

In den Galaxienkernen - „Von Raubtieren und ihrer Fütterung“

In Deutschland gibt es Vulkane, die schon lange ruhig sind, zu späterer Zeit aber durchaus wieder „aufwachen“ können. Um aktive Vulkane zu betrachten, müssen wir unseren Blick über die Ländergrenzen hinweg z. B. zu den Philippinen richten. Analog dazu verhält es sich mit der Aktivität unserer Sternheimat, dem Milchstraßensystem, im Vergleich zu anderen Sternsystemen (Galaxien). Während der Kern des Milchstraßensystems zur Zeit „schläft“, zeigt uns ein Blick über seine Grenzen hinweg, dass es Galaxien gibt, die weit heller sind, als es durch die dort vorhandenen Sterne zu erklären wäre, weil sie in ihren Kernen aktiv sind. Etwas beruhigend ist die Tatsache, dass die meisten aktiven Galaxien bei Rotverschiebungen von $z=2-3$ zu finden sind, d. h. dass die Periode der großen Galaxienaktivität in ferner Vergangenheit liegt. Wieder in Analogie lässt sich dies auf die deutschen Vulkane übertragen, und trotzdem ist in beiden Fällen ein Erwachen der Aktivität möglich.

Bei den im Folgenden vorgestellten didaktischen Materialien geht es um eine [faszinierende Anwendung des 3. keplerschen Gesetzes](#) bei der Erforschung des galaktischen Zentrums, um die [Berechnung der Ruheenergie](#) im Zusammenhang mit der „Fütterung“ eines Schwarzen Lochs, um den unterschätzten Stellenwert der [potentiellen Energie](#) und um die [räumliche Vorstellung einer geneigten Ellipse](#). Der so wichtige Naturkontakt wird durch eine [Beobachtungsaufgabe](#) hergestellt. Zur didaktischen Daueraufgabe der Motivation wird im abschließenden Beitrag [„Astronomie mit Gastronomie“](#) eine etwas ungewöhnliche Möglichkeit vorgestellt.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Mechanik, Relativitätstheorie	3.keplersches Gesetz, Ruheenergie, potentielle Energie, Leistung
Astronomie	Galaxien	scheinbare Bahn, wahre Bahn, aktive Galaxien, aktive galaktische Kerne (AGN), galaktisches Zentrum , Schwarze Löcher
Fächer- verknüpfung	Astro-Ma, Astro- Kunst	Ellipsen, Trigonometrie, figürliches Zeichnen



Abbildung 1: Die im Zentrum des Galaxiensuperhaufens, zu dem auch das Milchstraßensystem gehört (Virgo-Galaxienhaufen), stehende elliptische Riesengalaxie M87 (ca. 50 Mio Lichtjahre entfernt) ist zur Zeit aktiv, was sich u. a. durch den im Bild ersichtlichen Jet zeigt. ©: NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) - HubbleSite: gallery, release, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=102873>.

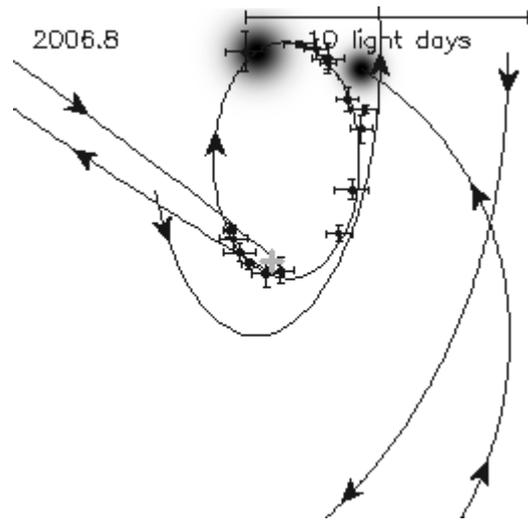
Aus weiteren Beobachtungen hat man abgeleitet, dass sich im Zentrum von M87 ein 3 Milliarden Sonnenmassen schweres Schwarzes Loch befindet.

Astrobilder lesen lernen: Nimmt man an, dass der Jet in der Bildebene zeigt, wie weit reicht er dann vom Schwarzen Loch weg heraus aus der Galaxie? Das Bild spannt in seiner Breite einen Winkel von 31" am Himmel auf.

(Ergebnis: ca. 5000 Lj)

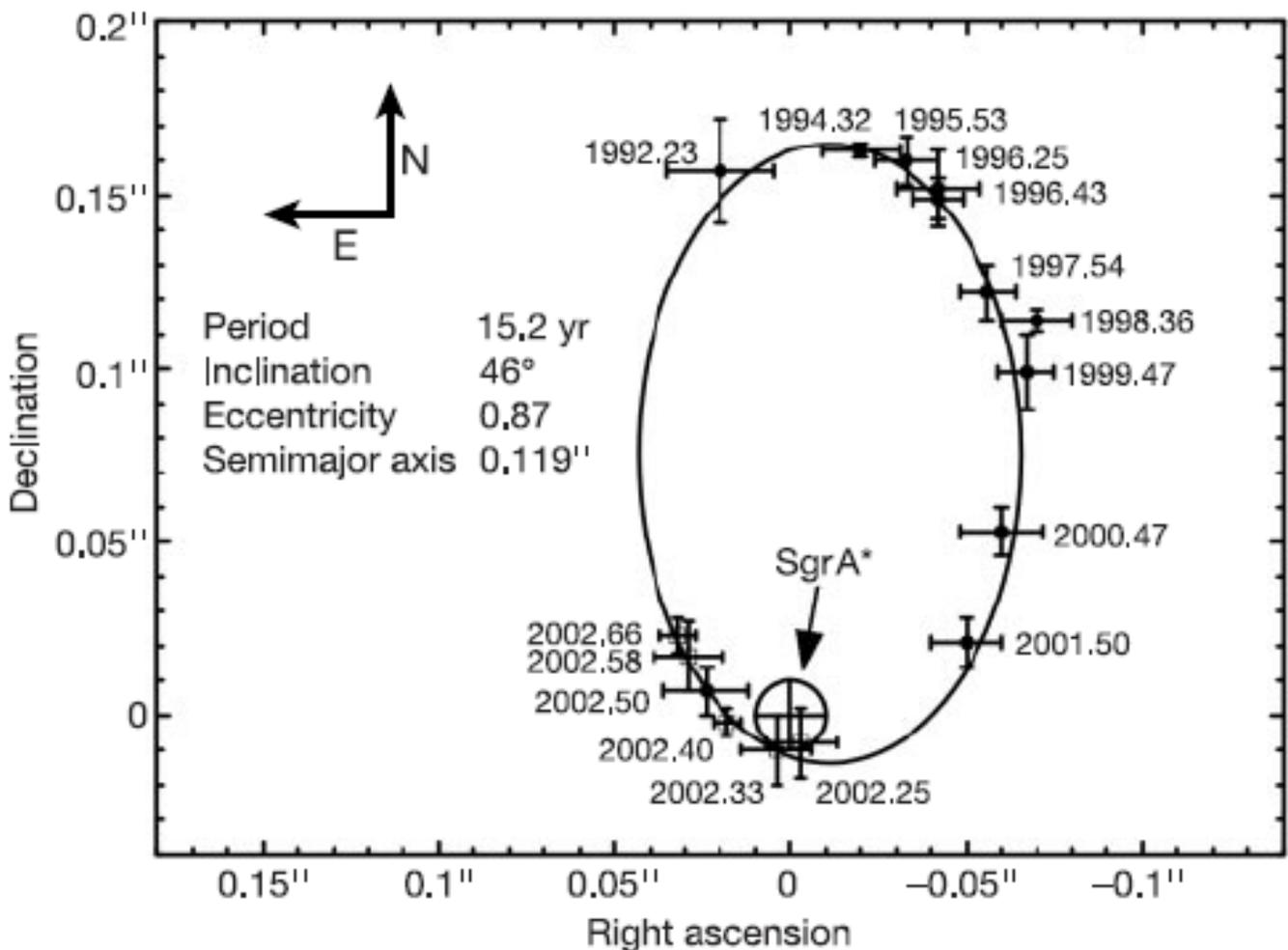
Aufgaben: Das „Monster“ im galaktischen Zentrum „auf der Waage“ ([→zurück zum Anfang](#))

Das Movie [MPA-Movie](#) (zu finden bei den angehängten didaktischen Materialien) zeigt im Zeitraffer den Umlauf von Riesensternen, deren Infrarotlicht den galaktischen „Staubvorhang“ teilweise zu durchdringen vermag, um das Zentrum des Milchstraßensystems. Im Bild rechts (Standbild aus dem Movie) werden die gemessenen Örter bis zum Zeitpunkt 2006,8 gezeigt.



In der unten gezeigten Abbildung (Quelle: Nature (Letters), Band 419, 17. Oktober 2002, S. 695) wird die Bahn des ausgesuchten Sterns S2 um das Zentrum des Milchstraßensystems (Ort der Radioquelle Sgr A*) präsentiert, die aus den zu verschiedenen Zeiten bestimmten Positionen konstruiert wurde. Im Zentrum wird schon lange ein Schwarzes Loch vermutet.

1. Warum steht Sgr A* nicht im Brennpunkt der sichtbaren Ellipse (Leserfrage aus SuW 8/2006, S. 7)? Diese Frage ist u. a. auch mit anschaulichen Hilfsmitteln zu klären. Welche Exzentrizität hat die sichtbare Ellipse?
2. Welche Masse befindet sich im Zentrum des Milchstraßensystems?



Lösung zu den Aufgaben: Das „Monster“ im galaktischen Zentrum „auf der Waage“

Zu 1.

Die aus verschiedenen Positionen von S2 konstruierte Ellipse stellt die in Projektion sichtbare wahre Bahnellipse dar. Sgr A* steht in einem Brennpunkt der wahren Bahnellipse. Blickt man schräg auf diese Ellipse und verdreht sie noch dazu, so kann man erkennen, dass der Brennpunkt von der Hauptachse der in Projektion sichtbaren Ellipse wegrutscht.

Den Unterschied zwischen der wahren Bahnellipse und ihrem Anblick in Projektion kann man sich anschaulich verdeutlichen. Dazu konstruiere man die wahre Bahnellipse auf Pappe, zeichne die große und kleine Bahnachse auf (senkrecht aufeinander, durch den Mittelpunkt laufend) und markiere zumindest einen Brennpunkt. Die Ellipse wird nun so verdreht und verkippt, dass ihr Anblick dem in der Abbildung sichtbaren entspricht. Das Achsenkreuz erscheint nun windschief und der Brennpunkt der wahren Bahnellipse liegt in der projizierten Ellipse an verschobener Position (siehe Abb. 2).

Zur Konstruktion werden aus den im Bild gegebenen Größen für die wahre Bahnellipse $\varepsilon=0,87$ und $a=0,119''$ die lineare Exzentrizität e und die kleine Halbachse b berechnet.

$$e = \varepsilon \cdot a = 0,87 \cdot 0,119'' \approx 0,104'' \quad \text{und} \quad b = \sqrt{a^2 \cdot (1 - \varepsilon^2)} \approx 0,059''.$$

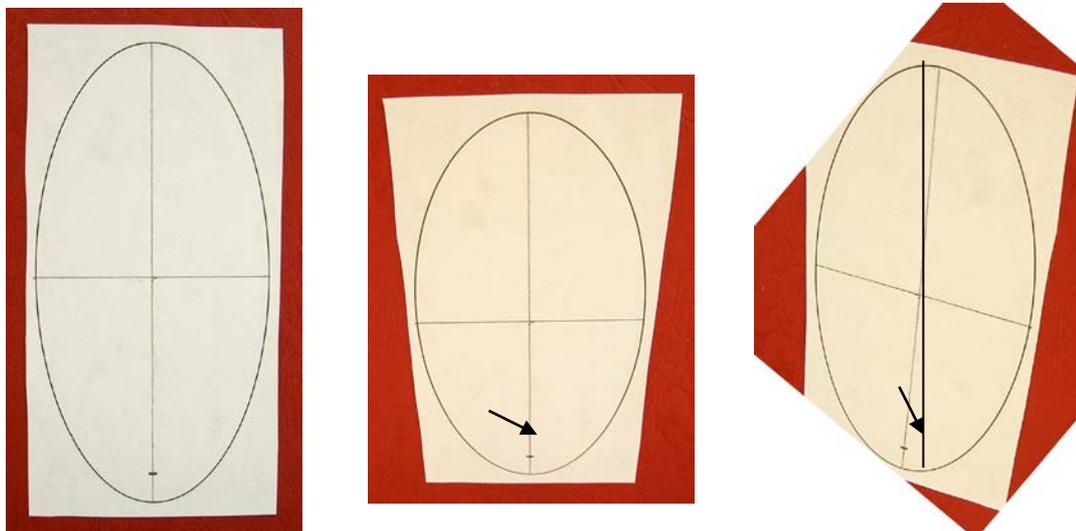


Abbildung 2: Links: Die wahre Bahnellipse des Sterns S2 um das galaktische Zentrum. Mitte: Kippt man die wahre Bahnellipse gegen die Tangentialebene, so ändert sich die Exzentrizität der nun in Projektion sichtbaren Ellipse (scheinbare Bahnellipse, Pfeil weist auf deren Brennpunkt). Rechts: Verdreht man die wahre Ellipse noch etwas in ihrer verkippten Lage, so erscheinen ihre Achsen windschief und der Brennpunkt der wahren Bahnellipse rutscht von der eingezeichneten Längsachse der scheinbaren Bahnellipse weg (was zu Irritationen führen kann).

Die Längen der großen und der kleinen Ellipsenachse der in Projektion sichtbaren Ellipse betragen $a=247$ und $b=150$ Pixel. Daraus ergibt sich für die im Bild sichtbare Ellipse (scheinbare Bahnellipse) eine numerische Exzentrizität von

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \frac{\sqrt{247^2 - 150^2}}{247} \approx \underline{\underline{0,79}}.$$

Zu 2.

Geg.: große Bahnhalbachse (Winkelausdehnung)	$\alpha = 0,119''$
Umlaufzeit	$T = 15,2 \text{ a}$
Abstand zum galaktischen Zentrum	$r \approx 8 \text{ kpc}$
Gravitationskonstante	$\gamma = 6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$
Umrechnung	$1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$
Sonnenmasse	$M_S = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

Zunächst gilt es, aus der scheinbaren Größe der großen Halbachse der Umlaufbahn von S2 die wahre Größe zu berechnen.

$$a = \tan \alpha \cdot r = \tan\left(\frac{0,119''}{3600''/\text{°}}\right) \cdot 8000 \cdot 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m} = 1,4243 \cdot 10^{14} \text{ m}.$$

Zum Vergleich: Die große Halbachse der Umlaufbahn würde sich etwa 1000 AE weit weg von der Sonne erstrecken. Das ist weit weniger als der Abstand zum nächsten Stern oder gar zur äußeren Grenze der Oortschen Wolke.

Annahme: Betrachtung im Mittelpunktssystem des Milchstraßensystems, d. h. Vernachlässigung der Masse des Sterns S2 (im 3. Keplerschen Gesetz erscheint dann nur die Zentralkörpermasse)

3. Keplersches Gesetz:

$$M = \frac{a^3}{T^2} \cdot \frac{4\pi^2}{\gamma} = \frac{(1,4243 \cdot 10^{14} \text{ m})^3}{(15,2 \cdot 365,25 \cdot 86400 \text{ s})^2} \cdot \frac{4\pi^2}{6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}}$$

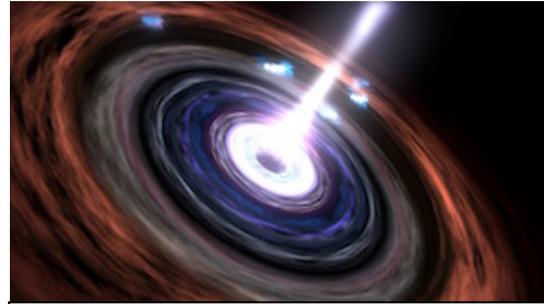
$$\underline{\underline{M \approx 7,4 \cdot 10^{36} \text{ kg.}}}$$

Zum Vergleich: Im Zentrum des Milchstraßensystems befindet sich eine Masse von etwa 3,7 Millionen Sonnenmassen. Davon entfallen $2,6 \cdot 10^6$ Sonnenmassen auf das supermassive Schwarze Loch und der Rest auf einen bis zur Grenze hin konzentrierten zentralen Sternhaufen (siehe Nature (Letters), Band 419, 17. Oktober 2002, S. 695).

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Fragen und Probleme zur „Fütterung“ des Schwarzen Lochs im galaktischen Zentrum

1. Wer weiß schon, dass die potentielle Energie der Gravitation zu den ergiebigsten Energiequellen gehören kann, die die Kernenergie weit in den Schatten stellt, wenn man ein Schwarzes Loch als „Generator“ zur Hand hat. Dieses beschleunigt die zuströmende Materie nahezu auf Lichtgeschwindigkeit. Beim Zusammenprall mit Materie, die sich im Umlauf um das Schwarze Loch befindet wie auch beim gegenseitigen Stoßen der mit verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten umlaufenden Materie wird die Materie so erhitzt (Reibung), dass etwa 10% der zuströmenden Materie in Strahlungsenergie umgewandelt werden.



Künstlerische Darstellung der Zentralregion einer aktiven Galaxie. ©: NASA/Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab.

Um wie viel effektiver ist diese Art der Energiefreisetzung im Vergleich zur Kernfusion von Wasserstoff?

2. Für die potentielle Energie eines Körpers der Masse m nahe der Erdoberfläche (Fallbeschleunigung g) kennen wir den Formelausdruck

$$E = m \cdot g \cdot h,$$

d. h. mit zunehmender Höhe h wächst die potentielle Energie E eines Körpers.

Nun findet man in verschiedenen Büchern eine allgemeiner gültige Formel zur Berechnung der potentiellen Energie eines Körpers der Masse m im Abstand R von der das Gravitationsfeld erzeugenden Masse M (γ ... Gravitationskonstante)

$$E = \frac{\gamma \cdot M \cdot m}{R}.$$

Es hat nun den Anschein, dass die potentielle Energie mit zunehmendem Abstand R kleiner wird. Wo liegt das Problem?

3. Aktive Galaxien können um Größenordnungen heller sein als Galaxien mit dem gleichen Sterninhalt, die sich „ruhig verhalten“. Welche Masse (ausgedrückt in Sonnenmassen) wird pro Jahr im Zentrum eines Quasars (Kern einer aktiven Galaxie) „verschluckt“, der die 1000-fache Leuchtkraft des Milchstraßensystems (MSS: ca. 10^{37} W) besitzt? Für den Radius, bis zu dem die „Fütterungsmasse“ einfällt, soll ein Wert von 10^{10} m angenommen werden.

Antworten zur „Fütterung“ des Schwarzen Lochs im galaktischen Zentrum

Zu 1.

Bei der Fusion von Wasserstoff zu Helium werden ca. 0,7 % der Ruhemasse des Wasserstoffs zu Strahlungsenergie gewandelt. Im Vergleich dazu werden bei der Energieumwandlung von potentieller Energie im Gravitationsfeld eines Schwarzen Lochs etwa 10 % der zuströmenden Materie in Strahlungsenergie umgewandelt.

Daraus folgt, dass diese Art der Energiefreisetzung (aus der Ruheenergie) etwa 14-mal effektiver ist.

Zu 2.

Ein Körper der Masse m erhält potentielle Energie im Gravitationsfeld der Masse M , wenn an ihm unter dem Einfluss der Gravitationskraft F Arbeit verrichtet wird, d. h., wenn er (egal auf welchem Weg) vom Abstand R bis zum Abstand r vom Gravitationszentrum hin bewegt wird. Es gilt

$$E = \int_R^r F(r') dr' = \int_R^r \frac{\gamma \cdot M \cdot m}{r'^2} dr' = \gamma \cdot M \cdot m \cdot \int_R^r \frac{1}{r'^2} dr' = \gamma \cdot M \cdot m \cdot \left[-\frac{1}{r'} \right]_R^r = \underline{\underline{\gamma \cdot M \cdot m \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)}}$$

Fall 1:

Wird der Körper unendlich weit weg befördert ($r \rightarrow \infty$), so besitzt er die maximal mögliche potentielle Energie und man erhält

$$E = \gamma \cdot M \cdot m \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{\infty} \right) = \underline{\underline{\frac{\gamma \cdot M \cdot m}{R}}}$$

Dieser Formelausdruck gilt also für einen Körper, der aus dem Unendlichen bis zum Abstand R einstürzt (und nicht für einen Körper, der um den Betrag von R radial verschoben wird).

Fall 2:

Liegen r und R nicht weit auseinander (man denke z. B. an einen begrenzten Bereich über der Erdoberfläche), d. h. $R \cdot r \approx R^2$ und nimmt für die Differenz $r - R$ gleich h an, so erhält man wieder den „altbekannten“ Ausdruck

$$E = \gamma \cdot M \cdot m \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right) = \gamma \cdot M \cdot m \cdot \left(\frac{r - R}{R \cdot r} \right) \approx \gamma \cdot M \cdot m \cdot \frac{h}{R^2} = m \cdot \frac{\gamma \cdot M}{R^2} \cdot h = \underline{\underline{m \cdot g \cdot h}}$$

Zu 3.

Es kann genähert angenommen werden, dass die Masse aus dem Unendlichen einfällt. Die potentielle Energie, die zu Strahlung umgewandelt wird, kann dann entsprechend wie folgt berechnet werden (siehe zuvor)

$$E = 0,1 \cdot \frac{\gamma \cdot M \cdot m}{R}$$

Die Leuchtkraft als Leistungsangabe (Gesamtstrahlungsleistung) ergibt sich aus der zeitlichen Änderung der Energie, also aus

$$L = 0,1 \cdot \frac{\gamma \cdot M \cdot \frac{m}{t}}{R}$$

und für die „Fütterungsrate“ m/t erhält man

$$\frac{m}{t} = \frac{10 \cdot L \cdot R}{\gamma \cdot M} = \frac{10 \cdot 1000 \cdot 10^{37} \text{ W} \cdot 10^{10} \text{ m}}{6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \cdot 5,2 \cdot 10^{36} \text{ kg}} = \frac{10^{51} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{m}}{6,6726 \cdot 5,2 \cdot 10^{25} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}}$$

$$\frac{m}{t} \approx 2,9 \cdot 10^{24} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Pro Jahr ($t=365,25 \cdot 86400$ s) werden also

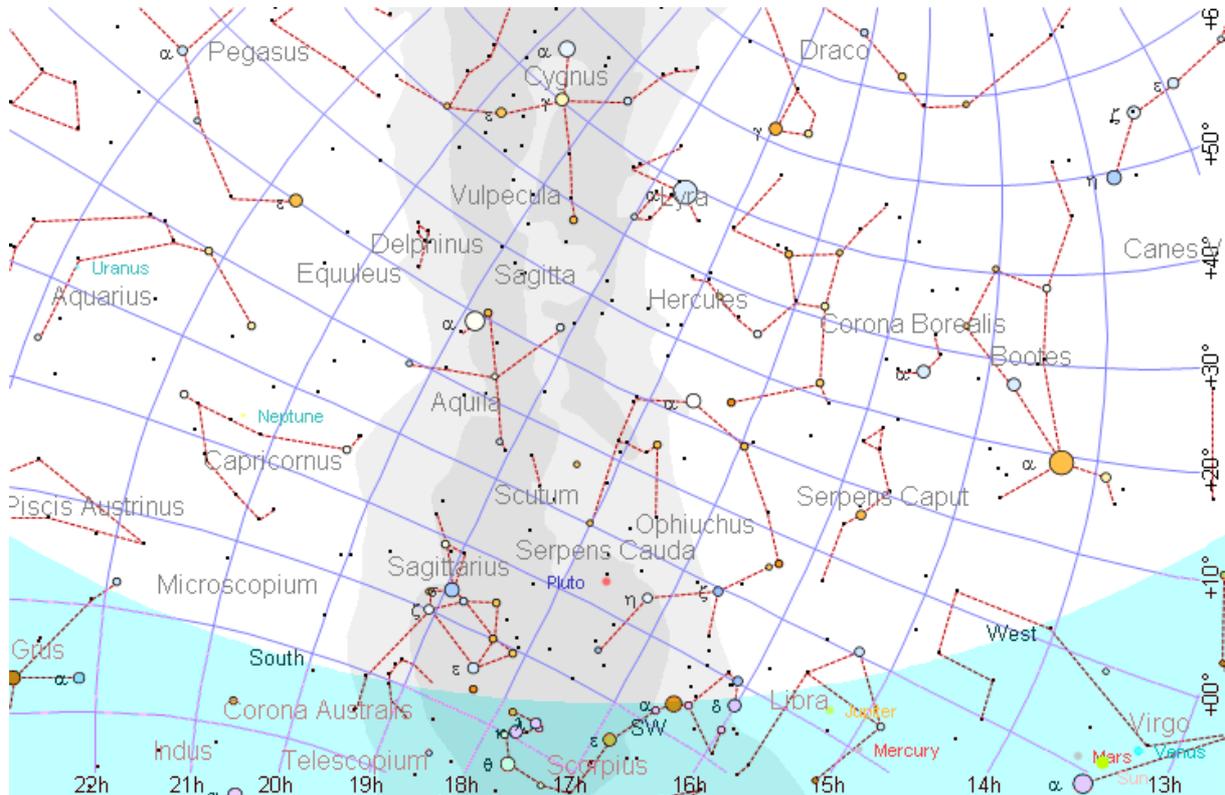
$$6,25 \cdot 10^{28} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 365,25 \cdot 86400 \text{ s} \approx 9 \cdot 10^{31} \text{ kg}$$

„verfüttert“, was etwa 46 Sonnenmassen pro Jahr entspricht.

Dazu im Vergleich „verhungert“ das Schwarze Loch im Kern des Milchstraßensystems mit einer „Fütterungsrate“ von etwa 0,001 Sonnenmassen/a.

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Beobachtungsaufgabe: „Mit dem Schwan ins galaktische Zentrum fliegen“



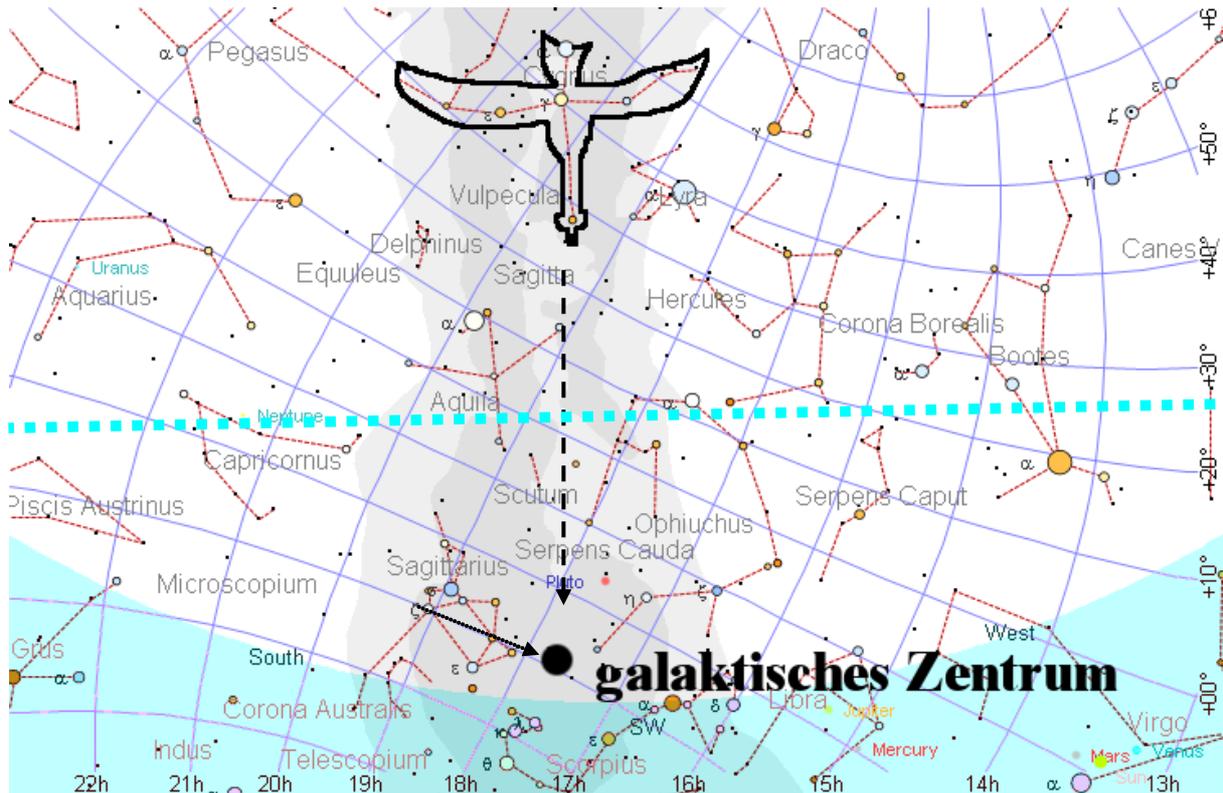
Sternhimmel über Stuttgart am 15. Oktober um 21.00 Uhr. Die Milchstraße ist im Herbst besonders gut zu beobachten, weil sie steil aus dem Horizont ragt. (Karte mit Planetariumsprogramm erzeugt.)

Der Ort des galaktischen Zentrums, d. h. die Richtung zum Schwarzen Loch im Inneren des Milchstraßensystems ist in der Sternkarte zu kennzeichnen (Koordinaten: $\alpha \approx 265,6^\circ$, $\delta \approx -28,9^\circ$) und am Himmel aufzusuchen. Für das Aufsuchen ist eine „Wegweisung“ mit Hilfe von Sternen zu beschreiben/skizzieren.

Das Sternbild Schwan erlaubt dabei eine einfache und einprägsame Groborientierung, „fliegt“ der Schwan doch die Milchstraße entlang auf dessen Zentrum zu. Der Schwan ist in der Sternkarte figürlich nachzubilden.

Angenommen, das galaktische Zentrum wird wieder aktiv - wie würde sich dies am Sternhimmel bemerkbar machen (Hinweis: galaktischer Nordpol bei $\alpha \approx 192,9^\circ$, $\delta \approx 27,1^\circ$)?

Lösung zur Beobachtungsaufgabe: „Mit dem Schwan ins galaktische Zentrum fliegen“

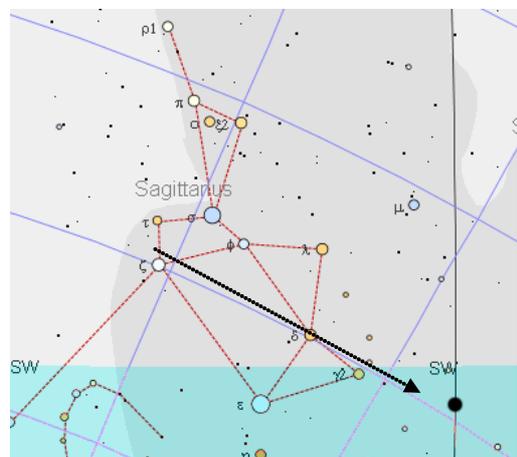


Sternhimmel über Stuttgart am 15. Oktober um 21.00 Uhr. Die Milchstraße ist im Herbst besonders gut zu beobachten, weil sie steil aus dem Horizont ragt.

Das Einzeichnen des Orts des galaktischen Zentrums erfordert den Umgang mit projektiv verzerrten Koordinatenlinien (Bezug zur Geografie). Zudem muss der im Winkelmaß gegebene Rektaszensionswinkel ins Zeitmaß, nach dem die Koordinatenlinien beschriftet sind, umgerechnet werden. Danach sind $\alpha = 265,6^\circ$ auch $\alpha \approx 17^{\text{h}}42^{\text{min}}$ ($(265,6^\circ/360^\circ) \cdot 24^{\text{h}}$).

Für das Aufsuchen der Richtung zum Schwarzen Loch im Zentrum unserer Galaxis könnte man sich an einigen Sternen des Sternbildes Schütze orientieren (siehe Skizze rechts).

Das Sternbild Schwan, das manchmal auch als Kreuz des Nordens bezeichnet wird, ist markant. Der hellste Stern (α) markiert die Schwanzspitze, die sich daran anschließende Sternkette kann als Körperlängsachse verstanden werden, an der sich zu beiden Seiten in leichten Bogen aufgereichte Sterne anschließen, die man sich gut als Flügel vorstellen kann. Der Kopf des Schwans hat als Augenpaar den markanten Doppelstern Albireo



Ein aktives galaktisches Zentrum würde sich durch Jets bemerkbar machen, die sich in Richtung der galaktischen Pole (zur einen Hälfte vom Adler zum Bootes in Richtung galaktischer Nordpol) erstrecken (in Sternkarte als gepunktete Linie senkrecht zur galaktischen Scheibe (Milchstraße) angedeutet).

„Astronomie mit Gastronomie“

(→zurück zum Anfang)

„Liebe geht durch den Magen“, sagt man. Sicherlich ist es so, dass durch den Genuss eine positive Einstellung auch gegenüber von Ideen gefördert werden kann. Entsprechend sollte man nicht davor zurückschrecken, zu gegebenem Anlass (Schulfest, Tag der offenen Tür, Klassenfeier o. ä.) auch einmal über Speisen und Getränke nachdenken zu lassen (diese zu organisieren oder herzustellen), die in irgendeiner Art und Weise relevant für die Astronomie und Weltraumfahrt sind. Es wäre eine Herausforderung an die **Phantasie** der Schüler (aller Klassenstufen) und zugleich ein **Motiv**, sich mit kosmischen Objekten, ihrer Erforschung und ihren Bezügen zur Naturwissenschaft auseinanderzusetzen. So könnte man (noch recht phantasielos) die Schokoriegel Mars oder Milky Way anbieten, wobei allein die Namen der Produkte eine Relevanz besitzen. Der Einsatz von



Tasty Active Galaxy

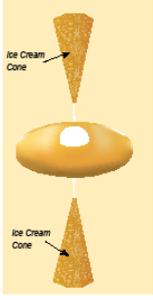
Now that you know what an Active Galaxy looks like, let's see what it is really made of...

Do you wonder what an active galaxy tastes like? You are about to find out...

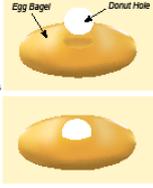
We are going to make an Active Galaxy with black hole:

- 1 First gather all the ingredients from the list (see "You will need").
- 2 Place the donut hole in the middle of the Bagel half. The Bagel represents the galaxy's **disk and torus**, while the donut hole represents the **center and black hole**.

(Note: If the hole of your bagel is not large enough, cut the extra dough with the butter knife to make the donut hole fit.)



Ice Cream Cone



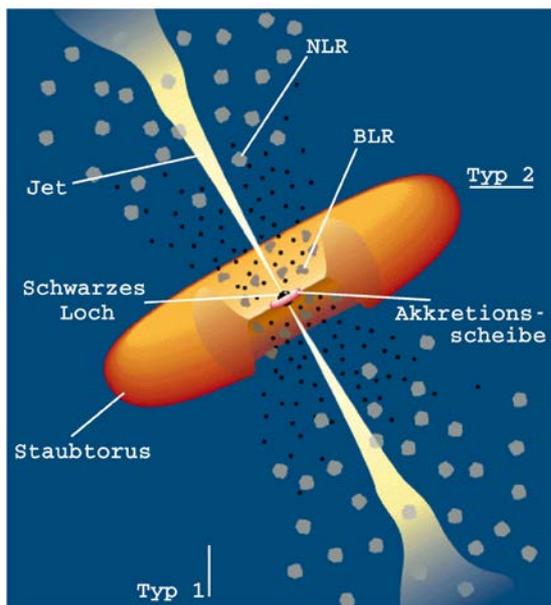
Egg Bagel
Donut Hole

You will need:

- 2 Ice cream cones
- 1/2 Egg Bagel (top)
- 1 Donut Hole
- Chocolate frosting
- A butter knife

- 3 Gently push the ice cream cones into the middle of the doughnut hole on each side of the bagel. You have made the jets.
- 4 Now spread the chocolate frosting on the outside edge of the bagel to create the torus.
- 5 Finally, the fun part... Let's see if you can eat your galaxy without being swallowed by the Black Hole!

For more information, please see:
<http://glast.sonoma.edu/teachers/teachers.html#agn> and <http://glast.sonoma.edu/teachers/popsip.html>



aus essbaren Bestandteilen zu modellieren. Dazu ist es im Vorfeld erforderlich, sich eine Vorstellung von den Strukturelementen zu verschaffen (siehe Bild unten, Hintergrundbild aus: Abb. 1 in C.M. Urry, P. Padovani, 1995, "Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei", [PASP, 107, 803](#)).

Tubenprodukten wäre Anlass, über die Zwänge der Nahrungsaufnahme im Weltraum nachzudenken. Beim Essen von Sternchensuppe könnte die Frage entstehen, was es mit den Zacken der Sterndarstellung auf sich haben könnte (Bezüge zum Strahlenmodell oder zu Beugungskreuzen auf Teleskopbildern oder ...).

Mehr Aufwand erfordert dann schon ein Mondkuchen, der Details der Mondoberfläche zeigt oder ein Mixgetränk namens „Kometenwasser“, welches einige nachgeahmte Ingridenzen aus einem Kometenkern in sich hat (über die es dann hoffentlich neugierige Fragen gibt).

Zum Thema der aktiven Galaxien passt die im Bild oben vorgestellte Idee (als Datei [Tastyagnea.pdf](#) abrufbar, Quelle: Education and Public outreach, NASA). Die Aufgabe besteht darin, den Kern einer aktiven Galaxie

Quellen

(→zurück zum Anfang)

- [1] <http://www.ubicampus.mh-hannover.de/~physik/vorlesung/kap44/kap44.html>
- [2] <http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/>