

Max Planck und die mysteriöse Quantenwelt



Michael Bonitz

*Institut für Theoretische Physik
und Astrophysik
Lehrstuhl „Statistische Physik“*

www.theo-physik.uni-kiel.de/bonitz/

Mysteriöse “Quantenwelt“

Elektron ist Welle und Teilchen

(gleichzeitig?)

Im Atom kreisen die Elektronen um den Kern (Bohr)

Warum stürzen sie nicht ab?

Mysteriöse “Quantenwelt“

Elektron ist Welle und Teilchen

(gleichzeitig?)

Im Atom kreisen die Elektronen um den Kern (Bohr)

Warum stürzen sie nicht ab?

Diese Vorstellungen sind leider falsch und irreführend

Mysteriöse “Quantenwelt“

Elektron ist Welle und Teilchen

(gleichzeitig?)

Im Atom kreisen die Elektronen um den Kern (Bohr)

Warum stürzen sie nicht ab?

Diese Vorstellungen sind leider falsch und irreführend!
Es gibt überhaupt keine einfache Vorstellung.
Es gibt eine höchst erfolgreiche Sprache: Mathematik

Quantenmechanik

“Geboren”: 14. Dezember 1900

Max Plancks Theorie des Strahlungsspektrums
Zunächst belächelt, ignoriert

Mathematische Theorie: 1925-28

Schrödinger, Heisenberg, Pauli, Dirac ...

Fazit heute: unerhört erfolgreich. Keine Fehler bekannt*

Standard-“Werkzeug” der modernen Physik, präzise
Aber: Interpretation nicht trivial.

* innerhalb des bekannten Gültigkeitsbereiches

Quantenmechanik – Motor und „Goldgrube“ der modernen Physik

Die letzten Physik-Nobelpreise

2018: optische Pinzetten, Hochintensitätslaser (Ashkin, Mourou, Strickland)

2017: Gravitationswellen (Weiss, Barish, Thorne)

2016: Topologische Phasenübergänge 2D (Thouless, Kosterlitz, Haldane)

2015: Neutrino-Oszillationen (Kajita, Mc Donald)

Quantenmechanik – Motor und „Goldgrube“ der modernen Physik (2)

Die letzten Physik-Nobelpreise

- 2014:** Blaue LED (Akasaki, Amano, Nakamura)
Quantentheorie von Halbleiter-Heterostrukturen
- 2013:** Higgs Boson (Higgs, Englert)
Quantentheorie der Elementarteilchen („Standardmodell“)
- 2012:** Ionen und Photonen in Fallen (Wineland, Haroche)
Quantentheorie der Licht-Materie-Wechselwirkung
- 2010:** Graphen (Geim, Novoselov)
Quantentheorie des Festkörpers

Quantenmechanik – Motor und „Goldgrube“ der modernen Physik (3)

Die letzten Physik-Nobelpreise

- 2008:** Elementarteilchen (Quarks) (Masukawa, Kobayashi, Nambu)
Quantentheorie der Symmetriebrechung
- 2007:** Magneto-Riesenwiderstand (Fert, Grünwald)
Quantentheorie des Festkörpers
- 2005:** Quantenoptik und -Spektroskopie (Glauber, Hall, Hänsch)
Quantentheorie des Lichts
- 2004:** Theorie der asymptotischen Freiheit (Gross, Politzer, Wilczek)
Quantentheorie der starken Wechselwirkung

Quantenmechanik – Motor der modernen Chemie

Neuere Chemie-Nobelpreise - Auswahl

2017: Kryo-Elektronenmikroskopie (Dubochet, Frank, Henderson)

2014: Superauflösende Fluoreszenzmikroskopie
(Betzig, Hell, Moerner)

2013: Multiskalen-Simulationen (Karplus, Levitt, Warshel)
Quanten-Vielteilchen-Simulationen

2007: chemische Verfahren auf festen Oberflächen (Ertl)
Quantenchemie und -physik

1999: Femtosekundenspektroskopie (Zewail)

1998: Theoretische Quantenphysik und -chemie (Kohn, Pople)

Quantenmechanik – Motor der modernen Medizin

Medizin-Nobelpreise - Auswahl

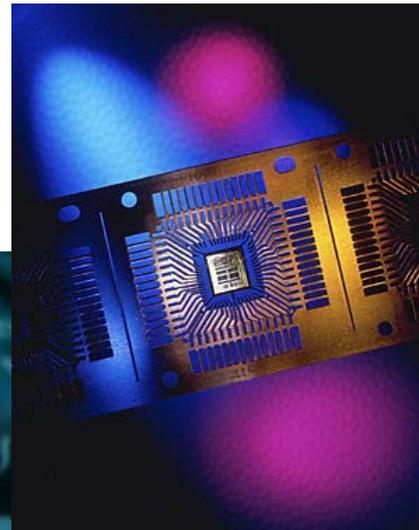
2003: Magnetresonanz-Tomographie (Lauterbur, Mansfield)
Quantentheorie der Kernspin-Resonanz

1979: Computer-Tomographie (Cormack, Hounsfield)
Quantentheorie der Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Gewebe

1962: Entdeckung der DNA (Watson, Crick, Wilkins)
Quantenphysik der Röntgenbeugung

Quantenmechanik – Basis der modernen Technologien

- Chips, Computer, Fernseher, smartphone....



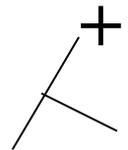
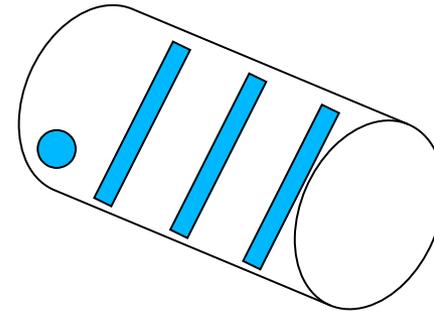
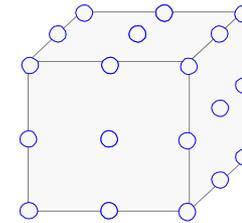
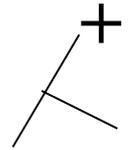
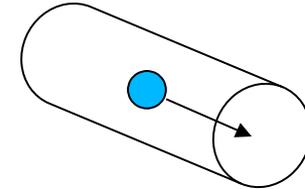
Ohne Quantenmechanik kein Stromfluss!

wären die Elektronen Kugeln
und die Drähte hohle Röhren...
wäre alles bestens

In der Realität:
Kristallgitter im Metalldraht,

kein Durchkommen für Kugeln!

Erfahrung: nahezu verlustfreie elektrische Leitung in Metallen
möglich nur durch Quantenmechanik (wie??)



Quantenmechanik heute – Grundlage von Wissenschaft und Technologie

in nur wenigen Jahrzehnten:
→ **Revolution der Wissenschaft**

Vergleichbar mit Kopernikus, Newton, Darwin...

Inhalt

- 1. Quantenphysik heute: Grundlage von Wissenschaft und Technologie**
- 2. Max Planck und die Entstehung der Quantentheorie**
- 3. Moderne Entwicklungen der Quantenmechanik**
- 4. Max Planck-Ehrung in Kiel**

2. Quantenmechanik – der Anfang

... war Ende des 19.Jh. in keiner Weise vorhersagbar

Die Physik war überaus erfolgreich und „abgeschlossen“ (um 1875)

Niemand sah eine Notwendigkeit für irgendeine Revolution

2. Quantenmechanik – der Anfang

... war in keiner Weise vorhersagbar

Die Physik war abgeschlossen und überaus erfolgreich (um 1875)

Niemand sah die Notwendigkeit für irgendeine Revolution

Die Revolution kam von einer völlig überraschenden Seite:
Aus der Thermodynamik, Problem der Wärmestrahlung

Rückblick: Kiel um 1860



Jahnshof, Küterstraße 17

Plancks Kindheit in Kiel, 1858-1867

Geboren in Kiel am 23. April 1858

Vater Julius Wilhelm Planck (1817-1900), Juraprofessor in Kiel

Mutter Emma Planck, geb. Patzig

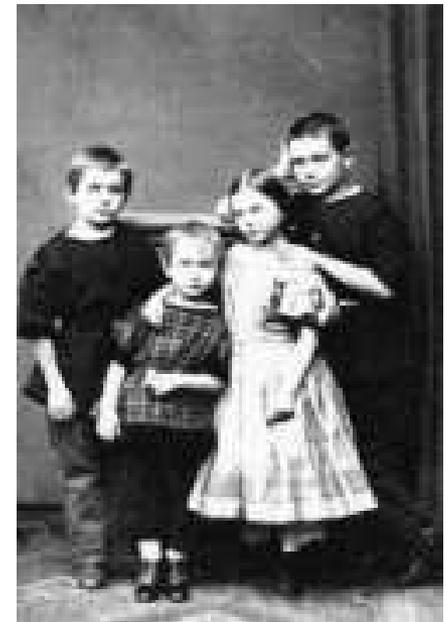
Onkel Gottlieb Planck (1824-1907), Jurist

Großvater Gottlieb Jakob Planck (1751-1833), Theologe



die Eltern

Max und seine
Geschwister
1862



Physikstudium

Schule in München: 1867-1874

Studium: 1874-1879, München und Berlin

Helmholtz, Kirchhoff, Weierstraß

Selbststudium: Clausius

Promotion 1879: über 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Privatdozent: 1879-1885, München

Weiter mit Physik?



Max Planck nach dem Physikstudium



„Studienberatung“ bei Prof. Jolly in München
(„auf der Höhe der Zeit stehender Physiker“) um 1877

*„Theoretische Physik näherte 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.

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

Max Planck nach dem Physikstudium



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

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

Professor an der CAU Kiel

nach mehreren Jahren vergeblichen Wartens auf Berufung

1885: Ruf nach Kiel

Extraordinarius für Theoretische Physik,

für Planck: „Erlösung“

Professor an der CAU Kiel

1886 Gründung seiner Familie:

Heirat seiner Jugendfreundin Marie Merck

In Kiel entstehen wichtige 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

1889: Ruf an Universität Berlin

Die 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

Die Physik um 1875

Strahlung
Bewegter Körper



Wärme-
Strahlung

Äther

Elektrodynamik

Elektrische und
Magnetische Vorgänge,
Elektro-magn. Wellen

Mechanik

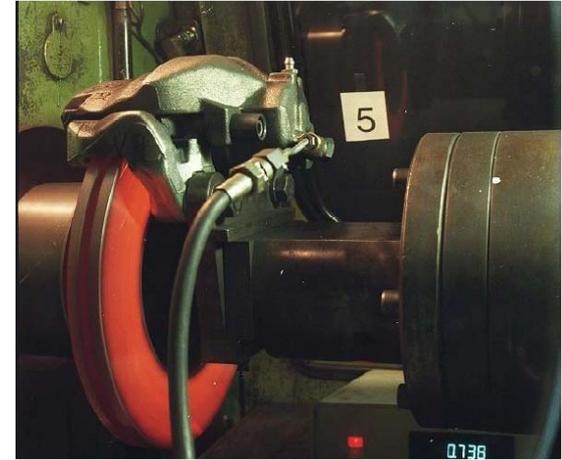
Dynamik der Körper
und Planeten,
Flüssigkeiten,
Elastischen Medien

Wärmestoff

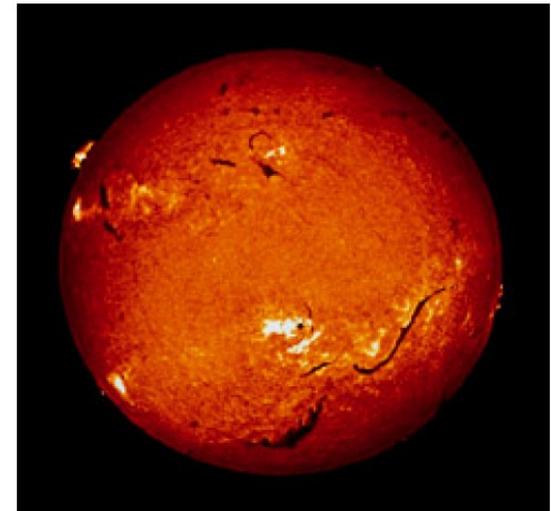
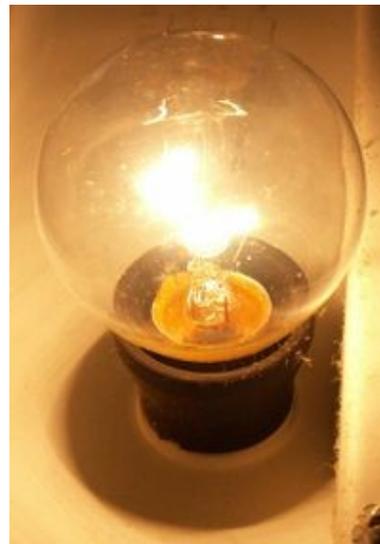
Thermodynamik

Wärme, Gase,
Wärme- und Kälte-
maschinen

Wärmestrahlung

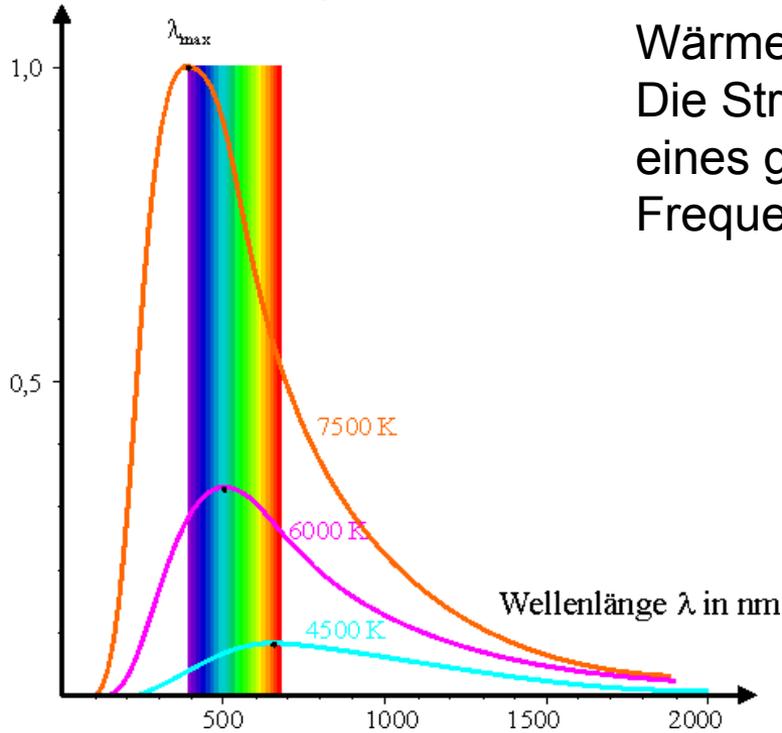


- Jeder Körper strahlt
- universeller Zusammenhang zwischen Farbe und Temperatur (Wien)

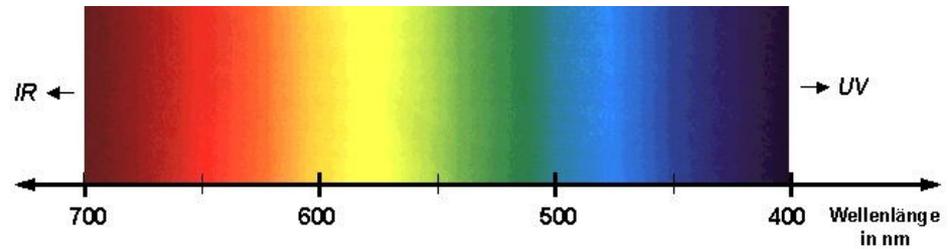


Wärmestrahlung

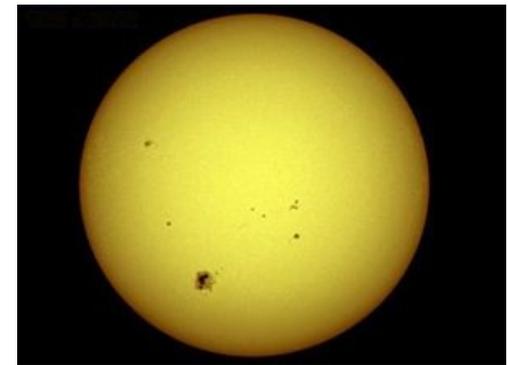
Strahlungsleistung $P_{\lambda,T}$ im Intervall $[\lambda; \lambda+\Delta\lambda]$



Wärme, Licht: elektromagnetische Wellen (Maxwell, Hertz)
Die Strahlungsleistung (\sim Energiedichte der Strahlung) eines glühenden Körpers ist über einen bestimmten Frequenzbereich verteilt und hängt von der Temperatur ab.

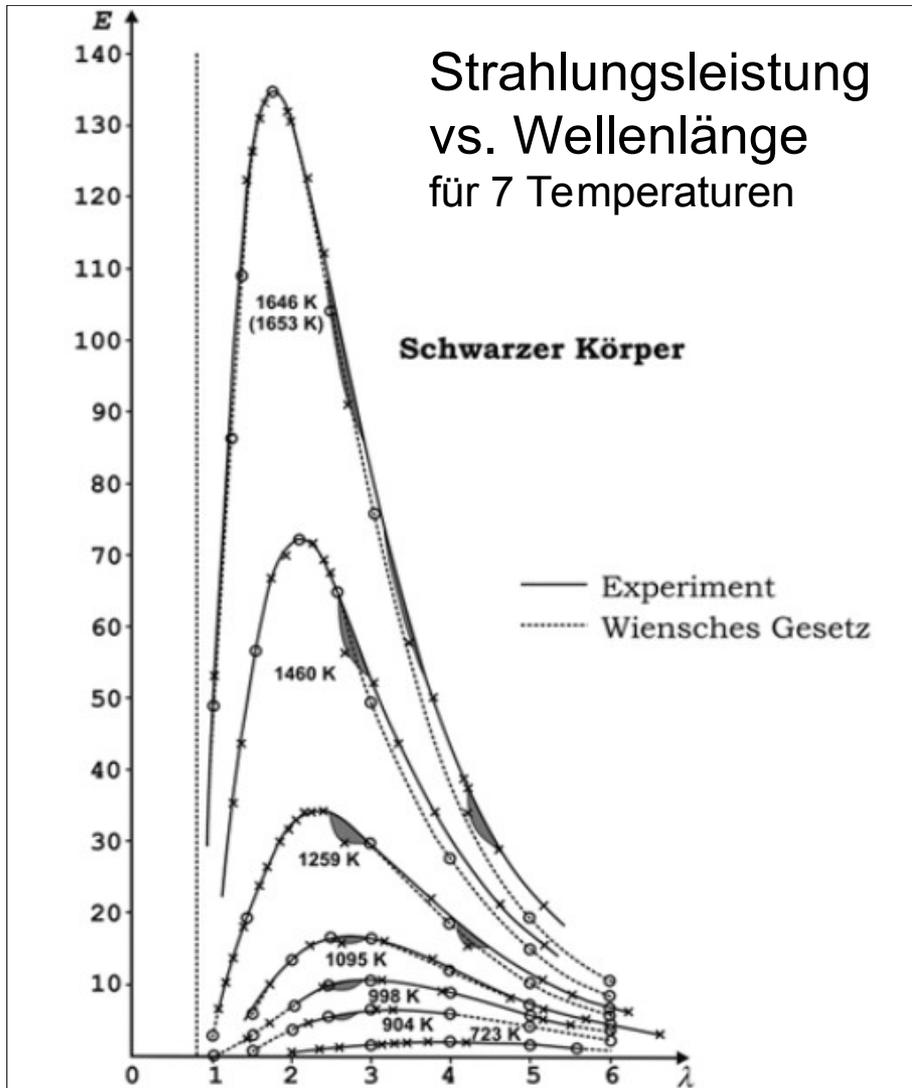


Wichtige Anwendung: Bestimmung der Temperatur von Sternen



Sonne: 5.778 K

Experiment zeigt Ungenauigkeit der Theorie



Neue Messungen an der PTR Berlin:
O. Lummer, E. Pringsheim,
VhDPG 2, 163-180 (1900)

Hohe Genauigkeit: signifikante
Abweichungen der Theorie von Wien
bei hohen Wellenlängen

Planck findet die Strahlungsformel

(DPG, Berlin, 19.10. 1900)

I. Wien-Formel
(große Frequenzen)

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

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

II. Rayleigh-Jeans-Gesetz
(kleine Frequenzen)

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

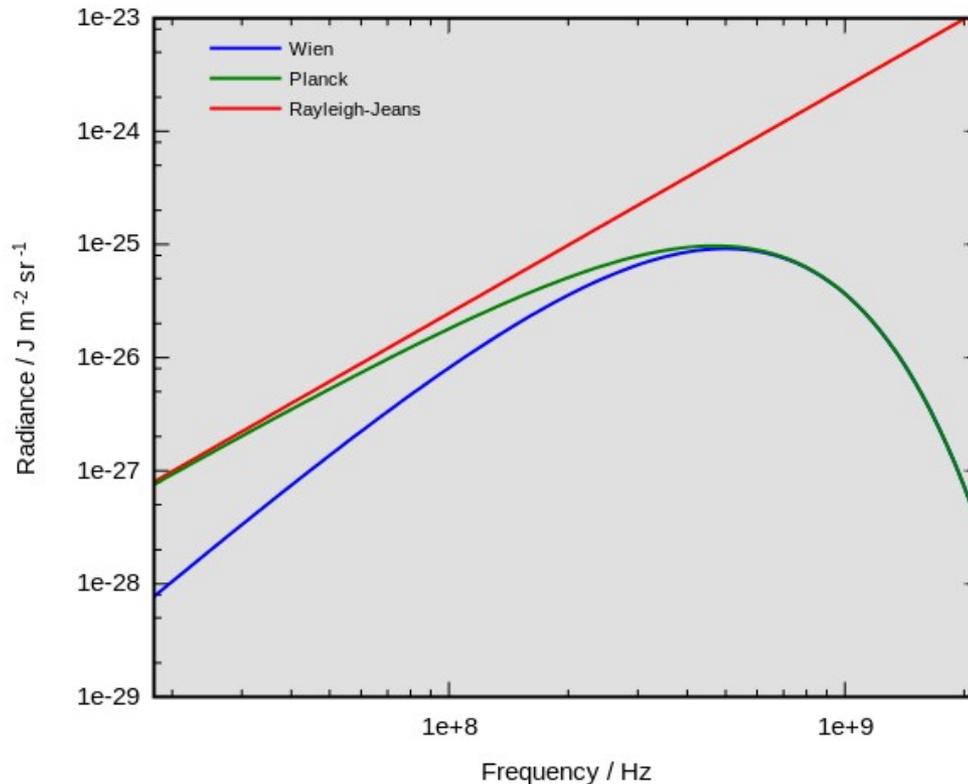
$$R = -U^2 / d$$

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

Plancks Strahlungsformel verbindet Wien und Rayleigh-Jeans



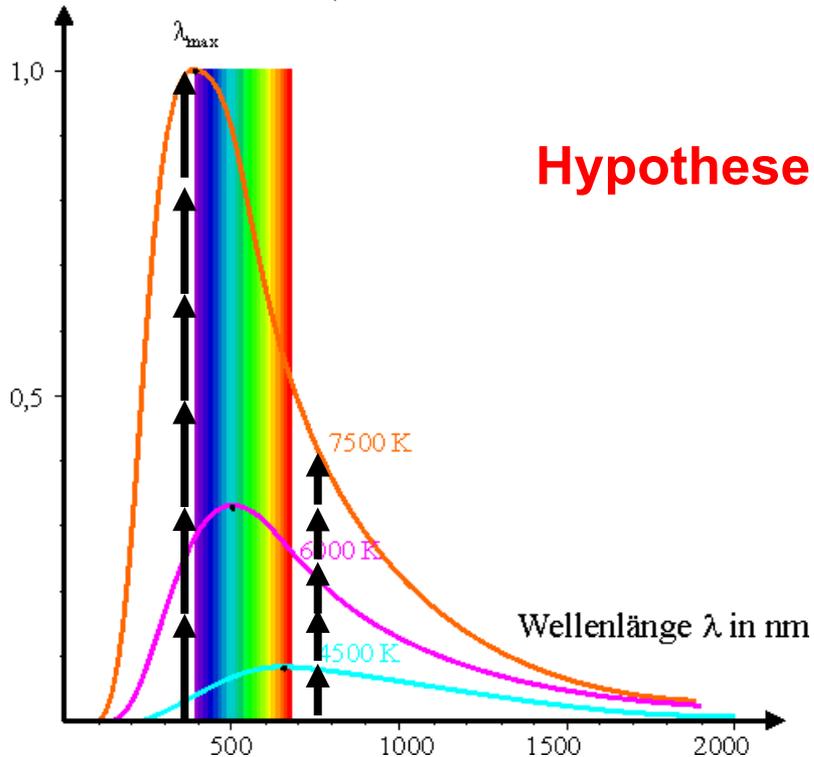
Aber: physikalische Erklärung für die Formel fehlte

Plancks Herleitung

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

Planck berechnet die wahrscheinlichste Verteilung der Strahlungsenergie im „Schwarzen Körper“

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



Hypothese: die Energie in jeder Farbe besteht aus identischen Portionen – „Energiequanten“

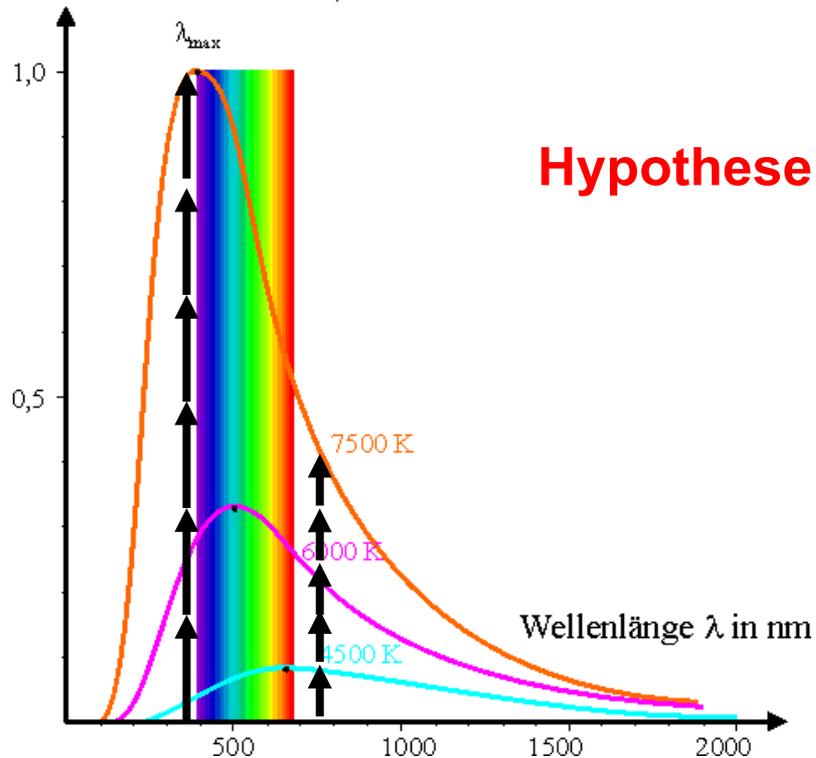
$$U_v = N_v \cdot \varepsilon_v = N_v \cdot h\nu$$

Plancks Herleitung

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

Planck berechnet die wahrscheinlichste Verteilung der Strahlungsenergie im „Schwarzen Körper“

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



Hypothese: die Energie in jeder Farbe besteht aus identischen Portionen – „Energiequanten“

$$U_\nu = N_\nu \cdot \varepsilon_\nu = N_\nu \cdot h\nu$$

14. Dezember 1900, DPG, Berlin
„Geburtsstunde der Quantentheorie“

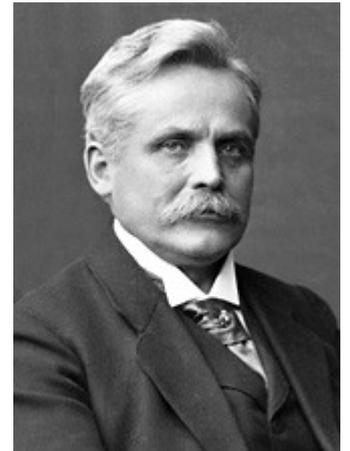
Allgemeine Skepsis

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

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*"

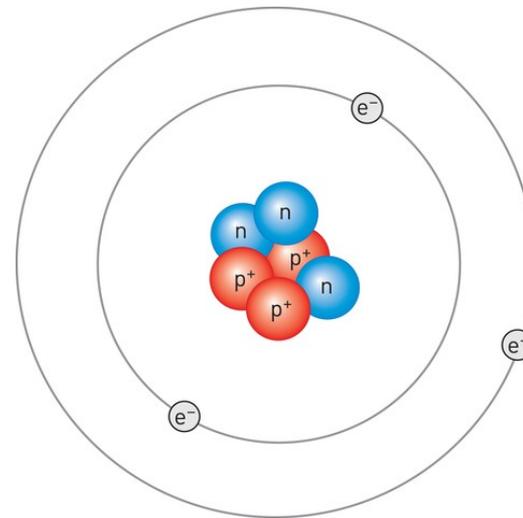


Quanten-Ideen finden Anwendung

Photoeffekt: Einstein 1905

Planetenmodell des Atoms: Niels Bohr 1916

Hypothese der Existenz
strahlungsfreier Bahnen
(Quantisierung der Wirkung)



1918: Nobelpreis an Max Planck*

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

*verliehen 1919

1918: Nobelpreis an 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 an 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

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

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)



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



Inhalt

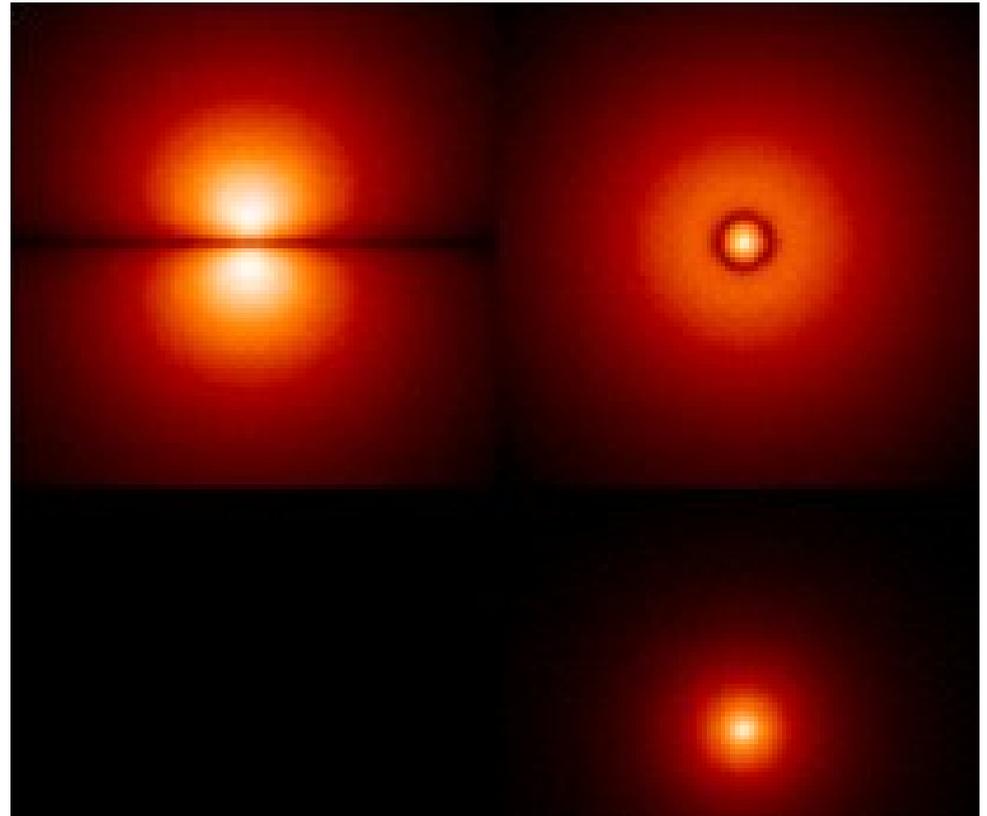
- 1. Quantenphysik heute: Grundlage von Wissenschaft und Technologie**
- 2. Max Planck und die Entstehung der Quantentheorie**
- 3. Moderne Entwicklungen der Quantenmechanik**
- 4. Max Planck-Ehrung in Kiel**

Quantenmechanik der Atome und Moleküle

Wasserstoff-Atom

2p-, 2s-Orbitale

1s-Orbital (Grundzustand)



Das Elektron ist delokalisiert!!

Das Bohr-Atom ist leer

Kern: $10^{-15} m$

Elektronen“radius“
im Grundzustand: $10^{-10} m$

Das Bohr-Atom ist leer

Kern: 10^{-15} m

Elektronen“radius“
im Grundzustand: 10^{-10} m

Vergrößern um Faktor 10^{12}



ca. 100m von Tor zu Tor,

Holsteinstadion, Quelle: Wikipedia

Das Quanten-Atom ist *halb leer*

Kern:	$10^{-15} m$	$1 mm$	
Elektronen“radius“ im Grundzustand:	$10^{-10} m$	$100 m$	(40-170)m

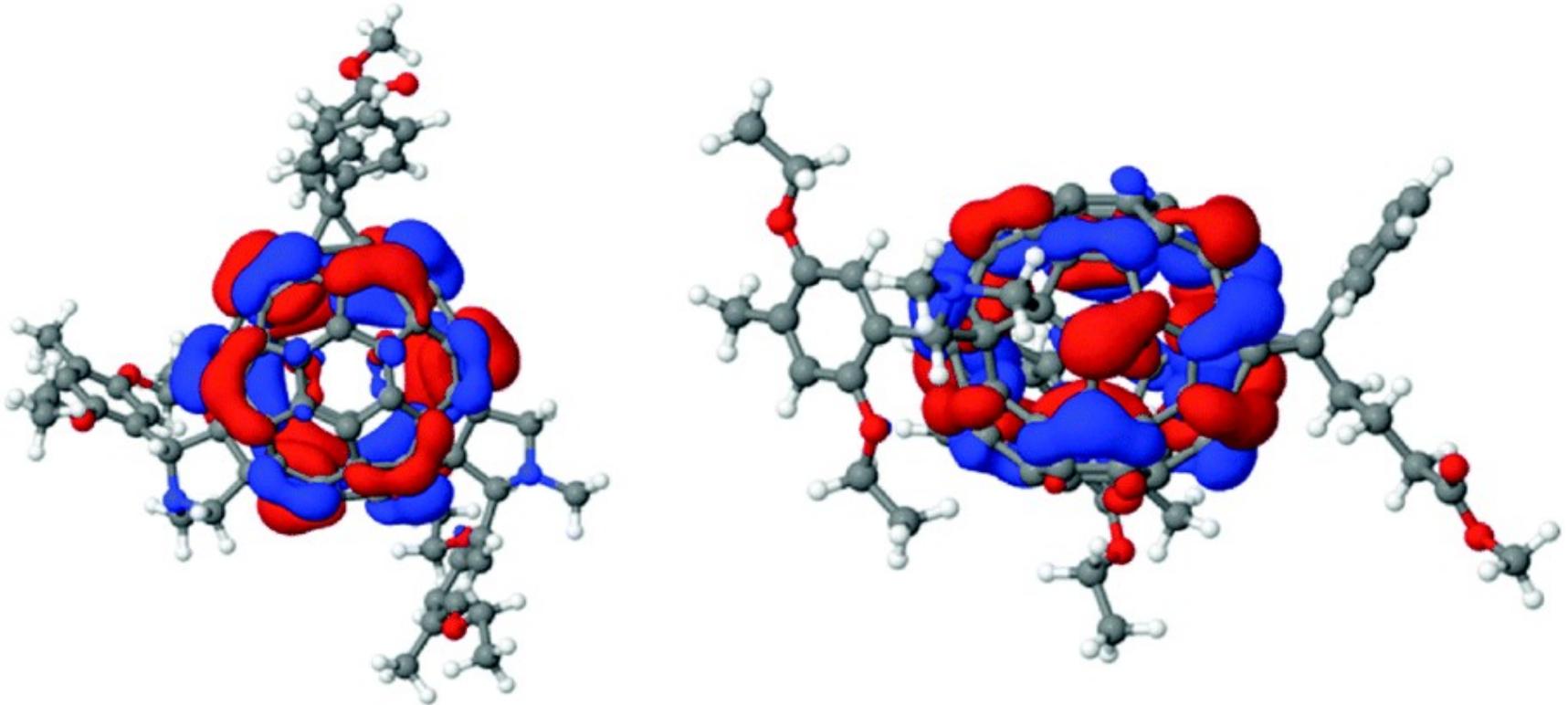
Vergrößern um Faktor 10^{12}



ca. 100m von Tor zu Tor,

Holsteinstadion, Quelle: Wikipedia

Quantenmechanik der Atome und Moleküle

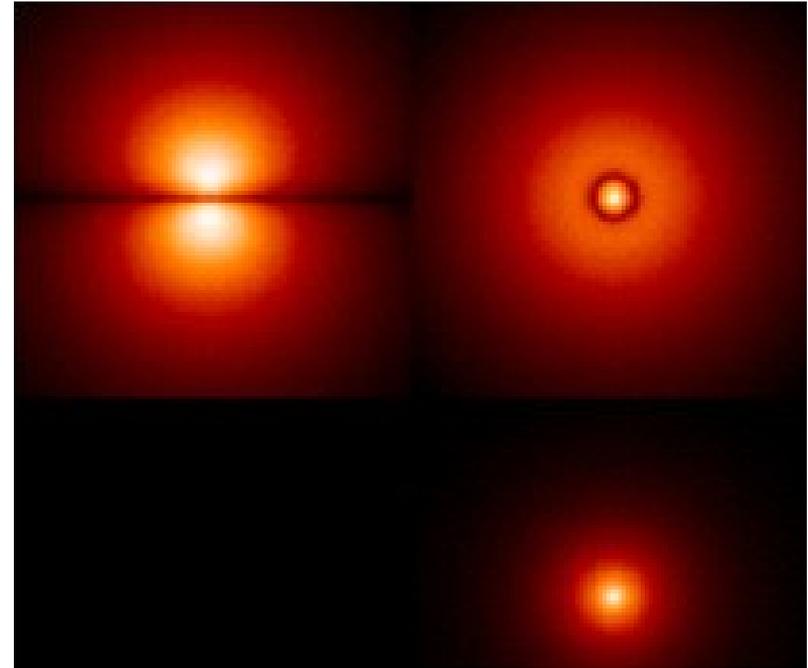
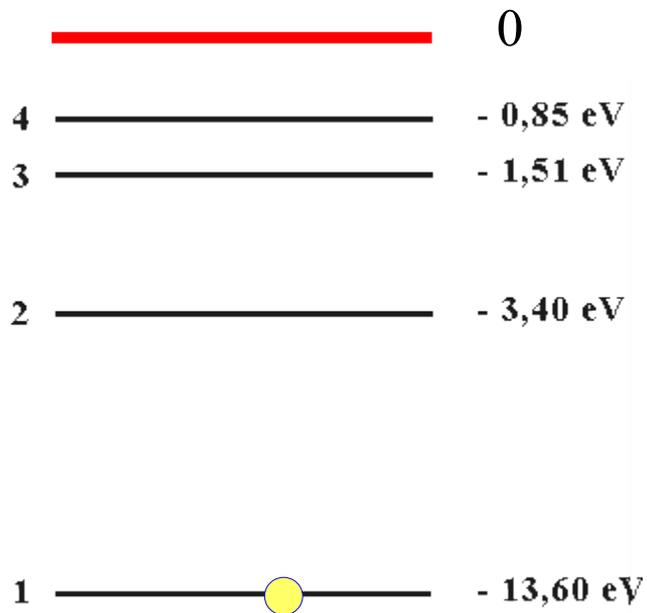


Dichtefunktional-Theorie-Resultat

3 LUMO Front-Orbitale (the most probable PPCBMB adducts, phenyl-C61-butyric acid methyl ester), Stephen et al., Chemical Communications 2016

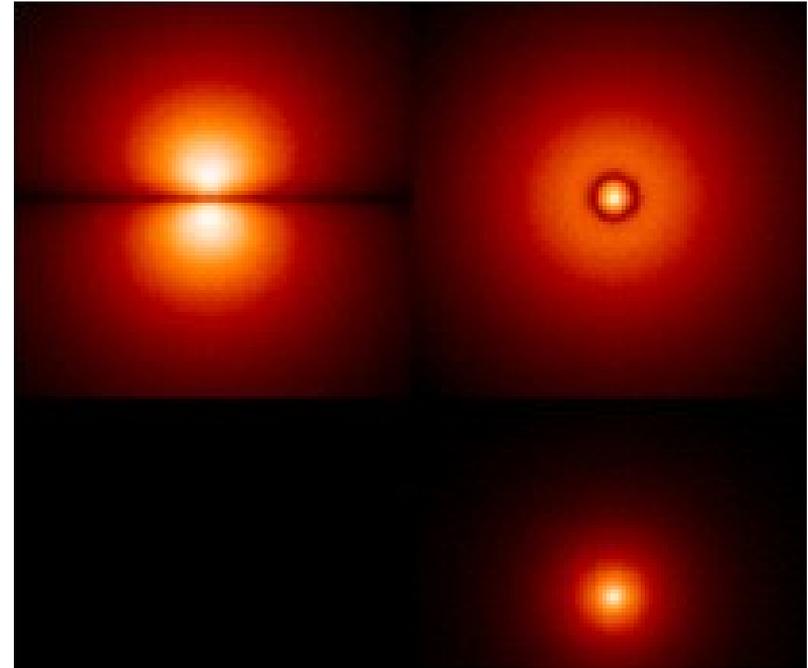
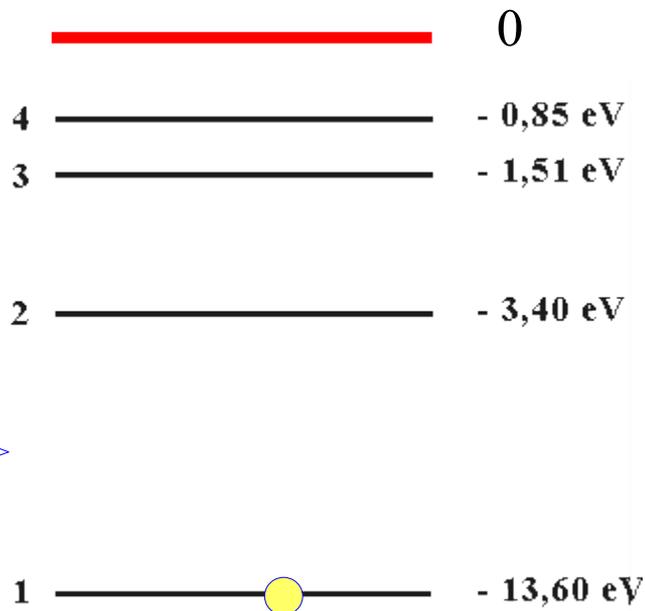
Atom, Quantisierung, Photonen (Beispiel: H)

Energie des Elektrons
quantisiert



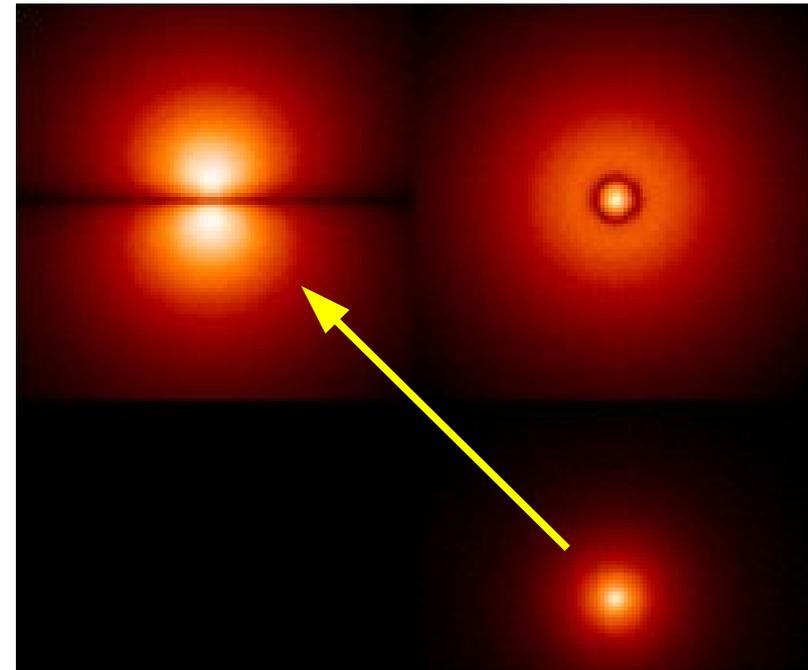
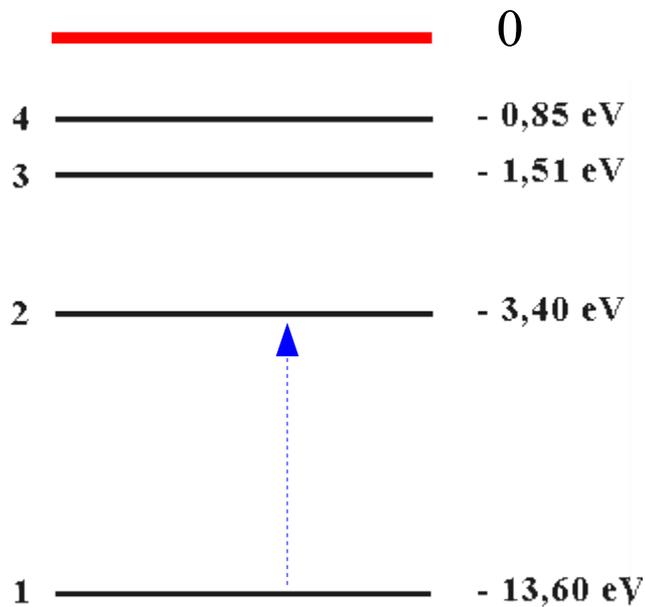
Atom, Quantisierung, Photonen (Beispiel: H)

Energie des Elektrons
quantisiert



Atom, Quantisierung, Photonen (Beispiel: H)

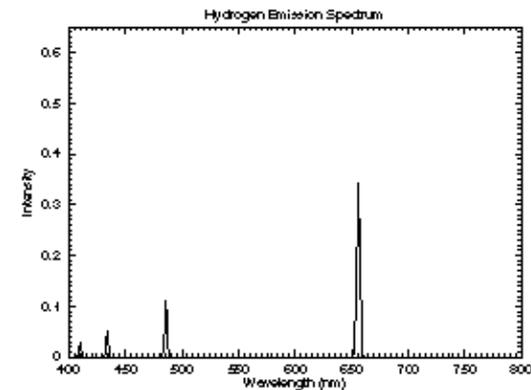
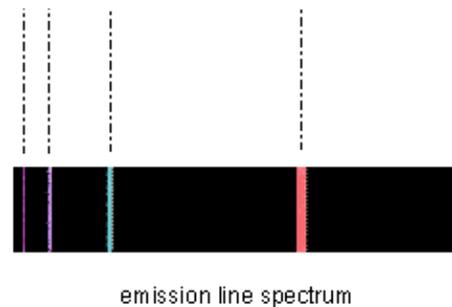
Energie des Elektrons
quantisiert



Übergang in neuen Zustand
„ausgewählt“ vom Licht

Photonen und Atome

Emission von Gasen:
Atome emittieren dieselben
charakteristische Frequenzen
(bei Abregung der Elektronen)

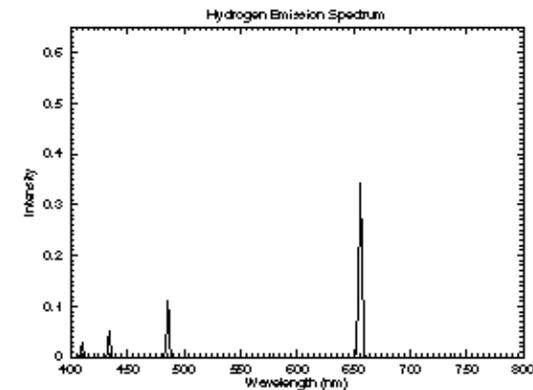
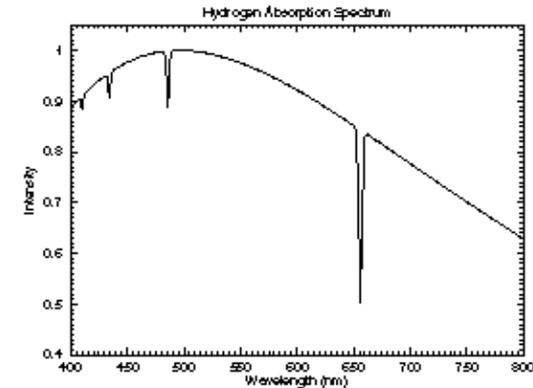
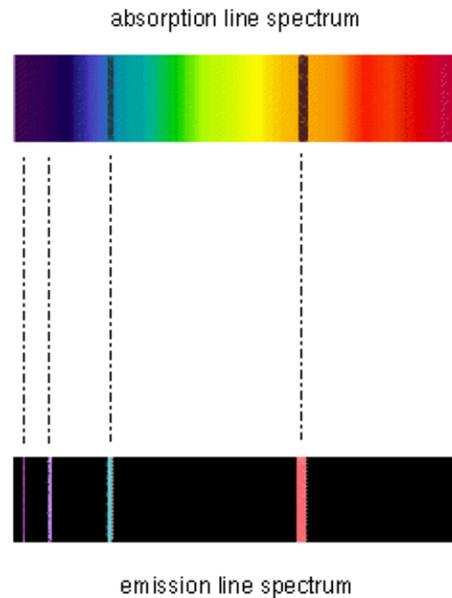


Atom durch Spektrum (Linien) eindeutig bestimmbar
Alle Atome eines Elements **identisch**: auf Erde und im Universum

Photonen und Atome

Planck-Spektrum von
Sonnenlicht auf Erde:
Atome absorbieren
charakteristische Frequenzen

Emission von Gasen:
Atome emittieren dieselben
charakteristische Frequenzen



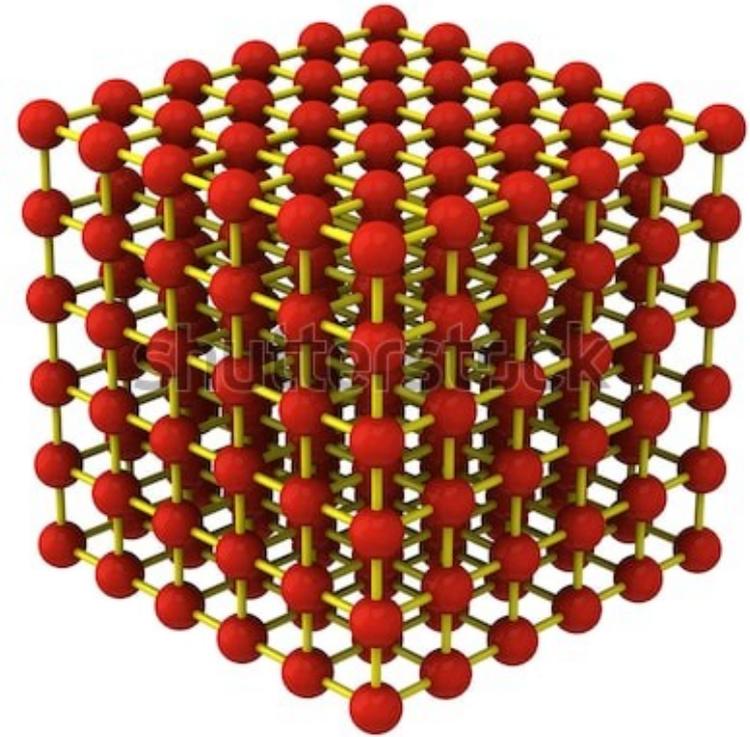
Atom durch Spektrum (Linien) eindeutig bestimmbar
Alle Atome eines Elements **identisch**: auf Erde und im Universum

Quantentheorie der elektrischen Leitung

Quasifreie Elektronen im Metall

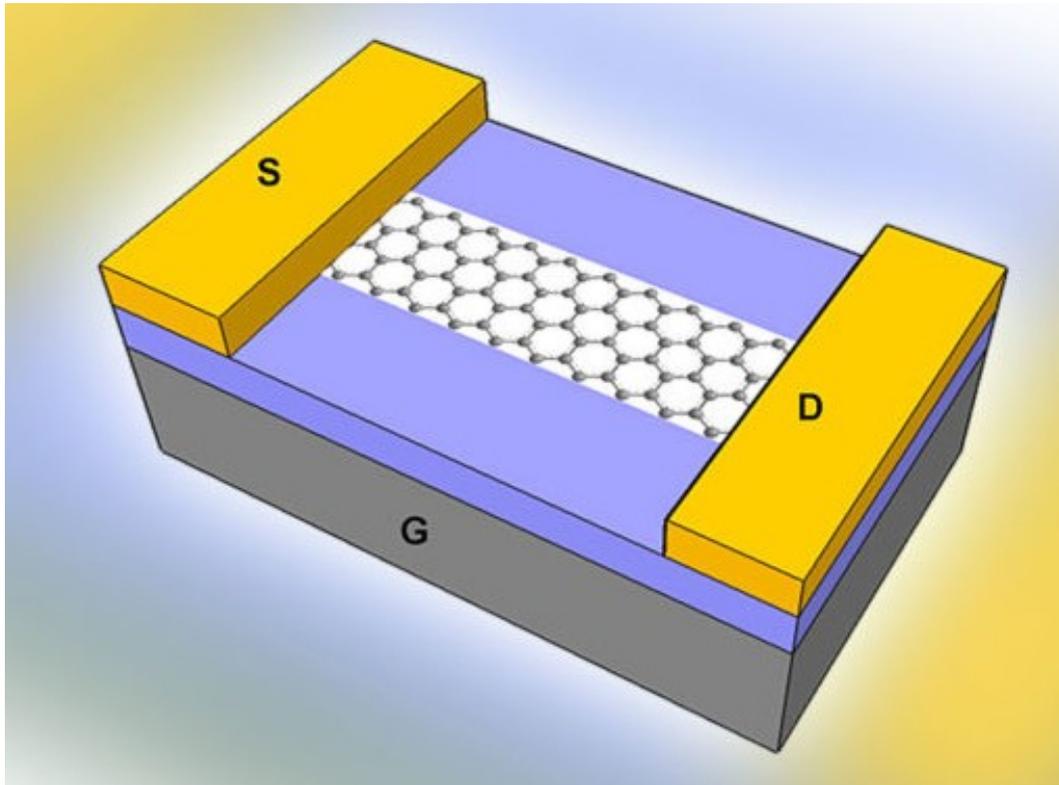
Für ausgewählte Energie-Bänder

→ Video



www.shutterstock.com • 106110071

Graphen-Nanobänder: Nanotechnologie der Zukunft?



Transistoren
optische Bauelemente

Laseranregung → Video
J.-P. Joost et al.,
phys. Stat. Sol. (b) 2019

Quelle: Coherent news,
27. Dez. 2017

Hohe Elektronen-Beweglichkeit, wie Graphen (Nobelpreis 2010)
Einstellbare Bandlücke, starke Elektron-Elektron-Korrelationen

Quanteneffekte auf galaktischen Skalen?

Astronomische Beobachtungen: das Universum expandiert
(Rotverschiebung, Dopplereffekt)

Hypothese: Materie war vor 13.7 Mrd. Jahren (fast) in einem Punkt konzentriert („Urknall“)

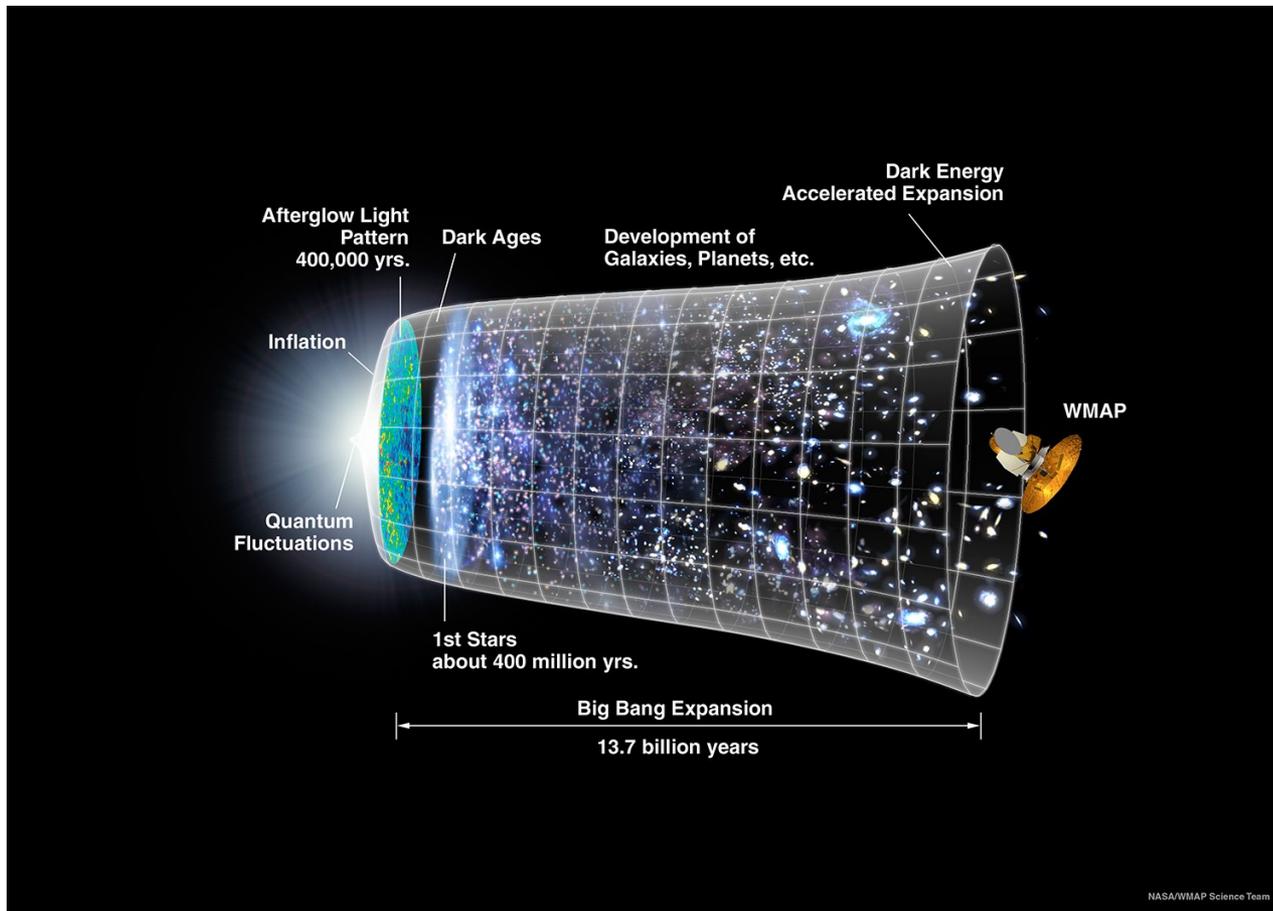
Quanteneffekte auf galaktischen Skalen?

Elektronen, Quarks, Photonen



heutige Materie

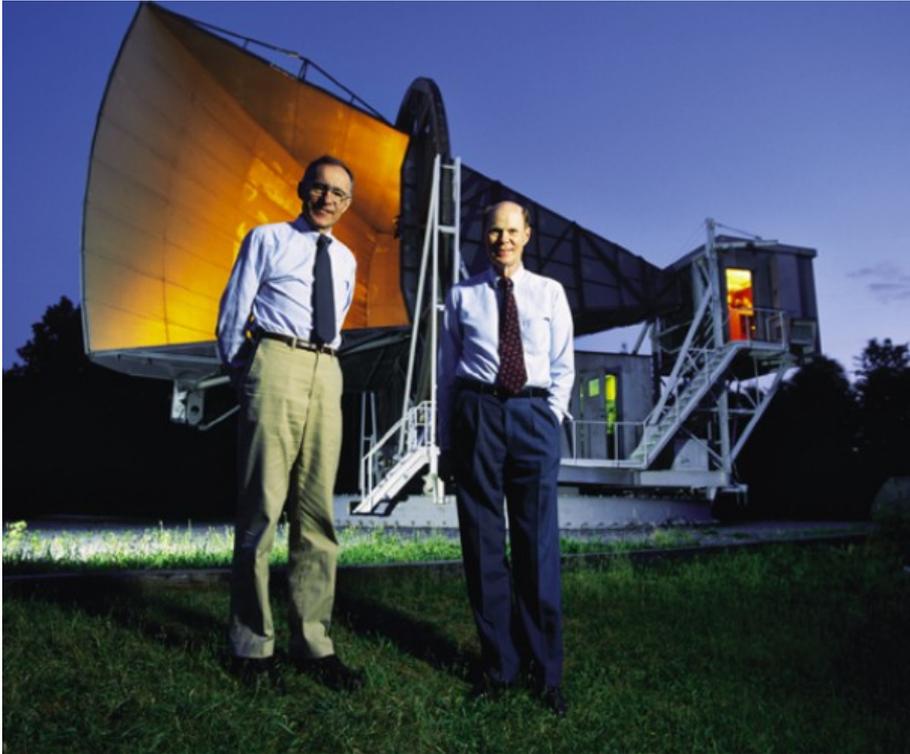
ein paar
Photonen
haben
überlebt!



Alpher, Herman,
Gamov u.a.
1947

Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung

1964: Penzias, Wilson



„Horn-Antenne“, Radiowellen
störendes Rauschen...

Expansion und Abkühlung $3000\text{K} \rightarrow 2.73\text{K}$

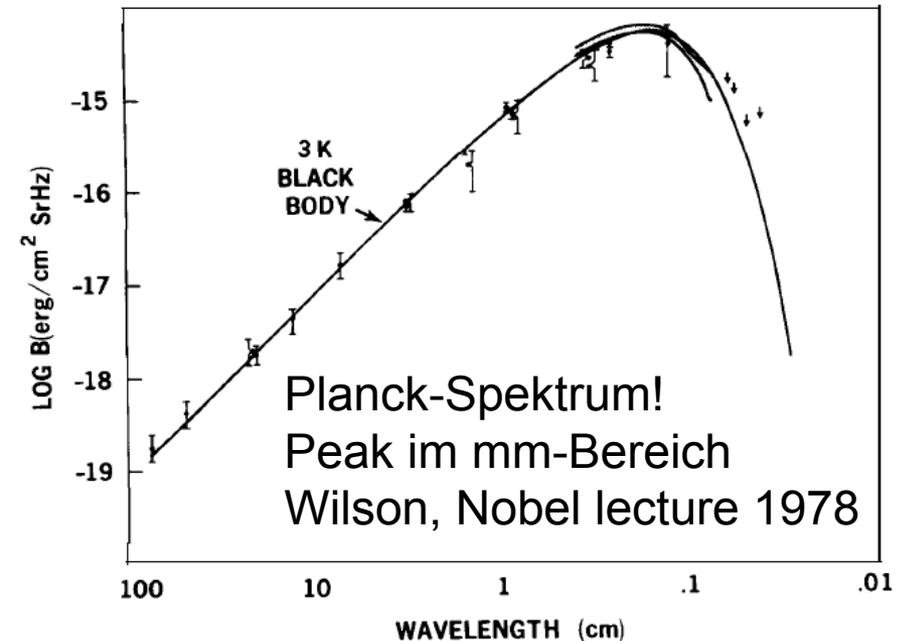
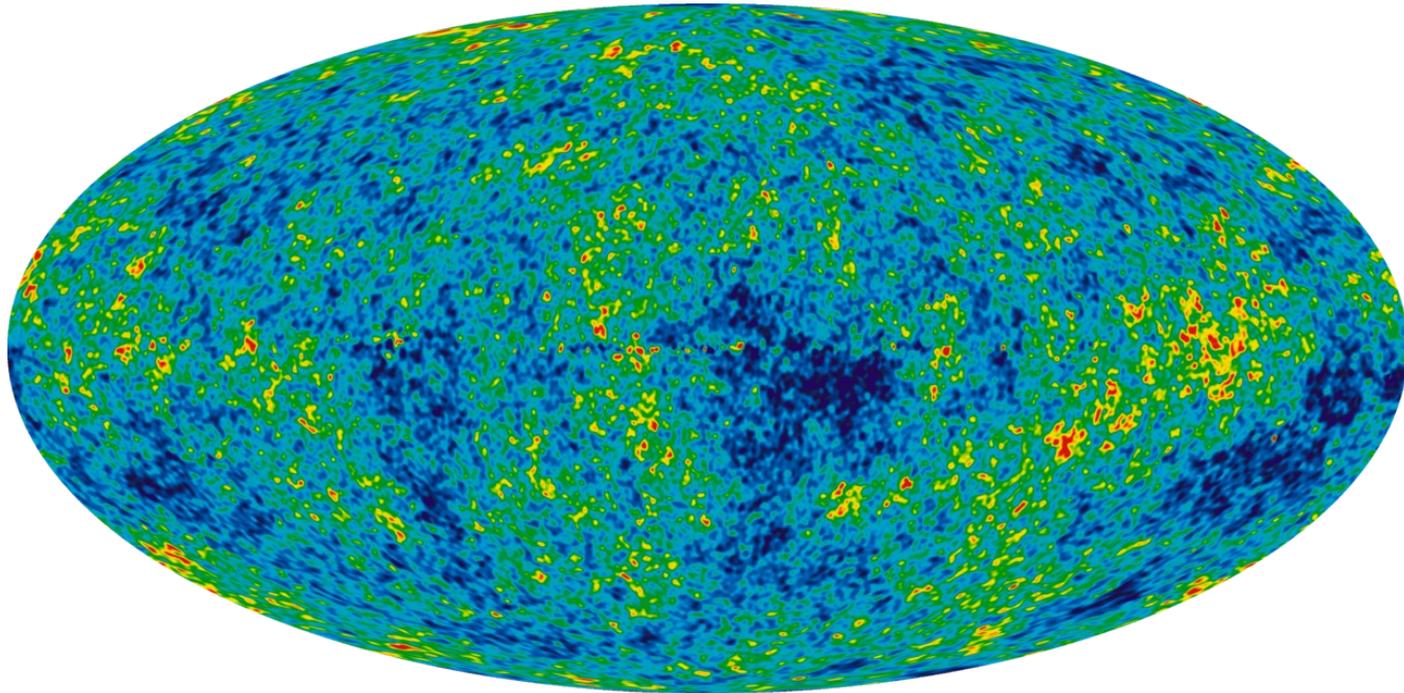


Fig. 12 Measurements of the spectrum of the cosmic microwave background radiation.

Fenster zum Universum vor 13.7 Mrd. Jahren!



2006: Physik-Nobelpreis für Mather und Smooth, COBE-Satellit (1989-93)

Heute: Satelliten messen Anisotropie, lokale Masse-Verteilung etc.

WMAP (2001-10), Planck (2009-13)

Quelle: Wikipedia

Planck-Satellit-Daten:

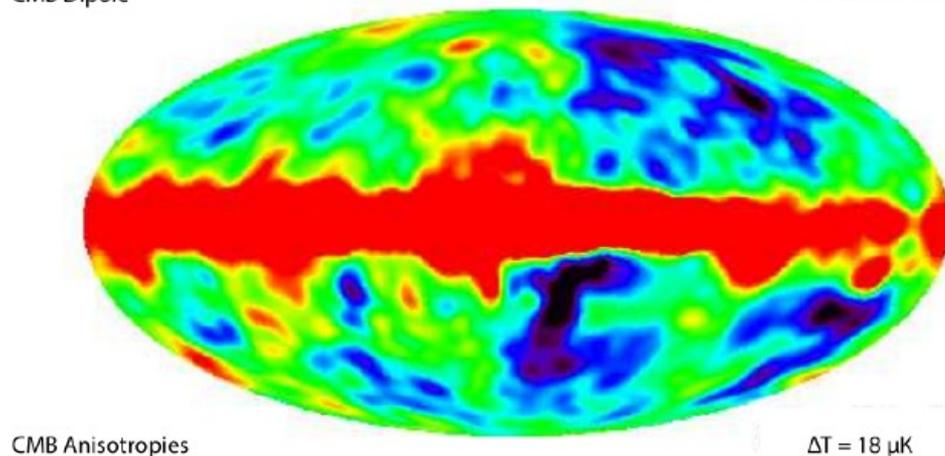
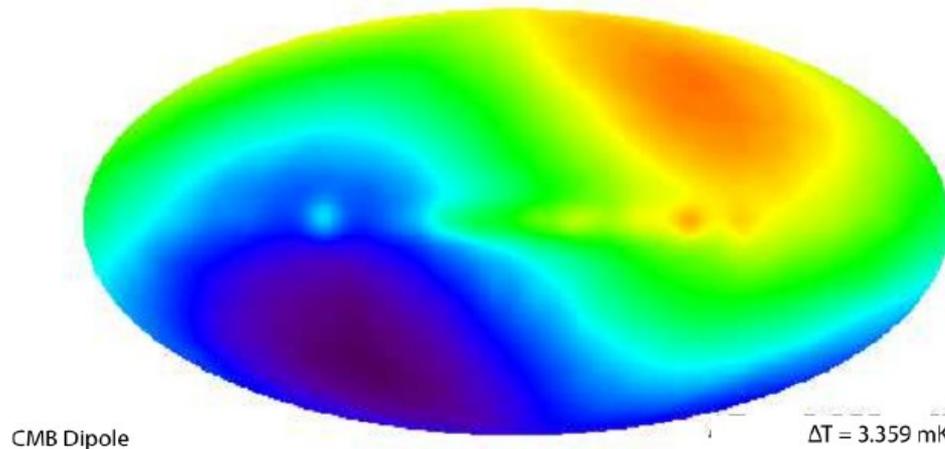
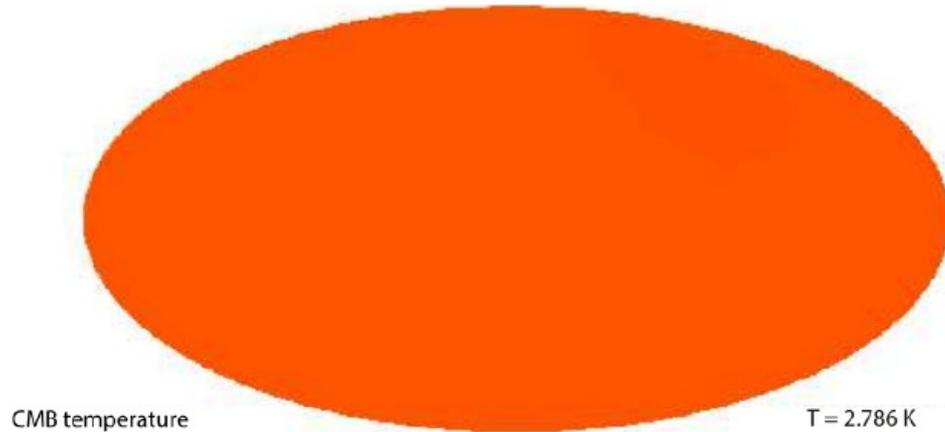
Das Universum: die perfekte Wärmestrahlungs-Quelle!

Mehr als 2000 Multipolmomente

Präzise kosmologische Daten:

Alter des Universums:
(13.799 \pm 0.021) Mrd. Jahre

Zeitpunkt der Entkopplung:
(377200 \pm 3200) Jahre



Zusammenfassung und Ausblick



*„Ich hege nicht den Wunsch,
Neuland zu entdecken ... 1877*

... 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.“ 1920

Zusammenfassung und Ausblick



*„Ich hege nicht den Wunsch,
Neuland zu entdecken ... 1877*

... 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.“ 1920

Quantenmechanik 2018:

- Revolution von Wissenschaft und Technik
- einzigartiges Beispiel wissenschaftlicher Entdeckung und persönlicher Integrität.
- Ein Schatz für Kiel und das Land.

Zusammenfassung und Ausblick



... Ein Schatz für Kiel und das Land

Max Planck und Schleswig-Holstein

Seit 1889 wirkte Planck in Berlin

damals: Zentrum der Wissenschaft

Arbeiten zur Strahlungsformel,

Bekanntgabe seiner Entdeckung im Jahr 1900

Wirkungsort Plancks bis 1944

Welche Rolle spielten Kiel und Schleswig-Holstein?

Max Planck und Schleswig-Holstein (2)

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

1920, anlässlich der Nobelpreis-Verleihung (Lebenslauf)

Planck-Ehrungen in Kiel

1944 Ehrensenator der CAU Kiel

1947 Ehrenbürgerwürde der Stadt Kiel

Geburtshaus in der Küterstraße zerstört
an seiner Stelle steht ...

... die (ehemalige) HSH-Nordbank



Planck-Ehrung in Kiel 2007/2008

Umfangreiches gemeinsames Programm
von Stadt Kiel, CAU und Max-Planck-Schule

Auftakt: 4. 10. 2007:
Gedenkfeier der Stadt
zum 60. Todestag von Max Planck

Jan-April 2008: hochkarätige
wissenschaftliche Vorträge,
Schülervorlesungen, Ausstellungen u.v.a.



Planck und die Quantenmechanik

Führungen, Schülervorlesungen...



Im Rats-Saal der Stadt Kiel, April 2008

Planck-Ehrung in Kiel 2007/2008

Umfangreiches gemeinsames Programm
von Stadt Kiel, CAU und Max-Planck-Schule

Auftakt: 4. 10. 2007:

Gedenkfeier der Stadt
zum 60. Todestag von Max Planck

Ansprache des „Physikers vom Dienst“

**Vorschlag einer angemessenen Ehrung:
Max-Planck-Museum**



Max-Planck-Ausstellung Im Physikzentrum der CAU



Physikzentrum der CAU Kiel, Leibnizstrasse, Eröffnung: 14.12. 2013

www.theo-physik.uni-kiel.de/~bonitz/planck.html

Max-Planck-Ausstellung Im Physikzentrum der CAU



Physikzentrum der CAU Kiel, Leibnizstrasse, Eröffnung: 14.12. 2013

www.theo-physik.uni-kiel.de/~bonitz/planck.html → s. flyer



**Initiative
Max-Planck-Museum
Kiel**

www.theo-physik.uni-kiel.de/~bonitz/planck.html

Genauigkeit der Quantenmechanik

Übereinstimmung mit dem Experiment (Beispiele):

- Wärmestrahlung (Planck-Theorie): exzellente Übereinstimmung
- Struktur der Atome: genauestens beschrieben durch Q-Mechanik
- Quanten-Elektrodynamik: Feinstrukturkonstante (EM Wechselwirkung)
relative Abweichung Experiment vs. Theorie: $10/1.000.000.000$

Genauigkeit der Quantenmechanik

Übereinstimmung mit dem Experiment (Beispiele):

- Wärmestrahlung (Planck-Theorie): exzellente Übereinstimmung
- Struktur der Atome: genauestens beschrieben durch Q-Mechanik
- Quanten-Elektrodynamik: Feinstrukturkonstante (EM Wechselwirkung)
relative Abweichung Experiment vs. Theorie: 10/1.000.000.000

Vorhersage neuer Effekte und Teilchen:

Positron (Antimaterie): theoretische Vorhersage P. Dirac 1928
Entdeckung: C.D. Anderson 1932

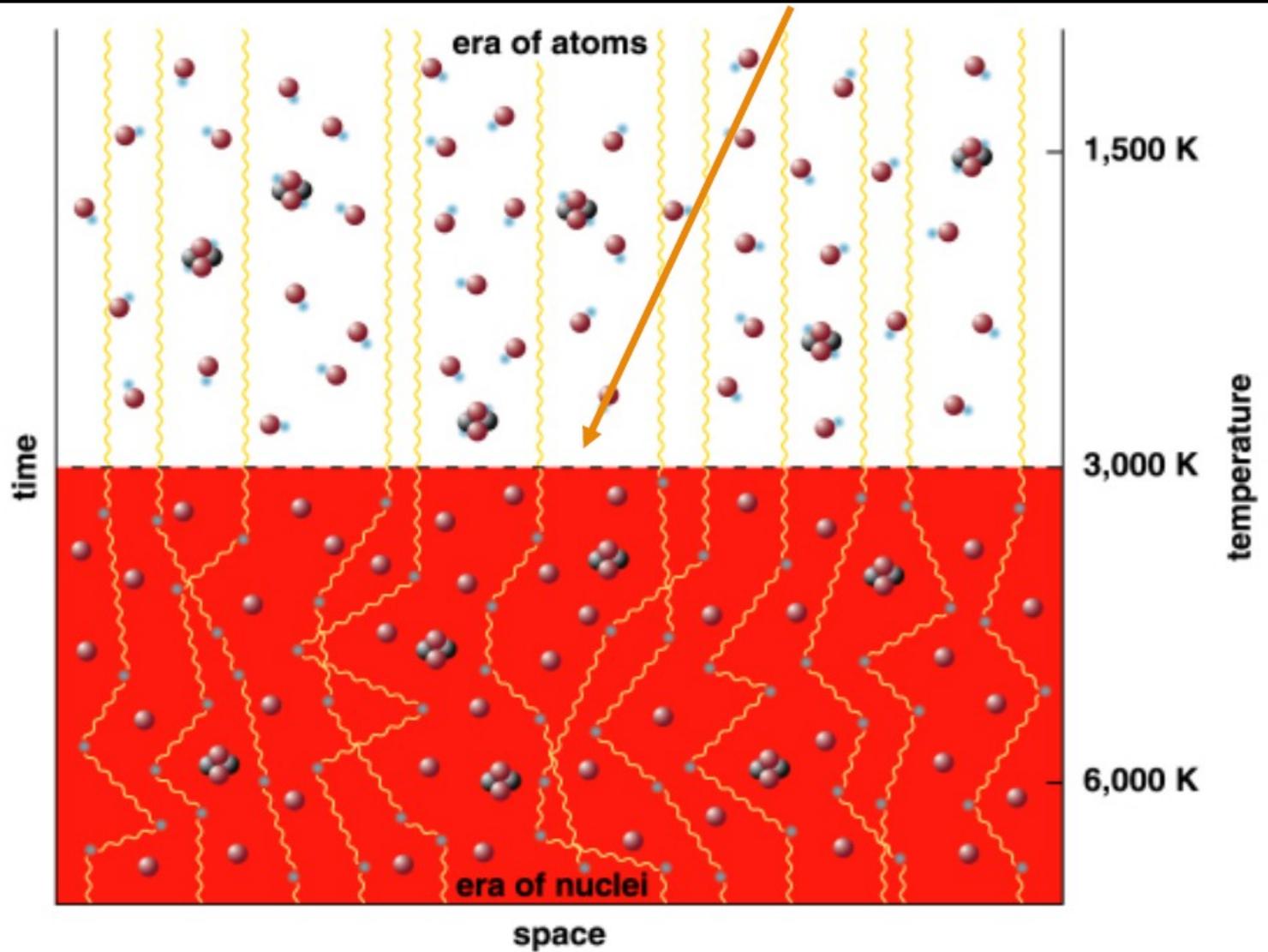
Higgs-Boson: Vorhersage Englert, Higgs u. andere (1964)
Entdeckung: LHC (CERN), 2003-2012 (5.9 sigma, 22xZahl)

Relic radiation from the last scattering surface: CMB

electrons
attached to
atoms,
photons
stream
through

380 000 yrs

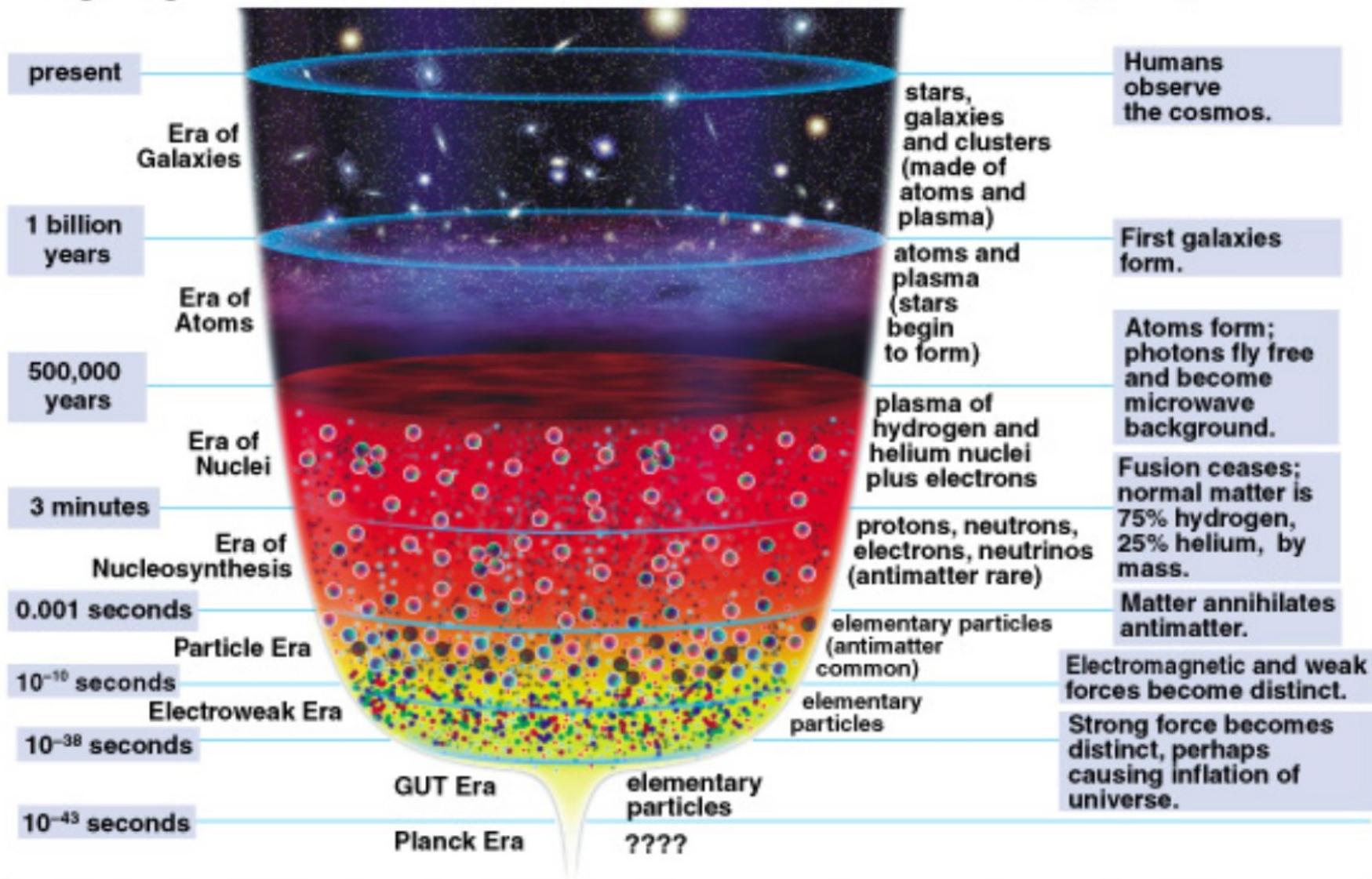
electron
plasma
"soup"
traps
photons



Copyright © Addison Wesley.

Time Since Big Bang

Major Events Since Big Bang



neutron
proton



electron
neutrino



antiproton
antineutron



antielectrons



quarks



Die Planck-Einheiten

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

Plancks Strahlungsgesetz enthält zwei Konstanten \hbar, k_B

genau festgelegt durch das Experiment

Max Planck [1]: diese Konstanten werden „... ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch außerirdische und außermenschliche Culturen notwendig behalten...“

[1] Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Band 5, S. 479, 1899

Das Plancksche Einheitensystem (1899)

Planck-, Boltzmann-Konstante, Lichtgeschwindigkeit und Gravitationskonstante G ersetzen das konventionelle 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...“