

Der Einfluss von schwarzen Löchern auf die Entstehung von Galaxien

Facharbeit von Juli Sophie Lüdinghaus

Seminarfach: Astronomie

Fachlehrer: Herr Riemer

Greselius-Gymnasium Bramsche

Schuljahr 2023/2024

Abgabetermin: Bramsche, 28. Februar 2024

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Schwarze Löcher	3
2.1. Was sind schwarze Löcher?	3
2.2. Entstehung schwarzer Löcher- Kurzerklärung	4
2.3. Aufbau von schwarzen Löchern	5
2.4. Arten schwarzer Löcher	5
3. Galaxien	6
3.1. Was sind Galaxien?.....	6
3.2. Galaxientypen	7
3.3. Galaxienentstehung	8
4. Schwarze Löcher und Galaxien	9
4.1. Was entstand zuerst?	9
4.2. Einflussnahme schwarzer Löcher auf Galaxienentstehung	10
4.2.1. Akkretionsfeedback/Akkretionsrückkopplungen	11
4.2.2. Arten von Akkretionsrückkopplungen	11
4.2.3. Vorteile schwarzer Löcher auf die Sternentstehung	13
5. Fazit	13
6. Glossar	16
7. Anhang	18
8. Verzeichnisse	25
8.1. Literatur- und Quellenverzeichnis.....	25
8.2. Abbildungsverzeichnis	31
9. Versicherung der selbstständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit	33
10. Einverständniserklärung zur Veröffentlichung	33

1. Einleitung

Supermassereiche schwarze Löcher, die sich mit einer millionen- bis milliardenfachen **Sonnenmasse** in fast jedem Zentrum aller aktiven Galaxien befinden¹, stellen für Astronomen seit dem 19. Jahrhundert² das größte Rätsel dar. Durch ihre enormen Anziehungskräfte inmitten von Galaxien erkunden Forscher schon lange, welche Eigenschaften beide Phänomene verbindet³ und inwieweit schwarze Löcher auf die Entstehung von Galaxien Einfluss genommen haben⁴. Dabei sollen sich, laut Ramesh Narayan, einem theoretischen Astrophysiker von der Harvard University im US-amerikanischen Cambridge, schwarze Löcher als überraschend wichtige Gestalter und Kontrolleure der Galaxienentwicklung herausgestellt haben. „Zwischen vielen Galaxien und den Schwarzen Löchern in ihren Zentren besteht [also] eine enge, dynamische Beziehung.“⁵

Des Weiteren stellte sich heraus, dass schwarze Löcher in Bezug auf Galaxien als „Wiege und Grab“ fungieren.⁶ Dementsprechend können sich die gefräßigen durch ihre enorme Schwerkraft alles verschlingenden schwarzen Löcher positiv sowie negativ auf die Galaxienentstehung auswirken. Diese Einflussnahme der schwarzen Löcher auf die Galaxienentstehung soll in dieser Facharbeit ausführlich und verständlich dargestellt werden. Dazu erfolgt zunächst zum besseren Verständnis eine Definition der schwarzen Löchern, mit einer anschließenden Entstehungsgeschichte der „Schwerkraftmonster“⁷. Des Weiteren werden dann der Aufbau und die verschiedenen Arten schwarzer Löcher erläutert. Darüber hinaus erfolgt ein Einstieg ins Thema Galaxien, wobei die Definition, die Erklärung verschiedener Galaxientypen und die Entstehung der Galaxien beschrieben wird. Anschließend wird dann das Zusammenspiel zwischen Galaxien und schwarzen Löchern dargestellt. Bevor der Einfluss der schwarzen Löcher auf die Galaxienentstehung folgt, gibt es zuerst eine Aufklärung zu der Frage, welches der

¹ <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/supermassereiche-schwarze-loecher/464>

² <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/schwarze-loecher-wurden-lange-nicht-ernst-genommen/>

³ Galaxien im Ausnahmezustand-Weaver, Kimberly, S. 38

⁴ <https://astrokramkiste.de/schwarzes-loch>

⁵ <https://www.spektrum.de/news/schwarze-loecher-galaktische-getriebe/2202137>

⁶ <https://www.oeaw.ac.at/news/das-schwarze-loch-wiege-und-grab-von-galaxien>

⁷ <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/schwarzes-loch-forscher-entdecken-erdnaechstes-schwerkraftmonster-a-8105cc26-7ce2-48af-9dda-223bc0f3d968>

beiden Phänomenen zuerst dar war und anschließend die Einflussnahme der schwarzen Löcher, die eine ausführliche Darstellung zu den sogenannten Akkretionsrückkopplungen eines schwarzen Lochs erfordert. Dabei werden Vor- und Nachteile der Akkretionsrückkopplung nach einer kurzen Erläuterung zum Akkretions-Feedback dargelegt. Abschließend zu diesen Themen dient dann ein ausführliches Fazit, welches die entscheidendsten Punkte nochmals zusammenhängend darstellt.

2. Schwarze Löcher

2.1. Was sind schwarze Löcher?

Schwarze Löcher (s. Anhang, Abbildung 1), die auch als „Massemonster“⁸ oder „Lichtfallen“⁹ bezeichnet werden, sind die rätselhaftesten sowie faszinierendsten und auch gleichzeitig unheimlichsten Objekte für uns Menschen im Weltall.¹⁰ Sie sind überall im kosmischen Raum verstreut und zeichnen sich durch ihre enorme Schwerkraft aus, die alles, was sie in ihre „Fänge“ bekommen, aufsaugen (s. Anhang, Abbildung 2).¹¹ Seit über 200 Jahren forschen Astronomen an diesen rätselhaften Objekten¹², stoßen jedoch in dieser Hinsicht immer wieder an ihre Grenzen, da sie über den Ereignishorizont eines schwarzen Lochs hinaus keinerlei Informationen mehr über dieses „Schwerkraftmonster“¹³ ermitteln können, da ein schwarzes Loch ab diesem Punkt alles verschlingen würde, was dieser Grenze zu nahekommt.¹⁴ Astronomen konnten mit der Zeit feststellen, dass schwarze Löcher wirklich existieren und ein enorm starkes Gravitationsfeld besitzen, welches Raum und Zeit nach der 1917 eingeführten **Relativitätstheorie von Albert Einstein** so stark krümmt, dass alle Materie im Weltall einschließlich des Lichts eingefangen werden und nicht mehr entweichen können (s. Anhang, Abbildung 3/4), da sich

⁸ Ins Herz der Finsternis-Gast, Robert, S. 42

⁹ <https://web.de/magazine/wissen/weltraum/faszinierend-weltraum-15825032>

¹⁰ <https://www.rnd.de/wissen/schwarze-loecher-neue-instrumente-sollen-raetsel-loesen-PSGXH2JHGNGZHN4ID7T43DWOCI.html>

¹¹ Wie schwarze Löcher wachsen-Vaas, Rüdiger, S. 58

¹² <https://www.ds.mpg.de/211507/09>

¹³ <https://www.spektrum.de/thema/schwarze-loecher/911284>

¹⁴ <https://www.spektrum.de/news/hawking-lag-mit-schwarzen-loechern-falsch/2201488>

nichts mit **Überlichtgeschwindigkeit** bewegen kann.¹⁵ Dabei wird das starke Gravitationsfeld dadurch erzeugt, dass bei einem schwarzen Loch extrem viel Masse auf extrem kleinen Volumen zusammenkommt, was diese extreme alles verschlingende Kraft auslöst.¹⁶ Schwarze Löcher gelten also als „schwarz“ beziehungsweise „unsichtbar“¹⁷, da sie als „Lichtfallen“¹⁸ fungieren und so kein Licht mehr aussenden, wodurch ein dunkles Loch im Weltall entsteht¹⁹. Des Weiteren gibt es drei unterschiedliche Klassen von schwarzen Löchern. Die stellaren schwarzen Löcher, die massereichen in Zentren von Galaxien und die noch nicht richtig nachgewiesenen mittelgroßen schwarzen Löcher.²⁰ Zudem lassen sich schwarze Löcher auch nur durch ihre Masse, ihren **Drehimpuls** und ihre elektrische Ladung beschreiben, da sie sonst, wie Physiker es ausdrücken, „keine Haare“, also keine weiteren Eigenschaften, besitzen.²¹ Ein bekanntes Beispiel für ein schwarzes Loch ist Sagittarius A* im Herzen unserer Milchstraße (s. Anhang, Abbildung 5).²²

2.2. Entstehung von schwarzen Löchern- Kurzerklärung

Ein Stern, der seinen atomaren „Brennstoff“ verbraucht hat, kann dem Gravitationsdruck nicht mehr entgegenwirken und kollabiert in einer Supernova zu einem **Weißem Zwerg** oder einem **Neutronenstern**.²³

Sollte nun dieser Stern jedoch eine größere Masse besitzen, über die **Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Grenze** hinaus, wird die Schwerkraft so groß, dass es zum kompletten Zusammenbruch kommt.²⁴ Daraus resultiert ein schwarzes Loch oder auch „Kollapsar“²⁵(Abkürzung für kollabierter Stern, s. Anhang, Abbildung 6)

¹⁵ <https://www.sternenforscher.de/schwarzes-loch/>

¹⁶ <https://www.merkur.de/wissen/schwarzes-loch-weltall-universum-schwerkraft-ereignishorizont-science-fiction-mysterioes-92434845.html>

¹⁷ <https://www.merkur.de/wissen/schwarzes-loch-weltall-universum-schwerkraft-ereignishorizont-science-fiction-mysterioes-92434845.html>

¹⁸ <https://web.de/magazine/wissen/weltraum/faszinierend-weltraum-15825032>

¹⁹ <https://astrokramkiste.de/schwarzes-loch>

²⁰ <https://www.sterngucker.de/wissen/schwarzes-loch/>

²¹ Die Feuerwand am Horizont-Polchinski, Joseph, S. 36

²² <https://www.spektrum.de/news/schwarzes-loch-sagittarius-a-das-bild-unseres-unsichtbaren-monsters/2019883>

²³ <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/schwarze-loecher-wurden-lange-nicht-ernst-genommen/>

²⁴ https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes_Loch

²⁵ Die schwarzen Löcher-Isaac Asimov, S. 171

genannt, welches viel Masse auf einem ungewöhnlich kleinen Volumen vereint und eine extreme Raumzeitkrümmung aufweist, die ihr Umfeld stark beeinflusst.²⁶

2.3. Aufbau von schwarzen Löchern

Schwarze Löcher besitzen keine Oberfläche²⁷ sondern weisen eine durch die Raumzeitkrümmung entstehende „trichterförmige Struktur“²⁸ auf (s. Anhang, Abbildung 7).

Sie besitzen eine sogenannte Singularität, die die zentrale Region beschreibt, wo Materie in einem Punkt mit unendlich großer Dichte und einem unendlich starken Gravitationsfeld verdichtet und die Raumzeit ebenfalls unendlich stark gekrümmt ist. Ringsumher von diesem Punkt liegt der Ereignishorizont, der alles Unsichtbare inmitten des schwarzen Lochs begrenzt und die Grenze darstellt, über die hinaus weder **Materie** noch Licht dem starken Gravitationsfeld des schwarzen Lochs entkommen können. Sollte man diese Grenze also überschreiten, würde es kein Zurück mehr geben. Darüber hinaus wird dieser Horizont dann von einer Akkretionsscheibe umrundet, die den Bereich definiert, wo die vom dem schwarzen Loch angezogene Materie, die nicht hineingefallen ist, um das schwarze Loch herum rotiert und dabei Röntgenstrahlung freigibt. Zudem zeichnet sich ein schwarzes Loch durch einen Jet aus, der einen Strahl aus sengendem Plasma, der Teilchen tausende Lichtjahre weit ins All schleudern kann, beschreibt und durch den Einfall von Materie ins schwarze Loch auftritt.²⁹ (s. Anhang, Abbildung 8)

2.4. Arten schwarzer Löcher

Schwarze Löcher werden, wie bereits erwähnt, in stellare, supermassereiche und mittelschwere schwarze Löcher aufgeteilt.³⁰ Stellare schwarze Löcher lassen sich dabei zwischen drei und etwa hundert Sonnenmassen einordnen.³¹

Sie entstehen durch den Gravitationskollaps massereicher Sterne oder durch die

²⁶ https://www.planetenimsonnensystem.de/schwarzes_loch.html

²⁷ <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/schwarze-locher-3871>

²⁸ Schwarze Löcher: Die mysteriösen Himmelskörper- Cornelia Faustmann

²⁹ <https://www.welt.de/wissenschaft/article191604741/Schwarzes-Loch-Wie-kann-ein-Bild-davon-ueberhaupt-entstehen.html>

³⁰ <https://www.sterngucker.de/wissen/schwarzes-loch/>

³¹ <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/schwarzes-loch/429>

Kollision von zwei Neutronensternen miteinander. Des Weiteren gibt es dann die supermassereichen schwarzen Löcher, die eine millionen- bis milliardenfache Sonnenmasse haben können und sich in Zentren von Galaxien wiederfinden lassen. Wie sie entstanden sind, ist dabei immer noch unklar, doch Forscher gehen davon aus, dass sie vielleicht unmittelbar nach dem Urknall entstanden sein könnten und dann schnell anwuchsen oder sich durch den Kollaps extrem massereicher Sterne, die sich im frühen Kosmos geformt haben, bilden konnten. Zudem wird über diese Phänomene in Zentren von Galaxien derzeit erforscht, inwieweit sie Einfluss auf die Entstehung von Galaxien genommen haben. Dabei scheinen schwarze Löcher in den Zentren von Galaxien eine sehr grundlegende Rolle für die Entwicklung und auch die Entstehung von Galaxien gespielt zu haben. Schlussendlich gibt es dann noch die Klasse der mittelschweren schwarzen Löcher, die immer noch nicht richtig nachgewiesen werden konnten und mit ihrer Masse zwischen stellaren und supermassereichen schwarzen Löchern liegen. Die mittelschweren Phänomene sind hierbei höchstwahrscheinlich in dichten Sternhaufen, durch Kollisionen oder Verschmelzung mehrerer Sterne entstanden.³²

3. Galaxien

3.1. Was sind Galaxien?

Galaxien, die früher von Alexander Humboldt und auch heute noch als „Welteninseln“ gekennzeichnet werden³³, sind riesige, rotierende durch Gravitation gebundene Ansammlungen von Sternen, Gas, Staub, **dunkler Materie** und anderen Objekten, wie Planetensystemen (s. Anhang, Abbildung 9).³⁴ Sie besitzen normalerweise einen Durchmesser von 10000 bis 100000 Lichtjahren und weisen ein übliches Gesamtgewicht von 10^9 bis 10^{13} Sonnenmassen auf.³⁵ Daneben gibt es, wie bei den schwarzen Löchern, unterschiedliche Galaxientypen, die nach dem Astronomen Edwin Hubble 1929 in elliptische, spiral und irregulären

³² <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/>

³³ <https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Galaxie>

³⁴ <https://www.sterngucker.de/galaxie/>

³⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Galaxie>

Galaxien aufgeteilt wurden.³⁶ Zwei bekannte Beispiele für Galaxien sind einerseits die schon bereits erwähnte Milchstraße (s. Anhang, Abbildung 10) mit einem Durchmesser von 100000 Lichtjahren und schätzungsweise 100 bis 400 Milliarden Sternen in sich³⁷ und andererseits unsere Nachbargalaxie, die Andromedagalaxie (s. Anhang, Abbildung 11), die den doppelten Durchmesser unserer Milchstraße ausmacht und eine Billion Sterne enthält³⁸. Beide Galaxien gehören zur Klasse der größeren Spiralgalaxien und beherbergen jeweils in ihrem Zentrum ein super massereiches Loch³⁹, welches höchstwahrscheinlich einen starken Einfluss auf ihre Entstehung sowie auf ihre weitere Entwicklung genommen hat⁴⁰.

3.2. Galaxientypen

Die Hauptgruppen der Galaxien stellen die schon bereits erwähnten elliptischen, spiral und irregulären Galaxien dar. Neben solcherlei Klassen gibt es jedoch auch noch weitere Galaxientypen, wie **Zwerggalaxien**, **Starburstgalaxien** oder Galaxien mit **Quasaren**.⁴¹

Diese variieren alle stark in ihrem Aussehen, ihrer Größe und ihrer Zusammensetzung.⁴²

Auf die Haupttypen des gravitativ gebundenen Systems bezogen, lassen sich elliptische Galaxien, die die Hälfte der Gesamtanzahl ausmachen, als runde Ansammlungen alter massearmer Sterne ohne Spiral- oder Scheibenstruktur bezeichnen (s. Anhang, Abbildung 12). Dabei besitzen die kugelförmigen, strukturlosen Galaxien wenig Staub und Gas, weshalb es so gut wie keine Sternentstehung mehr in ihnen gibt.⁴³

Des Weiteren entstanden sie höchstwahrscheinlich durch die Kollision von Spiralgalaxien und enthalten ein schwarzes Loch in ihrem Zentrum⁴⁴, was durch

³⁶ Die leuchtschwächsten Galaxien-Bothun, Gregory D., S. 62

³⁷ [https://de.wikipedia.org/wiki/Milchstraße](https://de.wikipedia.org/wiki/Milchstra%C3%9Fe)

³⁸ <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/518955/m31>

³⁹ <https://www.scinexx.de/news/kosmos/halos-von-milchstrasse-und-andromeda-beruehren-sich/>

⁴⁰ <https://www.sterngucker.de/wissen/schwarzes-loch/>

⁴¹ <https://www.ardalpha.de/wissen/weltall/astronomie/sterngucker/galaxientypen-galaxien-spiralgalaxien-elliptisch-irregulaer-zwerggalaxien-100.html>

⁴² <https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Galaxie>

⁴³ Galaxien-Couper, Heather/Henbest, Nigel, S. 210/211

⁴⁴ <https://astro-uk0.webnode.page/elliptische-galaxien/>

seinen Einfluss, auf den ich später noch detailliert eingehen werde, mit verantwortlich für die niedrige Sternentstehungsrate in diesem galaktischen System sein könnte.⁴⁵

Weiterführend gibt es dann die Spiralgalaxien, die sich durch eine flache Sternscheibe mit Spiralarmen aus jungen Sternen um eine elliptische zentrale Erhebung aus alten Sternen, auch „Bulge“⁴⁶ genannt, auszeichnen (s. Anhang, Abbildung 13). Das bemerkenswerte hierbei ist der Erhalt von jungen Sternen, heller Nebel, sowie viel Gas und Staub, obwohl ein schwarzes Loch im Herzen dieser Galaxien schlummert. Daraus ergibt sich wiederum die Frage, wieweit der Einfluss von schwarzen Löchern reicht und ob sich die Schwerkraftmonster sogar positiv auf Galaxien auswirken können. Letztendlich gibt es dann noch die irregulären Galaxien (s. Anhang, Abbildung 14), die durch ihre unregelmäßige Struktur stark aus den anderen Sternsystemen herausragen. In diesen Galaxien gibt es eine hohe Sternentstehungsrate sowie viel Gas und Staub.⁴⁷

Ein Beispiel für sie sind unregelmäßige Zwerggalaxien.⁴⁸

3.3. Galaxienentstehung

Die Entstehung und die komplexe Dynamik der rund 200 Milliarden Galaxien in unserem Universum erforschen Astronomen schon seit Jahren.⁴⁹ Derweil gelang es ihnen mit dem Weltraumteleskop Hubble die bislang ältesten Galaxien aufzuspüren, wobei sie zu der Erkenntnis kamen, dass sich schon bereits die ersten Sterninseln kurz nach dem **Urknall** vor rund 13,8 Milliarden Jahren bildeten.⁵⁰ Daneben sollten sich die Galaxien, wie ihre Vorläufer, den „Protogalaxien“, im Frühstadium aus kugelförmigen, rotierenden, hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium bestehenden Gaswolken entwickelt haben (s. Anhang, Abbildung 15/16).⁵¹

⁴⁵ <https://www.deutschlandfunk.de/elliptische-galaxien-kleine-und-grosse-100.html>

⁴⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Spiralgalaxie>

⁴⁷ Galaxien-Couper, Heather/Henbest, Nigel, S. 210/211

⁴⁸ <https://www.ardalpha.de/wissen/weltall/astronomie/sterngucker/galaxietypen-galaxien-spiralgalaxien-elliptisch-irregulaer-zwerggalaxien-100.html>

⁴⁹ <https://www.merkur.de/wissen/galaxie-milchstrasse-spiralgalaxie-weltall-universum-92487461.html>

https://www.mpifr-bonn.mpg.de/559720/physik_journal_galaxien.pdf

⁵⁰ <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/galaxien-und-galaxienhaufen/galaxienentstehung-und-entwicklung/>

⁵¹ Die Entwicklung von Scheibengalaxien- Strom, Stephen E./ Karen M., S. 20-22

Diese protogalaktischen Gaswolken entstanden dabei höchstwahrscheinlich kurz nach dem Urknall, als sich das von dem heißen Gas angefüllte Universum abkühlte und sich weiter ausdehnte, sodass es später zur Bildung von **Dichtefluktuationen** kam, die starke Materieansammlungen in manchen Bereichen herbeiführten.⁵² Diese Ansammlungen von Staub und Gas zogen sich dann mit der Zeit unter ihrer eigenen Gravitation zusammen, sodass Sterne entstehen konnten, sobald die Dichte im Zentrum der Wolken groß genug war (s. Anhang, Abbildung 16). Diese neu entstandenen Sterne nahmen dann den Großteil des vorhandenen Gases auf und entwickelten sich zu einem kugelförmigen System, welches stark einer elliptischen Galaxie ähnelte, weiter. Da nun aber der Gravitationskollaps der Wolke im Zentrum schneller verlief als in den äußeren Schichten, war damit das äußere Gas noch zu stark „verdünnt“, um neue Sterne bilden zu können, weshalb sich erstmals „Klumpen“ bildeten, die dann mit der Zeit zum Zentrum der Protogalaxie fielen, um sich dann in einer rotierenden Scheibe anzusammeln. Sollte die Dichte dann abermals einen kritischen Wert übersteigen, würde es auch hierbei wieder zu einer neuen Sternbildung kommen.⁵³

Des Weiteren spielen noch andere Faktoren, wie die dunkle Materie, die mit ihrer Schwerkraft dazu beiträgt, die Galaxien zu stabilisieren und zusammenzuhalten⁵⁴, oder schwarze Löcher in Bezug auf die Galaxienentstehung, eine wichtige Rolle.⁵⁵ Schlussendlich entstehen Galaxien, neben den Gravitationskollapsen von Gaswolken, auch heute noch durch das Verschmelzen von anderen Galaxien miteinander (s. Anhang, Abbildung 17) oder von kleineren Galaxien mit Gaswolken zu größeren Sternsystemen (s. Anhang, Abbildung 18).⁵⁶

4. Schwarze Löcher und Galaxien

4.1. Was entstand zuerst?

⁵² https://www.uibk.ac.at/sp-physik/events/tag-der-physik/poster/handouts/galaxien_handout.pdf

⁵³ Die Entwicklung von Scheibengalaxien- Strom, Stephen E./ Karen M., S. 20-22

⁵⁴ Dunkle Materie-Couper, Heather/Henbest, Nigel, S. 230

⁵⁵ <https://www.sterngucker.de/wissen/schwarzes-loch/>

⁵⁶ Galaxieentstehung-Couper, Heather/Henbest, Nigel, S. 229

Um zu verstehen, inwieweit schwarze Löcher die Galaxienentstehung beeinflussen, mussten Astronomen erstmal feststellen, welches der beiden gigantischen Himmelsobjekten zuerst da war. Schwarzes Loch oder Galaxie? Für dieses sogenannte „Huhn-Ei-Problem“ (s. Anhang, Abbildung 19) entwickelten die Astronomen zwei Szenarien, die diese Frage erklären sollten. Das eine Szenario wird dabei als „Inside-Out“ Szenario beschrieben und besagt, dass es schwarze Löcher schon vor den sich zugehörigen Galaxien gab, sodass sich die Galaxien also von innen nach außen gebildet haben müssen. Hierbei sollten die schwarzen Löcher als „Geburtshelfer“ fungiert haben. Daneben entstand das „Outside- in“ Szenario, welches die Entwicklung genau umgekehrt beschrieb. Die Galaxie bildete sich also von außen nach innen. In Bezug auf die schwarzen Löcher entwickelten sich diese also erst später, als immer mehr Materie ins Zentrum von Galaxien strömte und wurden in dieser Hinsicht dann auch als „Abfallprodukte“ eingestuft.⁵⁷ Letztendlich erkannten Forschende jedoch, dass sich Galaxien und schwarze Löcher zusammen entwickeln und gegenseitig beeinflussen.⁵⁸

4.2. Einflussnahme schwarzer Löcher auf Galaxienentstehung

Massereiche schwarze Löcher, die in den Zentren von fast jeder aktiven Galaxie sitzen, gelten als „effektivste Müllschlucker“ in unserem Universum und können Unmengen Massen von Sternen in sich vereinen. Astronomen erforschen deshalb schon seit Jahren, welche Einflüsse schwarze Löcher auf Galaxien nehmen können und inwieweit sie zu der Entstehung der „Sterninseln“ beigetragen haben.⁵⁹ Dabei vermuten Forscher, dass diese enormen Gravitationsphänomene einerseits als „**Katalysator**“ bei der Galaxienentstehung dienen, andererseits letztlich aber auch nur ein nicht entscheidendes „Begleitphänomen“ darstellen könnten.⁶⁰

Des Weiteren umfassen die schwarzen Herzen der Galaxien nicht mehr als ein Prozent der Gesamtmasse und „schlummern“ die meiste Zeit vor sich hin, sollte keine Materie zu nah an ihren „Höllenschlund“ gelangen und in sie hineinfallen,

⁵⁷ Gefräßige Geburtshelfer-Vaas, Rüdiger, S. 52-53

⁵⁸ <https://www.spektrum.de/news/weder-huhn-noch-ei/620873>

⁵⁹ Galaxien im Ausnahmezustand-Weaver, Kimberly, S. 39

⁶⁰ <https://www.europeanscientist.com/de/weltraum/schwarze-loecher-koennten-wie-katalysatoren-des-jungen-universums-gewirkt-haben/>

sodass die äußeren Sterne der umliegenden Galaxie kaum etwas von der Anziehungskraft des schwarzen Lochs zu spüren bekommen.⁶¹

Im Endeffekt jedoch lösen die aktiven schwarzen Löcher durch ihre besonderen Eigenschaften und Aktivitäten in Bereichen wie Stern- oder Galaxienentstehung eine beeinflussende Reaktion aus. Die Akkretionsrückkopplung eines schwarzen Lochs spielt dabei eine zentrale Aufgabe.⁶²

4.2.1. Akkretionsrückkopplung/Akkretionsfeedback

Die Akkretionsrückkopplung, auch Akkretionsfeedback genannt, eines schwarzen Loches beschreibt den Prozess, bei dem die umliegende Materie von einem schwarzen Loch aufgesaugt wird und in Folge darauf enorme Energiemengen in Form von Strahlung, Winden oder Jets freisetzt (s. Anhang, Abbildung 20/21). Diese freigesetzten Energiemengen bringen dabei belastende Auswirkungen, wie Gaserhitzung oder den Ausfluss von Materie auf ihre Umgebung hervor. Andererseits ist dieser Rückkopplungseffekt jedoch auch entscheidend für die Regulierung des Galaxienwachstums und der Sternentstehung, da ohne den Prozess sonst Galaxien ungebremst weiterwachsen würden und die Sternentstehung irgendwann wirkungslos wäre. Insgeheim beeinflusst der Prozess also die Galaxien- und Sternentstehung. Darüber hinaus gibt es vier unterschiedliche Arten des Akkretionsfeedback, die sich in Wind-, Strahlungs-, Jet- und mechanische Rückkopplung aufteilen.⁶³ Im Folgenden werde ich die Eigenschaften und Auswirkungen der Akkretionsrückkopplungen näher erläutern.

4.2.2. Arten von Akkretionsrückkopplungen

Die Windrückkopplung entsteht, wenn sich Materie um das schwarze Loch herum in einer Akkretionsscheibe ansammelt und dabei so stark rotiert, dass es zu intensiven Strömungen und kosmischen Winden kommt. Diese Winde können das angrenzende Gas zerstreuen und in den kosmischen Raum weiträumig verteilen.

⁶¹Galaxien im Ausnahmezustand-Weaver, Kimberly, S. 39

⁶² <https://fastercapital.com/de/inhalt/Akkretion-Feedback--Die-kosmischen-Massstaebenausgleichen.html>

⁶³ <https://fastercapital.com/de/startup-thema/Schwarzen-Loechern.html>

Demzufolge kann es durch das Fehlen der Gaswolken, die die „Geburtsstätten“⁶⁴ der Sterne darstellen, zu keiner Sternbildung in der Umgebung des Windes von dem schwarzen Loch mehr kommen.⁶⁵ Infolgedessen werden auch Galaxientstehungen daraufhin durch den Mangel an Sternen gehemmt, da die Sterne den Hauptbestandteil der „Sterneninseln“ ausmachen.⁶⁶ Zudem gelang es Forschern in der Galaxie PDS456 einen solchen kosmischen Wind mit einer Geschwindigkeit von 100000 Kilometern aufzuspüren, der zu einer Hemmung der Sternentstehung geführt hat.⁶⁷ Weiterführend gibt es dann die Strahlungsrückkopplung, die auftritt, wenn die in das schwarze Loch fallenden Teilchen eine durchdringende Strahlung freisetzen. Dabei sorgt sie ebenfalls für eine Hemmung der Sternbildung durch eine auslösende Gaserhitzung und Ionisierung⁶⁸, da das Gas kalt sein muss, damit Regionen darin kollabieren und neue Sterne entstehen können⁶⁹. Neben diesen zwei Aspekten existiert ansonsten das Jet-Feedback, welches erzeugt wird, wenn Materie durch den Sturz ins schwarze Loch einen Partikelstrahl erzeugt. Daneben können die bereits erwähnten Jets mit dem umgebenden Gas sowie den Sternen interagieren und sorgen ebenso wie die Strahlungsrückkopplung für eine Erhitzung und Ionisierung der für die Sterne entstehungsnotwendigen Gaswolken. Zuletzt tritt dann noch das mechanische Feedback auf, welches sich bildet, wenn die Akkretionsscheibe um das schwarze Loch herum einen starken Gasaustritt erzeugt. Diese Ausströme können wie bei der Windrückkopplung, Gaswolken im Universum unregelmäßig verteilen, sodass es auch hier wiederum zur Verhinderung der Sternentstehung und gleichzeitig der Galaxientstehung kommt. Letztendlich können schwarze Löcher durch ihre Eigenschaften also die Galaxientstehung beeinflussen und die weitere Entwicklung regulieren.⁷⁰

⁶⁴ Molekülwolken, Sternentstehung und Galaxienstruktur- Young, Nick Scoville/Judith S., S. 46

⁶⁵ <https://fastercapital.com/de/inhalt/Akkretion-Feedback--Der-Einfluss-der-Materieakkretion-auf-die-galaktische-Entwicklung.html#Arten-des-Akkretions-Feedbacks>

⁶⁶ <https://universe2go.com/de/galaxien-das-zuhause-der-sterne/>

⁶⁷ <https://www.zeit.de/wissen/2015-02/astrophysik-galaxie-schwarzes-loch>

⁶⁸ <https://fastercapital.com/de/inhalt/Akkretion-Feedback--Der-Einfluss-der-Materieakkretion-auf-die-galaktische-Entwicklung.html#Arten-des-Akkretions-Feedbacks>

⁶⁹ <https://www.mpia.de/aktuelles/wissenschaft/2018-01-schwarzes-loch-sterneentstehung>

⁷⁰ <https://fastercapital.com/de/inhalt/Akkretion-Feedback--Der-Einfluss-der-Materieakkretion-auf-die-galaktische-Entwicklung.html#Arten-des-Akkretions-Feedbacks>

4.2.3. Vorteile schwarzer Löcher auf die Sternentstehung

Aktive schwarze Löcher, die meist einen schlechten Ruf im Universum durch ihre alles verschlingende Kraft aufweisen, können sich nach Forschungsergebnissen von Astronomen auch positiv auf ihre Umgebung und die Galaxienentstehung auswirken. Jahrelang bekam man nur die dunkle Seite der schwarzen Löcher zu sehen und kam dabei zu der einseitigen Erkenntnis, dass die Schwerkraftmonster die Galaxieentstehung negativ beeinflussen, indem sie ganze Gaswolken mit ihrer Schwerkraft verschlucken oder sogar ganze Sterne zerreißen und aufsaugen können.⁷¹

Doch niemand wusste bis dahin, dass die dunklen Herzen der Galaxien auch positive Maßnahmen bezüglich der Galaxienbildung ergreifen könnten. Diese positiven Auswirkungen lassen sich dabei wiederum auf die Akkretionsrückkopplungen eines schwarzen Lochs zurückführen, die die Bildung neuer Sterne auslösen können, indem sie das intergalaktische Gas komprimieren und schocken. Aufgrund dessen entwickeln sich abermals dichte Ansammlungen, in denen neue Sterne entstehen können, sobald die Schwerkraft in der sich aufbauenden Gaswolke Oberhand gewinnt und damit zu einem Kollaps der Wolke führt.⁷²

Insgesamt lässt sich also feststellen, dass schwarze Löcher auch als Hilfe bei der Bildung von den großen Sternansammlungsgebieten fungieren.⁷³

5. Fazit

Supermassereiche schwarze Löcher, die höchstwahrscheinlich kurz nach dem Urknall durch den Kollaps massereicher Sterne entstanden sind⁷⁴, stellen das Herz fast jeder „Welteninsel“⁷⁵ dar und haben ihre Entstehung sowie weitere Entwicklung entscheidend geprägt.⁷⁶ Sie zeichnen sich durch ihre enorme

⁷¹ <https://www.fr.de/wissen/schwarzes-loch-ueberrascht-forscher-verhalten-universum-weltall-zr-13264245.html>

⁷² <https://fastercapital.com/de/keyword/umgebende-gas.html>

⁷³ <https://www.mpg.de/17007450/0608-astr-satelliten-sternentstehung-150980-x>

⁷⁴ <https://www.weltraum-aktuell.de/index.php/nachrichten2/1111-wie-entstehen-supermassereiche-schwarze-loecher>

⁷⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Galaxie>

⁷⁶ <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/supermassereiche-schwarze-loecher/464>

Schwerkraft aus und weisen eine extreme Raumzeitkrümmung auf, sodass sie alles verschlingen, was über ihren so entscheidenden Ereignishorizont tritt.⁷⁷ Sollte Materie von einem schwarzen Loch verschlungen werden, würde sie eine Rückkopplung in Form von Strahlung aussenden, die die sich bildenden Galaxien beeinflussen würde, da sie durch Gaserhitzung zu einer Hemmung der Sternentstehung führen würden. Auch andere Rückkopplungsfaktoren verursachen eine Hemmung der Sternbildung und die daraus folgende Verhinderung einer neu entstehenden Galaxie, da die Sterne den Hauptbestandteil der Galaxien darstellen. Andererseits jedoch können sich die Eigenschaften eines schwarzen Lochs auch positiv auf das gravitativ gebundene Sternsystem auswirken, indem sie durch Rückkopplungseffekte eine Sternentstehung herbeiführen.⁷⁸

Letztlich übt jedes schwarze Loch jedoch einen anderen Einfluss auf die Galaxien aus, da sie in unterschiedlichen Größen vorkommen und damit je nach Masse beziehungsweise Größe eine stärkere beziehungsweise schwächere Anziehungskraft aufweisen.⁷⁹ Ein Beispiel für das Zusammenspiel zwischen schwarzen Löchern und Galaxien ist unsere Milchstraße mit dem schwarzen Loch Sagittarius A* in seiner Mitte.⁸⁰ Hierbei kann das schwarze Loch zu einer weiteren Sternentstehung führen oder zu einer Sternhemmung.⁸¹ Auch in anderen Galaxien, wie in elliptischen Galaxien oder Spiralgalaxien, macht sich ein schwarzes Loch durch den Bestand älterer oder jüngerer Sterne bemerkbar. Daraus kann man herleiten, warum es in elliptischen Galaxien ältere Sterne, sowie keine weitere Sternentstehung mehr gibt und in Spiralgalaxien jüngere Sterne mit einer höheren Sternentstehungsrate.⁸² Am Ende lässt sich also von einem negativen sowie

⁷⁷ <https://www.mpg.de/10967263/schwarze-loecher>

⁷⁸ <https://fastercapital.com/de/keyword/umgebende-gas.html>

⁷⁹ <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/raumfahrt/schwarze-loecher-und-ihre-geheimnisse/>

⁸⁰ <https://www.spektrum.de/news/schwarze-loecher-galaktische-getriebe/2202137>

⁸¹ <https://fastercapital.com/de/keyword/umgebende-gas.html>

⁸² Galaxien-Couper, Heather/Henbest, Nigel, S. 210/211

<https://www.spektrum.de/news/schwarze-loecher-galaktische-getriebe/2202137>

positiven Einfluss sprechen⁸³, der auch in den nächsten Jahren noch infolge vieler ungeklärter Fragen in diesem Bereich von Astronomen erforscht wird.⁸⁴

⁸³ <https://www.fr.de/wissen/schwarzes-loch-ueberrascht-forscher-verhalten-universum-weltall-zr-13264245.html>

⁸⁴ <https://www.planet-wissen.de/technik/weltraumforschung/astronomie/pwieschwarzeloecher100.html>

6. Glossar

Sonnenmasse: $1,989 \cdot 10^{30}$ Kilogramm (332 946 Erdmassen)⁸⁵

Relativitätstheorie von Albert Einstein: Die 1917 von Albert Einstein eingeführte Relativitätstheorie besagt einerseits, dass sich in Gebieten maximaler Geschwindigkeiten nicht nur die Zeit verändert, sondern auch der Raum. Andererseits drückt die Theorie aus, dass die Schwerkraft unmittelbar mit den Merkmalen des Raums zusammenhängt, sodass laut Einstein jede Masse den sie umgebenden Raum krümmt.⁸⁶

Überlichtgeschwindigkeit: Beschreibt die Geschwindigkeit die größer beziehungsweise schneller ist als die Naturkonstante Lichtgeschwindigkeit.⁸⁷

Drehimpuls: Erhaltungsgröße, die den Bewegungszustand eines sich drehenden Körpers beschreibt.⁸⁸

Weißer Zwerg: Winziger, sehr dichter alter Stern, der die Rückstände erloschener Sterne darstellt. Er entsteht aus seinem Vorläuferstern, einem Roten Riesen, der seine äußere Hülle abstößt und dabei den Kern übriglässt, der als weißer Zwerg bezeichnet wird.⁸⁹

Neutronenstern: Extrem kompakte Überreste, die entstehen, wenn ein massereicher Stern in einer Supernova endet. Ihr Hauptbestandteil sind Neutronen.⁹⁰

Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Grenze: Obere Grenze für die Masse von Neutronensternen, die 1939 von Robert Oppenheimer und Georg Michael Volkoff auf den vorhergehenden Erkenntnissen von Richard C. Tolman ermittelt wurde.

⁸⁵ <https://www.einstein-online.info/explandict/sonnenmasse/>

⁸⁶ <https://www.tessloff.com/was-ist-was/wissenschaft/einsteins-universum/was-bedeutet-relativitaetstheorie.html>

Das Membran-Modell für Schwarze Löcher-Price, Richard H./Thorne, Kip S., S. 74

⁸⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cberlichtgeschwindigkeit>

⁸⁸ <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/drehimpuls-1525>

⁸⁹ https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Wei%C3%9Fer_Zwerg

⁹⁰ <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2010/neutronensterne-bestehen-wirklich-aus-neutronen/>

<https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/neutronenstern-schwer-auffindbare-sternleiche-aufgespuert-a-1201590.html>

Dabei lag die obere Grenze früher bei maximal 0.7 Sonnenmassen. Heutzutage liegt es im Bereich von 1,5 bis 3,2 Sonnenmassen. Über diese Grenze hinaus würde ein Neutronenstern weiter in sich zusammenfallen und höchstwahrscheinlich zu einem schwarzen Loch kollabieren.⁹¹

Materie: „[...] Substanz, die Masse besitzt und physischen Platz einnimmt.“ Sie enthält Atome, sowie Elementarteilchen und kann in unterschiedlichen Aggregatzuständen auftreten.⁹²

Dunkle Materie: Unsichtbare Materie, die sich durch ihre auf den kosmischen Raum einflussnehmende Schwerkraft, bemerkbar macht und insgesamt 27 % des Universums einnimmt.⁹³

Zwerggalaxien: Ungewöhnlich kleine Galaxien mit einer geringen Masse und Helligkeit.⁹⁴

Starburstgalaxien: Galaxien in denen pro Zeiteinheit tausendmal mehr Sterne entstehen im Gegensatz zu anderen Galaxien dieser Größe.⁹⁵

Quasare: Sehr helle Kerne von aktiven Galaxien, die eine intensive Strahlung aussenden.⁹⁶

Urknall: Entstehung unseres Universums vor 13,8 Milliarden Jahren (Entstehung von Materie, Raum und Zeit).⁹⁷

Dichtefluktuationen: Dichteschwankungen, die kurz nach dem Urknall entstanden sind und zu der Anordnung des kosmischen Raums beigetragen haben.⁹⁸

Katalysator: Beschleunigt eine Reaktion, ohne dabei selbst verbraucht zu werden.⁹⁹

⁹¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Grenze>

⁹² <https://www.computerweekly.com/de/definition/Materie>

⁹³ https://www.mpg.de/7696088/mpik_jb_2013

⁹⁴ <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/zwerggalaxie/15956>

⁹⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Starburstgalaxie>

⁹⁶ Schwarze Löcher-Lützgendorf, Nora/ Kissler-Patig, Markus, S. 27

⁹⁷ <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/urknall-6064>

⁹⁸ <https://abenteuer-universum.de/galaxien/galax.html>

⁹⁹ <https://www.chemie.de/lexikon/Katalysator.html>

7. Anhang

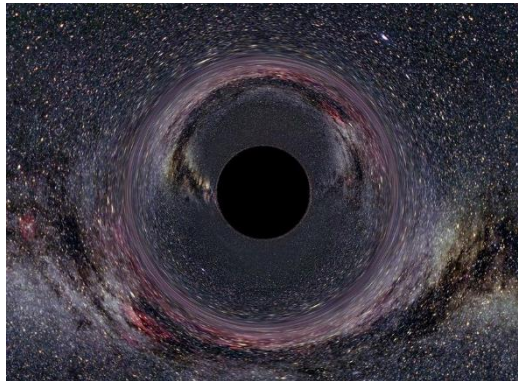


Abbildung 1: Simulation eines schwarzen Lochs



Abbildung 2: Astronaut wird durch die enorme Anziehungskraft eines schwarzen Lochs „verschlungen“



Abbildung 3: Licht kann dem Gravitationszug des schwarzen Lochs ebenfalls nicht entweichen

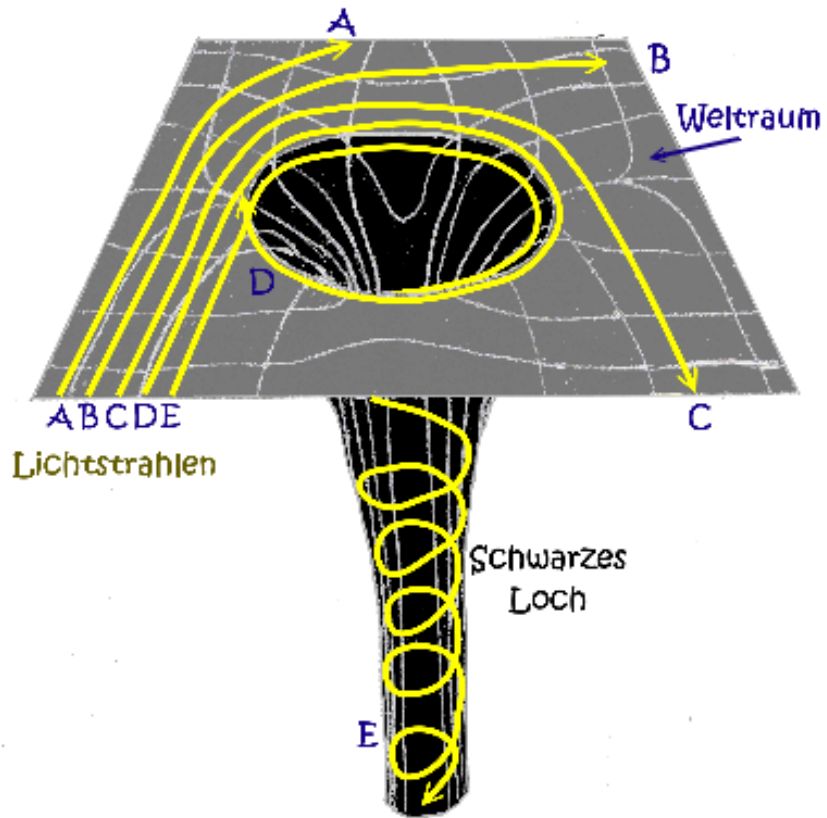


Abbildung 4: Lichtstrahlen werden durch die enorme Schwerkraft und Raumzeitkrümmung des schwarzen Lochs von ihrer eigentlichen Bahn abgelenkt

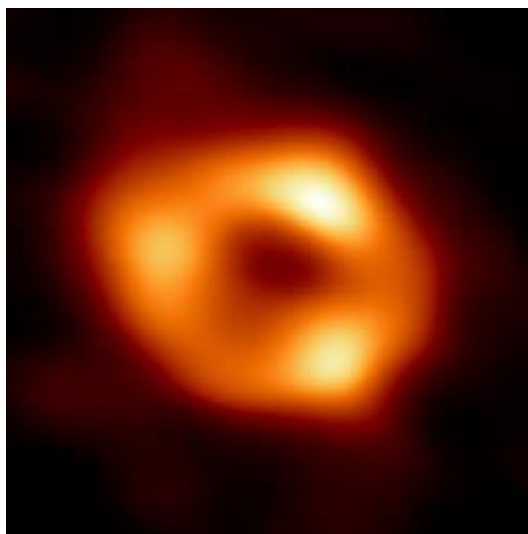


Abbildung 5: Sagittarius A*- Das schwarze Loch der Milchstraße

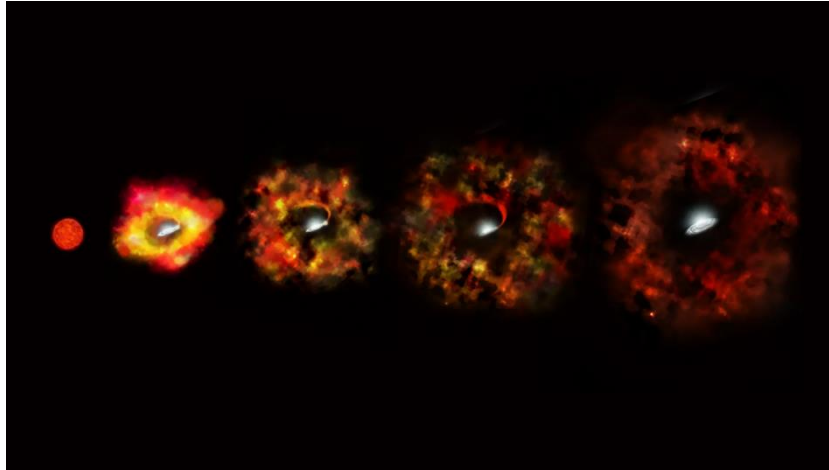


Abbildung 6: Kollaps eines Riesensterns - Entstehung eines schwarzen Lochs

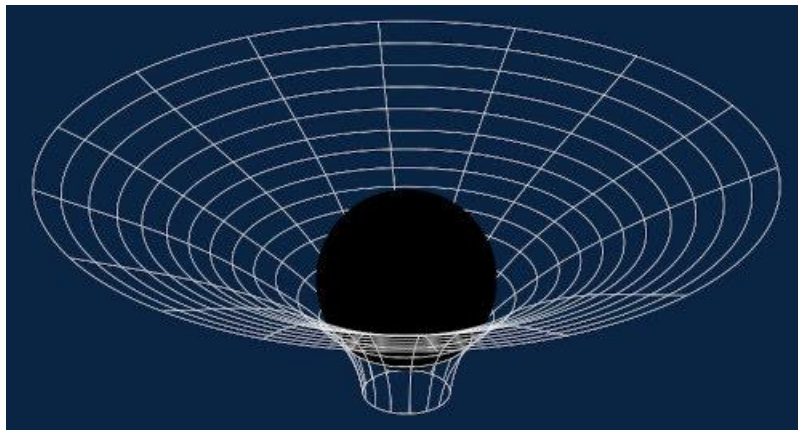


Abbildung 7: Die Raumzeitkrümmung eines schwarzen Lochs verursacht eine „trichterförmige“ Struktur

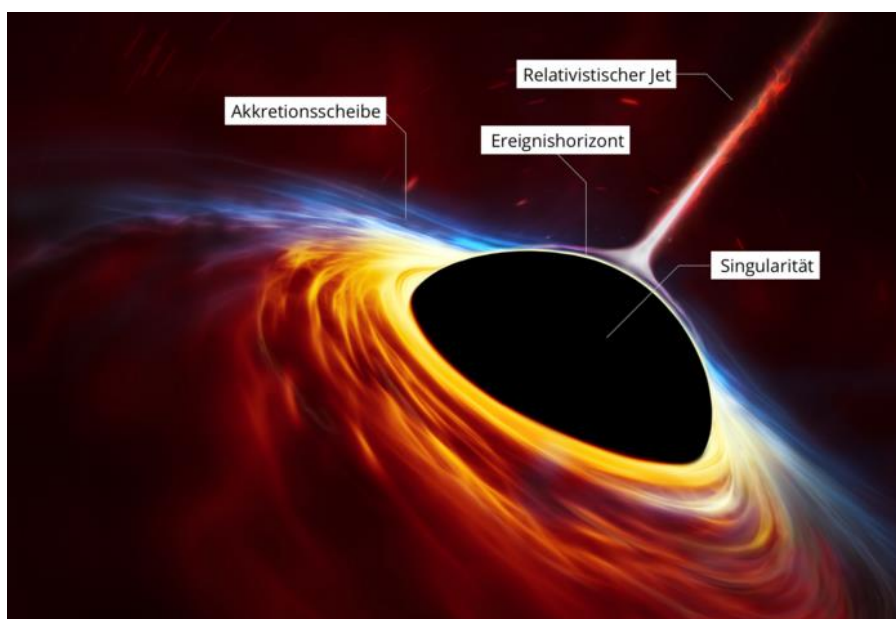


Abbildung 8: Aufbau eines schwarzen Lochs

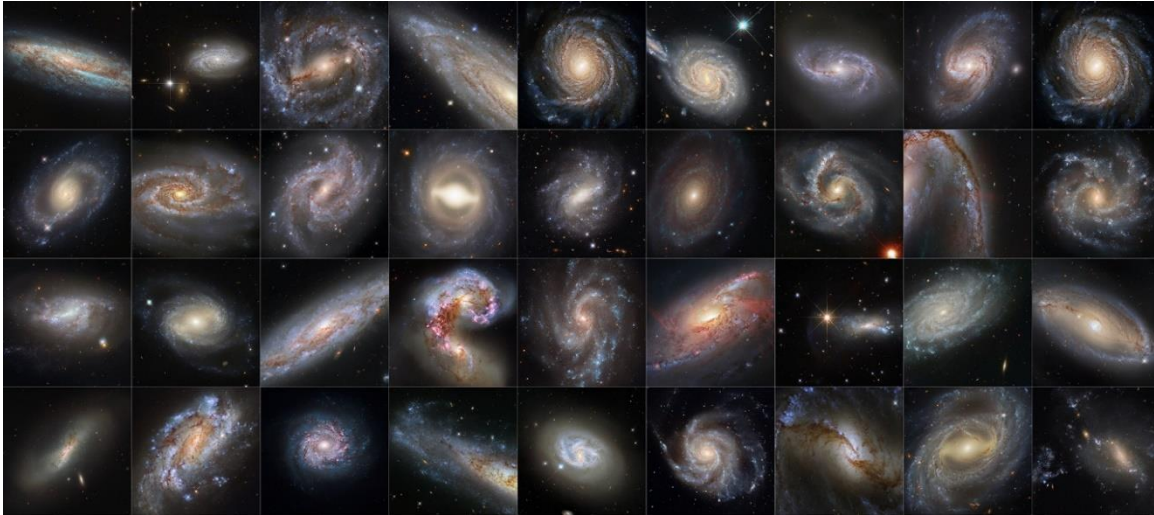


Abbildung 9: Viele unterschiedliche Galaxientypen



Abbildung 10: Die Milchstraße

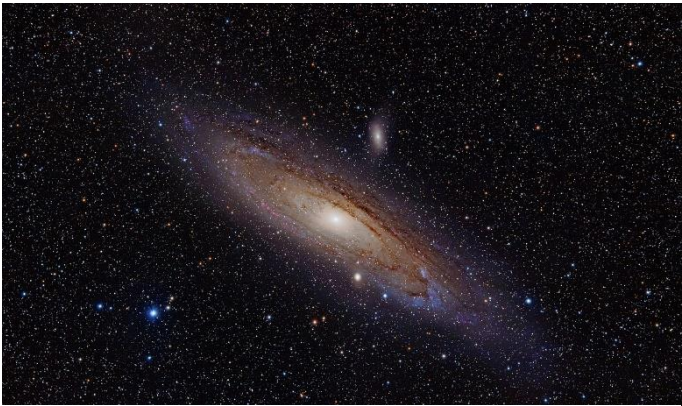


Abbildung 11: Die Andromedagalaxie



Abbildung 12: Bild der elliptischen Galaxie M87



Abbildung 13: Bild der Spiralgalaxie NGC 2336



Abbildung 14: Bild der irregulären Galaxie NGC 2623



Abbildung 15: Der Orionnebel – Sternentstehungsgebiet

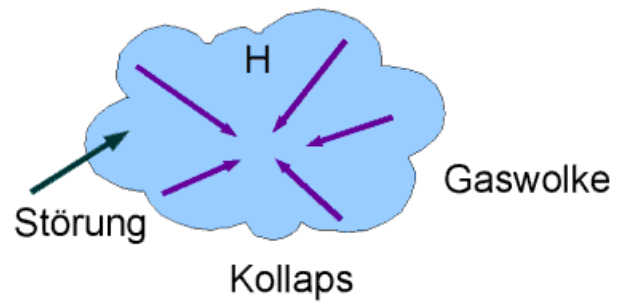


Abbildung 16: Kollaps einer Gaswolke



Abbildung 17: Kollision zweier Galaxien



Abbildung 18: Verschmelzung von Galaxien mit einer Gaswolke

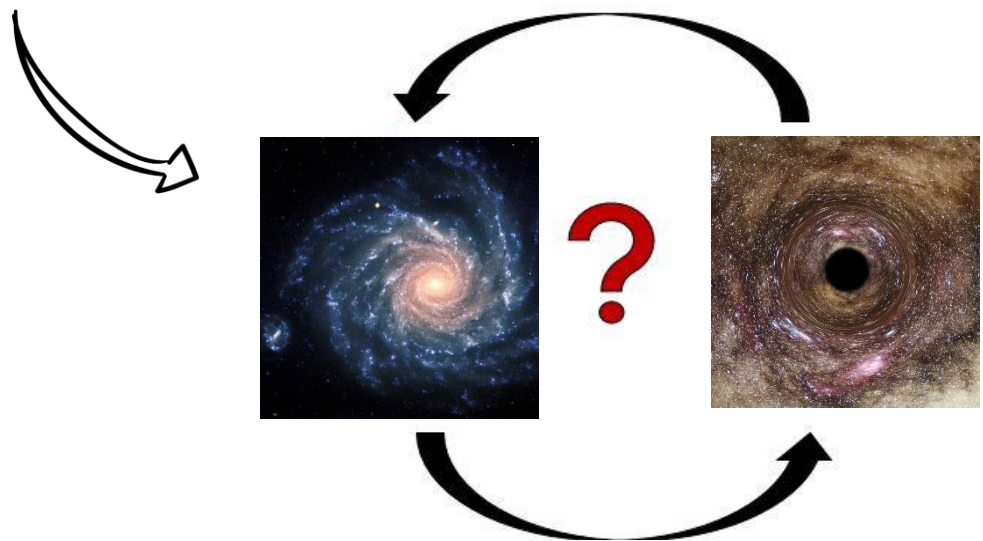
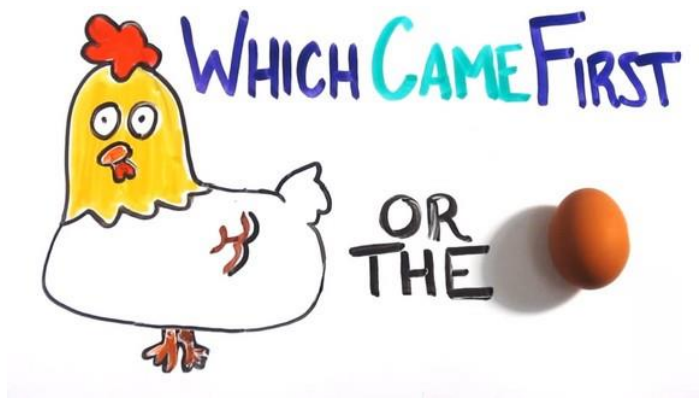


Abbildung 19: „Huhn-Ei-Problem“ – Was entstand zuerst?

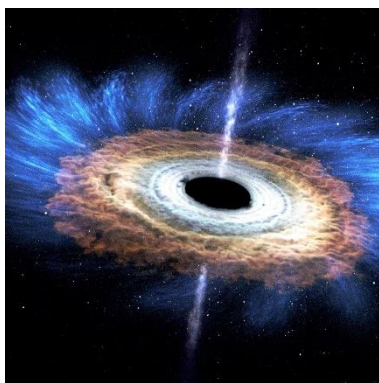


Abbildung 20/21: Akkretionsrückkopplungen eines schwarzen Lochs

8. Verzeichnisse

8.1. Literaturverzeichnis:

- **Asimov, Isaac:** Die schwarzen Löcher. Köln 1979. Verlag Kiepenheuer & Witsch ISBN: 3-462-01906-6
- **Bothun, Gregory D.:** Die leuchtschwächsten Galaxien, in: Spektrum der Wissenschaft, 4/1997, S. 62-67
- **Couper, Heather; Henbest, Nigel:** Der Weltraum. Planeten, Sterne, Galaxien. München 2000. Dorling Kindersley Verlag GmbH ISBN: 3-8310-0024-7
- **Faustmann, Cornelia:** Schwarze Löcher: Die mysteriösen Himmelskörper. Erscheinungsdatum 24.03.2023. Verlag Neobooks ISBN: 9783754993101
- **Gast, Robert:** Ins Herz der Finsternis, in: Spektrum der Wissenschaft, 7/19, S. 42-51
- **Lützgendorf, Nora; Kissler-Patig, Markus:** Schwarze Löcher-Auf der Suche nach der Mittelklasse, in: Sterne und Weltraum, 3/2016, S.24-33
- **Polchinski, Joseph:** Die Feuerwand am Horizont, in: Spektrum der Wissenschaft, 9/15, S. 34-39
- **Price, Richard H.; Thorne, Kip S.:** Das Membran-Modell für Schwarze Löcher, in: Spektrum der Wissenschaft, 6/1988, S. 74-83
- **Strom, Stephen E./ Karen M.:** Die Entwicklung von Scheibengalaxien, in: Spektrum der Wissenschaft, 6/1979, S. 19-28
- **Vaas, Rüdiger:** Gefräßige Geburtshelfer, in Bild der Wissenschaft, 9/2002, S. 50-55
- **Vaas, Rüdiger:** Wie schwarze Löcher wachsen, in: Bild der Wissenschaft, 7/2003, S.58-59
- **Weaver, Kimberly:** Galaxien im Ausnahmezustand, in: Spektrum der Wissenschaft, 9/2003, S. 38-45
- **Young, Nick Scoville/Judith S.:** Molekülwolken, Sternentstehung und Galaxienstruktur, in: Spektrum der Wissenschaft, 6/1984, S. 46-58

8.2. Quellenverzeichnis:

- **Bischoff, Manon:** Stephen Hawking lag mit Schwarzen Löchern falsch
<https://www.spektrum.de/news/hawking-lag-mit-schwarzen-loechern-falsch/2201488> (Stand: 24.02.2024)
- **Banner, Tanja:** Schwarze Löcher sind geheimnisvolle und faszinierende Objekt im Universum (01.08.2023)
<https://www.merkur.de/wissen/schwarzes-loch-weltall-universum-schwerkraft-ereignishorizont-science-fiction-mysterioes-92434845.html>
(Stand: 24.02.2024)
- **Banner, Tanja:** Verhalten eines Schwarzen Lochs überrascht Forscher - „Es ist unglaublich“ (06.05.2020)
<https://www.fr.de/wissen/schwarzes-loch-ueberrascht-forscher-verhalten-universum-weltall-zr-13264245.html> (Stand: 24.02.2024)
- **Brenner, Harald; Ziegler, Wiebke:** Schwarze Löcher (19.09.2019)
<https://www.planet-wissen.de/technik/weltraumforschung/astronomie/pwieschwarzeloecher100.html> (Stand: 24.02.2024)
- **Bennigfield, Damond:** Elliptische Galaxien – kleine und große (05.07.2007)
<https://www.deutschlandfunk.de/elliptische-galaxien-kleine-und-grosse-100.html>
- **Denise:** Schwarzes Loch
<https://astrokramkiste.de/schwarzes-loch> (Stand: 27.02.2024)
- **Genzel, Reinhard:** Das Schwarze Loch: Wiege und Grab von Galaxien (18.11.2022)
<https://www.oeaw.ac.at/news/das-schwarze-loch-wiege-und-grab-von-galaxien> (Stand: 24.02.2024)
- **Hermann, Kim:** „Schwarze Löcher wurden lange nicht ernst genommen“ (30.10. 2022)
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze->

loecher/schwarze-loecher-wurden-lange-nicht-ernst-genommen/ (Stand: 24.02.2024)

- **Kayser, Rainer:** Schwarzes Loch bläst Sternentstehung aus (19.02.2015)
<https://www.zeit.de/wissen/2015-02/astrophysik-galaxie-schwarzes-loch>
(Stand: 24.02.2024)
- **Kayser, Rainer:** Wie entstehen supermassereiche Schwarze Löcher?
(07.11.2023)
<https://www.weltraum-aktuell.de/index.php/nachrichten2/1111-wie-entstehen-supermassereiche-schwarze-loecher> (Stand: 24.02.2024)
- **Konitzer, Franziska:** Entstehung und Entwicklung von Galaxien
(07.03.2013)
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/galaxien-und-galaxienhaufen/galaxienentstehung-und-entwicklung/> (Stand: 24.02.2024)
- **Konitzer, Franziska:** »Unser« Schwarzes Loch in Großaufnahme
(12.05.2022)
<https://www.spektrum.de/news/schwarzes-loch-sagittarius-a-das-bild-unseres-unsichtbaren-monsters/2019883> (Stand: 24.02.2024)
- **Lewton, Thomas:** Galaktische Getriebe
<https://www.spektrum.de/news/schwarze-loecher-galaktische-getriebe/2202137> (Stand: 24.02.2024)
- **Lindner, Manfred; Marrodán Undagoitia, Teresa; Schwetz-Mangold, Thomas; Simgen, Hardy:** Dunkle Materie
https://www.mpg.de/7696088/mpik_jb_2013 (Stand: 25.02.2024)
- **Mokler, Felicitas:** Fallen in der Raumzeit (18.01.2017)
<https://www.mpg.de/10967263/schwarze-loecher> (Stand: 24.02.2024)
- **Müller, Andreas:** Schwarzes Loch
<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/schwarzes-loch/429>
(Stand: 24.02.2024)
- **Müller, Andreas:** Supermassereiche schwarze Löcher
<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/supermassereiche-schwarze-loecher/464> (Stand: 24.02.2024)

- **Podbregar, Nadja:** Halos von Milchstraße und Andromeda berühren sich (31.08.2020)
<https://www.scinexx.de/news/kosmos/halos-von-milchstrasse-und-andromeda-beruehren-sich/> (Stand: 24.02.2024)
- **Springel, Volker:** Die Entstehung der Galaxien
https://www.mpifr-bonn.mpg.de/559720/physik_journal_galaxien.pdf (Stand: 24.02.2024)
- **Schüring, Joachim:** Weder Huhn noch Ei (16.07.2003)
<https://www.spektrum.de/news/weder-huhn-noch-ei/620873> (Stand: 24.02.2024)
- **Schleuning, Raphael:** Schwarze Löcher könnten wie Katalysatoren des jungen Universums gewirkt haben
<https://www.europeanscientist.com/de/weltraum/schwarze-loecher-koennten-wie-katalysatoren-des-jungen-universums-gewirkt-haben/> (Stand: 24.02.2024)
- **Weiß, Stephan:** Wie entsteht ein Schwarzes Loch?
<https://www.ds.mpg.de/211507/09> (Stand: 24.02.2024)

Unbekannte Autoren:

- <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/schwarzes-loch-forscher-entdecken-erdnaechstes-schwerkraftmonster-a-8105cc26-7ce2-48af-9dda-223bc0f3d968>
- <https://web.de/magazine/wissen/weltraum/faszinierend-weltraum-15825032> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.rnd.de/wissen/schwarze-loecher-neue-instrumente-sollen-raetsel-loesen-PSGXH2JHGNGZHN4ID7T43DWOCi.html> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.spektrum.de/thema/schwarze-loecher/911284> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.sternenforscher.de/schwarzes-loch/> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.sterngucker.de/wissen/schwarzes-loch/> (Stand: 24.02.2024)

- https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes_Loch (Stand: 24.02.2024)
- https://www.planetenimsonnensystem.de/schwarzes_loch.html (Stand: 24.02.2024)
- <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/schwarze-locher-3871> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.welt.de/wissenschaft/article191604741/Schwarzes-Loch-Wie-kann-ein-Bild-davon-ueberhaupt-entstehen.html> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Galaxie> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.sterngucker.de/galaxie/> (Stand: 24.02.2024)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Galaxie> (Stand: 24.02.2024)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Milchstra%C3%BEe> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/518955/m31> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.ardalpha.de/wissen/weltall/astronomie/sterngucker/galaxie-typen-galaxien-spiralgalaxien-elliptisch-irregulaer-zwerggalaxien-100.html> (Stand: 24.02.2024)
- <https://astro-uk0.webnode.page/elliptische-galaxien/> (Stand: 24.02.2024)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Spiralgalaxie> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.merkur.de/wissen/galaxie-milchstrasse-spiralgalaxie-weltall-universum-92487461.html> (Stand: 24.02.2024)
- https://www.uibk.ac.at/sp-physik/events/tag-der-physik/poster/handouts/galaxien_handout.pdf (Stand: 24.02.2024)
- <https://fastercapital.com/de/inhalt/Akkretion-Feedback--Die-kosmischen-Massstaebe-ausgleichen.html> (Stand: 24.02.2024)
- <https://fastercapital.com/de/startup-thema/Schwarzen-Loechern.html> (Stand: 24.02.2024)
- <https://fastercapital.com/de/inhalt/Akkretion-Feedback--Der-Einfluss-der-Materieakkretion-auf-die-galaktische-Entwicklung.html#Arten-des-Akkretions-Feedbacks> (Stand: 24.02.2024)

- <https://universe2go.com/de/galaxien-das-zuhause-der-sterne/> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.mpia.de/aktuelles/wissenschaft/2018-01-schwarzes-loch-sterntstehung> (Stand: 24.02.2024)
- <https://fastercapital.com/de/keyword/umgebende-gas.html> (Stand: 24.02.2024)
- <https://www.mpg.de/17007450/0608-astr-satelliten-sterntstehung-150980-x> (Stand: 24.02.2024)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cberlichtgeschwindigkeit> (Stand: 25.02.2024)
- <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/drehimpuls-1525> (Stand: 25.02.2024)
- https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Wei%C3%9Fer_Zwerg (Stand: 25.02.2024)
- <https://www.einstein-online.info/explandict/sonnenmasse/> (Stand: 25.02.2024)
- <https://www.tessloff.com/was-ist-was/wissenschaft/einsteins-universum/was-bedeutet-relativitaetstheorie.html> (Stand: 25.02.2024)
- <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/neutronenstern-schwer-auffindbare-sterneleiche-aufgespuert-a-1201590.html> (Stand: 25.02.2024)
- <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2010/neutronensterne-bestehen-wirklich-aus-neutronen/> (Stand: 25.02.2024)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Grenze> (Stand: 25.02.2024)
- <https://www.computerweekly.com/de/definition/Materie> (Stand: 25.02.2024)
- <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/zwerggalaxie/15956> (Stand: 25.02.2024)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Starburstgalaxie> (Stand: 25.02.2024)
- <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/urknall-6064> (Stand: 25.02.2024)
- <https://abenteuer-universum.de/galaxien/galax.html> (Stand: 25.02.2024)

- <https://www.chemie.de/lexikon/Katalysator.html> (Stand: 25.02.2024)

8.3. Abbildungsverzeichnis

- **Abbildung 1:** <https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/kann-ein-schwarzes-loch-die-erde-schlucken/>
- **Abbildung 2:** <https://www.profil.at/wissenschaft/was-mit-ihnen-passiert-wenn-sie-in-ein-schwarzes-loch-fallen/402233205>
- **Abbildung 3:** <https://www.tessloff.com/was-ist-was/wissenswelt-weltraumatlas/die-frage-der-woche-was-befindet-sich-in-einem-schwarzen-loch-und-wie-entsteht-es.html>
- **Abbildung 4:** <https://astrokramkiste.de/schwarzes-loch>
- **Abbildung 5:** https://de.wikipedia.org/wiki/Sagittarius_A*
- **Abbildung 6:** <https://www.spektrum.de/news/kollabierender-stern-gebiert-schwarzes-loch/1460931>
- **Abbildung 7:** <https://dropseaofulaula.blogspot.com/2019/06/segreti-infografica-fatti-misfatti-buco-nero.html>
- **Abbildung 8:** <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/>
- **Abbildung 9:** <https://ger.animalia-life.club/Galaxien-viele-Galaxien>
- **Abbildung 10:** https://www.mpa-garching.mpg.de/2532/research_report_7819841?c=356764
- **Abbildung 11:** <https://de.wikipedia.org/wiki/Andromedagalaxie>
- **Abbildung 12:**
https://www.andromedagalaxie.de/html/galaxien_elliptische.htm
- **Abbildung 13:**
<https://www.ardalpha.de/wissen/weltall/astronomie/sterngucker/galaxie-typen-galaxien-spiralgalaxien-elliptisch-irregulaer-zwerggalaxien-100.html>
- **Abbildung 14:** <https://www.spektrum.de/news/geschwungene-fluegel-aus-jungen-sternen/1010950>
- **Abbildung 15:** <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternentstehung>

- **Abbildung 16:** <https://wissenstexte.de/physik/sterne.htm>
- **Abbildung 17:** <https://futurezone.at/science/galaxie-nasa-foto-verschmelzen-zusammenstossen-spektakulaer-atemberaubend-ngc-4568-4567/402110892>
- **Abbildung 18:** <https://science.orf.at/v2/stories/2812187/>
- **Abbildung 19:** <https://gilly.berlin/2013/01/25/die-losung-fur-das-henne-ei-problem-was-war-zuerst-da-die-henne-oder-das-ei>
<https://enou.co/blog/chicken-and-egg-problem/>
<https://www.fr.de/wissen/schwarzes-loch-galaxie-nasa-milchstrasse-weltraum-isoliert-astronomie-hubble-weltraumteleskop-91629652.html>
<https://de.quora.com/Was-ist-eine-Galaxie-und-wie-viele-gibt-es>
- **Abbildung 20:** <https://www.mdr.de/wissen/groesstes-schwarzes-loch-im-universum-entdeckt-100.html>
- **Abbildung 21:** <https://www.geo.de/wissen/weltall/schwarze-loecher-und-dunkle-materie--ein-zusammenhang--31781286.html>

9. Versicherung der selbstständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

10. Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers