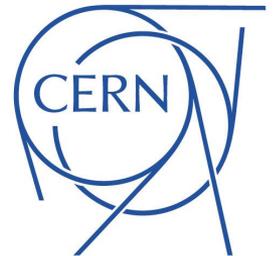


Neue Physik

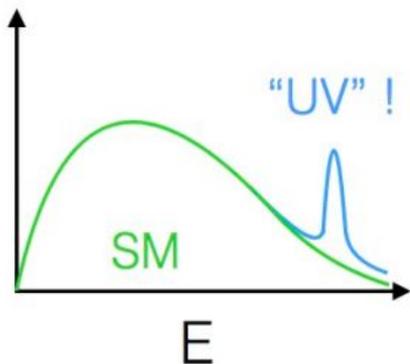
Einige spannende Suchen

German Teacher Program



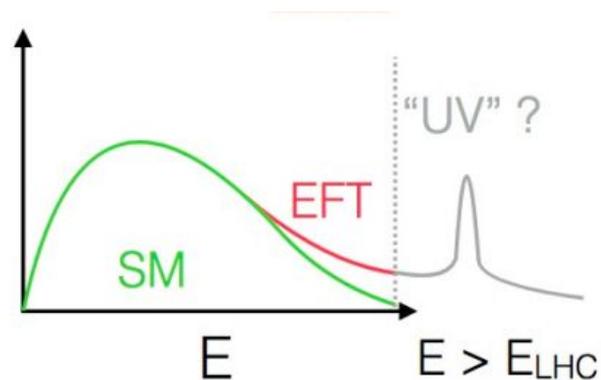
- **Direkte Suchen**

- Suche nach einem Teilchen, das produziert wird und anhand seiner Zerfallsprodukte rekonstruiert wird

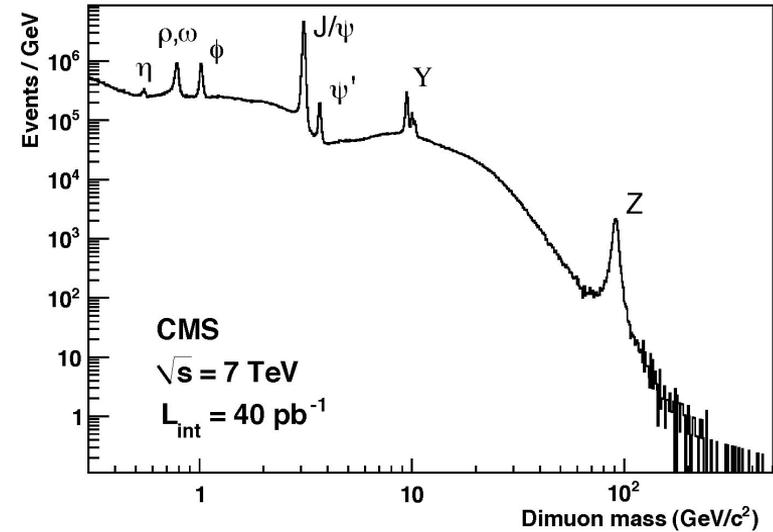


- **Indirekte Suchen**

- Suche nach Abweichungen vom SM

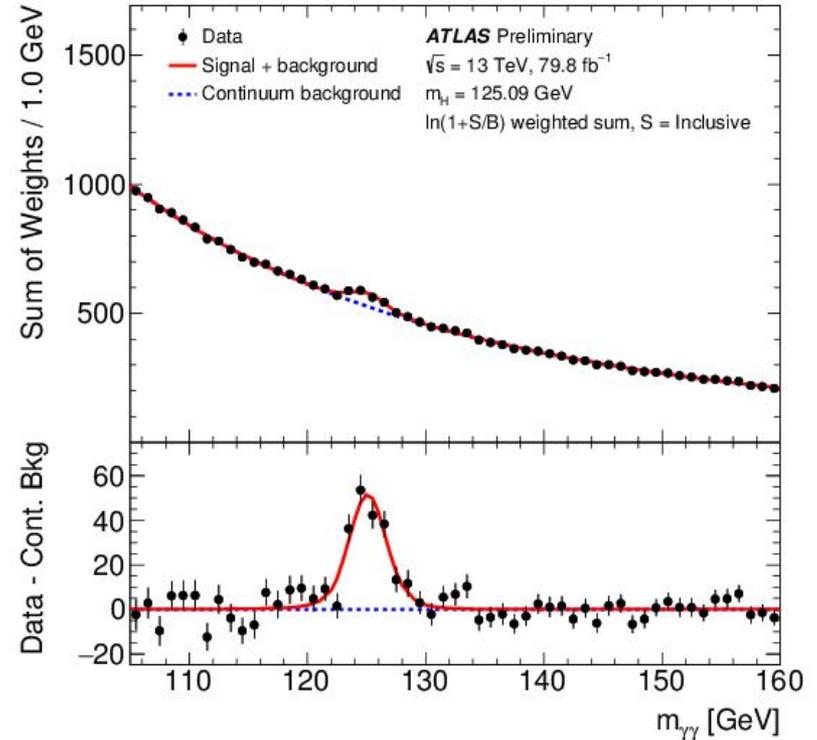
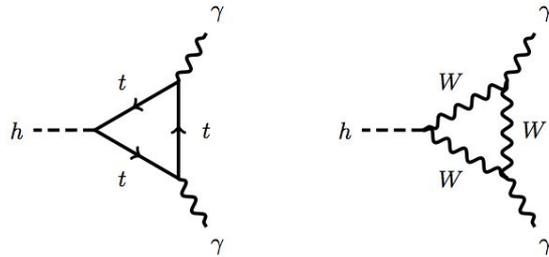


- Suchen nach einer Resonanz
 - **Resonante Produktion** = Teilchen, das in zwei andere SM Teilchen zerfällt, und einen “**Bump**” in **Spektrum der invarianten Masse** verursacht
 - **Nicht resonante Produktion** = Teilchen deren Zerfallsprodukte keinen Peak im Detektor hinterlassen

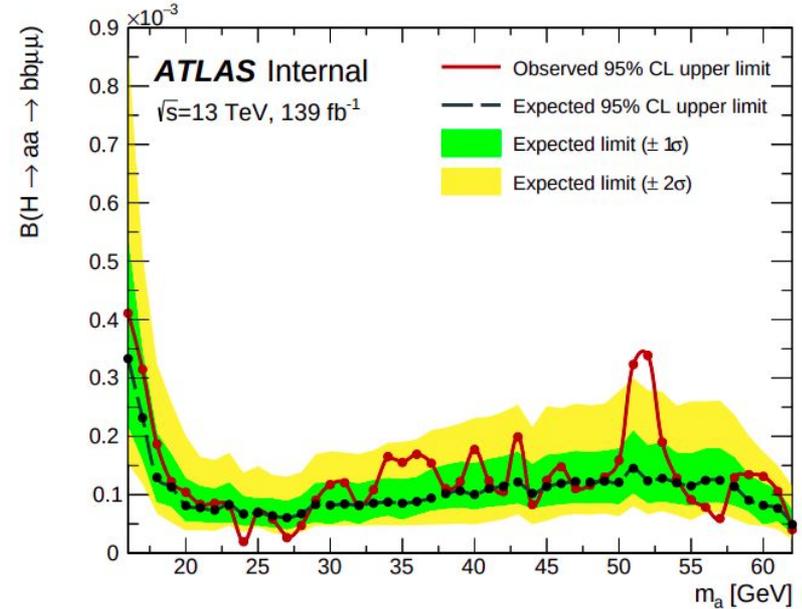


Suchen nach einer Resonanz

- Beispiel:
Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$
Suche nach Bump im $m_{\gamma\gamma}$ Spektrum!



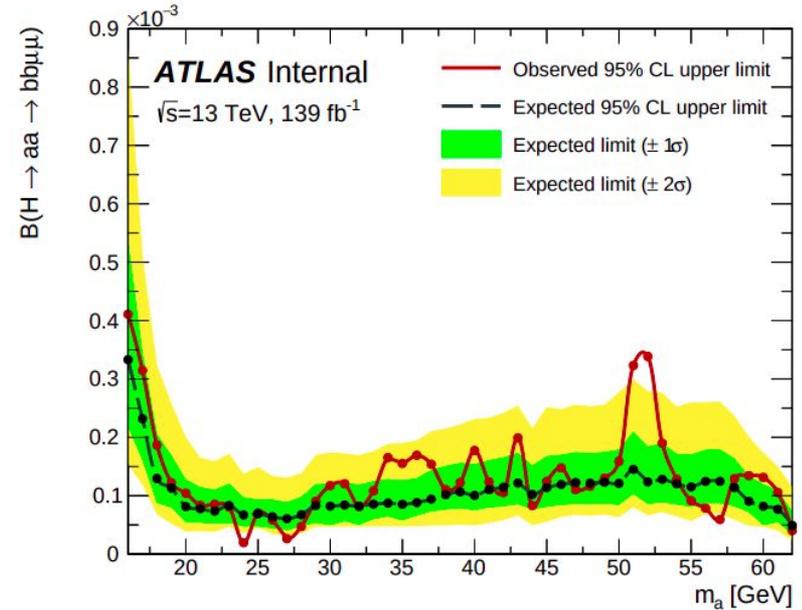
- Die meisten Suchen enden damit, dass man nichts findet.
- Was machen wir, wenn wir nichts finden? Wir setzen ein **Limit** an die **Zerfallswahrscheinlichkeit** bzw. den **Wirkungsquerschnitt**!
- Limit = **Höchster Wirkungsquerschnitt**, den ein Zerfall haben kann, ohne dass wir den Zerfall entdecken. Falls der Wirkungsquerschnitt höher als das gesetzte Limit wäre, hätten wir den Zerfall entdeckt!
- Mit Limitsetzung kann man eventuell **existierende theoretische Modelle ausschließen**.
- **95% CL** (confidence level): Wahrscheinlichkeit, dass wir mit dem gesetzten Limit Recht haben.



Was ist ein Limit?

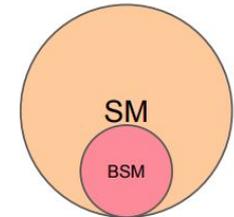
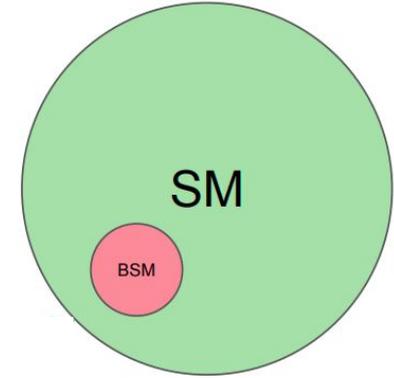


- **95% CL** (confidence level): Wahrscheinlichkeit, dass wir mit dem gesetzten Limit Recht haben.
- Überschuss an Ereignissen im Detektor, (“events”), die die gleichen Eigenschaften wie das Signal haben, zeigen sich als Bump in den Daten.
- Kleine Überschüsse erweisen sich oft als **statistische Fluktuation**.
- Wann sprechen wir von einer **Entdeckung**?
 - **Hinweis** auf neue Physik:
Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Signal von einer **Untergrundfluktuation** stammt, ist **0.3%**.
 - Entdeckung:
Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Signal von einer Untergrundfluktuation stammt, ist **1:5000000**.



- Man sieht den **Effekt** von neuen Teilchen in Zerfällen, die man analysiert.
 - Das neue Teilchen wird **nicht direkt gemessen!**
 - Meist Zerfallswahrscheinlichkeit anders als erwartet.
 - Oft kann man die Abweichung vom SM in Präzisionsmessungen sehen.
- Analysen, in denen viel mit indirekten Suchen gearbeitet wird
 - Top-Quark Physik
 - B-Physik
 - Seltene Higgszerfälle

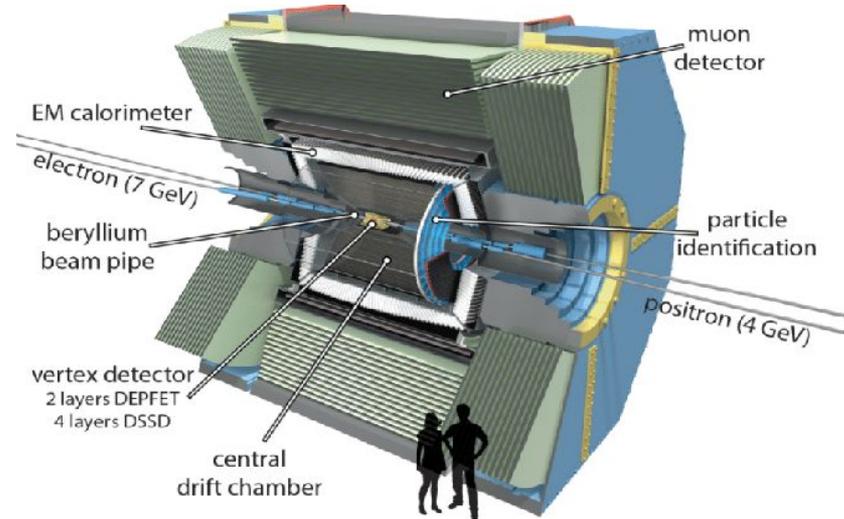
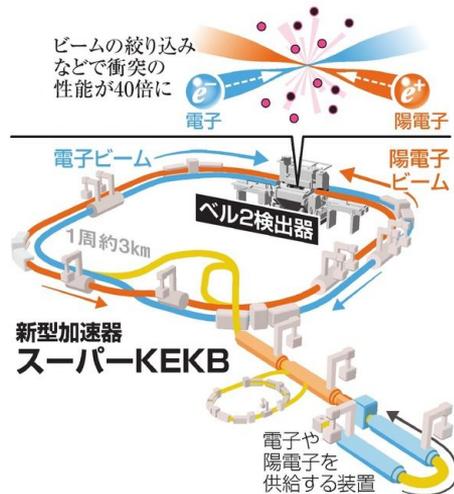
- Was sind seltene Zerfälle?
 - Prozesse, die vom SM **ausgeschlossen** bzw. **unterdrückt** sind.
 - Haben typischerweise eine **Zerfallswahrscheinlichkeit** $\mathcal{B} < O(10^{-7})$
- Warum nach seltenen Zerfällen suchen?
 - Es ist einfacher eine Nadel in einem kleinen als in einem großen Heuhaufen zu finden!



Suchen nach Zerfällen die nicht im SM passieren können

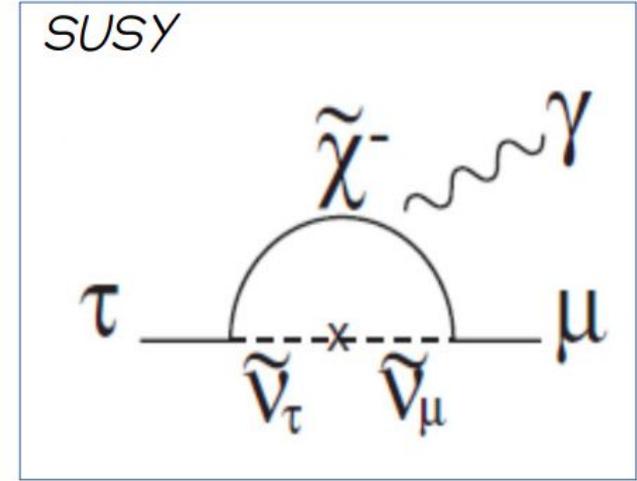
Lepton-Flavor verletzende Zerfälle (Belle)

- Das Belle Experiment befand sich am **KEKB**, einem **Elektron-Positron Beschleuniger**.
- Belle war ein großer hermetischer Detektor (Belle-II ist der Nachfolger).



Lepton-Flavor verletzende Zerfälle (Belle)

- Indirekte Suche nach **Lepton-Flavor verletzenden Zerfällen** des τ :
 - $\tau^\mp \rightarrow e^\mp \gamma$
 - $\tau^\mp \rightarrow \mu^\mp \gamma$
- Dieser Zerfall kann ist unterdrückt im SM. Er kann jedoch als ein **SUSY Zerfall** interpretiert werden!



- Kein **Signal** wurde gefunden \rightarrow wir setzen ein Limit an die **Zerfallsverscheinlichkeit!**

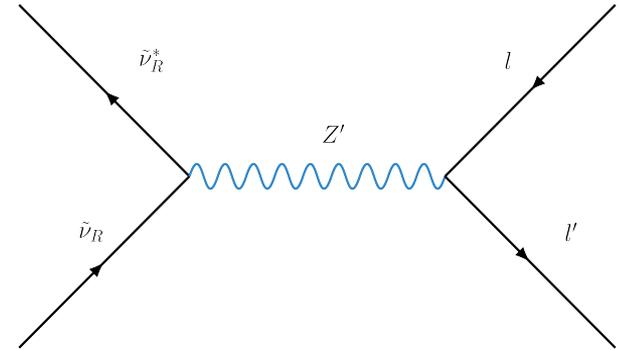
Obergrenze an Zerfallswahrscheinlichkeit

- $\tau^\mp \rightarrow \mu^\mp \gamma < 4.2 \times 10^{-8}$
- $\tau^\mp \rightarrow e^\mp \gamma < 5.6 \times 10^{-8}$

Lepton-Flavor Verletzung (ATLAS)

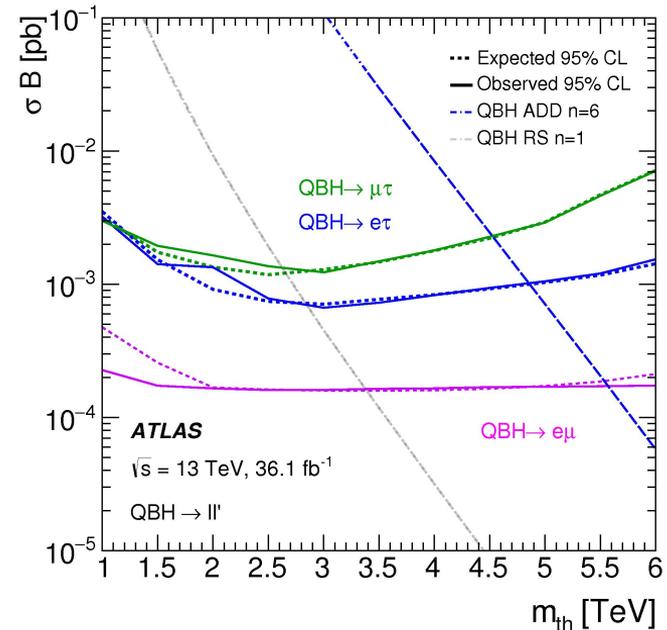
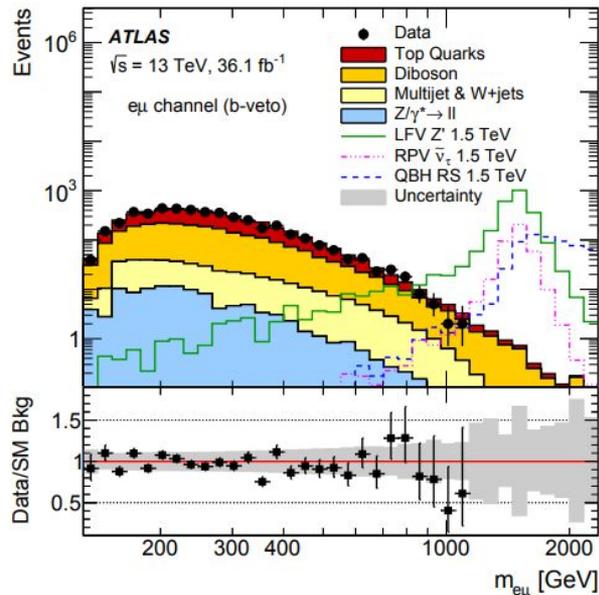


- Suche nach **schwerem Teilchen**, das in $e\mu$, $e\tau$ or $\mu\tau$ zerfällt.
- Mit dieser Analyse kann man für verschiedenste theoretische Modelle Limits setzen:
 - Z'
 - Supersymmetrisches τ -sneutrino
 - Mikroskopische schwarze Löcher
- Suche optimisiert für hohe Massen (bis zu 6 TeV)!



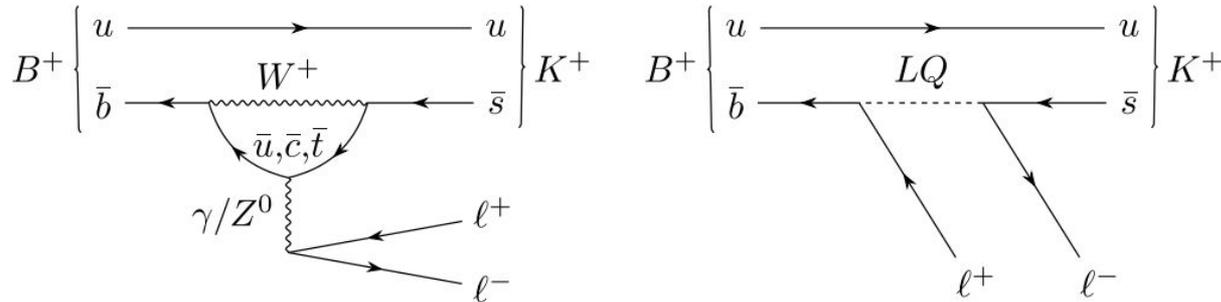
Lepton-Flavor Verletzung (ATLAS)

- Wir sehen uns die **invariante Masse $m_{e\mu}$ der beiden Leptonen** an.
- Kein Überschuss an Ereignissen im Detektor, aber wir können wieder Limits setzen und theoretische Modelle teilweise ausschließen



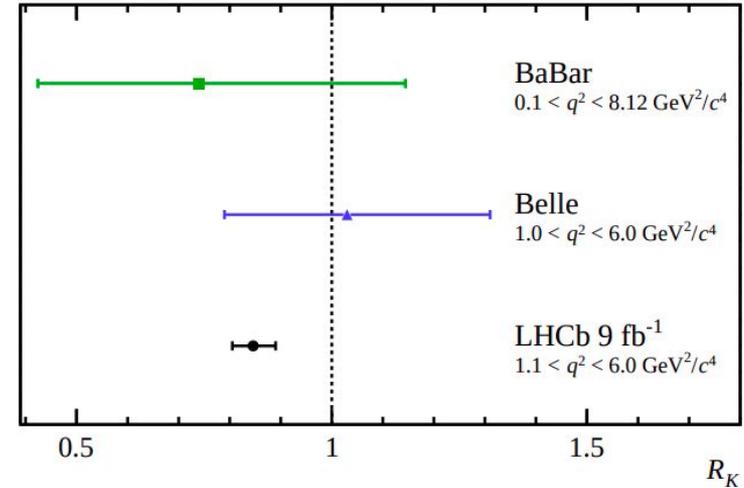
Lepton-Universalität verletzende Zerfälle (LHCb)

- Seltene Zerfälle von B-Mesonen werden untersucht (**indirekte** Suche)
- Im SM müssen wir aufgrund der **Lepton-Universalität** zu gleichen Teilen Zerfälle in $e\bar{e}$, $\mu\bar{\mu}$, und $\tau\bar{\tau}$ sehen.
Falls dem nicht so ist, könnte ein neues Teilchen **LQ (Leptoquark)** die Erklärung dafür sein.



Lepton-Universalität verletzende Zerfälle (LHCb)

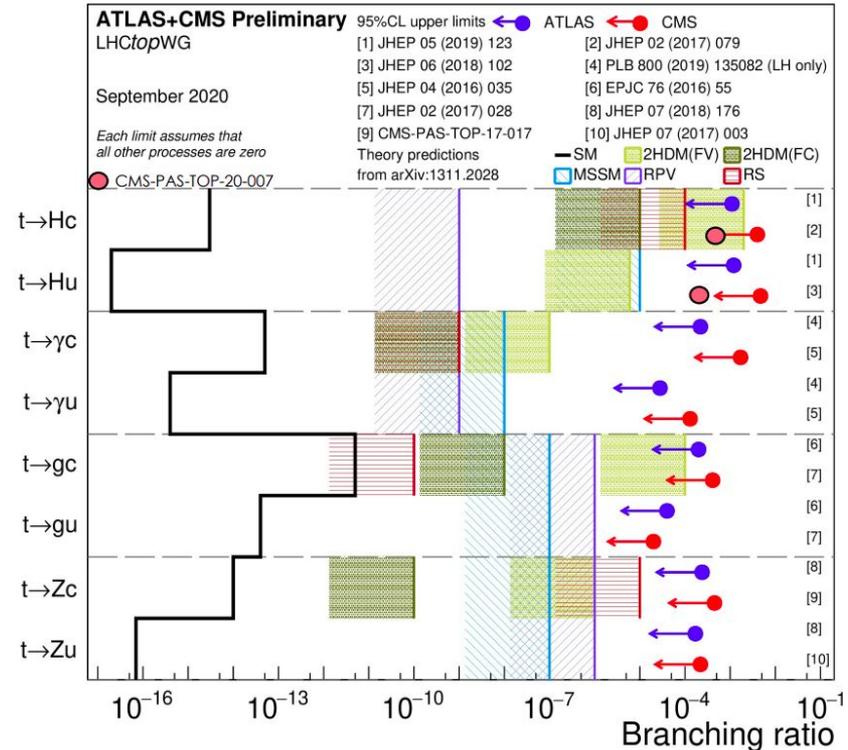
- R_K ist das **Verhältnis zwischen der Anzahl der Elektronen und Myonen** die detektiert werden.
- Falls **Lepton- Universalität** gegeben ist, **müsste das Verhältnis 1 sein** (da Z^0 zu gleichen Teilen in Elektronen, Myonen und Taus zerfällt).
- Wir messen aber $R_K \neq 1!$
 - $R_K = 0.846^{+0.042}_{-0.039}$ (stat.) $^{+0.013}_{-0.012}$ (syst.)



Flavor Changing Neutral Current (ATLAS+CMS)

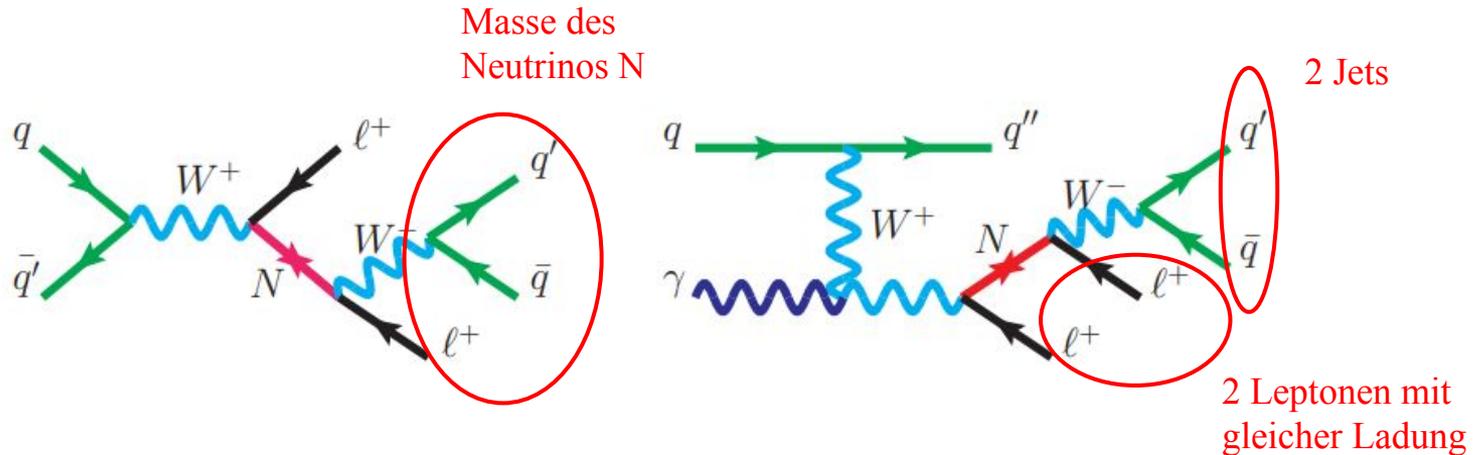


- FCNC ermöglicht den **Übergang von einer Familie in eine andere ohne den Austausch eines W Bosons** (z.B. $t \rightarrow Hc$).
- Solche Zerfälle existieren im SM nicht bzw. sind sie sehr unterdrückt. Sie haben Zerfallswahrscheinlichkeiten $< 10^{-11}$!
- Mit den von uns gesetzten Limits in Suchen, die FCNC voraussetzen, fangen wir an, theoretische Modelle auszuschließen.



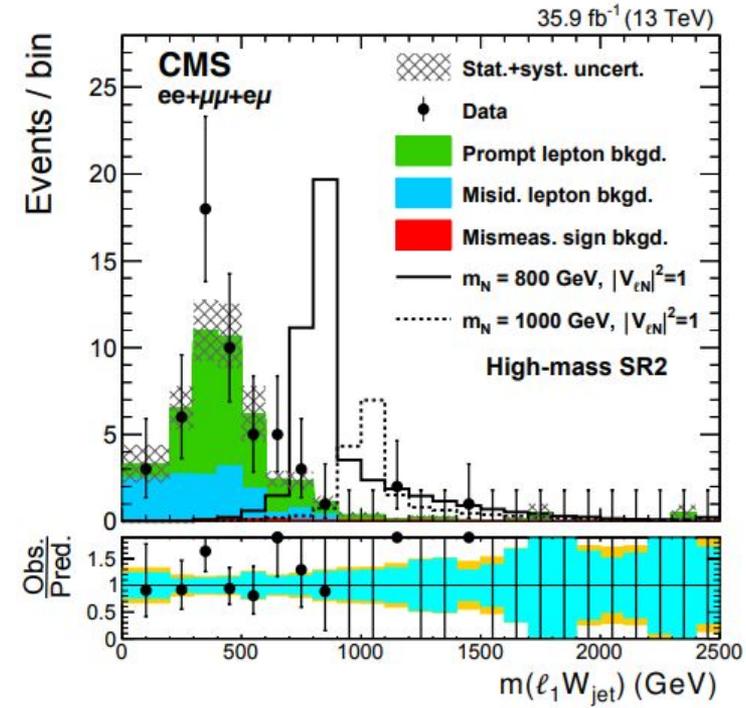
Suche nach schweren Neutrinos (CMS)

- Wir suchen nach einem Zerfall, der **zwei gleich geladene Leptonen und zwei Jets** im Endzustand hat!
- Man kann die **Masse des schweren Neutrinos N** über die Masse des **W-Boson** und eines **Leptons** rekonstruieren!



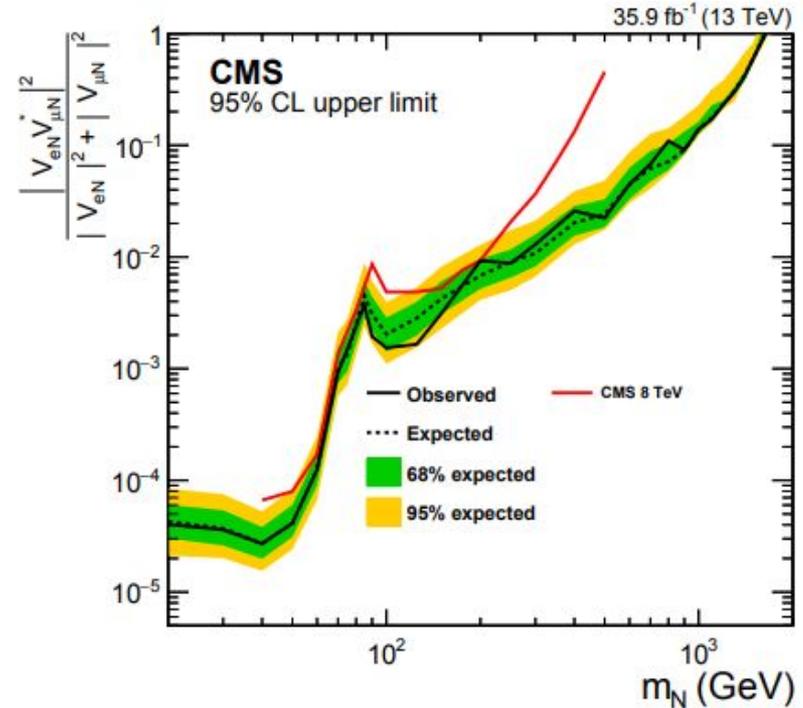
Suche nach schweren Neutrinos (CMS)

- Es wurde **kein Überschuss von Daten** in der invarianten Masse des W Bosons und eines Leptons gesehen.
- Wir setzen ein Limit!



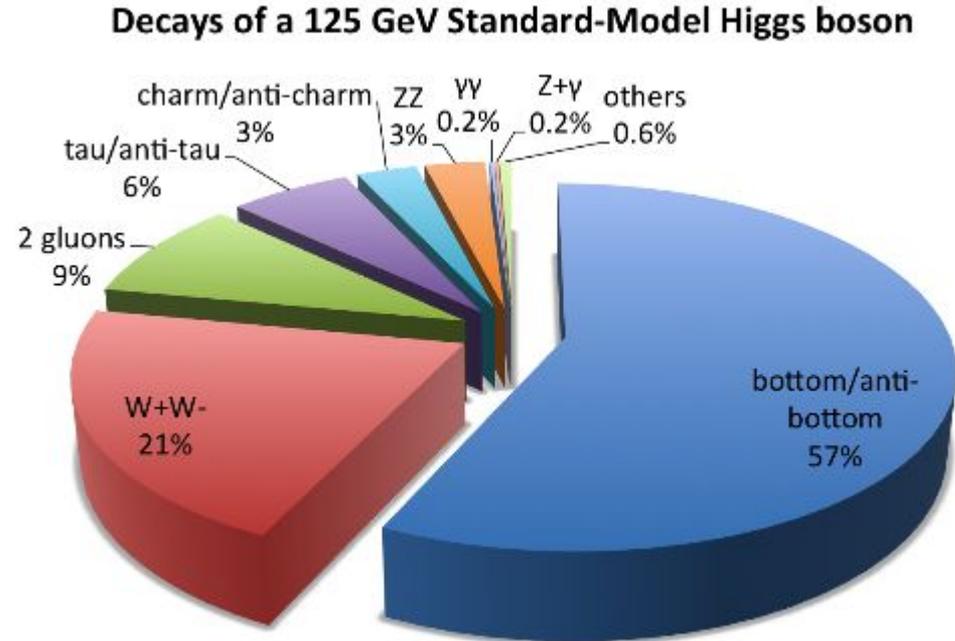
Suche nach schweren Neutrinos (CMS)

- Für Massen zwischen $20 \text{ GeV} < m_N < 1600 \text{ GeV}$ wurden Limits gesetzt!
- Rote Linie zeigt, dass die Limits seit dem LHC Run 1 verbessert wurden.



Exotische Higgszerfälle

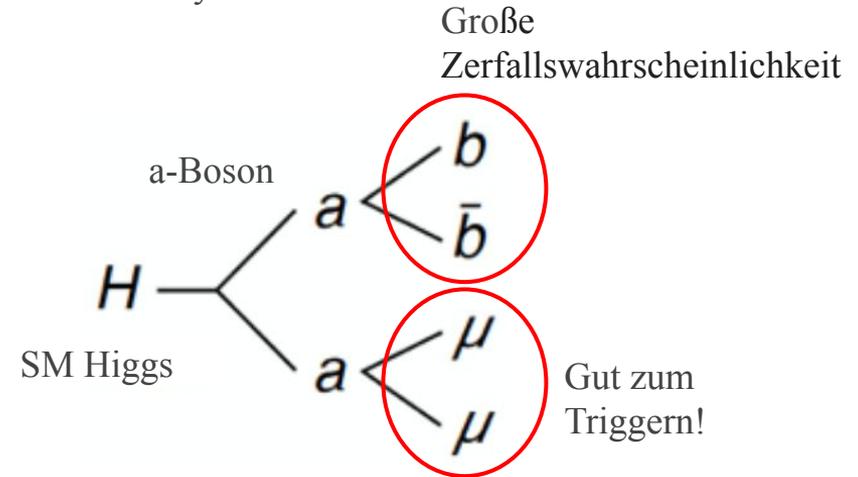
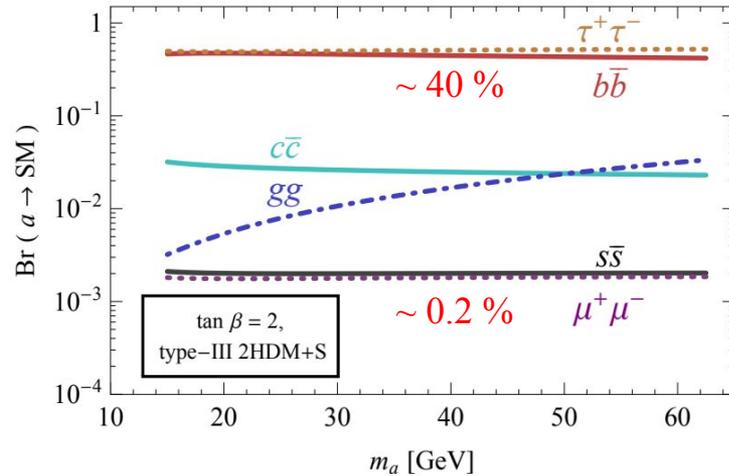
- Im SM wissen wir, wie das Higgs zerfällt.
- Mit einer **Lebenszeit von 10^{-22} s** praktisch am **Ort des Entstehens** und bevorzugt in Elementarteilchen mit größtmöglicher Masse.
- Aufgrund der Messunwahrscheinlichkeit der einzelnen **Zerfallkanäle** bleibt aber noch Platz für Zerfälle in neue Elementarteilchen!
- Exotische Higgszerfälle!



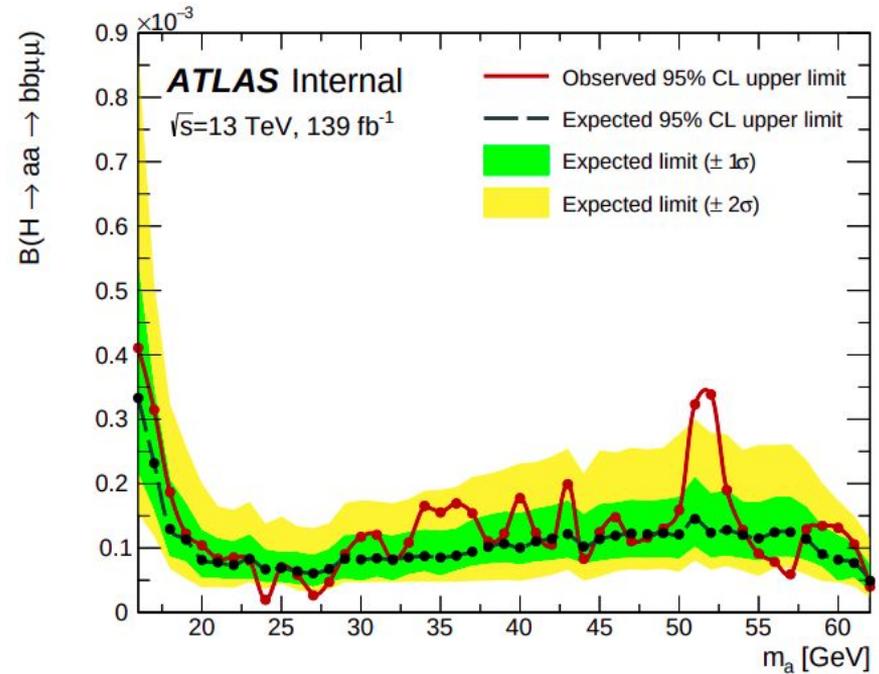
Exotische Higgszerfälle (ATLAS)



- $H \rightarrow aa \rightarrow bb\mu\mu$
- Wir suchen nach einem Endzustand mit zwei b-Jets und zwei Myonen.

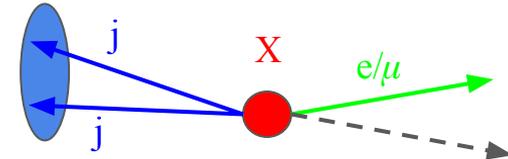
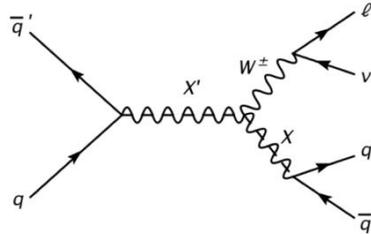
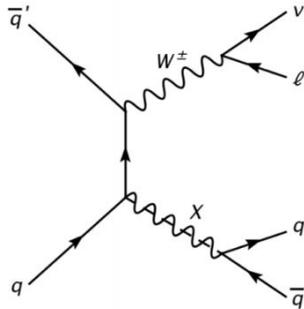


- Suche nach Bump im $m_{\mu\mu}$ Spektrum.
- Wir setzen ein **Limit an den Wirkungsquerschnitt für Massen m_a** zwischen 16 und 62 GeV.
- Sehr **niedrige** Massen!
→ **Low mass searches** (eigentlich sind ATLAS und CMS für hohe Energien optimisiert)
- Überschuss an Daten (**Signal**) bei $m_a = 52$ GeV?
Um das überprüfen zu können, müssen wir:
 - **Mehr Daten nehmen** oder
 - unsere **Analyse und den Detektor verbessern**



Generische Suche: Dijet + lepton (ATLAS)

- Ein Teilchen X ($'$), zerfällt in **zwei Partonen zusammen mit einem Lepton**.
- Suche nach einem Bump im m_{jj} **Spektrum** (invariante Masse Spektrum der beiden Jets).

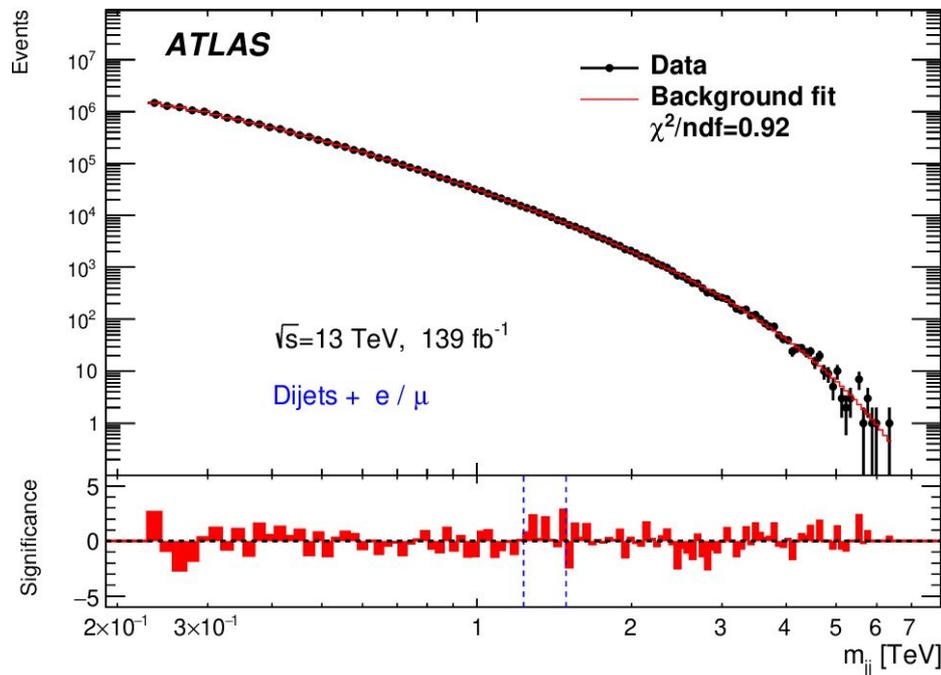


Lepton wird zum Triggern verwendet!

Generische Suche: Dijet + lepton (ATLAS)



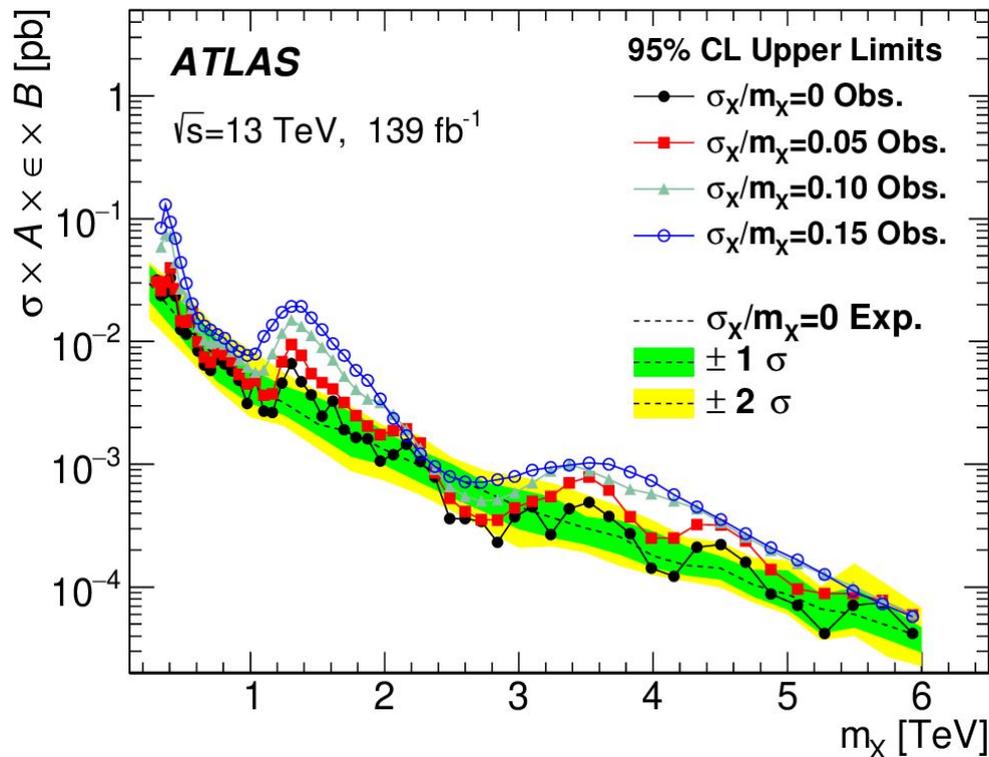
- “Generische Suche”
 - Wir gehen von keinem speziellen Modell aus, sondern suchen nach **irgendeinem Zerfall**, der im **Endzustand zwei Jets und ein Lepton** hat.
- **Kein Überschuss** an Daten im gemessenen Spektrum gefunden.
- Wir sagen:
“**Das gemessene Spektrum ist kompatibel mit der Background-only Hypothese.**”
- Kein Überschuss → wir setzen ein Limit!



Generische Suche: Dijet + lepton (ATLAS)



- Wir analysieren das m_{jj} Spektrum.
Suche nach Resonanz mit sehr **hoher** Masse!
- Wir setzen ein **Limit an den Wirkungsquerschnitt für Massen m_X** zwischen 0.25 TeV und 6 TeV.
Wir verwenden dazu Signale mit verschiedener Breite σ_X .
- Je **schmäler das Signal**, desto niedriger das Limit!

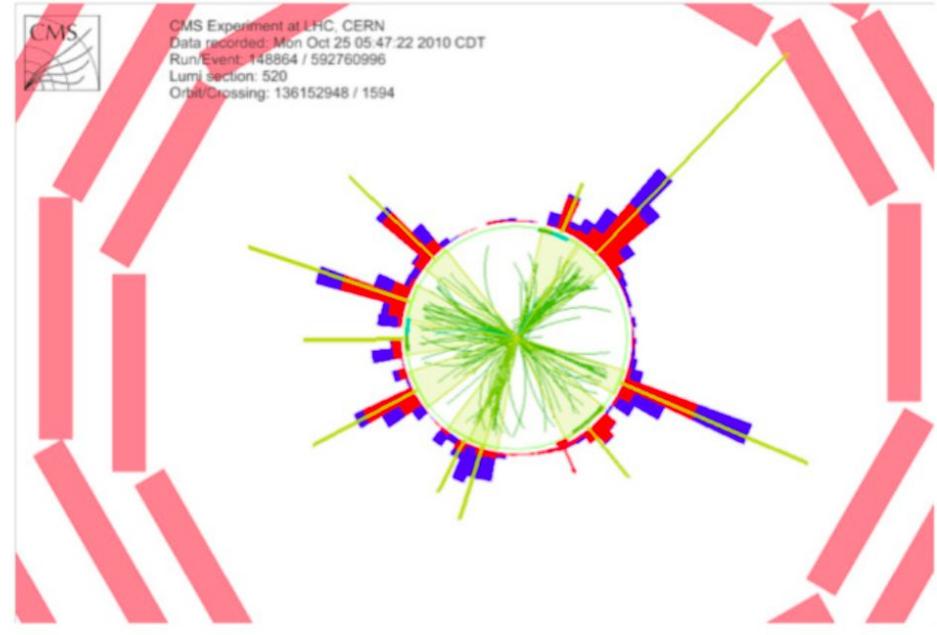


Schwarze Löcher

Mikroskopische schwarze Löcher (CMS)



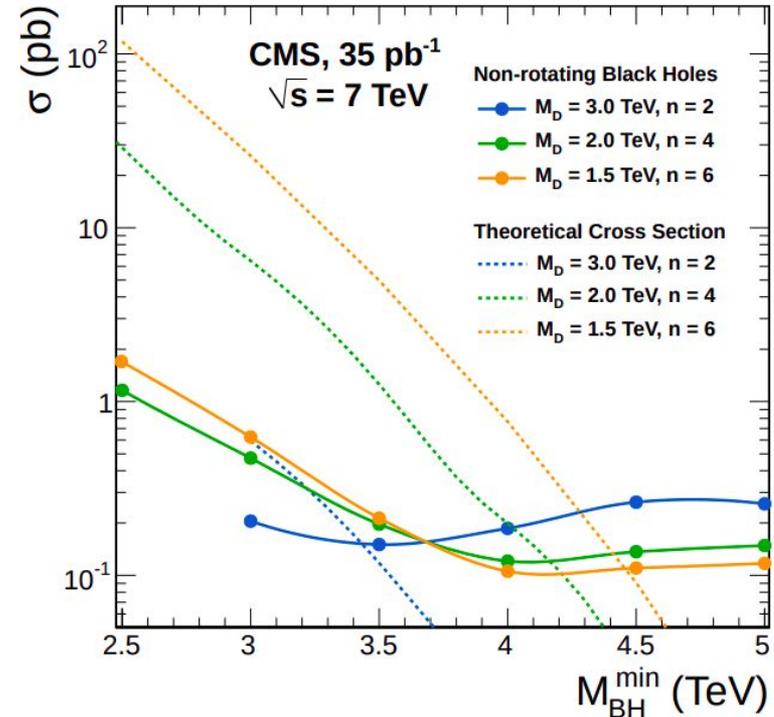
- Wir suchen nach einem Ereignis, der **viele Jets, Leptonen und Photonen** im Endzustand hat.
Das wäre ein Indiz für die Präsenz eines mikroskopischen schwarzen Lochs!
- Wenn man so ein schwarzes Loch fände, hätte man das **Hierarchieproblem** behoben!
- Warum?
Modelle die so ein schwarzes Loch vorhersagen, sagen voraus, dass die **Gravitation Zugang zu Extradimensionen** hat, aber der Rest der uns bekannten Kräfte wohnt mit uns im 3+1 dimensionalem Raum.



Mikroskopische schwarze Löcher (CMS)



- Wieder einmal haben wir leider (noch) nichts entdeckt.
- **Aber:** Mit dem von uns gesetzten Limit können wir schon **manche theoretische Modelle ausschließen!**
- Wichtiges **Wechselspiel** zwischen **Theoretikern und Experimentalphysikern!**



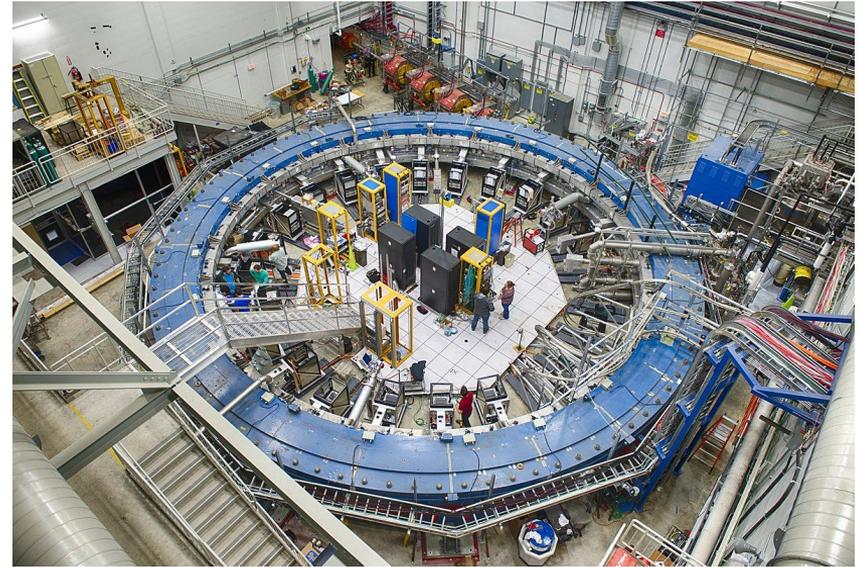
Präzisionsmessung

g-2 Messung (Fermilab)

- Magnetisches Moment des Myons ist definiert als

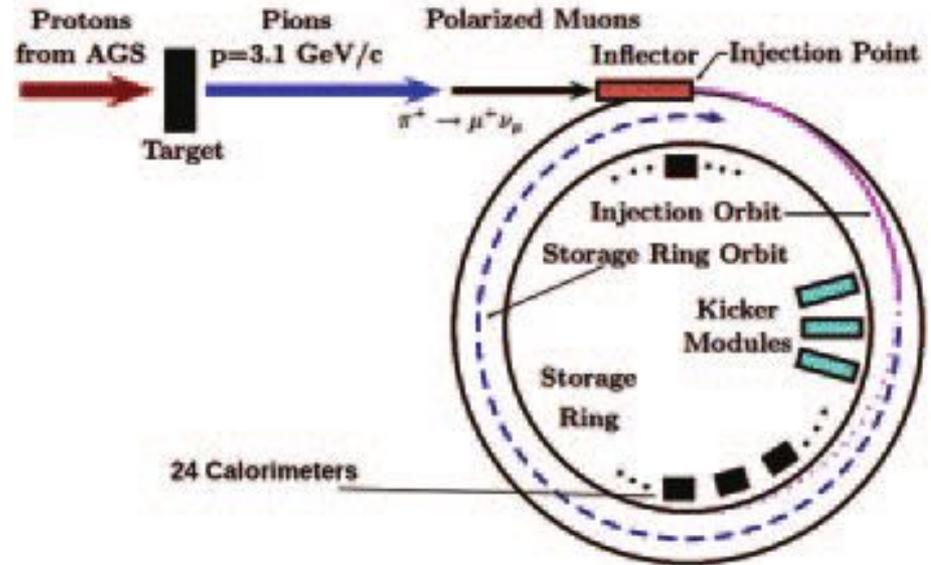
$$\vec{\mu}_\ell = g_\ell \left(\frac{q}{2m_\ell} \right) \vec{s} \quad \text{where } g_\ell = 2(1 + a_\ell),$$

- Anomales magnetisches Moment ist der Unterschied von g_1 zu 2.



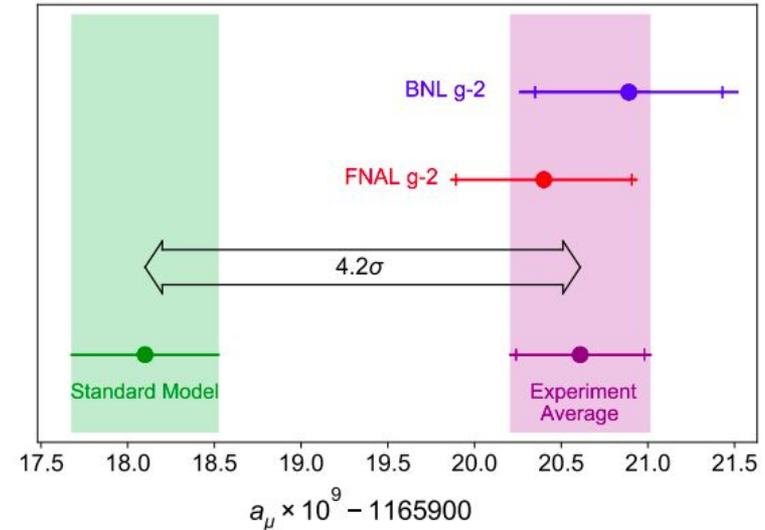
g-2 Messung (Fermilab)

- Myonen werden in den Beschleuniger injiziert.
- Es wird gemessen, wie schnell die Myonen präzidieren und g_μ kann extrahiert werden.



g-2 Messung (Fermilab)

- Nach **theoretischen Berechnung** ist $g - 2 = a_\mu(\text{SM}) = 116\,591\,810(43) \times 10^{-11}$ (**0.37 ppm**)
- Experimentelles Resultat ist allerdings **0.47 ppm!**
- Die Abweichung vom experimentellem zum theoretischen Resultat ist sehr groß! Die Wahrscheinlichkeit, dass es nur eine statistische Fluktuation ist, ist 1:750000!
- **Nicht kompatibel** mit dem SM!

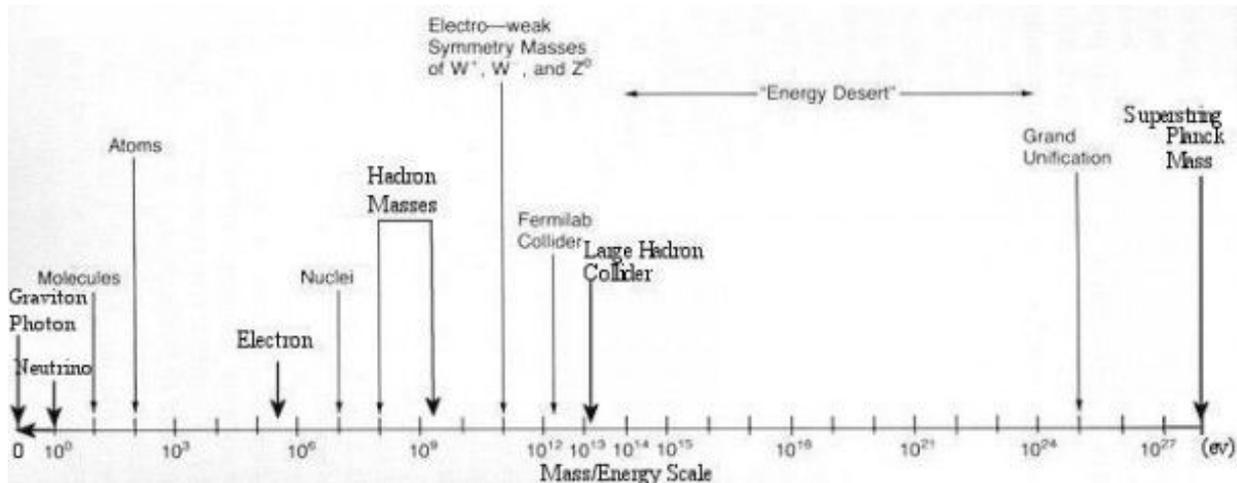


Zum Abschluss



....es bleibt spannend!

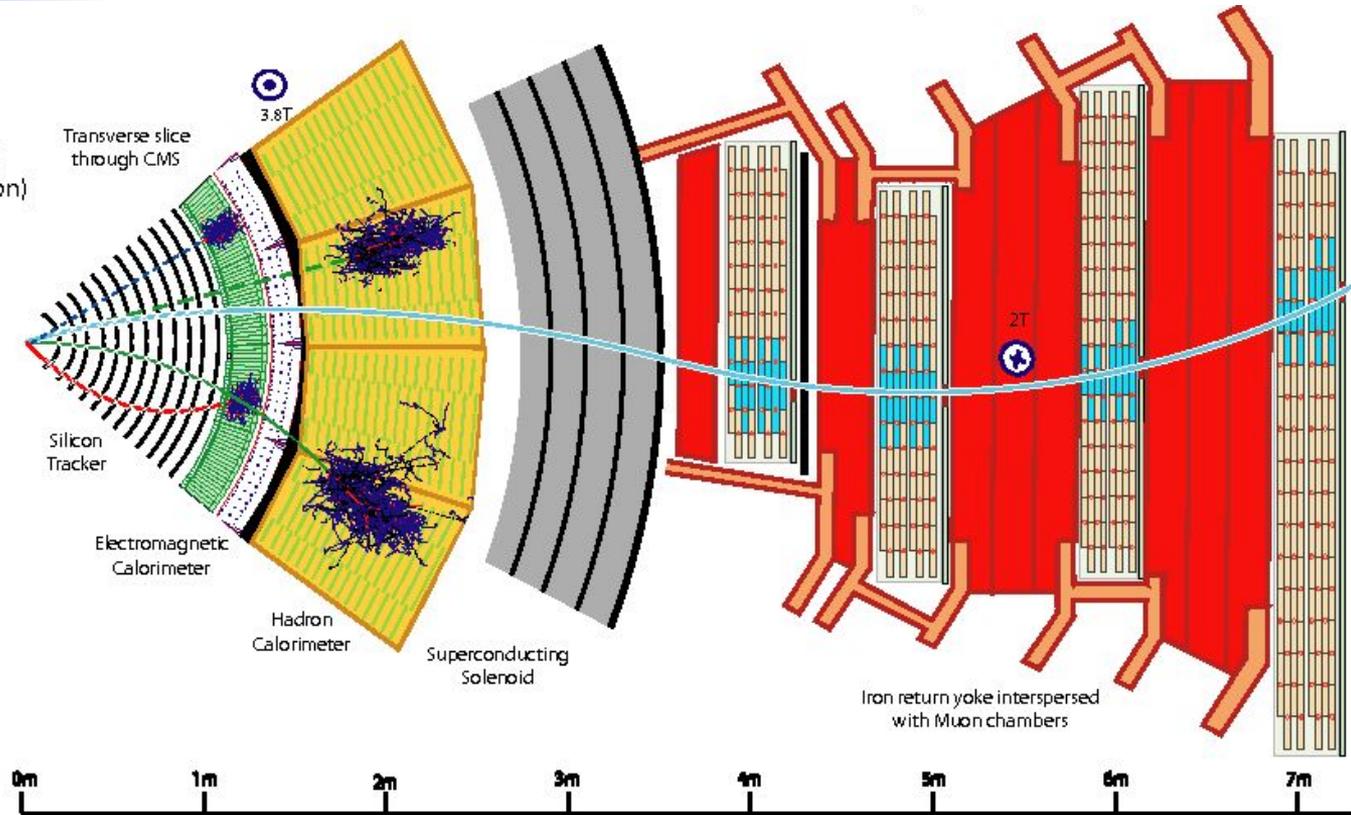
- Viele Suchen haben Hinweise auf neue Teilchen hinterlassen!
- Viele Suchen haben schon existierende theoretische Modelle ausgeschlossen bzw. auf einen kleineren Parameterraum zurückgedrängt.
- Die Zukunft ist ungewiss, aber bestimmt nicht langweilig!



Backup

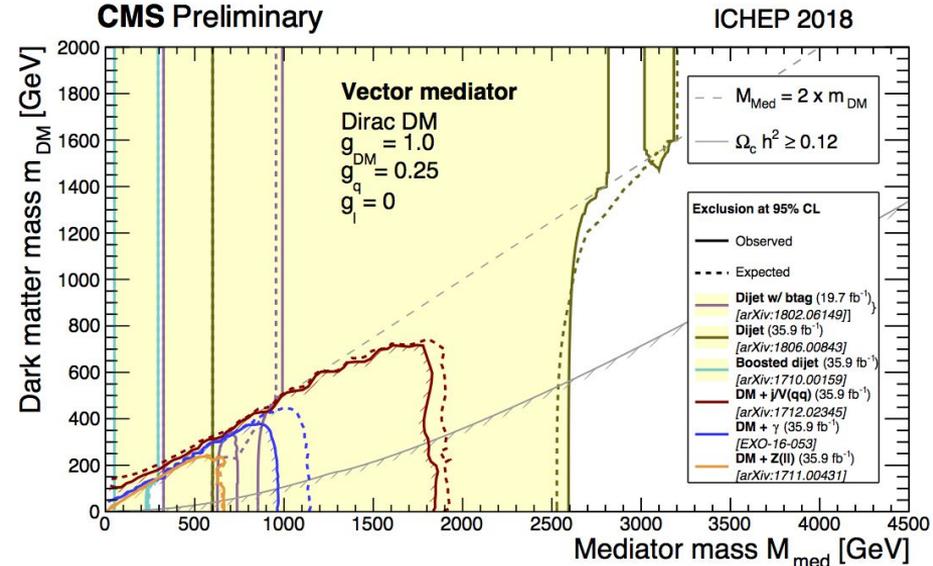
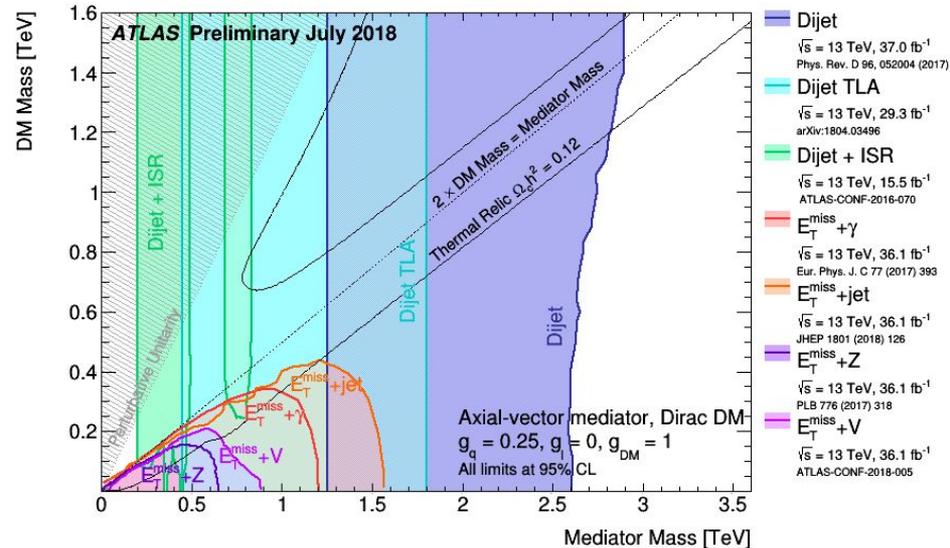
How to look for new particles: Particle reconstruction

- Key:
- Muon
 - Electron
 - Charged Hadron (e.g. Pion)
 - - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
 - Photon



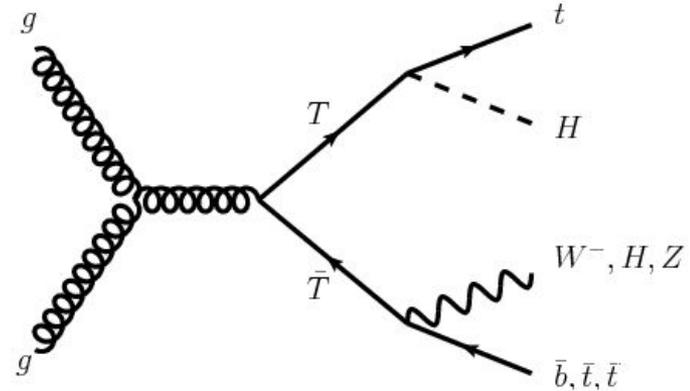
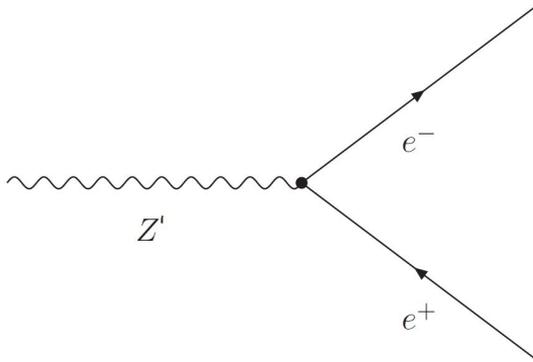
Dark matter searches: Overview CMS & ATLAS

Regions in a dark matter mass-mediator mass plane excluded at 95% CL computed for a universal quark coupling $g_q = 0.25$ and for a DM coupling of $g_{DM} = 1.0$.



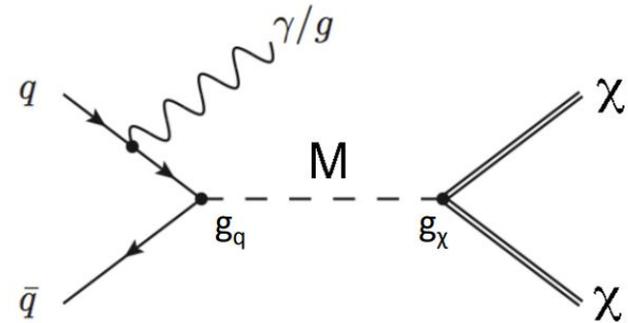
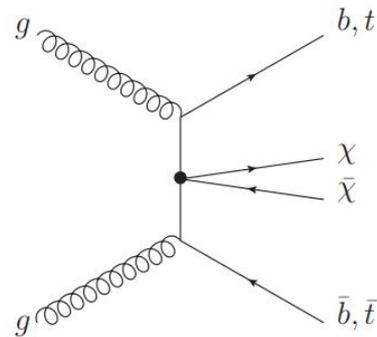
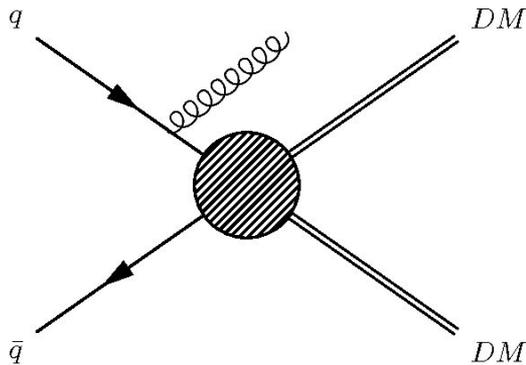
How to look for new particles: Expected signatures

- In most searches we assume that **new particles decay to SM particles** that can be detected.
 - Exception to that are Mono-X searches.
- These new particles are expected at high masses.
 - Final state objects must have a high p_T .
 - Often final state particles expected.

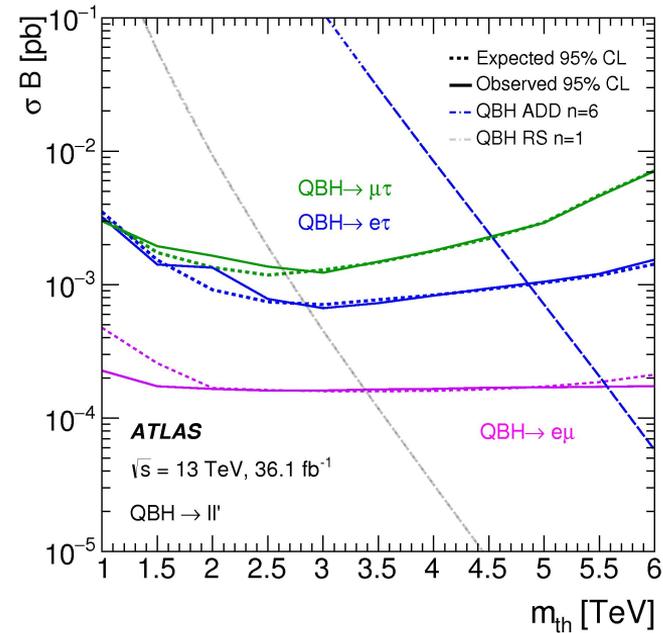
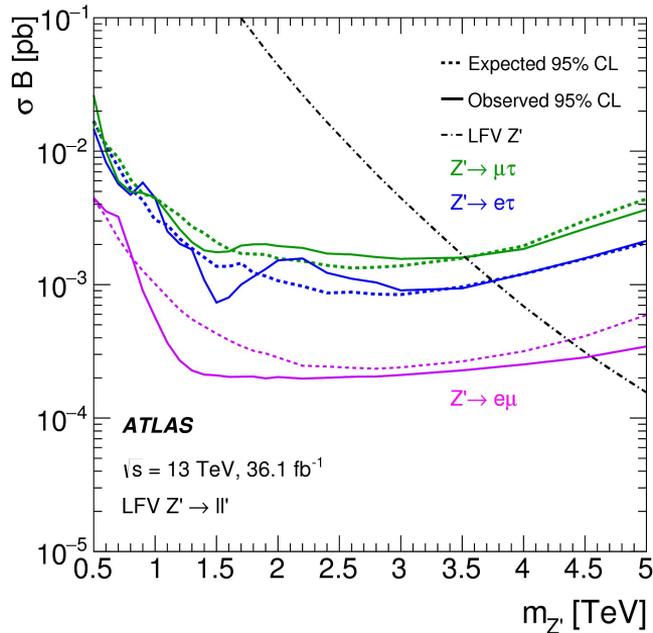


Suchen nach dunkler Materie

- Three search approaches
 - Mono-X signature: Look for initial state radiation
 - Associate production of dark matter with SM particles
 - Direct search for mediators that result in dijet resonance



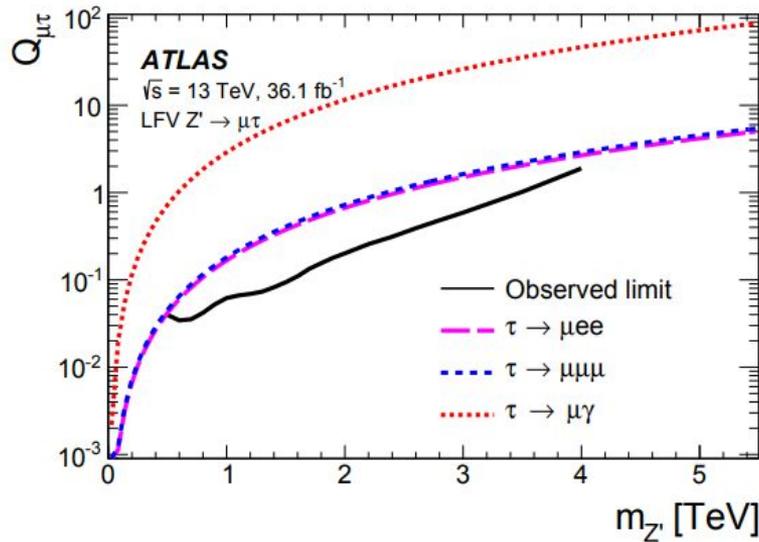
Lepton-Flavor Verletzung (ATLAS)



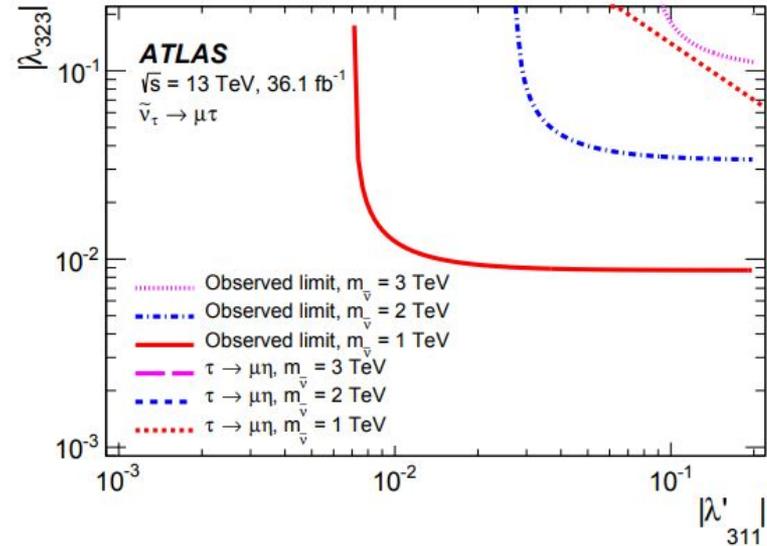
Bayesian lower limits at 95% CL are set for all three considered models.

Search for lepton-flavor violation (ATLAS)

Coupling limits for the lepton-flavor-violating Z' and the τ -sneutrino are more stringent than those from low-energy experiments for the channels including a τ .



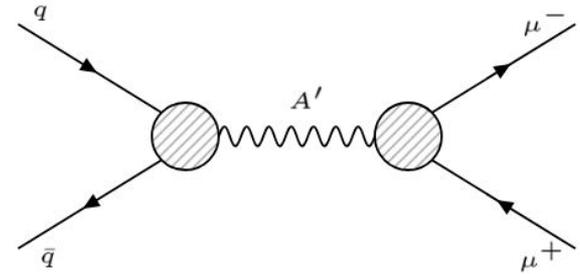
95% CL upper limits on the coupling $Q_{\mu\tau}$ as a function of $m_{Z'}$.



95% CL upper limits on the RPV couplings $|\lambda_{323}|$ versus $|\lambda_{311}^2|$ for a few values of $m_{\tilde{\nu}}$.

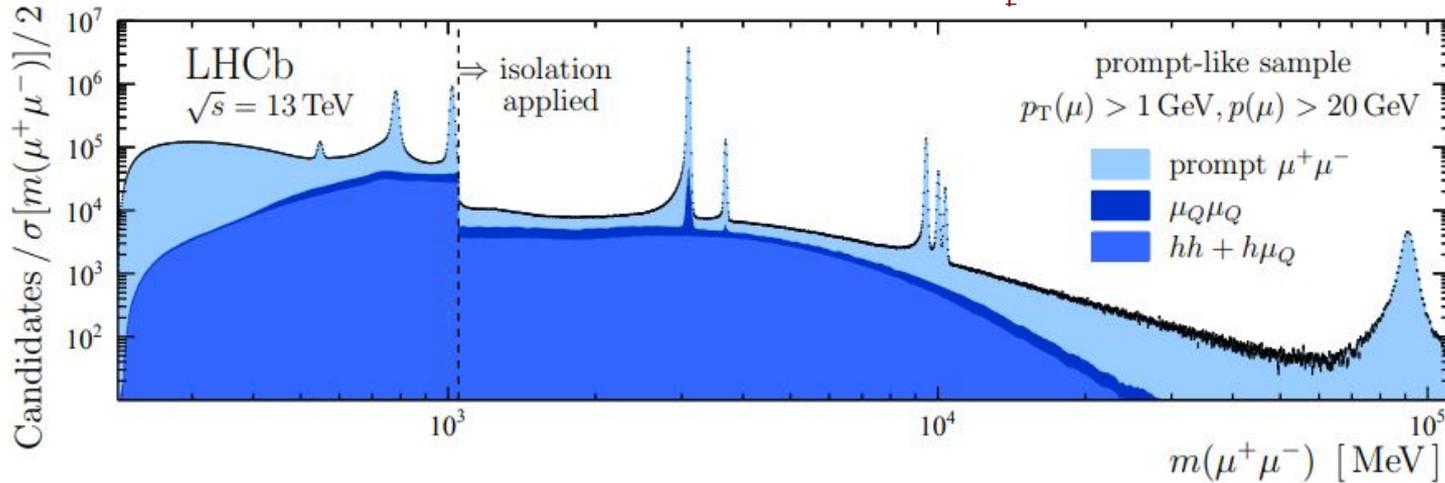
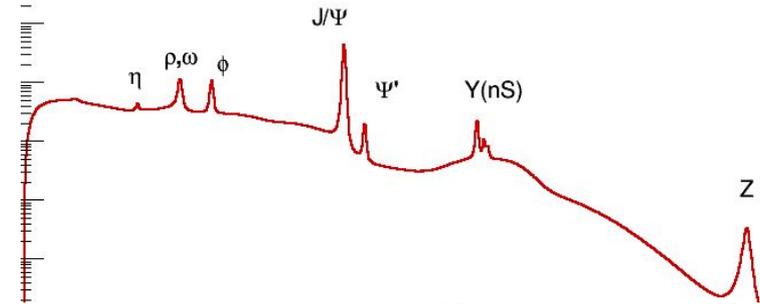
Suchen mit sehr niedrigen Energien

- **Massives dunkles Photon A'**
Hypothetisches Teilchen, das als **Austauschteilchen** mit dunkler Materie interagiert.
- $A' \rightarrow \mu^+ \mu^-$ Zerfälle werden untersucht. Suche nach Bump im $m_{\mu\mu}$ **Spektrum!**
- Es werden zwei Arten von Zerfällen des A' untersucht:
 - “Prompte” Zerfälle
 - Zerfälle von langlebigen A'



Dunkle Photonen (LHCb)

- Suche nach Bump im $m_{\mu\mu}$ Spektrum.
- Alle gefundenen Peaks kommen von schon bekannten Teilchen!



Dunkle Photonen (LHCb)



- Limits werden im Parameterraum $[m(A'), \varepsilon^2]$ gesetzt.
- Limits von LHCb erweitern den **ausgeschlossenen Parameterraum!**
- Falls es dunkle Photonen gibt, wissen wir, wo sie nicht sind!

