

## Was ist ein Dunkelmaterie-Halo?

[Skip to content](#)

You said:

# Was ist ein Dunkelmaterie-Halo?

ChatGPT said:

Ein **Dunkelmaterie-Halo** (auch **dunkler Halo** genannt) ist eine große, unsichtbare Hülle aus **Dunkelmaterie**, die **Galaxien und Galaxienhaufen** umgibt und ihren größten Teil der Masse ausmacht.

## Hier ist eine einfache, aber genaue Erklärung 🙌

---

### Grundidee

- Eine Galaxie (wie die Milchstraße) besteht aus Sternen, Gas, Staub und **Dunkelmaterie**.
  - Die sichtbaren Bestandteile machen **nur etwa 10 %** der Gesamtmasse aus.
  - Der Rest steckt in einem **ausgedehnten Halo aus Dunkelmaterie**, der:
    - **kugelförmig** um die Galaxie verteilt ist,
    - **viel weiter reicht** als die sichtbare Scheibe,
    - und **keine elektromagnetische Strahlung** aussendet (daher „dunkel“).
- 

### Warum wissen wir, dass es ihn gibt?

Man kann den Halo **nicht direkt sehen**, aber seine **Gravitationswirkung** verrät ihn:

#### 1. Rotationskurven von Galaxien

- Sterne am Rand rotieren **zu schnell**, um nur durch sichtbare Materie gehalten zu werden.
- → Es muss zusätzliche, unsichtbare Masse geben: den Dunkelmaterie-Halo.

#### 2. Gravitationslinseneffekt

- Licht von weit entfernten Galaxien wird durch die Schwerkraft des Halos **gebogen**.

#### 3. Kosmologische Simulationen und Galaxienbildung

- Ohne Dunkelmaterie-Halos könnten sich Galaxien in der Frühzeit des Universums **nicht so schnell gebildet** haben.
-

## Was ist ein Dunkelmaterie-Halo?

### Eigenschaften eines Dunkelmaterie-Halos

Eigenschaft	Beschreibung
<b>Form</b>	annähernd kugelförmig oder leicht elliptisch
<b>Größe</b>	reicht oft 10× weiter als die sichtbare Galaxie
<b>Masseanteil</b>	80–90 % der Gesamtmasse der Galaxie
<b>Zusammensetzung</b>	unbekannt – wahrscheinlich aus <b>nicht-baryonischer Dunkelmaterie</b> (z. B. WIMPs, Axionen o. Ä.)
<b>Temperatur / Strahlung</b>	keine; Dunkelmaterie wechselwirkt kaum mit Licht

---

### Beispiel: Die Milchstraße

- Sichtbarer Durchmesser: ca. **100.000 Lichtjahre**
  - Dunkelmaterie-Halo: reicht bis zu **1 Million Lichtjahre** weit
  - Masseanteil des Halos: etwa **90 % der Gesamtmasse**
- 

Wenn du möchtest, kann ich dir auch **eine einfache Grafik oder Simulation** zeigen, wie der Halo im Verhältnis zur sichtbaren Galaxie aussieht — möchtest du das?

**You said:**

Ich bitte um Grafik und Simulation

ChatGPT said:

Hier sind ein paar **Grafiken** und Hinweise auf **Simulationen**, die zeigen, wie ein Dunkelmaterie-Halo um eine Galaxie aussehen könnte und wie sich solcher Halo in kosmologischen Simulationen entwickelt.

---



### Die Grafiken (Illustrationen)

- Oben links: ein schematischer Aufbau der Milchstraßen-Galaxie mit innerem und äußerem Halo. (Quelle: AAS Nova)
- Oben rechts: Darstellung eines simulierten Halo mit Substrukturen („Subhalos“) – also kleinen Klumpen von Dunkelmaterie innerhalb des größeren Halos.
- Unten links: eine Illustration, wie das Halo die Galaxienscheibe umgibt.
- Unten rechts: schematisch: der sichtbare Teil der Galaxie eingebettet im unsichtbaren Halo.

Diese Illustrationen vermitteln ein intuitives Bild: die sichtbare Galaxie (Sterne, Gas, Milchstraßenscheibe) ist nur der „Spitzenanteil“, während der Halo sie größtenteils umgibt und weit über sie hinausreicht.



### Simulationen & dynamische Darstellungen

Eine besonders eindrucksvolle Simulation ist dieses Video:

#### **How Dark Matter Evolves – Galactic Halo Simulation High-Res 8K**

In dieser Darstellung sieht man, wie ein Dunkelmaterie-Halo über kosmologische Zeit skaliert aus kleinen Dichten zu einer dichten, klumpigen Struktur heranwächst.

[YouTube](#)

Diese Simulation gehört zum **Aquarius-Projekt**, das einen Milchstraßen-ähnlichen Halo sehr hoch aufgelöst simuliert. [arXiv+2NASA Science+2](#)

Aus solchen Simulationen stammen auch Darstellungen, in denen der Halo nicht perfekt symmetrisch ist, sondern asymmetrisch verzerrt durch Einflüsse benachbarter Galaxien (z. B. die Große Magellansche Wolke) [AAS Nova](#).

---



### Technische Hinweise & wichtige Aspekte aus Simulationen

- In hochwertigen N-Körper-Simulationen (bei denen man viele Massenpunkte zur Modellierung von Dunkelmaterie benutzt) sieht man, dass der Halo **Substrukturen** enthält: kleinere dunkle Klumpen (Subhalos), die selbst Teil des Gesamt-Halos sind. [MPA Garching+2arXiv+2](#)
  - Die Dichteverteilung des Halos folgt typischerweise einem **dichteren Kern** und abfallender Dichte nach außen. Häufig verwendet man Modelle wie das **NFW-Profil** oder das **Einasto-Profil** als funktionale Ansätze. [Wikipedia+5NASA/IPAC Extragalactic Database+5Adsabs+5](#)
  - Die Form des Halos ist oft **nicht perfekt kugelförmig**, sondern leicht ellipsoid oder triaxial (d. h. drei ungleiche Achsen). [arXiv+3NASA/IPAC Extragalactic Database+3arXiv+3](#)
  - Auch Umwelt-Einflüsse zählen: Große Nachbargalaxien können den Halo verzerren oder „Wellen“ erzeugen (etwa, wie eine große Galaxie durch das Halo der Milchstraße zieht und eine Art „Hinterlassenschaft“ hinterlässt). [AAS Nova](#)
- 

Wenn du willst, kann ich dir eine **interaktive Simulation**, z. B. eine Web-App, nennen oder dich anleiten, wie du selbst mit Software (z. B. mit Python + Astronomie-Bibliotheken) eine einfache Simulation eines Dunkelmaterie-Halos erzeugst. Möchtest du das?

## Was ist ein Dunkelmaterie-Halo?

**You said:**

**Wie könnte es bei der Simulation der Kinematik von Galaxien helfen, wenn man eine **\*\*Reverse-Rekonstruktions-Methode\*\*** hätte,**

welche die 18 fundamentalen Konstanten des Standardmodells aus nur 5 primordialen Parametern mit 1-3% Genauigkeit ableitet und das Teilchen für die Dunkle Materie kennen würde?

ChatGPT said: **Sehr spannende Frage – das ist tatsächlich eine der tiefsten**

**Verknüpfungen zwischen Teilchenphysik und Kosmologie,**

und eine solche *Reverse-Rekonstruktions-Methode* wäre ein gewaltiger Durchbruch.

Ich erkläre das Schritt für Schritt 🙌

---



### 1. Ausgangslage: Das Problem heute

In der heutigen Astrophysik und Kosmologie simulieren wir Galaxien und ihre Dynamik (Kinematik) auf Basis von:

- beobachteten Anfangsbedingungen (z. B. Dichteschwankungen im frühen Universum),
- empirischen oder modellierten **kosmologischen Parametern** ( $H_0$ ,  $\Omega_m$ ,  $\Omega_\Lambda$ ,  $\sigma_8$  usw.),
- und **angenommenen Eigenschaften** der Dunklen Materie (z. B. "kalt", "warm", „collisionless“).



Das Problem:

Wir **kennen die Mikrophysik der Dunklen Materie nicht** und müssen sie durch einfache Annahmen (z. B. WIMP mit Masse  $m_\chi$ , keine Selbstwechselwirkung) ersetzen.

Dadurch bleiben Simulationen **degeneriert**: verschiedene Teilchenmodelle können ähnliche makroskopische Effekte erzeugen.

---



### 2. Was deine „Reverse-Rekonstruktions-Methode“ leisten würde

Wenn man eine Methode hätte, die:

- **aus 5 primordialen Parametern** (etwa Planck-Masse, Inflationsparameter, Kopplungsstärken der frühen Felder etc.)
- die **18 fundamentalen Konstanten des Standardmodells** (inkl. Teilchenmassen, Kopplungen, CP-Phasen etc.) mit 1–3 % Genauigkeit **rückwärts rekonstruieren** kann,

## Was ist ein Dunkelmaterie-Halo?

- und zugleich das **Teilchen der Dunklen Materie eindeutig identifiziert** (z. B. seine Masse, Spin, Kopplung, Stabilitätsmechanismus),

dann würde man den **mikrophysikalischen Ursprung der makroskopischen Dynamik** kennen.

Das bedeutet:

Man könnte **von der fundamentalen Physik bis zur Galaxienkinematik durchsimulieren**, ohne empirische Freiheiten.

---



## 3. Direkte Auswirkungen auf Galaxiensimulationen

### a) Initial Conditions & Power Spectrum

- Aus den 5 primordialen Parametern folgt das genaue **materielle Fluktuationsspektrum** (wie stark Dichteschwankungen in verschiedenen Skalen anfänglich waren).
- Damit könnte man **die korrekte Anfangsverteilung der Dunklen Materie** im frühen Universum präzise bestimmen.
- Keine empirische Anpassung an CMB-Daten nötig – sie wären *abgeleitet*, nicht *eingesetzt*.

### b) Teilchenphysikalische Natur der Dunklen Materie

- Wenn man Masse, Spin und Kopplungen kennt, kann man exakt berechnen:
  - thermische Geschichte (Freeze-out / Freeze-in),
  - Selbstwechselwirkungen,
  - Streuquerschnitte mit baryonischer Materie.
- Das beeinflusst:
  - die **Feinstruktur der Halos** (Subhalo-Verteilung),
  - die **Kerne vs. Cusps** in Galaxienzentren,
  - und sogar **Balkenbildung und Scheibendynamik**.

### c) Dissipative oder nicht-dissipative DM

- Wenn die DM z. B. schwach dissipativ ist (etwa durch ein „dunkles Photon“), könnte sie Haloformen verändern.
  - Die Methode würde zeigen, ob man eine **kollisionsfreie** oder **leicht wechselwirkende** Dunkelmaterie erwartet.
  - Das ist entscheidend für realistische Rotationskurven und Stabilitätssimulationen.
-



## 4. Praktischer Nutzen für die Simulation der Kinematik

Mit einer solchen Methode könnte man:

1. **Galaxienrotationen, Halo-Profile und Satellitenverteilungen** *ohne empirische Fitparameter* vorhersagen.
2. **Numerische Simulationen (z. B. N-body oder Hydrodynamik)** mit exakt berechneten mikrophysikalischen Inputs initialisieren.
3. **Vergleiche zwischen Theorie und Beobachtung** auf völlig neuer Ebene anstellen – etwa prüfen, ob beobachtete Geschwindigkeitsverteilungen mit der „abgeleiteten“ Dunkelmaterie konsistent sind.

Das wäre der Übergang von:

„Wir passen Modelle an Beobachtungen an“  
→ zu  
„Wir berechnen Beobachtungen aus der fundamentalen Physik.“



## 5. Philosophische Konsequenz

Man würde eine **geschlossene Kausalkette** von der Planck-Ära bis zur heutigen Galaxienkinematik besitzen:

Primordiale Parameter → Standardmodellkonstanten → Teilchenphysik der Dunklen Materie → Strukturbildung → Galaxienbewegung

Das hieße:

Man könnte das Verhalten einer Spiralgalaxie erklären **ohne** empirische Freiheitsgrade – rein aus der Frühzeit des Universums heraus.

Das wäre **die ultimative Vereinheitlichung von Mikrophysik und Astrophysik.**



## Zusammenfassung

Ebene	Status heute	Mit Reverse-Rekonstruktions-Methode
Fundamentale Konstanten	empirisch gemessen	aus 5 Parametern abgeleitet
Dunkle Materie	unbekannt	bekanntes Teilchen mit definierter Mikrophysik
Simulation	parametrisch (fit-based)	ab-initio (ableitungsbasiert)
Genauigkeit	begrenzt durch Unsicherheiten	1–3 % auf allen Skalen
Aussagekraft	phänomenologisch	kausal-deterministisch

## Was ist ein Dunkelmaterie-Halo?

---

Wenn du willst, kann ich dir **skizzieren, wie man so eine Rückwärts-Rekonstruktion theoretisch aufbauen könnte** (z. B. welche 5 primordialen Parameter nötig wären, welche mathematische Form die Rückwärtsabbildung haben müsste und wie man sie mit Simulationen koppelt).  
Möchtest du, dass ich das tue?

## You said: Ich habe diese Methode bereits mit folgendem Teilchen:

**\*\*Kernvorhersage:\*\*** Eine skalare Resonanz bei  $1000,0 \pm 12,5$  GeV ( $\Gamma = 25,3$  MeV) mit dominanten Top-Quark-Zerfällen (85%). **\*\*Experimenteller Status:\*\***  $2-3\sigma$  Signifikanz in aktuellen LHC- Daten,  $>5\sigma$  Entdeckungspotential am HL-LHC.

## ChatGPT said:

Das ist spannend — danke für die konkreten Parameter. Ich fasse zuerst kurz zusammen, berechne ein paar unmittelbar relevante Größen aus deinen Angaben und zeige dann präzise, welche Konsequenzen so ein Signal für Galaxysimulationen / Kinematik hätte und wie du es praktisch in Simulationen einbauen kannst.

---

### 1) Kurz-Zusammenfassung deiner Inputs

- Resonanz: **Skalares Teilchen** mit  $m_\phi = 1000.0 \pm 12.5$  GeV
- Totale Breite:  $\Gamma_{\text{tot}} = 25.3$  MeV (sehr schmal)
- Dominante Zerfälle: **85 %** in  $t\bar{t}$  (top-Quarks)
- Experimenteller Status:  **$2-3\sigma$**  in aktuellen LHC-Daten;  $>5\sigma$  möglich beim HL-LHC.

Wichtig: Ein Teilchen, das zu  $t\bar{t}$  zerfällt, ist **unstable** — damit ist es nicht selbst ein Dark-Matter-Kandidat (außer in exotischen Szenarien mit nahezu stabiler Long-lived-Komponente). Viel wahrscheinlicher: es ist ein **Mediator** zwischen Standardmodell-Feld(en) und einer möglichen Dunkelmaterie-Sphäre, oder eine neue (kurzlebige) Skalar-Resonanz.

---

### 2) Direkte, berechenbare Zahl: Effektive Kopplung an Tops

Aus  $\Gamma_{t\bar{t}} \approx 0.85 \Gamma_{\text{tot}}$  und der Standardformel für einen skalaren Zweifermion-Partialwidth (für eine einfache Yukawa-Kopplung  $y\phi\bar{t}t$ )

$$\Gamma_{t\bar{t}} \approx 8\pi y_\phi^2 m_\phi \beta_{3,\beta=1-m_\phi^2/4m_t^2}$$

## Was ist ein Dunkelmaterie-Halo?

ergibt sich (mit  $m_t \approx 172.5$  GeV,  $m_\phi = 1000$  GeV,  $\Gamma_{t\bar{t}} \approx 0.0215$  GeV):

### Effektiver Yukawa-Kopplungsparameter

$y_\phi \approx 1.48 \times 10^{-2}$  ( $\approx 0.0148$ ).

Das ist **sehr klein** im Vergleich zur SM-Top-Yukawa ( $y_{tSM} \sim 1$ ). Das erklärt, warum das Signal bisher nur schwach sichtbar ist (kleine Produktionsrate / schmale Breite).

---

## 3) Was folgt daraus für Dark-Matter-Modelle & Strukturentstehung?

Ich unterscheide zwei physikalisch sehr verschiedene Rollen, die so ein Skalar haben kann — und die Konsequenzen für Galaxienkinematik sind sehr unterschiedlich:

### A) Das Skalar ist der Dark-Matter-Teilchen (*implausibel*)

- **Problem:** Wenn es zu  $t\bar{t}$  mit 85% zerfällt, ist es nicht stabil auf kosmologischen Zeiten → **kann nicht** der dominierende DM-Baustein sein (außer extrem exotische Modelle mit fast-stabilen Zuständen, die hier nicht offensichtlich sind).
- Folge: kein DM-Teilchen → keine direkten Auswirkungen auf Kinematik.

### B) Das Skalar ist ein Mediator zwischen SM und (möglicher) Dunkelmaterie

Das ist realistischer. Dann haben wir mindestens zwei relevante Massen / Skalen:

- $m_\phi \approx 1$  TeV (schwer),
- $m_\chi$  = Masse des tatsächlichen DM-Teilchens (unbekannt in deinem Postulat).

Wichtige Folgen:

#### 1. Kurzreichweitige Wechselwirkung:

Ein *schwerer* Mediator ( $\sim 1$  TeV) erzeugt **kurzreichweitige (Kontakt-) Wechselwirkung** zwischen DM-Teilchen. Solche Wechselwirkungen führen typischerweise zu sehr kleinen Selbstwechselwirkungs-Querschnitten pro Masse  $\sigma/m$  bei galaktischen Geschwindigkeiten, **so dass die DM-Hülle CDM-like bleibt** (d.h. collisionless cold dark matter).

→ **Keine großen Änderungen** an Standard-CDM-Vorhersagen für Rotationskurven, Subhalo-Abundanz, free-streaming auf kpc-Skalen, außer wenn zusätzliche *leichte* Mediatoren existieren.

#### 2. Selbstwechselwirkungen (SIDM) nur bei leichtem Mediator:

Wenn zusätzlich zu deinem 1-TeV-Skalar ein **leichter** (MeV–GeV oder leichter) Mediator existiert, kann man velocity-dependent SIDM-Kopplungen erhalten, die Kernbildung in Zwerggalaxien fördern ( $\sigma/m \sim 0.1\text{--}1$  cm<sup>2</sup>/g). **Ein 1-TeV Mediator allein erzeugt das in der Regel nicht.**

#### 3. Free-streaming / Warmth:

Ein DM-Teilchen mit thermischer Masse  $\sim$  TeV ist **kalt**: die Free-streaming-Skala liegt bei



## Was ist ein Dunkelmaterie-Halo?

$\ll$  kpc (typisch sub-pc bis pc Bereiche). Somit ändert sich die lineare Power-Spectrum-Suppression nicht relevant für galaktische Skalen  $\rightarrow$  CDM-Vorhersagen unberührt.

### 4. Annihilation / Indirekte Effekte (Annihilation in Halos):

Wenn DM annihiliert über  $\chi\chi \rightarrow \phi \rightarrow t\bar{t}$ , könnten indirekte Signale ( $\gamma$ ,  $p^\pm$ ,  $\nu$ ) auftreten. Für schwere DM ( $\geq$  TeV) sind kosmologische / CMB-Limits weniger streng, aber lokale Indirekt-Suchen sind sensibel. Für die Kinematik sind annihilation-heating-Effekte in Halos normalerweise vernachlässigbar (zu klein, um Rotationskurven zu verändern), außer bei extrem hohen Kreuzschnitten.

### 5. Baryonische Kopplung durch Top-Kanal:

Da der Mediator schwach an Tops gekoppelt ist ( $y_\phi \sim 1.5 \times 10^{-2}$ ), sind direkte Kopplungen an leichte Quarks und damit direkte Detektionsraten **häufig stark unterdrückt** (entweder loop-unterdrückt oder durch kleine Mixing-Winkel). Heißt: die übliche baryonische Rückkopplung auf Halo-Skalen bleibt primär baryonisch (SNe, AGN) und wird nicht stark von diesem Mediator gesteuert.

---

## 4) Konkrete Abschätzung: Selbst-Wechselwirkungs-Skala $\sigma/m$ (wie groß müsste sie sein, damit Kinematik sichtbar ändert?)

- Referenzbereich, bei dem SIDM astrophysikalische Kerne erzeugt:  $\sigma/m \sim 0.1 - 1 \text{ cm}^2/\text{g}$ .
- Für ein DM-Teilchen der Masse  $m_\chi$  ist die zugehörige partikuläre Querschnittsgröße  $\sigma$  bei  $\sigma/m = 1 \text{ cm}^2/\text{g}$  numerisch:

$$\sigma \simeq (\sigma/m) \times m_\chi (\text{in cgs}),$$

$$\text{z. B. für } m_\chi = 1000 \text{ GeV gilt } (1 \text{ GeV} \approx 1.7827 \times 10^{-24} \text{ g})$$

$$m_\chi \approx 1.78 \times 10^{-21} \text{ g} \Rightarrow \sigma \approx 1.78 \times 10^{-21} \text{ cm}^2.$$

Das ist extrem klein als partikulärer Querschnitt — aber realisierbar, wenn ein **leichter** Vermittler vorhanden ist. Ein schwerer 1-TeV Mediator führt typischerweise zu noch viel kleineren  $\sigma$ .

**Schlussfolgerung:** Mit nur deinem 1-TeV Skalar als Mediation erwarten wir  $\sigma/m \ll 0.1 \text{ cm}^2/\text{g} \rightarrow$  also praktisch *kein* sichtbarer Einfluss auf Galaxien-Kinematik gegenüber CDM.

---

## 5) Praktische Umsetzung in Simulations-Pipelines (Was tun, wenn dein Modell stimmt?)

Wenn du willst, dass deine Reverse-Rekonstruktions-Methode *konkret* in Kinematik-Simulationen wirksam getestet wird, hier ein praktischer **Arbeitsplan** (Schritt-für-Schritt):

### 1. Bestimme die Rolle des Skalars

## Was ist ein Dunkelmaterie-Halo?

- Ist  $\phi$  Mediator oder DM selbst? (Deine Angaben deuten auf Mediator.)
- Falls Mediator: definiere  $m_\chi$ , Kopplungen  $g_\chi$  (DM-Seite) und  $y_\phi$  (SM-Seite  $\approx 0.0148$ ).

### 2. Berechne effektive Größen

- Annihilationsquerschnitt  $\langle\sigma v\rangle$  für  $\chi\chi \rightarrow t\bar{t}$  (s-channel via  $\phi$ ).
- Selbst-Streuteilchen-Querschnitt  $\sigma_{\chi\chi}(v)$  (Born-Regime:  $\sim g_\chi^4 m_\chi^2 / (4\pi m_\phi^4)$ ); für starke Effekte braucht leichten Mediator).
- Free-streaming Länge / Transfer-Funktion (falls DM warm).

Ich kann dir konkrete Formeln / Scripts liefern — z. B. ein Python-Snippet, das  $\sigma/m$  als Funktion von  $m_\chi, m_\phi, g_\chi$  berechnet.

### 3. Lineare Power-Spectrum / Transferfunktion

- Falls DM kalt (TeV), benutze Standard-CDM Transferfunktion (keine Dämpfung auf kpc-Skalen).
- Falls nicht, erzeuge modifizierte Transferfunktion (z.B. mit CLASS/ CAMB oder approximativ via analytic cut-off).

### 4. N-body / Hydro Simulation

- Für SIDM: implementiere ein **collisional scattering module** (Monte-Carlo scattering) mit velocity-dependent  $\sigma(v)$ .
- Keine SIDM-Effekte erwartet bei rein schwerem Mediator  $\rightarrow$  Standard collisionless runs ausreichend.
- Star-formation / feedback Modelle unangetastet lassen; vergleiche Rotation Curves/Velocity Dispersion gegen Beobachtungen.

### 5. Auswertung

- Vergleiche Rotation-Kurven, Kern-Dichteprofile, Subhalo-Massenfunktion, Satelliten-Kinematik zwischen „Standard-CDM“ und deinem Modell.
- Prüfe ob Unterschiede innerhalb 1–3% (dein gewünschter methodischer Fehlerbereich) messbar sind.

---

## 6) Weitere signifikante Schnittstellen / Constraints, die du einbauen musst

- **Collider  $\rightarrow$  Kosmo**: dein  $y_\phi$  legt Produktionsrate am LHC fest; falls  $\phi$  gekoppelt zu DM, die Kopplung  $g_\chi$  kann aus Verhältnis von sichtbarer Breite zu unsichtbaren Breite abgeschätzt werden (falls es unsichtbare Kanäle gäbe).

## Was ist ein Dunkelmaterie-Halo?

- **Indirekte Detektion:**  $\chi\chi \rightarrow t\bar{t}$  produziert  $\gamma$ -Spektren, Antiprotonen; prüfen gegen AMS-02, Fermi, H.E.S.S.
  - **CMB Bounds:** Annihilation während Rekombination (bei starken s-wave-Kreuzschnitten) begrenzt  $\langle\sigma v\rangle$ . Für TeV-Masse typischerweise weniger streng, aber prüfen.
  - **Direkte Detektion:** Top-gekoppelte Mediatoren erzeugen oft sehr kleine SI-Kopplungen an Nukleonen (loop-suppressed)  $\rightarrow$  schwache Limits.
- 

## 7) Fazit — Kurz und knapp

- **Wenn** dein skalares Signal echt ist und es *nur* der 1-TeV Skalar ist (ohne leichten Zusatzmediator), dann **ändert sich an der Galaxien-Kinematik praktisch nichts**: das Modell verhält sich wie CDM auf galaktischen Skalen.
  - **Wenn** aber derselbe Skalar mit einer (zusätzlichen) **leichten** Vermittler-Komponente gekoppelt ist oder DM selbst leichte Komponenten hat, dann kann die Kinematik merklich beeinflusst werden (Kernbildung, veränderte Rotationskurven).
  - Die kleine gefundene Yukawa-Kopplung  $y\phi\approx 0.015$  an Top erklärt den schmalen Resonanzfall und ist konsistent mit nur moderaten kosmologischen Effekten.
- 

## 8) Konkrete Hilfsangebote (ich kann sofort liefern)

- Ein **Python-Skript**, das für gegebene  $(m_\chi, m_\phi, g_\chi, y_\phi)$  rechnet:
  - $\langle\sigma v\rangle$  für  $\chi\chi \rightarrow t\bar{t}$ ,
  - $\sigma_{\chi\chi}(v)$  (Born-Approximation) und  $\sigma/m$  in  $\text{cm}^2/\text{g}$ ,
  - einfache Transferfunktion Abschätzung (falls warm).
- Ein **Mini-Notebook** mit Beispielen: typische Werte zeigen, ob  $\sigma/m$  in SIDM-relevanten Bereich fällt.
- Ein **Workflow**, wie du die Microphysics in ein N-body-SIDM-Patch (z. B. Gadget/AREPO plugin) einbindest.

Sag mir kurz, welches Ergebnis du als Nächstes willst (z. B. „berechne  $\sigma/m$  für  $m_\chi=100, 1000, 104$  GeV bei  $g_\chi=0.1, 0.5, 1.0$ “), dann generiere ich das Python-Notebook und die Plots sofort.