

Das Neutrino aus der Jetschleuder

Linus Engelfried

Inhaltsverzeichnis

- Seite 3: Prozesse in Sternen
- Seite 5: Entwicklung von Sternen zu schwarzen Löchern
- Seite 9: Eigenschaften von schwarzen Löchern
- Seite 10: Extrem massereiches schwarzes Loch
- Seite 11: Magnetische Rotationsinstabilität
- Seite 12: Was ist ein Jet?
 - Seite 13: Blandford-Payne-Szenario
 - Seite 14: Blandford-Znajet-Prozess
- Seite 15: Neutrinos
 - Seite 16: Nachweis von Neutrinos
- Seite 17: Das Neutrino aus der Jetschleuder
 - Seite 18: Entdeckung des energiereichen Neutrinos
 - Seite 19: Quelle lokalisieren
 - Seite 20: Untersuchung des Jets
 - Seite 21: Die zwei Szenarien
 - Seite 22: Die zwei Theorien
- Seite 23: Bedeutung für die Astronomie
- Seite 24-27: Quellennachweis

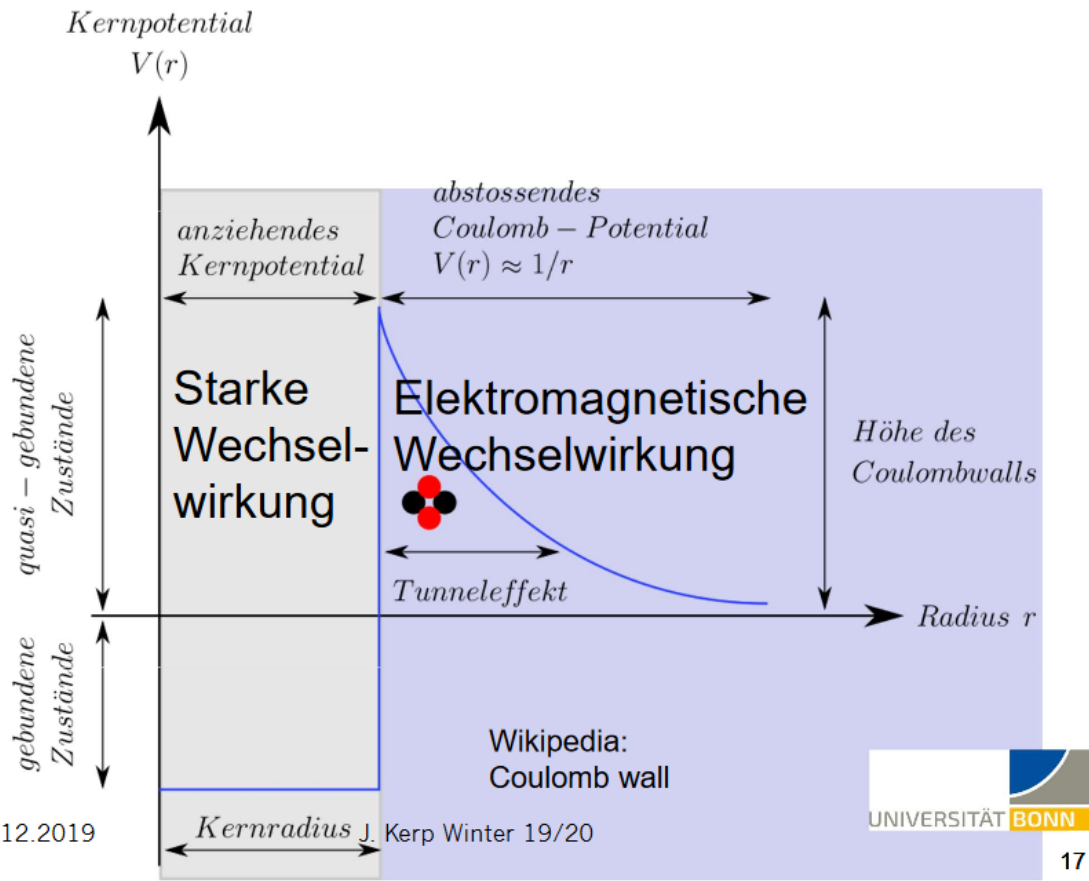
Grundlagen

- Schwarze Löcher und deren Entstehung
 - Prozesse in Sternen
 - Entwicklung von Sternen
 - Entstehung des schwarzen Lochs
 - Eigenschaften des schwarzen Lochs
- Entstehung von Jets
 - Was ist ein Jet?
 - Blandford-Payne-Szenario
 - Blandford-Znajek-Prozess
- Was sind Neutrinos?

Prozesse in Sternen

- Sterne gewinnen Energie durch Kernfusion, wobei Sterne auf der Hauptreihe (im Hertzsprung-Russell-Diagramm) Wasserstoff zu Helium fusionieren (PP-Kette).
- Die Fusion funktioniert, da der Kern sehr komprimiert ist und dementsprechend hohe Temperaturen vorliegen. Dann können Protonen die elektrostatische Anziehungskraft überwinden und in den Bereich der starken Kernkraft übergehen. Das wiederum funktioniert nur wegen des Tunneleffekts, der aus der Heisenbergschen Unschärferelation folgt. Danach liegt eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür vor, dass das Proton sich, ohne die Coulombabstoßung zu überwinden, nah genug am anderen Proton befindet, um fusionieren zu können.
- Die Energie, die durch die Kernfusion erzeugt wird, wird in Form von Neutrinos und Photonen abgestrahlt.

Tunneleffekt



15.12.2019

J. Kerp Winter 19/20

17

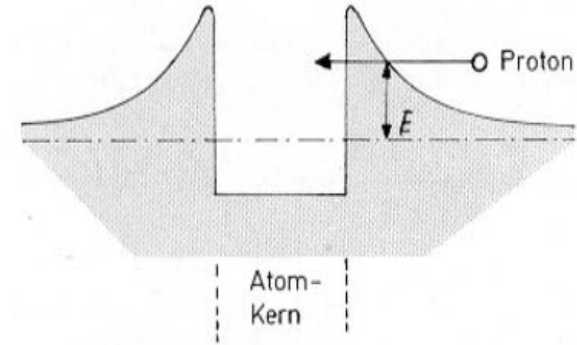
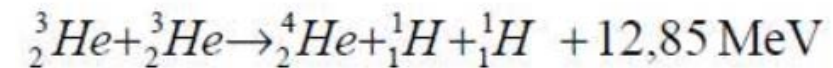
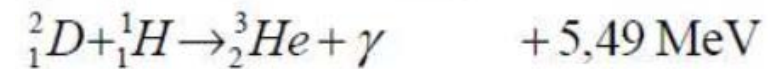
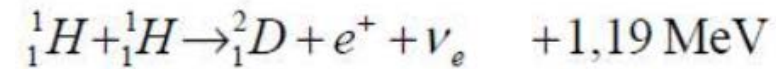


Abb. 4.11 Zum Tunnel-Effekt. Mit zunehmender Energie E des Protons steigt die Wahrscheinlichkeit für sein Eindringen in den Atomkern



Entwicklung von Sternen zu schwarzen Löchern

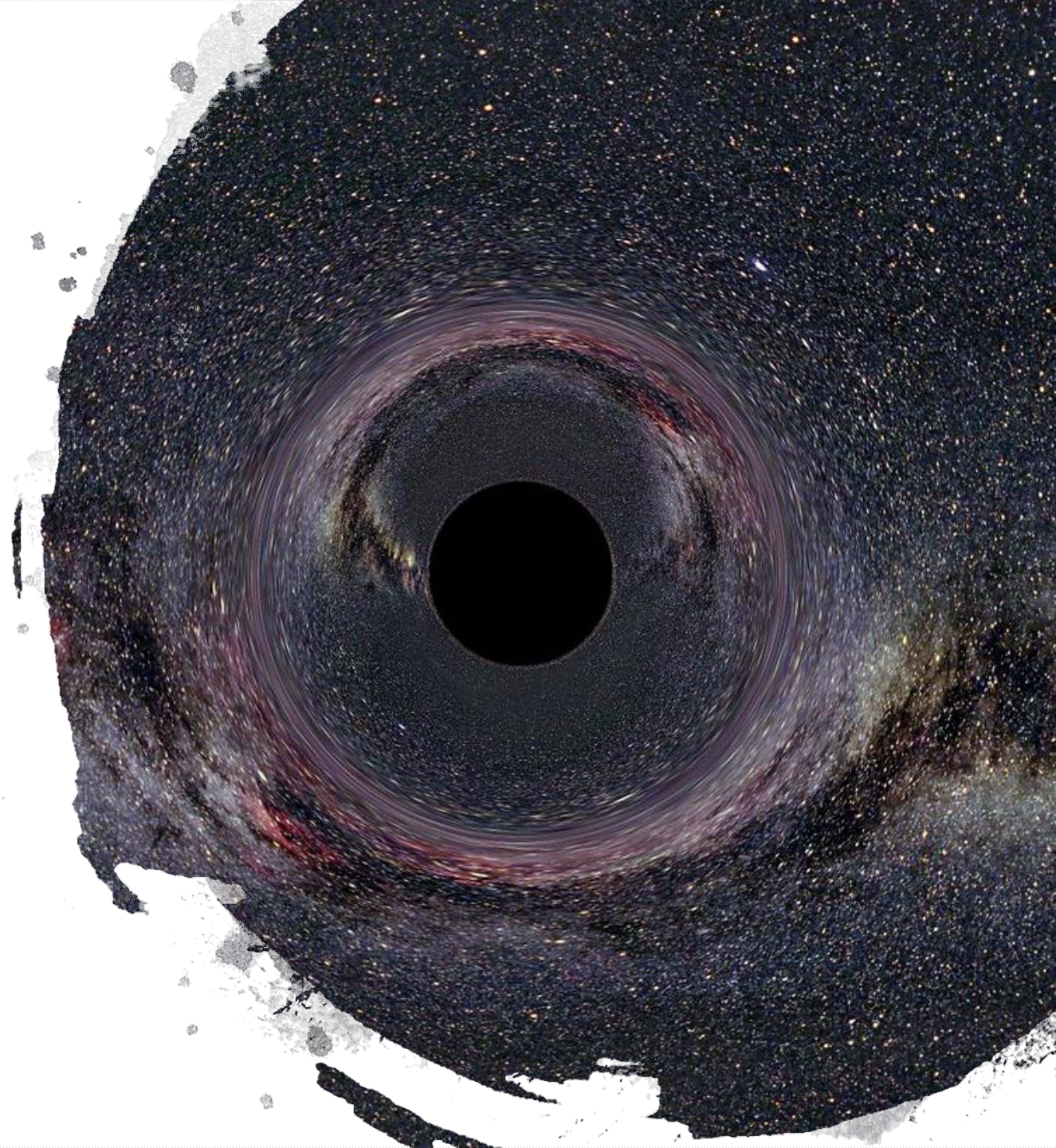
- Wenn einem massereichen Stern irgendwann der Wasserstoff im Kern ausgeht, zieht er sich zusammen, da kein Strahlungsdruck mehr herrscht und nur noch die Gravitation wirkt. Dadurch wiederum steigt die Temperatur, was zur Folge hat, dass nun auch außerhalb des Kerns Wasserstoff fusioniert wird (Schalenbrand). Während sich der Kern weiter zusammen zieht, dehnt sich der Rest des Sterns aus (Roter Riese) bis die Temperatur im Kern hoch genug ist, um Helium zu fusionieren (Heliumflash). Den Zyklus zu schwereren Elementen kann ein Stern solange durchlaufen, bis nur noch Eisen im Kern ist, da man Eisen nicht weiter fusionieren kann. Ob es dem Stern allerdings gelingt, im Kern Helium oder später noch Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff usw. zu fusionieren, hängt von seiner Masse ab.

Entwicklung von Sternen zu schwarzen Löchern

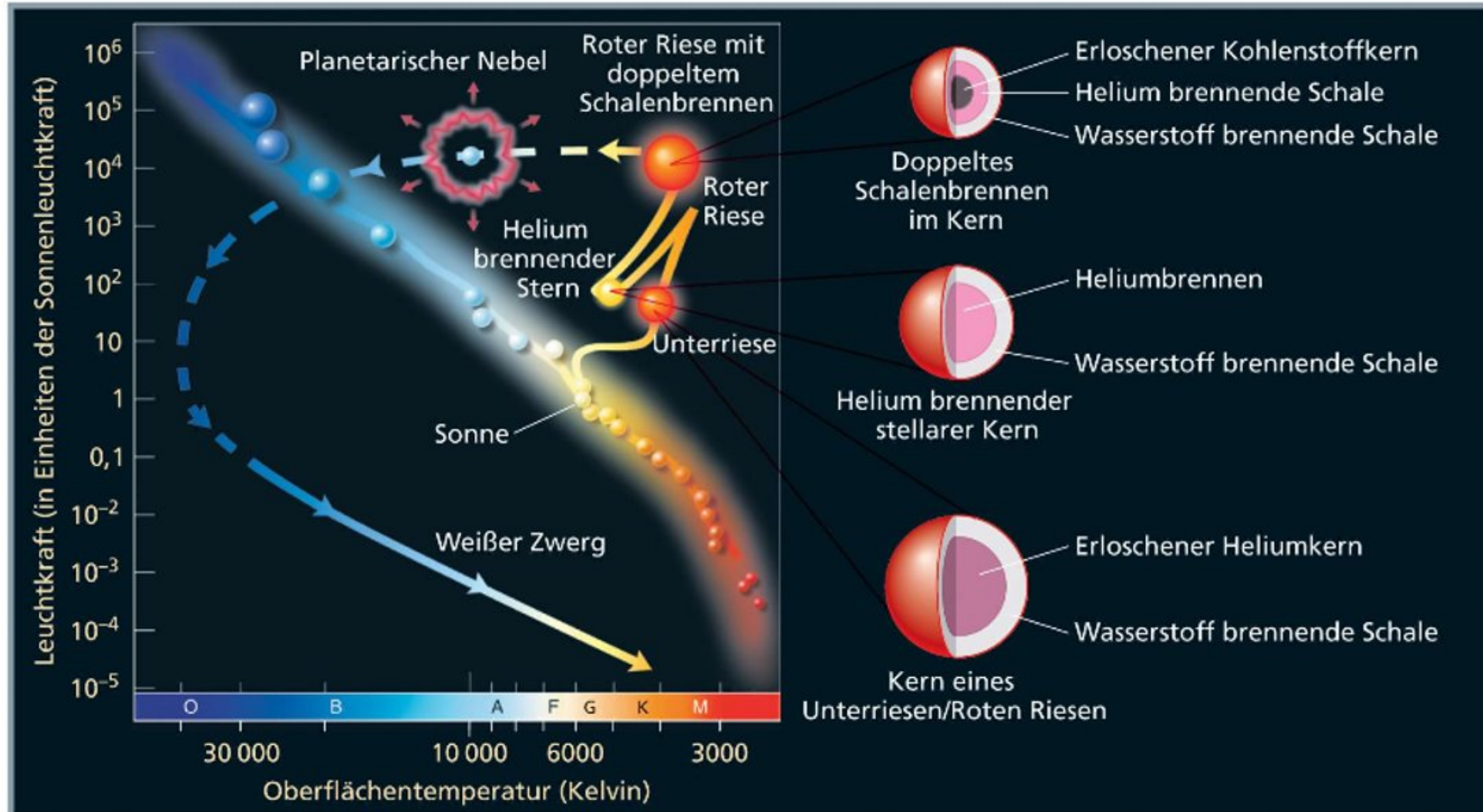
- Wenn ein massearmer Stern wie die Sonne nicht mehr in der Lage ist, durch Fusion Energie zu erzeugen, sorgen Instabilitäten dafür, dass die äußere Hülle "weggeblasen" wird, sodass nur noch der Kern übrig bleibt (weißer Zwerg).
- Dieser stürzt nicht unter seiner eigenen Gravitation zusammen, weil der extreme Druck dafür sorgt, dass die Elektronen entartet werden. Das heißt, es ist fortan nur noch ein Elektron pro Energieniveau zulässig, wodurch ein Druck (Entartungsdruck) der Gravitation entgegen wirkt.
- Sollte bei massereicheren Sternen dieser nun auch überwunden werden, so wird der Stern weiter komprimiert, bis die Neutronen entarten und der Gravitation entgegenwirken (Neutronenstern). Gleichzeitig entstehen eine Menge Neutrinos, weil die Protonen und Elektronen zu Neutronen werden. Diese Neutrinos können fast jede Materie nahezu ohne Wechselwirkung durchdringen. Nach einer Supernova-Explosion bleibt im Zentrum ein kompakter Neutronenstern mit extrem hoher Dichte. Ist die Masse noch höher, kann das Zentralobjekt noch weiter kollabieren, zu einer Singularität (einem schwarzen Loch).

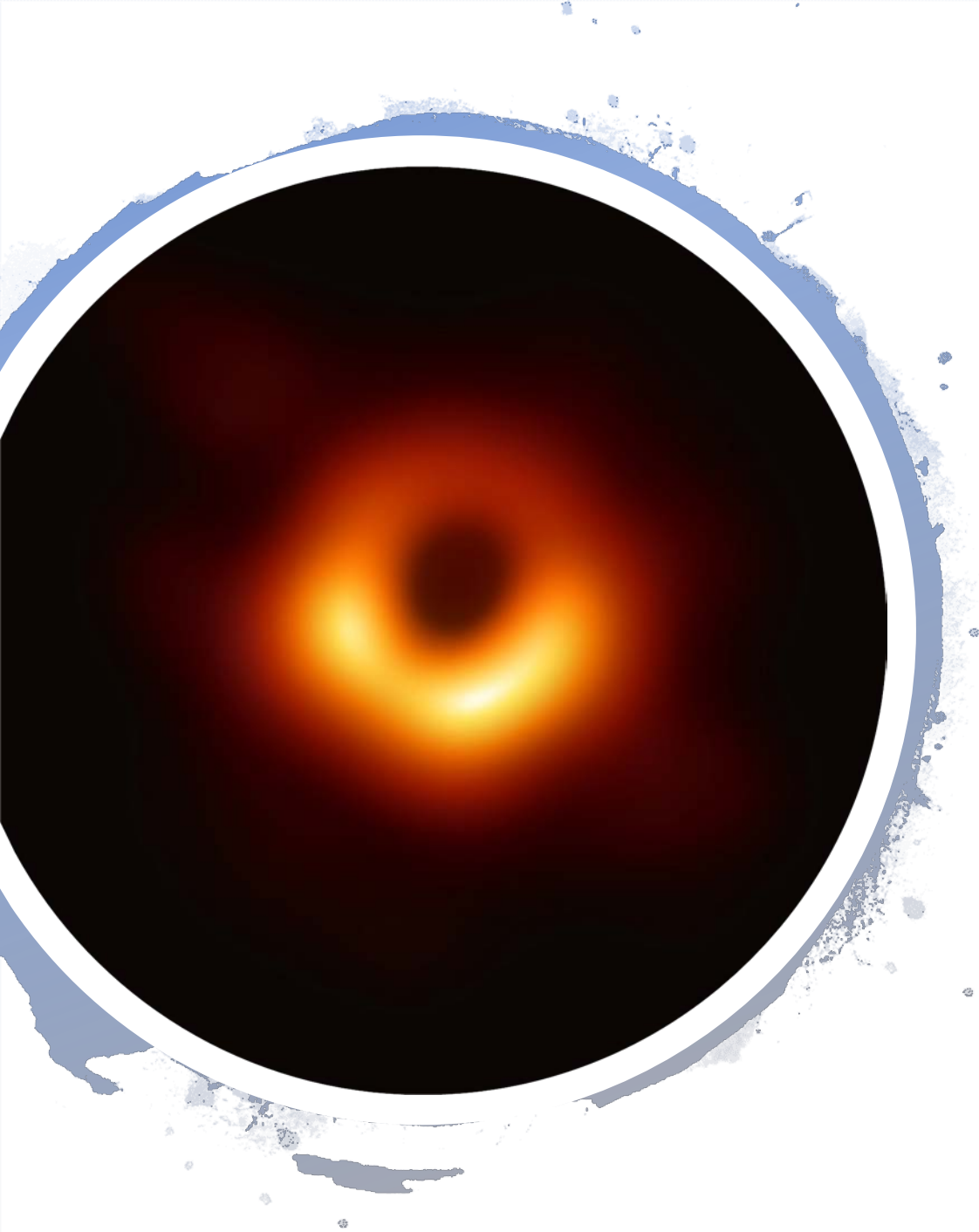
Eigenschaften schwarzer Löcher

- Klassische Schwarze Löcher können mit drei Eigenschaften vollständig beschrieben werden: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung, wobei Letztere in allen realistischen Situationen gleich Null ist.
- Der Schwarzschildradius eines statischen schwarzen Lochs kann mit $R=2Gm/c^2$ beschrieben werden. Für die Herleitung muss man im Grunde nur den Radius berechnen, bei dem die Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist ($\frac{1}{2} * m * c^2 = G * M * m / r$)
- Die Dichte eines schwarzen Lochs ist unendlich groß.



Beispiel der Entwicklung eines Sterns an der Sonne





Extrem massereiches schwarzes Loch

- Im Zentrum der meisten Galaxien befinden sich extrem massereiche schwarze Löcher mit einigen Millionen oder sogar Milliarden Sonnenmassen.
- Wie ein solch massereiches schwarzes Loch entstehen kann, ist noch unklar; es könnte sein, dass es sich aus verschiedenen schwarzen Löchern geringerer Masse gebildet hat.
- In unmittelbarer Umgebung zum schwarzen Loch, das im Zentrum einer aktiven Galaxie (active galactic nucleus, AGN) sitzt, entstehen sogenannte AGN-Jets.

Magnetische Rotationsinstabilität (MRI)

- Die MRI kommt durch das Magnetfeld zwischen zwei Teilchen zustande, das bei einer differentiellen Rotation dafür sorgt, dass das Teilchen, das weiter innen rotiert, abgebremst wird, wohingegen jenes, das weiter außen rotiert, beschleunigt wird.
- Durch die MRI transportieren innere Plasmateilchen im Akkretionsfluss Drehimpuls nach außen zu äußeren Plasmateilchen. Sie ist ein sehr effizienter Mechanismus für den Drehimpulstransport in magnetischen Akkretionsflüssen.
- Ohne die MRI würde gar keine Materie in das schwarze Loch einfallen können, da der Drehimpuls nicht nach außen übertragen wird, wodurch das Teilchen immer schneller rotieren und nach außen beschleunigt werden würde.



Was ist ein Jet?

- Jets sind die größten Teilchenbeschleuniger des Universums.
- Materie aktiver Galaxienkerne (AGN) wird in Form von gerichteten, fast lichtschnellen Strömen (Jets) abgegeben.
- AGN-Jets entstehen in der unmittelbaren Umgebung eines zentralen massereichen schwarzen Lochs.
- Es gibt zwei Theorien zur Entstehung von Jets:
 - Blandford-Payne-Szenario
 - Blandford-Znajek-Prozess

Blandford- Payne- Szenario

In der Nähe des schwarzen Lochs liegt sämtliche Materie nicht im atomaren, sondern im ionisierten Zustand (Plasma) vor, da die Temperaturen auf Grund der Kompaktheit sehr groß sind und dementsprechend genug Energie vorhanden ist, um die Elektronen von den Protonen zu trennen.

Durch die Bewegungen der Ionen und Elektronen werden Magnetfelder induziert.

Diese Magnetfelder sind in der Lage, Teilchen aus der Scheibe zu lösen. Diese gelösten Teilchen bezeichnet man als Scheibenwind.

Es kann nun ein Jet entstehen, wenn dieser Wind durch magnetische Lorentzkräfte oder durch den Strahlungsdruck heißer Umgebungsquellen gebündelt wird.

Blandford- Znajek- Prozess

Mit dem Gravitomagnetismus geht eine Verstärkung des Magnetfeldes einher. Wird die erreichte Feldstärke groß genug, kann ein Plasma aus Elektronen und Positronen gebildet werden.

Diese Teilchen werden durch die gravitomagnetische Kraft dazu angeregt, den Randbereich des schwarzen Lochs zu verlassen, wodurch dem schwarzen Loch Rotationsenergie entzogen wird.

Auf diese Weise wird einfallende Materie mit Hilfe von Magnetfeldern nach außen umgeleitet. Aus dieser Materie kann nun wieder ein Jet entstehen, wenn sie durch magnetische Lorentzkräfte oder durch den Strahlungsdruck heißer Umgebungsquellen gebündelt wird.

Neutrinos

Standard-Modell der Elementarteilchen

| Drei Generationen der Materie (Fermionen) | | | Wechselwirkungen (Bosonen) | | |
|---|--|--|--|--------------------------------------|----------------------------------|
| | I | II | III | | |
| Masse | $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ | 0 | $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ |
| Ladung | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | 0 | 0 |
| Spin | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 | 0 |
| | u Up | c Charm | t Top | g Gluon | H Higgs |
| | d Down | s Strange | b Bottom | γ Photon | |
| | e Elektron | μ Muon | τ Tau | Z Z-Boson | |
| | ν_e Elektron-Neutrino | ν_μ Muon-Neutrino | ν_τ Tau-Neutrino | W W-Boson | |

QUARKS (links), **LEPTONEN** (links), **SKALARBOSONEN** (rechts), **EICHBOSONEN VEKTORBOSONEN** (rechts)

- Neutrinos sind elektrisch neutrale, fast masselose Teilchen, die sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ausbreiten.
- Sie entstehen z.B. wenn ein Neutron in ein Elektron und ein Proton zerfällt oder bei Fusionsprozessen in der Sonne (und allen anderen Sternen, die Fusion nach der PP-Kette betreiben).
- Sie wechselwirken kaum mit anderen Teilchen, was ihren Nachweis äußerst schwierig macht.
- Sie gehören zu den Leptonen und es gibt 3 verschiedene Arten von Neutrinos: Das Elektron-Neutrino, das Myon-Neutrino und das Tau-Neutrino.

Nachweis von Neutrinos

- Das IceCube-Observatorium am Südpol weist Neutrinos indirekt nach, indem es ihre Sekundärteilchen beobachtet.
- Wenn ein hochenergetisches Neutrino zufällig mit einem Atomkern zusammenstößt, entsteht das Sekundärteilchen des Neutrinos, also beispielsweise ein Myon, welches Energie in Form von blauem Licht abgibt.



Das Neutrino aus der Jetschleuder



ENTDECKUNG DES
EXTREM
ENERGIEREICHEN
NEUTRINOS



QUELLE LOKALISIEREN

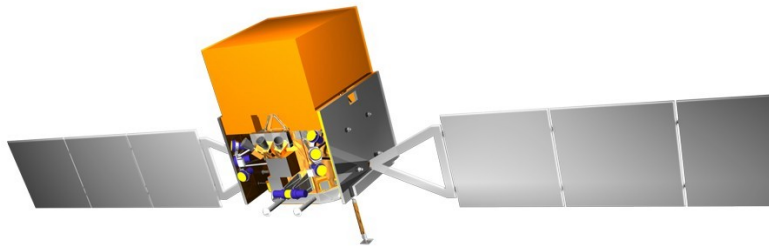


UNTERSUCHUNG DES
JETS



BEDEUTUNG FÜR DIE
ASTRONOMIE

Entdeckung des energiereichen Neutrinos



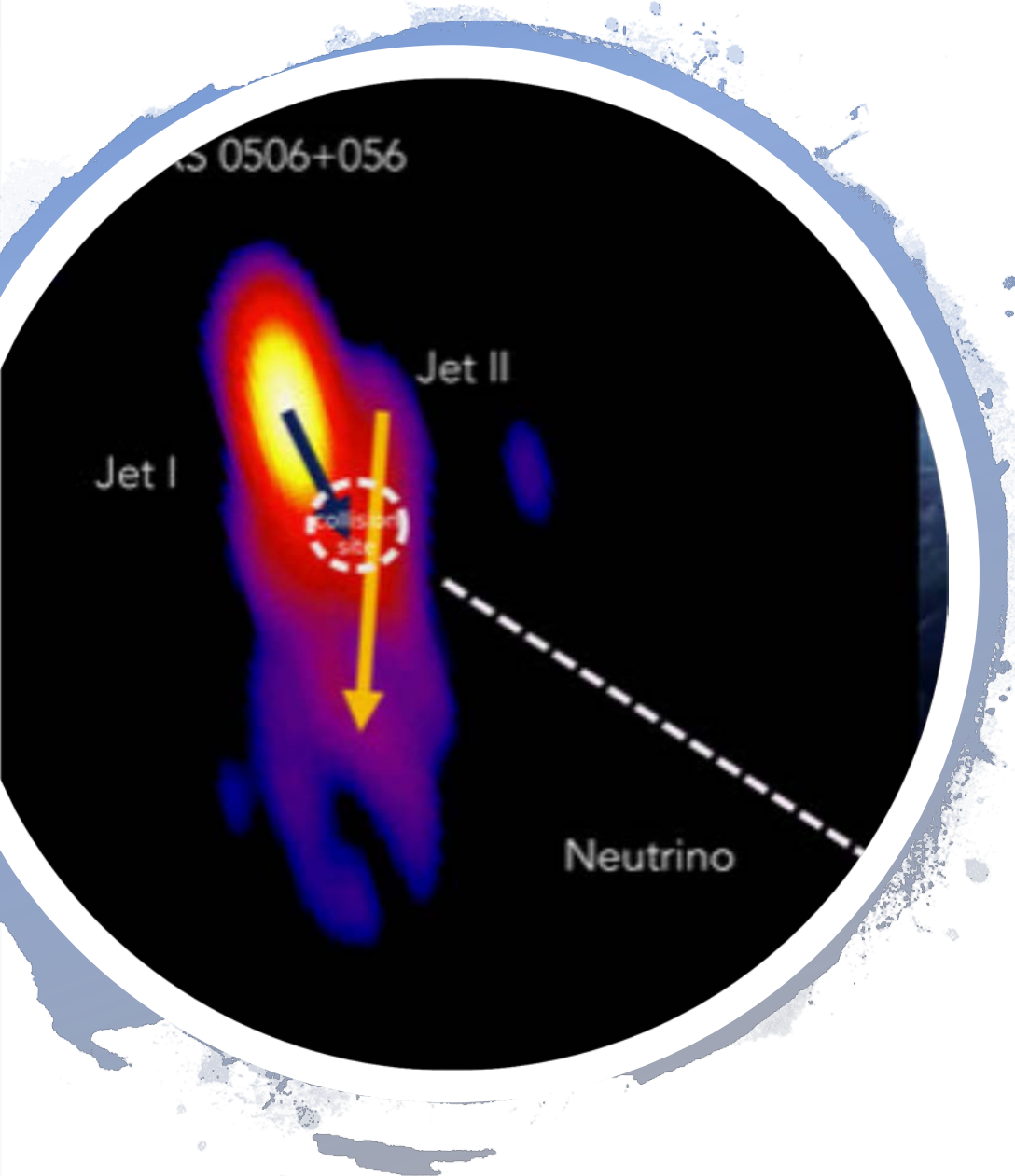
- Am 22. September 2017 wurde von einem Forscherteam mit dem Neutrinodetektor IceCube ein Neutrino mit einer Energie von fast 300 Teraelektronenvolt entdeckt. Das ist etwa das Dreißigfache der Energie der Protonen am schnellsten Teilchenbeschleuniger der Welt.
- Sämtliche Gammastrahlenteleskope weltweit wurden auf die Position der Quelle ausgerichtet, ebenso das Weltraumteleskop Fermi der NASA, sowie das Tscherenkowteleskop MAGIC konnten als Ursprungsort des Neutrinos den aktiven Kern einer Galaxie ausmachen, die fast 4 Milliarden Lichtjahre entfernt ist.
- Diese Galaxie wurde TXS 0506+056 genannt.

Quelle lokalisieren

- Da sich in Jets energiereiche Röntgen- und Gammastrahlung bildet, muss man nach dieser Gammastrahlung suchen, um die Quelle des Neutrinos zu finden.
- Um die aktive Galaxie genauer beobachten zu können, wurden Radiowellen genutzt. Dazu wurden Messdaten von einem Netzwerk von Radioteleskopen über einen Zeitraum von fast 10 Jahren ausgewertet.
- Ein internationales Forscherteam unter der Leitung von Silke Britzen vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie hat damit die Radiodaten vor und nach dem Neutrinoereignis von dieser Galaxie untersuchen können.

Untersuchung des Jets

- Durch die Radiobeobachtungen erhielt man Hinweise darauf, dass es mehrere Jetkanäle gibt und auf eine Kollision von Jetmaterial.
- Durch diese Kollision muss das Neutrino entstanden sein. Es beweist, dass sich in dem Jet Protonen befinden müssen, da das Neutrino wahrscheinlich durch die Wechselwirkung von hochenergetischen Protonen untereinander oder durch deren Interaktion mit Photonen entstanden ist.
- Es sind zwei Szenarien denkbar (nächste Seite).
- Zusätzlich zum Nachweis der Kollision von Jetmaterie wurden auch Anzeichen für eine Präzession des zentralen Jets gefunden.
- Auch hier gibt es zwei Theorien, wie diese Präzession entstanden sein könnte.



Die zwei Szenarien

- 1. Szenario
 - Neuere Jetmaterial kollidiert mit weiter außen befindlichem Plasma und erzeugt bei diesem Prozess Neutrinos.
- 2. Szenario
 - Zwei Jets kollidieren miteinander und erzeugen Neutrinos. In TXS 0506+056 wurden zum ersten Mal Hinweise auf die Kollision zweier Jets gefunden.

Die zwei Theorien

1. Theorie

- Es umkreisen sich zwei extrem massereiche schwarze Löcher, die aufeinander Kräfte ausüben, so dass das schwarze Loch, das den Jet herausschießt, eine Präzessionsbewegung ausführt.

2. Theorie

- Die Kräfte zwischen dem schwarzen Loch und der umgebenden Akkretionsscheibe übertragen sich auf den Jet und bewirken so die Präzession.

Bedeutung für die Astronomie

Wichtige Einsichten
bezüglich des
Jetmaterials. Ein Teil
davon muss hadronisch
(aus Protonen und
Elektronen bestehend)
sein, da ansonsten keine
Neutrinos erzeugt
werden könnten.

Neutrinoquellen an sich
sind schon sehr selten,
zuvor wurden nur
Neutrinos der Sonne und
von der Supernova
1987A detektiert.

Es kann sein, dass es zum
ersten Mal gelungen ist,
die Kollision zweier Jets
im Zentrum einer Galaxie
nachzuweisen.

Die Entdeckung eines
kosmischen Neutrinos
könnte etwas über die
Existenz eines doppelten
extrem massereichen
schwarzen Lochs
verraten.

Quellennachweis

- <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/jet/210>
- <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/blandford-payne-szenario/45>
- <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/blandford-znajek-mechanismus/46>
- <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/magnetische-rotationsinstabilitaet/287>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Neutrino>

Quellennachweis

- [https://www.eso.org/public/images/eso1029a/\)/CCBY4.08creativecommons.org/licences/by/4.0/legalcode\)](https://www.eso.org/public/images/eso1029a/)/CCBY4.08creativecommons.org/licences/by/4.0/legalcode)
- <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/pressemeldungen/2019/9>
- <https://www.wissenschaft.de/wissenschafts-lexikon/gut-zu-wissen/schwarze-loecher-2/>

Bildnachweis

- Von Ute Kraus, Physikdidaktik Ute Kraus, Universität Hildesheim, Tempolimit Lichtgeschwindigkeit, (Milchstraßenpanorama im Hintergrund: Axel Mellinger) - Galerie von Tempolimit Lichtgeschwindigkeit, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=370240>
- Von Event Horizon Telescope - <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/> (image link) The highest-quality image (7416x4320 pixels, TIF, 16-bit, 180 Mb), ESO Article, ESO TIF, CC-BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=77925953>

Bildnachweis

- Von NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) - HubbleSite: gallery, release., Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=102873>
- Von Amble - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8773726>
- Von MissMJderivative work: Polluks (talk) - Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg, Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11307906>
- Von SpectrumAstro - <http://gammarray.msfc.nasa.gov/gbm/>,
Copyrighted free use,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=388482>

Bildnachweis

- <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/4822332/original-1569929795.jpg?t=eyJ3aWR0aCI6NTQwLCJvYmpfaWQiOjQ4MjIzMzJ9--b4eb8f621176b50e3723ce19c79e00cdf51b769a>
- Coulomb-Wall (S. 5 links): Vorlesung Dr. Jürgen Kerp, WS 2019/20, Univ. Bonn (nach: Wikipedia)
- Tunneleffekt (S. 5 rechts): nach: F. Gondolatsch et al., Astronomie I, Klett Verlag 1977 (Abb. 4.11)
- Hertzsprung-Russell-Diagramm (S. 9): nach J. Bennett et al., Astronomie – die kosmische Perspektive, Pearson 2010 (Abb. 17.8)