

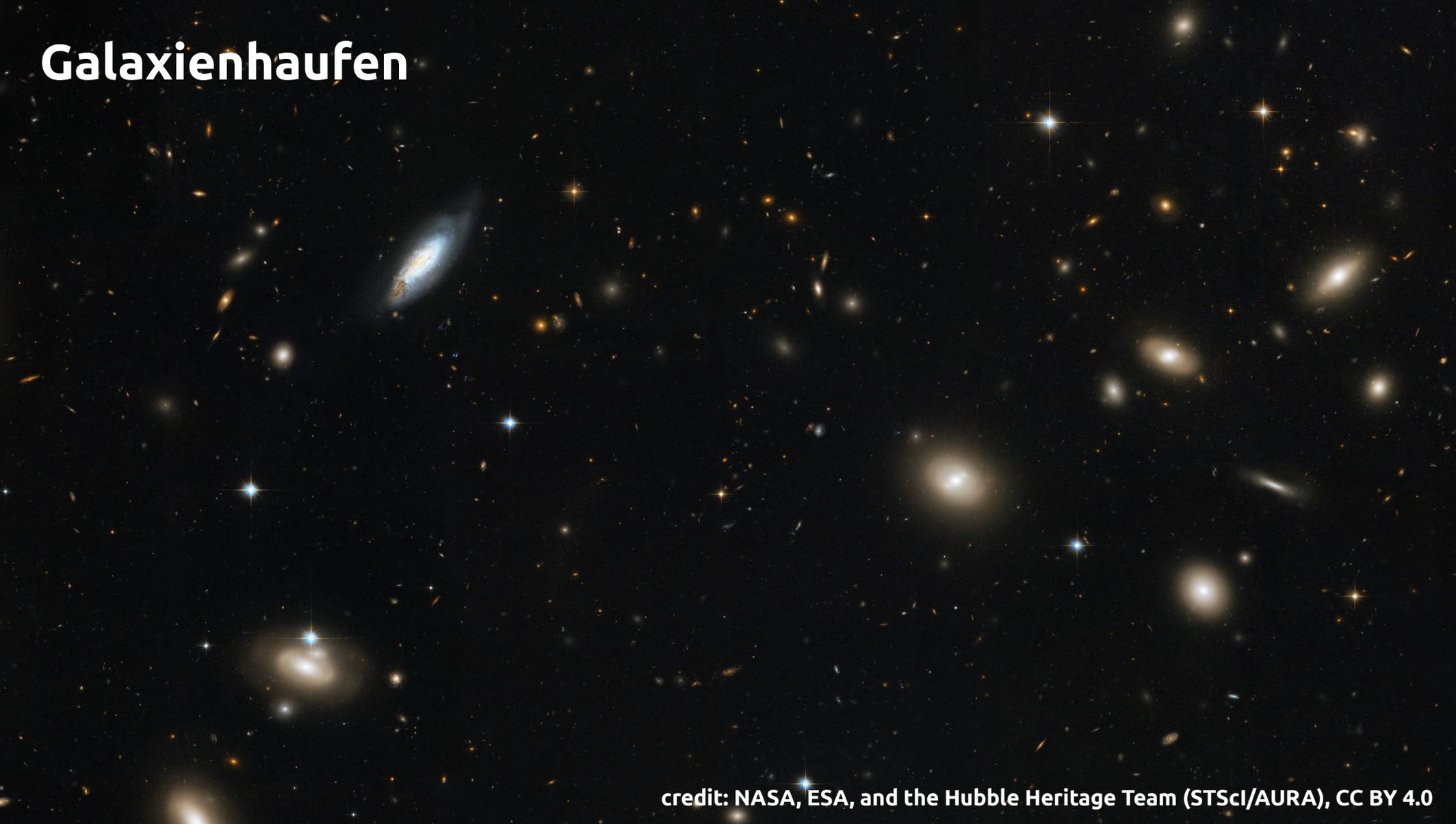
# Die Rätsel des frühen Universums

**Julia Harz**

Johannes Gutenberg Universität Mainz

# Woraus besteht unser Universum?

# Galaxienhaufen

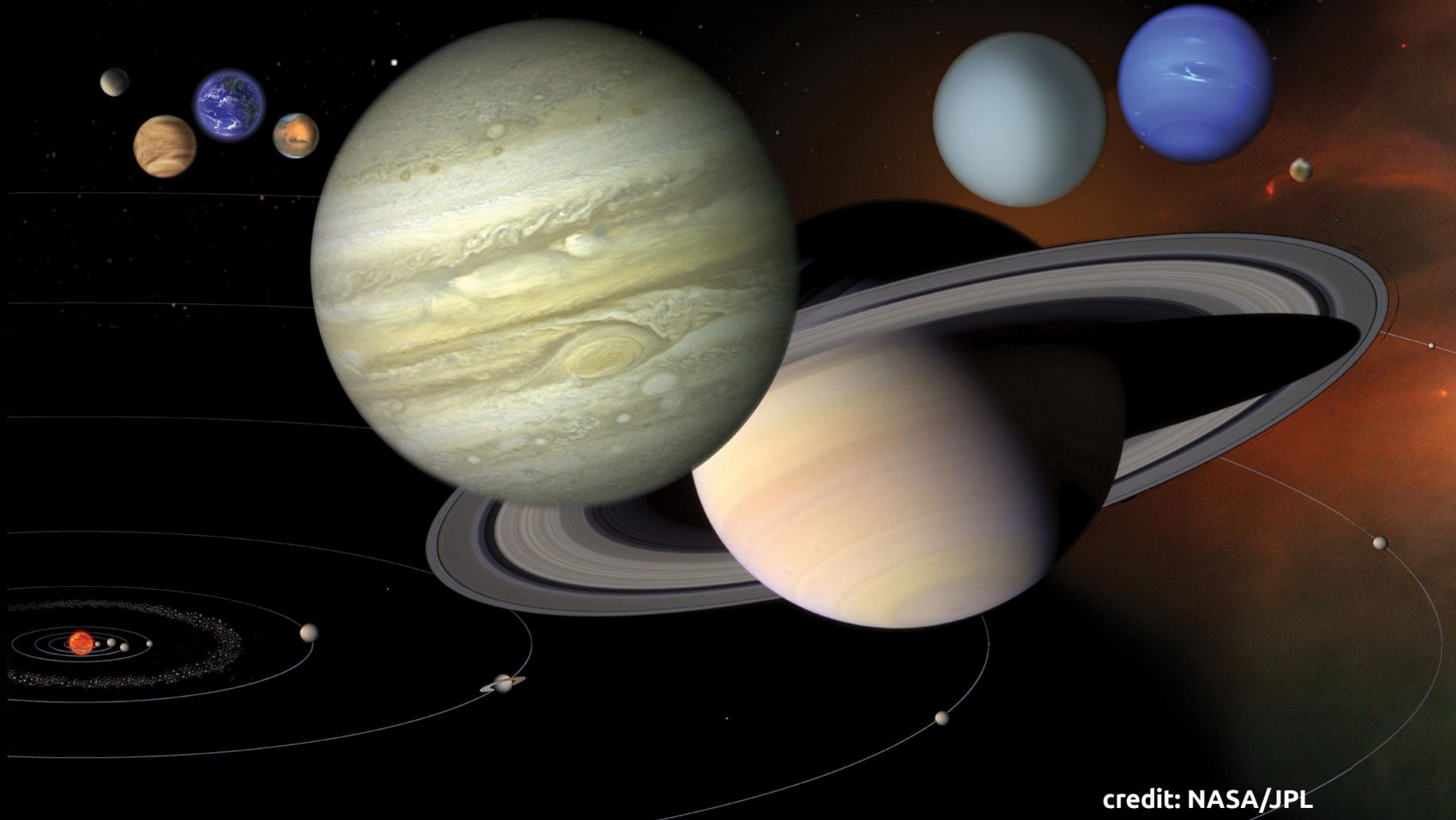


# Galaxien



credit: NASA, ESA, and B. Holwerda (University of Louisville), CC BY 4.0

# Unser Sonnensystem



credit: NASA/JPL

# Unsere Erde



credit: NASA/JPL

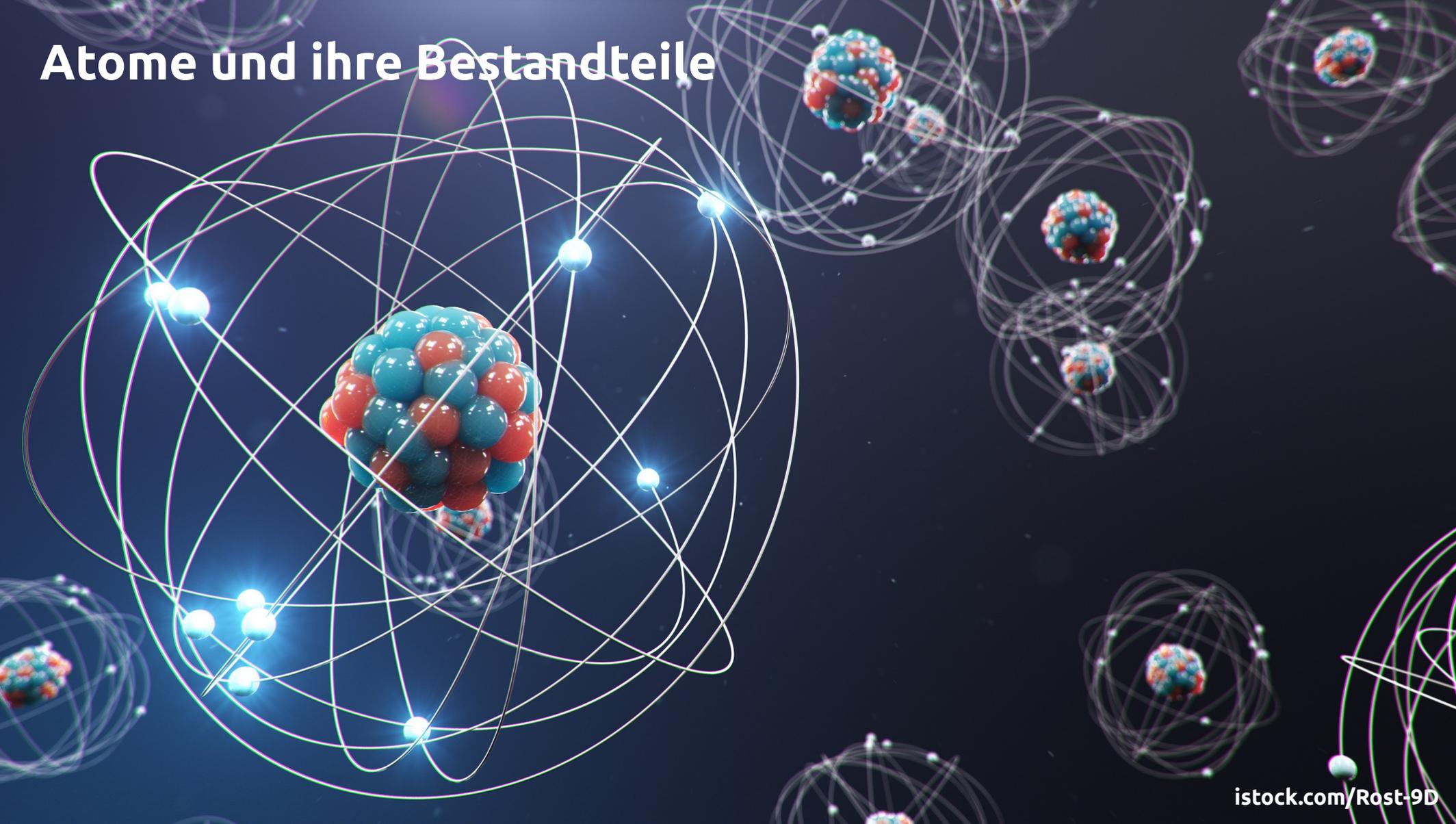
# Strukturen unserer Umgebung



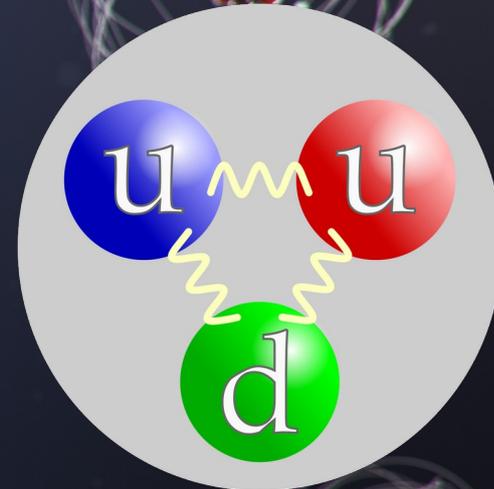
# Moleküle



# Atome und ihre Bestandteile



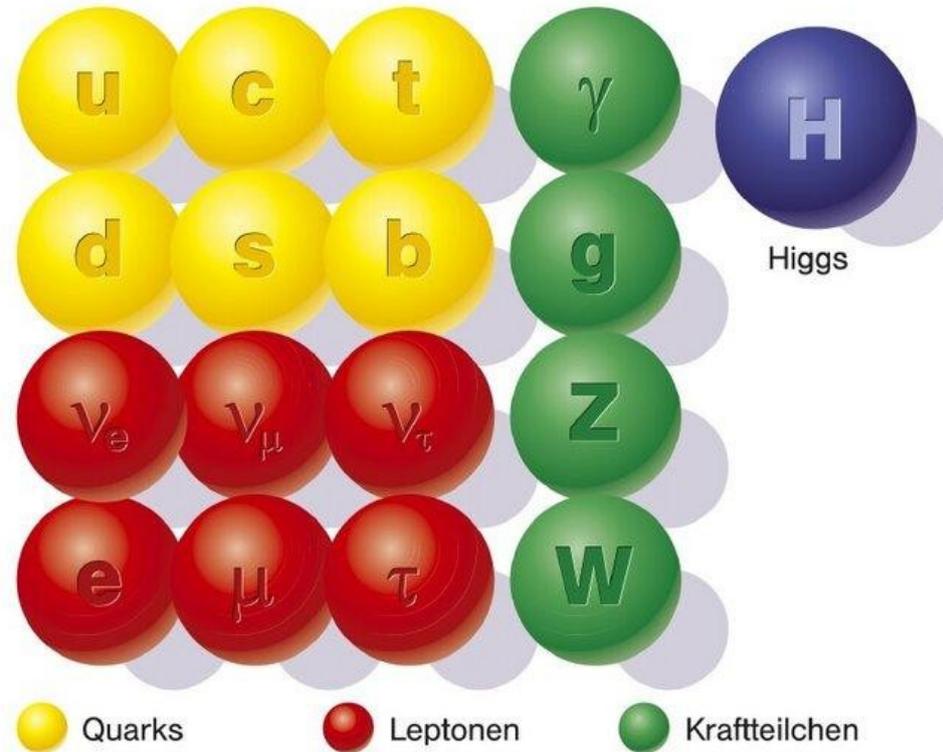
# Atome und ihre Bestandteile



Proton  
(Baryon)

Quelle: Arpad Horvath, CC BY-SA 2.5

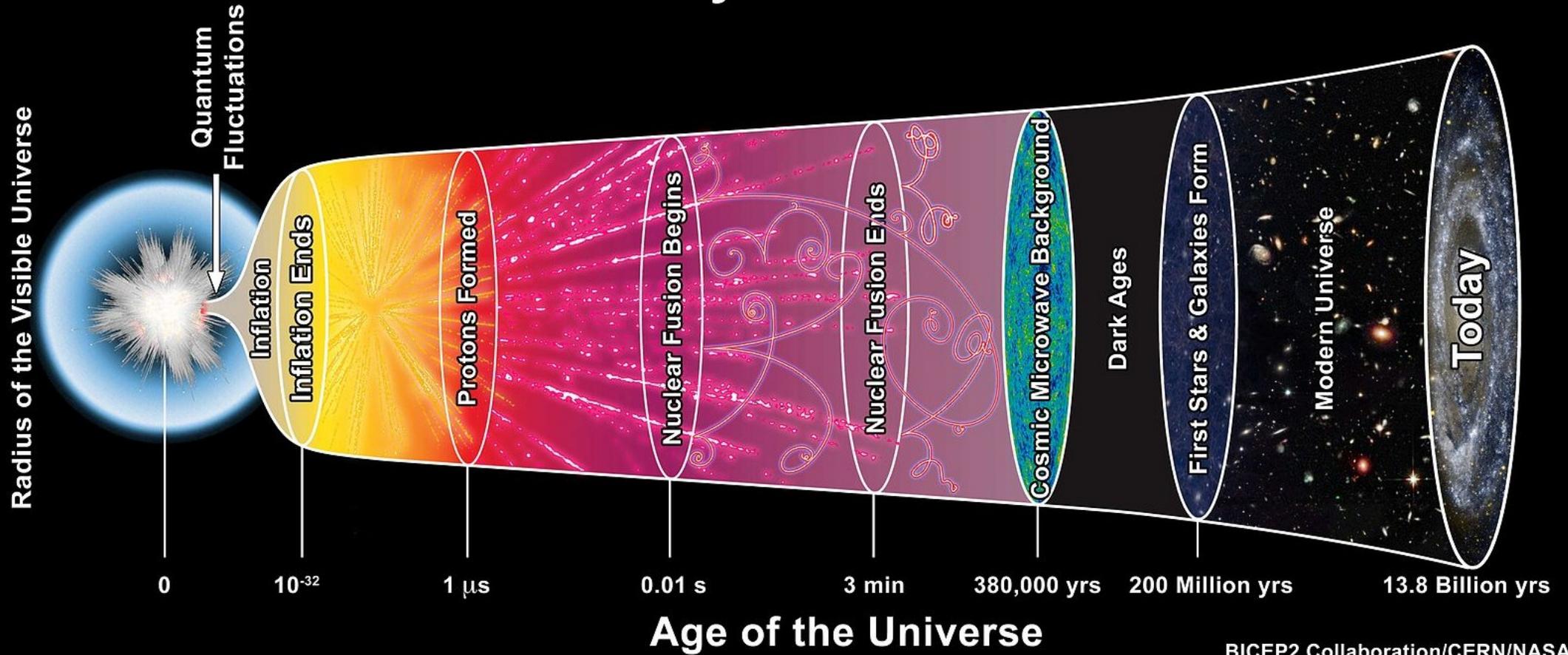
# Das Standardmodell der Teilchenphysik



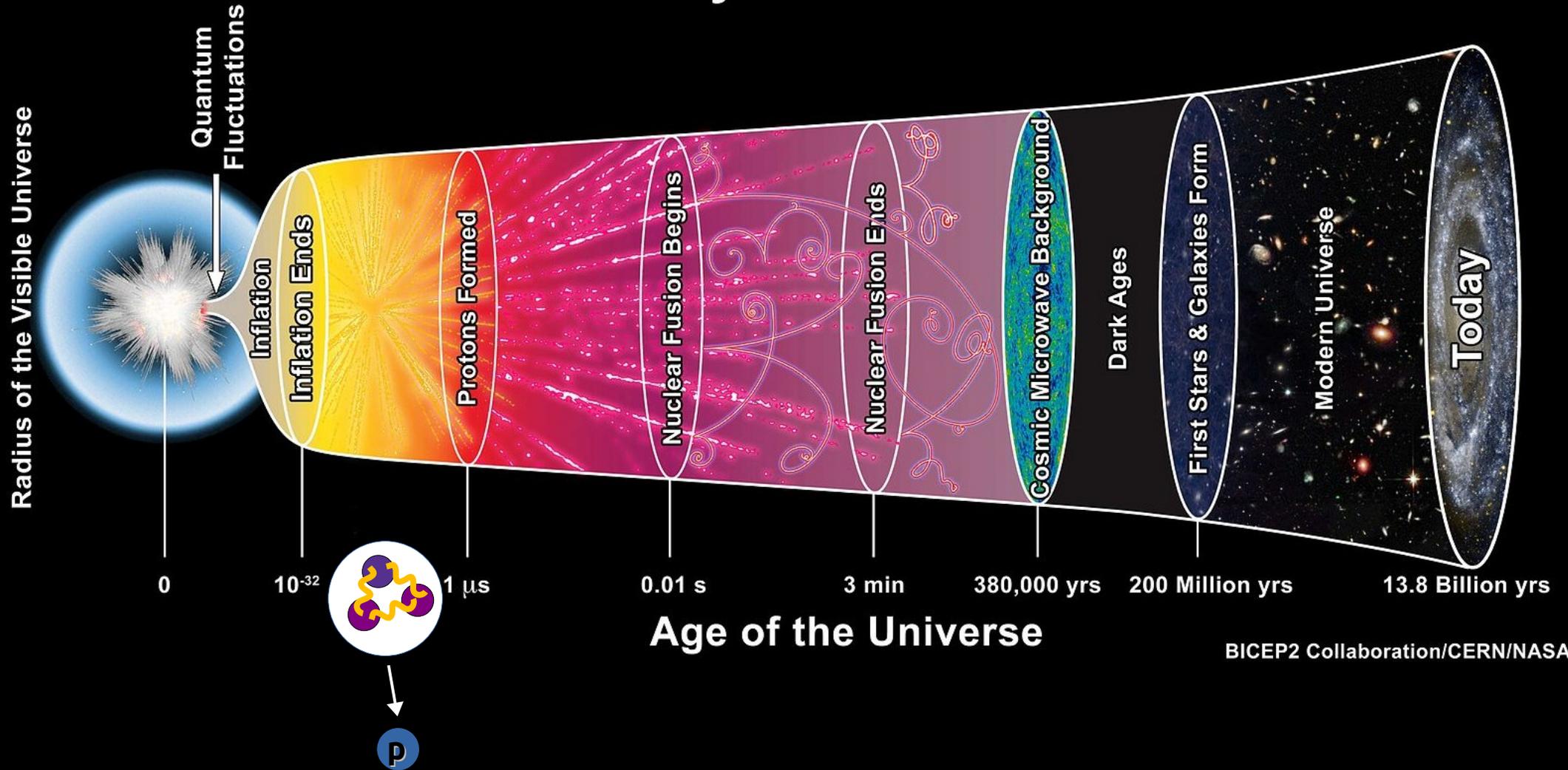
Quelle: Welt der Physik / DESY

# Wie hat sich unser Universum entwickelt?

# History of the Universe

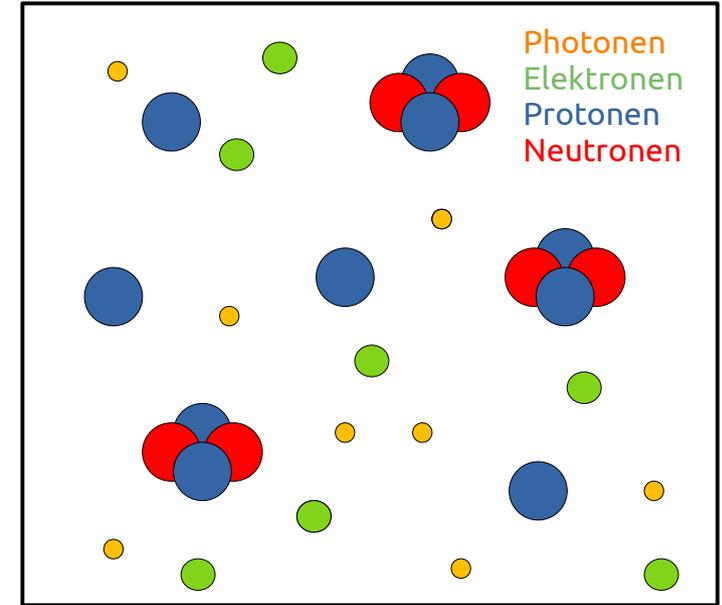
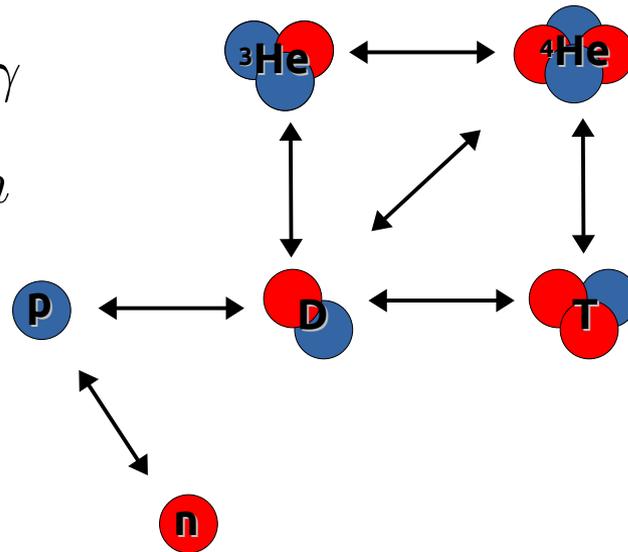
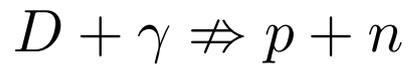
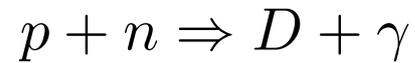


# History of the Universe

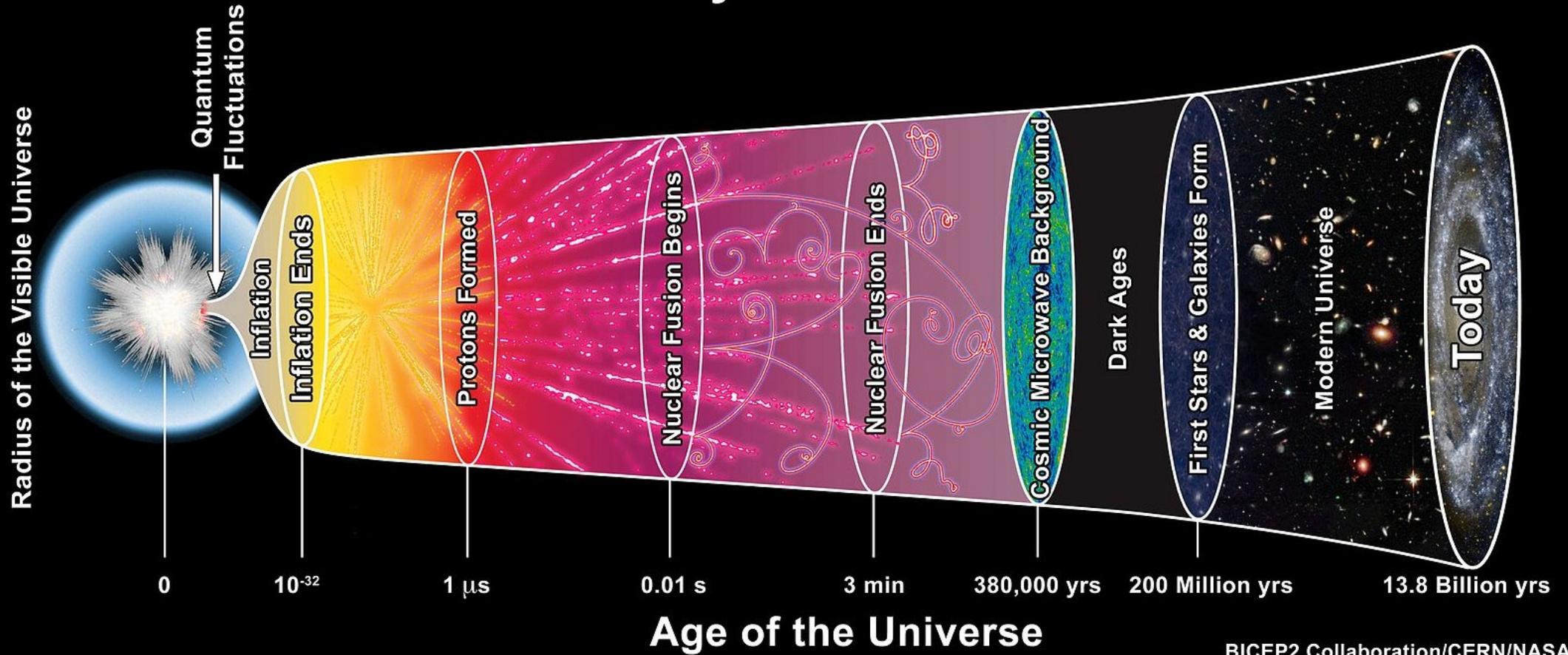


# Big Bang Nukleosynthese

- Bildung der ersten Atomkerne
- Irreversibel sobald Photonen das Deuterium nicht mehr aufbrechen können

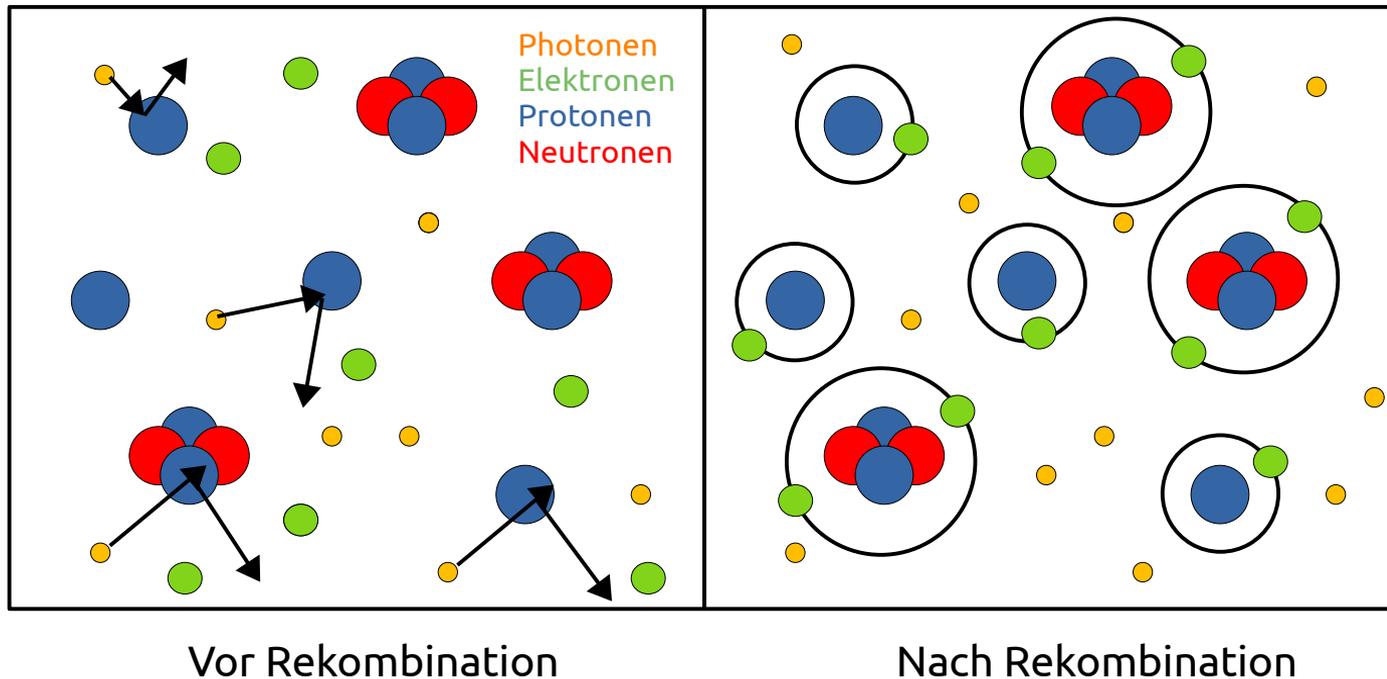


# History of the Universe



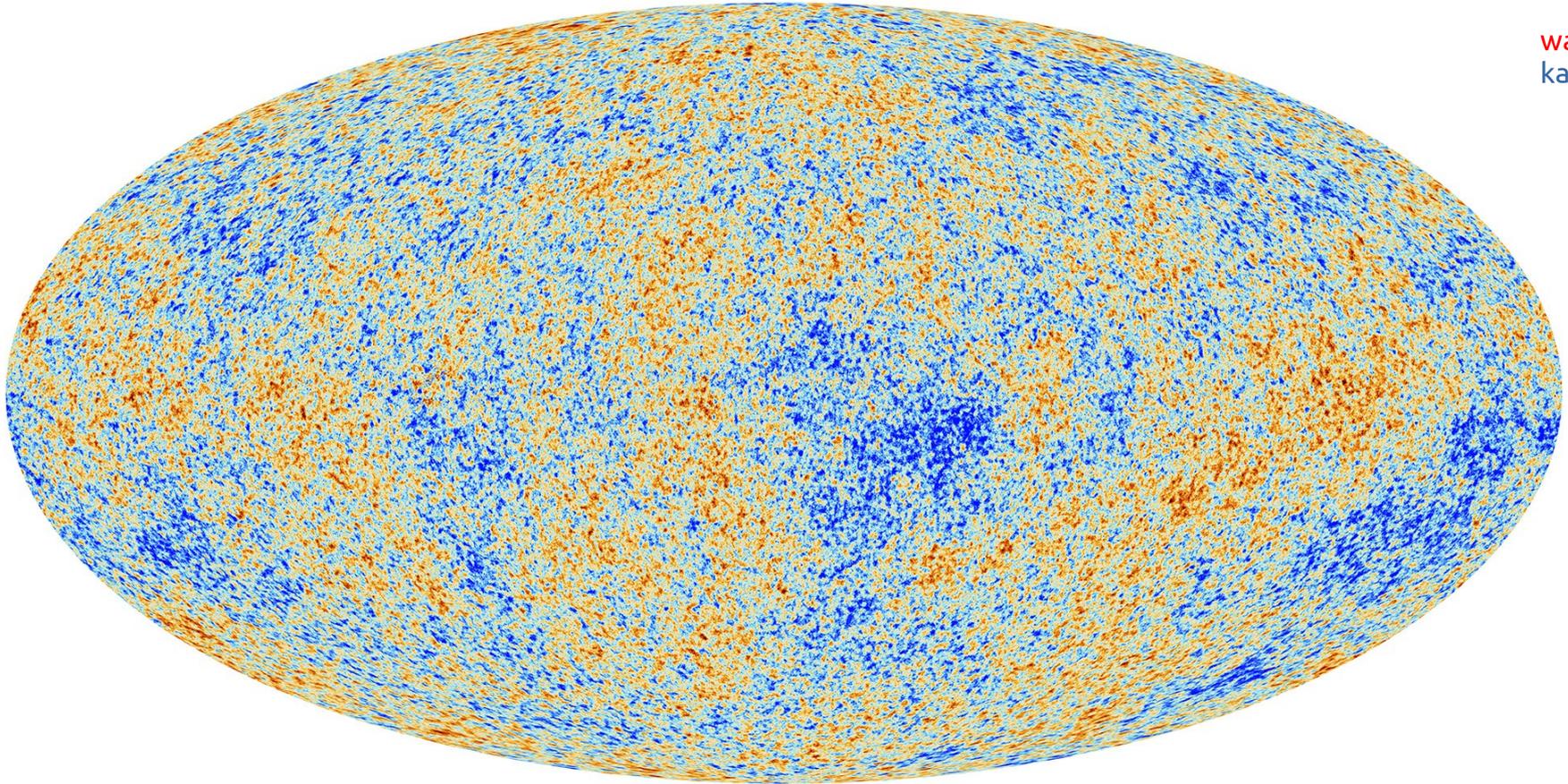
# Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

- **Rekombination** bezeichnet die stabile Bildung der Atome; den Moment, wenn Photonen sich frei bewegen können
- Die **kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung** besteht aus diesen freien Photonen



# Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

warm  
kalt

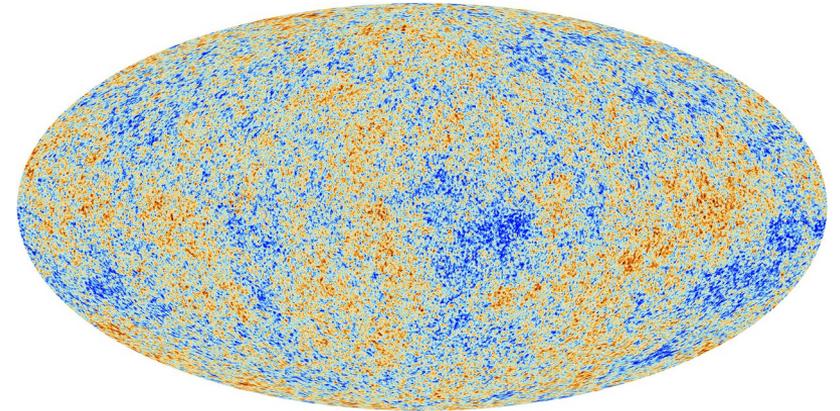
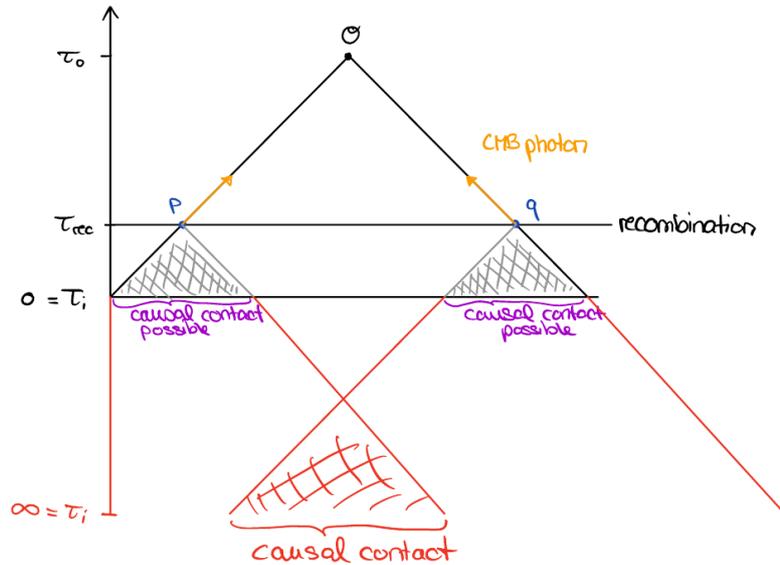


credit: ESA/PLANCK collaboration

# Warum ist unser Universum so homogen?

# Das Horizontproblem

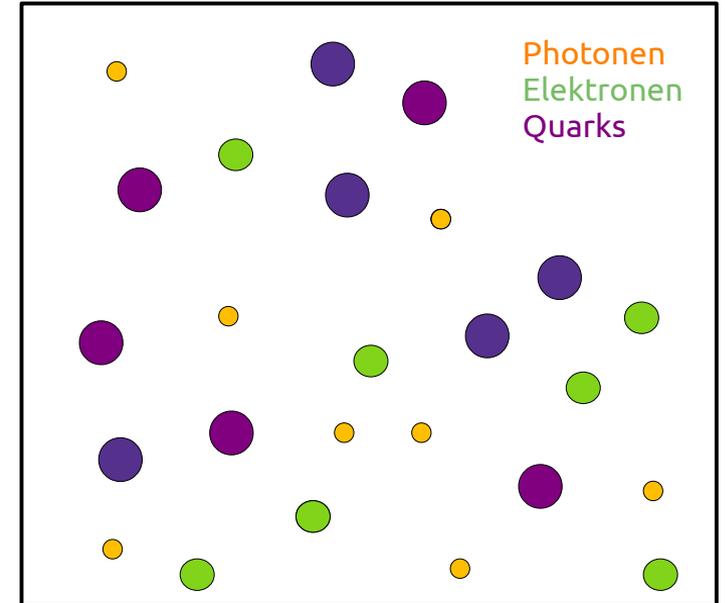
Zum Zeitpunkt der Rekombination konnten Photonen im CMB max. bis  $\theta \sim 3.5^\circ$  kausalen Kontakt gehabt haben!



**Warum ist das Universum so homogen?**

# Inflation

- Beschleunigte Ausdehnung des Universums
- “neue Physik” (Teilchen) notwendig
- Zerfall des neuen Teilchens ins Standardmodell
- Heißes Plasma mit freien Standardmodellteilchen





Credit: Ella Dreiner

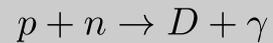
# Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?

# Big Bang Nukleosynthese

3 min nach Big Bang

## Deuterium Bottleneck

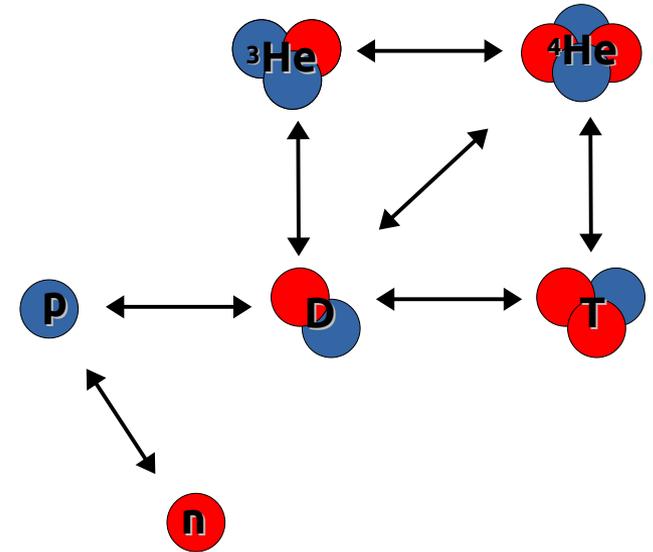
Nukleosynthese beginnt mit Formation von Deuterium (D)



Nur wenn Photodissoziation ineffektiv wird, können sich die leichten Elemente stabil formen

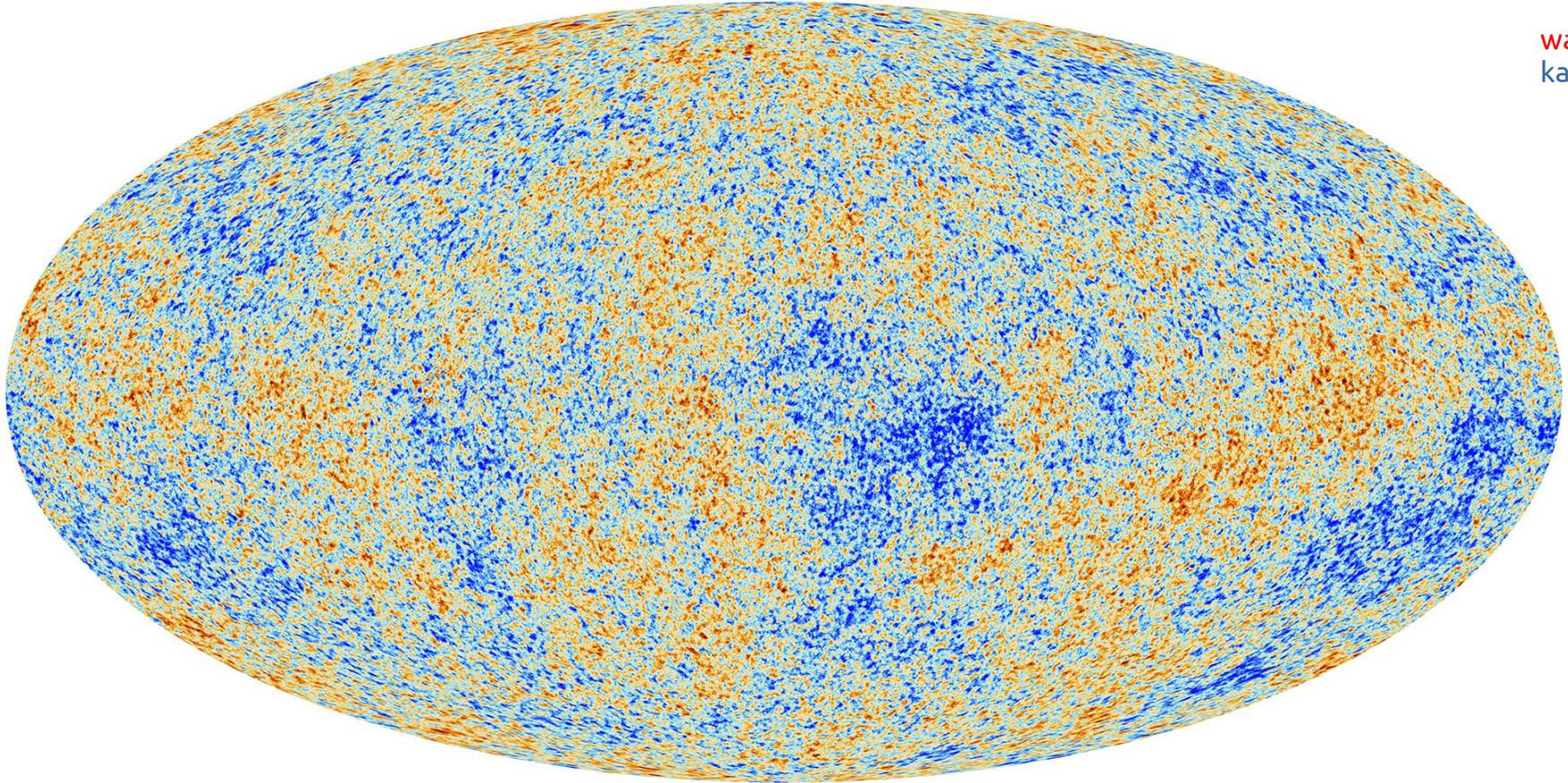
$$T_{\text{nuc}}^D \approx \frac{B_D}{\log \eta_B^{-1}}$$

$$\eta_B^{\text{obs}} = (6.14 \pm 0.19) \times 10^{-10}$$



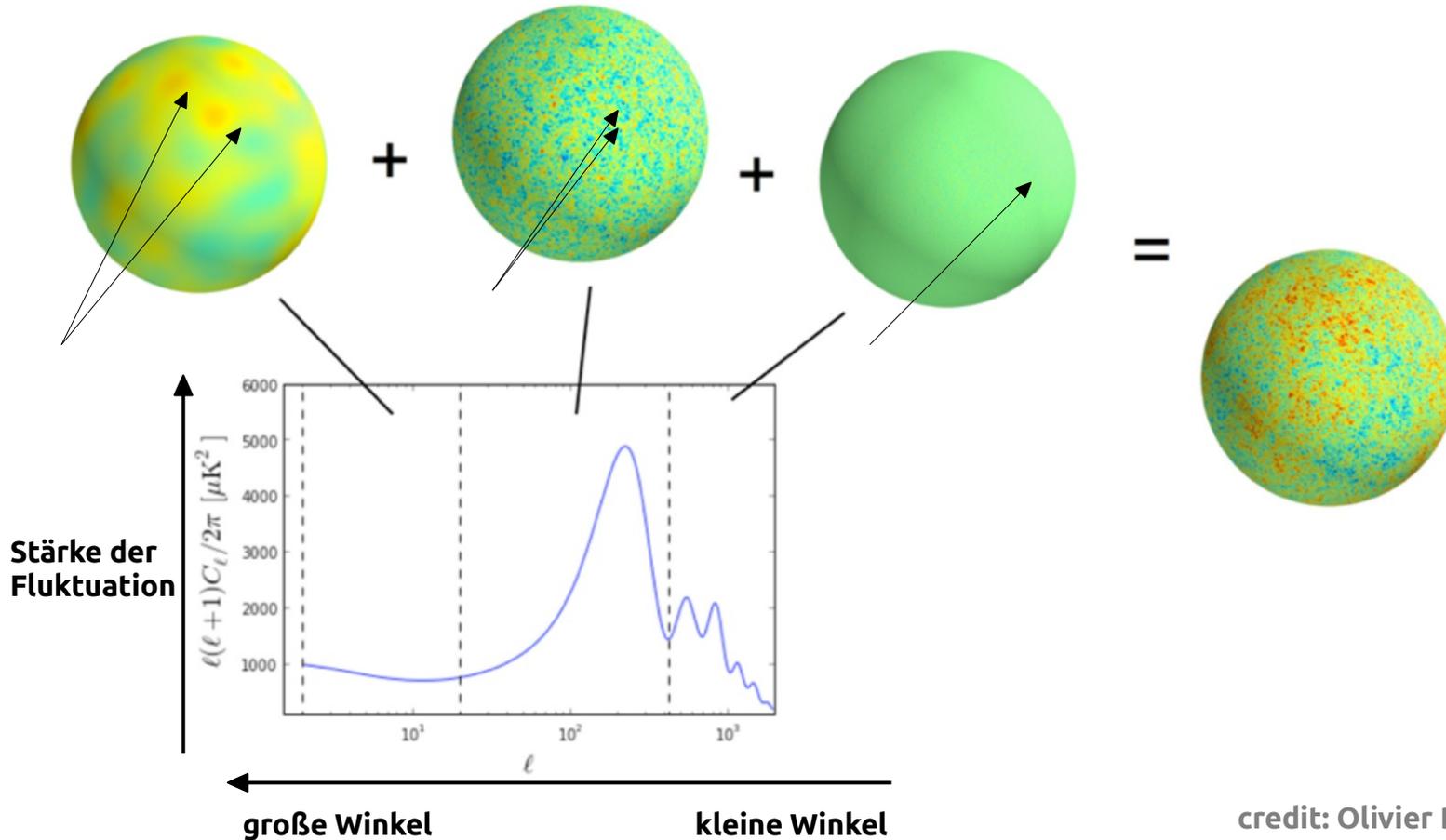
# Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

warm  
kalt



credit: ESA/PLANCK collaboration

# Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

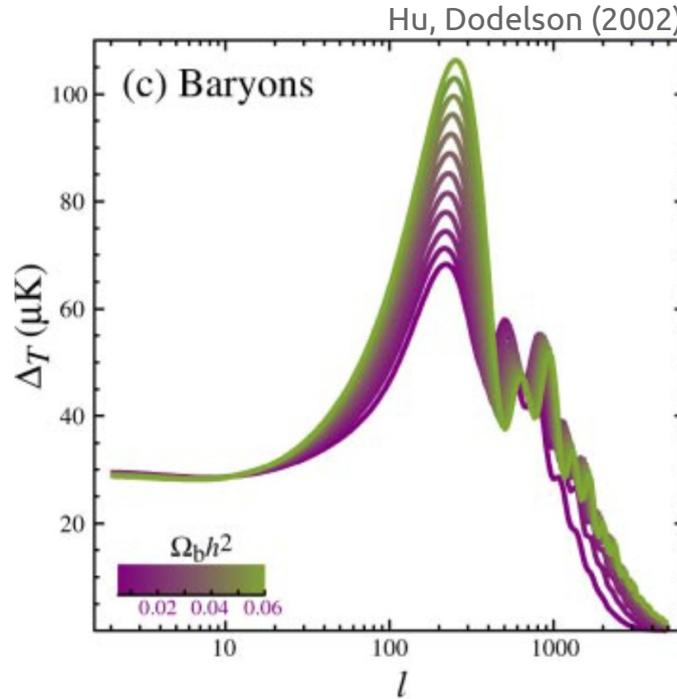


credit: Olivier Doré, Caltech 2017, adapted

# Baryonen im CMB

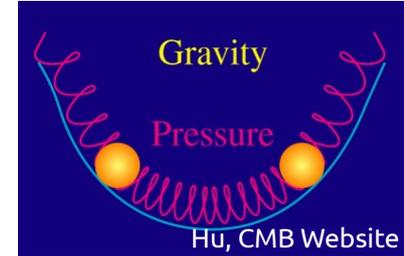
400.000 y nach Big Bang

Stärke der  
Fluktuation



Große Winkel

Kleine Winkel

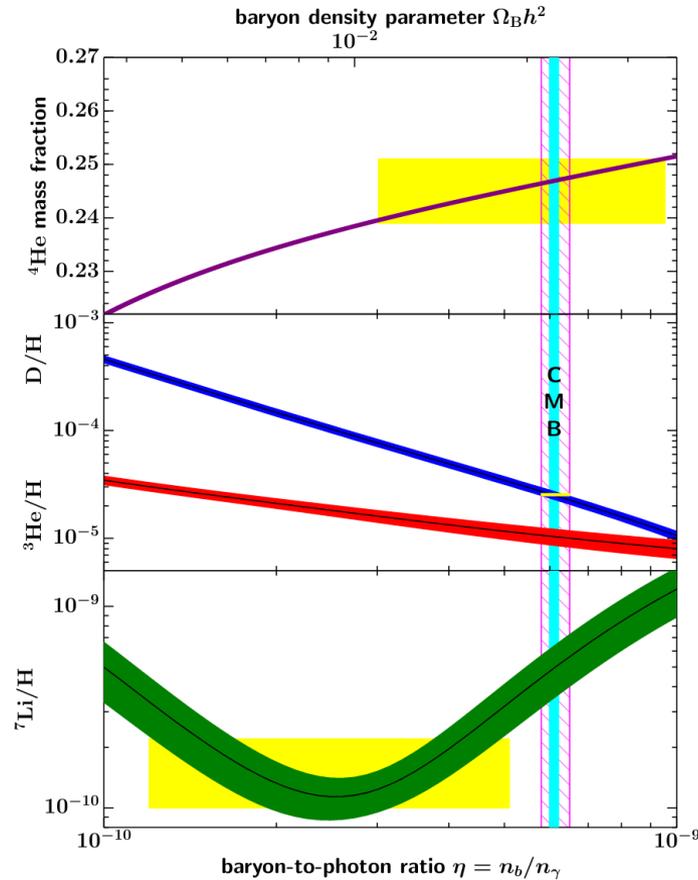


$$\Omega_B h^2 = 0.02230 \pm 0.00020$$

Heutiger Anteil der Baryonen  
an der Gesamtenergiedichte

$$\Omega_B = 0.05$$

# Kombination von BBN & CMB

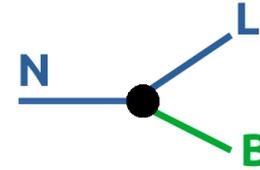


**Übereinstimmung von BBN und CMB, obwohl basierend auf zwei komplett unterschiedlichen Epochen.**

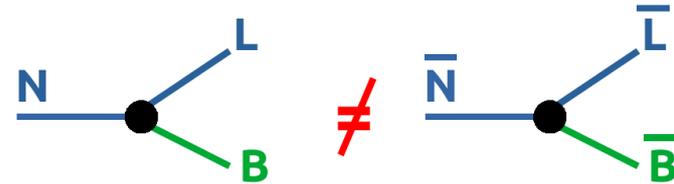
# Warum benötigen wir neue Physik?

Wir kennen die notwendigen, theoretischen Bedingungen, die erfüllt sein müssen, um eine Asymmetrie zu erzeugen (Sakharov Bedingungen):

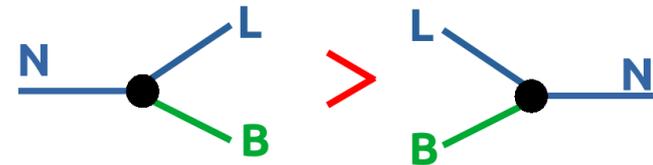
B-L Verletzung



C and CP Verletzung



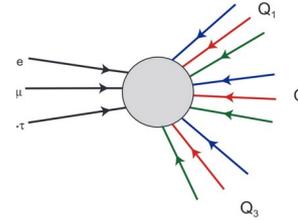
Abweichung vom thermischen Gleichgewicht



# Warum benötigen wir neue Physik?

Wir kennen die notwendigen, theoretischen Bedingungen, die erfüllt sein müssen, ob eine Asymmetrie zu erzeugen (Sakharov Bedingungen):

B-L Verletzung



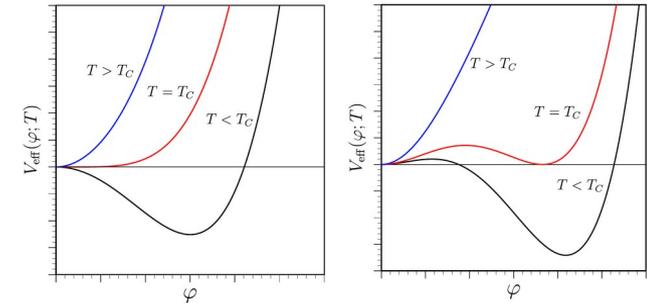
$$\Delta B = \Delta L = 3$$

C and CP Verletzung

$$|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1 + |\epsilon|^2}} (|K_2^0\rangle + \epsilon |\bar{K}_1^0\rangle) \quad K_1^0 \rightarrow 2\pi$$

$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1 + |\epsilon|^2}} (|K_1^0\rangle + \epsilon |\bar{K}_2^0\rangle) \quad K_2^0 \rightarrow 3\pi$$

Abweichung vom thermischen Gleichgewicht



Standard Modell der Teilchenphysik?

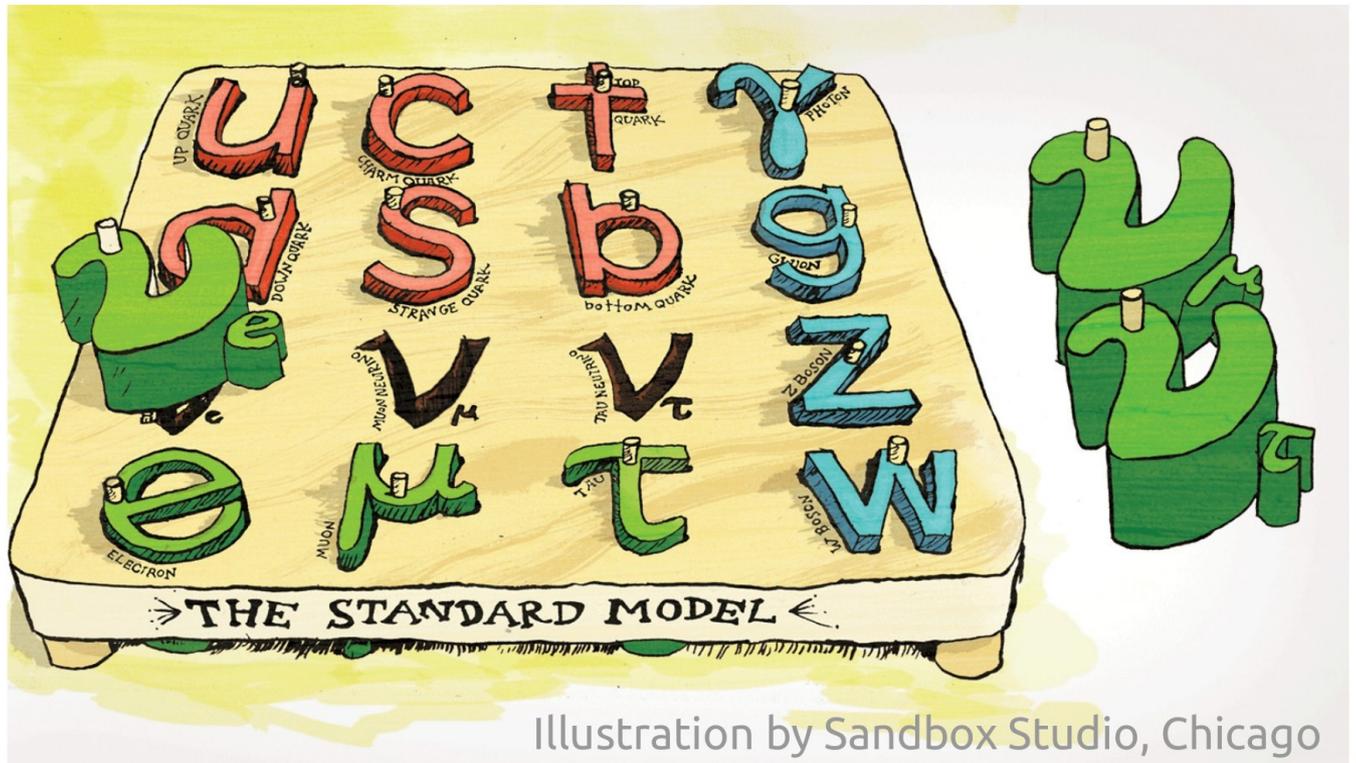
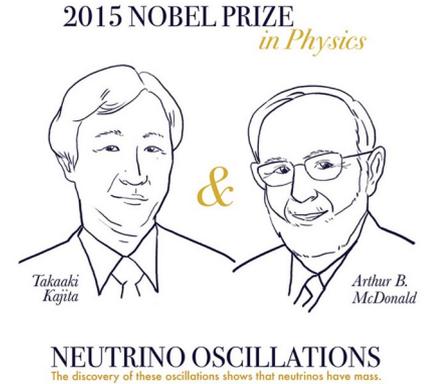
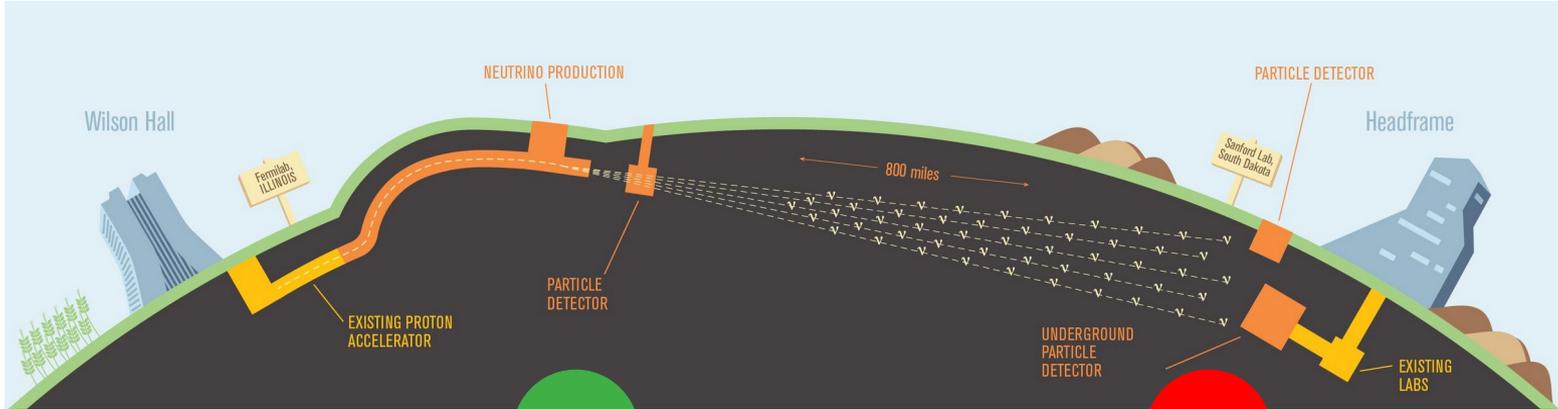


Illustration by Sandbox Studio, Chicago

## Woher bekommen Neutrinos ihre Masse?

# Neutrinooszillationen als Zeichen neuer Physik

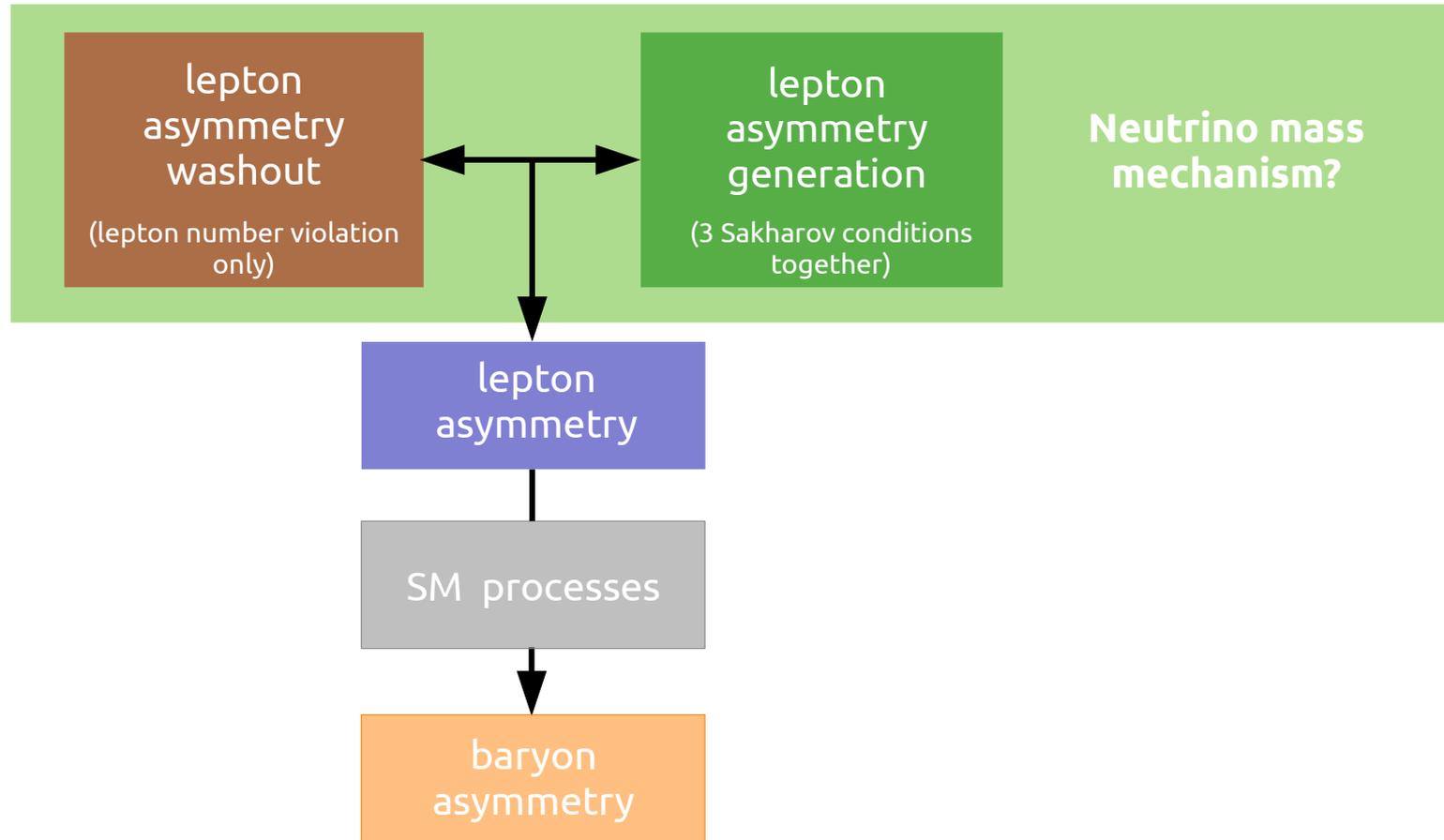


$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$

Neutrinooszillationen benötigen massive Neutrinos, nicht enthalten im Standard Modell.

**Welcher Mechanismus generiert die Neutrinomassen?**

# Prinzip der Leptogenese



# Gibt es etwas jenseits der sichtbaren Materie?

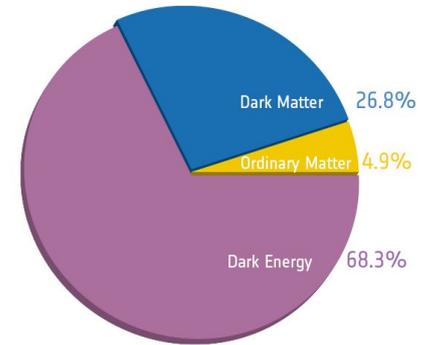
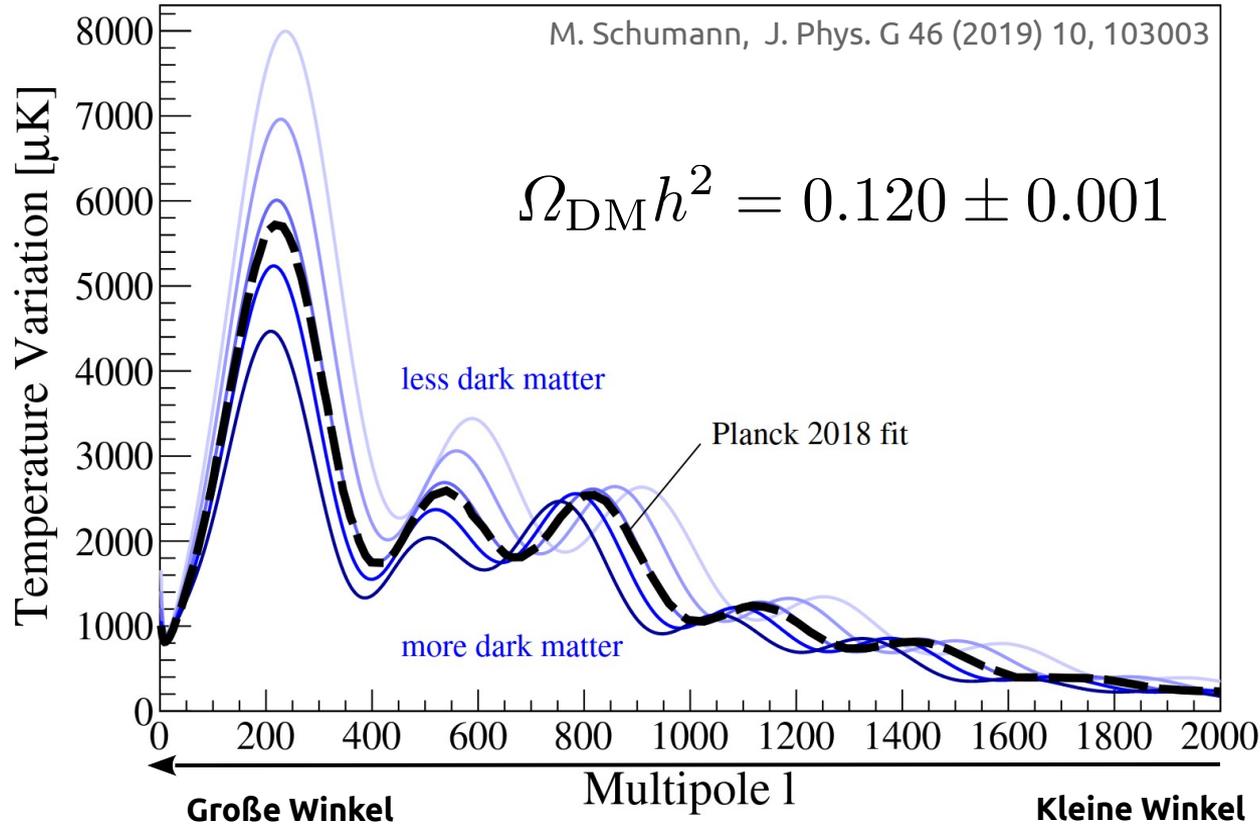
# Sichtbare Materie – die Spitze des Eisberges

**5% visible matter**

**26% dark matter**

**69% dark energy**

# CMB und Dunkle Materie



Credit: PLANCK collaboration

# 1933: Erster Hinweis auf Dunkle Materie



# 1933: Erster Hinweis auf Dunkle Materie



credit: Wikipedia

**Fritz Zwicky**

- Bestimmung der Masse durch Gesamtleuchtkraft des Comahaufens
- Abschätzung der Geschwindigkeitsvariation im Galaxiehaufen

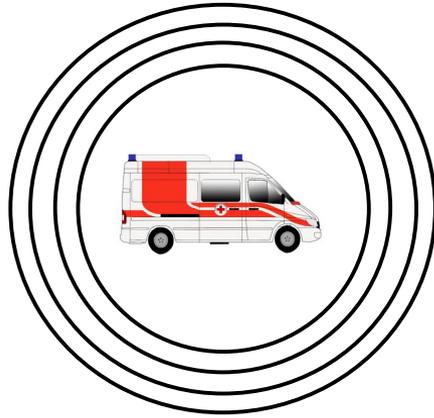
Gravitationsenergie = Kinetische Energie

$$M \sim \Delta v^2$$

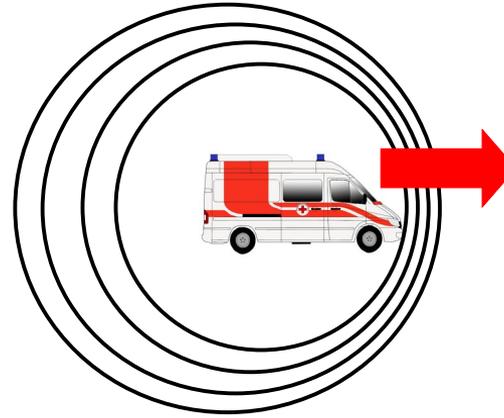
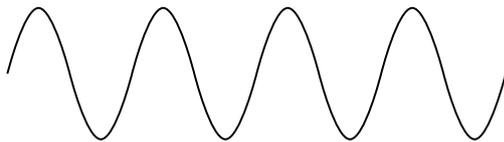


- Geschwindigkeitsvariation messbar durch Rotverschiebung der Galaxien

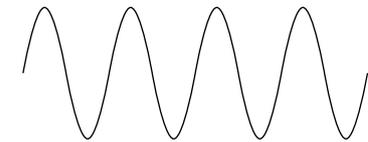
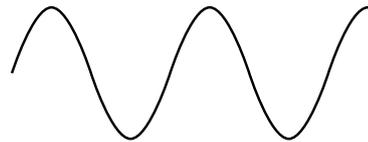
# Die Rotverschiebung / Der Doppler Effekt



statische Quelle

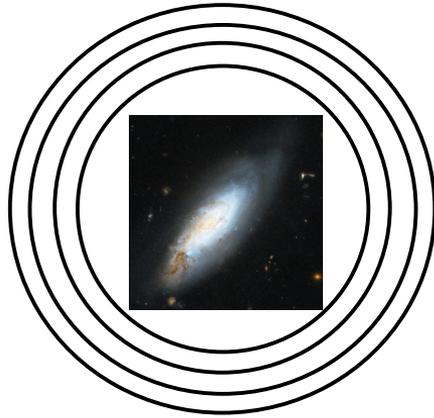


bewegte Quelle

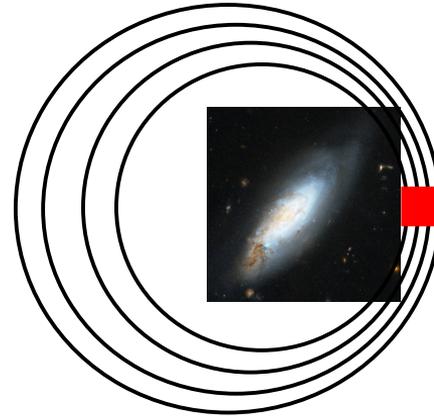


Credit for ambulance car: Markus Elian, CC BY-SA 3.0

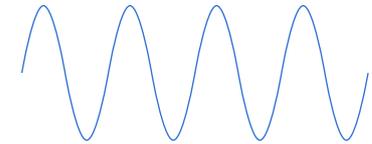
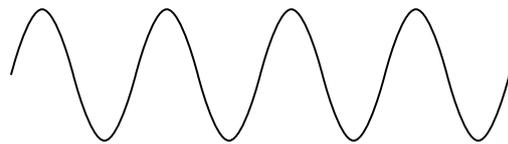
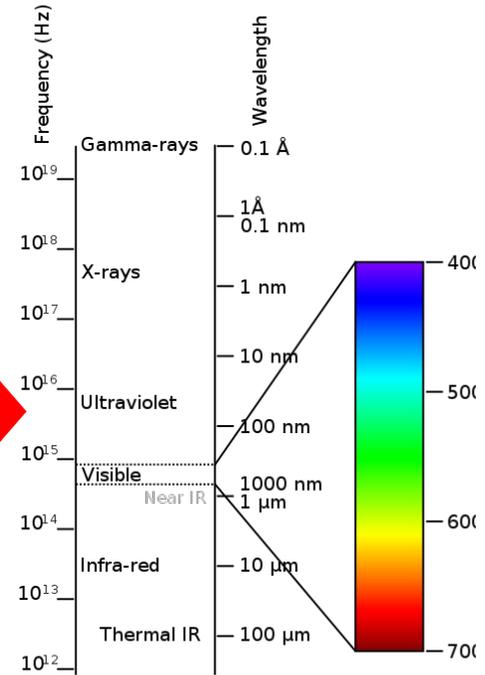
# Die Rotverschiebung / Der Doppler Effekt



statische Quelle



bewegte Quelle



Credit for galaxy: ESA/Hubble, CC BY 4.0  
Credit for spectrum: Victor Blacus, CC BY-SA 3.0

# 1933: Erster Hinweis auf Dunkle Materie



credit: Wikipedia

**Fritz Zwicky**

- Bestimmung der Masse durch Gesamtleuchtkraft des Comahaufens
- Abschätzung der Geschwindigkeitsvariation im Galaxiehaufen

Gravitationsenergie = Kinetische Energie

$$M \sim \Delta v^2$$



- Geschwindigkeitsvariation messbar durch Rotverschiebung der Galaxien

# 1933: Erster Hinweis auf Dunkle Materie



credit: Wikipedia

Franz Zwicky

Zwicky, Helvetica Physica Acta, Vol. 6, p. 110-127, 1933

Rotverschiebung extragalaktischer Nebel.

125

Um, wie beobachtet, einen mittleren Dopplereffekt von 1000 km/sek oder mehr zu erhalten, müsste also die mittlere Dichte im Comasystem mindestens 400 mal grösser sein als die auf Grund von Beobachtungen an leuchtender Materie abgeleitete<sup>1)</sup>. Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also das überraschende Resultat ergeben, dass dunkle Materie in sehr viel grösserer Dichte vorhanden ist als leuchtende Materie.

**“Masse bestimmt durch Rotverschiebung  
größer als durch Leuchtkraftmessung”**

**→ Zusätzliche Masse durch Dunkle Materie?**

# 1970: Verstärkung der Hinweise auf Dunkle Materie



# 1970: Verstärkung der Hinweise auf Dunkle Materie



Credit: KPNO/NOIRLab/NSF/AURA, CC BY 4.0



Vera Rubin

credit: NASA, ESA, and B. Holwerda (University of Louisville), CC BY 4.0

# 1970: Verstärkung der Hinweise auf Dunkle Materie

Geschwindigkeit  $v_c$

Radius

Geschwindigkeit  $v_c$

Credit: KPNO/NOIRLab/NSF/AURA, CC BY 4.0

Vera Rubin

credit: NASA, ESA, and B. Holwerda (University of Louisville), CC BY 4.0

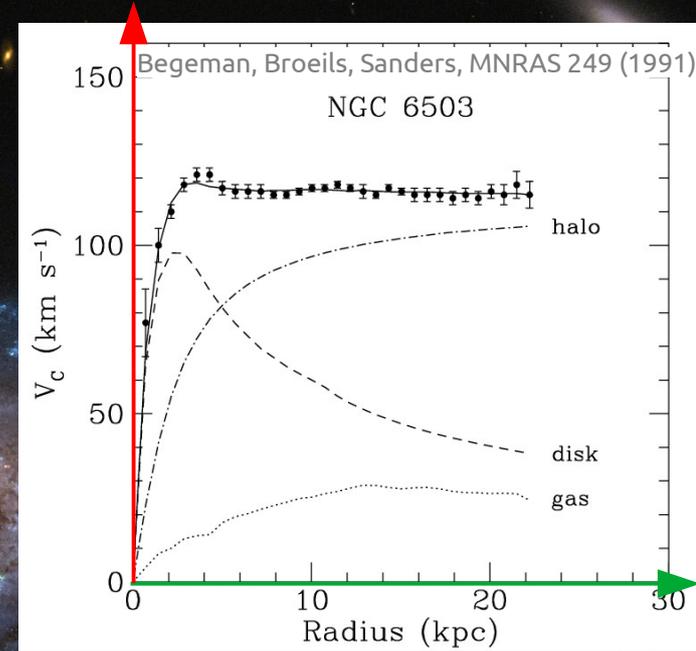


# 1970: Verstärkung der Hinweise auf Dunkle Materie

Geschwindigkeit  $v_c$

Radius

Geschwindigkeit  $v_c$



Credit: KPNO/NOIRLab/NSF/AURA, CC BY 4.0

Vera Rubin

credit: NASA, ESA, and B. Holwerda (University of Louisville), CC BY 4.0

# 1970: Verstärkung der Hinweise auf Dunkle Materie



**Erwartung**



**Beobachtung**

Credit: Ingo Berg, CC BY-SA 3.0

→ **Zusätzliche Masse durch Dunkle Materie**

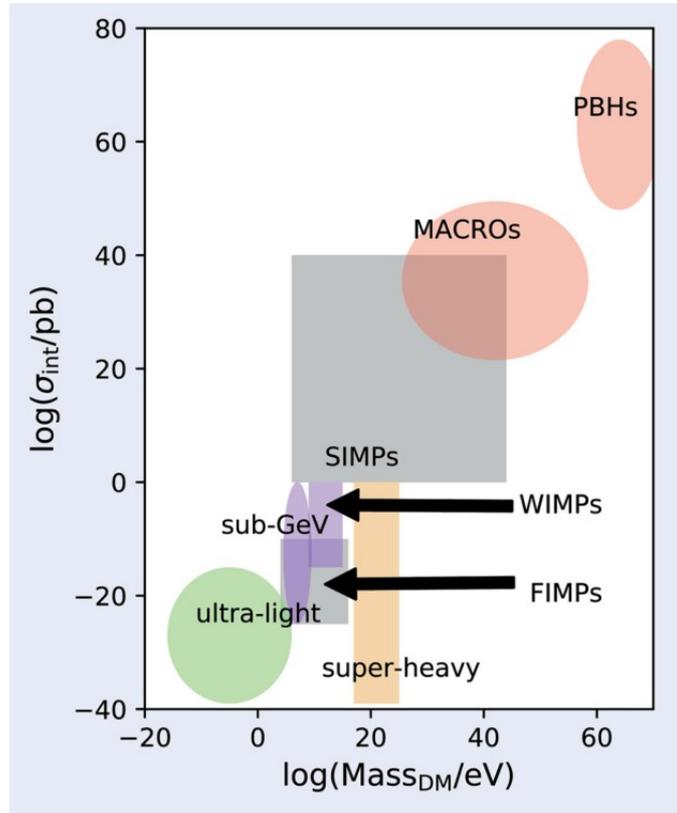
**Viele offene Fragen, die zu beantworten sind...**

# Forschungsthemen

# Dunkle Materie

# Landschaft der Dunklen Materie Kandidaten

Wechselwirkungsstärke  
der Dunklen Materie mit  
Standard Modell



Masse der  
Dunklen Materie

C. Arina, CERN Courier, 4 March 2021

# Das WIMP – weakly interacting massive particle

# Das “WIMP Wunder”

Masse der Dunklen Materie

$$\Omega \sim \frac{m_\chi^2}{g^4} \times 10^{-10} \text{GeV}^{-2} \sim 0.26$$

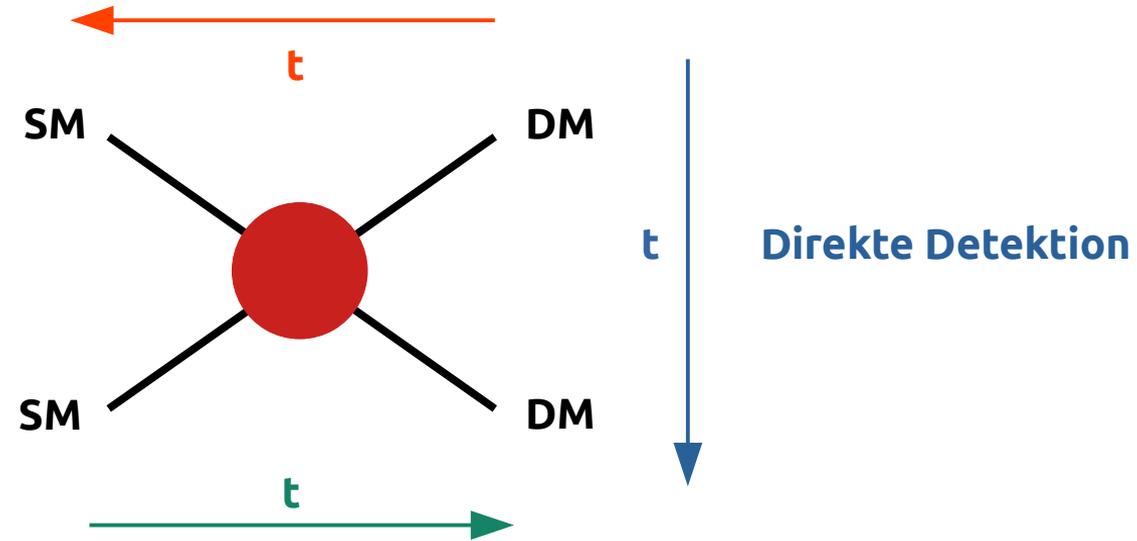
Wechselwirkungsstärke der Dunklen Materie mit Standard Modell



# Die Jagd nach dem WIMP

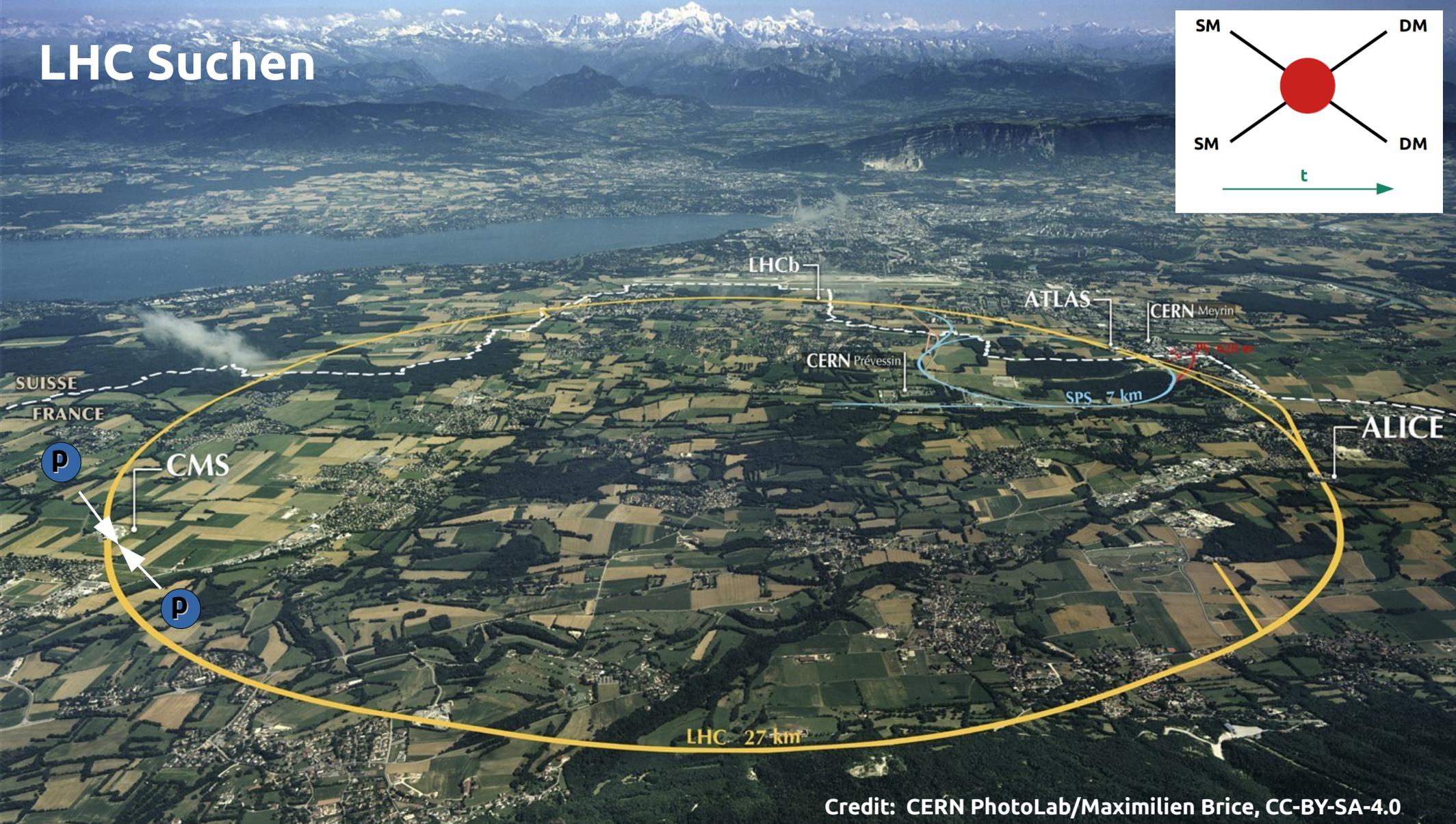
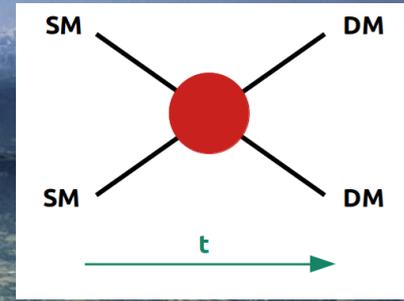
Erzeugung Restdichte (frühes Universum)

Indirekte Detektion (heute)

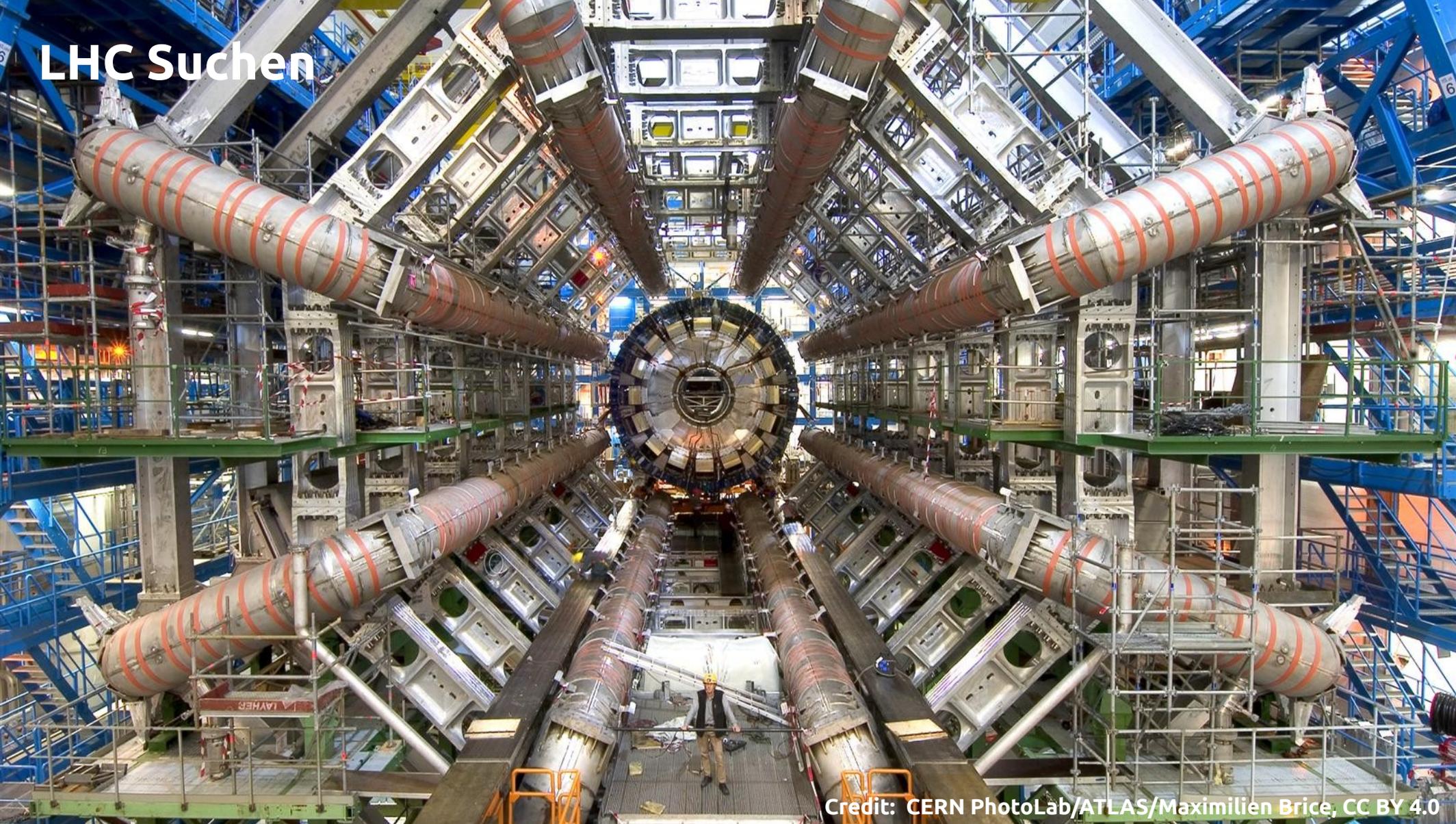


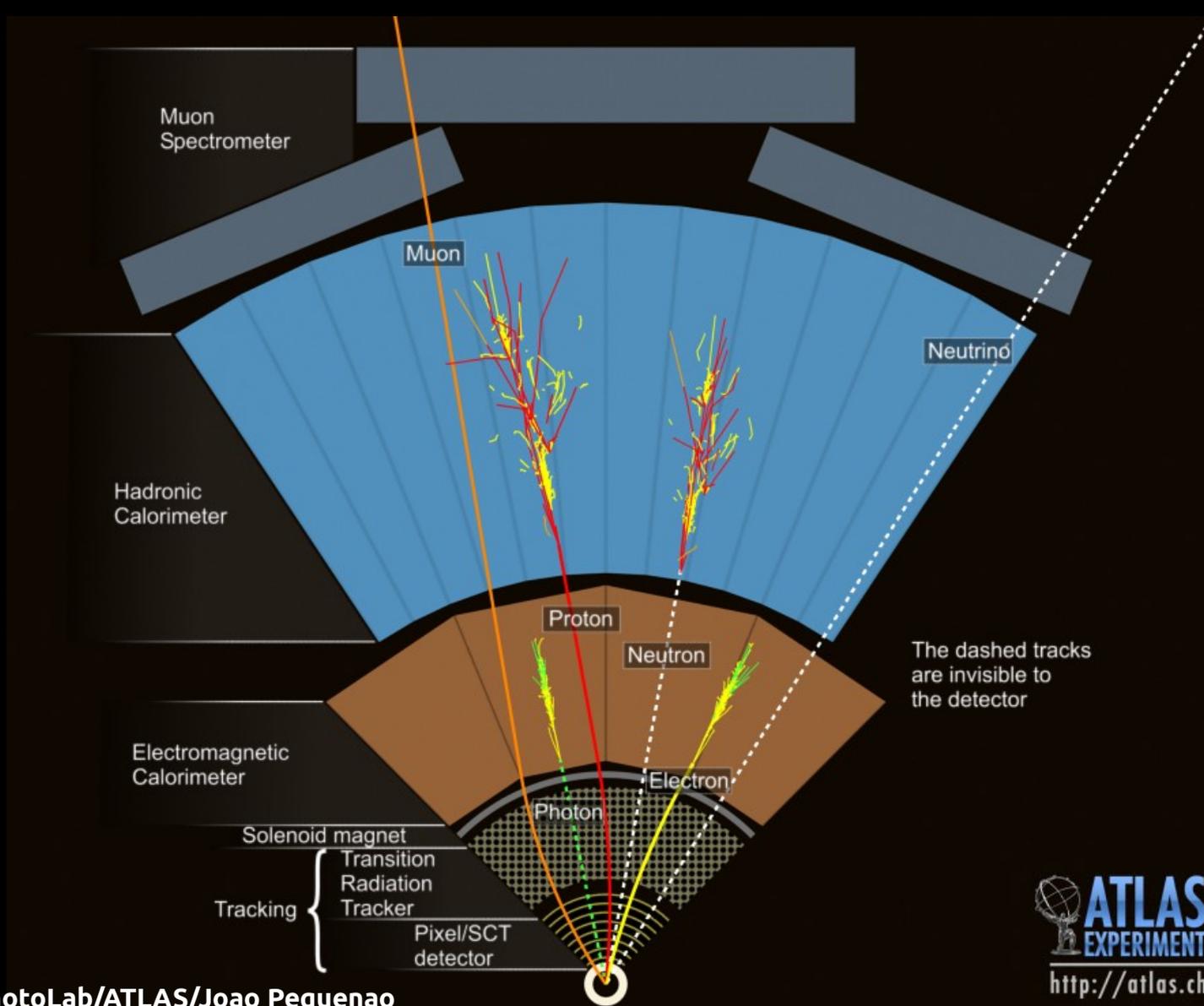
Teilchenbeschleuniger (LHC)

# LHC Suchen



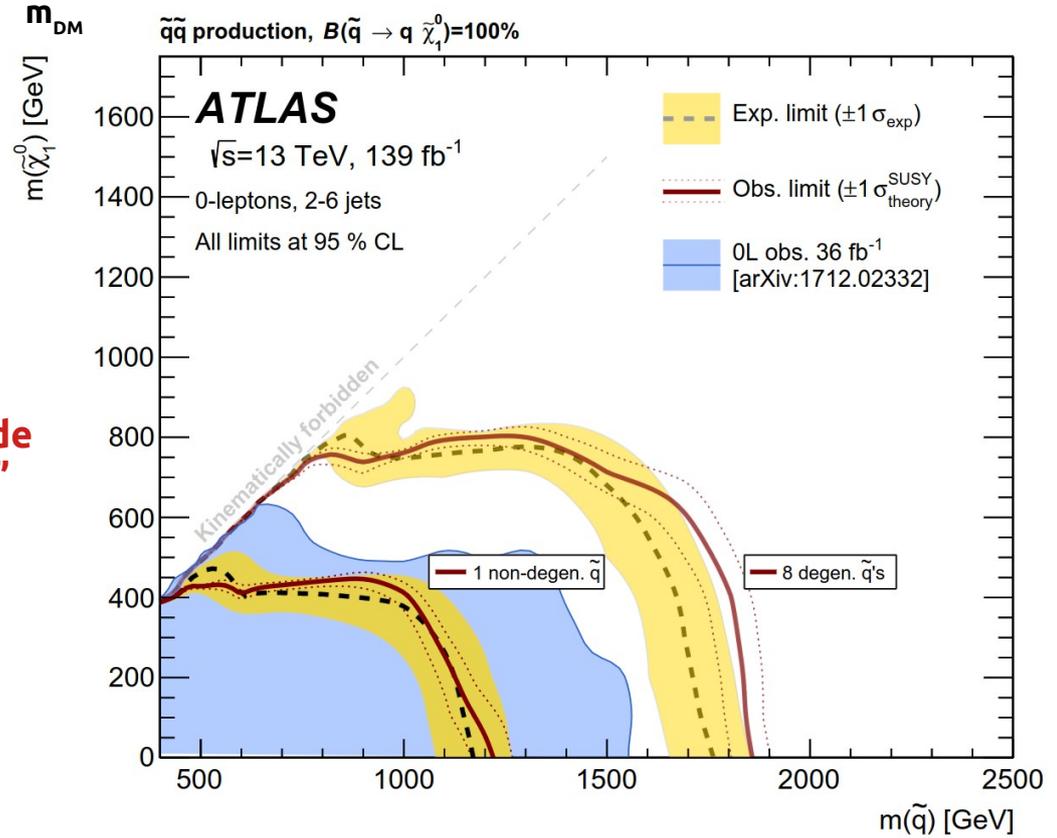
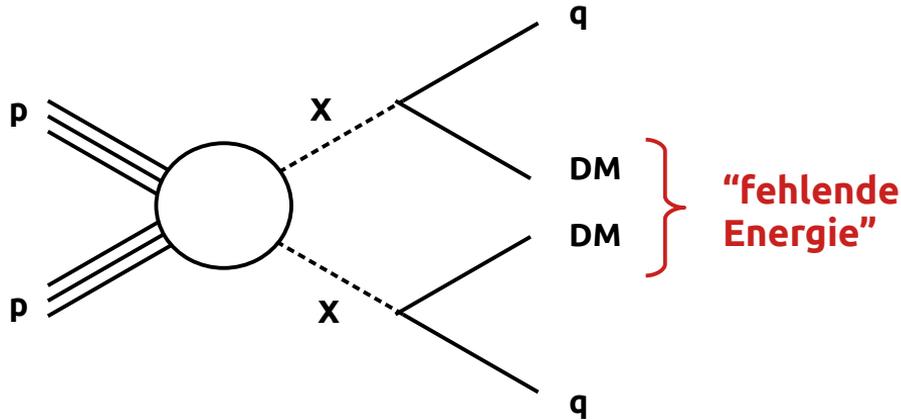
# LHC Suchen





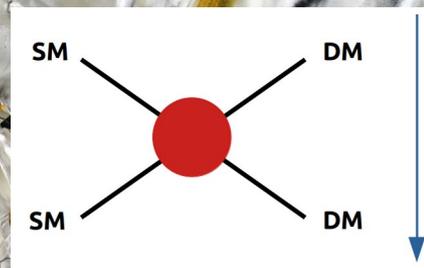
Credit: CERN PhotoLab/ATLAS/Joao Pequeno

# LHC Suchen

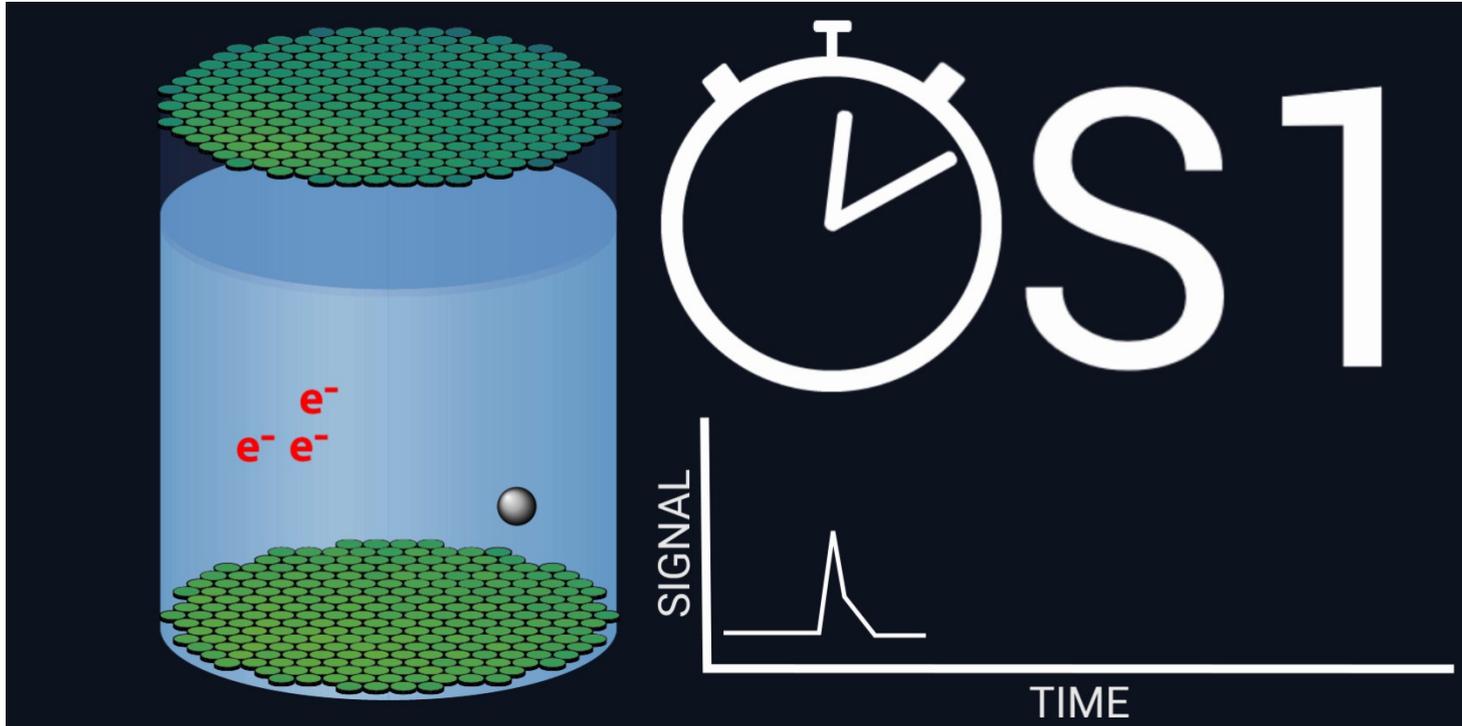
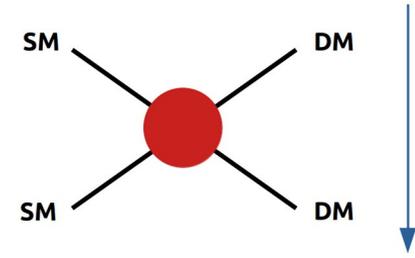


Credit: ATLAS collaboration, arXiv:2010.14293

# Direkte Suchen

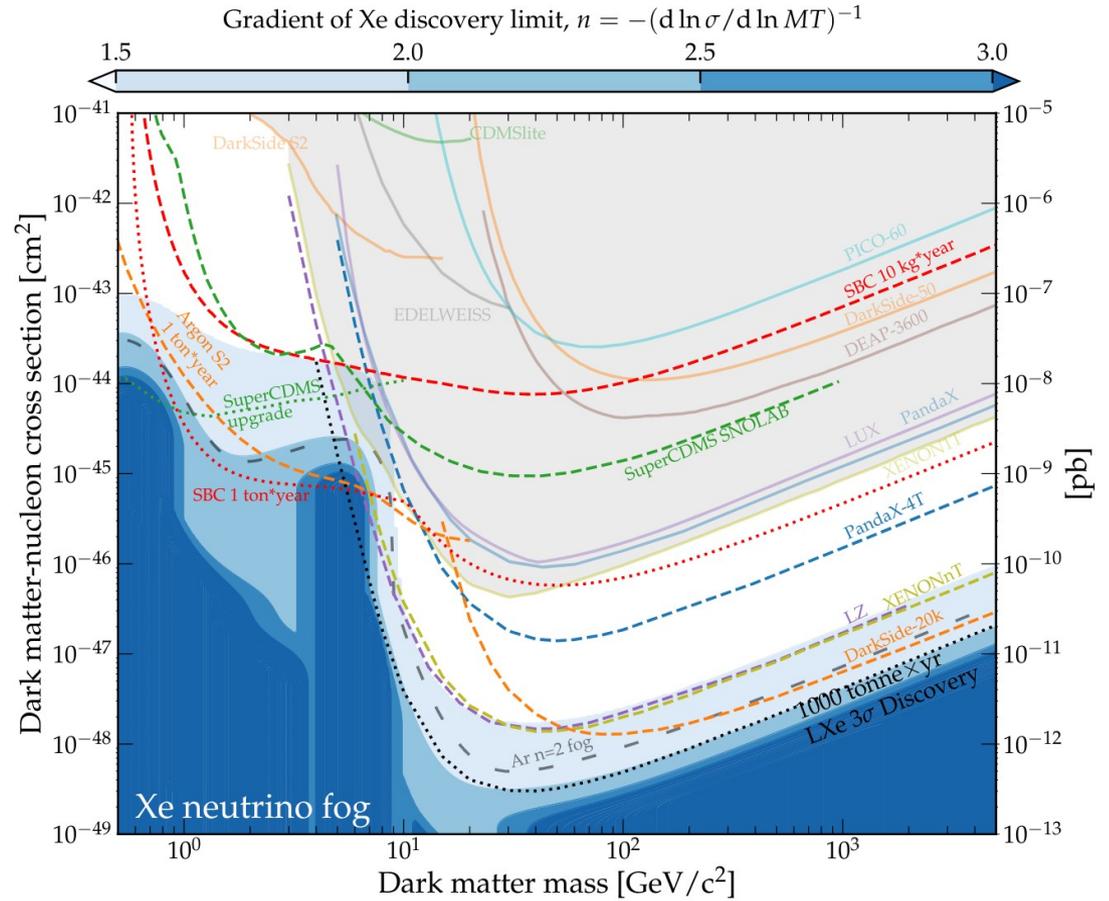
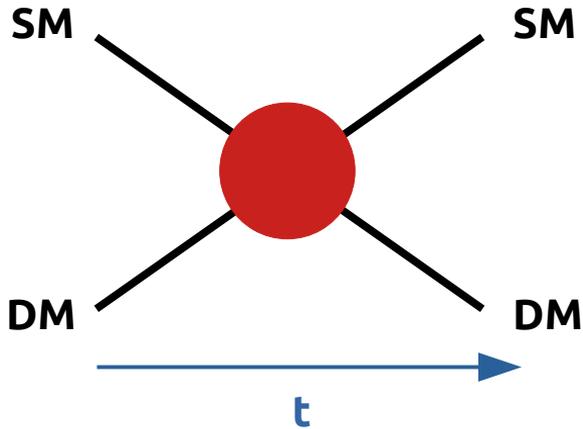


# Direkte Suchen



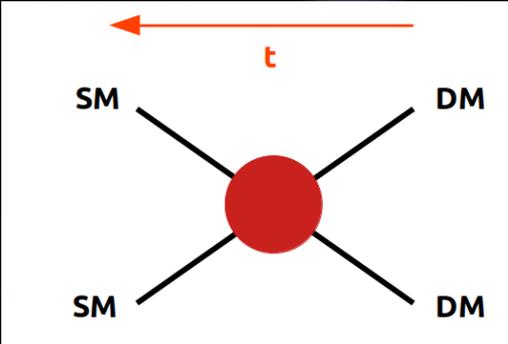
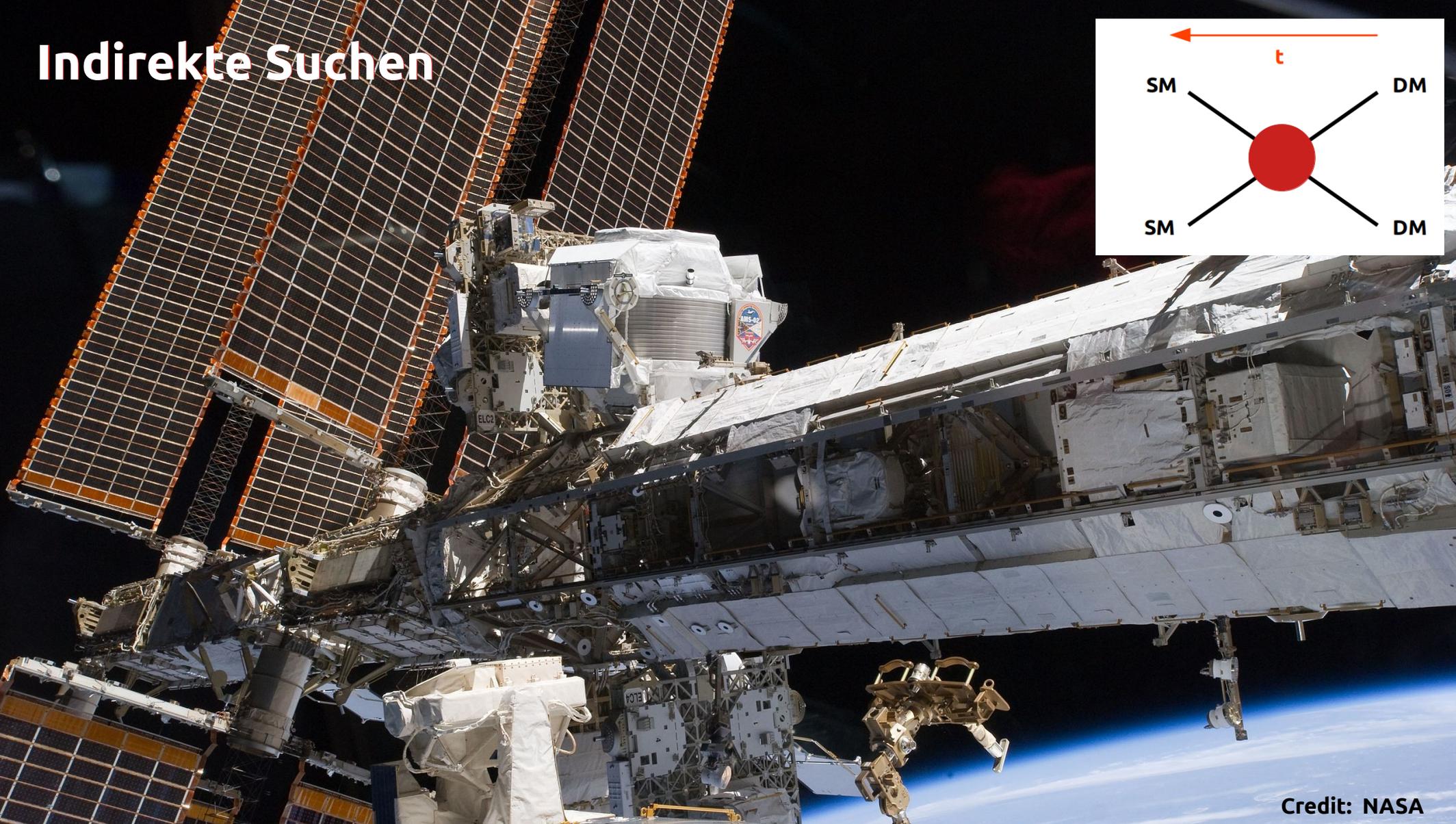
Credit: Xenon Collaboration

# Direkte Suchen

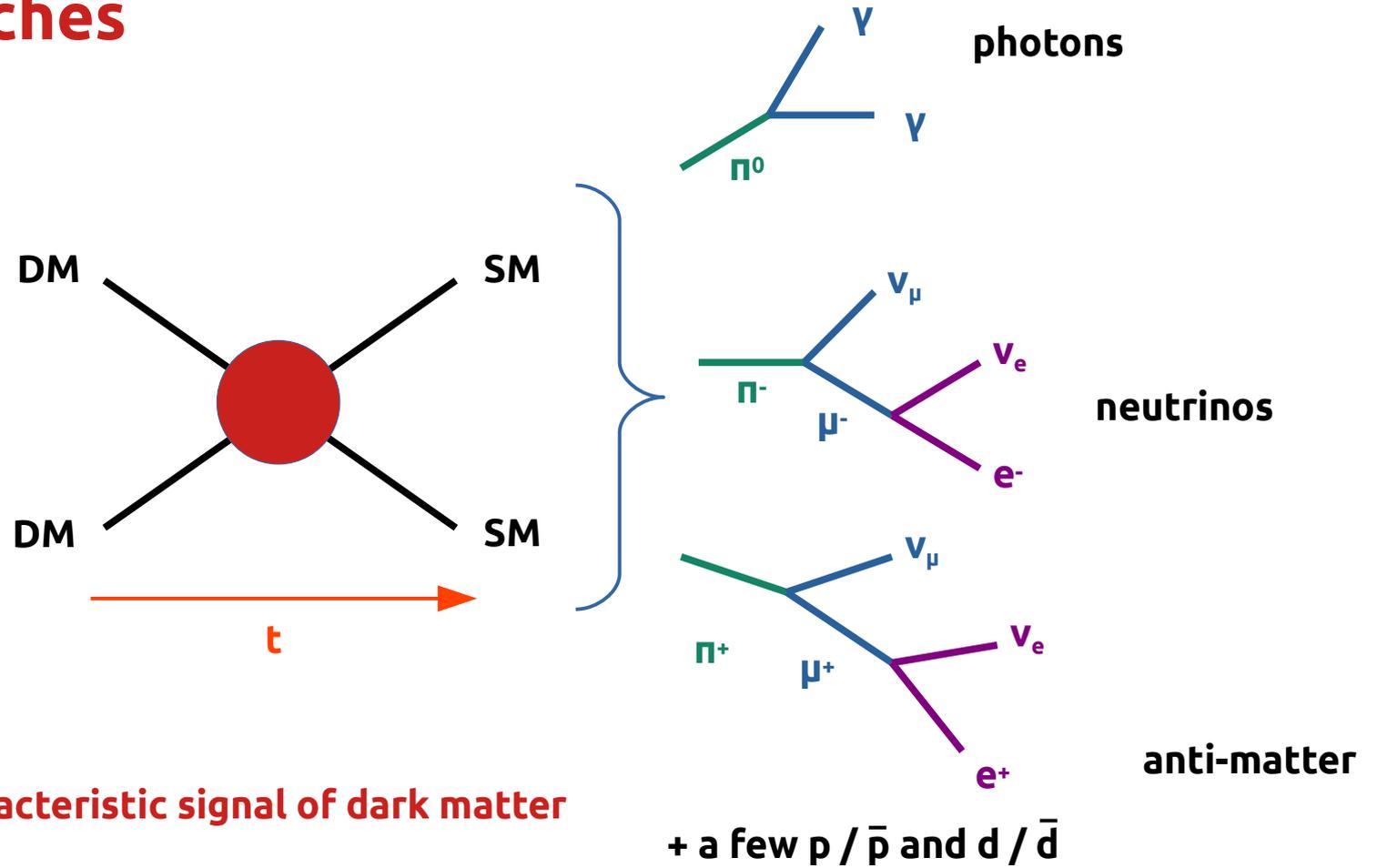


Akerib et al., Snowmass2021, arXiv:2203.08084

# Indirekte Suchen



# Indirect Searches



→ search for characteristic signal of dark matter

# Berechnung der Restdichte Dunkler Materie

$$\frac{dn}{dt} = -3Hn - \langle \sigma_{\text{eff}} v \rangle (n^2 - n_{\text{eq}}^2)$$

Zeitliche Änderung der  
DM Anzahldichte

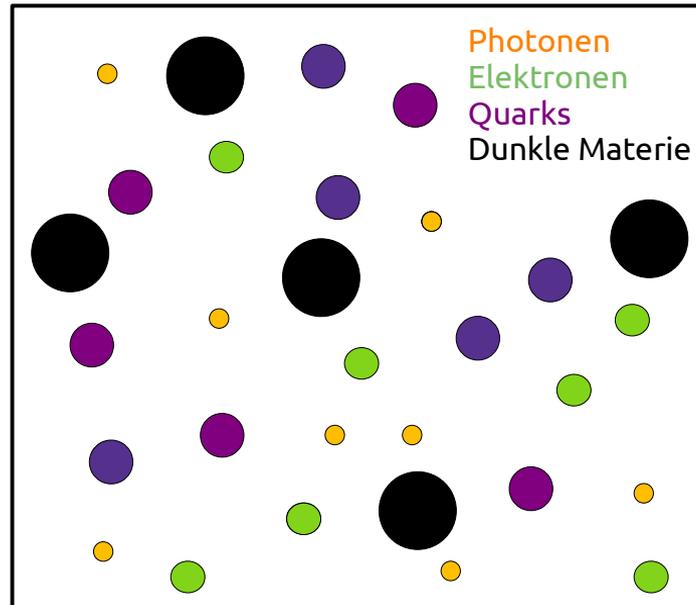
Ausdehnung des  
Universums

Wechselwirkung mit anderen Teilchen



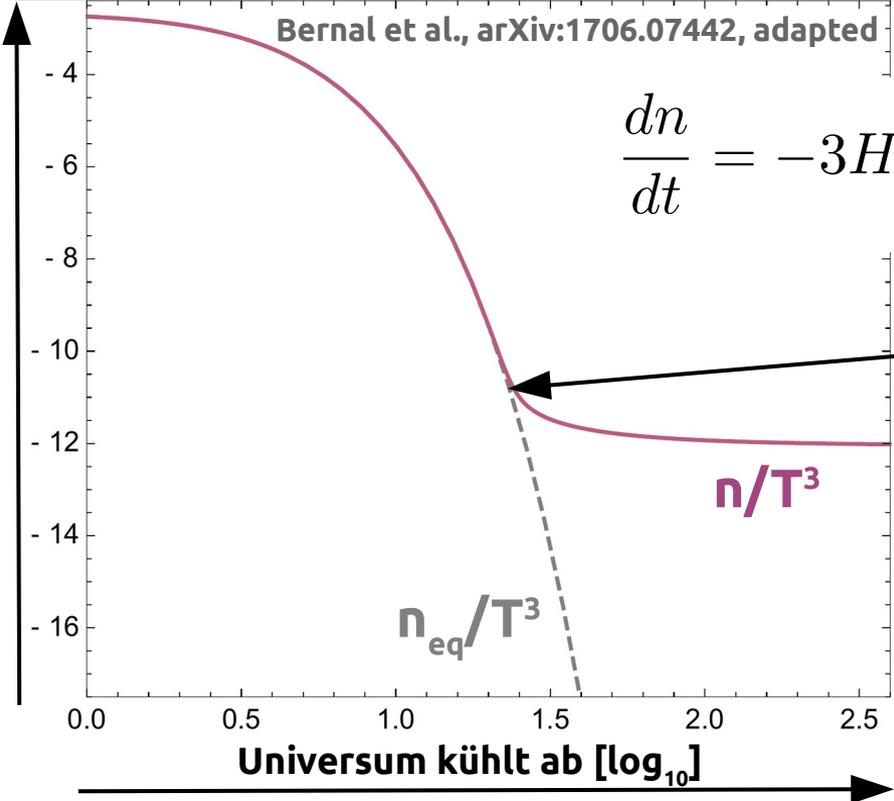
# Ausfrieren der Dunklen Materie

- Dunkle Materie ist von Beginn an im Bad der Standardmodellteilchen vorhanden (“im Gleichgewicht”)

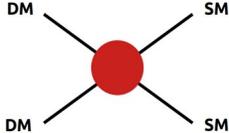


# Ausfrieren der Dunklen Materie

Normierte Anzahldichte der Dunklen Materie [log<sub>10</sub>]

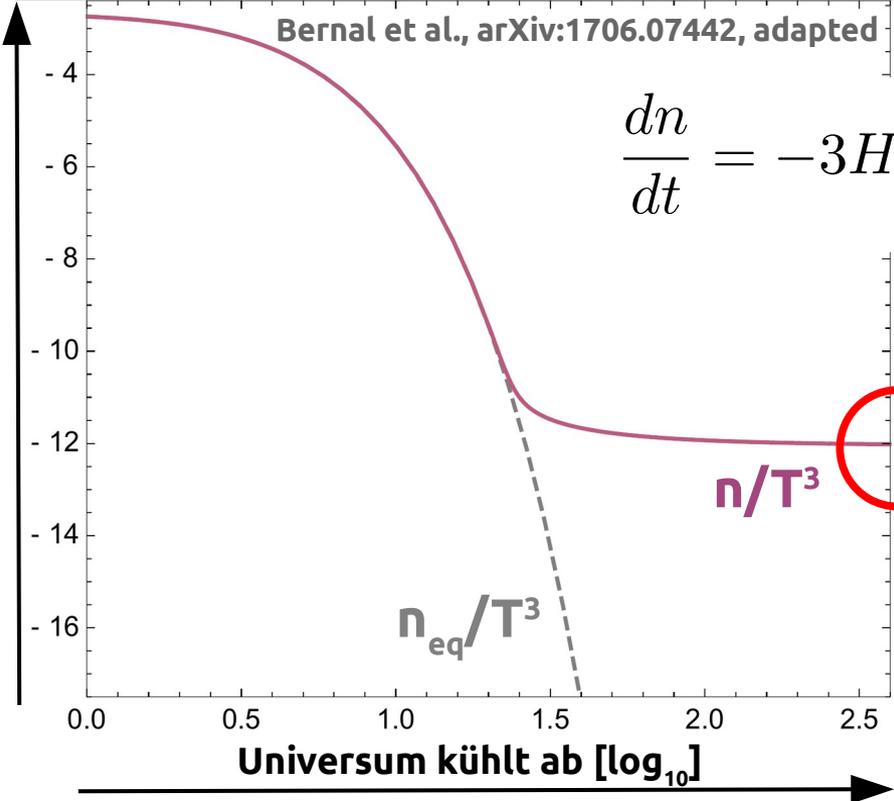


Expansion schneller als Wechselwirkungsrate der Dunklen Materie ("Ausfrieren")



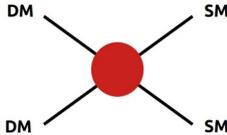
# Ausfrieren der Dunklen Materie

Normierte Anzahldichte  
der Dunklen Materie  
[log<sub>10</sub>]



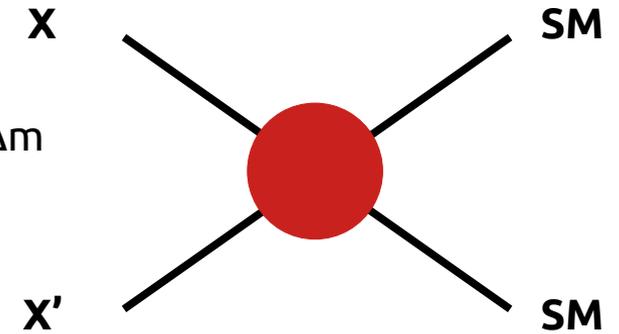
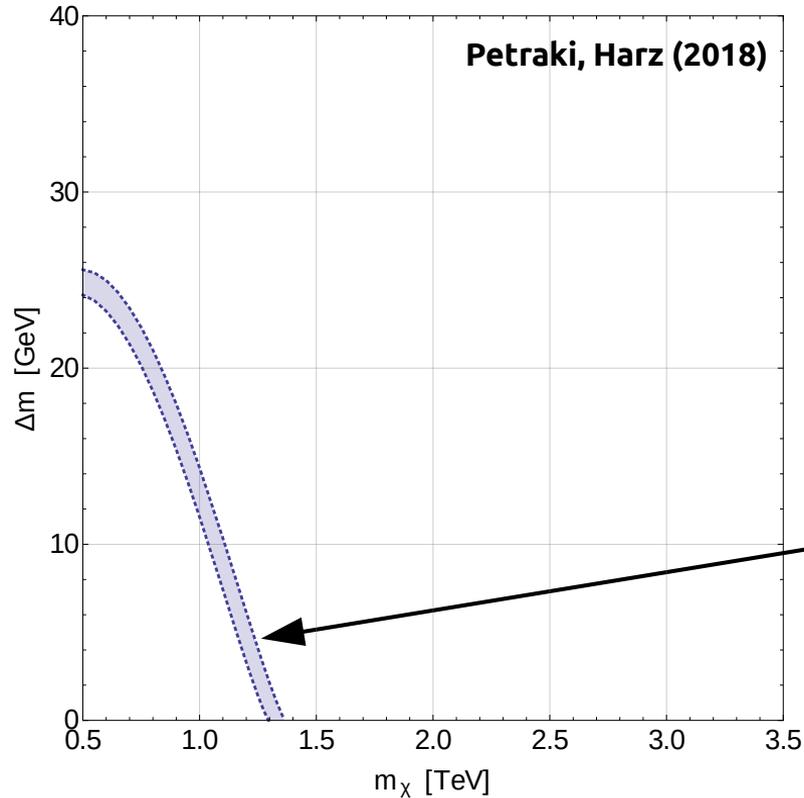
$$\frac{dn}{dt} = -3Hn - \langle \sigma_{\text{eff}} v \rangle (n^2 - n_{\text{eq}}^2)$$

$\Omega_{\text{DM}} = 0.264 ?$



# Theoretische Vorhersage

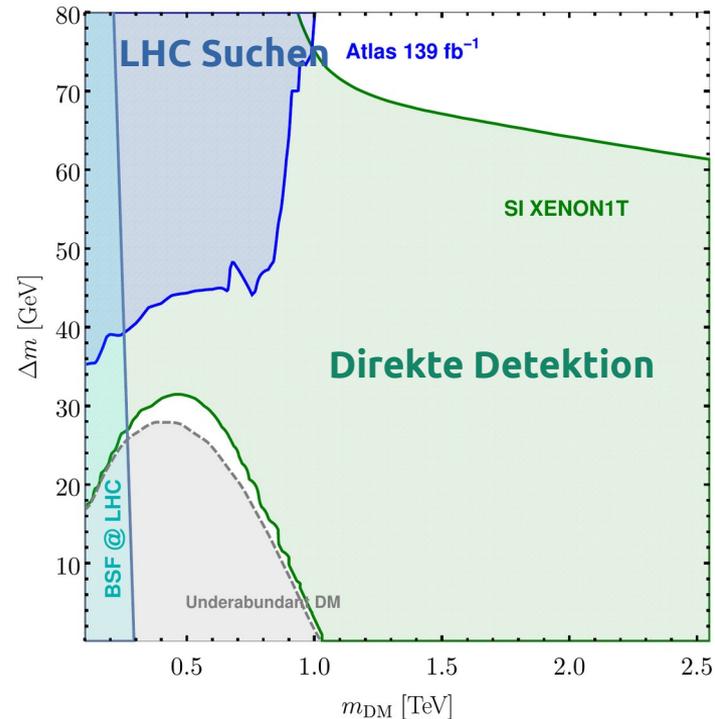
- Annahme:** Zwei neue, "dunkle" Teilchen mit Massenunterschied  $\Delta m$



Band gegeben durch Bereich in dem  
 $\Omega_{\text{CDM}} = 0.264 \pm 0.002$

# Zusammenspiel von Theorie und Experiment

- **Ausschluss** des Parameterraums durch (1) experimentelle Daten und gleichzeitige (2) Vermeidung der Überproduktion von Dunkler Materie



Becker, Copello, Harz, Mohan, Sengupta (2022)

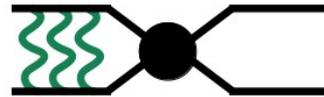
# Neue Standards in der Berechnung der Restdichte

$$\frac{dn}{dt} = -3Hn - \langle \sigma_{\text{eff}} v \rangle (n^2 - n_{\text{eq}}^2)$$

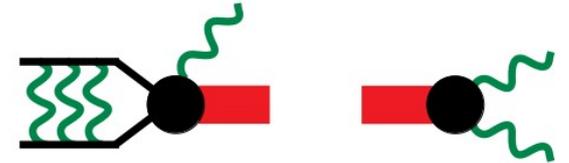
Higher order corrections



Sommerfeld effect



Bound states

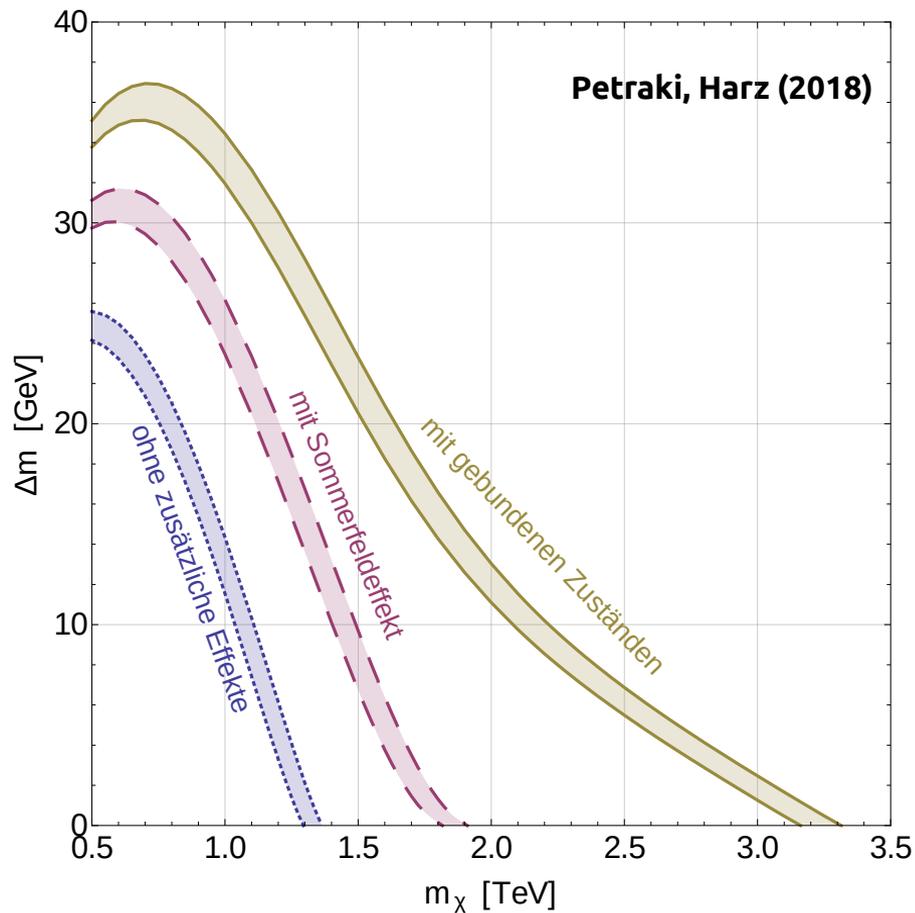


For colored co-annihilation see e.g. Harz, Herrmann, Klasen et al. (2013, 2015, 2016, 2019, 2022, 2023)

For colored co-annihilation see e.g. Harz, Herrmann, Klasen et al., (2015, 2019), Harz, Petraki (2018)

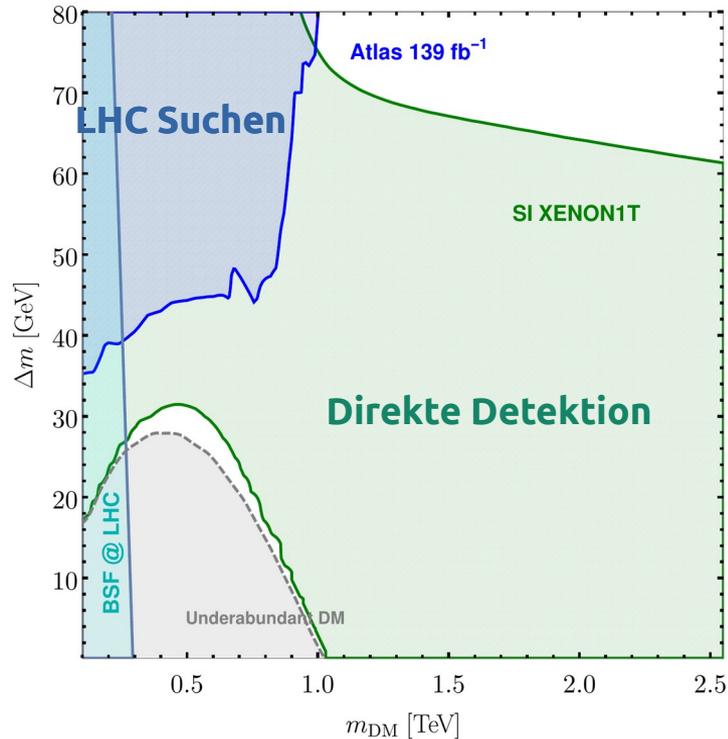
See e.g. Harz, Petraki (2018, 2019)

# Auswirkung der zuvor vernachlässigten Effekte

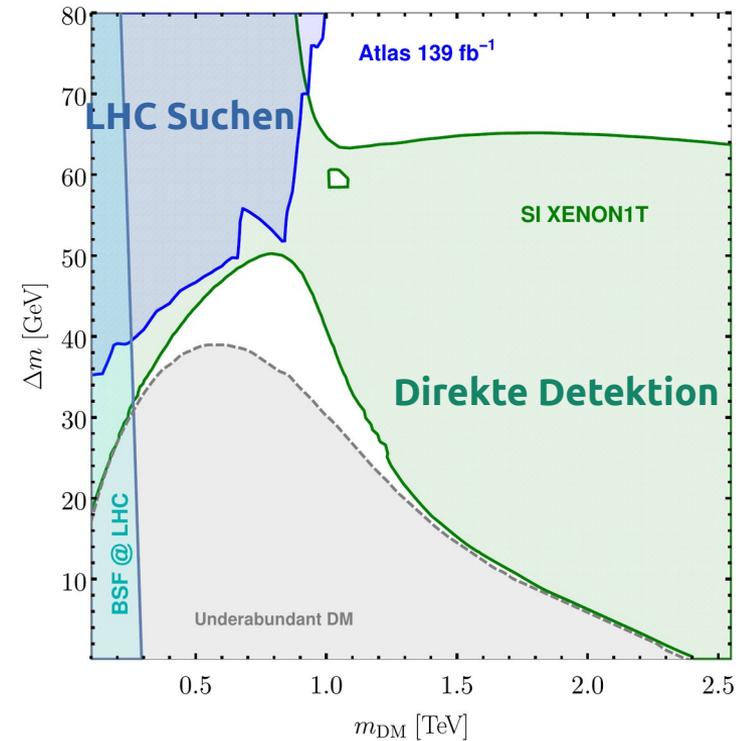


# Einfluss auf die Interpretation experimenteller Ergebnisse

## Ohne zusätzliche Effekte



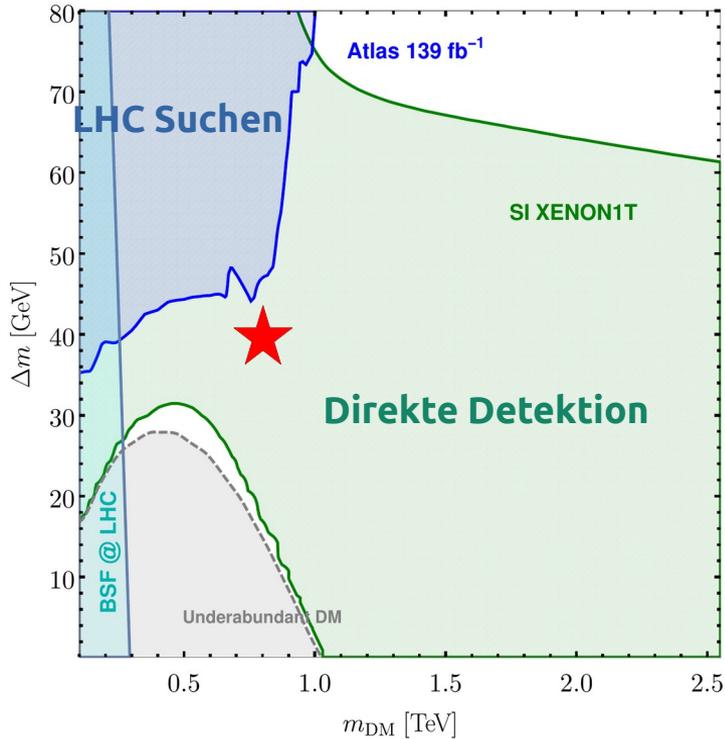
## Mit zusätzlichen Effekten



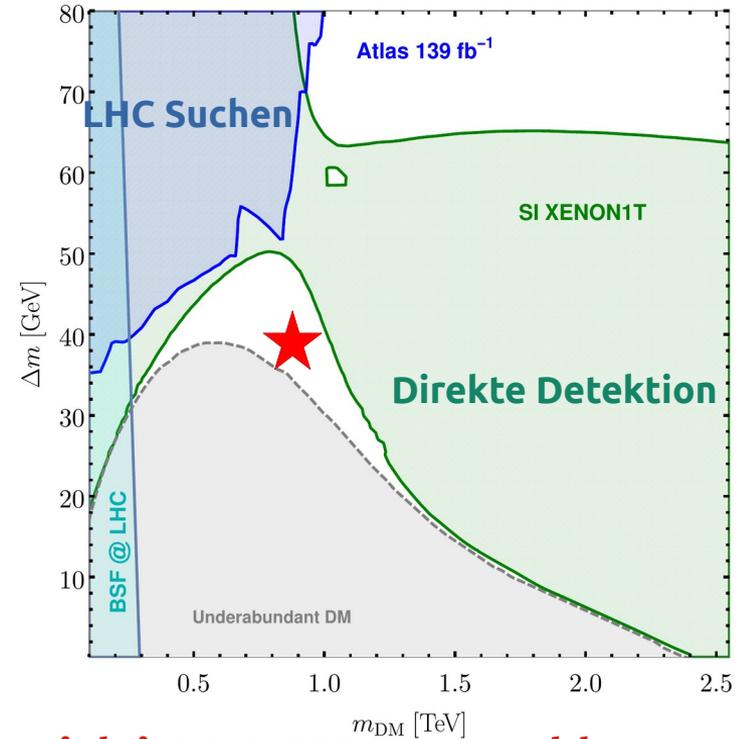
Becker, Copello, Harz, Mohan, Sengupta (2022)

# Einfluss auf die Interpretation experimenteller Ergebnisse

## Ohne zusätzliche Effekte



## Mit zusätzlichen Effekten



**Zuvor ausgeschlossener Parameterbereich ist NICHT ausgeschlossen!**

Becker, Copello, Harz, Mohan, Sengupta (2022)

# Zusammenfassung

- **Viele offene Fragen (Inflation, Baryogenese, Neutrino, Dunkle Materie) im Bereich der Astroteilchenphysik und des frühen Universums**
- **Weltweite Anstrengungen von experimentellen und theoretischen PhysikerInnen den Antworten auf diese Fragen näher zu kommen**
- **Sind die Antworten auf diese offenen Fragen miteinander verknüpft?**

**Werden wir Zeitzeugen Ihrer experimentellen Entdeckung?**



**Vielen Dank für Ihr Interesse und  
Ihre Aufmerksamkeit!**

# Bildnachweis

- Our Solar System, NASA/JPL, [https://solarsystem.nasa.gov/resources/487/our-solar-system/?category=solar-system\\_our-solar-system](https://solarsystem.nasa.gov/resources/487/our-solar-system/?category=solar-system_our-solar-system)
- Sand ripples in the Erg Chebbi in Morocco, Rosino, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Morocco\\_Africa\\_Flickr\\_Rosino\\_December\\_2005\\_84527213.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Morocco_Africa_Flickr_Rosino_December_2005_84527213.jpg), CC-BY-SA-2.0
- Molecule display, allispossible.org.uk, <https://www.flickr.com/photos/wheatfields/2074121298/in/photostream/>, CC BY 2.0
- Quark structure of a proton, Arpad Horvath, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quark\\_structure\\_proton.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quark_structure_proton.svg), CC BY-SA 2.5
- Standardmodell der Teilchenphysik, Welt der Physik / DESY, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/jenseits-des-standardmodells/>
- Abell 1656, NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), <https://esahubble.org/images/heic0813a/> CC BY 4.0
- Fritz Zwicky ETH Bibliothek, [https://de.wikipedia.org/wiki/Fritz\\_Zwicky#/media/Datei:ETH-BIB-Zwicky,\\_Fritz\\_\(1898-1974\)-Portr\\_01030.tif](https://de.wikipedia.org/wiki/Fritz_Zwicky#/media/Datei:ETH-BIB-Zwicky,_Fritz_(1898-1974)-Portr_01030.tif)
- Rettungswagen (MB Sprinter) Å–RK LV NÖ, Markus Elian, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rettungswagen\\_%28MB\\_Sprinter%29\\_%C3%96RK\\_LV\\_N%C3%96.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rettungswagen_%28MB_Sprinter%29_%C3%96RK_LV_N%C3%96.png), CC BY-SA 3.0
- Electromagnetic spectrum, Victor Blacus, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic-Spectrum.svg>, CC BY-SA 3.0
- UGC 2885, NASA, ESA, and B. Holwerda (University of Louisville), <https://esahubble.org/images/heic2002a/>, CC BY 4.0
- Vera Rubin using Kitt Peak National Observatory's 36-inch telescope, KPNO/NOIRLab/NSF/AURA, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vera\\_Rubin\\_using\\_Kitt\\_Peak\\_National\\_Observatory%27s\\_36-inch\\_telescope.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vera_Rubin_using_Kitt_Peak_National_Observatory%27s_36-inch_telescope.jpg), CC BY 4.0
- Galaxy rotation under the influence of dark matter, Ingo Berg, [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Galaxy\\_rotation\\_under\\_the\\_influence\\_of\\_dark\\_matter.ogv](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Galaxy_rotation_under_the_influence_of_dark_matter.ogv), CC BY-SA 3.0
- The History of the Universe, BICEP2/CERN/NASA/TheAstronomyBum, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The\\_History\\_of\\_the\\_Universe.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_History_of_the_Universe.jpg), CC0 1.0
- PLANCK CMB, ESA and the Planck Collaboration, [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2013/03/Planck\\_CMB](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_CMB)
- CMB Spektrum, Olivier Doré, Caltech 2017, [https://sites.astro.caltech.edu/~george/ay127/Olivier\\_Dore\\_Cosmological\\_Parameters.pdf](https://sites.astro.caltech.edu/~george/ay127/Olivier_Dore_Cosmological_Parameters.pdf)
- Variation in CMB Spektrum, Hu, Dodelson, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2002. 40:171-216
- Dark Matter Candidates, Chiara Arina, <https://cerncourier.com/a/tooling-up-to-hunt-dark-matter/>
- Aerial View of the CERN taken in 2008, CERN PhotoLab/Maximilien Brice, <https://cds.cern.ch/record/1295244?ln=de>, CC-BY-SA-4.0
- ATLAS, CERN PhotoLab/ATLAS/Maximilien Brice, <https://cds.cern.ch/images/CERN-EX-0511013-0>, CC BY 4.0
- Event Cross Section in a computer generated image of the ATLAS detector, <https://cds.cern.ch/record/1096081>
- Simulation Xenon collaboration, <https://xenonexperiment.org/time-projection-chamber/>
- XenonnT, [https://press.uni-mainz.de/files/2023/03/08\\_PRISMA\\_XENONnT-detektor.jpg](https://press.uni-mainz.de/files/2023/03/08_PRISMA_XENONnT-detektor.jpg)
- AMS, NASA, <https://images.nasa.gov/details/s134e007532>

