

# Fortgeschrittene Experimentalphysik für Lehramtsstudierende

## Teil II: Kern- und Teilchenphysik



Prof. Markus Schumacher  
Sommersemester 2013

### Kapitel 1: Einleitung und Grundbegriffe

# 1.1 Gegenstand von Kern- und Teilchenphysik I

**bisher:** Atom-, Molekül- Festkörperphysik

Abstände  $> 10^{-10}$  m

relevante Kraft: elektromagnetische Wechselwirkung (meist nicht relativistisch)

**nun:** Abstände  $10^{-13}$  bis  $10^{-18}$  m

weitere Kräfte relevant/dominant:

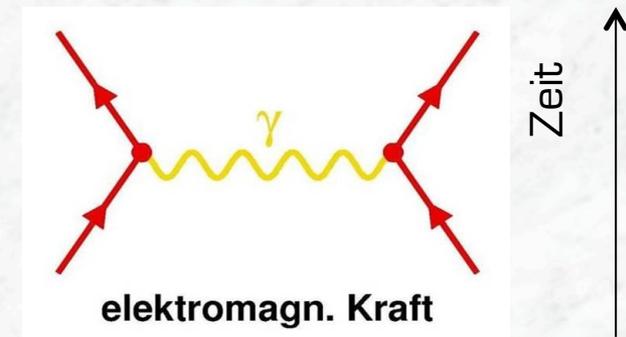
starke Kernkraft, starke Wechselwirkung, schwache Wechselwirkung

(Gravitation bei erreichbaren Energien und Abständen irrelevant)

- Kernphysik:**
- Theorie der kondensierten, stark wechselwirkenden Materie
  - Vielteilchensystem, komplexe Phänomene, „scharfe“ Quantenzustände
  - störungstheoretische Berechenbarkeit eingeschränkt wegen großer Stärke der starken Kernkraft
  - bisher keine einheitliche Theorie sondern verschiedene Modelle zur Erklärung von Phänomenen, Parametrisierungen
  - Eigenschaften von stabilen und angeregten Kernen (Masse, Größe, Spin, ....)
  - Stabilität und Zerfall von Kernen
  - Struktur der Kernkraft: Wechselwirkung zwischen Kernen, Kernen und Elementarteilchen

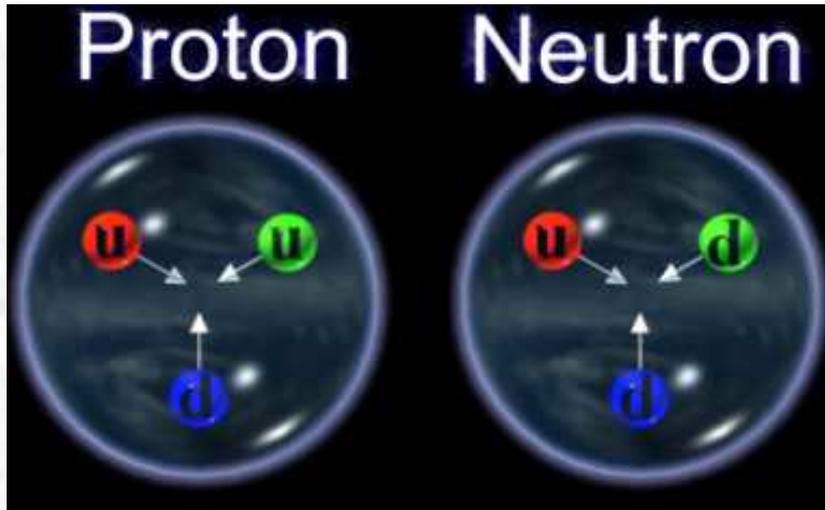
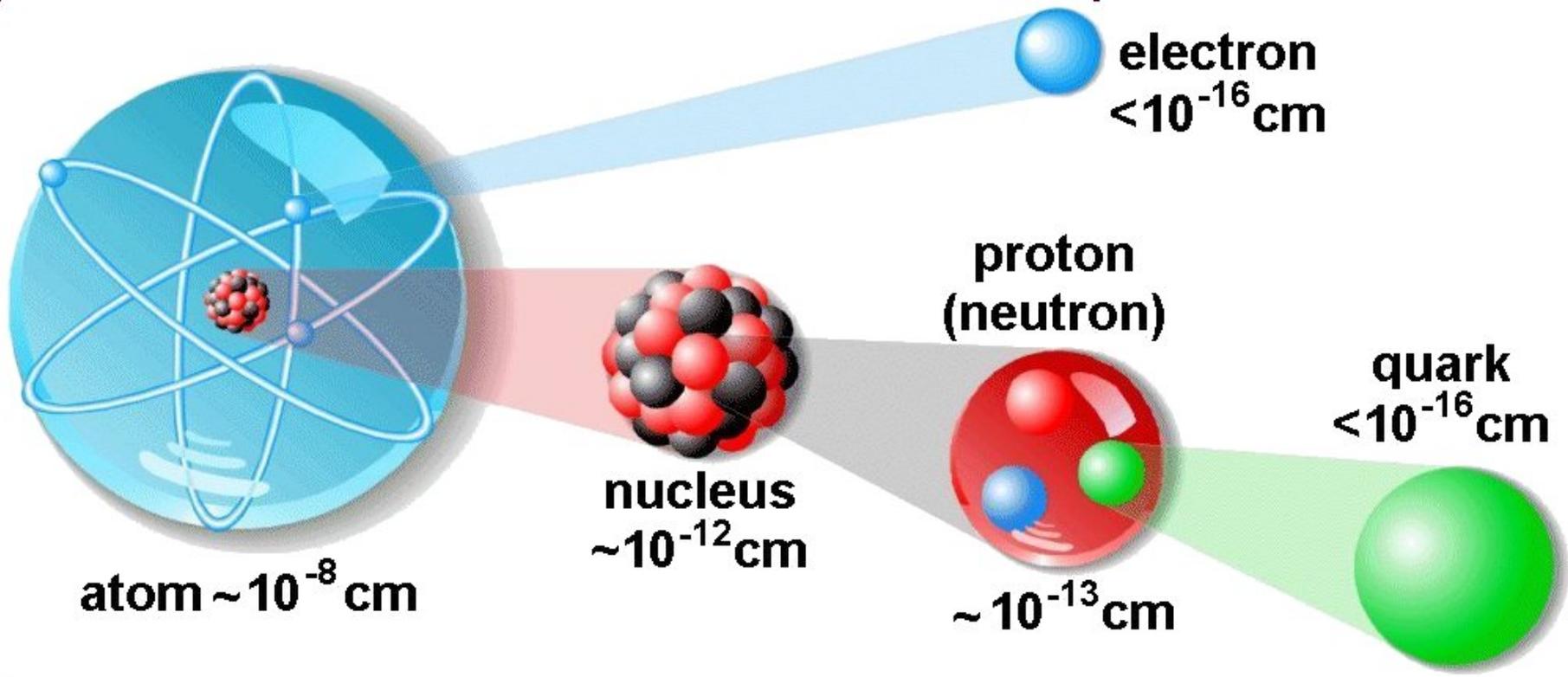
# Gegenstand von Kern- und Teilchenphysik II

- Teilchenphysik:**
- Theorie der elementaren Bausteine der Materie und ihrer Wechselwirkungen
  - Eigenschaften/ Symmetrieprinzipien bei Bausteinen und Kräften
  - Elementarteilchen: Quantenobjekt ohne permanente Substruktur  
(zeitabhängig: Atom  $\rightarrow$  Nukleon  $\rightarrow$  Quark)
  - Kräfte vermittelt durch Botenteilchen mit Spin=1  
hier z.B. : Feynman-Diagramm der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen zwei Elektronen (Spin=1/2)
  - einheitliche Theorie bis  $E = 1 \text{ TeV}$   
Abständen von  $10^{-18} \text{ m}$   
 $\rightarrow$  Standardmodell der Elementarteilchenphysik



- Technische Bedeutung:**
- Diagnostik und Therapie in der Medizin
  - Energiegewinnung
  - Altersbestimmung (Archäologie, Geologie)
  - Spurenelementanalyse
  - Entwicklung neuer Technologien (Beschleuniger, Detektoren, Elektronik, Informationstechnologie, ...)

# Aufbau der Materie aus Fermionen (Spin = 1/2)



„unsere“ Welt besteht aus:  
up-Quark, down-Quark, Elektron

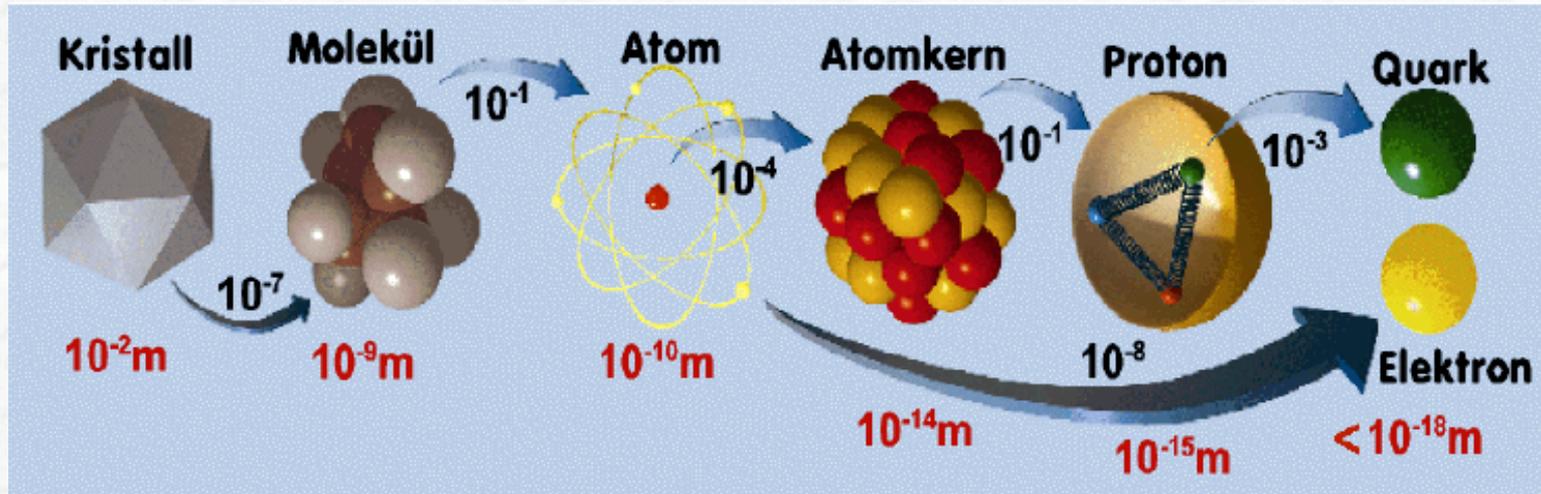
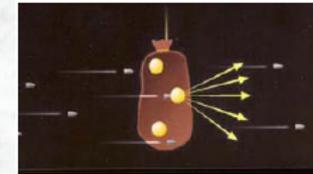
bisher keine Substruktur  
Theorie: punktförmig  
Experiment:  $< 10^{-18}$  m

# Auflösungsvermögen

hohe räumliches Auflösungsvermögen verlangt gemäß Heisenberg große Energien / Impulse der Projektile:

$$\Delta x = h / (2\pi p)$$

De-Broglie-Wellenlänge des Projektils muss kleiner als Längenskala der untersuchten Struktur sein



Auge,  
Mikroskop

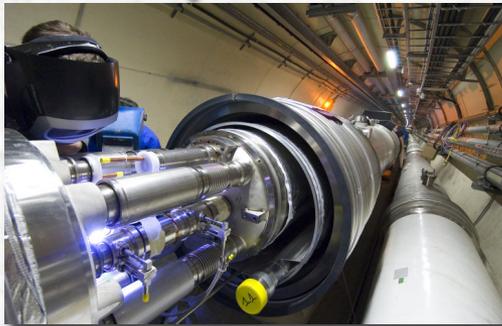
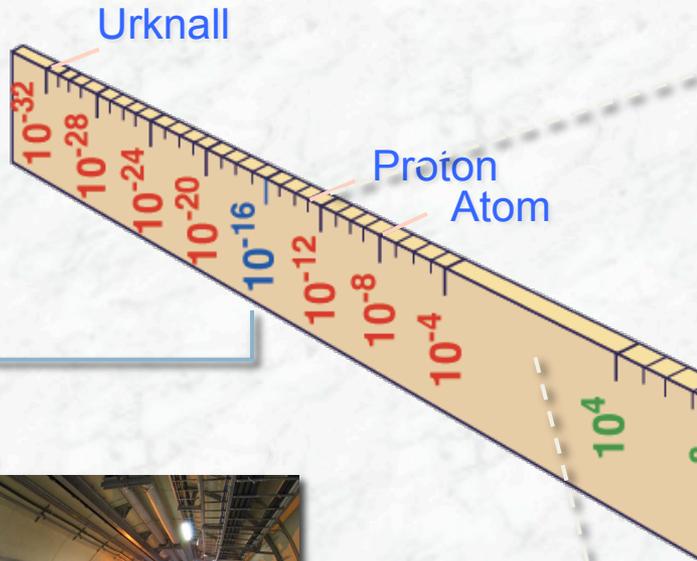


**Elektronenmikroskop**



**Hochenergetische  
Teilchenstrahlen**

# Zu neuen kleinsten Abständen

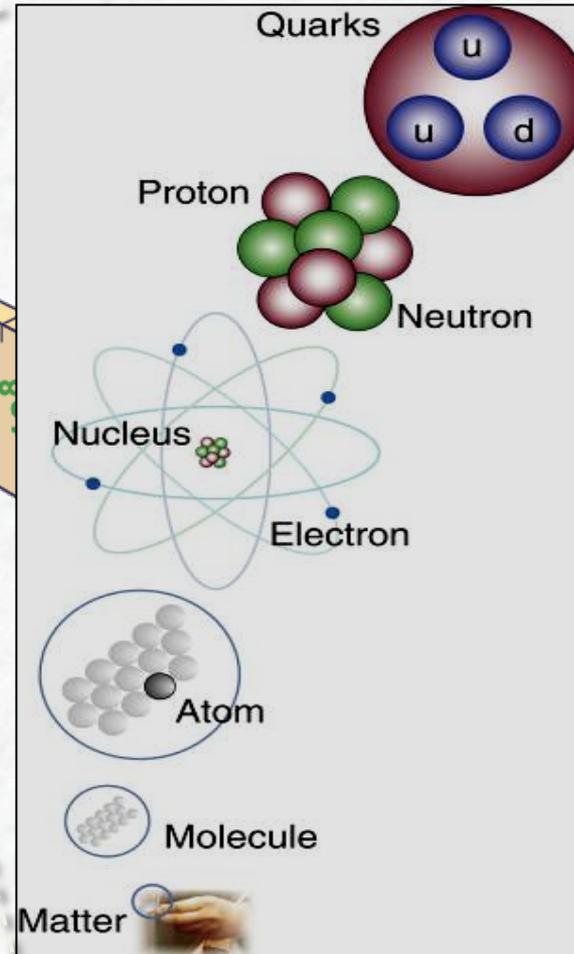


LHC

Super-Mikroskop

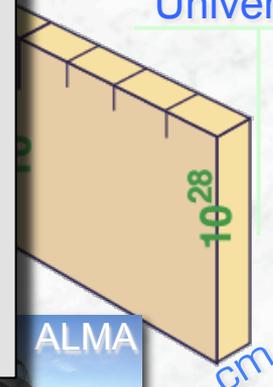


Untersuche physikalische Gesetze in den ersten Momenten nach dem Urknall. Große Symbiose zwischen Teilchenphysik, Astroteilchenphysik und Kosmologie

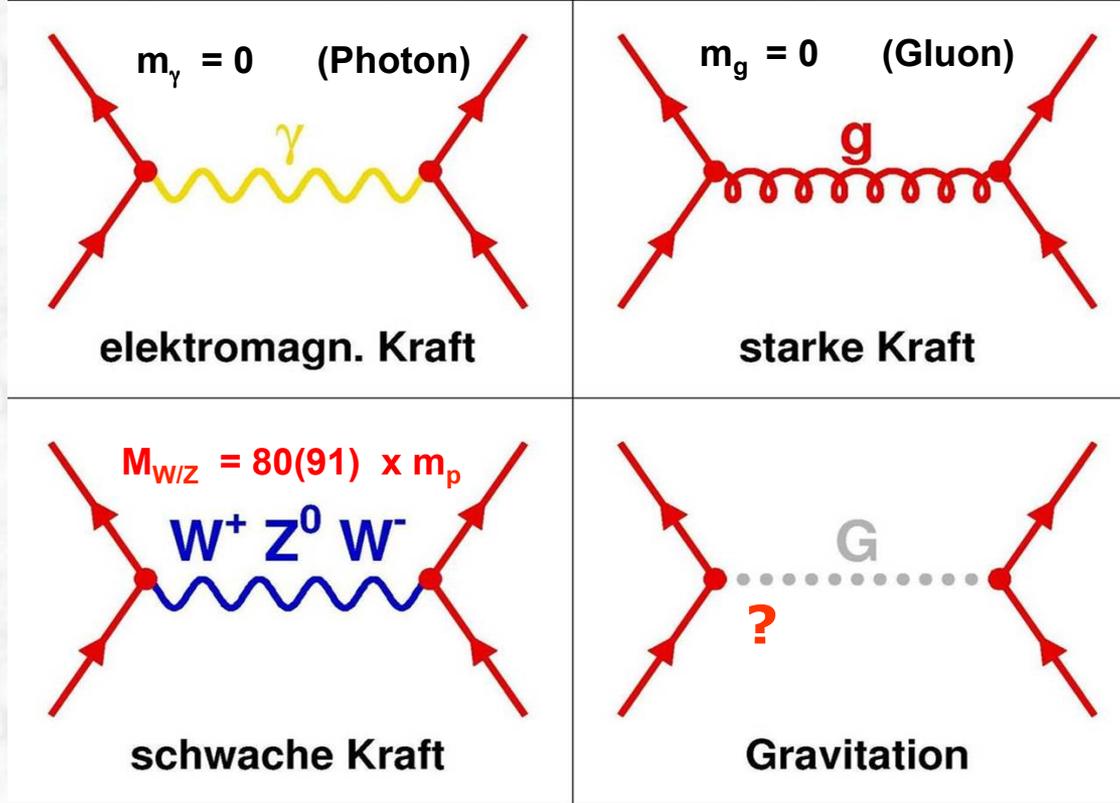
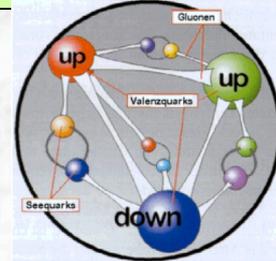
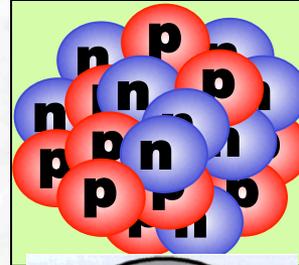
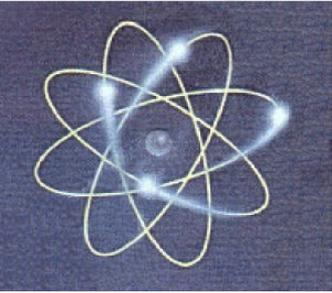


Radius von Galaxien

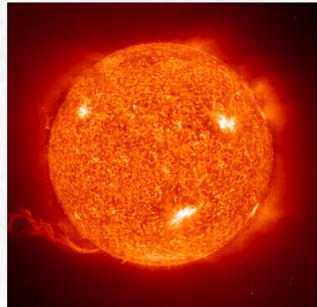
Universum



# Die vier fundamentalen Kräfte/Wechselwirkungen



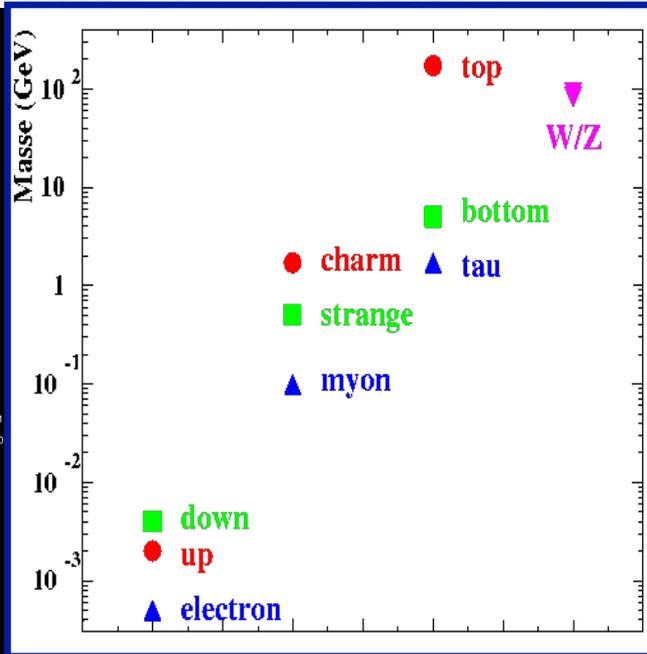
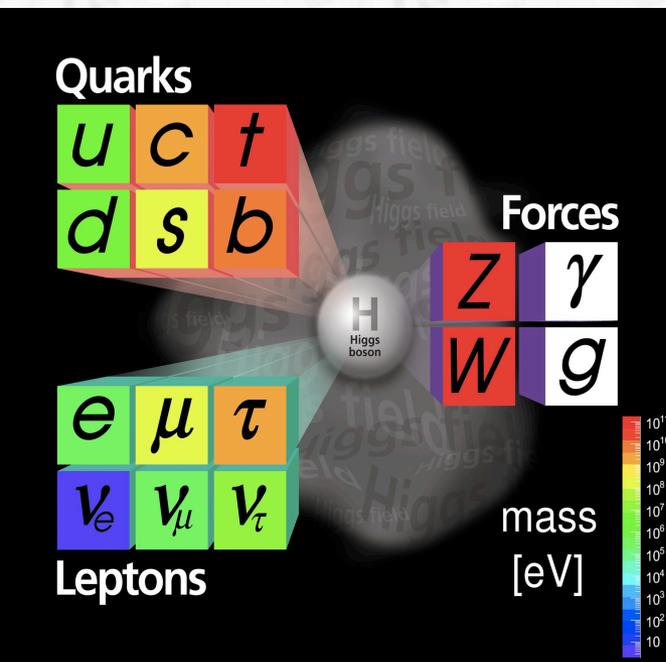
Stärke 1/10000  
x el-mag. Kraft



<b>Bosonen</b>	8 Gluonen	$W^+, W^-, Z$	$\gamma$
<b>Gruppe</b>	SU(3)	SU(2)	U(1)
<b>Theorie</b>	starke Kraft QCD	schwache Kraft	elektro-magnetische Kraft QED

Beschreibung der Wechselwirkungen  
beruht auf abstrakten Symmetrien  
→ Quantenfeldtheorie

# Das Standardmodell (SM) der Teilchenphysik



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} \\
 & + \bar{L}\gamma^\mu(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g\tau W_\mu - \frac{1}{2}g'Y B_\mu)L \\
 & + \bar{R}\gamma^\mu(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g'Y B_\mu)R \\
 & + |(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g\tau W_\mu - \frac{1}{2}g'Y B_\mu)\phi|^2 - V(\phi) \\
 & - (g_1\bar{L}\phi R + g_2\bar{L}\tilde{\phi}R + \text{herm.conj.}) \\
 & + \frac{1}{2}g_s(\bar{\Psi}_q^j\gamma^\mu\lambda_{jk}^a\Psi_q^k)G_\mu^a
 \end{aligned}$$

Fermionen in drei Familien (Hauptunterschied Massenhierarchie)  
 Die Existenz eines Higgs-Bosons (Spin = 0) war bis vor kurzem nicht klar.

# Warum diese hohen Energien?

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

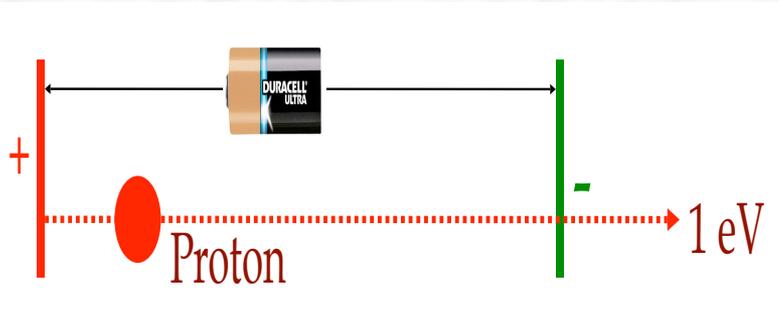
Werner Heisenberg:  
kleine Strukturen – kleine Abstände  
LHC: Abstände von  $10^{-19}\text{m}$

$$E = m \cdot c^2$$

Albert Einstein:  
neue und schwere Materie  
LHC: bis 3000 Protonmassen

$$\langle E \rangle \approx k_b \cdot T$$

Ludwig Boltzmann:  
hohe Temperaturen  
LHC: bis zu  $4 \times 10^{16} \text{ K}$  (Universum  $10^{-12}\text{s}$  nach Urknall)



$m_{\text{Elektron}}$	= 511 keV	=	511 000 eV
$m_{\text{Proton}}$	= 938 MeV	=	938 000 000 eV
$m_{\text{Top-Quark}}$	= 172 GeV	=	172 000 000 000 eV
$E_{\text{LHC}}$	= 3.5 TeV	=	3 500 000 000 000 eV



# History of the Universe

pp-Kollisionen am LHC korrespondieren zu Zustandsbedingungen ungefähr hier

**BIG BANG**

Inflation

t	$10^{-44}$	$10^{-37}$ s
T	$10^{32}$	$10^{28}$
E	$10^{19}$	$10^{15}$

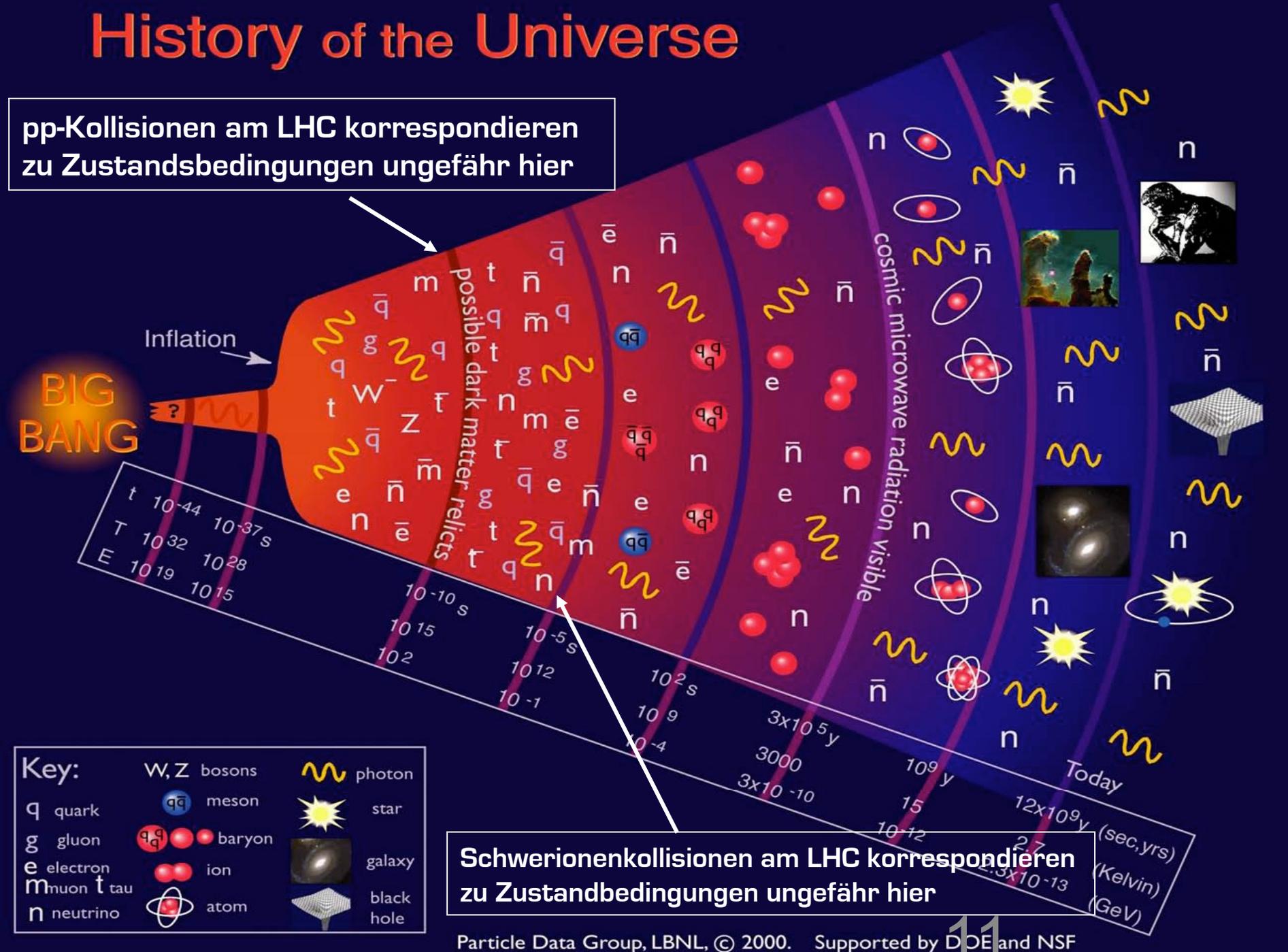
**Key:**

W, Z bosons		photon	
q quark		meson	
g gluon		baryon	
e electron		ion	
m muon		atom	
t tau		star	
n neutrino		galaxy	
		black hole	

possible dark matter relicts

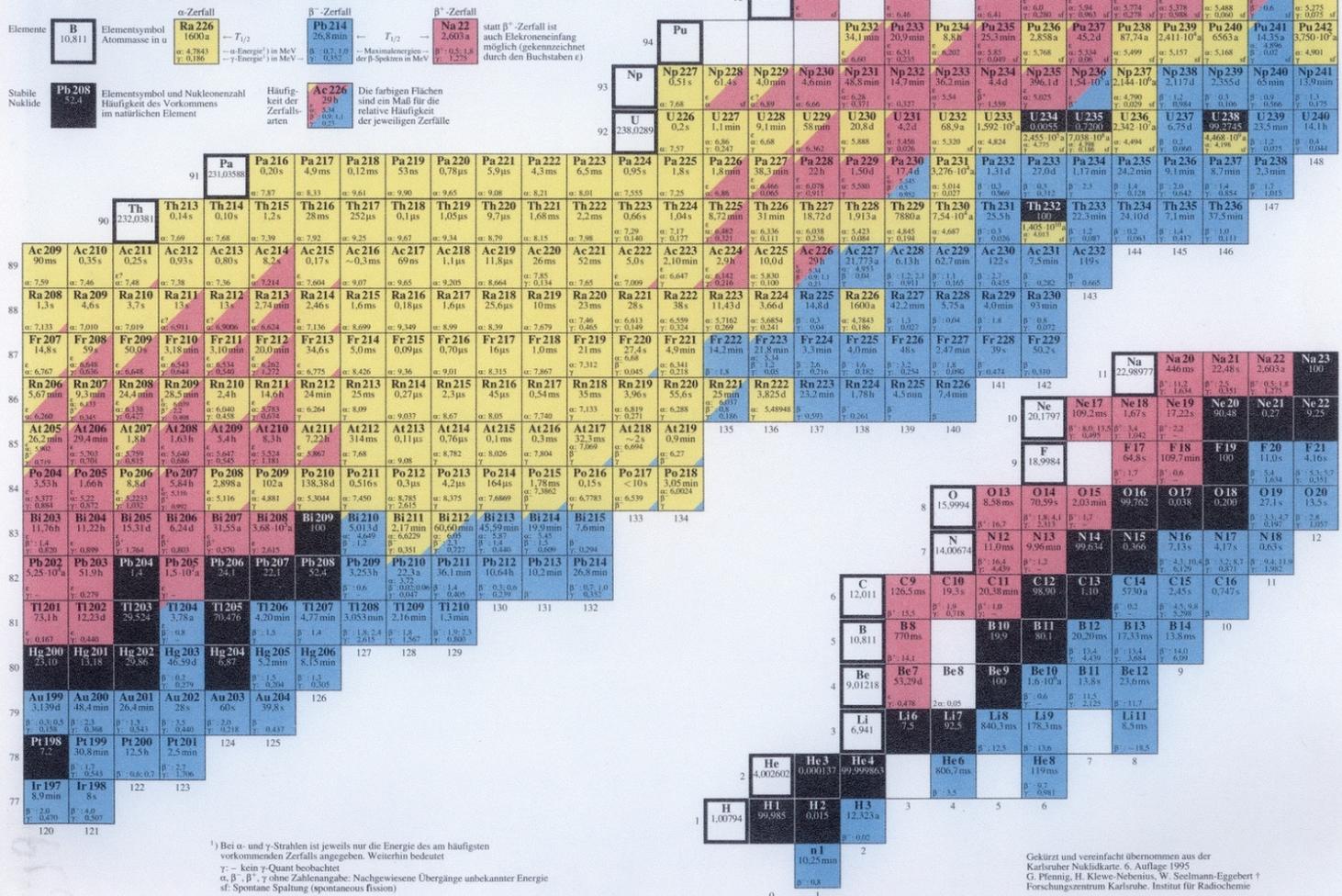
cosmic microwave radiation visible

Schwerionenkollisionen am LHC korrespondieren zu Zustandsbedingungen ungefähr hier

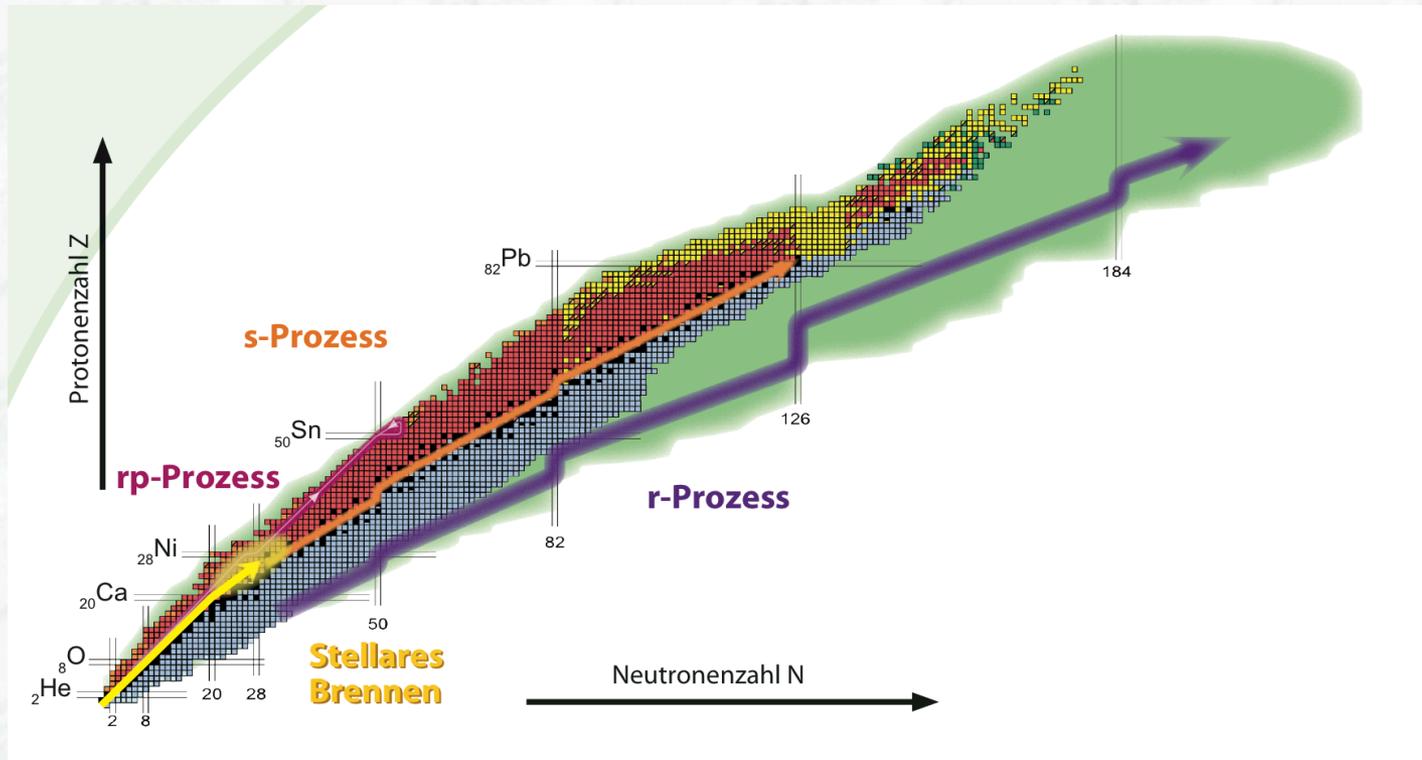


# Nuklidkarte

## Ausschnitt aus der Nuklidkarte



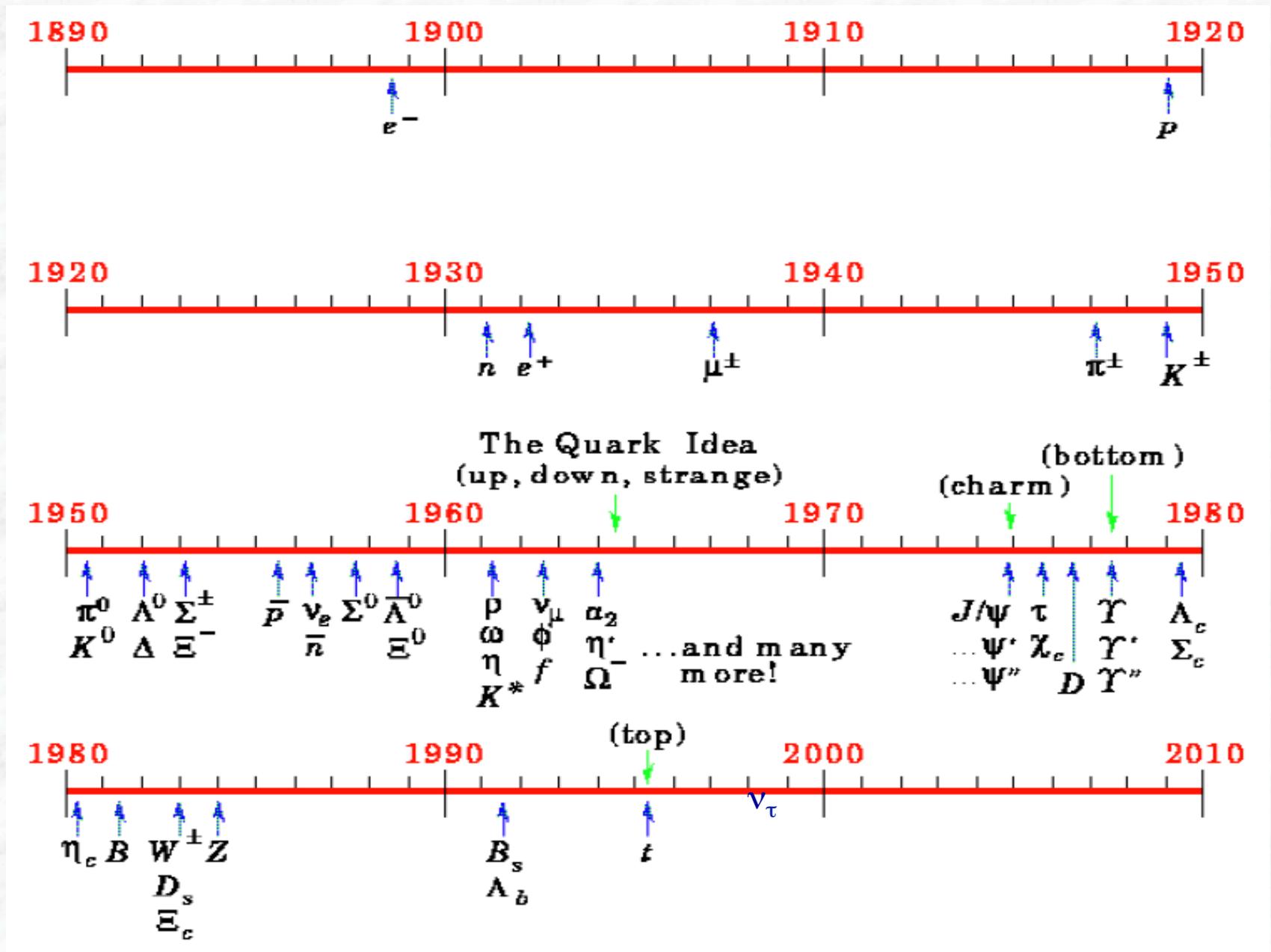
# Nuklidkarte



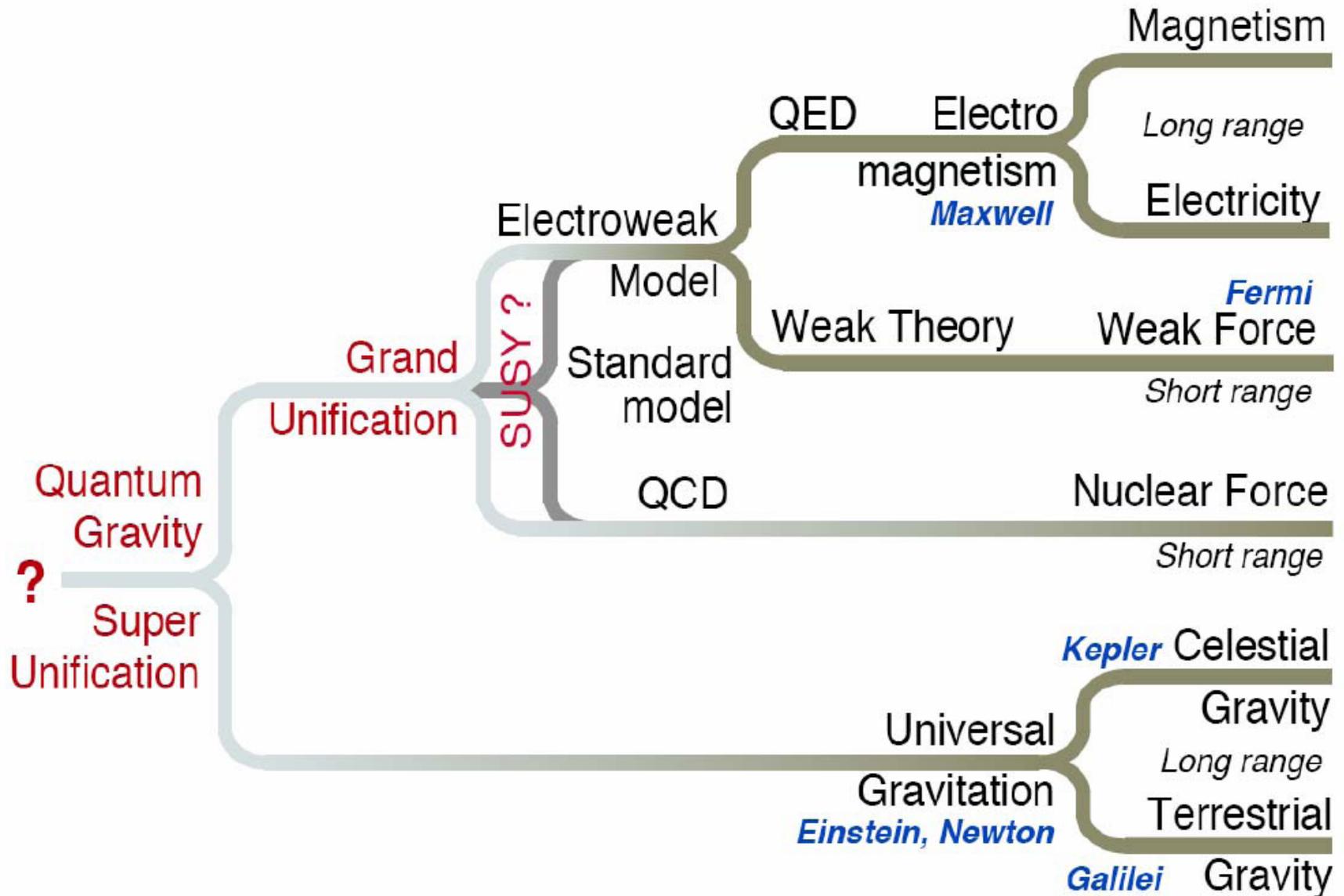
■ **Abbildung 2:** In der Nuklidkarte sind die Atomkerne (Nuklide) in der Weise angeordnet, dass die Zahl der Neutronen waagrecht und die Zahl der Protonen, die Kernladungszahl, senkrecht aufgetragen ist. Die Kernladungszahl definiert das Element. Atomkerne mit gleicher Kernladungszahl aber verschiedener Neutronenzahl nennt man Isotope eines Elements. Die stabilen Nuklide sind als schwarze Quadrate dargestellt. Die bereits bekannten, instabilen Nuklide sind durch farbige Quadrate repräsentiert: rot oder blau markiert sind Kerne mit Protonen- oder Neutronenüberschuss, die sich durch einen Beta-Zerfall umwandeln, gelb dargestellt sind Kerne, die ein Alpha-Teilchen emittieren, und grün markiert sind Kerne, die durch Spaltung zerfallen. Im hellgrünen Gebiet liegen sehr neutronreiche Isotope, deren Existenz theoretisch vorhergesagt wird.

Die verschiedenen Produktionspfade der Elementsynthese sind durch Pfeile gekennzeichnet. Die Fusion leichter Atomkerne in Sternen bringt Nuklide bis zum Eisen hervor (stellares Brennen). Die wichtigsten Produktionspfade zur Bildung schwerer Kerne sind der langsame (slow) Neutroneneinfang (s-Prozess), der ebenfalls in Sternen abläuft, und der schnelle (rapid) Neutroneneinfang (r-Prozess), der in Supernovae oder in Kollisionen von Neutronensternen passiert. Außerdem gibt es noch andere Prozesse, die zu den protonenreichen schweren Kernen führen. Einer davon ist der schnelle Protoneneinfang (rp-Prozess). Der rp- und der r-Prozess laufen durch Gebiete weitab der stabilen Isotope und sollen an der geplanten Teilchenbeschleunigeranlage FAIR systematisch erforscht werden. Die Elementsynthese in Sternen wird in dem nächsten Beitrag ausführlicher dargestellt.

# Geschichte der Teilchenentdeckungen

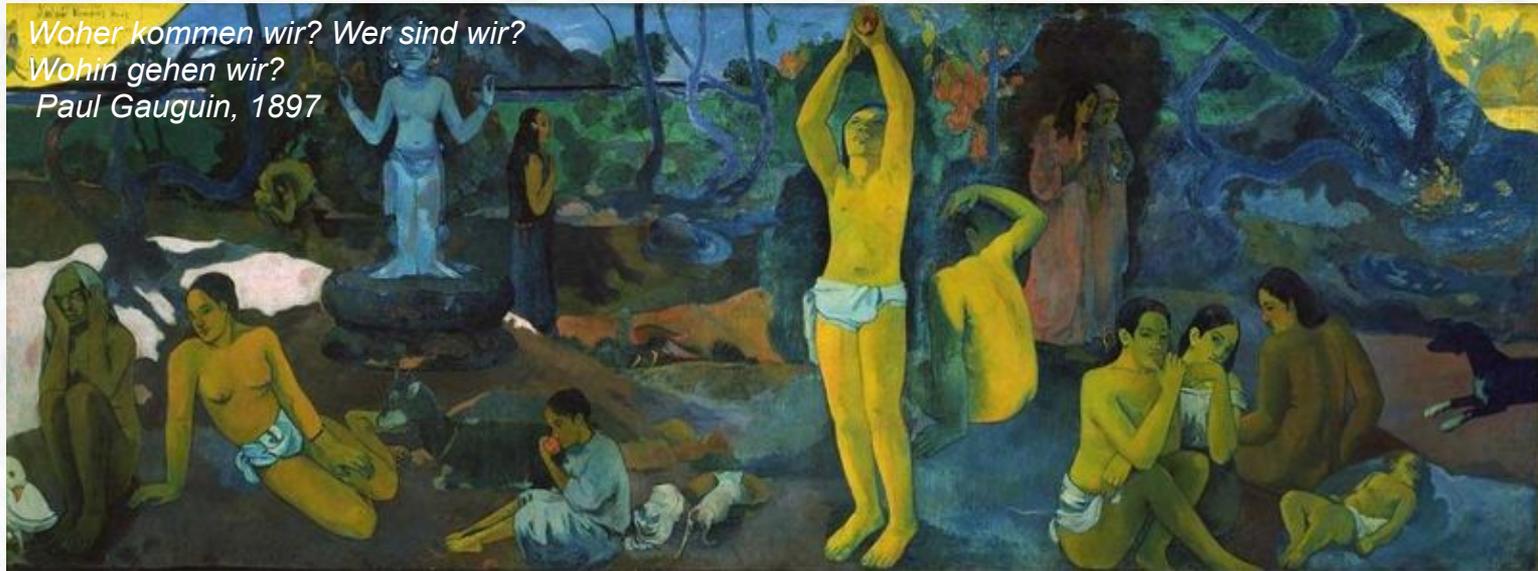


# Vereinigung der Kräfte im frühen Universum?



# Fragestellungen der Kern- und Teilchenphysik

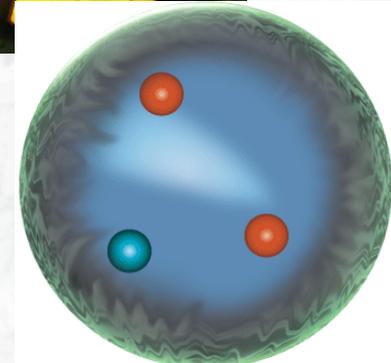
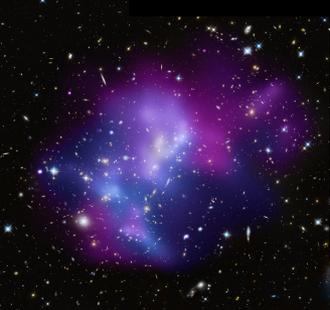
Wie ist das Universum entstanden und wohin entwickelt es sich?



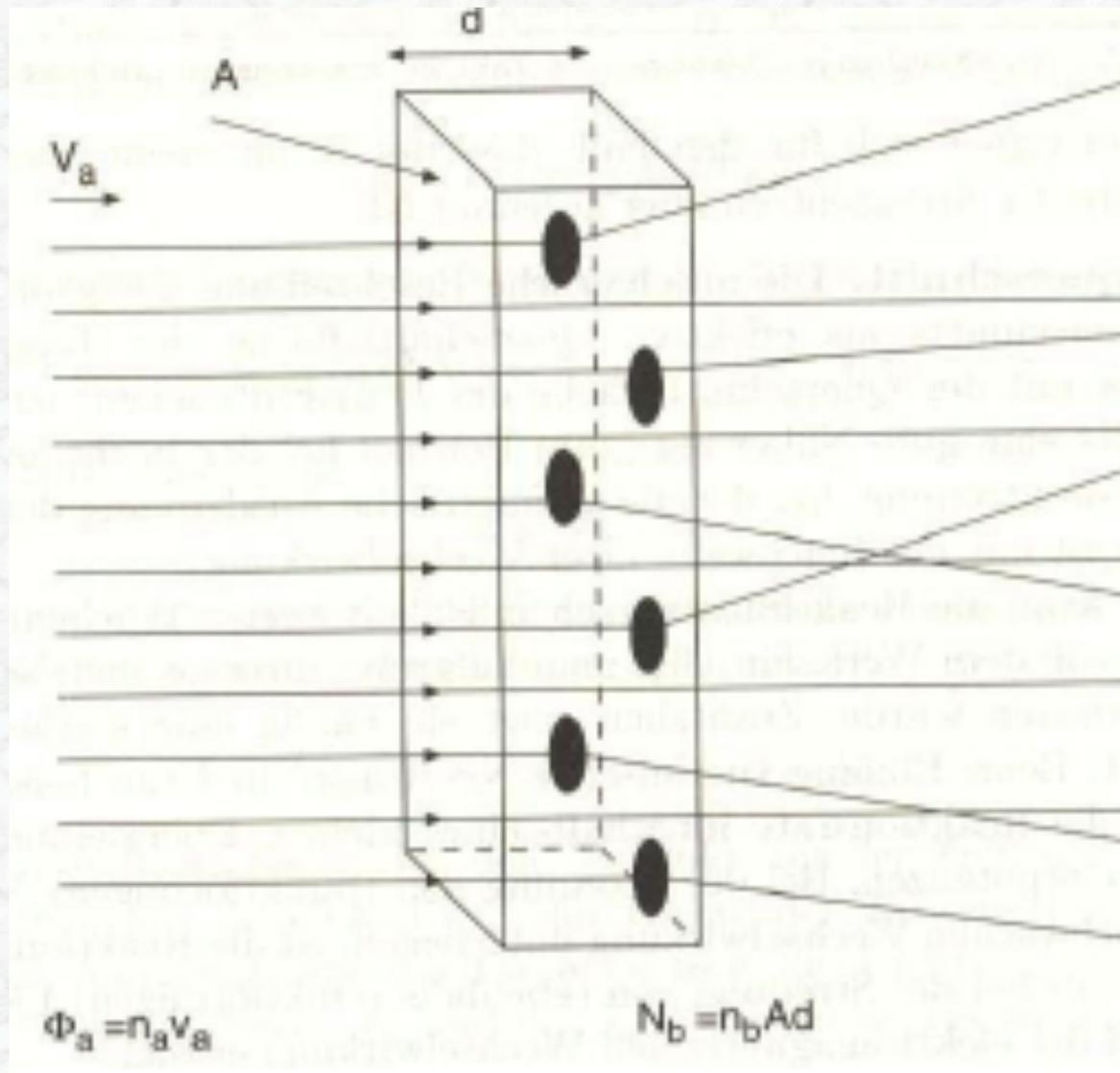
Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält ... (Goethe, Faust)



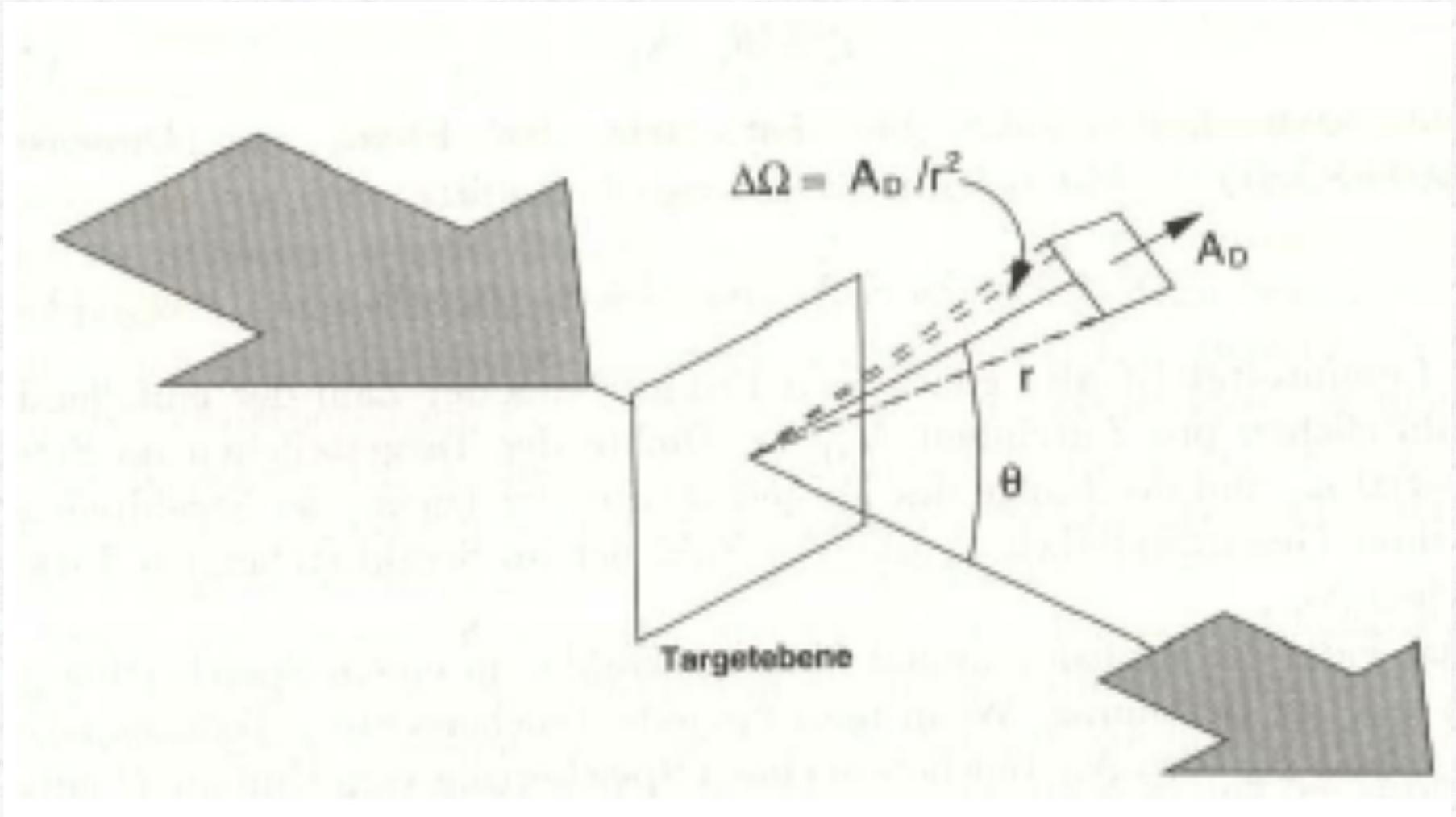
Einheitliche und umfassende  
Beschreibung der Struktur  
der Materie, der Kräfte und der Raum-Zeit  
von kleinsten Abständen ( $10^{-18}$  m)  
bis zu kosmischen Dimensionen ( $10^{25}$  m)



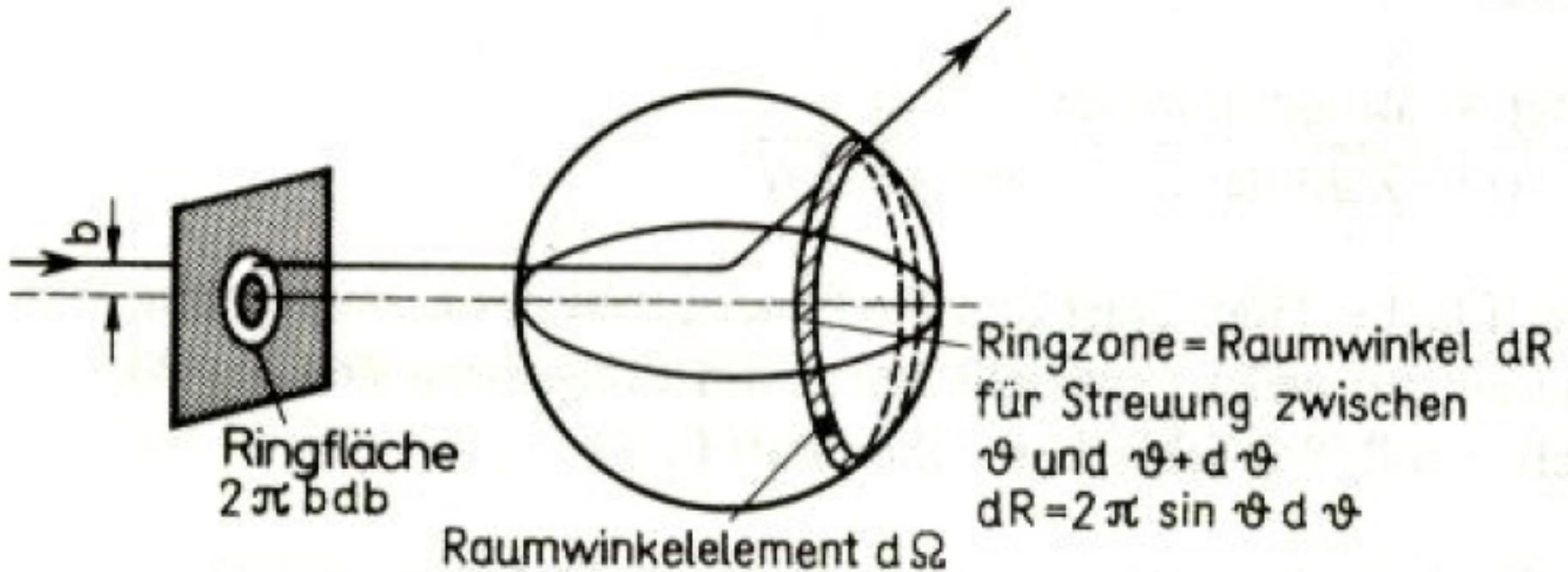
# Zur geo. Interpretation des Wirkungsquerschnitt



# Differentieller Wirkungsquerschnitt



# Geometrische Verhältnisse bei elastischer Streuung



Th. Mayer-Kuckuck, *Kernphysik*, Teubner Verlag

Zur Herleitung des Zusammenhangs zwischen  
Stossparameter  $b$  und Streuwinkel  $\theta$