

**Die Welt im Großen und Kleinen**

---

**Kosmologie und  
Teilchenphysik**

Prof. Dr. Michael Feindt

# Die Welt im Großen



Die Welt  
im Großen

Rosen

$10^0$  m  
0,001 km  
1 m



Die Welt  
im Großen

Rosenbeet  
auf dem  
CERN-  
Gelände

$10^1$  m  
0,01 km  
10 m



Die Welt  
im Großen

Luftaufnahme  
CERN

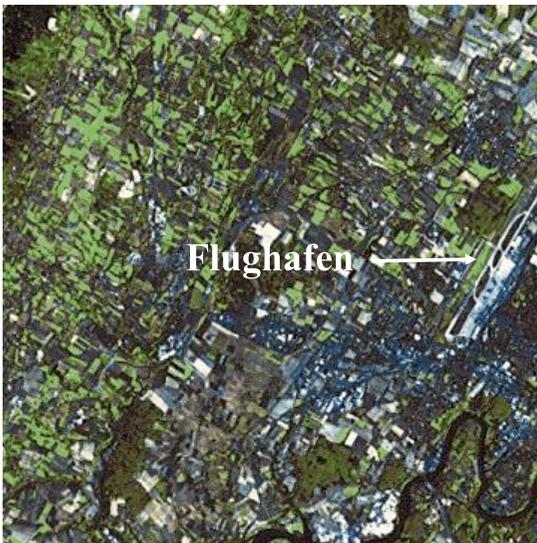
$10^2$  m  
0,1 km  
100 m



Die Welt  
im Großen

Luftaufnahme  
CERN

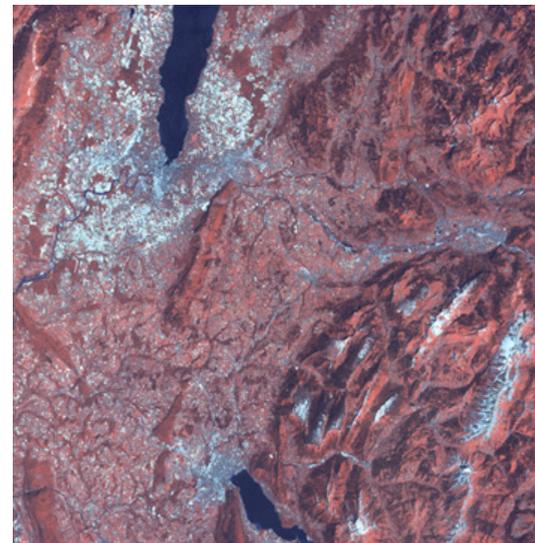
$10^3$  m  
1 km  
1 000 m



Die Welt  
im Großen

Luftaufnahme  
Genf

$10^4$  m  
10 km  
10 000 m



Die Welt  
im Großen

Genfer See und  
französische  
Alpen

$10^5$  m  
100 km  
100 000 m



Die Welt  
im Großen

Europa

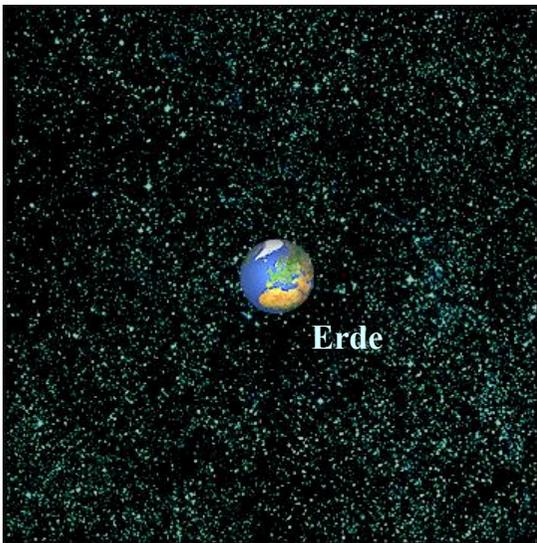
$10^6$  m  
1 000 km  
1 000 000 m



Die Welt  
im Großen

Erde

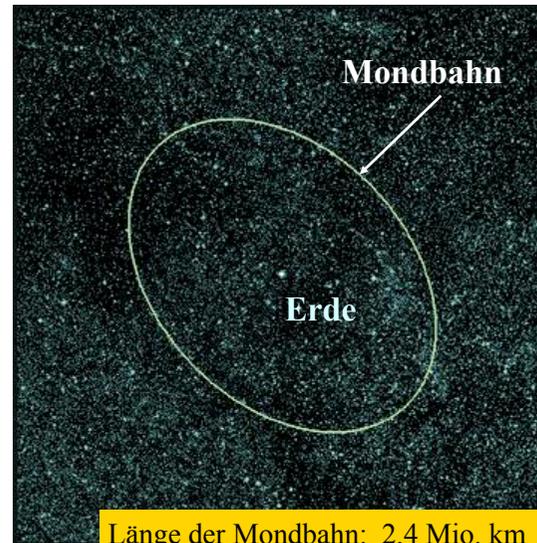
$10^7$  m  
10 000 km  
10 000 000 m



Die Welt  
im Großen

Erde

$10^8$  m  
100 000 km  
100 000 000 m

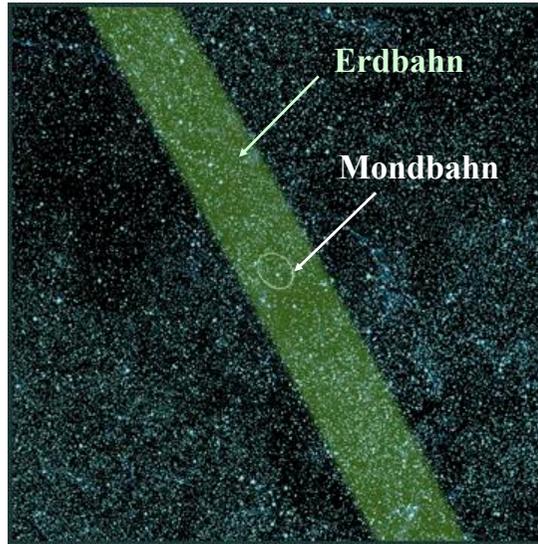


Die Welt  
im Großen

Umlaufbahn  
des  
Mondes

Länge der Mondbahn: 2,4 Mio. km  
Höhe der deutschen Staatsverschuldung  
als Turm von 1 €-Münzen: 3,2 Mio. km

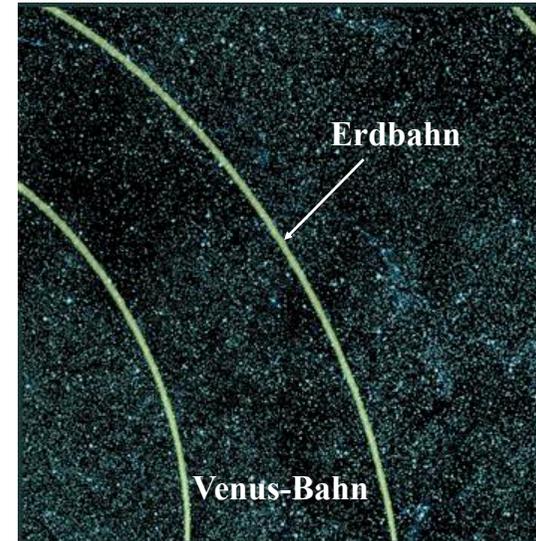
$10^9$  m  
1 Millionen km  
1 000 000 000 m



## Die Welt im Großen

Umlaufbahn  
des  
Mondes

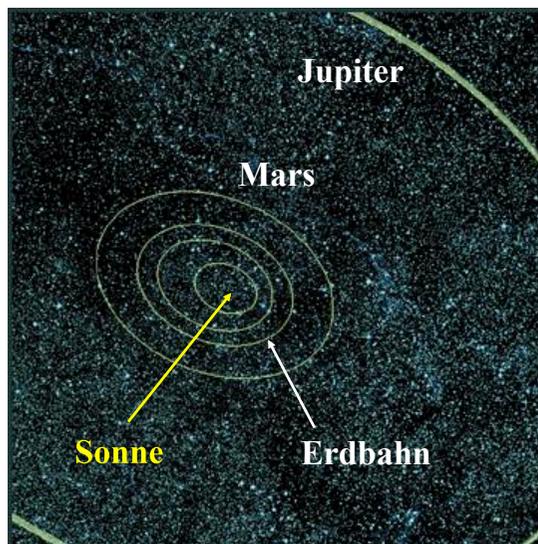
$10^{10}$  m  
10 Millionen km  
10 000 000 000 m



## Die Welt im Großen

Innere  
Planetenbahnen  
des  
Sonnensystems

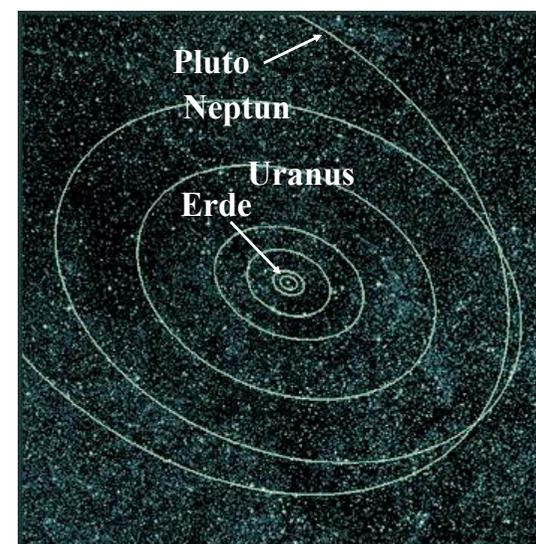
$10^{11}$  m  
100 Millionen km  
100 000 000 000 m



## Die Welt im Großen

Innere  
Planetenbahnen  
des  
Sonnensystems

$10^{12}$  m  
1 Milliarde km  
1 000 000 000 000 m



## Die Welt im Großen

Äußere  
Planetenbahnen  
des  
Sonnensystems

$10^{13}$  m  
10 Milliarden km  
10 000 000 000 000 m



## Die Welt im Großen

Äußere Planetenbahnen der Sonne

$10^{14}$  m  
100 Milliarden km  
100 000 000 000 000 m

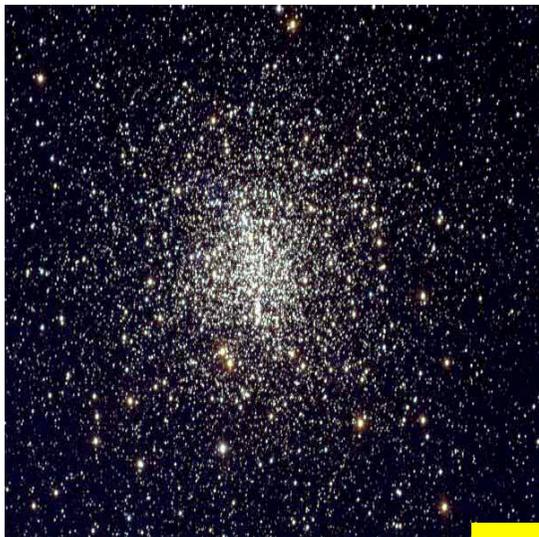


## Die Welt im Großen

Entfernung zum nächsten Fixstern Alpha Centauri

**Faktor 500**

$4.3 \cdot 10^{16}$  m  
 $\approx 4.3$  Lichtjahre  
43 000 000 000 000 000 m



## Die Welt im Großen

Entfernung zum nächsten Sternhaufen M4

**Faktor 2000**

$7 \cdot 10^{19}$  m  
 $\approx 7000$  Lichtjahre  
70 000 000 000 000 000 000 m



## Die Welt im Großen

Spiralgalaxie

$10^{21}$  m  
 $\approx 100\,000$  Lichtjahre  
1 000 000 000 000 000 000 000 m



Die Welt  
im Großen

Galaxie  
mit Satelliten-  
galaxien

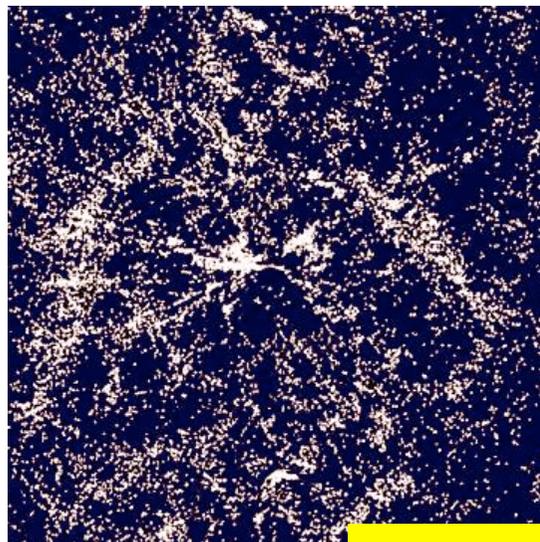
$10^{22}$  m  
≈ 1 Millionen Lichtjahre  
10 000 000 000 000 000 000 000 m



Die Welt  
im Großen

Galaxien-  
haufen

$10^{23}$  m  
≈ 10 Millionen Lichtjahre  
100 000 000 000 000 000 000 000 m

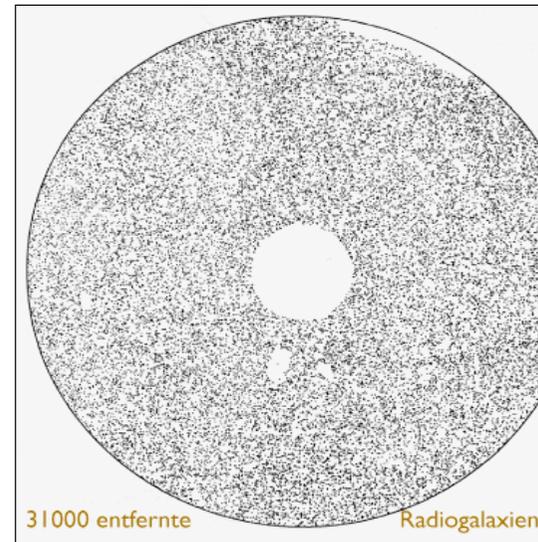


Die Welt  
im Großen

Struktur in  
Verteilung der  
Galaxien:  
Blasen und  
Löcher

$10^{25}$  m  
≈ 1 Milliarde Lichtjahre  
100 000 000 000 000 000 000 000 000 m

**Faktor 100**



Die Welt  
im Großen

Homogenes  
Universum

$10^{26}$  m  
≈ 10 Milliarden Lichtjahre  
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 m

# Die Welt im Kleinen



Die Welt  
im Kleinen

Rosen

$10^0$  m  
0,001 km  
1 m



Die Welt  
im Kleinen

Rosenblatt

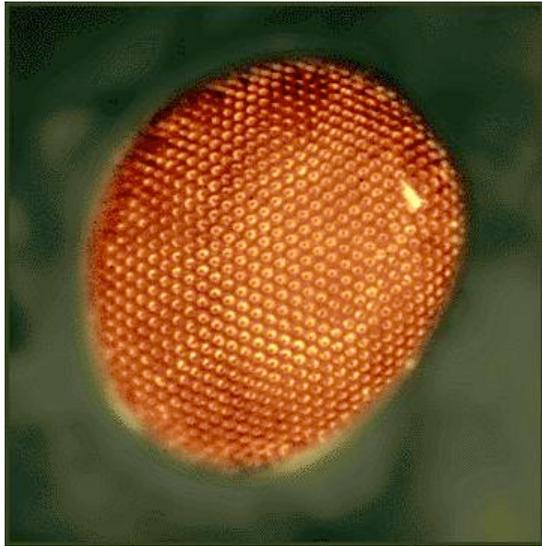
$10^{-1}$  m  
1 dm  
0.1 m



Die Welt  
im Kleinen

Fliege

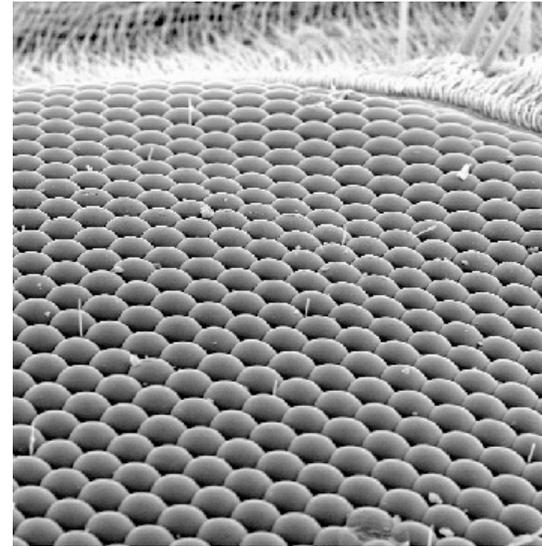
$10^{-2}$  m  
1 cm  
0.01 m



Die Welt  
im Kleinen

Fliegenauge

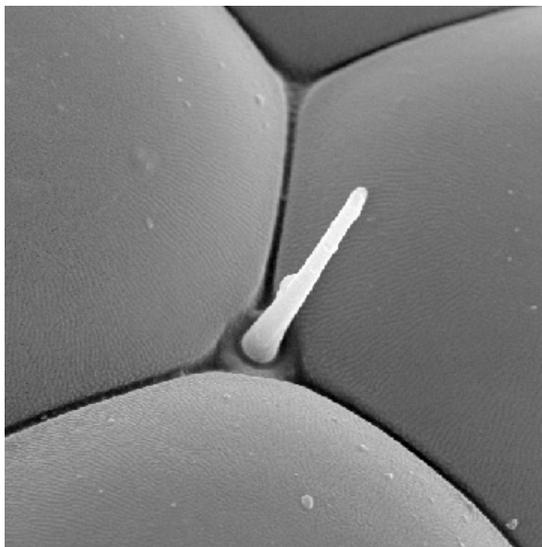
$10^{-3}$  m  
1 mm  
0.001 m



Die Welt  
im Kleinen

Fliegenauge

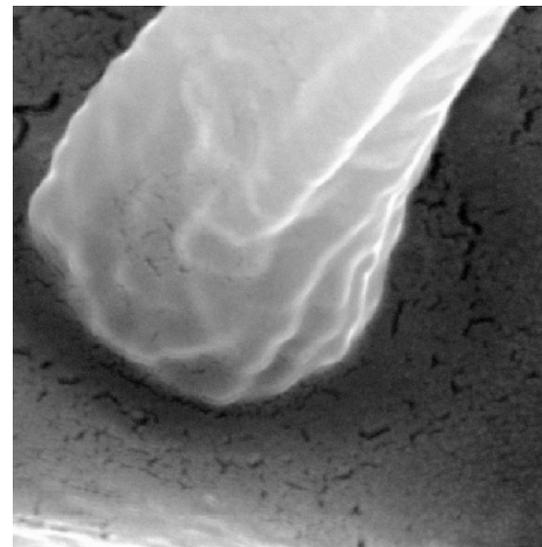
$10^{-4}$  m  
100  $\mu$  m  
0.0001 m



Die Welt  
im Kleinen

Detail im  
Fliegenauge

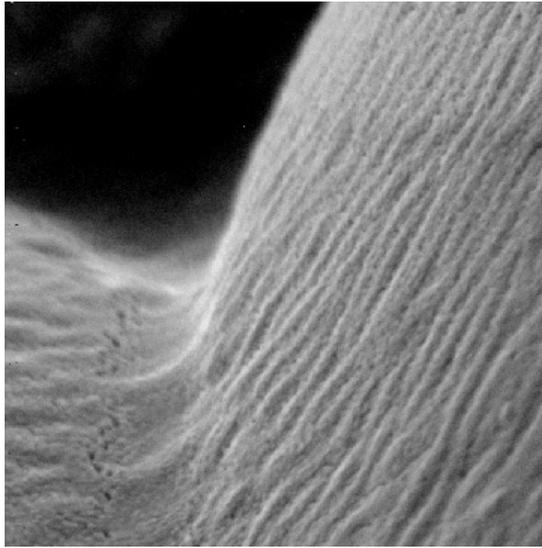
$10^{-5}$  m  
10  $\mu$  m  
0.00001 m



Die Welt  
im Kleinen

Elektronen-  
mikroskop-  
Aufnahme

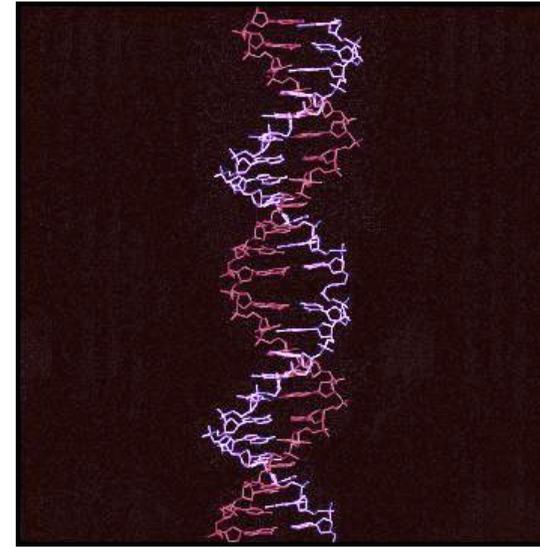
$10^{-6}$  m  
1  $\mu$  m  
0.000001 m



## Die Welt im Kleinen

Elektronen-  
mikroskop-  
Aufnahme

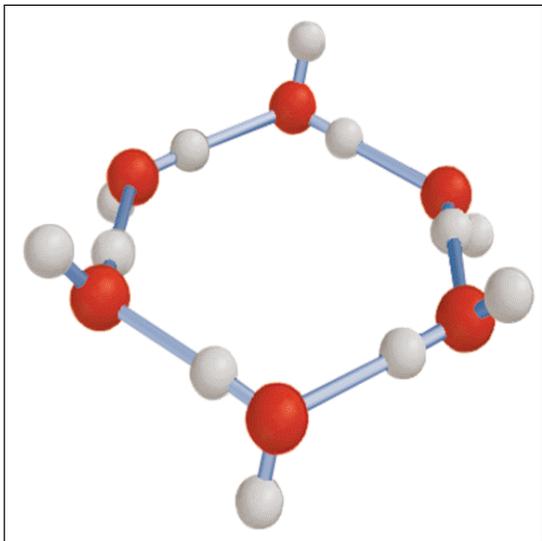
$10^{-7}$  m  
100 nm  
0.000 000 1 m



## Die Welt im Kleinen

DNS-Molekül

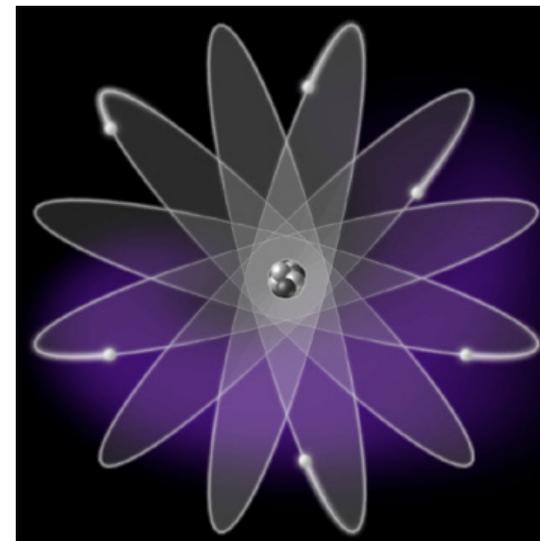
$10^{-8}$  m  
10 nm  
0.000 000 01 m



## Die Welt im Kleinen

Molekül

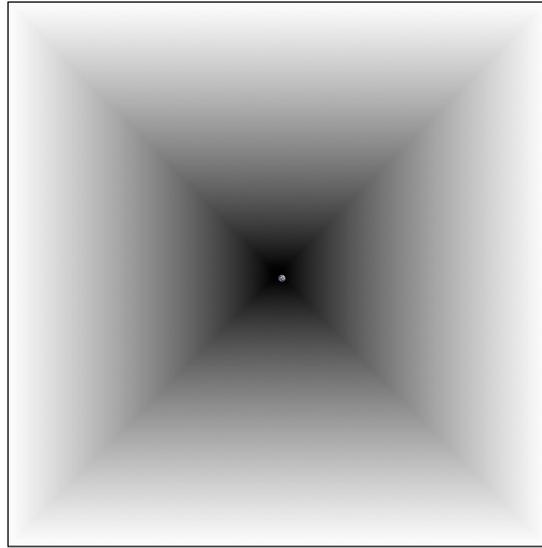
$10^{-9}$  m  
1 nm  
0.000 000 001 m



## Die Welt im Kleinen

Atome  
bestehen aus  
Kern und  
Elektronenhülle

$10^{-10}$  m  
0.1 nm  
0.000 000 000 1 m



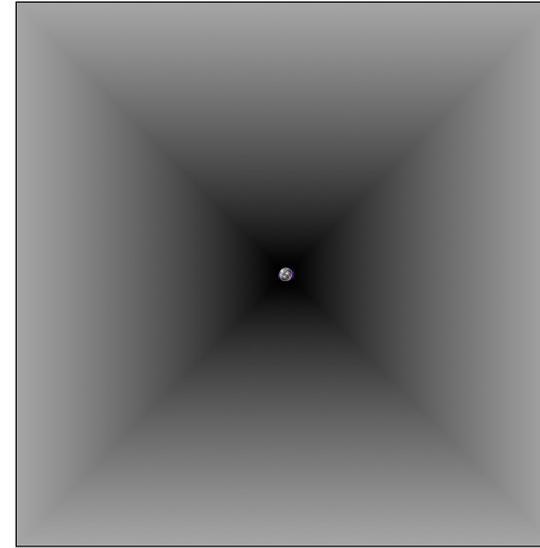
## Die Welt im Kleinen

Atome sind  
fast leer,  
der Kern  
ist sehr klein

$10^{-11}$  m

10 pm

0.000 000 000 01 m



## Die Welt im Kleinen

Atome sind  
fast leer,  
der Kern  
ist sehr klein

$10^{-12}$  m

1 pm

0.000 000 000 001 m



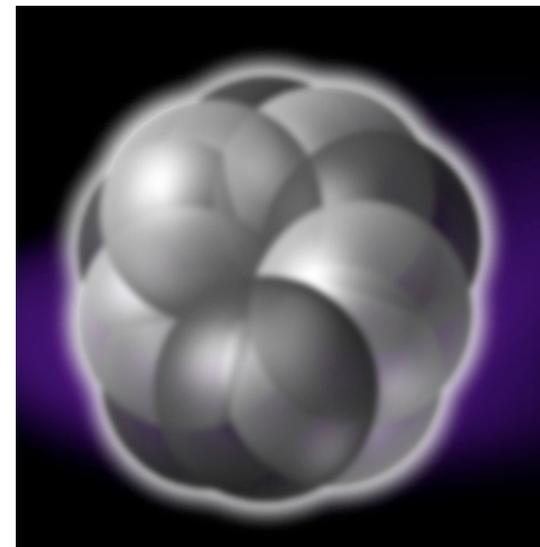
## Die Welt im Kleinen

Radius des  
Kerns nur  
ca. 1/10.000  
der innersten  
Elektronenbahn

$10^{-13}$  m

100 fm

0.000 000 000 000 1 m



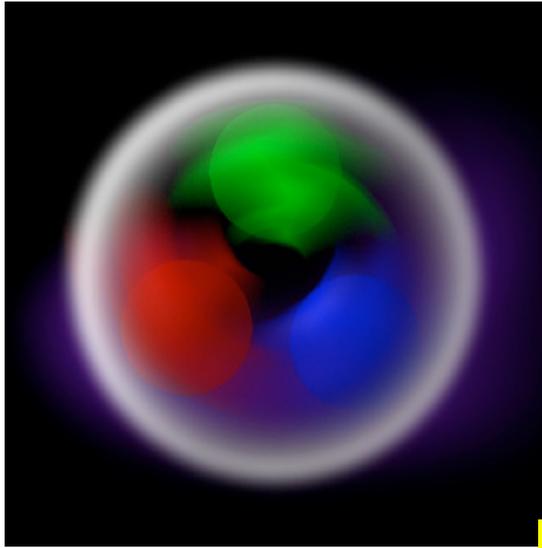
## Die Welt im Kleinen

Atomkerne  
bestehen aus  
Protonen und  
Neutronen

$10^{-14}$  m

10 fm

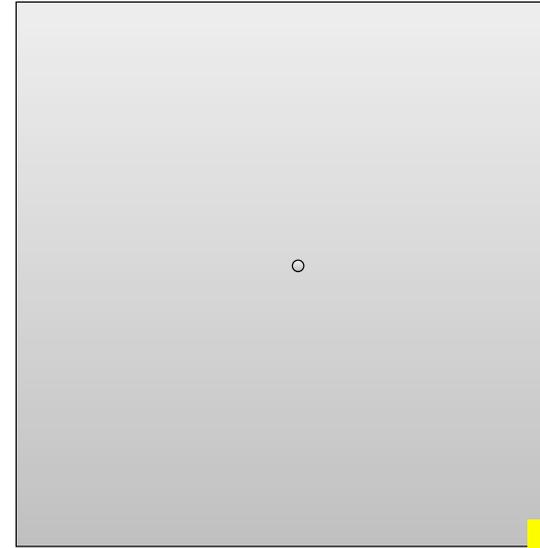
0.000 000 000 000 01 m



Die Welt  
im Kleinen

Proton/Neutron  
bestehen  
aus Quarks

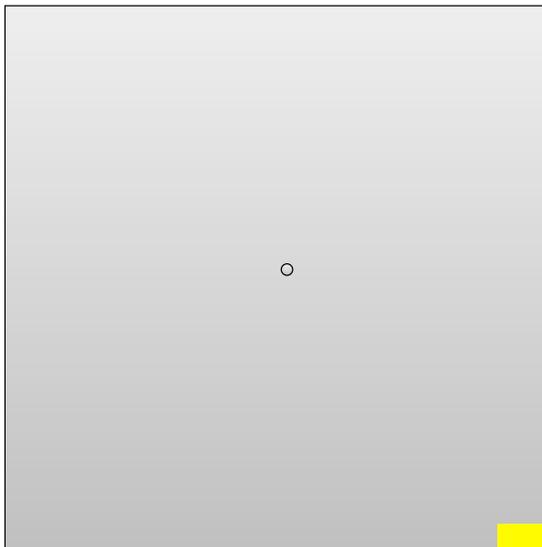
$10^{-15}$  m  
1 fm  
0.000 000 000 000 001 m



Die Welt  
im Kleinen

Punktförmige  
Quarks und  
Leptonen

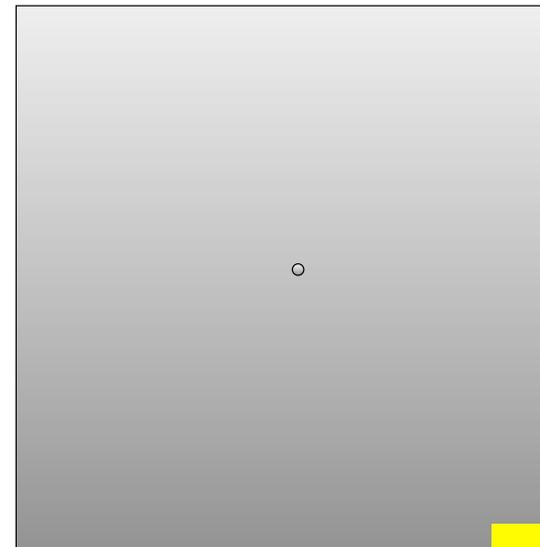
$10^{-16}$  m  
0.1 fm  
0.000 000 000 000 000 1 m



Die Welt  
im Kleinen

Punktförmige  
Quarks und  
Leptonen

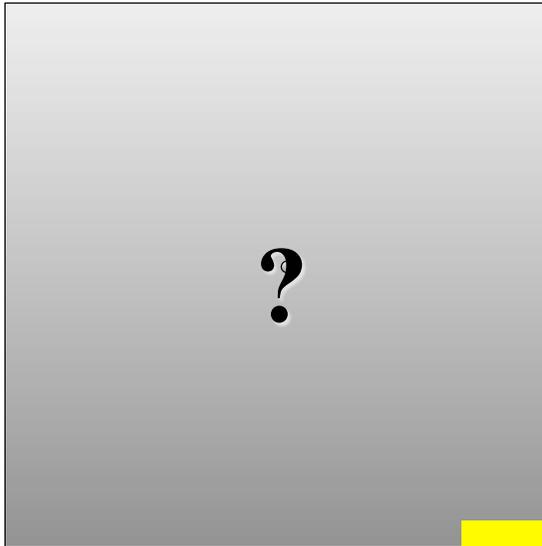
$10^{-17}$  m  
0.01 fm  
0.000 000 000 000 000 01 m



Die Welt  
im Kleinen

Punktförmige  
Quarks und  
Leptonen

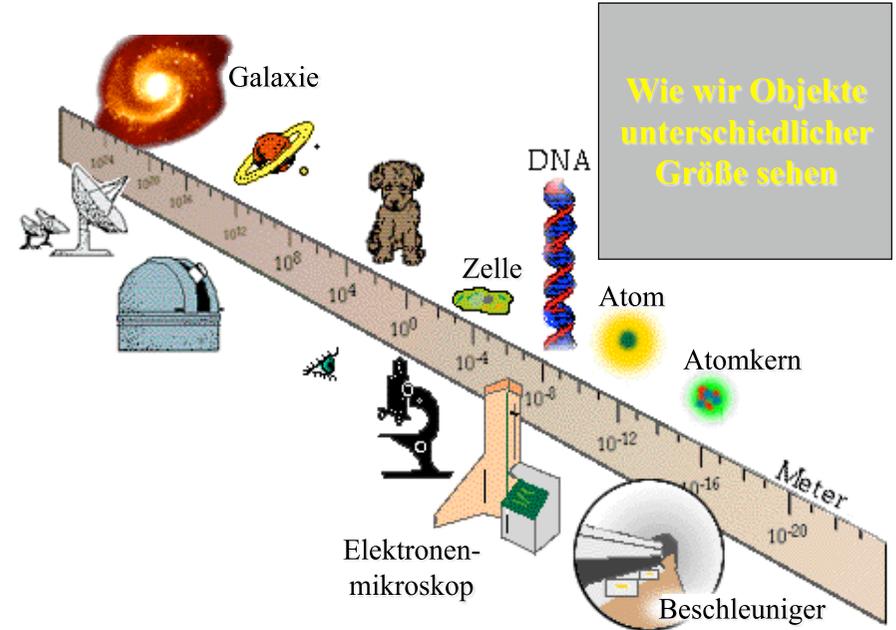
$10^{-18}$  m  
0.001 fm  
0.000 000 000 000 000 001 m



## Die Welt im Kleinen

Quarks und Leptonen wirklich gar keine Ausdehnung?

$10^{-19}$  m  
0.000 1 fm  
0. 000 000 000 000 000 000 1 m

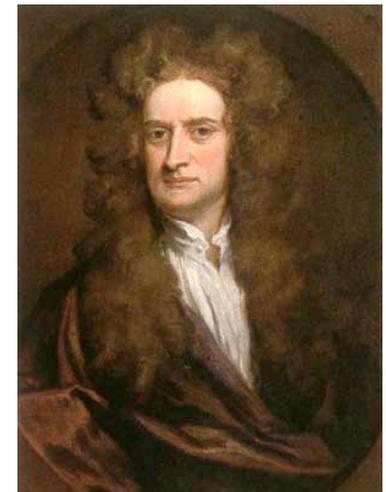


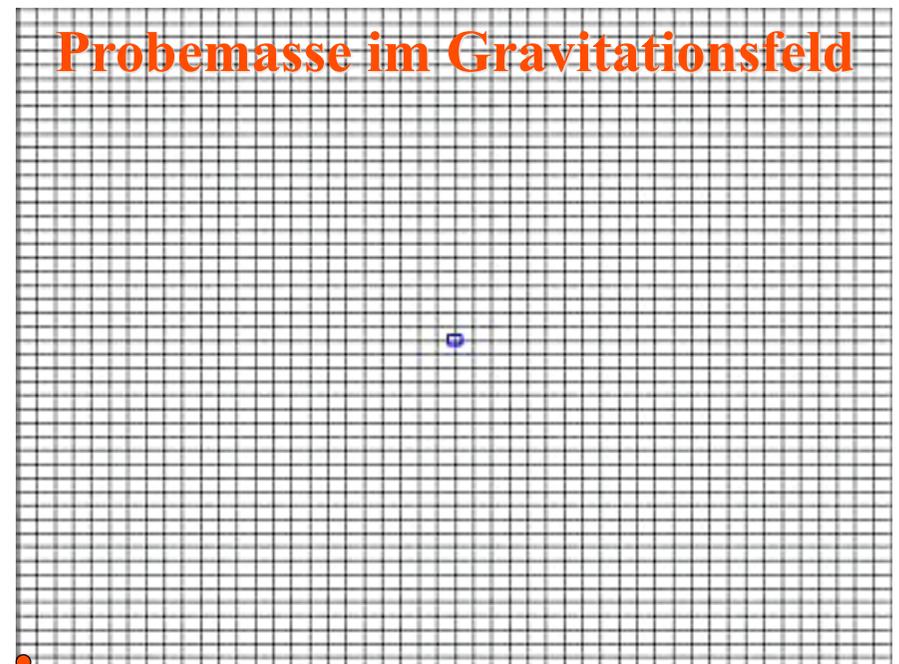
# Gravitation

Schwerkraft , Erdanziehung  
Bewegung des Mondes um die Erde  
Bewegung der Planeten um die Sonne  
Sterne und Galaxien  
Galaxien und Galaxienhaufen  
Universum

Erste Theorie:

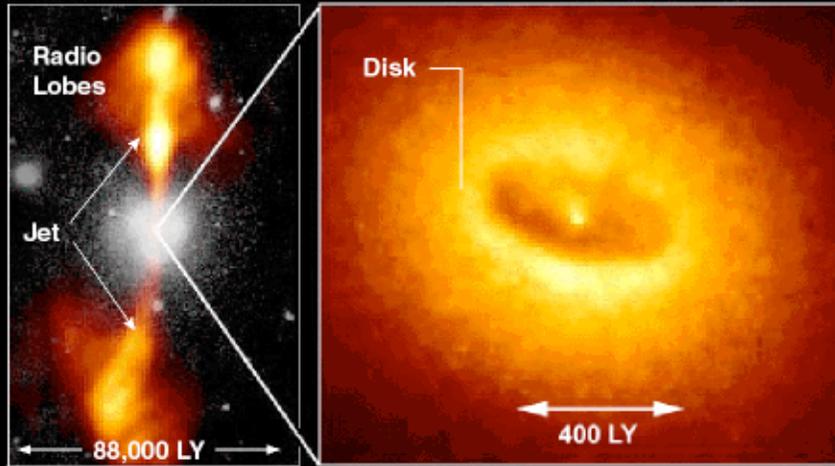
Isaac Newton





# Schwarzes Loch

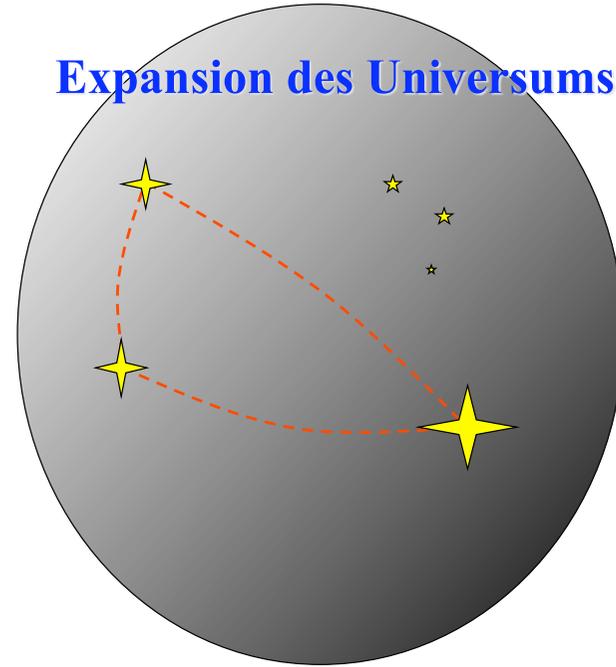
NGC 4261 HST WFPC 2



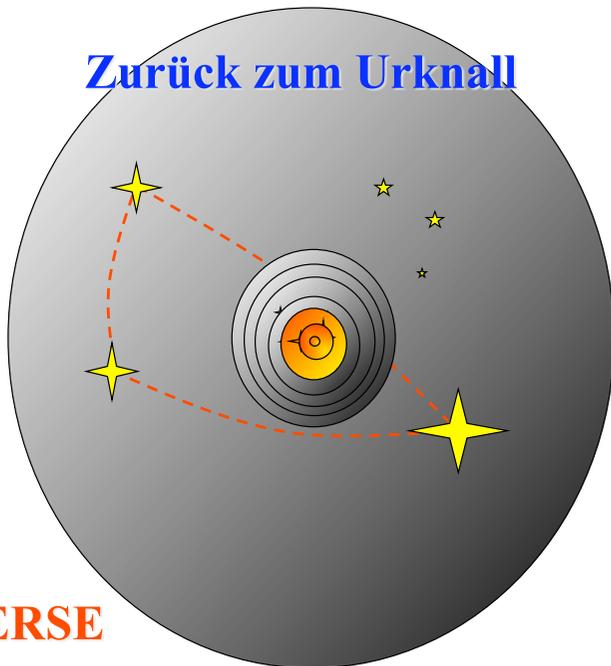
Ground Radio + Optical

Hubble Space Telescope

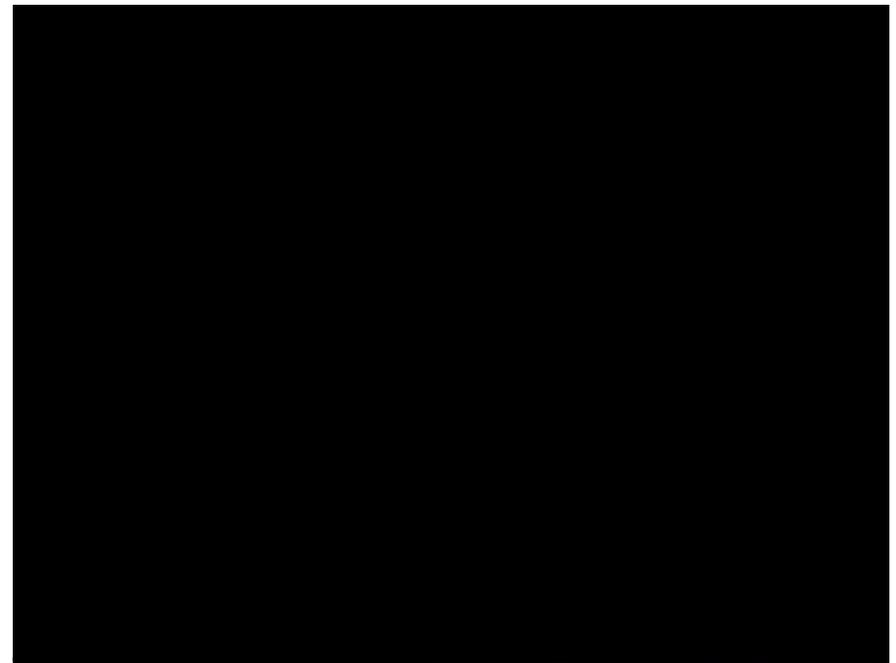
## Expansion des Universums



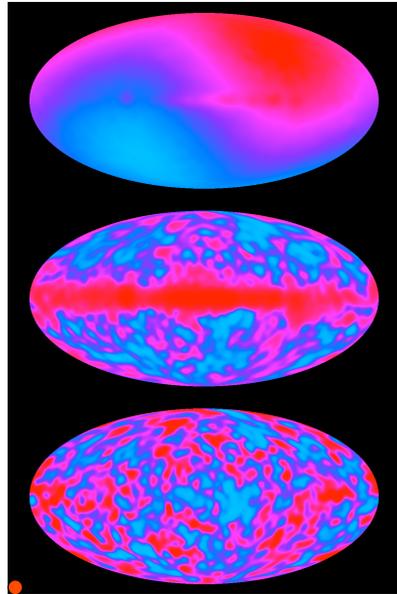
## Zurück zum Urknall



**REVERSE**



## Der Nachhall des Urknalls

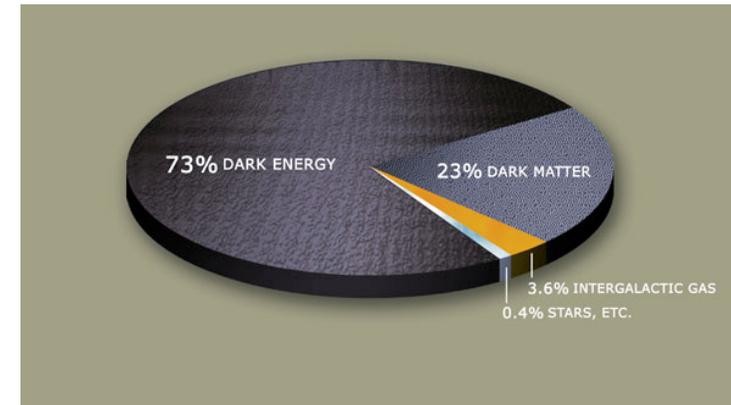


**Kosmische  
Hintergrundstrahlung:  
extrem homogen**



**Cobe-Satellit**

## Masse und Energie im Universum



Wir verstehen nur ca 4% der Masse des Universums



## Elektromagnetismus

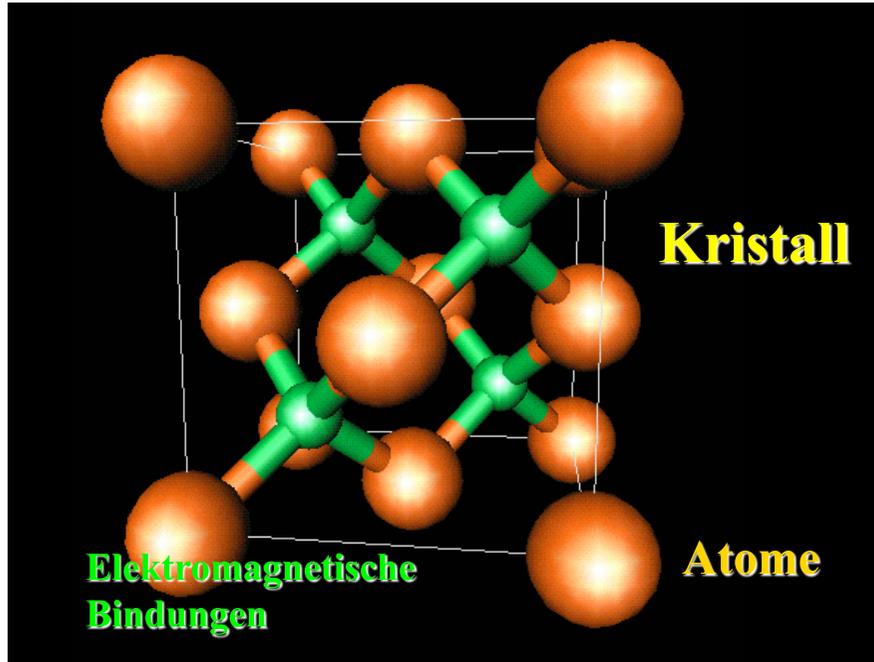
Blitze

Elektrische Ladungen,  
elektrischer Strom

Magnetismus

Chemische Bindungen,  
Moleküle und Festkörper

Bindung von Atomen



## Struktur der Atome

Rutherford - Streuexperiment



Es gibt einen kleinen harten Kern im Atom

Das Atom ist im Wesentlichen leer!

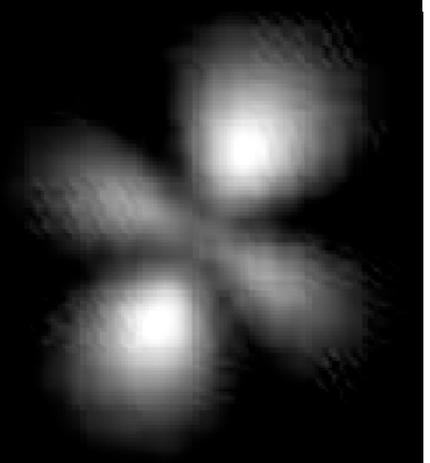
Bohrsches Atommodell  
H-Atom

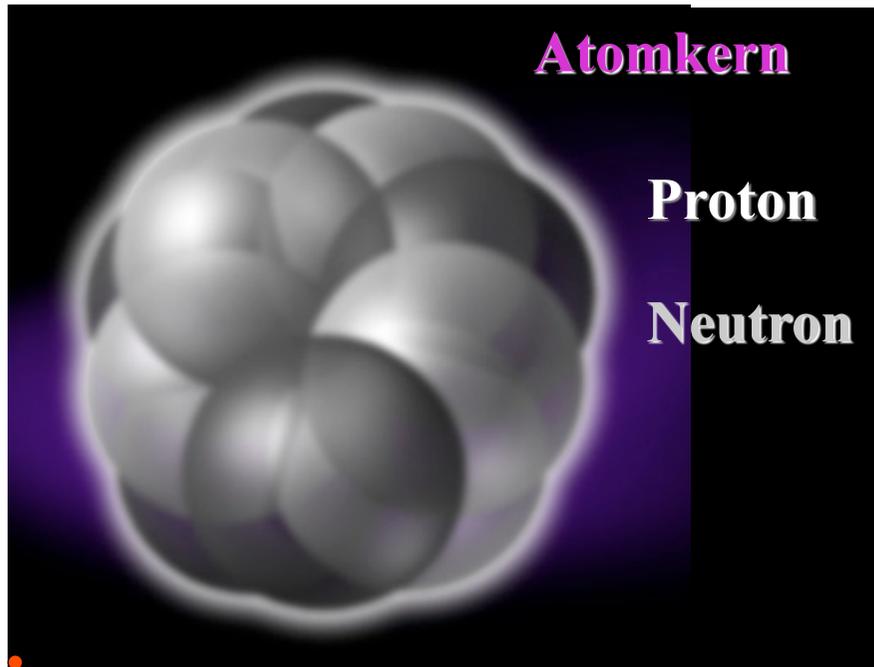
99,999 999  
999 999%  
des Atoms  
ist leer !



## Quantenmechanisches Atom

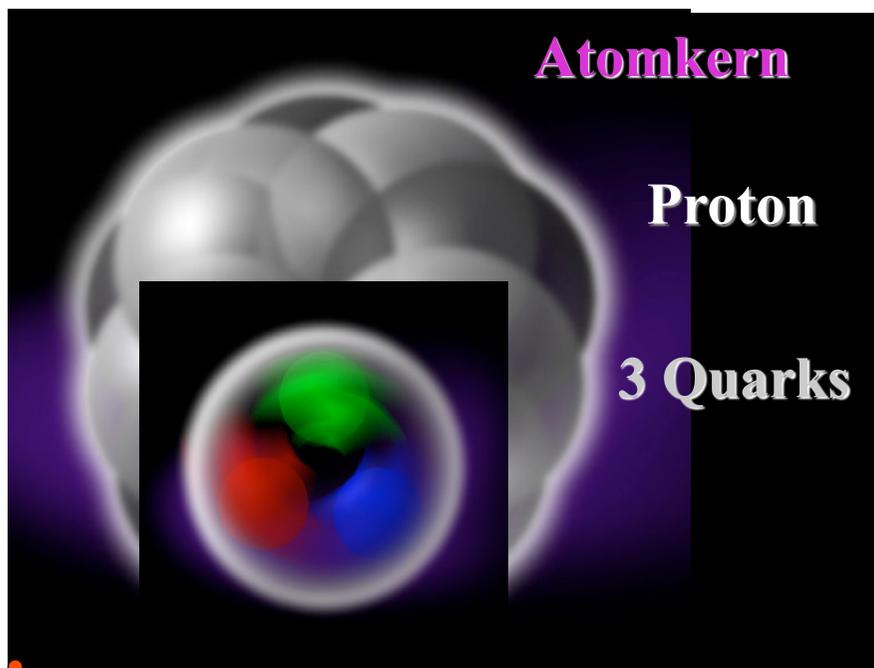
Heisenbergsche Unschärferelation





## **Starke Wechselwirkung**

Atom- und Wasserstoffbombe  
Energieerzeugung in der Sonne  
(Solarenergie=Kernfusion)  
Energieerzeugung durch  
Kernspaltung und Kernfusion  
Zusammenhalt der Kerne  
Zusammenhalt der Quarks in  
Protonen und Neutronen



## **Schwache Wechselwirkung**

Kernreaktionen in der Sonne  
Radioaktiver Kernzerfall  
Umwandlung von chemischen  
Elementen (Alchemie)  
Zerfall des Neutrons  
Übergänge zwischen  
verschiedenen Quark-Sorten

# Elementare Bestandteile der Materie 1900

**Periodensystem der Elemente (PSE)**  
<http://www.chemie-master.de>  
 Die Zahl über dem Symbol gibt die Atommasse an (Molareibet u).  
 Die Ordnungszahl (= Kernladungszahl) steht unter dem Symbol.  
 □ Metalle (rot) □ Halbmetalle (Übergangsmetalle) (grün) □ Nichtmetalle (blau) □ Edelgase (gelb)

Hauptgruppen		Periodensystem der Elemente (PSE)																Hauptgruppen							
I	II																	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1.0 1 H Wasserstoff																		4.0 2 He Helium							
6.9 3 Li Lithium	9.0 4 Be Beryllium																	10.8 5 B Bor	12.0 6 C Kohlenstoff	14.0 7 N Stickstoff	16.0 8 O Sauerstoff	19.0 9 F Fluor	20.2 10 Ne Neon		
23.0 11 Na Natrium	24.3 12 Mg Magnesium	Nebengruppen																27.0 13 Al Aluminium	28.1 14 Si Silizium	31.0 15 P Phosphor	32.1 16 S Schwefel	35.5 17 Cl Chlor	39.9 18 Ar Argon		
39.1 19 K Kalium	40.1 20 Ca Calcium	45.0 21 Sc Scandium	47.9 22 Ti Titan	50.9 23 V Vanadium	52.0 24 Cr Chrom	54.9 25 Mn Mangan	55.8 26 Fe Eisen	58.9 27 Co Cobalt	58.7 28 Ni Nickel	63.5 29 Cu Kupfer	65.4 30 Zn Zink	69.7 31 Ga Gallium	72.6 32 Ge Germanium	74.9 33 As Arsen	78.9 34 Se Selen	85.4 35 Br Brom	89.9 36 Kr Krypton								
85.5 37 Rb Rubidium	86.9 38 Sr Strontium	88.9 39 Y Yttrium	91.2 40 Zr Zirkon	92.9 41 Nb Niob	95.9 42 Mo Molybdän	97.9 43 Tc Technetium	101.1 44 Ru Ruthenium	106.4 45 Rh Rodium	106.9 46 Pd Platin	107.9 47 Ag Silber	132.9 48 Cd Cadmium	127.6 49 In Indium	127.8 50 Sn Zinn	127.6 51 Sb Antimon	127.6 52 Te Tellur	127.6 53 I Jod	132.9 54 Xe Xenon								
132.9 55 Cs Cäsium	132.9 56 Ba Baryum	173.0 57-71 Lanthanoid	175.0 58 Ce Cer	177.0 59 Pr Praseodym	178.5 60 Nd Neodym	180.9 61 Pm Promethium	183.8 62 Sm Samarium	186.2 63 Eu Europium	187.7 64 Gd Gadolinium	188.9 65 Tb Terbium	190.2 66 Dy Dysprosium	191.2 67 Ho Holmium	192.2 68 Er Erbium	193.1 69 Tm Thulium	194.0 70 Yb Ytterbium	197.0 71 Lu Lutetium	200.5 72 Hf Hafnium								
223.0 87 Fr Francium	226.0 88 Ra Radium	227.0 89-103 Aktinoid	227.0 89 Ac Actinium	228.0 90 Th Thorium	231.0 91 Pa Protactinium	232.0 92 U Uran	238.0 93 Np Neptunium	241.0 94 Pu Plutonium	244.0 95 Am Americium	247.0 96 Cm Curium	250.0 97 Bk Berkelium	252.0 98 Cf Californium	257.0 99 Es Einsteinium	261.0 100 Fm Fermium	265.0 101 Md Mendelevium	269.0 102 No Nobelium	272.0 103 Lr Lawrencium								
Lanthanoid																									
Aktinoid																									

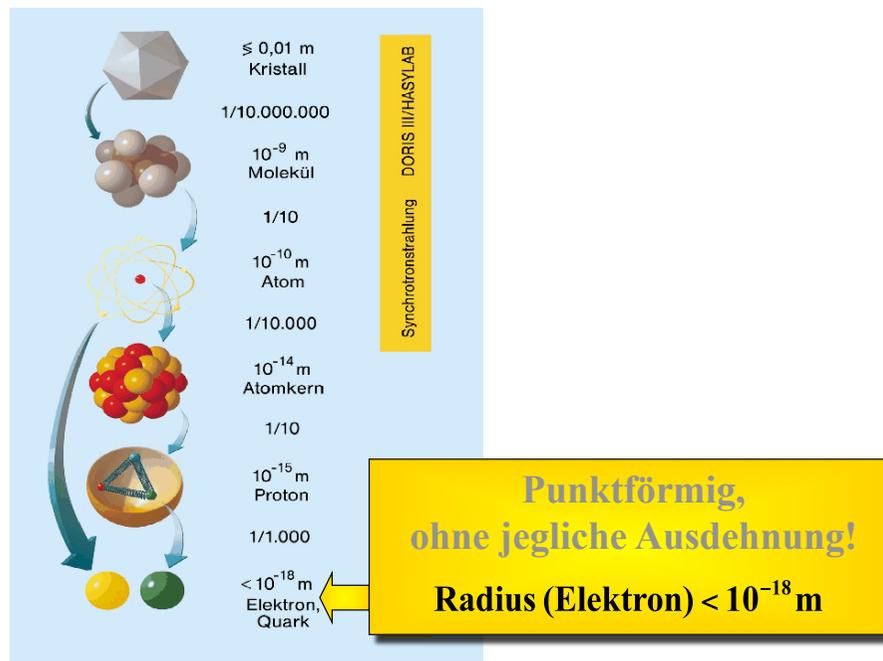
# Elementare Bestandteile der Materie 2000

Quarks :



Bausteine der Materie des heutigen Universums

Leptonen :



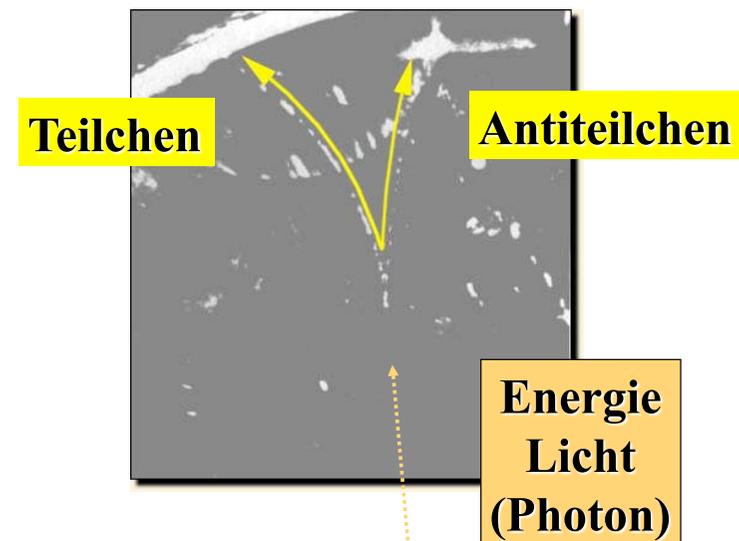
**Untersuchung der Quarks und Leptonen**

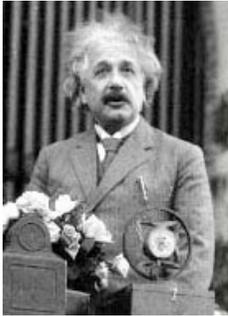
Starkes Mikroskop  
 =  
 Streuexperiment bei hohen Energien

große Teilchenbeschleuniger



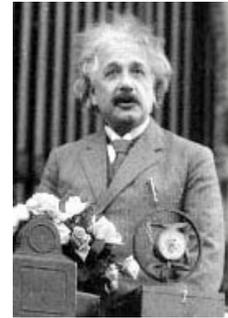
## Feynman-Diagramm für Streuprozesse

$$A = (-ie)^2 \bar{u}(p_1) \gamma_\mu u(p_2) \cdot \frac{-g_{\mu\nu} + \frac{k_\mu k_\nu}{M^2}}{k^2 - M^2} \cdot \bar{u}(p_1') \gamma_\nu u(p_2')$$




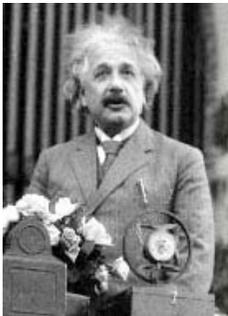
$$E = m \cdot c^2$$

Originalton Einstein



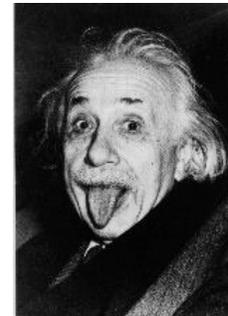
$$E = m \cdot c^2$$

Aus der speziellen Relativitätstheorie folgt, daß Masse und Energie beides nur verschiedene Erscheinungsformen derselben Sache sind -- eine etwas ungewöhnliche Betrachtungsweise für einen durchschnittlichen Geist.



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

Weiterhin zeigt die Gleichung E gleich m mal c-Quadrat, in der Energie mit Masse, multipliziert mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit, gleichgesetzt wird, daß eine sehr kleine Menge Masse in eine sehr große Menge Energie umgewandelt werden kann und umgekehrt.



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

Masse und Energie sind sogar äquivalent nach der obengenannten Formel. Dies wurde von Cockcroft und Walton 1932 experimentell demonstriert.

# Annihilation Feynman-Diagramm



# Der LEP - Speicherring am CERN



# Das Forschungslabor CERN bei Genf



# Blick in den Tunnel: 27 km Magnete und Kavitäten





**Magneten von LEP**



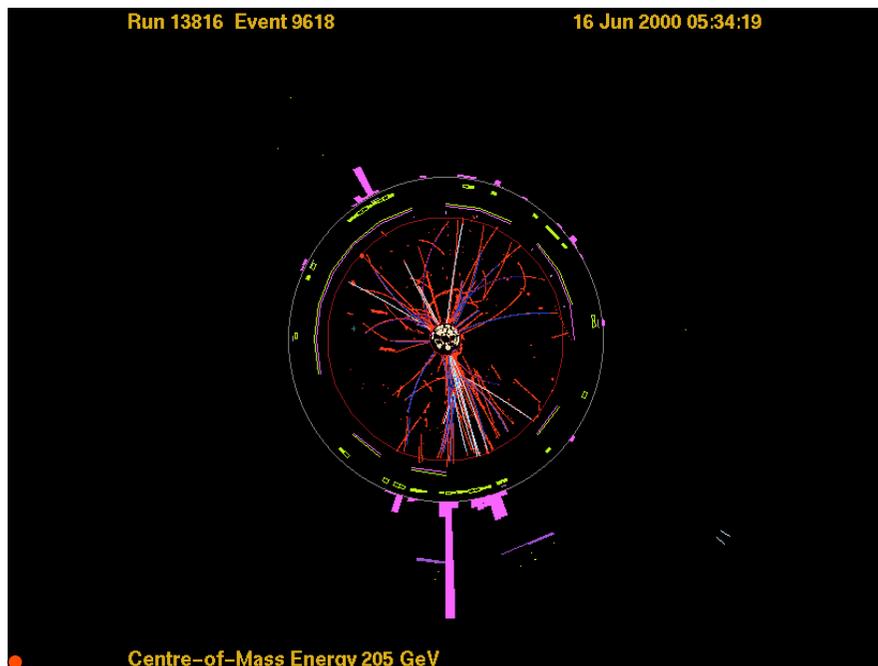
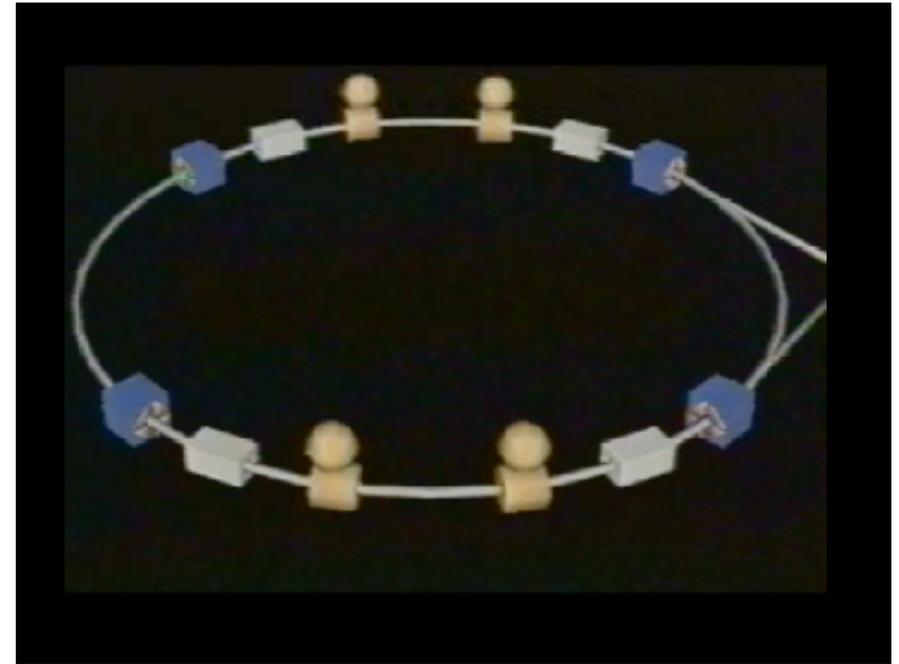
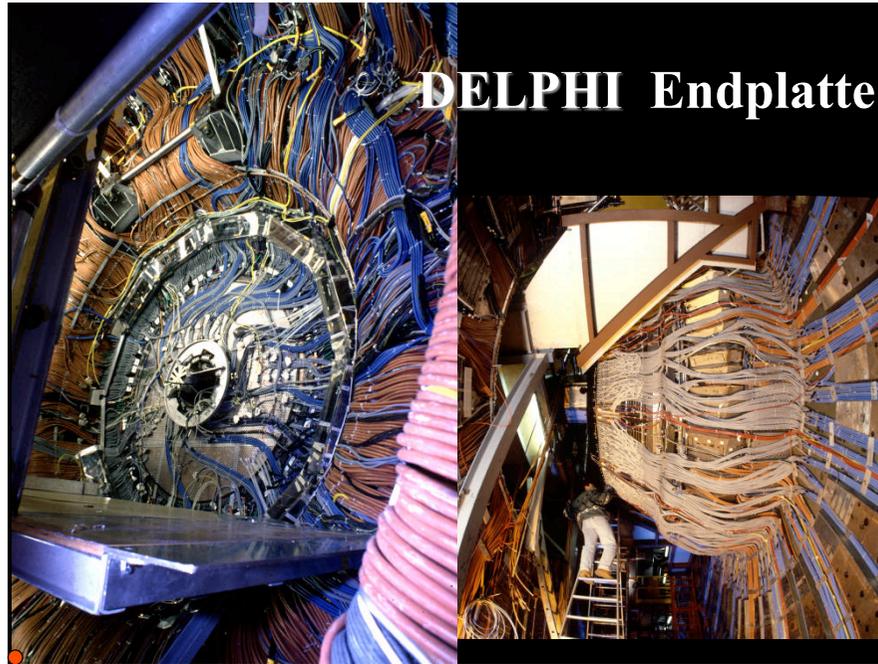
**Supraleitende  
Beschleunigungsstrecke  
für LEP II**



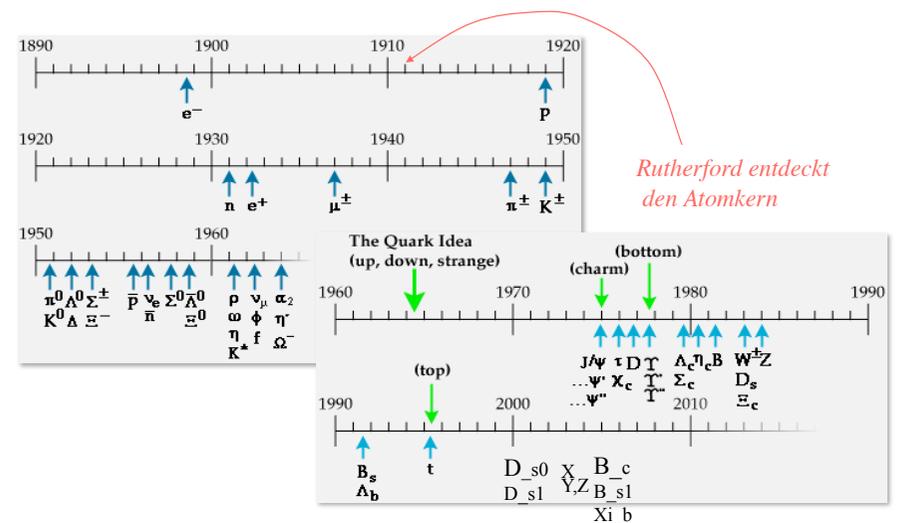
**Zugang zum DELPHI-Experiment**



**100 Meter tiefer: DELPHI**



## Entdeckung neuer Teilchen



# Fundamentale Wechselwirkungen

**Gravitation:** Allg. Relativitätstheorie, Graviton? String-Theorie?

**Elektromagnetismus:** Photon



**Starke Wechselwirkung:** Gluonen

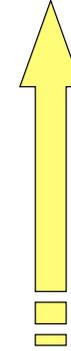


**Schwache Wechselwirkung:** W und Z-Bosonen

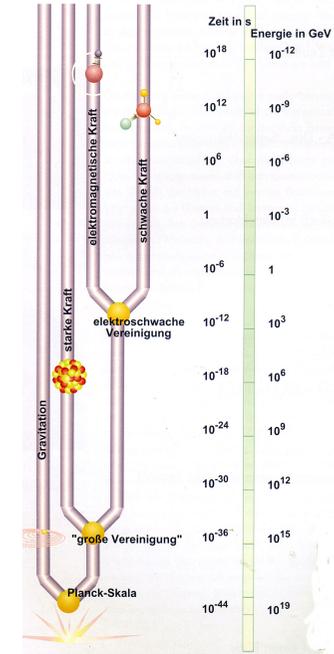


# Historie des Universums

Komplexe Struktur, Symmetrien teilweise aufgehoben



Einfache Struktur, Symmetrien gültig



# Der Kreis schließt sich:

Die Rolle der Elementarteilchen im frühen Universum

Stufenweise  
Strukturbildung durch  
Abkühlung und  
anziehende Wechselwirkungen

# Expansion des Universums: Abkühlung

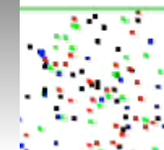
Volumen ↑



Temperatur ↓



Geschwindigkeit ↓





**1. Schritt:**  
**3 Mikrosekunden nach Null**

Formation of Hadrons  
Quarks und Gluonen bilden  
Hadronen  
(Protonen, Neutronen, etc)

(starke WW)

**2. Schritt:**  
**10 -300 Sekunden nach Null**

Formation of Nuclei  
Protonen und Neutronen  
bilden leichte Kerne

(starke WW)

**3. Schritt:**  
**ca 300 000 Jahre nach Null**

Recombination  
Kerne fangen Elektronen ein  
und bilden Atome

(elektromagnetische WW)

## 4. Schritt:

Atome bilden Sterne

(Gravitation)

## Offene Fragen:

Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie im Universum?

Eine Voraussetzung: **CP-Verletzung**  
d.h. es gibt keine exakte Symmetrie  
unter Vertauschen von  
links und rechts und  
Teilchen und Antiteilchen

## Offene Fragen:

Woher kommt die Masse ?  
Was ist dunkle Materie/Energie?

Higgs-Mechanismus?  
Supersymmetrie?  
Suche bei höchsten Energien (LHC)  
und höchsten Präzisionen  
(Super-B-Fabrik SuperBelle)

