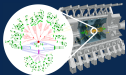




Das Durcheinander zähmen: Präzise Simulationen für Kollisionen am Large Hadron Collider

Frank Siegert



Emmy
Noether-
Programm

Deutsche
Forschungsgemeinschaft
DFG



RADUIERTEN
KOLLEG

Masse-Spektrum-Symmetrie



Physikalisches Kolloquium, Dresden, 02.06.2015

Präzise Simulationen für Kollisionen am Large Hadron Collider

- 1** Die Theorie dahinter
Standardmodell im Schnelldurchgang
- 2** Die “Weltmaschine” am CERN
Large Hadron Collider und ATLAS-Detektor
- 3** Präzise Theorievorhersagen

Warum Teilchenphysik?

“Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält”

Goethe

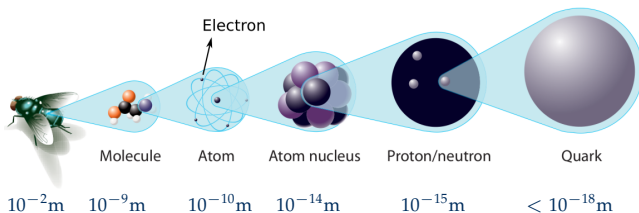
- Fundamentale Bausteine der Materie
- Deren fundamentale Wechselwirkungen

Warum Teilchenphysik?

“Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält”

Goethe

- Fundamentale Bausteine der Materie
- Deren fundamentale Wechselwirkungen



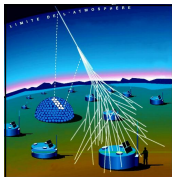
Warum Teilchenphysik?

“Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält”

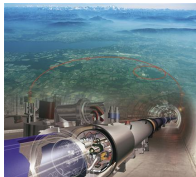
Goethe

- Fundamentale Bausteine der Materie
- Deren fundamentale Wechselwirkungen

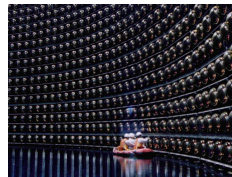
Wie?



Astroteilchen



Beschleuniger



Flavour/Neutrinos

...

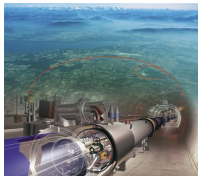
Warum Teilchenphysik?

“Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält”

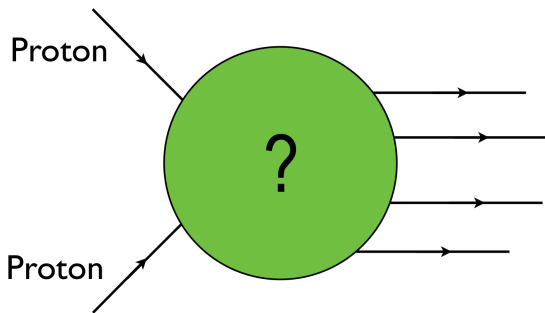
Goethe

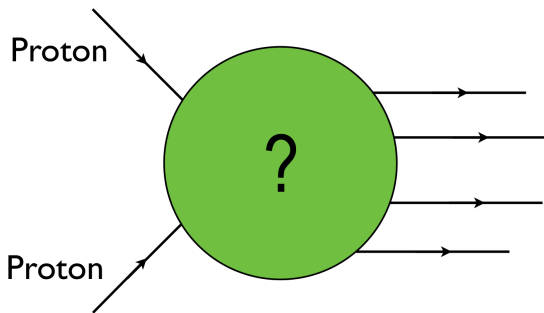
- Fundamentale Bausteine der Materie
- Deren fundamentale Wechselwirkungen

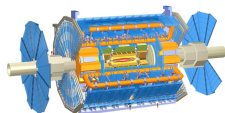
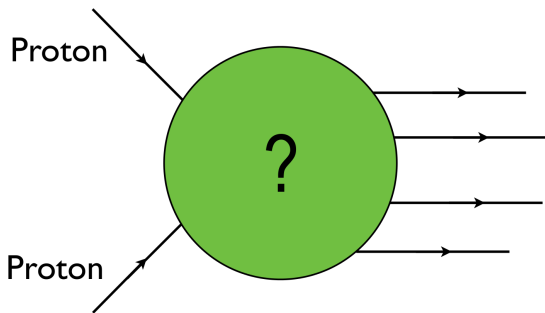
Wie?

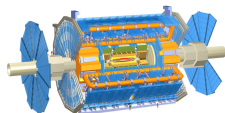
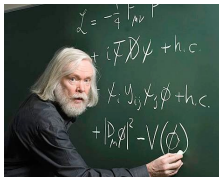
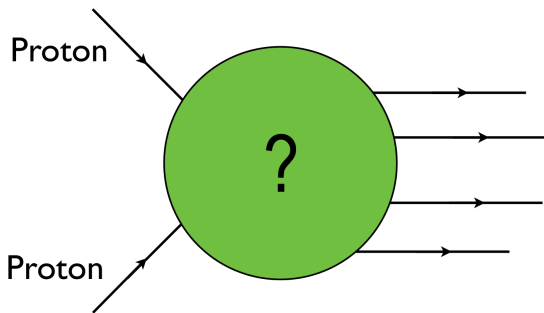


Beschleuniger



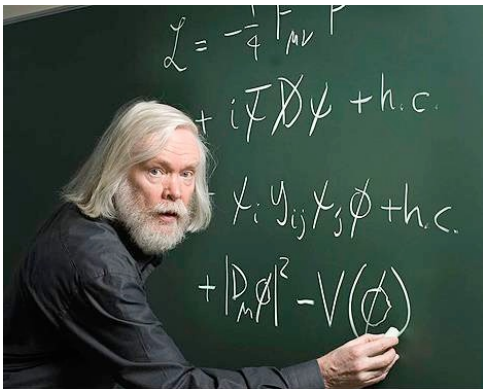






Eine Prise Theorie

Das Standardmodell im Schnelldurchgang



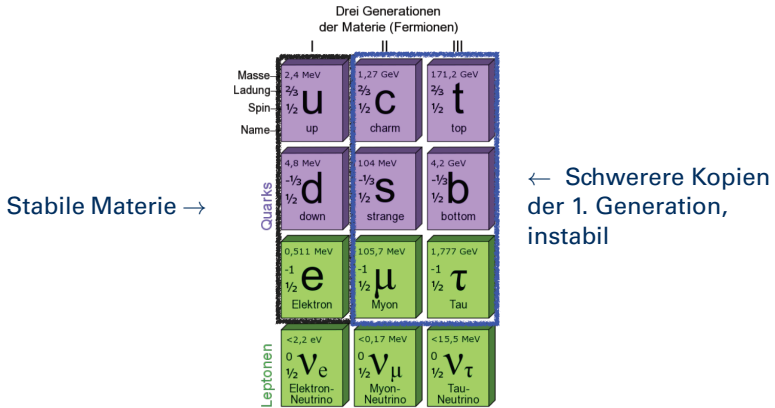
Fundamentale Bausteine der Materie

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name →	u up	c charm	t top
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron- Neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon- Neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau- Neutrino
Leptonen			

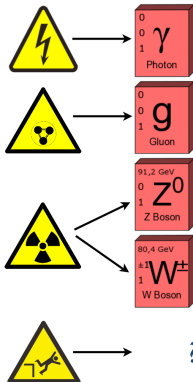
- Materieteilchen tragen Spin 1/2 (= Fermionen)

Fundamentale Bausteine der Materie



- Materieteilchen tragen Spin 1/2 (= Fermionen)

Wechselwirkungen



- Austauscheteilchen tragen Spin 1 (= Bosonen)

Mathematischer Aufbau des Standardmodells (Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder $\psi(\vec{x}, t)$

Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder $\psi(\vec{x}, t)$
- Wechselwirkungen = bosonische Felder aus Eichsymmetrie:

Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder $\psi(\vec{x}, t)$
- Wechselwirkungen = bosonische Felder aus Eichsymmetrie:

Fordere Invarianz unter **lokaler** Phasentrafo $\psi' = \exp(i\chi(\vec{x}, t)) \cdot \psi$
(analog zu QM: $|\psi|^2 = |\psi'|^2$)

Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder $\psi(\vec{x}, t)$
- Wechselwirkungen = bosonische Felder aus Eichsymmetrie:

Fordere Invarianz unter lokaler Phasentrafo $\psi' = \exp(i\chi(\vec{x}, t)) \cdot \psi$
(analog zu QM: $|\psi|^2 = |\psi'|^2$)

? Freie Dirac-Glg $(i\gamma^\mu \partial_\mu - mc/\hbar) \psi = 0$ nicht invariant!

Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder $\psi(\vec{x}, t)$
- Wechselwirkungen = bosonische Felder aus Eichsymmetrie:

Fordere Invarianz unter lokaler Phasentrafo $\psi' = \exp(i\chi(\vec{x}, t)) \cdot \psi$
(analog zu QM: $|\psi|^2 = |\psi'|^2$)

? Freie Dirac-Glg $(i\gamma^\mu \partial_\mu - mc/\hbar) \psi = 0$ nicht invariant!

! "Minimale Kopplung" durch kovariante Ableitung:

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu := \partial_\mu + \frac{iq}{\hbar} A_\mu \text{ mit Eichtransformation } A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \chi(\vec{x}, t)$$

Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder $\psi(\vec{x}, t)$
- Wechselwirkungen = bosonische Felder aus Eichsymmetrie:

Fordere Invarianz unter lokaler Phasentrafo $\psi' = \exp(i\chi(\vec{x}, t)) \cdot \psi$
(analog zu QM: $|\psi|^2 = |\psi'|^2$)

? Freie Dirac-Glg $(i\gamma^\mu \partial_\mu - mc/\hbar) \psi = 0$ nicht invariant!

! "Minimale Kopplung" durch kovariante Ableitung:

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu := \partial_\mu + \frac{iq}{\hbar} A_\mu \text{ mit Eichtransformation } A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \chi(\vec{x}, t)$$

⇒ Eichfeld A_μ (Photon) vorhergesagt

Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder $\psi(\vec{x}, t)$
- Wechselwirkungen = bosonische Felder aus Eichsymmetrie:

Fordere Invarianz unter lokaler Phasentrafo $\psi' = \exp(i\chi(\vec{x}, t)) \cdot \psi$
(analog zu QM: $|\psi|^2 = |\psi'|^2$)

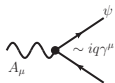
? Freie Dirac-Glg $(i\gamma^\mu \partial_\mu - mc/\hbar) \psi = 0$ nicht invariant!

! "Minimale Kopplung" durch kovariante Ableitung:

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu := \partial_\mu + \frac{iq}{\hbar} A_\mu \text{ mit Eichtransformation } A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \chi(\vec{x}, t)$$

⇒ Eichfeld A_μ (Photon) vorhergesagt

Kopplung an Fermionen



Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder $\psi(\vec{x}, t)$
- Wechselwirkungen = bosonische Felder aus Eichsymmetrie:

Fordere Invarianz unter lokaler Phasentrafo $\psi' = \exp(i\chi(\vec{x}, t)) \cdot \psi$
(analog zu QM: $|\psi|^2 = |\psi'|^2$)

? Freie Dirac-Glg $(i\gamma^\mu \partial_\mu - mc/\hbar) \psi = 0$ nicht invariant!

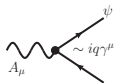
! "Minimale Kopplung" durch kovariante Ableitung:

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu := \partial_\mu + \frac{iq}{\hbar} A_\mu \text{ mit Eichtransformation } A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \chi(\vec{x}, t)$$

⇒ Eichfeld A_μ (Photon) vorhergesagt

Kopplung an Fermionen

eichinvarianter kinetischer Term



$$\mathcal{L}_{\text{em}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

mit $F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$

Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder $\psi(\vec{x}, t)$
- Wechselwirkungen = bosonische Felder aus Eichsymmetrie:

Fordere Invarianz unter lokaler Phasentrafo $\psi' = \exp(i\chi(\vec{x}, t)) \cdot \psi$
(analog zu QM: $|\psi|^2 = |\psi'|^2$)

? Freie Dirac-Glg $(i\gamma^\mu \partial_\mu - mc/\hbar) \psi = 0$ nicht invariant!

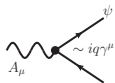
! "Minimale Kopplung" durch kovariante Ableitung:

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu := \partial_\mu + \frac{iq}{\hbar} A_\mu \text{ mit Eichtransformation } A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \chi(\vec{x}, t)$$

⇒ Eichfeld A_μ (Photon) vorhergesagt

Kopplung an Fermionen

eichinvarianter kinetischer Term



$$\mathcal{L}_{\text{em}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$\text{mit } F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$$

- Ähnlicher (aber komplizierterer) Mechanismus für starke und schwache Wechselwirkung

Besonderheiten der starken Wechselwirkung

- Nicht-Abelsche Gruppe SU(3) definiert Eichtransformation

$$\psi'_a = \exp\left(i\theta^C(\vec{x}, t) t_{ab}^C\right) \cdot \psi_b$$

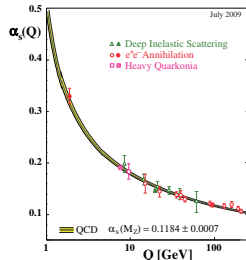
- Jedes Quark kommt in 3 Ladungen: $a, b = \text{rot, grün, blau}$
- Modifizierter Feldstärketensor führt zu Gluon-Selbstkopplungen



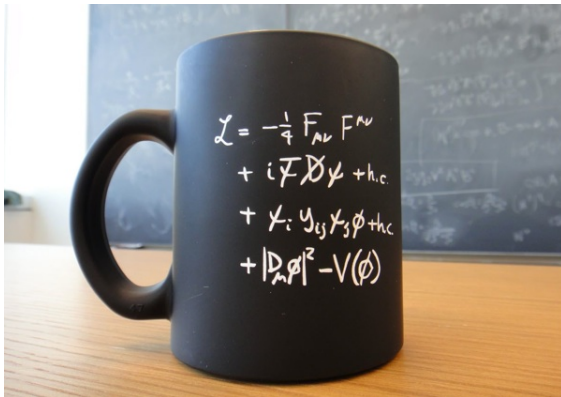
- Asymptotische Freiheit und Confinement: Kopplung wächst wie Gummiband

$$g_s^2(Q^2) \approx \frac{4\pi}{b_0 \ln Q^2/\Lambda^2}$$

- ⇒ Quarks treten nie als freie Teilchen auf
- ⇒ Beobachtung von Quarks nur als Hadronen-Bündel = "Jets"



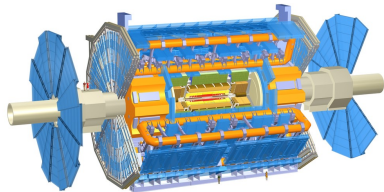
Lagrangedichte des Standardmodells

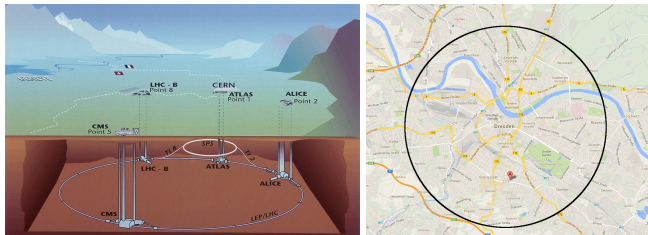


- Bisher: Zeile 1 (Bosonen) + Zeile 2 (Fermionen, minimale Kopplung)
- Zeile 3: fermionische Massenterme
- Zeile 4: Higgodynamik und bosonische Massenterme

Zwei experimentelle Zutaten

Large Hadron Collider und ATLAS-Detektor



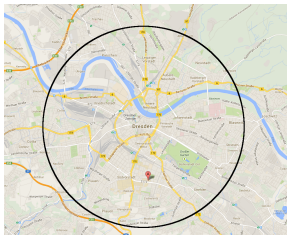
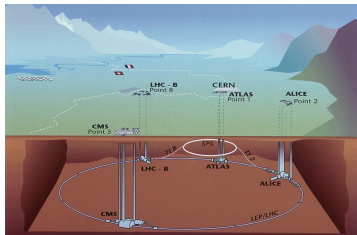


Designkriterien

- Higgs-Entdeckung bis $m_H = 1 \text{ TeV}$
(≈ 1000 Proton-Massen)
- Verwendung des LEP-Tunnels (27 km)
- Konkurrenz zu US-Beschleunigern
(Tevatron, SSC in Planung)



Proton-Proton-Beschleuniger mit
 supraleitenden Führungsmagneten für hohe
 Kollisionsrate und hohe Strahlenergie
 ($E_{\text{cms}} = 14 \text{ TeV} \approx \text{Tevatron} \times 7$)



Designkriterien

- Higgs-Entdeckung bis $m_H = 1 \text{ TeV}$ (≈ 1000 Proton-Massen)
- Verwendung des LEP-Tunnels (27 km)
- Konkurrenz zu US-Beschleunigern (Tevatron, SSC in Planung)



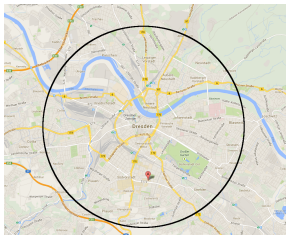
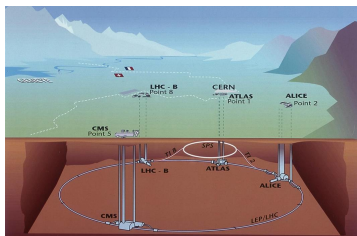
Proton-Proton-Beschleuniger mit
supraleitenden Führungsmagneten für hohe
Kollisionsrate und hohe Strahlenergie
($E_{\text{cms}} = 14 \text{ TeV} \approx \text{Tevatron} \times 7$)

Kollisionsraten

- Pro Strahl 2808 Pakete (mit je $\sim 10^{11}$ Protonen)
→ Crossing-Rate $\approx 31 \text{ MHz}$
- jeweils ≈ 20 Kollisionen



600 Mio Kollisionen pro Sekunde!



Designkriterien

- Higgs-Entdeckung bis $m_H = 1 \text{ TeV}$ (≈ 1000 Proton-Massen)
- Verwendung des LEP-Tunnels (27 km)
- Konkurrenz zu US-Beschleunigern (Tevatron, SSC in Planung)



Proton-Proton-Beschleuniger mit
supraleitenden Führungsmagneten für hohe
Kollisionsrate und hohe Strahlenergie
($E_{\text{cms}} = 14 \text{ TeV} \approx \text{Tevatron} \times 7$)

Kollisionsraten

- Pro Strahl 2808 Pakete
(mit je $\sim 10^{11}$ Protonen)
→ Crossing-Rate $\approx 31 \text{ MHz}$
- jeweils ≈ 20 Kollisionen

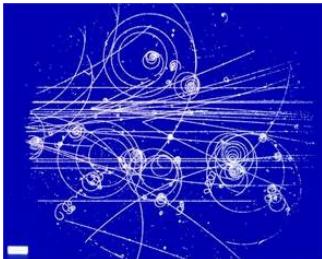


600 Mio Kollisionen pro Sekunde!

- Herausforderung:
1 interessantes Ereignis in 10^{12}
- Beispiel bei Idealbedingungen:
 ~ 1 "Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ " Ereignis pro Stunde

Wie weist man Elementarteilchen nach?

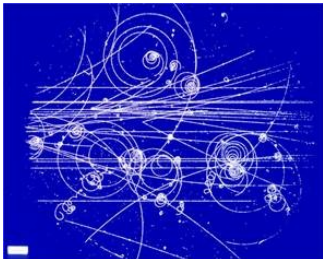
Historisch: Bildgebende Detektoren



- Sichtbare Teilchenspuren in Nebelkammer/Blasenkammer
- Manuelle Ausmessung der Krümmungsradien für Impulsmessung
→ zu langsam für 600 MHz

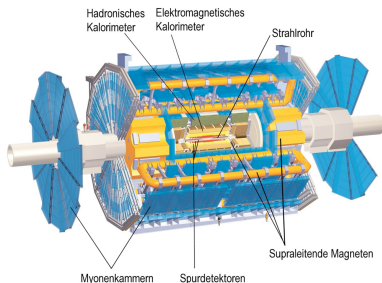
Wie weist man Elementarteilchen nach?

Historisch: Bildgebende Detektoren



- Sichtbare Teilchenspuren in Nebelkammer/Blasenkammer
- Manuelle Ausmessung der Krümmungsradien für Impulsmessung
→ zu langsam für 600 MHz

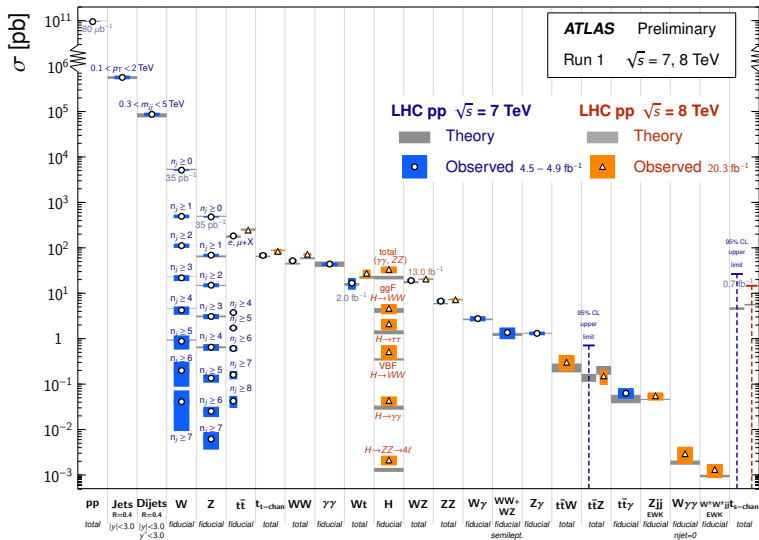
Elektronische Detektoren, z.B. ATLAS



- Zwiebelförmige Struktur für Messung verschiedener Teilchenarten
- Messung elektrischer Signale
- Auswahl und Auswertung mit komplexen Software-Algorithmen

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: March 2015



ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

Status: Feb 2015

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$

Model	e, μ, τ, γ	Jets	E_{miss}^{γ}	$[L, d](fb^{-1})$	Mass limit	Reference		
Inclusive Searches	MSUGRA/CMSSM	0	2-6 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}, \tilde{u}, \tilde{d}$ 1.7 TeV	$m(\tilde{g})=m(\tilde{t})$ 1405.7875	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$	0	2-6 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 850 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 0 \text{ GeV}, m(\tilde{t}_2^0, \text{gen. } \tilde{q})=m(\tilde{t}_1^0)$ 1405.7875	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$ (compressed)	1 γ	0-1 jet	Yes	20.3	\tilde{g} 250 GeV	$m(\tilde{g})=m(\tilde{t}_1^0) = m(\tilde{c})$ 1411.1559	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$	0	2-6 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 1.33 TeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 0 \text{ GeV}$ 1405.7875	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$	1 e, μ	3-6 jets	Yes	20	\tilde{g} 1.2 TeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 300 \text{ GeV}, m(\tilde{t}_2^0) \geq 0.5(m(\tilde{t}_1^0) + m(\tilde{t}_2^0))$ 1501.0355	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$	2 e, μ	0-3 jets	Yes	20	\tilde{g} 1.32 TeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 0 \text{ GeV}$ 1501.0355	
	GMSB (\tilde{L} NLSP)	1.2 + 0-1 τ	0-2 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 3.5 TeV	$\tau_{\text{stop}} > 20$ 1407.0603	
	GGM (bino NLSP)	2 γ	-	Yes	20.3	\tilde{g} 1.28 TeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 50 \text{ GeV}$ ATLAS-CO NF-2014-001	
	GGM (wino NLSP)	1 $e, \mu + \gamma$	-	Yes	4.8	\tilde{g} 619 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 50 \text{ GeV}$ ATLAS-CO NF-2012-144	
	GGM (higgsino-bino NLSP)	γ	1 b	Yes	4.8	\tilde{g} 900 GeV	1211.1167	
GGM (higgsino NLSP)	2 e, μ (Z)	0-3 jets	Yes	5.8	\tilde{g} 690 GeV	$m(\text{NLSP}) > 200 \text{ GeV}$ ATLAS-CO NF-2012-152		
Gravitino LSP	0	mono-jet	Yes	20.3	\tilde{g}^{stop} 865 GeV	$m(\tilde{G}) > 1.8 \times 10^{-4} \text{ eV}, m(\tilde{g})=m(\tilde{g})=1.5 \text{ TeV}$ 1502.01518		
3^{rd} gen. & med.	$\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$	0	3 b	Yes	20.1	\tilde{g} 1.25 TeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 400 \text{ GeV}$ 1407.0600	
	$\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$	0	7.10 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 1.1 TeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 350 \text{ GeV}$ 1308.1841	
	$\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$	0-1 e, μ	3 b	Yes	20.1	\tilde{g} 1.34 TeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 400 \text{ GeV}$ 1407.0600	
	$\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$	0-1 e, μ	3 b	Yes	20.1	\tilde{g} 1.3 TeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 300 \text{ GeV}$ 1407.0600	
3^{rd} gen. squarks direct production	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	0	2 b	Yes	20.1	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 100-620 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 90 \text{ GeV}$ 1308.2631	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	2 e, μ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 275-440 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 2 m(\tilde{t}_2^0)$ 1404.2500	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	1-2 e, μ	1-2 b	Yes	4.7	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 110-167 GeV 230-460 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) = 2m(\tilde{t}_2^0), m(\tilde{t}_1^0) \geq 55 \text{ GeV}$ 1209.2102, 1407.0583	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow W\tilde{b}_1^* \text{ or } \tilde{u}\tilde{u}^*$	2 e, μ	0-2 jets	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 90-191 GeV 215-530 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) = 1 \text{ TeV}$ 1403.4853, 1412.4742	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	0-1 e, μ	1-2 b	Yes	20	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 210-640 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) = 1 \text{ TeV}$ 1407.0583, 1406.1122	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	0	mono-jet+ ν -tag	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 90-240 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) = m(\tilde{t}_2^0) \geq 85 \text{ GeV}$ 1407.0608	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (natural GMSB)	2 e, μ (Z)	1 b	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 150-580 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 150 \text{ GeV}$ 1403.5222	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow Z$	3 e, μ (Z)	1 b	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 290-600 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 200 \text{ GeV}$ 1403.5222	
	EW direct	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	2 e, μ	0	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 90-325 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 0 \text{ GeV}$ 1403.5294
		$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	2 e, μ	0	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 140-485 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 0 \text{ GeV}, m(\nu, \nu) \geq 0.5(m(\tilde{t}_1^0) + m(\tilde{t}_2^0))$ 1403.5294
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$		2 τ	-	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 100-350 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 0 \text{ GeV}, m(\nu, \nu) \geq 0.5(m(\tilde{t}_1^0) + m(\tilde{t}_2^0))$ 1407.0350	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$		3 e, μ	-	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 700 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) = m(\tilde{t}_2^0), m(\tilde{t}_1^0) \geq 0, m(\nu, \nu) \geq 0.5(m(\tilde{t}_1^0) + m(\tilde{t}_2^0))$ 1402.7029	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow W\tilde{b}_1^*, \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$		2-3 e, μ	0-2 jets	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 420 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) = m(\tilde{t}_2^0), m(\tilde{t}_1^0) \geq 0, \text{ sleptons decoupled}$ 1403.5294, 1402.7029	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow W\tilde{b}_1^*, \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$		4 e, μ	0-2 b	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 250 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) = m(\tilde{t}_2^0), m(\tilde{t}_1^0) \geq 0, \text{ sleptons decoupled}$ 1501.07110	
Long-lived particles	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	0	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 620 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) = m(\tilde{t}_2^0), m(\tilde{t}_1^0) \geq 0, m(\nu, \nu) \geq 0.5(m(\tilde{t}_1^0) + m(\tilde{t}_2^0))$ 1405.5086		
	Direct $\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1$ prod., long-lived \tilde{t}_1^0	Disapp. trk	1 jet	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 270 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) = m(\tilde{t}_2^0) = 160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{t}_1^0) \geq 0.2 \text{ ns}$ 1310.3675	
	Stable, stoppped \tilde{t}_1 R-hadron	0	1-5 jets	Yes	27.9	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 832 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 0 \text{ GeV}, 10 \mu\text{s} < \tau(\tilde{t}_1^0) < 1000 \text{ s}$ 1310.8584	
	Stable \tilde{t}_1 R-hadron	trk	-	Yes	19.1	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 1.27 TeV	1411.8736	
	GMSB, stable $\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow W\tilde{b}_1^*, \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	1-2 μ	-	Yes	19.1	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 537 GeV	$10\text{-stop} < 50$ 1411.8736	
RPV	GMSB, $\tilde{t}_1^0 \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$, long-lived \tilde{t}_1^0	2 γ	-	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 435 GeV	$2 < \tau(\tilde{t}_1^0) < 3 \text{ ns}$, SP8B model 1400.5542	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$ (RPV)	1 μ , displ. vtx	-	Yes	20.3	\tilde{g} 1.0 TeV	$1.5 < \tau < 158 \text{ ms}$, BR($\tilde{g} \rightarrow 1, m(\tilde{t}_1^0) = 108 \text{ GeV}$ ATLAS-CO NF-2013-002	
	LFV $\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_1\tilde{t}_1 + X, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{u} + \mu$	2 e, μ	-	Yes	4.6	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 1.61 TeV	$\tilde{t}_1 \rightarrow 0, 10, \lambda_{111} < 0.05$ 1212.1272	
	LFV $\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_1\tilde{t}_1 + X, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{u} + (\mu + \tau)$	1 $e, \mu + \tau$	-	Yes	4.6	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 1.1 TeV	$\tilde{t}_1 \rightarrow 0, 10, \lambda_{111} < 0.05$ 1212.1272	
	Bilinear RPV CMSSM	2 e, μ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 1.35 TeV	$m(\tilde{g})=m(\tilde{t}_1^0), \tau_{\tilde{t}_1} < 1 \text{ ms}$ 1404.2500	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow W\tilde{b}_1^*, \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	4 e, μ	-	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 750 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 0.2 m(\tilde{t}_2^0), \lambda_{111} < 0$ 1405.5086	
Other	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1\tilde{b}_1 \rightarrow W\tilde{b}_1^*, \tilde{u}\tilde{u}^*, \tilde{d}\tilde{d}^*$	3 $e, \mu + \tau$	-	Yes	20.3	\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 450 GeV	$m(\tilde{t}_1^0) \geq 0.2 m(\tilde{t}_2^0), \lambda_{111} < 0$ 1405.5086	
	$\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$	0	6-7 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 916 GeV	BR($\tilde{g} \rightarrow \text{BR}(\tilde{g})$) = BR($\tilde{g} \rightarrow 0$) ATLAS-CO NF-2013-091	
	$\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u}^*$	2 e, μ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	\tilde{g} 890 GeV	1404.2500	

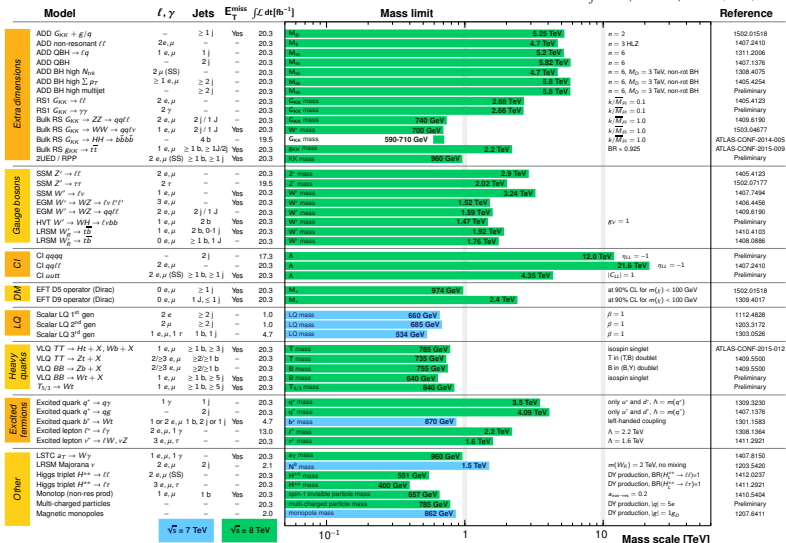
*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus 1 σ theoretical signal cross section uncertainty.

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Exclusion

Status: March 2015

ATLAS Preliminary

$$\int \mathcal{L} dt = (1.0 - 20.3) \text{ fb}^{-1} \quad \sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$$

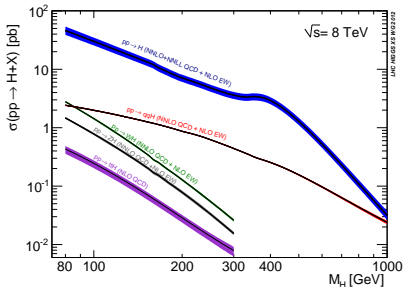


*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

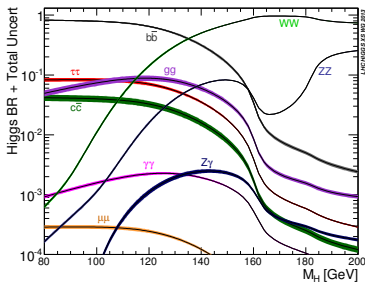
Wie entdeckt man ein Higgs-Boson?

- Kopplungsstärke der Higgs-Bosonen proportional zu Teilchenmasse
→ v.a. an schwere Quarks (t und b) und schwache Eichbosonen (W, Z)

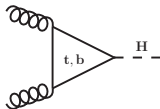
Produktionsprozesse



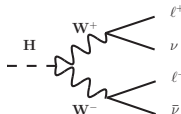
Zerfälle



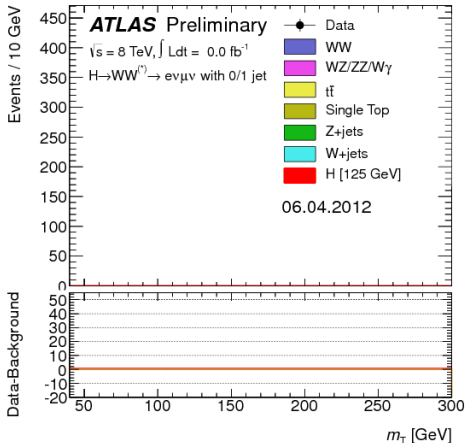
Dominiert durch Gluon-Gluon-Fusion:



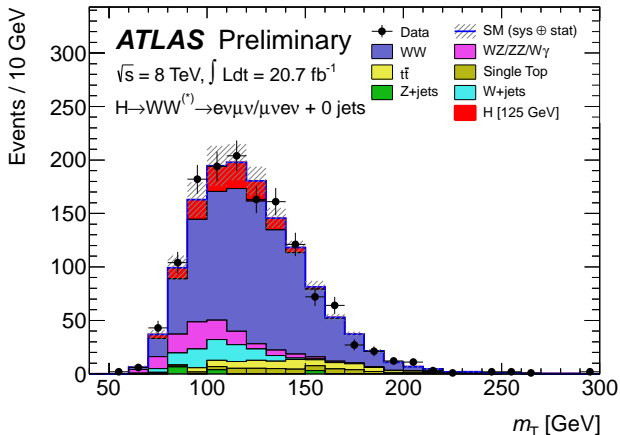
Sehr häufiger Zerfall:



Higgs-Messungen mit Daten von 2012



Higgs-Messungen mit Daten von 2012

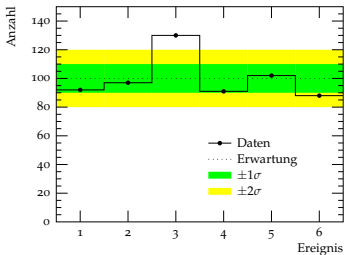


Theorievorhersagen für Signal- und Untergrundprozesse notwendig!

Präzise Theorievorhersagen

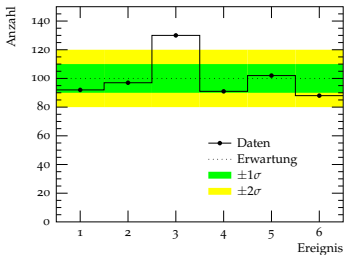
Analogie: Ist der Würfel manipuliert?

- Experiment: 600 Würfel
- Theorievorhersage: $N_i = 100$



Analogie: Ist der Würfel manipuliert?

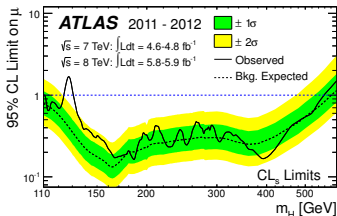
- Experiment: 600 Würfel
- Theorievorhersage: $N_i = 100$

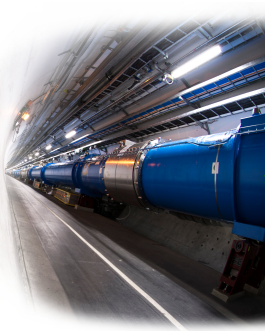


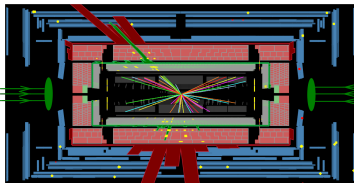
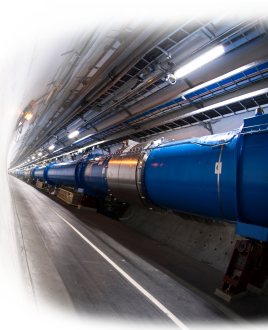
Teilchenphysik: Existiert das Higgs-Boson?

- Experiment: LHC-Kollisionsereignisse auf interessante Observablen projiziert
- Theorievorhersage mit/ohne Higgs: ?
Nicht analytisch berechenbar!

⇒ Verwendung von Monte Carlo Programmen für stochastische Simulation der Theoriehypothese



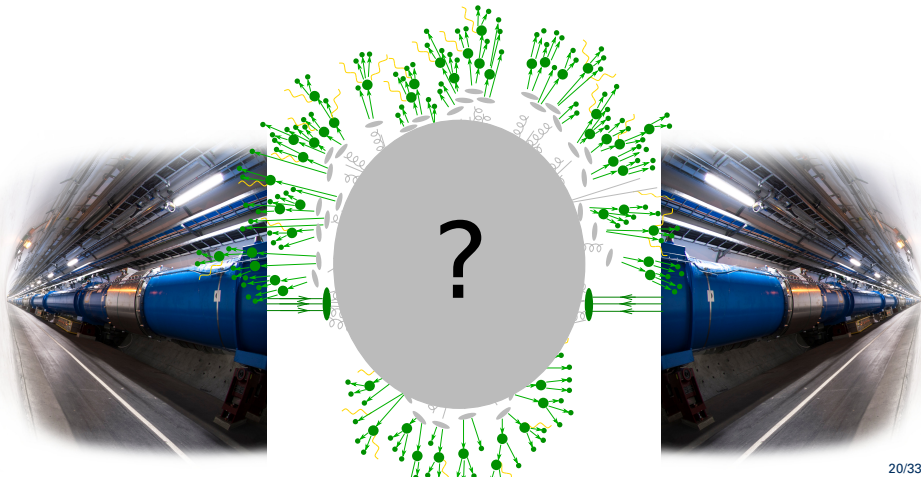




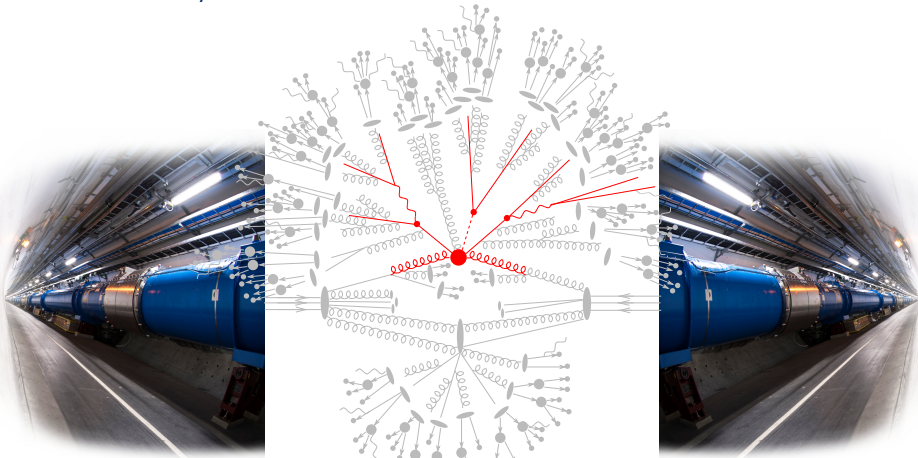
[ATLAS event display from 13 TeV collisions]



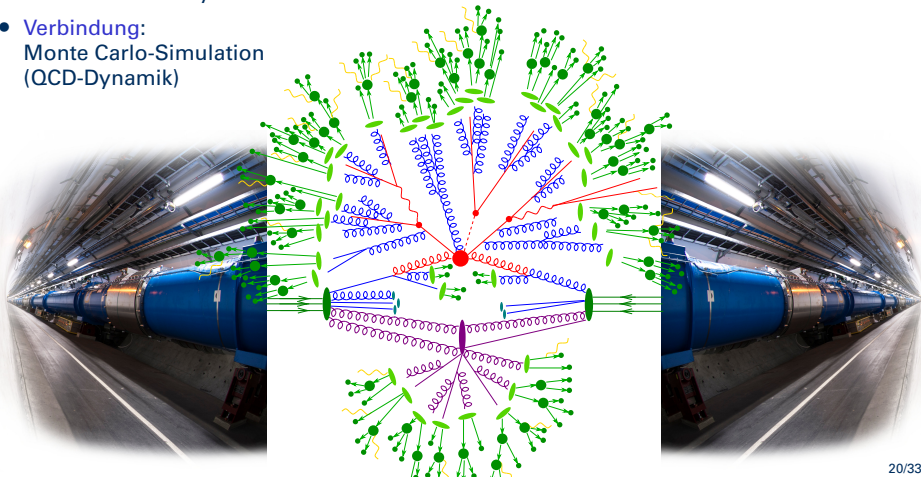
- Experimentell messen wir:
 $pp \rightarrow$ stabile Teilchen (z.B. Pionen)



- Experimentell messen wir:
 $pp \rightarrow$ stabile Teilchen (z.B. Pionen)
- Aber theoretisch interessiert uns:
Fundamentale Physik!



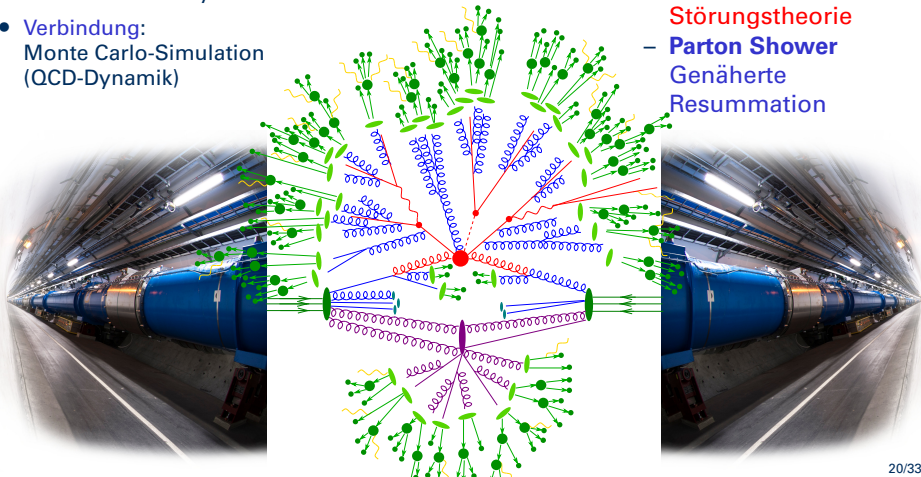
- Experimentell messen wir:
 $pp \rightarrow$ stabile Teilchen (z.B. Pionen)
- Aber theoretisch interessiert uns:
Fundamentale Physik!
- **Verbindung:**
Monte Carlo-Simulation
(QCD-Dynamik)



- Experimentell messen wir:
 $pp \rightarrow$ stabile Teilchen (z.B. Pionen)
- Aber theoretisch interessiert uns:
Fundamentale Physik!
- **Verbindung:**
Monte Carlo-Simulation
(QCD-Dynamik)

- **Mein Schwerpunkt:**
Perturbative QCD

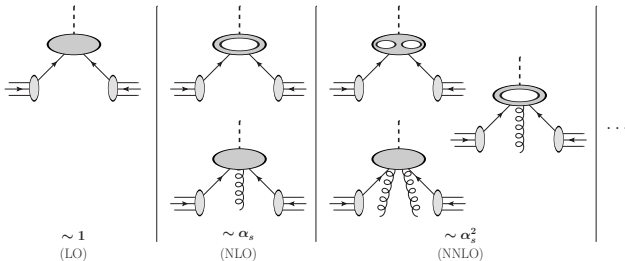
- **Matrix Element**
Feste Ordnung in
Störungstheorie
- **Parton Shower**
Genäherte
Resummation



- Exakte Berechnung von QCD-Effekten nicht möglich

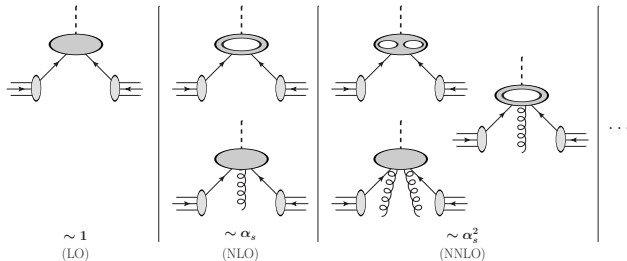


- Exakte Berechnung von QCD-Effekten nicht möglich
- Nur **Störungsreihe** in α_s (a la Feynman):

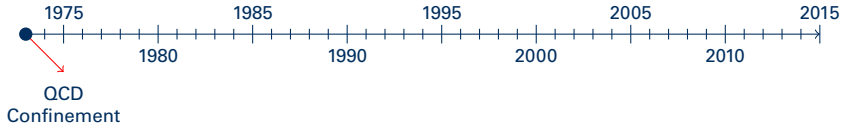


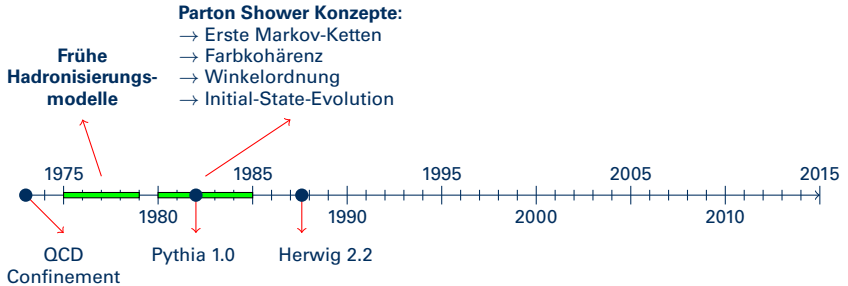


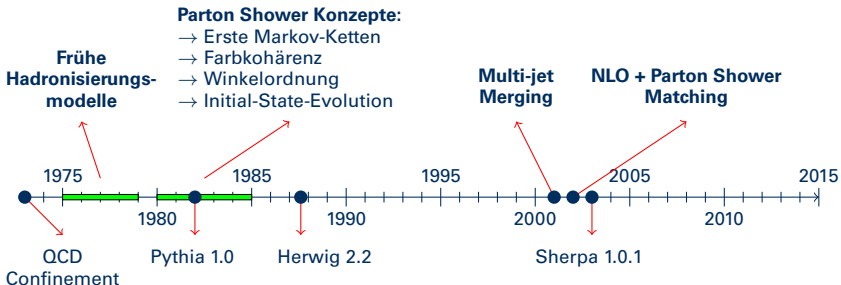
- Exakte Berechnung von QCD-Effekten nicht möglich
- Nur **Störungsreihe** in α_s (a la Feynman):

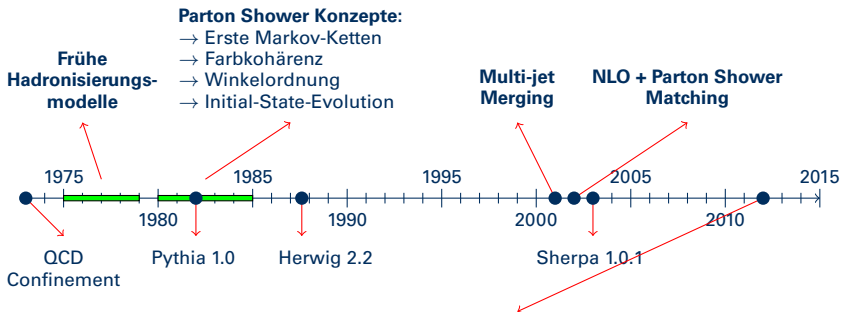


- Für Vorhersagen auf **Hadronenniveau**: Keine Konvergenz!
- Resummation der Reihe notwendig
- Enorme Komplexität!
 - Näherung: **Resummiere nur universelle große Beiträge** jeder Ordnung
- Konkret in unserem Fall: **Parton Shower (PS)**
= QCD-Bremsstrahlung entsprechend der großen Beiträge

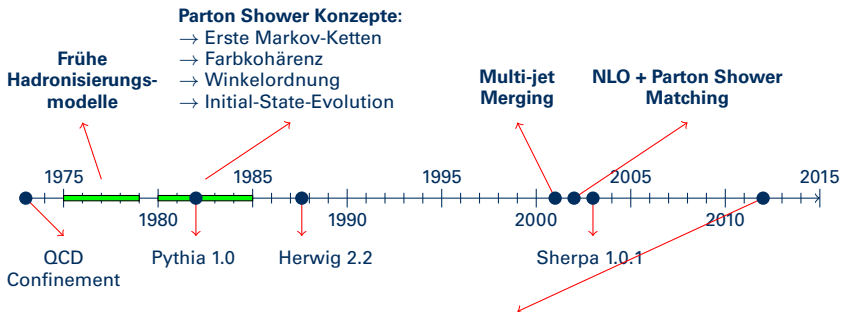








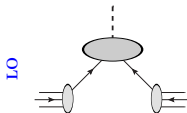
2012 – Das Jahr des Higgs



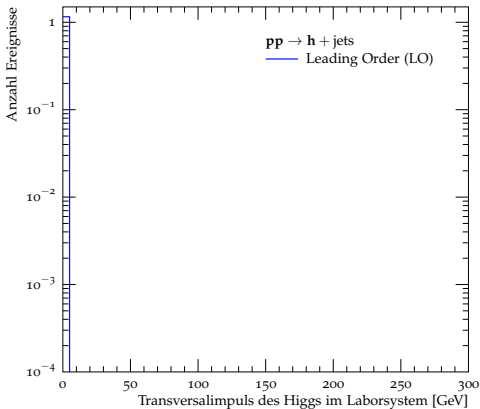
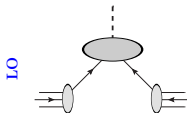
2012 – Das Jahr des Higgs Multi-Jet Merging auf NLO

- Lavesson, Lönnblad [2008]
- Höche, Krauss, Schönherr, FS [2012]
- Frederix, Frixione [2012]
- Plätzer [2012]
- Alioli, Bauer, Berggren, Hornig, Tackmann, Vermilion, Walsh, Zuberi [2012]
- Lönnblad, Prestel [2012]
- Hamilton, Nason, Oleari, Zanderighi [2012]

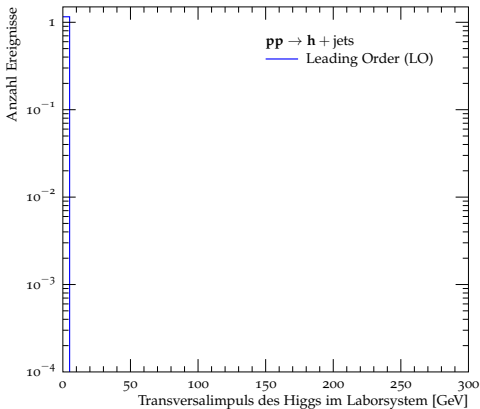
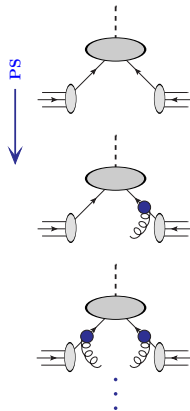
Beispiel: $pp \rightarrow h+jets$



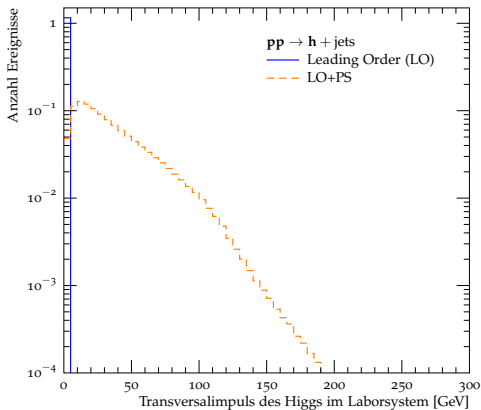
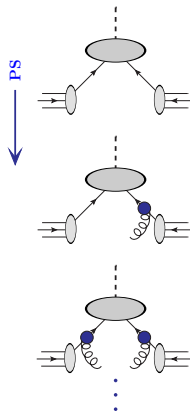
Beispiel: $pp \rightarrow h + \text{jets}$



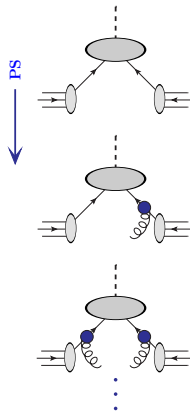
Beispiel: $pp \rightarrow h + \text{jets}$



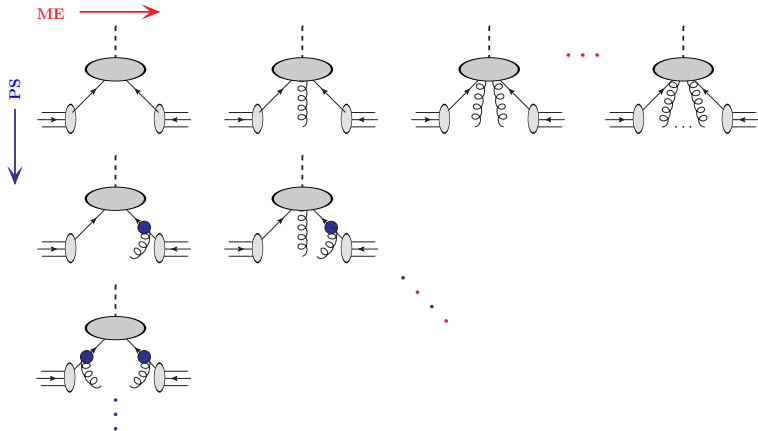
Beispiel: $pp \rightarrow h + \text{jets}$



Multi-Jet Merging mit Baumdiagrammen (LO)

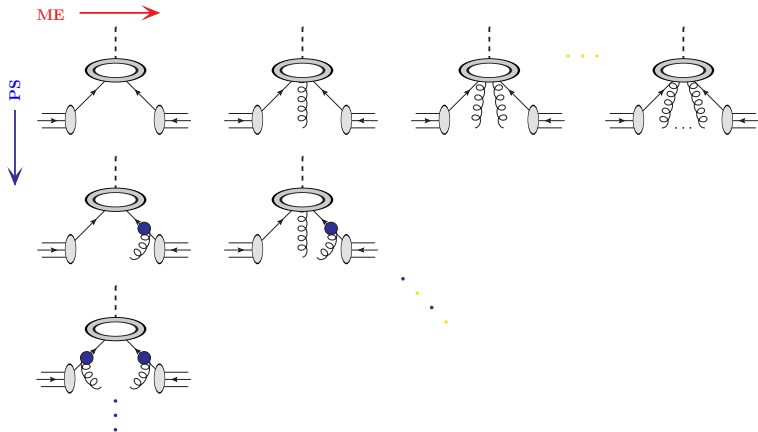


Multi-Jet Merging mit Baumdiagrammen (LO)



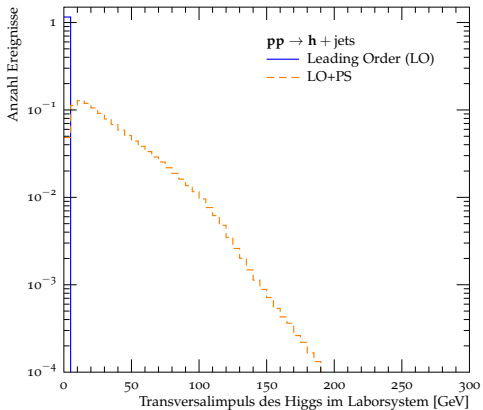
Catani, Krauss, Kuhn, Webber (2001)
Höche, Krauss, Schumann, FS (2009)

Multi-Jet Merging auf 1-Schleifen-Niveau (NLO)

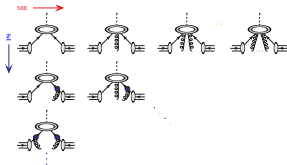


Höche, Krauss, Schönherr, FS [2012]

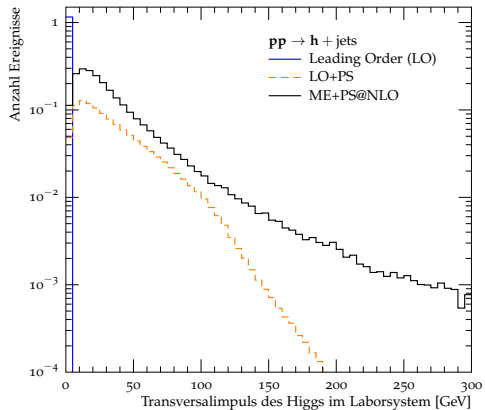
Beispiel: $pp \rightarrow h + \text{jets}$

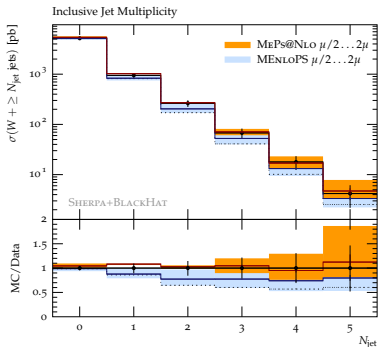


Beispiel: $pp \rightarrow h + \text{jets}$



$pp \rightarrow h + \text{jets}$ Vorhersage
in höchster Präzision

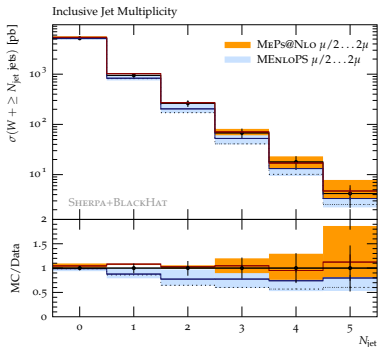




W-Boson-Produktion am LHC

Höche, Krauss, Schönherr, FS (2012)

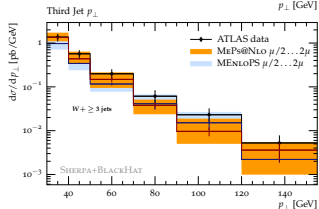
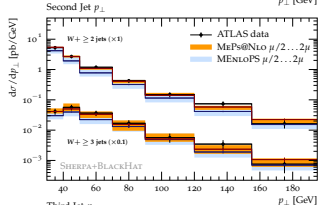
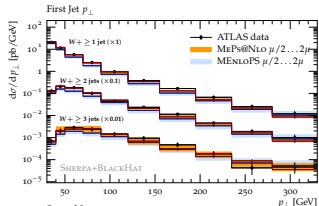
- Vergleich mit ATLAS-Messung
Phys.Rev. D85 (2012), 092002
- Signifikante Reduktion der theoretischen Unsicherheiten
- Exzellente Übereinstimmung mit Experiment

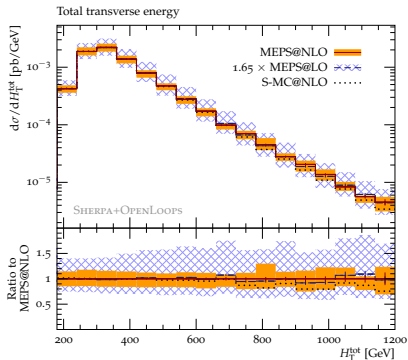
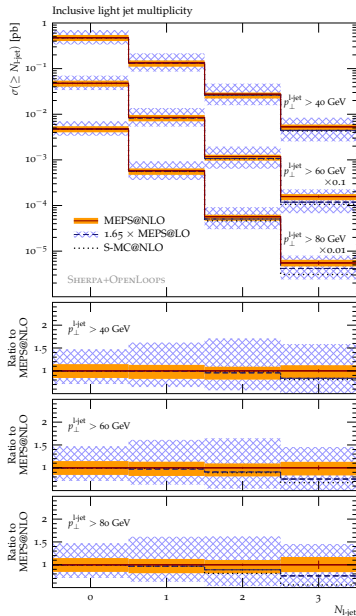


W-Boson-Produktion am LHC

Höhe, Krauss, Schönherr, FS (2012)

- Vergleich mit ATLAS-Messung
Phys.Rev. D85 (2012), 092002
- Signifikante Reduktion der theoretischen Unsicherheiten
- Exzellente Übereinstimmung mit Experiment





Top-Quark-Paarproduktion

Höhe, Krauss, Maierhöfer, Pozzorini, Schönherr, FS (2014)

- Oft dominanter Untergrundprozess für Suchen nach neuer Physik
- Relevante Suchregion: $H_T^{\text{tot}} > 500 \text{ GeV}$
→ Theoretische Unsicherheiten von 80% auf 20% reduziert!

Cascioli, Höche, Krauss, Maierhöfer, Pozzorini, FS (2013)

Präzise Vorhersagen für $pp \rightarrow ll\nu\nu + \text{jets}$

- Als Signal: SM-Messungen, Vektorbosonenstreuung, anomale Kopplungen, ...
- Als Untergrund: Higgs-Produktion, BSM-Suchen

Schwierigkeiten der Theorievorhersage

- Multi-Jet-Beschreibung für Untergrundunterdrückung relevant
- WW^* -Produktion jenseits der Massenschale \Rightarrow nichtresonante Diagramme und Interferenzeffekte
- Schleifen-induzierte Prozesse ("LOOP²") wie $gg \rightarrow WW^*$ tragen in der Higgs-Signal-Region erheblich bei

Toolkit

- SHERPA mit Multi-Jet Merging auf NLO
- OPENLOOPS automatisierte 1-Schleifen Matrixelemente
- COLLIER Schnelle und stabile Tensorintegral-Reduktion

Höche, Krauss, Schönherr, FS (2012)

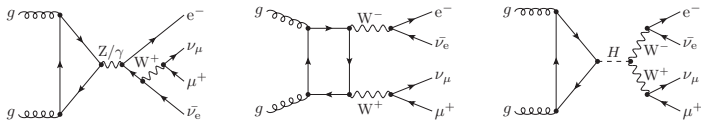
Cascioli, Maierhöfer, Pozzorini (2011)

Denner, Dittmaier, Hofer (2014)

\Rightarrow QCD-NLO-Automatisierung

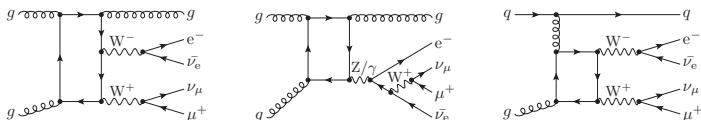
0-Jet-Produktion: Beispiele für $gg \rightarrow 4\ell$ -Diagramme

- Finiter Anteil der NNLO-Korrekturen
- Am LHC wegen hoher Gluon-Dichte relevant

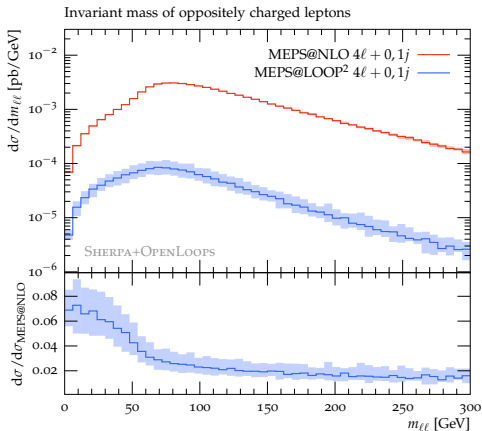


1-Jet-Produktion

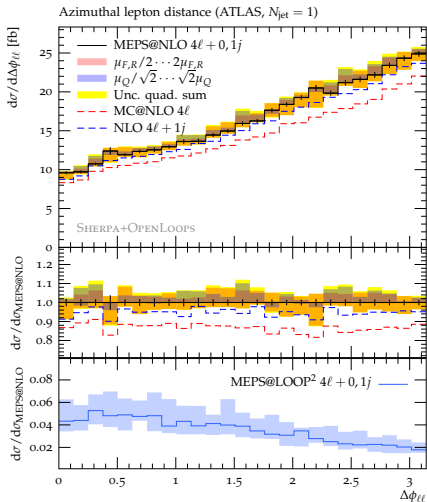
- Beispieldiagramme:

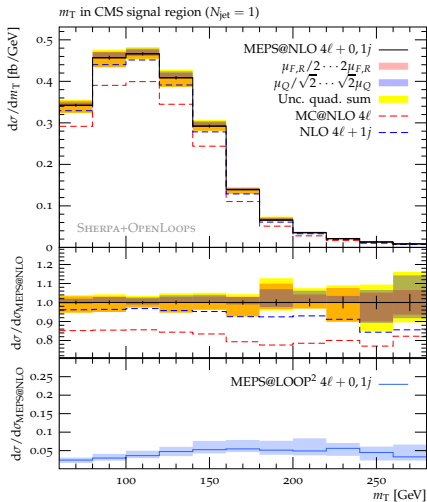
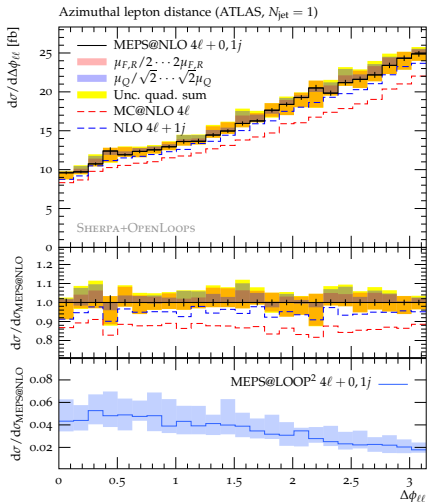


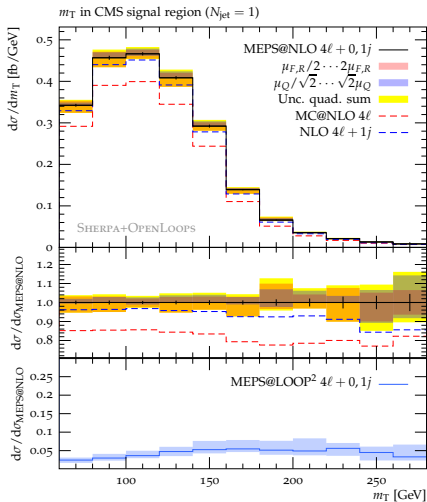
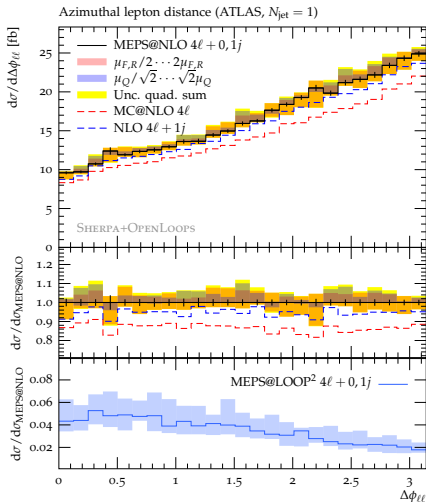
⇒ Hier erste Kombination von 0- und 1-jet LOOP² Prozessen



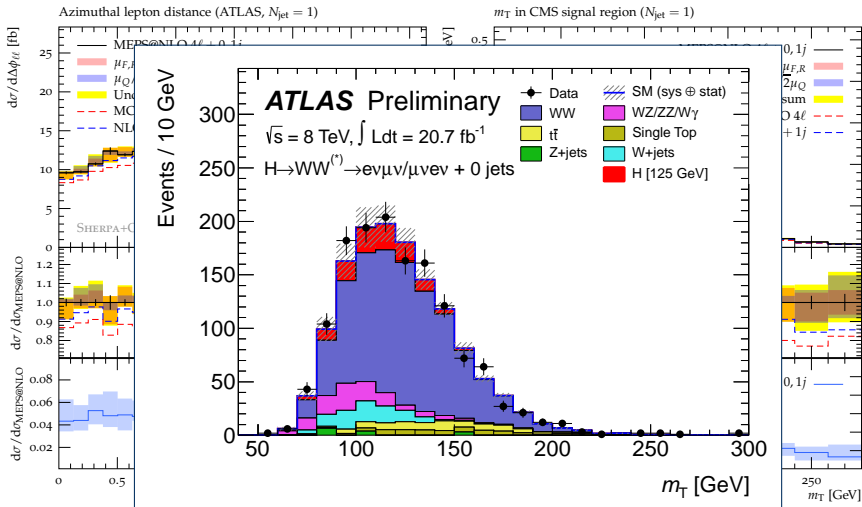
- Beitrag insgesamt im Prozentbereich
- Aber Veränderung des Untergrundverhaltens:
größer in Higgs-Signalregion (z.B. niedrige $m_{\ell\ell}$)







- 3% - 5% kombinierte Unsicherheit der MEPS@NLO-Vorhersage



- 3% - 5% kombinierte Unsicherheit der MEPS@NLO-Vorhersage



- Das Higgs ist gefunden!
 - Standardmodell-Teilchen vollständig beobachtet!
- Ziel erreicht,
Beschleuniger überflüssig?



- Das Higgs ist gefunden!
 - Standardmodell-Teilchen vollständig beobachtet!
- Ziel erreicht,
Beschleuniger überflüssig?

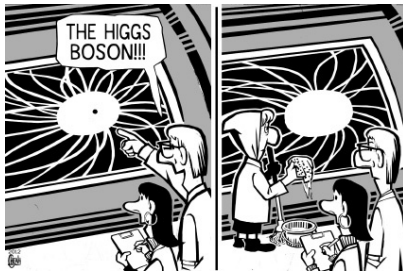
Zukünftige Herausforderungen

- Vermessung des Higgs-Bosons
 - Masse
 - Quantenzahlen
 - Differentielle Wirkungsquerschnitte
- Entdeckung von Physik **jenseits des Standardmodells?**
 - Supersymmetrische Partner
 - Exotische Resonanzen
 - Neue Kopplungsstrukturen



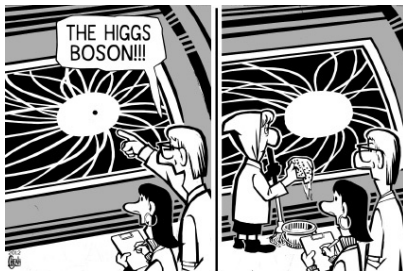
Höchste Präzision in theoretischen Vorhersagen für Signal und Untergrund notwendig

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



PS: Ab morgen wird's wieder spannend...
Erste "stabile" 13 TeV Kollisionen erwartet!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



PS: Ab morgen wird's wieder spannend...
Erste "stabile" 13 TeV Kollisionen erwartet!

Werbung

Interesse? Bachelor-, Master-, oder Promotionsthema gesucht?
<http://cern.ch/fsiegert/group.html>