

Dunkle Materie

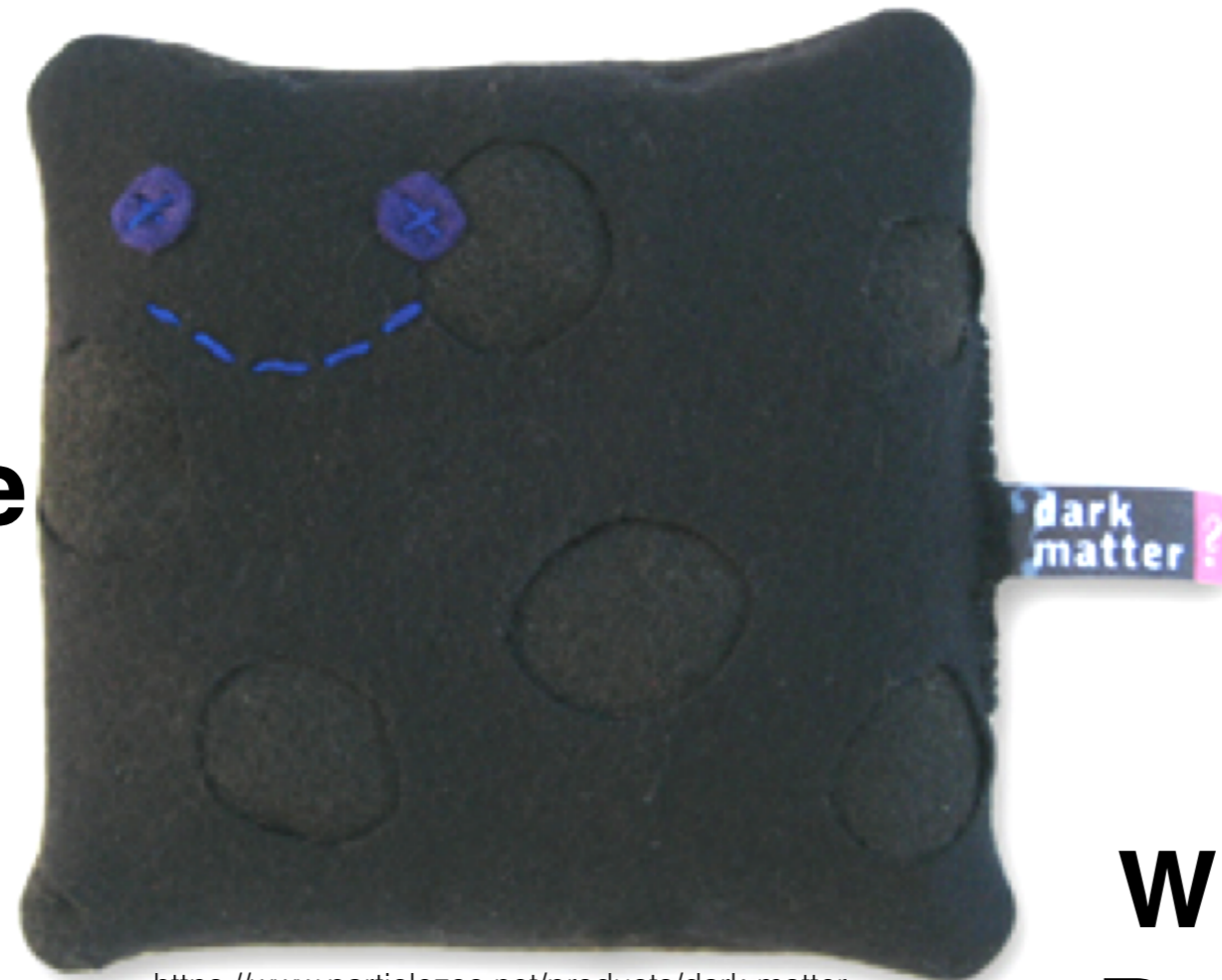
Johanna Gramling
UC Irvine

jgramlin@cern.ch

Was ist Dunkle Materie?

**Warum überhaupt
Dunkle Materie?**

**Was macht
Dunkle Materie
interessant?**



**Wie kann man
Dunkle Materie
"sehen"?**

**Woraus könnte Dunkle
Materie bestehen?**

Was ist Dunkle Materie?

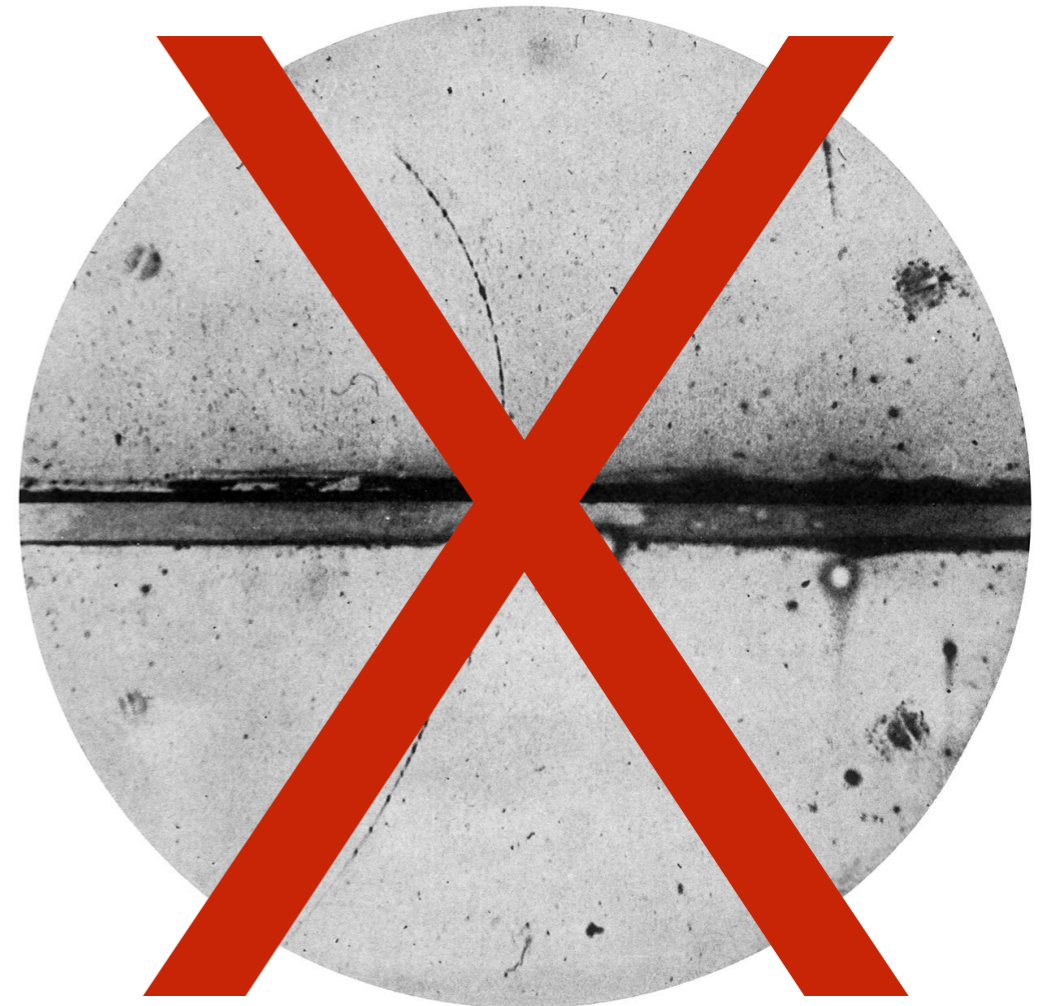
NICHT

Schwarzes Loch



<https://cdn.eso.org/images/publicationjpg/eso1907a.jpg>

Antimaterie



Anderson, Carl D. (1933). "The Positive Electron". *Physical Review* 43 (6): 491–494.

Was ist Dunkle Materie?



Was ist Dunkle Materie?



So ganz genau wissen wir das eigentlich gar nicht...

Was ist Dunkle Materie?



So ganz genau wissen wir das eigentlich gar nicht...

Aber: Warum überhaupt Dunkle Materie?

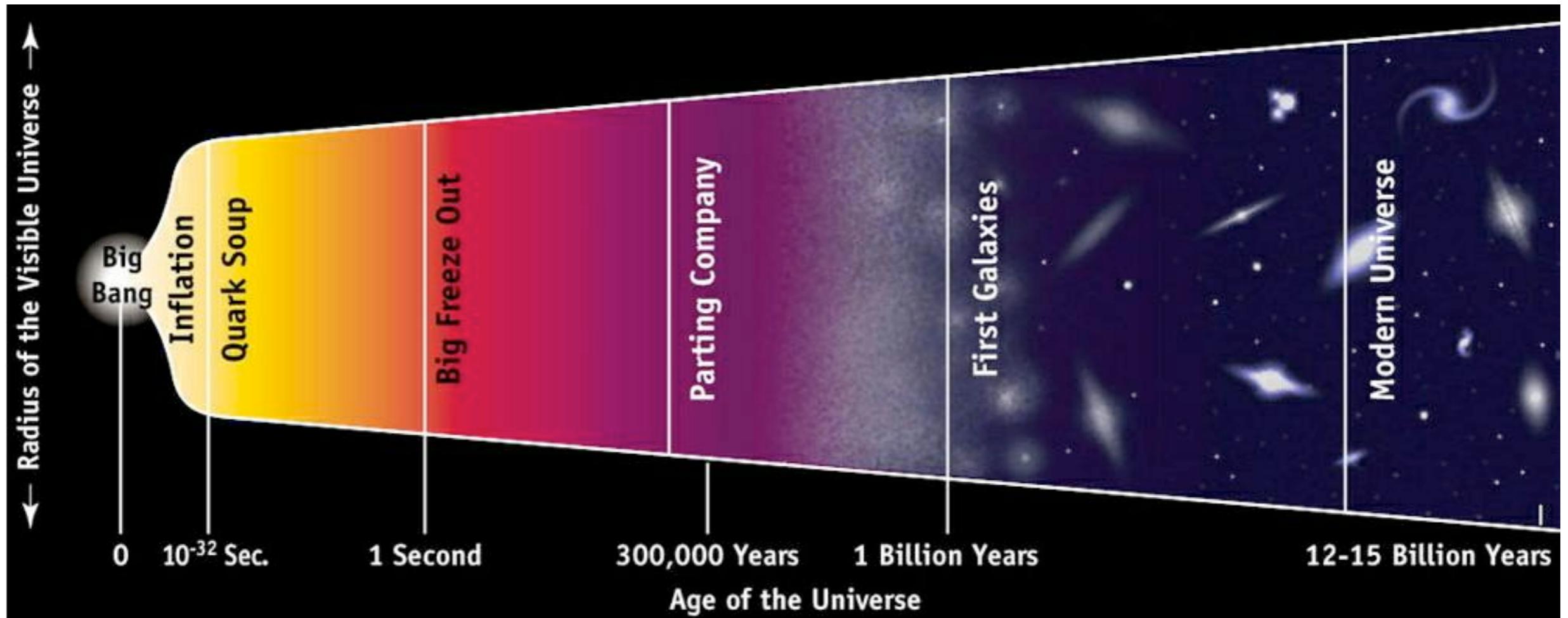
- Wie kommt es denn, dass Physiker Dunkle Materie “erfunden” haben? Warum glauben sie, dass es so etwas gibt, obwohl man vieles darüber gar nicht weiß?

Warum Dunkle Materie?

Exkurs: Geschichte des Universums



<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>

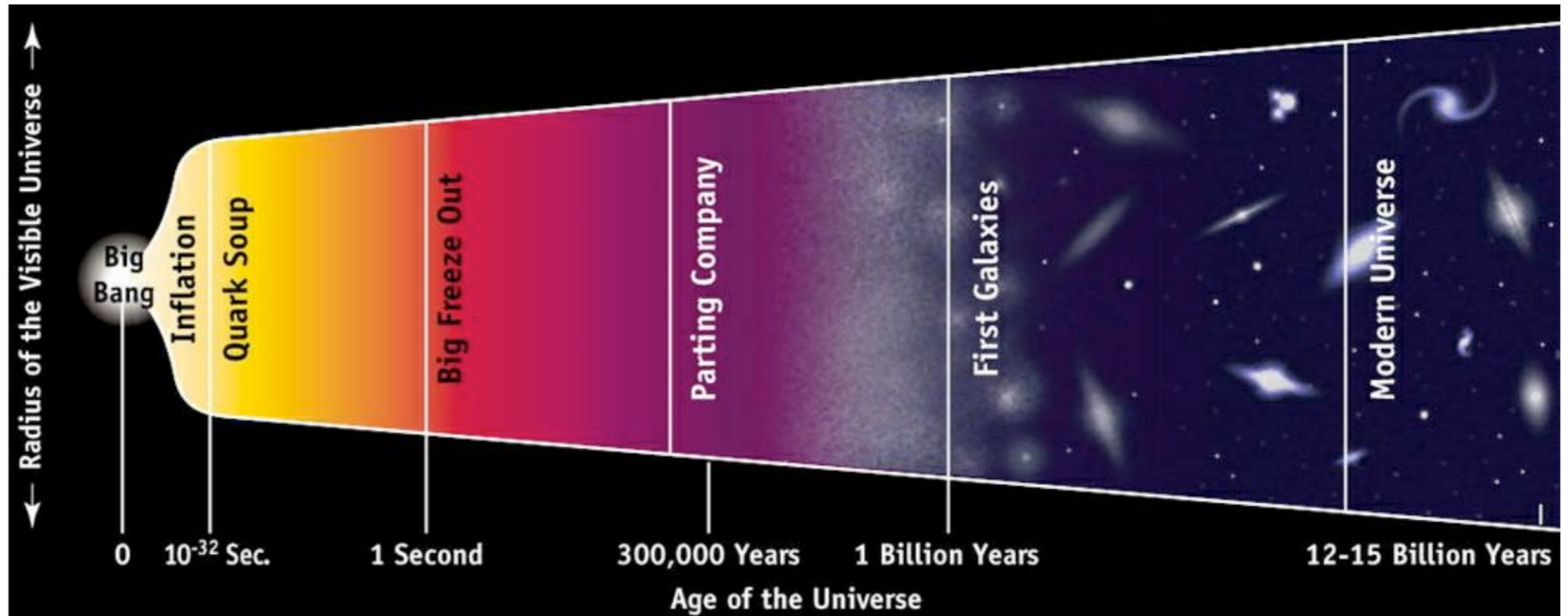


Warum Dunkle Materie?

Exkurs: Geschichte des Universums



<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>



Zeitpunkt nach
Big Bang



Skala, auf der man
Effekte beobachten kann



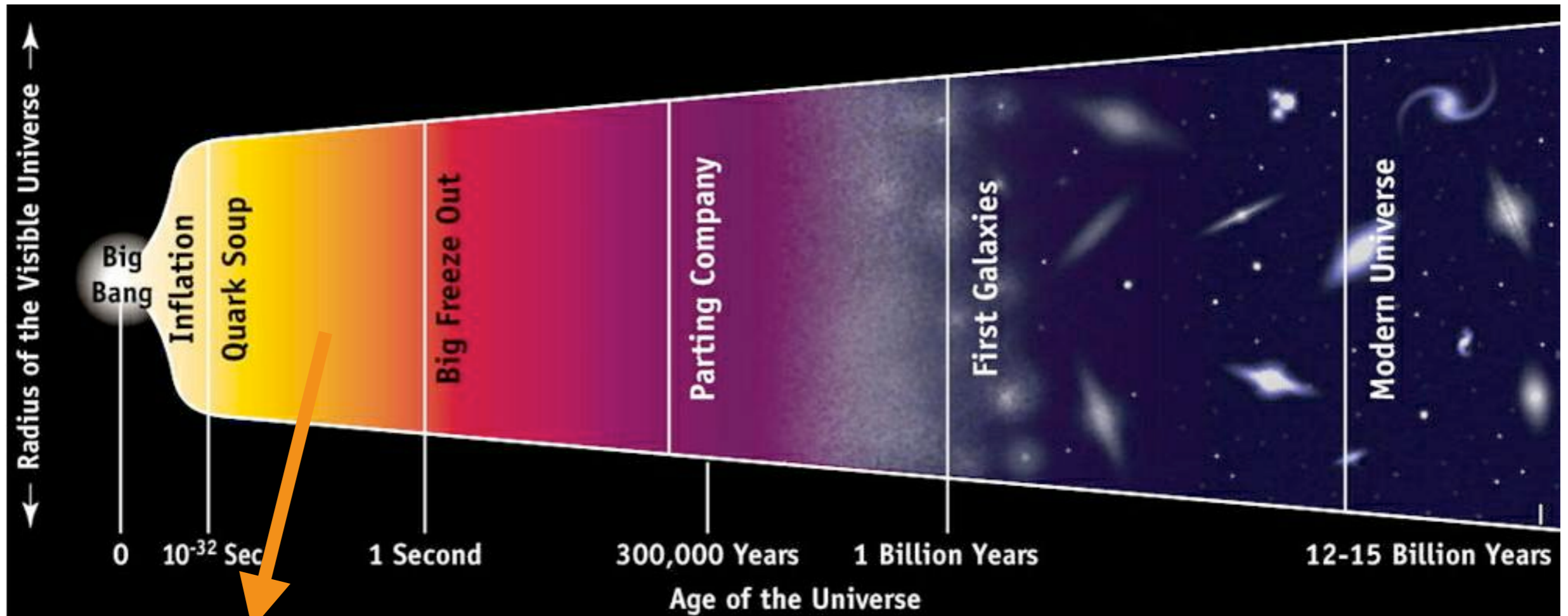
relevante Physik
(Skala der Wechselwirkung)

Warum Dunkle Materie?

Exkurs: Geschichte des Universums



<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>



kosmologische Effekte (gesamtes Universum)
Wechselwirkungen bei größten Energien/
zwischen elementarsten Objekten

Zeitpunkt nach
Big Bang



Skala, auf der man
Effekte beobachten kann

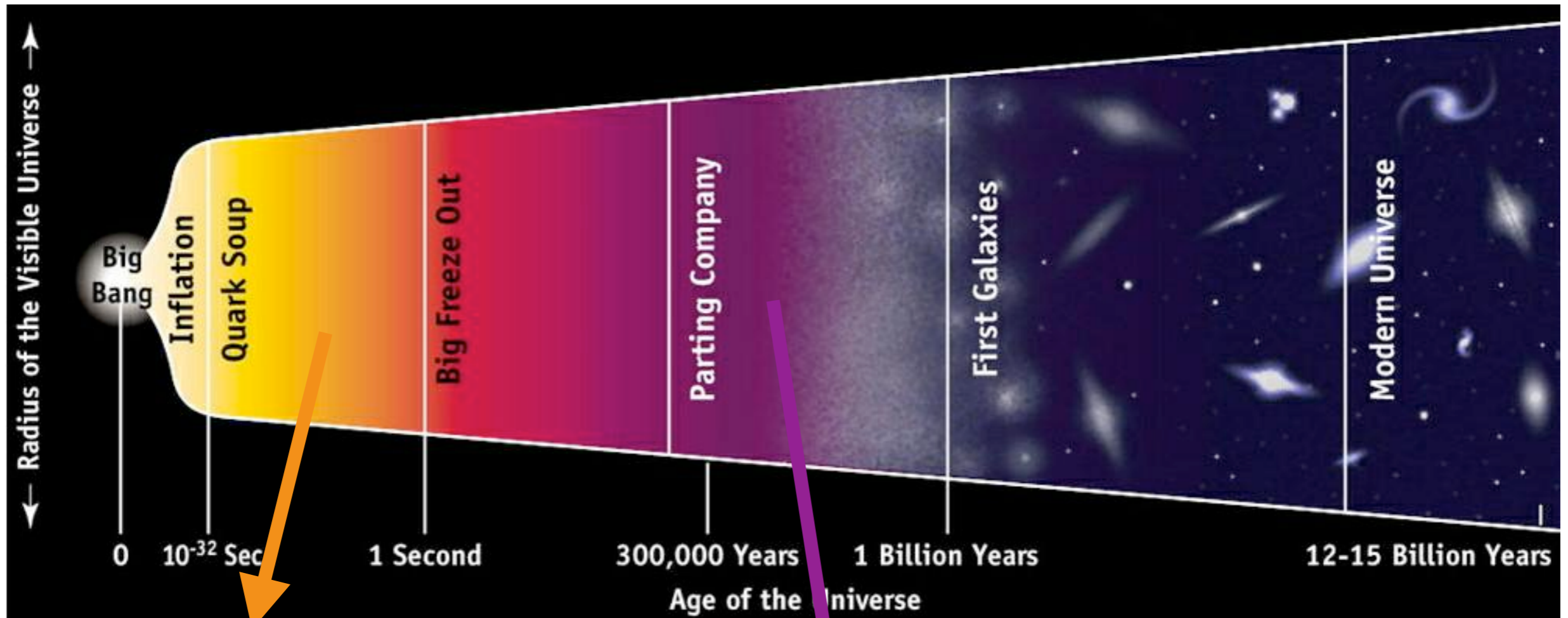


relevante Physik
(Skala der Wechselwirkung)

Warum Dunkle Materie?

Exkurs: Geschichte des Universums

<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>



kosmologische Effekte (gesamtes Universum)
Wechselwirkungen bei größten Energien/
zwischen elementarsten Objekten

Effekte auf mittleren Skalen
Wechselwirkungen bei mittleren Energien/
z.B. Atome formen sich

Zeitpunkt nach
Big Bang



Skala, auf der man
Effekte beobachten kann



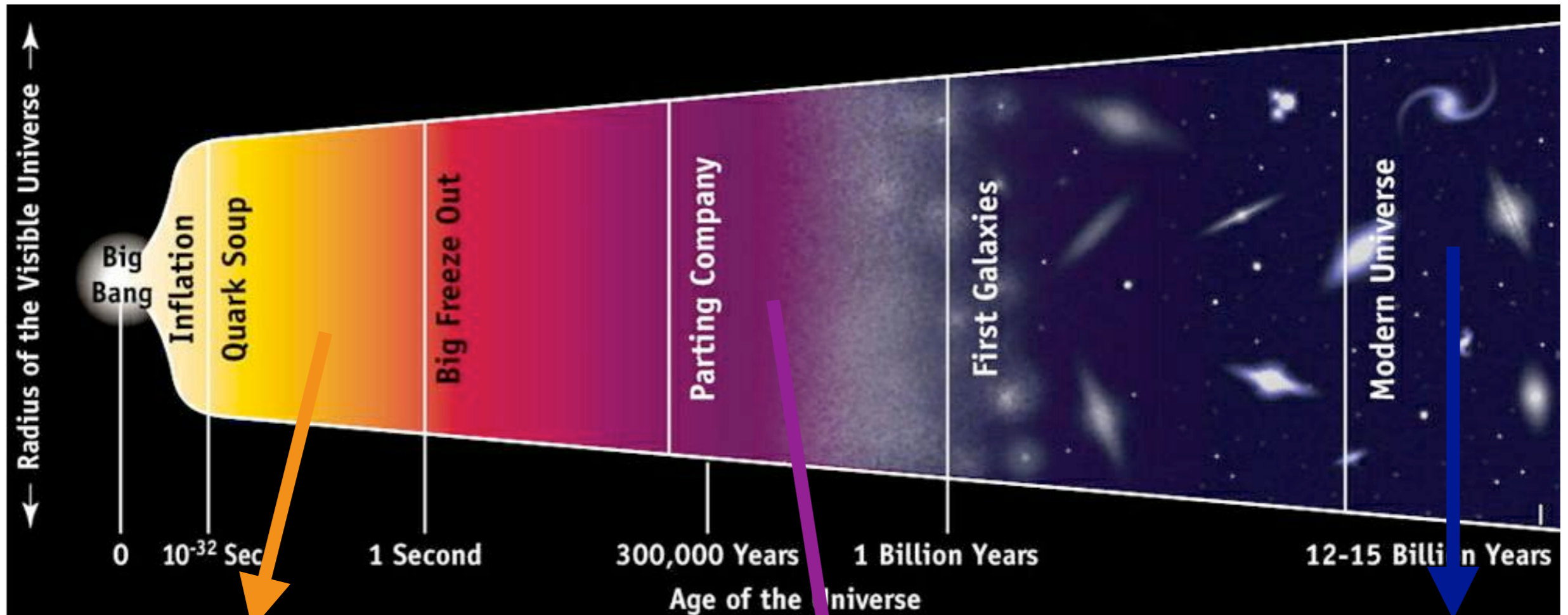
relevante Physik
(Skala der Wechselwirkung)

Warum Dunkle Materie?

Exkurs: Geschichte des Universums



<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>



kosmologische Effekte (gesamtes Universum)
Wechselwirkungen bei größten Energien/
zwischen elementarsten Objekten

Effekte auf kleineren Skalen (z.B. Galaxien)
Wechselwirkungen bei niedrigeren Energien/
Gravitation

Effekte auf mittleren Skalen
Wechselwirkungen bei mittleren Energien/
z.B. Atome formen sich

Zeitpunkt nach
Big Bang



Skala, auf der man
Effekte beobachten kann

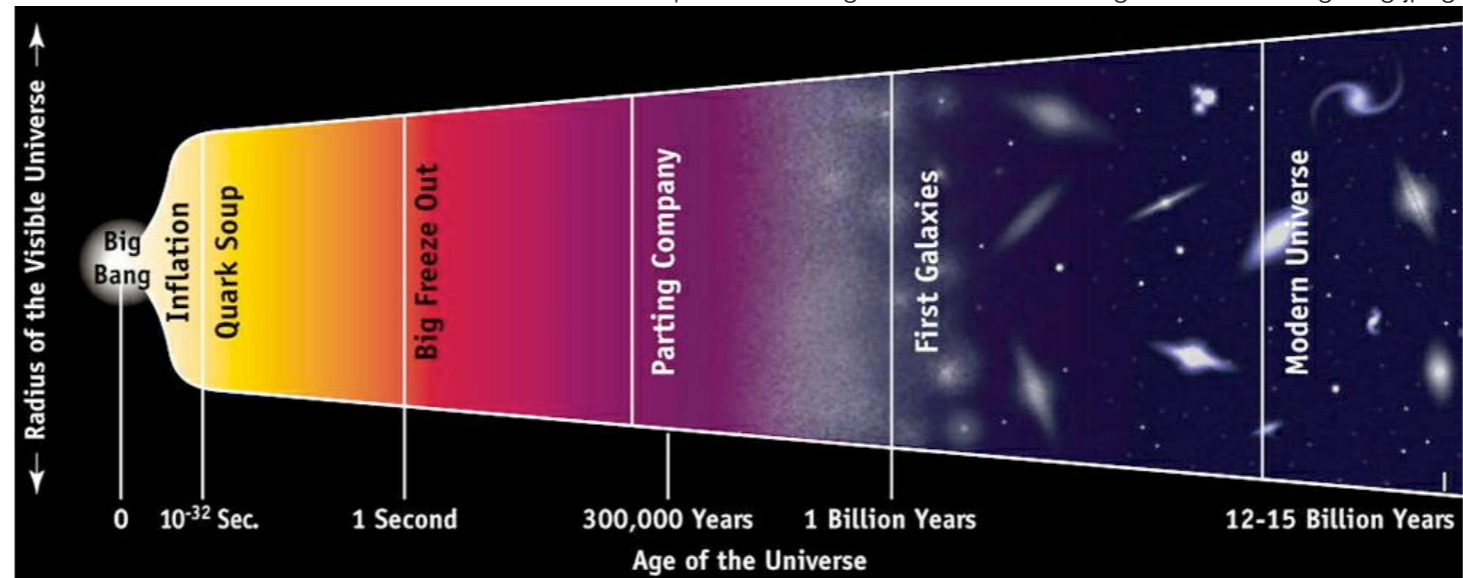


relevante Physik
(Skala der Wechselwirkung)

Warum Dunkle Materie?



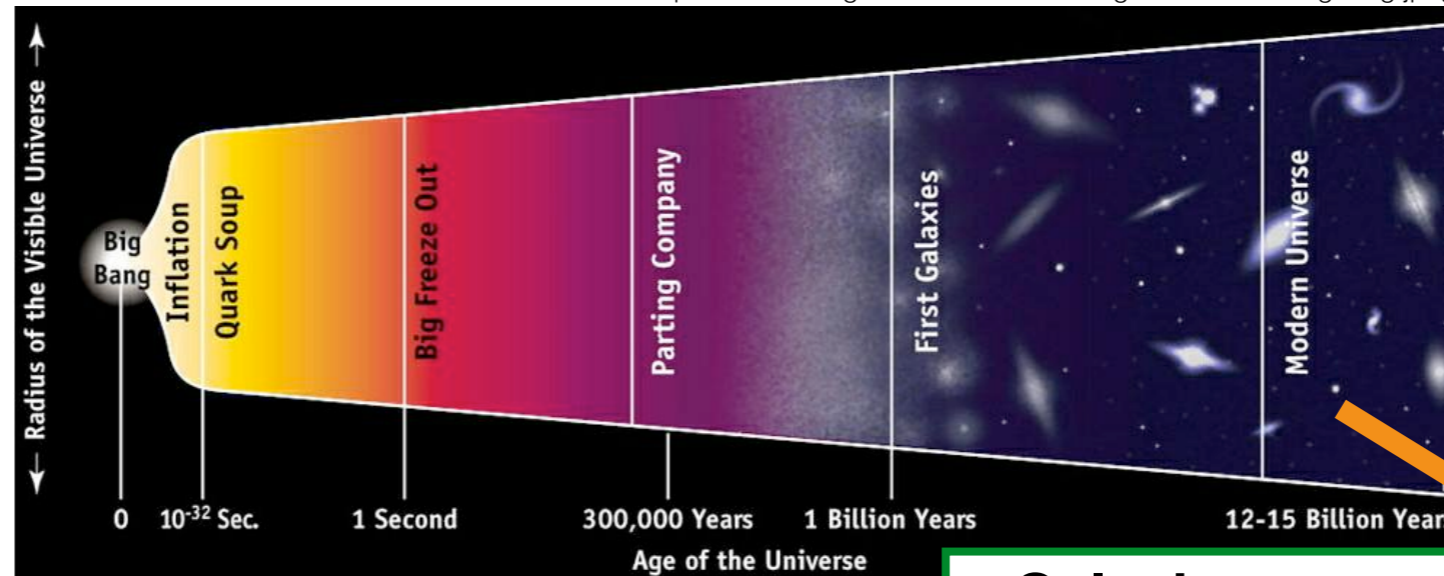
<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>



Warum Dunkle Materie?



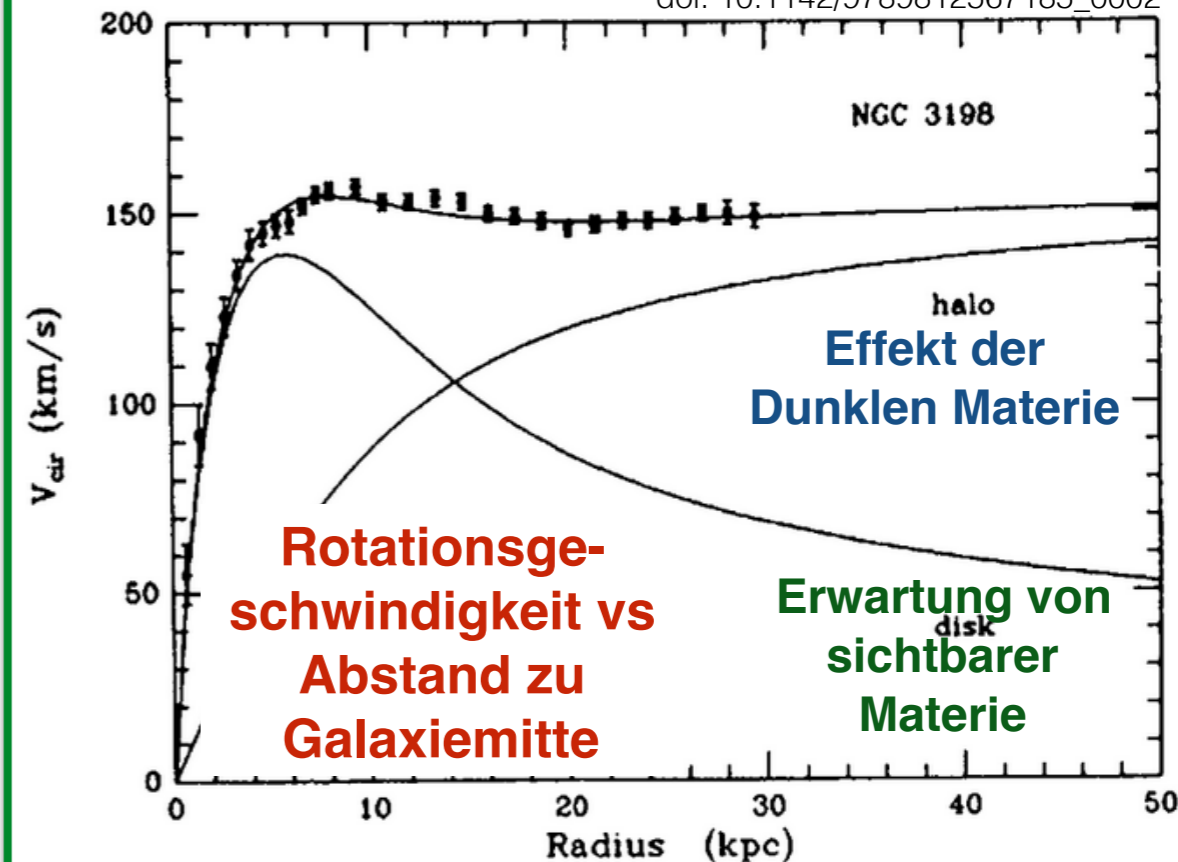
<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>



Galaxien:

Rotationsgeschwindigkeiten von Sternen in Galaxien anders als erwartet

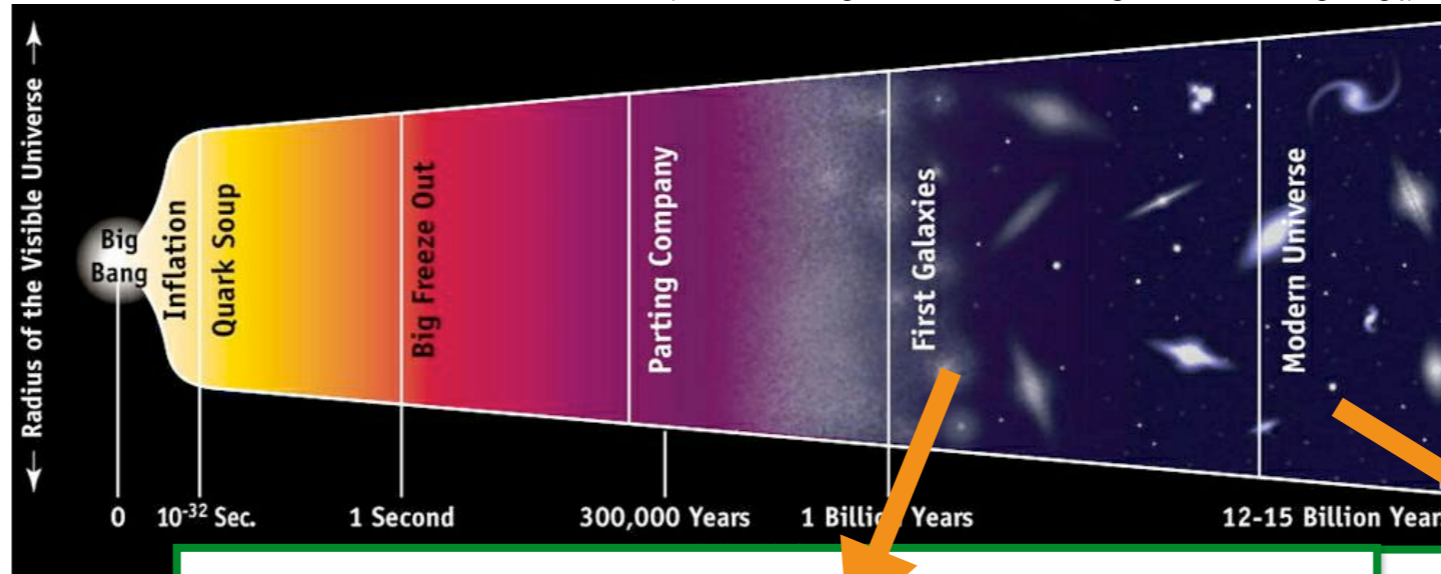
doi: 10.1142/9789812567185_0002



Warum Dunkle Materie?



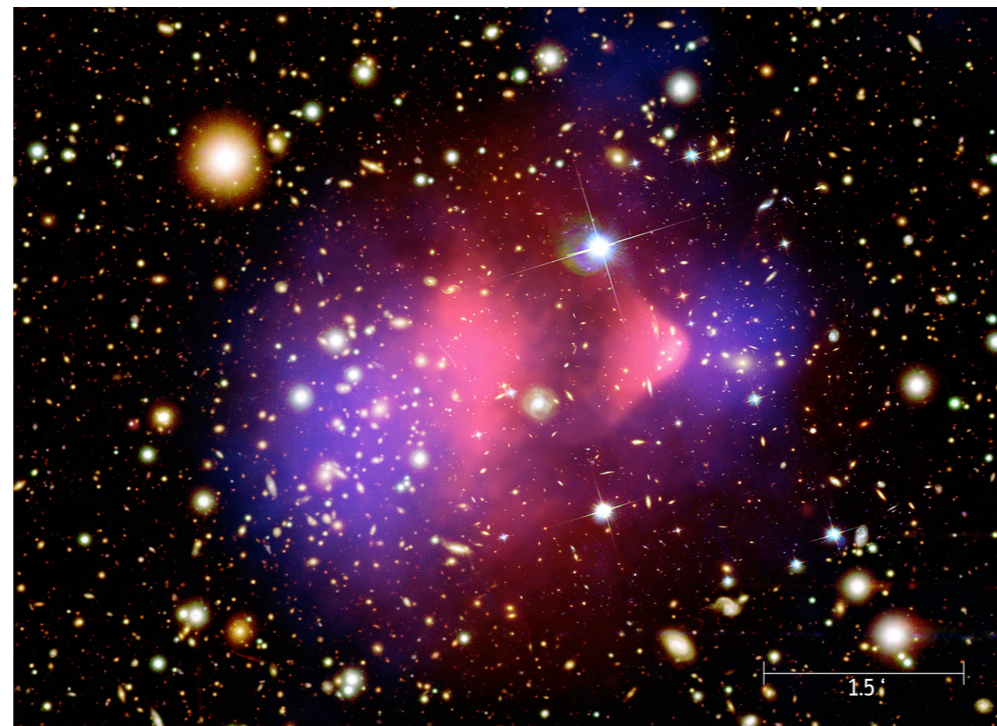
<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>



Galaxiencluster:

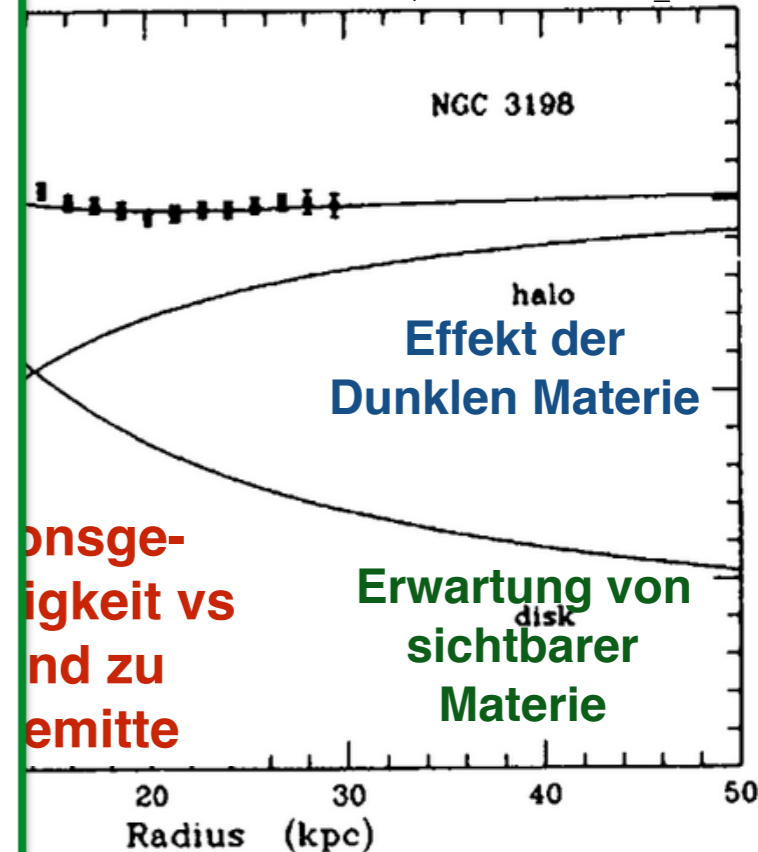
Gravitationslinseneffekt zeigt Verschiebung von sichtbarer Materie (rot) und Gravitationszentrum (blau)

Chandra X-Ray Observatory: 1E 0657-56



hwindigkeiten von Sternen
ders als erwartet

doi: 10.1142/9789812567185_0002



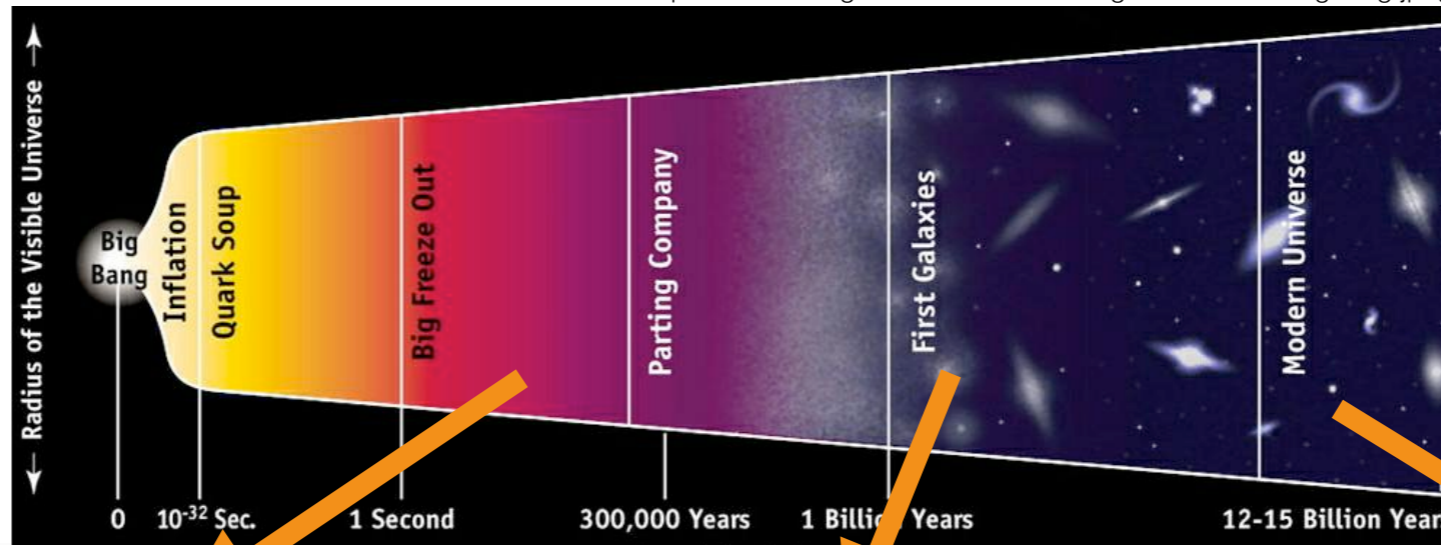
onsge-
igkeit vs
nd zu
emitte

Erwartung von
sichtbarer
Materie

Warum Dunkle Materie?

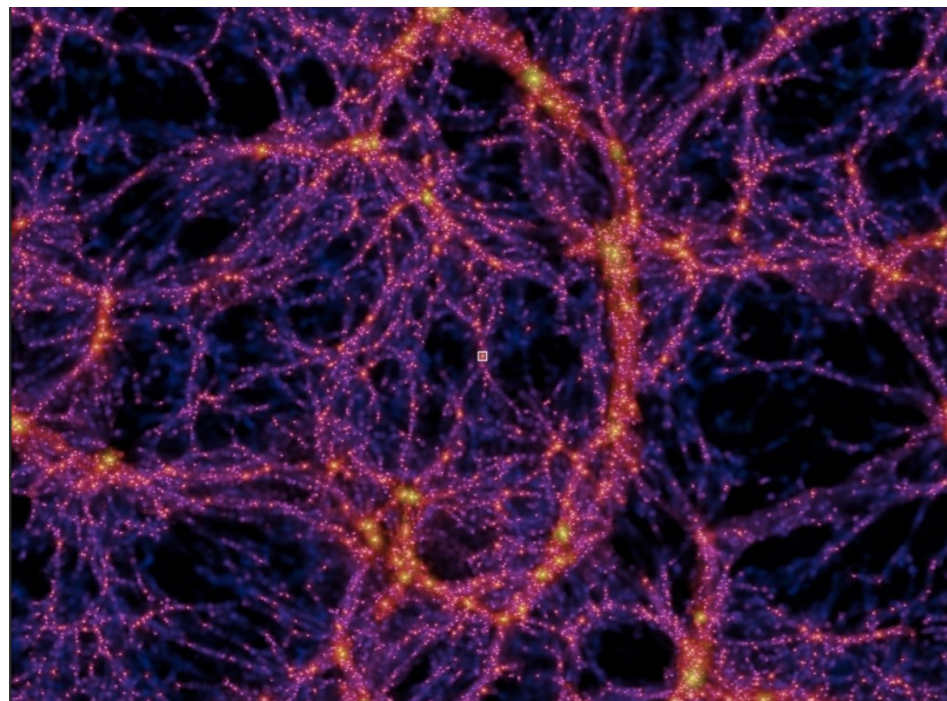


<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>



Kosmologisch:

Formation von großflächigen Strukturen im Universum kann nur korrekt berechnet werden, wenn Dunkle Materie angenommen wird



ter:

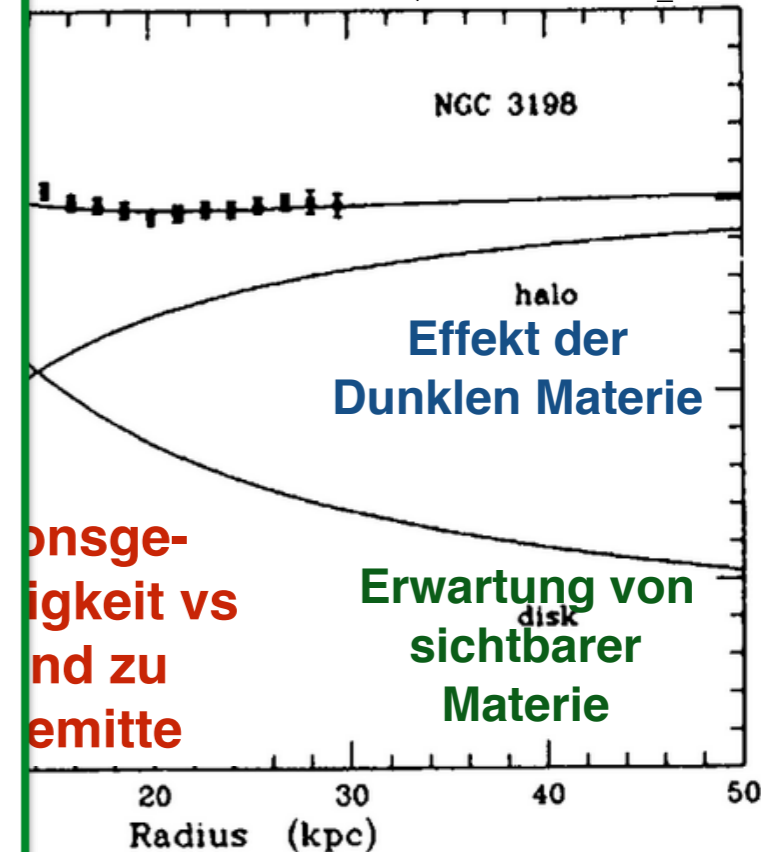
senereffekt zeigt von sichtbarer Materie (rot) ins Zentrum (blau)

Chandra X-Ray Observatory: 1E 0657-56



hwindigkeiten von Sternen anders als erwartet

doi: 10.1142/9789812567185_0002

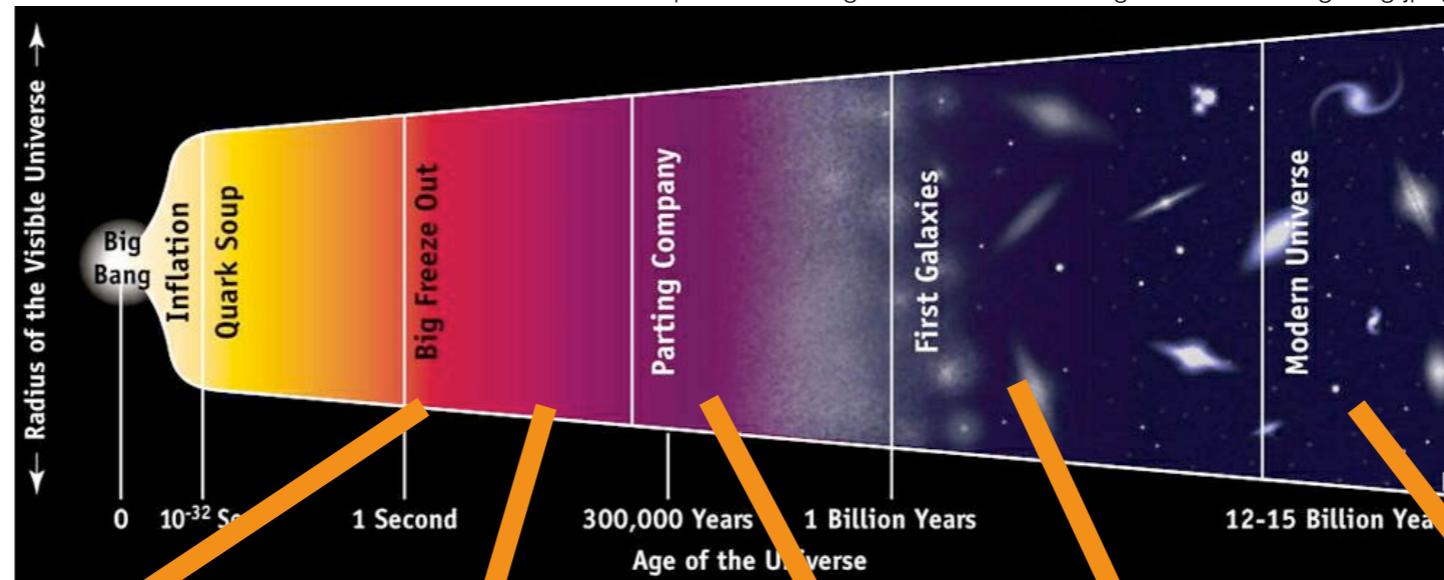


onsge-
igkeit vs
nd zu
emitte

Warum Dunkle Materie?



<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>



**Big-Bang
Nucleosynthese**

**Struktur-
formation**

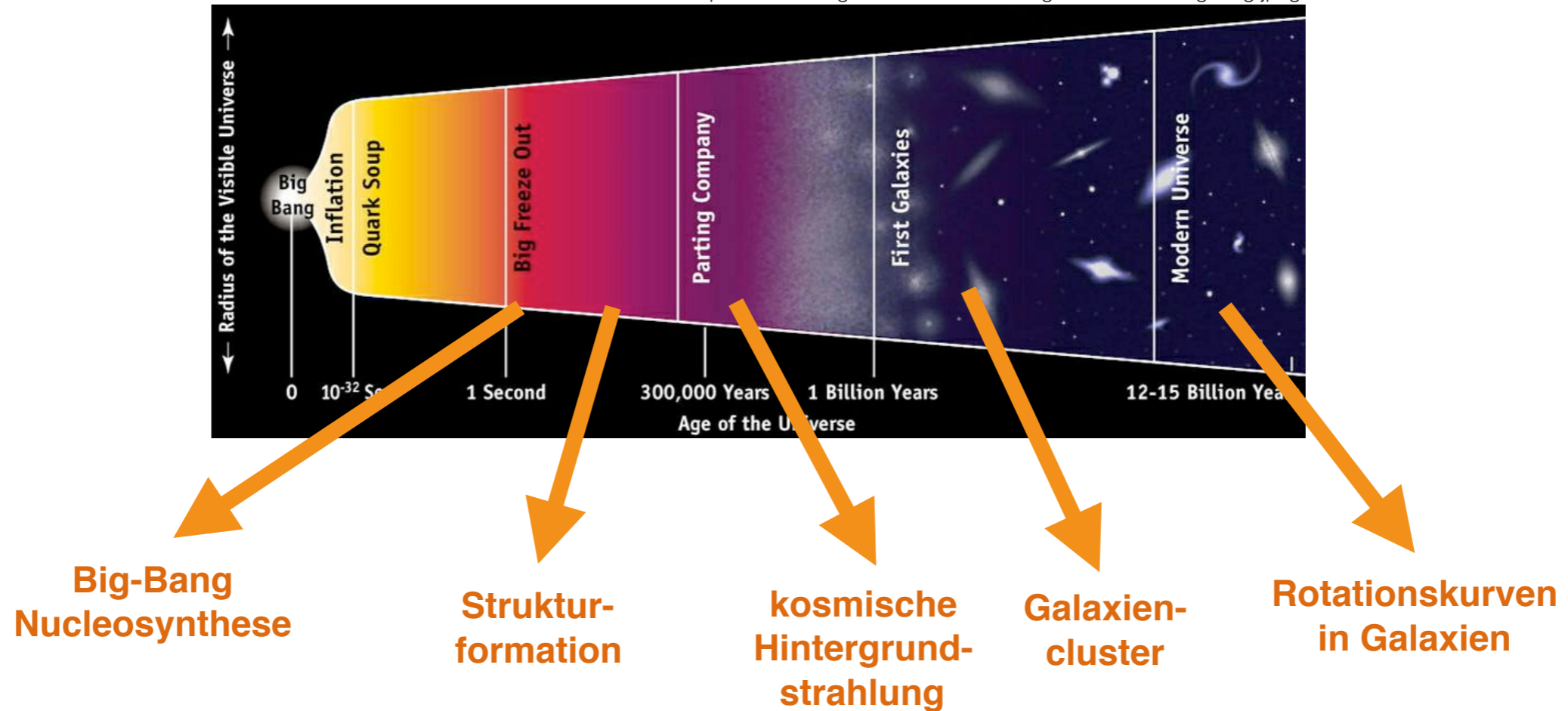
**kosmische
Hintergrund-
strahlung**

**Galaxien-
cluster**

**Rotationskurven
in Galaxien**

Warum Dunkle Materie?

<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2012/10/bigbang.jpeg>



Annahme, dass es Dunkle Materie gibt, die aus Teilchen besteht, führt zu guter Beschreibung der Phänomene auf allen unterschiedlichen Skalen!

Zurück: Was ist Dunkle Materie?



So ganz genau wissen wir das eigentlich gar nicht...

...aber: wir wissen um einige Eigenschaften

- **“Dunkel”**: keine elektromagnetische oder starke Wechselwirkung (eigentlich besser: “durchsichtig”)
- **“Kalt”**: bewegte sich recht langsam (nicht-relativistisch), als sich die größeren Strukturen im Universum ausbildeten
- **“Stabil”**: zerfällt nicht, zumindest nur so langsam, dass wir sie heute noch beobachten können
- **Gravitative Wechselwirkung**

Zurück: Was ist Dunkle Materie?



So ganz genau wissen wir das eigentlich gar nicht...

...aber: wir wissen um einige Eigenschaften

- **“Dunkel”**: keine elektromagnetische oder starke Wechselwirkung (eigentlich besser: “durchsichtig”)
- **“Kalt”**: bewegte sich recht langsam (nicht-relativistisch), als sich die größeren Strukturen im Universum ausbildeten
- **“Stabil”**: zerfällt nicht, zumindest nur so langsam, dass wir sie heute noch beobachten können
- **Gravitative Wechselwirkung**

Keine passenden Teilchen im Standardmodell! Neue Physik!?

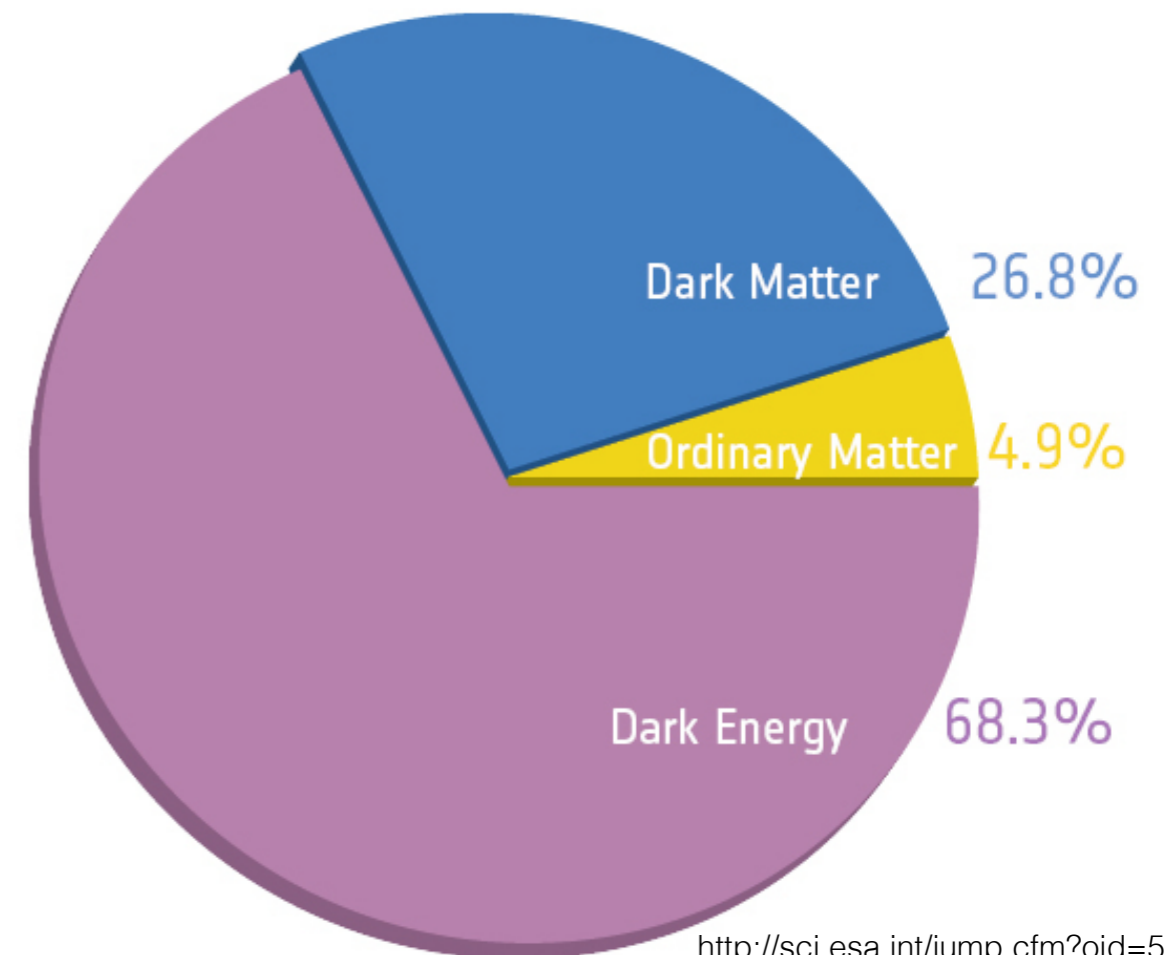
Was macht Dunkle Materie interessant?

Keine passenden Teilchen im Standardmodell! Neue Physik!?

- Das Standardmodell lässt uns mit vielen offenen Fragen zurück, jeder Hinweis auf Physik jenseits ist äußerst wertvoll

Untersucht man die gesamte Energie im Universum, macht die Materie, die wir kennen, nur ca. 5% aus!

- 5x mehr Dunkle Materie als die Materie, die wir kennen - wichtig, mehr darüber zu wissen! Nur so können wir das Universum und seine Entwicklung besser verstehen



<http://sci.esa.int/jump.cfm?oid=51557>

Woraus besteht Dunkle Materie?



Einfachstes Szenario: Füge ein einziges neues Teilchen zum Standardmodell hinzu, aus dem alle Dunkle Materie besteht

Sinnvoll? Ja → Occam's Razor: Wähle einfachstes Modell, das Beobachtungen erklären kann

Wahrscheinlich? Mmhh...

Woraus besteht Dunkle Materie?



Einfachstes Szenario: Füge ein einziges neues Teilchen zum Standardmodell hinzu, aus dem alle Dunkle Materie besteht

Sinnvoll? Ja → Occam's Razor: Wähle einfachstes Modell, das Beobachtungen erklären kann

Wahrscheinlich? Mmhh...

Bekanntestes Szenario: Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)

- Häufigkeit Dunkler Materie heute ist vollkommen bestimmt durch WIMP Masse und Kopplung zum Standardmodell (→ thermische Produktion)
- Nimmt man eine Masse um 1 TeV an (und eine Wechselwirkung im Bereich der schwachen Kraft), passt die Häufigkeit zu den Beobachtungen
→ **“WIMP miracle”**
- Warum so “wunderbar”? Andere Hinweise auf neue Physik in diesem Regime → Verbindung zu Dunkler Materie?!

Woraus besteht Dunkle Materie?



Einfachstes Szenario: Füge ein einziges neues Teilchen zum Standardmodell hinzu, aus dem alle Dunkle Materie besteht

Sinnvoll? Ja → Occam's Razor: Wähle einfachstes Modell, das Beobachtungen erklären kann

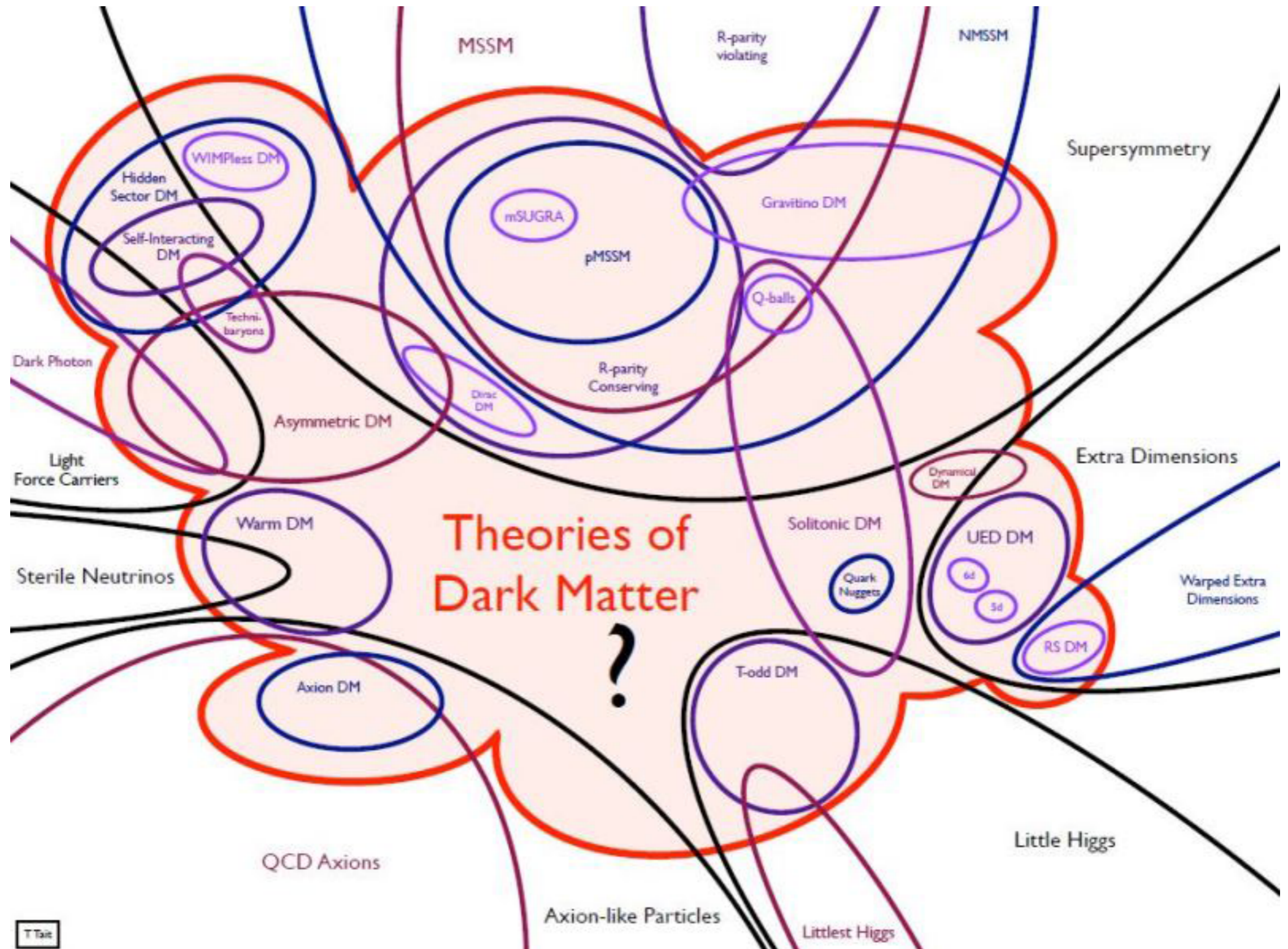
Wahrscheinlich? Mmhh...

Bekanntestes Szenario: Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)

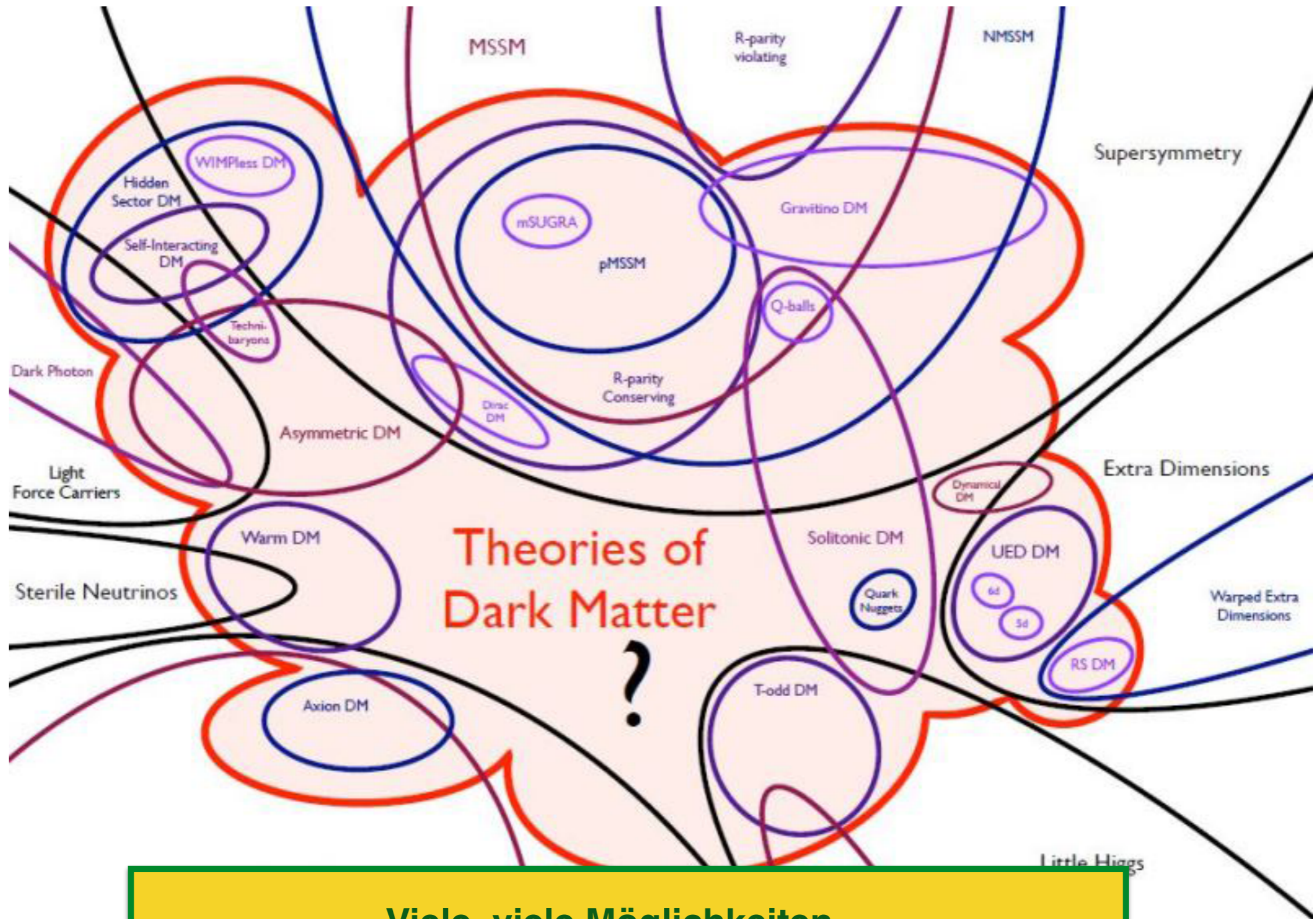
- Häufigkeit Dunkler Materie heute ist vollkommen bestimmt durch WIMP Masse und Kopplung zum Standardmodell (→ thermische Produktion)
- Nimmt man eine Masse um 1 TeV an (und eine Wechselwirkung im Bereich der schwachen Kraft), passt die Häufigkeit zu den Beobachtungen
→ **“WIMP miracle”**
- Warum so “wunderbar”? Andere Hinweise auf neue Physik in diesem Regime → Verbindung zu Dunkler Materie?!

Solche Teilchen könnten am LHC produziert werden!

Woraus besteht Dunkle Materie?



Woraus besteht Dunkle Materie?



Viele, viele Möglichkeiten...

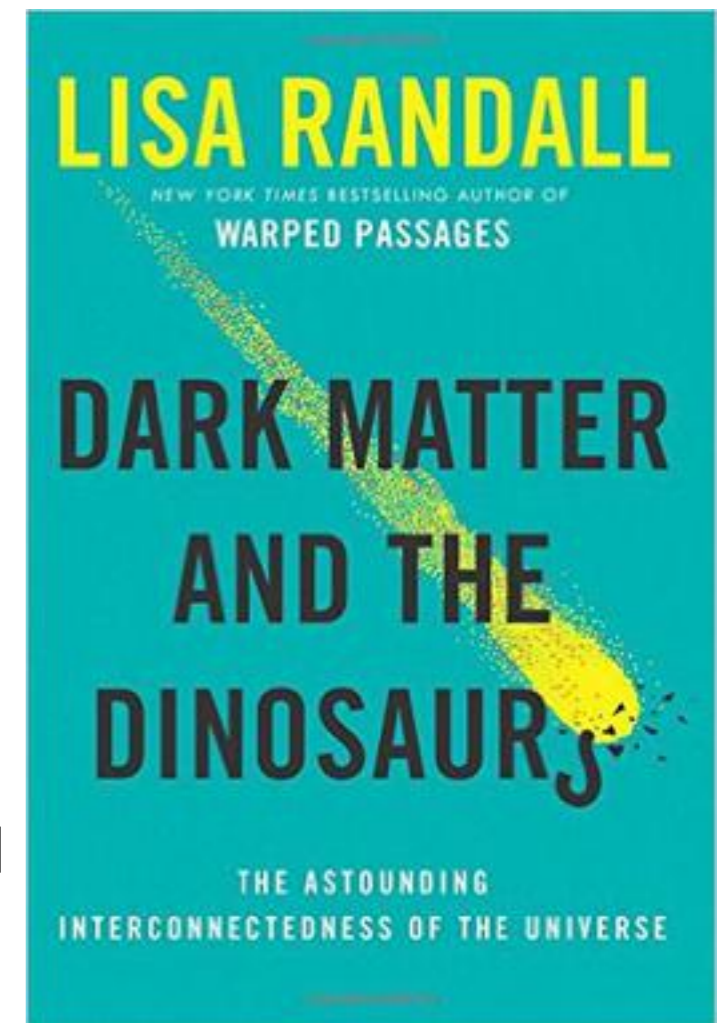
Tait

Wie kann man Dunkle Materie “sehen”?



Alle Beobachtungen von Dunkler Materie bisher sind über GRAVITATION

- Eigentlich kein Grund zur Annahme einer anderen Wechselwirkung mit “unserer Welt”
- Langweiliges Szenario (zumindest für Teilchenphysiker ;)), denn Gravitation spielt in den möglichen Experimenten keine Rolle
- **“Dark Matter and the Dinosaurs”** von Lisa Randall
 - Diskutiert Annahmen und Konsequenzen verschiedener Theorien Dunkler Materie
 - Einfaches, WIMP-ähnliches Modell vs. viele verschiedene “dunkle” Teilchensorten und “dunkle” Kräfte
 - ändert, wie und wo Dunkle Materie im Universum verteilt ist
 - Überlegung, wie entscheidend die Anwesenheit und Beschaffenheit Dunkler Materie fürs Aussterben der Dinosaurier war

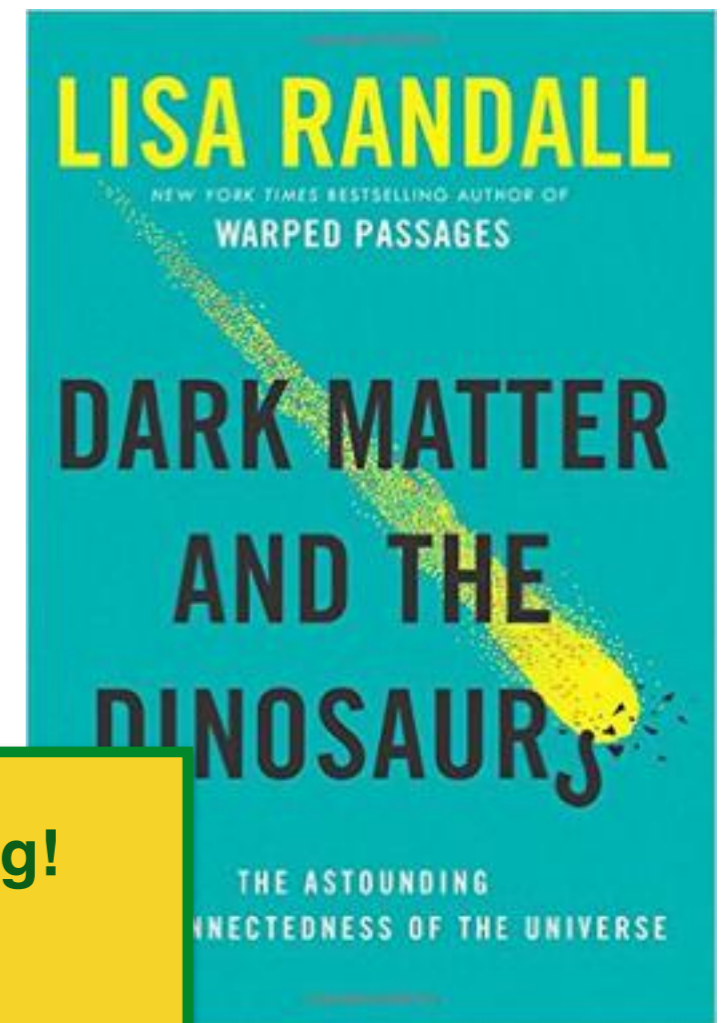


Wie kann man Dunkle Materie “sehen”?



Alle Beobachtungen von Dunkler Materie bisher sind über GRAVITATION

- Eigentlich kein Grund zur Annahme einer anderen Wechselwirkung mit “unserer Welt”
- Langweiliges Szenario (zumindest für Teilchenphysiker ;)), denn Gravitation spielt in den möglichen Experimenten keine Rolle
- **“Dark Matter and the Dinosaurs”** von Lisa Randall
 - Diskutiert Annahmen und Konsequenzen verschiedener Theorien Dunkler Materie
 - Einfaches, WIMP-ähnliches Modell vs. viele verschiedene “dunkle” Teilchensorten und “dunkle” Kräfte
→ ändert, wie und wo Dunkle Materie im Universum verteilt ist



Selbst ohne weitere Wechselwirkungen wichtig!

Aber... nicht einfach zu untersuchen

Wie kann man Dunkle Materie sehen?



**Annahme IRGENDEINER Wechselwirkung zwischen
Dunkler Materie und Standardmodell**

Wie kann man Dunkle Materie sehen?



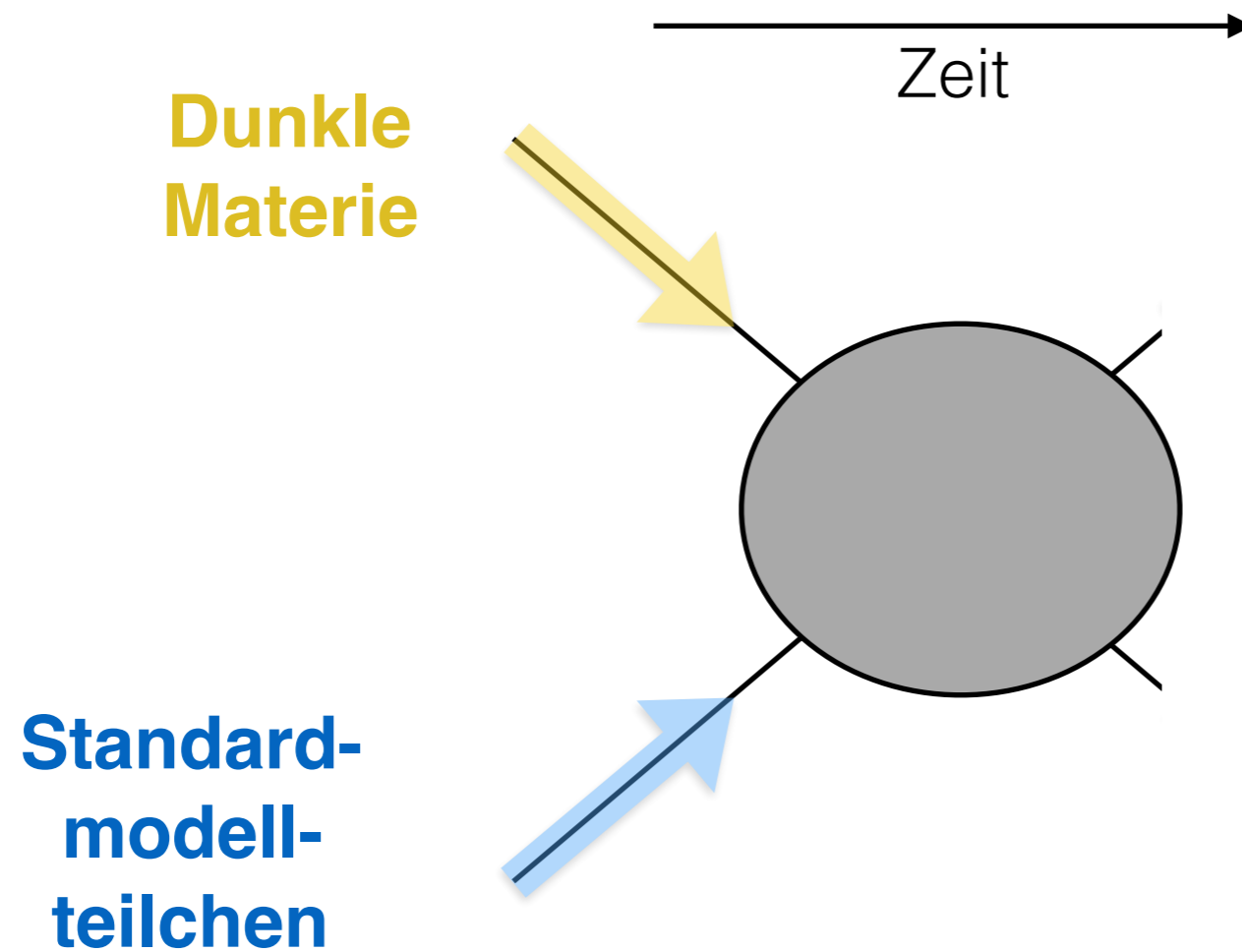
Annahme IRGENDEINER Wechselwirkung zwischen
Dunkler Materie und Standardmodell



Wie kann man Dunkle Materie sehen?



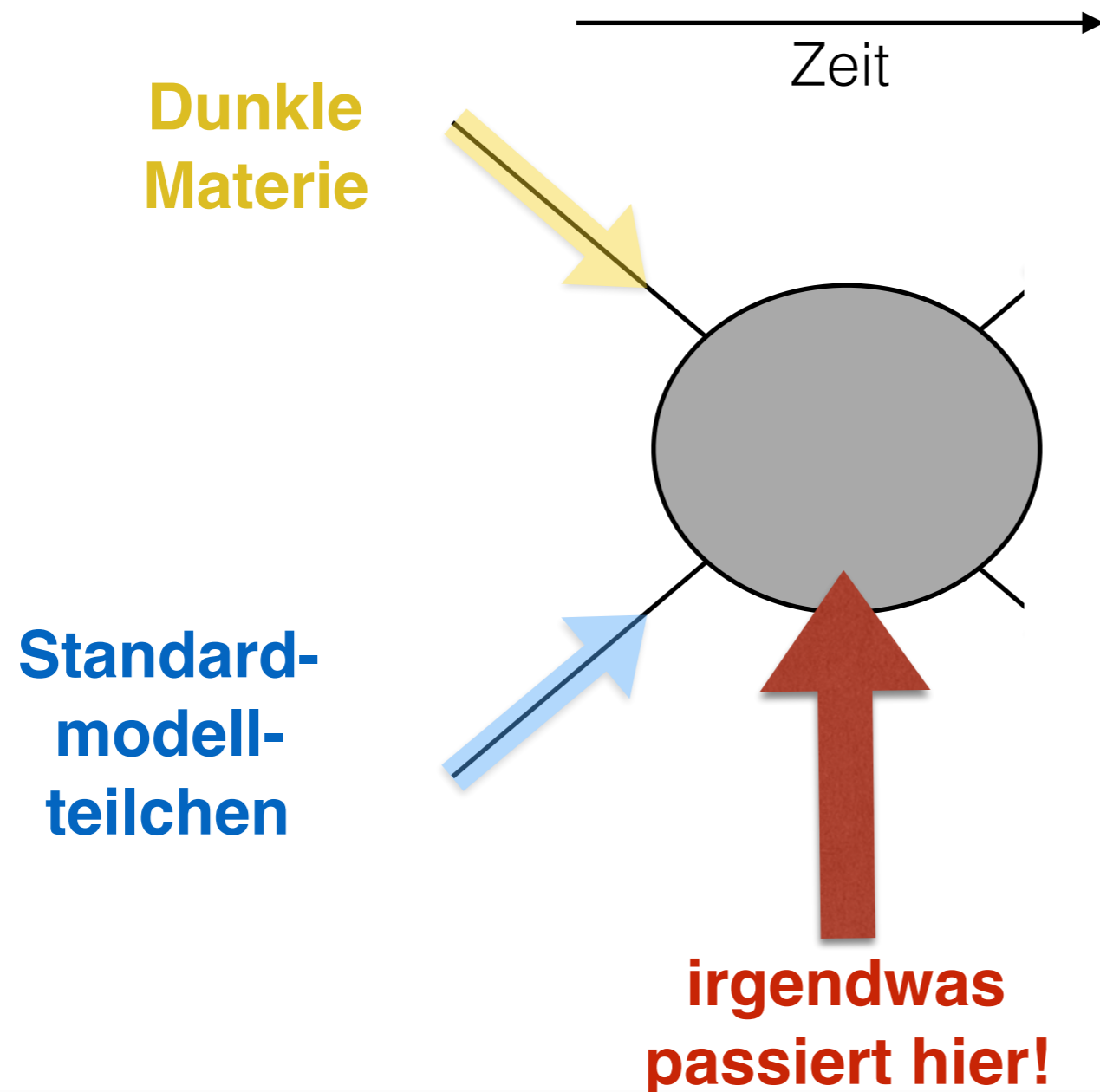
Annahme IRGENDEINER Wechselwirkung zwischen
Dunkler Materie und Standardmodell



Wie kann man Dunkle Materie sehen?



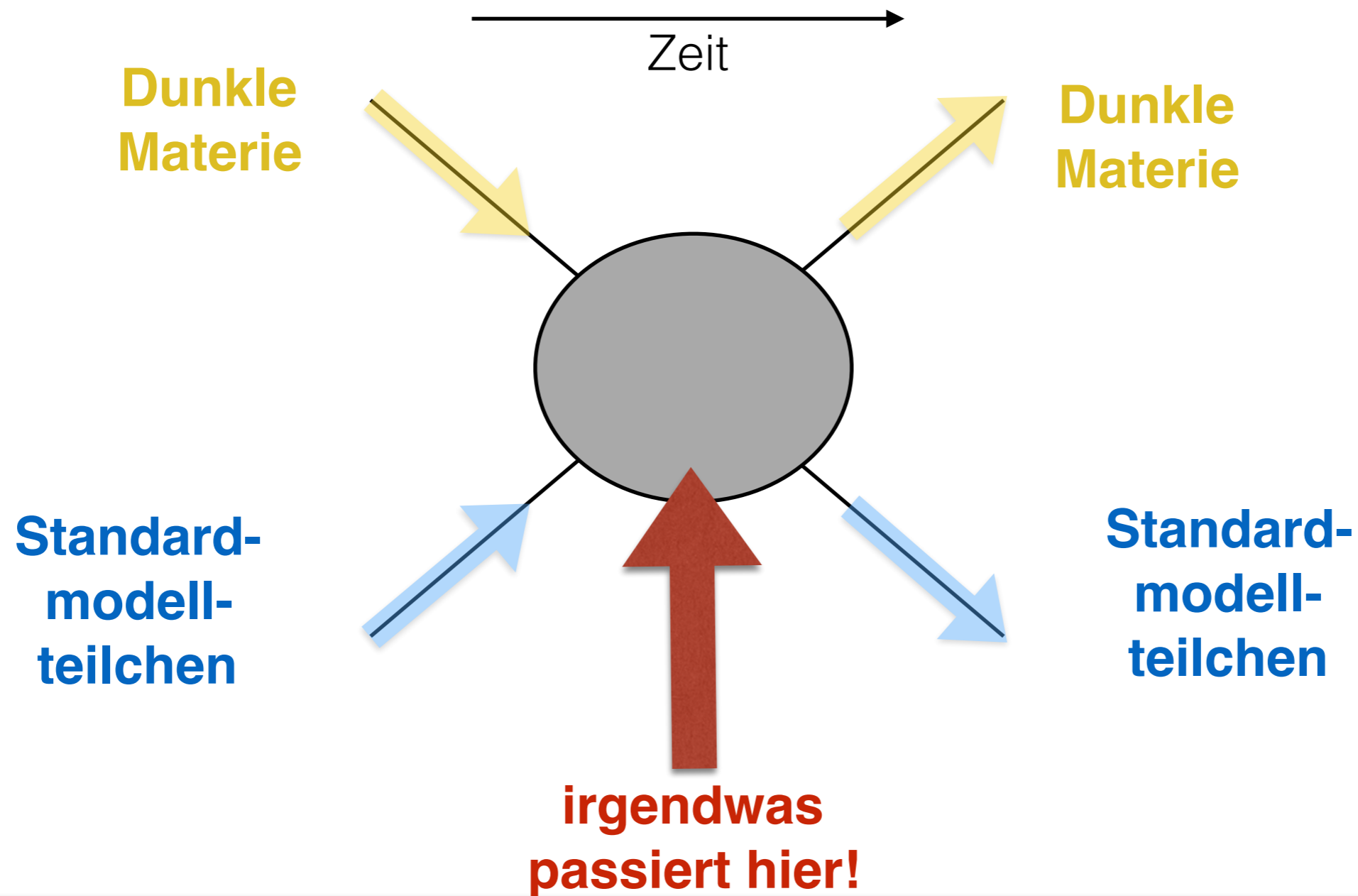
Annahme IRGENDEINER Wechselwirkung zwischen
Dunkler Materie und Standardmodell



Wie kann man Dunkle Materie sehen?

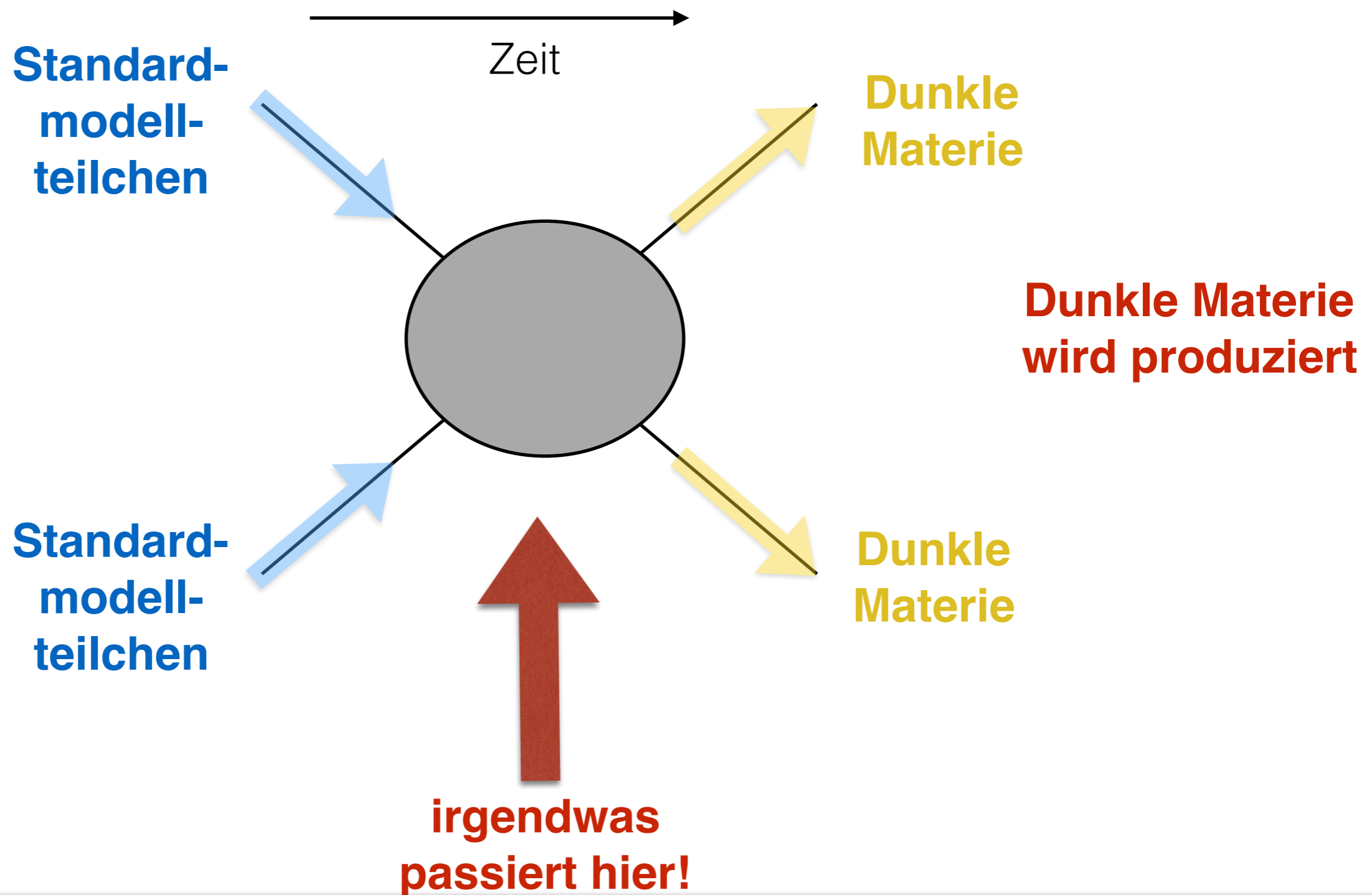


Annahme IRGENDEINER Wechselwirkung zwischen Dunkler Materie und Standardmodell



Wie kann man Dunkle Materie sehen...

... am LHC?



Wie kann man Dunkle Materie sehen...



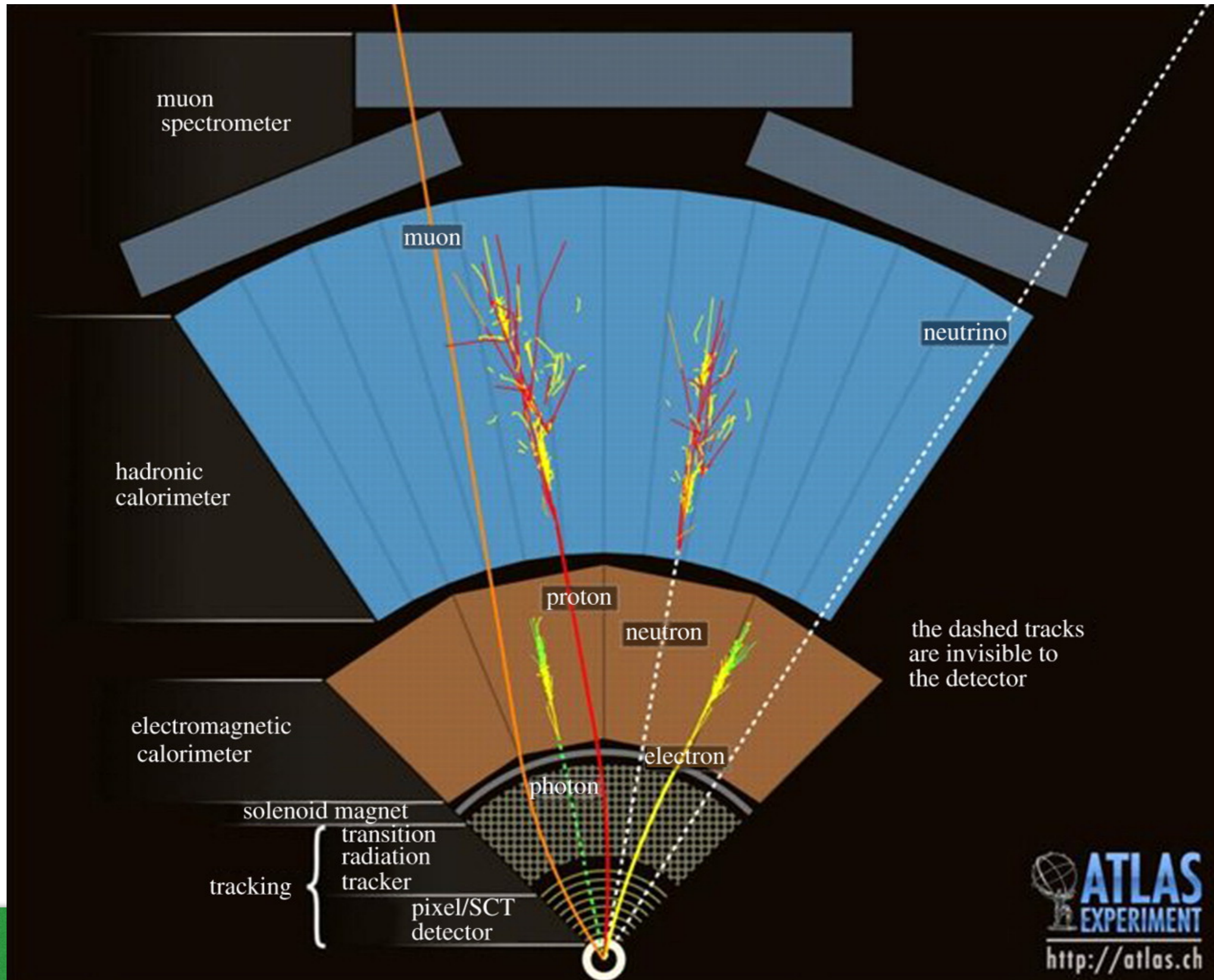
... im Detektor?

Erinnerung: Eigenschaften Dunkler Materie

- “**Dunkel**”: keine elektromagnetische oder starke Wechselwirkung (eigentlich besser: “durchsichtig”)

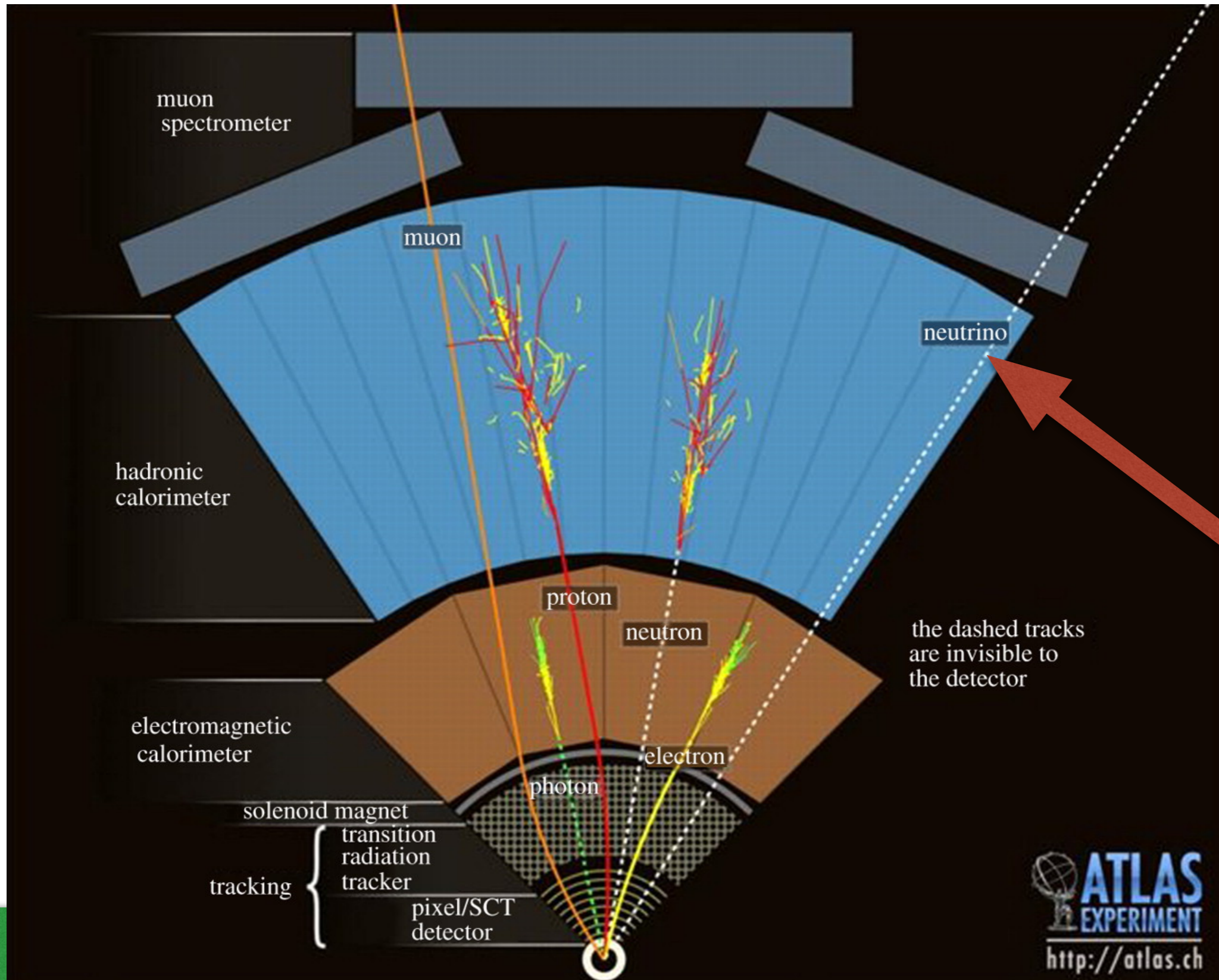
Wie kann man Dunkle Materie sehen...

... im Detektor?



Wie kann man Dunkle Materie sehen...

... im Detektor?



**Dunkle
Materie wie
Neutrino:
unsichtbar!**

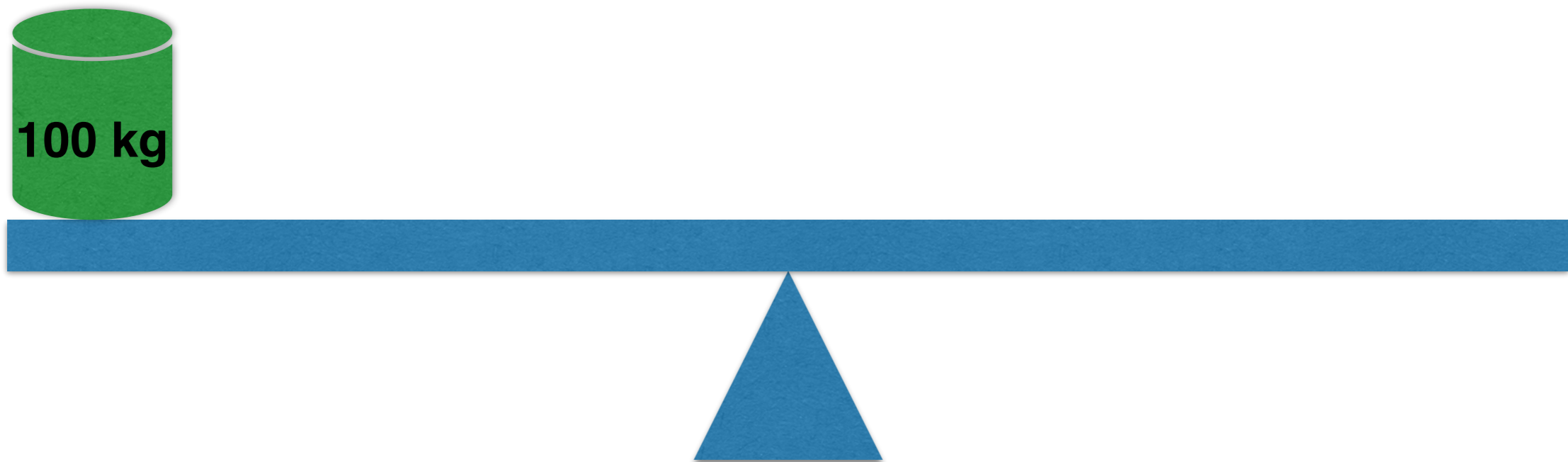
Wie kann man Dunkle Materie sehen...

... im Detektor?

Durch Impulserhaltung!

- Wird ein "sichtbares" Teilchen zusätzlich zur Dunklen Materie produziert, sehen wir das Ungleichgewicht - wir sehen das Unsichtbare

fehlende Transversalenergie
(“missing E_T ”)



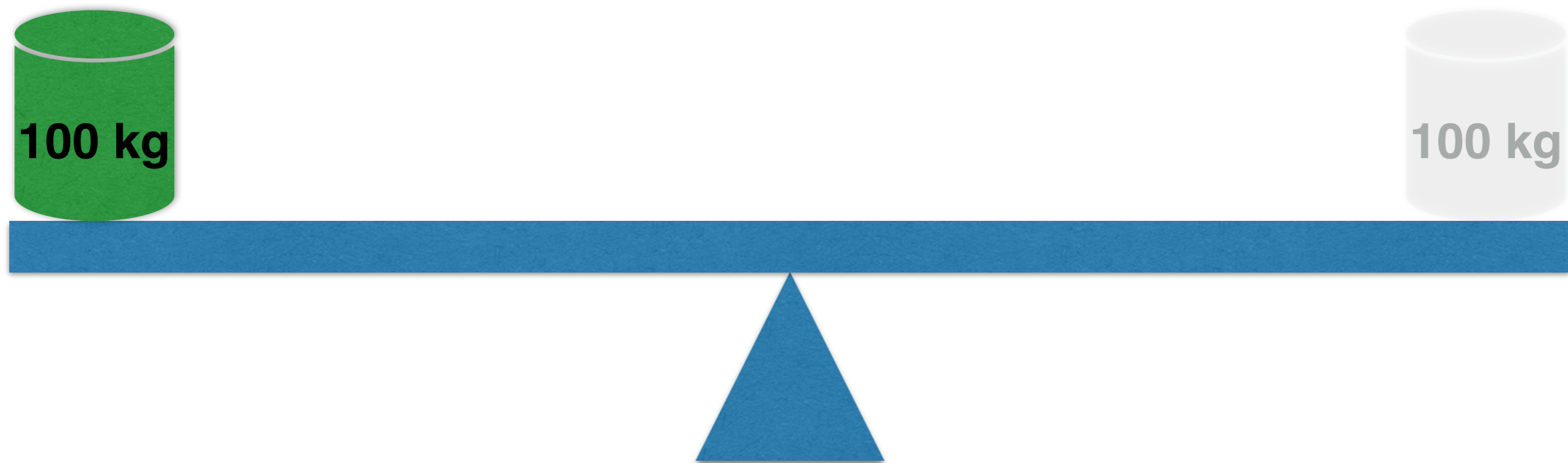
Wie kann man Dunkle Materie sehen...

... im Detektor?

Durch Impulserhaltung!

- Wird ein "sichtbares" Teilchen zusätzlich zur Dunklen Materie produziert, sehen wir das Ungleichgewicht - wir sehen das Unsichtbare

fehlende Transversalenergie
(**"missing E_T "**)

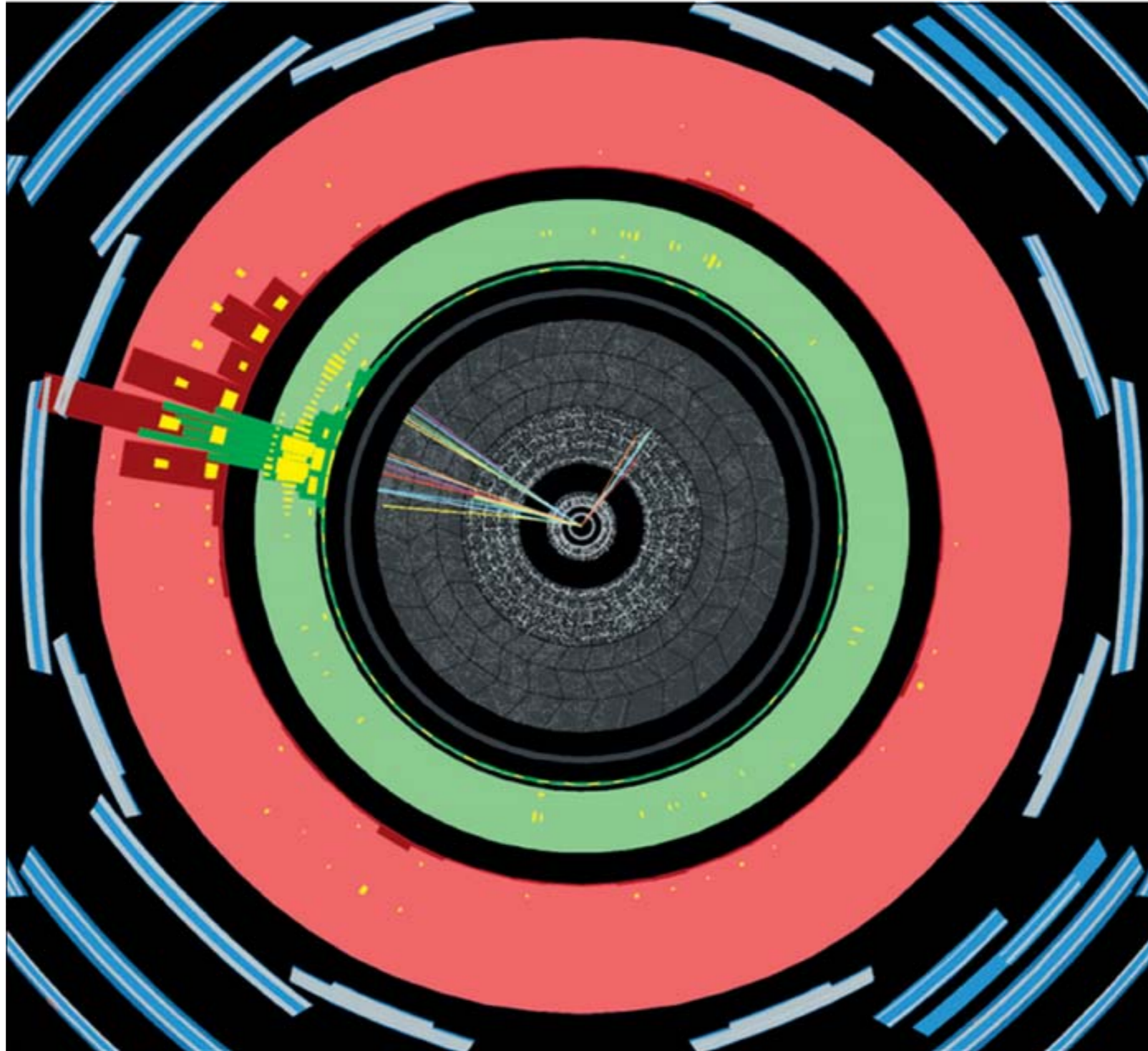


Wie kann man Dunkle Materie sehen...



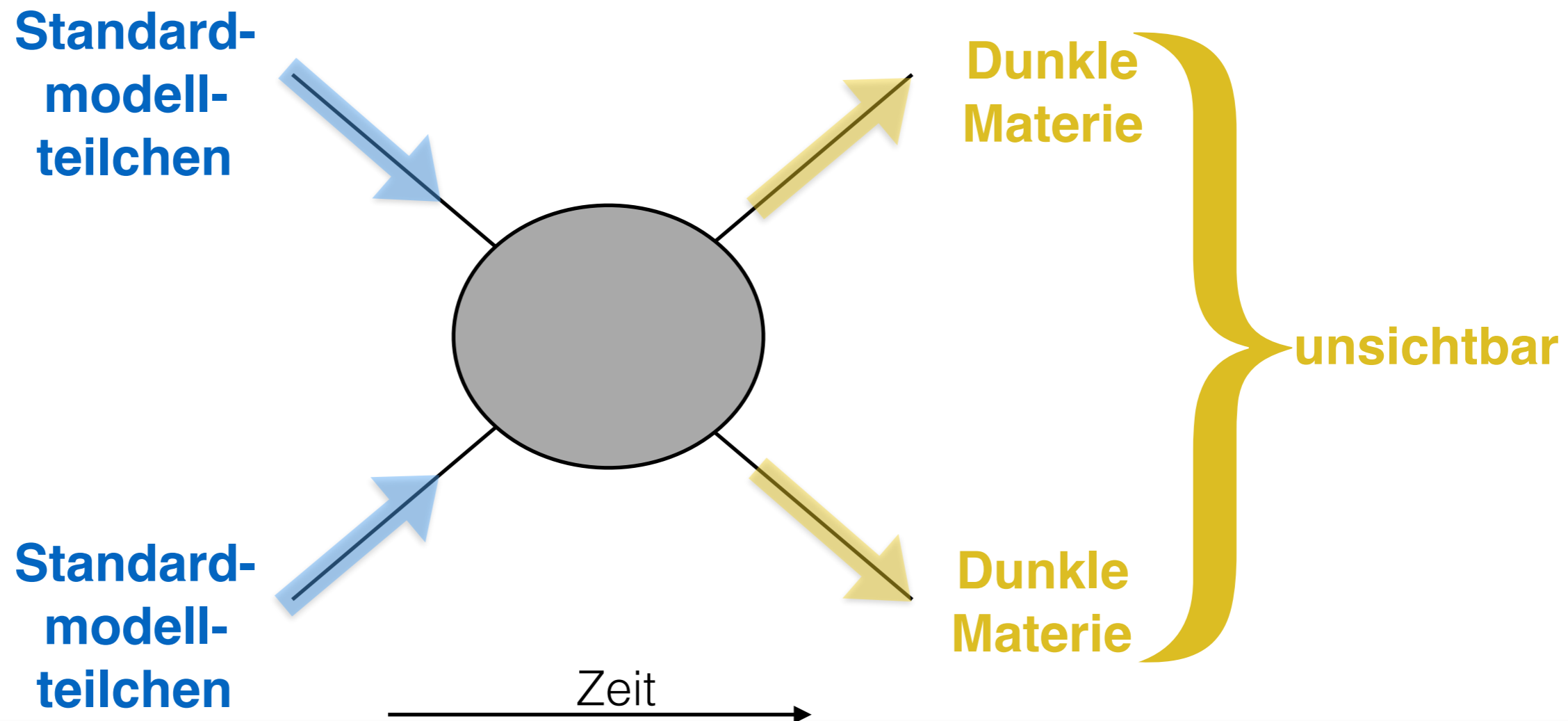
... im Detektor?

ATLAS-CONF-2012-147



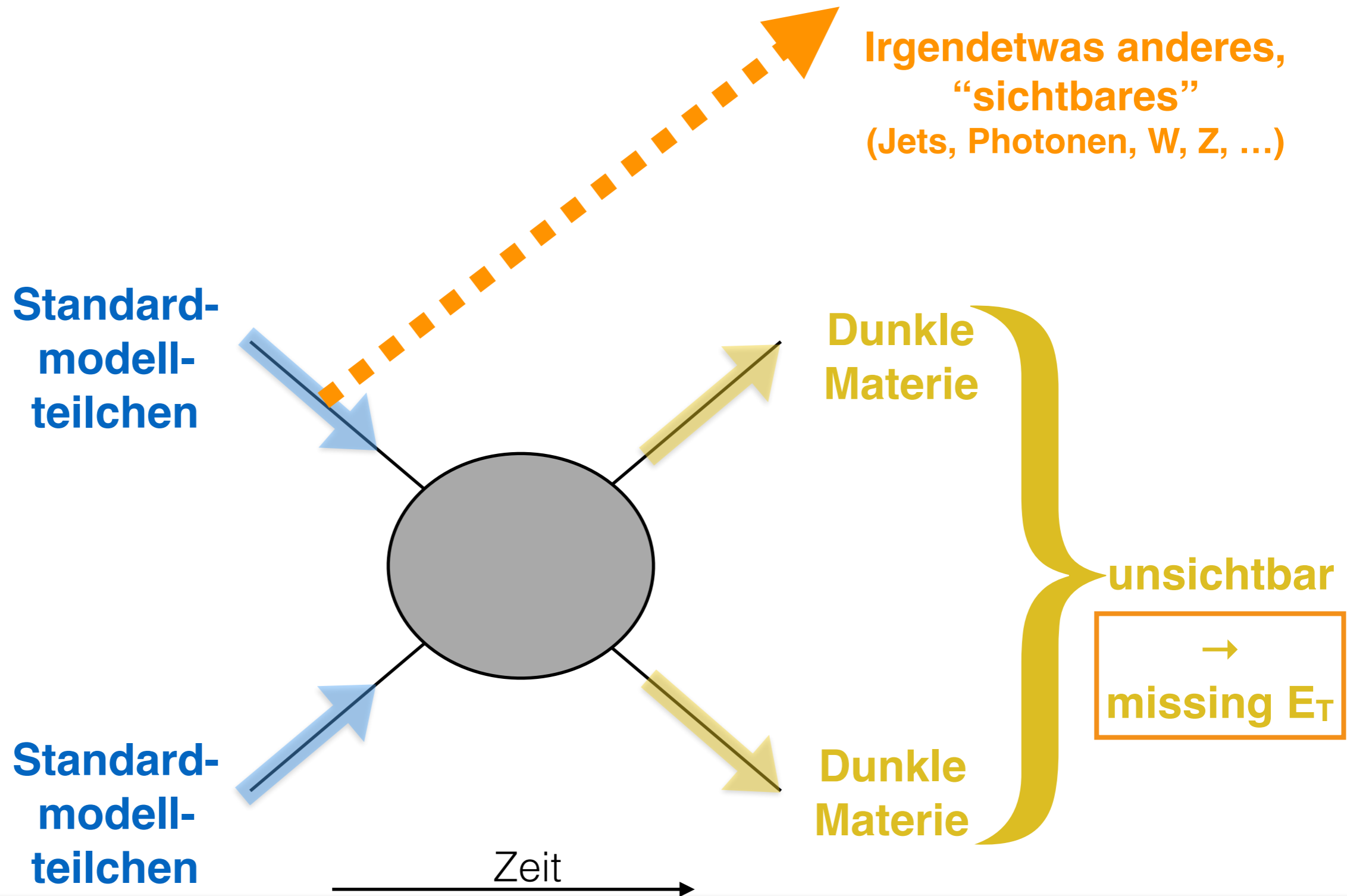
Wie kann man Dunkle Materie sehen...

... am LHC?

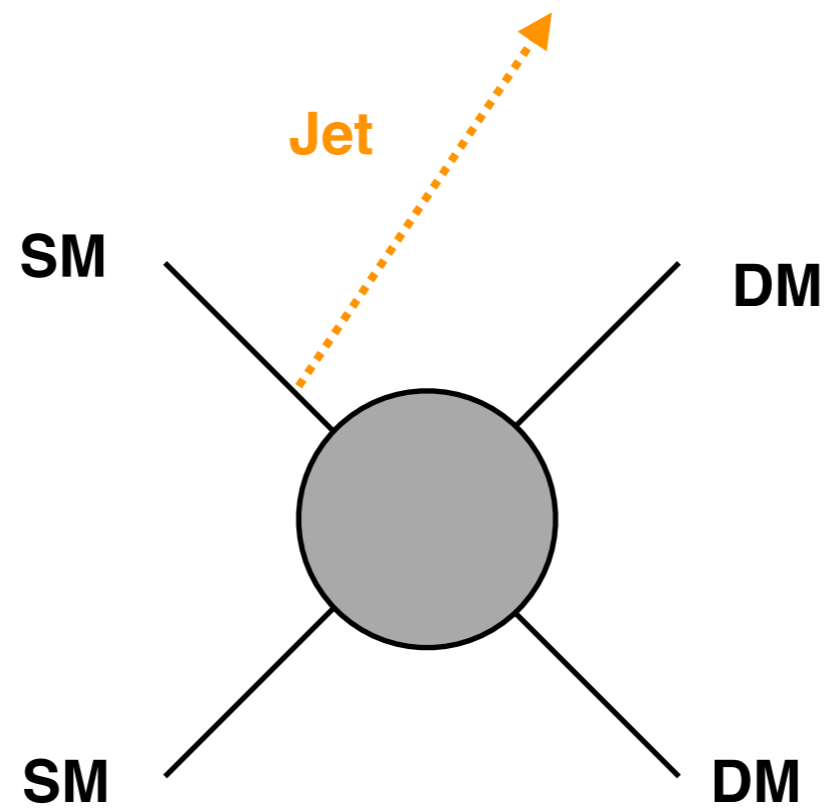


Wie kann man Dunkle Materie sehen...

... am LHC?



Monojet-Analyse

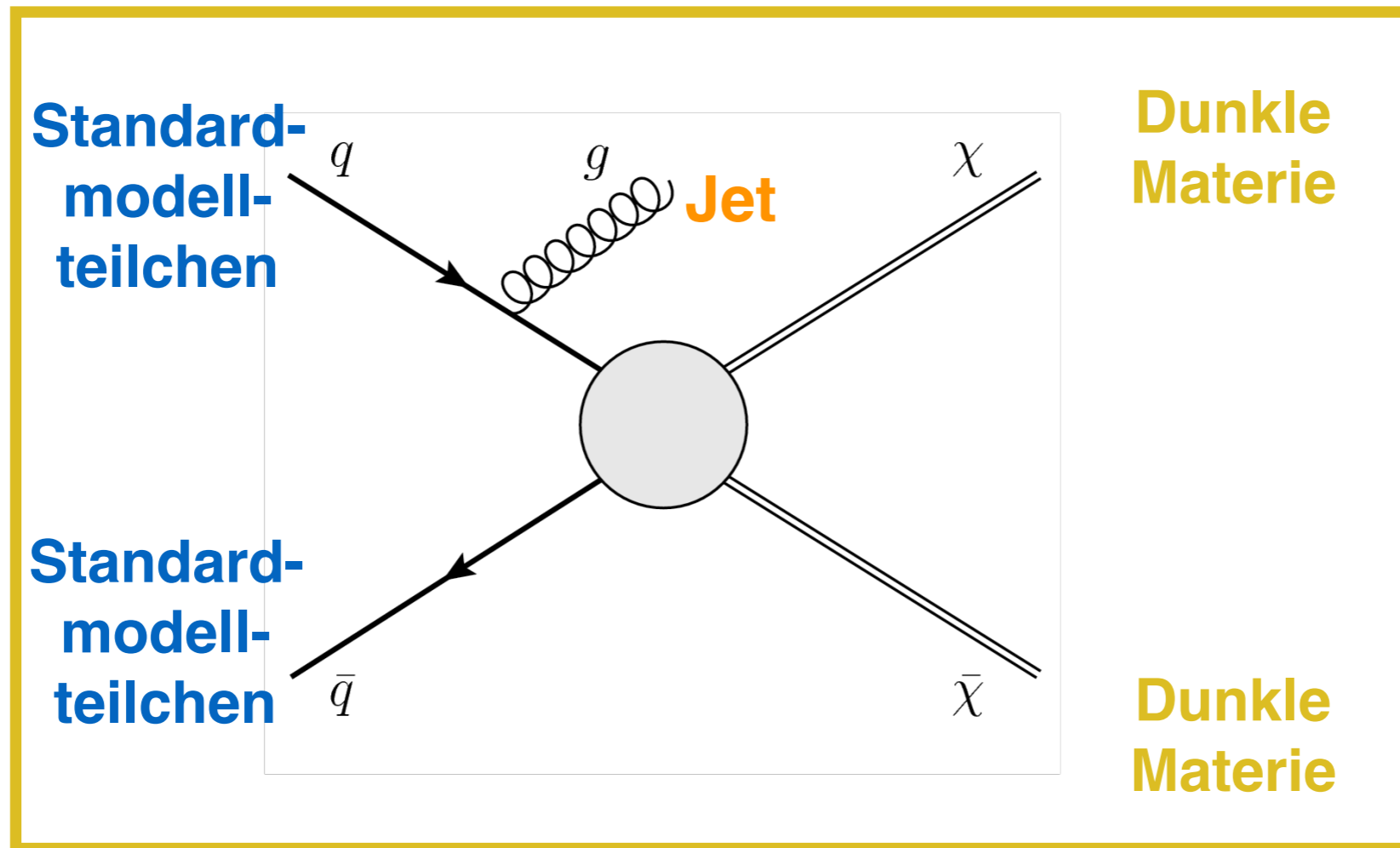


Eur. Phys. J. C 75, no. 7, 299 (2015)

Überblick



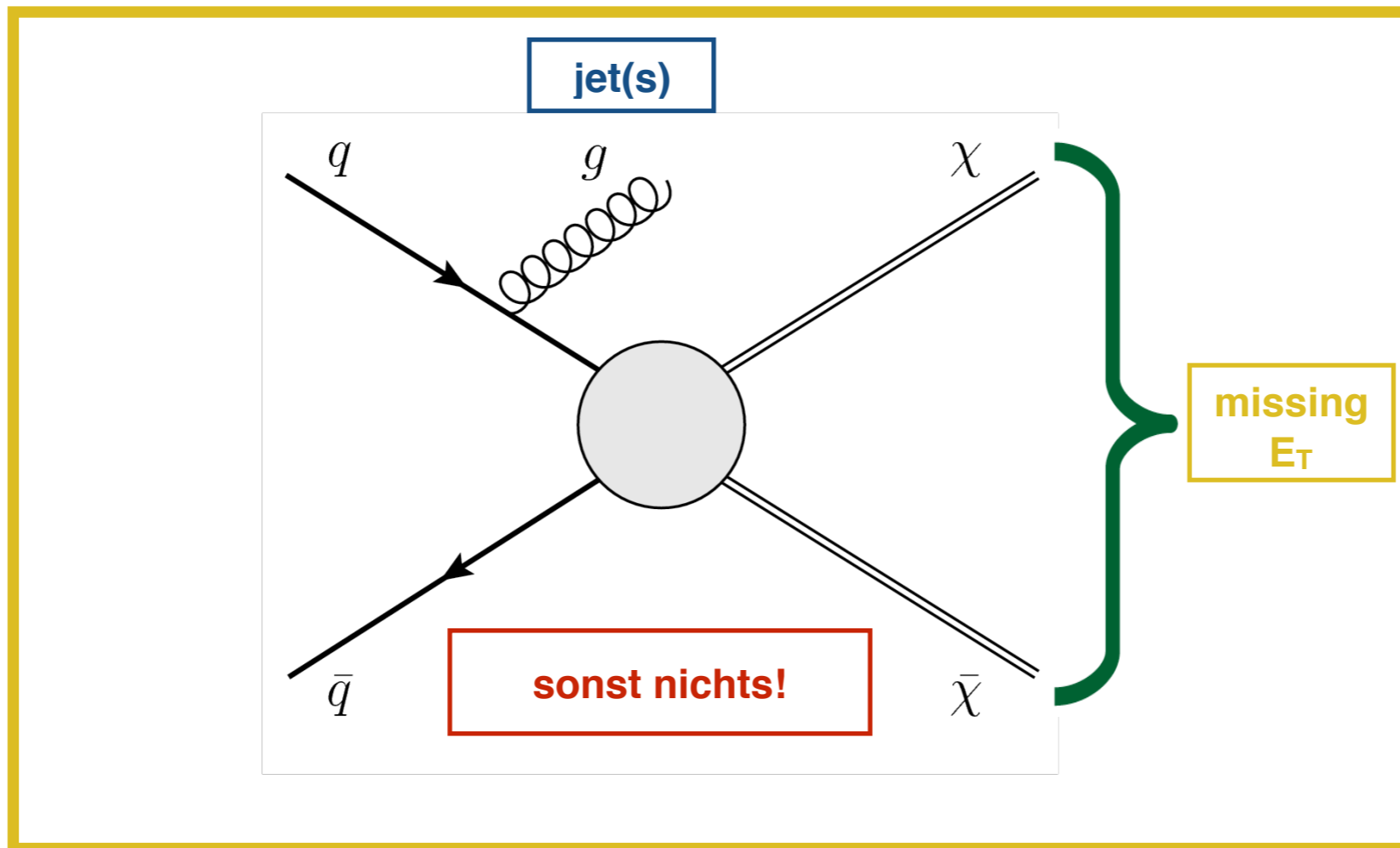
Produktion Dunkler Materie



Überblick



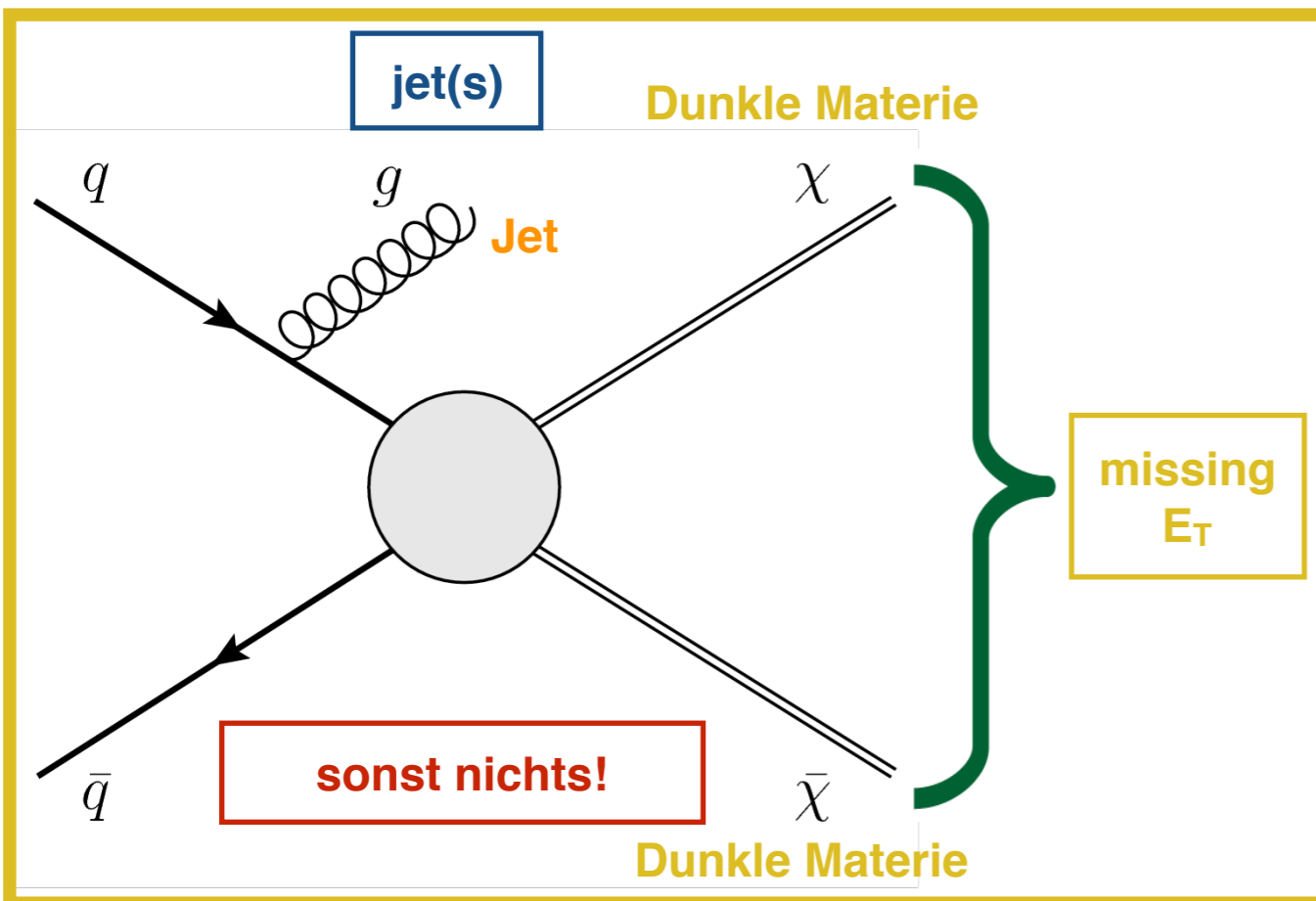
Produktion Dunkler Materie



Überblick



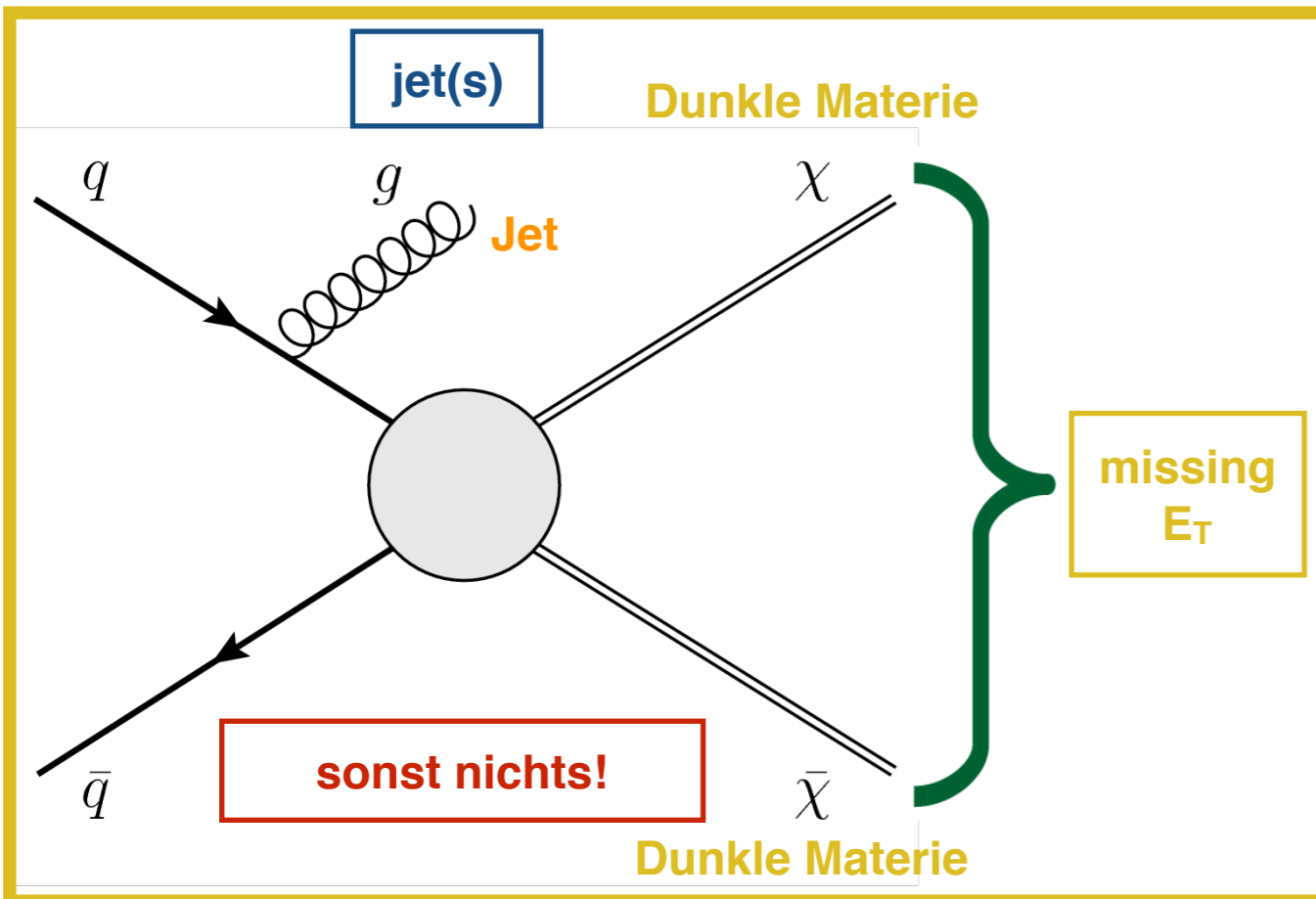
Produktion Dunkler Materie



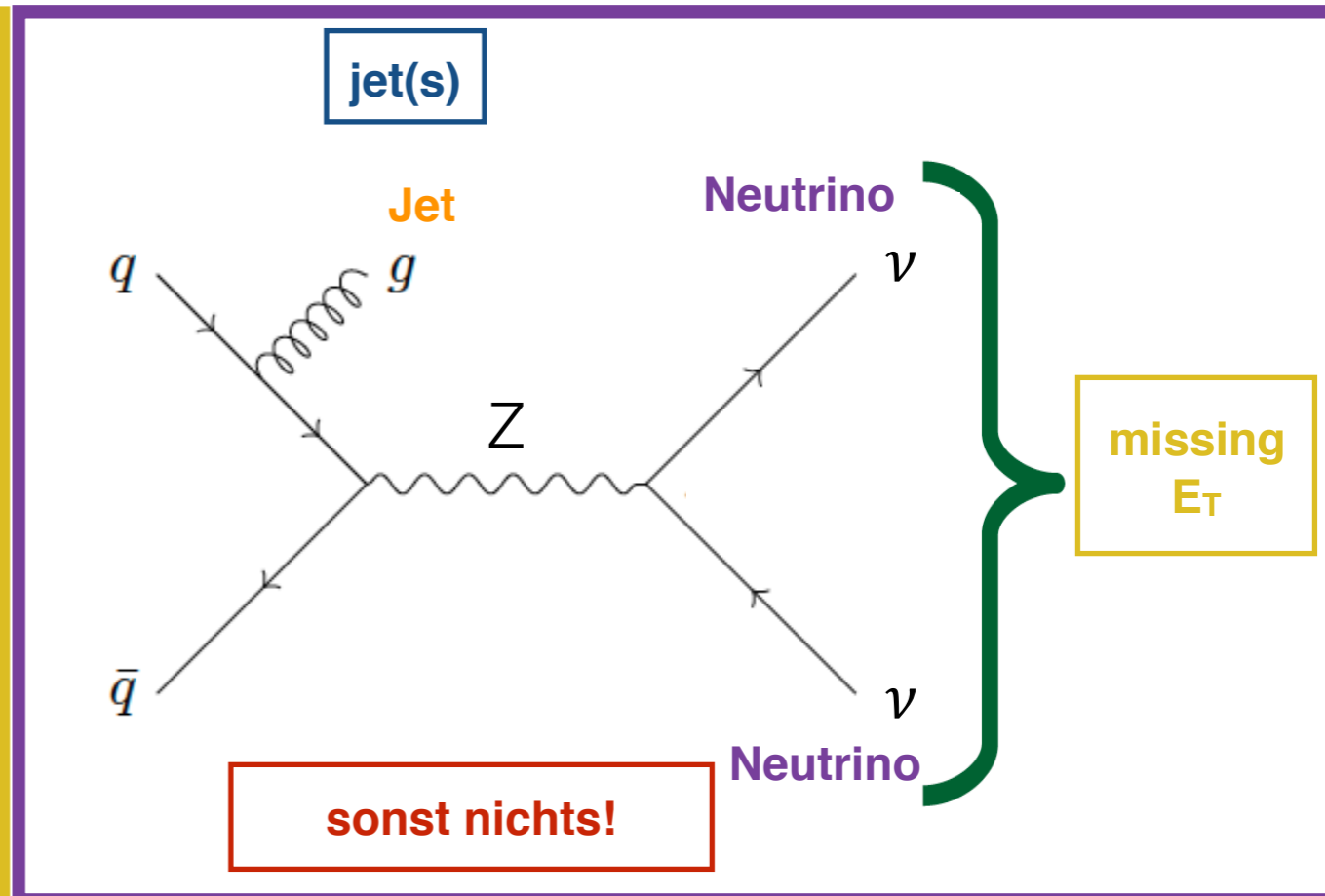
Überblick



Produktion Dunkler Materie

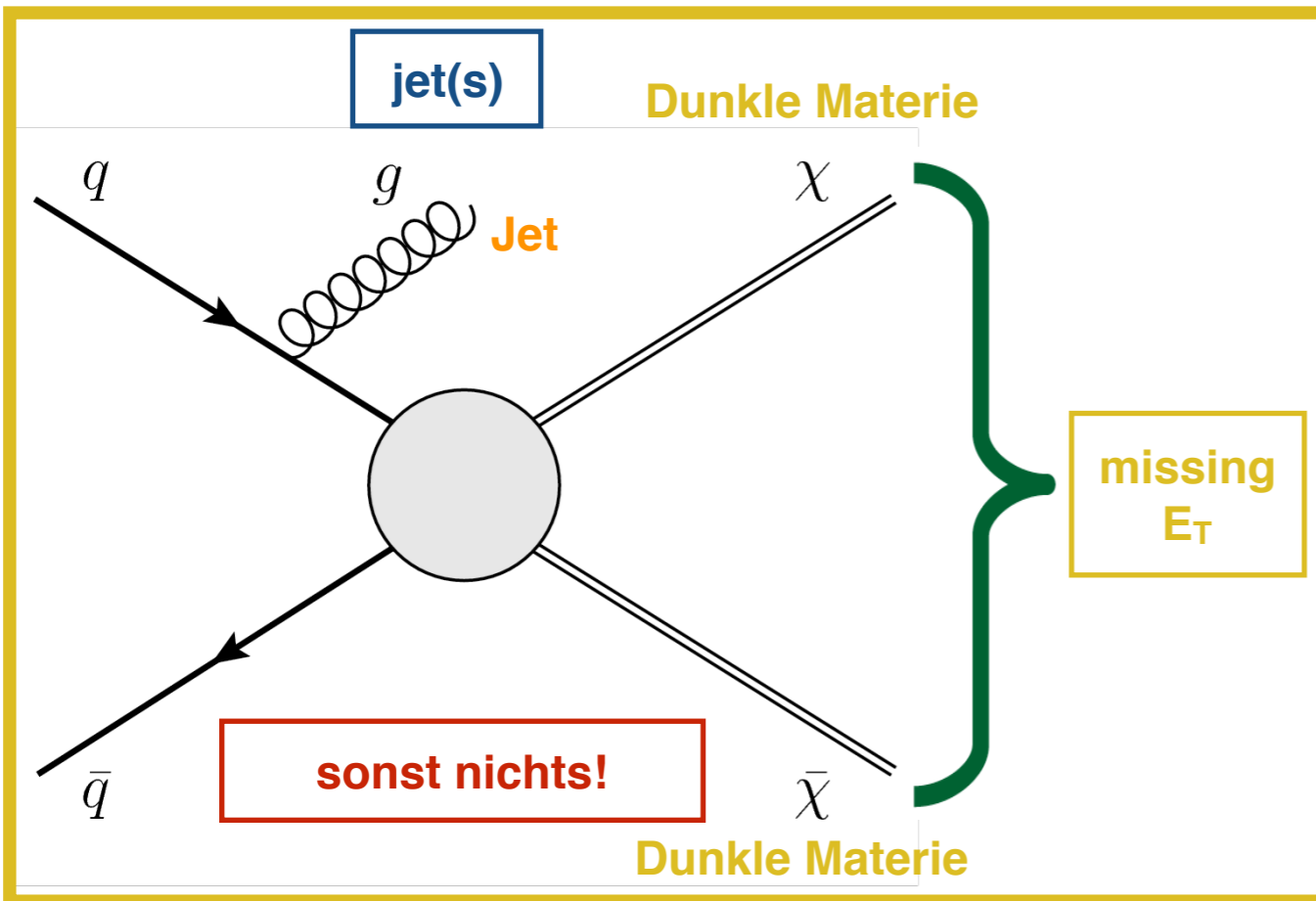


Standardmodell-Prozess

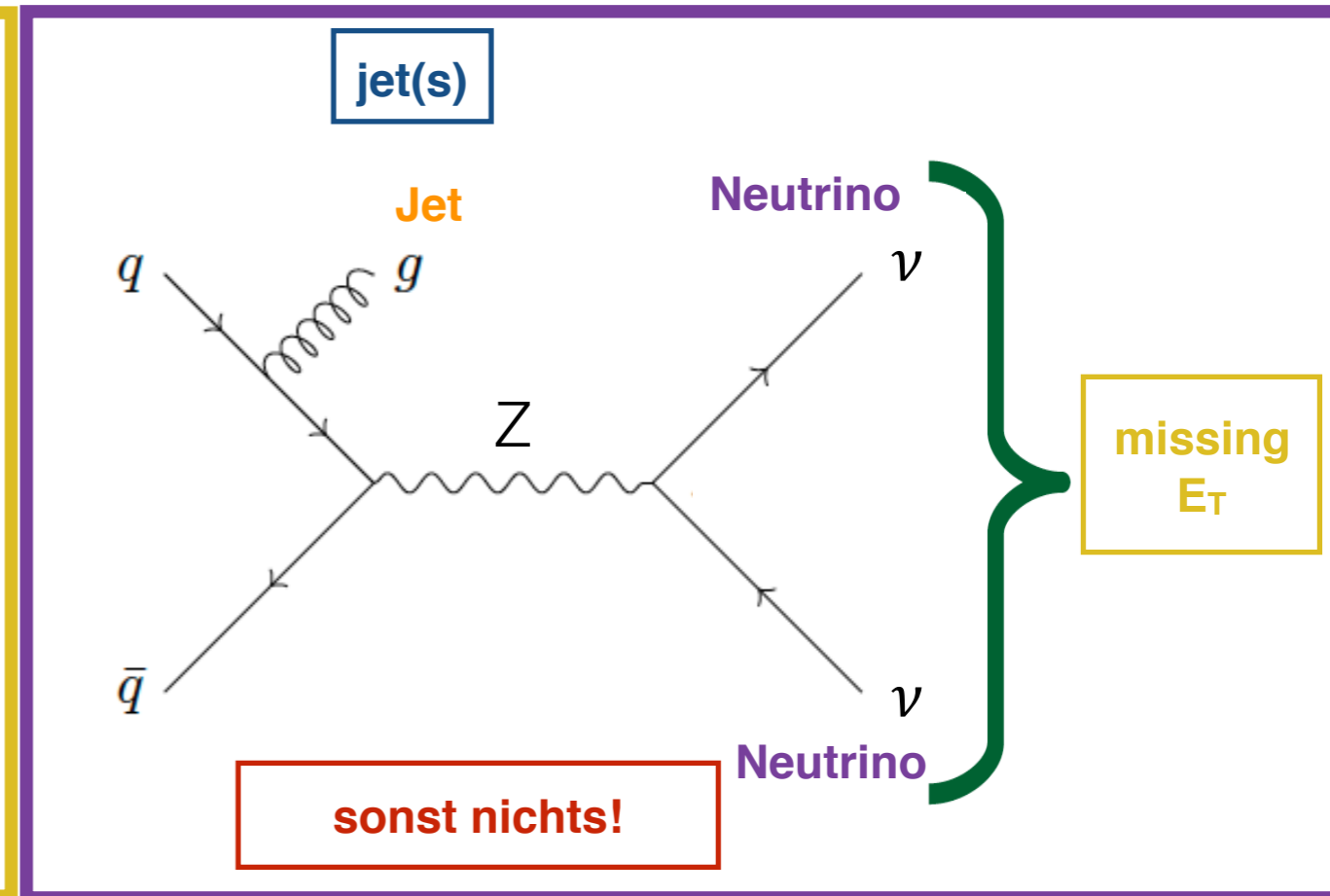


Überblick

Produktion Dunkler Materie



Standardmodell-Prozess

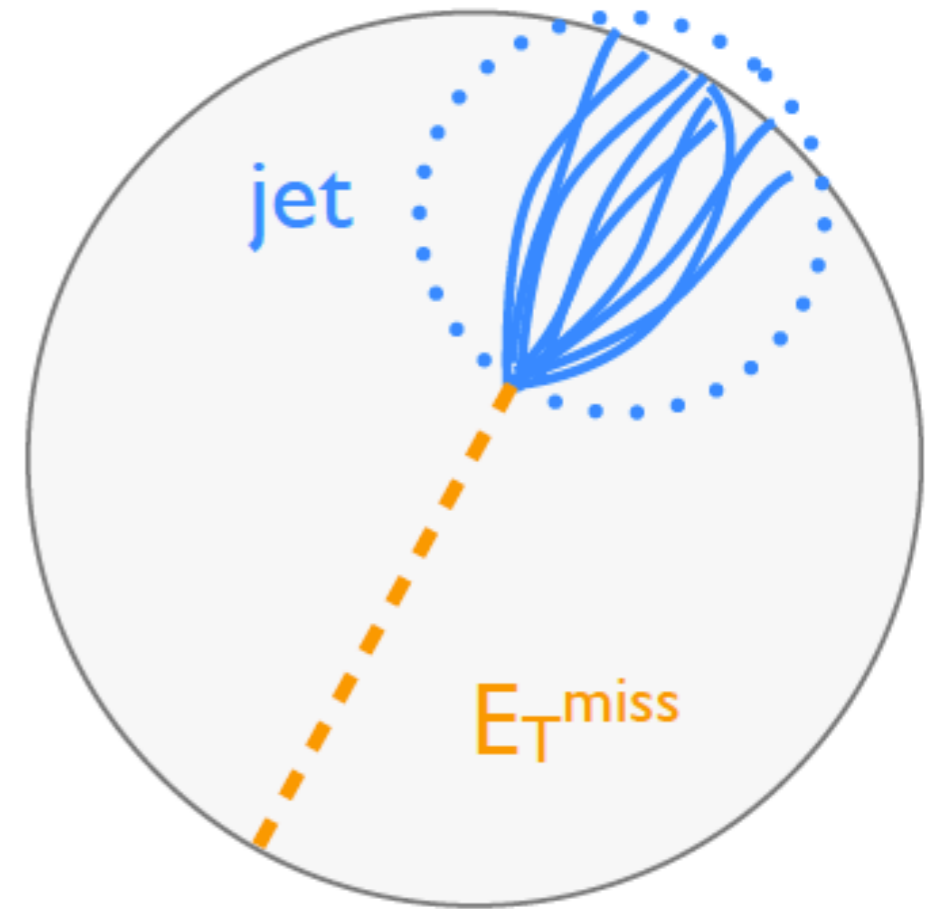


Herausforderung: Untergrundbestimmung!

Untergrundbestimmung



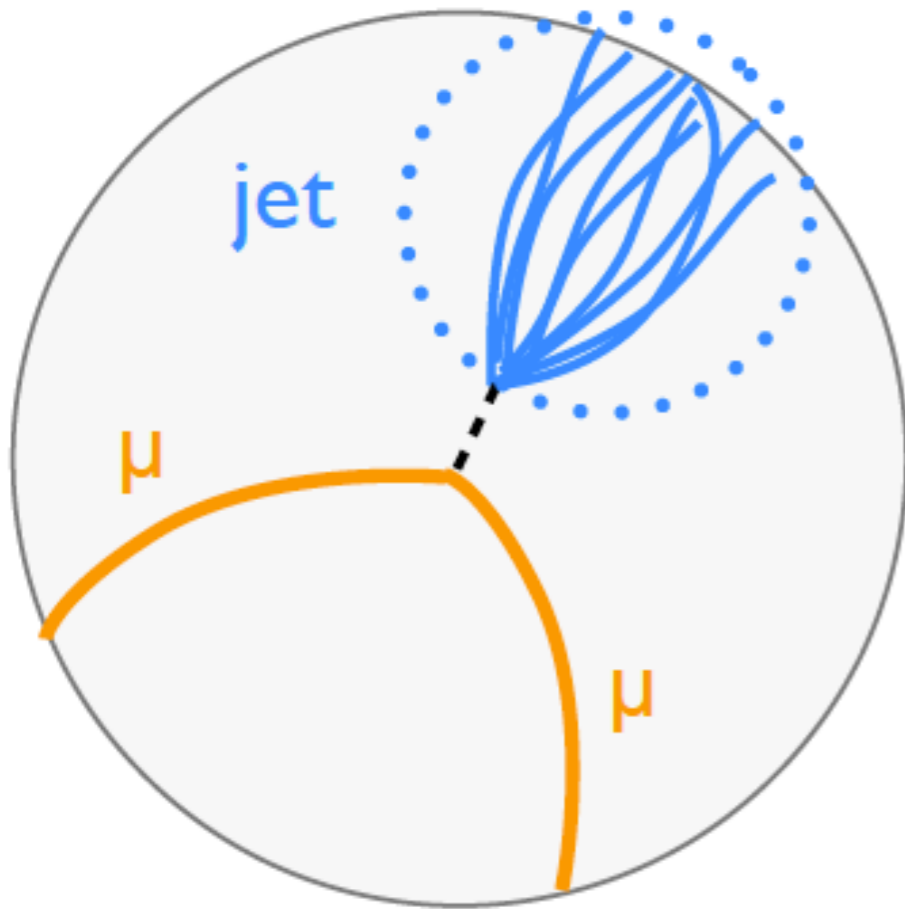
$Z(\nu\bar{\nu})+\text{jet}$



Untergrund, den wir bestimmen müssen

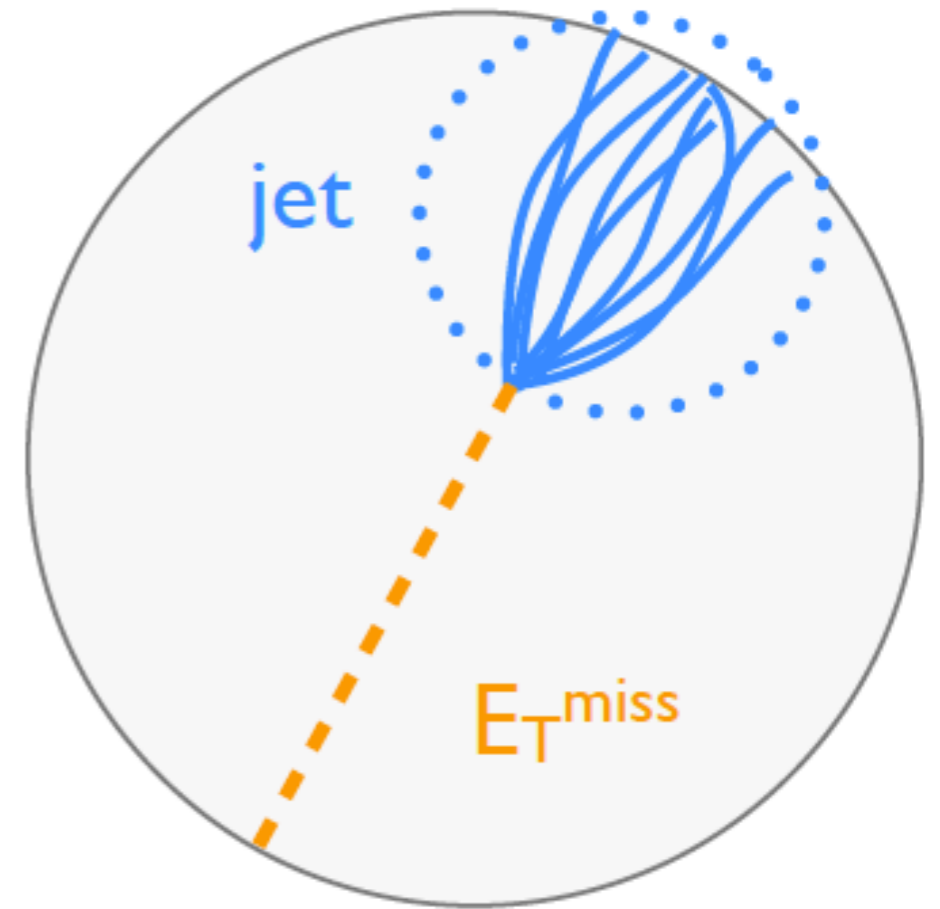
Untergrundbestimmung

$Z(\mu^+\mu^-)+\text{jet}$



Prozess, den wir messen können

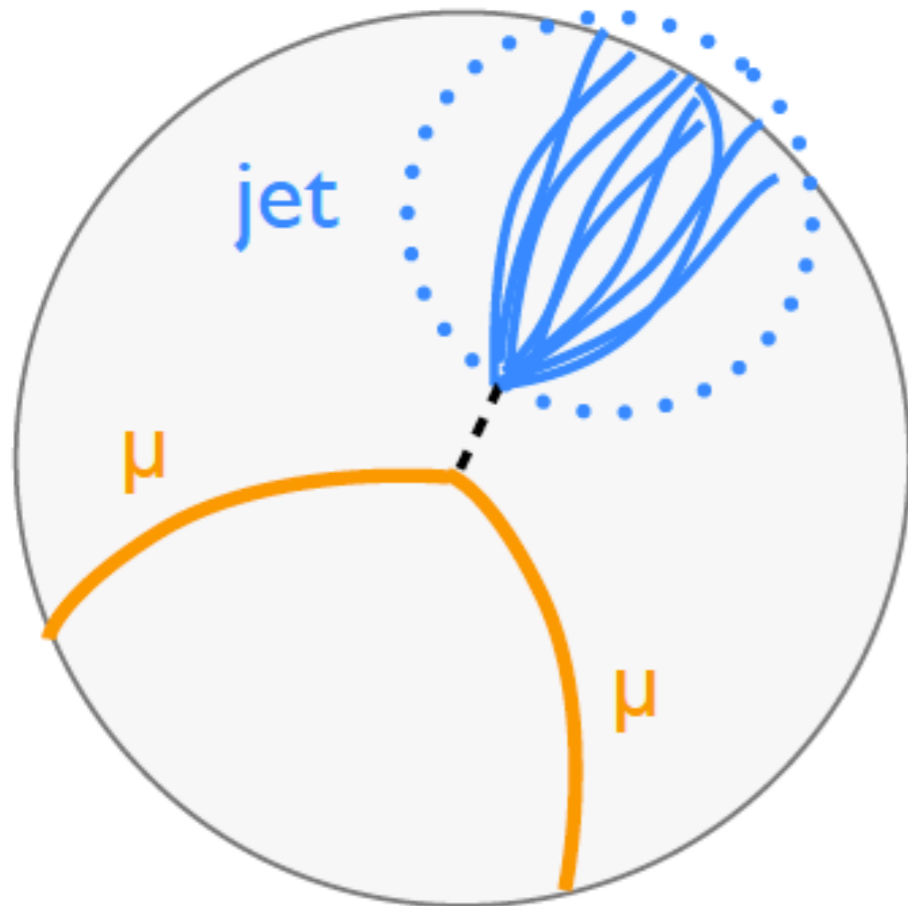
$Z(\nu\bar{\nu})+\text{jet}$



Untergrund, den wir bestimmen müssen

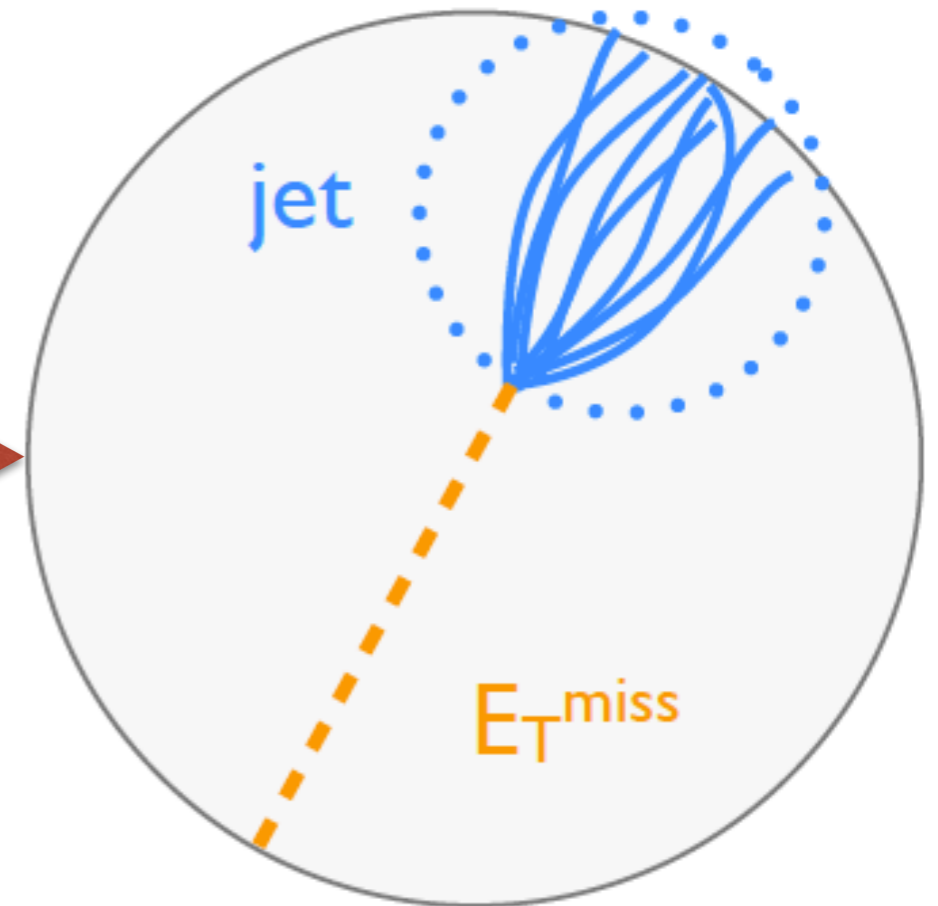
Untergrundbestimmung

$Z(\mu^+\mu^-)+\text{jet}$



Prozess, den wir messen können

$Z(\nu\bar{\nu})+\text{jet}$



Untergrund, den wir bestimmen müssen



Standardmodell sagt uns genau das Verhältnis der beiden Prozesse!

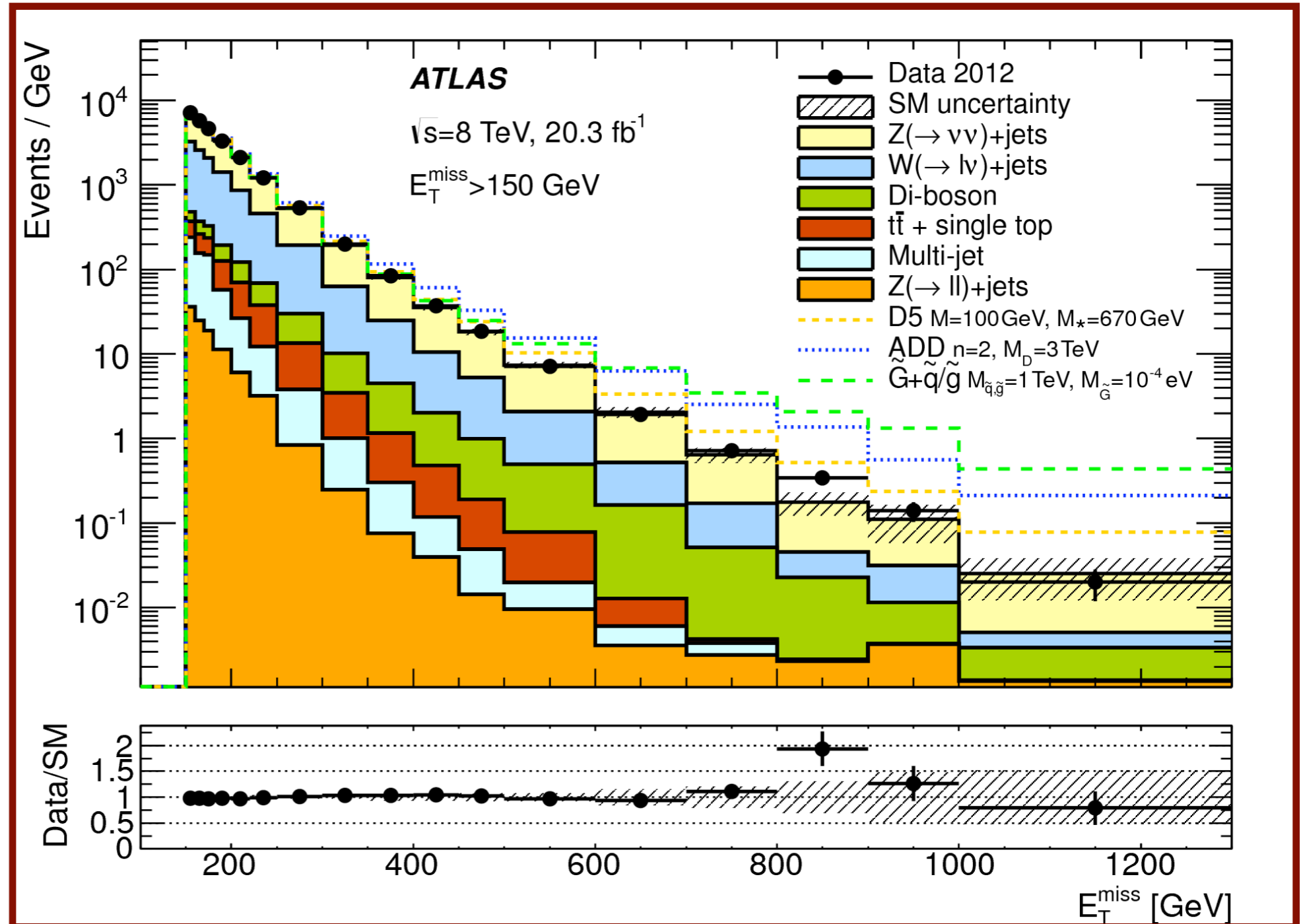


Ergebnis

- 1. Untergrund:** Bestimmen, wie viele Ereignisse man von bekannten Prozessen erwartet, bei gewählter Selektion
- 2. Messen:** Wie viele Ereignisse sieht man in den Daten, bei gewählter Selektion?
- 3. Vergleichen:** Stimmen Daten mit Erwartung von Untergrund - oder mit möglichen Signalen - überein?

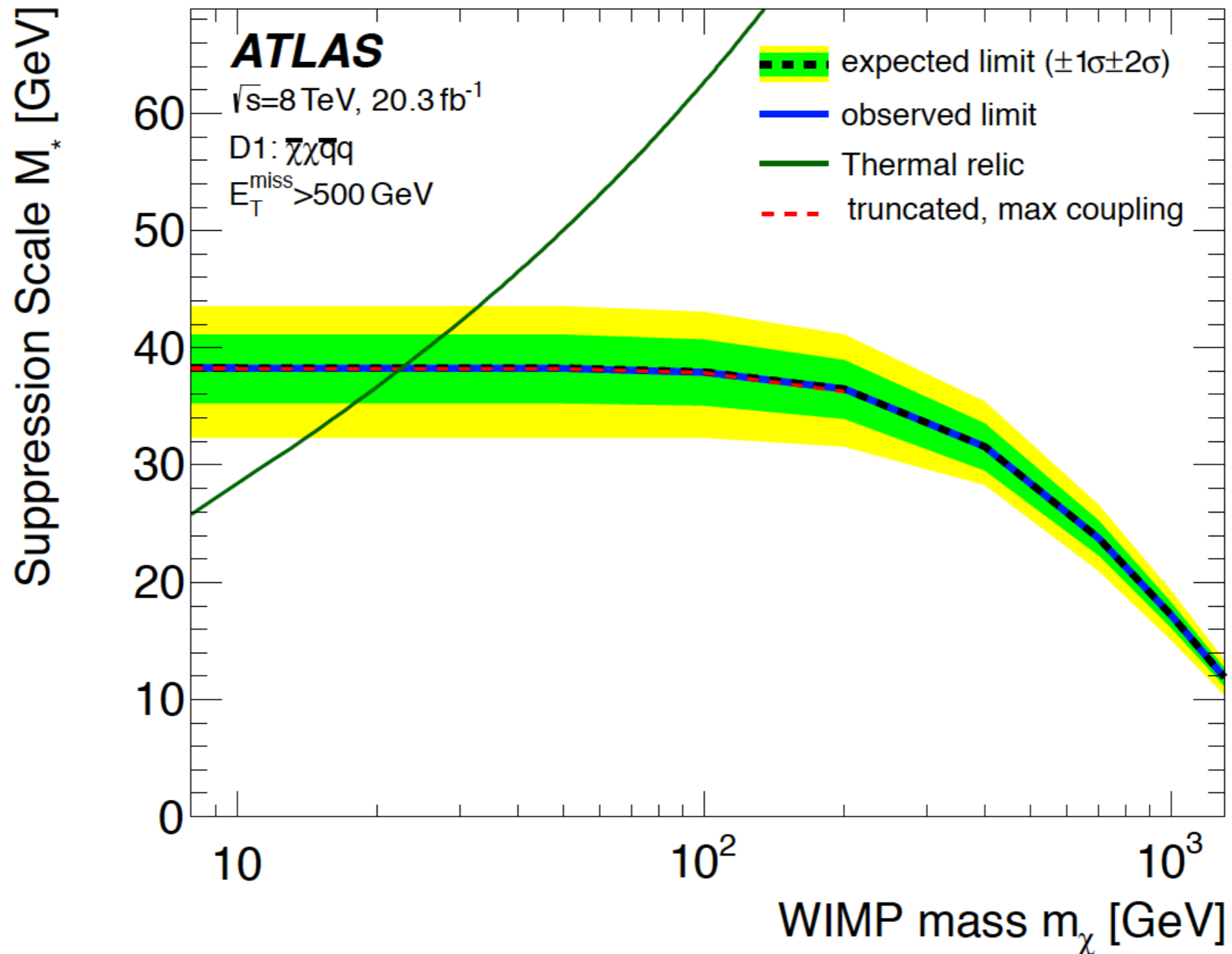
Ergebnis

1. Untergrund
2. Messen
3. Vergleichen



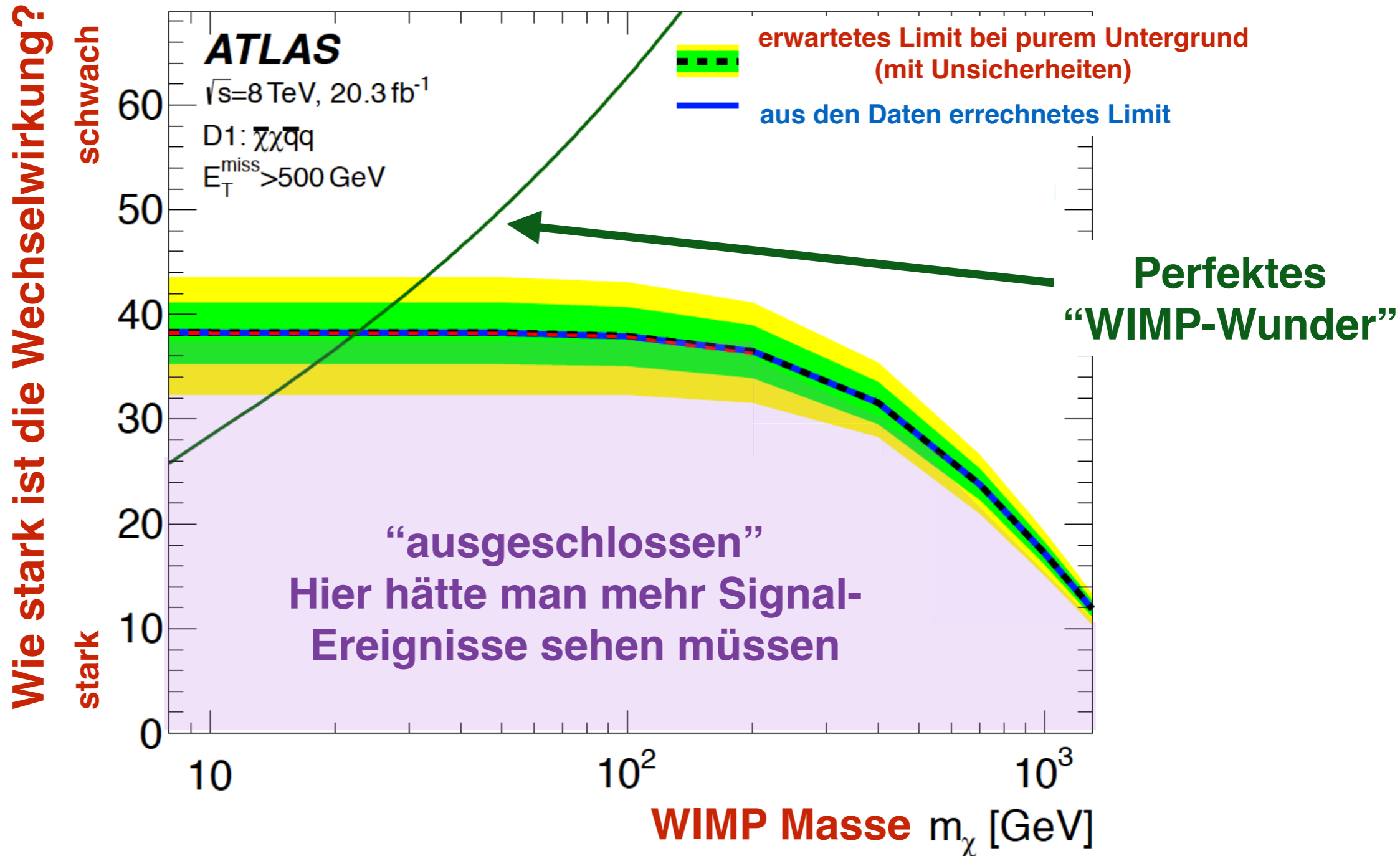
Ergebnis: Limit

Was bedeutet es für ein bestimmtes Signalmodell, dass man keine Signalereignisse gesehen hat?

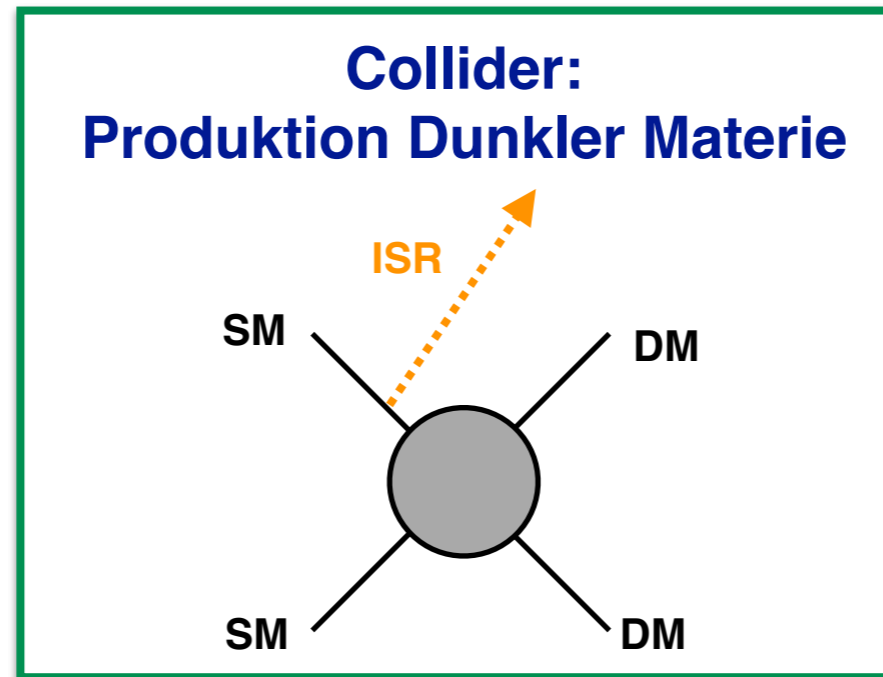


Ergebnis: Limit

Was bedeutet es für ein bestimmtes Signalmodell, dass ich keine Signalereignisse gesehen habe?

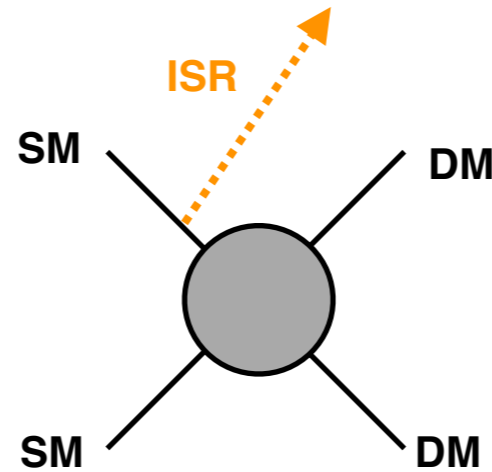


Wie kann man Dunkle Materie noch sehen?

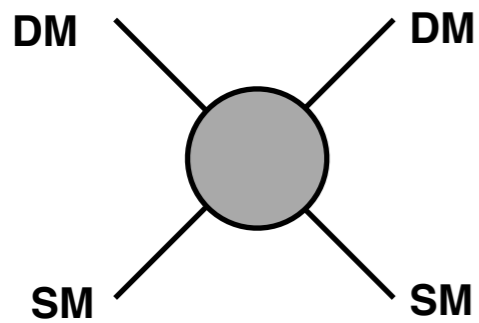


Wie kann man Dunkle Materie noch sehen?

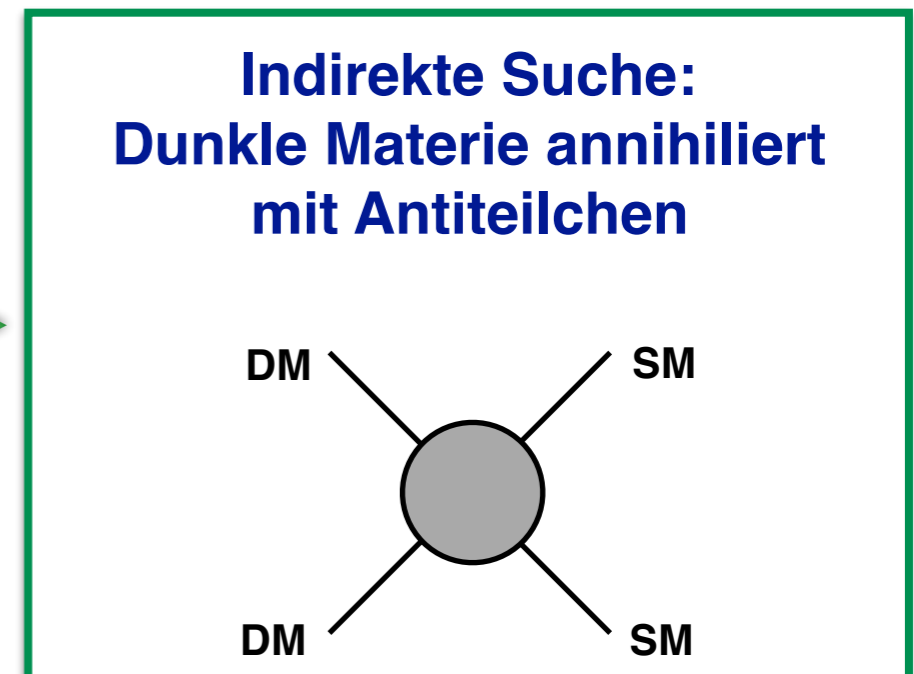
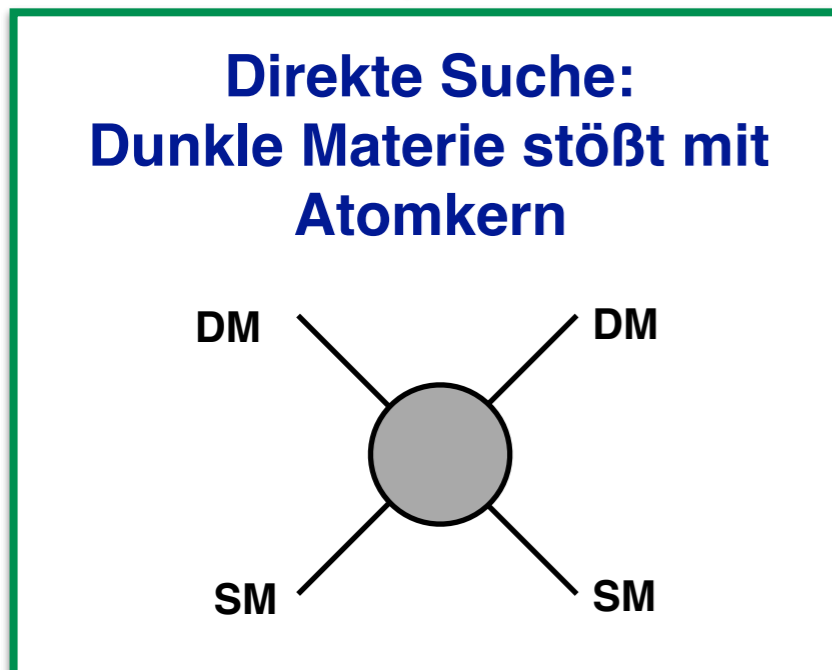
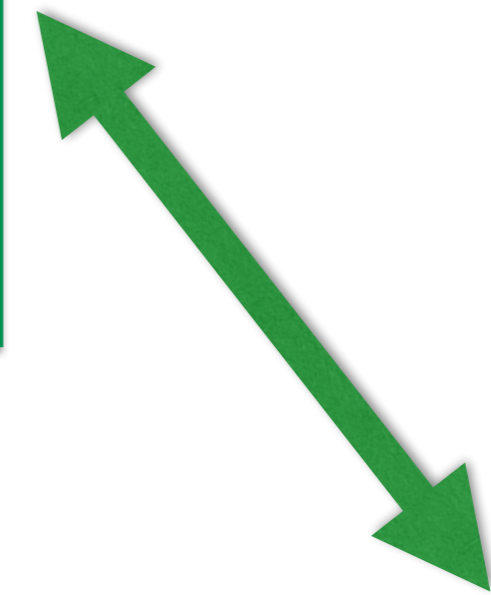
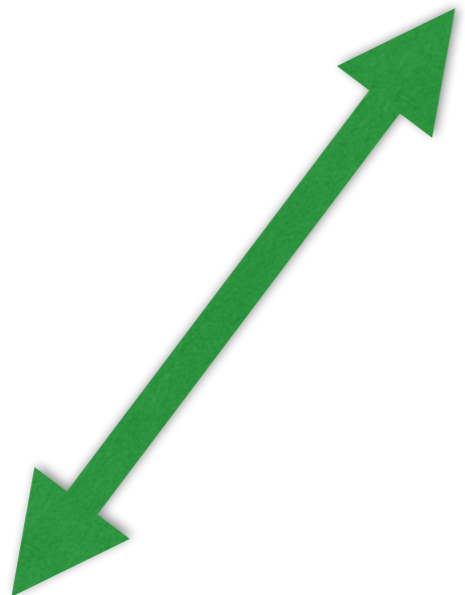
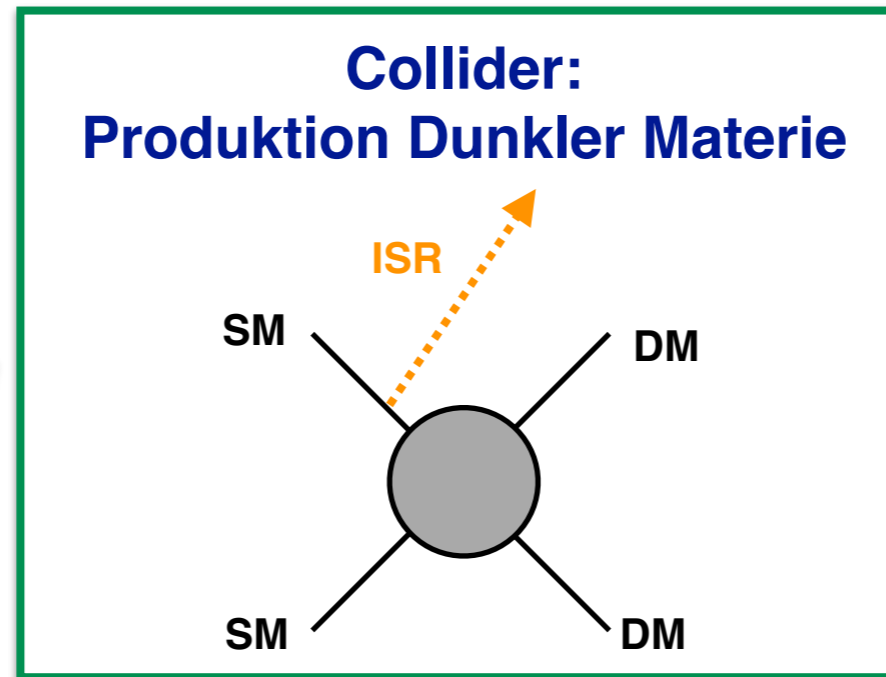
Collider: Produktion Dunkler Materie



Direkte Suche: Dunkle Materie stößt mit Atomkern

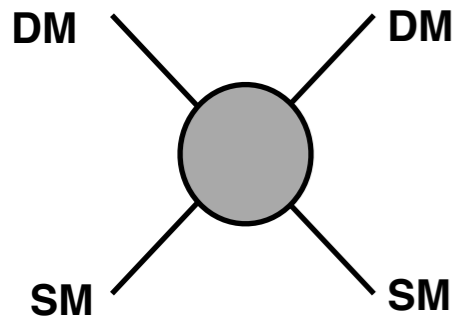


Wie kann man Dunkle Materie noch sehen?



Direkte Suche

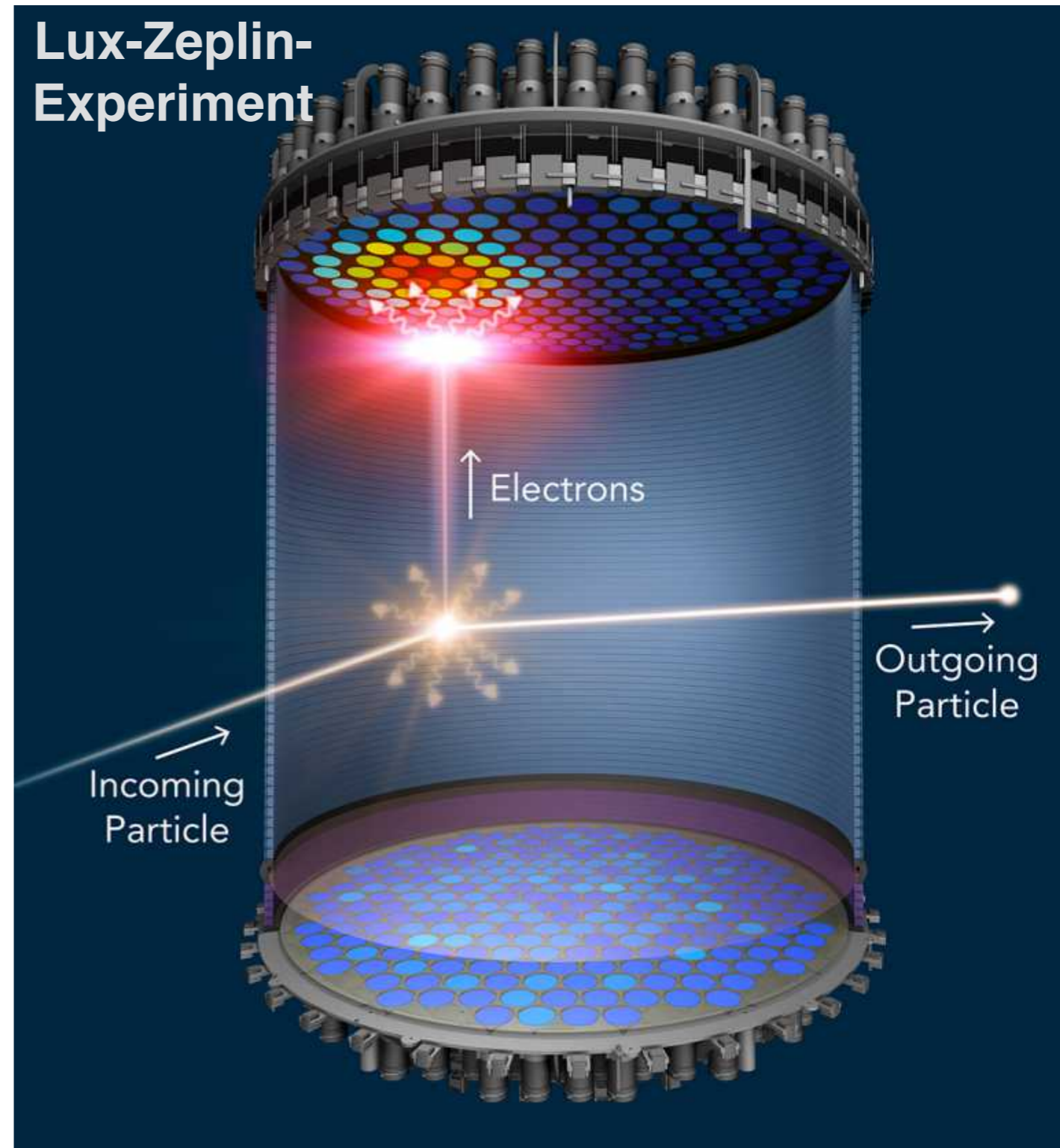
Dunkle-Materie-Teilchen stößt mit Atomkern



Dunkle-Materie-Teilchen stößt mit Atomkern, Rückstoß wird gemessen

- Detektoren müssen sehr empfindlich sein, Rückstoßenergie ist i.A. sehr klein
- Typischerweise große Detektoren, Edelgase oder Halbleiter werden verwendet
- Tief unter der Erde: Abschirmung von Untergrund durch z.B. kosmische Strahlung

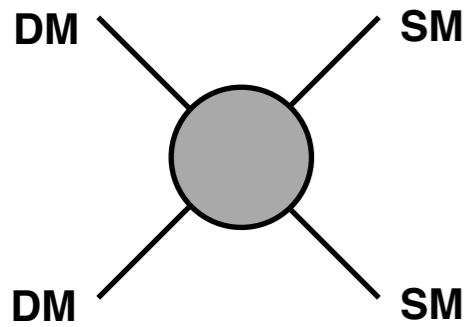
Lux-Zeplin-Experiment



<https://kipac.stanford.edu/research/topics/direct-detection-dark-matter>

Indirekte Suche

Dunkle-Materie-Teilchen annihilieren

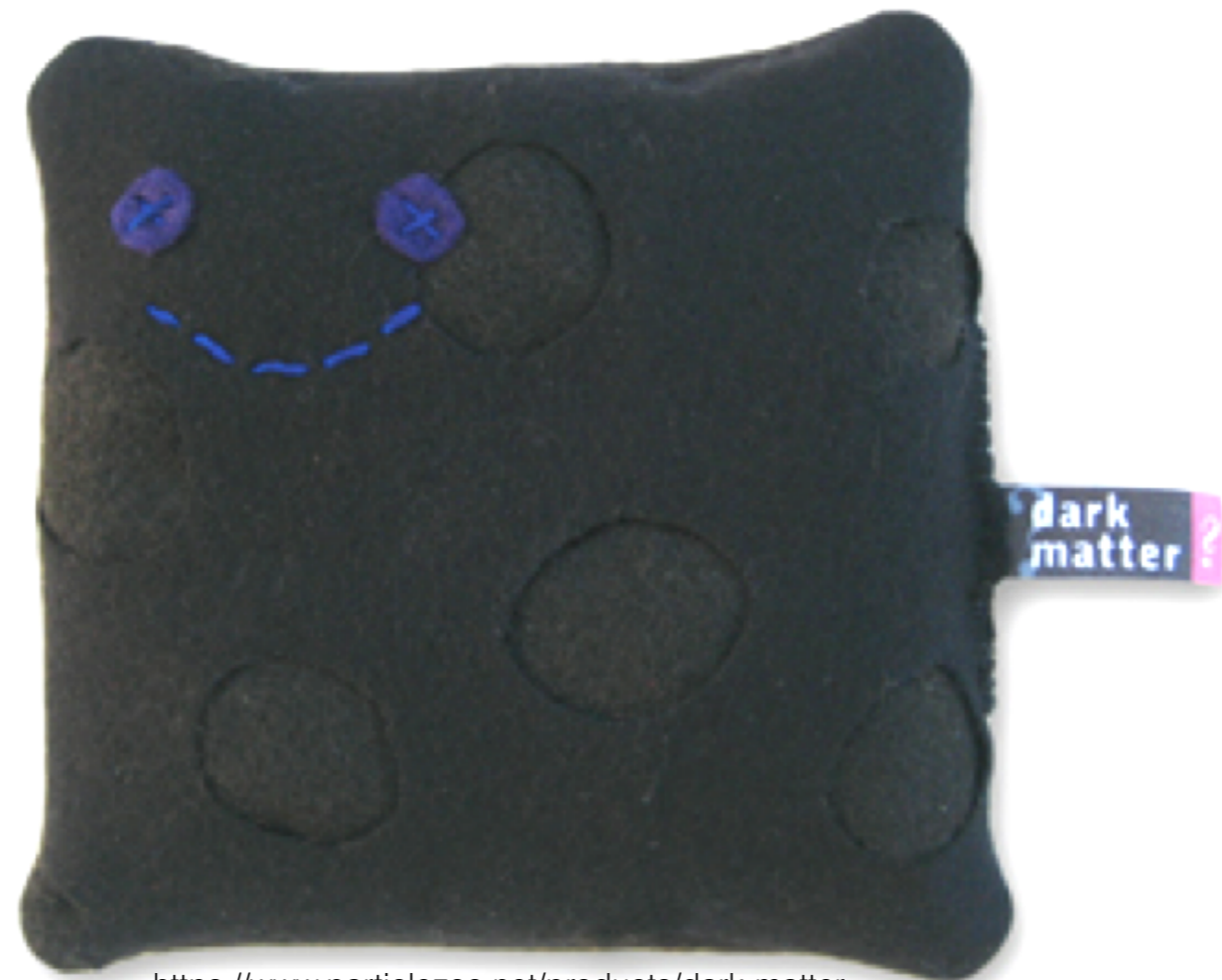


Dunkle-Materie-Teilchen trifft Dunkle-Materie-Antiteilchen und sie löschen sich aus, die dabei entstehenden Teilchen werden gemessen

- Typischerweise Satelliten im All, außerhalb der Atmosphäre, große Teleskope
- Fokus auf Regionen, in denen sehr viel Dunkle Materie vermutet wird (z.B. Zentrum der Galaxie)



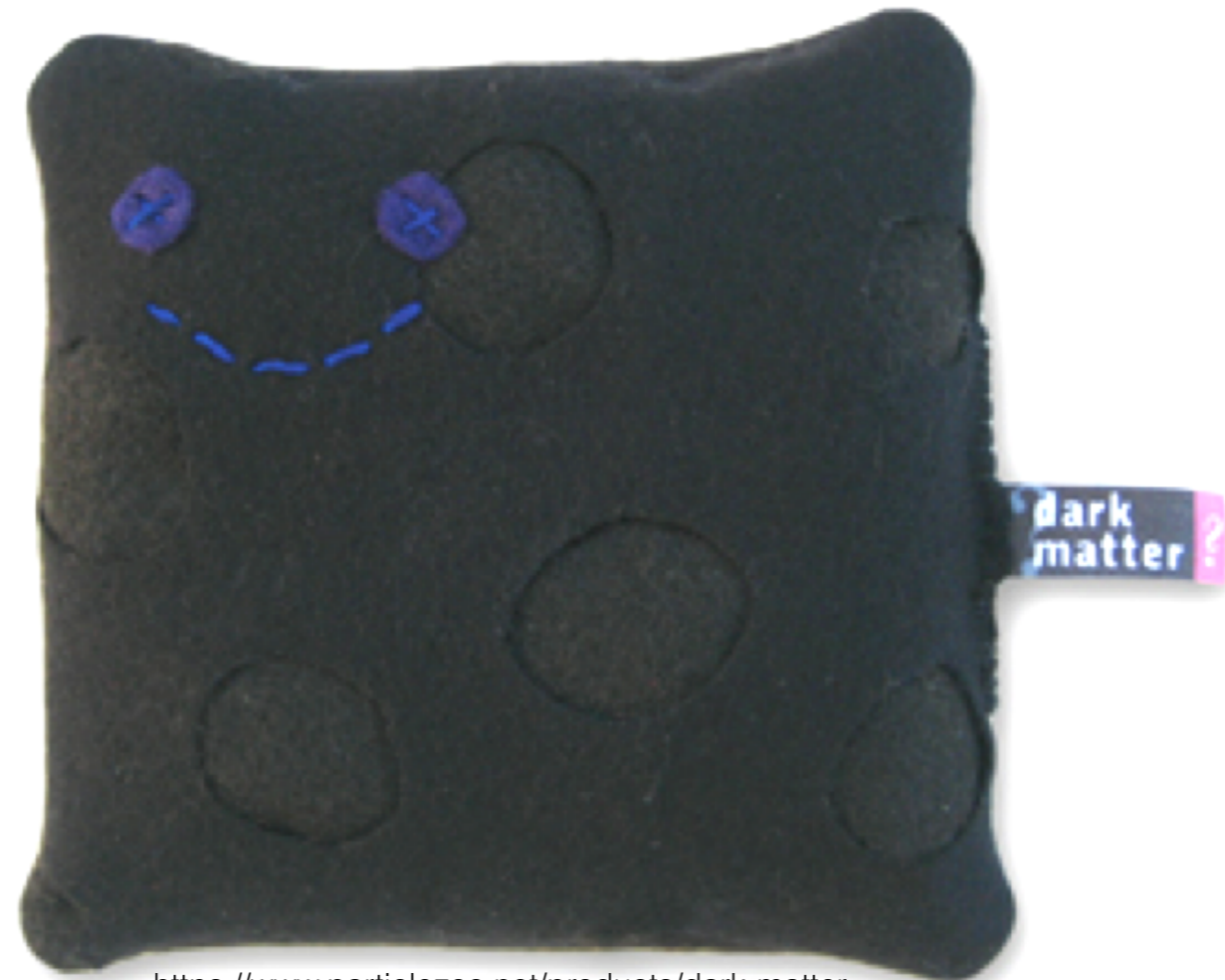
<https://fermi.gsfc.nasa.gov/inc/img/spacecraft.jpg>



<https://www.particlezoo.net/products/dark-matter>

Was ist Dunkle Materie?

- Eine extra "Zutat" im Universum
- Wahrscheinlich neue(s) Teilchen, mit speziellen Eigenschaften



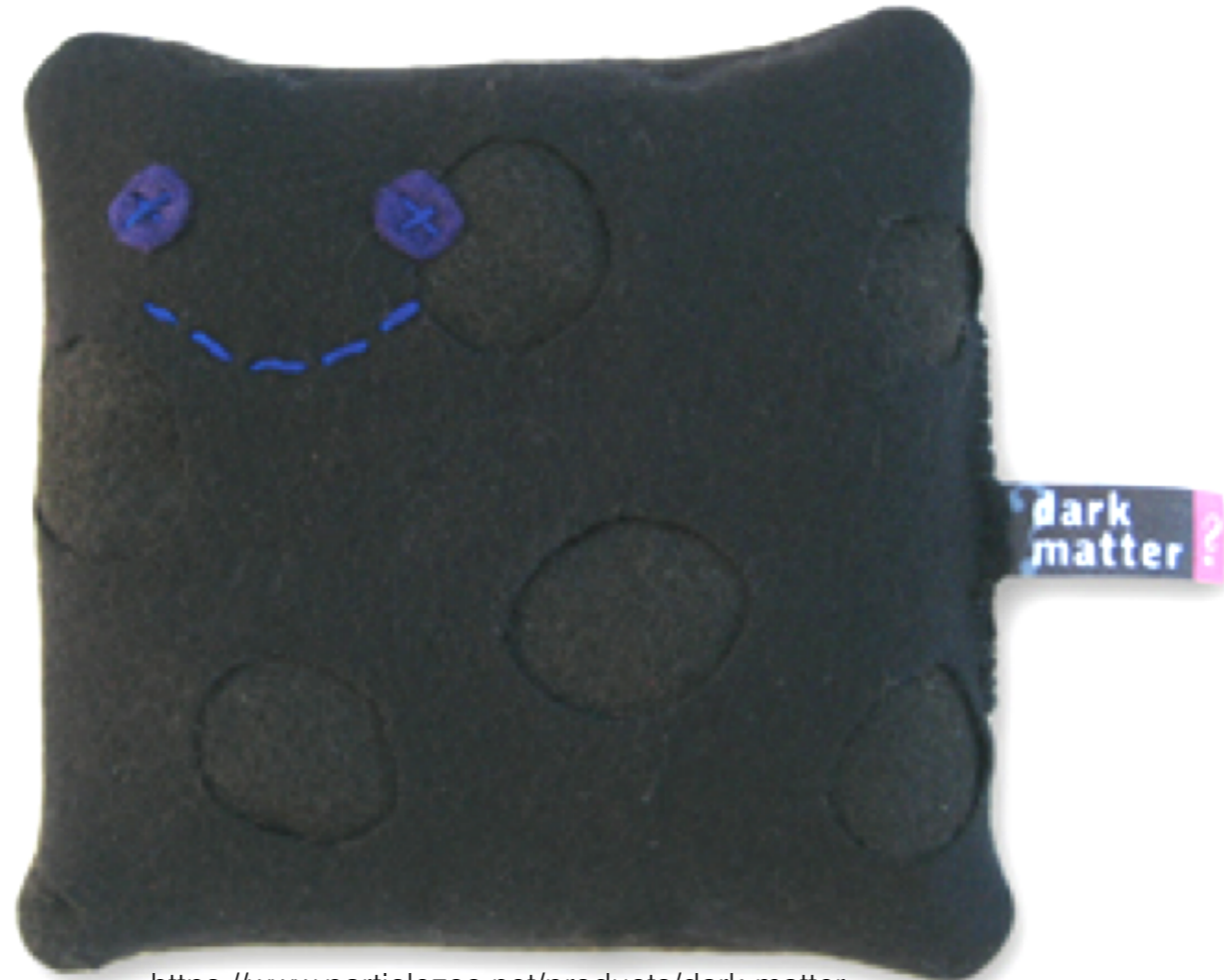
<https://www.particlezoo.net/products/dark-matter>

Was ist Dunkle Materie?

- Eine extra "Zutat" im Universum
- Wahrscheinlich neue(s) Teilchen, mit speziellen Eigenschaften

Warum überhaupt Dunkle Materie?

- Viele, sehr verschiedene, beobachtete Phänomene können durch die Annahme von Dunkler Materie erklärt werden



<https://www.particlezoo.net/products/dark-matter>

Was ist Dunkle Materie?

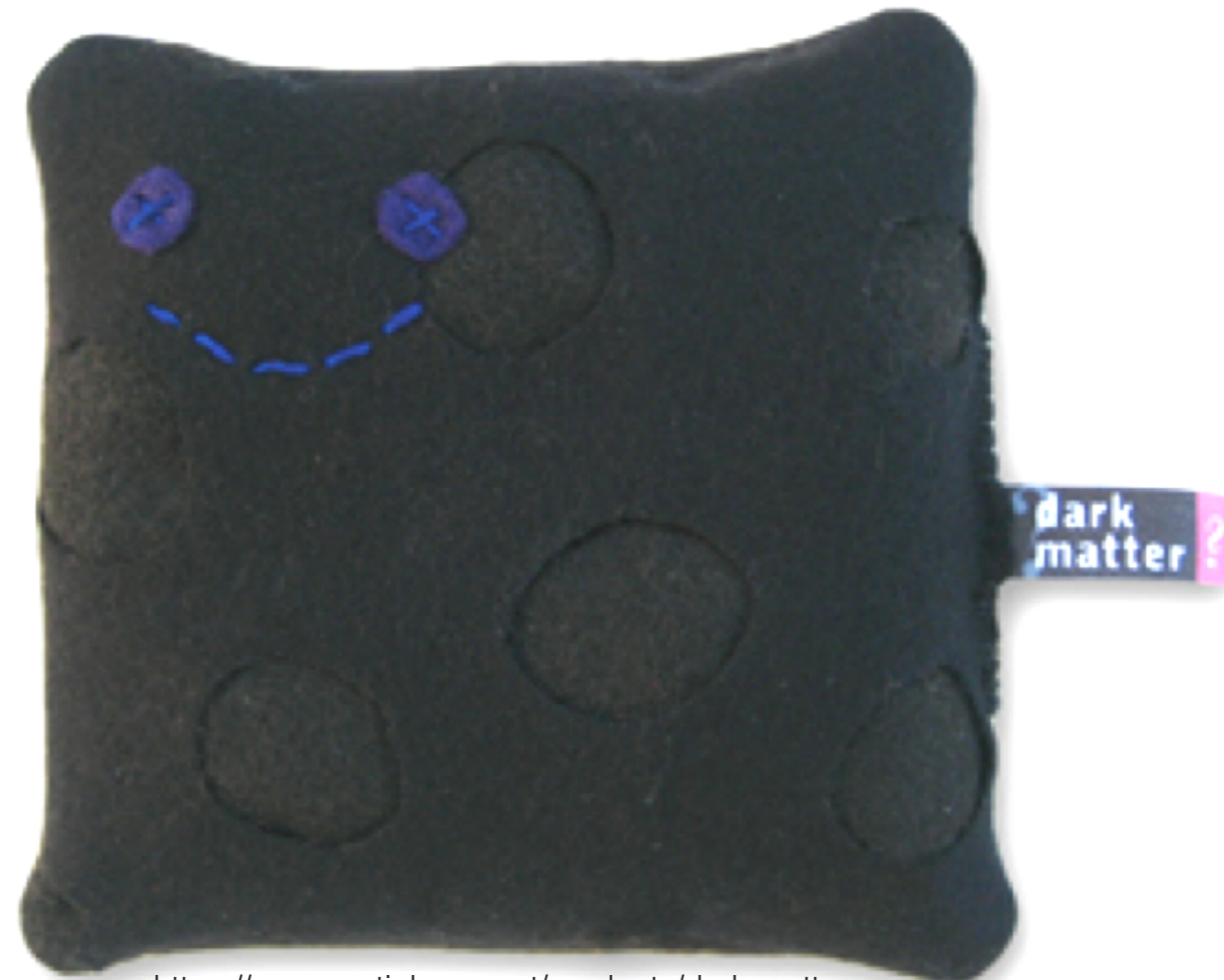
- Eine extra “Zutat” im Universum
- Wahrscheinlich neue(s) Teilchen, mit speziellen Eigenschaften

Warum überhaupt Dunkle Materie?

- Viele, sehr verschiedene, beobachtete Phänomene können durch die Annahme von Dunkler Materie erklärt werden

Was macht Dunkle Materie interessant?

- Es gibt ca. 5x mehr Dunkle Materie im Universum als “normale” Materie
- “Tor” zu neuer Physik



<https://www.particlezoo.net/products/dark-matter>

Was ist Dunkle Materie?

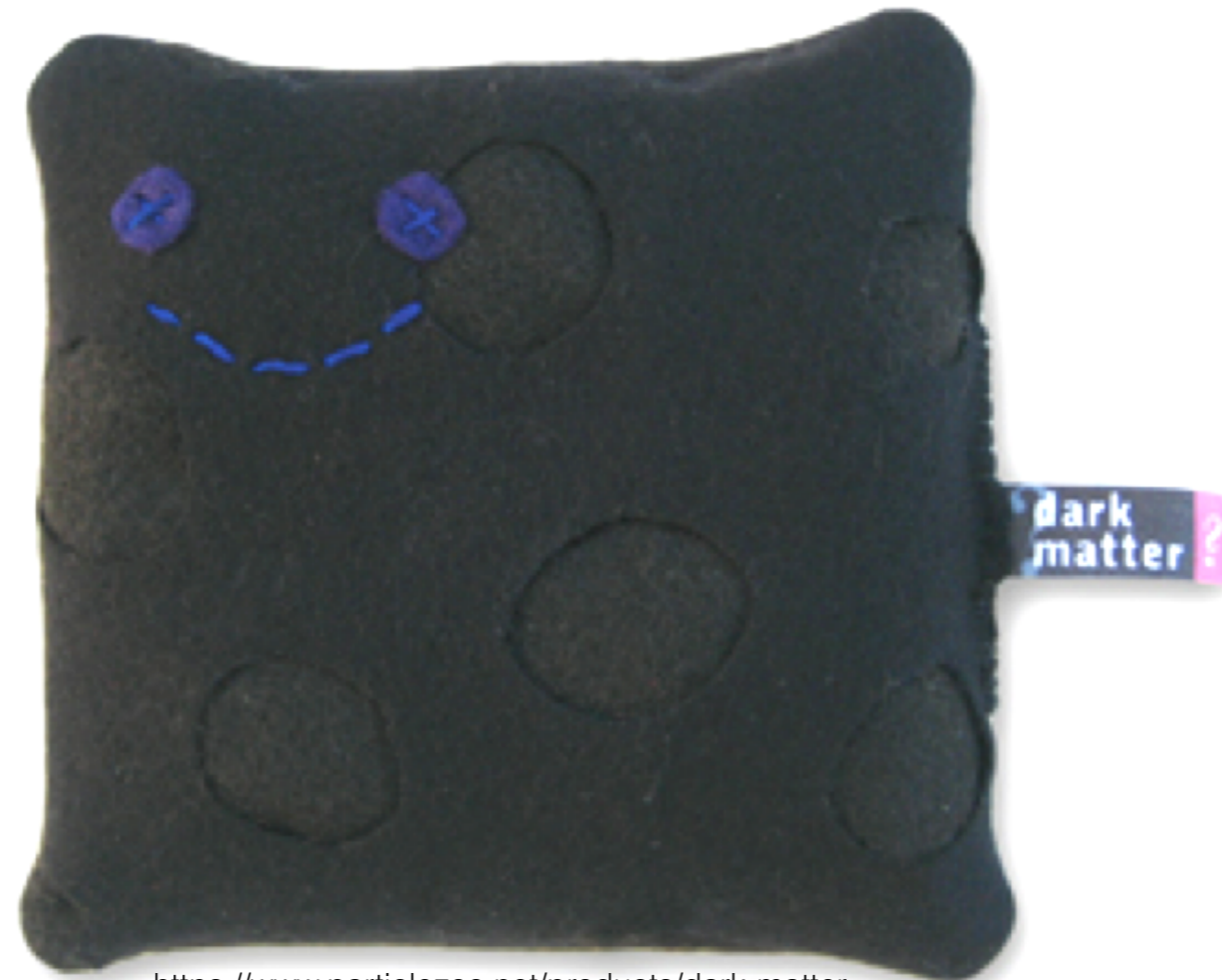
- Eine extra "Zutat" im Universum
- Wahrscheinlich neue(s) Teilchen, mit speziellen Eigenschaften

Warum überhaupt Dunkle Materie?

- Viele, sehr verschiedene, beobachtete Phänomene können durch die Annahme von Dunkler Materie erklärt werden

Was macht Dunkle Materie interessant?

- Es gibt ca. 5x mehr Dunkle Materie im Universum als "normale" Materie
- "Tor" zu neuer Physik



<https://www.particlezoo.net/products/dark-matter>

Woraus könnte Dunkle Materie bestehen?

- Viele mögliche Modelle! Von ganz einfach (z.B. WIMP) zu sehr komplex

Was ist Dunkle Materie?

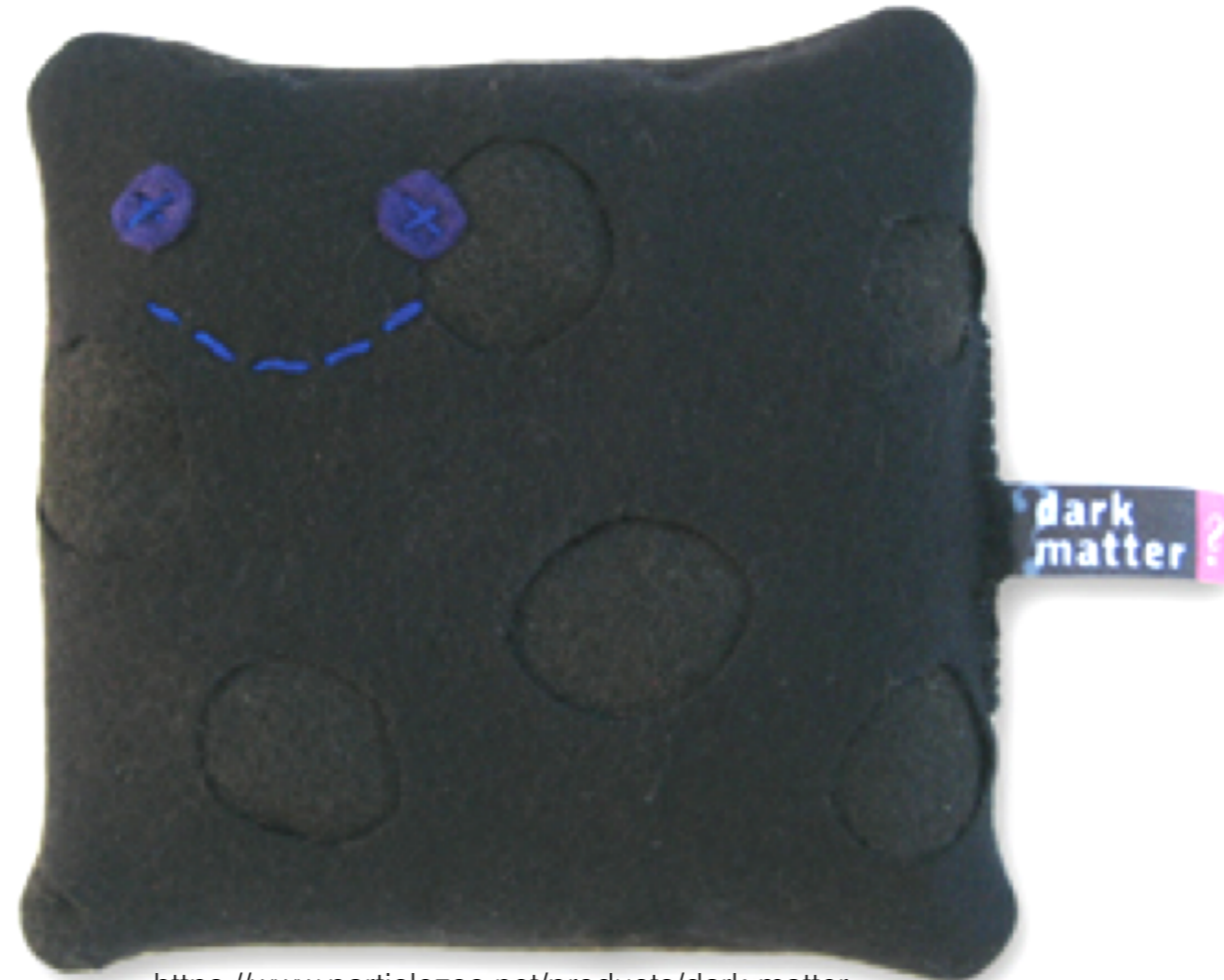
- Eine extra “Zutat” im Universum
- Wahrscheinlich neue(s) Teilchen, mit speziellen Eigenschaften

Warum überhaupt Dunkle Materie?

- Viele, sehr verschiedene, beobachtete Phänomene können durch die Annahme von Dunkler Materie erklärt werden

Was macht Dunkle Materie interessant?

- Es gibt ca. 5x mehr Dunkle Materie im Universum als “normale” Materie
- “Tor” zu neuer Physik



<https://www.particlezoo.net/products/dark-matter>

Woraus könnte Dunkle Materie bestehen?

- Viele mögliche Modelle! Von ganz einfach (z.B. WIMP) zu sehr komplex

Wie kann man Dunkle Materie sehen?

- Am LHC: Im Detektor unsichtbar, aber “missing E_T ”
- Außerdem direkte und indirekte Suchen

Was ist Dunkle Materie?

- Eine extra "Zutat" im Universum
- Wahrscheinlich neue(s) Teilchen, mit speziellen Eigenschaften

Warum überhaupt Dunkle Materie?

- Viele, sehr verschiedene, beobachtete Phänomene können durch die Annahme von Dunkler Materie erklärt werden

Was macht Dunkle Materie interessant?

- Es gibt ca. 5x mehr Dunkle Materie im Universum als "normale" Materie
- "Tor" zu neuer Physik



Woraus könnte Dunkle Materie bestehen?

- Viele mögliche Modelle! Von ganz einfach (z.B. WIMP) zu sehr komplex

LHC ist ein wichtiger und interessanter Ort, um nach Dunkler Materie zu suchen

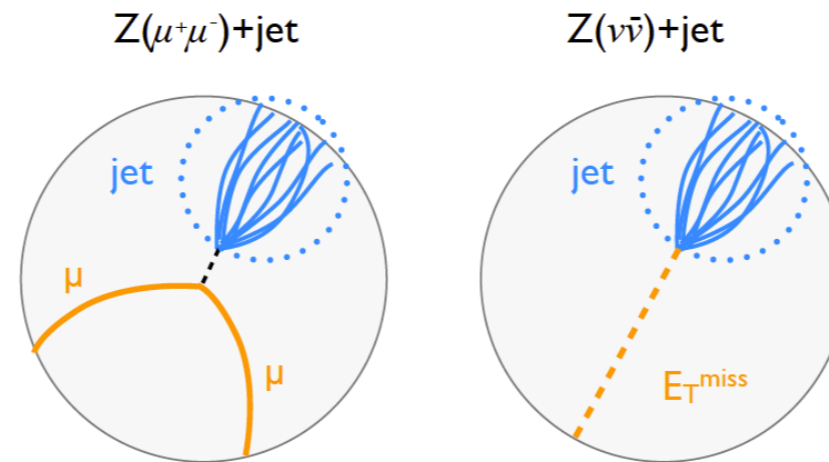
Kein einzelnes Experiment, Suchansatz, Teilgebiet der Physik kann den Eigenschaften Dunkler Materie alleine auf die Spur kommen: das macht es nicht ganz einfach - aber auch sehr spannend!

Danke!

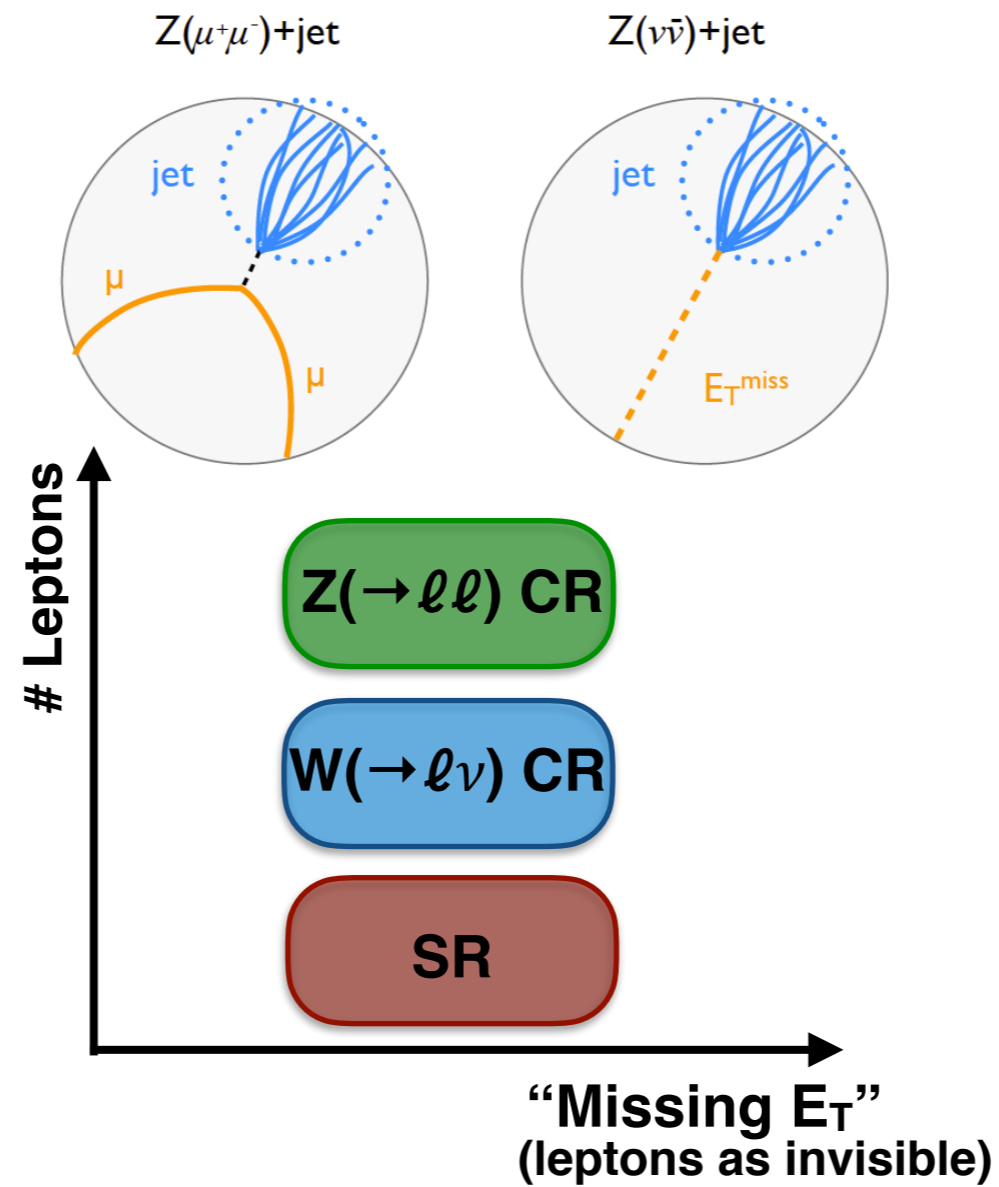
Fragen?

gerne auch noch später, per Mail:
jgramlin@cern.ch

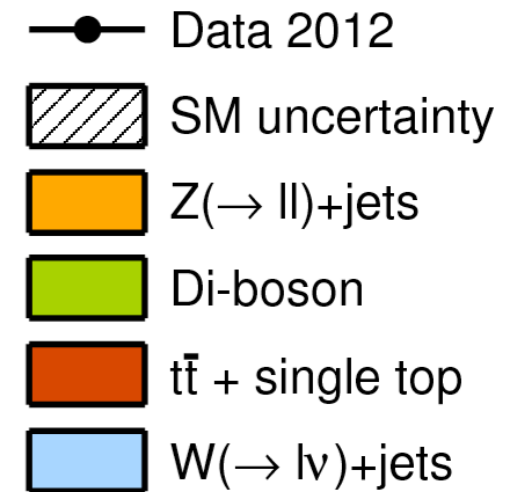
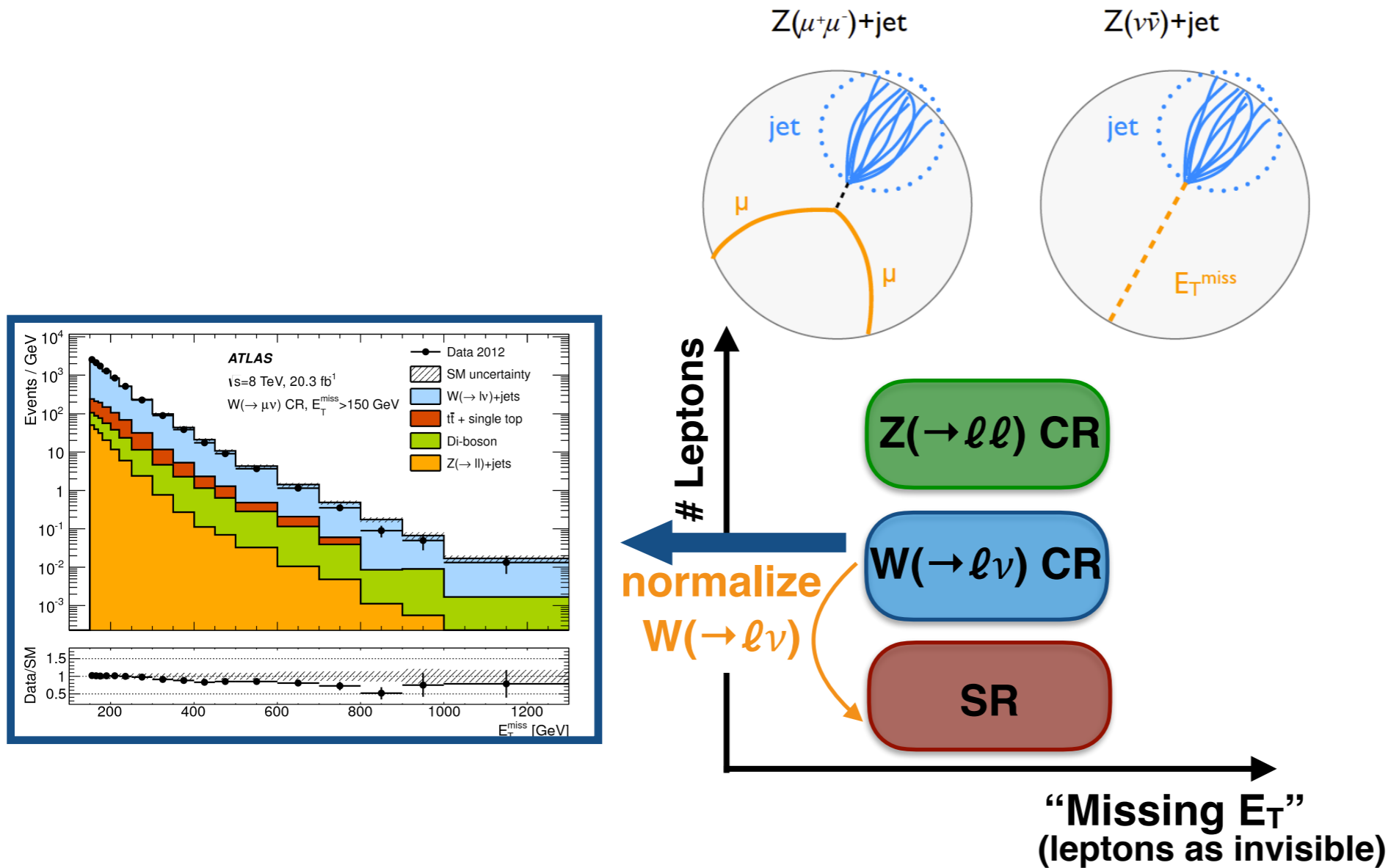
Untergrundbestimmung



Untergrundbestimmung



Untergrundbestimmung

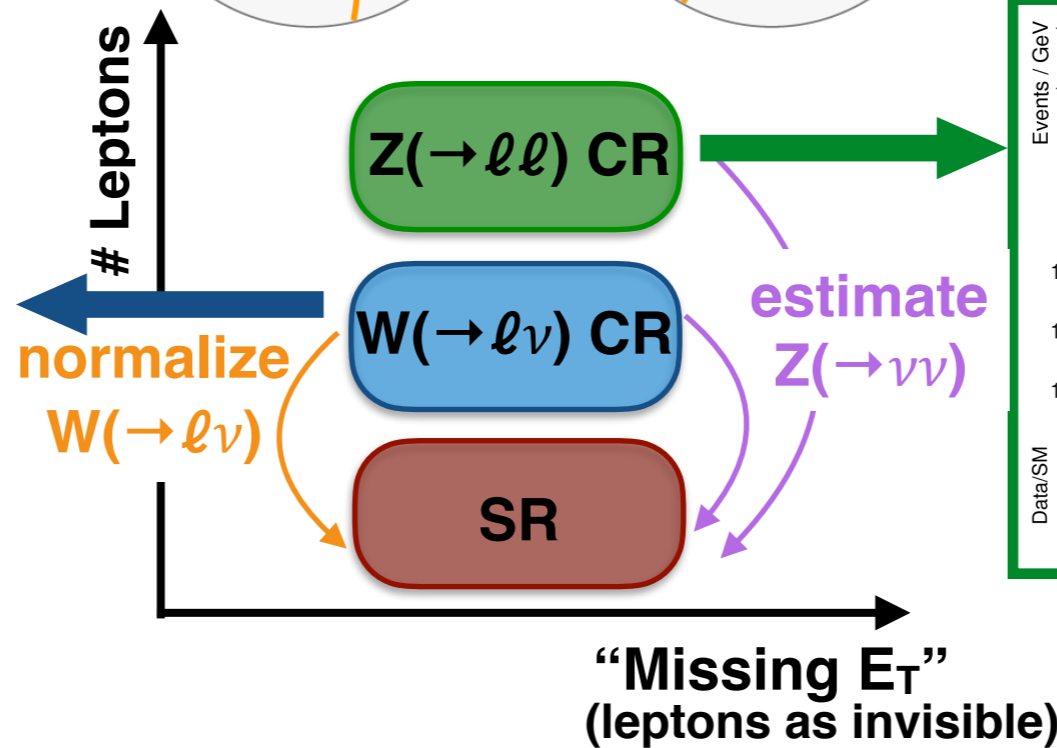
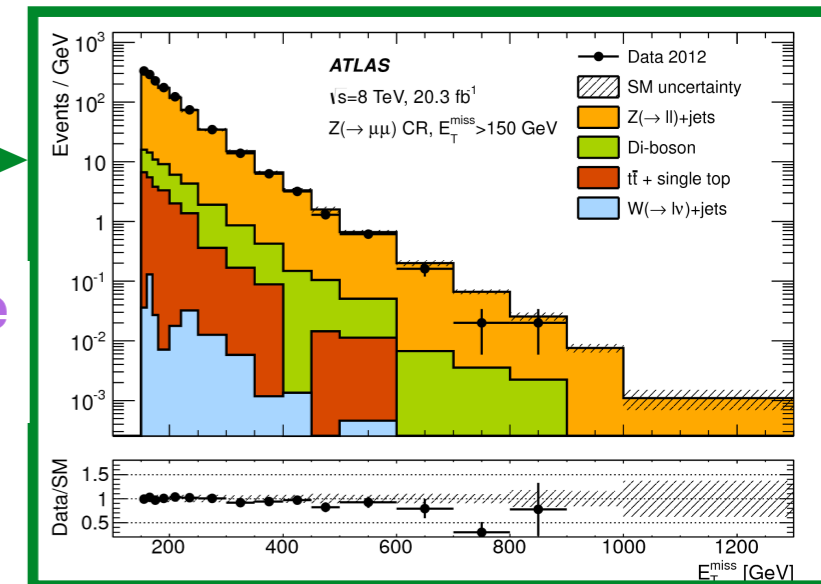
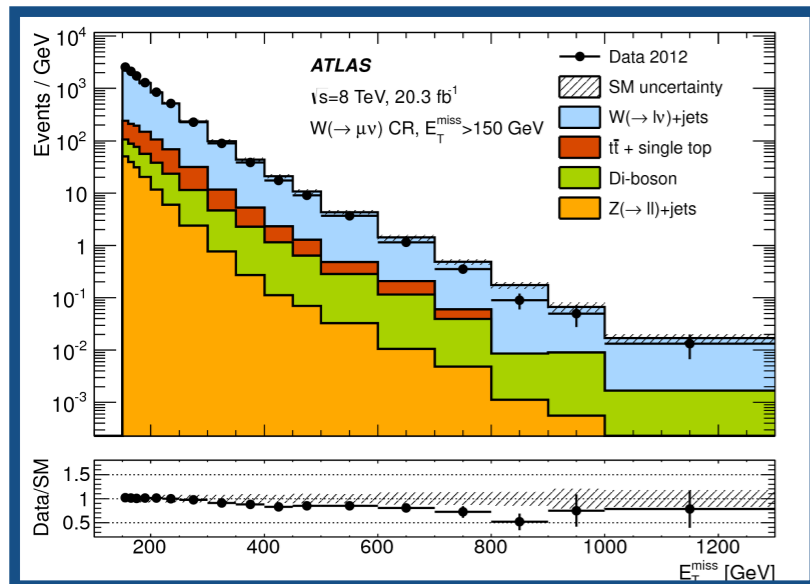
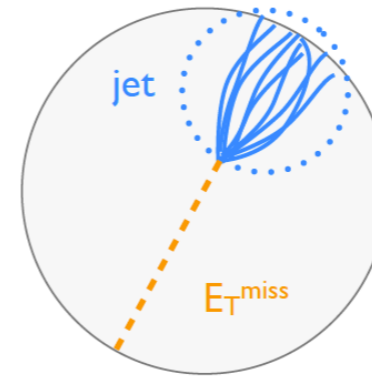
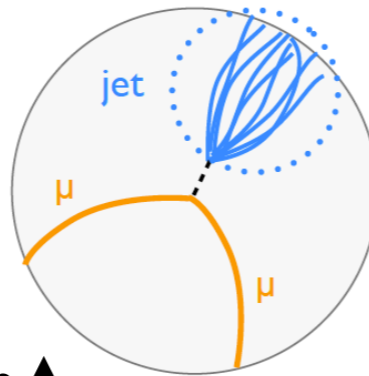


Untergrundbestimmung



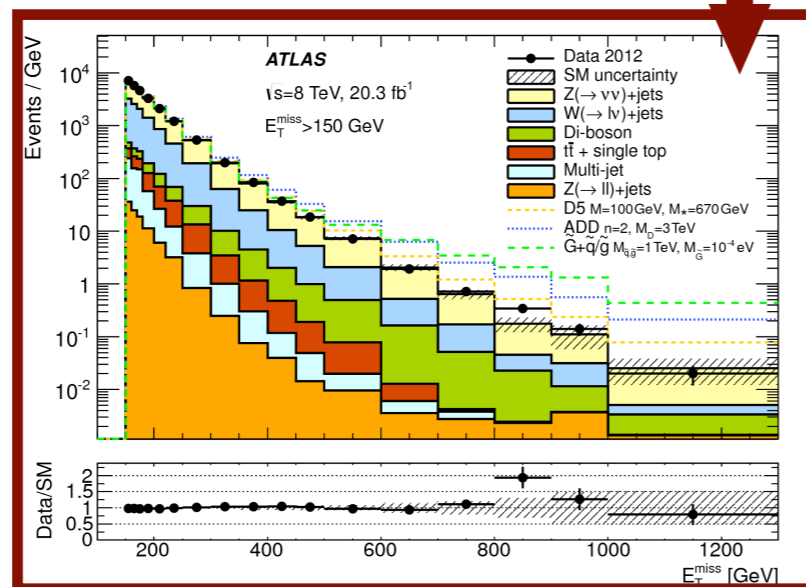
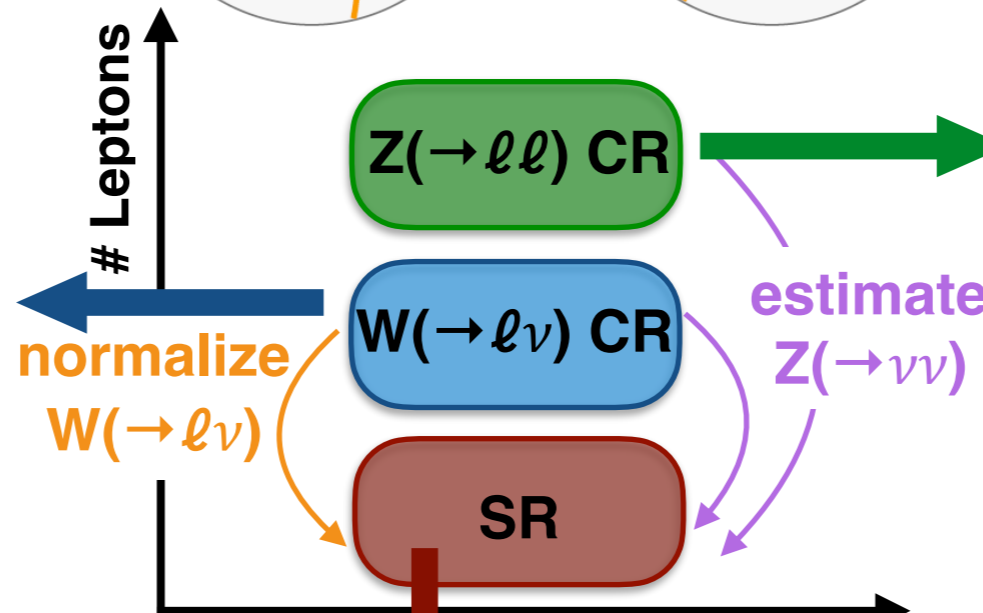
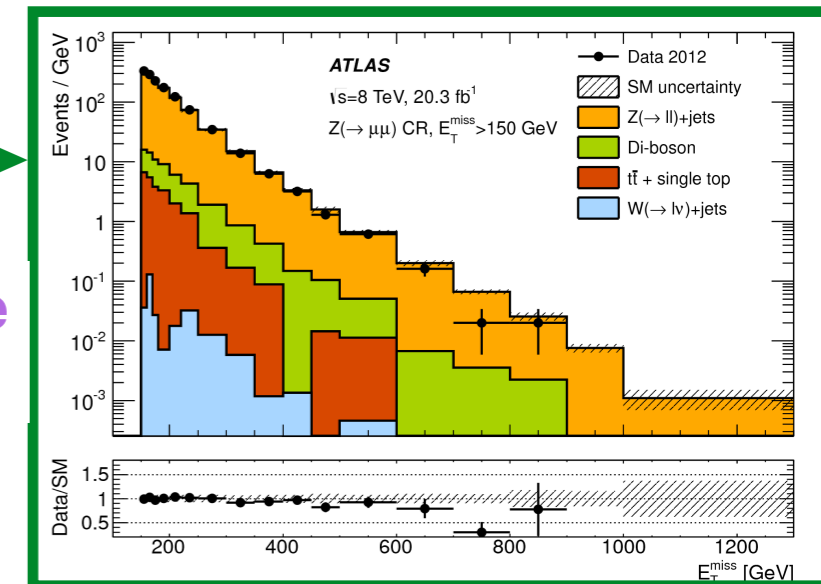
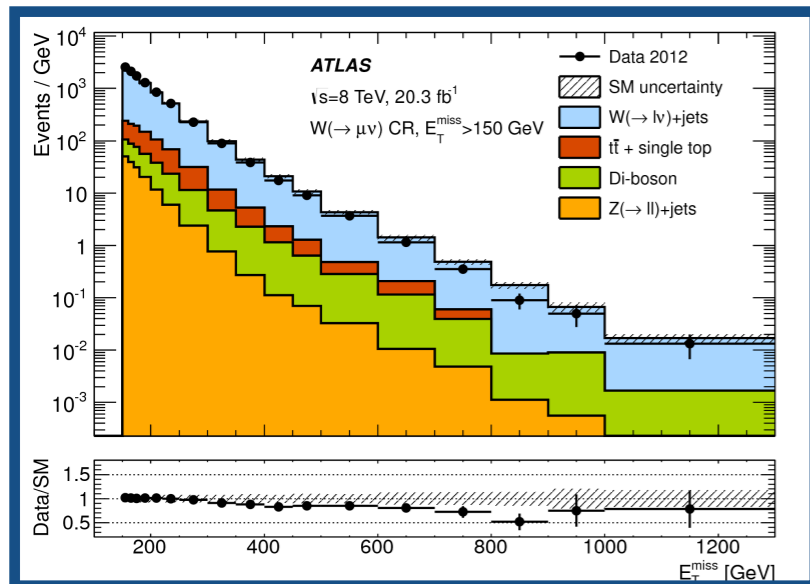
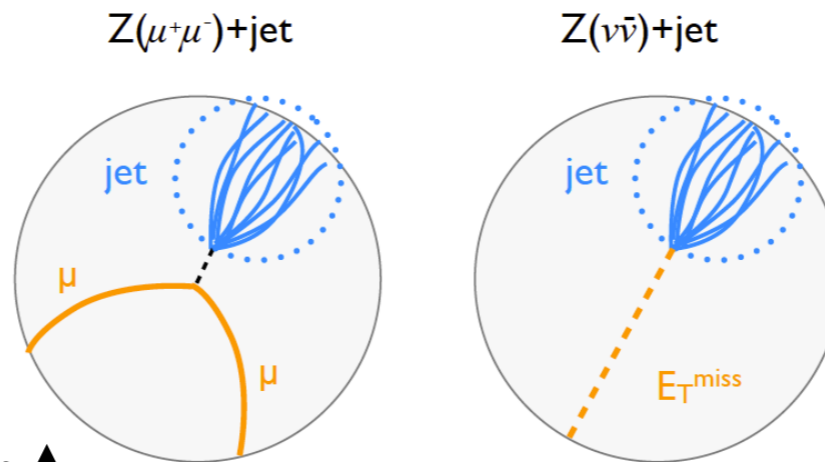
$Z(\mu^+\mu^-)+jet$

$Z(\nu\bar{\nu})+jet$



- Data 2012
- ▨ SM uncertainty
- Z(→ ll)+jets
- Di-boson
- tt + single top
- W(→ lv)+jets

Untergrundbestimmung



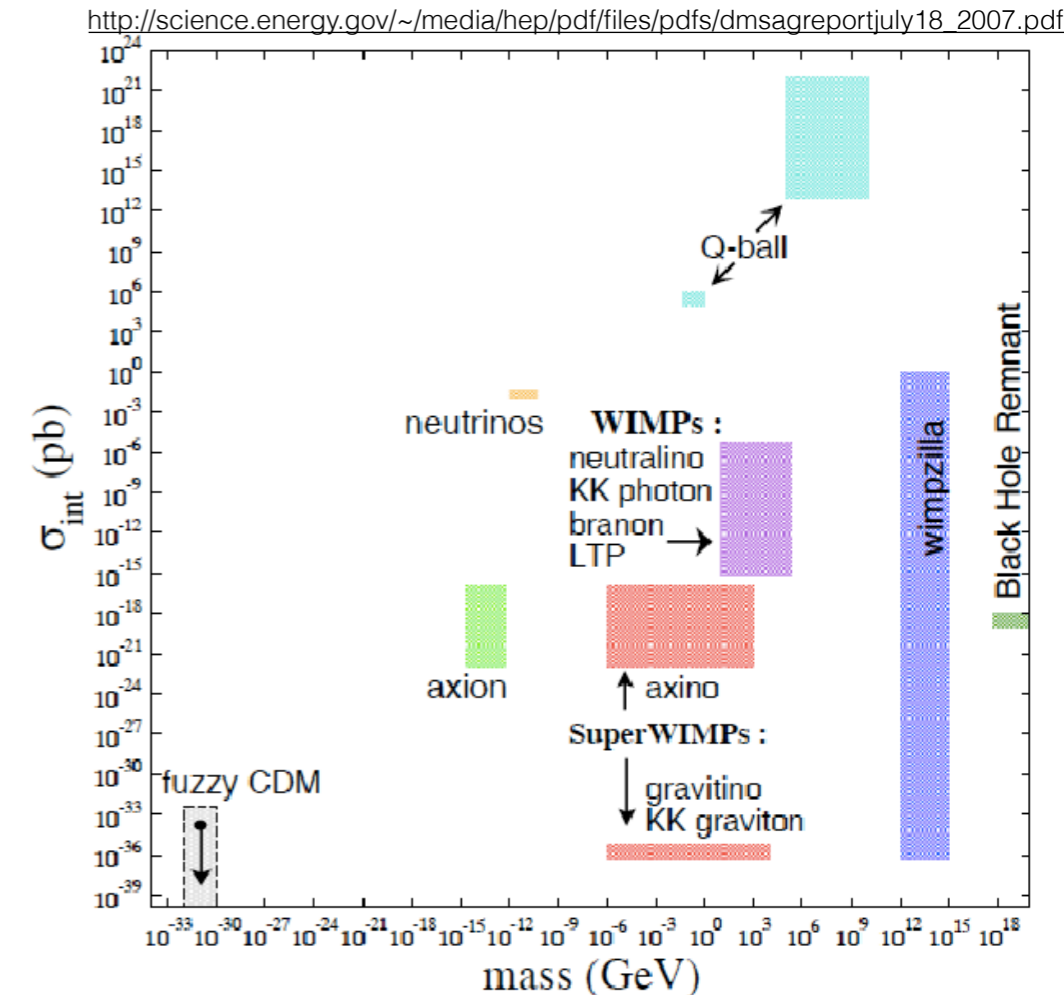
“Missing E_T ”
(leptons as invisible)

- Data 2012
- ▨ SM uncertainty
- Z(->ll)+jets
- Di-boson
- tt + single top
- W(->lv)+jets

Dunkle Materie: Kandidaten

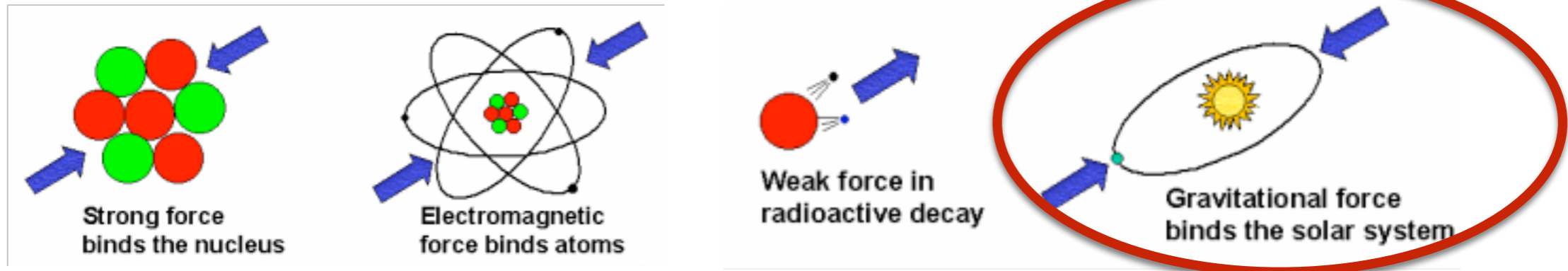
Sterile Neutrinos: keine Standardmodell-Wechselwirkung, nur Mixing, vielleicht viel schwerer, sehr schwierig zu entdecken

- **Axionen:** sehr leicht, schwache Wechselwirkungen, nicht thermisch, eingeschränkte Bereiche, in denen DM möglich
- **Supersymmetrische Kandidaten:** Das leichteste SUSY-Teilchen wird als stabil angenommen und könnte DM sein
- **Extradimensionen:** Das “Extradimensions-Teilchen” mit der niedrigsten Energie könnte DM sein
- **Superheavy Dark Matter:** “WIMPzillas” waren sehr, sehr schwer, entstünden anders als WIMPS, sehr schwer zu entdecken



Warum neue Physik?

Gravitation lässt sich nicht (einfach) ins Standardmodell integrieren

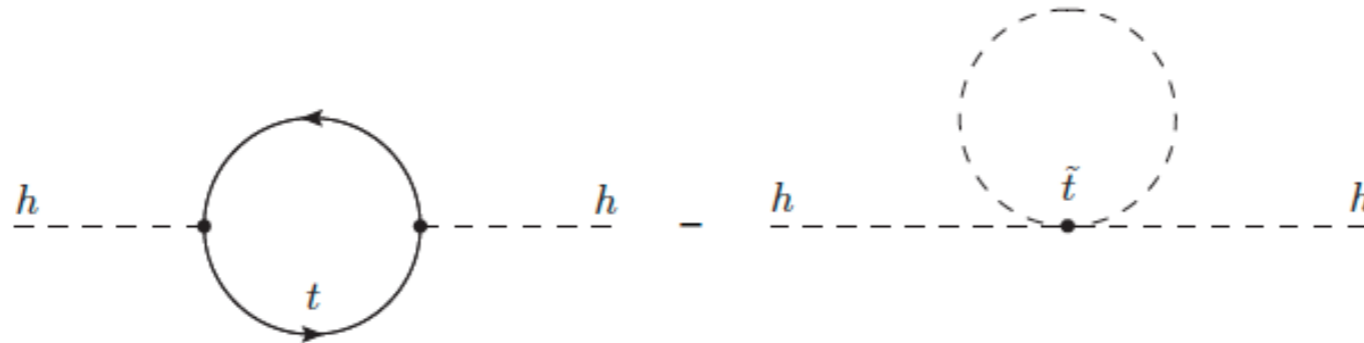


Higgs-Masse ist abhängig von Korrekturen proportional zum Quadrat jeglicher (neuer) Skalen

- Gravitation ist viel schwächer als andere Kräfte: entspricht naiv einer sehr großen Energieskala, viel größer als jene der elektroschwachen oder starken Wechselwirkung
→ **Hierarchieproblem:** Korrekturen der Higgs-Masse sind so viel größer als der tatsächliche Wert... Wie kann das sein? Gibt es einen Mechanismus, so dass sich Korrekturen gegenseitig aufheben? Wenn, dann müsste er sich am LHC zeigen!
- Mögliche Lösung: **Supersymmetrie!**

Supersymmetrie

Jedes Teilchen bekommt Partnerteilchen (mit unterschiedlichem Spin)
 → Higgs-Masse-Korrekturen heben sich auf!



Partnerteilchen sollten die gleiche Masse haben → nicht beobachtet

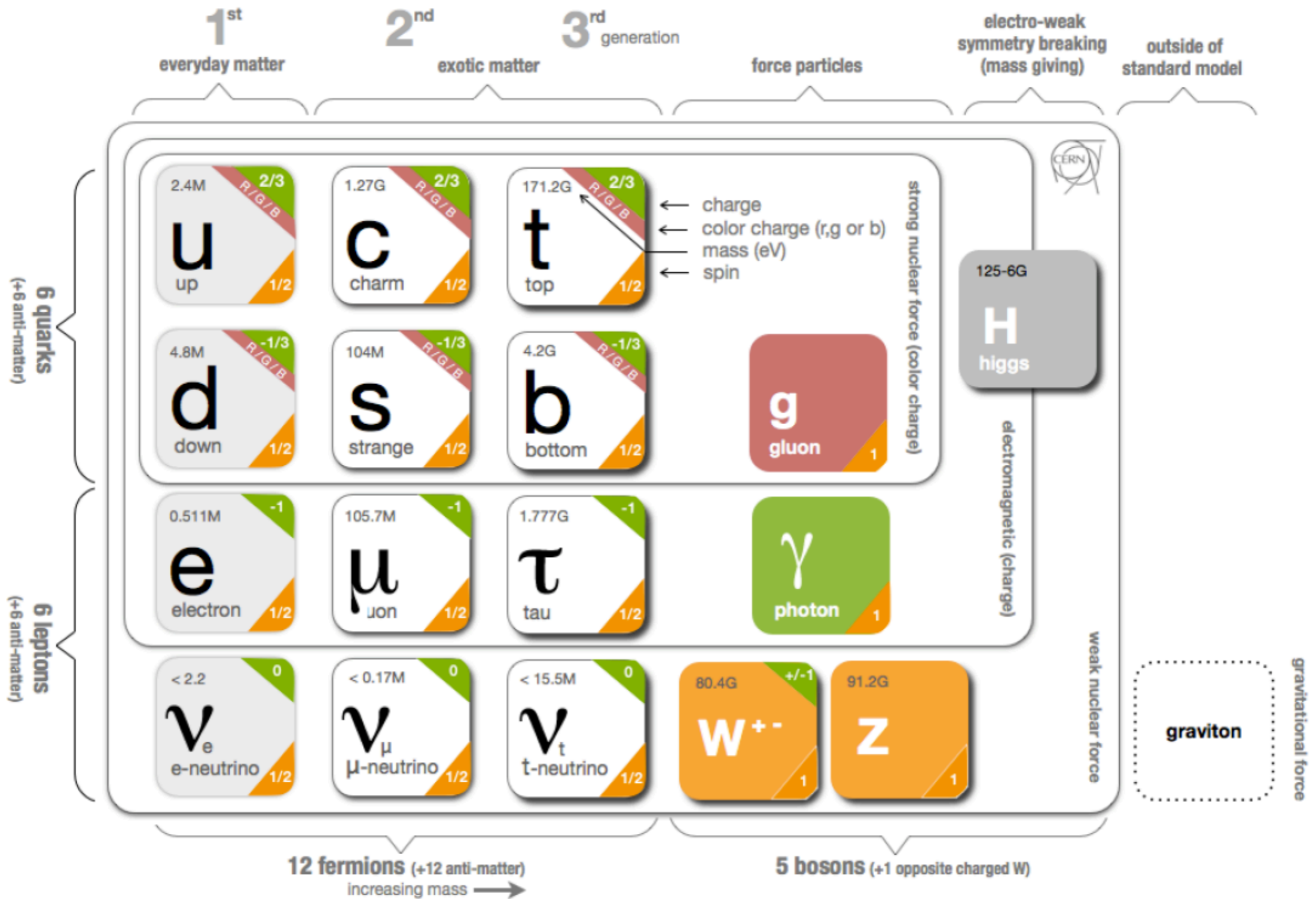
- Das heißt erstmal nur, dass Symmetrie nicht ganz perfekt ist, und sich somit auch die Korrekturterme nicht ganz aufheben

Im Allgemeinen wird angenommen, dass das leichteste Partnerteilchen stabil ist → DM-Kandidat!

SUSY-Modelle haben viele Parameter

- Man braucht immer Annahmen und Vereinfachungen, um es zu testen!
- → Aussagen, Limits, oft spezifisch

Das Standardmodell



Cosmic Microwave Background

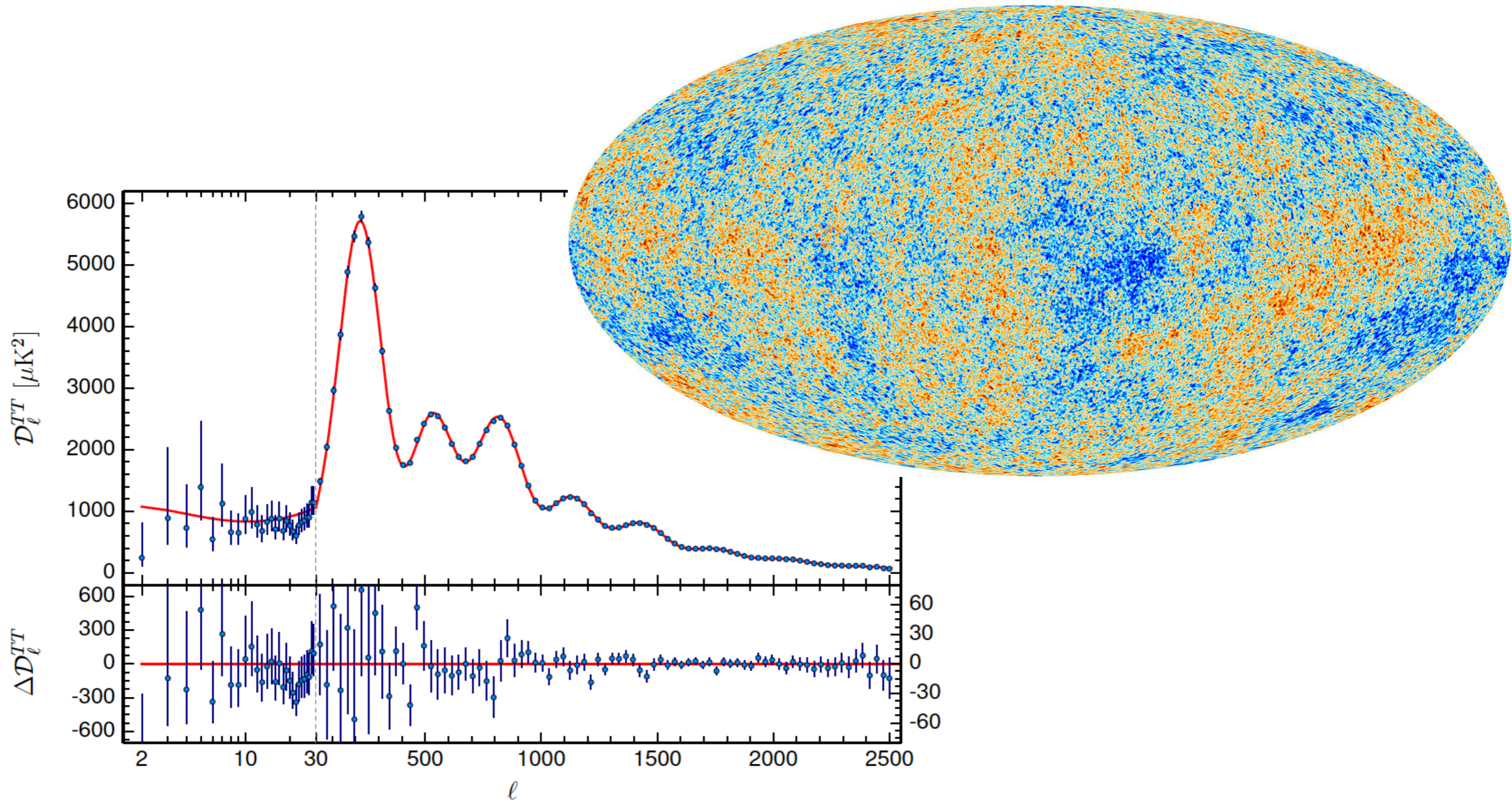
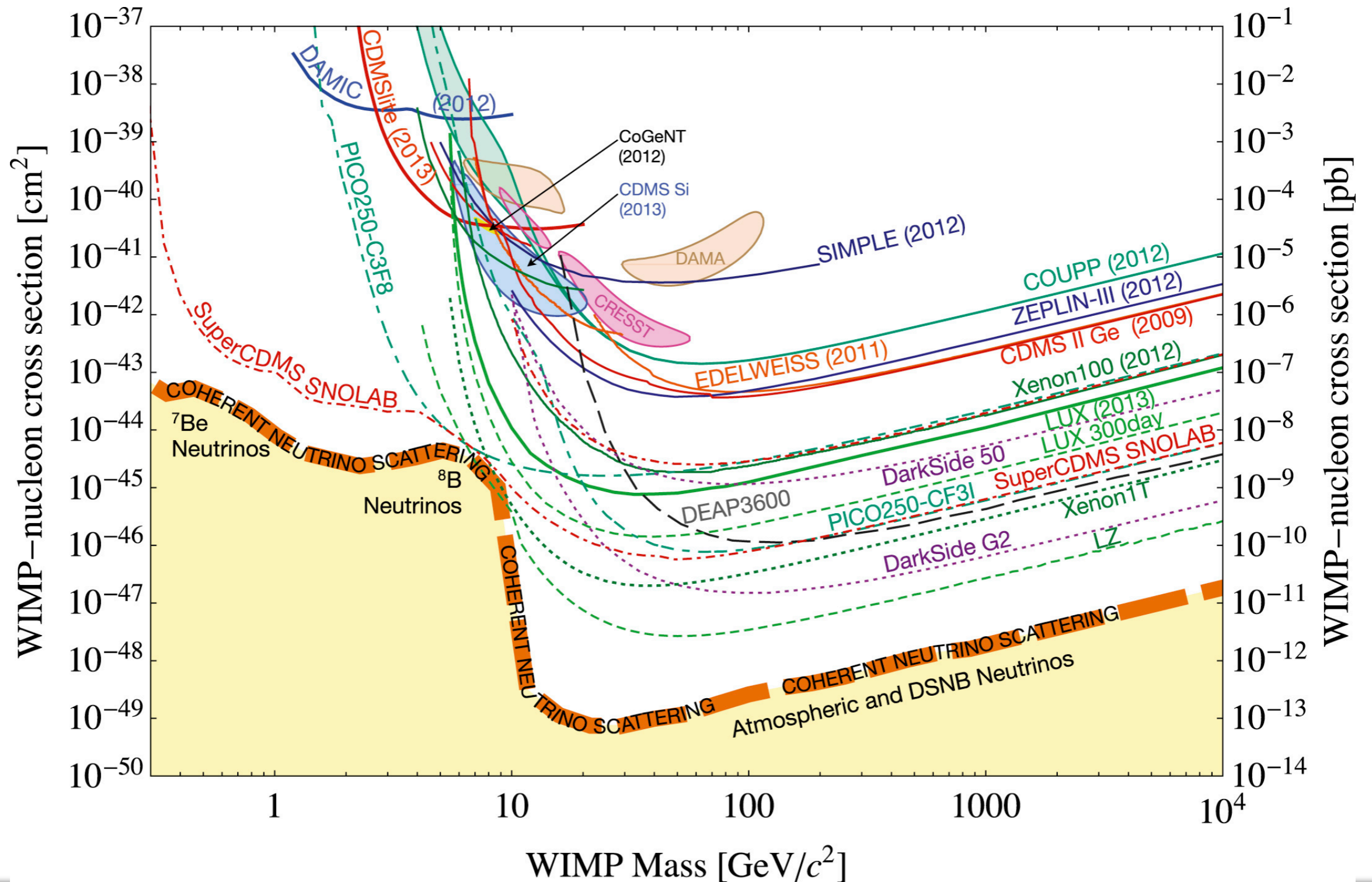


Figure 2.3: The *Planck* 2015 temperature power spectrum. The best-fit based Λ CDM theoretical spectrum fitted to the *Planck* data is plotted in the upper panel. Residuals with respect to this model are shown in the lower panel. The error bars show $\pm 1\sigma$ uncertainties.

Direkte Suchen



LHC Limits vs Direkte Suche

