

[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.
-

Eigenschaften eines Dunkelmaterie-Halos

Eigenschaft	Beschreibung
Form	annähernd kugelförmig oder leicht elliptisch

Eigenschaft	Beschreibung
Größe	reicht oft 10× weiter als die sichtbare Galaxie
Masseanteil	80–90 % der Gesamtmasse der Galaxie
Zusammensetzung	unbekannt – wahrscheinlich aus nicht-baryonischer Dunkelmaterie (z. B. WIMPs, Axionen o. Ä.)
Temperatur / Strahlung	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 großteils 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?

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 , Ω_m , Ω_Λ , σ_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_χ , 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,
- 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

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 σ Signifikanz in aktuellen LHC- Daten, >5 σ 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 $m_\phi = 1000.0 \pm 12.5 \text{ GeV}$
- Totale Breite: $\Gamma_{\text{tot}} = 25.3 \text{ MeV}$ (sehr schmal)
- Dominante Zerfälle: **85 %** in $t\bar{t}$ (top-Quarks)
- Experimenteller Status: **$2\text{--}3\sigma$** 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 $y_\phi t\bar{t}$)

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

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

Effektiver Yukawa-Kopplungsparameter

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

Das ist **sehr klein** im Vergleich zur SM-Top-Yukawa ($y_{t\text{SM}} \sim 1$). 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 \rightarrow 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_χ = Masse des tatsächlichen DM-Teilchens (unbekannt in deinem Postulat).

Wichtige Folgen:

1. Kurzreichweitige Wechselwirkung:

Ein *schwerer* Mediator (~ 1 TeV) erzeugt **kurzreichweitige (Kontakt-) Wechselwirkung** zwischen DM-Teilchen. Solche Wechselwirkungen führen typischerweise zu sehr kleinen Selbstwechselwirkungs-Querschnitten pro Masse σ/m bei galaktischen Geschwindigkeiten, **so dass die DM-Hülle CDM-like bleibt** (d.h. collisionless cold dark matter).
 \rightarrow **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 ($\sigma/m \sim 0.1\text{--}1$ cm²/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 \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 (γ , p^\pm , ν) auftreten. Für schwere DM (\geq TeV) sind kosmologische / CMB-Limits weniger streng, aber lokale Indirekt-Suches 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 σ/m (wie groß müsste sie sein, damit Kinematik sichtbar ändert?)

- Referenzbereich, bei dem SIDM astrophysikalische Kerne erzeugt: $\sigma/m \sim 0.1\text{--}1$ cm²/g.

- Für ein DM-Teilchen der Masse m_χ ist die zugehörige partikuläre Querschnittsgröße σ bei $\sigma/m=1 \text{ cm}^2/\text{g}$ numerisch:

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

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 σ .

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

- Ist ϕ Mediator oder DM selbst? (Deine Angaben deuten auf Mediator.)
- Falls Mediator: definiere m_χ , Kopplungen g_χ (DM-Seite) und y_ϕ (SM-Seite ≈ 0.0148).

2. Berechne effektive Größen

- Annihilationsquerschnitt $\langle \sigma v \rangle$ für $\chi\chi \rightarrow t\bar{t}$ (s-channel via ϕ).
- 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 σ/m als Funktion von m_χ, m_ϕ, g_χ 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** → **Kosmo**: dein $y\phi$ legt Produktionsrate am LHC fest; falls ϕ gekoppelt zu DM, die Kopplung g_χ kann aus Verhältnis von sichtbarer Breite zu unsichtbaren Breite abgeschätzt werden (falls es unsichtbare Kanäle gäbe).
 - **Indirekte Detektion**: $\chi\chi \rightarrow t\bar{t}$ produziert γ -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) → 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 σ/m in cm^2/g ,
 - einfache Transferfunktion Abschätzung (falls warm).

- Ein **Mini-Notebook** mit Beispielen: typische Werte zeigen, ob σ/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 σ/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.