

**Max Planck,
das Wirkungsquantum
und die moderne Physik**

Michael Bonitz

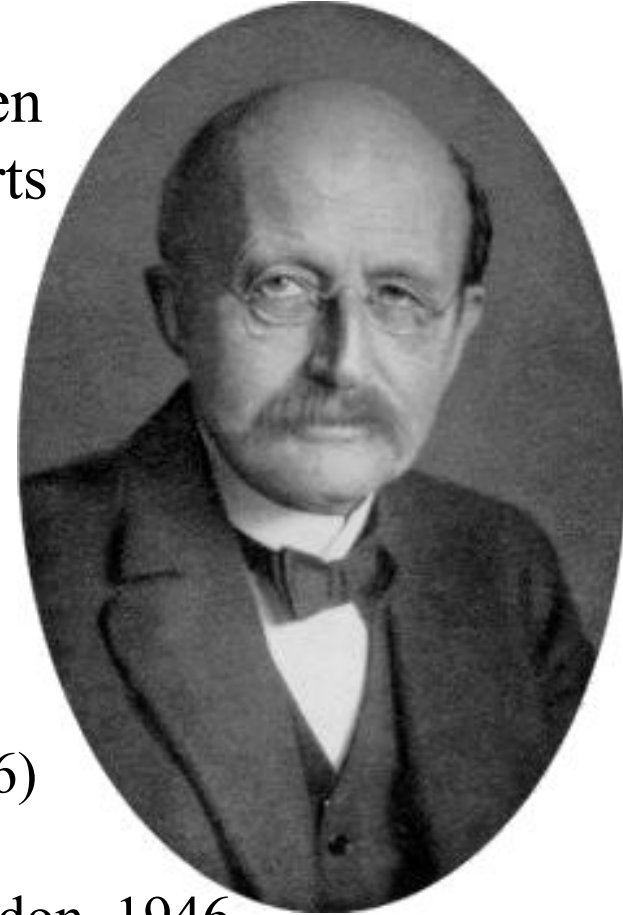
Institut für Theoretische Physik und Astrophysik
Christian-Albrechts-Universität Kiel

Plancks Verdienste für die deutsche Wissenschaft

Einer der führenden und angesehensten deutschen Wissenschaftler der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts

Plancks Aktivitäten (Auswahl):

- ständiger Sekretär der Preußischen Akademie der Wissenschaften (1912/38)
- Rektor der Berliner Universität (1913/14)
- wiederholt Vorsitzender der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
- Präsident der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft (1930/36)
- Einziger Deutscher auf 300-Jahrfeier Newtons, London, 1946
- Präsident der Max-Planck-Gesellschaft (1945/46), ermöglichte damit Neuaufbau der deutschen Wissenschaft nach 2. Weltkrieg



Die Bedeutung von Plancks Entdeckung

Auslöser für die Quantentheorie, dadurch

- vollständige Umwälzung der Physik
- radikale Veränderung der Chemie
- großer Einfluss auf Molekularbiologie u.v.a
- Ausgangspunkt völlig neuer Technologien

angesichts ihrer Tragweite überragt Plancks Entdeckung alle Errungenschaften der Physik seit Newton, Maxwell, einschließlich der Relativitätstheorie

Max Planck und Kiel

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

1920, anlässlich der Nobelpreis-Verleihung (Lebenslauf)

Inhalt

1. Frühe Jahre. Erste Forschungen
2. Physikerlaufbahn. Kiel. Berlin
3. Die Physik um 1875
4. Die Wärmestrahlung. Das Wirkungsquantum
5. Konsequenzen der Quantenhypothese

Die Jahre 1858-1874

- Geboren in Kiel am 23. April 1858
Vater Julius Wilhelm Planck (1817-1900), Juraprofessor in Kiel
Mutter Emma Planck, geb. Patzig

Onkel Gottlieb Planck (1824-1907), Jurist

Großvater Gottlieb Jakob Planck (1751-1833), Theologe



Eltern

Geschwister
1862



Schulzeit

- 1867: Familie verlässt Kiel in Richtung München
(Vater war „strammer Augustenburger“), „glückliche Jugend“

Eingeschätzt als:

- hochbegabt, fleißig und pflichtbewußt
keine besondere Begabung für Mathematik oder Naturwissenschaften
- Stärken im musischen und philologischen Bereich
erhielt fast jedes Jahr den Schulpreis in Religionslehre und für sittliches Betragen

Aus dem Zeugnis des Jahres 1872:

»*Mit Recht der Liebling seiner Lehrer und seiner Mitschüler ...
und bei aller Kindlichkeit ein sehr klarer und logischer Kopf.
Verspricht etwas Rechtes.*«

1874: glänzendes Abitur am humanistischen Gymnasium

Studium der Mathematik und Physik

- 1874-1877 in München bei den Professoren Jolly, Seidel, Bauer, Beetz
- 1878 ein Jahr in Berlin bei Helmholtz, Kirchhoff und Weierstrass
- Selbststudium der Arbeiten von Clausius, prägend für die Zukunft
- Wieder in München: Prüfung für das höhere Lehramt



1878, Student

Quelle: „Wikipedia“

Planck über seine Lehrer

- Münchner Professoren waren nur "lokale Größen"
- Berlin: bahnbrechende Forscher, dürftige Lehrer...

Helmholtz: war nie richtig vorbereitet, sprach stockend („wobei er in einem kleinen Notizbuch sich die nötigen Daten heraussuchte“), verrechnete sich ständig, Hörer blieben weg

Kirchhoff: „trug sehr gut ausgearbeitetes Kollegheft vor“, aber es „wirkte wie auswendig gelernt, trocken und eintönig. Wir bewunderten den Redner, aber nicht das, was er sagte.“

- **Rudolph Clausius: begeistert von dessen Abhandlungen**
„wohlverständliche Sprache und einleuchtende Klarheit“
- kein einzelner war prägend, dadurch
„hohe Unabhängigkeit bewahrt“, aber „gewisse Einseitigkeit der Bildung“

„Wissenschaftliche Selbstbiographie“, Leipzig, J.A. Barth, 7-34 (1948)

Welches Forschungsgebiet wählen?

- Physik um 1875: „abgeschlossene Wissenschaft“, basierend auf Newtonscher Mechanik und Maxwellscher Elektrodynamik
- Insbesondere die „Theoretische Physik näherte sich der Vollendung“, die etwa die Geometrie seit Jahrhunderten erreicht hat.

„Studienberatung“ bei Prof. Jolly in München
(„auf der Höhe der Zeit stehender Physiker“)

„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.

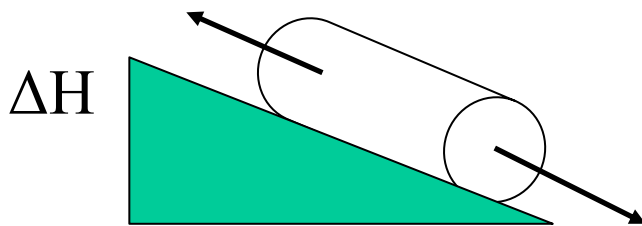
Planck: *„Ich hege nicht den Wunsch, Neuland zu entdecken, sondern lediglich, die bereits bestehenden Fundamente der physikalischen Wissenschaft zu verstehen, vielleicht auch noch zu vertiefen.“*

Naturwiss. **13**, 52-59 (1925)

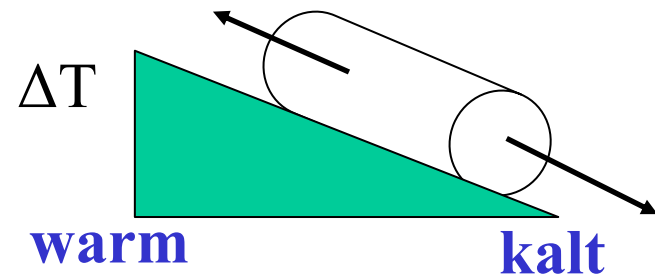
Thermodynamik (Wärmelehre)

Verbreitete Vorstellung von „Wärmestoff“, durchdringt alle Körper

- **Energieerhaltungssatz** (1. Hauptsatz, Joule, Helmholtz...):
Wärme kann in mechanische Arbeit umgewandelt werden und umgekehrt
- Reversibilität der Mechanik
Strömung bergab und bergauf



analog: „Wärmestoff“



- Aber: Wärmeaustausch nur von wärmerem zu kälterem Körper, **irreversibel**, mathematische Formulierung durch Entropie (Rudolf Clausius), **2. Hauptsatz**

Plancks Dissertation

„Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie“,
München, 1879

„Der Eindruck dieser Schrift in der damaligen
physikalischen Öffentlichkeit war gleich Null“.

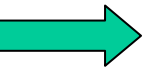
- unverstanden von den Münchner Professoren

vernichtende Meinung bzw. Desinteresse der Experten:

- Helmholtz hatte Arbeit nicht gelesen
- Kirchhoff lehnte Inhalt ausdrücklich ab (Entropie gelte nur für reversible Prozesse)
- Clausius war nicht zu erreichen

„Wissenschaftliche Selbstbiographie“, Leipzig, J.A. Barth, 7-34 (1948)

Inhalt

1. Frühe Jahre. Erste Forschungen
-  2. Physikerlaufbahn. Kiel. Berlin
3. Die Physik um 1875
4. Die Wärmestrahlung. Das Wirkungsquantum
5. Konsequenzen der Quantenhypothese

Forschungen zur Entropie

„Solche Erfahrungen hinderten mich jedoch nicht, tief durchdrungen von der Bedeutung dieser Aufgabe, das Studium der Entropie, die ich neben der Energie als die wichtigste Eigenschaft eines physikalischen Gebildes betrachtete, weiter fortzusetzen“

- Entropie für Aggregatzustands-Änderungen: Habilarbeit
„Gleichgewichtszustände isotroper Körper in verschiedenen Temperaturen“, München, 1880
- Entropie für Gasgemische

„Wissenschaftliche Selbstbiographie“, Leipzig, J.A. Barth, 7-34 (1948)

Professor an der Uni Kiel

- Privatdozent in München,
viele Jahre vergebliches Warten auf Berufung
- Göttinger Preisaufgabe über das Wesen der Energie
- 1885: Ruf nach Kiel als Extraordinarius für Theoretische Physik,
„Erlösung“

(vermutete, dass nicht fachliche Leistung, sondern Beziehungen seines Vaters zum Kieler Physikprofessor Gustav Karsten Ausschlag gaben),
Jahresgehalt 2000 Mark

Professor an der Uni Kiel

1886 Gründung seiner Familie:

Heirat seiner Jugendfreundin Marie Merck



- **Dez. 86 - Dez. 88: 8 Arbeiten:**

- "*Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie*" (3 Arb.)
- "*Über die molekulare Konstitution verdünnter Lösungen*"
- "*Das chemische Gleichgewicht in verdünnten Lösungen*"
- "*Über die Hypothese der Dissoziation der Salze in sehr verdünnten Lösungen*"
- "*Über die Dampfspannung verdünnter Lösungen flüchtiger Stoffe*"
- "*Zur Theorie der Thermoelektrizität in metallischen Leitern*"

- 1887: erhielt (nur) 2. Preis bei Göttinger Preisaufgabe
ergriff für Helmholtz und gegen W. Weber (Göttingen) Partei

dazu: Vortrag von Prof. Werner Ebeling am 5. Februar 2008

Professor an der Uni Berlin

- 1889 Ruf nach Berlin, Nachfolge Kirchhoffs†
ab 1892 Ordinarius (Jahresgehalt 6200 Mark + 1000 Mark Tantiemen)
- hier intensiver Kontakt zur wissenschaftlichen Spitze:
Helmholtz, von Bezold, Kundt, Rubens u.a.
„stärkste Erweiterung meiner ganzen wissenschaftlichen Denkweise“
- Große Rolle Herrman v. Helmholtz:
*„zu Herzen gehende menschliche Güte“,
glücklich über jedes Lob*

„Wissenschaftliche Selbstbiographie“,
Leipzig, J.A. Barth, 7-34 (1948)

„Wikipedia“



Plancks Stellung in der Physik der 1880er, 90er Jahre

„Ich war eigentlich damals der einzige Theoretiker und hatte es daher nicht so ganz leicht, weil ich mit meiner Entropie hervorkam, und die war damals nicht sehr beliebt, weil sie ein mathematisches Gespenst war“.

„...am eigenen Leibe erfahren, wie einem Forscher zumute ist, der sich im Besitz einer sachlich überlegenen Idee weiß“, aber nicht überzeugen kann, da seine Position zu schwach ist gegen die Autorität von Männern wie Ostwald, Helm, Mach...“

ergriff Partei für Boltzmann, gegen die „Energetik“

Vortrag „Ursprung und Auswirkung wissenschaftlicher Ideen“ 17.2. 1933, Berlin, Verein Dt. Ingenieure, Zeitschr. VDI 77, 185-190 (1933)

Professor an der Uni Berlin

- **Lehre:** hielt 6-semestrige Vorlesung zur Theoretischen Physik, Vorlesung war „*nüchtern, etwas unpersönlich*“ (Lise Meitner),
- Hörerzahl wuchs von 18 (1890) auf 143 (1909)



1901

- **1907 Ruf** auf Boltzmanns Lehrstuhl in Wien, Planck lehnte ab, Berliner Studentenschaft dankte ihm mit einem Fackelzug.
- **Emeritierung:** 1. Oktober 1926, Nachfolger: Erwin Schrödinger.

Quelle: „Wikipedia“

Plancks Schüler

- ca. 20 Doktoranden, darunter (Jahr der Promotion):

Max Abraham 1897 (1875–1922)

Moritz Schlick 1904 (1882–1936), Begründer des "Wiener Kreises"

Walther Meißner 1906 (1882–1974)

Max von Laue 1906 (1879–1960), Nobelpreisträger 1914

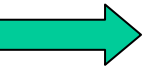
Fritz Reiche 1907 (1883–1960)

Walter Schottky 1912 (1886–1976)

Walther Bothe 1914 (1891–1957), Nobelpreisträger 1954

Quelle: „Wikipedia“

Inhalt

1. Frühe Jahre. Erste Forschungen
2. Physikerlaufbahn. Kiel. Berlin
-  3. Die Physik um 1875
4. Die Wärmestrahlung. Das Wirkungsquantum
5. Konsequenzen der Quantenhypothese

Die klassische Physik um 1875

Elektrodynamik

Elektrische und
Magnetische Vorgänge,
Elektro-magn. Wellen

Mechanik

Dynamik der Körper
und Planeten,
Flüssigkeiten,
Elastischen Medien

Thermodynamik

Wärme, Gase,
Wärme- und Kälte-
maschinen

Das mechanistische Weltbild

„abgeschlossen,
endgültig“



„nur kleine,
Schönheitsfehler“

Elektrodynamik

Elektrische und
magnetische Vorgänge,
Elektro-magn. Wellen

Äther

Mechanik

Dynamik der Körper
und Planeten,
Flüssigkeiten,
elastischen Medien

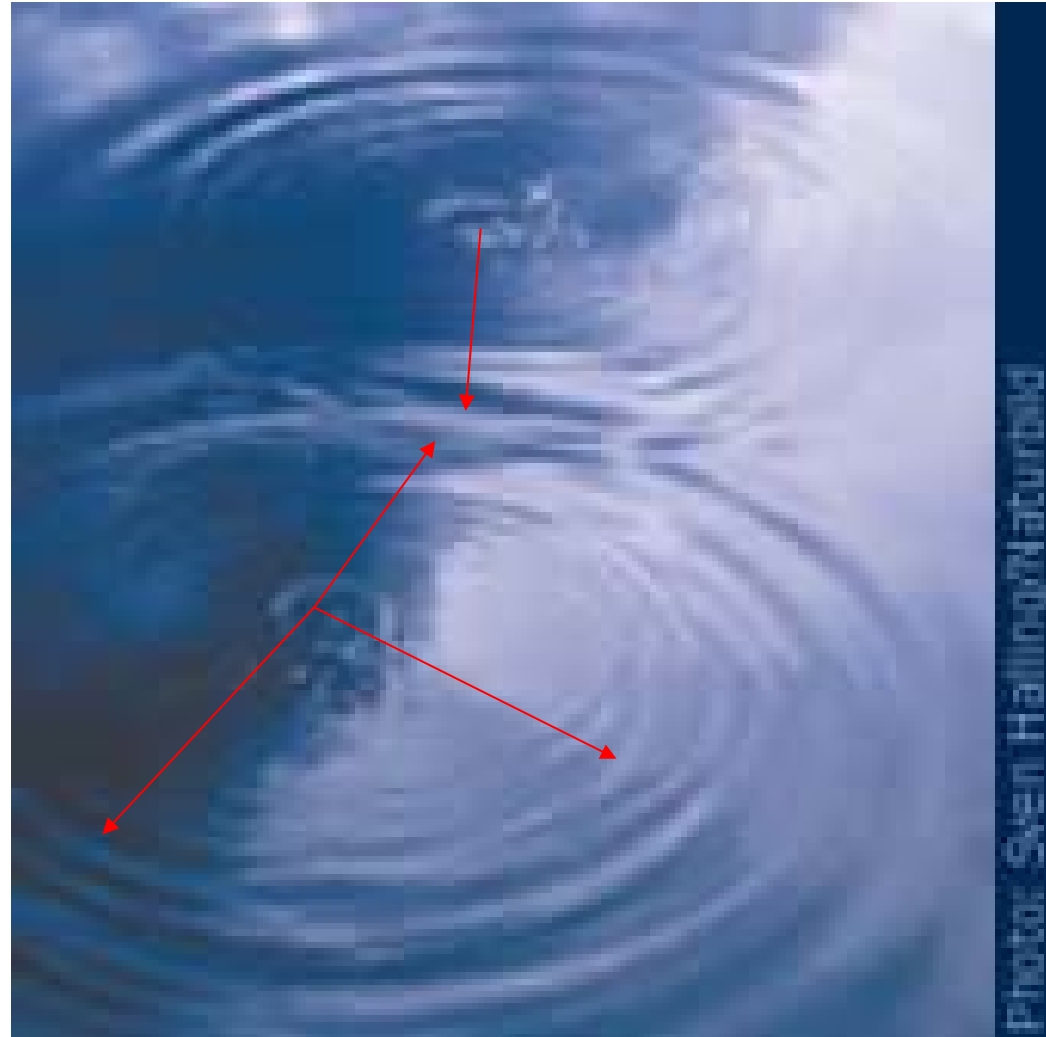
Thermodynamik

Wärme, Gase,
Wärme- und Kälte-
maschinen

Wärmestoff

Mechanische Wellen

- Lokale Anregung
- Ausbreitung im elastischen Medium
- Interferenz zweier Wellen

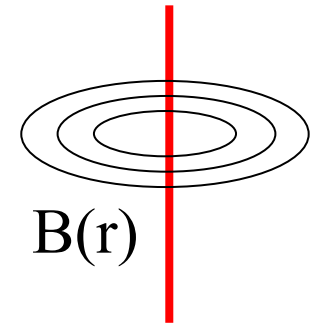
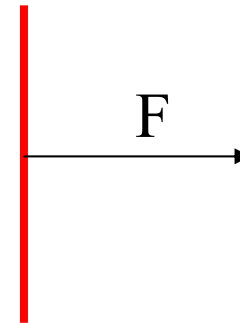
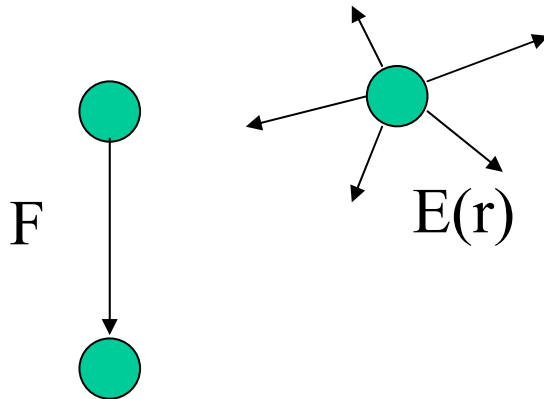


Photoc: Sven Halling/Waturland

Elektromagnetische Wellen

J.C. Maxwell 1865: Gleichungen für das E- und B-Feld

- Mathematische Beschreibung aller bekannten Phänomene der Elektrizitätslehre und des Magnetismus
- Kraft zwischen **Ladungen** (**Strömen**) vermittelt durch E(B)-Feld



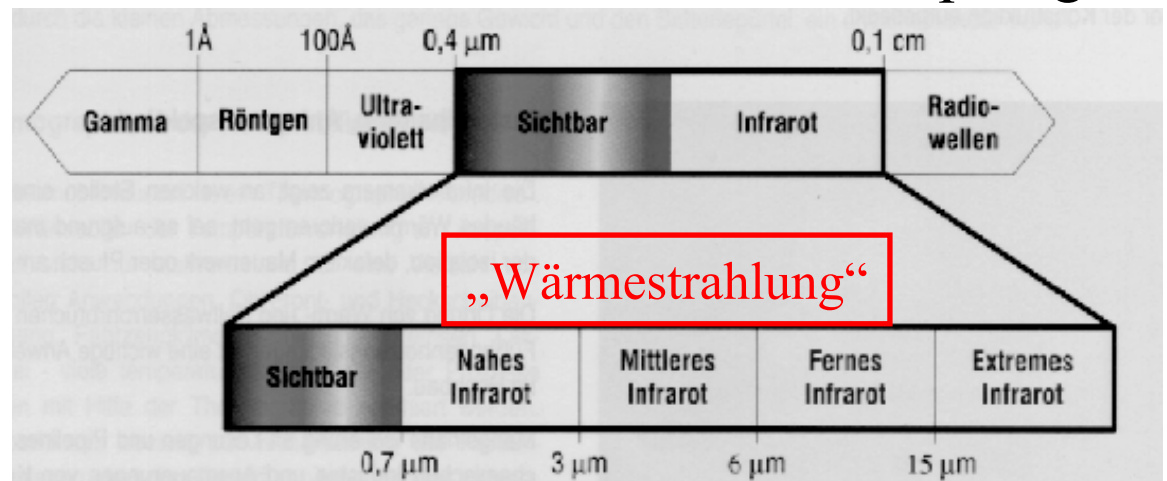
- Vorhersage EM Wellen im Vakuum

Elektromagnetische Wellen (2)

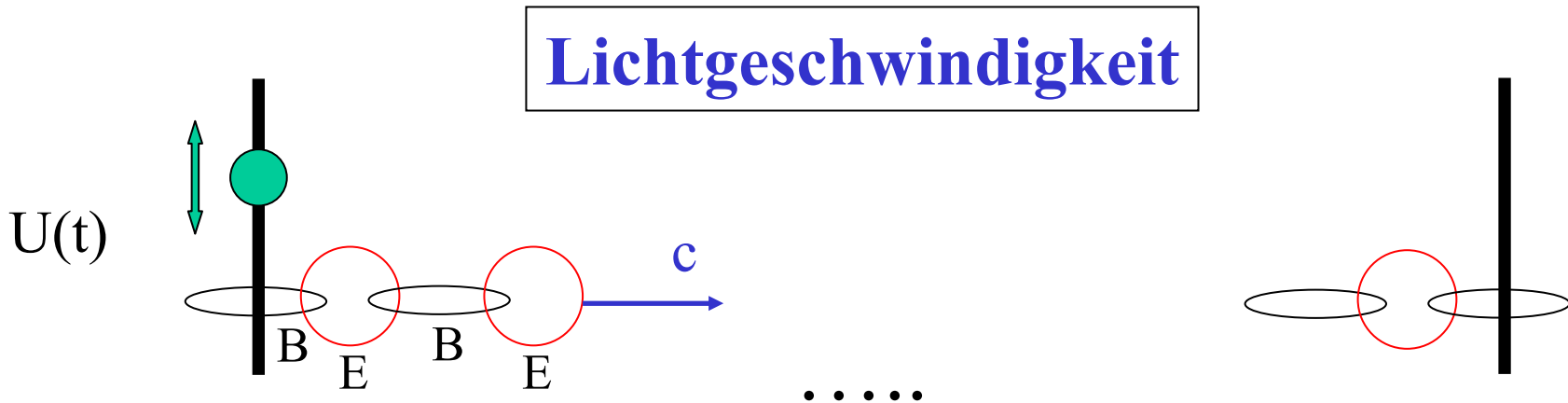
- EM Wellen (Nachweis: H. Hertz, 1888)



- Ausbreitungsgeschwindigkeit: c



Probleme für die Mechanik (1)



1) Mechanische Vorstellung:
elastisches Trägermedium: „Äther“

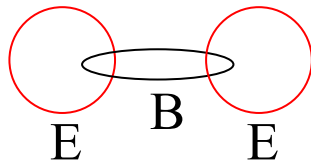
2) Wellengeschwindigkeit bei bewegter Quelle
o. Empfänger immer c , Michelson 1887



**→ Relativitätstheorie (Lorentz, Einstein 1905)
Aufgabe mechanischer Bilder (Äther)**

Probleme für die Mechanik (2)

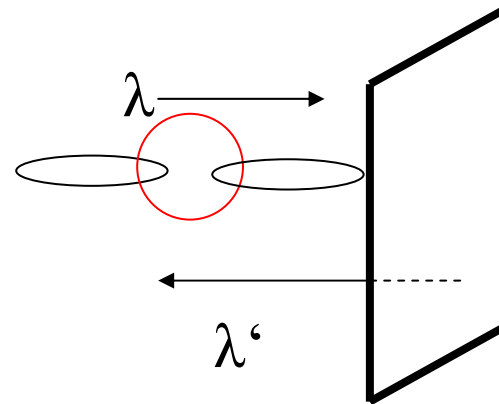
EM Welle, λ
(Wärmestrahlung)



Gesamtenergie der Welle

$$\frac{W(r,t)}{V} \propto \sum_{\lambda} E^2(\lambda; r, t)$$

Auftreffen auf Oberfläche



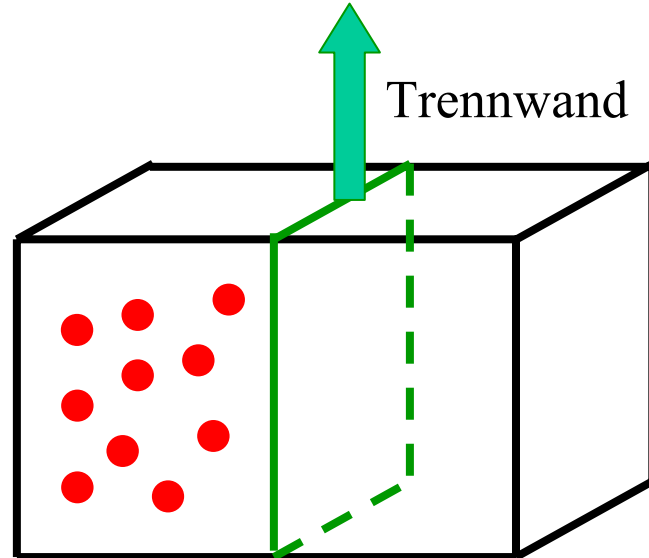
Absorption,
Reflexion, Re-Emission

Spektrale Energieverteilung ??

Das Thermodynamische Gleichgewicht

Sich selbst überlassene (von Umgebung isolierte) Körper streben Gleichgewichtszustand an → *besonderer Zustand*


Beispiel:
gleichmäßige Verteilung
von Gasmolekülen



analog: Temperatenausgleich zw. warmem und kaltem Körper

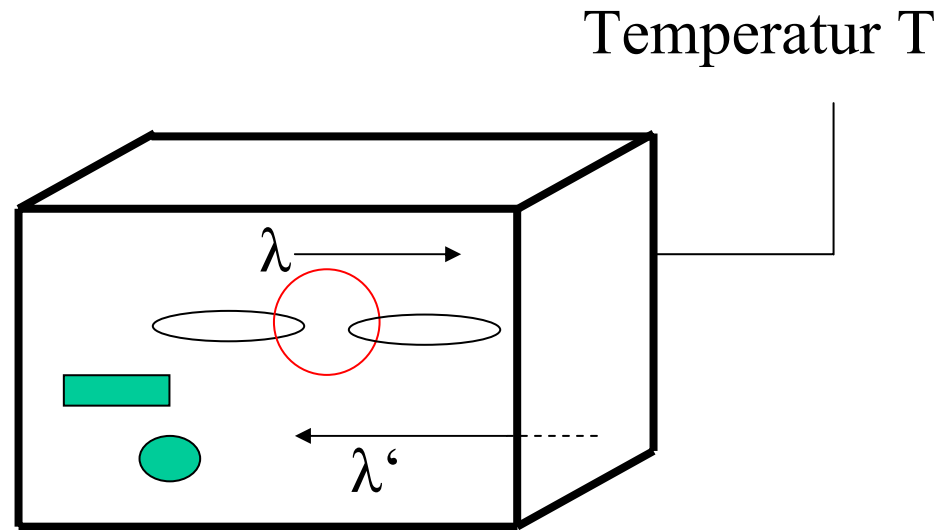
→ spontan ablaufender Prozess, irreversibel
2. Hauptsatz der Wärmelehre (Clausius),
Anwachsen der Entropie $S(t)$

Inhalt

1. Frühe Jahre. Erste Forschungen
2. Physikerlaufbahn. Kiel. Berlin
3. Die Physik um 1875
-  4. Die Wärmestrahlung. Das Wirkungsquantum
5. Konsequenzen der Quantenhypothese

EM Strahlung im TD Gleichgewicht

1. Kirchhoff 1859:
Modell des
„Schwarzen Körpers“,
absorbiert vollständig



spontane irreversible Umverteilung der Strahlung:
→ im Raum, sowie der spektralen Anteile, Phasen...

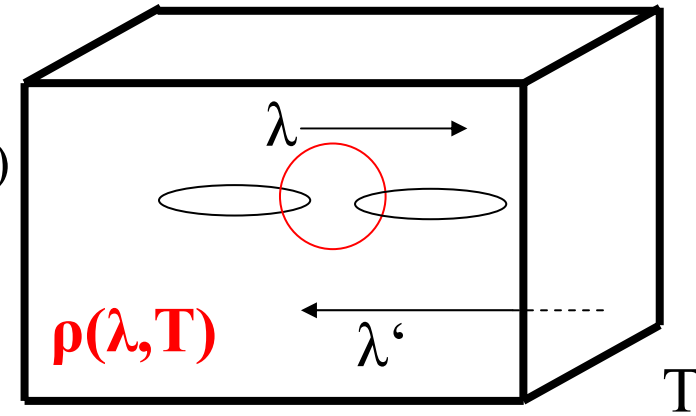
Gleichgewicht von Körper und Strahlung, $\rho(\lambda, T)$

GG-Zustand unabhängig von Art/Form von Körpern
→ **absolutes Gesetz, *Eigenschaft der Strahlung***

Spektrale Energieverteilung $\rho(\lambda, T)$

- 2. Messungen:** Langley...,
1887: Physikalisch-Technische Reichsanstalt Berlin.
(Lummer, Pringsheim); TH Berlin (Rubens, Kurlbaum)
Paschen 1896, Fitformel:

$$\rho(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^{5.5}} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$



- 3. Ableitung: Wien 1896, Annahmen:**

a) Emission durch Moleküle,

maxwell-verteilt (TD GG): $f(v) \propto v^2 e^{-mv^2/2kT}$

b) λ Funktion nur von v

Ableitung der Paschenformel $\rho(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$



Abhängigkeit nur vom Produkt λT

1890 PTR, 1896 Aachen

Plancks Arbeiten 1894-99

- a) Wechselwirkung Strahlung - „Resonator“ (Absorption und Emission), Strahlungsdämpfung \rightarrow irreversible Relaxation
- b) Dabei muss monoton wachsende Größe existieren: Entropie $S(U;t)$

$$\text{mit } \beta = \frac{1}{kT} = \frac{dS}{dU}$$

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

$$\text{folgt } S(U) = -\frac{U}{a} \left[\ln \frac{U}{b} - 1 \right]$$

$$\text{mit } \frac{dS}{dt} \geq 0$$



$$R = \frac{1}{\frac{d^2 S}{dU^2}} = -T^2 C = -aU$$

Das Wirkungsquantum (1899)

Wien-Gesetz enthält zwei Konstanten: a, b $U(\beta) = a \nu e^{-b\nu/T}$

Aus Vergleich mit den Messungen der PTR A, TH Berlin
(Kurlbaum, Paschen) berechnet Planck:

$$b = 0.4818 \cdot 10^{-10} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s} = h / k_B$$

$$a = 6.885 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s} = h$$

„Plancksches Wirkungsquantum“ $h = 6.62606876(52) \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2 = 2\pi\hbar$

Planck bestimmt daraus Loschmidtsche Zahl und Elementarladung e

Universelle Konstanten (Konsequenz des 1. und 2. Hauptsatzes
der Thermodynamik, material-unabhängig)!

Das Plancksche Einheitensystem (1899)

Konstanten a, b , Lichtgeschwindigkeit und Gravitationskonstante G ersetzen das konventionelle (*willkürliche*) System, CGS, SI (MKSA)

$$l_p = \left(\frac{G\hbar}{c^3} \right)^{1/2} = 1.6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

$$t_p = \frac{l_p}{c} = \left(\frac{G\hbar}{c^5} \right)^{1/2} = 5.4 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

$$m_p = \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{1/2} = 2.2 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

$$T_p = \frac{1}{k_B} \left(\frac{hc^5}{G} \right)^{1/2} = 3.5 \cdot 10^{32} \text{ K}$$

Gleichheit von Gravitationsenergie,
Photonen-Energie, Ruhe-Energie
und thermischer Energie

$$\frac{m_p^2 G}{l_p} = \frac{h}{t_p} = m_p c^2 = k_B T_p$$

Gültig „nach den verschiedensten Methoden gemessen
und von den verschiedensten Intelligenzen...“

Das Problem großer Wellenlängen

1900, neue Messungen (Rubens, Kurlbaum, Lummer) für große λ (IR):
Abweichungen von Wien-Formel („Rayleigh-Jeans-Gesetz“)

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

$$U(\beta) = \frac{d}{\beta}$$

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

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

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

Das Plancksche Strahlungsgesetz $\rho(\lambda, T)$

19. Oktober 1900

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

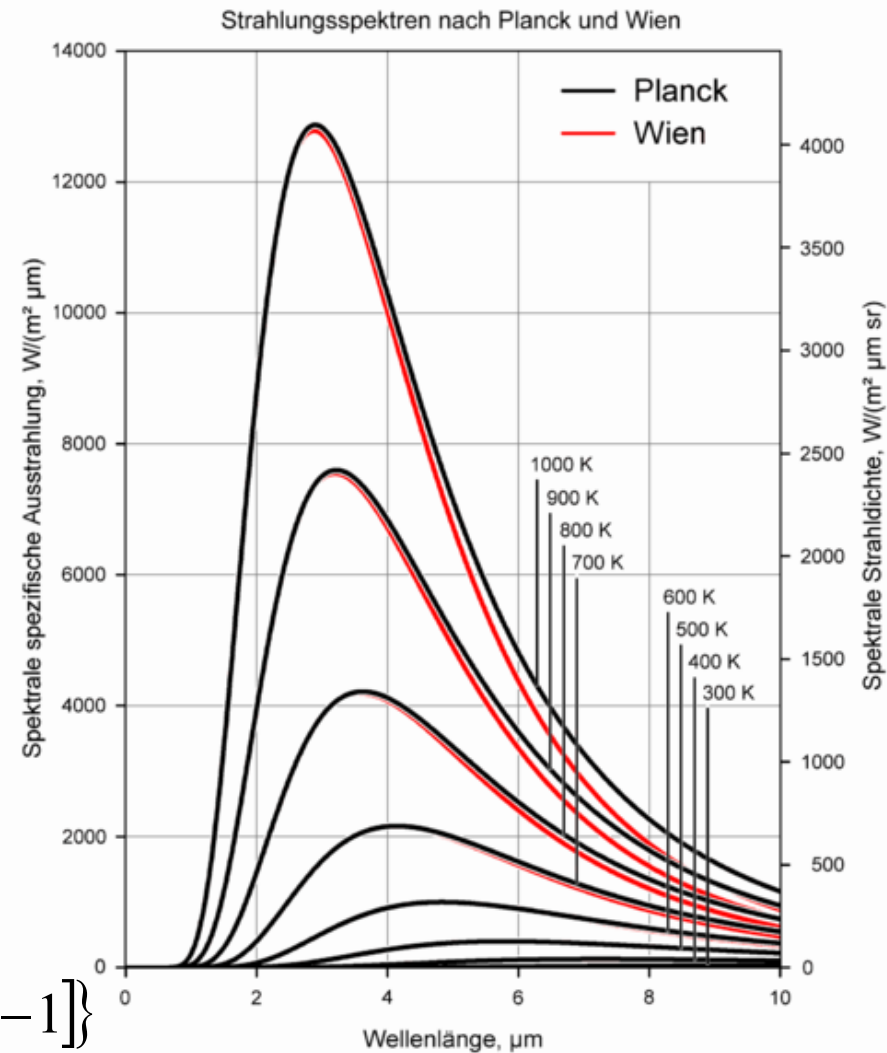
Übereinstimmung mit
Experimenten

→ 19.2. Vortrag Prof. Helbig

Begründung??

Ableitung der Entropie??

$$S(U) = \frac{1}{a} \left\{ (U + ad) [\ln(U + ad) - 1] - U [\ln U - 1] \right\}$$



Boltzmanns Statistische Theorie

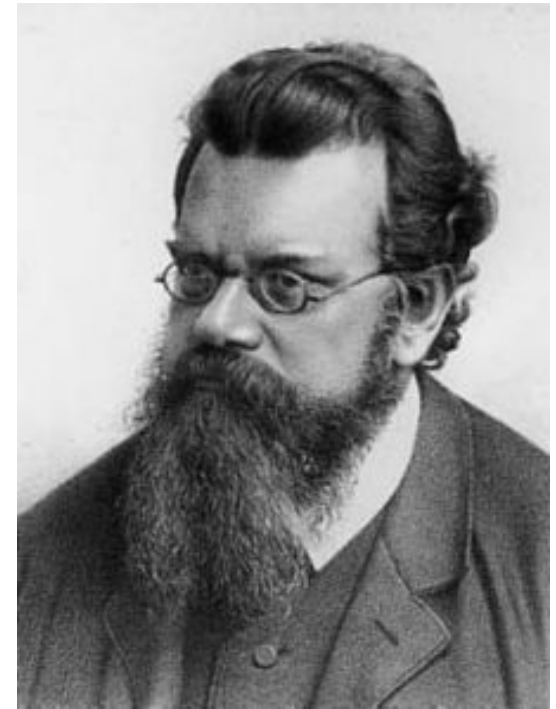
Atomistische Begründung der Irreversibilität,
„Molekulares Chaos“

Statistisches Resultat für Entropie eines
Zustandes, ($W \sim$ Wahrscheinlichkeit): $S \sim \ln W$

W – Anzahl der Möglichkeiten, Energie NU
auf N Moleküle zu verteilen

Resultat: Gleichgewichtsverteilung der
Geschwindigkeiten (Maxwell):

$$f(v) \propto v^2 e^{-mv^2 / 2kT}$$



Ludwig Boltzmann
1844-1906

Plancks Energie-Quantisierung („Akt der Verzweiflung“)

Statistisches Resultat (Boltzmann 1877): $S \sim \ln W$

W – Anzahl der Möglichkeiten, Energie NU
auf N Oszillatoren zu verteilen

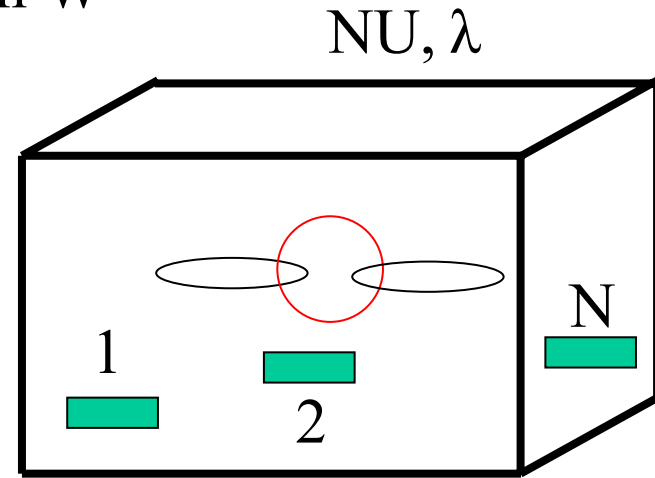
P – Anzahl der Energieportionen ε

$$NU = P \cdot \varepsilon = (P_1 + P_2 + \dots + P_N) \cdot \varepsilon$$

$$\text{Resultat: } W = \frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!} \approx \frac{(N + P)^{N+P}}{N^N P^P}$$

$$\text{Entropie: } S = k \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \frac{U}{\varepsilon} \right\} \equiv f\left(\frac{U}{\varepsilon}\right) \Rightarrow \varepsilon \propto \nu$$

Planck-Formel folgt bei $\varepsilon = h\nu$ Energiequant (Photonen-Energie)



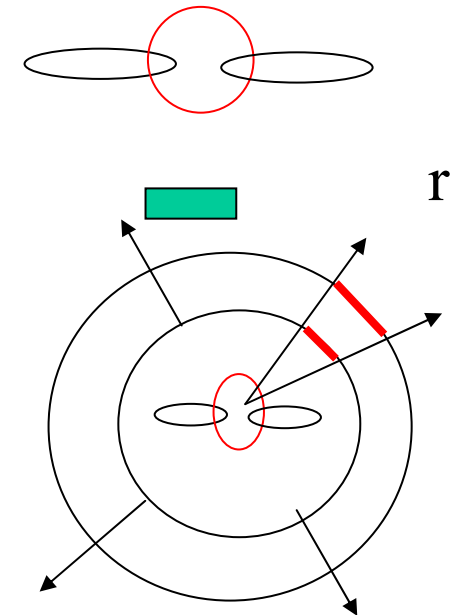
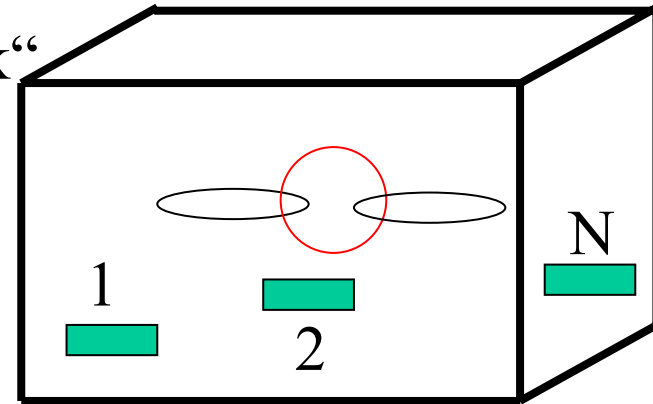
14. Dezember 1900, „Geburtsstunde der Quantenphysik“

Plancks Zweifel

Energieportionen $\varepsilon = h\nu$ „formaler Rechentrick“

$$NU = P \cdot \varepsilon = (P_1 + P_2 + \dots + P_N) \cdot \varepsilon$$

- beschreiben nur Energieaustausch zwischen EM Welle und Resonator (Wand)
- Besteht EM Welle selbst nur aus ganzzahligen Vielfachen von ε ??
- enthält Resonator nach Absorption auch nur ganzzahlige Vielfache von ε ??
- Widerspruch zu Maxwells Elektrodynamik:
Abnahme der Intensität in Kugelwelle $\sim 1/r^2$
„unendliche Verdünnung“



Allgemeine Skepsis

- Widerspruch zu Strahlungsgesetz aus klassischer Elektrodynamik
 - Kritik von Rayleigh, Jeans, Ehrenfest u.v.a.
 - Widerspruch zu klassischer Elektronentheorie (H.A. Lorentz)
- Einwände der Theoretiker...

Max Planck zu neuen Ideen in der Wissenschaft

"Eine neue große wissenschaftliche Idee pflegt sich nicht in der Weise durchzusetzen, daß ihre Gegner allmählich überzeugt und bekehrt werden - daß aus einem Saulus ein Paulus wird, ist eine große Seltenheit -,

sondern vielmehr in der Weise, daß die Gegner allmählich aussterben und daß die heranwachsende Generation von vornherein mit der Idee vertraut gemacht wird."

M. Planck, Vortrag „Ursprung und Auswirkung wissenschaftlicher Ideen“,
17.2. 1933, Berlin, Verein Dt. Ingenieure, Zeitschr. VDI 77, 185-190 (1933)

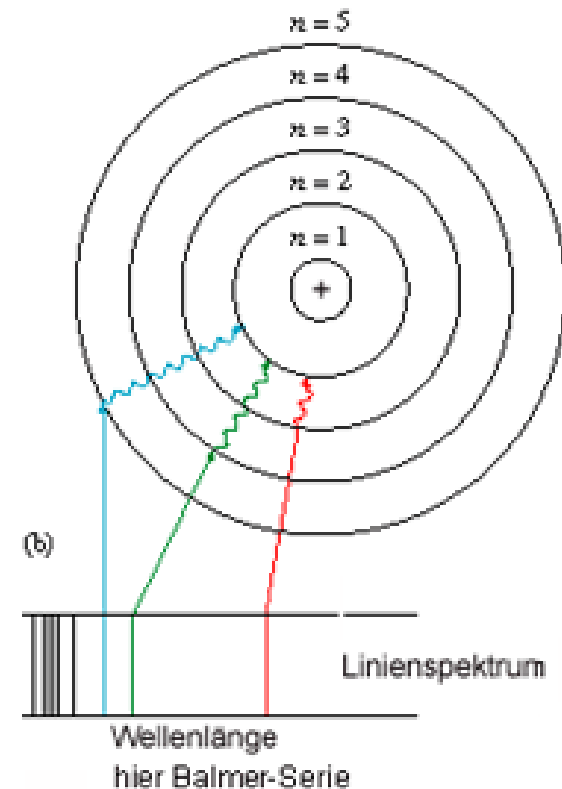
Allgemeine Skepsis

- Widerspruch zu Strahlungsgesetz aus klassischer Elektrodynamik
 - Kritik von Rayleigh, Jeans, Ehrenfest u.v.a.
 - Widerspruch zu klassischer Elektronentheorie (H.A. Lorentz)
- Einwände der Theoretiker...

1911: Nobelpreis für Wilhelm Wien,
"for his discoveries regarding
the laws governing the *radiation of heat*"

Allmählicher Durchbruch

- Einstein 1905 (Photoeffekt): Quantisierung ist *intrinsische Eigenschaft der Strahlung*: Energie: $\hbar\omega$
(„Ideales Gas“) Impuls: $\hbar k$
- Photoionisation von Gasen
- Spezifische Wärme von Festkörpern (Einstein 1906, Debye 1912)
- Absorption und Emission von Atomen: *diskrete Frequenzen* (Linienspektrum)
- Struktur des Atoms (Elektrons) quantisiert Bohr-Modell, *diskrete Energien*



1918: Nobelpreis an Max Planck

„For ... establishment and development
of the theory of elementary quanta“

„Experience had to provide powerful confirmation ...
before Planck's radiation theory could be accepted.
In the meantime this theory has had unheard-of success.“

„Planck's radiation theory is, in truth,
the most significant lodestar for modern physical research,
and it seems that it will be a long time before the treasures
will be exhausted which have been unearthed
as a result of Planck's genius.“

A.G. Ekstrand, President Royal Swedish Society, presentation speech, 1. Juni 1920

Unzählige Ehrungen

- Auszeichnungen, Preise,
u.a. erster Träger der Max-Planck-Medaille der DPG
- Ehrendoktorwürden, Ehrenmitgliedschaften
- Planck-Straßen und –Schulen in vielen Städten

Seine Heimatstadt Kiel ehrt Planck sehr spät:

1944 Ehrensensator der Universität

1947 Ehrenbürger

1958 Gedenkstein in Küterstraße

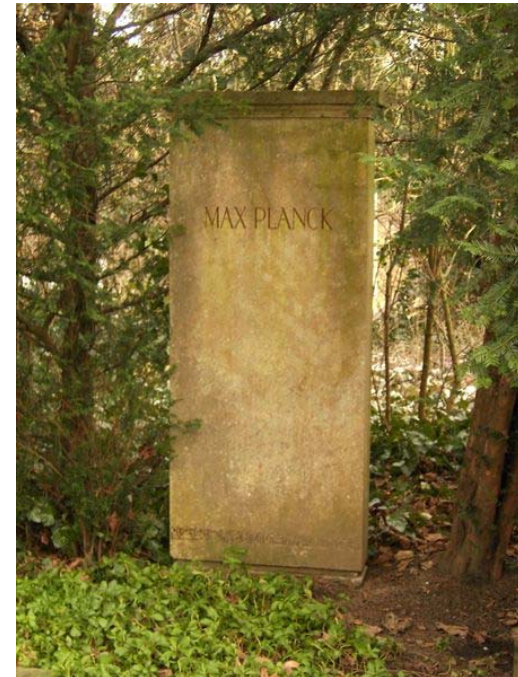


Tragisches persönliches Schicksal


- 1909 Tod seiner ersten Frau
- erlebte den Tod aller 4 Kinder aus erster Ehe:
 - Sohn Karl, gefallen im 1. Weltkrieg 1916
 - Zwillingstöchter Emma und Grete starben 1919 und 1917 bei der Geburt ihres ersten Kindes
 - Sohn Erwin hingerichtet am 23.1. 1945 (beteiligt am Hitler-Attentat)
 - nur Sohn Herrmann (aus 2. Ehe) überlebte Planck um wenige Jahre
- Erlebte im 2. Weltkrieg die Vernichtung Kassels, entging - in Luftschutzraum verschüttet - nur knapp dem Tod
- verlor 1944 bei Bombenangriff gesamten Besitz, letzte Lebensjahre unter z.T. primitivsten Bedingungen

Letzte Jahre

- Einladung zur 300-Jahrfeier Newtons in London, 1946
(Einzigster Deutscher)
- Präsident der Max-Planck-Gesellschaft (1945/46),
(ehem. Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft),
ermöglichte damit Neuaufbau der deutschen
Wissenschaft nach 2. Weltkrieg
- Tod am 4. Oktober 1947
in Göttingen



Inhalt

1. Frühe Jahre. Erste Forschungen
2. Physikerlaufbahn. Kiel. Berlin
3. Die Physik um 1875
4. Die Wärmestrahlung. Plancks Entdeckungen
-  5. Konsequenzen der Quantenhypothese

Der Zusammenbruch des mechanistischen Weltbildes

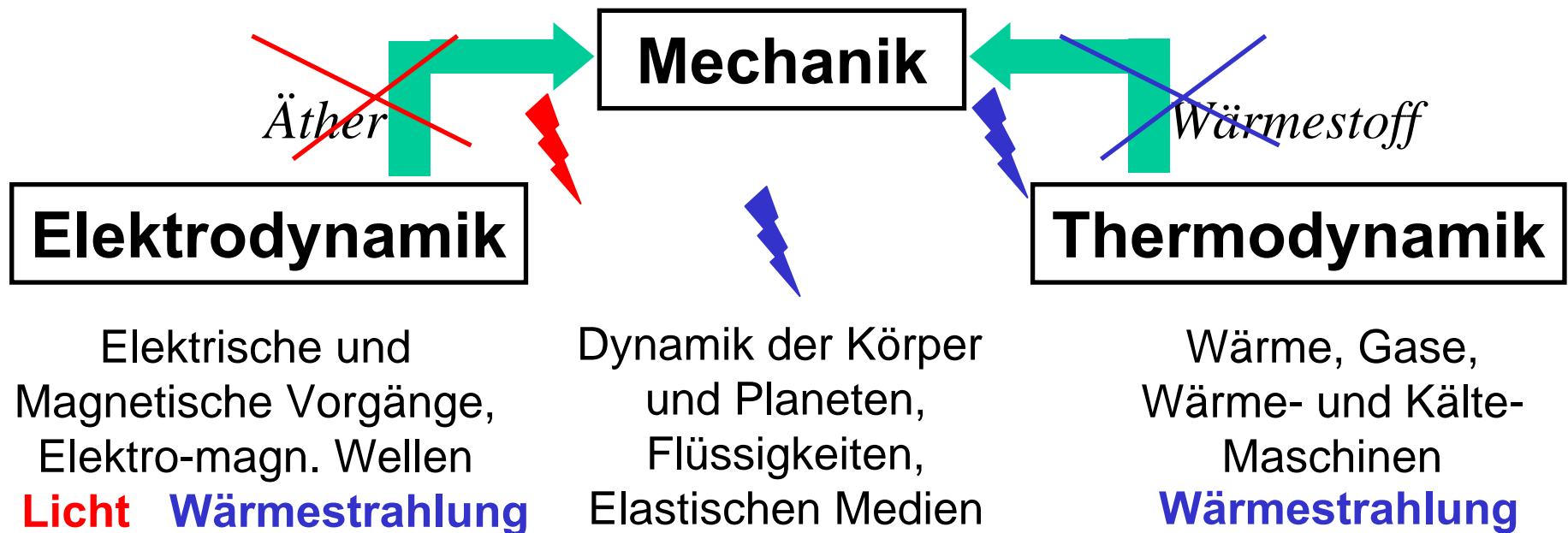
Neue Experimente in Grenzgebieten, ohne mechanische Erklärung:

- **Michelson-Versuch**

- **Emission von Festkörpern**

Relativitätstheorie

Quantentheorie



Quantenmechanik

- Experiment: Elektronen haben Welleneigenschaften (Interferenz, Beugung an Kristallen),

DeBroglie: Wellenlänge des freien Elektrons:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

- Elektron im Atom: diskrete Energien (Bohr)

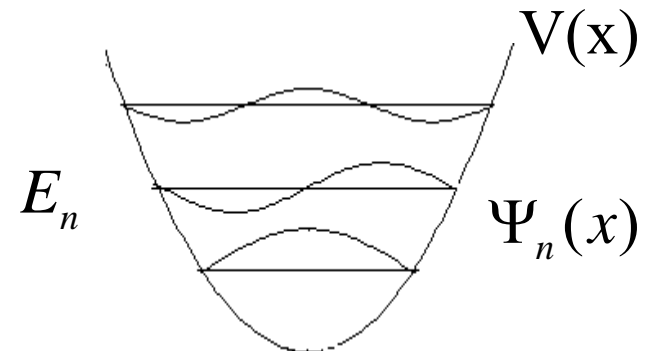
- Einheitliche mathematische Theorie 1926-1928:

Schrödinger, Heisenberg, Bohr, Pauli, Jordan, Dirac u.v.a.

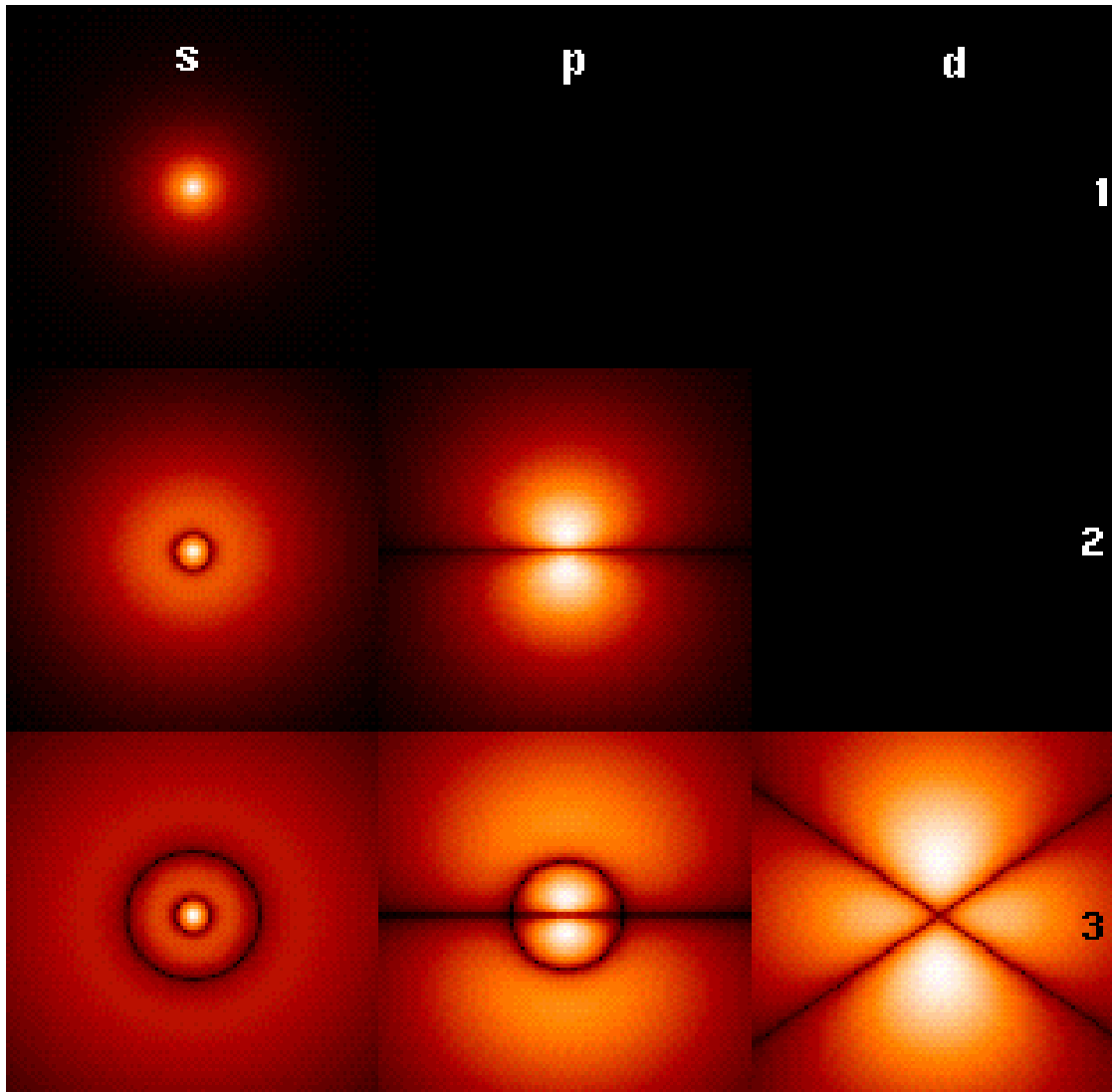
→ Wellengleichung, Wahrscheinlichkeits-Interpretation

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial \vec{r}^2} + V(r) \right) \Psi$$

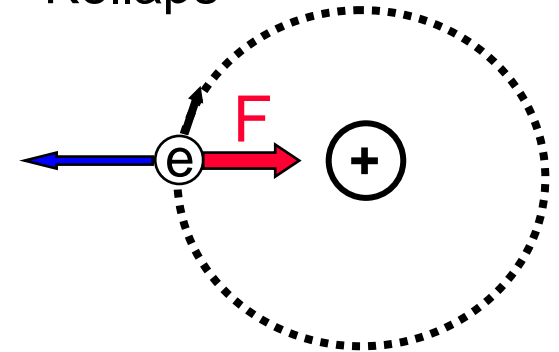
$$\rho(\vec{r}, t) = |\Psi(\vec{r}, t)|^2$$



Struktur des Mikrokosmos



Erklärung für Stabilität
des Atoms gegen
Kollaps



**Elektron im
Wasserstoff-Atom**

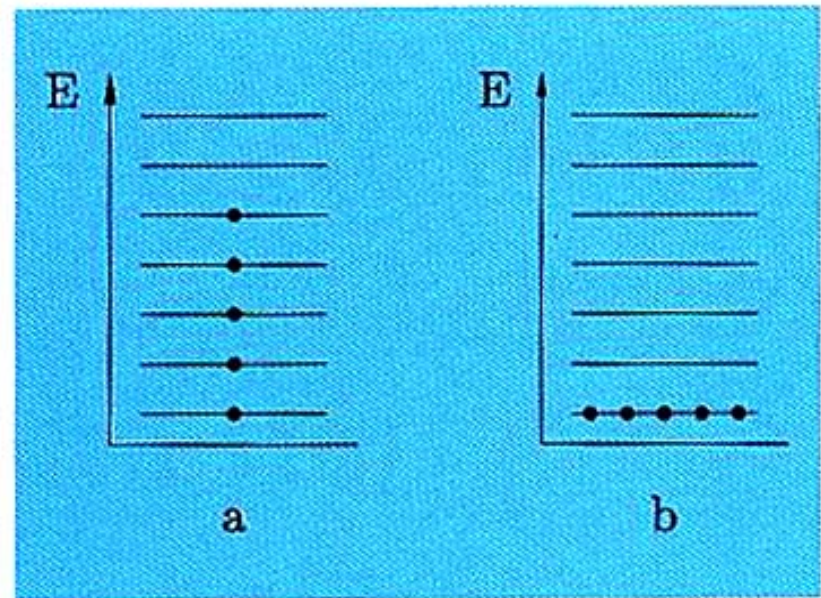
Hell: große Aufenthalts-
wahrscheinlichkeit

Quelle: Wikipedia

Struktur des Makrokosmos

- Ultradichte Materie im Kosmos: Weiße Zwerge, Neutronensterne:
 $10^6 \dots 10^{15}$ faches der Dichte der Erde

- Stabilität der Materie gegen
Gravitationskollaps:
Fermistatistik der Elektronen
(spin $\frac{1}{2}$), Pauliprinzip



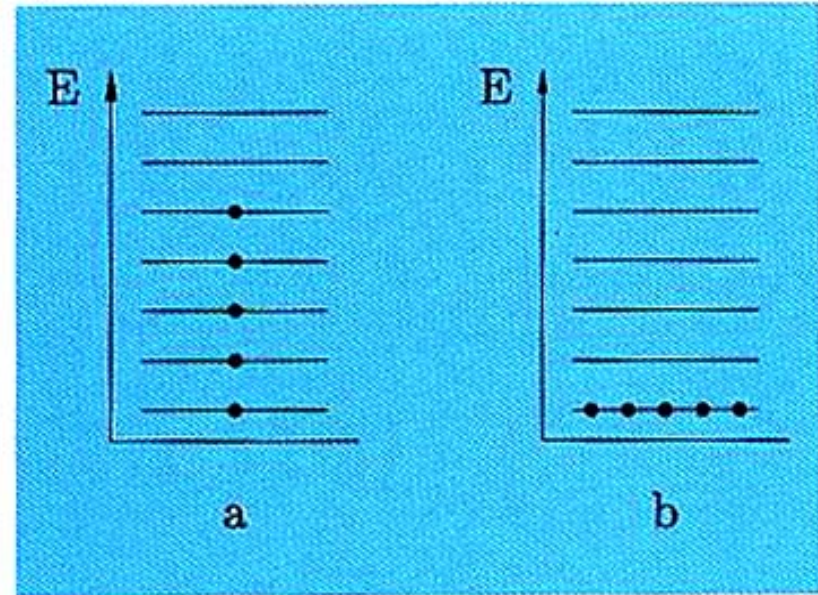
(a) Grundzustand für Fermionen.
(b) Grundzustand für Bosonen.

Bosonen

- Elementarteilchen mit *ganzzahligem* Spin: Bosonen
- Planck entdeckte das erste Boson: *das Photon*

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

- Planckverteilung ist die Energieverteilung von Bosonen - die Bose-Einstein-Verteilung (ultrarelativistischer Grenzfall)

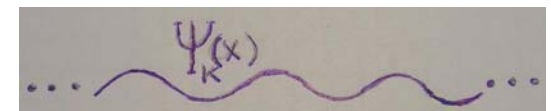
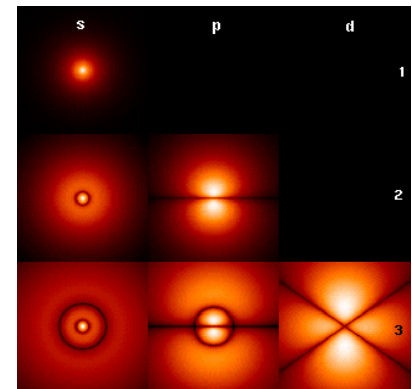
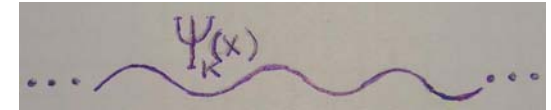


(a) Grundzustand für Fermionen.
(b) Grundzustand für Bosonen.

- Bose-Einstein-Kondensation (makroskopische Kohärenz)
- bei Licht: LASER

Welle-Teilchen-Dualismus des Elektrons

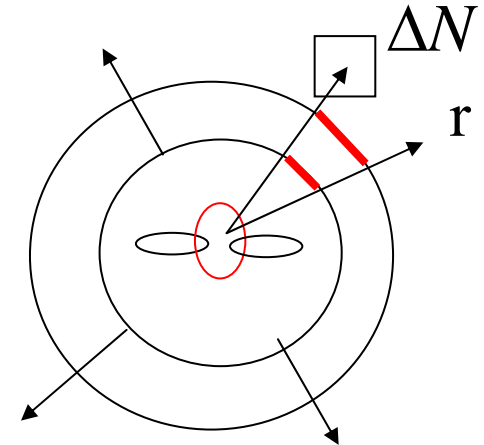
- freies Elektron: Welleneigenschaften, λ beliebig, e räumlich *delokalisiert*
- im Atom/Molekül: Bindung an positiv geladenen Kern, diskrete Energien
→ *Lokalisierung*
- Elektron im periodischen Feld vieler Ionen (Metall) → Welle, *Delokalisierung*, elektrischer Strom, Nanotechnologie



Fazit: es gibt keine „gewöhnlichen“ (Punkt-)Teilchen und keine simple Vorstellung vom Elektron („Stoff“)

Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts

- Maxwells Elektrodynamik: Licht \sim Welle,
Energie räumlich **delokalisiert**.
Abnahme der Intensität in Kugelwelle $I(r) \sim 1/r^2$



- Planck, Einstein: **Photonen** mit Energie $\hbar\omega$
Impuls $\hbar k$
- Wechselwirkung mit geladener Materie (Atom, Molekül):
Absorption/Emission von Photonen, **räumlich lokal**
- Quantenelektrodynamik (Schwinger, Feynman, Yukawa u.a.)

$\Delta I(r, t) \sim \Delta N_{\text{Photon}}(r, t)$ *mittlere* Photonenzahl in ΔV
stochastischer Prozess, Photon \sim Mode des Maxwellfeldes

Zusammenfassung



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

Unerschütterlicher Glaube an:

- Priorität experimenteller Fakten
- Universelle Gültigkeit der physikalischen Grundgesetze (Maxwells Elektrodynamik, Hauptsätze der TD)
- Konsequente Anwendung der Theorie → Widersprüche

Zusammenfassung (2)

„... von Natur ... konservativ, revolutionären Neuerungen abgeneigt und skeptisch gegen Spekulationen. Aber sein Glaube an die **zwingende Kraft des auf Tatsachen gestützten logischen Denkens** war so groß, daß er nicht zauderte, eine Behauptung, die aller Tradition widersprach, auszusprechen, weil er sich überzeugt hatte, daß kein anderer Ausweg möglich war.“ (Max Born)

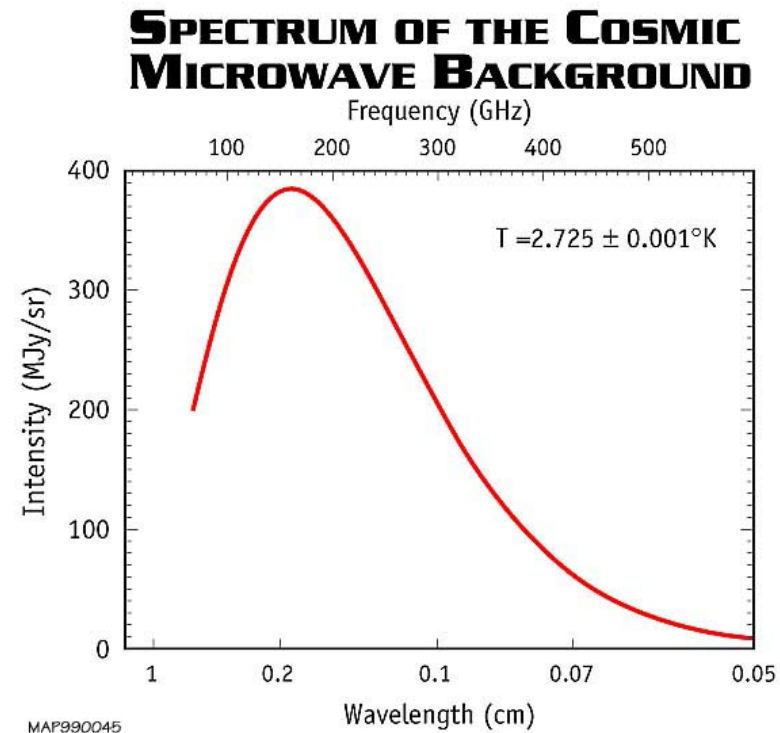
Auslöser für die Quantentheorie, dadurch

- vollständige Umwälzung von Physik, Chemie,...
- Ausgangspunkt völlig neuer Technologien

Bislang alle Vorhersagen der Quantentheorie hervorragend bestätigt

Strahlung aus dem All

- viele kosmische Objekte emittieren elektromagnetische Wellen: detektiert mit optischen, IR- bzw. Radioteleskopen
- Penzias, Wilson, 1964: Präzisionsmessungen im Mikrowellen-Bereich (cm), Nobelpreis 1978
 - unabhängig von Richtung, füllt Raum
 - Nachweis des kosmischen Ursprungs
- COBE-Satellit 1989: **Nachweis eines Planck-Spektrums**, Anisotropie
Nobelpreis 2006 für Mather, Smoot
- Gamow 1947: Vorhersage einer kosmischen „Reststrahlung“ des Urknalls



Kosmische Wärmestrahlung

TD Gleichgewicht
Plancksches
Strahlungsgesetz
gültig

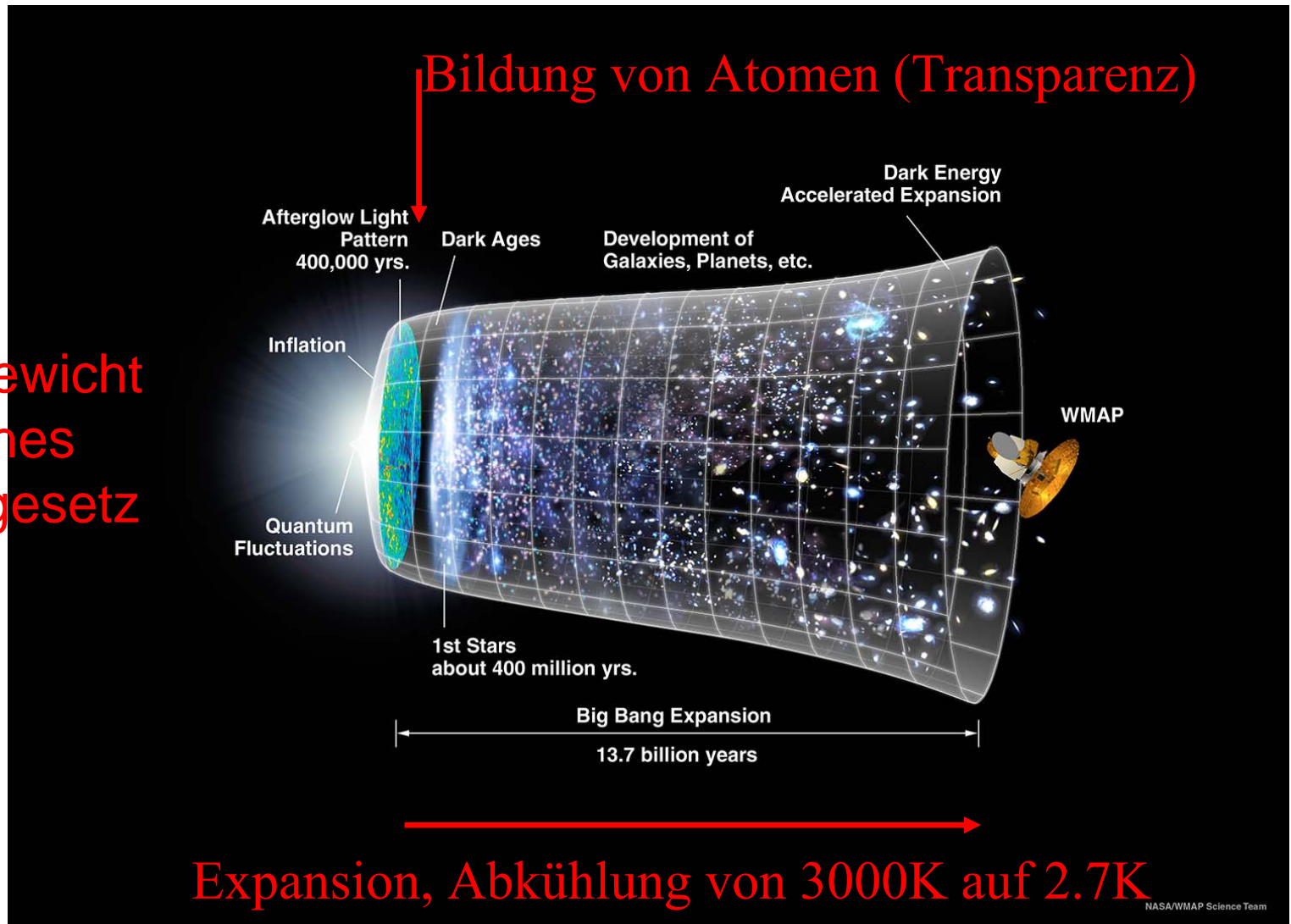


Abb.: NASA

Zusammenfassung (3)

Plancks Entdeckung...

... Auslöser für die Quantentheorie

- vollständige Umwälzung von Physik, Chemie,...
- Ausgangspunkt völlig neuer Technologien

...beschreibt fundamentale Eigenschaft des Universums,
...von allen Zivilisationen zu jeder Zeit zu registrieren.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

