

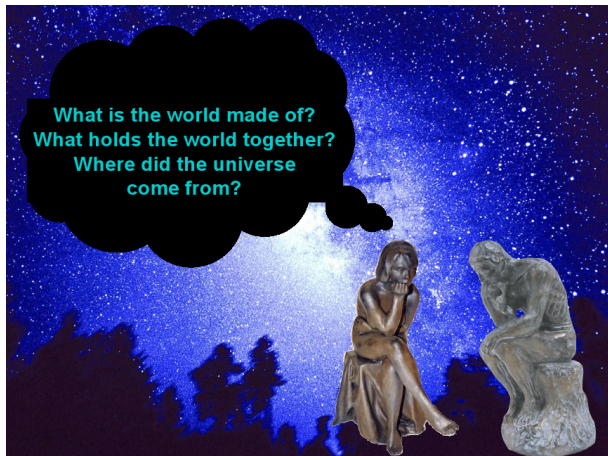
Von den kleinsten zu den größten Dimensionen in der Physik

Andreas Wipf

Theoretisch-Physikalisches Institut
Physikalisch-Astronomische Fakultät
Friedrich-Schiller-Universität Jena



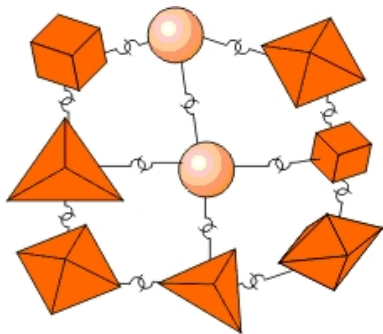
Bausteine des Universums



Der Beginn aller Wissenschaften ist das Erstaunen, daß die Dinge sind, wie sie sind.

ARISTOTELES

Bausteine des Universums



*Scheinbar ist Farbe, scheinbar Süßigkeit, scheinbar Bitterkeit:
wirklich nur Atome und Leeres*

DEMKRIT, 5. JHD. V.CHR.

*Wenn die Menschen nur über das sprächen, was sie begreifen, dann
würde es sehr still auf der Welt sein.*

ALBERT EINSTEIN

Wie Groß ist Groß, Wie Klein ist Klein

Galaxienabstand:

20 Billionen Meter = 20 000 000 000 000 000 m

Atomgröße:

1 Zehn-Milliardstel Meter = 0,000 000 000 1 m = 0,1 nm

10^3	Tausend	Kilo	<i>k</i>	10^{-3}	Tausendstel	Milli	m
10^6	Million	Mega	<i>M</i>	10^{-6}	Millionstel	Mikro	μ
10^9	Milliarde	Giga	<i>G</i>	10^{-9}	Milliardstel	Nano	<i>n</i>
10^{12}	Billion	Tera	<i>T</i>	10^{-12}	Billionstel	Piko	<i>p</i>
10^{15}	Billiarde	Peta	<i>P</i>	10^{-15}	Billiardstel	Femto	<i>f</i>
10^{18}	Trillion	Exa	<i>E</i>	10^{-18}	Trillionstel	Atto	<i>a</i>

Auflösung Teilchenbeschleuniger: $L_{\min} \approx 10^{-18}$ m

Radius des bekannten Universums: $L_{\max} \approx 10^{+26}$ m

mittlere Abstand: $\bar{L} \approx 10$ km

Grenzgeschwindigkeit = Lichtgeschwindigkeit

$$c = 299\,792\,458 \text{ km/s}$$

30 Zentimeter in 1 Nanosekunde = Tempolimit in Natur
Physik des sehr Schnellen: *spezielle Relativitätstheorie*



$$v = 0$$



$$v/c = 0,8$$

Elementare Ladung

elektrische Ladungen Vielfache von

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ As}$$

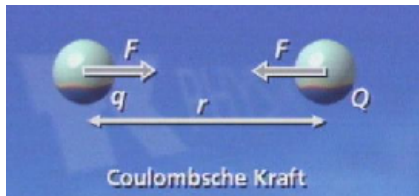
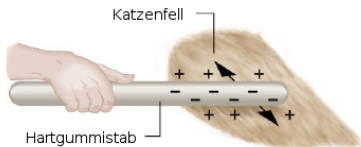
Elektron $q = -e$

Proton $q = +e$

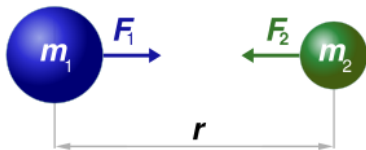
Jede Sekunde 10^{18} Elektronen durch Glühbirne

$$\text{Kraft} \propto \frac{q_1 q_2}{(\text{Abstand})^2}$$

Physik der elektrischen und magnetischen Erscheinungen



Gravitationskonstante



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

Kraft zwischen zwei Körpern mit Massen m_1 und m_2

$$\text{Kraft} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

immer anziehend

wirkt universell auf alle Körper

Gravitationskonstante

$$G = 6.674\,28 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

Physik des Großen:
Gravitationstheorie

Plancksches Wirkungsquantum



$$\begin{aligned}\text{Wirkung} &= \text{Energie} \times \text{Zeit} \\ &= \text{Länge} \times \text{Impuls}\end{aligned}$$

Jede Wirkung ein Vielfaches von

$$\hbar = 10^{-34} \text{Js} = 10^{-34} \text{kg} \times \text{m} \times \text{m/s}$$

$$\begin{aligned}\text{Unschärferelationen: } \Delta x \cdot \Delta p &\geq \hbar \\ \Delta t \cdot \Delta E &\geq \hbar\end{aligned}$$

Stabilität der Materie

Physik des sehr Kleinen: *Quantentheorie*

Sp. Relativitätstheorie

$$c = 299\,792\,458 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Gravitation

$$G = 6.674\,28 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

Quantentheorie

$$\hbar = 1.05457148 \cdot 10^{-34} \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}}$$

Elektromagnetismus

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137.035999679}$$

zeitabhängig (Dirac)? überall gleich?

e , G , c aus einheitlicher Feldtheorie?

$$1/\alpha = 108 \cdot \pi(8/1843)^{1/6} = 137.035915$$

Einstein im Brief an Ilse Rosenthal-Schneider (Mai 1945)

„Sie haben in der Frage der **universellen Konstanten** eine der interessantesten Fragen aufgeworfen, die man wohl stellen kann. Es gibt deren zweierlei: **scheinbare und wirkliche**. Die scheinbaren kommen einfach von der Einführung willkürlicher Einheiten, sind aber eliminierbar. Die **wahren sind echte Zahlen**, die Gott gewissermaßen willkürlich zu wählen hatte, als er diese Welt zu erschaffen geruhte. Meine Meinung ist nun, kurz gesagt, dass es solche Konstanten der zweiten Art gar nicht gibt, und dass ihre scheinbare Existenz darauf beruht, dass wir nicht tief genug eingedrungen sind. Ich glaube also, dass derartige Zahlen nur von rationaler Art sein können, wie zum Beispiel π oder e “

Damit z.B. wäre c keine Naturkonstante

Energie: Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten

Energie ist erhalten

Energie ist umwandelbar

mechanische, potentielle, elektrische und magnetische,...

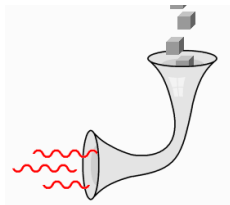
Thermische Energie:

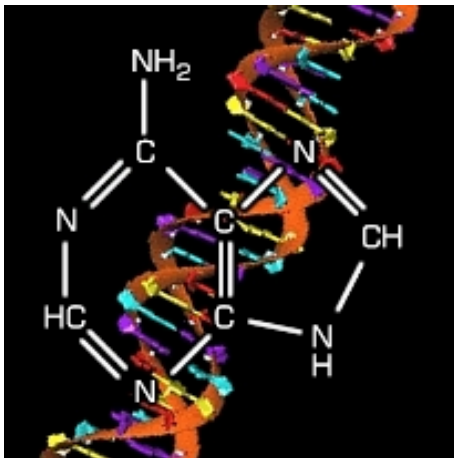
$$E = k_B T, \quad k_B \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Masse ist Form von Energie

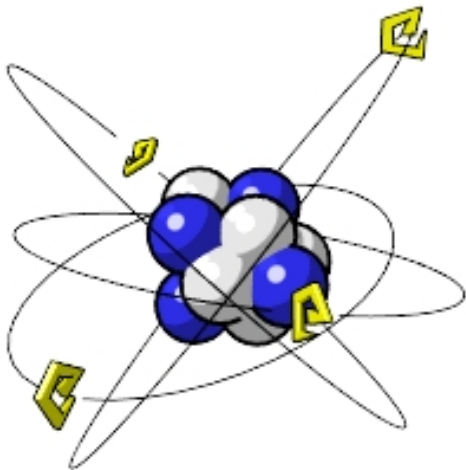
$$E = mc^2, \quad c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\text{Joule, Ws, ...} \quad 1\text{eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}$$





Moleküle $>$ Ångström



Atom

Wasserstoffatom

Elektron „bewegt sich“ relativ langsam um ruhenden Atomkern: e , m
Quanteneffekte stabilisieren Atom (Unschärferelation): \hbar

$$\text{Energie} = \frac{m^2}{2} v^2 - \frac{e^2}{r} \quad \text{klassisch instabil}$$

$$\Delta p \cdot \Delta x \approx mv \cdot r \approx \hbar \implies \text{Energie} = \frac{\hbar^2}{2mr^2} - \frac{e^2}{r}$$

minimal für **Bohr Radius**

$$r_B = \frac{\hbar^2}{me^2} = 5 \times 10^{-11} \text{ m} \quad , \quad E_B = -\frac{me^4}{\hbar^2} \approx \text{eV},$$

Mit zunehmender Verschwommenheit ($\propto \hbar$) wird Atom größer

Mit zunehmender Masse wird Atom kleiner (μ -Atome): $r \propto 1/m$

Dimensionsbetrachtung

Elektron „bewegt sich“ relativ langsam um ruhenden Atomkern: e , m

Quanteneffekte stabilisieren Atom (Unschärferelation): \hbar

m Dimensions M

Kraft = Masse x Beschleunigung e^2 Dimension ML^3/T^2

Wirkung = Energie x Zeit $\Rightarrow \hbar$ Dimension ML^2/T

$$\text{Bohr Radius } r_B = \frac{\hbar^2}{me^2} = 5 \times 10^{-11} \text{ m}$$

Mit zunehmender Verschwommenheit ($\propto \hbar$) wird Atom größer

Mit zunehmender Masse wird Atom kleiner (μ -Atome): $r \propto 1/m$

Atom = Atomkern + Elektron, Größe $\approx 10^{-10}$ m



Elektron

Masse:

$$9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$= 511 \text{ keV}$$

In einem Schwarzbrot:

1/8 g Elektronen

Elektron = kleiner als 10^{-18} m
punktförmig, elementar (?)

inneren Drehimpuls
magnetisches Moment

Ladung e : [Arbeitspferd der Moderne](#)

Quantenmechanik und Relativitätstheorie

Beschreibung des bei Elektronen **kleinen Längenskalen**

Lokalisierung des Elektrons auf $\Delta x \Rightarrow \Delta p \geq \hbar/\Delta x$

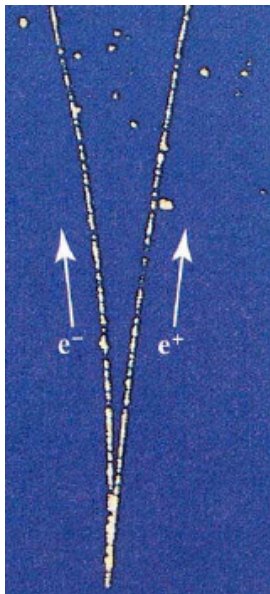
genaue Lokalisierung $\Rightarrow \Delta p$ und rel. kinetische Energie T groß

T gleich Ruhenergie mc^2 des Elektrons für $\Delta x = \lambda_c$

Dimensionsbetrachtung

\hbar Dimension ML^2/T , c Dimension L/T

$$\lambda_c = \frac{\hbar}{mc} = 4 \times 10^{-13} \text{ m} \quad \text{Compton-Wellenlänge} \propto \frac{1}{m}$$



Lokalisierung des Elektrons auf

$$\Delta x < \lambda_c \Rightarrow$$

genügend Energie für

Elektron-Positron Paarproduktion



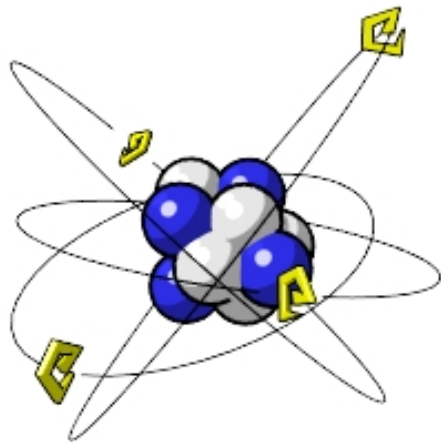
Vereinigung von Quantentheorie und
Relativitätstheorie \Rightarrow

Existenz von Antimaterie ...
Elementarteilchenphysik

Theorie: **Quantenfeldtheorien**

Experimente: **Teilchenbeschleuniger**

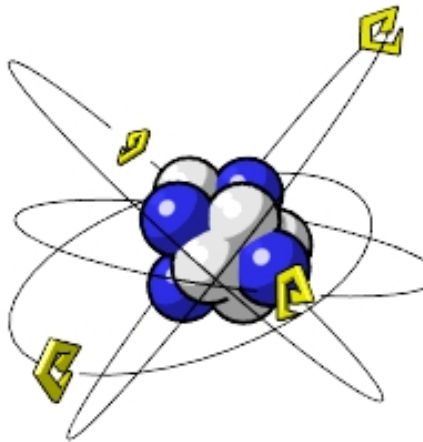
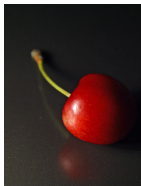
Der Raum ist leer



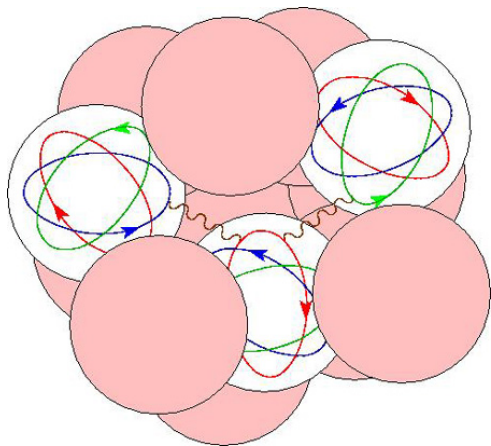
Atom: $0.1 \text{ nm} = 10^5 \text{ fm}$

Atomkern: 1 fm

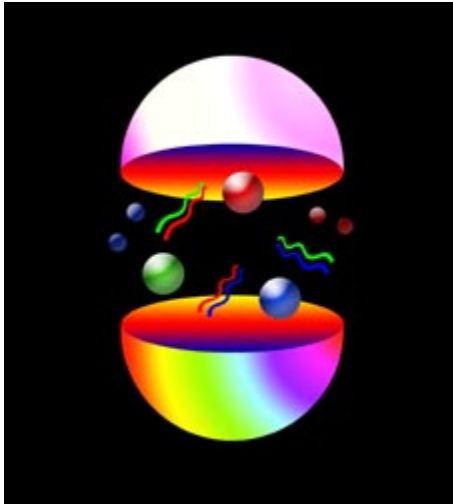
Der Raum ist leer



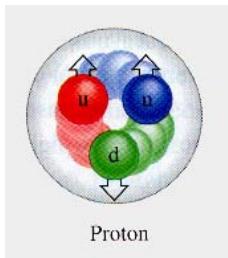
Atom: $0.1 \text{ nm} = 10^5 \text{ fm}$
Atomkern: 1 fm



Atomkern: Protonen und Neutronen

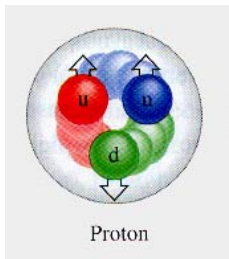


Quarks und Gluonen im Proton



Starke

Kraft

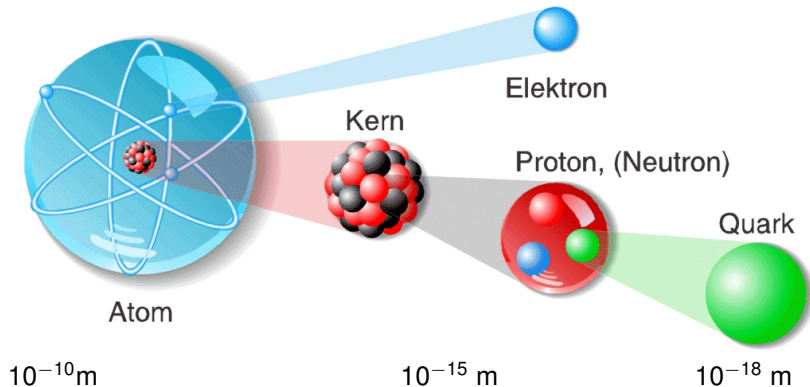


Starke

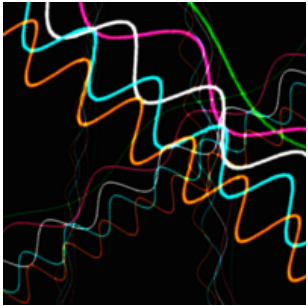
Kraft



Bausteine des Universums

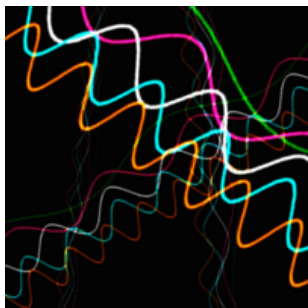


Photonen = Teilchen des Lichts



Photon γ

Photonen = Teilchen des Lichts



Photon γ

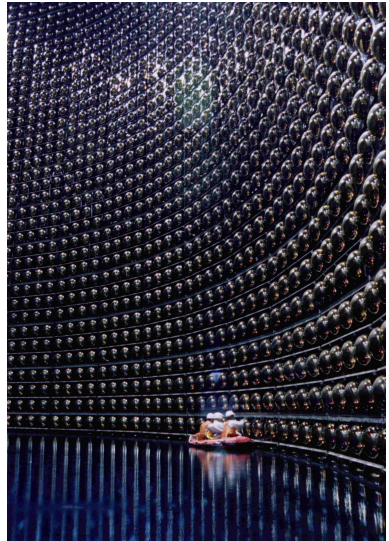
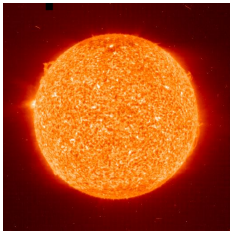


10 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{22}
masselose Photonen/Sekunde ($m < 10^{-47}$ kg)

$$E = \hbar\omega \quad , \quad p = \hbar k \quad (\text{Einstein})$$

bewegen sich im Vakuum immer mit $v = c$

Neutrinos



Neutrinos

z.B. aus Zerfall des Neutrons $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$

70 Milliarden **solare** ν pro Sekunde und cm^2 auf Erdoberfläche
fliegen mit großer Wahrscheinlichkeit durch Millionen-km dicke
Bleiklötze

⇒ sehr schwierig nachzuweisen

braucht viele ν , viel Zeit und riesige Detektoren

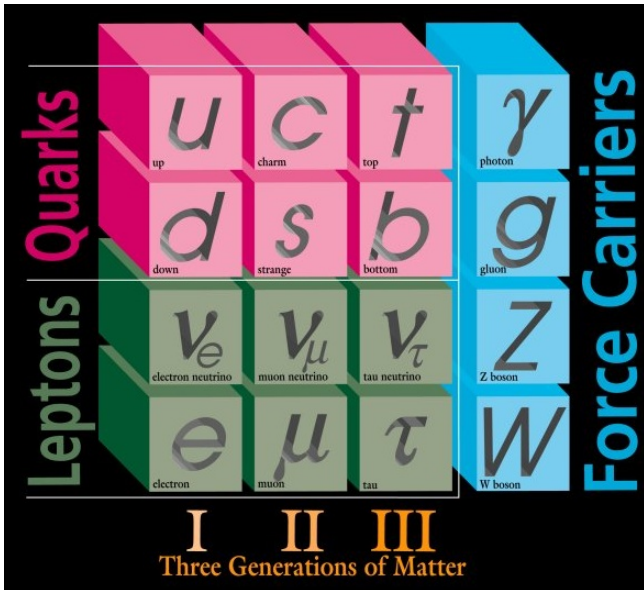
Neutrinos von **Sonne, Supernovae,...** Beispiel: Super-Kamiokande

50 000 Tonnen hochreines Wasser

11 200 Photomultiplier

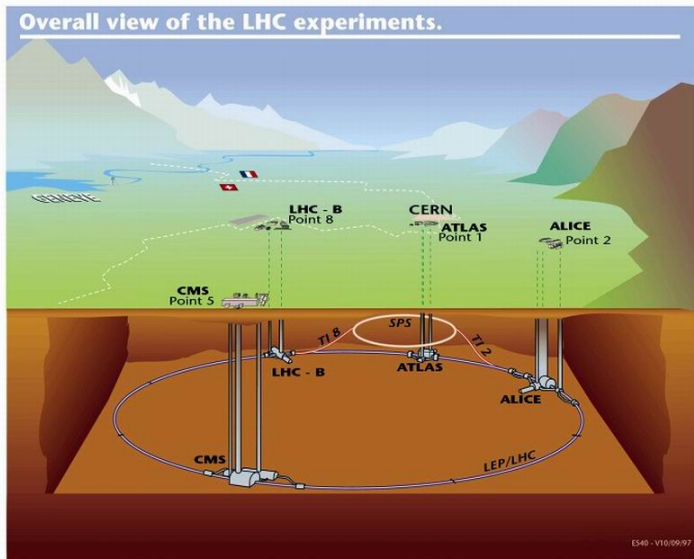
mißt Tscherenkow-Strahlung von Elektronen

Bausteine des Universums

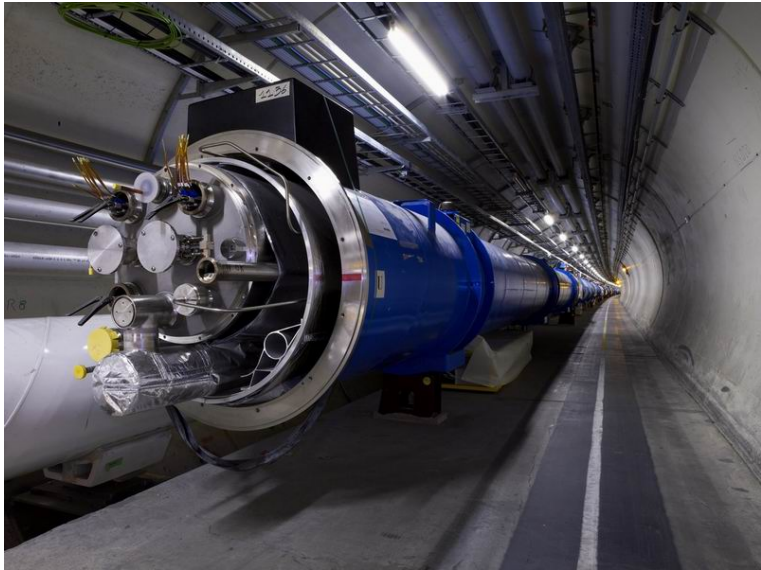




Der Large Hadron Collider (LHC)



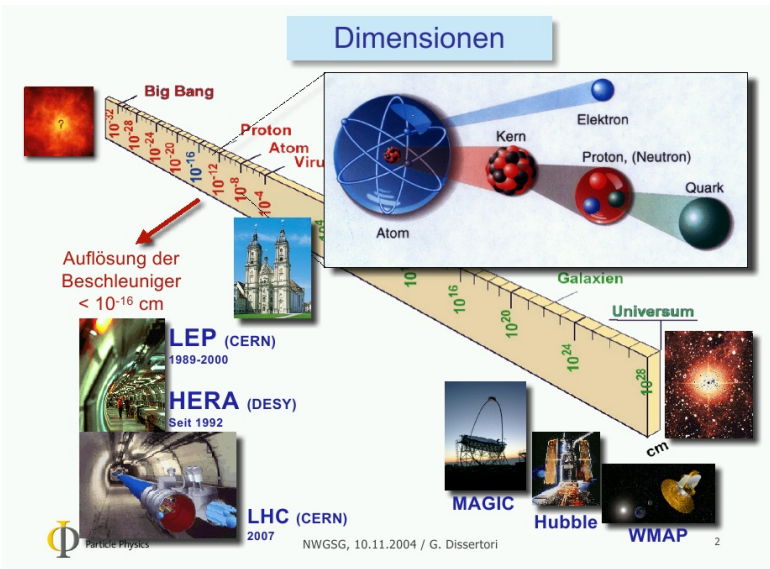
Der Large Hadron Collider (LHC)



Der Large Hadron Collider (LHC)



... und der Bauplan im Großen?

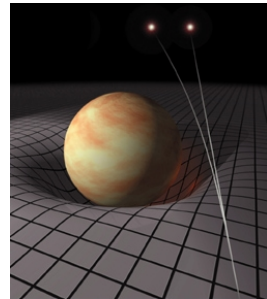
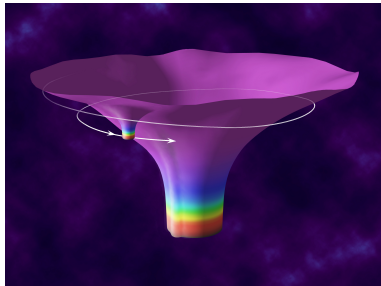
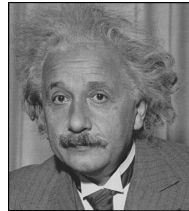
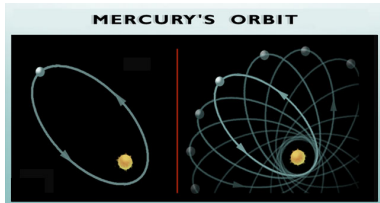


NWGGG, 10.11.2004 / G. Dissertori

Universelle Gravitationskraft dominiert

Universelle Gravitationskraft dominiert

ALBERT EINSTEIN 1879-1955



Wann werden Quanten- und Gravitationseffekte wichtig?

Raumzeit wird körnig: **Wheeler**: space-time foam

Hawking: See von virt. Schwarzen Löchern

Ashtekar: Netzwerk von Knoten

Dimensionsanalyse

Naturkonstanten:

$$[G] = \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}, \quad [\hbar] = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}}, \quad [c] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Eindeutige Kombination die Länge ergibt

$$L_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.6 \cdot 10^{-35} \text{ cm}$$

Quanteneffekte, relativistische Effekte, Gravitation: alle wichtig

Schwarzes Loch mit Horizontradius

$$r_{SL} = \frac{2Gm}{c^2}$$

Horizontradius = Compton-Wellenlänge für

$$r_{BH} = L_p$$

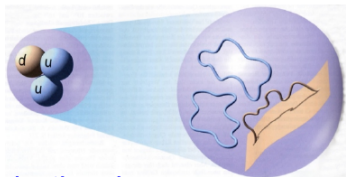
Lokalisierung eines SL auf $\Delta x < L_p$ nicht möglich

Paarproduktion von SL

Konzept eine kontinuierlichen Raumzeit?

Quanteneffekte, relativistische Effekte,
Gravitation gleichermaßen wichtig

Theorie aller Kräfte



Quantengravitation? Stringtheorie? ...

Hoffnung:

Beschreibung des **sehr frühen Universums**

Erklärung der **Vakuumenergie** (dunklen Energie)

Teilchenmassen, Kopplungskonstanten

Naturkonstanten

**Stringtheorie braucht Supersymmetrie
und extra Dimensionen**

Teilchenphysik und Gravitation treffen sich

Neue hoch-interessante und geförderte Gebiete der Physik:

Astro-Teilchenphysik

Neutrino-physik

Supernovas

kompakte Objekte (WZ, NS)

hochenergetische kosmische Strahlung (10^{20} eV)

dunkle Materie

Kosmo-Teilchenphysik

Phasenübergänge im frühen Universum

Materie über Antimaterie-Überschuß

Strukturentstehung aus Quantenfluktuationen

Rätsel der dunklen Materie (20-30 %) und dunklen Energie (70 %)

Phasenübergang

