50 Jahre Teilchenphysik in Hamburg

Universität Hamburg

DESY

Albrecht Wagner, DESY und Universität Hamburg, 27. August 2014

Überblick

- Wie alles in Hamburg begann…
- Beschleuniger in Hamburg
  - Was sind und wozu braucht man Beschleuniger
- Elementarteilchenphysik
  - Die fundamentalen Bausteine und Kräfte
- DESY, DORIS, PETRA, HERA (1964 – 2007)
  - Beiträge Hamburgs zur Entwicklung der Teilchenphysik
- Die Zeit nach HERA und offene Fragen der Teilchenphysik
  - LHC
  - International Linear Collider

Voraussetzungen

1955 trat der **Vertrag über die Beziehungen zwischen der Bundesrepublik Deutschland und den Drei Mächten** in Kraft.

Die Bundesrepublik erhielt die volle Macht eines souveränen Staates über ihre inneren und äußeren Angelegenheiten.

Damit entfiel u.a. das Verbot zur kernphysikalischen Forschung in D

Es bestand in D der Wunsch den Vorsprung des Auslands auf diesem Forschungsgebiet aufzuholen

1954 wurde CERN als europäische Zentrum für subatomare Forschung gegründet.

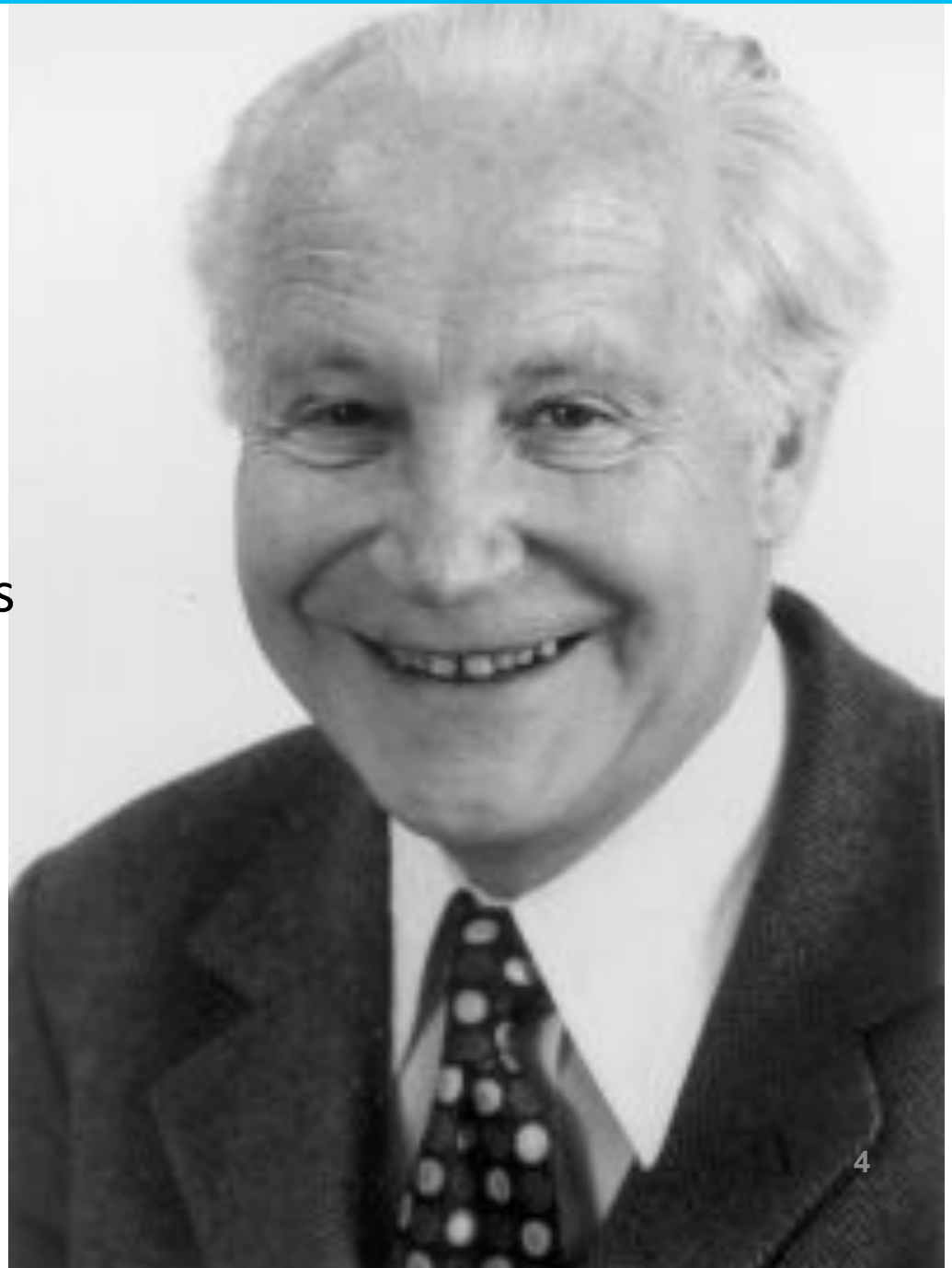
Wie alles in Hamburg begann

Willibald Jentschke
1911 - 2001

Nimmt 1955 Ruf an Uni HH an, nach Zusage von 7.3 Mio DM durch die FHH für den Bau eines Elektronenbeschleunigers

Vom HH-Projekt zum Bundesprojekt zur Nutzung durch die deutschen Universitäten

Universität Hamburg



Unterzeichnung Staatsvertrag
für DESY am 18.12.1959

Beschleuniger in HH

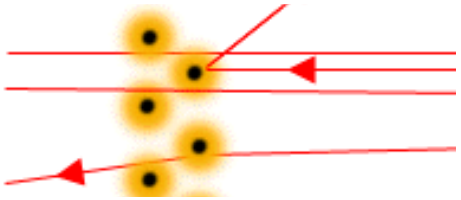
1964
1284

DESY beschleunigt erste Elektronen

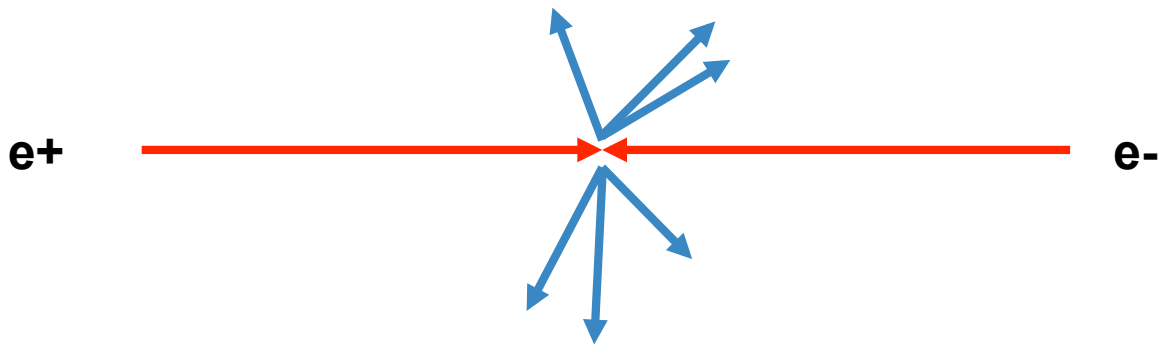
Warum braucht man Beschleuniger?

Um Teilchen auf hohe Energien beschleunigen,

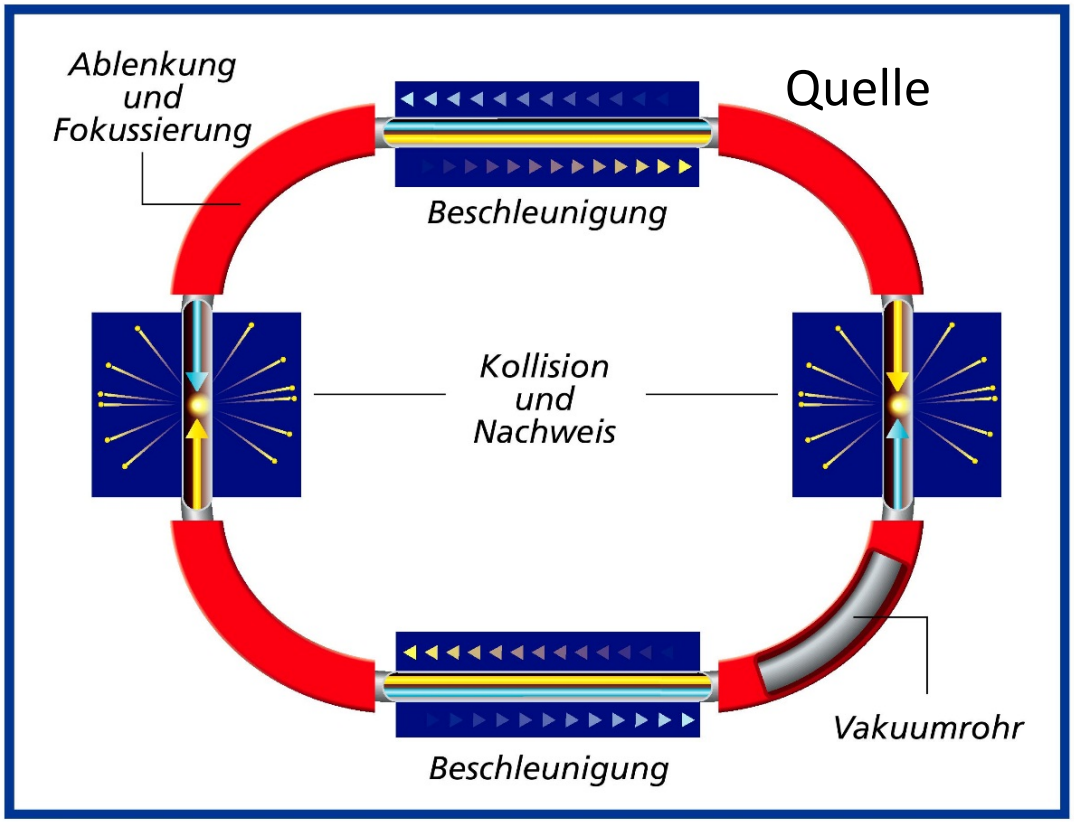
- Um kleinste Gegenstände zu sehen: $E = h\nu$



- Um schwere Massen zu erzeugen: $E = m c^2$



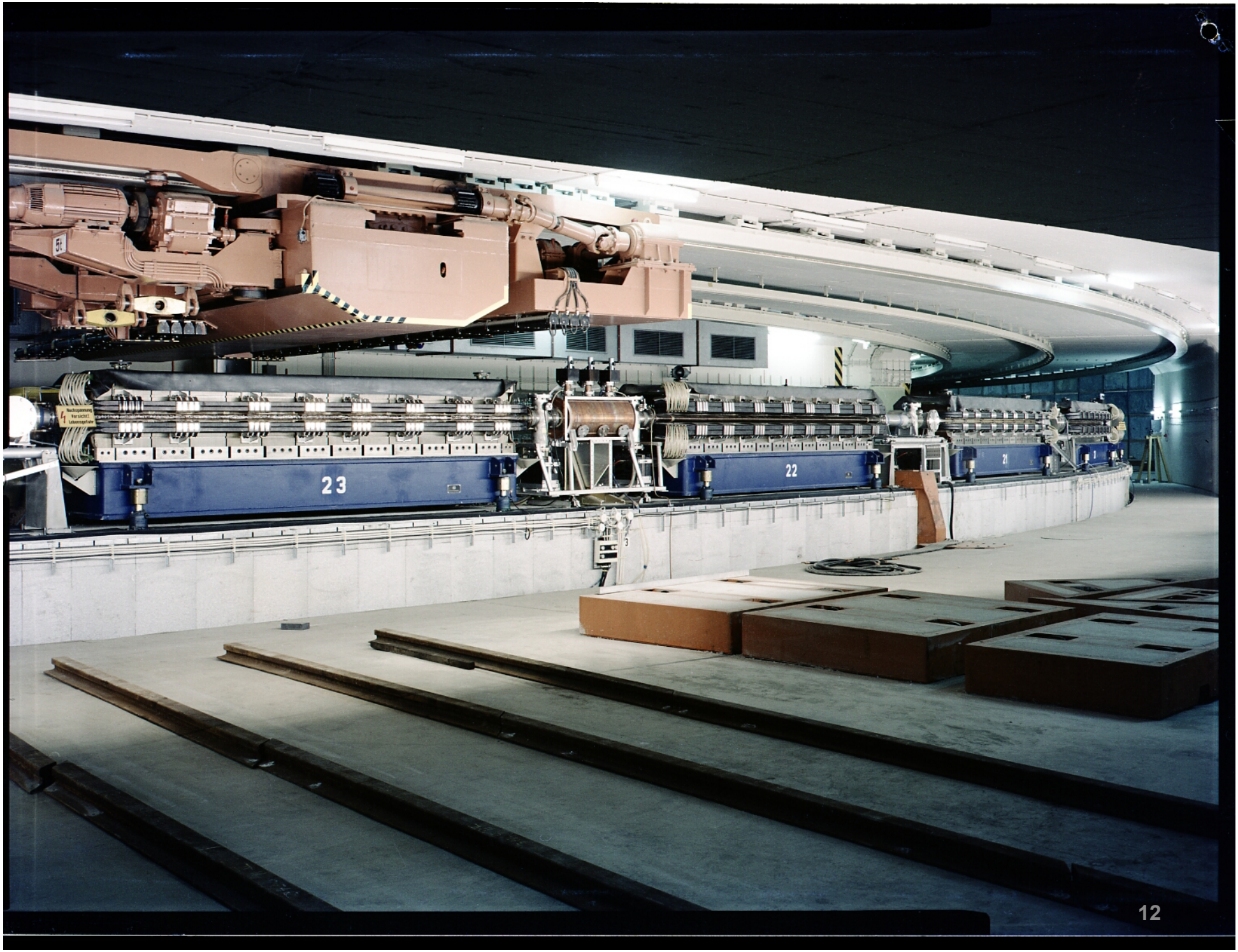
Das Beschleuniger-Prinzip



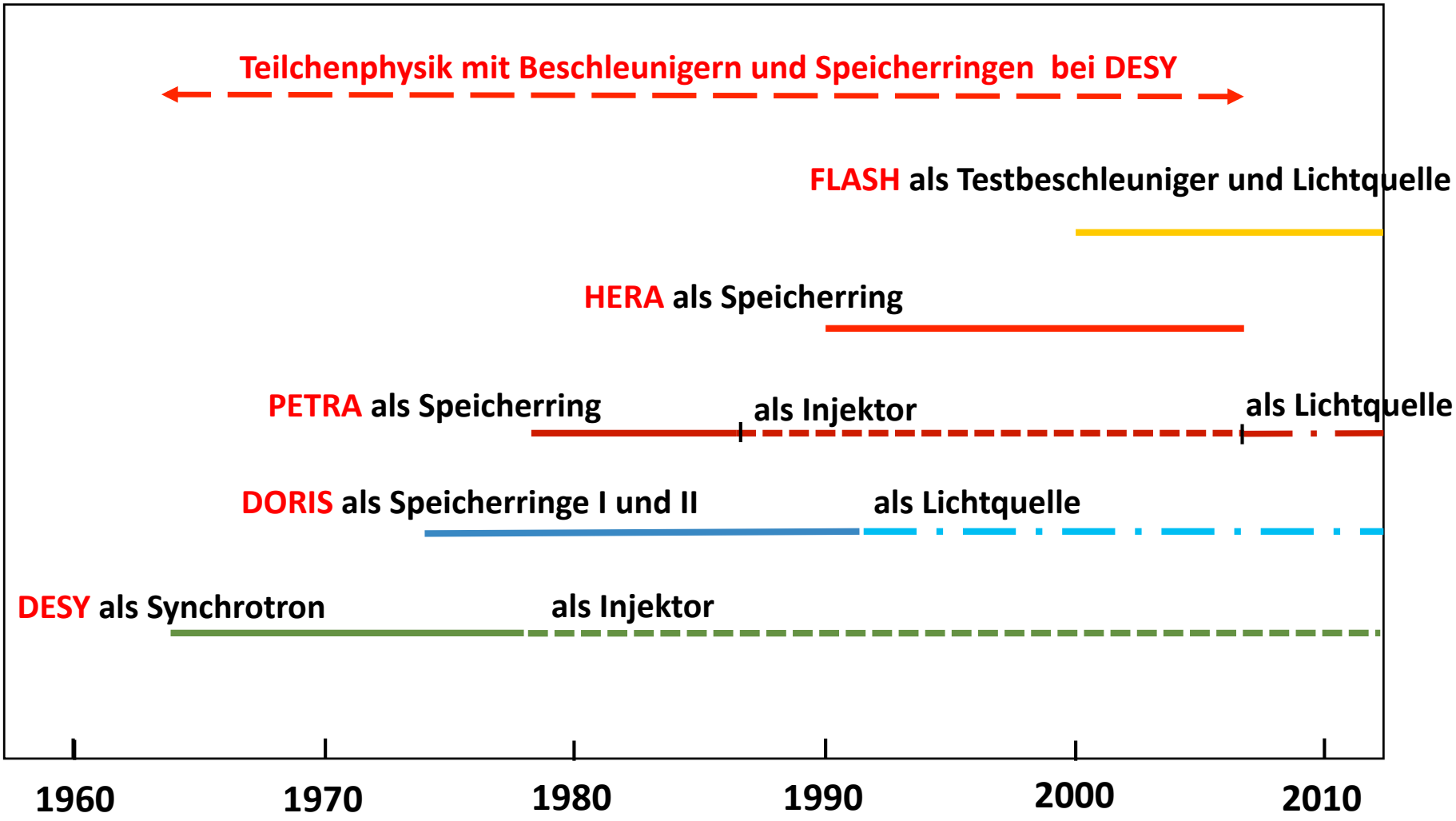
Größe wird bestimmt durch:

- **technisch erreichbare Magnetfeldstärke zur Ablenkung der Teilchen**
- **Begrenzung des Energieverlustes in den Kurven**

Von Beschleunigern zu Speicherringen

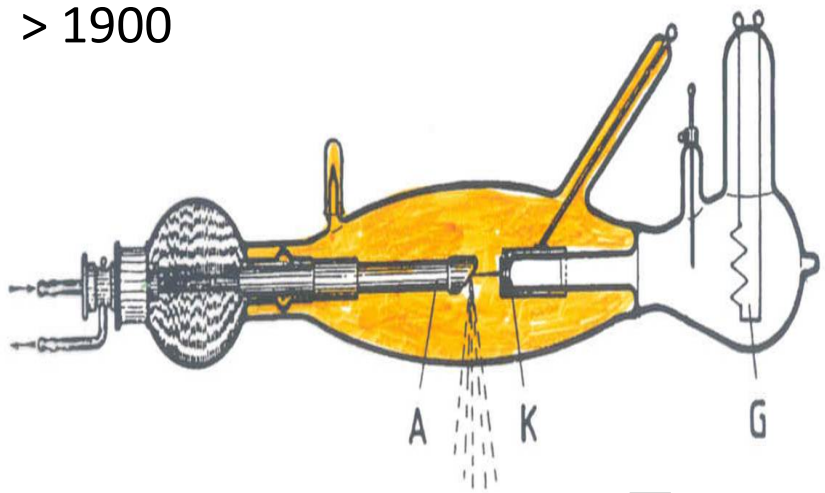

23
22
21
5t

Beschleuniger bei DESY



Beschleuniger als Lichtquellen

> 1900

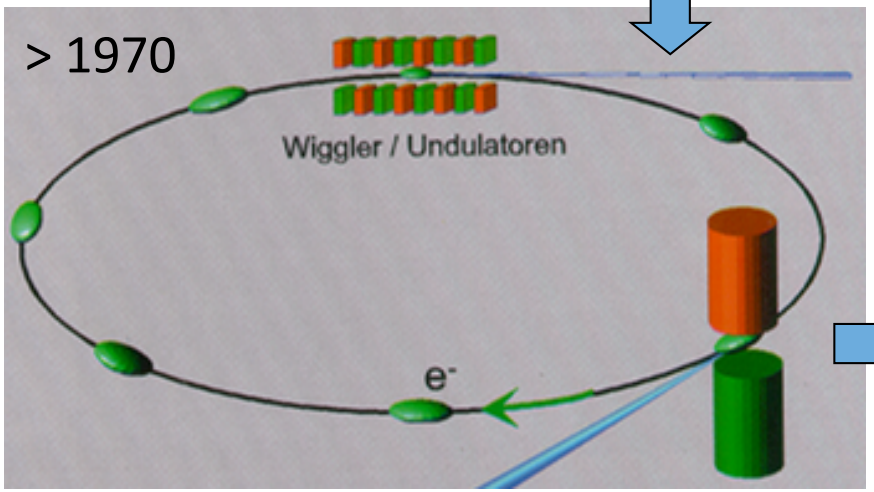


Röntgenröhren

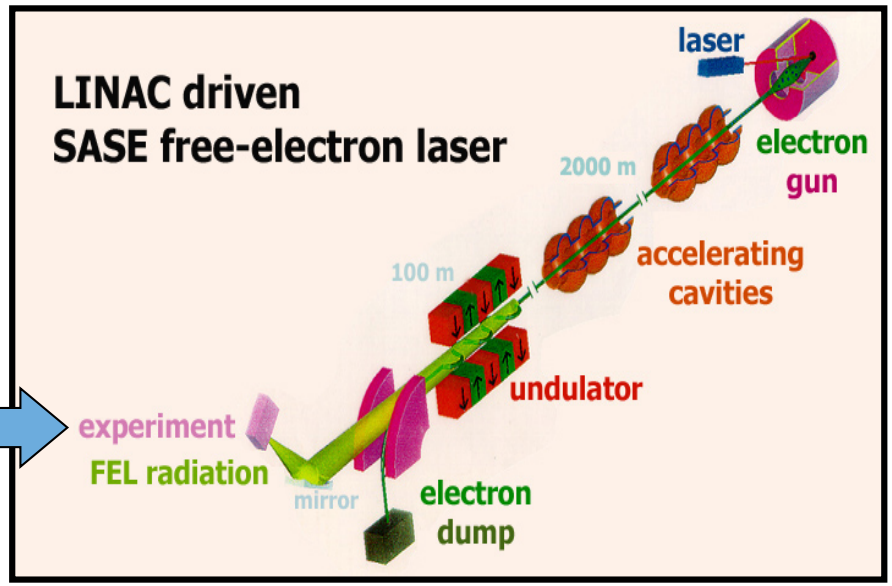
Synchrotron Strahlung

Röntgen Laser (XFEL)

> 1970



> 2000



Beschleunigerbau = Hochtechnologie

Im Kreis und geradeaus

Beschleunigte Ladungen strahlen (je leichter, umso mehr)

-> Verdoppelung der Energie in einem Kreisbeschleuniger erhöht den Energieverlust um einen Faktor 16

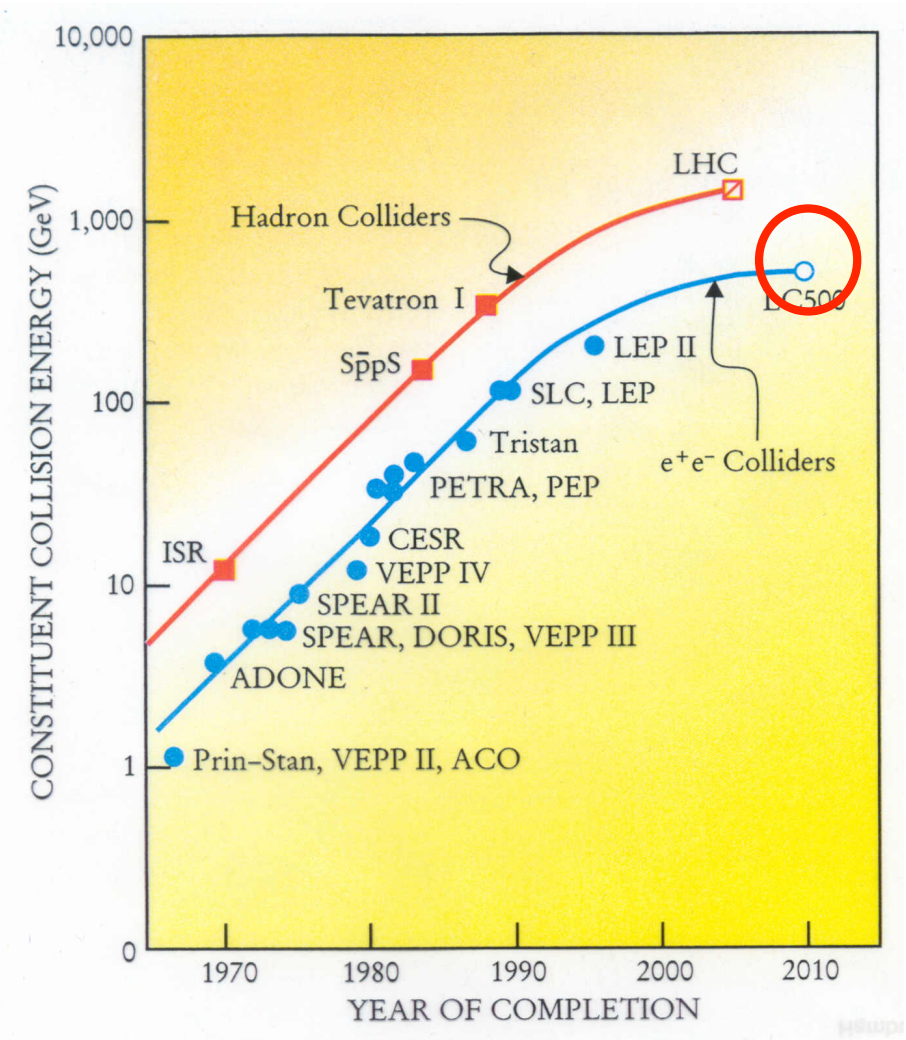
Herausforderung:

Am muss lineare Beschleuniger bauen, mit

- hoher Beschleunigung/m

- winzigen Strahldurchmessern am Kollisionsort

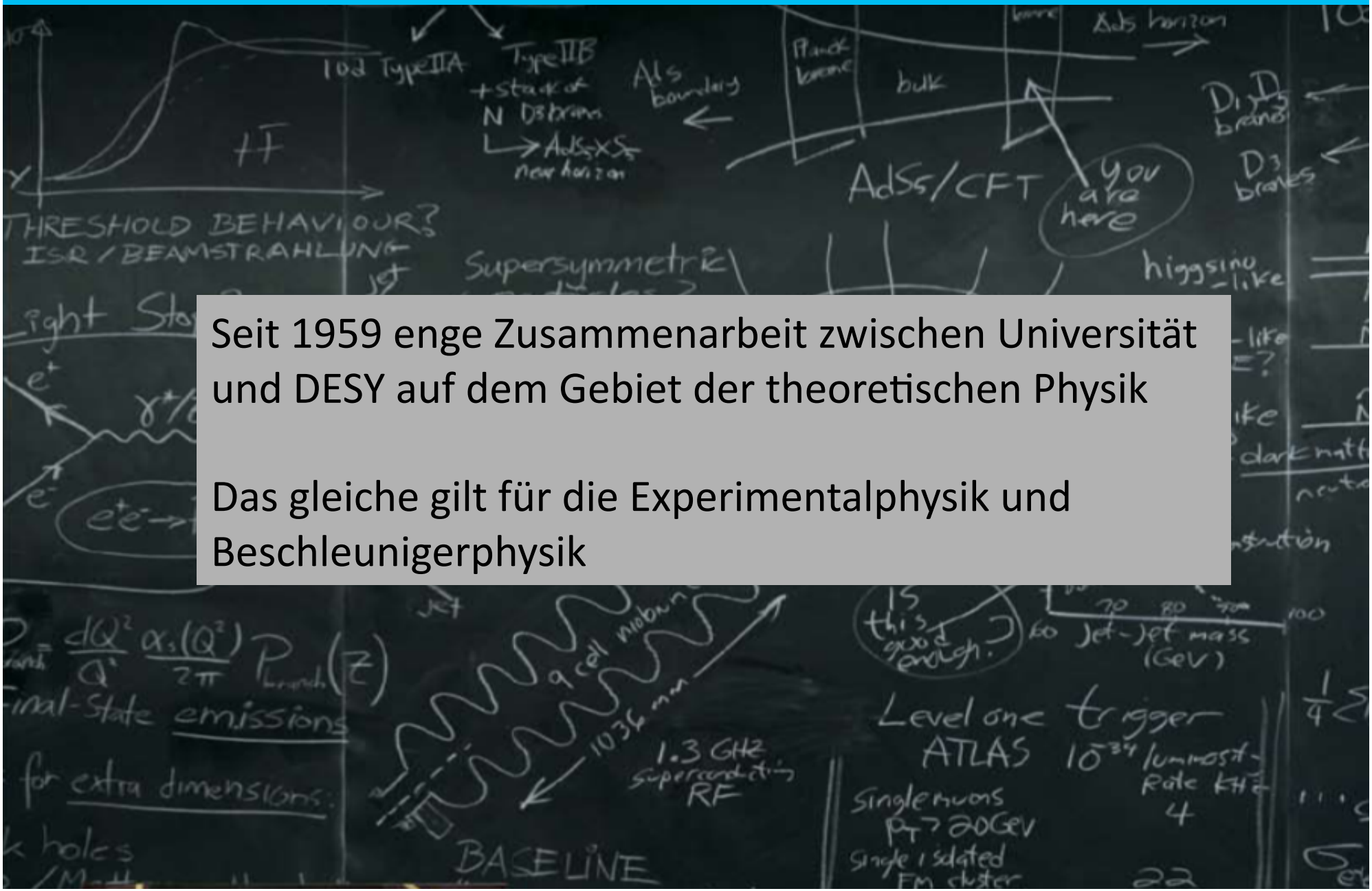
Speicherringe



Elementarteilchenphysik

- Theoretische Grundlagen
- Dimensionen und Strukturen: Vom unendlich Großen zum unendlich Kleinen
- Die Bausteine des Mikrokosmos – 1964
- Fundamentale Kräfte: Was die Welt im Innersten zusammenhält
- Der Mikrokosmos - heute

Theoretische Teilchenphysik in HH



Seit 1959 enge Zusammenarbeit zwischen Universität und DESY auf dem Gebiet der theoretischen Physik

Das gleiche gilt für die Experimentalphysik und Beschleunigerphysik

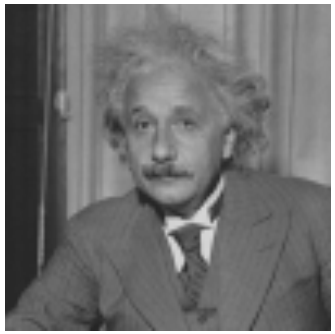
Theoretische Grundlagen

- Relativität

  Masse ist Energie und
  Energie ist Masse

  $$E = mc^2$$

  Erzeugung schwerer Teilchen erfordert hohe Energie



A. Einstein

- Quantenmechanik

  Teilchen sind Wellen und
  Wellen sind Teilchen

  $$\lambda = h/p$$

  Hoher Impuls p (oder Energie) heißt kleinere Wellenlänge

L. de Broglie

- Unschärferelation

  Ort und Impuls sind nicht
  beliebig genau messbar

  $$\Delta x \, \Delta p \approx \hbar$$

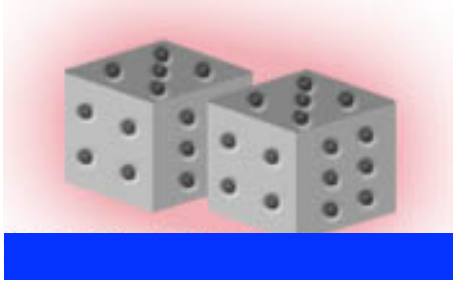
W. Heisenberg

M. Planck

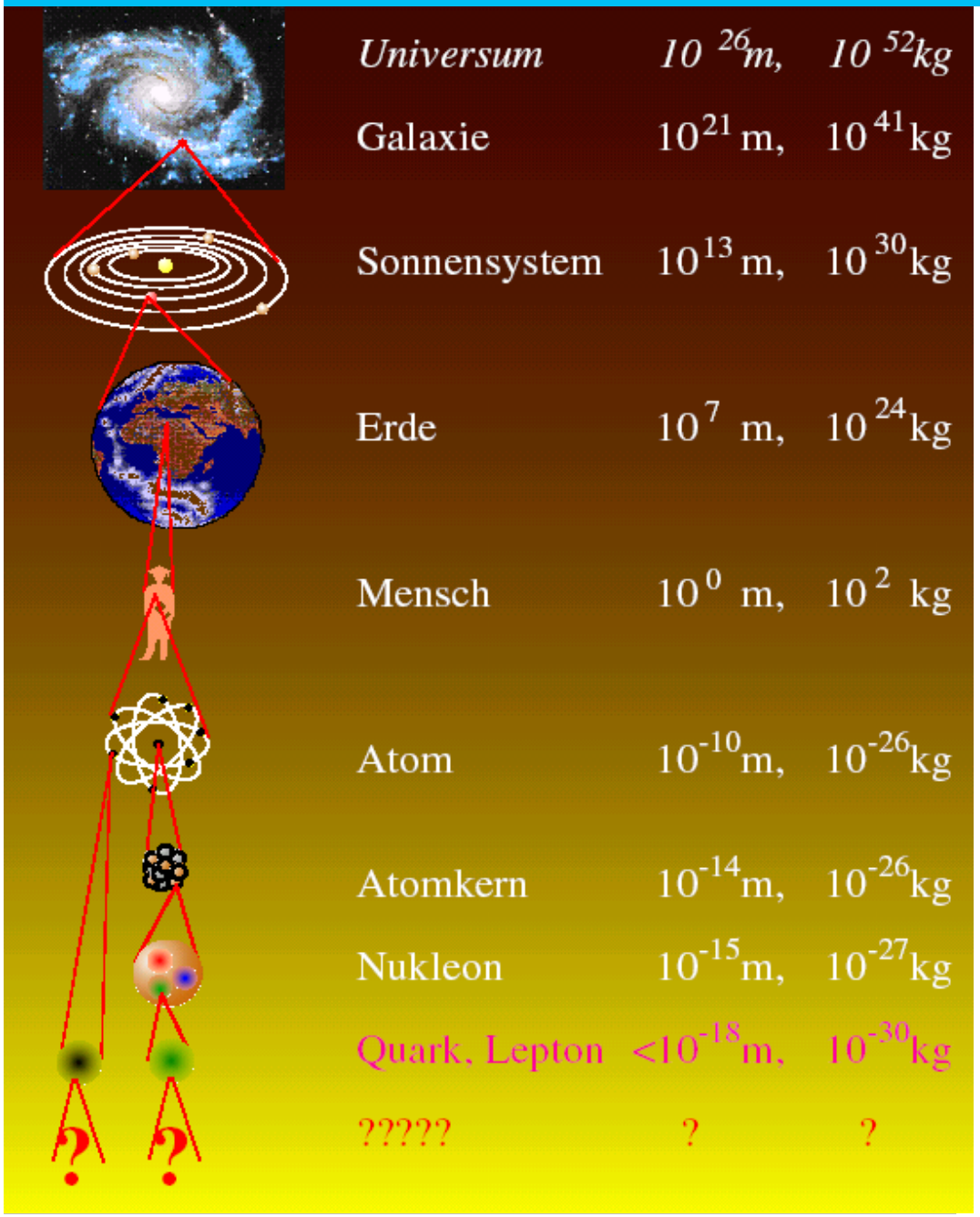
- Wahrscheinlichkeit

  In Quanten-Prozesse sind nur Wahrscheinlichkeiten berechenbar

  Experimente müssen häufig wiederholt werden



Dimensionen und Strukturen



- Kosmologie
- Astronomie und -physik
- Die Welt, in der wir leben
- Festkörper-, Atomphysik
- Kernphysik
- Elementarteilchenphysik

Das Standard Modell

Eine der erfolgreichsten Theorien der Physik:

Basiert auf
- den Bausteinen des Mikrokosmos
- den fundamentalen Kräften
- und dem Higgs Boson

Entstand in den letzten 50 Jahren aus der Zusammenarbeit von Theoretikern, Experimentalphysikern und Beschleuniger-entwicklern

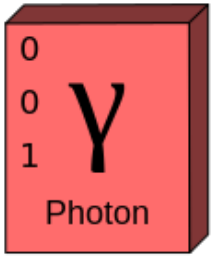
Wichtige Beiträge durch Hamburg (DESY, Uni HH)

Wäre ohne die Beschleunigerergebnisse und -entwicklung nicht verifizierbar gewesen

Der Mikrokosmos - 1964

Man kannte um 1964:

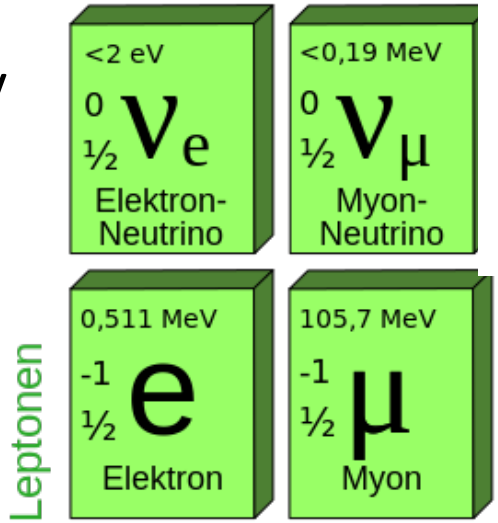
- das Proton und Neutron
- beide sind nicht punktförmig (1956)
- einen „Zoo von Teilchen“:
  Mesonen (Pion, K …)
  Baryonen (Lambda, Sigma …)



1905/
1925

- Quarks wurden 1964 theoretisch vorhergesagt, aber erst gegen Ende der 60er indirekt nachgewiesen

1930/
1956



1962

1897

1936

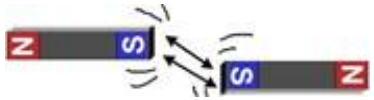
Fundamentale Wechselwirkungen (Kräfte)

1) Gravitation

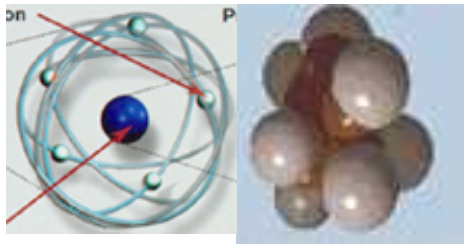
zu schwach für Elementarteilchen
nicht durch Standardmodell erklärt

2) Elektromagnetische Kräfte -> Quantenelektrodynamik

Elektrostatik Magnetismus

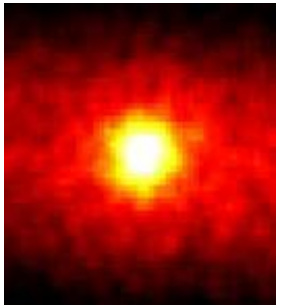


Bindet Elektronen und Kerne zu Atomen und
Atome zu Molekülen



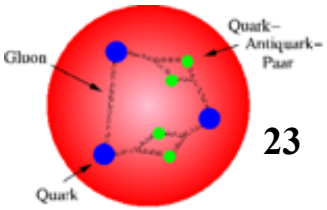
3) Schwache Kraft → Elektroschwache Kraft

Wichtig in Kern- und Teilchenphysikprozessen,
z.B. Neutronzerfall $n \rightarrow p\, e^- \nu_e$
Energieproduktion in der Sonne $4\,H \rightarrow He$



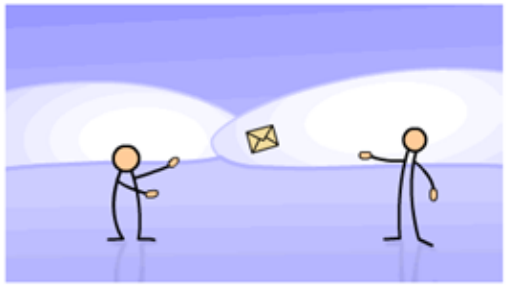
4) Starke Kraft -> Quantenchromodynamik

Bindet Quarks in Protonen und Neutronen



Fundamentale Wechselwirkungen (Kräfte)

- Fundamentale Kräfte werden durch Austauschteilchen vermittelt
  Spin 1, deshalb Bosonen genannt

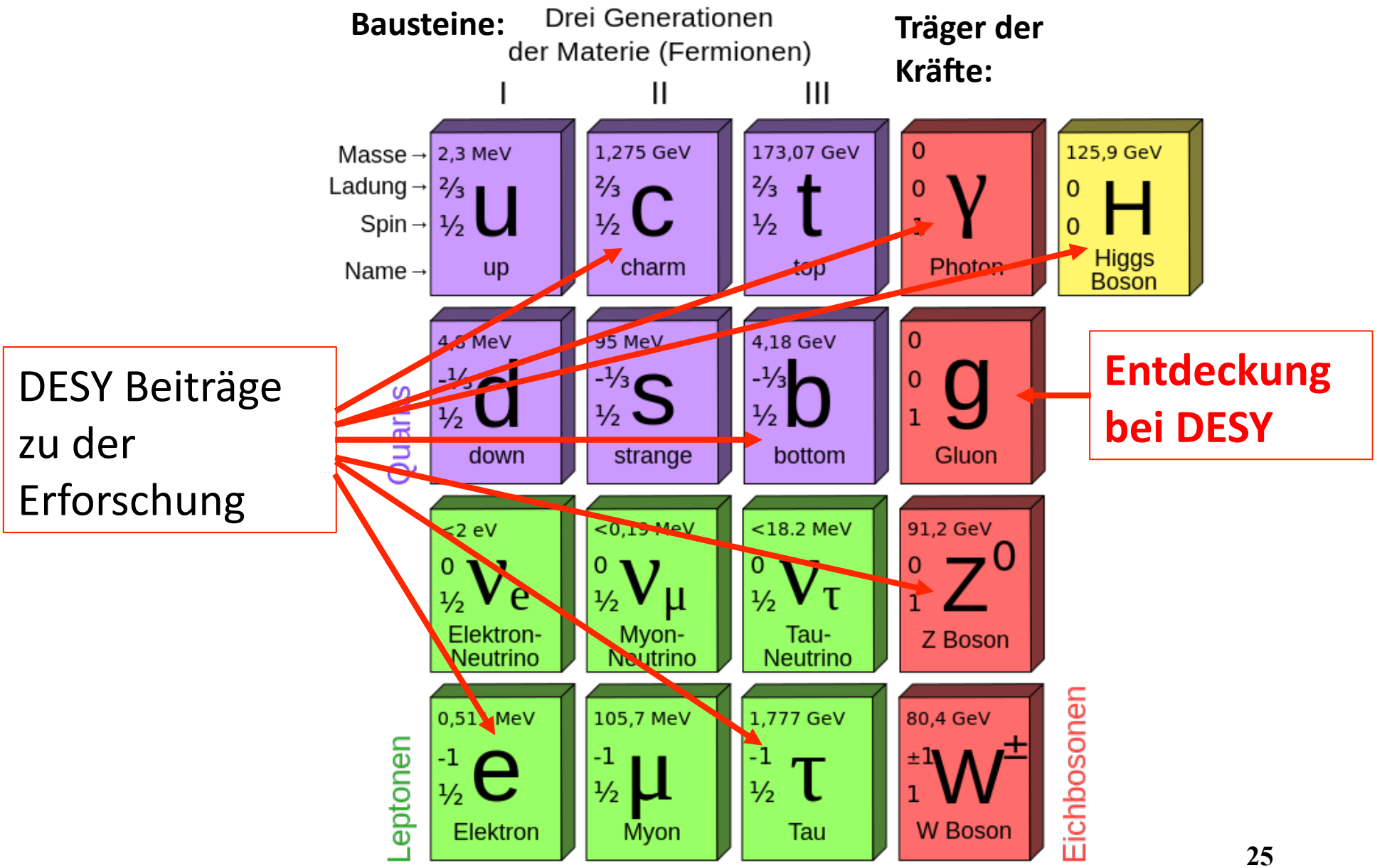


- Fundamentale Kräfte werden mathematisch durch Symmetrien beschrieben
  Lokale Eichsymmetrien

Wechelwirkung	Teilchen	Masse [GeV]	Symmetrie-Gruppe
Gravitation	?	?	?
Elektromagnetisch	Photon γ	0	U(1)
Schwach	$W^{\pm}$,Z Boson	80, 91	SU(2)
Stark	Gluonen g	0	SU(3)

- Problem: Massen sind inkompatibel mit dem Symmetrie-Konzept
  - ok für Photon und Gluonen
  - massiv verletzt für W- und Z-Boson, und für alle Fermionen (Materie-Teilchen)

Der Mikrokosmos - heute



DESY, DORIS, PETRA

DESY

1964 Erste Ergebnisse

6.3 GeV Elektronen

DORIS e+e-

1974 Erste Ergebnisse

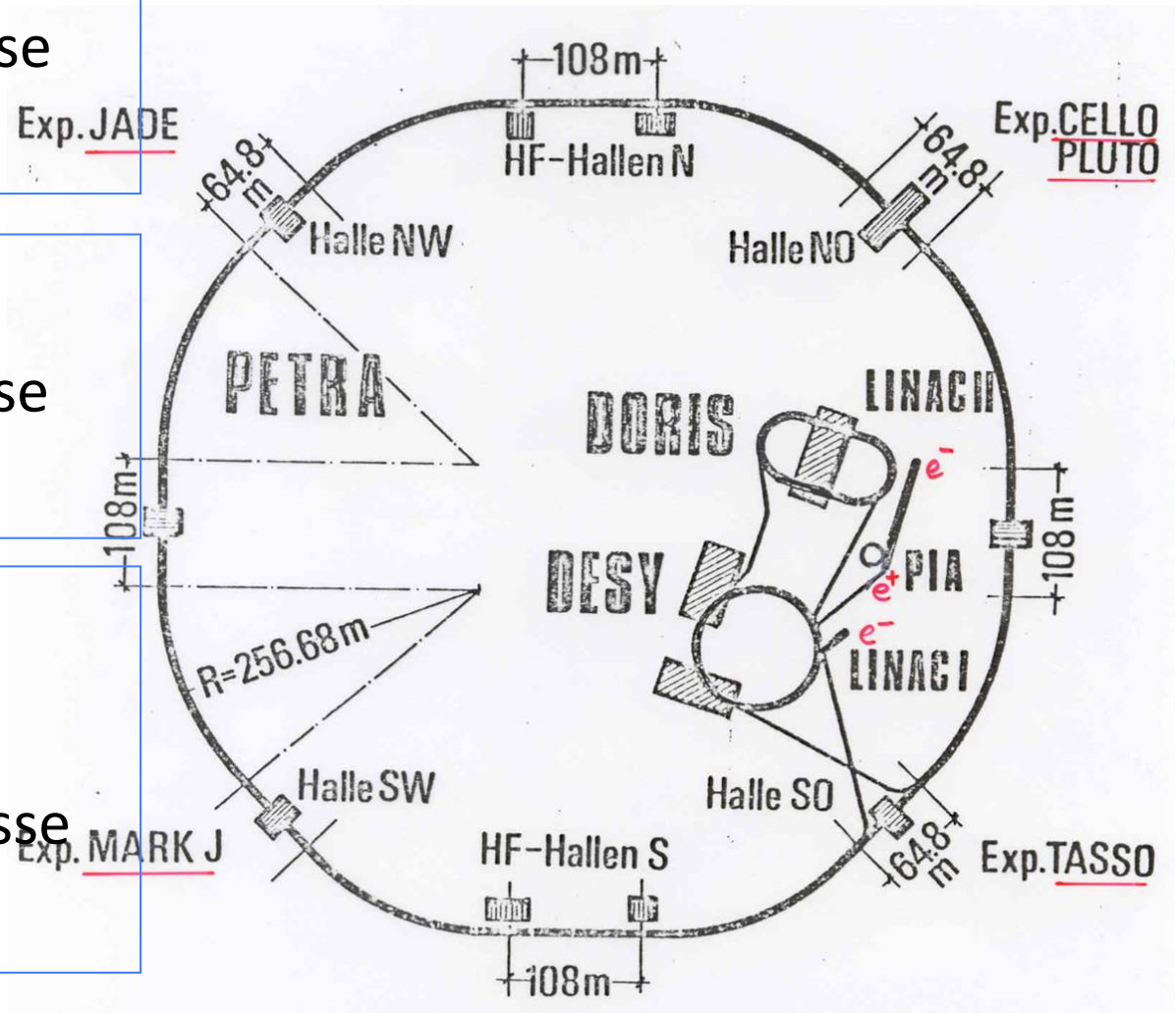
3 < E < 10 GeV

PETRA

1974 Vorschlag

1978 Erste Ergebnisse

13 < E < 47 GeV



DESY: Erste Ergebnisse 1965

Sensation in Hamburg:

Anti-Teilchen aus Licht

Eine zehnköpfige Forschergruppe fand Spuren unsichtbarer Welten

Freitag, 10. Dezember 1965 ‡ 15 Pf

Bild ZEITUNG

UNABHÄNGIG · ÜBERPARTEILICH

Das ist die Forschungsanlage DESY in Bahrenfeld

Anti-Teilchen können die Erde zertrümmern

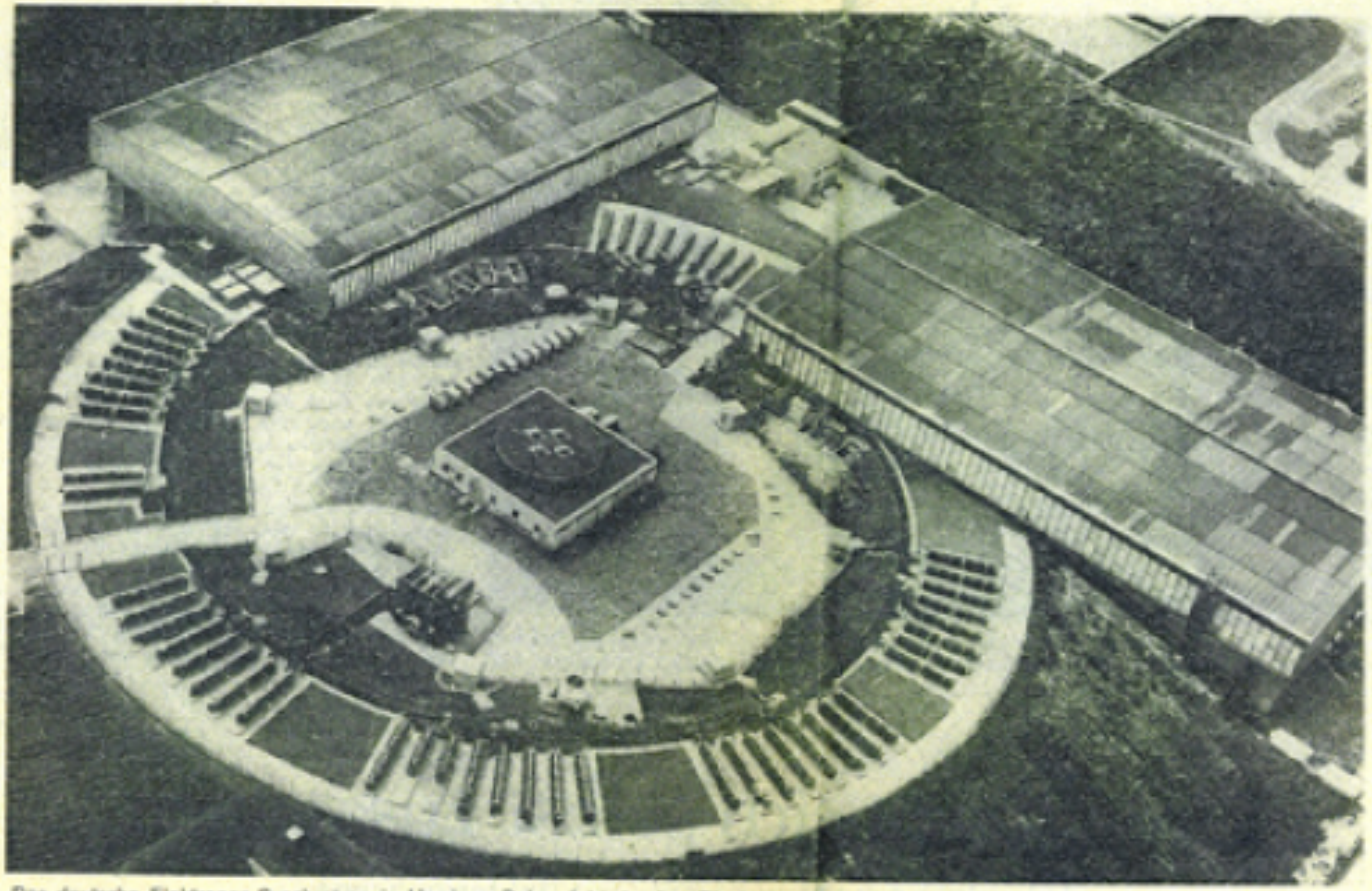
Fortsetzung von Seite 1

Antiproton bereits 1955 in Berkeley entdeckt

Süddeutsche Zeitung:

Aufsehen hat der Erfolg erregt, den eine Gruppe junger Wissenschaftler am **Physikalischen Institut der Universität Hamburg** errungen hat. Am Hamburger Elektronen-Synchrotron ist der Nachweis gelungen, dass **Antiprotonen aus Licht** erzeugt werden können.

Das deutsche Elektronen-Synchrotron lieferte Forschungsergebnisse von fundamentaler Bedeutung



Das deutsche Elektronen-Synchrotron in Hamburg-Bahrenfeld. In dem Ringbau von etwa hundert Meter Durchmesser werden die Elektronen beschleunigt. Die Versuche mit diesen energiereichen Elektronenstrahl werden in den beiden großen Experimentierhallen durchgeführt.

DESY rettete eine Theorie

Auf der Suche nach den Grundgesetzen der Physik / Von Thomas v. Randow

g dieses Jahres nach mühevol-
ungen die Ministerpräsidenten
eßlich doch entschlossen, dem
onen-Synchrotron (DESY) in
Geld zu bewilligen, daß diese
chwerpunkte ihre gerade be-
fortsetzen konnte, mag man-
gualt haben, ob es wohl sich-
shaushalt mit der Finanzierung
ipen Instituts zu belasten. Im-
Betrieb des Synchrotrons, der
sine, die etwa soviel Strom ver-
nittlere Kleinstadt, und für die
r Experimente, die der physi-
ngenforschung dienen, müssen
r jährlich etwa vierzig Millio-
ngen. Freilich hatte man den
nacht, daß dieser Zweig der
Hochenergiephysik, zu den in-
ordnenden Gebieten gehört, auf
e Naturwissenschaft noch eine
einstige Weltgeltung zurück-
ob das junge Hamburger In-
nehbarer Zeit wesentliche Er-
ngen würde, das konnte natur-
rungen.

e inzwischen die Erwartungen
Das stellte sich kürzlich bei der
nferenz der Hochenergiephy-
(Kalifornien) heraus. Hier be-
Direktor Professor Wilhelm
ntge seiner Mitarbeiter über
ch unveröffentlichten Experi-
die am Deutschen Elektronen-
nfe dieses Jahres erzielt wur-
ittelungen erregten unter den
lnnen großes Aufsehen.
siker arbeiten mit hohen
gesagt, mit Atombausteinen
Elektronen, denen durch eine
schine sehr große Bewegungs-
erden. Nur vermittels derart
r Teilchen nämlich ist es mög-
des Allerkleinsten einzudrin-
der Grundbausteine der Ma-
kann man nach den Gesetzen
Verhalten jener elementaren
hen, mithin nach den Grund-
urgeschehens überhaupt.

Elektronen-Synchrotron in
eld sind es Elektronen, die
end Umläufen in einem Ring
Meter Durchmesser beschleu-
sie soviel Energie erhalten
n Beispiel bis ins Innere eines
rzudringen vermögen, in das
hens, das nur einen Bruchteil

Die Blasenkammer ist ein mit
wasserstoff gefülltes Gefäß — am
mal 40 mal 40 cm groß —, das vo
Magneten umfaßt wird. Eine P
für, daß in kurzen Zeitabständen
Unterdruck in der Kammer e
dieser Unterdruck herrsche, hi
trisch geladene Elementarteilchen
Wasserstoff fliegen, dort Bläschen
die Teilchen im Kraftfeld des
ihrer geradlinigen Bahn abgelen
zwar mehr oder weniger stark
welche Masse und Energie sie be
Bläschenspuren mehr oder wen
krümmt und verraten auf diese
die Existenz, sondern auch eine R
schaften der unvorstellbar kleinen
aus der Dichte der Spuren und ih
der Physiker Rückschlüsse auf d
schen Besonderheiten der Teilchen

Um den räumlichen Verlauf
spuren festzuhalten, photographi
matische Kameras gleichzeitig d
der Blasenkammer aus drei zuein
ten Richtungen; in der Sekund
zehn solcher dreifachen Aufnah
Bei ihrer Auswertung kommt es
nur diejenigen Teilchen zu ide
Spuren hinterlassen haben, sonde
auch solche, deren Verhandensei
senkammerphotos nicht sichtbar
Partikel ungeladen sind oder
Lebensdauer haben. Der Physike
Fall darauf angewiesen, die Ei
Eigenschaften jener Teilchen ind
und dem Verhalten ihrer nicht
Zerfallsprodukte abzulesen.

Am DESY sind bis jetzt 1,6 M
kammerphotos angefertigt und f
ausgewertet worden. Die hierbei
stehungs- und Zerfallsprozesse
teilchen haben vor allem dazu be
nung in dem scheinbaren Chaos d
Partikel zu schaffen, von denen
tig über 150 verschiedene kennt.

Ein in den letzten Jahren von
ner *Murray Gell-Mann*, dem Isr
eman und dem japanischen Phy
konzipiertes Ordnungsschema —
— oder in seiner erweiterten For
matik genannt — gilt als das mei
Verfahren, die Spezies im „El
Zoo" gewissermaßen nach Gattu
lien zu klassifizieren.

Ordnung ist ein nahezu Ech

Test der Quantenelektrodynamik

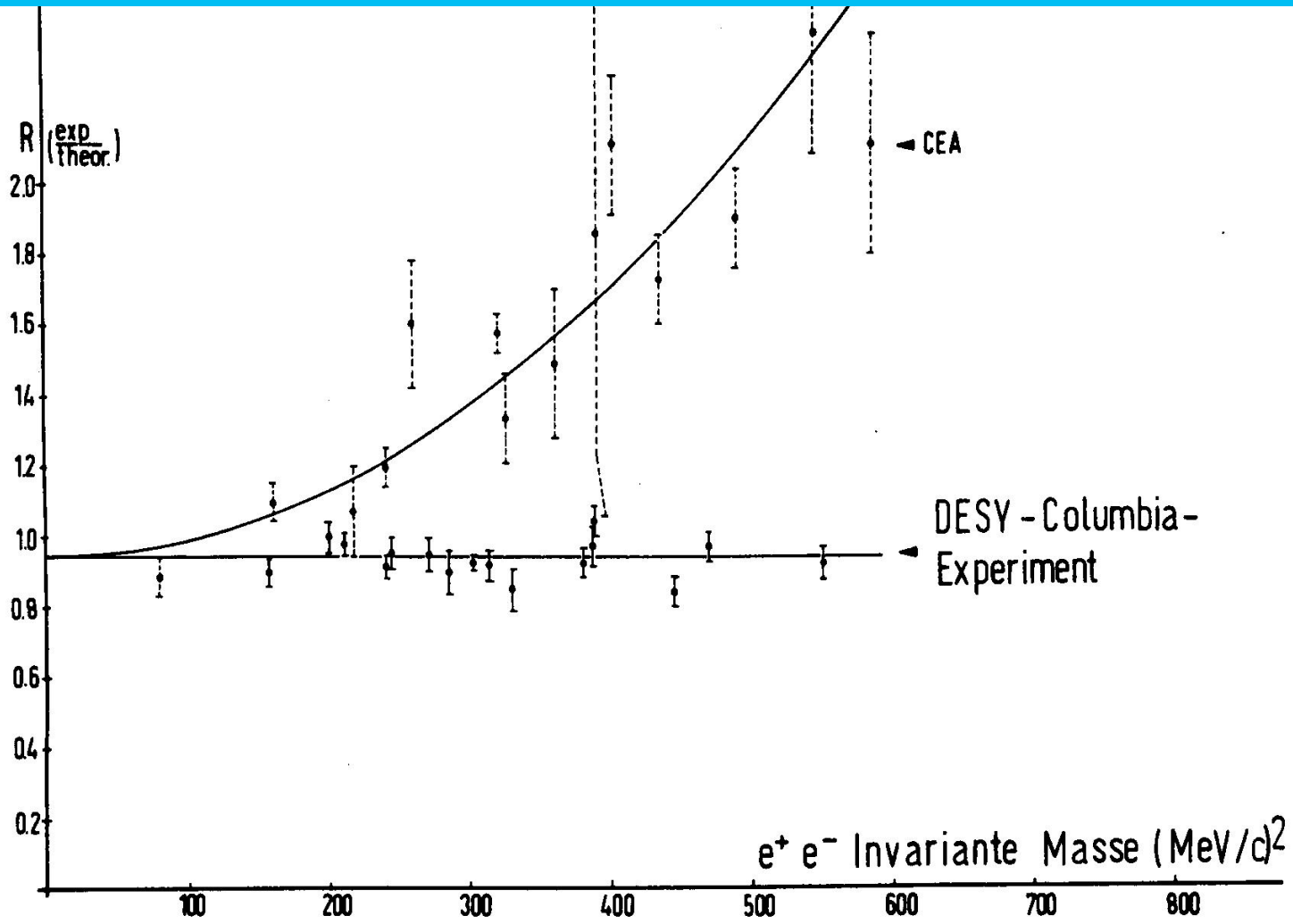
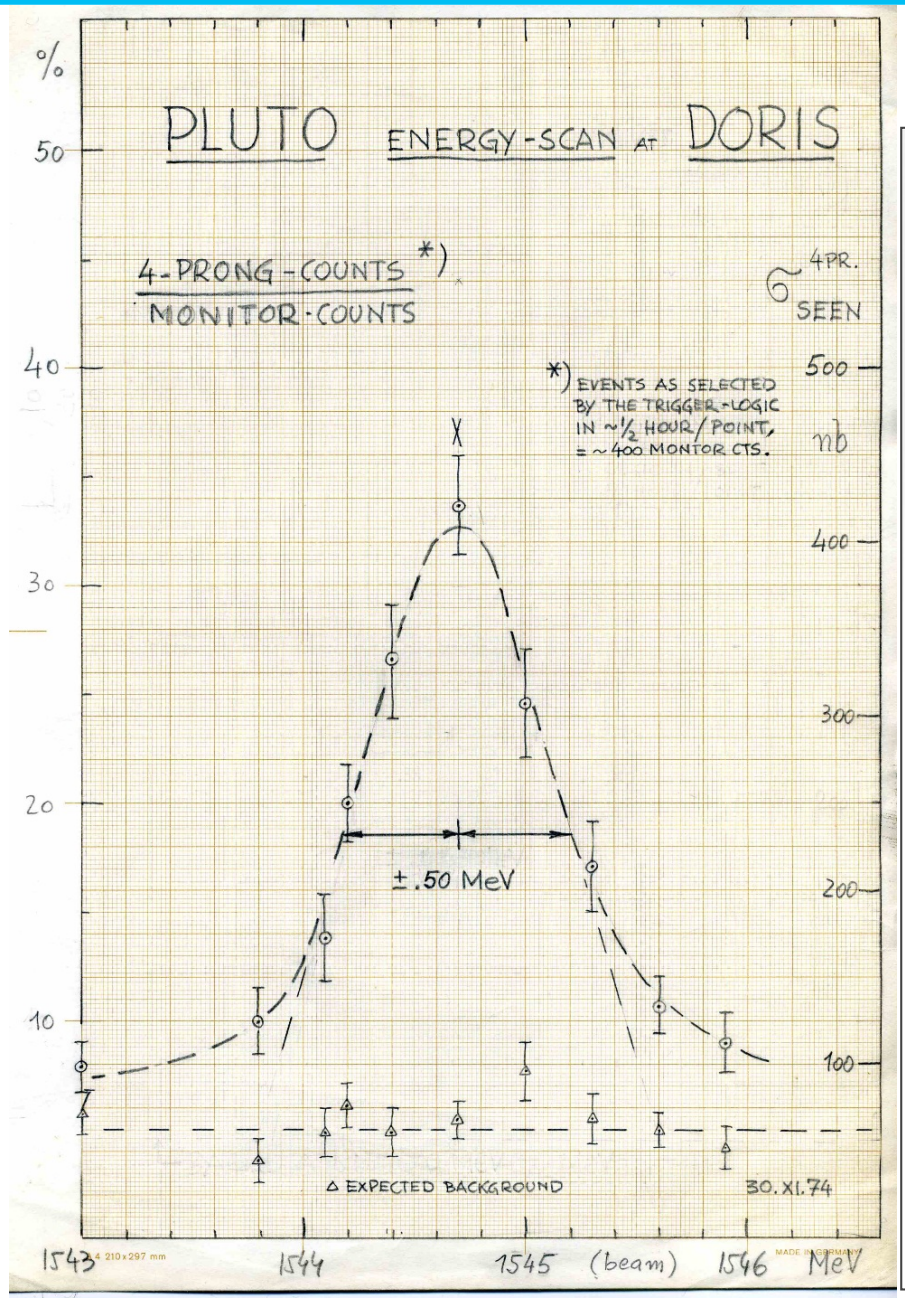
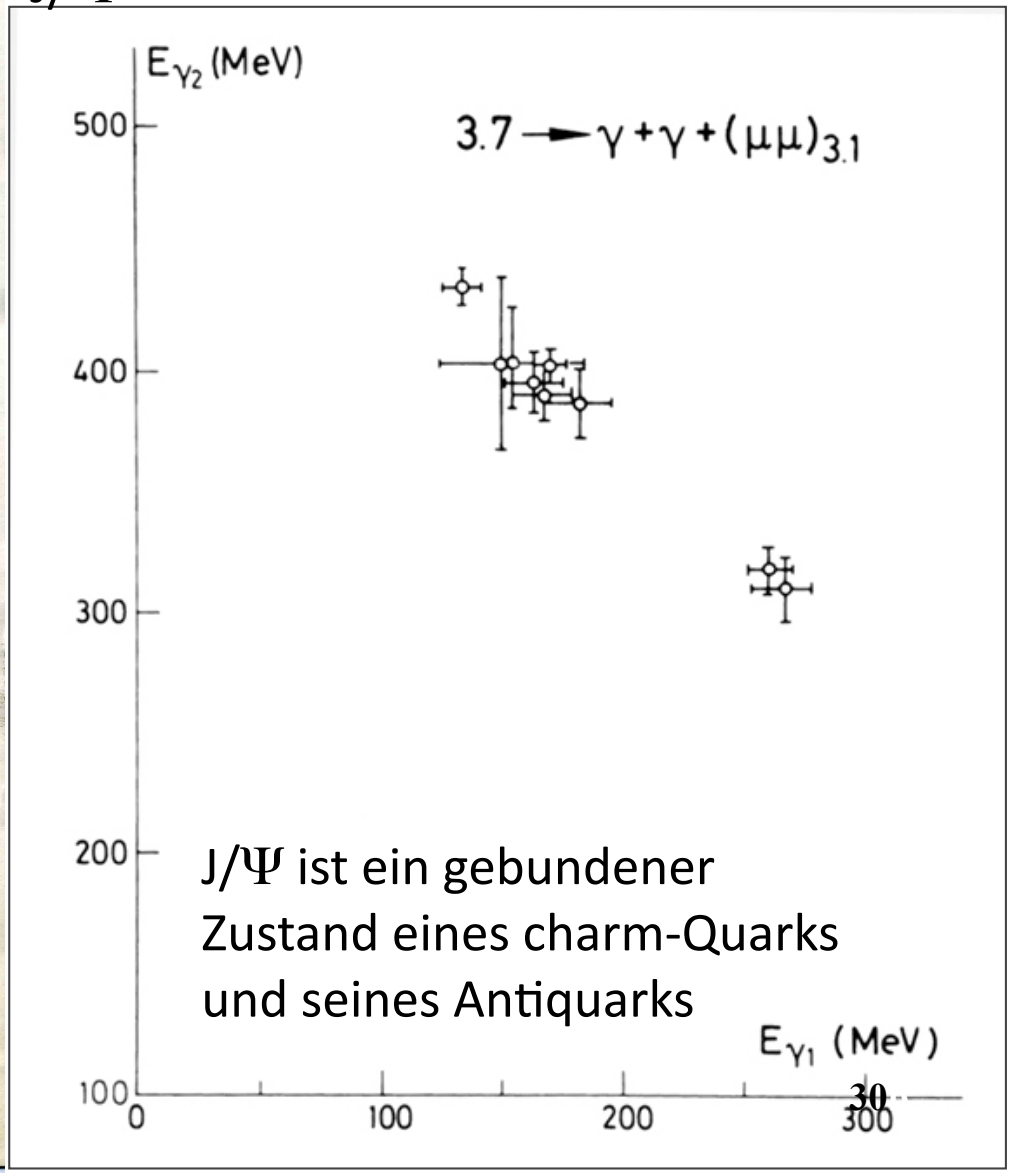


Bild 24 Verhältnis von experimenteller zu theoretischer Zählrate bei der Photoerzeugung von Elektron-Positron-Paaren als Funktion der invarianten Masse der erzeugten Paare

DORIS – Die Zeit des charm Quarks – 1975 ff



Zerfall des Ψ' über Zwischenzustand in ein J/ Ψ



PETRA 1976 - 1986

Wettbewerb mit SLAC (PEP)

Bau begann 1976

Sehr schneller Fortschritt

Bau beendet 1978, > 12 Monate vor Plan (und 20 M unter Budget von 100 MDM)

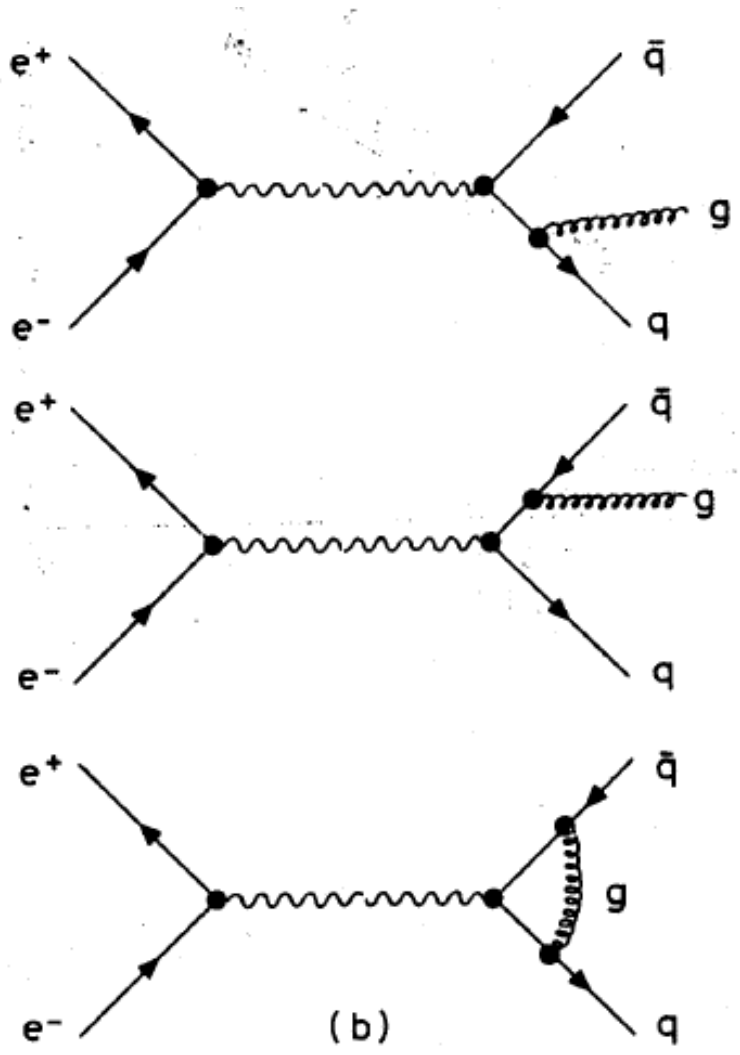
Erste Teilchen beschleunigt: 1978

Fünf Experiments: CELLO, JADE, Mark J, PLUTO, TASSO

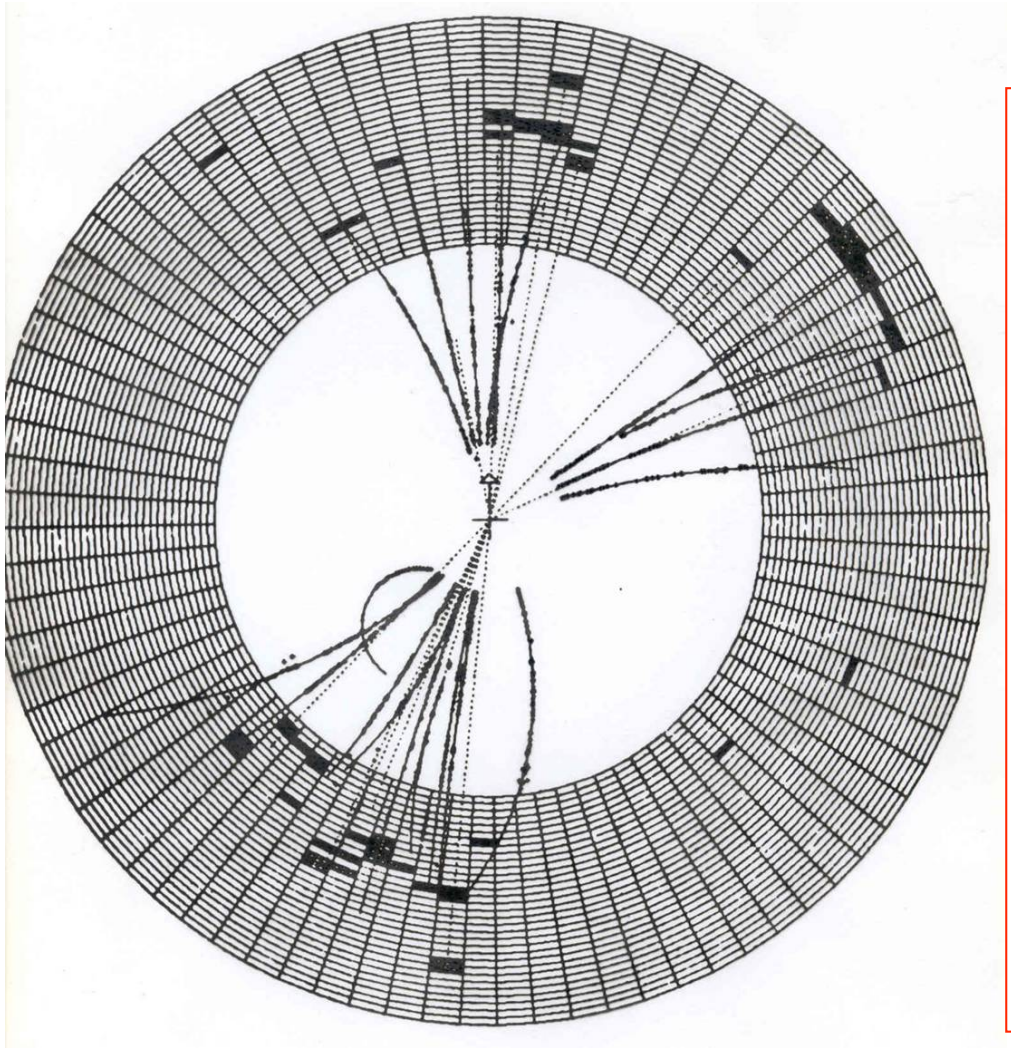
Durch PETRA wurde DESY ein internationales Labor

Entdeckung des Gluons

- QCD (Quantenchromodynamik) = Theorie der starken Kraft wurde entwickelt
- „Farbladungen“
- wirkt auf alle Quarks
- wird durch Gluonen übertragen
- Quarks können Gluonen abstrahlen



Entdeckung des Gluons 1979



PETRA testet die QCD:

Quarks strahlen Gluonen ab

-> 3 jet Ereignisse

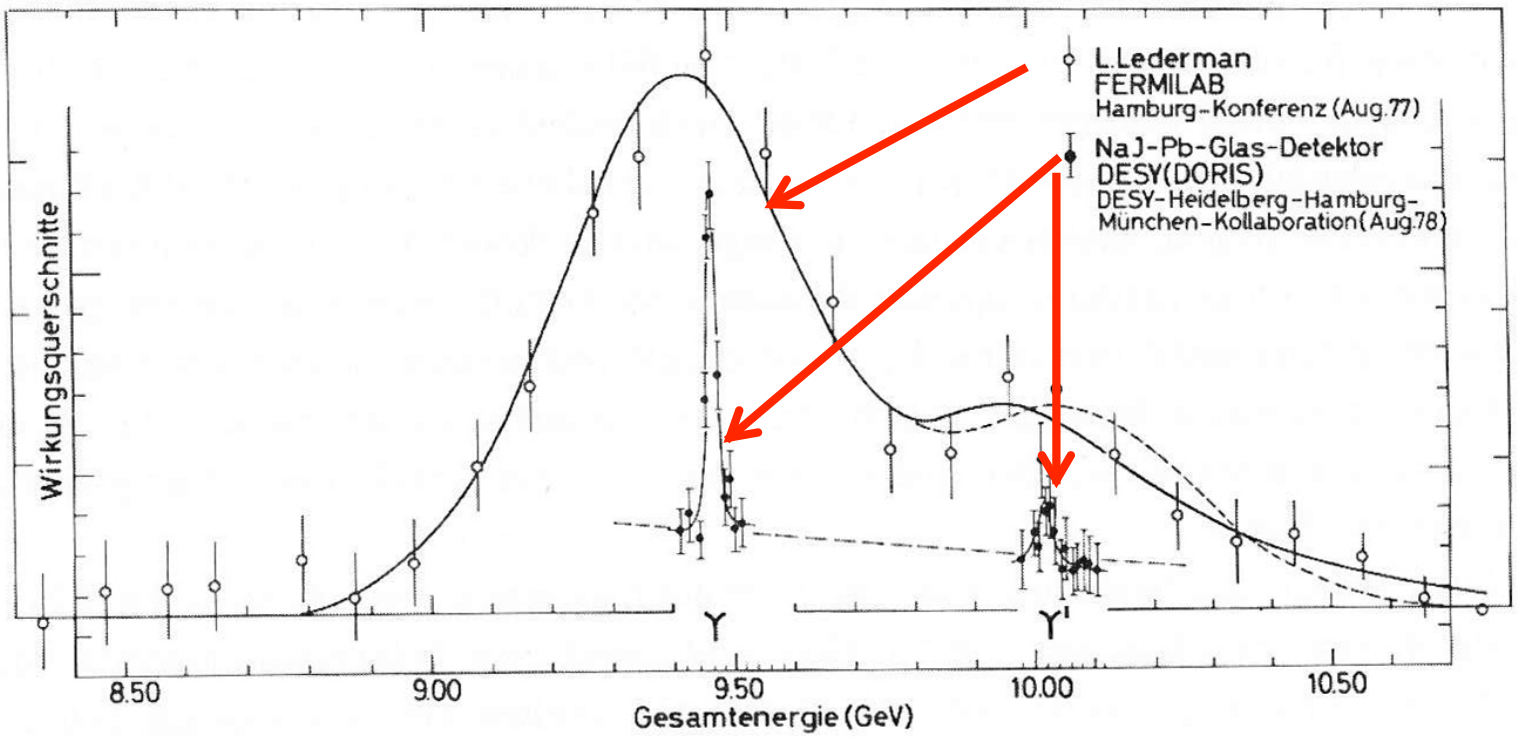
Die Wahrscheinlichkeit für die Abstrahlung bei PETRA beträgt ~ $a_s(q^2)/p$, ~ 10%.

1979: 20 Jahre DESY

DORIS II – The 3rd Quark Generation

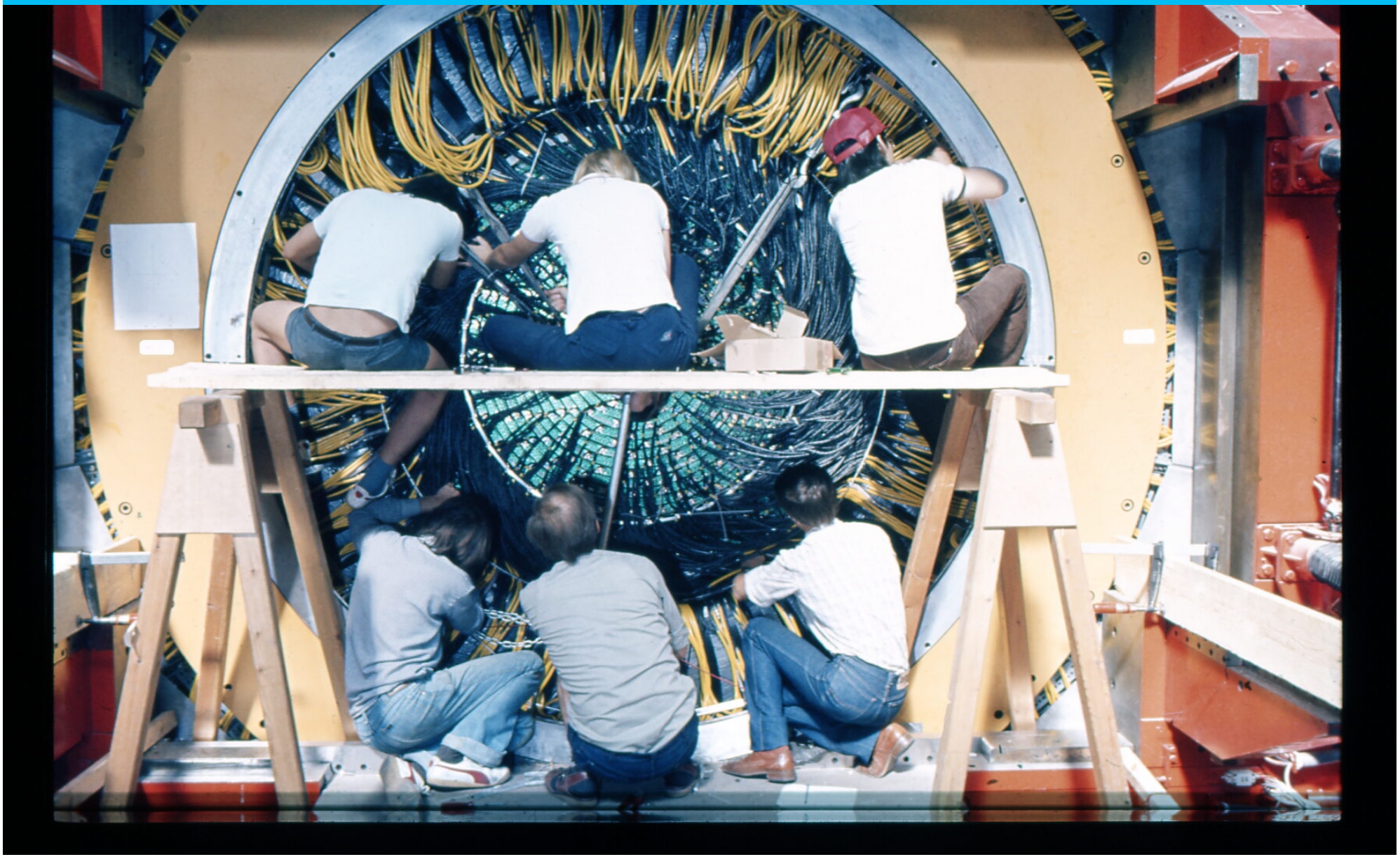
- Das b-quark

Entdeckung: Juni 1977
bei Fermilab

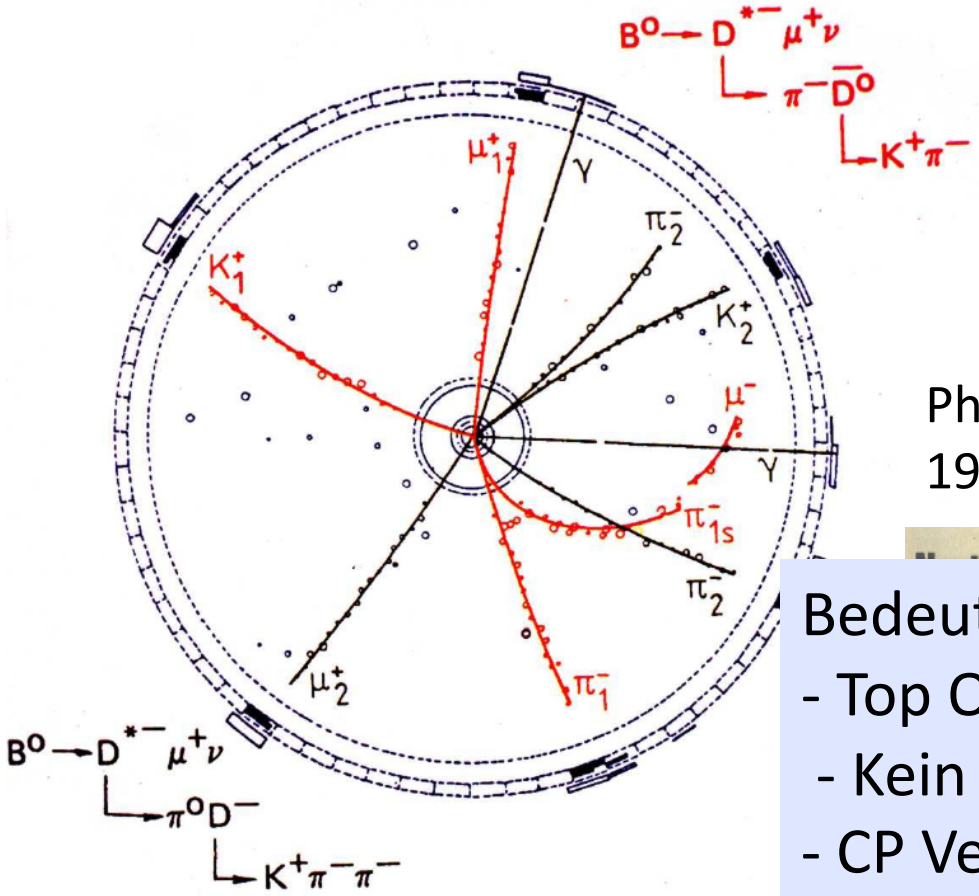


-> Umbau von DORIS
Energie erhöht um Υ-Resonanzen erzeugen zu können

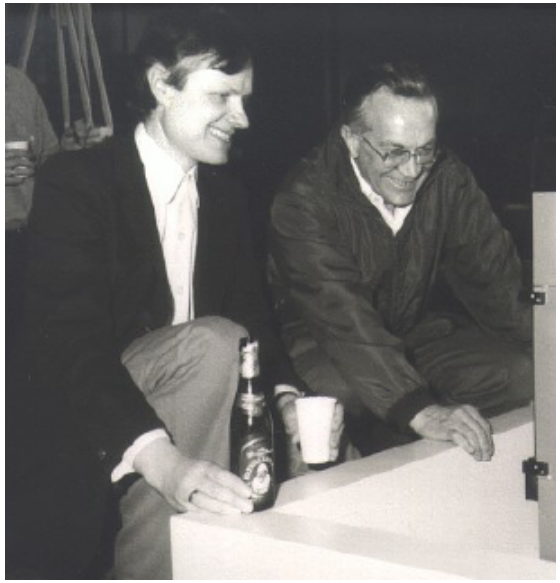
ARGUS an DORIS



Materie-Antimaterie-Umwandlung

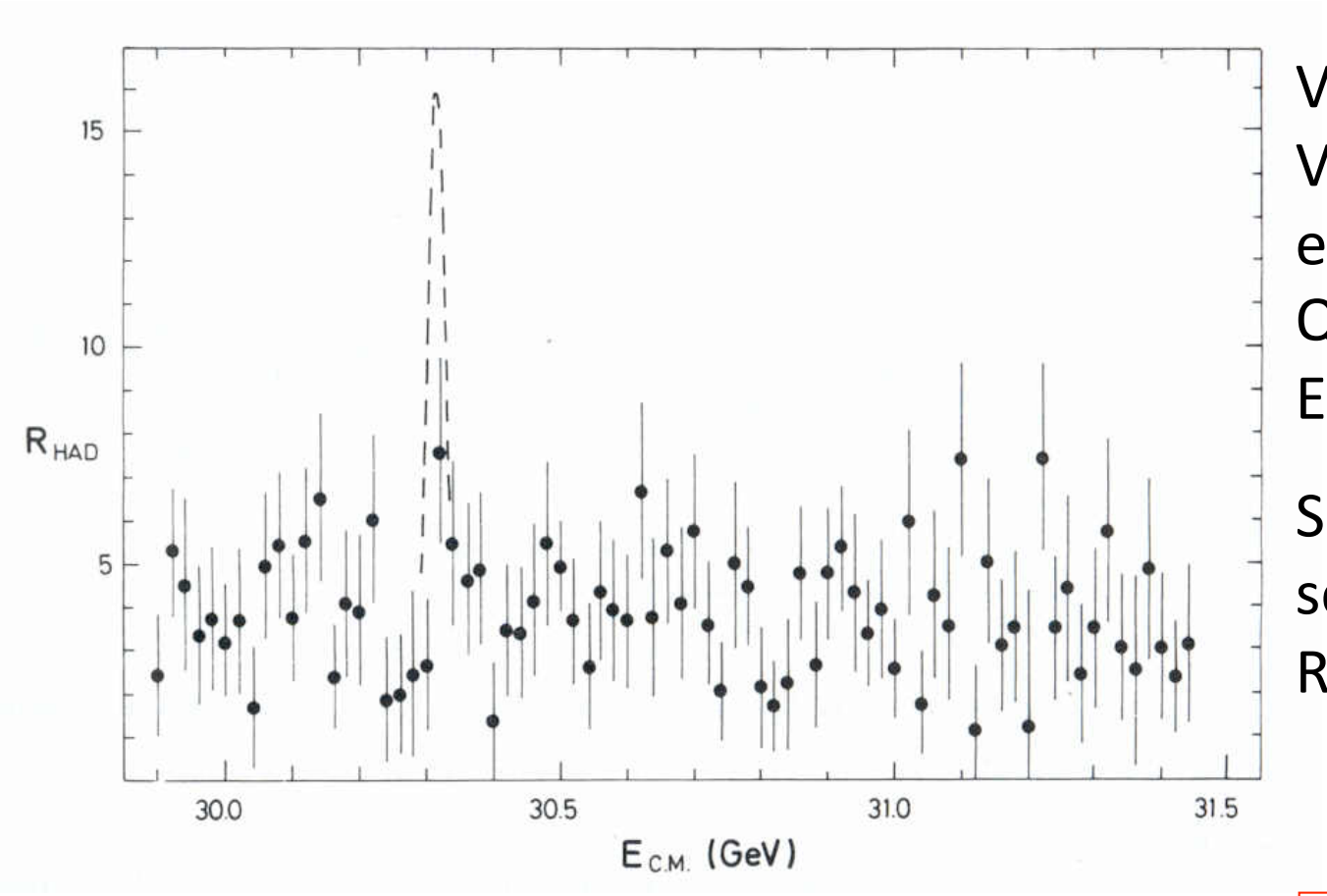


Physics Today
1987



Bedeutung:
- Top Quark ist sehr schwer (m > 50 GeV)
- Kein Top bei LEP1 und SLC
- CP Verletzung von B Mesons ist beobachtbar -> erfordert „B factory“
- Keine “neue Physik” in der Nähe
- Bahnte den Weg für… Nobel-Preis 2008

Suche nach dem Top Quark bei PETRA



Viele theoretische Vorhersagen erwarteten das Top Quark in diesem Energiebereich

Suche nach schmalen Resonanzen

Suche bei PETRA bis m=22 GeV

Entdeckung in USA 1995 bei m=173 GeV

$R = 3.88 \pm 0.22$

Wie erwartet für udscb + QCD Korr.

HERA 1992 - 2007

HERA: Modell für Internationale Projekte

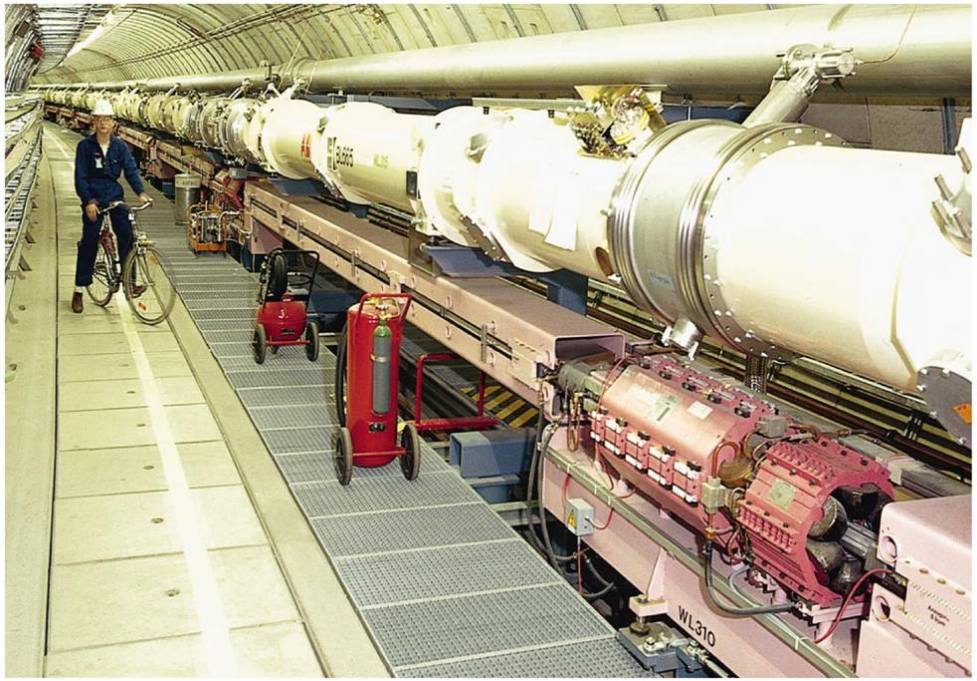
Beschleuniger gebaut mit Hilfe (Personal) und Komponenten aus Italien, Frankreich, Polen und China

Betrieb von D bezahlt

Experimente wurde von großen internationalen Kollaborationen gebaut

Komponenten von allen Beteiligten

Betriebskosten wurden geteilt

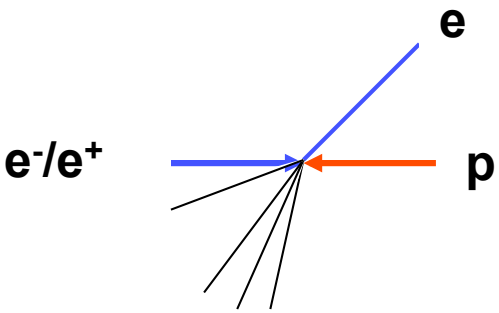


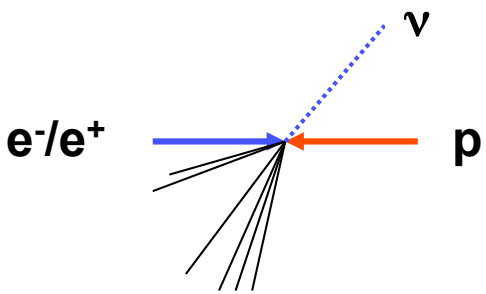
HERA Parameter und Prozesse

HERA - das weltweit stärkste Elektronenmikroskop

1994-97: **e^-/e^+ (27.5 GeV)** **p (820 GeV)**

1998-2000: **p (920 GeV)**





Kraft übertragen durch γ, Z **durch W^+, W^-**

Schwerpunktenergie:

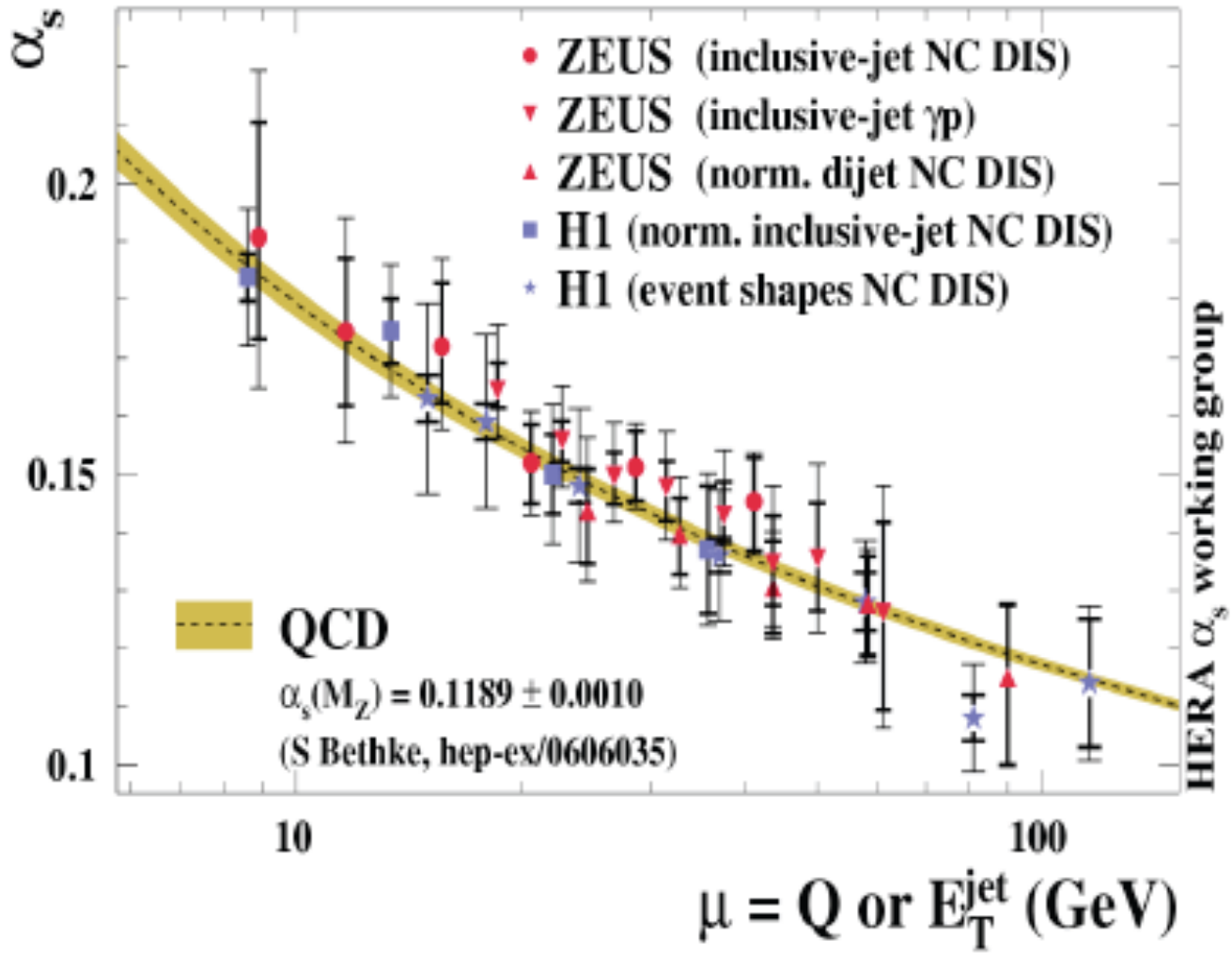
$$\sqrt{s} = \sqrt{4E_eE_p} \approx 300\ GeV$$

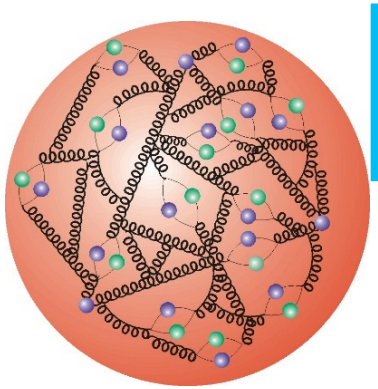
(entspricht 47-50 TeV bei 'fixed target' Energie)

ZEUS

HERA und die starke Kraft

Die Kopplungs-“Konstante“ der starken Kraft hängt von der Energie ab:



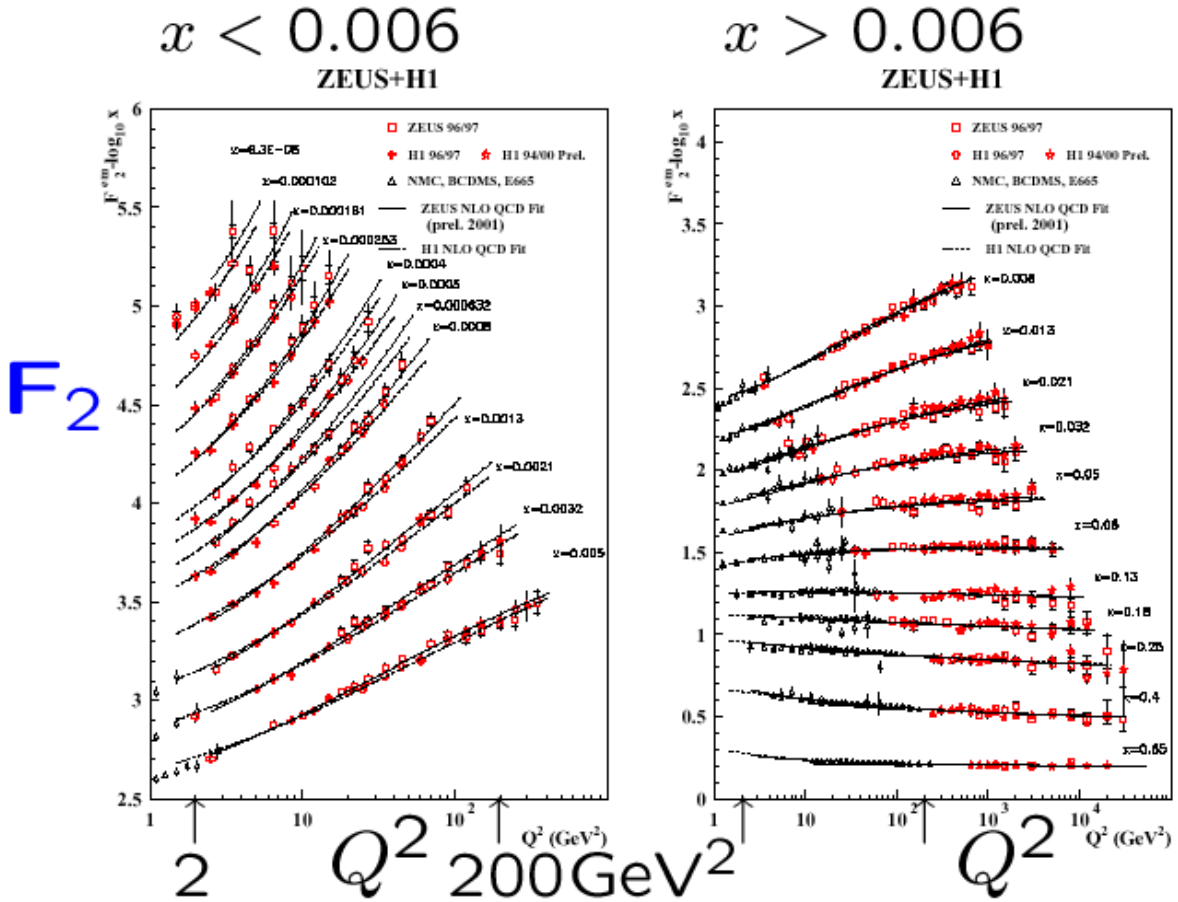


Struktur des Protons

Test der QCD und von Bedeutung für Proton Collider

proton structure function F_2

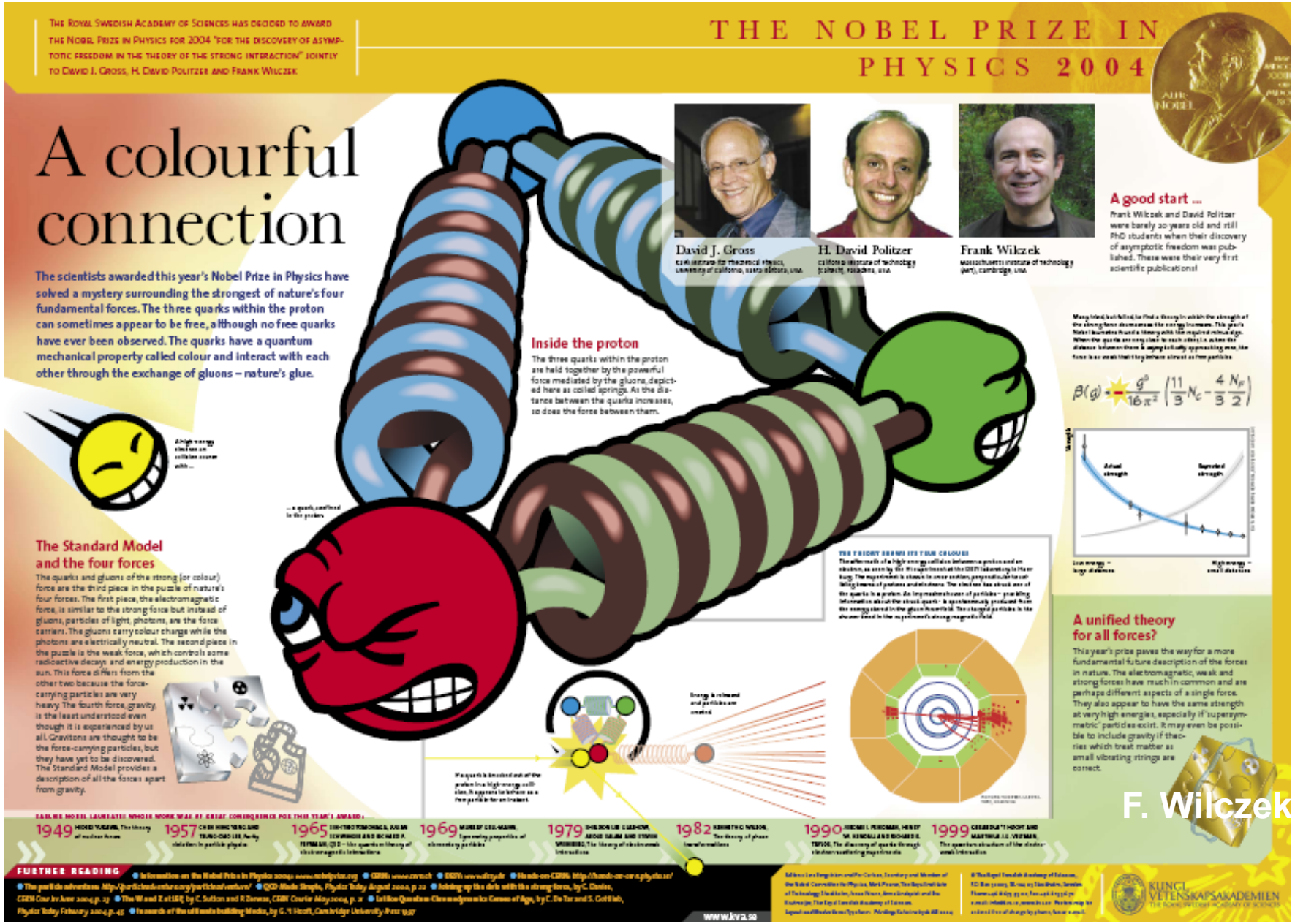
$\sqrt{s}$ = 300 GeV



Q .... Impulsübertrag
x .... Bruchteil des Parton Impulses

Ergebnisse:

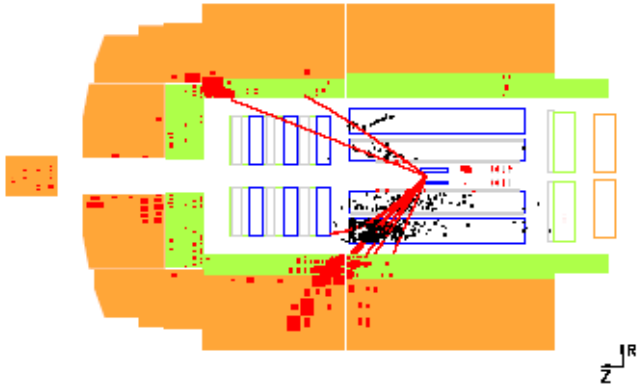
- Hohe Partondichten bei niedrigem x aufgrund starker Gluon-Abstrahlung.
- QCD beschreibt F_2 für Q> 1 GeV



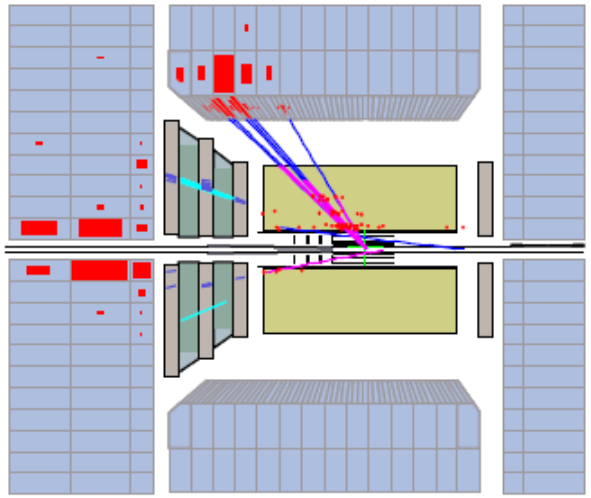
consequences, regarding the pointwise evolution of structure functions, were derived. The most dramatic of these, that protons viewed at ever higher resolution would appear more and more as field energy (soft glue), was only clearly verified at HERA twenty years later.

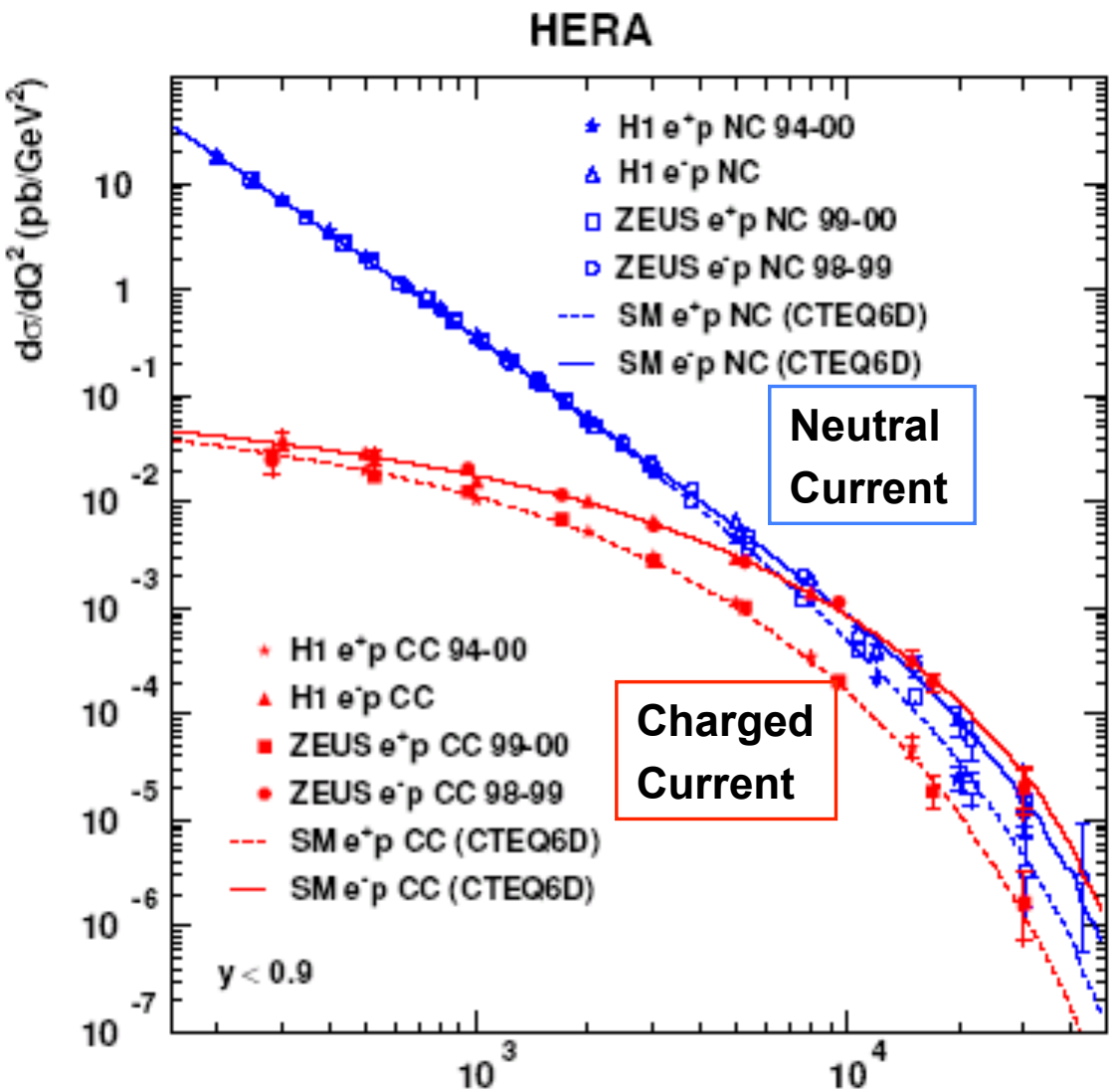
Vereinigung der Kräfte

Neutrale Ströme $e^+ p \rightarrow e^+ X$



Geladene Ströme $e^+ p \rightarrow \bar{\nu} X$





$$\sigma_{cc} \approx \sigma_{NC} \quad for\, Q > M_W^2, M_Z^2$$

Many congratulations to all
who have worked at HERA
Highly
Exceptional
Research
Achievement

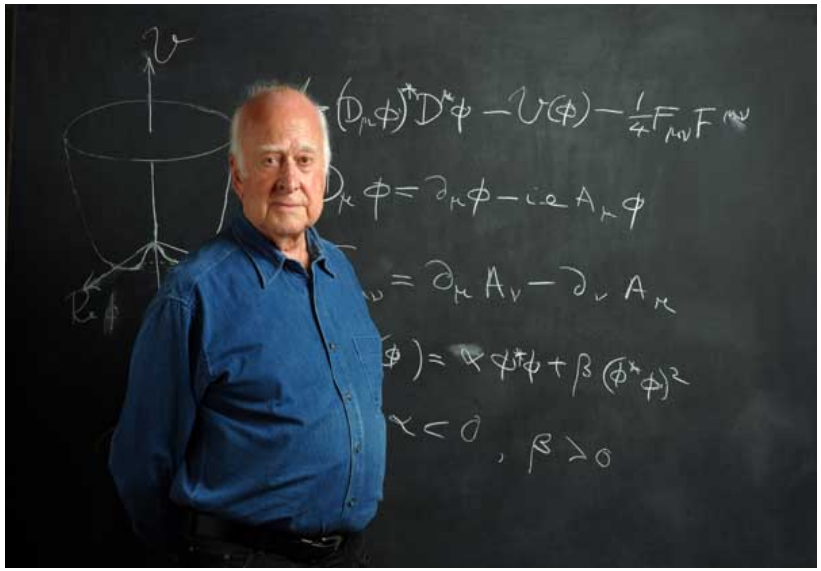
Offene Fragen und die Zeit nach HERA

- Offene Fragen der Teilchenphysik
- Large Hadron Collider
  - Die Suche nach der Nadel im Heuhaufen oder die Entdeckung des Higgs Bosons
- Vorschlag eines Linear Colliders

Woher stammen die Massen?

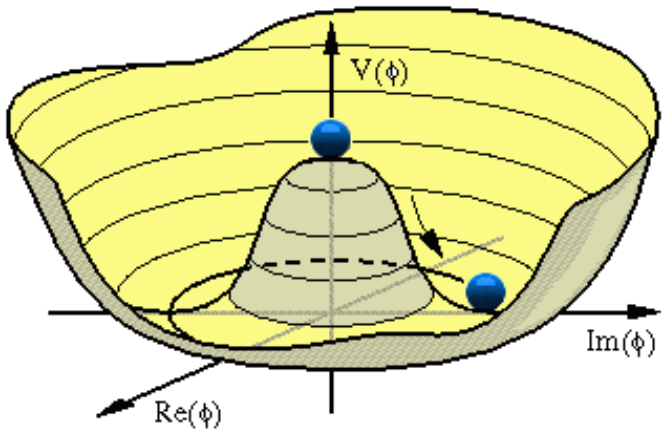
Ursprung der Masse: Higgs Mechanismus

- Mathematischer Trick von Peter Higgs und anderen um 1964 vorgeschlagen:
  - Das Vakuum ist erfüllt mit einem Feld
  - Damit können Bosonen und Fermionen Massen erhalten



- Konsequenz:

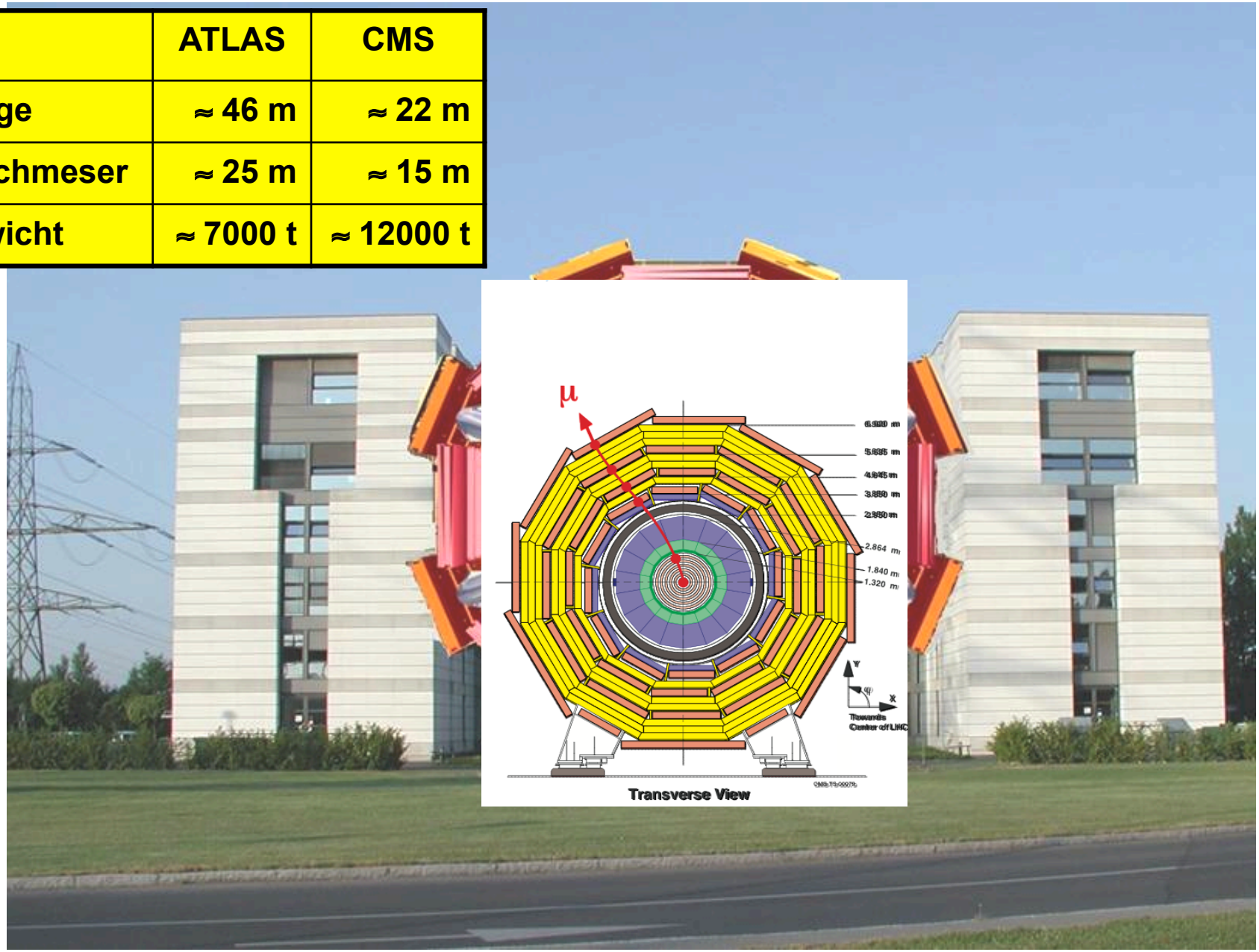
  Es gibt ein Higgs-Boson
  - Spin 0
  - Maximale Masse ca. 1000 GeV



- Das Higgs-Boson entspricht einer Anregung des Feldes

Large Hadron Collider (LHC)

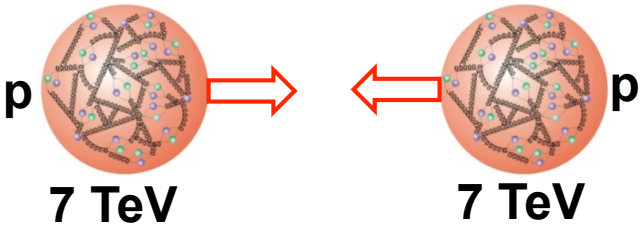
	ATLAS	CMS
Länge	≈ 46 m	≈ 22 m
Durchmeser	≈ 25 m	≈ 15 m
Gewicht	≈ 7000 t	≈ 12000 t



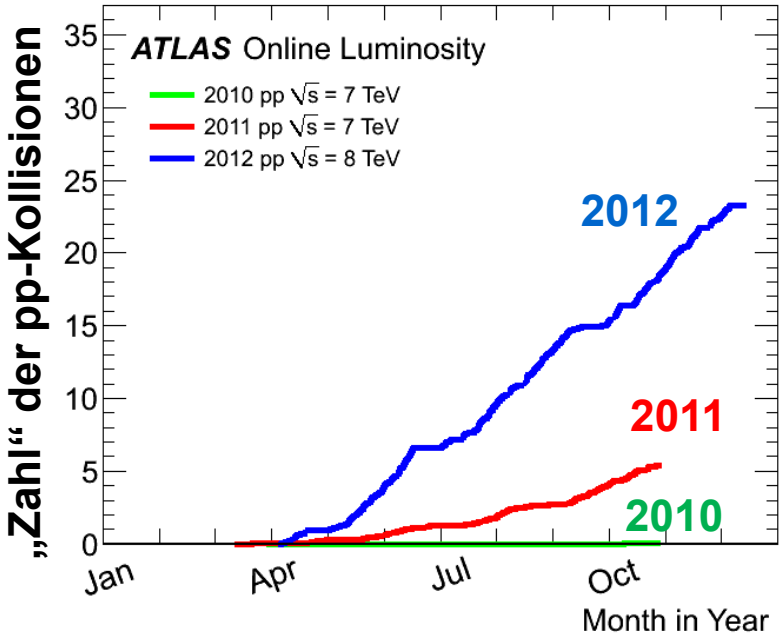
Large Hadron Collider LHC

- LHC ist ein Proton-Proton Collider
  - am europäischen Zentrum für Teilchenphysik CERN in Genf
- Höchste mögliche Energie
  - max. 14 TeV im pp Schwerpunktsystem
  - zurzeit werden 8 TeV erreicht
- Kollisionen erzeugen Bedingungen wie 10^{-13} – 10^{-14} s nach den Urknall
- Beschleuniger und Detektoren gebaut in internationalen Kollaborationen
  - mit starker Beteiligung von DESY

- 2010 Start des Physikprogramms
- Stetige Steigerung der Zahl der Proton-Proton-Kollisionen

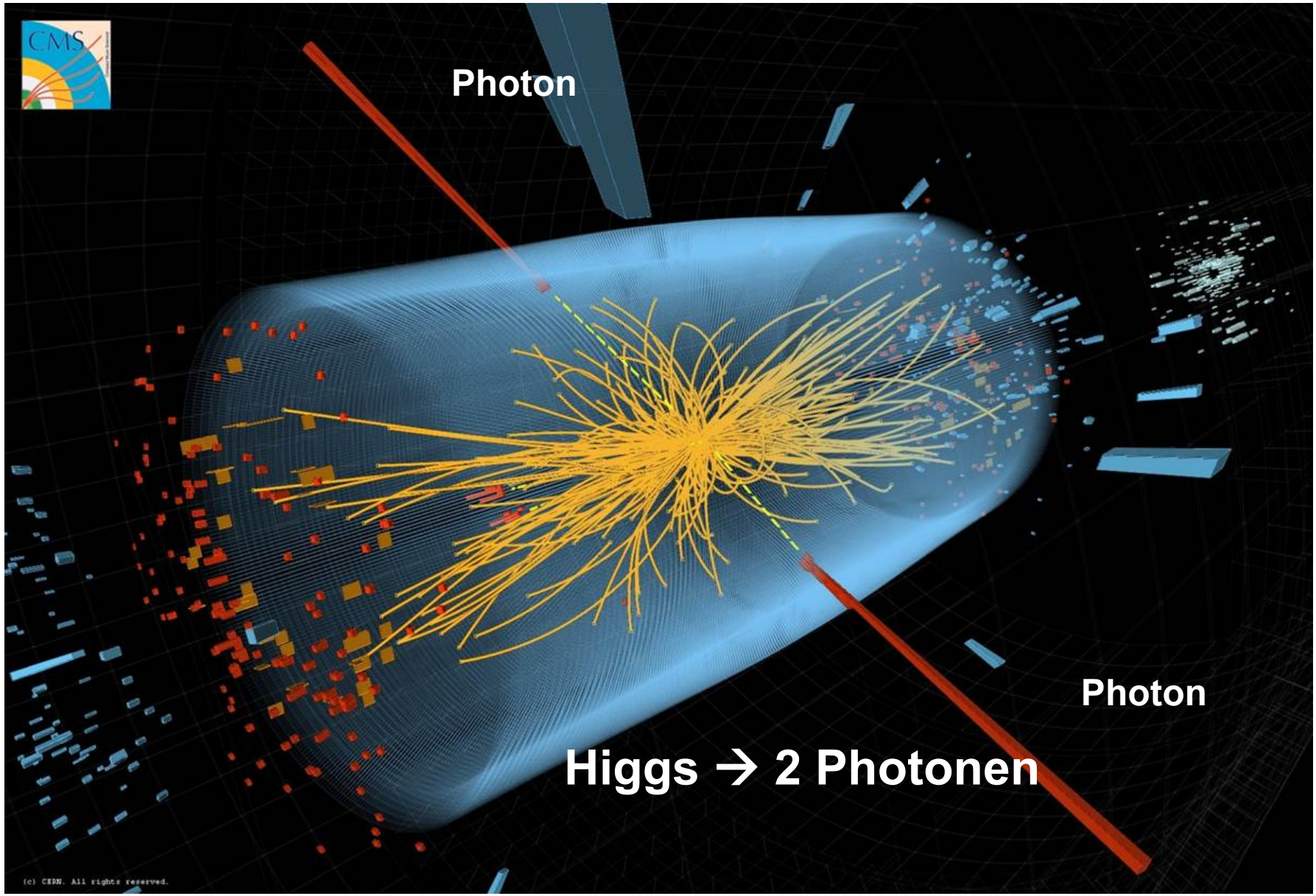


1 000 eV	= 1 keV
1 000 000 eV	= 1 MeV
1 000 000 000 eV	= 1 GeV
1 000 000 000 000 eV	= 1 TeV



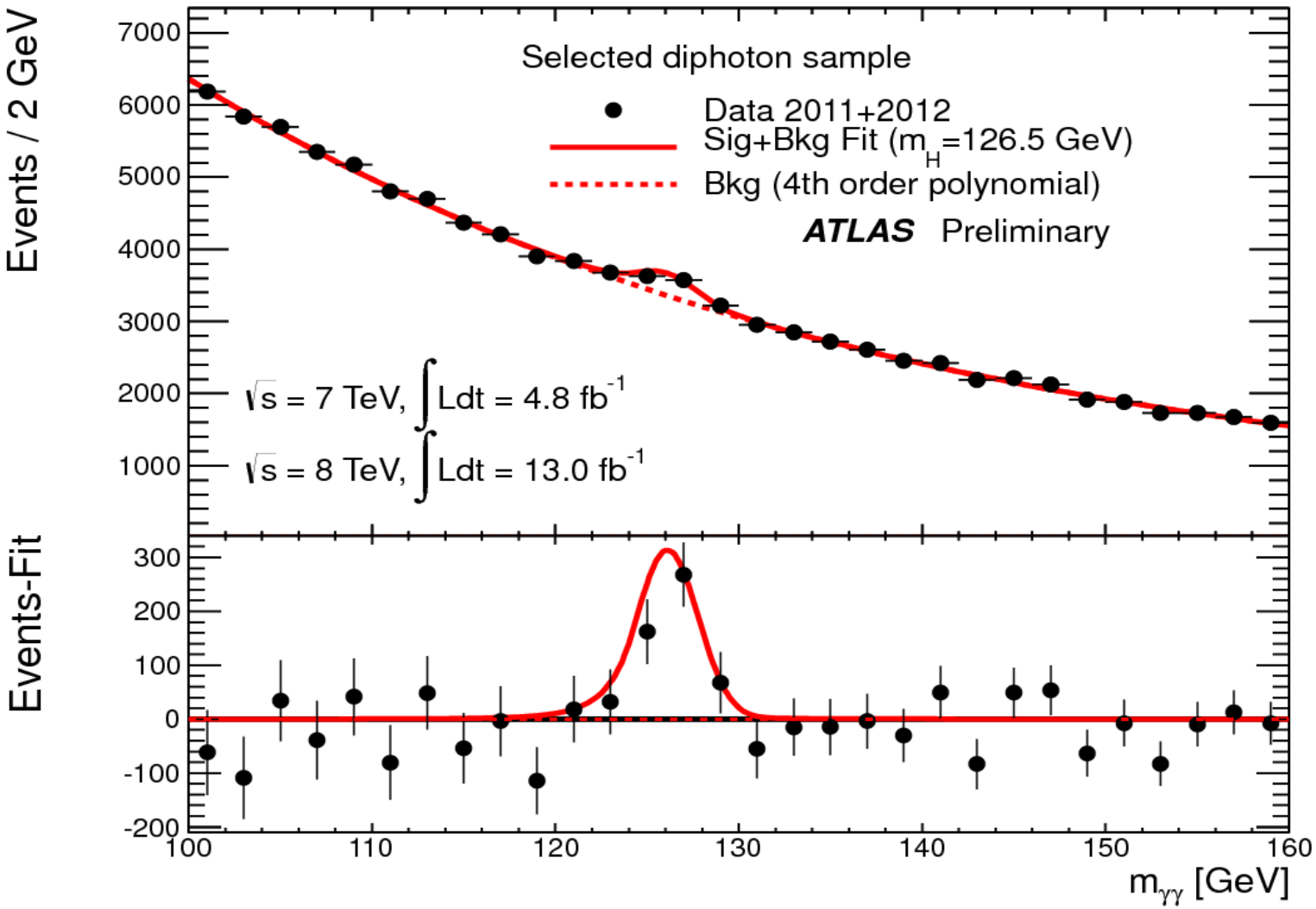
Higgs-Ereignisse am LHC

- Eine von ca. 3 000 000 000 000 000 Proton-Proton-Kollisionen ($3\ 10^{15}$):



Higgs-Boson Zerfall in 2 Photonen

- Beispiel des ATLAS Experimentes



Hamburger Abendblatt 9.10.2013

Diese Hamburger halfen bei der Entdeckung des Teilchens

Etwa 150 Physiker aus der Hansestadt sind an den Experimenten mit den gewaltigen Detektoren ATLAS und CMS in Genf beteiligt

HAMBURG :: Die Suche nach dem Higgs-Teilchen und exotischen Partikeln ist ein Mammutprojekt: Etwa 10.000 Forscher aus aller Welt sind an den Experimenten mit dem Large Hadron Collider (LHC) beteiligt, einer 27 Kilometer langen Röhre, in der Zustände simuliert werden, wie sie vermutlich kurz nach dem Urknall herrschten, als alle Partikel entstanden, die heute bekannt sind – und womöglich solche, die wir bisher nicht kennen.

Die beiden größten der vier Teilchendetektoren entlang des Beschleunigerrings heißen ATLAS und CMS. Allein CMS ist 21 Meter lang und mit einem Gewicht von 12.500 Tonnen fast doppelt so schwer wie der Eiffelturm. Zu den Forschern, die diese Geräte konstruiert haben und nun mit ihnen arbeiten, gehören auch etwa 150 Physiker vom Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) und der Uni Hamburg.

Kerstin Borras vom Desy ist seit Kurzem stellvertretende Sprecherin der CMS-Gruppe Foto: Desy

Am CERN in Genf weilte am Dienstag **Kerstin Borras**. „Hier war ein Riesenjubel", erzählte die stellvertretende Sprecherin des CMS-Experiments nach der Bekanntgabe. Sie und viele ihrer Kollegen hatten die Übertragung der Preisverkündung live verfolgt, die sich eine gute Stunde verzögert hatte. „Wir haben alle hier eine Stunde gewartet. Das war eine Superanspannung, die sich dann in einem Riesenapplaus löste", so Borras, die die CMS-Gruppe am DESY leitet.

Peter Schleper von der Uni Hamburg ist Vorsitzender des Komitees für Elementarteilchenphysik Foto: privat

Ebenfalls zur CMS-Gruppe gehört **Prof. Joachim Mnich**, Mitglied des Desy-Direktoriums. Er war bisher unter anderem am Aufbau des zentralen Spurdetektors des CMS beteiligt, mit dem Signale der durchfliegenden Teilchen gemessen werden.

Eine besondere Stellung hat **Prof. Peter Schleper** vom Institut für Experimentalphysik der Uni Hamburg. Seit 2012 ist der Forscher der Vorsitzende des Komitees für Elementarteilchenphysik KET, der Vertretung aller deutschen Teilchenphysiker. Schleper ist Mitglied der CMS-Gruppe. Mit seinem Team entwickelte er einen Teil der Siliziumsensoren in dem Detektor. Diese erfassen die Bahnen der durchfliegenden Teilchen. Anhand dieser Bahnen können die Physiker am CERN auf die Energie der Teilchen schließen. Die Kombination der Energie mehrerer Teilchen wiederum gibt Auskunft über die Masse eines Teilchens (etwa des Higgs), das in andere Teilchen zerfallen ist. Zur CMS-Gruppe der Uni Hamburg gehören neben Schleper unter anderem die Physik-Professoren **Erika Garutti**, **Johannes Haller** und **Christian Sander**.

Kerstin Tackmann leitet eine Nachwuchstruppe zur Higgs-Forschung am DESY Foto: DESY

Erst 35 Jahre alt ist die Physikerin **Kerstin Tackmann**, und doch hat die Leiterin einer ATLAS-Nachwuchsgruppe am DESY schon einiges vorzuweisen. So trug sie aus Sicht der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) sogar entscheidend zum Nachweis des Higgs-Teilchens bei. Dieses lässt sich nicht direkt nachweisen; es zerfällt in Kombinationen von Teilchen, sogenannte Zerfallskanäle. Einer ist der Zerfall in zwei Lichtteilchen (Photonen). Tackmann führte Studien zu diesem Kanal durch und verbesserte die Algorithmen, mit denen sich der Zerfall berechnen lässt. Der ATLAS-Detektor wies das Higgs dann auch im Zwei-Photon-Kanal nach. Für ihre Arbeit wurde Tackmann von der DPG mit dem Hertha-Sponer-Preis ausgezeichnet. (mha/dpa)

Offene Fragen

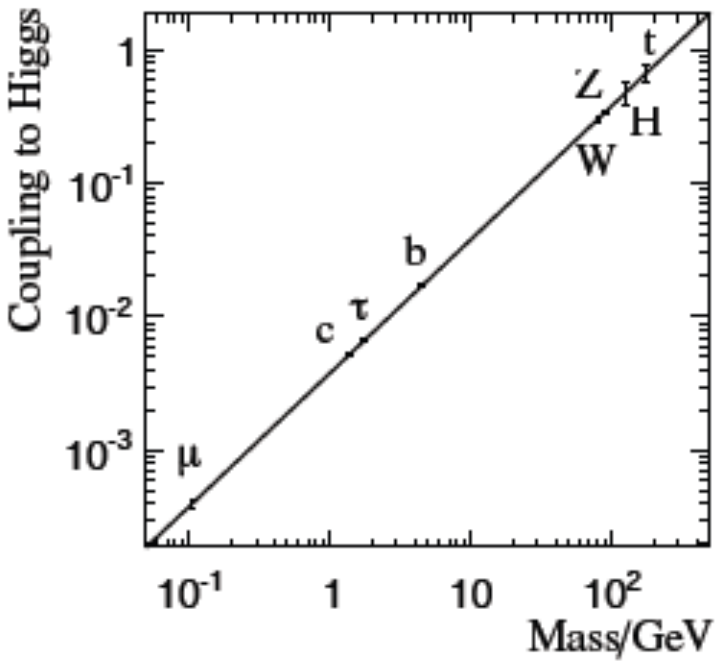
- Am LHC ist ein Higgs-Teilchen entdeckt worden

  Masse ca. 125 GeV

  - es hat offenbar Spin 0
  - und wird mit ungefähr der erwarteten Rate produziert

- Aber ist es DAS Higgs-Boson?
  - koppelt es an die anderen fundamentalen Teilchen entsprechend der Voraussagen?

- Oder gibt es noch andere Higgs-Teilchen?
  - so wie z.B. in der Supersymmetrie vorhergesagt



- Weitere Untersuchungen am LHC in den nächsten Jahren
- Und an zukünftiger Higgs-Fabrik als e^+e^- Linear Collider !?

2001

TESLA

A 500 - 800 GeV Electron Positron Linear Collider
with an integrated X-Ray Free Electron Laser Laboratory

COLLOQUIUM

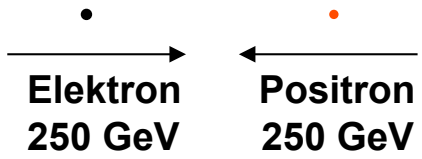
Scientific Perspectives and Technical Realisation of TESLA

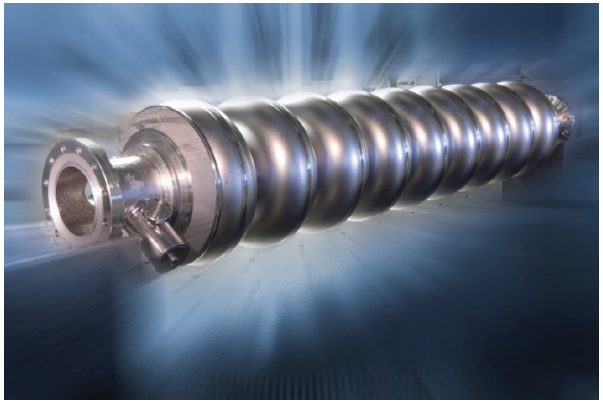
March 23/24 2001 at DESY in Hamburg

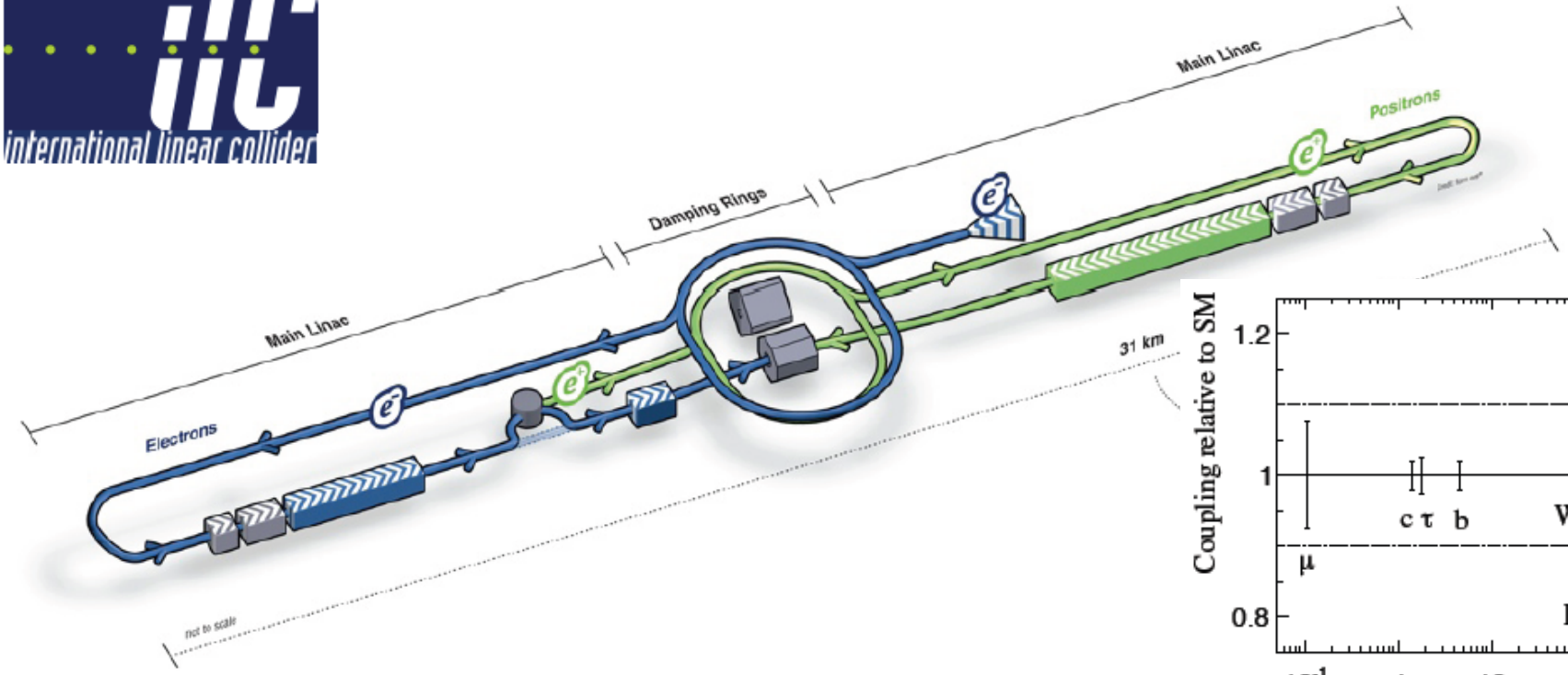
The institutes which have contributed in an international effort to the Technical Design Report (TDR) of TESLA will present its perspectives for particle physics and science with X-ray free electron lasers as well as its technical realisation.

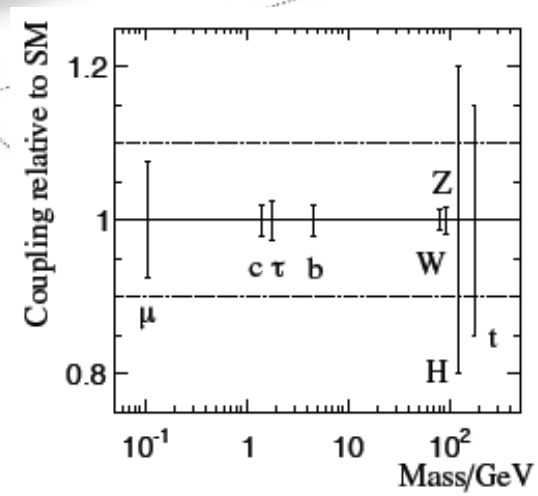
Der International Linear Collider (ILC)

- Elektron-Positron Collider
  - Fundamentale Teilchen
  - Erlaubt präzisere Messungen als am LHC
  - Projektvorschlages Ende 2012 (in Japan?)





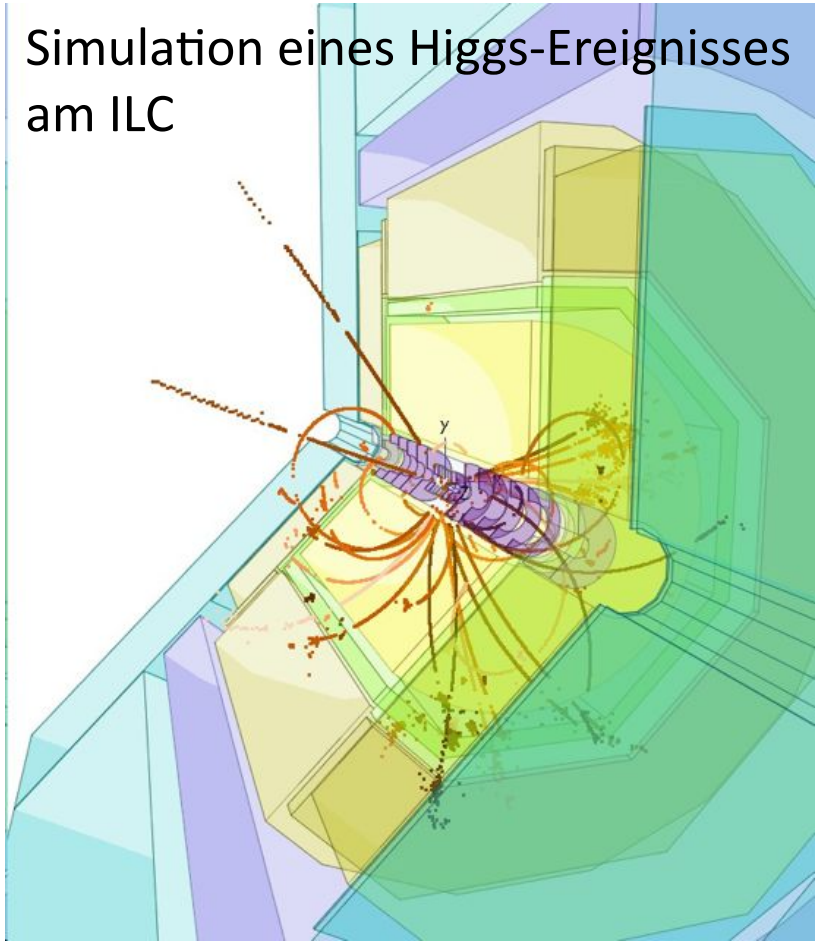




Hamburg und der ILC

- Führend in der supraleitenden Beschleunigungstechnologie
  - FLASH
  - European XFEL
  - ILC

- und in der Vorbereitung der Physik und Detektoren



50 Jahre Teilchenphysik in Hamburg

- Enge Zusammenarbeit zwischen Universität und DESY in den Bereichen
  - Beschleunigerentwicklung und - bau
  - Experimentelle Teilchenphysik und Detektorentwicklung
  - Theoretische Physik
- Die Hamburger Forschung hat entscheidend zur Entwicklung des Standard Modells und dem heute geltenden Weltbild des Mikrokosmos beigetragen
- Bis 2007 Forschung an Hamburger Beschleunigern
- Seither Mitarbeit an globalen Projekten, z.Z. am LHC
- Teilchenphysik und Forschung mit Licht waren seit 1964 eng verbunden, die Zukunft der Forschung mit Beschleunigern in HH liegt in diesem Bereich

Besonderer Dank an

- Joachim Mnich

- Erich Lohrmann und Paul Soeding:

  „Von schnellen Teilchen und hellem Licht“

- Alle Kolleginnen und Kollegen, die zu den gezeigten Ergebnissen beigetragen haben