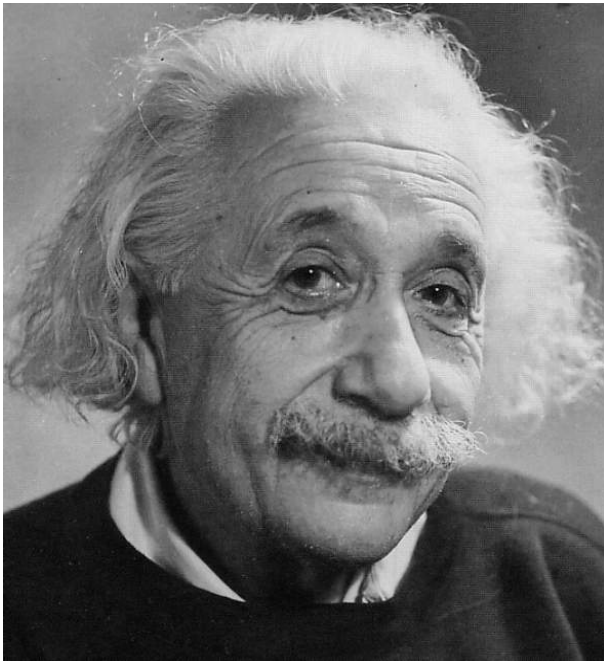


# Revolutionen im Weltbild der Physik seit 1900

Prof. (em.) Dr. Hans-Jürgen Mikeska

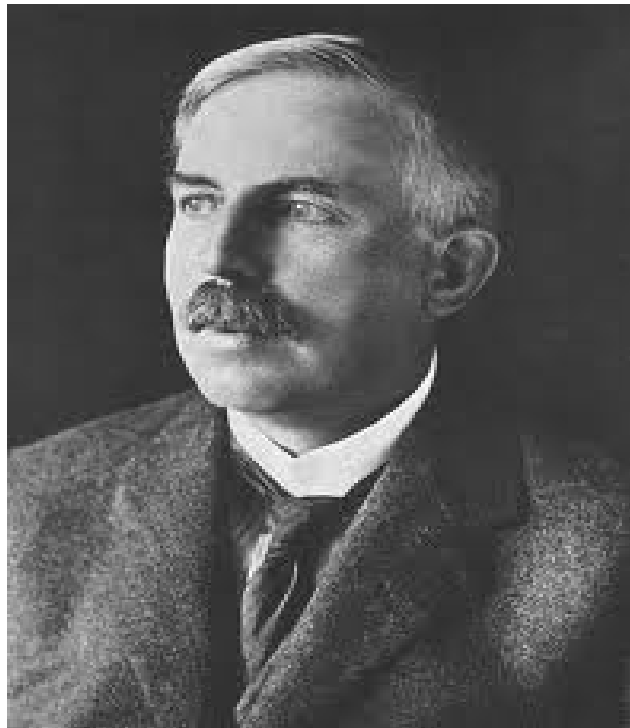
Theoretische Physik, Universität Hannover

VHS Springe, 05.11.2011





# Zwei Revolutionen in der Physik im 20. Jhd



Ernest Rutherford 1911:

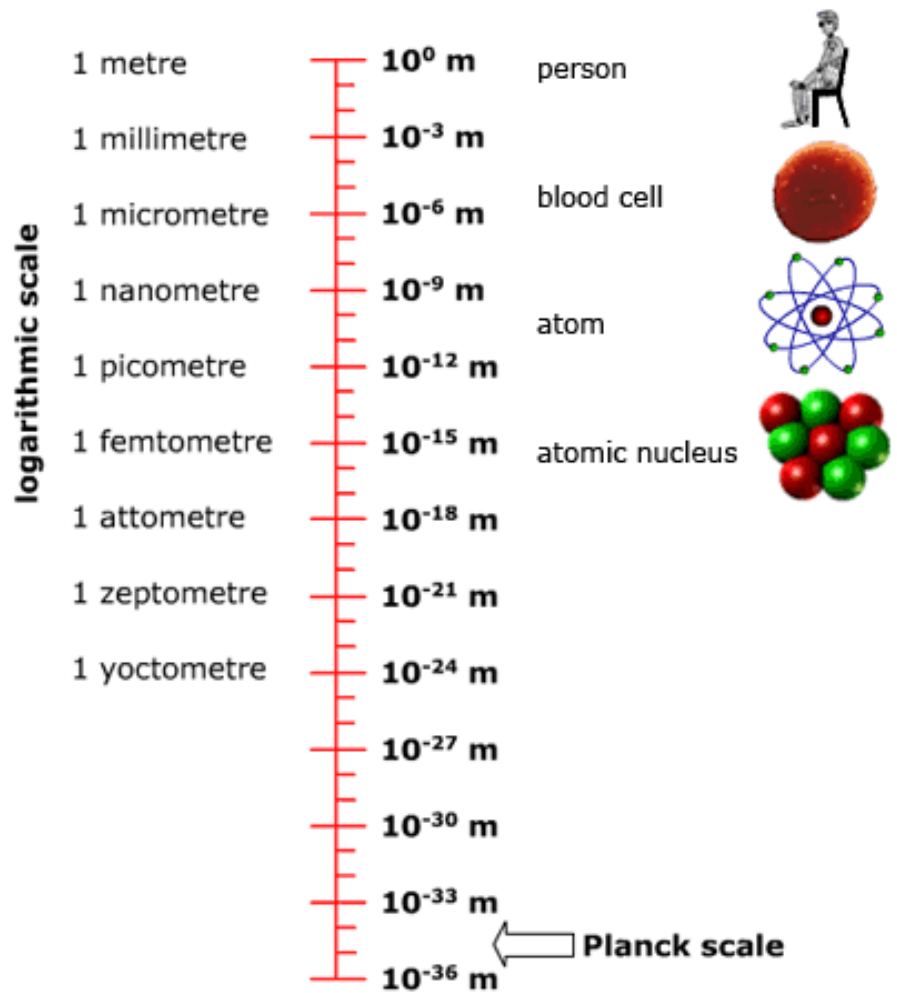
Atome haben einen winzigen Kern



Edwin Hubble 1929:

Das Universum dehnt sich aus

# Längenskalen im Universum



[www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight](http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight)



Erde  
12000 km

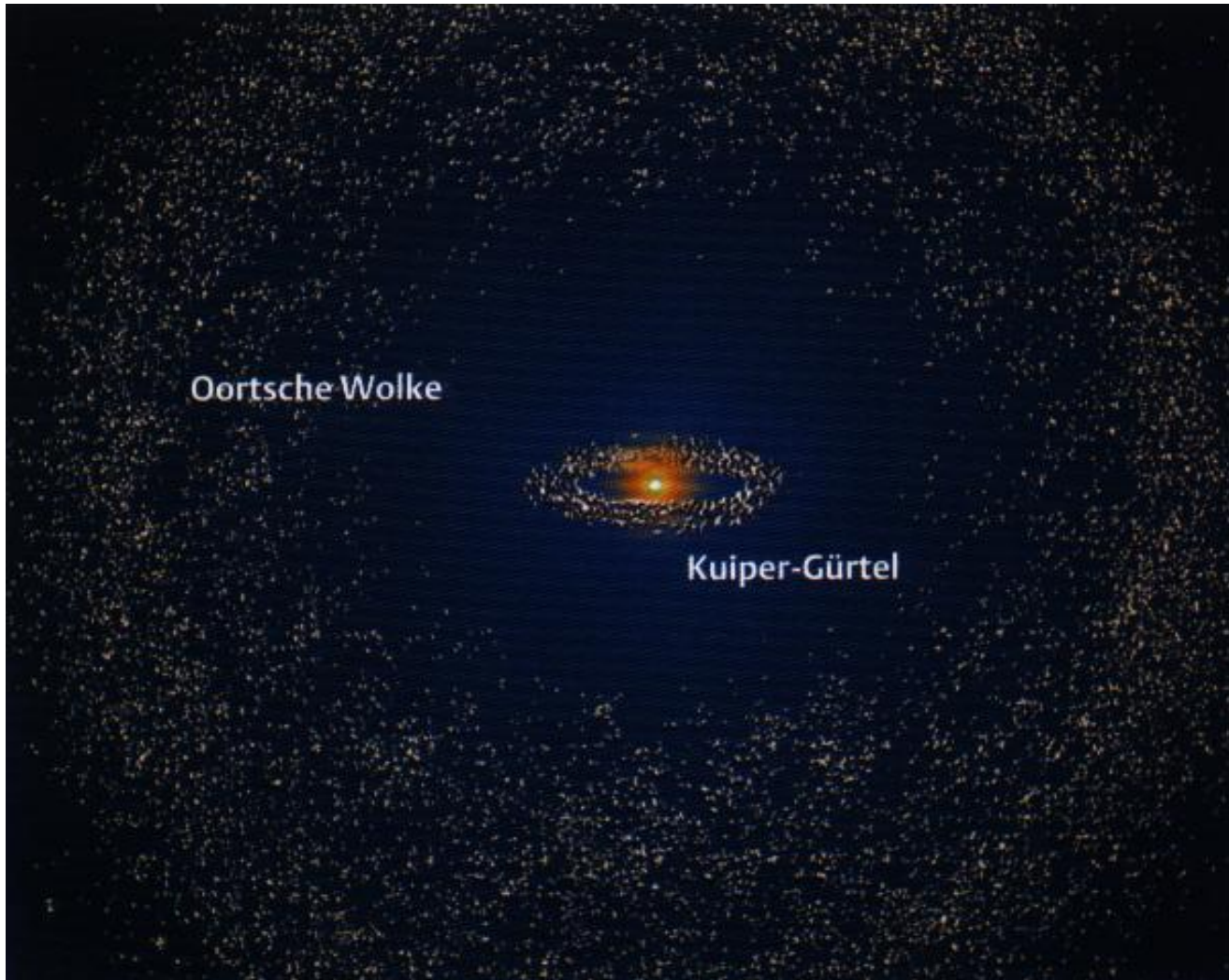


Oortsche Wolke  
(Heimat der Kometen)  
100 Milliarden km

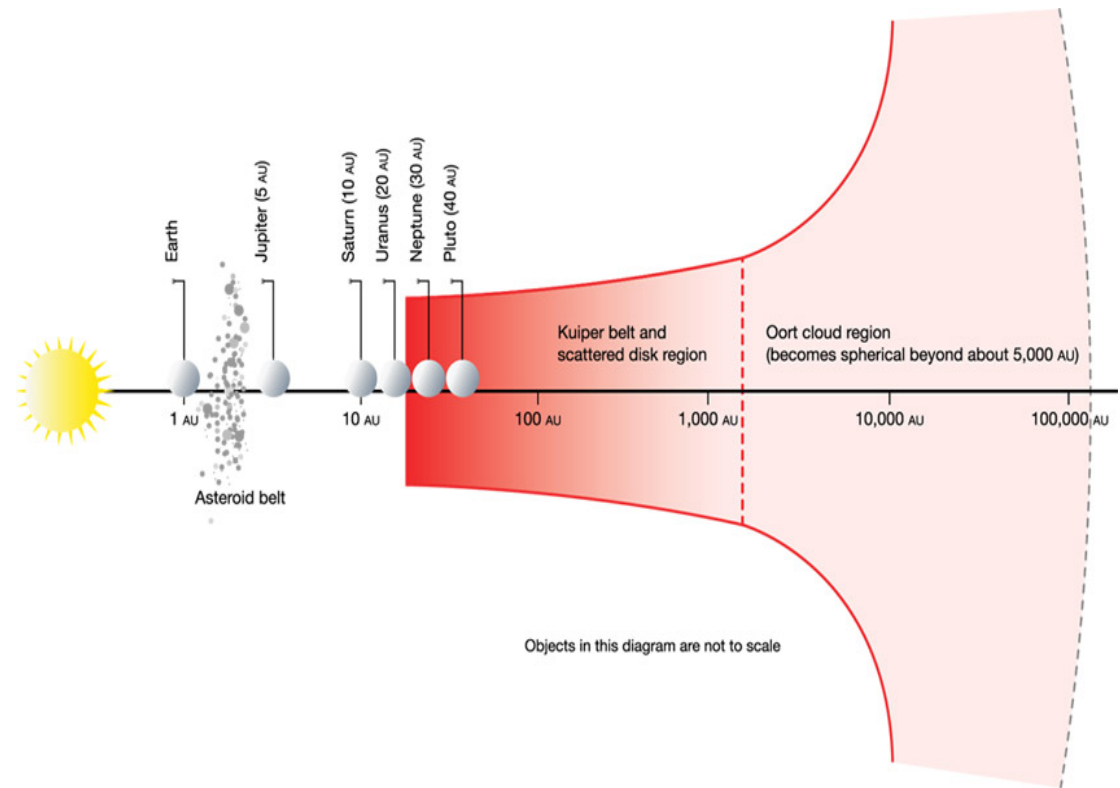
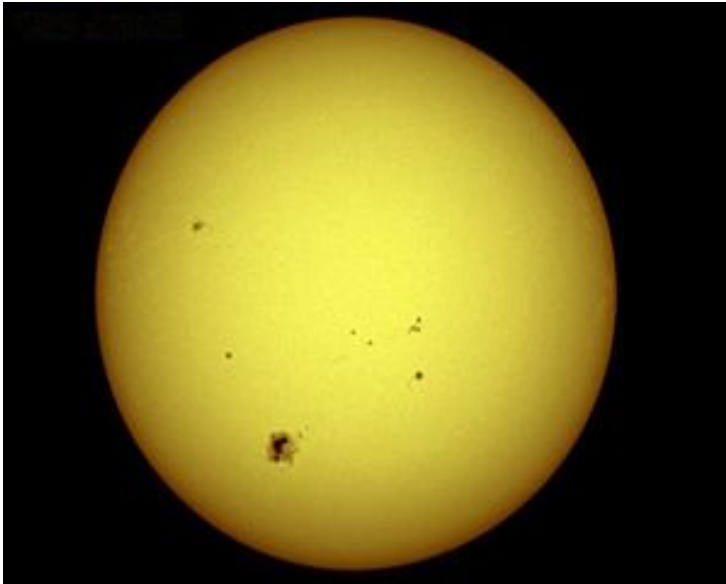


Spiralgalaxie  
 $10^{18}$  km

# Oortsche Wolke (großes Bild)



# mehr aus dem Sonnensystem



# Revolutionen im 20./21. Jhd:

## Die Welt im Kleinen:

Struktur der Materie ( = Atomkerne, quarks ...)

Quantenmechanik ( = „Gott würfelt“)

## Die Welt im Großen:

Urknall, Sternentstehung, Ende der Welt (= Kosmologie)

## Dagegen 19.Jhd.:

- Moleküle, Atome, Elektronen, Periodensystem
- elektromagnetische Wellen
- radioaktive Strahlen ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -Strahlen)
- statisches Universum (unsere Galaxie = Milchstraße)



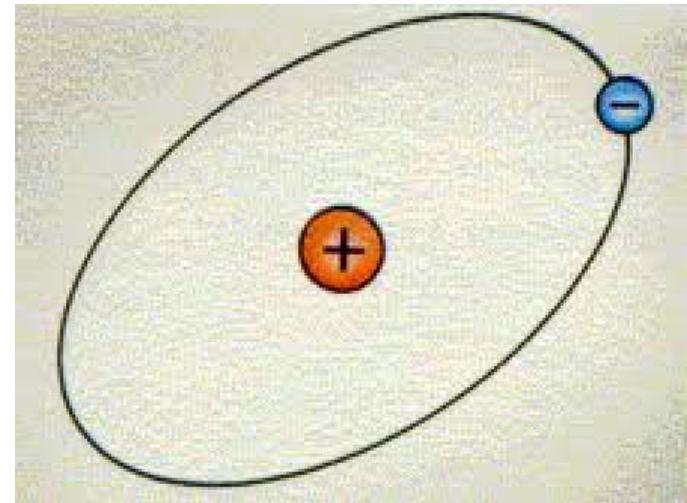
# Rutherford ab 1911:

Das Wasserstoffatom hat einen winzigen Kern, in dem die positive Ladung konzentriert ist.

Der Kern des Wasserstoffatoms heißt **Proton**.

Es gibt ein ungeladenes Gegenstück zum Proton: Neutron (Chadwick 1932)

Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen



Planetenmodell des Wasserstoffatoms

# Streuexperimente

Rutherford ab 1911:

$\alpha$ -Teilchen auf Goldatome

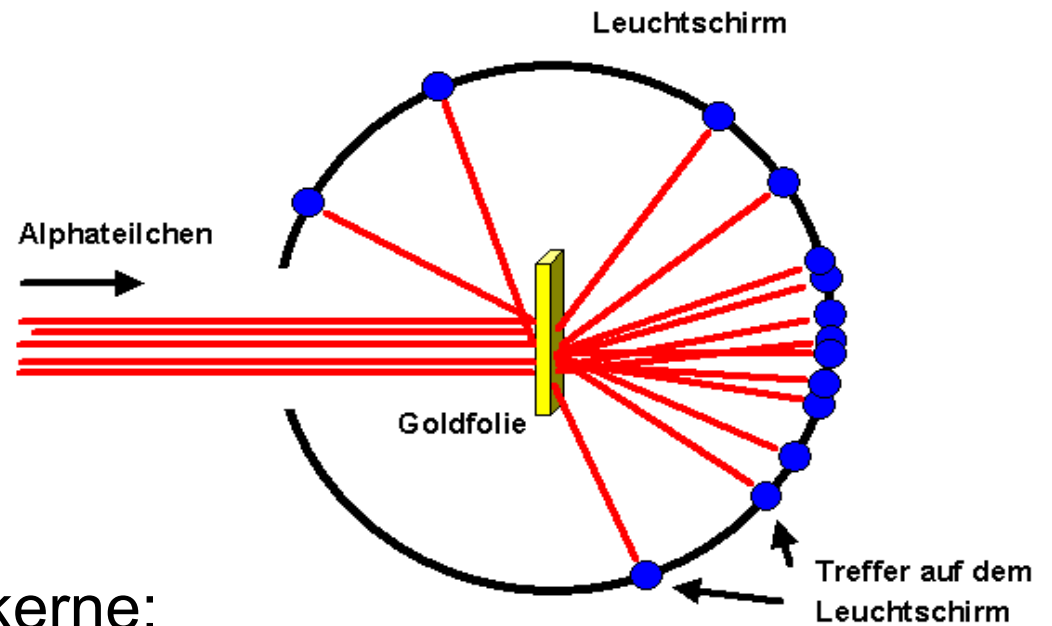
proton existiert

Hofstadter 1957:

Elektronen auf Wasserstoffkerne:

proton hat Struktur

( = quarks existieren)



# Quarks als Bestandteile des Protons

Experimente Hofstadter ab 1957:

Das Proton ist endlich ausgedehnt und hat innere Struktur

Theorie Gell-Mann ab 1964:

Mathematische Beschreibung des Aufbaus von Proton, Neutron usw. aus fiktiven fundamentaleren Einheiten, quarks genannt

Theorie Feynman 1969: Beschreibung der Streuung am Proton

Experiment Friedmann, Kendall, Taylor  $\approx$ 1970:

Das Proton hat drei punktförmige Bestandteile, genannt quarks

# Elementare Bestandteile der Materie

Alle Materie unserer täglichen Erfahrung besteht aus drei Sorten von Elementarteilchen:

zwei quarks u, d  
(„up“, „down“)  
und Elektronen e

Proton = (u,u,d)

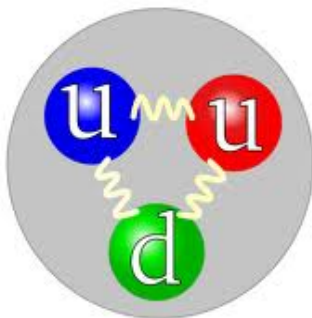
Neutron = (u,d,d)

Elektrische Ladung:

Elektron -1

u quark +2/3

d quark - 1/3



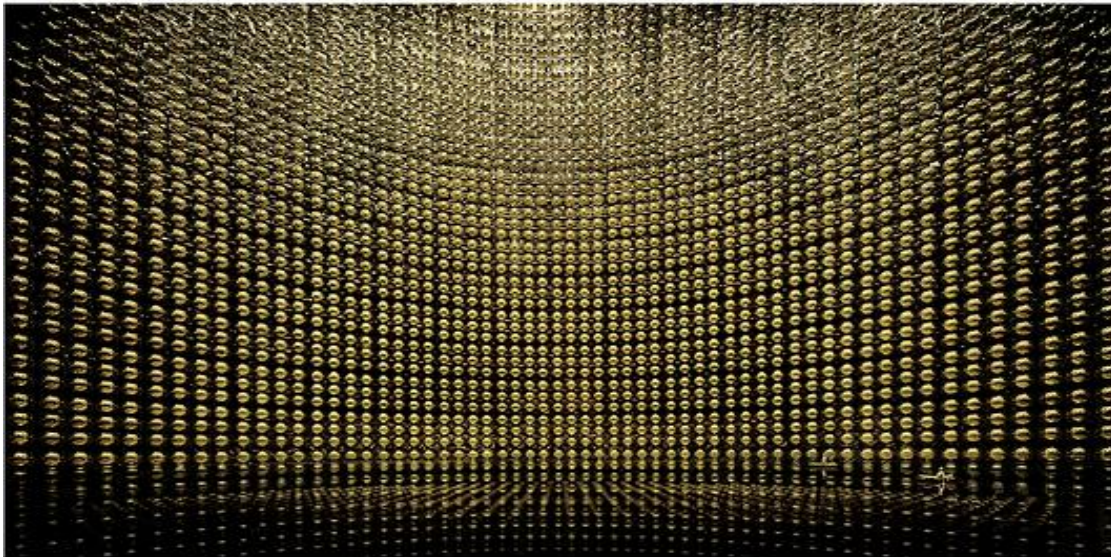
# 1. Überraschung:

Es gibt (so etwas wie) ein ungeladenes Elektron,  
das **Neutrino  $\nu_e$**

Existenz postuliert 1932 von Wolfgang Pauli

Experimentell nachgewiesen 1959

⇒ **zwei Paare elementarer Teilchen:**      (u, d)      (e,  $\nu_e$ )



Andreas Gursky:  
Neutrinodetektor  
Kamiokande (Japan)

# Überraschungen

Es gibt (so etwas wie) ein ungeladenes Elektron,  
das **Neutrino  $\nu_e$**

Existenz postuliert 1932 von Pauli

Experimentell nachgewiesen 1959

⇒ **Symmetrisches Ergebnis:**      (u, d)      (e,  $\nu_e$ )

Es gibt (so etwas wie) ein schweres Elektron, das  
**Muon  $\mu$**  (ursprünglich „ $\mu$ -Meson“, Anderson 1936)

Pauli: „Who has that ordered?“

## 2. Überraschung:

Es gibt (so etwas wie) ein schweres Elektron, das **Muon  $\mu$**  (ursprünglich „ $\mu$ -Meson“, Anderson 1936)

Pauli: „Who has that ordered?“

Das Muon ist die Spitze eines Eisbergs, das erste Anzeichen der vollständigen Liste der elementaren Teilchen:

1. Familie:	(u, d)	(e, $\nu_e$ )
2. Familie:	(c, s)	( $\mu$ , $\nu_\mu$ )
3. Familie:	(t, b)	( $\tau$ , $\nu_\tau$ )

„punktförmige“

Quarks / Leptonen

## 2. Überraschung:

Es gibt (so etwas wie) ein schweres Elektron, das **Muon  $\mu$**  (ursprünglich „ $\mu$ -Meson“, Anderson 1936)

Pauli: „Who has that ordered?“

Das Muon ist die „Spitze eines Eisbergs“: es ist das erste Anzeichen für drei Familien von elementaren Teilchen:



# Materie im „Standardmodell“

1. Familie:	(u, d)	(e, $\nu_e$ )
2. Familie:	(c, s)	( $\mu$ , $\nu_\mu$ )
3. Familie:	(t, b)	( $\tau$ , $\nu_\tau$ )

Quarks und Leptonen sind „punktförmig“.

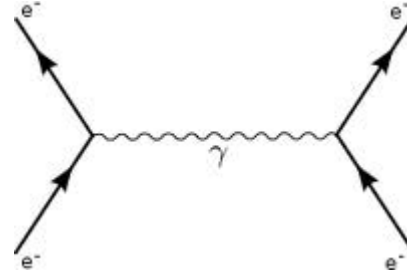
Sie haben zwei mögliche Werte,  $\pm 1/2$ , für ihren „inneren Drehimpuls“ (genannt „spin“), sie sind „Fermionen“.

Zu allen Teilchen gibt es Antiteilchen (Elektron / Positron)

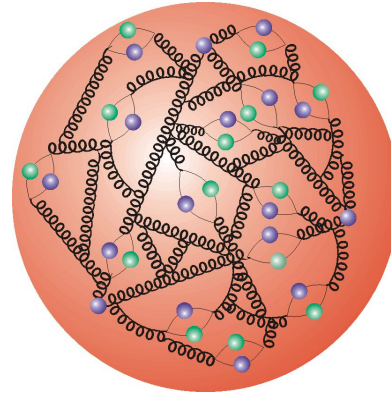
Quarks haben drei verschiedene Farbladungen („rot, blau, grün“)

# Wechselwirkungen

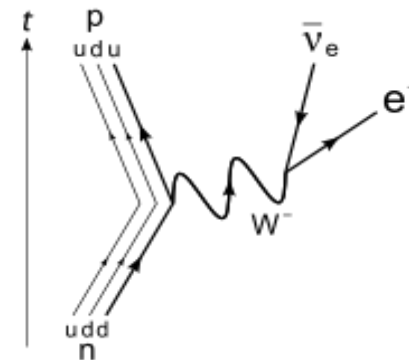
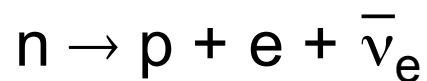
Elektrische Anziehung /  
Abstoßung durch Austausch  
von Photonen  
(= Licht,  $\gamma$ -Quanten )



Starke Wechselwirkung  
(= Kräfte im Atomkern) durch  
Austausch von „Gluonen“

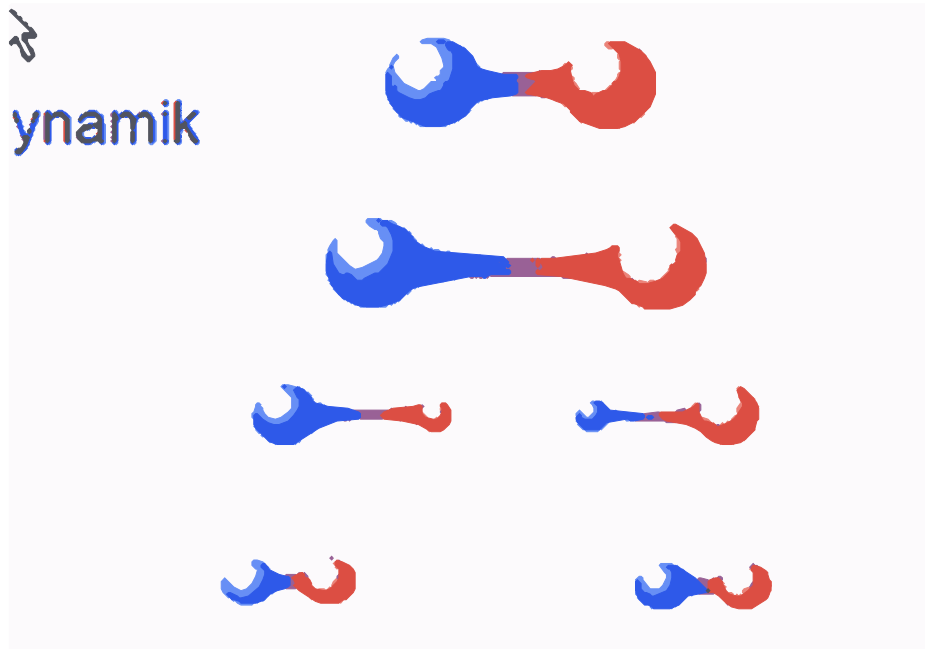


Schwache Wechselwirkung  
Zerfall des Neutrons durch  
Austausch von W Bosonen:

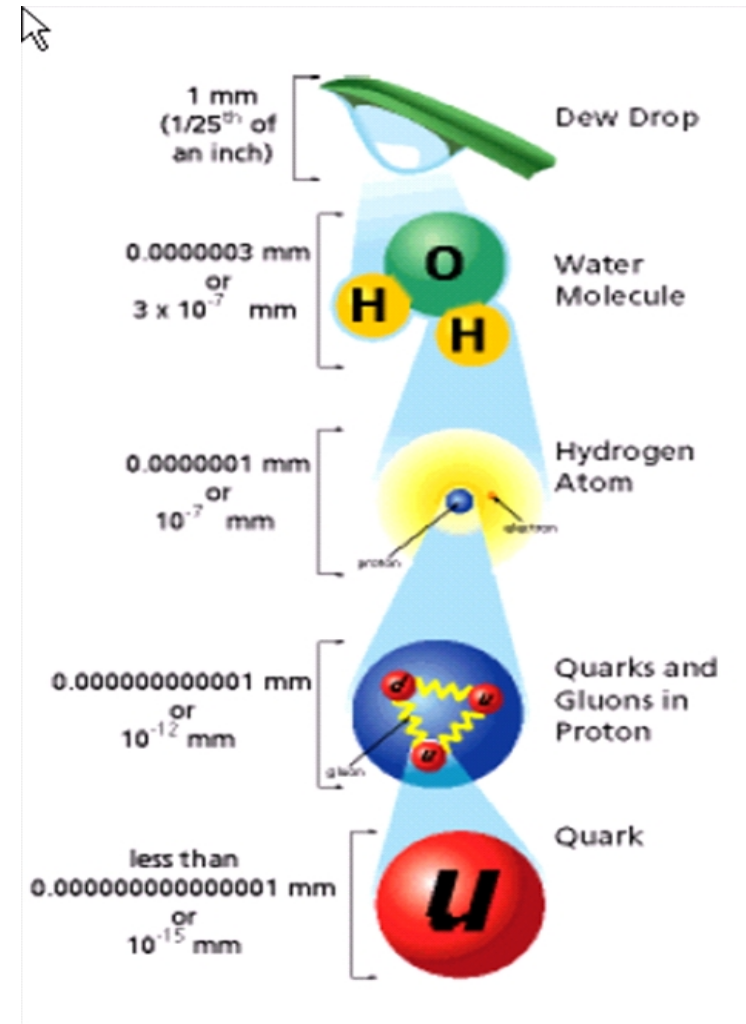


# Warum gibt es keine freien quarks?

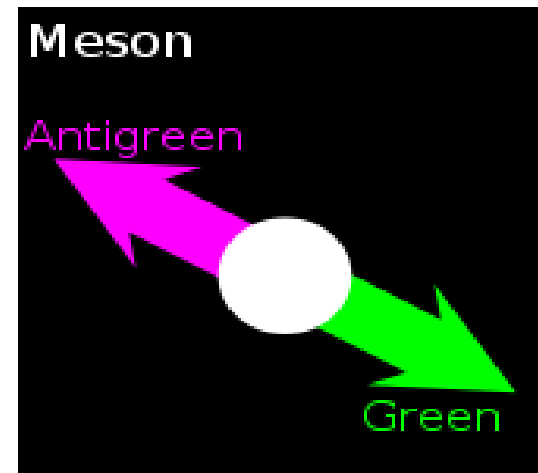
Versuch, ein aus zwei quarks  
zusammengesetztes  
Teilchen (Meson) zu spalten:



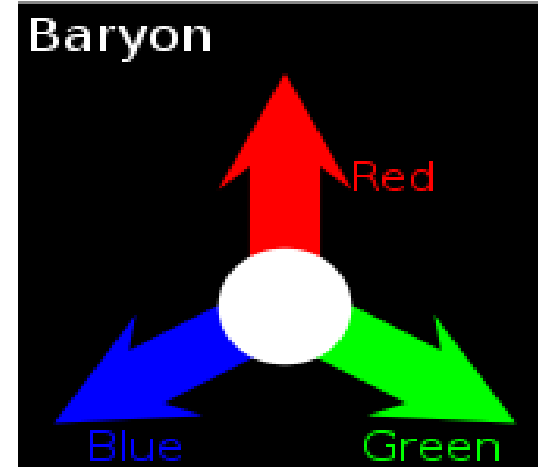
## Größenordnungen



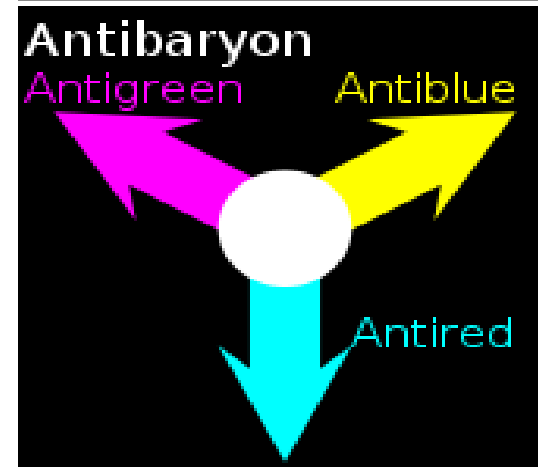
Meson (z.B.  $\pi$  - Meson),  
zusammengesetzt aus  
quark und antiquark mit Farbladung



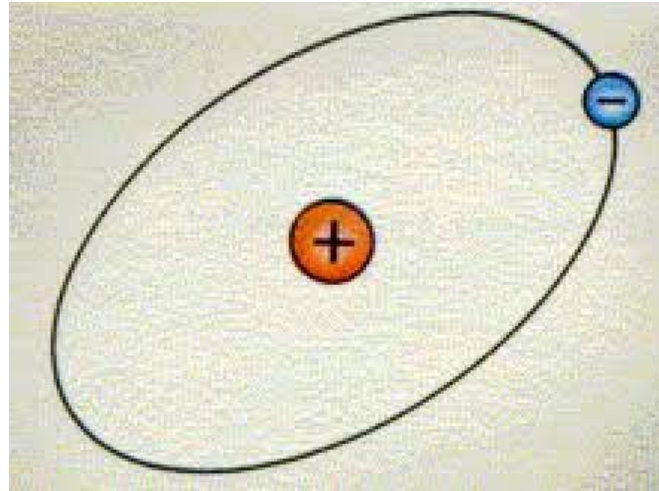
Baryon (z.B. proton),  
zusammengesetzt aus  
drei quarks mit Farbladung



Antibaryon (z.B. antiproton),  
zusammengesetzt aus  
drei antiquarks mit  
komplementären Farbladungen



# Quanten: In der Welt des sehr Kleinen ist vieles ganz anders



## Problem Wasserstoffatom:

Positive und negative Ladungen ziehen sich an:

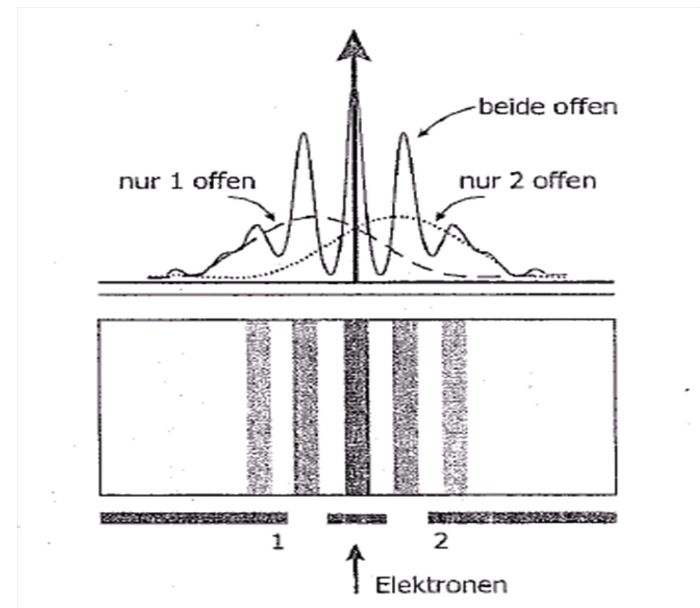
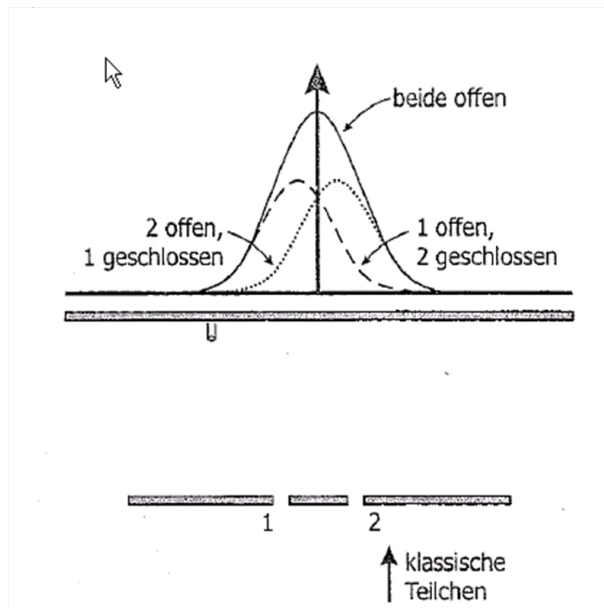
Warum fällt das Elektron nicht in den Atomkern ?

Warum strahlt das geladene Elektron nicht wie eine Antenne?

# Elektronen als Materiewellen

P.G.Thomson / Davisson und Germer 1927:

Elektronen zeigen Beugung und Interferenz am Gitter  
(genau wie Licht)

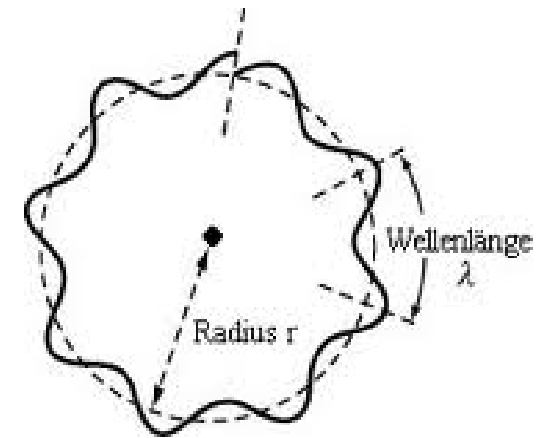
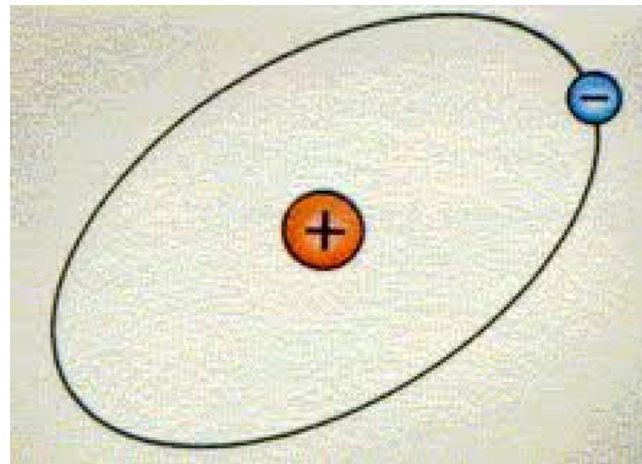
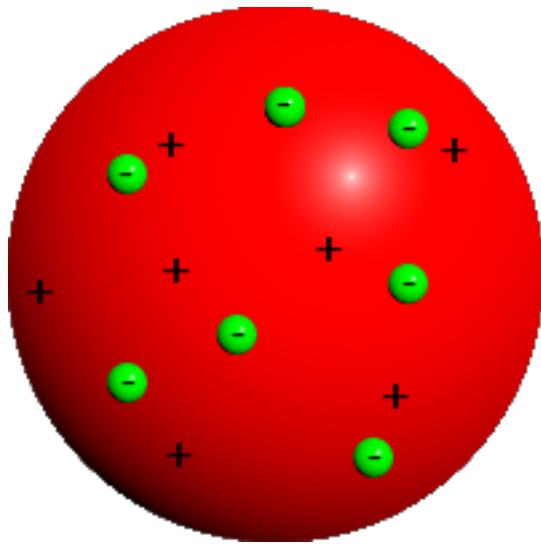


Wellenlänge:  $\lambda = h / (mv)$

# Modelle für das Elektron im Wasserstoffatom

Elektron als Teilchen:

Elektron als Welle:



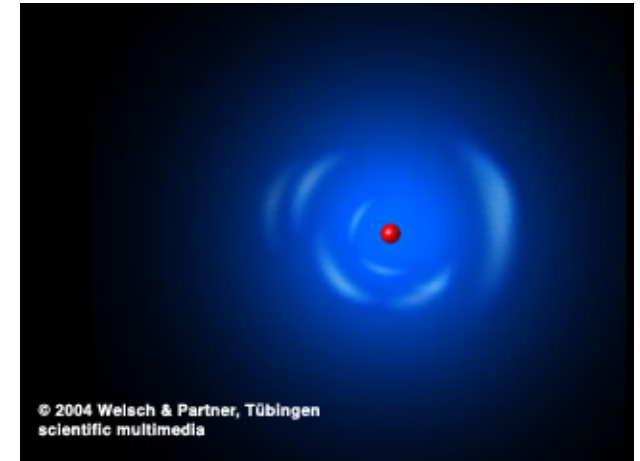
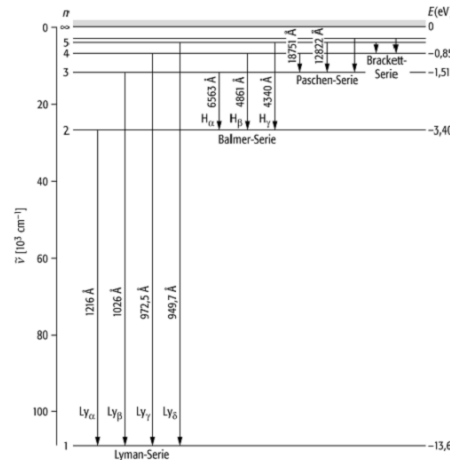
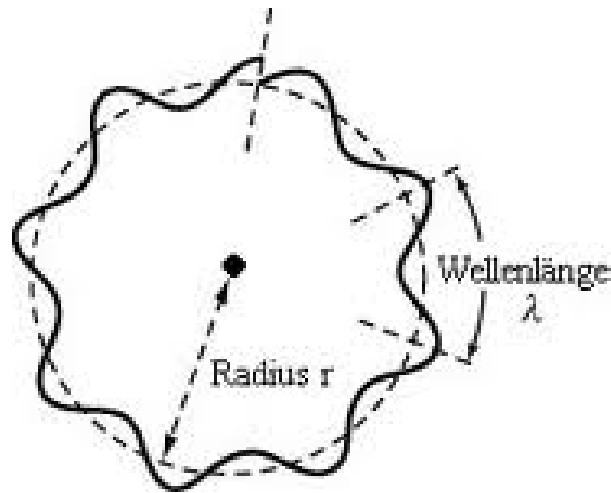
J.J. Thomson (1897)

Rutherford (1911)

Vorhersage: L. deBroglie  
(1924)

Experiment: G.P. Thomson  
(1927)

# Aspekte der Quantenmechanik: dreimal Elektron im Wasserstoffatom



Stehende  
Elektronenwelle  
(de Broglie)

Diskrete  
Energieniveaus  
(Bohr, Heisenberg)

Verschmierte  
Elektronenwolke  
(Schrödinger)



# Quantenwelt mikroskopisch

**Fragen:** Warum fällt das Elektron nicht in den Atomkern ?

Warum strahlt das geladene Elektron nicht als Antenne?

**Antworten der Quantenmechanik:**

Elektronen benehmen sich, je nach Fragestellung, als Teilchen oder als Wellen

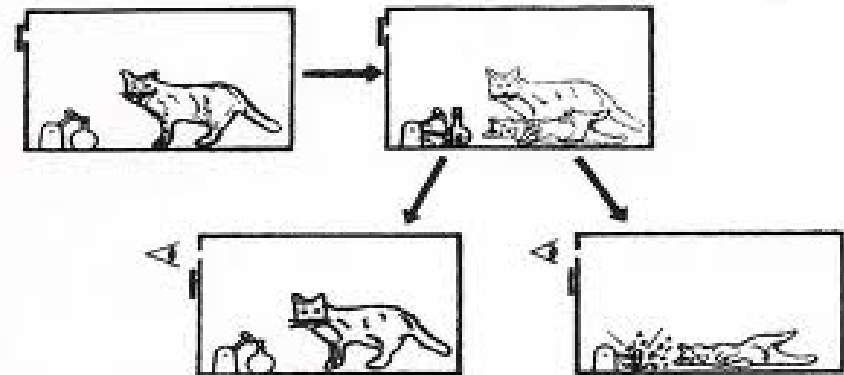
Das Elektron ist verschmiert, hat keine genaue Position.  
(Heisenberg'sche Unschärferelation von 1927)

Das Ergebnis einer Messung ist nicht vorhersagbar.

Einstein 1935: Gott würfelt nicht! ????

# Quantenwelt auch makroskopisch ?

Schrödingers Katze: Tot oder lebendig ist erst nach dem Öffnen der Kiste eine sinnvolle Alternative.

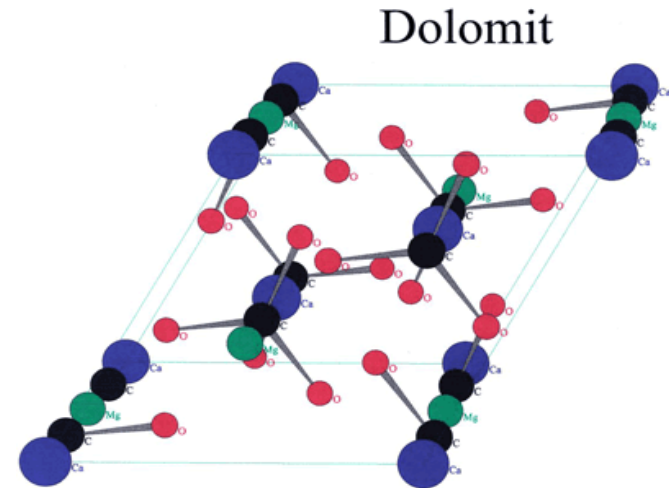


- Quantenlogik (verschränkter Zustand) statt aristotelischer Logik (tertium non datur)
- Quantenmechanik und Determinismus
- Chaos, Multiversen



# Systeme aus sehr vielen Atomen

I. Gase, Flüssigkeiten, Kristalle,  
Metalle, Steine, Berge .....



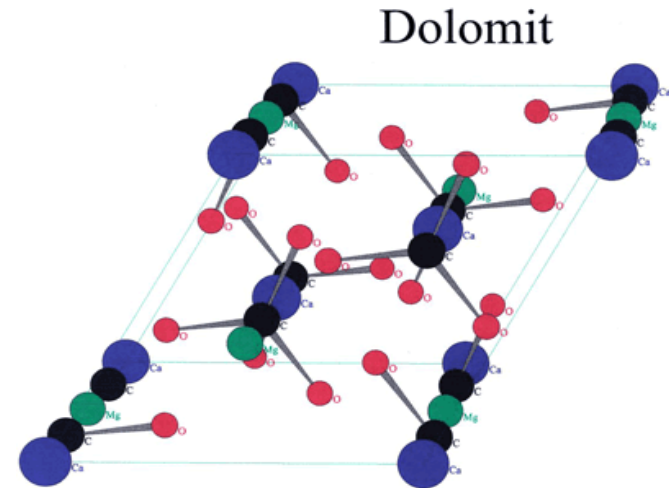
II. Planeten, Sterne .....



# Systeme aus sehr vielen Atomen

I. Gase, Flüssigkeiten, Kristalle, Metalle, Steine, Berge .....

d.h. die Gravitation zwischen den Bestandteilen spielt keine Rolle, die Bestandteile halten durch die molekularen Anziehungskräfte zusammen (durch die chemische Bindung).



II. Planeten, Sterne .....

d.h. die Bestandteile werden durch die Gravitation zwischen ihnen zusammen gehalten.



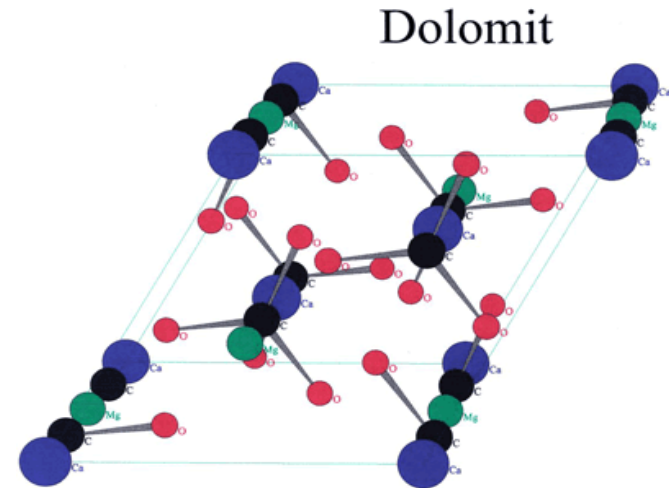
# Wie groß ist der größte Berg / Stein / Planet?

Die Bindungskräfte halten eine Menge aus, die Atome kommen einander zwar näher, aber der Stein wird größer.

Wenn die Atome einander sehr nahe kommen, werden die Elektronen sozialisiert: an die Stelle des chemischen Drucks tritt der sog. *Entartungsdruck* der Elektronen.

Ebenso bei Planeten:

Ein Beispiel für diese Sozialisation im irdischen Labor ist metallischer Wasserstoff.



# *Entartungsdruck*

Wolfgang Pauli 1925:

Elektronen mit gleicher Spinausrichtung haben Abscheu voreinander, sie vermeiden es, zusammen zu sein. Dies hat nichts mit der Abstoßung durch ihre gleichnamigen Ladungen zu tun (die noch zusätzlich auftritt) und gilt für alle Fermionen (Spin  $\frac{1}{2}$  Teilchen:  $\nu$ ,  $\mu$ ,  $u$ ,  $d$ .....,  $p$ ,  $n$ ,... $\text{He}^3$ ), aber nicht für Bosonen (Spin 0 und 1 Teilchen:  $\text{He}^4$ )

**= Pauli Prinzip**

Konsequenzen des Pauli Prinzips:

Periodisches System der Elemente (aus Schalenstruktur)

*Entartungsdruck* im Elektronengas

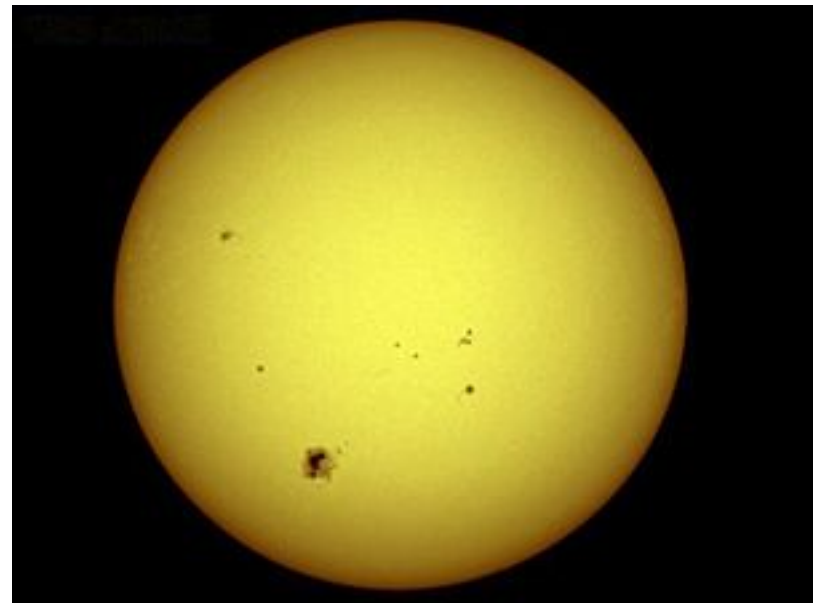
# Gleichgewicht in Sternen

Die Gravitationsanziehung zwischen den einzelnen Bestandteilen eines Sterns muss durch eine Gegenkraft ausgeglichen werden, sonst würde er zusammenstürzen.

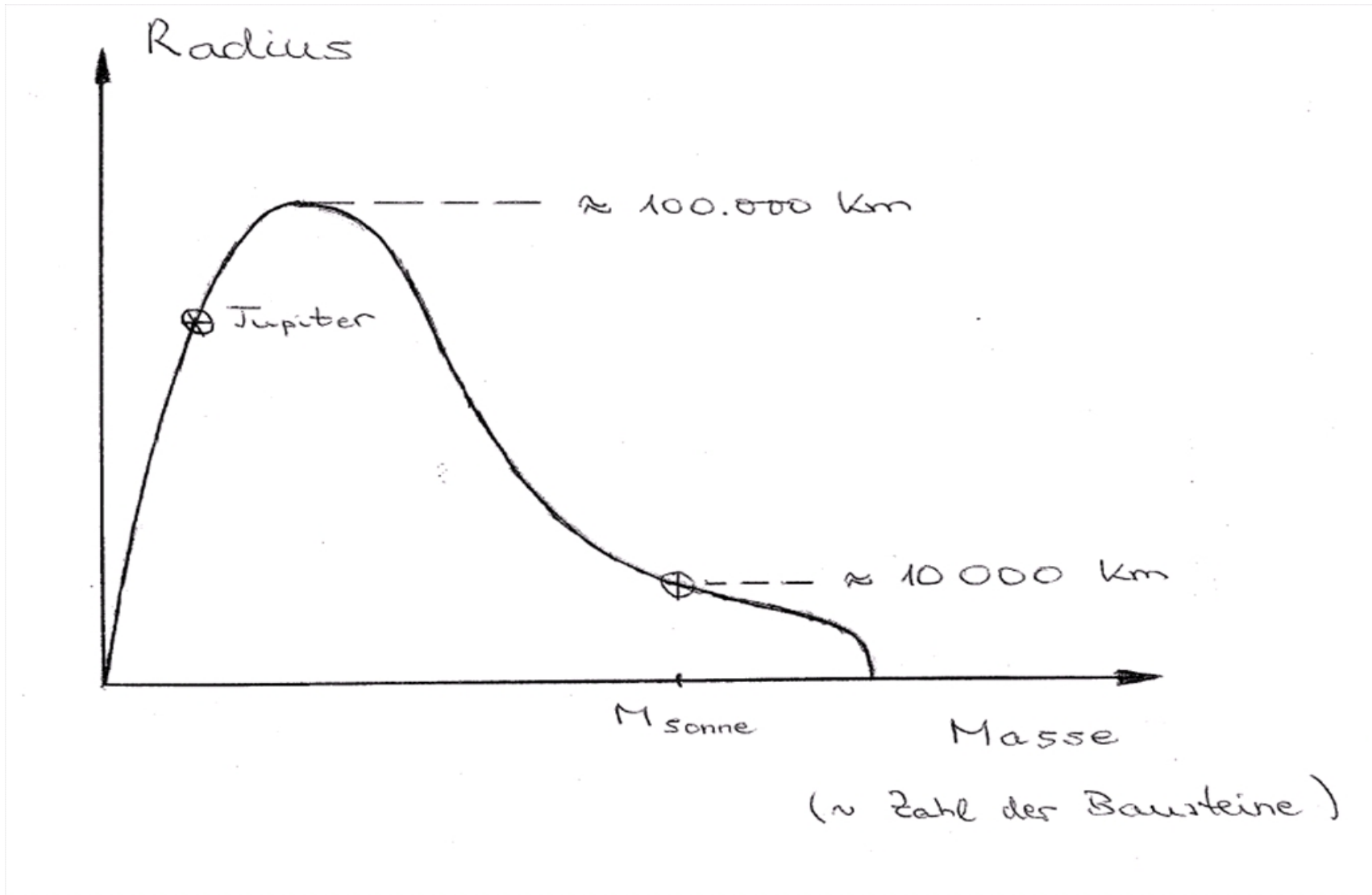
„lebende“ Sterne heizen in ihrem Innern – der so entstehende Gasdruck hält der Gravitation das Gleichgewicht.

Temperatur im Sonneninnern:  
15 Mio Grad

„tote“ Sterne sind kalt:  
Entartungsdruck statt Gasdruck



# Größe eines Berges / Steins / Planeten in Abhängigkeit von der Masse





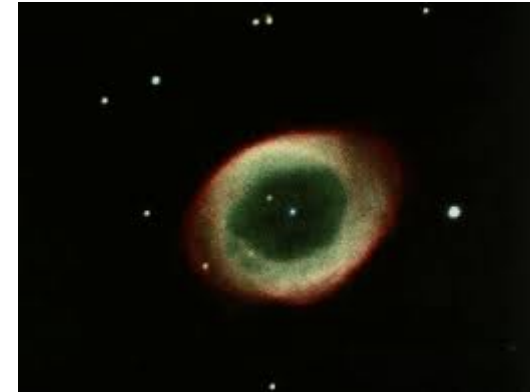
# Gleichgewicht in ausgebrannten Sternen

Maximaler Gegendruck durch  
Elektronenentartung:

⇒ Elektronenstern

= weißer Zwerg

( $\cong$  Riesenatom, -metall)



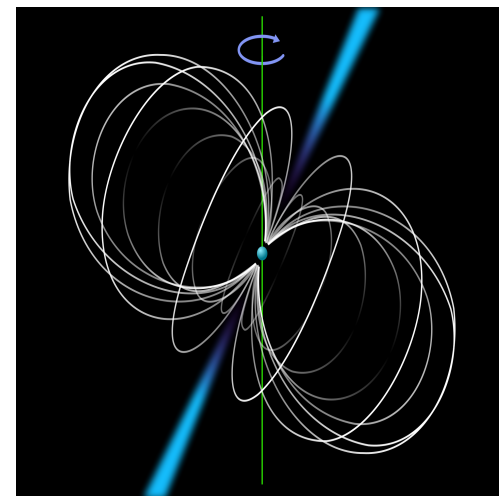
Weißer Zwerg im Zentrum eines  
planetarischen Nebels (Ringnebel)

Maximaler Gegendruck durch  
Neutronenentartung:

⇒ Neutronenstern

= Pulsar

( $\cong$  Riesenatomkern)

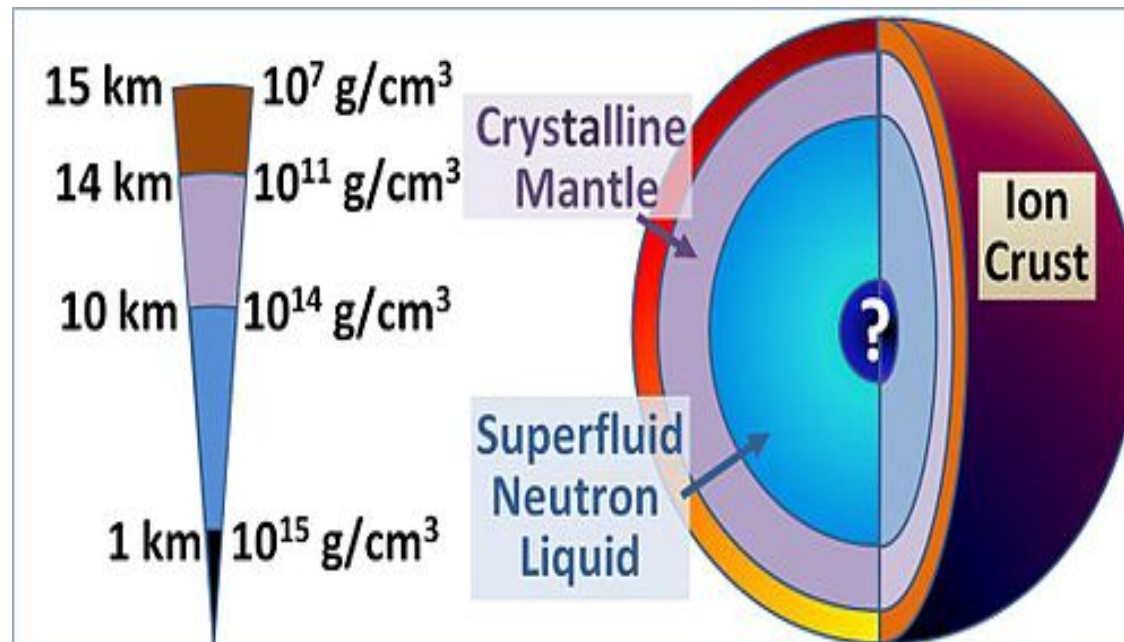


Neutronenstern = Pulsar

# Materie höchster Dichte

Weißer Zwerg: 3m x 2,5m x 1m Beton im Volumen einer Streichholzschachtel

Neutronenstern: 3km x 2,5km x 1km Beton im Volumen einer Streichholzschachtel



# Lecture 02

- Wie heizen die Sterne, insbesondere die Sonne ?
- Woher stammen die heute vorhandenen Elemente ?
- Wie war der Anfang des Universums ?
- Wie haben sich Elementarteilchen, Atome, Galaxien, Sterne gebildet ?
- Ist das Universum unendlich, wie schnell dehnt es sich aus?