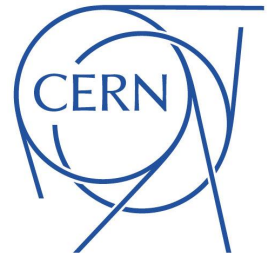


# Neue Physik

## Einige spannende Suchen

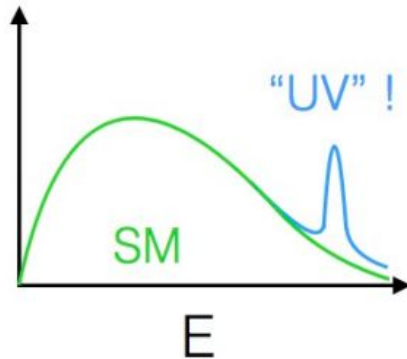
14. Juni 2022  
German Teacher Program



# Suchen nach neuer Physik

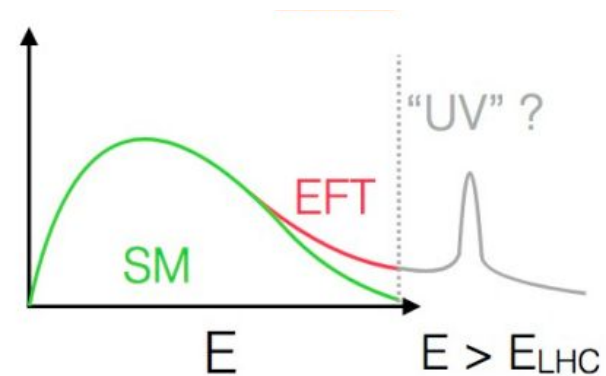
- **Direkte Suchen**

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

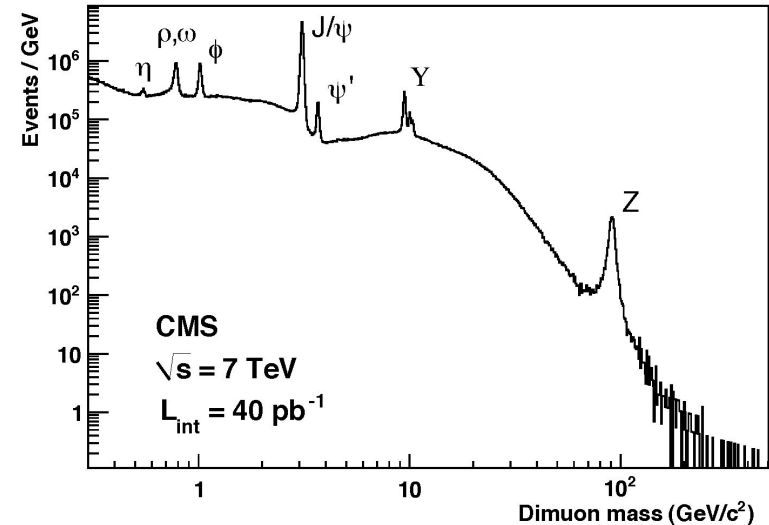


- **Indirekte Suchen**

- Suche nach Abweichungen vom SM

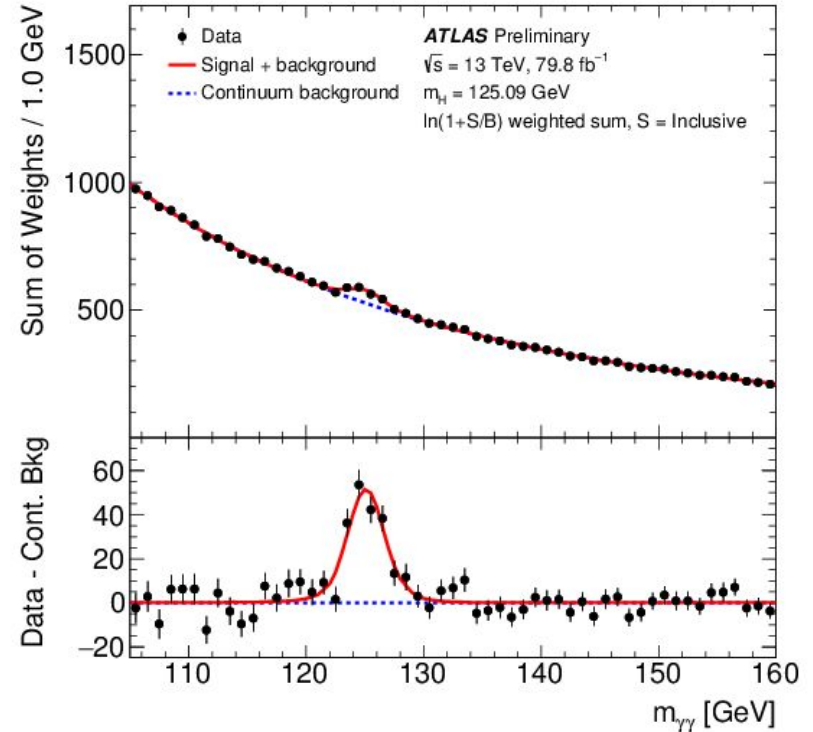
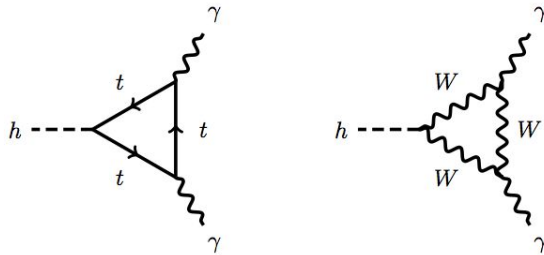


- Suchen nach einer Resonanz
  - **Resonante Produktion** = Teilchen, das in zwei andere SM Teilchen zerfällt, und einen “**Bump**” in **Spektrum der invarianten Masse** verursacht
  - **Nicht resonante Produktion** = Teilchen deren Zerfallsprodukte keinen Peak im Detektor hinterlassen



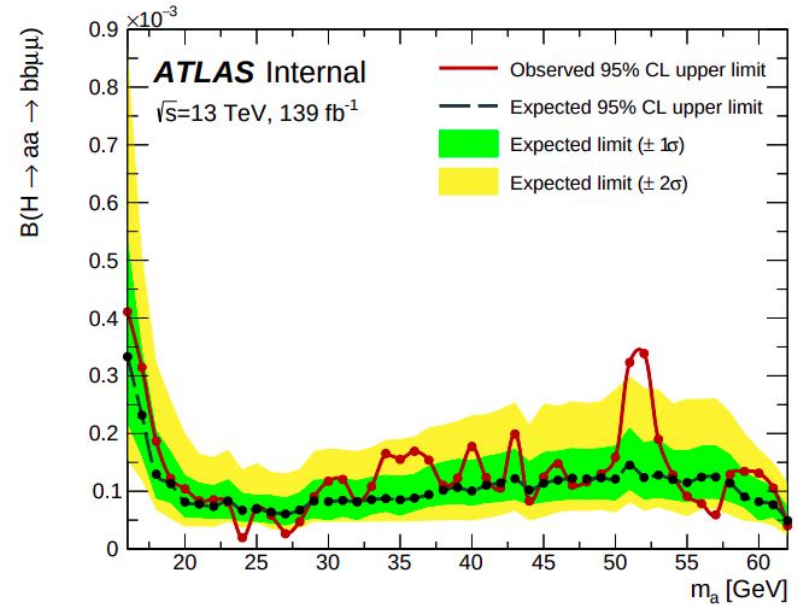
# Suchen nach einer Resonanz

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

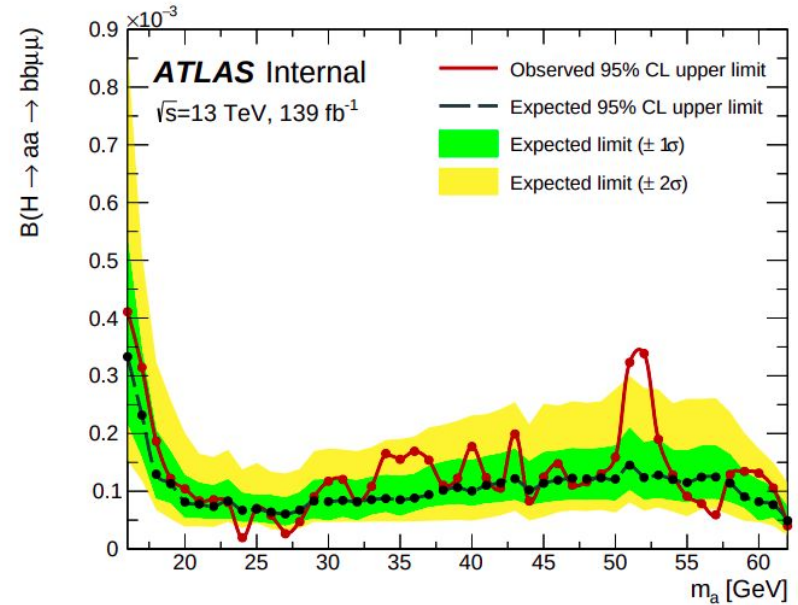


# Was ist ein Limit?

- 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 das 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.

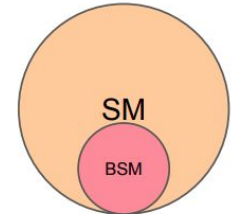
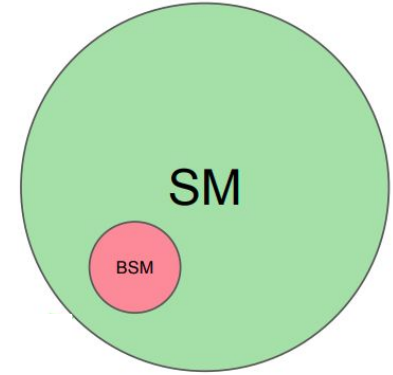


- **95% CL** (confidence level): Wahrscheinlichkeit, dass wir mit dem gesetzten Limit Recht haben.
- Überschuss an Ereignissen im Detektor, (“events”), die die gleichen Eigenschaften wie das Signal haben, zeigen sich als Bump in den Daten.
- Kleine Überschüsse erweisen sich oft als **statistische Fluktuation**.
- 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!





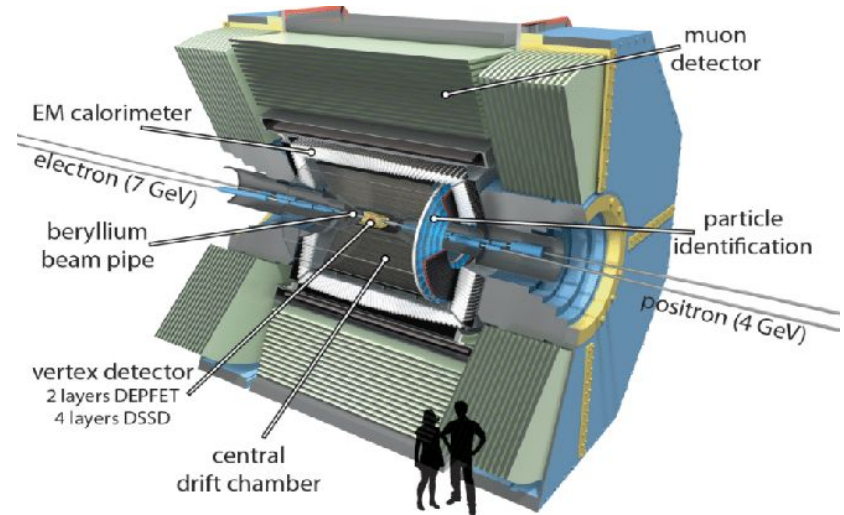
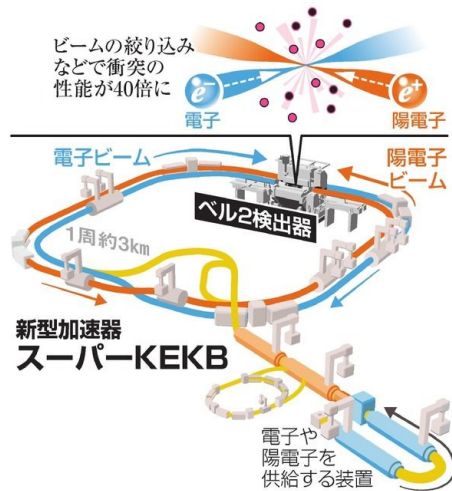
---

---

# 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).

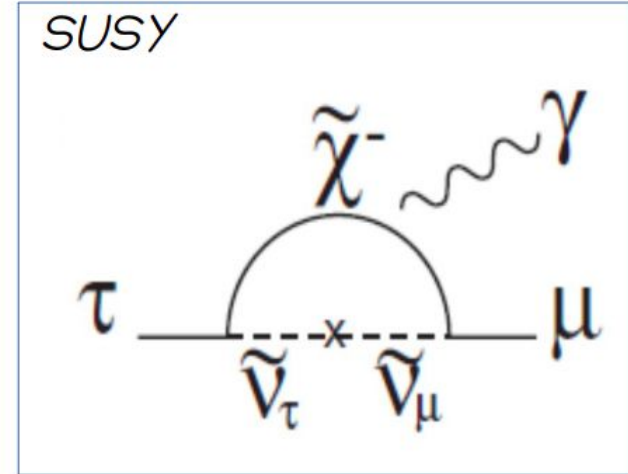


# Lepton-Flavor verletzende Zerfälle (Belle)

- Indirekte Suche nach **Lepton-Flavor verletzenden Zerfällen** des  $\tau$ :
  - $\tau^\mp \rightarrow e^\mp \gamma$
  - $\tau^\mp \rightarrow \mu^\mp \gamma$
- 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!**



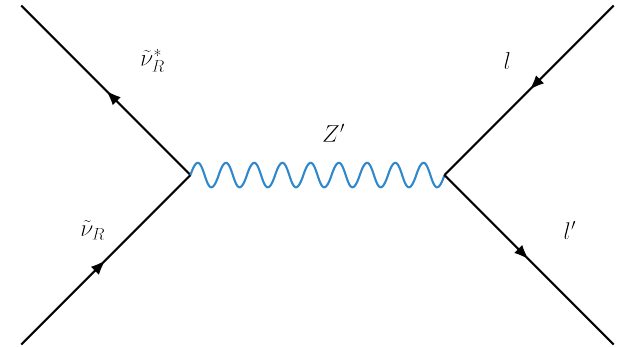
Obergrenze an Zerfallswahrscheinlichkeit

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

# Lepton-Flavor Verletzung (ATLAS)

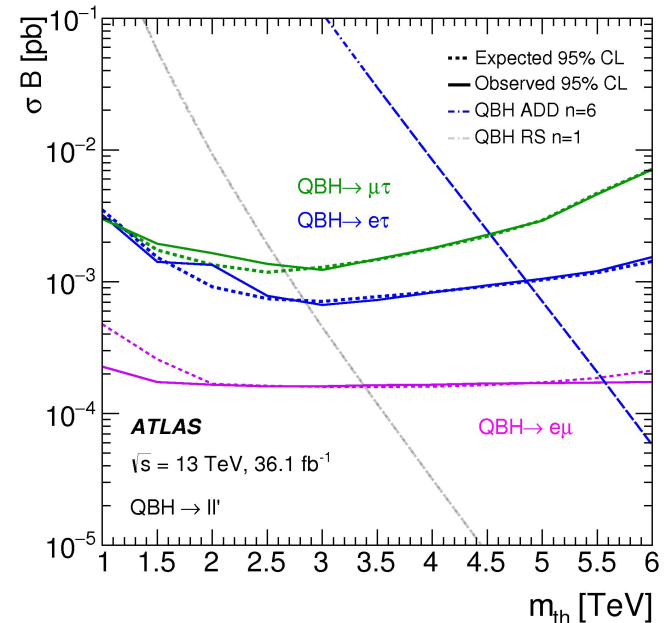
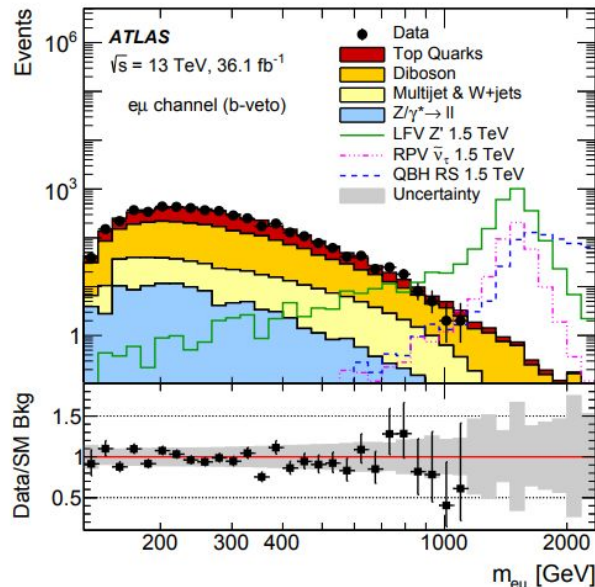


- Suche nach **schwerem Teilchen**, das in  $e\mu$ ,  $e\tau$  or  $\mu\tau$  zerfällt.
- Mit dieser Analyse kann man für verschiedenste theoretische Modelle Limits setzen:
  - $Z'$
  - Supersymmetrisches  $\tau$ -sneutrino
  - Mikroskopische schwarze Löcher
- Suche optimisiert für hohe Massen (bis zu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



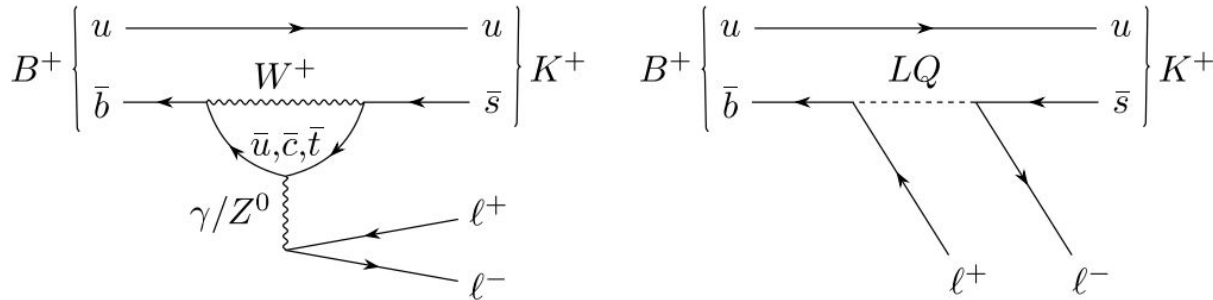
# Lepton-Flavor Verletzung (ATLAS)

- 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



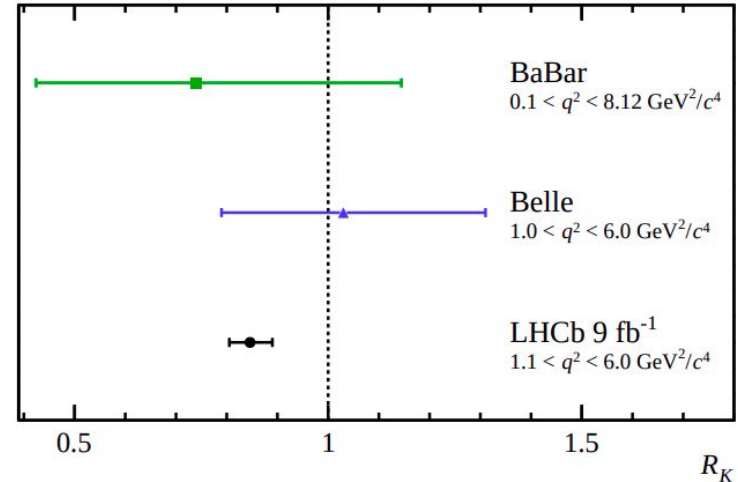
# Lepton-Universalität verletzende Zerfälle (LHCb)

- 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)

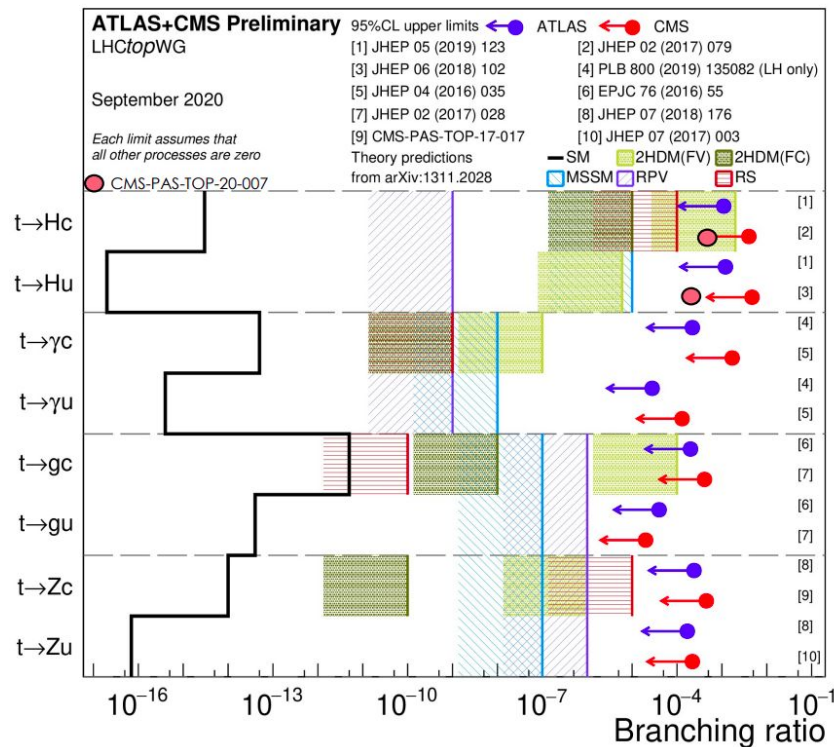
- $R_K$  ist das **Verhältnis zwischen der Anzahl der Elektronen und Myonen** die detektiert werden.
- Falls **Lepton- Universalität** gegeben ist, **müsste das Verhältnis 1 sein** (da  $Z^0$  zu gleichen Teilen in Elektronen, Myonen und Taus zerfällt).
- Wir messen aber  $R_K \neq 1!$ 
  - $R_K = 0.846^{+0.042}_{-0.039}$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



# Flavor Changing Neutral Current (ATLAS+CMS)



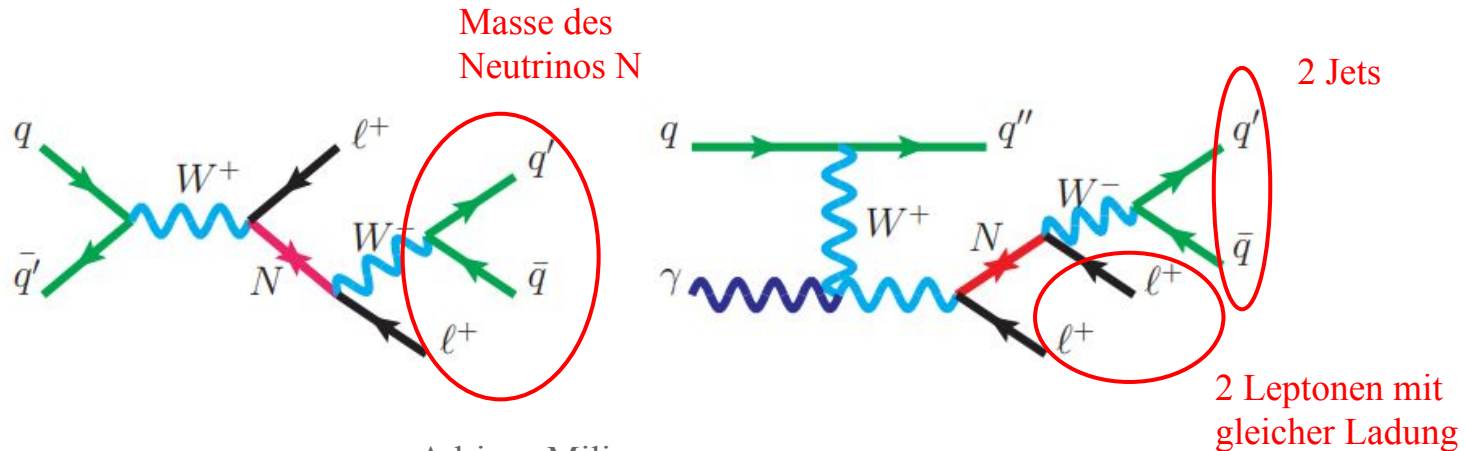
- FCNC ermöglicht den **Übergang von einer Familie in eine andere ohne den Austausch eines W Bosons** (z.B.  $t \rightarrow Hc$ ).
- Solche Zerfälle existieren im SM nicht bzw. sind sie sehr unterdrückt. Sie haben Zerfallswahrscheinlichkeiten  $< 10^{-11}$ !
- Mit den von uns gesetzten Limits in Suchen,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





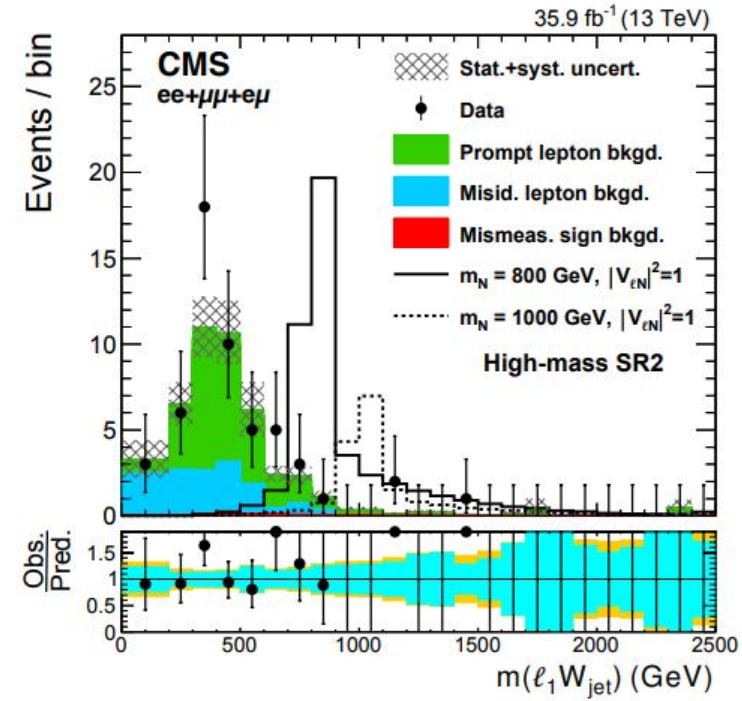
# Suche nach schweren Neutrinos (CMS)

- 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!



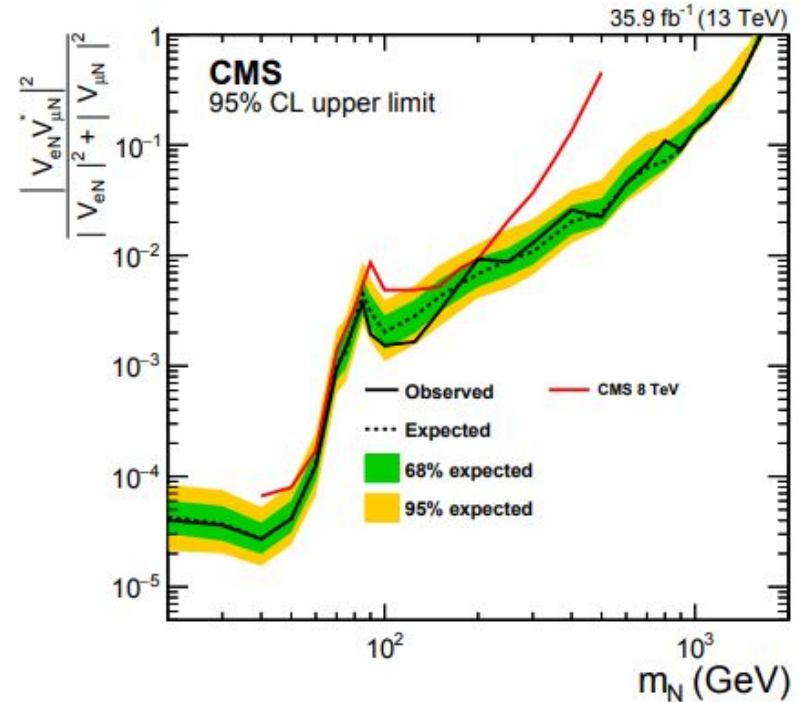
# Suche nach schweren Neutrinos (CMS)

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



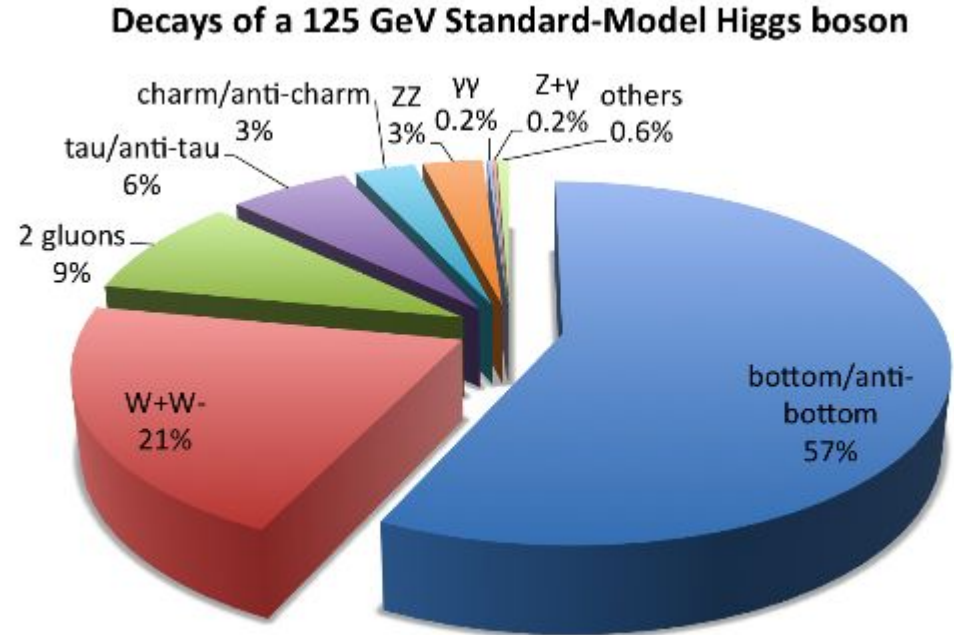
# Suche nach schweren Neutrinos (CMS)

- 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

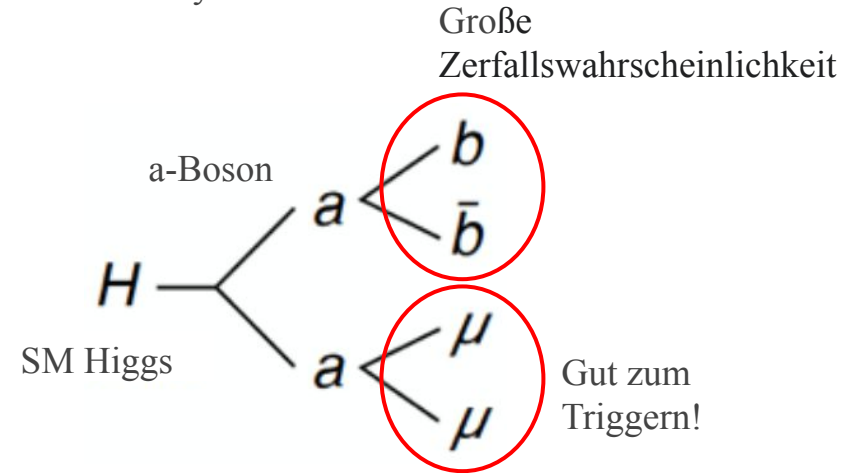
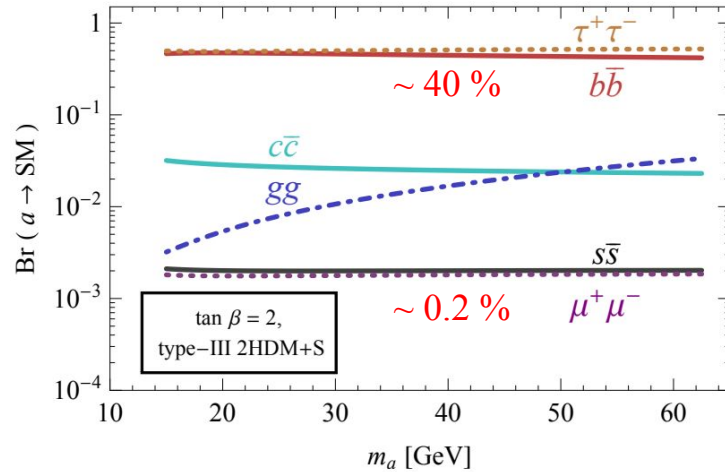
- Im SM wissen wir, wie das Higgs zerfällt.
- Mit einer **Lebenszeit von  $10^{-22}$  s** praktisch am **Ort des Entstehens** und bevorzugt in Elementarteilchen mit größtmöglicher Masse.
- Aufgrund der Messunwahrscheinlichkeit der einzelnen **Zerfallkanäle** bleibt aber noch Platz für Zerfälle in neue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



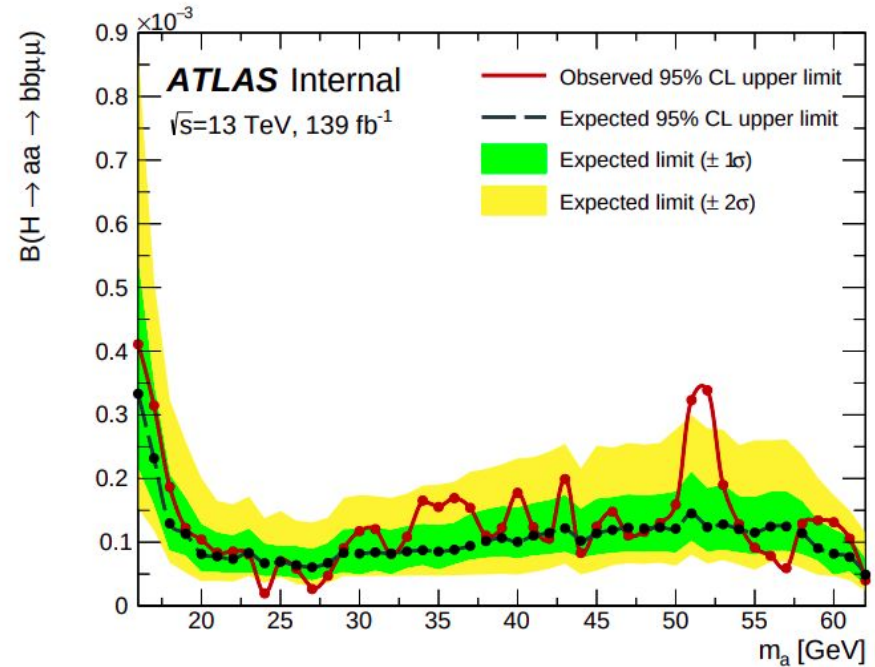
# Exotische Higgszerfälle (ATLAS)



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

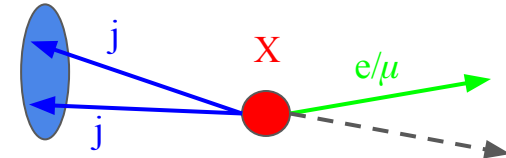
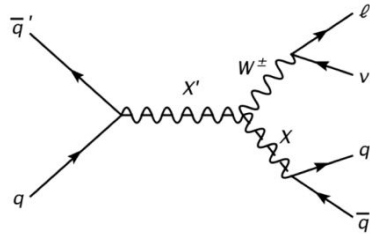
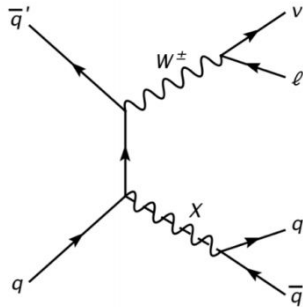


- Suche nach Bump im  $m_{\mu\mu}$  Spektrum.
- Wir setzen ein **Limit an den Wirkungsquerschnitt für Massen  $m_a$**  zwischen 16 und 62 GeV.
- Sehr **niedrige** Massen!  
→ **Low mass searches** (eigentlich sind ATLAS und CMS für hohe Energien optimisiert)
- Überschuss an Daten (**Signal**) bei  $m_a = 52$  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  $X(\prime)$ , zerfällt in **zwei Partonen zusammen mit einem Lepton**.
- Suche nach einem Bump im  $m_{jj}$  **Spektrum** (invariante Masse Spektrum der beiden Jets).



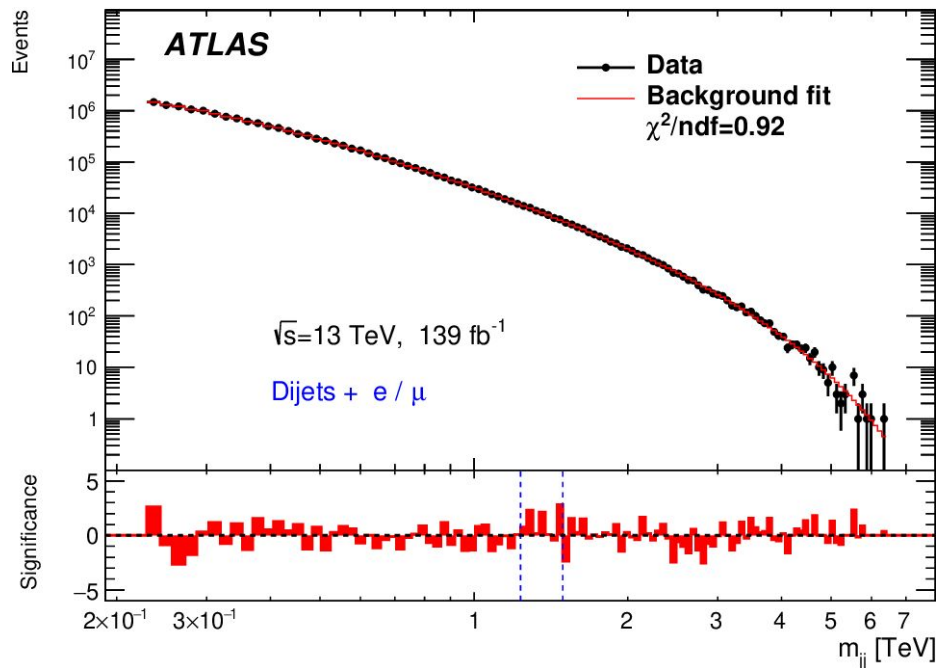
Lepton wird zum Triggern verwendet!



# Generische Suche: Dijet + lepton (ATLAS)

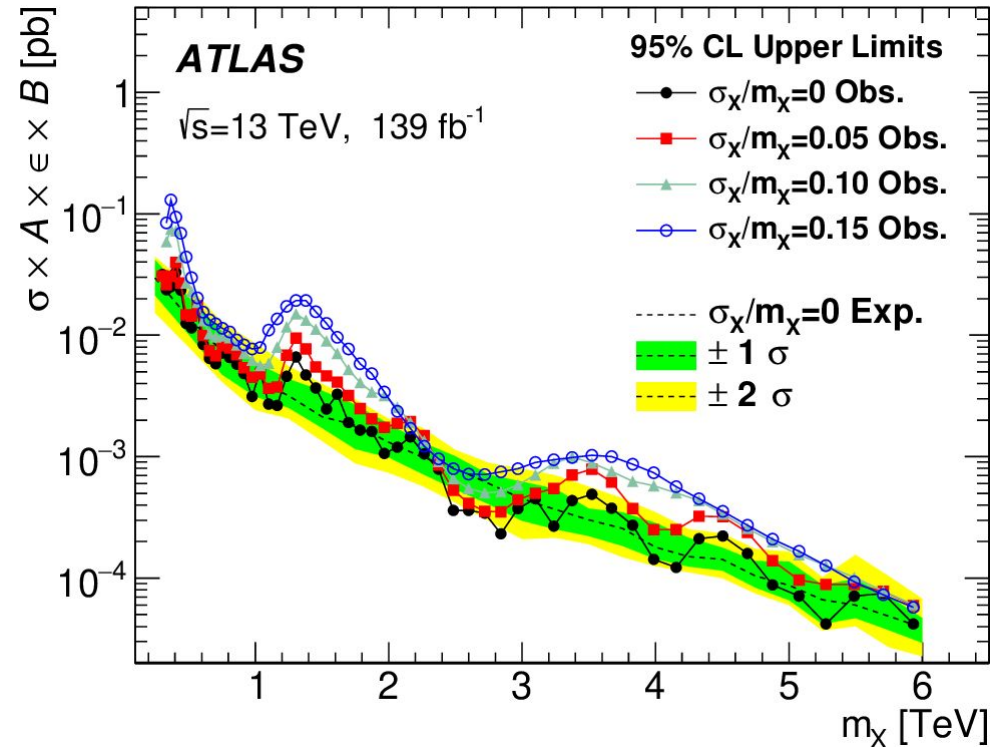


- “Generische Suche”
  - Wir gehen von keinem speziellen Modell aus, sondern suchen nach irgendeinem Zerfall, der im Endzustand zwei Jets und ein Lepton hat.
- Kein Überschuss an Daten im gemessenen Spektrum gefunden.
- Wir sagen:  
“Das gemessene Spektrum ist kompatibel mit der Background-only Hypothese.”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



# Generische Suche: Dijet + lepton (ATLAS)

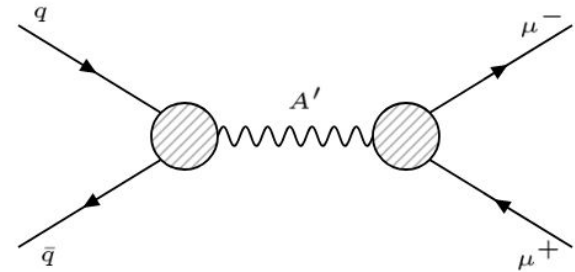
- Wir analysieren das  $m_{jj}$  Spektrum.  
Suche nach Resonanz mit sehr **hoher** Masse!
- Wir setzen ein **Limit an den Wirkungsquerschnitt für Massen  $m_X$**  zwischen 0.25 TeV und 6 TeV.  
Wir verwenden dazu Signale mit verschiedener Breite  $\sigma_X$ .
- Je **schmäler das Signal**, desto niedriger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



# Suchen mit sehr niedrigen Energien

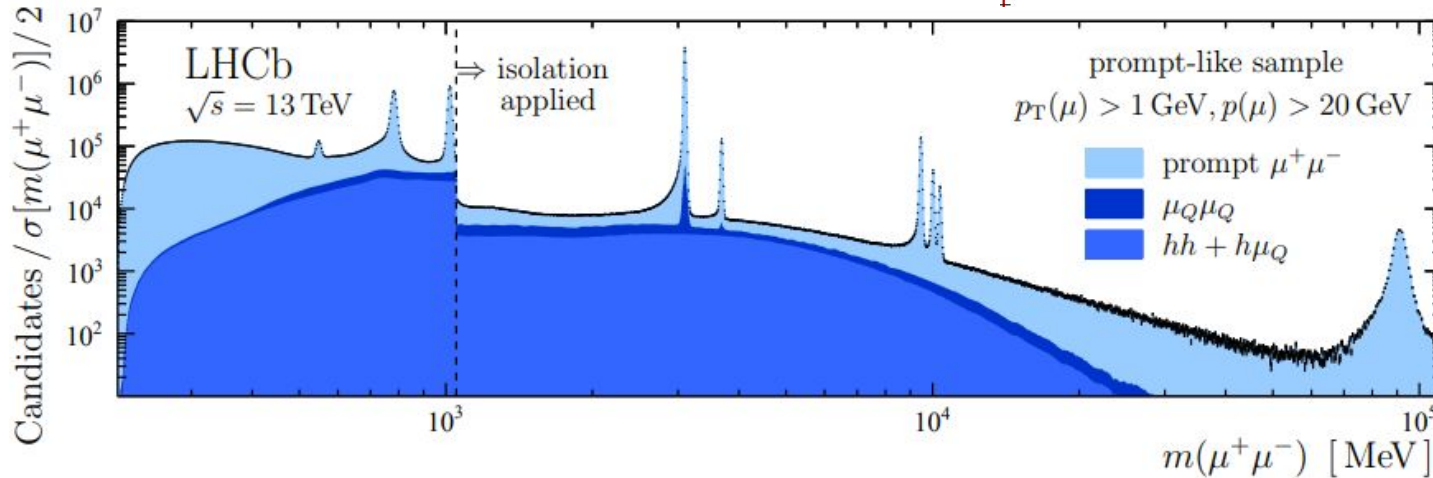
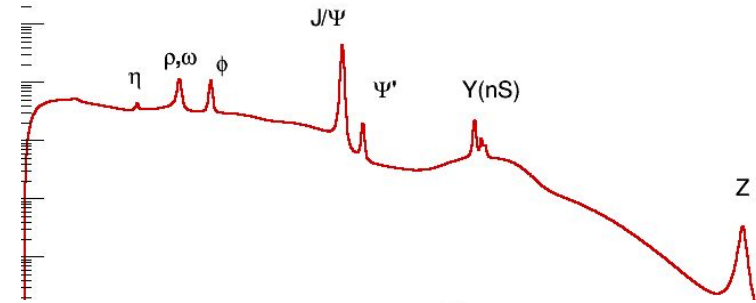
# Dunkle Photonen (LHCb)

- **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)

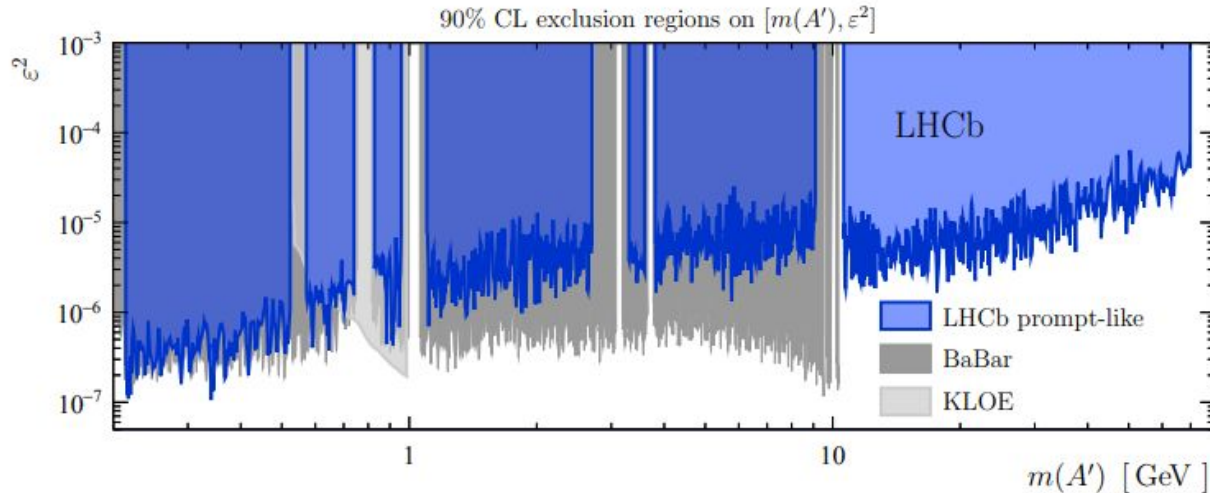
- Suche nach Bump im  $m_{\mu\mu}$  Spektrum.
- Alle gefundenen Peaks kommen von schon bekannten Teilchen!



# Dunkle Photonen (LHCb)



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



---

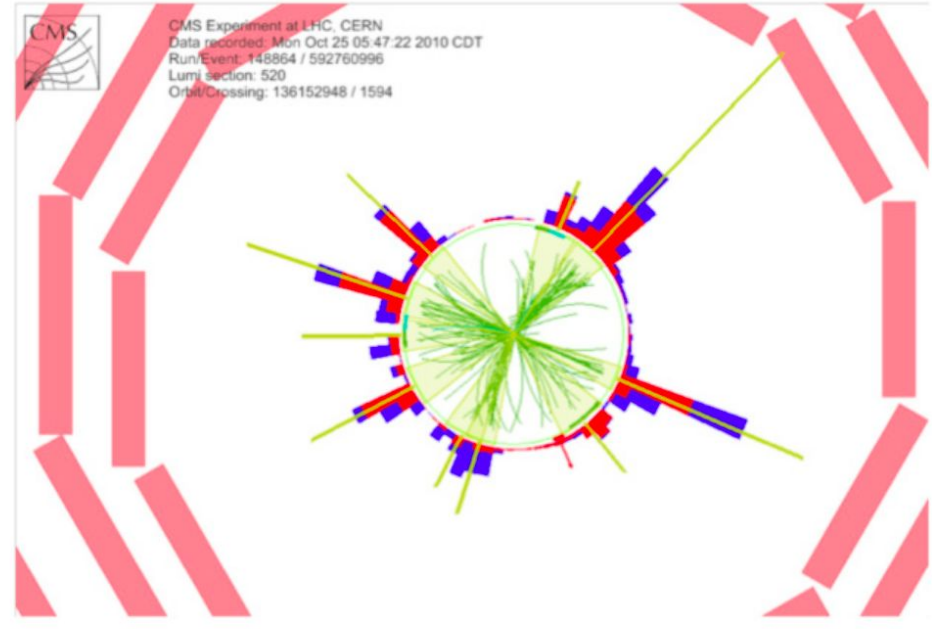
---

# 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.

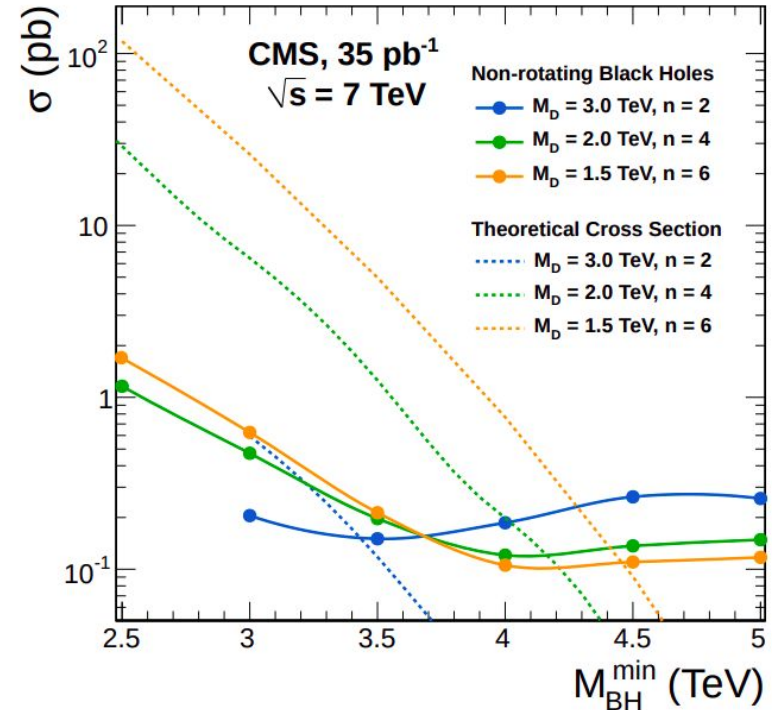




# Mikroskopische schwarze Löcher (CMS)



- 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!**



---

---

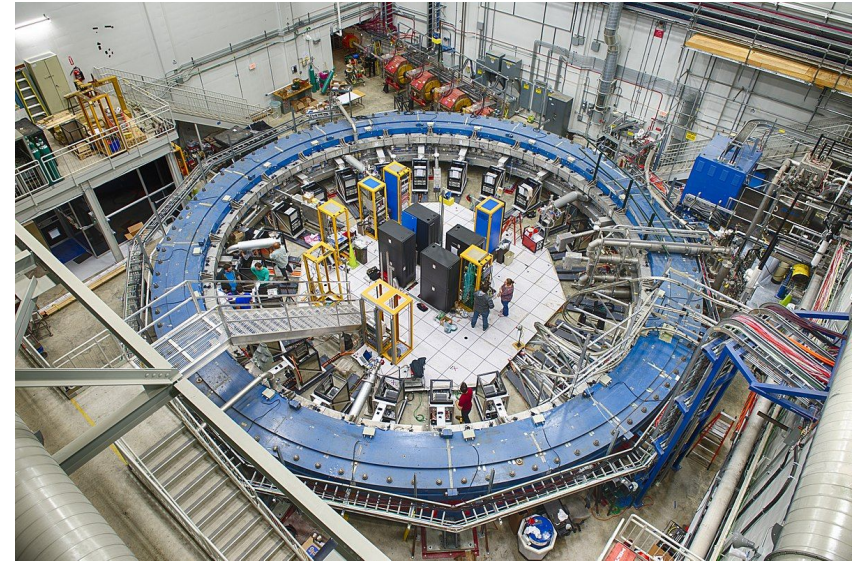
# Präzisionsmessung

# g-2 Messung (Fermilab)

- Magnetisches Moment des Myons ist definiert als

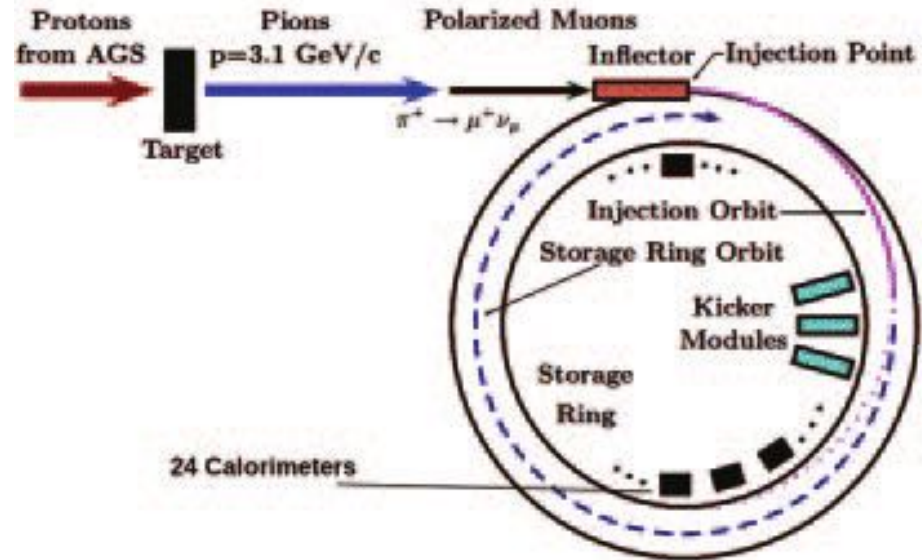
$$\vec{\mu}_\ell = g_\ell \left( \frac{q}{2m_\ell} \right) \vec{s} \quad \text{where } g_\ell = 2(1 + a_\ell),$$

- Anomales magnetisches Moment ist der Unterschied von  $g_\mu$  zu 2.



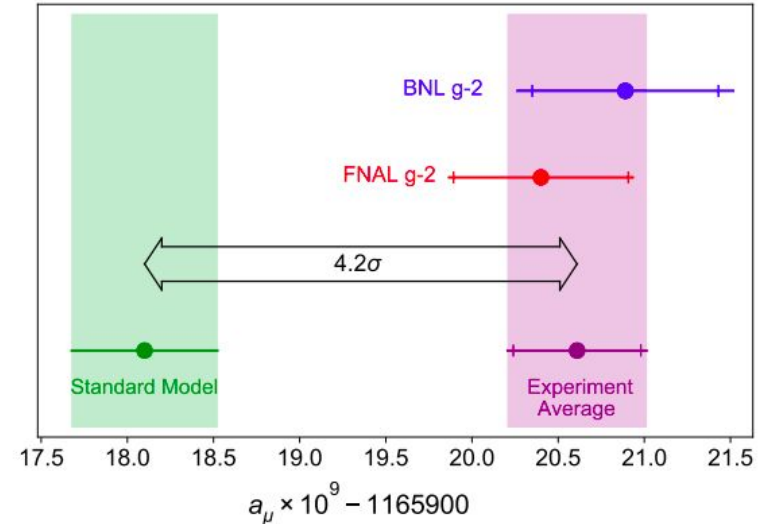
# g-2 Messung (Fermilab)

- Myonen werden in den Beschleuniger injiziert.
- Es wird gemessen, wie schnell die Myonen präzidieren und  $g_\mu$  kann extrahiert werden.



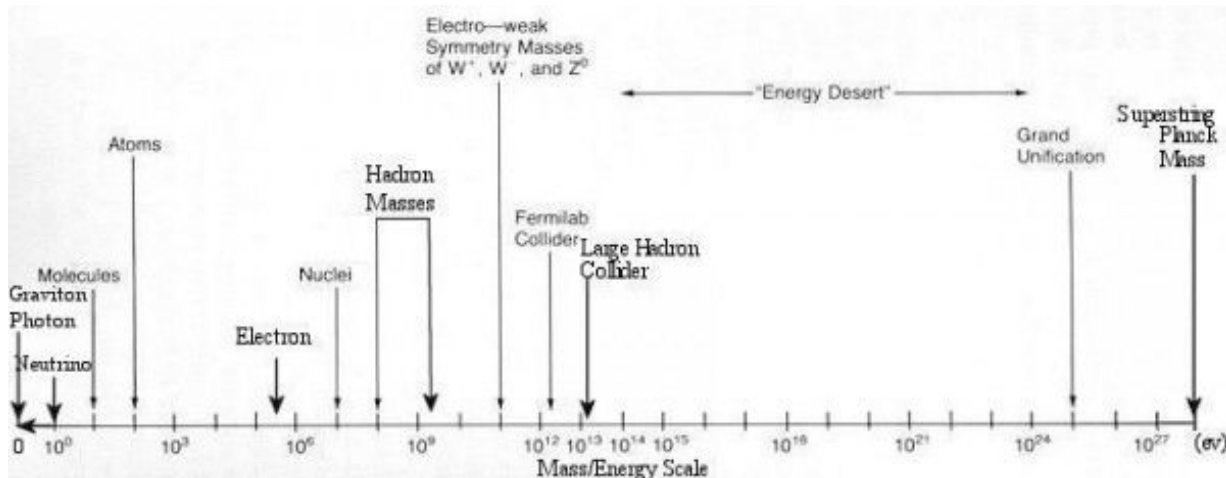
# g-2 Messung (Fermilab)

- 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!



....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!

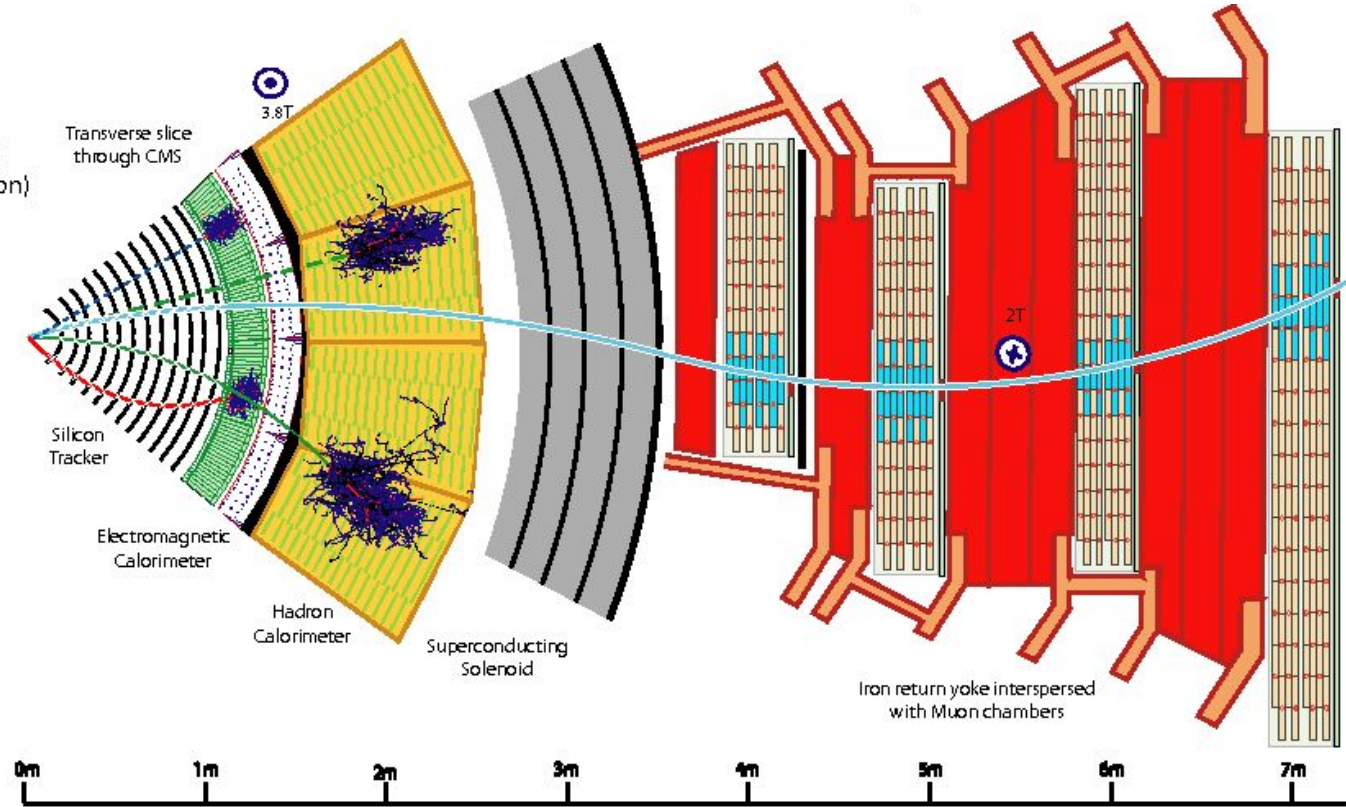


# Backup



# How to look for new particles: Particle reconstruction

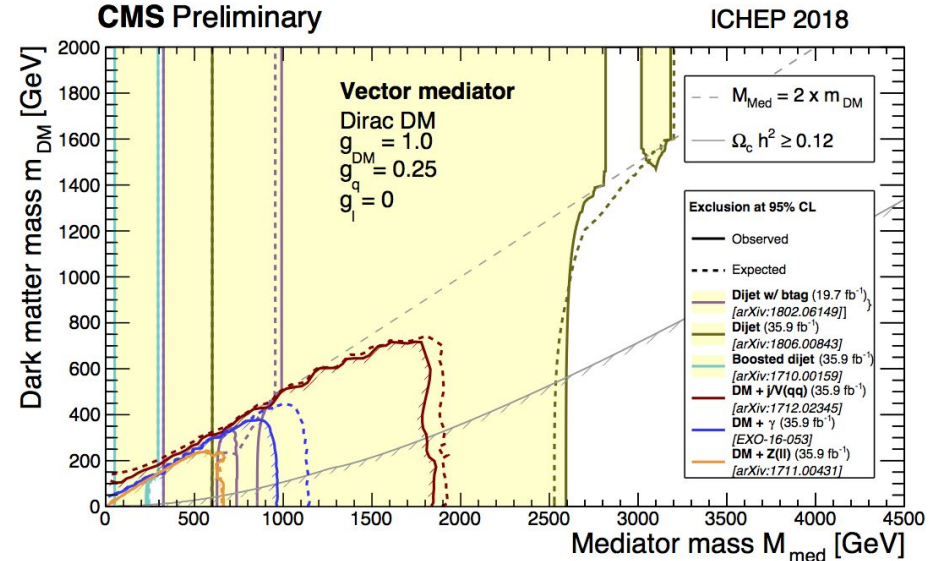
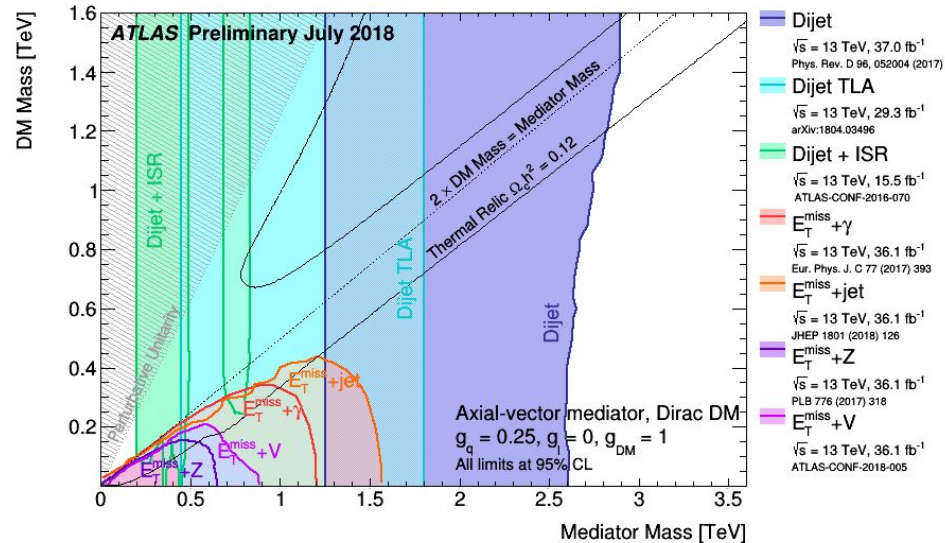
- Key:
- Muon
  - Electron
  - Charged Hadron (e.g. Pion)
  - - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
  - Photon





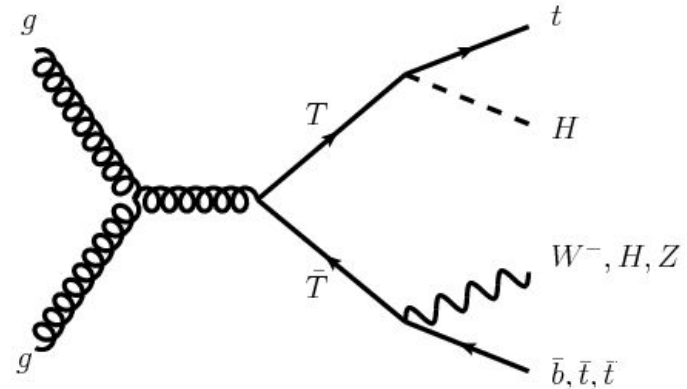
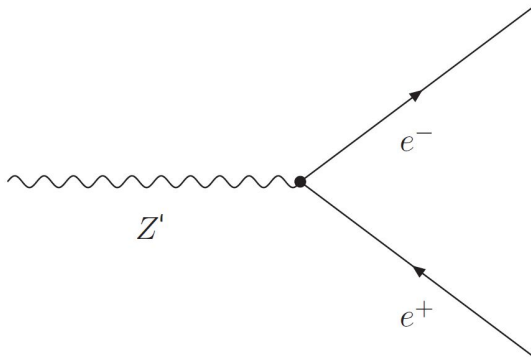
# Dark matter searches: Overview CMS & ATLAS

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  $g_{DM} = 1.0$ .



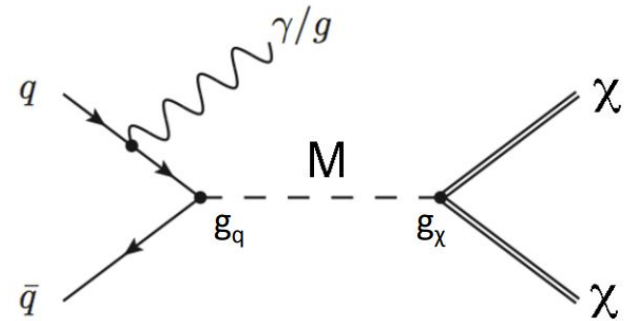
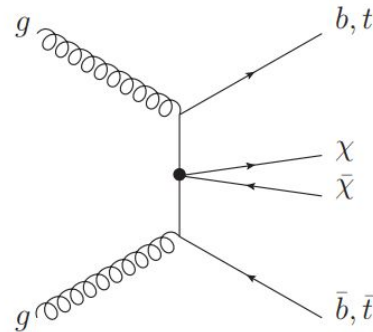
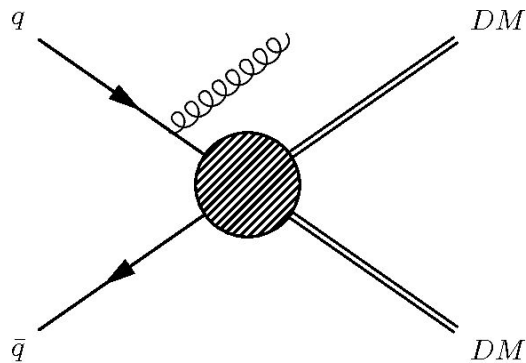
# How to look for new particles: Expected signatures

- 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.

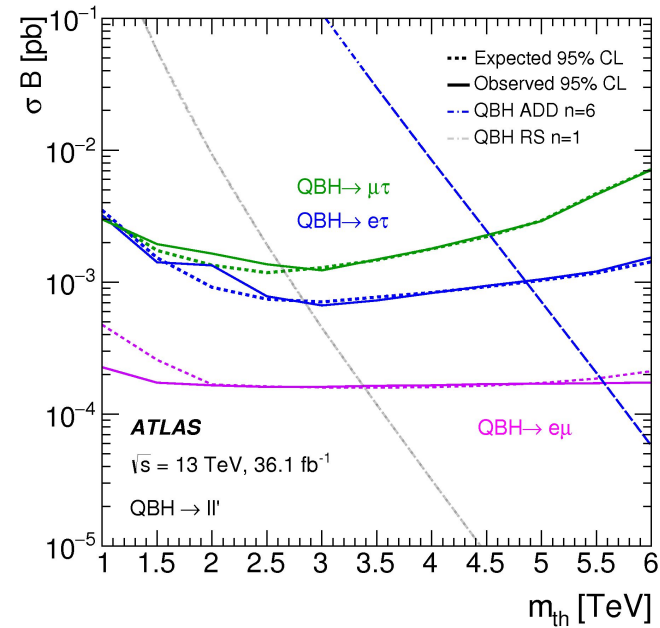
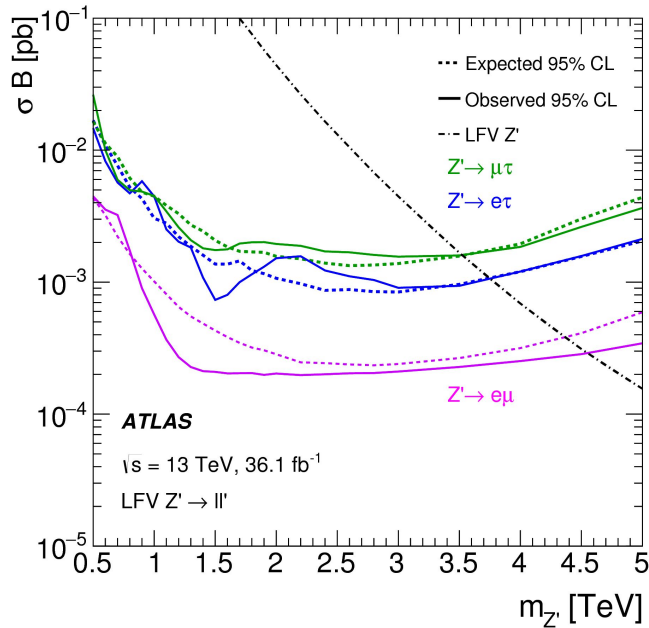


# Suchen nach dunkler Materie

- 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



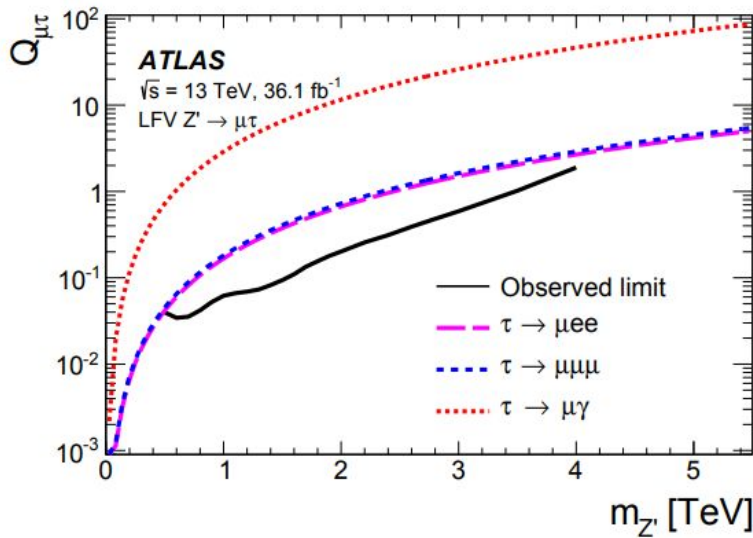
# Lepton-Flavor Verletzung (ATLAS)



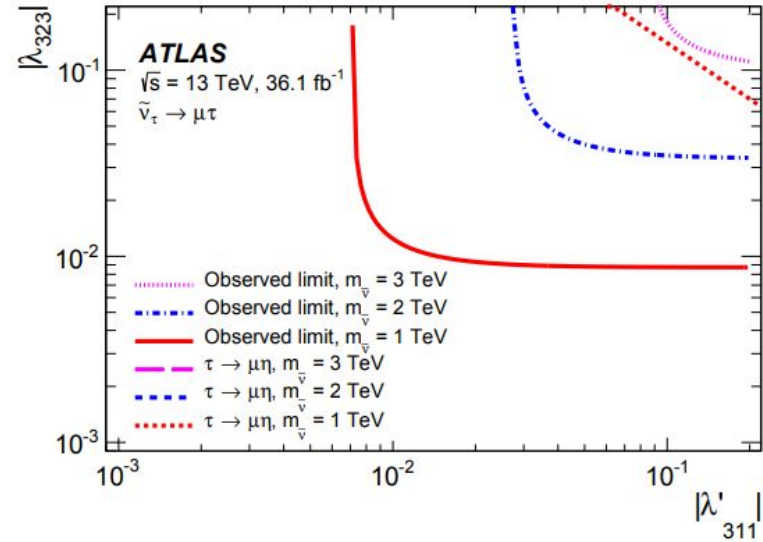
Bayesian lower limits at 95% CL are set for all three considered models.

# Search for lepton-flavor violation (ATLAS)

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



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  $m_{\tilde{\nu}}$ .