

# Vorlesung 1:

---

## Roter Faden:

Atomphysik beschäftigt sich mit dem Aufbau der Materie auf dem Niveau der Atome unter Berücksichtigung der Quantenmechanik.

## Atom:

**griechisch: das *Unzerschneidbare***  
**lateinisch: das *Individuum***

Folien im Web:

**<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/>**  
(unter Lehre)

# Übungen und Klausur

---

---

**VL: Di. 09:45 - 11:15 im Gerthsen Geb. 30.21**

**Do. 08:00 - 09:30 im Gerthsen Geb. 30.21**

**Fragen zur VL: Sprechstunde nach jeder VL.  
oder email: [wim.de.boer@kit.edu](mailto:wim.de.boer@kit.edu)**

**Übungen Doppelstunde pro Woche**

**Mo. 8:00-13:00 mehrere Gruppen, Anmeldung: siehe nächsten Folien**

**Übungsleiter: Frank Hartmann email: [frank.hartmann@kit.edu](mailto:frank.hartmann@kit.edu)**

**Tel.: +41 76 487 4362**

**Tel.: +49 7247 82 24173**

# Wie lernen wir?

## Wir behalten von dem

- Was wir lesen: 10%
- Was wir hören: 20%
- Was wir sehen (schreiben) 30%
- Hören und sehen (schreiben): 50%
- Selber sagen (formulieren): 70%
- Selber tun: 90%

Vorlesungen

Vorlesungen

Vorlesungen

Wissenschaftliches  
Gespräch!

Übungen

# Übungen

---

## **Tutorien:**

**Montagsmorgen 8.00 – 9.30; 9.45 – 10.14 und 11.30 – 13.00**

**Die Übungsaufgaben werden via Email verschickt  
Also bitte MIT korrekter Emailadresse anmelden**

**Zusätzlich finden sich die Aufgaben unter:**

**[www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~hartmann/atom12.htm](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~hartmann/atom12.htm)**

**Anmeldung zu den Übungen unter:**

**<http://www.physik.uni-karlsruhe.de/Tutorium/SS12/Physik4/>**

**Ab Heute um 18.00 bis 19.04.2012 (bis 12.00 Mittags pünktlich)**

**Einteilung:**

**Wird am 20.04.2012 im Internet veröffentlicht**

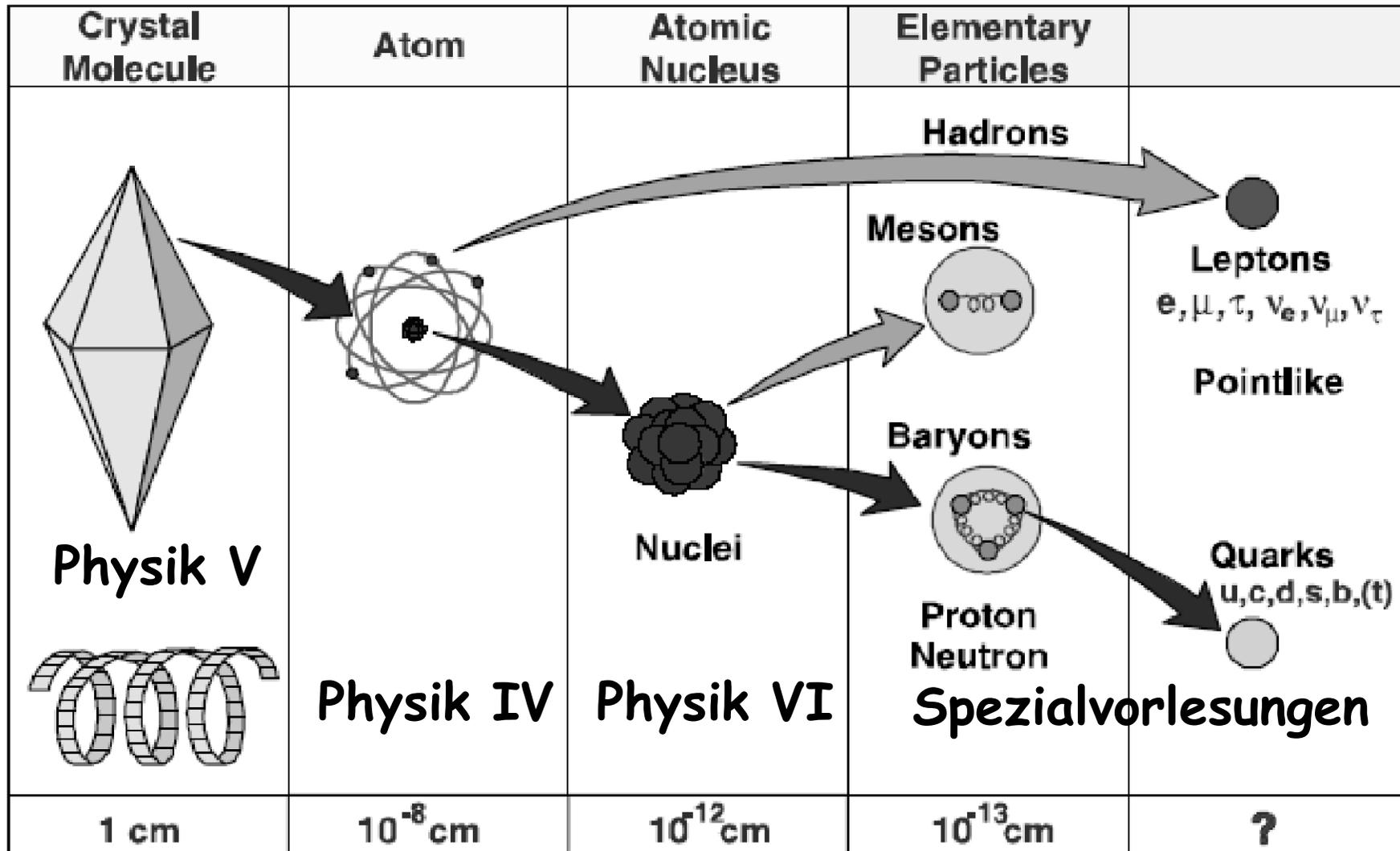
# Schein-Kriterien Orientierungsniveau

---

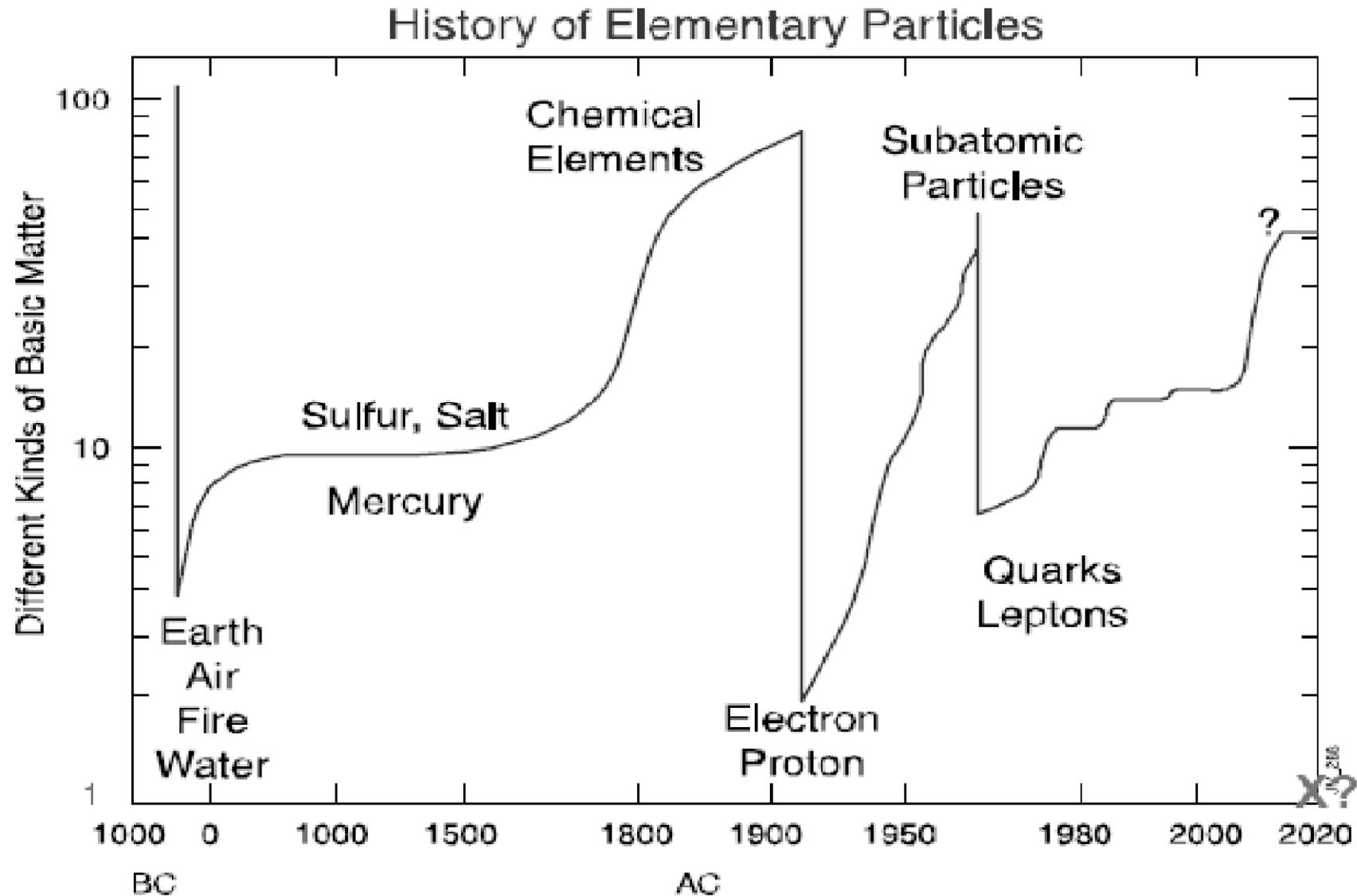
---

- Scheinkriterium und Note:
  - Semester-Klausur am 21.09.2012 von 08.00 - 10.00 im Gerthsen
    - Einsicht (voraussichtlich) 24.09.2012 14.00 – 15.00
  - Zweitklausur am 15.10.2012 abends (*gegen* 17.00 Uhr)
    - Einsicht (voraussichtlich) 16.10.2012 14.00- 15.00
- Vorleistung (Voraussetzung zur Klausur):
  - 50% *virtuell* gerechneter Aufgaben.
  - Virtuelles Rechnen: Zu Beginn des Tutoriums legt man fest, welche Aufgaben man vorrechnen kann, hiermit erklärt man sich auch bereit diese Aufgabe nach Aufforderung vorzurechnen.
    - Sollte der Tutor beim Vorrechnen den Eindruck bekommen, dass die Aufgaben NICHT selbst gerechnet wurden „Betrugsversuch“ wird keine Aufgabe des Tages anerkannt.
- Aufgabenblätter, Lösungen und Infos:  
[www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~hartmann/atom12.htm](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~hartmann/atom12.htm)

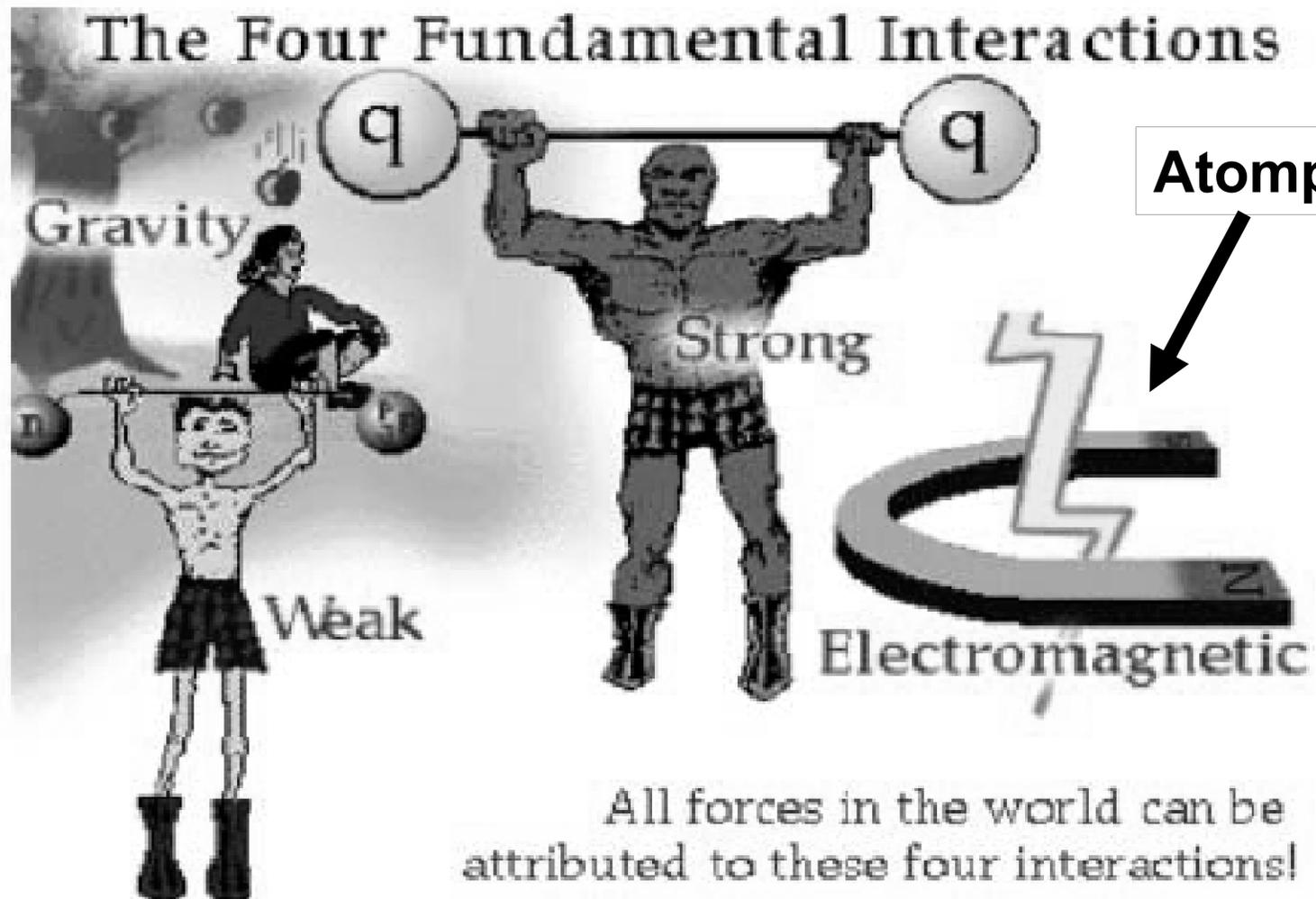
# Die elementaren Bausteine der Materie



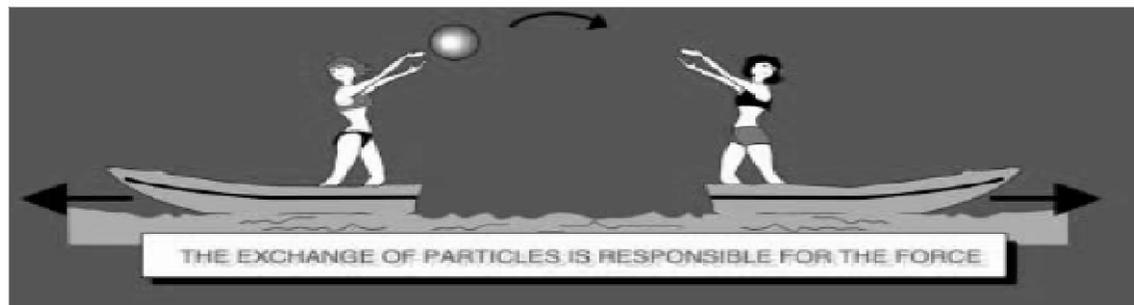
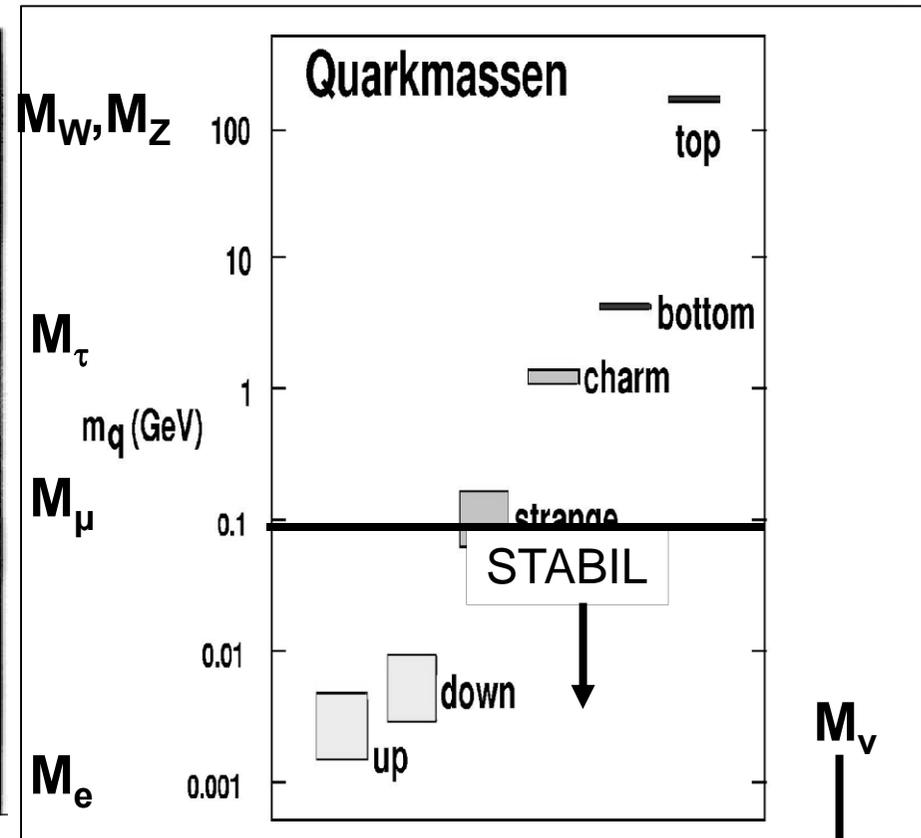
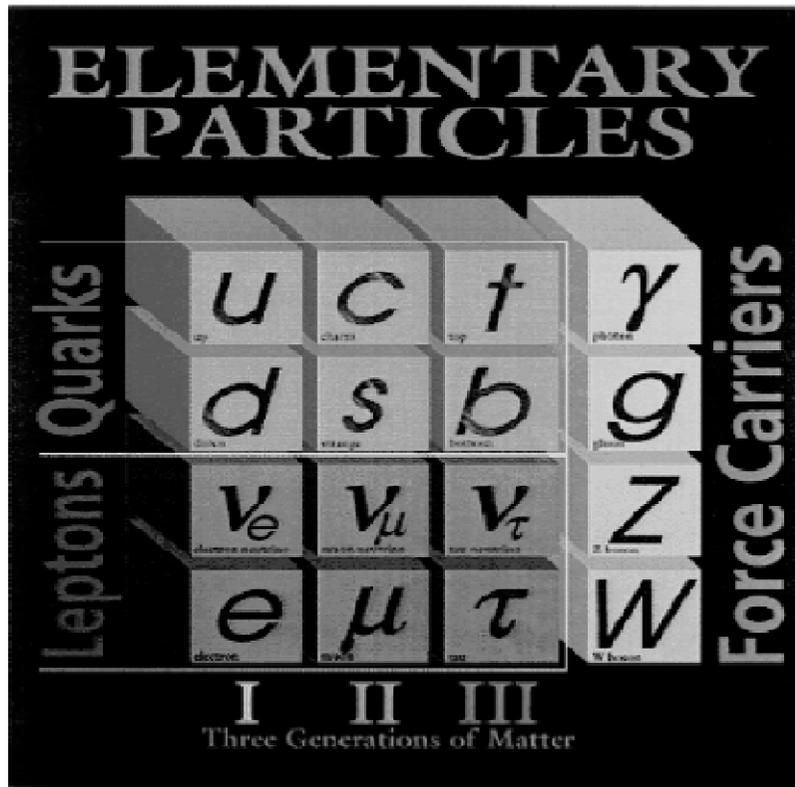
# “Elementarteilchen” als Fkt. der Zeit



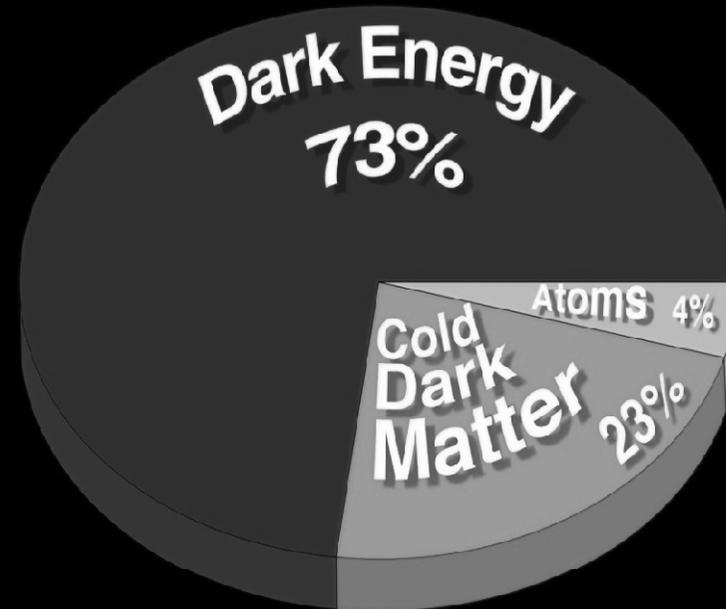
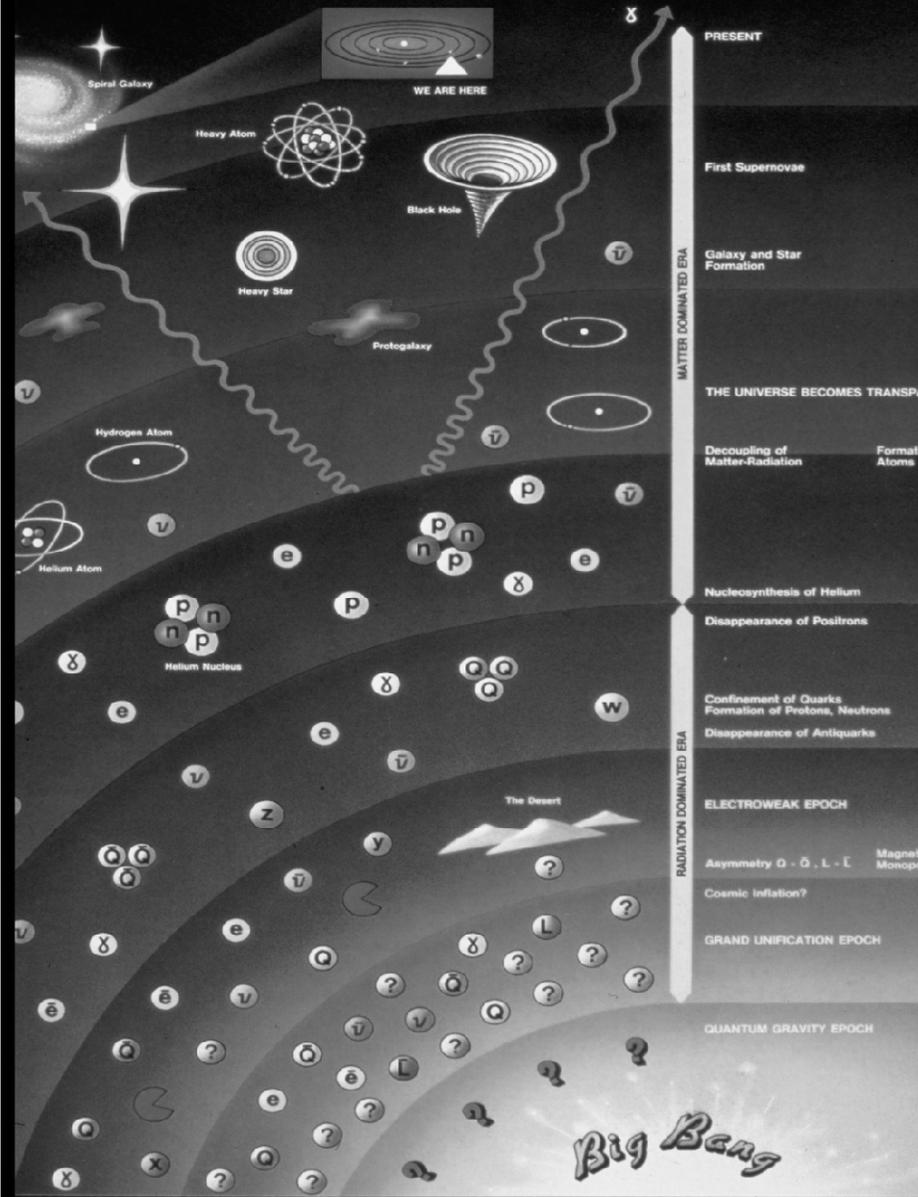
# Die elementaren Wechselwirkungen



# Das Standard Modell der Teilchenphysik



# History of the Universe

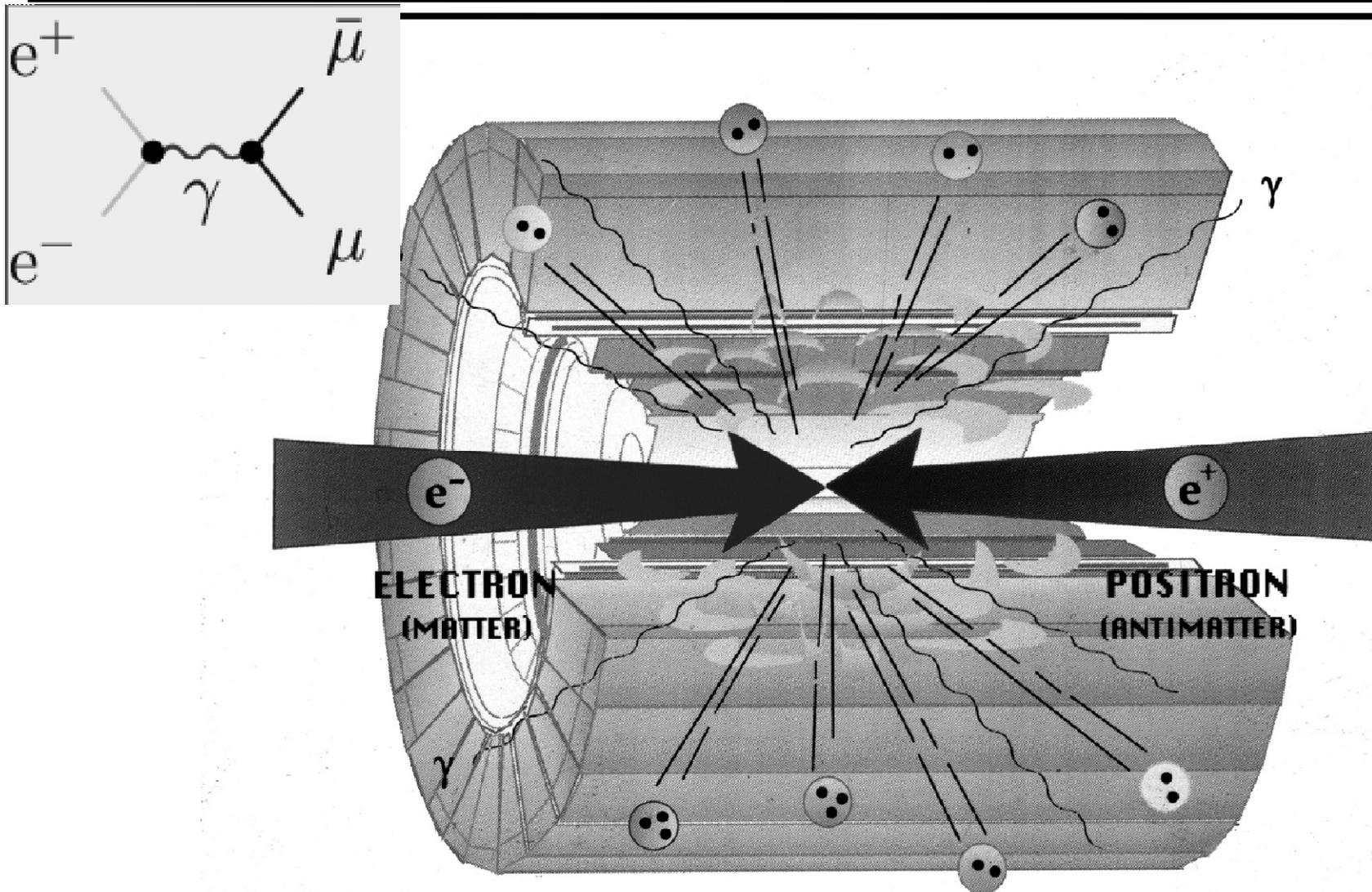


**Dunkle Materie: Grav. anziehend**  
**Dunkle Energie: Grav. abstoßend**  
 (wenn  $dp/dt=0!$ )

$$\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}} = \Omega_B + \Omega_{\text{DM}} + \Omega_{\Lambda} = 1$$

23±4% der Energie des Univ.  
 = DM (WIMPS)

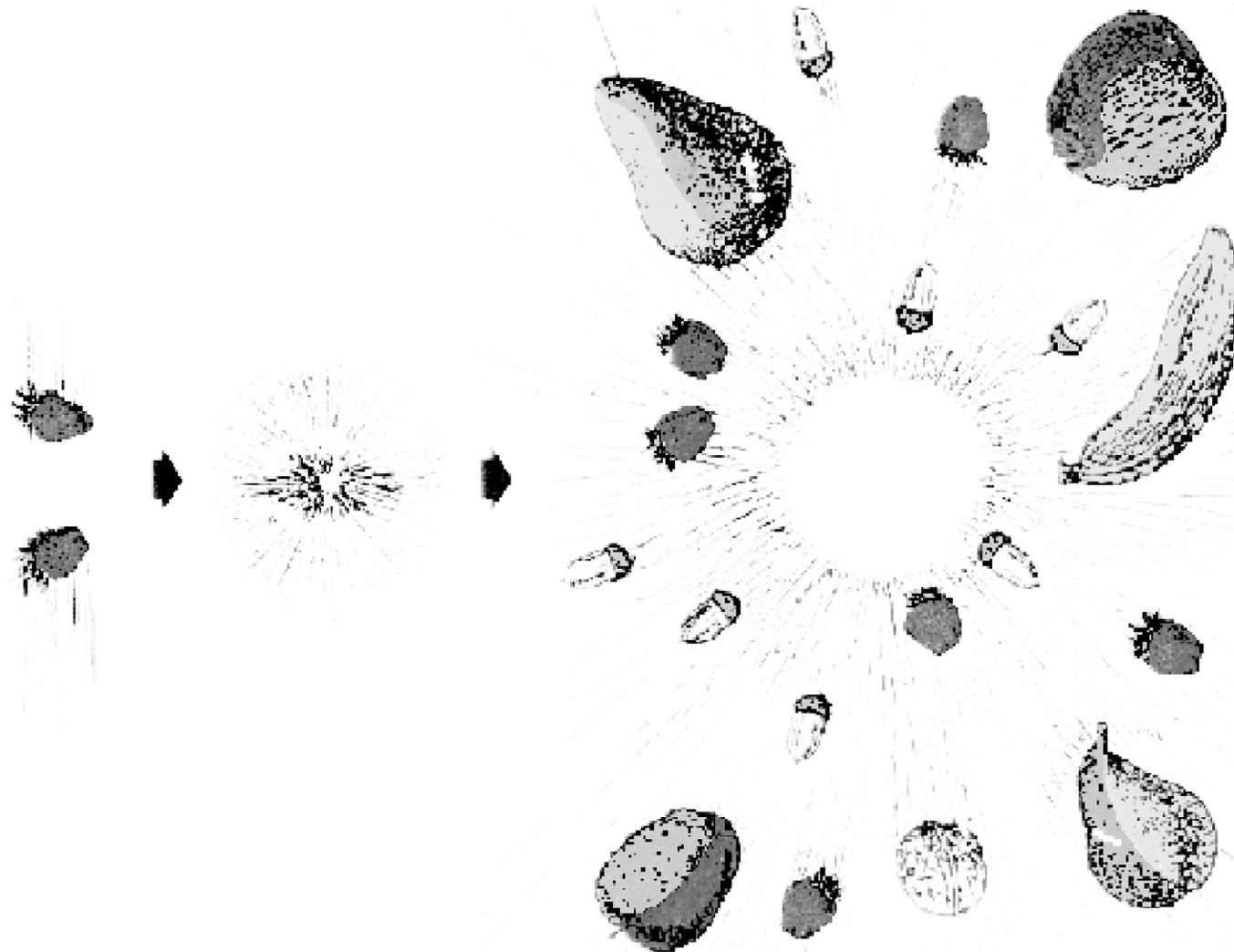
# Entdeckung der Quarks und Leptonen mit Streu-Experimenten



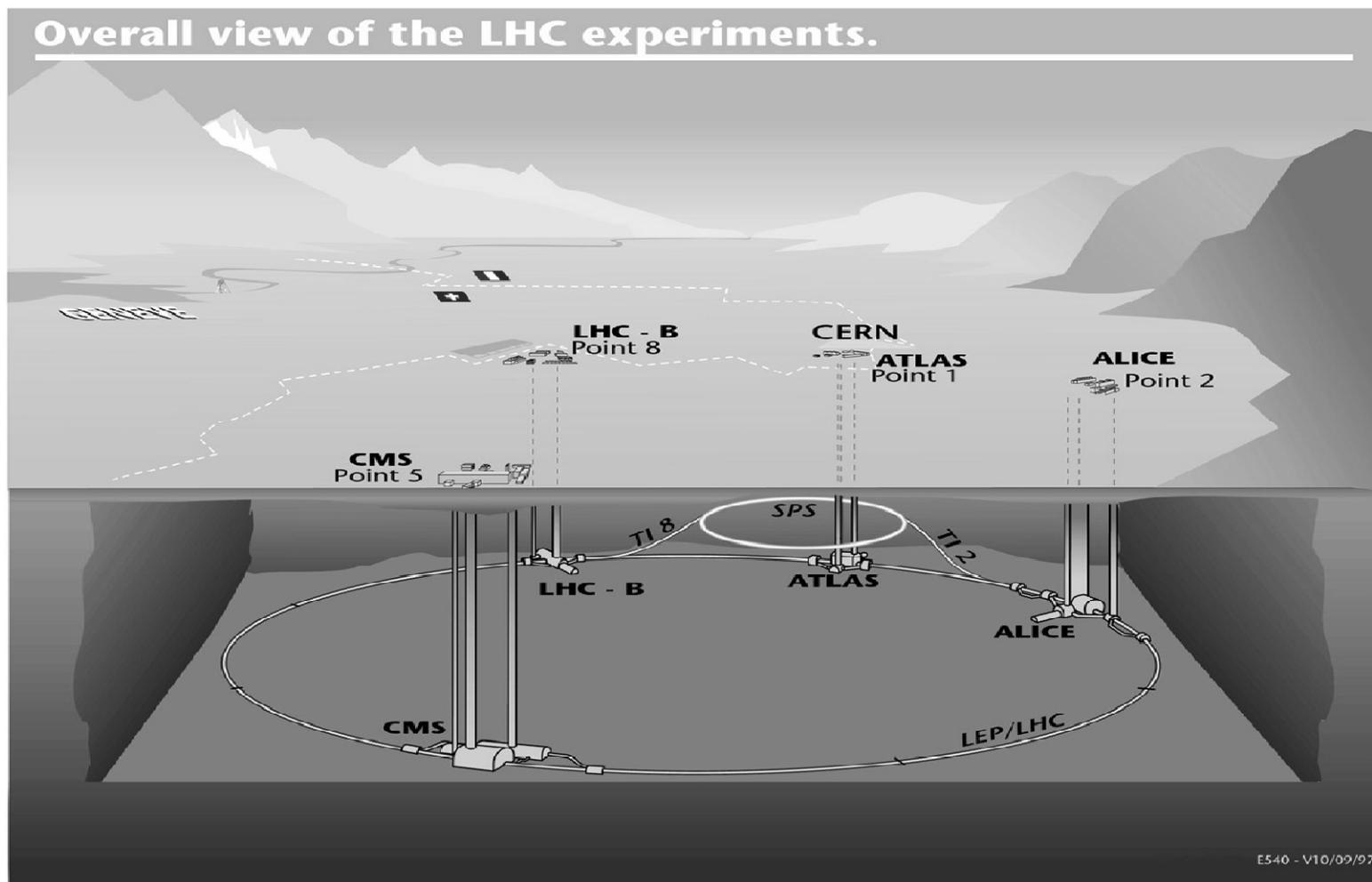
*Eliane Onursal*

# $E=mc^2$ macht es möglich

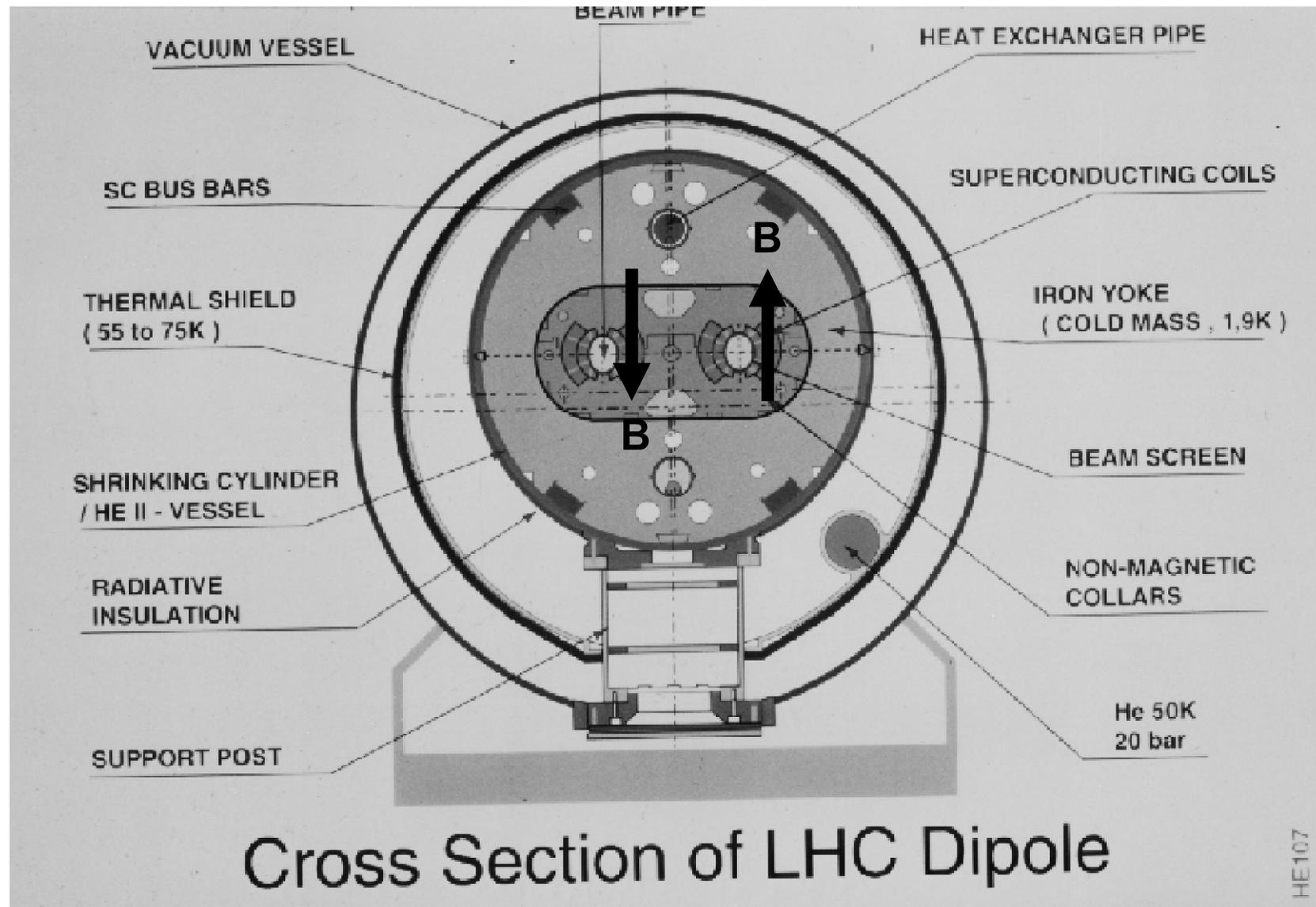
---



# Experimente am LHC (LHC= Large Hadron Collider)



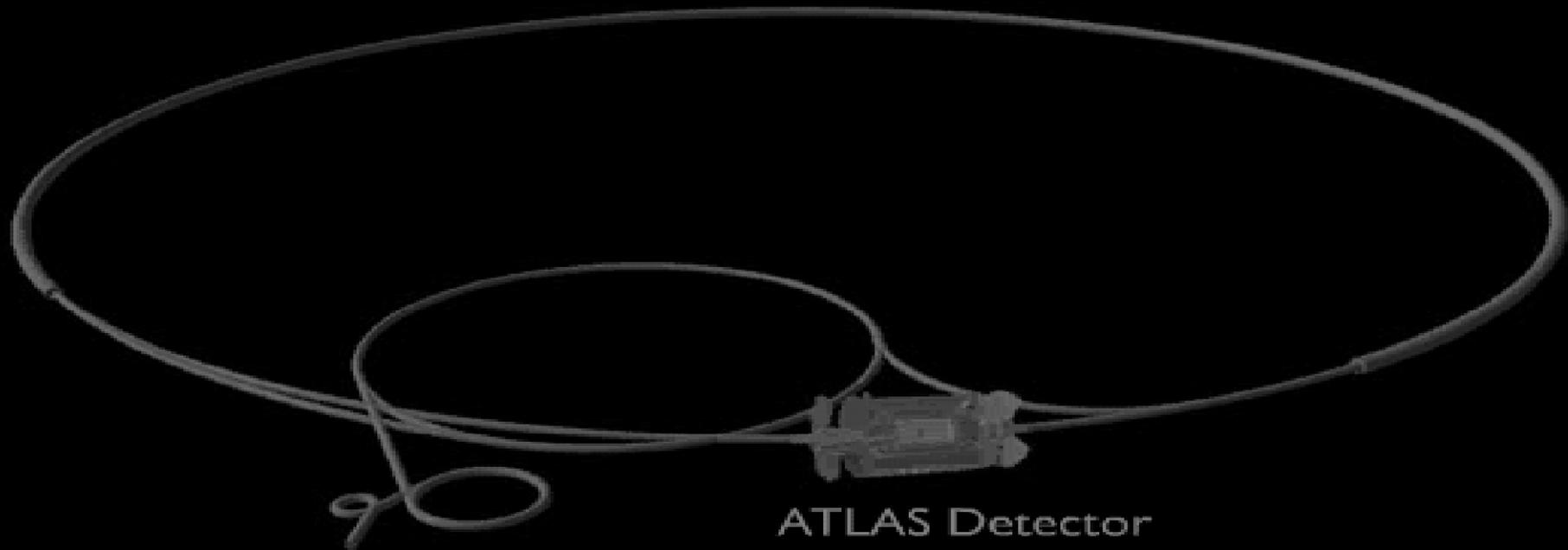
# Supraleitender LHC Magnet: zwei Dipole





PLAY ▶

Large Hadron Collider



ATLAS Detector

# Der CMS-Detektor



## CMS Collaboration



36 Nations, 160 Institutions, 2008 Scientists and Engineers (November 2003)

### TRIGGER & DATA ACQUISITION

Austria, CERN, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Korea, Poland, Portugal, Switzerland, UK, USA

### TRACKER

Austria, Belgium, CERN, Finland, France, New Zealand, Germany, Italy, Japan\*, Switzerland, UK, USA

### CRYSTAL ECAL

Belarus, CERN, China, Croatia, Cyprus, France, Ireland, Italy, Japan\*, Portugal, Russia, Serbia, Switzerland, UK, USA

### PRESHOWER

Armenia, Belarus, CERN, Greece, India, Russia, Taipei, Uzbekistan

### RETURN YOKE

Barrel: Czech Rep., Estonia, Germany, Greece, Russia  
Endcap: Japan\*, USA, Brazil

### SUPERCONDUCTING MAGNET

All countries in CMS contribute to Magnet financing in particular: Finland, France, Italy, Japan\*, Korea, Switzerland, USA

**FEET**  
Pakistan  
China

### FORWARD CALORIMETER

Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

### HCAL

Barrel: Bulgaria, India, Spain\*, USA  
Endcap: Belarus, Bulgaria, Russia, Ukraine  
HO: India

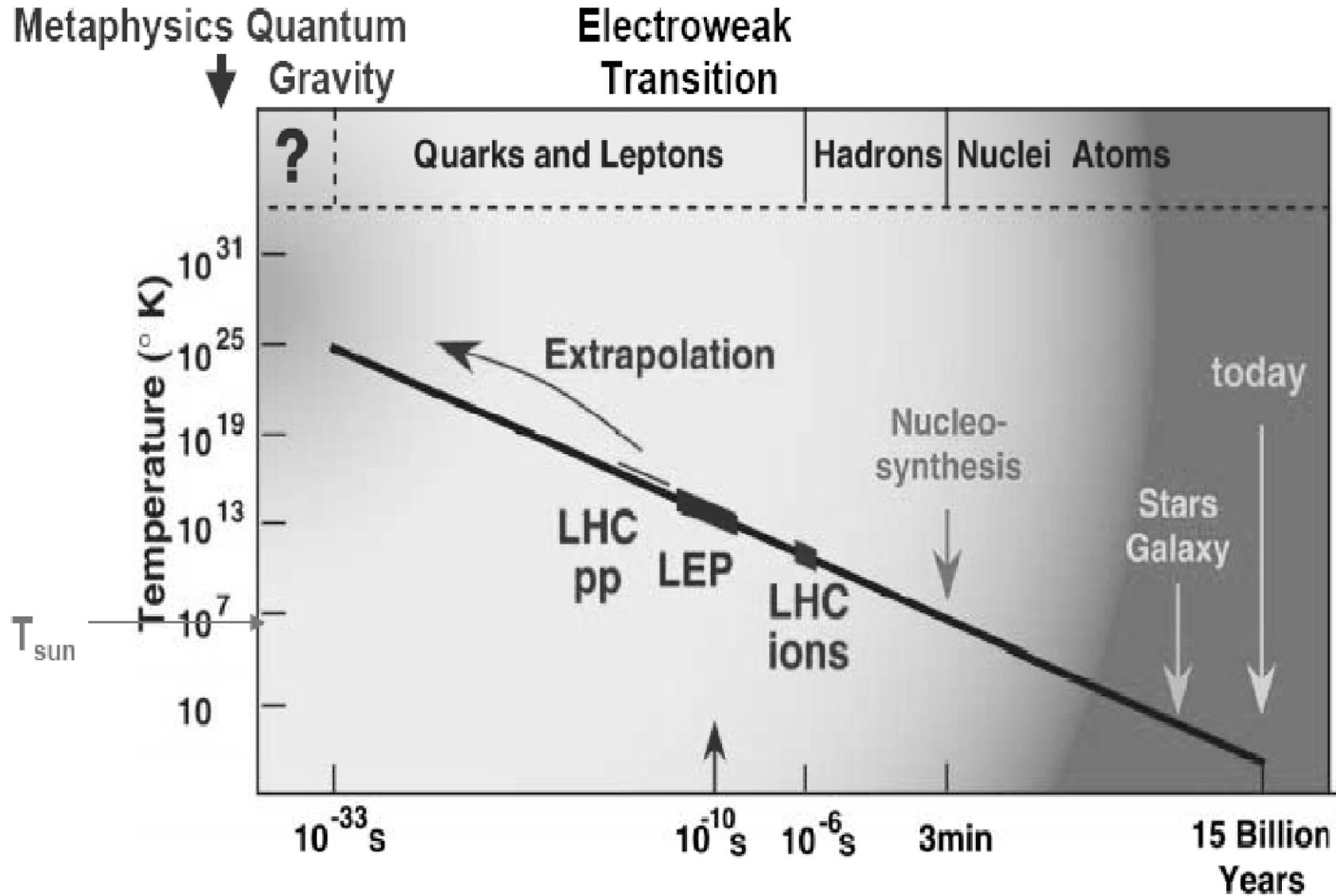
### MUON CHAMBERS

Barrel: Austria, Bulgaria, CERN, China, Germany, Hungary, Italy, Spain,  
Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Korea, Pakistan, Russia, USA

\* Only through industrial contracts

**Total weight** : 12500 T  
**Overall diameter** : 15.0 m  
**Overall length** : 21.5 m  
**Magnetic field** : 4 Tesla

# Temperatur Entwicklung des Universums



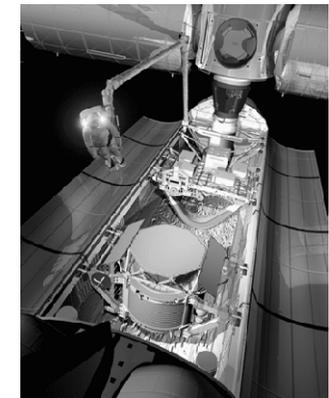
# Suche nach dunkler Materie mit AMS-02 im Weltall

---

## AMS: Alpha Magnetic Spectrometer



**Large acceptance detector ( $0.4 \text{ m}^2\text{sr}$ ) with excellent particle identification by Silicon Tracker in SC magnet, RICH, TRD, TOF, EM Calorimeter**



## Warum braucht man ab dem 4. Semester Quantenmechanik?

---

Beobachtungen bedeuten Impulsänderungen am Objekt!  
Z.B. wenn etwas optisch beobachtet wird, dann werden Photonen am Objekt gestreut.  
Wenn das Objekt sehr klein ist, kann dies merkbare Unsicherheiten im Ort und Impuls des Objekts verursachen.

**ES GIBT EINE UNTERE GRENZE AN DIE  
GENAUIGKEIT WOMIT MAN  $x$  und  $p$  beobachten kann!**  
(ausgedrückt durch Heisenbergsche Unschärfe-Relation  
 $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$  ( $\hbar = h/2\pi$  mit  $h =$  Plancksche Konstante der QM))  
Folge: man kann  $x$  und  $p$  NICHT GLEICHZEITIG genau bestimmen, denn wenn  $x$  sehr genau bestimmt wird, dann wird  $\Delta p \geq \hbar / \Delta x$  sehr gross. M.a.W.  $\Delta x$  sehr klein verlangt viele Photonen, die  $\Delta p$  sehr gross machen.

**Atome sind sehr kleine Objekte, bei denen  
Quanteneffekte eine SEHR GROSSE ROLLE spielen!**

## Weitere Extravaganzen der QM

**Der Unterschied zwischen Teilchen und Welle verschwindet im Quantumbereich, d.h.**

**Elektronen haben Wellencharakter**

**Wellenlänge eines Elektrons hängt vom Impuls ab:**

$$\lambda = h / p \text{ (de Broglie Beziehung)}$$

**Beispiel: statt ein Lichtmikroskop verwendet man ein Elektronenmikroskop, das eine viel kleinere Wellenlänge und dementsprechend eine höhere Auflösung hat**

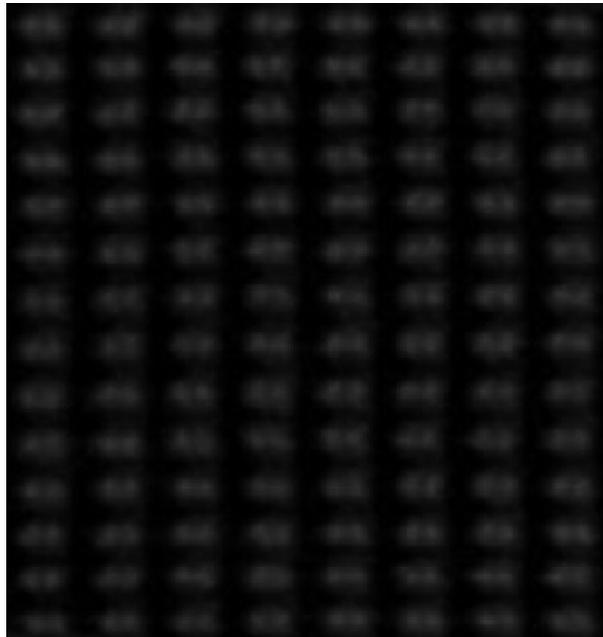
**Photonen haben Teilchencharakter (sind “quantisiert”)**

**Masse eines Photons gegeben durch:  $E = h\nu = mc^2$  (mit  $\nu=c/\lambda \Rightarrow \lambda = h / p$ )  
(Beispiel: Photoeffekt, Impulse der Photonen auf Elektronen übertragen und somit wird Licht in Strom umgewandelt (digitale Kamera, Photomultiplier,..))**

# Kann man Atome sehen?

Ein Lichtmikroskop hat eine Auflösung  $d = \lambda/n \sin\theta \approx O(\lambda)$  ,  
*Für Licht mit  $\lambda \approx 5000 \text{ \AA} = 500\text{nm}$  und Atome » 1-100 \AA* *bedeut das:*  
mit Licht kann man keine Atome auflösen

**JEDOCH:** Röntgenlicht *hat  $\lambda \approx 1 \text{ \AA}$  . Im Prinzip ok, jedoch praktische*  
*Auflösung » 100 \AA*, weil keine Linsen für Röntgen-Strahlung existieren  
( $n \approx 1$  für alle Materialien),  
Elektronenmikroskop:  $\lambda \approx 0,04 \text{ \AA}$ , Reale Auflösung  $\approx 1 \text{ \AA}$



"Looking down on a silicon crystal, we can see atoms that are only 0.78 angstroms apart, which is the first unequivocal proof that we're getting subangstrom resolution. The same image shows that we're getting resolution in the 0.6 angstrom range," said ORNL Condensed Matter Sciences Division researcher Stephen Pennycook. (Science, 2004)

## Weitere Extravaganzen der QM

Wenn Teilchen Wellencharakter haben, sind sie NICHT lokalisiert. Daher kann man nur eine **AUFENTHALTSWAHRSCHEINLICHKEIT** für einen bestimmten Ort angeben.

Diese Aufenthaltswahrscheinlichkeit wird bestimmt durch  $|\Psi|^2$ , wobei  $\Psi$  die sogenannte Wellenfkt. ist.

Für stabile Bahnen der Elektronen müssen die Wellenfkt. stehende Wellen entsprechen, z.B.

$$2\pi r = n \lambda = nh/p \text{ oder } L = r p = nh/2\pi$$

(Drehimpuls gequantelt)

Solche Randbedingungen bestimmen erlaubte Bahnen und führen zu “Quantenzahlen” (in diesem Fall  $n$ ), die die Energie-Niveaus bestimmen.

# Klassische Mechanik und Quantenmechanik

	groß	klein
langsam	<u>KLASSISCHE MECHANIK</u> $F = ma$	<u>QUANTENMECHANIK</u> $i\hbar\partial_t\psi = H\psi$ <b>Schrödingergl. der Atomphysik</b>
	<u>SPEZ. RELATIVITÄTSTHEORIE</u> $x' = \gamma(x + vt)$ $t' = \gamma(t + vx/c^2)$ $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} ; \beta = \frac{v}{c}$	<u>RELAT. QUANTENMECHANIK</u> Klein-Gordon-Gln. Dirac-Gln. Proca-Gln.  und QUANTENFELDTHEORIE Symmetrien Eichtheorien
schnell		

# Literatur

---

Bänder für die gesamte Physik:

- **Physik von Gerthsen/Meschede (Springer)**
- **Physik von Tipler (Spektrum)**
- **Physik von Giancoli (Pearson)**
- **Physik von Alonso/Finn (Addison-Wesley)**
- **Physik von Halliday et al. (Wiley)**
- **Taschenbuch der Physik von Stoecker**

Jeweils mehrere Bänder:

- **Physik von Haensel/Neumann (Spektrum)**
- **Lehrbuch der Experimentalphysik von Bergmann/Schaefer (Springer)**
- **Experimentalphysik Demtroeder (Springer)**

**Einzelne Physikbücher für die gesamte Physik geben einen sehr guten Überblick, reichen jedoch nicht für einzelne Vorlesungen**

# Spezielle Literatur Atomphysik

## Literaturangaben

1. Haken-Wolf: Atom und Quantenphysik (Springer)
2. Mayer-Kuckuck: Atomphysik (Teubner)
3. Hänsel+Neumann: Physik (Band III):  
Atome, Atomkerne, Elementarteilchen

} Wichtig!

Haken-Wolf behandelt AP +QM in gleicher Notation. Gleichzeitig ein Kapitel über Molekülphysik.

**Daher wird sich die Vorlesung an Haken-Wolf orientieren.**

## Zusätzliche Angaben:

4. Alonso+Finn: Quantenphysik und Statistische Physik  
(übersetzt aus Fundamental Univ. Phys., Vol III )
5. D. Griffiths: Introduction to QM  
*Von Griffiths auch: (kein VL.-Stoff, aber ausgezeichnet)*  
*Introduction to Electrodynamics*  
*Introduction to Elementary Particle Physics*

# Überblick der Vorlesung

## 1. Experimentelle Grundlagen der Atomphysik

Masse und Größe der Atome  
Struktur der Atome  
Rutherfordstreuung  
Schwarzkörperstrahlung  
Bohrsche Postulate  
Photoeffekt,  
Comptoneffekt

## 2. Elemente der Quantenmechanik

Wahrscheinlichkeitsdeutung in der QM  
Heisenbergsche Unsicherheitsrelation  
Schrödingergleichung

## 3. Das Wasserstoffatom

Wellenfkt. des H-Atoms aus der  
Schrödingergleichung  
Energiezustände des Wasserstoffatoms  
Bahn- und Spinmagnetismus,  
Stern-Gerlach Versuch  
Spin-Bahnkopplung, Feinstruktur  
Kernspin, Hyperfeinstruktur

## 4. Atome im magnetischen und elektrischen Feld

Zeeman-Effekt  
Paschen-Back-Effekt  
Spinresonanz  
Stark-Effekt  
Lamb-shift

## 5. Mehrelektronensysteme

Heliumatom  
Kopplung von Drehimpulsen  
Periodensystem  
Schalenstruktur  
Röntgenstrahlung  
Laser  
Maser

## 6. Molekülphysik

Molekülbindungen  
Molekülspektroskopie

# Einteilung der Vorlesung

---

## **VL1. Einleitung**

Die fundamentalen Bausteine und Kräfte der Natur

## **VL2. Experimentelle Grundlagen der Atomphysik**

2.1. Masse, Größe der Atome

2.2. Elementarladung, spezifische Ladung des Elektrons

2.3 Massenspektroskopie

2.4. Struktur der Atome, Rutherford-Streuversuch

## **VL3. Photonen (Quanteneigenschaften des Lichts I)**

3.1. Photoeffekt

3.2. Comptoneffekt

## **VL4. Photonen (Quanteneigenschaften des Lichts II)**

3.3. Gravitationseffekte des Photons

3.4. Temperaturstrahlung

## **VL5. Materiewellen (Welleneigenschaften von Teilchen)**

4.1. Beugung und Interferenz von Elektronen

4.2. Materiewellen und Wellenpakete

4.3. Heisenbergsche Unschärferelation

# Einteilung der Vorlesung

---

---

## **VL6. Elemente der Quantenmechanik I**

- 6.1. Schrödingergleichung als Wellengleichung der Materie
- 6.2. Messungen in der Quantenmechanik

## **VL7. Elemente der Quantenmechanik II**

- 7.1 Kurzfassung der Eigenschaften der Eigenfunktionen
- 7.2 Zusammenfassung der Operatoren der QM
- 7.3 Vertauschungsrelationen
- 7.4 Postulate der QM
- 7.5 Lösungen der Schrödingergleichung in einer Dimension

## **VL8. Elemente der Quantenmechanik III**

- 8.1. Wellenpakete als Lösungen der Schrödingergleichung
- 8.2. Lösungen der Schrödingergleichung in einem Potentialfeld

# Einteilung der Vorlesung

---

## **VL9. Das Wasserstoffatom in der Klass. Mechanik**

- 9.1. Emissions- und Absorptionsspektren der Atome**
- 9.2. Quantelung der Energie (Frank-Hertz Versuch)**
- 9.3. Spektren des Wasserstoffatoms**
- 9.4. Bohrsches Atommodell**

## **VL10. Elemente der Quantenmechanik IV**

- 10.1. Schrödingergleichung mit beliebigem Potential**
- 10.2. Harmonischer Oszillator**
- 10.3. Drehimpulsoperator**

## **VL11. Das Wasserstoffatom in der QM (I)**

- 11.1. SG in einem kugelsymmetrischen Potential**
- 11.2. Quantenzahlen des Wasserstoffatoms**
- 11.3. Winkelabhängigkeit (Kugelflächenfunktionen)**

# Einteilung der Vorlesung (VORLÄUFIG)

---

## **VL12. Das Wasserstoffatom in der QM II**

- 12.1. Energiezustände des Wasserstoffatoms
- 12.2. Radiale Abhängigkeit (Laguerre-Polynome)

## **VL13. Spin-Bahn-Kopplung (I)**

- 13.1 Bahnmagnetismus (Zeeman-Effekt)
- 13.2 Spinmagnetismus (Stern-Gerlach-Exp.)
- 13.3 Landé-Faktor (Einstein-deHaas Effekt)

## **VL14. Spin-Bahn-Kopplung (II)**

- 14.1. Spin-Bahnkopplung
- 14.2. Das Experiment von Lamb und Retherford

## **VL15. Atome in einem starken Magnetfeld**

- 15.1. Paschen-Back Effekt
- 15.2. Elektronspin-Resonanz
- 15.3. Kernspin-Resonanz

# Einteilung der Vorlesung (VORLÄUFIG)

---

## **VL16. Mehrelektronensysteme (Pauliprinzip)**

16.1. Heliumatom

16.2. Kopplung von Drehimpulsen (L-S- und j-j-Kopplung)

## **VL17. Periodensystem**

17.1. Periodensystem und Schalenstruktur

## **18. Röntgenstrahlung**

18.1. Röntgenstrahlung

## **19. Laser**

19.1. Maser und Laser

## **20. Übergänge**

## **21. Moleküle**

## **22. Molekülbindungen**

## **23. Molekülspektroskopie**

# Historischer Überblick

---

**Proust, Dalton, Mendelejeff, Gay-Lussac, Avogadro:**  
**Atomistik der Materie aus chemischen Reaktionen.**  
⇒ **Periodisches System der Elemente**

**Clausius, Boltzmann:**  
**Atomistik der Wärme ⇒ kinetische Gastheorie.**

**1833 Faraday: Atomistik der Elektrizität aus Elektrolyse:**  
**abgeschiedene Menge  $\propto$  Ladung: wenn Menge quantisiert in Atomen,**  
**muss auch die Ladung quantisiert sein und die “Atome” der Elektrizität**  
**(später sind es die Elektronen) sind mit Atomen der Materie verkoppelt**

**1900 Planck: Atomistik der Energie aus Hohlraumstrahlung**  
⇒ **Energie harmonischer Oszillatoren gequantelt:  $E=h\nu$**

**Kirchhoff, Bunsen, Balmer: optische Spektrallinien**  
**charakteristisch für jedes Element**

**1911 Rutherford: Atommasse konzentriert im Kern**  
**1913 Bohr: Atommodell mit quantisierten Energien**

**De Broglie, Born, Heisenberg, Schrödinger, Pauli: QM der Atome**

# Begriffe aus der Chemie

---

**Atomgewicht = relative Atommasse ( $A_r$ ) = Gewicht eines Atoms  
in atomaren Einheiten (u)**

**1 u = Gewicht eines Protons = 1/12 der Masse von  $^{12}_6\text{C}$**

$^{12}_6\text{C}$  hat  $A_r=12$ , d.h. 12 Nukleonen,  
davon 6 Protonen (Kernladungszahl  $Z=6$ )  
daher  $A_r-Z=6$  Neutronen

$^{13}_6\text{C}$  hat 6 Protonen + 7 Neutronen ! "Isotop",  
gleicher Kernladung und daher gleiche Anzahl der Elektronen  
! gleiche chemische Eigenschaften

**1 u =  $1,6605655 \pm 0,0000086 \cdot 10^{-27}$  kg**

**$m_e = m_p/1836$ , d.h. Masse der Elektronen ( $m_e$ ) vernachlässigbar**

**Stoffmenge:**

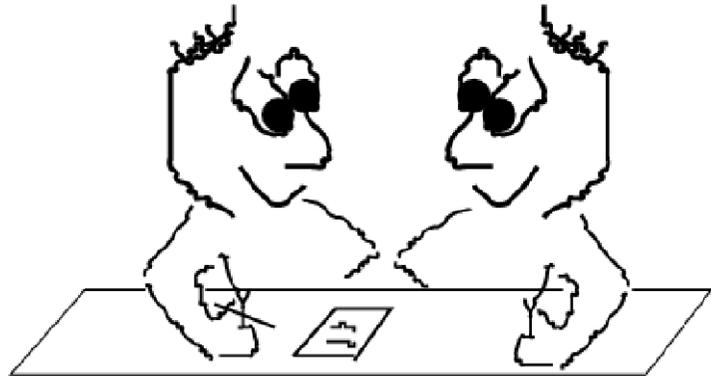
**1 Mol eines Stoffes ist so viel Gramm eines Stoffes, wie das relative  
Atom-oder Molekülgewicht beträgt**

**z.B. 1 Mol  $^{12}\text{C}$  sind 12 g**

**1 Mol  $\text{H}_2\text{O}$  sind  $2 + 12 = 18$  g ( $^{16}_8\text{O}$ )**

**1 Mol einer Substanz enthält jeweils die gleiche Anzahl  $N_A$  (oder  $N_L$ )  
von Atomen oder Molekülen ( $A = \text{Avogadro}$ ,  $L = \text{Loschmidt}$ ,  $N_L = 6,0 \cdot 10^{23}/\text{Mol}$ )**

**1 Mol Gas = 22,4 Liter unter Normalbedingungen (1 bar, 273 K)**



**Frage: wo gibt es mehr Moleküle: in einer Flasche  
Sprudel oder in der Luft im Hörsaal?**

# Bestimmung der Avogadrozahl

Z.B. aus der Elektrolyse:  $\text{CuSO}_4 \Rightarrow \text{Cu}^{++} + \text{SO}_4^{--}$

Für die Abscheidung eines Mols einer einwertigen Substanz braucht man 1 Faraday = 96458 [As]

$Q_F = \int I dt = 2 F$ , für ein Mol Cu = 63,5 g

abgeschiedene Masse auf die Elektrode.  $N_A = Q_F/e$

Aus  $N_A$  kann man die Masse eines Atoms berechnen  $m_{Atom} = A/N_A$

1 u = 1/12 der Masse eines C-Atoms  $\approx$  Masse eines Protons =  $1,6605655 \pm 0,0000086 \cdot 10^{-27}$  kg = 931,478 MeV/c<sup>2</sup> (aus  $E=mc^2$ )

Andere Methoden, um  $N_A$  zu bestimmen: aus der Gaskonstanten R in  $PV = nRT$  und der Boltzmannkonstanten  $k = R/N_A$

Die Boltzmannkonstante  $k$  kann man z.B. aus der Dichteverteilung kleiner Schwebeteilchen in einer Suspension bestimmen, die im thermischen Gleichgewicht unter gleichzeitiger Wirkung von Schwere und Brownscher Molekularbewegung durch die Gleichung:  $n_h = n_0 e^{-mgh/kT}$  gegeben ist. Dies ist ein Spezialfall der berühmten Boltzmann-Verteilung, die angibt wie die Teilchen über die möglichen Energieniveaus (Höhen) verteilt sind.

# Zum Mitnehmen

**Dalton 1803-1808**

**Lehre von den Atomen als  
Grundbausteinen der Stoffe**

**Meyer/Mendelejev 1869-1871**

**Periodensystem der Elemente**

**107 Chemische Verbindungen 112 Atome**

**Später:**

**Rutherford (1871-1937)**

**Atome: kompakter Kern mit Elektronenhülle**

**Bothe, Chadwick, Joliot (um 1932)**

**Neutronen und Protonen im Kern**

**Gell-Mann, Zweig (1964)**

**Protonen, Neutronen, andere Hadronen**

**Bestehen aus Quarks**

