

Max Planck und der Beginn der Quantenphysik

Michael Bonitz und Holger Kersten

Institut für Theoretische Physik und Astrophysik

Institut für Experimentelle und Angewandte Physik

Christian-Albrechts-Universität Kiel

Quantenphysik heute - Basis der Naturwissenschaften

Grundlage der Beschreibung des Mikrokosmos: Atome, Moleküle, Atomkerne, Elementarteilchen...

Grundlage der Kosmologie (Bestätigung der Urknall-Hypothese, CMB)

Quantenphysik heute - Basis der Naturwissenschaften

Grundlage der Beschreibung des Mikrokosmos: Atome, Moleküle, Atomkerne, Elementarteilchen...

Grundlage der Kosmologie (Bestätigung der Urknall-Hypothese, CMB)

Grundlage der modernen (Quanten-)Chemie, Materialwissenschaften

„Goldgrube“ für die Forschung

2023: ein Jahr der Quantenphysik!

Physik-Nobelpreis für Attosekundenpulse

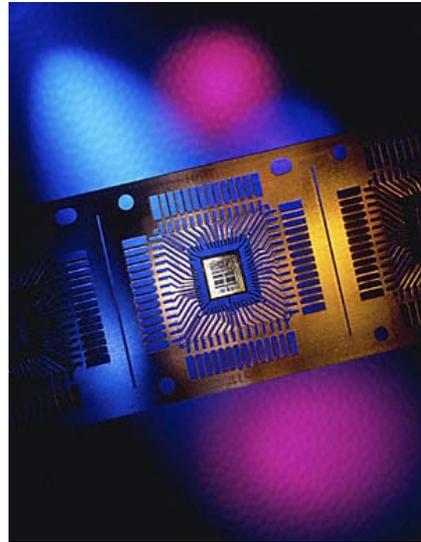
Anne L'Huillier, Pierre Agostini, Ferenc Krausz

Chemie-Nobelpreis für Quantenpunkte

Moungi G. Bawendi, Louis E. Brus, Alexei I. Ekimov

Quantenphysik heute - Grundlage der Nanotechnologie

(elektrische Leitung)



2025



100 Jahre Schrödinger-Gleichung

Würdigung der „Väter“ (und „Mütter“) der Quantenmechanik:
insbesondere: Bohr, Schrödinger, Heisenberg, Born, Pauli, Dirac, Fermi...

2025



Der Anfang der Quantentheorie:

Geburtstag: 14.12. 1900: Max Plancks Entdeckung der Quantisierung der elektromagnetischen Strahlung

Max Planck und die Entstehung der Quantentheorie

geboren in Kiel, 23.4. 1858

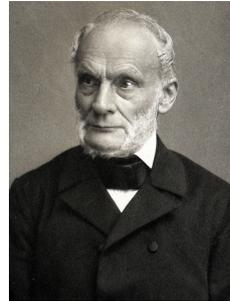
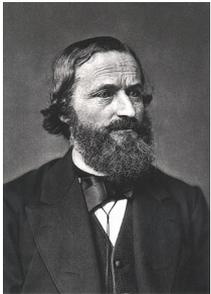
rechts: mit Schwester und Brüdern 1862

1867 Übersiedlung nach München
Gymnasium, 1874 Abitur



Physikstudium in München und Berlin 1874-1879

u.a. bei Helmholtz, Kirchhoff, Weierstraß
im Selbststudium: Clausius



Max Planck, 1874

1879 Promotion über 2. Hauptsatz der Thermodynamik
1880 Habilitation, Privatdozent, unbesoldete Vorlesungen

Weiter mit Physik?

“Studienberatung“ bei Prof. Jolly, München 1877



*„Theoretische Physik nähere sich der Vollendung“,
die etwa die Geometrie seit Jahrhunderten erreicht hat.*

*„Wohl gäbe es vielleicht in einem oder dem anderen
Winkel noch ein Stäubchen oder ein Bläschen zu prüfen
und einzuordnen“,* aber das System als Ganzes stehe
ziemlich gesichert da.

Weiter mit Physik?

“Studienberatung“ bei Prof. Jolly, München 1877



*„Theoretische Physik nähere sich der Vollendung“,
die etwa die Geometrie seit Jahrhunderten erreicht hat.*

*„Wohl gäbe es vielleicht in einem oder dem anderen
Winkel noch ein Stäubchen oder ein Bläschen zu prüfen
und einzuordnen“,* aber das System als Ganzes stehe
ziemlich gesichert da.

*„Ich hege nicht den Wunsch, Neuland zu entdecken, sondern
lediglich, die bereits bestehenden Fundamente der physikalischen
Wissenschaft zu verstehen, vielleicht auch noch zu vertiefen“*

1885: „Erlösung“ - Professur in Kiel

1886 Gründung seiner Familie:

Heirat seiner Jugendfreundin Marie Merck

4 Kinder: 2 Söhne, 2 Töchter

In Kiel entstehen wichtige Arbeiten
zur Entropie und Thermodynamik von Lösungen

Ruf an Universität Berlin, Nachfolge Kirchhoffs
(Zentrum der Wissenschaft) 1889-1926



Die Physik um 1890

Elektrodynamik

Elektrische und Magnetische Vorgänge, Elektro-magn. Wellen

Mechanik

Dynamik der Körper und Planeten, Flüssigkeiten, Elastischen Medien

Thermodynamik

Wärme, Gase, Wärme- und Kälte-Maschinen

Die Physik um 1890

Strahlung
bewegter Körper



Wärme-
Strahlung

Elektrodynamik

Elektrische und Magnetische
Vorgänge, Elektro-magn. Wellen

Mechanik

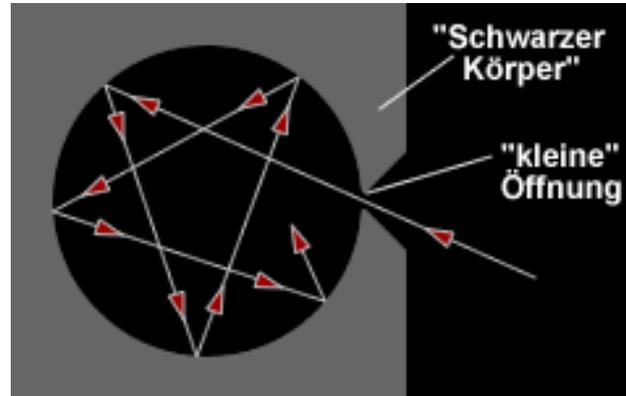
Dynamik der Körper und
Planeten, Flüssigkeiten,
Elastischen Medien

Thermodynamik

Wärme, Gase, Wärme-
und Kälte-Maschinen

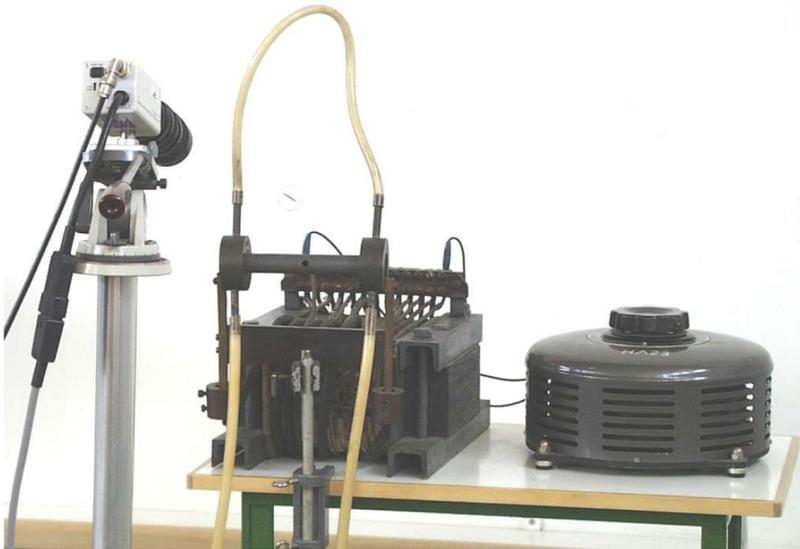
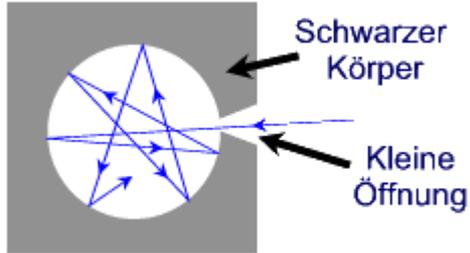
Wärmestrahlung. „Schwarzer Körper“

1860: Gustav Kirchhoff: Gedanken-Experiment
EM Wellen in einem Resonator im **TD Gleichgewicht**



1894 Berlin: Experimentalphysiker an der PT Reichsanstalt erhalten präzise Daten im Infrarot-Bereich, Wien findet eine Theorie

Hohlraum-(Wärme-)Strahlung



- ein Körper strahlt bei einer gegebenen Temperatur Energie ab (Emission)
- in umgekehrter Weise kann der Körper auch Energie durch Strahlung aufnehmen (Absorption)

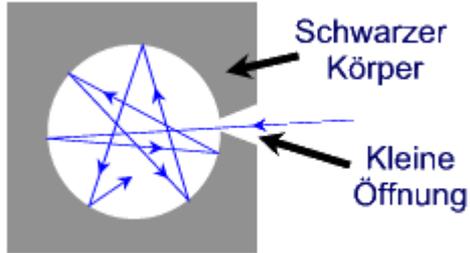
• Emissions- und Absorptionsvermögen eines Körpers sind nicht unabhängig voneinander, sondern bilden ein Verhältnis bilden, das *nur* von der Temperatur abhängt.

• ein Körper, der sehr gut absorbiert ist also gleichzeitig ein sehr guter Emitter

• **das Optimum kann durch einen sog. Hohlraumstrahler realisiert werden**

• die abgestrahlte Leistung folgt einer charakteristischen Abhängigkeit gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz und die spektrale Verteilung der Planck'schen Strahlungsformel

Hohlraum-(Wärme-)Strahlung



- ein Körper strahlt bei einer gegebenen Temperatur Energie ab (Emission)
- in umgekehrter Weise kann der Körper auch Energie durch Strahlung aufnehmen (Absorption)

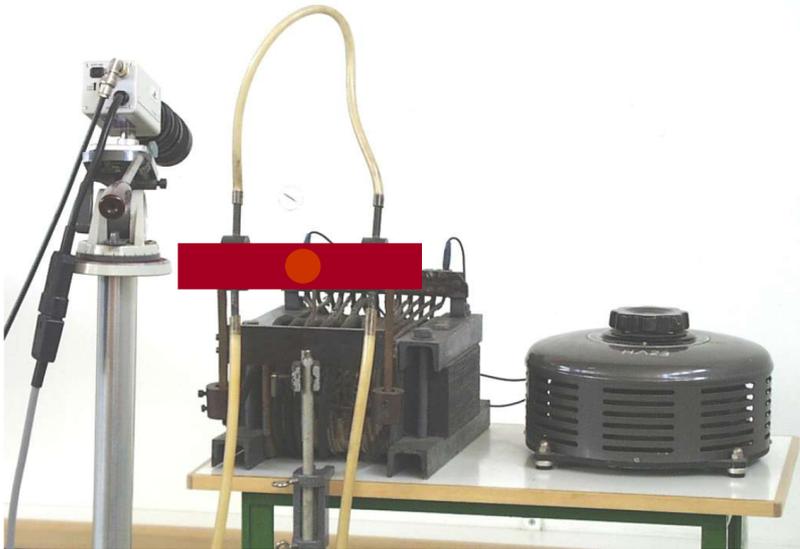
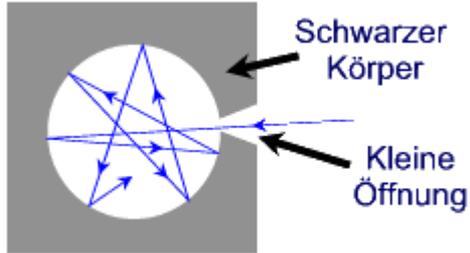
• Emissions- und Absorptionsvermögen eines Körpers sind nicht unabhängig voneinander, sondern bilden ein Verhältnis bilden, das *nur* von der Temperatur abhängt.

• ein Körper, der sehr gut absorbiert ist also gleichzeitig ein sehr guter Emitter

• **das Optimum kann durch einen sog. Hohlraumstrahler realisiert werden**

• die abgestrahlte Leistung folgt einer charakteristischen Abhängigkeit gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz und die spektrale Verteilung der Planck'schen Strahlungsformel

Hohlraum-(Wärme-)Strahlung



- ein Körper strahlt bei einer gegebenen Temperatur Energie ab (Emission)
- in umgekehrter Weise kann der Körper auch Energie durch Strahlung aufnehmen (Absorption)

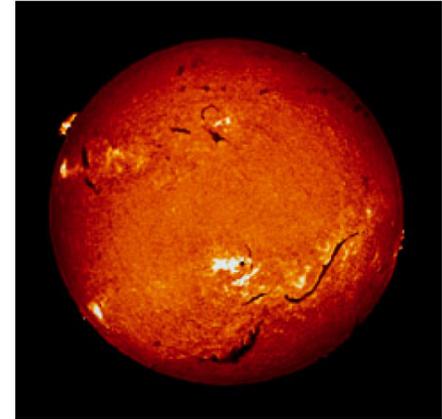
• Emissions- und Absorptionsvermögen eines Körpers sind nicht unabhängig voneinander, sondern bilden ein Verhältnis bilden, das *nur* von der Temperatur abhängt.

• ein Körper, der sehr gut absorbiert ist also gleichzeitig ein sehr guter Emitter

• das Optimum kann durch einen sog. Hohlraumstrahler realisiert werden

• die abgestrahlte Leistung folgt einer charakteristischen Abhängigkeit gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz und die spektrale Verteilung der Planck'schen Strahlungsformel

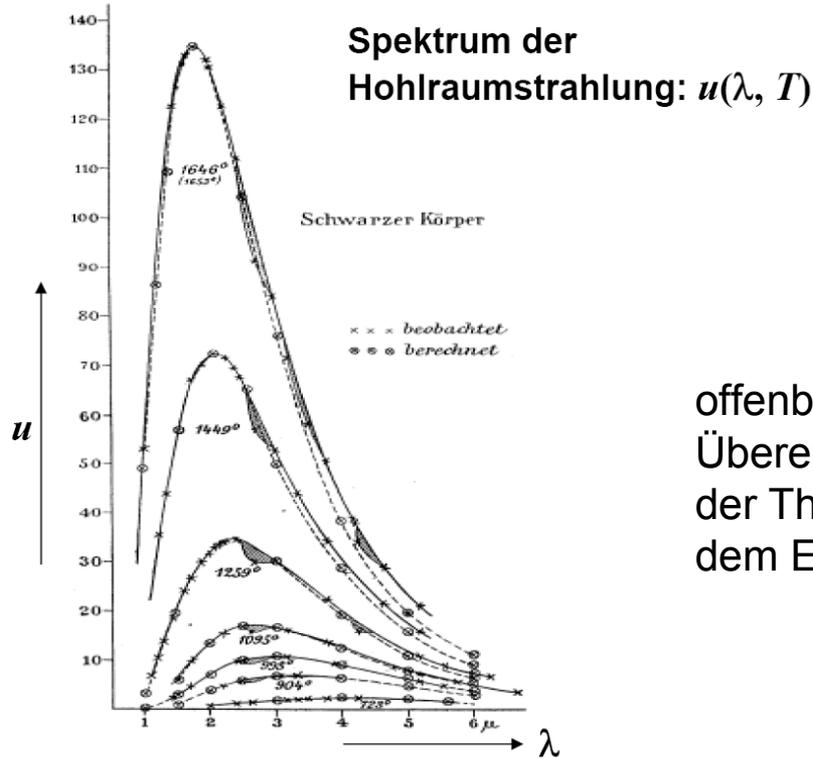
Jedes Objekt ist ein „Schwarzer Körper“



W. Wien: Farbe (hellste) nur durch Temperatur bestimmt

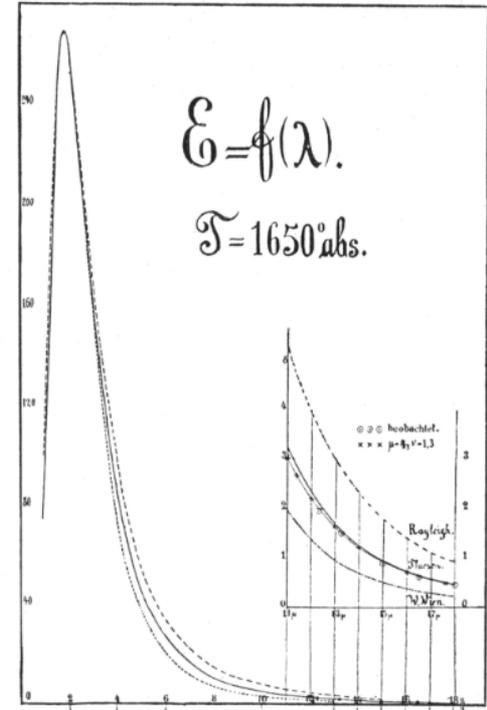


Die neuen Messdaten der PTRA



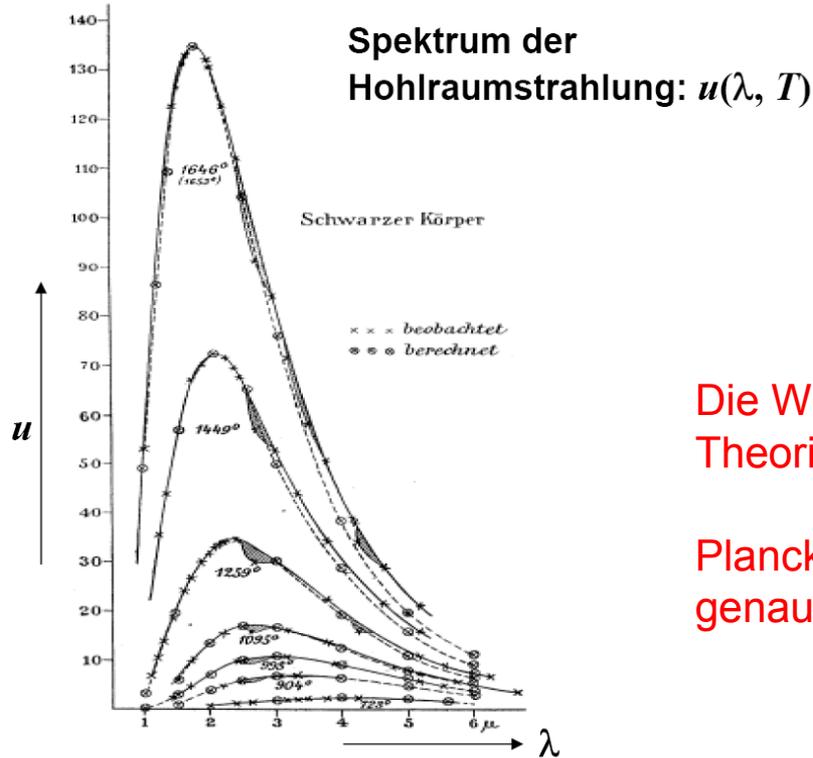
Messung von Lummer und Pringsheim (1900)

offenbar sehr gute
Übereinstimmung
der Theorie mit
dem Experiment



Rubens, Kurlbaum (1900):
Übereinstimmung mit Rayleigh

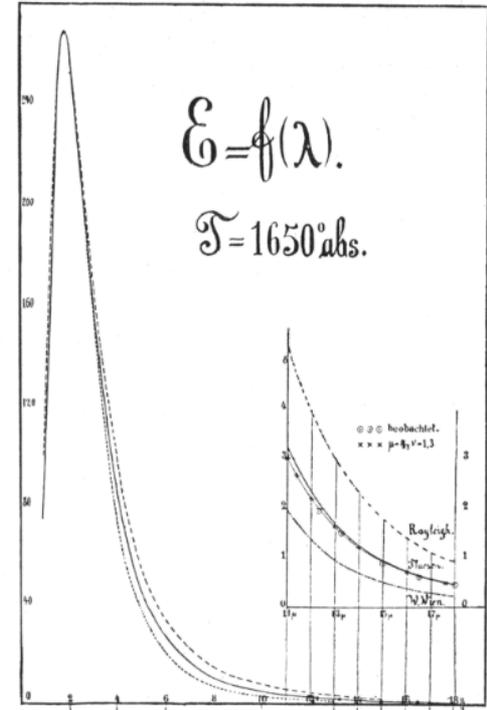
Die neuen Messdaten der PTRA



Messung von Lummer und Pringsheim (1900)

Die Wiensche
Theorie versagt

Planck sucht eine
genauere Formel

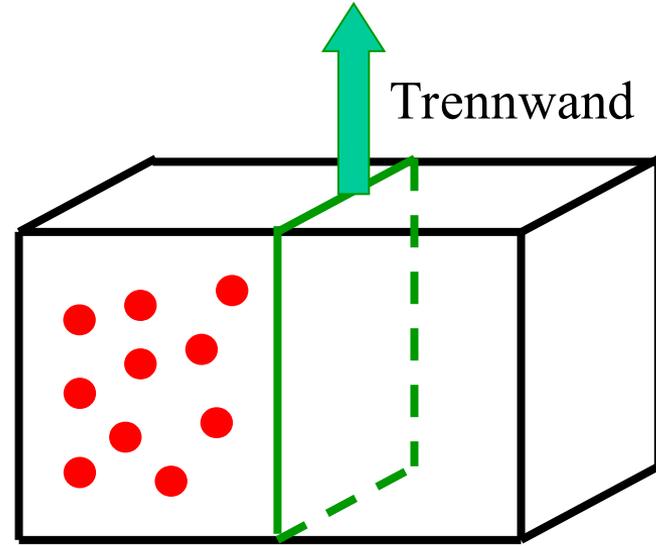


Rubens, Kurlbaum (1900):
Übereinstimmung mit Rayleigh

TD Gleichgewicht: Maximum der Entropie

Beispiel: gleichmäßige
Verteilung von Gasmolekülen

Irreversibler Prozess,
Entropie wächst, erreicht Maximum



Planck findet die Strahlungsformel

I. Wien-Formel
(große Frequenzen)

$$U(\beta) = b e^{-a\beta}$$

$$R = \left(\frac{d^2 S}{dU^2} \right)^{-1} = -aU$$

II. Rayleigh-Rubens Gesetz
(kleine Frequenzen)

$$U(\beta) = \frac{d}{\beta}, \quad \beta = 1/kT$$

$$R = -U^2 / d$$

Kombination: $R = -aU - U^2 / d$

Integration: $\frac{dS}{dU} = \beta(U) = \frac{1}{a} \ln \left[1 + \frac{ad}{U} \right]$

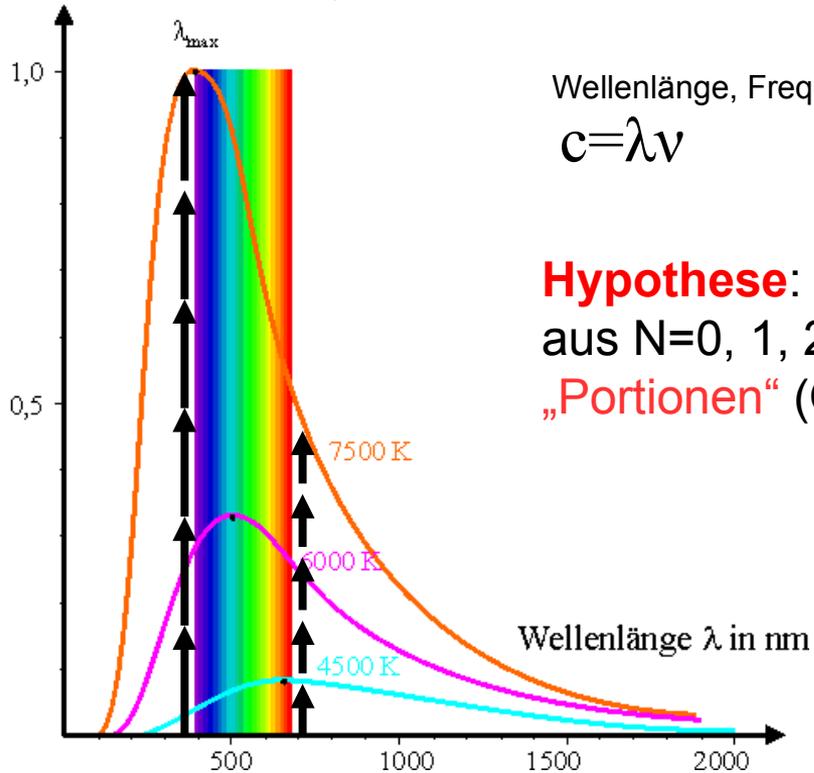
Auflösen nach U:

$$U(\beta) = \frac{ad}{e^{a\beta} - 1}$$

DPG Berlin,
19.10. 1900

Plancks Ableitung der Strahlungsformel

Strahlungsleistung $P_{\lambda,T}$ im Intervall $[\lambda; \lambda+\Delta\lambda]$



$$\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi ch}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$$

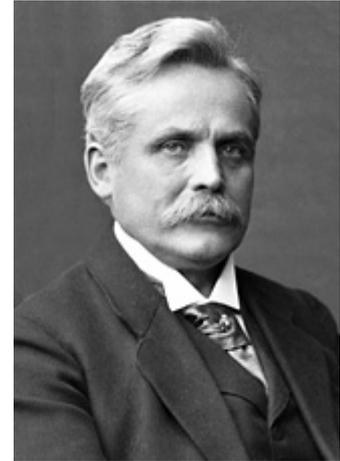
$$U_\nu = N_\nu \cdot \underline{\varepsilon_\nu} = N_\nu \cdot \underline{h\nu}$$

DPG Berlin,
14.12. 1900
„Geburtsstunde der
Quantentheorie“

Skeptische Aufnahme der Entdeckung

1911: Nobelpreis für Wilhelm Wien,

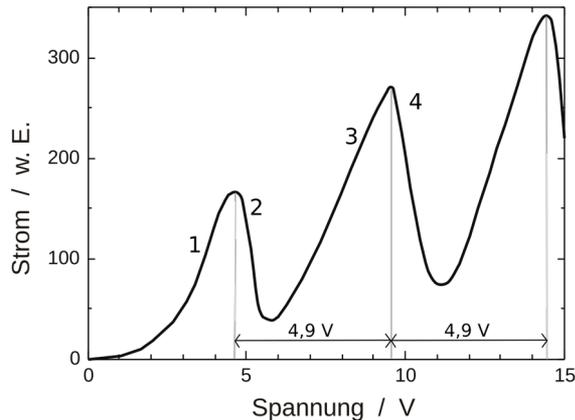
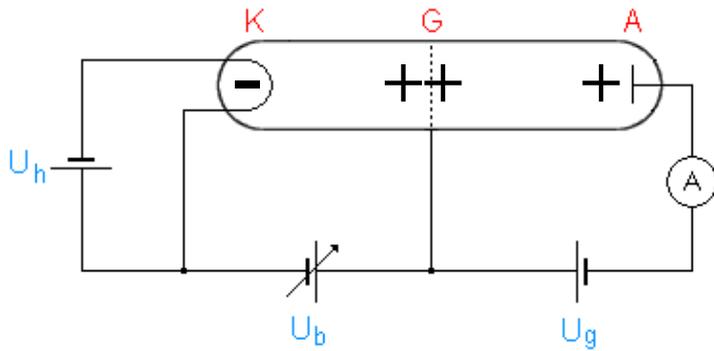
"for his discoveries regarding the laws governing the *radiation of heat*"



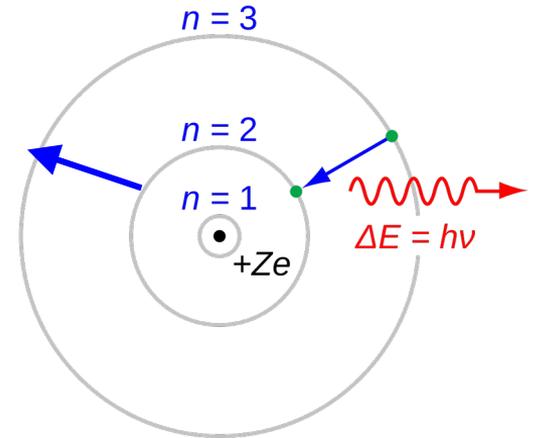
Allmähliche Bestätigung der Elementarquanten

- 1905 Einstein: Theorie des Photoeffekts
- 1907 Einstein, Debye 1912: Theorie der Wärmekapazität von Festkörpern
- 1908 Rutherford, Geiger: Messung der elektrischen Elementarladung
- 1913 Bohr: „Planeten“-Modell des Wasserstoffatoms

Allmähliche Bestätigung der Elementarquanten: Franck-Hertz-Versuch (1914)*



Anregung des Atoms
durch Energie-Abgabe
eines beschleunigten
Elektrons



Bohr-Modell

*James Franck, Gustav Hertz, Nobelpreis 1925

Stehende Schichten

- Elektronen werden durch Sekundärelektronen-Emission (SEE) aus der Kathode (-) herausgelöst und zu Anode (+) beschleunigt.
- **durch inelastische Stöße der Elektronen werden die Atome und Moleküle im Gas (Plasma) angeregt, bei Abregung senden sie Licht (ein Photon) aus**
- **jede leuchtende Schicht entspricht somit einer erneuten Anregung** – genau wie im Franck-Hertz-Versuch
- räumliche Struktur der Schichten hängt i.w. vom elektrischen Feld (axial, radial) ab
- die Ausbildung stehender Schichten erfolgt nur in einem engen Regime mit geringer Raumladung (sehr kleiner Strom)
- in diesem Experiment haben Raumladung und Wandeffekte (Geometrie) einen starken Einfluss

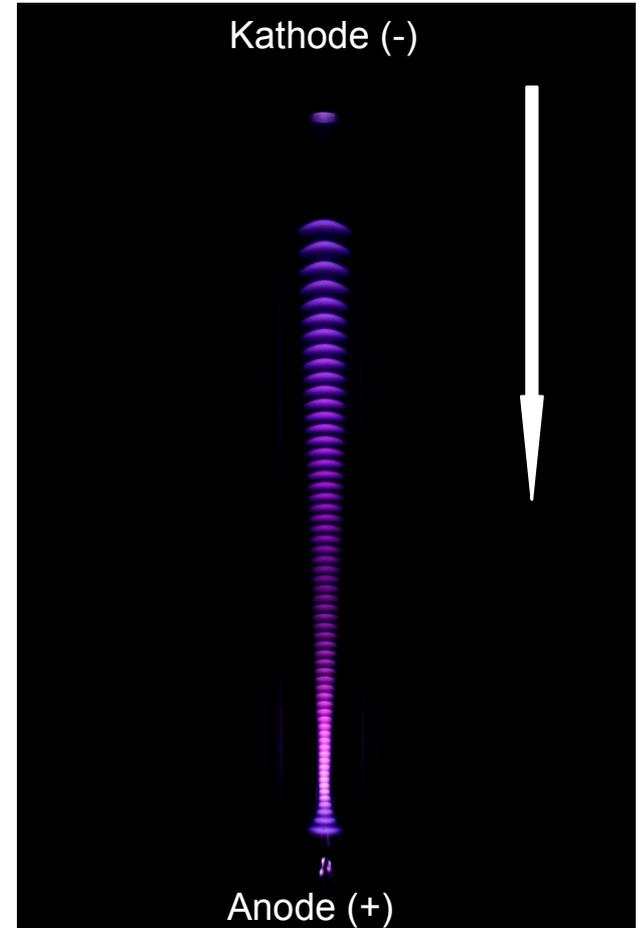
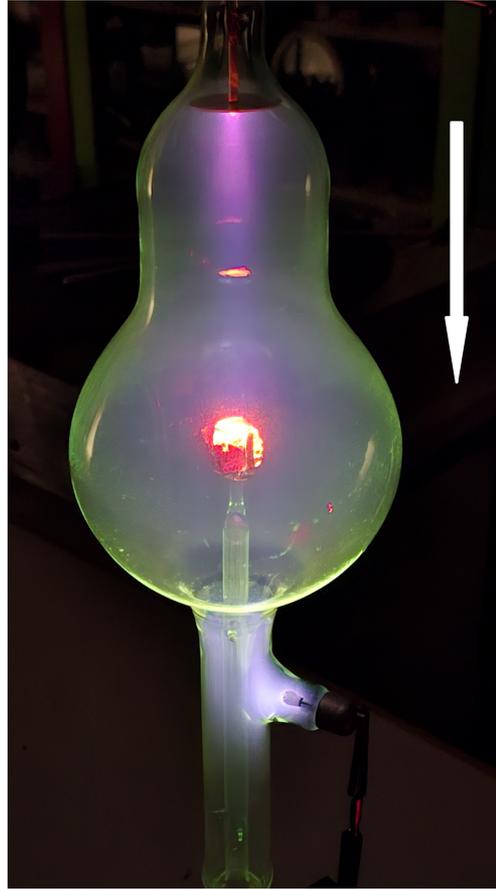


Foto : U. Haeder



Fotos: S. Krüger



Geissler-Röhre („Kathodenstrahlen“)

- Elektronen werden durch SEE aus der Kathode herausgelöst und zur Anode beschleunigt
- **durch inelastische Stöße der Elektronen mit den Atomen des Festkörpers werden diese zum Leuchten („Kathodolumineszenz“) angeregt**
- die aus der Kathode austretenden Strahlen, die offensichtlich die Ursache für die Leucht-Erscheinungen sind, wurden daher zunächst „Kathodenstrahlen“ genannt – bis man erkannte, dass es sich dabei um Elektronen handelt (J.J. Thomson, 1897)

1918: Nobelpreis für Max Planck

„Für ... die Formulierung und Entwicklung
der Theorie der Elementar-Quanten“

A.G. Ekstrand, Präsident der Königlichen Schwedischen Gesellschaft, 1. Juni 1920

Kiel, 14. 12. 2024

1918: Nobelpreis für Max Planck

„Für ... die Formulierung und Entwicklung
der Theorie der Elementar-Quanten“

„Die **Erfahrung musste zunächst eine starke Bestätigung** liefern*,
...bevor Plancks Strahlungstheorie akzeptiert werden konnte.
Inzwischen erlebte diese Theorie einen unerhörten Erfolg.“

*70 Nominierungen

A.G. Ekstrand, Präsident der Königlichen Schwedischen Gesellschaft, 1. Juni 1920

1918: Nobelpreis für Max Planck

„Für ... die Formulierung und Entwicklung
der Theorie der Elementar-Quanten“

„Die **Erfahrung musste zunächst eine starke Bestätigung** liefern*,
...bevor Plancks Strahlungstheorie akzeptiert werden konnte.
Inzwischen erlebte diese Theorie einen unerhörten Erfolg.“

„Plancks Strahlungstheorie ist ... **der bedeutendste Leitstern** für die
moderne physikalische Forschung. Es wird noch lange dauern, bis **die
Schätze, die Plancks Genie uns geschenkt** hat, erschöpft sein werden.“

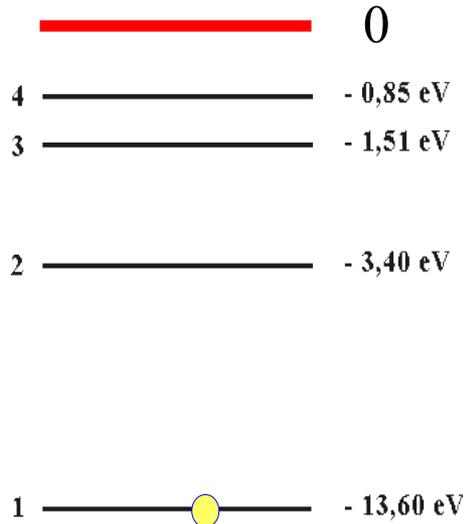
A.G. Ekstrand, Präsident der Königlichen Schwedischen Gesellschaft, 1. Juni 1920

Kiel, 14. 12. 2024

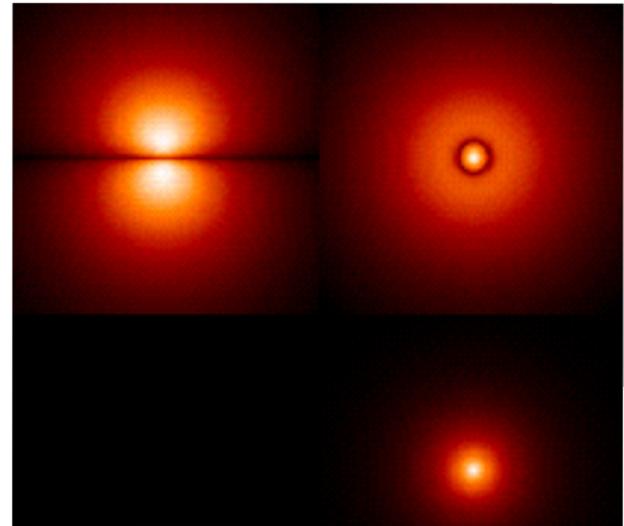
1925: Quantenmechanik

Strenge mathematische Beschreibung von Elektronen, **Atomen**, Molekülen

Energie des Elektrons
quantisiert



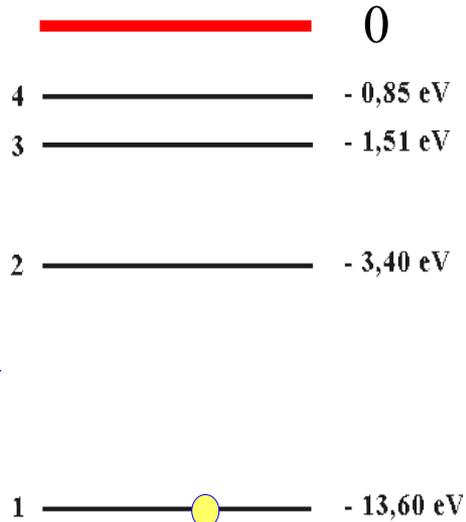
Beispiel: Wasserstoff-Atom



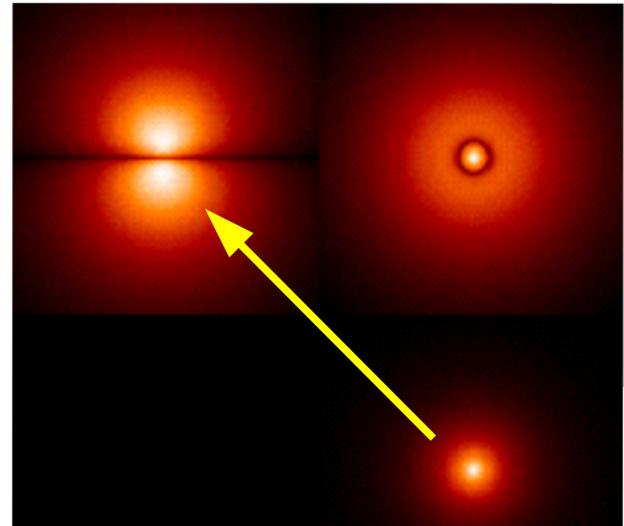
1925: Quantenmechanik

Strenge mathematische Beschreibung von Elektronen, **Atomen**, Molekülen

Energie des Elektrons
quantisiert



Beispiel: Wasserstoff-Atom



1925: Quantenmechanik

Strenge mathematische Beschreibung von **Elektronen**, Atomen, Molekülen

Beispiel: freies Elektron

Elektron an Hindernis

Überlagerung mit sich selbst

→ *Videos*: Lösung der
Schrödingergleichung

Max Planck: tragisches Schicksal

- 1909 Tod seiner Frau Marie
- 1911 Heirat mit Marga von Hoeßlin, gemeinsamer Sohn Herrmann (1911-1954)
- erlebte den Tod von drei Kindern innerhalb von 3 Jahren
 - Sohn Karl, gefallen im 1. Weltkrieg 1916
 - Tochter Grete starb 1917 bei der Geburt ihres Kindes
 - Tochter Emma starb 1919 bei der Geburt ihres Kindes

Max Planck: tragisches Schicksal

- 1909 Tod seiner Frau Marie
- 1911 Heirat mit Marga von Hoeßlin, gemeinsamer Sohn Herrmann (1911-1954)
- erlebte den Tod von drei Kindern innerhalb von 3 Jahren
 - Sohn Karl, gefallen im 1. Weltkrieg 1916
 - Tochter Grete starb 1917 bei der Geburt ihres Kindes
 - Tochter Emma starb 1919 bei der Geburt ihres Kindes
- Drittes Reich und Zweiter Weltkrieg: Planck bleibt in Deutschland
 - 1943 überlebt nur knapp das Bombardement von Kassel
 - 1944 Zerstörung seines Hauses in Berlin, Planck kommt in Rogätz unter Verhaftung des jüngsten Sohnes Erwin, Hinrichtung am 23.1. 1945
- Mai 1945: Evakuierung nach Göttingen (G. Kuipers), Tod: 4.10. 1947

Max Planck: Verdienst um die deutsche Wissenschaft (Auswahl)

- Ständiger Sekretär der Preußischen AdW (1912/38)
- Rektor der Berliner Universität (1913/14)
- 4 mal Vorsitzender der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
- Präsident der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft (1930-36)

Viele öffentliche Vorlesungen über Wissenschaft, Ethik, Philosophie bekannt und geschätzt in der breiten Öffentlichkeit

- Einzigartige Autorität in der deutschen und internationalen Wissenschaft

Max Planck in den Worten seiner Kollegen

(Kondolenz an seine Frau Marga, 1947)



Liese Meitner
(1878-1958)

In Washington DC 1946

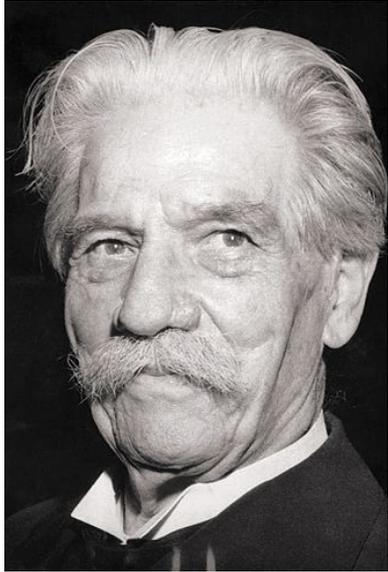
„Das Leben Ihres Mannes war ungewöhnlich, wie er selbst ungewöhnlich war, in seiner wunderbaren reinen Persönlichkeit, die jeden Menschen, der nur in seine Nähe kam, besser machte.“

„...his life was unusual, as he was unusual himself, with his wonderful pure personality, that made everybody who came close to him a better person.“



Max Planck in den Worten seiner Kollegen

(Kondolenz an seine Frau Marga, 1947)



Albert Schweitzer
(1865-1948)

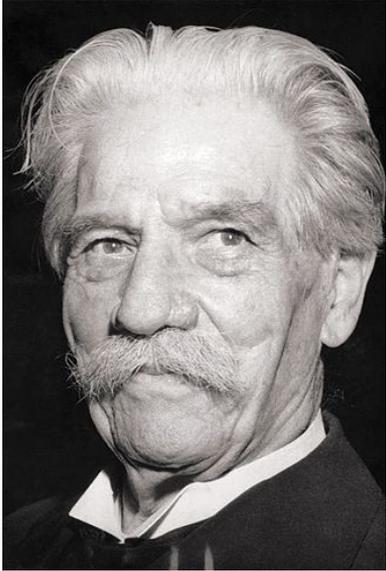
Friedens-Nobelpreis 1952
1955, ©: Bundesarchiv

„...Aber wie Schweres hat er im Alter dann noch erleben müssen! Und in dem Schweren hat er sich als ein aufrechter Mann gezeigt, auf den viele Augen gerichtet waren. Er vertrat die ewigen ethischen Kulturwerte denjenigen gegenüber, die sie anzutasten und zu entwerten versuchten.“



Max Planck in den Worten seiner Kollegen

(Kondolenz an seine Frau Marga, 1947)



„... Trost und Stärkung in grausigen Zeiten gab er damit vielen, die in der allgemeinen Verirrung nicht mitmachen wollten.... In einer Zeit, wo so viele Gelehrte sich als Menschen kleiner erwiesen, wahrte er sich edelstes Menschentum und zeigte ruhige Unerschrockenheit.“



Albert Schweitzer
(1865-1948)

Friedens-Nobelpreis 1952
1955, ©: Bundesarchiv

Max Plancks internationale Wertschätzung

Die große Mehrzahl der deutschen Wissenschaftler hatte sich im Dritten Reich im Ausland diskreditiert – nicht so Max Planck.

1946: Einladung nach London, zur 300-Jahr-Feier Isaac Newton's - als einziger Wissenschaftler aus Deutschland

1945/46: Max Planck wurde noch einmal kommissarischer Präsident der Kaiser-Wilhelm Gesellschaft. Die KWG entging der Schließung durch die Alliierten nur durch Plancks Zustimmung zur Umbenennung in *Max-Planck-Gesellschaft*

Planck legte damit die Grundlage für eine der heute weltweit erfolgreichsten Wissenschafts-Gesellschaften (84 Institute, 23 Nobelpreise)

Zusammenfassung und Ausblick

„Ich hege nicht den Wunsch, Neuland zu entdecken, sondern lediglich, die bereits bestehenden Fundamente der physikalischen Wissenschaft zu verstehen, vielleicht auch noch zu vertiefen“



Zusammenfassung und Ausblick

„Ich hege nicht den Wunsch, Neuland zu entdecken, sondern lediglich, die bereits bestehenden Fundamente der physikalischen Wissenschaft zu verstehen, vielleicht auch noch zu vertiefen“

„Plancks Strahlungstheorie ist ... **der bedeutendste Leitstern** für die moderne physikalische Forschung. Es wird noch lange dauern, bis **die Schätze, die Plancks Genie uns geschenkt** hat, erschöpft sein werden.“

Zusammenfassung und Ausblick

„Ich hege nicht den Wunsch, Neuland zu entdecken, sondern lediglich, die bereits bestehenden Fundamente der physikalischen Wissenschaft zu verstehen, vielleicht auch noch zu vertiefen“

„Plancks Strahlungstheorie ist ... **der bedeutendste Leitstern** für die moderne physikalische Forschung. Es wird noch lange dauern, bis **die Schätze, die Plancks Genie uns geschenkt** hat, erschöpft sein werden.“

Quantenmechanik 2024: Revolution von Wissenschaft und Technik

- einzigartiges Beispiel wissenschaftlicher Entdeckung und persönlicher Integrität.
- weltweite Anerkennung

Ist Kiel nur eine Fußnote in Plancks vita?

*„... betrachte ich doch Kiel
als meine eigentliche Heimat
und fühle mich auch heute noch
als Schleswig-Holsteiner“*

Max Planck, 1920, anlässlich der Nobelpreis-Verleihung (Lebenslauf)

Verpflichtung und Chance für Kiel und Schleswig-Holstein

Planck-Ehrungen in Kiel

1944 Ehrensensator der CAU Kiel

1947 Ehrenbürgerwürde der Stadt Kiel

1958 Gedenkstein (E. Scheerer) in der Küterstraße

2015 Nobelpreisträger-Büsten (J. Plickat)
im Ratsdienergarten



14.12. 2013 - Eröffnung des Max-Planck-Museums* im Physikzentrum der CAU



Kiel, 14. 12. 2024

*das einzige weltweit

Ein Museum für Planck und die Quantentheorie



14.12. 2013 in der Fachbibliothek Physik: Dokumente mit Kiel-Bezug, Fotos, Nobelpreis-Urkunde, Plancks Wanderausrüstung (Leihgabe der Familie) u.v.a.

2 Urenkelinnen Plancks – Christine Roos und Cornelia Kulenkampff - waren Gäste der Eröffnung

Unterstützung des Museums durch die Planck-Familie: Der Planck-Nachlass kommt nach Kiel



Frank Homann und Patrick Ludwig, 8.10. 2020, Kiel



15.7. 2022: Gabriele Taylor, übergibt den Leihvertrag über Plancks Nachlass

Nachlass: erste Ergebnisse

Erster Überblick: ca. 2000 Dokumente mit ca. 10 000 Seiten
unsortiert in 19 Kartons

Erste Sichtung unter Mitwirkung von Studierenden der Physik und
Regionalgeschichte (AG Prof. O. Auge)

Interessenten sind herzlich eingeladen, bei der Sichtung mitzuwirken

Hervorzuheben:

- von Planck signierte Original-Sonderdrucke
- ca. 30 Originalbriefe Plancks, Original-Dokumente (insbes. Pässe)
- Briefe führender Wissenschaftler an Planck bzw. seine Frau. insbes. von Max von Laue, Liese Meitner, Arnold Sommerfeld, Werner Heisenberg, Otto Hahn u.v.a.
- Kondolenzschreiben führender Wissenschaftler zu Plancks Tod (Bohr, Sommerfeld, Heisenberg, Jordan, Meitner, Franck, Millikan u.v.a.)

- Originalbriefe von Plancks Kindern, darunter viele von Erwin Planck
- Briefe von Kielerinnen und Kielern
- beeindruckende Zeitdokumente, insbes. 1940-1947

Nachlass: erste Veröffentlichungen

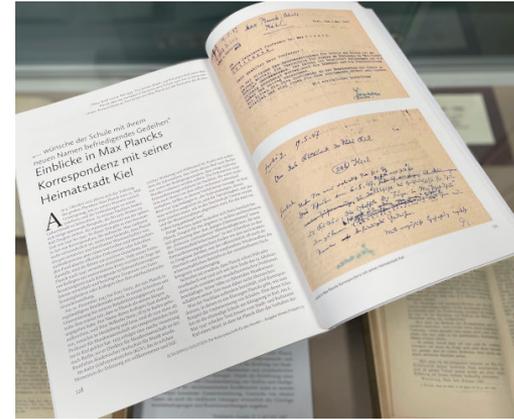
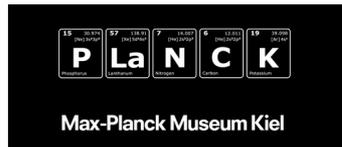
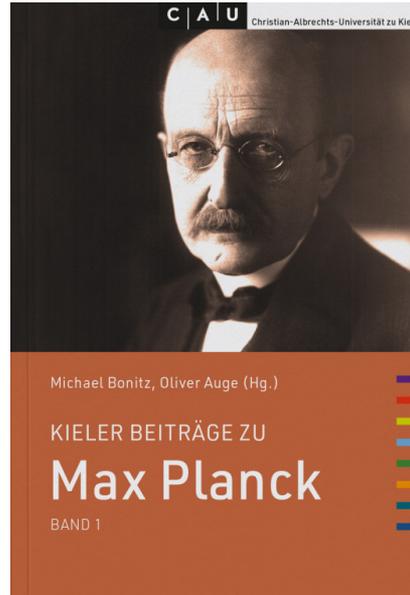
(frei zugänglich auf unseren webseiten)

11.12. 2024 gestartet:
**Open access Buch-
Reihe im CAU-Verlag**
M. Bonitz, O. Auge (Hg.)

Bd. 1: M. Bonitz,
"Max Planck, Kiel und der
Beginn der Quantentheorie"

Bd. 2: C. Pittschellis,
E. Schroedter und M. Bonitz,
„Die Kondolenzen von Wis-
senschaftlerinnen und Wissen-
schaftlern zum Tode Max Plancks 1947“

Ergebnisse im Museum



Kulturzeitschrift *Schleswig-Holstein*

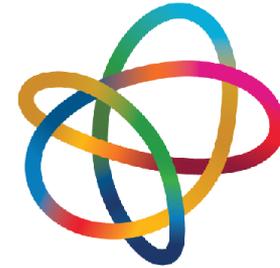
2023 5 Artikel: von M. Bonitz, K. Liebler, A. Krohn,
E. Schroedter und O. Auge

2024: E. Schroedter und M. Bonitz (Kondolenzen)

124 Jahre Quantentheorie - 124 Jahre faszinierender Entdeckungen

15 30.974 [Ne] 3s ² 3p ³ P Phosphorus	57 138.91 [Xe] 5d ¹ 6s ² La Lanthanum	7 14.007 [He] 2s ² 2p ³ N Nitrogen	6 12.011 [He] 2s ² 2p ² C Carbon	19 39.098 [Ar] 4s ¹ K Potassium
--	--	---	---	---

Max-Planck Museum Kiel



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology



Quantum2025