

Die Physik gilt auch ausserhalb des Sonnensystems

Fritz Gassmann, 5412 Vogelsang, gassmann@bluewin.ch

Der folgende Artikel wurde aus der **Vierteljahrsschrift 3|2020** Seiten 16 - 19 der **Naturforschenden Gesellschaft in Zürich** (www.ngzh.ch) entnommen. Die detaillierte Berechnung der wahren Ellipse von Sirius B wird als Zusatz im DMK-Teil des vorliegenden Bulletins wiedergegeben.

Die im NGZH-Neujahrsblatt auf das Jahr 1933 mit dem Titel “Aus der neueren Astronomie” beschriebenen Beobachtungen zum Siriusbegleiter bilden einen Durchbruch für unser Verständnis des Kosmos. Sie sind Vorläufer der spektakulären Entdeckungen der vergangenen Jahre wie Exoplaneten, Neutronensterne und Schwarze Löcher.

1 Sirius A, der hellste Stern in klaren Winternächten

Der etwa 240 Millionen Jahre junge Sirius A (Alpha Canis Majoris, Hundstern) strahlt 26 mal stärker als unsere Sonne und ist nur 8,6 Lichtjahre entfernt. Lediglich 4 ältere und kleinere Sterne sind uns näher. Die absolute Entfernung ist durch Messung der Parallaxe sehr genau bekannt: die Amplitude der Veränderung der Sternposition durch den jährlichen Umlauf der Erde um die Sonne beträgt 0,379 Bogensekunden. Mit Hilfe des Erdbahnradius von 150 Millionen Kilometern kann die Distanz trigonometrisch bestimmt werden. Messungen der Relativbewegung von Sirius A gegenüber der Sonne zwischen 1750 und 1850 haben gezeigt, dass diese nicht gleichmässig ist, sondern kleine Schwankungen mit einer Periode von rund 50 Jahren aufweist. Der deutsche Mathematiker und Astronom Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) hat daraus gefolgert, dass ein unsichtbarer Begleiter (Sirius B) existieren muss, der den Hauptstern alle 50 Jahre umkreist. Abb. 1 zeigt eine moderne Aufnahme des Sirius mit seinem Begleiter.

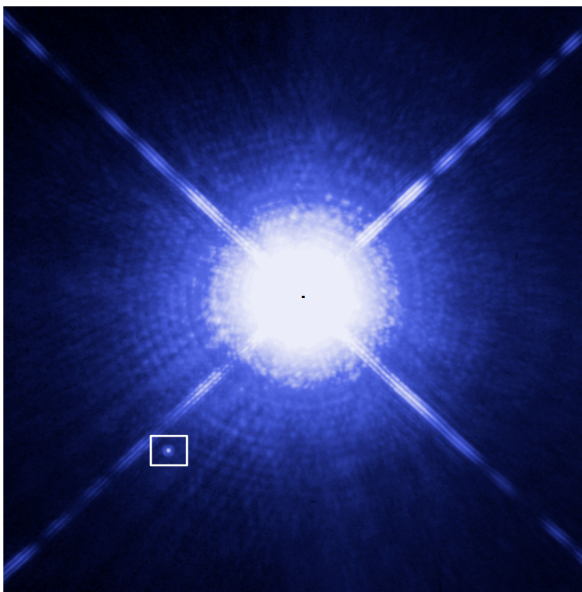


Abbildung 1 – Aufnahme von Sirius A (schwarzer Punkt) und Sirius B (im weissen Quadrat) durch das Hubble Weltraumteleskop am 15. 10. 2003. Durch die lange Belichtungszeit wurden über 100 Interferenzringe um Sirius A herum sichtbar (vgl. dazu Gassmann 2019a), wobei durch die Überbelichtung des 10'000 mal helleren Sirius A die inneren Ringe miteinander verschmolzen. Mit unendlich guter Auflösung würde Sirius A genauso punktförmig erscheinen wie Sirius B. Die vier Strahlen sind Diffraktionserscheinungen, verursacht durch die kreuzförmige Aufhängung des Sekundärspiegels über dem Zentrum des 2,4 Meter Hauptspiegels des Hubble-Teleskops. Die Distanz zwischen den beiden Sternen war rund 6 Winkelsekunden entsprechend 16 Erdbahnradien.

Bild: NASA/ESA, H. Bond, M. Barstow, CC BY 3.0

2 Entdeckung von Sirius B

Bessels Schüler, Christian August Friedrich Peters (1806-1880), berechnete aus rund einem Dutzend durch verschiedene Astronomen gemessenen Abweichungen des Sirius A von einer geradlinig gleichförmigen Bahn die am besten passende elliptische Bahn des vermuteten Begleiters in Bezug auf den Hauptstern (Peters 1851). Abb. 2 zeigt die beobachteten Schwankungen der Rektaszension von Sirius A, die einen Teil der Grundlagen bildete, auf denen Peters seine Bahnberechnungen für den Begleiter stützte. Die durchgezogene Kurve zeigt die Werte der Rektaszension, die auf Grund der berechneten wahrscheinlichsten Bahn des Begleiters entstehen würden. Diese Abbildung findet sich jedoch nicht in der Publikation von Peters und dürfte eine spätere Rekonstruktion darstellen. Man beachte, dass Peters dieselbe Methode anwendete, die rund 140 Jahre später zur Entdeckung des ersten um einen sonnenähnlichen Stern kreisenden Exoplaneten führte (Gassmann 2019b) und mit dem Physik-Nobelpreis 2019 ausgezeichnet wurde.

Alvan Graham Clark (1832-1897), ein Astronom und Teleskophersteller aus Massachusetts (USA), testete Ende Januar 1862 einen neuen 470 Millimeter Teleskopspiegel mit Hilfe des hellen Sirius. Dabei entdeckte er zu seiner Überraschung in rund 10 Bogensekunden Abstand einen schwachen Lichtpunkt, der im Sirius-bezogenen Koordinatensystem nur 0,8 Grad von der durch Peters 11 Jahre zuvor prognostizierten Position abwich: Sirius B wurde zum ersten Mal beobachtet!

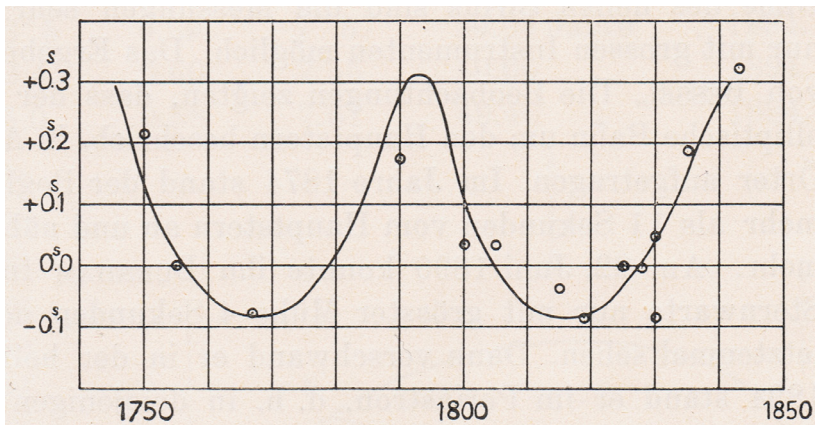


Abbildung 2 – Beobachtete Rektaszensionen von Sirius A mit bestem Fit ausgehend von der Hypothese, dass die Schwankungen von einem Begleitstern verursacht werden. Beim schmalen Kurvenmaximum im Jahr 1793 sind sich die beiden Sterne am nächsten (Periastron) und haben deshalb die grösste Relativgeschwindigkeit. Bei den beiden Minima sind sie am weitesten

voneinander entfernt (Apastron) und drehen sich langsamer um den gemeinsamen Schwerpunkt, der sich gleichförmig geradlinig im All fortbewegt.

(Abb. 7 im NGZH-Neujahrsblatt auf das Jahr 1933)

3 Die Bahn des Sirius B

Sofort wurde der Ort des Sirius B relativ zum Hauptstern viel und sorgfältig gemessen. Dabei wurde die Vermutung von Bessel bestätigt, dass der Begleiter in 50 Jahren (heutiger Wert: 50,052 Jahre) eine elliptische Bahn um den Hauptstern beschreibt. Abb. 3 zeigt die Beobachtungsreihe über 70 Jahre ab dem Entdeckungsjahr 1862. Die Lücke zwischen 1890 und 1895 links im Bild ist darauf zurückzuführen, dass Sirius B vom Hauptstern in Periastronnähe überstrahlt wird und deshalb nicht beobachtbar ist (vgl. dazu Abb. 1). Trotzdem liess sich aus den beobachteten Positionsmessungen sehr genau die scheinbare Bahnellipse von Sirius B relativ zu Sirius A bestimmen. Man konnte auch die scheinbare Bahnellipse von Sirius A um den Schwerpunkt der beiden Sterne aus Ortsbestimmungen wie in Abb. 2 dargestellt. Durch Superposition der beiden Ellipsen liess sich die scheinbare Bahnellipse von Sirius B um den Schwerpunkt des Systems bestimmen. Die Umrechnungen gestalteten sich einfach, da die drei Ellipsen zueinander ähnlich sind. Um die gemeinsame Ebene der scheinbaren Ellipsen so zu drehen, dass sie in frontaler Sicht erscheinen, wurde die in Abb. 3 blau gestrichelt dargestellte Ellipse im Raum so gedreht, dass Sirius A in den Fokus zu liegen kommt

und die beiden Hauptachsen senkrecht aufeinander stehen. Die interessante Aufgabe in analytischer Geometrie zum Thema *affine Abbildungen* findet sich im DMK-Teil des vorliegenden Bulletins und liefert praktisch dieselben wahren Bahnelemente, wie sie im Neujahrsblatt angegeben werden. Zusammen mit der bekannten absoluten Entfernung des Sirius-Systems konnten die absoluten Achsenlängen der Ellipsenbahnen in Metern berechnet werden. Mit Hilfe der Keplerschen Gesetze war es schliesslich möglich, auch die Massen der beiden Sterne zu bestimmen. Man erhielt für Sirius A 2,5 und für Sirius B 1,0 Sonnenmassen. Ihr Verhältnis 2,5 spiegelt sich im Verhältnis der grossen Achsen von $1/2,5$ der beiden Ellipsen von Sirius A und Sirius B um den gemeinsamen Schwerpunkt. Die heutigen Werte für die Massen betragen 2,12 und 0,98 Sonnenmassen mit einem Verhältnis von 2,16.

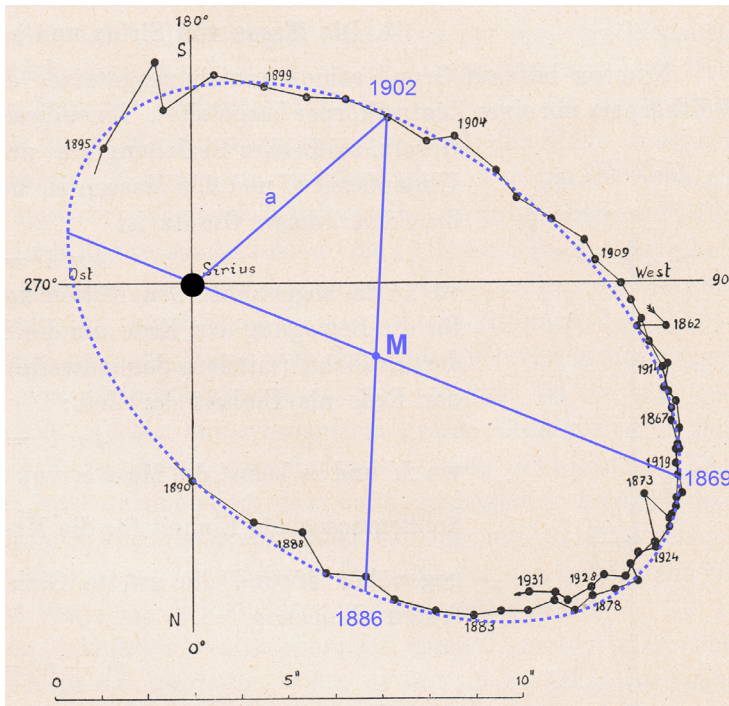


Abbildung 3 – Beobachtungen der Bahn von Sirius B relativ zu Sirius A über 70 Jahre (1862-1931). Blau eingezeichnet ist die angenäherte Ellipse mit Mittelpunkt M. Die projizierte grosse Achse der wahren Ellipse geht durch M und den Brennpunkt (Sirius A). Das Apastron wurde 1869 und 1919 erreicht. Die Endpunkte der kleinen Achse müssen so liegen, dass die Zeitdifferenzen zum Apastron gleich gross sind (17 Jahre). In der wahren Ellipse stehen die beiden Achsen senkrecht aufeinander und die Länge der Verbindungslinie a ist gleich der Länge der grossen Halbachse. Mit Hilfe dieser zwei Bedingungen konnten die Bahndaten der wahren Ellipse um die 1920er Jahre berechnet werden. Der Längenmassstab ist unten in Bogensekunden angegeben.

(Abb. 10 NGZH Neujahrsblatt auf das Jahr 1933, blaue Linien durch den Autor ergänzt)

4 Überraschende Dichte von Sirius B

Sirius B hat also über zweimal weniger Masse als Sirius A, leuchtet aber rund 10 Helligkeitsklassen oder einen Faktor 10'000 weniger stark. Sein Spektrum zu bestimmen war aufgrund der Überstrahlung durch den hellen Sirius A sehr schwierig, gelang jedoch 1914 mit dem 1,5-Meter-Teleskop der Mount-Wilson-Sternwarte (USA) und ergab ein erstaunliches Resultat. Sirius B ist nicht wie erwartet ein relativ kalter roter Zwergstern, sondern ein sehr aktiver Stern mit einer hohen Oberflächentemperatur von vielleicht etwa 8'000 Kelvin (der heutige Wert beträgt sogar 25'000 Kelvin, unsere Sonne hat rund 6'000 Kelvin). Daraus konnte gefolgert werden, dass der Radius von Sirius B nur 3% des Sonnenradius betragen konnte und dies bei derselben Masse wie die Sonne! Die Dichte von 52'000 mal derjenigen von Wasser kam den damaligen Astronomen schlicht absurd vor: Ein Kubikzentimeter würde auf der Erde 52 Kilogramm wiegen!

Es ist verständlich, dass man bestrebt war, eine unabhängige Bestätigung für diese Dichte zu finden, was 1925 mit dem damals neuen 2,5-Meter-Teleskop der Mount-Wilson-Sternwarte gelang. Mit 40 Minuten Belichtungszeit konnte das Spektrum von Sirius B so genau beobachtet werden, dass zwei Wasserstoff- und einige andere Linien vermessen werden konnten. Nach Einsteins 1916 veröffentlichter Allgemeiner Relativitätstheorie muss die enorme Gravitationskraft an der Oberfläche von Sirius B die Spektrallinien gegen längere Wellen verschieben (sog. Gravitations-Rotverschiebung,

vgl. Gassmann et al. 2020: 64-66). Die theoretisch erwartete Verschiebung stimmte mit den Messungen auf wenige Prozent genau überein, was die Akzeptanz der riesigen Dichte entscheidend erhöhte.

5 Versuche von physikalischen Erklärungen für die Dichte von Sirius B

Trotz erdrückender experimenteller Beweise wagte man lange nicht, die ausserordentlich grosse Dichte von Sirius B ernst zu nehmen, bis der bekannte englische Astronom Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) zeigte, wie so grosse Dichten physikalisch möglich sind. Im Innern von Sternen haben die Atome aufgrund der hohen Temperaturen riesige thermische Geschwindigkeiten. Bei entsprechend heftigen Zusammenstössen verlieren sie einen Teil ihrer Elektronen, werden deshalb kleiner und können näher zusammenrücken. Seine Abschätzungen zeigten, dass noch wesentlich grössere Dichten möglich wären, wenn die Atomkerne alle Elektronen verlieren würden und die Protonen durch Aufnahme von Elektronen in Neutronen umgewandelt würden. Die zu dieser Zeit formulierte Quantentheorie ermöglichte zudem genauere Berechnungen von Elektronengasen und entarteten Gaszuständen. Heute kennt man viele Neutronensterne in unserer Galaxie, die eine über 10 Milliarden mal grössere Dichte haben als Sirius B und ab einer kritischen Masse zu Schwarzen Löchern werden können. Diese kritische Masse liegt über 2 und unter 5 Sonnenmassen, also in der in Abb. 4 gezeigten Lücke zwischen den bekannten Neutronensternen (gelbe Punkte) und Schwarzen Löchern (violette und blaue Kreisflächen).

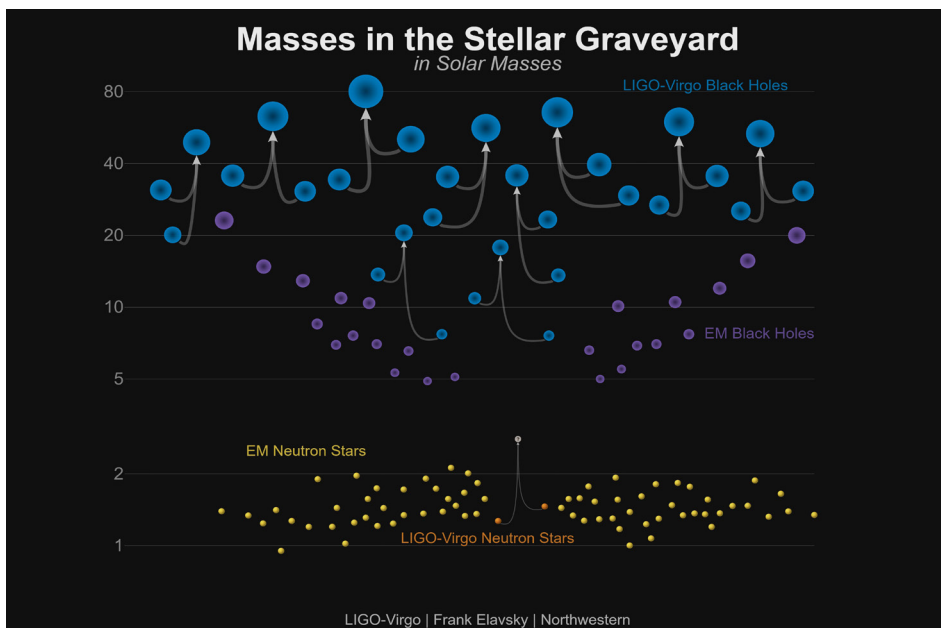


Abbildung 4 – Durch die Gravitationswellen-Observatorien LIGO und Virgo beobachtete Verschmelzungen von 20 schwarzen Löchern zu 10 grösseren schwarzen Löchern (blau). Ihre Massen sind durch die logarithmische Skala zwischen 1 und 80 Sonnenmassen links in der Abbildung gegeben. In violetter Farbe sind 24 Schwarze Löcher eingezeichnet, die bereits früher mittels Röntgen-Satelliten beobachtet wurden.

Die Röntgenstrahlung wird erzeugt durch Materie, die in ein Schwarzes Loch fällt. Man sieht, dass die Schwarzen Löcher, die durch Gravitationswellen beobachtet wurden, schwerer sind als diejenigen, die mit Röntgenstrahlung detektiert wurden. Dies ist möglicherweise auf die Beobachtungsmethoden zurückzuführen. Letztere befinden sich in unserer Galaxie oder in der benachbarten Andromeda und durch Röntgenstrahlung können nur Schwarze Löcher beobachtet werden, die von Materie umgeben sind. Die durch Gravitationswellen detektierten Schwarzen Löcher sind wesentlich weiter entfernt. Im unteren Teil der Abbildung sind Massen von Neutronensternen wiedergegeben, die sich in unserer Galaxie befinden (gelb). Die weit ausserhalb der Milchstrasse beobachtete Kilonova GW170817 (orange in der Mitte) wurde durch Gravitations- wie auch durch elektromagnetische Wellen beobachtet. Es ist noch offen, ob aus der Kollision der zwei Neutronensterne ein Schwarzes Loch oder ein massiverer Neutronenstern entstand.

Grafik: LIGO Collaboration, LIGO-Virgo, Frank Elavsky, Northwestern Univ.
Weitere Erklärungen in Gassmann et al. 2020: 44-72.

6 Gelten die physikalischen Gesetze überall?

Sir Isaac Newton konnte bereits 1687 zeigen, dass die drei Kepler-Gesetze streng mathematisch aus seiner Bewegungsgleichung und seinem Gravitationsgesetz abgeleitet werden können. Obwohl die meisten späteren Astronomen kaum Zweifel hegten, dass dieselben physikalischen Gesetze auch ausserhalb des Sonnensystems im ganzen Universum und zu allen Zeiten gegolten haben dürften, war dies eine naheliegende aber unbewiesene Hypothese. Die Beobachtungen des Sirius-Systems zeigten erstmals, dass sich die beiden Sterne selbst in 8,6 Lichtjahren Entfernung genauso wie die Planeten um die Sonne bewegten. Es wäre aber immer noch möglich gewesen, dass sie aus anderen Elementen als die Körper im Sonnensystem bestehen würden. Die Beobachtung ihrer Spektren zeigten aber, dass auch dies nicht zutrifft. Aber das Erstaunlichste ist, dass man sich seit der Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie 1916 und der Quantentheorie 1926 mehr auf diese grundlegenden Theorien verlassen konnte als auf den „gesunden Menschenverstand“. Ein erstes Beispiel dafür war die unvorstellbare Dichte von Sirius B, die dem menschlichen Vorstellungsvermögen, nicht aber der Relativitätstheorie (Gravitations-Rotverschiebung) und der Quantenmechanik (entartete Gase und Chandrasekhar-Grenze, vgl. Gassmann et al. 2020: 27f.) Probleme bereitete! Weitere spätere Beispiele dafür sind Neutronensterne, Schwarze Löcher, die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, Supernovae, die beschleunigte Ausdehnung des Universums, etc.. Zu Recht betonte William Otto Brunner (1878-1958), der Autor des Neujahrsblattes 1933, diese Erkenntnis: „Die Entdeckung zeigte, dass wenigstens in erster Annäherung das Gravitationsgesetz auch im Bereich der Fixsterne gilt.“ Später bemerkt er: „Das Ergebnis ist sehr wichtig. Es bedeutet, wenn es richtig ist, eine astronomische Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie und gleichzeitig beweist es die Existenz von Zwergsternen von ausserordentlich grosser Dichte.“ Brunner war von 1926-1945 Direktor der Eidgenössischen Sternwarte in Zürich, die beim ETH-Zentrum liegt. Er publizierte viele Beobachtungen zu Sonnenflecken und später auch zwei Bücher für Astronomie-Interessierte.

Der Autor dieses Artikels ist Physiker mit Fachgebiet Modellierung komplexer Systeme, ehem. Paul Scherrer Institut und FHNW Brugg-Windisch, seit 2017 Präsident der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich www.ngzh.ch

Literatur

Heutige Messdaten entnommen aus Wikipedia unter Stichwort „Sirius“.

Gassmann F. 2019a. Von der Lochkamera zum Event Horizon Telescope. Vierteljahrsschrift NGZH 164(2): 6-9. Download: www.ngzh.ch/publikationen/vierteljahrsschrift

Gassmann F. 2019b. Der grosse Erfolg der Schweizer Planetenjäger. Vierteljahrsschrift NGZH 164(4): 8-10. Download: www.ngzh.ch/publikationen/vierteljahrsschrift

Gassmann F. et al. 2020. Kometen, Supernovae und Gravitationswellen. Neujahrsblatt NGZH 222: 72p.

Peters C. A. F. 1851. Über die eigene Bewegung des Sirius. Astron. Nachr. 32: 1-58.