

International AXion Observatory

Auf der Suche nach der Dunklen Strahlung der Sonne - und vielem mehr!

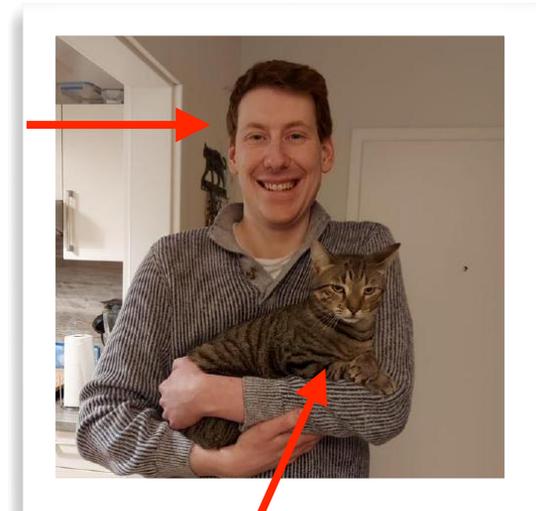
Daniel Heuchel (DESY)
daniel.heuchel@desy.de
Vortrag Landesschule Pforta
04. Juni 2025



Ein paar Worte über mich...

Übersicht meines (akademischen) Weges

Katzenfreund
Daniel



Kater Tigris

Ein paar Worte über mich...

Übersicht meines (akademischen) Weges



Aufgewachsen in Neuharlingersiel...



Ein paar Worte über mich...

Übersicht meines (akademischen) Weges



Aufgewachsen in Neuharlingersiel...



... seit Kindertagen HSV Fan.



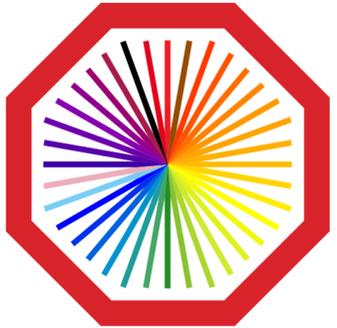
Ein paar Worte über mich...

Übersicht meines (akademischen) Weges

Technische
Universität
München



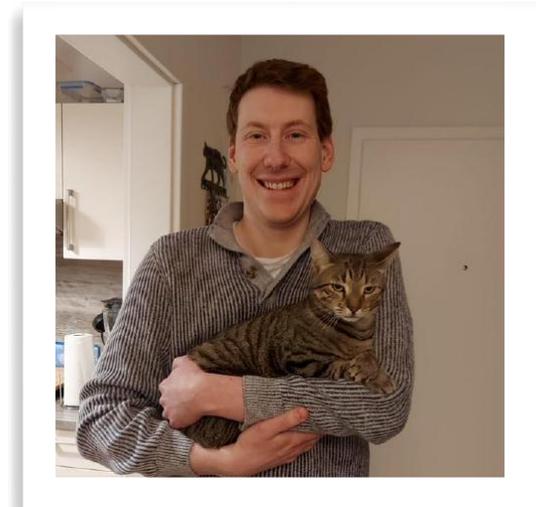
Max-Planck-Institut
für Physik



ALICE



Bachelor und Master of Science Physik mit
Schwerpunkt Teilchenphysik in München
(Mit schmerzhaften Besuchen in der Allianz Arena...)



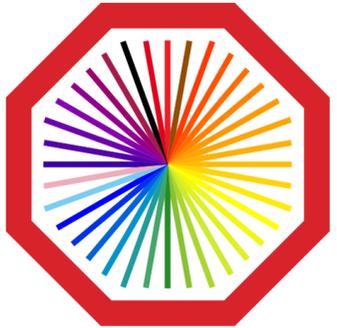
Ein paar Worte über mich...

Übersicht meines (akademischen) Weges

Technische
Universität
München



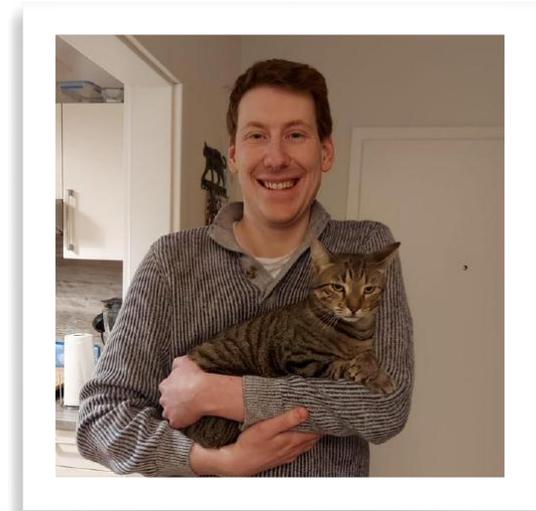
Max-Planck-Institut
für Physik



ALICE



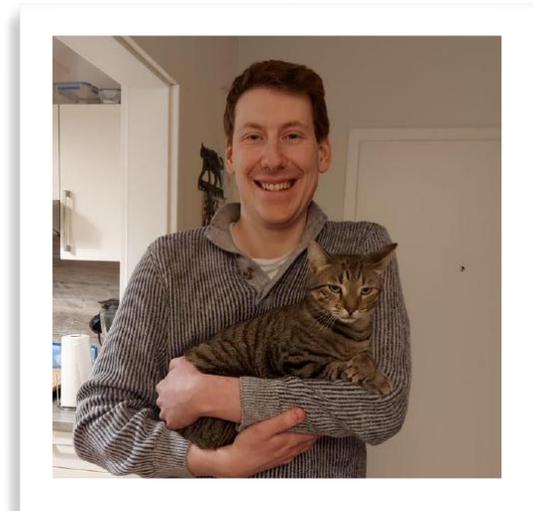
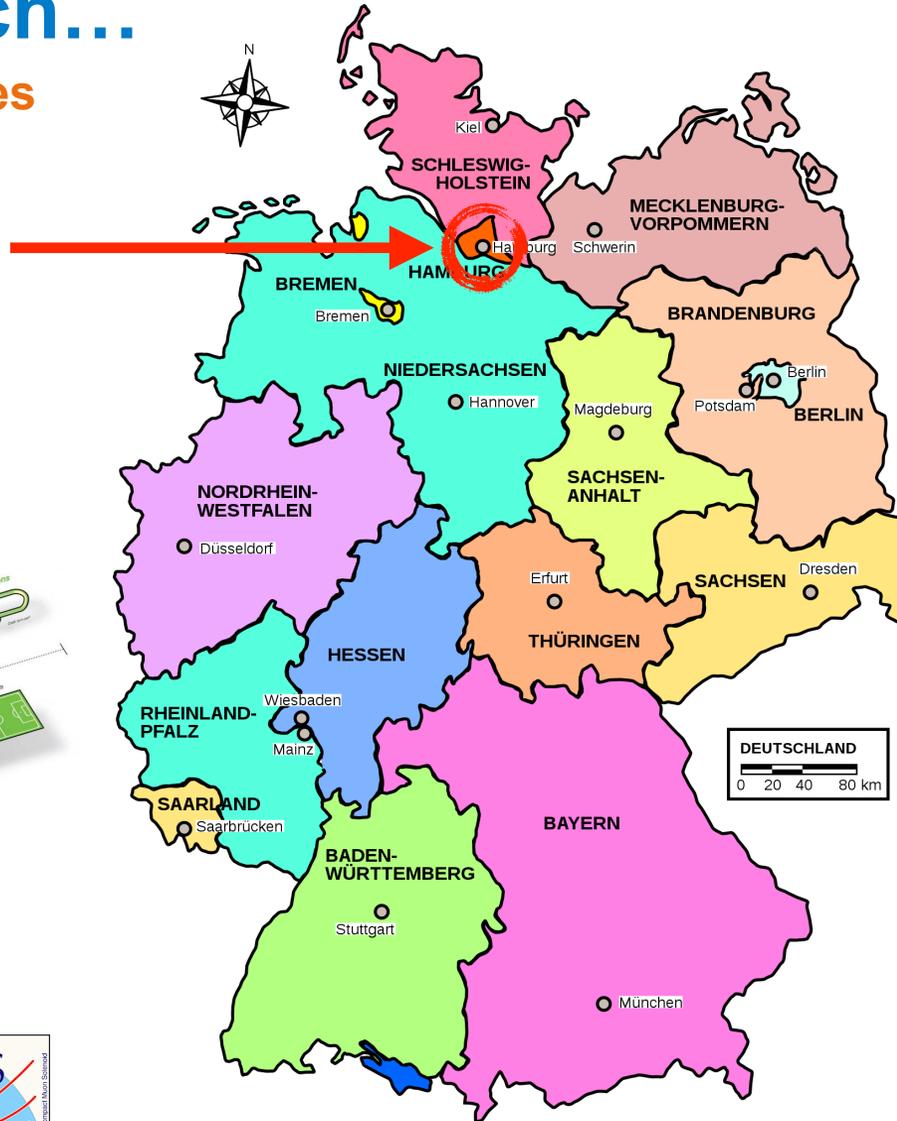
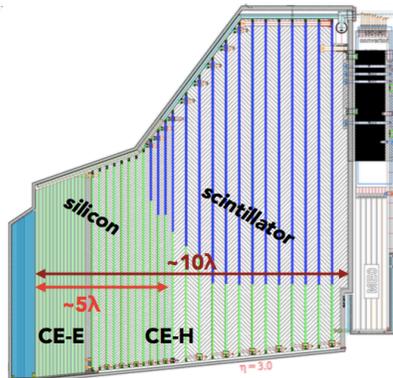
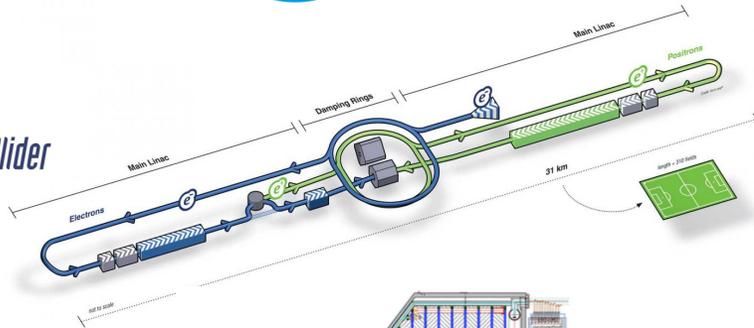
Bachelor und Master of Science Physik mit
Schwerpunkt Teilchenphysik in München
(Mit schmerzhaften Besuchen in der Allianz Arena...)



Ein paar Worte über mich...

Übersicht meines (akademischen) Weges

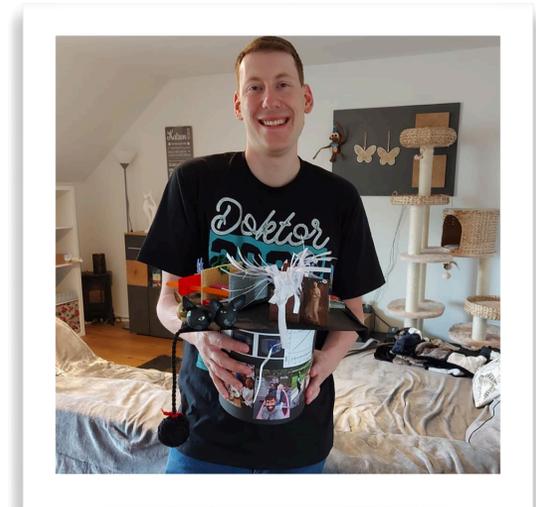
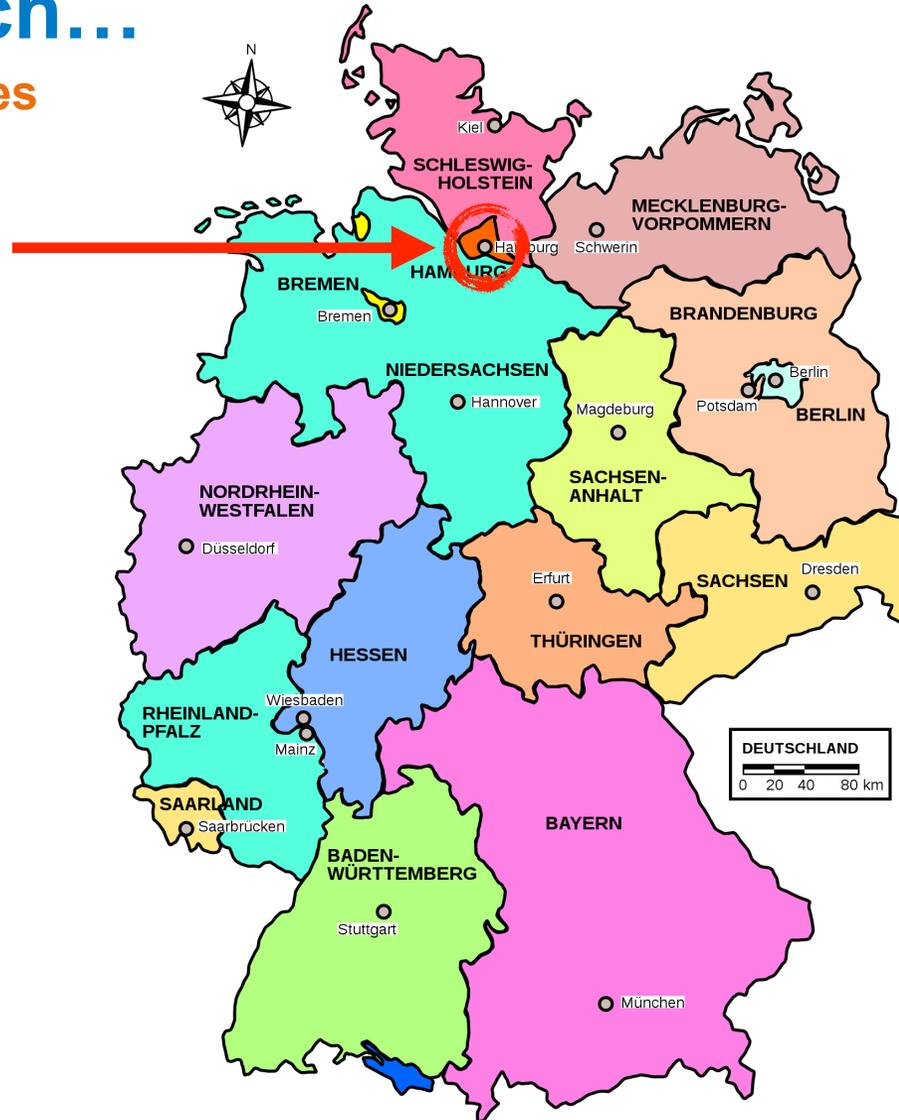
2018 als Doktorand zurück in Norddeutschland bei DESY



Ein paar Worte über mich...

Übersicht meines (akademischen) Weges

Seit August 2022 als Research Fellow in der DESY-ALPS Gruppe auf der Suche nach Axionen & Dunkler Materie mit Experimenten in Hamburg!



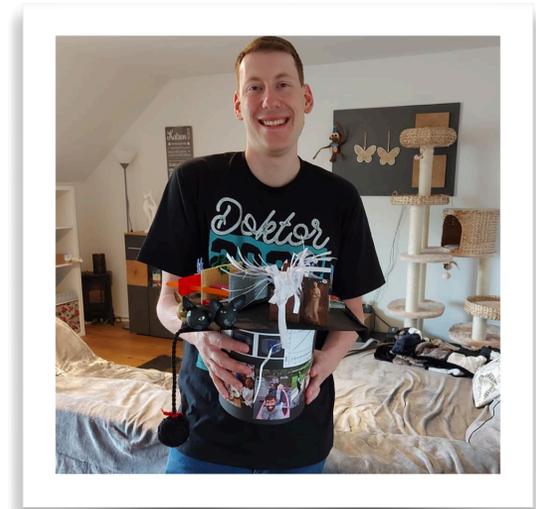
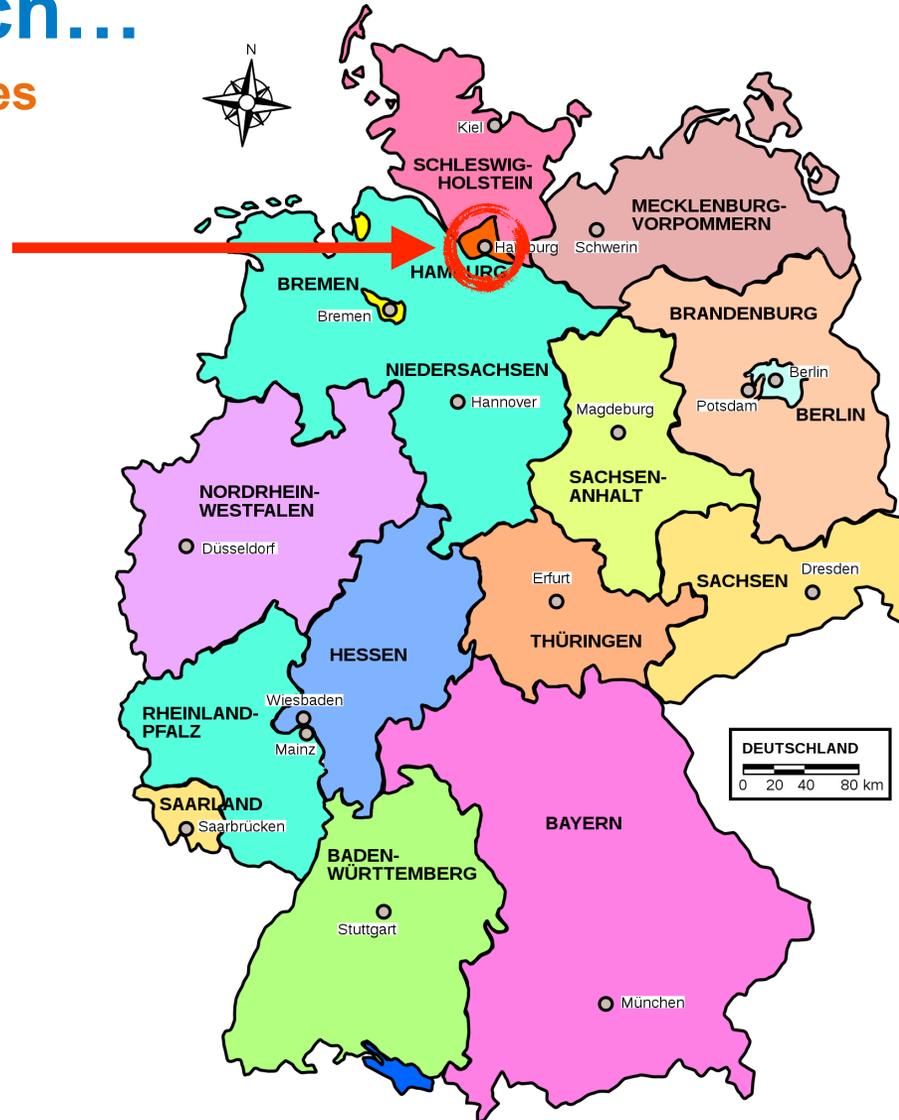
Ein paar Worte über mich...

Übersicht meines (akademischen) Weges

Seit August 2022 als Research Fellow in der DESY-ALPS Gruppe auf der Suche nach Axionen & Dunkler Materie mit Experimenten in Hamburg!



➔ Bei Unklarheiten oder Fragen unterbrecht mich jederzeit gerne! :-)



Hochpräzisions-Experimente bei DESY

Auf der Suche nach Axionen, ALPS und Dunkler Materie.



Hochpräzisions-Experimente bei DESY

Auf der Suche nach Axionen, ALPS und Dunkler Materie.



- Direkte Suche nach neuen Teilchen mit speziellen ultrapräzisen Experimenten bei DESY!

Experimentelle Ansätze

Zum Aufspüren verschiedener Axionen

Concept

Source

Detection

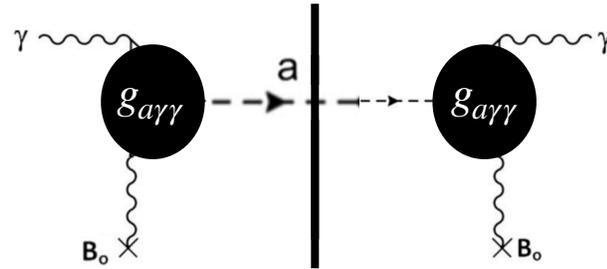
Model Dependency

Photon Energy
DESY Experiments

Light-shining-through-wall experiments



Lab axions



Independent
"self-made" axions

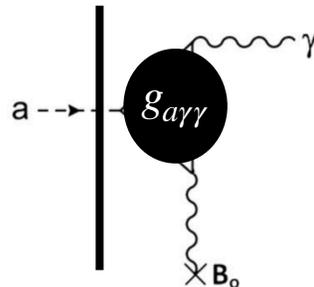
Microwave-Optical
ALPS, ALPS II



Helioscopes



Solar axions



Low
Depending on solar
production channel

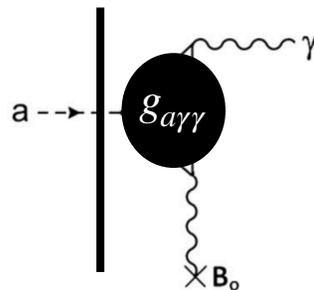
X-rays
(Baby)IAXO



Haloscopes



Relic axions



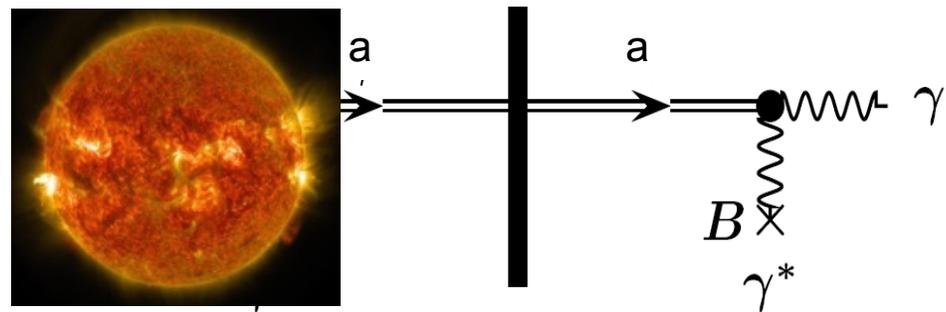
High
Axions = cold dark
matter constituents

Microwave
MADMAX



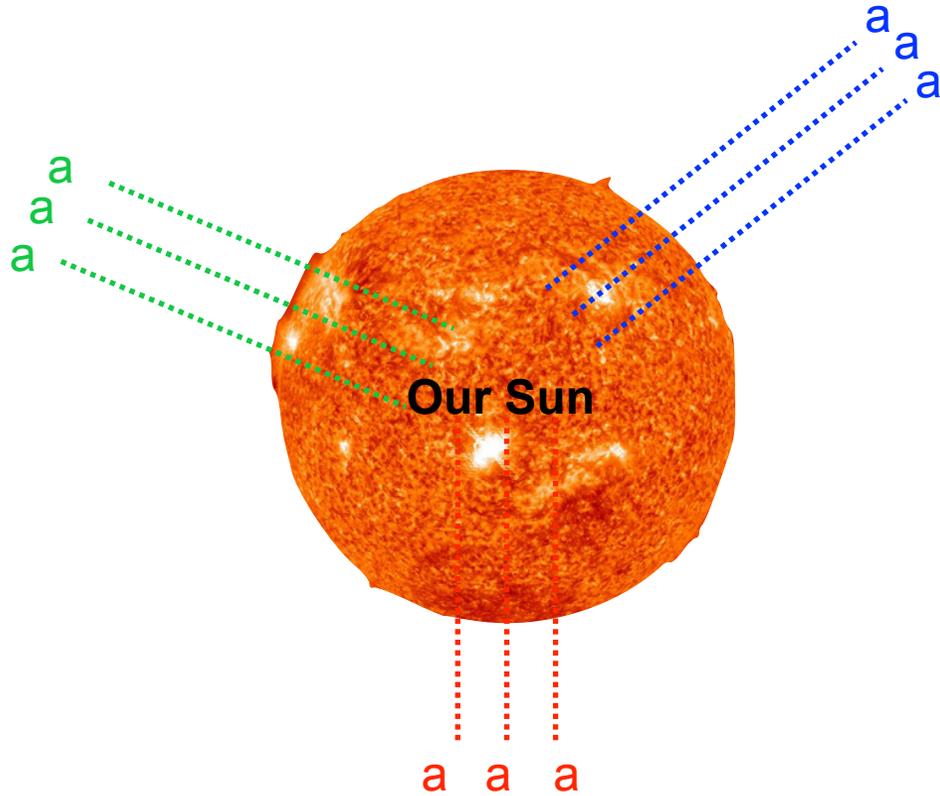
Helioskope

Die Suche nach solaren Axionen



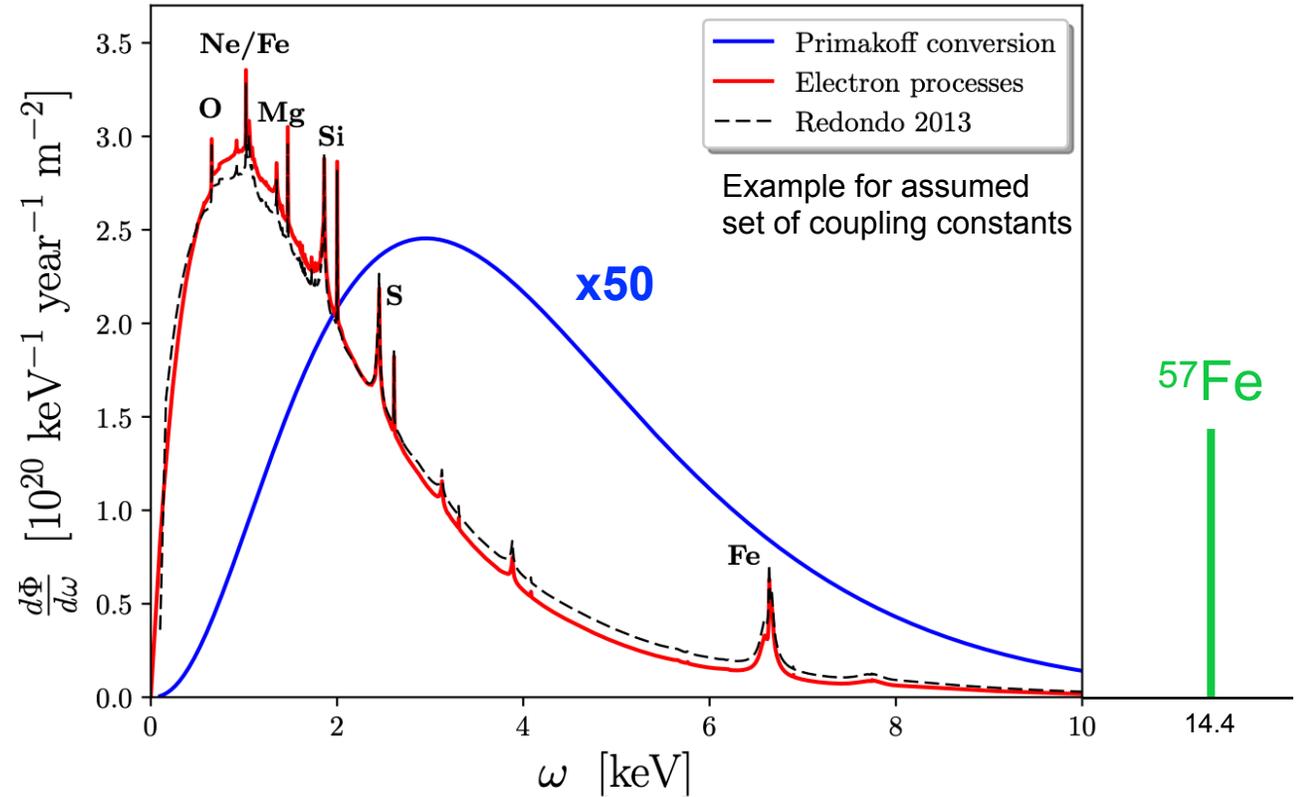
Solare Axionen

Verschiedene Produktionsmechanismen!



1. Axions aus Axion-Photon Kopplung $g_{a\gamma\gamma}$
 2. Axions aus Axion-Electron Kopplung g_{ae}
 3. Axions aus Axion-Nukleon Kopplung g_{an}
- + noch mehr!

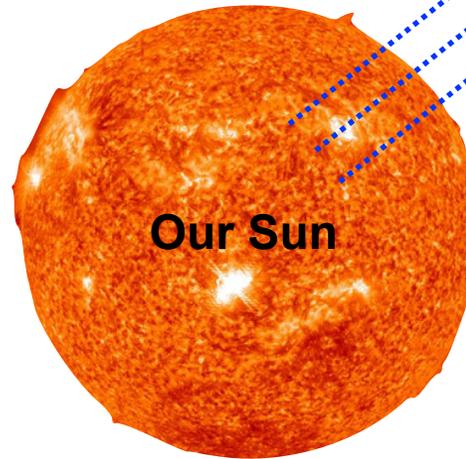
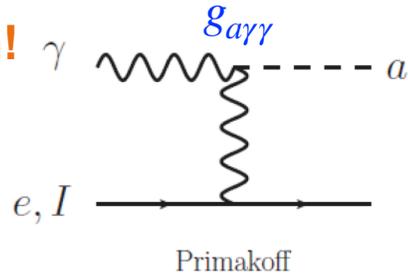
Differentieller Axionen-Fluss auf der Erde



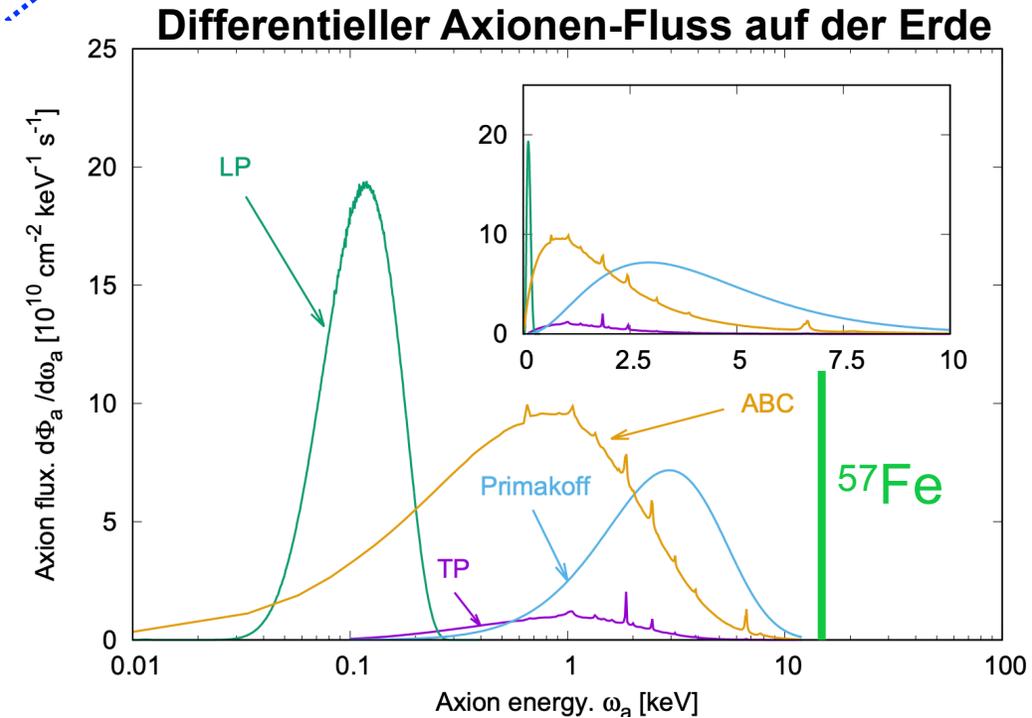
- Resultat: Ein spezifisches Röntgenspektrum zwischen ca. [0.1, 15] keV.
 ➔ Helioskop-Anforderungen (zB. Detektoren)

Solare Axionen

Verschiedene Produktionsmechanismen!

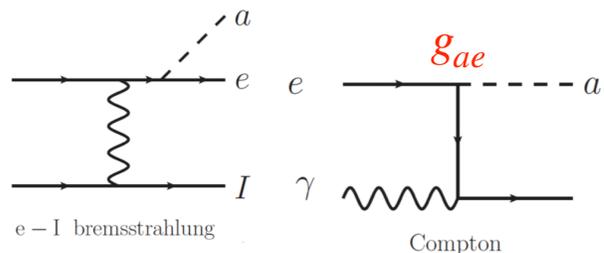
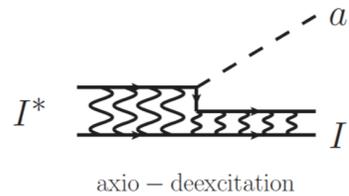
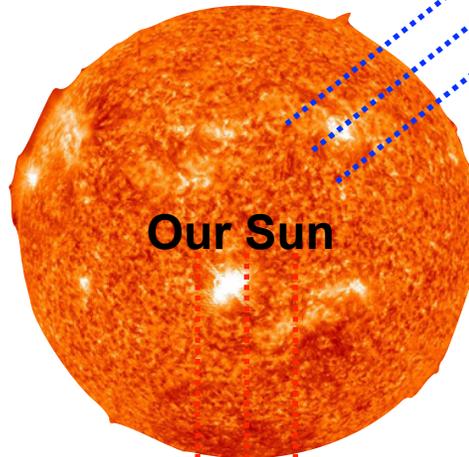
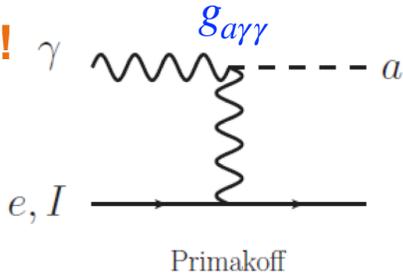


1. "Klassische" Primakoff Axionen aus Photonen des Sonnenplasmas
 - ➔ Generische Vorhersage meiste Modelle
 - ➔ Axion Energie: Thermisches Spektrum



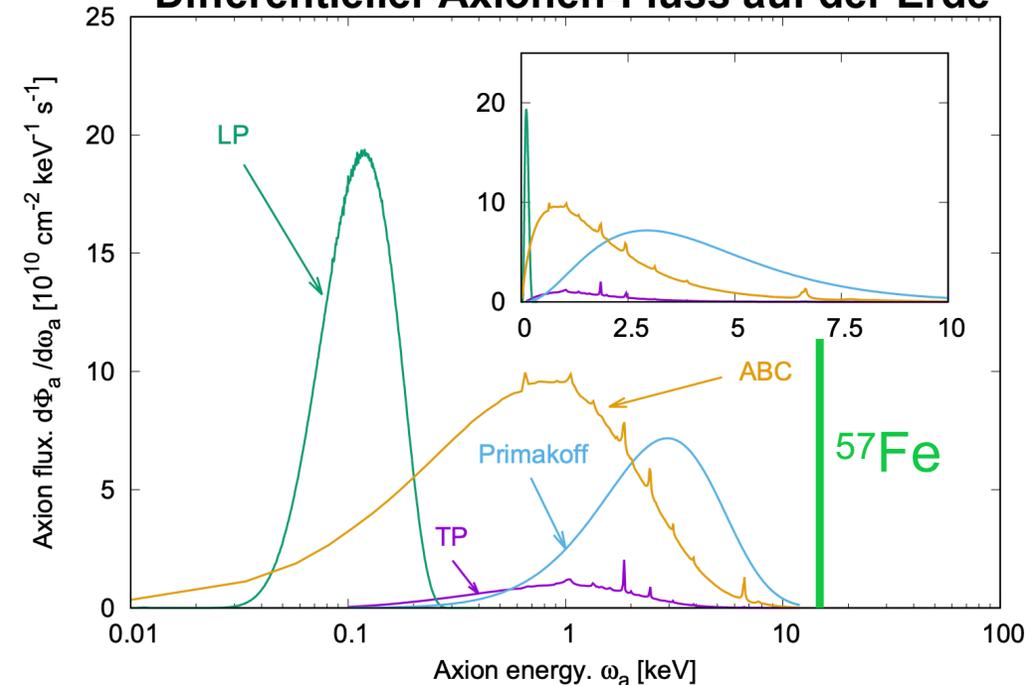
Solare Axionen

Verschiedene Produktionsmechanismen!



1. "Klassische" Primakoff Axionen aus Photonen des Sonnenplasmas
 - ➔ Generische Vorhersage meiste Modelle
 - ➔ Axion Energie: Thermisches Spektrum

Differentieller Axionen-Fluss auf der Erde



2. "ABC" solaren Axionen

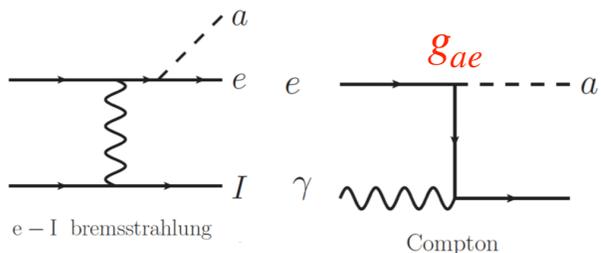
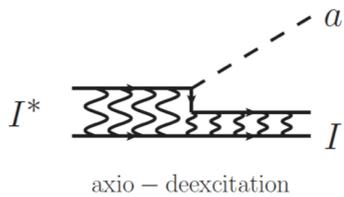
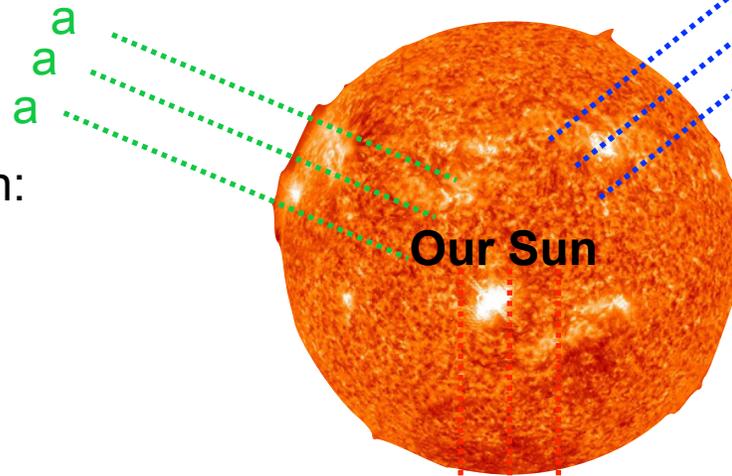
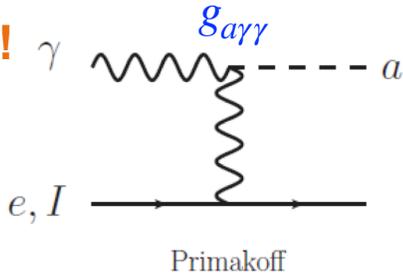
- ➔ Model-abhängig
- ➔ Axion Energie: Kontinuierliches Spektrum + Elementpeaks

Solare Axionen

Verschiedene Produktionsmechanismen!

3. Solar Axionen aus Axion-Nukleon Kopplung g_{an}

- ➔ Model-abhängig
- ➔ Fusionsprozesse und nukleare Übergänge, e.g. ^{57}Fe
- ➔ Monochromatische Linien: e.g. 14.4 keV (^{57}Fe)

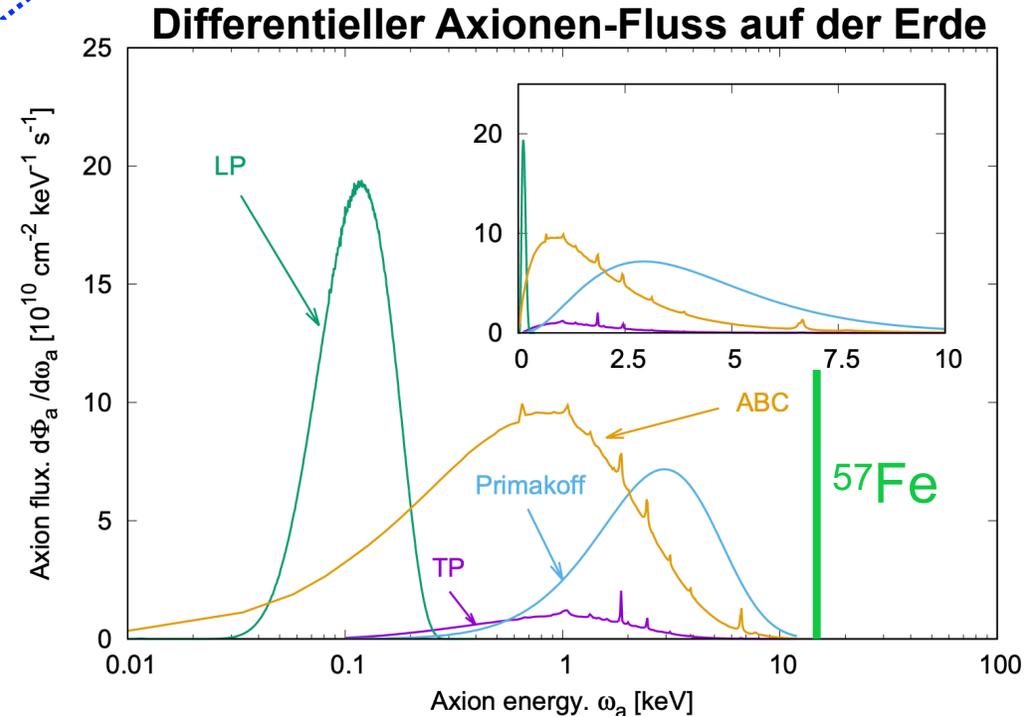


2. "ABC" solaren Axionen

- ➔ Model-abhängig
- ➔ Axion Energie: Kontinuierliches Spektrum + Elementpeaks

1. "Klassische" Primakoff Axionen aus Photonen des Sonnenplasmas

- ➔ Generische Vorhersage meiste Modelle
- ➔ Axion Energie: Thermisches Spektrum



Solare Axionen

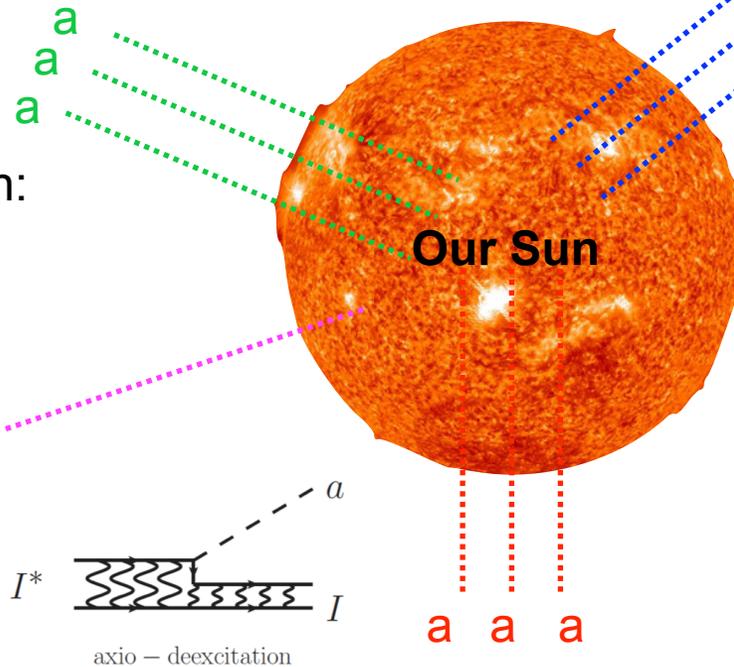
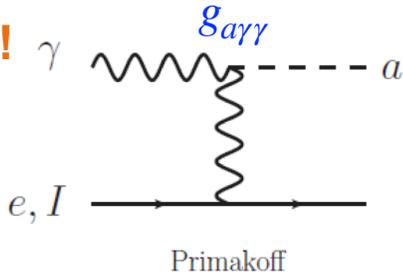
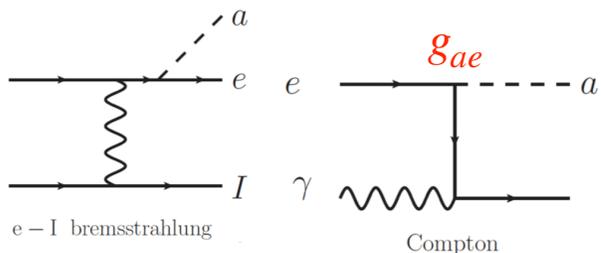
Verschiedene Produktionsmechanismen!

3. Solar Axionen aus Axion-Nukleon Kopplung g_{an}

- ➔ Model-abhängig
- ➔ Fusionsprozesse und nukleare Übergänge, e.g. ^{57}Fe
- ➔ Monochromatische Linien: e.g. 14.4 keV (^{57}Fe)

4. Andere Mechanismen:

- ➔ Photon-axion Konversion a in makroskopischem B-Feld
- ➔ ...



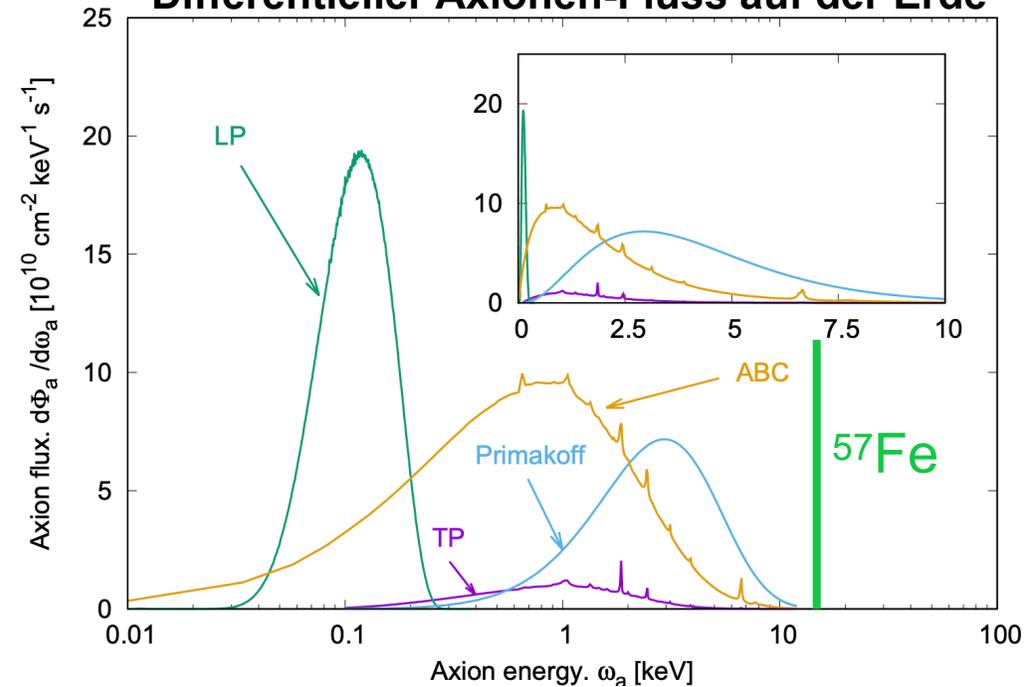
2. "ABC" solaren Axionen

- ➔ Model-abhängig
- ➔ Axion Energie: Kontinuierliches Spektrum + Elementpeaks

1. "Klassische" Primakoff Axionen aus Photonen des Sonnenplasmas

- ➔ Generische Vorhersage meiste Modelle
- ➔ Axion Energie: Thermisches Spektrum

Differentieller Axionen-Fluss auf der Erde



Solare Axionen

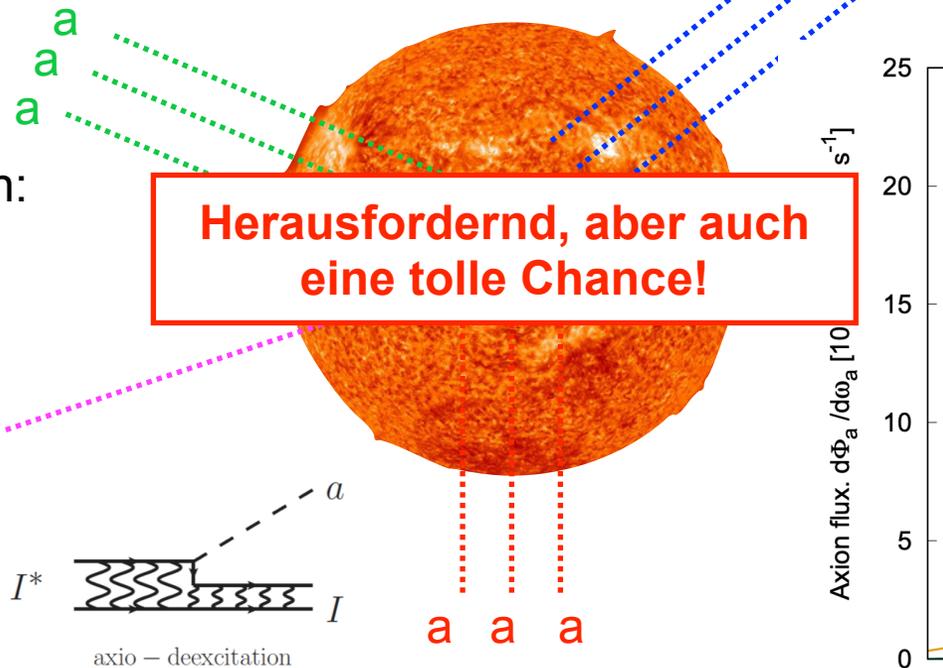
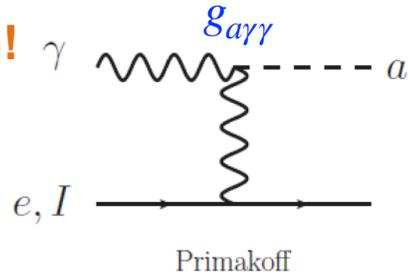
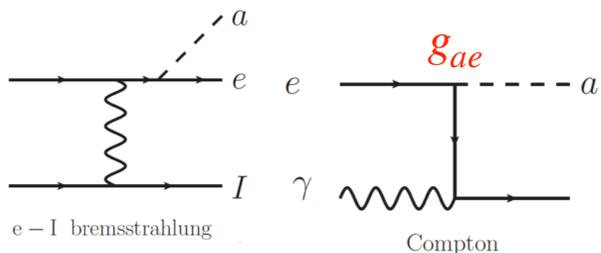
Verschiedene Produktionsmechanismen!

3. Solar Axionen aus Axion-Nukleon Kopplung g_{an}

- ➔ Model-abhängig
- ➔ Fusionsprozesse und nukleare Übergänge, e.g. ^{57}Fe
- ➔ Monochromatische Linien: e.g. 14.4 keV (^{57}Fe)

4. Andere Mechanismen:

- ➔ Photon-axion Konversion a in makroskopischem B-Feld
- ➔ ...



Herausfordernd, aber auch eine tolle Chance!

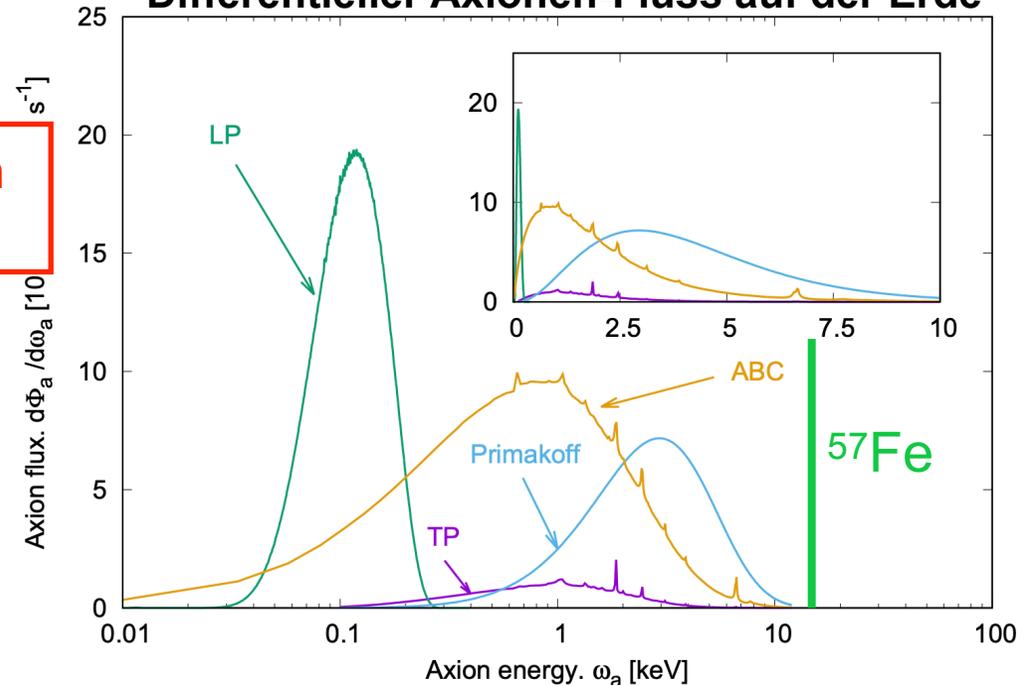
2. "ABC" solaren Axionen

- ➔ Model-abhängig
- ➔ Axion Energie: Kontinuierliches Spektrum + Elementpeaks

1. "Klassische" Primakoff Axionen aus Photonen des Sonnenplasmas

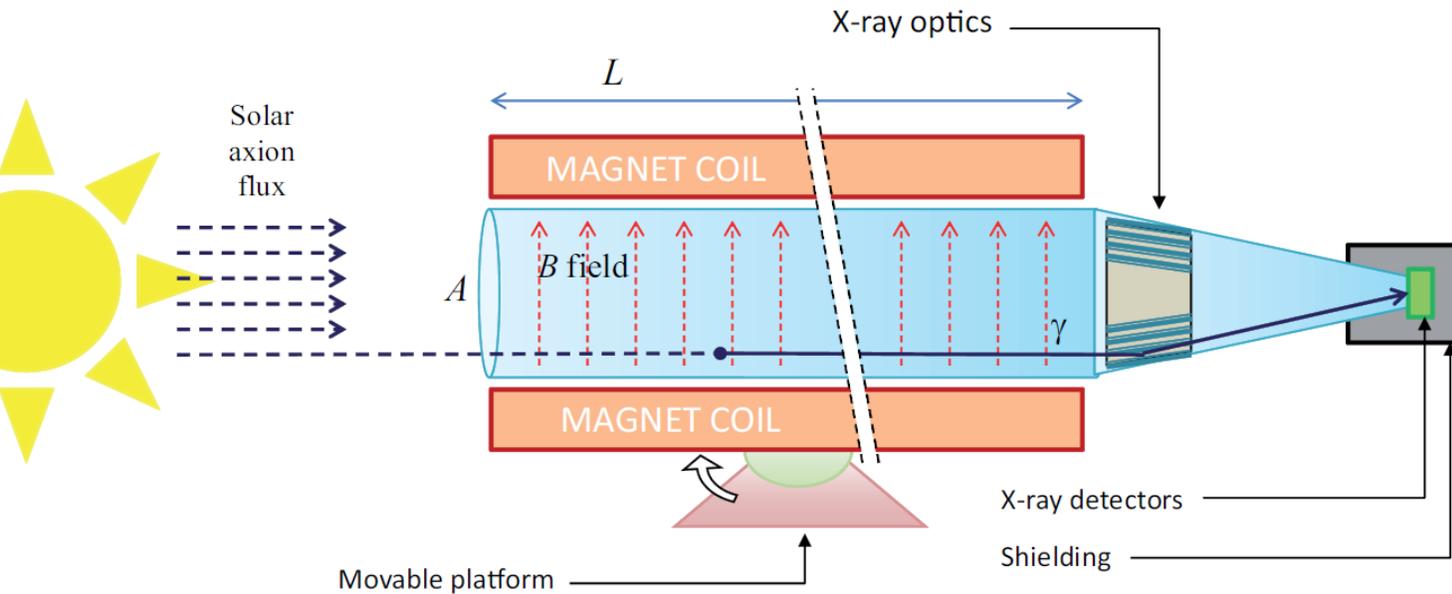
- ➔ Generische Vorhersage meiste Modelle
- ➔ Axion Energie: Thermisches Spektrum

Differentieller Axionen-Fluss auf der Erde



Axion Helioskope

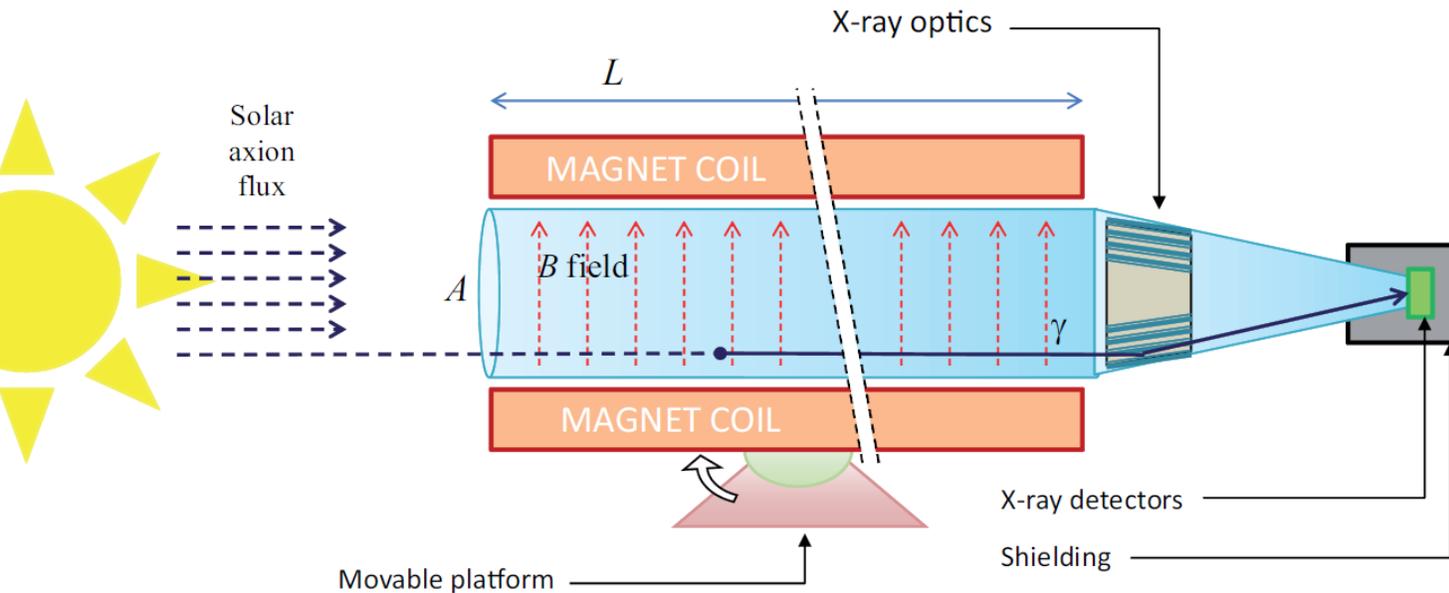
Die Grundlagen



- Falls Axionen existieren: Die meisten Theorien sagen vorher, dass eine extrem hohe Anzahl im Kern unserer Sonne produziert werden!
- **Große Teleskope (Helioskope)** suchen nach diesen Axionen.
 - ➔ Optimiert für keV-Energien (Röntgenstrahlung)

Axion Helioskope

Die Grundlagen



- Falls Axionen existieren: Die meisten Theorien sagen vorher, dass eine extrem hohe Anzahl im Kern unserer Sonne produziert werden!
- **Große Teleskope (Helioskope)** suchen nach diesen Axionen.
 - ➔ Optimiert für keV-Energien (Röntgenstrahlung)

- Prinzip: Ausrichtung des Helioskops auf die Sonne:

1. Axionen wandeln sich in starkem Magnetfeld in Röntgenstrahlung (Photonen) um.
2. Fokussierung durch optische Instrumente.
3. Messung mit Röntgendetektoren.

Axion Helioskope - Herausforderungen!

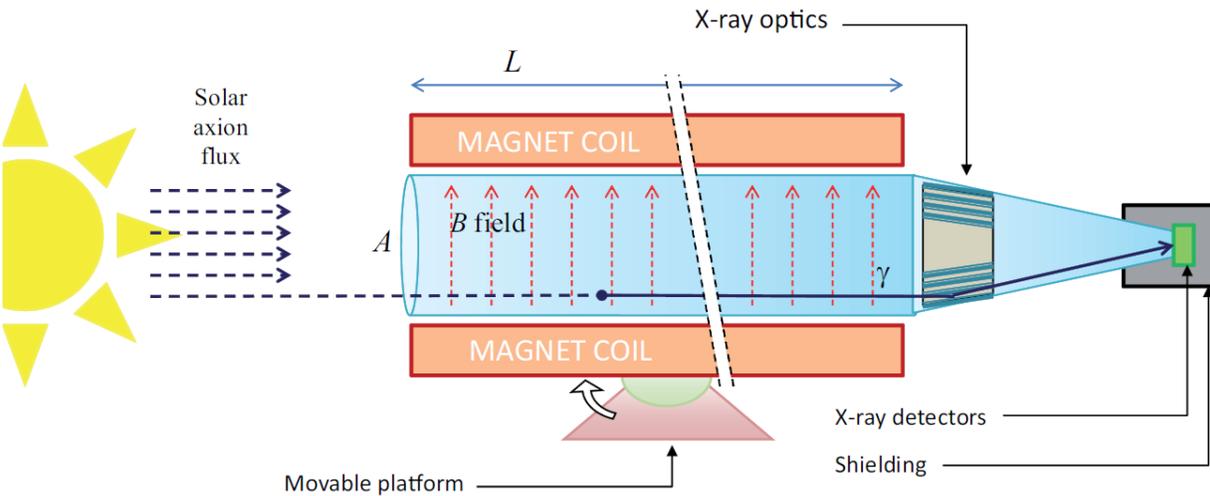
Die Grundlagen

Klingt relativ einfach... ist es das auch?

Axion Helioskope - Herausforderungen!

Die Grundlagen

Klingt relativ einfach... ist es das auch?

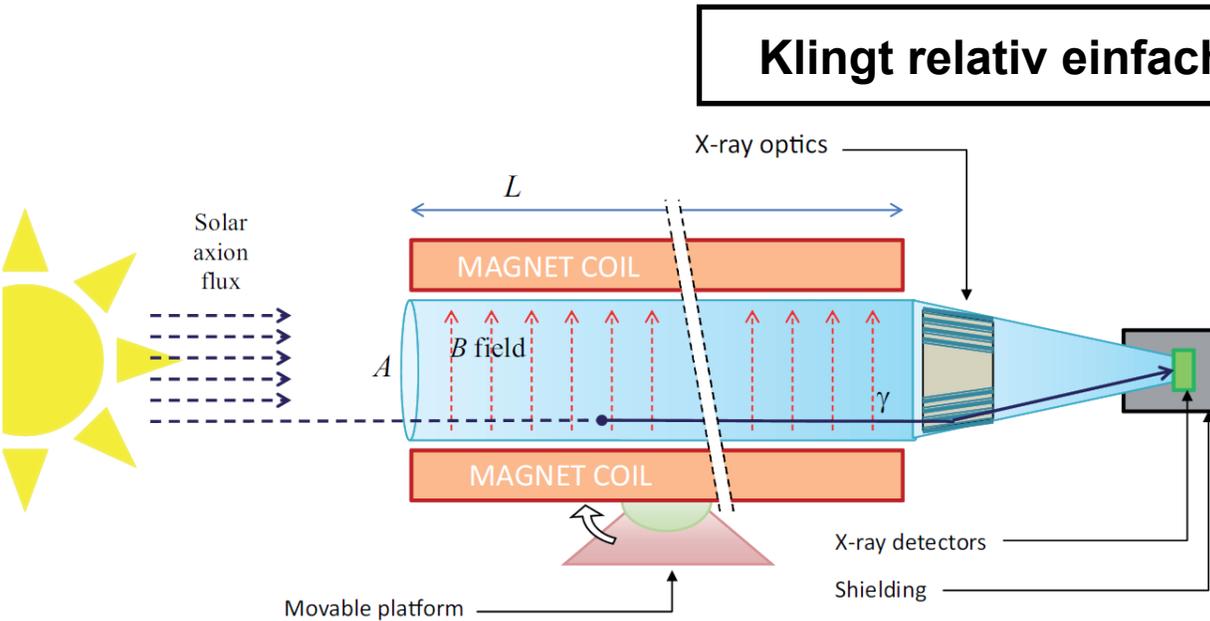


Für die nächste Generation an Helioskopen wollen wir folgende Sensitivität erreichen:
1 Photon / Jahr / cm² / keV !

Axion Helioskope - Herausforderungen!

Die Grundlagen

Klingt relativ einfach... ist es das auch?



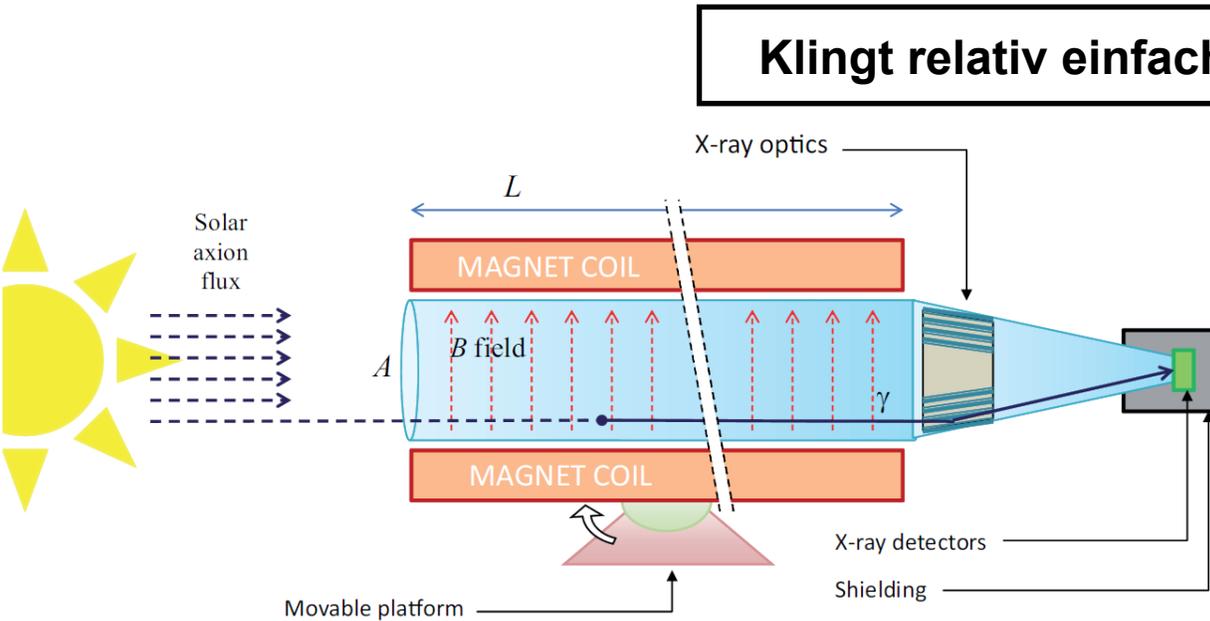
Für die nächste Generation an Helioskopen wollen wir folgende Sensitivität erreichen:
1 Photon / Jahr / cm² / keV !

Sensitivität-Güte: $g_{a\gamma}^4 \propto \underbrace{b^{1/2} \epsilon^{-1}}_{\text{detectors}} \times \underbrace{a^{1/2} \epsilon_o^{-1}}_{\text{optics}} \times \underbrace{(BL)^{-2} A^{-1}}_{\text{magnet}} \times \underbrace{t^{-1/2}}_{\text{exposure}}$

Axion Helioskope - Herausforderungen!

Die Grundlagen

Klingt relativ einfach... ist es das auch?



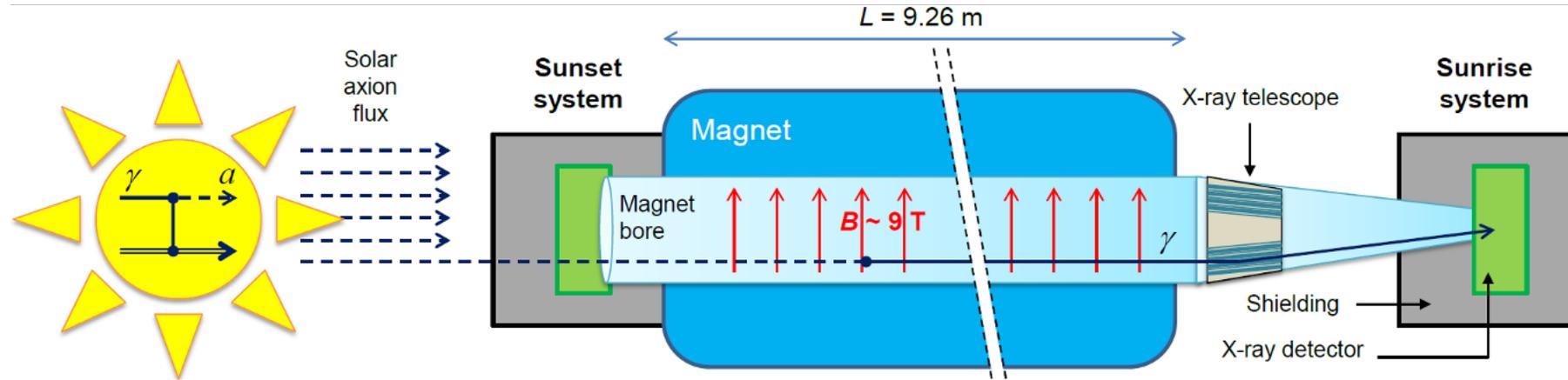
Für die nächste Generation an Helioskopen wollen wir folgende Sensitivität erreichen:
1 Photon / Jahr / cm² / keV !

Sensitivität-Güte: $g_{a\gamma}^4 \propto$

$b^{1/2} \epsilon^{-1}$ detectors	\times	$a^{1/2} \epsilon_o^{-1}$ optics	\times	$(BL)^{-2} A^{-1}$ magnet	\times	$t^{-1/2}$ exposure
Hintergrund		Effizienz		Stärke Länge Querschnitt		Zeit
		Fokussierfläche				

CAST - CERN Axion Solar Telescope

Die Vergangenheit



- Sunrise & sunset system: Ausrichtung auf Sonne für for 2 x 1.5 Stunden / Tag.
- LHC Magnet: ~ 9 T, ~ 10 m lang und 4.2 cm Durchmesser Magnetinnenfläche.
- Erste Implementierung von X-ray Fokussierung und Low-Background Techniken in Helioskopen.
- Datennahme 2001-2021, 20 Jahre!
 - ➔ Bis heute state-of-the-art Grenzen von $g_{a\gamma\gamma}$ vs. m_a und andere Parameter!
 - ➔ Letzten Jahre des Experiments: IAXO Pathfinder Phase.

CAST - CERN Axion Solar Telescope

Die Vergangenheit

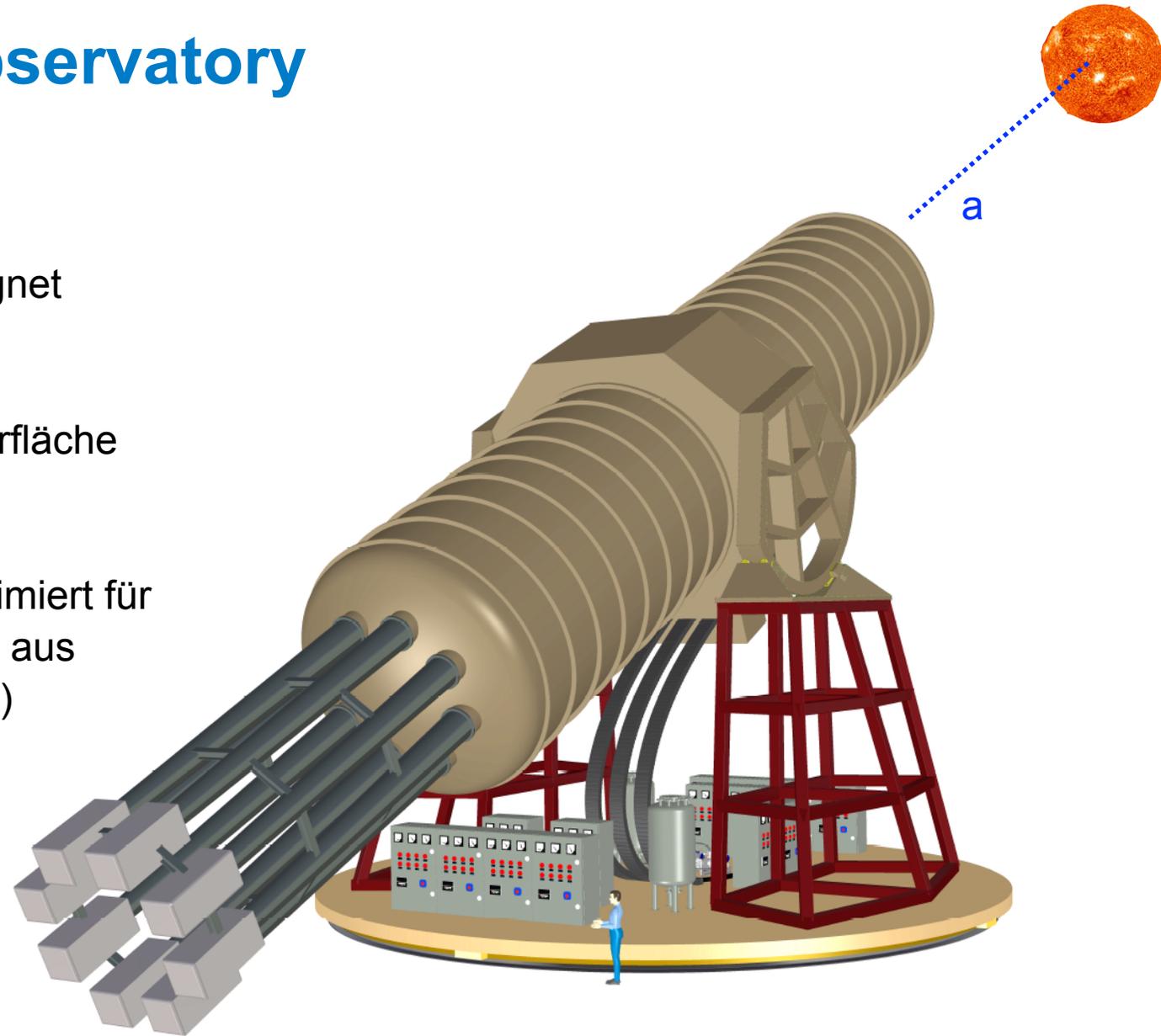


- Sunrise & sunset system: Ausrichtung auf Sonne für for 2 x 1.5 Stunden / Tag.
- LHC Magnet: ~9 T, ~10 m lang und 4.2 cm Durchmesser Magnetinnenfläche.
- Erste Implementierung von X-ray Fokussierung und Low-Background Techniken in Helioskopen.
- Datennahme 2001-2021, 20 Jahre!
 - ➔ Bis heute state-of-the-art Grenzen von $g_{a\gamma\gamma}$ vs. m_a und andere Parameter!
 - ➔ Letzten Jahre des Experiments: IAXO Pathfinder Phase.

IAXO - Internation AXion Observatory

Die Zukunft

- 12 Stunden Sonnenausrichtung pro Tag
- 20 m supraleitender speziell angefertigter Magnet
 - ➔ 2-3 T, 8 Kerne (d = 60 cm jeweils)
- X-ray Fokussieroptiken mit $\sim 0.2 \text{ cm}^2$ Fokussierfläche
- 8 Detektorplätze
 - ➔ Komplementäre Detektortechnologien optimiert für unterschiedliche Messungen (zB. Axionen aus verschiedenen Produktionsmechanismen!)
- Sensitivitätsgüte: **$\sim 10.000\times$ CAST**



BabyIAXO

Die (quasi) Gegenwart



Neues Leben in HERA Halle Süd?



BabyIAXO

Die (quasi) Gegenwart

- Prototyp für alle IAXO Subsysteme mit vergleichbaren Parametern, bis auf:
 - ➔ 10 m supraleitender Dipolmagnet, 2-3 T, 2 Kerne (d = 70 cm jeweils)
 - ➔ 2 Detektorplätze
- Sensitivitätsgüte: **~100x CAST**



BabyIAXO

Die (quasi) Gegenwart

- Prototyp für alle IAXO Subsysteme mit vergleichbaren Parametern, bis auf:
 - ➔ 10 m supraleitender Dipolmagnet, 2-3 T, 2 Kerne (d = 70 cm jeweils)
 - ➔ 2 Detektorplätze
- Sensitivitätsgüte: **~100x CAST**
- **Bereits voll einsatzfähiges Helioskop, das neuen Phasenraum erschließen wird und das Axion finden könnte!**
- Baustart: 2026? Start Messungen: 2029?
- **Laufzeit: 2 + 2 Jahre Baseline + Extras.**
- Ort: HERA Süd oder oberirdisch DESY Campus.



IAXO Kollaboration

Überblick

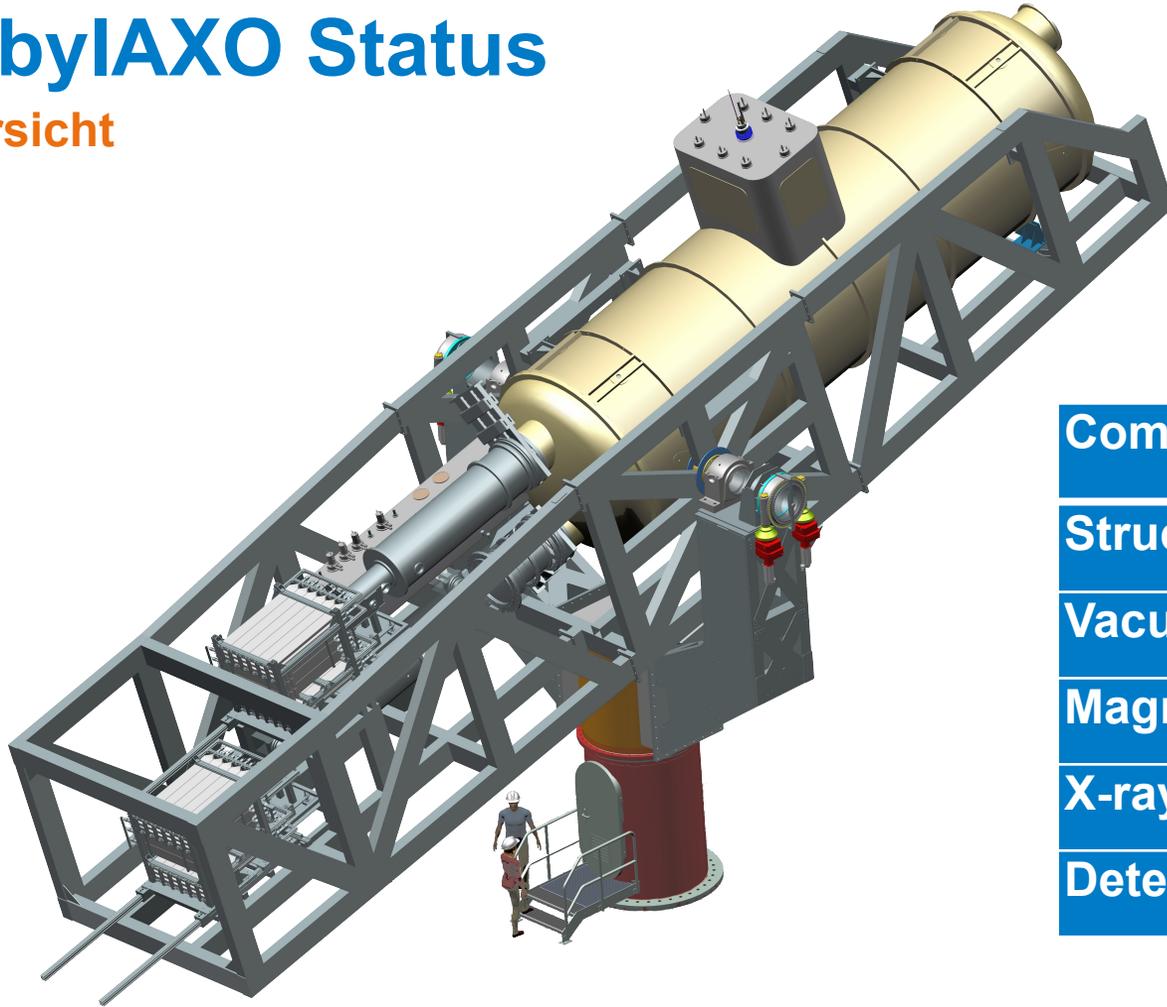


Größte Axion Kollaboration weltweit!
23 Institute und Unis in 12 Ländern.
Ca. 120 Menschen aus versch. Bereichen (Physik,
Ingenieurwesen, IT, Planung, Verwaltung,...)

IAXO Kollaborationstreffen am DESY, 12.03.2025

BabyIAXO Status

Übersicht



Component / Status	Technical	Funding
Structure & Drive system	(✓)	(✓)
Vacuum & Gas System	✓	✓
Magnet	(✓)	(?)
X-ray Telescopes	✓	✓
Detectors	✓	✓

- Prinzipiell bereit für den Baustart!
 - ➔ Aktuell “Trocken-Kampagne” diskutiert: Vollständige Installation bis auf den Magneten.
 - ➔ Frühe Instandsetzung, Ausrichtungsoptimierung, Integrationstests, BKG-Messungen, erste Physik.

Structure and Drive System (SDS)

Turm, Rahmen, Antrieb

- Recycling CTA-MST Prototyp aus DESY Zeuthen (Astrophysik). 

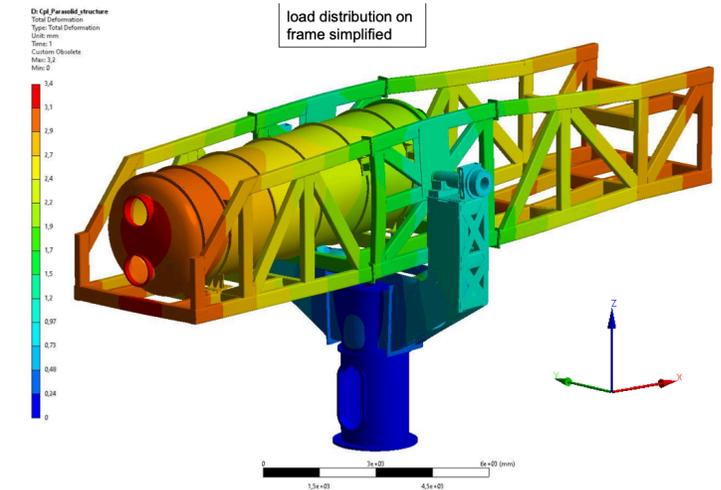
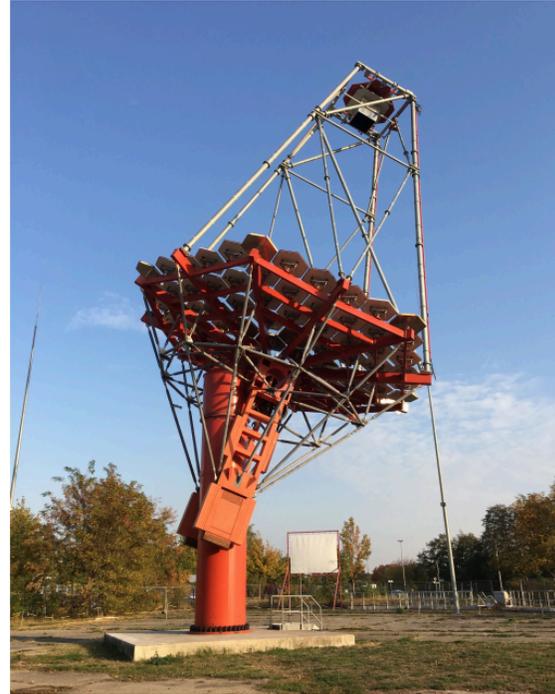
➔ Rotation: 360° , Neigung: $\pm 25^\circ$

➔ Ausrichtungspräzision: $< 0.01^\circ$

- **Weit fortgeschritten:**

➔ Design quasi abgeschlossen.

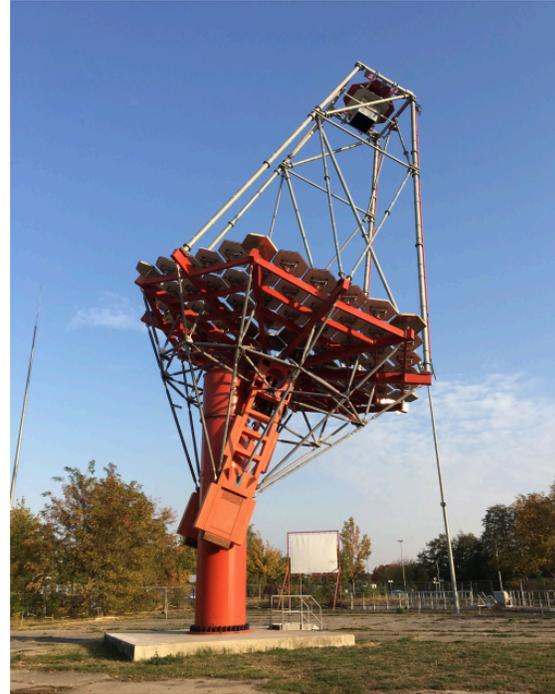
➔ Mechanische Simulationen fortgeschritten.



Structure and Drive System (SDS)

Turm, Rahmen, Antrieb

- Recycling CTA-MST Prototyp aus DESY Zeuthen (Astrophysik) 
 - ➔ Rotation: 360° , Neigung: $\pm 25^\circ$
 - ➔ Ausrichtungspräzision: $< 0.01^\circ$
- **Weit fortgeschritten:**
 - ➔ Design quasi abgeschlossen.
 - ➔ Mechanische Simulationen fortgeschritten.
 - ➔ Externe Ausrichtung: CEFCA + DESY.

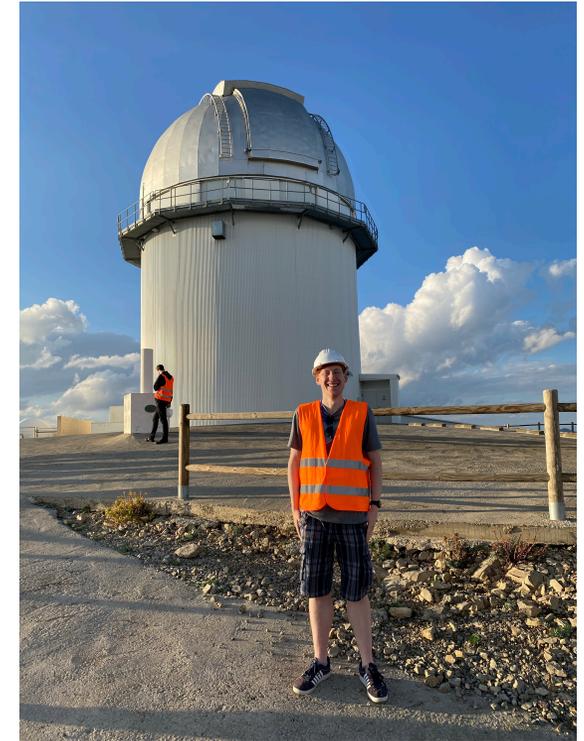
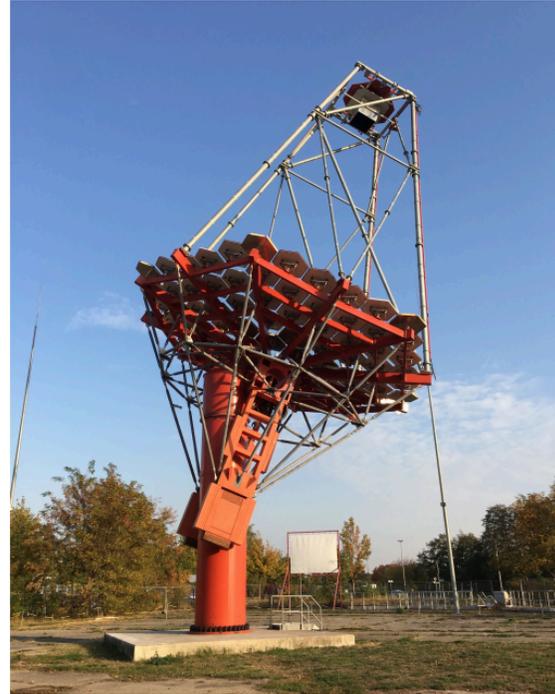


OAJ: Observatorio Astrofísico de Javalambre, CEFCA, close to Teruel, Spain

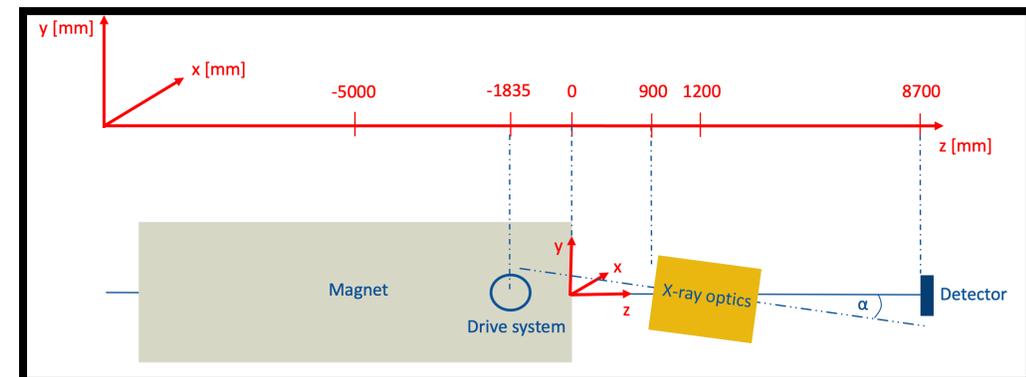
Structure and Drive System (SDS)

Turm, Rahmen, Antrieb

- Recycling CTA-MST Prototyp aus DESY Zeuthen (Astrophysik) 
 - ➔ Rotation: 360° , Neigung: $\pm 25^\circ$
 - ➔ Ausrichtungspräzision: $< 0.01^\circ$
- **Weit fortgeschritten:**
 - ➔ Design quasi abgeschlossen.
 - ➔ Mechanische Simulationen fortgeschritten.
 - ➔ Externe Ausrichtung: CEFCA + DESY.
 - ➔ Interne Ausrichtung: Monte-Carlo Simulationen.

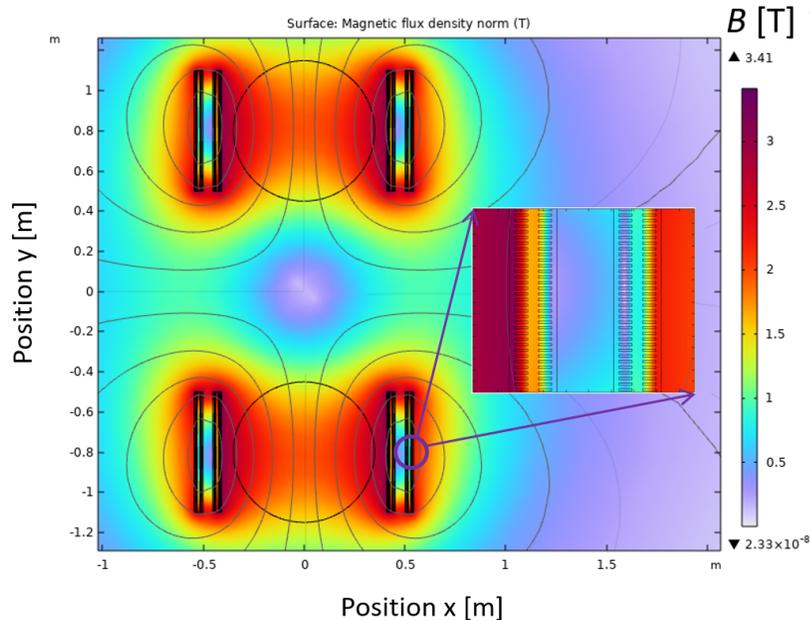
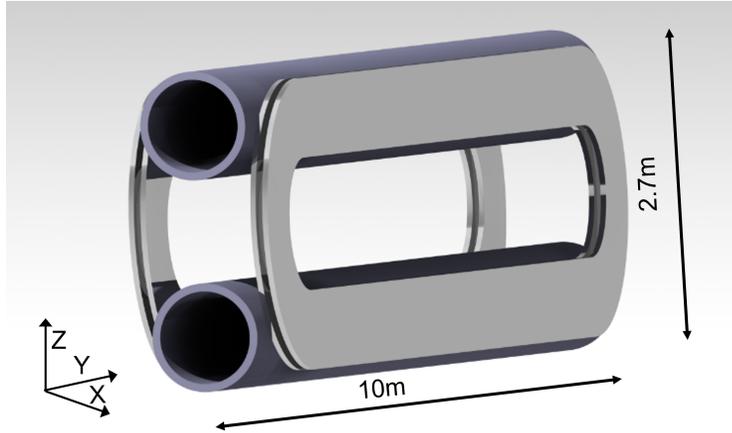


OAJ: Observatorio Astrofísico de Javalambre, CEFCA, close to Teruel, Spain



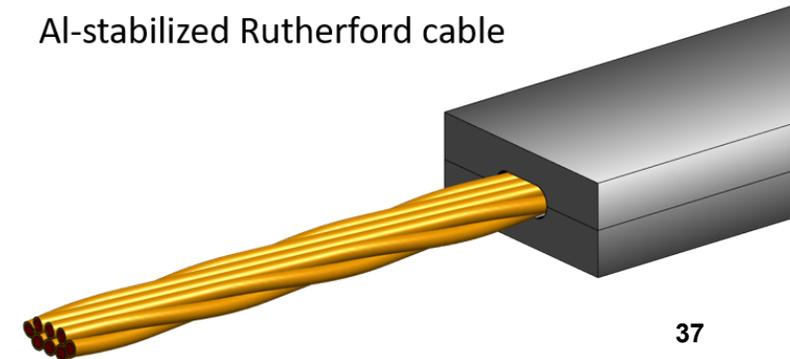
Magnet

Für die Konversion der Axionen zu Photonen



- Spule: Rennbahn Design
- 2022-2023 große Probleme durch Überfall Russlands auf die Ukraine: Technische Expertise für supraleitendes Kabel ging verloren!
- Seit 2024 großer Aufschwung:
 - ➔ Neue Industriepartner + DESY + CERN + U. Zaragoza.
 - ➔ Verbessertes Design.
 - ➔ Finanzierung: ERC Synergy Grant, Exzellenzcluster-Bewilligung,...

Al-stabilized Rutherford cable



Optiken

BabyIAXO

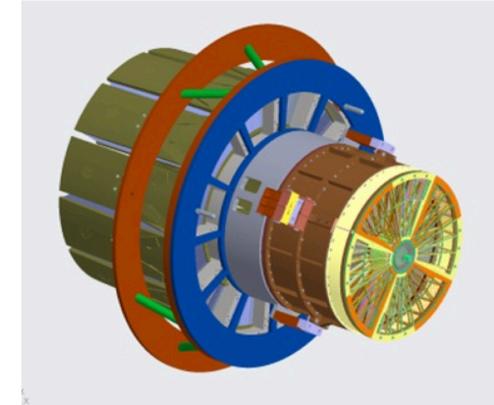
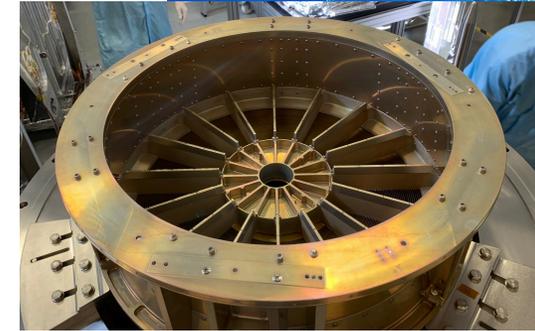
- Zwei verschiedene X-ray Fokussieroptiken für BabyIAXO geplant.

1. Ersatzmodul der XMM Newton Mission der ESA.

- ➔ Zwei Module per Leihvertrag DESY-ESA.
- ➔ Rekalbrierung (PANTER nahe München) vor Einbau.

2. Selbstgebaute Hybrid Module.

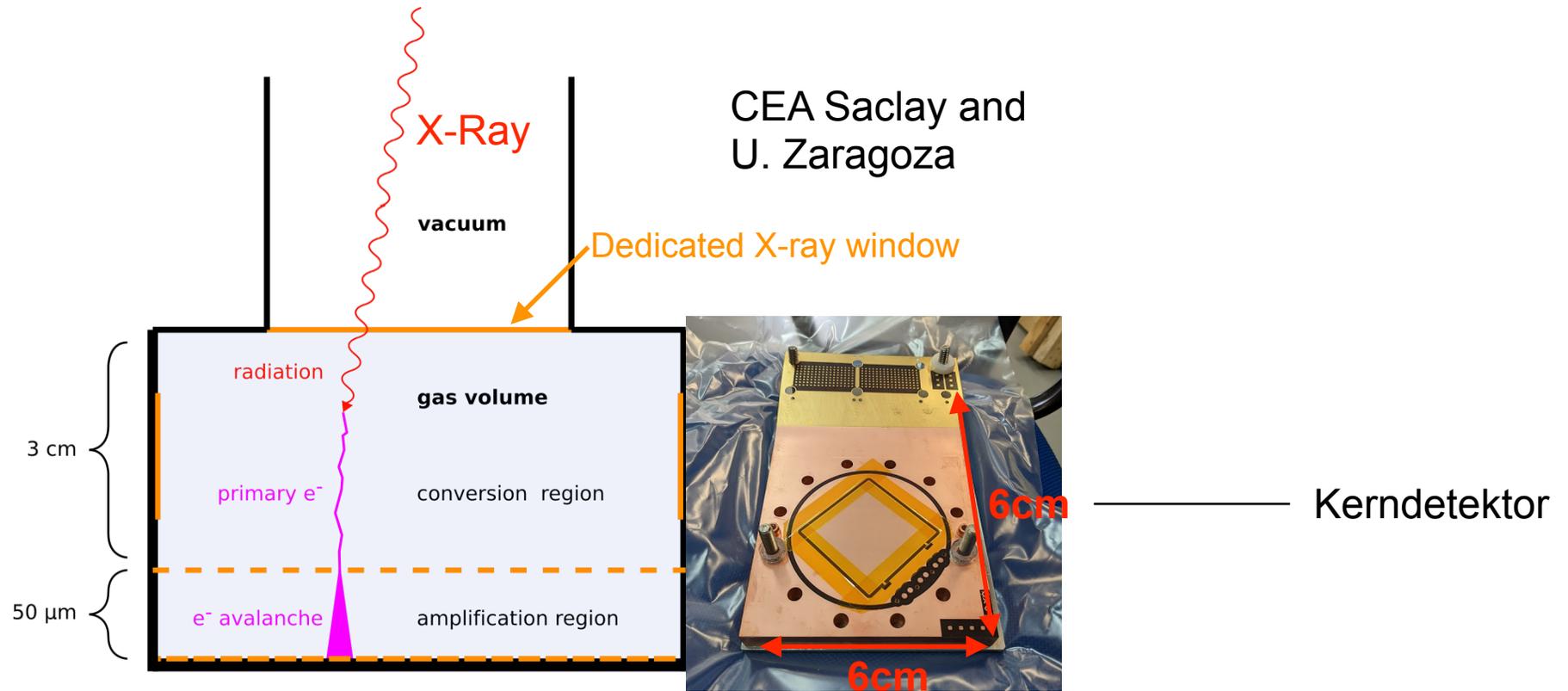
- ➔ Gemeinsame Entwicklung U. Columbia und INAF Italien.
- ➔ Potentielles Interesses der NASA für Einstieg in Entwicklung.
- ➔ Erste Prototypen.



Detektoren

Entdeckungstechnologien

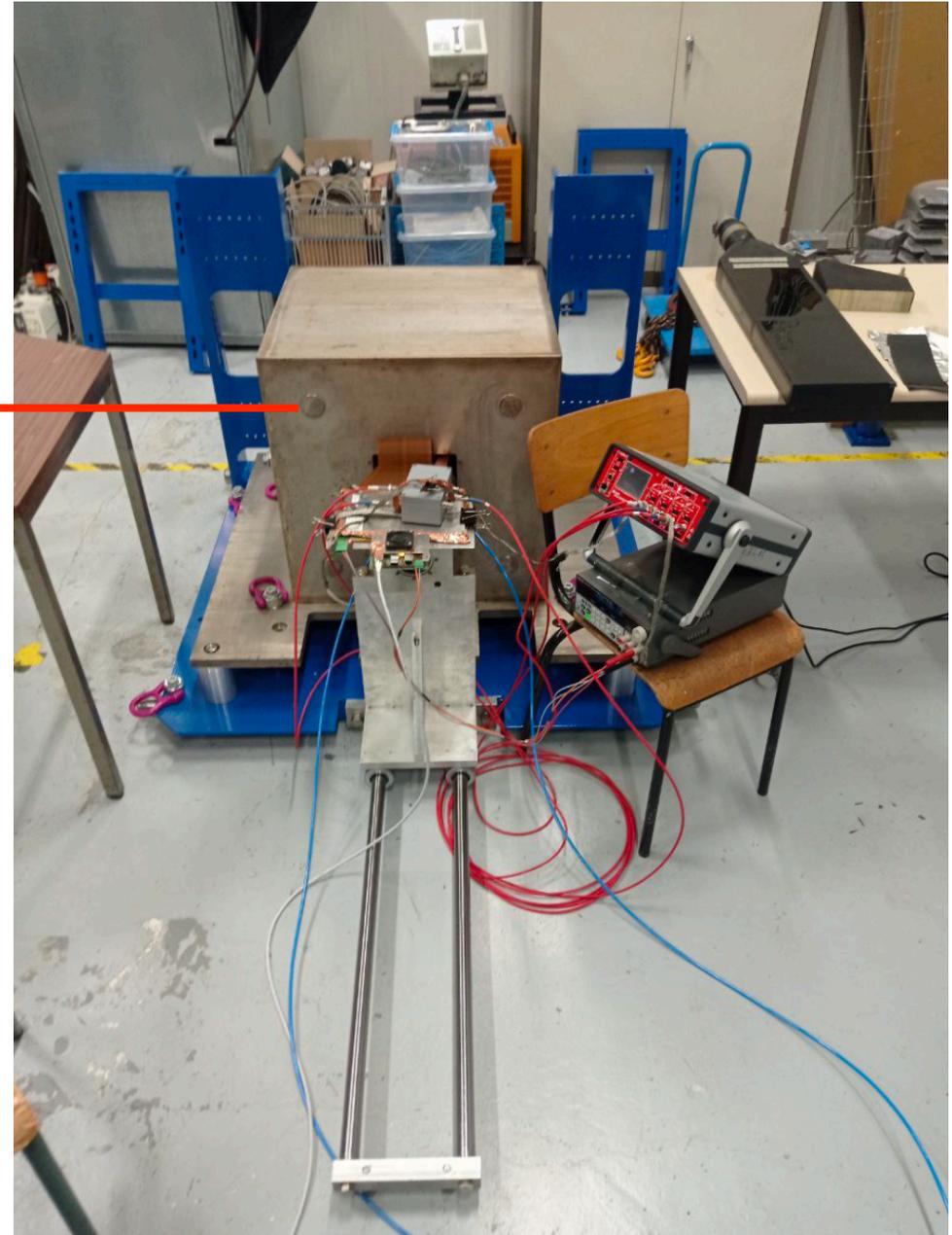
- Micromegas (Micro-Mesh) Zeitprojektionskammer + Blei-Abschirmung + Veto-Systeme
- ➔ Optimiert für: Low-Background Messungen und Detektionseffizienz



Detektoren

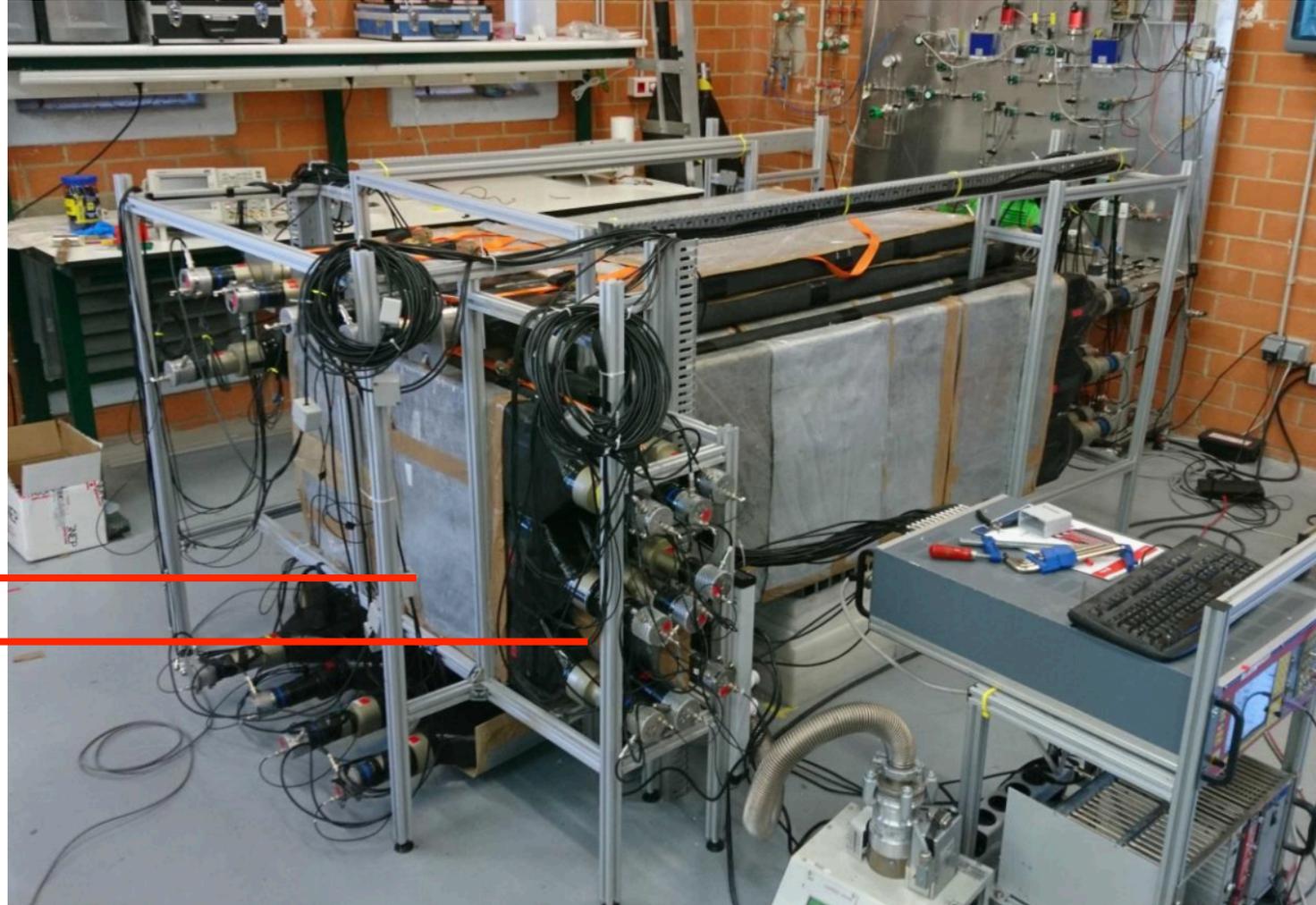
Entdeckungstechnologien

Bleiabschirmung (2-3 t) für Radioaktivität und externe Photonen.



Detektoren

Entdeckungstechnologien



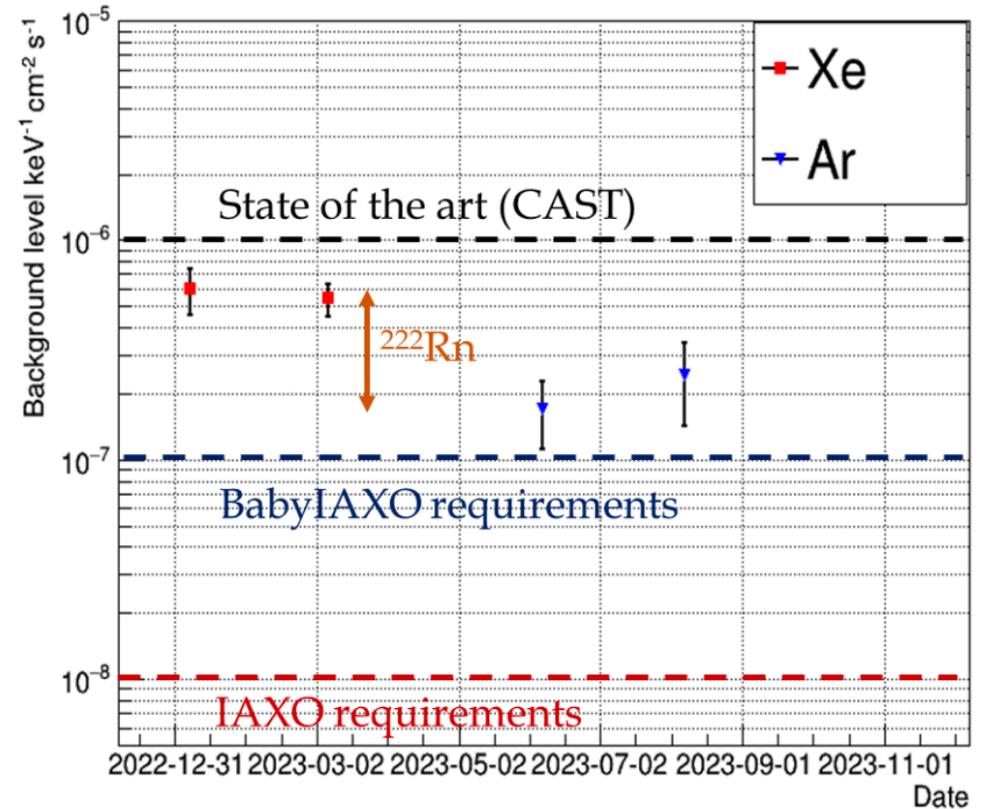
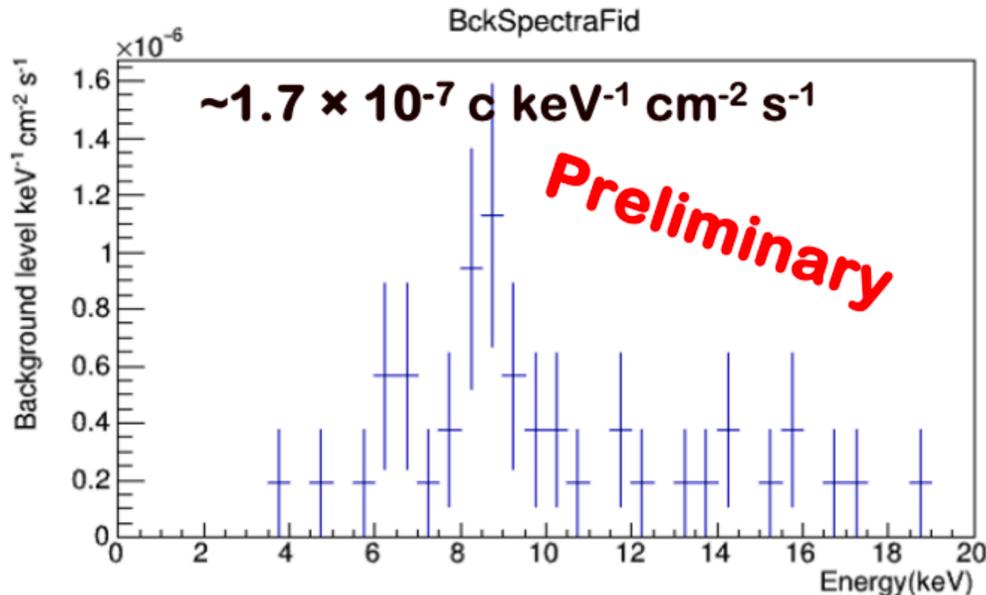
Veto-Systeme für
kosmische Strahlung und
Radioaktivität:
Szintillatoren +
Photomultiplier-Röhren
(oder SiPMs)

Rekordmessung: Untergrund

Micromegas Detektor

- Mai 2023: ~38 Tage Datennahme mit IAXO-D1 Micromegas Prototyp (Ar-Isobutane) in Canfranc Untergrundlabor

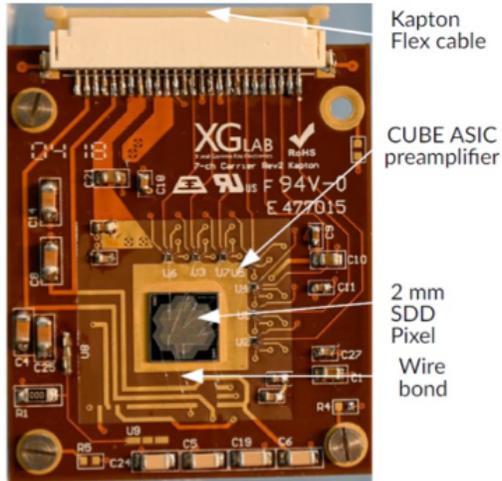
**Weltrekord für diese
Detektortechnologie! :-)**



Detektoren

Präzisionstechnologien

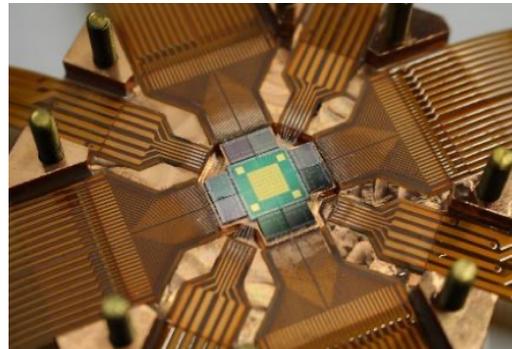
- ➔ Optimiert für: **Energieauflösung**, Zeitauflösung, Ortsauflösung.
- ➔ Die Idee: Nach der Entdeckung des Axions messen wir dessen Eigenschaften präzise!



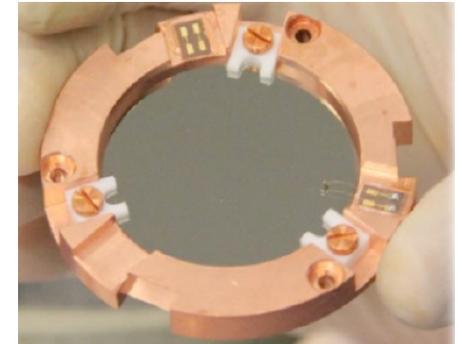
SDD: Silicon Drift Detectors (TUM)



GridPix
(U. Bonn)



MMC: Metallic Magnetic Calorimeters (U. Heidelberg & CEA Saclay)

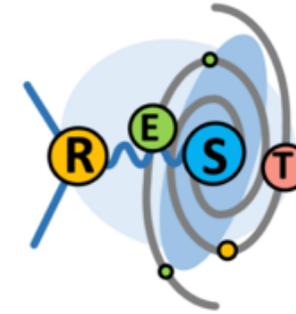


TES: Transition Edge Sensors (INMA-ICMAB CSIC)

Simulationen

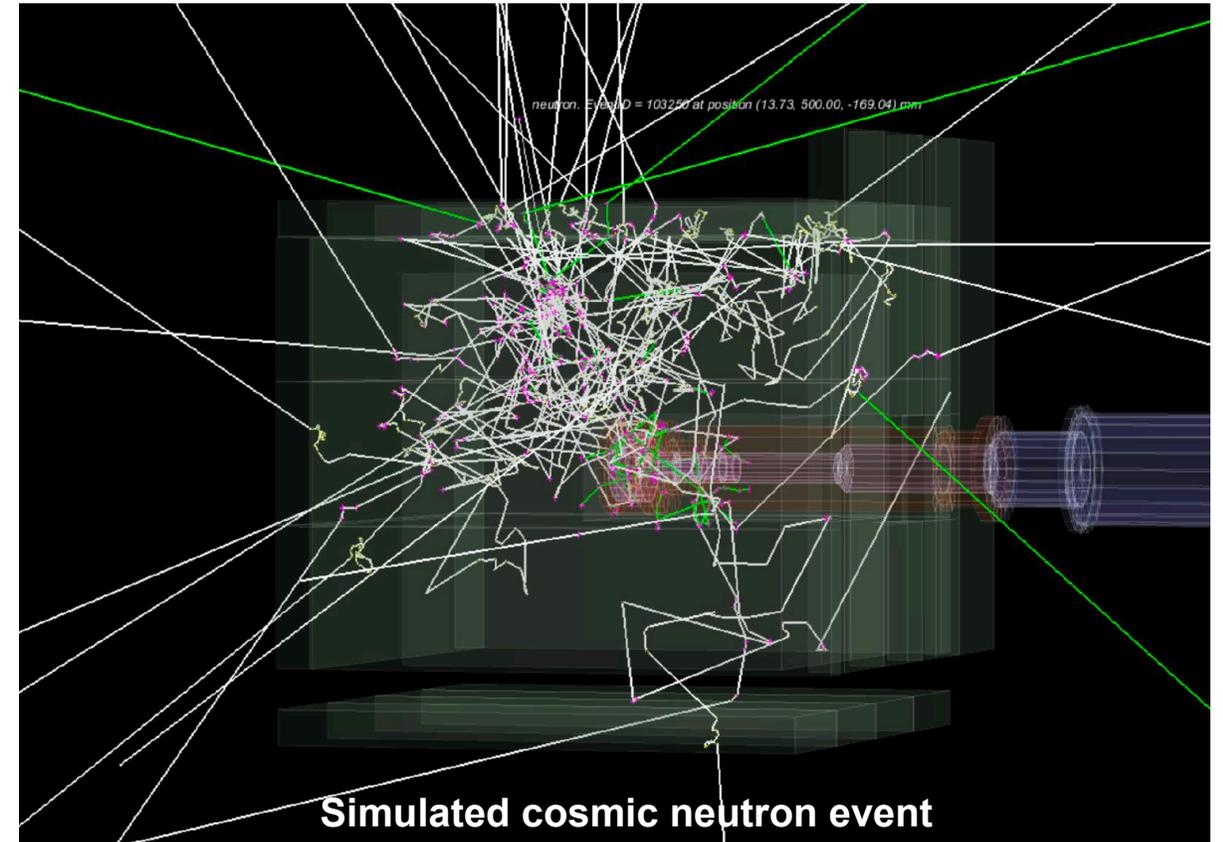
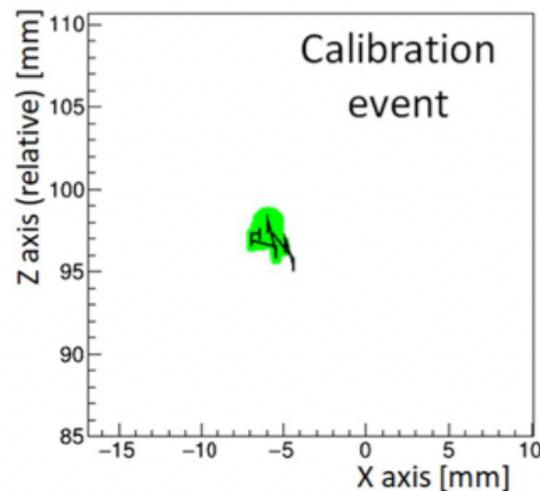
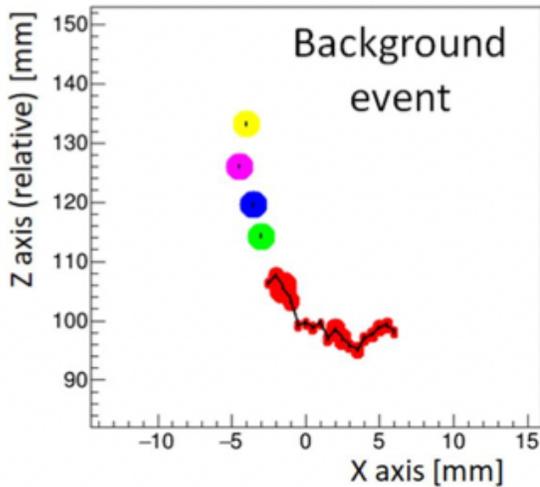
Präzises Verständnis von Axionen- und Hintergrundsignalen

- REST-for-Physics ist (geplantes) zentralisiertes Software-Framework der IAXO Kollaboration (C++ und Python)
 - ➔ Signalstudien (Sonne -> Detektor).
 - ➔ Hintergrundstudien (Unterdrückung).
 - ➔ Generelle Datenanalyse und Rekonstruktion.



[arXiv:2109.05863](https://arxiv.org/abs/2109.05863)

[REST on Github](#)

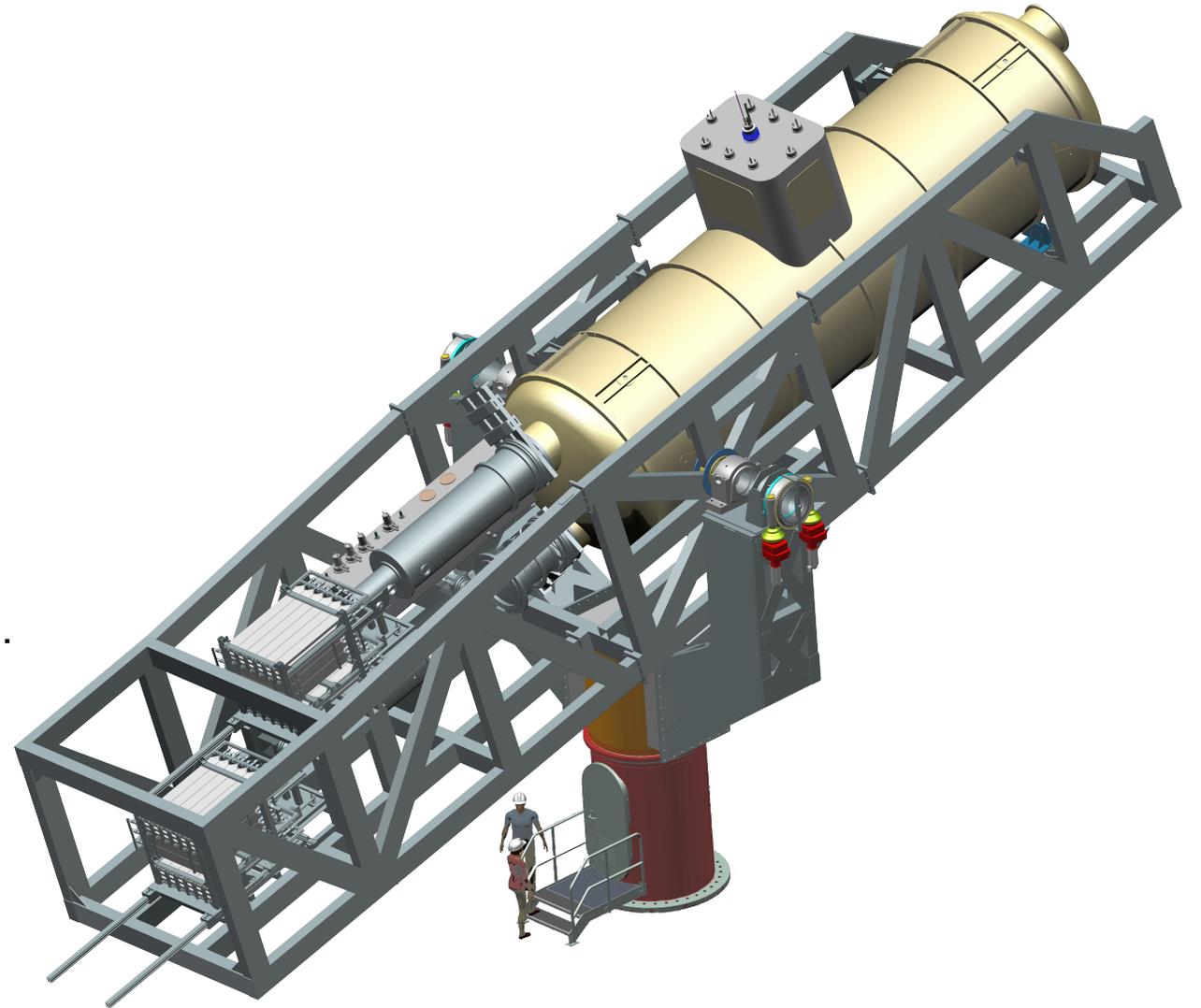


(Baby)IAXO Physik Programm

Eine Bandbreite an Entdeckungsmöglichkeiten!

“Hätte ich heute noch einmal die Möglichkeit frei zu entscheiden, ob ich ALPS II oder BabyIAXO bauen würde - würde ich mich definitiv für BabyIAXO entscheiden. Damit können wir so viel mehr Physik machen!”

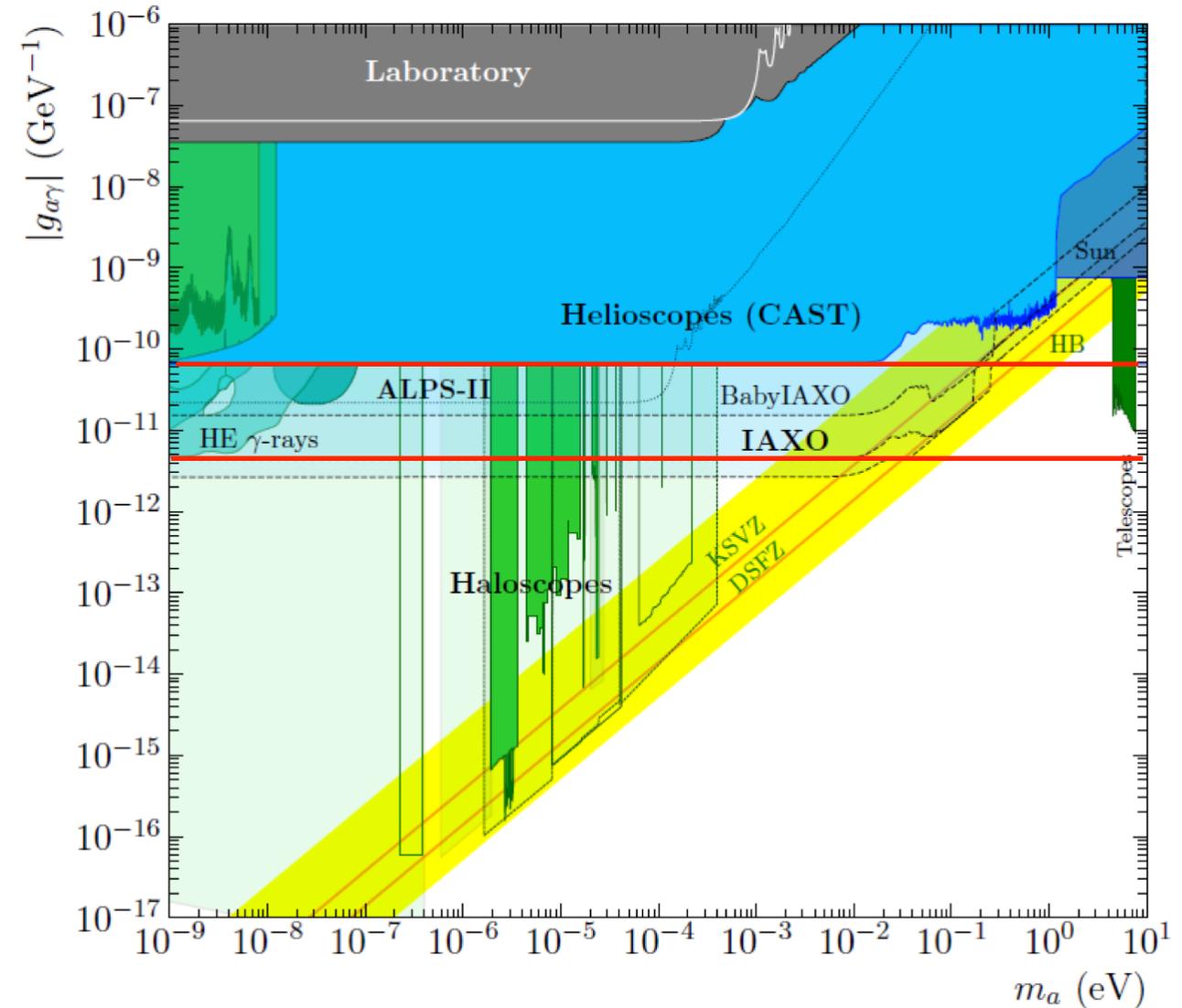
- Axion-Ikone am DESY, 2024.



Case I: Sensitivität für Baseline Primakoff Entdeckung

BabyIAXO

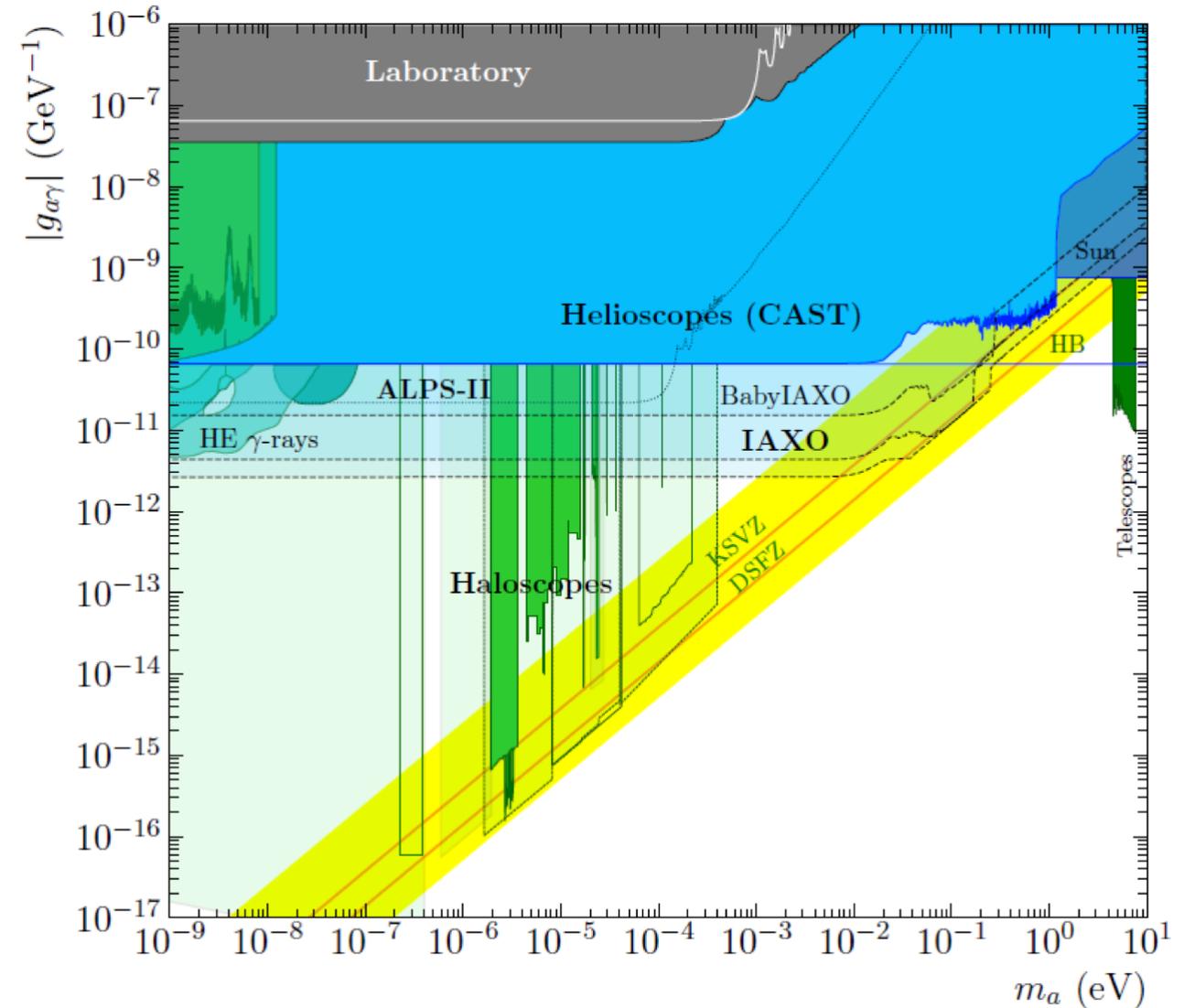
- $g_{a\gamma\gamma}$ Sensitivität $\sim 3x$ besser als CAST:
 - ➔ Test der Region **astrophysikalischer Hinweise**
 - Übersteigt ALPS II Sensitivität.
 - Im Falle einer Entdeckung:
 - ➔ Vergleich $g_{a\gamma\gamma}$: Vakuum and Plasma.



Case I: Sensitivität für Baseline Primakoff Entdeckung

BabyIAXO

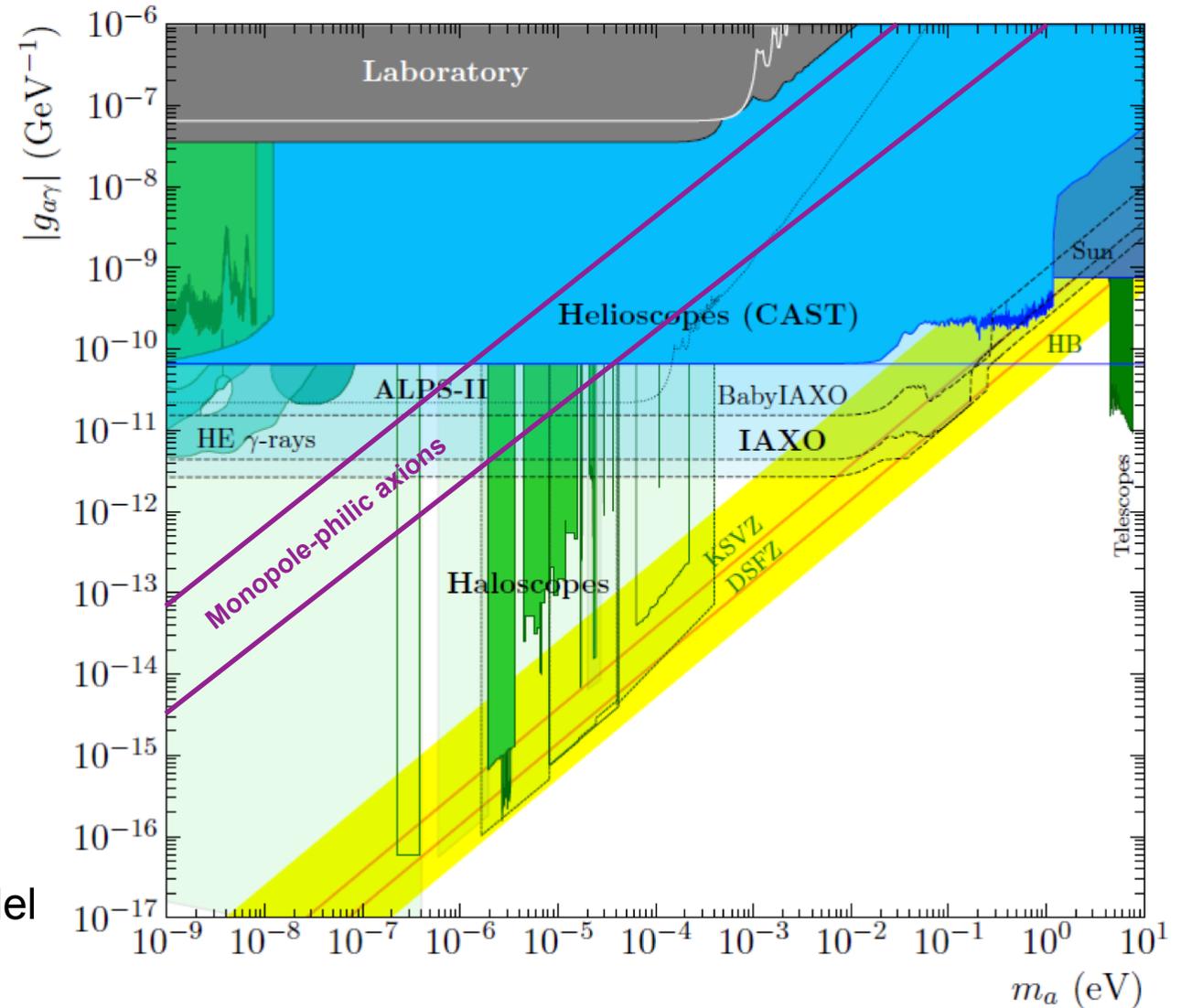
- $g_{a\gamma\gamma}$ Sensitivität $\sim 3x$ besser als CAST:
 - ➔ Test der Region **astrophysikalischer Hinweise**
 - Übersteigt ALPS II Sensitivität.
 - Im Falle einer Entdeckung:
 - ➔ Vergleich $g_{a\gamma\gamma}$: Vakuum and Plasma.
 - ➔ Test der **Vanilla QCD Axion Modelle (QCD)**



Case I: Sensitivität für Baseline Primakoff Entdeckung

BabyIAXO

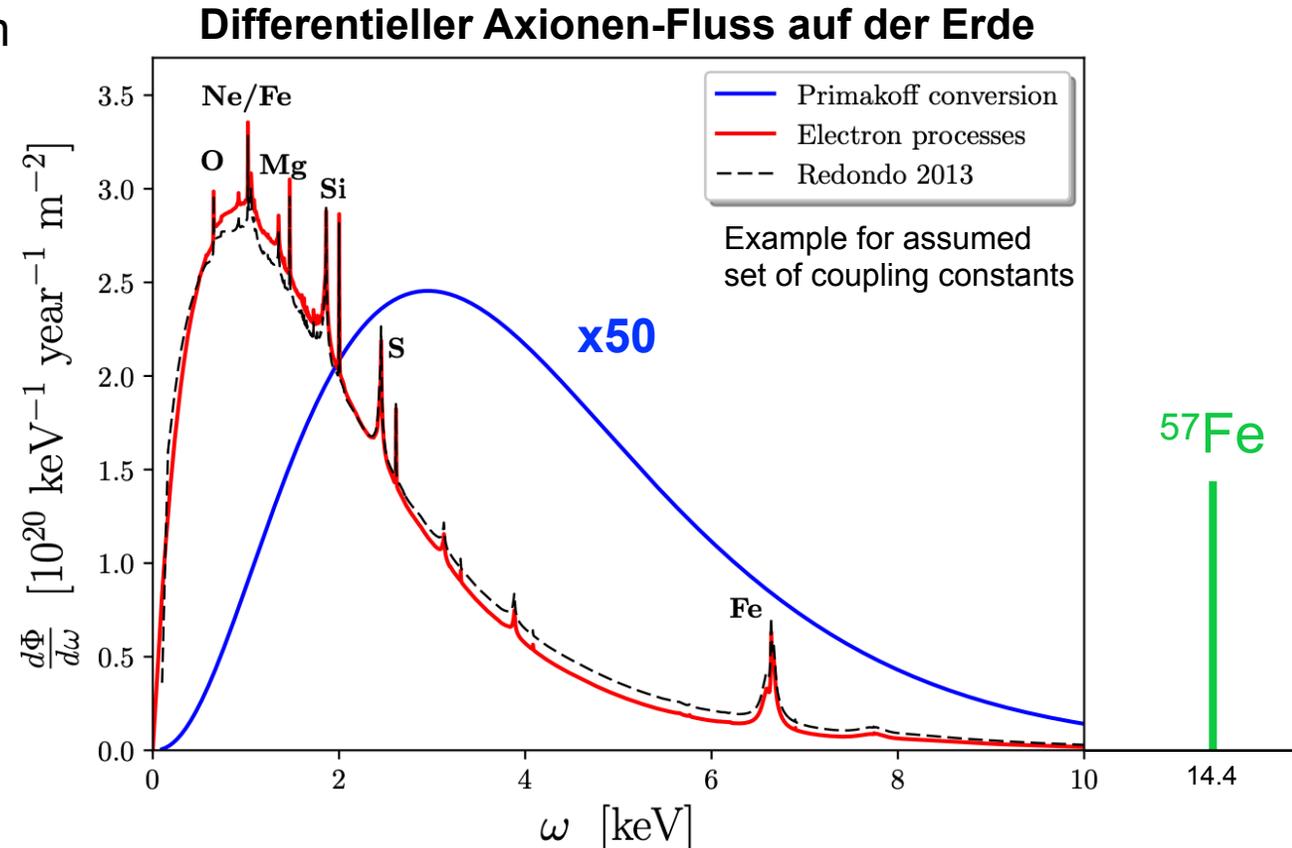
- $g_{a\gamma\gamma}$ Sensitivität $\sim 3x$ besser als CAST:
 - ➔ Test der Region **astrophysikalischer Hinweise**
 - Übersteigt ALPS II Sensitivität.
 - Im Falle einer Entdeckung:
 - ➔ Vergleich $g_{a\gamma\gamma}$: Vakuum and Plasma.
 - ➔ Test der **Vanilla QCD Axion Modelle (QCD)**
 - ➔ Test QCD Axionen ausserhalb des Vanilla Bands: zB. **Theorie von Sokolov-Ringwald.**
- ➔ Lasst uns eine Axion-Entdeckung annehmen:
BabyIAXO kann die Physik über dem Standardmodell weiter erforschen!



Case 2: Tieferes Verständnis der BSM-Physik

BabyIAXO

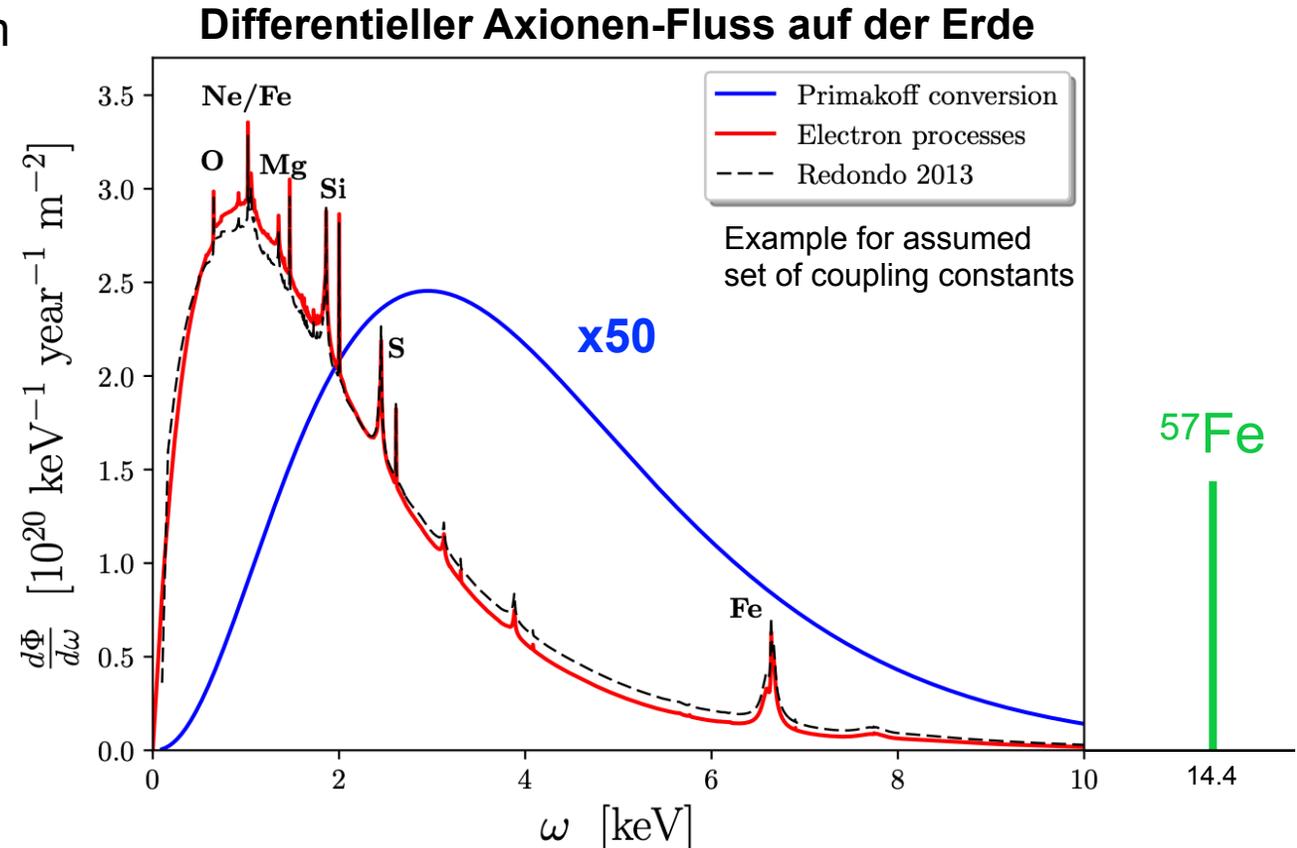
- Je nachdem wie das gemessene Energiespektrum in unserem Detektor aussieht können wir Rückschlüsse auf die dahinterliegende Physik ziehen!



Case 2: Tieferes Verständnis der BSM-Physik

BabyIAXO

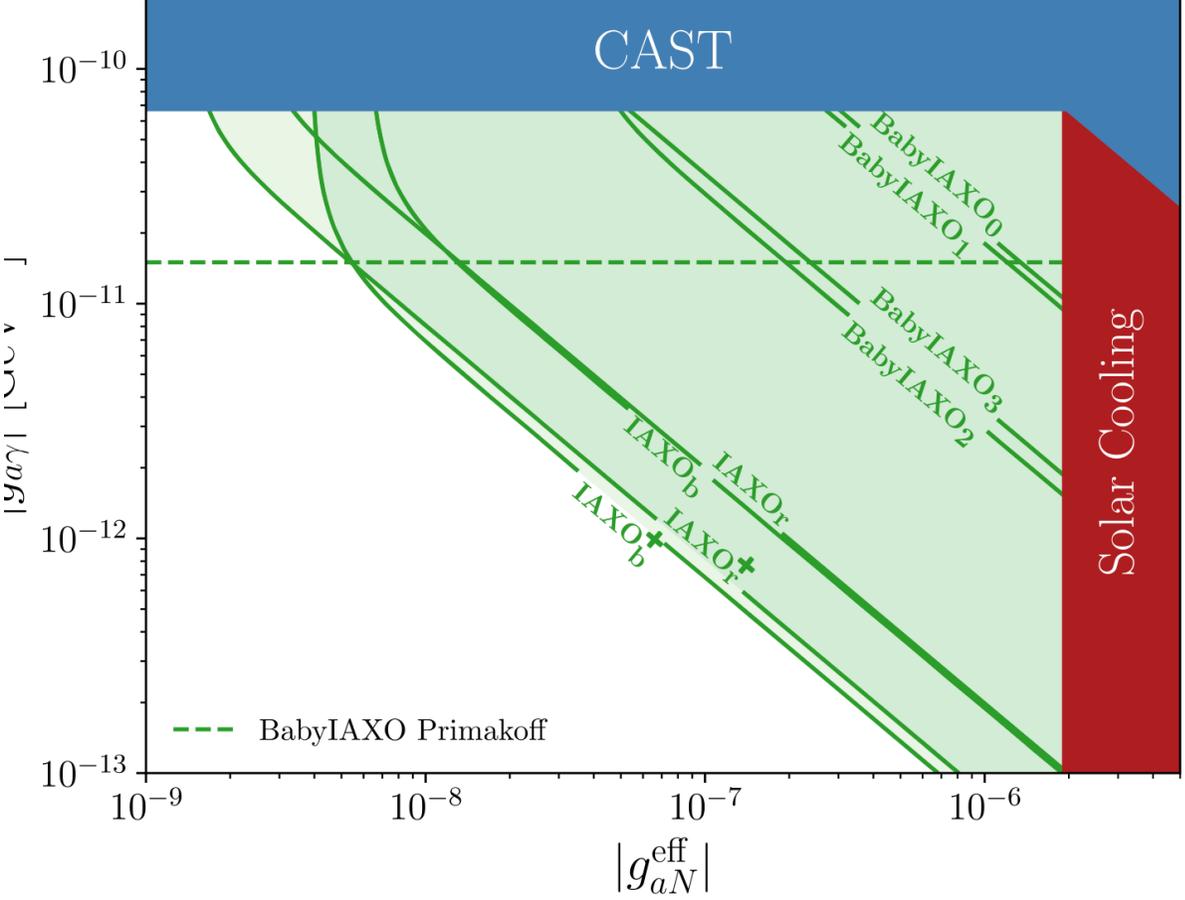
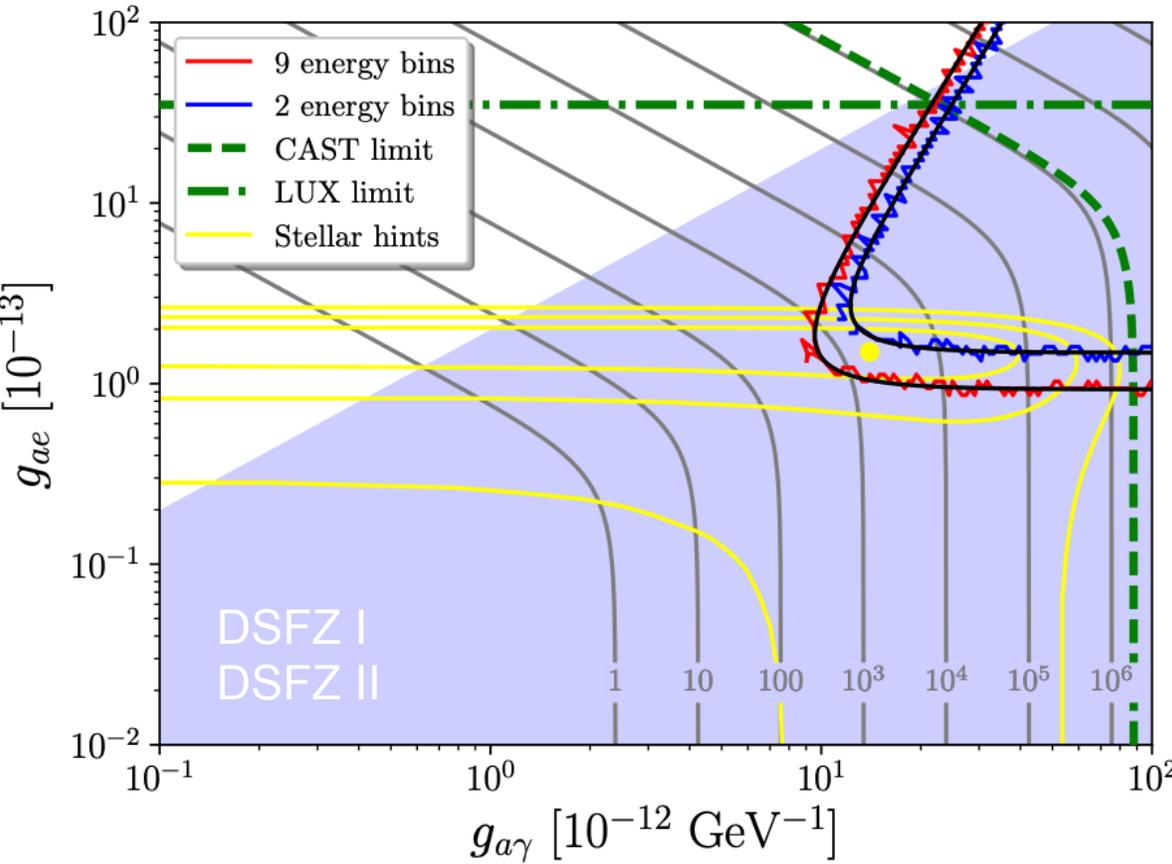
- Je nachdem wie das gemessene Energiespektrum in unserem Detektor aussieht können wir Rückschlüsse auf die dahinterliegende Physik ziehen!
 - ➔ Beobachten wir Axionen aus allen Produktionskanälen (zB. Element-Peaks, monochromatische Linie bei 14.4 keV)?
 - ➔ Wenn ja, wie stehen diese im Verhältnis zueinander?
 - ➔ Rückschlüsse auf Kopplungskonstanten Axion-Photon/Elektron/Nucleon und in gewissen Bereichen auch Masse des Axions.



Case 2: Tieferes Verständnis der BSM-Physik

BabyIAXO

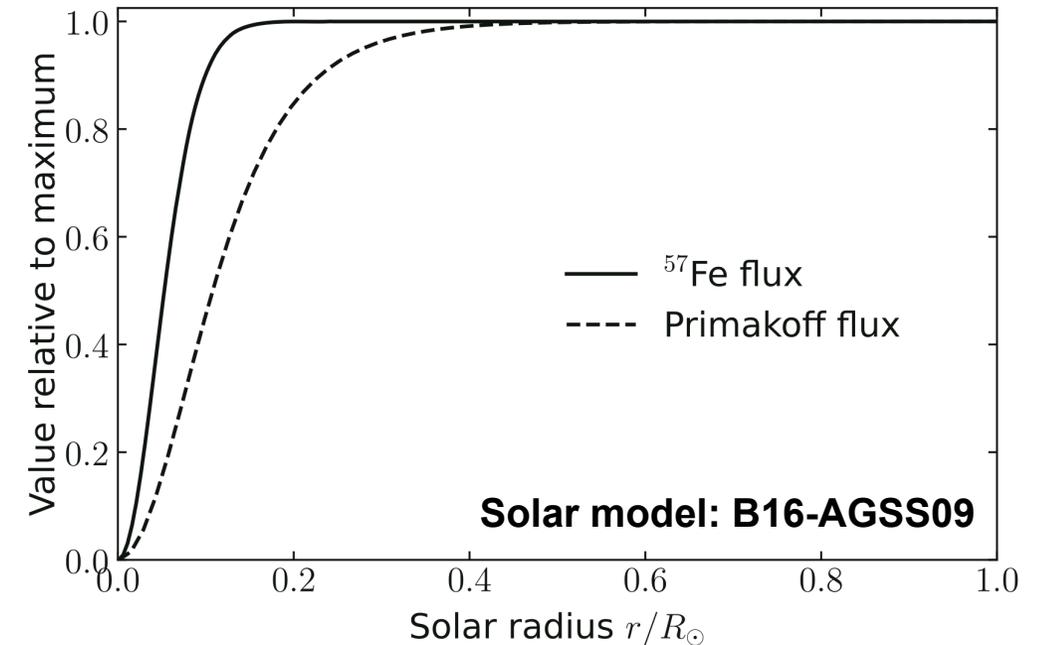
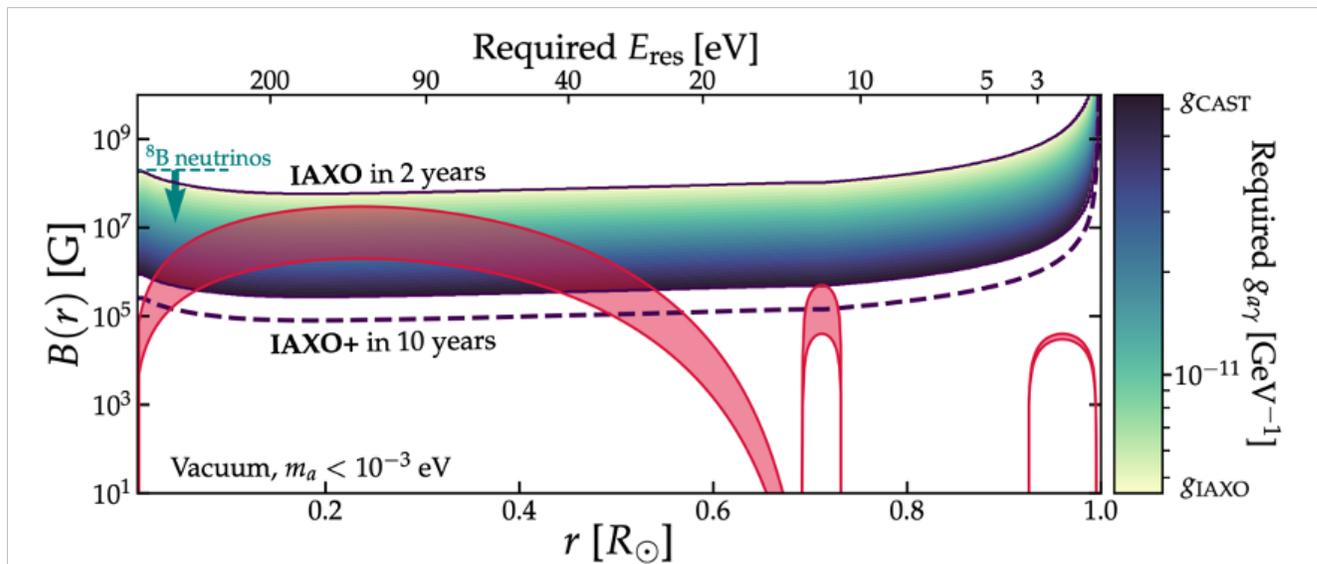
- Sensitivitätsprognosen basierend auf Simulationen.



Case 3: Solarphysik

Röntgenbilder der Sonne

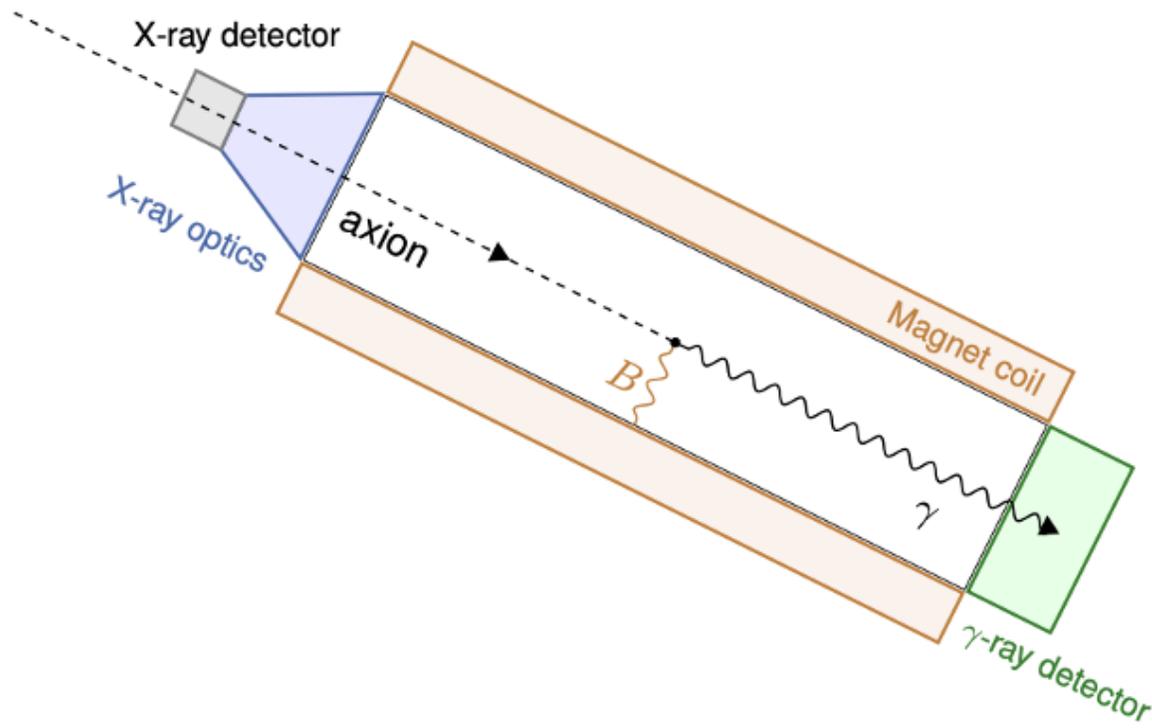
- BabyIAXO kann sich auf bestimmte Bereiche der Sonne ausrichten (Kern, Hüllen)
- Je nachdem wie das gemessene Energiespektrum sich ändert, können wir Rückschlüsse ziehen auf: B-Feld, Temperatur, Metallgehalt in der Sonne.
 - ➔ Wir können mit unseren Röntgenbildern die Sonne kartographieren!



Case 4: Suche nach Supernova Axionen

BabyIAXO

SN



- In unsere direkten astronomischen Umgebung gibt es nur wenige Supernova Kandidaten
- Im Falle eines Events (Neutrino-Pre-Burst) hätten wir die Zeit und Chance BabyIAXO auf einen Kandidaten auszurichten!
- Laut Theorie: Axionen aus SN höhere Energien im MeV Bereich -> Gamma Detektor.
- Aktuell: Simulationsstudien und Diskussion um Implementierung eines solchen Detektors.
- Bonus: MeV-Axionen aus Fusionsprozessen :)

Case 5: RADES - Haloskop

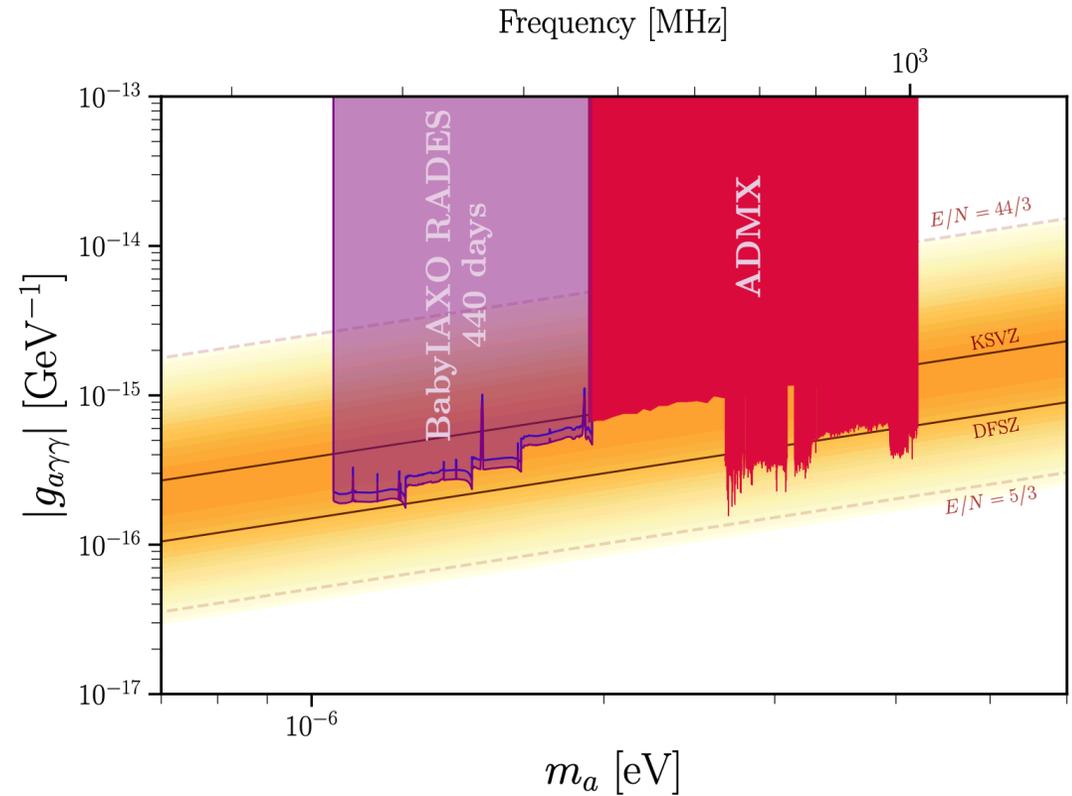
BabylAXO Magnet

- Idee: Nutzen des BabylAXO Magneten als Haloskop Experiment (reine Dunkle Materie Suche)
 - ➔ BabylAXO Magnetkern: zB. 4x 5m Kavitäten mit Zielbereich 1-2 μeV bis zum Vanilla QCD Axion Band.
 - ➔ Mehrere Konzepte in der Entwicklung für Post-Helioskop-Phase.



RADES-BabylAXO Prototype

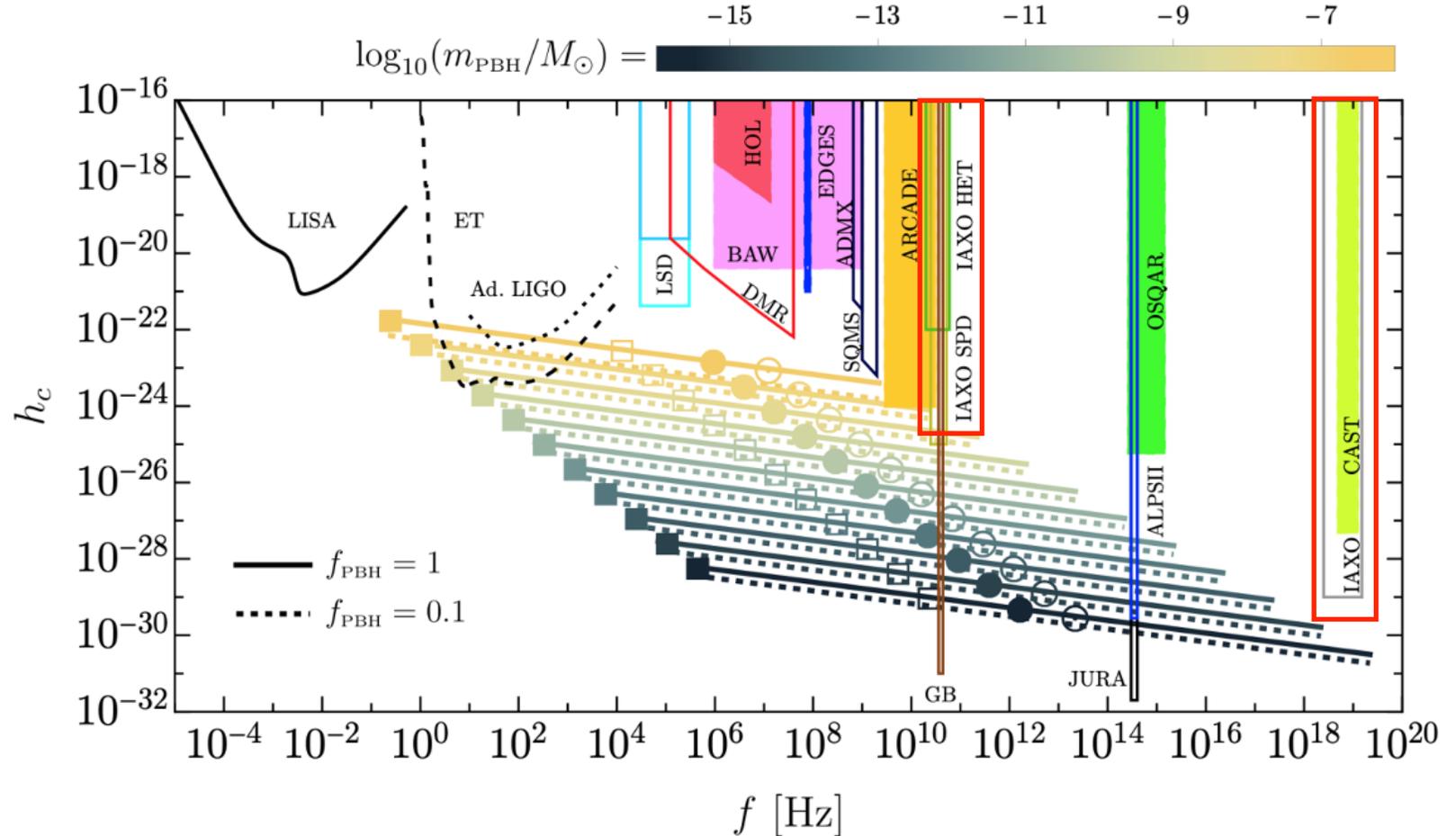
Gefördert durch **ERC synergy grant**
DarkQuantum by I. Irastorza et al.



Case 6: Suche nach Gravitationswellen

BabyIAXO

- Hochfrequente Gravitationswellen werden in nicht-Standard kosmologischen Szenarien erwartet zB. Bei Formation von primordialen schwarzen Löchern.
- Gravitationswelle-Photon Umwandlung in einem B-Feld (inverser Gertsenshtein Effekt)
 - ➔ (Baby)IAXO sensitiv?
- Aufkeimendes Feld an Studien und Synergien.



Einblick in meine Arbeit: IAXO-Detektorlabor bei DESY

BabyIAXO

Towards a Detector Test Stand in the HERA South Hall at DESY for the BabyIAXO Experiment

The IAXO Detector and Background Groups
Version 2.0 by Daniel Heuchel (DESY)
September 2024



1



Strategische Planung, Koordination und Umsetzung: Detektorlabor @ DESY für internationale Detektorgruppen der IAXO Kollaboration (Low Background Measurements, Integrationstests Hardware und Software)



Organisator IAXO Kollaborations-Meeting 2023-2025 @ DESY.

Einblick in meine Arbeit: Natur des Teilchens durch Polarisation?

BabyIAXO

- Simulationsstudie für einen weiteren Physics Case: Die Natur des Teilchens - intrinsische Parität.

Pseudo-scalar: 0^-

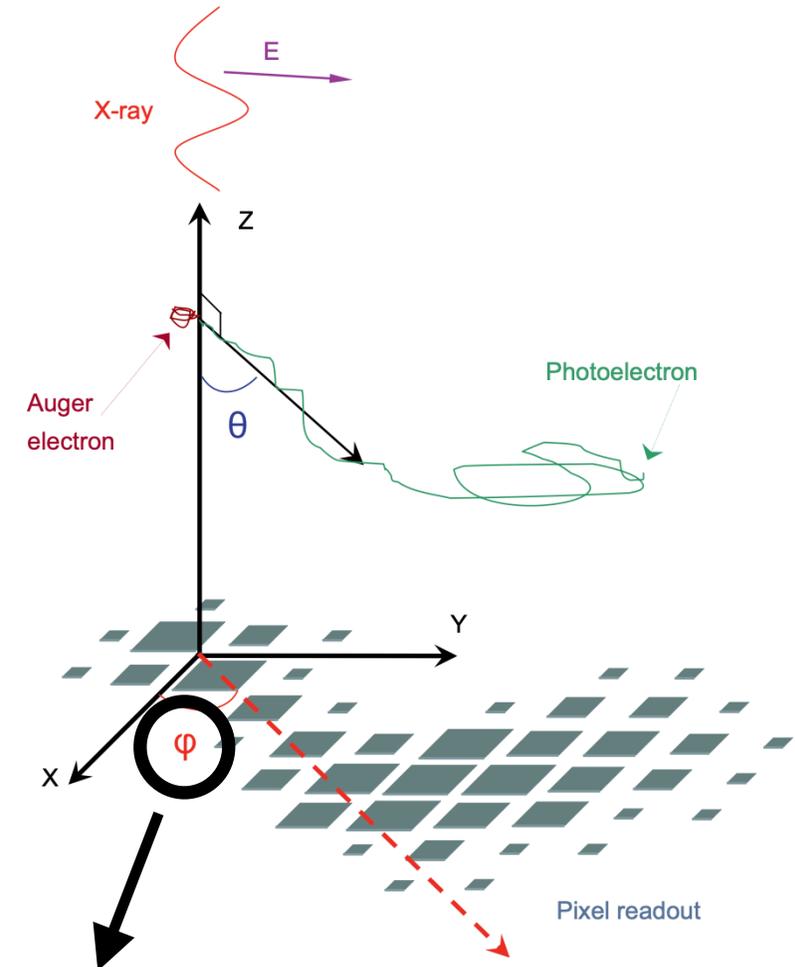
$$E_\gamma \parallel B_{ext} \text{ (p-polarisation)}$$

Cos²-Spektrum Azimuth-Winkel (Photoelektron)

Scalar: 0^+

$$E_\gamma \perp B_{ext} \text{ (s-polarisation)}$$

Sin²-Spektrum Azimuth-Winkel (Photoelektron)



Wie kann ich präzise rekonstruieren?
Wie viel Statistik (Anzahl Photonen)
benötige ich für eine signifikante Aussage?

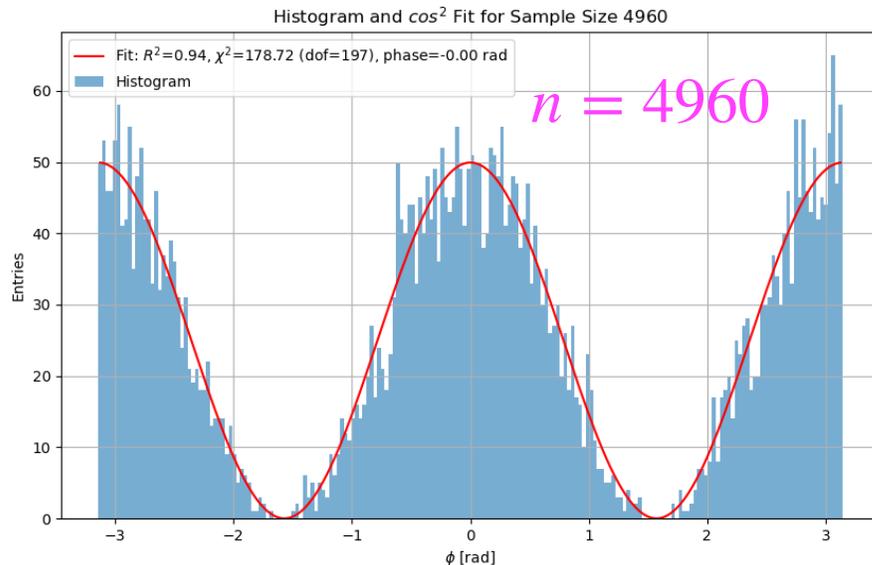
Einblick in meine Arbeit: Natur des Teilchens durch Polarisation?

BabyIAXO

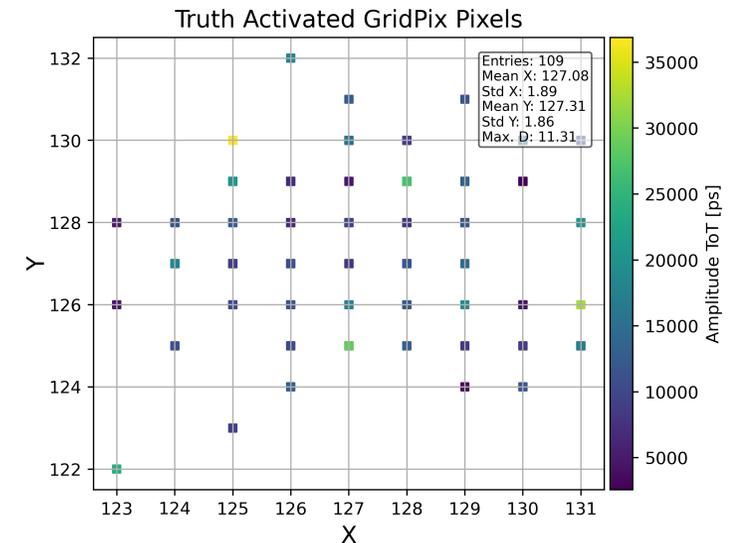
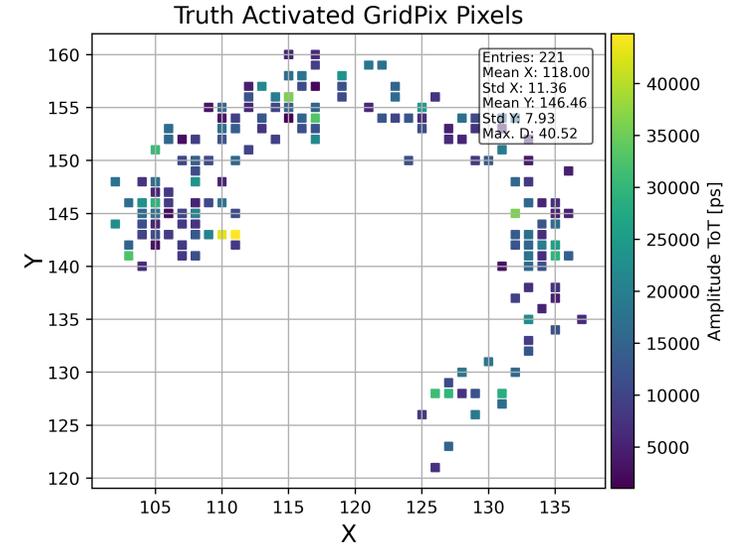
- Einsatz von maschinellem Lernen (einfache lineare neutrale Netzwerke) und Vergleich zu konventionellen Rekonstruktionsmethoden.



Rekonstruierten Spektrum



Einzelne Events



Einblick in meine Arbeit: Daniel's Desktop

Simulationsarbeiten für BabyIAXO

The image displays a Mac desktop environment with several windows open:

- Terminal Window:** Shows the output of a REST-for-Physics installation. It includes commit information (cc6b802), branch details (jgalan_fix_macos_libs/v2.3.15), and a file listing for the workspace.
- GitHub Window:** Displays the source code for `simulation.C` in the `GridPix_xray_simulation` repository. The code includes functions for reading configuration files and writing simulation results.
- Python Script Window:** Shows a script named `plot_hdf5_all_input_reco_datasets.py` with code for loading HDF5 data and plotting.
- Plot 1:** A 2D heatmap titled "Truth Activated GridPix Pixels" showing the spatial distribution of activated pixels. The x-axis is labeled "X" and the y-axis is labeled "Y". A color bar on the right indicates the number of entries, ranging from 0 to 40,000.
- Plot 2:** A histogram titled "Pixel Amplitude Sum" showing the distribution of pixel amplitude sums. The x-axis is "Pixel Amplitude ToT [ps]" and the y-axis is "# Entries". The histogram shows a peak around 3.0 ps. A statistics box indicates: Entries: 100, Mean: 3023590.72, Std Dev: 731256.44, Overflow: 0.

Einblick in meine Arbeit: IAXO Öffentlichkeitsarbeit

Outreach-Koordination, Guide, Sprecher, Konzeptentwicklung,...



Aufbau einer Helioskop-Ausstellung @ DESY



Präsentation: KAI Workshop 2025 @ DESY Die Menschen hinter BabyIAXO



Instagram-Reel:

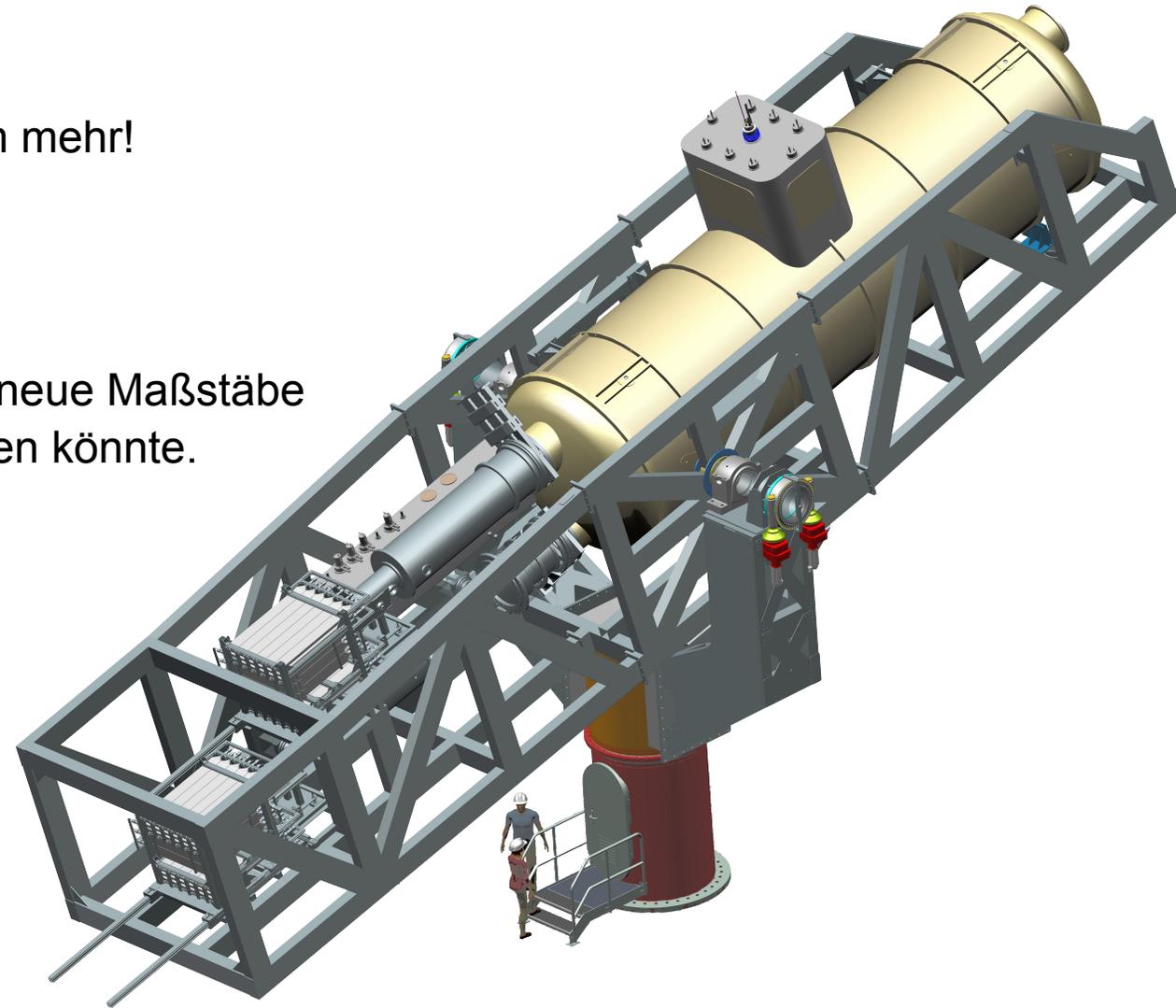


Mark Benecke @ DESY
[YouTube Link](#)

Take Home Messages

International AXion Observatory

- Helioskope suchen nach solaren Axionen und vielem mehr!
 - ➔ Viele Vorteile und einzigartige Möglichkeiten.
- BabyIAXO @ DESY ist das nächste Helioskop, das neue Maßstäbe setzen wird und neue Teilchen/Phänomene entdecken könnte.
 - ➔ Baustart: 2026?, Start der Datennahme: 2029?
 - ➔ Zeitgleich Prototyp für IAXO.
- BabyIAXO und IAXO sind Teil des komplementären und starken Axionen-Programms bei DESY.
- Stay tuned (zB. Social Media: [iaxo_official](#))! :-)



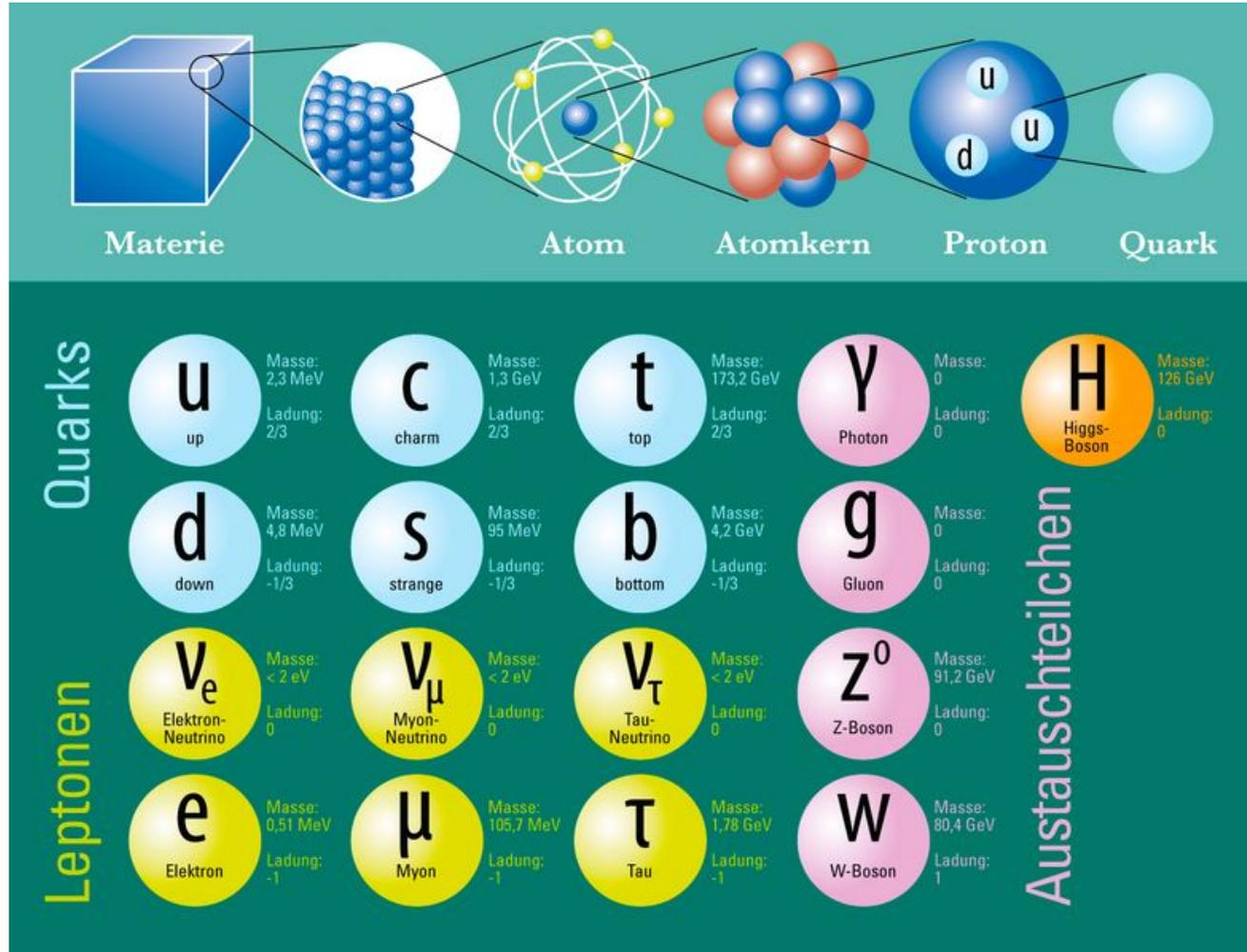
**Offene Fragerunde!
Zu mir, meinem Werdegang,
meinem Alltag, meiner Arbeit,...
Eure Chance! :)**

**Oder schreibt mir gerne eine Mail:
daniel.heuchel@desy.de**

Backup

Zentrale Frage: Aus was besteht die Welt?

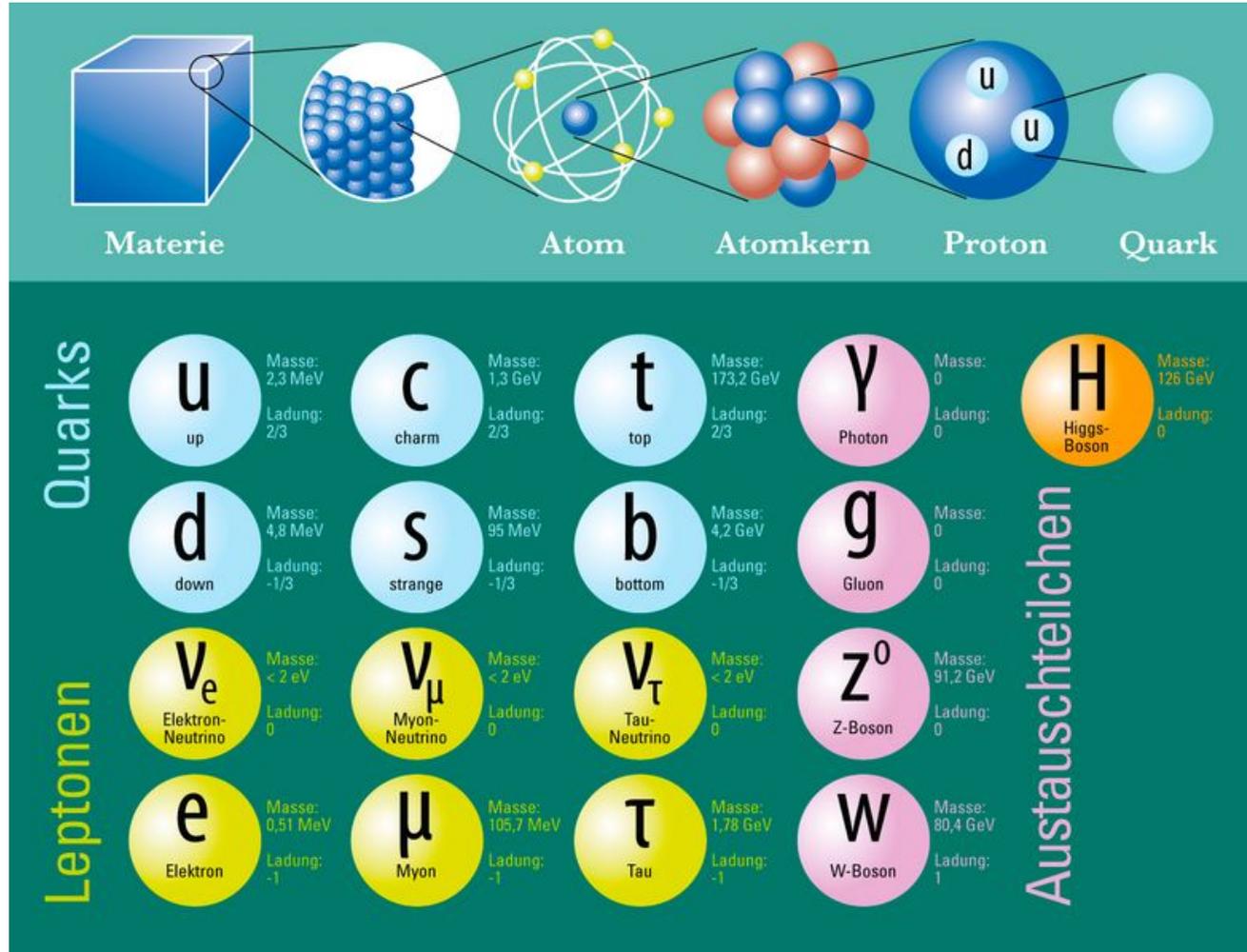
Das Standardmodell der Teilchenphysik (oder: Unser Teilchenzoo)



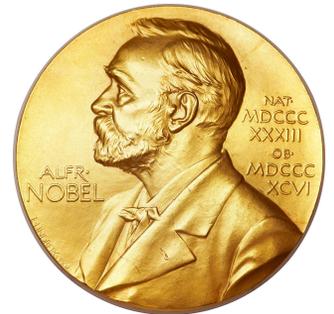
- Erfolgreichste Theorie der Physik
 - ➔ Teilchen und Wechselwirkungen
 - ➔ Highlight: Entdeckung Higgs Bosons 2012 am LHC@CERN, verleiht Masse

Zentrale Frage: Aus was besteht die Welt?

Das Standardmodell der Teilchenphysik (oder: Unser Teilchenzoo)



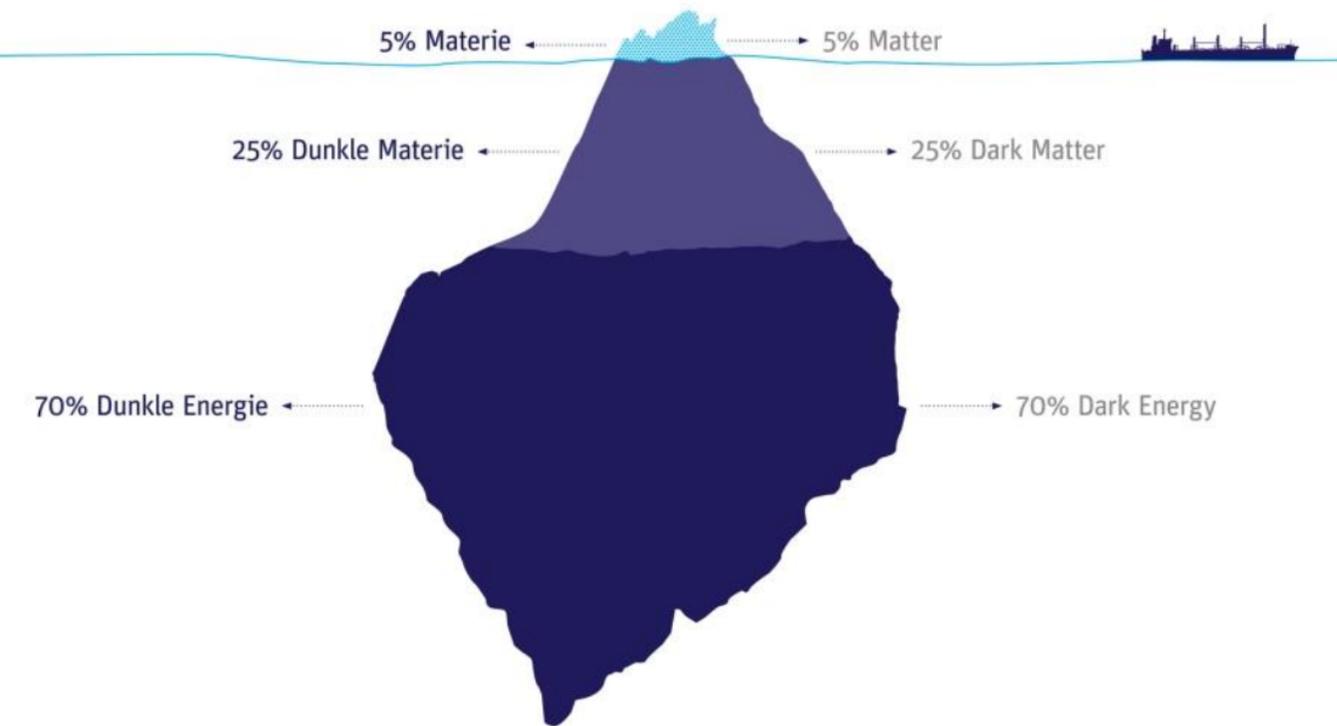
- Erfolgreichste Theorie der Physik
 - ➔ Teilchen und Wechselwirkungen
 - ➔ Highlight: Entdeckung Higgs Bosons 2012 am LHC@CERN, verleiht Masse



Nobelpreis Physik 2013 (Englert & Higgs)

Und welche Fragen sind noch offen?

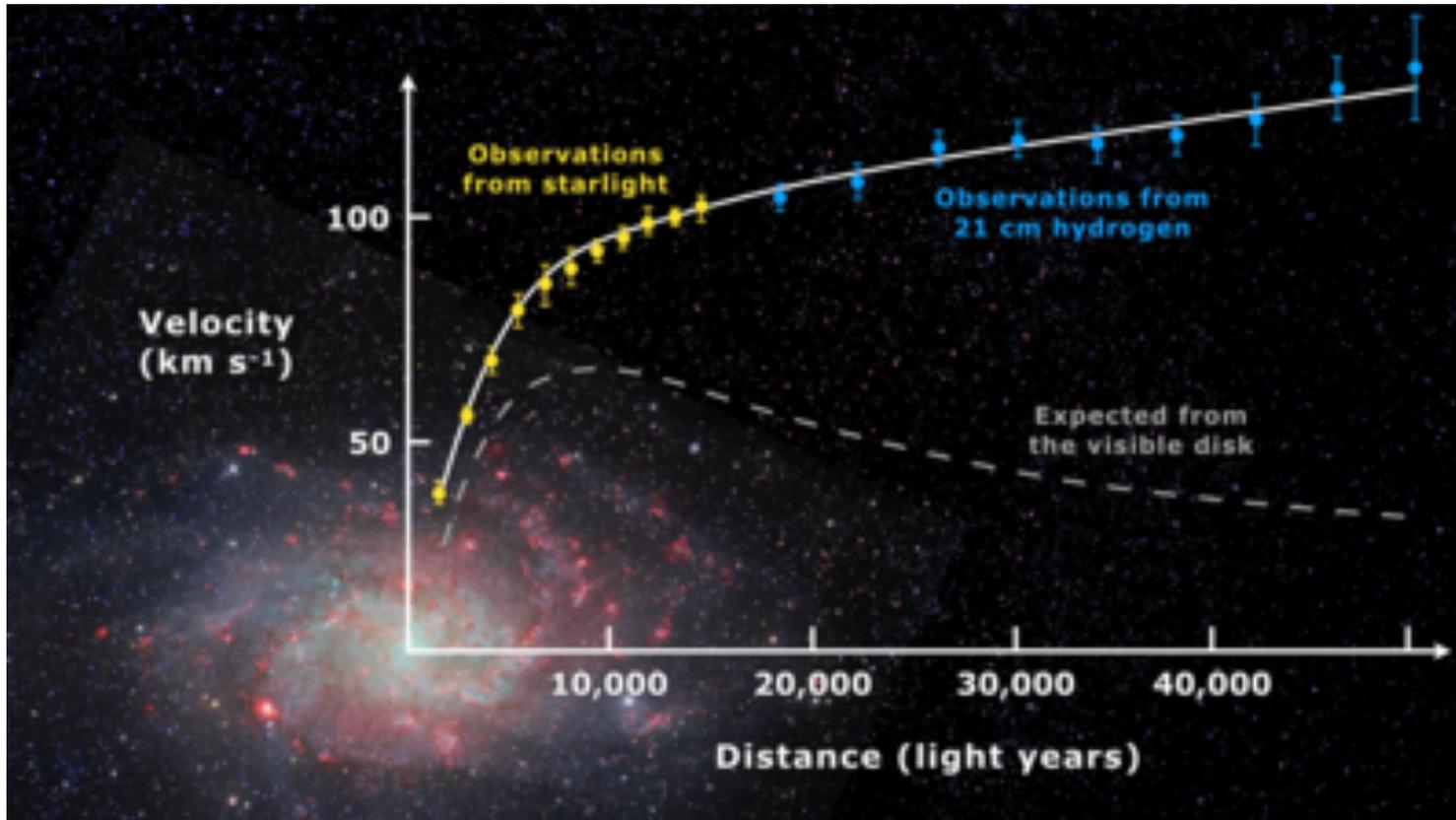
Grenzen des Standardmodells der Teilchenphysik



- Warum haben Neutrinos eine endliche Masse?
- Warum gibt es 3 Generationen von Teilchen?
- Warum gibt es so viel mehr Materie als Antimaterie?
- ...
- Was sind **Dunkle Materie** und Dunkle Energie?

Die Akte: Dunkle Materie Teil I

Hinweis Galaktische Rotationskurven

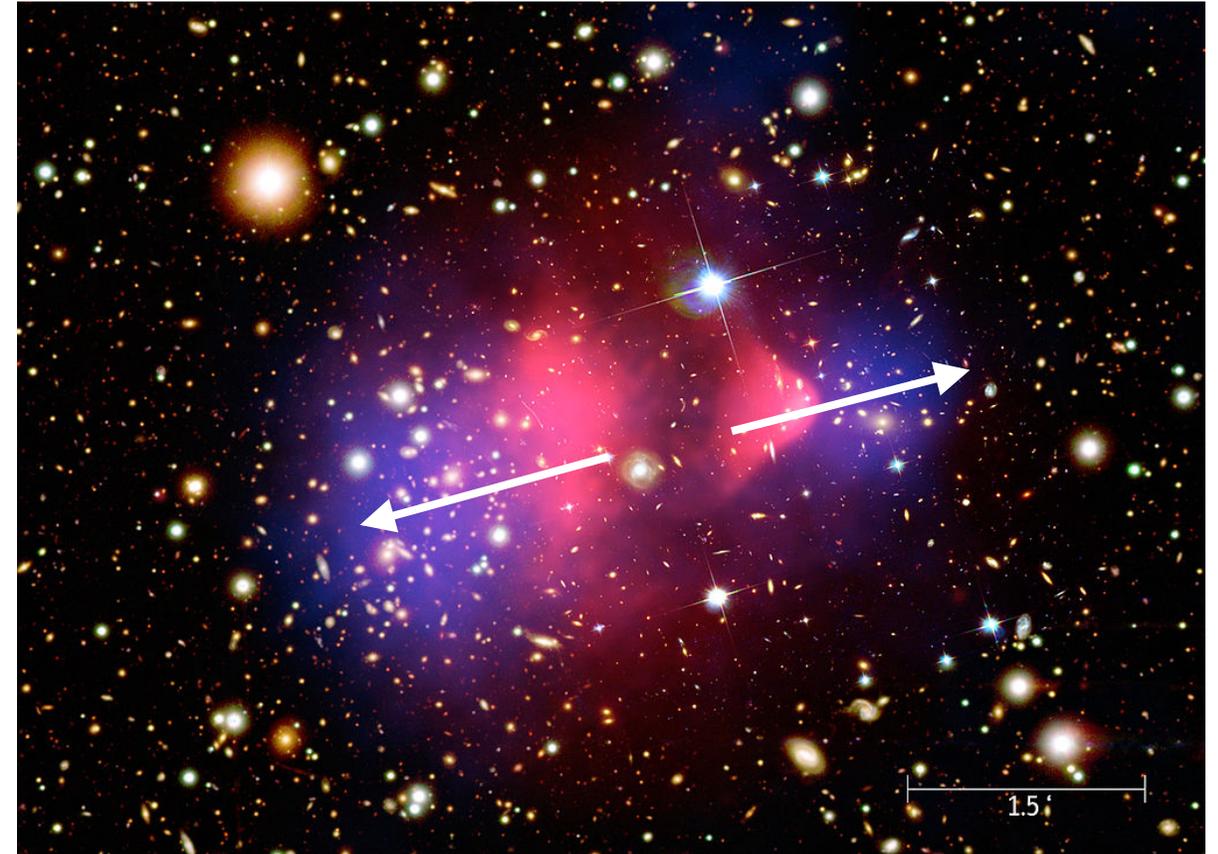


- Astrophysikalische Beobachtung: Rotationsgeschwindigkeiten von Galaxien verhalten sich nicht wie vorhergesagt.
 - ➔ Hinweis auf **Dunkle Materie**.

Die Akte: Dunkle Materie Teil II

Hinweis Bullet Cluster Kollision

- Astrophysikalische Beobachtung: Kollision von zwei Galaxie-Haufen
 - ➔ **Normale Materie** interagiert und bewegt sich langsamer.
 - ➔ **Dunkle Materie** interagiert nicht (kaum) und eilt ungebremst voraus.

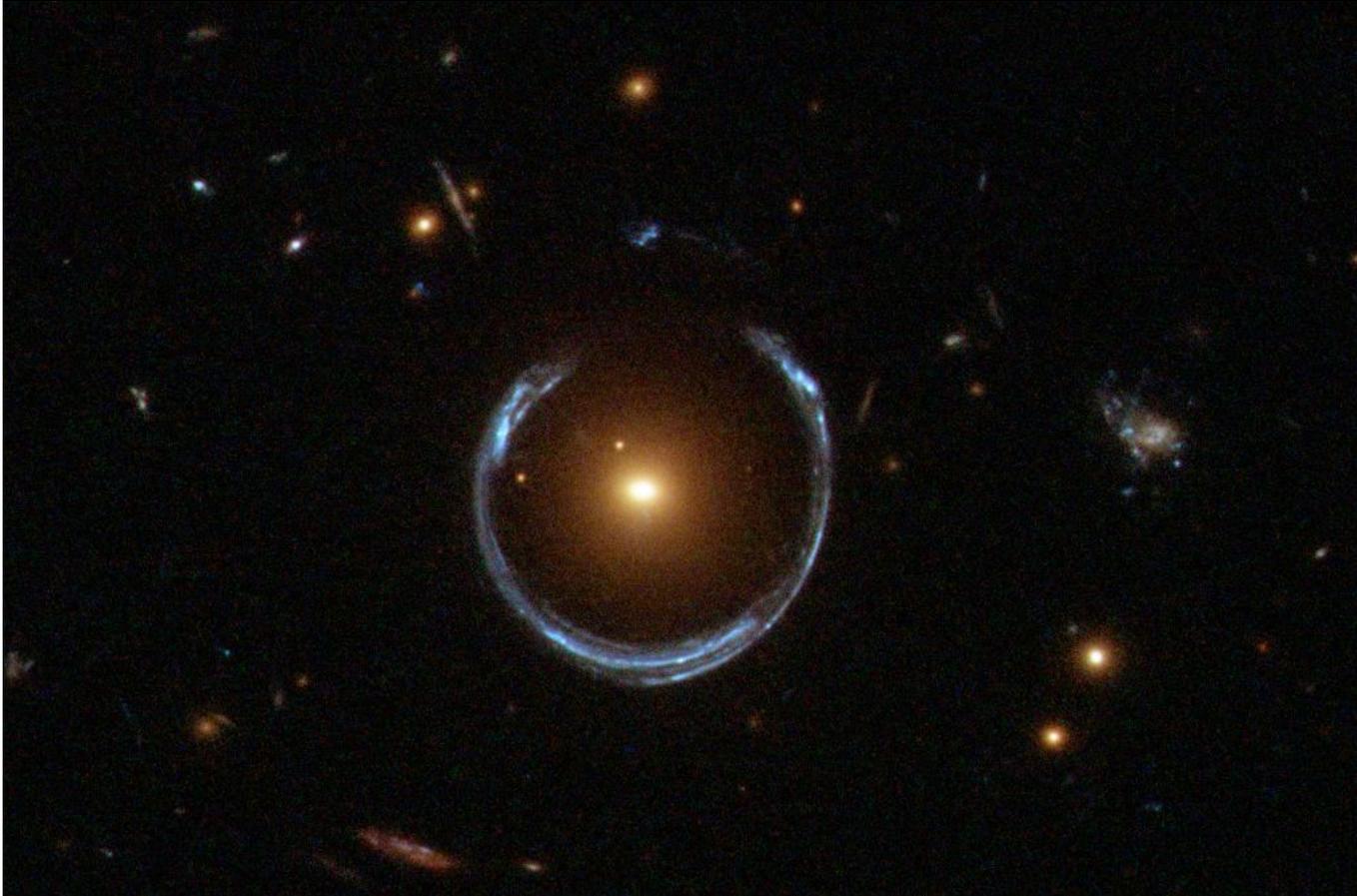


Normale Materie: Heisses Gas (Röntgenstrahlung)

Dunkle Materie (Gravitationslinseneffekt)

Die Akte: Dunkle Materie Teil III

Hinweis Gravitationslinseneffekt

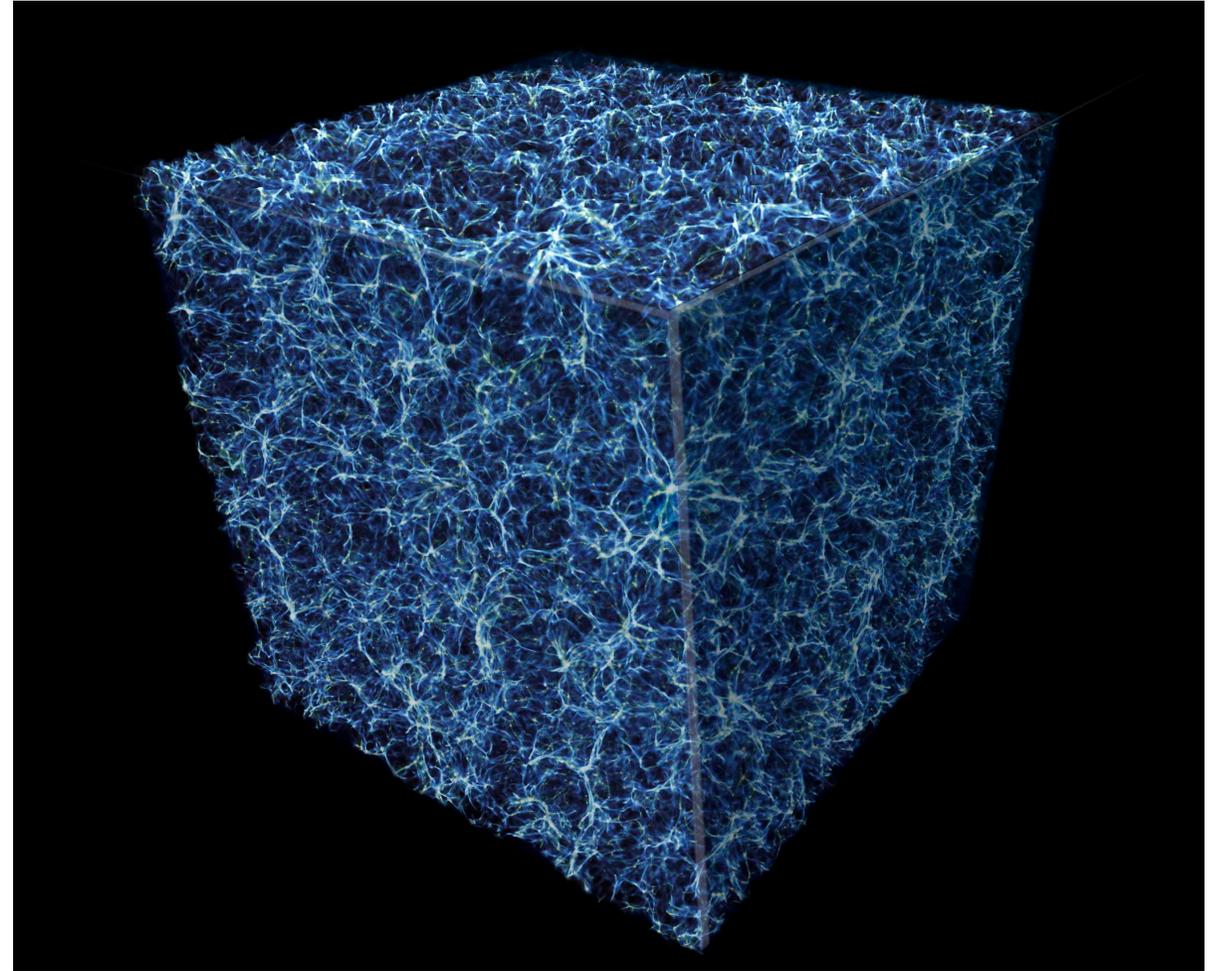


- Licht wird durch Gravitation abgelenkt (Einsteinringe).
- Berechnungen ergeben: Sichtbare Masse reicht für die beobachtete starke Krümmung nicht aus.
 - ➔ Hinweis auf **Dunkle Materie**.

Die Akte: Dunkle Materie Teil IV

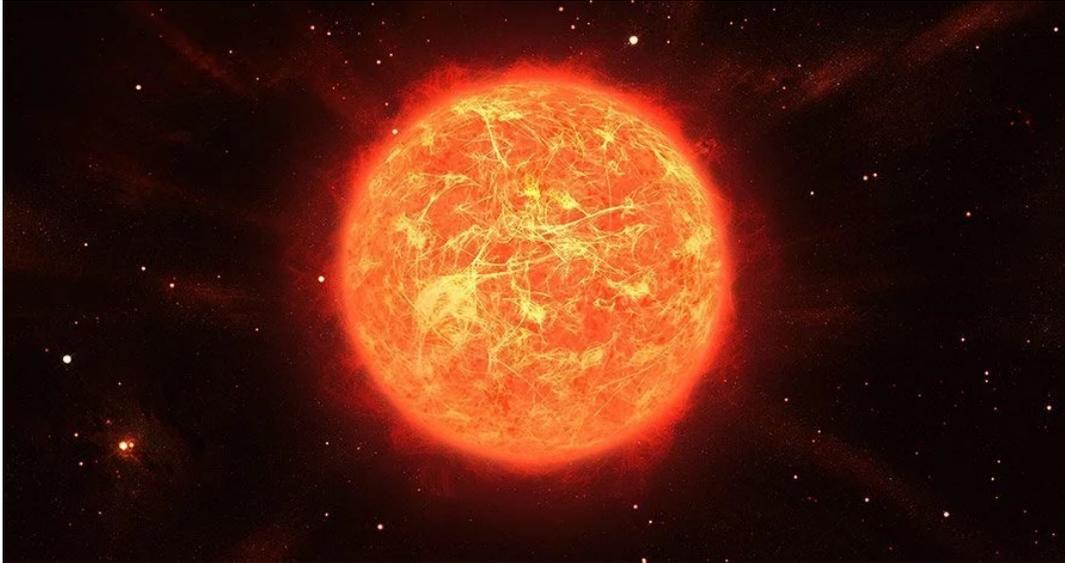
Beweis durch Strukturen im Universum

- Auf sehr sehr großen Skalen zeichnet sich in unserem Universum eine Struktur aus (= es ist nicht alles gleich verteilt).
- Ohne Gravitationspotentiale schon im frühen Universum unmöglich.
- Unsere heutigen sichtbaren Masse im Universum reicht dafür nicht aus.
 - ➔ Hinweis/**Beweis** für Existenz der **Dunklen Materie**.

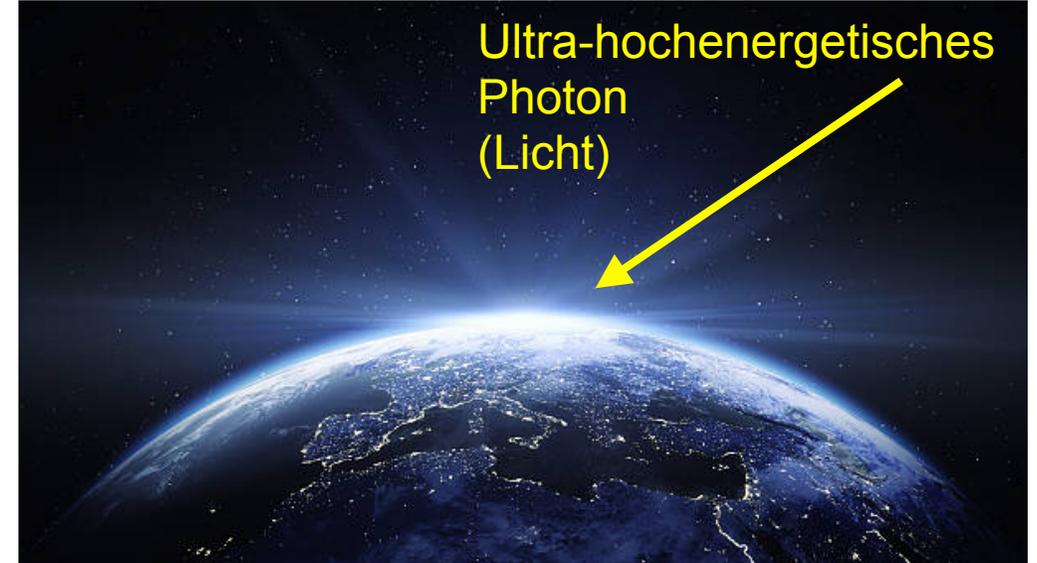


Die Akte: Dunkle Materie Teil V

Hinweis Sternenkühlung und intergalaktische Lichttransparenz



- Hinweise auf ungewöhnlich schnelles Abkühlen von bestimmten Sternen.



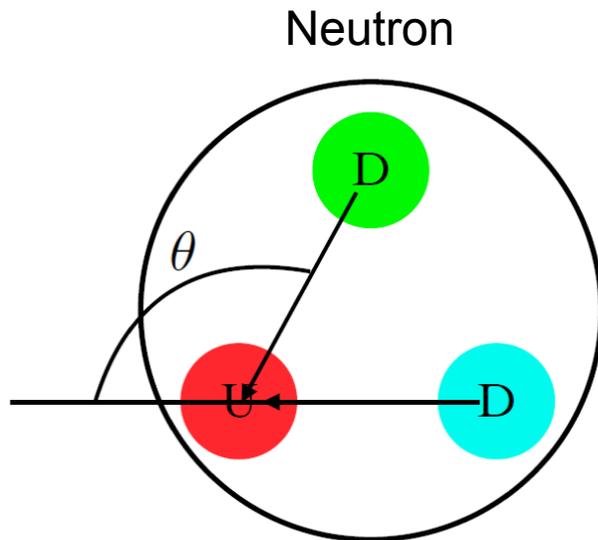
- Hinweise auf “TeV” Transparenz: Ultra-hochenergetische Lichtteilchen aus extragalaktischen Quellen erreichen Erde.

Die Akte: Dunkle Materie (eigentlich Axionen) Teil VI

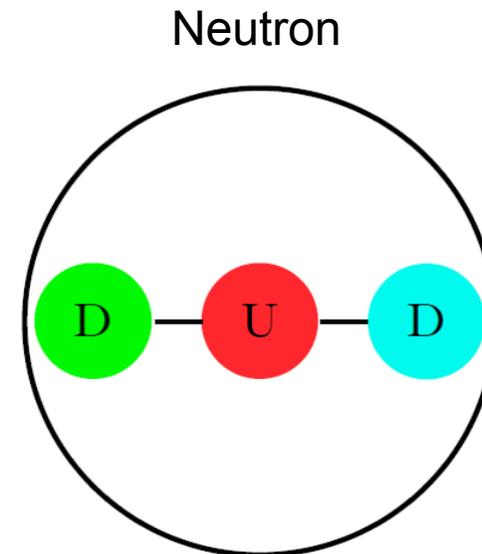
CP Konservierung in der starken Wechselwirkung

- In der starken Wechselwirkung (Atomkerne) wird eine perfekte Konservierung der Physik unter Ladungs- und Raumspeglung beobachtet (CP)
 - ➔ CP Verletzung im Standardmodell möglich, warum nicht beobachtet?

Oder einfacher:



Warum nicht so?



Warum so?

Die drei Quarks sind perfekt aufeinander ausgerichtet! Warum?

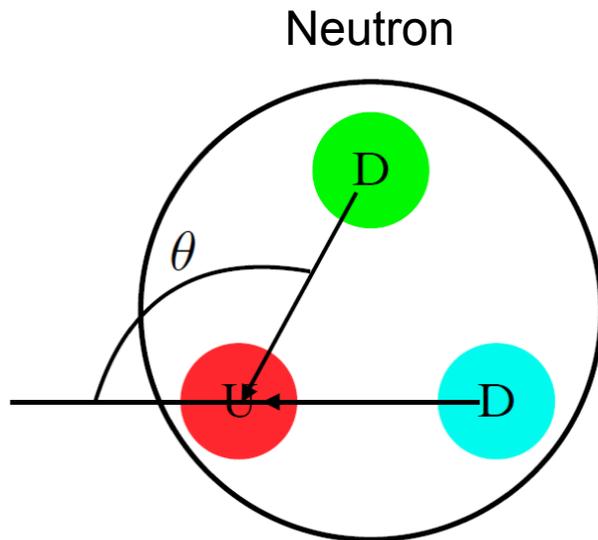
Die Akte: Dunkle Materie (eigentlich Axionen) Teil VI

CP Konservierung in der starken Wechselwirkung

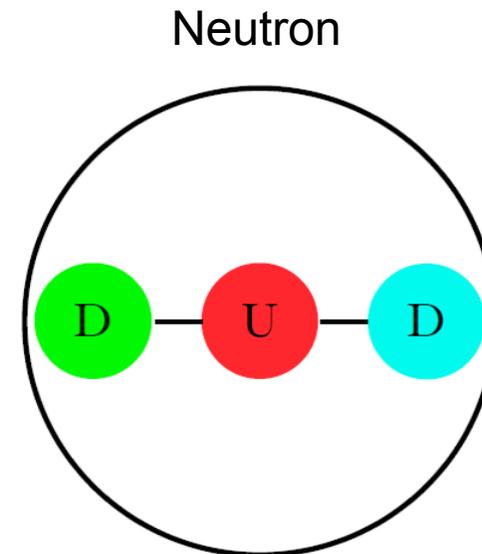
- In der starken Wechselwirkung (Atomkerne) wird eine perfekte Konservierung der Physik unter Ladungs- und Raumspeglung beobachtet (CP)
 - ➔ CP Verletzung im Standardmodell möglich, warum nicht beobachtet?

➔ **Wie können wir diesen Fragen auf den Grund gehen?**

Oder einfacher:



Warum nicht so?

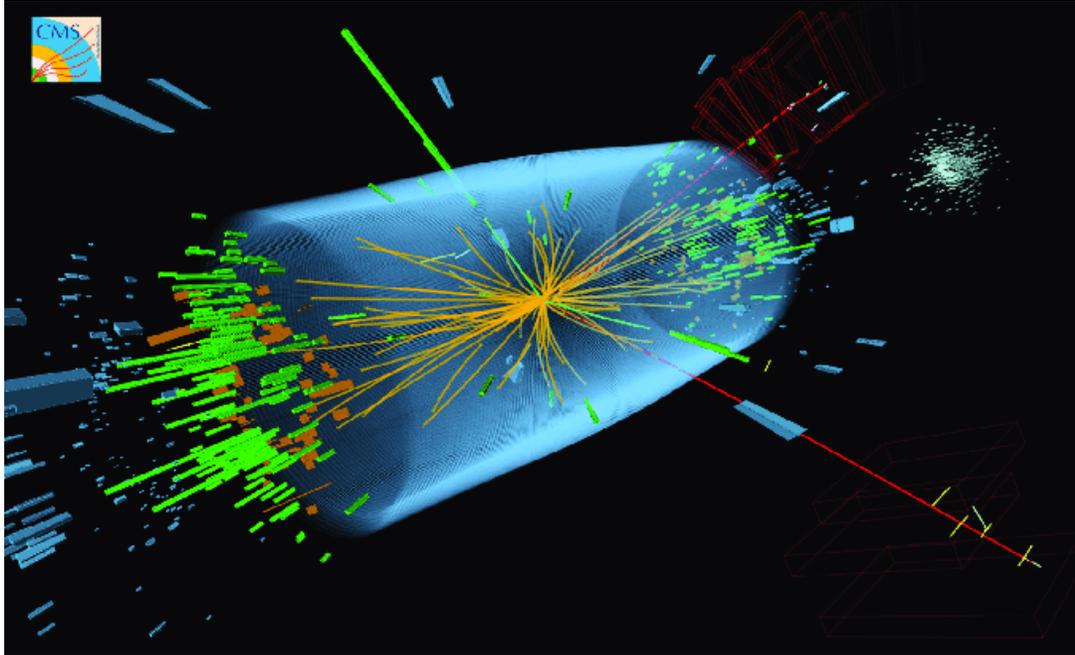


Warum so?

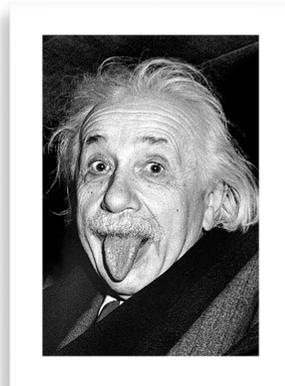
Die drei Quarks sind perfekt aufeinander ausgerichtet! Warum?

Ansatz 1: Beschleunigerexperimente

Fokus auf Beiträge von DESY @ Hamburg

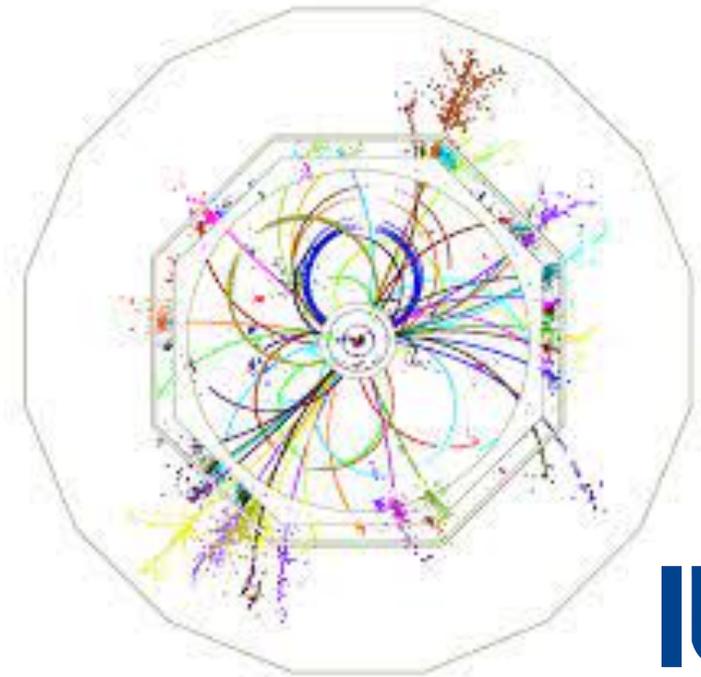
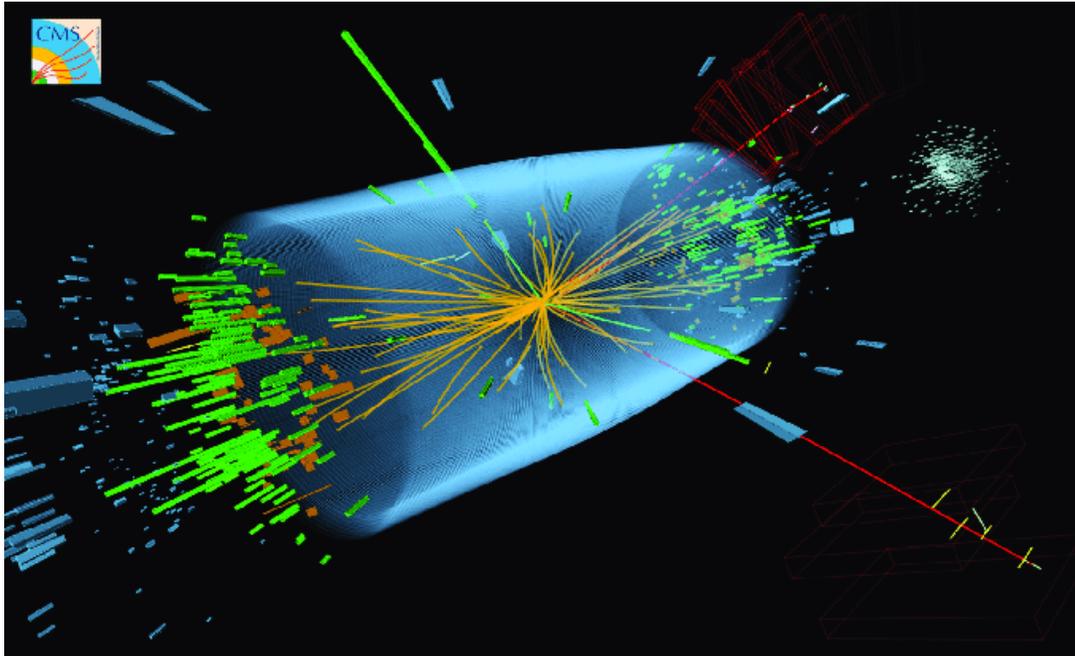


- Entweder hochenergetische Kollisionsexperimente zur direkten Erzeugung von neuen Teilchen
 ➔ $E = mc^2$



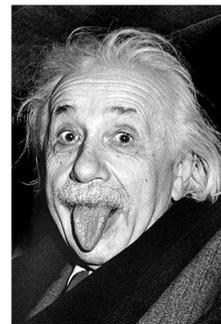
Ansatz 1: Beschleunigerexperimente

Fokus auf Beiträge von DESY @ Hamburg



- Entweder hochenergetische Kollisionsexperimente zur direkten Erzeugung von neuen Teilchen.

➔ $E = mc^2$

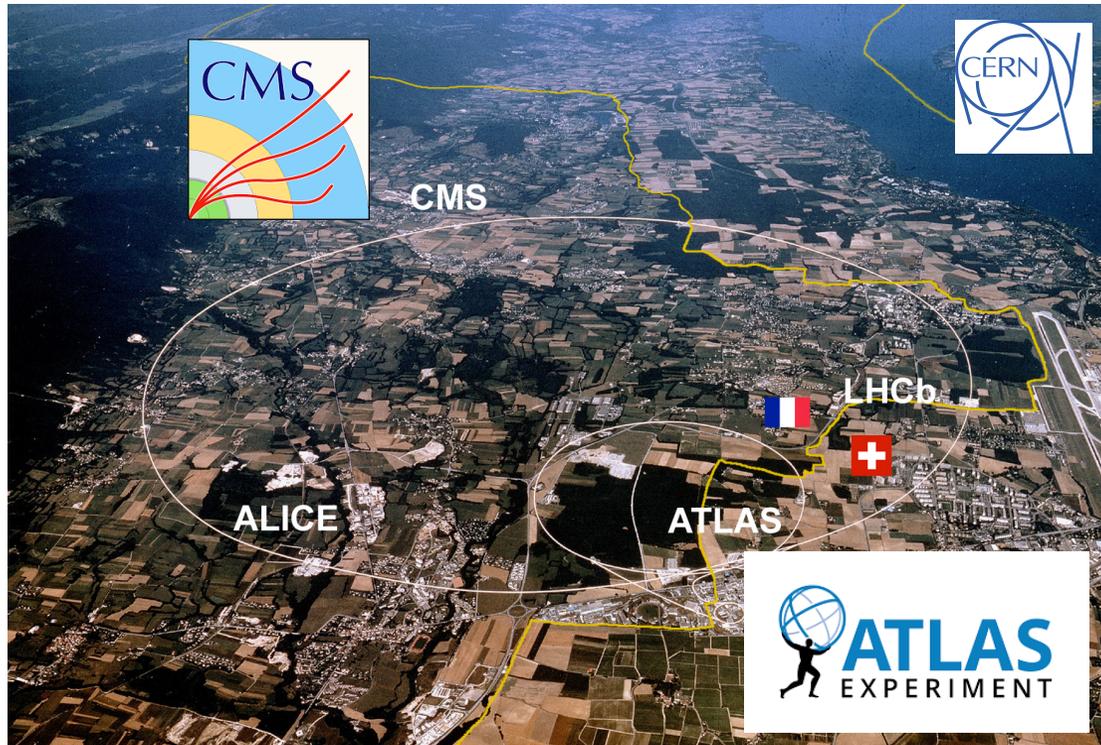


- Oder statistische Präzisionsmessungen in Kollisionsexperimenten zur genauen Vermessung der Größen des Standardmodells.

➔ Abweichung = Neue Physik

Ansatz 1: Beschleunigerexperimente

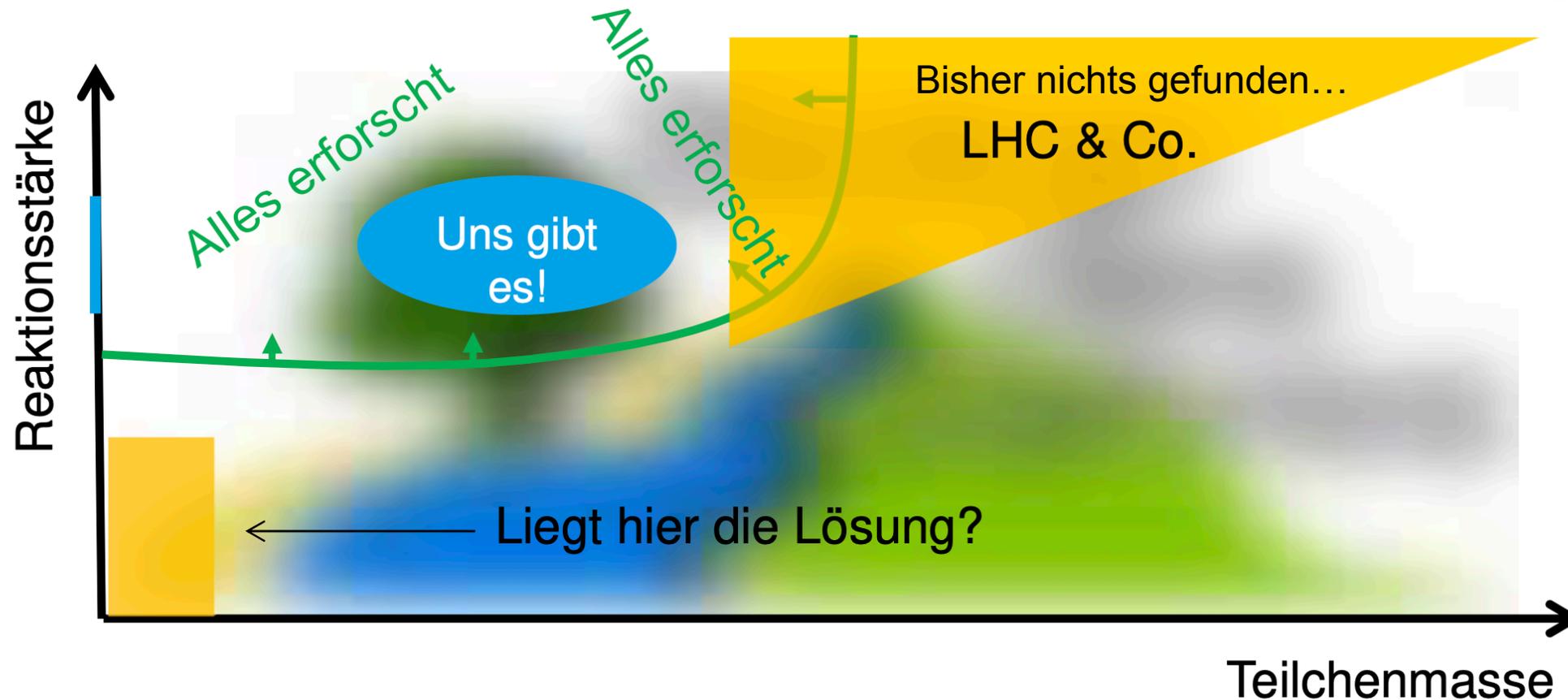
Fokus auf Beiträge von DESY @ Hamburg



- ATLAS & CMS @ CERN, Belle II @ Tsukuba (Japan), zukünftige Beschleunigerkonzepte und Experimente (ILC, CLIC, FCCee,...)

Ansatz 2: Hochpräzisions-Experimente

Der Stand der Dinge



- Minimal-wechselwirkende und sehr leichte neue Teilchen können an Beschleunigerexperimenten nicht gefunden werden!

Axion und Axion-like-Particles (ALPs)

Ein neues Teilchen könnte (fast) alles erklären!

- Axion: Theoretisches sehr gut-motiviertes Teilchen (Peccei&Quinn, 1977)
 - ➔ “Reinigt” die Theorie: Erklärung für CP-Konservierung in starker Wechselwirkung.
 - ➔ Dunkle Materie Kandidat.
 - ➔ Könnte TeV Transparenz und Sternenkühlung erklären.
 - ➔ ALPs werden durch viele Erweiterungen des Standardmodells generisch vorhergesagt, zB. String-Theorie.



Axion und Axion-like-Particles (ALPs)

Ein neues Teilchen könnte (fast) alles erklären!

- Axion: Theoretisches sehr gut-motiviertes Teilchen (Peccei&Quinn, 1977)
 - ➔ “Reinigt” die Theorie: Erklärung für CP-Konservierung in starker Wechselwirkung.
 - ➔ Dunkle Materie Kandidat.
 - ➔ Könnte TeV Transparenz und Sternenkühlung erklären.
 - ➔ ALPs werden durch viele Erweiterungen des Standardmodells generisch vorhergesagt, zB. String-Theorie.
- Eigenschaften von Axionen/ALPs:
 - ➔ Sehr sehr kleine Masse
 - ➔ Keine elektrische Ladung
 - ➔ Minimale Wechselwirkung mit normaler Materie, **schwer messbar!**
 - ➔ **Geringe Wechselwirkung mit Photonen (Licht)**



Wie suchen wir nach Axionen?

Grundprinzip: Wechselwirkung mit Licht



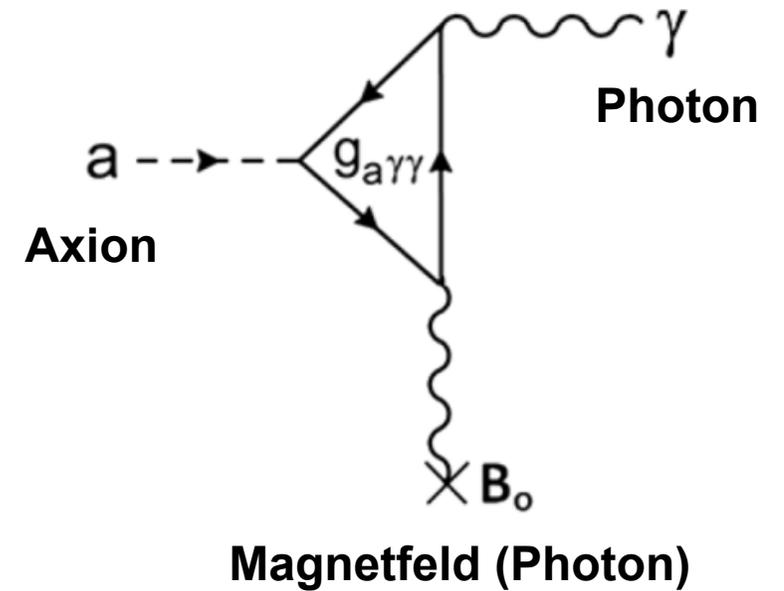
Physikalisch: 

Wie suchen wir nach Axionen?

Grundprinzip: Wechselwirkung mit Licht



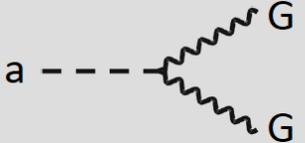
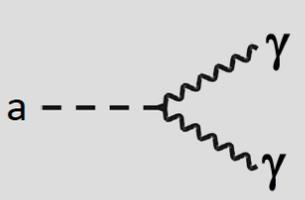
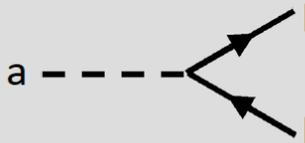
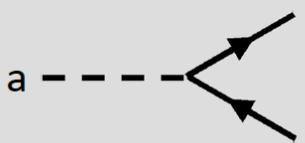
Physikalisch: 



- Sikivie Effekt: Axion + starkes Magnetfeld = Lichtteilchen (Photon).
 - ➔ Photonen sind im Prinzip leicht messbar!
 - ➔ Grundlage für die meisten Axion Experiment.

Axions

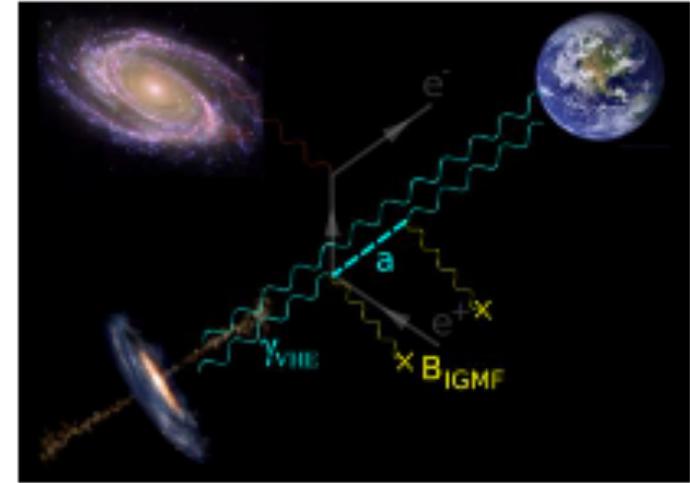
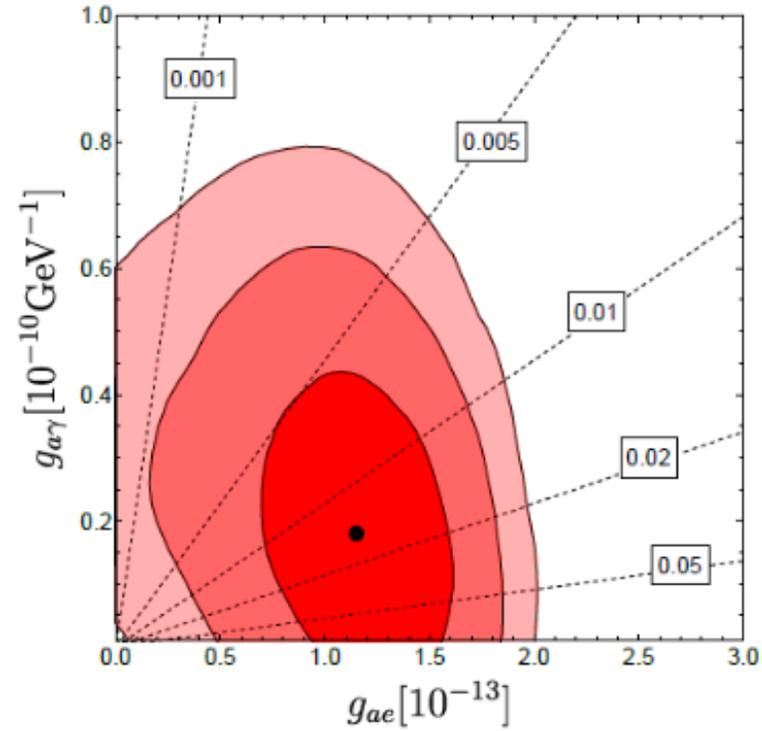
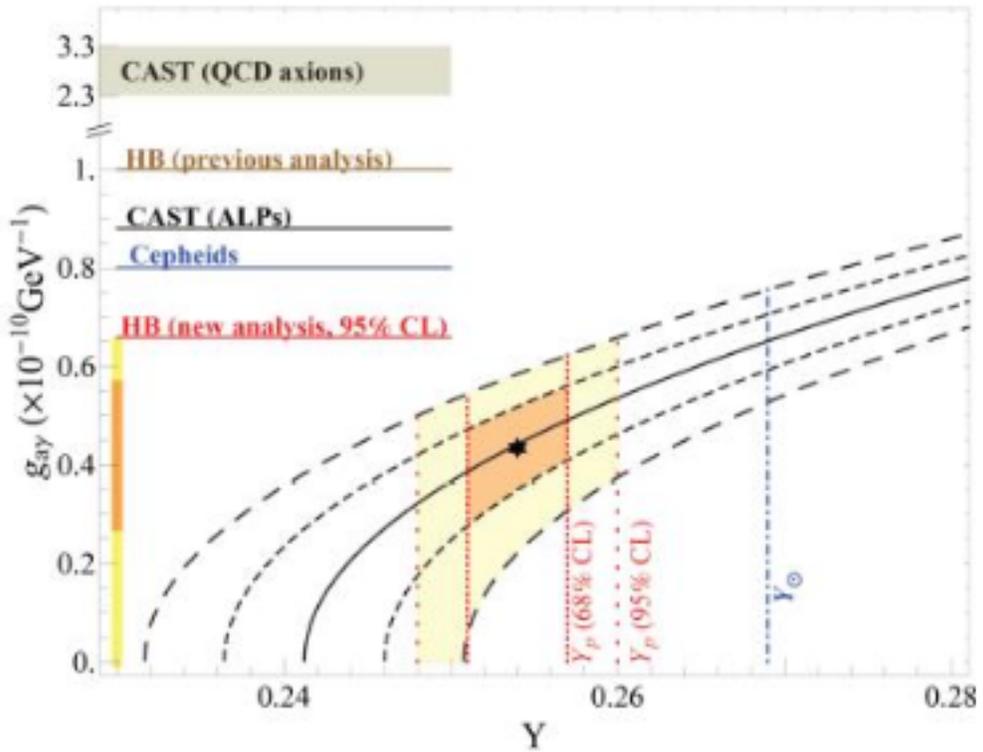
SM Couplings

Gluon coupling (generic)	$\mathcal{L}_{aG} = \frac{\alpha_s}{8\pi f_a} G\tilde{G}a$	
Mass (generic)	$m_a = \frac{\sqrt{m_u m_d}}{m_u + m_d} \frac{m_\pi}{f_\pi f_a} \approx \frac{6 \mu\text{eV}}{f_a / 10^{12} \text{ GeV}}$	
Photon coupling	$\mathcal{L}_{a\gamma} = -\frac{g_{a\gamma}}{4} F\tilde{F}a = g_{a\gamma} \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} a$ $g_{a\gamma} = \frac{\alpha}{2\pi f_a} \left(\frac{E}{N} - 1.92 \right)$	
Pion coupling	$\mathcal{L}_{a\pi} = \frac{C_{a\pi}}{f_\pi f_a} (\pi^0 \pi^+ \partial_\mu \pi^- + \dots) \partial^\mu a$	
Nucleon coupling (axial vector)	$\mathcal{L}_{aN} = \frac{C_N}{2f_a} \bar{\Psi}_N \gamma^\mu \gamma_5 \Psi_N \partial_\mu a$	
Electron coupling (optional)	$\mathcal{L}_{ae} = \frac{C_e}{2f_a} \bar{\Psi}_e \gamma^\mu \gamma_5 \Psi_e \partial_\mu a$	

A. Mirizzi, Next Frontiers in the Search for Dark Matter, 2019

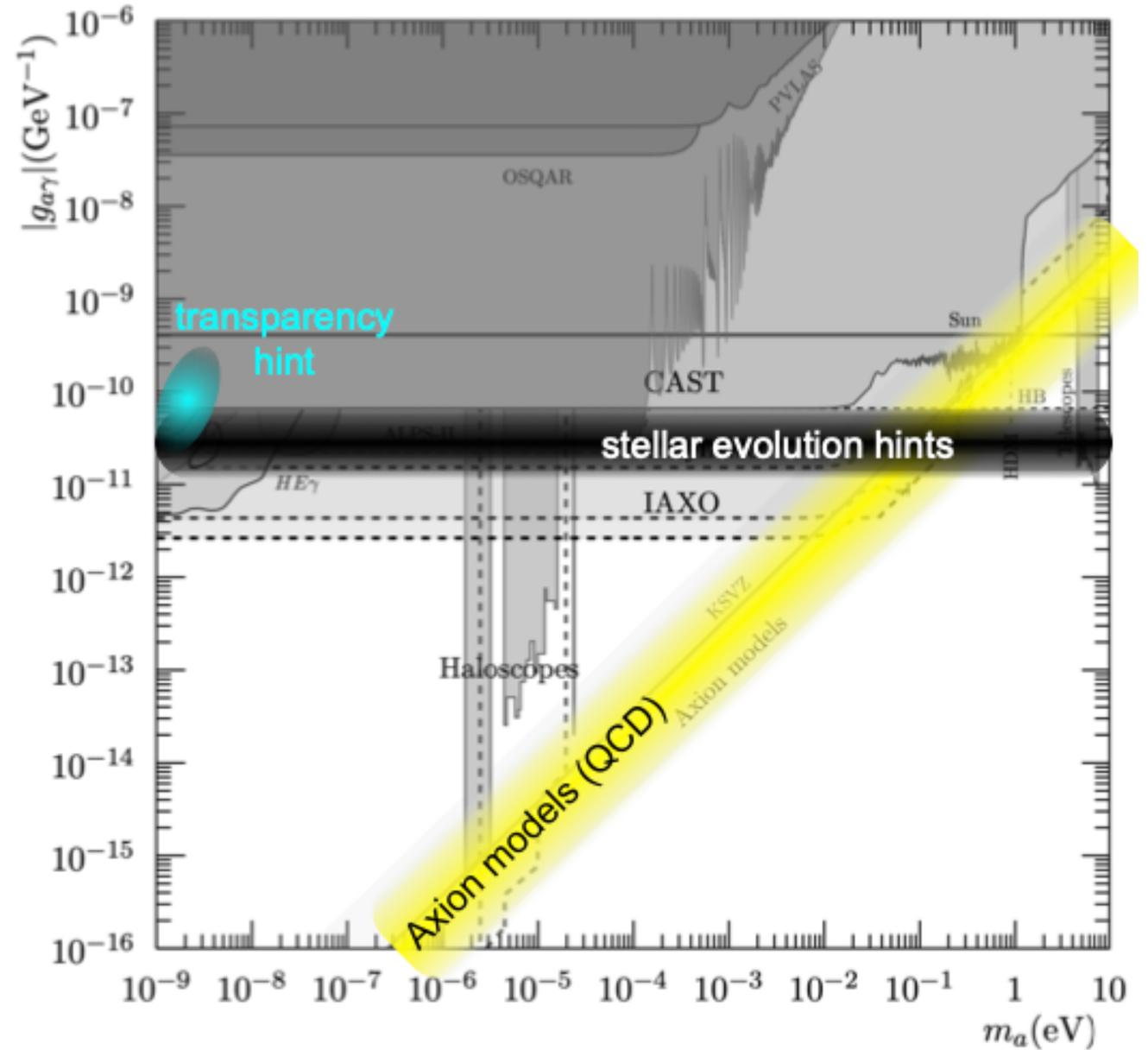
Axions

Astrophysical Hints



Axions: Where to look

Interessante Regionen



Axions

Sensitivity Projections

