

Kosmologie – Schwarzes Loch – Universum

Gedanken eines pensionierten Physiklehrers

Vor dem Lesen der folgenden Seiten sollte möglichst ein Blick in die [Anmerkungen](#) erfolgen.

Recherchiert man zur Kosmologie, so erhält man eine vielfältige Auswahl an Erklärungsmöglichkeiten zur Entstehung unserer Welt.

Richtig überzeugt hat mich davon noch keine Darstellung.

Selbst beim Standardmodell (Urknall – kosmische Inflation – weiter ausdehnendes Weltall – Dunkle Materie – Dunkle Energie) sind mir die aufgezählten Punkte suspekt:

Urknall: Wirklich zu Beginn die ganze Materie und Energie in einer Singularität?

Kosmische Inflation: Ausdehnung des Universums im Bruchteil einer Sekunde auf die (fast) jetzige Größe?

Dunkle Materie: Trotz intensiver Suche ist bis jetzt keine Teilchenart gefunden worden, aus der Dunkle Materie bestehen könnte.

Dunkle Energie: Etwas, das Ursache für die Abschwächung der Gravitation sein könnte?

Auch bei den Beschreibungen zu Schwarzen Löchern ergeben sich Fragen, die noch nicht geklärt sind.

Fällt die Materie wirklich in eine Singularität?

Was sollen in diesem Zusammenhang Weiße Löcher und Wurmlöcher erklären?

Im Folgenden werde ich einige Überlegungen zum Entstehen von Schwarzen Löchern darlegen und Vermutungen anstellen, was dabei im Schwarzen Loch passiert.

Da ich trotz meines Physikstudiums und meiner langen Lehrerzeit zu wenig Kenntnisse in der theoretischen Physik habe um rechnerisch meine Vorstellungen zu belegen oder auch zu widerlegen, bitte ich um Rückmeldungen (E-Mail „42@khmeyberg.de“), falls meine Überlegungen nicht haltbar sind. Über Bestätigungen würde ich mich natürlich auch sehr freuen...

Kapitel 1: Die Entstehung des Schwarzen Lochs – von außen betrachtet

In der Wikipedia (https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes_Loch) wird ausführlich über Schwarze Löcher informiert.

Wenn ich nur einen Aspekt aus den beschriebenen Modellen auswähle, dann nur deshalb, weil bis jetzt jedes beobachtete Schwarze Loch rotiert.

Warum müssen Schwarze Löcher rotieren? Es gäbe keine Rotation, wenn die Materie zentral zum Mittelpunkt des Schwarzen Lochs gezogen würde. Dann benötigen wir auch zur Beschreibung des Vorganges die sogenannte Singularität, in der sich die gesamte Materie sammelt. Aber spätestens in der Nähe des Schwarzen Lochs kommen sich die

einfallenden Materieteilchen näher und durch gravitative Auswirkung ergibt sich eine Ablenkung. Die Materie wird sich im weiteren Verlauf auf gekrümmten Bahnen bewegen und besitzt deshalb Drehimpuls $L = m \cdot r \cdot v = m \cdot r^2 \cdot \omega$.

Daraus folgt, dass bei Annäherung (r wird kleiner) der Masse an das Schwarze Loch die Geschwindigkeit v bzw. die Winkelgeschwindigkeit ω größer wird.

Die Geschwindigkeit wird dabei für manche Teilchen so groß, dass die Fliehkraft, die die Teilchen erfahren, größer wird als die Anziehungskraft des Schwarzen Lochs. Die Teilchen fallen also nicht unter den Schwarzschild-Radius $r_s = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$ des Schwarzen Lochs.

r_s ist der Schwarzschildradius, der Radius des Kugelvolumens, aus dem keine Information aus dem Schwarzen Loch kommen kann, G ist die Gravitationskonstante, M die Masse des Schwarzen Lochs und c die Lichtgeschwindigkeit.

Die Geschwindigkeit v , mit der sich die Teilchen bei konstantem Radius r_s um den Rand des Schwarzen Lochs bewegen, ergibt sich aus der Fliehkraft $F_z = \frac{m \cdot v^2}{r_s}$ und der

Gravitationskraft $F_G = G \cdot \frac{m \cdot M}{r_s^2}$ zu $v = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot c \approx 0,7 \cdot c$.

Bei diesen hohen Geschwindigkeiten erzeugen die sich bewegenden Teilchen, die in der Regel geladen sein werden, Synchrotronstrahlung in einem Frequenzbereich vom Radiobereich bis zum Röntgenbereich. Eine Messung an einem Schwarzen Loch hat ergeben, dass das Spektrum im Mikrowellenbereich abbricht. Daraus folgt, dass energiearme und damit langsame Teilchen in den Bereich des Schwarzen Lochs eintreten und damit keine Strahlung mehr nach außen abgeben können. Diese Tatsache wird im folgenden Text noch wichtig sein.

Wie also entsteht ein Schwarzes Loch? Es sammelt sich durch gravitative Effekte Materie um einen Punkt herum. Weitere umgebende Materie wird dadurch angezogen. Die gesammelte Masse rotiert, um so mehr, je mehr Drehimpuls zusätzliche Masse mitbringt. Schließlich hat sich so viel Masse gesammelt, dass die gravitative Wirkung dieser Masse so groß ist, dass nichts aus einem bestimmten inneren Volumen mehr entweichen kann. Oder vielleicht sollte man lieber sagen: Die gesammelte Masse krümmt den Raum so stark, dass selbst Licht, das sich ja geradlinig ausbreitet, diesen Raum nicht verlassen kann.

Kapitel 2: Die Entstehung des Schwarzen Lochs – von innen betrachtet

Wie ergeht es aber nun Teilchen, die eine kleinere Geschwindigkeit haben und deshalb in das "Innere" des Schwarzen Lochs fallen?

Früher habe ich gedacht, das Schwarze Loch müsse vollständig mit Materie erfüllt sein und es würden besondere physikalische Gesetze in diesem Bereich gelten.

Unter Berücksichtigung von Ockhams Rasiermesser denke ich heute anders und ich versuche es radikal mit: "Im Schwarzen Loch gelten keine anderen physikalischen Gesetze als außen." Na ja, die Raumkrümmung ist schon extrem. Aber schon vor Jahrzehnten wurde zum Beispiel bestätigt, dass wegen der Krümmung des Raums durch

die Sonne ein nahe an der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl "abgelenkt" wird. Also ist Raumkrümmung etwas "Normales".

Stellen wir uns nun vor, wir könnten von Innen beobachten, wie das Schwarze Loch unmittelbar nach seiner Bildung aussieht. Ist es voll mit Masse ausgefüllt?

Bei der Masse M des Schwarzen Lochs hat dieses den Schwarzschild-Radius $r_s = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$.

Nimmt man ein kugelförmiges Volumen des Schwarzen Lochs an, so beträgt dieses

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_s^3 \text{ oder } V \approx r_s^3 = \left(\frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2} \right)^3 = \frac{8 \cdot G^3 \cdot M^3}{c^6} \rightarrow V \approx M^3, \text{ d.h. bei linearer Vergrößerung von}$$

M wächst V kubisch an. Doppelte Masse bedeutet also 8-faches Volumen. Kommt also mehr Masse ins Schwarze Loch, so wird der Raum gefühlsmäßig immer weniger ausgefüllt wirken. Platzprobleme gibt es also nicht.

Was sieht man zu Beginn von dem Außenbereich des Schwarzen Lochs? Rings ums Schwarze Loch bewegt sich Materie sehr schnell und sendet Synchrotronstrahlung aus. Da diese aber in Vorwärtsrichtung abgestrahlt wird (also tangential zum Rand des Schwarzen Lochs) tritt diese nicht ins Schwarze Loch ein. Mikrowellenstrahlung und ggf. schwächerer Strahlung wird hingegen in das Innere des Schwarzen Lochs gestrahlt und verlässt es nicht wieder, weil die Materie in diesen inneren Bereich eingetaucht ist.

Die einfallende Materie war etwas zu langsam, um auf ihrer Bahn zu bleiben und nähert sich spiralförmig dem Gravitationszentrum. Dabei vergrößert sie wegen des Impulserhaltungssatzes ständig ihre Geschwindigkeit, bis Gravitationskraft und Fliehkraft übereinstimmen. Da der nötige Geschwindigkeitszuwachs nur gering ist, wird die neue Umlaufbahn einen Radius von nur etwas weniger als dem Schwarzschildradius haben und da das Volumen zugenommen hat, wird auch Platz für die neue Masse vorhanden sein.

Kommen dann die nächsten Materieschübe im Schwarzen Loch an, wiederholt sich der Prozess und die Materieanteile lagern sich zwiebelschalenartig übereinander an.

Hier könnte man kritisieren, dass wegen des [Lense-Thirring-Effekts](#) nahe am Schwarzschild-Radius der Raum so gekrümmt ist, dass sich keine Fliehkräfte entwickeln können. Aber gerade wegen dieses Effektes wird die Materie auf eine Kreisbahn gezwungen.

Weiter innen im Schwarzen Loch nimmt die Gravitation ab (weiter innen und weiter außen befindliche Materie heben die Gravitation teilweise auf). Daher ist dort der Raum nicht so stark gekrümmt und es treten Fliehkräfte auf.

Wichtig (für das kommende Kapitel) ist mir eigentlich nur folgender Punkt, der wohl als gegeben angenommen werden darf:

Im Inneren des Schwarzen Lochs kreist die Materie mit sehr hoher Geschwindigkeit um das Gravitationszentrum herum.

Kapitel 3: Ist das Universum, in dem wir leben, ein Schwarzes Loch (U=SL)?

Wenn man etwas Unbekanntes erklären will, kann man in der Regel davon ausgehen, dass die Erklärung, die am einfachsten ist und die die wenigsten neuen Parameter benötigt, die "richtige" ist.

Die Standard-Kosmologie enthält wenigstens drei neue Parameter: kosmologische Inflation, dunkle Materie, dunkle Energie.

Ich möchte nun darlegen, warum das Modell "Unser Weltall ist ein Schwarzes Loch" diese drei Parameter überflüssig macht und auch sonst mit Beobachtungen übereinstimmt.

Grundannahme ist: Unser Bezugssystem, aus dem wir heraus die Welt wahrnehmen, ist ein mit hoher Geschwindigkeit kreisendes System. Damit müssen wir mit Erscheinungen rechnen (Kräften oder Massen) die eigentlich nicht vorhanden sind, für uns aber spürbar werden. Beispielsweise führen wir auf der kreisenden Erde das Wettergeschehen auf die Corioliskraft zurück, die aber nur eine Scheinkraft ist und in Karussells fühlen wir eine Fliehkraft, die ebenfalls nur eine Scheinkraft ist.

1. Wenn wir uns mit so großer Geschwindigkeit auf einem Kreis bewegen - müssten wir das nicht spüren?

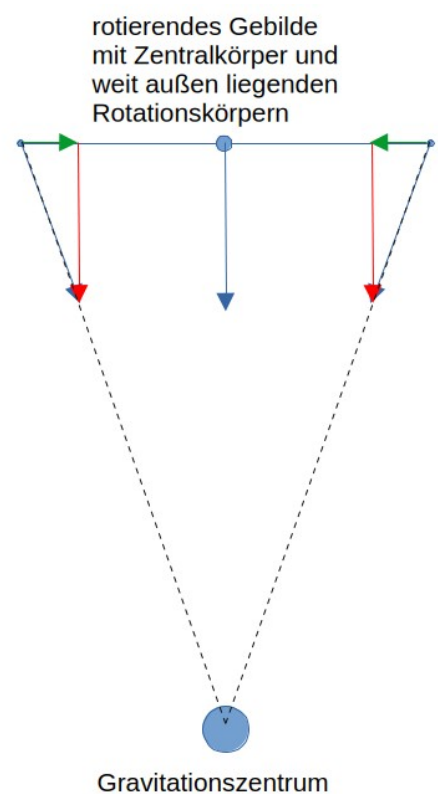
Die Astronauten auf der ISS bewegen sich sehr schnell um die Erde. Da sie so schnell sind, dass die Fliehkraft der Gravitationskraft durch die Erde gleich ist, sind sie "schwerelos". Sie fallen ständig um die Erde herum und haben dabei das Gefühl, als würde keine Gewichtskraft wirken. Genauso könnte es auch bei uns sein, wenn wir mit der Erde, dem Sonnensystem, der Milchstraße die "richtige" Geschwindigkeit haben, so dass die Fliehkraft gleich der Gravitationskraft der inneren Masse des Schwarzen Lochs ist. Gravitative Wirkung spüren wir nur durch Massen, die in unserer Nähe mit uns um den Mittelpunkt des Schwarzen Lochs kreisen.

2. Das James-Webb_Teleskop hat ermittelt, dass rund 2/3 aller Galaxien den gleichen Drehsinn haben. Das widerspricht der Auffassung, dass die Bewegung der Materie in unserem Universum rein zufällig ist und ist ein Anzeichen dafür, dass eine bevorzugte Rotationsrichtung im Universum vorgegeben ist. (Pluspunkt für U=SL)

3. Berechnet man den Schwarzschildradius eines Schwarzen Lochs, das die Masse des sichtbaren Universums besitzt, so erhält man denselben Wert wie für den Radius des beobachtbaren Universums, etwa $4 \cdot 10^{26} m$. (Pluspunkt für U=SL)

4. Für einige der nächsten Punkte ist gut zu wissen, wie sich "leichte" Materie verhält, die schwerelos um ein Gravitationszentrum mit großer gravitativer Wirkung kreist.

Das Ergebnis kann man in unserem Sonnensystem beobachten: Der Merkur zeigt immer mit derselben Seite zur Sonne und genauso zeigt der Mond immer mit derselben Seite zur Erde. Man nennt das



"Gebundene Rotation"

(https://de.wikipedia.org/wiki/Gebundene_Rotation)

Grund für das Zustandekommen ist, dass die gravitative Kraft auf den Randbereich nicht parallel zum Mittelbereich ist. Alle Körper werden zentral zum Gravitationszentrum gezogen (blaue Pfeile). Die Kraftpfeile des Randbereichs geben an, dass es neben der Kraftkomponente zum Gravitationszentrum (rote Pfeile) auch noch Kraftkomponenten zur Mitte (grüne Pfeile) gibt. Das drückt das rotierende Gebilde zusammen und bei kompakteren Gebilden wird dann das rotierende Gebilde in Richtung Gravitationszentrum gestreckt, so dass kreisähnliche Gebilde zu Ellipsen und kugelförmige Gebilde zu Ellipsoiden werden. Daraus entstehen Gezeiteneffekte, die dann zu einer gebundenen Rotation führen.

5. Kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung

Hier <https://de.wikipedia.org/wiki/Hintergrundstrahlung>

gibt es Informationen dazu. Es handelt sich um eine Mikrowellenstrahlung, die aus jeder Richtung mit fast identischer Stärke gemessen wird. Sie soll nach dem Standardmodell der Kosmologie beim Urknall erzeugt worden sein und sich im Lauf der Zeit bis auf den heutigen Wert abgeschwächt haben. Es gibt aber Abweichungen in der Intensität, die noch nicht verstanden worden sind.

Das Modell U=SL ergibt eine viel einfachere Erklärung:

Wie im Kapitel 1 angegeben, sendet die sehr schnell kreisende Materie rings um das Schwarze Loch nur Strahlung aus, die stärker als Mikrowellenstrahlung ist. Materie, die Mikrowellenstrahlung oder schwächere Strahlung aussendet, ist zu langsam und verschwindet im Schwarzen Loch. Dort wird dann am intensivsten die Mikrowellenstrahlung verbreitet, die aus "allen" Richtungen kommt, weil der Eintritt der Materie ins Schwarze Loch ja über die gesamte Schwarzschildradius-Ebene erfolgt. Wir bemerken also mit der Messung der Mikrowellenstrahlung, dass neue Materie ins Schwarze Loch eingetreten ist.

(Pluspunkt für U=SL)

6. Filamente im Kosmos

[https://de.wikipedia.org/wiki/Filament_\(Kosmos\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Filament_(Kosmos))

Die Materieansammlungen im Kosmos sind in wabenartigen Strukturen angeordnet. Wie Perlen an langen Schnüren sind die Materieansammlungen aufgereiht.

Dazwischen gibt es große Leerräume, die fast keine Materie enthalten. Durch gravitative Effekte können diese Leerräume nicht entstanden sein.

Das Modell U=SL ergibt eine einfache Erklärung:

Ein Stern, der von einem Schwarzen Loch "aufgesogen" wird, wird außerhalb des Schwarzen Lochs zerlegt, indem laufend Materie von der Oberfläche abgenommen wird. Dadurch entsteht ein sehr langes "Staubband". Tritt dieses in das Schwarze Loch ein und erreicht schließlich eine stabile Umlaufbahn, so können sich gravitative Einflüsse in diesem Staubband auswirken, indem Materiezentren entstehen, um die sich dann weitere kleinere Materiezentren entwickeln. So entstehen Galaxien, Sonnen und Planeten. Diese Himmelskörper sind dann angeordnet entlang des ehemaligen Staubbandes wie bei einer Perlenschnur. Liegen weitere Staubbänder in naher Entfernung, können auch zwischen den Staubbändern Materiebrücken entstehen. Dadurch ergeben sich schwammähnliche Gebilde. Die Leerräume sind einfach Stellen, die von keiner Materie erreicht wurden.

(Pluspunkt für U=SL)

7. Kosmologische Inflation

[https://de.wikipedia.org/wiki/Inflation_\(Kosmologie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Inflation_(Kosmologie))

Während der kosmischen Inflation soll sich das Universum kurz nach dem Urknall in kürzester Zeit um viele Größenordnungen ausgedehnt haben. Das soll erklären, warum die Materie im Universum etwa gleich verteilt ist. Hätte es damals schon Teilchen gegeben, hätten die sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen müssen! Das Modell $U=SL$ löst viel einfacher die Fast-Gleichverteilung der Materie:

Nachdem sich zum Beispiel nach einer gewaltigen Sternexplosion oder während des Kompressionsvorgangs einer großen Masseansammlung zunächst ein kleines Schwarzes Loch gebildet hat und sich damit ein Raumbereich mit einem kleinen Schwarzschildradius ergeben hatte, strömte unmittelbar darauf weitere Materie in das Schwarze Loch. Mit jeder zusätzlichen Masse wurde dann aber der Schwarzschildradius größer und jede weitere Materie lagerte sich entsprechend immer weiter außen an. So entstand dann in kurzer Zeit über einen großen Raumbereich in Form eines Zwiebelchalenmusters ein Volumenbereich mit fast gleich verteilter Materie.

(Pluspunkt für $U=SL$)

8. Dunkle Energie

https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Energie

Das Vorhandensein Dunkler Energie wurde postuliert, um damit die beschleunigte Expansion des Weltalls erklären zu können. Überzeugende Erklärungen für die Dunkle Energie fehlen bis heute.

Das Modell $U=SL$ beschreibt den Grund für die Expansion viel einfacher:

In dem übergeordneten Universum, in das unser Universum als Schwarzes Loch eingebettet ist, gibt es natürlich noch viel mehr Materie. Wenn diese Materie in unser Schwarzes Loch stürzt, vergrößert sich der Schwarzschildradius und damit auch das Volumen des Schwarzen Lochs. Dazu ist aber kein Grund nötig, der im Schwarzen Loch angelegt sein muss, sondern es reicht die Zufuhr neuer Materie. Durch die neu dazu kommende Materie, die sich außen im Schwarzen Loch befindet, wird die gravitative Kraft auf die vorhandene Materie verringert, so dass eine allgemeine Ausdehnung stattfindet und damit auch der Abstand zwischen den Materieansammlungen (Galaxien) vergrößert wird.

"Kosmische Inflation" und "Dunkle Energie" beschreiben also beide lediglich das Zuführen von Materie ins Schwarze Loch. Man könnte mit $U=SL$ also auf diese Begriffe verzichten.

(Pluspunkt für $U=SL$)

9. Dunkle Materie

https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Materie

Man misst in Außenbereichen von Galaxien Umlaufgeschwindigkeiten, die zu größeren Fliehkräften führen würden, als für die gravitative Anziehung nötig sind. Die Umlaufbahnen dürften also nicht stabil sein.

Man postuliert deshalb unsichtbare Masse in den Galaxien, die zwar zur Gravitation beitragen, aber keine elektromagnetische Wechselwirkung zeigen.

Leider ist es bis heute nicht gelungen, die Teilchen der Dunklen Materie nachzuweisen.

Auch hier bietet das Modell $U=SL$ eine Lösung des Problems und macht die

Existenz Dunkler Materie überflüssig:

Unter Punkt 4 habe ich gezeigt, dass durch die Rotation eines (rotierenden) Massegebildes um ein Gravitationszentrum auf die äußeren Bereiche eine Gravitationskomponente hin zur Mitte der Massenansammlung wirkt. Würde man das rotierende Gebilde separat sehen, würde man sagen: Da muss noch irgendwo Masse sein. Sonst würden sich die Außenteile nicht so bewegen, wie wir es sehen. Diese Masse ist so eine "Scheinmasse" in rotierenden Bezugssystemen, wie es die "Scheinkräfte" Fliehkraft und Corioliskraft sind.

(Pluspunkt für $U=SL$)

Kapitel 4: Was ist die Wahrheit?

Douglas Adams lässt im Roman "Per Anhalter durch die Galaxis" einen Computer nach über 7 Millionen Jahren Rechenzeit auf die "endgültige Frage nach dem Leben, dem Universum und dem ganzen Rest" die Antwort 42 geben. Diese Antwort sei wahr.

[https://de.wikipedia.org/wiki/42_\(Antwort\)](https://de.wikipedia.org/wiki/42_(Antwort))

Selbst, wenn es stimmen würde, die Antwort hilft uns nicht weiter. Man kann ein System nicht von innen heraus bis ins Letzte verstehen.

Da wir aus unserer Welt nicht heraustreten können, werden wir unsere Welt auch nie vollständig verstehen.

Sollte gelten "Unser Universum ist ein Schwarzes Loch", dann gibt es ein übergeordnetes Universum. Ist das auch ein Schwarzes Loch? Wo ist der Anfang, wo das Ende?

Ich würde mich jedenfalls freuen, wenn man schwer verständliche Begriffe wie z.B. singulärer Punkt, kosmische Inflation, dunkle Materie, dunkle Energie usw. streichen könnte, weil es überzeugendere und einfachere Erklärungen für unsere Welt gibt.

Falls ich mit diesen Zeilen dazu beigetragen haben sollte, würde es mich freuen.

Falls ich meine Fehler (die mit Sicherheit vorhanden sind) nicht gesehen haben sollte, bitte ich um Nachsicht bzw. Nachricht unter meiner E-Mail-Adresse 42@khmeyberg.de

Nachtrag am 12.04.2026:

Kapitel 5: Kann es eine Singularität im Zentrum eines Schwarzen Lochs geben?

Beobachtungen haben gezeigt, dass sich nach [Sternexplosionen](#) übrig bleibende Materie im Zentrum sammelt und dass dabei je nach Menge ein weißer Zwerg, ein [Neutronenstern](#) oder ein Schwarzes Loch entstehen kann.

Neutronen lassen sich nicht weiter komprimieren (siehe verlinkter Artikel zu Neutronensternen) und deshalb ist es für mich nicht einsichtig, dass bei weiterer Materiezufuhr zu einem Neutronenstern beim Entstehen des Schwarzen Lochs die ganze Materie in eine Singularität fällt.

Ich kann mir vorstellen, dass schließlich so viele Neutronen in einem bestimmten Raumbereich vorhanden sind, dass die Bedingung für ein Schwarzes Loch gegeben ist. In einer unten angefügten Rechnung ergibt sich, dass vereinfacht betrachtet bei extremer Dichte der Neutronen ein kugelförmiges schwarzes Loch mit dem Durchmesser von etwas über 30 km dafür ausreicht.

In dieser "Neutronenkugel" nimmt der Druck zwar zur Mitte hin zu, aber die Gravitation nimmt zur Mitte hin ab.

Hier die Rechnung (Werte gerundet):

$$\text{Gravitationskonstante } G: G = 6,674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

$$\text{Lichtgeschwindigkeit } c: c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Masse des Schwarzen Lochs M

$$\text{Schwarzschildradius: } r_s = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$$

$$\text{Volumen des Schwarzen Lochs (Kugel) } V_{SL}: V_{SL} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_s^3$$

$$\text{Neutronenmasse } m_n: m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Neutronenradius } r_n: r_n = 0,85 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

$$\text{Neutronenvolumen } V_n: V_n = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_n^3$$

Die "Neutronenkugel" bestehe aus x Neutronen.

$$\text{Dann gilt } V_{SL} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{8 \cdot G^3 \cdot M^3}{c^6} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{8 \cdot G^3 \cdot x^3 \cdot m_n^3}{c^6} = x \cdot V_n = x \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_n^3$$

$$\rightarrow \frac{8 \cdot G^3 \cdot x^3 \cdot m_n^3}{c^6} = x \cdot r_n^3$$

$$\rightarrow x^2 = \frac{r_n^3 \cdot c^6}{8 \cdot G^3 \cdot m_n^3}$$

Ist r_{Sn} der Schwarzschildradius für die "Neutronenkugel", so gilt

$$r_{Sn}^2 = \frac{4 \cdot G^2 \cdot x^2 \cdot m_n^2}{c^4} = \frac{4 \cdot G^2 \cdot r_n^3 \cdot c^6 \cdot m_n^2}{c^4 \cdot 8 \cdot G^3 \cdot m_n^3} = \frac{c^2 \cdot r_n^3}{2 \cdot G \cdot m_n}$$

$$r_{Sn} = \sqrt{\frac{c^2 \cdot r_n^3}{2 \cdot G \cdot m_n}} = 1,572 \cdot 10^4 \text{ m} = 15,72 \text{ km}$$