Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Anja Beck

Lehrstuhl für Theoretische Physik IV
Fakultät Physik
Technische Universität Dortmund

1. August 2017

Dunkle Materie

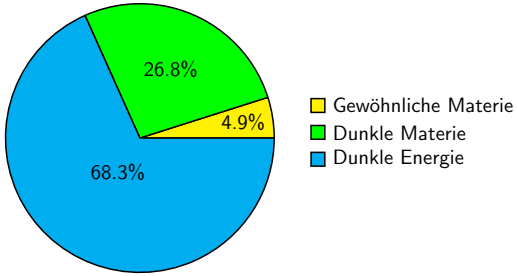


Abbildung: Energieverteilung im Universum (ESA, Planck Colaboration 2013)

Dunkle Materie

Abbildung: Energieverteilung im Universum (ESA, Planck Colaboration 2013)

Menschen schauen schon immer in den Himmel.
Dunkle Materie als Lösung für zu schnelle Galaxien.
Großteil dessen was das Universums ausmacht ist unbekannt.

Direct Detection

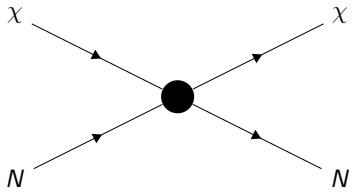


Abbildung: Direct Detection: Streuung eines DM-Teilchens am Atomkern.

Direct Detection

Abbildung: Direct Detection: Streuung eines DM-Teilchens am Atomkern.

Inhalt

Inhalt

1 Einführung
2 Flavour-Mischung
3 Verwendeter Formalismus
4 Neue Wechselwirkung
5 Ergebnisse

Flavour-Mischung

Ursprung

Die Massen-Eigenzustände sind nicht gleich den Flavour-Eigenzuständen.

$$\mathcal{L}^{(\text{mass})} = -\frac{v}{\sqrt{2}}\left[\bar{E}_L \lambda^e E_R + \bar{D}_L \lambda^d D_R + \bar{U}_L \lambda^u U_R + \text{h.c.}\right]$$

- Massenterme werden durch unitäre Rotation der Teilchen-Multipletts diagonalisiert:

$$E_L \to S_e E_L \qquad E_R \to R_e E_R$$

$$\bar{E}_L \lambda^e E_R \to \bar{E}_L S_e^\dagger \lambda^e R_e E_R$$

- Dadurch verändert sich der Strom

$$\bar{U}_L \gamma^\mu D_L \to \bar{U}_L \gamma^\mu S_u^\dagger S_d D_L$$

Flavour-Mischung

Ursprung

Die Massen-Eigenzustände sind nicht gleich den Flavour-Eigenzuständen.

$\mathcal{L}^{(\text{mass})} = -\frac{v}{\sqrt{2}}\left[\bar{E}_L \lambda^e E_R + \bar{D}_L \lambda^d D_R + \bar{U}_L \lambda^u U_R + \text{h.c.}\right]$

- Massenterme werden durch unitäre Rotation der Teilchen-Multipletts diagonalisiert:

$E_L \to S_e E_L \qquad E_R \to R_e E_R$

$\bar{E}_L \lambda^e E_R \to \bar{E}_L S_e^\dagger \lambda^e R_e E_R$

- Dadurch verändert sich der Strom

$\bar{U}_L \gamma^\mu D_L \to \bar{U}_L \gamma^\mu S_u^\dagger S_d D_L$

Flavour-Mischung

CKM-Matrix

Beträge der Matrix-Elemente:

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 0.974 & 0.225 & 0.004 \\ 0.220 & 0.995 & 0.041 \\ 0.008 & 0.040 & 1.009 \end{pmatrix}$$

- Hinweis, dass die Mischung häufig vernachlässigt wird.

Flavour-Mischung

CKM-Matrix

Beträge der Matrix-Elemente:

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 0.974 & 0.225 & 0.004 \\ 0.220 & 0.995 & 0.041 \\ 0.008 & 0.040 & 1.009 \end{pmatrix}$$

- Hinweis, dass die Mischung häufig vernachlässigt wird.

Formalismus

Operatoren

Unchirale Operatoren:

$$R_{1,q} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{q}\gamma^\mu q) \qquad R_{3,q} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{q}\gamma^\mu\gamma_5 q)$$
$$R_{2,q} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{q}\gamma^\mu q) \qquad R_{4,q} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{q}\gamma^\mu\gamma_5 q)$$

Chirale Operatoren:

$$Q_{1ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\tilde{\tau}^3\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^\mu\tau^3 Q_L^j) \qquad Q_{5ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\tilde{\tau}^3\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^\mu\tau^3 Q_L^j)$$
$$Q_{2ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^\mu Q_L^j) \qquad Q_{6ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^\mu Q_L^j)$$
$$Q_{3ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{U}_R^i\gamma^\mu U_R^j) \qquad Q_{7ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{U}_R^i\gamma^\mu U_R^j)$$
$$Q_{4ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{D}_R^i\gamma^\mu D_R^j) \qquad Q_{8ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{D}_R^i\gamma^\mu D_R^j)$$

Ziel: Drücke die Koeffizienten der unchiralen Operatoren in Abhängigkeit der Koeffizienten der chiralen Operatoren aus.

Formalismus

Operatoren

Unchirale Operatoren:

$R_{1,q} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{q}\gamma^\mu q)$ $R_{3,q} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{q}\gamma^\mu\gamma_5 q)$

$R_{2,q} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{q}\gamma^\mu q)$ $R_{4,q} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{q}\gamma^\mu\gamma_5 q)$

Chirale Operatoren:

$Q_{1ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\tilde{\tau}^3\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^\mu\tau^3 Q_L^j)$ $Q_{5ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\tilde{\tau}^3\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^\mu\tau^3 Q_L^j)$

$Q_{2ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^\mu Q_L^j)$ $Q_{6ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^\mu Q_L^j)$

$Q_{3ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{U}_R^i\gamma^\mu U_R^j)$ $Q_{7ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{U}_R^i\gamma^\mu U_R^j)$

$Q_{4ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{D}_R^i\gamma^\mu D_R^j)$ $Q_{8ij} = (\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{D}_R^i\gamma^\mu D_R^j)$

Ziel: Drücke die Koeffizienten der unchiralen Operatoren in Abhängigkeit der Koeffizienten der chiralen Operatoren aus.

Formalismus

Rechnung: Schritt 1

Einfügen der CKM-Matrix:

$$\begin{aligned}\bar{Q}_L^i \gamma^\mu Q_L^j &= \bar{U}_L^i \gamma^\mu U_L^j + \bar{D}_L^i \gamma^\mu D_L^j \\ &= \bar{U}_L^i \gamma^\mu U_L^j \\ &+ (V_{id}^* \bar{d}_L + V_{is}^* \bar{s}_L + V_{ib}^* \bar{b}_L) \gamma^\mu (V_{jd} d_L + V_{js} s_L + V_{jb} b_L) \\ &= \bar{u}_L \gamma^\mu u_L \delta_{ij} \delta_{iu} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d}_L \gamma^\mu d_L + V_{is}^* V_{js} \bar{s}_L \gamma^\mu s_L\end{aligned}$$

Formalismus

Rechnung: Schritt 1

Einfügen der CKM-Matrix:

$$\begin{aligned}\bar{Q}_L^i \gamma^\mu Q_L^j &= \bar{U}_L^i \gamma^\mu U_L^j + \bar{D}_L^i \gamma^\mu D_L^j \\ &= \bar{U}_L^i \gamma^\mu U_L^j \\ &+ (V_{id}^* \bar{d}_L + V_{is}^* \bar{s}_L + V_{ib}^* \bar{b}_L) \gamma^\mu (V_{jd} d_L + V_{js} s_L + V_{jb} b_L) \\ &= \bar{u}_L \gamma^\mu u_L \delta_{ij} \delta_{iu} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d}_L \gamma^\mu d_L + V_{is}^* V_{js} \bar{s}_L \gamma^\mu s_L\end{aligned}$$

Formalismus

Rechnung: Schritt 2

Umschreiben der chiralen Teilchen-Multipletts mit den links- und rechtshändigen Projektoren:

$$\bar{Q}_L^i \gamma^\mu Q_L^j = \frac{1}{2}(\bar{u}\gamma^\mu u \delta_{iu}\delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d}\gamma^\mu d + V_{is}^* V_{js} \bar{s}\gamma^\mu s) - \frac{1}{2}(\bar{u}\gamma^\mu\gamma_5 u \delta_{iu}\delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d + V_{is}^* V_{js} \bar{s}\gamma^\mu\gamma_5 s)$$

Identifikation der nicht-chiralen Operatoren:

$$Q_{2ij} = \frac{1}{2}(R_{1u}\delta_{iu}\delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} R_{1d} + V_{is}^* V_{js} R_{1s}) - \frac{1}{2}(R_{3u}\delta_{iu}\delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} R_{3d} + V_{is}^* V_{js} R_{3s})$$

Formalismus

Rechnung: Schritt 2

Umschreiben der chiralen Teilchen-Multipletts mit den links- und rechtshändigen Projektoren:

$$\bar{Q}_L^i \gamma^\mu Q_L^j = \frac{1}{2}(\bar{u}\gamma^\mu u \delta_{iu}\delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d}\gamma^\mu d + V_{is}^* V_{js} \bar{s}\gamma^\mu s) - \frac{1}{2}(\bar{u}\gamma^\mu\gamma_5 u \delta_{iu}\delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d + V_{is}^* V_{js} \bar{s}\gamma^\mu\gamma_5 s)$$

Identifikation der nicht-chiralen Operatoren:

$$Q_{2ij} = \frac{1}{2}(R_{1u}\delta_{iu}\delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} R_{1d} + V_{is}^* V_{js} R_{1s}) - \frac{1}{2}(R_{3u}\delta_{iu}\delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} R_{3d} + V_{is}^* V_{js} R_{3s})$$

Formalismus

Rechnung: Schritt 3

Aufstellen des Lagrangian:

$$\sum_{l,q} K_{l,q} R_{l,q} \stackrel{!}{=} \sum_{m,i,j} C_{mij} Q_{mij}$$

Nach dem Umsortieren der rechten Seite nach $R_{l,q}$ liefert ein Koeffizienten-Vergleich die Abhängigkeiten $K_{l,q}(C_{mij})$.

Warum ist die Abhängigkeit interessant?

Formalismus

Rechnung: Schritt 3

Aufstellen des Lagrangian:

$$\sum_{l,q} K_{l,q} R_{l,q} \stackrel{!}{=} \sum_{m,i,j} C_{mij} Q_{mij}$$

Nach dem Umsortieren der rechten Seite nach $R_{l,q}$ liefert ein Koeffizienten-Vergleich die Abhängigkeiten $K_{l,q}(C_{mij})$.

Neue Wechselwirkung

- Neue $U(1)$-Symmetrie mit Eichboson Z' [1]
- Unter der neuen Wechselwirkung geladene Teilchen:
  - Leptonen der zweiten und dritten Generation
  - Neue Quarks
  - Dunkle Materie [2]
- Ein paar Worte zu $L_\mu - L_\tau$.

Neue Wechselwirkung

- Neue $U(1)$-Symmetrie mit Eichboson Z' [1]
- Unter der neuen Wechselwirkung geladene Teilchen:
  - Leptonen der zweiten und dritten Generation
  - Neue Quarks
  - Dunkle Materie [2]
- Ein paar Worte zu $L_\mu - L_\tau$.

Neue Wechselwirkung

Kopplung der neuen Quarks an die SM-Quarks

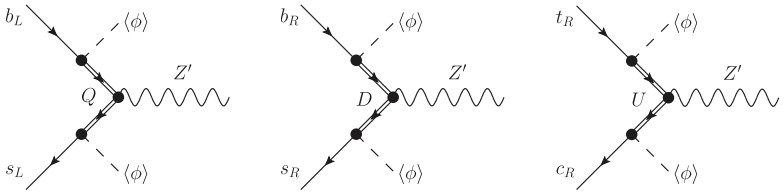


Abbildung: Wechselwirkung von SM-Quarks mit dem Eichboson Z' (aus [1])

Neue Wechselwirkung

Kopplung der neuen Quarks an die SM-Quarks

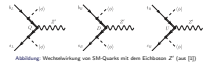


Abbildung: Wechselwirkung von SM-Quarks mit dem Eichboson Z' (aus [1])

Neue Wechselwirkung

Erklärung seltener B-Zerfälle

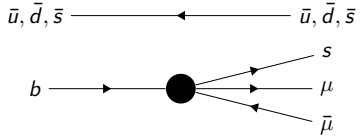


Abbildung: $B \to K\mu\bar{\mu}$ bzw. $B_s \to \Phi\mu\bar{\mu}$

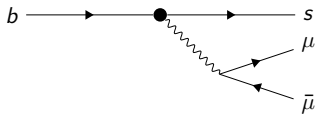


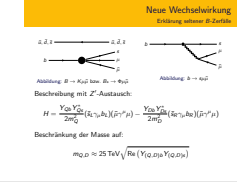
Abbildung: $b \to s\mu\bar{\mu}$

Beschreibung mit Z'-Austausch:

$$H = \frac{Y_{Qb} Y^*_{Qs}}{2m^2_Q} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L)(\bar{\mu}\gamma^\mu \mu) - \frac{Y_{Db} Y^*_{Ds}}{2m^2_D} (\bar{s}_R \gamma_\mu b_R)(\bar{\mu}\gamma^\mu \mu)$$

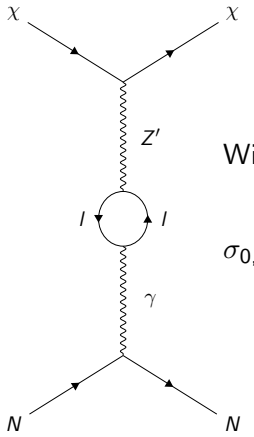
Beschränkung der Masse auf:

$$m_{Q,D} \approx 25\,\text{TeV} \sqrt{\text{Re}\left(Y_{(Q,D)b} Y_{(Q,D)s}\right)}$$



Neue Wechselwirkung

Loop-Diagramm zur Streuung am Atomkern



Wirkungsquerschnitt ohne Impulsübertrag:

$$\sigma_{0,\text{loop}} = \frac{\mu_{A\chi}^2}{A^2\pi}\left(\frac{\alpha_{em}Z}{3\pi}\,\frac{g'^2 q_\chi q_l}{m_{Z'}^2}\log\left(\frac{m_\mu^2}{m_\tau^2}\right)\right)^2$$

Neue Wechselwirkung

Loop-Diagramm zur Streuung am Atomkern

Wirkungsquerschnitt ohne Impulsübertrag:

$\sigma_{0,\text{loop}} = \frac{\mu_{A\chi}^2}{A^2\pi}\left(\frac{\alpha_{em}Z}{3\pi}\,\frac{g'^2 q_\chi q_l}{m_{Z'}^2}\log\left(\frac{m_\mu^2}{m_\tau^2}\right)\right)^2$

Neue Wechselwirkung

Beschränkung der Parameter

Weitere B-Zerfälle:

$$540\,\text{GeV} \lessapprox \frac{m_{Z'}}{g'} \lessapprox 4.9\,\text{TeV}$$

Relic Density:

$$m_{Z'} \approx 2m_\chi$$

Direct Detection ($q_\chi = q_l$):

$$10\,\text{GeV} \lessapprox m_{Z'} \lessapprox 46\,\text{GeV}$$

$$2 \cdot 10^{-3} \lessapprox g' \lessapprox 10^{-2}$$

Neue Wechselwirkung
Beschränkung der Parameter
Weitere B-Zerfälle:
$540\,\text{GeV} \lessapprox \frac{m_{Z'}}{g'} \lessapprox 4.9\,\text{TeV}$
Relic Density:
$m_{Z'} \approx 2m_\chi$
Direct Detection ($q_\chi = q_l$):
$10\,\text{GeV} \lessapprox m_{Z'} \lessapprox 46\,\text{GeV}$
$2 \cdot 10^{-3} \lessapprox g' \lessapprox 10^{-2}$

Direct Detection mit Flavour-Mischung

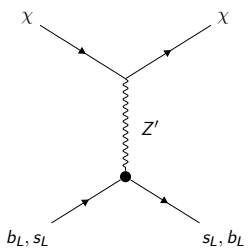


Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

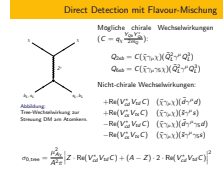
Mögliche chirale Wechselwirkungen ($C = q_\chi \frac{Y_{Qb} Y^*_{Qs}}{2m_Q}$):

$$Q_{2sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}^2_L\gamma^\mu Q^3_L)$$
$$Q_{6sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}^2_L\gamma^\mu Q^3_L)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$\begin{aligned}
&+\mathrm{Re}(V^*_{cd}V_{td}C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu d)\\
&+\mathrm{Re}(V^*_{cs}V_{ts}C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu s)\\
&-\mathrm{Re}(V^*_{cd}V_{td}C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d)\\
&-\mathrm{Re}(V^*_{cs}V_{ts}C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu\gamma_5 s)
\end{aligned}$$

$$\sigma_{0,\mathrm{tree}} = \frac{\mu^2_{A_\chi}}{A^2\pi}\left|Z\cdot\mathrm{Re}(V^*_{cd}V_{td}C) + (A-Z)\cdot 2\cdot\mathrm{Re}(V^*_{cd}V_{td}C)\right|^2$$



Direct Detection mit Flavour-Mischung

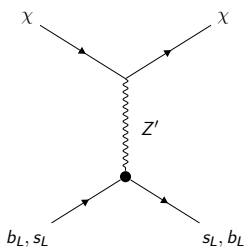


Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

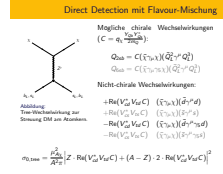
Mögliche chirale Wechselwirkungen ($C = q_\chi \frac{Y_{Qb} Y^*_{Qs}}{2m_Q}$):

$$Q_{2sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$
$$Q_{6sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\mathrm{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu d)$$
$$+\mathrm{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu s)$$
$$-\mathrm{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d)$$
$$-\mathrm{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu\gamma_5 s)$$

$$\sigma_{0,\mathrm{tree}} = \frac{\mu_{A_\chi}^2}{A^2\pi}\left|Z \cdot \mathrm{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) + (A-Z)\cdot 2 \cdot \mathrm{Re}(V_{cd}^* V_{td} C)\right|^2$$



Direct Detection mit Flavour-Mischung

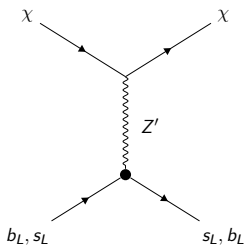


Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

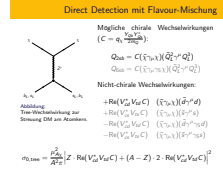
Mögliche chirale Wechselwirkungen ($C = q_\chi \frac{Y_{Qb} Y^*_{Qs}}{2m_Q}$):

$$Q_{2sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$
$$Q_{6sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\mathrm{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu d)$$
$$+\mathrm{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu s)$$
$$-\mathrm{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d)$$
$$-\mathrm{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu\gamma_5 s)$$

$$\sigma_{0,\mathrm{tree}} = \frac{\mu_{A_\chi}^2}{A^2\pi}\left|Z \cdot \mathrm{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) + (A-Z)\cdot 2 \cdot \mathrm{Re}(V_{cd}^* V_{td} C)\right|^2$$



Vergleich

Tree-Wechselwirkung:

$$\sigma_{0,\text{tree}} \propto \left|\text{Re}(V_{cd}^* V_{td}\, C)\right|^2$$

- $\text{Re}\left(\frac{C}{q_\chi}\right) = \text{Re}\left(\frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}\right) \approx 8 \cdot 10^{-10}\,\text{GeV}^{-2}$

Loop-Wechselwirkung:

$$\sigma_{0,\text{loop}} \propto \left(\frac{g'^2 q_\chi q_l}{m_{Z'}^2}\right)^2$$

- B-Zerfälle: Einschränkung von $m_{Z'}/g'$
- Relic Density: $m_{Z'} \approx 2m_\chi$
- Direct Detection mit $q_\chi = q_l$: Einschränkung von $m_{Z'}, m_\chi, g'$

Vergleich

Tree-Wechselwirkung:

$\sigma_{0,\text{tree}} \propto \left|\text{Re}(V_{cd}^* V_{td}\, C)\right|^2$

- $\text{Re}\left(\frac{C}{q_\chi}\right) = \text{Re}\left(\frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}\right) \approx 8 \cdot 10^{-10}\,\text{GeV}^{-2}$

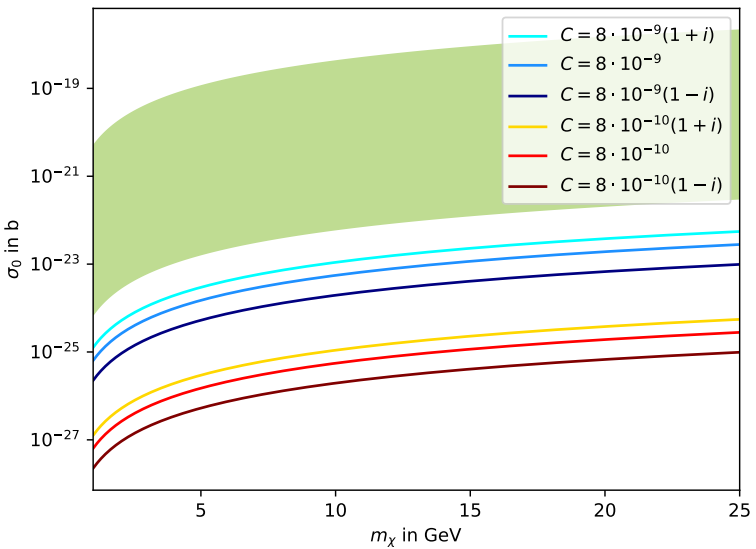
Loop-Wechselwirkung:

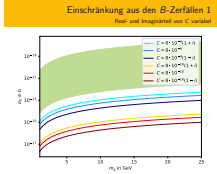
$\sigma_{0,\text{loop}} \propto \left(\frac{g'^2 q_\chi q_l}{m_{Z'}^2}\right)^2$

- B-Zerfälle: Einschränkung von $m_{Z'}/g'$
- Relic Density: $m_{Z'} \approx 2m_\chi$
- Direct Detection mit $q_\chi = q_l$: Einschränkung von $m_{Z'}, m_\chi, g'$

Einschränkung aus den B-Zerfällen 1

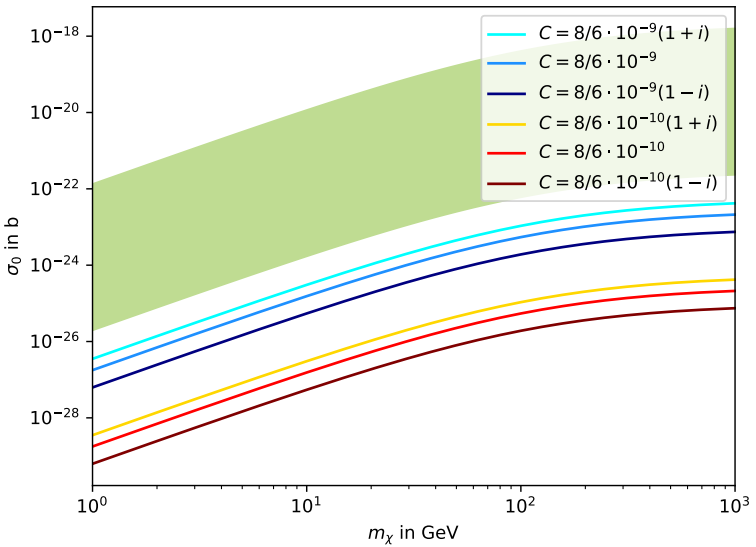
Real- und Imaginärteil von C variabel

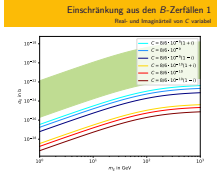




Einschränkung aus den B-Zerfällen 1

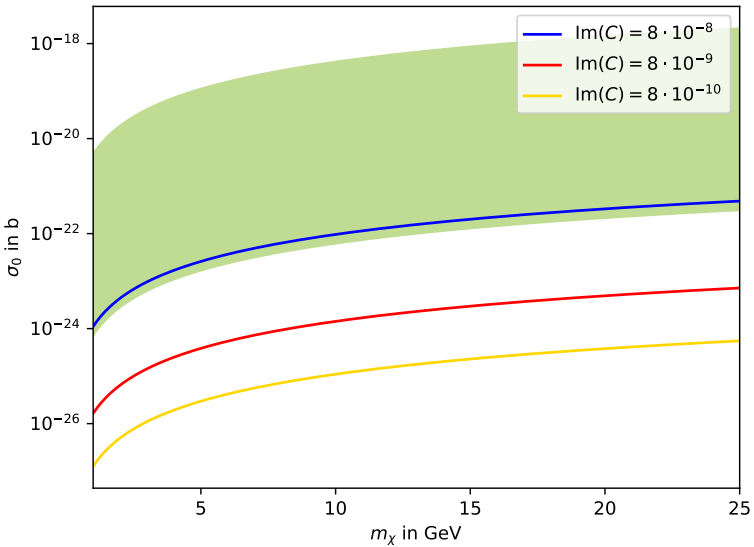
Real- und Imaginärteil von C variabel

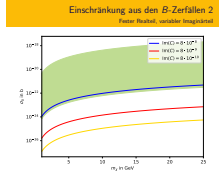




Einschränkung aus den B-Zerfällen 2

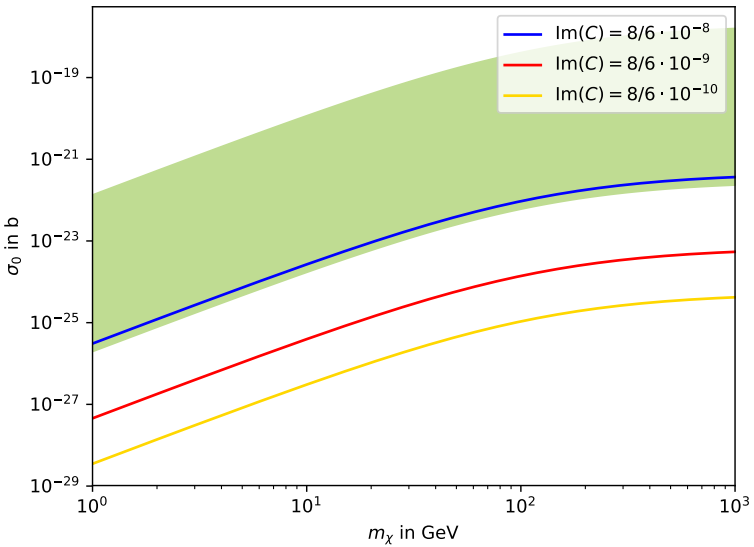
Fester Realteil, variabler Imaginärteil

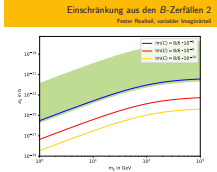




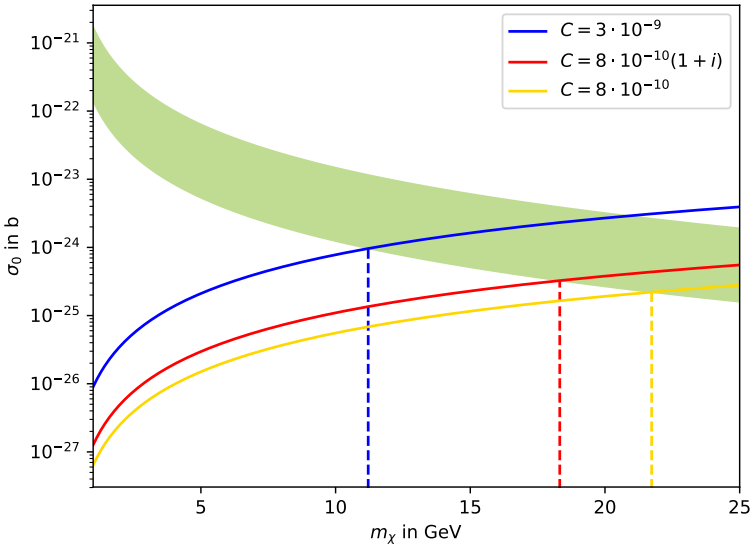
Einschränkung aus den B-Zerfällen 2

Fester Realteil, variabler Imaginärteil

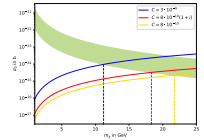




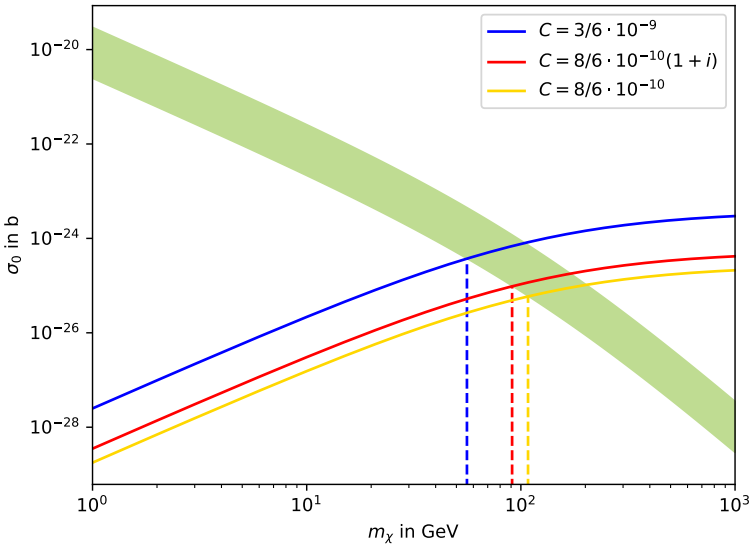
Einschränkung aus der Relic Density



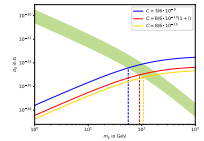
Einschränkung aus der Relic Density



Einschränkung aus der Relic Density



Einschränkung aus der Relic Density



Bibliographie

W. Altmannshofer, S. Gori, M. Pospelov und I. Yavin. *Dressing $L_\mu - L_\tau$ in Color*. 2016. arXiv: 1403.1269v3 [hep-ph].

W. Altmannshofer, S. Gori, S. Profumo und F. S. Queiroz. *Explaining Dark Matter and B Decay Anomalies with an $L_\mu - L_\tau$ Model*. 2017. arXiv: 1609.04026v2 [hep-ph].

Bibliographie

W. Altmannshofer, S. Gori, M. Pospelov und I. Yavin. *Dressing $L_\mu - L_\tau$ in Color*. 2016. arXiv: 1403.1269v3 [hep-ph].

W. Altmannshofer, S. Gori, S. Profumo und F. S. Queiroz. *Explaining Dark Matter and B Decay Anomalies with an $L_\mu - L_\tau$ Model*. 2017. arXiv: 1609.04026v2 [hep-ph].