

DER SCHWERPUNKT TEILCHEN PHYSIK



„WAS DIE WELT IM INNERSTEN ZUSAMMENHÄLT“

- Frage nach den fundamentalen Bausteinen der Materie und ihren Wechselwirkungen.
- Seit 1970er Jahren grundlegende Beschreibung mittels des **Standardmodells der Teilchenphysik**: Relativistische Quantenfeldtheorie
 - *3 Naturkräfte (Elektromagnetismus, Schwache-, Starke Kernkraft)*
 - *Quarks + Leptonen in 3 Familien.*
- Seit 2012 voll experimentell bestätigt (Nachweis Higgs-Boson)
- Wissen, dass Standardmodell nicht die finale Theorie der Teilchenphysik ist:
 - *Dunkle Materie*
 - *Quantentheorie der Gravitation*
 - *Materie/Antimaterie Asymmetrie im Universum*

DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Quarks	Leptonen	Eichbosonen
mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$ u up	mass → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$ c charm	mass → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$ t top
$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom
		mass → 0 charge → 0 spin → 1 g gluon
		mass → $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ charge → 0 spin → 0 H Higgs boson
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon
	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino
	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson
		0 0 2 h graviton

Gravitation ?

CARTOON DES STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

Eichboson selbst-*WW*:
Verallgemeinerung der
Elektrodynamik

$$+ i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c.$$

Fermion-Eichboson *WW*

$$+ \bar{\chi}_i Y_{ij} \chi_j \phi + h.c.$$

Fermion-Higgsboson *WW*

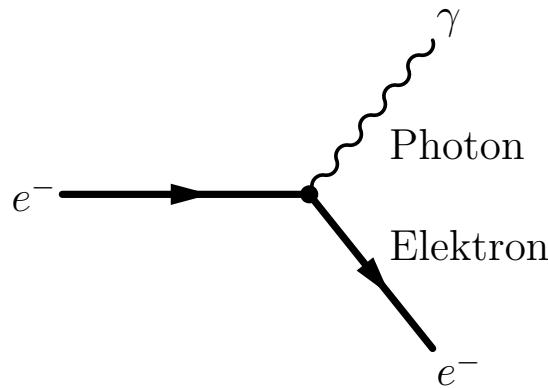
$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Higgsboson selbst-*WW*

WW: Wechselwirkung

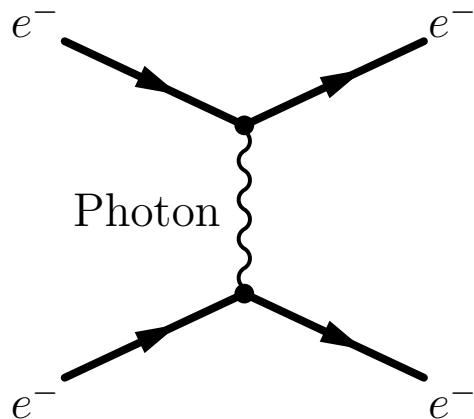
QUANTENFELDTHEORIE: QM + SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE

- Neuer Effekt: Erzeugung und Vernichtung von Elementarteilchen



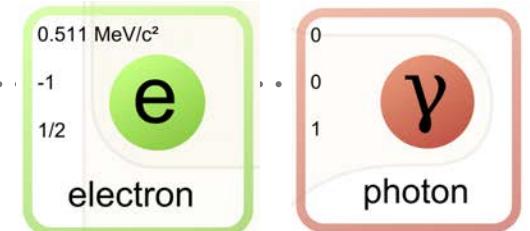
Abstrahlung eines Photons

- Kräfte werden durch den Austausch von Teilchen übertragen



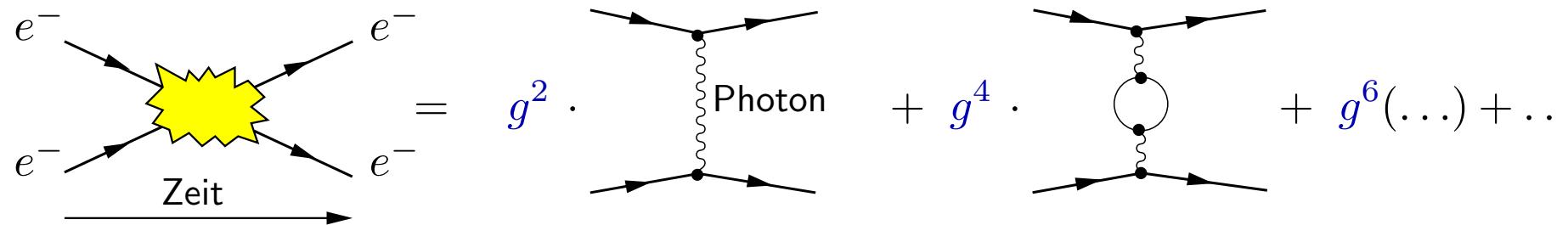
Kraftteilchen der elektromagnetischen Kraft: Photon ("Licht")

STÖRUNGSTHEORIE UND FEYNMANGRAPHEN



- Beispiel Quantenelektrodynamik:

Physikal. Theorie der Elektronen und Photonen sowie deren Wechselwirkungen
(g : Ladung oder "Kopplungskonstante")



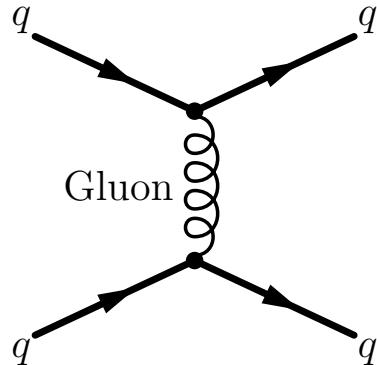
Streuung von Elektronen

Störungsreihe in $g \ll 1$

- Renormierung: $g \rightarrow g(E)$
- Drei Naturkräfte beschrieben durch **Eichfeldtheorien** [1955, 1971]
- Was passiert bei $g \sim 1$? \Rightarrow nicht-störungstheoretische Quantenfeldtheorie

QUANTENCHROMODYNAMIK

- Eichtheorie: (Gluonen A_μ) + Quarks (q)

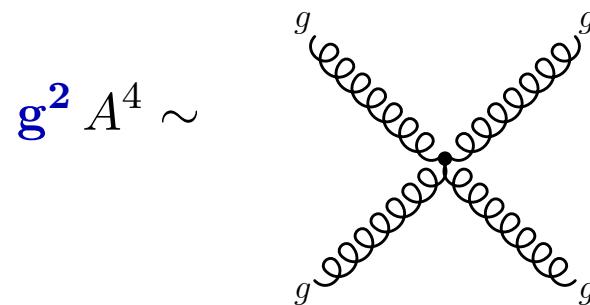
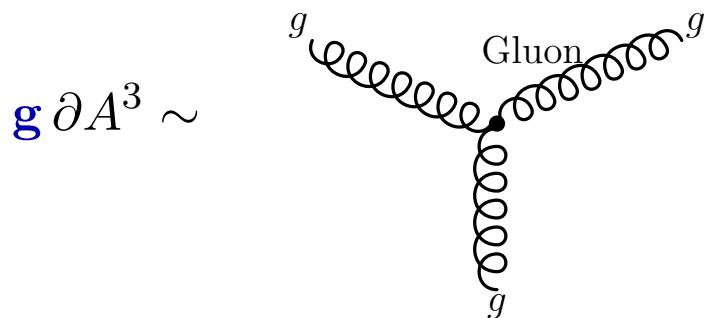


Wechselwirkung:

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$
charge →	$2/3$
spin →	$1/2$
	up
mass →	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$
spin →	$1/2$
	charm
mass →	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$
spin →	$1/2$
	top
mass →	0
charge →	0
spin →	1
	gluon
Quarks	
mass →	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$
charge →	$-1/3$
spin →	$1/2$
	down
mass →	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$
charge →	$-1/3$
spin →	$1/2$
	strange
mass →	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$-1/3$
spin →	$1/2$
	bottom

Verantwortlich z.B. für
den Zusammenhalt des
Protons

- Gluonen haben **Selbstwechselwirkungen**



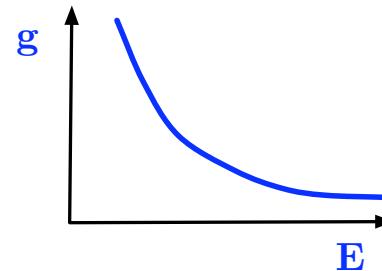
- Die starke Kraft:
 - 1000 mal stärker als elektromagnetische Kraft
 - 10^5 mal stärker als schwache Kraft
 - 10^{38} mal stärker als Gravitation!!

QUANTENCHROMODYNAMIK: DER SCHEINRIESE



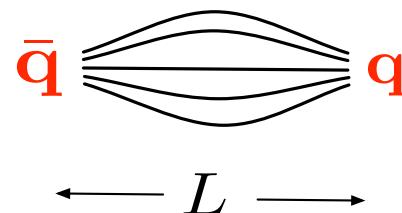
- Kopplungskonstante ist energieabhängig $g \rightarrow g(E)$

[Gross, Wilczek, Politzer]



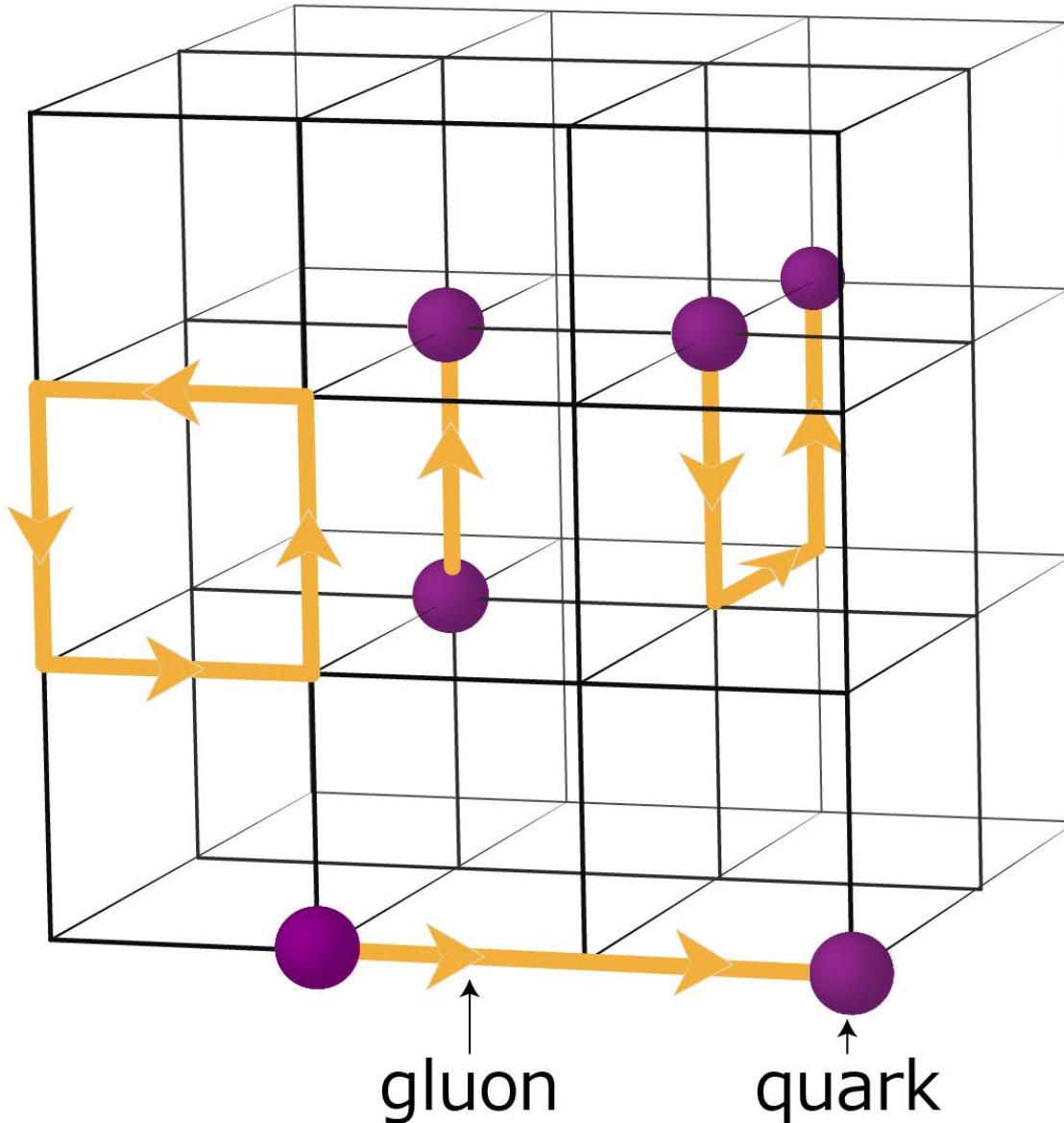
- Niedrige Energien ($g \gg 1$): **Confinement** (“Farbeinschluss”)
Es werden keine freien Quarks oder Gluonen beobachtet.
- Stattdessen: Gebundene Zustände (**Hadronen**)

Mesonen:



- $\bar{q}q$ -Potential:
$$V = \frac{1}{l_S^2} L$$
 “Farbkraftschlauch”

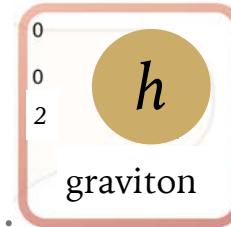
GITTERFELDTHEORIE: QUANTENFELDTHEORIE AUF DEM COMPUTER



Diskretisierung der Feldtheorie:

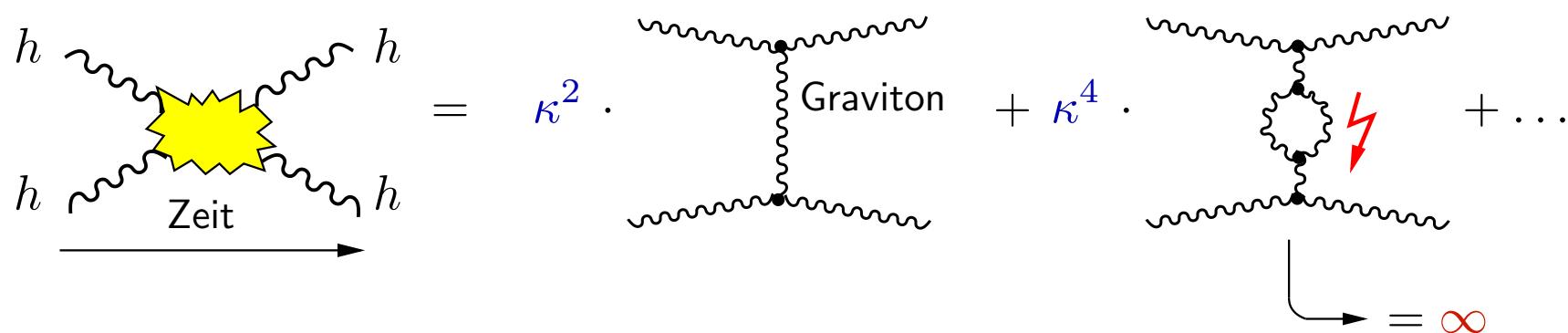
- 4d Raumzeitgitter
- Pfadintegral wird ein hochdimensionales gewöhnliches Integral
- Numerische Berechnung mittels Monte-Carlo Methoden
- Nichtstörungstheoretische Ergebnisse möglich
- Kontinuumslimes nichtrivial

PROBLEM DER QUANTENGRAVITATION



- Behandle Einsteins Gravitationstheorie als Quantenfeldtheorie:

Gravitonstreuung: $g_{\mu\nu}(x) = \eta_{\mu\nu} + \kappa \cdot h_{\mu\nu}(x)$ (Gedankenexperiment)



- **NICHT** "renormierbar" \Rightarrow

Quantenfeldtheorie der Gravitation benötigt ∞ viele zu messende Parameter

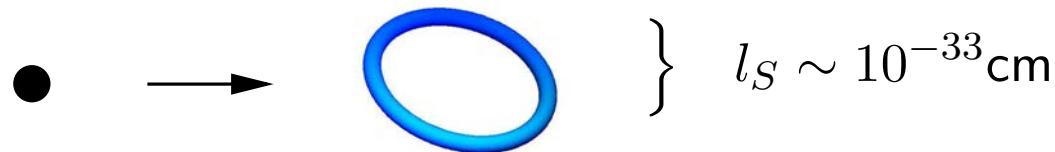
- Kopplungskonstante der Gravitation sehr schwach:

Wird relevant erst bei der Längenskala $[\kappa] = \frac{1}{M_{\text{Planck}}} \hat{=} 10^{-33} \text{ cm}$

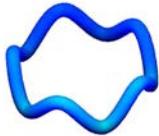
DIE STRINGTHEORIE

Wie können wir Vorhersagekraft für die Quantengravitation erreichen?

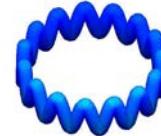
- **Idee:** Ersetze Teilchen durch ausgedehntes 1d Objekt: “**String**”



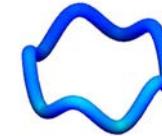
- Quantenmechanik einer “Saite”: Schwerpunktsbewegung + Eigenschwingung:



Graviton

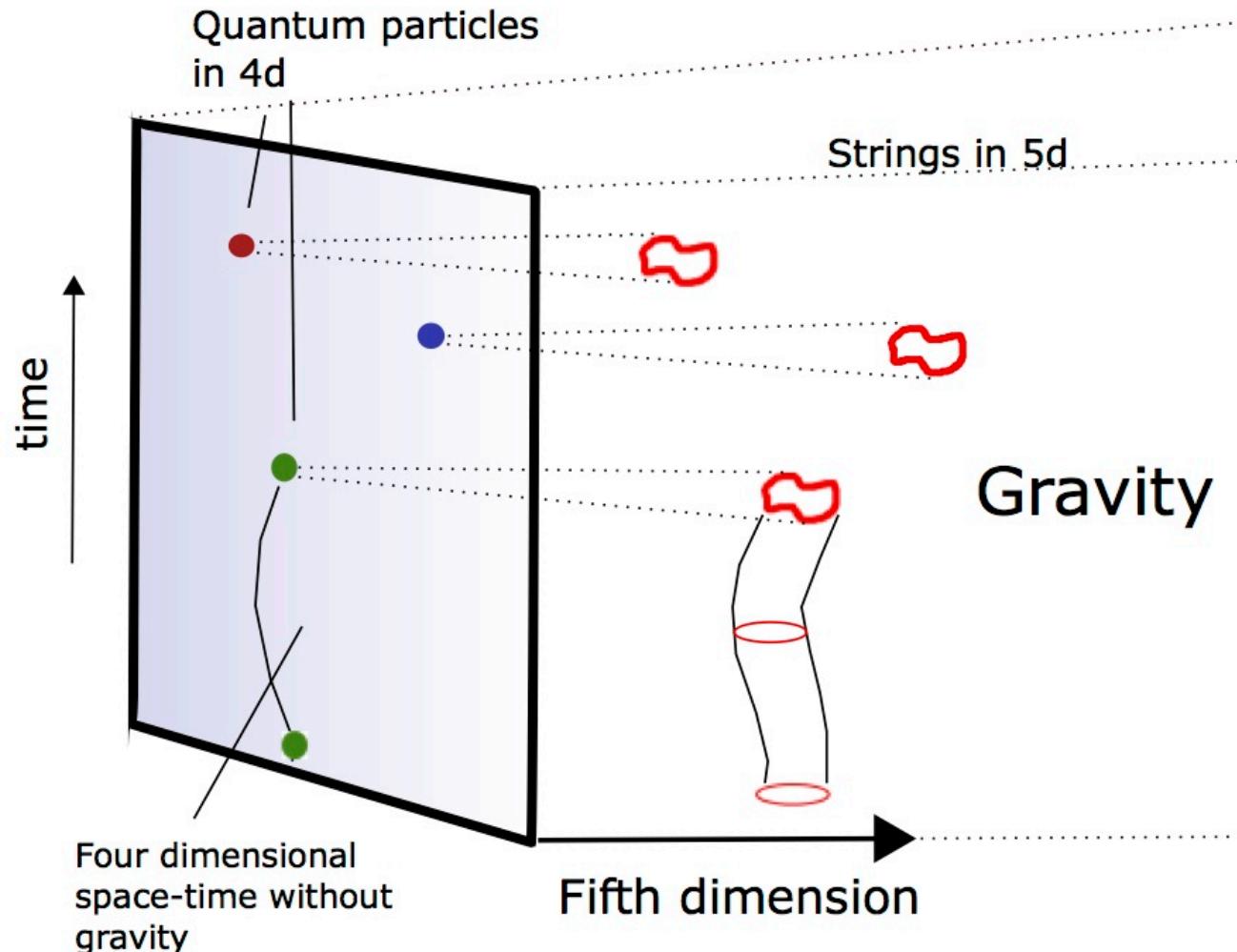


Eichteilchen



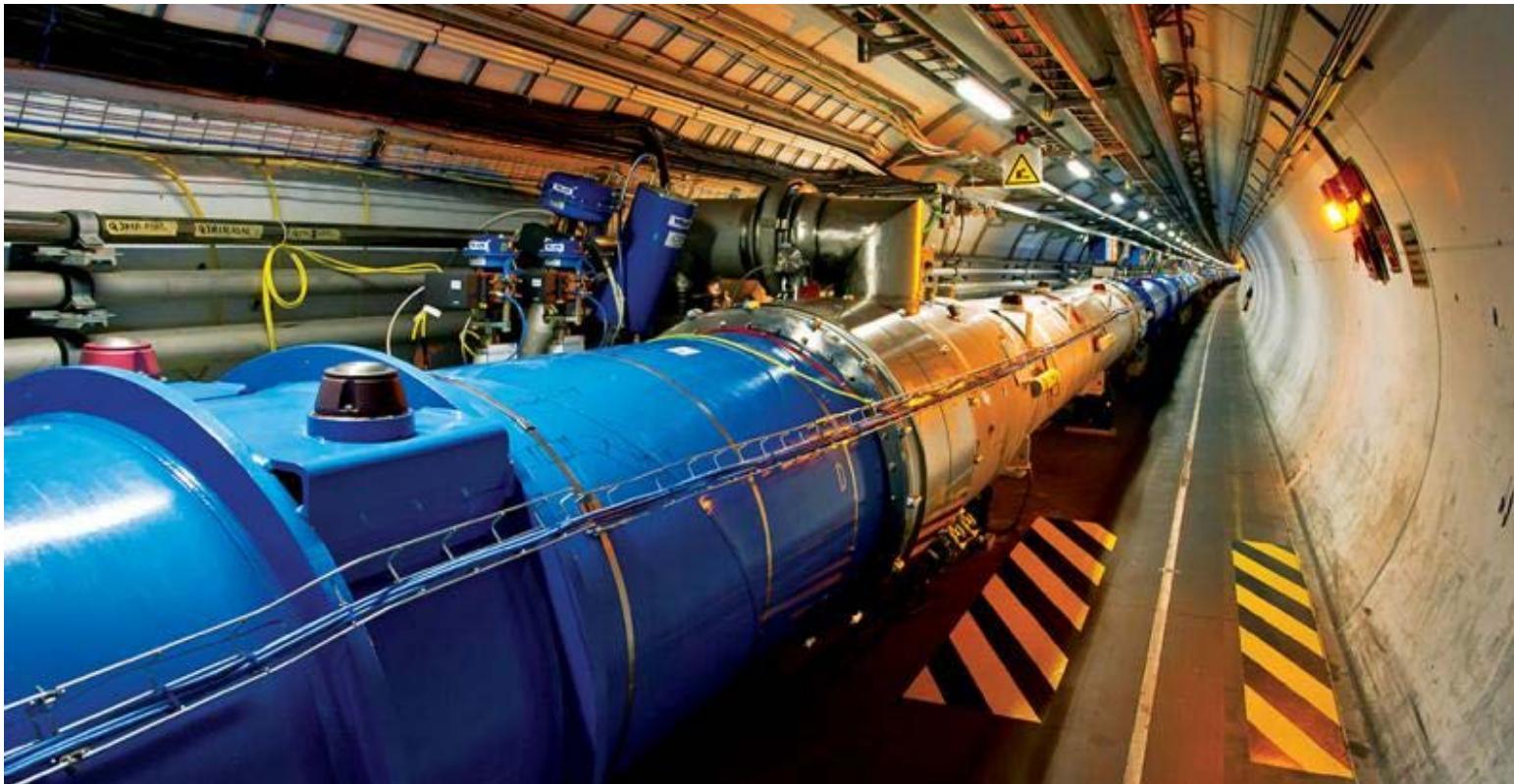
Materieteilchen

DIE WELT ALS HOLOGRAMM: DIMENSIONEN SIND ILLUSIONEN



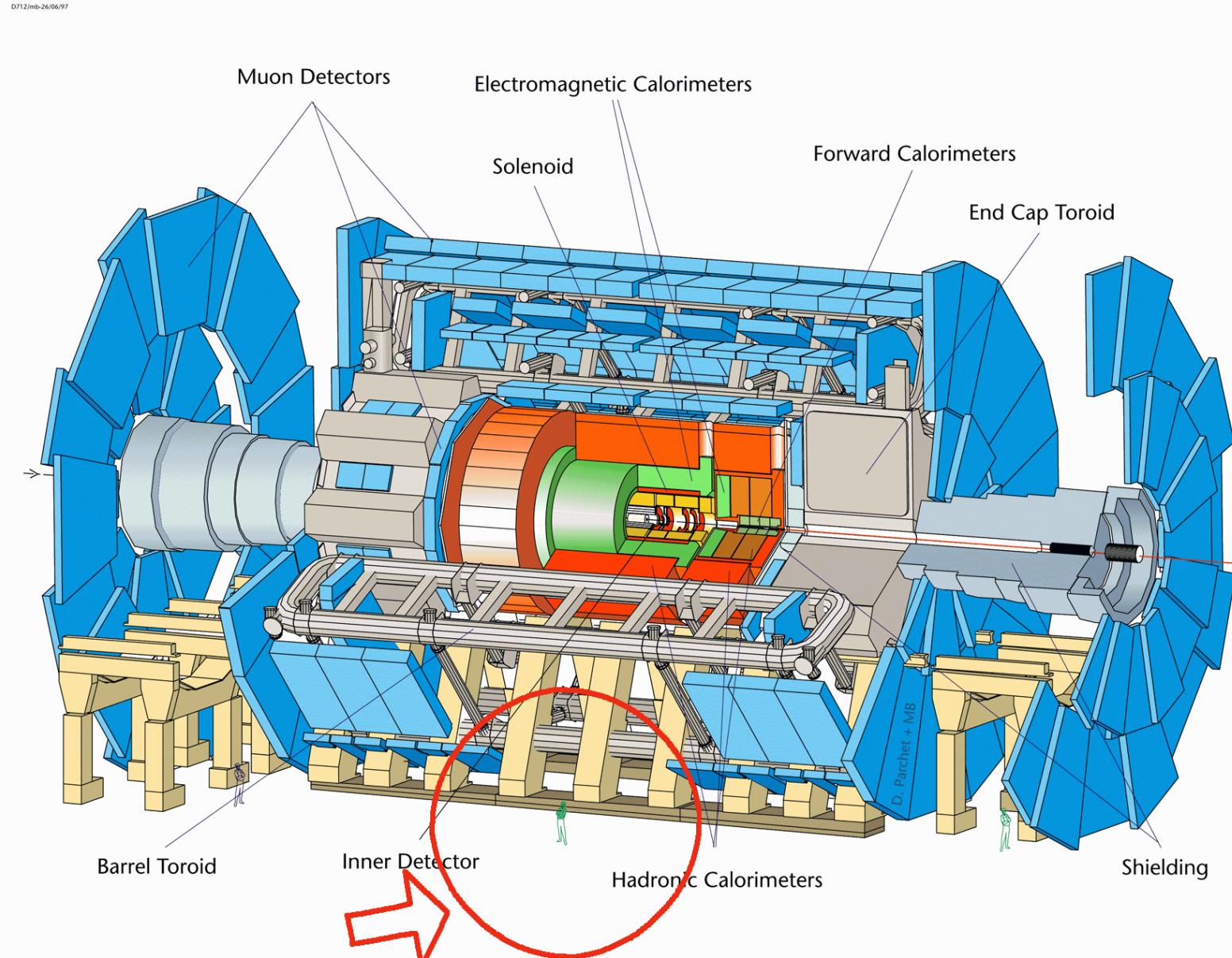
4d particle theory \Leftrightarrow (5+5)d gravity theory \Leftrightarrow 2d string worldsheet theory

DER LARGE HADRON COLLIDER AM CERN IN GENF

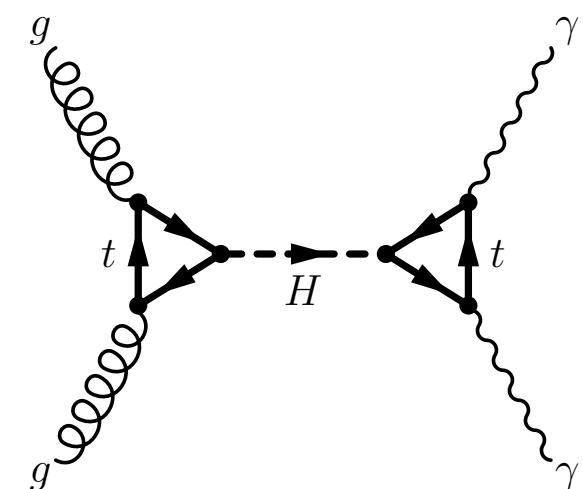
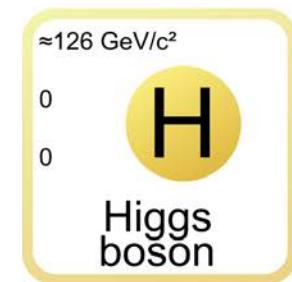
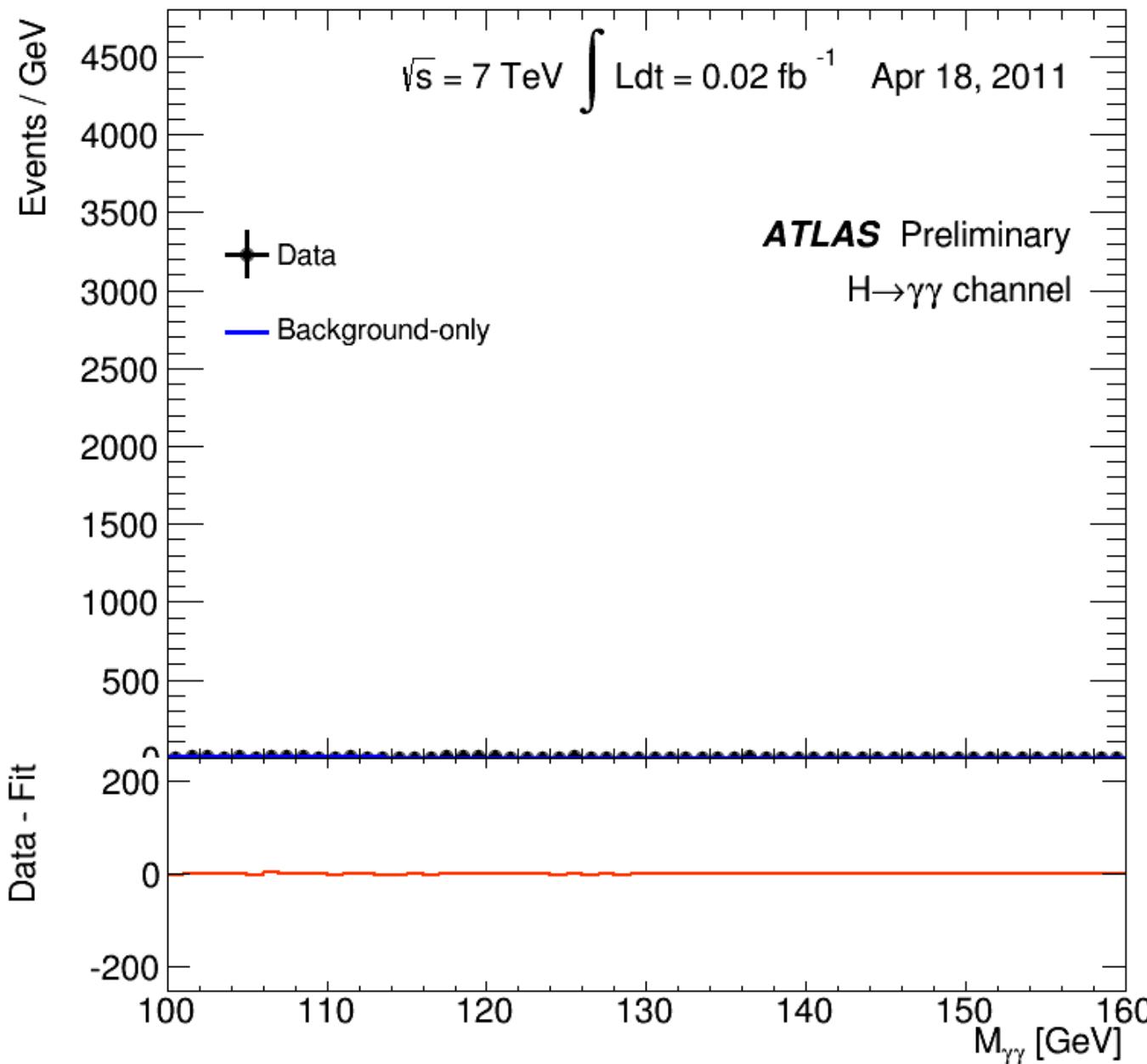


- Die „Weltmaschine“: Größter und leistungsfähigster Teilchenbeschleuniger der Welt
- Vakuumring von 27km Umfang mit supraleitenden Magneten
- Zwei Protonenstrahlen laufen gegenläufig und kollidieren an 4 Detektoren (**ATLAS**, CMS, ALICE, LHCb) bei 13 TeV

DER ATLAS DETEKTOR

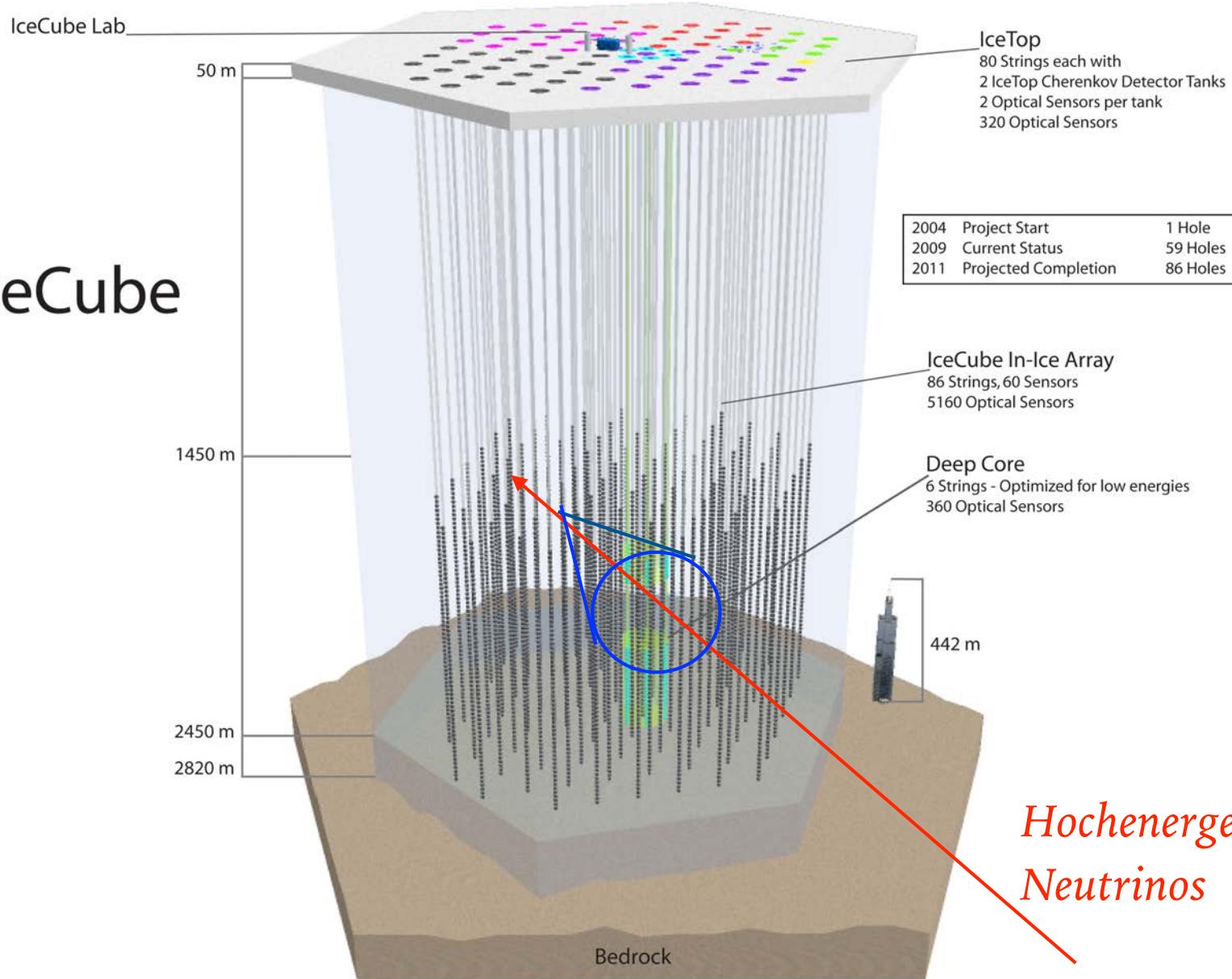


GRÖßTER ERFOLG: NACHWEIS DES HIGGSTEILCHENS



ASTROTEILCHEN-PHYSIK MIT ICECUBE NEUTRINO OBSERVATORIUM

IceCube

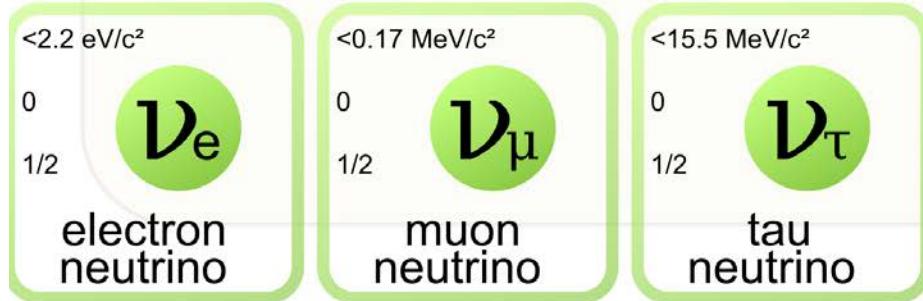


*Photomultiplier
messen Cherenkov-
Strahlung*

*Am Südpol! Eis
wird als Detektor
genutzt*

*Hochenergetische kosmische
Neutrinos*

NEUTRINOPHYSIK

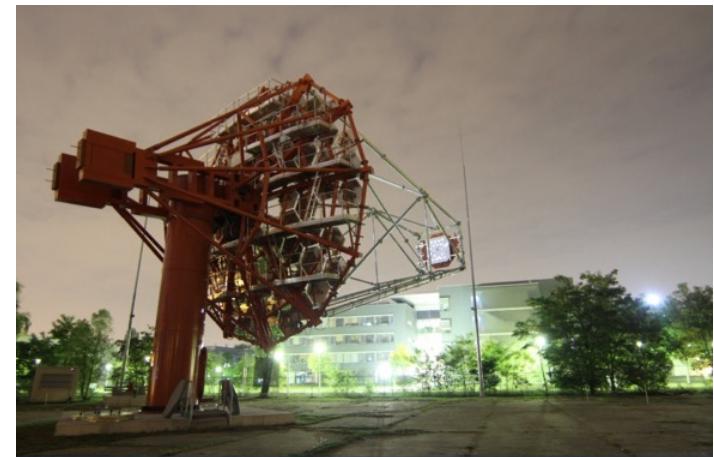


- Neutrinooszillationen
- Neutrinomassen
- Ursprung kosmischer Neutrinos
- Neutrino Astronomie: Aktive Galaktische Kerne
- Koinzidenzmessungen mit kosmischer Gammastrahlung und Gravitationswellen

ASTROTEILCHENPHYSIK MIT PHOTONEN: H.E.S.S. & CTA



- Nachweis hochenergetischer kosmischer Gammastrahlung
- H.E.S.S. in Namibia
- Zukünftiges Projekt CTA:
- Modell hier in Adlershof



TEILCHEN, FELDER, UNIVERSUM – EXPERIMENT

Exp. Elementarteilchenphysik: ATLAS@LHC, ShiP

Berge (HU/DESY)

Issever

Lacker

Lohse

Exp. Astroteilchenphysik: HESS und CTA (Namibia), Ice-Cube (Südpol)

Berge (HU/DESY)

Franckowiak

Kowalski

Lohse

Beobachtende Kosmologie:

Kowalski

Beoschleunigerphysik

Jankowiak (HZB)

TEILCHEN, FELDER, UNIVERSUM – THEORIE

Phänomenologie

Grojean (HU/DESY)

Uwer

Schulze

Gitterreichtheorie

Patella

Sommer (HU/DESY)

Quantenfeldtheorie und Strings:

Hohm

Malek

Plefka

Mathematische Physik

Kreimer

Staudacher

van Tongeren

Gravitationswellen

Buonanno (MPI Potsdam)

Theoretische Astroteilchenphysik

Winter

AUSSENUNIVERSITÄRE PARTNER

.....



DESY (Zeuthen)

Experimentelle Elementarteilchenphysik

Experimentelle Astroteilchenphysik

Theoretische Astroteilchenphysik

Gitterfeldtheorie



Max-Planck Institut für Gravitationsphysik Potsdam

Gravitationswellen, Quantengravitation



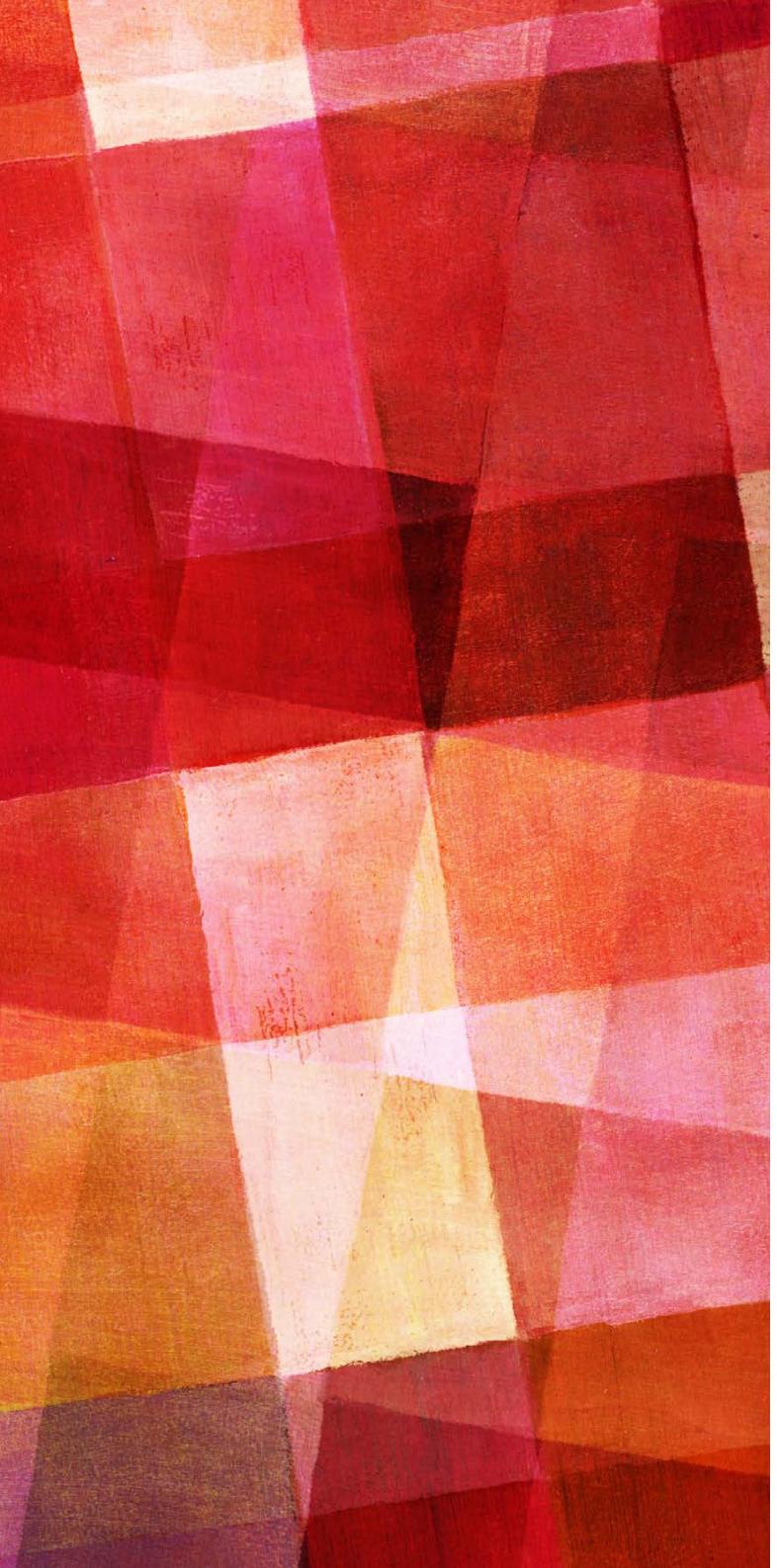
Helmholtz-Zentrum Berlin

Beschleunigerphysik



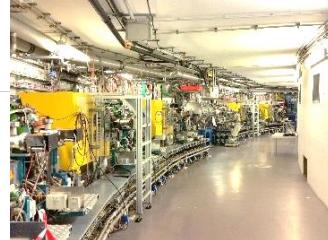
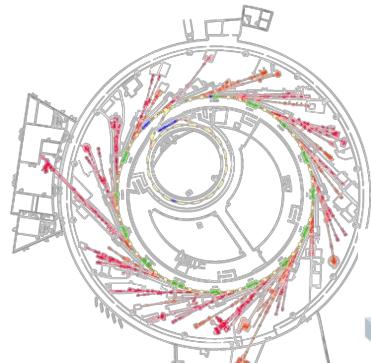
ALLGEMEINE EMPFEHLUNGEN ZUM STUDIENABLAUF

- Schwerpunktmodul I: P23.1 Einf. i.d. Elementarteilchenphysik
- Schwerpunktmodul II:
 - Theorie: P23.2 Theoretische Festkörperphysik
 - Experiment: P23.5 Laserphysik
- Spezialisierungen:
 - Theorie: P22.b Einführung in die Quantenfeldtheorie
 - Experiment: P25.1.c/P22.g Statistische Methoden der Datenanalyse
 - P24.1.h Detektoren
 - P24.1.e Experimentelle Elementarteilchenphysik
- Astroteilchenphysik: P22.g Kosmologie

A vertical abstract painting on the left side of the page. It features a complex arrangement of overlapping geometric shapes in shades of red, orange, yellow, and pink. The composition is roughly divided into three horizontal bands: a top band of red and orange, a middle band of yellow and orange, and a bottom band of pink and red. The edges of the shapes are slightly irregular, giving it a hand-painted feel.

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT

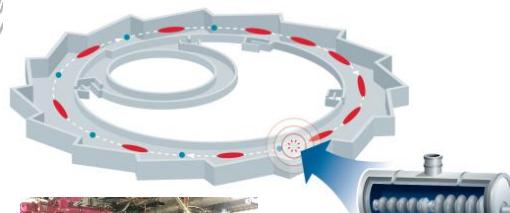
.....



BESSY II &

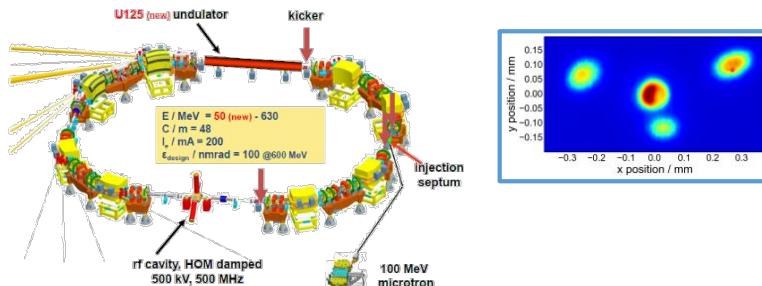
BESSY VSR

- Strahldynamik und Strahloptik für Elektronenspeicherringe
- Kurze Pulse variabler Länge (ps und fs) in Speicherringen



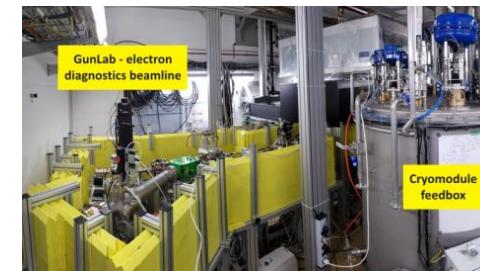
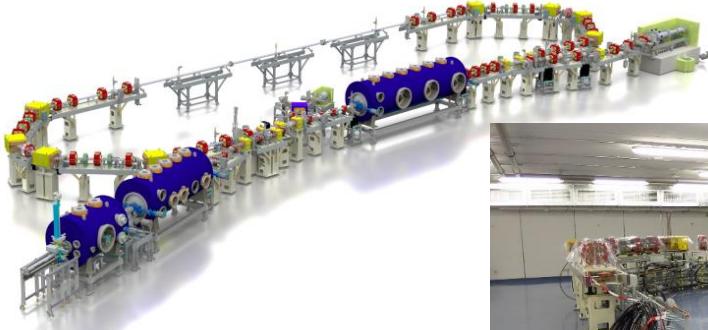
Metrology Light Source @ PTB

- longitudinale Strahldynamik
- low-alpha Betrieb für kürzeste Pulse

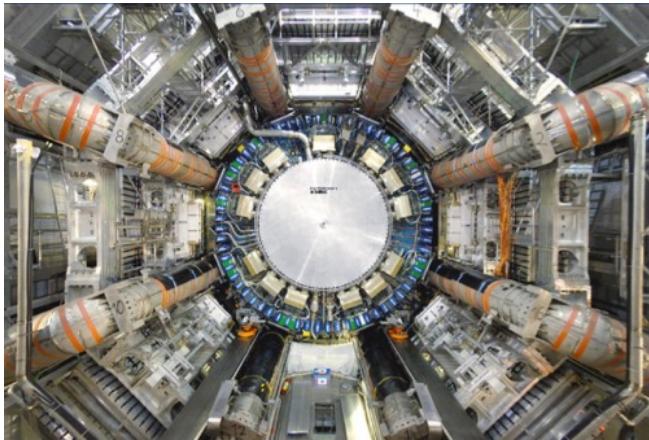


bERLinPro

- Testanlage für eine neue Beschleunigertechnologie
- Entwicklung von hochbrillanten Elektronenquellen



AG Lohse (3 ATLAS- & 3 CTA-Postdocs)



Teilchenphysik bei ATLAS

- Top-Quarks
- Flavour-ändernde Neutralströme
- Analyse großer Datensätze
- Moderne statistische Verfahren
- Theoretische Interpretation

- Analyse galaktischer Quellen
- Kalibration des Prototyp-Teleskops
- Analyse echter Daten
- Machine Learning Methoden
- Hardware/Software/Tests am CTA-Prototyp in Adlershof

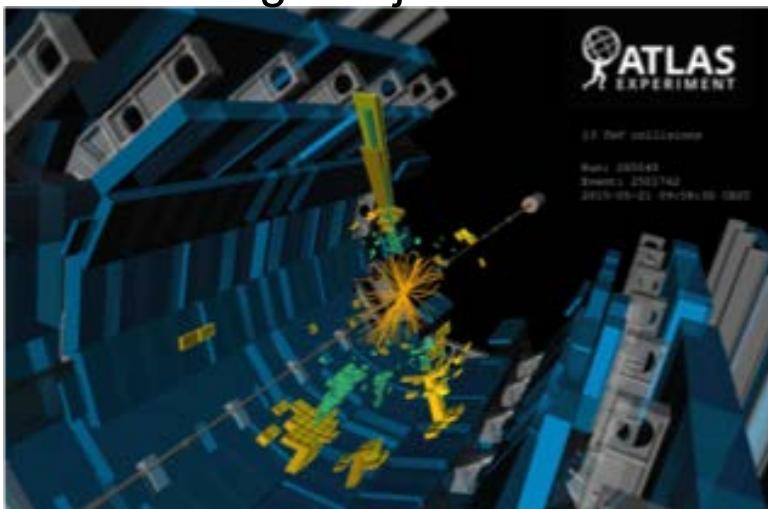


Gammastrahlungsastronomie
bei H.E.S.S. & CTA

EXPERIMENTELLE ELEMENTARTEILCHENPHYSIK 2 (AG LACKER)

Auf der Suche nach “Neuer Physik”
mit dem ATLAS-Experiment am
Large Hadron Collider (LHC) am CERN:

vektorartige Quarks, geladene Higgs-Bosonen,
rechtshändige Majorana-Neutrinos

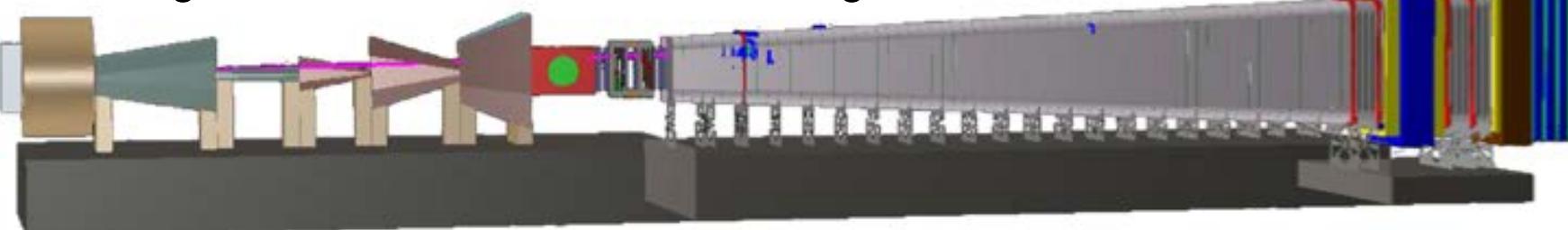


Neuer Siliziumstreifendetektor für
das ATLAS-Experiment für den
Hochluminositätsausbau des LHC



Neuer Experimentvorschlag: SHiP

Suche nach rechtshändigen Majorana-Neutrinos, "dunklen" Photonen, dunkle Materie
Entwicklung neuer Photodetektoren für Flüssigszintillatoren

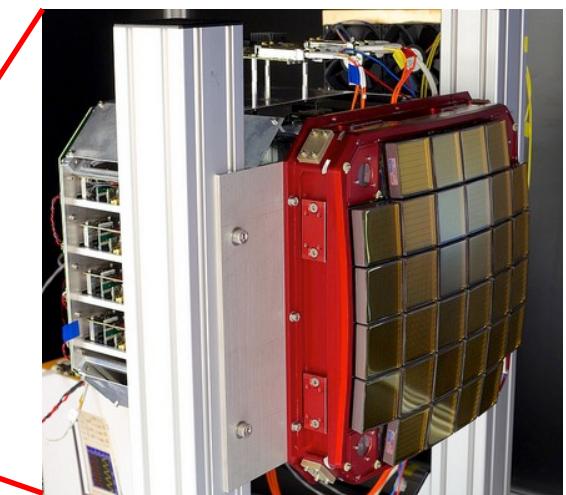
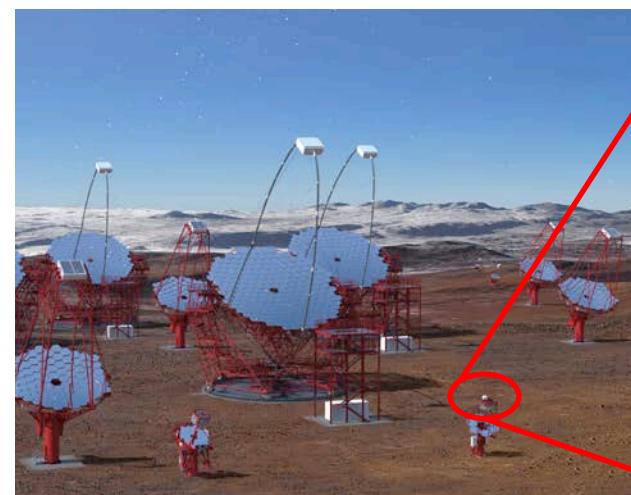
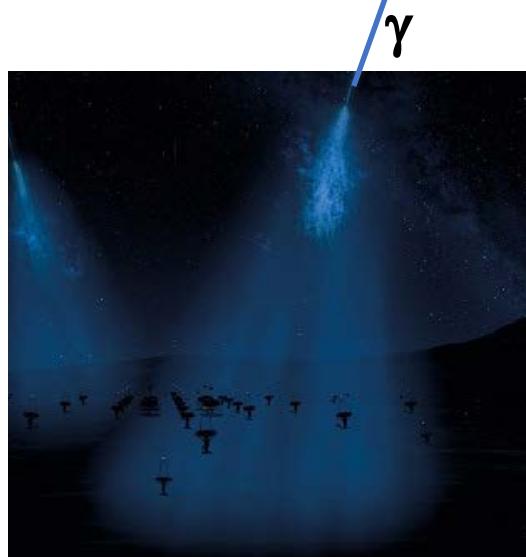


AG Experimentelle Teilchen- und Astroteilchenphysik

david.berge@desy.de



- Gammastrahlungs-Astronomie mit atmosphärischen Cherenkov Teleskopen
- Suche nach dunkler Materie am LHC (ATLAS)
- Datenanalyse Projekte H.E.S.S. oder ATLAS
- Programmieren, Statistik, Interpretation von Daten, um
 - kosmische Teilchenbeschleuniger zu verstehen
 - dunkle Materie zu suchen
- Entwicklung und Tests moderner Cherenkov Kameras
- State-of-art Photosensoren Tests

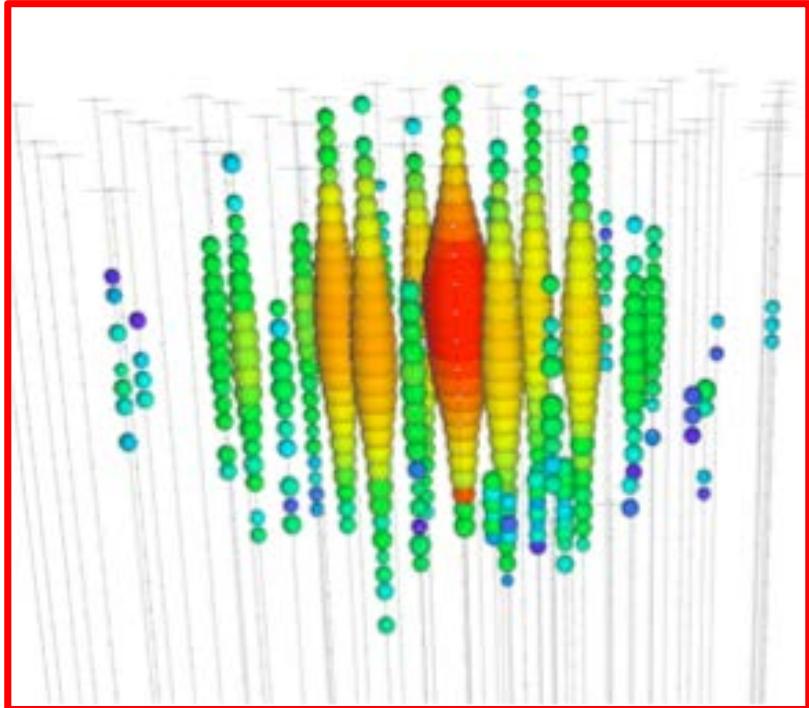




Experimental Astroparticle Physics & Cosmology



Prof. Dr. M. Kowalski, Dr. J. Nordin



Neutrinos

- Neutrino astronomy
- Neutrino physics
- Detector R&D (light sensors, etc)

Cosmology

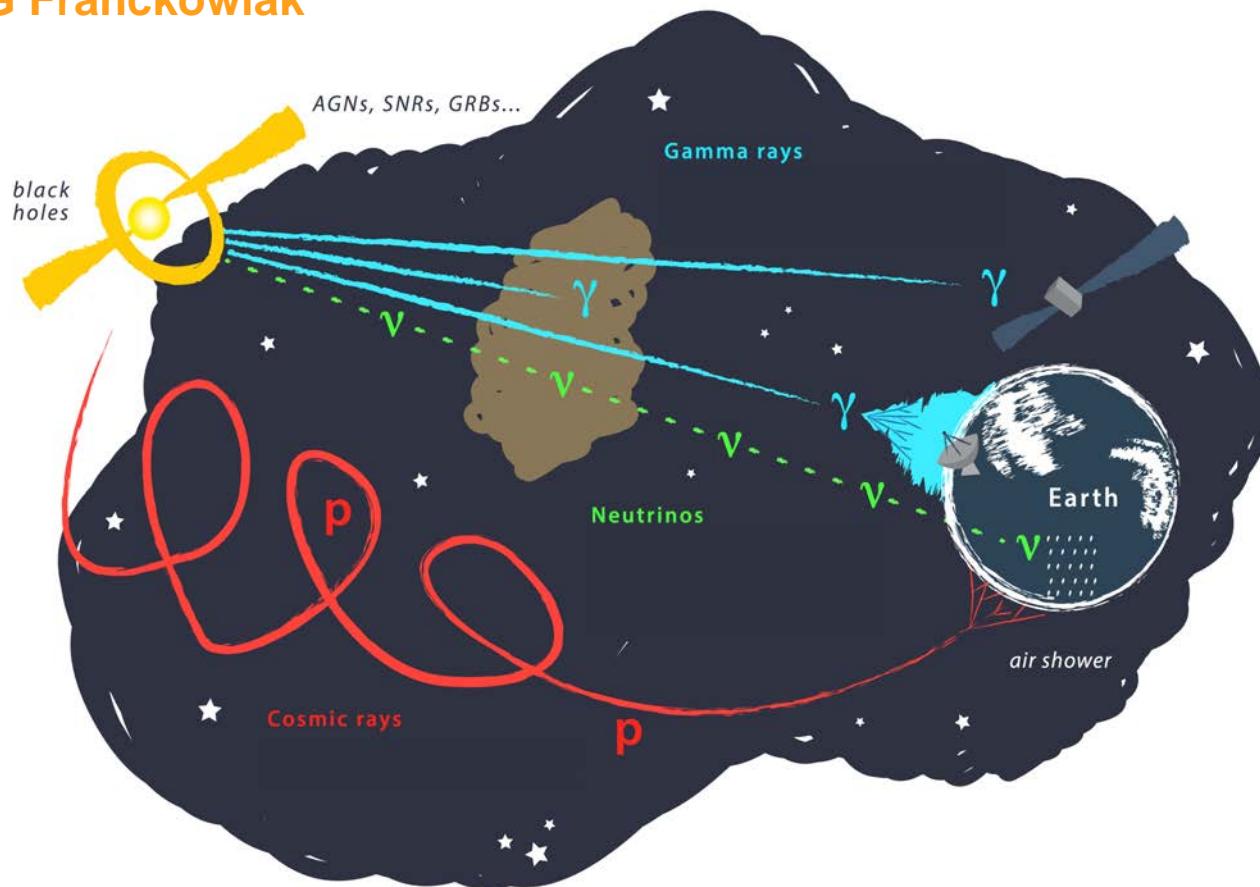
- Dark energy
- Hubble Constant
- Structure formation

Experiments: IceCube, IceCube-Gen2, Zwicky Transient Facility

Thesis projects on Simulation, reconstruction & machine learning, detector R&D

Multi-Messenger Astronomy

AG Franckowiak



Fermi gamma-ray space telescope



Robotic Optical telescopes

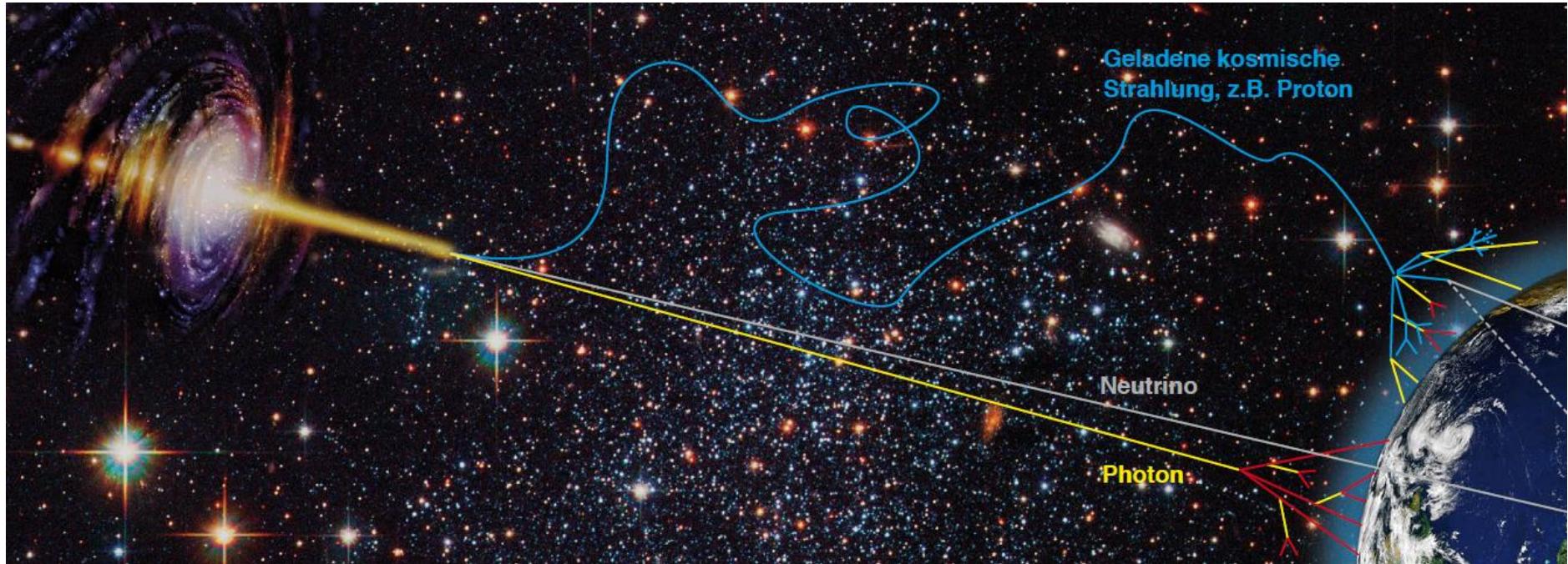


Goal: Identifying Neutrino sources through their electromagnetic counterpart

Method: Combine IceCube neutrino data with optical and gamma-ray data

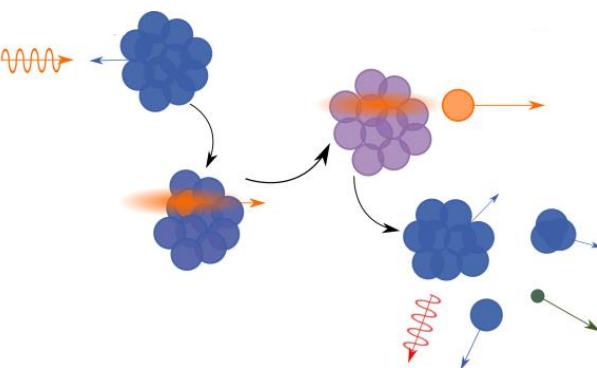
IceCube neutrino detector





Können durch die gemeinsame Betrachtung der drei Messenger die Quellen identifiziert werden?

- Kosmische Strahlung (Protonen / Ionen)
- Gamma-Rays
- Neutrinos



• **Forschungsschwerpunkte**

- Photo-Wechselwirkungen schwerer Kerne
- Simulation extragalaktischer Quellen
(Aktive Galaktische Kerne, Gammastrahlenblitze,)
- Propagation kosmischer Strahlung
- **Methoden:** Numerische Simulationen in C und Python
- **Interesse?** jonas.heinze@desy.de | annika.rudolph@desy.de
walter.winter@desy.de | astro.desy.de/theorie/neucos

Theoretical Particle Physics

From First Principles to Collider Phenomenology



Phenomenology of Elementary Particle Physics (*Prof. Peter Uwer*) (*Prof. Ramona Gröber*) (*Prof. Christophe Grojean*)

Precision Physics in Quantum Field Theories as Probe of Fundamental Interactions (*Dr. Markus Schulze*, Heisenberg Fellow)

Motivation

Understanding of Nature at the quantum level.

What are the basic building blocks and interactions?

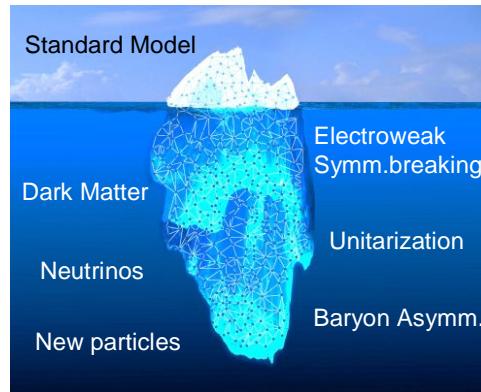
What are the fundamental principles?

The Standard Model of particle physics is inspired by symmetries.

It describes a vast number of phenomena with high precision.

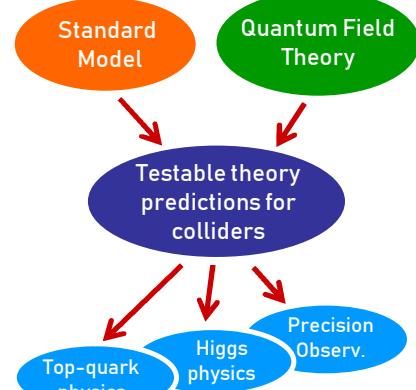
Colliders are the only controlled environment for elementary particle studies.

Conditions like 10^{-10} sec after the Big Bang.



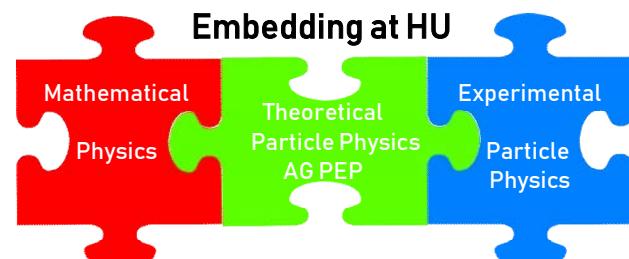
Open Questions

- Are there **new particles** hiding (weakly interacting or heavy)?
- What is **Dark Matter**?
- How do **neutrinos** acquire their masses? Neutrino **CP violation**?
- What causes the **Baryon asymmetry** in the universe?
- Does the Higgs mechanism "correctly" describe **Electroweak Symmetry Breaking** (EWSB)?
- Does the Higgs restore **unitarity** of scattering amplitudes?

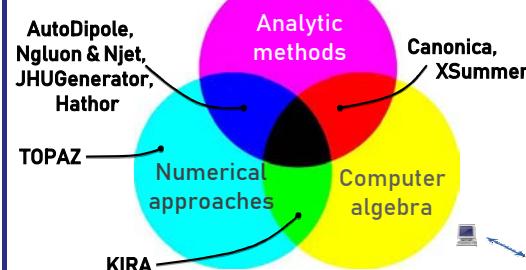


Main research directions

- Conceptual developments for perturbation theory
- Precision calculations for collider processes
- Refining the interface theory - experiment



Methodology



Published tools partly developed by Master and Graduate students.

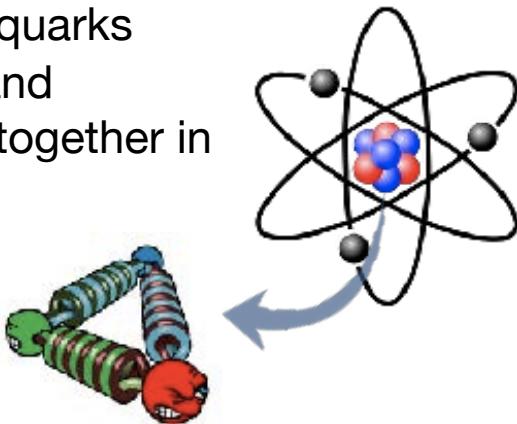
See also: www.physik.hu-berlin.de/pep/tools



Gitterfeldtheorie – Lattice Field Theory

Strong force keeps quarks together in protons and neutrons, and these together in the atomic nuclei.

1.



Fundamental theory of quarks and gluons:
Quantum ChromoDynamics (QCD).

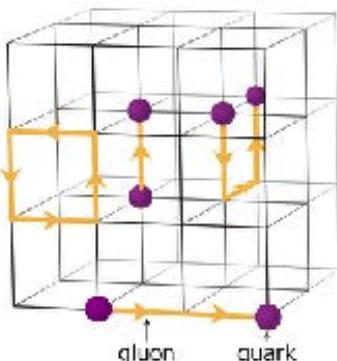
2.

This is a quantum field theory with very rich phenomenology.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_j \bar{q}_j (i \gamma^\mu D_\mu + m_j) q_j$$

Numerical simulations on supercomputers are needed to extract physics from QCD equations (approximated on a lattice).

3.



Research group
Prof. Agostino Patella
Prof. Rainer Sommer
Prof. Ulrich Wolff
Dr. Oliver Bär
Dr. Martin Hasenbusch

AG Staudacher — Raum, Zeit & Materie

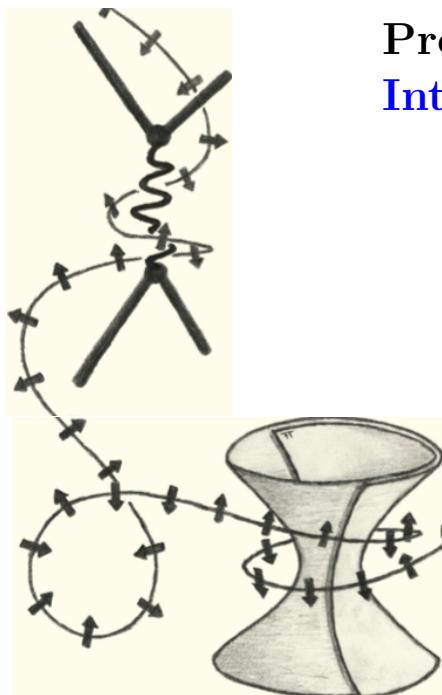
- Eichtheorie/Stringtheorie Dualität, speziell:

$\mathcal{N} = 4$ susy Yang-Mills Theorie in 4 Dimensionen \Leftrightarrow IIB Superstrings auf $\text{AdS}_5 \times S^5$

Energieniveaus: **Bethe Ansatz** (Spinketten) — **Integrabilität**

- Mathematische Strukturen in **Streuamplituden**

Mitglieder und derzeitige Forschungsschwerpunkte:



Prof. Dr. M. Staudacher:

Integrabilität & Amplituden, Yangsche Invarianz, Graßmann-Mannigfaltigkeiten

Dr. J. Brödel:

Feynman Integrale & String-Amplituden, elliptische Polylogarithmen

Dr. B. Eden:

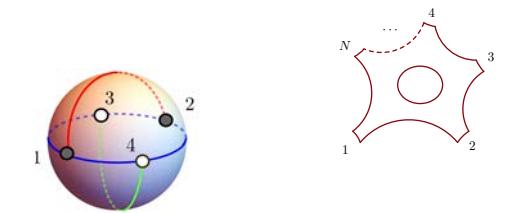
Integrabilität & n-Punkt Funktionen

Dr. A. Ipsen:

Integrabilität & Randbedingungen

Dr. S. van Tongeren:

Integrabilität & Deformierungen von $\text{AdS}_5 \times S^5$



$$c_1 = B_+ (\square) = \square$$

$$c_1 = B_+ (\square) + B_+ (\square) + B_+ (\square)$$

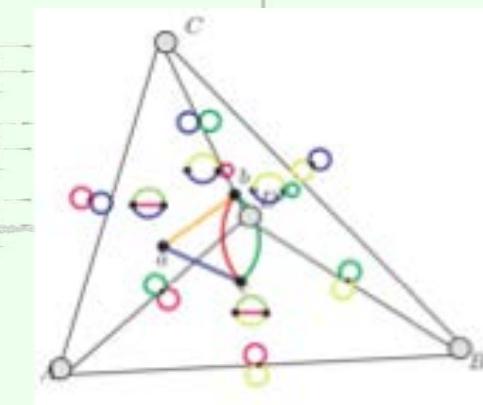
$$c_1 = B_+ (\square) + B_+ (\square) + B_+ (\square) + \frac{1}{2} [B_+ (\square) + B_+ (\square) + B_+ (\square)]$$

- Feynman diagrams are the building blocks of perturbative calculations in quantum field theory
- Each diagram represents an integral that contributes to the amplitude of a particle scattering process
- Calculations important for theory and practice (high-energy physics, fundamental forces/standard model, phase transitions in solids and superfluids)
- Connections to pure mathematics: Combinatorics, Hopf Algebras, Number Theory, Algebraic Geometry, Functional analysis and special functions
- A road to quantum gravity?

Renormalisation

Dyson-Schwinger equations

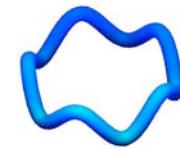
Analytic structure of Feynman integrals



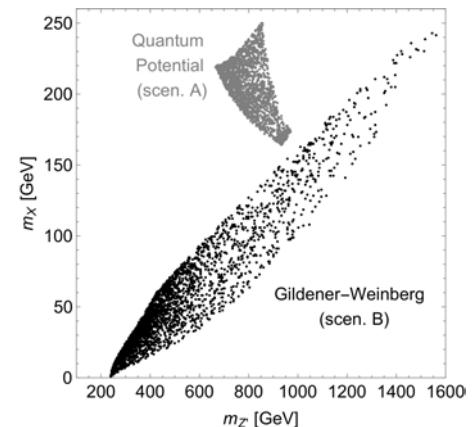
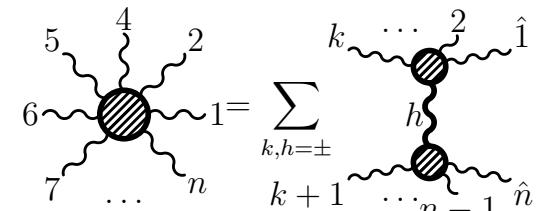
QUANTENFELD- UND STRINGTHEORIE

- Moderne Methoden für Streuamplituden in Eichtheorien und Gravitation
- AdS/CFT Korrespondenz und Integrabilität

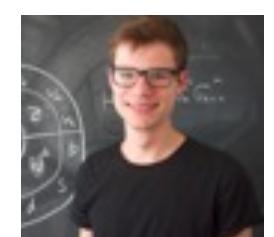
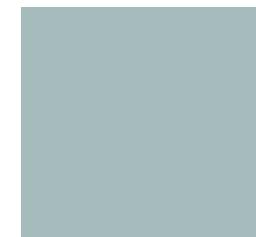
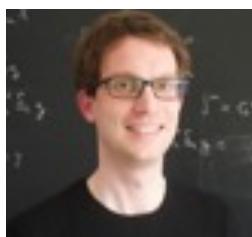
- Konforme Symmetrien



- Erweiterungen des Standardmodels (Higgsstabilität und Konformes SM)



Ansprechpartner:



Prof. J. Plefka PD. T. Klose Dr. F. Loebbert Dr. Tianheng Wang J. Miczajka