

um entscheiden zu lassen, ob es sich um kontinuierliche Spektren oder aus zahllosen Linien aufgebaute Banden handelt. Da hat nun Bjerrum erkannt, daß man die quantengemäße Linienstruktur der Rotationsspektren auf einfacherem Wege *indirekt* beweisen könne:

Bjerrum sah, daß man die im kurzwelligen, leicht zugänglichen Ultrarot gelegenen Absorptionsspektren heteropolarer Dämpfe nicht als einfache, den Reststrahlen analoge Schwingungsspektren zu deuten habe, sondern als *Schwingungsrotationsspektren*. Das soll heißen, daß sowohl Schwingungen der Ionen gegeneinander wie ihre gemeinsame Rotation als Molekül den optischen Strahlungsvorgang bestimmen. Nach der klassischen Theorie besagt das, daß wir außer einer Schwingungsfrequenz ν_0 noch zu beiden Seiten Frequenzen $\nu_0 + \nu_r$ und Frequenzen $\nu_0 - \nu_r$ erhalten, wenn ν_r Frequenzen der Rotation bedeuten. Wir sollen also den Schwingungsabsorptionsstreifen ν_0 , der von gerade nicht rotierenden Molekülen herrührt, von zwei *kontinuierlichen Banden* eingerahmt finden, die von rotierenden Molekülen ausgesandt werden. Hat aber die Quantenauffassung recht, so dürfen wir nicht zu beiden

Seiten von ν_0 eine *kontinuierliche* Bande, sondern je eine aus *Linien* aufgebaute Bande beobachten. Derartige aus Linien aufgebaute Banden symmetrisch zu beiden Seiten einer Frequenz hat nun zuerst im Rubensschen Laboratorium *Eva von Bahr* aufgefunden. Weitere Arbeiten von *Rubens* und seinen Schülern haben die Erfolge vergrößert und damit das experimentelle Beweismaterial geliefert, daß auch die Rotationsenergie der Moleküle zu quanteln ist. Die Ergebnisse sind keineswegs nur qualitativer Natur, die genaue Ausmessung der Linien, besonders in letzter Zeit durch *Imes* in Amerika, hat eine weitgehende Übereinstimmung mit den an Bjerrum anknüpfenden Quantenrechnungen ergeben.

Diese kurzen Ausführungen mögen genügen, um uns den Einfluß von *Rubens'* Arbeiten auf die Entwicklung der Quantentheorie zu vergegenwärtigen. Insbesondere sind sie ein Beispiel für die Erfolge, die ein Experimentalphysiker dann erzielt, wenn er in dauernder Fühlung mit der Theorie bleibt, jedoch versteht, sich seine kritische Selbständigkeit zu erhalten und als letzte Instanz immer nur die experimentelle Erfahrung entscheiden zu lassen.

Die Bedeutung von Rubens Arbeiten für die Plancksche Strahlungsformel.

Von G. Hettner, Berlin.

Im Jahre 1860 gelangte *Gustav Kirchhoff* in seiner berühmten Abhandlung „Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht“¹⁾ zu folgendem höchst bedeutsamen Ergebnis. Er betrachtete die Wärmestrahlung in einem allseitig von Körpern gleicher Temperatur umgebenen Raum im stationären Zustand und fand, daß die auf jede Wellenlänge entfallende Strahlungsintensität nur von der Temperatur jener Körper abhängt, aber nicht von deren sonstiger Beschaffenheit. Die Intensität dieser „Hohlraumstrahlung“ ist zugleich identisch mit der Intensität derjenigen Strahlung, die ein „absolut schwarzer“ Körper aussendet, d. h. ein Körper, der auf ihn fallende Strahlung jeder Wellenlänge vollständig absorbiert, und unterscheidet sich daher nur durch einen Zahlenfaktor von dem Emissionsvermögen eines solchen Körpers, d. h. derjenigen Energie, die die Einheit der Oberfläche in der Zeiteinheit ausstrahlt. Damit hatte *Kirchhoff* die Existenz einer universellen Funktion $F(\lambda, T)$ der Wellenlänge λ und der Temperatur T erwiesen, die die Intensität der Hohlraumstrahlung oder das Emissionsvermögen eines absolut schwarzen Körpers darstellt. Es gibt zwar in der Natur keinen absolut schwarzen Körper. Aber nach dem Kirchhoffschen Gesetz von der Emission

und Absorption der Körper ergibt sich das Emissionsvermögen jedes beliebigen Körpers aus dem des schwarzen einfach durch Multiplikation mit dem Absorptionsvermögen jenes Körpers. Die Funktion $F(\lambda, T)$, die das Strahlungsgesetz des schwarzen Körpers ausspricht, ist also von der umfassendsten Bedeutung. *Kirchhoff* selbst sagt von ihr in der zitierten Abhandlung: „Es ist eine Aufgabe von hoher Wichtigkeit, diese Funktion zu finden. Der experimentellen Bestimmung derselben stehen große Schwierigkeiten im Wege; trotzdem scheint die Hoffnung begründet, sie durch Versuche ermitteln zu können, da sie unzweifelhaft von einfacher Form ist, wie alle Funktionen es sind, die nicht von den Eigenschaften einzelner Körper abhängen, und die man bisher kennen gelernt hat. Erst wenn diese Aufgabe gelöst ist, wird die ganze Fruchtbarkeit des bewiesenen Satzes sich zeigen können.“

Die Aufgabe war von höchstem Reiz. Aber es war ein weiter Weg bis zu ihrer Lösung; das Ziel sollte erst nach 40 Jahren erreicht werden. Das Aufsuchen des Strahlungsgesetzes bildet ein schönes Beispiel für die gegenseitige Befruchtung von Theorie und Experiment. Dabei spielen auf der experimentellen Seite Arbeiten von *Heinrich Rubens* eine entscheidende Rolle, und darum sei diese Entwicklung hier geschildert.

Die Gesamtstrahlung heißer Körper war schon seit *Newton* Gegenstand zahlreicher experimen-

¹⁾ Pogg. Ann. 109, 275, 1860; Ges. Abhdl. S. 571.

teller Untersuchungen. Es wurden verschiedene Gesetze aufgestellt und wieder verworfen. Im Jahre 1879 sprach *I. Stefan*²⁾ auf Grund einer Kritik der bis dahin vorliegenden Messungen das Gesetz aus, daß die Gesamtstrahlung eines Körpers der 4. Potenz seiner absoluten Temperatur proportional sei. Die zahlreichen hierdurch angeregten Arbeiten bestätigten aber das Gesetz im allgemeinen nicht, nur die Versuche von *Schneebeli*³⁾ zeigten genaueste Übereinstimmung mit dem Gesetz. Der Widerspruch klärte sich durch eine theoretische Arbeit von *L. Boltzmann*⁴⁾ auf, in der er zeigte, daß der aus der Maxwell'schen Theorie gefolgerte Strahlungsdruck zusammen mit den beiden Hauptsätzen der Thermodynamik das Stefansche Gesetz abzuleiten gestattet, aber nur für den absolut schwarzen Körper. In der Tat hatte *Schneebeli*, ohne es zu wissen, Strahlungsquellen benutzt, die nahezu die Eigenschaften eines schwarzen Körpers besaßen.

Während das Stefan-Boltzmannsche Gesetz sowohl dem Experiment wie der Theorie zu danken war, wurde der nächste Fortschritt auf rein theoretischem Wege erzielt. Im Jahre 1893 konnte *Helmholtz* der Berliner Akademie der Wissenschaften eine Abhandlung von *W. Wien*⁵⁾, damals Assistent an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, vorlegen, in der dieser, wiederum auf Grund des Strahlungsdruckes und mit Hilfe thermodynamischer Gedankenexperimente, eine fundamentale Eigenschaft der Hohlraumstrahlung ableitete. *Wien* zeigte, daß man die Verteilung der Energie als Funktion der Wellenlänge für jede Temperatur angeben kann, sobald sie für eine Temperatur gegeben ist. Ist die Energieverteilung in Form einer Kurve dargestellt, so hat man, um zu einer anderen Temperatur überzugehen, die Ordinaten der Kurve in bestimmter Weise zu verschieben und ihre Höhe zu verändern. Das Gesetz heißt deshalb „Verschiebungsgesetz“. Es läßt sich am einfachsten so formulieren, daß

$$F(\lambda, T) = \frac{f(\lambda T)}{\lambda^5} \dots \dots \dots (1)$$

Die Funktion F der beiden Variablen λ und T wird also auf eine Funktion der einen Größe λT zurückgeführt, was natürlich eine wesentliche Vereinfachung des Problems bedeutet.

Macht man von der Erfahrungstatsache Gebrauch, daß das Emissionsvermögen für jede Temperatur bei einer bestimmten Wellenlänge $\lambda = \lambda_m$ ein Maximum besitzt, so folgt aus dem Verschiebungsgesetz unmittelbar die einfache Beziehung:

$$\lambda_m T = \text{const.} \dots \dots \dots (2)$$

In dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz der

Gesamtstrahlung und dem Wienschen Verschiebungsgesetz waren zwei wichtige Eigenschaften der Funktion $F(\lambda, T)$ erkannt, aber damit war auch die Leistungsfähigkeit der Elektrodynamik und der Thermodynamik erschöpft, so daß weitere Fortschritte auf theoretischem Wege nur durch Zuhilfenahme besonderer Hypothesen zu erzielen waren. Die nächsten theoretischen Ergebnisse besaßen daher einen viel geringeren Grad von Sicherheit als jene beiden Gesetze. Nachdem *W. Michelsohn*⁶⁾, *H. F. Weber*⁷⁾ und *R. V. Kövesligethy*⁸⁾ Gesetze aufgestellt hatten, die schon durch die damals vorliegenden Messungen widerlegt wurden, gelangte *W. Wien*⁹⁾ 1896 auf Grund ganz bestimmter molekular-theoretischer Hypothesen zu der Strahlungsformel:

$$E_{\lambda, T} = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \dots \dots \dots (3)$$

Diese Formel gewann an Wahrscheinlichkeit durch Messungen von *F. Paschen*¹⁰⁾ in Hannover, der die Spektren verschiedener fester Körper untersuchte. Seine Ergebnisse ließen sich um so besser durch die Formel darstellen, je schwärzer die strahlenden Oberflächen waren. Auch *M. Planck*¹¹⁾ wurde in einer Reihe von Arbeiten durch elektrodynamische und thermodynamische Betrachtungen und mit Hilfe seiner Hypothese der natürlichen Strahlung zu derselben Formel geführt. In seiner Ableitung hatte er allerdings eine Festsetzung über die Entropie eines elektrodynamischen Resonators machen müssen, die zwar die einzige zu sein schien, die mit den thermodynamischen Forderungen im Einklang war, ohne daß sich dies jedoch beweisen ließ.

Inzwischen aber war die Führung beim Aufsuchen der Strahlungsformel auf die experimentelle Forschung übergegangen. Diese hatte nämlich einen grundlegenden Fortschritt erzielt: es war gelungen, die Strahlung des schwarzen Körpers in aller Strenge zu realisieren. Die Kirchhoffsche Hohlraumtheorie gab hierzu einen deutlichen Fingerzeig, und man muß sich fast wundern, daß erst 1895 *W. Wien* und *O. Lummer*¹²⁾ auf den Gedanken kamen, einen schwarzen Körper dadurch zu verwirklichen, „daß man einen Hohlraum auf möglichst gleichmäßige Temperatur bringt und seine Strahlung durch eine Öffnung nach außen gelangen läßt“. Erst seitdem war man imstande, wirklich „schwarze“ Strahlung experimentell zu untersuchen, denn

⁶⁾ Journ. de Phys. 3, 467, 1887.

⁷⁾ Berl. Ber. 1888, 933.

⁸⁾ Grundzüge einer theoretischen Spektralanalyse, Halle 1890.

⁹⁾ Wied. Ann. 58, 662, 1896.

¹⁰⁾ Wied. Ann. 58, 455, 1896, und 60, 662, 1897.

¹¹⁾ Berl. Ber. 1897—99; Ann. d. Phys. 1, 69 u. 719, 1900.

¹²⁾ Wied. Ann. 56, 451, 1895; gleichzeitig mit *Wien* u. *Lummer* kam *Ch. E. St. John* auf experimentellem Wege zu der Folgerung, daß Hohlräume wie schwarze Körper strahlen (Wied. Ann. 56, 433, 1895).

²⁾ Wien. Akad. Ber. 79, 391, 1879.

³⁾ Vierteljahrsschr. d. Züricher Naturf.-Ges. Bd. 19; Wied. Ann. 22, 430, 1884.

⁴⁾ Wied. Ann. 22, 291, 1884.

⁵⁾ Berl. Ber. 1893, 55.

die vorher benutzten geschwärzten Oberflächen besaßen stets, namentlich für lange Wellen, noch ein erhebliches Reflexionsvermögen. Auch ist die Messung der Temperatur bei einem Hohlraum sehr viel leichter auszuführen als bei einer Oberfläche. Zunächst maßen *O. Lummer* und *E. Pringsheim*¹³⁾ an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt die Gesamtstrahlung eines solchen „schwarzen“ Körpers und konnten das Stefan-Boltzmannsche Gesetz zwischen 290° und 1560° abs. bestätigen. Die ersten Messungen spektral zerlegter schwarzer Strahlung bilden eine Doktorarbeit von *H. Beckmann*¹⁴⁾, die auf Veranlassung und unter Leitung von *Rubens*, damals Professor an der Berliner Technischen Hochschule, in deren physikalischem Institut angefertigt wurde. *Rubens* hatte kurz vorher zusammen mit *Nichols* die Reststrahlenmethode¹⁵⁾ zur Aussonderung langwelliger Strahlung erfunden und stellte diese nun sogleich in den Dienst der Strahlungsmessung. Die Anwendung langwelliger Strahlung bot den Vorteil, daß die Intensität schon bei verhältnismäßig niedriger Temperatur genügend groß ist. So wurde die Messung hoher Temperaturen, die damals noch nicht sehr exakt war, vermieden und außerdem die Möglichkeit geschaffen, die als schwarzer Körper dienende Hohlkugel von Flüssigkeitsbädern zu umgeben, was die Gleichmäßigkeit der Temperatur am besten gewährleistet. Die Inhomogenität der Reststrahlen ist unschädlich, da für so große Wellenlängen die Energiekurven einander so nahe geometrisch ähnlich sind, daß es genügt, mit einer mittleren Wellenlänge zu rechnen. *Beckmann* benutzte die Reststrahlen von Flußspat, deren mittlere Wellenlänge *Rubens* und *Nichols* zu 24,5 μ bestimmt hatten, und variierte die Temperatur von 193° bis 873° abs., das Produkt λT lag bei seinen Messungen also zwischen etwa 5000 und 22 000. Er konnte seine Messungen durch die Wiensche Formel darstellen, wenn er der Konstanten c_2 den Wert 24 250 beilegte, den *Rubens* später¹⁶⁾ mit Rücksicht auf das inzwischen entdeckte langwelligere Maximum der Flußspatreststrahlen auf 26 000 korrigierte. Dieser Wert war aber ein ganz anderer als der von *Paschen* für kurze Wellen bei den erwähnten Versuchen gefundene Wert von etwa 14 000. *Rubens* ist sich der großen Tragweite dieses Befundes wohl bewußt gewesen, denn er hat *Beckmann* mehrmals zur Nachprüfung seiner Ergebnisse veranlaßt. Es lagen aber keine Versuchsfehler vor.

Dieser Arbeit, die im Sommer 1898 beendet war, folgten Messungen von *Lummer* und *Pringsheim*¹⁷⁾, über die *F. Kohlrausch* im November desselben Jahres der Berliner Akademie

berichtete. Die Strahlung eines elektrisch geheizten schwarzen Körpers wurde von etwa 800° bis 1400° abs. zwischen 1 und 6 μ gemessen, so daß λT zwischen etwa 800 und 8400 variierte. Die Resultate ließen sich nicht genau durch die Wiensche Formel darstellen; namentlich zeigte die „Konstante“ c_2 einen Gang von 13 500 bis 16 500. *Lummer* und *Pringsheim* hielten es aber nicht für ausgeschlossen, daß dies auf Versuchsfehlern beruhte. Als höchst wahrscheinlich konnten sie jedoch die Ungültigkeit des Wienschen Gesetzes hinstellen, als sie im nächsten Jahre¹⁸⁾ ihre Messungen bis 1646° und 8,3 μ ausdehnten. Die „Konstante“ c_2 ging jetzt bis 18 500.

Inzwischen hatte auch *Paschen*¹⁹⁾, z. T. gemeinsam mit *Wanner*, einige Arbeiten über die Energieverteilung der schwarzen Strahlung ausgeführt. Er maß die Strahlungsintensität im sichtbaren Gebiet photometrisch, im Ultrarot, wie *Lummer* und *Pringsheim*, bolometrisch und erreichte fast ebenso hohe Temperaturen und sogar noch etwas größere Wellenlängen als diese. Im Gegensatz zu ihnen aber fand er keine außerhalb der Beobachtungsfehler liegenden Abweichungen von der Wienschen Formel. Diese stellte vielmehr mit einem Wert von c_2 gleich etwa 14 500 alle seine Beobachtungen recht gut dar.

Das nächste Jahr, 1900, sollte die Entscheidung bringen. *Lummer* und *Pringsheim*²⁰⁾ dehnten ihre Messungen mit Hilfe eines von *Rubens* geliehenen Sylvinprismas auf das Spektralgebiet von 12 bis 18 μ aus, unter Benutzung der von *Rubens* und *Trowbridge*²¹⁾ am Sylvin ausgeführten Dispersionsbestimmungen. Auch das Temperaturintervall wurde noch weiter vergrößert, von 85° bis 1772° abs., so daß das Produkt λT einen Wert von etwa 32 000 erreichte. Jetzt war schon die Darstellung einer einzelnen Isochromate, also der Energie als Funktion der Temperatur für eine bestimmte Wellenlänge, durch die Wiensche Formel unmöglich. Man hätte der „Konstanten“ c_2 Werte bis 27 600 geben müssen. Als *Pringsheim* im Februar 1900 in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft über die neuen Messungen berichtete, konnte er als Ergebnis feststellen, daß die Wiensche Formel nur ein Grenzgesetz für kleine Werte von λT ist.

Die Aufgabe war also nun die, möglichst genaue Untersuchungen für große Werte von λT anzustellen. Dazu mußte man, da die Temperatur nicht mehr wesentlich zu steigern war, mit langwelliger Strahlung arbeiten. Hier griff nun wieder *Rubens*²²⁾ mit seiner Reststrahlmethode und seiner reichen Erfahrung auf diesem Gebiet ein. Zusammen mit *F. Kurlbaum* machte er

¹³⁾ Wied. Ann. 63, 395, 1897.

¹⁴⁾ Inaug.-Diss. Tübingen 1898.

¹⁵⁾ Naturwiss. Rdsch. 11, 545, 1896.

¹⁶⁾ Wied. Ann. 69, 582, 1899.

¹⁷⁾ Verh. Phys. Ges. 1, 23, 1899.

¹⁸⁾ Verh. Phys. Ges. 1, 215, 1899.

¹⁹⁾ Berl. Ber. 1899, 5, 405 u. 959.

²⁰⁾ Verh. Phys. Ges. 2, 163, 1900.

²¹⁾ Wied. Ann. 60, 724, 1897.

²²⁾ Berl. Ber. 1900, 929; Astrophys. Journ. 14, 335 1901.

eine große Reihe sorgfältigster Energiemessungen an den Reststrahlen von Flußpat und Steinsalz. Zur Strahlungsmessung diente die Rubenssche Thermosäule²³⁾ in Verbindung mit dem von *H. du Bois* und ihm kurz vorher konstruierten Panzergalvanometer²⁴⁾. Die Temperatur der benutzten schwarzen Körper konnte von 85° bis 1747° abs. variiert werden; da ferner die mittlere Wellenlänge der Steinsalzreststrahlen 51,2 μ betrug, erreichte das Produkt λT Werte bis 90 000, also fast das Dreifache des bisher erreichten größten Wertes. Das Ergebnis war sehr überraschend. Die Energiekurven besaßen bei diesen langen Wellen einen völlig anderen Charakter: Von den tiefsten Temperaturen abgesehen, war die Energie einfach der Temperatur proportional.

Die weitere Entwicklung ist nun von einer geradezu dramatischen Schnelligkeit und Folgerichtigkeit. Als am Sonntag, dem 7. Oktober 1900, *Rubens* mit seiner Frau bei *Planck* einen Besuch machte, kam das Gespräch auch auf die Messungen, mit denen *Rubens* beschäftigt war. Er erzählte, daß bei seinen längsten Wellen das kürzlich von *Lord Rayleigh*²⁵⁾ aufgestellte Gesetz:

$$E_{\lambda, T} = c_1 \frac{T}{\lambda^4} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \dots \dots \dots (4)$$

gelte*). Eine allgemeingültige Strahlungsformel müsse jedenfalls für große λT in diese Form übergehen. Auf dieses Gespräch hin stellte nun *Planck* sogleich folgende Rechnung an: Er war gewohnt, nicht mit der Strahlungsformel selbst, sondern mit der Entropie S eines mit der Strahlung im Gleichgewicht befindlichen Resonators zu rechnen, die als Funktion seiner Energie U sehr viel einfachere Ausdrücke liefert. S und U stehen mit der Temperatur T in der Beziehung:

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} \dots \dots \dots (5)$$

Proportionalität der Energie mit der Temperatur ergibt also:

$$\frac{dS}{dU} = \frac{\text{const}}{U}$$

oder

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{\text{const}}{U^2} \dots \dots \dots (6)$$

Aus dem Wienschen Energieverteilungsgesetz folgt dagegen

$$\frac{1}{T} = -\text{const} \ln U + \text{const},$$

also

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{\text{const}}{U} \dots \dots \dots (7)$$

Es mußte demnach für kleine λT , also kleine U ,

²³⁾ ZS. f. Instrk. 18, 65, 1898.

²⁴⁾ Ann. d. Phys. 2, 84, 1900.

²⁵⁾ Phil. Mag. 49, 539, 1900.

*) Es handelt sich also nicht um dasjenige Gesetz, das man jetzt unter dem Rayleighschen oder Rayleigh-Jeansschen Gesetz zu verstehen pflegt. Dieses wurde erst später aufgestellt (vgl. Formel 10).

die Formel (7), für große λT , also große U , die Formel (6) gelten, und *Planck* kam nun auf den überaus glücklichen Gedanken, beide Formeln in der Weise zu verbinden, daß er setzte:

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{\text{const}}{U(U + \text{const})} \dots \dots \dots (8)$$

Mit Hilfe der Beziehung (5) und des Verschiebungsgesetzes führte ihn diese Formel (8) unmittelbar zu dem Energieverteilungsgesetz:

$$E_{\lambda, T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \dots \dots \dots (9)$$

Noch an demselben Abend teilte er *Rubens* diese Formel auf einer Postkarte mit, die dieser am nächsten Morgen erhielt. Ein oder zwei Tage darauf ging *Rubens* wieder zu *Planck* und konnte ihm die Nachricht bringen, daß die neue Formel vorzüglich mit seinen Beobachtungen stimme. Am Freitag der folgenden Woche, dem 19. Oktober, berichtete *Kurlbaum* in der Sitzung der Physikalischen Gesellschaft über *Rubens'* und seine Strahlungsmessungen, und im Anschluß daran teilte *Planck* seine Formel mit und zeigte ihre Übereinstimmung mit den Beobachtungen an einigen Zahlenbeispielen.

Aber so wertvoll die Kenntnis eines allgemeingültigen Strahlungsgesetzes war, *Planck* gab sich mit einer empirischen Formel nicht zufrieden. „Daher war ich“, so erzählt er uns selbst in seinem Nobelvortrag²⁶⁾, „von dem Tage ihrer Aufstellung an mit der Aufgabe beschäftigt, ihr einen wirklichen physikalischen Sinn zu verschaffen, und diese Frage führte mich von selbst zu der Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit, also auf Boltzmannsche Ideengänge; bis sich nach einigen Wochen der angespanntesten Arbeit meines Lebens das Dunkel lichtete und eine neue ungeahnte Fernsicht aufzudämmern begann.“ Schon am 14. Dezember desselben Jahres konnte er in der Physikalischen Gesellschaft seine berühmte, auf der Einführung der Energiequanten beruhende Herleitung seiner Formel mitteilen. Es ist nicht zu verwundern, daß diese unerhört neuartige physikalische Theorie zunächst sehr geteilte Aufnahme fand, aber *Rubens* äußerte sich sogleich zustimmend. So wurde der 14. Dezember 1900, um einen Ausdruck *Sommerfelds*²⁷⁾ zu gebrauchen, der „Geburtstag“ der Quantentheorie, die in den nächsten Jahrzehnten die ganze Atom- und Molekularphysik durchdringen sollte.

Inzwischen hatte *Paschen* erkannt, daß die von ihm benutzten Strahlungsquellen zum Teil keine vollkommen schwarzen Körper gewesen waren, und hatte in einer neuen Untersuchung²⁸⁾

²⁶⁾ Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie, Leipzig 1920.

²⁷⁾ Atombau und Spektrallinien, S. 44, Braunschweig 1922.

²⁸⁾ Ann. d. Phys. 4, 277, 1901.

zwischen 1 und 9μ ebenfalls eine Bestätigung der Planckschen Formel erhalten. Auch *Rubens* und *Kurlbaum* setzten ihre Versuche noch fort und ergänzten sie durch Messungen²⁹⁾ an den Reststrahlen von Quarz. Die Übereinstimmung mit der Planckschen Formel war hier nicht ganz so gut; dies lag offenbar, wie *Rubens* selbst später in seinem Bericht³⁰⁾ auf dem Solvay-Kongreß erwähnte, an der Inhomogenität der Reststrahlen, die sich bei diesen kürzeren Wellen ($8,50$ und $9,05\mu$) schon viel stärker bemerkbar macht.

Eine neue theoretische Stütze gewann die Plancksche Formel, als Lord *Rayleigh*³¹⁾ und *I. H. Jeans*³²⁾ im Jahre 1905 zeigten, daß für hinreichend große λT die Strahlungsformel:

$$E_{\lambda, T} = c_1 \frac{T}{\lambda^4} \dots \dots \dots (10)$$

gelten müsse. Ihre Herleitung war deshalb von größter Beweiskraft, weil sie die Betrachtung der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie ganz vermeidet und nur auf die Vorgänge im Vakuum eingeht. In der Tat war ja die Plancksche Formel so aufgestellt, daß $E_{\lambda, T}$ für große λT mit T proportional wird, woraus sich mittelst des Verschiebungsgesetzes die *Rayleigh-Jeanssche* Formel (10) ergibt.

Dagegen wurde das Vertrauen in alle bisher ausgeführten experimentellen Prüfungen, soweit sie sich auf hohe Temperaturen beziehen, ein wenig erschüttert, als *L. Holborn* und *S. Valentiner*³³⁾ 1907 bei einer erneuten Prüfung fanden, daß die bisher benutzte Temperaturskala oberhalb 1100°C. , wo sie auf einer Extrapolation beruhte, erheblich fehlerhaft war. Indessen schienen die Messungen von *Holborn* und *Valentiner* nach Anbringen der Temperaturkorrektur sowie alle späteren Arbeiten, von denen vor allem die langjährigen systematischen Untersuchungen von *Warburg* und seinen Mitarbeitern³⁴⁾ an der Reichsanstalt zu nennen sind, zum mindesten keinen Widerspruch gegen die Plancksche Formel zu ergeben. Aber alle diese Arbeiten hatten viel mehr eine genaue Bestimmung der Konstanten c_2 als eine Prüfung der Strahlungsformel in einem möglichst großen Temperatur- und Wellenlängenbereich zum Ziel.

Vor drei Jahren unterzogen nun *W. Nernst* und *Th. Wulf*³⁵⁾ das gesamte vorliegende Beobachtungsmaterial einer kritischen Durchsicht und sorgfältigen Neuberechnung. Sie nahmen das Wiensche Verschiebungsgesetz, sowie für kleine λT die Wiensche und für große λT die

Rayleigh-Jeanssche Strahlungsformel als theoretisch und experimentell sichergestellt an. Für die Konstante c_2 benutzten sie den Wert $14\,300$, der sich aus den Messungen bei kleinen λT mit einem Fehler von höchstens einigen Promille ergibt. Es zeigte sich dann, daß die Beobachtungen im Gebiete mittlerer λT systematisch etwas größere Werte für das Emissionsvermögen $E_{\lambda, T}$ geben als die Plancksche Formel. *Nernst* und *Wulf* setzten:

$$E_{\lambda, T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} (1 + \alpha) \dots \dots (11)$$

Die Größe α , die die Abweichung von der Planckschen Formel mißt und nach dem Verschiebungsgesetz nur eine Funktion von λT sein kann, verschwindet nach den gemachten Voraussetzungen sowohl für kleine wie für große λT , erreicht aber für λT gleich etwa 5700 ein Maximum von $0,072$. Wenn diese Abweichung auch klein ist, so würde sie, wenn sie nicht auf Versuchsfehlern beruhte, für die Quantentheorie von unabsehbaren Folgen sein. Denn diese verlangt die absolut exakte Gültigkeit der Planckschen Formel.

Die Werte von λT , für die die „ α -Korrektur“ beträchtlich wird, lassen sich nur im Ultrarot erreichen. Niemand war also mehr dazu berufen, über die Realität der α -Korrektur durch neue Messungen zu entscheiden als *Rubens* mit seiner einzig dastehenden Erfahrung auf diesem Gebiet. Und so begann er 1920, zusammen mit *G. Michel*, eine neue systematische Prüfung der Planckschen Formel, hauptsächlich in dem von der α -Korrektur betroffenen Gebiet der λT . Die Aufgabe war diesmal schwieriger als vor 20 Jahren. Damals hatte es sich um die Entscheidung zwischen Formeln gehandelt, die in gewissen Gebieten weit voneinander abwichen; jetzt sollte über eine Differenz, die im Maximum wenige Prozente erreichte, entschieden werden. Aber die experimentellen Hilfsmittel waren seitdem, vor allem durch *Rubens* selbst, wesentlich verbessert und die Genauigkeit der Messung hoher Temperaturen erheblich gesteigert worden, so daß die Lösung der Aufgabe möglich erschien.

Rubens und *Michel*³⁶⁾ nahmen mit allen erdenklichen Vorsichtsmaßregeln und Kontrollen acht Isochromaten in einem großen Temperaturintervall auf, und zwar bei sechs verschiedenen Wellenlängen zwischen 4 und 16μ mit einem Flußspat-, einem Steinsalz- und einem Sylvinprisma sowie mit Hilfe der Reststrahlen von Flußspat und Steinsalz. Sie berechneten dann aus der beobachteten Energie die Größen:

$$C = \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right) E_{\lambda, T}$$

und

$$C' = \frac{C}{1 + \alpha}$$

²⁹⁾ Ann. d. Phys. 4, 649, 1901.
³⁰⁾ Sur la vérification de la formule du rayonnement de Planck dans le domaine des grandes longueurs d'onde, Paris 1912.

³¹⁾ Nature 72, 54 u. 243, 1905.

³²⁾ Phil. Mag. 10, 91, 1905.

³³⁾ Ann. d. Phys. 22, 1, 1907.

³⁴⁾ E. Warburg, G. Leithäuser, E. Hupka, C. Müller, Ann. d. Phys. 40, 609, 1913; E. Warburg, C. Müller, Ann. d. Phys. 48, 410, 1915.

³⁵⁾ Verh. Phys. Ges. 21, 294, 1919.

³⁶⁾ Berl. Ber. 1921, 590; Phys. ZS. 22, 569, 1921.

von denen für jede Isochromate C bei Gültigkeit der Planckschen, C' bei Gültigkeit der Nernst-Wulfschen Formel konstant sein muß. Das Ergebnis war, daß die C -Werte nur unsystematische Schwankungen zeigten, die im allgemeinen innerhalb $\pm 1\%$ lagen, die C' -Werte dagegen einen Gang bis zu 6% erkennen ließen. Damit war die Gültigkeit der Planckschen Formel innerhalb der Meßgenauigkeit von 1% erwiesen. Ein einheitlicher Grund für die scheinbar systematischen Abweichungen der früheren Beobachtungen läßt sich nicht angeben, aber es gibt viele Ursachen,

die die Genauigkeit der früheren Beobachtungen beeinträchtigten und die *Rubens* jetzt vermeiden konnte.

Diese mit der gewohnten unübertrefflichen Sorgfalt und Gewissenhaftigkeit durchgeführte Untersuchung, durch die *Rubens* die Grundlage der Quantentheorie sicherstellte, bildet eins seiner höchsten Verdienste. Es ist ein großes Glück, daß er, obgleich er den Keim der tödlichen Krankheit schon in sich hatte, der physikalischen Forschung dieses wertvolle Geschenk noch hat machen können.

Verzeichnis der von Rubens veröffentlichten Arbeiten.

- Rubens*, Die selektive Reflexion der Metalle. Wied. Ann. 37, 249, 1889.
- Rubens*, Nachweis von Telephon- und Mikrophonströmen mit dem Galvanometer. Wied. Ann. 37, 522, 1889.
- Paalzow* und *Rubens*, Anwendung des bolometrischen Prinzips auf elektrische Messungen. Wied. Ann. 37, 529, 1889.
- Du Bois* und *Rubens*, Brechung und Dispersion des Lichtes in einigen Metallen. Berl. Ber. 1890, 955; Wied. Ann. 41, 507, 1890.
- Rubens* und *Ritter*, Über die Anwendung des Bolometers zur quantitativen Messung der Hertzschon Strahlung. Verh. Phys. Ges. 9, 27, 1890.
- Rubens* und *Ritter*, Über das Verhalten von Drahtgittern gegen elektrische Schwingungen. Wied. Ann. 40, 55, 1890.
- Rubens*, Über Messung stehender Wellen in Drähten. Verh. Phys. Ges. 9, 109, 1890.
- Rubens*, Über stehende elektrische Wellen in Drähten und deren Messung. Wied. Ann. 42, 154, 1891.
- Arons* und *Rubens*, Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen in isolierenden Flüssigkeiten. Wied. Ann. 42, 581, 1891.
- Arons* und *Rubens*, Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen in einigen festen Isolatoren. Wied. Ann. 44, 206, 1891.
- Rubens* und *Hirsch*, Über ein neues Elektrodynamometer. Verh. Phys. Ges. 10, 23, 1891.
- Rubens*, Über neuere Versuche auf elektrodynamischem Gebiete. Naturwiss. Rdsch. 6, 482, 1891.
- Rubens*, Über Dispersion ultraroter Strahlen. Wied. Ann. 45, 283, 1892.
- Arons* und *Rubens*, Bemerkung zur Abhandlung des Herrn Waitz über die Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen in verschiedenen Dielektriciis. Wied. Ann. 45, 381, 1892.
- Du Bois* und *Rubens*, Über ein Brechungsgesetz für den Eintritt des Lichtes in absorbierende Medien. Wied. Ann. 47, 203, 1892.
- Rubens*, Über neuere Versuche auf elektrodynamischem Gebiet II. Naturw. Rdsch. 7, 4, 1892.
- Rubens* und *Snow*, Über die Brechung der Strahlen von großer Wellenlänge in Steinsalz, Sylvin und Fluorit. Wied. Ann. 46, 529, 1892. Phil. Mag. 35, 35, 1893.
- Du Bois* und *Rubens*, Über die Polarisation ultraroter Strahlen beim Durchgang durch Metalldrahtgitter. Berl. Ber. 1892, 1129.
- Du Bois* und *Rubens*, Modifiziertes astatiches Galvanometer. Wied. Ann. 48, 236, 1893.
- Du Bois* und *Rubens*, Über Polarisation von Wärmestrahlen durch Metalldrahtgitter. Naturw. Rdsch. 8, 453, 1893.
- Du Bois* und *Rubens*, Polarisation ungebogter ultraroter Strahlung durch Metalldrahtgitter. Wied. Ann. 49, 593, 1893.
- Rubens*, Prüfung der Ketteler-Helmholtzschen Dispersionsformel. Wied. Ann. 53, 267, 1894.
- Rubens*, Prüfung der Helmholtzschen Dispersions-theorie. Naturw. Rdsch. 9, 389, 1894.
- Rubens*, Zur Helmholtzschen Dispersionstheorie. Naturw. Rdsch. 9, 606, 1894.
- Rubens*, Zur Dispersion der ultraroten Strahlen in Fluorit. Wied. Ann. 51, 381, 1894.
- Du Bois* und *Rubens*, Einige neuere Galvanometerformen. Elektrot. ZS. 1894, 321.
- Rubens*, Die Ketteler-Helmholtzsche Dispersionsformel. Wied. Ann. 54, 476, 1895.
- Rubens*, Vibrationsgalvanometer. Wied. Ann. 56, 27, 1895.
- W. Rathenau*, *E. Rathenau* und *Rubens*, Versuche über elektrische Telegraphie ohne Draht. Naturw. Rdsch. 10, 41, 1895.
- Rubens*, Über das ultrarote Absorptionsspektrum von Steinsalz und Sylvin. Verh. Phys. Ges. 15, 108, 1896.
- Rubens* und *Nichols*, Beobachtung elektrischer Resonanz an Wärmestrahlen von großer Wellenlänge. Berl. Ber. 1896, 1393.
- Rubens*, Demonstrationsversuche mit elektrischen Wellen. ZS. f. Unterr. 9, 241, 1896.
- Rubens*, Aufstellung und Astasierung eines empfindlichen Spiegelgalvanometers. Verh. Phys. Ges. 15, 11, 1896.
- Rubens* und *Nichols*, Über Wärmestrahlen von großer Wellenlänge. Naturw. Rdsch. 11, 545, 1896.
- Rubens* und *Nichols*, Versuche mit Wärmestrahlen von großer Wellenlänge. Wied. Ann. 60, 418, 1897.
- Rubens* und *Troubridge*, Beitrag zur Kenntnis der Dispersion und Absorption der ultraroten Strahlen in Steinsalz und Sylvin. Wied. Ann. 60, 724, 1897; Silk. Journ. 5, 33, 1898.
- Rubens*, Certain optical and electro-magnetic properties of heat waves of great wave length. Phys. Rev. 5, 98 u. 152, 1897.
- Rubens*, Versuche mit kurzen elektrischen Wellen. ZS. f. Unterr. 10, 239, 1897.
- Rubens*, Eine neue Thermosäule. ZS. f. Instrk. 18, 65, 1898; ZS. f. Unterr. 11, 126, 1898.