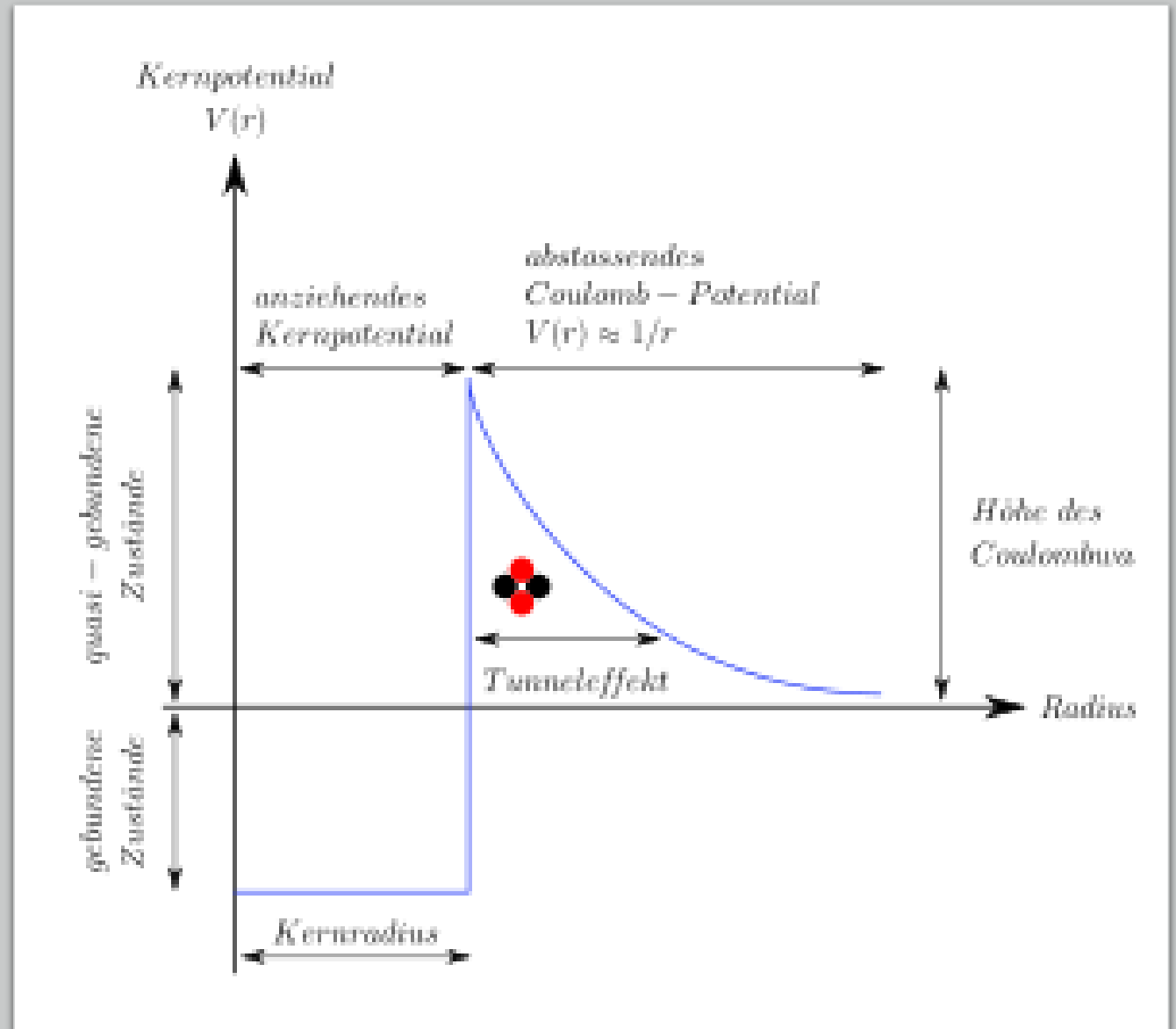




Einschub: Kernfusion 1

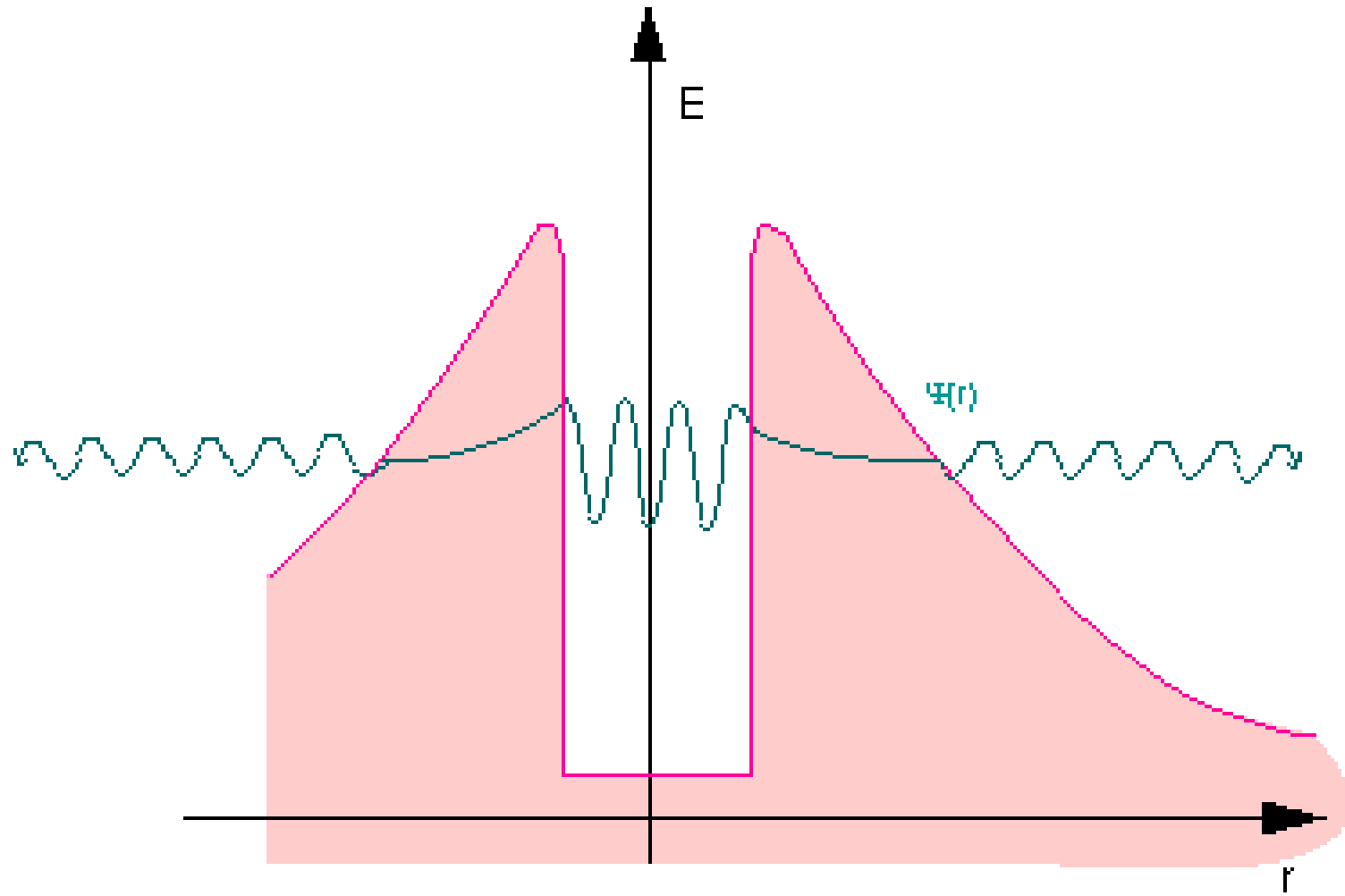
- Damit Protonen miteinander fusionieren, muss die Coulomb-Abstoßung, die durch die elektromagnetische Wechselwirkung gegeben ist (positiv und positiv geladene Teilchen stoßen sich ab), mit Hilfe von zugeführter Energie überwunden werden. Wird den Protonen genug Energie zugefügt, so können sie nah genug aneinander kommen, damit die starke Kernkraft einsetzt.

Die zu
überwindende
Coulomb-
Abstoßung



Einschub: Kernfusion 2

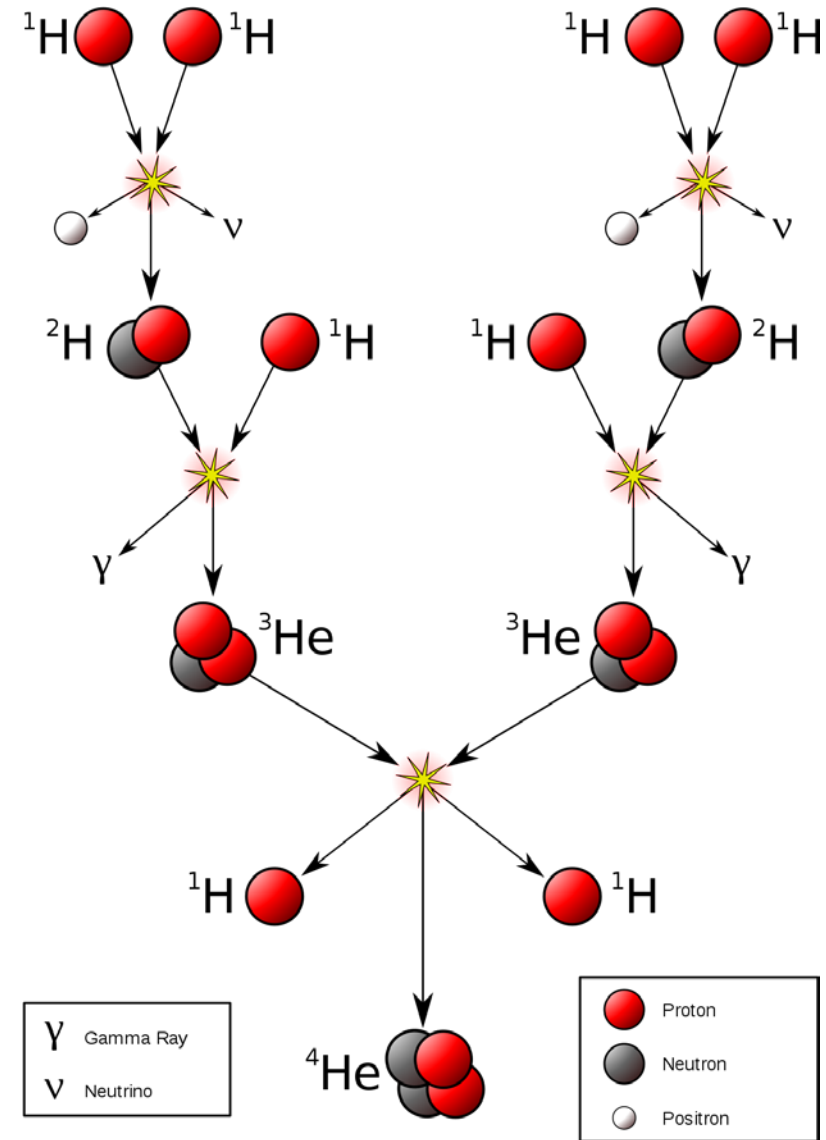
- Problem: Die Energie müsste in Form von Temperatur (thermisch) von der Sonne zur Verfügung gestellt werden, doch mit einer Temperatur von 15 Millionen Grad im Inneren der Sonne werden einem Proton direkt nur 600 eV zugefügt. Für die Fusion benötigen die Protonen jedoch ungefähr 250 000 eV.
- Lösung: Tunneleffekt
 - Dank der Energie-Zeit-Unschärferelation von Werner Heisenberg wissen wir, dass mit zunehmender Energie des Teilchens der Ort eines Teilchens immer ungewisser wird. Je mehr Energie also das Proton hat, desto wahrscheinlicher wird es, dass es sich plötzlich einfach nah genug an dem anderen Proton befindet, damit die starke Kernkraft wirkt. Es tunnelt einfach an der Coulomb-Barriere vorbei.



Tunneleffekt

Energieerzeugung durch Kernfusion

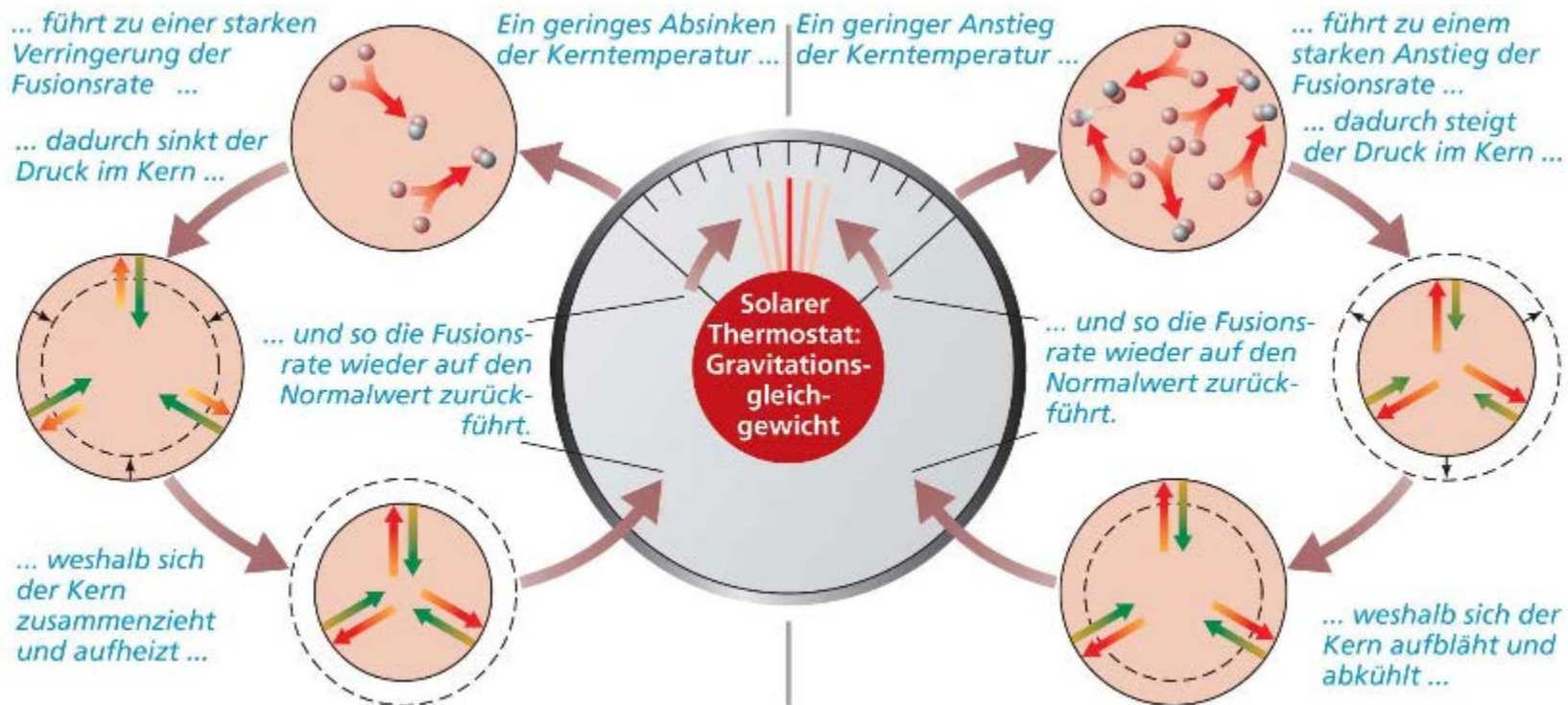
- In der Sonne wird über die pp-Kette (Proton-Proton-Kette) Wasserstoff zu Helium fusioniert. Die dabei verlorene Masse wird in Form von Energie gemäß $E=mc^2$ freigesetzt.



Der Lebensweg der Sonne: Verlauf auf der Hauptreihe

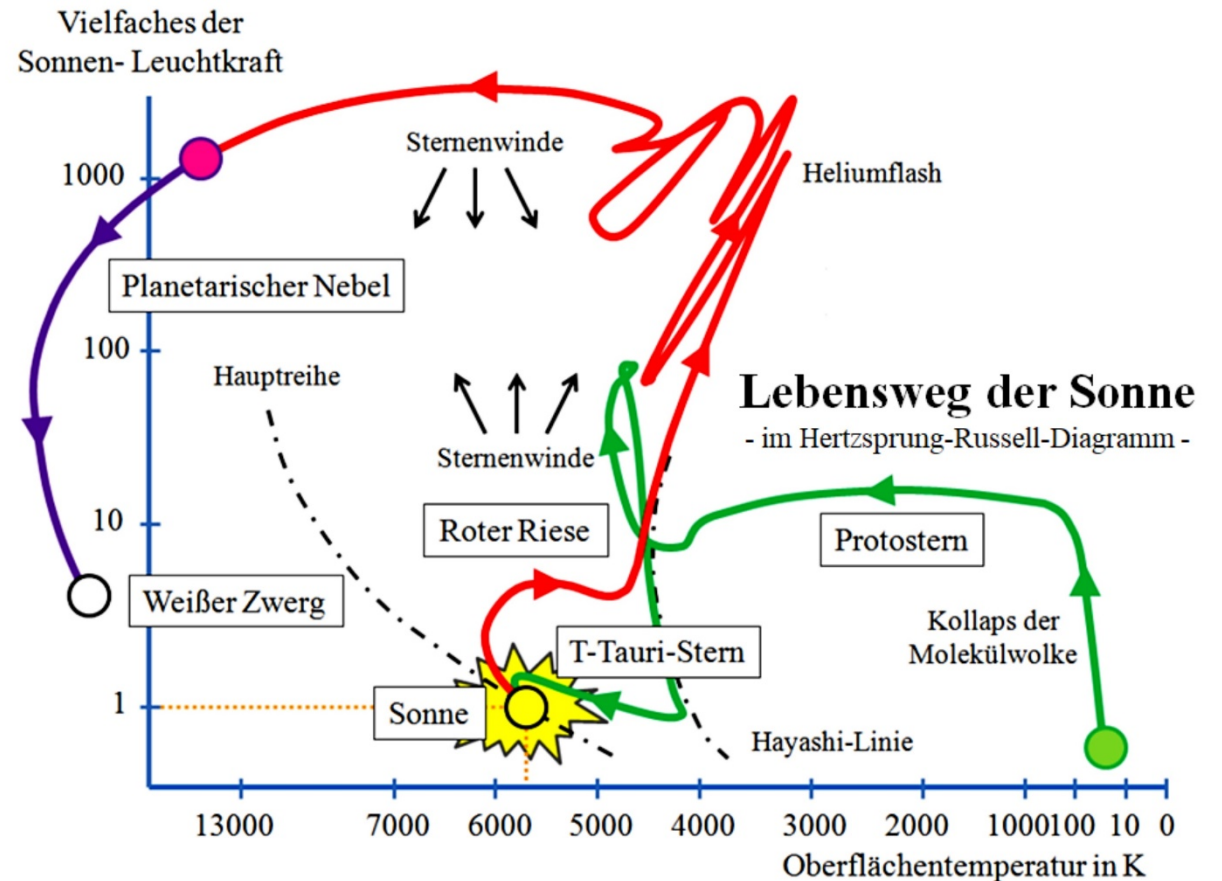
- Es herrscht ein Gleichgewicht zwischen der nach Innen wirkenden Kraft (Gravitation) und den nach außen wirkenden Kräften (Gasdruck, Strahlungsdruck und Fliehkraft), weshalb der Stern im stabilen Gleichgewicht bleibt. Die Sonne fusioniert Wasserstoff im Kern zu Helium. Ist die Temperatur im Kern zu gering, so geht die Fusionsrate zurück. Dadurch sinkt der Druck im Kern und er zieht sich zusammen, damit wird wieder mehr fusioniert, der Kern wird größer und heizt sich auf. Insgesamt bleibt die Temperatur stabil. Wäre die Temperatur zu hoch, so würde der Prozess umgekehrt ablaufen.
- Auf der Hauptreihe bleibt die Sonne mehrere Milliarden Jahre, bis so viel Wasserstoff fusioniert wurde, dass die Anzahl der Wasserstoffatome nicht mehr ausreicht, um eine hohe Wahrscheinlichkeit für den Tunneleffekt zu haben.

Gravitationsgleichgewicht



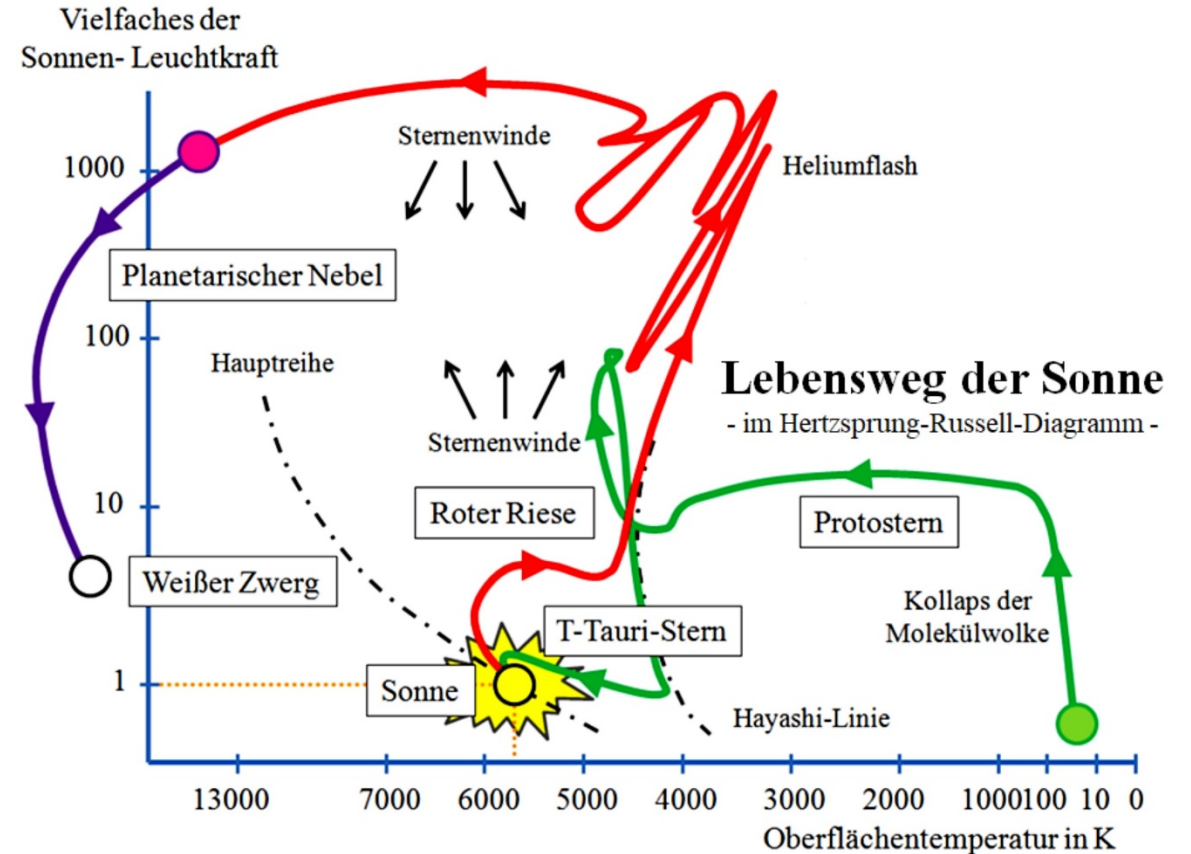
Der Lebensweg der Sonne: Abzweigepunkt

- Nachdem die Kernfusion so viel Wasserstoff in Helium verwandelt hat, zieht sich der Kern aufgrund des fehlenden Strahlungsdrucks zusammen. Und die äußeren Bereiche dehnen sich nach dem Spiegeleffekt aus. Die Temperatur um den Kern steigt so hoch an, dass Wasserstoff außerhalb des Kerns fusioniert wird; ein Schalenbrennen entsteht. Irgendwann werden Druck und Temperatur im Kern so groß, dass Helium weiter fusioniert wird zu Kohlenstoff, der sogenannte Heliumflash.



Der Lebensweg der Sonne: Entstehung des weißen Zwergs

- Nachdem auch das Helium im Kern fusioniert wurde, zieht dieser sich wieder zusammen, es entsteht ein Heliumschalenbrennen, die bereits weit entfernten äußeren Schichten können dem Strahlungsdruck nicht mehr standhalten und sie werden weggeblasen. Es bleibt nur noch der heiße, aber nicht mehr fusionierende Kern übrig, der abkühlt.



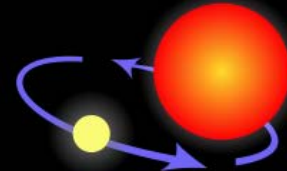
Was passiert nun mit diesem weißen Zwerg?

- Befindet sich der Vorgängerstern in einem Binärsystem mit einem massereicheren Stern, der vorher zum roten Riesen wurde, erhält er Gas von dem anderen Stern und nimmt an Masse zu. Die beiden Sterne bewegen sich nun in einer Hülle aufeinander zu. Diese Hülle wird dann abgestoßen und der Stern wird zum weißen Zwerg. Der Zwergstern erhält aber weiterhin Gas vom Sekundärstern und überschreitet irgendwann die Chandrasekhar-Masse von ca. 1,4 Sonnenmassen, so dass er zu instabil wird und explodiert.

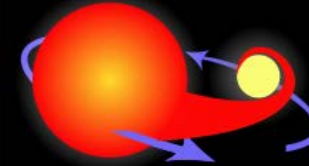
Vorläufer einer Typ Ia Supernova



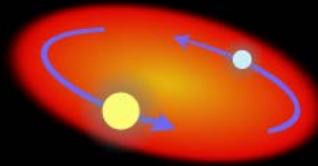
Zwei normale Sterne in einem Binärsystem.



Der größere Stern wird zum roten Riesen...



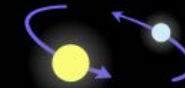
...der Gas an den zweiten Stern abgibt und diesen einhüllt und wachsen läßt.



Der zweite, leichtere Stern und der Kern des Riesen winden sich in einer gemeinsamen Hülle aufeinander zu.



Die gemeinsame Hülle wird abgestoßen, während der Abstand zwischen Kern und Sekundärstern schrumpft.



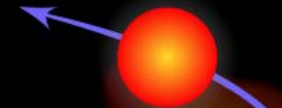
Der verbleibende Kern des Riesen kollabiert und wird zum weißen Zwerg.



Der alternde Begleitstern schwillt an und gibt nun Gas an den Zwerg ab.



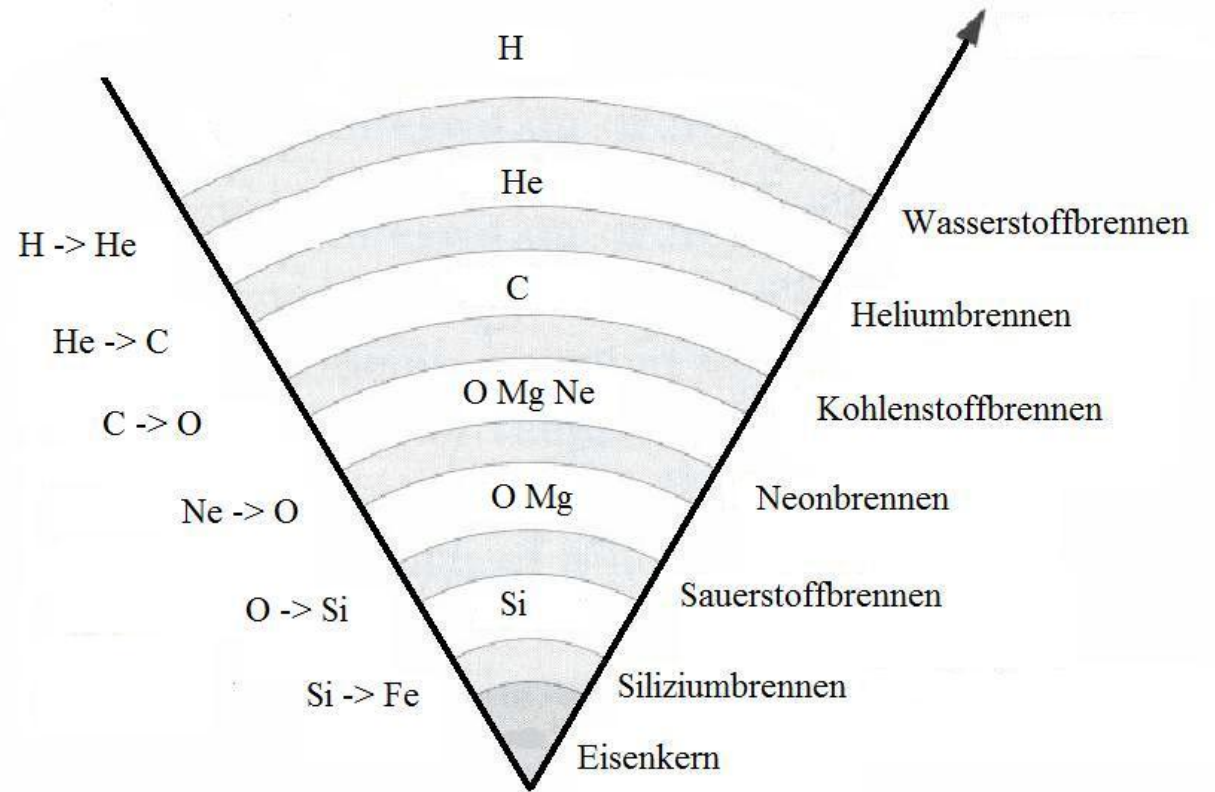
Der weiße Zwerg wächst an, bis er eine kritische Masse erreicht und explodiert...



... und schleudert damit den Begleitstern davon.

Supernova Typ II, Entstehung eines Neutronensterns

- Ein Neutronenstern entsteht aus massereicheren Vorgängern (meist O-Sternen). Nach der Zeit auf der Hauptreihe des HRDs reicht die Masse aus, um noch weiteres Schalenbrennen zu zünden. Er kann nach dem Heliumflash noch weiter fusionieren, bis irgendwann Eisen entsteht, dessen Fusionierung keine Energie mehr erzeugen würde (da Eisen die höchste Bindungsenergie pro Nukleon besitzt). Oberhalb von Eisen erhält man Energie durch Kernspaltung. Jede neue Fusion im Kern bringt immer weniger Energie, die Schalenbrände werden bis weit nach außen getragen.



Supernova Typ II

- Durch den fehlenden Strahlungsdruck hält nichts mehr der Gravitation stand (der Einfachheit halber vernachlässigen wir hier den Entartungsdruck der Elektronen), der Stern kollabiert und aus Protonen und Elektronen entstehen Neutronen und Neutrinos. Diese Neutrinos üben einen starken Druck nach außen und führen zur Explosion des Sterns. Fällt weitere Materie auf diesen ein, so stabilisiert der Entartungsdruck der Neutronen den Stern. Ist die Gravitation zu stark, kollabiert der Neutronenstern weiter zu einem schwarzen Loch.

These 2: Verschmelzung zweier Neutronensterne

- Die bis 2017 einzige beobachtete Neutronensternverschmelzung lieferte Daten, mit denen man evtl. auch einen Radioblitz erklären könnte. Im August 2017 beobachteten Astronomen, ein Ereignis, das zeigte, wie in der 130 Millionen Lichtjahren entfernten Galaxie NGC 4993 zwei Neutronensterne zusammenstießen und miteinander verschmolzen. Mit GW170817 registrierte man erstmalig elektromagnetische und Gravitationswellen. Neben den gemessenen Gravitationswellen, konnte man auch starke UV-Strahlung und, noch wesentlich länger nachweisbare Wellen im optischen, Infrarot-, Radio- und später auch im Röntgenbereich aufzeichnen. Außerdem gab es einen kurzen Strahlungsausbruch; allerdings im Gamma- und nicht im Radiobereich.
- Nebenbei liefert dieses Phänomen eine mögliche Erklärung für ein weiteres Rätsel; es erklärt, wie sich schwere Elemente gebildet haben. Wie bereits vorher gesagt, fusionieren Sterne Elemente nur bis zum Eisen. Mit dem r-Prozess (engl. rapid = schnell), bei dem bereits vorhandene Atomkerne mehrere Neutronen aufnehmen und dann rasch zu neutronenreichen Kernen zerfallen (über β -Zerfall), können noch schwerere Elemente gebildet werden. Dafür braucht man eine hohe Neutronendichte, einen hohen Neutronenfluss, und es muss schnell erfolgen, weshalb nur eine explosive Ursache wie die Verschmelzung zweier Neutronensterne in Frage kommt.

Erklärt die Hypothese auch einen FRB?

Wie kam es zu diesem Gammablitz?

- Die bisher favorisierte Erklärung besagt, dass die Gammastrahlung, durch beinahe mit Lichtgeschwindigkeit ausgeschleuderte Materiejets entstanden ist.

Ist das auch mit Radioblitzen denkbar?

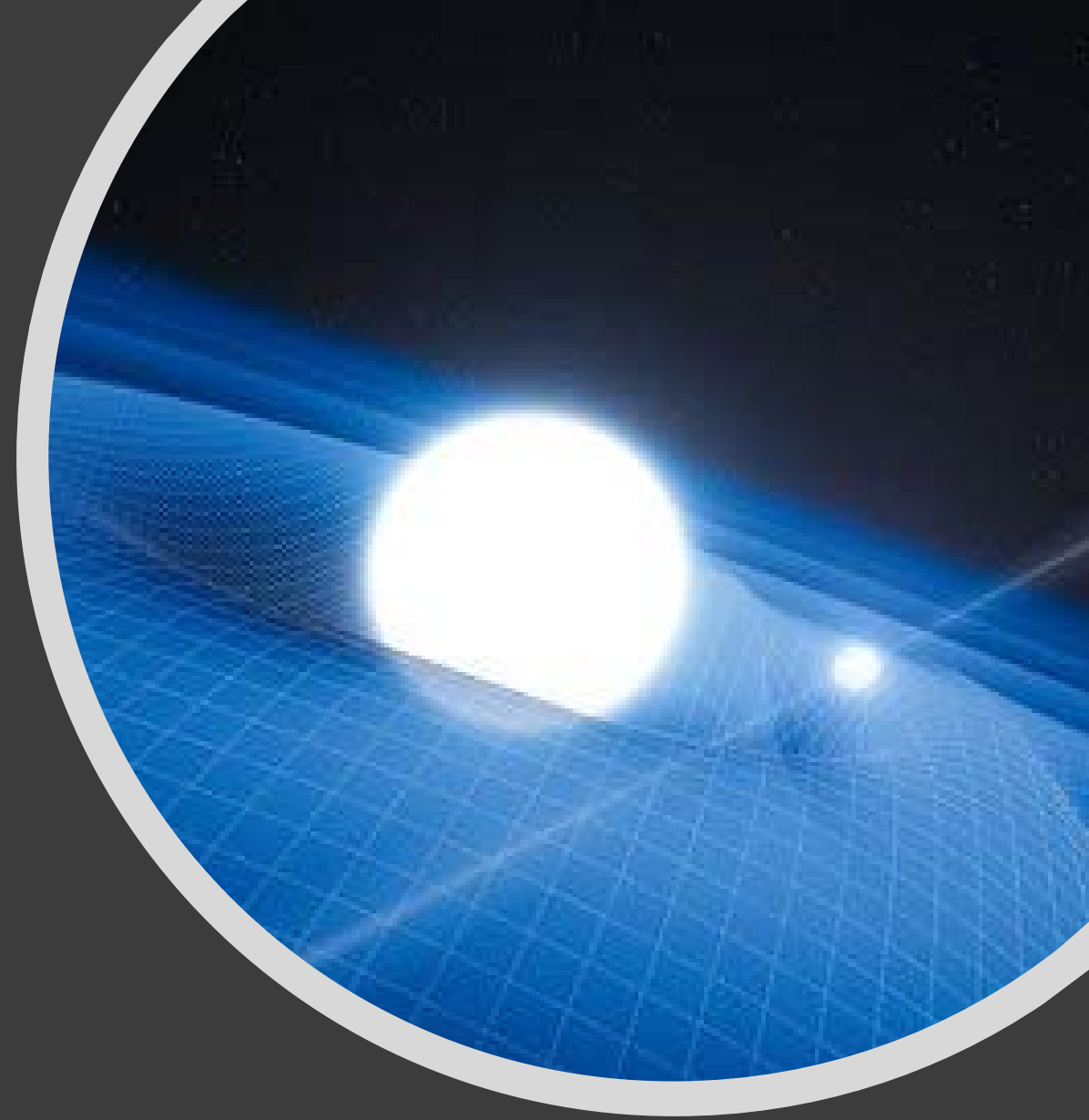
- Der Fast Radio Burst könnte an den Gamma ray burst gekoppelt sein, wenn durch die Verschmelzung der Neutronensterne ein schnell rotierender supermassereicher Neutronenstern entsteht, dabei Materie von einem der Neutronensterne die Fluchtgeschwindigkeit nicht erreicht und auf den Stern zurück fällt. Dieser Stern würde dann sein Magnetfeld und seine Rotation abbauen und zu einem schwarzen Loch kollabieren, wobei er einen Radioblitz aussenden würde. Somit würde man kurz nach dem Gammablitz auch einen FRB bemerken müssen. Die Nachbeobachtungen nach der Verschmelzung belegen die These allerdings nicht. Etwas ähnliches würde auch der dritten These zufolge passieren; auch hier würde der Kollaps eines Neutronensterns zu einem Radioblitz führen.

Sind die Thesen zutreffend?

- Zwar erklären diese Thesen alle, wie FRBs entstehen können, doch sie haben einen klaren Nachteil. Sie erklären lediglich einen einmaligen Radiostrahlungsausbruch. Nach einer Supernova, der Verschmelzung eines Neutronensterns oder der Entstehung eines schwarzen Lochs könnten jedoch keine weiteren FRBs mehr ausgesendet werden.

These 4: Pulsare (Riesenpulse)

- Ein Pulsar ist ein schnell rotierender Neutronenstern. Da der Rotationsimpuls erhalten bleibt, der Vorgängerstern aber auf einen Bruchteil seiner ursprünglichen Größe komprimiert wird, rotiert der Stern extrem schnell um seine Achse, wodurch ein starkes Magnetfeld induziert wird. Weicht die Symmetrieachse des Magnetfeldes von der Rotationsachse des Neutronensterns ab, so wird ein stark gebündelter Radiostrahl, entlang der Magnetfeldlinien ausgesendet. Zeigt der Strahl in Richtung Erde, so können wir das als Radiopuls messen.



Schwachstelle

- Die meisten dieser Pulsare sind zu schwach, um aus großen Distanzen detektiert zu werden.
- evtl. Lösung: Es gibt Ausnahmen, sogenannte Riesenpulse, welche besonders kurz und stark sind. Ein Beispiel dafür wäre der Krebspulsar, welcher aus einer Supernova um 1054 nach Christus entstand, einen Radius von ca. 20 km besitzt und 30 mal pro Sekunde um die eigene Achse rotiert. Dieser Pulsar wurde mit dem MAGIC-Teleskop beobachtet und in seiner Atmosphäre werden Elektronen und Positronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Neben Röntgen- und extrem intensiver Gammastrahlung (2014 empfing man sogar einen Gammapuls von über 1,5 TeV), entsteht auch Radiostrahlung, die man aus der Entfernung von anderen Galaxien messen könnte.

Stimmt diese Hypothese:

- Diese Vermutung wird von dem repeater FRB 121102 unterstützt, da dessen Heimatgalaxie das Potential dazu hat, viele Neutronensterne hervorzubringen.
- Der 2019 untersuchte repeater FRB 180916.J0158+68, der innerhalb von fünf Stunden gleich vier Strahlungsausbrüche hatte, stammt aus einer "nur" ungefähr 500 Millionen Lichtjahren entfernten Galaxie, welche im direkten Umfeld des Bursts ebenfalls eine hohe Rate an Sterngeburten hat.

Ist irgendeine Hypothese zutreffend?

- Die Entstehung der FRBs durch Pulsare wird aktuell als die wahrscheinlichste Theorie angenommen, wobei man sich unter Forschern noch nicht sicher ist, ob die FRBs lediglich von dem gleichen physikalischen Prozess erzeugt werden, oder ob sie nicht mehrere, verschiedene Ursprünge haben könnten.
- Es gibt noch andere Theorien, z.B., dass ein aktiver Galaxienkern (Active Galactic Nucleus oder AGN; das ist ein riesiges schwarzes Loch) Materie beschleunigt, so dass ein Radiojet, eine Art riesiger Teilchenbeschleuniger, entsteht. Eine weitere Theorie stammt von einem japanischen Forscher und besagt, dass Radioblitz durch Kollisionen zweier Sterne aus dunkler Materie auftreten. Eine in Fachkreisen wohl eher weniger ernstgenommene Theorie hält die Repeater sogar für außerirdische Kommunikationssignale.

Für was brauchen wir FRBs?

- Auf dem Signalweg, findet eine Plasmadispersion statt, das heißt, durch Wechselwirkung mit dem im Universum vorkommenden Gas und Plasma nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der unterschiedlichen Radiowellen ab, wenn die Frequenz (also Energie) der Welle niedriger wird bzw. die Wellenlänge größer wird. Wir können also, wenn wir wissen wo der FRB ausgestrahlt wurde, aus den Beobachtungen ableiten, wie viel Materie zwischen uns und der Quelle liegt und sogar auf die dreidimensionale Verteilung der Materie im Kosmos schließen. Damit würde man die fehleranfälligen und nur sehr schwer belegbaren Modellrechnungen ersetzen und sich ein Bild von der Materieverteilung in unserem Universum schaffen können. Außerdem könnte man evtl. die Struktur von dunkler Materie ermitteln. Das wäre ein riesiger Fortschritt in der Astrophysik.

Die Forschung zu FRBs am Max Planck Institut

- Eine der führenden Astronominnen auf diesem Gebiet, Laura Spitler, leitet am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn eine Gruppe zur Erforschung der Radioblitze. Sie promovierte über das Thema und nun möchte sie mit ihrem Team die Radioausbrüche nutzen, um die Struktur des Universums zu untersuchen und Materiedichten sowie weitere Parameter zu bestimmen.



Bildquellen:

- Luftbild Radioteleskop Effelsberg, Peter Sondermann, Viscom/City-Luftbilder. Bildrechte: MPIfR, S.1
- Lorimer Blitz, Wikipedia, Von Psr1909 - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, S.5: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=44102265>
- Hertzsprung-Russell-Diagramm, Von User:Sch - derived from Image:HR-sparse.svg by User:Rursus. Text translated to German, some cosmetics applied, position of Sun corrected (spectral class G, not K), CC BY-SA 3.0 S.15: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3670343>
- Lebensweg der Sonne S. 16; S.17; S.25 & S.26, mit freundlicher Genehmigung von Ulrich von Kusserow, Initiativkreis Astronomie und Raumfahrt (IAR), Bremen

Bildquellen

- VLBI: Teleskope weltweit S.7: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/4990323/original-1578317140.jpg?t=eyJ3aWR0aCI6NTQwLCJvYmpfaWQiOiQ5OTAzMjN9--8ea22d7f74ff44ce4a223f75698494904605e72c>
- CHIME collaboration, CC BY-SA 4.0, S.8: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=41957741>
- Supernova Typ Ia, Von X-ray: NASA/CXC/J.Hester (ASU); Optical: NASA/ESA/J.Hester& A.Loll (ASU); Infrared: NASA/JPL-Caltech/R.Gehrz (Univ. Minn.) - http://gallery.spitzer.caltech.edu/Imagegallery/image.php?image_name=sig06-028, Gemeinfrei, S.14: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2387592>
- Coloumbabstoßung S. 19: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/16/Tunneleffekt_alpha_zerfall.svg/1200px-Tunneleffekt_alpha_zerfall.svg.png

Bildquellen

- Gravitationsgleichgewicht S. 24: nach: J. Bennett et al., Astronomie – Die kosmische Perspektive, Pearson 2010 (Abb. 14.8)
- Schalenbrennen in Sternen, Von Agentjoerg (Diskussion) - Eigenes Werk (Originaltext: selbst erstellt), Gemeinfrei, S.29:
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=51695415>
- Ein Neutronenstern , Europäische Südsternwarte ESO/L. Calçada
S.34: <https://www.scinexx.de/wp-content/uploads/0/1/01-21672-einsteinpulsar.jpg>
- Laura Spitler S.39: https://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/lspitler/images/Spitler_profile3.jpg
- Tunneleffekt S.21: http://milq.tu-bs.de/data/_uploaded/Lehrgang/Kapitel11/Abb118.gif
- Supernova Typ 1, Wie geschieht das?, Von NASA, ESA and A. Feild (STScI); vectorisation and translation by chris 論 -
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/star/supernova/2004/34/image/d/>,
CC BY 3.0, S.28: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8666296>

Textquellen

- Welt der Physik "Verschmelzende Neutronensterne als Reaktor", 2019: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/news/2019/verschmelzende-neutronensterne-als-reaktor/>
- scinexx Welt der Wissenschaft "Erste Gravitationswellen von Neutronenstern-Kollision", 2017 : <https://www.scinexx.de/news/kosmos/erste-gravitationswellen-von-neutronenstern-kollision/>
- Max-Planck-Gesellschaft "Gravitationswellen von verschmelzenden Neutronensternen gemessen", 2017: <https://www.mpg.de/11555828/gravitationswellen-und-gammablitz>
- Fast Radio Bursts, Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Fast_Radio_Burst

Textquellen

- Max-Planck-Institut für Radioastronomie "Ein sich wiederholender Radiostrahlungsausbruch aus einer Spiralgalaxie": <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/pressemeldungen/2020/1>
- Max-Planck-Gesellschaft "Radioblitze sind ein neues Werkzeug", 2020: <https://www.mpg.de/14366624/radioblitze-sind-ein-neues-werkzeug>
- Max-Planck-Gesellschaft "Das Rätsel der himmlischen Blitze", 2020: <https://www.mpg.de/14366983/das-raetsel-der-himmlischen-blitze>
- Max-Planck-Institut für Radioastronomie "Radioblitze aus der Tiefe des Weltalls", 2017: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/3725287/2017>

Textquellen

- Spektrum.de "Magnetfeldlinien":
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/magnetfeldlinien/9288>