

Teilchenphysik: Erfolge, offene Fragen und Perspektiven

Maximilian.Kreuzer@tuwien.ac.at Insitut für Theoretische Physik, TU-Wien
<http://hep.itp.tuwien.ac.at/~kreuzer/ump>

Thanks to the **Austrian Research Fund FWF**

Grundlagen

- Raum & Zeit, Materie & Kräfte: Mechanik, Schwerkraft & Electromagnetismus
- Relativität & Quanten: Atom/Kern-Physik → Standardmodell der Teilchenphysik

Experimentelle Fragen

- Masse (4%; Higgs?), Dunkle Materie (23%) → LHC
- Dunkle Energie (73%), Zukunft des Universums → Typ 1a SN
- Urknall und Inflation, Protonen/Photonen= 10^{-9} → CMB

Theoretische Fragen

- Einheit der Naturkräfte: Symmetrien, Geometrie, verborgene Dimensionen
- Quantengravitation, Strings & Branes

1

Inhalt

- **Urgeschichte**
 - Maxwell und Einstein: Elektromagnetismus → Relativitätstheorie
 - Kaluza und Klein: verborgene Dimensionen (?)
 - Schrödinger, Heisenberg, Pauli: Quanten und Unschärfe
 - Dirac, Feynman, Schwinger: Quantenfelder
- **Die goldenen 60er und 70er**
 - 1967 / 1973: Teilchenzoo + Standardmodell
 - 1974 GUT (große Vereinheitlichung)
 - 1974 SUSY (Supersymmetrie) → SUGRA & KK revival
 - 1974 Strings → Quantengravitation: 1984 / 1995 revolutions
- **Neue Experimente und Ideen**
 - LHC, Icecube, LISA, ... ILC, Planck, BBO
 - Brane-worlds, holography, landscape

2

Spezielle Relativitätstheorie:

- Elektromagnetismus → Maxwell Gleichungen:

$$\text{rot } E + B/c = 0$$

$$\text{div } B = 0$$

$$\text{rot } B - \dot{E}/c = j/c$$

$$\text{div } E = \rho$$

Wirbeldichte

Quelldichte

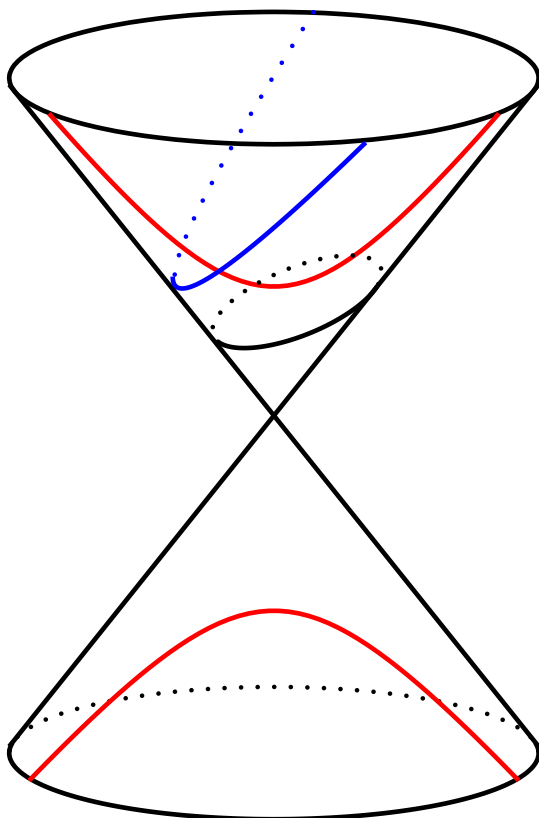
Elektrizität (E) ↔ Magnetismus (B): Lichtgeschwindigkeit c

Licht = Welle → was schwingt? Relativbewegung der Erde?

Geschwindigkeit: Uhrenvergleich? Ausweg: Gleichzeitigkeit ist relativ!

→ Zeitdilatation / Längenkontraktion

3



Kegelschnitte

Ellipse:

$$y^2 + x^2 = c^2$$

Parabel

$$y = x^2 + c$$

Hyperbel

$$y^2 - x^2 = c^2$$

$$y = it$$

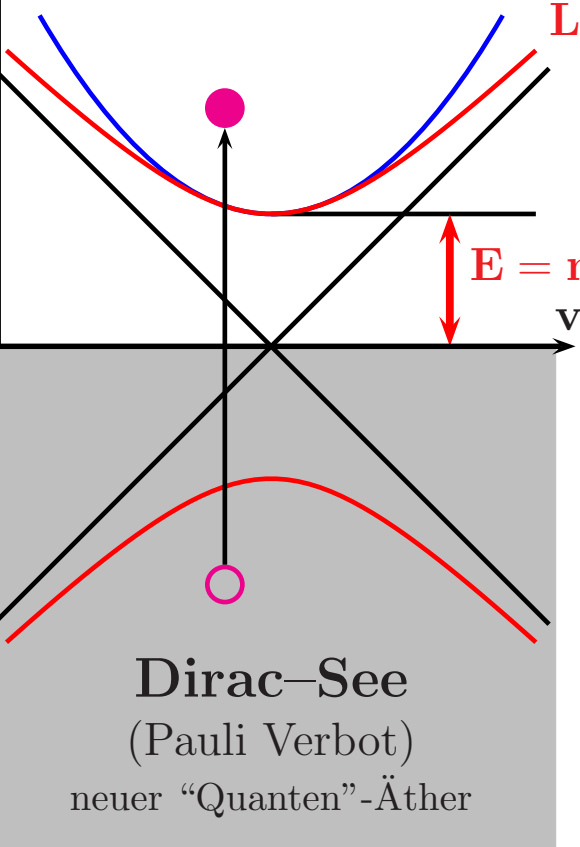
Zeit → Raum

SRT

4

Dirac's Vorhersage der Antimaterie

Bewegungsenergie: $E = \frac{1}{2}mv^2$



Lorentz 1904: Raum/Zeit-Hyperbel

Emmy Noether 1915:

Symmetrien \Leftrightarrow Erhaltungssätze

zeitunabhängig \rightarrow Energieerhaltung

$E = mc^2 \Leftarrow$ Energie/Impuls-Hyperbel

Einstein 1905: "Ruheenergie"

Lichtkegel: Geschwindigkeit $< c$

Quanten: "verschwommen"
"alles" ist möglich was Noether

\rightarrow **negative Energie !!!** nicht verboten hat

Dirac 1928: Löcher = Protonen ?

... \sim 1931: Es gibt Antimaterie !

QM+SRT \Rightarrow Quantenfeldtheorie

ART: Äquivalenzprinzip

Träge Masse = schwere Masse

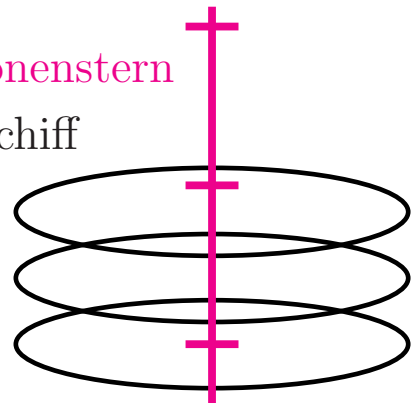
\Rightarrow Zeitdilatation durch Schwerkraft

\Rightarrow Newton-Kraft (Haupteffekt: Zeitdilatation!)

\rightarrow geradeaus in gekrümmter Geometrie

Neutronenstern

Raumschiff



Schwarzschild 1916: Schwarze Löcher (Name: Wheeler)

$$ds^2 = g_{tt}c^2 dt^2 - g_{rr}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$$(1 - \frac{2MG}{rc^2}) c^2 dt^2 - \frac{1}{1 - \frac{2MG}{rc^2}} dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2).$$

Zeitdilatation $g_{tt} = 1 - \frac{2MG}{rc^2}$, Längenkontraktion $g_{rr} = \frac{1}{g_{tt}}$

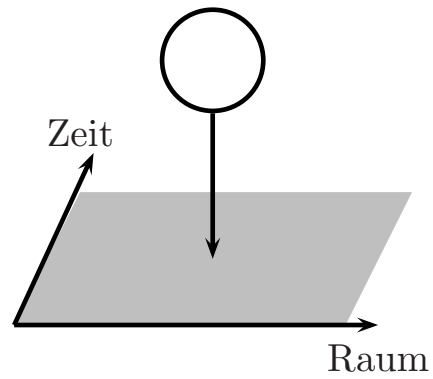
Geodätengleichung: $\ddot{x}^\rho = \dot{x}^\mu \dot{x}^\nu \Gamma_{\mu\nu}^\rho$

$\Gamma_{\mu\nu}^\rho = g^{\rho\lambda}(\partial_\mu g_{\nu\lambda} + \partial_\nu g_{\mu\lambda} - \partial_\lambda g_{\mu\nu}) \xrightarrow{\dot{x}=(1,0,0,0)}$ Newton \approx Zeitdilatation

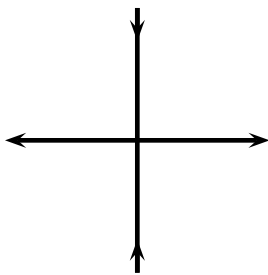
Kaluza 1919 + Klein 1926: die 5. Dimension

Schwerkraft/Geometrie:

T	\triangleleft	\triangleleft	\triangleleft	\triangleleft	\triangleleft
\triangleleft	L_x	\triangleleft	\triangleleft	\triangleleft	\triangleleft
\triangleleft	\triangleleft	L_y	\triangleleft	\triangleleft	\triangleleft
\triangleleft	\triangleleft	\triangleleft	L_z	\triangleleft	\triangleleft
\triangleleft	\triangleleft	\triangleleft	\triangleleft	\triangleleft	ϕ



Gravitationswellen:



Elektromagnetismus



7

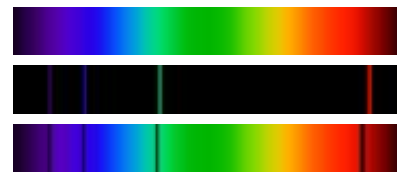
Quantenphysik

Quantisierung vs. Unschärfe

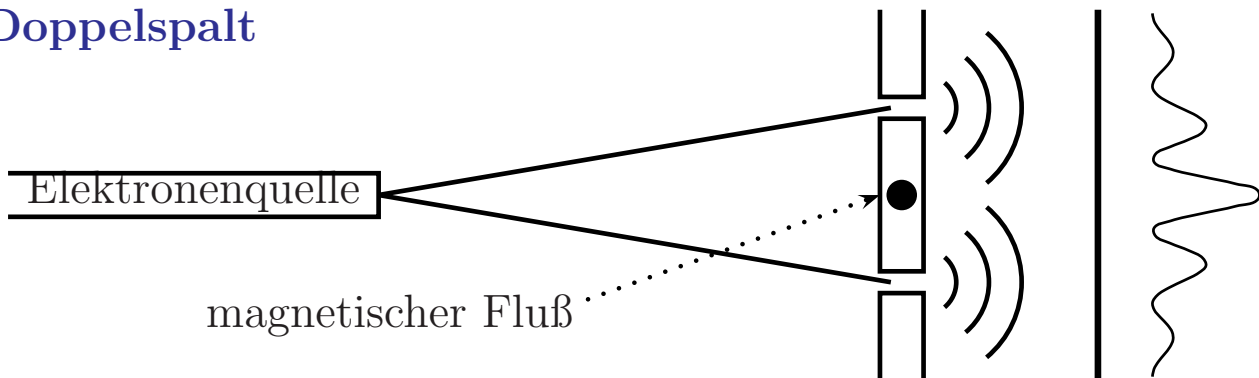
• Spektrallinien



Kontinuum
Emission
Absorption



• Doppelspalt



• **Philosophisch:** keine lokal realistische Interpretation möglich

• **Quanten & ART:** Punktteilchen=Schwarzes Loch $\Rightarrow M_{Planck} = 10^{19} GeV/c^2$
 $L_{Planck} = 10^{-35} m$

8

Das Standardmodell '67 + '73

50 Jahre Quantenfeldtheorie: Dirac, Heisenberg, ...
 Tomonaga, Schwinger, Feynman, ...

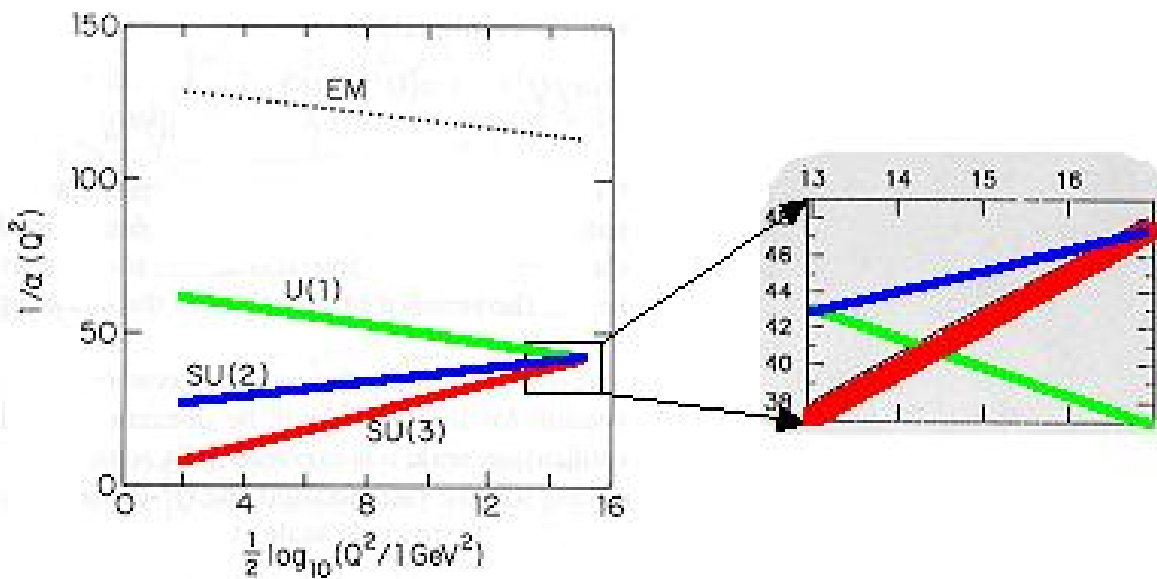
Beschleuniger → Gell-Mann '64: Proton = $q q q$
 Meson = Quark Antiquark

Kräfte (13 Teilchen): Elektromagnetismus (Photonen)
 schwache Kernkraft W^\pm, Z
 starke Kernkraft Gluonen
 Schwerkraft Gravitonen

Materie (45 Teilchen): Quarks: u^\pm, d^\pm (zweite Familie: c, s ; dritte Familie: t, b)
 Leptonen: $e^\pm, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

Masse: Higgs-Teilchen ϕ (spontane Symmetriebrechung) → LHC (?)

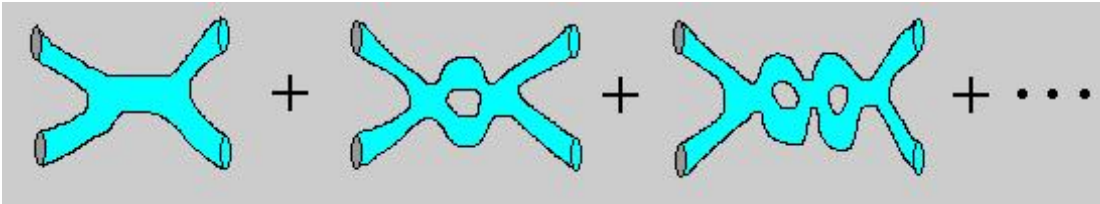
Grand unification und Supersymmetrie '74



Elektromagnetismus
 schwache Kernkräfte
 starke Kernkräfte

Vereinigung (SUSY) bei 10^{16} GeV
 Quantengravitation bei 10^{19} GeV
 Protonzerfall: Sakharov (1967)

Superstrings & D-branes



Elementarteilchen \leftrightarrow Schwingungszustände

- vermeidet Unendlichkeiten von Punktteilchen
- 26 Dimensionen, Graviton + Extras, Tachyon
 - SUPERstring ... 10 Dimensionen + Fermionen=Materie
- Kaluza–Klein:
 - “unsichtbare” Geometrie bestimmt beobachtbare Physik
- String–Dualitäten → “Quantengeometrie”
- D-branes: leben wir auf einer 4-dim. “Knotenfläche”?
 - erklärt “schwache” Gravitation (GUT bei $10^{16} \ll 10^{19} GeV$)

11

Kosmologie:

1917 Einstein: kosmologische Konstante

1922 Friedman, Robertson, Walker: kosmologische Lösungen

1929 Hubble: Expansion des Weltalls ! (→ Urknall)

1965 Entdeckung der Hintergrundstrahlung (Beweis für Urknall)

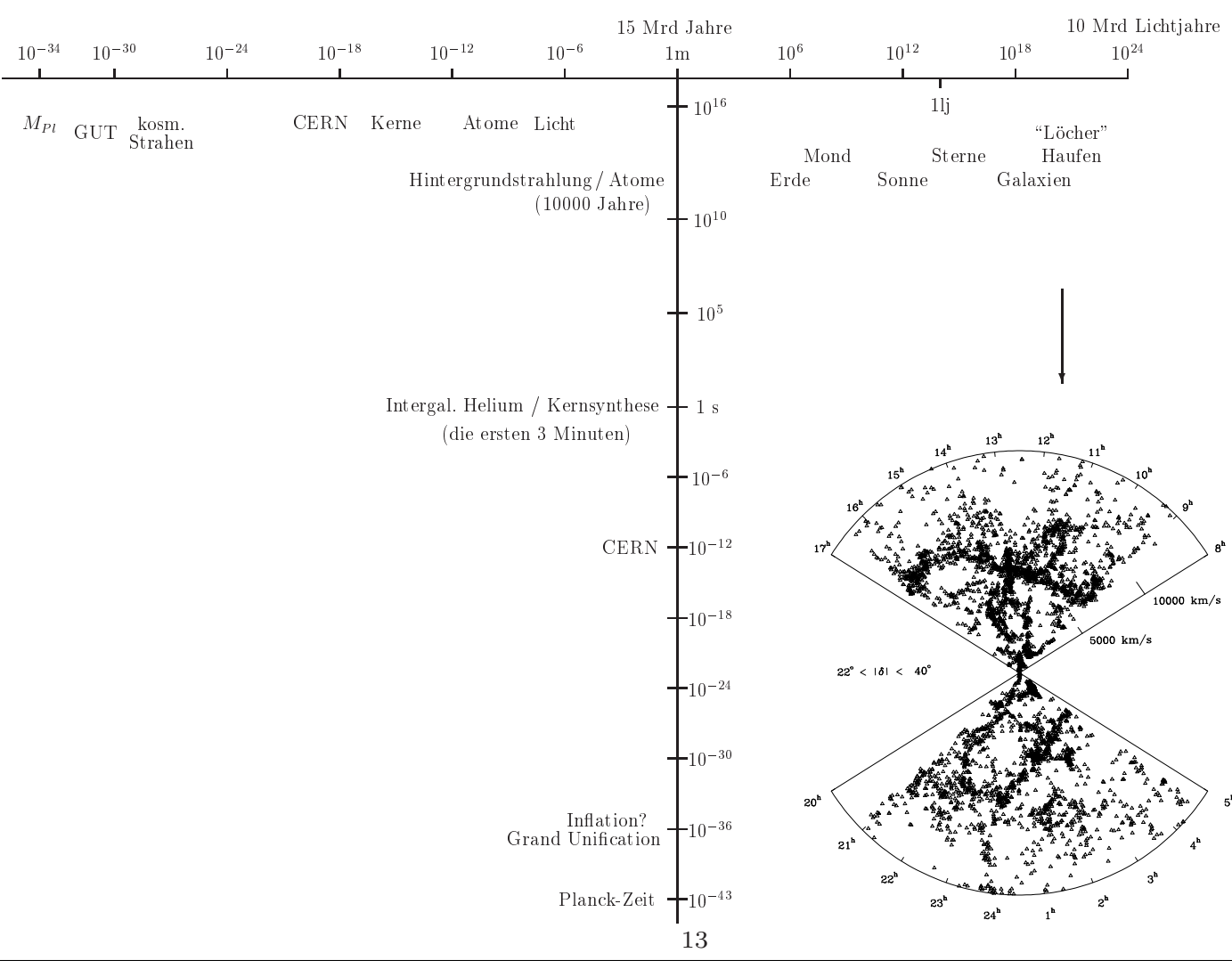
Relativitätstheorie

Kruskal 1963: Lösung für ein rotierendes Schwarzes Loch !

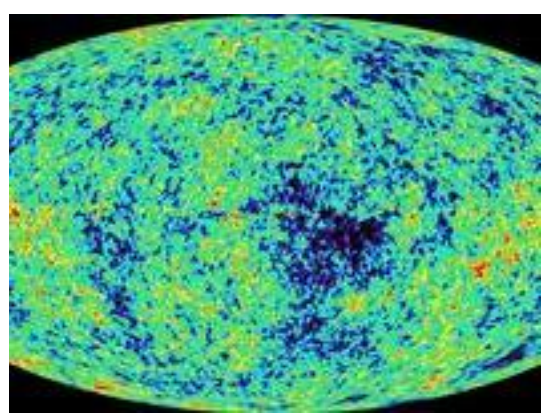
Penrose 1965: Singularitätentheoreme (“trapped surfaces”)

Beckenstein: Entropie, Hawking: Temperaturstrahlung von SL

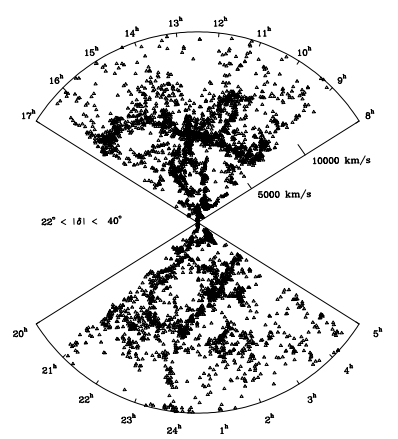
Israel: no hair, Wheeler: Wurmlöcher/Zeitschleifen, Stabilitätsfragen



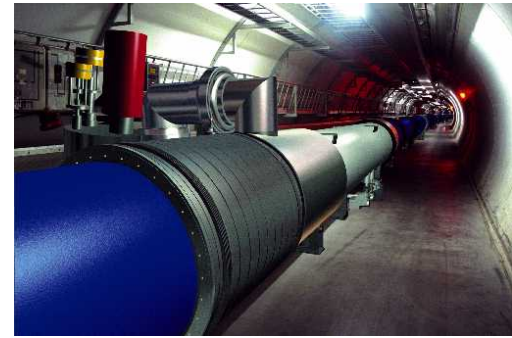
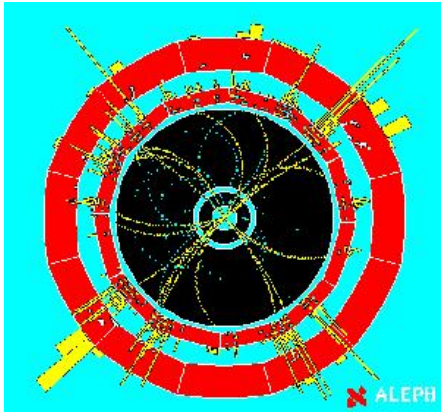
Lichtkegel → Lichtsekunden und ...



- 1 Lichtsekunde bis zum Mond = 8 x Äquator
- 1 Lichtstunde Jupiter
- 4 Lichtjahr Nachbarstern
- 1 Million Lichtjahre Andromeda
- 10 Milliarden Lichtjahre Welthorizont



... Elektronvolt



- 1 MeV = 10^6 eV $e^+ + e^-$ (Atomradius)
- 1 GeV = 10^9 eV Protonmasse (um 1960)
- 80 GeV schwache Kernkräfte (1982)
- 200 GeV LEP
- 14 TeV = 10^{-7} s LHC (2007)
- 10^{19} GeV = 10^{-45} s Quantengravitation/Urknall



15

LHC Detectoren: **ATLAS** + LHCf, **CMS** + TOTEM, **ALICE**, **LHCb**

25 ns / 40 MHz * durchschnittlich 22 Kollisionen

Hardware Trigger: entscheide in $2-3\mu\text{s}$ / behalte etwa 1 Ereignis von 400

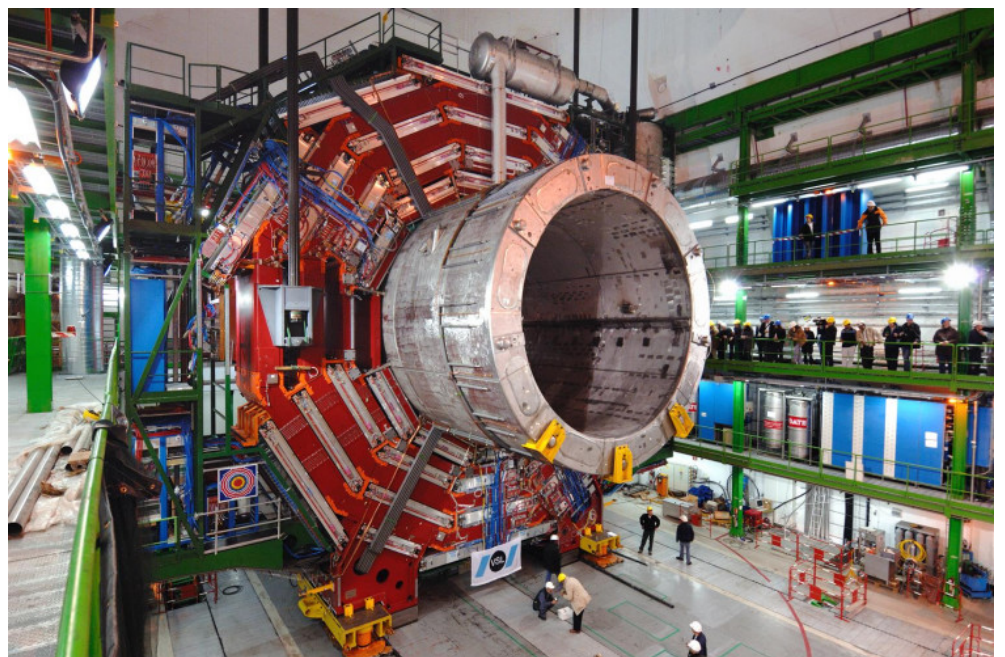
SW Trigger: 100 Hz \rightarrow 4-5 GB/Sekunde = 10^6 GB Daten pro Jahr

CMS: 12000 T

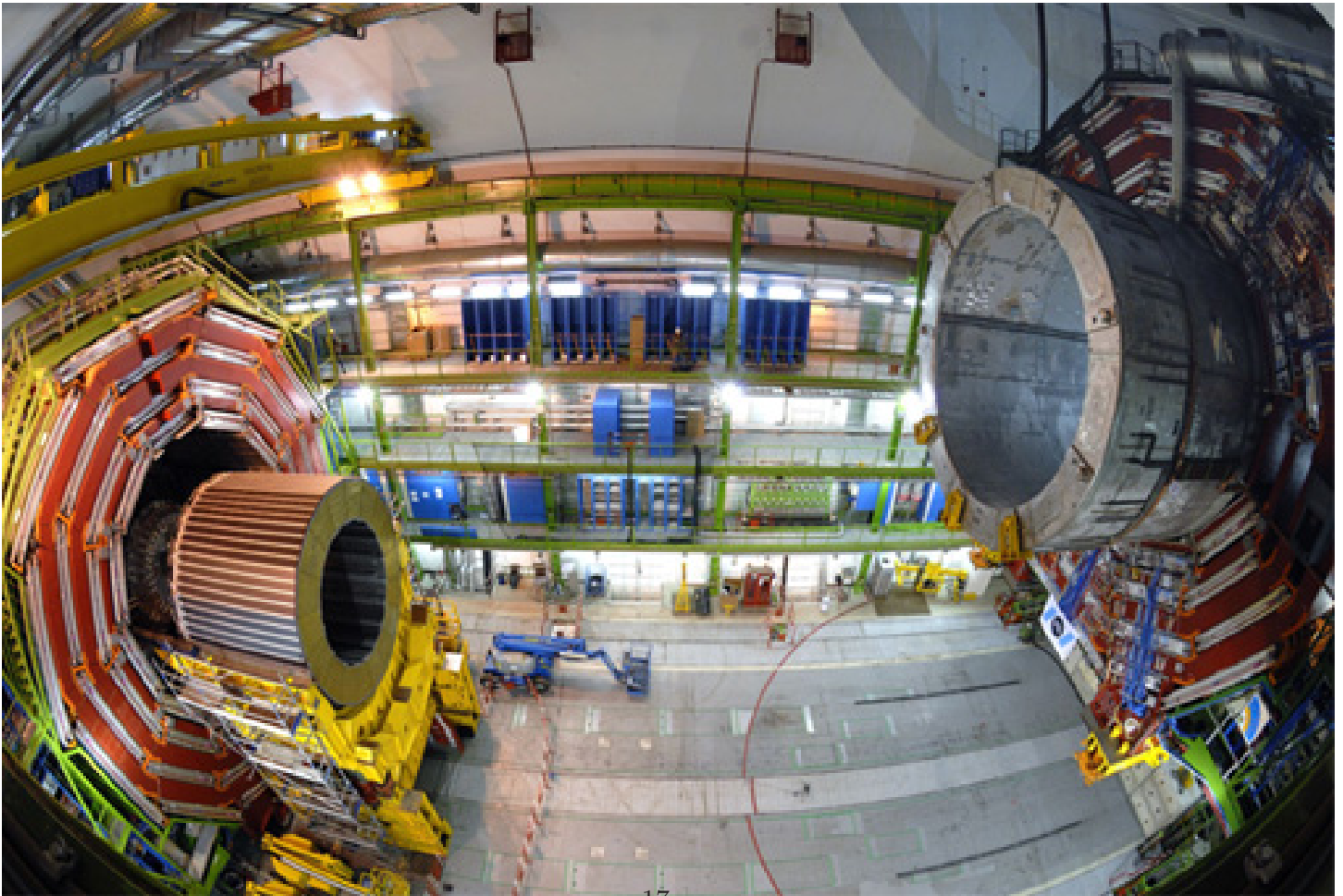
L=23m / \emptyset =15m

Atlas: 7000 T

L=44m / \emptyset =22m



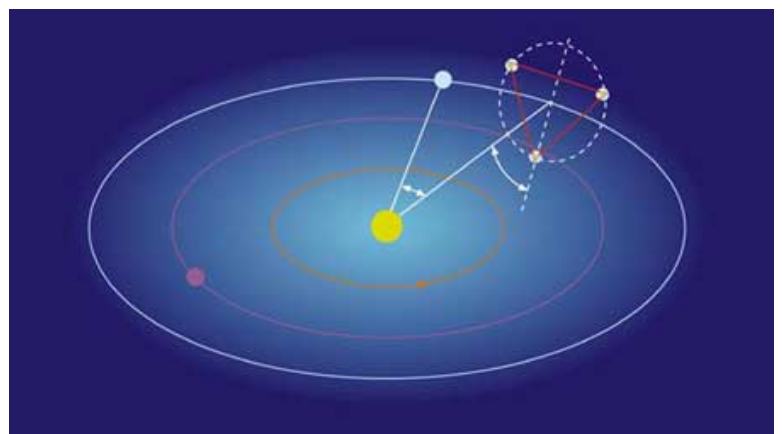
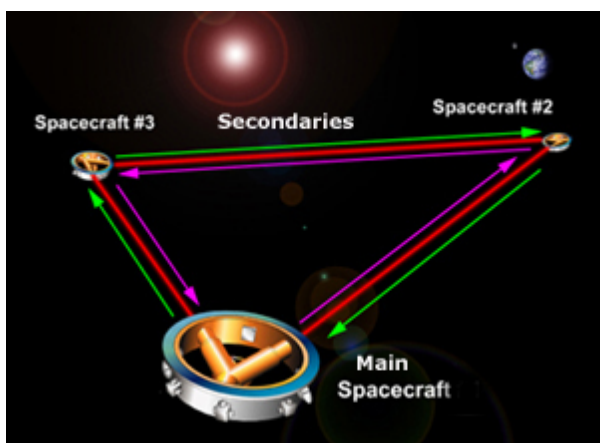
16



17

LISA Gravitationswellen (black hole merger, etc.)

Dreieck: Seite = 5 Millionen km



LISA: 0.001 - 0.03 Hz

Planck/BBO: Frequenzbereich = Gravitationswellen vom Urknall

ICE CUBE Neutrino-Observatorium am Südpol

