

Das Large Hadron Collider Projekt

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

- Intro: vom Kosmos zu den Quarks
- Stand der Teilchenphysik
- offene fundamentale Fragen
- der LHC Beschleuniger
- LHC Detektoren
- Status und Perspektiven
- Animationsvideo: ATLAS Integration

Vom Kosmos zu den Quarks

(Kurzfilm)

Die Theorie der Materie: Das "Standardmodell" der Teilchenphysik

Elementare Teilchen:

(sowie jeweilige
Anti-Teilchen)

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

Fundamentale Kräfte:

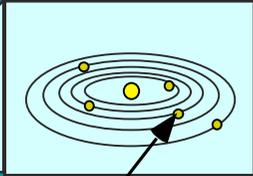
Elementare Kräfte
(Wechselwirkungen)
kommen durch **Austausch** von
besonderen Teilchen
(Austauschbosonen) zustande.

Wechselwirkung	relative Reichweite	zugehörige Austauschteilchen	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

Temperatur	Alter
2.7 K	13.7 Milliarden Jahre

GEGENWART

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

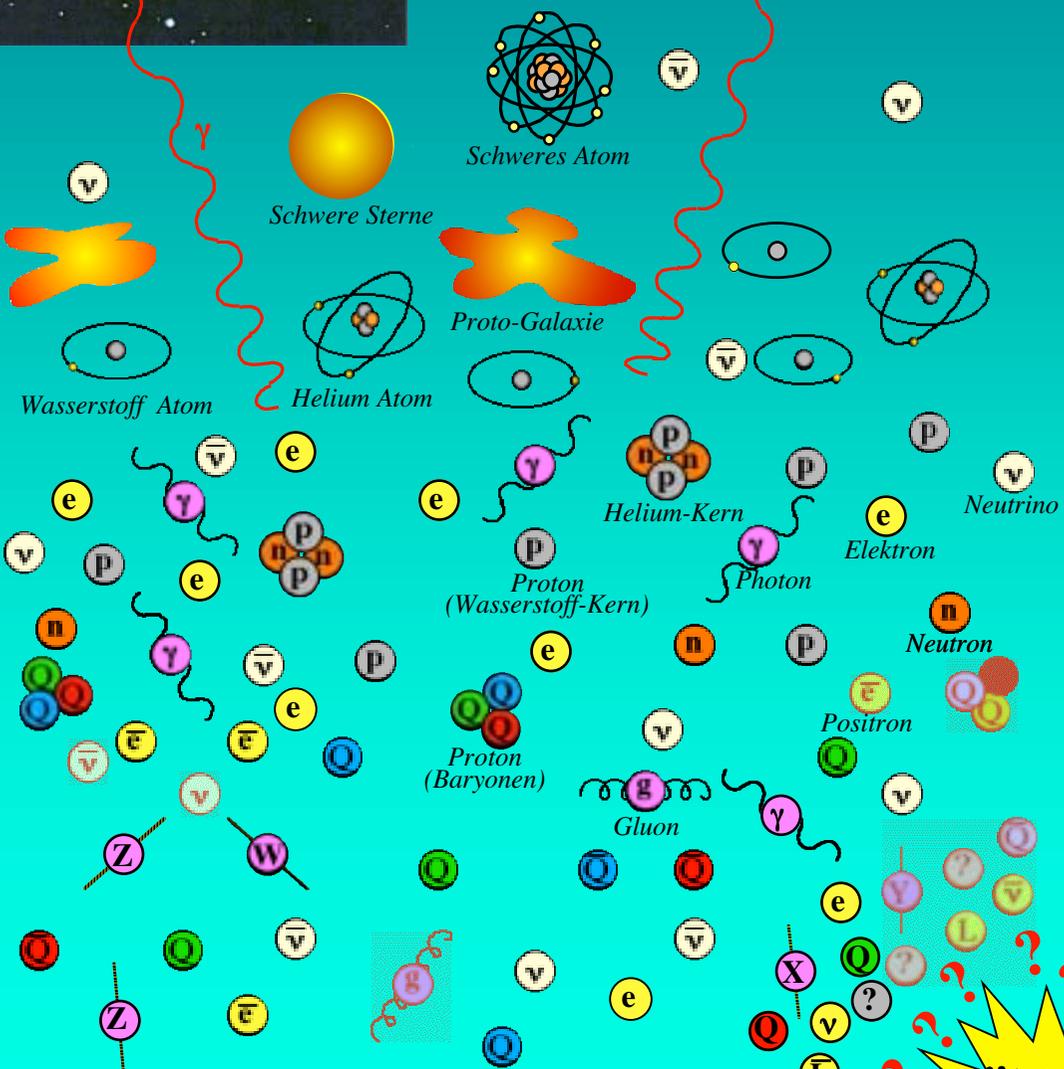
10^{27} K	10^{-34} sec
-------------	----------------

GROSSE VEREINHEITLICHUNG

QUANTEN- GRAVITATION

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

strahlungsdominierte Ära materiedominierte Ära



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

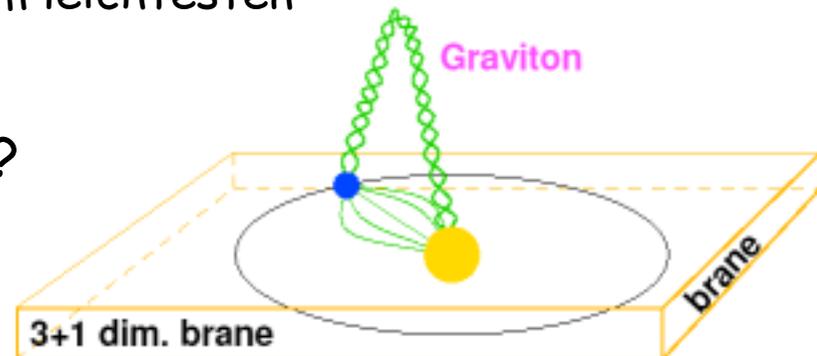
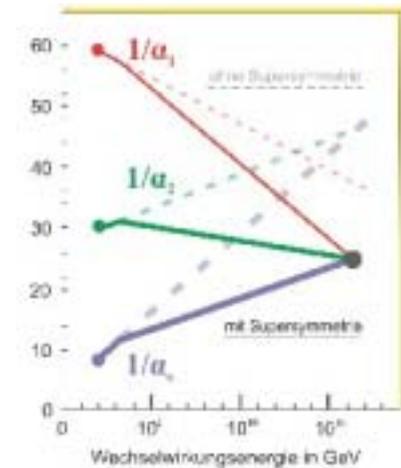
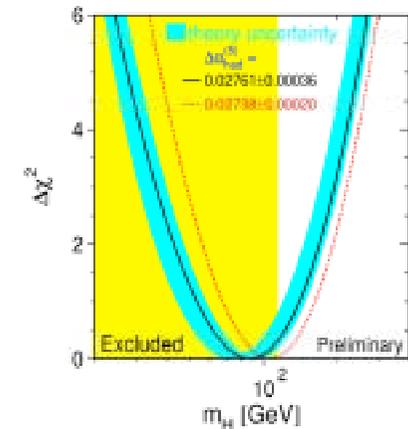
... kann jedoch nicht die ultimative Theorie sein:

- 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 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 andere 3 WW ?

...



Status: Dunkle Materie

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}; \quad \rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 5.1 h_{70}^2 \frac{\text{GeV}}{\text{m}^3} \quad h_{70} = \frac{H_0}{70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}} = 1.0 \pm 0.15$$

Gegenwärtiges Standard-Szenario:

$$\Omega = 1$$

$$\Omega = \Omega_\Lambda + \Omega_M$$

$$\Omega_\Lambda \approx 0.7$$

$$\Omega_M \approx 0.3$$

Ω_M : $\approx 10\%$ baryonisch, $\leq 20\%$ HDM, $\geq 70\%$ CDM

→ $\Omega_b = (0.04 \pm 0.01) h_{70}^2$ (Nukleosynthese)

→ davon ca. 10% leuchtend ($\Omega_{\text{lum}} \sim 0.002$)

Hauptkandidaten:

- HDM: Massive Neutrinos
- CDM: Axions, SUSY-WIMPs



if it's not
dark
it doesn't
matter

DENNIS the MENACE



"LOTS OF THINGS ARE INVISIBLE, BUT WE DON'T
KNOW HOW MANY BECAUSE WE CAN'T SEE THEM."

Supersymmetrie

- ermöglicht gegenseitige Aufhebung von divergenten Strahlungskorrekturen → löst das Hierarchieproblem
- postuliert Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen:
neue Fermion- (Boson-) Partner für alle bekannten fundamentalen Bosonen (Fermionen)

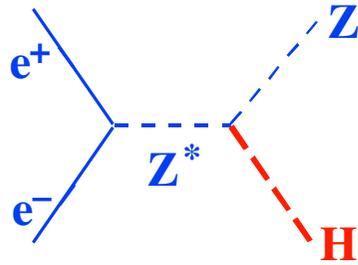
Teilchen	Spin	S-Teilchen	Spin
Quark Q	1/2	Squark \tilde{Q}	0
Lepton l	1/2	Slepton \tilde{l}	0
Photon γ	1	Photino $\tilde{\gamma}$	1/2
Gluon g	1	Gluino \tilde{g}	1/2
W^\pm	1	Wino \tilde{W}^\pm	1/2
Z^0	1	Zino \tilde{Z}^0	1/2

- Higgs-Struktur im Minimalen Supersymmetrischen Standardmodell (MSSM):
2 komplexe Higgs-Doublets (8 freie skalare Parameter) → 5 physikalische Higgs-Felder:
 H^\pm, H_1^0, H_2^0, A^0 . Konsistenzbedingung: $M_{H_1^0} \leq 130 \text{ GeV}$
- Gauginos ($\tilde{\gamma}, \tilde{W}^\pm, \tilde{Z}$) mixen mit den Higgsinos und bilden somit als Eigenzustände
4 charginos ($\chi_{1,2}^\pm$) und 4 neutralions ($\chi_{1,2,3,4}^0$)

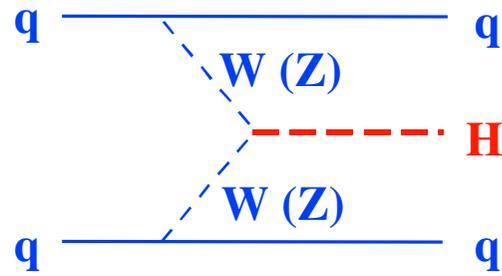
Supersymmetrie

- **124 freie Parameter** (!!) zur Beschreibung der Massen und Kopplungen der SUSY-Teilchen; davon ein Winkel β , mit $\tan(\beta) = v_1/v_2$. Einzige bekannte Bedingung: $(v_1^2 + v_2^2) = 246 \text{ GeV}^2$
- neue Erhaltungsgröße: “R-Parität”: $R = (-1)^{3(B-L)+2S}$ (B, L: Baryon-/Leptonzahl; S: Spin); $R = +1$ für normale Materie, $R = -1$ für supersymmetrische Teilchen
- falls R-Paritätserhaltung gilt: - Susyteilchen werden nur **paarweise** (assoziiert) **erzeugt**
- Susyteilchen zerfallen alle in “lightest Susy Particle”, **LSP**, das selbst **stabil** ist.
- kosmologische Argumente: LSP ist ladungsneutral und trägt keine Farbladung \rightarrow nur schwache Wechselwirkung!
 \rightarrow führt zur Signatur fehlender Energie (wie Neutrinos).
- Supersymmetrie mit Massen von $O(1 - 10 \text{ TeV})$ führt zu Änderung der Energieabhängigkeit der Kopplungskonstanten, sodaß “Vereinheitlichung” bei $E \sim 10^{16} \text{ GeV}$ geschieht \rightarrow Proton-Lebensdauer damit $\gg 10^{32}$ Jahre (jenseits exp. Möglichkeiten) im Rahmen von **SUSY-GUT**.
- **LSP** ist Hauptkandidat für Cold Dark Matter (**CDM**).

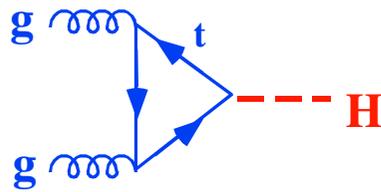
Higgs: Produktion und Zerfälle



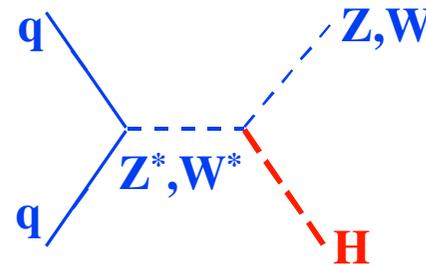
Higgs-Strahlung



W- (Z-) Fusion



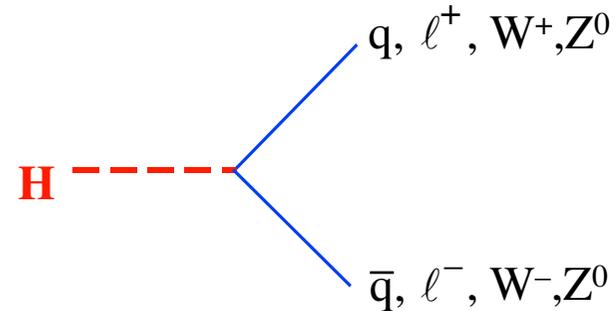
Gluon - Fusion



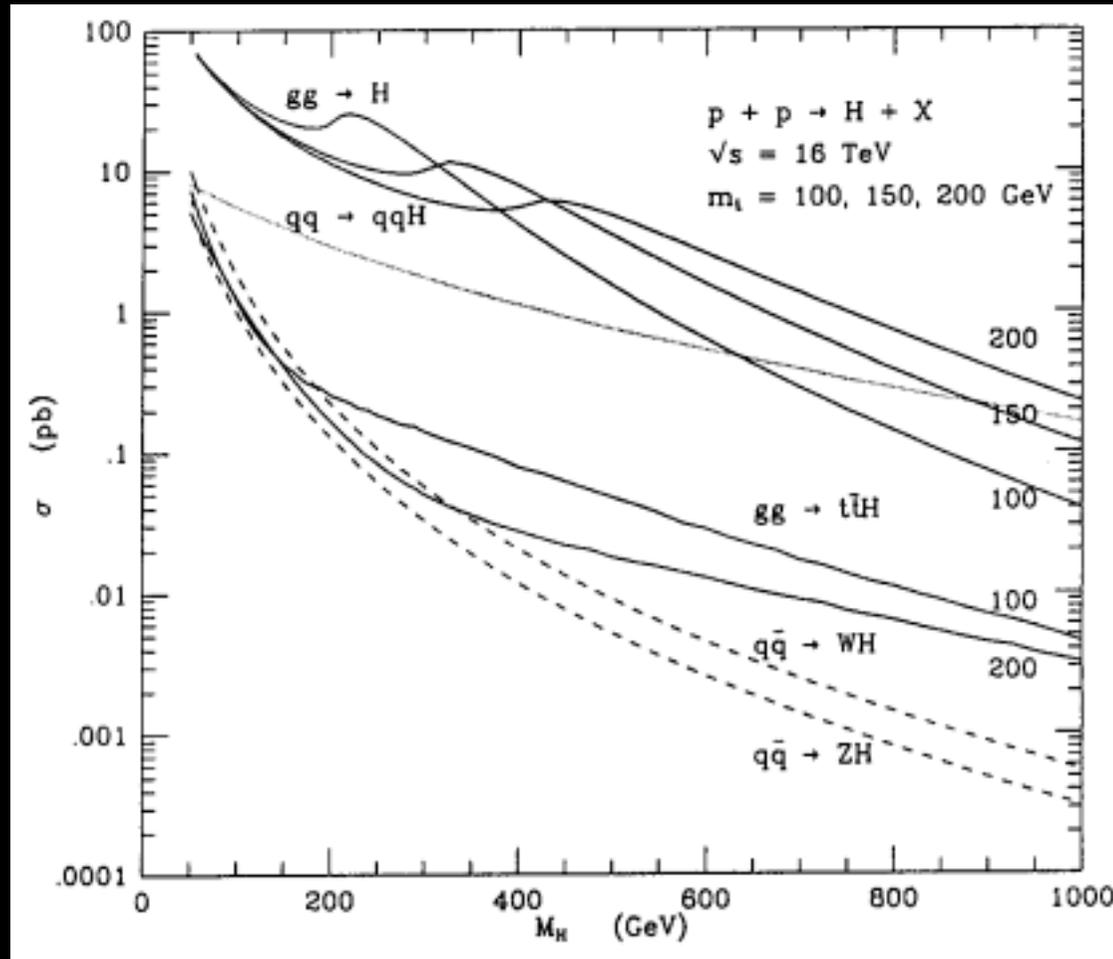
Higgs-Strahlung

Higgs-Zerfall:

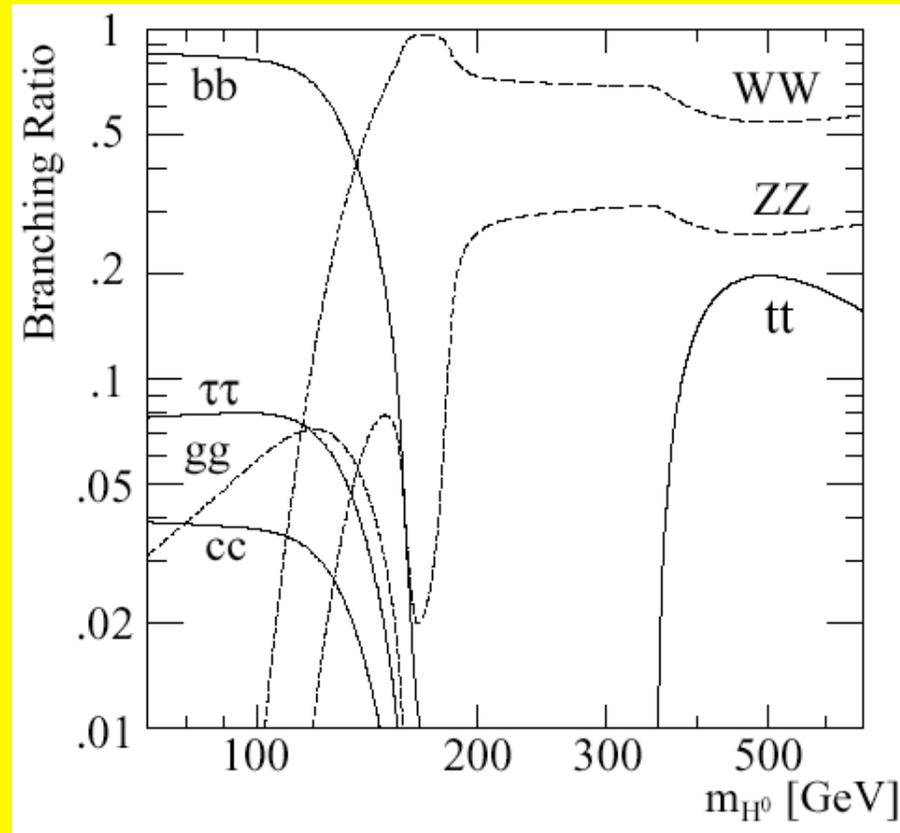
In jeweils schwerstes, kinematisch zugängliches Fermion-/Anti-Fermion oder Bosonen-Paar



Higgs-Suche in Hadronkollisionen: Produktion



Higgs-Suche in Hadronkollisionen: Zerfälle

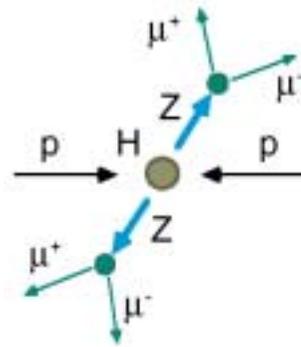


$$\text{Br}(H \rightarrow \gamma\gamma) \sim 10^{-3}$$

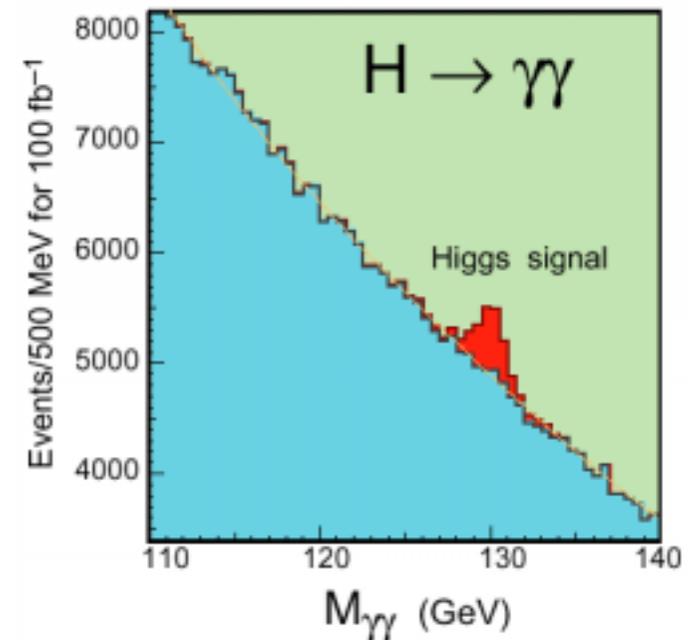
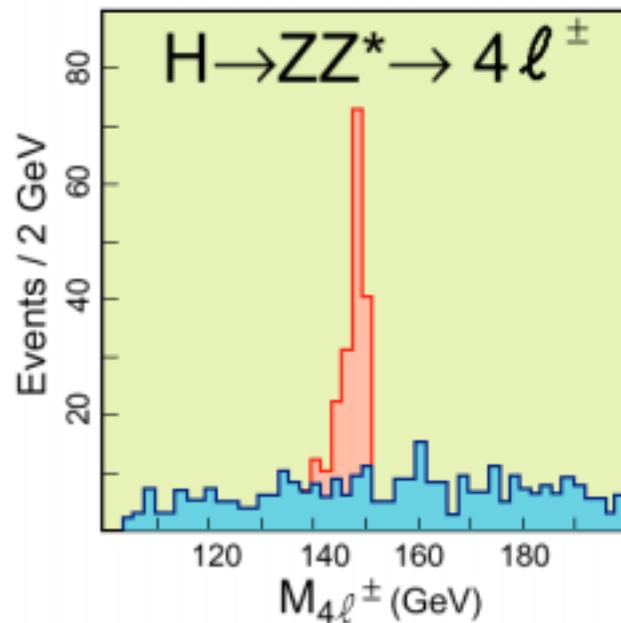
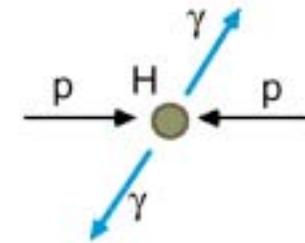
Die Suche nach dem Higgs Teilchen

Wichtige Zerfälle zum Nachweis am LHC:

- $H \rightarrow ZZ \rightarrow llll$
(der goldene Kanal)

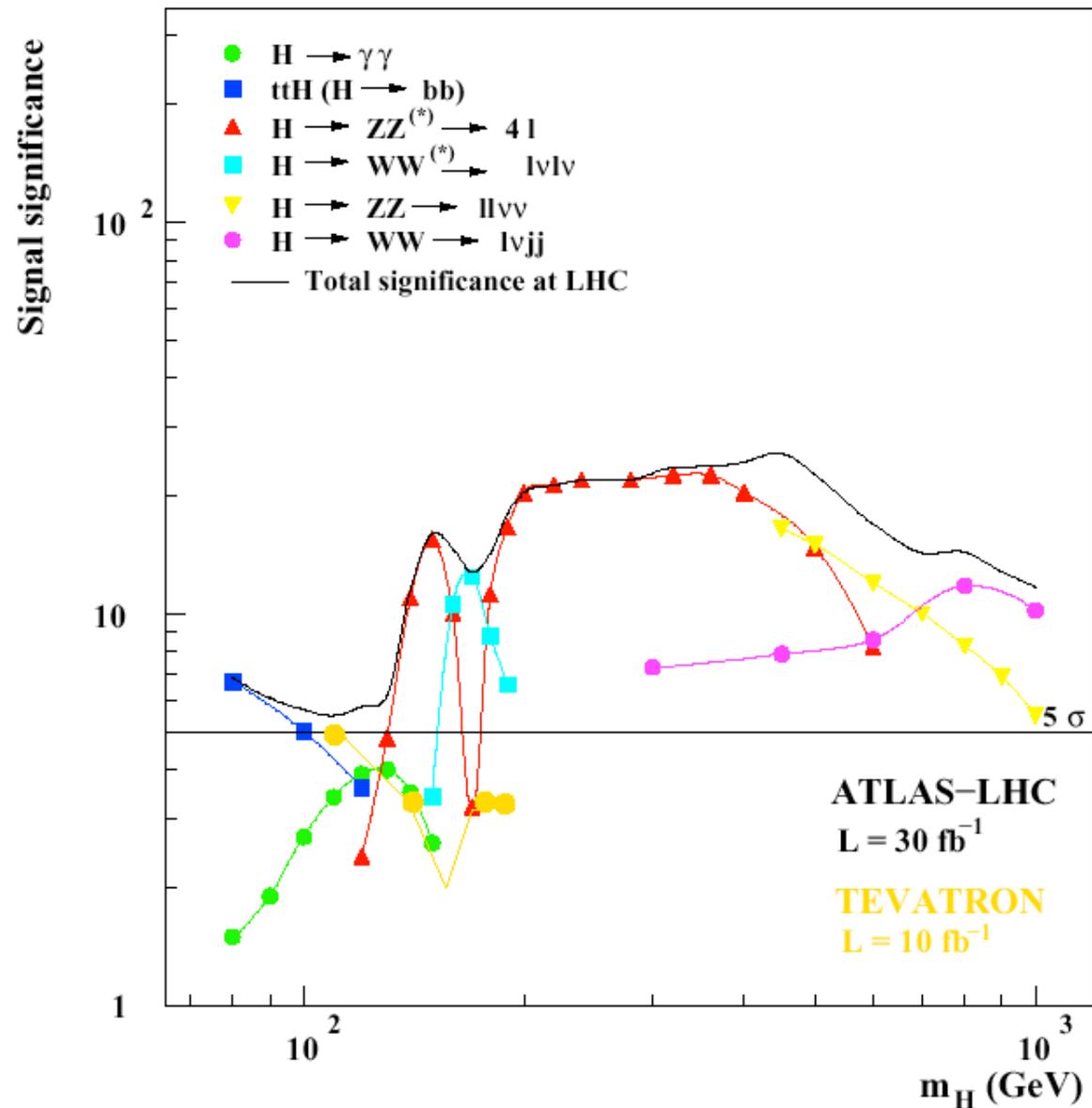


- $H \rightarrow \gamma\gamma$



Higgs-Suche am LHC

Zerfallskanäle und Entdeckungspotential am LHC:



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

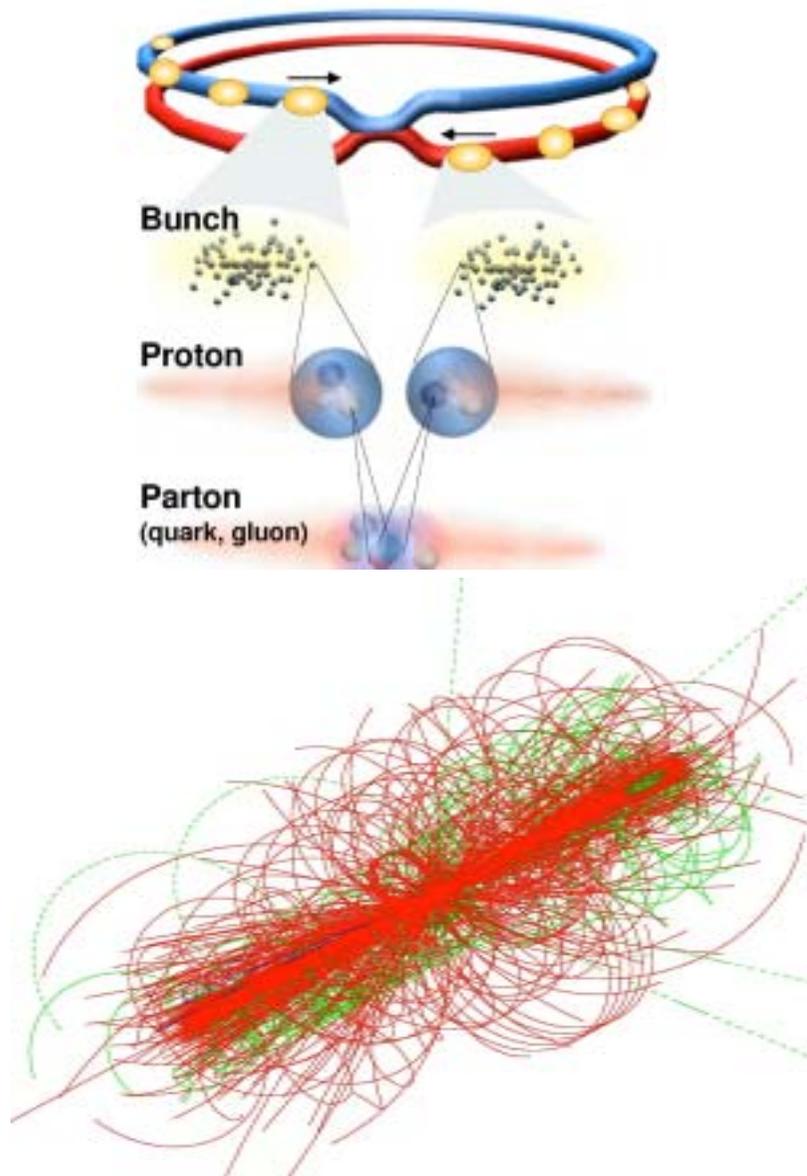
CERN / Genf



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

LHC: $p-p$ Kollisionen ab 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: $\sim 10^9 / \text{sec}$

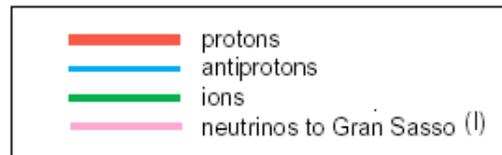
(Überlagerung von 23 pp-Wechselwirkungen während einer Strahlkreuzung)

~ 1600 geladene Teilchen im Detektor

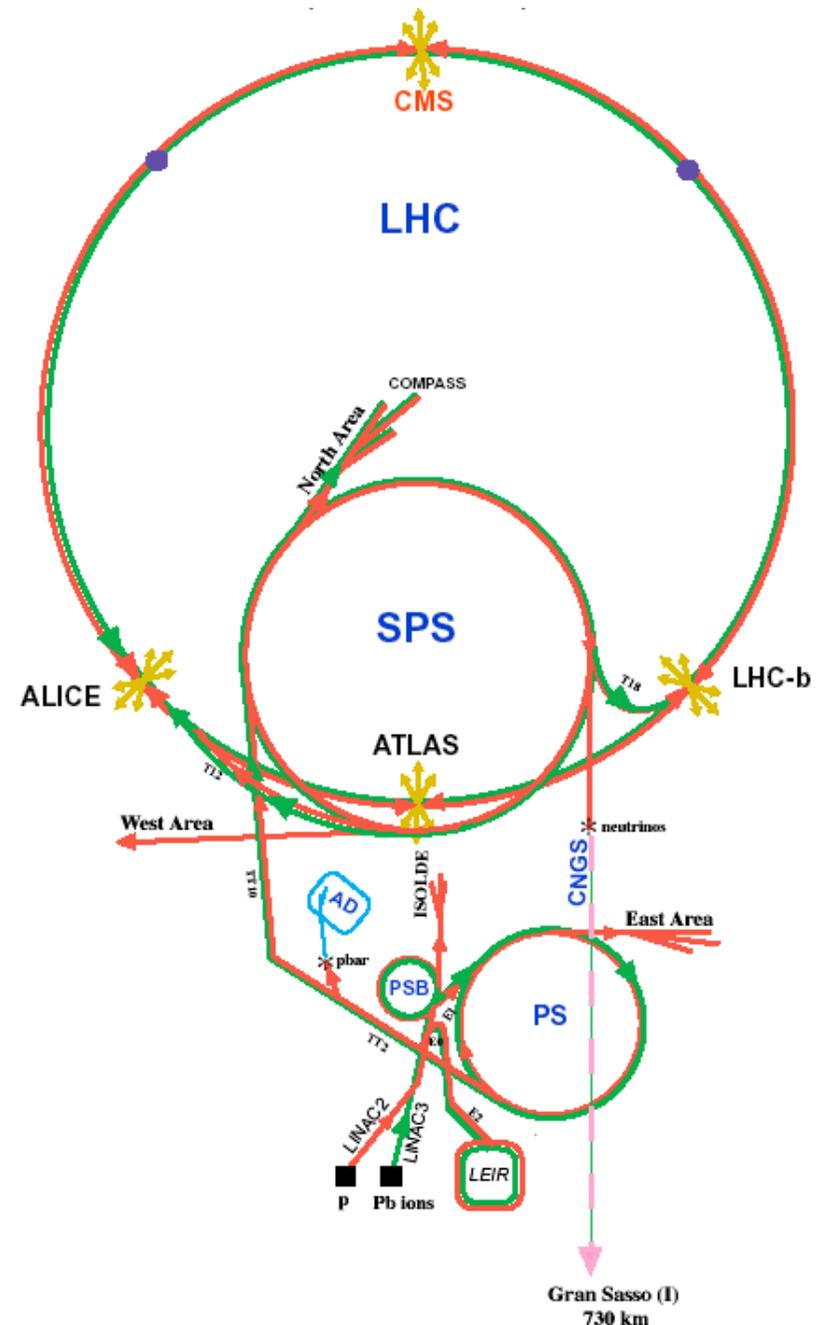
⇒ hohe Anforderungen an die Detektoren

Beschleunigersystem des CERN

(nicht skalentreu)



LHC: Large Hadron Collider
 SPS: Super Proton Synchrotron
 AD: Antiproton Decelerator
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
 PSB: Proton Synchrotron Booster
 PS: Proton Synchrotron
 LINAC: LINear ACcelerator
 LEIR: Low Energy Ion Ring
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso



General LHC Parameters Version 4.0
 (These parameters correspond to optics version 6.4 and the
 RF parameter update from the [14. LTC meeting \(15. October 2003\)](#))
 (the [Version 3 parameters can be found here](#))

Momentum at collision	7	TeV / c
Momentum at injection	450	GeV / c
Machine Circumference	26658.883	m
Revolution frequency	11.2455 (*)	kHz
Super-periodicity	1	
Lattice Type	FODO, 2-in-1	
Number of lattice cells per arc	23	
Number of insertions	8	
Number of experimental insertions	4	
Utility insertions	2 collimation 1 RF and 1 extraction	
Dipole field at 450 GeV	0.535	T
Dipole field at 7 TeV	8.33	T
Bending radius	2803.95	m
Main dipole coil inner diameter	56	mm
Distance between aperture axes (1.9 K)	194	mm
Main Dipole Length	14.3	m
Main Dipole Ends	236.5	mm
Half Cell Length	53.45	m
Phase advance per cell	90	degree
Horizontal tune at injection	64.28	
Vertical tune at injection	59.31	
Horizontal tune at collision	64.31	
Vertical tune at collision	59.32	
Maximum beta-function (cell)	177 / 180 (**)	m
Minimum beta-function (cell)	30 / 30 (**)	m

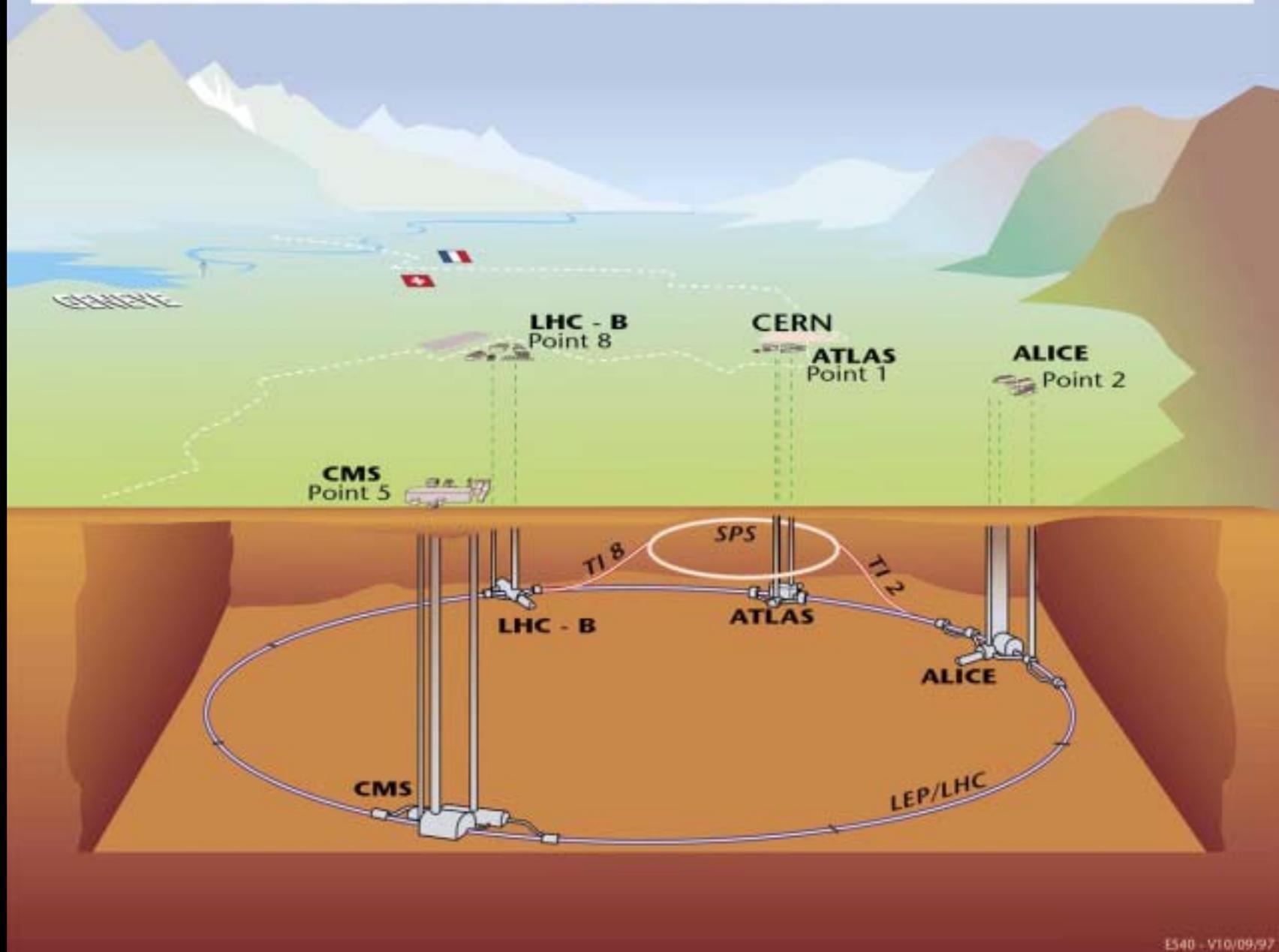
Maximum dispersion (cell)	2.018 / 0.0 (**)	m
Maximum beta-function (service insertions)	594.5 / 609.3 (**)	m
Free space for detectors	+/-23	m
Gamma Transition	55.678	
Momentum Compaction	0.0003225 (**)	
Main RF System	400.8	MHz
Harmonic number	35640	
Voltage of 400 MHz RF system at 7 TeV	16	MV
Synchrotron frequency at 7 TeV	23.0	Hz
Bucket area at 7 TeV	7.91	eV.s
Bucket half-height at 7 TeV	3.56	10 ⁻⁴
Voltage of 400 MHz RF system at 450 GeV	8	MV
Synchrotron frequency at 450 GeV (without 200 MHz RF)	63.7	Hz
Bucket area at 450 GeV	1.43	eV.s
Bucket half-height at 450 GeV	10	10 ⁻⁴
Capture RF system	200.4	MHz

Produktionsraten am LHC

• Inelastische Proton-Proton Reaktionen:	1	Milliarde / sec
• Quark -Quark/Gluon Streuungen mit großen transversalen Impulsen (> 20 GeV)	~ 100	Millionen/ sec
• b-Quark Paare	5	Millionen / sec
• top-Quark Paare	8	/ sec
• $W \rightarrow e \nu$	150	/ sec
• $Z \rightarrow e e$	15	/ sec
• Higgs (Masse = 150 GeV)	0.2	/ sec
• Gluino, Squarks (Masse = 1 TeV)	0.03	/ sec

- Interessante Physikprozesse sind selten:
 \Rightarrow hohe Strahlintensität des Beschleunigers,
 extrem gute Detektoren (Unterdrückung des Untergrundes)

Overall view of the LHC experiments.



E540 - V10/09/97

LHC Access Point 1 (ATLAS)



LHC Tunnel (2002)



LEP / LHC Tunnel (2002)



Access Shaft LHC Point 1 (ATLAS)





ATLAS Halle (04/2002)

ATLAS Halle (04/2003)



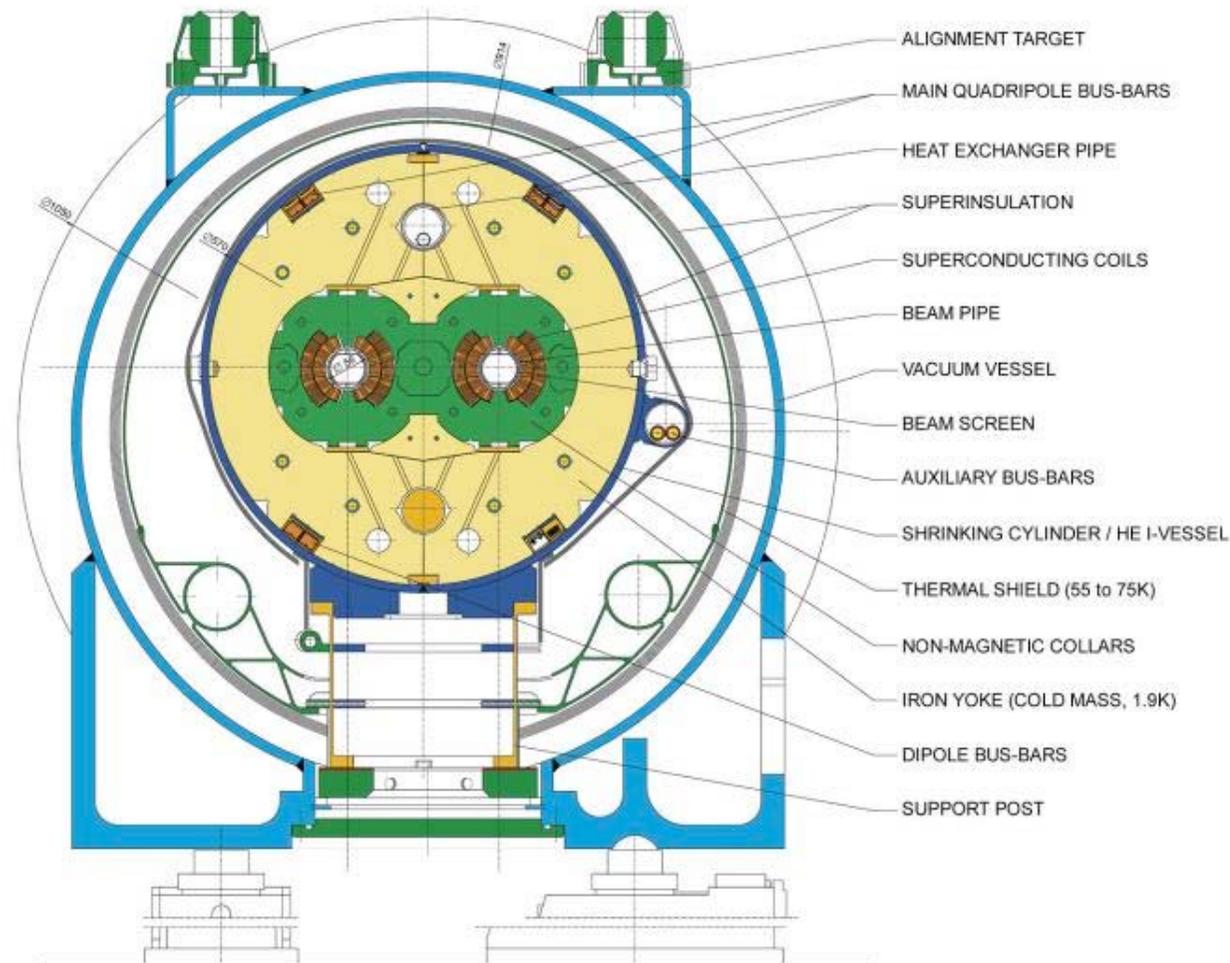
ehem. LEP-Tunnel mit LHC - Infrastruktur (Modell)



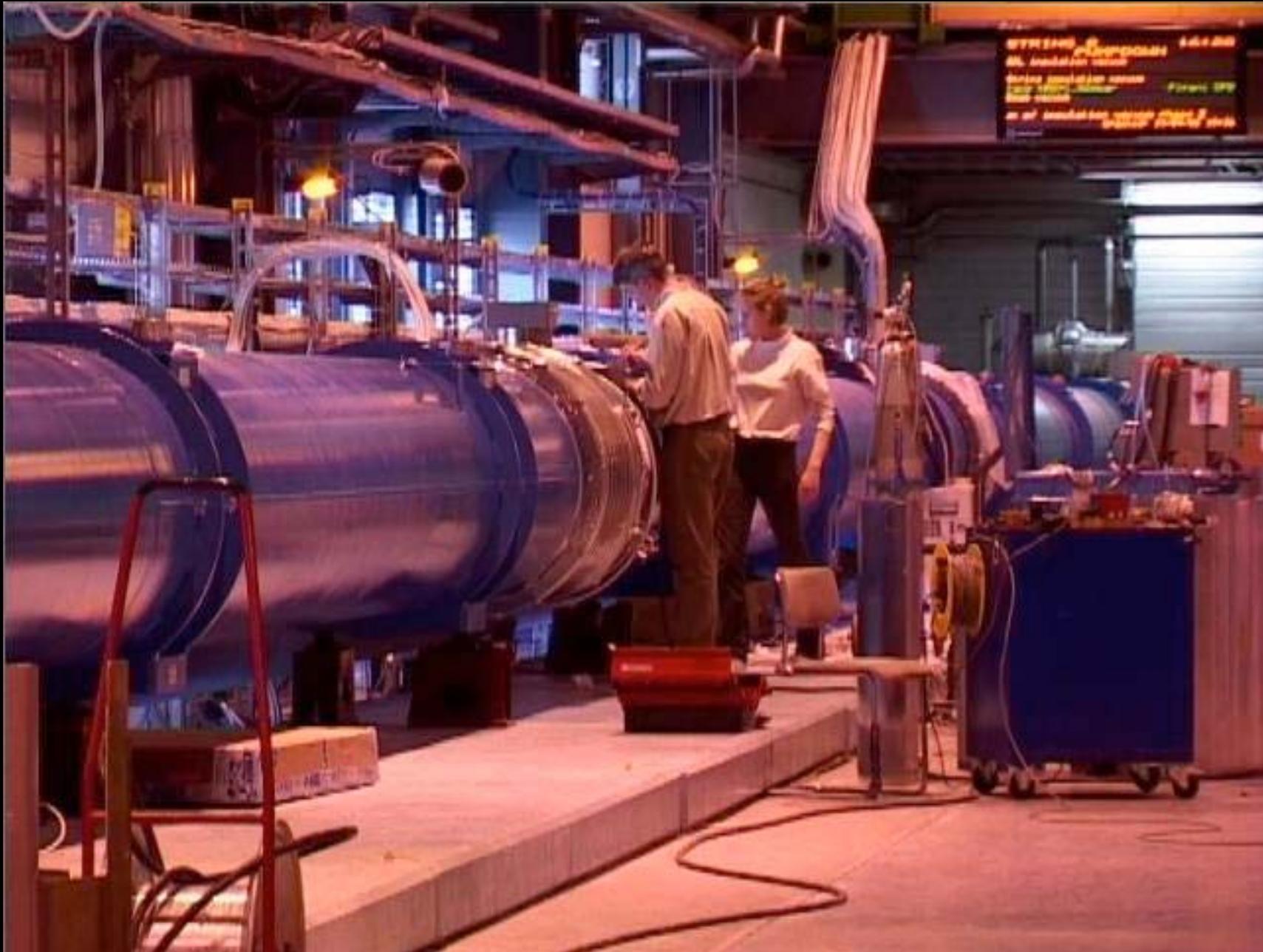
- **Supraleitende Dipolmagnete**
- größte Herausforderung: Magnetfeld von 9 Tesla
 - insgesamt 1300 Stück, jeweils 15 m lang
 - Betrieb bei einer Temperatur von 1.9 K

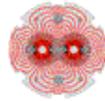
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN AC/DI/MM - HE107 - 10.04.1999

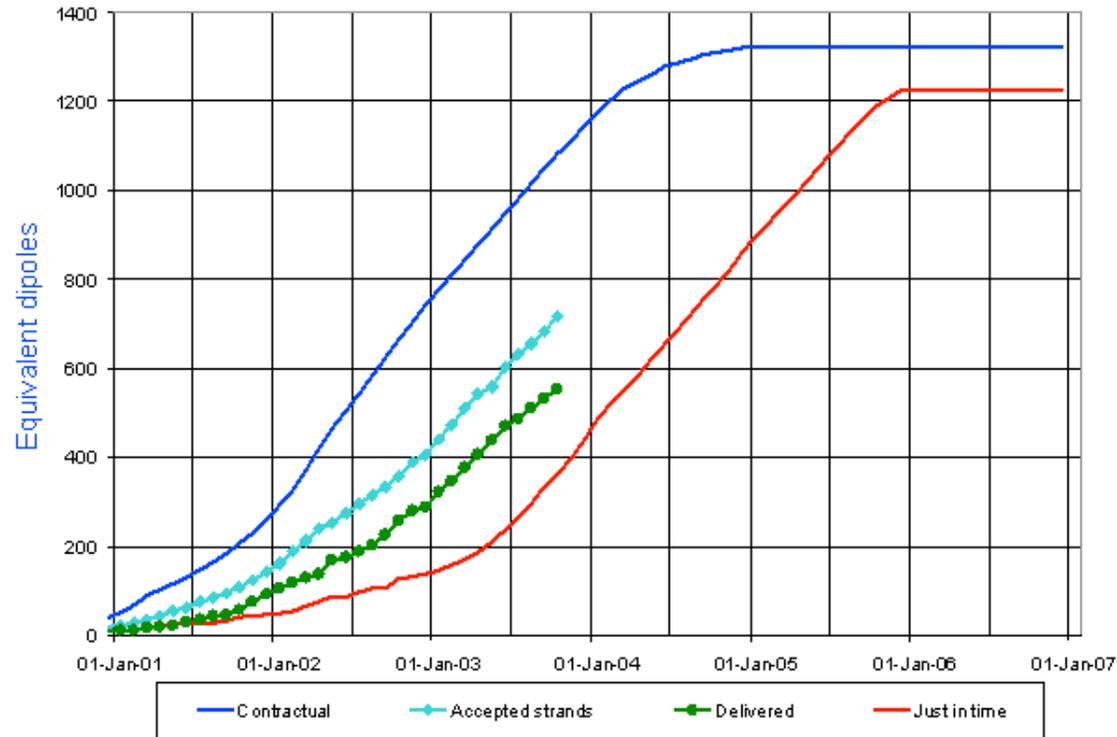






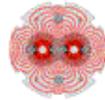


Superconducting cable 2

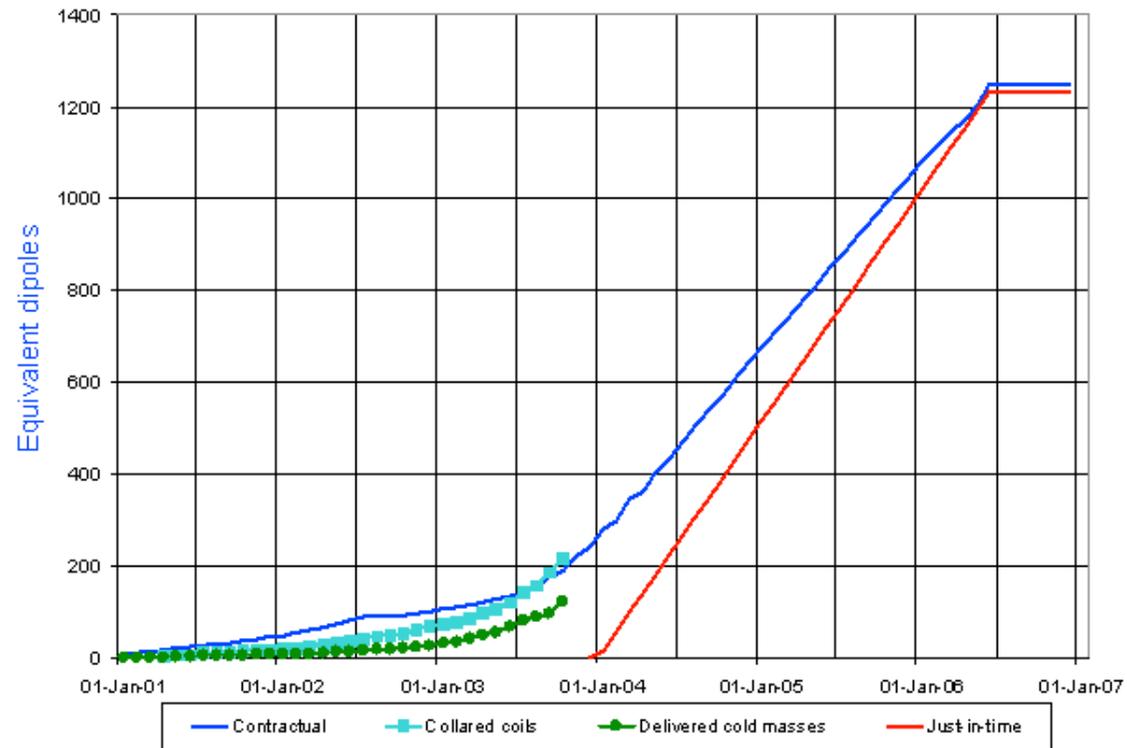


Updated 31 Oct 2003

Data provided by A. Verweij AT-MAS



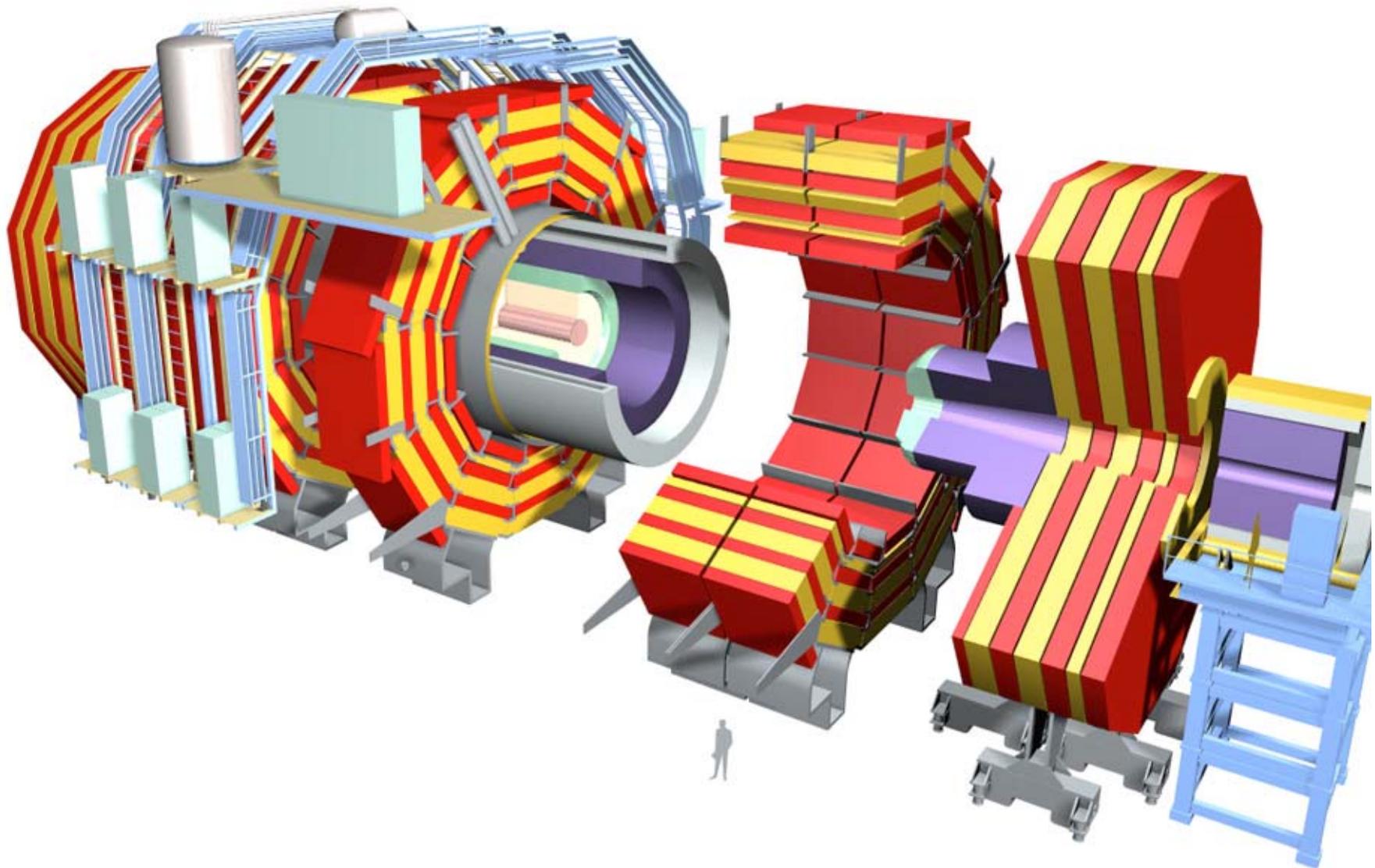
Dipole cold masses



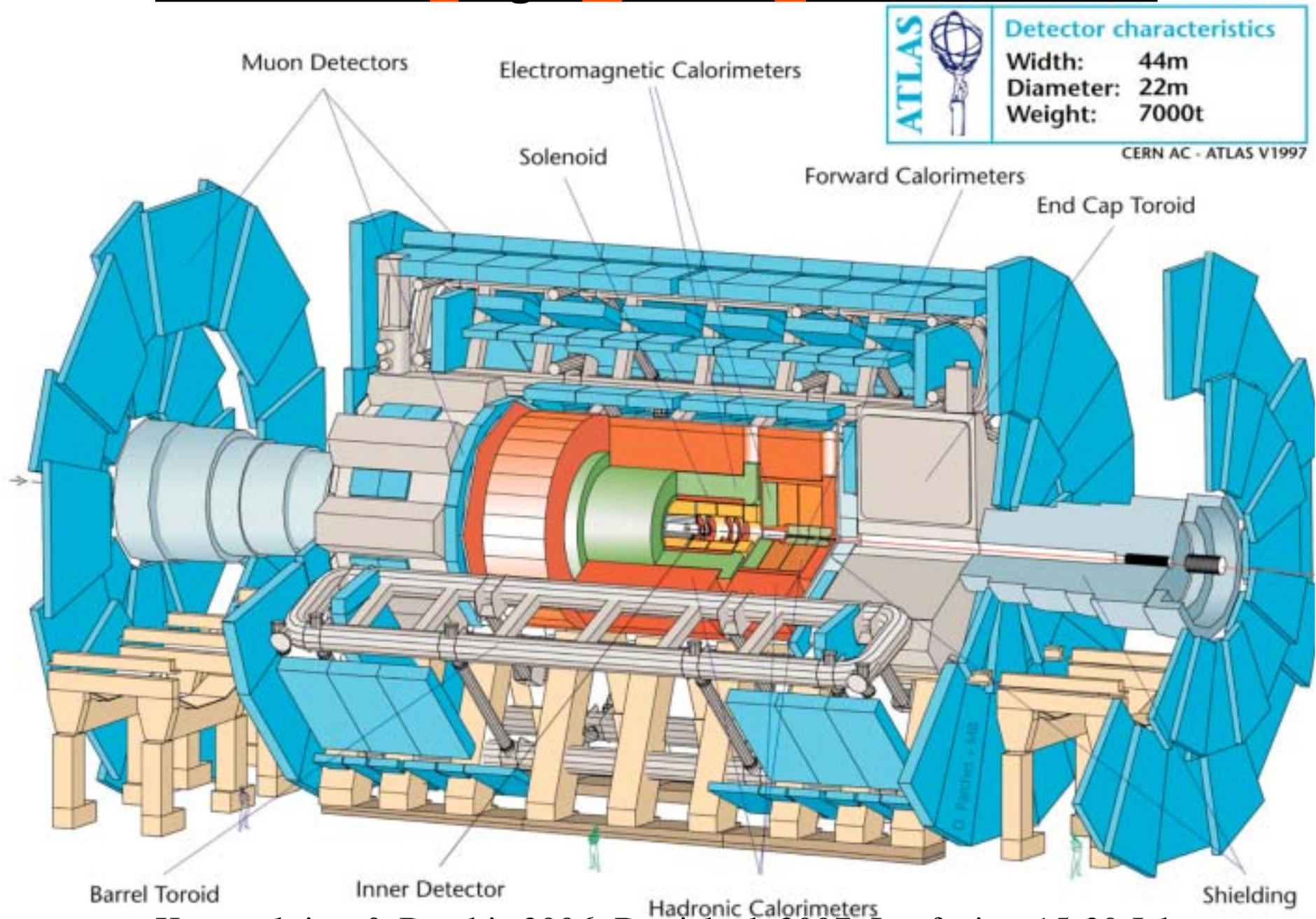
Updated 31 Oct 2003

Data provided by P. Lienard AT-MAS

Der CMS Detektor



ATLAS am Large Hadron Collider / CERN

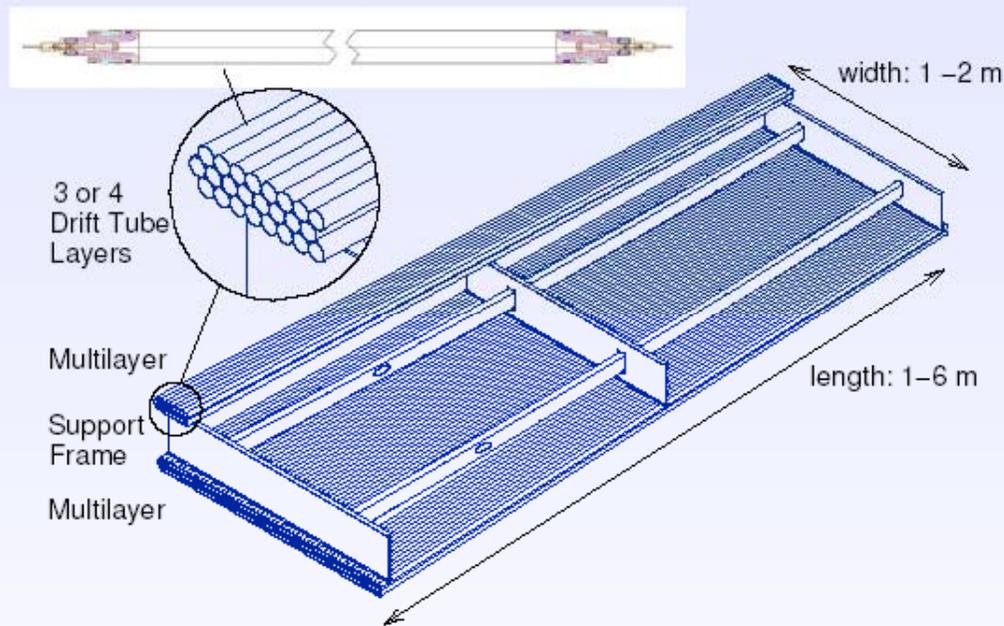


Konstruktion & Bau bis 2006, Betrieb ab 2007, Laufzeit ~ 15-20 Jahre

MDT Chamber

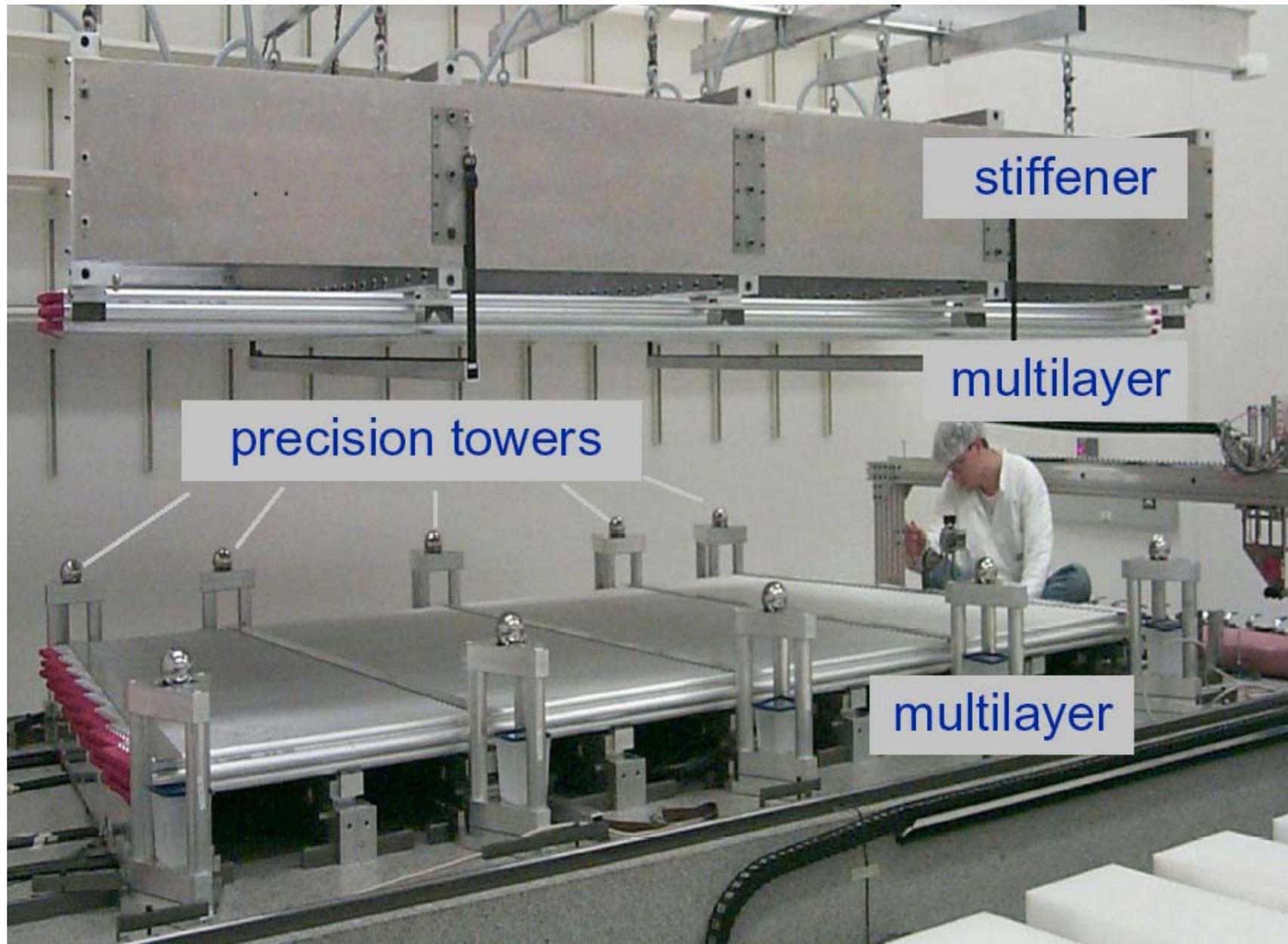
1194 MDT tracking chambers covering 5500 m²; 370 000 drift tubes

Drift Tube, Ar:CO₂ (93:7), gas gain $2 \cdot 10^4$

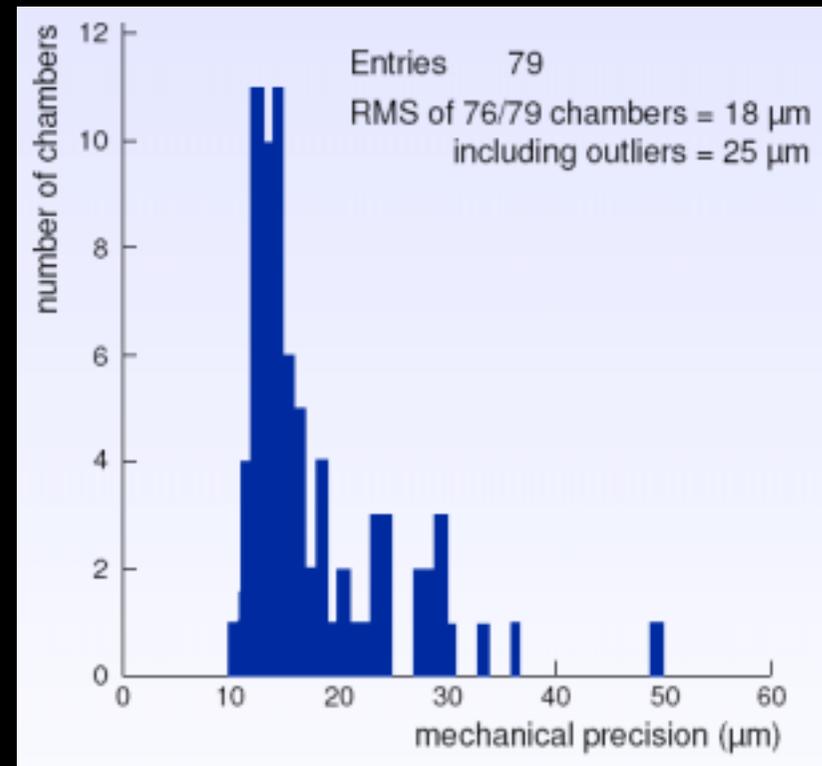
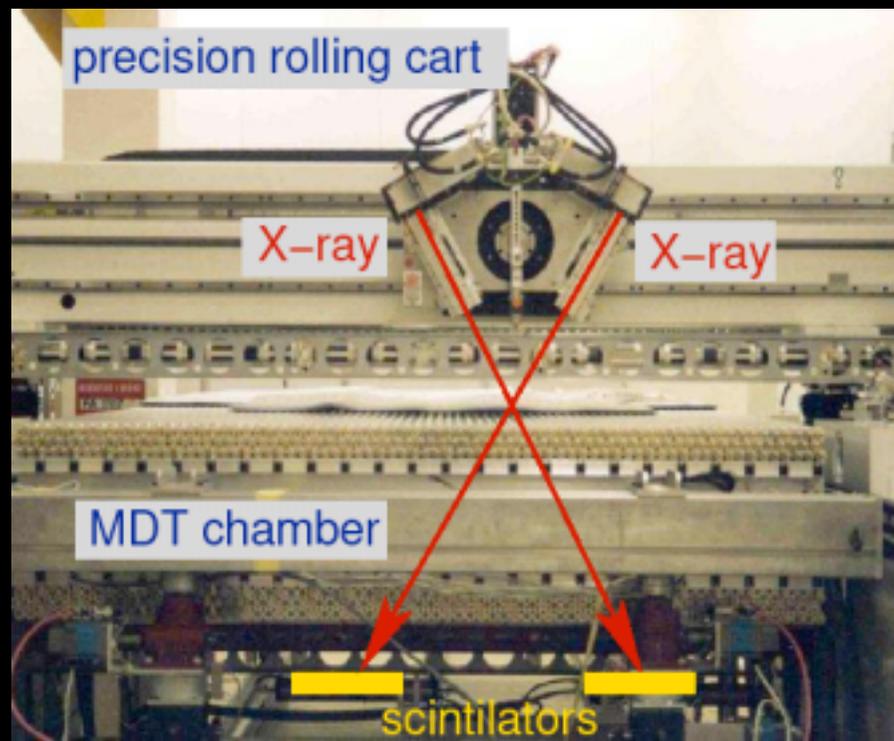


Requirements - chamber resolution of $40 \mu\text{m} \Rightarrow$

- ★ single tube resolution: better than $100 \mu\text{m}$
- ★ positioning of the sense wires within the chamber: $20 \mu\text{m rms}$



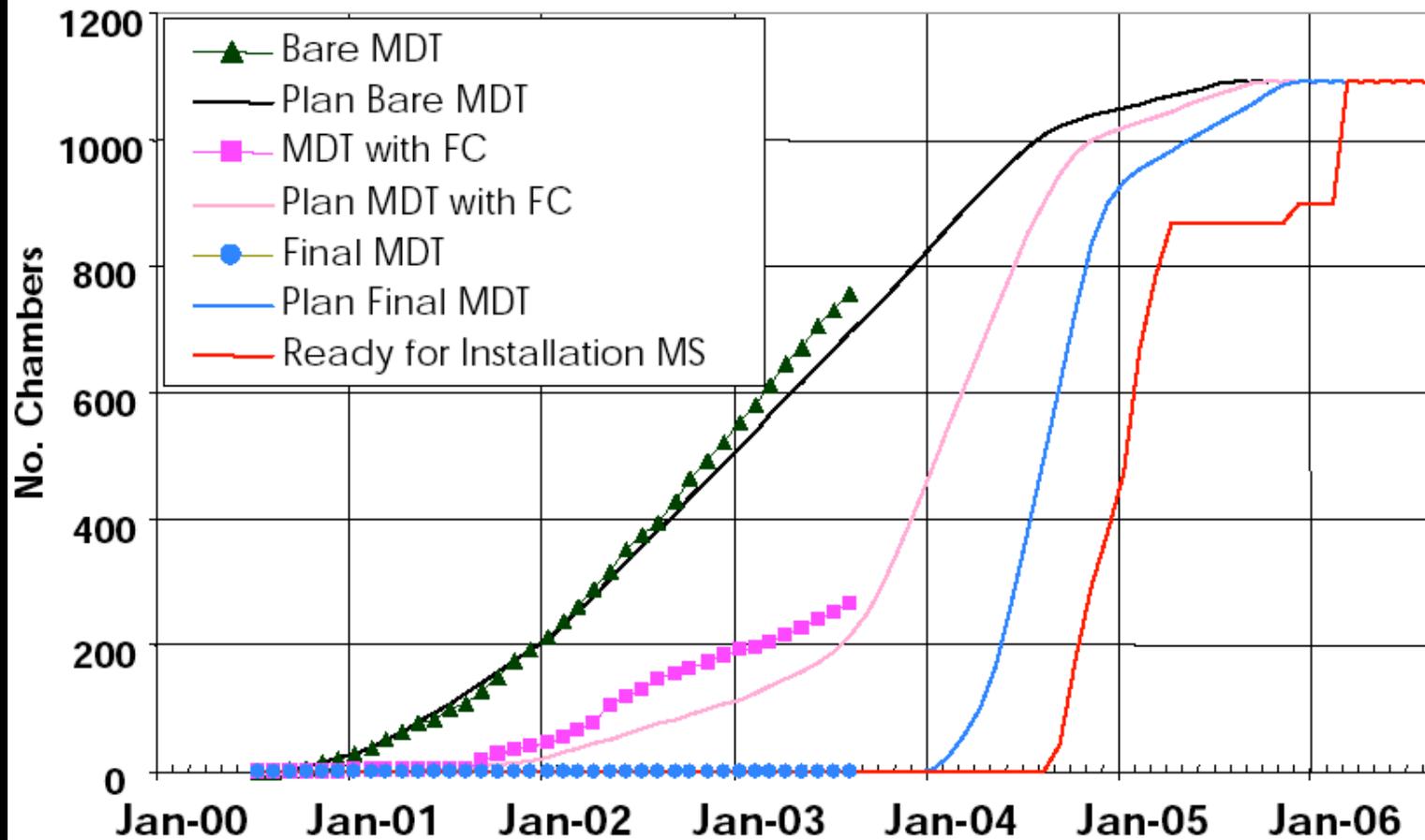
Röntgentomograph zur Vermessung der Muon-Kammern
(Genauigkeit der Drahtposition: $\pm 2 \mu\text{m}$ (stat) $\pm 2 \mu\text{m}$ (sys))



Production Status: 31.08.2003.

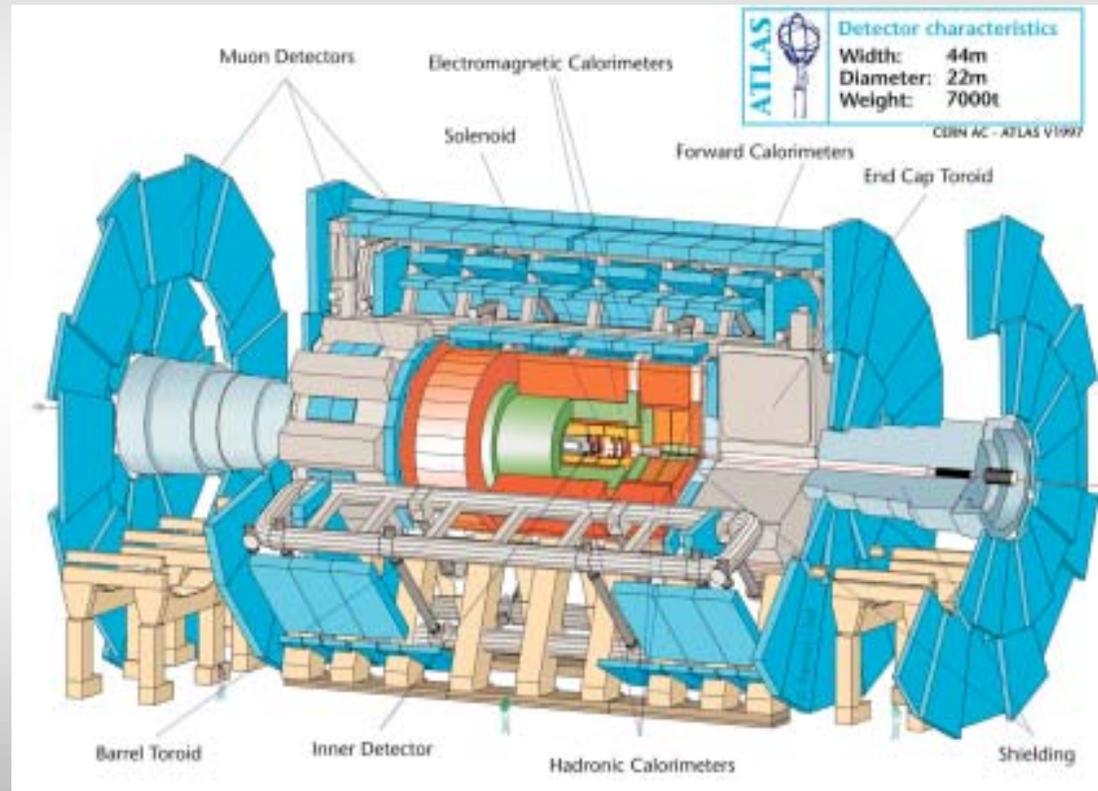
Site	Type	total/site	Bare MDT/Plan	MDT with FC/Plan
Boston	EI, EM	80	65/62	49/46
Univ.Washington	EI, EM	80	74/67	74/61
Univ.Michigan	EM	80	79/69	78/62
Protvino	EO	192	107/95	24/28
Beijing	BEE	32	0/0	0/0
Greece	BIS	128	90/87	0/0
Cosenza/Roma	BIL/BIR	64	40/41	16/6
Cosenza/Pavia	BIL/BIR	56	29/35	3/2
Dubna	BMS	84	62/52	0/0
Frascati	BML	94	76/64	13/7
Munich/Dubna	BOS/BOF	88	70/52	8/8
Freiburg	BOG	18	0/0	0/0
NIKHEF	BOL	96	63/61	2/2
All sites			755/685	267/222
TOTAL NUMBER		1092	1092	1092

MDT Chamber Production (w/o EE)

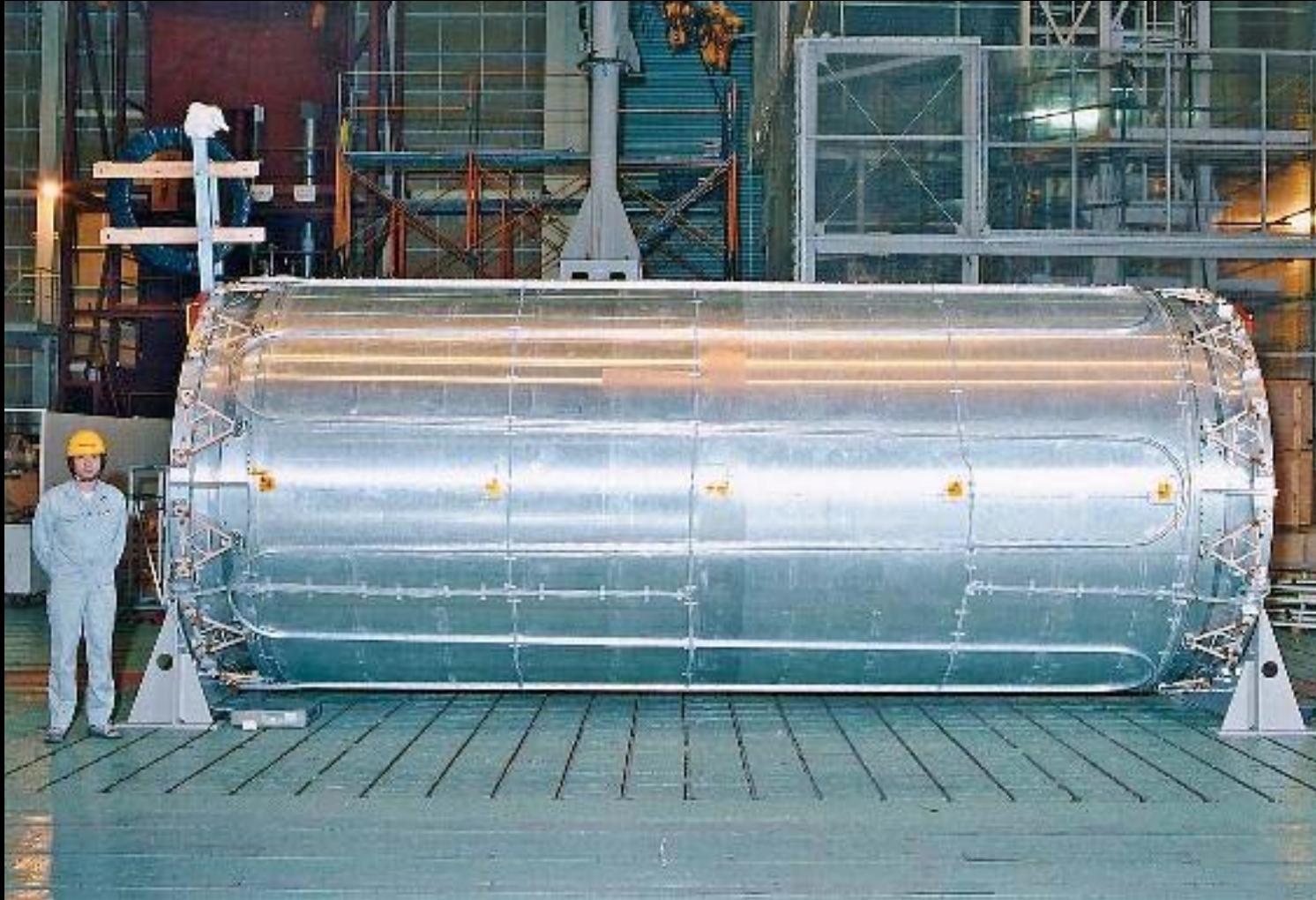


ATLAS Magnet System

- Barrel Toroid + End Cap Toroids + Central Solenoid
 - System of **4 magnets** providing the magnetic field for inner detector and muon detector
 - 20 m diameter x 25 m long
 - **8200 m³** volume
 - **170 t** superconductor
 - **700 t** cold mass
 - **1320 t** total weight
 - **90 km** conductor
 - **20.5 kA at 4.1 T**
 - **1.55 GJ** stored Energy
 - conduction cooled at **4.8 K**
 - **7 years** construction 98-05

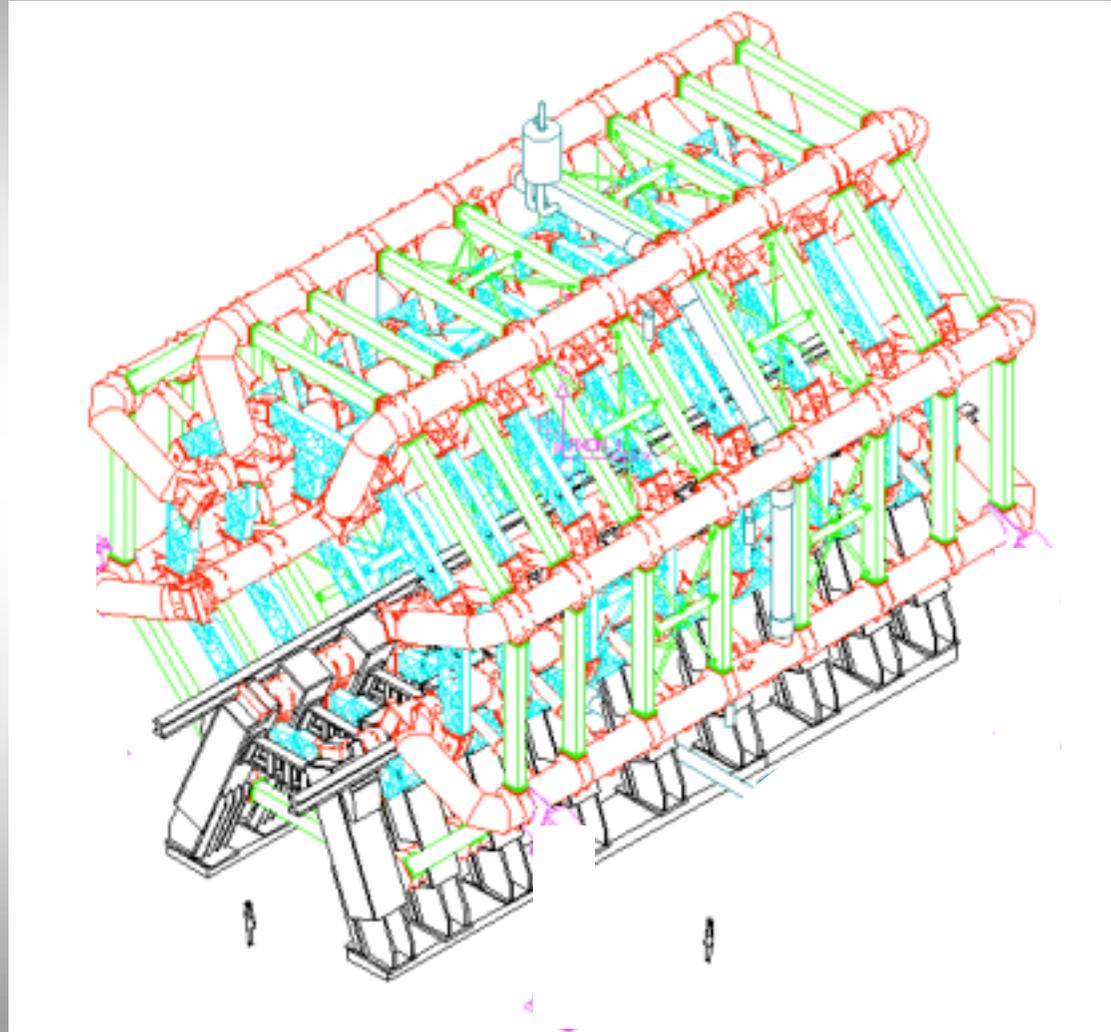


ATLAS Central Solenoid



ATLAS Barrel Toroid

- BT lay-out
 - 8 Coils
 - Assembled as toroid using the warm structure
 - Ring of voussoirs
 - Ring of struts
 - Resting on 18 feet and bedplates
 - Current & Cryogenics connected via the cryoring



Barrel Toroid, tasks completed



**56 km
Superconductor**



**16 Double
Pancakes**



**8 Coil
casings**



**8 Vacuum
Vessels**

Barrel Toroid Integration Overview



Barrel Toroid installation components

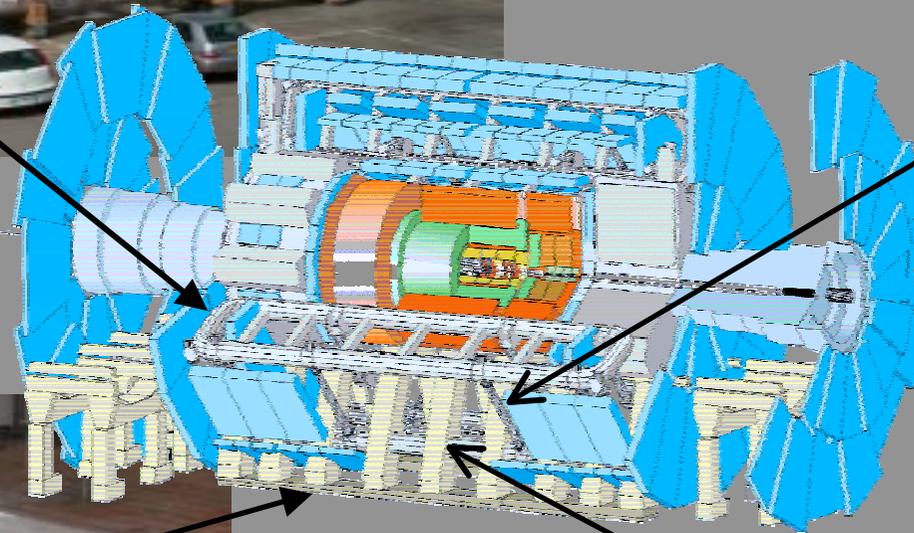


coils

struts



bedplates



feet

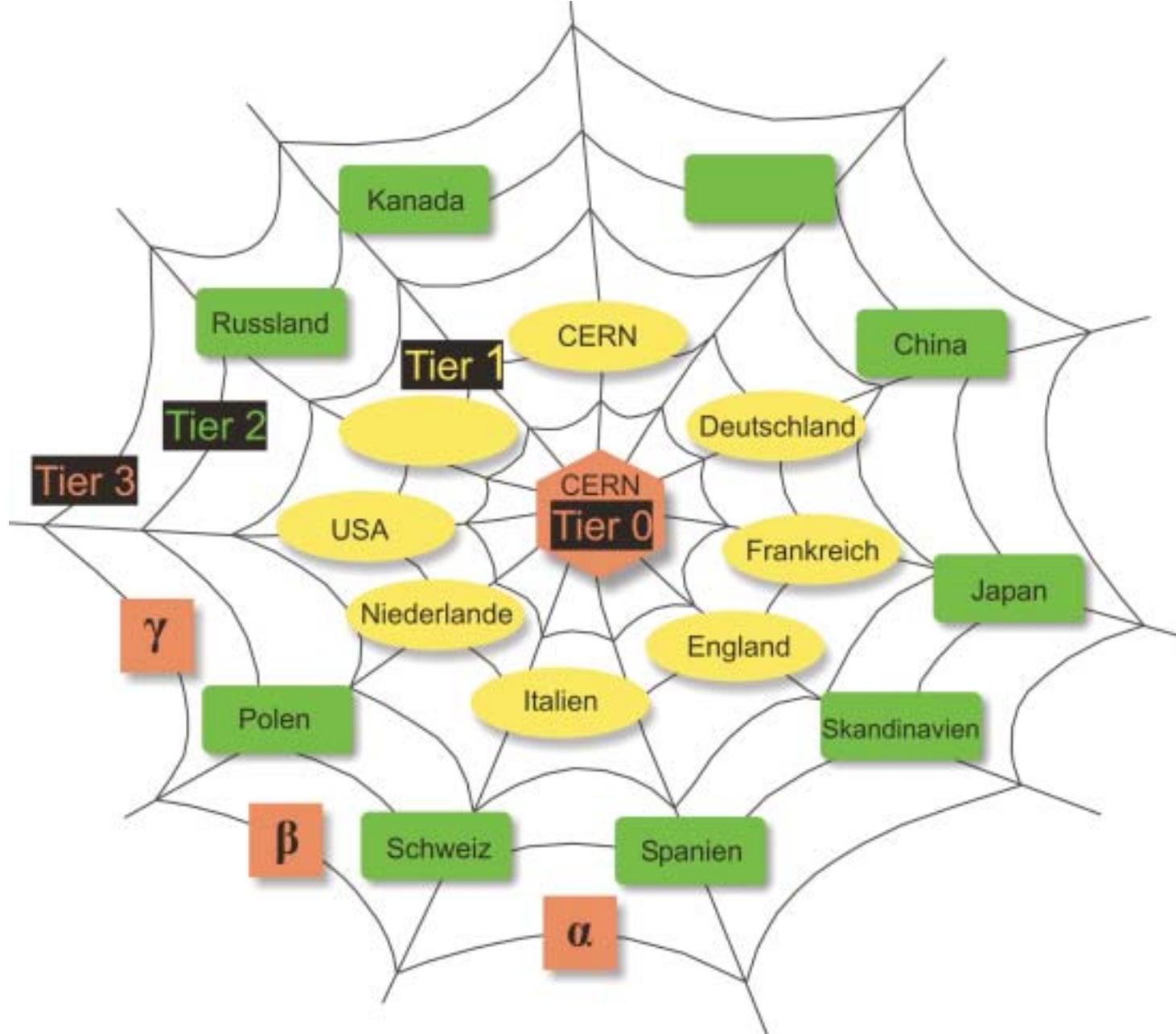
LHC Data and Computing

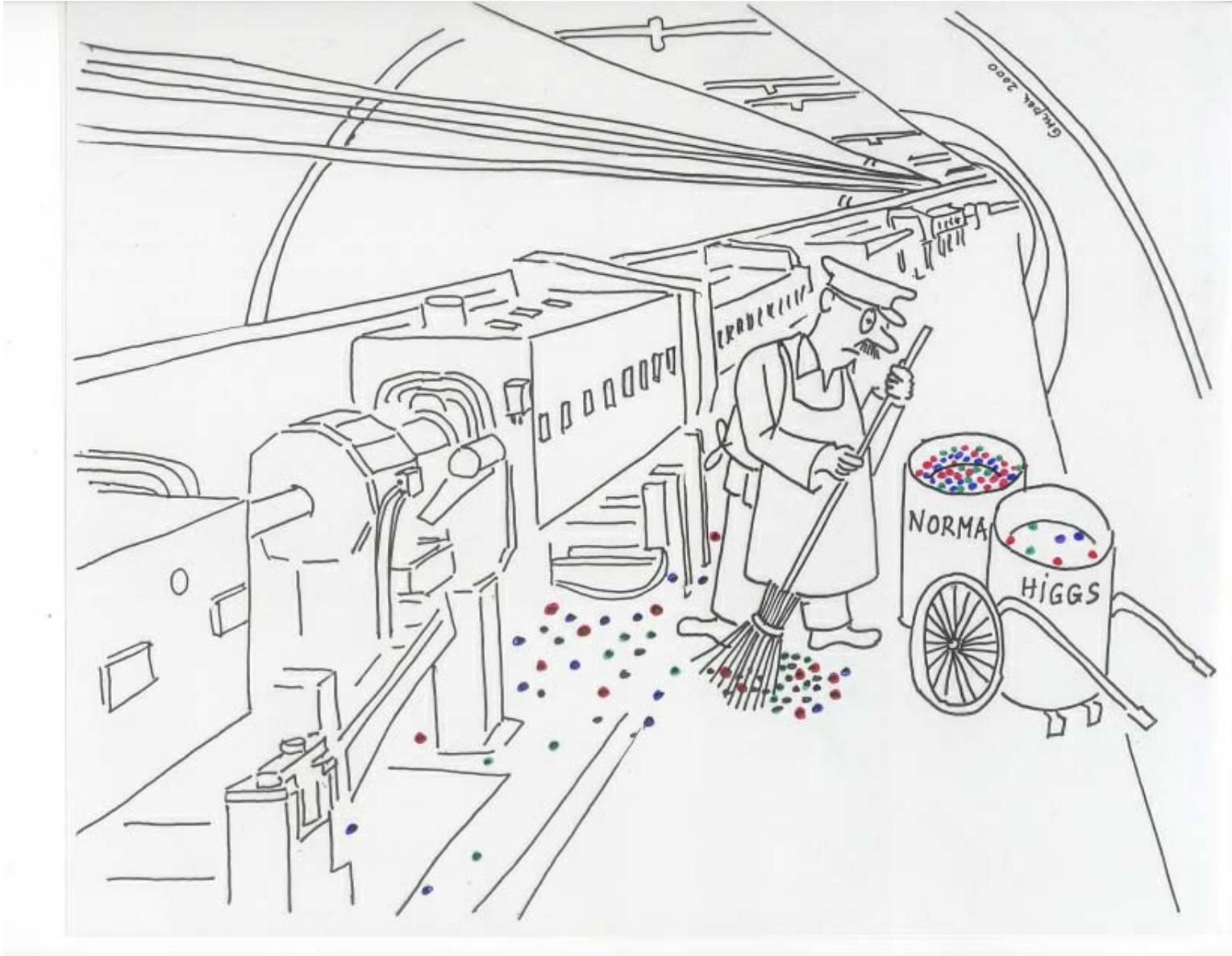
the challenge:

- 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 a`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





ATLAS Integration Movie

(<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/TCOORD/Activities/TcOffice/Scheduling/Installation/ATLASinstallation.htm>)1

The End