

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Anja Beck

Technische Universität Dortmund

1. August 2017

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Anja Beck

Technische Universität Dortmund

1. August 2017

Dunkle Materie

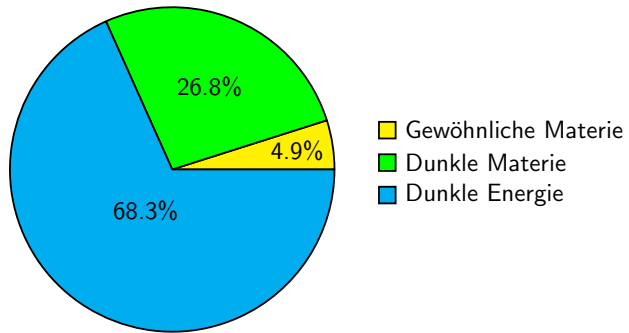


Abbildung: Energieverteilung im Universum (ESA, Planck Teleskop 2013)

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Einführung

Dunkle Materie

Dunkle Materie

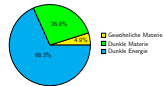


Abbildung: Energieverteilung im Universum (ESA, Planck Teleskop 2013)

Direct Detection

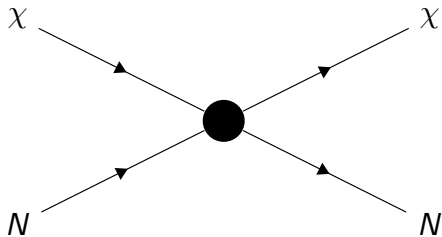


Abbildung: Streuung eines DM-Teilchens am Atomkern.

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Einführung

└ Direct Detection

Direct Detection

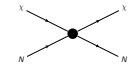


Abbildung: Streuung eines DM-Teilchens am Atomkern.

Inhalt

Einführung

Flavour-Mischung

Verwendeter Formalismus

Neue Wechselwirkung

Ergebnisse

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Einführung

└ Inhalt

Inhalt

Einführung

Flavour-Mischung

Verwendeter Formalismus

Neue Wechselwirkung

Ergebnisse

Ursprung der Flavour-Mischung

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

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

- └ Flavour-Mischung
 - └ Ursprung der Flavour-Mischung

[Ursprung der Flavour-Mischung](#)
Die Massen-Eigenzustände sind nicht gleich den Flavour-Eigenzuständen.

Ursprung der Flavour-Mischung

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

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

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Flavour-Mischung

└ Ursprung der Flavour-Mischung

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

Ursprung der Flavour-Mischung

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:

$$E_L \rightarrow S_e E_L \quad E_R \rightarrow R_e E_R$$

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

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Flavour-Mischung

└ Ursprung der Flavour-Mischung

Ursprung der Flavour-Mischung

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:

$$E_L \rightarrow S_e E_L \quad E_R \rightarrow R_e E_R$$

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

Ursprung der Flavour-Mischung

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:

$$E_L \rightarrow S_e E_L \quad E_R \rightarrow R_e E_R$$

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

- Dadurch verändert sich der Strom

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

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Flavour-Mischung

└ Ursprung der Flavour-Mischung

Ursprung der Flavour-Mischung

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:

$$E_L \rightarrow S_e E_L \quad E_R \rightarrow R_e E_R$$

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

- Dadurch verändert sich der Strom

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

CKM-Matrix

Beträge der Matrix-Elemente:

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

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

- Flavour-Mischung
- CKM-Matrix

CKM-Matrix

Beträge der Matrix-Elemente:

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

Operatoren

Unchirale Operatoren:

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

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

$$R_{3,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}\gamma_5q)$$

$$R_{4,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}\gamma_5q)$$

Chirale Operatoren:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Verwendeter Formalismus

└ Operatoren

Unchirale Operatoren:

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

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

$$R_{3,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}\gamma_5q)$$

$$R_{4,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}\gamma_5q)$$

Chirale Operatoren:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Rechnung: Schritt 1

Einfügen der CKM-Matrix:

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

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Verwendeter Formalismus

└ Rechnung: Schritt 1

Rechnung: Schritt 1

Einfügen der CKM-Matrix:

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

Rechnung: Schritt 2

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

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

Identifikation der nicht-chiralen Operatoren:

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

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Verwendeter Formalismus

└ Rechnung: Schritt 2

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

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

Identifikation der nicht-chiralen Operatoren:

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

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 $K_{l,q}(C_{mij})$.

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Verwendeter Formalismus

└ Rechnung: Schritt 3

Warum ist die Abhängigkeit interessant?

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

- ▶ Zusätzliche $U(1)$ -Symmetrie mit Eichboson Z'
- ▶ Unter der neuen Wechselwirkung geladene Teilchen:
 - ▶ Leptonen der zweiten und dritten Generation
 - ▶ Neue Quarks
 - ▶ Dunkle Materie

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└─ Neue Wechselwirkung

└─ Neue Wechselwirkung

- ▶ Zusätzliche $U(1)$ -Symmetrie mit Eichboson Z'
- ▶ Unter der neuen Wechselwirkung geladene Teilchen:
 - ▶ Leptonen der zweiten und dritten Generation
 - ▶ Neue Quarks
 - ▶ Dunkle Materie

Neue Wechselwirkung

- ▶ Zusätzliche $U(1)$ -Symmetrie mit Eichboson Z'
- ▶ Unter der neuen Wechselwirkung geladene Teilchen:
 - ▶ Leptonen der zweiten und dritten Generation
 - ▶ Neue Quarks
 - ▶ Dunkle Materie

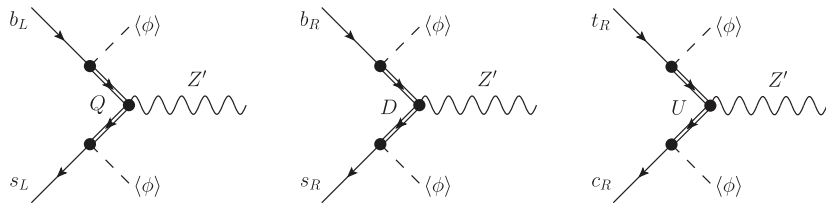


Abbildung: Wechselwirkung von SM-Quarks mit dem Eichboson Z'

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Neue Wechselwirkung

└ Neue Wechselwirkung

Neue Wechselwirkung

- ▶ Zusätzliche $U(1)$ -Symmetrie mit Eichboson Z'
- ▶ Unter der neuen Wechselwirkung geladene Teilchen:
 - ▶ Leptonen der zweiten und dritten Generation
 - ▶ Neue Quarks
 - ▶ Dunkle Materie

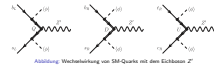


Abbildung: Wechselwirkung von SM-Quarks mit dem Eichboson Z'

Erklärung seltener B -Zerfälle

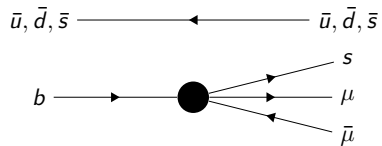


Abbildung: $B \rightarrow K \mu \bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi \mu \bar{\mu}$

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Neue Wechselwirkung

└ Erklärung seltener B -Zerfälle

Alle anderen Parameter =0.



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

Erklärung seltener B -Zerfälle

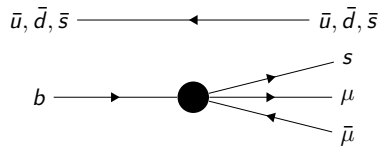


Abbildung: $B \rightarrow K \mu \bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi \mu \bar{\mu}$

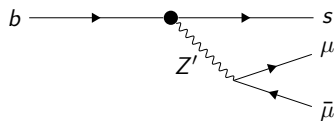


Abbildung: $b \rightarrow s \mu \bar{\mu}$

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Neue Wechselwirkung

└ Erklärung seltener B -Zerfälle

Alle anderen Parameter =0.

Erklärung seltener B -Zerfälle

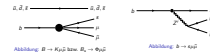


Abbildung: $B \rightarrow K \mu \bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi \mu \bar{\mu}$



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

Erklärung seltener B -Zerfälle

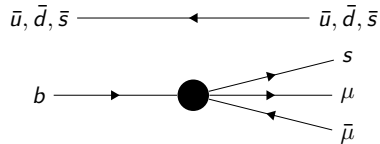


Abbildung: $B \rightarrow K \mu \bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi \mu \bar{\mu}$

Beschreibung mit Z' -Austausch:

$$H = \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu) - \frac{Y_{Db} Y_{Ds}^*}{2m_D^2} (\bar{s}_R \gamma_\mu b_R) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu)$$

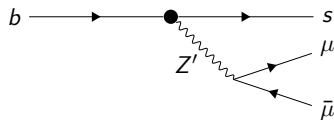


Abbildung: $b \rightarrow s \mu \bar{\mu}$

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Neue Wechselwirkung

└ Erklärung seltener B -Zerfälle

Alle anderen Parameter =0.



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

Beschreibung mit Z' -Austausch:

$$H = \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu) - \frac{Y_{Db} Y_{Ds}^*}{2m_D^2} (\bar{s}_R \gamma_\mu b_R) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu)$$

Erklärung seltener B -Zerfälle

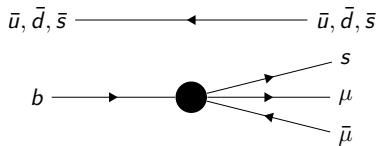


Abbildung: $B \rightarrow K \mu \bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi \mu \bar{\mu}$

Beschreibung mit Z' -Austausch:

$$H = \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu) - \frac{Y_{Db} Y_{Ds}^*}{2m_D^2} (\bar{s}_R \gamma_\mu b_R) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu)$$

Beschränkung der Masse auf:

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

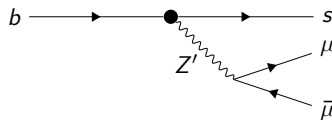


Abbildung: $b \rightarrow s \mu \bar{\mu}$

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Neue Wechselwirkung

└ Erklärung seltener B -Zerfälle

Alle anderen Parameter =0.

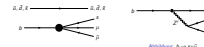


Abbildung: $B \rightarrow K \mu \bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi \mu \bar{\mu}$

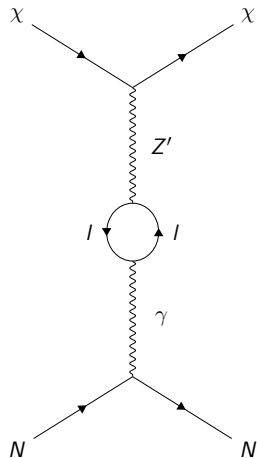
Beschreibung mit Z' -Austausch:

$$H = \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu) - \frac{Y_{Db} Y_{Ds}^*}{2m_D^2} (\bar{s}_R \gamma_\mu b_R) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu)$$

Beschränkung der Masse auf:

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

Loop-Diagramm zur Streuung am Atomkern



Wirkungsquerschnitt ohne Impulsübertrag:

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

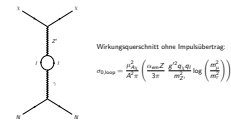
2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Neue Wechselwirkung

└ Loop-Diagramm zur Streuung am Atomkern

Loop-Diagramm zur Streuung am Atomkern



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

Beschränkung der Parameter

B -Zerfälle:

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

Relic Density:

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

Direct Detection ($q_\chi = q_l = 1$):

$$10 \text{ GeV} \lesssim m_{Z'} \lesssim 46 \text{ GeV}$$

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

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Neue Wechselwirkung

└ Beschränkung der Parameter

Beschränkung der Parameter

$$\begin{aligned} B\text{-Zerfälle:} \quad & 540 \text{ GeV} \lesssim \frac{m_{Z'}}{g'} \lesssim 4.9 \text{ TeV} \\ \text{Relic Density:} \quad & m_{Z'} \approx 2m_\chi \\ \text{Direct Detection (} q_\chi = q_l = 1 \text{):} \quad & 10 \text{ GeV} \lesssim m_{Z'} \lesssim 46 \text{ GeV} \\ & 2 \cdot 10^{-3} \lesssim g' \lesssim 10^{-2} \end{aligned}$$

Direct Detection mit Flavour-Mischung

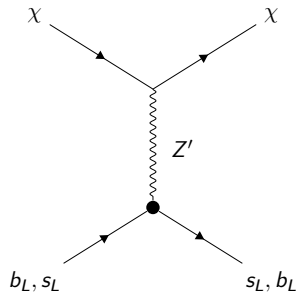


Abbildung: Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Direct Detection mit Flavour-Mischung



Abbildung: Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

Direct Detection mit Flavour-Mischung

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

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

$$Q_{2bs} = (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{Q}_L^3 \gamma^\mu Q_L^2)$$

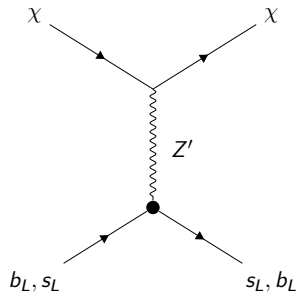


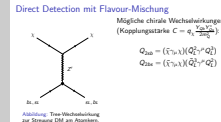
Abbildung: Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Direct Detection mit Flavour-Mischung



Direct Detection mit Flavour-Mischung

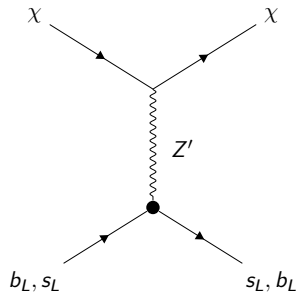


Abbildung: Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

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

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

$$Q_{2bs} = (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{Q}_L^3 \gamma^\mu Q_L^2)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{d} \gamma^\mu d)$$

$$+\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{s} \gamma^\mu s)$$

$$-\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{d} \gamma^\mu \gamma_5 d)$$

$$-\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{s} \gamma^\mu \gamma_5 s)$$

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Direct Detection mit Flavour-Mischung

Direct Detection mit Flavour-Mischung

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

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

$$Q_{2bs} = (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{Q}_L^3 \gamma^\mu Q_L^2)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

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

Abbildung: Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

Direct Detection mit Flavour-Mischung

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

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

$$Q_{2bs} = (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{Q}_L^3 \gamma^\mu Q_L^2)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{d} \gamma^\mu d)$$

$$+\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{s} \gamma^\mu s)$$

$$-\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{d} \gamma^\mu \gamma_5 d)$$

$$-\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{s} \gamma^\mu \gamma_5 s)$$

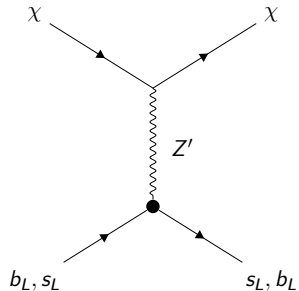


Abbildung: Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Direct Detection mit Flavour-Mischung

Direct Detection mit Flavour-Mischung

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

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

$$Q_{2bs} = (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{Q}_L^3 \gamma^\mu Q_L^2)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

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

Abbildung: Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

Direct Detection mit Flavour-Mischung

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

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

$$Q_{2bs} = (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{Q}_L^3 \gamma^\mu Q_L^2)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{d} \gamma^\mu d)$$

$$+\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{s} \gamma^\mu s)$$

$$-\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{d} \gamma^\mu \gamma_5 d)$$

$$-\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{s} \gamma^\mu \gamma_5 s)$$

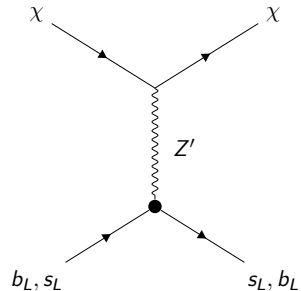


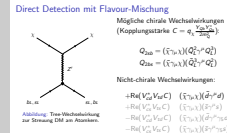
Abbildung: Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Direct Detection mit Flavour-Mischung



Direct Detection mit Flavour-Mischung

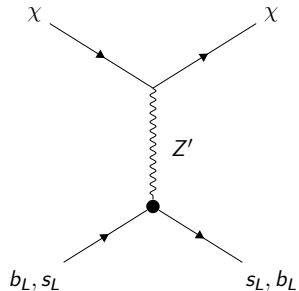


Abbildung: Tree-Wechselwirkung zur Streuung DM am Atomkern.

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

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

$$Q_{2bs} = (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{Q}_L^3 \gamma^\mu Q_L^2)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{d} \gamma^\mu d)$$

$$+\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{s} \gamma^\mu s)$$

$$-\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{d} \gamma^\mu \gamma_5 d)$$

$$-\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi} \gamma_\mu \chi) (\bar{s} \gamma^\mu \gamma_5 s)$$

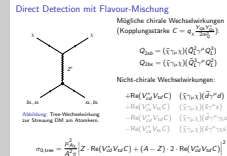
$$\sigma_{0,\text{tree}} = \frac{\mu_{A\chi}^2}{A^2 \pi} \left| Z \cdot \text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) + (A - Z) \cdot 2 \cdot \text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \right|^2$$

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Direct Detection mit Flavour-Mischung



Vergleich

Tree-Wechselwirkung:

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

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

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: Einschränkung von $m_{Z'}, g'$

2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

- └ Ergebnisse
- └ Vergleich

Vergleich

Tree-Wechselwirkung:

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

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

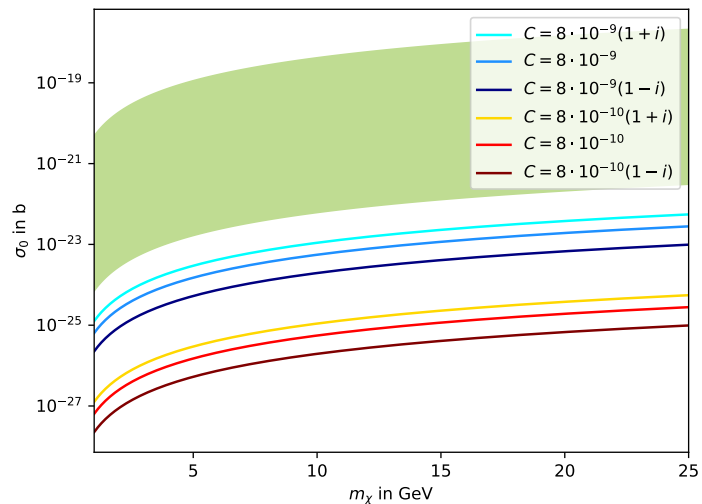
Loop-Wechselwirkung:

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

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

Einschränkung aus den B -Zerfällen 1

$540 \text{ GeV} \lesssim m_{Z'}/g' \lesssim 4.9 \text{ TeV}$, Real- und Imaginärteil von C variabel

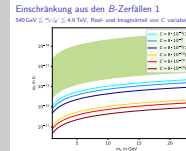


2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

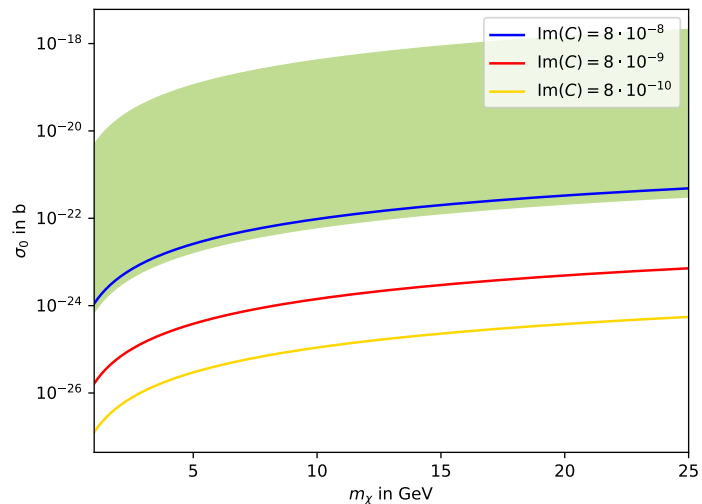
Ergebnisse

Einschränkung aus den B -Zerfällen 1



Einschränkung aus den B -Zerfällen 2

$540 \text{ GeV} \lesssim m_{Z'}/g' \lesssim 4.9 \text{ TeV}$, $\text{Re}(C) = 8 \cdot 10^{-10} \text{ GeV}^{-2}$, $\text{Im}(C)$ variabel

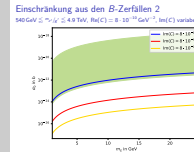


2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

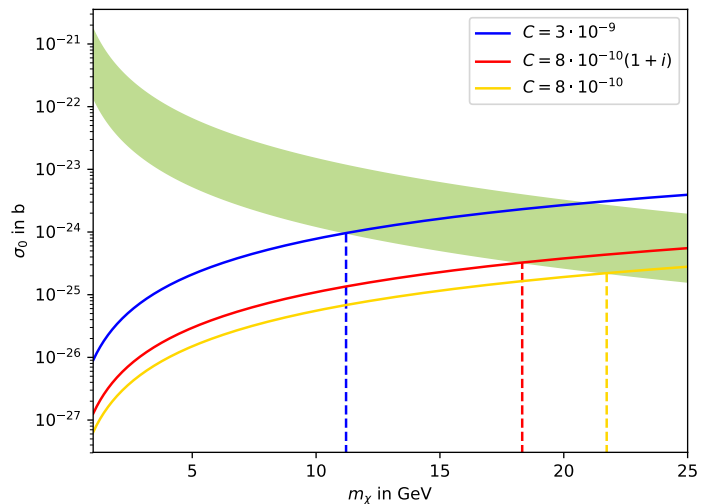
Ergebnisse

Einschränkung aus den B -Zerfällen 2



Einschränkung aus der Relic Density und Direct Detection

$$m_{Z'} \approx 2m_\chi, g' = 2 \cdot 10^{-3}$$



2017-07-31

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Einschränkung aus der Relic Density und Direct Detection

