

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**

Übungen Doppelstunde pro Woche

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

Übungsleiter: Frank Hartmann email: 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

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.*

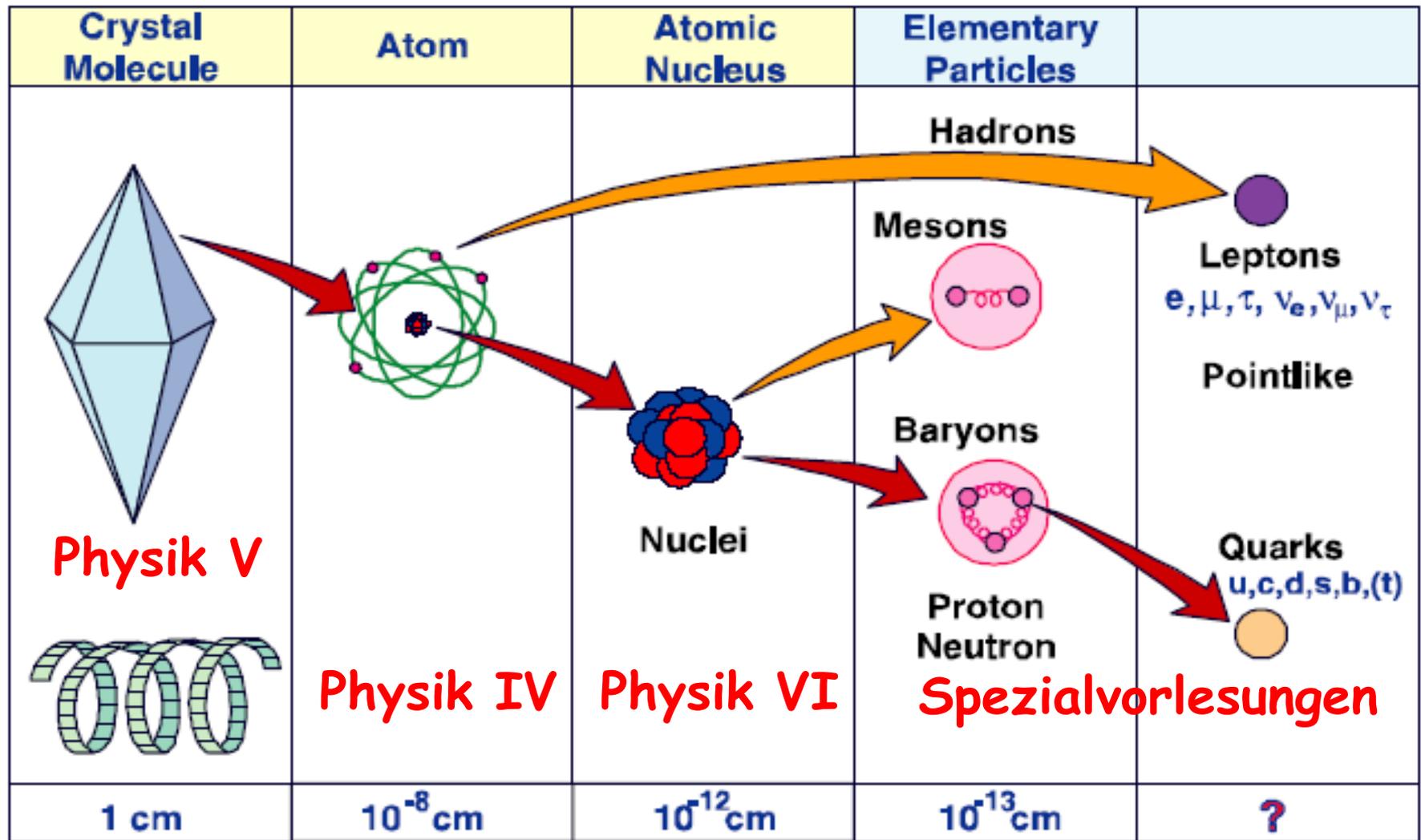
- Virtuelles Rechnen: Zu Beginn des Tutoriums legt man fest, welche Aufgaben man vorrechnen kann, hiermit erklärt man sich auch bereit diese Aufgabe nach Aufforderung vorzurechnen.

- 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:

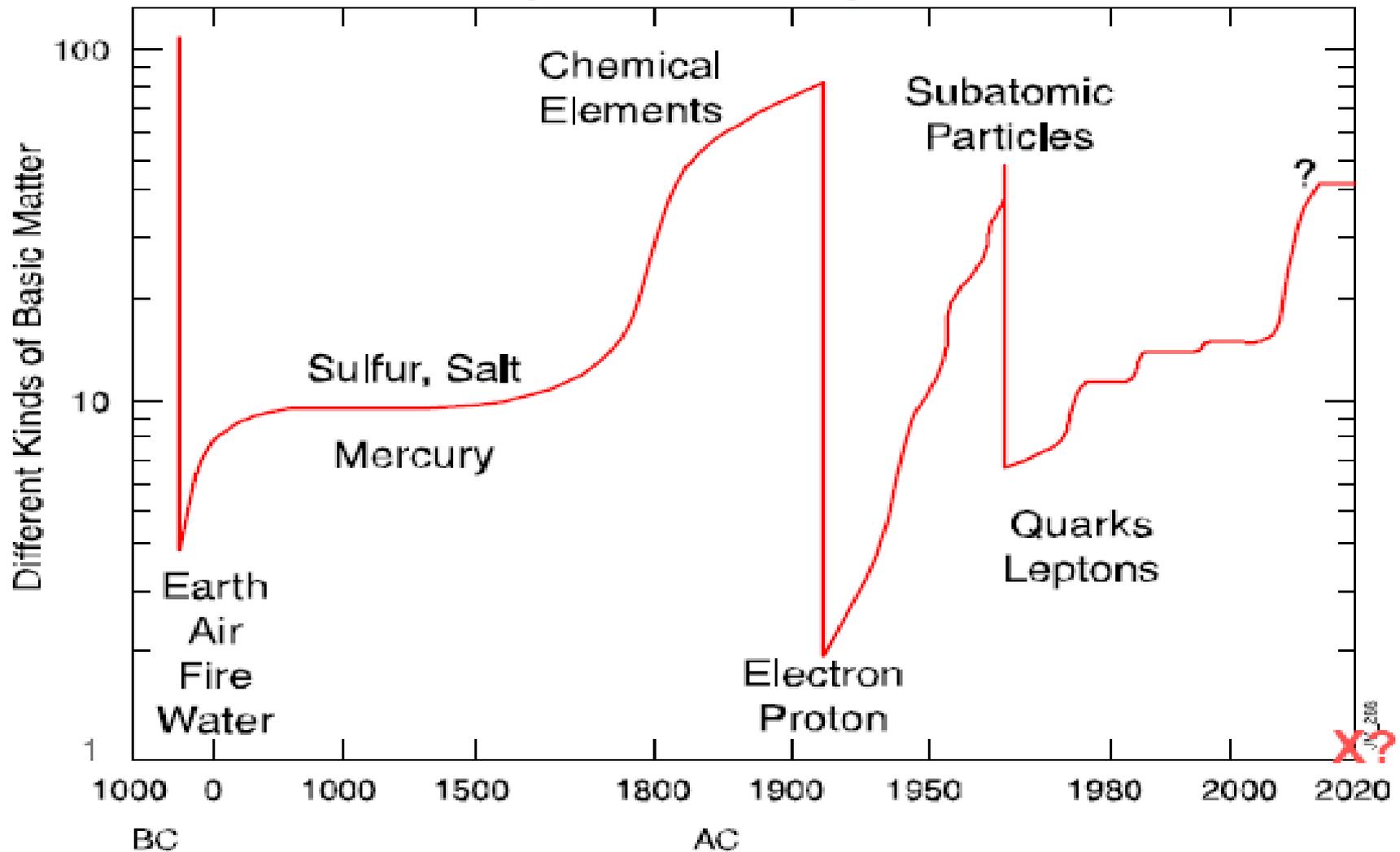
www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~hartmann/atom12.htm

Die elementaren Bausteine der Materie



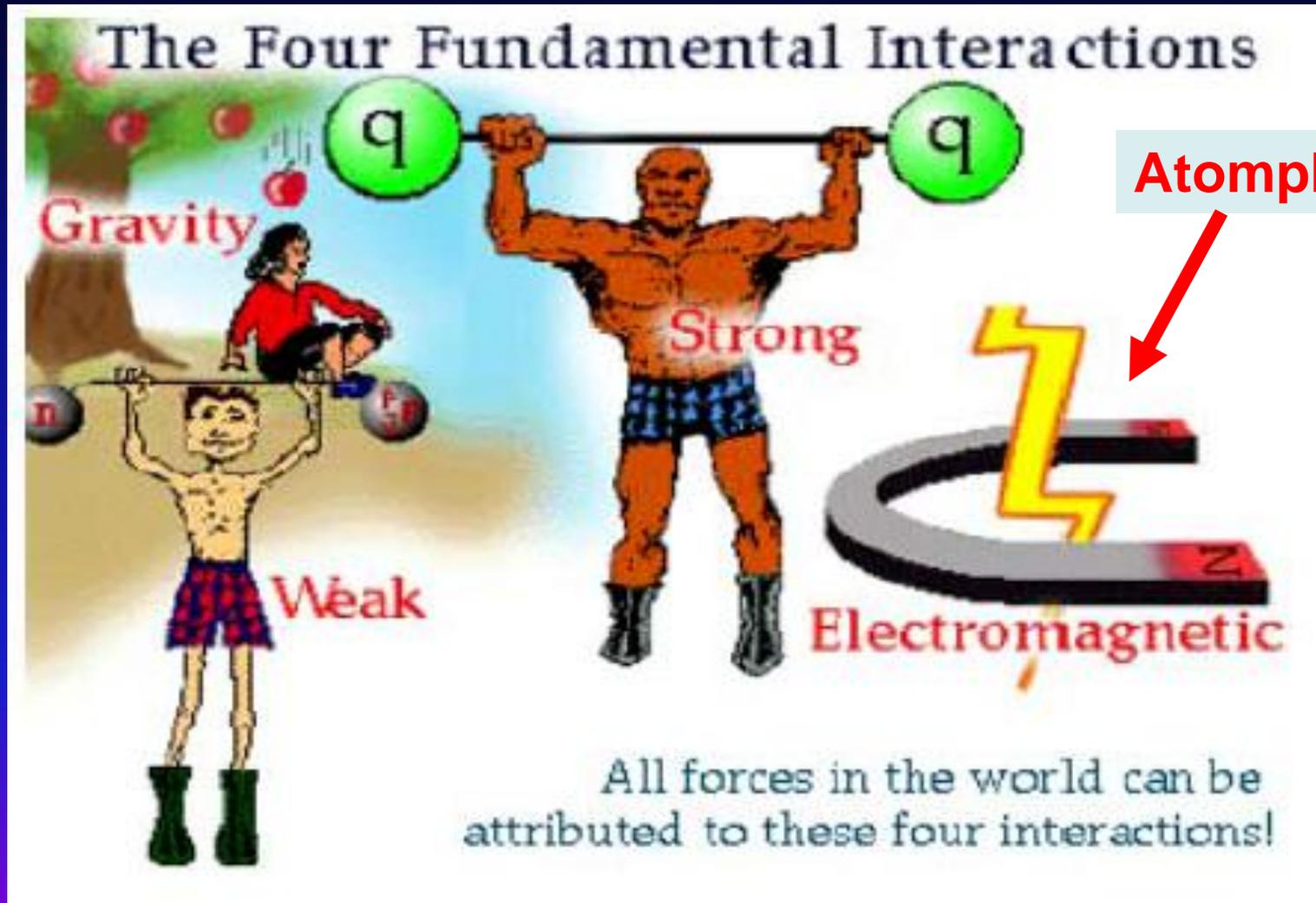
“Elementarteilchen” als Fkt. der Zeit

History of Elementary Particles

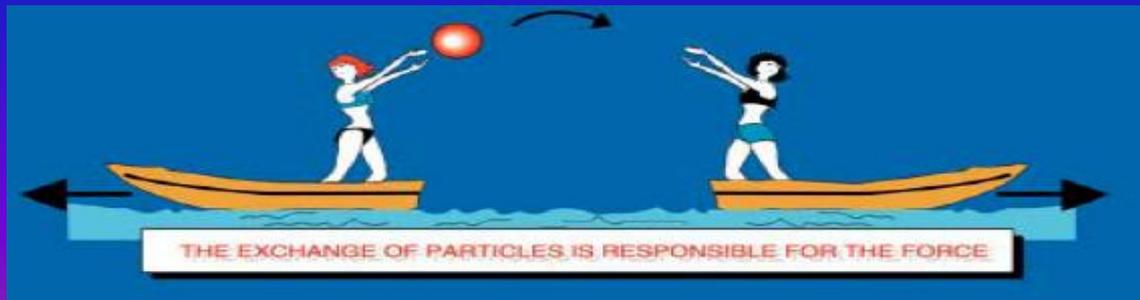
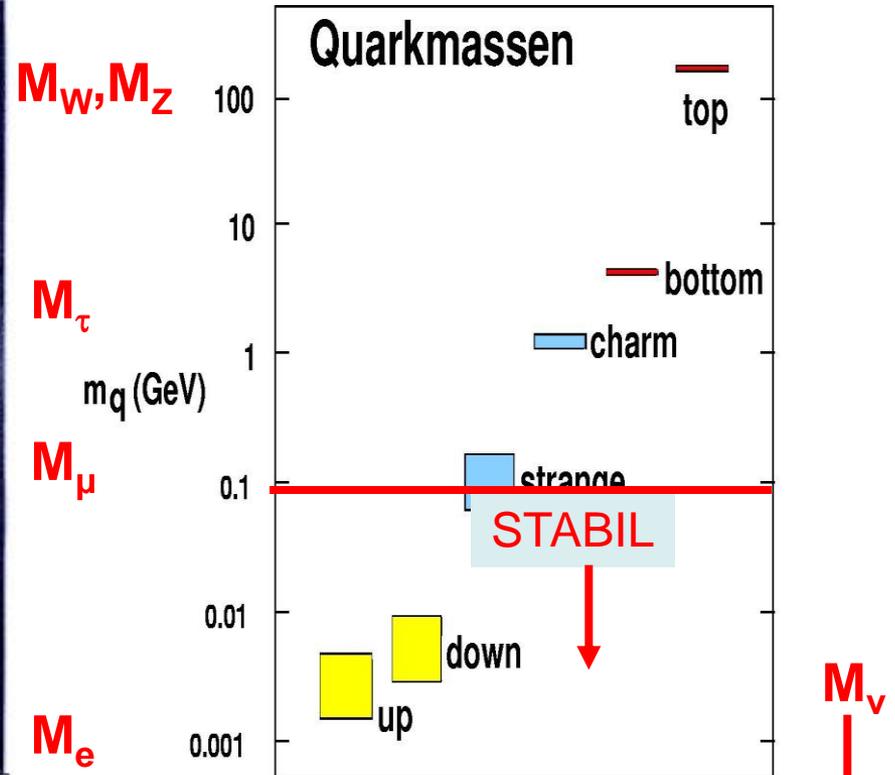
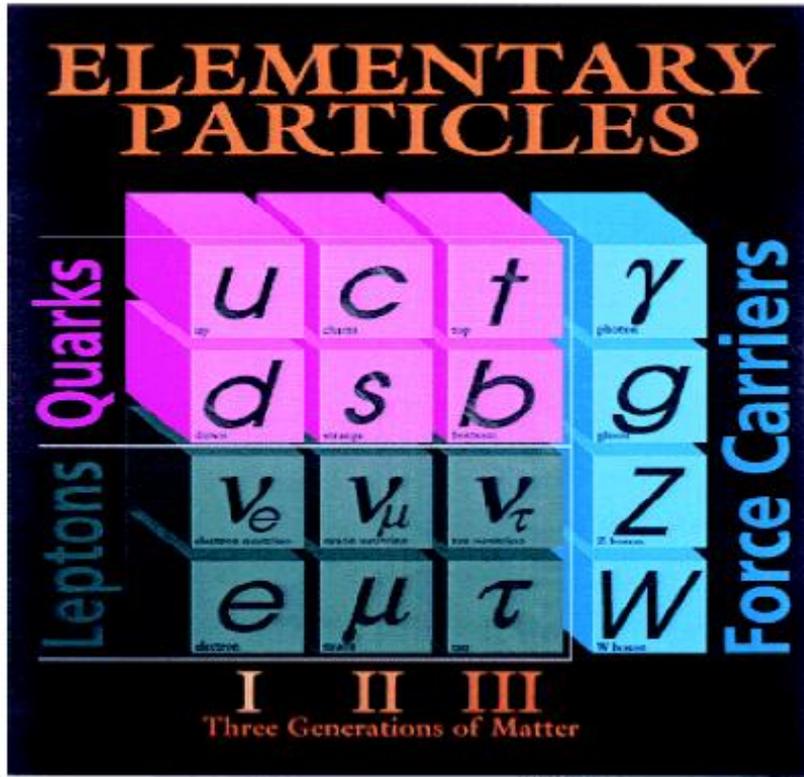


17288 X?

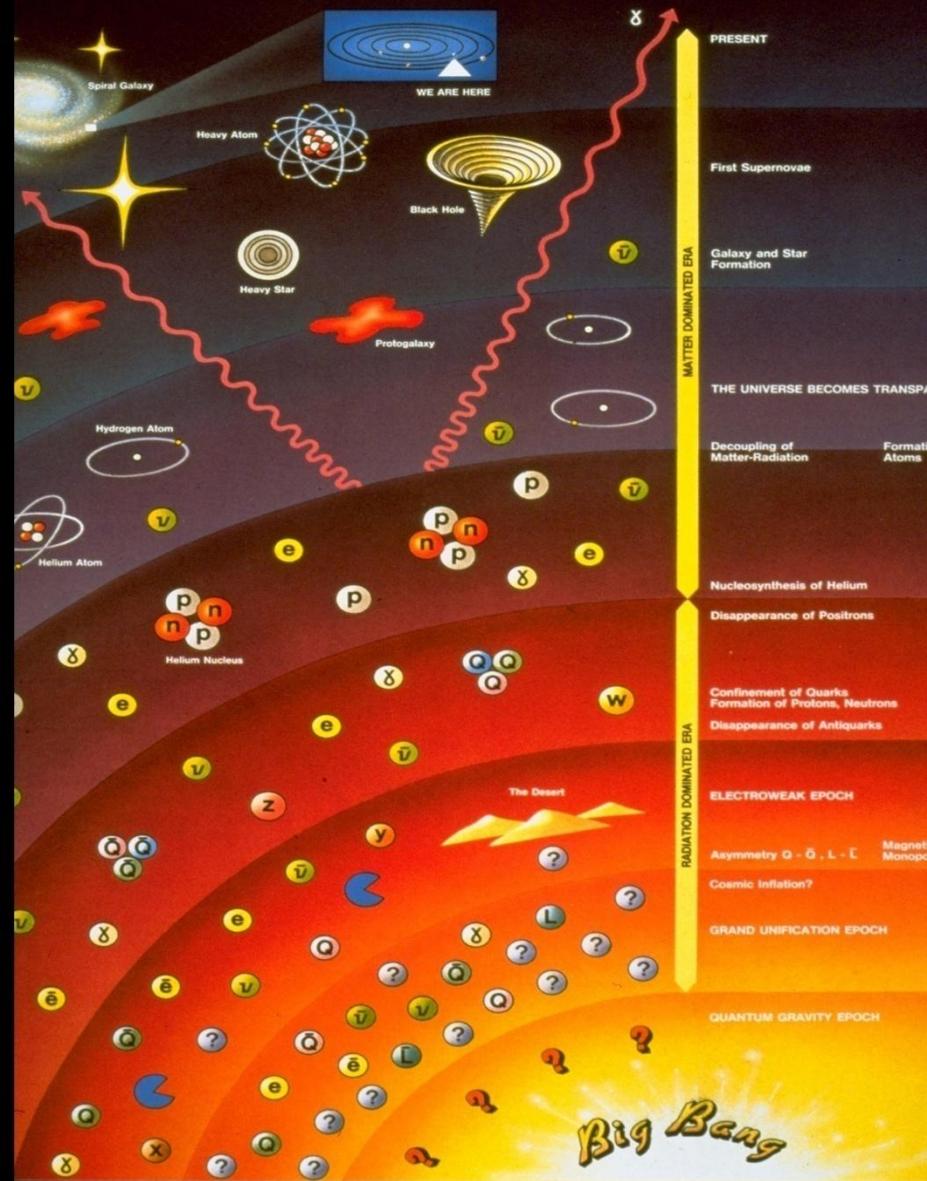
Die elementaren Wechselwirkungen



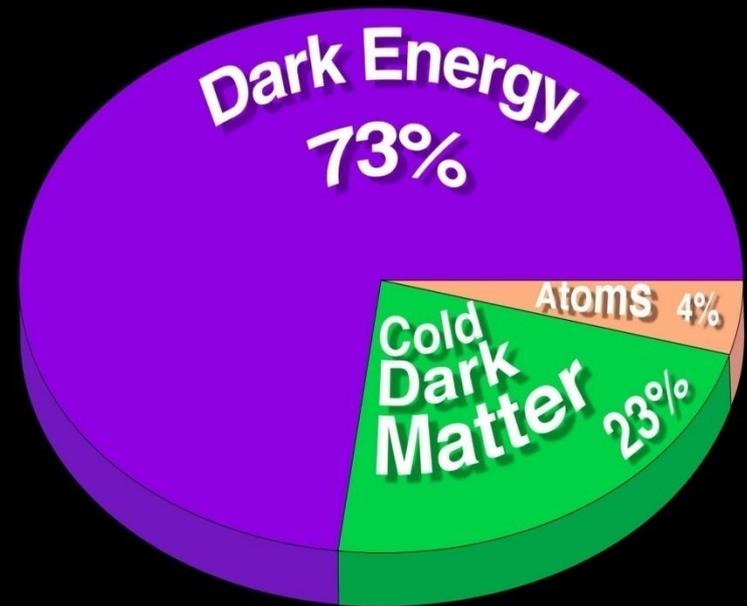
Das Standard Modell der Teilchenphysik



History of the Universe



Details: siehe VL Kosmologie im WS



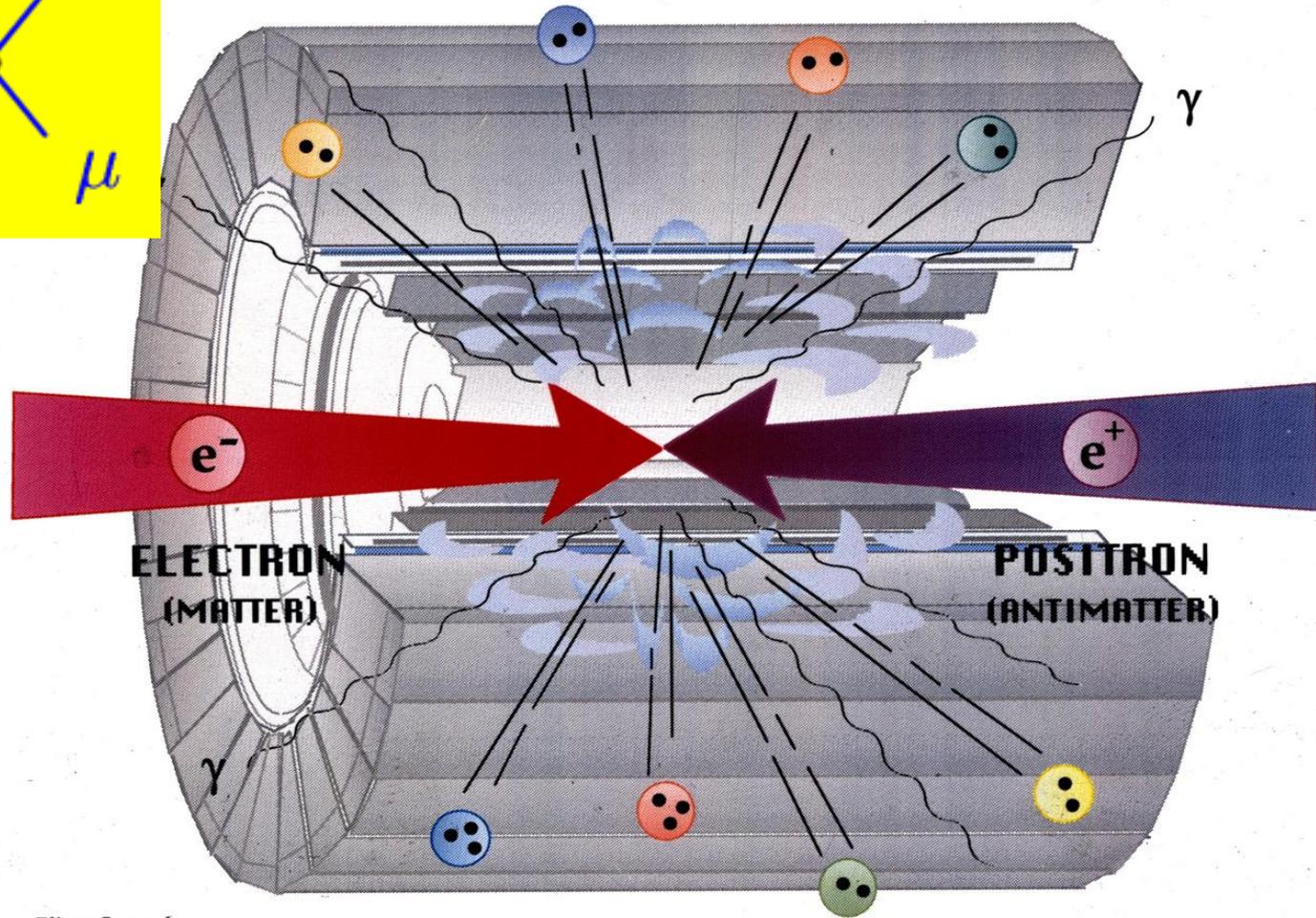
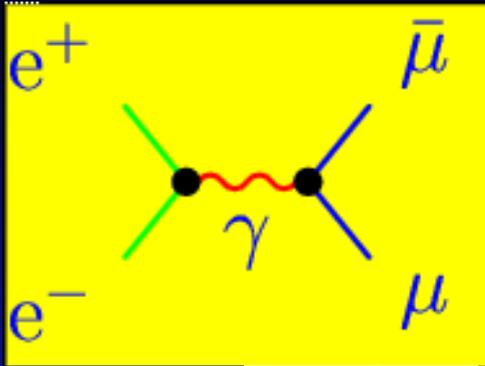
If it is not dark, it does not matter

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

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

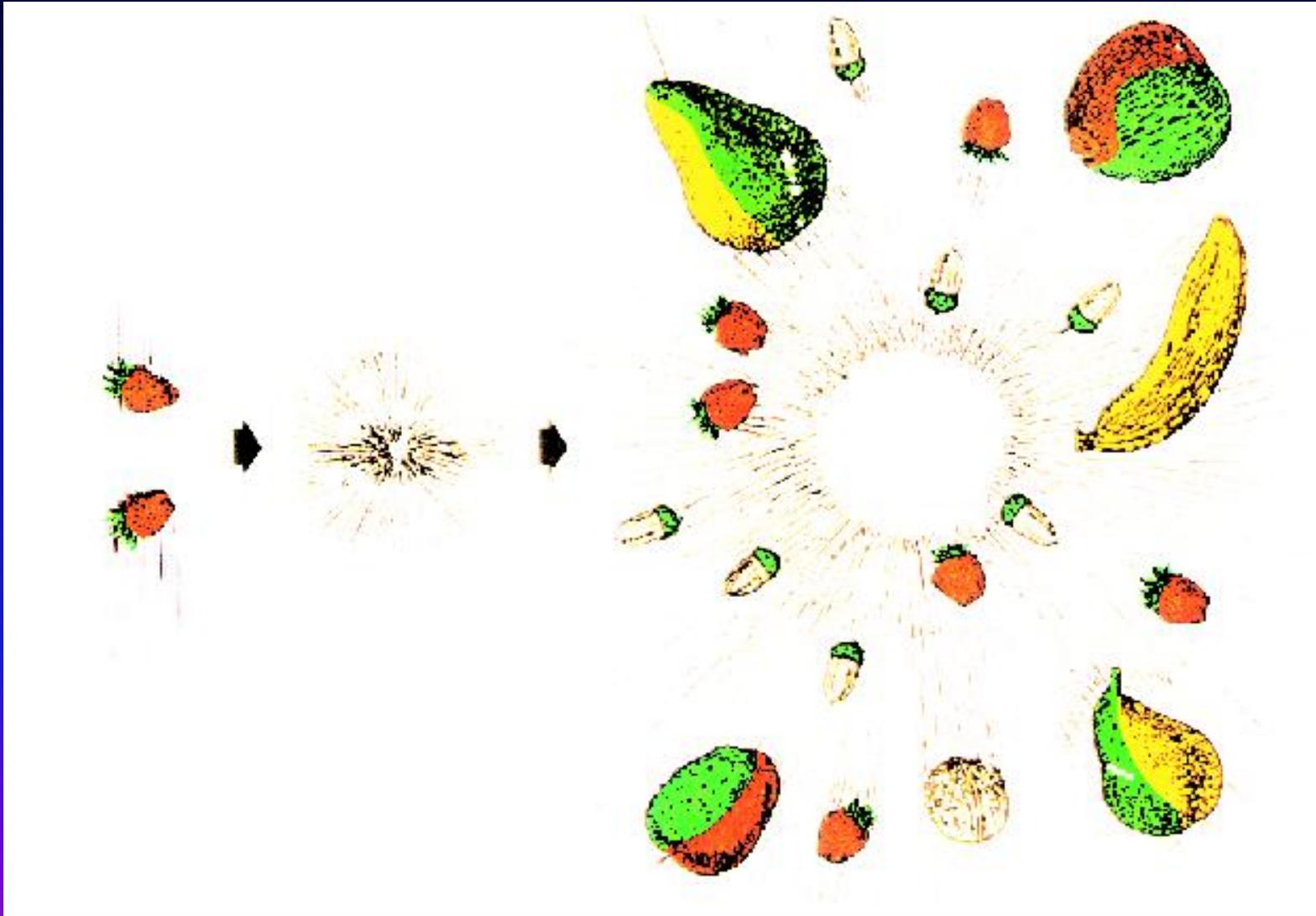
23±4% der Energie des Univ.
 = DM (WIMPS)

Entdeckung der Quarks und Leptonen mit Streu-Experimenten



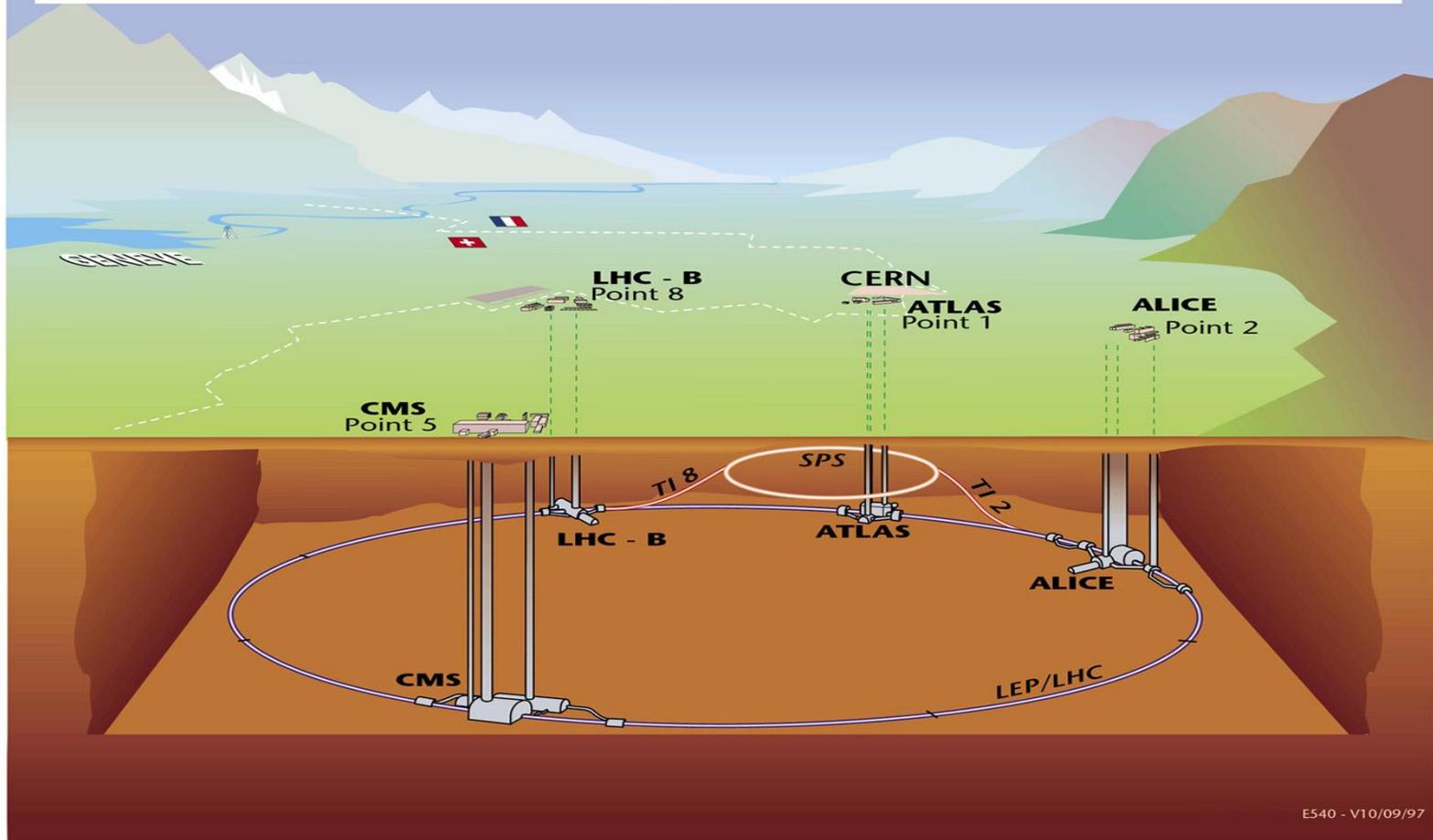
Eliane Onursal

$E=mc^2$ macht es möglich

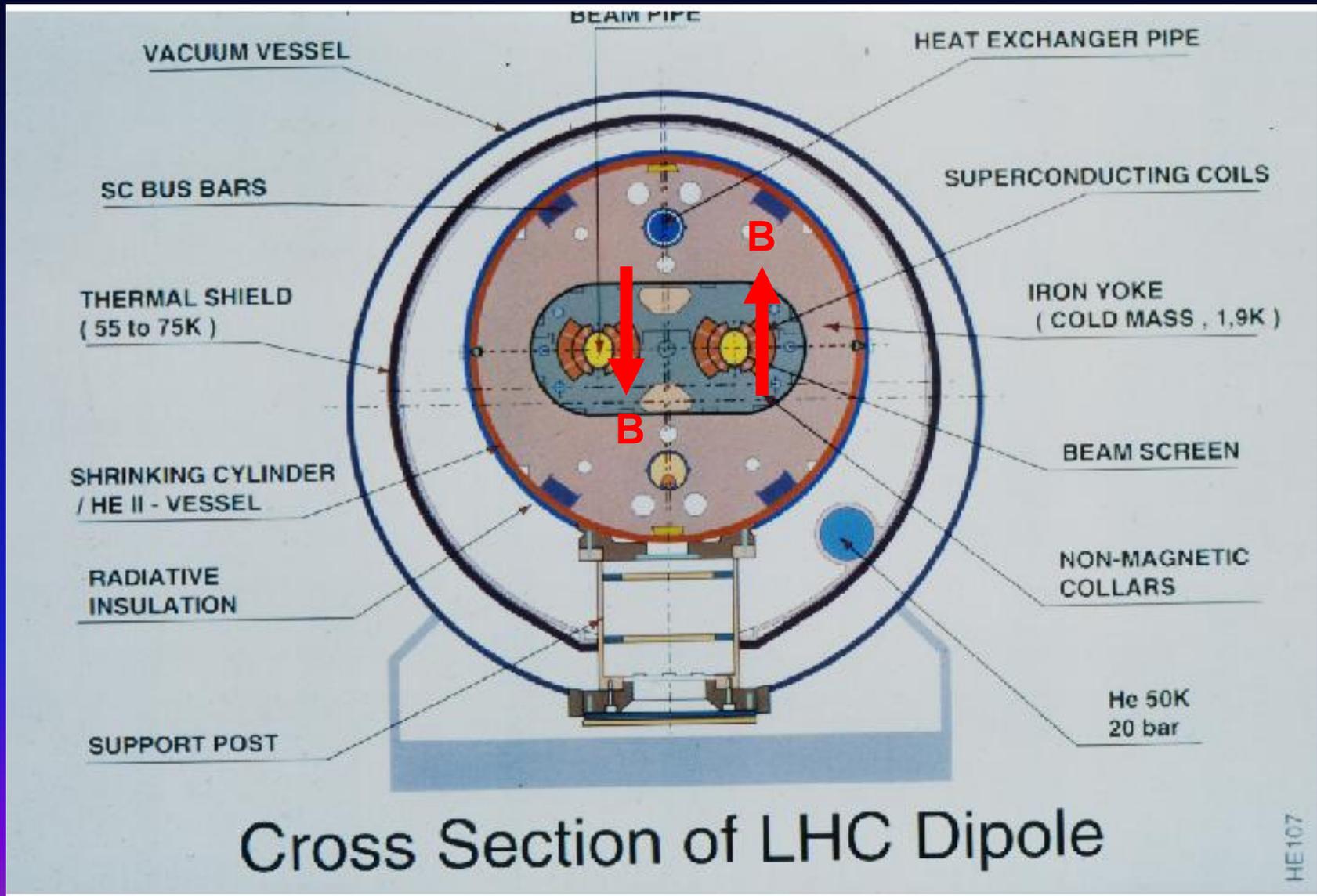


Experimente am LHC (LHC= Large Hadron Collider)

Overall view of the LHC experiments.



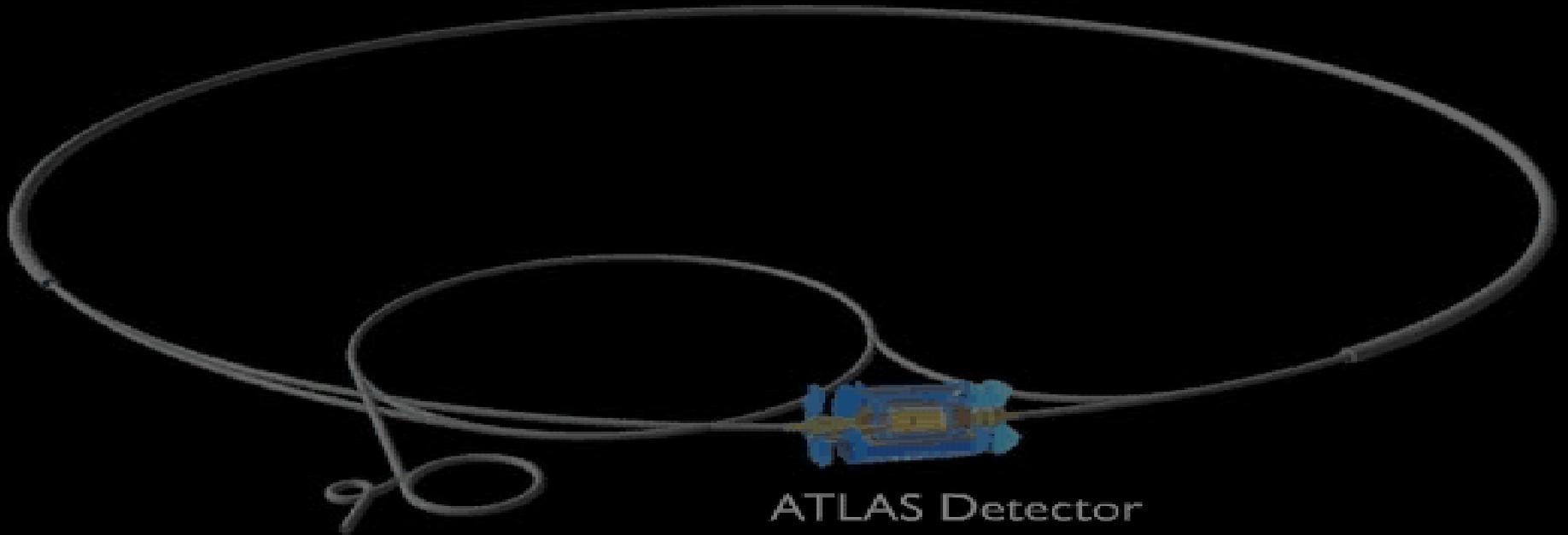
Supraleitender LHC Magnet: zwei Dipole





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

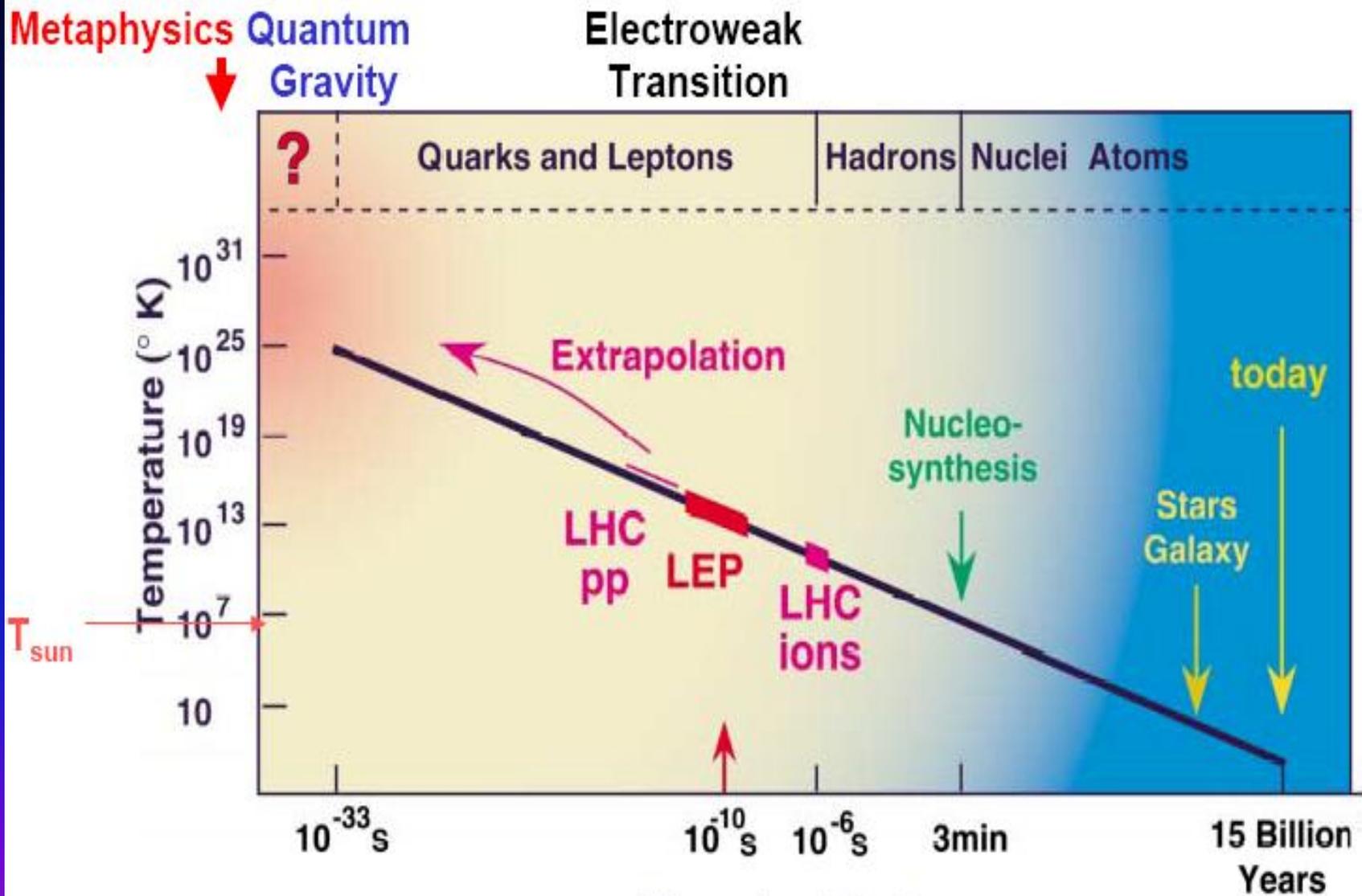
MUON CHAMBERS

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



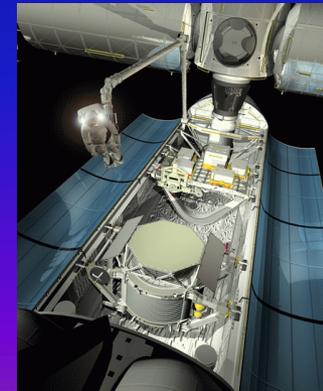
Suche nach dunkler Materie mit AMS-02 im Weltall

AMS: Alpha Magnetic Spectrometer



Mai, 2011

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. Δx sehr klein verlangt viele Photonen, die Δp 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

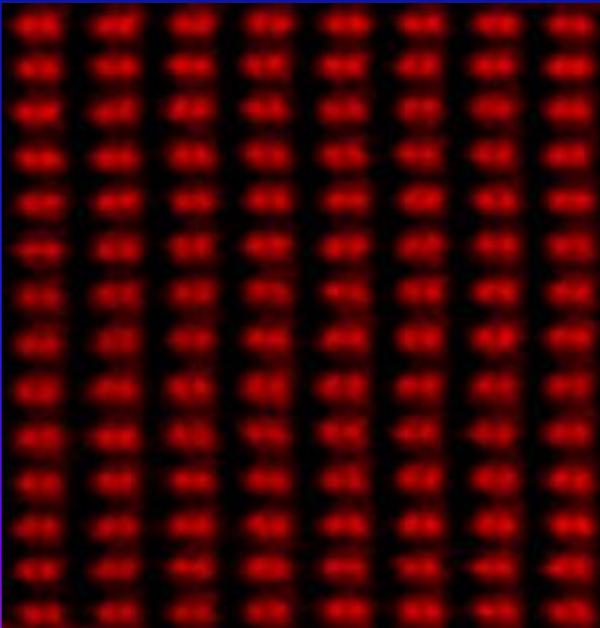
Photonen haben Teilchencharakter (sind “quantisiert”)

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

JEDOCH: Röntgenlicht *hat* $\lambda \approx 1 \text{ \AA}$. Im Prinzip ok, jedoch praktische
Auflösung » 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 Ψ 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> $i\hbar\partial_t\psi = H\psi$ Schrödingergl. der Atomphysik
schnell	<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

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:

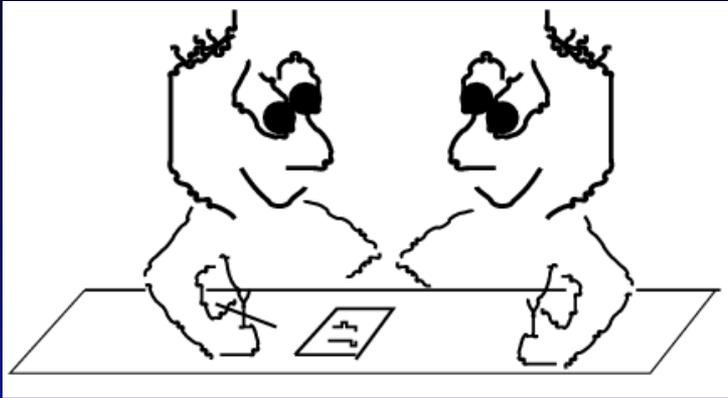
**1 Mol eines Stoffes ist so viel Gramm eines Stoffes, wie das relative
Atom-oder Molekülgewicht beträgt**

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

1 Mol H_2O 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 $m_{\text{Atom}} = A / N_A$

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/c² (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**

