

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: Iris Gebauer Email: iris.gebauer@kit.edu

Tel.: 4608 47678

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/~gebauer/atom13.html

Anmeldung zu den Übungen unter:

<http://www.physik.uni-karlsruhe.de/Tutorium/SS13/Physik4/>

Ab Heute um 18.00 bis 18.04.2013 (bis 12.00 Mittags pünktlich)

Einteilung:

Wird am 19.04.2013 im Internet veröffentlicht unter

<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~gebauer/atom13.html>

Schein-Kriterien Orientierungsniveau

- Scheinkriterium und Note:
 - Semester-Klausur am 22.07.2013 (17.30 - 19.30 im Gerthsen)
 - Einsicht (voraussichtlich) 26.07.2013, Zeit wird noch bekanntgegeben.
 - Zweitklausur am 12.08.2013 (11:00-13:00 Uhr im Gerthsen)
 - Einsicht (voraussichtlich) 16..08.13, Zeit wird noch bekanntgegeben
- 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/~gebauer/atom13.htm

ANMELDUNG ZU KLAUSUREN UND VORLEISTUNG

Anmeldung via <https://studium.kit.edu>

Vorleistung: 50% der Aufgaben virtuell gerechnet
Anmeldung: 15.04.2013-08.07.2013.
Abmeldung bis 08.07.2013.

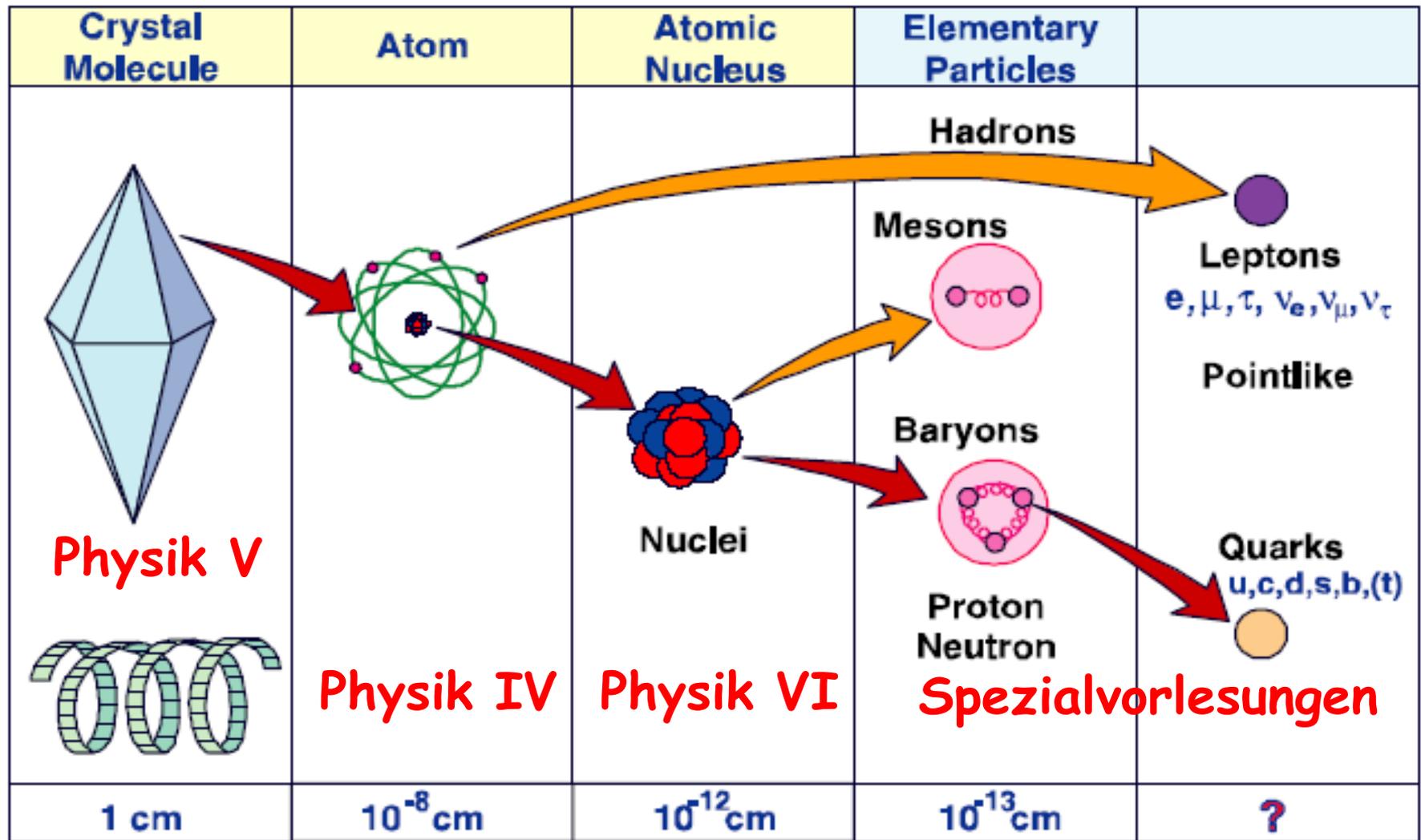
Semesterklausur: Anmeldung: 15.05.2013 – 19.07.2013.
Abmeldung bis 19.07.2013.

**Hiernach ist nur noch die persönliche
Abmeldung im Hörsaal möglich!**

Zweitklausur: Anmeldung: 15.05.2013 – 09.08.2013.
Abmeldung bis 09.08.2013.

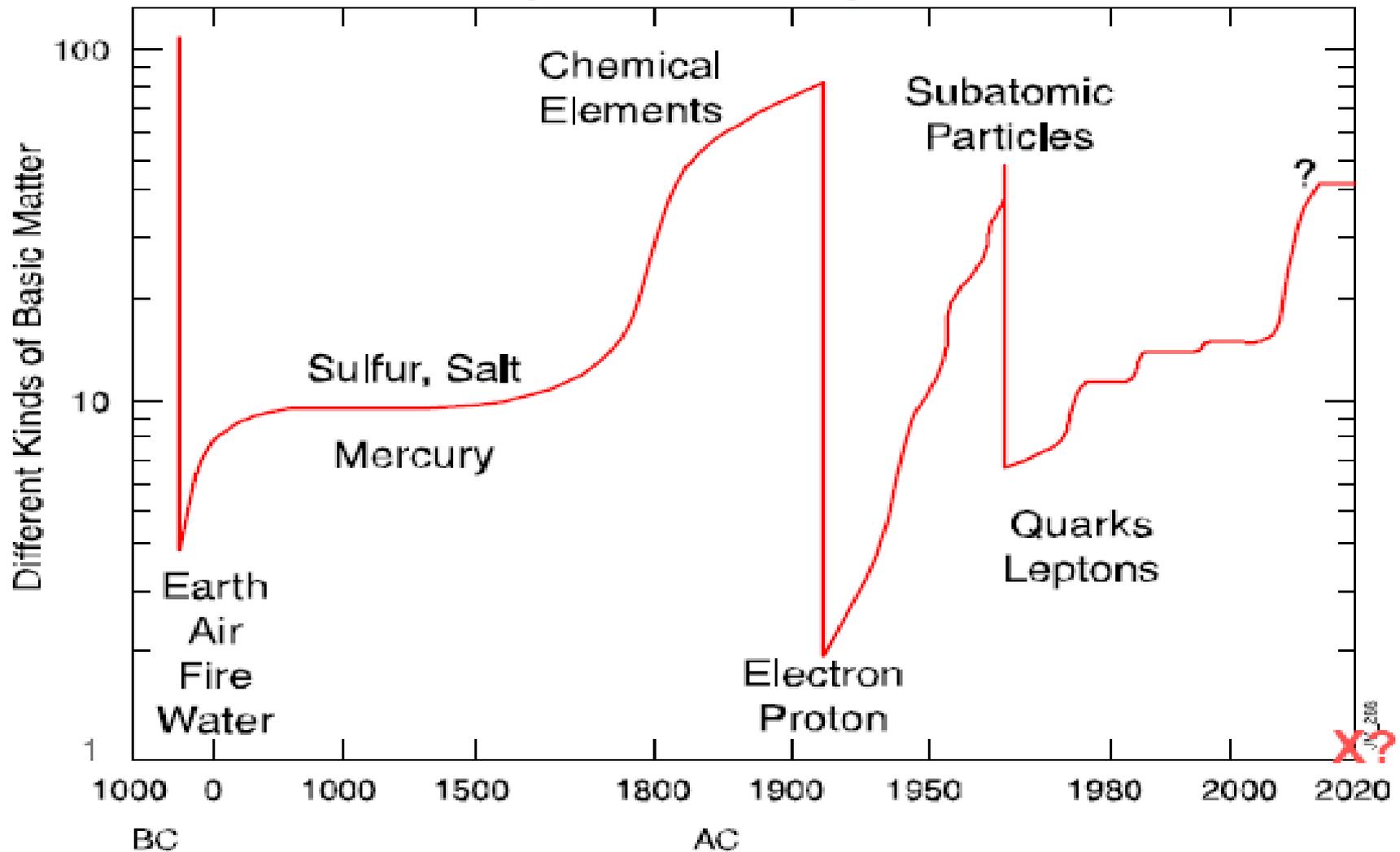
**Hiernach ist nur noch die persönliche
Abmeldung im Hörsaal möglich!**

Die elementaren Bausteine der Materie

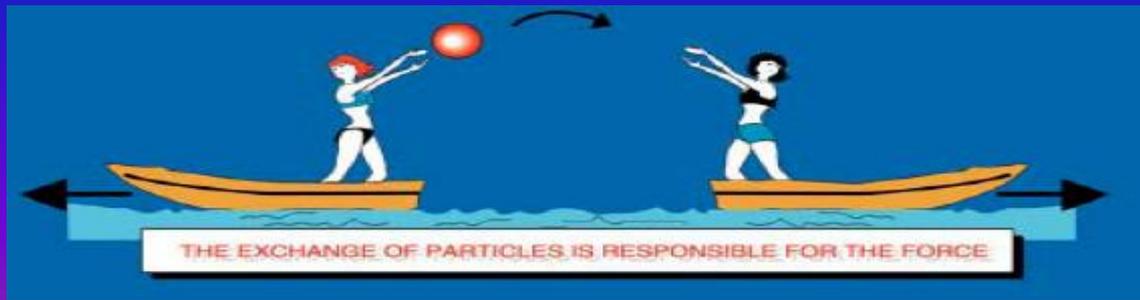
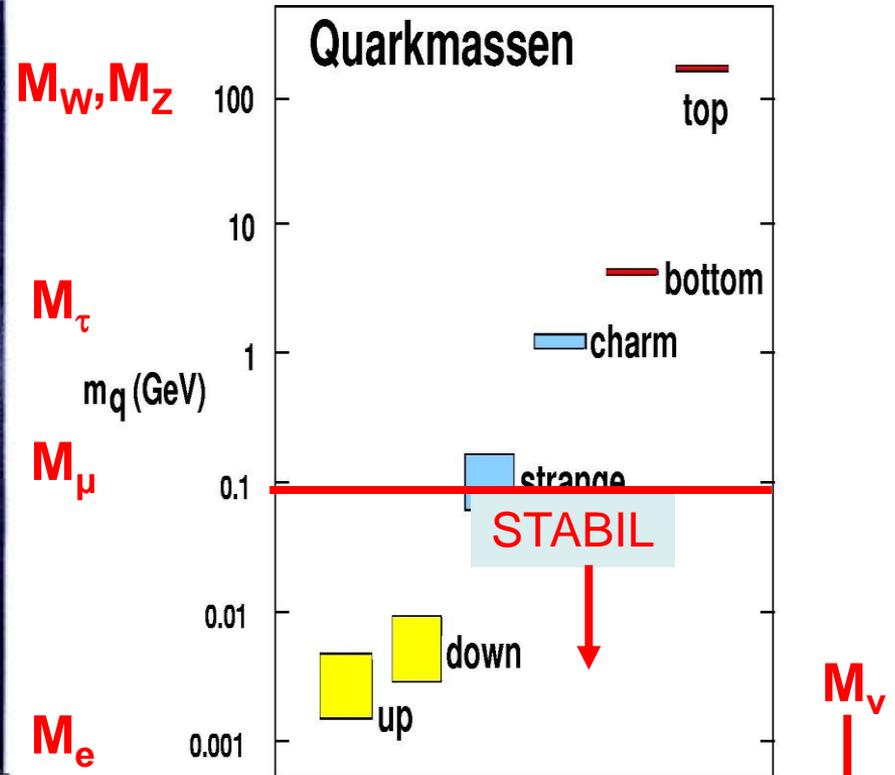
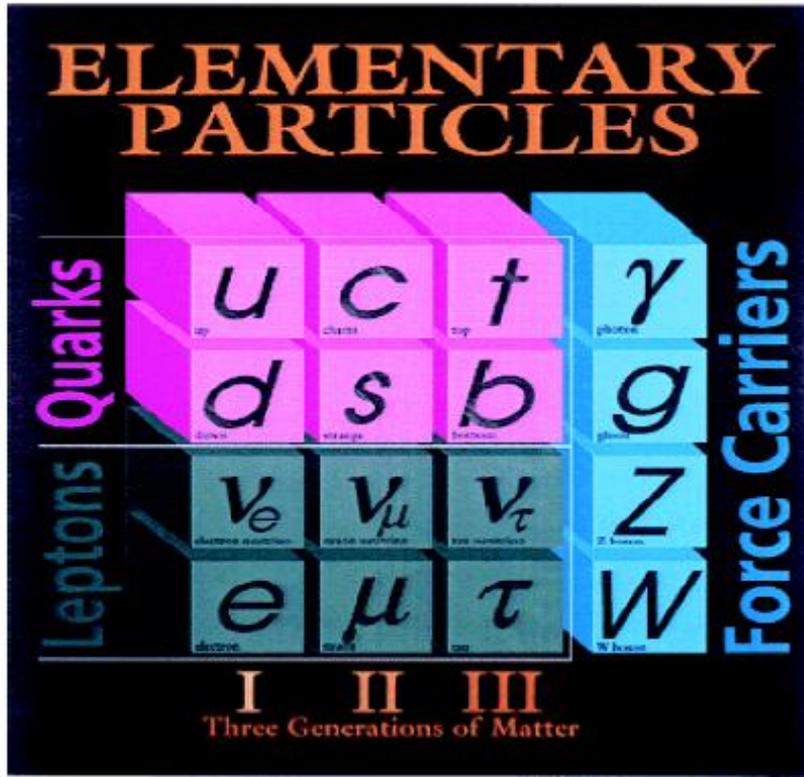


“Elementarteilchen” als Fkt. der Zeit

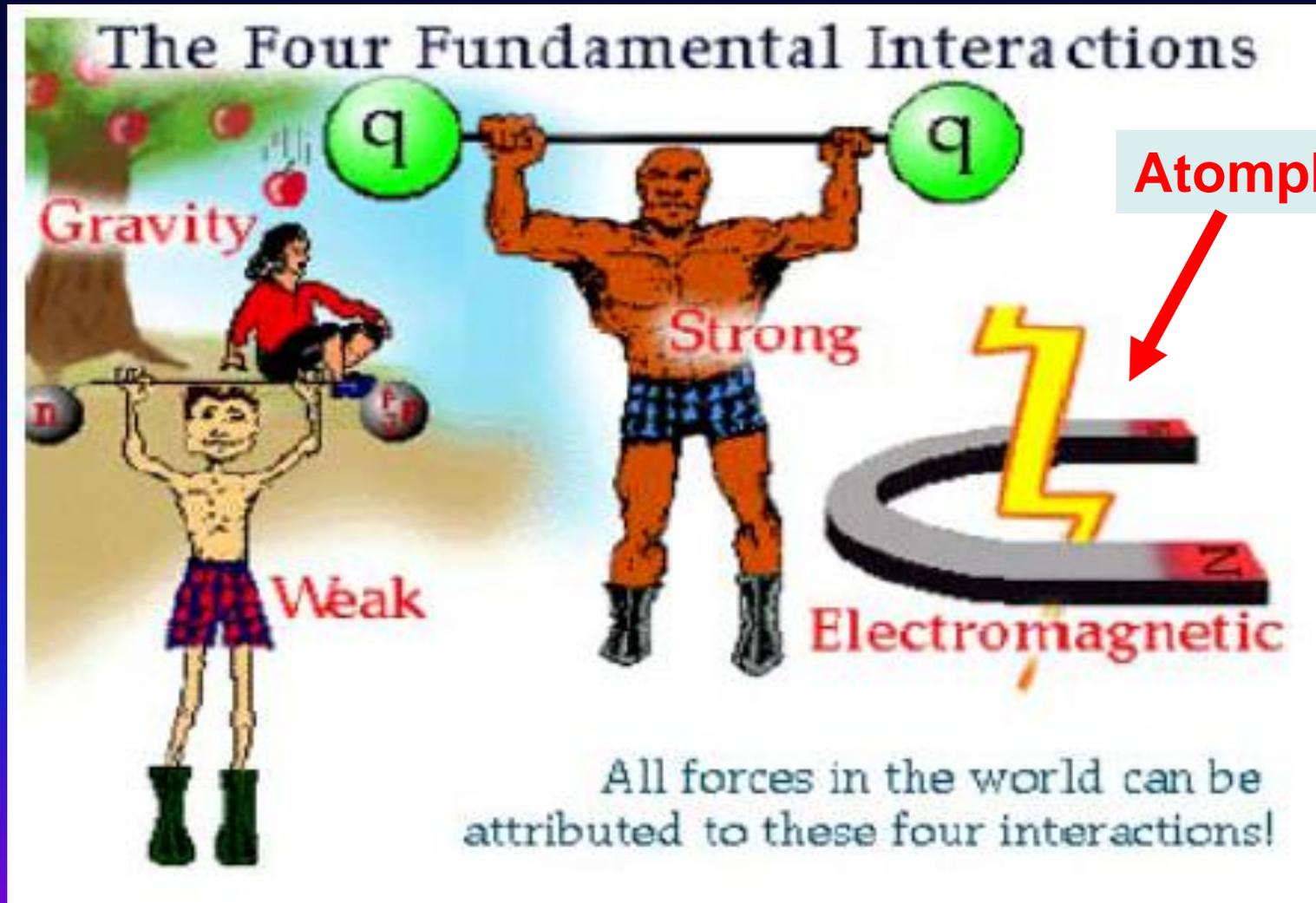
History of Elementary Particles



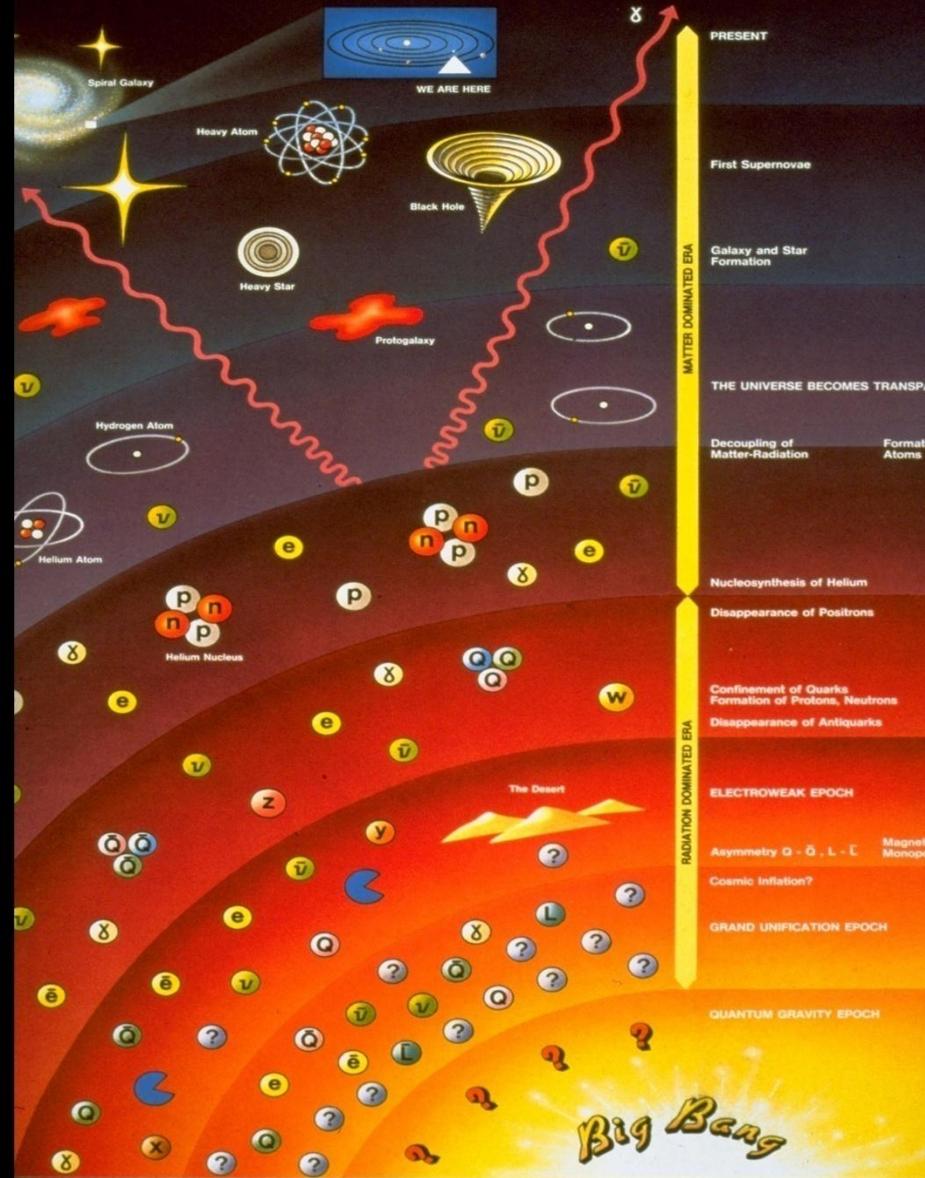
Das Standard Modell der Teilchenphysik



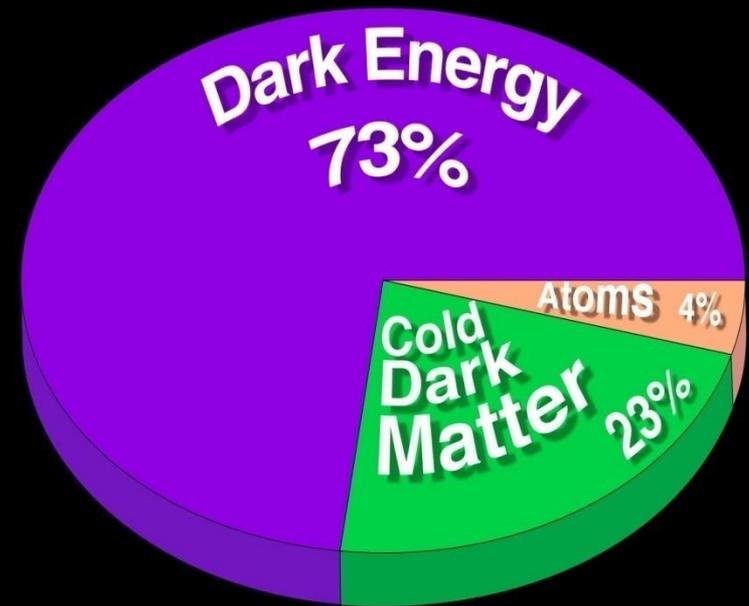
Die elementaren Wechselwirkungen



History of the Universe



Details: siehe VL Kosmologie im WS



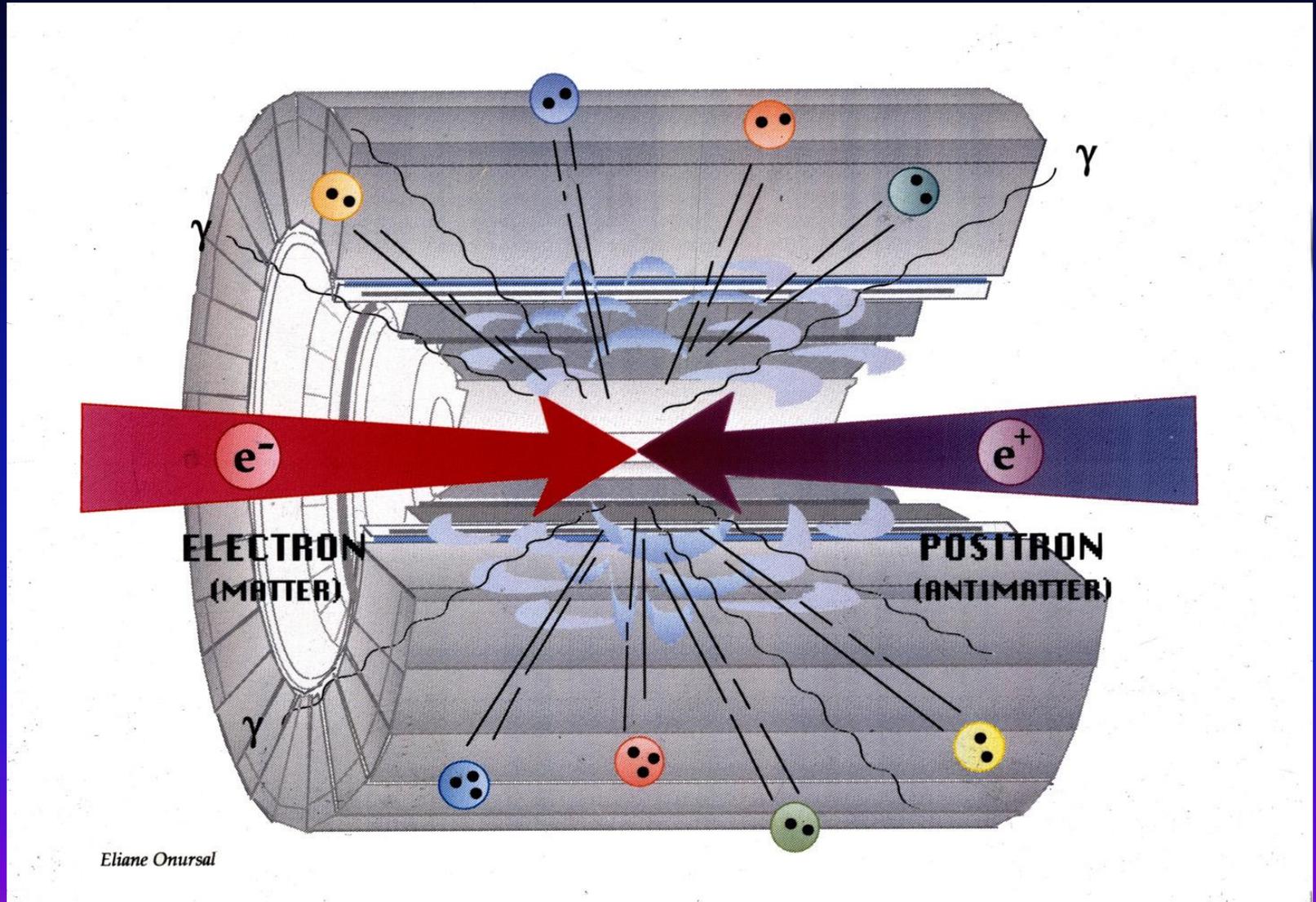
If it is not dark, it does not matter

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

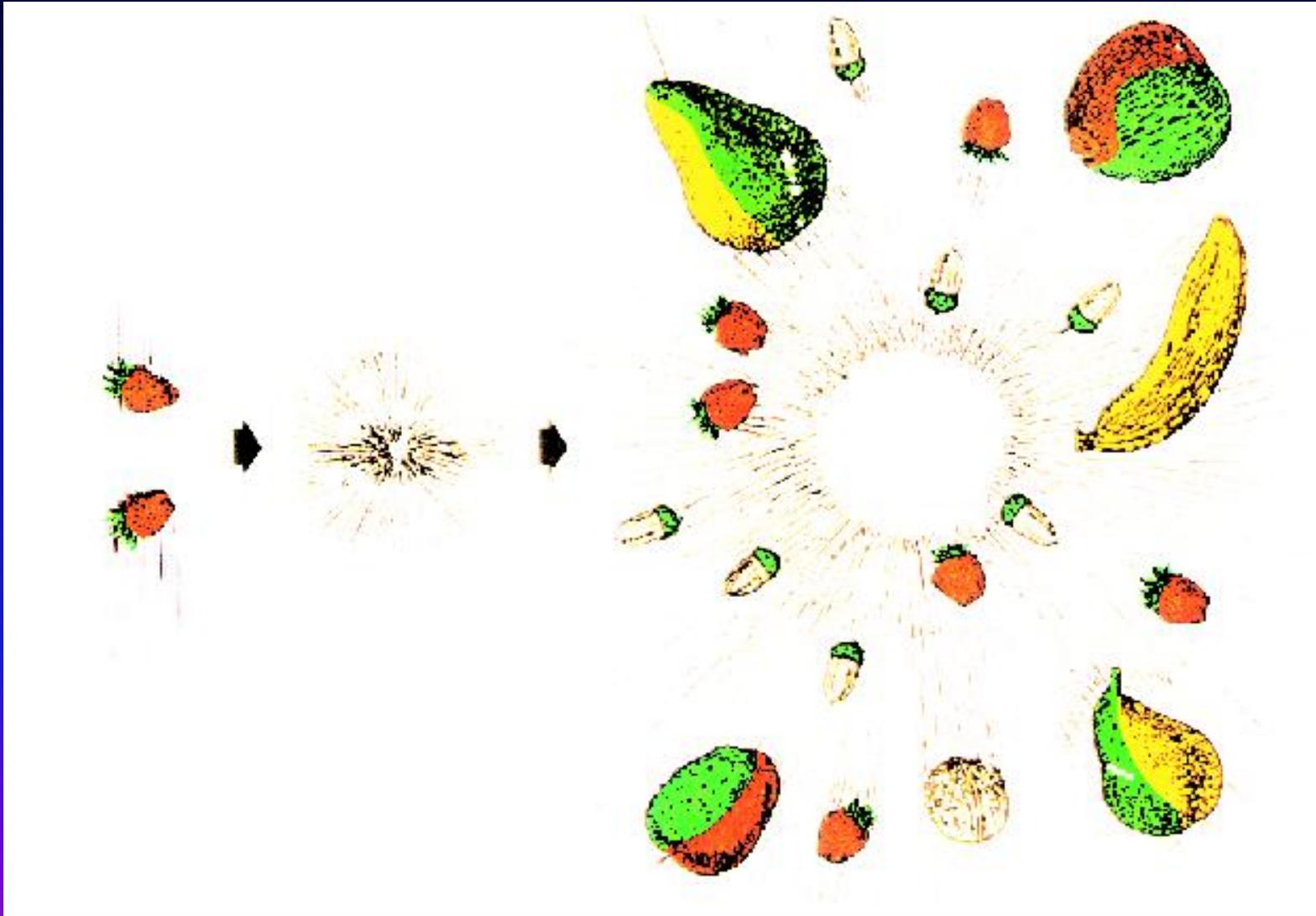
$$\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}} = \Omega_B + \Omega_{\text{DM}} + \Omega_{\Lambda} = 1$$

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

Entdeckung der Quarks und Leptonen mit Streu-Experimenten

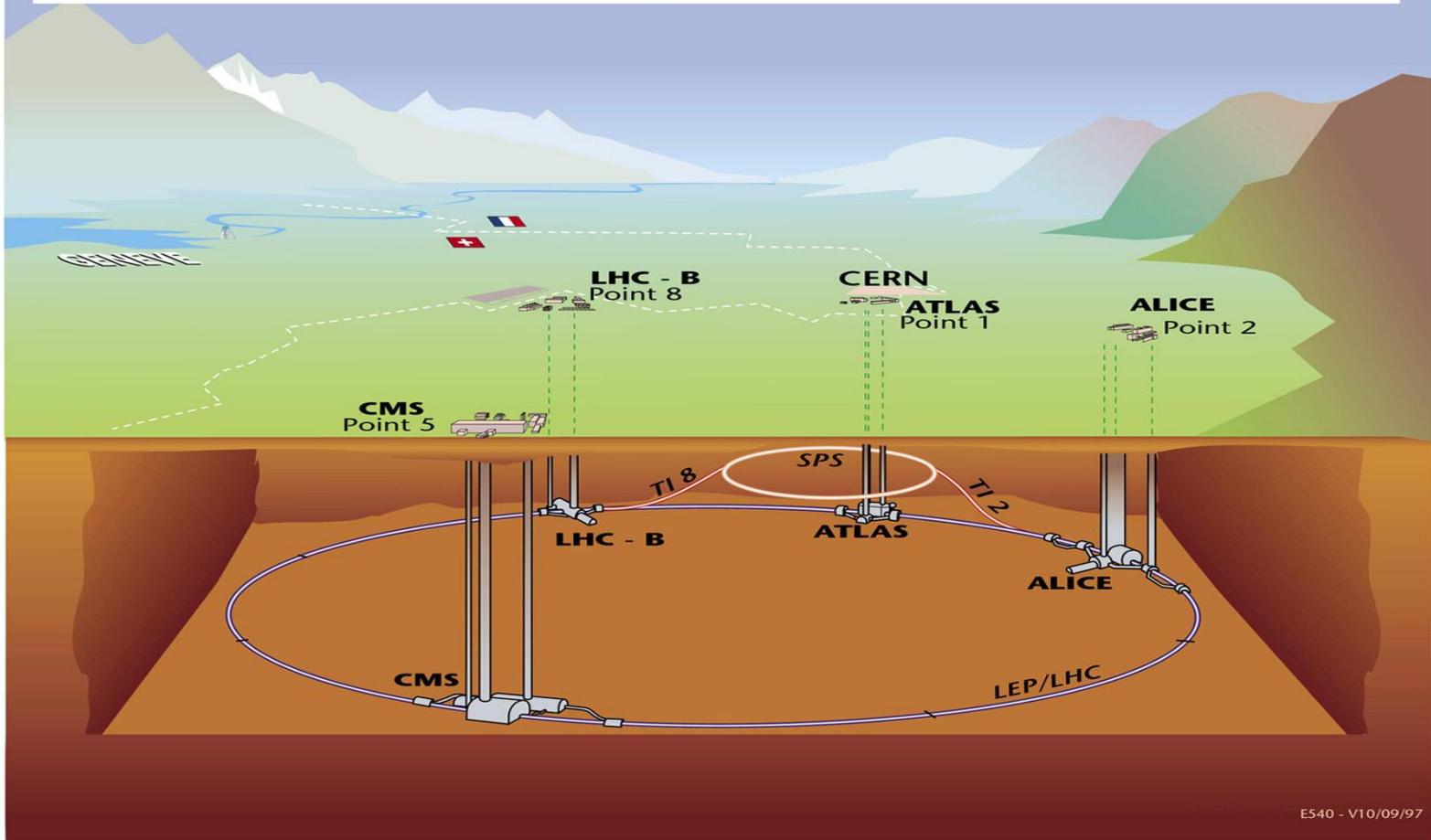


$E=mc^2$ macht es möglich

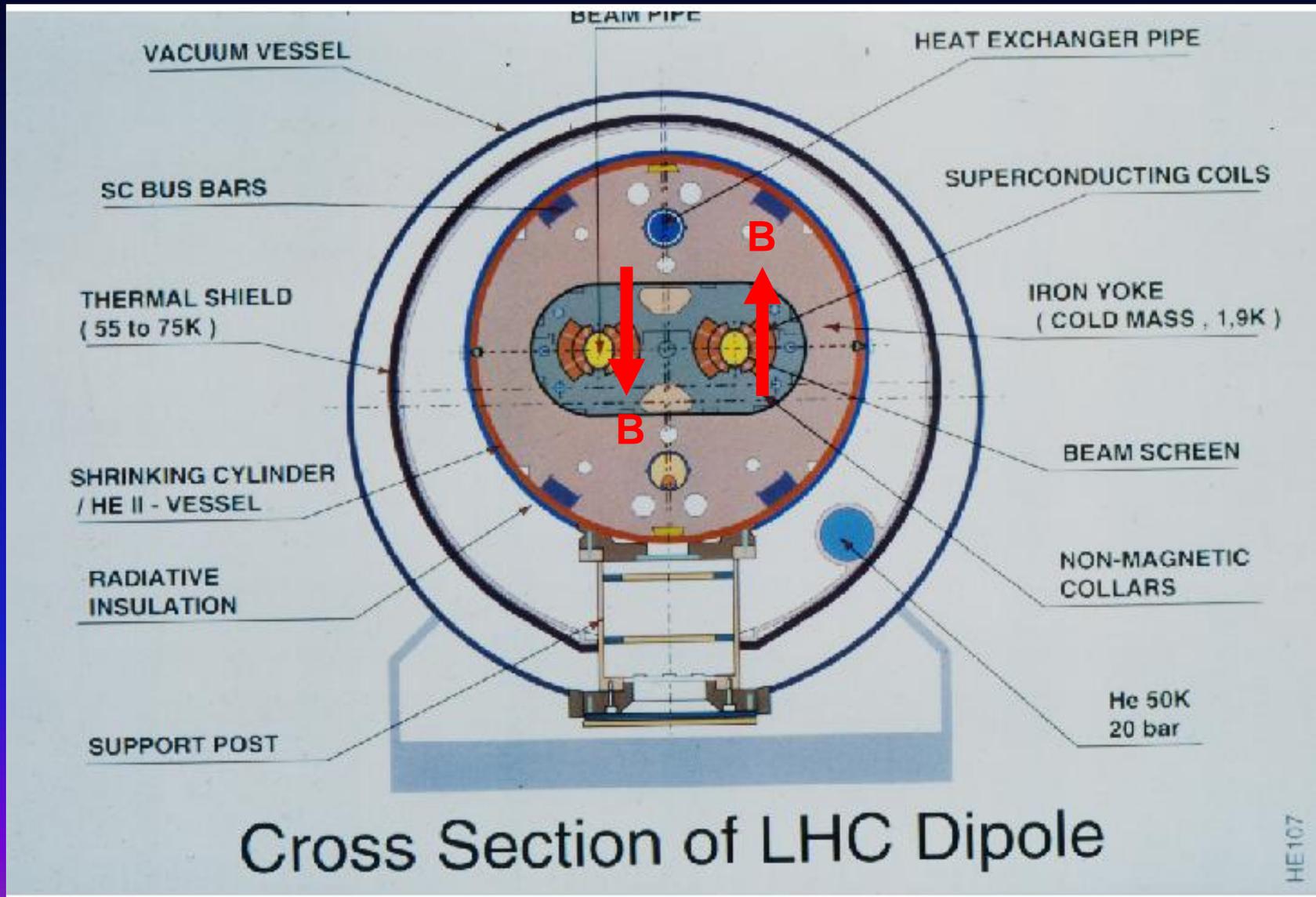


Experimente am LHC (LHC= Large Hadron Collider)

Overall view of the LHC experiments.



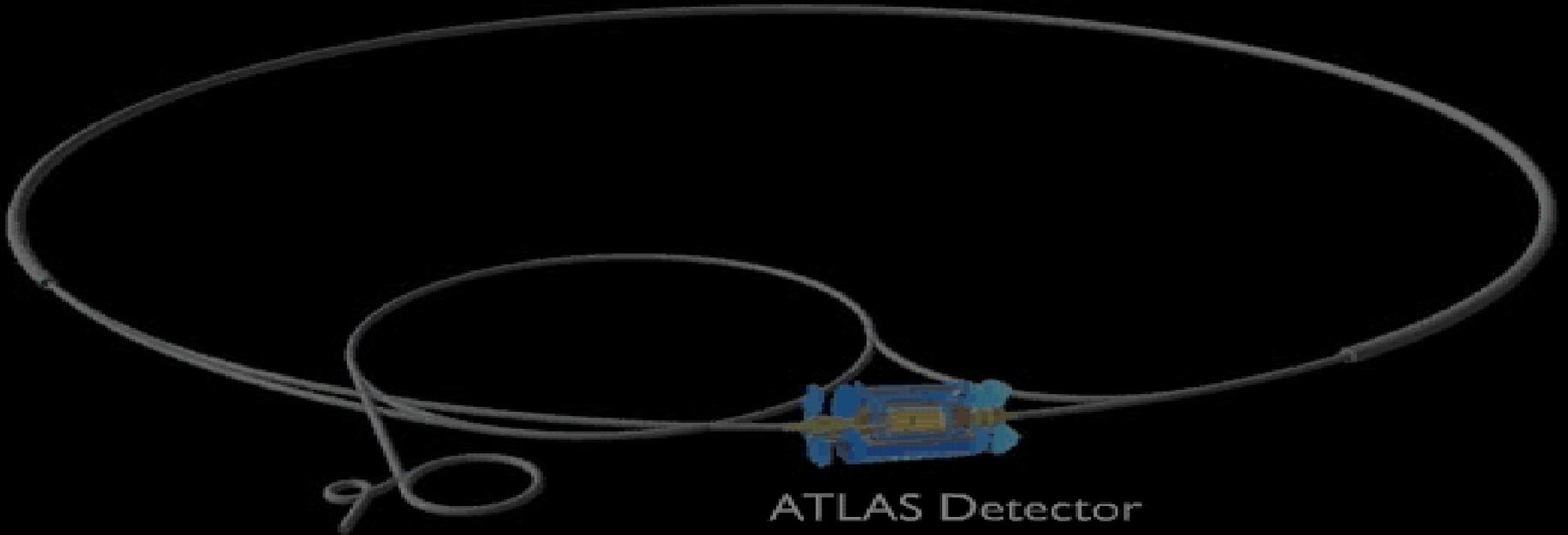
Supraleitender LHC Magnet: zwei Dipole





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

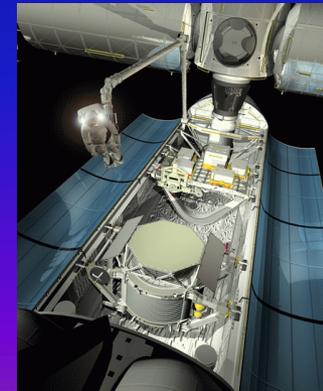
Suche nach dunkler Materie mit AMS-02 im Weltall

AMS: Alpha Magnetic Spectrometer



Mai, 2011

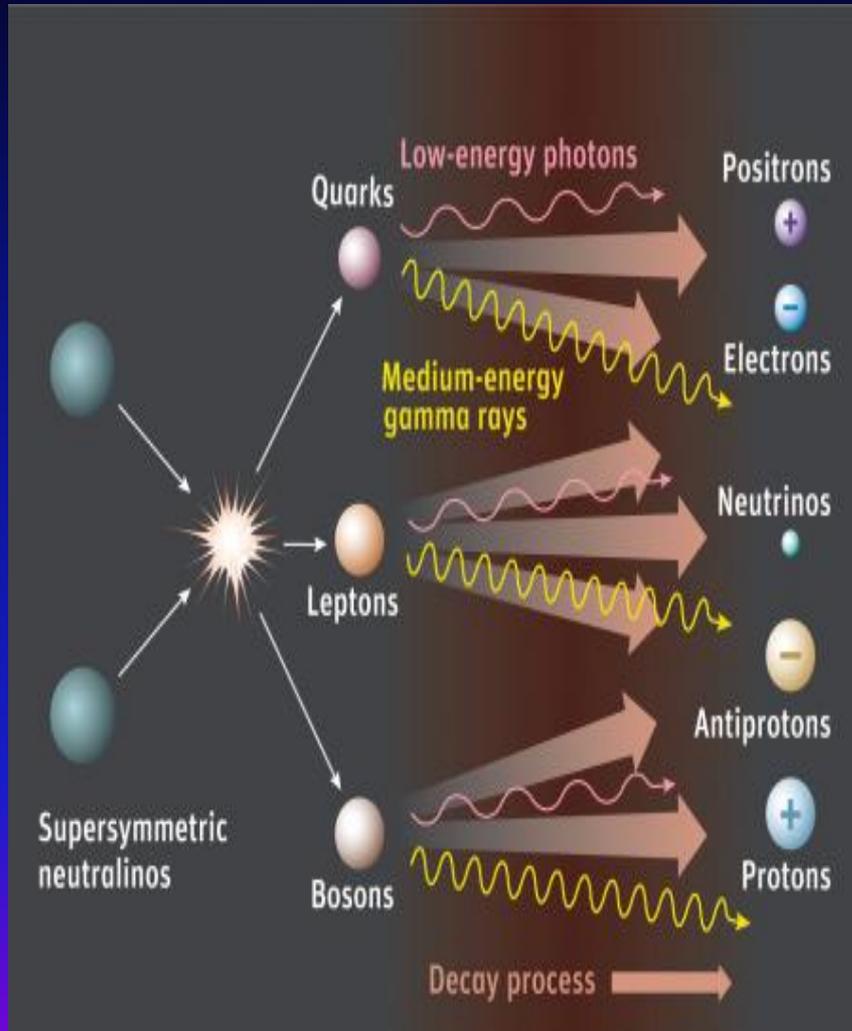
Large acceptance detector ($0.4 \text{ m}^2\text{sr}$) with excellent particle identification by Silicon Tracker in SC magnet, RICH, TRD, TOF, EM Calorimeter



ISS Tour

Indirect Dark Matter Searches

Annihilation products from dark matter annihilation:



Gamma rays

(EGRET, FERMI, AMS-02)

Positrons (PAMELA, AMS-02)

Antiprotons (PAMELA, AMS-02)

$e^+ + e^-$

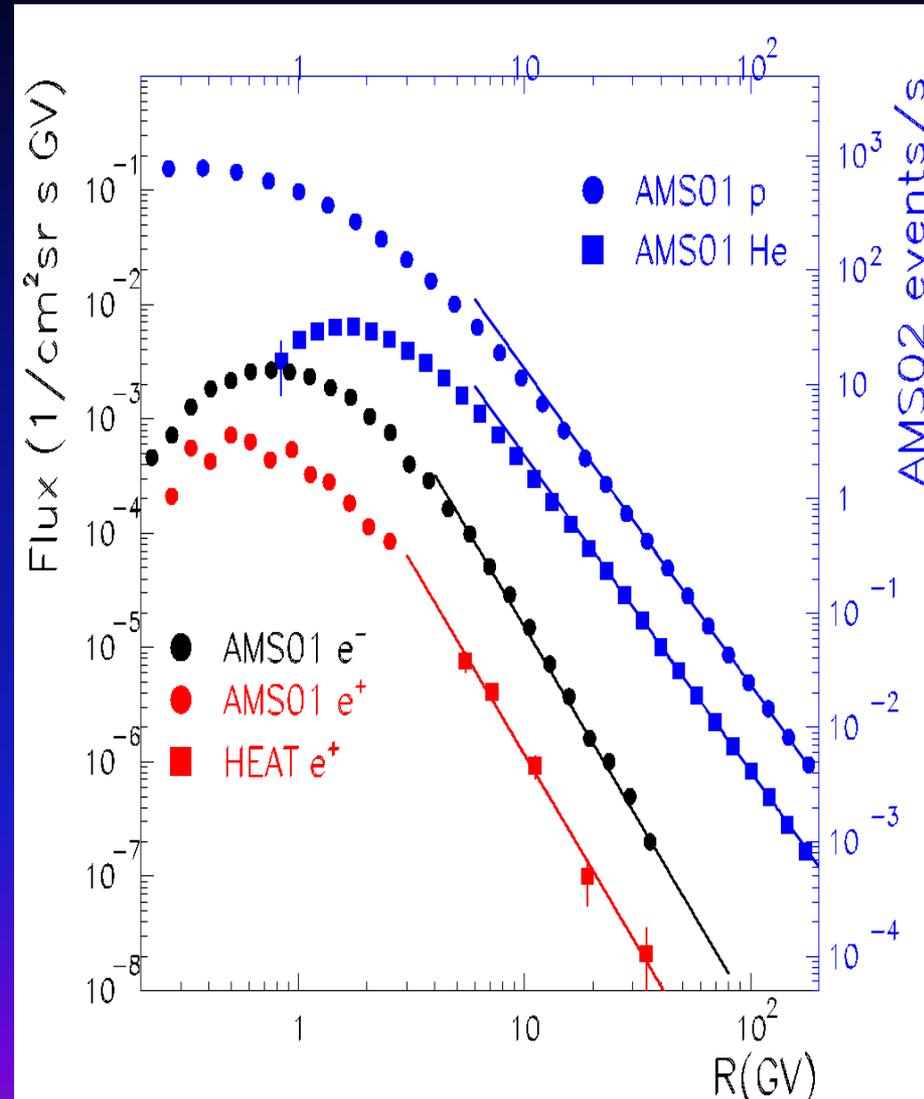
(ATIC, FERMI, HESS,
PAMELA, AMS-02)

Neutrinos (Icecube, no results yet)

e^- , p down in cosmic rays?

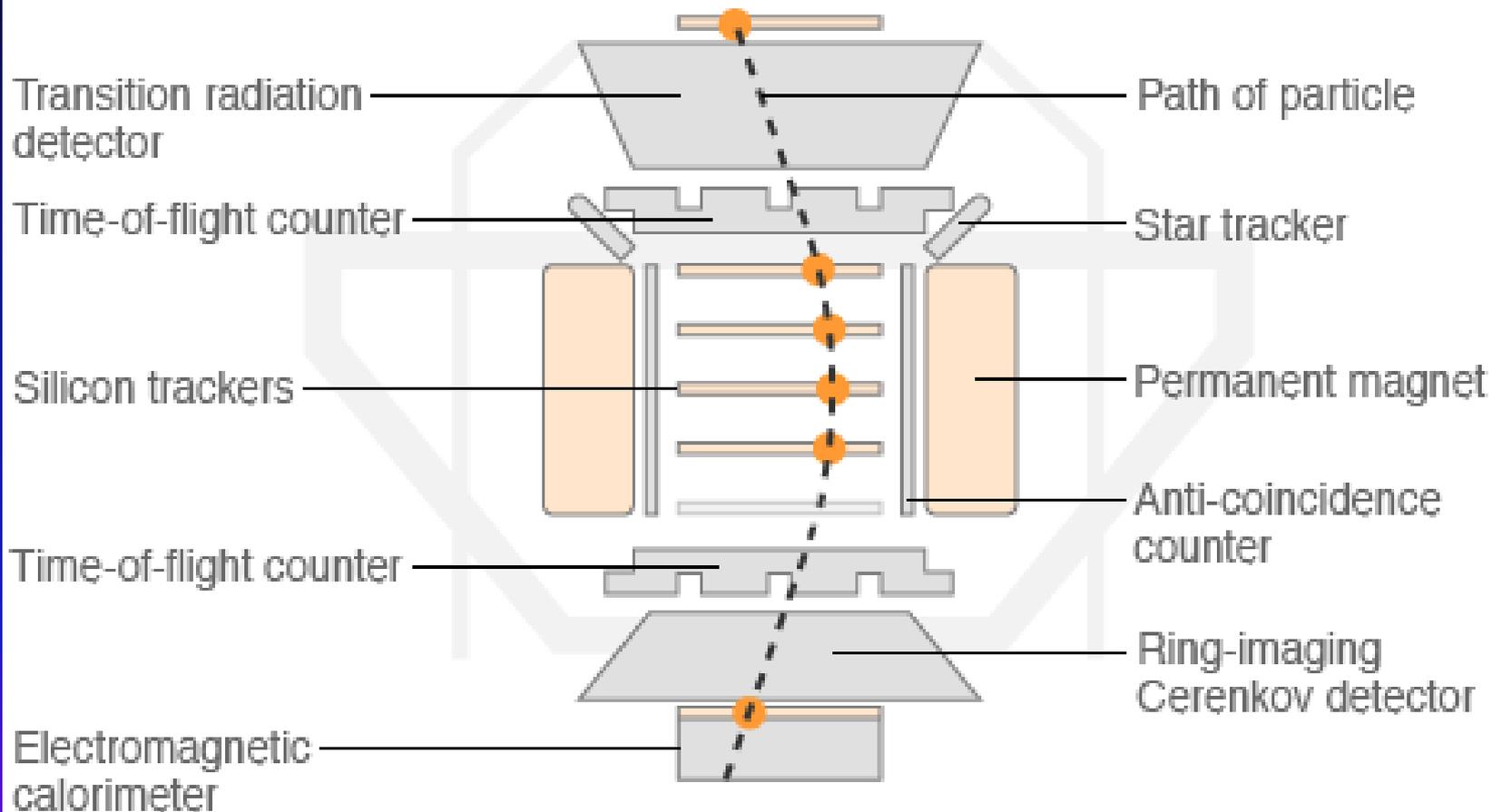
PARTICLE IDENTIFICATION = THE NAME OF THE GAME

- For every antiproton at some energy there are 10,000-100,000 protons
- For every positron at some energy there are ~10,000 protons which have same charge sign
- Secondary particles (long and short lived) are locally produced
- Single scatters change apparent particle charge sign in simple trackers



Alpha Magnetic Spectrometer AMS-02

The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02)



Source: CERN

Experiment auf der ISS Forscher finden Hinweise auf Dunkle Materie

Ein Wissenschaftlerteam am Forschungszentrum CERN in Genf hat erstmals Hinweise auf die Existenz der Dunklen Materie gefunden.

"Das wäre so, als würde ein neuer Kontinent entdeckt", erklärte die CERN-Forscherin Pauline Gagnon gegenüber Reuters die Bedeutung der Entdeckung. "Es würde das Tor in eine neue Welt öffnen."

**Unfortunately, there are other explanations.... and
„One swallow does not make a summer“**

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

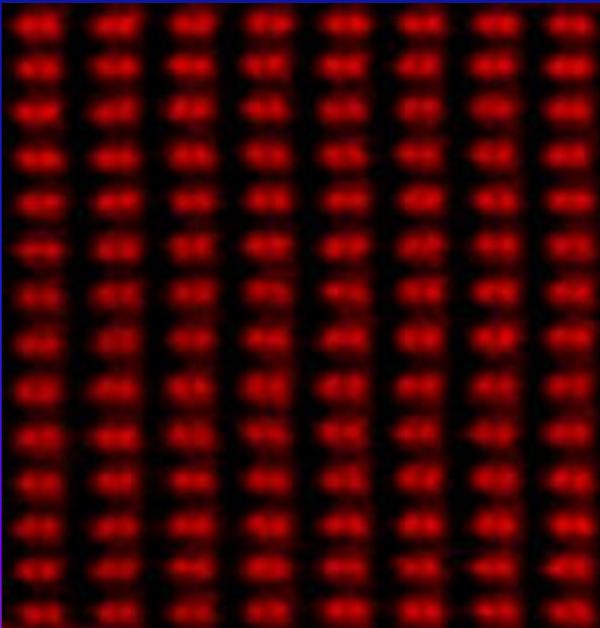
Photonen haben Teilchencharakter (sind “quantisiert”)

**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 Energieniveaus 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 die Vorlesung sich an Haken-Wolf orientieren.

Zusätzliche Angaben SEHR nützlicher Bücher:

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

1.1 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)

4.1. Gravitationseffekte des Photons

4.2. Temperaturstrahlung

VL5. Materiewellen (Welleneigenschaften von Teilchen)

5.1. Beugung und Interferenz von Elektronen

5.2. Materiewellen und Wellenpakete

5.3. 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. Wellenpakete als Lösungen der Schrödingergleichung

7.2. Lösungen der Schrödingergleichung in einem Potentialfeld

Einteilung der Vorlesung

VL8. Das Wasserstoffatom in der klass. Mechanik

8.1. Emissions- und Absorptionsspektren der Atome

8.2. Quantelung der Energie (Frank-Hertz Versuch)

8.3. Spektren des Wasserstoffatoms

8.4. Bohrsches Atommodell

VL9. Schrödingergleichung

9.1. Schrödingergleichung mit beliebigem Potential

9.2. Harmonischer Oszillator

9.3. Drehimpulsoperator

VL10. Das Wasserstoffatom in der QM (I)

10.1. SG in einem kugelsymmetrischen Potential

10.2. Quantenzahlen des Wasserstoffatoms

10.3. Winkelabhängigkeit (Kugelflächenfunktionen)

Einteilung der Vorlesung

VL11. Das Wasserstoffatom in der QM (II)

11.1. Radiale Abhängigkeit (Laguerre-Polynome)

11.2. Energiezustände des Wasserstoffatoms

VL12. Spin-Bahn-Kopplung (I)

12.1 Bahnmagnetismus (Zeeman-Effekt)

12.2 Spinmagnetismus (Stern-Gerlach-Versuch)

VL13. Spin-Bahn-Kopplung (II)

13.1. Spin-Bahnkopplung

13.2 Landé-Faktor (Einstein-deHaas Effekt)

13.3. Das Experiment von Lamb und Retherford

VL14. Spin-Bahn-Kopplung (III)

14.1. Spin-Bahn-Kopplung

14.2. Paschen-Back Effekt

Einteilung der Vorlesung

VL15. Wasserstoffspektrum

15.1. Lamb Shift

VL16. Hyperfeinstruktur

16.1. Hyperfeinstruktur

16.2. Kernspinresonanz

VL 17 Magnetische Elektronenspinresonanz

17.1. Elektronenspinresonanz

17.2. Kernspintomographie

VL 18 Laser und Maser

18.1. Laser

(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

18.2 Maser = Laser im Mikrowellenbereich, d.h.

Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Einteilung der Vorlesung

VL19. Mehrelektronensysteme (Pauliprinzip)

19.1. Heliumatom

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

VL20. Periodensystem

20.1. Periodensystem und Schalenstruktur

VL21. Röntgenstrahlung

21.1. Röntgenstrahlung

Einteilung der Vorlesung

VL 22. Molekülbindungen

22.1. Homonukleare Moleküle

VL 23. Molekülbindungen

23.1. Heteronukleare Moleküle

VL 24. Molekülspektroskopie

24.1. Molekülschwingungen

24.2 Molekülrotationen

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

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

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

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

$m_e = m_p/1836$, 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

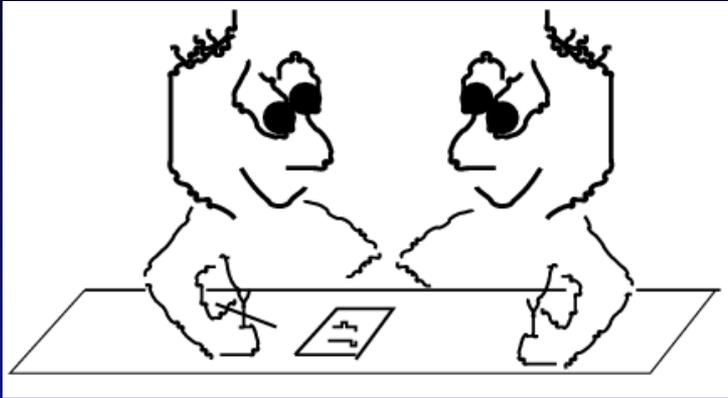
z.B. 1 Mol ^{12}C sind 12 g

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 = Avogadro, L = 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 =

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

$$931,478 \text{ MeV}/c^2 \text{ (aus } E=mc^2)$$

Bestimmung der Avogadrozahl

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**

