

Das geheimnisvolle Top-Quark

**60 Jahre Thomas Müller –
35 Jahre Forschung an Hadron-
Kollidern im Zeichen des
schwersten Elementarteilchens**

**Wolfgang Wagner
Bergische Universität Wuppertal**

art work by Dr. Jan Lück





Thomas Müller
geboren
in Wuppertal
am 16. Januar 1953

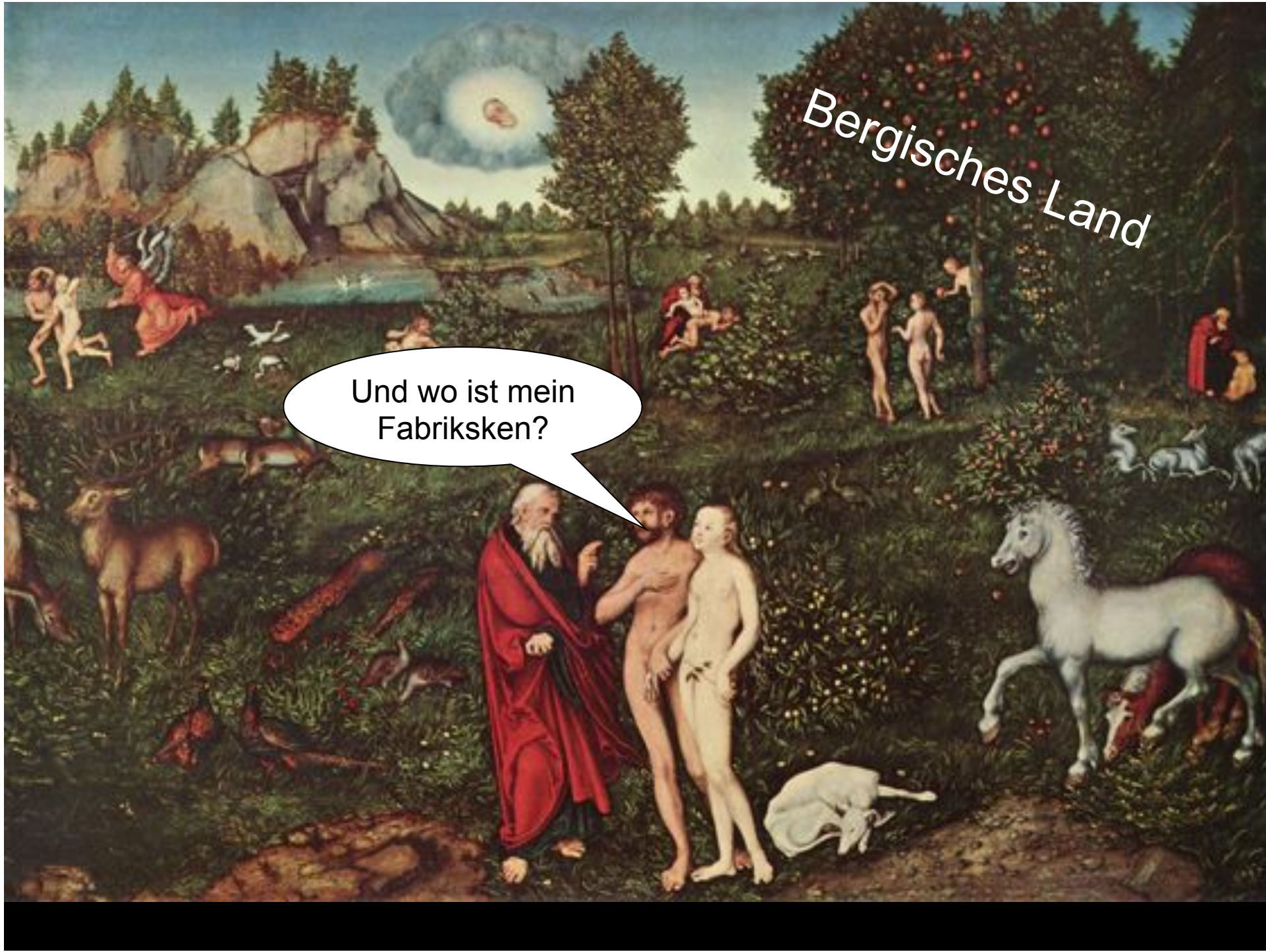
Schmiede der Familie Windgassen

in Wuppertal-Ronsdorf



Bergisches Land

Und wo ist mein Fabriksken?





Antrittsvorlesung in
Karlsruhe 1997

Hinaus in die weite Welt



Syrien 1953



Damaskus, Syrien 1955

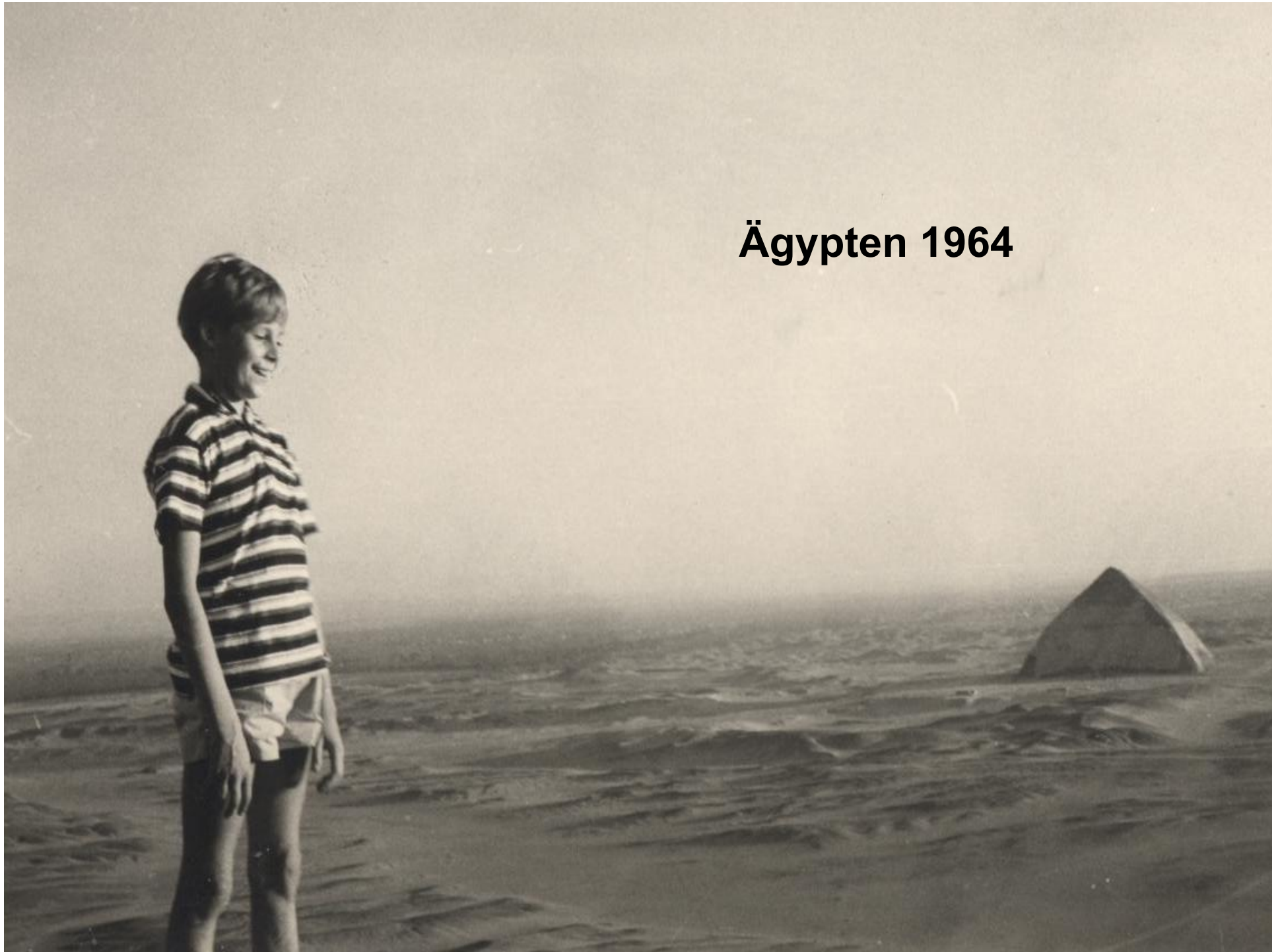
Karachi, Pakistan 1960





Dalsee, Kaschmir 1961

Ägypten 1964



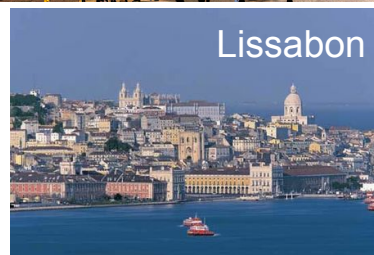
Äthiopien 1965



Teilchenphysik heißt Reisen, Reisen, Reisen, ...

Reisetätigkeit Prof. Müller 2012

19.-20.01.12	CERN
17.-18.02.12	RECFA-Meeting, Amsterdam
28.02.-01.03.12	CERN
07.-11.03.12	Buenos Aires, Argentinien
26./27.02.12	Leinsweiler/Pfalz, Single TOP
18.-20.04.12	CERN
24.24.04.12	CERN
06.-08.05.12	CERN
11./12.05.12	Krakau, Polen ECFA
08./09.05.12	Mulhouse, Frankreich EPS
13.-15.06.12	CERN
21.06.12	CERN
28.-30.06.12	CERN
06.-13.07.12	Melbourne, Australien ICHEP
31.07.-01.08.12	CERN
14.-19.08.12	CERN
05.-08.09.12	Lissabon, Portugal CMS-Woche
26.09.12	CERN
04.-06.10.12	Rom, Italien ECFA
18./19.10.12	Wien, Österreich ÖAW
28./29.10.12	CERN
21.-25.10.12	Rio de Janeiro, Brasilien DAAD



Zeugnis Pakistan 1961

MONTH

Report for the Term Ending: 31. 8. 1961.

New Term Begins:

Name Thomas Mueller
 Std..... I
 No. in Class..... 19
 Position in Class..... 18

SUBJECTS	Max. Marks	Marks Obtained	REMARKS
Religious Knowledge			
Scripture			
English Language	20	16	Fair.
English Literature			
Dictation <u>Spelling</u>	30	23	Fair.
Arithmetic	30	20	Rather careless.
<u>Tables</u>	30	29	Good.
<u>Algebra</u>			
<u>N. Study</u>	15	1	} Very weak must concentrate more.
<u>Geometry</u>			
History	20	6	
<u>Geography</u>	20	10	
<u>Writing</u>	10	7	
<u>Physiology</u>			
French or Urdu	20	13	Has made a good beginning
Art			
Drill and Games			
Needlework			

Conduct..... Good
 Application..... Inclined to day dream
 Attendance..... Good
 Promotion

Teacher's Signature..... T. J. Losey Principal's Signature.....



Helmholtz-Gymnasium
 Städt. neuspr. u. math.-naturw. Gymnasium
 Bonn-Duisdorf

Elternsprechtag

am: 8. Feb. 1972

9-12, 15-18 Uhr

Schuljahr 19 72/73 1. Halbjahr

Klasse: 13d

ZEUGNIS

für Thomas Müller

FÜHRUNG:
 BETEILIGUNG AM UNTERRICHT:
 HÄUSLICHER FLEISS:
 ORDNUNG:

Versäumte Stunden: 10, davon unentschuldig 1 Stunden. Verspätet: 1 mal.

LEISTUNGEN: Prädikate: sehr gut (1), gut (2), befriedigend (3), ausreichend (4), mangelhaft (5), ungenügend (6).

- | | | | |
|---|-----------------------|---|-----------------------|
| 1. Religionslehre: | <u>befriedigend</u> | 10. Mathematik: | <u>befriedigend</u> |
| 2. Deutsch: | <u>mangelhaft</u> | 11. Physik: | <u>sehr gut</u> |
| 3. Geschichte: | / | 12. Chemie: | / |
| 4. Erdkunde: | / | 13. Biologie: | / |
| 5. Gemeinschaftskd.
Geschichte mit Sozialkunde: <u>3</u> | } <u>befriedigend</u> | 14. Musik: | <u>gut</u> |
| Erdkunde: <u>3</u> | | 15. Kunst: | / |
| Philosophie: <u>4</u> | | 16. Nadelarbeit: | / |
| 6. Lateinisch: | / | 17. Leibesübungen: | <u>sehr gut</u> |
| 7. Griechisch: | / | 18. Handschrift: | / |
| 8. Englisch: | <u>ausreichend</u> | Wahlpflichtfach:
Naturwissenschaften | Physik: |
| 9. Französisch: | / | Chemie: <u>3</u> | } <u>befriedigend</u> |
| | | Biologie: <u>3</u> | |

Zusätzliche Unterrichtsveranstaltungen:

Nicht ausreichende Leistungen in einem wissenschaftlichen Fach können die Versetzung gefährden.

Bemerkungen:

Bonn-Duisdorf, den 28.1. 19 72

Klein
Oberstudiendirektor

M. Kunt Müller
Unterschrift der Erziehungsberechtigten

Jansen
Klassenleiter(in)



Bestell-Nr. 117 G I
 Verlagsgesellschaft Ferdinand Langenkämper, Wuppertal-Elberfeld
 Nachdruck verboten!

Wiederbeginn des Unterrichts:
 Elternsprechtag am Uhr.



Thomas Müller

Eigenhändige Unterschrift des Wehrpaß-Inhabers
(Ruf- und Familienname)

Wehrpaß-Inhaber:

MÜLLER

(Familienname)

Thomas

(Vornamen, Rufnamen unterstreichen)

16 01 53 M 30 520

(Personenkennziffer)

Bonn

(Kreiswehrrersatzamt)

den 11. 1. 72

Im Auftrag:

(Unterschrift)



(Amtsbezeichnung)

REG.-AMTMANN

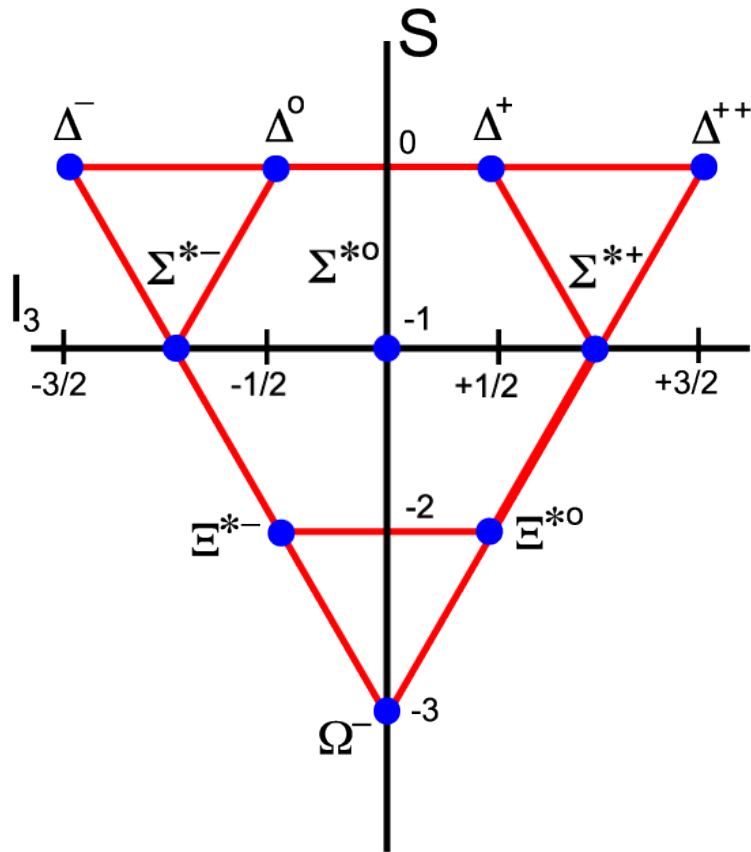
ABC-Schutzmaske:

Blutgruppe: Rhesusfaktor positiv — negativ
(Nichtzutreffendes streichen)

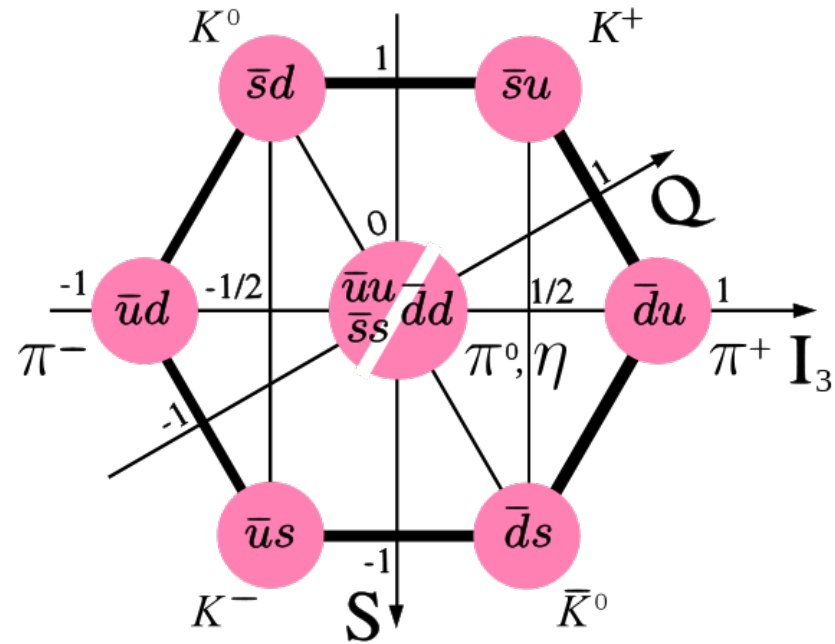


Physikstudium an der
Universität Bonn
1973 – 1979

The Eightfold Way










Das Baryon-Dekuplett
(Spin 3/2)



Das Meson-Oktett
(Spin 0)

Die Welt der Elementarteilchen 1973

	1. Familie	2. Familie	Ladung
Quarks	 up		+2/3 e
	 down	 strange	-1/3 e
Leptonen	 e-Neutrino	 μ -Neutrino	0
	 Elektron	 Myon	-1 e

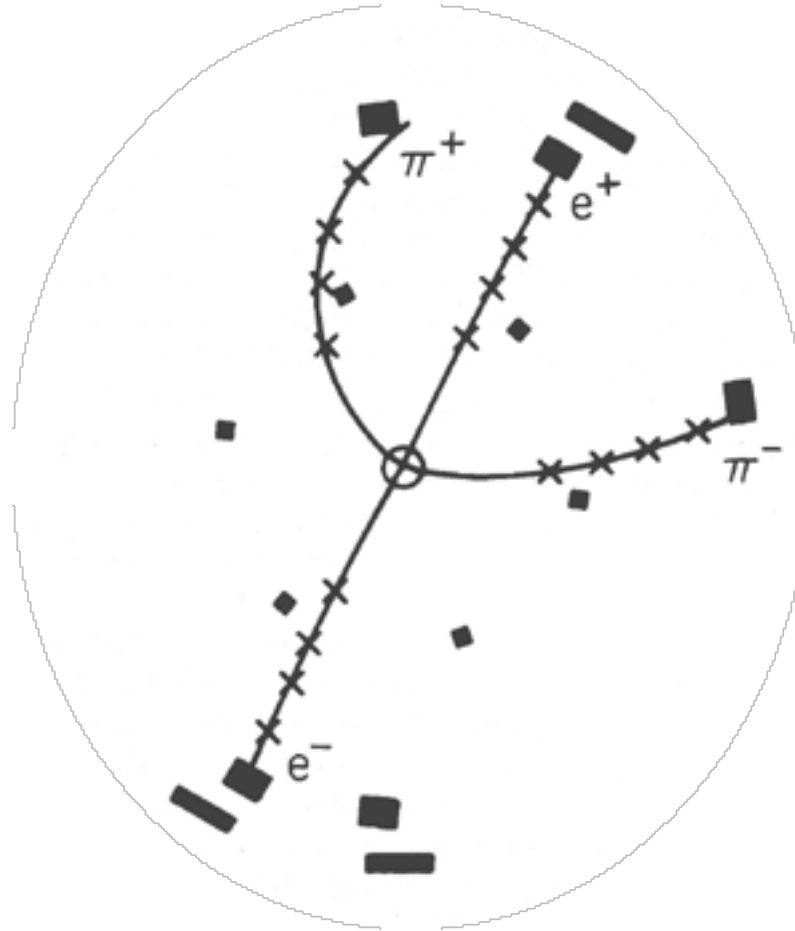
... und deren Antiteilchen

Die November-Revolution 1974

Die Entdeckung des J/ψ und damit des Charm-Quarks.



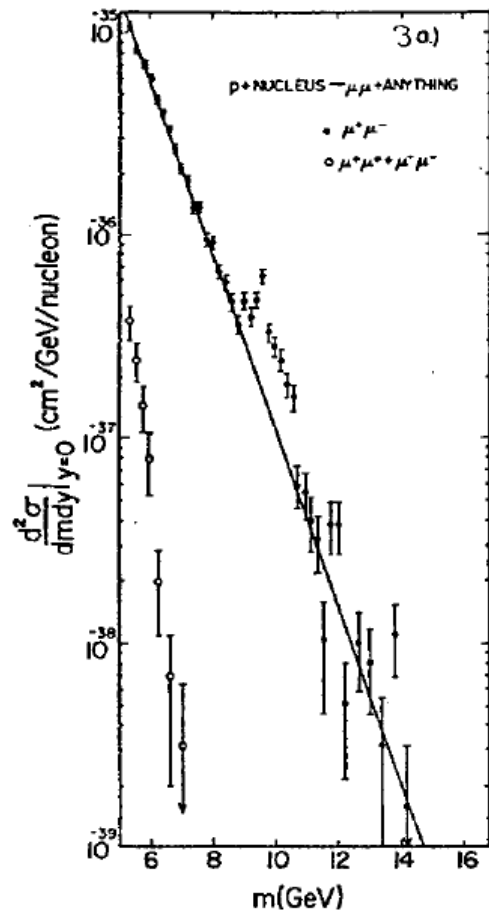
Burton Richter
(SLAC)



Samuel Ting
(BNL)

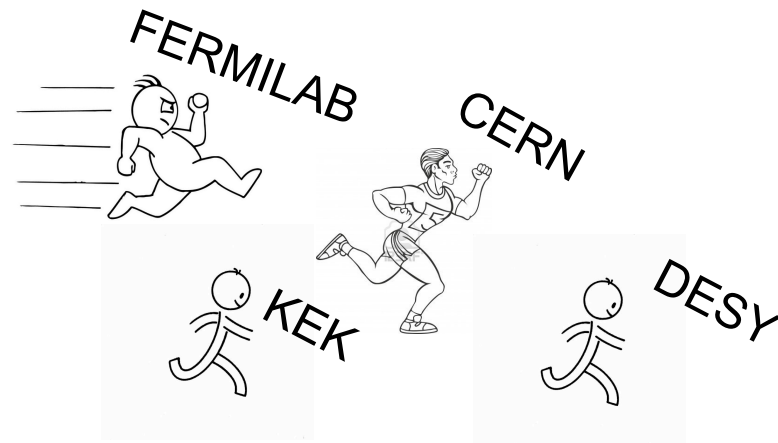
Die Entdeckung des Bottom-Quarks

OBSERVATION OF A DIMUON RESONANCE AT 9.5 GeV IN 400 GeV PROTON-NUCLEUS COLLISIONS


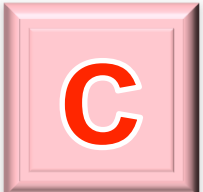












Entdeckung des Upsilon (b anti-b Resonanz)
im Kanal $\Upsilon \rightarrow \mu^+\mu^-$

... das Rennen um die Entdeckung des
Top-Quarks war eröffnet.



Die Welt der Elementarteilchen 1977

	1. Familie	2. Familie		Ladung
Quarks	 up	 charm		$+2/3 e$
	 down	 strange	 bottom	$-1/3 e$
	 e-Neutrino	 μ-Neutrino	 τ-Neutrino*	0
Leptonen	 Elektron	 Myon	 Tau(on)	$-1 e$

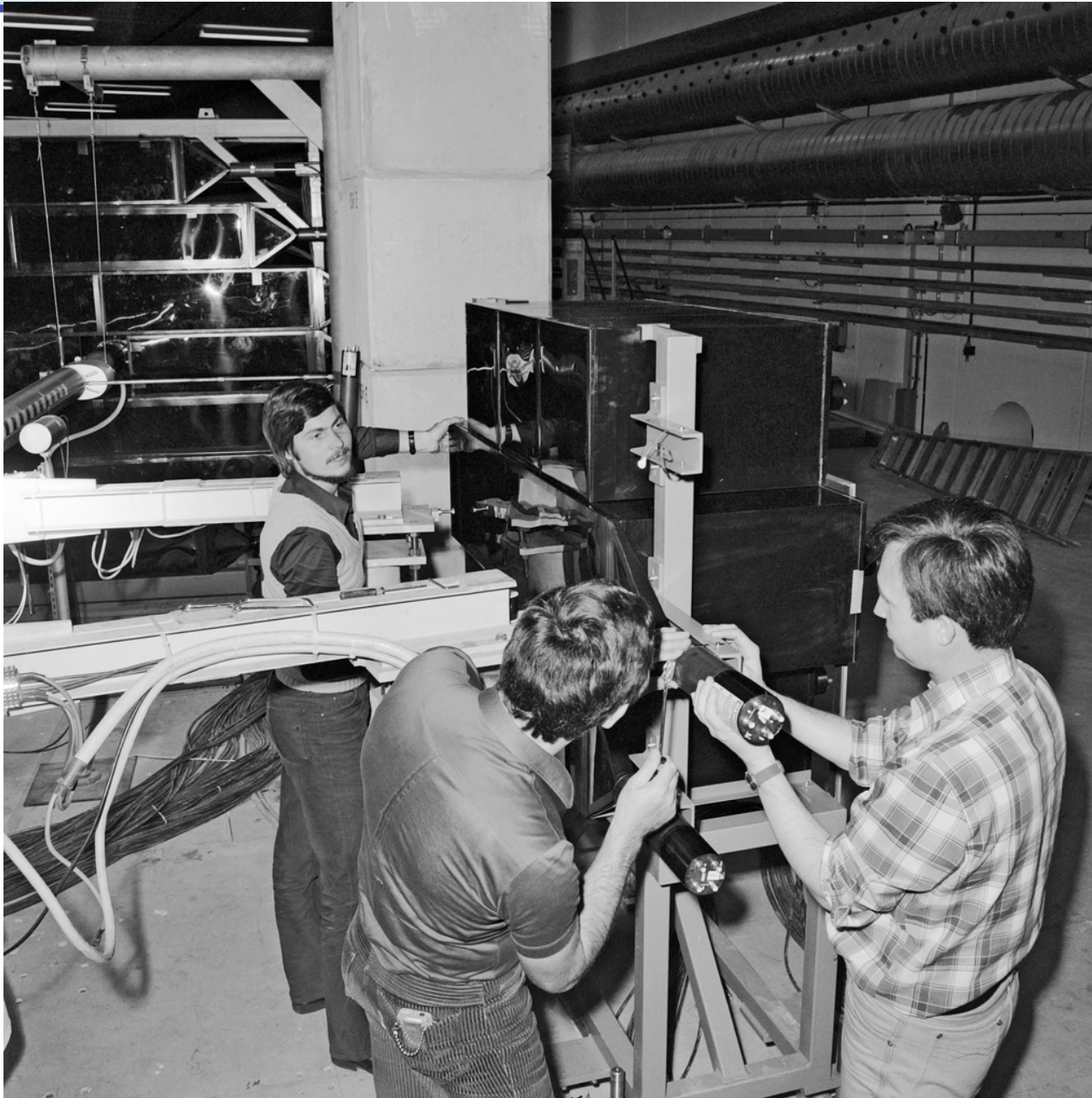
*direkter Nachweis erst 2001

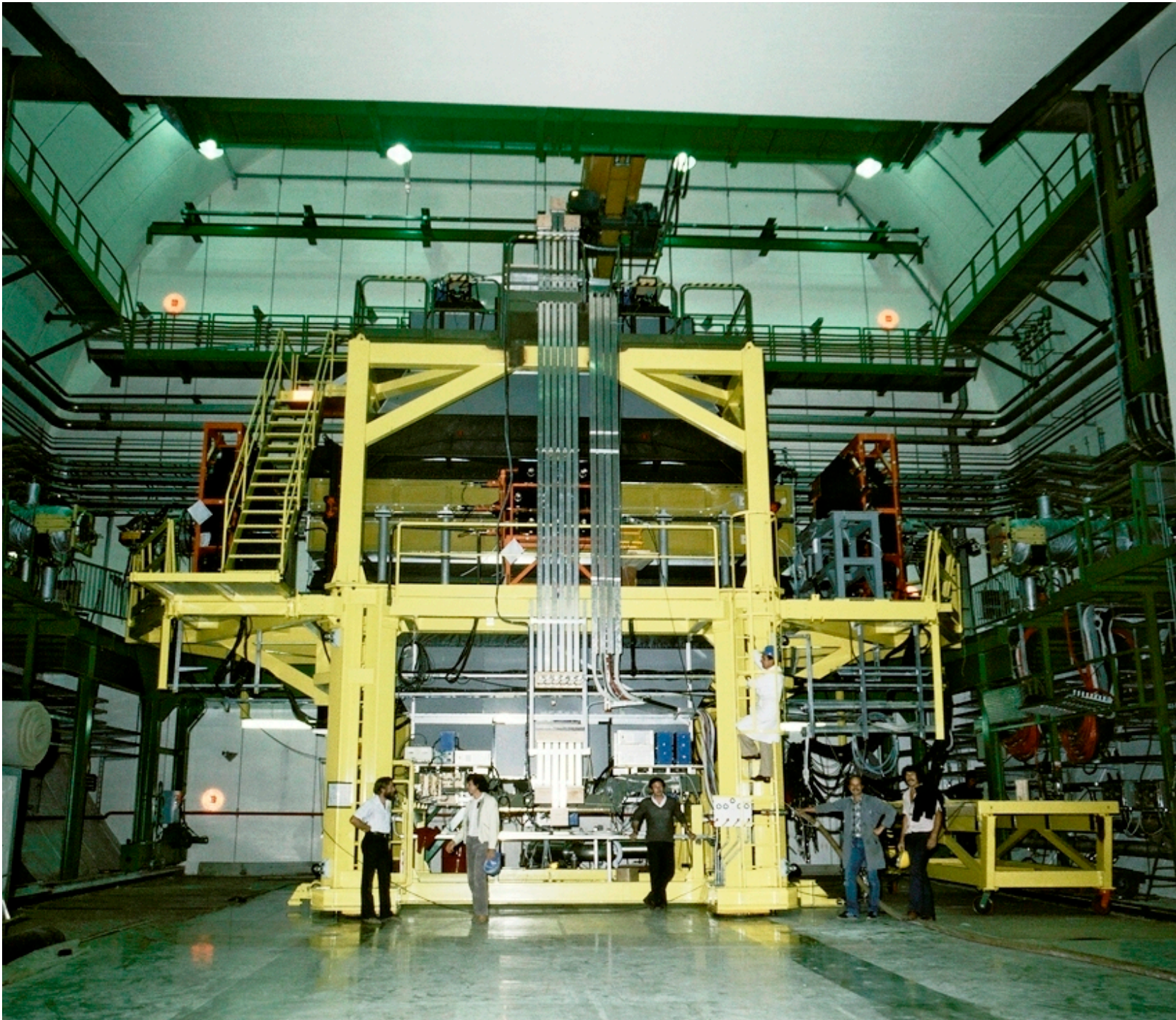


Super Proton Synchrotron
am CERN

in Betrieb seit 1976

1980: Aufbau UA5 am ISR



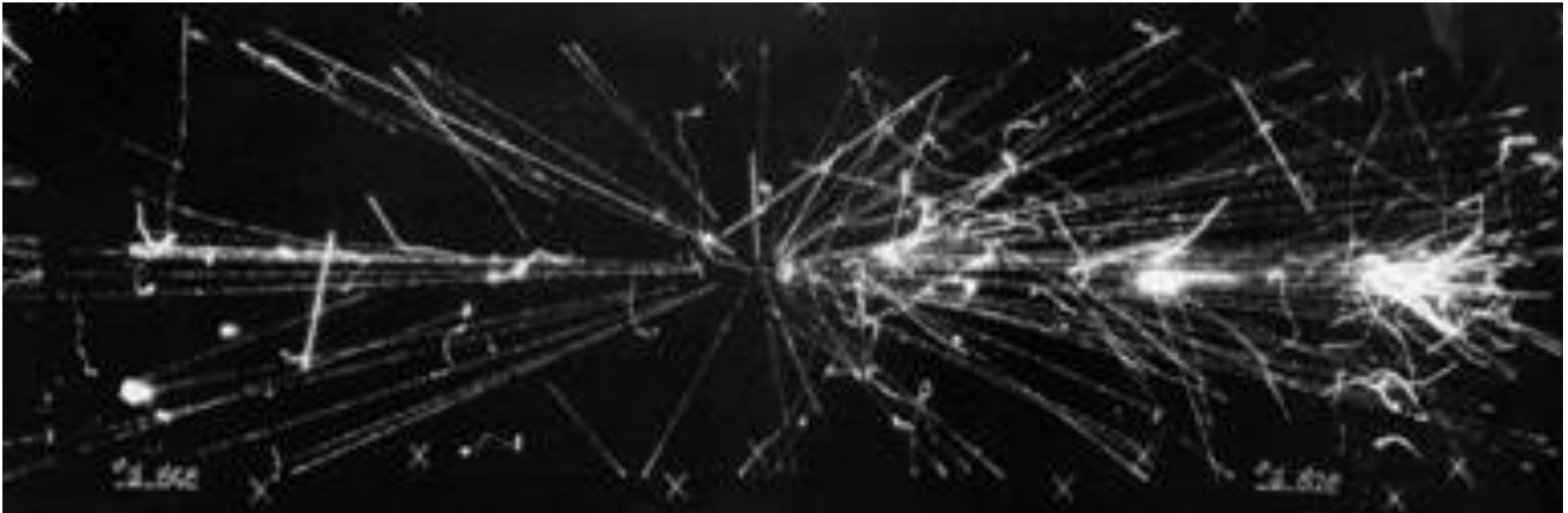


UA5

1981

Erste Kollisionen in UA5

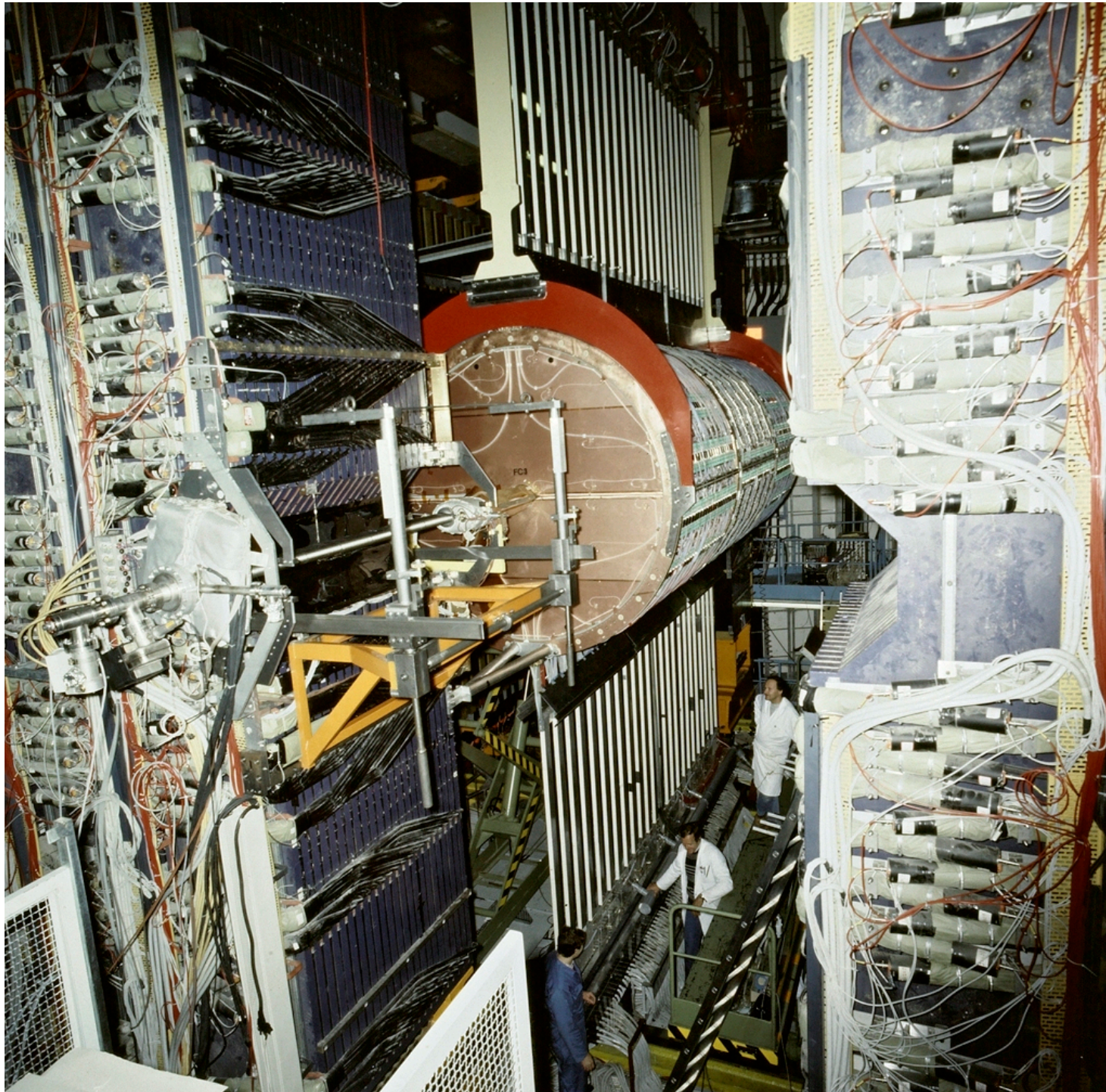
1981



Dissertation 1983:

“Particle Production in Proton-Antiproton-Reactions at 540 GeV Center-of-Mass Energy”

(Minimum Bias triggered events)

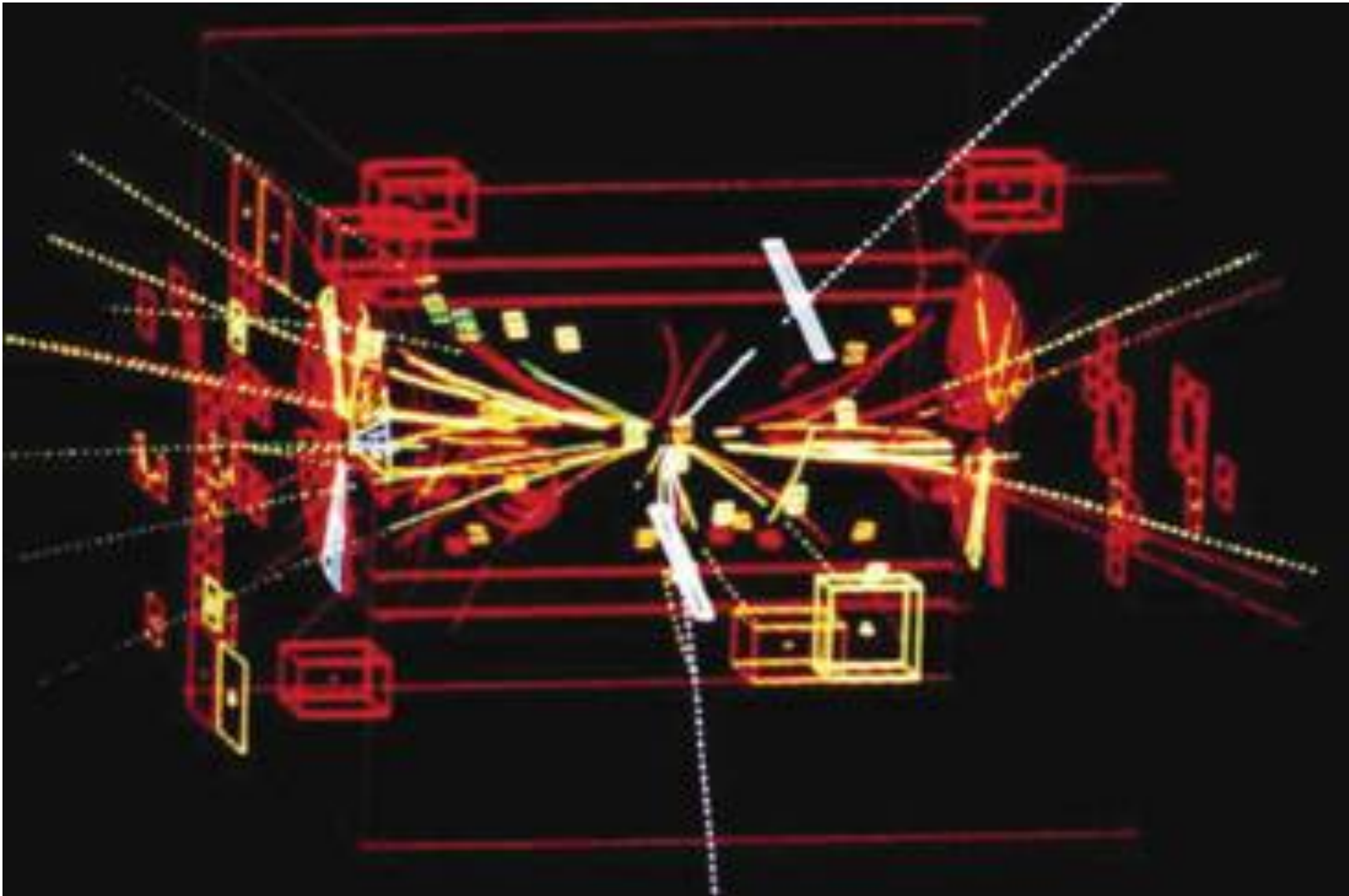


UA1 1984

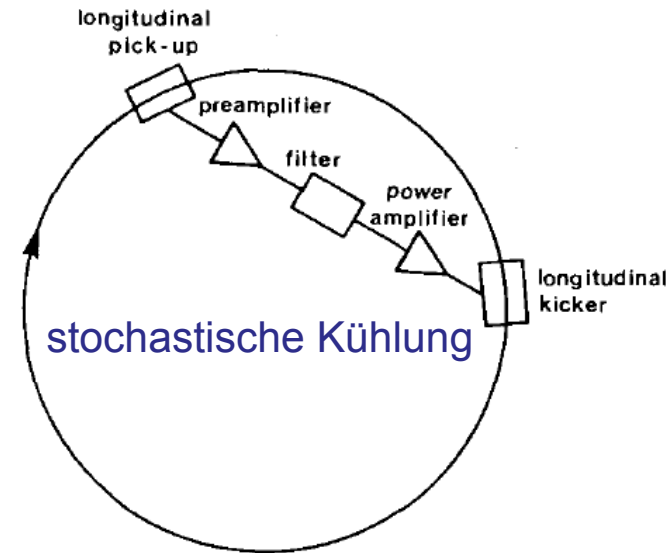
CERN Fellow
1984 – 1985

CERN
Research Staff
1986 – 1989

Z-Boson-Ereignis in UA 1 im Jahr 1983



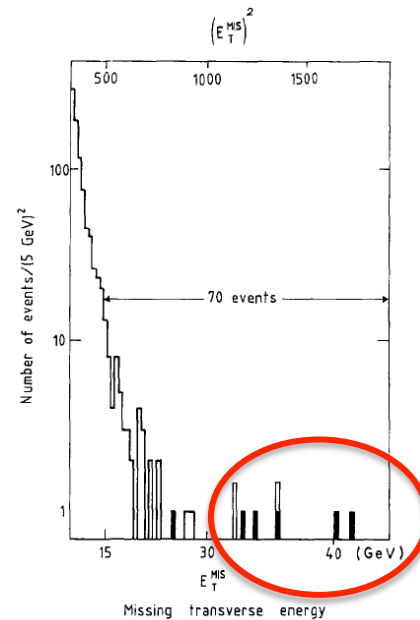
Nobelpreis 1984



Simon van der Meer



Carlo Rubbia



großer
fehlender Transversalimpuls

Phys. Lett. 122B, 103

**Production Properties of the Intermediate Vector Bosons W and Z
at the CERN $p\bar{p}$ Collider**

THOMAS MÜLLER

CERN, Geneva, Switzerland (UA 1 Collaboration at CERN)

Contents

1. Introduction	340
2. Theoretical Aspects	341
2.1. The way to a unified description of weak and electromagnetic interactions	341
2.2. General properties of W and Z bosons in the framework of the Standard Model	344
2.3. The production mechanism of W and Z in $p\bar{p}$ collisions	346
2.4. The structure of events with a W or Z boson	350
3. The UA 1 and UA 2 Experiments at CERN	351
3.1. The $p\bar{p}$ Collider	351
3.2. Status of the experiment UA 1 and UA 2 up to 1986	353
3.3. Trigger and data taking	359
4. Detection of W and Z Bosons	360
4.1. IVB decays into leptons of the three known generations	360
4.2. IVB decays into quarks of the three known generations	369
4.3. Search for IVB decays into leptons and quarks of higher generations	371
4.4. Search for IVB decays into supersymmetric particles	373
5. Properties of the Weak Bosons	374
5.1. Masses and decay widths	374
5.2. Charge asymmetry in IVB decays, and the spin of the W	378
6. Production Properties of W and Z	381
6.1. Production cross-sections and the test of universality in weak couplings to leptons	381
6.2. Longitudinal motion of IVBs	386
6.3. Transverse emission of W and Z	387
6.4. Pair production of weak bosons	393
6.5. Is there a massive object decaying into IVBs?	394

Frühe Vorhersagen von M_{top}

1979 G. Preparata, Phys. Lett. 82B, 398

$$m_c \approx 4 m_s \Rightarrow m_t \approx 4 m_b ? \Rightarrow m_t \approx 21 \text{ GeV}$$

1980 S. Glashow (Nobelpreis 1979), Phys. Rev. Lett. 45, 1914

$$m(\text{Toponium}) \approx (38 \pm 2) \text{ GeV}$$

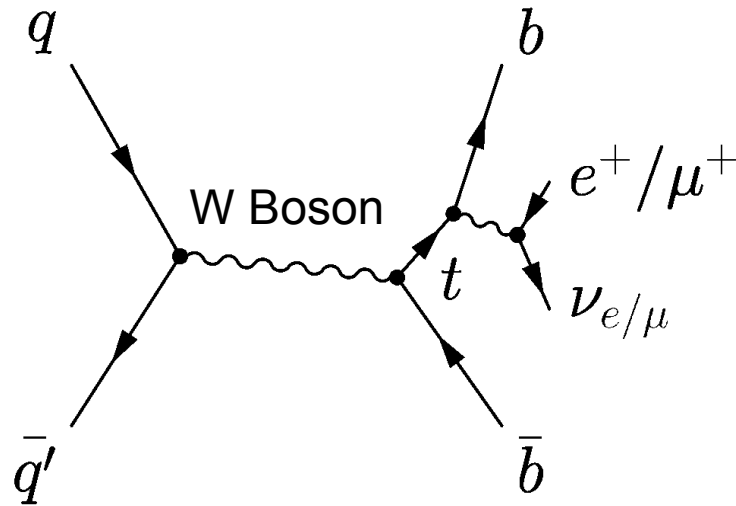
1981 A. Buras, Phys. Rev. Lett. 46, 1354

$$\Delta M = m(K_L) - m(K_S) \text{ und Zerfallsrate } \Gamma \text{ von } K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

$$\Rightarrow m_t < 47 \text{ GeV}$$



Die „Beinahe“-Entdeckung des Top-Quarks



Suche nach W-Bosonen, die Top-Quark und Anti-Bottom-Quark zerfallen.

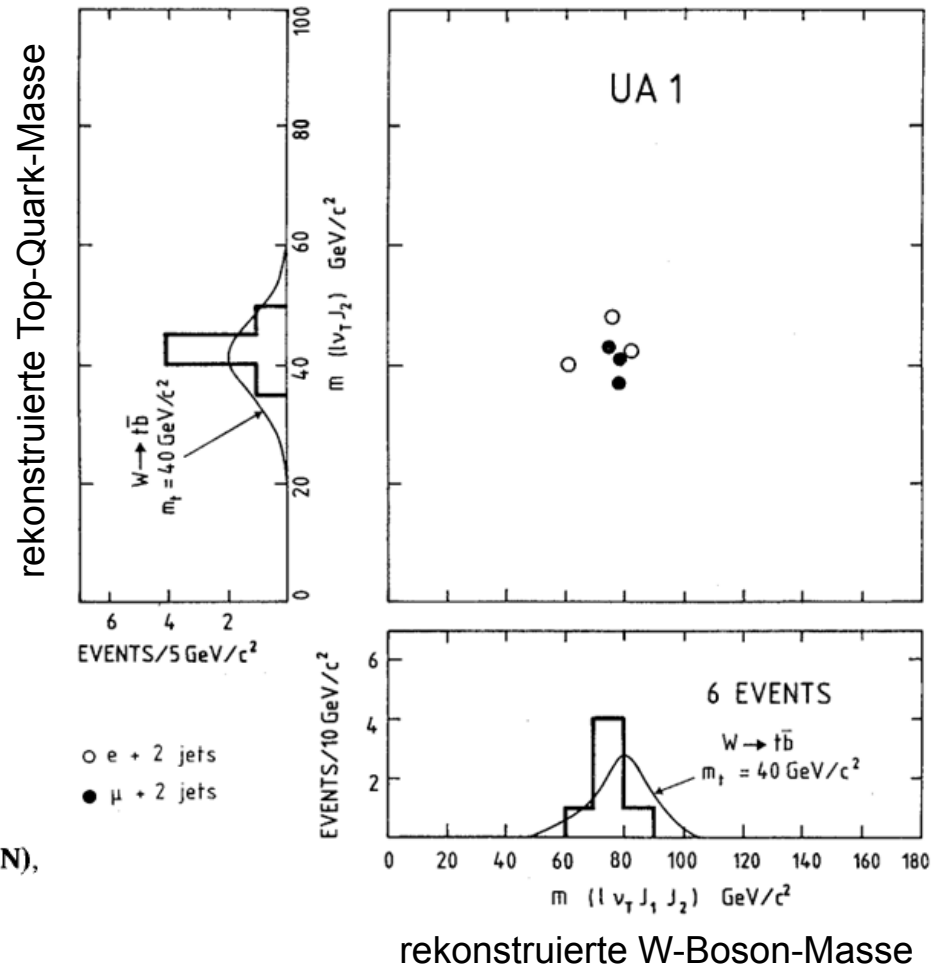
→ Einzelne Top-Quarks

ASSOCIATED PRODUCTION OF AN ISOLATED, LARGE-TRANSVERSE-MOMENTUM LEPTON (ELECTRON OR MUON), AND TWO JETS AT THE CERN $p\bar{p}$ COLLIDER

UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland

A clear signal is observed for the production of three centrally produced jets. The two-jet events

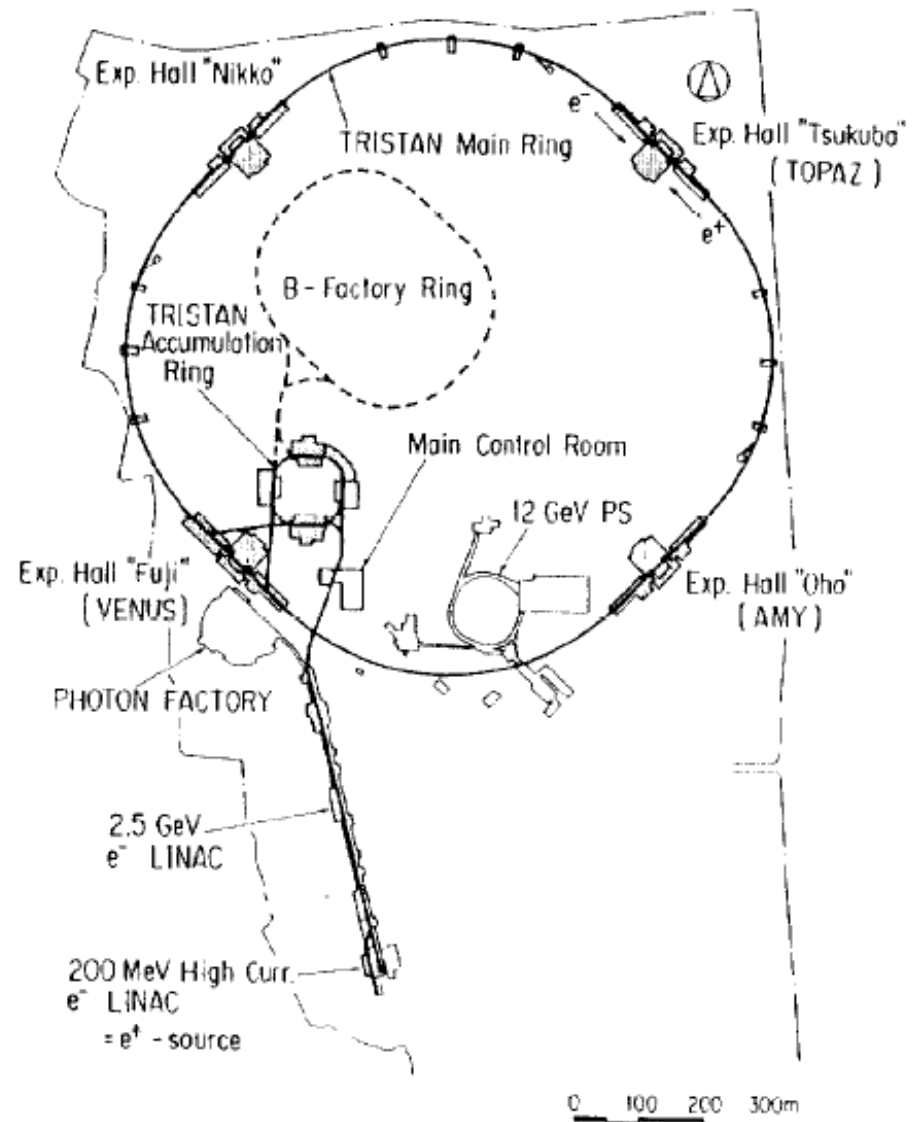
UA1 beobachtet Überschuss an Ereignissen



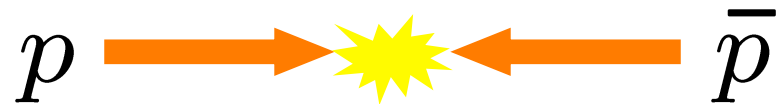
Phys. Lett. B 147, 493 (1984)

TRISTAN

- TRISTAN (e^+e^- @ $\sqrt{s} = 61$ GeV) am KEK.
- $m_t > 30.2$ GeV



Jagd nach dem Top-Quark am Tevatron



Das Rennen ums Top-Quark ganz konkret ...

Fermilab Race 1990



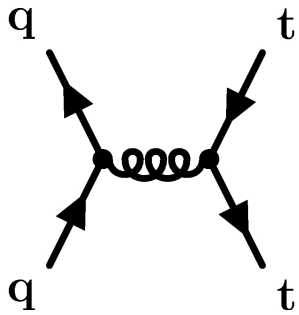
Professor an der UCLA

1990 – 1995

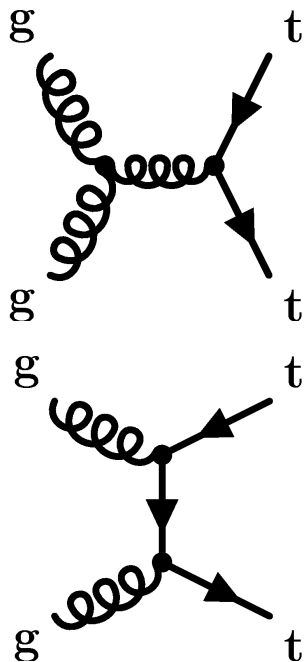


Erste Top-Quark-Antiquark-Kandidaten

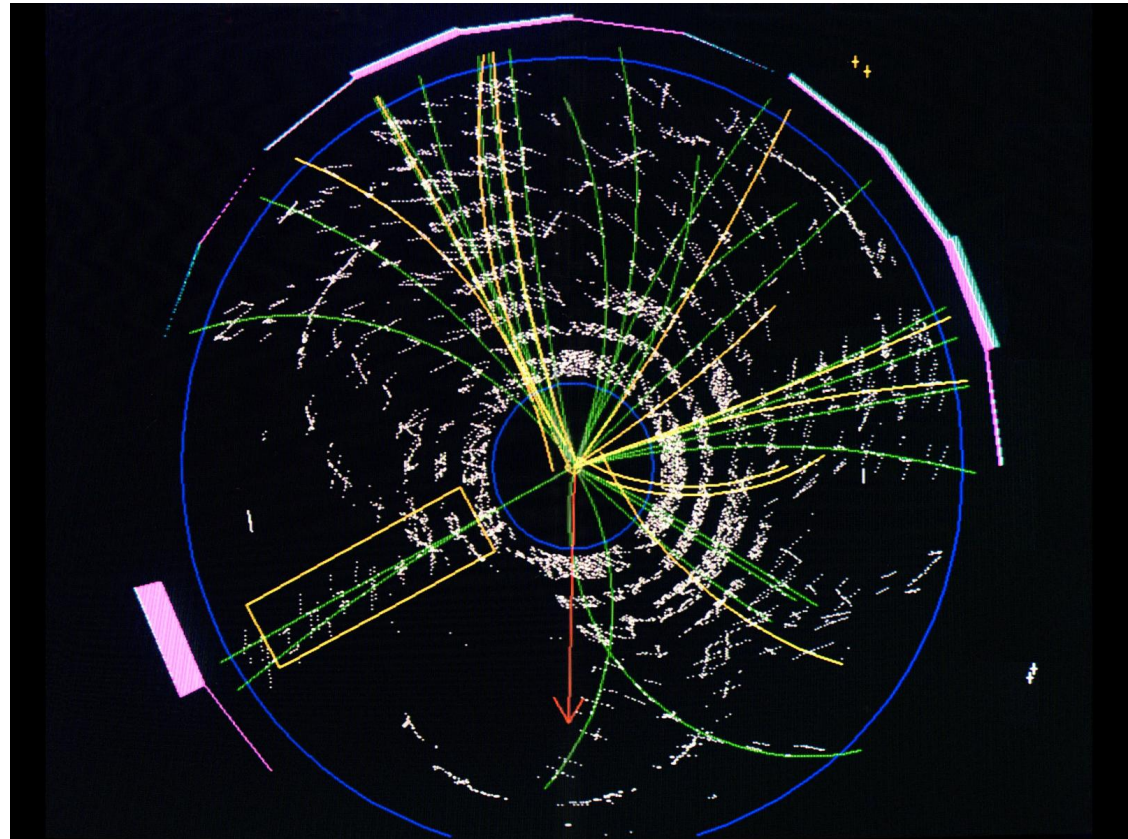
quark-antiquark annihilation



gluon-gluon fusion



CDF Top-Quark-Antiquark Kandidat (24.09.1992)



Top-Quark-Entdeckung 1995



und



CDF:

$$m_{\text{top}} = 176 \pm 8 \text{ (stat)} \pm 10 \text{ (syst)} \text{ GeV}/c^2$$

aktuell bei CMS @ LHC:

$$m_{\text{top}} = 172.5 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 1.5 \text{ (syst)} \text{ GeV}/c^2$$

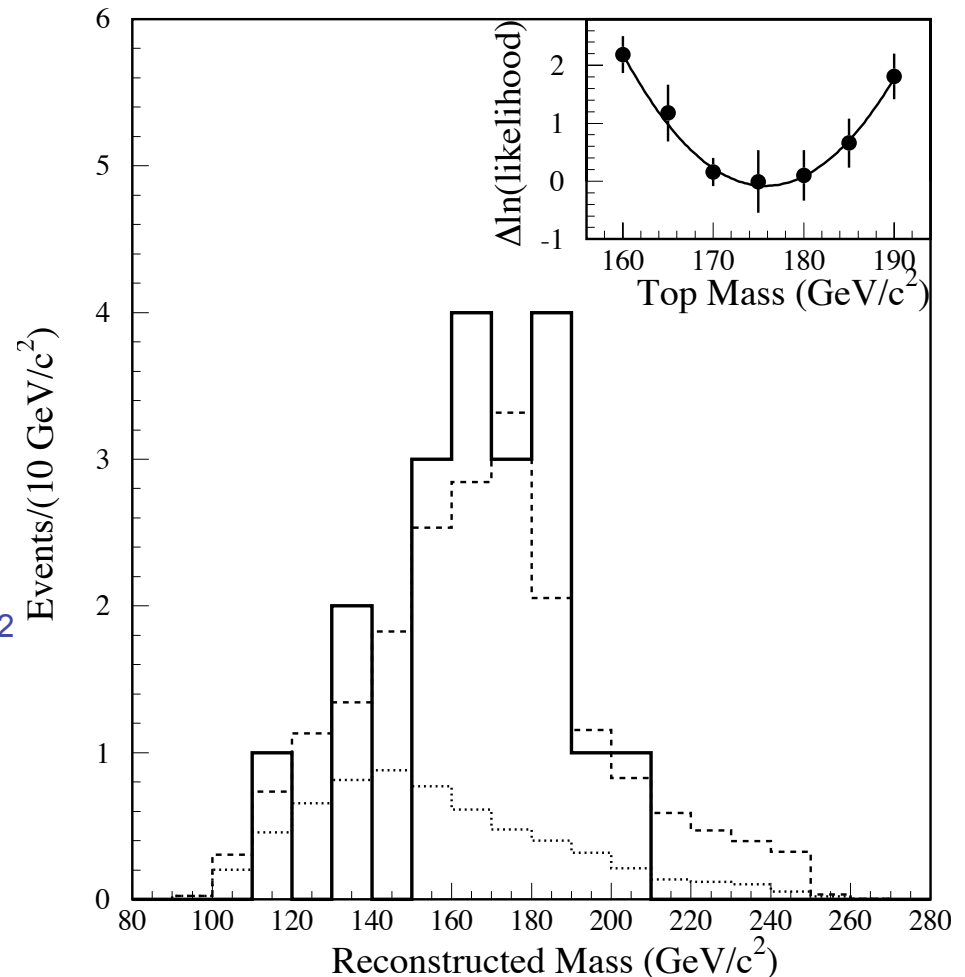
Evidenz:

F. Abe et al. (CDF), Phys. Rev. Lett. 73, 225 (1994).

Entdeckung:

F. Abe et al. (CDF), Phys. Rev. Lett. 74, 2626 (1995).

S. Abachi et al. (DØ), Phys. Rev. Lett. 74, 2632 (1995).



Massenverteilung des rekonstruierten Top-Quarks bei CDF

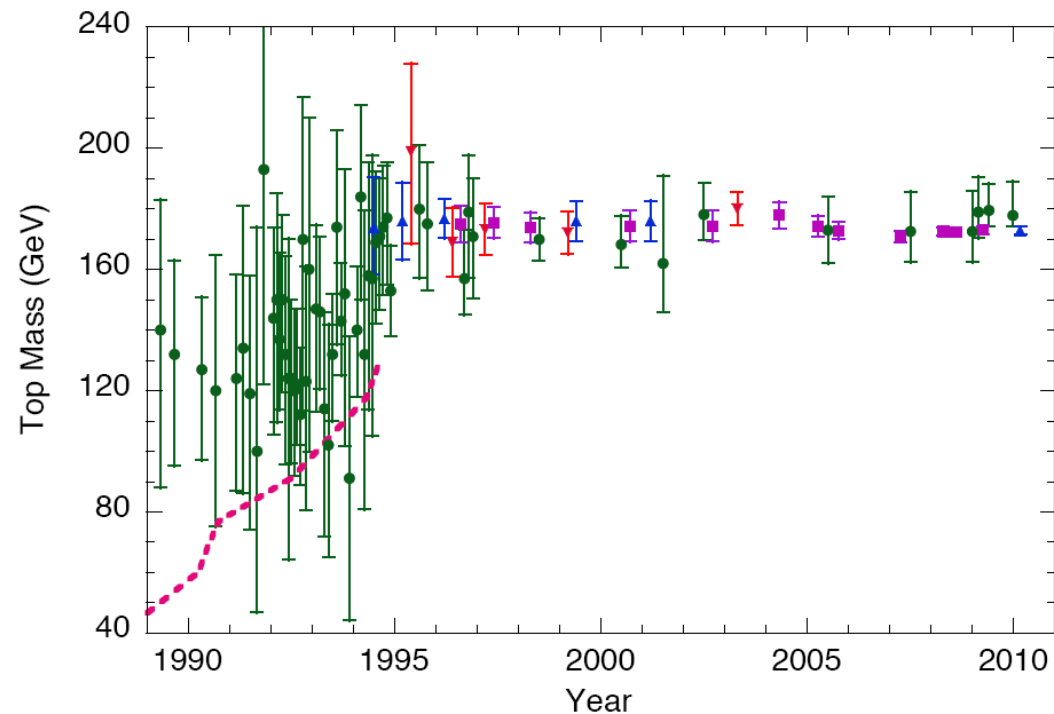
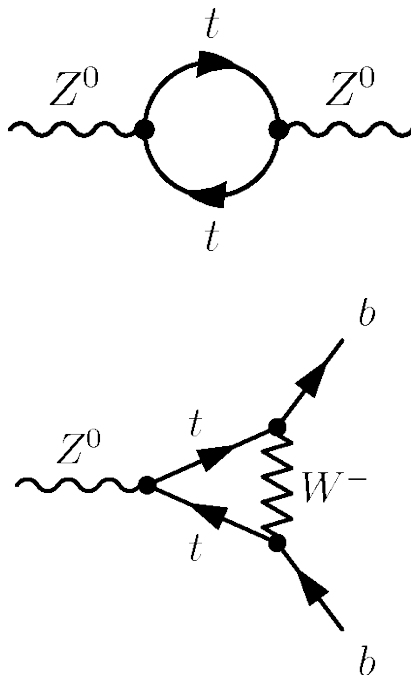
Übereinstimmung mit Vorhersagen

LEP und SLC

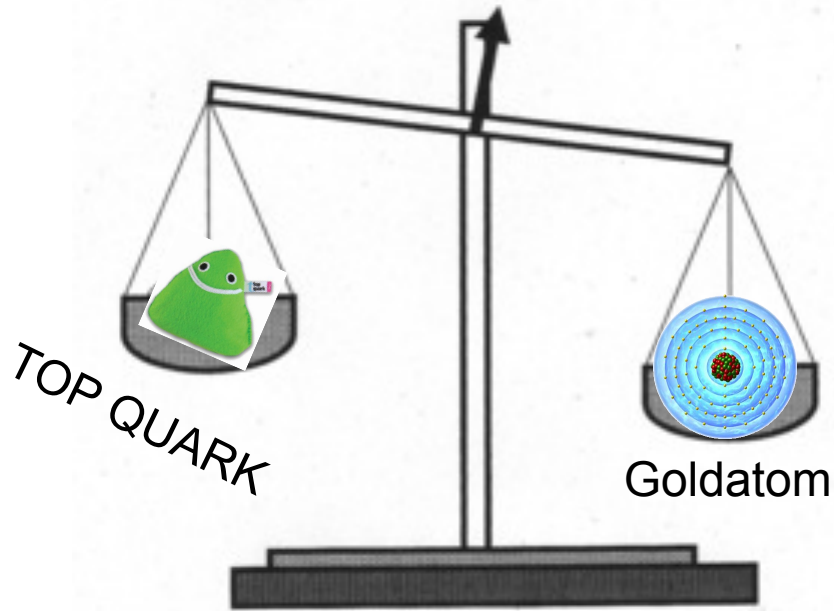
$$e^+e^- \rightarrow Z^0/\gamma^* \rightarrow \ell^+\ell^-/\nu\bar{\nu}/q\bar{q}$$

Vorhersage von m_{top} :

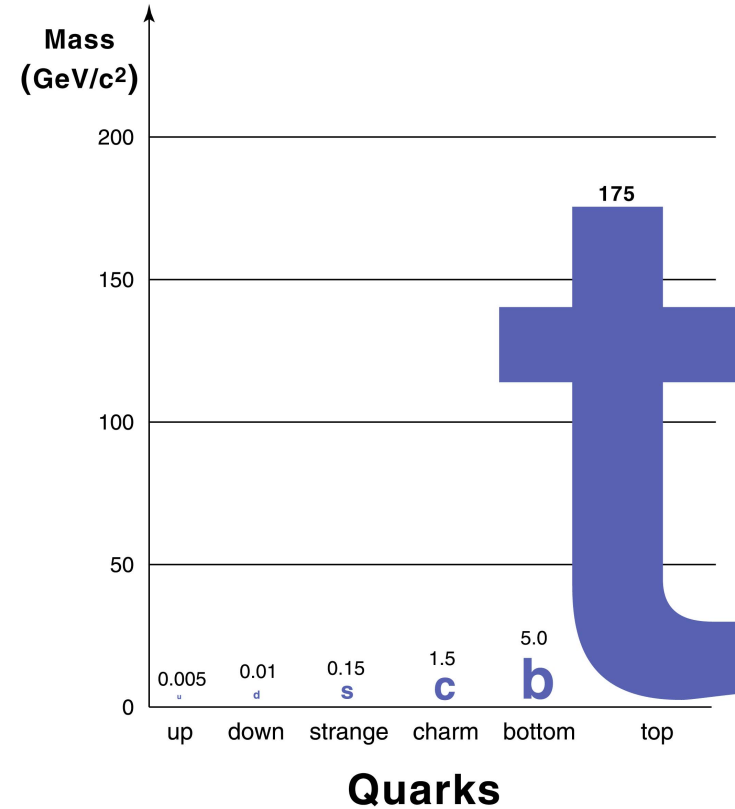
Elektroschwache Präzisionsmessungen + Berechnung von Strahlungskorrekturen (Schleifendiagramme)



Das Top-Quark ist schwer !!!



Quark-Massen



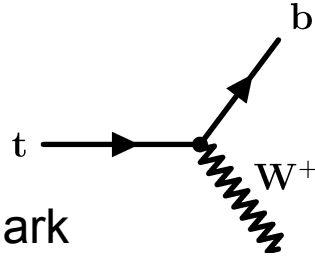
Fermilab 01-XXX

**5 Größenordnungen
zwischen Quarkmassen!**

Implikationen der großen Masse

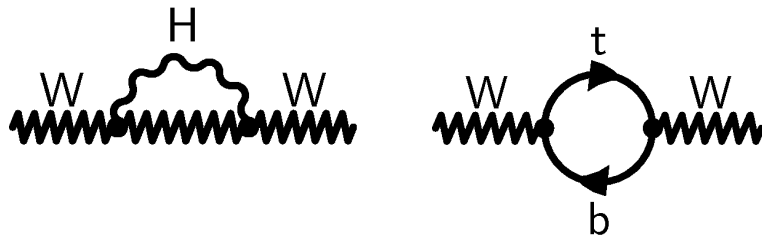
- $\tau_{\text{top}} \ll \tau_{\text{QCD}}$:

zerfällt als „nacktes“ Quark



- $M_t \gg M_b > M_c \gg M_s$

⇒ große Beiträge zu Schleifenkorrekturen

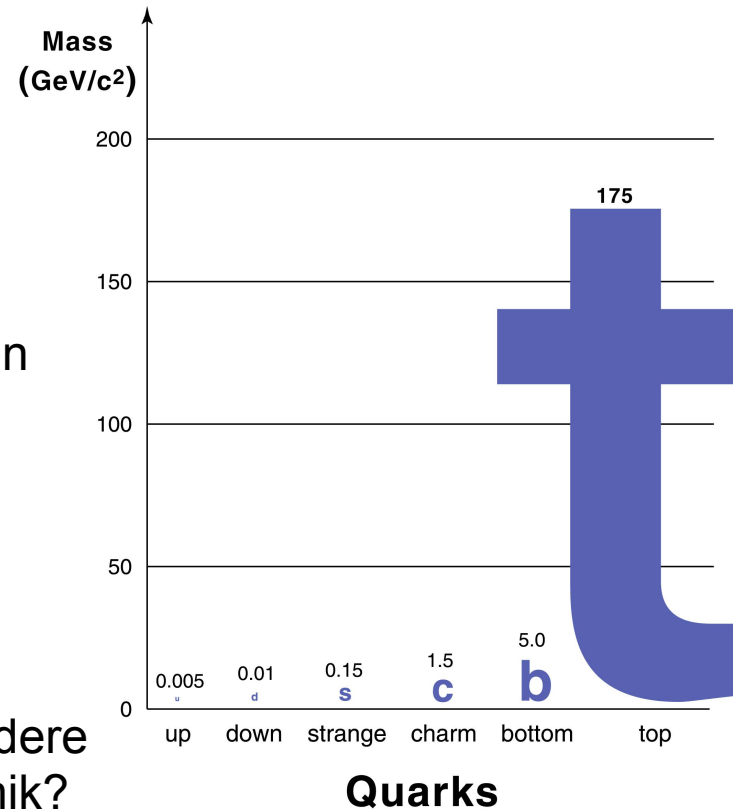


- $M_t \sim$ Skala der elektroschwachen Symmetriebrechung



Besondere Dynamik?

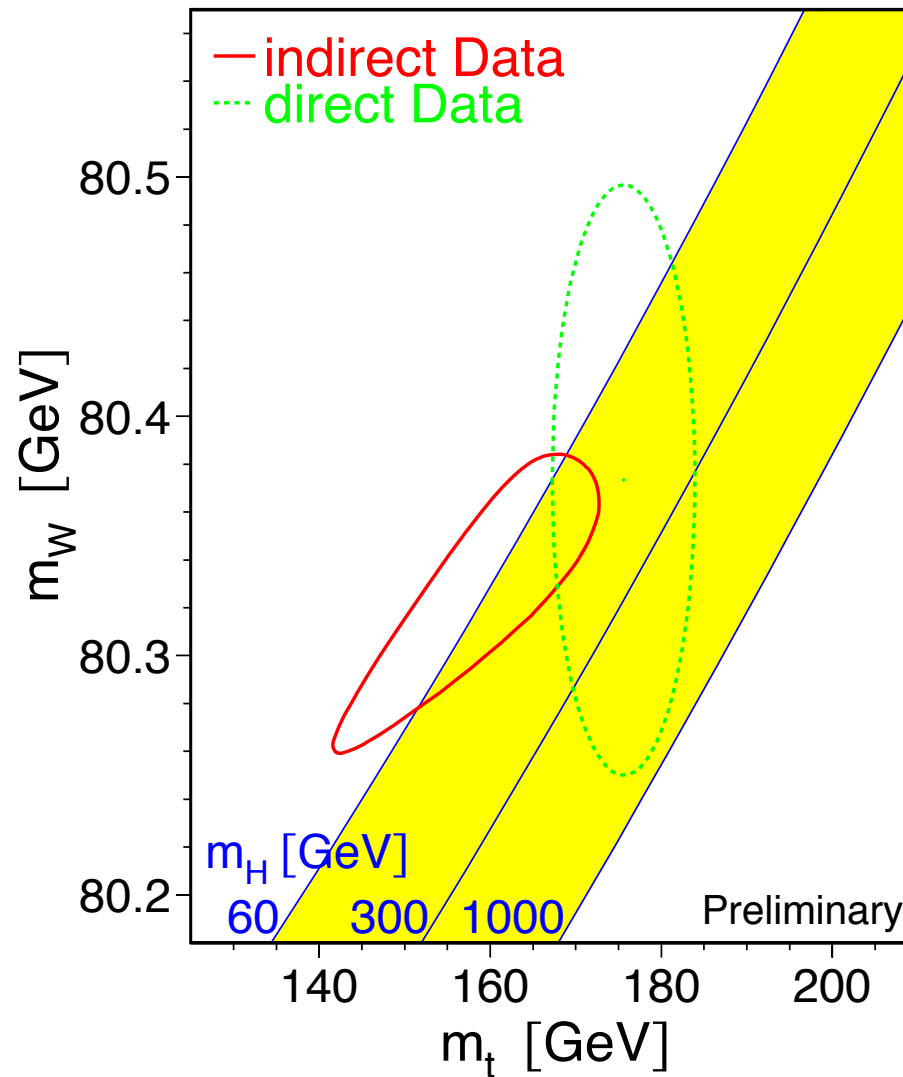
Quark-Massen



Fermilab 01-XXX

**5 Größenordnungen
zwischen Quarkmassen!**

Vorhersagen der Higgs-Masse



LEP EWWG
Stand 1997

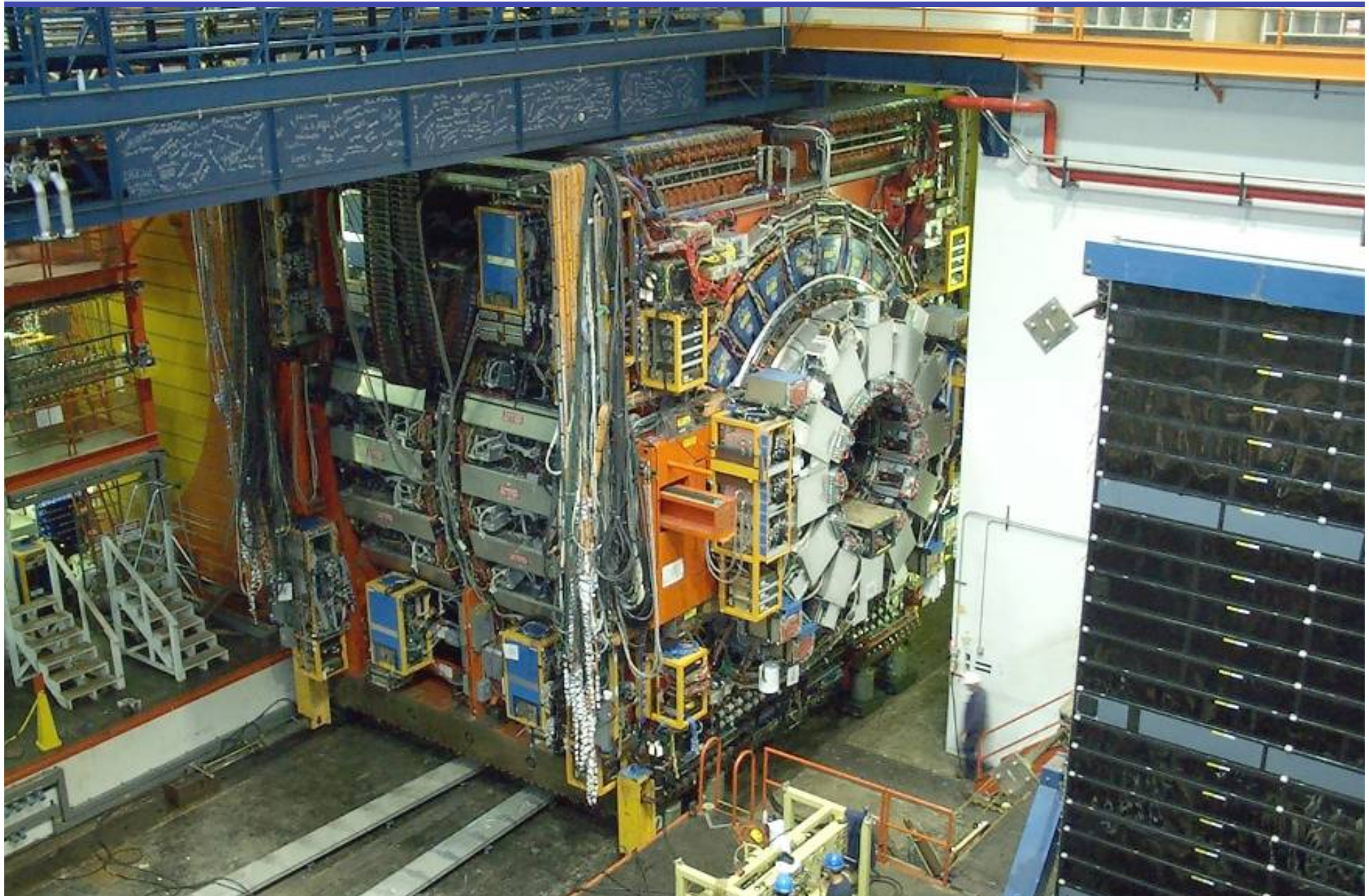
SSC Fellows 1992



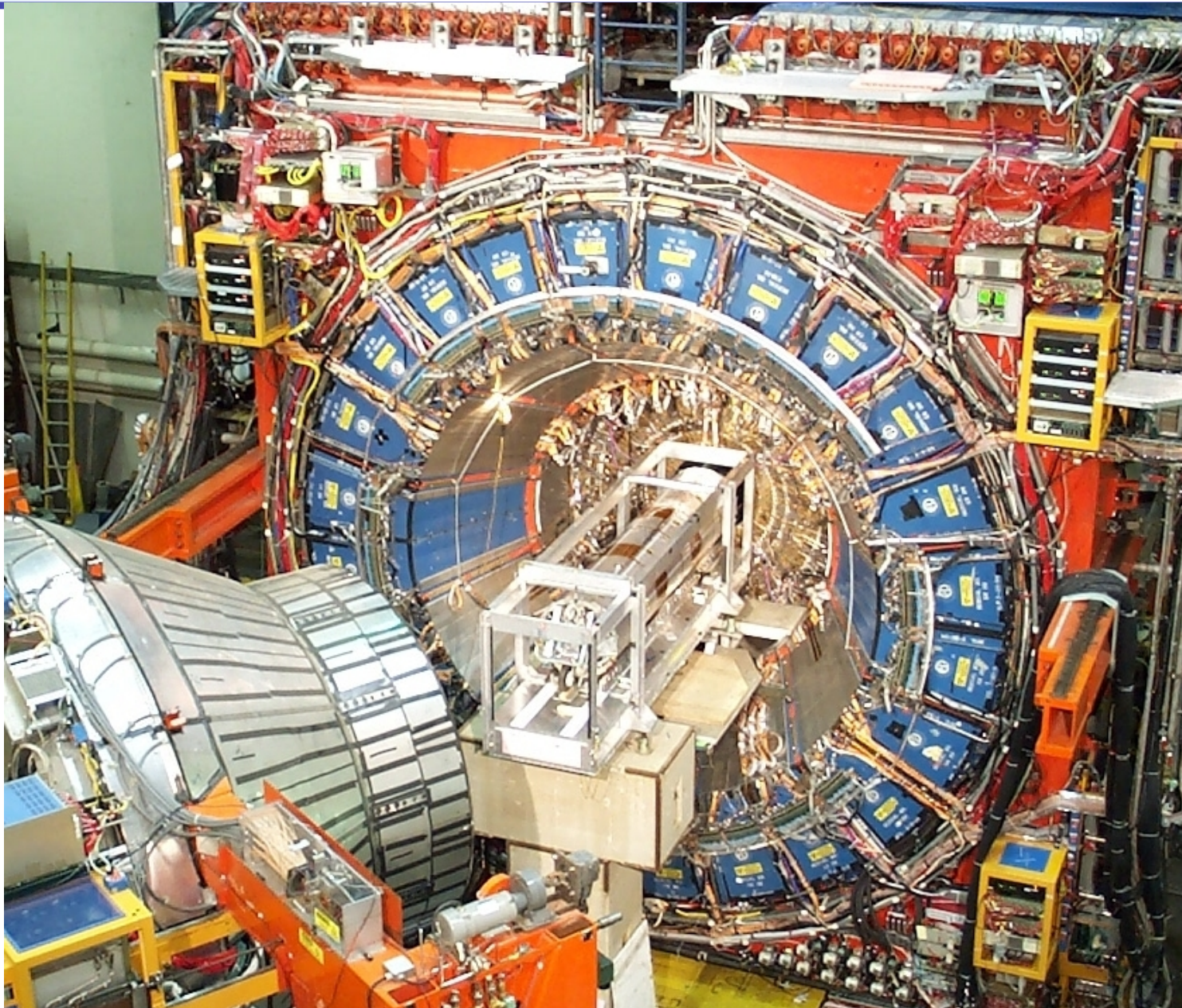


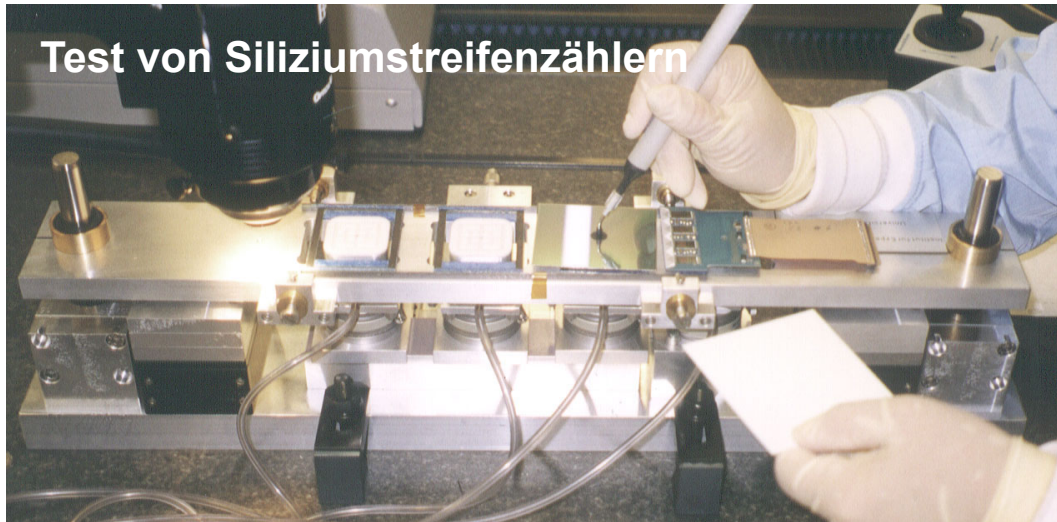
US LHC 1994

“Detector Roll-In” im Februar 2001



Einbau der Siliziumspurkammer



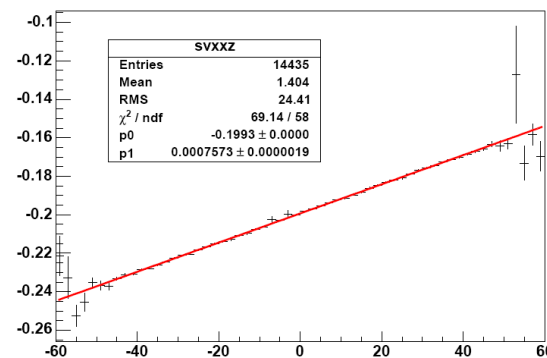
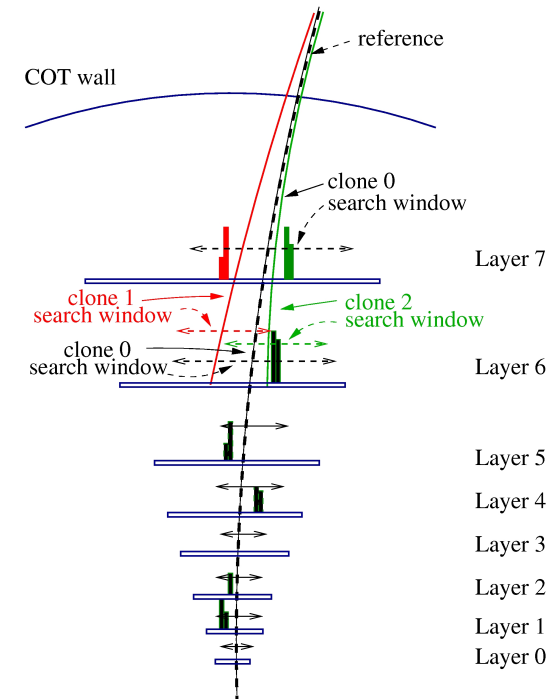


Test von Siliziumstreifenzählern



Online-Monitoring-Software

Spurrekonstruktion mit Kalmanfilter



Primärvertexrekonstruktion und Bestimmung der Strahlposition



CDF Kollaboration

im Jahr 2002



**12 Länder,
61 Institute,
600 Physiker**





**Promotion Andreas
Heiss 2001**



**Sakura of Tokio,
Naperville**



BELLE 2 Beteiligung des
EKP seit 2007



Top-Physik in Karlsruhe 2003 – 2009

8 Journal-Artikel zu 4 Themen:

- **Observation of Single Top Quark Production and Measurement of $|V_{tb}|$ with CDF**
[Phys. Rev. D 82, 112005 \(2010\)](#). Preprint [arXiv:1004.1181 \[hep-ex\]](#). [SPIRES entry](#). **TOPCITE = 50+**
- **Observation of Electroweak Single Top Quark Production**
[Phys. Rev. Lett. 103, 092002 \(2009\)](#). Preprint [arXiv:0903.0885 \[hep-ex\]](#). [INSPIRE entry](#). **TOPCITE = 200+**
- **Search for top-quark production via flavor-changing neutral currents in W+1 jet events at CDF.**
[Phys. Rev. Lett. 102, 151801 \(2009\)](#). Preprint [arXiv:0812.3400 \[hep-ex\]](#). [SPIRES entry](#).
- **Measurement of W-Boson Helicity Fractions in Top-Quark Decays Using $\cos \theta^*$**
[Phys. Lett. B 674, 160-167 \(2009\)](#). Preprint [arXiv: 0811.0344 \[hep-ex\]](#). [SPIRES entry](#).
- **Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section at CDF**
[Phys. Rev. Lett. 101, 252001 \(2008\)](#). Preprint [arXiv:0809.2581 \[hep-ex\]](#). [SPIRES entry](#). **TOPCITE = 50+**
- **Forward-Backward Asymmetry in Top Quark Production in Proton-Antiproton Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV**
[Phys. Rev. Lett. 101, 202001 \(2008\)](#). Preprint [arXiv: 0806.2472 \[hep-ex\]](#). [INSPIRE entry](#). **TOPCITE = 100+**
- **Measurement of the Helicity Fractions of W Bosons from Top Quark Decays Using Fully Reconstructed Top-Antitop Events with CDF II**
[Phys. Rev. D 75, 052001 \(2007\)](#). Preprint [hep-ex/0612011](#) from arXiv. [SPIRES entry](#).
- **Search for electroweak single top quark production in p pbar collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV**
[Phys. Rev. D 71, 012005 \(2005\)](#). Preprint [hep-ex/0410058](#) from arXiv. [SPIRES entry](#). **TOPCITE = 50+**

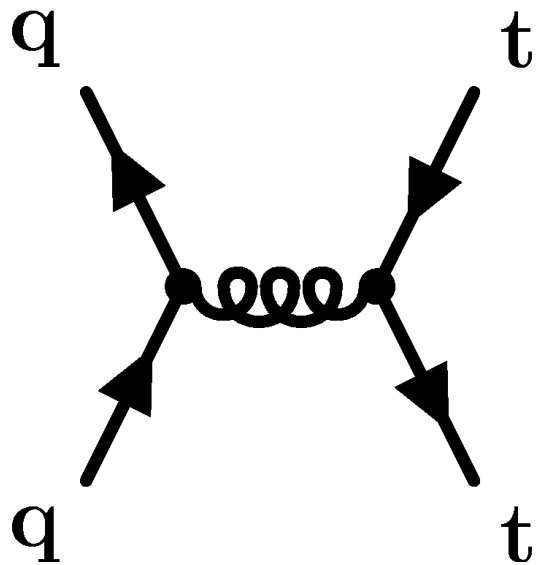
Top-Physik in Karlsruhe 2003 – 2009

Suche nach seltsamen “Tierchen”:
den Single Top-Quarks

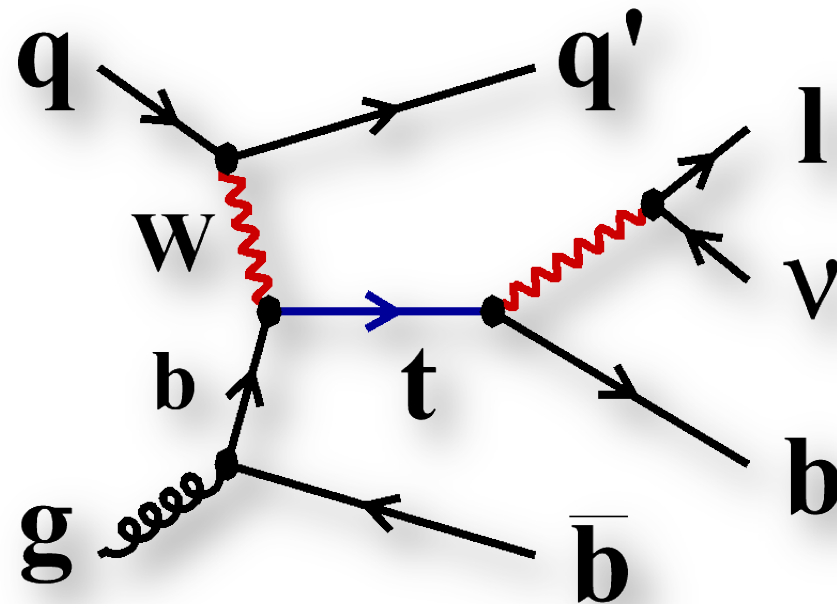


Einzelne Top-Quarks

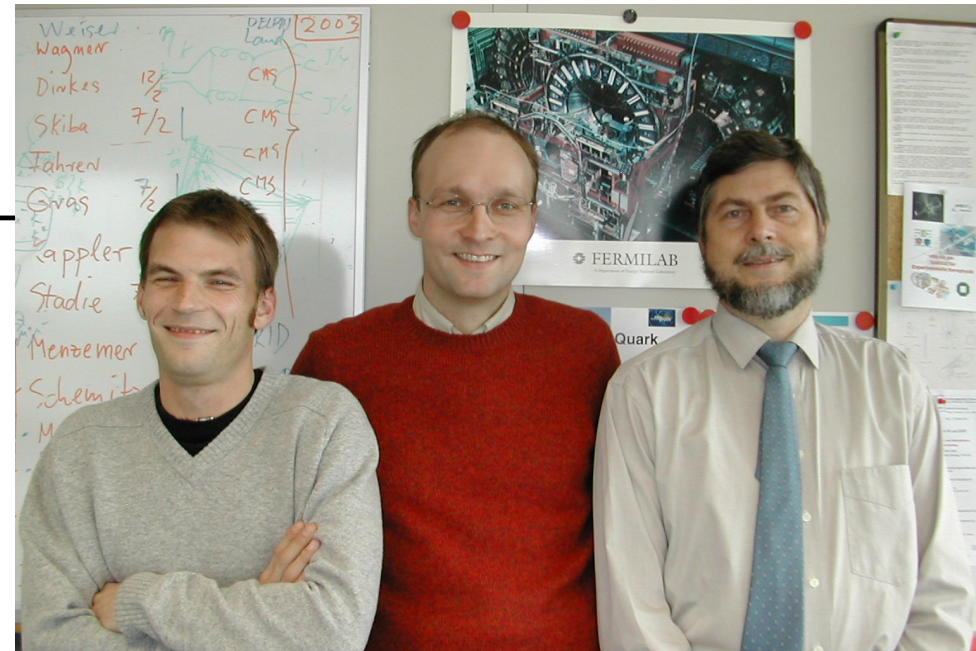
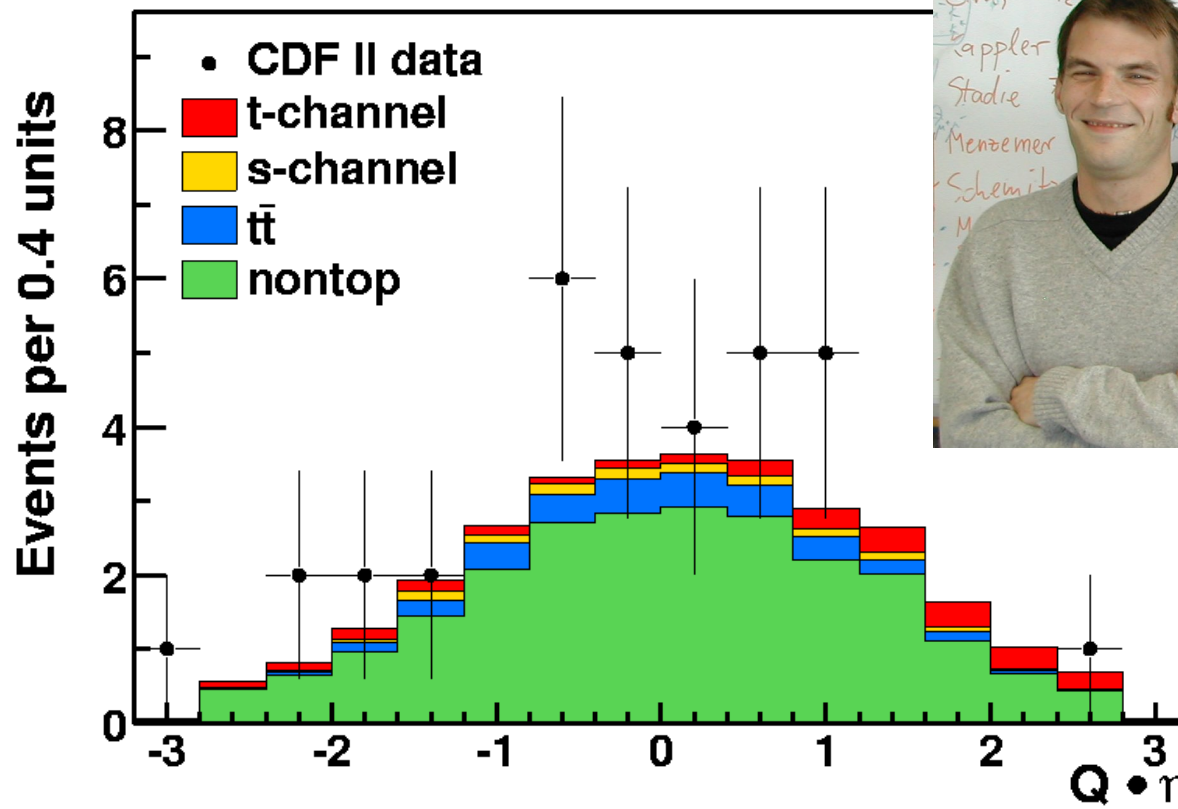
“Normale” Produktion von Top-Quarks über die starke Wechselwirkung



Produktion über die schwache Wechselwirkung



Erste Analyse zu Single Top-Quarks in Run II



Single Top Team 2004

Nur Limits, aber unsere erste Run II Publikation:
Phys. Rev. D 71, 012005 (2005)

single top discovery!!!
2009

super discriminant

statistical tools

multivariate methods

develop back-
ground model

estimate
background

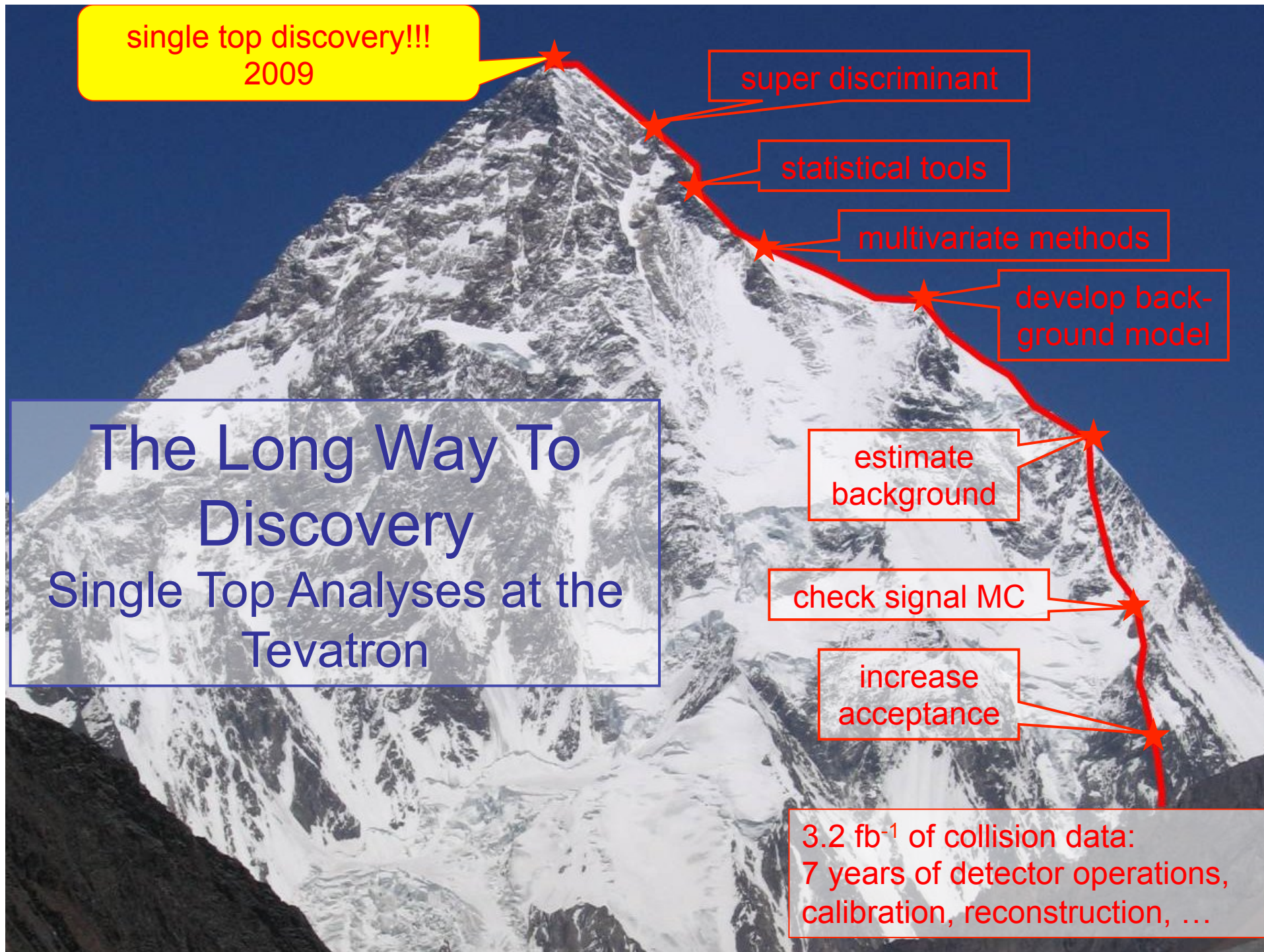
check signal MC

increase
acceptance

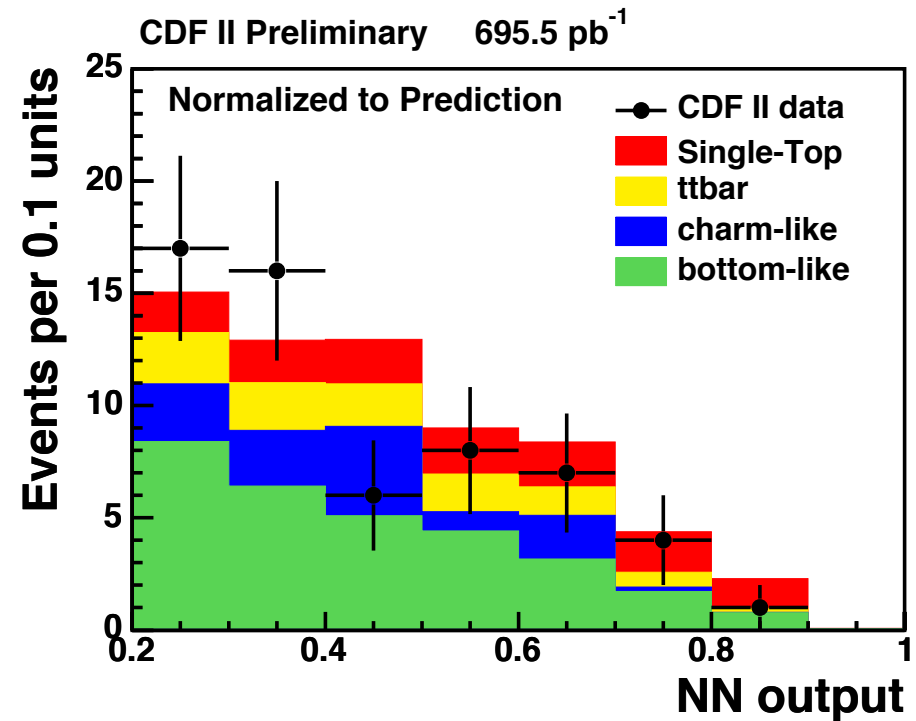
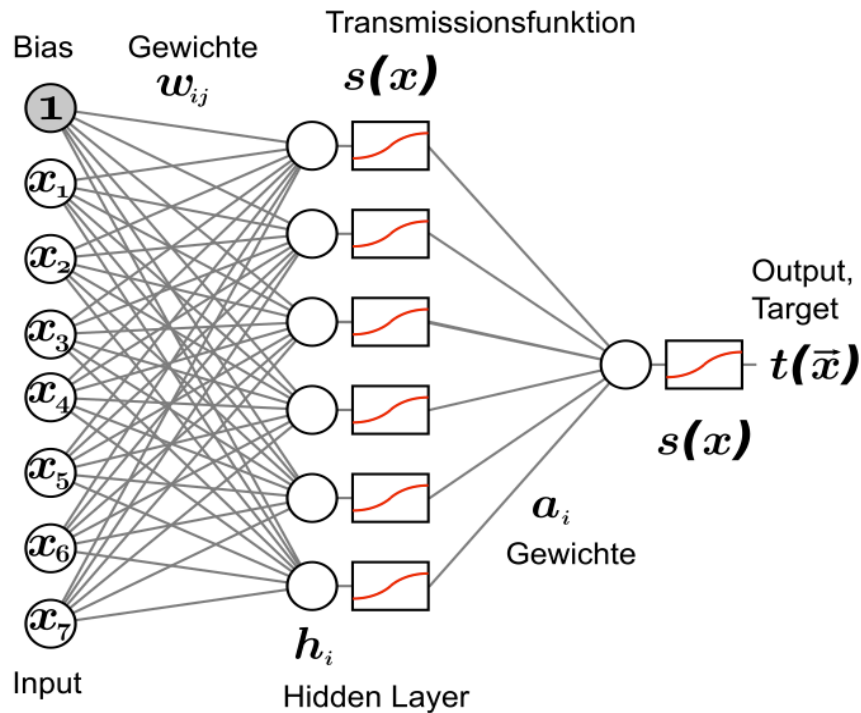
3.2 fb⁻¹ of collision data:
7 years of detector operations,
calibration, reconstruction, ...

The Long Way To Discovery

Single Top Analyses at the Tevatron



Analyse mit Neuronalen Netze



Stand: Frühjahr 2006

NeuroBayes[®]

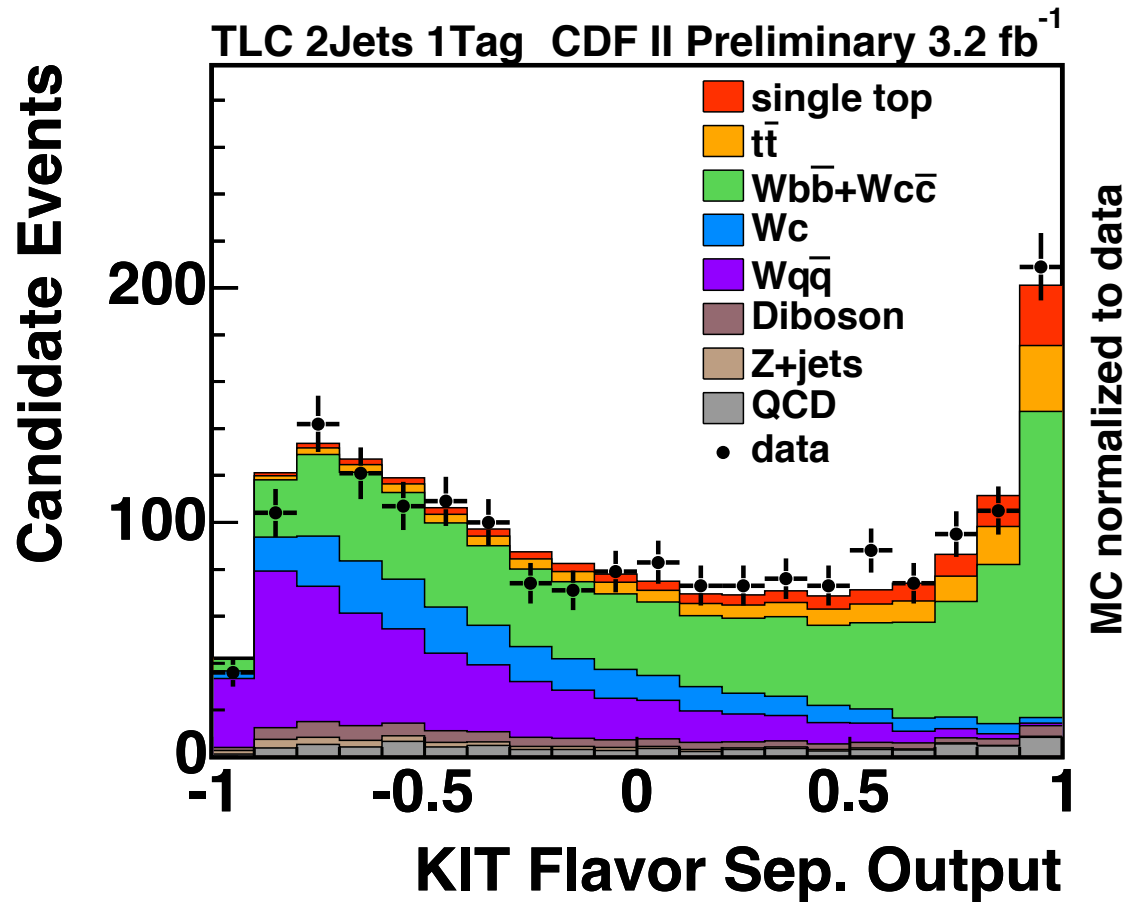
<phi-t>[®]
Physics Information Technologies

Conf. Proc. C060726 (2006) 733-737.
hep-ex/0610074.

Karlsruher Spuren bei CDF

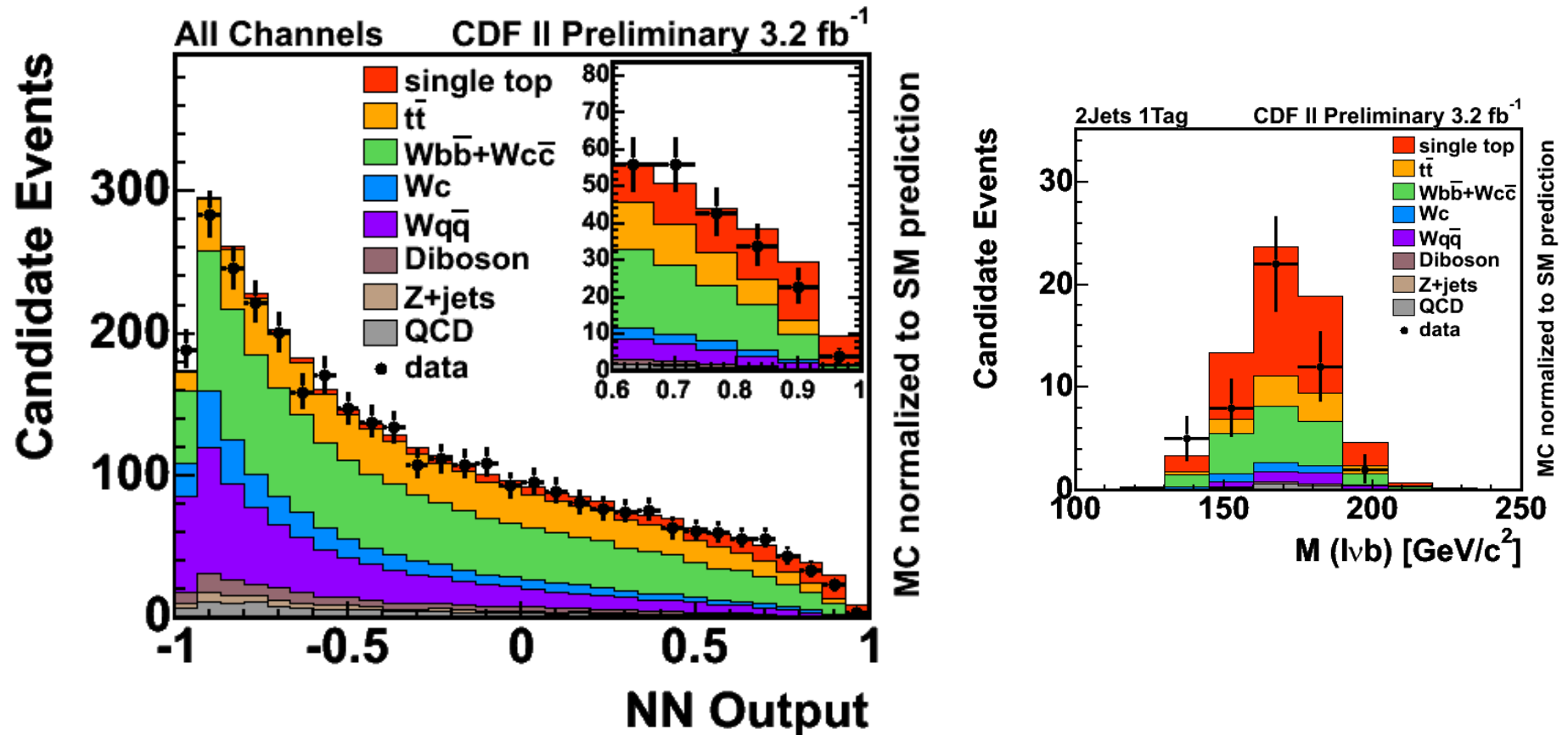
Thomas' Motto: "Tue Gutes und sprich
darüber."

Karlsruhe Flavor Separator



Entdeckung der Produktion einzelner Top-Quarks

Dissertation, Dr. Jan Lück



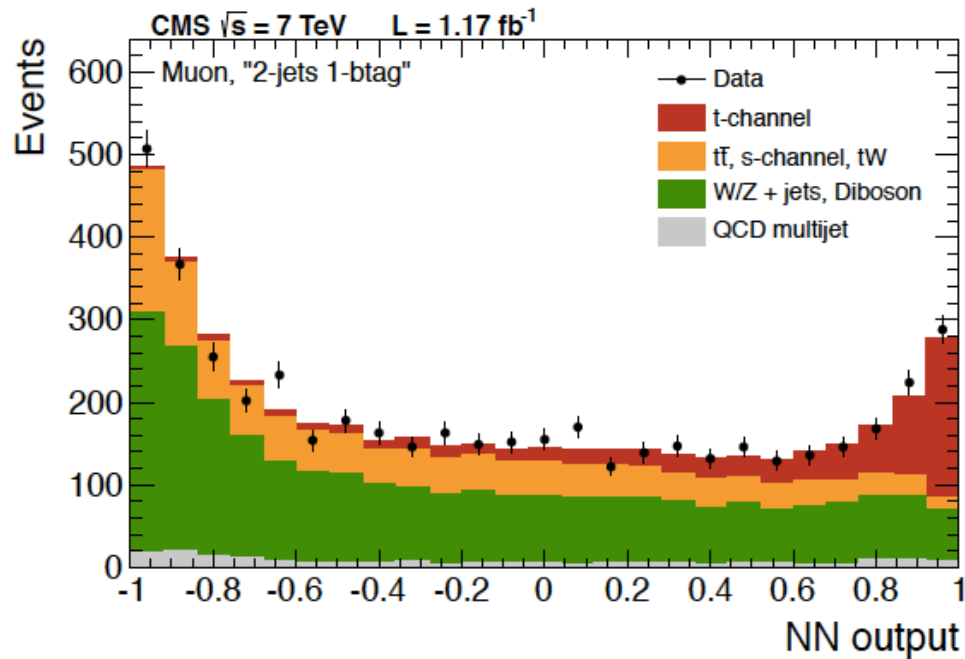
- Observation of Electroweak Single Top Quark Production, Phys. Rev. Lett. 103, 092002 (2009). [75 Zitate](#).
- Observation of Single Top Quark Production and Measurement of $|V_{tb}|$ with CDF, Phys. Rev. D 82, 112005 (2010). [252 Zitate](#).

Der ungläubige Thomas

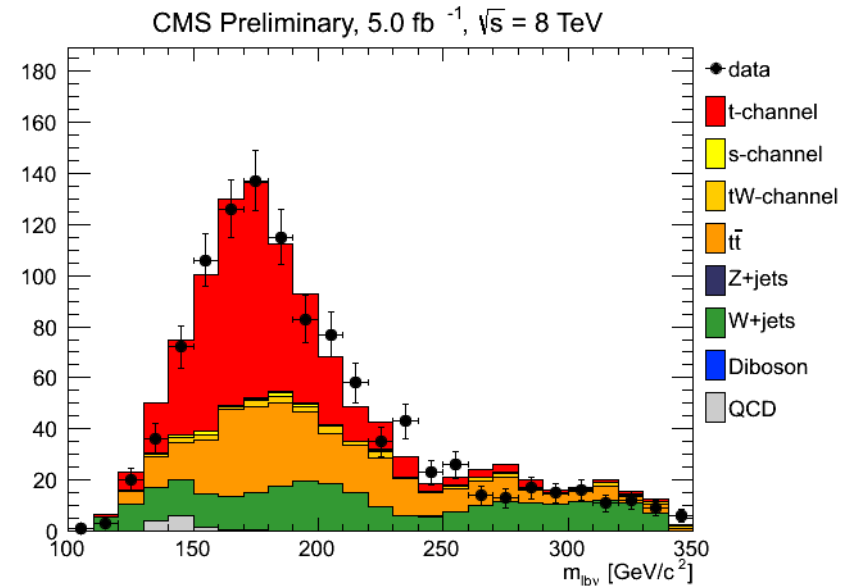


Single Top-Quarks bei CMS

8 TeV Analyse:
schnittbasiert

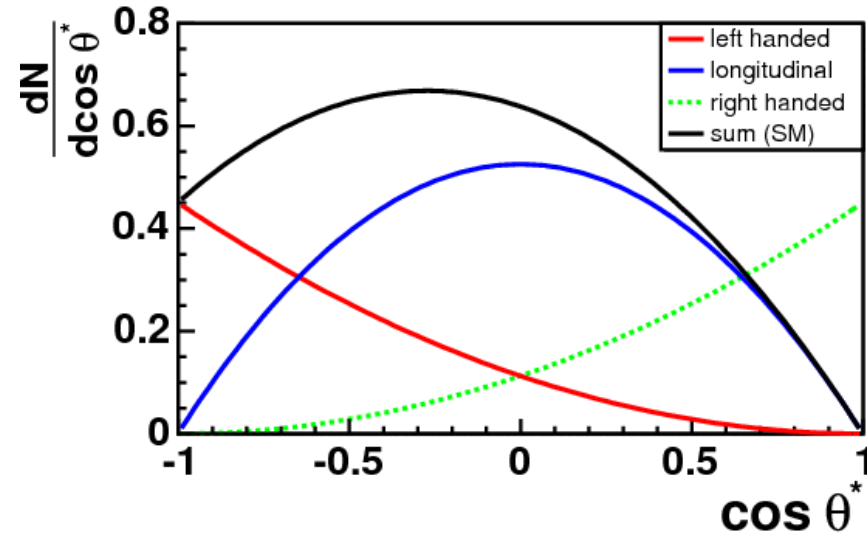
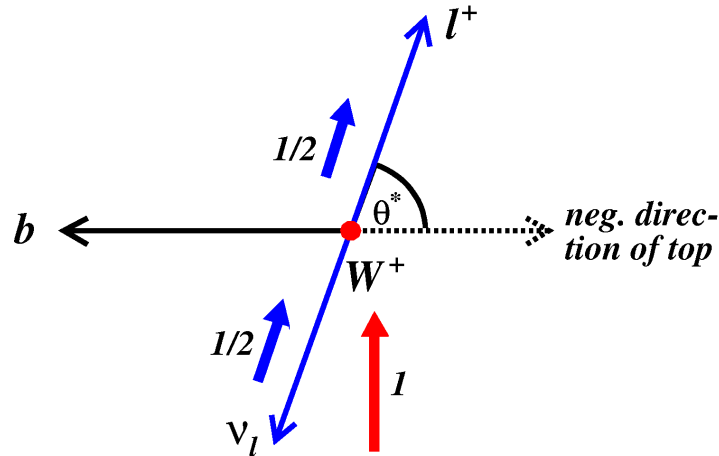


EKP Single-Top-Analyse 2012



Single Top-Quarks:
Jetzt auch mit "Massenpeak"
und ohne multivariate
Methoden.

Helizität des W-Bosons im Top-Quark-Zerfall

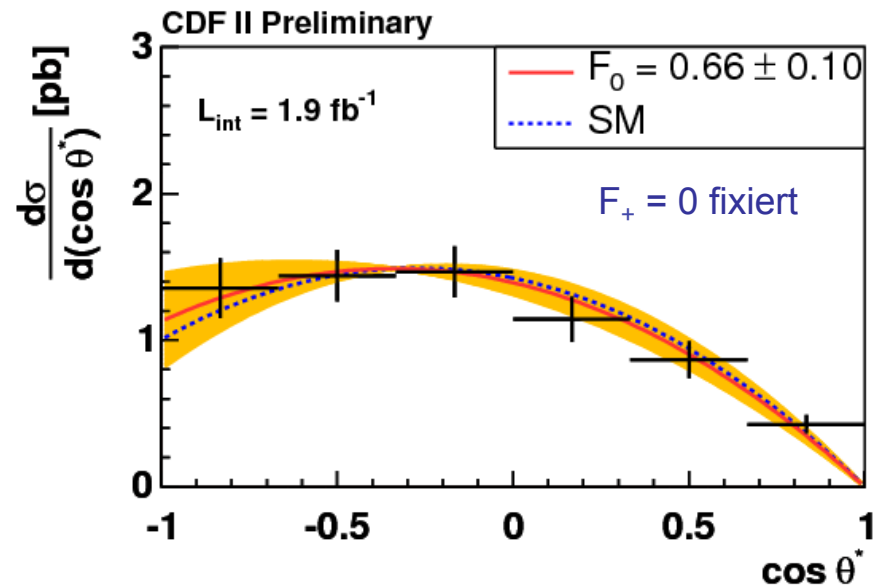


$$F_0 = 0.66 \pm 0.10 \text{ (stat)} \pm 0.06 \text{ (syst)}$$

$$F_+ = 0.01 \pm 0.05 \text{ (stat)} \pm 0.03 \text{ (syst)}$$

Dissertation Dr. Thorsten Chwalek

Phys. Lett. B 674, 160 – 167

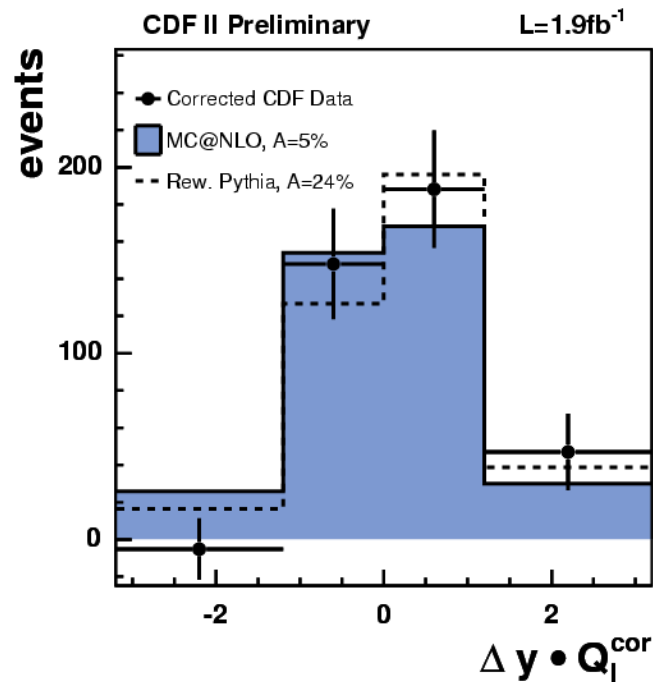


Ladungsasymmetrie in Top-Quark-Antiquark-Ereignissen

Am Tevatron:

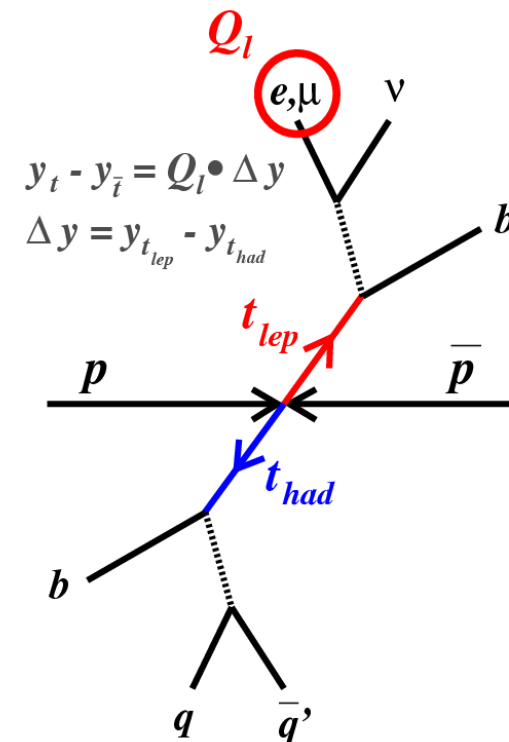
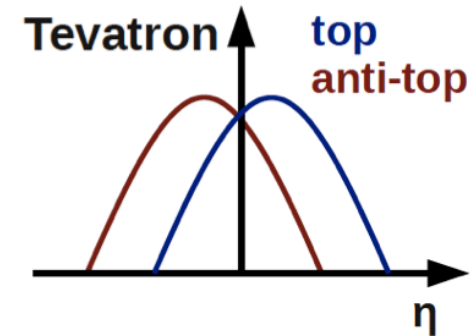
Top-Quarks fliegen bevorzugt in Protonrichtung,

Top-Antiquarks in Antiprotonrichtung.



Beobachtete Asymmetrie: $24 \pm 13 \pm 4 \%$

QCD Erwartung: $6 - 8 \%$



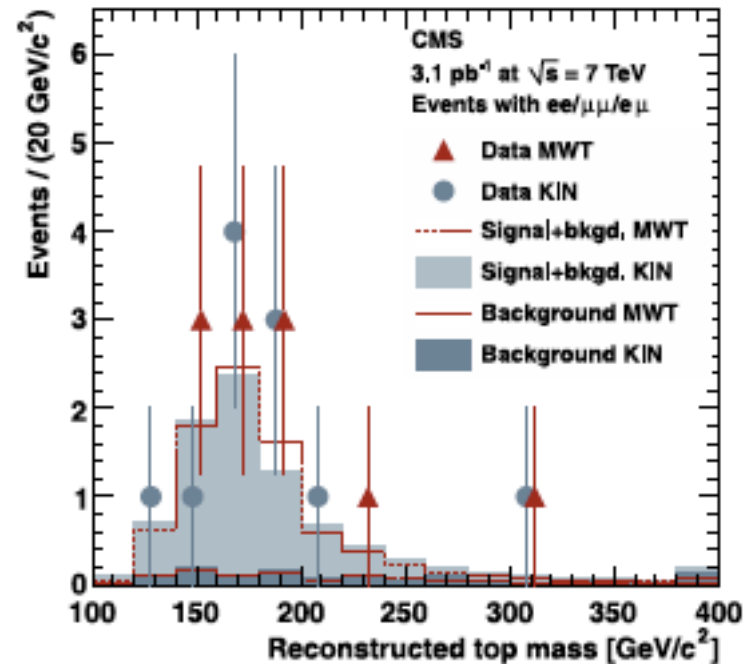
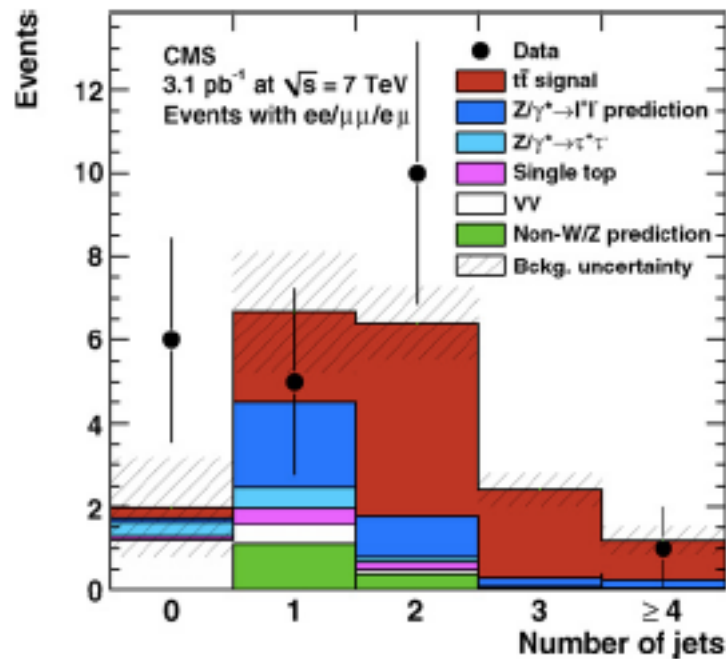
Erste Beobachtung von Top-Quarks am LHC

Physics Letters B 695 (2011) 424–443

First measurement of the cross section for top-quark pair production in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV \star

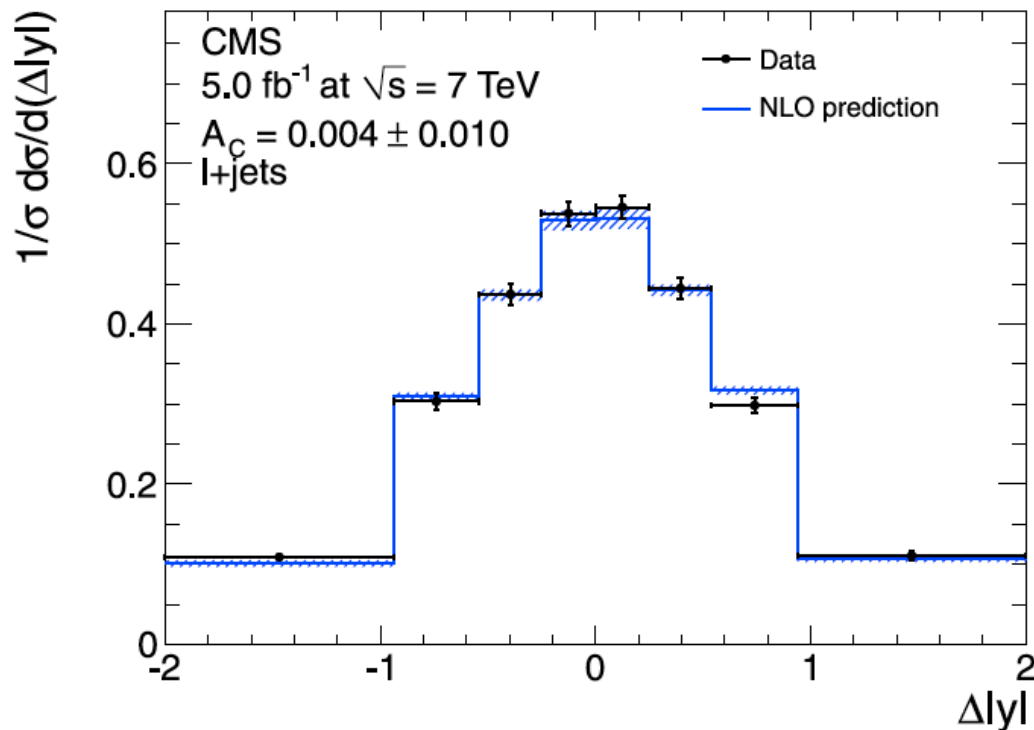
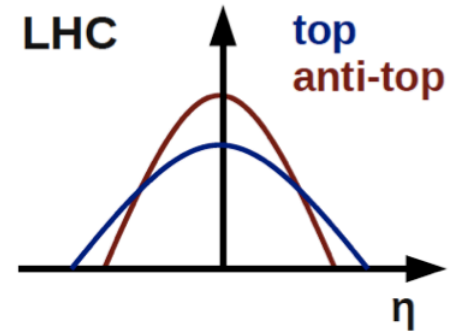
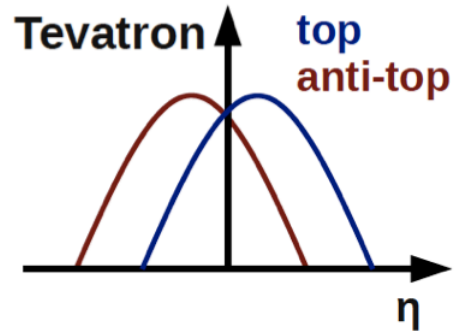
CMS Collaboration

CERN, Switzerland



mit starker EKP-Beteiligung

Ladungsasymmetrie am LHC



Asymmetrie ist mit Null kompatibel!

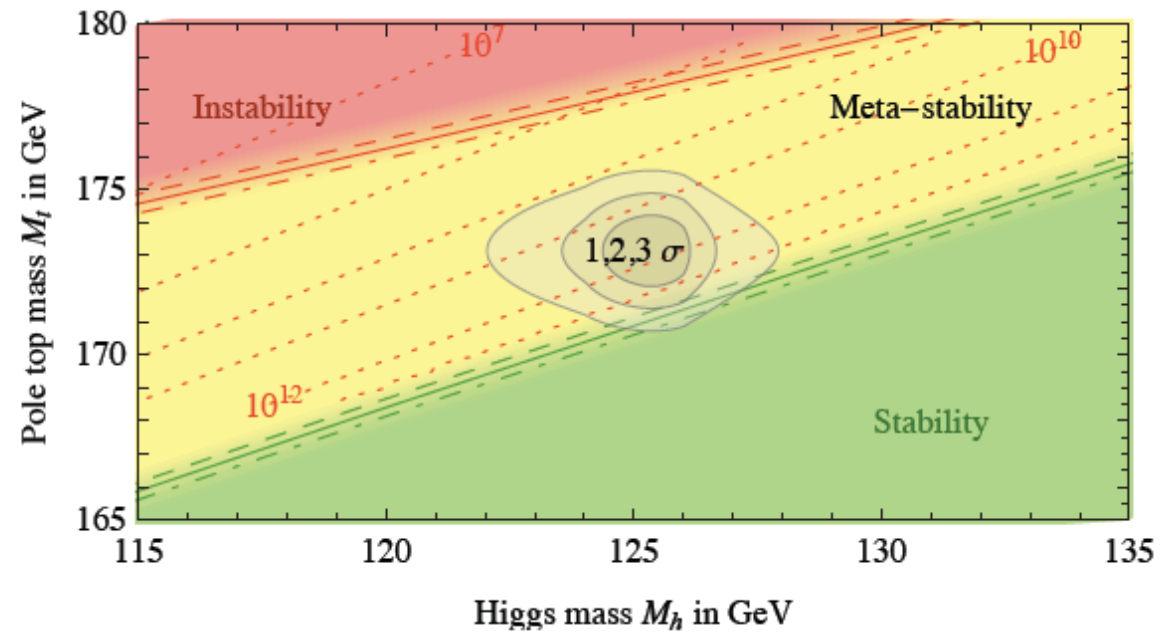
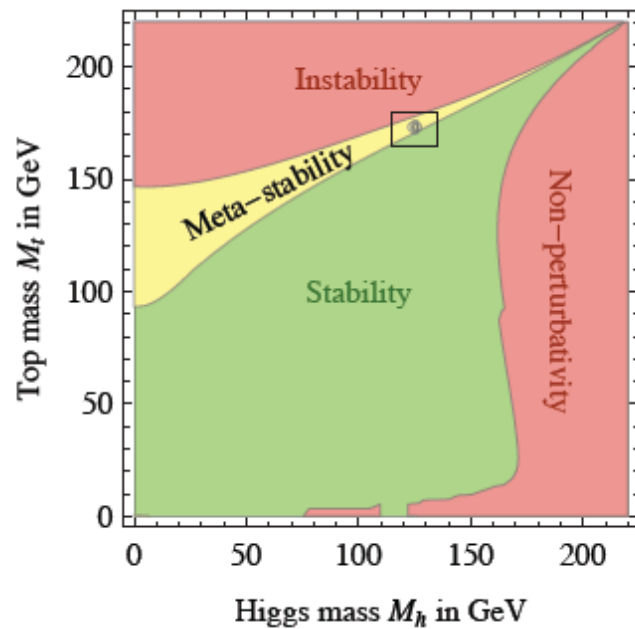
$$A_C = 0.004 \pm 0.010 \pm 0.011$$

Phys. Lett. B 717 (2012) 129 – 150

Top-Quark bleibt wichtig ...

... auch nach der Entdeckung des Higgs-Bosons.

Vakuum des Standardmodells scheint metastabil zu sein.



Degrassi et al., JHEP 1208 (2012) 098, arXiv:1205.6497 [hep-ph] .

Die Müllerfeten



*Herzlichen
Glückwunsch zum
Geburtstag!*

*Danke
Thomas Müller*

*für 35 Jahre Physik
an Hadronkollidern*

und

*für über 20 Jahre
Top-Quark-Physik.*

