

50 Jahre CERN - den kleinsten Teilchen auf der Spur

*Siegfried Bethke
Max-Planck-Institut für Physik
(Werner Heisenberg Institut)
München*

- vom Kosmos zu den Quarks -
Materie und fundamentale Kräfte
- Sonden zur Auflösung kleinster Strukturen
- CERN: 50 Jahre Geschichte des
europäischen Zentrums für Teilchenphysik
- fundamentale offene Fragen
- die Zukunft: der Large Hadron Collider

Dimensionen und Struktur der Materie



Universum 10^{26} m

Galaxie 10^{21} m

Sonnensystem 10^{13} m

Erde 10^7 m

Mensch 10^0 m

Atom 10^{-10} m

Atomkern 10^{-14} m

Nukleon 10^{-15} m

Quark; Lepton $< 10^{-18}$ m

?????

???

Aufbau der Materie und fundamentale Kräfte: Das „Standardmodell“ der Teilchenphysik

Elementare Teilchen:

(sowie jeweilige Anti-Teilchen)

Sichtbare Welt besteht nur aus Teilchen der ersten Generation!

Fundamentale Kräfte:

Elementare Kräfte (Wechselwirkungen) kommen durch **Austausch** von besonderen Teilchen (Austauschbosonen) zustande.

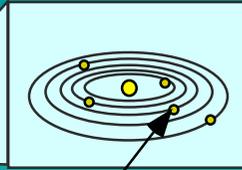
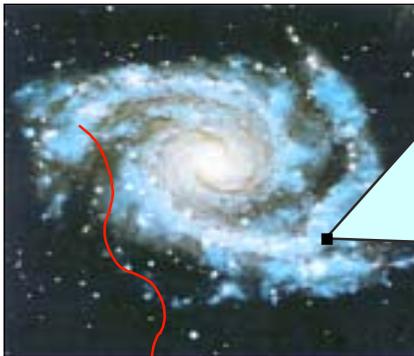
	Familien			elektr. Ladung	Kräfte			
	u d	c s	t b		st	em	schw	grav
Quarks	u d	c s	t b	2/3 -1/3	x x	x x	x x	x x
Leptonen	ν_e e	ν_μ μ	ν_τ τ	0 -1	- -	- x	x x	x x

Wechselwirkung	relative Reichweite	zugehörige Austauscheteilchen	relative Stärke
Stark	subatomar	Gluon (g)	1
Electromagnet.	unendlich	Photon (γ)	$\frac{1}{137}$
Schwach	subatomar	W^+, W^-, Z^0	10^{-14}
Gravitation	unendlich	Graviton (G)	10^{-40}

Theoretische Vorhersage zur Erzeugung der Teilchenmassen:

→ Higgs-Teilchen (H) ; bisher unentdeckt

Die Geschichte des Universums



Wir sind hier

Zeit

GEGENWART

Temperatur 2.7 K Alter 13.7 Milliarden Jahre

erste Supernovae

Entstehung von Sternen und Galaxien 11 K 1 Milliarde Jahre

UNIVERSUM WIRD TRANSPARENT

Bildung von Atomen. Entkopplung von Strahlung und Materie. 1.000 K 300 000 Jahre

Nukleosynthese von Helium Positronen verschwinden 10^{10} K 1 sec.

Formation von Protonen und Neutronen Antiquarks verschwinden 10^{15} K 10^{-10} sec

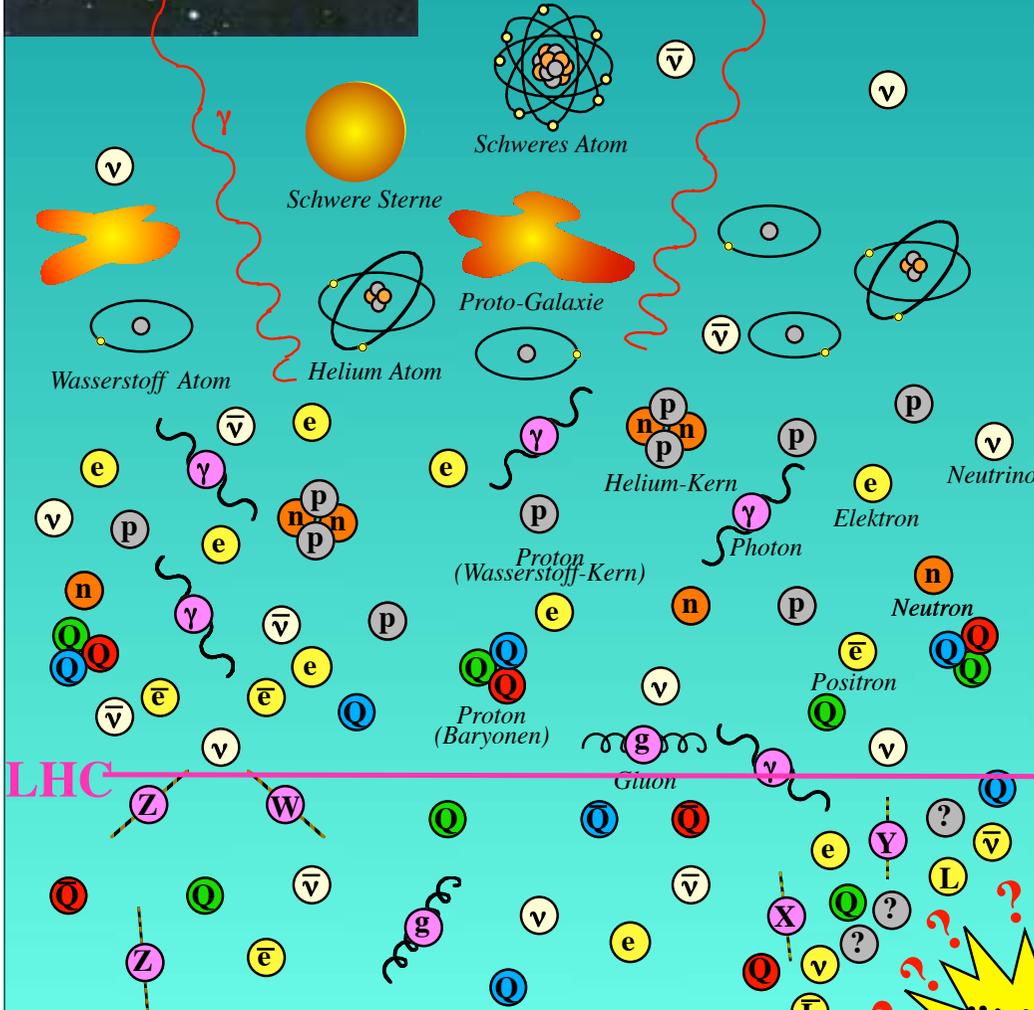
Asymmetry $Q - \bar{Q}$ $L - \bar{L}$ Inflation 10^{16} K 10^{-15} sec

GROSSE VEREINHEITLICHUNG QUANTEN-GRAVITATION 10^{27} K 10^{-34} sec

10^{31} K 10^{-43} sec

materiedominierte Ära
strahlungsdominierte Ära

Teilchenbeschleuniger

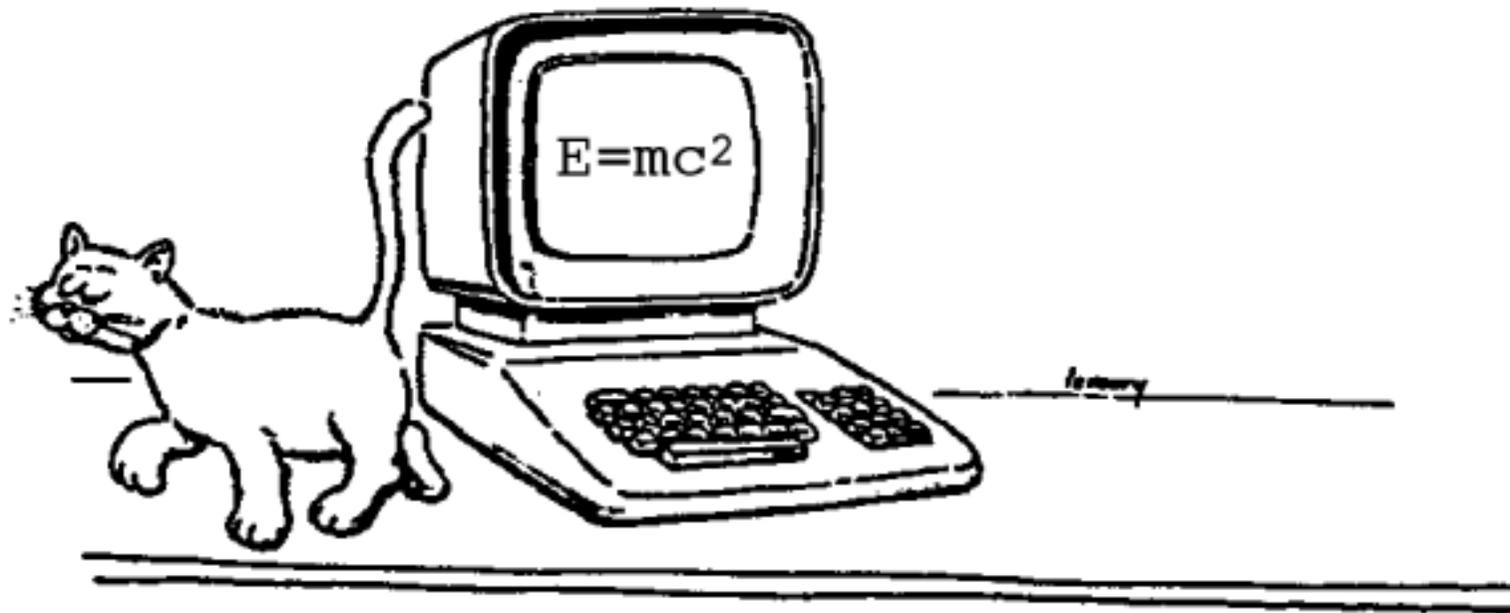


LHC

Woher wissen wir dies alles?

Wie kann man Quarks und Leptonen „sehen“?

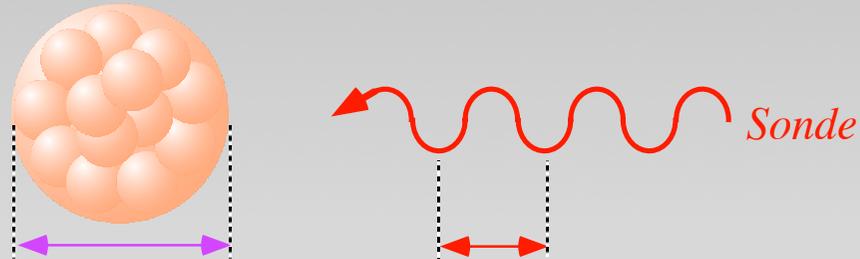
Wie kann man die zwischen ihnen wirkenden Kräfte erforschen und theoretisch beschreiben?



(eine mögliche, aber nicht sehr wissenschaftliche Methode ...)

Sonden zur Auflösung kleinster Strukturen

Auflösung subnuklearer Strukturen } → Hohe Energien
(Kleine Wellenlängen)
der 'Sonden'



$$\Delta s \geq \lambda \sim 1/E$$

Kleinster noch
trennbarer Abstand
zweier Objekte

Wellenlänge der
'Sonde': z.B. Licht,
Elektronen, Protonen

Energie der
Sonden

elektromagn. Welle:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

massives Teilchen:

$$E = m \cdot c^2 \equiv h \cdot \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{m \cdot c}$$

Sonden zur Auflösung kleinster Strukturen

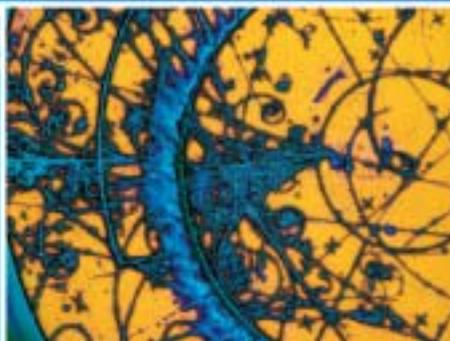
Sonde, Instrument	typ. Energie	Auflösung bis ca.	auflösbare Objekte
sichtbares Licht	1 ... 3 eV	10^{-6} m	Viren
Röntgenstrahlung; Elektronenmikroskop	10 keV	10^{-10} m	Atome, Kristallstrukt.
niederenergetische Teilchenbeschleuniger	100 MeV	10^{-14} m	Atomkern
Moderne Teilchenbe- schleuniger (LEP, HERA)	100 GeV	10^{-17} m	Quarks & Co.
Zukunft: - Large Hadron Collider (in Bau; Start 2007)	14 TeV	10^{-19} m	????

Europäisches Zentrum für Teilchenphysik CERN / Genf



LEP: e^+e^- Kollisionen 1989 - 2000

LHC: p-p Kollisionen ab 2007



CERN

Europäische Organisation
für Kernforschung

CERN

Europäische Organisation
für Kernforschung

Sucht

nach Antworten auf grundlegende
Fragen des Universums:
Woraus besteht es?
Wie hat es sich entwickelt?

Vereint

7000 Wissenschaftler aus über 80
Ländern: CERN ist ein Labor für die
ganze Welt

Entwickelt

neue Technologien an den Grenzen des
Machbaren

Bildet aus

junge Wissenschaftler und Ingenieure –
die Experten von morgen



1954

1954 CERN, die Europäische Organisation für Kernforschung, hat sich seit der
Gründung im Jahre 1954 zu einem herausragenden Vorbild internationaler
Zusammenarbeit entwickelt, und zählt heute 20 Mitgliedsstaaten. Nahe Genf, zu
beiden Seiten der schweizerisch-französischen Grenze gelegen, ist es das größte
Forschungszentrum für Teilchenphysik weltweit.

1. Juli 1953: Unterzeichnung der CERN Konvention

La sixième session du Conseil fut organisée à Paris du 29 juin au 1^{er} juillet 1953. C'est à cette occasion que la Convention établissant l'Organisation fut signée, sous réserve de ratification, par douze Etats membres.

For the German Federal Republic <i>K. Henning</i> subject to ratification	Pour la République Fédérale d'Allemagne	For the Kingdom of Norway <i>3/11/53</i> <i>Trygve Bratteli</i>	Pour le Royaume de Norvège Subject to ratification
For the Kingdom of Belgium <i>J. Kille</i> sous réserve de ratification	Pour le Royaume de Belgique	For the Kingdom of the Netherlands <i>W. van</i> subject to ratification	Pour le Royaume des Pays-Bas
For the Kingdom of Denmark <i>Olav</i> sans réserve de ratification	Pour le Royaume de Danemark	For the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland <i>Rockefeller</i> subject to ratification	Pour le Royaume-Uni de la Grande-Bretagne et de l'Irlande du Nord
For the French Republic <i>Charles P. P. P.</i> <i>Paul</i> sans réserve de ratification	Pour la République Française	For the Kingdom of Sweden <i>Sos & Walter</i> <i>Torsten Borchgrevink</i> Subject to ratification	Pour le Royaume de Suède
For the Kingdom of Greece <i>N. Kondis</i> sans réserve de ratification	Pour le Royaume de Grèce	For the Confederation of Switzerland <i>J. L.</i> sans réserve de ratification	Pour la Confédération Suisse
For Italy <i>Giulio Cesare</i> <i>Antonio</i> sous réserve de ratification	Pour l'Italie	For the Federal People's Republic of Yugoslavia <i>Bole Savic</i> sans réserve de ratification	Pour la République Fédérale Populaire de Yougoslavie

The Sixth Session of the CERN Council took place in Paris on 29 June—1 July 1953. It was here that the Convention establishing the Organization was signed, subject to ratification, by twelve States.

Bundesrepublik
Deutschland

Königreich
Belgien

Königreich
Dänemark

Französische
Republik

Königreich
Griechenland

Italien

Königreich
Norwegen

Königreich der
Niederlande

Vereinigtes
Königreich
Großbritannien
und Nordirland

Königreich
Schweden

Schweizer
Konföderation

Volksrepublik
Jugoslawien



10. Juni 1955:

Grundsteinlegung
durch den ersten
CERN Generaldirektor,
Felix Bloch.

CERN Baustelle ~1956





1957

Der erste Beschleuniger, das Synchro-Zyklotron (SC), geht in Betrieb



1959

Das Proton-Synchrotron (PS) geht in Betrieb



1968

George Charpak erfindet die Vielrohr-Proportionalkammer (Nobelpreis 1992)



1971

Die Intersecting Storage Rings (ISR), der erste Proton-Proton-Speicherring der Welt, gehen in Betrieb



1973

Entdeckung der "Neutralen Ströme", die erste Bestätigung der elektro-schwachen Theorie



1976

Das Super-Proton-Synchrotron (SPS) geht in Betrieb



1957

Der erste Beschleuniger, das Synchro-Zyklotron (SC), geht in Betrieb



1959

Das Proton-Synchrotron (PS) geht in Betrieb



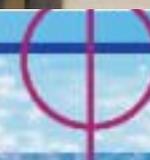
1968

George Charpak erfindet die Vielrohr-Proportionalkammer (Nobelpreis 1992)



1971

Die Intersecting Storage Rings (ISR), der erste Proton-Proton-Speicherring der Welt, gehen in Betrieb



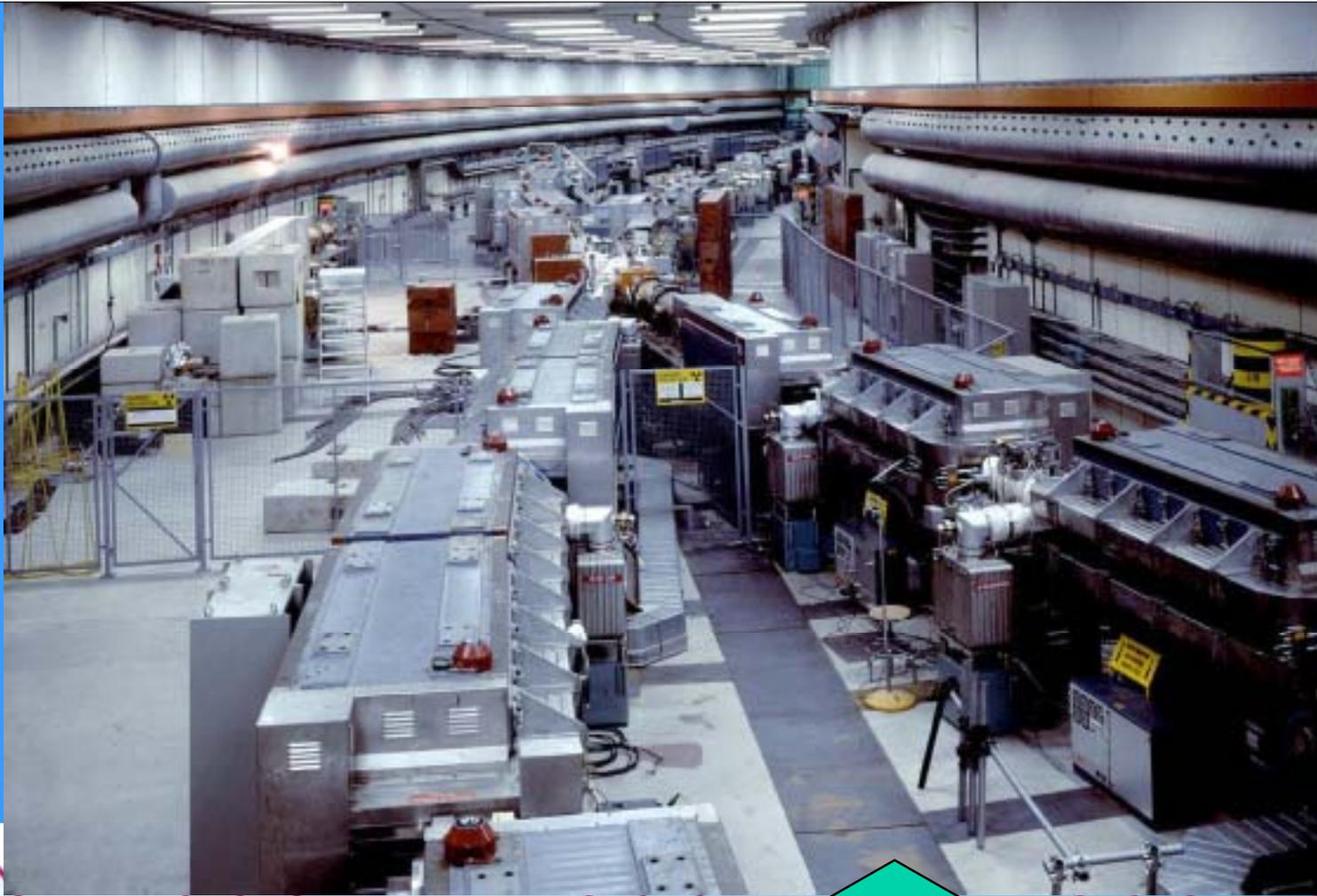
1973

Entdeckung der "Neutralen Ströme", die erste Bestätigung der elektro-schwachen Theorie



1976

Das Super-Proton-Synchrotron (SPS) geht in Betrieb



1957

Der erste Beschleuniger, das Synchro-Zyklotron (SC), geht in Betrieb



1959

Das Proton-Synchrotron (PS) geht in Betrieb



1968

George Charpak erfindet die Vielrohr-Proportionalkammer (Nobelpreis 1992)



1971

Die Intersecting Storage Rings (ISR), der erste Proton-Proton-Speicherring der Welt, gehen in Betrieb



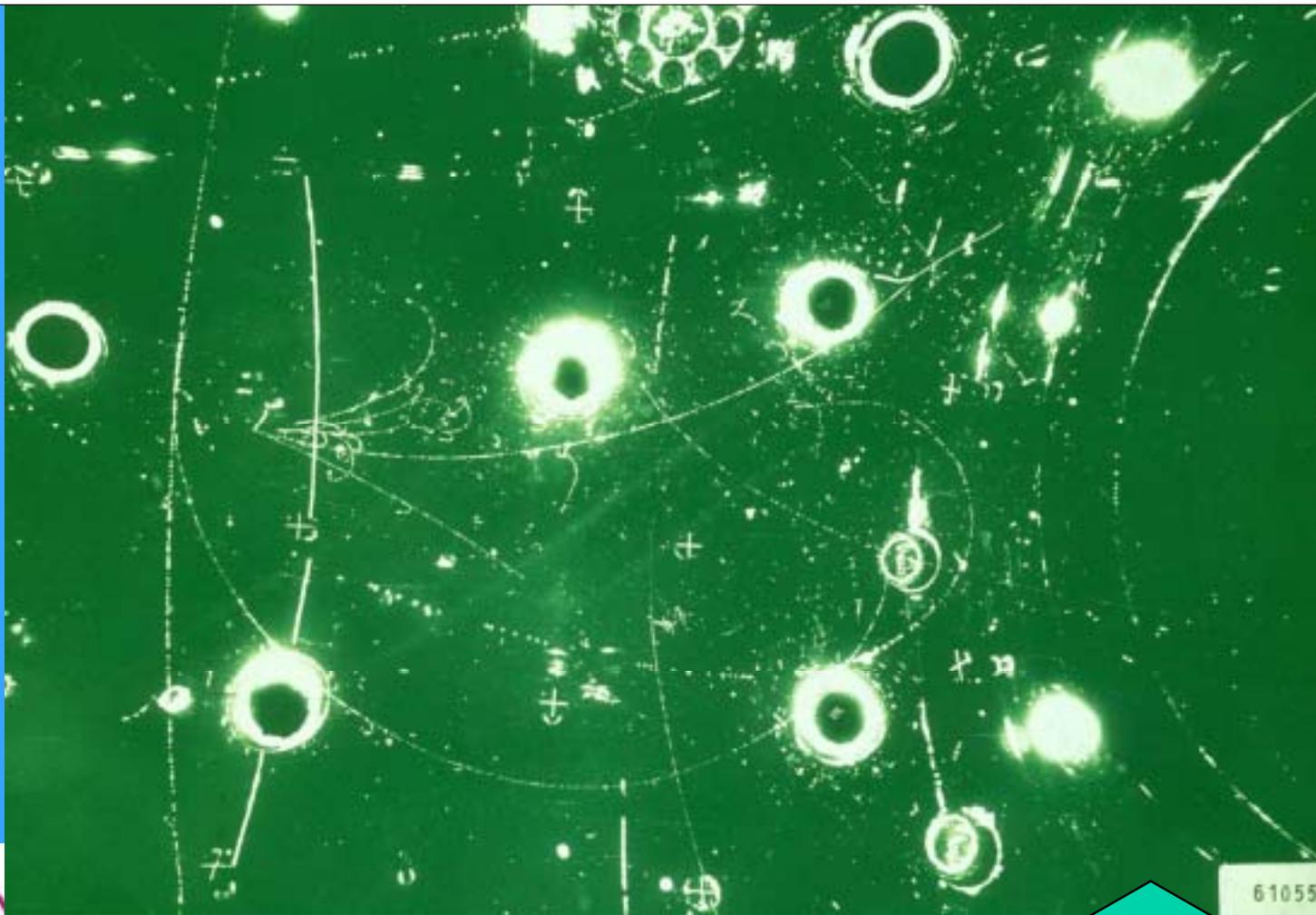
1973

Entdeckung der "Neutralen Ströme", die erste Bestätigung der elektro-schwachen Theorie



1976

Das Super-Proton-Synchrotron (SPS) geht in Betrieb



1957

Der erste Beschleuniger, das Synchro-Zyklotron (SC), geht in Betrieb



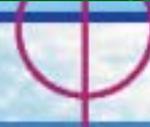
1959

Das Proton-Synchrotron (PS) geht in Betrieb



1968

George Charpak erfindet die Vielrohr-Proportionalkammer (Nobelpreis 1992)



1971

Die Intersecting Storage Rings (ISR), der erste Proton-Proton-Speicherring der Welt, gehen in Betrieb



1973

Entdeckung der "Neutralen Ströme", die erste Bestätigung der elektro-schwachen Theorie



1976

Das Super-Proton-Synchrotron (SPS) geht in Betrieb

61055



1957

Der erste Beschleuniger, das Synchro-Zyklotron (SC), geht in Betrieb



1959

Das Proton-Synchrotron (PS) geht in Betrieb



1968

George Charpak erfindet die Vielrohr-Proportionalkammer (Nobelpreis 1992)



1971

Die Intersecting Storage Rings (ISR), der erste Proton-Proton-Speicherring der Welt, gehen in Betrieb



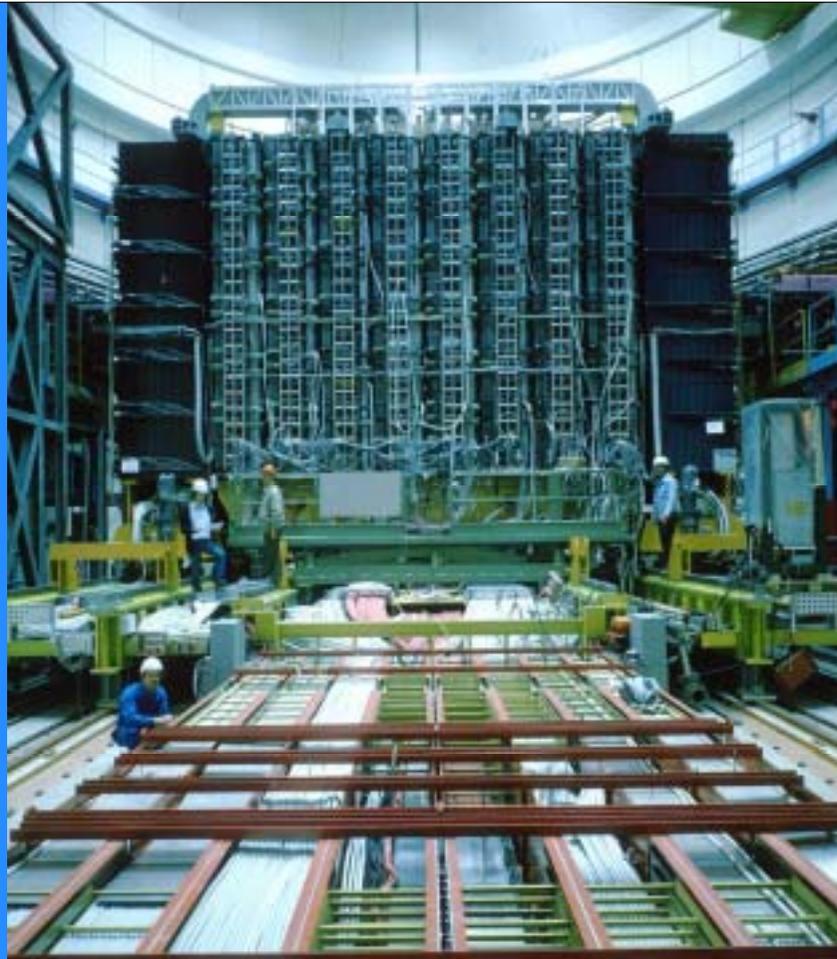
1973

Entdeckung der "Neutrino Ströme", die erste Bestätigung der elektro-schwachen Theorie



1976

Das Super-Proton-Synchrotron (SPS) geht in Betrieb



1983

Entdeckung der W- und Z-Teilchen. Nobelpreis für Carlo Rubbia und Simon van der Meer 1984



1989

Der große Elektron-Positron Speicherring (LEP) geht in Betrieb und bestätigt, daß es nur 3 Neutrinoarten gibt



1990

Tim Berners-Lee erfindet das World Wide Web



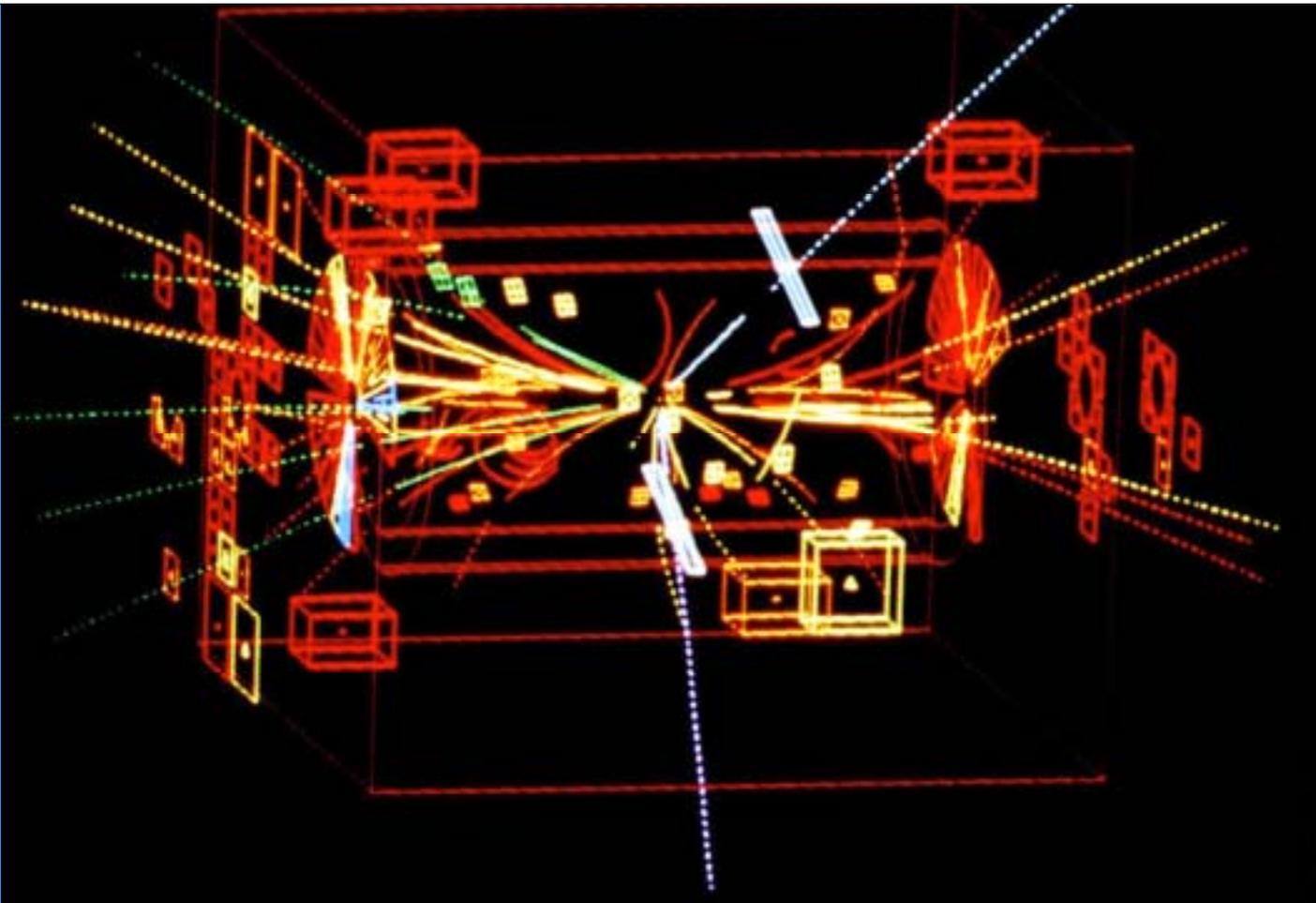
1993

Erste genaue Messungen der CP-Verletzung, einem winzigen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie



1995

Erste Beobachtung von Anti-Wasserstoff



1983

Entdeckung der W- und Z-Teilchen. Nobelpreis für Carlo Rubbia und Simon van der Meer 1984



1989

Der große Elektron-Positron Speicherring (LEP) geht in Betrieb und bestätigt, daß es nur 3 Neutrinoarten gibt



1990

Tim Berners-Lee erfindet das World Wide Web



1993

Erste genaue Messungen der CP-Verletzung, einem winzigen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie



1995

Erste Beobachtung von Anti-Wasserstoff



1983

Entdeckung der W- und Z-Teilchen. Nobelpreis für Carlo Rubbia und Simon van der Meer 1984



1989

Der große Elektron-Positron Speicherring (LEP) geht in Betrieb und bestätigt, daß es nur 3 Neutrinoarten gibt



1990

Tim Berners-Lee erfindet das World Wide Web



1993

Erste genaue Messungen der CP-Verletzung, einem winzigen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie



1995

Erste Beobachtung von Anti-Wasserstoff



1983

Entdeckung der W- und Z-Teilchen. Nobelpreis für Carlo Rubbia und Simon van der Meer 1984



1989

Der große Elektron-Positron Speicherring (LEP) geht in Betrieb und bestätigt, daß es nur 3 Neutrinoarten gibt



1990

Tim Berners-Lee erfindet das World Wide Web



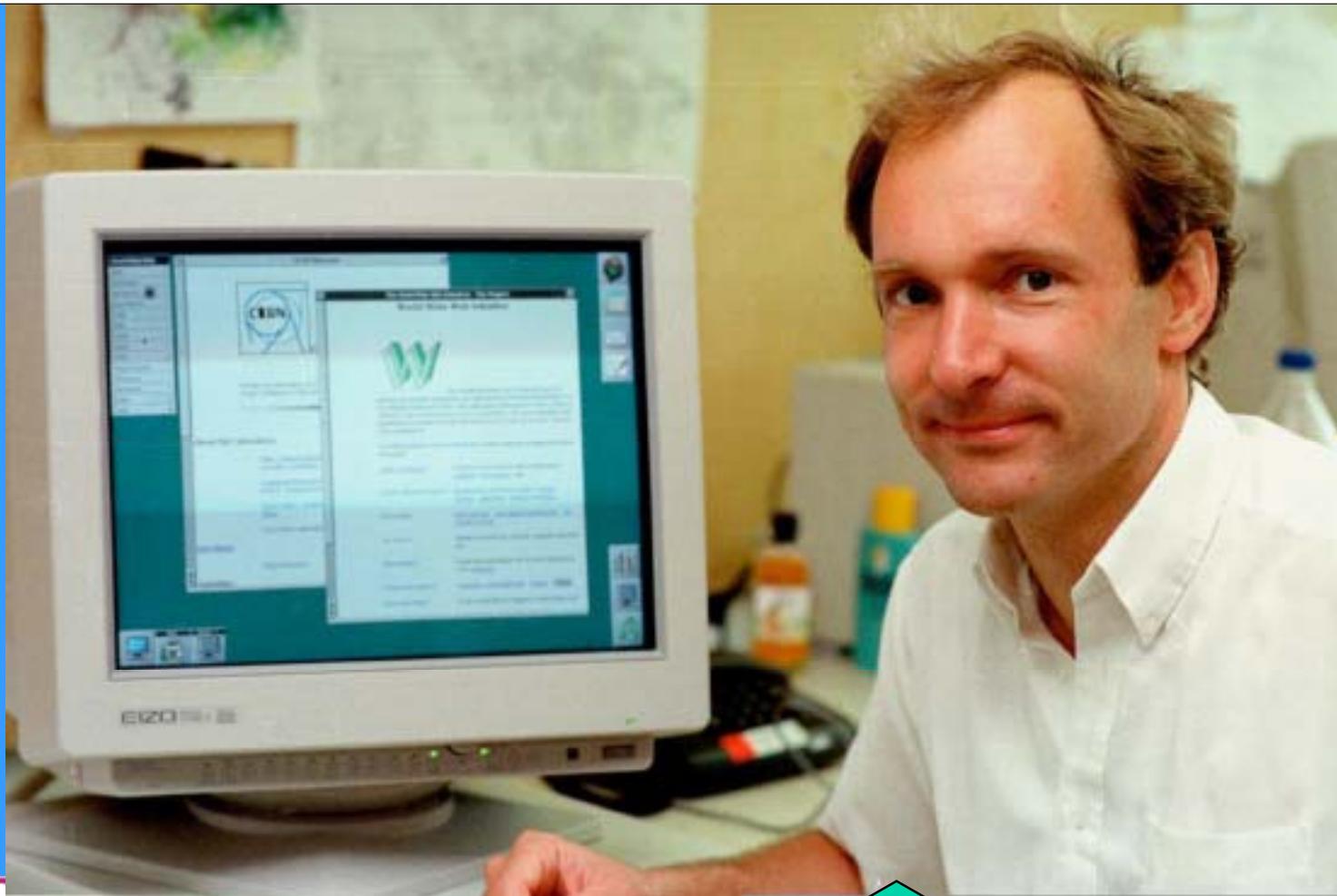
1993

Erste genaue Messungen der CP-Verletzung, einem winzigen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie



1995

Erste Beobachtung von Anti-Wasserstoff



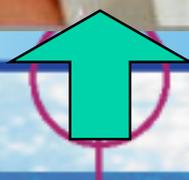
1983

Entdeckung der W- und Z-Teilchen. Nobelpreis für Carlo Rubbia und Simon van der Meer 1984



1989

Der große Elektron-Positron Speicherring (LEP) geht in Betrieb und bestätigt, daß es nur 3 Neutrinoarten gibt



1990

Tim Berners-Lee erfindet das World Wide Web



1993

Erste genaue Messungen der CP-Verletzung, einem winzigen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie



1995

Erste Beobachtung von Anti-Wasserstoff



1983

Entdeckung der W- und Z-Teilchen. Nobelpreis für Carlo Rubbia und Simon van der Meer 1984



1989

Der große Elektron-Positron Speicherring (LEP) geht in Betrieb und bestätigt, daß es nur 3 Neutrinoarten gibt



1990

Tim Berners-Lee erfindet das World Wide Web



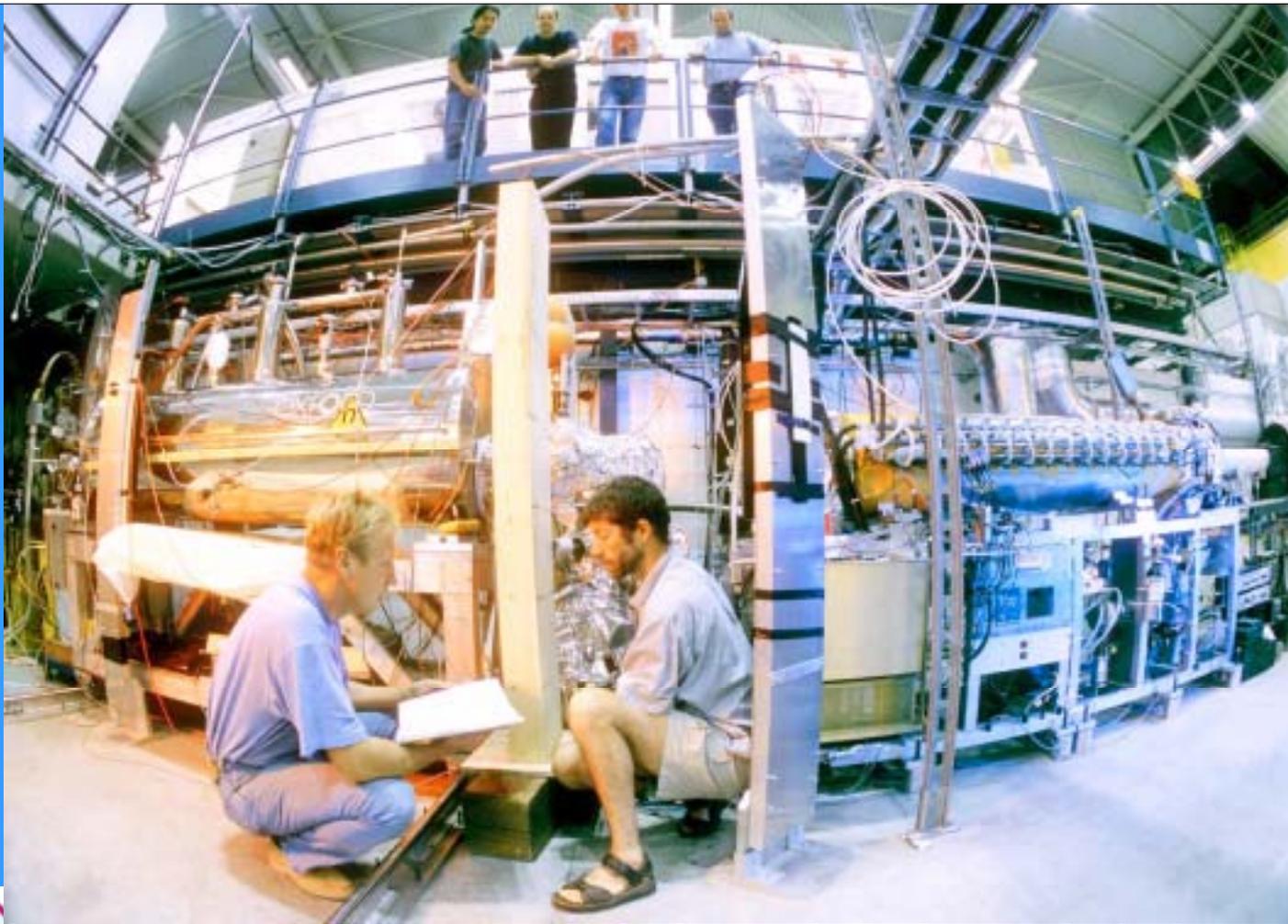
1993

Erste genaue Messungen der CP-Verletzung, einem winzigen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie



1995

Erste Beobachtung von Anti-Wasserstoff



1983

Entdeckung der W- und Z-Teilchen. Nobelpreis für Carlo Rubbia und Simon van der Meer 1984



1989

Der große Elektron-Positron Speicherring (LEP) geht in Betrieb und bestätigt, daß es nur 3 Neutrinoarten gibt



1990

Tim Berners-Lee erfindet das World Wide Web



1993

Erste genaue Messungen der CP-Verletzung, einem winzigen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie



1995

Erste Beobachtung von Anti-Wasserstoff



1999

Baubeginn
des Großen
Hadronen-
Kolliders



2000

Erzeugung eines neuen Zustands von
Materie, des Quark-Gluon-Plasmas,
das wahrscheinlich unmittelbar nach
dem Urknall existierte



2002

Erste
Ergebnisse zu
AntiWasserstoff-
Atomen



Europäische Organisation für Kernforschung
CH-1211 Genf, Schweiz
www.cern.ch



2007

Geplante
Inbetriebnahme
des LHC



1999

Baubeginn
des Großen
Hadronen-
Kolliders



2000

Erzeugung eines neuen Zustands von
Materie, des Quark-Gluon-Plasmas,
das wahrscheinlich unmittelbar nach
dem Urknall existierte



2002

Erste
Ergebnisse zu
AntiWasserstoff-
Atomen



Europäische Organisation für Kernforschung
CH-1211 Genf, Schweiz
www.cern.ch



2007

Geplante
Inbetriebnahme
des LHC



1999

Baubeginn
des Großen
Hadronen-
Kolliders



2000

Erzeugung eines neuen Zustands von
Materie, des Quark-Gluon-Plasmas,
das wahrscheinlich unmittelbar nach
dem Urknall existierte



2002

Erste
Ergebnisse zu
AntiWasserstoff-
Atomen

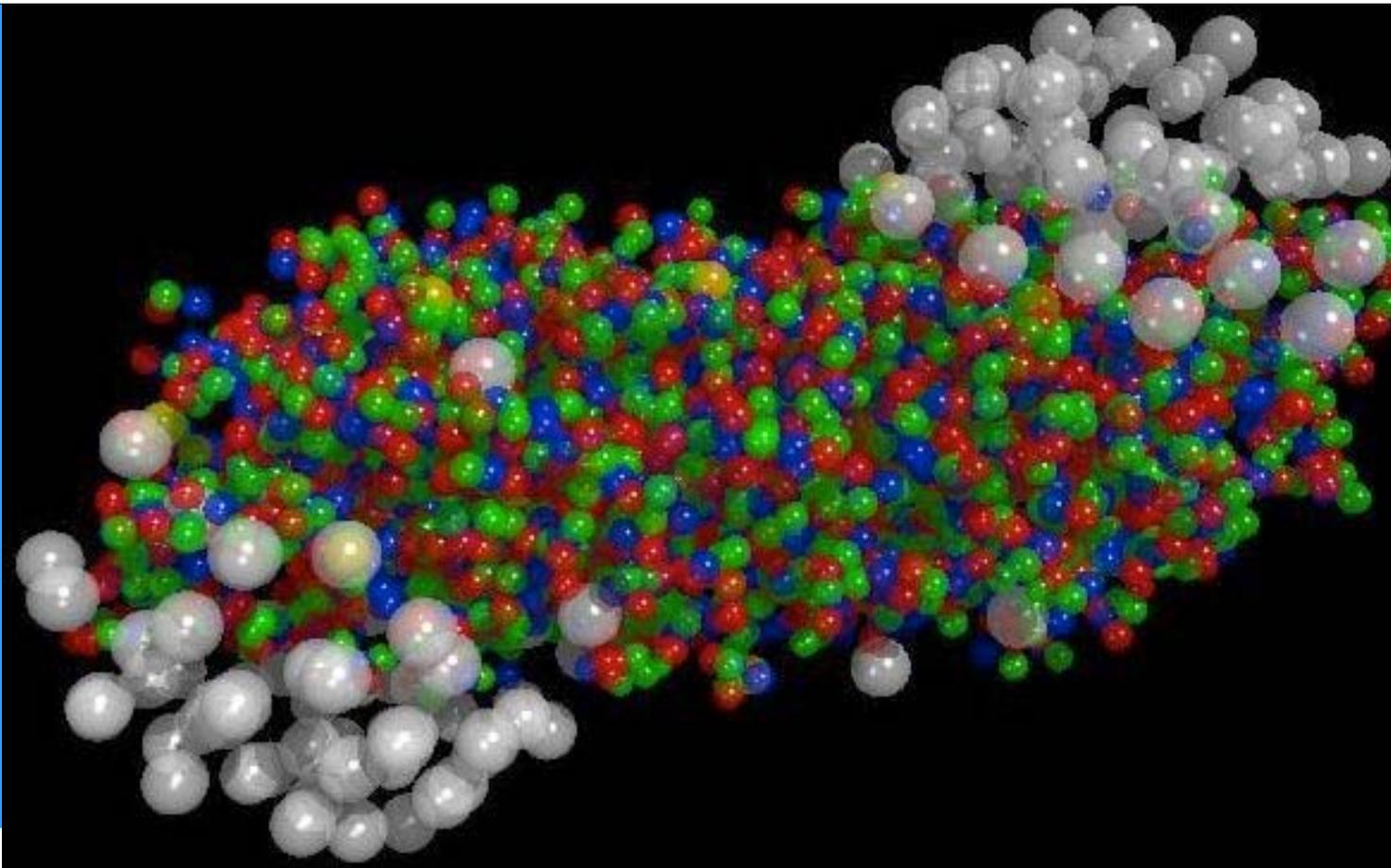


Europäische Organisation für Kernforschung
CH-1211 Genf, Schweiz
www.cern.ch



2007

Geplante
Inbetriebnahme
des LHC



1999

Baubeginn
des Großen
Hadronen-
Kolliders



2000

Erzeugung eines neuen Zustands von
Materie, des Quark-Gluon-Plasmas,
das wahrscheinlich unmittelbar nach
dem Urknall existierte



2002

Erste
Ergebnisse zu
Antiwasserstoff-
Atomen



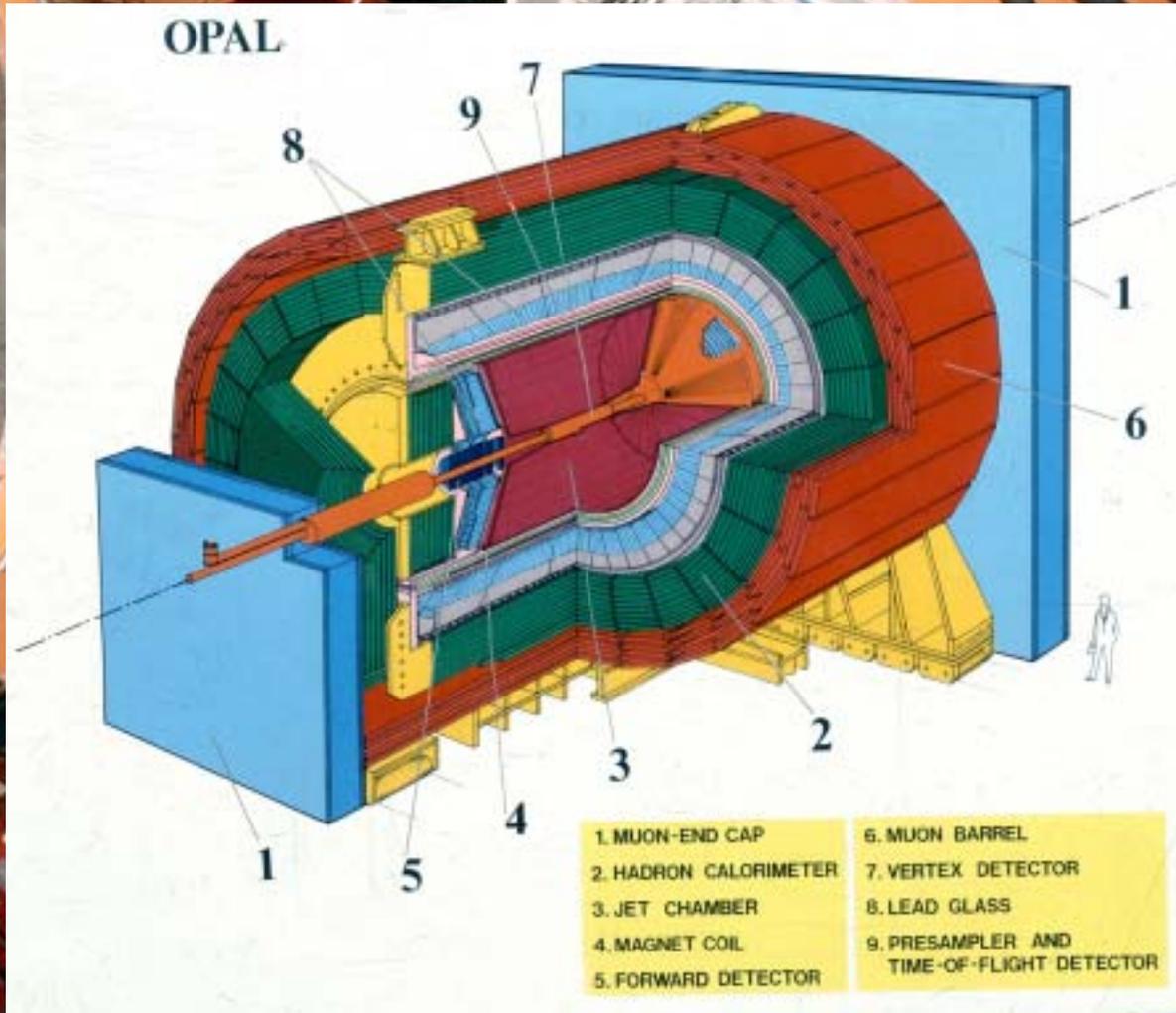
Europäische Organisation für Kernforschung
CH-1211 Genf, Schweiz
www.cern.ch



2007

Geplante
Inbetriebnahme
des LHC

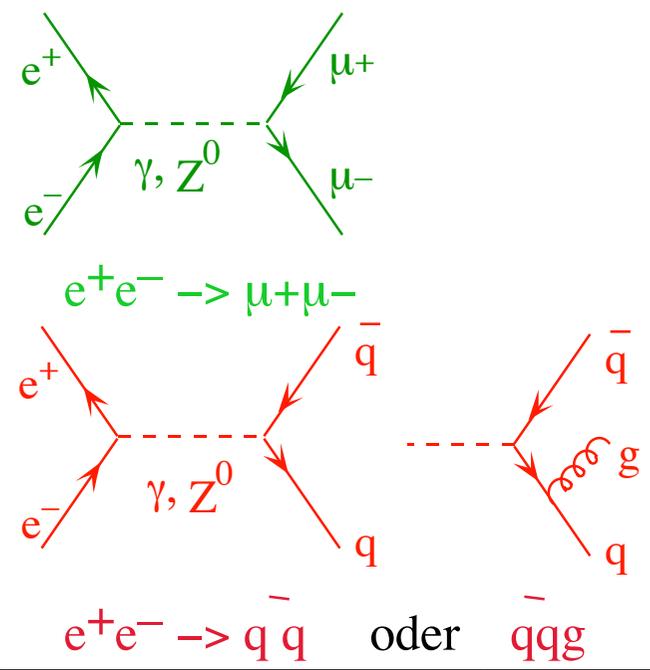
Teilchendetektor am LEP: OPAL



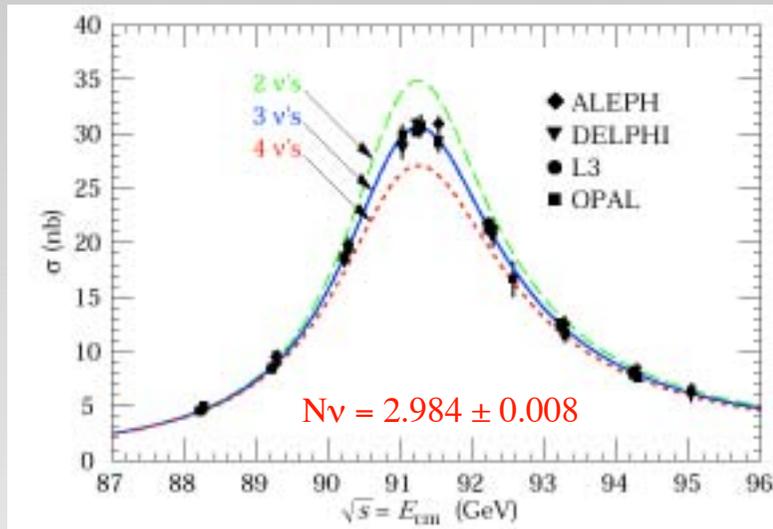
e^+e^- Vernichtungsreaktionen, gemessen mit OPAL bei LEP:

Quantenmechanik:
Jedes Mal
passiert etwas
anderes!

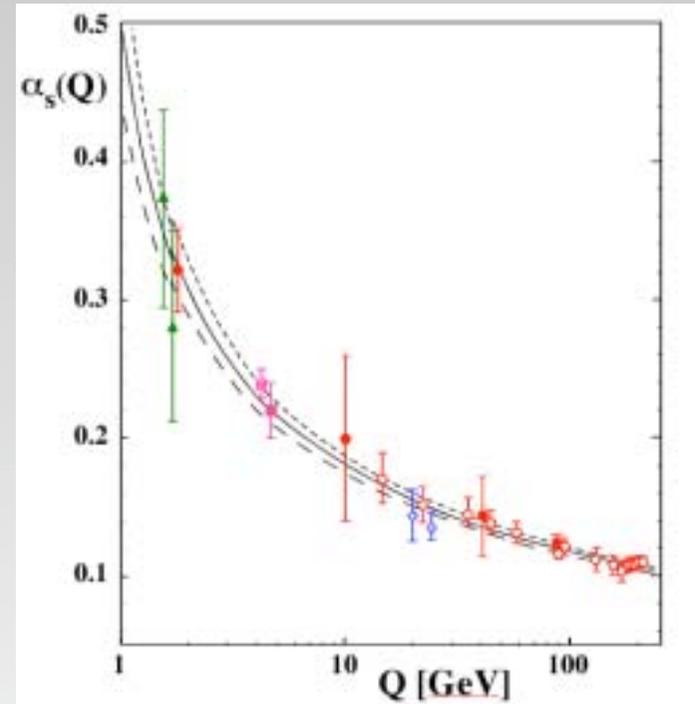
zum Beispiel:



Einige Highlights von LEP & Co:



- Resonanzlinie des Z^0 bei LEP: es gibt **genau** 3 Neutrino- (Teilchen-) Familien!
- $M_Z = (91.1875 \pm 0.0021) \text{ GeV}$
(...nach Korrektur auf Mondphasen und TGV-Fahrplan)
- exp. Tests des Standardmodells der Teilchenphysik im Promillebereich
- Grenzen für die Masse des Higgs-Boson bisher unentdeckt, aber von Theorie vorhergesagt: $114.1 \text{ GeV} < M_H < 185 \text{ GeV}$



- Präzisionsmessungen der Stärke der Starken Kraft: α_s „läuft“;
Beweis der Asymptotischen Freiheit, des Confinement und damit der **QCD**!

Das Standardmodell der Teilchenphysik...

- beschreibt die vereinheitlichte Elektroschwache Wechselwirkung und die Starke Wechselwirkung mit eichinvarianten Quantenfeldtheorien
- ist extrem erfolgreich in konsistenter und präziser Beschreibung der bis heute beobachteten Teilchenreaktionen

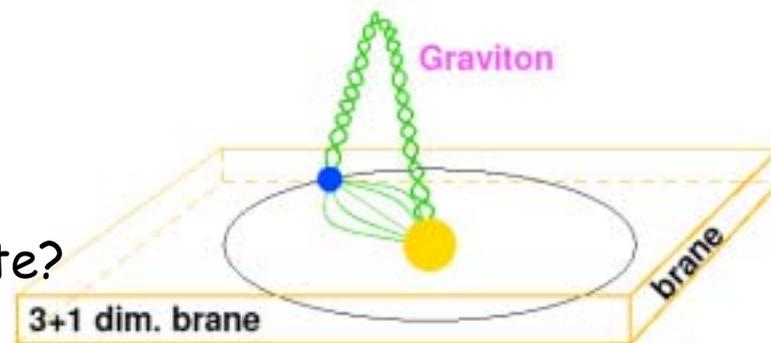
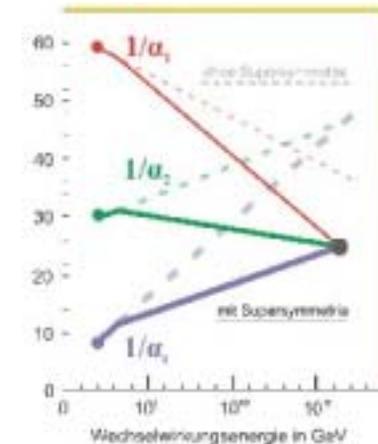
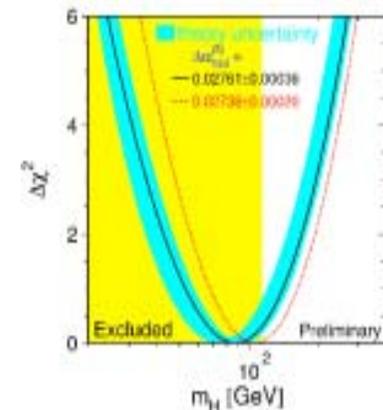
... kann jedoch nicht die ultimative Theorie sein:

- es versagt bei sehr hohen Energien (Unitaritätsverletzung)
-> es muss etwas passieren im Bereich $E \sim 100 \text{ GeV} \dots 1 \text{ TeV}$
- es hat zu viele freie Parameter (Kopplungsstärken, Massen, ...)
- es lässt viele fundamentalen Fragen offen:

fundamentale offene Fragen:

1. Was ist der Ursprung der Masse ?
 - Existiert das **Higgs Teilchen** ?
 - Falls nein, wie sonst erhalten die Teilchen Masse ?
2. Warum gibt es 3 Quark-/Leptonfamilien ?
Warum ist (Ladung des e^-) = -(Ladung des p) ?
3. Wo ist die Antimaterie im Universum?
4. Gibt es eine Universalkraft als gemeinsame Urkraft ?
-> GUT
5. Gibt es bisher unbekannte Formen von Materie ?
 - Ist unsere Welt **supersymmetrisch** ?
 - Besteht die **dunkle Materie** aus dem leichtesten supersymmetrischen Teilchen ?
6. Gibt es verborgene Raumdimensionen ?
 - warum ist Gravitation so viel schwächer als die anderen Kräfte?

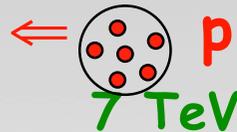
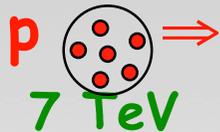
...



Beantwortung der (meisten) offenen, fundamentalen Fragen:

Der Large Hadron Collider (LHC)

- Proton-Proton Beschleuniger im LEP-Tunnel am CERN

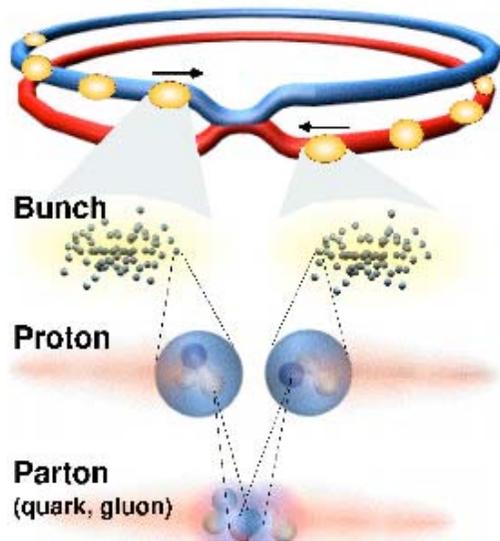


- Höchste Energien pro Kollision
- Höchste Luminositäten



- Vier geplante Experimente: ATLAS, CMS (pp-Physik)
LHC-B (Physik der b-Quarks)
ALICE (Pb-Pb Kollisionen)
- Gebaut in einer internationalen Kollaboration aus 34 Ländern
- Geplante Inbetriebnahme: 2007

Der Large Hadron Collider (LHC)



Proton - Proton Kollisionen:

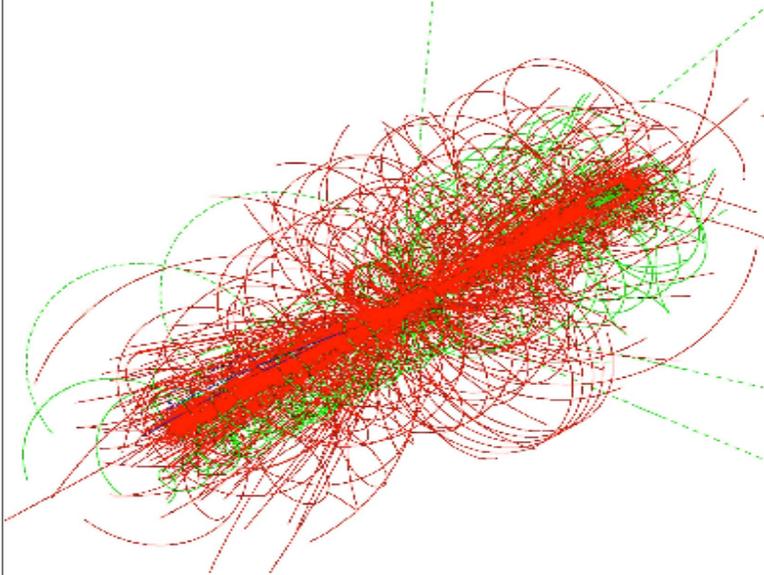
2835 x 2835 Pakete (bunches)
Abstand: 7.5 m (25 ns)

10^{11} Protonen / bunch
Kreuzungsrate der p-Pakete: 40 Mio. mal / sec.
Luminosität: $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

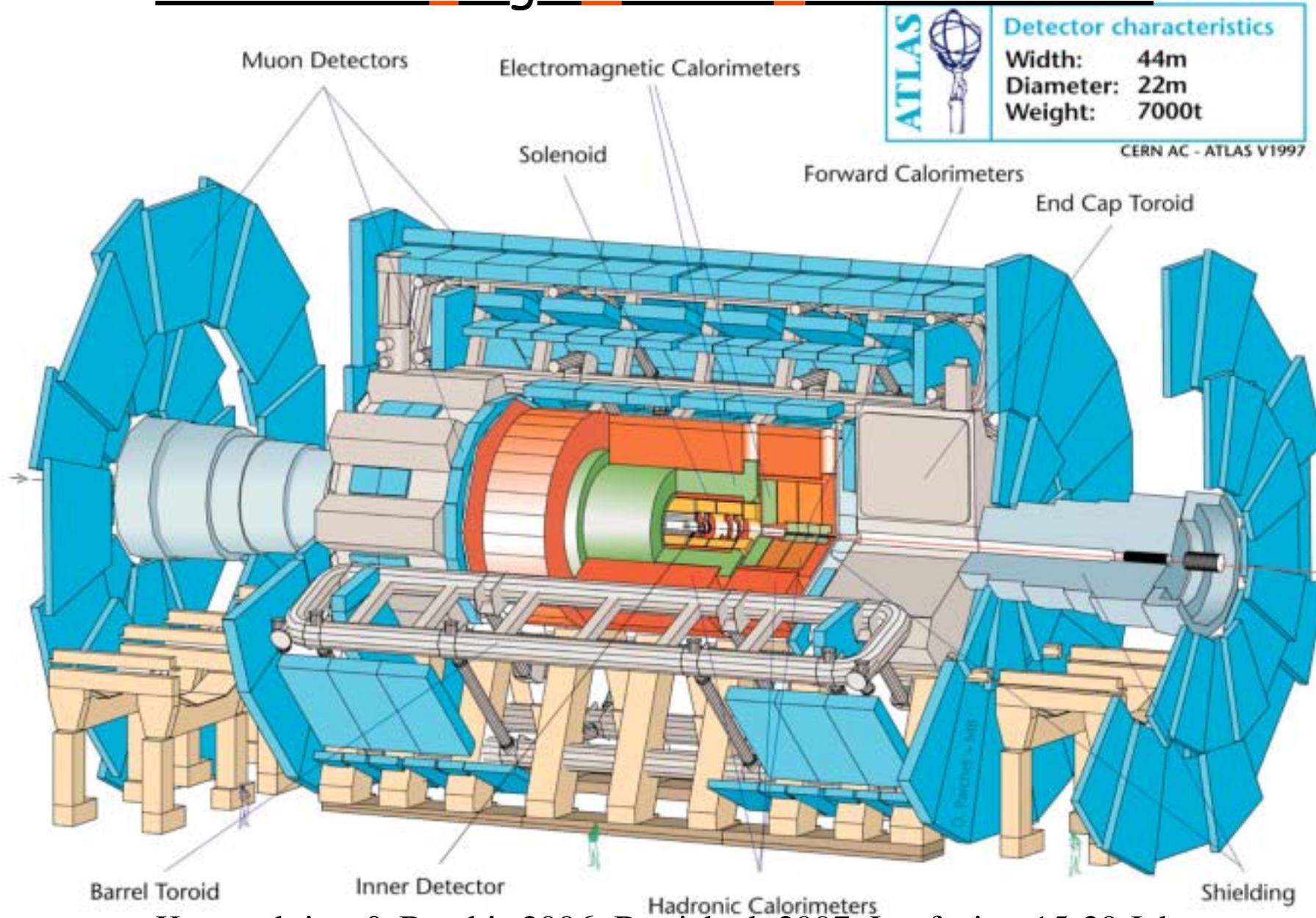
Proton-Proton Kollisionen: $\sim 10^9$ / sec
(Überlagerung von 23 pp-Wechselwirkungen
während einer Strahlkreuzung)

~ 1600 geladene Teilchen im Detektor

⇒ hohe Anforderungen an die Detektoren



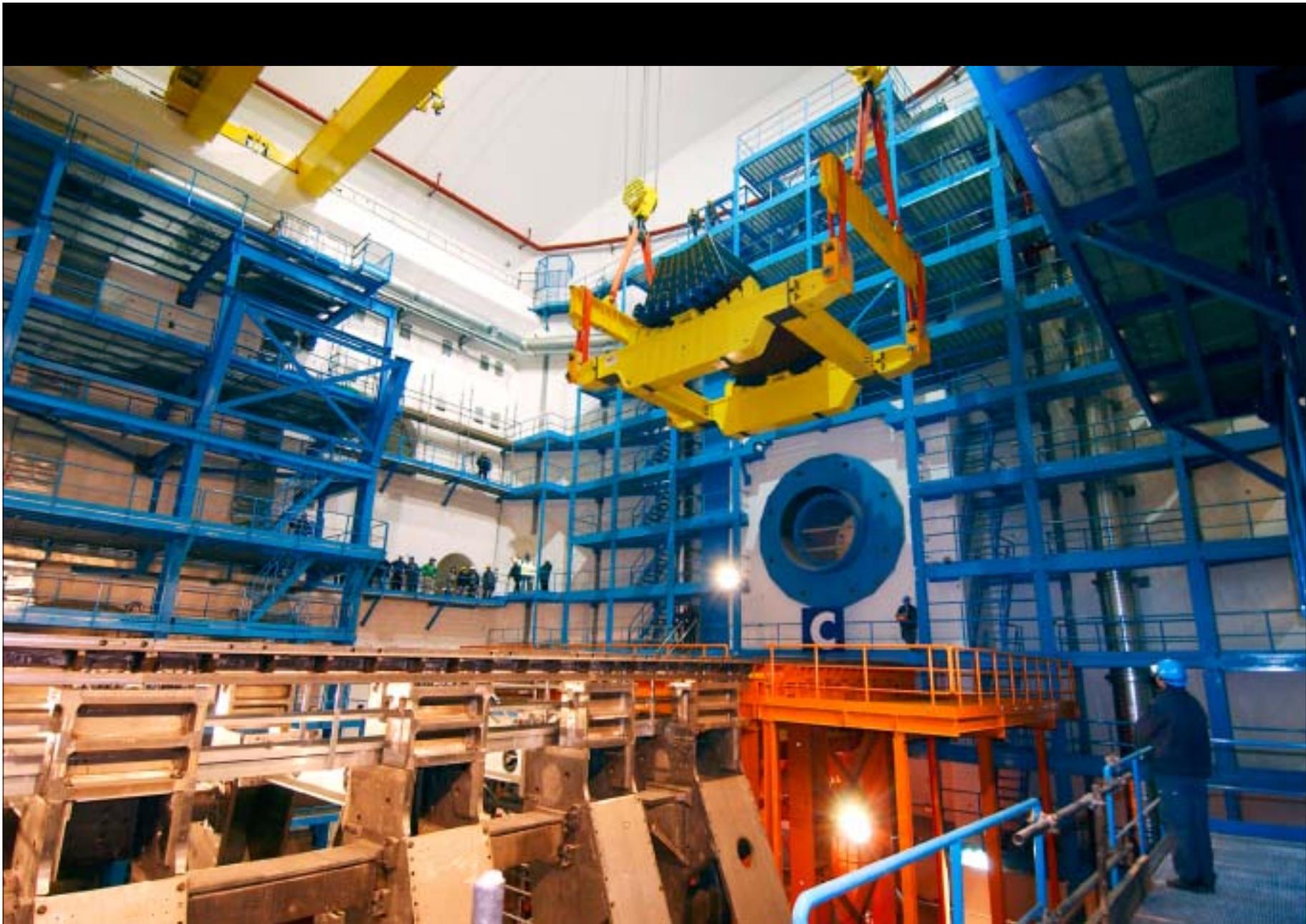
ATLAS am Large Hadron Collider / CERN



Konstruktion & Bau bis 2006, Betrieb ab 2007, Laufzeit ~ 15-20 Jahre

ATLAS Halle (04/2004)







- ~ 1800 Physiker und Ingenieure
- 151 Institute
- 35 Nationen

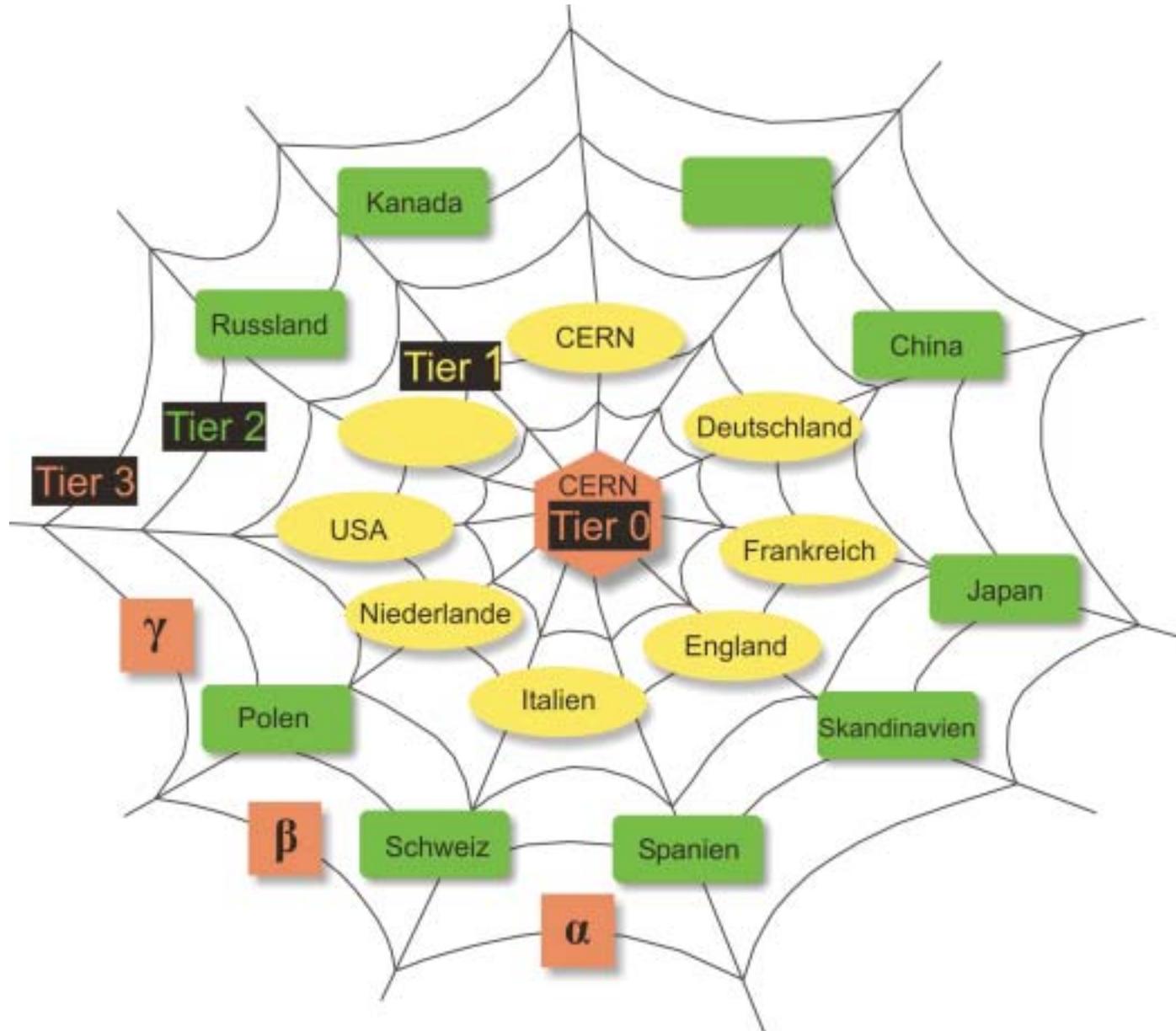
LHC Data and Computing

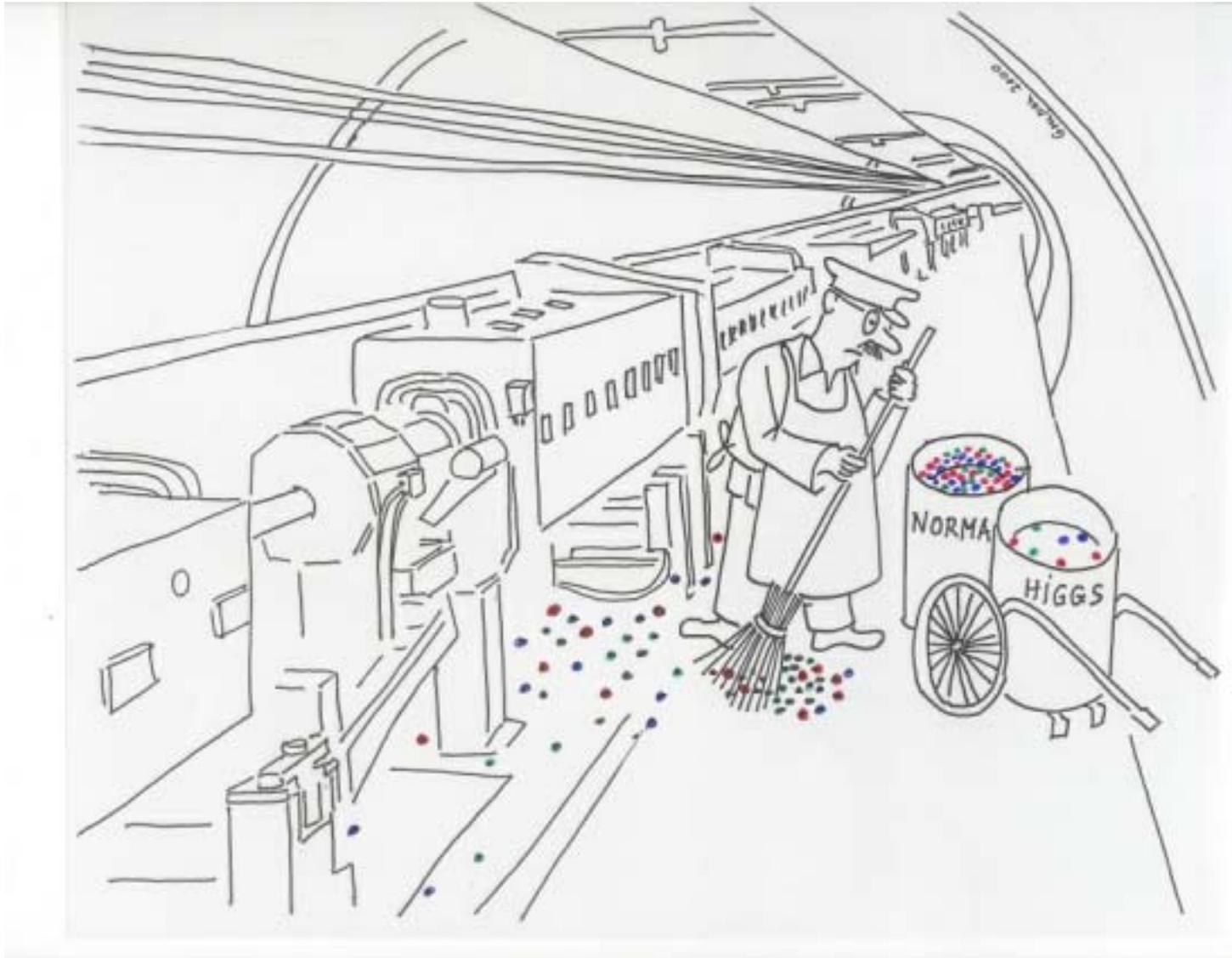
the challenge:

- 40 MHz collision rate -> unfiltered data flow $\sim 10^{14}$ B/s
(~10 Billion phone calls)
- 4 experiments; 50-200 Hz data taking rate
- raw event size: 0.12 / 1 / 1-25 MB (LHCb / ATLAS-CMS / ALICE)
- total raw data storage: 7 PB/a
($7 \cdot 10^{15}$ Bytes/year;
100 000 km thick
pile of A4-paper)
- total simulated Data storage: 3.2 PB/a
- world-wide* tape storage: 28.5 PB/a (40 million CD-Rom's)
- world-wide* disk storage: 10.4 PB/a (140k disks à 75 GB)
- world-wide* CPU capacity: 7350 k SI-95 (360k today's PCs)
- WAN bandwidth (Tier-0/-1): 1500 Mbps (1 experiment)
(5000 Mbps when serving all 4 exp.'s)

* all Tier-0, Tier-1 and Tier-2 computing centres, excl. Tier-3 and -4

The LHC Data Grid





The End

www.mppmu.mpg.de

Tag der offenen Tür am MPI für Physik, München: Sa, 16.10.2004