

Zentrum der Milchstraße, wo sie mit ihm zusammen das gigantische Loch mit vier Milliarden Sonnenmassen entdecken konnten. Klaus H. wiederum machte deutlich, wie sich allmählich die Idee von Lichtqu... herausbildete: Er zeigte auf, wie vielschichtig Einsteins 1905 vorgest... Konzept war und wie dessen Interpretation jahrzehntelang kontrove... tiert wurde. Der Band wird durch eine persönliche Rede Werner Heis... zur Einweihung des Werner-Heisenberg-Gymnasiums in Garching be... in der er Erfahrungen aus seiner eigenen Schulzeit teilte. Die Heisenberg-Gesellschaft widmet sich dem Nachlass von Werner Heisenberg, der Aufarbeitung spannender Aspekte der Wissenschaftsgesch... insbesondere der Quantenmechanik – und der schulischen Vermittl... moderner Physik.

www.hirzel.de

S. Hirzel Verla

ISBN 978-3-7776-3359-6



Quanten 10
Herausgegeben von Johannes Blümer



S. Hirzel Verlag

SCHRIFTENREIHE DER HEISENBERG-GESELLSCHAFT

Herausgegeben von der
Heisenberg-Gesellschaft e.V., München
Band 10

www.hirzel.de/series/2748-5323

Quanten 10

HERAUSGEGEBEN

VON JOHANNES BLÜMER

S. Hirzel Verlag



Dieses Buch ist eine Open-Access-Publikation.
Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons
Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen
4.0 International Lizenz.
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in
der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über dnb.d-nb.de abrufbar.

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsge-
setzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzung,
Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

© Johannes Blümer 2025
Veröffentlicht in der S. Hirzel Verlag GmbH
Maybachstraße 8, 70469 Stuttgart
service@hirzel.de
www.hirzel.de

Layout und Herstellung durch den Verlag
Druck: Beltz Grafische Betriebe, Bad Langensalza
Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier.
Printed in Germany
ISBN 978-3-7776-3359-6 (Print)
ISBN 978-3-7776-3349-7 (E-Book)
DOI 10.3813/9783777633497

Inhalt

7 Vorwort des Herausgebers

REINHARD GENZEL

9 Galaxien und Schwarze Löcher

KLAUS HENTSCHEL

47 ‚Lichtquanten‘ bzw. ‚Photonen‘
*Über die hinter diesen Termini liegenden mentalen
Modelle und die stufenweise Anreicherung ihrer
Bedeutungsschichten*

WERNER HEISENBERG

109 Festrede zur Einweihungsfeier des Werner-Heisenberg-
Gymnasiums in Garching, 1971

119 Autoren

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.

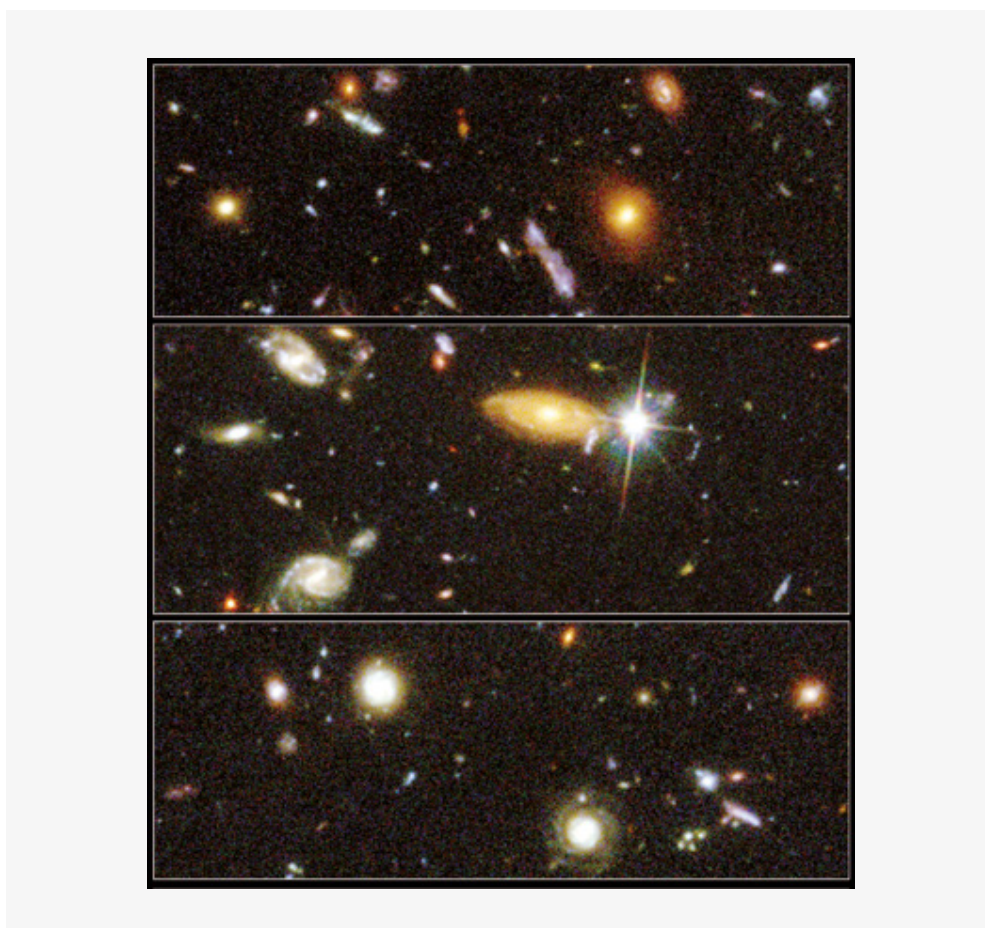


Abb. 1: Klassische Aufnahme von ausgewählten fernen Galaxien mit dem Hubble-Weltraumteleskop (Deep Field 1995).

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.

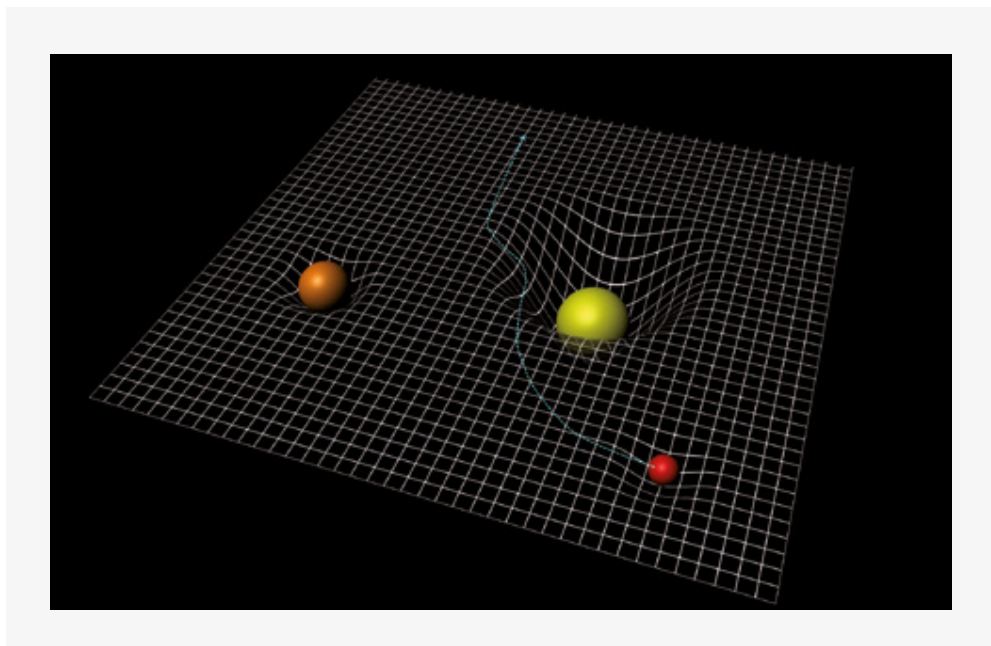


Abb. 5: Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie verzerren Massen den Raum und beeinflussen so die Bewegungen anderer Massen in ihrer Umgebung.

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-

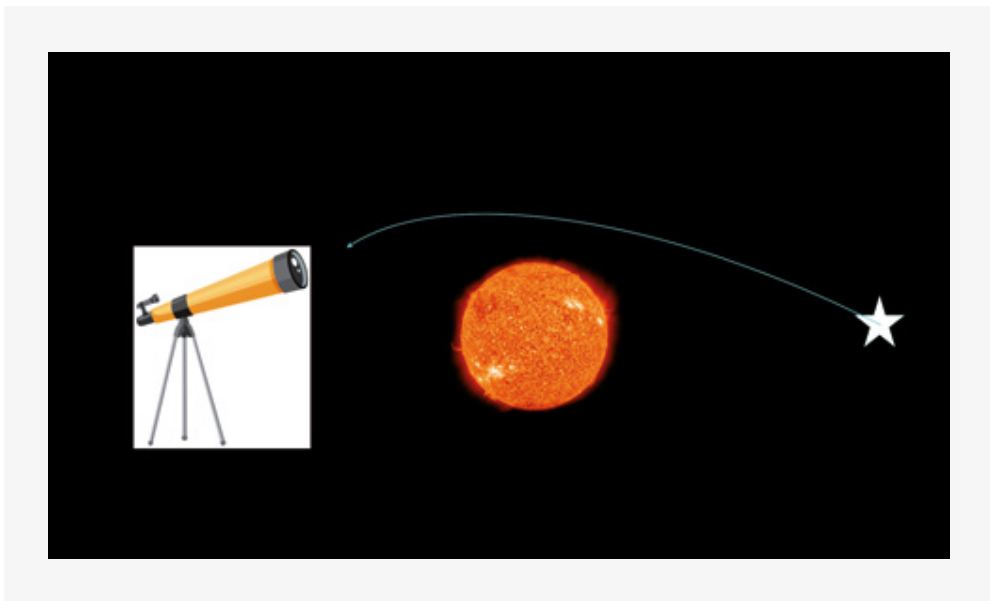


Abb. 6: Ablenkung des Lichts eines Sterns im Gravitationsfeld der Sonne.

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).

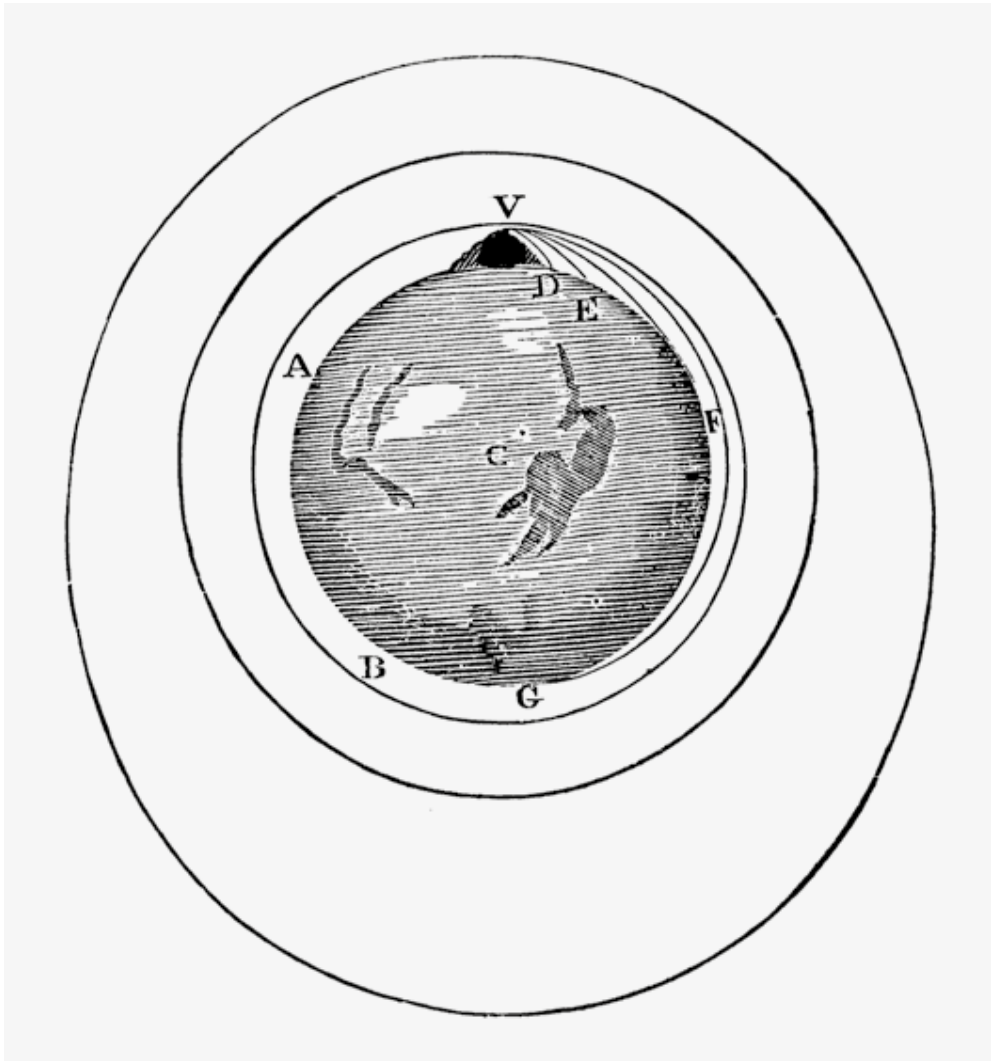


Abb. 7: Illustration aus Newtons *Principia* zur Bewegung von Wurfgeschossen und Umlaufbahnen um die Erde.

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!

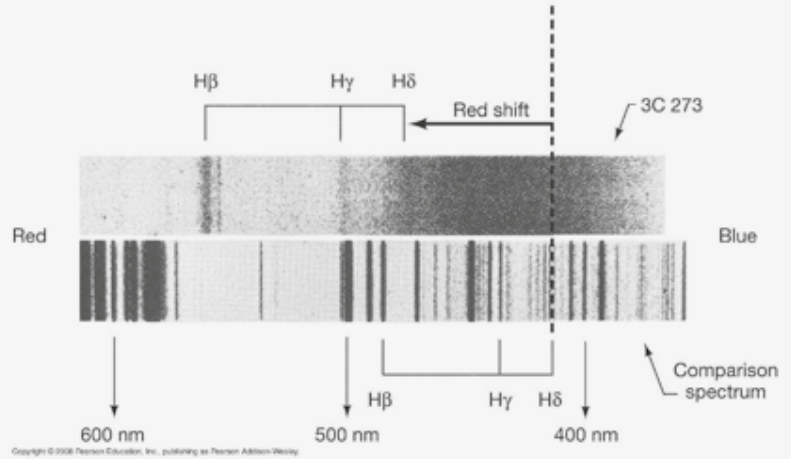
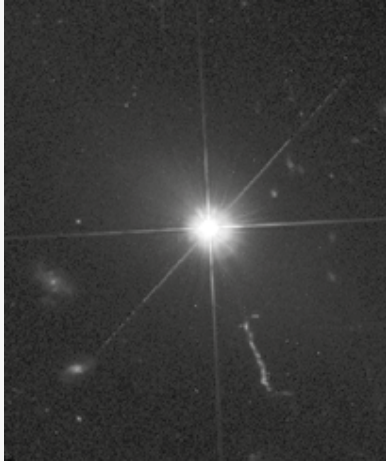


Abb. 8: Links: optische Aufnahme des Quasars 3C273 mit dem Hubble-Teleskop. Rechts: Spektrum der Wasserstoff-Emissionslinien von 3C273 im Vergleich zu einem Referenzspektrum im Labor.

Nun kannte man ja damals in den 60er-Jahren bereits die Expansion des Universums. Wir wussten damals sehr genau, dass die Rotverschiebung im Spektrum proportional zur Entfernung des Objekts von uns ist. 16 Prozent Rotverschiebung bei 3C273 entspricht dann einer Entfernung von 2,4 Milliarden Lichtjahren; die Astronomen bezeichnen das als $z = 0,16$. Das war damals eine Sensation. Wenn man dann diese schwache optische Strahlung umrechnet auf die abgestrahlte Energie, dann muss dieses kleine Sternchen 1000-mal heller sein als die gesamte Milchstraße. Jetzt hat man ein Problem – wie kann man das erklären? Und es wurde noch schlimmer, als innerhalb von zehn Jahren die maximale Rotverschiebung von diesen Quasaren von $z = 0,16$ bis auf $z = 2-4$ hoch ging. Das waren also Objekte, die kurz nach dem Urknall aktiv gewesen sein müssen, und dementsprechend sind die Helligkeiten bis zu 100.000-mal höher als die Leuchtkraft der Milchstraße. Wie kann man so große Leuchtkräfte erklären?

Ein Erklärungsversuch mit Hilfe der Kernfusion in Sternen scheiterte gleich, die notwendigen Massen sind einfach zu groß.

Aber, und das war eine große Überraschung, Schwarze Löcher können das erklären. Die Idee ist, dass ein Schwarzes Loch wohl keine Strahlung von innen nach außen schicken kann, aber wenn die Materie mit einer Masse M langsam in das Schwarze Loch hinein spiralisiert, kann die Gravitationsenergie, die dort frei wird, in Strahlung umgewandelt werden. Und die Effizienz, mit der das nahe am Ereignishorizont geschieht, kann je nach der Rotation des Schwarzen Lochs bis zu 40 Prozent der Gesamtenergie Mc^2 sein. Das ist 100-mal effizienter als die Fusion von Wasserstoff nach Helium in der Sonne. Mit Hilfe dieser Erklärung braucht man jetzt „nur“ noch Objekte von einigen Milliarden Sonnenmassen. Immer noch abstrus hoch für die damalige Zeit, aber vielleicht möglich. Das war also der Vorschlag – aber wie können wir das durch Beobachtungen nachweisen? Es war sofort klar, dass diese Quasare viel zu weit entfernt sind, um irgendwie diese Testteilchen-Methode zu benutzen, die ich Ihnen vorhin erklärt habe. Dazu brauchen wir Objekte, die wesentlich näher sind.

In dieser Situation kamen die zwei britischen Theoretiker Donald Lynden-Bell und Martin Rees auf die Idee, dass diese Quasare sozusagen das Maximum, der hellste Zustand von solchen akkretierenden Schwarzen Löchern sind und dass Schwarze Löcher auch in anderen Galaxien, vielleicht in allen Galaxien, vorhanden sind. In den meisten Galaxien würde jedoch die Akkretion und damit die Leuchtkraft gering sein. Heute wissen wir in der Tat, dass praktisch jede Galaxie ein Schwarzes Loch im Zentrum hat, mit verschiedenen Massen, aber immerhin. Auch unsere eigene Milchstraße könnte deshalb ein solches Schwarzes Loch im Zentrum haben, das in unserem Fall eben nur 27.000 Lichtjahre entfernt ist. Und dann sagten Lynden-Bell und Rees in 1971: „Da schaut doch einmal nach, indem ihr Testteilchen, Gaswolken oder Sterne benutzt, ob im Zentrum unserer Milchstraße irgendetwas Massereiches sitzt.“⁴

Diese Aufgabe war leicht formuliert, aber es muss ein gewaltiger Aufwand getrieben werden, um diese Art von Mes-

sungen durchzuführen. Diese Staubwolken, die wir bereits in Abb. 4 gesehen haben, schwächen das sichtbare Licht um einen Riesenfaktor ab. Das heißt, im optischen Wellenlängenbereich kommt man gar nicht in das Zentrum unserer Milchstraße hinein. Da muss man zu längeren Wellenlängen gehen, in den Infrarotbereich und in den Radiobereich oder zu ganz kurzen Wellenlängen in den Röntgenbereich. In den 70er-Jahren hatte man noch nicht die Technologie zur Verfügung, um diese Wellenlängen im Einzelnen untersuchbar zu machen. So hat es dann eine Weile gedauert. Heute können wir das, wie ich Ihnen nun zeigen werde.

Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße

Kommen wir zurück auf das Zentrum der Milchstraße, das wir schon in Abb. 3 gesehen haben. In Abb. 9 zoomen wir nun hinein in den zentralen Bereich auf einer Skala von etwa ein paar Lichtjahren. Sie sehen eine sehr dichte Ansammlung von sehr massereichen Sternen; das sind keine Sonnen wie unsere, sondern Objekte mit bis zu 100-mal der Masse der Sonne. Und die Dichte der Sterne in unserem Zentrum ist etwa eine Million Mal höher als die in der Sonnenumgebung. Nachts würden Sie da keinen dunklen Nachthimmel sehen, sondern das wäre alles hellstens beleuchtet.

Wir hatten schon erwähnt, dass die Radioastronomen die zentrale kompakte Radioquelle Sagittarius A* untersucht haben. Wir wissen heute, und wir wollen das jetzt nicht im Einzelnen diskutieren, dass der Winkeldurchmesser dieser Radioquelle 40 Mikrobogensekunden ist. Mit dem Auge haben Sie eine Auflösung von etwa 40 Bogensekunden. 40 Mikrobogensekunden ist eine Million Mal schärfer, als was Sie mit dem Auge sehen können. Und das kann man heute mit der so genannten interkontinentalen Radiointerferometrie auflösen oder zumindestens einmal messbar machen. 40 Mikrobogensekunden entsprechen etwa 20 Zentimeter auf dem Mond von hier aus gese-

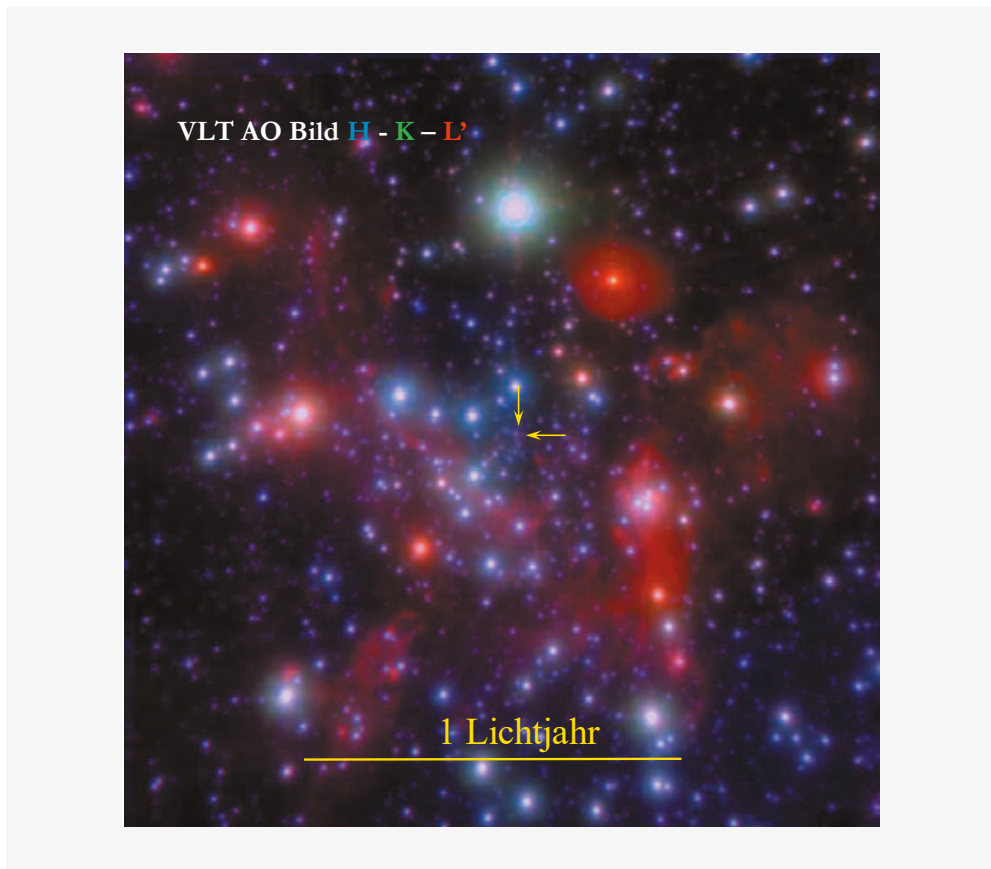


Abb. 9: Zentraler Bereich der Milchstraße im Sternbild Schütze mit einer Ausdehnung von wenigen Lichtjahren. Die zentrale Position der Radioquelle Sagittarius A* ist mit zwei Pfeilen markiert.

hen. Die *community* sagte, „Aha, das könnte doch so etwas wie ein Schwarzes Loch sein“.

Der nächste Schritt war dann, Bewegungen zu benutzen, und zwar Bewegungen von Gas. Im Zentrum der Milchstraße gibt es neben den Sternen, die ich gezeigt habe, auch noch ionisiertes Gas, pinkfarben in Abb. 10. Neutrales Gas ist grün dargestellt. Die Gasbewegungen kann man durch Beobachtung der Spektrallinien und ihrer Dopplerverschiebungen vermessen. Diese Pionierarbeiten sind von einer Forschergruppe um Charles Townes in Berkeley durchgeführt worden. Townes war ein ganz berühmter Experimentalphysiker, der den Nobelpreis 1964 für die Entwicklung des Lasers und des Masers bekom-

men hatte. Townes machte dann einen radikalen Wechsel im Forschungsfeld: „So, jetzt lasse ich das einmal sein, das machen andere weiter und ich mache jetzt einmal Astronomie.“

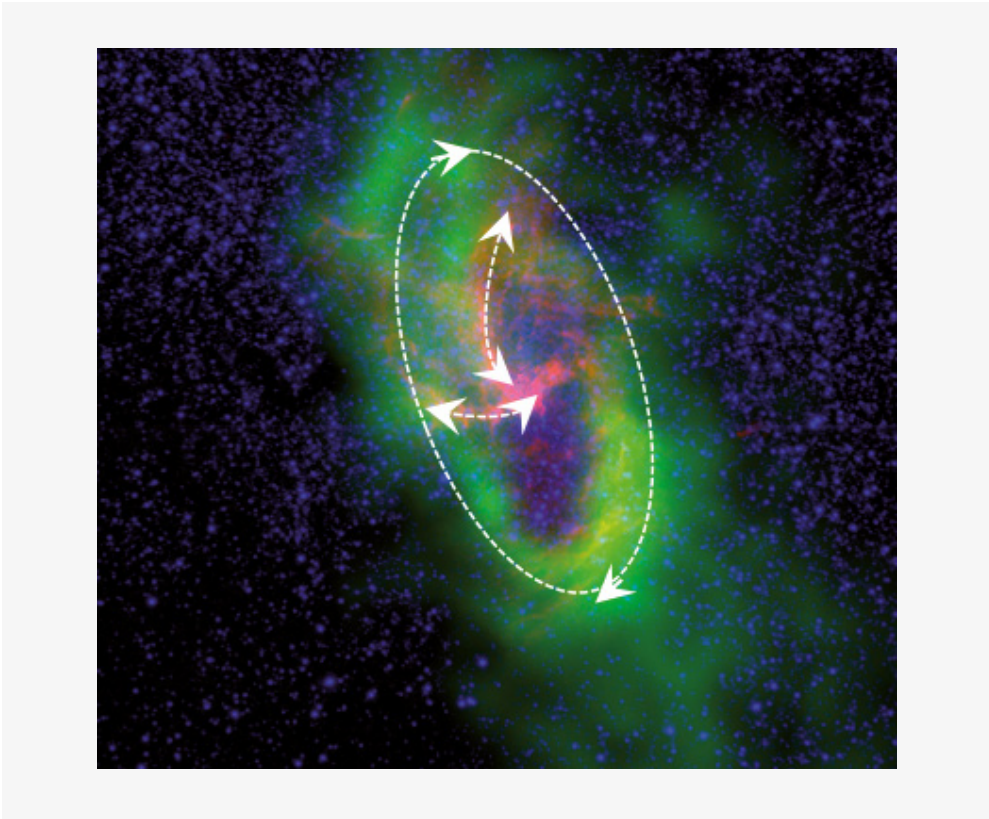


Abb. 10: Gasbewegungen im zentralen Bereich der Milchstraße. Die Farben stellen Sterne (blau), ionisiertes Gas (rosa) und neutrales/molekulares Gas (grün) dar, die Gasbewegungen sind schematisch als Pfeile dargestellt.

Townes ist dann nach Berkeley gegangen und hat dort eine Forschergruppe gegründet, die mit neuen Techniken der Infrarotspektroskopie jetzt zum ersten Mal in diesem Wellenlängenbereich spektroskopisch messen konnte und damit diese Doppelerbewegung zeigen konnte. Townes und seine Studenten – ich wurde einer der Postdocs und später einer seiner Kollegen – haben dann von Ende der 70er-Jahre bis Mitte der 80er-Jahre diese Wolkenbewegungen untersucht. Das Ergebnis haben wir 1985 in einem *Nature*-Paper publiziert: In Abb. 11 sehen Sie den

Abstand der eingeschlossenen Masse vom Zentrum, also von der Radioquelle Sagittarius A*, in logarithmischer Auftragung.

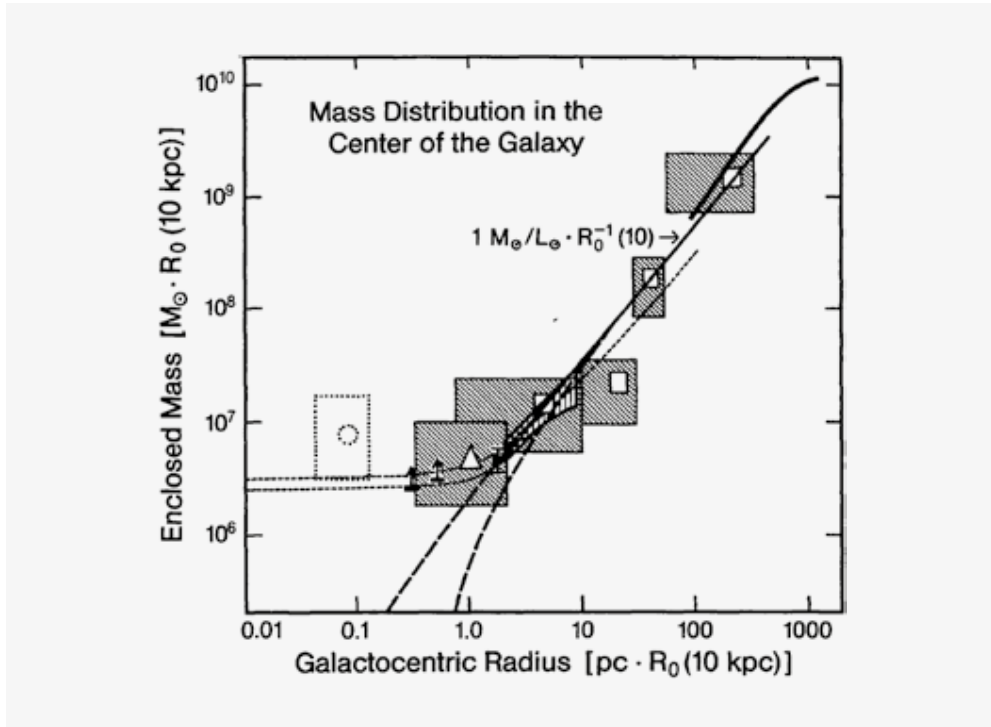


Abb. 11: Eingeschlossene Masse als Funktion des Abstands vom Zentrum der Milchstraße.

Sie sehen, wenn Sie weit draußen sind, dann ist die Masse abhängig vom Radius. Das heißt, es handelt sich um eine ausgedehnte Masse, nämlich die Sterne, die da draußen dominieren. Bei kleinen Abständen wird die Masse immer kleiner, bis sie etwa bei drei bis vier Millionen Sonnenmassen konstant bleibt. Und wir haben gesagt, „ja, das kann ein Schwarzes Loch sein“.

An dieser Stelle muss der Physiker sich fragen, ob er jetzt die Untersuchung belässt oder ob er weiter geht. Denn die Frage ist jetzt natürlich, ob es denn ein Schwarzes Loch sein *muss*. Es *kann* eines sein. Obwohl wir sehr genau gemessen haben, sind wir dem Ereignishorizont des mutmaßlichen Schwarzen Lochs von dieser Masse nur bis zu einem Faktor von einer Million nahe gekommen. Und da kann alles Mögliche drin sein, was kein Schwarzes

Loch ist, aber so aussieht wie ein Schwarzes Loch. Zum Beispiel könnte man sich einen Haufen von einer Million Neutronensternen vorstellen. Unsere Kollegen damals waren insgesamt wenig beeindruckt von unserem stolzen *Nature*-Paper und haben gesagt: „Nein, das glauben wir euch nicht. Macht mehr; strengt euch einmal ein bisschen mehr an.“ Und wir wussten ja selber, wir müssen näher heran an das Zentrum. Außerdem ist es so, dass die Gaswolken nicht nur auf Gravitation reagieren, sondern auch möglicherweise auf andere Kräfte, elektrodynamische Kräfte und Magnetfelder und so weiter und so fort.

Das Programm für die nächsten vielen Jahre war also klar: Wir müssen höhere Auflösung erzielen und die Sterne in der unmittelbaren Nähe des galaktischen Zentrums beobachten, die wirklich die Gravitation nachweisen. Dazu benötigt man abbildende Detektoren mit geringem Rauschen im infraroten Wellenlängenbereich. Das dauerte etwa zehn Jahre.

Das nächste Problem ist die Erdatmosphäre. Wir schauen ja durch eine Erdatmosphäre durch, die uns die Bilder von Sternen verzerrt. Sie kennen im Prinzip den Effekt, auf einer heißen Straße ein entferntes Auto anzuschauen: das Bild von dem Auto flimmert. Ursache ist die Brechung des Lichts in der Luft, die von der Luftdichte und Temperatur abhängig ist. Die Wellenfronten, die von einem entfernten Stern kommen, werden entsprechend zeitabhängig verzerrt. Das kann man jedoch mit geeigneten hellen Objekten messen und mit Hilfe von deformierbaren Spiegeln im Strahlengang korrigieren, um die Wellenfront wieder gerade zu biegen. Es ist technisch hochanspruchsvoll und hat eine Reihe von Jahren gedauert, aber diese so genannte adaptive Optik ist heute technologischer Standard. Und dann kann man in der Tat von einem schlechten, verzerrten Bild zu einem scharfen, beugungslimitierten Bild kommen. Mit adaptiver Optik konnte man auch die großen, neuen, damals gerade in Betrieb gehenden 10-Meter-Teleskope benutzen, um schärfste Bilder zu bekommen und höchste Genauigkeit in der Positionsmessung zu erhalten.



Abb. 12: Adaptive Optik kann Bildverzerrungen durch die instabile Atmosphäre ausgleichen. Wenn kein heller Leitstern zur Verfügung steht, kann das mit einem Laserstrahl ausgeglichen werden, der ein Referenzsignal in der Atmosphäre erzeugt.

Nicht immer hat man einen Stern, der hell genug ist, gerade dort, wo man hinschauen will. Das heißt, wir mussten auch lernen, quasi unsere eigenen Sterne zu imitieren, indem man Laser in die obere Erdatmosphäre schießt und dort auf einer Höhe von etwa 90 Kilometern Natriumatome zu resonanter Rückstreuung bringt, um dann über dieses zurückgestreute Laserlicht die Wellenfrontverbiegung zu vermessen und dann im Spiegel zu korrigieren (Abb. 12). Ganz augenfällig ist der Gewinn an Sehschärfe in Abb. 13 zu sehen.

Gehen wir zurück zu der Situation, als wir mit diesen ersten Kameras die Bewegungen von Sternen angeschaut haben; das war damals in den 90er-Jahren zunächst mit Dreieinhalb-Meter-

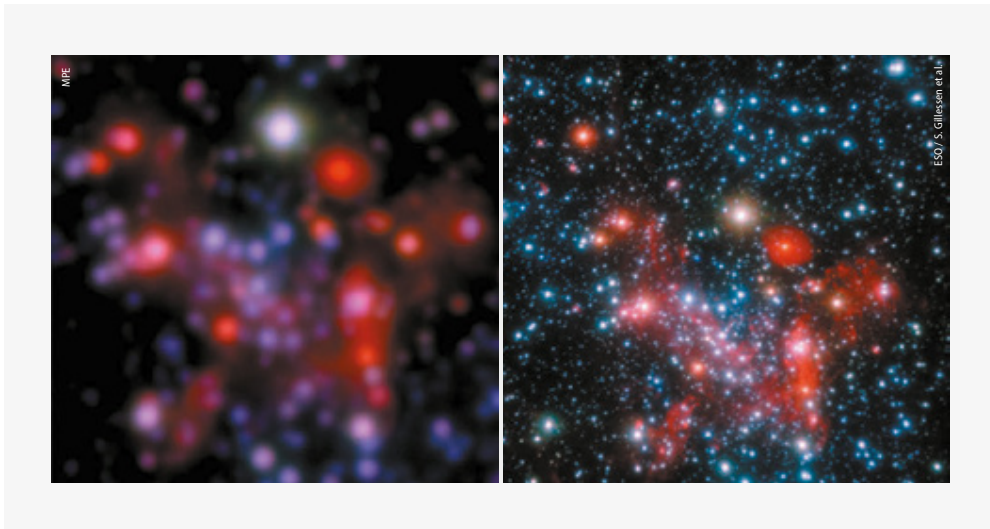


Abb. 13: Die Nahinfrarot-Aufnahme des galaktischen Zentrums mit adaptiver Optik (rechts) besitzt 20-mal mehr räumliche Schärfe als die Aufnahme ohne adaptive Optik (links).

Teleskopen und dann aber mit Acht-Meter-Teleskopen. Hier sehen Sie, was wir – unsere Gruppe zusammen mit der ESO und mit Andrea Ghez, mit der ich (RG) ja im letzten Jahr den Nobelpreis geteilt habe – an dem Keck-Teleskop auf Mauna Kea in Hawaii damit erreichen konnten. Mit Hilfe der damals neuen adaptiven Optik konnten wir Bilder machen, die über drei Jahre hinweg die Bewegungen von Sternen am Himmel direkt sichtbar machen konnten.

Sie sehen in Abb. 14, wie sich Sterne, die ja nahe an der Radioquelle Sagittarius A* sind, mit einigen Tausend Kilometern pro Sekunde bewegen. Das ist unglaublich schnell, etwa 100-mal so schnell, wie sich die Erde um die Sonne dreht. Wenn Sie diese Geschwindigkeit jetzt umsetzen in eine Masse im Zentrum der Rotation, dann weiß man sofort, dass auf dieser Skala von wenigen Lichttagen eine Masse von einigen Millionen Sonnenmassen enthalten sein muss. Wir hatten einen Sprung von etwa einem Faktor zehn gegenüber dem vorher Erreichten gemacht!

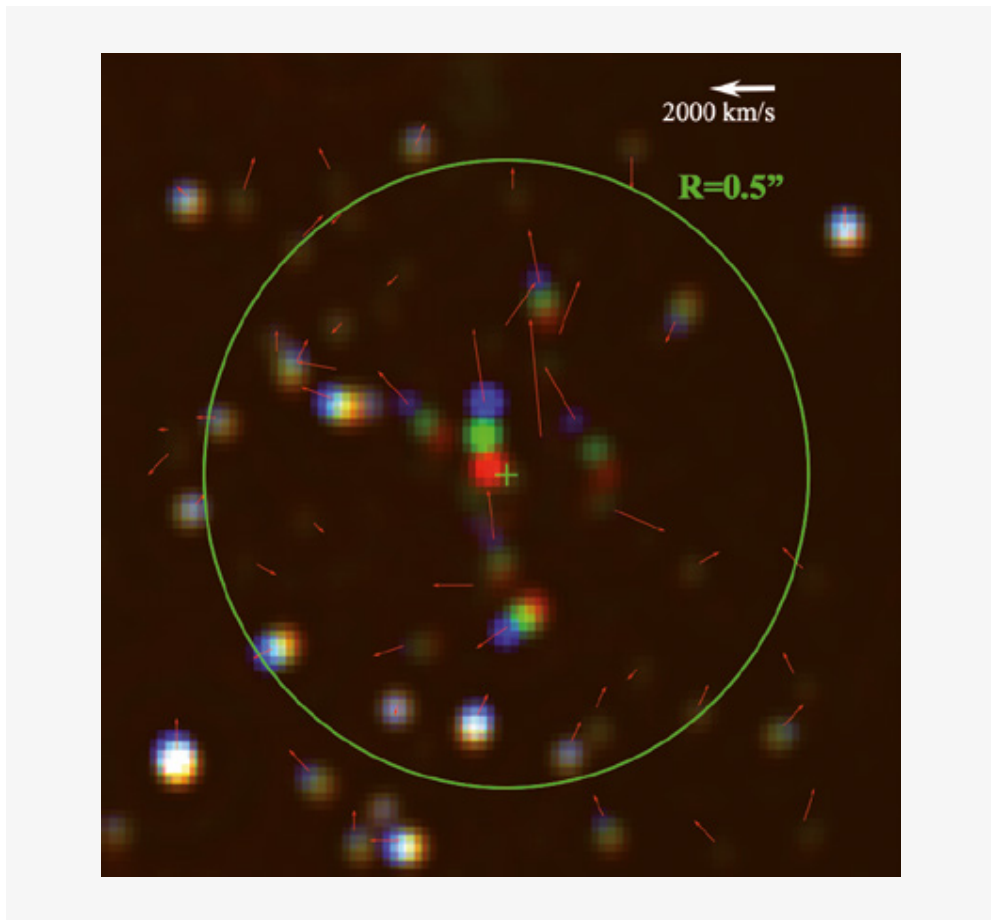


Abb. 14: Das grüne Kreuz ist die Position von SgrA* und der grüne Kreis hat einen Durchmesser von einem Lichtmonat. Die Daten aus drei aufeinanderfolgenden Jahren (rot, grün, blau) wurden in den neunziger Jahren im Zentralfeld um SgrA* mit adaptiver Optik aufgenommen. Dies veranschaulicht die Sternbewegungen.

Wir sehen an der Bewegung auch, dass die Keplerschen Gesetze gelten. Wenn wir Sternbewegungen weiter außen betrachten, werden die Sternbilder immer weißer, das heißt, die Geschwindigkeiten kleiner. Das ist das „Eins über Wurzel aus dem Abstand“-Gesetz, das für eine konzentrierte Masse gilt, die sehr, sehr nahe an der Radioquelle Sagittarius A* sitzt.

Und dann hatten wir im Jahr 2002 das Glück zu sehen, dass es Sterne gibt, die so nahe an das Zentrum herankommen, dass wir nicht nur die Bewegungen sehen, sondern ganze Bahnen.

Die schärfsten Augen: GRAVITY

Unsere beiden Gruppen haben dann in den nächsten Jahren immer mehr von solchen Sternen sehen können und sozusagen auch die Schönheit des ganzen Systems verstanden. Denn die Gravitationsphysik ist nur *eine* Frage. Die andere Frage ist natürlich, wie kommen solche Sterne hierhin? Wie sind sie entstanden, so nahe an einem Schwarzen Loch? Wir haben halt das Glück, dass die Natur uns hier phantastische Studienobjekte zur Verfügung gestellt hat. Jeder von diesen Sternen ist quasi ein Präzisionsinstrument, um die Gravitation zu messen.



Abb. 16: Teleskope der ESO auf dem Mt. Paranal in Chile.

Gut, sind wir jetzt fertig? Können wir einpacken und in die Ferien gehen? Nein, denn die Aussage, dass wahrscheinlich ein Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße ist, hängt sehr stark immer noch an der Gültigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie. Glücklicherweise hat der Stern S2 eine Umlaufperiode von 16 Jahren, er würde also im Jahr 2018 wieder da sein.

Wenn wir dann noch genauer messen können, können wir die Allgemeine Relativitätstheorie präzise testen. Die Frage war also, wie können wir *noch* genauer messen? Die Antwort war „Ja“, indem wir die vier Teleskope der ESO auf dem Paranal in Chile zusammenschalten, um effektiv aus vier Acht-Meter-Spiegeln einen einzigen zu bilden (Abb. 16).

Bislang hatten wir nur einen dieser Spiegel benutzt. Wir haben uns nun einer Technik bedient, die in der Radioastronomie wohlbekannt ist, nämlich Interferometrie. Man bringt beispielsweise das Licht von zwei von den vier Teleskopen kohärent zusammen, indem man es in einem Tunnel unterhalb der Spiegel in einer Mittelstation zur Interferenz bringt. Das erlaubt einem sozusagen, einen virtuellen Spiegel mit einem Durchmesser von über 100 Metern zu erzeugen. Das ist noch einmal ein Faktor 15–20 besser, als wir das mit den Einzelteleskopen tun konnten. Unser Team hat mit dieser Technik – unter der Leitung von Frank Eisenhauer – im Jahr 2018 den nächsten Perihel-Durchgang dieses Sterns mit einer Genauig-

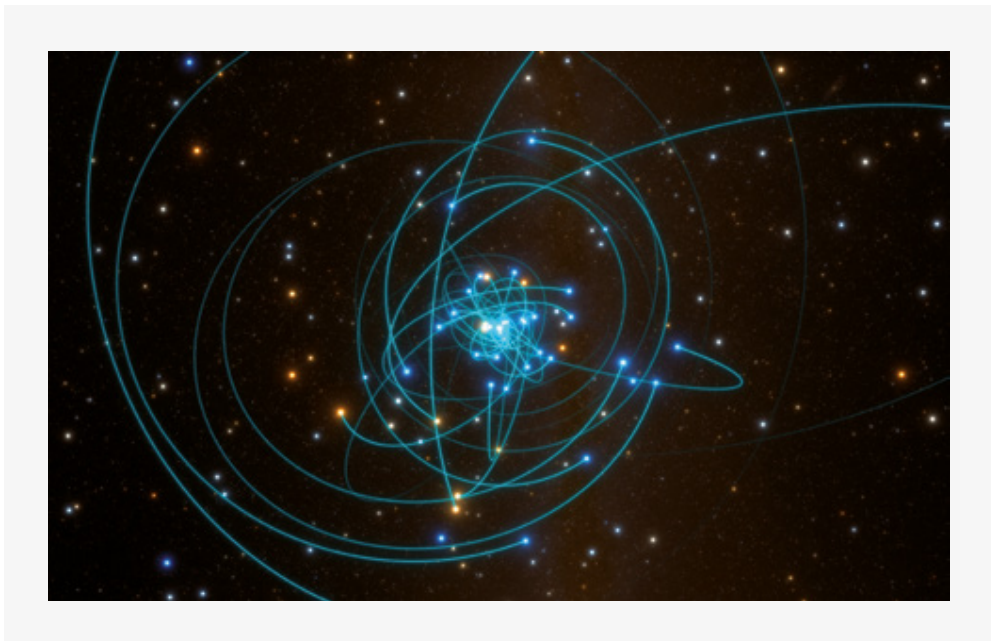


Abb. 17: Auszug aus einer Video-Simulation von Sternbahnen in der Nähe des galaktischen Zentrums.

keit von einigen zehn Mikrobogensekunden angeschaut. Diese Auflösung entspricht dem Erkennen einer Euro-Cent-Münze auf dem Mond! Mit den adaptiven Optiken konnten wir jetzt also die Sterne, die in diesem Feld bislang unscharf waren, in Einzelobjekte auflösen. Abb. 17 zeigt einen Schnappschuss aus einem Video (im Vortrag konnten die Bewegungen noch lebhafter visualisiert werden!).

Im nächsten Schritt können wir das Sternchen „S2“ ganz in der Nähe der Radioquelle mit dem Interferometer auflösen.

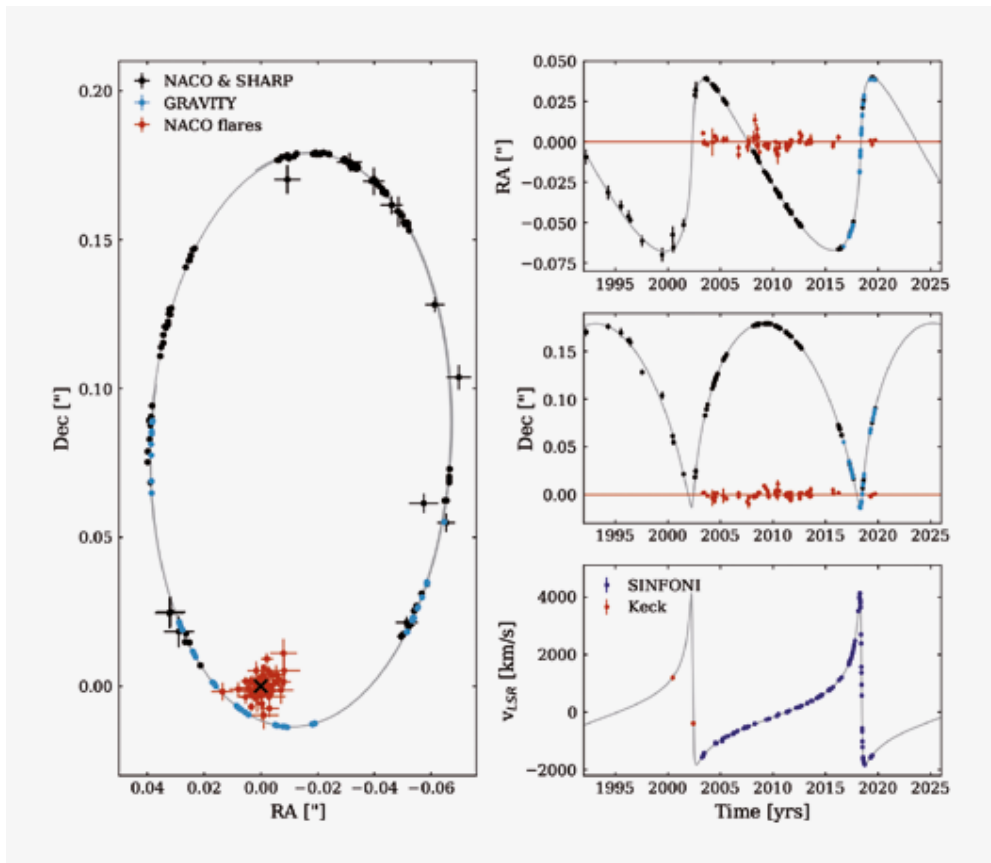


Abb. 18: Präzise Vermessung der Bahn des Sterns S2 von 1992 bis Ende 2019. Links: Die verfügbaren astrometrischen Positionsbestimmungen und die beste Kurvenanpassung; die Bahnkurve schließt sich nicht! Rechts: Rektaszension und Deklination von S2 (schwarz und blau) und Infrarotemission von Sgr A* (rot) relativ zur Position von Sgr A*. Rechts unten: Relativgeschwindigkeit von S2 entlang der Sichtlinie.

Abb. 18 zeigt die Daten von GRAVITY (hellblau mit ganz kleinen Messfehlern) zusammen mit anderen Messungen über einen Zeitraum von 26 Jahren. Im kleinen Diagramm rechts unten von Abb. 18 kann man ablesen, dass die Relativgeschwindigkeit von S2 entlang der Sichtlinie bis zu 4.000 km/s beträgt.

Abb. 19 ist ein Vergleich von Bildern des innersten Bereichs um Sagittarius A* herum mit verschiedenen Techniken – der Fortschritt ist geradezu augenfällig. Mit der heutigen Techno-

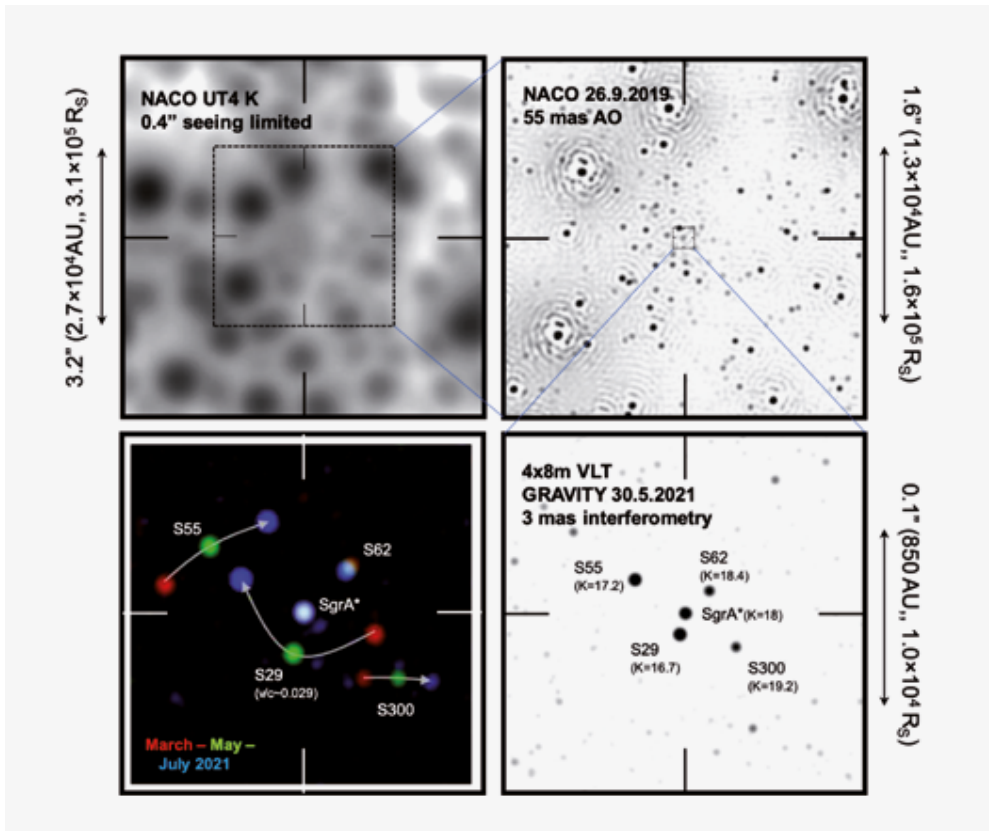


Abb. 19: Fortschritte in der Auflösung und Empfindlichkeit von Infrarot-Abbildungen des Zentralbereichs um die Radioquelle SgrA* (roter Stern). Von oben links nach unten links im Uhrzeigersinn: Erste Infrarotbilder mit Halbleiterkameras an einem 3,5 m-Teleskop in den 1990er Jahren; adaptives Optikbild mit dem 8 m-VLT; interferometrische Bildrekonstruktion mit allen vier 8 m-Teleskopen und schließlich die Kombination von drei solcher Bilder über einige Monate im Jahr 2021. Die Bewegungen der Sterne sind deutlich an farbigen Punkten zu erkennen.

logie sehen Sie die Bewegung der vier Sterne S55, S62, S29 und S300 im Laufe einiger Monate.

Und tatsächlich kann man jetzt die Bewegung der Sterne von Monat zu Monat und sogar von Nacht zu Nacht beobachten und sieht sie dann mit großer Geschwindigkeit ihre Bahnen verfolgen. Die Bahnen können wir mit einer Genauigkeit von 0,1 Promille vermessen und daraus das Gravitationspotenzial ganz genau berechnen. Abb. 20 zeigt die Bewegung von „S2“ von Nacht zu Nacht!

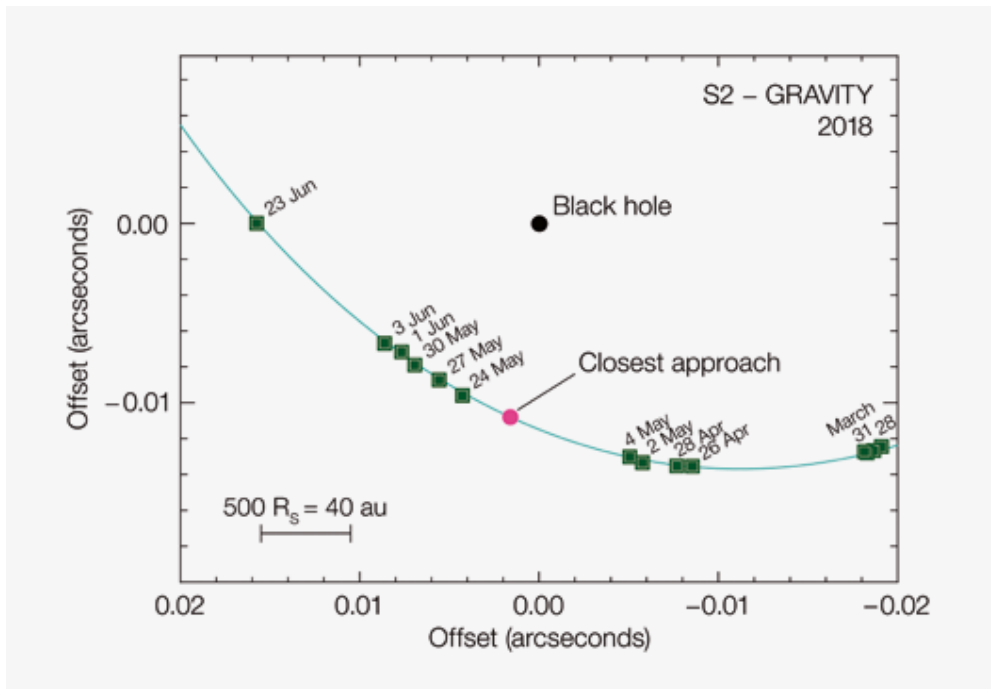


Abb. 20: Die Position des Sterns S2 ist in einzelnen Nächten zwischen März und Juni 2018 gezeigt.

Präzisionstests der Allgemeinen Relativitätstheorie

Das heißt, wir sind jetzt in der Lage, auf der Skala des Sonnensystems mit Präzisionsmessungen das Gravitationspotenzial um diese Quelle Sagittarius A* zu vermessen. Den ersten Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie konnten wir innerhalb von einem halben Jahr sehen, die so genannte Gravitationsrotver-

schiebung. Wenn Lichtteilchen aus der Umgebung des Schwarzen Lochs zu uns kommen, müssen sie aus dem Potenzialwall herausklettern, dabei werden sie um etwa 0,03 Prozent ins Rote verschoben. In Abb. 21 ist der Effekt im Vergleich zur Newtonschen Theorie (gestrichelte Linie) gezeigt.

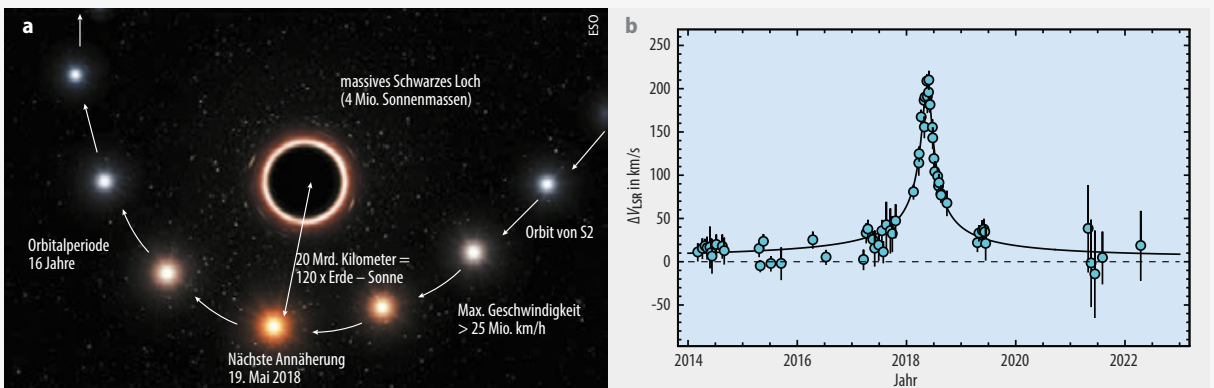


Abb. 21: Die Infografik (a) zeigt einen Ausschnitt des Orbits von S2 um das Perizentrum: Die Rotverschiebung ist am größten bei der nächsten Annäherung. Die Spektrallinien waren im Mai 2018 um bis zu 200 km/s mehr rotverschoben (b), als es allein der Orbit erfordert.

Die durchgezogene Linie zeigt die Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie, und die Pünktchen sind die Messungen. Das ist ganz offensichtlich ein sehr guter Nachweis dieser Gravitationsrotverschiebung in dieser Radioquelle Sagittarius A*.

Jetzt schauen wir uns den nächsten Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie an, die Präzession des Sterns. Weil die Bahn so extrem elliptisch ist, findet die Präzession hauptsächlich nahe Sagittarius A* statt und weniger stark weit draußen. Das heißt, wenn Sie sich einmal nur eine Koordinate anschauen, dann sehen Sie in Abb. 22 die Newtonsche Bahn als graue Linie und die rote Linie ist die Allgemeine Relativitätstheorie. Unsere Messungen zeigen genau den Knick in der Bahn, den die Schwarzschild-Präzession vorhersagt.

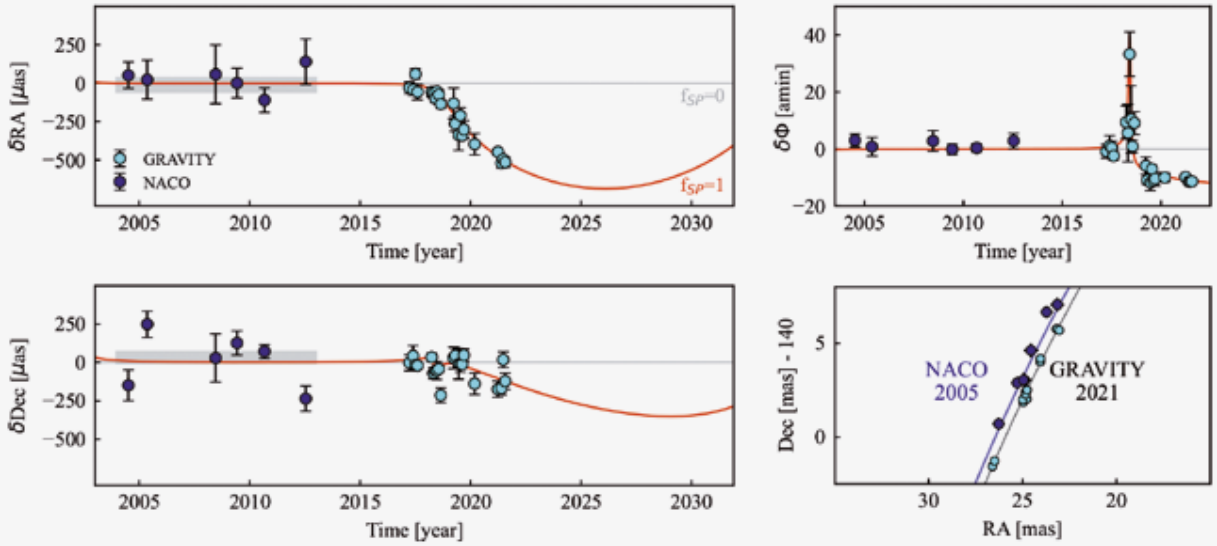


Abb. 22: Präzession der Bahn von S2 um SgrA*, nach Abzug des Newtonschen Anteils der Bahn. Die Residuen zeigen die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte Schwarzschild-Präzession.

Die Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie werden also immer genauer, und die Vorhersagen bestätigen sich wirklich eindrucksvoll.

Bis jetzt haben wir noch keinen Spin des Schwarzen Lochs gemessen. Das wollen wir in der Zukunft tun, und wir sind ziemlich zuversichtlich, dass es uns gelingt. Allerdings sind wir immer noch bei einem Abstand von etwa 1000 Schwarzschild-Radien vom Zentrum. Bei noch kleineren Abständen können wir keine Sterne mehr als Testkörper nehmen, sondern wir beobachten die Bewegung von Gas, das elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich ausstrahlt.

Der Prozess ist wahrscheinlich, dass heißes Gas dort in magnetischen Konvektionen beschleunigt wird und dabei dann sehr hell wird. Und dort können wir, wie in Abb. 23 gezeigt, die Bewegung des Maximums der Strahlung nachweisen. Die Entfernungen der Gasemissionen sind etwa fünf Mal der Ereignishorizont. Die Geschwindigkeiten dieser Punkte betragen etwa

30 Prozent von der Lichtgeschwindigkeit, das heißt, wir sind hier wirklich im relativistischen Bereich. Die Masse, die man aus diesen Messungen ableiten kann, ist in der Tat konsistent mit diesen vier Millionen Sonnenmassen, die wir schon längst kennen.

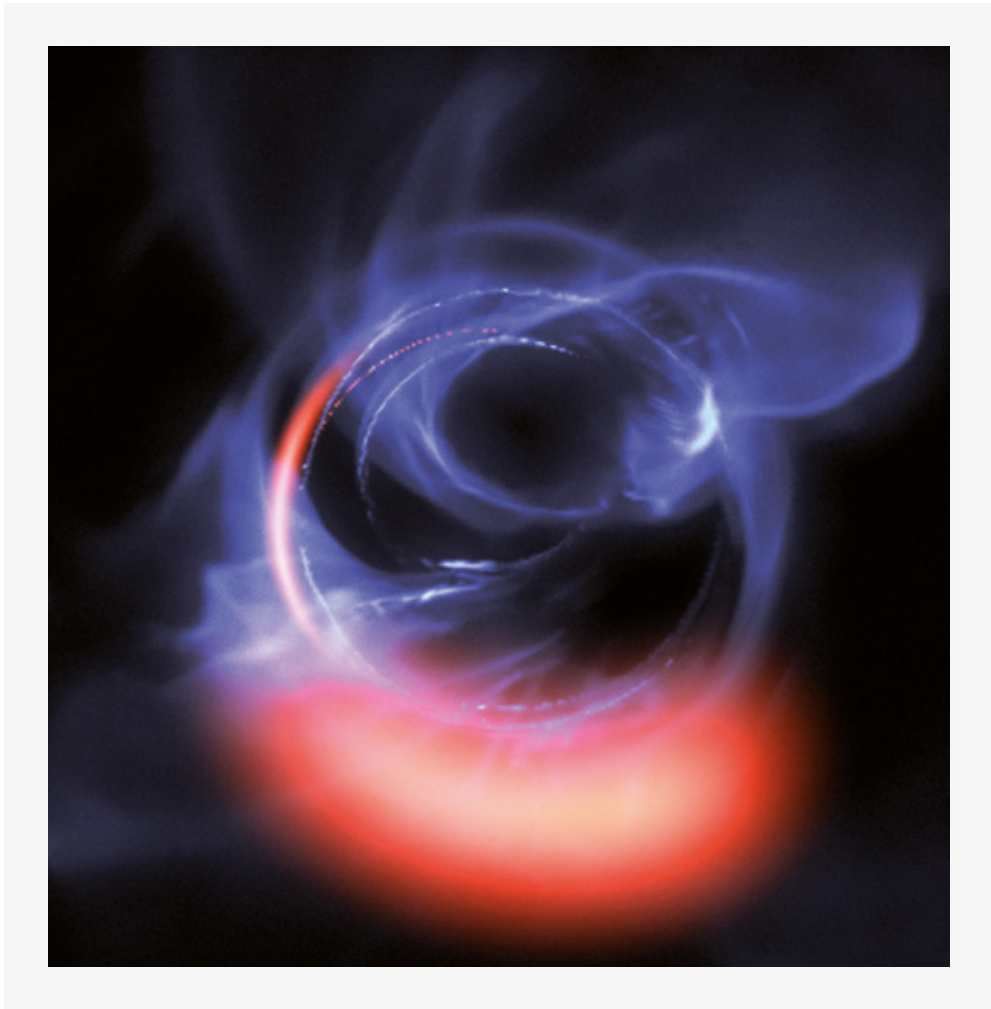


Abb. 23: Neueste Beobachtungen zeigen Materie ganz nahe am Ereignishorizont, von dem es ‚kein zurück‘ mehr gibt. Das Bild ist eine Visualisierung von Gaswolken, die mit ungefähr 30% der Lichtgeschwindigkeit um ein Massezentrum von vier Millionen Sonnenmassen herum wirbeln.

Es kann wohl nur ein Schwarzes Loch sein

Auf unserer Reise sind wir nach 40 Jahren langsam aber sicher von außen nach innen zum Zentrum der Milchstraße gewandert. Wenn Sie so wollen, mit immer demselben „langweiligen“ Ergebnis: Wir messen vier Millionen Sonnenmassen. Allerdings –

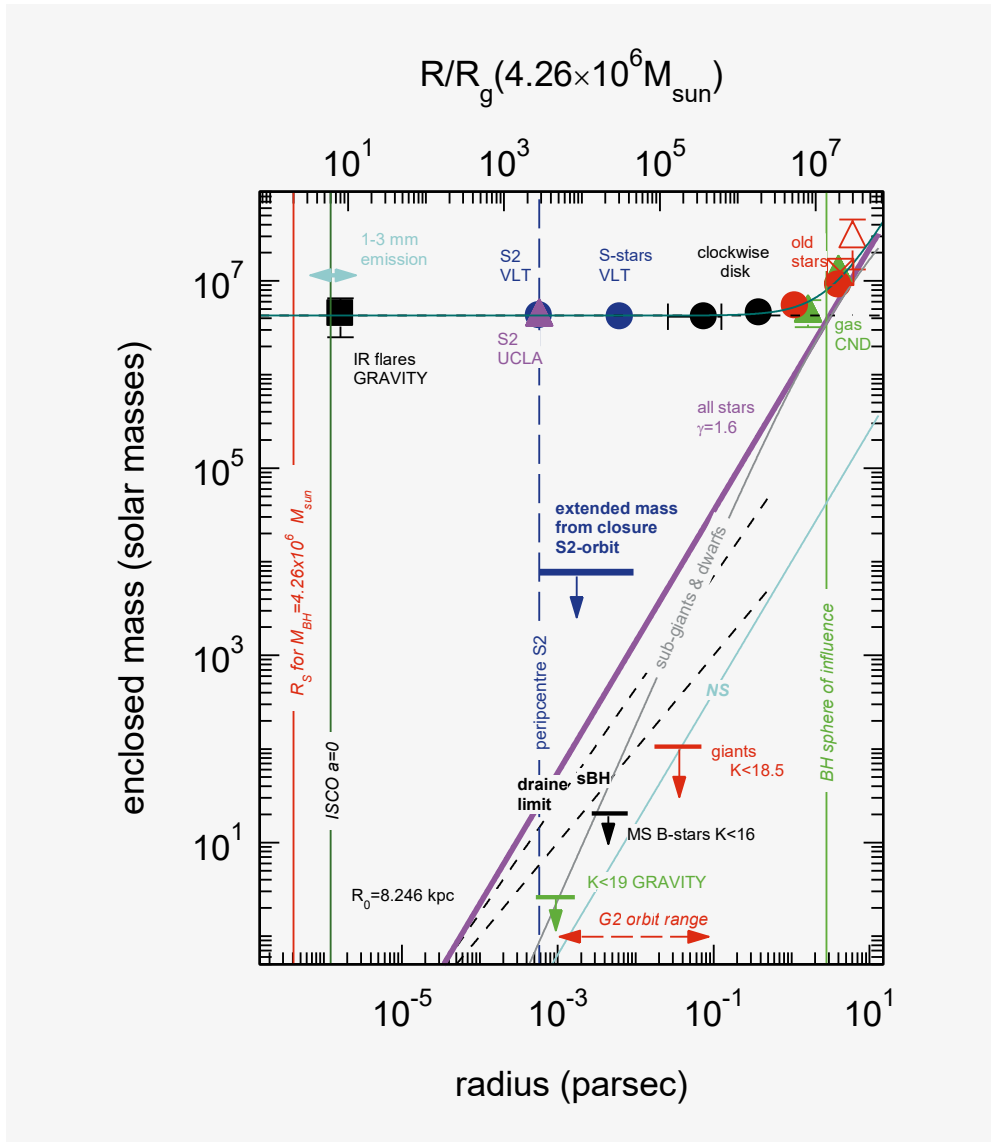


Abb. 24: Grenzwerte auf die eingeschlossene Masse als Funktion des Abstands vom Zentrum. Die Details sind im Text und in der Publikation der GRAVITY Collaboration von 2020 erklärt.

und das ist sehr bedeutsam – ergibt sich dieser immer gleiche Wert für immer kleinere Volumina. Mit den ersten Messungen konnten wir noch nicht ausschließen, dass es vielleicht eine ausgedehnte Masse gibt, z. B. von unsichtbaren Sternen. Jetzt aber wissen wir, dass die Masse von vier Millionen Sonnenmassen in der Tat innerhalb von wenigen Ereignishorizonten konzentriert sein muss. Die Masse außerhalb unseres Messbereichs ist so gering, dass sie keine Rolle spielt. Damit können wir auch ausschließen, dass eine signifikante Menge von Dunkler Materie in diesem Bereich um das Schwarze Loch vorhanden ist.

Abbildung 24 fasst das alles zusammen. Es sind Einzelmessungen (Datensymbole) und Ausschlusskurven gezeigt für die eingeschlossene Masse als Funktion des Abstands vom Zentrum. Erinnern wir uns, dass 1 Parsec etwa 3,26 Lichtjahre sind. Die senkrechte rote Linie links bezeichnet den Ereignishorizont für die Masse von $4,26 \times 10^6$ Sonnenmassen, sie liegt bei 4×10^{-6} pc, das sind nur 120 Millionen Kilometer, weniger als der Radius der Erdbahn! Die Messungen mit Gaswolken oben links im Diagramm kommen diesem Limit am nächsten. Alle anderen Beiträge sind vernachlässigbar klein.

Es kann also wohl nur ein Schwarzes Loch sein!

Was bringt die Zukunft?

Am Ende des Vortrags sind einige Worte zur gesamten Situation und zu den Zukunftsperspektiven angebracht. Wenn man immer weiter ins Weltall hinausschaut, begibt man sich wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit auf eine Zeitreise. Je weiter man nach außen schaut, umso weiter liegen die Bilder in der Vergangenheit. Solche zentralen Massen wie in unserer Milchstraße werden auch in anderen Galaxien gefunden, und im Durchschnitt sind wohl zwanzig Prozent der Masse einer Galaxie in solchen Schwarzen Löchern konzentriert. Inzwischen ist auch klar, dass diese Masse in Schwarzen Löchern relativ

zu der in Sternen angelegten Masse eine symbiotische Entwicklung beider Systeme über die kosmische Zeit darstellt.

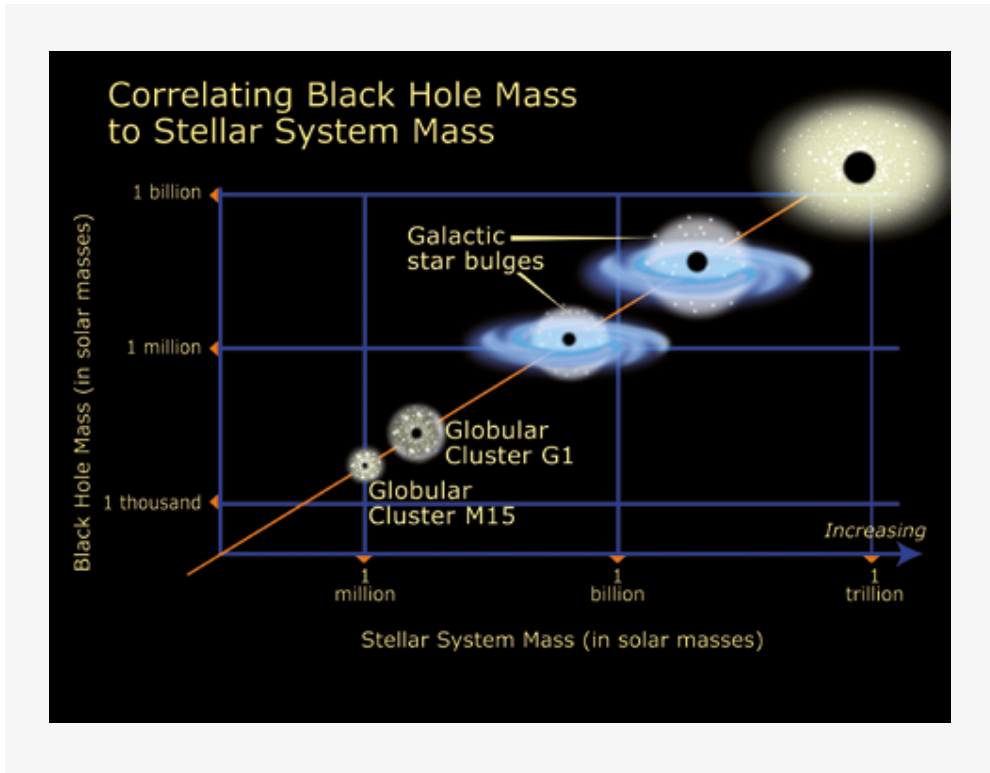


Abb. 25: Korrelation zwischen der Masse von zentralen Schwarzen Löchern und der Masse des Sternsystems.

Die Prozesse von Akkretion von Dunkler Materie und baryonischer Materie haben auch diese zentralen Schwarzen Löcher gebildet, und je mehr die Galaxien gewachsen sind, umso größer wurden dann auch die zentralen Schwarzen Löcher. In Abb. 25 ist das anschaulich dargestellt.

Die Zukunft bleibt sehr spannend: Der Spin des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße als nächstes Ziel ist schon erwähnt worden. Das interferometrische Instrument wird noch einmal um einen Faktor 100 verbessert, um auch Schwarze Löcher außerhalb unserer Milchstraße genau anzuschauen. Das wird unterstützt von den Radioastronomen, die den Effekt auf

das Licht in der Umgebung von solchen Schwarzen Löchern über den so genannten Schatteneffekt feststellen.

In der Europäischen Südsternwarte ESO in der Atacama-Wüste in Chile wird gerade ein noch größeres Teleskop errichtet, das so genannte E-ELT. Es wird 40 Meter im Durchmesser haben, gegenüber 10 Metern der bisher größten Instrumente. Erst mit adaptiver Optik und Laser wird die riesige Sammelfläche wirklich voll ausgenutzt werden können. Zusammen mit zehn anderen europäischen Instituten wird das erste Instrument für das E-ELT gebaut (oben links in Abb. 26).

Es wird äußerst wichtig sein, die Gravitationswellenforschung mit weltraumgestützter Gravitationswellenmessung einzubeziehen. Das ist ein Riesenprojekt der europäischen Raumfahrtorganisation ESA, die in etwa 15–20 Jahren ein weltraumgestütztes Interferometer mit Basislinien von etwa zwei Millionen Kilometern in den Weltraum bringen will (unten links in Abb. 26). Damit wird man dann sehen können, wie ein stellares Schwarzes Loch spiralförmig in ein massives Schwarzes Loch hineinstürzt und mit diesem verschmilzt. Das ist sozusagen die Idealmessung, um das *No Hair Theorem* wirklich ein



Abb 26: Zukunftsprojekte der relativistischen Astrophysik.

für alle Mal zu testen und *ad acta* zu legen. Aber wir werden sehen, wie es kommt.

Ich glaube, Sie haben auch ein Gefühl dafür bekommen, dass diese Art von Forschung nicht nur einen langen Atem und großes Interesse und Einsatz bedeutet, sondern auch eine Teamsache ist. Alleine kann das niemand machen, sondern man benötigt sehr viele Leute mit verschiedenen Begabungen bei Computern, Experimenten, Theorie und so weiter und so fort, um solche Forschungen immer weiter voranzubringen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Robert Williams and the Hubble Deep Field Team (STScI) and NASA; <https://hubblesite.org/contents/media/images/1996/01/389-Image.html?news=true>

Abbildung 2: NASA, ESA, J. Dalcanton, B. F. Williams, and L. C. Johnson (University of Washington), the PHAT team, and R. Gendler; https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/hs-2015-02-a-hires_jpg.jpg

Abbildung 3: ESO/Nogueras-Lara et al.; <https://cdn.eso.org/images/publicationjpg/eso1920a.jpg>

Abbildung 4: Christian Berger, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sagittarius_A*_location_in_visible_light.jpg (2018).

Abbildung 5: eigene Graphik

Abbildung 6: eigene Graphik

Abbildung 7: Newton's Principia, z. B. bei <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Principia1846-513.png>

Abbildung 8

links: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2003/03/1288-Image.html>

Abbildung 8

rechts: The Linda Hall Library; <https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/maarten-schmidt>

Abbildung 9: ESO/S. Gillessen et al.; <https://www.eso.org/public/images/eso0846a/>

- Abbildung 10: Angepasst von Reinhard Genzel, Frank Eisenhauer, and Stefan Gillessen, *Rev. Mod. Phys.* 82 (2010) 3121
- Abbildung 11: R. Genzel, C.H. Townes, *Physical Conditions, Dynamics and Mass Distribution in the Center of the Galaxy*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1987, 25: 377–423.
- Abbildung 12: https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/adaptive_optics/
- Abbildung 13: Stefan Gillessen und Frank Eisenhauer, *Physik Journal* 21 (2022) Nr. 8/9, 32
- Abbildung 14: Colloquium R. Genzel, <https://online.kitp.ucsb.edu/online/colloq/genzel1/oh/46.html>
- Abbildung 15: Schödel, R., Ott, T., Genzel, R. et al., A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way. *Nature* 419, 694–696 (2002). <https://doi.org/10.1038/nature01121>
- Abbildung 16: ESO: <https://www.eso.org/public/images/archive/category/paranal/>
- Abbildung 17: Ausschnitt aus <https://www.eso.org/public/images/eso1825d/>
- Abbildung 18: Gravity Collaboration, *A&A* 636, L5 (2020)
- Abbildung 19: Gravity Collaboration, *A&A* 657, L12 (2022)
- Abbildung 20: Gravity Collaboration, *A&A* 657, L12 (2022)
- Abbildung 21: Stefan Gillessen und Frank Eisenhauer, *Physik Journal* 21 (2022) Nr. 8/9
- Abbildung 22: Gravity Collaboration, *A&A* 657, L12 (2022)
- Abbildung 23: ESO/Gravity Consortium/L. Calçada; private Kommunikation
- Abbildung 24: GRAVITY Collaboration *A&A* 636, L5 (2020)
- Abbildung 25: ESA: <https://esahubble.org/images/opo0218f/>
- Abbildung 26: eigene Graphik

Abbildungen aus dem Internet können möglicherweise mit der Zeit Änderungen unterworfen sein. Die verwendeten Bilder repräsentieren den Status vom 14.11.2023.

Anmerkungen

- * Bearbeitung des Vortrags vom 15.10.2021 als Buchkapitel.
- 1 J. H. Piddington and H. C. Minnett: „Observations of Galactic Radiation at Frequencies of 1200 and 3000 Mc/s.“, Australian Journal of Scientific Research A Physical Sciences, vol. 4, p. 459 (1951). doi:10.1071/CH9510459.
- 2 J. H. Oort and G. W. Rougoor: The Position of the Galactic Centre; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 121, Issue 2, August 1960, Pages 171–173, <https://doi.org/10.1093/mnras/121.2.171>.
- 3 M. Schmidt, 3C 273: A Star-Like Object with Large Red-Shift. Nature 197, 1040 (1963). <https://doi.org/10.1038/1971040a0>.
- 4 D. Lynden-Bell and M. J. Rees, On Quasars: Dust and the Galactic Centre; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 152, p. 461 (1971); https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1971MNRAS.152..461L/doi:10.1093/mnras/152.4.461.

„Lichtquanten“ bzw. „Photonen“
*Über die hinter diesen Termini liegenden
mental Modelle und die stufenweise
Anreicherung ihrer Bedeutungsschichten**

Am 9. Juni 1905 erschien Einsteins Aufsatz ‚Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt‘. Es war dieser Aufsatz, und nicht die im gleichen *annus mirabilis* erschienenen Aufsätze über die Relativitätstheorie oder die Brownsche Molekularbewegung, den Einstein in einem Brief an einen Freund als „sehr revolutionär“ bezeichnete. Das dort von Einstein vorgestellte Konzept von ‚Lichtquanten‘ ist sehr vielschichtig und es herrschte jahrzehntelang Streit darüber, wie diese Lichtquanten zu interpretieren waren, zumal unterschiedliche Akteure ganz verschiedene mentale Modelle von Lichtquanten bzw. Photonen hatten. Im vorliegenden Aufsatz werden zwölf Bedeutungsebenen dieses Konzepts herausgearbeitet, die eine sehr unterschiedlich lange zurückreichende Geschichte haben. Einsteins Überlegungen und Heuristiken bis hin zum Salzburger Vortrag 1909 und seine sich wandelnden mentalen Modelle werden hier im Vergleich

zu denen von Newton, Planck, Lorentz und einiger Experimentatoren wie etwa Lenard, Stark und Millikan dargestellt.

Zwölf Bedeutungsschichten von ‚Lichtquantum‘ heute

Wenn Sie als naturwissenschaftlich interessierte Leser das Stichwort ‚Lichtquanten‘ sehen, werden für Sie wahrscheinlich fast automatisch *alle* oder zumindest doch die meisten der folgenden Bedeutungsschichten mitschwingen:

1. Teilchenartigkeit
2. Ausbreitung mit endlicher Lichtgeschwindigkeit
3. Gleichheit dieser Lichtgeschwindigkeit für alle Farben/Frequenzen
4. Licht (über)trägt Energie E
5. Licht überträgt Impuls $p = E/c$ (Strahlungsdruck)
6. Die Energie E des Lichts ist korreliert mit dessen Frequenz $E \sim \nu$ und diese Energie E ist quantisiert $E = h \cdot \nu$ (mit dem Planckschen Wirkungsquantum h)
7. Lichtquanten übertragen Drehimpuls; der Spin dieses Teilchens ist ± 1
8. Emission und Absorption von Lichtquanten durch Materie
9. Im Grenzfall kurzer Wellenlängen erscheinen diese Lichtquanten teilchenartig, im Grenzfall langer Wellenlängen hingegen wellenartig (Welle-Teilchen-Dualismus)
10. Lichtquanten gleicher Energie E und Spinausrichtung sind ununterscheidbar
11. Die Statistik dieser Lichtquanten ist die von Bosonen (Bose-Einstein-Statistik)
12. Lichtquanten sind auch die Eichbosonen der elektromagnetischen Wechselwirkung, also masselose Austauschteilchen, die von geladenen Teilchen wie z.B. Elektronen virtuell emittiert und absorbiert werden können und diese Wechselwirkung vermitteln.

Viele von Ihnen werden sich vielleicht gewundert haben, warum ich so altmodisch von ‚Lichtquanten‘ spreche und nicht das heute gebräuchliche Wort ‚Photon‘ benutze. Als Wissenschaftshistoriker muss ich mich jedoch vor solchen Projektionen auf die Ebene heutigen Wissens hüten. Moderne Wissenschaftsgeschichte bemüht sich um die Rekonstruktion der Entstehung von Wissen(schaft) im Kontext des jeweiligen Wissenshorizonts. Der Terminus ‚Photon‘ beispielsweise wurde erst Ende 1926 von Gilbert N. Lewis eingeführt, also gute 20 Jahre nach Einsteins berühmtem Aufsatz von 1905, und zudem mit – wie sich dann herausstellte – völlig falschen Annahmen über die Erhaltung von deren Anzahl.¹

Wir werden sehen, dass alle oben aufgelisteten Bedeutungsschichten von ‚Lichtquanten‘ eine sehr unterschiedlich lange zurückreichende Vorgeschichte haben, die ich im 2. Abschnitt in einer knappen Folge von *Kurzgeschichten* (im wahrsten Sinne des Wortes) aufrollen möchte. Um Einsteins Zugang, seinen spezifischen Stil der Theoriebildung zu verstehen, ist dieser Vergleich mit historischen Vorläufern von Newton bis Planck und auch mit den davon z. T. stark abweichenden Ansichten seiner Zeitgenossen unentbehrlich. Nachdem wir die schrittweise Entfaltung des Konzeptes in ihren historischen Phasen verfolgt haben, die immerhin von den 1660er Jahren bis zur Entstehung der QED um 1950 reichen, werde ich im 3. Abschnitt noch kurz auf die äußerst reservierte Rezeption eingehen, die das Konzept des Lichtquantums zwischen 1905 und 1922 erfahren hat. Doch beginnen wir mit einem Aufrollen der (mindestens) zwölf verschiedenen Bedeutungsschichten dieses komplexen Konzeptes.

Zur ersten Bedeutungsschicht: Teilchenartigkeit

Teilchenmodelle des Lichts im weitesten Sinne finden wir bereits bei antiken Atomisten, aber das erste ausgefeiltere Modell dieser Art entwickelte Sir Isaac Newton (1643–1727). In seinen frühen Aufsätzen in den *Philosophical Transactions* der Royal

Society 1672 war er bedacht darauf, seine zugrunde liegende korpuskulare Modellvorstellung zum Licht *nicht* durchscheinen zu lassen, aber sowohl in den *Principia* von 1687 wie auch in den „queries“ seiner *Opticks* von 1704 finden sich klare Andeutungen dieses Projekttilmodells. In seinen „mathematischen Prinzipien der Naturlehre“ leitet er beispielsweise die Lichtbrechung aus der stärkeren Anziehung der Lichtpartikel zum dichteren Medium ab und in query 29 seiner Optik fragt er:

*Are not the Rays of Light very small Bodies emitted from shining Substances? For such Bodies will pass through uniform Mediums in right Lines without bending into the Shadow, which is the Nature of the Rays of Light. They will also be capable of several Properties, and be able to conserve their Properties unchanged in passing through several Mediums, which is another condition of the Rays of Light.*²

Aber all denen, die ihn auf dieses Projekttilmodell des Lichts festnageln wollten (wie beispielsweise Robert Hooke in seiner ersten Kritik von Newtons ‚New theory of light and colours‘ 1672), hielt Newton gerne seine Unterscheidung zwischen Fakten und Hypothesen entgegen:

*that light is a body [...], it seems, is taken for my Hypothesis. Tis true, that from my Theory I argue the Corporeity of Light; but I do it without any absolute positiveness, as the word perhaps intimates; and make it at most but a very plausible consequence of the Doctrine, and not a fundamental Supposition, nor so much as any part of it.*³

Der Grund für diese Vorsicht war klar: Newton wusste sehr wohl, dass er dieses Modell des Lichts aus den Beobachtungen alleine nicht zweifelsfrei begründen konnte, sondern dass andere Deutungsmöglichkeiten verblieben:

But I knew, that the Properties, which I declar'd of Light, were in some measure capable of being explicated not only by that, but by many other

*Mechanical Hypotheses. And therefore I chose to decline them all, and to speak of Light in general terms, considering it abstractedly, as something or other propagated every way in straight lines from luminous bodies, without determining, what that Thing is.*⁴

Newton wollte nicht wie die Cartesianer ins Blaue hinein Hypothesen fingieren (*hypotheses non fingo*), was nicht ausschloss, dass er sich heuristisch häufig solcher Hypothesen bediente. Aber seine durch Prismenexperimente gewonnene Einsicht in die Zusammengesetztheit weißen Lichts aus farbigen Bestandteilen sollte keinesfalls durch solche spekulativeren Modellannahmen belastet werden. Deshalb beschränkte er sich in seinen weiteren Aufsätzen auf die gewissermaßen phänomenologische Theorie des weißen Lichts als aus farbigem zusammengesetzt. – Schon dies war damals kontrovers genug.

Im Hinblick auf den Vergleich Newtons mit Einstein bemerkenswert erscheint mir, dass auch Einstein in seinen Aufsätzen zum Lichtquantum, und ganz besonders in seinem ersten Aufsatz dazu von 1905 eine ähnlich vorsichtige Position einnahm. Wenn er 1905 in seinem Aufsatz über den ‚heuristischen Gesichtspunkt‘ schreibt: „monochromatische Strahlung von geringer Dichte (innerhalb des Gültigkeitsbereichs der Wienschen Strahlungsformel) verhält sich so, wie wenn sie aus n voneinander unabhängigen Energiequanten [...] bestünde“,⁵ dann erzeugt dieser fiktionalistische Als-Ob-Konjunktiv die gleiche intellektuelle Reserve, mit der auch Newton sein Projekttilmodell umhüllt. Genau wie Newton hat auch Einstein eine dringlichere und im Vergleich zum Lichtquantenmodell phänomenologischere Aussage zu verteidigen, nämlich die Formel $E = h \cdot \nu$, der gegenüber das zugrunde liegende Modell des Lichts in den Hintergrund geschoben wird. Doch die aus Vorsicht eingenommene rhetorische Pose macht das zugrunde liegende Modell heuristisch keineswegs weniger wirksam. In beiden Fällen schimmert es durch die erhaltenen Texte hindurch, ohne dass die Akteure

sich darauf festlegen lassen, was verständlich wird, wenn wir an die skeptische Rezeption des Lichtquantums nach 1905 denken.

Wie konkret Newton sich seine Lichtglobuli vorgestellt hat, in welches Detail seine hydromechanische Modellierung jener Lichtpartikel bei ihm ging, wissen wir aus einigen erhaltenen Manuskripten. Am ausgeführtesten ist sein 1664–65 entstandenes Notizbuch *Questiones quædam philosophicæ*, in dem wir u. a. folgende Skizze eines *Globulus of light* samt Begleittext finden (Abb. 1).

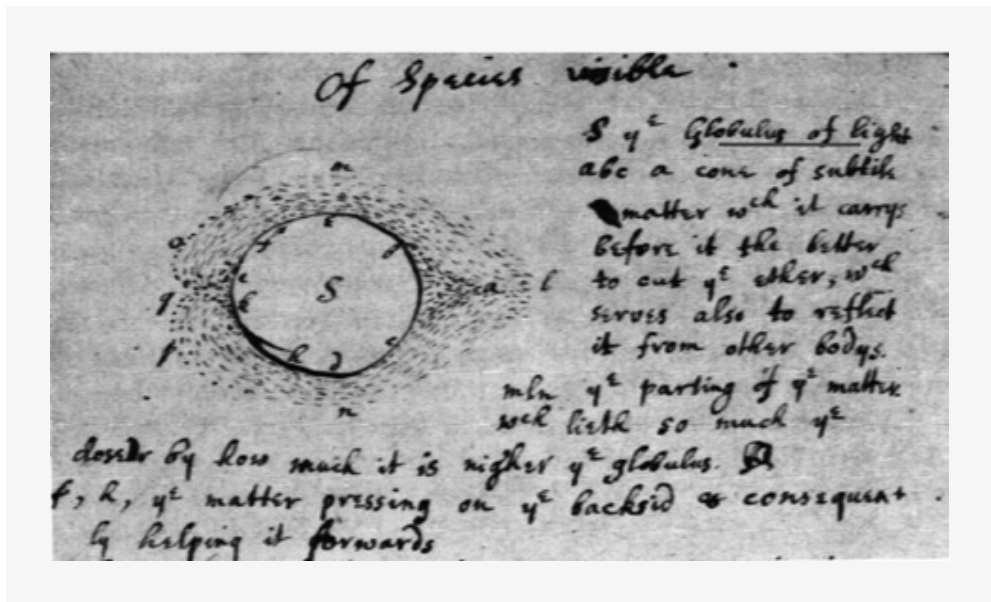


Abb. 1: Isaac Newtons *Questiones quædam Philosophiæ*, fol. 104v, MS Add. 3996, Cambridge University Library, Cambridge, UK.

Das kugelförmige Lichtteilchen wird hier von einer ‚subtile matter‘, also einem Lichtäther umhüllt gezeichnet. Die Bewegung des „Globulus of Light“ von links nach rechts führt dazu, dass der Lichtäther dieses Teilchen gewissermaßen umströmt (rechts eine Kompressionszone mit entsprechendem Widerstand, und links eine Verwirbelungszone, von der Newton annahm, dass diese rückwärtig eine Art Schub erzeuge, der das Lichtteilchen vorwärts presse: „by pressing on the back side ... consequently helping it forward“.⁶

Nun könnten Sie einwenden, dass seit der Konjunktur des Newtonschen Projektilmodells des Lichts bereits einige Zeit vergangen war und es kaum wahrscheinlich ist, dass Einstein direkt hieran ankoppelte. Brauchte er auch nicht, denn nur zwei Jahre vor seinem Aufsatz von 1905 hatte Joseph John Thomson (1856–1940) in Cambridge diese Erinnerungsarbeit für Einstein geleistet. In seinen Silliman Lectures als Gastdozent an der *Yale University* 1903 über *Electricity and Matter*, schon ein Jahr später 1904 auch ins Deutsche übersetzt, hatte J.J. Thomson die Vorstellung teilchenartig lokalisierter Lichtquanten herangezogen, den Lichtstrahl mit einem „Schwarm diskreter Teilchen“ verglichen und die Wellenfront als porös aufgefasst, um Auffälligkeiten in der Ausbreitung der Ende 1895 entdeckten Röntgenstrahlen zu erklären:

1. die extrem gerichtete und punktuelle Wirkung dieser harten ‚Nadel‘-Strahlung,
2. den Umstand, dass sich deren Intensität nicht wie $1/r^2$ abschwächte, sondern auch über größere Abstände r hinweg nahezu gleichblieb, wenn man von der gelegentlichen Ionisation eines direkt getroffenen Gasmoleküls absah.

Noch 1950 sprach Robert Millikan in seiner Autobiographie nicht von Einsteins Lichtquanten, sondern von der „Thomson-Planck-Einstein conception of localized radiant energy (i. e., the corpuscular or photon conception of light)“.⁷ Spekulationen über die Teilchenartigkeit bestimmter Formen der elektromagnetischen Strahlung sind also älter als Einsteins ‚heuristischer Gesichtspunkt‘ von 1905. Zugleich liegen in allzu naiven Teilchenvorstellungen auch physikalische Fallstricke.

Zur Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts

Zugegeben, ich habe keine analoge Skizze Einsteins, die Ihnen eine ähnlich ausgeprägte Veranschaulichung eines Lichtquants durch Einstein zeigen würde, wie vormals bei Newton

und J.J. Thomson. Doch heißt dies nicht, dass Einsteins Modellbildung weniger sophisticated war: nur etwas abstrakter. Aber auch bei ihm standen Überlegungen zur Teilchenartigkeit des Lichts in engem Zusammenhang mit deren Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die ‚Umgebung‘, der Äther Newtons, wird bei Einstein zum umgebenden Strahlungsfeld der anderen Lichtteilchen (dazu später mehr), und die Konstanz der Ausbreitungsgeschwindigkeit war bekanntlich eines der Axiome seiner nur drei Monate später bei den *Annalen der Physik* eingereichten Arbeit ‚Zur Elektrodynamik bewegter Körper‘. Wir sehen hier eine der untergründigen, versteckten Verbindungen zwischen den berühmten Aufsätzen von 1905.⁸

Die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit war bekanntlich schon vor Newton durch Ole Rømer anhand der Beobachtung der Zeitverzögerungen des Durchgangs von Jupitermonden festgestellt worden, auch wenn Rømer keinen konkreten Zahlenwert dafür angegeben hatte. Erste numerische Abschätzungen erfolgten dann durch Huygens, Cassini, Halley und andere Astronomen, aber erst im 19. Jahrhundert war die experimentelle Technik so weit fortgeschritten, dass die Lichtgeschwindigkeit mit raffinierten Instrumenten wie etwa schnell rotierenden Spiegelsystemen oder Michelsonschen Interferometern auch in terrestrischen Experimenten gemessen werden konnte.⁹

Von diesen Präzisionsmessungen in ruhenden Medien unbenommen war die Frage, wie sich diese Lichtgeschwindigkeit ändert, wenn der Emitter des Lichts oder das Medium, in dem das Licht sich ausbreitet, seinerseits relativ zum Beobachter in Bewegung ist. Das Superpositionsprinzip der klassischen Mechanik ebenso wie hydrodynamische Modelle der Lichtausbreitung ließen eigentlich erwarten, dass sich die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit c_0 dann auch entsprechend verändert. Fizeaus experimentelle Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in fließendem Wasser der Geschwindigkeit w (bis zu 6 m/sec) ließ jedoch auf eine nur partielle Mitführung schließen, die Fresnel zu $c' = c_0/n - w(1 - 1/n^2)$ quantifizierte.¹⁰

Auch Einstein erwog, bevor er sich zum Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum durchrang, deren Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Emitters, wie Projektionstheorien des Lichts es nahelegten. Wir wissen das aus seiner Korrespondenz sowie aus Einsteins Kommentaren zu den zeitgenössischen Arbeiten von Walter Ritz, der genau solche Emissionstheorien weiter durchspielte.¹¹ Einsteins Postulat einer Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen, das seiner speziellen Relativitätstheorie von 1905 neben dem Relativitätsprinzip der Bewegung als zweites Axiom zugrundeliegt, war die Konsequenz aus dem Scheitern dieser theoretischen Überlegungen zu Emissionstheorien. Wir sehen hier eine erste untergründige Verbindung zwischen Einsteins Aufsätzen im *annus mirabilis* 1905. Der Fresnelsche Mitführungskoeffizient, der in der klassischen Elektrodynamik nur aus recht künstlichen Annahmen über eine partielle Mitführung des Lichtäthers ‚erklärt‘ werden konnte, war in Einsteins ‚Elektrodynamik bewegter Körper‘ eine fast triviale Konsequenz seines relativistischen Additionstheorems der Geschwindigkeiten $v_{\text{relat}} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$, das an die Stelle der klassischen Superpositionsregel $v_{\text{klass}} = v_1 + v_2$ trat.

Kasten 1

Ableitung des Fresnel-Fizeauschen Mitführungskoeffizienten aus der relativistischen Geschwindigkeitsaddition in dieser Form durch M. v. Laue: *Ann. Phys.* (4) 23 (1907), 989.

Wie addiert man die Geschwindigkeit von Licht, das sich im Medium Wasser in Richtung von dessen Flussrichtung ausbreitet? Klassisch gilt Wasser $\xrightarrow{v_2}$ + Licht $\xrightarrow{v_2 = c/n}$ = $v_1 + v_2$

Aus Einsteins relativistischer Formel $v_{\text{relat}} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$

folgt für die relativistische Addition von $v_1 = w$ und $v_2 = c/n$ mit n als Brechungsindex von Wasser

$$v_{\text{relat}} = \frac{\frac{c}{n} + w}{1 + \frac{w \cdot \frac{c}{n}}{c^2}} \cong \left(\frac{c}{n} + w\right) \left(1 - \frac{w}{nc} + \frac{1}{2} \left(\frac{w}{nc}\right)^2\right) \cong \frac{c}{n} + w \left(1 - \frac{1}{n^2} \frac{c}{c}\right) + O\left(\frac{w}{c}\right)^2$$

Gleichheit der Lichtgeschwindigkeit für verschiedene Farben

Dass die Lichtgeschwindigkeit für verschiedenfarbiges Licht exakt gleich groß ist, schien Newton keineswegs evident. 1691 fragte er deswegen den ‚Astronomer Royal‘, John Flamsteed (1646–1719), ob bei der Beobachtung von Jupitermonden kurz nach deren Durchgang hinter dem Planeten nicht vielleicht erst die rote und danach erst die blaue Komponente ihres Lichts beim irdischen Beobachter ankommt.

Doch Flamsteeds negatives Ergebnis brachte Newton von der Hypothese, dass rotes Licht schneller als blaues sei, wieder ab. Stattdessen vermutete er nun, dass die je nach Farbe unterschiedlich starke Lichtbrechung entweder von einer verschiedenen Größe oder einer verschieden großen Masse der Lichtglobuli herrühre.¹² Die Konstanz und Gleichheit der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum wurde später nicht für nur alle spektralen Komponenten des Lichts, sondern auch für andere Transversalwellen bestätigt (etwa Wärmestrahlung, ultraviolettes Licht, Röntgenstrahlung, γ -Strahlen, Radiowellen usw.), die von Maxwells Theorie allesamt als Formen elektromagnetischer Strahlung gedeutet wurden, die sich nur in ihrer Wellenlänge bzw. Frequenz voneinander unterschieden.

Energietransport und Impulstransport (Strahlungsdruck)

Auch die Schichten 4 und 5 des mentalen Modells von Lichtquanten haben eine lange zurückreichende Geschichte. Schon Kepler nahm zur Erklärung der Orientierung der Kometenschweife weg von der Sonne so etwas wie einen Strahlungsdruck an, während Newton sich vorstellte, dass die Sonnenstrahlen zu einer Erwärmung der Dämpfe im Schweif des Kometen führen, die sich dann, wie Rauch im Kamin, von der Quelle der Hitze wegbewegen.¹³ Im 18. Jahrhundert glaubten gleich mehrere Naturforscher, den aus dem Projektilmodell so anschaulich, gewissermaßen unwillkürlich folgenden Strahlungsdruck experimentell nachgewiesen zu haben. Einer der ersten war Wilhelm Homberg, der 1708 mit einem 1 Meter großen Tschirnhaus'schen Brennspeigel fasrigen Asbest im Fokus dieses Instruments von einer Seite auf die andere zu drehen vermochte, was er als Evidenz dafür ansah, „que les rayons de soleil eussent la force de presser & de pousser, même quand ils sont réunis par le Miroir ardent.“ Das freie Ende einer Feder, das von der geballten Sonnenstrahlung eines etwa 30 cm Durchmesser großen Brennglases getroffen wurde, geriet in merkliche Schwingungen, so als ob es mit einem Stock angeschlagen worden sei.¹⁴ Dass die enorme Hitzewirkung im Fokus dieser Brennspeigel und -gläser im Verbund mit der Verdampfung von Materie und den dadurch ausgelösten Strömungen zu Störeffekten führen könnten, wurde den Experimentatoren schon Mitte des 18. Jahrhunderts klar: Die erste Beobachtung einer frei schwingenden Nadel im evakuierten Glasgefäß (Abb. 2) machte 1792 der Reverend Abraham Bennet (1749–99), aber sein Ergebnis war ernüchternd: „I could not perceive any motion distinguishable from the effects of heat“. Deshalb vermutete er einen grundsätzlichen Defekt des Projektilmodells: „Perhaps sensible heat and light may not be caused by the influx or rectilineal projections of fine particles:

but by the vibrations made in the universally diffused caloric or matter of heat, or fluid of light.“¹⁵

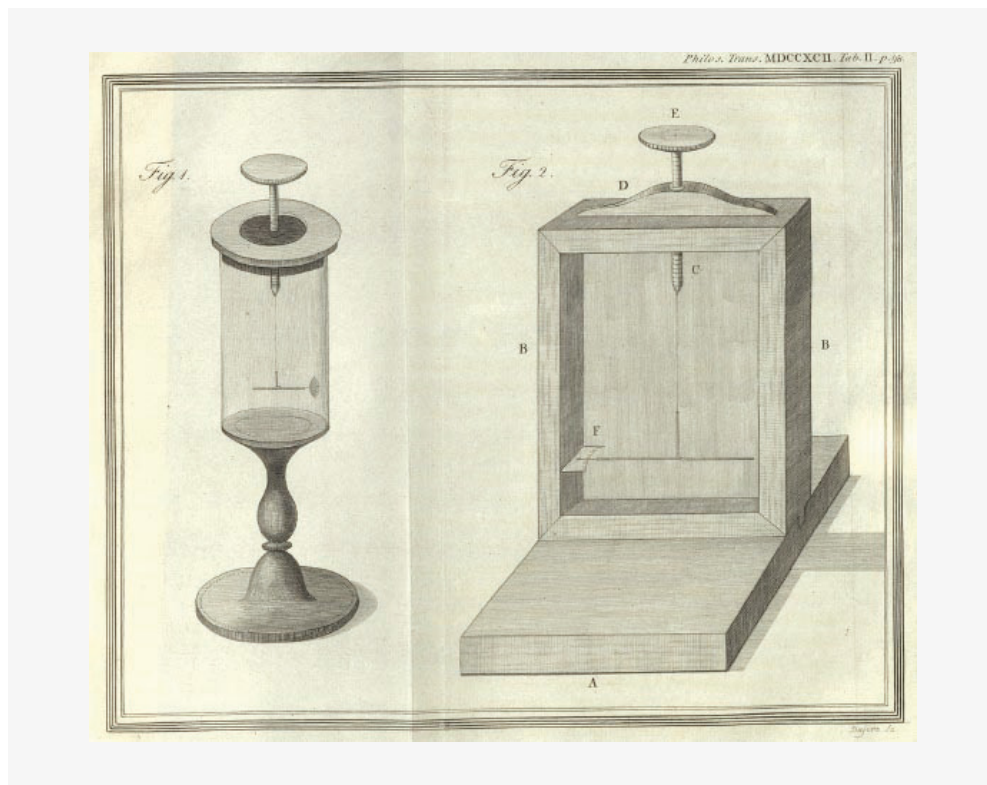


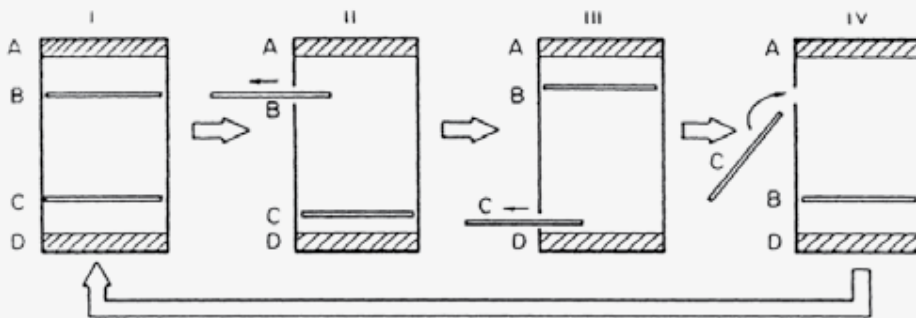
Abb. 2: Aufbau des Experiments von Bennet zur Messung des Strahlungsdrucks auf eine frei aufgehängte Nadel in einem teilvakuierten Glasgefäß. Aus Bennet (1792) Tafel II.

Auch das Crookes'sche Radiometer wurde lange Zeit in diesem Kontext als ‚Lichtmühle‘ interpretiert, obwohl Arthur Schusters Aufsatz von 1876 gezeigt hatte, dass dessen Erklärung eigentlich nur der thermischen Wirkung auf die Restgase im teilvakuierten Gefäß zu verdanken war.¹⁶ Ein experimenteller Nachweis des Lichtdrucks gelang 1901 dem Russen Pjotr Nikolajewitsch Lebedev (1866–1912) eher qualitativ, noch mit über 20 % Fehlermarge, und kurz danach bereits mit stark verbesserter Genauigkeit den Amerikanern Ernest Fox Nichols (1869–1924) und Gordon Ferry Hull (1870–1956). Ersterer bemühte sich besonders um die Konstruktion geeigneter ‚Windfahnen‘, letztere

benutzten eine später von Bell und Green weiter verbesserte ballistische Methode. Theoretischer Vergleichsstandard bei diesen Präzisionsmessungen Anfang des Jahrhunderts waren Voraussagen der Größe dieses Lichtdrucks durch James Clerk Maxwell (basierend auf dessen Theorie elektromagnetischer Strahlung) und Adolfo Bartoli (1851–96), aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, angewendet auf einen Kreisprozess mit Wärmestrahlung.¹⁷

Kasten 2

Bartolis Gedankenexperiment 1876:



A und D sind ideal-schwarze Körper im Gleichgewicht mit dem Hohlraum. Die Temperatur von D (Raum CD) sei höher als die von A (Raum AB).

Durch geschicktes Verschieben der Membran B von A Richtung D könnte arbeitsfrei Wärme vom kälteren zum wärmeren Körper geführt werden, wenn diesem Verschieben nicht eine Gegenkraft, der Strahlungsdruck, entgegenwirken würde. Wenn kein Widerspruch zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik zugelassen werden soll, *muss* dieser Strahlungsdruck angenommen werden. Vgl. Adolph Bartoli: Die strahlende Wärme und der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie, *Repertorium der Physik* 21, (1884): 198–207. B. Carazza & H. Kragh: Bartoli and the problem of radiant heat, *Annals of Science* 46 (1989): 188.

Zum Zeitpunkt der Einreichung von Einsteins Aufsatz 1905 war die Existenz dieses Strahlungsdrucks also gerade experimentell eindeutig geklärt worden. Die entscheidenden Arbeiten fallen genau in die Phase, in der Einstein die *Annalen der Physik* und andere physikalischen Zeitschriften in seiner Freizeit als Patentamtsprüfer intensiv studierte. Dass er sie kannte, zeigen Bemerkungen seiner Aufsätze von 1905 und 1909 über den „erst in neuerer Zeit experimentell konstatierte(n) Lichtdruck, welcher in der Theorie der Strahlung eine so wichtige Rolle spielt“.¹⁸ Der inverse Effekt, der Strahlungsrückstoß eines Atoms bei Emission eines Lichtquants, wurde 1910 von John Henry Poynting (1862–1914) mithilfe hochempfindlicher Radiometer und 1933 von Otto Robert Frisch an Natrium-Atomen in Molekularstrahlen nachgewiesen.¹⁹

Proportionalität der Energie zur Frequenz

Aber nicht alles konnte Einstein bereits der Literatur entnehmen. Hätte er sich auf sie verlassen, so wäre ihm die Korrelation der Energie des Lichtes mit seiner Frequenz entgangen. Denn sowohl Lebedev wie auch Nichols & Hull gingen von der klassischen Elektrodynamik aus, die die Energie des Lichts stets als proportional zur Intensität I annahm: $E \sim I \sim B^2 + E^2$. So schreibt Lebedev ausdrücklich: „Diese Druckkräfte des Lichtes sind der auffallenden Energiemenge direct proportional und unabhängig von der Farbe des Lichtes“. Nichols & Hull meinten, dieses Ergebnis zwei Jahre später (1903) bestätigen zu können, da auch ihre Messungen des Lichtdrucks unabhängig vom Filter (Luft, Glas und Wasser) zunächst eine frequenzunabhängige Energie proportional zur Intensität des Lichts nahelegten.²⁰

Dass Einstein hier *nicht* auf die falsche Fährte geriet, verdankte er seinem außerordentlichen Gespür für die Tragfähigkeit experimenteller Resultate. Statt nur auf diesen einen Experimentierstrang zu setzen, hatte er die verschiedensten Bereiche experimenteller Naturforschung im Blick, deren Er-

gebnisse er auf neuartige Weise miteinander verband. Statt sich an diesem einen Strang weiter zu hangeln, knüpfte Einstein aus diesem und anderen ein rasch dichter werdendes Netz, mit dem er sich gegen unvermeidliche Fehler oder drohende Sackgassen in jedem einzelnen dieser Stränge absicherte.²¹

Seit 1887 war bekannt, dass bei der Bestrahlung von Kathoden in evakuierten Röhren mit ultraviolettem Licht negativ geladene Elektrizität, sog. Kathodenstrahlen freigesetzt werden.²² Philipp Lenard hatte 1902 konstatiert, dass die im sogenannten photoelektrischen Effekt freigesetzte Ladungsmenge unabhängig von äußerer Spannung ist. Daraus schloss er, „dass das Licht die Strahlenbildung nicht außerhalb, sondern im Innern des Körpers veranlasst, wo es auch absorbiert wird, derart, dass dort negative Electricitätsquanten mit bestimmten Anfangsgeschwindigkeiten in fortschreitende Bewegung versetzt werden, sodass sie aus dem Körper herausfahren können“.²³ Es gab zwei Möglichkeiten der Modellierung:

1. Die kinetische Energie freigesetzter Kathodenstrahlen (oder Elektronen, wie einige, nicht jedoch Lenard, die „Electricitätsquanten“ zu nennen begannen) stammt von absorbierter UV-Strahlung oder
2. Die UV-Strahlung wirkt nur als eine Art Trigger, der Ladungen freisetzt.

Experimentell fand Lenard, dass die Anfangsgeschwindigkeiten der Kathodenstrahlen (Elektronen) weitgehend unabhängig von der Lichtintensität waren, weshalb er Option 1 ausschloss und sich in seinem mentalen Modell des Prozesses auf Option 2 festlegte. Lenards Triggerhypothese besagte, dass

die Anfangsgeschwindigkeiten der ausgestrahlten [Electricitäts]Quanten überhaupt nicht der Lichtenergie entstammen, sondern innerhalb der Atome schon vor der Belichtung vorhandenen heftigen Bewegungen, sodass die Resonanzbewegungen [zwischen UV-Strahlung und Atomen] nur eine auslösende Rolle spielen [...] für Bewegungen, welche dann

*dauernd in voller Geschwindigkeit innerhalb der Körperatome vorhanden sein müssten.*²⁴

Für Lenard stammte die kinetische Energie der Kathodenstrahlen also *nicht* vom Licht. Mit diesem – wie sich später herausstellte – falschen mentalen Modell hatte er sich ein tieferes Verständnis seiner eigenen Experimente verbaut.

Einstein war von dieser Lenardschen Triggerhypothese *nicht* überzeugt. Seine Lichtquantenhypothese legte eine andere Modellierung des photoelektrischen Effektes (eher im Sinne von Lenards verworfener Option 1) nahe:

*Nach der Auffassung, daß das erregende Licht aus Energiequanten von der Energie $(R/N)h\nu$ bestehe, läßt sich die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch Licht folgendermaßen auffassen. In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen Energiequanten ein, und deren Energie verwandelt sich wenigstens zum Teil in kinetische Energie von Elektronen. [...] Außerdem wird anzunehmen sein, daß jedes Elektron beim Verlassen des Körpers eine (für den Körper charakteristische) Arbeit P zu leisten hat, wenn es den Körper verläßt.*²⁵

Die kinetische Energie der freigesetzten Elektronen war somit gleich der Energie der auftreffenden Strahlung minus der Austrittsarbeit P . Sie konnte bestimmt werden, indem man das positive Potential so lange erhöhte, bis kein freigesetztes Elektron mehr die Gegenspannung durchlaufen konnte, der photoelektrische Strom also Null wurde. Dieses Grenzpotential Π mal der Elementarladung dieser ‚Electricitätsquanten‘ war also gleich der maximalen kinetischen Energie = $h\nu - P$. Die experimentelle Ermittlung dieses Grenzpotentials als Funktion der Frequenz einfallender möglichst monochromatischer Strahlung ergab die Möglichkeit, deren Energie als Funktion der Frequenz zu bestimmen (Abb. 3):

Ist die abgeleitete Formel richtig, so muß [das positive Grenzpotential] Π , als Funktion der Frequenz des erregenden Lichtes in kartesischen Koordinaten dargestellt, eine Gerade sein, deren Neigung von der Natur der untersuchten Substanz unabhängig ist.

Lenard hatte aufgrund seines andersartigen Modells *nicht* nach dieser Frequenzabhängigkeit gesucht, sondern lediglich eine Abhängigkeit des Grenzpotentials von der Lichtsorte konstatiert. Zwischen 1900 und 1915 erschienen zahlreiche Artikel zum Photoeffekt, in denen dieser Zusammenhang zwischen der Wellenlänge der den Photoeffekt anregenden Strahlung und der Energie der Elektronen untersucht wurde, mit äußerst widersprüchlichen Ergebnissen: nach einigen Experimentatoren war die Energie proportional zum Quadrat der Frequenz oder zu $\nu^{2/3}$ oder gar zu $\log \nu$.²⁶ Hätte Einstein sich auf die vorliegenden Untersuchungen verlassen, wäre ihm der lineare Zusammenhang genau wie Lenard u. v. a. entgangen.

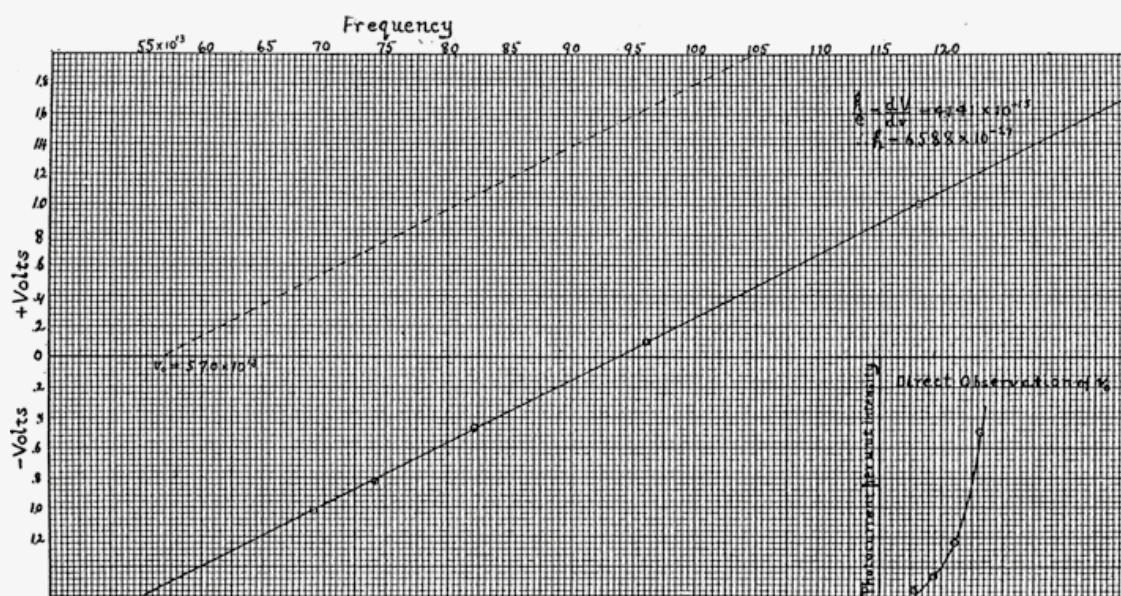


Abb. 3: Das experimentelle Ergebnis von Millikan (1916, S. 377), mit Genehmigung der *American Physical Society* ©1916.

Viele dieser Messungen benutzten einen zu kleinen Frequenzbereich, für den keine aussagekräftigen Extrapolationen zur Gesamtabhängigkeit der Energie von der Frequenz gemacht werden konnten. Ein weiteres experimentelles Problem bei diesen Messungen war die rasche Oxidation der Metalloberflächen in den evakuierten Röhren bereits während der Messung, was deren Ergebnisse verfälschte, weil die Austrittsarbeit für metallische und oxidierte Oberflächen eine andere war. Eine klare experimentelle Bestätigung dieser Ergebnisse (Abb. 3) erfolgte erst zehn Jahre später (1916 publiziert) durch Robert Millikan (1868–1953). Ihm gelang es 1915, die Metalloberflächen in seinen evakuierten Röhren noch kurz vor der Exponierung mit Strahlung wieder frisch abzuschleifen, wofür der kunstreiche

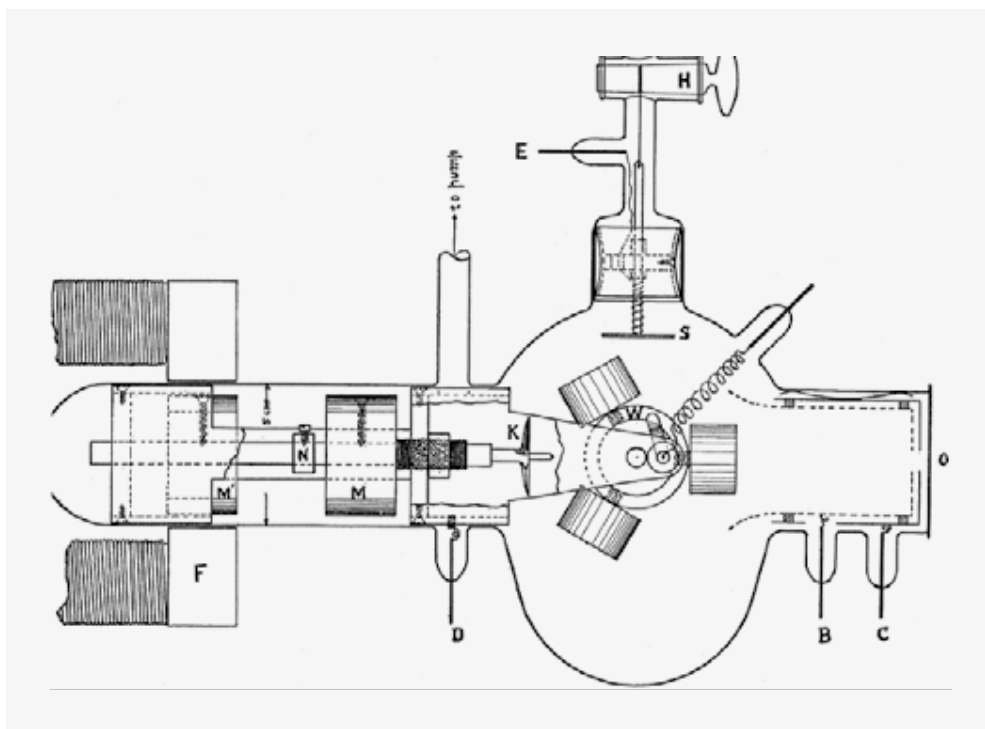


Abb. 4: Millikans „machine shop in vacuo“ links im Innern seiner evakuierten Röhre, mit dem die am drehbaren Rad W montierten Metalloberflächen von Na, K u. Li unmittelbar vor der Messung des photoelektrischen Effekts abgeschliffen werden konnten. Aus Millikan 1916: 362.

Einbau eines ganzen „machine shop in vacuo“ in die Röhren erforderlich war (Abb. 4).²⁷

Dabei ist nicht zu vergessen, dass Millikan ausdrücklich angetreten war, diese Einsteinsche Voraussage zu *widerlegen*: „I spent ten years of my life testing that 1905 equation of Einstein's and, *contrary to all my expectations*, I was compelled in 1915 to assert its unambiguous verification in spite of its unreasonableness since it seemed to violate everything we knew about the interference of light.“²⁸ Es ist also *nicht* so wie manche Sozialkonstruktivisten behaupten, dass Experimentatoren nur das bestätigen, was sie erwarten.

Energiequantisierung

Bei Max Planck (1858–1947) hatte die Energiequantisierung nur den Status eines Notbehelfs, der von ihm eingeführt wurde, um zu verhindern, dass die Wechselwirkung Strahlung–Resonator zu einem immer stärkeren Überwiegen immer kleinerer Schwingungen (größerer λ) im Strahlungsfeld führt.²⁹ Planck dachte sich die Energie der elektromagnetischen Strahlung *kontinuierlich*, denn die Maxwellsche Elektrodynamik ist eine Kontinuumstheorie. Die Maxwellgleichungen waren für ihn also eine exakte Darstellung der elektrodynamischen Vorgänge im Vakuum, an der unbedingt festzuhalten war.³⁰ Die Unstetigkeit kommt laut Planck nur beim Prozess der Energieübertragung vom Strahlungsfeld auf den Oszillator ins Spiel, da dieser unstehtig erfolgt. Planck glaubte also, dass die Diskontinuität nur aufgrund der Wechselwirkung von Strahlung und Materie ins Spiel kam, während das elektromagnetische Feld selbst ein klassisches Kontinuum bliebe. Wie eine mittlerweile große Schar von Kommentatoren festgestellt hat, war dies eine unentschlossene Kompromisslösung, die Neues mit Altem zu kombinieren versucht.

Kasten 3

Plancks Herleitung 1900 war innerlich zwiespältig: Im Ansatz für die Energiedichte u des Feldes als Funktion der Frequenz benutzte er eine aus der klassischen Elektrodynamik folgende Formel:

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot U$$

D. h. die Schwingungsmoden des Strahlungsfeldes wurden als *kontinuierlich* vorausgesetzt. Bei der kombinatorischen Berechnung der ‚Komplexionen‘ K , also der Zahl der Mikrozustände, die einem gegebenen Makrozustand fester Energie und Temperatur entsprechen, setzte er dem Vorbild von Boltzmann (1877) folgend

$$K = \frac{(N + P - \nu)!}{N! P!}.$$

Die Energieaufnahme und -abgabe durch die Resonatoren wurde in diesem Schritt also als *diskontinuierlich* vorausgesetzt. Um diese Komplexion überhaupt kombinatorisch berechnen zu können, war die Endlichkeit der auf die N Resonatoren zu verteilenden Energieportionen zwingend notwendig, aber es blieb laut Planck eine „nur formale Annahme“, auch wenn der spätere Grenzübergang $h \rightarrow 0$ anders als bei Boltzmann 1877 unmöglich blieb.

An diesem Punkt setzt die Kritik von Einstein ein. In einem vielzitierten Brief an Conrad Habicht kündigt er im Mai 1905 einen „sehr revolutionären“ Aufsatz an.³¹ Was genau war das „sehr Revolutionäre“ seiner Abhandlung vom März 1905? *Vordergründig*: die Einführung von Lichtquanten. Die Quantisierung wurde ausdrücklich *nicht* beschränkt auf die Resonatoren oder die Wechselwirkung Materie–Feld, sondern auch für die Energie des elektromagnetischen Feldes selbst gefordert:

bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahls [ist] die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganzes absorbiert und erzeugt werden können.³²

Bald schon fand dann eine terminologische und konzeptuelle Ausweitung statt von ‚Lichtenergiequanten‘ (= Aufteilung der Energie in Paketen) zu ‚Lichtquanten‘ (= Modellierung von Licht als einem teilchenhaften Phänomen). Wie schon bei der Energiequantisierung durch Planck, so sehen wir auch hier bei Einstein einen graduellen Prozess der Klarwerdung über die radikalen Implikationen dieses Schrittes. Dass dieser Prozess sich über Monate oder gar Jahre hinzieht, ist übrigens der Normalfall, woraus sich erklärt, dass Wissenschaftshistoriker mit den beliebten Jubiläen einer Idee oder Entdeckung, die diese auf einen genauen Zeitpunkt festzunageln versuchen, so ihre Probleme haben. Dies nur am Rande.

Aber warum war dieser Gedanke so ‚revolutionär‘? Wie wir gesehen haben, war die Idee einer Teilchenartigkeit des Lichts sehr viel älter. Das neue war die Quantisierung der Energie dieser Teilchen: diese war mit der klassischen Kontinuumsmechanik und Elektrodynamik Maxwells unvereinbar. Einstein hatte erkannt, dass „nicht nur die Molekularmechanik, sondern auch die Maxwell-Lorentz’sche Elektrodynamik mit der Strahlungsformel nicht in Einklang gebracht werden kann.“³³ Auch wenn Einstein dies klar war: im Aufsatz von 1905 hütete er sich, diese weitreichenden Implikationen allzu klar auszusprechen. Er hatte die völlig unspektakuläre Überschrift: „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“, ist datiert Bern, 17. März 1905 und erschien im Heft vom 9. Juni 1905 der *Annalen der Physik*, zu dieser Zeit herausgegeben von Willy Wien und Max Planck, also genau den beiden theoretischen Physikern, an deren Werk Einstein direkt anknüpft – leider sind keine Gutachten o. ä. erhalten!

„Heuristisch“: das war nicht nur zu dieser Zeit, sondern ist vielleicht bis heute eine etwas schillernde Vokabel mit einer Interpretationsspanne, die von ‚problemlösungsorientiert‘ über ‚tentativ‘, ‚unbeweisbar‘ bis ‚unsicher‘ reicht. *Webster’s Dictionary* definiert ‚heuristic‘ als „providing aid and direction in the solution of a problem but otherwise unjustified or incapable of justification.“ Zusammen mit der eben zitierten Briefstelle an Habicht wird jedoch klar: Einstein wusste, dass sein Vorschlag gewagt war und er Vorsicht walten lassen musste. Daher das Konjunktivische an der Formulierung Einsteins vom März 1905. Er sagt keineswegs: Es *gibt* Lichtquanten der Energie $E = h \cdot \nu$, sondern formuliert viel vorsichtiger, es läge nahe, monochromatische Strahlung der Frequenz ν im Wien-Limes so aufzufassen, *als ob* sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten ... *bestünde*. Die Wechselwirkung Materie–Feld bestünde dann konsequentermaßen in der Emission und Absorption solcher quantisierter Energiepakete: ein Gedanke, der sich 1913 in Bohrs Atommodell wiederfindet. Ein anschauliches Modell, so wie später bei Bohr, wird für diese Annahme bei Einstein 1905 jedoch *nicht* gegeben. Sein Argumentationsstil ist der von Gustav Robert Kirchhoff, dem ersten Professor für theoretische Physik an der Universität Berlin, Vorgänger Plancks: *keine* detaillierten Materiemodelle, sondern möglichst allgemeine, modellunabhängige Annahmen. Auch Plancks ‚Resonatoren‘, eben nicht konkrete Atome oder Moleküle, sondern allgemein schwingungsfähige Systeme oder sein ‚schwarzer Körper‘, sind Beispiele für diesen Stil der Konzeptualisierung, der auch für Einstein charakteristisch war.

Aber wie argumentierte Einstein denn nun für die Existenz oder wenigstens die Plausibilität der Annahme solcher Lichtenergiequanten? Mit einer der für Einstein so typischen zweispurigen Ableitungen, in denen er ein und das gleiche System zunächst mit zwei verschiedenen theoretischen Instrumentarien analysiert, soweit er kommt, und dann in einem zweiten Schritt die Gleichheit der auf beiden Wegen ermittelten Ausdrü-

cke für die gleichen physikalischen Größen fordert, die vorliegen muss, wenn beide miteinander konsistent sein sollen. Gegeben seien n dieser Lichtquanten (oder allgemeiner teilchenartig lokalisierte Systeme) in einem Volumen V_0 . Dann lässt sich fragen, wie wahrscheinlich es ist, dass alle diese n punktförmigen Systeme nicht nur im Ausgangsvolumen V_0 , sondern auch in einem kleineren Teilvolumen V liegen. Je kleiner V gegenüber V_0 ist, desto unwahrscheinlicher wird dies sein, und Antworten auf diese Frage lassen sich einerseits aus der allgemeinen Wahrscheinlichkeitstheorie (im Kasten 4 links) und andererseits aus der Wien/Planckschen Strahlungstheorie (im Kasten 4 rechts) berechnen. Da beide miteinander kompatibel sein sollen, müssen diese beiden Ausdrücke gleich sein, was nur möglich ist, wenn $E = h\nu$ ist, w. z. b. w.

Kasten 4

Einsteins (1905) Vergleich von idealem Boltzmann-Gas mit Strahlung im Wien-Limes

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \cdot \ln(W)$$

$$S = V \int_0^\infty \varphi(u, \nu) d\nu$$

$$W = \left(\frac{V}{V_0}\right)^n \cong \text{Wahrscheinlichkeit}$$

$$u_{\text{Wien}} = \alpha \nu^3 \cdot e^{-(\beta\nu)/T}$$

dafür, dass sich in einem zufällig herausgegriffenen Zeitmoment alle n in einem gegebenen Volumen V_0 unabhängig voneinander beweglichen Punkte zufällig im gleichen Volumen V befinden.

$$S(V, T) - S(V_0, T)$$

$$= 1/T = d\varphi/du$$

$$\frac{R}{N} \ln \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^n \right] (*)$$

$$= \frac{R}{N} \ln \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^{(NE/R\beta\nu)} \right] (**)$$

$$(*), (**) \Rightarrow n = NE/R\beta\nu$$

$$\equiv \frac{E}{k\beta\nu} = \frac{E}{(h \cdot \nu)}$$

$$\frac{R}{N} = k \quad \beta = \frac{h}{k}$$

Lichtquantenhypothese: „monochromatische Strahlung von geringer Dichte (innerhalb des Gültigkeitsbereiches der Wienschen Strahlungsformel) verhält sich so, wie wenn sie aus n voneinander unabhängigen Energiequanten von der Größe $R\beta\nu/N [= h \cdot \nu]$ bestünde.“³⁴

Exkurs: Vergleich der Zugänge von Planck und Einstein

Wir haben im ersten Teil dieses Aufsatzes gesehen, wie Planck und Einstein beide Netze aus Strängen der Thermodynamik, statistischer Mechanik und der Strahlungstheorie weben und dabei vielfach auf die gleichen Knotenpunkte rekurren: Entropie, deren Ableitungen und die Verknüpfung mit der Wahrscheinlichkeit W eines Systems, gemessen über dessen Komplexionen (also die makroskopisch nicht unterscheidbaren Realisierungen dieses Systems). Aber Planck webte dieses Netz vorwiegend mit dem Ziel der Stabilisierung, der Ausbesserung, allenfalls der minimalst-möglichen Modifikation (im Sinne einer Schadensbegrenzung für die klassische Physik, an der er soweit es irgend geht festhalten wollte). Zwei Zitate, die diese Einstellung Plancks belegen:

*Ich suche die Bedeutung des elementaren Wirkungsquantums (Lichtquants) nicht im Vakuum, sondern an den Stellen der Absorption und Emission, und nehme an, daß die Vorgänge im Vakuum durch die Maxwell'schen Gleichungen genau dargestellt werden. Wenigstens sehe ich noch keinen zwingenden Grund, von dieser Annahme, die mir einstweilen die einfachste scheint ... abzugehen.*³⁵

Es scheint mir, daß gegenüber der neuen Einsteinschen Korpuskulartheorie des Lichtes die größte Vorsicht geboten ist ... Die Theorie des Lichtes würde nicht um Jahrzehnte, sondern um Jahrhunderte zurückgeworfen, bis in die Zeit, da Christian Huygens seinen Kampf gegen die übermächtige Newtonsche Emissionstheorie wagte ... Und alle diese Er-

rungschaften, die zu den stolzesten Erfolgen der Physik, ja der Naturforschung überhaupt gehören, sollen preisgegeben werden um einiger noch recht anfechtbarer Betrachtungen willen? Da bedarf es denn doch noch schwereren Geschützes, um das nachgerade sehr stark fundierte Gebäude der elektromagnetischen Lichttheorie ins Wanken zu bringen.³⁶

Einstein hingegen suchte offensiv gerade die Bruchstellen, legt den Finger auf die brennenden Wunden, und sah darin den Anlass zur Suche nach grundlegend Neuem. Eine weitere mögliche Bedeutung von „heuristischer Gesichtspunkt“ ist: er soll zukünftiger Forschung den Weg freimachen. Der erste Schritt dahin war die Voraussage etlicher experimenteller Effekte bzw. erfolgreiche Retrodktion, d. h. Erklärung schon bekannter, aber bislang unverstandener empirischer Befunde:

- Stokes'sche Regel zur Photoluminiszenz (die Frequenz der Re-Emission < Frequenz des Anregers) folgt für Einstein einfach aus der Energieerhaltung $E = h\nu$
- Photoelektrischer Effekt, beobachtet erstmals 1888 von Hallwachs, gezielt experimentell untersucht von Lenard 1902 (Erzeugung von Kathodenstrahlen aus UV). $E \sim h\nu - P$ und *nicht* $E \sim$ Amplitudenquadrat, wie dies laut klassischer Theorie zu erwarten gewesen wäre.
- kurzwellige Grenze der Röntgenbremsstrahlung $\nu < E_{\max}$
- Ferner 1906 der Nachweis der Kompatibilität seiner Lichtquantenhypothese mit der Planck'schen Formel für die Energiedichte der Schwarzkörperstrahlung.

Der Zusammenklang dieser allesamt empirisch bestätigten Voraussagen ergab eine ‚consilience of inductions‘ im Sinne des englischen Wissenschaftstheoretikers William Whewell (1794–1866), nicht nur für diesen, sondern auch für alle Naturforscher eines der stärksten Indizien für die Richtigkeit einer Hypothese.

In den Folgejahren 1906 f. und 1909 schrieb Einstein weitere Aufsätze zur Strahlungstheorie sowie zum Problem spezifischer Wärmen, was hier nur gestreift werden kann. Bei tiefen

Temperaturen gab es eine zunehmende Diskrepanz zur Dulong-Petit'schen Regel fester spezifischer Wärme pro Grammäquivalent und Freiheitsgrad eines Stoffes. Einstein konnte dies mit seinem Modell zwanglos aus dem Tieftemperatur-Limes der Planck'schen Energieverteilung ableiten! Die Daten zur spezifischen Wärme stammen übrigens von Einsteins Doktorvater Heinrich Friedrich Weber (1843–1912).

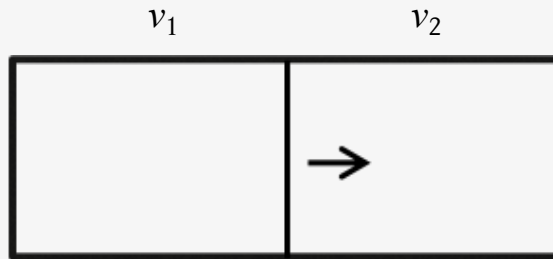
Immer wieder war Einstein auf der Suche nach Argumenten, die Planck u. a. davon überzeugen können, dass es nicht nur die Resonatoren-Emission und -Absorption ist, die quantisiert werden muss, sondern allgemein die *Energie*, auch die des Strahlungsfeldes selbst. 1906 z. B. versuchte er es mit einer allgemeinen statistischen Ableitung der mittleren Energie (von Resonatoren, aber auch von beliebigen schwingenden Systemen) *ohne* Rekurs auf Strahlungsmessungen! Die These Einsteins war, dass Plancks Ableitung der spektralen Energiedichte implizit bereits die Lichtquantenhypothese benutzt.³⁷

Erste Andeutungen des Welle-Teilchen-Dualismus

Nach dem Hinweis auf die Ionisierung von Gasen durch UV-Strahlung (1905, exp. Stark 1908), das Absinken der spezifischen Wärmen bei tiefen Temperaturen (1906) und auf die einfache Erklärung des photochemischen Äquivalentgesetzes (1905 nur angedeutet, expliziter dann 1912 ff.; vgl. nächster Abschnitt) fand Einstein 1909 nochmals ein anderes experimentell zugängliches Gebiet, in dem sich Quantenphänomene zeigen, und zwar Schwankungserscheinungen in der räumlichen Verteilung und im Strahlungsdruck. Die Zitterbewegung des Spiegels ist analog der Brownschen Molekularbewegung (seit seinem diesbezüglichen Aufsatz von 1905 für Einstein vertrautes Territorium). Letzteres führte ihn auf die Betrachtung nicht nur der Energie, sondern auch des Impulses elektromagnetischer Wellen, und damit zu einer weiteren Anreicherung seines Konzepts der Lichtquanten.³⁸

Kasten 5

Energieschwankungen \rightsquigarrow Impulsschwankungen



Frei beweglicher Spiegel der Fläche f

Wenn Energieschwankungen in beiden Teilhälften v_1, v_2 auftreten, so werden auch ungleich viele und ungleich starke Stöße auf den Spiegel ausgeübt und dieser führt Zitterbewegung aus.

Δ : *Geschwindigkeitsänderungen des Spiegels in Zeitintervall τ aufgrund von Schwankungen*

$$\frac{\Delta^2}{\tau} = \frac{1}{c} \left[h \cdot \rho \cdot v + \frac{c^3 \rho^2}{8\pi v^2} \right] dv \cdot f$$

analog

$$\overline{\varepsilon^2} = v \cdot \left[h \cdot \rho \cdot v + \frac{c^3 \rho^2}{8\pi v^2} \right] dv$$

Schwankung wegen unabhängiger Bewegung bzw. Interferenz „wenig ausgedehnter Komplexe von der Energie $h \cdot v$ “

Einsteins mentales Modell zum Lichtquantum 1909

Im ersten Teil des Aufsatzes hatten wir festgestellt, dass es leider keine der Newtonschen Skizze eines *light globulus* analoge Zeichnung Einsteins gibt. Kann man trotzdem sagen, wie Einstein sich damals die Lichtquanten vorgestellt hat? Die folgende Passage aus Einsteins Salzburger Vortrag (und eine fast gleich-

lautende Stelle in einem Brief an Lorentz auch aus dem Jahr 1909) gibt uns Auskunft:

Soviel mir bekannt ist, ist die Aufstellung einer mathematischen Theorie der Strahlung, welche der Undulationsstruktur und der [...] Quantenstruktur zusammen gerecht wird, noch nicht gelungen. [...] Immerhin erscheint mir vor der Hand die Auffassung die natürlichste, daß das Auftreten der elektromagnetischen Felder des Lichtes ebenso an singuläre Punkte gebunden sei wie das Auftreten elektrostatischer Felder nach der Elektronentheorie. Es ist nicht ausgeschlossen, daß in einer solchen Theorie die ganze Energie des elektromagnetischen Feldes als in diesen Singularitäten lokalisiert angesehen werden könnte, ganz wie bei der alten Fernwirkungstheorie. Ich denke mir etwa jeden solchen singulären Punkt von einem Kraftfeld umgeben, das im wesentlichen den Charakter einer ebenen Welle besitzt, und dessen Amplitude mit der Entfernung vom singulären Punkte abnimmt. Sind solche Singularitäten viele in Abständen vorhanden, die klein sind gegenüber den Abmessungen des Kraftfeldes eines singulären Punktes, so werden die Kraftfelder sich übereinanderlagern und in ihrer Gesamtheit ein undulatorisches Kraftfeld ergeben, das sich von einem undulatorischen Felde im Sinne der gegenwärtigen elektromagnetischen Lichttheorie vielleicht nur wenig unterscheidet.³⁹

Einstein sah also die Lichtquanten als Singularitäten des elektromagnetischen Feldes in etwa analog zu J.J. Thomsons Deutung der Elektronen als Singularitäten des elektromagnetischen Feldes.⁴⁰ Allerdings folgt auf diese spekulative Überlegung Einsteins gleich auch wieder eine Einschränkung: „Daß einem derartigen Bilde, solange dasselbe nicht zu einer exakten Theorie führt, kein Wert beizumessen ist, braucht wohl nicht besonders hervorgehoben zu werden.“

Also die gleiche Zurückhaltung Einsteins gegenüber diesem „Bild“ (Hertz' Grundlagen der Mechanik) oder Modell des Lichts wie bei Newton: ‚Thou shalt not mix certainties with conjectures.‘ Auch andere Hypothesen sind denkbar, die zu diesen Er-

scheinungen führen, deshalb kein Wort von Einstein über seine heuristische Modellvorstellung (außer diesem einen Vortrag und wenigen Briefen an Lorentz).

Ich wollte durch dasselbe nur kurz veranschaulichen, daß die beiden Struktureigenschaften (Undulationsstruktur und Quantenstruktur), welche gemäß der Planckschen Formel beide der Strahlung zukommen sollen, nicht als miteinander unvereinbar anzusehen sind.

So beendet Einstein seinen Salzburger Vortrag 1909: eine Art Entschuldigung für blühende Phantasie, fast schon ein Bekenntnis schlechten Gewissens, gegen den Buchstaben des Newtonischen *hypotheses non fingo* verstoßen zu haben. Mit dieser Spekulation über eine Verschmelzung von Elektrodynamik und Quantentheorie war Einstein seiner Zeit nun noch weiter voraus als mit dem heuristischen Prinzip der Lichtquanten. Eine Quanten-Elektrodynamik entsteht erst rund 20 Jahre später, in den späten 20er, 30er und 40er Jahren, nachdem der jahrhundertealte Dualismus Welle–Teilchen völlig neu aufgerollt worden war. Hier, im Jahr 1909 liegen die ersten zögerlichen Anfänge dieses Prozesses.⁴¹

Welche Gründe hatte Einstein für seine Reserviertheit?

- Probleme mit einer Erklärung der Interferenz (Brief von H. A. Lorentz, 6. Mai 1909)
- Starke Abweichung von der Punktförmigkeit?
- Probleme mit Deutung von partieller Reflexion (die Spaltung eines Photons ist ausgeschlossen!)
- Probleme mit der Teilchenartigkeit des Lichtquantums (wenn es Energie transportiert, hat es nach $E = mc^2$ Masse, aber kein massives Teilchen kann sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen)

Kasten 6

Max Planck über die Lichtquantenhypothese, aus: Das Wesen des Lichts. Vortrag, gehalten in der Hauptversammlung der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft, 28. Okt. 1919, publ. in *Physikalische Rundblicke*, Leipzig 1942, 129–147, Zitat S. 142:

„Wir sehen hier die Newtonsche Emanationstheorie in einer anderen, energetisch modifizierten Form wieder auferstehen. Aber was der Newtonschen Emanationslehre seinerzeit die weitere Entwicklung versperrte, die Erscheinung der Interferenz des Lichtes, türmt sich auch der Lichtquantentheorie gegenüber als eine ungeheure Schwierigkeit auf; denn es ist zur Zeit schwer abzusehen, wie zwei gleich beschaffene, selbständig durch den Raum fliegende Lichtquanten, welche auf gemeinschaftlichem Wege zusammentreffen, sich gegenseitig sollen neutralisieren können, ohne daß das Energieprinzip verletzt wird.“

An den theoretischen Physiker Hendrik Antoon Lorentz in Leiden, mit dem er seit Anfang des Jahres einen intensiven Briefwechsel über Probleme der Lichtquantenhypothese hatte, schrieb Einstein am 23. Mai 1909: „Sie können sich kaum vorstellen, wie sehr ich mich darauf freue, Sie persönlich kennen zu lernen [...]. Schon im voraus beteuere ich Ihnen, dass ich nicht der orthodoxe Lichtquantler bin, für den Sie mich halten; das mag von ungenauer Ausdrucksweise in meinen Arbeiten herkommen.“ Dass dahinter mehr als nur Höflichkeit stand, sehen wir aus einem Brief an seinen engen Freund Michele Besso vom 13. Mai 1911: „Ob diese Quanten wirklich existieren, das frage ich nicht mehr. Ich suche sie auch nicht mehr zu konstruieren, weil ich nun weiss, dass mein Gehirn so nicht durchzudringen vermag. Aber ich suche möglichst sorgfältig die Konsequenzen ab, um über den Bereich der Anwendbarkeit dieser Vorstellung unterrichtet zu werden.“ Und an den befreundeten Mathematiker

Ludwig Hopf Ende Febr. 1912: „Die Quanten thun zwar das, was ihnen zukommt, aber sie existieren nicht, so wie der ruhende Lichtäther. Letzterer dreht sich gegenwärtig fleissig im Grabe herum, in der Absicht, wieder lebendig zu werden – der Arme.“⁴²

Die Hoffnung, auf konstruktivem Wege eine Theorie der Lichtquanten zu finden, so wie seinerzeit Lorentz seine Elektronentheorie der Metalle aufbaute, hatte Einstein aufgegeben. Für eine quasi-axiomatische Prinziptheorie wie der Relativitätstheorie reichte es auch nicht. blieb nur dieser dritte Weg eines ständigen Hin- und Her zwischen Mikro- und Makrophysik – wie oben bereits angedeutet Einsteins bewährteste Strategie.

Ich glaube vielmehr, dass sich das Licht in ähnlicher Weise um singuläre Punkte herum gruppiert, wie wir das vom elektrostatischen Felde anzunehmen gewohnt sind. Ich denke mir das einzelne Lichtquant als einen Punkt, der von einem sehr ausgedehnten Vektorenfeld umgeben ist, das mit der Entfernung irgendwie abnimmt. Der Punkt ist eine Singularität, ohne welche das Vektorenfeld nicht existieren kann. [...] Die Energie des elektromagnetischen Feldes müsste – wenigstens bei genügend verdünnter Strahlung – mit der Anzahl dieser singulären Punkte in gewisser Weise zusammenhängen. Absorption fände nur statt beim Verschwinden eines derartigen singulären Punktes bzw. bei Degenerieren des zu diesem Punkte gehörigen Strahlungsfeldes.

Emission und Absorption von Lichtquanten

Die quantenhafte Emission und Absorption von Strahlung wurde erst mit dem sehr erfolgreichen Bohr'schen Atommodell von 1913 einer größeren Zahl von Forschern bekannt. Der Übergang der Elektronen zwischen Orbitalen erfolgt laut Bohr durch Emission bzw. Absorption von Lichtquanten (Quantensprünge). In einigen Spezialgebieten hat die Lichtquantenhypothese aber auch schon vorher Absorptionsprozesse besser verstehen helfen. So bildete sie beispielsweise die Grundlage für das photochemische Äquivalentgesetz, derzufolge die Absorption des

Licht nur in ganzen Quanten erfolgen kann. Als Johannes Stark 1912 Priorität in der ‚Anwendung des Planck’schen Elementargesetzes auf photochemische Prozesse‘ reklamierte, widersprach ihm Einstein mit dem Hinweis darauf, dass „es sich bei dem photochemischen Äquivalentgesetz um eine ganz selbstverständliche Folgerung der Quantenhypothese handelt.“⁴³ Der Begriff ‚Quantenausbeute‘ bezeichnet das Verhältnis der Anzahl photochemisch veränderter Moleküle dividiert durch die Zahl absorbierter Lichtquanten. Nach Einsteins Modell der Absorption des Lichts sollte diese Quantenausbeute stets gleich 1 sein, was z.B. 1921 bis 1927 von John Eggert (1891–1973) und Walter Noddack (1893–1960) an der Spaltung von Silberbromid in Silber- und Chloratome auch bestätigt wurde: Jedes absorbierte Lichtquant bewirkt dort in der Tat genau eine chemische Reaktion. Für viele andere Reaktionen stellte man jedoch Quantenausbeuten sehr viel größer als 1 fest, was zu dem Schluss führte, dass auf die photochemische Primärreaktion andere Sekundärreaktionen folgen müssen, die die Wirkung eines Lichtquants in einer Kettenreaktion gleichsam vervielfachen. Die von Max Bodenstein 1911 und Walther Nernst 1918 vermuteten Reaktionsmechanismen wurden 1922 von Carl Weigert und Hermann Richard Kellermann nachgewiesen.⁴⁴

Spontane und induzierte Emission

1916 ging Einstein einen Schritt weiter in Richtung „quantentheoretischer Betrachtungen über die Wechselwirkung von Materie und Strahlung“. In einer erneuten Ableitung der Planck’schen Energiedichte für Hohlraumstrahlung führte Einstein Koeffizienten für die Übergangswahrscheinlichkeiten von Gasatomen ein, die mit umgebender Strahlung im statistischen Gleichgewicht stehen sollen: Neben einem Koeffizienten für die spontane Emission von Strahlung (analog dem radioaktiven Zerfall) musste er zwingend noch je einen für die sogenannte induzierte Emission und Absorption einführen, um das Plancksche

Ergebnis reproduzieren zu können.⁴⁵ Auch die Bohr'sche Frequenzbedingung $E_m - E_n = h\nu$ für die Übergänge zwischen den Energieniveaus E_m und E_n war automatisch erfüllt und somit der Anschluss der Strahlungstheorie an das erfolgreiche Bohr'sche Atommodell gewährleistet. Die gesamte heutige Lasertechnologie basiert auf dieser durch vorhandene Strahlung ‚induzierten‘ Emission weiterer Lichtquanten. In einer Folgearbeit noch im gleichen Jahr wies Einstein erneut explizit darauf hin, dass den Lichtquanten neben Energie $h\nu$ auch ein Impuls $h\nu/c$ zuzuordnen ist und dass die atomaren Emissions- und Absorptionsprozesse von Lichtquanten gerichtete Vorgänge sind. Die Schichten (1)–(9) hatten sich in seinem Denken bereits verfestigt, auch wenn er zu dieser Zeit noch (fast) der Einzige war, der die Existenz von Lichtquanten wirklich ernst nahm. Wie hellichtig Einstein 1916 auch die weiteren Konsequenzen dieses statistischen Ansatzes überblickte, der letztendlich in die von ihm nicht mehr mitgetragene stochastische Quantenmechanik führte, zeigt folgendes spannende Zitat aus dem wenig bekannten Folgeaufsatz für die *Physikalische Gesellschaft Zürich*:

Diese [...] Eigenschaften der Elementarprozesse lassen die Aufstellung einer eigentlich quantenhaften Theorie der Strahlung fast unvermeidlich scheinen. Die Schwäche der Theorie liegt einerseits darin, daß sie uns dem Anschluß an die Undulationstheorie nicht näher bringt, andererseits darin, daß sie Zeit und Richtung der Elementarprozesse dem ‚Zufall‘ überläßt; trotzdem hege ich das volle Vertrauen in die Zuverlässigkeit des eingeschlagenen Weges.⁴⁶

„Der liebe Gott würfelt nicht“ blieb bekanntlich Einsteins Maxime bis zum Ende seines Lebens,⁴⁷ aber die theoretische Alternative, die Zeit und Richtung der atomaren Elementarprozesse vorausszusagen gestatten würde, hat nach Einstein und bis heute auch kein anderer gefunden. Es ist Teil der besonderen Tragik dieses Denkers, so entscheidend zu einer Entwicklung beigetragen zu haben, die er am Ende grundsätzlich ablehnen musste.

Zur Ununterscheidbarkeit der Lichtquanten

Christian Wolffs *Vernünfftige Gedancken von den Würckungen der Natur, den Liebhabern der Wahrheit mitgetheilet*, aus dem Jahr 1723 enthalten eine ungewöhnlich klare Darstellung einer meist nur impliziten Voraussetzung klassischer Physik, nämlich der Unterscheidbarkeit der Materieteilchen auf allen Stufen:

Anfangs ist gewiß, daß kein dergleichen Wesen, als wie die Größen sind, welche man in der Geometrie hat, in der Natur vorhanden, noch auch in derselben seyn kann. ... Wir haben schon anderswo (§ 685 Met[aphysik].) gezeiget, daß die Materie nicht aus einander ähnlichen Theilen, die nur dem Raume nach von einandern unterschieden sind, bestehen könne, und der Satz des nicht zu unterscheidenden, der zwey ihrem Wesen nach ähnliche Dinge in der Natur nicht leidet (§ 589 Met.) bestetiget dieses zur Genüge. ...

Wer diesen Weg gehet, der nimmet nichts erdichtetes an und kennet doch überall auf eine begreifliche Art den Reichthum der Natur als unergründlich im allerkleinsten. ... so ist auch jedes Stäublein der Materie würcklich in unendlich viel Theile zertheilet, die aber weder in der Größe, noch der Figur, noch sonst mit einander überein kommen.⁴⁸

Hier finden wir gleich zwei dieser klassischen Prämissen klar ausgesprochen:

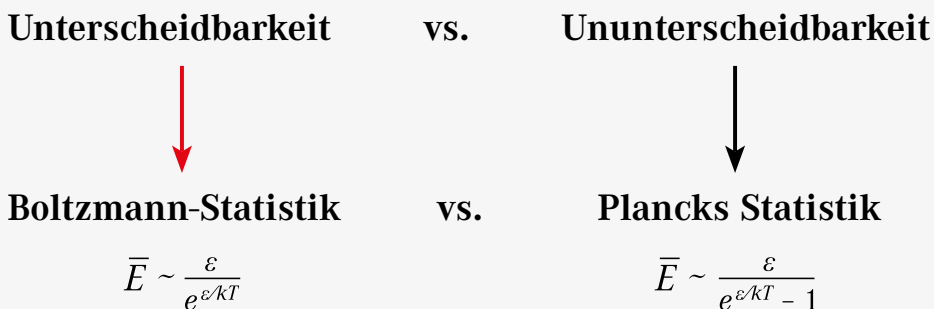
1. die nicht-atomistische Kontinuumshypothese unbeschränkter Teilbarkeit
2. die notwendige Unterscheidbarkeit aller Materieteile; dahinter steht Leibniz' *principium individuationis*, das die Identität des Ununterscheidbaren fordert. Im Prinzip könnte man also klassische Teilchen durchnummerieren oder mit anderen, jedes einzelne Teilchen identifizierenden Markierungen versehen. Dass dies in der Quantenwelt eben nicht mehr so ist, wurde erst im 20. Jahrhundert durch die Verbindung von statistischer Mechanik und früher Quantentheorie klar. Der erste, der dies klar erkannt hat, war der Charkover

Physiker Ladislas Natanson (1864–1937).⁴⁹ 1911 wies er in einem Artikel über die statistische Theorie der Strahlung darauf hin, dass Plancks Energieverteilung von Schwarzkörperstrahlung nur resultiert,

*wenn wir voraussetzen, daß bei dem Prozeß der Wahrscheinlichkeitsberechnung die Energiehalter als identifizierbar behandelt werden können, und daß die Energieeinheiten, die in jeder Hinsicht vollkommen gleich sind, nicht als identifizierbar behandelt werden können.*⁵⁰

Kasten 7

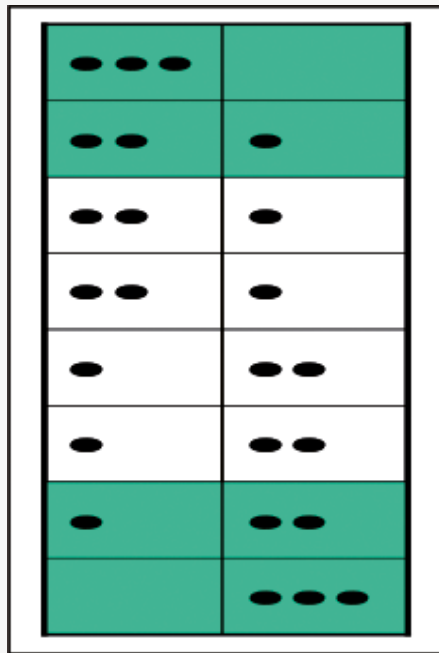
Natanson zeigte, daß *nur* wenn man Ununterscheidbarkeit voraussetzt, nach Einsetzen in die Formel für die Entropie $S = k \ln W$ und zweifache Ableitung Plancks Formel für die mittlere Energie E eines Resonators resultiert, während bei Voraussetzung der Unterscheidbarkeit die Boltzmann'sche Verteilung herauskommt.



Natanson 1911 S. 662 weiter: „Da unser Verfahren in letzter Linie auf dieser Annahme beruht, [daß die Energieeinheiten, die in jeder Hinsicht vollkommen gleich sind, nicht als identifizierbar behandelt werden können], so erscheint es naturgemäß, es ohne weiteres als Grundlage der Theorie anzusprechen. Anscheinend hat man dem Umstande nicht die genügende Bedeutung beigelegt, daß wir tatsächlich keine andere Möglichkeit haben, die Berechtigung des

Planck'schen Verfahrens zur Wahrscheinlichkeitsberechnung nachzuweisen“. Ähnlich wie schon Planck 1900, so sah auch Natanson sich mehr oder weniger gezwungen, diesen Schritt zu machen und die Ununterscheidbarkeit als Grundeigenschaft der Energiequanten anzusehen. Für Einstein musste dies heißen: Lichtquanten sind ununterscheidbar, denn diese waren ja für ihn die Träger der Energie. Wären sie *nicht* ununterscheidbar, so würde Plancks Berechnungsmethode der mittleren Energie von Schwarzkörperstrahlung auf Licht u. a. elektromagnetische Strahlung gerade nicht mehr zutreffen und Plancks Theorie der Strahlung schwarzer Körper in sich zusammenbrechen.

Ein einfaches Rechenbeispiel zeigt, was Natanson damit meinte: Angenommen, P Energiequanten seien auf N unterscheidbare Resonatoren aufzuteilen. Die Antwort, wie viele apriori gleich wahrscheinliche Möglichkeiten es gibt (und damit auch die gesuchte Durchschnittsenergie der



Resonatoren) hängt davon ab, ob die Energiequanten *unterscheidbar oder ununterscheidbar* sind. Oben sind beide Fälle für $P = 3$ und $N = 2$ angegeben, in grün für Ununterscheidbarkeit: Es resultieren 4 bzw. 8 Möglichkeiten mit Durchschnittsenergie 2 bzw. 1,5

(die vier weiß hinterlegten Fälle sind von den unmittelbar darüber und darunter angegebenen nicht zu unterscheiden, wenn die Energiequanten wie hier durch die gleichförmigen Punkte angedeutet, ihrerseits nicht voneinander zu unterscheiden sind).

Allgemein gilt für Anzahl der Möglichkeiten W einer Komplexion (berechnet à la Boltzmann):

$W = N^P$ berechnet für P **unterscheidbare** Energiequanten

$W = \frac{(N + P - 1)!}{P!(N - 1)!}$ bzw. für P **ununterscheidbare** Energiequanten bei N Resonatoren

Die Ursprünge der Bose-Einstein-Statistik

Wie schon unser kleines Rechenbeispiel im Kasten 7 gezeigt hat, sind die beiden Fälle der Boltzmann- und der Planck-Natanson-Bose-Einstein-Statistik (wie man sie der historischen Abfolge gemäß eigentlich nennen sollte) völlig verschieden. Bei unterscheidbaren Teilchen ist ihre Verteilung über N Zellen $(N - 1)!$ mal wahrscheinlicher als ihre Konzentration in genau einer Zelle, im Falle ununterscheidbarer Teilchen hingegen diese N -mal wahrscheinlicher als ihre gleichmäßige Verteilung auf alle Zellen. Verkürzt gesagt kann man sagen: Unterscheidbare Teilchen tendieren zu gleichförmiger Energieverteilung, ununterscheidbare zum Clustern im Zustand niedrigster Energie.

Da dieses Verhalten von unserer im Umgang mit klassischen Teilchen entstandenen physikalischen Intuition so radikal abweicht, ist es nicht verwunderlich, dass es gut zwanzig Jahre gedauert hat, bis diese neuartige Statistik in ihrer vollen Tragweite erkannt wurde. Erst nachdem der indische Physiker Satyendra Nath Bose (1894–1974) im Jahr 1924 eine Ableitung der Planck'schen Strahlungsformel vorgelegt hatte, die sich konsequent auf die Lichtquantenhypothese stützte und diese als ein Gas identischer Teilchen behandelte, erkannte Einstein die sich darin abzeichnende neuartige Statistik dieses „Quantengases“. Bezüglich dieses Clusters von Lichtquanten oder anderen ununterscheidbaren Teilchen gleicher Statistik sprach Einstein 1925 treffend von einem „Paradoxon“, von „Entartung“ dieses „Quantengases“ bzw. von Teilchen „ganz rätselhafter Art“.⁵¹ Seine neue ‚Quantentheorie des idealen Gases‘ erschien ihm „dann als berechtigt, wenn man von der Überzeugung ausgeht, dass ein Lichtquant (abgesehen von seiner Polarisations-eigenschaft) sich von einem einatomigen Molekül im Wesentlichen nur dadurch unterscheidet, dass die Ruhemasse des Quants verschwindend klein ist.“ Damit war eine neue Brücke zwischen Gas- und Quantentheorie geschlagen und Boses Statistik der Lichtquanten konnte auf alle Elementarteilchen mit ganzzahligem Spin erweitert werden, während diejenigen Teilchen, die (wie z. B. Elektronen) halbzahligen Spin haben, der 1926 entdeckten Fermi-Dirac-Statistik genügen.

Diese für Bosonen so typische Tendenz zum Clustern führt zu völlig neuen Zuständen wie etwa den Bose-Einstein-Kondensaten. Beim Photonengas und anderen Elementarteilchen, die der Bose-Einstein-Statistik genügen, ist genau diese Bose-Einstein-Kondensation mit heutigen Mitteln auch experimentell zu beobachten.⁵² Auch zahlreiche weitere physikalische Effekte wie etwa die von Hanbury Brown und Twiss 1955–57 beobachteten „Photonenklumpen“ im HBT-Effekt oder das Photon-bunching und der Hong-Ou-Mandel-Effekt 1987 lassen sich auf die Eigenschaft der Photonen zurückführen, Bosonen zu sein.⁵³

Kasten 8

Einige Empfehlungen von webpages, jeweils mit links:

Über Bose-Einstein-Kondensate: <https://www.uni-muenster.de/Physik.AP/Demokritov/Forschen/Forschungsschwerpunkte/mBECfnP.html> sowie <http://www.mpq.mpg.de/atomlaser/html/bose-einstein-kondensat.html>

<https://www.pro-physik.de/restricted-files/101781> https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Satyendra_Nath_Bose über Bose

https://de.wikipedia.org/wiki/W%C5%82adys%C5%82aw_Natanson über Natanson

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1927/compton/lecture/>

<http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/spin/goudsmit.html> Entdeckung des Spin

<https://plato.stanford.edu/entries/qt-idind/> zur Ununterscheidbarkeit

<https://plato.stanford.edu/entries/quantum-field-theory/qft-history.html> über die Geschichte von Quantenfeldtheorien

https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_electrodynamics zur Geschichte der QED

Photonen als Austauscheteilchen der QED

Die Quantenelektrodynamik (QED)⁵⁴ ist eine aus der Verbindung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik entstandene, heute experimentell hochgenau bestätigte quantisierte Theorie der Wechselwirkung von Punktladungen wie Elektronen oder Positronen mit Licht. Das Elektron wird in der QED als Spinorfeld mit Ladung $-e$, das Photon als zugehöriges masse-

loses Eichfeld interpretiert, woraus sich auch die unendliche Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung erklärt, deren sonstige Eigenschaften und Randbedingungen aus Forderungen wie Eichinvarianz und Invarianz gegenüber Lorentztransformationen hergeleitet werden.⁵⁵ Der Austausch von Photonen ist der QED zufolge in vielen Fällen ein bloß virtueller, auf sehr kurze Zeitintervalle $\Delta t < h/E$ beschränkter Austausch, für den die Heisenberg'sche Unschärferelation nicht gilt. Richard Feynman (1918–1988) kam 1948 auf die geniale Idee, die raumzeitlichen Verhältnisse bei einem solchen Wechselwirkungsprozess in einfachen Schemata zu visualisieren, die bald nach ihm ‚Feynman-Diagramme‘ genannt wurden.⁵⁶ Durchgezogene Linien stehen darin für Elementarteilchen wie Elektronen, während gewellte Linien für Photonen stehen. Die Zeitachse läuft in den nachfolgenden Diagrammen (Abb. 5) stets von unten nach oben, so dass reelle Teilchen immer in fast senkrechter Richtung in das Diagramm eingetragen sind, während virtuelle, Wechselwirkungen vermittelnde Teilchen annähernd horizontal visualisiert sind.

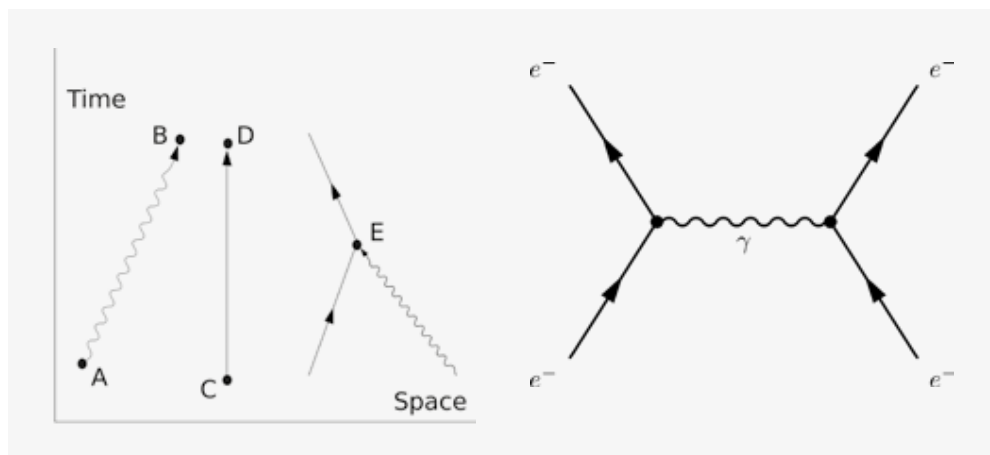


Abb. 5: Links einige reale Prozesse wie die Bewegung eines realen Photons von A nach B, eines Elektrons von C nach D sowie die Absorption eines Photons durch ein Elektron; rechts der Austausch eines virtuellen Photons durch zwei miteinander wechselwirkende Photonen. Beide Graphen aus https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_electrodynamics (7.11.2021).

Die Wahrscheinlichkeit reeller Prozesse wie etwa die Wechselwirkung zweier Elektronen kann in der QED als Summe aller zulässigen Feynman-Graphen berechnet werden, was die Feynman-Graphen zu extrem nützlichen Hilfsmitteln in der quantenmechanischen Störungsrechnung machte.⁵⁷ Es gibt in der QED keine Erhaltungszahl, die sich mit der Zahl der Photonen in einem System verbindet, d.h. Photonen können erzeugt, aber auch wieder vernichtet werden. Es gibt im Allgemeinen auch keinen Ortsoperator, der sich widerspruchsfrei mit einem einzelnen Photon verbinden ließe, was Phänomene wie die räumlich ausgedehnte Interferenz erklärt, aber mit einem naiven mentalen Modell von Photonen als quasi-punktförmigen „Lichtatomen“ in Widerspruch steht. Interpretativ lässt die QED jedoch offen, was das Photon nunmehr ist – für die einen nurmehr das Ergebnis der Anwendung eines Erzeugungs- oder Vernichtungsoperators in einer algebraischen Quantenfeldtheorie oder eine Art Fourierkoeffizient der Feldenergiedichte, für die anderen eines der Elementarteilchen des sogenannten Standardmodells der starken, schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung. Letzteres, obgleich die naive Rede von Teilchen den Welle-Teilchen-Dualismus übergeht, demzufolge das Photon eben nicht nur Teilchen oder nur Welle ist, sondern als das ein oder andere erscheint, je nachdem welche Fragen wir an es stellen, d.h. welchen experimentellen Fragestellungen wir es unterwerfen. Quantenmechanische Natur wird nicht mehr nur gemessen im Sinne des Ermitteln einer Größe, die vor der Messung bereits feststeht und von der nur wir vor der Messung ihren Wert nicht kennen, sondern je nach Messapparatur bekommen wir die eine oder andere Antwort – schon Heisenberg hatte 1927 bereits diese Einsicht.⁵⁸

Zur Rezeption des Lichtquantums

Pikanterweise war ausgerechnet der Experimentalphysiker Johannes Stark (1874–1957) – später berühmt-berüchtigt als einer

der übelsten Antisemiten und Protagonisten der ‚Arischen‘ oder ‚Deutschen Physik‘ – einer der ersten und glühendsten Anhänger des Einstein’schen Konzepts von Lichtquanten. Seine Argumente für dieses Konzept waren vorwiegend experimenteller Natur:

1. Photoelektrischer Effekt
2. Kurzwellige Grenze der Röntgenbremsstrahlung
3. Die Existenz eines Intensitätsminimums beim Dopplereffekt
4. Allgemein: diskrete Anregungsenergie der Atome

Es gab bei ihm aber auch eine persönliche Tendenz zur Opposition gegen Lehrmeinung.⁵⁹ Allerdings musste sich Stark für diese Befürwortung des Lichtquantums auch Kritik gefallen lassen: Im Februar 1911 schreibt der japanische Physiker Hantaro Nagaoka (1865–1950) während einer Reise an Ernest Rutherford (1871–1937):⁶⁰

Stark [... in Aachen] was propounding his ‚Lichtquantentheorie‘; there is some doubt whether he will succeed in explaining the interference phenomena, or not. The Germans say that he is full of phantasies, which may be partly true.

Arnold Sommerfeld (1868–1951) u. v. a. blieben skeptisch. Am 10. Oktober 1908 schrieb er einen Brief an Stark mit der Bitte zu Punkt (3) obiger Liste:

Sehr dankbar wäre ich Ihnen über ein überflüssiges Spektrogramm ihrer Quantenaufnahme, die ich gern im Unterricht verwenden würde, vor allem aber dazu, mich selbst definitiv zu der Planckschen fundamentalen Hypothese zu bekehren.⁶¹

Das heißt, dass auch Sommerfeld damals noch Zweifel an der Energiequantisierung hatte! In einem Brief vom 4. Dezember 1909 an Einstein schreibt er über: „die doch sehr hypothetische und unbestimmte Lichtquantentheorie.... Nicht als ob ich an der Bedeutung des Wirkungsquantums zweifelte. Aber die Ausge-

staltung, die Sie ihm geben (Lichtquantum) scheint nicht nur mir, sondern auch Planck sehr gewagt.“ Ähnlich skeptisch war auch Max Planck, etwa in den *Annalen der Physik* im Januar 1910: „Ebensowenig wie den Deduktionen von A. Einstein kann ich den Versuchen von J. Stark an Röntgenstrahlen einstweilen zwingende Beweiskraft zugunsten einer Korpuskulartheorie des Lichts zuerkennen.“⁶²

Allerdings machte die Skepsis gegenüber der „revolutionären“ Hypothese der Lichtquanten Planck, Nernst u. a. Berliner Physiker nicht blind gegenüber der Genialität Einsteins. Planck, seit 1912 beständiger Sekretar der Preußischen Akademie der Wissenschaften, bemühte sich, Einstein nach Berlin zu ziehen: 1914 hatte er damit Erfolg. Einstein erhielt eine hochbezahlte Stelle an der Akademie ohne Lehrverpflichtungen, aber mit der Berechtigung zur Lehre. Er schrieb darüber ironisch: „die Herren Berliner spekulieren mit mir wie mit einem prämierten Leghuhn; aber ich weiß nicht, ob ich noch Eier legen kann.“⁶³ Im Wahlvorschlag für Einsteins Aufnahme als ordentliches Mitglied in die Akademie der Wissenschaften, datiert 12. Juni 1913 und unterzeichnet von Planck, Nernst, Rubens und E. Warburg, finden wir neben viel Lob über Einsteins Beiträge zur Relativitätstheorie und Quantentheorie auch folgende Einschränkung Plancks:

Auch mit dem lichtelektrischen Effekt hat er die Quantenhypothese durch Aufstellung neuer, interessanter, durch Messungen kontrollierbarer Beziehungen in Zusammenhang gebracht [...] Daß er in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z. B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzu schwer anrechnen dürfen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, läßt sich auch in der exakten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.⁶⁴

Ein Stimmungsumschwung *zugunsten* der Lichtquantenhypothese kam dann in den Folgejahren. So sah 1911 etwa Walther Nernst in Experimenten zu spezifischen Wärmen den entschei-

denden Durchbruch: „dass in ihrer Gesamtheit die Beobachtungen eine glänzende Bestätigung der Quantentheorie von Planck und Einstein erbringen, liegt auf der Hand“.⁶⁵

Sommerfeld spielte ebenfalls seit 1911 mit diesem Schritt; Paul Ehrenfest (1880–1933) und Henri Poincaré unterstrichen 1911/12 irreparable Probleme klassischer Ansätze: So sprach etwa Ehrenfest 1911 dramatisch von der „Rayleigh-Jeans-Katastrophe im Ultravioletten“.⁶⁶ Robert Millikans Messungen von 1915 zu $E = h\nu - P$ wurden bereits oben erwähnt. Häufig vergessen wird aber, dass Millikan selbst viele Jahre brauchte, um sich mit der Lichtquantenhypothese anzufreunden. 1916 war er noch der Meinung: „Einstein’s photoelectric equation [...] cannot in my judgement be looked upon at present as resting upon any sort of a satisfactory theoretical foundation [even though] it actually represents very accurately the behavior“ of photoelectricity (S. 18, Jan. 1916).⁶⁷ Konsistent damit distanzierte er sich auch in seinem berühmten Aufsatz vom März 1916 von jedweder „coupling of photo effects [...] with any form of quantum theory“ (S. 355, März 1916). Einsteins Lichtquantum war für Millikan damals noch „a bold, not to say reckless hypothesis of an electromagnetic light corpuscle.“ (Ebenda.)

Auch in seiner Nobelpreisrede vom 23. Mai 1924 sieht er sein Verdienst noch ausschließlich in der Bestätigung der Einstein-Gleichung für den Photoeffekt und deutet Zweifel an Einsteins zugrundeliegender Modellvorstellung an:

*After ten years of testing and changing and learning and sometimes blundering [...] this work resulted, contrary to my own expectation, in the first direct experimental proof [...] of the exact validity [...] of the Einstein equation and the first direct photo-electric determination of Planck’s h . [...] The general validity of Einstein’s equation is, I think now universally concluded, and to that extent the reality of Einsteins light quanta may be considered as experimentally established. But the conception of localized light quanta out of which Einstein got his equation must still be regarded as far from being established.*⁶⁸

Erst in seiner Autobiographie, im zeitlichen Abstand von 35 Jahren, hat er seinen Frieden mit der Lichtquantenhypothese gemacht und deutete seine damaligen Experimente nun retrospektiv begründend als direkte Bestätigung des Modells, nicht nur der Gleichung. Unter der Kapitelüberschrift „The Experimental Proof of the Existence of the Photon“ lesen wir dort, dass die experimentellen Daten

proved simply and irrefutably, I thought, that the emitted electron that escapes with the energy $h\nu$ gets that energy by the direct transfer of $h\nu$ units of energy from the light to the electron and hence scarcely permits any other interpretation than that which Einstein had originally suggested, namely that of the semi-corpuseular or photon theory of light itself.⁶⁹

Schlussstein in der Kette experimenteller Indizien für die Existenz von Lichtquanten war dann die Messung des Compton-Effekts. Arthur Holly Compton (1892–1962) hatte seit 1922 die Streuung von Röntgenstrahlen an Graphit und anderen leichten Elementen beobachtet, d. h. an Elementen, bei denen die Elektronen sehr locker gebunden, also praktisch frei sind. Das Ergebnis seiner Experimente, die Abhängigkeit der Intensität und Frequenz des gestreuten Lichtes vom Streuwinkel, sowie die Zunahme der Wellenlänge der gestreuten Strahlen widersprachen den klassischen Erwartungen, ließen sich aber aus der Annahme einer Stoßwechselwirkung von Photonen mit Elektronen unter Zugrundelegung der relativistischen Kinematik problemlos verstehen.⁷⁰ Dafür erhielt Compton den halben Physik-Nobelpreis des Jahres 1927. Auch Einsteins Nobelpreis 1922 wurde bekanntlich für die theoretische Deutung 1905 des photoelektrischen Effektes, nicht für seine sehr viel breiter rezipierte Relativitätstheorie erteilt. 1922 erschien der Schwedischen Akademie der Wissenschaften die Lichtquantenhypothese also bereits besser bestätigt als die noch immer stark umstrittene Relativitätstheorie!

Ausklang

Vergegenwärtigen wir uns am Ende dieses Aufsatzes nochmals die vielen Bedeutungsschichten des mentalen Modells ‚Lichtquantum‘ (Photon) heute:

- Teilchenartigkeit
Newtons Projekttilmodell 1687/1704
- Ausbreitung mit endlicher Lichtgeschwindigkeit
Newton + Rømer usw.
- Gleichheit dieser „für alle Farben/Frequenzen“
(nach anfängl. Zweifel), ...
- Licht (über)trägt Energie E
Maxwell, Poynting, Einstein 1905
- überträgt Impuls $p = E/c$ (Strahlungsdruck)
*Newtonianisch: Homborg 1708, de Mairan 1747, ... exp.:
Lebedew 1901, Nichols & Hull 1903f.; theor.: Poynting 1905,
Einstein 1909*
- Energie E des Lichts ist korreliert mit dessen Frequenz $E \sim \nu$
Einstein 1905
- Energie E jedes Lichtquants ist quantisiert $E = h \cdot \nu$
Einstein 1905
- Emission und Absorption durch Materie
Bohr 1913, Einstein 1916
- Absorption in ganzen Quanten (photochem. Äquiv.gesetz):
Stark 1908, Einstein 1912
- Im Grenzfall kurzer Wellenlängen erscheinen diese Lichtquanten teilchenartig, im Limes langer Wellenlängen hingegen wellenartig (Welle-Teilchen-Dualismus)
Einstein 1909, De Broglie 1922-25, Bohr 1927
- Lichtquanten übertragen Drehimpuls; Teilchenspin ist ± 1
Goudsmit & Uhlenbeck 1926
*zum Elektronenspin, aus dem indirekt auch der Photonenspin
von ± 1 folgt.*
- Je zwei Lichtquanten gleicher E u. Spinausrichtung sind ununterscheidbar: s. Haupttext

- Statistik dieser Lichtquanten
Planck, Natanson 1911, Bose, Einstein 1924/25
- Der Austausch von zwei oder mehreren virtuellen Photonen führt zur elektromagnetischen Wechselwirkung.

So sehen wir, dass dieses mentale Modell eine komplexe Geschichte hat. Einige seiner Schichten sind sehr alt, andere wurden erst nach Einsteins Aufsatz von 1905 ihm und anderen klar. Bis in die 1920er Jahre hinein wird es weiter angereichert: Ein schönes Beispiel für diese stufenweise Anreicherung stellt auch ein wenig bekannter Aufsatz von Louis de Broglie (1892–1987) aus dem Jahr 1922 dar, noch kurz vor dessen Durchbruch zur Wellentheorie der Materie verfasst. De Broglie setzt die Lichtquantenhypothese voraus und betrachtet Strahlung der Frequenz ν als „comme un gaz formé d’atomes de lumière d’énergie $W = h\nu$.“⁷¹ Aus Einsteins $W = mc^2$ ergibt sich für de Broglie dann ganz automatisch auch eine „masse des atomes de lumière“, ein Impuls $p = W/c$ sowie ein Lichtdruck von $1/3 nW$, wenn n die Zahl dieser ‚Lichtatome‘ pro Volumeneinheit ist, die er danach aus Plancks Statistik berechnet. Dass der resultierende Ausdruck von demjenigen des Wien’schen Gesetzes um den Faktor zwei abweicht, wird von de Broglie helllichtig damit erklärt: „cette difference n’est pas due à une erreur de calcul, mais probablement [...] à ce qu’on n’a pas introduit dans la théorie précédente la notion de polarisation de la lumière. Une théorie plus complète des quanta de lumière devrait l’introduire sous une forme telle que celle-ci: à chaque atome de lumière serait lié un état interne de polarisation circulaire droite ou gauche représenté par un vecteur axial ayant la direction de la vitesse de propagation. Deux atomes ayant même position et même vitesse, devraient encore, pour être regardés comme identiques dans le calcul [...], avoir le même sens de polarisation.“ Damit hatte de Broglie den Photonenspin fast schon vorweggenommen, allerdings führte ihn gerade sein spezifischer Zugang zu dieser Modellvorstellung eines Lichtquantums auch in eine

Sackgasse, denn er wusste, dass massive Teilchen sich nach Einsteins spezieller Relativitätstheorie nicht streng mit Lichtgeschwindigkeit bewegen können. Also probierte de Broglie es (wie schon Newton und Einstein vor ihm – siehe oben mit einer frequenzabhängigen Geschwindigkeit: „L’hypothèse des quanta de lumière conduirait donc, en adoptant la dynamique de la relativité, à regarder les atomes de lumière (supposés de même masse très faible) comme animés de vitesses variables avec leur énergie (fréquence), mais tous extrêmement voisines de c .“⁷²

In allen zwölf hier unterschiedenen Schichten liegt das moderne Konzept von Photonen tatsächlich erst 1926 vor, also nach de Broglies Wellenmodell der Materie, der Klarwerdung über die radikalen Implikationen der Bose-Einstein-Statistik und nach Entdeckung des Elektronen-Spins Ende 1925, auch wenn schon zuvor klar war, dass im Lichtquantenmodell eine zur Polarisation des Lichts analoge Größe gefunden werden musste (s. o. zu de Broglie). Deshalb ist es auch kein Zufall, dass der Terminus ‚Photon‘ erst so spät (nämlich erst Ende 1926 von Gilbert Lewis) eingeführt wurde.⁷³ In diesem Aufsatz gibt Lewis den Photonen die Attribute der Teilchenartigkeit (er spricht von ihnen sogar als neue Atome), quantisierten Energie, Spin (wenn auch nicht so genannt) und intrinsischen Ununterscheidbarkeit. Er irrt sich aber, wenn er diesen Photonen dann auch Unzerstörbarkeit zuschreibt, denn die Zahl der Photonen ist eben keine Erhaltungsgröße! Eine Berücksichtigung der verschiedenen Schichten der Lichtquantenhypothese erklärt also neben diversen Forschungserfolgen auch, warum auch hervorragende Physiker wie de Broglie, Lewis oder Planck mit diesem semi-klassischen Lichtteilchenkonzept letztendlich scheitern mussten.⁷⁴ Aber auch Einstein kämpfte zeitlebens weiter um ein adäquates Verständnis des Welle-Teilchen-Dualismus und des damit eng zusammenhängenden Niedergangs der naiven Vorstellung von punktförmigen Teilchen. Am 10. August 1952 gestand Einstein seinem Freund Michele Besso, er sei: „von einer wirklich vernünftigen Theorie der Doppelnatur der Lichtquanten und Teil-

chen ebenso weit entfernt wie vor 50 Jahren! [...] Eine wirklich vernünftige Theorie müsste die Elementargebilde (Elektron, etc.) deduzieren, nicht von vorneherein setzen.“⁷⁵

Unsere Zusammenstellung zeigt, dass die meisten dieser 12 Schichten für sich genommen bereits mehr oder weniger scharf von anderen erkannt worden waren. Damit sollen Einsteins entscheidende Beiträge für die Erkenntnis der strengen Quantisierung der Energie im Strahlungsfeld selbst (Schicht 8: 1905) und später (1909: Schicht 10) in ersten Andeutungen des später von Bohr u. a. sogenannten Welle-Teilchen-Dualismus nicht geschmälert werden. Beides waren äußerst gewagte Schritte, zu denen andere weder den Mut noch die intellektuelle Spannkraft gehabt hätten. Aber wie auch bei der Relativitätstheorie lag seine wohl wichtigste Leistung in der Zusammenführung all dieser Einzeleinsichten in eine erste in sich konsistente Quantentheorie des Strahlungsfeldes. Einsteins ‚die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffender heuristischer Gesichtspunkt‘ vom März 1905 verband kombinatorische Techniken von Boltzmann mit Ideen von J.J. Thomson, Wien, Planck, Lorentz sowie experimentellen Resultaten von Stokes, Lenard u. a. in einem organischen Ganzen. Dafür war es auch nötig, sich von einigen hartnäckigen Vorurteilen zu lösen, so etwa von Plancks Zweifel an einer Berechtigung der Quantisierung des Strahlungsfeldes selbst. Wir haben gesehen, wie Lorentz‘ konzeptuelle Probleme mit einer Erklärung der Interferenz Einstein 1909 dazu führten, dieser Quantentheorie des Strahlungsfeldes noch erste Andeutungen des Welle-Teilchen-Dualismus hinzuzufügen; 1916 folgte dann noch die induzierte Emission und noch später die sog. Bose-Einstein-Statistik (s. o.). Einsteins größte Stärke lag in diesem Herausspüren heuristisch fruchtbarer Ideenstränge aus dem großen Reservoir damals denkbarer Optionen, im konsequenten Abstreifen des damit Unverträglichen und im Verweben dieser zuvor unverbundenen Ideenstränge zu Theorien, die nicht nur in sich konsistent, sondern wegen seiner glücklichen Auswahl empirischer Befunde auch

empirisch adäquat waren. Von einer solchen Syntheseleistung sind wir in unserem heutigen Standardmodell der starken und elektroschwachen Wechselwirkungen meilenweit entfernt. Noch immer ist die Einstein lebenslang beschäftigende Frage: „What is a photon?“ nicht vollständig beantwortet,⁷⁶ auch wenn wir Photonen *praktisch* in der Optik, in Lasern und zahllosen anderen Anwendungen der Quantenoptik und Photonik ganz hervorragend gut beherrschen und auch *theoretisch* (mathematisch) gut im Griff haben. Wie John Archibald Wheeler (1911–2008) es formulierte: Das Photon bleibt ein „smoky dragon“, ein „elusive beast“, „a mysterious quantum Cheshire cat“.⁷⁷

Anmerkungen

- * Basierend z. T. auf meinem Vortrag bei der Jahresversammlung der *Heisenberg-Gesellschaft* am 15. Okt. 2021 an der LMU München, z. T. auf meinem Aufsatz: Einstein und die Lichtquantenhypothese. Zur stufenweisen Anreicherung der Bedeutungsschichten von ‚Lichtquantum‘, *Naturwissenschaftliche Rundschau* 58,6 [Juni 2005], 311–319 und 58,7 [Juli 2005], 363–371.
- 1 Eine ausführlichere Darstellung findet man in Klaus Hentschel: Lichtquanten. Die Geschichte des komplexen Konzepts und mentalen Modells von Photonen. Cham, erweiterte 2. Aufl. 2023 (auch in engl. Übers.), dort insb. S. 40–43, 154 f.–156 zu den (falschen) Vorstellungen des Physiko-Chemikers G. N. Lewis zu „light corpuscles“.
- 2 Newton Opticks, Reprint der 4. Auflage von 1730 (mit Vorwort von Albert Einstein). New York 1952 u. öfter, query 29, S. 370.
- 3 Newton in seiner Antwort auf Hooke, *Philosophical Transactions* 1672, S. 5086, Reprint zus. mit Hookes Einwüfen in I. B. Cohen (Hrsg.) *Isaac Newton’s Papers & Letters on Natural Philosophy*, Cambridge, Mass. 1958, Zitat S. 118.
- 4 Ebenda, S. 5087 bzw. Reprint 119; Orthographie, Interpunktion u. Hervorhebungen wie im vorigen Zitat Orig.
- 5 A. Einstein: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik* (4) 17

- (1905), S. 132–148, Zitat S. 143 bzw. annotierter und kommentierter Abdruck in den *Collected Papers of Albert Einstein*. Princeton (hiernach CPAE), Bd. 2 (1989), S. 161.
- 6 Alle vorstehenden Zitate aus Newtons *Questiones*, aus 1664/65 in der textkritischen Edition dieses Notizbuchs hrsg. durch J. E. McGuire & Martin Tamny, Cambridge 1983, S. 384–385.
 - 7 Robert Millikan: *The Autobiography*, New York: Prentice Hall, 1960, S. 102 (für Kritik an diesem Text s. u.), bezugnehmend auf J. J. Thomson: *Elektrizität und Materie*. Braunschweig 1904 (Zitat S. 111); vgl. Bruce Wheaton: *The Tiger and the Shark. Empirical Roots of Wave-Particle Dualism*. Cambridge 1983 u. Russell McCormach: *J. J. Thomson and the structure of light*, *British Journal for History of Science* 3 (1967), S. 362–387.
 - 8 Eine weitere Verbindung, die mit der gleichartigen relativistischen Transformation von Energie u. Frequenz zu tun hat, erwähnt Robert Rynasiewicz: *Der Weg zur neuen Kinematik*, *Physik Journal* 4 (2005), S. 69–75, hier S. 74.
 - 9 Über Römer siehe Isis 31 (1939), 315–379, 33 (1941), 24–40 sowie Römers *De mora luminis*, *American Journal of Physics* 53 (1985), 620–630 und dort jeweils genannte u. z. T. abgedruckte Primärquellen; zu Messungen des 19. Jahrhunderts z. B. William Tobin: *Toothed wheels and rotating mirrors*, *Vistas in Astronomy* 36 (1993), S. 253–294, Jan Frercks: *Creativity and technology in experimentation*, *Centaurus* 42 (2000), S. 249–287 und Erik Bergstrand: *Determination of the velocity of light*, *Handbuch der Physik* 24 (1956), S. 1–43.
 - 10 Dazu z. B. Jan Frercks: *Das Verhältnis von Publikation zu Theorie und Experiment in Fizeaus Forschungsprogramm zur Äthermitführung*, *NTM N.S.* 12 (2004), S. 18–39 und dort genannte, z. T. unpubl. Primärquellen.
 - 11 Siehe dazu z. B. A. Martinez: *Ritz, Einstein and the emission hypothesis*, *Physics in Perspective* 6 (2004), S. 4–28 und John Norton: *Einstein's investigations of Galilean covariant electrodynamics*, *Archive for History of Exact Sciences* 59 (2004), S. 45–105, insb. S. 57 ff. und dort zit. Primärliteratur, z. B. Einsteins Brief an Ehrenfest 1912.

- 12 Über diese Episode siehe A. Rupert Hall: *All Was Light. An Introduction to Newtons Optics*. Oxford 1993, S. 164–166 u. dort genannte Primärquellen, insb. Newtons Korrespondenz mit Flamsteed u. Gregory.
- 13 Siehe J. Kepler: *Ausführlicher Bericht von dem Cometen vnd seinen Bedeutungen*. Halle, 1608 (in *opera omnia*, 7 [1868], S. 25 ff.); Newtons *Principia*, Buch 3, Prop. 41 (S. 528 der Motte-Cajori-Ausg. bzw. in dt. Übers. in d. Wolfers-Ausgabe Berlin 1872, Fortsetz. des § 59 über Kometen, insb. S. 485, 491, 493 f. über Kepler.
- 14 Siehe W. Homberg in *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Année 1708 (publ. 1730), *Histoire* S. 21. Vgl. ferner John Worrall: *The pressure of light*, *Studies in the History and Philosophy of Science* 13 (1982), S. 133–171, hier S. 141 für Hinweise auf analoge Experimente von Nicolas Hartsoeker (1696) und de Mairan (1747) sowie deren Wiedergabe durch Musschenbroeks *Cours de physique experimentale et mathématique*, 1769.
- 15 Abraham Bennet: *Experiments on a new suspension of the magnetic needle*, *Philosophical Transactions of the Royal Society London* 82 (1792), S. 81–98, insb. S. 87 f. (Zitat) bzw. Tafel II ohne Angabe des Restdrucks.
- 16 Über diese Episode siehe Crookes 1875/76, Schuster 1876 sowie Worrall (1982, Anm. 14) S. 147 ff., A. E. Woodruff: *William Crookes and the radiometer*, *Isis* 57 (1966), S. 188–198, Günter Dörfel & Falk Müller: *Crookes' Radiometer und Geißlers Lichtmühle-Kooperation oder Konkurrenz?*, *NTM*, N. S. 11 (2003), S. 171–190.
- 17 Zum vorstehenden siehe z. B. Pjotr Lebedew: *Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes*, *Annalen der Physik* (4) 6 (1901), 433–458, Nichols & Hull: *The pressure due to radiation*, *Physical Review* 17 (1903), 26–50, 91–104 sowie die Korrekturen und weiteren Verbesserungen in Mary Bell & S. E. Green: *On radiometer action and the pressure of radiation*, *Proceedings of the Physical Society London* 45 (1933), S. 320–350, 46 (1934), 589–603; J. C. Maxwell: *A Treatise on Electricity & Magnetism*. Oxford 1873 u. öfter, 3. Aufl. 1891, § 792 f., Bruno Carazza & Helge Kragh: *Adolfo Bartoli and the problem of radiant heat*, *Annals of Science* 46 (1989), 183–194 und dort jeweils

gegebene Hinweise auf die weitere, z. T. entlegene Originalliteratur. Bartoli konnte 1876 durch Betrachtung komplizierter Kreisprozesse mit komprimierter Wärmestrahlung zeigen, dass der zweite Hauptsatz zu Widersprüchen führt, wenn man nicht die Existenz eines Strahlungsdrucks voraussetzt, gegen den beim Verkleinern von Volumina Arbeit verrichtet wird. Allerdings hat er diese Voraussage später irrtümlicherweise zurückgenommen und seine Originalarbeit wurde erst später durch Boltzmann (1884) wiederentdeckt.

- 18 A. Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik* (4) 17 (1905), S. 891–921, hier S. 915 bzw.: Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung, *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 11 (1909), S. 482–50 bzw. *CPAE*, Bd. 2, S. 300 bzw. 565, Zitat S. 483.
- 19 J.H. Poynting & Guy Barlow: The Pressure of light against the source: The recoil from light, *Proceedings of the Royal Society of London* A83 (1910), S. 534–546; O.R. Frisch: Experimenteller Nachweis des Einsteinschen Strahlungsrückstoßes, *Zeitschrift für Physik* 86 (1933), S. 42–48.
- 20 Lebedew [1901] (hier Anm. 17) S. 458 bzw. Nichols u. Hull (1903), S. 104: „it appears that the radiation pressure depends only upon the intensity of the radiation and is independent of the wave-length.“ Erst 1907 zeigte Erich Ladenburg (*Phys. Zeitschrift* 8, S. 590–594) experimentell eine Frequenzproportionalität der Energie von UV-Strahlung auf (wahrscheinlich ohne von Einsteins Arbeit von 1905 zu wissen, die er nicht zitierte); erst Abram Joffé wies dann in den *Annalen der Physik* (4) 24 (1907), S. 939–940 auf die gute Übereinstimmung mit Einsteins Voraussage von 1905 hin. Zum Energietransport des Lichts siehe auch Einstein an Conrad Habicht, Mitte Mai 1905, *CPAE* 5, Dok. 28, S. 33.
- 21 Einige von Ihnen wissen vielleicht, dass Einstein das seiner Relativitätstheorie scheinbar entgegenstehende Resultat von Walter Kaufmann zur Massenzunahme bewegter Elektronen mit der Geschwindigkeit abkanzelte, das eher für die Theorien von Abraham und Bucherer zu sprechen schien: „Jenen Theorien kommt aber nach meiner Meinung eine ziemlich geringe Wahrscheinlichkeit zu, weil

ihre die Maße des bewegten Elektrons betreffenden Grundannahmen nicht nahe gelegt werden durch theoretische Systeme, welche größere Komplexe von Erscheinungen umfassen.“ (A. Einstein: Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4 (1907), S. 411–462 Zitat S. 439) Hier also die gleiche holistische Bewertung ganzer Experimentalkomplexe, nicht einzelner Ergebnisse oder einzelner Forschungsfelder.

- 22 Wilhelm Hallwachs: Ueber den Einfluss des Lichtes auf elektrostatisch geladene Körper, Annalen der Physik (3) 33 (1887), S. 301–312 und weitere Primärquellen, zit. in Wheaton (1978, folgende Anm.) sowie in Karl-Heinrich Wiederkehr: Zur Geschichte der lichtelektrischen Wirkungen, Technikgeschichte 40 (1973), S. 93–103.
- 23 Siehe Philipp Lenard: Ueber die lichtelektrische Wirkung, Annalen der Physik (4) 8 (1902), S. 149–198, Zitat S. 149; vgl. auch Bruce R. Wheaton: Philipp Lenard and the photoelectric effect, 1889–1911, Historical Studies in the Physical Sciences 9 (1978), S. 299–322 zu Lenards Modellierung des Effekts, insb. S. 300 zu seiner Interpretationen der Elektrizitätsquanten als ‚freie Elektrizität‘, als „latente Bewegung des Äthers“; Roger Stuewer: Non-Einsteinian interpretations of the photoelectric effect, Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Minneapolis 1970, S. 246–263 und dort genannte weiterführende Primärquellen.
- 24 Lenard (1902), vorige Anm., S. 170, 150.
- 25 A. Einstein: Über einen die Erzeugung ..., (Anm. 5) 1905, S. 145 f.
- 26 Für eine Literaturübersicht bis 1909 siehe Rudolf Ladenburg: Die neueren Forschungen zur Emission negativer Elektronen, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 6 (1909), S. 425–484; vgl. Hentschel (2023, Anm. 1), S. 75 ff. (Anm. 1) und dort genannte weiterführende Literatur.
- 27 Siehe Robert Millikan: A direct photoelectric determination of Planck’s h , Physical Review (2) 7 (1916), S. 355–388 sowie Allan Franklin: Millikan’s measurement of Planck’s constant, European Physics Journal H 38 (2013), S. 573–594.

- 28 So Robert Millikan in seiner Autobiographie von 1950, das vorige Zitat stammt aus Millikan: Einstein's photoelectric equation and contact electromotive force, *Physical Review* (2) 7 (1916), S. 18; vgl. auch Gerald Holton: Millikan's struggle with theory, *Europhysics News* 31, Nr. 3 [2000] auch online unter www.europhysicsnews.com/full/03/article3/article3.html sowie Roger Stuewer: History as myth and muse, *Vorl. an der Univ. Amsterdam*, 11. Nov. 1998 und den späteren Abschnitt zur Rezeption. Siehe ferner Maurice de Broglie: La relation $h\nu = \varepsilon$ dans les phénomènes photo-électriques, in *Atomes et électrons*, Paris: Gauthier-Villars, 1923, S. 80–130, insb. S. 92 ff. über zum Photoeffekt inverse Phänomene.
- 29 M. Planck an W. Wood, 7. Okt. 1931, zit. in A. Hermann: Frühgeschichte der Quantentheorie, Mosbach: Physik-Verlag, 1969, S. 31 f.; vgl. A. Needell: Irreversibility and the Failure of Classical Dynamics: Max Planck's Work on the Quantum Theory 1900–1915, Diss. Yale Univ. 1980; Olivier Darrigol: From C-numbers to Q-numbers, San Francisco 1992, S. 22–77; C. A. Gearhart: Planck, the quantum, and the historians, *Physics in Perspective* 4 (2002), S. 170–215 für drei sehr verschiedene Darstellungen von Plancks Argumentation.
- 30 Siehe Plancks Interpretation von $E = h \cdot \nu$ im Brief an Lorentz vom 1.4.1908 und an Einstein am 6.7.1907, beide abgedruckt in CPAE.
- 31 CPAE, Bd. 5, Dok. Nr. 27 bzw. zum folgenden Einstein [1905] (Anm. 5).
- 32 So seine Definition der Lichtquanten in Einstein 1905 (Anm. 5) S. 133: vgl. z.B. A. Pais: Einstein and the quantum theory, *Reviews of Modern Physics* 51 (1979), S. 373.
- 33 So Einstein vier Jahre später an H. A. Lorentz (30.3.1909, CPAE 5, Nr. 1460).
- 34 Einstein (1905, Anm. 5), S. 143, bzw. CPAE, Bd. 2 (1989), S. 161; vgl. ferner Jon Dorling: Einstein's introduction of photons, *British Journal for the Philosophy of Science* 22 (1971), S. 1–8 sowie John Stachel: Einstein's light quantum hypothesis. In: *Einstein from B to Z*. Basel 2002, S. 427–444. Zu dem erst 1926 auftretenden Terminus ‚Photon‘ siehe den zweiten Teil dieses Artikels.
- 35 Planck an AE, 6 Juli 1907 (*Phys. Abh.* 1958, Bd. II, 292 ff.)

- 36 Planck, *Physikalische Zeitschrift* bzw. *Physik. Abh.* (1958) Bd. II, S. 242 ff.
- 37 A. Einstein: Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption, *Annalen der Physik* (4) (1906), 199–206 bzw. CPAE, Bd. 2, S. 350.
- 38 Siehe A. Einstein: Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems, *Physikalische Zeitschrift* 10 (1909), 185–193 sowie die Disk. ebenda 224 f., 323 f., 817–825: Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung; ferner F. E. Irons: Reappraising Einstein's 1909 application of fluctuation theory to Planck's radiation, *American Journal of Physics* 72 (2004), S. 1059–1066 sowie M. J. Klein: Einstein and the wave-particle duality, *The Natural Philosopher* 3 (1964), S. 3–49.
- 39 A. Einstein: Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung. *Verhandlungen der DPG* 7 (1909), S. 482–500, Zitat S. 499, bzw. CPAE, Bd. 2, Dok. 60.
- 40 Siehe dazu z. B. J. J. Thomson (vgl. Anm. 7), S. 14 ff.: Die Korpuskulartheorie der Materie. Braunschweig 1908, Kap. 2 sowie ergänzend zu hydrodynamischen Analogien: V. Bjerknes: Die Kraftfelder, ebenda, 1909.
- 41 Eine ausgezeichnete Gesamtdarstellung findet sich in Bruce Wheaton: *The Tiger and the Shark. Empirical Roots of Wave-Particle Dualism.* Cambridge 1983.
- 42 Die vorstehenden drei Zitate aus CPAE, Bd. 5 (1993), Dok. 163, S. 193, Dok. 267, S. 295 u. Dok. 364, S. 419.
- 43 Siehe dazu experimentell Johannes Stark: Weitere Bemerkungen über die thermische und chemische Absorption im Bandenspektrum, *Physikalische Zeitschrift* 9 (1908), 889 bzw. Stark: Über eine Anwendung des Planckschen Elementargesetzes, und Einsteins Antwort in den *Annalen der Physik* (4) 38 (1912), 467, 888. Einsteins Ableitung des Gesetzes: Thermodynamische Begründung des photochemischen Äquivalentgesetzes, ebenda 37 (1912), S. 832–838 erfolgte interessanterweise jedoch ohne Rekurs auf die Lichtquantenhypothese.
- 44 Für Hinweise auf Primärliteratur siehe Ivan Plotnikow: *Allgemeine Photochemie.* Berlin u. Leipzig 1920 bzw. 2. erw. Aufl. 1936, Max

- Bodenstein: 100 Jahre Photochemie des Chlorknallgases, Berichte der deutschen Chemischen Gesellschaft 75 (1942), S. 119–136 sowie Walter Meidinger: ‚Photochemie‘, Chemiker-Zeitung 58 (1934), S. 629–632.
- 45 Siehe A. Einstein: Strahlungs-Emission und -Absorption nach der Quantentheorie, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 18 (1916), S. 318–323 bzw. CPAE 6 (1996), Dok. 34.
- 46 Quantentheorie der Strahlung, Mitteilungen der Physikalischen Gesellschaft Zürich 18 (1916), S. 47–62 bzw. CPAE 6, Dok. 38, 381–398, Zitat S. 61/396.
- 47 Aus der umfangreichen Literatur zu Einsteins Kritik an der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik seien hier besonders empfohlen: Albert Einstein–Max Born: Briefwechsel 1916–1955. München 1969 u. öfter (insb. S. 119 ff.) sowie John A. Wheeler & W.H. Zurek (Hrsg.) Quantum Theory and Measurement. Princeton 1983 mit Reprints aller einschlägigen Aufsätze der Bohr-Einstein-Debatte.
- 48 Halle: Renger 1723, S. 11, 12, 17, 19.
- 49 Zu Natanson siehe Magdalena Waniek & Klaus Hentschel: Nicht zu unterscheiden, Physik Journal 10,5 (2011), 39–43 sowie Michał Kokowski: The divergent histories of Bose-Einstein statistics and the forgotten achievements of Władysław Natanson (1864–1937), Studia Historiae Scientiarum 18 (2019), S. 327–464.
- 50 L. Natanson: Statistische Theorie der Strahlung, Physikalische Zeitschrift 12 (1911), S. 659–666, Zitat S. 662 (Hervorh. K. H.); vgl. dazu auch Olivier Darrigol: Statistics and combinatorics in early quantum theory, Historical Studies in the Physical Sciences 19 (1988), S. 17–80, 21 (1990), S. 237–298, insb. 243 ff. Alfred Kastler: On the historical development of the indistinguishability concept for microparticles, in A. van der Merwe (Hrsg.) Old and New Questions in Physics, Cosmology and Theoretical Biology. New York 1983, S. 607–623, insb. S. 616 ff., kritisch dazu Stachel (Anm. 34) S. 438 f. und ferner Silvio Bergia: Who discovered the Bose-Einstein-statistics? In: Symmetries in Physics 1600–1980, hrsg. v. Manuel G. Doncel, Bellaterra 1987, S. 221–250.

- 51 Albert Einstein: Quantentheorie des einatomigen idealen Gases, Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften math.-physik. Klasse 1924, S. 261–267 und 1925, 3–14, 18–25 (Zitate S. 267, 266 u. 3, 18.)
- 52 Siehe z. B. W. Ketterle: Bose-Einstein-Kondensate: eine neue Form von Quantenmaterie, Physikalische Blätter 53 (1997), 677–680 und die Webpage-Empfehlungen in Kasten 8.
- 53 Für eine Übersicht siehe Harry W. Paul: Photonen: Eine Einführung in die Quantenoptik. Wiesbaden 1995 sowie Klaus Hentschel: Lichtquanten (2023, Anm. 1), Kap. 8.
- 54 Zur Frühgeschichte der QED bis ca. 1953 siehe Silvan S. Schweber: QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga. Princeton 1994 u. dort genannte Primärquellen, von denen viele Aufsätze in Julian Schwinger (Hrsg.) Selected Papers on Quantum Electrodynamics. New York 1958 bzw. Arthur I. Miller (Hrsg.) Early Quantum Electrodynamics. A Sourcebook. Cambridge 1994 gesammelt vorliegen.
- 55 Für systematische Ableitungen von Ergebnissen der QED siehe Walter Heitler: The Quantum Theory of Radiation. Oxford 1936, Richard Feynman: Quantum Electrodynamics, New York: Benjamin, 1961 sowie Jauch & Rohrlich: The Theory of Photons and Electrons. New York, Heidelberg & Berlin 1955, die nur von diesen abstrakten Prämissen ausgehen; eine anschaulichere Einführung auf elementarem Niveau bietet Richard Feynman: QED. The Strange Theory of Light and Matter. Princeton 1985.
- 56 Über Feynmans Leben und Werk siehe etwa Jagdish Mehra: The Beat of a Different Drum – The Life and Science of Richard Feynman. Oxford 1994 sowie Schweber (1994) Kap. 8 [zit. in Anm. 54]; zur Geschichte der Feynman-Diagramme: David Kaiser: Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics. Chicago 2004, Adrian Wüthrich: The Genesis of Feynman Diagrams. Dordrecht 2010, und C. Wüthrich in Michael Esfeld (Hrsg.) Philosophie der Physik. Frankfurt 2012.
- 57 Zum Einsatz von Feynman-Diagrammen in Lehre und Ausbildung siehe Kaiser (2004), Wüthrich (2010), (2012) [alle in voriger Anm.]

- u. dort jeweils angegebene weiterführende Quellen zur Rezeption und Durchsetzung der QED.
- 58 Siehe Werner Heisenberg: Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik* 43 (1927), S. 172–198 sowie die darauf dann aufbauende sogenannte „Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik“, eine so freilich erst im Nachhinein konstruierte Position, während sich deren Protagonisten, neben Heisenberg insb. auch Bohr, Kramers, v. Weizsäcker u. v. a. in ihren Deutungen de facto doch stärker voneinander unterschieden – vgl. dazu z. B. Mara Beller: *Quantum Dialogue. The Making of a Revolution*. Chicago 1999; Don Howard: Who invented the ‚Copenhagen interpretation‘? A study in mythology, *Philosophy of Science* 71 (2004), 669–682, Kristian Camilleri: Constructing the myth of the Copenhagen interpretation, *Perspectives on Science* 17,1 (2009): 26–57; Alexei Kojevnikov: Philosophical rhetoric in early quantum mechanics 1925–1927. In: *Weimar Culture and Quantum Mechanics*. London & Singapur 2011; und dort jeweils genannte weiterführende Texte.
- 59 Starks Tendenz zu spekulativen Atommodellen wurde mit der Zeit immer stärker, was seine Isolation in der scientific community verstärkte und seine späteren politischen Verfehlungen sicher auch mit motivierte: siehe dazu Andreas Kleinert: Die Axialität der Lichtemission und Atomstruktur: Johannes Starks Gegenentwurf zur Quantentheorie, in A. Schürmann u. B. Weiss (Hrsg.) *Chemie-Kultur-Geschichte. Festschrift für H. W. Schütt*. Diepholz 2002, S. 213–232.
- 60 zit. in Lawrence Badash: Nagaoka an Rutherford, 22 Februar 1911, *Physics Today* 20,4 (1967), S. 55–60, hier S. 59.
- 61 Zit. nach A. Hermann: Die frühe Diskussion zwischen Stark und Sommerfeld über die Quantenhypothese, *Centaurus* 12 (1968), S. 38–59, hier S. 40.
- 62 Max Planck: Zur Theorie der Wärmestrahlung, *Annalen der Physik* (4) 31 (1910), S. 758–768, Zitat S. 763.
- 63 CPAE, Bd. 5 (Anm. 37), S. 582.

- 64 Max Planck: Wahlvorschlag für Albert Einstein. In: Physiker über Physiker, hrsg. v. Körber u. Kirsten, Berlin 1975 bzw. CPAE , Bd. 5, S. 526–528, Zitat 527.
- 65 Äußerung von Walter Nernst während des ersten Solvay-Kongresses in Brüssel.
- 66 Paul Ehrenfest: Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle? *Annalen der Physik* (4) 36 (1911), S. 91–118, Zitat S. 921; weiteres zur Rezeption des Lichtquantums in B.Wheaton: *Symmetries of matter and light*, in *Symmetries in Physics*. Bellaterra, 1987, S. 279–297.
- 67 Robert A. Millikan: Einstein's photoelectric equation and contact electromotive force. *Physical Review, New Series* (2) 7 (1916), S. 355–388.
- 68 R. Millikan: The electron and the light quant from the experimental point of view, Nobel Prize 1923, S. 61 ff. Auch die Diskussion nach Maurice de Broglies Solvay-Vortrag (Anm. 71) zeigt die 1921 noch verbreitete Skepsis.
- 69 The *Autobiography of Robert Millikan*. New York 1950, S. 101 f.; vgl. Gerald Holton in *Thematic Origins of Scientific Thought*. Cambridge, Mass. 1988, S. 156–159 und Texte der vorigen Anm.
- 70 Siehe Roger Stuewer: *The Compton Effect, Turning Point in Physics*. New York 1975, in Kurzfassung in *Annalen der Physik* 9, 975–989 (2000) sowie Comptons Nobelpreis-Rede und Autobiographie in <http://nobelprize.org/physics/laureates/1927/compton-lecture.html> bzw. <http://nobelprize.org/physics/laureates/1927/compton-bio.html>.
- 71 L. de Broglie: Rayonnement noir et quanta de lumière, *Journal de Physique* (6) 3 (1922), S. 422–428, Zit. 422, 426.
- 72 *Ibid.*, S. 428; zur Genese von de Broglies Wellentheorie der Materie vgl. Olivier Darrigol: Strangeness and soundness in L. de Broglie's early works, *Physica* 30 (1993), S. 303–372 und dort zit. Primärquellen.
- 73 G. N. Lewis: The conservation of photons, *Nature* 118 (1926), S. 874–875.
- 74 Zu Plancks Ringen siehe etwa: Die physikalische Realität der Lichtquanten, *Die Naturwissenschaften* 15 (1927), 529–531. Weitere

irreparable Limitierungen dieses klassischen Photonenkonzepts als lokalisierbarem Lichtteilchen werden behandelt von G. Simonsohn: Probleme mit dem Photon im Physikunterricht, Praxis der Naturwissenschaften 30, Heft 9, 1981, S. 257–266 sowie in Physik und ihre Didaktik 7,3 (1980), S. 3–16, auch wenn ich mit seiner Empfehlung, den klassischen Zugang zugunsten der QED aus dem Unterricht zu verbannen, überhaupt nicht einverstanden bin.

- 75 Einstein-Besso-Correspondance 1903–1953, hrsg. v. Pierre Speziali, Paris 1972, S. 482 f. und ergänzend John Stachel: Einstein and the Quantum. Fifty years of struggle. In: Einstein from B to Z (Anm. 34), S. 367–402.
- 76 Fast jährlich erscheinen Bücher wie das von Chandrasekhar Roychoudhuri, A. F. Kracklauer & Kathy Creath (Hrsg.): The Nature of Light: What is a Photon? Boca Raton 2008. Für Thesen des Autors zur Frage, wie unser heutiges mentales Modell von Photonen aussehen, siehe Kap. 9 von Hentschel (2023).
- 77 So J. A. Wheeler in der 2. Summer School ‚Enrico Fermi‘, publiziert 1979 u. zit. n. Hentschel (2023, Anm. 1). S. 267.

Festrede zur Einweihungsfeier des Werner-Heisenberg-Gymnasiums in Garching, 1971*

Liebe Schulgemeinde,

Da diese schöne Schule nun meinen Namen tragen soll, schien es Eurem Direktor gut, dass Ihr auch den Namenspatron dieser Schule mal persönlich kennen lernt. Nun will ich Euch natürlich keinen feierlichen Vortrag halten, sondern ich glaube, das Beste ist, 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.

Ich bin natürlich nicht hier zur Schule gegangen, sondern in München drin und zwar ins Max-Gymnasium und die von Euch, die oft nach München reinkommen, die werden ja wissen, wo es liegt, hinter der Erlöserkirche rechts liegt so ein großes, gelbes Gebäude, das ist das Max-Gymnasium.

Und da habe ich also das gelernt, was Ihr jetzt hier in der Schule lernt, Latein und auch später Griechisch und all die Dinge und vielleicht sollte ich zuerst erzählen, wie ich in die Mathematik hereingekommen bin, die brauchte ich ja später im Leben sehr viel. Mathematik ist ja im Allgemeinen ein Fach, vor dem sehr viele fürchterliche Angst haben, das viel Schrecken erregt, aber ich bin auf sehr harmlose Weise reingekommen, nämlich dadurch, dass bei uns zu Hause Spiele sehr beliebt waren. Also, wenn am Sonntag mal schlechtes Wetter war und wir nicht nach draußen gehen konnten, so spielte unser Vater mit uns zwei Buben, meinem Bruder und mir, immer gern irgendwelche Spiele, Mühle fahren, Dame spielen, Schach spielen, und was es alles so Schönes gab. Doch die schönsten Spiele werden nach einiger Zeit langweilig und mein Vater, der selbst nun ein guter Lehrer war, dachte sich, es schadet ja nichts, wenn die Kinder beim Spielen auch etwas lernen. Nun hatte mein Bruder, der zwei Jahre älter war, einen sehr guten Mathematiklehrer und der gab seine Aufgaben immer in irgendwelchen schönen Verkleidungen, also so etwa: eine Hausfrau geht mit ihrem Hund in einen Laden und will 2 Pfund Fleisch kaufen und 3 Pfund Gemüse. Das kostet so und so viel und der Hund frisst dann noch eine Wurst und was kriegt man nachher vom Kaufmann wieder raus, wenn er 50 Mark mitnimmt. Diese Art von Aufgaben, die standen auch im Buch, und da sagt mein Vater: wir können ja diese Aufgaben um die Wette lösen. Wer's zuerst hat, hat gewonnen. Und dann merkte ich Lauf dieser Sonntage, dass ich's immer ein bisschen besser konnte als die anderen und schneller fertig wurde und so wurde mein Interesse am Rechnen und dann an Mathematik geweckt und der Lehrer merkte das dann auch und dann gab er mir mal so ein Göschchen-Bändchen über Differenzial- und Integralrechnungen in die Hand und sagte: na, du verstehst ja noch nichts davon, aber schau dir's mal an, vielleicht lernst du doch was. Und so habe ich relativ früh die Mathematik gelernt. Das war also die Art, wie ich in die Mathematik reingekommen bin und ihr seht, das war ganz harmlos

und vergnüglich und hatte mit sehr schwierigen Dingen eigentlich gar nichts zu tun.

Dann die Physik. Ja, (...) mit Physik habe ich später sehr viel zu tun gehabt, die habe ich natürlich so gelernt wie sicher viele von Euch auch: Ich habe angefangen zu basteln. Damals konnte man noch nicht Radio basteln, weil's noch gar kein Radio gab, das war noch nicht erfunden. Aber es gab schon Elektromotoren, es gab Transformatoren und solche Sachen und ich habe damit angefangen, kleine Elektromotoren zu basteln mit meinem Bruder zusammen und dann waren wir natürlich ungeheuer stolz, wenn wir dieses Ding zum Laufen kriegten und wenn damit sogar irgendwelche kleinen Dinge angetrieben werden konnten. Aber das netteste Spielzeug dieser Art war, es war nun schon die Zeit des 1. Weltkrieges, eine Bogenlampe, die wir gebaut hatten. Da hatte uns irgendjemand zwei Kohlestücke für solche Bogenlampen geschenkt und Ihr wisst wahrscheinlich gar nicht mehr, was das ist, weil's die jetzt kaum mehr gibt, aber die waren ja eine sehr helle Beleuchtung, zum Teil auch auf den Straßen und damit haben wir Jungs uns einen Scheinwerfer gebaut. Wir wohnten damals in der Hohenzollernstraße und da müsst ihr wissen, dass hinter der Hohenzollernstraße schon die grünen Wiesen anfangen. Jetzt liegt die Hohenzollernstraße mitten in Schwabing drin, aber damals konnte man von unserem Kinderzimmer aus über die Felder schauen und auf der anderen Seite dieser Felder war ein Haus, in dem ein Schulfreund meines Bruders wohnte. Er hieß Heilmeier und wurde später ein bekannter Internist.

Mit ihm zusammen haben wir Scheinwerfer gebaut und haben abends, wenn's dunkel war, uns gegenseitig Lichtsignale zugeschickt mit Morsealphabet, das haben wir gelernt und wir fanden es also furchtbar spannend, uns da irgendetwas über die Schule per Lichtsignal zu erzählen. Das hatte nun eine unangenehme Folge, denn eines Tages kam die Polizei - es war ja Krieg - und sagte, hier seien Spione am Werk und diese Spione signalisierten wohl irgendetwas für Agenten, die da auf

den Wiesen rumliefen oder für feindliche Flugzeuge, die ganz selten auch mal kamen. Item, es wurde bedenklich, wir wurden verhöhrt, aber natürlich löste sich alles in Wohlgefallen auf, denn mein Vater konnte glaubhaft nachweisen, dass wir halt bloß spielten und weiter nichts Böses taten.

Weil ich schon vom Krieg erzähle, damals hat sich für uns Kinder der Krieg nur so bemerkbar gemacht, ja höchstens dadurch natürlich, dass der Vater lange Zeit im Feld war und dann verwundet zurückkam, aber hauptsächlich dadurch, dass wir zu wenig zu Essen bekamen. Wir haben dann immer mehr und mehr gehungert. Im Jahr 17 war's so schwierig, dass wir uns wirklich nur noch schwer aufrecht halten konnten, und dann bin ich für ein Jahr lang in die Landwirtschaft gegangen und hab als Knecht auf einem Bauernhof in Miesbach gearbeitet, um mich wieder richtig herauszufüttern. Ich hatte da noch alle möglichen schönen Sachen an Schularbeit mitgenommen, ein lateinisches Lexikon und den Caesar Bellum Gallicum und so etwas, aber ich muss gestehen, ich war so müde, dass ich das ganze Jahr das Buch nicht ein einziges Mal aufgeschlagen habe. Aber auch das hat nichts geschadet, das gehörte eben damals zum Leben dazu.

Nun muss ich vielleicht noch erzählen, wie ich auf die Atomphysik gekommen bin. Also wo habe ich zum ersten Mal mit Atom zu tun bekommen? Ja, in unserem Schulbuch ist auch etwas von Atom gestanden, das fand ich aber ziemlich unvernünftig, was dastand, das konnte ich nicht glauben. Da waren so Atome abgebildet mit Haken und Ösen, mit denen sie sich aneinanderhängen und das fand ich, das musste Unsinn sein. Ich habe mich mit meinem Lehrer furchtbar gestritten, er meinte, er könnte mir damit doch irgendwie ein Verständnis vermitteln, aber dann hab ich's auch wieder vergessen und die eigentliche Bekanntschaft mit den Atomen ist später auf ganz merkwürdige Weise zustande gekommen und da muss ich wieder etwas von der Kriegszeit erzählen.

Der erste Weltkrieg ging ja verloren, die geschlagenen Armeen strömten nach Deutschland zurück und dann brach in München natürlicherweise aus dem Unglück über den verlorenen Krieg die Revolution aus. Der König wurde verjagt und es entstand eine sog. Räterepublik in München und das war eine recht unangenehme Zeit, weil auf den Straßen immer wieder herumgeschossen wurde.

Man musste sich in Acht nehmen, nicht da irgendwie hineinzugeraten und dann wurde auch einfach geraubt und geplündert, d. h. es kamen plötzlich Leute in die Wohnung und raubten die Wohnung aus. Mir selbst ging's mal so: ich fuhr mit dem Rad ins Max-Gymnasium, um zur Schule zu kommen, und dann kam ein Rotgardist auf mich zu und sagte: das Rad gehört mir. Hab ich gesagt: aber ich brauch's doch für die Schule und da nahm er seine Pistole und sagte, so gibst du mir das Rad her und da hab ich's ihm natürlich gegeben. Ich war kein Held, also hab ich ihm das Rad gegeben, nicht? Ganz einfach! Und dann hatte ich eben kein Fahrrad mehr und das war sehr schlimm. Und dann kam eine Zeit, wo die Regierung, die bayerische Regierung, die vom Landtag nun ja geleitet war, das sagte, ja also, das in München geht jetzt nicht mehr so weiter, das München muss jetzt wieder von Regierungstruppen besetzt werden und dann wurde München umzingelt und da war Garching eine der Stellen, die schon besetzt waren von den Regierungstruppen. In München aber ging's uns sehr schlecht, denn es kamen gar keine Lebensmittel mehr rein, keine Milch, kein Brot, keine Butter, gar nichts mehr und dann kriegten nur noch die Anhänger dieser roten Regierung, dieser roten Soldaten usw. bekamen etwas zu essen und wir bekamen nichts mehr zu essen. Einen Tag ohne Essen geht noch, zwei Tage ist schon schlechter und wie wir 3 Tage lang überhaupt nichts mehr gegessen hatten, keine Brotkrume mehr, und meine Mutter nur noch weinte, da hab ich dann mit meinem Bruder zusammen beschlossen, jetzt müssen wir was unternehmen, so geht das nicht weiter. Nun wusste ich, dass hier in Garching, und darum erzähle ich die Geschichte, dass

hier in Garching ein Bauer wohnte, der war im Kriege Feldwebel in der Kompanie meines Vaters gewesen. Und mein Vater, der Hauptmann war, der hat sich mit dem Feldwebel immer gut vertragen. Wir fragten den Vater, ob wir nicht zu dem Bauern gehen dürften, um zu sehen, ob wir da was zu essen kriegen. Der Vater hatte zuerst Sorge, das zu erlauben, denn dann mussten wir durch die Linien der Kämpfenden durch, denn das Garching war ja schon von Regierungstruppen besetzt, aber schließlich sagt er: na ja, verhungern hat auch keinen Zweck, gut, geht mal los. Dann sind wir also zu zweit, noch mit einem Freund zusammen, hierher gegangen.

Nun muss ich erzählen, dass schon von Freimann ab praktisch nur noch Wiesen da waren. Es gab natürlich die beiden alten Dörfer Dirnismaning und eben Garching, aber sonst war das alles Bauernland und zum Glück gab's an der Straße auch noch viel Gebüsch. Nun die letzte rote Feuerlinie, das waren so Maschinengewehre, die auf dem Bahndamm standen, die war bei Freimann und da konnten wir uns im Gebüsch da dran vorbeischlängeln und wahrscheinlich haben die uns auch mal gesehen und haben gedacht: Ach, diese Kinder, die soll man ruhig durchlassen. So ernst war das alles nicht und wir sind also in Dirnismaning dann mit großer Begeisterung auf die Regierungstruppen gestoßen und haben denen gesagt, wir wollen was zu essen haben und das kriegen wir in Garching. Dann sind wir also bis zu diesem Bauern in Garching gekommen, der gar nicht weit von dieser Schule aus seinen Hof gehabt haben muss. Ich hab gerade, wie ich hergefahren bin, versucht, diesen Hof noch zu finden, aber ich muss gestehen, solange hat mein Gedächtnis dann doch nicht mehr gereicht. Vielleicht ist der Hof auch gar nicht mehr da. Item! Wir haben uns dann den ganzen Rucksack voll Lebensmittel füllen lassen, wunderbares Stück Fleisch, und viel Butter und Brot und alles, einen so großen Rucksack voll, dann haben wir die Dunkelheit abgewartet, sind in die Isarauen und sind dann im Schutz der Nacht in den Isarauen wieder durch die Feuerlinien hindurchgegangen. Auf der

anderen Seite wurde ziemlich viel geschossen, da wurde sogar mit Artillerie geschossen, in Ismaning war ein Gefecht im Gang, aber wir kamen ungeschoren wieder nach Hause. Es war nachts 2 Uhr, bis wir nach Hause kamen. Die Eltern hatten natürlich eine furchtbare Angst um die Kinder. Das war nicht zu verhindern, weil sie nicht wussten, was los war, aber dann hat meine Mutter noch nachts um zwei ein wunderbares Essen gemacht und die ganze Familie wurde wieder zum ersten Mal satt.

Und so waren also die Zeitläufe damals. Und in diesem Zusammenhang habe ich nun die Atome kennen gelernt, und zwar auf folgende Weise: Ich habe mich dann, wie die Regierungstruppen allmählich München erstürmten, es waren einige Gefechte – also nicht sehr viele – man musste sich halt einfach zu Hause halten, wenn man nicht getroffen werden wollte, es war nicht so schlimm.

Dann habe ich mich bei den Regierungstruppen gemeldet als eine sogenannte stadtkundige Ordonnanz. Ich war damals 16 Jahre alt und die Regierungstruppen brauchten Leute, die die Stadt kannten und da wurde ich einquartiert in ein Gebäude gegenüber der Universität, also in der Ludwigstraße. Auf der anderen Seite, da ist auf der linken Seite ein Priesterseminar und in diesem Priesterseminar war damals dieses Armeequartier, das nannte sich Schützenkommando 11. Bei dem war ich eingeteilt und dann musste ich untertags eben die Soldaten oder Offiziere durch die Stadt führen und aufpassen, dass nichts passierte und nachts musste ich am Telefon sitzen und Telefongespräche vermitteln und da war's dann so, dass ich morgens von 4 Uhr ab eigentlich nichts mehr zu tun hatte, da waren keine Telefongespräche mehr und da fand ich, jetzt könnte ich auch ausruhen und da hab ich mich häufig oben in der aufgehenden Sonne aufs Dach gelegt. Da gab's so eine schöne Dachrinne, in der man gut liegen konnte, und in dieser Dachrinne habe ich manchmal geschlafen, aber dann bin ich mir drüber klar geworden, dass ich ja demnächst wieder in die Schule muss und dass ich auch wieder Griechisch lernen muss und da hab

ich mir die Dialoge von Platon mitgenommen auf diese Dachrinne und habe in diesen Dialogen von Platon versucht, mein Griechisch wieder aufzupolieren und wie der Zufall so will, ich bin auf den Dialog Timaios gestoßen und in dem Dialog ist von den Atomen die Rede. Und da bin ich hängen geblieben deswegen, weil die Stellen plötzlich schwer zu übersetzen waren und noch viel schwerer zu verstehen waren. Item! Ich hab dann angefangen mich sozusagen geistig herumzuraufen mit diesen sehr komischen Vorstellungen in dem Platonischen Dialog und hab eigentlich bei der Gelegenheit ein echtes Interesse für die Atomphysik gewonnen. Also in dieser Weise bin ich teilweise durch die Schularbeit, aber eben auch durch solch komische Zufälle wie diese Dachrinne da auf dem Priesterseminar in die Atomphysik hereingekommen.

Nun muss ich schließlich noch von einem letzten Gebiet erzählen, das mich auch mein Leben lang beschäftigt hat, obwohl es nichts mit meiner Berufsarbeit zu tun hat, das ist die Musik.

Wir hatten damals einen wirklich ausgezeichneten Deutschlehrer, der nicht nur uns über Literatur viel erzählte, sondern der uns einen allgemeinen Unterricht in Kulturgeschichte gab, so möchte ich's erklären. Also erstens war er ein sehr merkwürdiger Mann. Er konnte sehr schlecht sehen, er bewegte sich sehr ungeschickt. Die Kinder haben am Anfang immer über ihn gelacht und er konnte z. B. auch gar nicht gut vortragen, also ein Gedicht wie ein Schauspieler schön vortragen, davon hatte er keine Ahnung. Aber er hatte eine merkwürdige Fähigkeit einem zu erklären, was an so einem Gedicht schön war. Er fing etwa mit der letzten Zeile an und mit dieser letzten Zeile ist es ihm gelungen, ein ganzes Bild zu entwickeln, was in dem Gedicht gesagt war. Item! Wir haben den Lehrer dann alle sehr gern gehabt und haben ihm furchtbar gern zugehört, wenn er uns über irgendwelche kulturellen Dinge erzählte, darunter eben auch über jetzt nicht nur die Dichter, sondern auch die Musiker. Und er hat uns immer vorgeschwärmt von der Kammermusik. Er sagte immer, die Haydn'schen Streichquartette sind

das schönste, was überhaupt auf der Welt geschrieben wurde und so, sodass ich von daher eine große Lust bekam, mich mit Kammermusik zu beschäftigen und da ich nun zu Hause Klavierspielen gelernt hatte, fand ich dann auch bald Schulfreunde, einen Geiger und einen Cellisten. Ich hab mich gefreut, dass es das bei Euch auch gibt und hab dann zu Hause und in der Schule viel Kammermusik gemacht, hab dann im Schulorchester mitgespielt auf dem Klavier. Das war noch ein bisschen primitiv, heute tut man's nicht mehr, weil es schlecht klingt, aber das war damals so üblich und hab, wie gesagt, dann mich sehr viel beschäftigt mit Beethoven'schen Trios, Quartetten, dann Haydn'schen Streichquartetten usw., sodass ich also z.B. bei der Abiturfeier ein Beethoventrio mit zwei Schulkameraden zusammen gespielt habe und drum hat's mich gefreut zu hören, dass Ihr solche Dinge auch macht.

Ja, alle diese Dinge, die ich also da in der Schule so zuerst aufgeschnappt hab, teils gelernt hab, teils eben dazu angeregt worden bin, haben dann später eine große Rolle gespielt, aber ich glaube von der späteren Zeit sollte ich Euch nicht erzählen. Das ist ja eine Zeit, die Euch erst bevorsteht und in die Ihr erst hereinwachsen müsst. Ich kann nur sagen, dass ich von den vier verschiedenen Gebieten, die ich genannt hab, und die mir da in der Schule begegnet sind, später im Leben immer wieder große Freude gehabt hab, dass sich da wissenschaftlich so viel entwickelt hat, dass es eine ganz große Freude war, da mit seinem Leben teilzunehmen und ich kann Euch also nur wünschen, dass Ihr in Eurem späteren Leben an dem, was Ihr hier lernt, ebenso viel Freude haben werdet wie ich.

Anmerkung

* <https://whg-garching.de/namensgeber/>



Autoren

Klaus Hentschel

Klaus Hentschel wurde 1961 in Bad Nauheim geboren. Er studierte ab 1979 Physik, Philosophie, Wissenschaftsgeschichte und Musikwissenschaft an der Universität Hamburg. Hentschel wurde 1989 mit einer Arbeit über die philosophischen Fehlinterpretationen der Relativitätstheorie Albert Einsteins an der Universität Hamburg zum Dr. rer. nat. promoviert, wo er sich 1995 habilitierte. Nach Forschungsaufenthalten am Massachusetts Institute of Technology (MIT), in Göttingen, Hamburg und Bern erhielt er 2006 einen Ruf auf eine Professur für Geschichte der Naturwissenschaften und Technik am Historischen Institut der Universität Stuttgart.

Seine vielfältigen Forschungsschwerpunkte sind Geschichte der Naturwissenschaften, visuelle Repräsentationen in naturwissenschaftlicher Forschungspraxis und von Forschungstechnologien, soziale Netzwerkanalyse, ferner die Geschichte mentaler Modelle u. a. Aspekte kognitiver Wissenschaftsgeschichte. Er engagiert sich in zahlreichen Verbänden und Akademien, ist seit 2003 Mitglied der Leopoldina und seit 2013 Vollmitglied der Académie Internationale d'Histoire des Sciences. Klaus Hentschel ist Mitherausgeber u. a. der Buchreihe Stuttgarter Beiträge zur Wissenschafts- und Technikgeschichte.

Reinhard Genzel

Reinhard Genzel wurde 1952 in Bad Homburg vor der Höhe geboren. Er studierte Physik an der Friedrich-Wilhelms-Universität in Bonn und wurde 1978 am Max-Planck-Institut für Radioastronomie promoviert. Er ging anschließend an das Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge, Massachusetts. Nach 1980 hatte er verschiedene Forschungspositionen an der University of California, Berkeley, inne. Seit 1999 ist er dort *Full Professor*. Genzel wurde 1986 zum Direktor und Wissenschaftlichen Mitglied am Max-Planck-Institut für extra-

terrestrische Physik in Garching berufen. Seit 1988 ist er Honorarprofessor an der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Reinhard Genzel war maßgeblich an der Entwicklung der Infrarot- und Submillimeter-Astronomie beteiligt. Dafür wurde er mit zahlreichen nationalen und internationalen Auszeichnungen geehrt. Mit seinem Team gelang ihm durch langjährige immer höher aufgelöste Beobachtungen der Bahnen von Sternen nahe dem Zentrum der Milchstraße der Nachweis, dass sich dort ein Schwarzes Loch von etwa 4,3 Millionen Sonnenmassen befinden muss. Zusammen mit Andrea Ghez vom Keck-Observatorium erhielt er für ihre Entdeckung eine Hälfte des Nobelpreises für Physik 2020; die andere Hälfte erhielt Roger Penrose.

Werner Heisenberg

(1901 Würzburg – 1976 München). Studierte bei Sommerfeld in München, Promotion 1923 über ein Thema der Hydrodynamik. Assistent von Max Born in Göttingen, dort Habilitation 1924. Auf Helgoland 1925 Durchbruch zu einer neuen Mechanik, der Quantenmechanik. 1926 bei Niels Bohr in Kopenhagen. 1927 Unbestimmtheitsrelation. 1928 Professor in Leipzig. Erklärung des Ferromagnetismus. 1932 Nobelpreis für den „Schöpfer der Quantenmechanik“. Ab 1940 arbeitete er an der Streutheorie von Elementarteilchen (S-Matrix-Theorie), am Uranreaktor und über kosmische Strahlung. 1945 Gefangenschaft in Farm Hall. 1946 Gründung des Max-Planck-Institutes für Physik in Göttingen, 1949 Präsident des deutschen Forschungsrates. Arbeit an der nichtlinearen Spinortheorie, der „Weltformel“. 1958 Umzug des Max-Planck-Institutes nach München.

Zentrum der Milchstraße, wo sie mit ihm zusammen das gigantische Loch mit vier Milliarden Sonnenmassen entdecken konnten. Klaus H. wiederum machte deutlich, wie sich allmählich die Idee von Lichtqu herausbildete: Er zeigte auf, wie vielschichtig Einsteins 1905 vorgest Konzept war und wie dessen Interpretation jahrzehntelang kontrove tiert wurde. Der Band wird durch eine persönliche Rede Werner Heis zur Einweihung des Werner-Heisenberg-Gymnasiums in Garching be in der er Erfahrungen aus seiner eigenen Schulzeit teilte. Die Heisenberg-Gesellschaft widmet sich dem Nachlass von Werner berg, der Aufarbeitung spannender Aspekte der Wissenschaftsgesch insbesondere der Quantenmechanik – und der schulischen Vermittl moderner Physik.

www.hirzel.de

S. Hirzel Verl

ISBN 978-3-7776-3359-6



9 783777 633596