

Physik - Wie Forschung Spaß macht
Chemnitz 12.12.2009

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

**Ordnung ist etwas Natürliches -
das Nützliche ist Chaos**

P. Häussler
TU Chemnitz
Institut für Physik

Professur Physik Dünner Schichten



Arthur Schnitzler

* 15.05.1862 in Wien

† 21.10.1931 in Wien

österreichischer Erzähler und Dramatiker (Der Reigen)
einer der bedeutendsten Vertreter der Wiener Moderne

Einige Bemerkungen zum Satz von Schnitzler

Sie werden sich wohl wundern, denken, dass eher Chaos das Natürliche ist und Ordnung das Nützliche! Das waren auch meine ersten Gedanken, dann aber habe ich meine Meinung ändern müssen. Anlass waren unsere eigenen Arbeiten zur Strukturbildung in Materie, Arbeiten, die sich damit beschäftigen, wie sich aus einem Haufen von Atomen (zum Beispiel einer Ansammlung von 10^{23} Atomen, einer Gaswolke), ohne Zutun des Menschen, alleine durch Abkühlen, selbstorganisierend Kristalle bilden.

Das ist ein bis heute **nicht verstandenes Problem**. Ich möchte Ihnen erzählen, was wir dazu herausgefunden haben, möchte Ihnen aber das Ganze in einen größeren Zusammenhang stellen. Sie werden dann auch verstehen, weshalb es **in der Natur keine Metalle** gibt. Metalle sind aus der Sicht der Natur instabil (bei Zimmertemperatur), ungewollt, weshalb man allerlei Tricks anwenden muss, um sie in die Hände zu bekommen, und noch mehr Tricks, um sie durch Reaktionen mit anderen Atomen nicht wieder zu verlieren. Deshalb sollten Sie darauf achten, dass Lack immer schön ihr Auto oder Fahrrad schützt.

Was hat der Satz von Schnitzler damit zu tun?

Ich werde Ihnen zeigen, was die physikalischen Prinzipien sind, damit auf allen Stufen immer wieder **aus dem Chaos heraus als ein natürlicher Vorgang Ordnung** entsteht. **Das Chaos ist nützlich, Ordnung das natürliche Ergebnis.**

Ganz dringend notwendig muss aber zuerst mal Unordnung/Chaos vorhanden sein (ohne Unordnung keine Strukturbildung, ohne Mutation/Chaos keine Lebewesen!)

Aber, lassen sie mich von Anfang an beginnen

Ordnungsprozesse von Anfang an

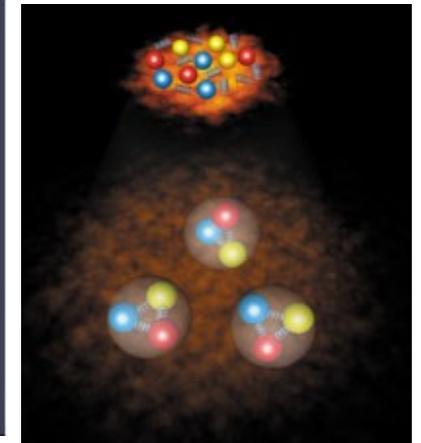
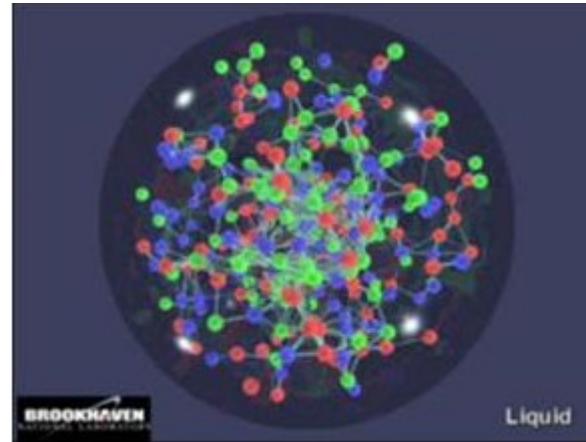
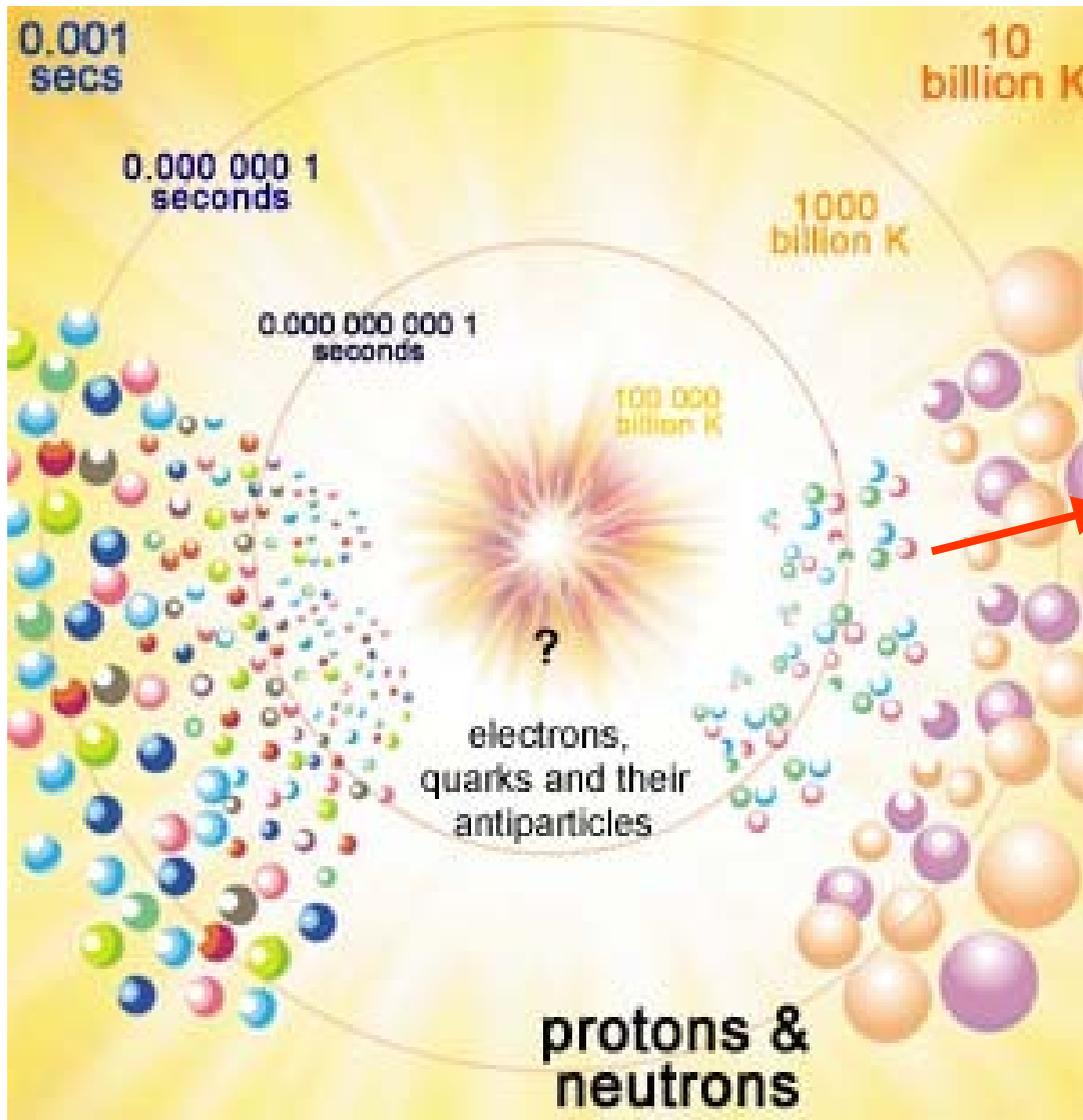
es gibt nur einen einzigen, extrem einfachen Zustand
(eine so genannte Singularität)
eigentlich hochgeordnet, aber mit extrem hoher Energie

kein Raum
keine Zeit
kein Impuls
keine Teilchen
kein Drehimpuls
keine Entropie
keine elektr. Ladung
nur Energie

Urknall:
die Geburt von Raum und Zeit und ...
vor etwa 14 Milliarden Jahren

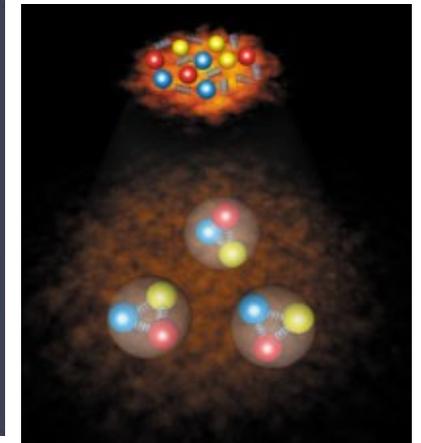
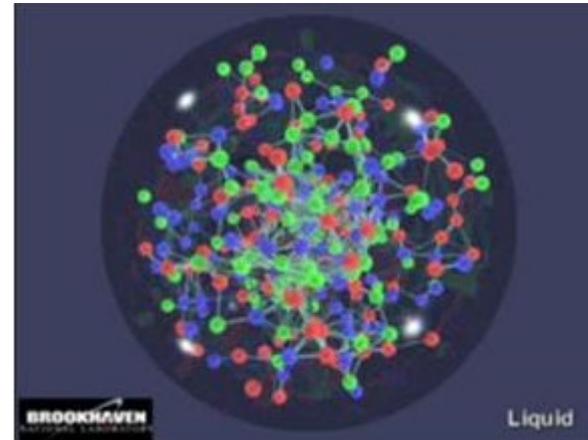
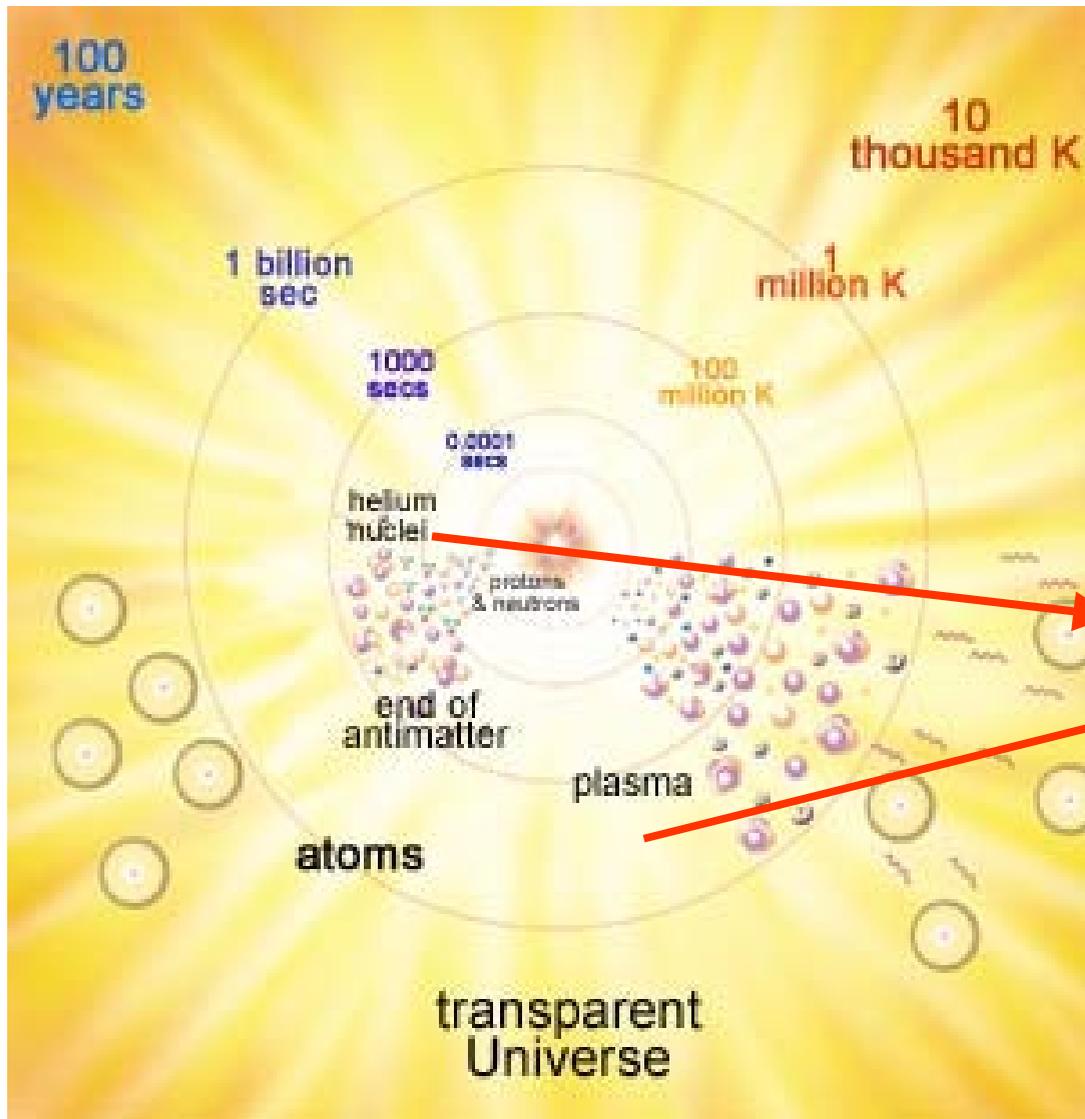
- wie kam Ordnung, Struktur in's Universum ?
(die Materialien in unserer Umgebung, ihre Eigenschaften, auch wir selbst!)
- wie, sehr spät, bilden sich z.B. aus einem Haufen von Kohlenstoffatomen Diamanten oder Graphit ?
- weshalb werden manche Materialien supraleitend, andere werden isolierend oder zu Körperzellen ?
- was verbindet die frühen Prozesse mit denen, die heute und zukünftig ablaufen ?

Alles ist das natürliche Ergebnis von sich selbst organisierenden, strukturbildenden Prozessen
- festgelegt durch Wechselwirkung zwischen vormals unabhängigen (chaotischen) Teilchen
(Austausch von irgend etwas)
- je schwächer diese Wechselwirkung, bei desto tieferer Temperatur tritt Ordnung auf
(Wärme stört die Ordnung)



Aus Quarks und Gluonen bildet sich ein Hadron (z.B. ein Proton oder ein Neutron)

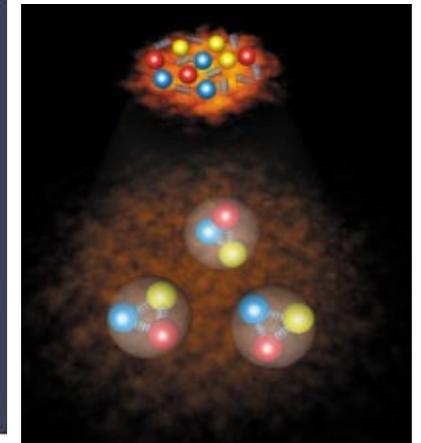
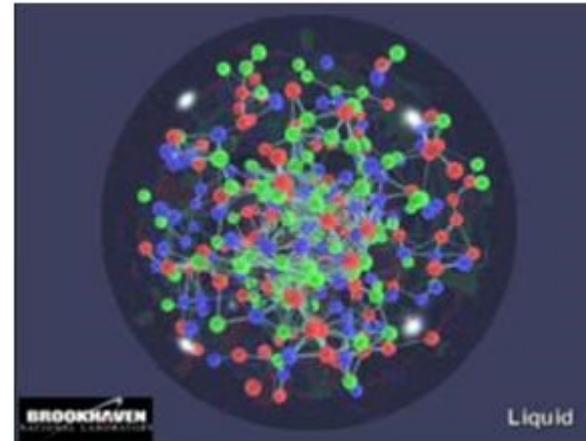
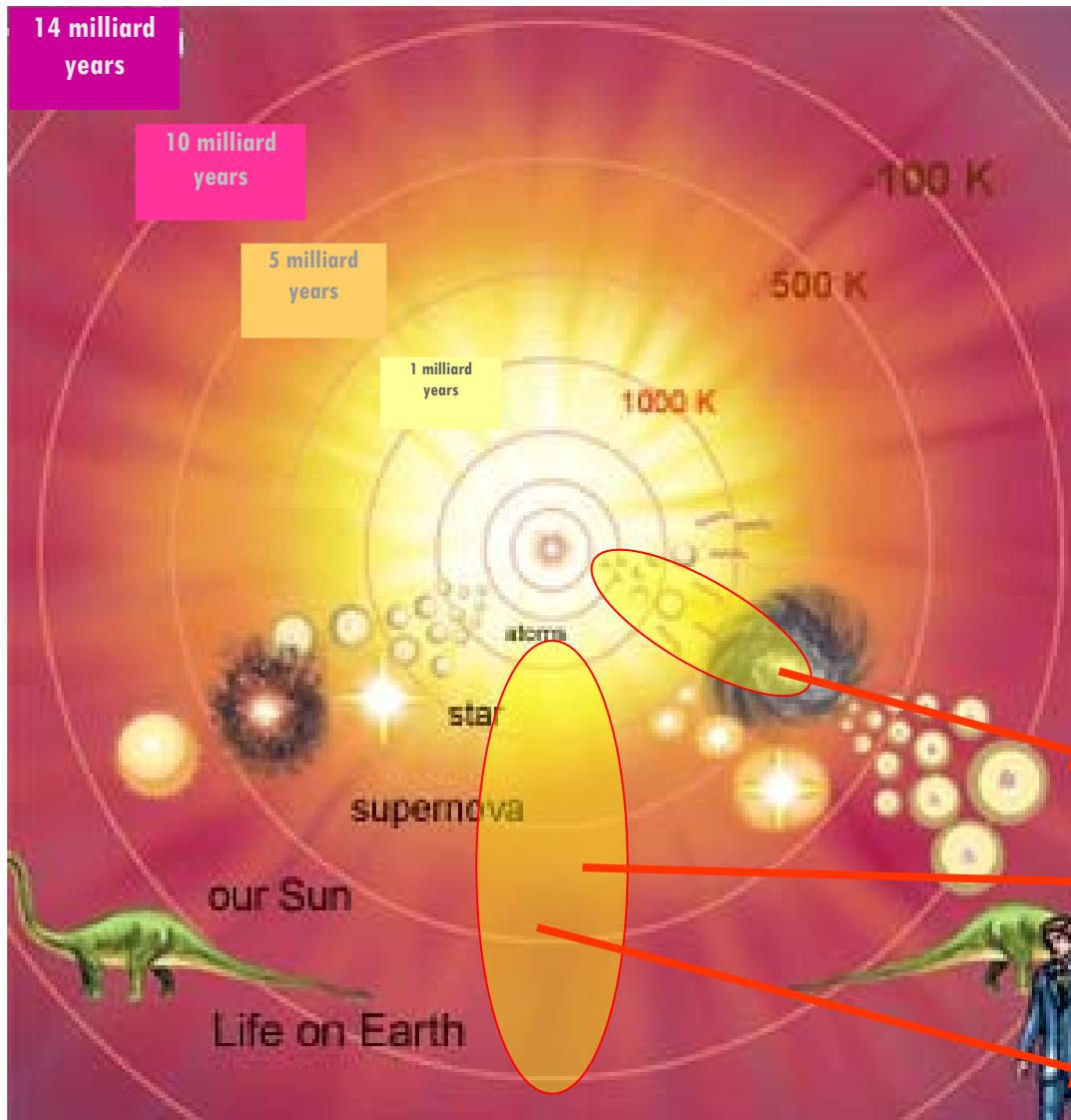
- durch die Ausdehnung des Raumes werden die Energiedichte und die Temperatur immer niedriger (heute ist die Temp. etwa -271°C , etwa 2.7K)
- in jeder Situation haben die 'Teilchen' immer wieder die tiefstmögliche Energie zu finden.
- Es gibt verschiedene Möglichkeiten dazu, z.B. Ordnungsprozesse.
- auf jeder Stufe wird Entropie erzeugt \Rightarrow gibt den Zeitpfeil vor, ist ein 'natürlicher' Prozeß



Aus Quarks und Gluonen bildet sich ein Hadron (z.B. ein Proton oder ein Neutron)

Aus Hadronen und Gluonen bildet sich ein Atomkern, aus einem Kern und Elektronen ein Atom.

- durch die Ausdehnung des Raumes werden die Energiedichte und die Temperatur immer niedriger (heute ist die Temp. etwa -271°C , etwa 2.7K)
- in jeder Situation haben die 'Teilchen' immer wieder die tiefstmögliche Energie zu finden.
- Es gibt verschiedene Möglichkeiten dazu, z.B. Ordnungsprozesse.
- auf jeder Stufe wird Entropie erzeugt \Rightarrow gibt den Zeitpfeil vor, ist ein 'natürlicher' Prozeß



Aus Quarks und Gluonen bildet sich ein Hadron (z.B. ein Proton oder ein Neutron)

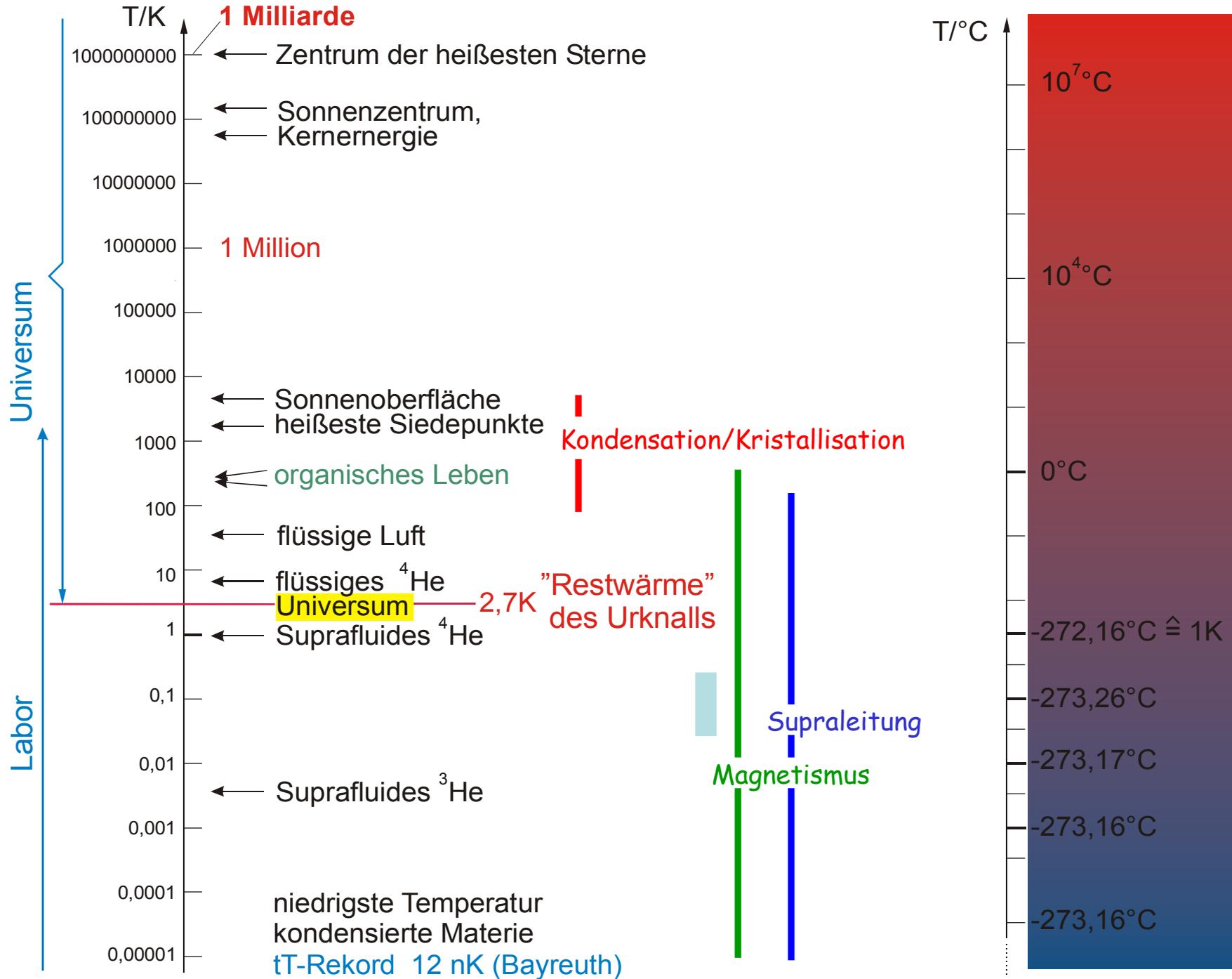
Aus Hadronen und Gluonen bildet sich ein Atomkern, aus einem Kern und Elektronen ein Atom.

Sichtbare und dunkle Materie wechselwirken miteinander (bilden großräumige Strukturen: Galaxien)

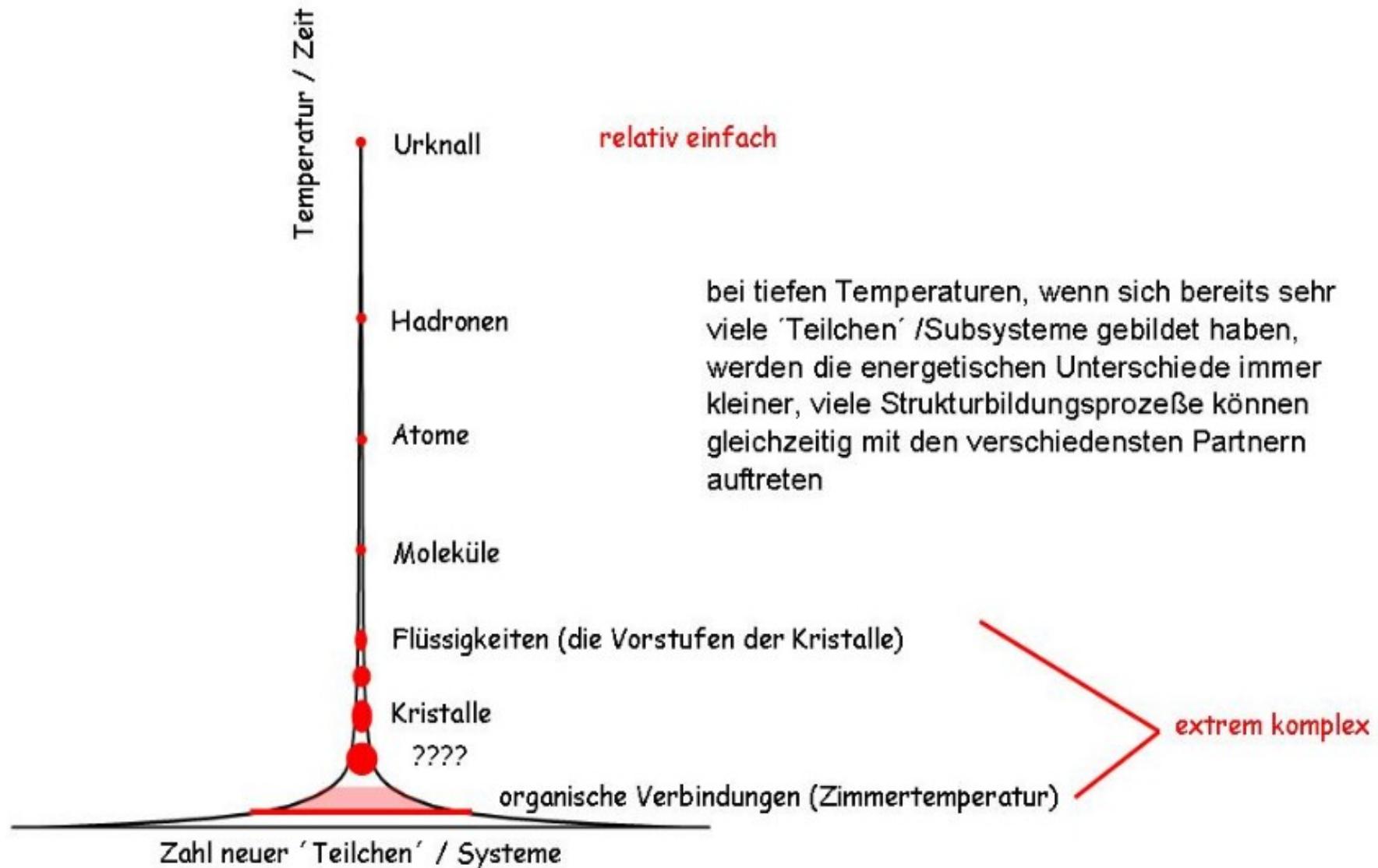
Elektronen ww miteinander, bilden ein Fermigas (Elektronen im Fermigas verhalten sich kollektiv, gehorchen anderer Statistik und bilden ein Subsystem/ 'Teilchen')

Das Fermigas bildet mit den Ionen/Atomen ein neues 'Teilchen', einen Kristall

- durch die Ausdehnung des Raumes werden die Energiedichte und die Temperatur immer niedriger (heute ist die Temp. etwa -271°C , etwa 2.7K)
- in jeder Situation haben die 'Teilchen' immer wieder die tiefstmögliche Energie zu finden.
- Es gibt verschiedene Möglichkeiten dazu, z.B. Ordnungsprozesse.
- auf jeder Stufe wird Entropie erzeugt \Rightarrow gibt den Zeitpfeil vor, ist ein 'natürlicher' Prozeß



Weshalb ist Strukturbildung bei tiefen Temperaturen so schwer zu beschreiben?



- Strukturbildung ist ein Vorgang, bei dem vormals unabhängige 'Teilchen' (chaotisch sich verhaltend) durch Wechselwirkung (Austausch von irgend etwas) aus dem **ungebundenen** in den **gebundenen** Zustand übergehen, sich ordnen.
- Der **ungebundene** Zustand ist ein **Nichtgleichgewichtszustand**, er ist instabil bei geringsten Störungen
- Durch solche Störungen geht er, unter **Erzeugung von Entropie**, in den **gebundenen** Zustand über, den stabilen **Gleichgewichtszustand**
(Gleichgewicht von was, messbar durch welche Eigenschaften?)
- Der **gebundene** (geordnete) Zustand, hat andere, neue Eigenschaften, bildet ein neues 'Teilchen' (ein Hadron, oder einen Atomkern, oder ein Atom, oder ein Molekül, oder einen Kristall)

Das einfachste Model, harmonischer Oszillator (Physik I im 1.Semester):

Experimente mit Kugeln/' Teilchen' und Federn/Kopplern (2 und mehr)

Ein Experimente mit 2 gekoppelten Pendeln und

Ein Experiment mit mehreren gekoppelten Pendeln

Was haben solche Pendel damit zu tun, dass sich

Quarks und Gluonen zu Hadronen reagieren?

Atomkerne und Elektronen sich zu Atomen bilden?

mehrere Atome sich zu Molekülen zusammenfinden?

viele Elektronen mit den Atomen zu einer Schmelze und dann zu einem Kristall sich formieren?

.....

manche Materialien isolierend werden?

manche Materialien metallisch?

wieder andere Materialien supraleitend?

Eisen magnetisch wird?

Organische Moleküle sich zu Mäusen oder Menschen formen?

.....

aus zwei Menschen sich ein Ehepaar bildet?

in einer Gesellschaft sich ein Kirchenchor oder ein Fußballverein bilden?

.....

dunkle und normale Materie Ansammlungen von Galaxien bilden?

.....

.....

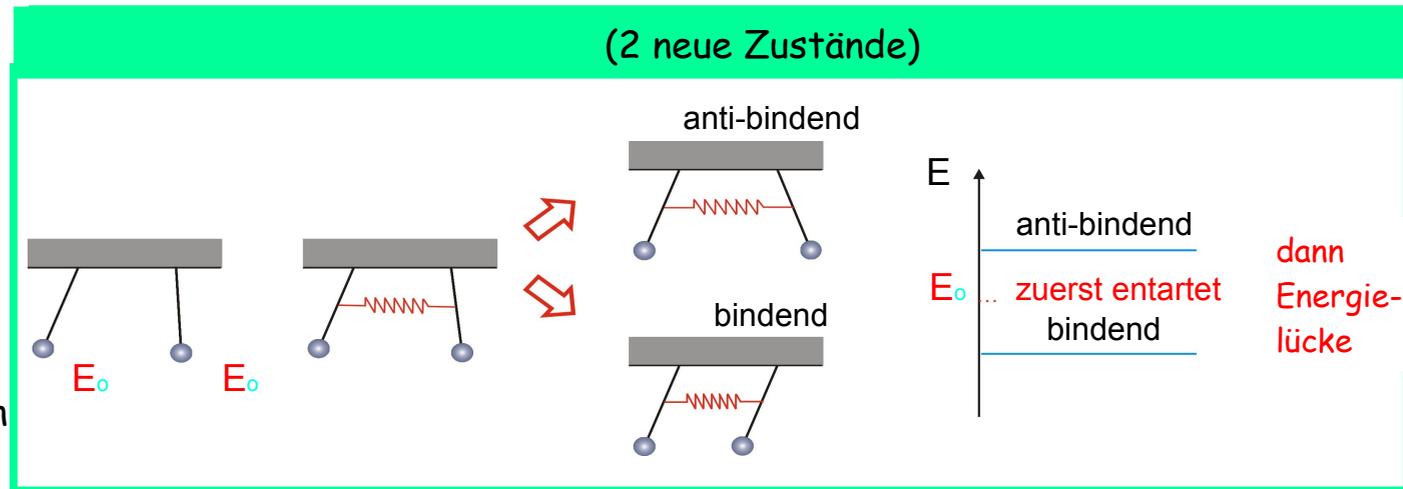
Unter resonanten Bedingungen können sie unter Entropieerzeugung den tiefsten, den bindenden Zustand besetzen, neue 'Teilchen' bilden. Sie stellen das einfachste strukturbildende System dar!  ein Modell

Wie geschieht 'Strukturbildung' beim gekoppelten Pendel?

durch den Aufbau von Resonanzen

Austausch von Energie und Impuls,
vermittelt durch die Feder.

Impuls-Gleichgewicht, ausgedrückt durch
gleiche Geschwindigkeiten



Resonanz zwischen Pendeln
(resonant präpariert, keine Selbstorganisation!)

Wie geschieht die Energieerniedrigung in Materie?

durch den Aufbau von lokalen Resonanzen

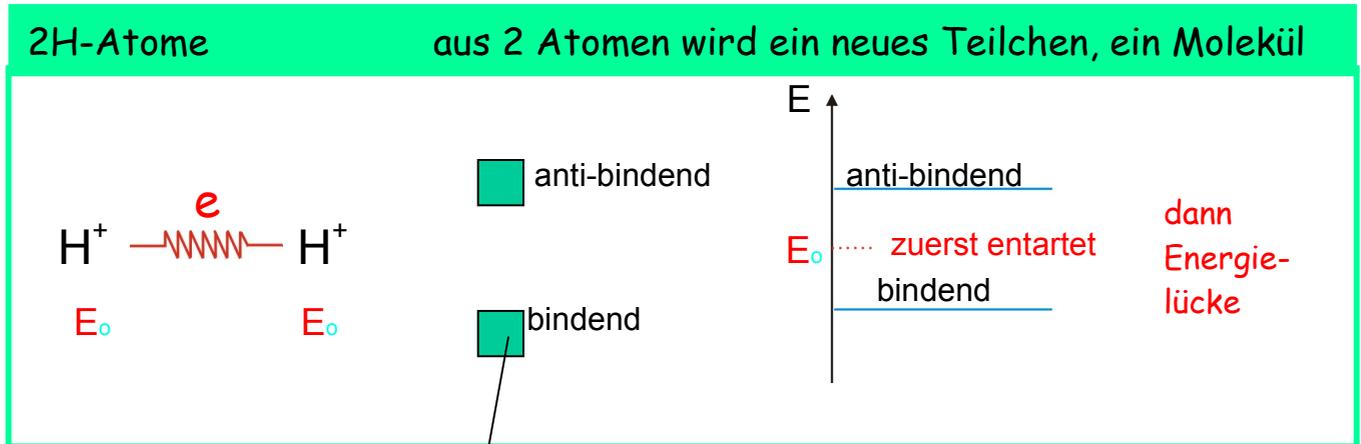
Austausch von Energie und Impuls, vermittelt durch die Elektronen.

Impuls-Gleichgewicht, ausgedrückt durch gleiche Geschwindigkeiten

Molekülbildung in der Gasphase

(lokale Ordnung zwischen Atompositionen und der Elektronendichteverteilung)

(Schrödinger-Gleichung) \Rightarrow bindende - / nicht-bindende Zustände



lokale Resonanzen zwischen Atomen
Selbstorganisation!

Zwei Videos

antibindender Zustand
bindender Zustand

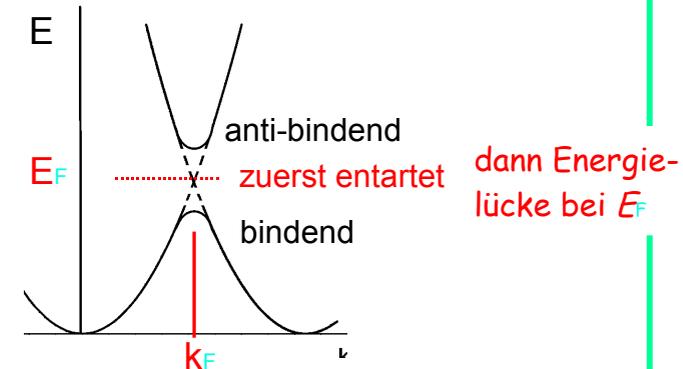
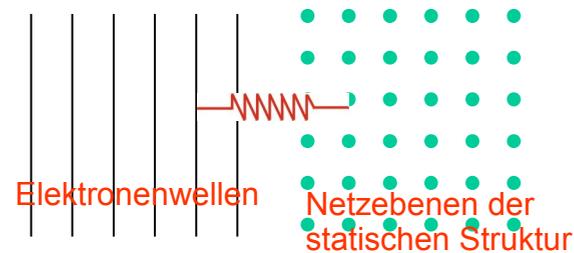
Wie geschieht die Energieerniedrigung in Materie?

durch den Aufbau von globalen Resonanzen

Austausch von Energie und Impuls, vermittelt durch Photonen.

Impuls-Gleichgewicht, ausgedrückt durch gleiche Geschwindigkeiten (kovalente Bdg.)

2 makroskopische Untersysteme / aus 2 Untersystemen wird ein neues



globale Resonanzen zwischen globalen Systemen

Kondensation des Dampfes zur Flüssigkeit

(global sphärische Ordnung zwischen Atompositionen und dem Fermigas)

(global sphärische Resonanzen) \Rightarrow Lücke bei E_F

Gefrieren der Schmelze zum Festkörper

(global planare Ordnung zwischen Atompositionen und der Elektronendichteverteilung)

(globale, planare Resonanzen) \Rightarrow Lücke bei E_F

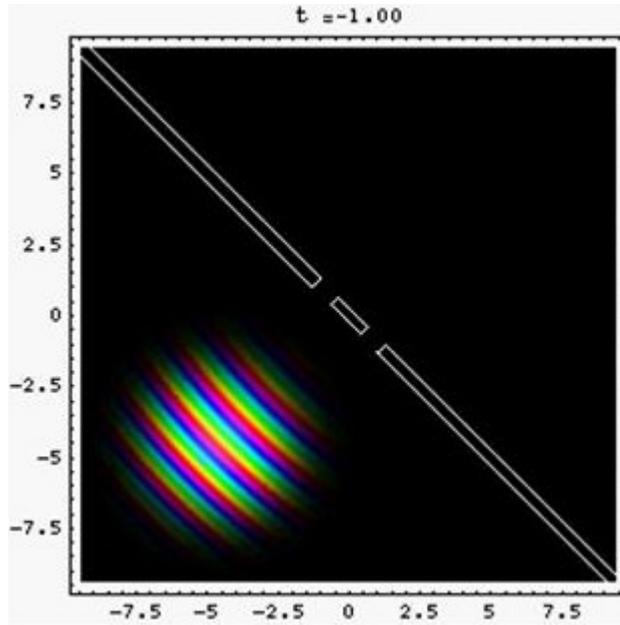
physikal. Handwerkszeug

- Beschreibung der Prozesse in der Sprache einer **Allgemeinen Dynamik**
Nichtgleichgewichte
Gleichgewichte
und Übergänge vom Nichtgleichgewicht unter Entropieerzeugung ins Gleichgewicht
- Beschreibung der beteiligten Subsysteme im Bild der **Wellenmechanik (Quantenmechanik)**
- Bedeutung von Energielücken bei der Fermienergie
Das Fermigas und die atomare Struktur haben extrem unterschiedliche Energien, obwohl sie im Gleichgewicht miteinander sind

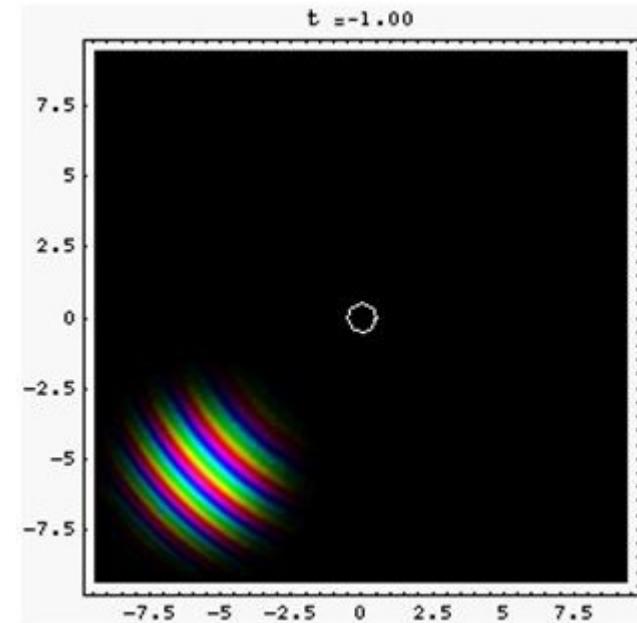


L. de Broglie

Wellenpaket
(Elektron)

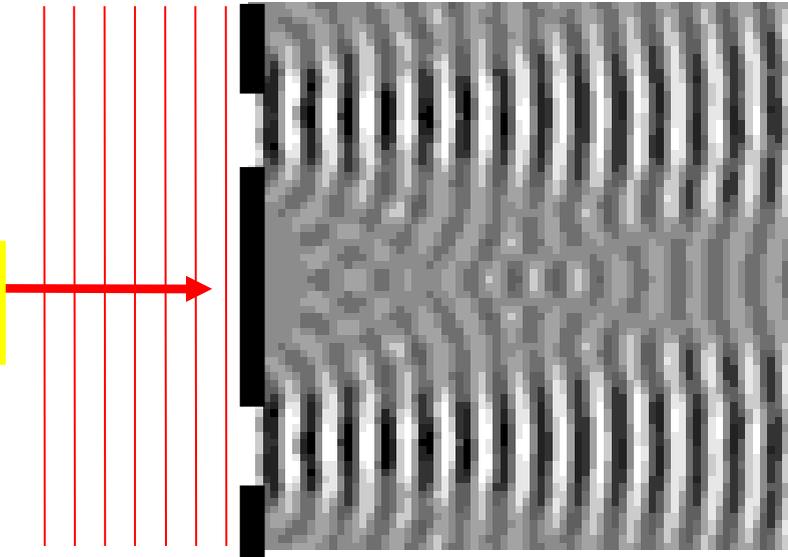


Streuung eines Elektrons
an einer Wand mit 2 Löchern

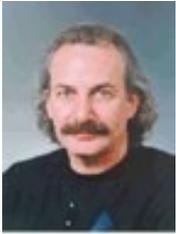


Streuung eines Elektrons
an einem Atom

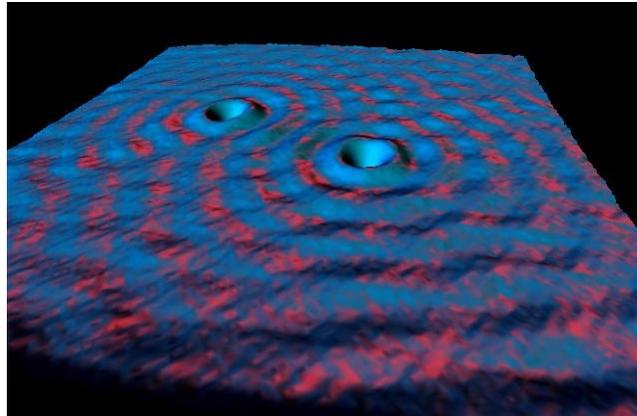
Ebene
Elektronenwelle



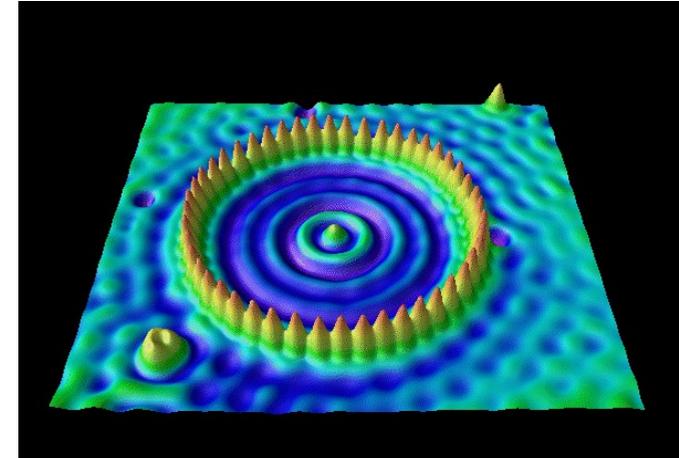
Stationäre Elektronendichte-Oszillationen (mit einem Tunnel-Mikroskop gemessen)



Don Eigler, IBM

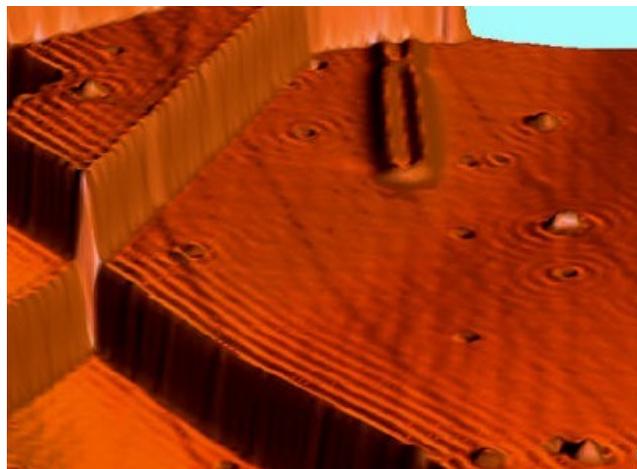


Stationäre Elektronendichtewellen im Umfeld von 2 Fehlatoemen auf Kupfer

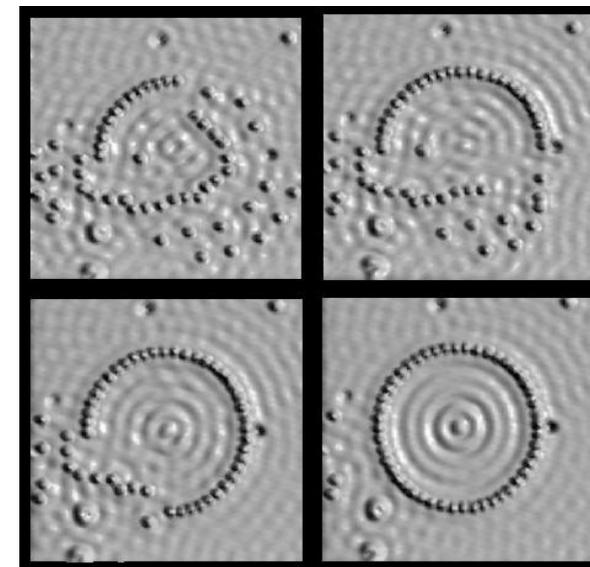


Käfig aus Eisenatomen auf einer Kupferoberfläche mit stationären Elektronendichtewellen im Innern

keine von selbst ablaufende Mechanismen!
(Kanten, Fehlstellen, Käfige sind gegeben bzw. werden konstruiert)



Stationäre Elektronendichtewellen auf Kupfer an Kanten und Störstellen



innere sphärische Wellen sind in Resonanz mit dem Käfig

Käfig in Arbeit

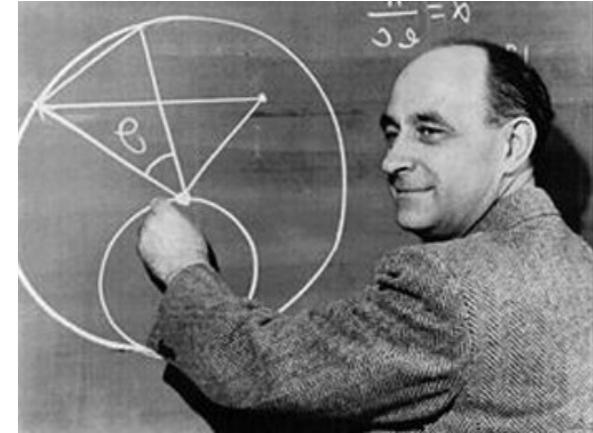
im Moment der Strukturbildung, wenn die Atome noch keine festen Lagen haben, haben die Elektronendichteverteilungen einen Einfluss auf die Atomlagen!

physikal. Handwerkszeug

Statistik



Fermi-See



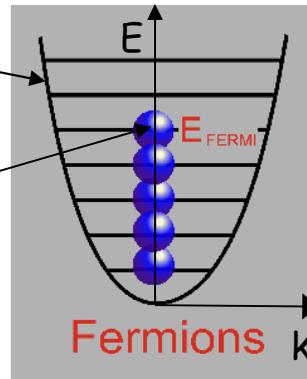
Enrico Fermi

Aus Sicht der Natur ist es günstiger die Elektronen nach unten zu schieben

weg mit den Elektronen von der Fermi-Energie!

$$E_F = \frac{h^2 k_F^2}{2m} = \frac{mv^2}{2}$$

$E_F = 5-10 \text{ eV}$
 $T = 50000-1000000 \text{ K}$



Teilchen mit ungeradzahligem Spin

Fermi-Statistik

Pauli-Prinzip

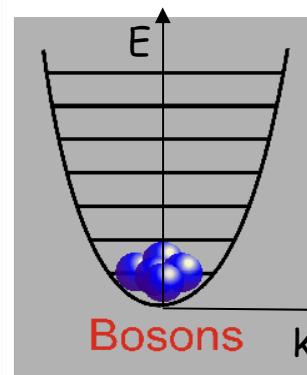
wo ein Fermion schon ist, kann **kein anderes** sein



Pauli

durch
Strukturbildung (Lücken bei E_F)
Magnetismus (mehr Spin up als Spin down)
Supraleitung (Elektronen \leftrightarrow Bosonen)

aus Sicht der Natur ist es günstiger Bosonen zu haben



Teilchen mit geradzahligem Spin

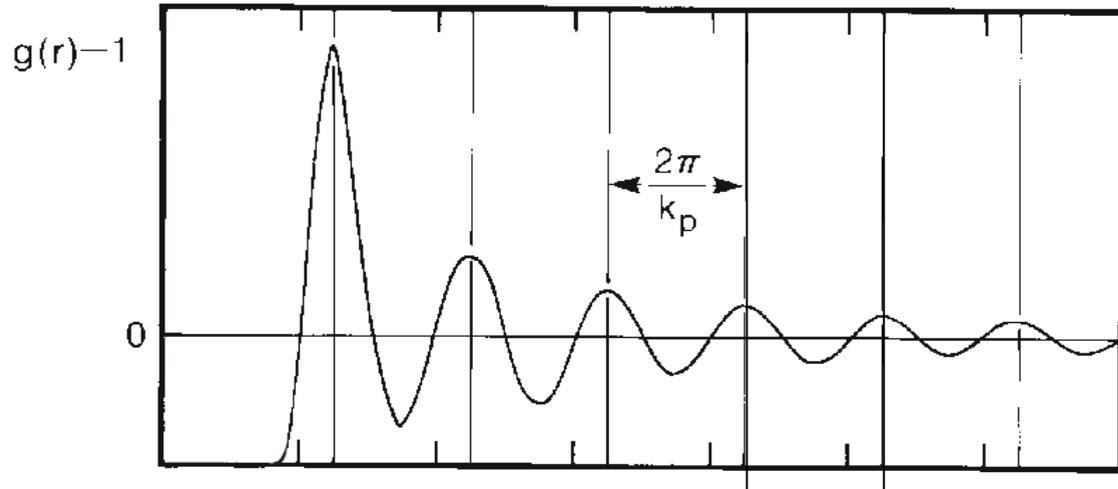
Bose-Einstein-Statistik

wo ein Boson ist, möchten **alle anderen** auch sein

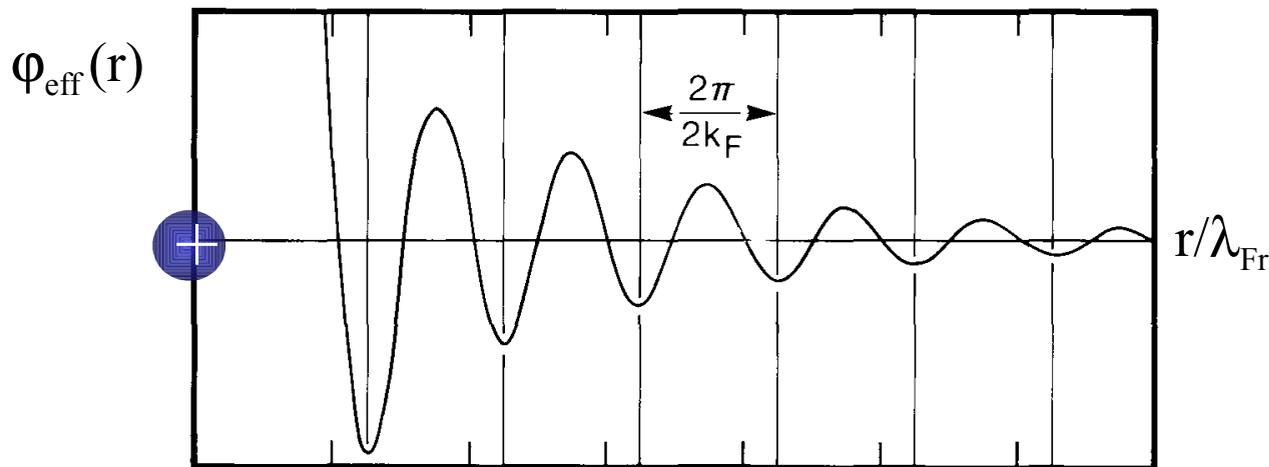


Bose

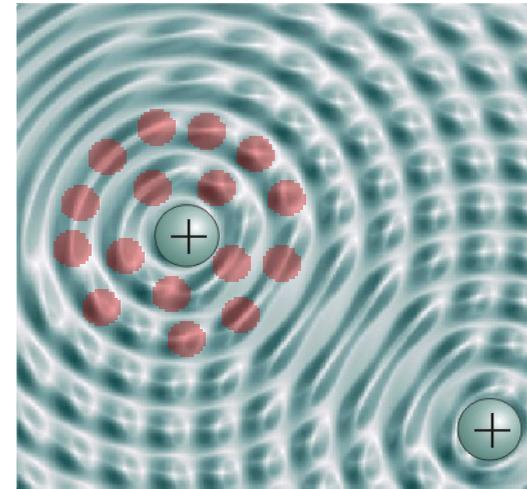
Strukturbildung



5/4 9/4 13/4 17/4 21/4 25/4

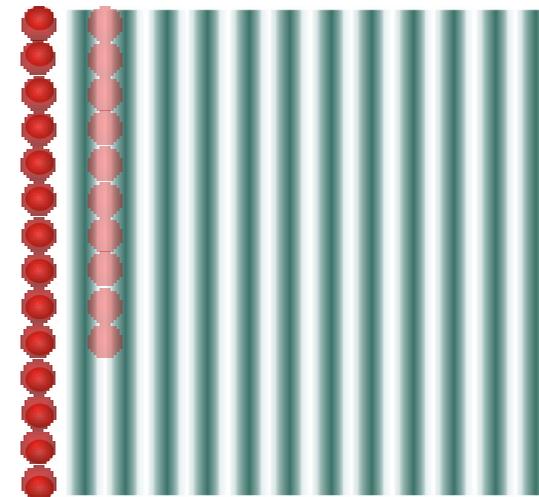


Potential (mit Friedel-Oszillationen) in der Nähe eines Atoms



Überlagerung der Oszillationen im Bereich von 2 Atomen

Sphärische Resonanzen führen zu sphär. periodischer Ordnung (Flüssigkeiten)



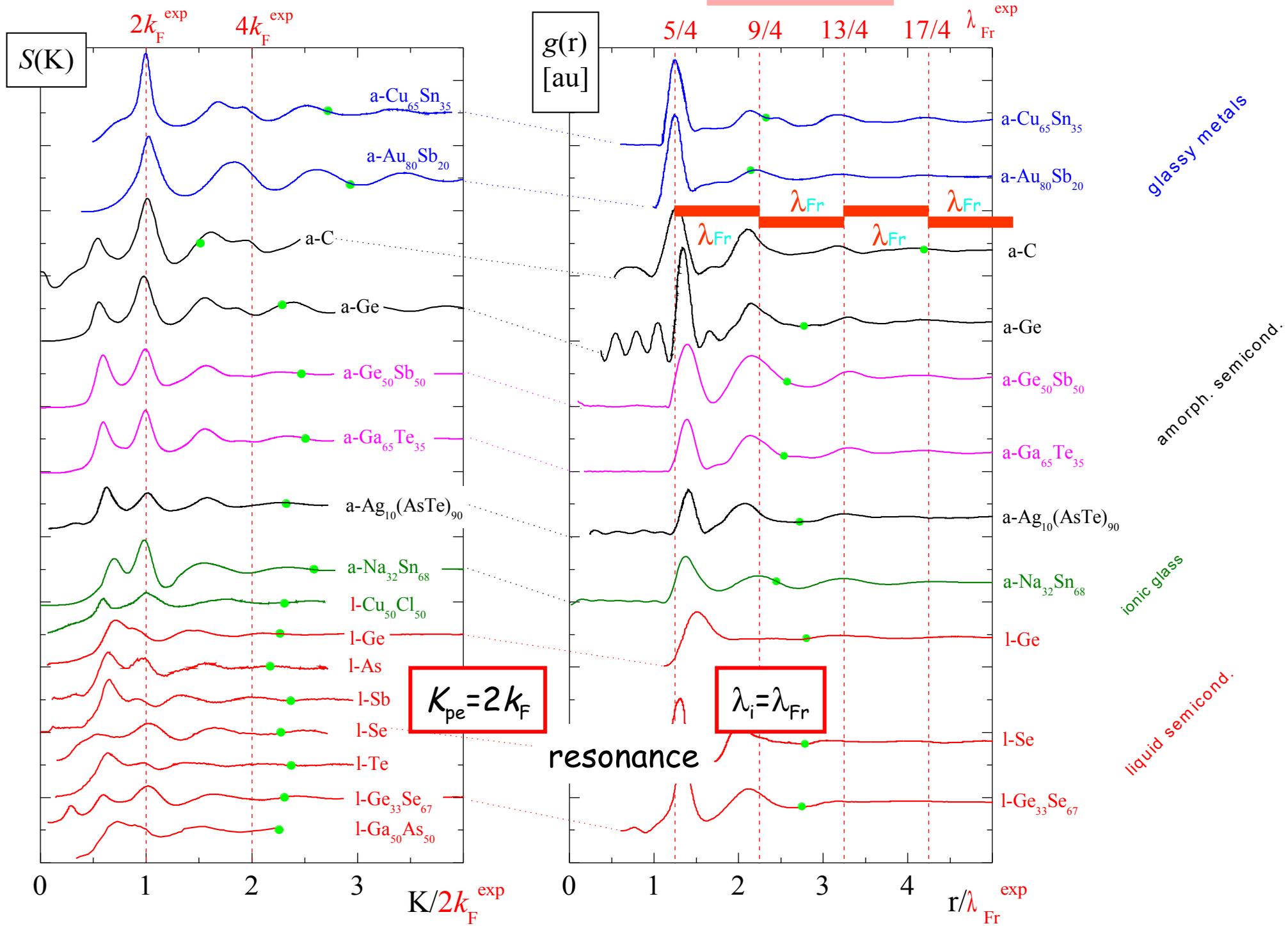
Überlagerung der Oszillationen im Bereich einer Netzebene

Ebene Resonanzen führen zu kristalliner Ordnung (Diamant)

Jedes neu hinzugekommene Atom ändert das Interferenzmuster! (nicht dargestellt)

$$2k_F = 2 \cdot \sqrt[3]{3\pi^2 n_0} \cdot Z$$

$$\lambda_{Fr} = 2\pi/2k_F$$



Wie geschieht die Energieerniedrigung in Materie?

durch den Aufbau von Resonanzen

Molekülbildung in der Gasphase

(lokale Ordnung zwischen Atompositionen und der Elektronendichteverteilung)

(Schrödinger-Gleichung) \Rightarrow bonding - antibonding Zustände

Kondensation des Dampfes zur Flüssigkeit

(global sphärische Ordnung zwischen Atompositionen und der Elektronendichteverteilung)

(global sphärische Resonanzen) \Rightarrow Lücke bei E_F

Gefrieren der Schmelze zum Festkörper

(global planare Ordnung zwischen Atompositionen und der Elektronendichteverteilung)

(globale, planare Resonanzen) \Rightarrow Lücke bei E_F

durch die unterschiedliche Besetzung von Spin-up und Spin-down Zuständen

Magnetismus (Ordnung zwischen d-, f-Elektronen)

\Rightarrow Lücke bei E_F

durch die Bildung von Elektronen zu Cooper-Paaren (von Fermionen zu Bosonen)

Supraleitung (Ordnung zwischen Elektronen)

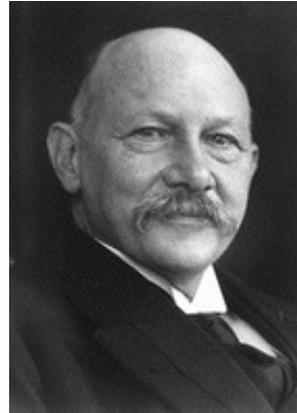
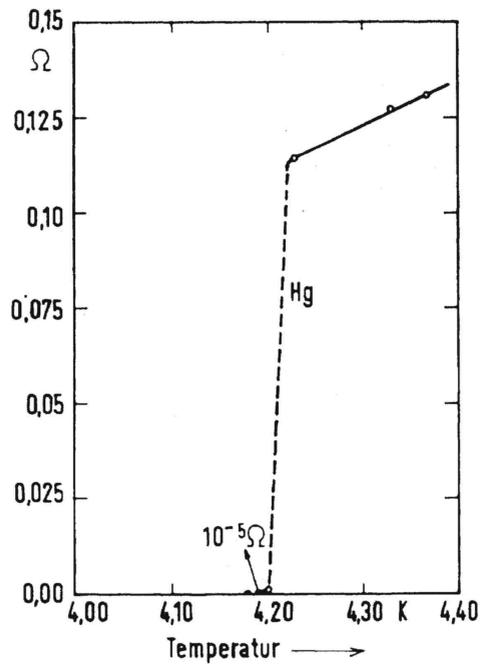
\Rightarrow Lücke bei E_F

durch die Bildung von H-Atomen zu Rotonen

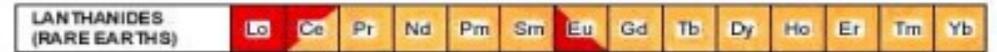
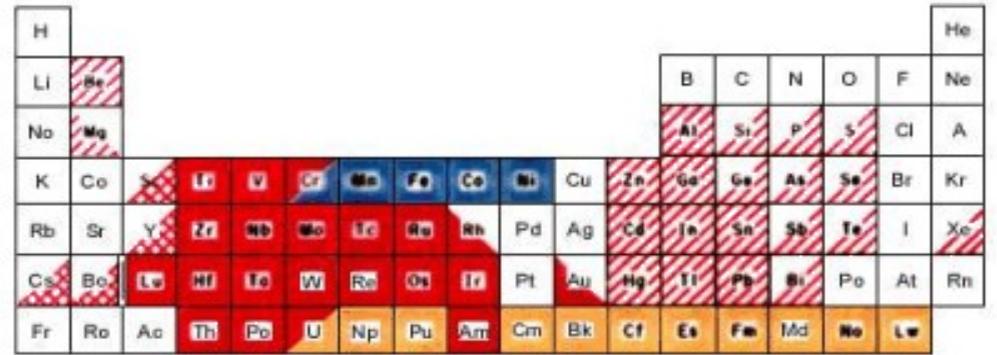
Superfluidität (Ordnung zwischen He-Atomen)

Alles was hilft, eine Lücke bei E_F zu bilden ist gut!
(Solbrig'sche Regel)

Tiefemperatur-Supraleitung

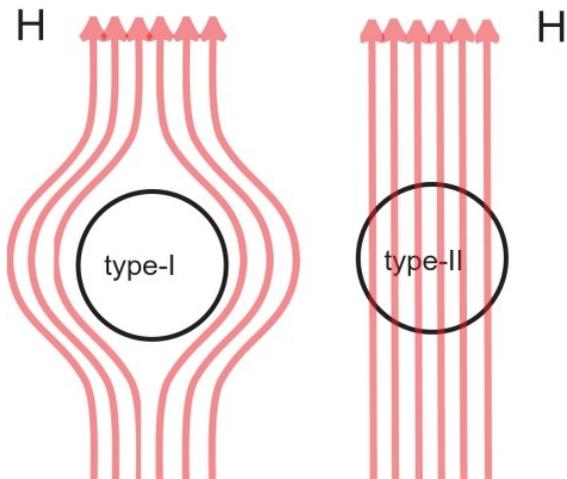


K. Onnes

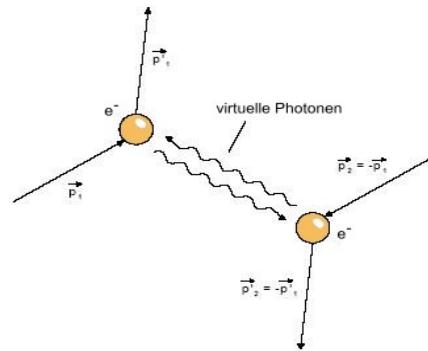


- TRANSITION ELEMENT SUPERCONDUCTORS
- TRANSITION ELEMENT SUPERCONDUCTORS (ONLY UNDER PRESSURE)
- NON-TRANSITION ELEMENT SUPERCONDUCTORS
- SUPERCONDUCTING (ONLY UNDER PRESSURE)
- EXTRAPOLATED
- RARE EARTHS AND TRANSURANIC ELEMENTS
- MAGNETIC TRANSITION ELEMENTS
- SUPERCONDUCTING IN THIN FILMS OR ANTIFERROMAGNETIC
- NOT SUPERCONDUCTING

Widerstandsabfall auf Null



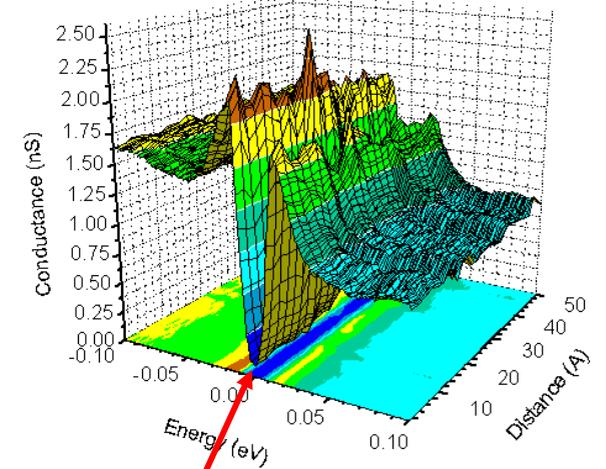
Herausdrängen von H-Feld
(Meissner-Ochsenfeld)
⇒ idealer Diamagnet



2 Elektronen koppeln über virt. Phononen,
bilden Cooper-Paare

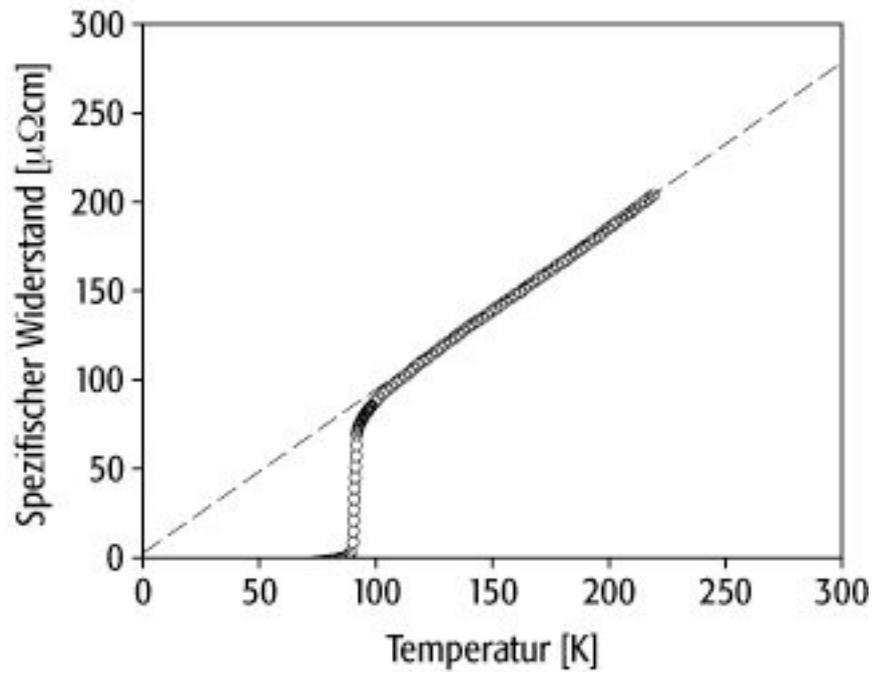
Metall- Isolator Übergang der
Elektronen! trotzdem Supraleitung
(Cooper-Paare tragen den Suprastrom)

5nm Spectral Line Cut: Heavily Overdoped Bi-2212

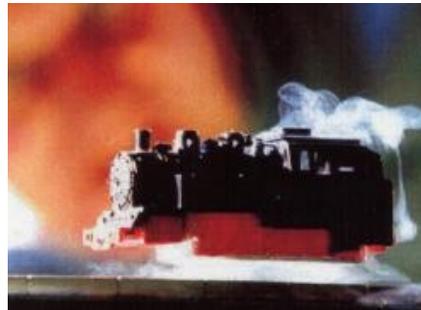
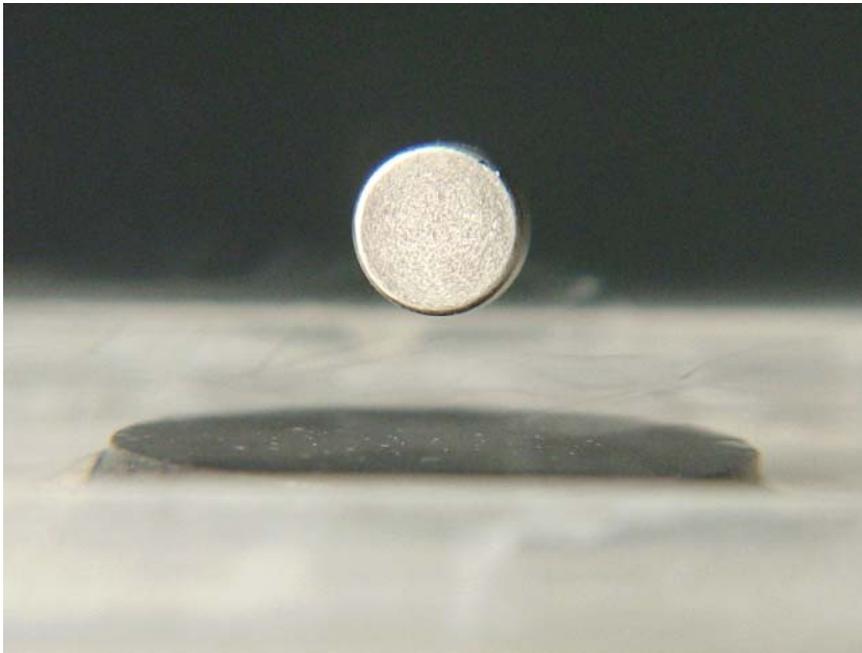


Lücke bei der Fermienergie

Hochtemperatur-Supraleitung



Bednorz, Müller



Zusammenfassung

- Es gibt eine einheitliche Beschreibung von Ordnungsphänomenen (vom Urknall bis zur SL)
 - z.B. Strukturbildung von den Quarks zu den Atomkernen zum Atom
 - z.B. Strukturbildung vom Atom/Molekül über die Flüssigkeit zum Kristall
(Resonanzen auf verschiedenen Längenskalen, zwischen verschiedenen Systemen)
 - z.B. Bildung magnetischer Materialien
(durch Umbesetzung von Spin-down nach Spin-up)
 - z.B. Bildung von Supraleitung
(durch die Bildung von Cooper-Paaren)
- **Chaos** (unabhängige 'Teilchen' /Subsysteme) spielt bei natürlichen **Ordnungs**phänomenen, bei Strukturbildung, eine extrem nützliche Rolle (ohne Chaos keine neuen Systeme!)
- Es zeigt sich dabei ein sehr allgemeines und wirkungsvolles Prinzip der Natur
Energie-Erniedrigung durch die Bildung von Resonanzen (Energielücken bei E_F in kond. Mat.)
- bereits Flüssigkeiten und amorphe Systeme besitzen einen hohen Grad von strukt. Ordnung
- Ein Kristall ist der gebundene Zustand zwischen dem Fermigas der Elektronen (als ein Subsystem) und der atomaren Struktur (als das andere Subsystem)
 - Lassen Sie ein bisschen Chaos zu, es ist nützlich!
 - Beide haben innere Freiheitsgrade, Möglichkeiten der Optimierung während der Selbstorganisation (unter zusätzlicher Unterstützung lokaler Resonanzen 'Quantenchemie')