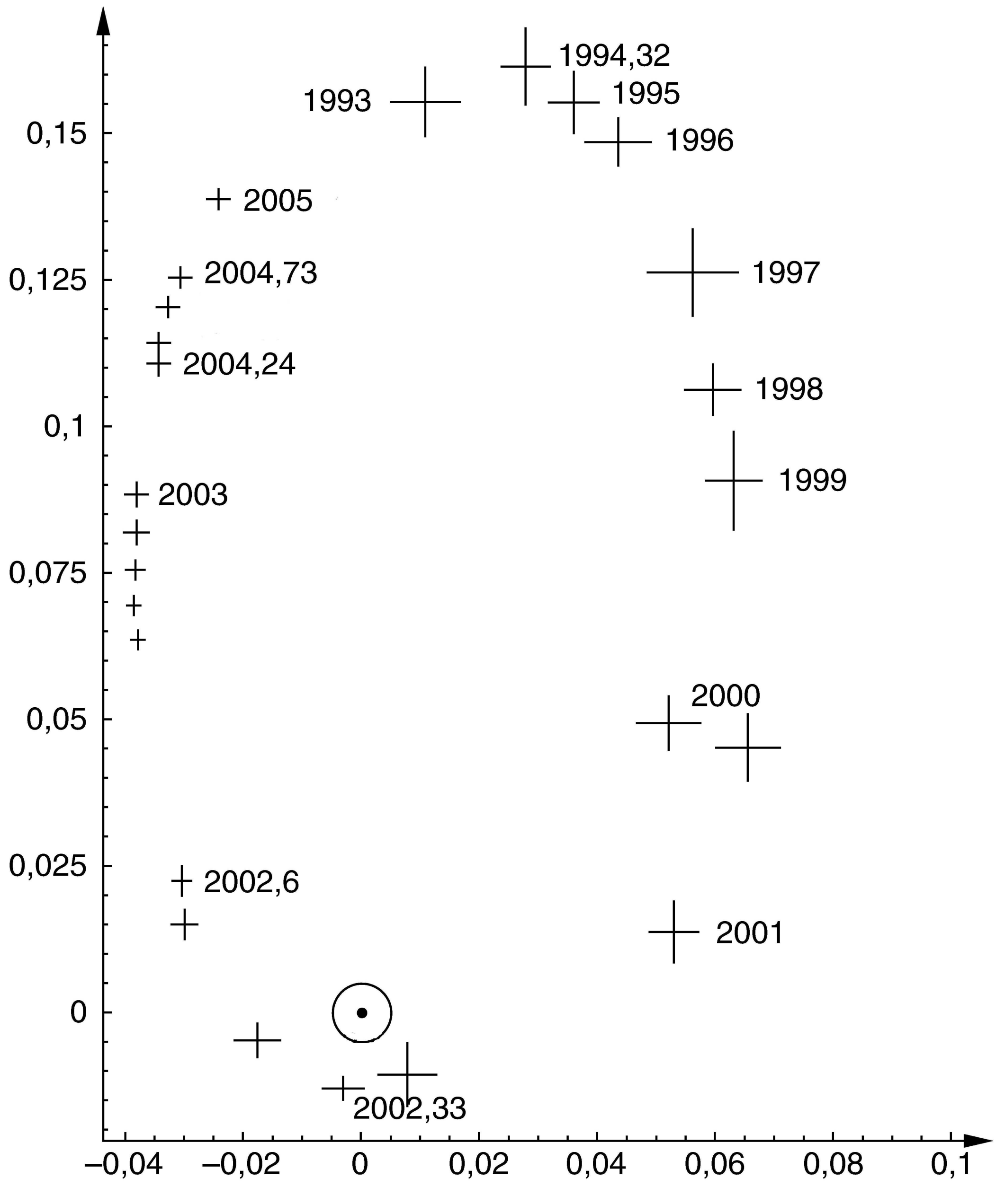
Sagittarius A* - Ein Schwarzes Loch im Zentrum unserer Galaxis?

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie sagt Objekte voraus, die so kompakt und massiv sind, dass ihnen noch nicht einmal Licht entweichen kann. Sie besitzen einen sogenannten Ereignis-Horizont, innerhalb dessen kein Licht oder sonstiges Signal mehr nach außen gelangen kann. Der experimentelle Nachweis dieser sogenannten Schwarze Löcher (engl. black holes) ist aus diesem Grund besonders schwierig.

Seit den 90er Jahren vermuten Astrophysiker, dass es im Zentrum der meisten Galaxien extrem massereiche Schwarze Löcher gibt. Im Jahre 1974 wurde im Zentrum unserer Milchstraße ein Objekt gefunden, dass im Radiowellenbereich sehr stark strahlt, während es z.B. im Infrarotbereich im Allgemeinen nicht sichtbar ist. Da es sich im Sternbild Schütze (Sagittarius) befindet, trägt es den Namen SgrA* (lies Sagittarius A*). Astrophysiker vermuten, dass es sich dabei um ein Schwarzes Loch handelt. Ihre Argumente sollen in den folgenden Aufgaben nachvollzogen werden:

Aufgabe 1: *Abb.1 stellt Positionsmessungen des Sternes S2 vom VLT dar, der das Objekt SgrA* umkreist. Die Angaben sind in Winkelsekunden gemacht. Rechnen Sie diesen Winkelmaßstab in einen Entfernungsmaßstab wie Lichttage (ld) um. Die Entfernung des galaktischen Zentrums von der Erde wurde zu (7,62 ± 0,33) kpc bestimmt. Ein Parsec = 1 pc = 3,26 Lichtjahre ist eine in der Astronomie übliche Entfernungsangabe.*

Abb. 1



Aufgabe 2: *Um die Masse von SgrA* zu bestimmen, müssen nun die Bahndaten von S2 ermittelt werden. Der Stern S2 umkreist SrgA* auf einer Ellipse, die im Bezug auf die Himmelsebene etwa wie in Abb. 2 gekippt und verdreht ist. Die für die Keplerschen Gesetze relevante große Halbachse verläuft jedoch auch bei schräger Aufsicht durch den Brennpunkt SgrA* und halbiert die projizierte Ellipse. Zeichnen Sie in Abb. 1 eine Ellipse ein, die die Positionsmessungen möglichst gut wiedergibt und ziehen Sie eine Achse durch das Zentrum SgrA*, die die Fläche der Ellipse halbiert. Bestimmen Sie die Länge $a_{||}$ der Projektion der großen Halbachse a auf die Himmelsebene.*

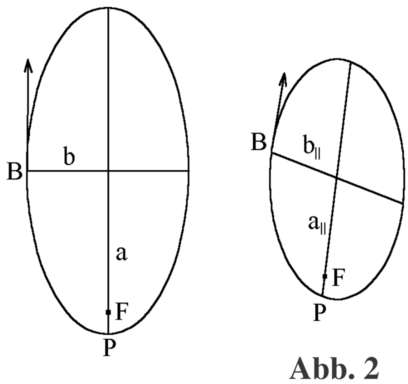


Abb. 2

Aufgabe 3: *Um die tatsächliche Halbachse a der Bahnkurve auszurechnen, muss man den Winkel α berechnen, um den die Halbachse im Bezug zur Himmelsebene geneigt ist (vgl. Abb. 3). Dieser Winkel lässt sich mit Hilfe einer Messung der Radialgeschwindigkeiten von S2 im Jahre 2004 bestimmen. Die Messwerte wurden in unmittelbarer Nähe zum Punkt B aufgenommen, wo der Geschwindigkeitsvektor v parallel zur großen Halbachse a ist (vgl. Abb. 2). Wir müssen daher im Punkt B die radiale Geschwindigkeit $v_\perp$ (in Richtung des Beobachters) und die Geschwindigkeit $v_{||}$ in der Himmelsebene ermitteln. Bestimmen Sie zunächst aus zwei Messpunkten des Jahres 2004 in Abb.3 die Geschwindigkeitskomponente $v_{||}$.*

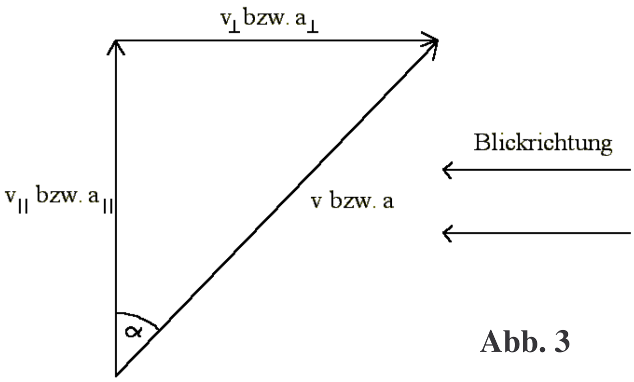


Abb. 3

Aufgabe 4: *Zur Bestimmung der radialen Geschwindigkeitskomponente $v_\perp$ verwendet man den Doppler-Effekt der Brackett-γ-Linie des Wasserstoffs. In der äußeren Hülle des Sterns S2 befindet sich Wasserstoff, der diese Linie absorbiert, die allerdings aufgrund dessen radialer Geschwindigkeit verschoben ist. Berechnen Sie die unverschobene Linie mit der Rydberg-Frequenz unter Berücksichtigung der Mitbewegung des Protons (in der Brackett-Serie ist die Quantenzahl des Grundniveaus $n = 4$)*

Aufgabe 5: *Ermitteln Sie aus dem vom VLT im Juli 2004 aufgenommenen Spektrum in Abb. 4 das Absorptionsmaximum, welches aufgrund der Geschwindigkeit von S2 verschoben ist. Berechnen Sie daraus mit der Doppler-Formel für elektromagnetische Wellen die Komponente $v_\perp$.*

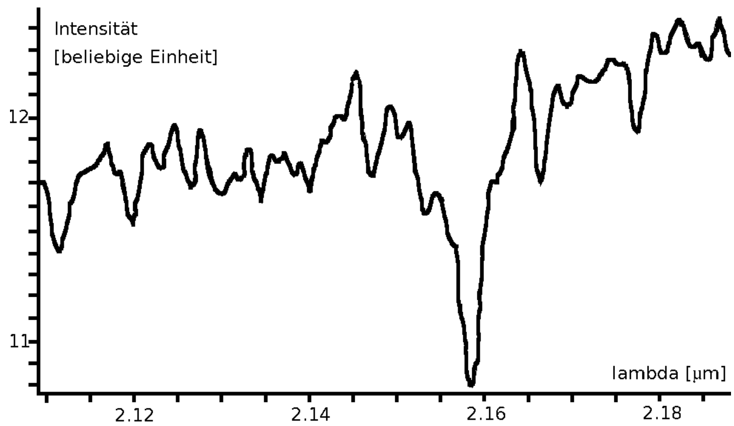


Abb. 4

Aufgabe 6: *Berechnen Sie mit den Ergebnissen von Aufgabe 3 und 5 den Winkel α der großen Halbachse in Abb. 3 mit der Himmelsebene und daraus die tatsächliche Halbachse a der Kepler-Ellipse von S2.*

Aufgabe 7: *Bestimmen Sie aus Abb. 1 die Umlaufdauer von S2.*

Aufgabe 8: *Berechnen Sie aus den Ergebnissen von Aufgabe 6 und 7 die Masse des Zentralgestirns SgrA*. Wie viele Sonnenmassen enthält es? Beachten Sie, dass nach dem dritten Keplerschen Gesetz die Umlaufdauer nur von der großen Halbachse a abhängt, d.h. sie ist genauso groß wie bei einer kreisförmigen Umlaufbahn mit demselben Radius.*

Aufgabe 9: *Schätzen Sie die Entfernung von S2 zu SgrA* im Periastron ab, vergleiche mit der Größe unseres Sonnensystems und geben Sie damit eine obere Grenze für die Größe von SgrA* an.*

Aufgabe 10: *Nach der AR kann selbst Licht, welches innerhalb des sogenannten Schwarzschild-Radius R_S ausgesandt wird, nicht mehr dem Schwarzen Loch entkommen. Berechne den Schwarzschild-Radius von SgrA* nach der Formel $R_S = 2\gamma M/c^2$ und vergleichen Sie mit dem Sonnenradius.*

Aufgabe 11: *Stellen Sie eine Formel für die Dichte eines Schwarzen Loches in Abhängigkeit von seiner Masse auf. Berechne die Dichte von SgrA* bzw. eines stellaren Schwarzen Loches von zehn Sonnenmassen.*

Aufgabe 12: *Zur Überprüfung der AR ist es wesentlich, die unmittelbare Umgebung eines Schwarzen Loches und die dort ablaufenden Prozesse zu untersuchen. Nach der AR sind Kreisbahnen um eine Punktmasse nicht wie in der Newtonschen Mechanik bis zu beliebig kleinen Radien stabil. Wenn der Radius kleiner als der dreifache Schwarzschildradius R_S ist, so stürzt die Materie in das Schwarze Loch. Solch ein Prozess, bei dem Gravitationsenergie zum Teil als Strahlung ausgesandt wird, wurde vermutlich am 16. Juni 2003 als ein sogenannter Flare (to flare: engl. aufleuchten) an der Position von SgrA* beobachtet, vgl. Abb. 5a und 5b. Man vermutet, dass bei einem solchen Aufleuchten eine Ansammlung von heißem relativistischem Gas unmittelbar um das schwarze Loch kreist, bevor es hinter dem Ereignishorizont verschwindet. Dies erklärt die periodischen Strukturen im zeitlichen Verlauf des Flares in Abb. 6: Während der relativen Strahlungsmaxima befindet sich das Gas von uns aus gesehen vor dem Schwarzen Loch, während der Minima befindet es sich dahinter, so dass die Strahlung abgeschirmt wird. Nehmen Sie an, dass sich das Gas während des Flares mit Lichtgeschwindigkeit auf einer Kreisbahn um das Schwarze Loch bewegt und schätzen Sie daraus den Abstand der letzten „stabilen" Kreisbahn ab.*

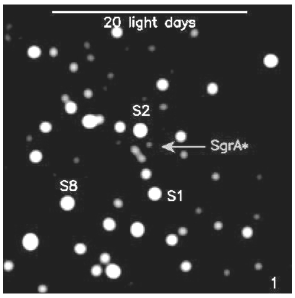


Abb. 5a

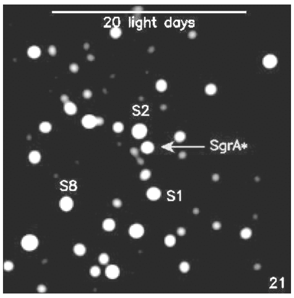


Abb. 5b

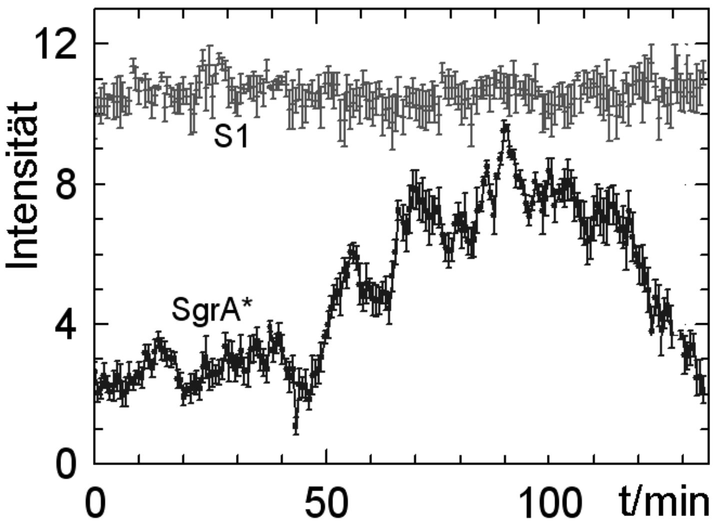


Abb. 6

Aufgabe 13: *Welcher Anteil der Masse unserer Milchstraße hat das zentrale schwarze Loch SgrA*. Schätzen Sie die Masse der Milchstraße aus der Tatsache, dass die äußersten Sonnen das Zentrum unserer Galaxis im Abstand von etwa 50000 Lichtjahren mit einer Geschwindigkeit von etwa 150 km/s umkreisen.*

Aufgabe 14: *Berechne die Gravitationsrotverschiebung von S2 durch das Schwarze Loch SgrA* mit Hilfe der Formel $\Delta f/f = -M\gamma/rc^2$.*