

Was ist und wozu dient der Kernspin?

Markus Schwoerer, Universität Bayreuth
BAdW, 5. April 2019

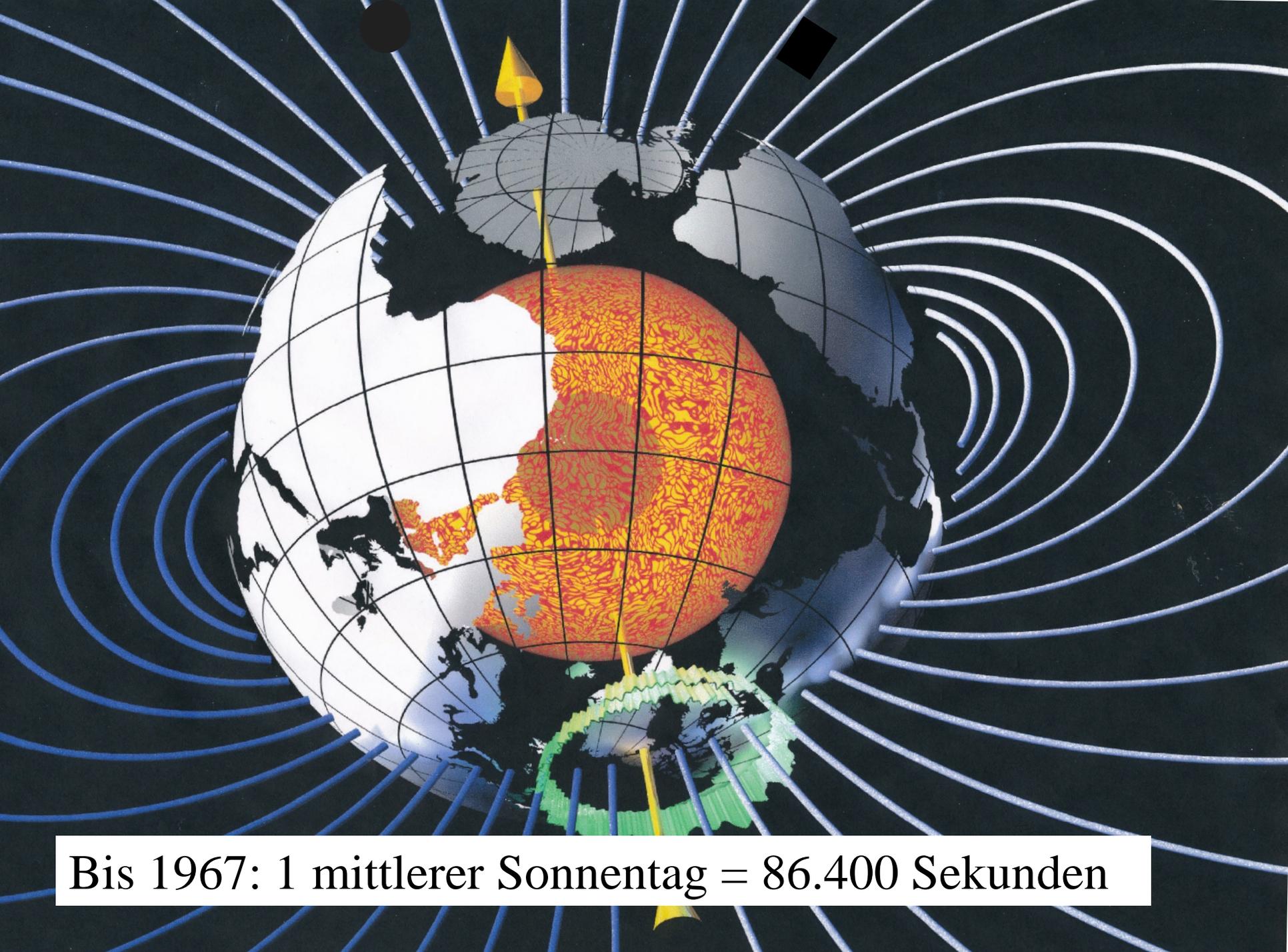
Der Drehimpuls eines makroskopischen Körpers

Hyperfeinstruktur in den Spektren von Atomen

Kernspinresonanz (NMR) von Molekülen

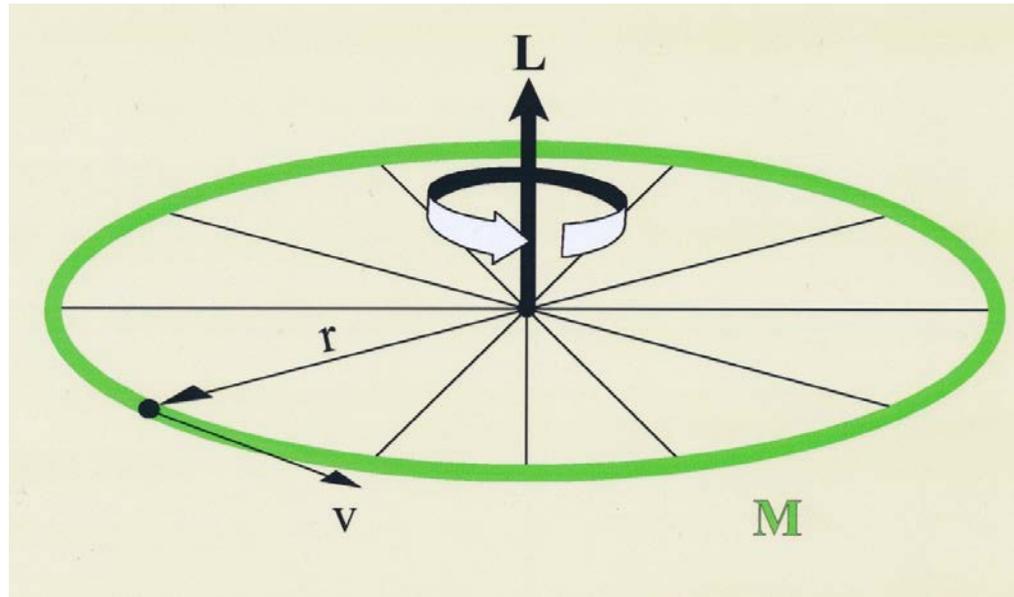
Magnetresonanz-Tomographie (MRT)

Kristalle



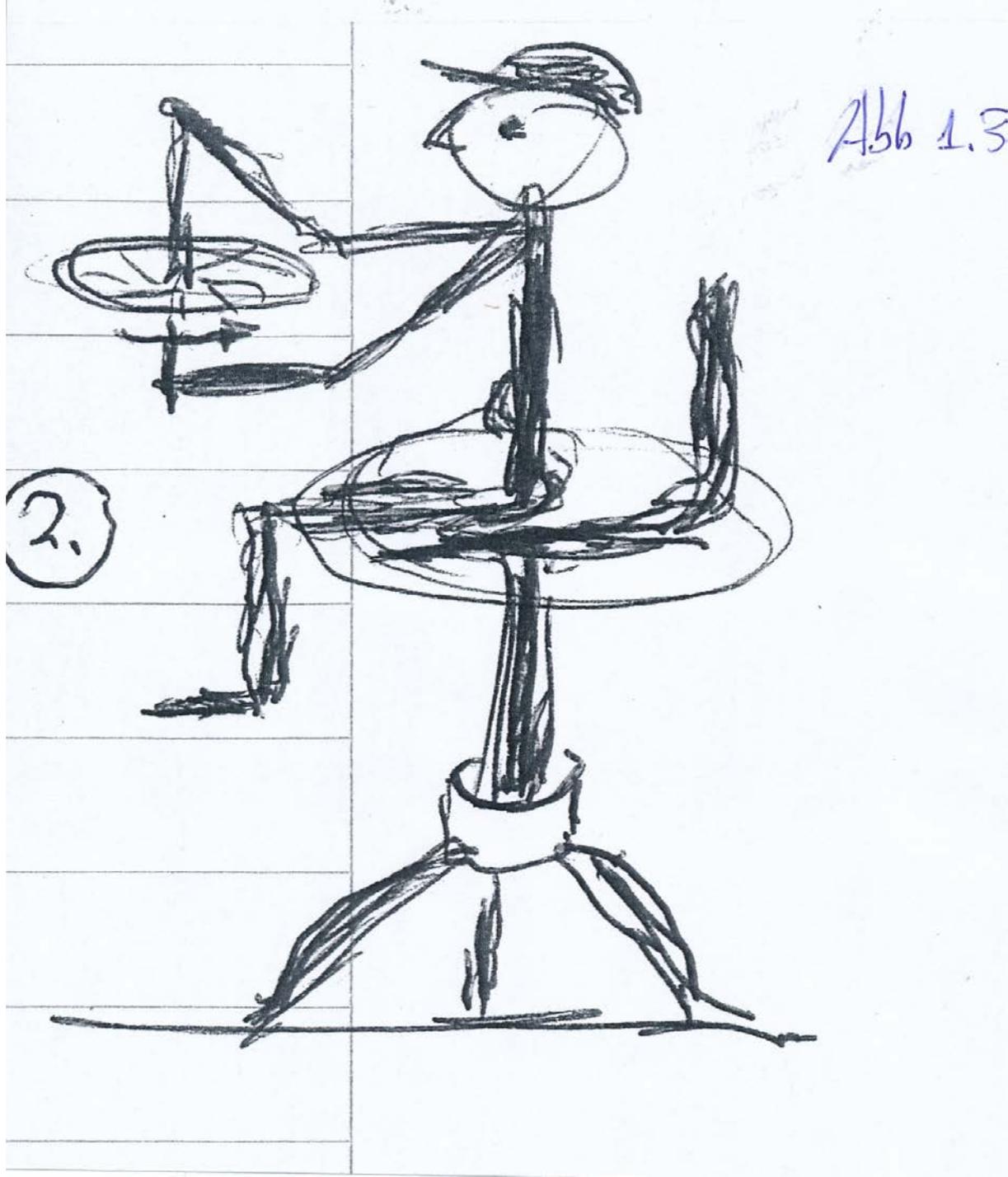
Bis 1967: 1 mittlerer Sonnentag = 86.400 Sekunden

Der Drehimpuls **L** eines Rads

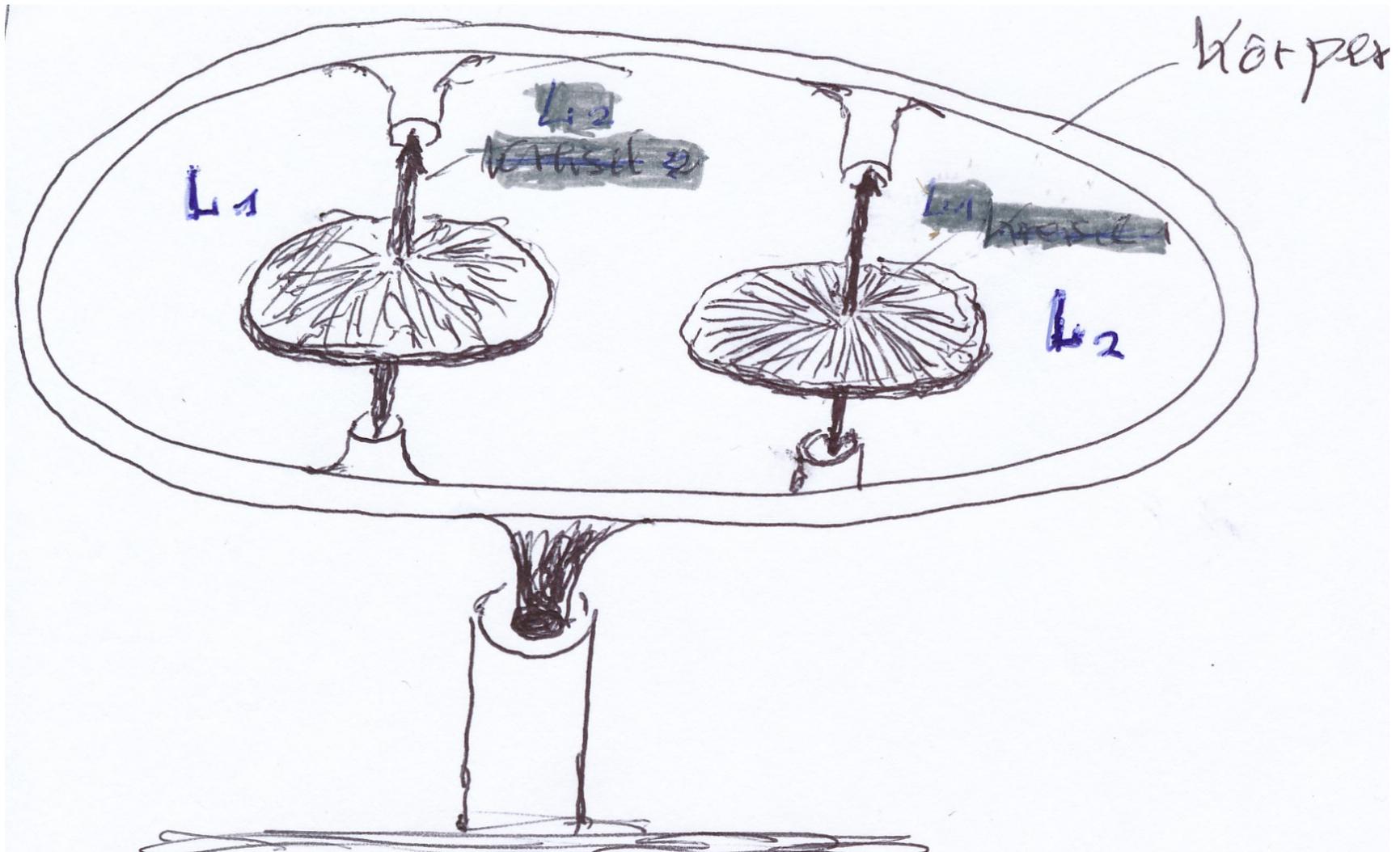


Drehimpuls **L** =
Masse **M** • Radius *r* • Geschwindigkeit *v*
 $M=1 \text{ kg}$, $r=0,5 \text{ m}$, $v=2\pi r / s$: **L = 1,6 Js**

Der Drehimpuls ist eine Erhaltungsgröße



Zwei gekoppelte, gleiche, parallele Drehimpulse
in einem abgeschlossenen System



Was ist und wozu dient der Kernspin?

Markus Schwoerer, Universität Bayreuth
BAdW, 5. April 2019

Der Drehimpuls eines makroskopischen Körpers

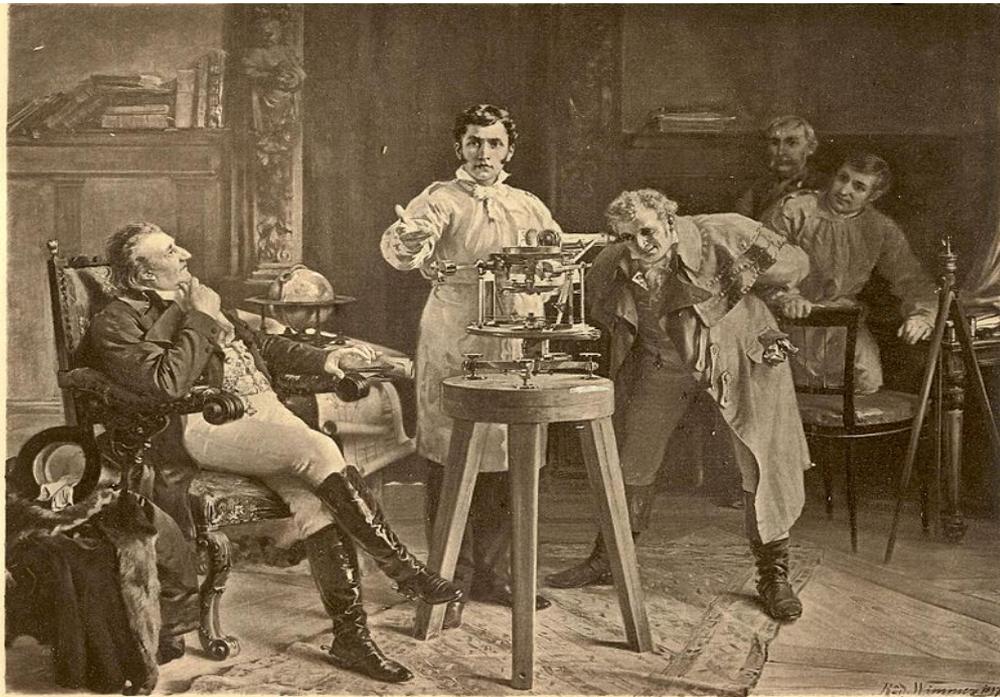
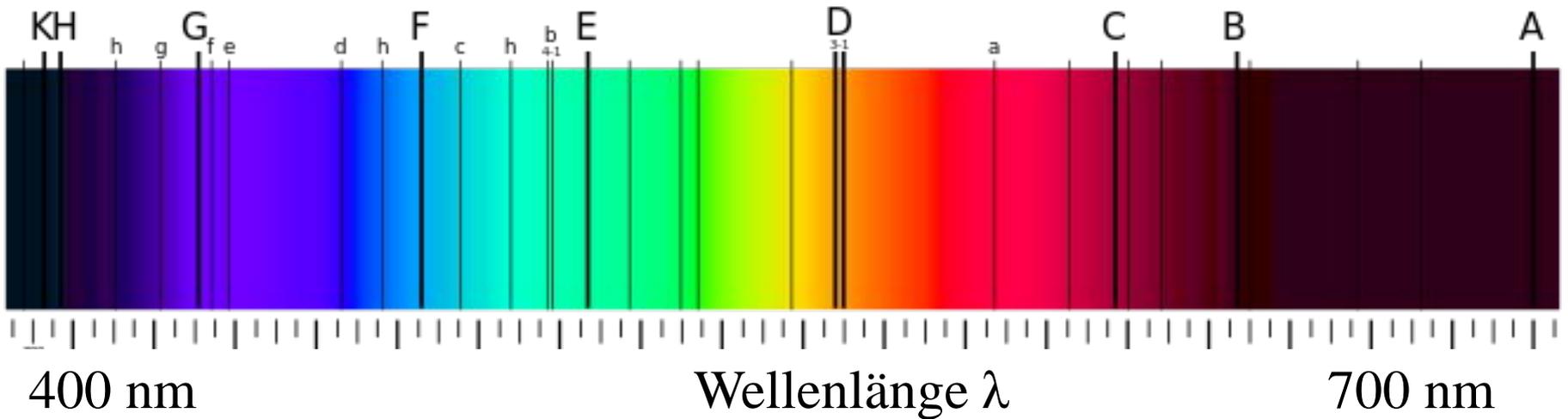
Hyperfeinstruktur in den Spektren von Atomen

Kernspinresonanz (NMR) von Molekülen

Magnetresonanz-Tomographie (MRT)

Kristalle

Absorption aus dem Sonnenspektrum: Fraunhofer-Linien



Josef von Fraunhofer
(1787 – 1826)

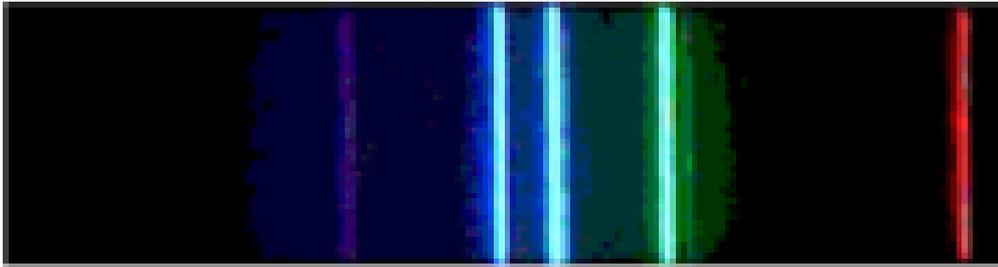
Wellenlänge λ

Frequenz f

$$f \cdot \lambda = c$$

c = Lichtgeschwindigkeit

Emission aus heißen Atomen: Bunsen und Kirchhoff



Quantenmechanik

Max Planck

Niels Bohr

Arnold Sommerfeld

Louis de Broglie

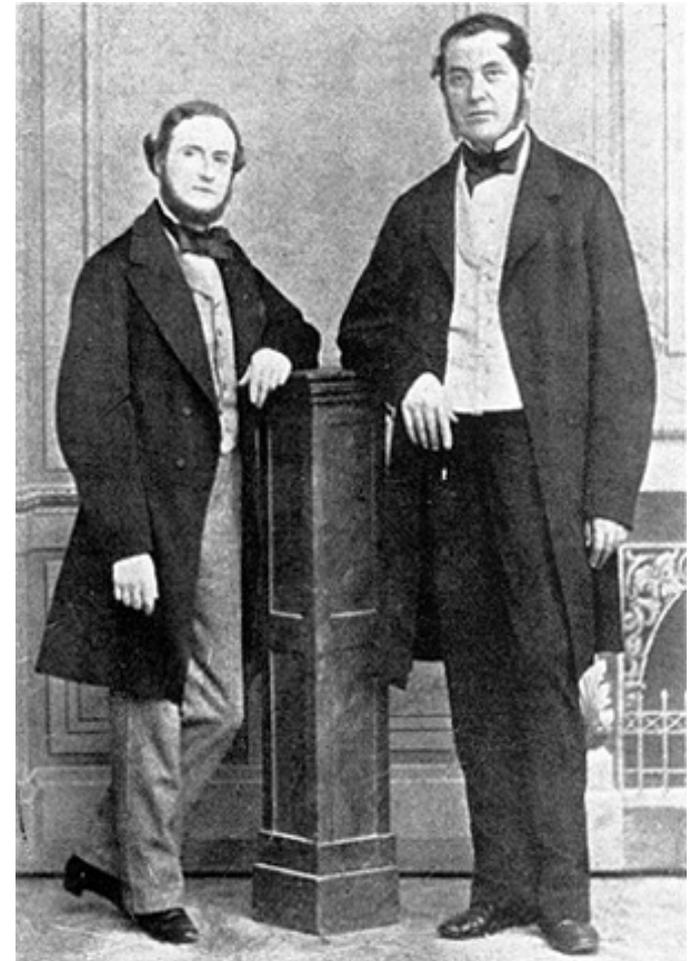
Werner Heisenberg

Erwin Schrödinger

Paul Dirac

Wolfgang Pauli

.....



Robert
Kirchhoff
1824 - 1887

Robert
Bunsen
1811 - 1899

Hyperfeinstruktur



(1900 - 1958)

Wolfgang Pauli
Nobelpreis für Physik
1945

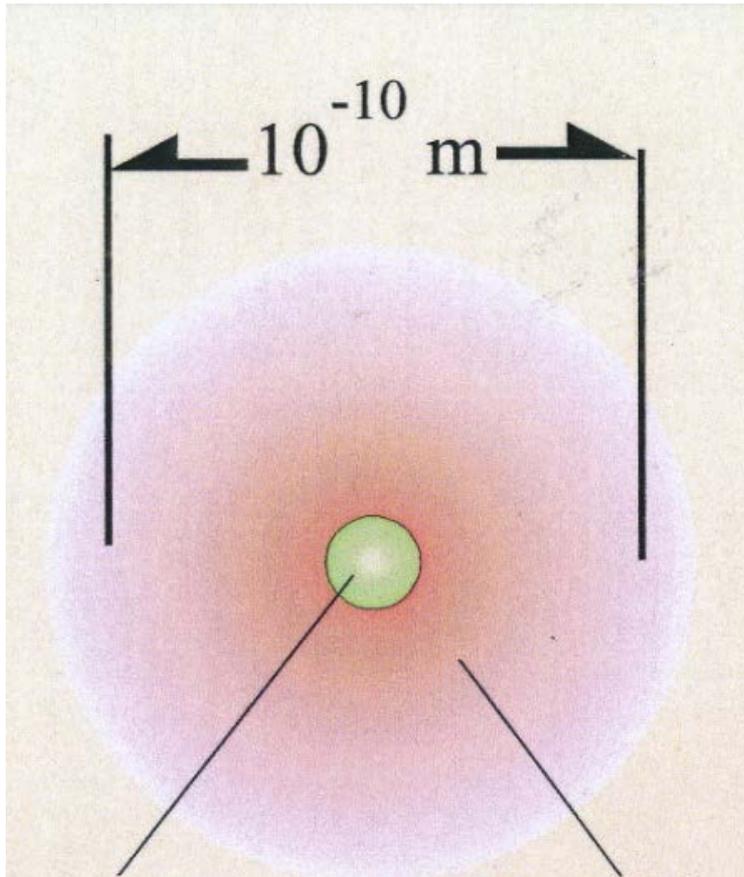
„Vorläufige Mitteilung“
von Wolfgang Pauli, Hamburg 1924:

„Zur Frage der theoretischen Deutung
der Satelliten einiger Spektrallinien
und ihre Beeinflussung durch
magnetische Felder“

Vermutung der Existenz des bis dahin
nicht erkannten **Spins** und des damit
verbundenen **magnetischen Moments**
von **Atomkernen**

Quantisierung des Spins im statischen Magnetfeld B

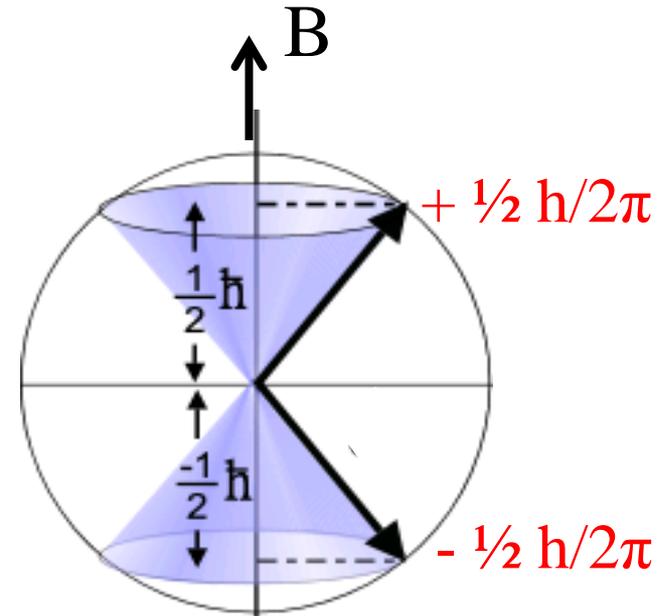
Wasserstoff-Atom H



Proton

Elektron

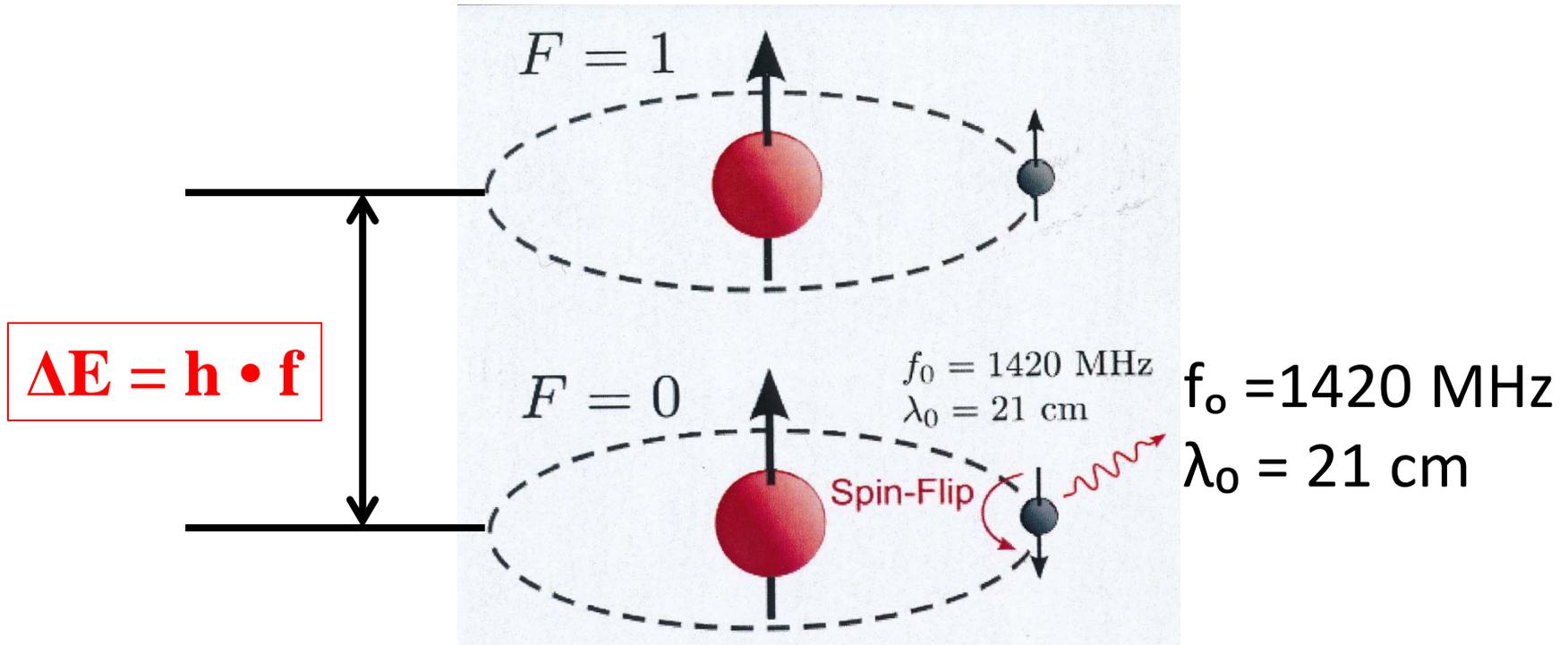
Proton: Kernspin I
Elektron: Elektronenspin S
in einem konstanten
Magnetfeld B



Plancksche Konstante : $h = 6,626070040 \cdot 10^{-34}$ Js

Das H-Atom: Hyperfeinstruktur im Grundzustand

F = Gesamtdrehimpuls - Quantenzahl



„21 cm- Linie“

Radiowellen-Emission aus
Wasserstoff-Atomen

Wasserstoff-Atome im Universum



Radio –Teleskop
Effelsberg

Dopplereffekt: Messung von
Turbulenzen in den Spiralarmen
der Milchstraße

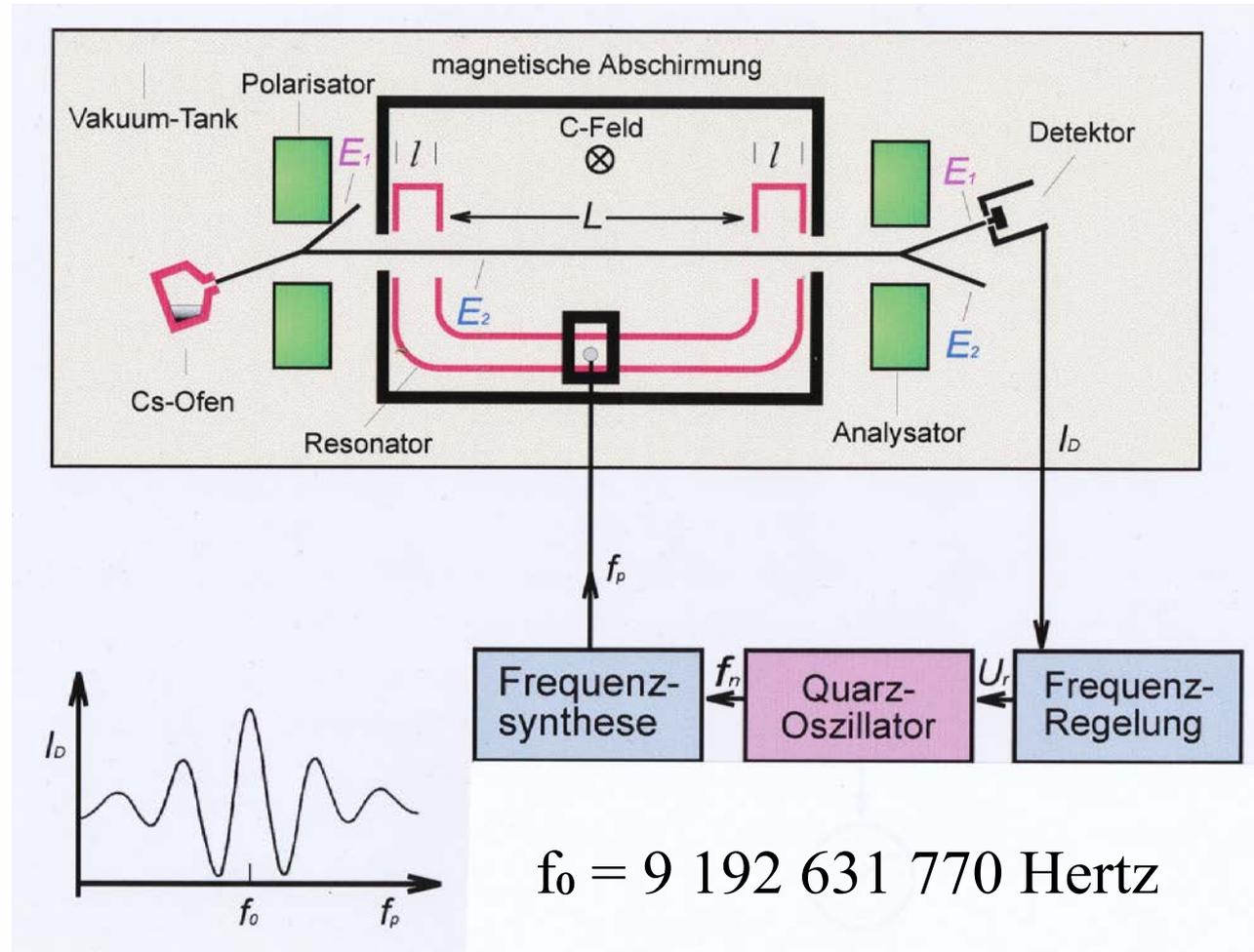
Atomstrahl – Resonanz mit Cäsiumatomen

Kernspin $I = 7/2$

Elektronenspin $S = 1/2$

Gesamtdrehimpuls:
 $F = 4$ oder $F = 3$

Siedepunkt: $690\text{ }^{\circ}\text{C}$

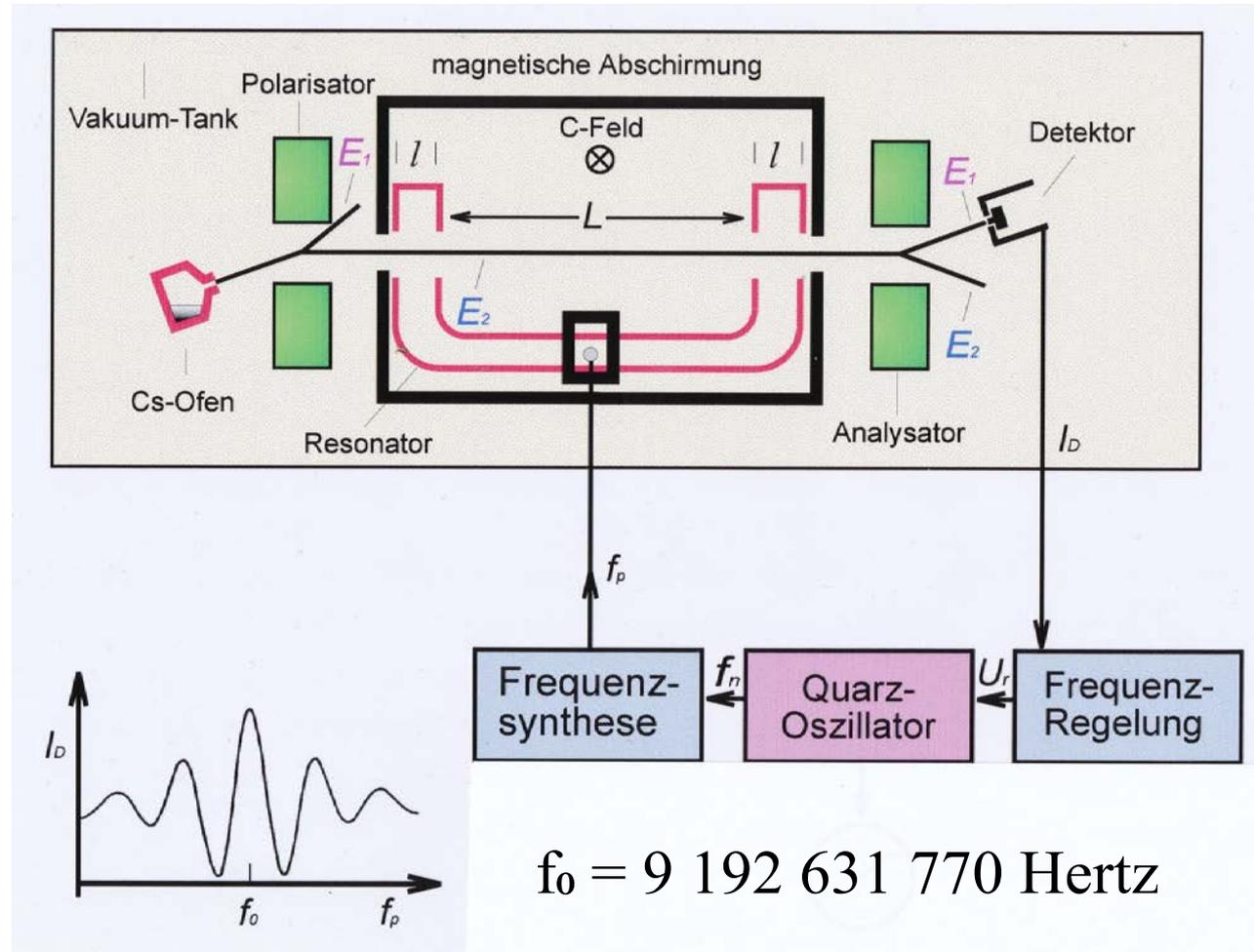


Atomstrahl – Resonanz mit Cäsiumatomen



Isidor Isaac Rabi
(1898 – 1988)

Nobelpreis für Physik 1944



Grundlagenexperiment zur Atomuhr

Was ist und wozu dient der Kernspin?

Markus Schwoerer, Universität Bayreuth

BAdW, 5. April 2019

Der Drehimpuls eines makroskopischen Körpers

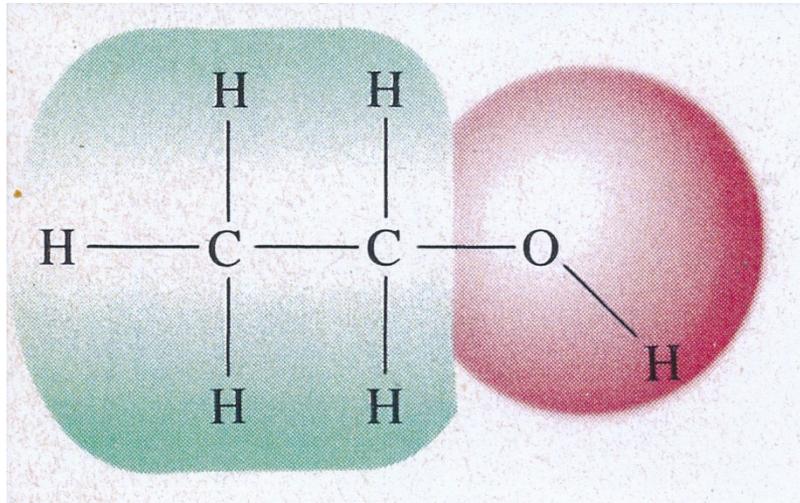
Hyperfeinstruktur in den Spektren von Atomen

Kernspinresonanz (NMR) von Molekülen
(mit Bildern von Prof. Kessler, TUM : vielen Dank !)

Magnetresonanz-Tomographie (MRT)

Kristalle

Moleküle: z. B. Ethanol

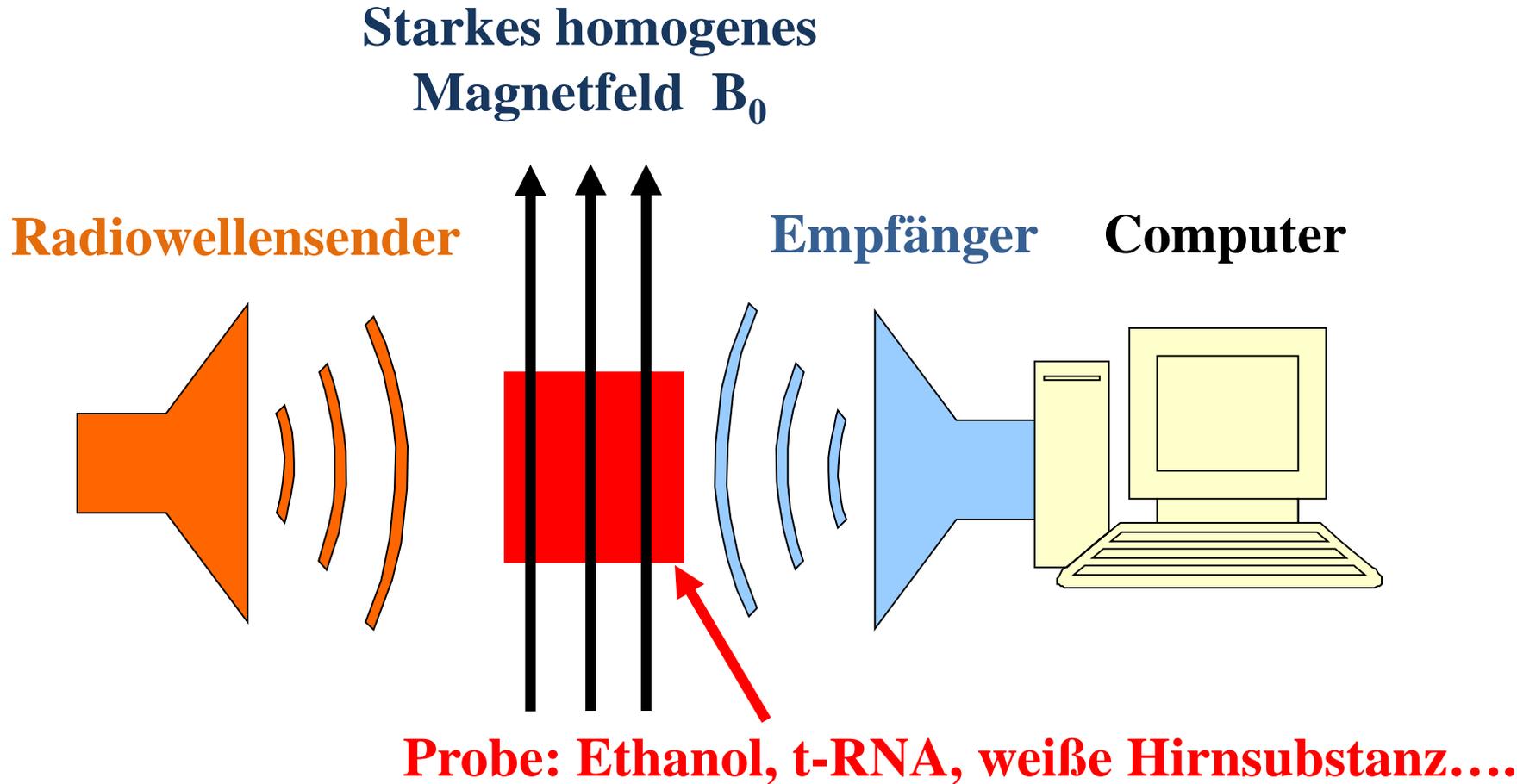


6 Protonen (H)
2 C-Kerne
1 O-Kern
26 Elektronen

Gesamtspin der Elektronen: $S = 0$! (Pauli Prinzip)

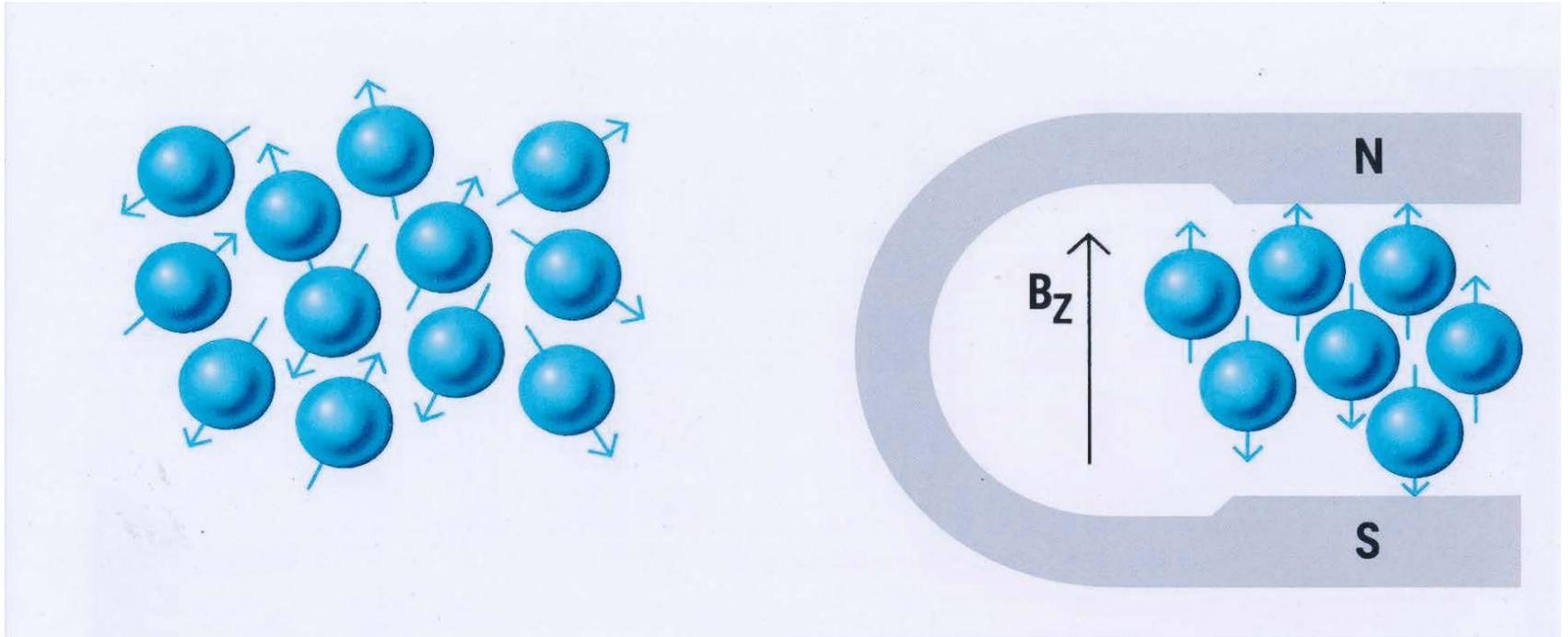
2 ml 50 %-iges Kirschwasser enthalten
 10^{22} Ethanol-Moleküle

Die Komponenten der NMR-Apparatur



Messung der „Spektrallinien“ der Kernspins in **ihrem** Magnetfeld **B**:
Frequenz, Intensität, Relaxation

Wozu ein Magnetfeld B_0 ?

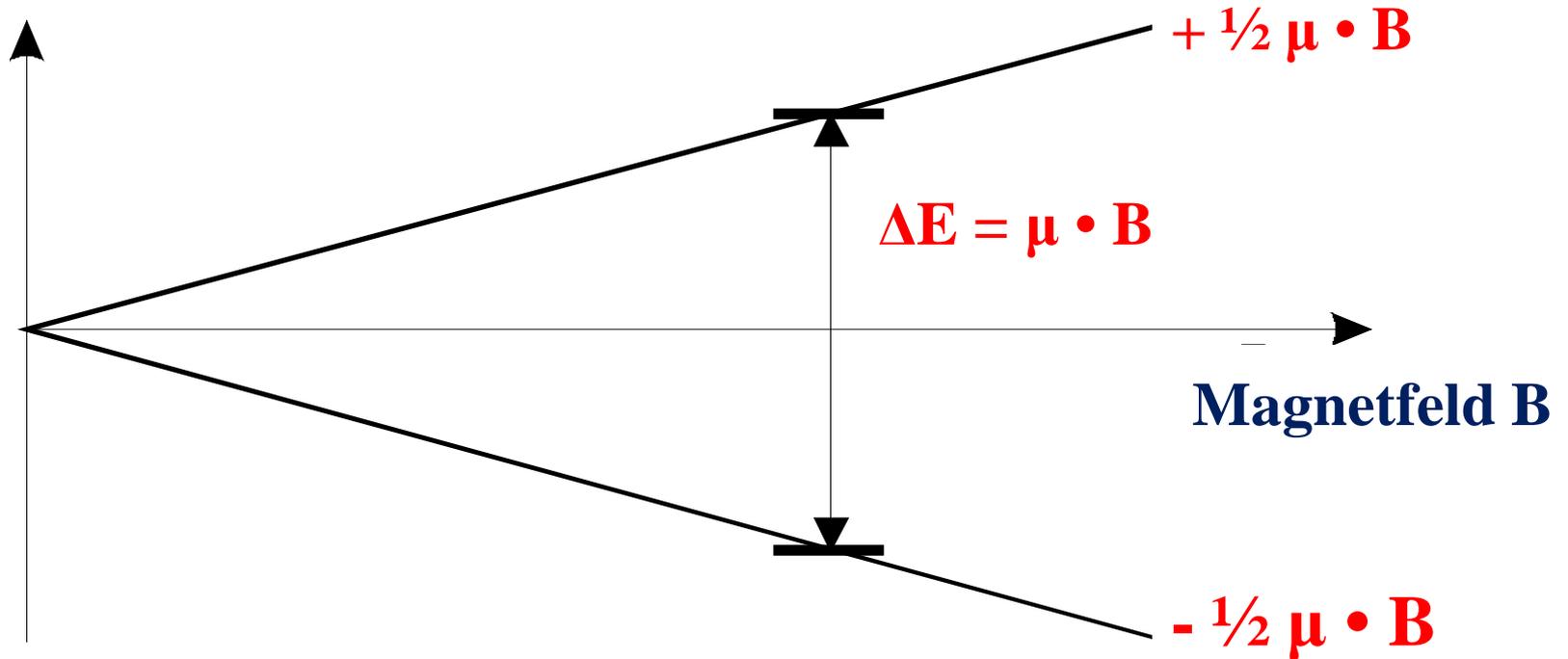


Statistisch verteilte Richtungen
der magnetischen Momente:
Keine Nettomagnetisierung

Orientierung im Magnetfeld B_z :
Gesamtmagnetisierung M_z
der gesamten Probe

Wozu Sender und Empfänger von Radiowellen?

Energie E der Spins im Magnetfeld B



μ = magnetisches Moment des Spins

$$\text{NMR – Frequenz : } \mathbf{f} = (\boldsymbol{\mu} / \mathbf{h}) \cdot \mathbf{B}$$

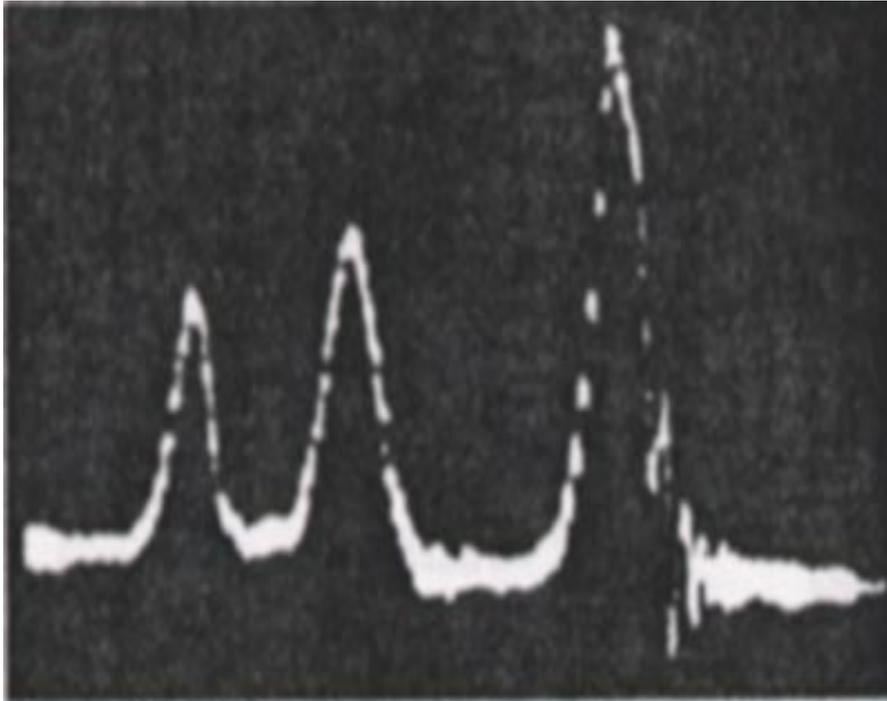
NMR-Frequenzen von Atomkernen mit Spin $I = 1/2$

Isotop	NMR Frequenz f bei $B = 14 \text{ Tesla}$	natürliche Häufigkeit
^1H	600 MHz	99,98 %
^{13}C	150 MHz	1,1 %

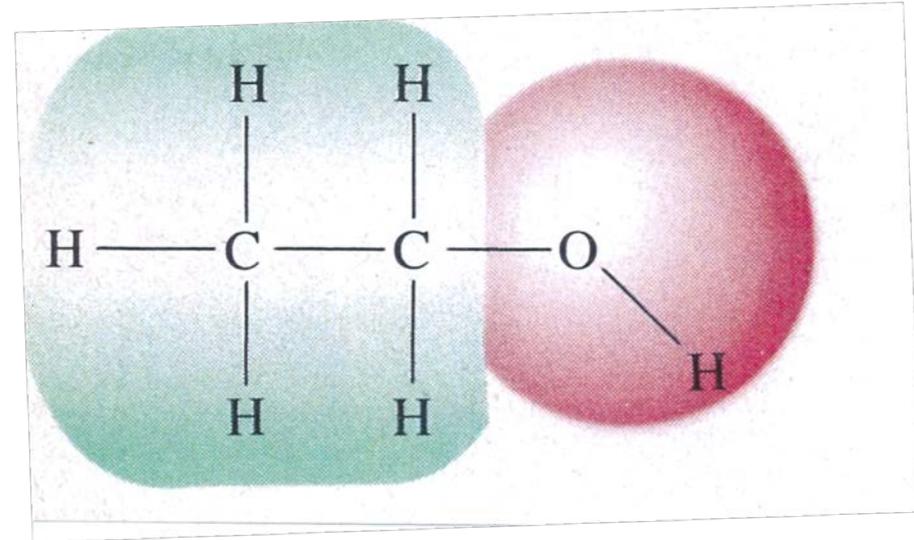
(Erdmagnetfeld in unserer geogr. Breite: ca. 40 μT)

^1H -NMR-Spektrum von Ethanol: Chemische Verschiebung

1951 Purcell



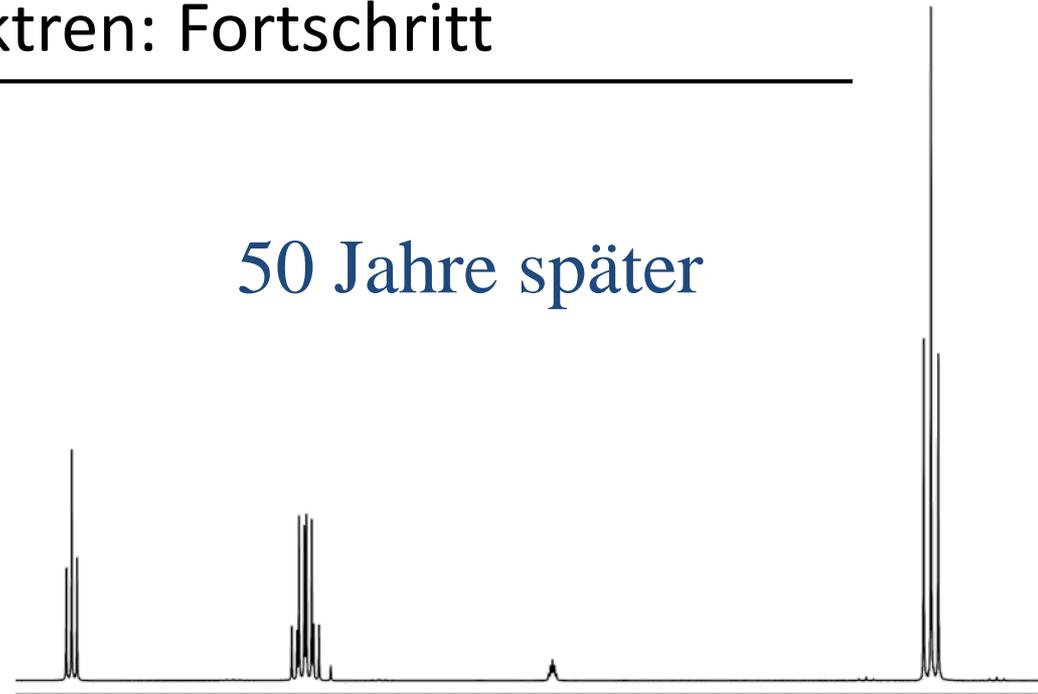
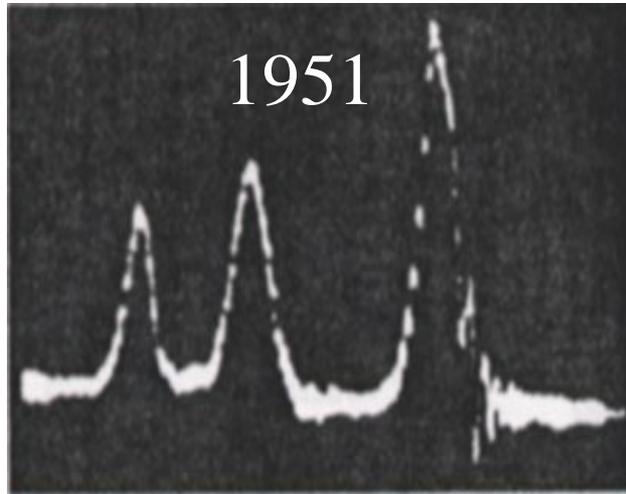
HO CH₂ CH₃



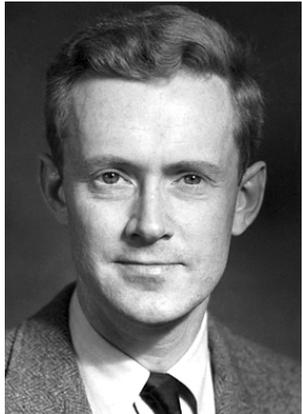
Ethanol = „Alkohol“

Man „sieht“ nur die Signale der Protonen:
„Chemische Verschiebung“: Diamagnetismus

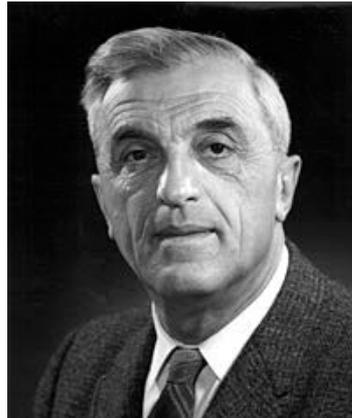
NMR-Spektren: Fortschritt



Nobelpreise Physik 1952

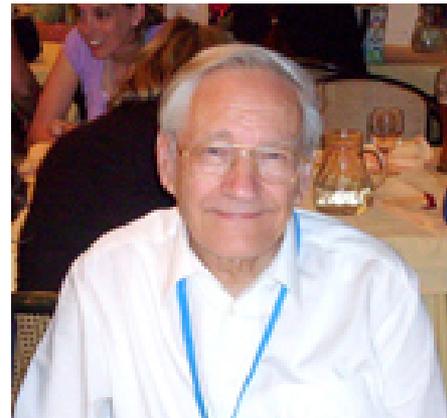


E.M. Purcell



F. Bloch

Nobelpreise Chemie 1991/2002



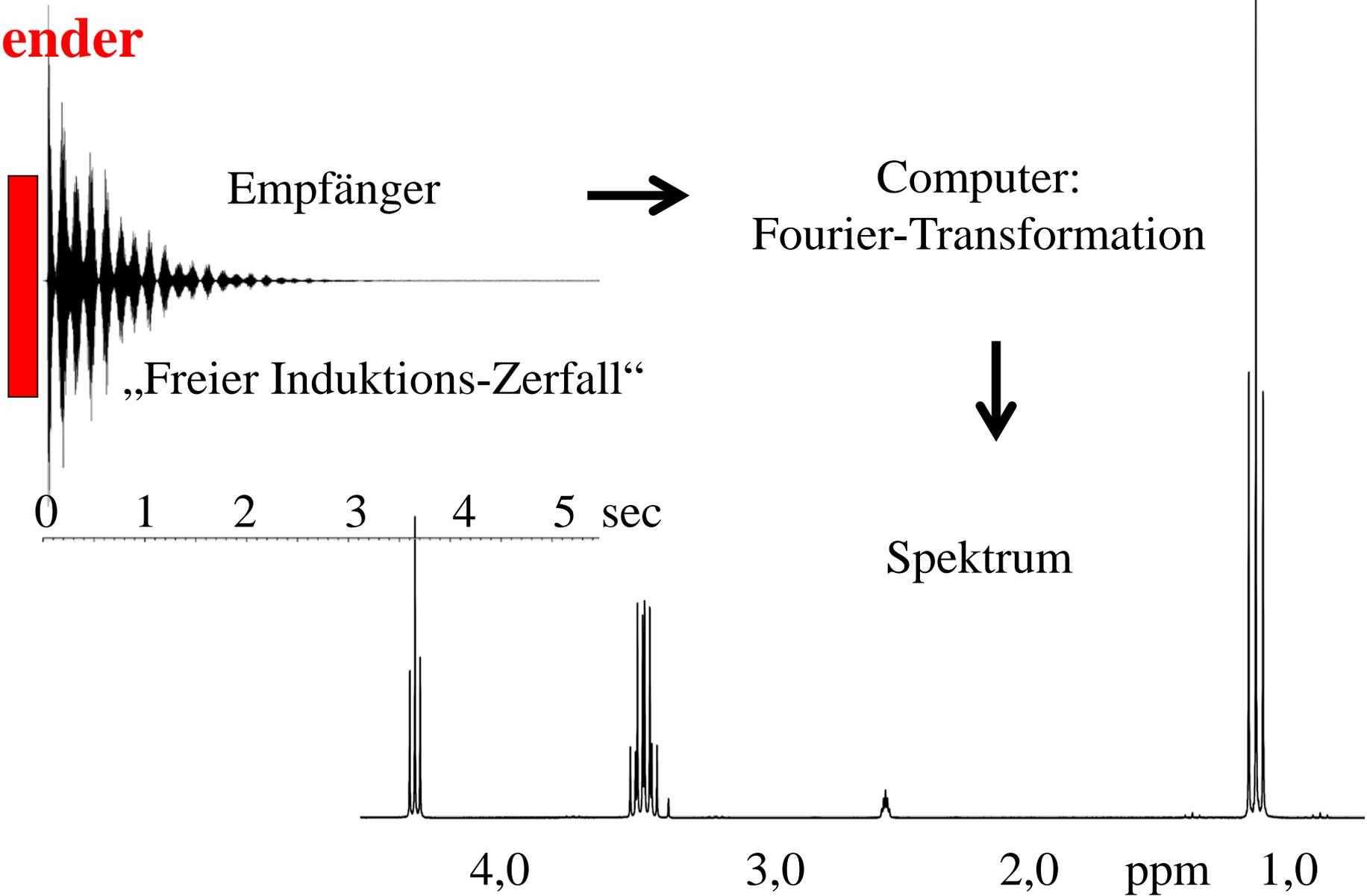
R. Ernst



K. Wüthrich

Puls-Fourier NMR-Spektroskopie: 1966

Sender



Was ist und wozu dient der Kernspin?

Markus Schwoerer, Universität Bayreuth

BAdW, 5. April 2019

Der Drehimpuls eines makroskopischen Körpers

Hyperfeinstruktur in den Spektren von Atomen

Kernspinresonanz (NMR) von Molekülen

Magnetresonanz-Tomographie (MRT)

Kristalle

Magnetresonanz-Tomographie (MRT) - Zeugmatographie

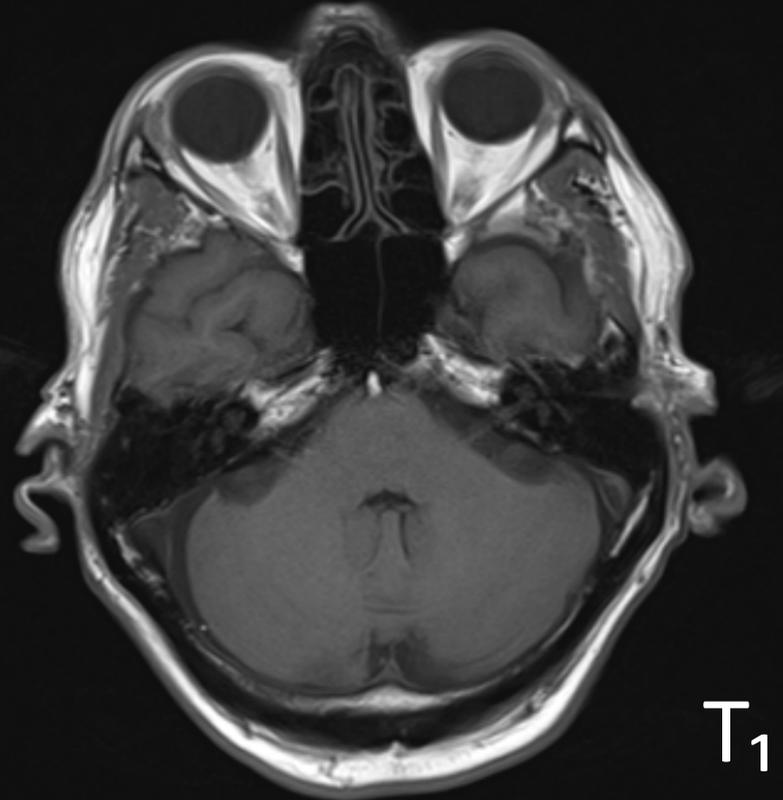
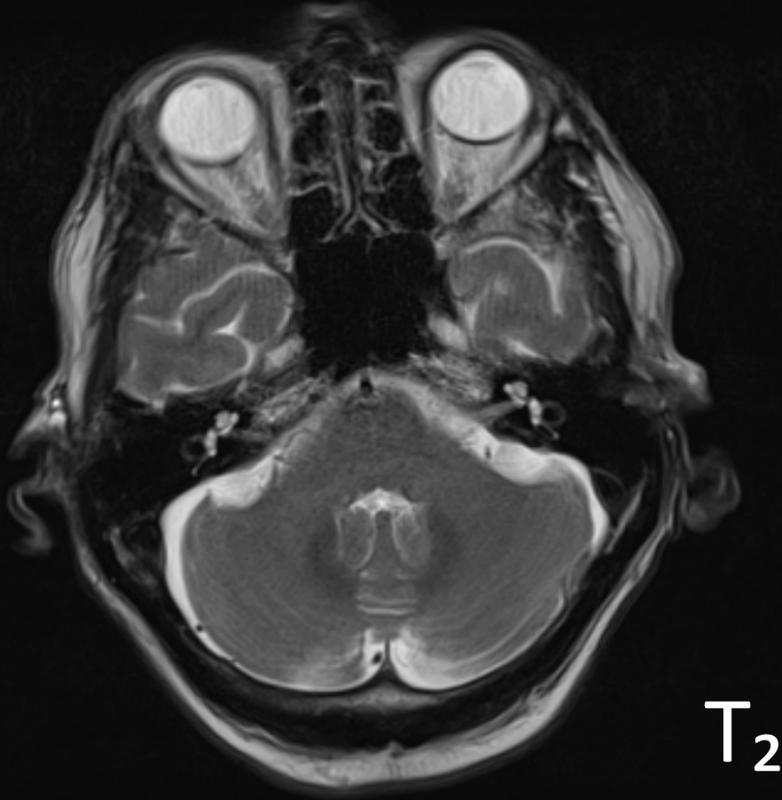


Paul Lauterbur
Nobelpreis für
Medizin 2003



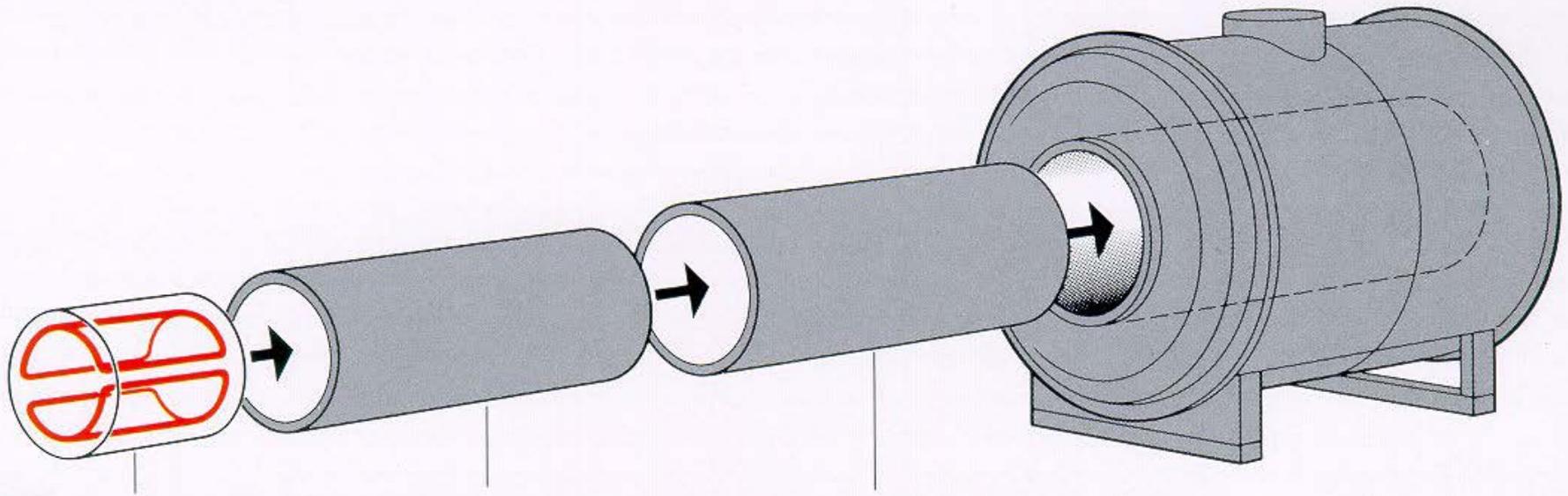
Sir Peter Mansfield
Nobelpreis für
Medizin 2003

„Schnitt“ durch meinen Kopf (2015)



Jeder Bildpunkt enthält die Dichte ρ der Protonen,
gewichtet mit T_2 oder T_1

Schema des Tomographen

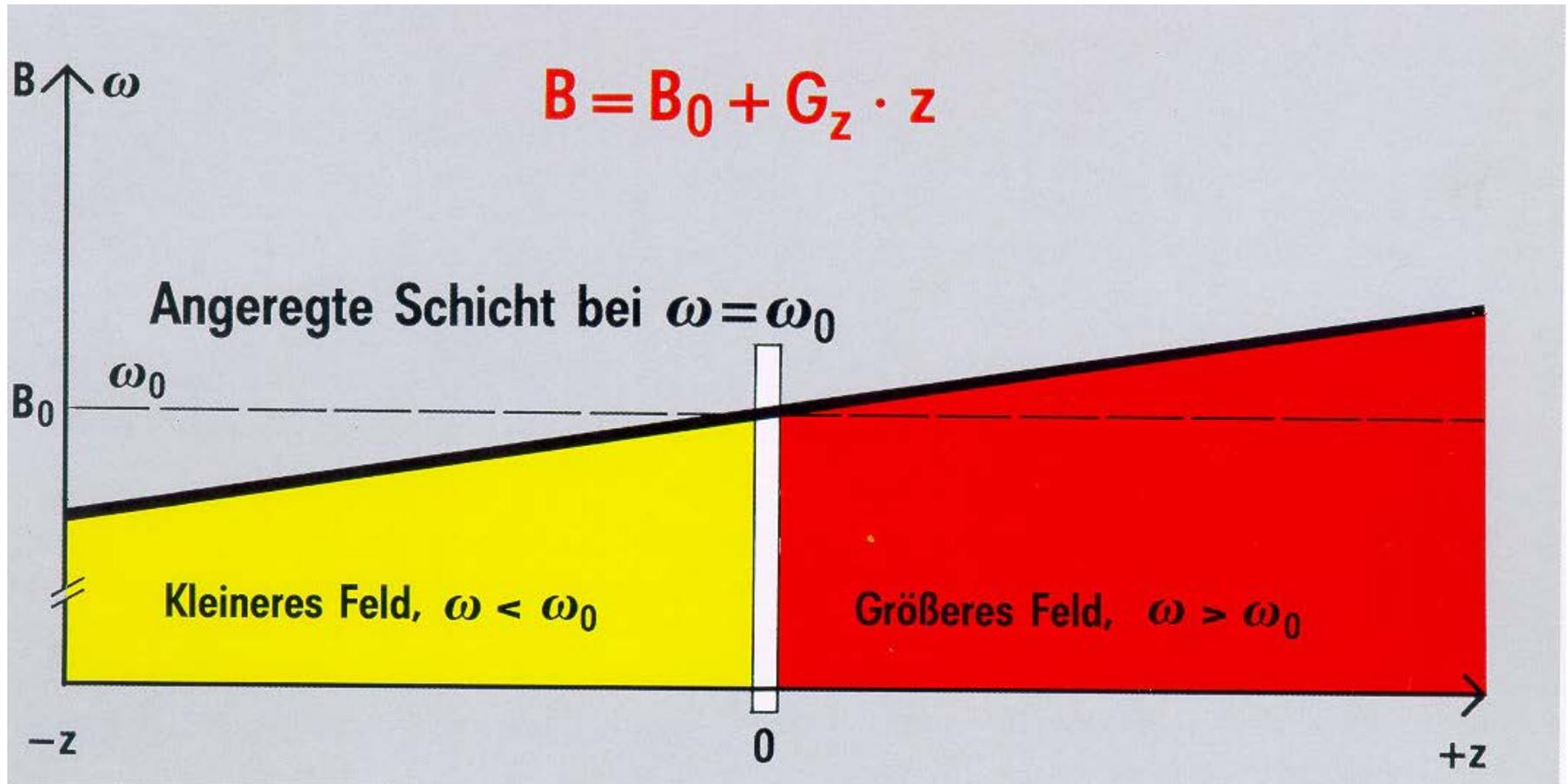


Körperresonator

Gradientenspulen

Shimspulen

Funktion der Gradientenspulen



zur 3 dimensionalen räumlichen Auflösung

Details der „Innereien“ : B₀-Feldspule

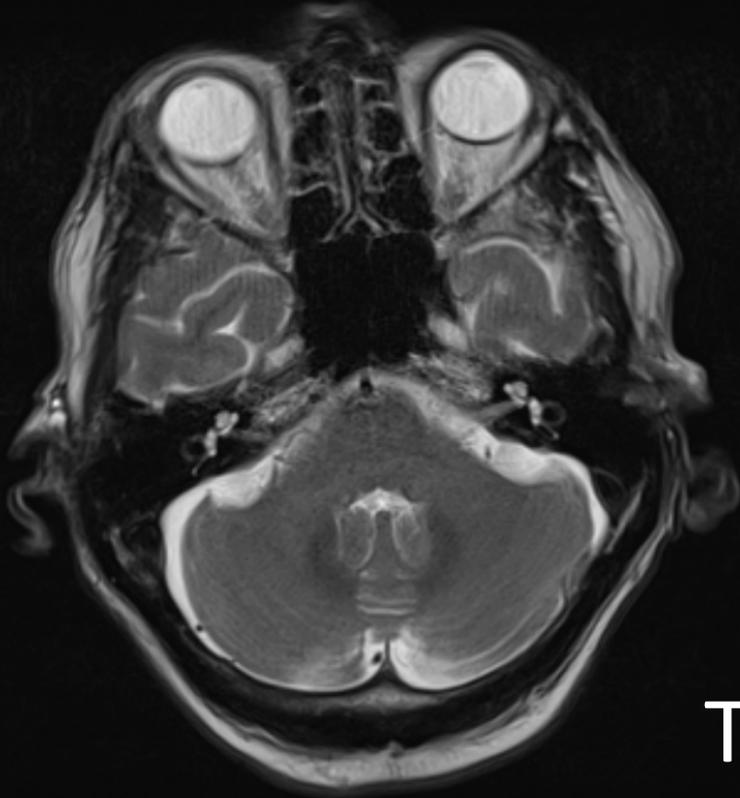


Zylindrischer B₀-Feld-Magnet
mit supraleitenden Drähten
auf Aluminium-Spulenträger

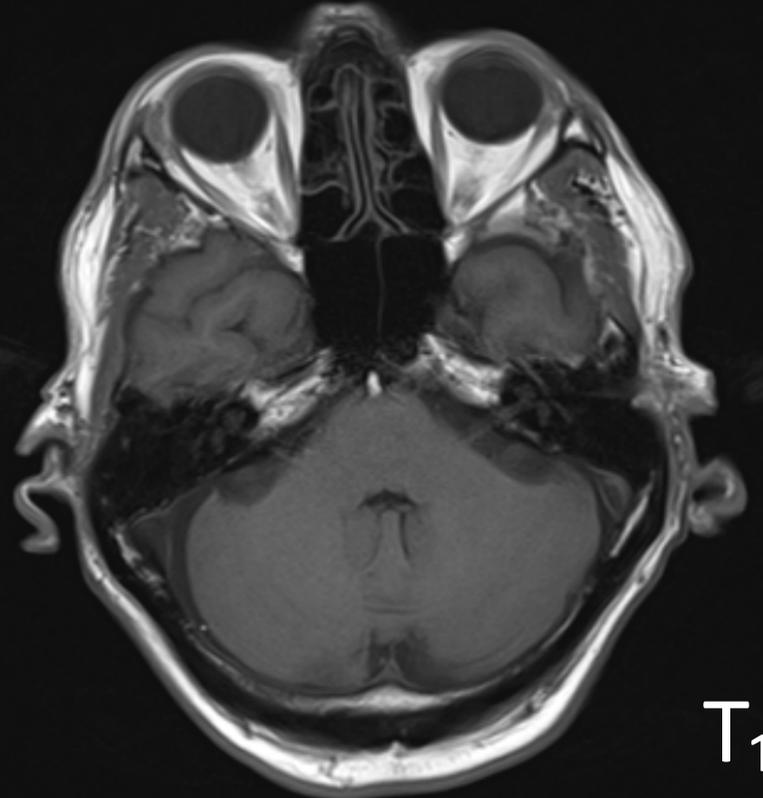
Kryogefäß für 1500 Liter
Flüssiges Helium,
4,15 K (−269 °C)

Aus: Mark E. Ladd in: Medizinische Physik, Springer Spektrum (2018)

„Schnitt“ durch meinen Kopf (2015)



Ohne Radiologen



und Therapeuten:

keine pathologische Befunde
und keine erfolgreiche Therapie

Was ist und wozu dient der Kernspin?

Markus Schwoerer, Universität Bayreuth
BAdW, 5. April 2019

Der Drehimpuls eines makroskopischen Körpers

Hyperfeinstruktur in den Spektren von Atomen

Kernspinresonanz (NMR) von Molekülen

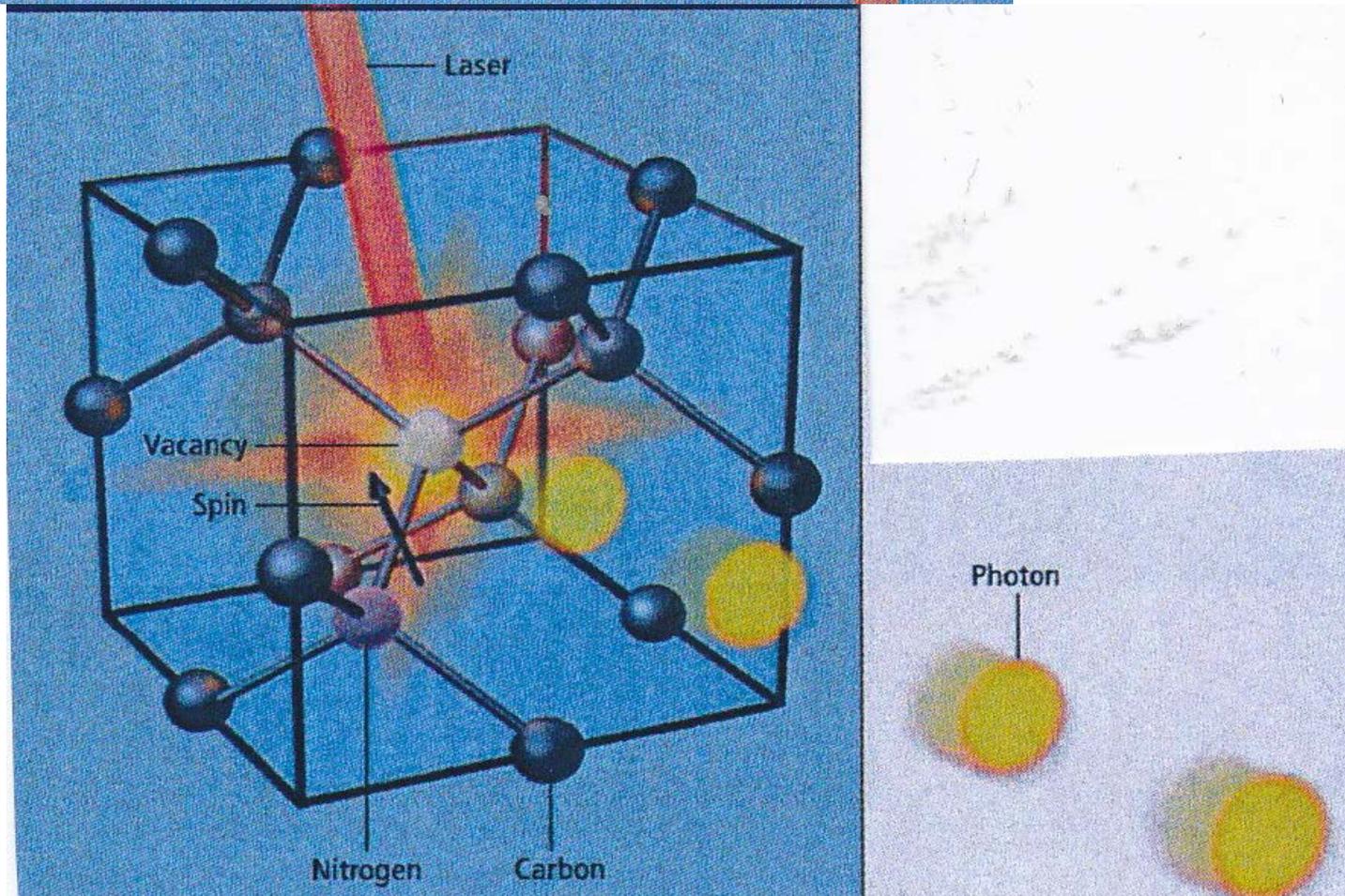
Magnetresonanz-Tomographie (MRT)

Kristalle

Ein Farbzentrum im Diamant

[DIAMOND SPINTRONICS]

A MAGICAL IMPURITY



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!