

Hadronen-Beschleuniger: Tevatron und LHC

- Grundlagen der Teilchenbeschleunigung
- Tevatron:
 - Antiprotonen
 - stochastische Kühlung
- Der Large Hadron Collider:
 - Visionen und Herausforderung
 - supraleitende Magnete
 - Status und Pläne

Das Standardmodell der Teilchenphysik...

- ... beschreibt erfolgreich und präzise alle bekannten Teilchen und Kräfte (LEP, HERA, Tevatron)

Elementare Teilchen				Elementare Kräfte		relative Stärke
	Generation			Austauschboson		
	1	2	3			
Quarks	u	c	t	Stark	g	1
	d	s	b		El.-magn.	
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ	Schwach	W^\pm, Z^0	10^{-14}
	e	μ	τ		Gravitation	

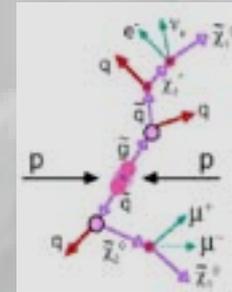
... kann jedoch nicht die ultimative Theorie sein!

es lässt viele fundamentale Fragen offen:

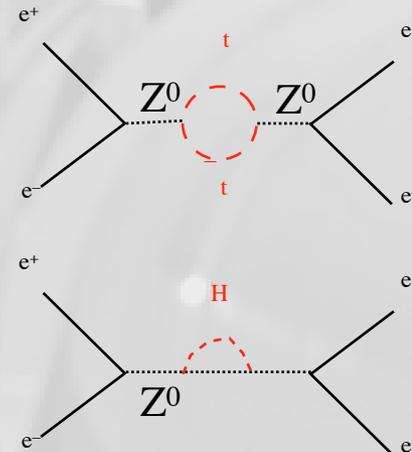
- Erzeugung der Teilchenmassen (Higgs-Boson?)
- bisher noch keine Quantenfeldtheorie der Gravitation
- Vereinheitlichung aller Kräfte (GUT; TOE) ?
- wo ist die Antimaterie geblieben ? („warum gibt es uns?“)
- was sind die „Dunkle“ Materie und Energie, die 95% unseres Universums ausmachen?

es gibt 2 prinzipielle Möglichkeiten, um nach Physik jenseit des Standardmodells zu suchen:

- direkte Produktion neuer Teilchen in **höchstenergetischen** Kollisionen
(diese Vorlesungsreihe)



- indirekte Evidenz für neue Phänomene in **Hochpräzisions**-Experimenten
(durch virtuelle „Schleifen“)



12

Kurze Frühgeschichte der Beschleunigerphysik

- 1928: R. Wideroe berichtet über ersten Betrieb eines Linearbeschleunigers (Ka- und Na-Ionen)
- 1931: Van de Graaff konstruiert ersten Hochspannungsgenerator
- 1932: Lawrence und Livingston präsentieren ersten Protonen-Strahl vom 1.2 MeV Zyklotron
- 1939: Hansen, Varian und Varian erfinden Klystron
- 1941: Kerst und Serber stellen das erste funktionierende Betatron vor; Touschek und Wideroe entwickeln das Prinzip von Ringbeschleunigern
- 1947 Alvarez entwickelt ersten Proton-Linearbeschleuniger
- 1950 Christofilos formuliert Konzept der Starken Fokussierung



E.O. Lawrence

Grundlagen der Teilchenbeschleunigung

Differentialform	Integralform
$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_{\text{frei}}$	$\oint \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q$
$\operatorname{div} \vec{B} = 0$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$
$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$
$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I + \frac{d}{dt} \int \vec{D} \cdot d\vec{A}$

Maxwell-
Gleichungen

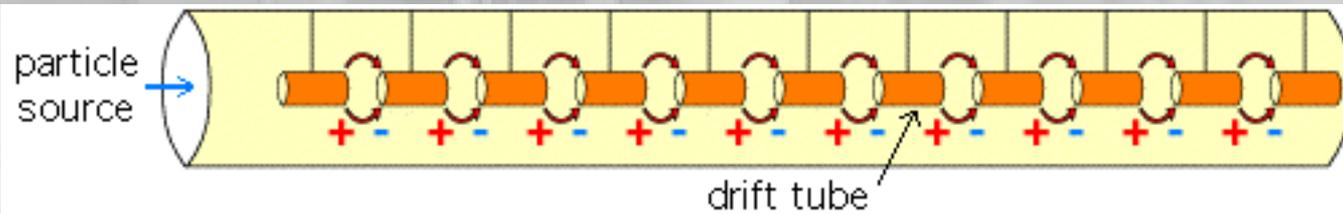
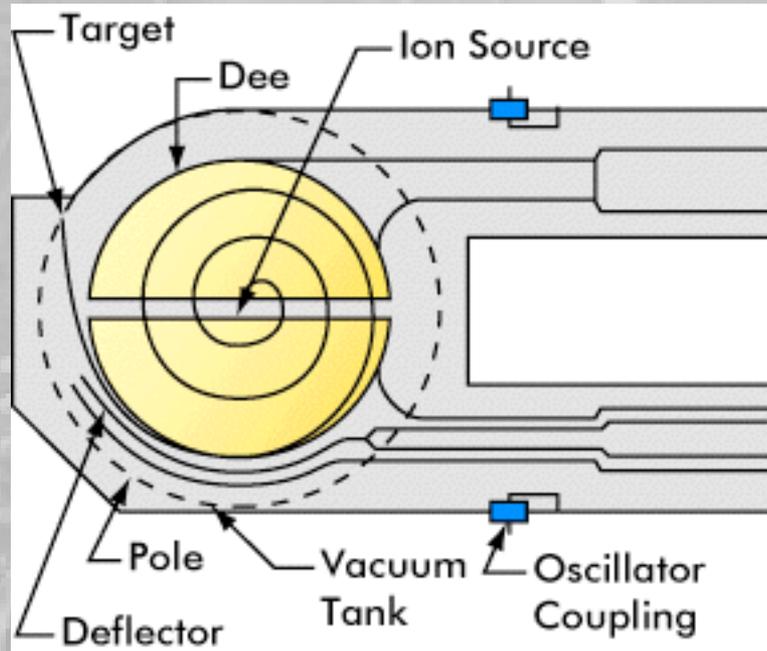
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{Lorentzkraft}$$

n.b.: Lorentzkraft bei zeitabhängigen Feldern ist keine konservative Kraft, i.e.

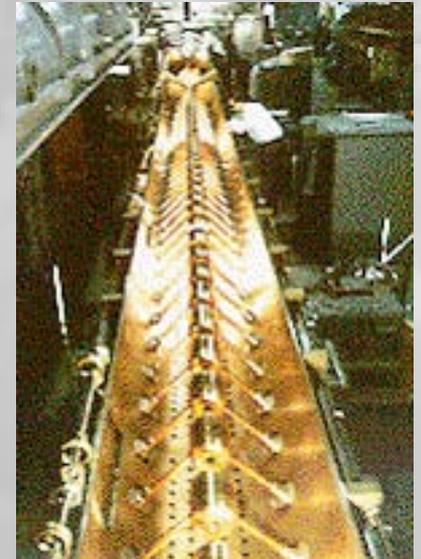
$$\oint \vec{F} \, d\vec{s} \neq 0$$

Grundlagen der Teilchenbeschleunigung

Zyklotron

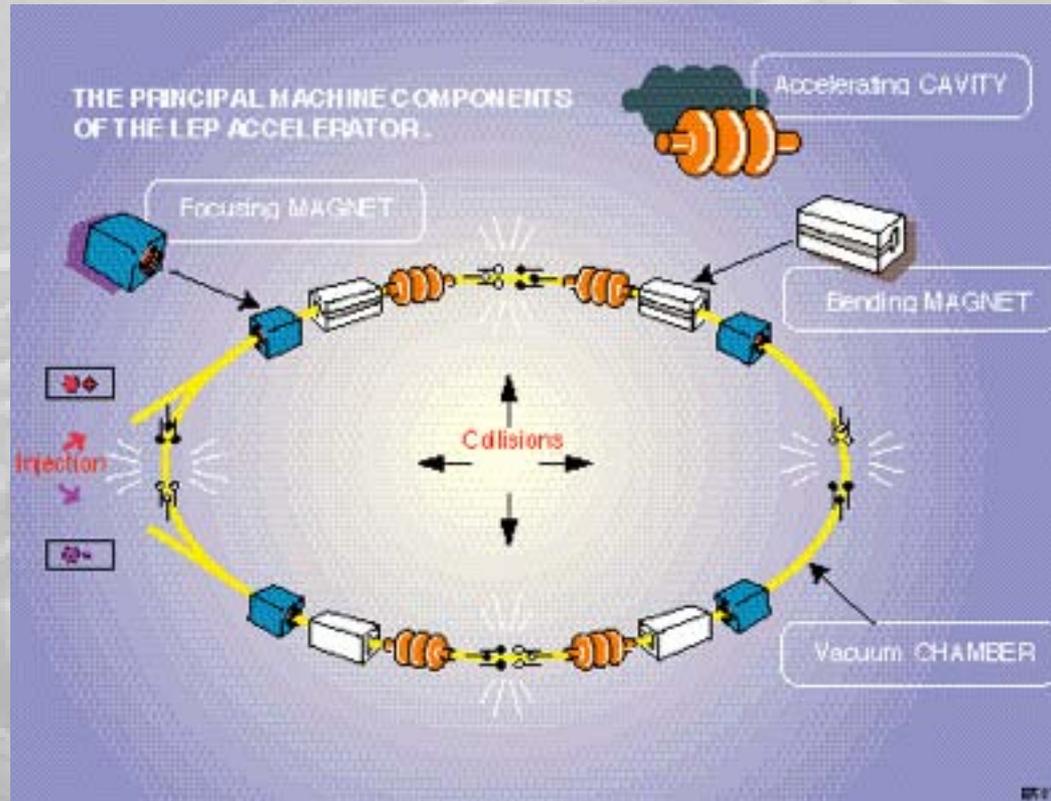


Linearbeschleuniger



Grundlagen der Teilchenbeschleunigung

Kreisförmige Beschleuniger



- Vorteile:
- Magnetfeld nur lokal um Strahlführung (ökonomischer als Zyklotron)
 - Mehrfachbenutzung der Beschleunigerstrecken
 - Höhere effektive Schwerpunktsenergie im "Collider"-Modus
 - Effektivere Ausnutzung der Teilchen (Speicherring)
- Nachteile:
- Energieverlust durch Bremsstrahlung (Synchrotronstrahlung)

Grundlagen der Teilchenbeschleunigung

Fixed Target versus Colliding Beams

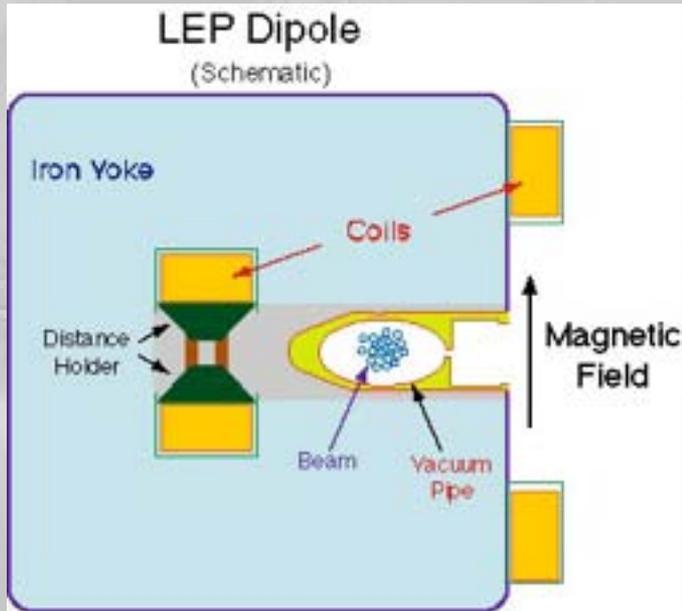
für Protonen ($m_p c^2 \sim 1 \text{ GeV}$):



$$E_{\text{cm}} = \sqrt{2(\gamma + 1)}m_p c^2$$

$$E_{\text{cm}} = 2E = 2\gamma m_p c^2$$

Funktionsteile von Kreisbeschleunigern:



Dipol
(Kreisbahn)

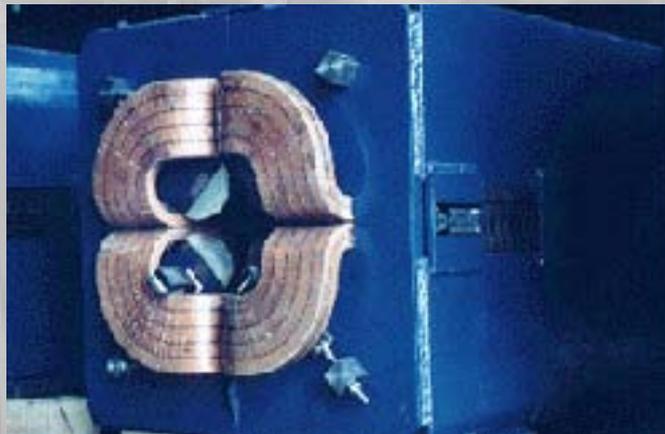


Kavität
(Beschleunigung)

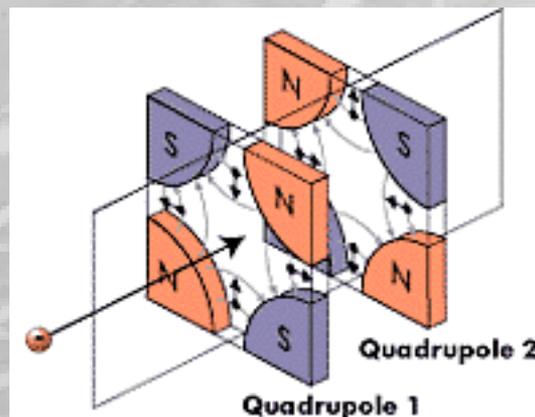


Tunnel, Strahlröhre,
Vakuumpumpen, Sextupol,
...

Quadrupol
(Fokussierung)



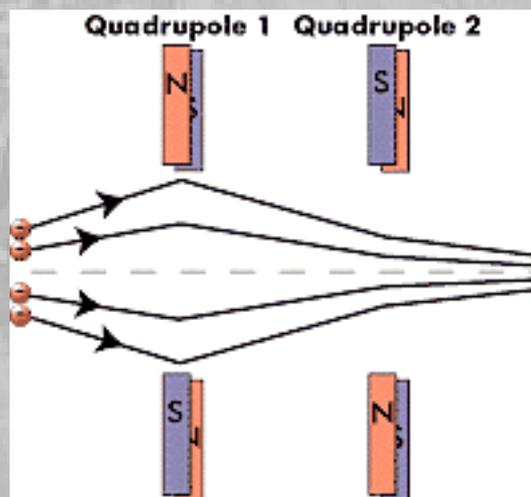
Strong Focussing



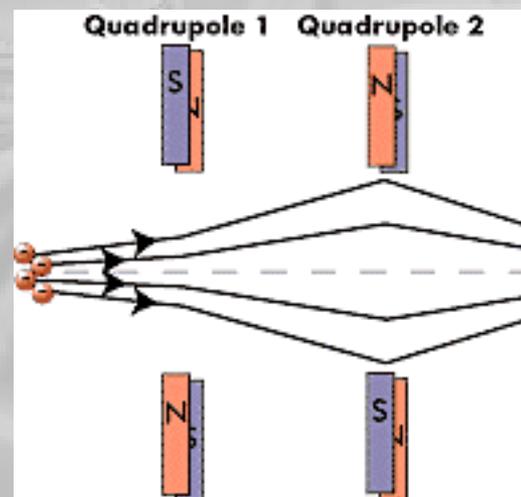
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

$$= \frac{f_1 + f_2 - d}{f_1 f_2}$$

Seitenansicht



Ansicht
von oben



Zwei gekreuzte Quadrupole im Abstand d kleiner als deren doppelte Fokallänge wirken insgesamt fokussierend (in beiden Ebenen).

Collider Parameter

Ereignis-Rate R:

$$R = L \cdot \sigma$$

σ : Wirkungsquerschnitt

Luminosität L:

$$L = f \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x \sigma_y}$$

f: Kollisionsfrequenz

n_i : Anzahl Teilchen in Paket i

σ_x : horizontale Strahlgröße

σ_y : vertikale Strahlgröße

Strahlgröße:

- transversale Emittanz ϵ (Strahlqualität)
- Amplitudenfunktion β (Strahloptik)

$$\epsilon = \pi\sigma\sigma' \quad \sigma: \text{transversale Versetzung}$$

$$\beta = \sigma/\sigma' \quad \sigma': \text{Winkel bzgl. Strahlachse}$$

β^* : Wert der β -function am WW-Punkt.

$$\text{Luminosität L: } \Rightarrow L = f \frac{n_1 n_2}{4\sqrt{\epsilon_x \beta_x^* \epsilon_y \beta_y^*}}$$

Grundlagen der Teilchenbeschleunigung

Synchrotronstrahlung:

Abstrahlungsleistung eines relativistischen Teilchens bei zentripetaler Beschleunigung:

$$P = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2 a^2}{c^3} \gamma^4$$

$$a = v^2 / \rho$$

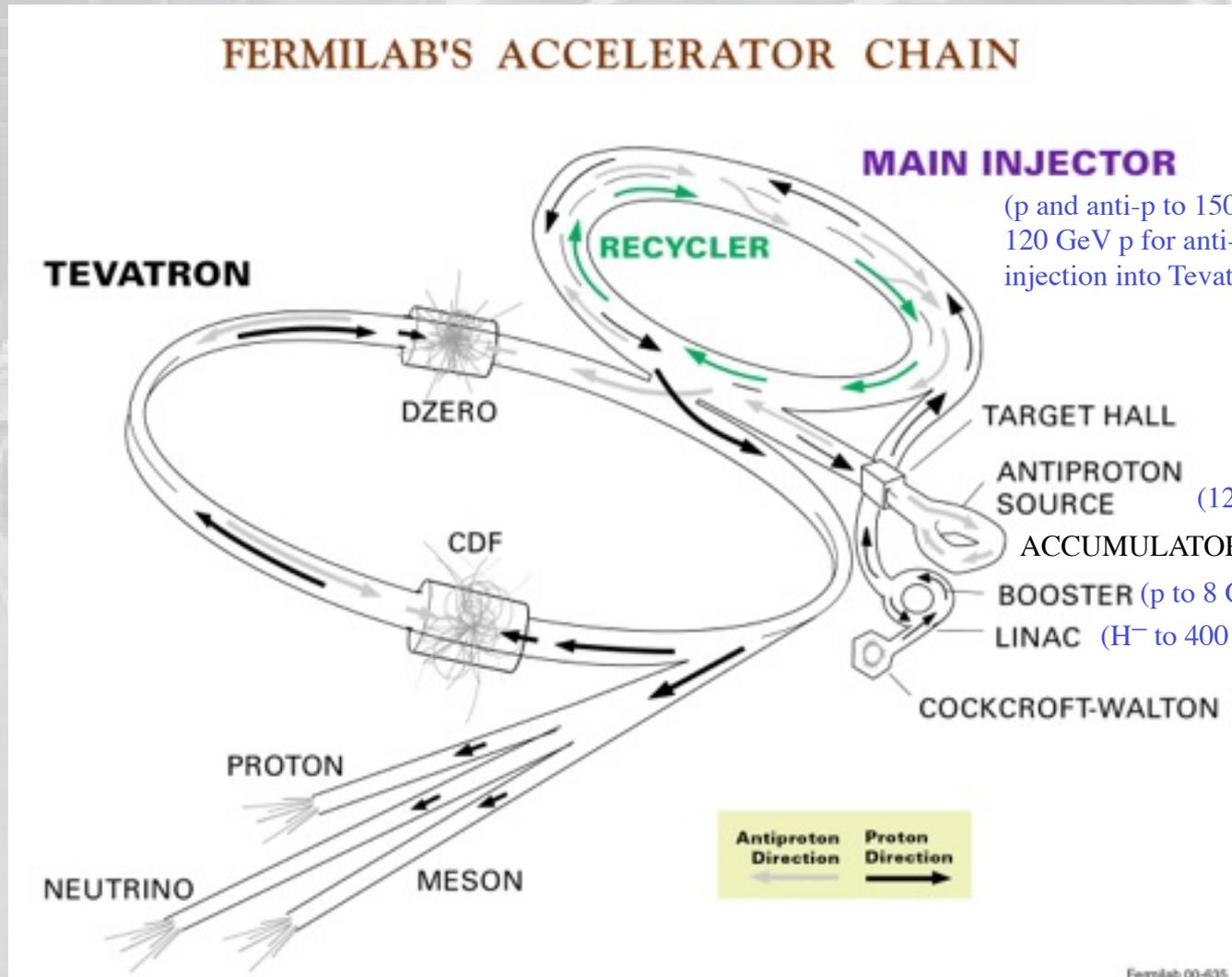
v: Teilchengeschwindigkeit

ρ : Krümmungsradius

Pro Umlauf abgestrahlte Energie:

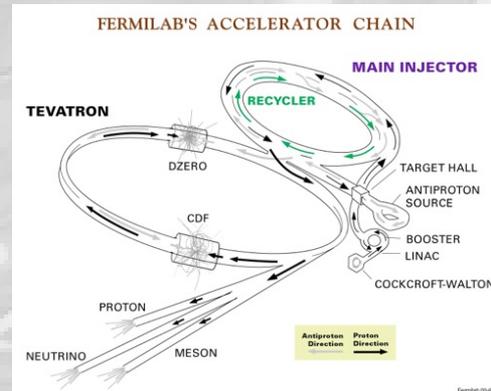
- Elektron mit $v \approx c$ $W = 8.85 \times 10^{-5} \frac{E^4 [\text{MeV}^4]}{\rho [\text{km}]} \text{MeV}$
- Proton mit $v \approx c$ $W = 7.8 \times 10^{-6} \frac{E^4 [\text{TeV}^4]}{\rho [\text{km}]} \text{MeV}$

Fermilab: Tevatron Accelerator (1983 - 2011)

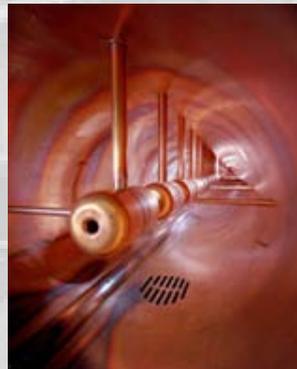




Fermilab's Accelerator Chain



Cockcroft-Walton
DC accelerator



LINAC



Booster



Main Injector



Antiproton Source



Tevatron

Warum Antiprotonen?

- können in gegensätzlicher Richtung durch dieselben Magnetfelder in einer einzigen Strahlröhre fliegen —> **ein** Ring statt zwei.
- bis zu 3 TeV Kollisionsenergie sind die Produktionsquerschnitte einiger Reaktionen in Proton-Antiproton Kollisionen höher als in Proton-Proton

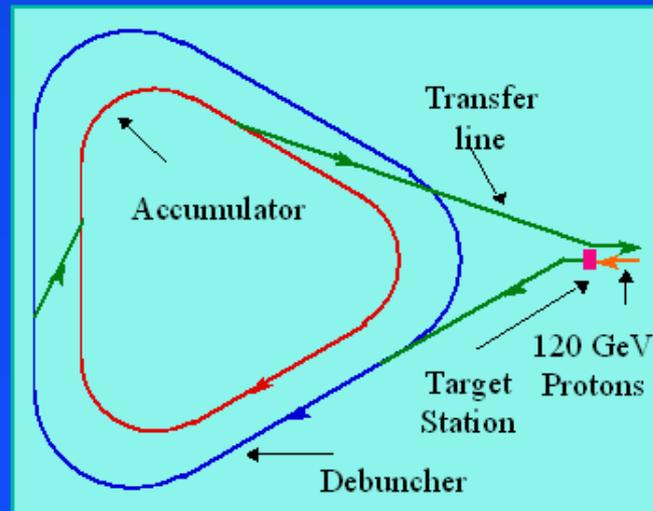
Nachteil von Antiprotonen:

- müssen erst erzeugt werden ...



Anti-Proton Production

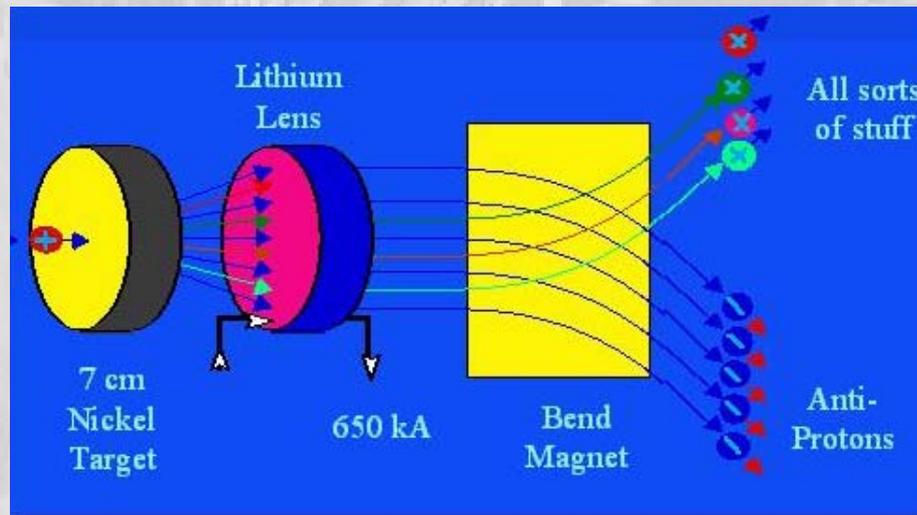
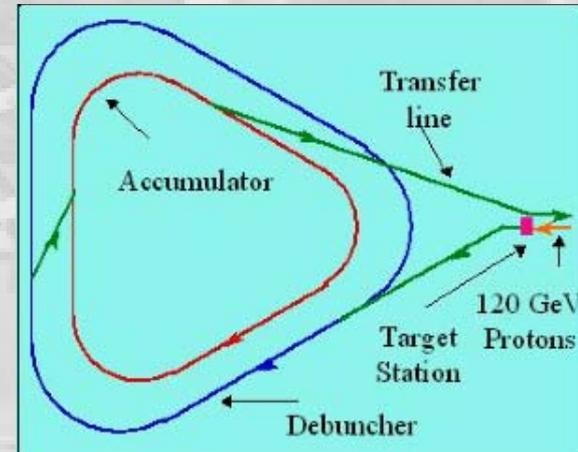
- The Anti-Proton Source consists of three major components:
 - ◆ The Target Station
 - ◆ The Debuncher
 - ◆ The Accumulator
- For every 1 million 120 GeV protons smashed on the pbar target, only about twenty 8 GeV pbars survive to make it into the Accumulator.



The price
of pbars

$$\frac{15 \text{ MW} \times \$45 / \text{MW-hr}}{5 \times 10^{10} \frac{\text{pbars}}{\text{hr}} \times 9.5 \times 1.67 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{pbar}} \times 2.2 \frac{\text{lbs}}{\text{kg}} \times 16 \frac{\text{oz}}{\text{lbs}}} = \$24,000 \times 10^{12} / \text{oz}$$

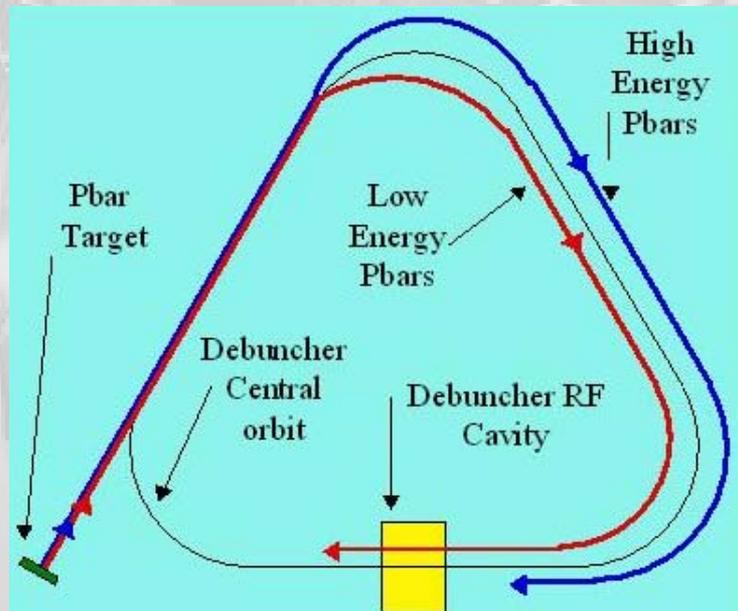
Die Antiprotonen-Quelle



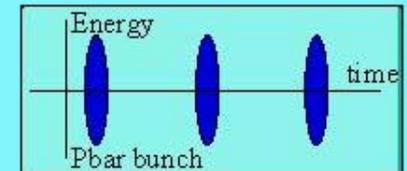
Debuncher & Accumulator

Debuncher

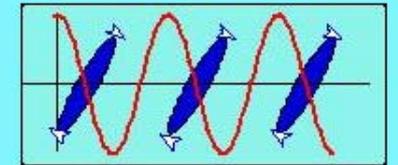
Austausch von grossem Energie- und kleinem Zeitbereich zu
Kleinem Energiebereich mit langer Zeitstruktur.



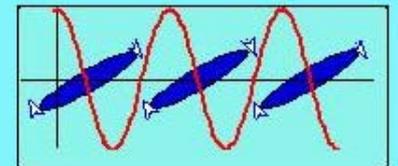
Antiprotons right after the target



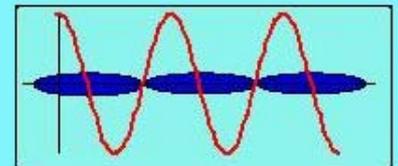
Antiprotons arriving at the RF cavity



Antiprotons after many turns through the RF cavity



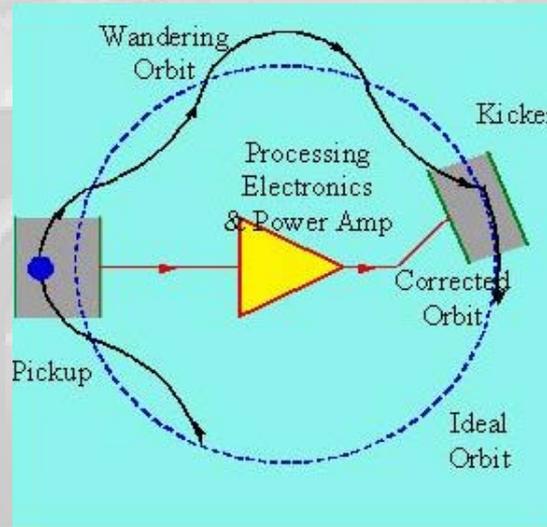
Antiprotons at the end of debunching



Stochastische Kühlung

(Nobelpreis Simon van der Meer 1984)

Reduktion des transversalen Phasenraums von Antiprotonen, durchgeführt im Debuncher (Verweildauer 1.5 sec) und im Accumulator (mehrere Stunden).



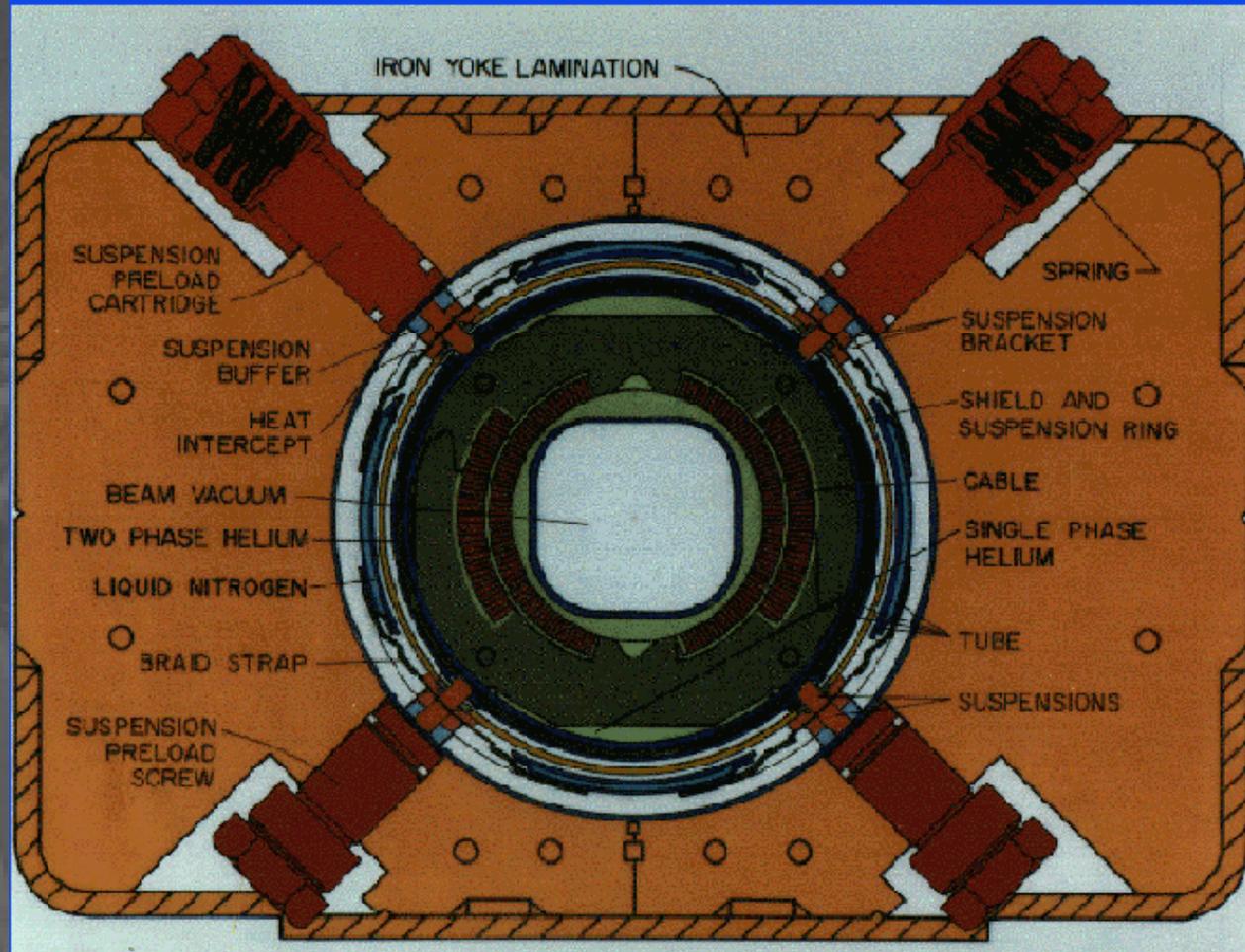
Verstärkung des Pick-Up Signals um 150 dB (10^{15}).



Superconducting Magnets

- Magnets in the TEVATRON are superconducting.
- There are about 1000 magnets in the TEV
- The coils are made of niobium-titanium alloy wire.
 - ◆ The size of the wire is 0.0003 inches (8 μm)
 - ◆ There are 11 million wire-turns in a coil.
 - ◆ The dipole magnet is 21 feet long
 - ◆ There are 42,500 miles of wire in a magnet
- For 900 GeV operation, the magnets are kept at 4.6° Kelvin.
- For 1000 GeV operation, the cryogenic system has been upgraded to obtain a temperature of 3.6° Kelvin (-453°F)

TEVATRON Magnet Cross-Section

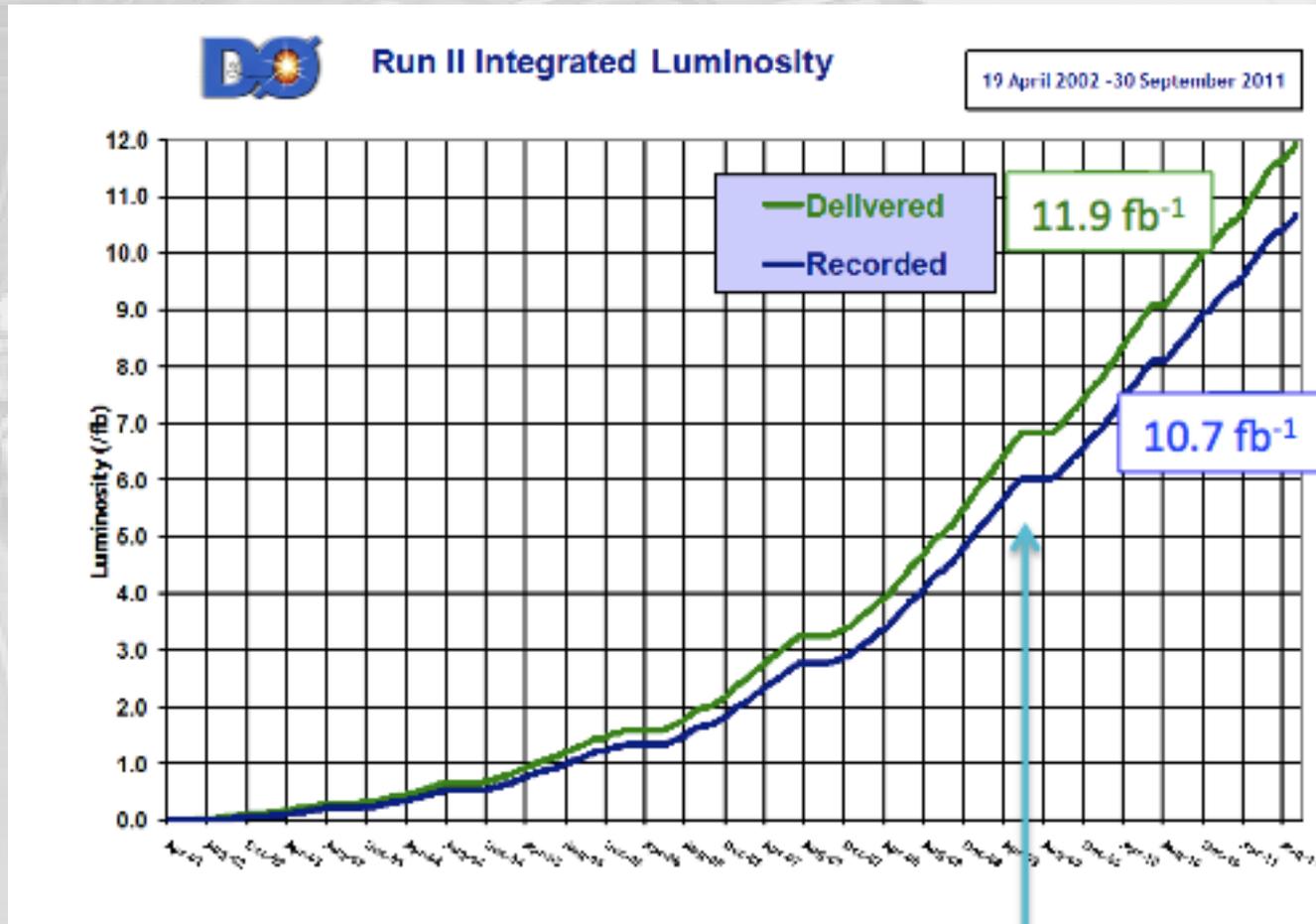




Superconducting Magnets

- The field in the magnets at 900 GeV is 4 Tesla (The Earth's magnetic field is 0.0003 Tesla, 13,000 times weaker than a TEV magnet)
 - ◆ An LHC magnet (Large Hadron Collider in Geneva, Switzerland) will have a magnetic field between 8-10 Tesla.
 - ◆ The theoretical limit for mechanically constraining a superconducting magnet is about 15 Tesla.
- The current flowing through a magnet at 900 GeV is 4000 Amperes.
 - ◆ The total inductance of the TEVATRON is 36 H.
 - ◆ The total magnetic stored energy in the TEVATRON at 900 GeV is 288 MegaJoules.
 - ◆ The time constant of the current dump system is 12 seconds.
 - ◆ If all the current in the TEV needed to be dumped, the dump resistors would have to dissipate energy at 24 megawatts

Tevatron integrated Luminosity (after project termination on 30 Sept 2011)



peak L: $\sim 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

der Large Hadron Collider

Visionen (1980'er)

- Bau eines Teilchenbeschleunigers mit den höchsten technisch realisierbaren Kollisionsenergien, mit dem Ziel:
 - das **Standard Modell** jenseits von Energien von 1 TeV zu testen
 - die fehlenden Teile des SM zu finden: **das top-Quark ...**
 - den Mechanismus der **elektroschwachen Symmetrie-Brechung** zu erforschen (d.h., das **Higgs Boson** zu finden)
 - nach einer **neuen Physik** jenseits des Standard Modells zu suchen (**SUperSYmmetrie**; höhere Raumdimensionen; ...)
 - das **Unerwartete** zu finden

Herausforderungen:

- "schnell" und „billig“ → benutze den existierenden LEP-Tunnel und die Vorbeschleuniger am CERN
- höchste Energien bei gegebenem Tunnelradius → beschleunige Protonen (statt Elektronen bei LEP)
- Kollisionsenergie der Konstituenten von $\sim \text{TeV}$ → Protonen-Energien von mindestens 5 TeV
- Protonen-Energien von mindestens 5 TeV → supraleitende Magnete mit ~ 8 Tesla
- produziere Objekte sehr hoher Massen → benötige hohe Strahlstärken ($L \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- $L \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ → hohe Datenraten; Strahlungssch.

Der Large Hadron Collider (LHC)

- Proton-Proton Beschleuniger im LEP-Tunnel am CERN



- Höchste Energien pro Kollision
- Höchste Luminositäten



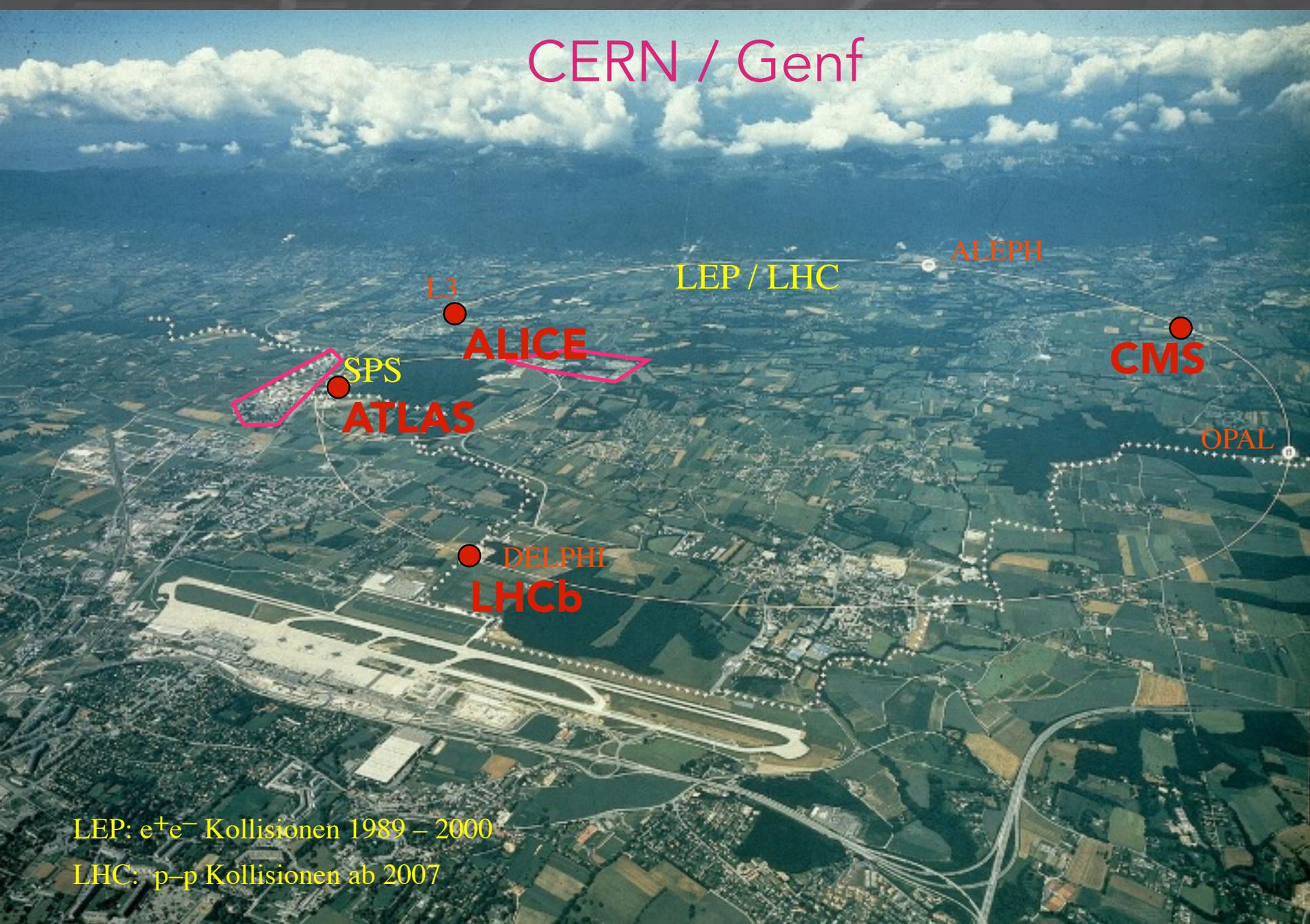
- Vier Experimente:

ATLAS, CMS	(pp-Physik)
LHC-B	(Physik der b-Quarks)
ALICE	(Pb-Pb Kollisionen)

- Gebaut in internationalen Kollaborationen aus ~40 Ländern

- Inbetriebnahme: 2005 -> 2007 -> 2008 -> 2009

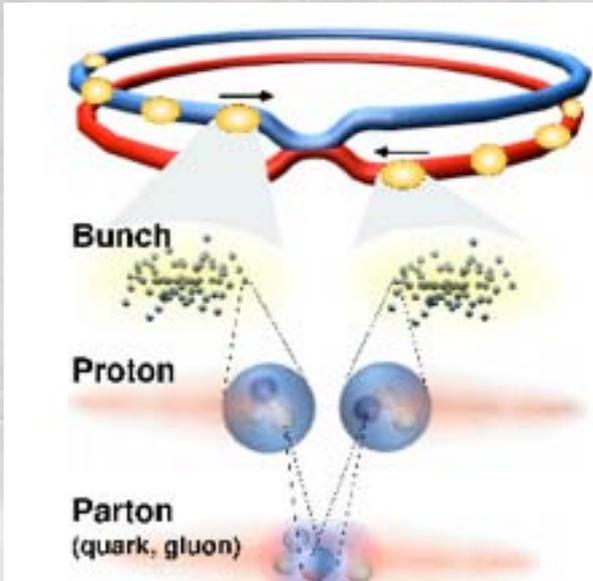
CERN / Genf



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.

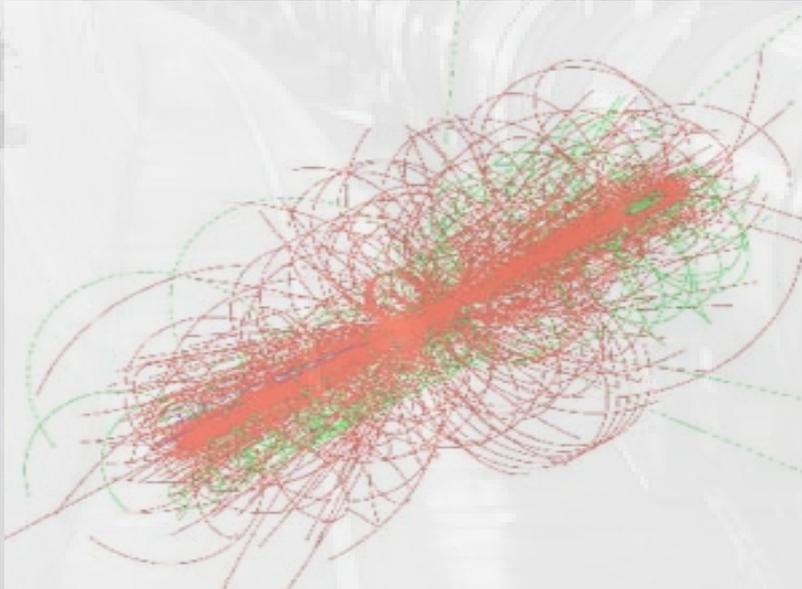
Luminosität: $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

Proton-Proton Kollisionen: $\sim 10^9 / \text{sec}$

(Überlagerung von 20-30 pp-Wechselwirkungen während einer Strahlkreuzung)

~ 1600 geladene Teilchen im Detektor

⇒ hohe Anforderungen an die Detektoren



Production cross sections and event rates at LHC

$$N_{\text{events}} / \text{s} = \sigma \cdot L$$

$$N_{\text{events}} = \sigma \cdot \int L \cdot dt$$

$$1 \text{ nb} = 10^{-33} \text{ cm}^2$$

calculus (example):

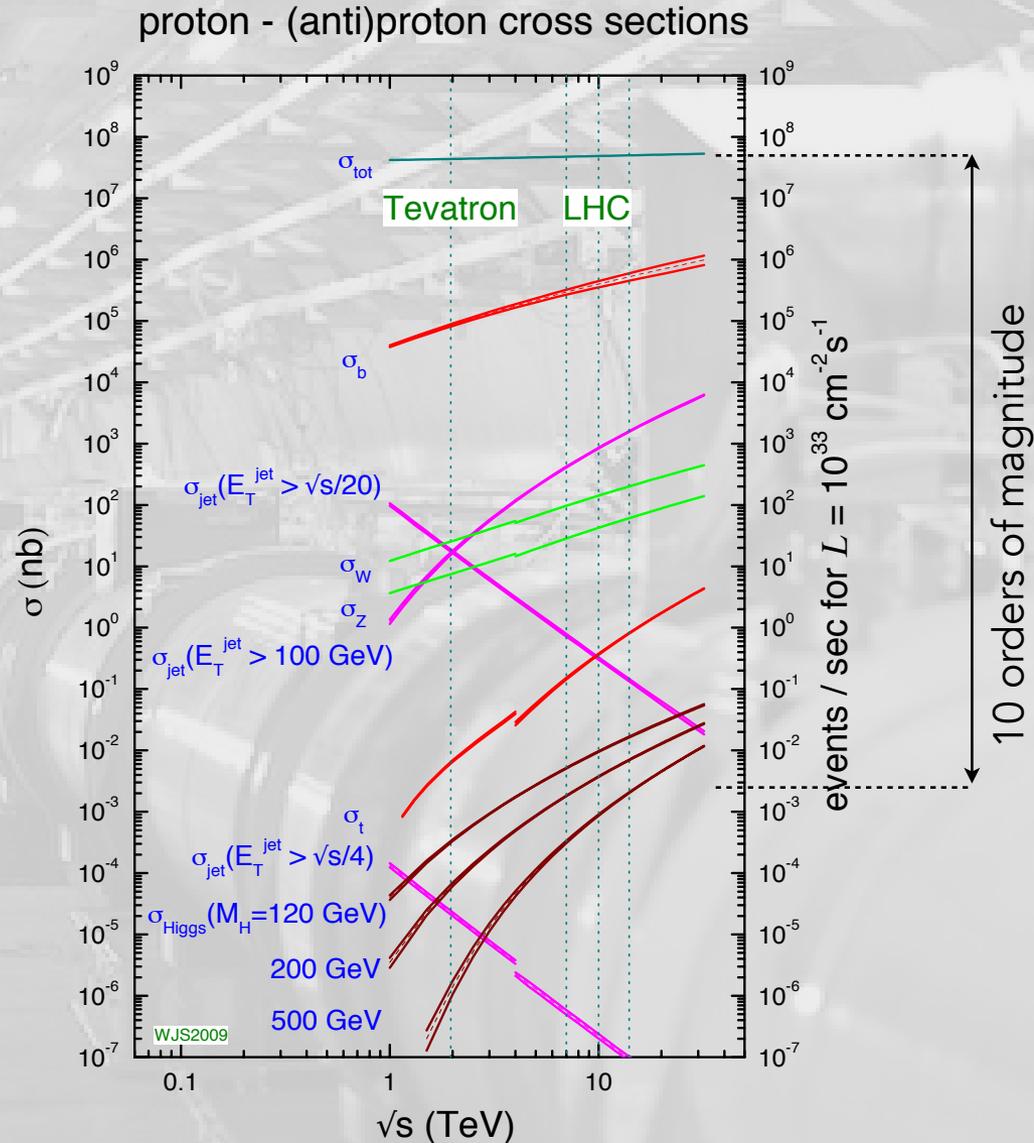
End of 2010:

$$\int L dt = 40 \text{ pb}^{-1} = 40 \cdot 10^3 \text{ nb}^{-1}$$

corresp. to $\sim 4 \cdot 10^3$ top-quark- events ($\sigma_t \sim 10^{-1} \text{ nb}$ at 7 TeV)

corresp. to ~ 200 Higgs-evts. with $M_H = 120 \text{ GeV}$ at 7 TeV

data sample 2011: $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$
 data sample 2012: $\sim 20 \text{ fb}^{-1}$



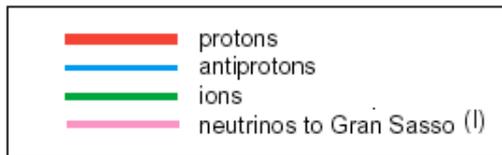
Produktionsraten am LHC

<ul style="list-style-type: none">• Inelastische Proton-Proton Reaktionen:	1 Milliarde / sec
<ul style="list-style-type: none">• Quark -Quark/Gluon Streuungen mit großen transversalen Impulsen (> 20 GeV)	~ 100 Millionen/ sec
<ul style="list-style-type: none">• b-Quark Paare	5 Millionen / sec
<ul style="list-style-type: none">• top-Quark Paare	8 / sec
<ul style="list-style-type: none">• $W \rightarrow e \nu$	150 / sec
<ul style="list-style-type: none">• $Z \rightarrow e e$	15 / sec
<ul style="list-style-type: none">• Higgs (Masse = 150 GeV)	0.2 / sec
<ul style="list-style-type: none">• Gluino, Squarks (Masse = 1 TeV)	0.03 / sec

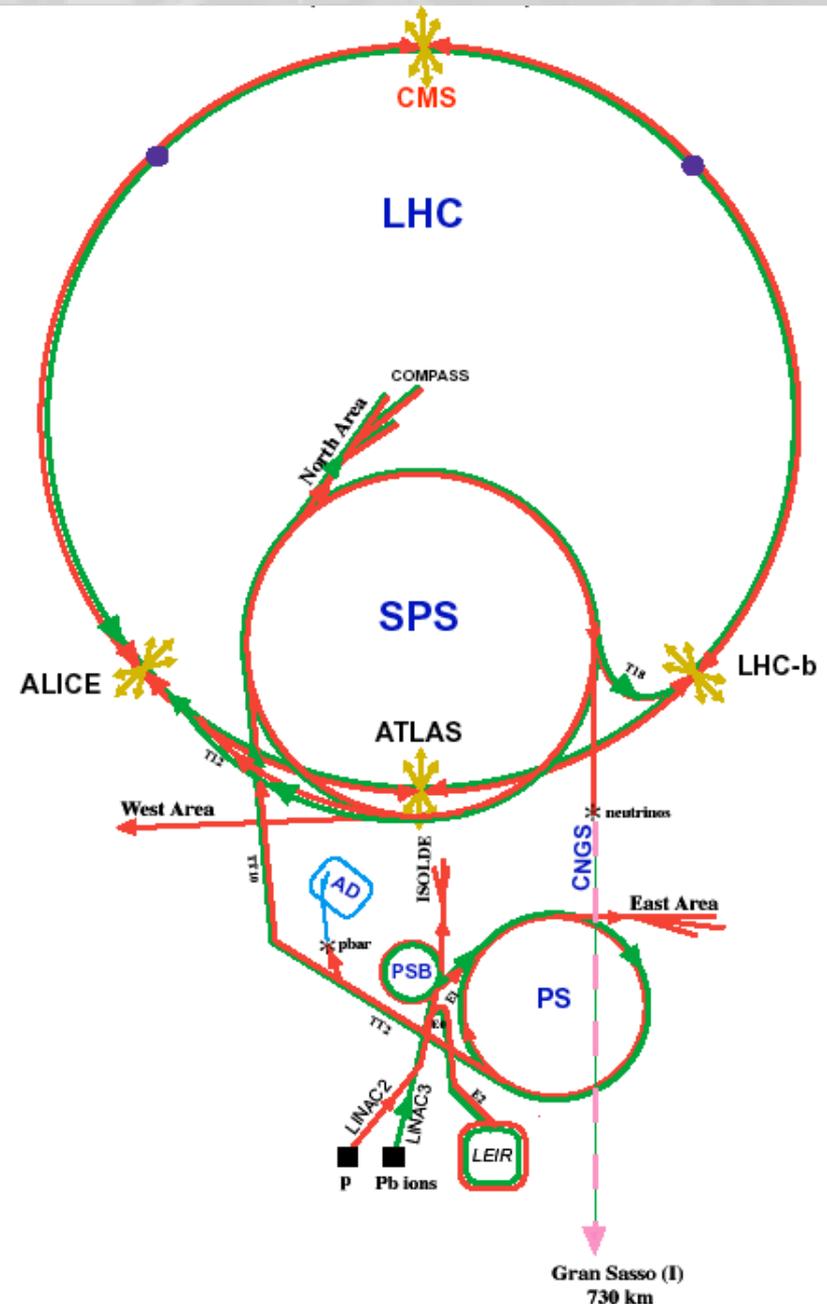
- Interessante Physikprozesse sind selten:
⇒ hohe Strahlintensität des Beschleunigers,
extrem gute Detektoren (Unterdrückung des Untergrundes)

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



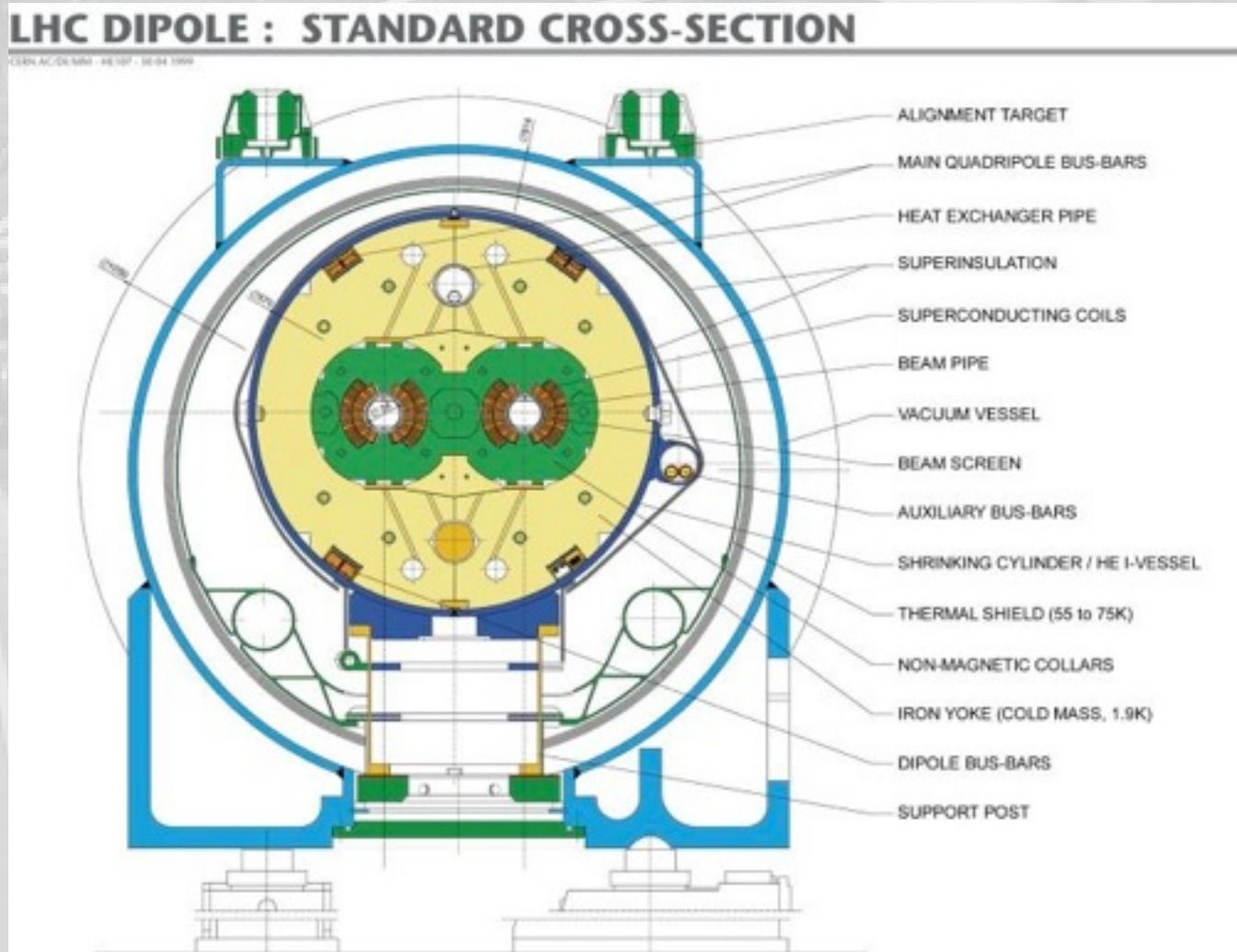
General LHC Parameters Version 4.0

(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](#))

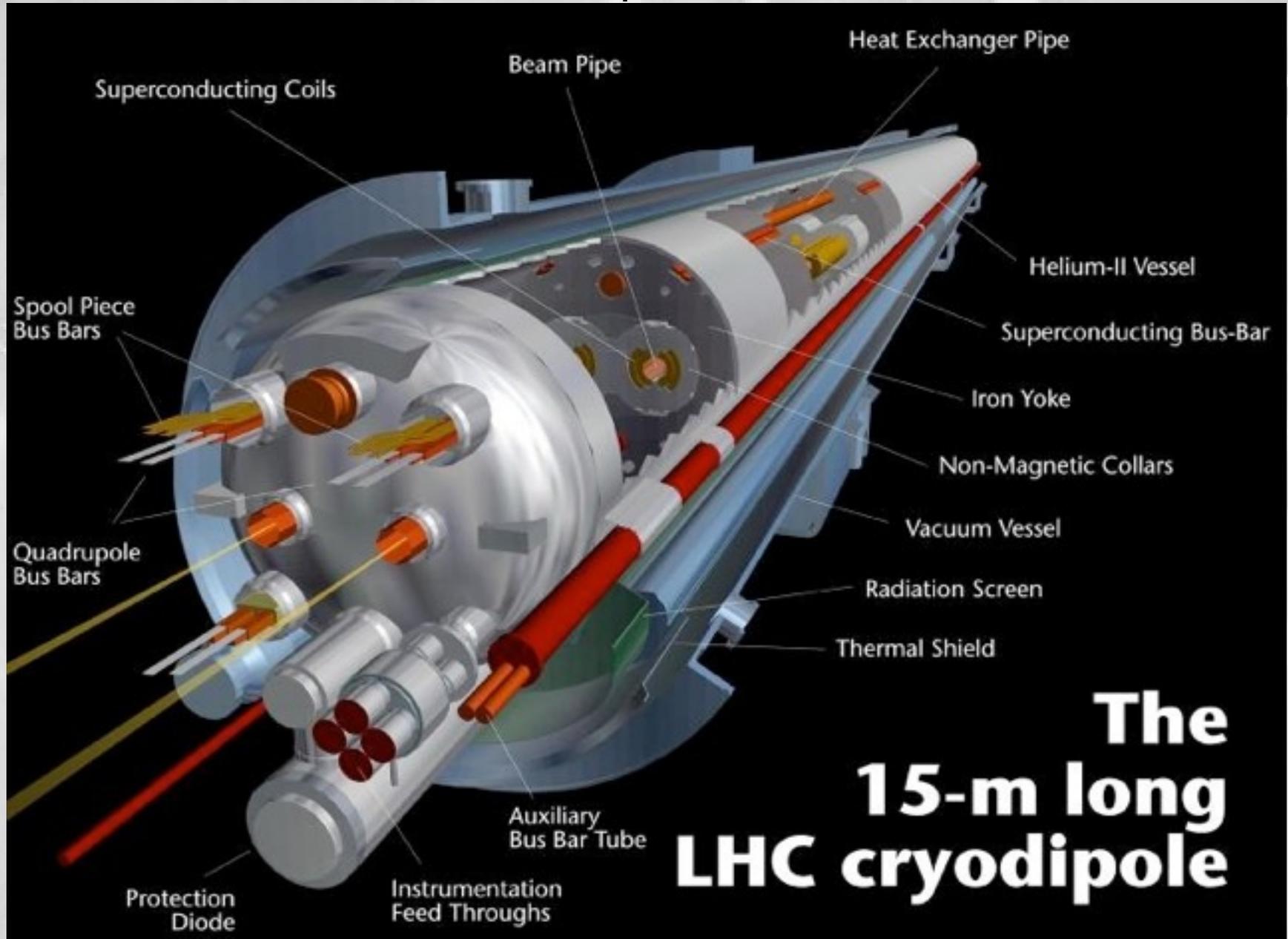
Momentum at collision	7	TeV / c
Momentum at injection	450	GeV / c
Machine Circumference	26658.883	m
Revolution frequency	11.2455 (*)	kHz
Super-periodicity	1	
Lattice Type	FODO, 2-in-1	
Number of lattice cells per arc	23	
Number of insertions	8	
Number of experimental insertions	4	
Utility insertions	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

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



Die LHC Dipol-Magnete

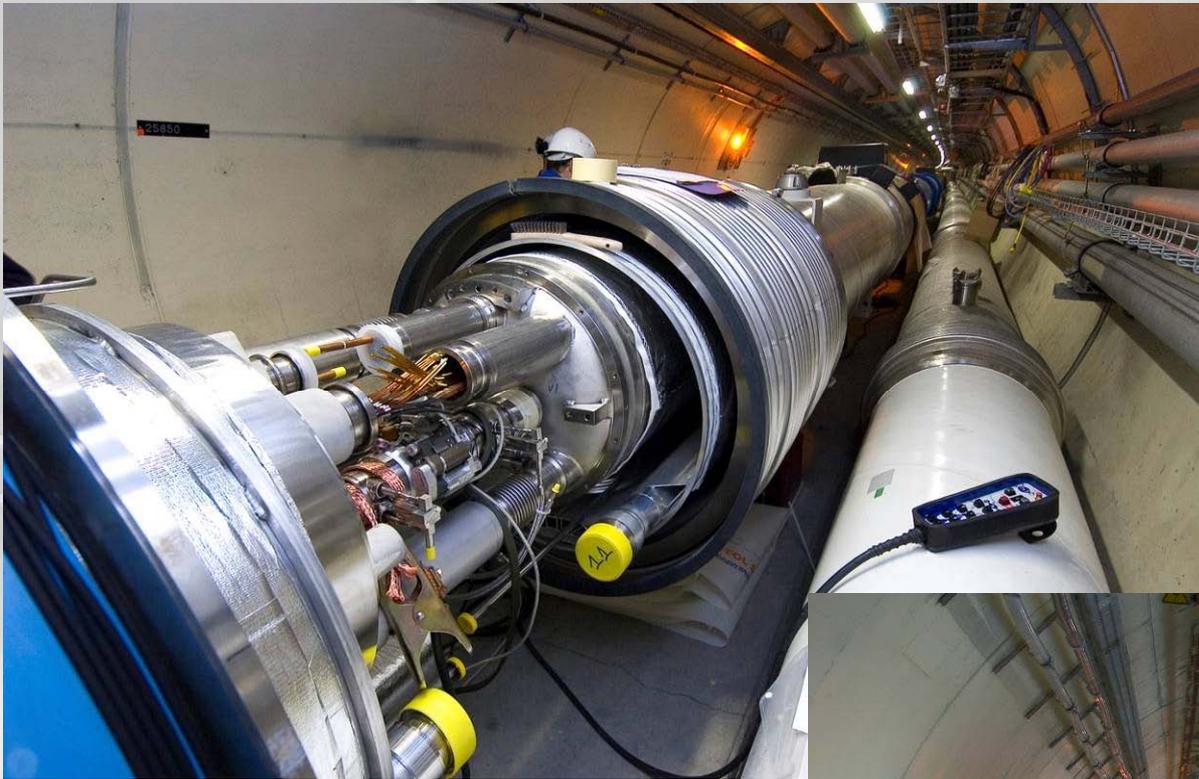




Lowering of the first dipole into the tunnel (March 2005)

Installation of dipoles in the LHC ring

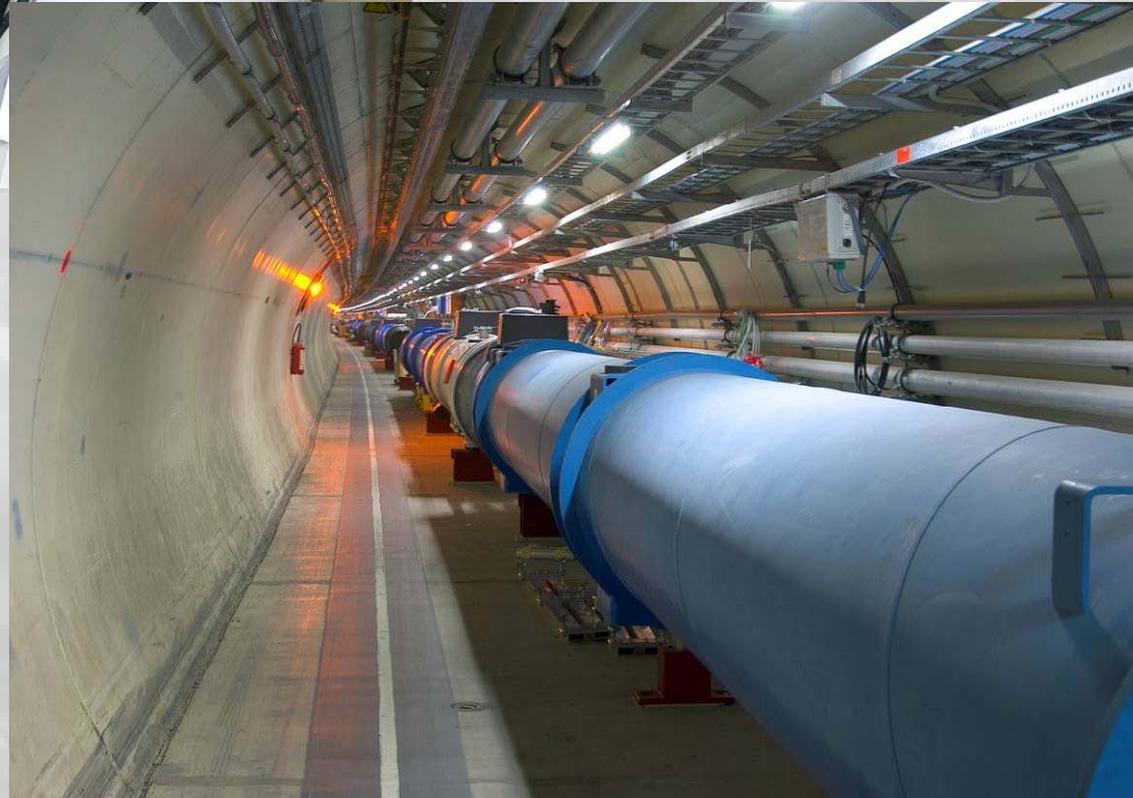




Interconnection of the dipoles
and connection to the cryoline



A view of the tunnel....



LHC Tunnel (12/2005)

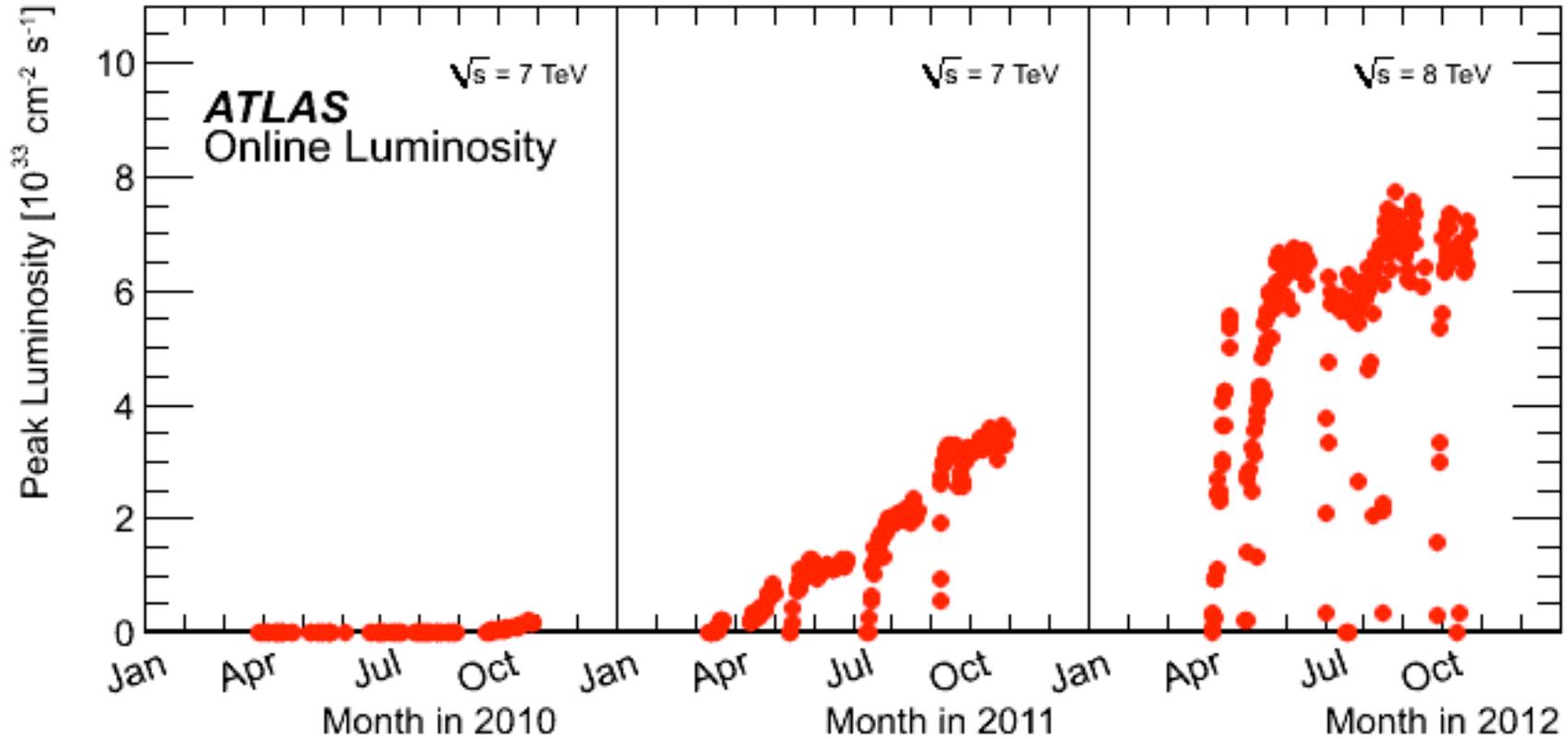


LHC - Status:

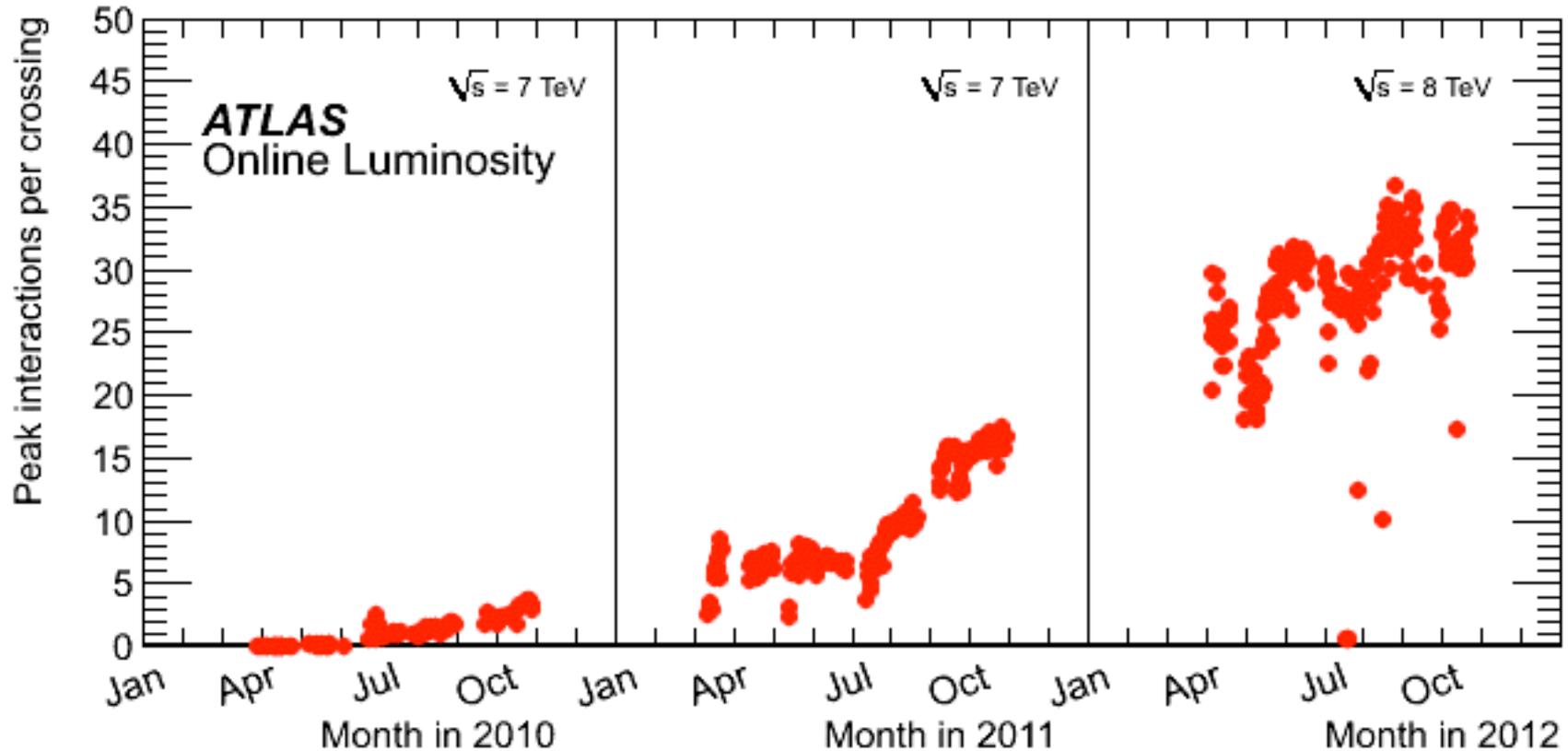
- 09.09.2008: erster stabiler „beam“ im LHC:
- 19.09.2008: technische Probleme mit grosser Wirkung:
Zerstörung eines Teils des LHC-Ringes. Reparatur: ~1 Jahr.
- 20.11.2009: Wiederaanlauf nach Reparatur; Kollisionen!
- 11.12.2009: Weltrekord: Kollisionen bei 2.36 TeV! (2·1.18 TeV)
- 30.03.2010: Kollisionen bei 7 TeV (2 · 3.5 TeV)
- Nov. 2011: 5 fb⁻¹ bei 7 TeV pro Experiment
- 2012:
 - Kollisionen bei 8 TeV
 - bis Ende Dez: ~20 fb⁻¹
 - 4. Juli 2012: ein neues Boson ...



LHC Peak Luminosity $\sim 8E33$ (October 2012)



LHC: interactions per bunch x-ing

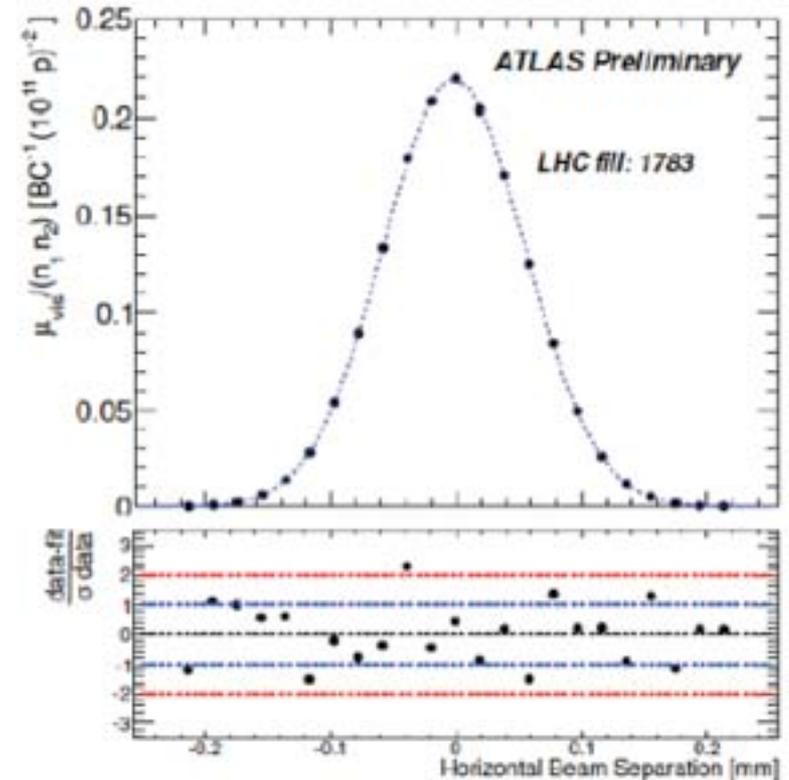


LHC luminosity determination

$$\mathcal{L} = \frac{n_b f_{\text{r}} n_1 n_2}{2\pi \Sigma_x \Sigma_y}$$

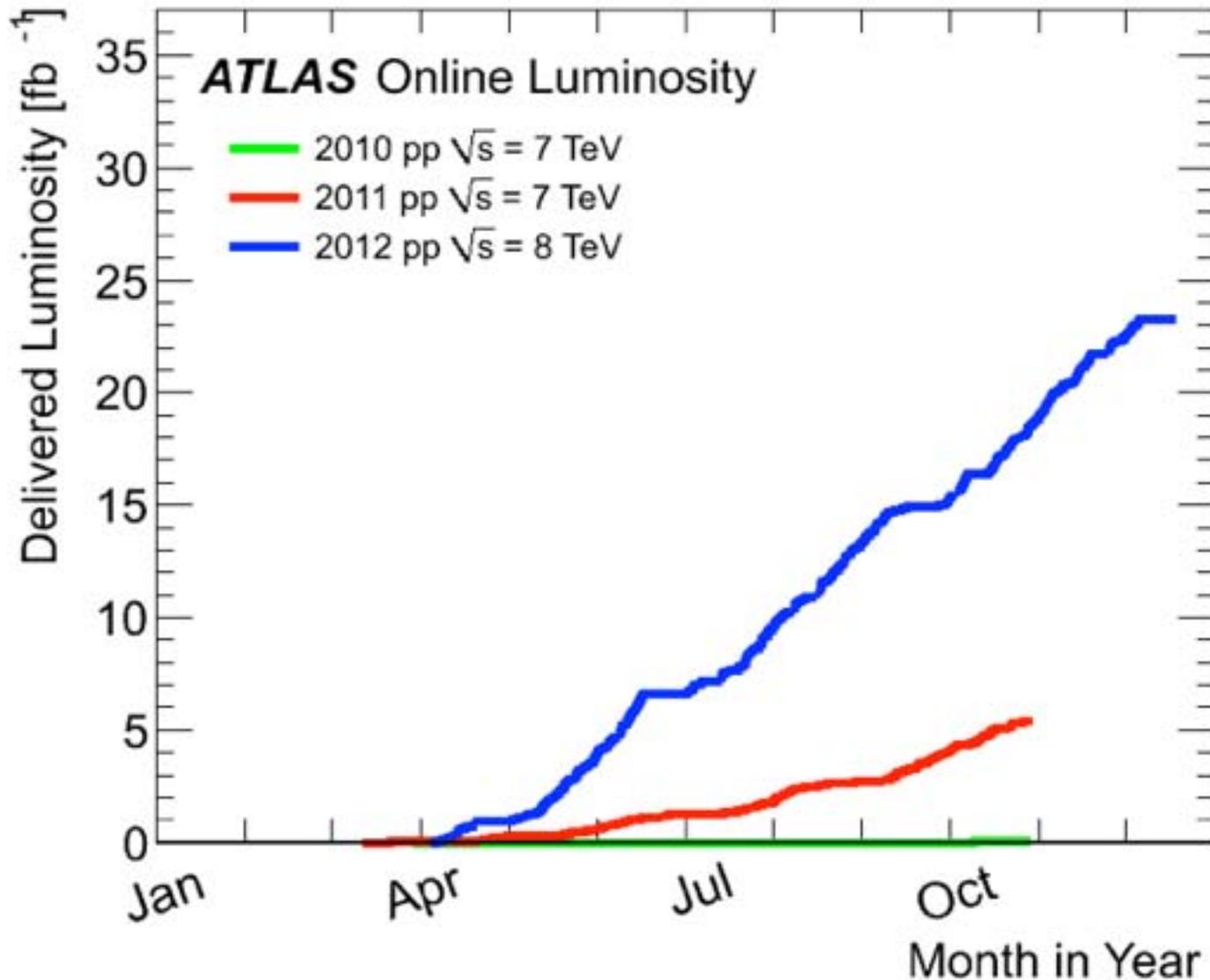
- Calibrated using van der Meer scans
- Present uncertainty $\pm 3.7\%$
 - dominated by beam current measurements $\pm 3\%$
 - already impressive
 - could come down by around a factor of two?

→ $\pm 1.8\%$ achieved (2013)



Simon van der Meer, 1925 - 2011

ATLAS online integ. Luminosity



Literatur / weiterführende Informationen:

- F. Hinterberger, „Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik“, Springer 2008
- H. Wiedemann, “Particle Accelerator Physics” I & II Springer 1993/1995
- K. Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger, Teubner 2002
- Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov>
- Fermilab, <http://www.fnal.gov/>
- CERN, <http://public.web.cern.ch/Public/ACCELERATORS/accintro.html>



nächste Vorlesung: 3.11.

Monte Carlo Generatoren und Detektor
Simulation