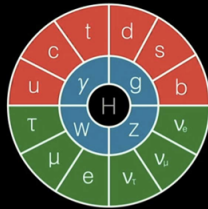


# Suche nach Dunkler Materie in Assoziation mit einem hadronisch zerfallenden $W/Z$ -Boson mit ATLAS Run-2 Daten



19.03.2018 - Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft  
Philipp Gadow, Betreuer: Patrick Rieck | Max-Planck-Institut für Physik, München



FERMIONS		BOSONS	
MATTER		FORCE CARRIERS	
■ QUARKS	■ LEPTONS	■ GAUGE BOSONS	■ HIGGS BOSON

On the relic, cosmic abundance of massive particles  
 Robert J. Scherrer and Michael S. Turner  
 Phys. Rev. D **33**, 1585 – Published 15 March 1986

Sterile neutrinos as dark matter  
 Scott Dodelson and Lawrence M. Widrow  
 Phys. Rev. Lett. **72**, 17 – Published 3 January 1994

Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection  
 Jonathan L. Feng  
 Department of Physics and Astronomy, University of California, Irvine, CA 92697, USA

Clustering properties of dark matter  
 D. Boyanovsky

Interactions of keV sterile neutrinos with matter  
 Shin'ichiro Ando<sup>1</sup> and Alexander Kusenko<sup>1,2,3</sup>

Anti-quark nuggets as dark matter  
 Detecting

Trans-Planckian wimpzillas  
 David W. Kolb

Dark Matter from Split Seesaw  
 Alexander Kusenko<sup>1,2,3</sup>, Fuminobu Takahashi<sup>4,5</sup> and Tsutomu T. Yanagida<sup>6,7</sup>

Is the Lightest Kaluza-Klein Particle a Viable Dark Matter Candidate?  
 Géraldine Servant<sup>a,b</sup> and Tim M.P. Tait<sup>a</sup>

SEARCHES FOR ASTROPHYSICAL AND COSMOLOGICAL AXIONS<sup>\*</sup>  
 Stephen J. Asztalos,<sup>1</sup> Leslie J. Rosenberg,<sup>1</sup> Karl van Bibber,<sup>1</sup> Pierre Sikivie,<sup>2,3</sup> and Konstantin Zioutas<sup>4</sup>

Mirror dark matter interpretations of the DAMA, CoGeNT and CRESST-II data  
 The U.S. Particle Accelerator

... weakly interacting  
 Baryogenesis, sphalerons, and the cogeneration of dark matter  
 S. M. Barr  
 Phys. Rev. D **44**, 3062

Annahme über Dunkle Materie: Schwach wechselwirkendes massives Teilchen (WIMP)

# Entwicklung der Dunkle-Materie-Modelle

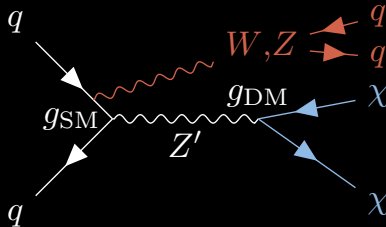
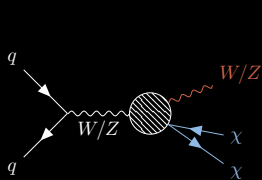
Effektive Feldtheorie



Vereinfachte Modelle



Konsistente Vereinfachte Modelle



# Signatur von Dunkler Materie im ATLAS-Detektor

Fehlender Transversalimpuls

$E_T^{\text{miss}}$

W/Z  
→ Jets

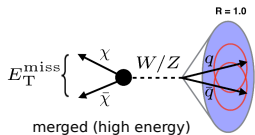
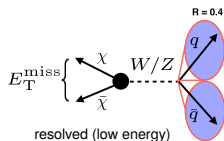
 **ATLAS**  
Work in Progress

Run: 299584  
Event: 421605895  
2016-05-20 07:30:49 CEST

# Mono - W/Z ( $q\bar{q}$ ) Suche

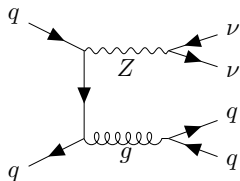
**Signatur:** Fehlender Transversalimpuls  $E_T^{\text{miss}}$  mit W/Z-Boson rekonstruiert als

- ▶ (resolved) zwei Jets mit kleinem Radiusparameter ( $R = 0.4$ )
- ▶ (merged) Jet mit großem Radiusparameter ( $R = 1.0$ )

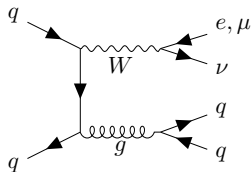


## Dominante Untergrundprozesse

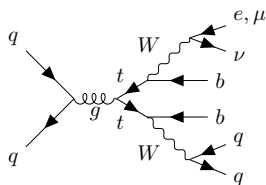
$Z \rightarrow \nu\bar{\nu} + \text{Jets}$



$W + \text{Jets}$



$t\bar{t}$



Weitere Untergrundprozesse: Diboson, Einzel-Top-Quark, Multijet

# Ereignisselektion

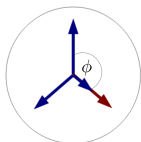
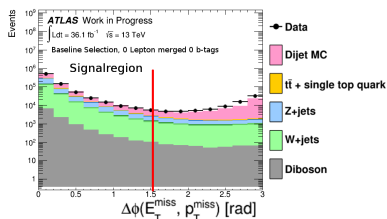
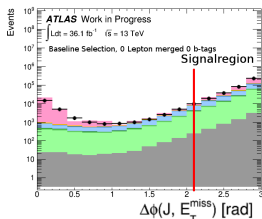
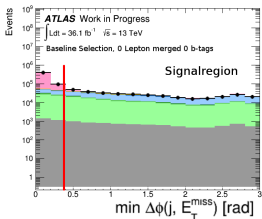
## Baseline

▶  $E_T^{\text{miss}}$ -Trigger  
(Schwelle: 70 - 110 GeV)

▶ Kallibriertes Lepton-Veto

▶  $p_T^{\text{miss}} > 30$  GeV  
für 0,1  $b$ -Jets

## Anti-QCD-Schnitte



Jet →  
 $E_T^{\text{miss}}$  →

## QCD-Multijet Untergrund

- ▶ Fehlerhafte Messung von  $p_T$  eines Jets verursacht Beitrag zu  $E_T^{\text{miss}}$
- ▶  $E_T^{\text{miss}}$  verläuft (anti-)parallel zu diesem Jet

# Ereignisselektion

## Baseline

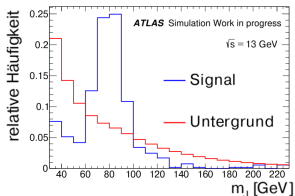
- ▶  $E_T^{\text{miss}}$ -Trigger (Schwelle: 70 - 110 GeV)
- ▶ Kallibriertes Lepton-Veto
- ▶  $p_T^{\text{miss}} > 30$  GeV für 0,1  $b$ -Jets

## Anti-QCD-Schnitte

- ▶  $\min \Delta\phi(j, E_T^{\text{miss}}) > 20^\circ$
- ▶  $\Delta\phi(J/jj, E_T^{\text{miss}}) > 120^\circ$
- ▶  $\Delta\phi(E_T^{\text{miss}}, p_T^{\text{miss}}) < 90^\circ$

## Merged: $E_T^{\text{miss}} > 250$ GeV

- ▶  $\geq 1$  Jets mit großem Radiusparameter ( $p_T > 200$  GeV)
- ▶ Veto auf nicht-assoziierte  $b$ -Jets
- ▶  $W/Z$ -Tagger ( $m_J, D_2^{\beta=1}$ )



## Resolved: $E_T^{\text{miss}} > 150$ GeV

- ▶ Ereignis nicht in Merged-Kategorie
- ▶  $\geq 2$  Jets mit kleinem Radiusparameter ( $p_T > 20$  GeV)
- ▶  $\Delta\phi(j, j) < 140^\circ$
- ▶  $\Delta R(j, j) < 1.4$  (2  $b$ -Jets: 1.25)
- ▶  $p_T^{\text{leading jet}} > 45$  GeV
- ▶  $\sum p_T^{j1, j2, (j3)} > 120$  (150) GeV
- ▶ 2 oder weniger  $b$ -Jets
- ▶  $m_{jj}$  im  $W/Z$ -Massenfenster

# Ereignisselektion

## Baseline

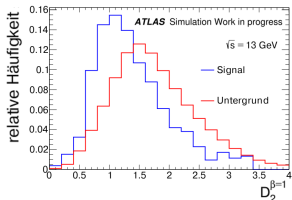
- ▶  $E_T^{\text{miss}}$ -Trigger (Schwelle: 70 - 110 GeV)
- ▶ Kallibriertes Lepton-Veto
- ▶  $p_T^{\text{miss}} > 30$  GeV für 0,1  $b$ -Jets

## Anti-QCD-Schnitte

- ▶  $\min \Delta\phi(j, E_T^{\text{miss}}) > 20^\circ$
- ▶  $\Delta\phi(J/jj, E_T^{\text{miss}}) > 120^\circ$
- ▶  $\Delta\phi(E_T^{\text{miss}}, p_T^{\text{miss}}) < 90^\circ$

## Merged: $E_T^{\text{miss}} > 250$ GeV

- ▶  $\geq 1$  Jets mit großem Radiusparameter ( $p_T > 200$  GeV)
- ▶ Veto auf nicht-assoziierte  $b$ -Jets
- ▶  $W/Z$ -Tagger ( $m_J, D_2^{\beta=1}$ )



## Resolved: $E_T^{\text{miss}} > 150$ GeV

- ▶ Ereignis nicht in Merged-Kategorie
- ▶  $\geq 2$  Jets mit kleinem Radiusparameter ( $p_T > 20$  GeV)
- ▶  $\Delta\phi(j, j) < 140^\circ$
- ▶  $\Delta R(j, j) < 1.4$  (2  $b$ -Jets: 1.25)
- ▶  $p_T^{\text{leading jet}} > 45$  GeV
- ▶  $\sum p_T^{j1, j2, (j3)} > 120$  (150) GeV
- ▶ 2 oder weniger  $b$ -Jets
- ▶  $m_{jj}$  im  $W/Z$ -Massenfenster



# Ereignisselektion

## Baseline

- ▶  $E_T^{\text{miss}}$ -Trigger (Schwelle: 70 - 110 GeV)
- ▶ Kallibriertes Lepton-Veto
- ▶  $p_T^{\text{miss}} > 30$  GeV für 0,1  $b$ -Jets

## Anti-QCD-Schnitte

- ▶  $\min \Delta\phi(j, E_T^{\text{miss}}) > 20^\circ$
- ▶  $\Delta\phi(J/jj, E_T^{\text{miss}}) > 120^\circ$
- ▶  $\Delta\phi(E_T^{\text{miss}}, p_T^{\text{miss}}) < 90^\circ$

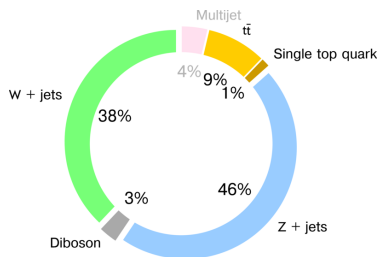
## Merged: $E_T^{\text{miss}} > 250$ GeV

- ▶  $\geq 1$  Jets mit großem Radiusparameter ( $p_T > 200$  GeV)
- ▶ Veto auf nicht-assoziierte  $b$ -Jets
- ▶  $W/Z$ -Tagger ( $m_J, D_2^{\beta=1}$ )

## Resolved: $E_T^{\text{miss}} > 150$ GeV

- ▶ Ereignis nicht in Merged-Kategorie
- ▶  $\geq 2$  Jets mit kleinem Radiusparameter ( $p_T > 20$  GeV)
- ▶  $\Delta\phi(j, j) < 140^\circ$
- ▶  $\Delta R(j, j) < 1.4$  (2  $b$ -Jets: 1.25)
- ▶  $p_T^{\text{leading jet}} > 45$  GeV
- ▶  $\sum p_T^{j1, j2, (j3)} > 120$  (150) GeV
- ▶ 2 oder weniger  $b$ -Jets
- ▶  $m_{jj}$  im  $W/Z$ -Massenfenster

# Untergrundabschätzung



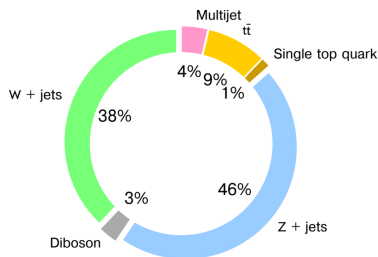
## Simulation der Untergründe:

- ▶  $Z + \text{Jets}$ : SHERPA 2.2.1
- ▶  $W + \text{Jets}$ : SHERPA 2.2.1
- ▶  $t\bar{t}$ : POWHEG + PYTHIA 6
- ▶ Einzel- $t$ : POWHEG + PYTHIA 6
- ▶  $WW/WZ/ZZ$ : SHERPA 2.1.1

## Reduziere Unsicherheiten auf Untergrundsimulation durch Kontrollregionen:

- ▶ **0-Lepton Signalregion** und **1-Lepton** / **2-Lepton** Kontrollregionen
- ▶ mit je **0, 1, and 2 b-tag** Kategorien
- ▶ jeweils unterteilt in  **$W/Z$ -Massenfenster** und **oberes Seitenband**
- ▶ für jeweils **merged** und **resolved** Topologien

# Untergrundabschätzung



## Simulation der Untergründe:

- ▶ **Z + Jets:** SHERPA 2.2.1
- ▶ **W + Jets:** SHERPA 2.2.1
- ▶ **tt:** POWHEG + PYTHIA 6
- ▶ **Einzel-t:** POWHEG + PYTHIA 6
- ▶ **WW/WZ/ZZ:** SHERPA 2.1.1

Zusätzlich **datenbasierte Multijet-Abschätzung** notwendig

## Reduziere Unsicherheiten auf Untergrundsimulation durch Kontrollregionen:

- ▶ **0-Lepton Signalregion** und **1-Lepton** / **2-Lepton** Kontrollregionen
- ▶ mit je **0, 1, and 2 b-tag** Kategorien
- ▶ jeweils unterteilt in **W/Z-Massenfenster** und **oberes Seitenband**
- ▶ für jeweils **merged** und **resolved** Topologien

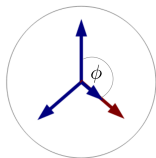
# Abschätzung des Multijet-Untergrunds

## Strategie:

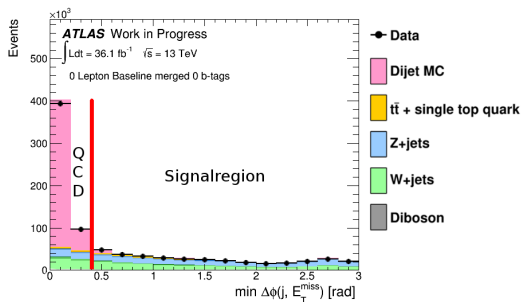
1. Form der  $E_T^{\text{miss}}$ -Verteilung aus an Multijet-Ereignissen reicher Selektion: Daten abzüglich sonstiger Untergründe
2. Bestimme Normierung dieser Verteilungen durch Fit an Daten im Seitenband der  $W$ -/ $Z$ -Masse

Multijet- $E_T^{\text{miss}}$ -Verteilung aus  
 Daten - MC in Selektion mit

$$\min_{i=1,2,3} \Delta\phi(\vec{E}_T^{\text{miss}}, \vec{p}_{\text{jet},i}) < 20^\circ$$



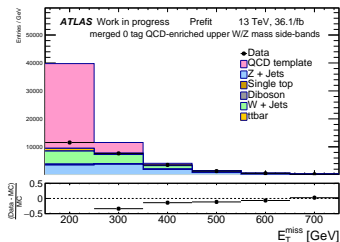
Jet  $\rightarrow$   
 $E_T^{\text{miss}}$   $\rightarrow$



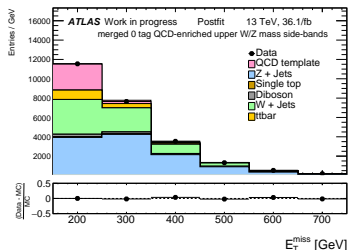
# Normierung des Multijet-Untergrunds

Normierung der noch unskalierten Multijet  $E_T^{\text{miss}}$ -Verteilung aus  $\min \Delta\phi < 20^\circ$  durch Fit an Daten in W/Z-Massen-Seitenband:

Vor Fit in Seitenband-Region



Nach Fit in Seitenband-Region

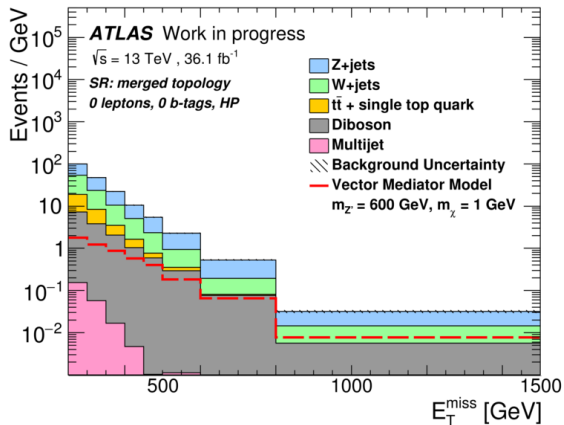


Normierungsfaktoren für Multijet  $E_T^{\text{miss}}$ -Verteilungen:

	0 $b$ -tag	1 $b$ -tag	2 $b$ -tag
merged	$(8.7 \pm 1.0)\%$	$(2.2 \pm 2.9)\%$	$(19.0 \pm 3.8)\%$
resolved	$(55.7 \pm 6.1)\%$	$(28.7 \pm 4.8)\%$	$(20.7 \pm 4.1)\%$

**ATLAS** Work in Progress

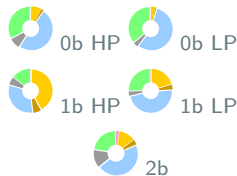
# Signalregion



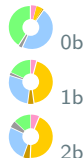
## b-tag Kategorien

Merged Topologie

(High Purity / Low Purity)



Resolved Topologie

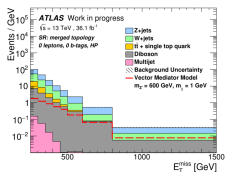


- ▶ b-tag Kategorien erhöhen Sensitivität auf  $Z \rightarrow b\bar{b}$
- ▶ Kombierter Fit in  $E_T^{\text{miss}}$  von statistischem Modell aus Signal und Untergrund an die Daten in 8 Signal- und 32 Kontrollregionen

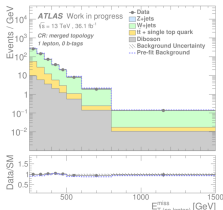
# Statistische Auswertung

"Fit des Modells an Daten": Profile-Likelihood Fit mit Likelihood-Funktion

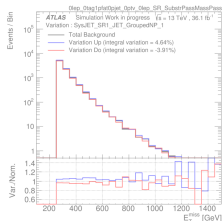
$$\mathcal{L}(\mu, \theta) = \prod_{\text{SR bins: } i} \text{Pois}(n_i | \mu S_i(\theta) + B_i(\theta)) \prod_{\text{CR bins: } j} \text{Pois}(n_j | B_j(\theta)) \prod_{\text{Nuisance parameters: } k} \text{Gaus}(0 | \text{mean} = \theta_k, \sigma = 1)$$



0-Lepton Signalregion



1-Lepton Kontrollregion  
 2-Lepton Kontrollregion



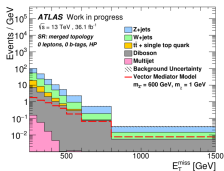
Systematische Unsicherheiten

- ▶ Normierungen der Untergründe können im Rahmen von Unsicherheiten variieren (festgelegt durch Maximum von  $\mathcal{L}$ )
- ▶ Kontrollregionen für dominante Untergründe legen deren Normierung in Signalregion fest

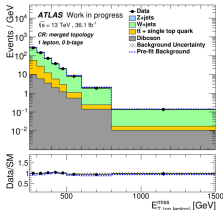
# Statistische Auswertung

"Fit des Modells an Daten": Profile-Likelihood Fit mit Likelihood-Funktion

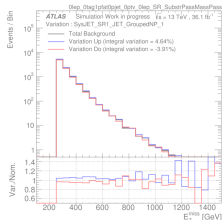
$$\mathcal{L}(\mu, \theta) = \prod_{\text{SR bins: } i} \text{Pois}(n_i | \mu S_i(\theta) + B_i(\theta)) \prod_{\text{CR bins: } j} \text{Pois}(n_j | B_j(\theta)) \prod_{\text{Nuisance parameters: } k} \text{Gaus}(0 | \text{mean} = \theta_k, \sigma = 1)$$



0-Lepton Signalregion



1-Lepton Kontrollregion  
2-Lepton Kontrollregion



Systematische Unsicherheiten

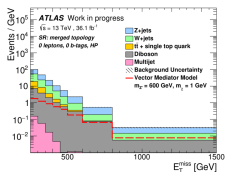
- ▶ Normierungen der Untergründe können im Rahmen von Unsicherheiten variieren (festgelegt durch Maximum von  $\mathcal{L}$ )
- ▶ Kontrollregionen für dominante Untergründe legen deren Normierung in Signalregion fest



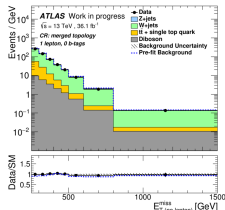
# Statistische Auswertung

"Fit des Modells an Daten": Profile-Likelihood Fit mit Likelihood-Funktion

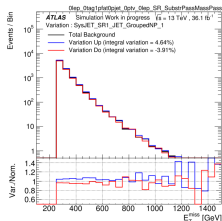
$$\mathcal{L}(\mu, \theta) = \prod_{\text{SR bins: } i} \text{Pois}(n_i | \mu S_i(\theta) + B_i(\theta)) \prod_{\text{CR bins: } j} \text{Pois}(n_j | B_j(\theta)) \prod_{\text{Nuisance parameters: } k} \text{Gaus}(0 | \text{mean} = \theta_k, \sigma = 1)$$



0-Lepton Signalregion



1-Lepton Kontrollregion  
2-Lepton Kontrollregion

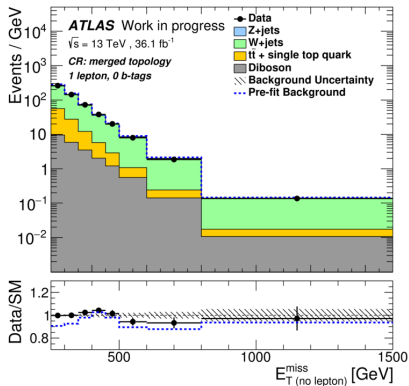


Systematische Unsicherheiten

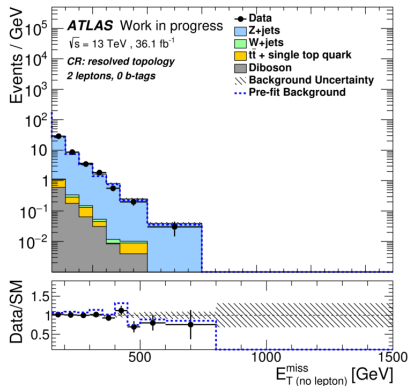
- ▶ Normierungen der Untergründe können im Rahmen von Unsicherheiten variieren (festgelegt durch Maximum von  $\mathcal{L}$ )
- ▶ Kontrollregionen für dominante Untergründe legen deren Normierung in Signalregion fest

# Verteilungen nach Fit

## 1-Lepton Kontrollregion - 0 tag merged

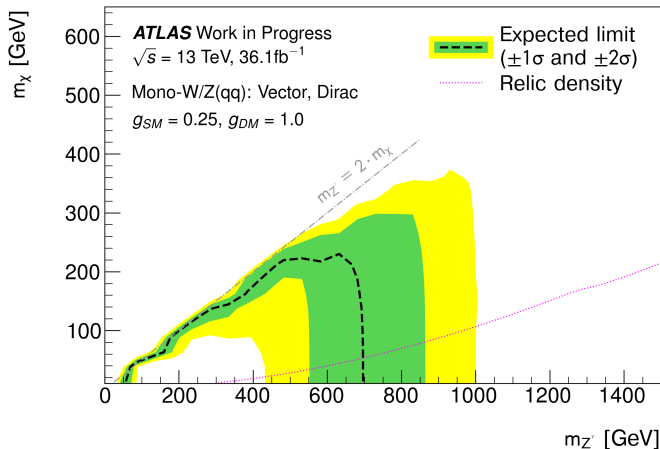
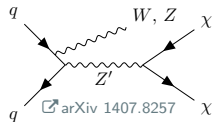


## 2-Lepton Kontrollregion - 0 tag resolved



- Daten werden durch statistisches Modell in allen Kategorien der Kontrollregionen gut beschrieben

# Erwartete Ausschlussgrenzen



Erwartete Reichweite der Suche für  $m_{Z'}$  bis 700 GeV und  $m_\chi$  bis 230 GeV

# Zusammenfassung

- ▶ Suche nach Dunkler Materie in Assoziation mit hadronisch zerfallendem  $W/Z$ -Boson am ATLAS-Experiment
- ▶ Multijet-Untergrund wurde abgeschätzt mit datenbasierter Template-Methode
- ▶ ATLAS Mono- $W/Z$ -Suche ist unter Annahme eines vereinfachten Modells mit Vektormediator vor allem für DM-Teilchen bis 230 GeV und Mediatoren bis 700 GeV sensitiv

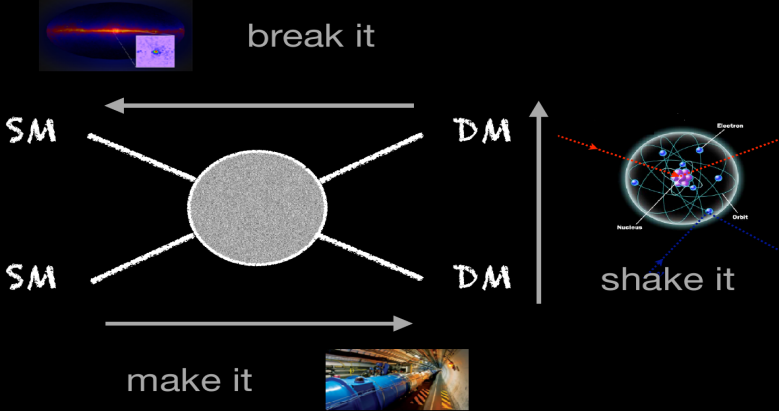
Hinweis auf ergänzende Vorträge:

T 28.8 Search for Dark Matter produced in association with a  $W$  or  $Z$  boson with the ATLAS Experiment at 13 TeV

T 28.9 Optimierung der Suche nach dunklen Materie mit dem ATLAS-Detektor im Mono-V-Kanal

# Backup Folien

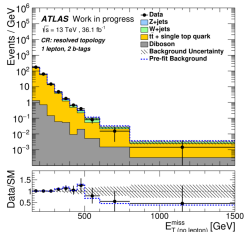
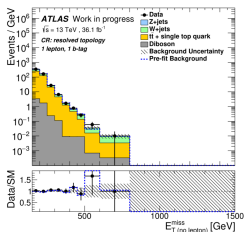
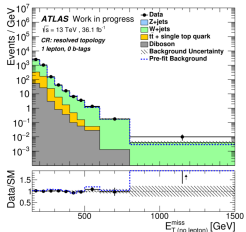
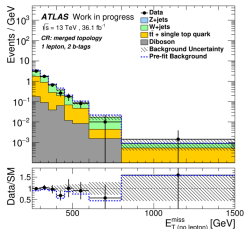
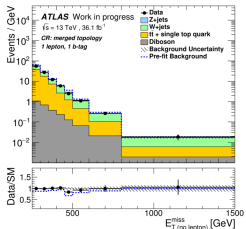
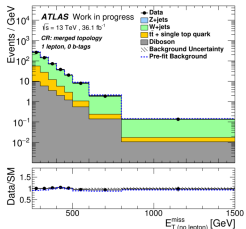
# Nachweis von Dunkler Materie



Annahme über Teilchennatur der Dunklen Materie:  
Schwach wechselwirkendes massives Teilchen (WIMP)

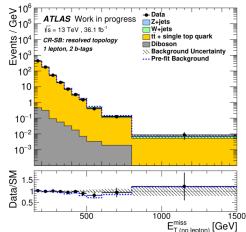
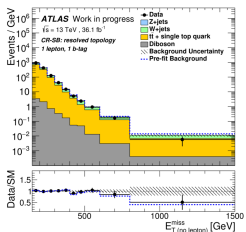
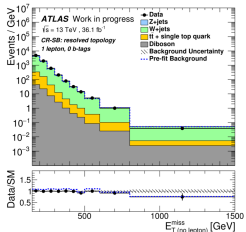
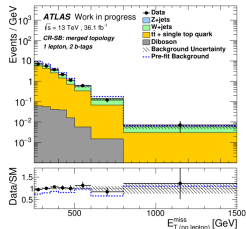
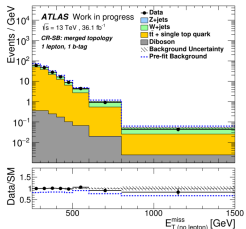
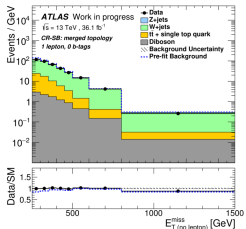
# Verteilungen nach dem Fit

## 1-Lepton: W/Z Massenfenster



# Verteilungen nach dem Fit

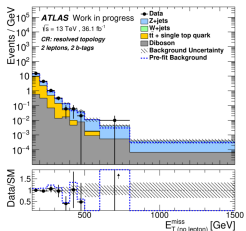
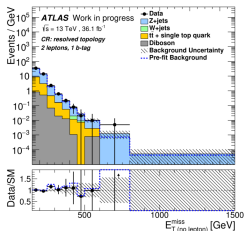
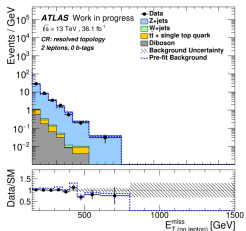
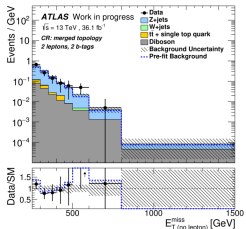
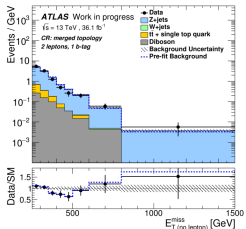
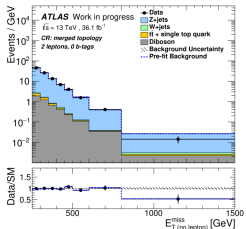
## 1-Lepton: Oberes W/Z Massen-Seitenband





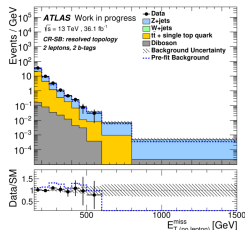
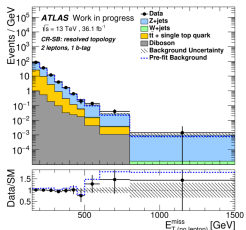
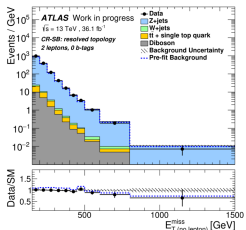
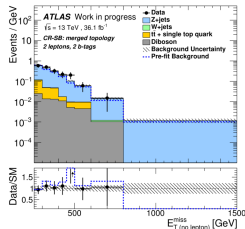
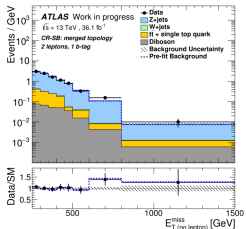
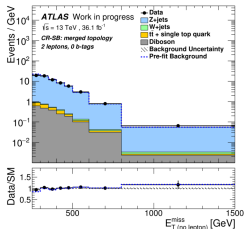
# Verteilungen nach dem Fit

## 2-Lepton: W/Z Massenfenster

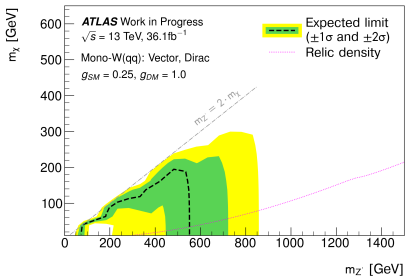


# Verteilungen nach dem Fit

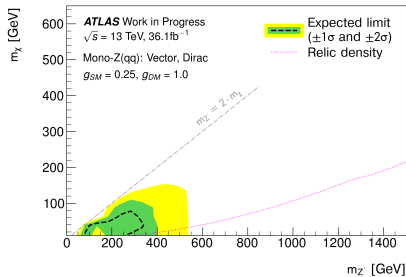
## 2-Lepton: Oberes W/Z Massen-Seitenband



# Erwartete Ausschlussgrenzen



Mono-W



Mono-Z