

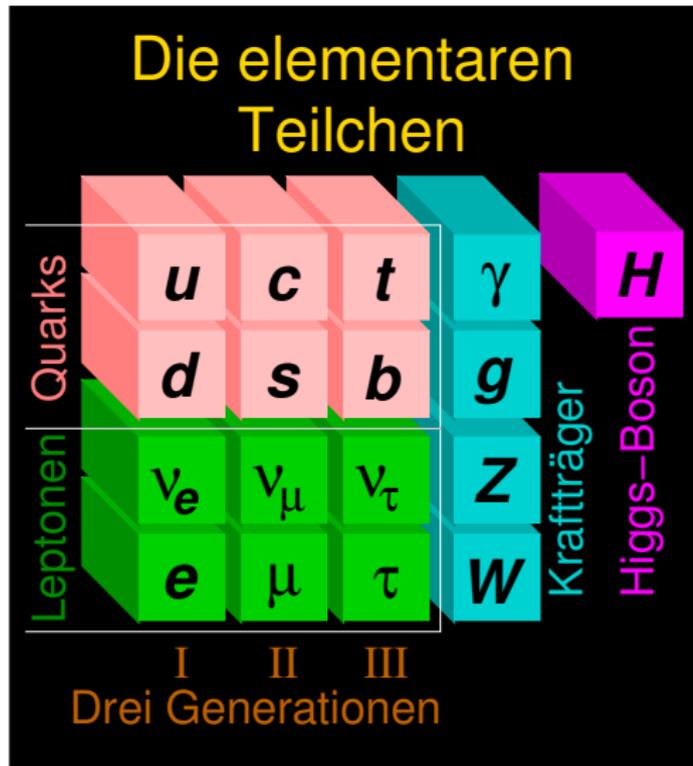
# Suche nach Physik außerhalb des Standardmodells in Proton-Antiproton-Kollisionen mit Leptonen und Jets im Endzustand

Thomas Nunnemann

LS Schaile

Fakultätskolloquium 06.07.2005

# Das Standardmodell der Teilchenphysik



## Entdeckungen im Standardmodell (SM)

1969: Entdeckung der Quarks, SLAC 

1973: neutraler schwacher Strom, CERN

1974: charm Quark ( $J/\psi$ ) BNL, SLAC 

1975:  $\tau$  Lepton, SLAC 

1977: bottom Quark ( $\Upsilon$ ,  $b\bar{b}$ ), Fermilab

1979: Gluonen, DESY

1983: Z und W Bosonen, CERN 

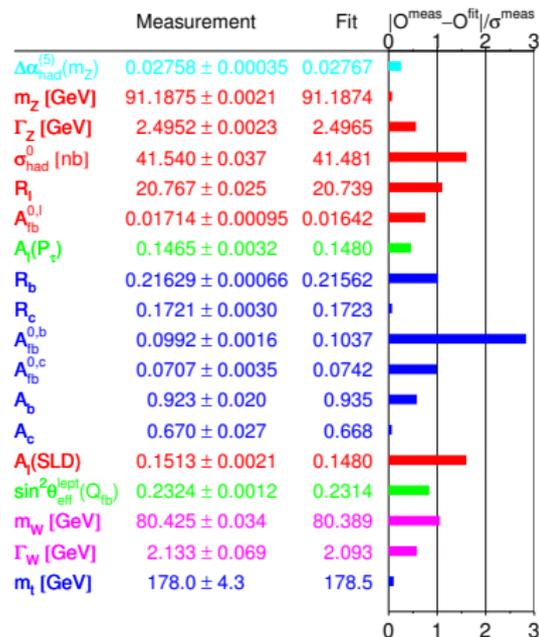
1995: top Quark, Fermilab

2000:  $\tau$  Neutrino, Fermilab

# Präzise Tests des Standardmodell

- Standardmodell beschreibt die elementare Materie und alle Wechselwirkungen (ohne Gravitation), erklärt die Brechung der elektroschwachen Symmetrie und stimmt mit allen teilchenphysikalischen Messungen überein.
- Warum also nach Physik außerhalb des Standardmodells suchen?

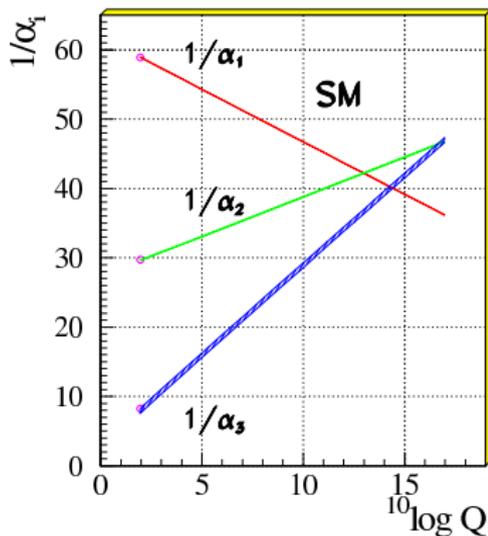
LEP EWWG: Summer 2005



## Grenzen des Standardmodells

Unser jetziges SM kann hier keine  
Antworten geben:

- Hierarchie-Problem: warum ist  
 $\frac{M_Z}{M_{Pl}} \simeq \frac{100 \text{ GeV}}{10^{19} \text{ GeV}} = 10^{-17}$ ?
- unnatürliche Feinabstimmung:  
Strahlungskorrekturen zu  $M_H^2$  sind  
von der Größe  $M_{Pl}^2$ .
- $CP$  Verletzung zu klein, um  
Materie-Antimaterie-Asymmetrie  
des Universums zu erklären
- kein Kandidat für dunkle Materie
- fundamentale Fragen  
unbeantwortet: Struktur und  
Verknüpfung der Generationen,  
Massenschema der Fermionen...



⇒ Standardmodell:  
effektives Modell bei  
„kleinen“ Energien einer  
fundamentaleren Theorie?

# Theorien außerhalb des SM (BSM)

Erwartung: fundamentale (und „einfache“) neue Theorie verknüpft mit neuen Phänomenen im Bereich der elektroschwachen Skala:

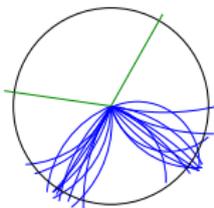
- **große Vereinheitlichung (GUT)**
  - massive Teilchen mit Quark-Lepton-Kopplung (Leptoquarks)
  - schwere Eichbosonen
  - einfache GUT Modelle unverträglich mit Lebenszeit des Protons
- **Unterstrukturen**
  - neue starke WW
- **Supersymmetrie (SUSY)**
  - Symmetrie zwischen Bosonen und Fermionen → supersymmetrische Partner
  - Kandidat für dunkle Materie
- **String-Theorie**
  - (große) zusätzliche Raum-Zeit-Dimensionen

# Signaturen neuer Physik

- reichhaltige Phänomenologie mit vielfältigen Signaturen, die an einem Beschleunigerexperiment nachgewiesen werden können:

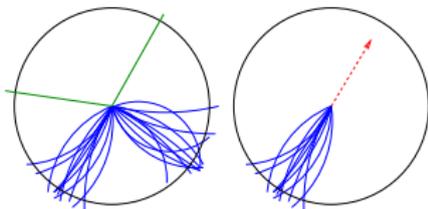
# Signaturen neuer Physik

- reichhaltige Phänomenologie mit vielfältigen Signaturen, die an einem Beschleunigerexperiment nachgewiesen werden können:
  - Nachweis neuer Teilchen über Zerfallsprodukte



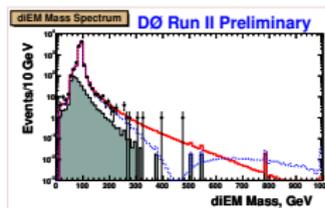
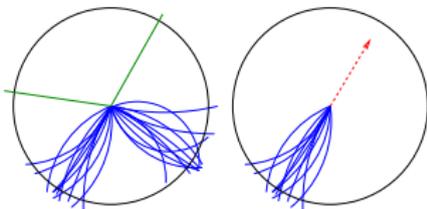
## Signaturen neuer Physik

- reichhaltige Phänomenologie mit vielfältigen Signaturen, die an einem Beschleunigerexperiment nachgewiesen werden können:
  - Nachweis neuer Teilchen über Zerfallsprodukte
  - Nachweis neuer stabiler, kaum wechselwirkender Teilchen über Impulsbilanz



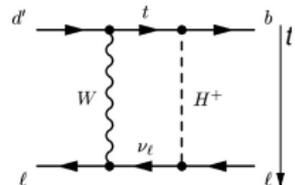
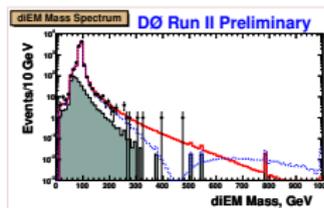
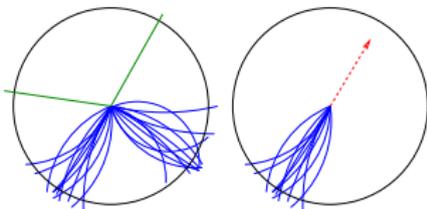
## Signaturen neuer Physik

- reichhaltige Phänomenologie mit vielfältigen Signaturen, die an einem Beschleunigerexperiment nachgewiesen werden können:
  - Nachweis neuer Teilchen über Zerfallsprodukte
  - Nachweis neuer stabiler, kaum wechselwirkender Teilchen über Impulsbilanz
  - Änderung von SM-Wirkungsquerschnitten durch Interferenz



# Signaturen neuer Physik

- reichhaltige Phänomenologie mit vielfältigen Signaturen, die an einem Beschleunigerexperiment nachgewiesen werden können:
  - Nachweis neuer Teilchen über Zerfallsprodukte
  - Nachweis neuer stabiler, kaum wechselwirkender Teilchen über Impulsbilanz
  - Änderung von SM-Wirkungsquerschnitten durch Interferenz
  - Verstärkung von im Standardmodell stark unterdrückten Zerfallskanälen

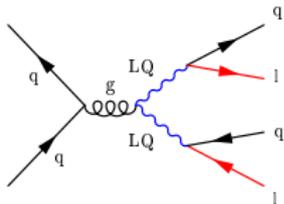


## Signaturen neuer Physik

- reichhaltige Phänomenologie mit vielfältigen Signaturen, die an einem Beschleunigerexperiment nachgewiesen werden können:
  - Nachweis neuer Teilchen über Zerfallsprodukte
  - Nachweis neuer stabiler, kaum wechselwirkender Teilchen über Impulsbilanz
  - Änderung von SM-Wirkungsquerschnitten durch Interferenz
  - Verstärkung von im Standardmodell stark unterdrückten Zerfallskanälen
- Zerfälle neuer Teilchen in Endzuständen mit Leptonen und Quarks bieten markante Signatur mit kontrollierbarem Untergrund aus SM Prozessen.
  - z.B. Leptoquark-Paarproduktion:  $LQ_2 \overline{LQ_2} \rightarrow \mu^- q \mu^+ \bar{q}$   
Supersymmetrie:  $\tilde{t} \rightarrow b \tilde{\nu}$

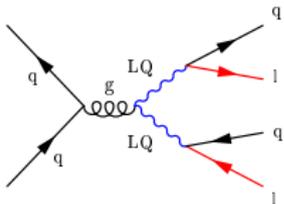
# Signaturen neuer Physik

## Beispiel: Leptoquark- Paarproduktion



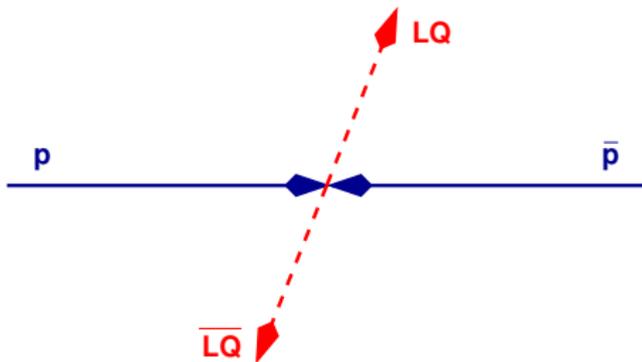
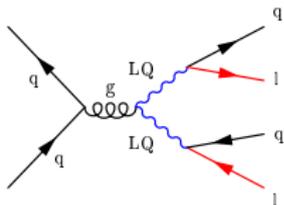
# Signaturen neuer Physik

## Beispiel: Leptoquark- Paarproduktion



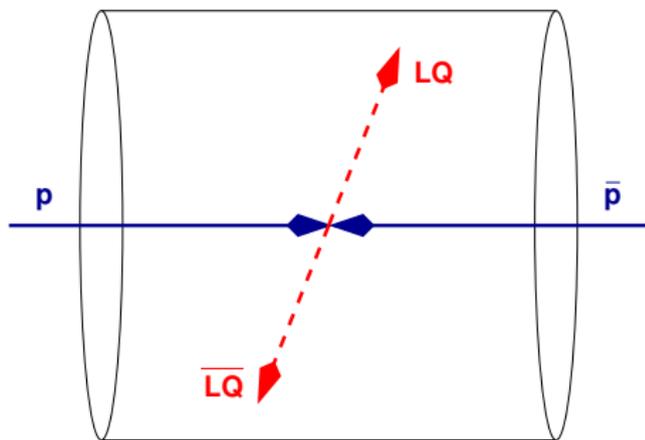
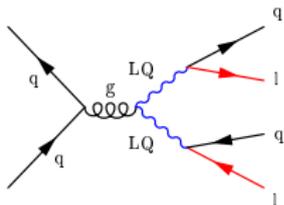
# Signaturen neuer Physik

## Beispiel: Leptoquark- Paarproduktion



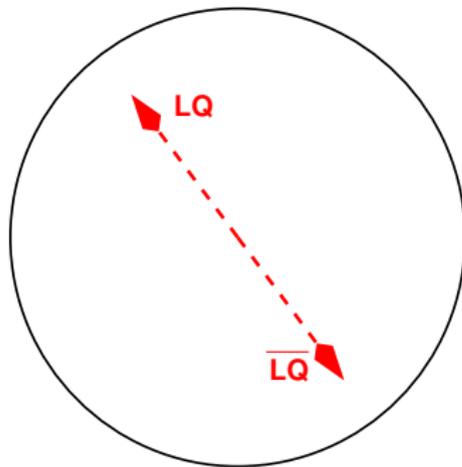
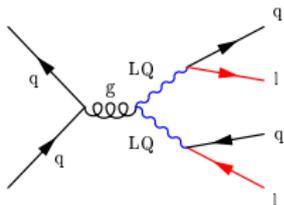
# Signaturen neuer Physik

## Beispiel: Leptoquark- Paarproduktion



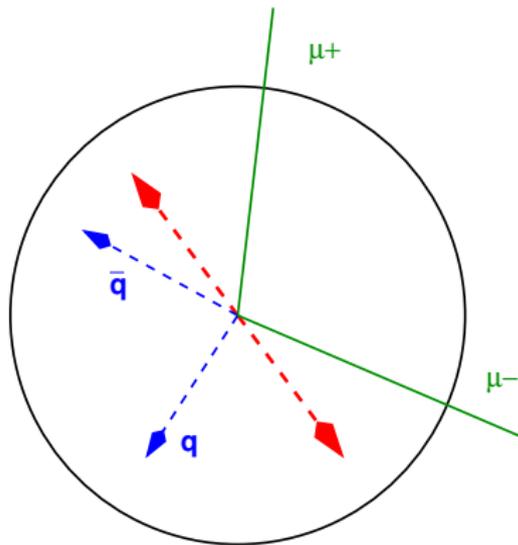
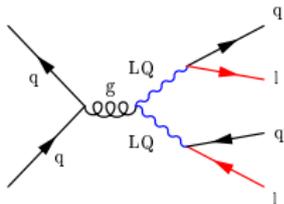
# Signaturen neuer Physik

## Beispiel: Leptoquark- Paarproduktion



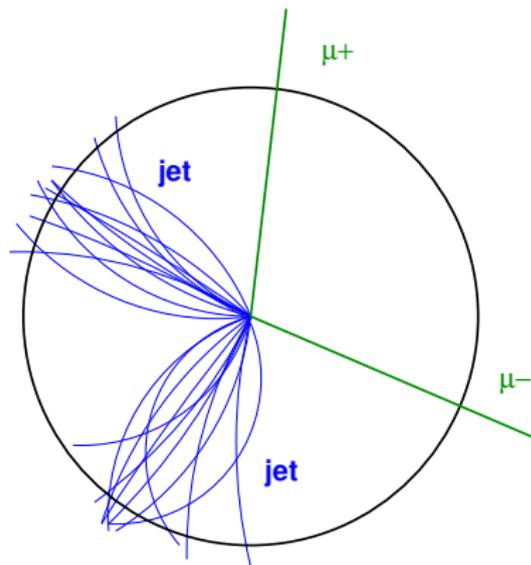
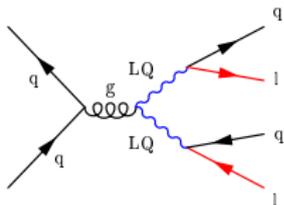
# Signaturen neuer Physik

## Beispiel: Leptoquark- Paarproduktion



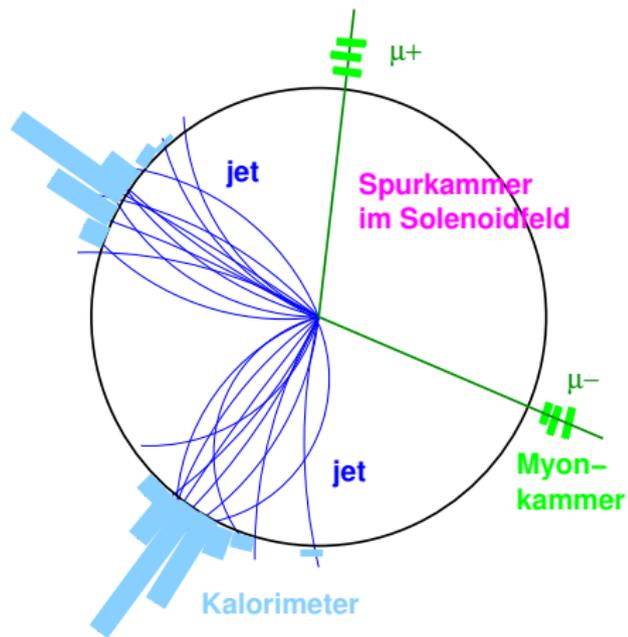
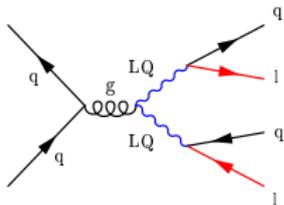
# Signaturen neuer Physik

## Beispiel: Leptoquark- Paarproduktion



# Signaturen neuer Physik

## Beispiel: Leptoquark- Paarproduktion



Suche nach  
Physik außerh.  
des SM

T. Nunnemann

Das Standard-  
modell

Theorien  
außerhalb des  
SM

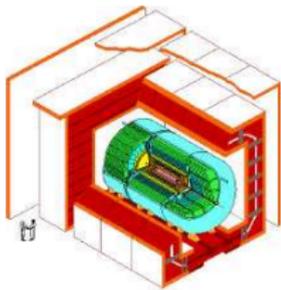
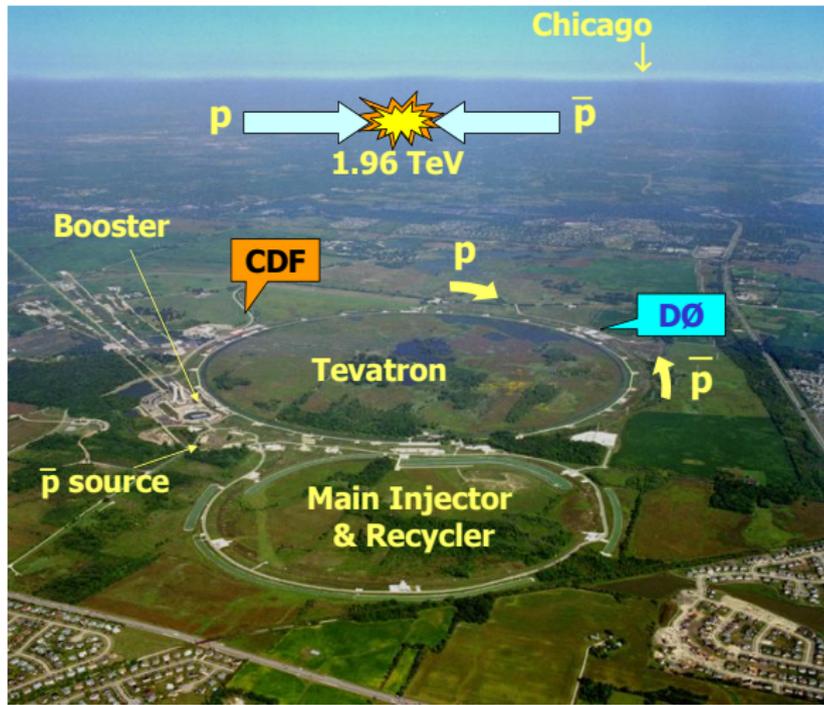
Tevatron und  
DØ

Tevatron  
Collider  
DØ Detektor  
Central Fiber  
Tracker  
Daten-  
prozessierung

SM Unter-  
grundprozesse

Signaturen  
von Physik  
außerhalb des  
SM

# Tevatron Collider am Fermilab



DØ Detektor



Main Injector  
und  $\bar{p}$  Recycler

Ereignisrate  $N = \sigma L \rightarrow$  benötige:

1. hohe Schwerpunktsenergie

- Erhöhung der Energie im Vergleich zu Run I (bis 1995):

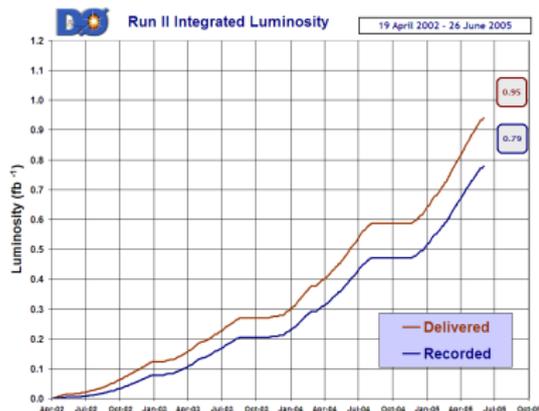
$$\sqrt{s}: 1.8 \text{ TeV} \rightarrow 1.96 \text{ TeV}$$

- Anstieg von  $\sqrt{s}$  hat großen Effekt auf Prozesse bei hohen Parton-Parton Energien  $\sqrt{\hat{s}}$  (starker Abfall der PDFs bei hohen  $x_{Bj}$ ):  
 $\sigma$  steigt um 70% für Paarproduktion von Teilchen mit  $M = 300 \text{ GeV}$ .

## Tevatron Run II

2. hohe integrierte Luminosität  $L$ :

- deutliche Verbesserung in letzten Jahren
- Projektion bis 2009:  $(4-9) \text{ fb}^{-1}$



Suche nach  
Physik außerh.  
des SM

T. Nunnemann

Das Standard-  
modell

Theorien  
außerhalb des  
SM

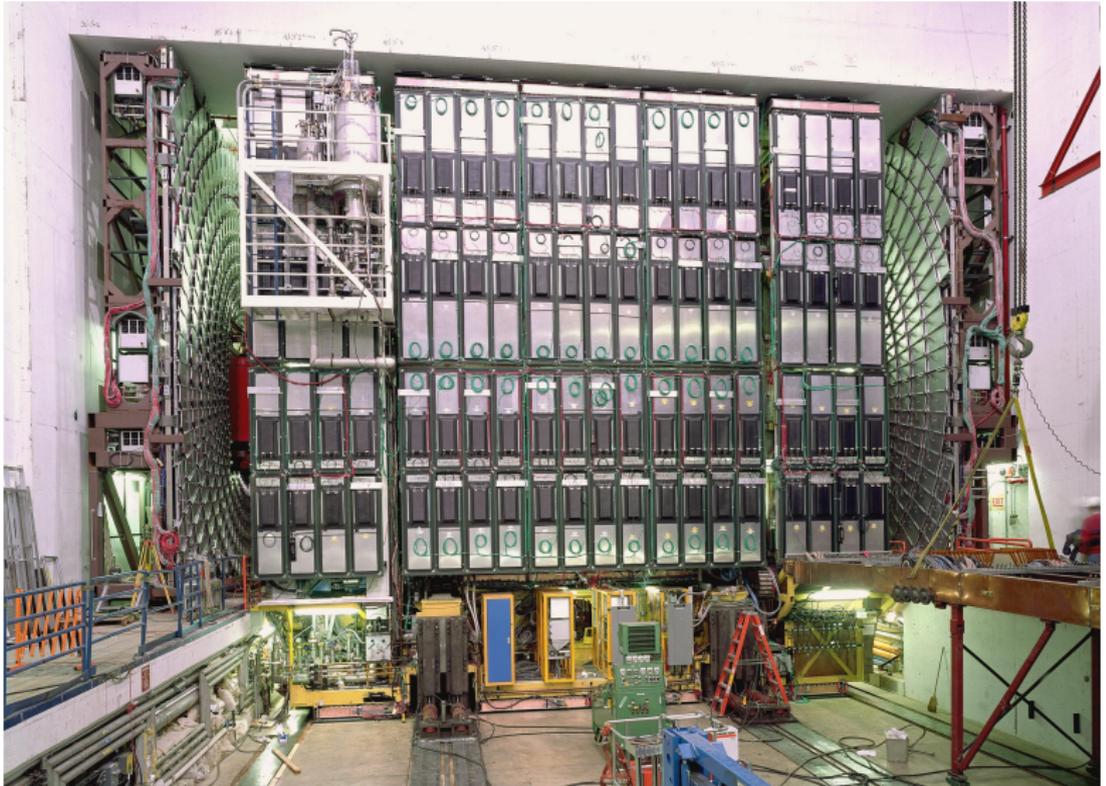
Tevatron und  
DØ

Tevatron  
Collider  
**DØ Detektor**  
Central Fiber  
Tracker  
Daten-  
prozessierung

SM Unter-  
grundprozesse

Signaturen  
von Physik  
außerhalb des  
SM

# Der DØ Detektor



## Der DØ Detektor

### • Multifunktions-Detektor

$e$  Akzeptanz:  $|\eta| < 3.0$

$\mu$  Akzeptanz:  $|\eta| < 2.0$

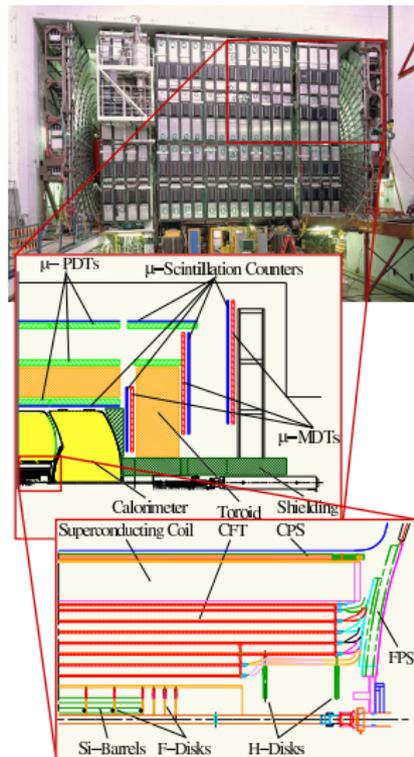
Spurrekonstruktion:  $|\eta| < 3.0$

### • schnelle Ausleseelektronik

- *bunch* Abstand 396 ns
- bei hohen Luminositäten:  $> 1$  Kollisionen, wenn *bunches* sich kreuzen

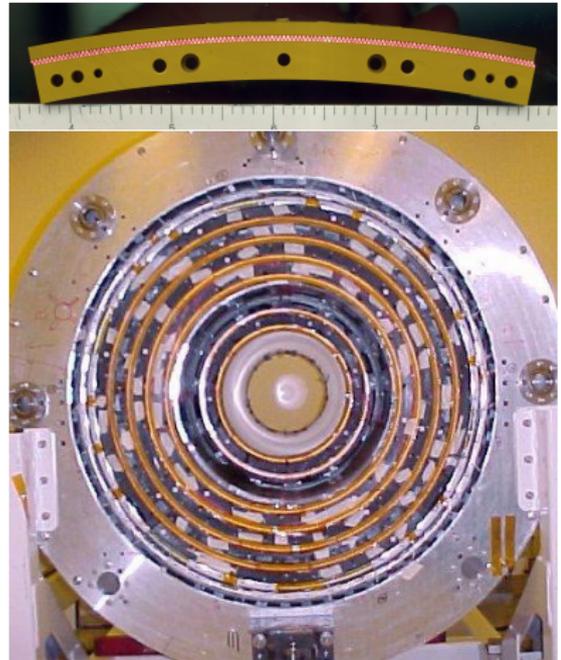
### • Trigger-System mit 3 *levels* (L1-L3):

- Auswahl von potentiell interessanten Ereignissen
- Reduktion: 50k (2.5 MHz  $\rightarrow$  50 Hz)
- L1-L2: programmierbare Elektronik
- L3: Linux CPU *farm*



## Central Fiber Tracker

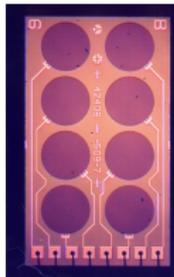
- 8 Doppelschichten  
szintillierender optischer Fasern  
(axial und stereo,  $\varnothing$ :  $830\ \mu\text{m}$ )
- 76800 Kanäle
- Radius: 20-51 cm
- Länge: 2.54 m
- Alignierung mit Präzision  $60\ \mu\text{m}$   
auf 2.54 m
- in 2 T Solenoidfeld
- Kopplung über 8-12 m lange  
klare Fasern
- Auslese durch *Visible Light  
Photon Counter*



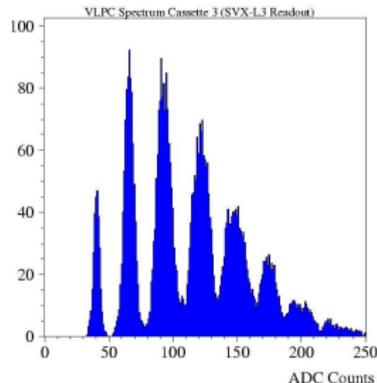
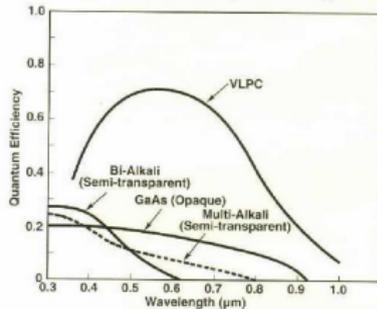
# Visible Light Photon Counter

Auslese der Lichtfasern über VLPCs:

- Si dotiert mit As (Bandlücke 0.05 eV)  
→ Betrieb bei  $T \sim 9\text{ K}$
- hohe Quanteneffizienz:  $\sim 70\%$  im sichtbaren Spektrum (auch IR)
- hohe Verstärkung:  $\gtrsim 60k\ e^-$  pro eingefangenes  $\gamma$   
→ Auflösung des Photon-Poisson-Spektrums
- schnelle Auslese  
→ Spurtrigger auf L1



Quantum Efficiency Greatly Exceeding PMT's

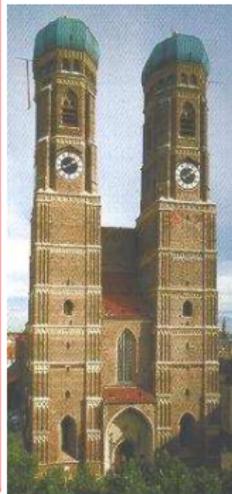


# Datenprozessierung

- Die bisher aufgezeichnete integrierte Luminosität von  $800 \text{ pb}^{-1}$  entspricht:
  - 1.5 Milliarden Ereignisse
  - 400 TB Rohdaten
  - 300 TB rekonstruierte Daten
  - 30k GHZ-Monate Rechenleistung
- zusätzlicher CPU- und Speicherbedarf für simulierte Ereignisse (insgesamt 1.3 PB an Daten)
- *Computing* Ressourcen (in 1 GHz Einheiten)
  - am Fermilab: 1000
  - verteilt (Grid):  $\sim 3500$   
GridKa: 25% von  $\sim 3000$
- Ereignissimulation und Daten-Reprozessierung über Grid verteilt

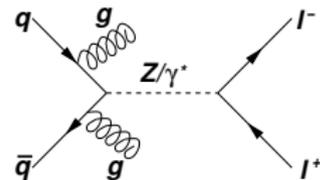
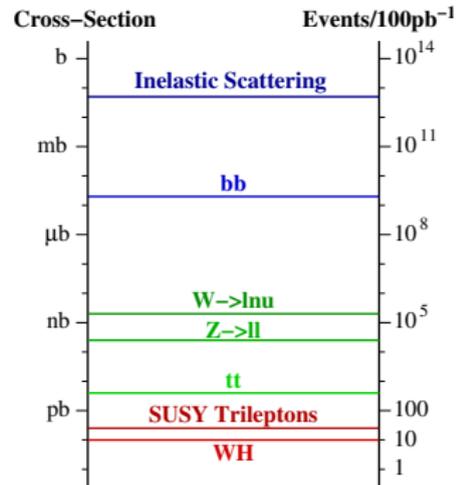
DVD

1.3 PB on DVD



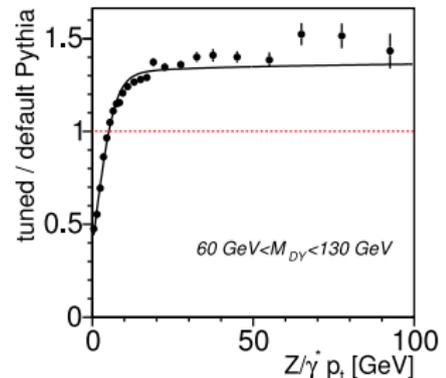
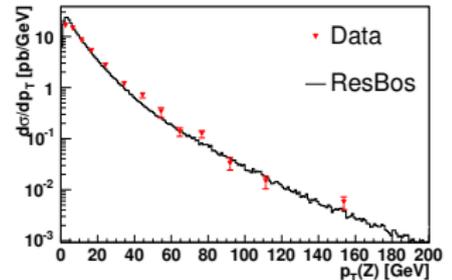
# Standardmodell Untergrundprozesse

- Produktion über starke WW möglich
  - großer WQ für SM-Prozesse  
→ Untergrund zu hypothetischen Signalen von neuer Physik (BSM)
  - auch relativ großer WQ für manche BSM-Signale
- Für BSM-Signale mit Leptonen und Jets im Endzustand ist insbesondere die elektroschwache Produktion von **W, Z und Drell-Yan** Ereignissen mit Gluon-Strahlung der Hauptuntergrund.
- **Genaue Kenntnis der SM-Produktion der Bosonen wichtig!**



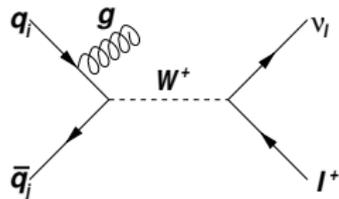
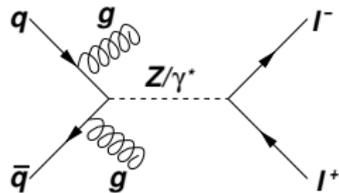
## Transversalimpulsspektrum des Z

- Motivation: Beschreibung der Lepton  $p_T$  der und Winkel  $\Delta\phi(l_1, l_2)$ , da wichtig für Diskriminierung von BSM-Ereignissen mit Dilepton-Sign.
- Messung des differentiellen WQ  $d\sigma/dp_T$  im Kanal  $Z \rightarrow \mu\mu$
- gute Übereinstimmung mit vorhergehenden Messungen in Run I und resummierter NLL-QCD
- deutliche Abweichung des LO *parton shower* Ereignisgenerators PYTHIA
- Messung wurde benutzt, um PYTHIA Simulationen zu tunen und eine Korrekturfunktion für bereits simulierte Daten zu erhalten.

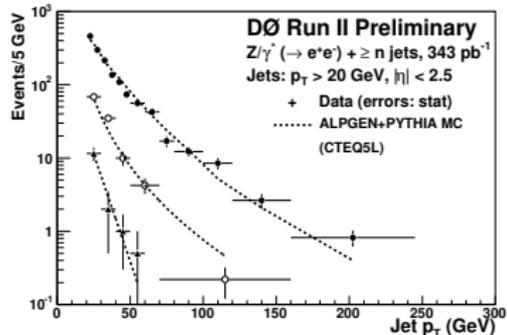
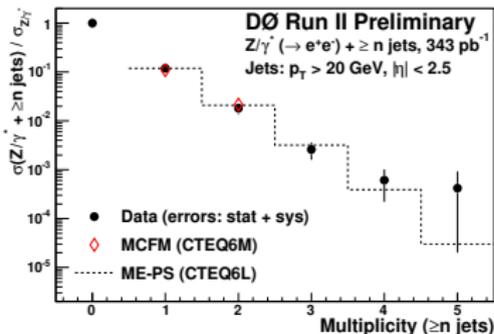


## Assoziierte Produktion von Jets mit W/Z Bosonen

- Jets aus Gluon-Abstrahlung im Anfangszustand (ISR)
- Messungen (durchgeführt bzw. in Arbeit):
  - Jet-Multiplizitäten
  - $E_T$  Spektren der Jets
  - Winkelkorrelationen zwischen Jets
- Experimentelle Herausforderung:
  - genaue Kenntnis der Jet Energieskala und Energieauflösung
  - Bestimmung der Transferfunktion (gemessenes Jet  $E_T \rightarrow$  Hadronen  $E_T$ ) zur Entfaltung des korrigierten Impulsspektrums



# Assoziierte Produktion von Jets mit W/Z Bosonen



- in Arbeit:
  - Messung für  $Z(\rightarrow \mu^+\mu^-)+\text{Jets}$  und  $W(\rightarrow \mu\nu)+\text{Jets}$
  - Entfaltung des gemessenen Impulsspektrums
  - Studien zum Vergleich von verschiedenen Simulationsprogrammen (*parton shower*, explizite Matrixelemente höherer Ordnung)

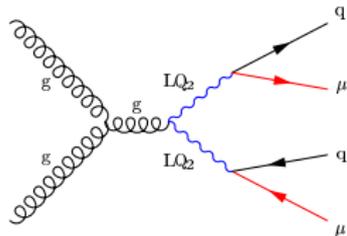
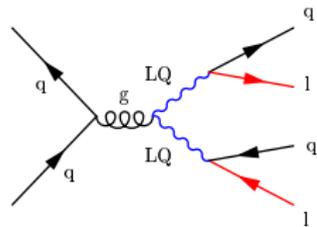
# Suche nach Signaturen von Physik außerhalb des Standardmodells

Im folgenden werden verschiedene Suchen nach Signaturen von Prozessen jenseits des Standardmodells vorgestellt:

- Paarproduktion von Leptoquarks
- Paarproduktion von skalaren top-Quarks
- assoziierte Neutralino-Chargino-Produktion

# Leptoquark Paarproduktion

- Leptoquarks (LQs) koppeln an Quarks und Leptonen innerhalb einer Generation
- vorhergesagt von vielen Erweiterungen des SM: GUT, erweiterter Eichsektor, Quark-Substruktur etc.
- Verknüpfung der Quark und Leptonfamilien
- Paar-Produktion über starke WW
  - relativ großer Wirkungsquerschnitt  $\sigma$
  - $\sigma$  für skalare LQs hängt nur von  $M_{LQ}$  ab
- LQs zerfallen in  $l^\pm q$  oder  $\nu q$  ( $\beta = BR(LQ \rightarrow l^\pm q)$ )
  - Topologie:  $2l + 2j, l + 2j + \cancel{t}, 2j + \cancel{t}$ , ( $l: e, \mu$  oder  $\tau$ )



Suche nach  
Physik außerh.  
des SM

T. Nunnemann

Das Standard-  
modell

Theorien  
außerhalb des  
SM

Tevatron und  
DØ

SM Unter-  
grundprozesse

Signaturen  
von Physik  
außerhalb des  
SM

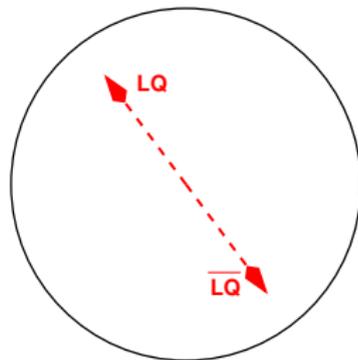
**Leptoquark  
Paarproduktion**

SUSY:  $\tilde{\tau}$

SUSY:  $3l$

Signatur

# Ein Leptoquark Kandidat



Suche nach  
Physik außerh.  
des SM

T. Nunnemann

Das Standard-  
modell

Theorien  
außerhalb des  
SM

Tevatron und  
DØ

SM Unter-  
grundprozesse

Signaturen  
von Physik  
außerhalb des  
SM

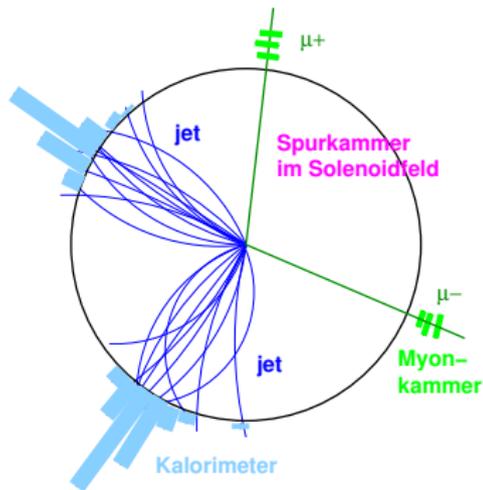
Leptoquark  
Paarproduktion

SUSY:  $\tilde{\tau}$

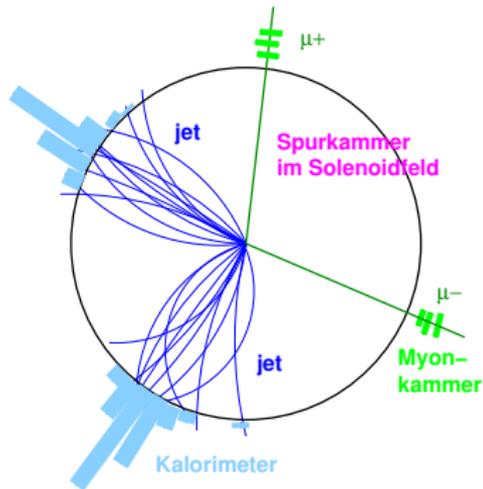
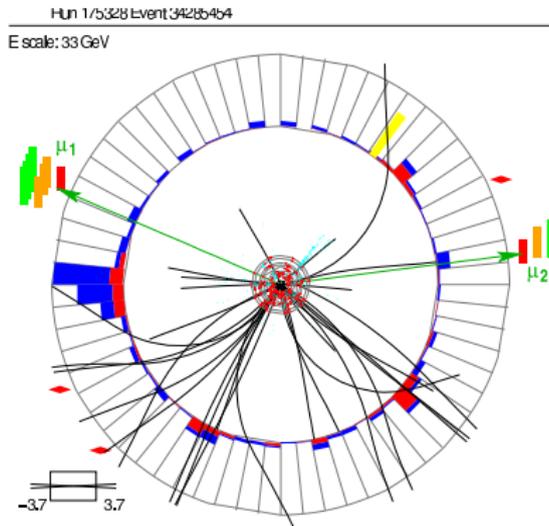
SUSY:  $3l$

Signatur

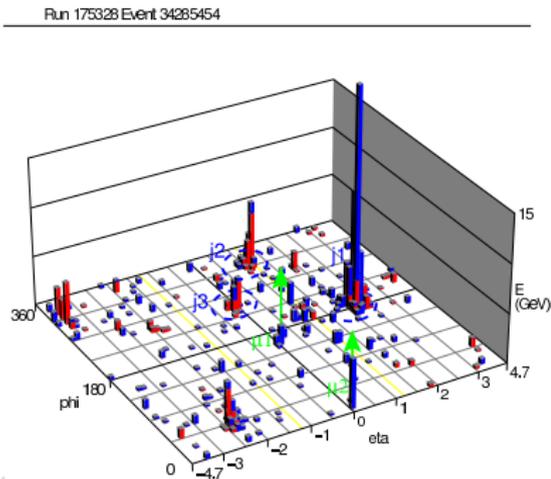
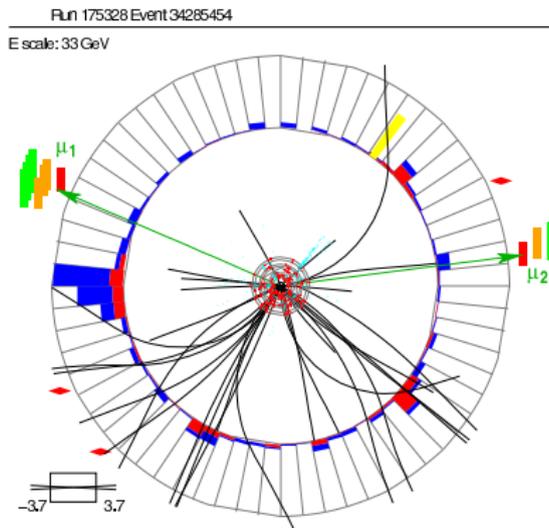
# Ein Leptoquark Kandidat



# Ein Leptoquark Kandidat



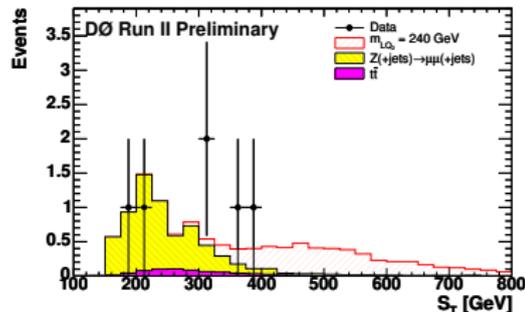
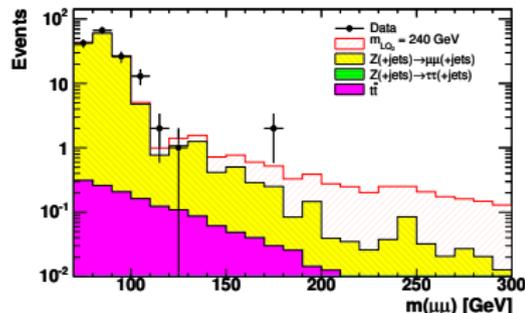
# Ein Leptoquark Kandidat



Drell-Yan + Jets

## Suche nach Leptoquarks der 2. Generation

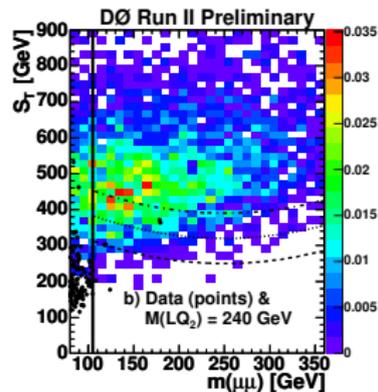
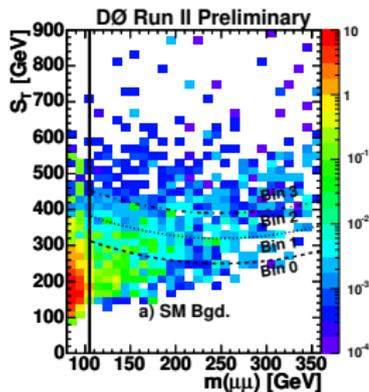
- Selektion: jeweils 2 isolierte hochenergetische Myonen und Jets
- Hauptuntergrund: Z/Drell-Yan + Jets  
→ Schnitt auf  $m(\mu\mu)$
- große LQ Masse ( $m_{LQ} \gtrsim 250$  GeV)  
→ Zerfallsprodukte mit großer transversaler Energie  $E_T$
- Diskrimination über skalare Summe  $S_T$  der  $E_T$  von Myonen und Jets



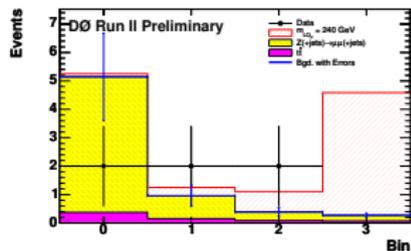
$$L = 300 \text{ pb}^{-1}$$

## Diskriminierung vom Untergrund

bessere  
Diskriminierung in  
( $S_T$ ,  $m(\mu\mu)$ )-Ebene

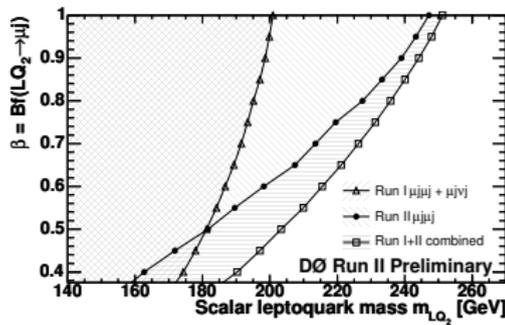
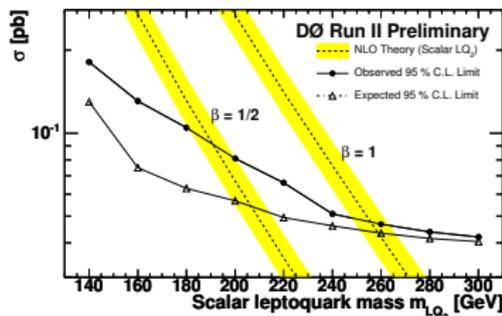


- 4 Signal-Bins mit verschiedenem  $S/B$  Verhältnis
- Daten stimmen mit Untergrundsimulation innerhalb Fehler überein.  
→ Bestimmung der oberen Grenze für Signalwirkungsquerschnitt



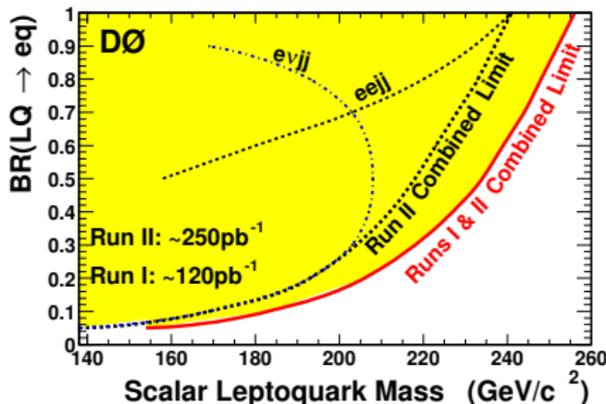
## Bestimmung der Ausschlussgrenzen

- obere Konfidenzgrenzen für Signal-WQ für verschiedene  $M_{LQ}$
- WQ für Paar-Produktion skalarer LQs ist modellunabhängig (Kopplung durch QCD definiert)  
→ Interpretation:  
Ausschlussgrenzen in  $M_{LQ}$  und  $\beta$
- Ergebnis für untere Massengrenzen (95% C.L.):
  - $\beta = 1$ :  $M_{LQ_2} > 251$  GeV
  - $\beta = 0.5$ :  $M_{LQ_2} > 204$  GeV



## Suche nach Leptoquarks der 1. Generation

- 2 Ereignis-Selektionen:
  - 2 isolierte  $e$ , 2 Jets
  - 1 isoliertes  $e$ , 2 Jets, fehlende transversale Energie  $\cancel{E}_t$
- Ergebnis fur untere Massengrenzen (95% C.L.):
  - $\beta = 1$ :  
 $M_{LQ_1} > 256 \text{ GeV}$
  - $\beta = 0.5$ :  
 $M_{LQ_1} > 234 \text{ GeV}$



- Für alle SM Fermionen/Bosonen existiert ein supersymmetrischer Partner-Boson/Fermion:

- $l, \nu \rightarrow \tilde{l}, \tilde{\nu}$
- $q \rightarrow \tilde{q}$
- $g \rightarrow \tilde{g}$
- $W, Z, \gamma, H \rightarrow \tilde{\chi}^0, \tilde{\chi}^\pm$

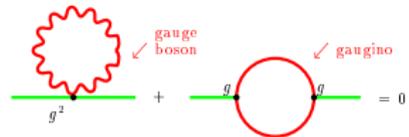
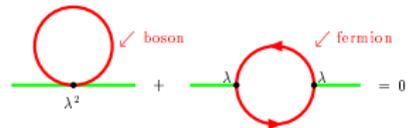
- 2 Higgs-Doublets notwendig  $\rightarrow$  5 Higgs-Teilchen

- $R$ -Paritätserhaltung  $\rightarrow$  leichtestes supersymmetrisches Teilchen (LSP) ist stabil

- Kandidat für dunkle Materie
- keine WW im Detektor  
 $\rightarrow$  Signatur:  $\cancel{E}_t$

## Supersymmetrie

- fermionische und bosonische Schleifenkorrekturen zu  $M_H^2$  löschen sich jeweils (annähernd) aus  $\rightarrow M_H \simeq M_{\text{SUSY}}$



- $M(\text{particle}) \neq M(\text{sparticle}) \rightarrow$  SUSY ist gebrochen, z.B. SUGRA

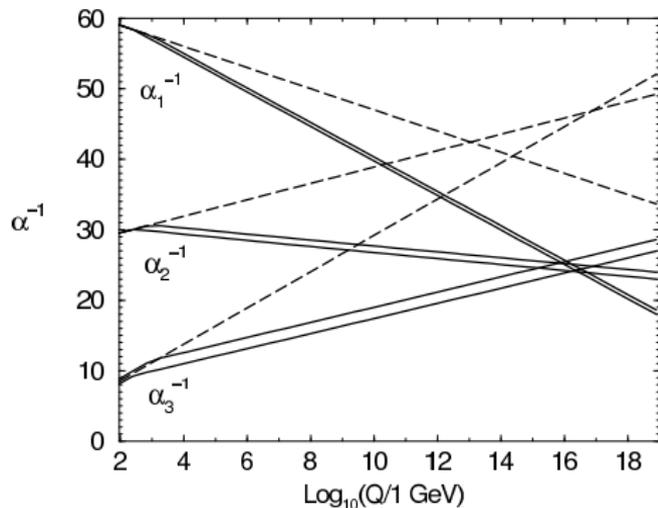
## Vereinheitlichung der Kopplungen in SUSY

- supersymmetrische Teilchen ermöglichen eine Änderung des Verlaufs der Kopplungskonstanten  $\rightarrow$  Vereinheitlichung bei  $M_{\text{GUT}}$

in minimaler super-  
symmetrischer  
Erweiterung des SM  
(MSSM):

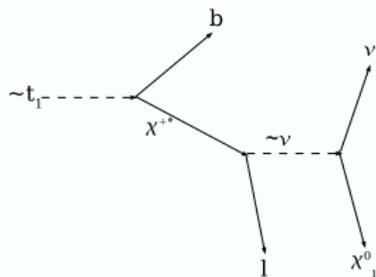
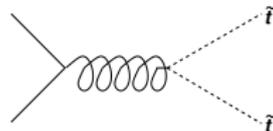
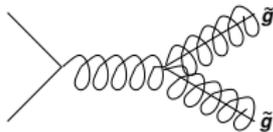
$$M_{\text{SUSY}} \sim 10^{3.5} \text{ GeV}$$

$$M_{\text{GUT}} \sim 10^{16} \text{ GeV}$$



## Paar-Produktion von skalaren top-Quarks

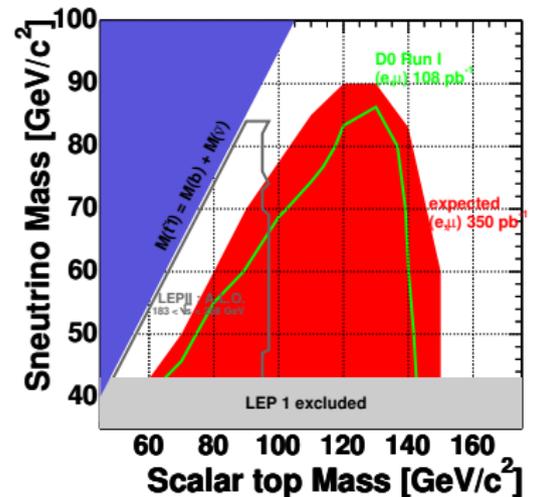
- Paar-Produktion von  $\tilde{g}$  und  $\tilde{q}$  über starke WW
- hohes  $m(t)$  ermöglicht große Mischung zwischen  $\tilde{t}_L$  und  $\tilde{t}_R \rightarrow$  Massenaufspaltung:  $\tilde{t}_1$  relativ leicht
- beste Sensitivität in  $\tilde{t}_1$ -Zerfall  $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\nu}$
- experimentelle Herausforderung:
  - für kleine  $m(\tilde{t}_1) - m(\tilde{\nu})$ : geringe  $p_T$  für Leptonen und Jets
  - Identifizierung der  $b$ -Jets



## Suche nach skalaren top-Quarks

- Selektion:  $l^+l^-$  (+Jets,  $+\cancel{E}_t$ )
- Details der Selektion und Untergrund stark abhängig von leptonischen Zerfallskanal, z.B.:
  - $\mu\mu$   
Hauptuntergrund:  
 $Z \rightarrow \mu\mu (\rightarrow \tau\tau), t\bar{t}$   
 $\rightarrow$  verlange 1 Jet mit  $b$ -tag,  
 $m(Z)$ -Veto, Veto auf große  
 $\sum E_T(\text{Jet})$
  - $e\mu$   
geringer Untergrund:  
 $Z \rightarrow \tau\tau, t\bar{t}, WW$   
 $\rightarrow \tau$ -Veto, kein rekonstruierter  
Jet verlangt für maximales  
 $S/B$

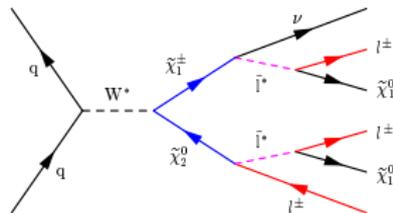
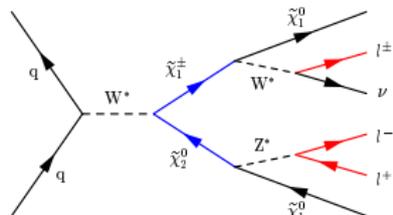
- erwarteter Ausschlussbereich für  $e\mu$ -Selektion



## Die 3-Lepton-Signatur

- 3 Lepton-Signaturen aus Chargino-Neutralino Paar-Produktion
- klare Signatur mit geringem Untergrund, aber:
  - kleine WQ und Verzweigungsverhältnisse (BR) in  $l$
  - Leptonen mit kleinem  $p_T$
  - Parameterbereich mit verstärkter Kopplung zu  $\tau$  (große  $\tan\beta$ ):  $\tau$ -Rekonstruktion schwierig

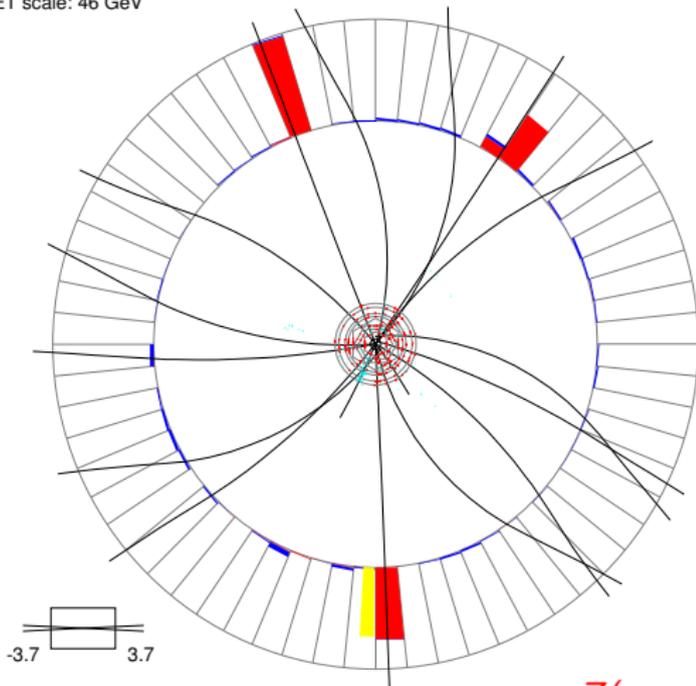
⇒ erfordert hohe Statistik: große integrierte Luminosität und Kombination vieler Endzustände



# eee Ereignis

Run 167885 Event 21398063 Fri Mar 7 13:08:32 2003

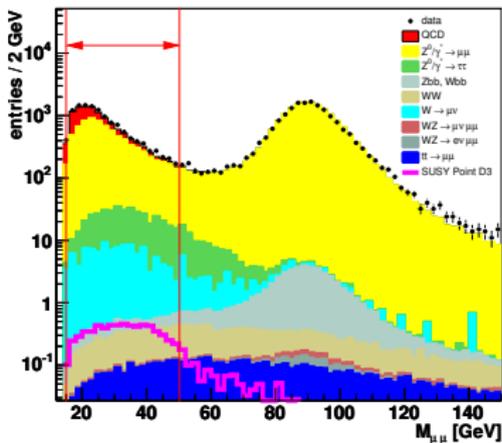
ET scale: 46 GeV



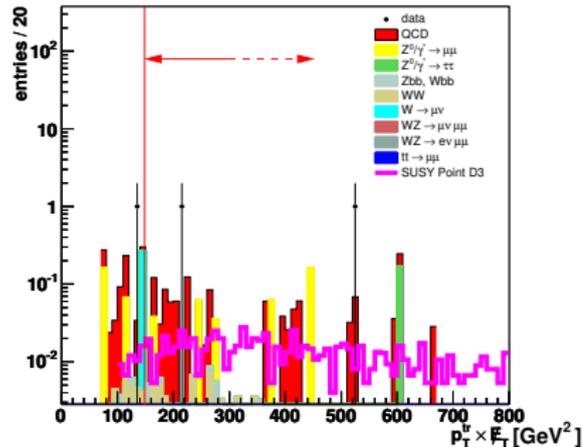
$Z(\rightarrow ee)W(\rightarrow e\nu_e)$

## Suche nach Drei-Lepton-Signaturen

Selektion:  $\mu^+$ ,  $\mu^-$  und zusätzliche isolierte Spur (aus  $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$  1-prong Zerfällen)



Anfang der Selektion



Ende der Selektion:

Daten: 2 Ereignisse

erwartet:  $1.75 \pm 0.34 \pm 0.46$

## Suche nach Drei-Lepton-Signaturen

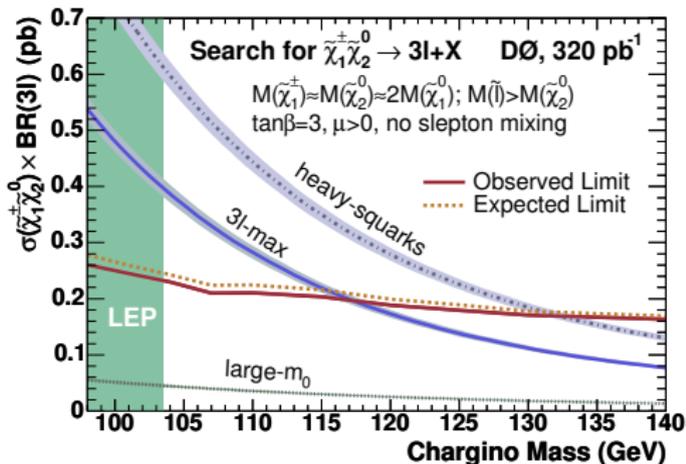
### Suche nach $\tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^0$ Produktion

- 4 Selektionen

$$3l + \cancel{E}_t :$$

$$ee + l, e\mu + l, \mu\mu + l, \\ \mu^\pm \mu^\pm$$

- Untergrund:  $WW$ ,  
 $WZ$ ,  $W\gamma$ ,  $Z$ ,  $b\bar{b}$



### betrachtete Supersymmetrieszenarien:

- „3l-max“:  $m(\tilde{l}) \simeq m(\tilde{\chi}_1^\pm)$ ,  $m(\tilde{\chi}_2^0) \rightarrow$  maximales BR in  $l$
- „large- $m_0$ “: schwere  $\tilde{l}$  und  $\tilde{q} \rightarrow$  kleines BR in  $l$
- „heavy squarks“:  $m(\tilde{l}) \ll m(\tilde{q}) \rightarrow$  Produktions-WQ und BR in  $l$  groß

# Zusammenfassung

## Arbeits- und Forschungsschwerpunkte:

- Spurdetektoren aus szintillierenden Fasern
  - Konstruktion, elektronische Auslese
- Grid-Computing
  - verteilte Datenproduktion und Simulation
- Eigenschaften der Produktion der schwachen Eichbosonen
  - bedeutender Untergrund bei vielen Suchen
- Suche nach Phänomenen außerhalb des Standardmodells in Ereignistopologien mit Leptonen und Jets
  - bisher keine konkreten Hinweise auf neue Physik
  - deutliche Verbesserung der Ausschlussgrenzen gegenüber LEP und Tevatron Run I