

# Alles ist magnetisch – manchmal muss man nachhelfen

Jürgen Schnack

Fakultät für Physik – Universität Bielefeld

<http://obelix.physik.uni-bielefeld.de/~schnack/>

Physik am Samstag,  
Universität Bielefeld, 07. 12. 2019

# Physik I

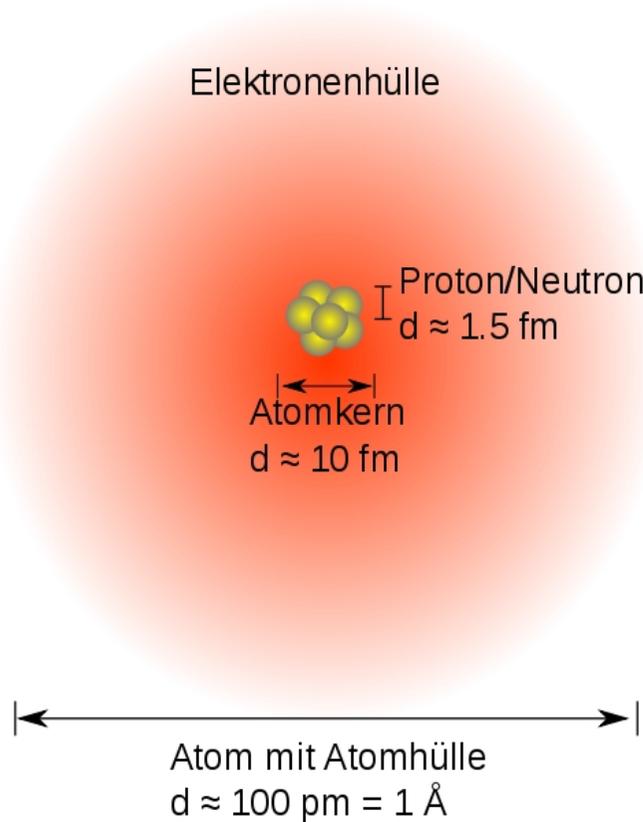
# Moderne Physik = Fundamentale Wechselwirkungen & Symmetrien

# 1. Die Gravitation (Schwerkraft)



- Alle Massen ziehen sich an.
- Für die kleinen Geschwister: Die Erde zieht uns an; wir fallen nicht herunter (auch nicht in Australien).
- Galileo Galilei (1564 - 1642) hat die Auswirkungen der Schwerkraft in Fallexperimenten untersucht.
- Kosmologie: Bewegung der Sterne, Planeten und Galaxien durch Gravitation bestimmt.

## 2. Die starke Kraft

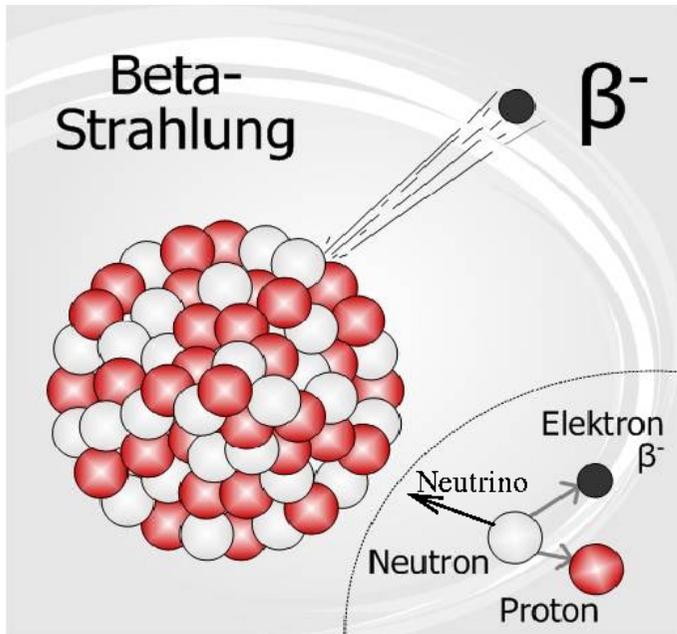


wikipedia.de

- Die starke Kraft hält die Atomkerne zusammen.
- Sie wirkt zwischen den Quarks in Proton und Neutron.
- Stärkste Kraft, aber wir können sie nicht spüren, da sie nicht über den Atomkern hinausreicht!

⇒ Physik am Samstag, 25. 1. 2020

### 3. Die schwache Kraft



wikipedia.de

- Die schwache Kraft lässt manche Atomkerne zerfallen.
- Der radioaktive  $\beta$ -Zerfall wird durch die schwache Kraft verursacht.
- Auch die schwache Kraft können wir nicht spüren; die Reichweite ist zu gering.

## 4. Die elektromagnetische Kraft



wikipedia.de

- Die elektromagnetische Kraft wirkt auf elektrische Ladungen und magnetische Objekte.
- Verantwortlich für: el. Strom, Licht, Radiowellen, Dynamo, Elektromotor, chemische Bindung, Festkörper usw..
- Magnetismus!
- Sie ist die Kraft, die wir bei Berührungen spüren.



dunkle Materie

dunkle Energie

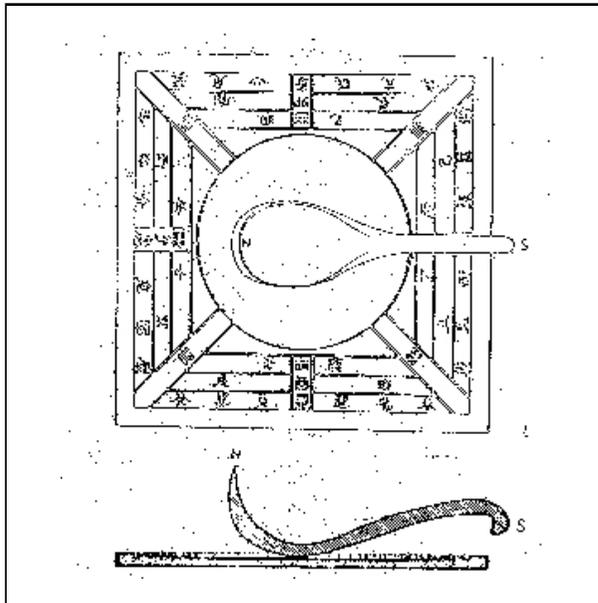
**bekannte, sichtbare Materie**

**dunkle Materie**

**dunkle Energie**

# Wo kommt Magnetismus vor?

# Magnetismus I

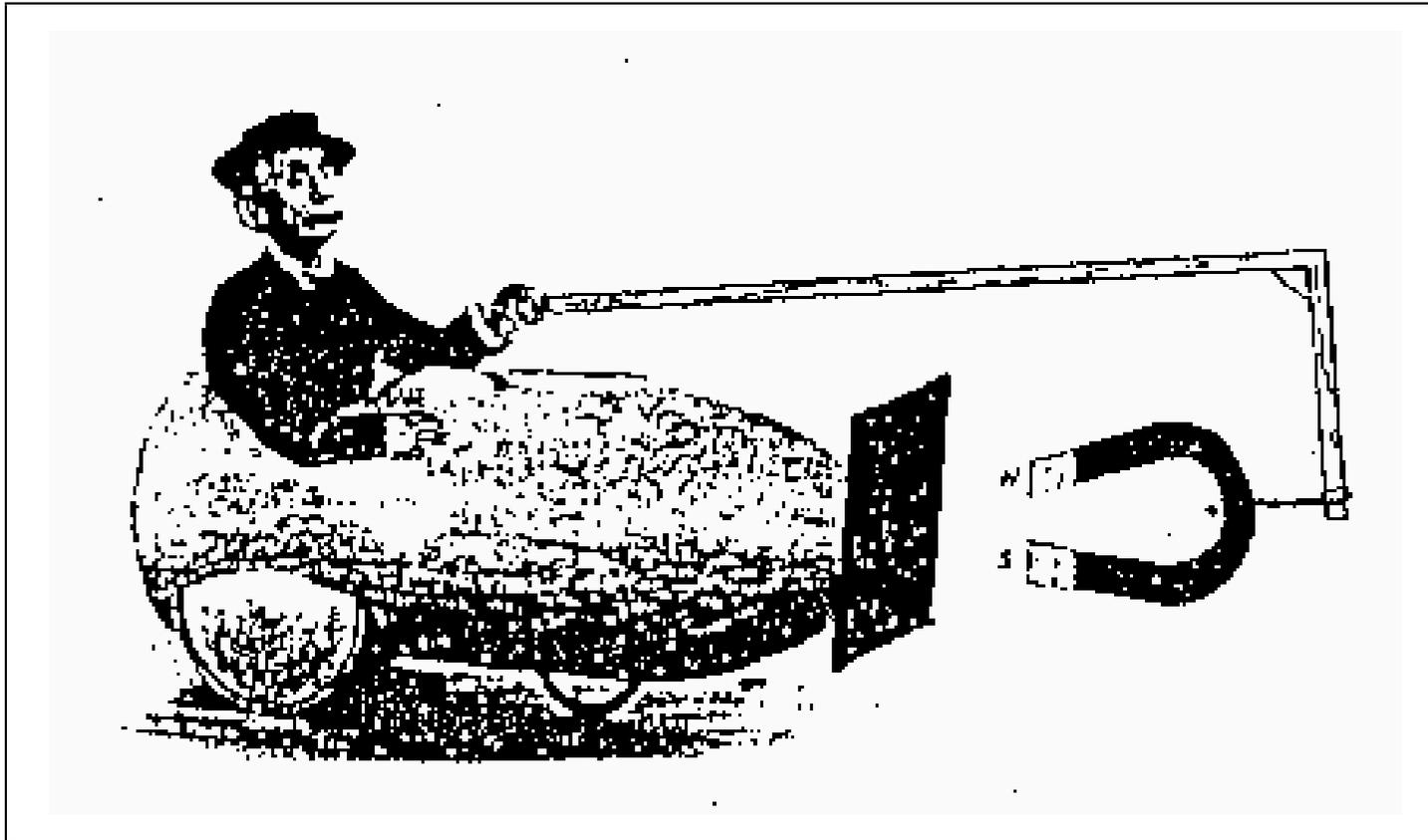


- Magnetisches Gestein in Ägypten, China und Europa lange vor Christi Geburt bekannt.
- Gestein enthält Magnetit, dieses kann während eines Gewitters magnetisiert werden.
- 100 AD kannten die Chinesen schon einen „Südzeiger“, Buch über die Herstellung des Kompass von Shen Kua 1088.

*Placed on the pillow of a guilty wife, it would make her confess her iniquities as she slept. It could be used for the treatment of many ailments, and as a contraceptive. There were curious beliefs that its effects could be countered by garlic or onions. It was said that sailors should be forbidden to eat these vegetables, in case their breath should demagnetise the needles.*

<http://www.tcd.ie/Physics/Schools/what/materials/magnetism>

## Magnetismus II



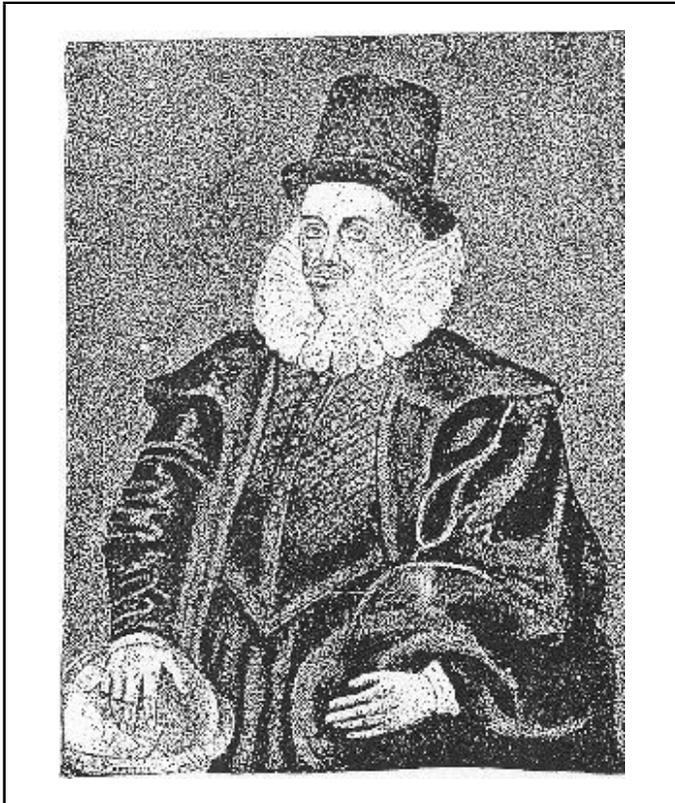
- Magnete mußten lange für haarsträubende Sachen herhalten und wurden auch gern zur Konstruktion des *perpetuum mobile* verwendet (Patente bis 1970), vgl. auch *Jim Knopf und die Wilde 13*.

## Magnetismus III



- Objekte aus Permanentmagneten erfahren in Magnetfeldern eine Kraft (Kompass, Elektromotor, ...).
- Neben Permanentmagneten gibt es auch sogenannte Diamagnete (die meisten anderen Stoffe).
- Sind die Felder (und ihre Gradienten) nur stark genug, können sogar Diamagnete, z.B. lebende Frösche, im Magnetfeld schweben.
- M.V. Berry and A.K. Geim, *Of flying frogs and levitrons*, Eur. J. Phys. **18** (1997) 307-313.

## Magnetismus IV



- Magnetismus als Wissenschaft begann um 1600.
- Entstehung der Idee eines magnetischen Feldes.
- William Gilbert, *De Magnete* (1600)

*In follies and fables do philosophers of the vulgar sort take delight; and with such like do they cram readers a-hungered for things obtruse, and every ignorant gaper for nonsense. But when the nature of the lodestone shall have been by our labours and experiments tested, then will the hidden and recondite but real causes of this great effect be brought forward, proven, demonstrated . . .*

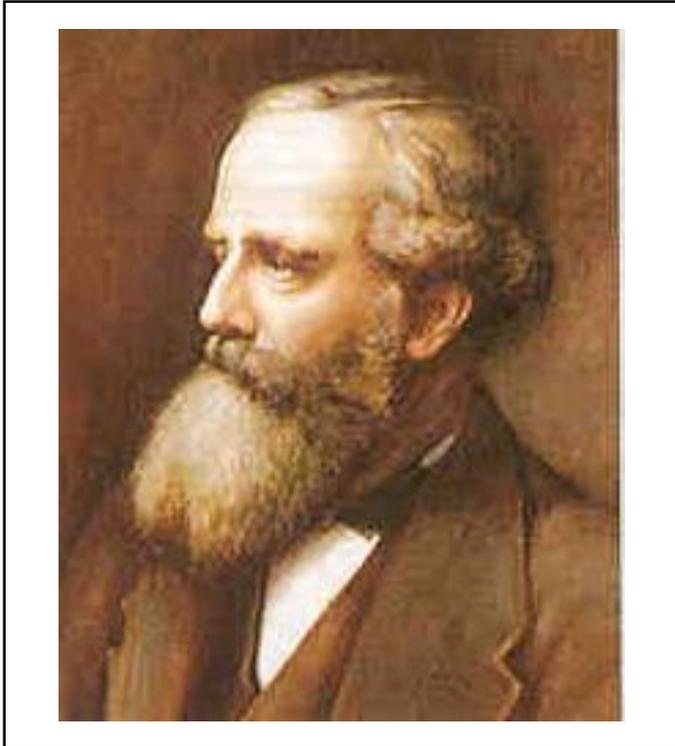
*. . . and the foundations of a grand magnetic science being laid will appear anew, so that high intellect may no more be deluded by vain opinions.*

# Magnetismus V



- Elektromagnetische Revolution im 19. Jahrhundert.
- Hans-Christian Oersted, 1820: Ablenkung einer Magnethadel in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters.
- Poisson, Fresnel, Fourier, Laplace, Biot, Savart, Arago, Ampere, ...
- Michael Faraday: Magnetfeld und Feldlinien.

# Magnetismus VI



- Maxwell-Gleichungen:

$$\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{B} = 0$$

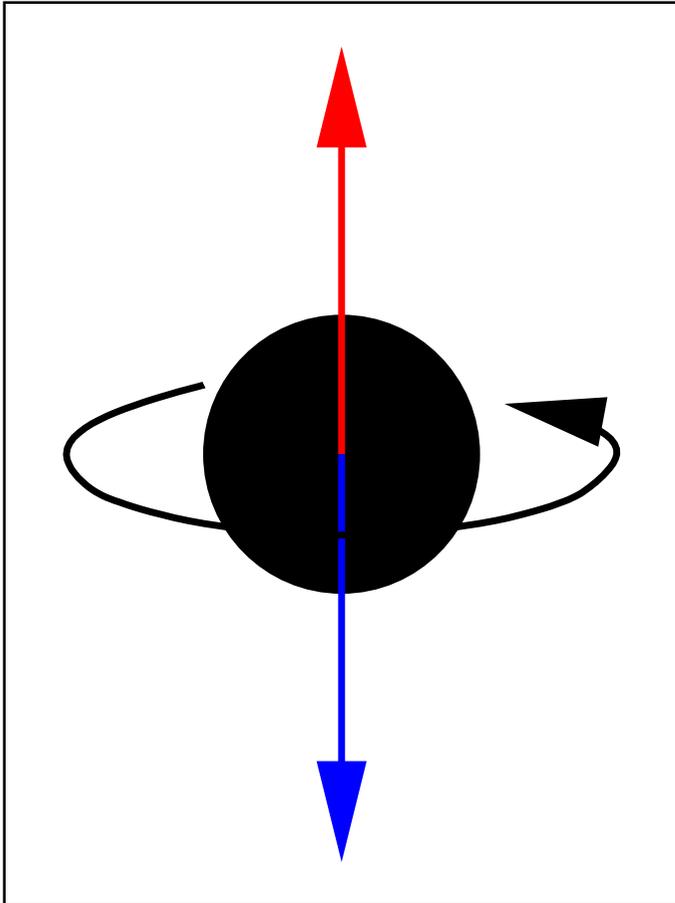
$$\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \times \vec{E} + \dot{\vec{B}} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \times \vec{H} = \vec{j} + \dot{\vec{D}}$$

*Ten thousand years from now, there can be little doubt that the most significant event of the 19th century will be judged as Maxwell's discovery of the laws of electrodynamics.*

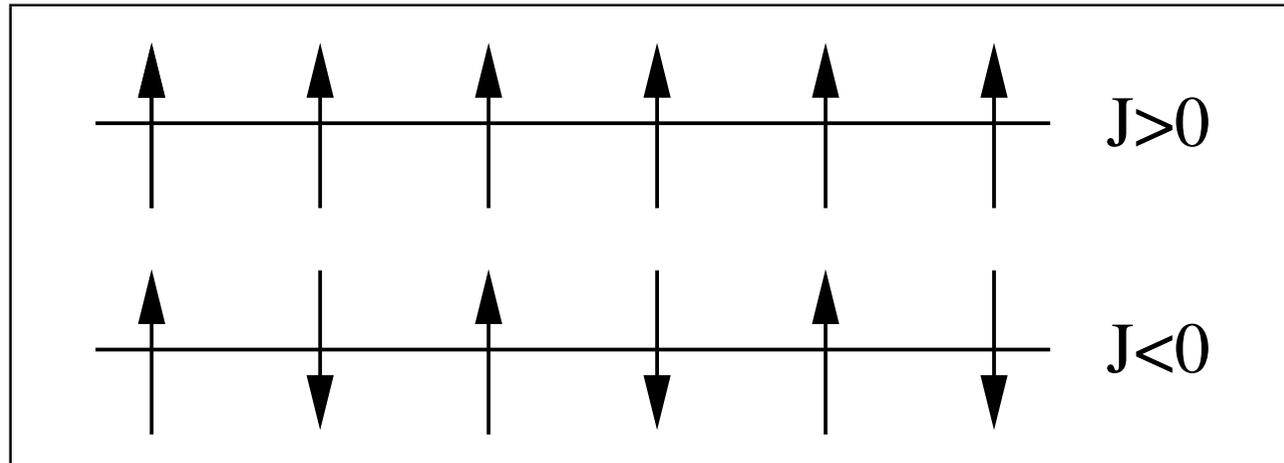
Richard Feynman

# Magnetismus I



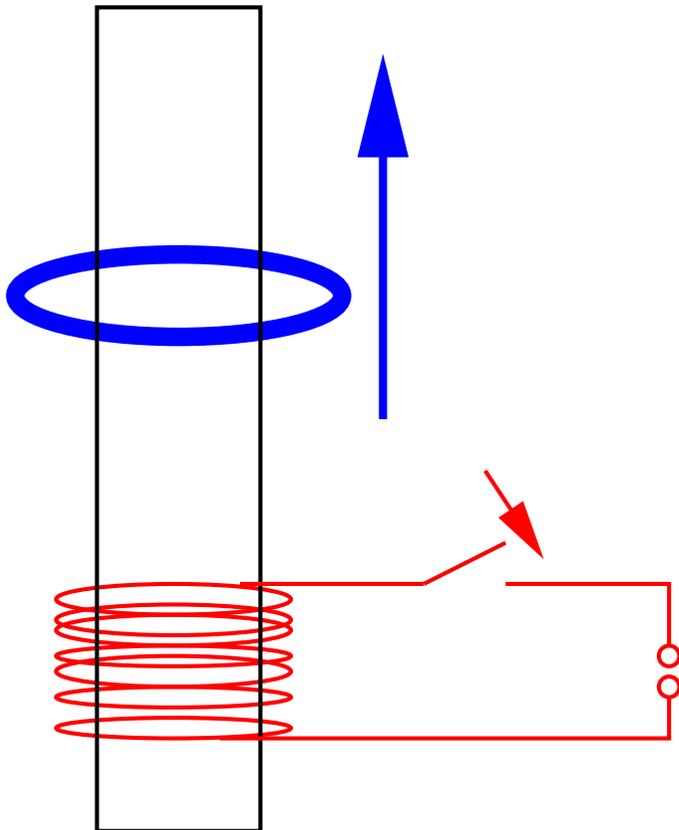
- Modernes Bild vom Magnetismus:
- Kreisströme, z.B. Elektronen im Atom, haben magnetisches Moment.
- Der Spin (Eigendrehimpuls) ist ebenfalls mit einem magnetischen Moment verbunden.
- Magnetische Momente wechselwirken mit Magnetfeldern wie die Kompassnadel mit dem Erdmagnetfeld.

## Magnetismus II



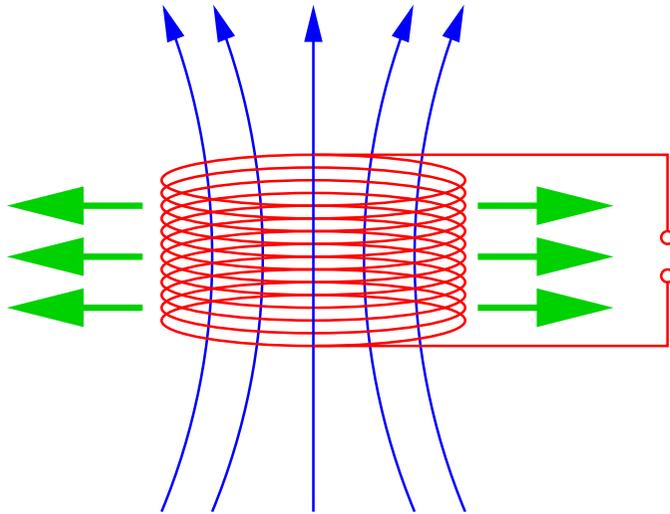
- **Paramagnet:** einzelnes Moment, das sich im Feld ausrichten kann.
- **Ferromagnet:** gleichgerichtete Momente,  $J > 0$ .
- **Antiferromagnet:** möglichst entgegengesetzt gerichtete Momente,  $J < 0$ .
- **Heisenberg-Modell:** 
$$\underline{H} = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \vec{s}(i) \cdot \vec{s}(j)$$
- **Diamagnet:** Material hat kein permanentes Moment, dieses kann aber durch ein äußeres Magnetfeld hervorgerufen werden (siehe fliegender Frosch).

# Alle Stoff sind (auch) Diamagnete



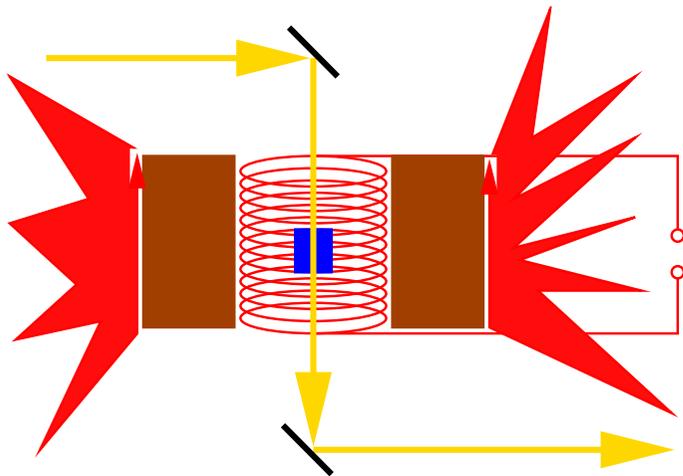
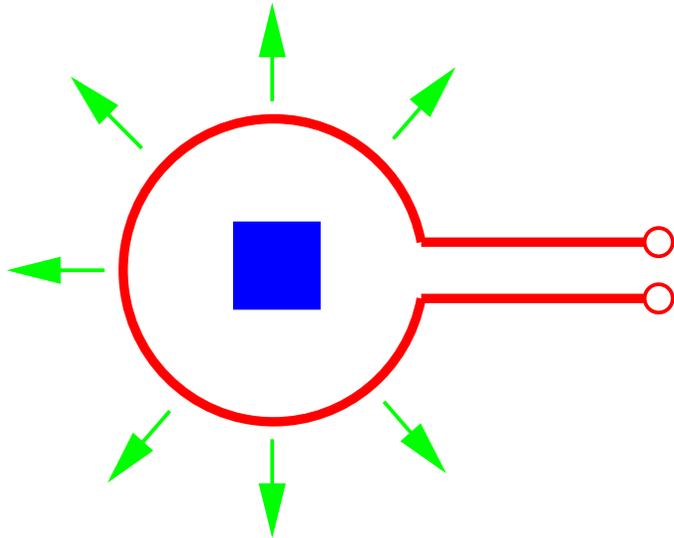
- Magnete beziehungsweise Magnetfelder können Stoffe so verändern, dass sie magnetisch werden.
- Induktion, Lenz, induzierte Felder stoßen sich vom ursprünglichen Feld ab.
- Thomsonscher Ringversuch,
- Kohlenstoff schwebt im Magnetfeld,
- Fliegender Frosch.
- Magnetismus durch Magnete!

# Problem: Große Magnetfelder



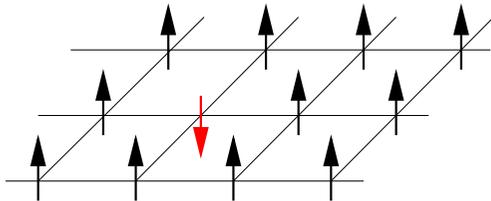
- Große Magnetfelder sind schwer herstellbar.
- Hohe Stromstärken, viel Elektroenergie; maximales statisches Feld  $\approx 35 \text{ T} \Rightarrow 24 \text{ MW!}$
- Lorentz-Kraft: Das starke Magnetfeld zerzt an der Spule. Dadurch kann sie zerreißen.
- Aber wir Physiker sind schneller!

# Gepulste Supermagnetfelder



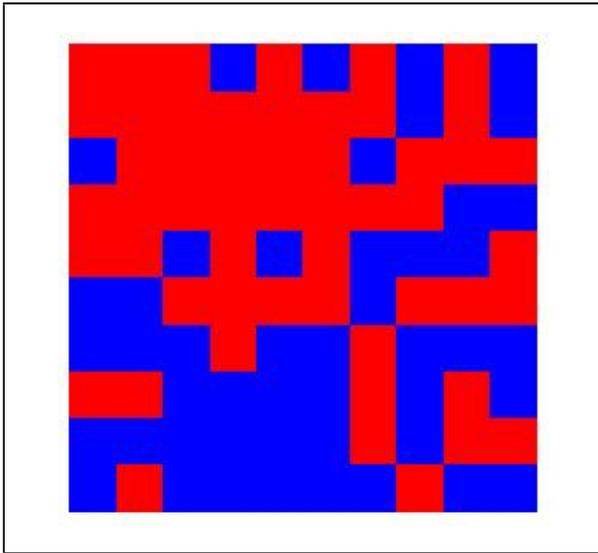
- Beim Herstellen großer gepulster Magnetfelder geht leider die Spule kaputt.
- Trotzdem kann man in der kurzen Zeit (Millisekunde) eine Messung durchführen, z.B. mit einem Laserstrahl.
- Für Felder von 80-300 Tesla explodiert die Spule einfach.
- Für Felder über 300 Tesla versucht man, die Explosion der Spule mit einer Gegenexplosion aufzuhalten und das Magnetfeld zusammenzuquetschen; allerdings auch nur für Millisekunden.

# Ferromagnetismus: eine geordnete Phase



- Ferromagnetismus: Stoff befindet sich in einer Phase (wie fest, flüssig, gasförmig).
- Ising-Modell: elementare „Magnetnadeln“ (Spins) können nur nach oben oder nach unten zeigen.
- Die Wechselwirkung zwischen nächsten Nachbarn bevorzugt Gleichrichtung.
- Eindimensionales Modell: analytisch gelöst, kein Phasenübergang (Ising gibt auf und verlässt physikalische Forschung).
- Zweidimensionales Modell: analytisch gelöst, Phasenübergang.

# Ferromagnetismus: Simulation im Ising-Modell



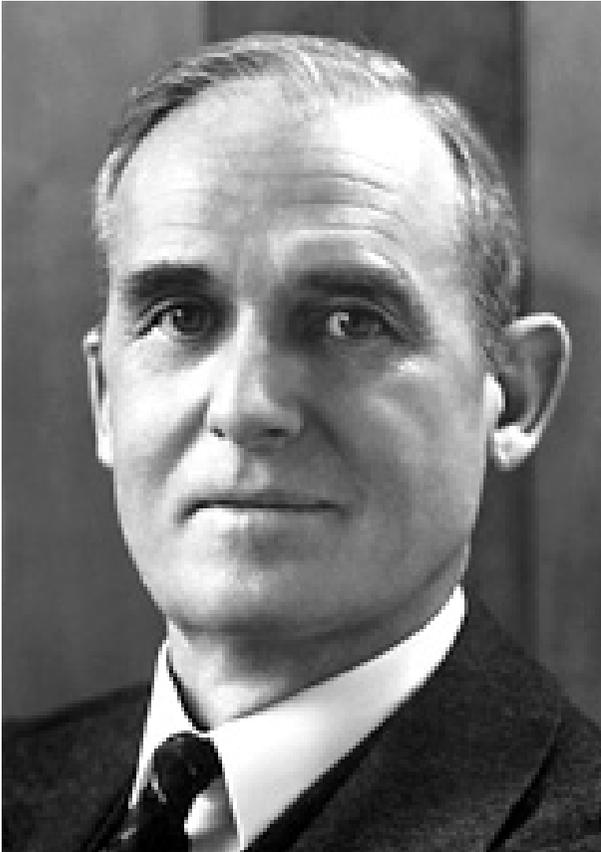
- Wie verhält sich der Ising-Ferromagnet als Funktion der Temperatur?
- Bei kleinen Temperaturen sollte er magnetisch sein, d.h., die Mehrheit der Spins sollte in dieselbe Richtung zeigen.  
Bei großen Temperaturen sollte er unmagnetisch sein, d.h., die Magnetnadeln zeigen statistisch gleichverteilt nach oben und unten = Paramagnet.
- Übergang ist ein Phasenübergang bei einer bestimmten Temperatur  $T_c$ .

Metropolis-Algorithmus: die nötige Zustandssumme (Physik, 5. Semester) wird ausgewürfelt. Merke: Integrale und Summen kann man auswürfeln!

Was macht man damit heute  
Spannendes, wo doch der  
Kühlschranksmagnet schon  
erfunden ist?

# Kühlschränke!

## Magnetisches Kühlen: Nobelpreis 1949



The Nobel Prize in Chemistry 1949 was awarded to William F. Giaouque *for his contributions in the field of chemical thermodynamics, particularly concerning the behaviour of substances at extremely low temperatures.*

# Magnetisches Kühlen: Geschichte

768

LETTERS TO THE EDITOR

## Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

We have recently carried out some preliminary experiments on the adiabatic demagnetization of  $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  at the temperatures of liquid helium. As previously predicted by one of us, a large fractional lowering of the absolute temperature was obtained.

An iron-free solenoid producing a field of about 8000 gauss was used for all the measurements. The amount of  $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  was 61 g. The observations were checked by many repetitions of the cooling. The temperatures were measured by means of the inductance of a coil surrounding the gadolinium sulfate. The coil was immersed in liquid helium and isolated from the gadolinium by means of an evacuated space. The thermometer was in excellent agreement with the temperature of liquid helium as indicated by its vapor pressure down to 1.5°K.

On March 19, starting at a temperature of about 3.4°K, the material cooled to 0.53°K. On April 8, starting at about 2°, a temperature of 0.34°K was reached. On April 9, starting at about 1.5°, a temperature of 0.25°K was attained.

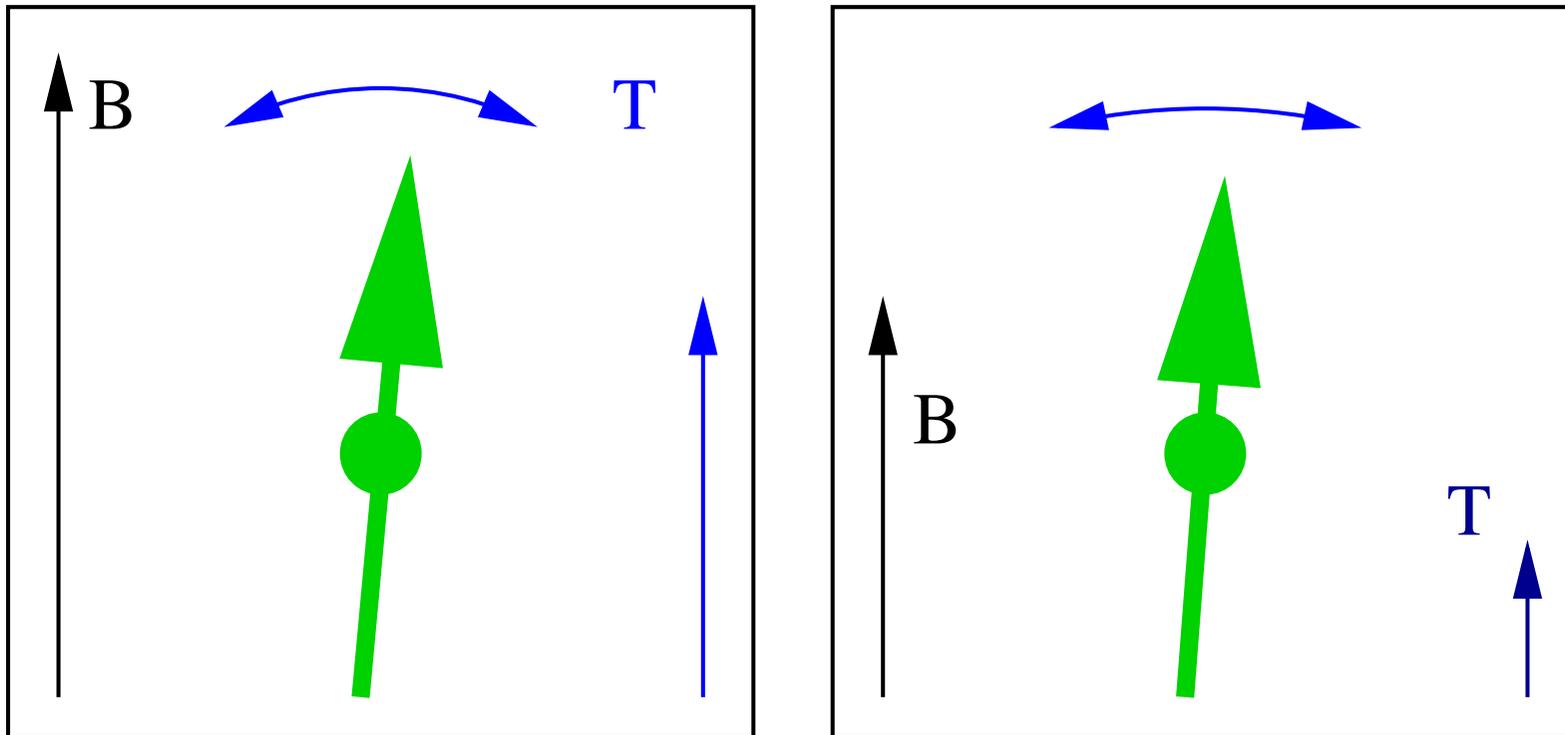
It is apparent that it will be possible to obtain much lower temperatures, especially when successive demagnetizations are utilized.

W. F. GIAUQUE  
D. P. MACDOUGALL

Department of Chemistry,  
University of California,  
Berkeley, California,  
April 12, 1933.

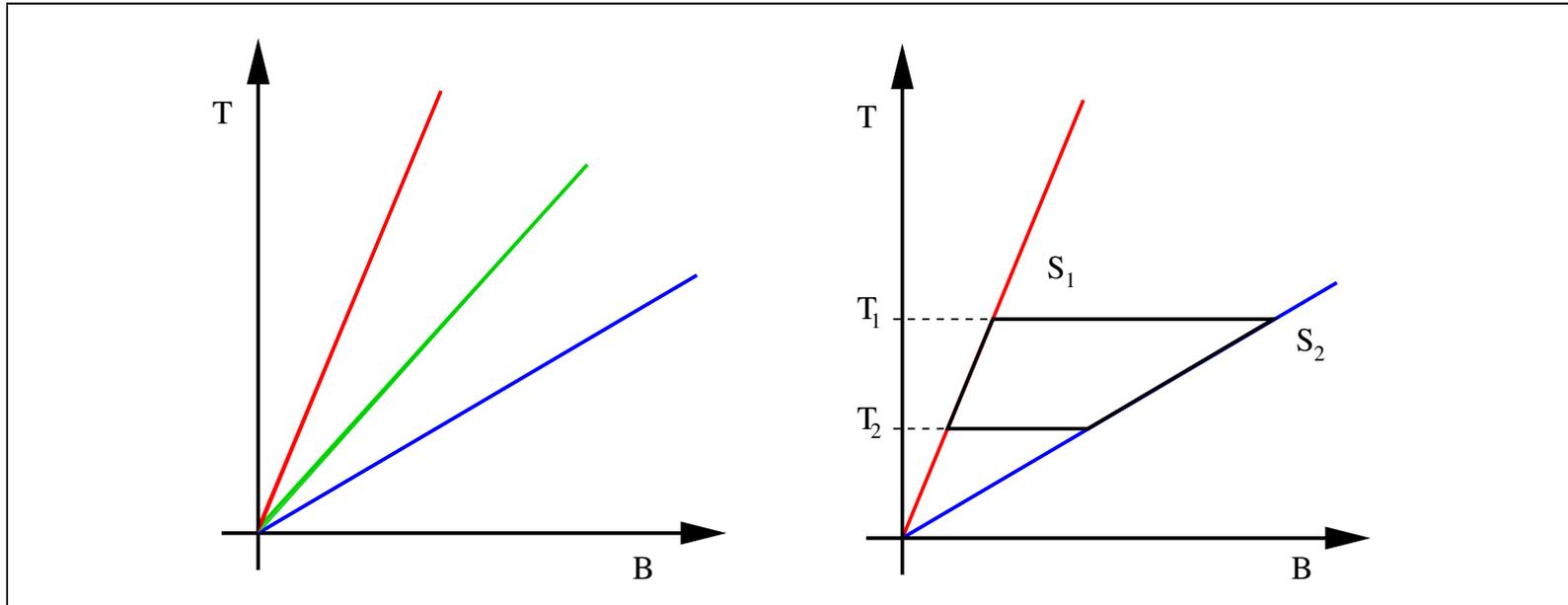
W. F. Giauque and D. MacDougall, Phys. Rev. **43**, 768 (1933).

# Magnetokalorischer Effekt anschaulich



Verringern des Magnetfeldes bei gleich bleibender „Ordnung“ (Entropie) führt zu einer Temperaturerniedrigung.

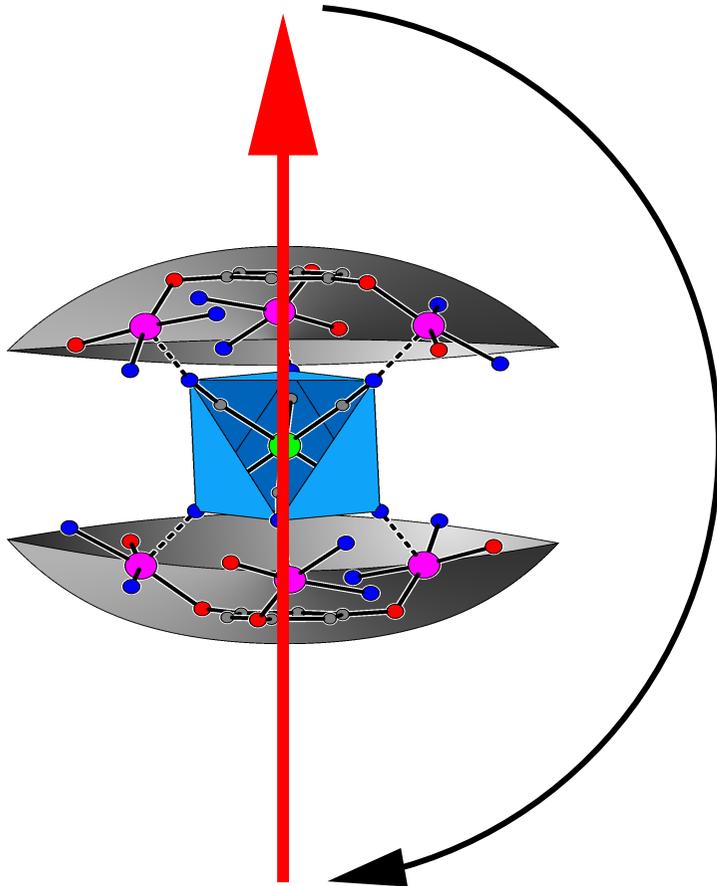
# Magnetisches Kühlen: Paramagnet



- **Idealer Paramagnet:**  $S(T, B) = f(B/T)$ , i.e.  $S = const \Rightarrow T \propto B$ .
- Carnot-Kreislauf für Wärmekraftmaschinen und Kühlschränke.

# Magnetische Moleküle als Speicher?

# Magnetische Moleküle als Speicher I



- Magnetische Moleküle können einen großen Gesamtspin aufweisen;
- Gesamtspin kann durch Anisotropiebarriere stabilisiert werden;
- Speicher: 1 Molekül = 1 Bit.

**ABER ...**

Ohne Quantenmechanik geht  
nichts!

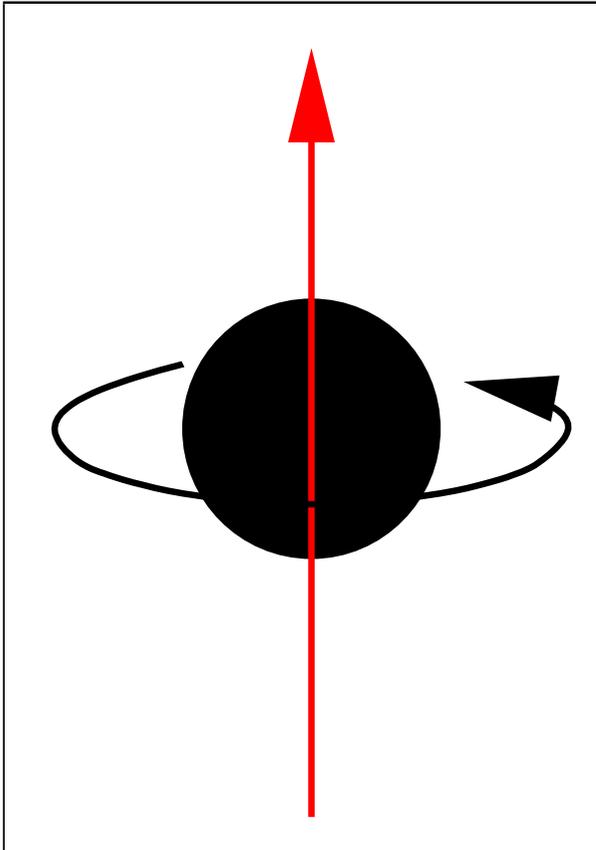
# Quantenspins I – Zustände

$$\uparrow = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\downarrow = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Zustände des Quantensystems werden durch Vektoren dargestellt.  
Ein Spin  $s = 1/2$  lebt in einem zweidimensionalen Vektorraum.

# Quantenspins II – Spinoperatoren



$$\vec{s}_z = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

Operatoren des Quantensystems werden durch Matrizen dargestellt.  
 Matrizen vermitteln Abbildungen.  
 Spins sind Vektoroperatoren, also Vektoren von Matrizen.

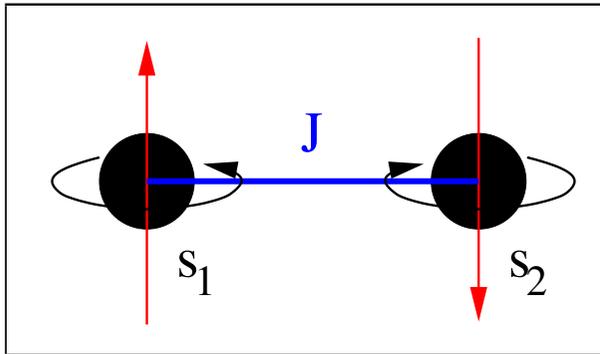
## Quantenspins III – Zustände für 2 Spins

$$\begin{aligned}
 \uparrow\uparrow &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, & \uparrow\downarrow &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 \downarrow\uparrow &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, & \downarrow\downarrow &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Zwei Spins von je  $s = 1/2$  leben in einem vierdimensionalen Vektorraum.

**Hausaufgabe: Wie groß ist der Vektorraum für drei Spins mit  $s = 1/2$ ? Für  $N$ ?**

# Quantenspins IV – Wechselwirkende Spins



$$\begin{aligned} \underline{H} &= -\frac{2J}{\hbar^2} \vec{s}_1 \cdot \vec{s}_2 \\ &= -J \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

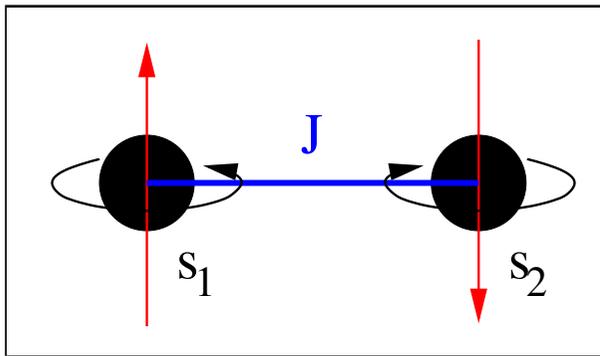
Die Wechselwirkungsenergie ist wieder eine Matrix.

Sie hat die Dimension des Vektorraumes.

Für zwei Spins mit  $s = 1/2$  ist das also eine  $4 \times 4$ -Matrix.

Wir benötigen alle Eigenwerte und Eigenvektoren, um zu verstehen, was das Quantensystem macht.

# Quantenspins V – Antiferromagnetischer Grundzustand



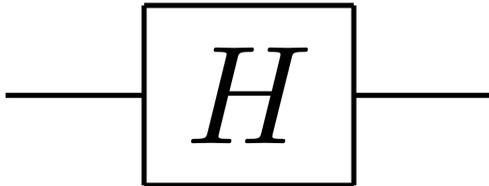
- Antiferromagnetischer Grundzustand:

$$\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- So etwas gibt es klassisch nicht!  
Superposition aus  $\uparrow\downarrow$  und (gleichzeitig)  $\downarrow\uparrow$ ;

- Grundlage für [Quantenkryptographie](#) und [Quantencomputer](#);
- Geschichte: Albert Einstein und Nils Bohr haben sich genau darüber Jahrzehnte lang gestritten.

# Quantencomputer I: Hadamard-Gate

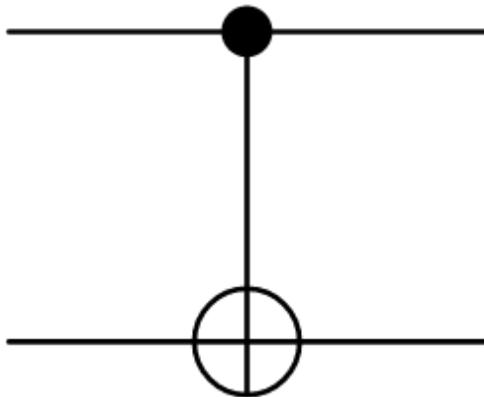


$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

- Überführt Zustände  $\uparrow$  und  $\downarrow$  in Überlagerungen aus den beiden.
- Braucht man im Quantencomputer, um z.B. aus einem  $\uparrow$ -Zustand, den man mit einem Magnetfeld präparieren könnte, einen Zustand zu erzeugen, der eine Überlagerung ist.
- **Wenn man mit der Überlagerung weiterrechnet, kann man Dinge für  $\uparrow$  und  $\downarrow$  GLEICHZEITIG ausrechnen!**

## Quantencomputer II: CNOT-Gate



$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- Controlled NOT: Invertiert den zweiten Spin, wenn erster Spin ↓.
- Alle Operationen des Quantencomputers sind von dieser Art. Zustände, die Überlagerungen (Superpositionen) beschreiben, werden durch die Quantengates in neue Zustände umgewandelt.
- Output: den letzten Zustand muss man mittels Messung untersuchen. Man bekommt i.d.R. kein eindeutiges Ergebnis.

# Wir simulieren soetwas mit mächtigen Computern



128 cores, 384 GB RAM

## Im Studium dürfen Sie auch!



Quantenmechanik: 4. Semester

Thermodynamik: 5. Semester

Sie dürfen auf diesem Computer spielen: > 8. Semester

128 cores, 384 GB RAM

Manchmal reicht das nicht!

# Manchmal muss es einfach die ganz große Lösung sein!



Supercomputer **SuperMUC NG** am Leibniz-Rechenzentrum in Garching:  
26,8739 PFLOPS, 311.040 Intel-Prozessor-Cores (Xeon Platinum)  
Platz 9 der TOP500-Liste der weltbesten Rechner, schnellster Rechner in der Europäischen Union

**Und Sie könnten dabei sein!**

Wenn das auch nicht  
mehr hilft:

Papier und Bleistift

(Zeit für eine neue Theorie)

Molecular Magnetism Web

[www.molmag.de](http://www.molmag.de)

Highlights. Tutorials. Who is who. Conferences.

Und Ihnen allen:  
Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit

(Sie haben's geschafft!)