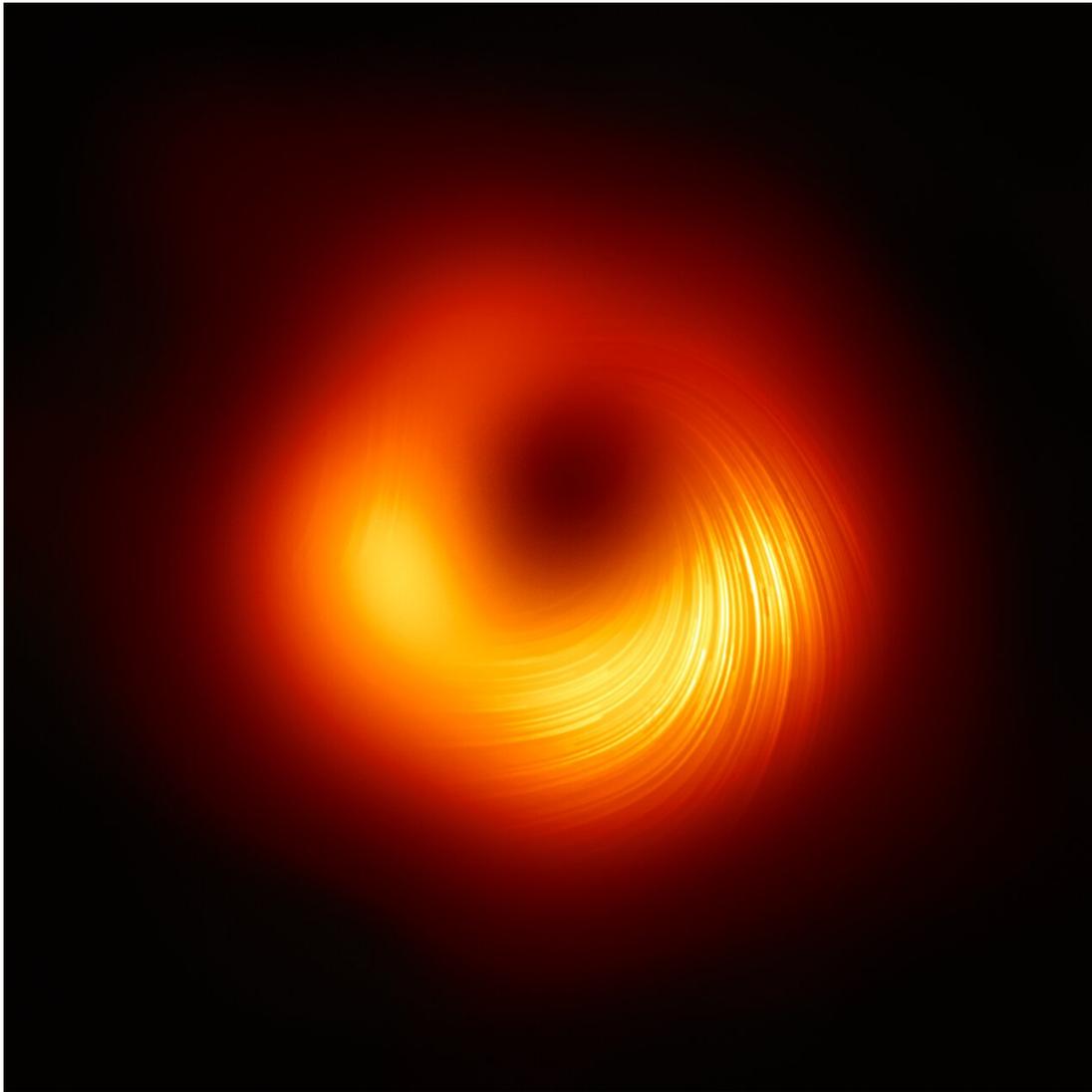


**Gymnasium Alfeld**

**Sekundarstufe II**

**Wie entstehen supermassereiche schwarze Löcher?**



**[0]**

**Malte Epmeier**

Gymnasium Alfeld

## **Facharbeit im Seminarfach**

Schuljahr: 2021/2022

Seminarfach: Astrophysik, Kosmologie und dunkle Materie

Semesterthema: Astrophysik

Verfasser: Malte Epmeier

Thema der Facharbeit: Wie entstehen supermassereiche schwarze Löcher

Ausgabedatum: 15.02.2022

Abgabedatum: 29.03.2022

Bewertung:

Unterschrift Verfasser:

Unterschrift Fachlehrer:

## Inhaltsverzeichnis

- (1) Einführung
- (2) Schwarze Löcher sind nicht intuitiv
- (3) Ein schwarzes Loch erzeugen
- (4) Die Supernova
- (5) Weiße Zwerge, rote Riesen, Neutronensterne und schwarze Löcher
- (6) Von den kleinsten bis zu den größten schwarzen Löchern
- (7) Messen der Masse eines schwarzen Lochs
- (8) Das Rätsel der supermassereichen schwarzen Löcher
- (9) Verschmelzung von Galaxien
- (10) Zusammenhang zwischen der Masse des Galaxiezentrum und des schwarzen Lochs
- (11) Galaxien ohne zentrale Anhäufung
- (12) Computersimulationen
- (13) Primordiale schwarze Löcher
- (14) Stellare schwarze Löcher
- (15) Eddington limitierte Akkretion
- (16) Schwarzes Loch durch direkten Kollaps
- (17) Außer Kontrolle geratene Verschmelzung
- (18) Einfluss supermassereicher schwarzer Löcher auf die Entwicklung des Universums
- (19) Was wird die Zukunft bringen?
- (20) Quellen

## **Einführung**

Eine der großen Fragen in der Kosmologie ist die Frage nach den ersten schwarzen Löchern und wie sie die Entwicklung des Universums beeinflusst haben. Schwarze Löcher sind extreme Objekte, die zurückgelassen werden, wenn ein Stern stirbt. Sie haben eine so starke Anziehungskraft, dass selbst Licht ihnen nicht mehr entkommen kann. Die ersten schwarzen Löcher hatten eine wichtige Rolle in der Beendigung des dunklen Zeitalters, eine Zeit nach der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung und vor der Entstehung der ersten Sterne und Galaxien. Dunkle Materie, welche den Großteil der Materie unseres Universums ausmacht, war ursprünglich sehr gleichmäßig verteilt. Es gab nur kleine Fluktuationen in der Dichteverteilung, welche auf Quantenprozesse kurz nach dem Urknall zurückzuführen sind. Diese Unterschiede wurden durch Gravitation langsam immer größer, bis sich Regionen von der allgemeinen Expansion des Universums abkoppeln konnten. Diese Regionen bildeten kugelähnliche „Dunkle-Materie-Halos“, welche auch etwas normale Materie in Form von Wasserstoff- und Heliumatomen enthielten. Manche dieser Halos waren in der Lage die ersten Galaxien und Sterne zu schaffen. Dies startete die Epoche der Reionisierung ungefähr 100 Millionen Jahre nach dem Urknall. In der Kosmologie ist es jedoch üblich Zeit in Form der Rotverschiebung, notiert mit dem Symbol „z“ anzugeben. Dabei wird gemessen, wie sehr die Wellenlänge des Lichtes durch die Expansion des Universums gestreckt wurde, bevor es den momentanen Beobachter erreicht. Je größer das z, desto länger ist es her. Die Entstehung der ersten Sterne korrespondiert zu  $z \sim 20-30$ . Diese Zeitperiode ist der fundamentale Start der Umformung des Universums von seinen ursprünglich einfachen Gegebenheiten, hin zu einem immer komplexer werdenden System. [1]

Der Fokus der Facharbeit liegt auf supermassereichen schwarzen Löchern im jungen Universum mit Massen aufwärts von  $10^6$  mal die Masse unserer Sonne. Jedoch ist es wahrscheinlich, dass die ersten schwarzen Löcher eher eine Masse von 10 mal der Sonnenmasse haben und aus dem Kollaps von Pop III Sternen entstanden sind (Sterne, welche aus dem ursprünglichen Wasserstoff und Helium entstanden, also die erste Generation Sterne). Ein Bruchteil dieser könnten ein Röntgendoppelsternsystem bilden, bei welchem das schwarze Loch und ein anderer Stern umeinander kreisen. Während Gas des Sterns in

das schwarze Loch fällt, entsteht durch extreme Reibung eine große Menge an Röntgenstrahlung, welche das junge intergalaktische Medium (Gas mit niedriger Dichte zwischen Galaxien) signifikant beeinflusst haben könnte. [1]

Auch eine andere Klasse von schwarzen Löchern könnte in dem sehr jungen und chaotischen Universum entstanden sein. Von sogenannten primordialen schwarzen Löchern wird normalerweise erwartet, dass sie eine sehr geringe Masse, bis hin zur kleinsten Masse überhaupt, der Planck Masse haben. Jedoch gibt es auch neue Theorien, nach denen eine Subklasse von primordialen schwarzen Löchern mit der Masse von mehreren zehn Sonnenmassen zur selben Zeit entstanden sein könnten. Diese könnten als die schwer fassbare dunkle Materie wirken. Die zu erwartbaren Gravitationswellen, welche bei Verschmelzung dieser auftreten würden sind deckungsgleich mit den vom Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) beobachteten Gravitationswellen. [1]

Wir wissen, dass das Universum in der Lage ist supermassereiche schwarze Löcher mit Massen von  $10^9$  Sonnenmassen in den Kernen von Galaxien zu bilden. Dies wurde durch das Event Horizon Telescope (ein Zusammenschluss mehrerer Teleskope auf der Erde, mit der ein Teleskop der Größe der Erde simuliert werden kann) mit einer Aufnahme des supermassereichen schwarzen Lochs in der Galaxie M87 (Coverbild) direkt bewiesen. Die Beobachtung von extrem weit entfernten Quasaren (aktive Kerne von Galaxien, welche große Mengen an hochenergetischen Photonen abstrahlen) impliziert außerdem, dass supermassereiche schwarze Löcher bereits sehr früh ( $z > 7$ ) in der Entwicklung des Universums vorhanden sein mussten. [1]

Nun stellt sich die Frage, wie diese frühen, massearmen schwarzen Löcher (weiterführend: Saat) in dieser limitierten Zeit zu so gigantischen Gebilden heranwachsen konnten. Ursprünglich wurde geglaubt, dass die Saat aus Sternmasse, möglicherweise massive Pop III Überbleibsel mit Massen von 100 Sonnenmassen dafür sorgten. Diese hätten dann durch Akkretion bis zum durch Observation erforderlichen Zeitpunkt auf die Masse eines supermassereichen schwarzen Lochs anwachsen können. [1]

Entscheidend ist hierbei, dass ein schwarzes Loch nicht mit beliebiger Geschwindigkeit wachsen kann. Als Wachstumslimit gilt hierbei die Eddington-Grenze. Die Idee ist, dass einfallende Masse extrem heiß ist und somit strahlt. Wenn jetzt immer mehr Masse in das schwarze Loch fällt, steigt der Strahlungsdruck und wirkt der einfallenden Masse immer mehr entgegen. Daraus ergibt sich an einem gewissen Punkt ein Kräftegleichgewicht und eine maximale Wachstumsrate. [1]

Das Szenario mit Sternmasse-Saat wurde jedoch kritisiert, da es den Einfluss der Strahlungsenergie des Vorfahrens des schwarzen Lochs - also des Sterns - nicht berücksichtigt. Speziell die UV-Strahlung des Sterns erhitzt das Gas der Umgebung und treibt somit einen „Abfluss“ des Gases an. Das neu geformte schwarze Loch finde sich als Konsequenz zunächst in einer Umgebung mit sehr geringer Gasdichte. Bis sich wieder ausreichend Gas für maximales Wachstum in der Umgebung befindet, dauert es ungefähr so lange wie das Universum damals alt war. (~ 100 Millionen Jahre) Unter diesen Bedingungen benötigt die Sonnenmasse-Saat eine Wachstumsrate oberhalb der Eddington-Grenze, um die Masse erreicht zu können, die wir beobachten. [1]

Dieses Timing Problem führte zur Theorie des direkten Kollapses von Wasserstoff- und Heliumgas innerhalb einer atomar gekühlten Halo, welche das zusammenfallende primordiale Gas auf Temperaturen von  $10^4$  Kelvin erhitzt. Das Gas ist damit heiß genug um bei Kollisionen das Elektron des Wasserstoffes auf das nächste Energielevel zu heben. Die folgende Rekombinationsstrahlung ist nun in der Lage die Hitze, welche beim Kollaps vom Gas entsteht, fortzutreiben. Um diesen Mechanismus zu aktivieren benötigt die Halo zu  $z > 10$  eine Masse von  $10^8$  Sonnenmassen. Das James Webb Space Telescope, das neueste und beste Weltraumteleskop der Welt, wird unter anderem dieser Theorie auf die Spur gehen und die benötigten Daten hoffentlich liefern. [1]

## **Schwarze Löcher sind nicht intuitiv**

Das Wesen eines schwarzen Loches ist nicht intuitiv. Auch abgesehen von den überaus komplizierten mathematischen Beschreibung und den wie Science Fiction klingenden Theorien, welche für fast jeden Menschen nicht nur nicht intuitiv, sondern komplett unverständlich sind, scheinen viele Menschen ein falsches Bild von schwarzen Löchern zu haben. Weit verbreitet scheint das Bild eines Staubsaugers zu sein, welcher alles in der Umgebung einfach einsaugen wird. Somit sollte in der Nähe eines schwarzen Loches nicht viel sein und jedes schwarze Loch würde ganz von alleine über die Zeit stetig massereicher werden. Ganz so einfach ist es jedoch nicht, sagt auch die preisgekrönte, britische Astrophysikerin, Autorin und Wissenschaftskommunikatorin, Rebecca Smethurst. Eine bessere Analogie sei laut ihr ein Sessel. Wie ein schwarzes Loch sitzt er unauffällig in der Gegend herum und ganz selten fällt mal was in die Spalte zwischen den Polsterungen. Sobald dies passiert ist, gibt es jedoch nie wieder ein zurück. Um zu verstehen, warum diese Analogie besser ist, muss man verstehen wie ein schwarzes Loch entsteht und was für Eigenschaften es hat. Sobald wir das Wesen eines schwarzen Lochs besser verstehen, wird klar, warum es so absurd schwierig ist ein schwarzes Loch mit der Masse von Millionen von Sonnenmassen zu erzeugen. [2]

## **Ein schwarzes Loch erzeugen**

Um ein schwarzes Loch zu erzeugen sind keine riesigen Massen notwendig. Tatsächlich kann aus einer beliebig geringen Masse ein schwarzes Loch werden. Die Masse muss nur auf einen Raum, der klein genug ist, komprimiert werden. Somit kann auch aus einem Apfel ein schwarzes Loch werden. Es wäre jedoch sehr ratsam, dies nicht auf der Erde zu tun. Die „Gravitationskraft“ bleibt zwar aus gleicher Entfernung gleich. Für einen Beobachter aus einem Meter Entfernung hat sich nur verändert, dass der Apfel nicht mehr zu sehen ist. Denn dieser wurde während der Komprimierung winzig klein. Er wurde zu einer Singularität, also ein Punkt, der umgangssprachlich mit einer unendlich hohen Dichte und unendlich starker Raumzeitkrümmung beschrieben wird. Diese Singularität wird von einem Schwarzschildradius (auch Ereignishorizont) umgeben. Dieser beschreibt die Entfernung zu der Singularität, ab welcher nicht einmal ein Photon, welches orthogonal zu dem Schwarzschildradius und von der Singularität weg „fliegen“ möchte, entkommen kann, da sich die Raumzeit

mit einer Geschwindigkeit, welche größer als die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist, auf die Singularität zubewegt. Aber auch dieser Horizont ist für einen Menschen mit bloßem Auge nicht erkennbar, da er so klein ist. Wie klein er genau ist, kann

man aus der Formel für die Fluchtgeschwindigkeit  $v_F = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$  [3] herleiten.

Die Fluchtgeschwindigkeit  $v_F$  ist die Geschwindigkeit, welche ein Objekt benötigt, um aus dem Gravitationsfeld eines anderen Objektes für immer zu

entkommen. Die Fluchtgeschwindigkeit der Erde liegt bei ungefähr  $11,19 \frac{km}{s}$

[3]. Dies ergibt sich durch folgende Berechnung:

$$v_F = \sqrt{\frac{2 * 6,674 * 10^{-11} \frac{m^3}{kg * s^2} * 5,972 * 10^{24} kg}{6371000 m}}$$

Setzt man für die Geschwindigkeit

$v_F$  jedoch die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ein und löst nach  $r$  auf, erhält man:

$$r_s(M) = \frac{2GM}{c^2}$$

. Gehen wir davon aus, dass unser Apfel eine Masse von

$m = 0,2 kg$  hat, ergibt sich nach folgender Rechnung:

$$r_s = \frac{2 * 6,674 * 10^{-11} \frac{m^3}{kg * s^2} * 0,2 kg}{299792458^2 \frac{m^2}{s^2}} \approx 2,97 * 10^{-28} m$$

, was um ein vielfaches kleiner

ist, als die Größe eines Atoms. Ein Wasserstoffatom hat in etwa den Radius

$$r_w = 10^{-11} m$$

Um den Größenunterschied anschaulicher zu machen: Der

Größenunterschied dieses schwarzen Loches zu einem Wasserstoffatom ist in etwa gleich groß, wie ein Wasserstoffatom zu unserer Sonne, welche einen

Radius von  $r_{Sonne} = 10^8 m$  hat. [4] Selbst ein Atom hätte also Schwierigkeiten,

in dieses schwarze Loch zu fallen. Dies heißt jedoch nicht, dass von diesem schwarzen Loch keine Gefahr ausgeht, ganz im Gegenteil. Jedes schwarze Loch gibt Hawkingstrahlung ab und wird somit über die Zeit kleiner, sofern nicht

neue Masse hinzugefügt wird. Momentan reicht alleine die kosmische Hintergrundstrahlung aus, um „normale“ schwarze Löcher größer werden zu lassen. Je kleiner das schwarze Loch ist, desto mehr Energie wird über die

Hawkingstrahlung abgegeben. Das heißt, dass schwarze Löcher, die durch eine Supernova entstehen, in einer nicht messbaren Geschwindigkeit kleiner werden, unser schwarzes Loch jedoch innerhalb einer kaum messbaren Zeit verschwinden. Berechnen lässt sich die Lebensdauer eines schwarzen Loches

mit folgender Formel [5]:  $\tau \approx \frac{G^2 * M^3}{\hbar * c^4}$ .  $\hbar$  ist vereinfacht gesagt das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum und beschreibt das Verhältnis zwischen Energie  $E$  und Frequenz  $f$  eines Photons, entsprechend der Formel  $E = h * f$ . [6] Setzen wir die entsprechenden Zahlen ein, erhalten wir:

$$\tau = \frac{(6,674 * 10^{-11})^2 \left(\frac{m^3}{kg * s^2}\right)^2 * 0,2^3 kg^3}{1,054 * 10^{-34} Js * 299792458^4 \left(\frac{m}{s}\right)^4} = 4,185 * 10^{-23} s$$

Das schwarze Loch hat

also keine Zeit, um die Welt zu verschlucken. Jedoch wird durch die Hawkingstrahlung so viel Energie freigesetzt, dass die Explosionen der größten Atombomben der Welt mit Leichtigkeit in den Schatten gestellt werden. [4] Allerdings wird zur Herstellung eines solchen schwarzen Loches eine riesige Menge an Energie benötigt, welche von Menschen (noch?) nicht zur Verfügung gestellt werden kann. Typischerweise wird diese Menge an Energie von einer Supernova zur Verfügung gestellt.

### Die Supernova

Eine Supernova ist der Kollaps und die darauf folgende Explosion eines Sterns. Um zu verstehen, wie es dazu kommen kann, muss man sich mit den inneren Vorgängen eines Sterns vertraut machen. In einem Stern herrscht ein stetiger Kampf zwischen dem nach außen gerichteten Druck des Sterns, welcher durch Kernfusion entsteht und dem nach innen gerichteten Druck, welcher durch die „Gravitationskraft“ entsteht. Nach und nach fusionieren die Wasserstoffatome zu immer schwereren Elementen, bis durch Fusion keine Energie mehr gewonnen werden kann. Dies ist bei Eisen der Fall. Nun kann der „Gravitationskraft“ nichts mehr entgegen gestellt werden und der Stern kollabiert. Die äußeren Schichten prallen auf den harten Kern des Sterns und prallen an diesem ab. Die darauf folgende Explosion an Material wird als Blitz wahrgenommen. Eine Supernova kann so viel Energie freisetzen, dass sie die

gesamte Galaxie, in der sich der Stern befand überscheinen kann. Was mit dem Kern passiert ist abhängig von der Masse des Sterns.[7]

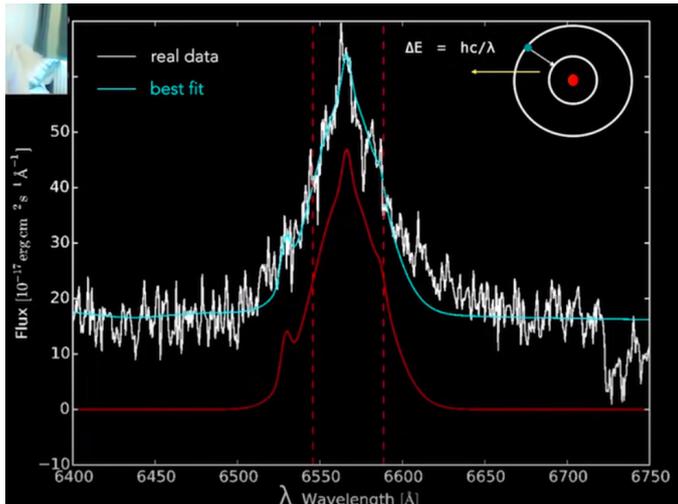
### **Weißer Zwerge, rote Riesen, Neutronensterne und schwarze Löcher**

Unsere Sonne wird keine Supernova erzeugen, dafür ist sie zu leicht. Sie wird sich ausdehnen und ihre äußeren Schichten verlieren. Diesen Zustand nennt man „roter Riese“. Zurück bleibt ein weißer Zwerg, also die inneren Schichten der Sonne. Hätte sich jedoch acht bis zwölf mal mehr Masse, wäre die „Gravitationskraft“ größer und eine Supernova würde entstehen können. Bei dieser Supernova könnte der Kern ein Neutronenstern werden. Hierbei werden die Elektronen in den Kern des Atoms gedrückt und eine äußerst dichte Masse entsteht. Hätte unsere Sonne 30-40 mal mehr Masse, würde nach der Supernova ein schwarzes Loch entstehen. Im Inneren des schwarzen Loches wissen wir nicht, was passiert. Es könnte eine neue, noch dichtere Masse vorhanden sein. Die Mathematik der Relativität beschreibt das Innere als eine Singularität, bei der die ganze Masse in einem unendlich kleinen Punkt existiert. Sicher kann man sich hier nicht sein, da keine nützliche Information aus dem schwarzen Loch herauskommt. Der Begriff „schwarzes Loch“ ist etwas verleitend, da es weder ein „Loch“ im eigentlichen Sinne, sondern eher ein 3D Objekt. Auch schwarz sind die wenigsten schwarzen Löcher. Schwarze Löcher gehören tatsächlich meistens zu den hellsten Objekten des Universums, da das Material, welches um dieses kreist, durch Reibung extrem erhitzt wird und so hochenergetisches Licht ausstrahlt. [4]

### **Von den kleinsten bis zu den größten schwarzen Löchern**

Schwarze Löcher existieren in den verschiedensten Größen. Von hypothetischen primordialen schwarzen Löchern mit einer Masse von weniger als einem Atom, über stellare schwarze Löcher mit einer Masse von einigen hundert Sonnenmassen bis hin zu supermassereichen schwarzen Löchern mit einer Masse von bis zu vielen Milliarden Sonnenmassen. [8] Hier stellt sich die Frage, wie man die Masse eines schwarzen Loches überhaupt misst, um dann Theorien über ihre Herkunft zu ermöglichen.

## Messen der Masse eines schwarzen Lochs



Die Masse um ein schwarzes Loch gibt hochenergetisches Licht ab. Dieses trifft auf umgebenes Gas. Wasserstoff ist das am häufigsten auftretende Gas im Universum. Trifft dieses Licht auf ein Wasserstoffatom, kann es dazu kommen, dass das Elektron in der Atomhülle die Energie

absorbiert und in ein höheres Energiestadium gestoßen wird. Da diese Stadium jedoch instabil ist, wird das Elektron nach einiger Zeit wieder auf das Grundstadium zurückfallen. Hierbei wird die Energie in Form von Licht wieder freigesetzt. Da es sich um sehr spezifische Energielevel handelt, wird hierbei immer die selbe Menge an Energie freigesetzt und somit immer Licht mit der selben Farbe, oder der selben Frequenz freigesetzt. Misst man dieses Licht, erhält man einen Graph wie diesen. Auf der x-Achse ist die Wellenlänge des empfangenen Lichts aufgetragen, auf der y-Achse vereinfacht gesagt die Menge an Licht mit dieser Wellenlänge. In der Mitte ist ein klarer Anstieg der empfangenen Wellenlänge zu sehen. Diese ist in etwa die Wellenlänge, die von einem Wasserstoffatom freigesetzt wird. Warum handelt es sich nicht um einen ganz klar definierten Bereich, wenn das freigesetzte Licht immer ein und dieselbe Wellenlänge hat? Dies liegt am Dopplereffekt. Das Gas umkreist mit einer relativ stetigen Geschwindigkeit das schwarze Loch. Wenn das Licht freigesetzt wird, während das Atom auf uns zukommt, wird die Wellenlänge quasi zusammengestaucht und somit energetischer. Das genaue Gegenteil passiert, wenn das Atom zum Zeitpunkt der Freisetzung von uns weg fliegt. Klar ist, dass die Geschwindigkeit des Lichts jedoch nicht von der Bewegung des Atoms abhängt. Die Lichtgeschwindigkeit ist für jeden Beobachter gleich schnell. Lediglich die empfundene Energie des Lichts ist relativ zur eigenen Geschwindigkeit. [4]

Im Diagramm dargestellt sind in weiß die tatsächlich gemessenen Daten, in blau die beste Übereinstimmung mit dem mathematischen Model. In rot das selbe, nur nach unten verschoben für bessere Ansicht. Die Breite des roten

Balkens gibt Aufschluss über die Geschwindigkeit der Masse, die um das schwarze Loch kreist. Je schneller dies ist, desto größer ist der Balken, da der Dopplereffekt immer einflussreicher wird. Aus der Geschwindigkeit des Gases, lässt sich schlussendlich die Masse des Objektes bestimmen, um das dieses kreist. [4]

### **Das Rätsel der supermassereichen schwarzen Löcher**

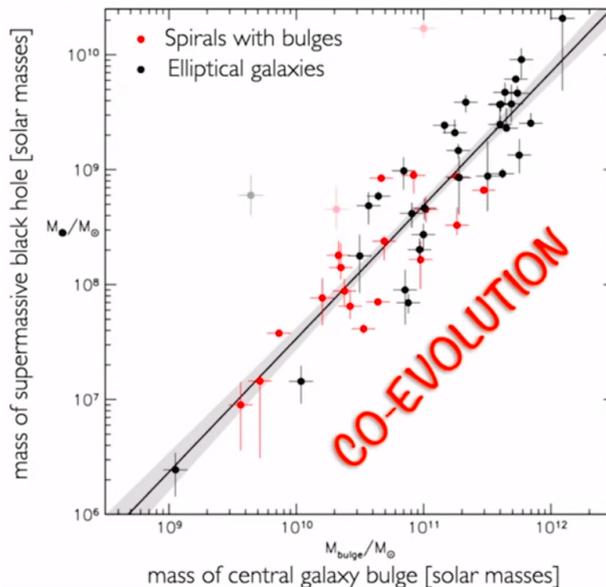
Die Hauptfrage bleibt jedoch bestehen: Wie entsteht ein super massereiches schwarzes Loch? Denn schwarze Löcher, die durch Supernovae entstehen sind höchstens bis zu 100 mal schwerer als unsere Sonne. Eine super massereiches schwarzes Loch hat jedoch eine Masse aufwärts von 1.000.000 mal schwerer als die Sonne. Die offensichtliche Antwort ist: Einfach mehr Masse hinzufügen. So wie davor auch. Das Problem ist: Es gibt eine Menge Theorien, aber keine Beweise. Die Entstehung von super massereichen schwarzen Löchern ist Thema der aktuellen Forschung. Fest steht: So gut wie alles würde ein schwarzes Loch einfach umkreisen und somit eben nicht zur Masse hinzufügen. Durch Supernovae entstehen solch riesigen schwarzen Löcher auch nicht. Dennoch befindet sich im Zentrum von so gut wie jeder Galaxie ein supermassereiches schwarzes Loch. Wie kann das sein? Auf irgendeine Art und Weise muss etliches Material von einem normalen schwarzen Loch verschlungen werden. Um verschlungen zu werden muss die Materie, die um ein schwarzes Loch auf einem stabilen Orbit kreist, rabiart beeinflusst werden. [1]

### **Verschmelzung von Galaxien**

Eine Möglichkeit um dies zu schaffen ist das Verschmelzen von zwei verschiedenen Galaxien. So wird es auch mit unserer Milchstraße und der Andromedagalaxie in drei bis vier Milliarden Jahren passieren. Während des sehr chaotischen Vorganges wird viel Materie von stabilen Orbits gestoßen. Auch die beiden super massereichen schwarzen Löcher werden schließlich Verschmelzen. Bei diesem Vorgang werden beide spiralförmigen Galaxien zu einer kugelförmigen Galaxie Namens Milchdromeda fusionieren. Eine wichtige Beobachtung hierbei ist, dass beide Spiralgalaxien ihre Form verlieren und eine neue entsteht. Je kleiner der relative Größenunterschied, desto disruptiver ist die Umformung der größeren Galaxie. Würde unsere Milchstraße mit einer

deutlich kleineren Galaxie kollidieren, würde sich nur eine kleine chaotische Kugel um das neu entstandene Zentrum bilden. Da Andromeda jedoch sogar etwas größer als die Milchstraße ist, wird Milchdromeda eine sehr kugelförmige Galaxie, in der fast keine Spiralform mehr vorhanden sein wird. Diese Galaxien nennt man Elliptische Galaxien. [4]

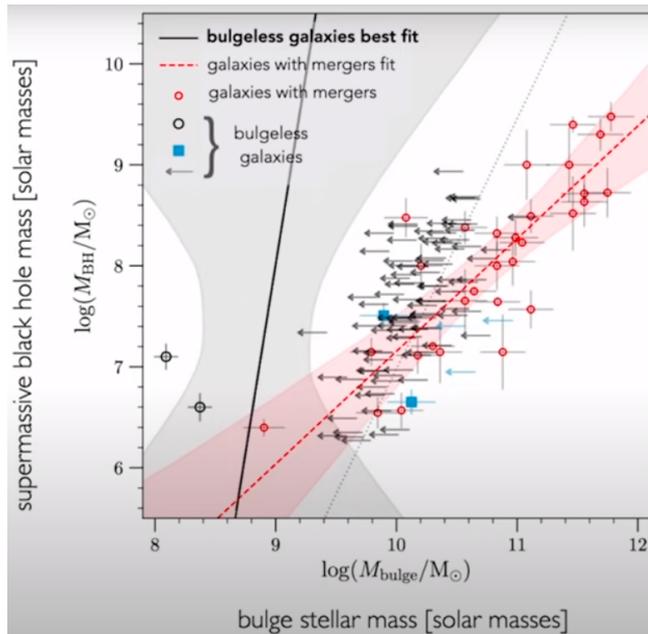
### Zusammenhang zwischen der Masse des Galaxiezentrum und des schwarzen Lochs



Dieser Graph zeigt die Positionierung verschiedener Galaxien mit unterschiedlicher Ausreifung der Masse der kugelförmigen Anhäufungen. Größtenteils spiralförmige Galaxien mit kleiner kugelförmiger Häufung in rot und elliptische Galaxien in schwarz. Die Übergänge sind hierbei fließend. Auf der x-Achse wird die Masse der zentralen

Häufung gemessen, auf der y-Achse die Masse des schwarzen Lochs der Galaxie. Sofort ist zu sehen, dass wir es hier mit einer Co-Evolution zu tun haben. Je größer die Masse der zentralen Häufung, welche durch galaktische Verschmelzungen entsteht ist, desto schwerer ist das schwarze Loch der Galaxie. Eine Art des Wachstums von schwarzen Löchern ist also das Verschmelzen von Galaxien. Jedoch gibt es auch Galaxien mit super massereichen schwarzen Löchern, die keine zentrale Anhäufung aufweisen. Wie sind diese also entstanden? [4]

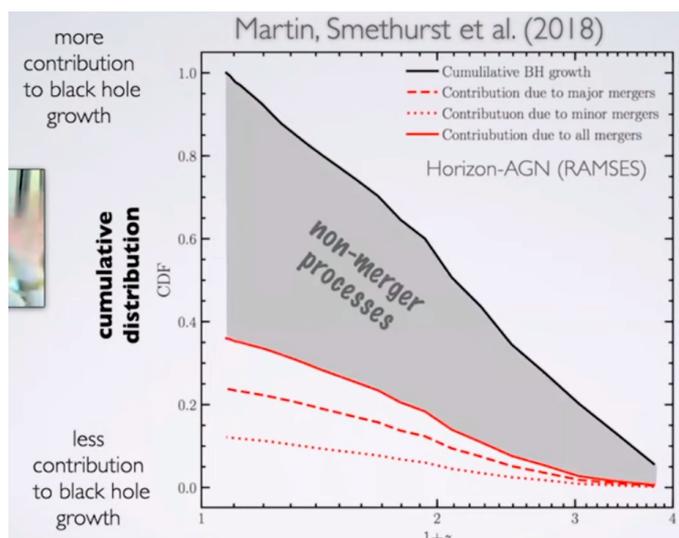
## Galaxien ohne zentrale Anhäufung



Galaxien ohne zentrale Anhäufung sind sehr selten, da Verschmelzungen auf die lange Zeit der Existenz des Universums sehr wahrscheinlich sind. Aber es gibt sie. Von 1.000.000 untersuchten Galaxien fand Dr. Becky in etwa 100 ohne augenscheinliche Verschmelzung. Hier sind in rot wieder die bekannten Galaxien mit Verschmelzungen eingetragen.

Die schwarzen Pfeile sind die neu untersuchten Galaxien ohne eine Verschmelzung mit anderen Galaxien. Sie sind als Pfeil eingetragen, da es sich um ein Limit handelt. Die grelle Helligkeit der kreisenden Masse verdeckt unter Umständen die wahre Größe des Kerns. Der Pfeil indiziert also die maximale Größe und weist darauf hin, dass die tatsächliche Größe wahrscheinlich weiter links liegt. Entgegen der Erwartung, dass eine Galaxie und das schwarze Loch im Zentrum nur wachsen kann, wenn es mit anderen Galaxien verschmilzt, kann man hier sehen, dass Galaxien ohne Verschmelzung die selben Dimensionen annehmen können, wie Galaxien mit Verschmelzung. Auch bei der Berechnung der besten mathematischen Beschreibung kam heraus, dass keine Korrelation zwischen der Masse des schwarzen Lochs und der Masse der Kugel vorliegt. Dies kann man sich als vertikale Linie in dem ausgegrauten Bereich des Möglichen vorstellen. Computersimulationen von schwarzen Löchern ohne Verschmelzung, zeigen im Grunde übereinstimmende Daten. Weiter kann man das gesamte Universum simulieren und errechnen, wie viel der Masse des super massereichen schwarzen Lochs tatsächlich durch Verschmelzungen hinzu kam. [4]

## Computersimulationen



Die Simulation ergab, dass nur 35% der gesamten Masse eines super massereichen schwarzen Lochs durch Verschmelzung mit anderen Galaxien zu erklären ist. Auf der x-Achse ist hier die Zeit zu sehen. Bei 1 ist das Jetzt verortet, bei 4 das frühe Universum. Auf der y-Achse ist

der Anteil der Masse des schwarzen Lochs von verschiedenen Ursachen zu sehen. 65% der Masse von super massereichen schwarzen Löchern ist nicht durch Verschmelzung zu erklären. Wie dieser signifikante Anteil in das schwarze Loch kommt, ist bis heute ungeklärt. Es gibt jedoch einige Theorien, die ich jetzt vorstellen werde. [4]

### Primordiale schwarze Löcher

Die aller ersten schwarzen Löcher könnten die Folge der extremen Bedingungen des ganz jungen Universums sein. Nach dem Urknall war das Universum sehr heiß und sehr dicht. Durch Quantenfluktuationen könnten überdichte Regionen entstehen, welche dann zu primordialen schwarzen Löchern führten. Diese könnten eine Masse von nur  $\sim 10^{-8}$  kg haben und hätten mit Ausnahme von Wachstum im Zentrum einer Galaxie ein sehr ineffizientes Wachstum hinter sich. Primordiale schwarze Löcher mit bis zu einer Masse von  $10^{11}$  kg haben wenig Einfluss auf die Entwicklung des Universums, da ihre Lebenszeit durch die Hawkingstrahlung drastisch unter dem momentanen Alters des Universums liegt. Massereichere primordiale schwarze Löcher würden jedoch noch immer existieren und würden einen geeigneten Kandidaten als dunkle Materie liefern. Die Masse dieser ist durch Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung jedoch auf 20 bis 100 Sonnenmassen beschränkt. Geringere Massen wurden durch eine Untersuchung von Mikrolinseneffekten in der großen magellanschen Wolke ausgeschlossen. Höhere Massen wurden durch Simulationen binärer Halo Systeme ausgeschlossen, da sie diese stören würden. Trotzdem könnten primordiale schwarze Löcher außerhalb dieser

Skala deutlich weniger häufig existieren und somit eine weitere Saat für supermassereiche schwarze Löcher liefern. [1]

### **Stellare schwarze Löcher**

Die ersten schwarzen Löcher, welche durch konventionelle Supernovae entstanden, waren die Nachfolger von Pop III Sternen. Da verglichen mit heute deutlich weniger Metalle existierten, waren viele Sterne sehr massereich. Die massereichsten Sterne (über 10 Sonnenmassen) waren sehr effizient in der Kernfusion und begannen bereits nach 3 Millionen Jahren Lebenszeit zu kollabieren. Jedoch drückte ihre Strahlung alles Gas in ihrer Umgebung weg und es ist durchaus möglich, dass sie während der Formung der jungen Galaxien aus dieser raus geschleudert wurden. Beides behindert ein starkes Wachstum der schwarzen Löcher. Der immer größere Anteil von Metallen im Universum durch Supernovae, läutete das Zeitalter der Pop II Sterne ein. Diese sind deutlich häufiger masseärmer als Pop III Sterne und beendete somit die Entstehung von massereichen schwarzen Löchern, die auf supermassereiche Level hätten anwachsen können. [1]

### **Eddington limitierte Akkretion**

Sobald ein schwarzes Loch geformt ist, kann das umgebene Gas in dieses fallen. Um ganz sicher eingefangen zu werden, muss ein Teilchen den Schwarzschildradius übertreten. Wenn man von einem sphärischen Zufluss an Gas ausgeht, wird dieses sicher innerhalb des Bondi-Hoyle Radius' gefangen werden. Dieses Modell dient als Maßstab für das Verständnis des Wachstums eines schwarzen Lochs. Das einfallende Gas strahlt einheitlich nach außen und reguliert somit das Wachstum. Jedoch gibt es in der Realität einige verkomplizierende Faktoren, die dieses einfache Modell verändern können. Zum Beispiel kann es dazu kommen, das Gas fast ausschließlich aus einer Ringformation in das schwarze Loch fällt. Dies erlaubt der Strahlung, größtenteils aus den Polen zu entkommen. Diese Konfiguration, zusammen mit viel dichtem Gas in der Umgebung, welches von der intensiven Strahlung nicht all zu sehr beeinflusst wird, kann über begrenzte Zeit zu Wachstum oberhalb des Eddington Limits führen. Tatsächlich wurde auch ein super-Eddington Quasar bei  $z \sim 6,6$  entdeckt. Normalerweise ist das Wachstum von schwarzen Löchern jedoch durch die selbstregulierende Strahlung zyklisch und unterhalb

des Eddington Limits. Wie lange das Wachstum oberhalb der Eddingtongrenze haltbar ist, bleibt bis jetzt ungelöst. Die vorhandenen starken turbulenten Kräfte der Akkretion, die kraftvollen Formungen der ersten Galaxien sowie die mächtigen Supernovae innerhalb dieser erschweren dies jedoch ungemein. [1]

### **Schwarzes Loch durch direkten Kollaps**

Um das ganze Timingproblem zu umgehen, wurde die Theorie des direkten Kollapses herangezogen. Hierbei kollabiert primordiales Gas selbst zu einem schwarzen Loch. Einige primordiale Galaxien könnten die seltenen Konfigurationen, welche dieses Szenario braucht, zur Verfügung stellen. Ein mögliches Szenario für die Formung lautet wie folgt: Man stelle sich eine riesige Gaswolke vor. Diese kollabiert zu zwei kleineren Halos. Eine formt zuerst Sterne, da sie zum Beispiel massereicher ist. Um Sterne zu formen, braucht man viel kaltes Gas. Wäre es zu heiß, würde es nicht zu einem Stern kollabieren, sondern weiter relativ frei umherfliegen. Die zweite Halo wird jetzt von der Strahlung der Sterne der ersten Halo beschienen. Dies erhitzt das Gas der zweiten Halo und verhindert somit die Entstehung von Sternen (Fragmentierung). Hat sich das ganze heiße Gas nun in eine kugelähnliche Formation gebracht, kann es schlussendlich doch noch zu einem Kollaps kommen, bei dem der Großteil des Gases der Halo in einem zentralen Konstrukt landet und somit ein schwarzes Loch mit einer Masse von bis zu  $10^6$  Sonnenmassen erzeugt. [1][9]

### **Außer Kontrolle geratene Verschmelzung**

Dieses Szenario bietet einen Zwischenfall zwischen direktem Kollaps und der lange anhaltenden, großen Wachstumsrate von isolierten schwarzen Löchern, die durch Supernovae entstanden. Man kann sich das ganze als verunglückter Versuch für einen direkten Kollaps vorstellen. Wenn relativ spät während des Prozesses etwas „schief“ läuft und es nicht zu einem vollkommenen Kollaps kommt, sondern nur ein kleines schwarzes Loch mit einer Masse von 10 Sonnenmassen entsteht, kann es passieren, dass dieses durch zufällige Bewegung durch einen oder mehrere der Materiehaufen der Halo fliegt und es zu extrem schnellem Wachstum kommt. Dieses Szenario ist jedoch sehr spekulativ, da es sich bis jetzt nicht konsistent modellieren ließ.[1]

## **Einfluss supermassereicher schwarzer Löcher auf die Entwicklung des Universums**

Obwohl supermassereiche schwarze Löcher meist einen geringen Anteil (~ 0,01%) der Masse einer Galaxie ausmacht, hat die effiziente Umformung von Masse zu Strahlung einen großen Einfluss auf die Entwicklung des Universums auf großer und kleiner Skala gehabt. Die intensive Strahlung reguliert Sternformation, betreibt kosmische Winde und hat zur Reionisierung des Universums beigetragen. [1]

### **Was wird die Zukunft bringen?**

Supermassereiche schwarze Löcher haben eine der Hauptrollen in der Entwicklung des jungen Universums gespielt. Diese weiter zu erforschen wird essentiell für die Entwicklung und Festigung kosmologischer Theorien sein. Und genau das wird auch immer mehr getan. Der Start des James Webb Space Telescope am 25.12.2022 markierte den Start einer neuen Wissenswelle speziell über das junge Universum. Stand 28.02.2022 ist das Teleskop gerade dabei alle hochsensible Spiegel in die richtige Position zu bringen. In wenigen Wochen kann damit begonnen werden ungefähr 13,5 Milliarden Jahre in die Vergangenheit zu gucken. [10]

Ich möchte an dieser Stelle mit den Worten der Forscher Aaron Smith und Volker Bromm, meinen Hauptquellen, schließen:

*„Angesichts des Zusammenflusses von Durchbrüchen in der theoretischen Modellierung sowie in den Beobachtungsmöglichkeiten verspricht das kommende Jahrzehnt ein goldenes Zeitalter der Entdeckung der ersten supermassereichen Objekte im Universum zu werden.“ [1]*

## Quellen:

- 0.) <https://eventhorizontelescope.org/blog/astronomers-image-magnetic-fields-edge-m87s-black-hole>
- 1.) Aaron Smith & Volker Bromm (2019): Supermassive black holes in the early universe, Contemporary Physics, DOI: 10.1080/00107514.2019.1615715  
<https://doi.org/10.1080/00107514.2019.1615715>
- 2.) <https://www.youtube.com/watch?v=qtXDF7N1YHQ> (Vorlesung Dr. Becky)
- 3.) <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/fluchtgeschwindigkeit/5102#:~:text=v%20F%20berechnet%20sich%20gem%C3%A4%C3%9F,7%2C9%20km%20%2F%20s.>
- 4.) <https://www.youtube.com/watch?v=8nHBGFKLHZQ> (schwarzes Loch in der Tasche)
- 5.) <https://www.wikiwand.com/de/Hawking-Strahlung#:~:text=Die%20Lebensdauer%20eines%20Schwarzen%20Loches,liegt%20damit%20jenseits%20s%C3%A4mtlicher%20Beobachtungsgrenzen.>
- 6.) [https://www.wikiwand.com/de/Plancksches\\_Wirkungsquantum](https://www.wikiwand.com/de/Plancksches_Wirkungsquantum)
- 7.) <https://www.wikiwand.com/de/Supernova>
- 8.) <https://www.youtube.com/watch?v=0FH9cgRhQ-k> (black holes size comparison)
- 9.) <https://www.youtube.com/watch?v=1-A2lpnbTMM> (direct collapse black hole)
- 10.) <https://jwst.nasa.gov/>

Letzter Web Zugriff: 28.03.2022