

Vorwort des Herausgebers

Der zehnte Band der Reihe „Quanten“ enthält die Vorträge auf der Mitgliederversammlung der Heisenberg-Gesellschaft am 15. Oktober 2021. Die Veranstaltung fand nach der COVID-19-Pandemie im Hybridformat in einem Hörsaal der Ludwigs-Maximilians-Universität statt, wobei eine Zuschaltung via Internet möglich war. Zwei komplementäre Themen wurden vorgetragen und lebhaft diskutiert: „Galaxien und Schwarze Löcher“ waren das Thema von Reinhard Genzel, während Klaus Hentschel über „Die allmähliche Herausbildung des Konzepts von Lichtquanten“ vortrug. Nach den Vorträgen hatten die ange-reisten ca. 50 Schüler und Schülerinnen Gelegenheit, ausgiebig mit den Referenten zu diskutieren – dies wurde sehr gut ange-nommen und blieb allen Beteiligten in Erinnerung!

Wir haben dieses Buch ergänzt mit einer Rede, die Werner Heisenberg 1971 zur Einweihung des Werner-Heisenberg-Gymnasiums in Garching hielt. Darin schildert er anschaulich, „... wenn Ihr mich kennen lernen wollt, dass ich aus meiner

eigenen Schulzeit erzähle und erzähle, wie ich von den Dingen, die ich in der Schule getrieben habe, so langsam in die Interessengebiete reingekommen bin, die mich dann später im Lauf meines Lebens beschäftigt haben“.

München, Dezember 2023

JOHANNES BLÜMER

VORSITZENDER DER HEISENBERG-GESELLSCHAFT

REINHARD GENZEL
JOHANNES BLÜMER*

Galaxien und Schwarze Löcher

In diesem Vortrag möchten wir von einer vierzigjährigen Reise erzählen, die eine persönliche Geschichte, aber auch eine Geschichte der modernen Physik ist, in der wir die Allgemeine Relativitätstheorie mehr als 100 Jahre nach ihrer Formulierung verifizieren können.

Nach einer sehr langen Zeit ist jetzt in drei verschiedenen Feldern der Knoten geplatzt: in der Gravitationswellenforschung, in der Radioastronomie und bei uns in der hochaufgelösten Infrarotastronomie. Wir können nun Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie in Regimes überprüfen, die bislang nicht zugänglich waren: Effekte bei großen Krümmungen des Gravitationsfeldes, in relativistischen Bereichen, oder Beobachtungen zur Existenz der von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Schwarzen Löcher und ihrer Rolle im Universum.

Unsere Milchstraße

Fangen wir an mit einer kleinen Reise durch das Universum. In Abb. 1 sehen wir eine klassische Aufnahme mit dem Hubble-Weltraumteleskop, die ausgewählte weit entfernte Galaxien mit unterschiedlichen Formen zeigt; die Galaxien haben typischerweise einen Durchmesser von ungefähr 100.000 Lichtjahren. Unsere Milchstraße ist eine von den größeren, so genannten Scheibengalaxien und hat etwa 100 Milliarden Sterne. Sie besteht wie viele dieser weit verstreuten Welteninseln aus überwiegend dunkler Materie – auf großen Skalen sind nur 14 % des gesamten Materieinhalts baryonischer Natur.

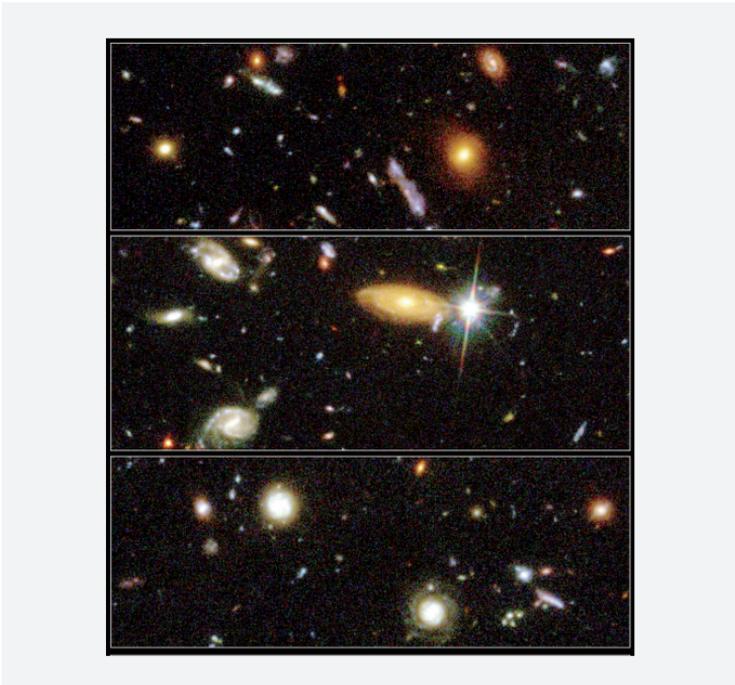


Abb. 1: Klassische Aufnahme von ausgewählten fernen Galaxien mit dem Hubble-Weltraumteleskop (Deep Field 1995).

Da wir uns innerhalb der galaktischen Scheibe befinden, können wir die Geometrie der Milchstraße nicht direkt erfassen. In Abbildung 2 ist daher eine wiederum klassische Aufnahme der Andromeda-Galaxie gezeigt, die mit unserer Milchstraße große Ähnlichkeiten aufweist. Wenn wir in die Milchstraße hineinfliegen, sehen wir ungefähr 27.000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt unsere Sonne. Wir erkennen schwarze Schleier, interstellare Materie, die in dünner Form als Staub und Gas zwischen den Sternen verteilt ist; dies ist quasi die Suppe, aus der sich neue Sterne bilden können.



Abb. 2: Detailaufnahme der Andromeda-Galaxie, die unserer Milchstraße sehr ähnlich sieht.

Die ersten Milchstraßensysteme bildeten sich bereits etwa eine Milliarde Jahre nach dem Urknall. In der kosmischen Expansion hat die Dunkle Materie sozusagen Potenzialtöpfe gebildet, in denen sich die Baryonen ansammelten, sich verdichteten und schließlich zu Sternen wurden. In der Vergangenheit, man könnte sagen in der Blüte ihrer Zeit vor etwa 10 Milliarden Jahren, hat unsere Milchstraße bis zu 100 Sonnen pro Jahr gebaut. Heute ist es eine etwas langsamere kosmische Fabrik geworden, die etwa zwei Sonnenmassen pro Jahr baut. Wenn wir das in die Zukunft weiter extrapolieren, wird es immer langweiliger, wenn man so will, einfach weil nicht mehr genügend Gas in das Zentrum kommt.



Abb. 3: Zentraler Bereich der Milchstraße.

Das Galaktische Zentrum

Kommen wir auf unserer Reise in die dichteren Gebiete im Zentrum unserer Milchstraße, sehen wir neben den Sternen auch dichtes, ionisiertes atomares und molekulares Gas, plus etwa 1 % Staubteilchen (die aber aufgrund ihrer effizienten Absorption von ultraviolettem und optischem Licht das Erscheinungsbild von Galaxien im optischen Bereich stark beeinflussen oder gar dominieren).

Im eigentlichen innersten Bereich, nur mehr ein halbes Lichtjahr vom Zentrum entfernt, sehen wir auf einmal etwas Neues: eine Radioquelle, die wir Sagittarius A* nennen. Sie wurde schon 1951 von Piddington und Minnett entdeckt¹. In einem klassischen Papier² argumentierten Oort und Rougoor 1960: „Im Hinblick auf die gegebene Evidenz erscheint es ziemlich sicher anzunehmen, dass Sagittarius A als das Galaktische Zentrum identifiziert werden kann.“

Darüber hinaus wird seit längerer Zeit vermutet, dass das ein Schwarzes Loch sein könnte, ein Objekt mit etwa vier Millionen Mal der Masse unserer Sonne.

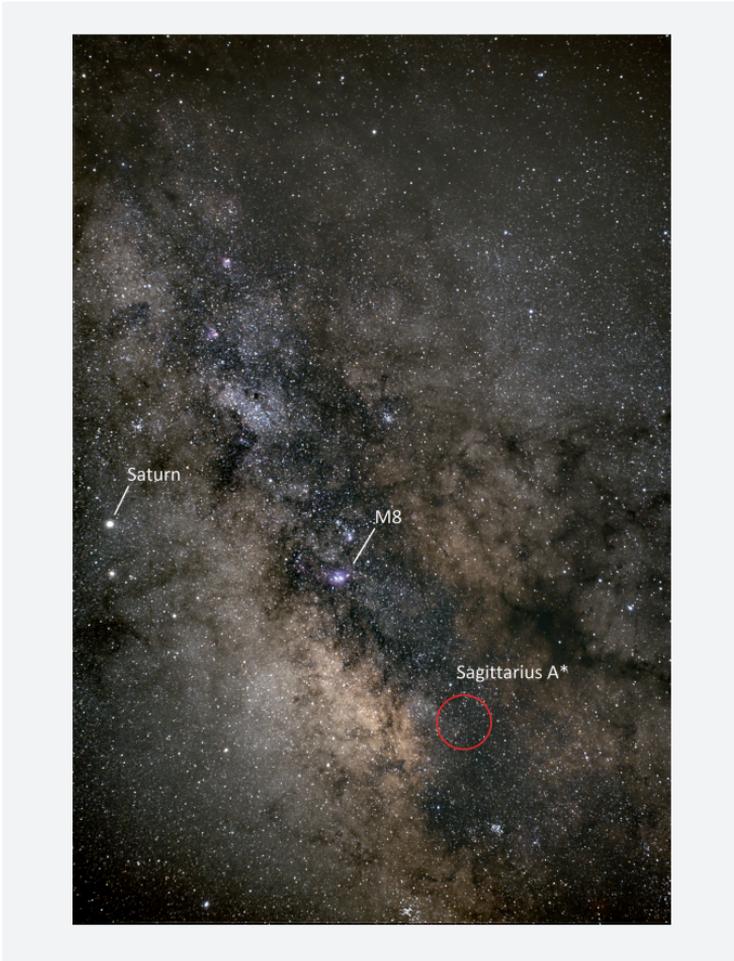


Abb. 4: Sagittarius A* am Südhorizont in sichtbarem Licht.

Schwarze Löcher und Allgemeine Relativitätstheorie

Unsere Forschung konnte dies jetzt experimentell bestätigen und verifizieren. Wenn wir noch weiter fliegen, in den Ereignishorizont dieses Schwarzen Lochs hinein, so sagt die Allge-

meine Relativitätstheorie, dass dann auch diese Reise zu Ende ist. Keine Rückkehr ist möglich, das Ticket ist verfallen. Im Zentrum dieses Schwarzen Lochs werden wir in einer endlichen Eigenzeit ankommen und dort, wie alles andere, was in das Schwarze Loch hineingeflogen ist, in einer Singularität verschwinden. Diese Überlegungen basieren auf der Allgemeinen Relativitätstheorie, wie sie Albert Einstein vor 107 Jahren im Harnackhaus in Berlin vorhergesagt hatte, und wo bereits ein Jahr später Schwarzschild die Existenz Schwarzer Löcher abgeleitet hatte.

Mit der Einführung der Allgemeinen Relativitätstheorie ging Einstein weit über das hinaus, was Newton und Kepler und alle vorhergehenden Wissenschaftler gemacht haben. Er vereinigte auf der einen Seite die Gravitation von Massen, die miteinander über die Schwerkraft wechselwirken, mit den Eigenschaften des Lichtes.

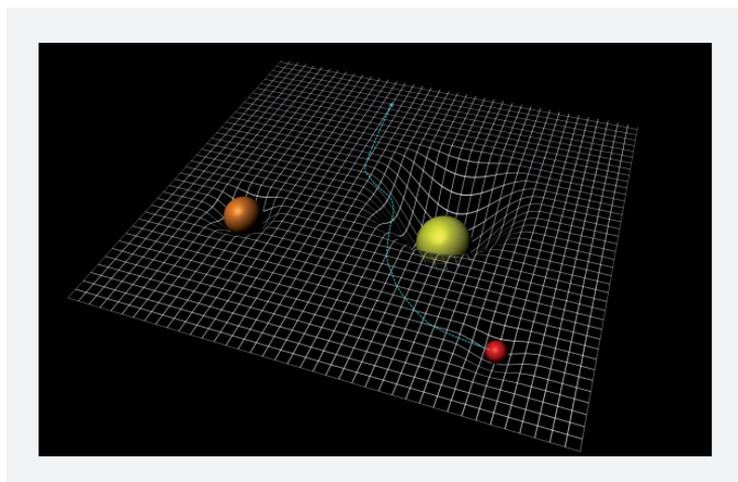


Abb. 5: Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie verzerren Massen den Raum und beeinflussen so die Bewegungen anderer Massen in ihrer Umgebung.

In Newtons Theorie haben die beiden nichts miteinander zu tun. Aber in Einsteins Beschreibung spürt das Licht auch die Gravitation. Dies war eine der ganz charakteristischen ersten Vorhersagen der neuen Theorie. Diese Theorie beschreibt die Natur in einer vierdimensionalen Raumzeit. Wenn wir hier unterschiedliche Massen in einem dreidimensionalen Raum haben (Abb. 5), so beeinflusst jede dieser Massen die Struktur der Raumzeit in ihrer Umgebung.

Eine weitere, kleine Masse würde laut Newton auf einer Bahn, einer Geodäte, um die großen Massen laufen. Einstein leitete nun ab, dass auch das Licht ganz ähnlich durch die Massen abgelenkt werden kann. Diese Vorhersage konnte sehr bald überprüft werden. Schauen wir einen Stern, der hinter der Sonne liegt, während einer Sonnenfinsternis an, so würde Newton sagen, dass die Lichtstrahlen radial nach außen gehend zu uns kommen. Wir sehen dann den Stern entweder nicht oder direkt an der Sonne. Die Allgemeine Relativitätstheorie dagegen sagt, dass die Gravitation auf diese Lichtstrahlen so wirkt, dass die Bahn der Lichtteilchen gebogen wird und der Stern nicht dort zu sein scheint, wo er tatsächlich ist (Abb. 6). Dieser Unter-

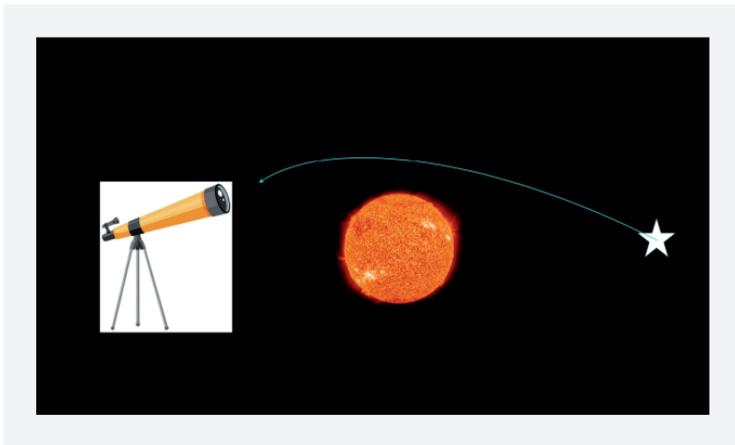


Abb. 6: Ablenkung des Lichts eines Sterns im Gravitationsfeld der Sonne.

schied beträgt beim Abstand der Sonne von der Erde und bei der gegebenen Masse der Sonne nur etwa anderthalb Bogensekunden. Bereits zwei Jahre nach Einsteins Präsentation war eine Sonnenfinsternis im mittleren Atlantik beobachtbar.

Britische Astronomen versuchten, in einem sehr reichen Sternfeld, dessen Verteilung man gut kannte, die Position der Sterne zu beobachten. Und tatsächlich sahen sie, wie sich die Position der Sterne, gerade als der Mond die Sonne verdunkelte, tatsächlich um anderthalb Bogensekunden verschob. Dies war natürlich eine fast instantane Bestätigung für Einsteins Theorie und hat ihn über Nacht berühmt gemacht.

Es gab aber auch noch andere Vorhersagen, zum Beispiel über eine Änderung der Bewegung von sich schnell umkreisenden Massen. Nach der Newtonschen Theorie kreist eine kleinere Masse um eine große zentrale Masse auf einer elliptischen Bahn. Diese Bahn bleibt im Laufe der Zeit erhalten, solange nicht noch ein drittes Objekt dazu kommt. Nicht so in der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt voraus, dass in der Ebene der Bahn des Teilchens sich diese Ellipse nach vorwärts dreht und im Laufe der Zeit eine Rosette beschreibt. Einstein hat nun ausgerechnet, was das für die Planeten bedeutet. Und in der Tat, für den Planeten Merkur ergaben sich 48 Bogensekunden pro 100 Jahre. Und das war genau die sogenannte Periheldrehung des Merkur, die schon bekannt, aber damals nicht erklärbar war. Das Sonnensystem ist ja kein einfaches System, es gibt zahlreiche Planeten, die sich gegenseitig beeinflussen. Aber wenn man diese Einflüsse berücksichtigt, bleibt genau die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte Periheldrehung übrig.

Diese neue Theorie war also sofort sehr erfolgreich. Karl Schwarzschild hatte auch schon gleich zu Beginn erkannt, dass die endliche Lichtgeschwindigkeit und vor allem der Einfluss der Gravitation auf das Licht zu einem neuen Phänomen führt.

Wenn wir auf der Erde nach oben springen, kommen wir ganz schnell wieder auf den Boden der Realität zurück. Weit

kommen wir nicht, auch wenn wir gute Hochspringer wären. Einfach wegen der Gravitation. Wollten wir von der Erde wegfliegen, dann bräuchten wir eine Rakete, die auf eine Geschwindigkeit von mindestens elf Kilometer pro Sekunde beschleunigt. Diese Zusammenhänge hatte Isaac Newton schon 1648 erkannt und in seinem berühmten Werk *Principia* illustriert (Abb. 7).

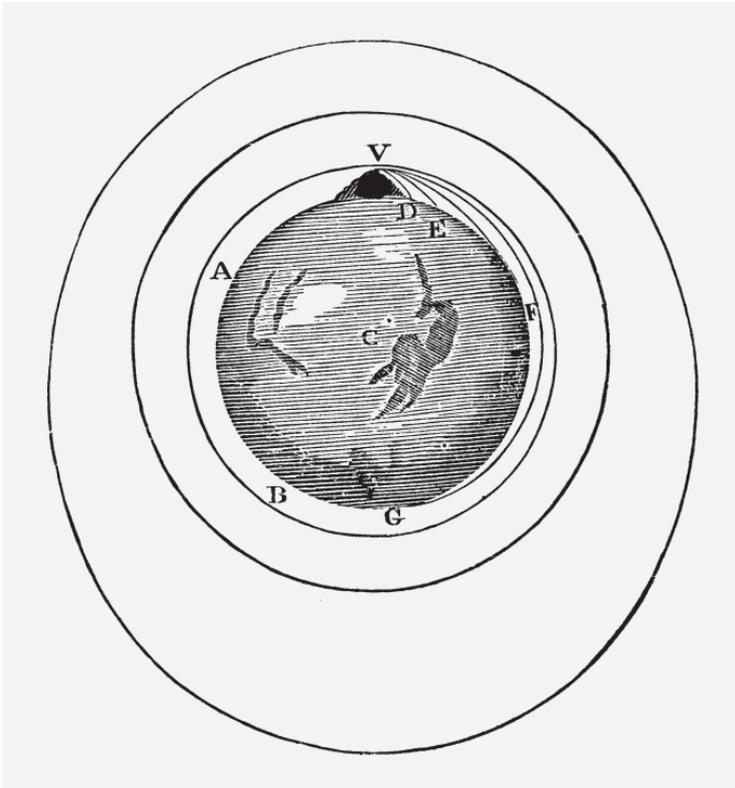


Abb. 7: Illustration aus Newtons *Principia* zur Bewegung von Wurfgeschossen und Umlaufbahnen um die Erde.

Wollten wir von der Sonne wegfliegen, bräuchten wir bereits etwa 600 Kilometer pro Sekunde. Diese mindestens erforder-

liche Entweichgeschwindigkeit hängt ab von der Masse der Sonne, aber auch von ihrer Größe. Als kleine Formelhilfe: Die Entweichgeschwindigkeit skaliert mit der Wurzel aus dem Verhältnis von Masse zu Radius, $v_e \sim \sqrt{M/R}$. Das heißt also, wenn Sie sich jetzt eine fiktive zweite Sonne vorstellen, die die gleiche Masse, aber einen sehr viel kleineren Radius hätte, dann wird die Schwerkraft an der Oberfläche und damit auch die notwendige Entweichgeschwindigkeit größer. Wenn Sie jetzt einmal in Gedanken die Sonne auf drei Kilometer komprimieren würden, dann würde rechnerisch die Entweichgeschwindigkeit der Rakete 300.000 Kilometer pro Sekunde sein – das ist die Lichtgeschwindigkeit! Geht das noch? Wir wissen aus vielen Experimenten, die am Ende des 19. Jahrhunderts durchgeführt wurden, dass im Vakuum die größte maximale Geschwindigkeit der Kommunikation, die Lichtgeschwindigkeit, eine Konstante der Natur ist; das Michelson-Morley-Experiment ist sicher das bekannteste Experiment dieser Art.

Wenn wir unsere fiktive Sonne noch einen Millimeter kleiner machen, dann wäre also die Entweichgeschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit: das geht nicht! Das heißt, wir haben eine Situation, wo eine solche fiktive kleine Sonne einen charakteristischen Radius hat, den Ereignishorizont, innerhalb dessen man nicht mehr mit der Außenwelt kommunizieren kann. Dieser Ereignishorizont beträgt bei der Sonne drei Kilometer und für die Erde ein Zentimeter. Also, wenn man die Erde auf einen Zentimeter komprimieren würde, kann kein Licht mehr von der Erde ausgesandt werden, sie wäre ein so genanntes Schwarzes Loch.

Nach Schwarzschild hat es aber noch eine relativ lange Zeit gedauert, bis Roy Kerr 1963 eine zweite Lösung für Schwarze Löcher gefunden hatte. Die Schwarzschild-Lösung geht ja von einer sehr symmetrischen Anordnung der Materie aus, also sphärische Symmetrie und vor allem keine Rotation. Die Kerr-Lösung nimmt an, dass die Masse sich dreht, also auch einen Drehimpuls hat. Es stellte sich dann heraus, dass es eigentlich

nur drei Zahlen gibt, die man zur Beschreibung Schwarzer Löcher braucht: die Masse, den Drehimpuls und die elektrische Ladung. Die Ladung können wir aber gleich wieder vergessen, sie spielt für Objekte, die wir in der Astronomie anschauen, keine Rolle. Schwarze Löcher sind also offensichtlich ganz einfache Objekte. Wigner hatte das ganz locker ausgedrückt in dem Satz: Schwarze Löcher haben keine Haare. Es gibt keine Hügel, keine Eindellung, die man bräuchte, um das Objekt zu beschreiben, auch wenn es beliebig massiv sein kann. Eine ganz erstaunliche Vorhersage.

Es war in der damaligen Zeit aber auch eine gewisse Skepsis entstanden, ob solche Objekte in der Realität im Universum wirklich vorkommen würden, und ob diese starken Annahmen über die Symmetrie und Rotation wirklich realistische Annahmen waren. Roger Penrose hat dann basierend auf rein topologischen Überlegungen gezeigt, dass es ein solches Schwarzes Loch geben muss, wenn die durch schwere Massen verursachten Dellen der Raumzeit über eine kritische Krümmung hinausgehen. Aus der Relativitätstheorie heraus folgt aber auch, dass die gesamte Masse und alle Energie im Zentrum des Schwarzen Lochs in einer Singularität, quasi in einem Punkt konzentriert ist. Viele Wissenschaftler und nicht zuletzt auch der vor einigen Jahren verstorbene Steven Hawking fragten sich, ob dies denn wirklich so sein kann, wenn man neben der Relativitätstheorie auch noch die Quantenmechanik berücksichtigt. Die sagt uns nämlich, dass zum Beispiel das Elektron nicht nur als punktförmig beschrieben werden kann, sondern auch über einen gewissen Raumbereich ausgedehnt ist.

Die klassische Seite der Allgemeinen Relativitätstheorie führt also zu der Vorstellung, dass die gesamte Masse, die gesamte Energie des Schwarzen Lochs im Zentrum vereint ist. Das bedeutet eine unendlich hohe Dichte und somit eine Singularität. Andererseits verträgt sich die Punkthaftigkeit von Objekten nicht gut mit der Quantentheorie. Wir haben folglich bei der Beschreibung von Schwarzen Löchern ein Problem.

Wenn es tatsächlich solche Schwarzen Löcher im Universum geben würde, möchten wir natürlich an diese Objekte herankommen – im Labor können wir sie leider nicht studieren. Wie machen wir sie denn dingfest, wenn wir sie nicht sehen können? Durch die Gravitation! Denken wir an das Sonnensystem und die Keplerschen Bahnen der Planeten um die Sonne. Wir wissen von den Keplerschen Gesetzen, dass die Umlaufgeschwindigkeiten der Planeten von außen nach innen zunehmen, und zwar mit dem Kehrwert der Wurzel aus dem Abstand von der Sonne. Die inneren Planeten bewegen sich schneller, die äußeren langsamer. Das heißt: Für unsere fiktive Sonne, die ja nicht strahlen würde, können wir dennoch ableiten, dass es im Zentrum ihres Sonnensystems dieses Objekt mit der Masse der Sonne geben müsste, wenn wir die Bahnen der Planeten wie Tycho Brahe vor langer Zeit vermessen würden. Weil die Bewegungsgesetze durch die Schwerkraft vorgegeben sind, man kann Schwarze Löcher über ihre Wechselwirkung mit, wie wir in der Physik sagen würden, Testteilchen in der Umgebung sichtbar machen. Und so können wir auch tatsächlich etwas über die Größe dieses Objekts im Zentrum der Milchstraße sagen.

Und jetzt kommt die nächste frappierende Sache, ein richtiges Paradoxon. Es war im Jahr 1963, als in der Astronomie auf einmal diese Schwarzen Löcher wirklich manifest von Interesse waren: Die Radioastronomen hatten gerade begonnen, Karten vom Radiohimmel zu machen. Dabei fanden sie sehr helle Radioquellen, die sich dann auf optischen Platten als ganz schwache, kleine Sternchen entpuppten. Man nannte sie Quasare, quasi-stellare Radioquellen. Und Maarten Schmidt, ein Astronom am *California Institute of Technology*, hat dann das große Teleskop auf dem Mount Palomar benutzt, um sich das optische Spektrum von einem dieser Quasare anzuschauen.³ Und da sah man, dass da sehr wohl bekannte Linien in diesem Spektrum sind, die sich leicht als Wasserstoff, Helium und so weiter identifizieren ließen. Aber alle Spektrallinien, wie im Beispiel Abb. 8 gezeigt, waren um 16 Prozent rotverschoben!