

TEILCHENPHYSIK FÜR FORTGESCHRITTENE

Beschleuniger und Experimente

Caren Hagner
Achim Geiser

(in teilweise Anlehnung an Skript von R. Klanner/T. Schörner-Sadenius)

Universität Hamburg, IExpPh
Sommersemester 2009



Veranstalter 2. Teil der Vorlesung

- Dr. Achim Geiser
- Studium in Aachen und Urbana/IL, Sommerstudent CERN
- Diplomarbeit (1987) und Dissertation (1992) an der RWTH Aachen/am UA1-Experiment am CERN
 - Zwei-Myon-Produktion
 - Beauty-Produktion in Proton-Antiproton-Kollisionen (QCD)
- CERN-Fellow + Staff (1992-98)
 - Suche nach Neutrinooszillationen mit dem NOMAD-Experiment am CERN
- Wissenschaftlicher Mitarbeiter Uni Hamburg (1999/2000)
 - Vorbereitung der MONOLITH- und OPERA-Neutrinoexperimente
- Wissenschaftlicher Angestellter am DESY (seit 2001)
 - Beauty-Produktion in ep-Kollisionen bei HERA/ZEUS
 - Top- und Higgs-Produktion bei LHC/CMS
 - (Sommer)Studenten- und Diplomanden/Doktorandenbetreuung
- Privatdozent Uni Hamburg (seit 2006)
 - derzeit 6 Doktorand(inn)en, auch Bachelor/Diplomarbeiten möglich



Vorlesung ist für [Sie](#)!

-> bitte Rückmeldung, wenn die Behandlung eines Themas zu schnell, zu unvollständig oder zu langatmig ist

bitte jederzeit unterbrechen, wenn etwas nicht klar ist

ÜBERBLICK

1. Teil:

1. Die quantenmechanische Beschreibung von Elektronen
2. Feynman-Regeln und –Diagramme
3. Lagrange-Formalismus und Eichprinzip
4. QED

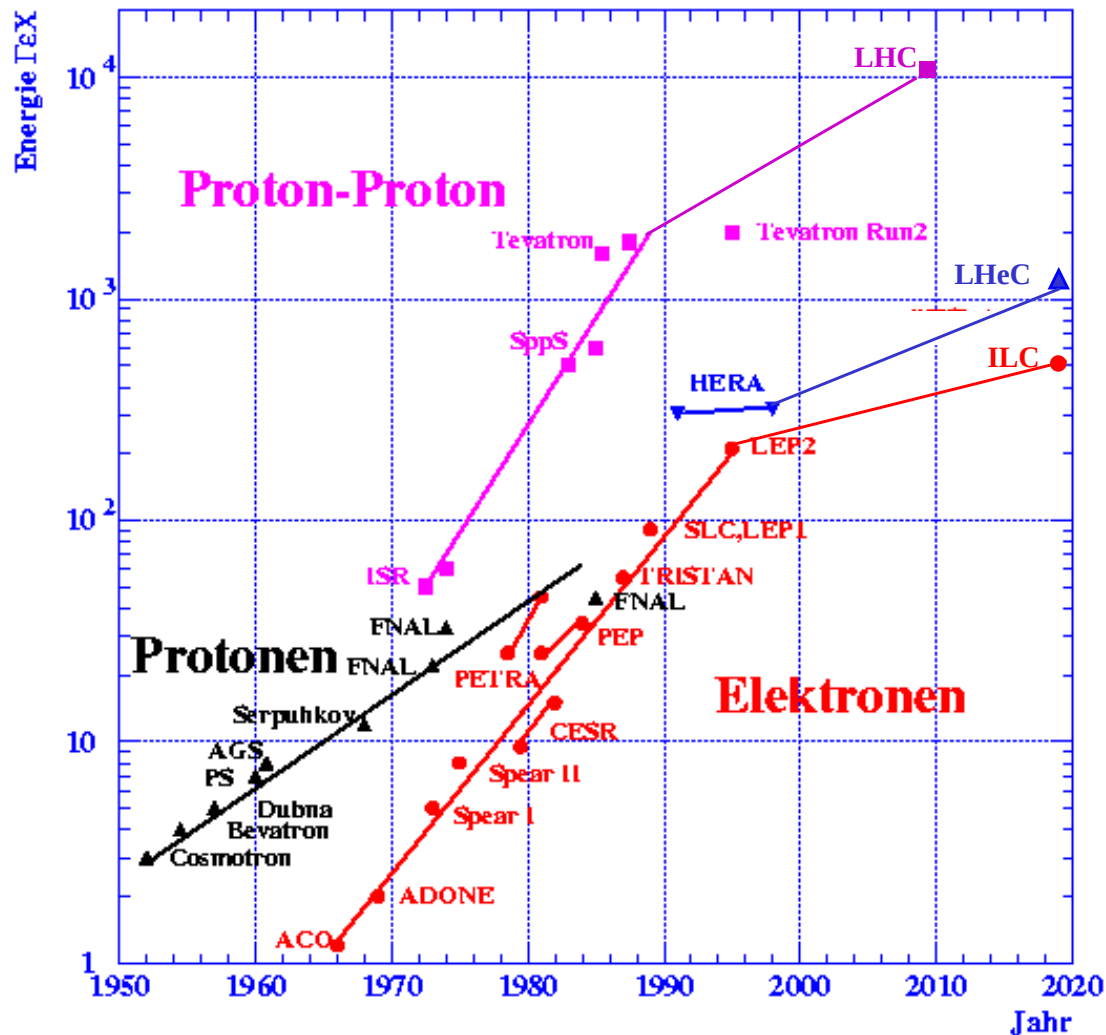
2. Teil:

Heute: Einschub: Beschleuniger und Experimente, ILC

5. Starke Wechselwirkung und QCD
6. Schwache Wechselwirkung
7. Mischung von Quarks und Leptonen
8. Teilchenphysik und Kosmologie
9. Physiker-Träume: Jenseits des Standardmodells

EINSCHUB: BESCHLEUNIGER

Livingston-Plot:



Nicht alle Maschinen abgedeckt:

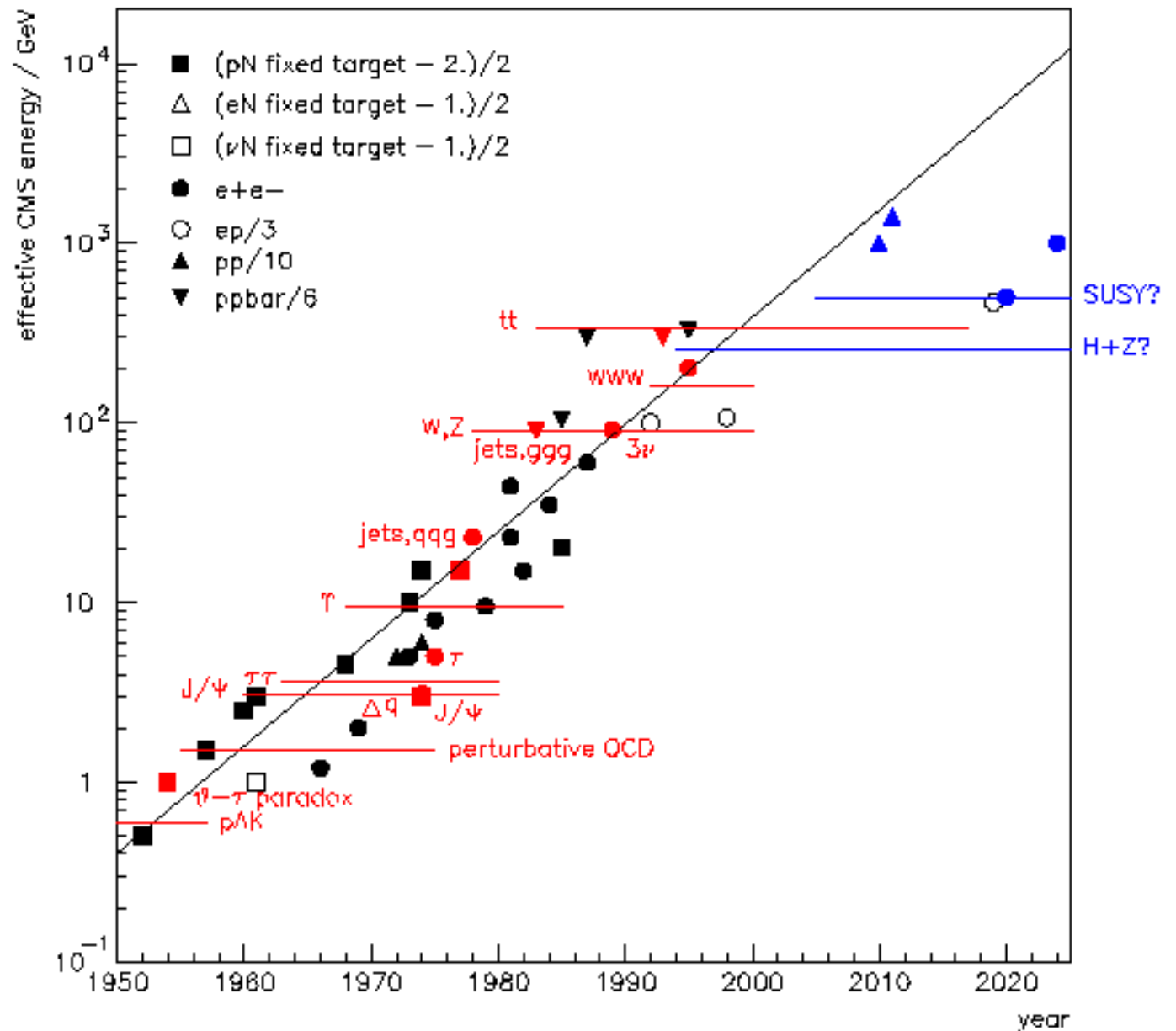
- frühe fixed-target
- Neutrino-Physik
- Upsilon-Entdeckung am FNAL
- ...

EINSCHUB: BESCHLEUNIGER

modifizierter Livingston-Plot:

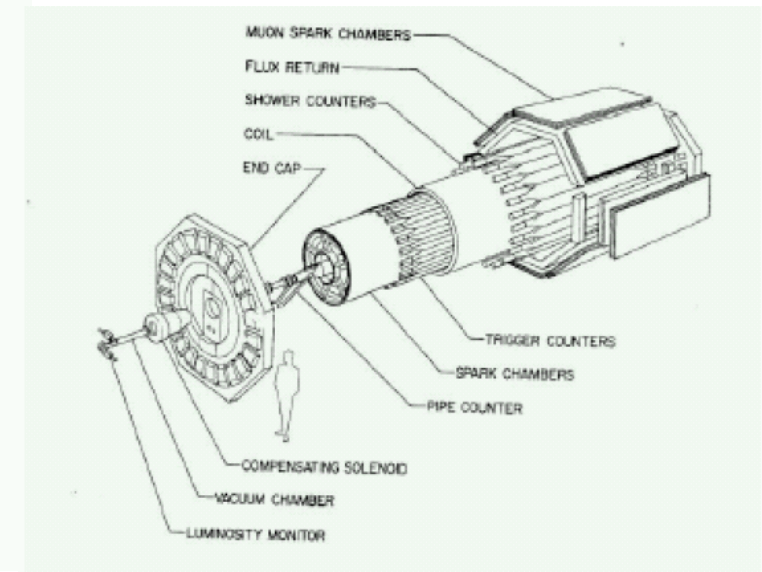
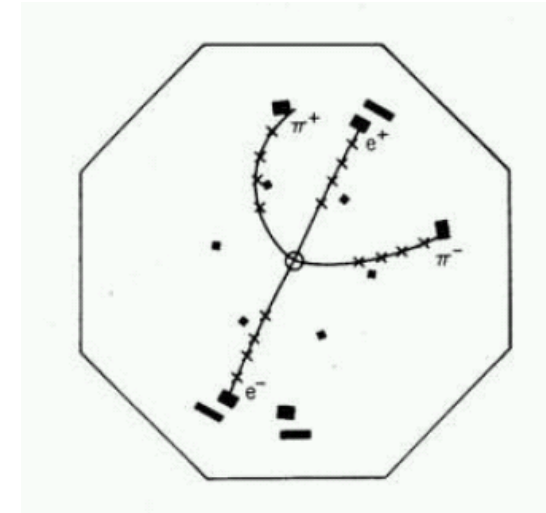
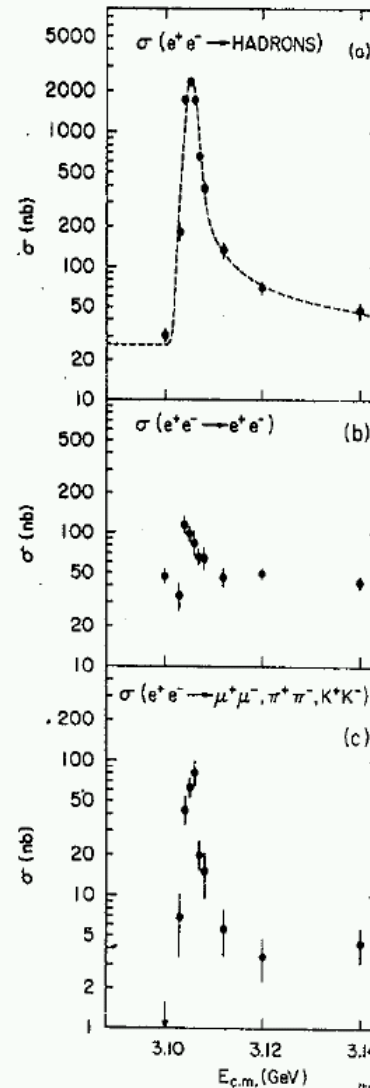
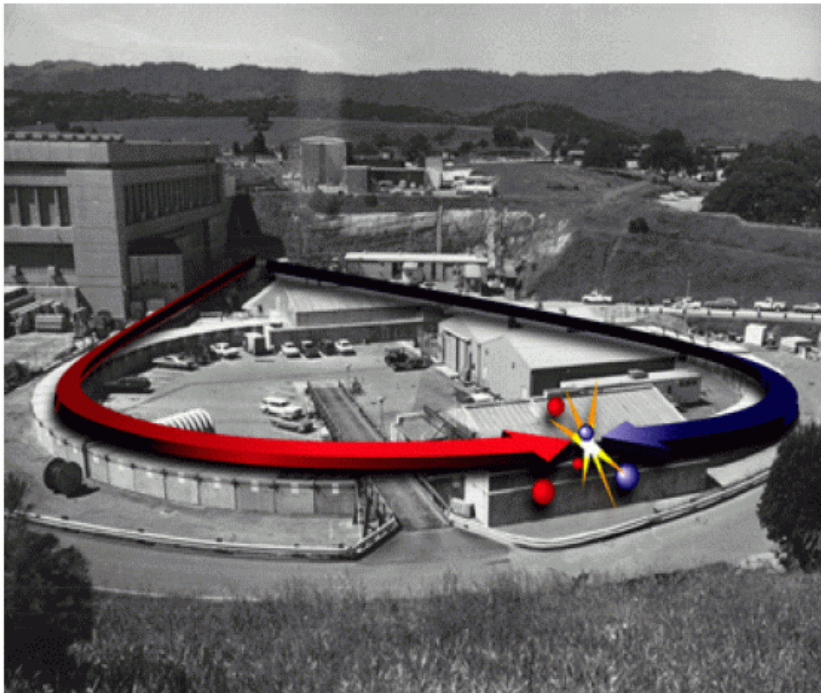
“effektive” Schwerpunkts-
energie oft kleiner als
formale.

z.B. Proton = 3 Valenzquarks
+ Quark- und Gluon-See

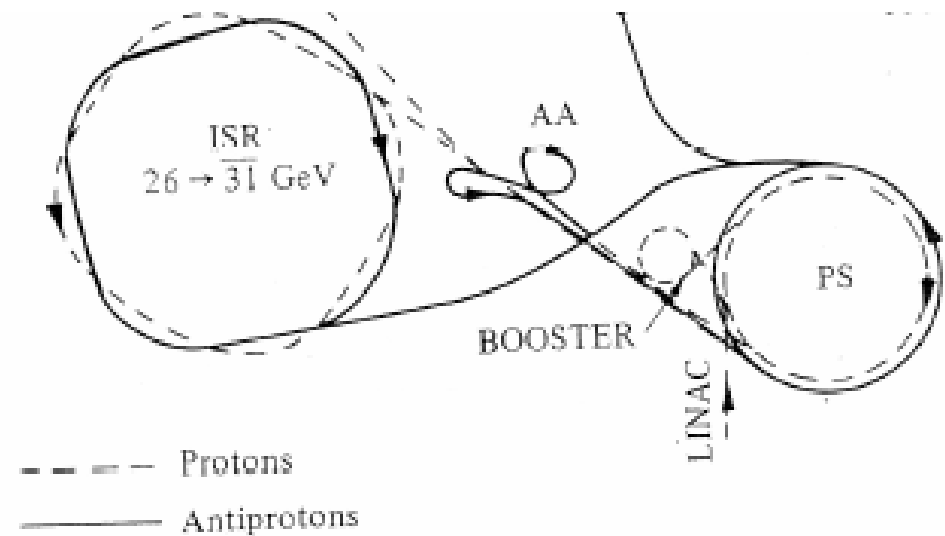


EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: SPEAR

- 4+4 GeV Elektron-Positron-Speicherring am SLAC (80m Durchmesser).
- Wesentliche Entdeckungen:
 - J/Psi 1974 (Richter) → NP 1976
 - Tau-Lepton 1976 (Perl)
- Detektor: Mark I



EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: ISR



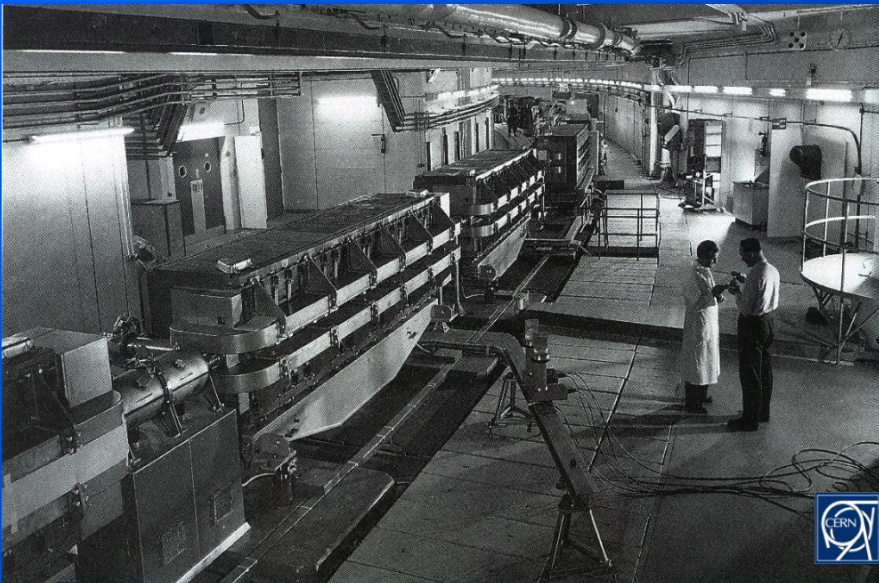
- Intersecting Storage Ring: pp bei 62 GeV
- 1972-1984 am CERN
- Beobachtung von J/Psi und Ypsilon.
- Erste Beobachtung von Jet-Strukturen unter grossem Winkel
- Lumi-Rekord in Hadron-Hadron bis Tevatron-Upgrade in 2004.
- Stochastic Cooling!

EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: $Sp(\bar{p})S$, PS

- Proton--Synchrotron
- Liefert Elektronen, Pionen, Protonen etc. für Fixed-Target und als Vorbeschleuniger.
- Noch heute eines der Arbeitspferde am CERN.
- Lieferte auch Neutrinos für große Blaskammer Gargamelle etc.

- Super-Proton(-Antiproton)-Synchrotron
- Proton-Antiproton bei bis zu 540/630 GeV.
- Ursprünglich nur SpS: Pionen/Protonen fuer Fixed-Target, Neutrinos etc.
- Experimente UA1 und UA2 entdeckten hier 1984 unter C. Rubbia die W- und Z-Bosonen.
→ Nobelpreis!
- z. Zt. z.B. Neutrinos für OPERA/Gran Sasso (I)

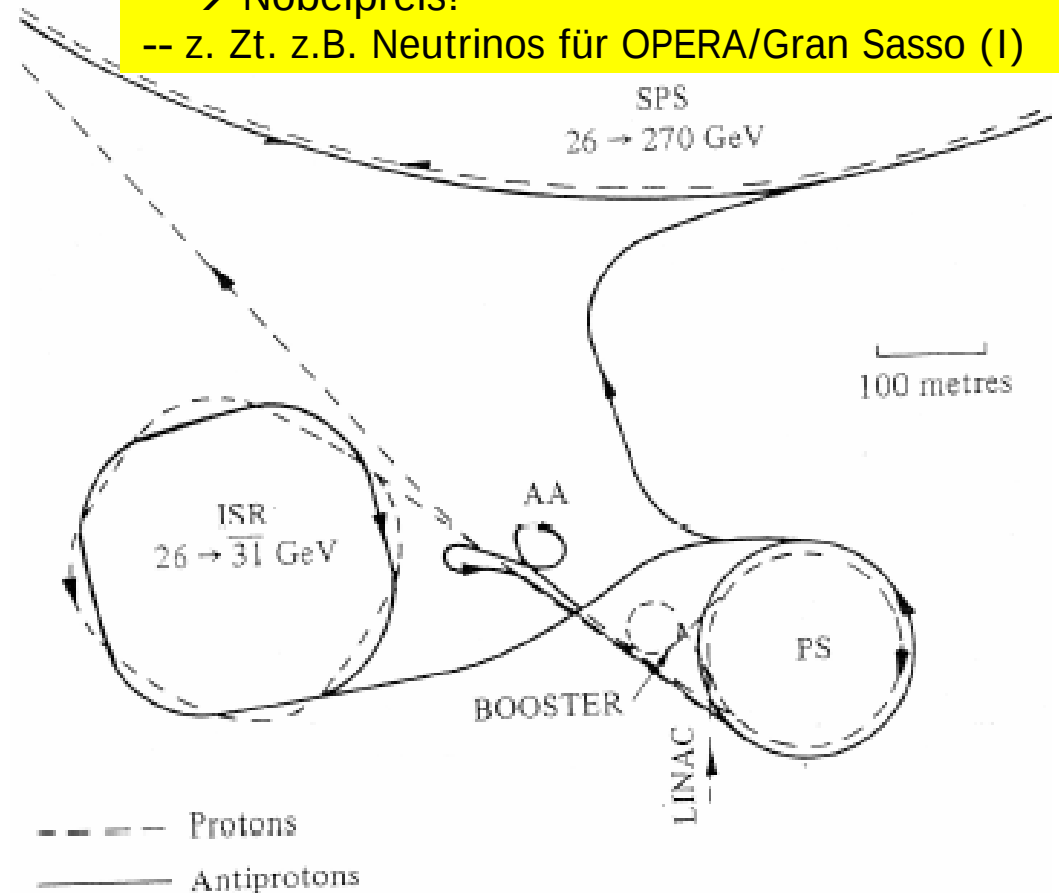
CERN's Proton Synchrotron



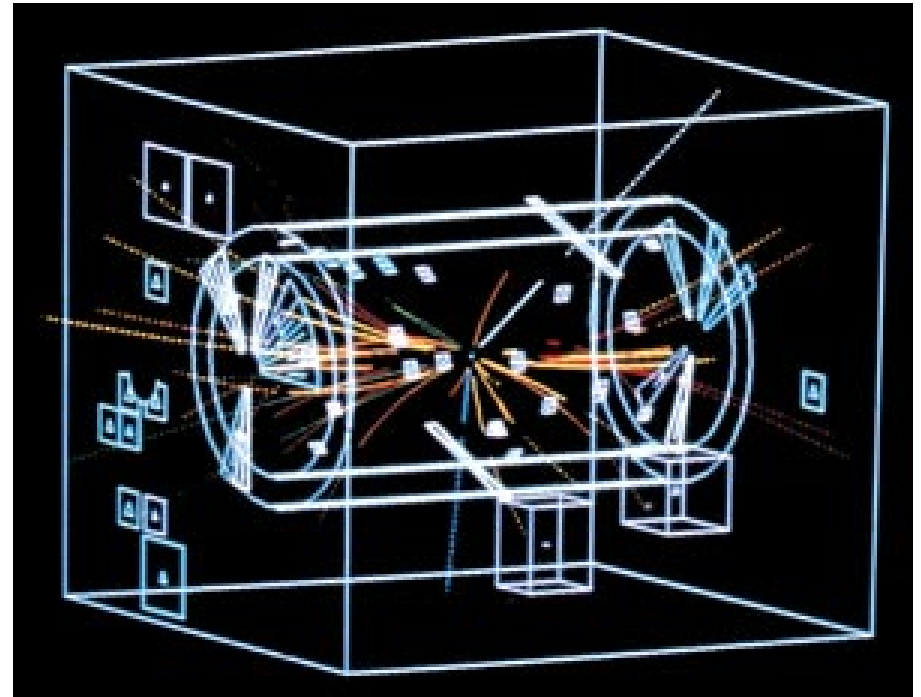
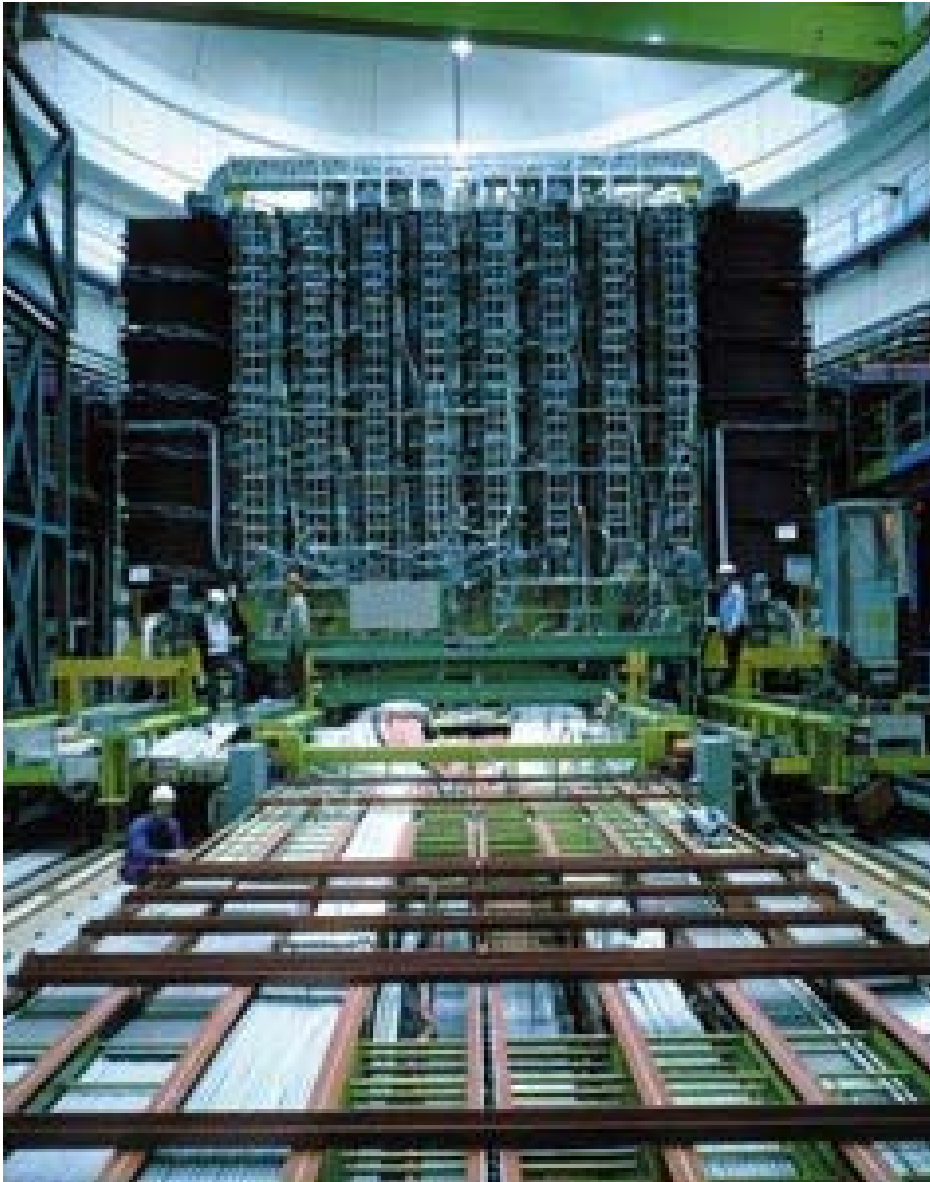
proton-synchrotron (PS) accelerated first protons to 24 GeV in 1959

... still running today and in the future for the LHC ...

10.-13.09.2004 Maria Laach Summer School 2004 - Amulf Quadt? Hadron Collider Physics, Experimental Overview ROCHSTER

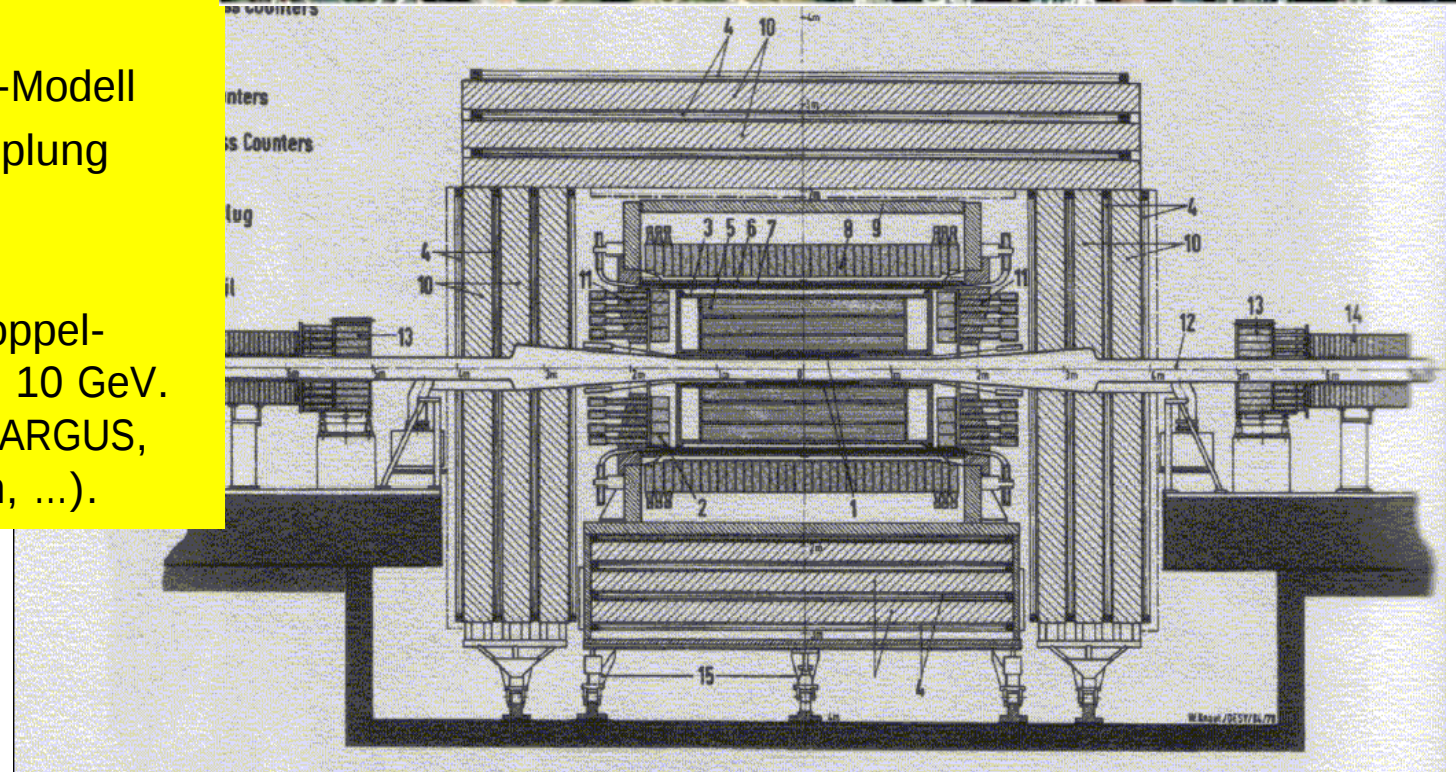


EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: $S\bar{p}\bar{p}S$ (UA1, UA2)

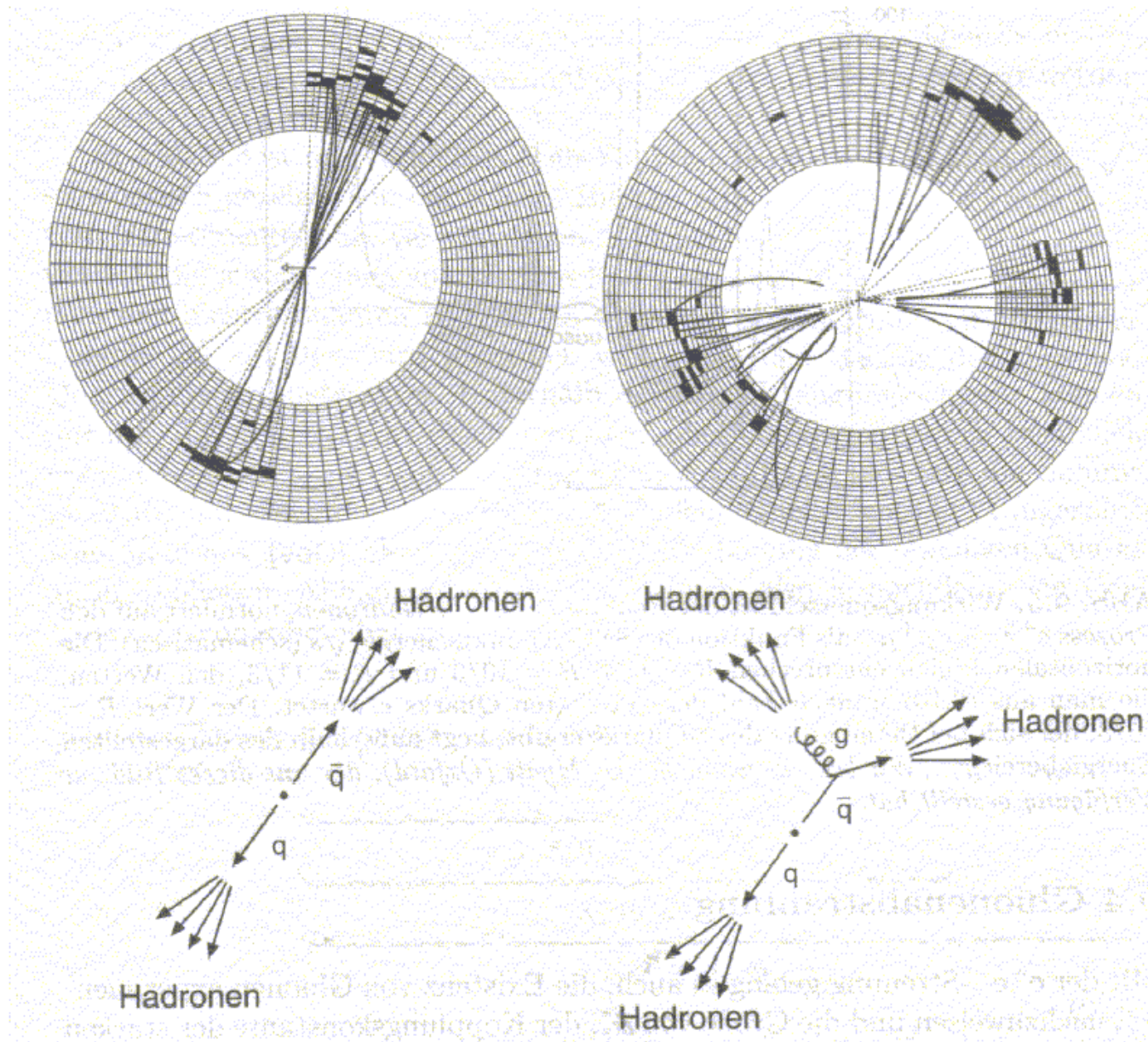


EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: PETRA (JADE)

- Einstmals (-1984) e^+e^- bis 44 GeV
- Wollte Top, Higgs finden
- Tolle QCD-Messungen
- Jade, Cello, Tasso (Jade = Japan, Deutschland, England)
- bis 2007 Vorbeschleuniger HERA
- z.Zt Wiedereinweihung als neueste Synchrotronstrahlungsquelle
- Erste Ergebnisse zum elektroschwachen Standard-Modell
- Messungen der starken Kopplung
- Entdeckung des Gluons → Bestätigung der QCD!
- Davor bei DESY: DORIS (Doppel-Ring-Speicher) mit e^+e^- bei 10 GeV. Wichtig für Flavour-Physik (ARGUS, open charm, B-Oszillationen, ...).

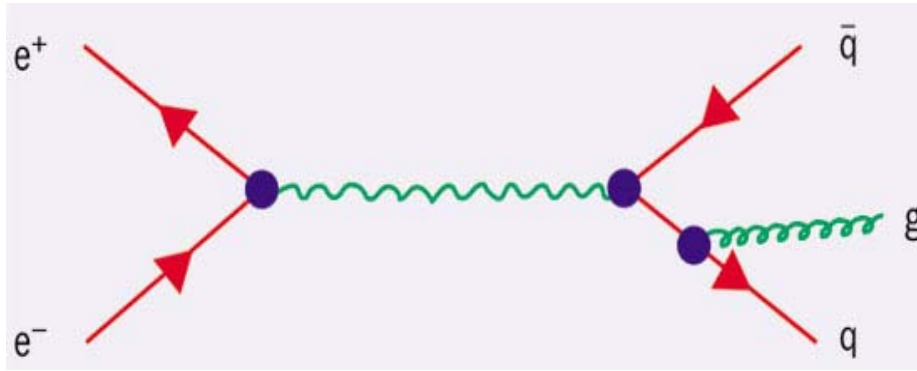


EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: PETRA (JADE)



Entdeckung des Gluons (1979)

PETRA bei DESY: suche nach



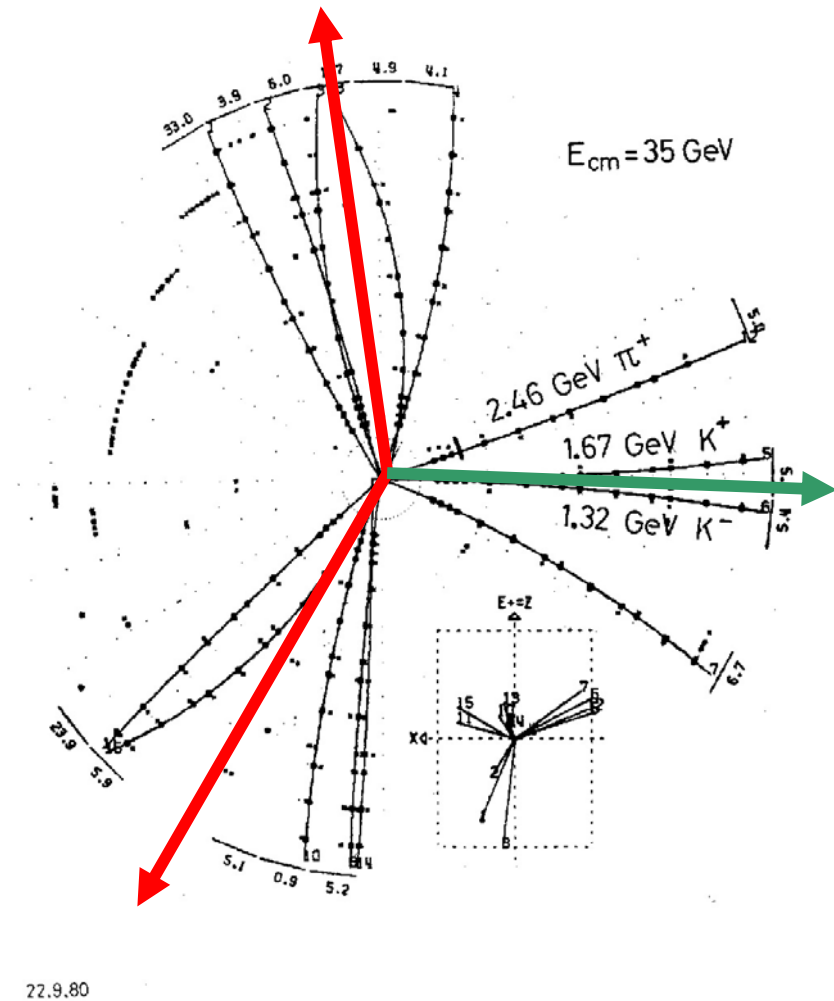
Björn Wiik

Paul Söding



Günter Wolf

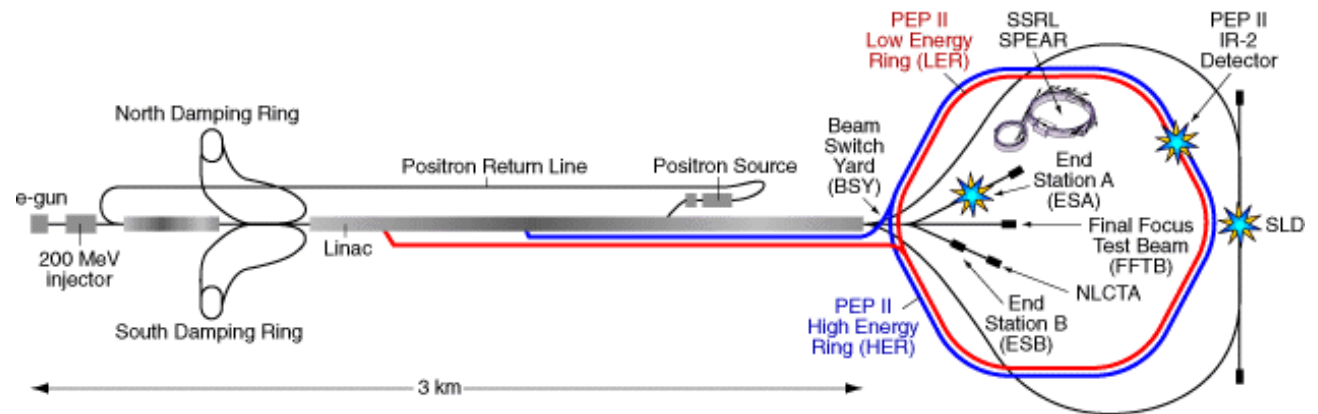
Sau Lan Wu



TASSO-Ereignis

EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: SLAC

- “Stanford Linear Accelerator”:
 e^+e^- bei M_Z .
- SLD: Z-Physik
- PEP mit BaBar (B-Physik)



Vergleichbar mit Belle bei Tristan (KEK).

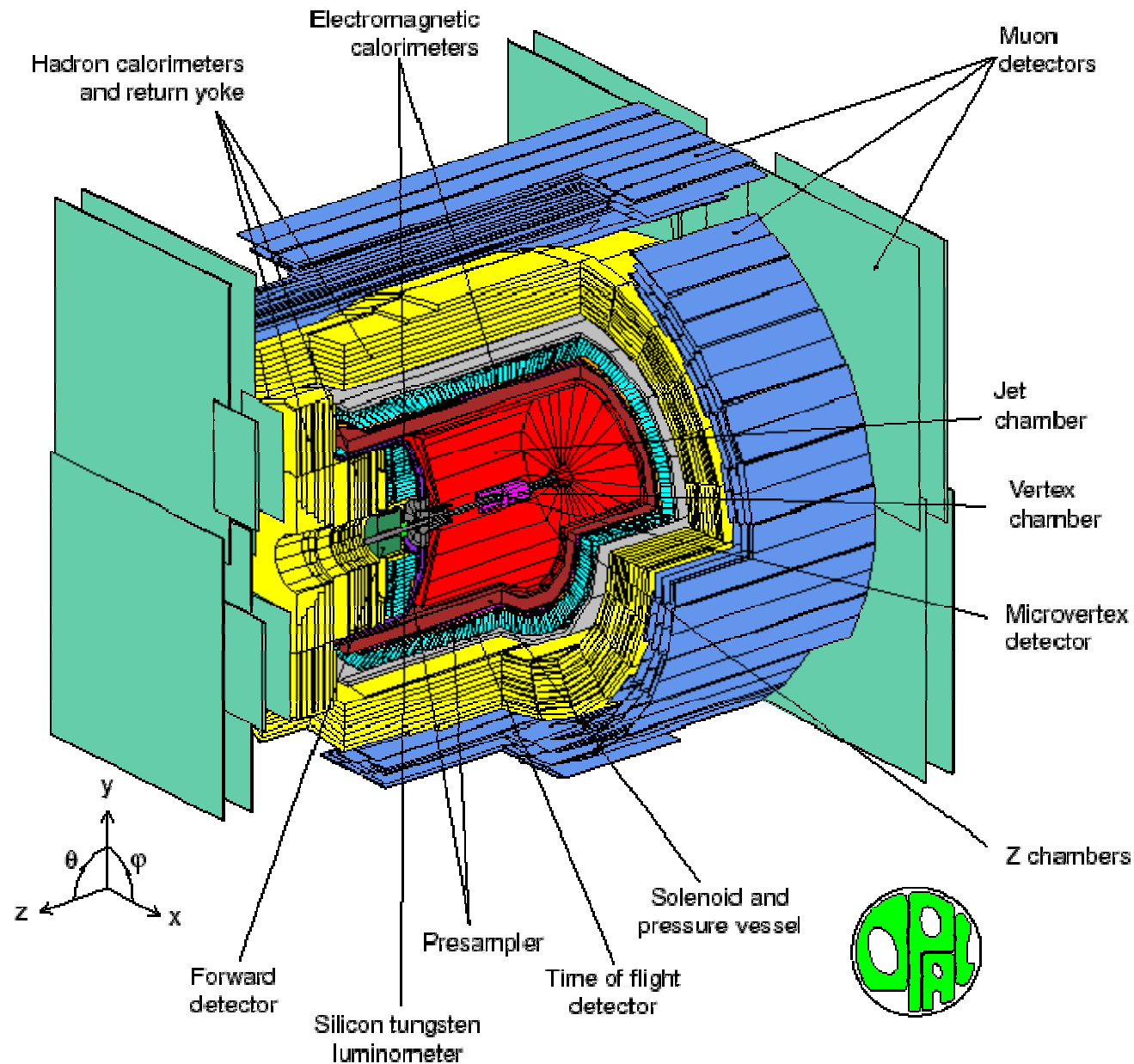
EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: LEP

- Large Electron Positron Collider
- 1989-2000
- OPAL, ALEPH, L3, DELPHI
- Vermessung des Z, des Standard-Modells
- Anzahl der Neutrino-Familien = 3
- Grenzen auf Higgs-Masse

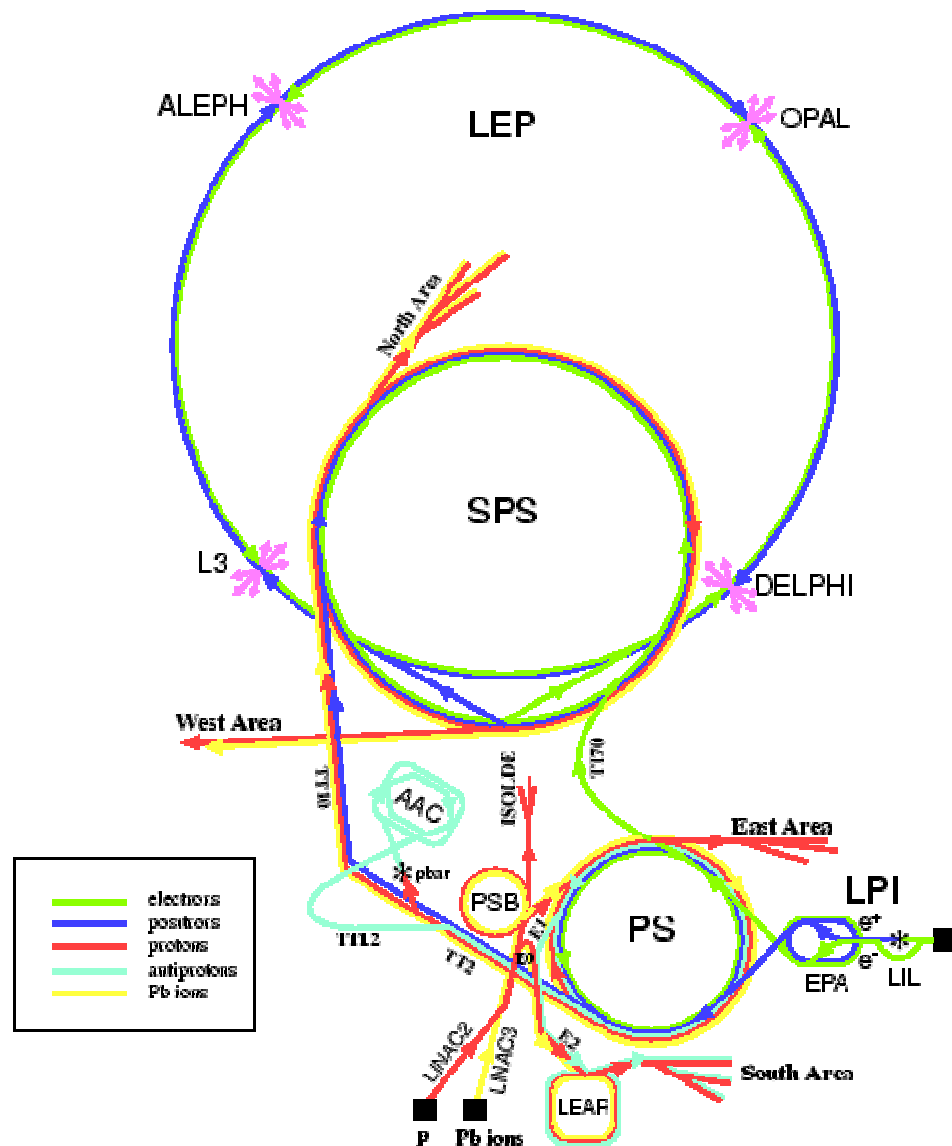
$\sqrt{s_{ee}} \approx 91 - 209 \text{ GeV}$
Umfang 27,5 km
WW - Rate $22 \mu\text{s}$



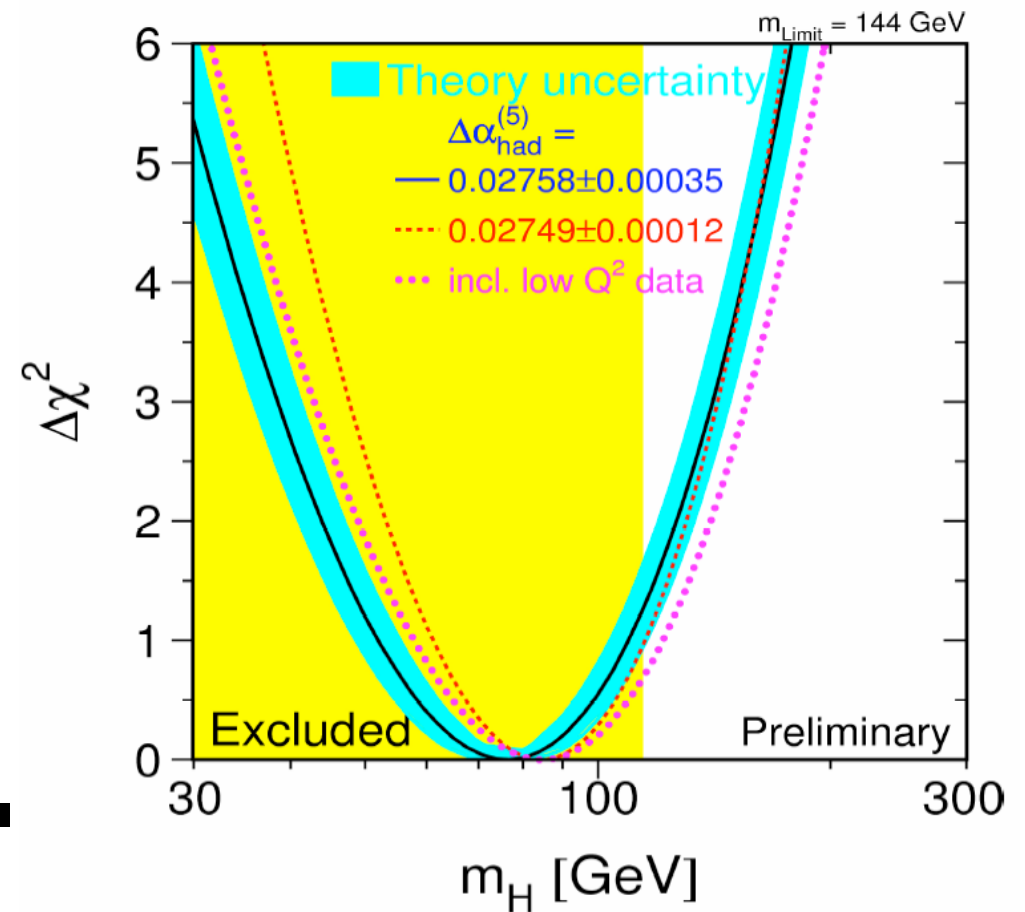
EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: LEP (OPAL)



EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: LEP

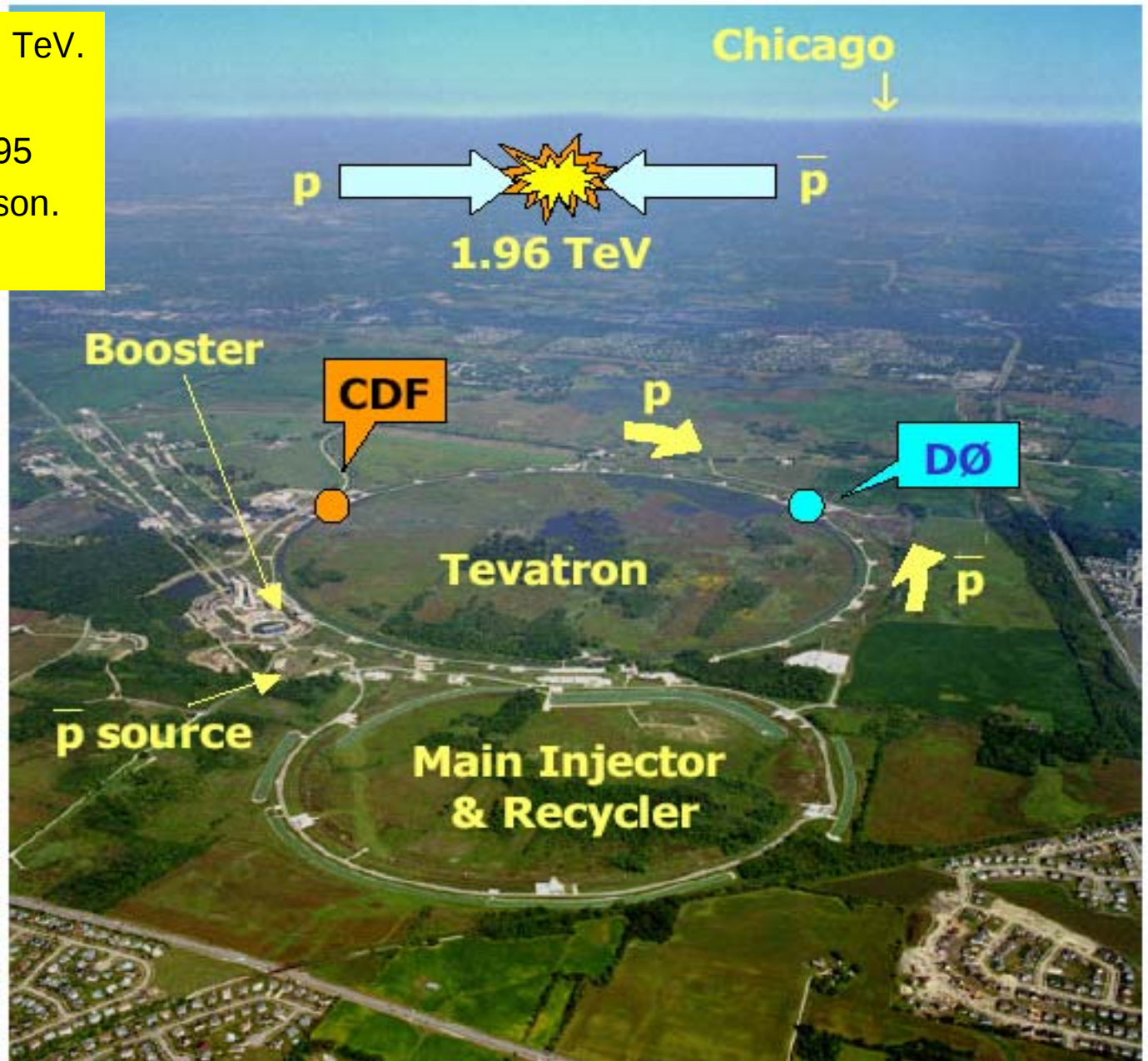


Präzisionsmessungen:



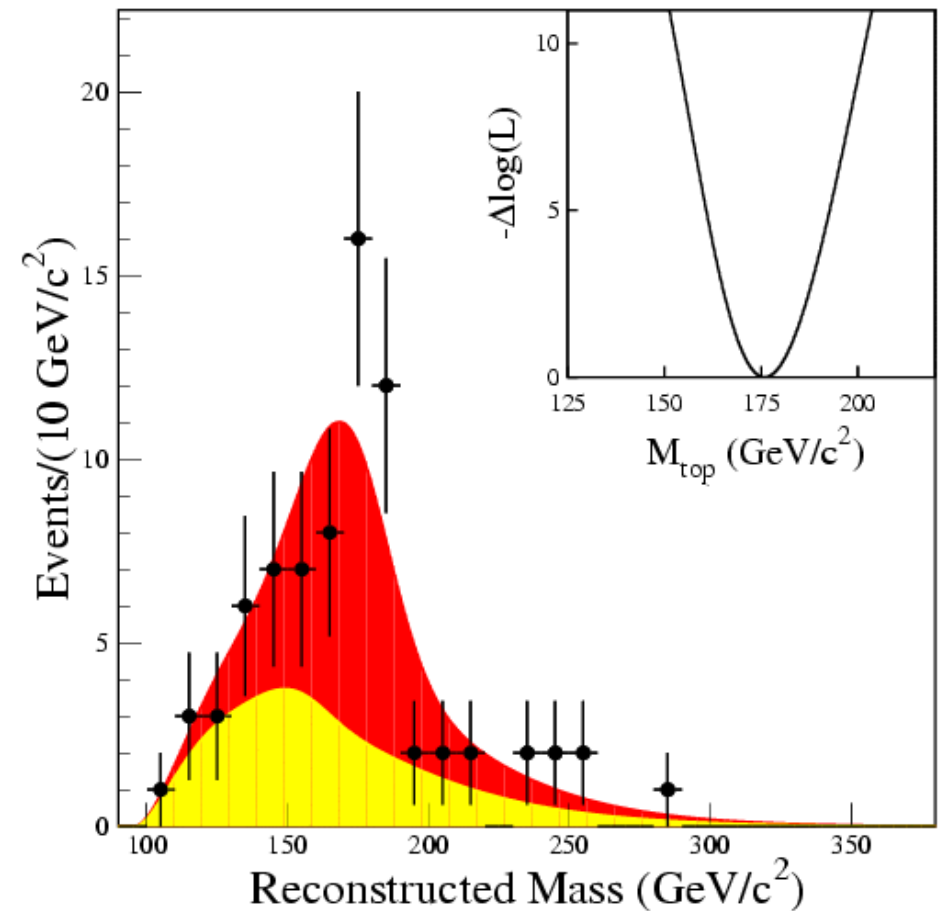
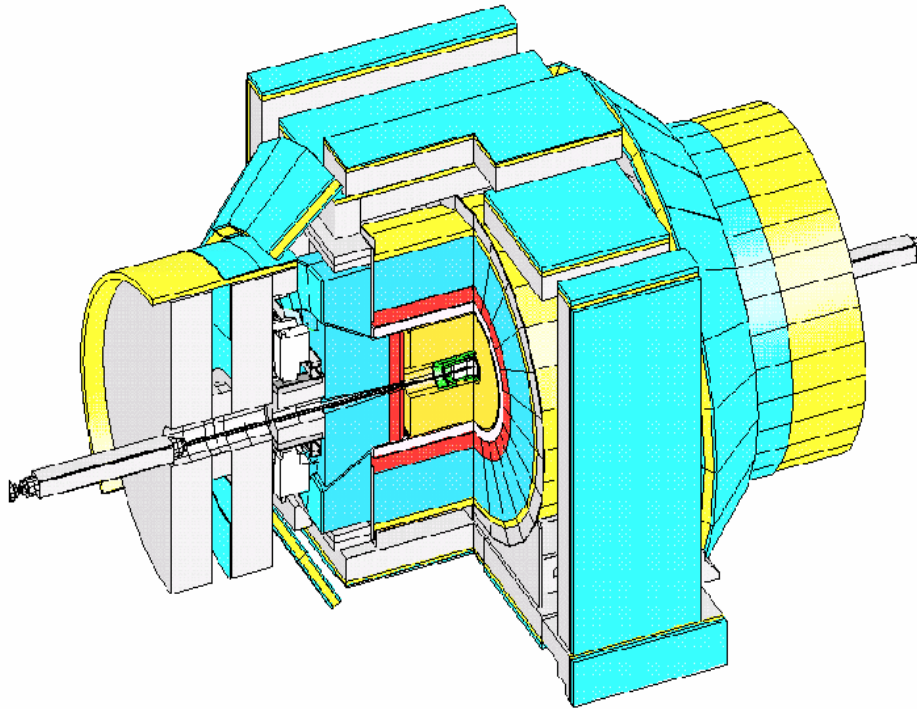
EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: TEVATRON

- Proton-Antiproton bei 1.95 (1.8) TeV.
- Experimente D0 und CDF
- Entdeckung des Top-Quarks 1995
- Heute Jagd nach dem Higgs-Boson.
- Betrieb bis ≤ 2009



$\sqrt{s}_{p\bar{p}} = 1.96 \text{ TeV}$
Umfang 6,3 km
WW - Rate 396ns

EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: TEVATRON (CDF)



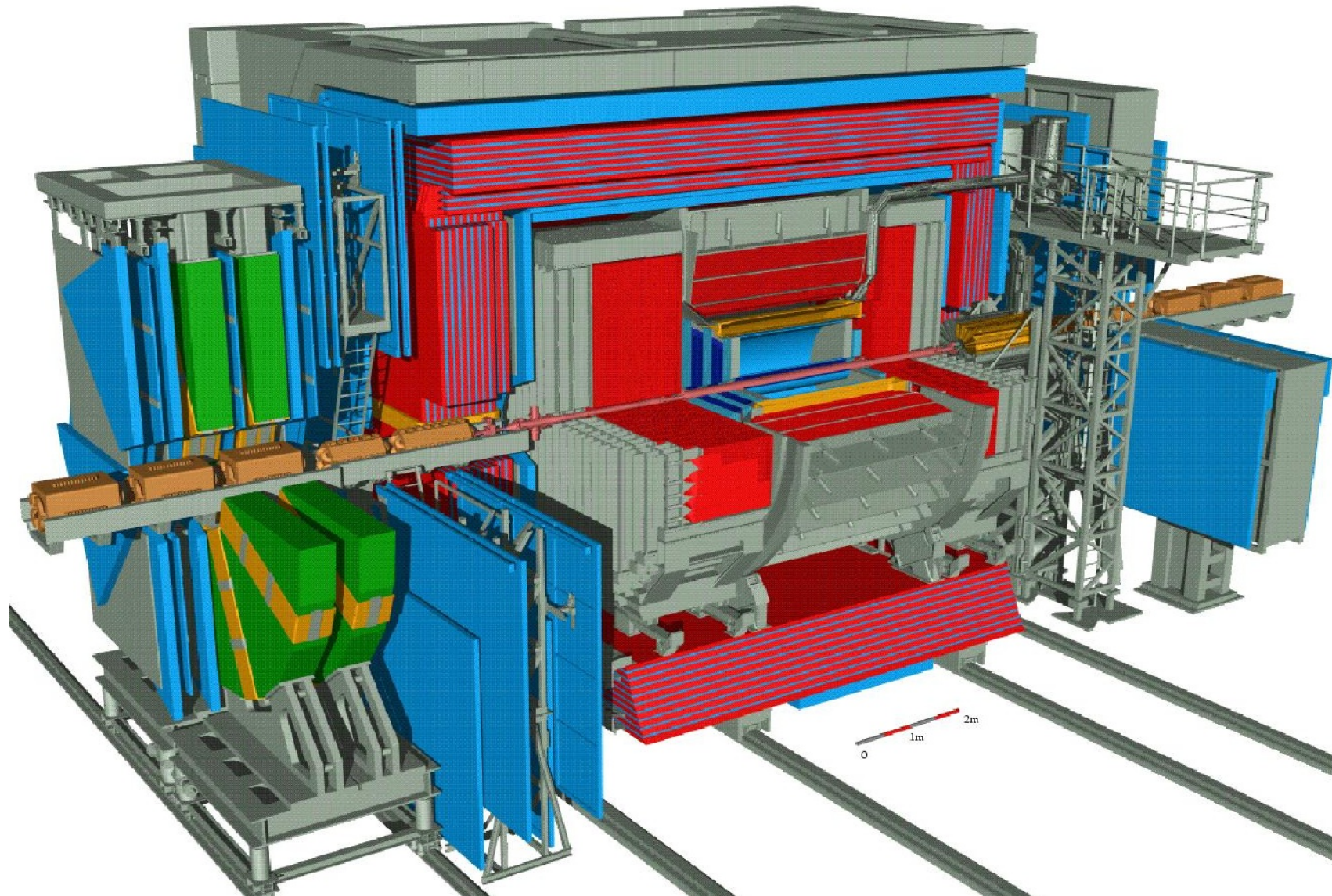
EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: HERA

- Einzige ep-Maschine, 318 GeV
- Vermessung der Struktur des Protons
- QCD-Maschine, z.B. Messung von α_s
- ZEUS, H1, HERMES, (HERA-B)
- Betrieb bis Mitte 2007,
Datenauswertung in vollem Gange

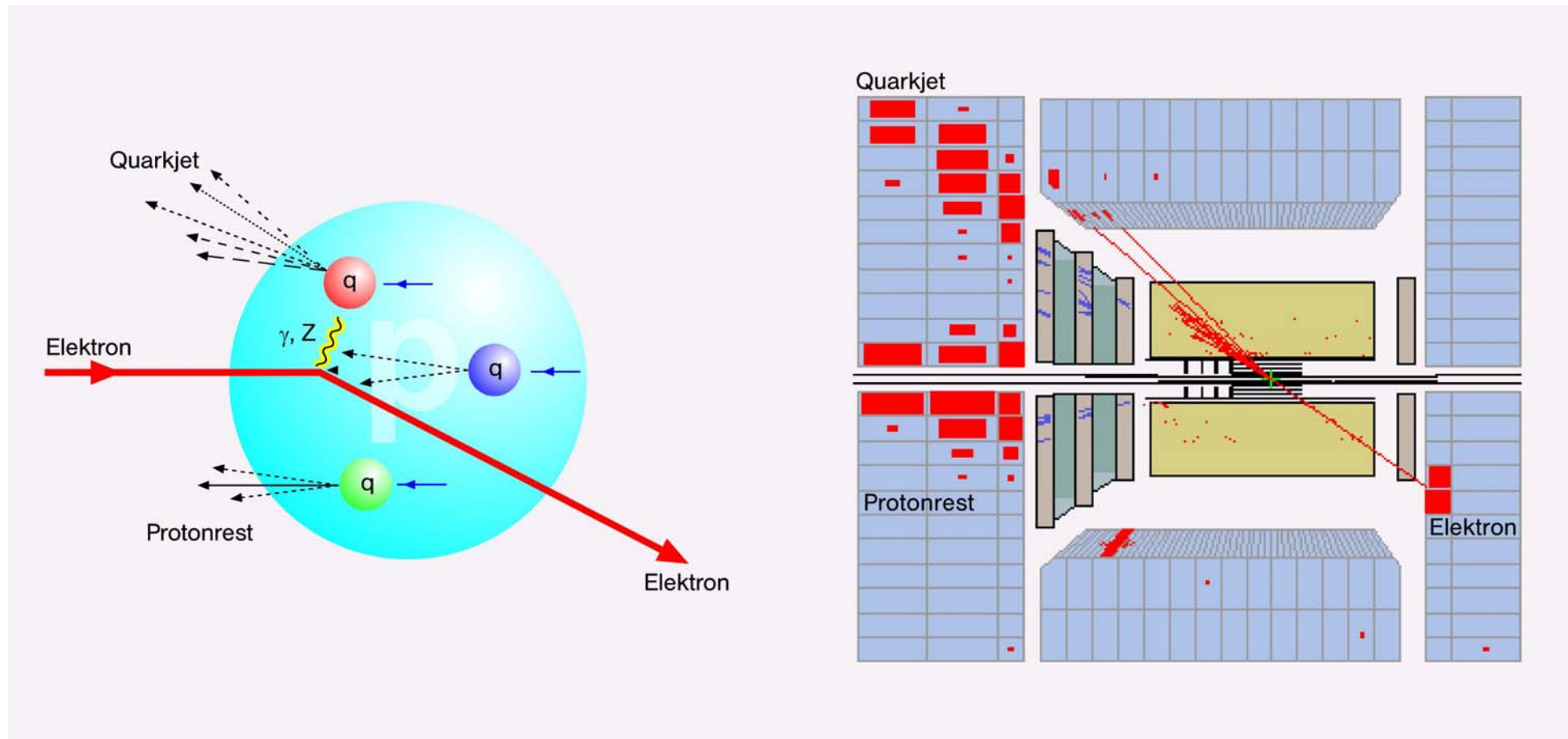


$\sqrt{s_{ep}} \approx 318 \text{ GeV}$
Umfang 6,3 km
WW - Rate 96ns

EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: HERA (ZEUS)

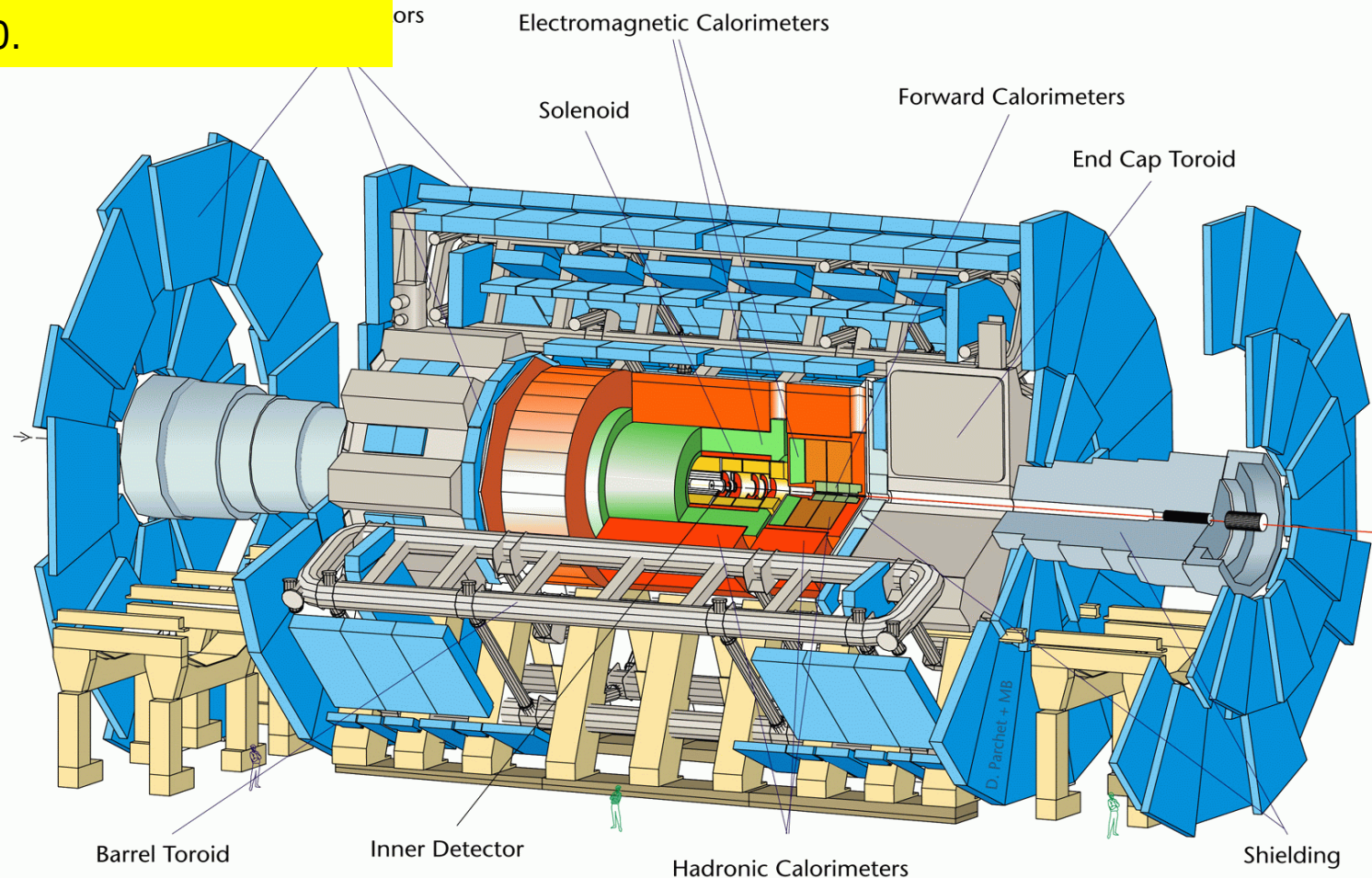


EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: HERA (ZEUS)



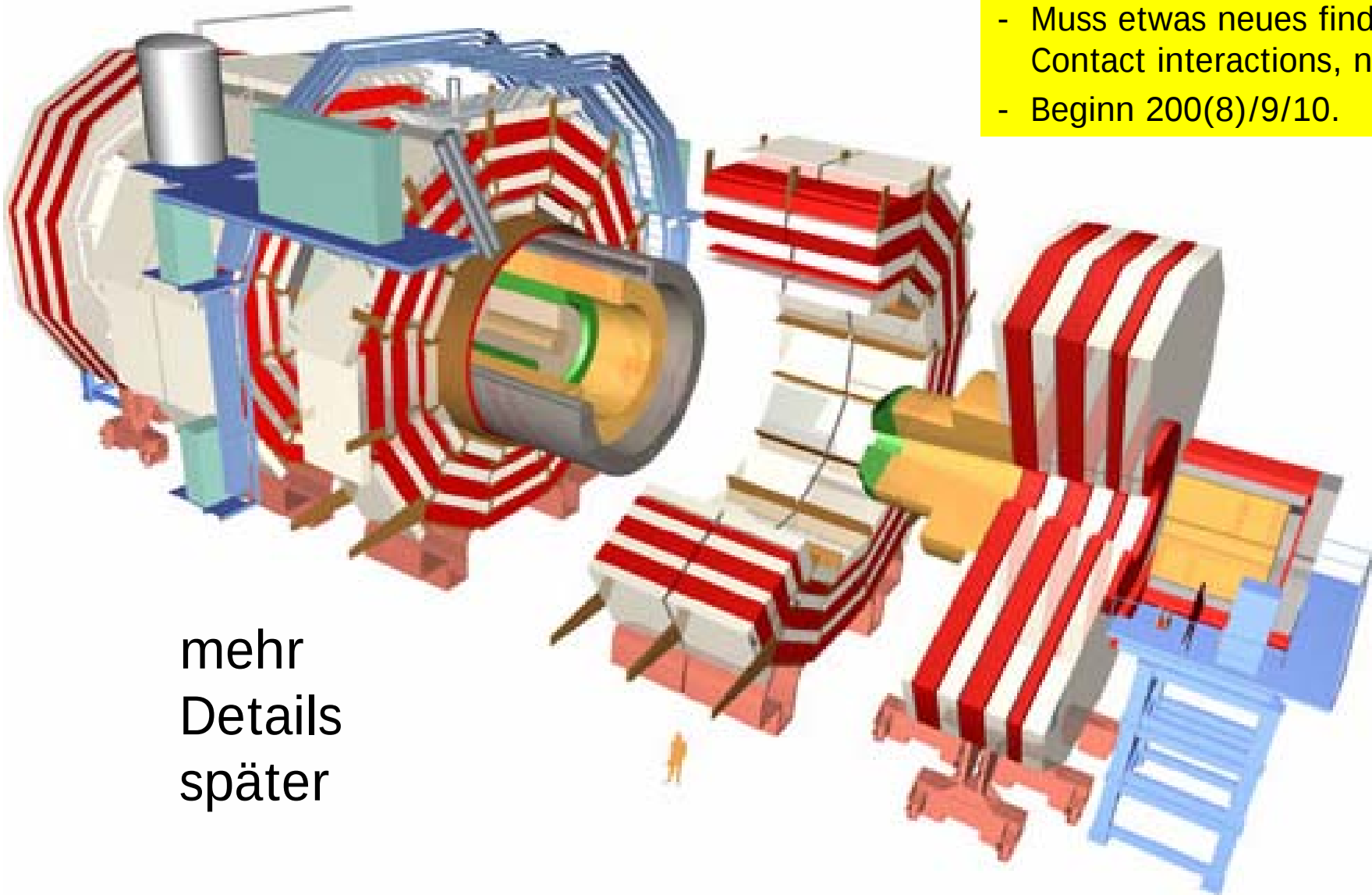
EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: LHC (ATLAS)

- Proton-Proton bei 10-14 TeV
- ATLAS, LHC, Alice und LHCb
- Muss etwas neues finden! SUSY, Higgs, Contact interactions, new dimensions ...
- Beginn 200(8)/9/10.



EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: LHC (CMS)

- Proton-Proton bei 10-14 TeV
- ATLAS, LHC, Alice und LHCb
- Muss etwas neues finden! SUSY, Higgs, Contact interactions, new dimensions ...
- Beginn 200(8)/9/10.

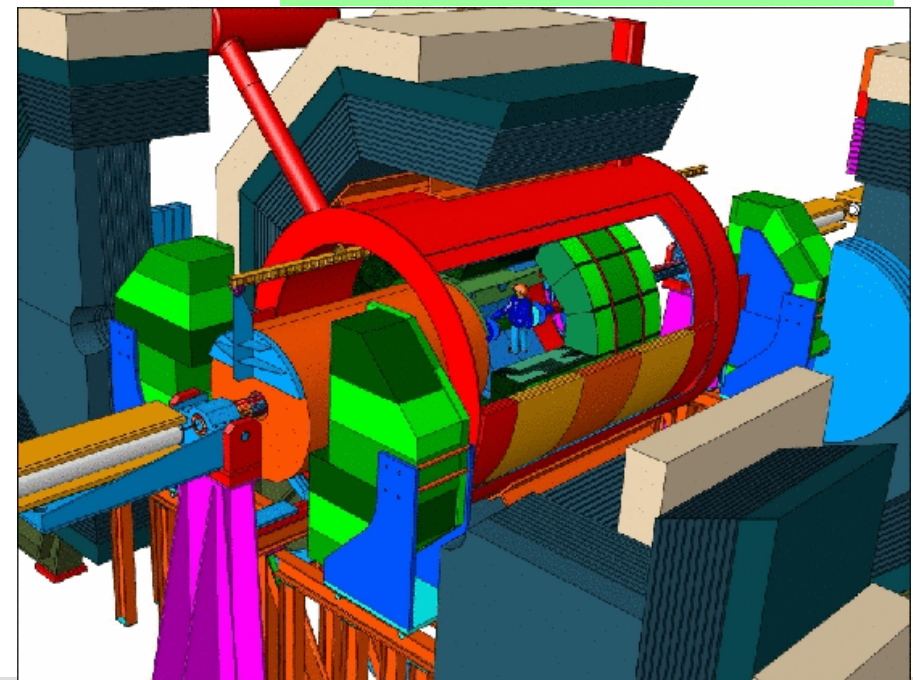
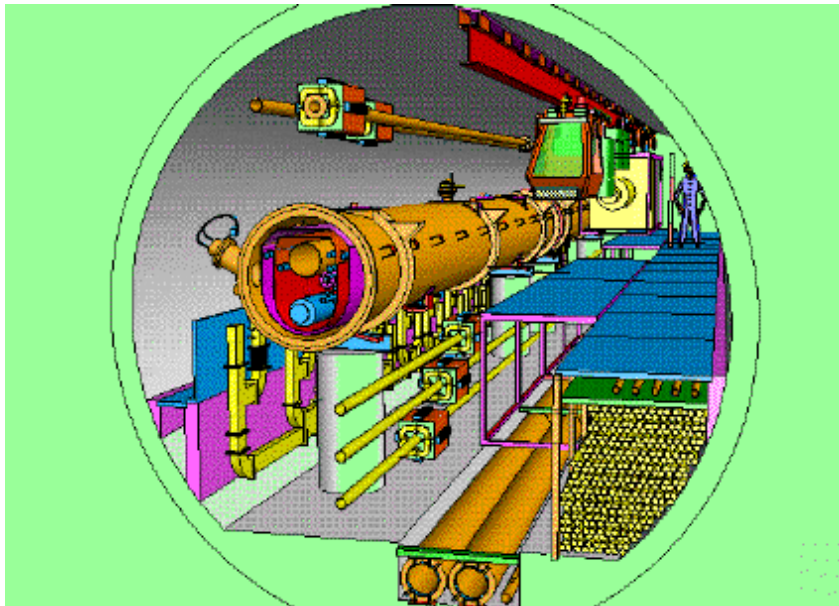
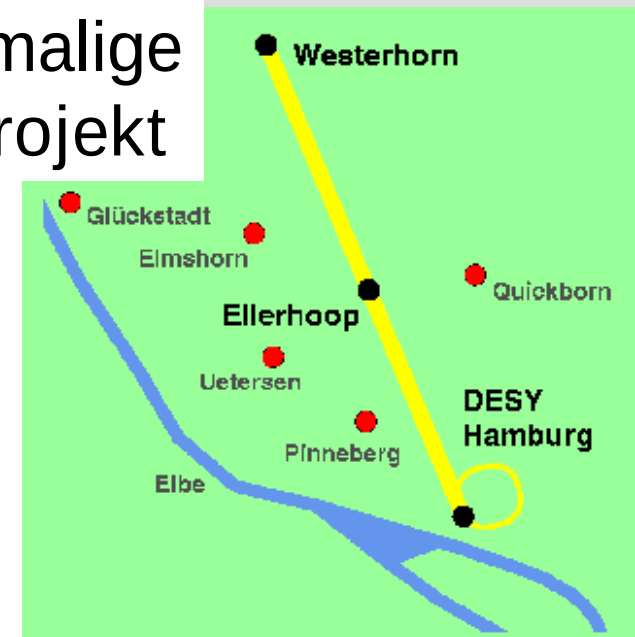


mehr
Details
später

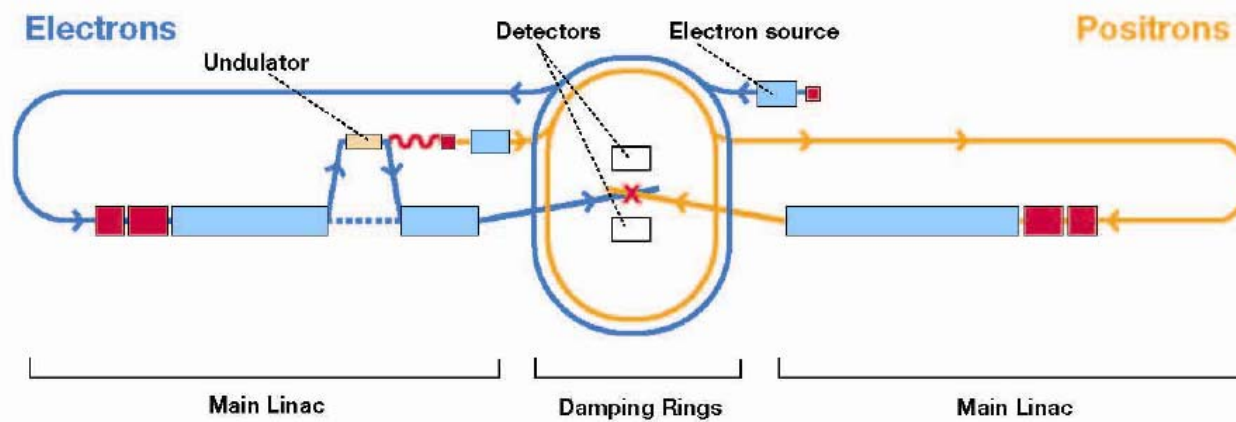
EINSCHUB: BESCHLEUNIGER: ILC

- International Linear Collider
- Geplanter e^+e^- -Linearbeschleuniger in Hamburg(?), Japan oder USA (Chicago?).
- Schwerpunktsenergie 500 GeV – 1 TeV, Länge ca. 30 km
- Ziel: Präzise Vermessung der Erweiterungen des Standardmodells, die LHC finden wird (hoffentlich :-)) ...
- Technologie: TESLA (DESY)
- Bau ab 2013?

Das ehemalige TESLA-Projekt



Das ILC-Projekt: Physik bei der Tera-Skala



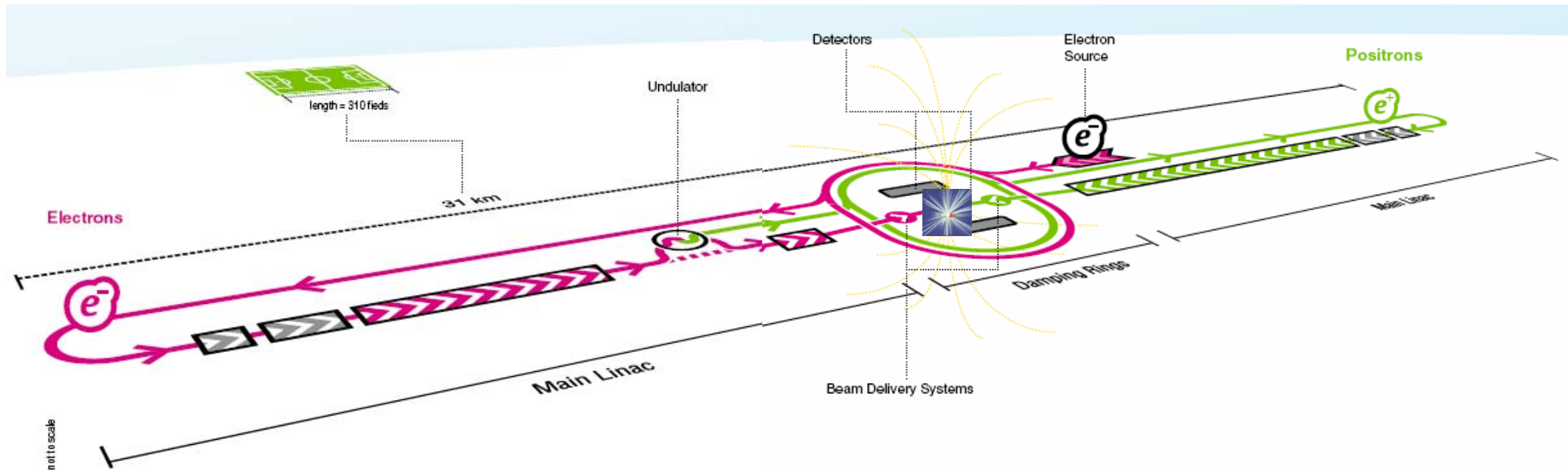
- Was ist der International Linear Collider?
- Warum ILC?
- Wie funktioniert er?
- Physik-Komplementarität zu LHC
- Zusammenfassung

Quelle: <http://www.linearcollider.org/>

Was ist der ILC?

International Linear Collider

- alle drei Worte wichtig!



~selbe Größe wie LHC

Warum einen **e^+e^- Collider** zusätzlich zum LHC?

Hadronen- und e^+e^- - Collider Komplementär:

Hadron-Collider: größere Energie

e^+e^- Collider: mehr Präzision

Beispiele:

Gluon entdeckt bei PETRA (e^+e^- , DESY)

nicht am ISR (pp , CERN) $\rightarrow$ Signatur nicht klar genug

W,Z entdeckt am Sp $\bar{p}$ S ($p\bar{p}$, CERN)

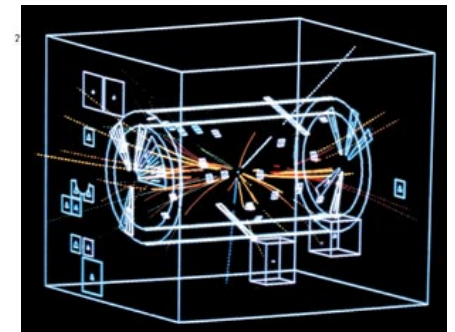
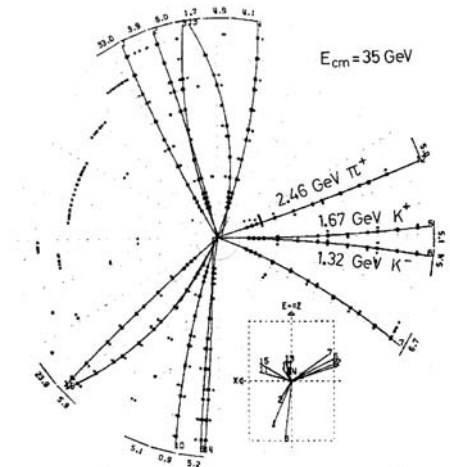
nicht bei LEP (e^+e^- , CERN)

$\rightarrow$ Sp $\bar{p}$ S hat zuerst die Energieschwelle überschritten

Higgs wäre bei LEP II entdeckt worden (e^+e^- , CERN)

and nicht am Tevatron ($p\bar{p}$, Fermilab) or LHC (pp , CERN)

(wo es hoffentlich gefunden wird), falls $m_H < 114$ GeV



Warum **Linear** ?

Kreisförmige e+e- -Maschinen leiden unter **großen Verlusten durch Synchrotron-Strahlung** (Bremsstrahlung im Magnetfeld)

Energieverlust:
$$\frac{dP}{dt} \propto \frac{E^4}{m^4 R^2}$$

Elektronen viel leichter als Protonen

-> **Synchrotron-Strahlung erlaubt keine kreisförmigen Beschleuniger mehr bei TeV-Energien**

Große Energie wird aber gebraucht um Produktionsschwelle zu überschreiten, z.B. für Higgs, top, Supersymmetrie ...

3 x höhere Energie -> 9 x mehr Radius!

Warum **International** ?

Auch ein Linear-Collider dieser Größe/Energie **sehr teuer:** **O(5 G€)**
und technologisch eine Herausforderung (excluding staff)

⇒ jenseits der Ressourcen eines einzelnen Landes, oder sogar einer einzigen Region

⇒ **gemeinsamer Global Design Effort von Europa, Asien, und Amerika**

Weitgehend Standort-unabhängiges design, plus spezifische Standortstudien für Amerika (Fermilab), Europa (CERN, evtl. auch Russland und/oder Hamburg), und Asien (Japan)

Alle Partner tragen zu Collider-Entwurf, Entwicklung, Bau und Betrieb bei, unabhängig vom letztendlich gewählten Standort

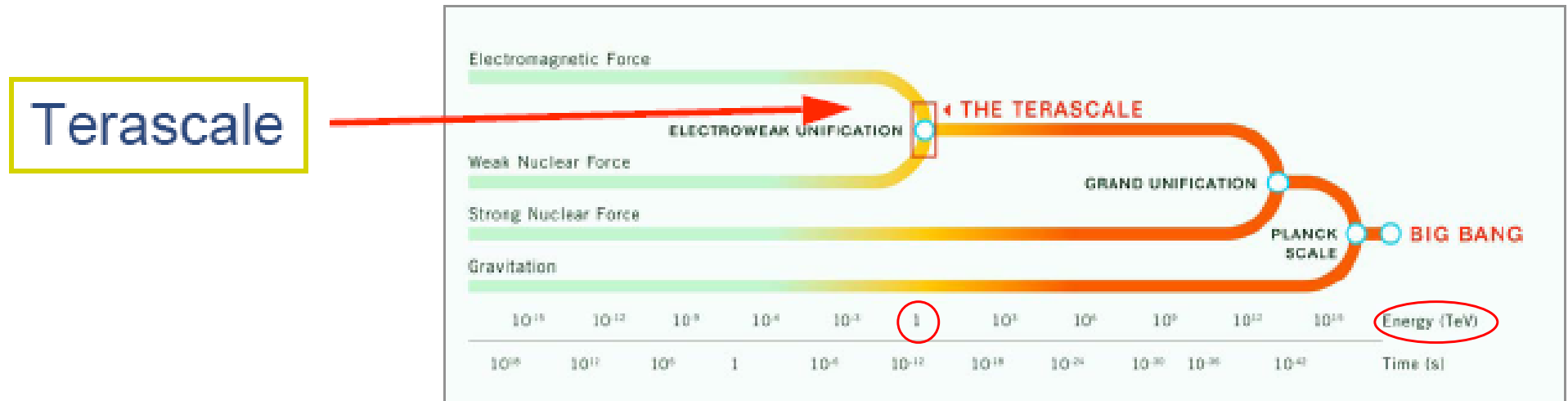
Geschichte des ILC

- 1990er: Ausarbeitung mehrerer Linear-Collider-Projekte (ca. 500 GeV)
- 2001: Veröffentlichung des TESLA Technical Design Report: der erste kostenmäßig voll ausgearbeitete Vorschlag, gedacht als weltweites Projekt zu Gast in Hamburg.
- Leider Zeit noch nicht reif für ein solches Projekt -> weitere Internationalisierung der Designphase.
Kombination von NLC, JLC, TESLA -> ILC
- 2004: internationale Vereinbarung zur Nutzung der supraleitenden TESLA-Technologie für den ILC (standortunabhängig)
- 2005: Start des Global Design Effort (GDE),
Direktor: Barry Barish, Caltech
- Ende 2005: Definition einer neuen Basisvariante für den Beschleuniger
- Febr. 2007: Reference Design Report, inklusive Kosten



mehr Information zum ILC: <http://www.linearcollider.org/>

Warum bei der **Teraskala** ? (TeV-Skala)

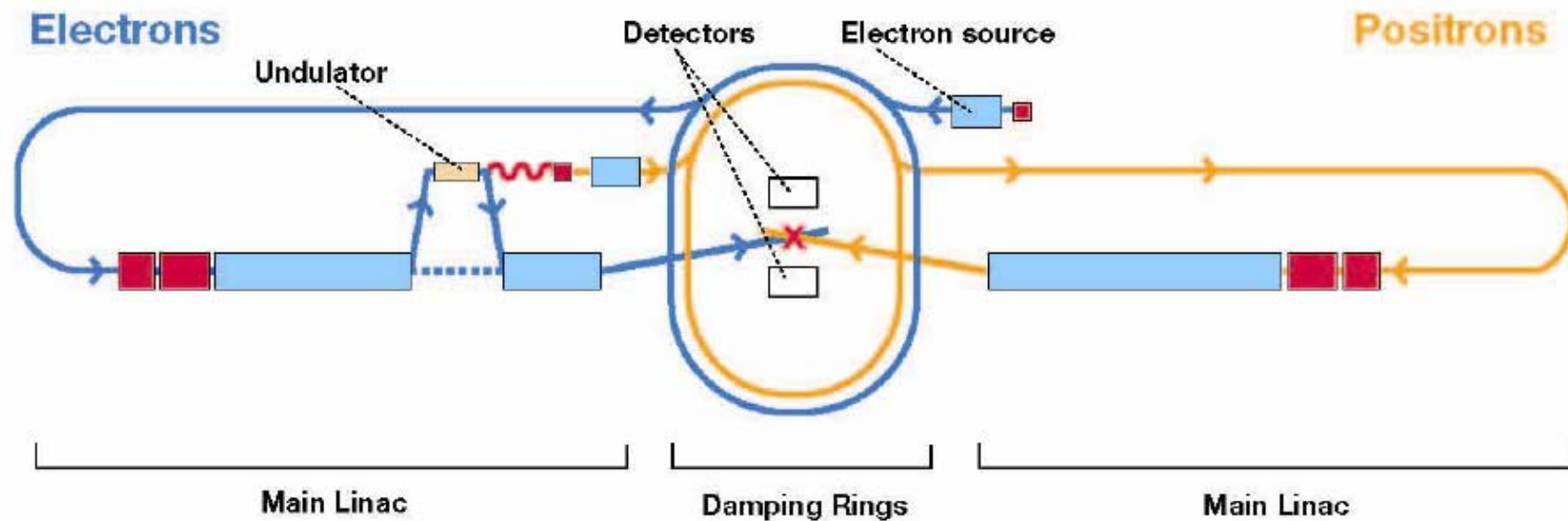


die Teraskala ist die Skala der elektroschwachen Vereinigung

Letzter, und sehr wichtiger, fehlender Baustein: Das Higgs-Teilchen, aber (hoffentlich) auch SuperSymmetrie, oder Extra Dimensionen, oder erste Hinweise auf die große Vereinheitlichung der Kräfte, oder eine andere Überraschung

Wie funktioniert er?

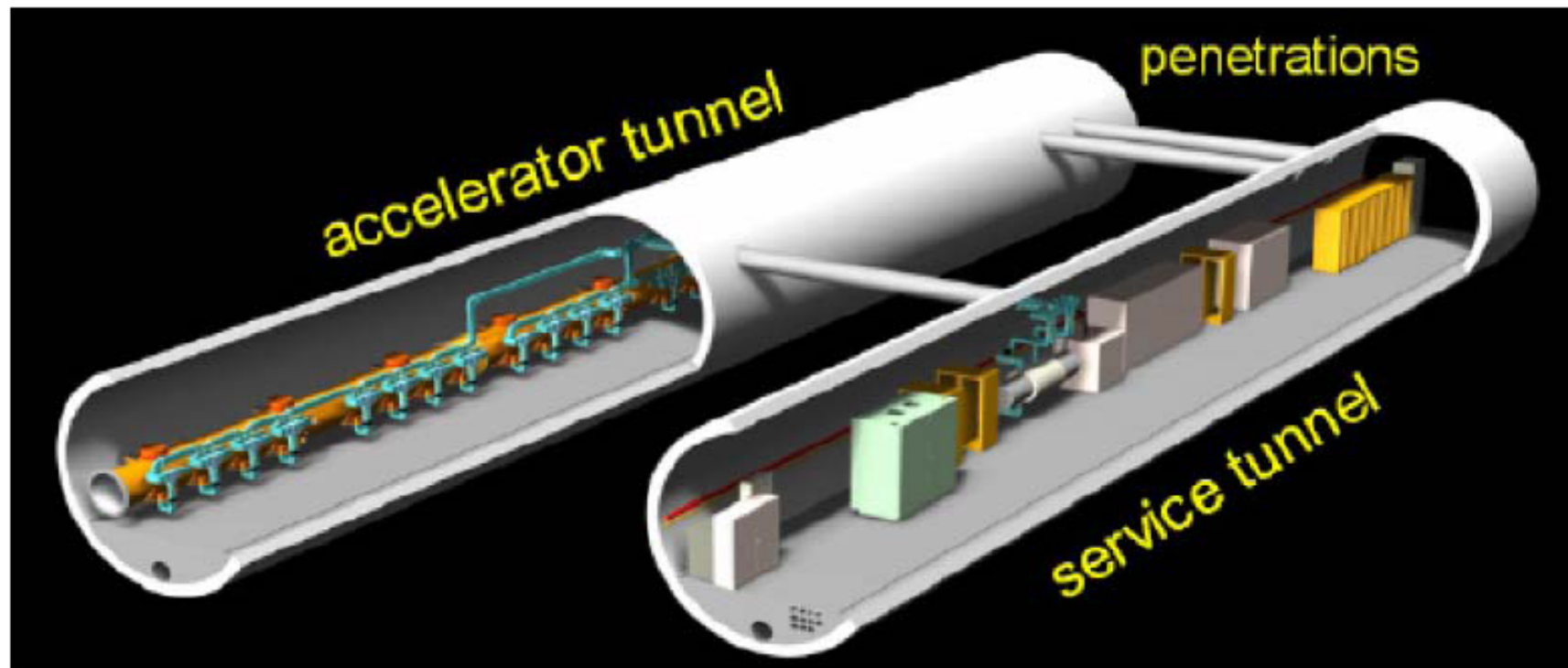
1. Create dense swarms of 20 billion electrons and 20 billion positrons
2. Collect them into bunches and transport them to the ends of the linacs
3. Accelerate them to close to the speed of light
4. Focus the bunches to spots 5 nm high
5. Collide them at interaction point, where the matter and antimatter annihilate into bursts of pure energy



Doppel-Tunnel-Option



Main Linac Double Tunnel



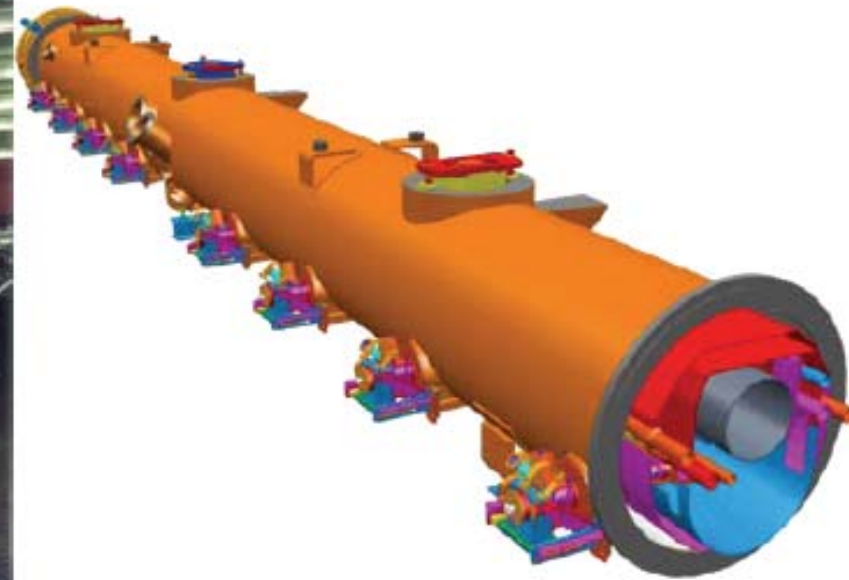
TESLA-Kavität:



bei Tesla Test Facility
(TTF)/FLASH bereits im Einsatz am DESY, wird auch für XFEL benutzt



TESLA cryomodule



**4th generation
prototype ILC
cryomodule**

Physik: Komplementarität zum LHC

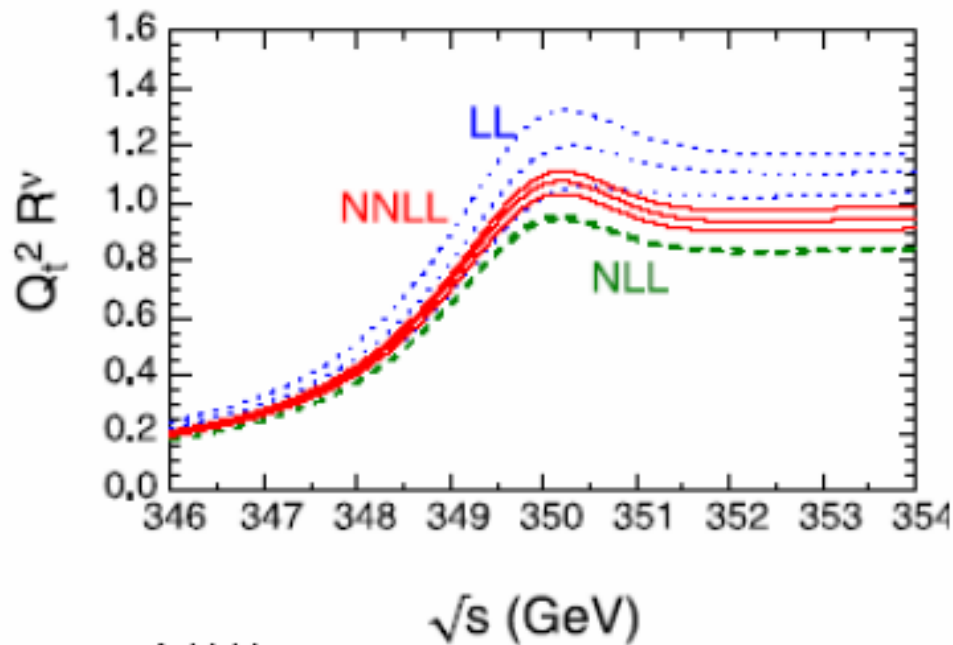
„Win-Win“-Situation:

- Je mehr neue Dinge am LHC entdeckt werden, desto höher das Entdeckungspotential am ILC !
- Je mehr neue Dinge **nicht** am LHC entdeckt werden, desto größer der Bedarf für Präzisionsmessungen am ILC um herauszufinden, warum, und wie es stattdessen funktioniert !

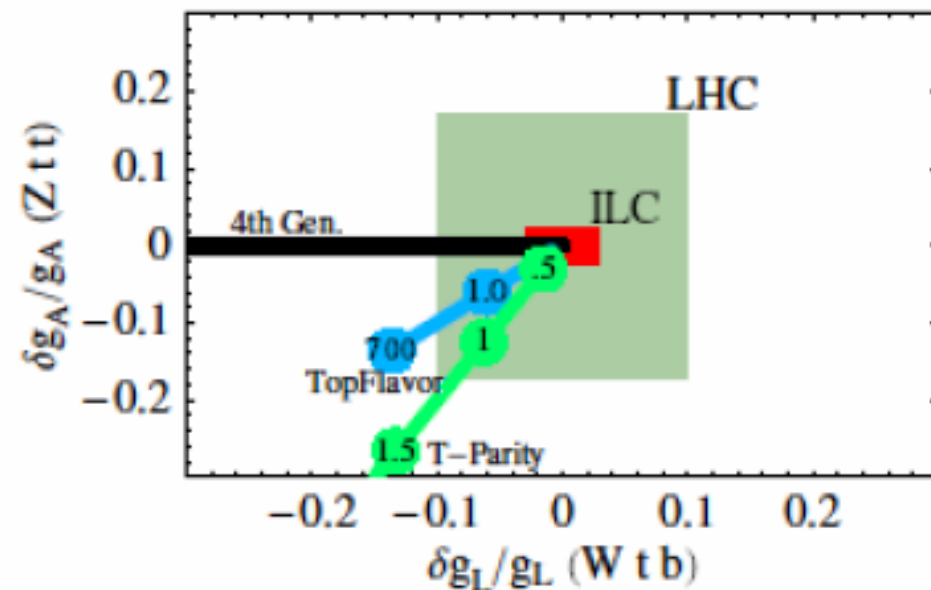
Top bereits am Tevatron gefunden

- weiteres Studium der Top-Quark-Eigenschaften am LHC und ILC

Theoretical and beam issues on top threshold scan.



Top Yukawa coupling and anomalous coupling to gauge bosons



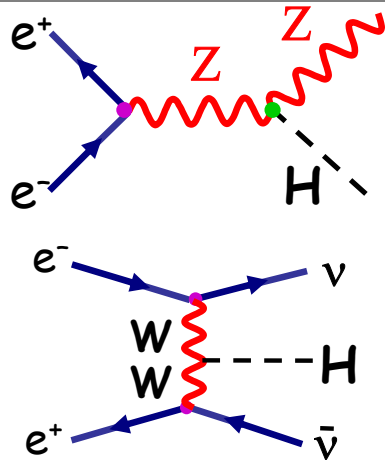
Hypothese: LHC findet das Higgs-Teilchen

(wird nicht am Tevatron gefunden. Grund: alle Bosonen wurden/werden in Europa entdeckt ☺)

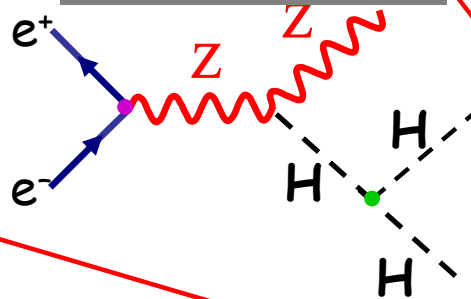
- Ist es das Standard-Modell-Higgs?
- Ist es ein SuperSymmetrisches Higgs?
- Ist ein Teilchen, das sich zwar benimmt wie ein Higgs, in Wirklichkeit aber etwas ganz anderes ist?
(z.B. „supraleitendes“ Kondensat von $t\bar{t}$ -Paaren, ...)
- Erklärt der Higgs-Mechanismus wirklich, wie fundamentale Massen entstehen?

Higgs-Physik beim ILC

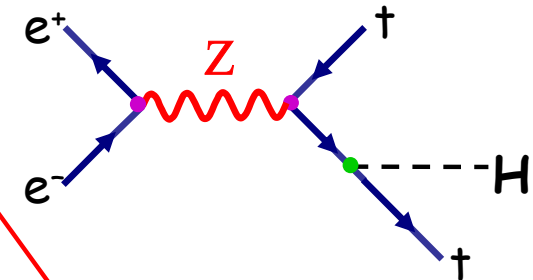
Gauge couplings



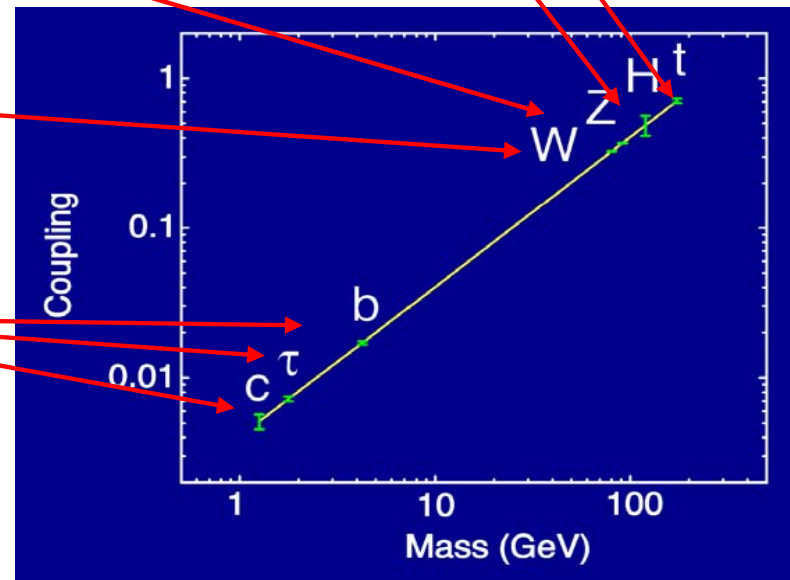
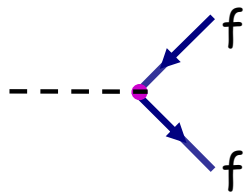
Self coupling



Top-Yukawa coupling



Yukawa couplings



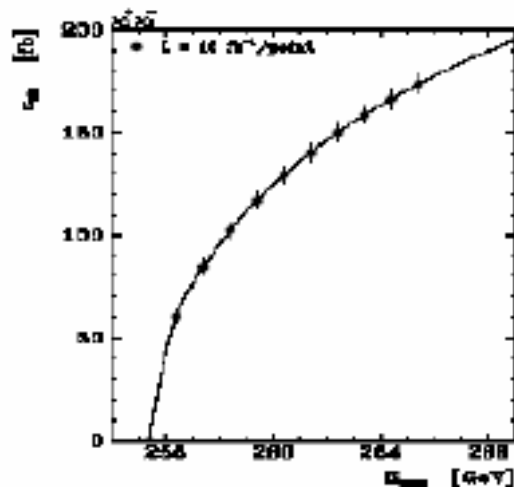
alle messbar mit hoher Präzision!

Hypothese: LHC findet SuperSymmetrie

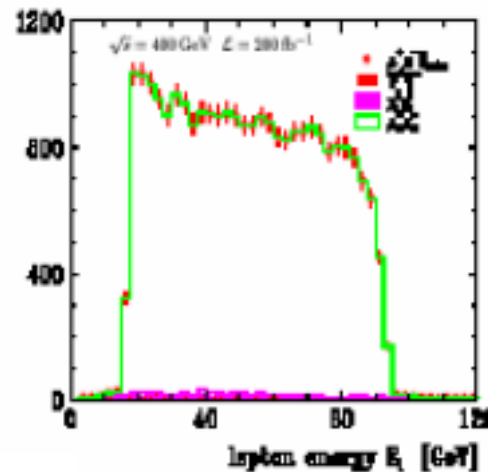
- => Myriaden neuer Teilchen warten auf ihre Entdeckung, viele neue Kopplungen müssen veremessen werden

Mass and mixing determination of chargino, neutralino, slepton, squark.

Chargino threshold scan

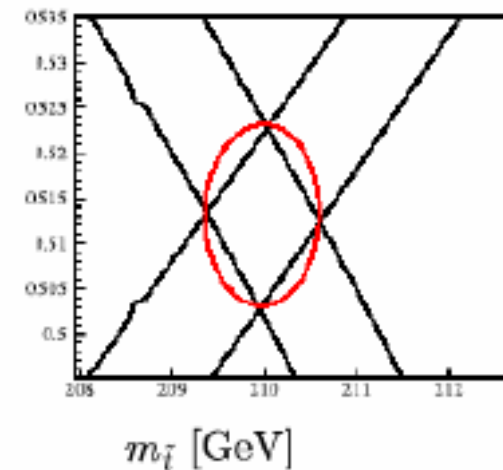


Smuon decay spectrum



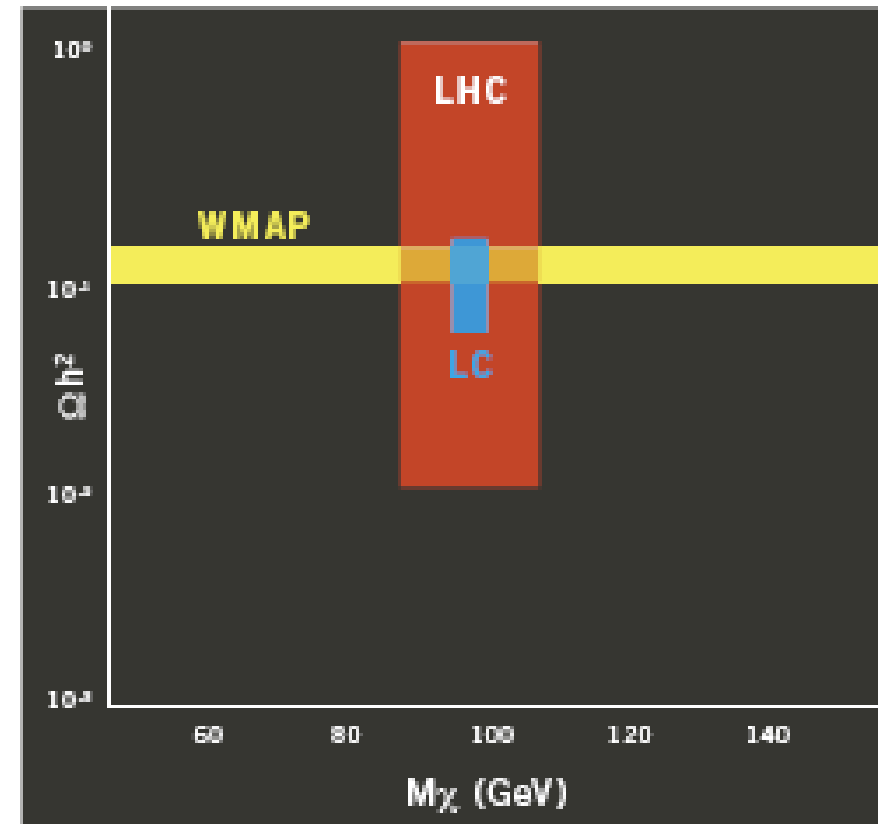
$\cos \theta_{\tilde{t}}$

Stop mixing



Die Suche nach dunkler Materie

Ist eines dieser neuen Teilchen Hauptbestandteil der dunklen Materie?

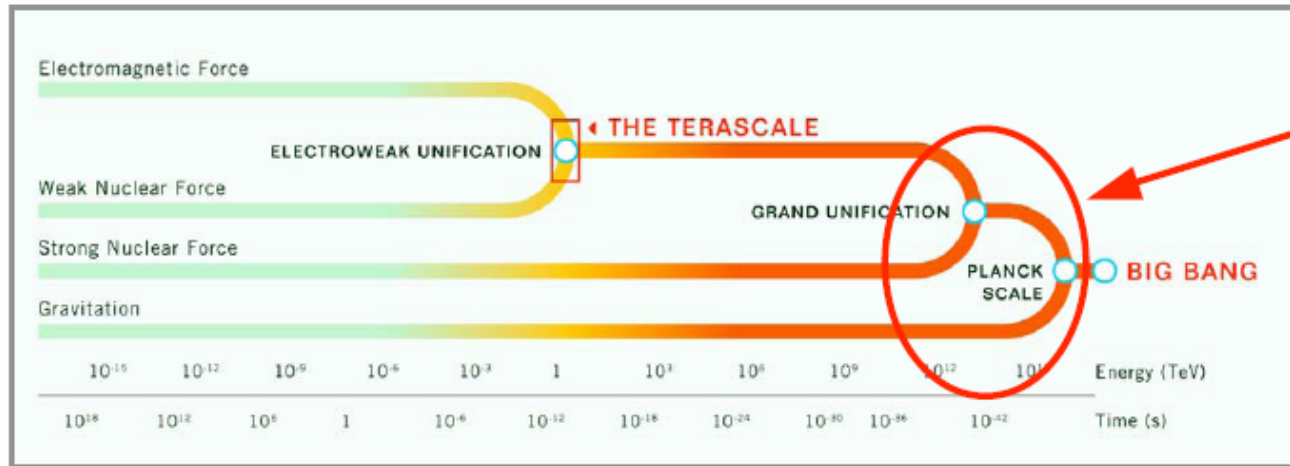


ACCURACY of WMAP, LHC and linear collider in determining the mass of the neutralino, a dark matter candidate, and so constraining its contribution to the energy density of the universe.

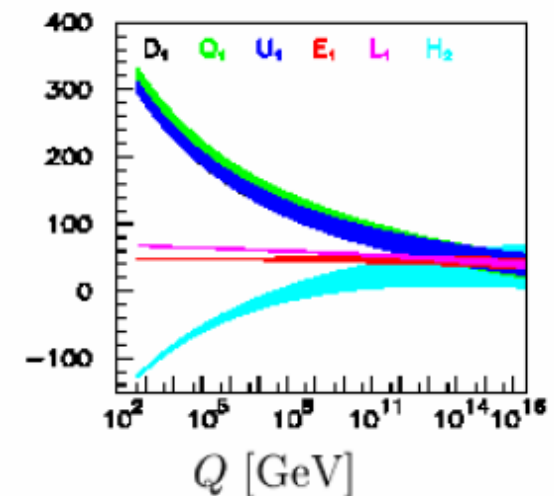
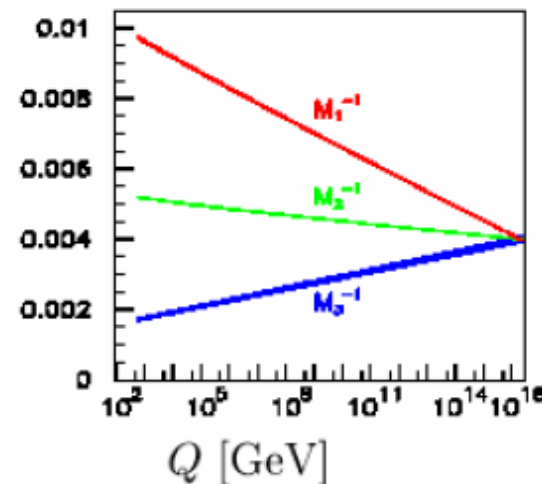
Credit: Andreas Birkedal

Hypothese: LHC findet SuperSymmetrie

Können Kräfte und Massen alle vereinheitlicht werden?



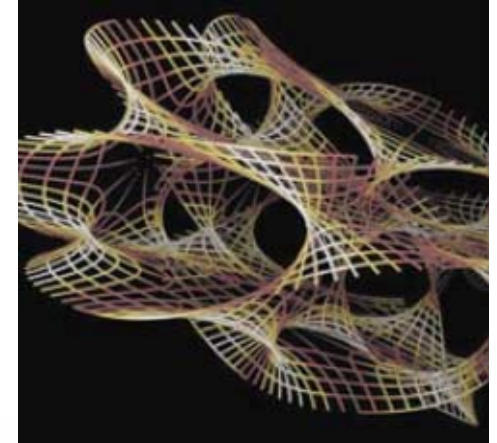
Reichweite von indirekten
Messungen weit jenseits
von 1 TeV !



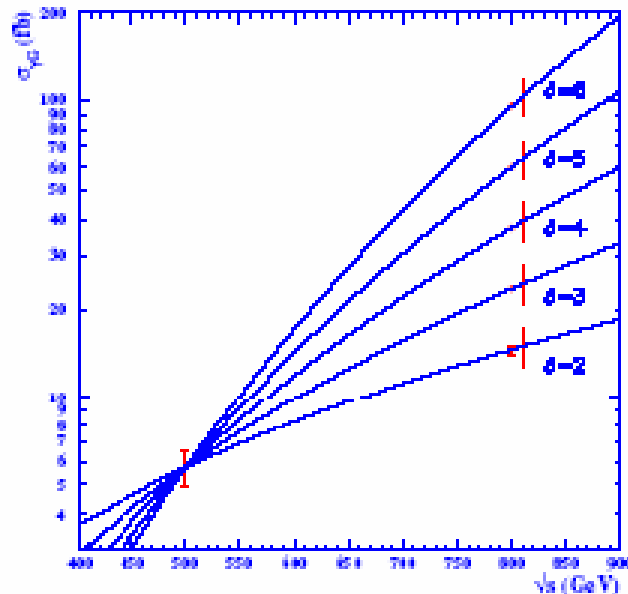
Hypothese: LHC findet Hinweise auf extra Dimensionen

Wieviele davon gibt es?

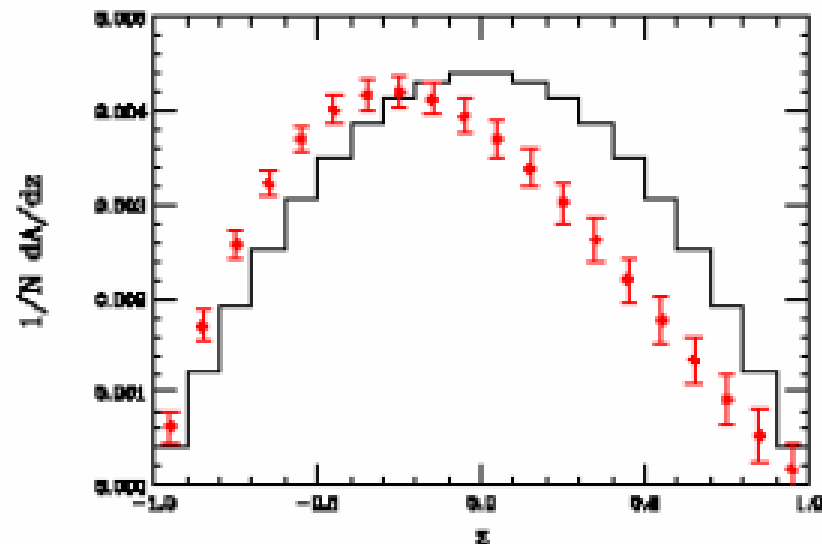
Wie sind die Eigenschaften sogenannter Kaluza-Klein-Gravitonen?



Number of extra dim



Spin2 nature of KK graviton



Hypothese: LHC findet Higgs, aber nichts anderes

Großer Triumph des Standard-Modells !

Aber Theorie sagt uns, dass dies nicht funktionieren sollte
(außer in einem kleinen möglichen Fenster)

-> Notwendigkeit herauszufinden, warum es trotzdem funktioniert !

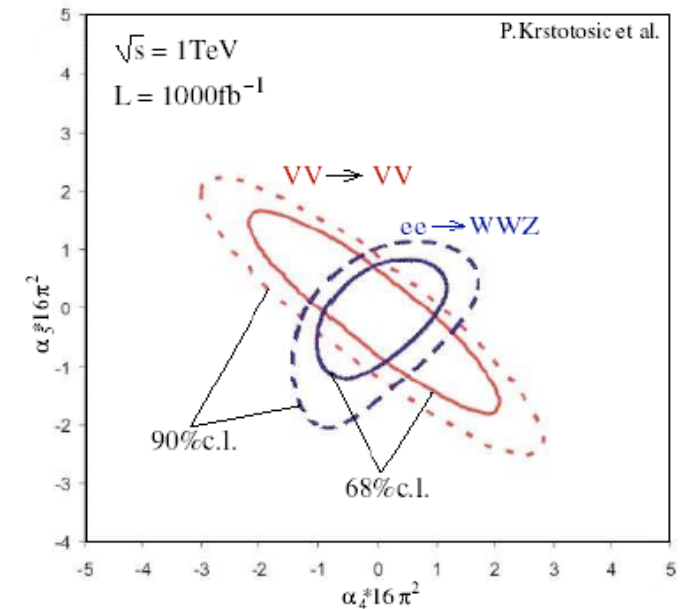
Oder: Was passiert wenn LHC gar kein Higgs findet?

=> es **muss** etwas anderes geben.

=> Notwendigkeit, herauszufinden, was!

=> benötige Detailstudien der
Eichboson-Kopplungen am ILC

-> wiederum Sensitivität auf höhere Skalen



2005

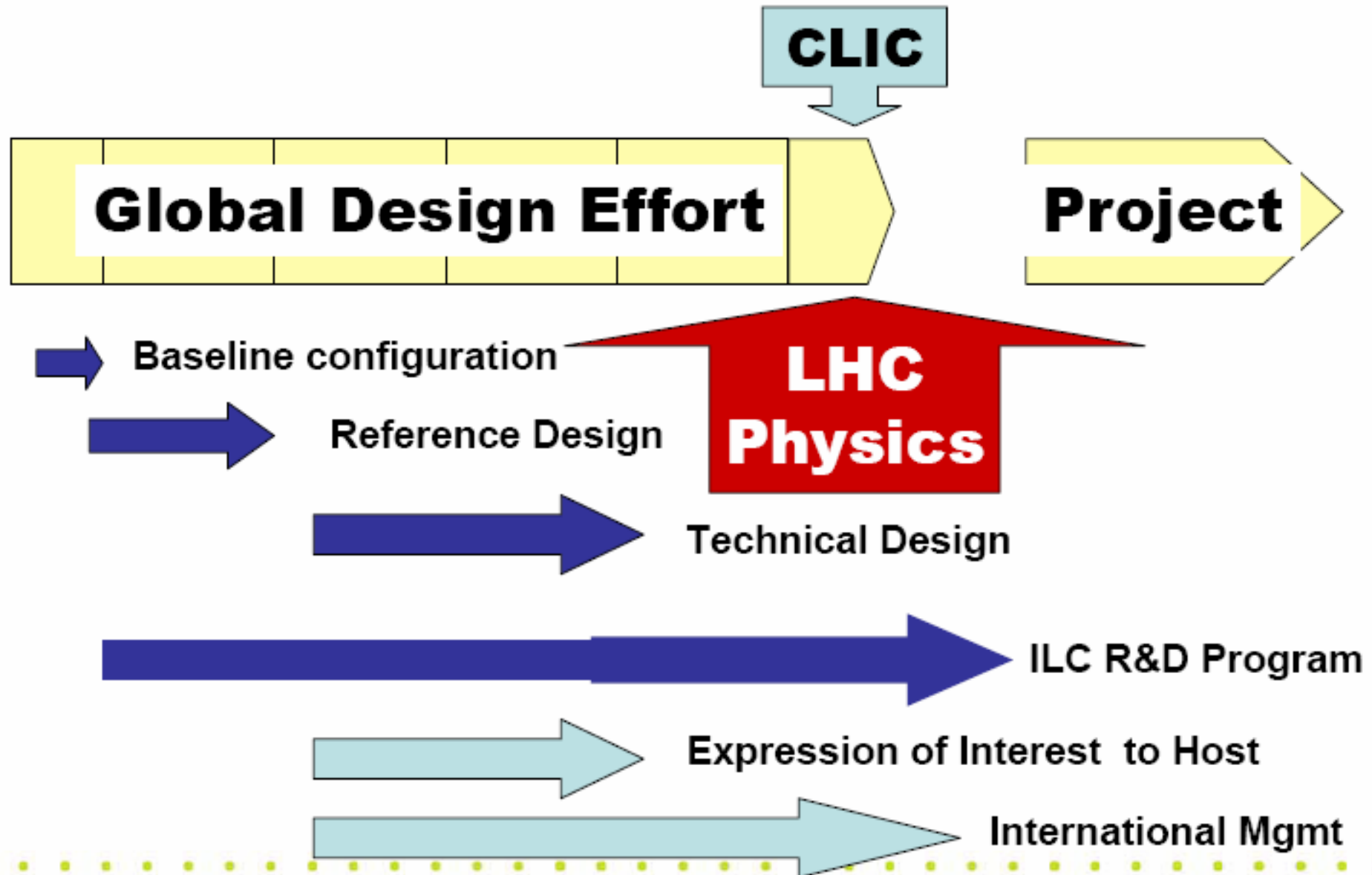
2006

2007

2008

2009

2010



Einige der ~1000 bisher beitragenden Physiker

einschliesslich Detektor-Entwicklung



contacts

To receive the latest news about the ILC, subscribe to ILC NewsLine at: <http://www.linearcollider.org/newsline>

Global Design Effort

<http://www.linearcollider.org>
communicators@linearcollider.org

P.O. Box 500
Batavia, IL 60510
USA

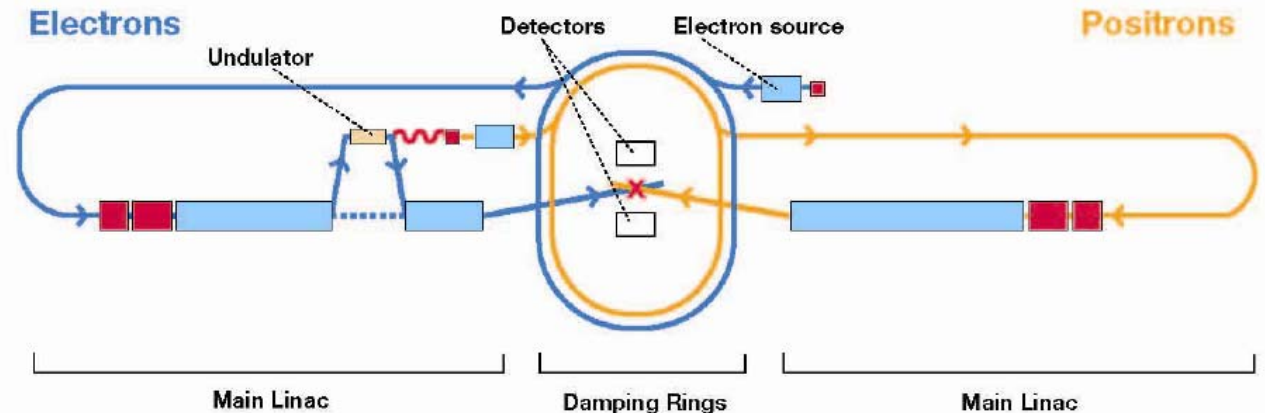
1-1 Oho, Tsukuba
Ibaraki, 305-0801
Japan

DESY-FLC
Notkestr. 85, 22607 Hamburg
Germany



Zusammenfassung ILC

- Ein e^+e^- Linear-Kollider im TeV-Bereich ist eine **essentielle Ergänzung** zum LHC (und Nicht-Beschleuniger-Experimenten)



- Er zielt auf ein Programm von **Entdeckungen**, die viele der derzeitigen **Ungereimtheiten** in der **Physik klären könnten** (Ursprung der Masse, Kosmologie, ...)
- Die Planung des **International Linear Collider** und seiner Detektoren ist weit fortgeschritten
- Hoffentlich werden bald große Entdeckungen am LHC die Genehmigung des ILC erleichtern**

HOW DOES THE ILC WORK?

Supersymmetry. Dark matter. Extra dimensions. Scientists have proposed the International Linear Collider (ILC), a next-generation project designed to smash together electrons and their antiparticles at a higher-than-ever energy, to learn more about these and other mysteries of the universe. The ILC Global Design Effort team, which includes more than 60 scientists and engineers from around the world, has agreed on the baseline configuration for the roughly 31-kilometer long, 500 billion-electronvolt (GeV) particle collider.

The Linacs

Scientists will use two main linear accelerators ("linacs"), one for electrons and one for positrons, each 12 kilometers long, to accelerate the bunches of particles toward the collision point. Each linac consists of 8,000 superconducting cavities nestled within a series of cooled vessels to form cryomodules. The modules use liquid helium to cool the cavities to -271°C , only slightly above absolute zero. Scientists will launch traveling electromagnetic waves into the cavities to "push" the particles through, and accelerate them to energies that will total 500 GeV.

Positrons

Positrons, the antimatter partners of electrons, do not exist naturally on earth. To produce them scientists will send the high-energy electron beam through an undulator, a special arrangement of magnets in which electrons are sent on a "roller-coaster" course. This turbulent motion will cause the electrons to emit a stream of photons. Just beyond the undulator the electrons will return to the main accelerator, while the photons will hit a titanium-alloy target and produce pairs of electrons and positrons. The positrons will be collected and launched into their own 250-meter 5-GeV accelerator.

The Detectors

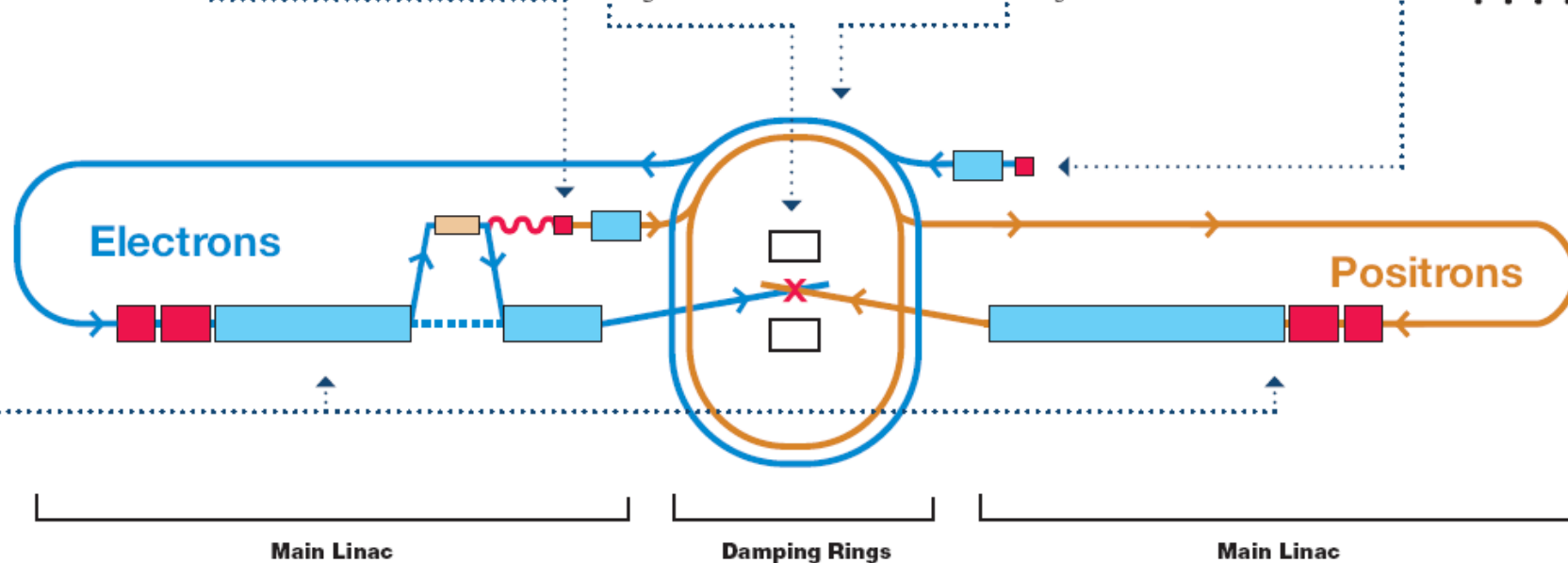
Traveling towards each other at nearly the speed of light, the electron and positron bunches will collide with a total energy of 500 GeV. Scientists will record the spectacular collisions in two giant particle detectors. These work like gigantic cameras, taking snapshots of the particles produced by the electron-positron annihilations. The two detectors will incorporate different but complementary state-of-the-art technologies to capture information about every particle produced in each collision. Having these two detectors will allow vital cross-checking of the potentially-subtle physics discovery signatures.

The Damping Rings

When created, neither the electron nor the positron bunches are compact enough to yield the high density needed to produce collisions inside the detectors. Scientists will solve this problem by using seven-kilometer-circumference damping rings, one for electrons and one for positrons. In each ring, the bunches will travel through a series of wigglers that literally "wobble" the beam to emit photons. This process makes the bunches more compact. Each bunch will circle the damping ring roughly 10,000 times in only two tenths of a second. Upon exiting the damping rings, the bunches will be a few millimeters long and thinner than a human hair.

Electrons

To produce electrons scientists will fire high-intensity, two-nanosecond light pulses from a laser at a target and knock out billions of electrons per pulse. They will gather the electrons using electric and magnetic fields to create bunches of particles and launch them into a 250-meter linear accelerator that boosts their energy to 5 GeV.



... ilc

Drawing not to scale
February 2007