

# 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)

# Wie lernen wir?

---

---



Wir behalten von dem

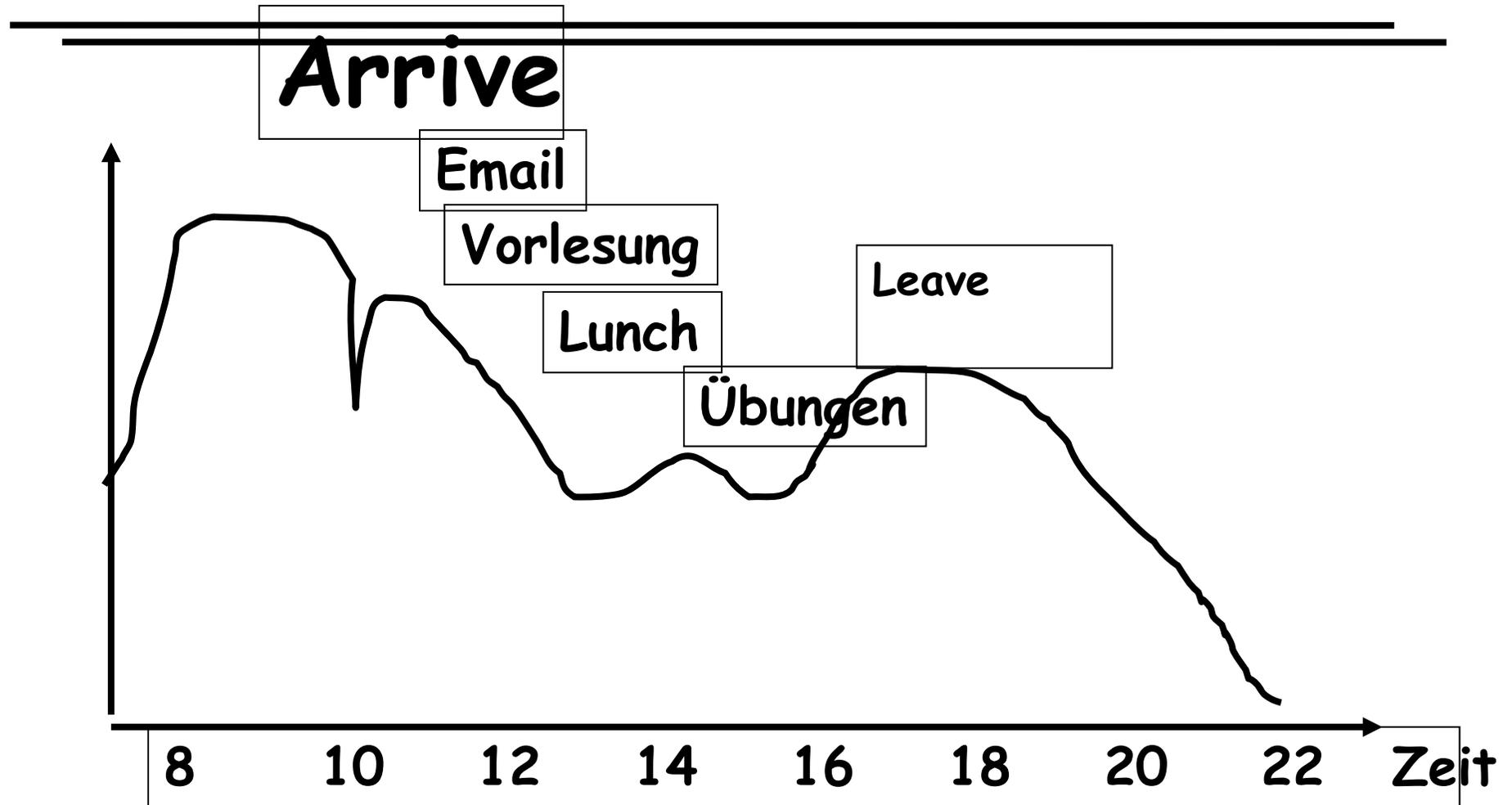
- Was wir lesen: 10%
- Was wir hören: 20%
- Was wir sehen (schreiben) 30%
- Hören und sehen (schreiben): 50%
- Selber sagen (formulieren): 70%
- Selber tun: 90%

Vorlesungen

Wissenschaftliches  
Gespräch!

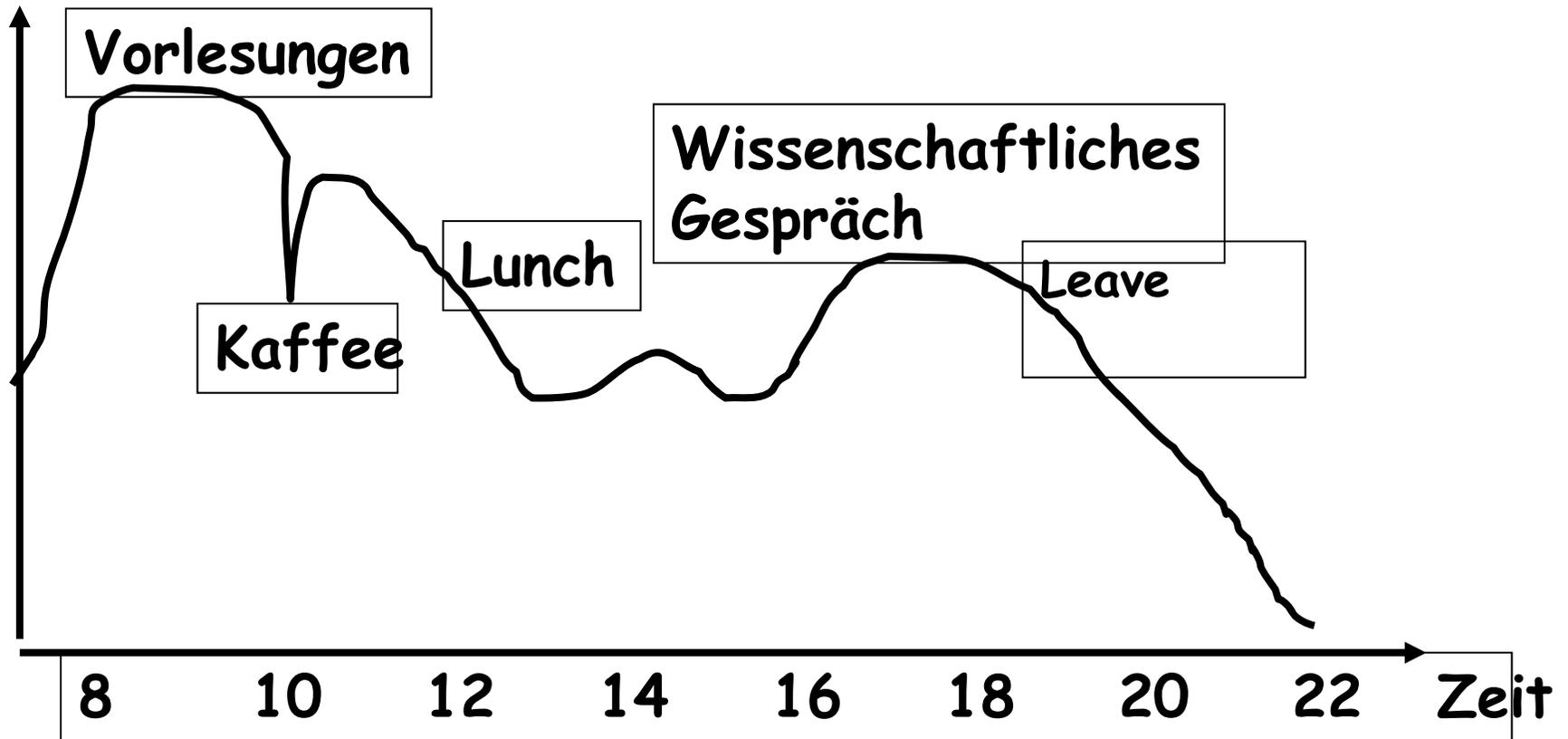
Übungen

# Kreativität des Gehirns



**Sub-optimal use of brain!**

# Besseres Zeitmanagement



# Übungen und Klausur

---

---

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

Do. 08:00 - 09:30 im Gaede Geb. 30.2

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)

Klausur: Di. 15:00 - 17:00 28.09.2010 Gerthsen Geb. 30.21

Zulassung Klausur: 50% der Aufgaben gerechnet

Klausur gibt benoteten Schein.

## FEHLER AUF WEBANMELDUNGSFORMULAR

---

---

**Übungen** finden am Montag statt, **NICHT AM DONNERSTAG**. Hier haben sich schon Leute angemeldet!!

Bitte nochmal anmelden nachdem Webseite korrigiert wurde

# Am 6.5 keine Vorlesung, wird verlegt auf 12.5

---

---

## EMAIL:

im Zuge der DFG-Begutachtung des SFB-TR27 am 6. Mai 2010 wird der Gaede-Hörsaal zu Präsentationszwecken benötigt.

Daher möchte ich Sie im Auftrag fragen, ob Sie Ihre Lehrveranstaltung "Physik IV" von 6.5. auf Mittwoch, 12.5., 8:00-9:30 Uhr im selben Hörsaal verlegen könnten.

Also VL am Di. 11.5 um 9:45 in Gerthsen  
Mi. 12.5 um 8:00 in Gaede  
Do. 13.5 HIMMELFAHRT

# Koordinaten Übungsleiter

---

---

Frank Hartmann

frank.hartmann@kit.edu

Tel.: +41 76 487 4362

Tel.: +49 7247 82 4173

# Übungen

---

---

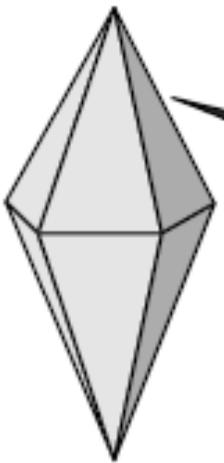
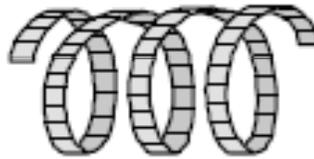
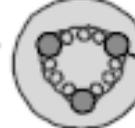
- Tutorien:
  - Montagmorgen 8.00 – 9.30; 9.45 – 10.14 und 11.30 – 13.00
- Die Übungsaufgaben werden via Mail verschickt
  - Also bitte MIT korrekter Mailadresse anmelden
  - Zusätzlich finden sich die Aufgaben unter:  
[www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~hartmann/atom10](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~hartmann/atom10)
- Anmeldung unter:
  - <http://www.physik.uni-karlsruhe.de/Tutorium/SS10/Physik4/>
  - bis 15.04. 12.00 Mittags (pünktlich)
- Einteilung:
  - Wird am 16.04.2010 im Internet veröffentlicht

# Schein-Kriterien Orientierungsniveau

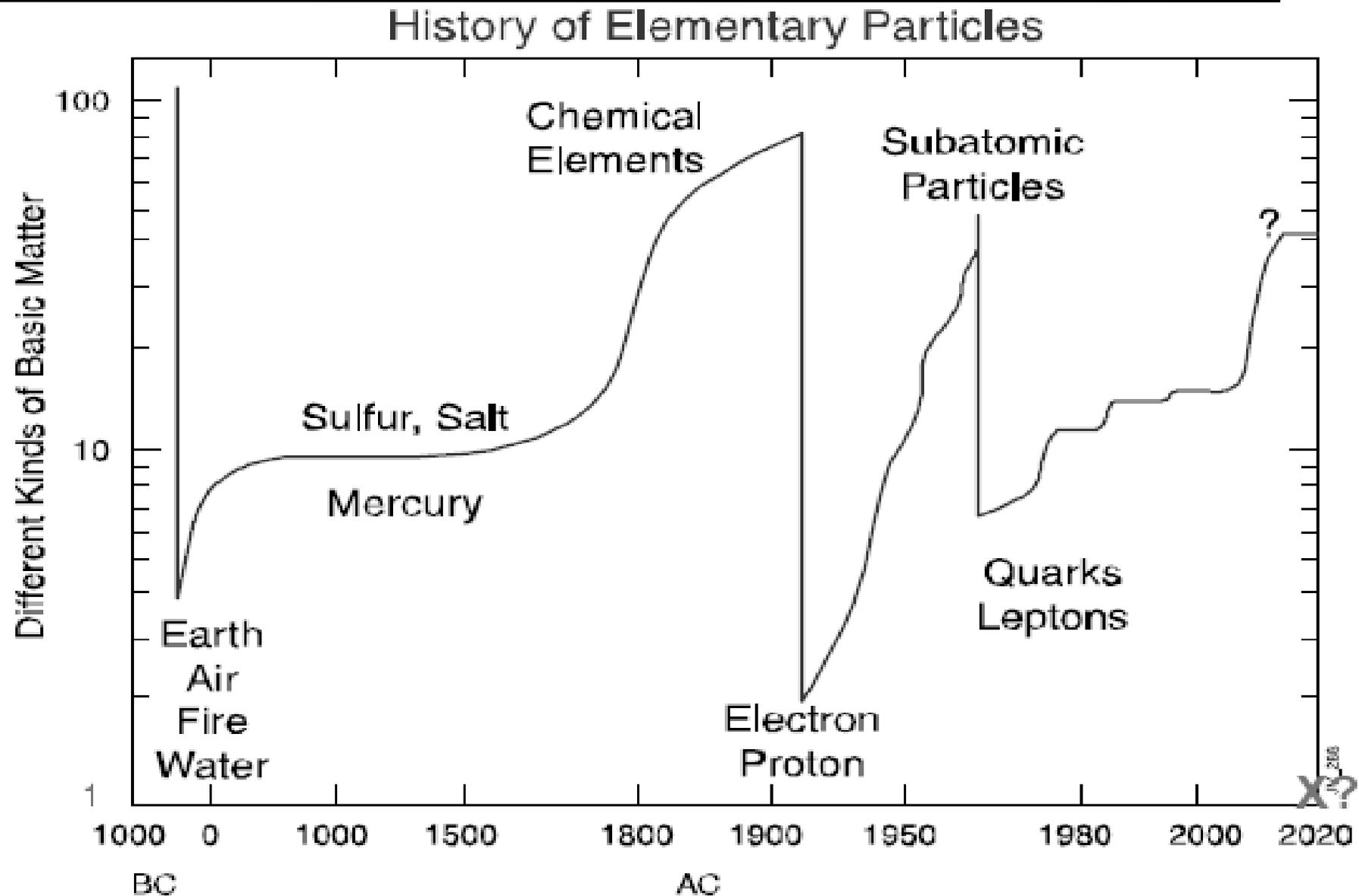
---

- Scheinkriterium und Note: Semester-Klausur am 28.09.2010 von 15.00 - 17.00 im Gerthsen Hörsaal
- 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/atom10](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~hartmann/atom10)

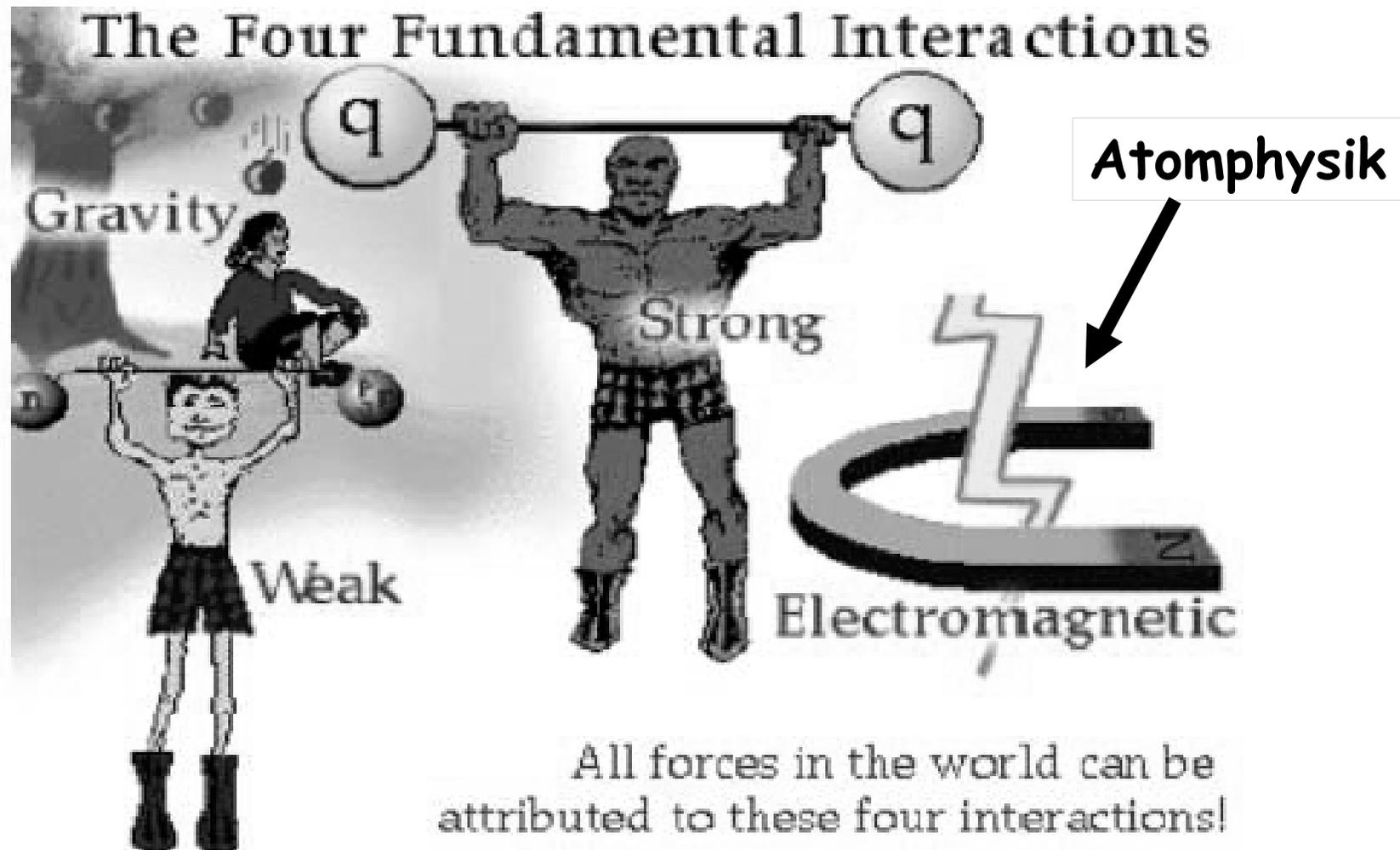
# Die elementaren Bausteine der Materie

| Crystal Molecule                                                                                                                                                                             | Atom                                                                                                      | Atomic Nucleus                                                                                             | Elementary Particles                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p><b>Physik V</b></p>  |  <p><b>Physik IV</b></p> |  <p><b>Physik VI</b></p> | <p><b>Hadrons</b></p> <p><b>Mesons</b></p>  <p><b>Baryons</b></p>  <p>Proton<br/>Neutron</p> <p><b>Spezialvorlesungen</b></p> |  <p><b>Leptons</b><br/><math>e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau</math></p> <p><b>Pointlike</b></p>  <p><b>Quarks</b><br/><math>u, c, d, s, b, (t)</math></p> |
| 1 cm                                                                                                                                                                                         | $10^{-8}$ cm                                                                                              | $10^{-12}$ cm                                                                                              | $10^{-13}$ cm                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

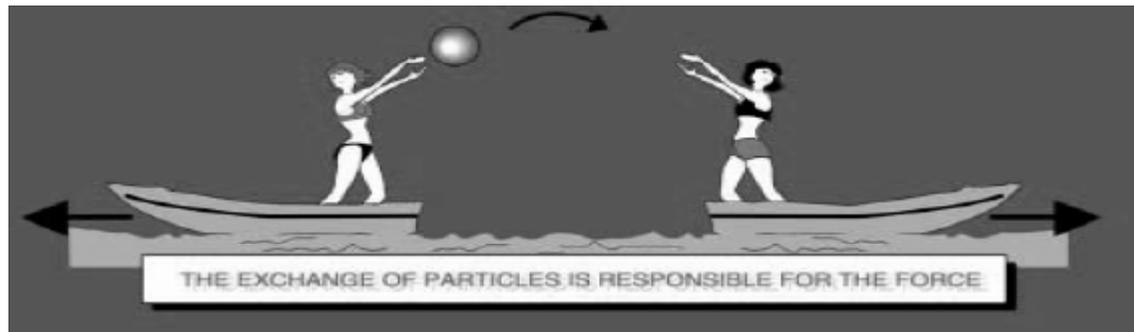
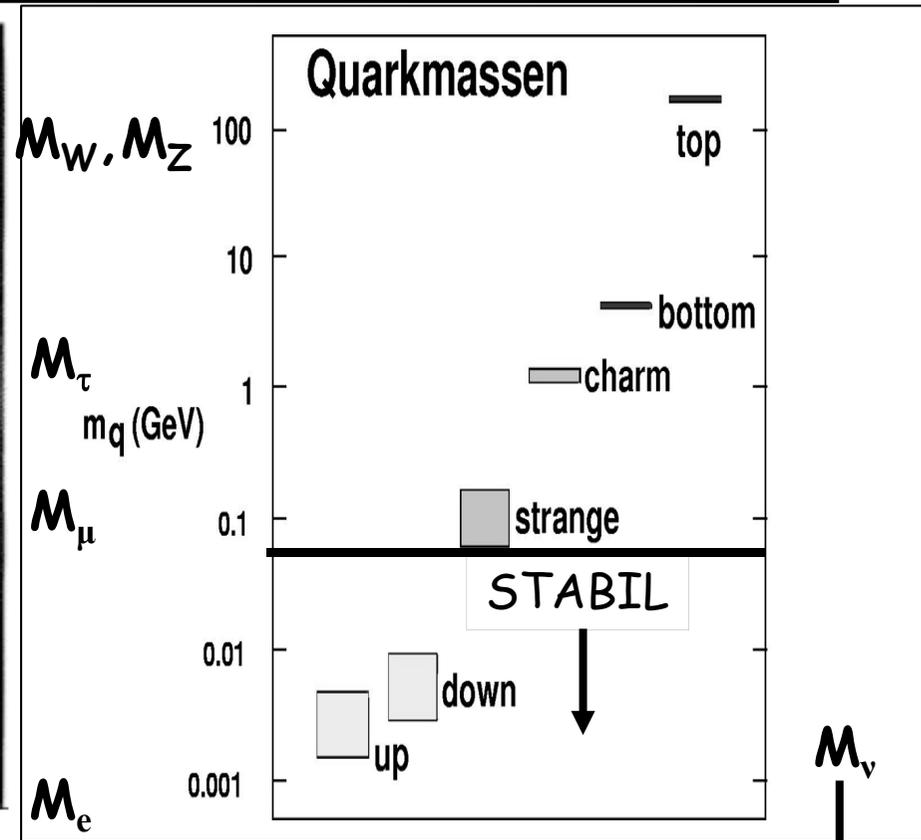
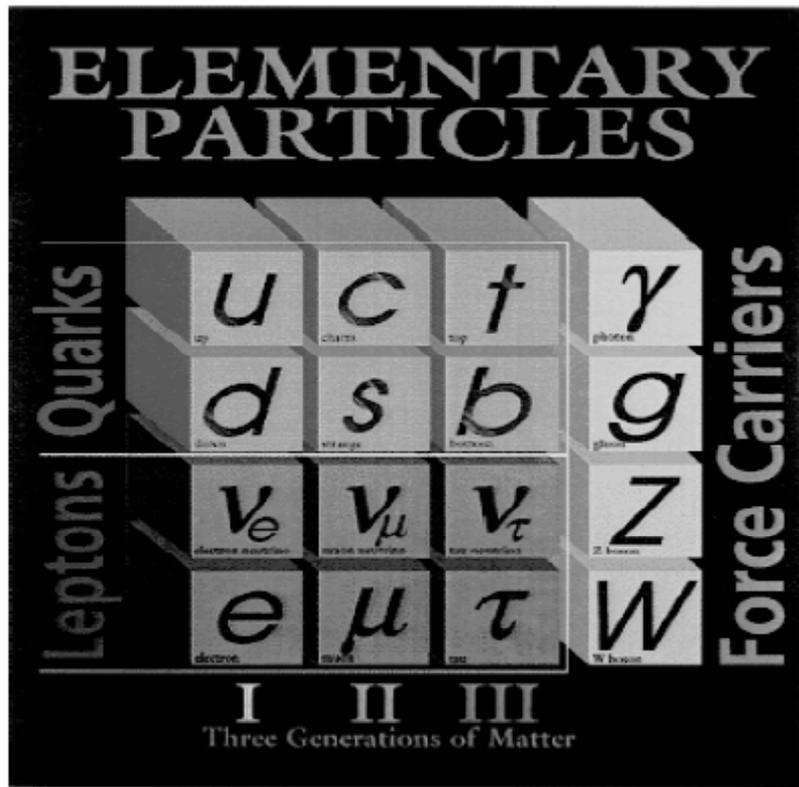
# "elementar" als Fkt. der Zeit



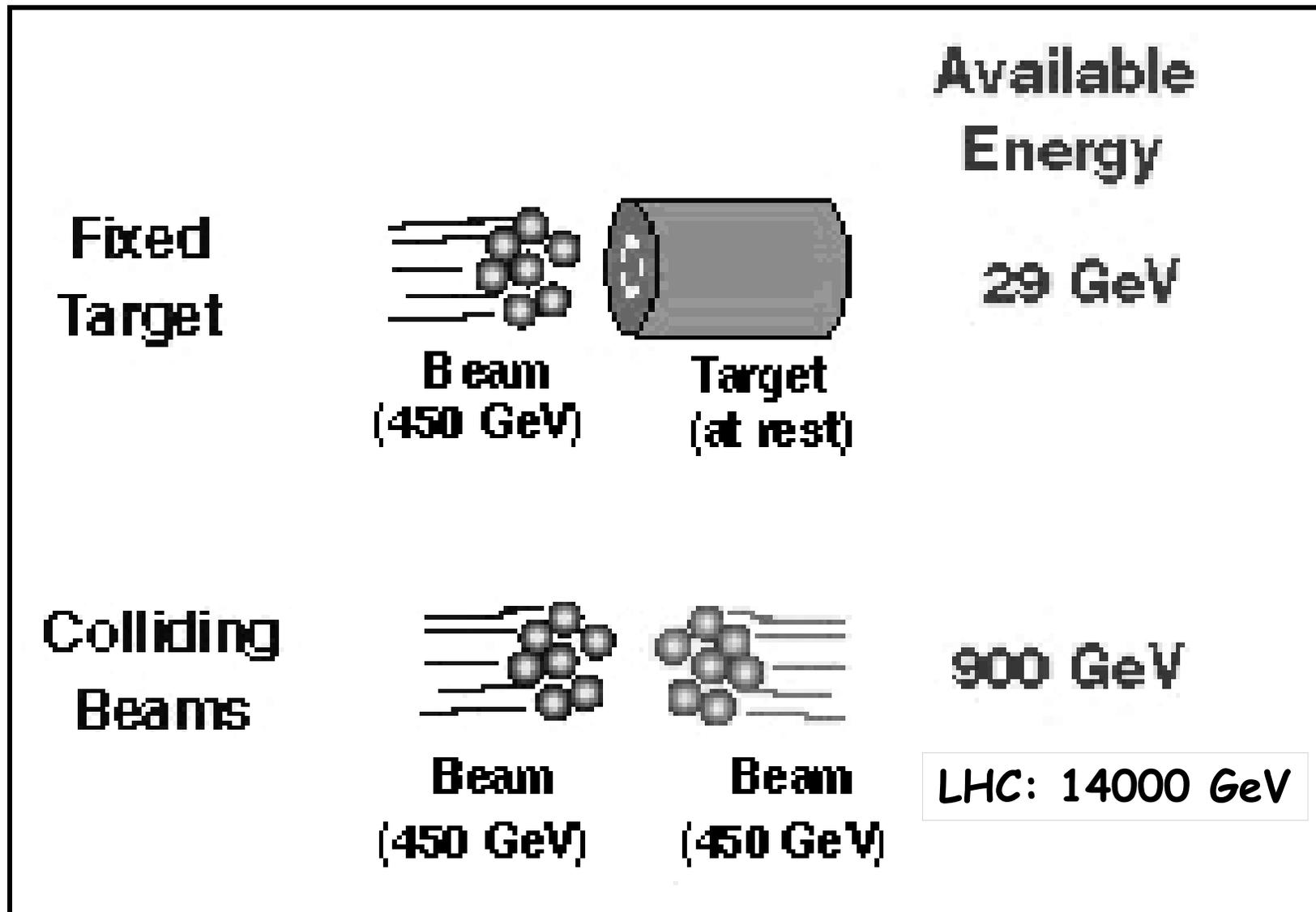
# Die elementaren Wechselwirkungen



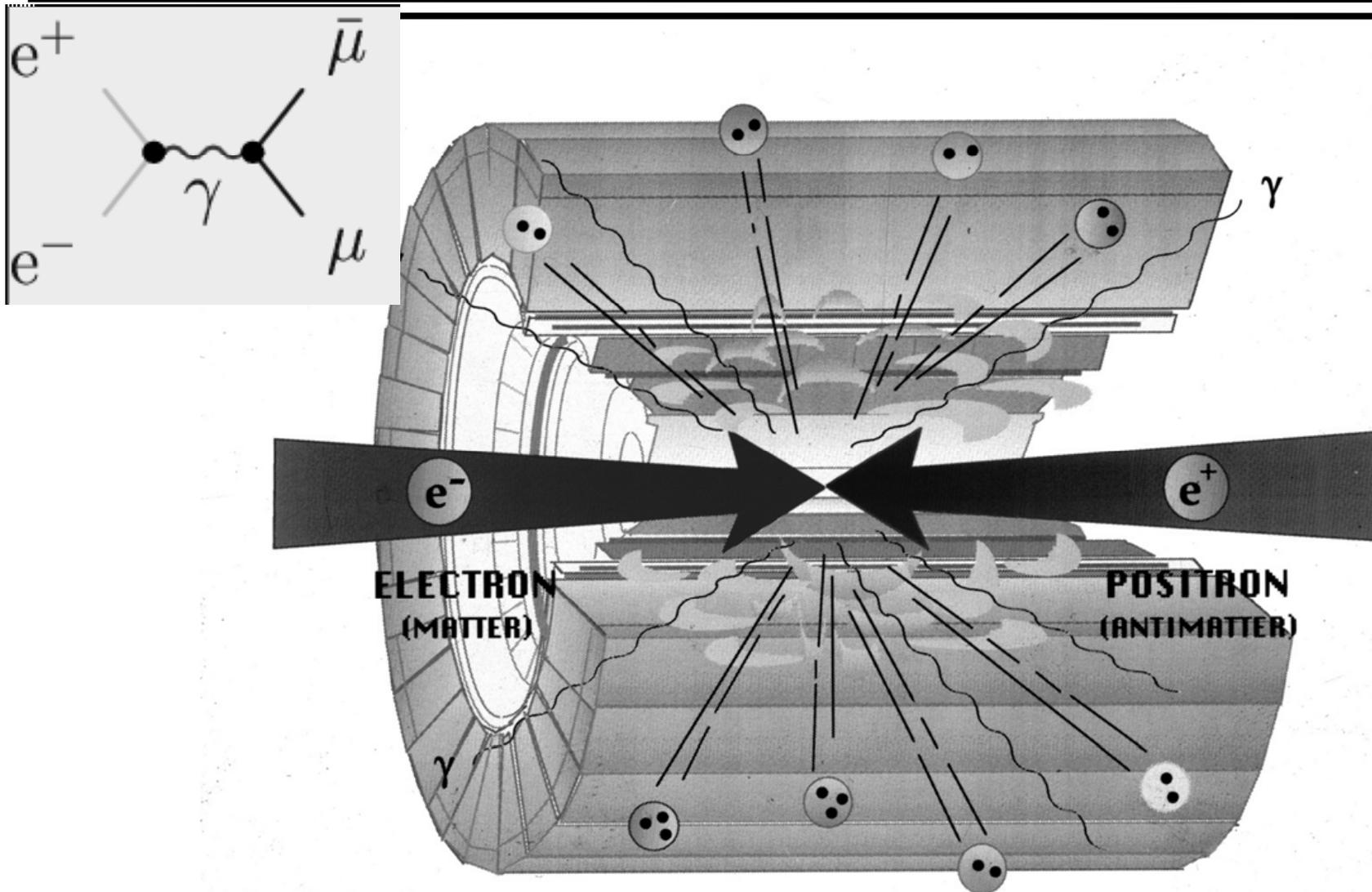
# Das Standard Modell der Teilchenphysik



# Collider Experimente



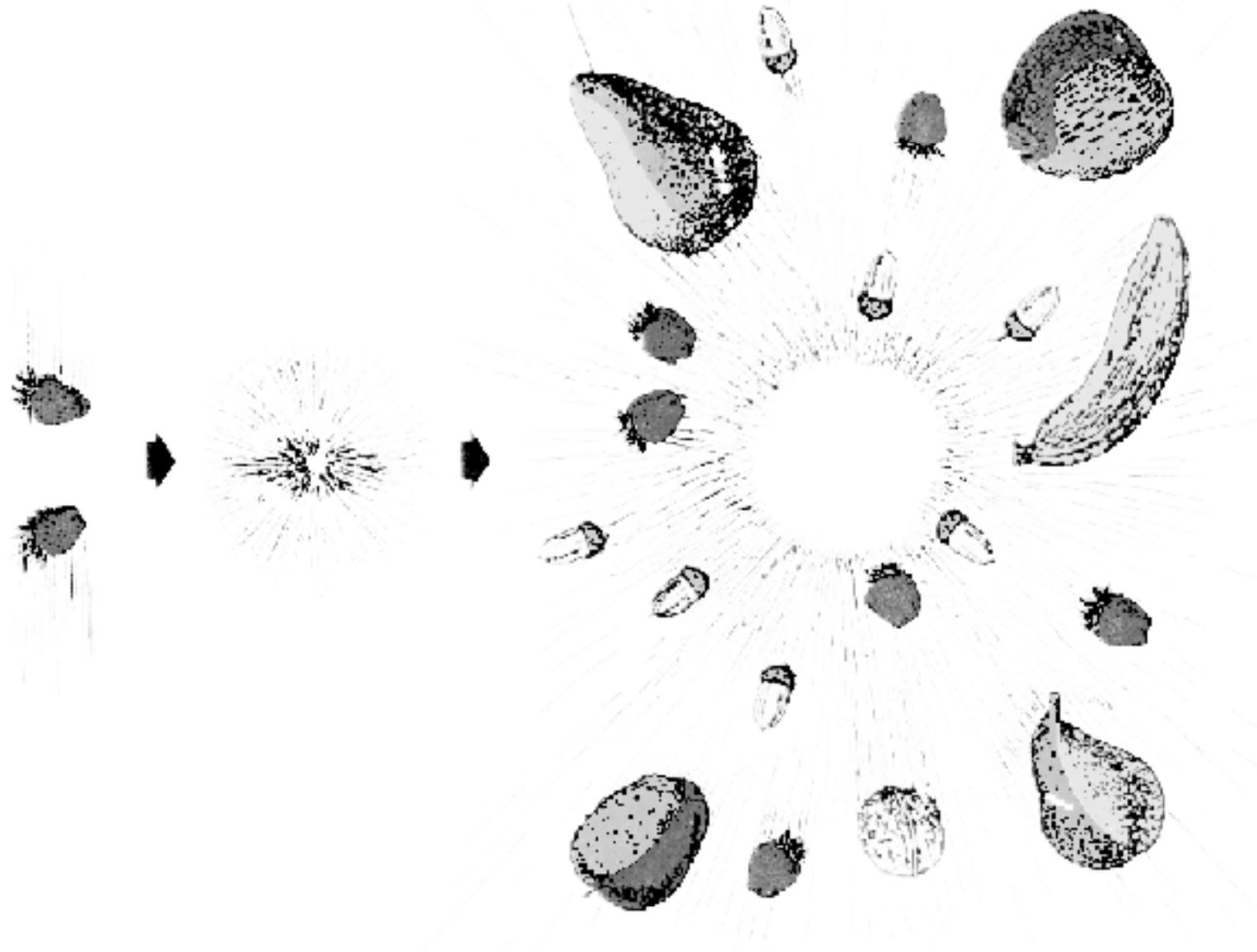
# Entdeckung der Quarks und Leptonen mit Streu-Experimenten



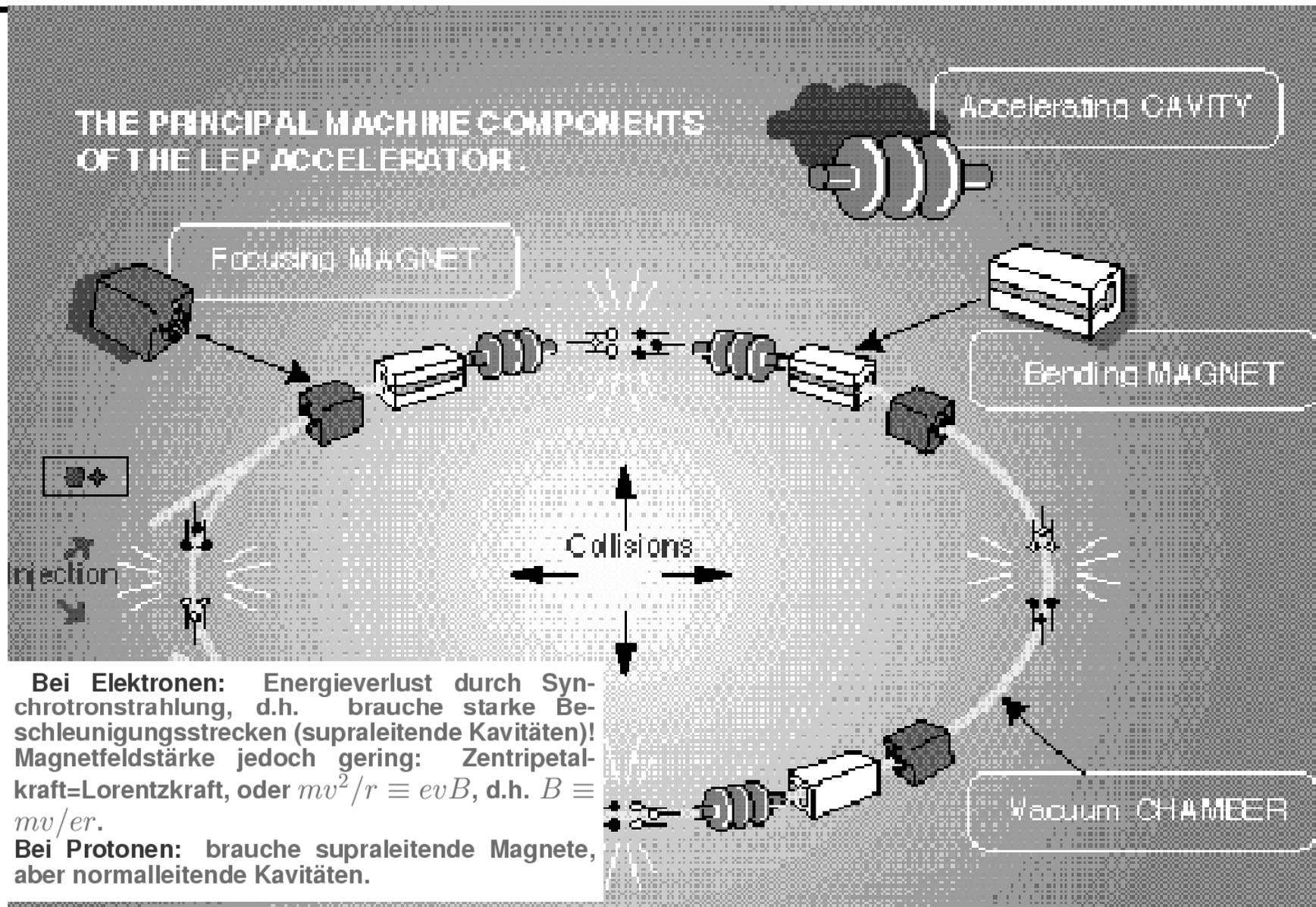
Eliane Onursal

# $E=mc^2$ macht es möglich

---

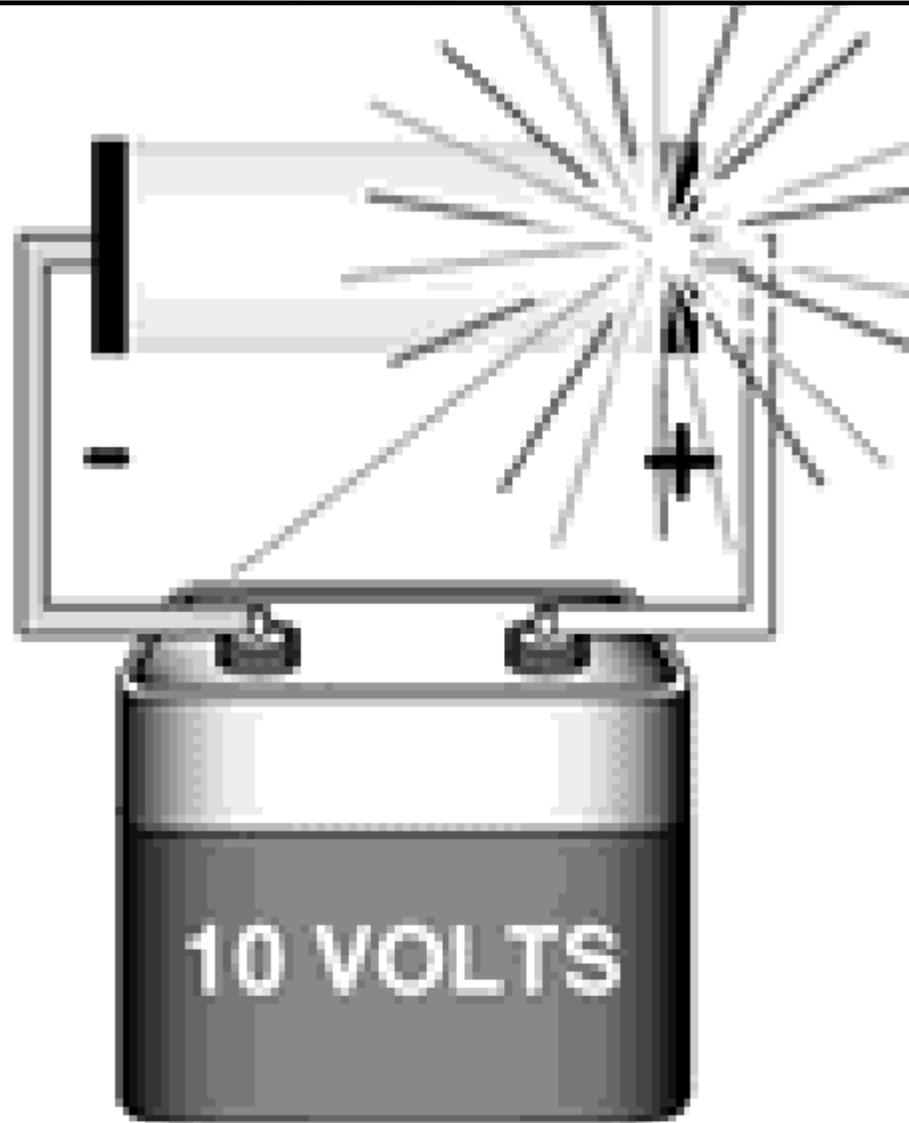


# Der LEP/LHC Collider

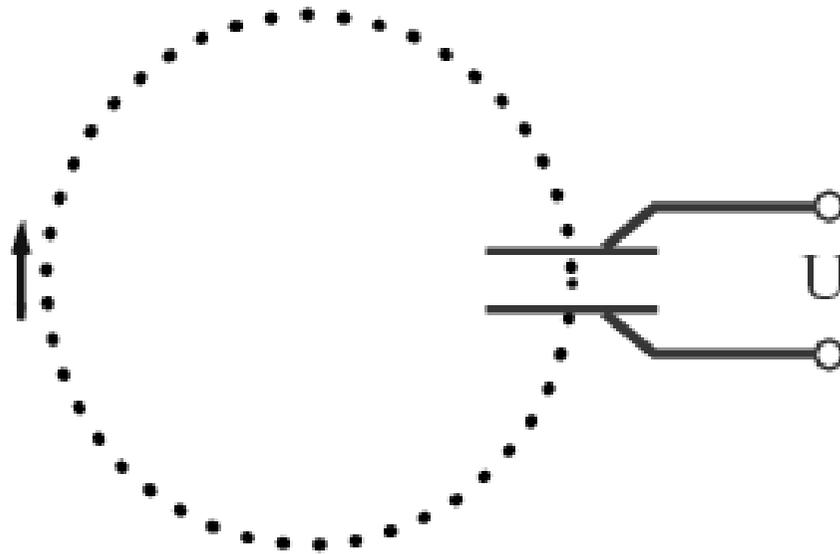


# 10 eV Beschleuniger

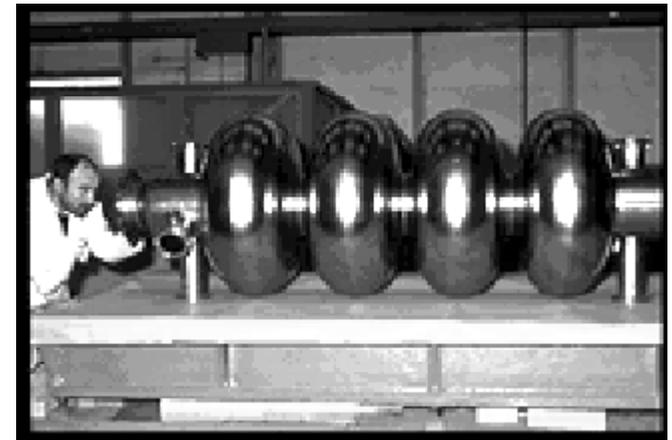
---



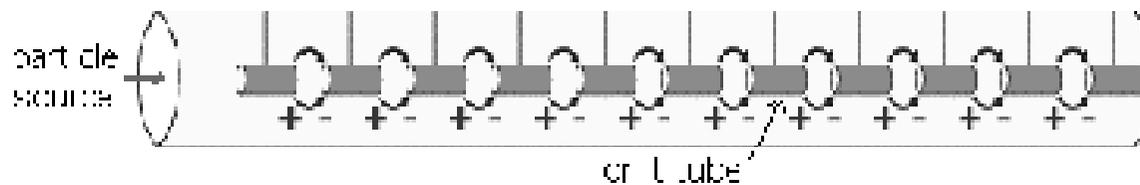
# Viel höhere Feldstärken bei Mikrowellen (statt statische Felder)



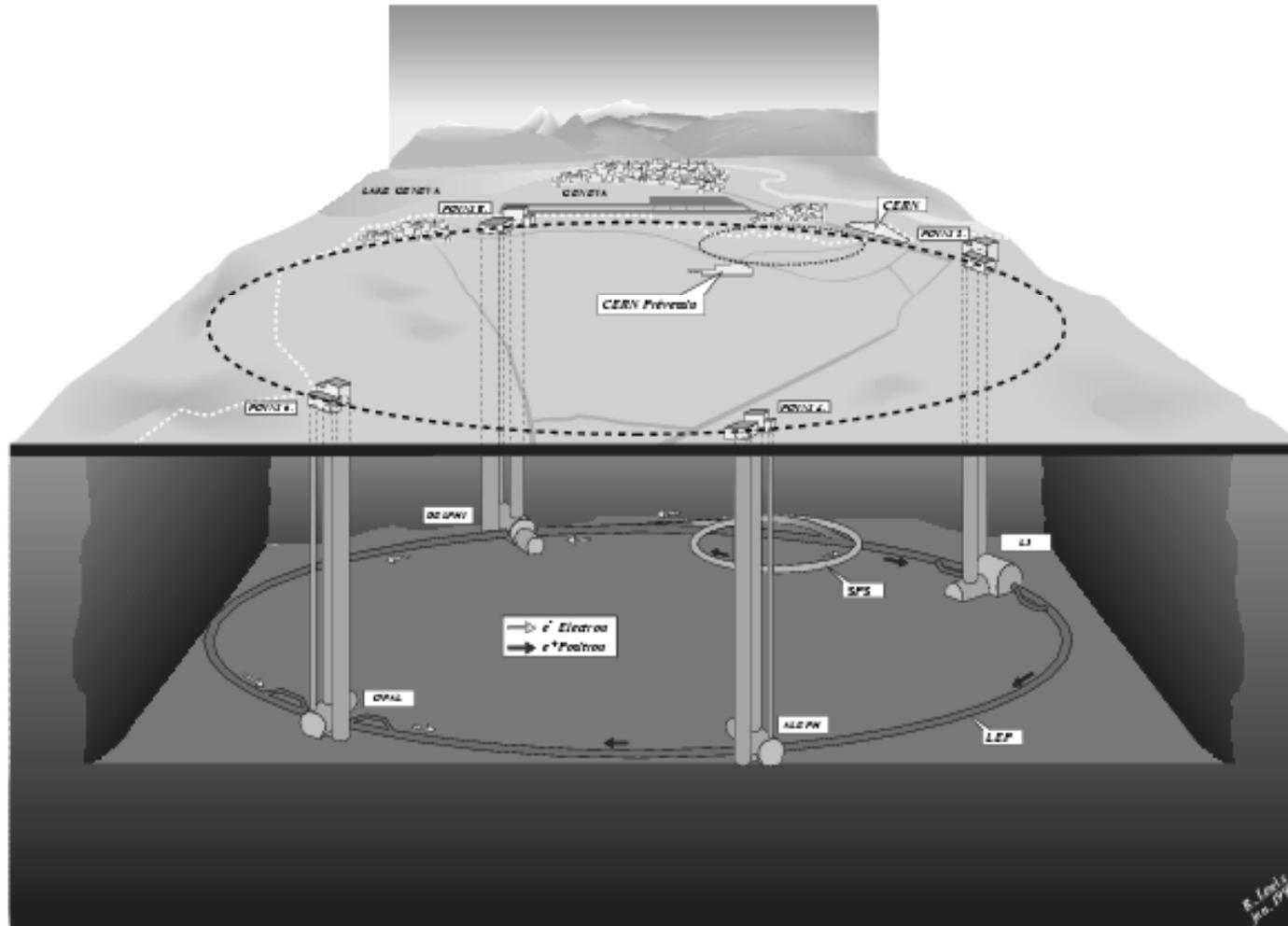
Mikrowellen-  
kavitäten



**HF Beschleunigungsstrecken**



# LEP Experimente (LEP=Large Electron Positron collider)



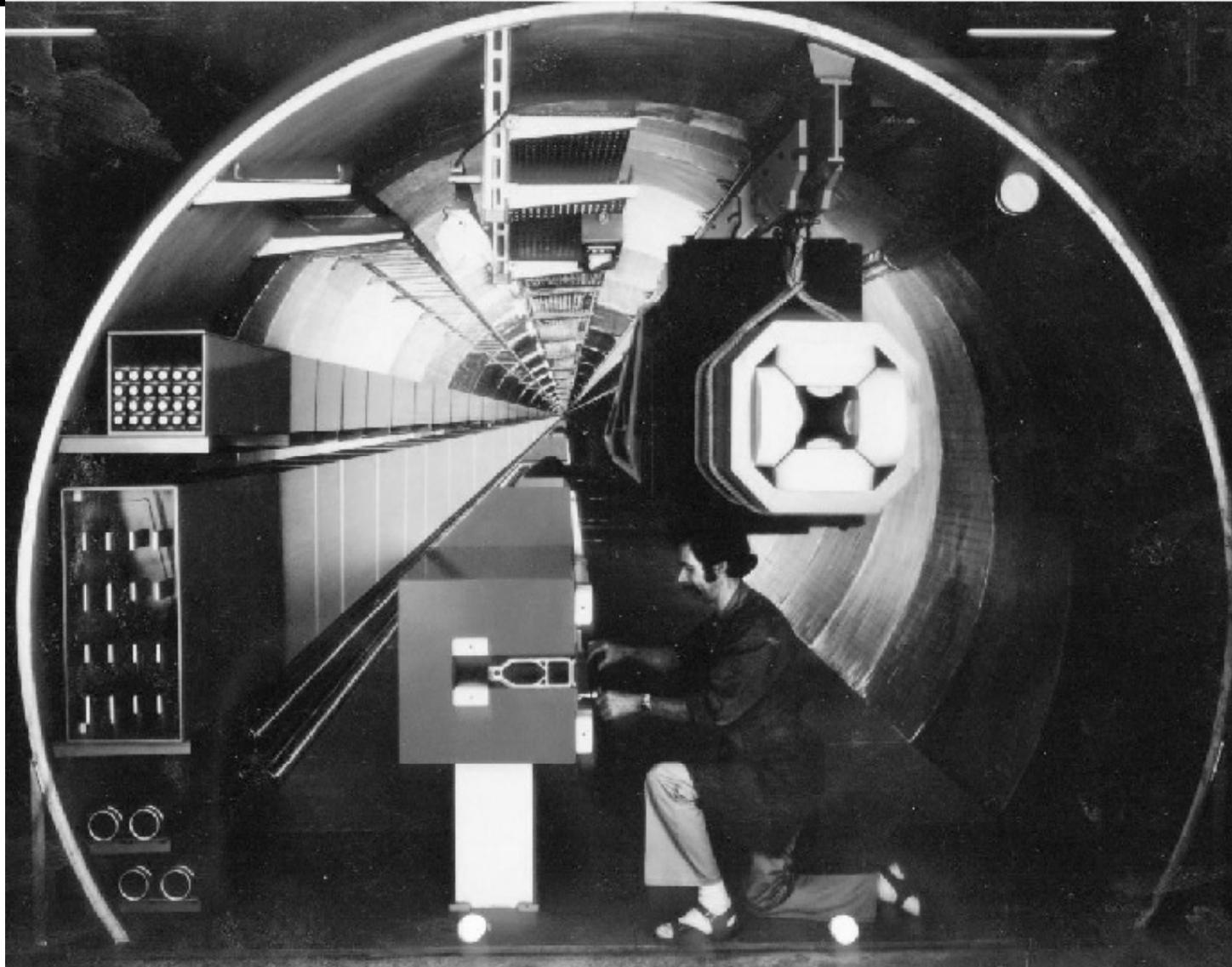
**Tunnel: 27 km lang**



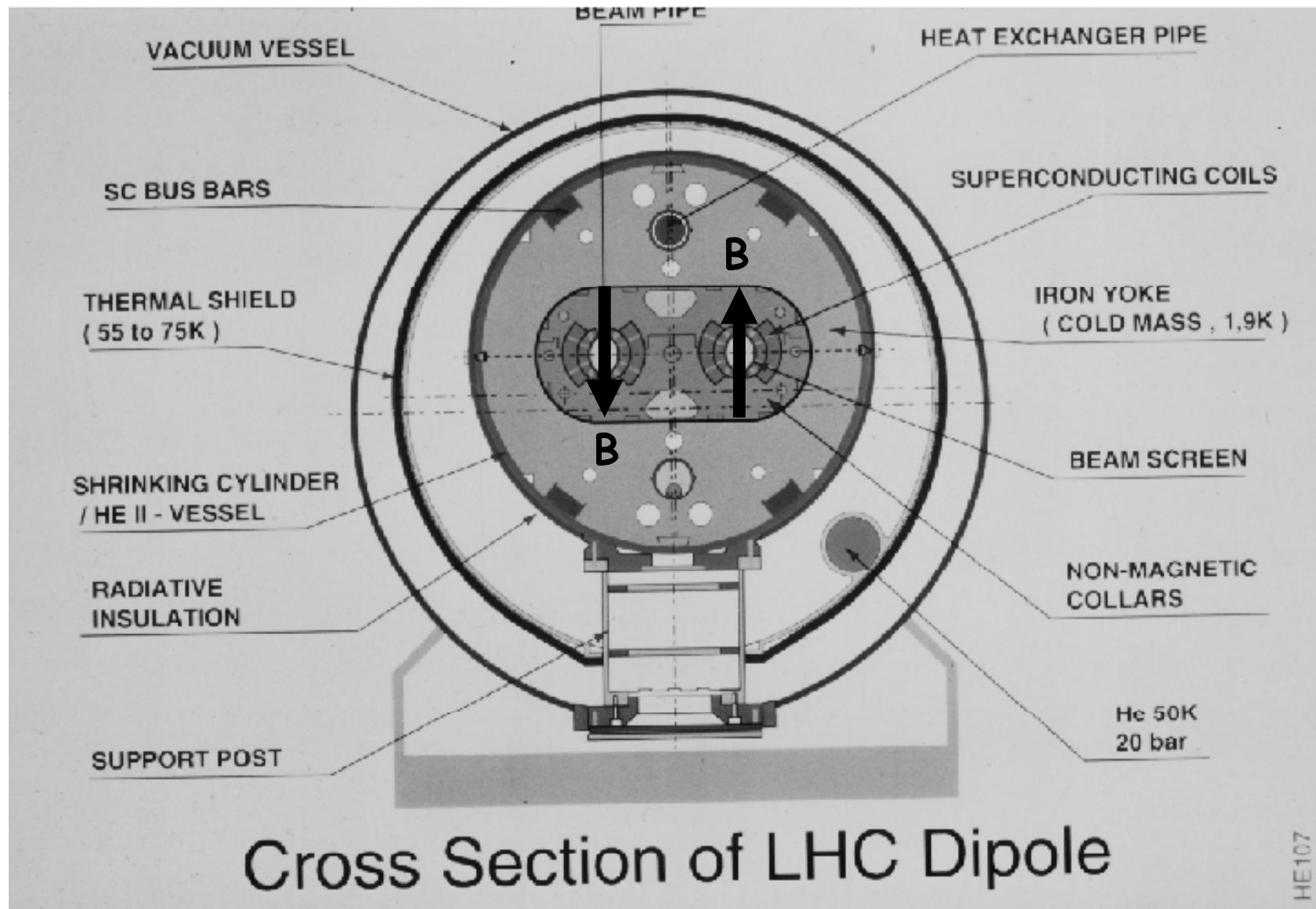


# LEP normal conducting magnets

---



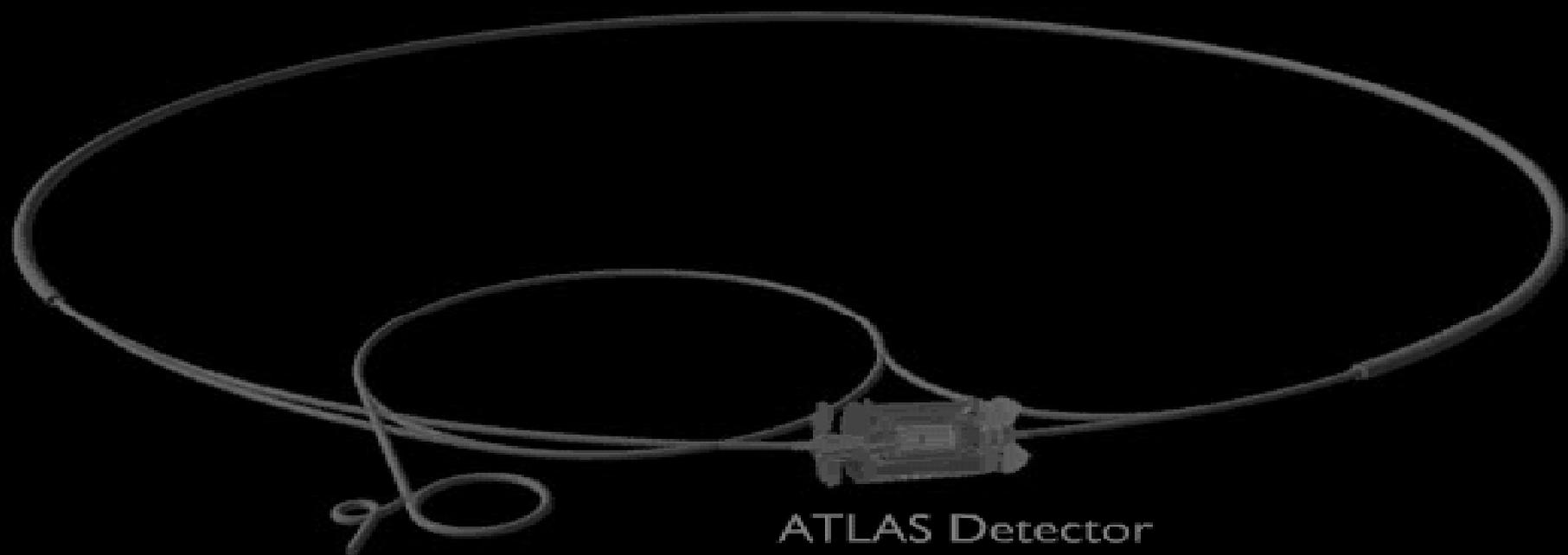
# Supraleitender LHC Magnet: zwei Dipole





PLAY ▶

Large Hadron Collider



ATLAS Detector

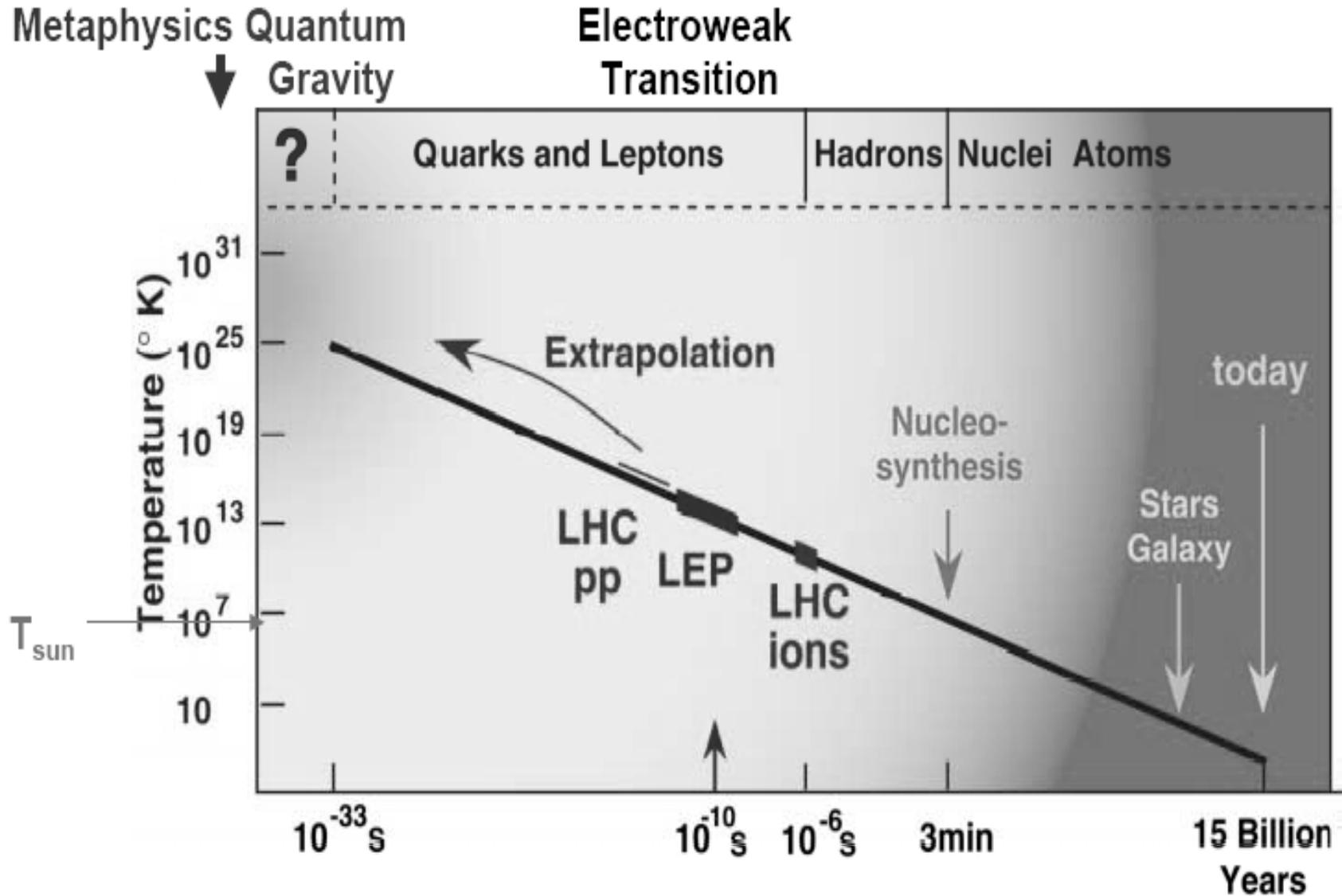


# Fakten, Fakten, Fakten ...

---

- Start 30.3.2010
- Proton-Strahlenergie: 2\*7 TeV (2\*3.5 TeV in 2010/2011)  
-> hohe Luminosität:  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Pakete mit 40 MHz
- Umfang großer Ring: 27 km
- 2 große Detektoren: CMS, ATLAS
- B-feld: 8.36 Tesla @ 1,9K
- Kostenpunkt: ca. 2 Mrd. €

# Temperatur Entwicklung des Universums



# 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

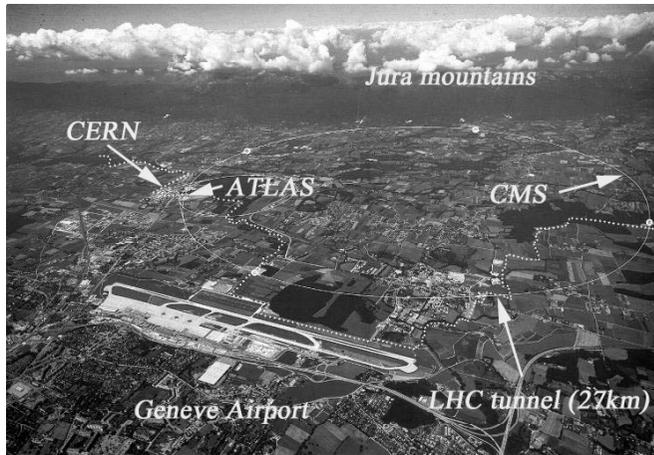
### MUON CHAMBERS

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

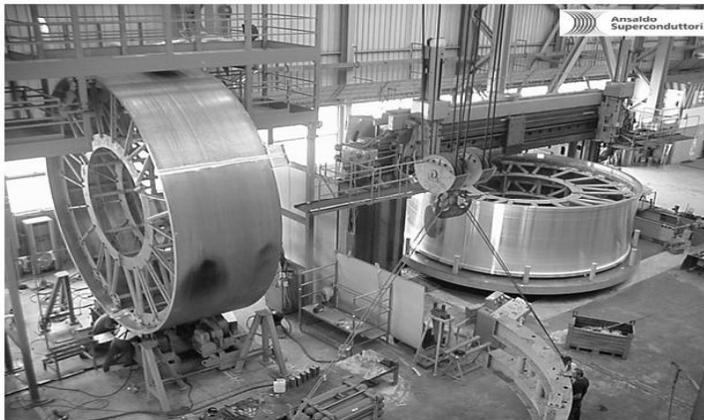
\* Only through industrial contracts

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

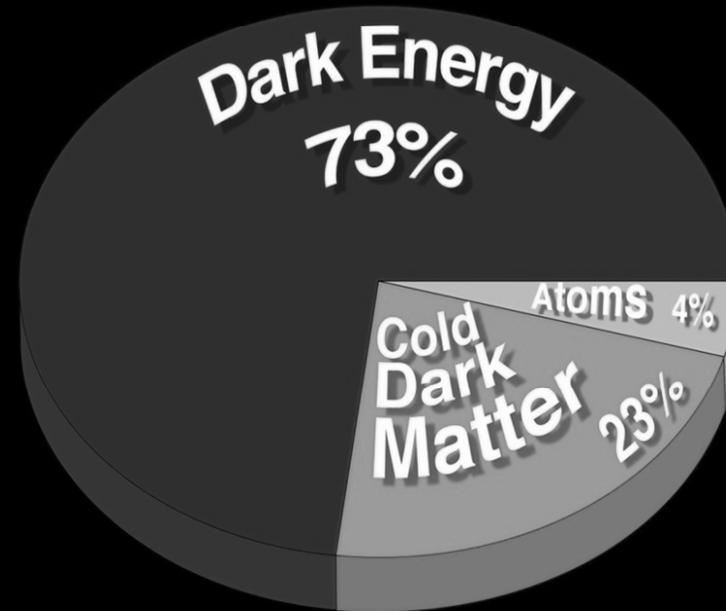
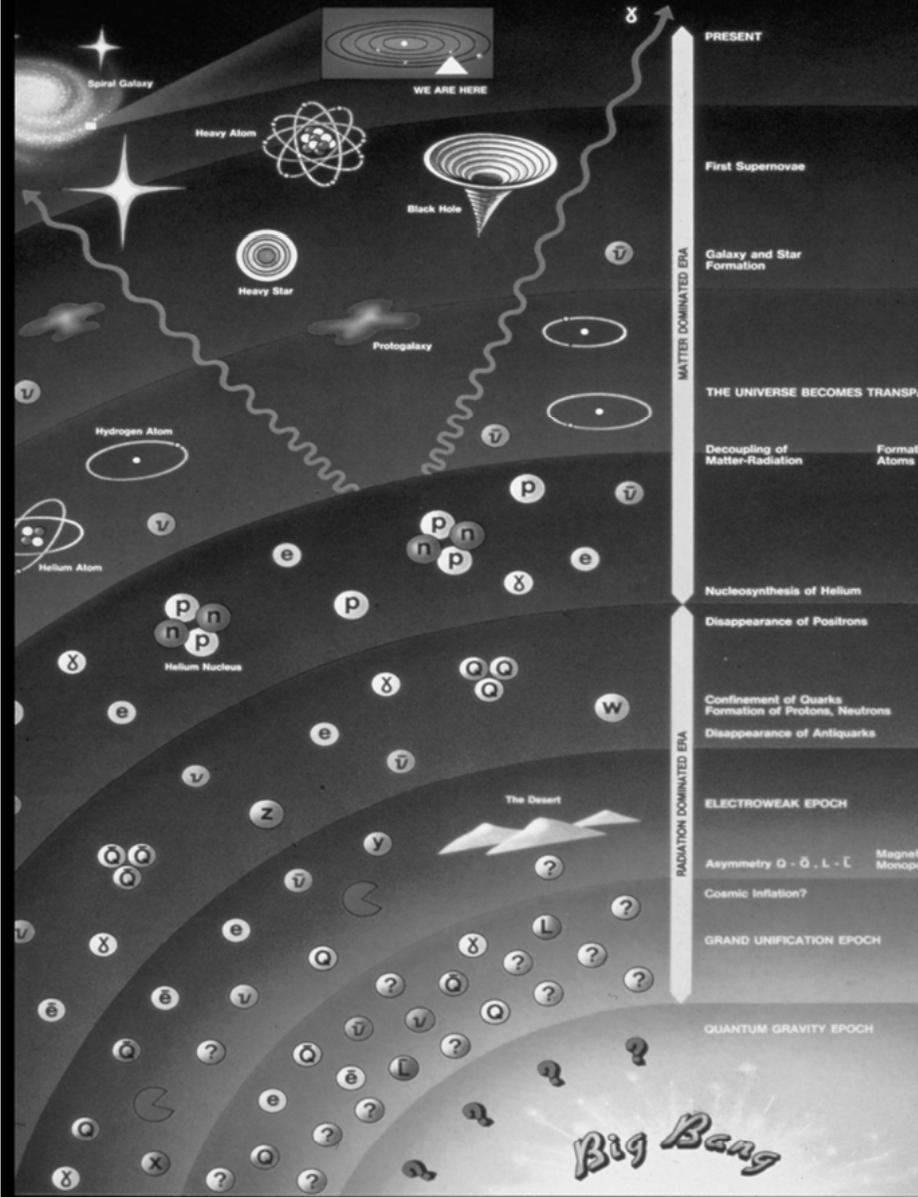
# Der CMS-Detektor



**Spoelen (2 van 5) voor CMS magneet in de maak**



# 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)

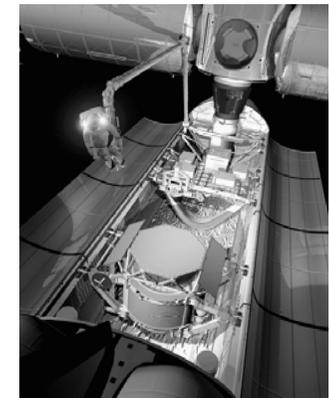
# Dark Matter Searches with AMS-02

---

## 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 gilt  $\Delta p \geq \hbar / \Delta x$  sehr gross. M.a.W.  $\Delta x$  sehr klein verlangt viele Photonen, die  $\Delta p$  sehr gross machen.

**Atome sind sehr kleine Objekte, wo 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:

$$2\pi\lambda = h / p \quad (\text{de Broglie Beziehung})$$

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

Photonen haben Teilchencharakter (sind "quantisiert")

Masse eines Photons gegeben durch:  $E = h\nu = mc^2$

(Beispiel: Photoeffekt, Impulse der Photonen auf Elektronen übertragen und somit wird Licht in Strom umgewandelt (digitale Kamera, Photomultiplier,...))

## 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.

$$2\pi r = n \lambda$$

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

# 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

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

# Themen der einzelnen Vorlesungen

---

1. Einführung,
2. Größe und Masse der Atome, Rutherfordstreuung -> Atomstruktur
3. Das Photon (als Teilchen) -> Photoeffekt, Comptoneffekt, Gravitationseffekte
4. Temperaturstrahlung -> Plancksche Strahlungsformel
5. Das Elektron (als Welle)
6. Heisenbergsche Unsicherheitsrelation, Wahrscheinlichkeit in QM
7. Bohrsche Atommodell
8. Schrödingergleichung
9. Lösung der Schrödingergleichung
10. Der harmonische Oszillator
11. Das Wasserstoffatom
12. Energieniveaus des Wasserstoffatoms
13. Spin-und Bahnmagnetismus
14. Atome im Magnetfeld und elektrischen Feld
15. Spinresonanz, Paschen-Back-Effekt
16. Mehrelektronensystem
17. Kopplung von Drehimpulsen
18. Röntgenstrahlung
19. Pauli-Prinzip, Periodensystem
20. Laser und Maser
21. Moleküle
22. Molekülbindungen
23. Vielatomige Moleküle
24. Klausur am 28.9.2010 um 17:00 im Gerthsen

# 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, d.h. 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 (A) beträgt

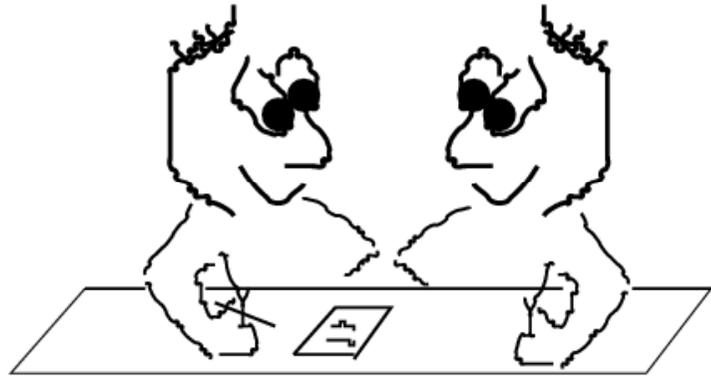
z.B. 1 Mol  $^{12}\text{C}$  sind 12g

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 =  
 $1,6605655 \pm 0,0000086 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,478 \text{ MeV}/c^2$  (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.

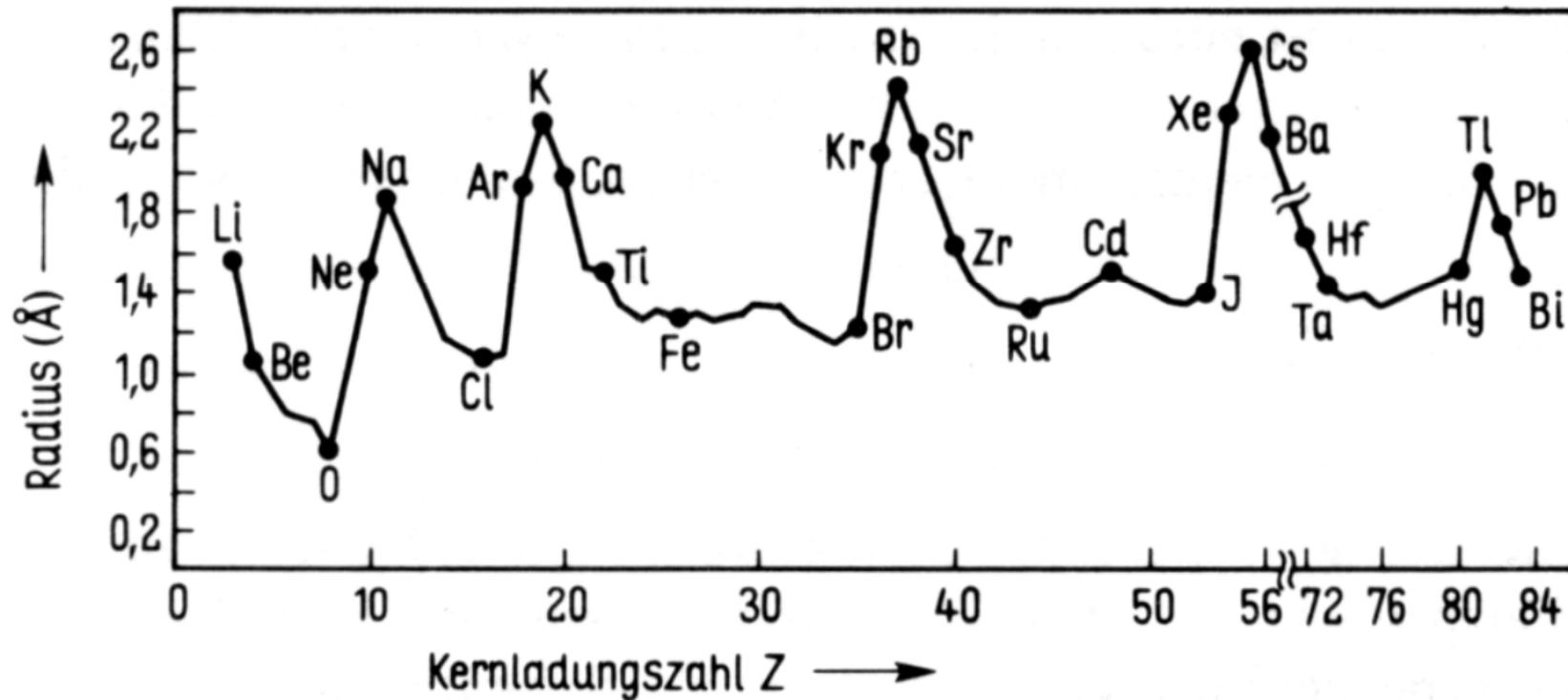
## Abschätzung von $N_A$

- Kombination der Faraday-Konstante  $Q_F$  und der elektrischen Elementarladung  $e$
- $Q_F$  ist die elektrische Ladung zum Abscheiden von 1 Mol bei der Elektrolyse,  
 $Q_F = 96\,485,309(29) \text{ C mol}^{-1} \Rightarrow N_A = Q_F/e$
- $e$  ist die elektrische Elementarladung  
 $= 1,602\,177\,33(49) \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
(heute präzise aus Quanten-Effekte)
- $N_A = Q_F/e = 6,022\,1367(36) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

# Wie groß sind Atome?

- Abschätzung des Atomvolumens aus der rel. Atommasse  $A_r$ , der Dichte  $\rho$  und der Avogadro-Konstante  $N_A$
- **Dichte:**  $\rho = (m/V)$ ,
- $V = m/\rho = N_A (4/3) \cdot \pi \cdot R^3 = A_r/\rho$  für 1 Mol
- **Natrium:**  $\rho = 0,97 \text{ g cm}^{-3}$ ;  $A_r = 22,98 \text{ g mol}^{-1}$
- **Radius:**  $R \sim 2 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 2 \text{ \AA}$  (Angstrom)

# Systematik der Atomradien

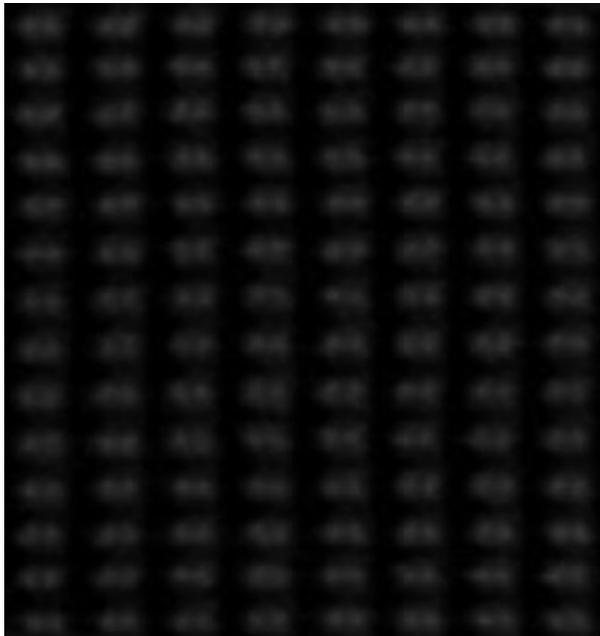


- Alle Atome haben „fast gleiche“ Radien
- Unterschiede korrelieren mit ihrer Stellung im Periodensystem

# 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  $\gg 1\text{-}100 \text{ \AA}$  bedeutet das:*  
mit Licht kann man keine Atome auflösen

**JEDOCH:** Röntgenlicht *hat  $\lambda \approx 1 \text{ \AA}$  . Im Prinzip ok, jedoch*  
*praktische Auflösung  $\gg 100 \text{ \AA}$ , 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)

# Elementarladung nach Millikan (1913)

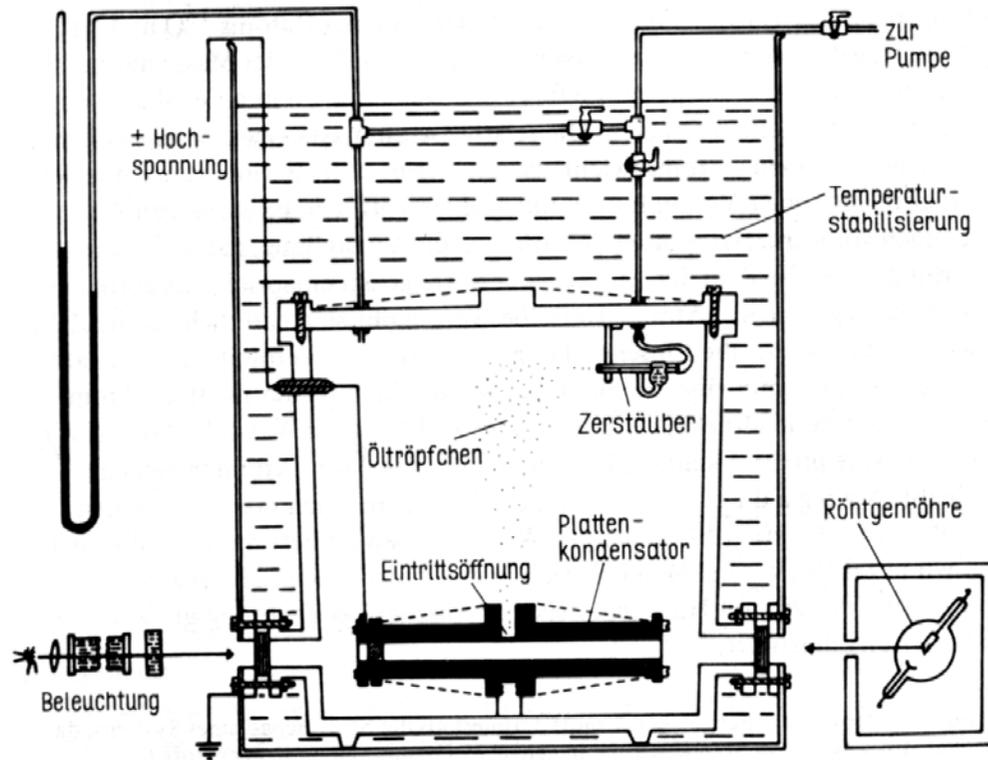
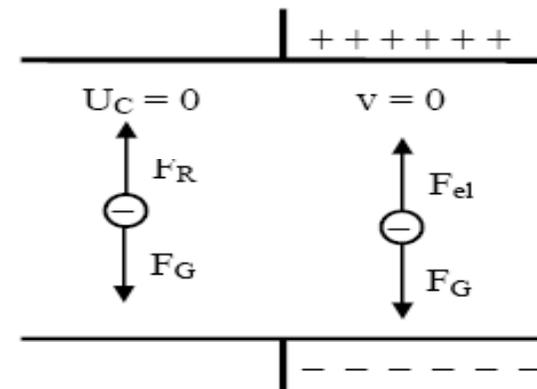
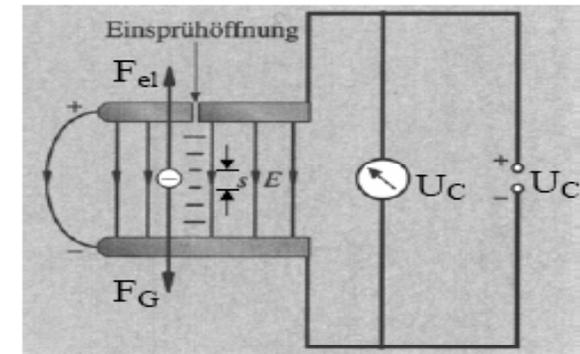


Fig. 3 Anordnung des Millikan-Versuchs (nach Phys. Rev. 2 (1913) 109)

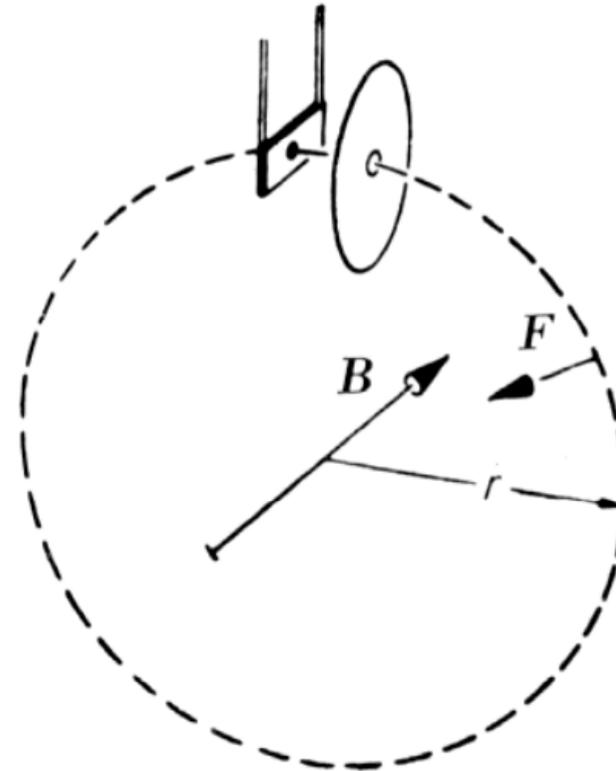


Problem: wie groß ist Masse  $m$  in  $F_G$ ?  $m$  nicht direkt messbar, durch Sinkgeschwindigkeit in Luft ohne E-Feld zu bestimmen (Stokesches Reibungsgesetz)

$$\begin{aligned}
 F_{el} &= F_G \\
 \Rightarrow q \cdot E &= F_G \\
 \Rightarrow q \cdot \frac{U_C}{d} &= F_G
 \end{aligned}$$

# Spezifische Elektronenladung

- Zentrifugalkraft = Lorentzkraft
- $(m \cdot v^2)/r = e \cdot v \cdot B$  (1)
- Beschleunigungsarbeit = kinetische Energie
- $e \cdot U = (1/2) \cdot m \cdot v^2$  (2)
- Kombination (1) u. (2)
- $(e/m) = (2 \cdot U)/(r^2 \cdot B^2)$



$$e/m = 1,758\ 819\ 62(53) \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$$

# Atom- und Elektronenmasse

- **Atommasse:**
- Atommassenkonstante  $m_u = m(^{12}\text{C})/N_A / 12$   
(12 weil 12 Nukleonen im C-Atom)
- $m_u = 1,660\,5402(10) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- **Elektronenmasse:**
- $m_e = e/(e/m_e) = 9,109\,3897(54) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- $m_u/m_e = 1\,838,683662(40)$
- **Atommasse/Elektronenmasse ~ 2000/1**

# Zum Mitnehmen

---

---

- **Elementarladungen** kann man mit Hilfe von optisch sichtbaren Objekten (Tröpfchen) bestimmen.
- Aus der Faraday-Konstante und der Elementarladung erhält man eine Schätzung der Avogadro -Konstante.
- Relative Atommasse, Dichte und Avogadro Konstante liefern eine Abschätzung für die Atomgröße.
- Durch Ablenkung von Teilchen in magnetischen Feldern kann man  $e/m$  bestimmen.
- Kombination der Ergebnisse liefert  $m_e$ ,  $m_U$
- und das Verhältnis:  $m_e/m_U \sim 1/2000$ .