

# Die Dunkle Seite des Universums

Marc Schumann      *AEC, Universität Bern*

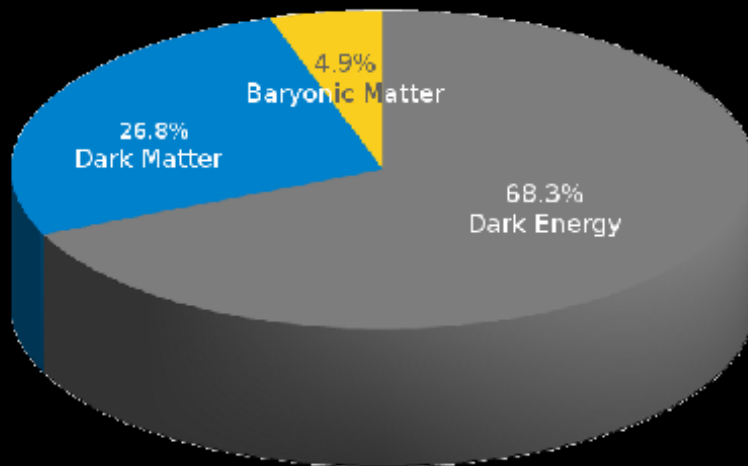
Physik am Freitag, Bern, 16. Januar 2015

[marc.schumann@lhep.unibe.ch](mailto:marc.schumann@lhep.unibe.ch)  
[www.lhep.unibe.ch/darkmatter](http://www.lhep.unibe.ch/darkmatter)

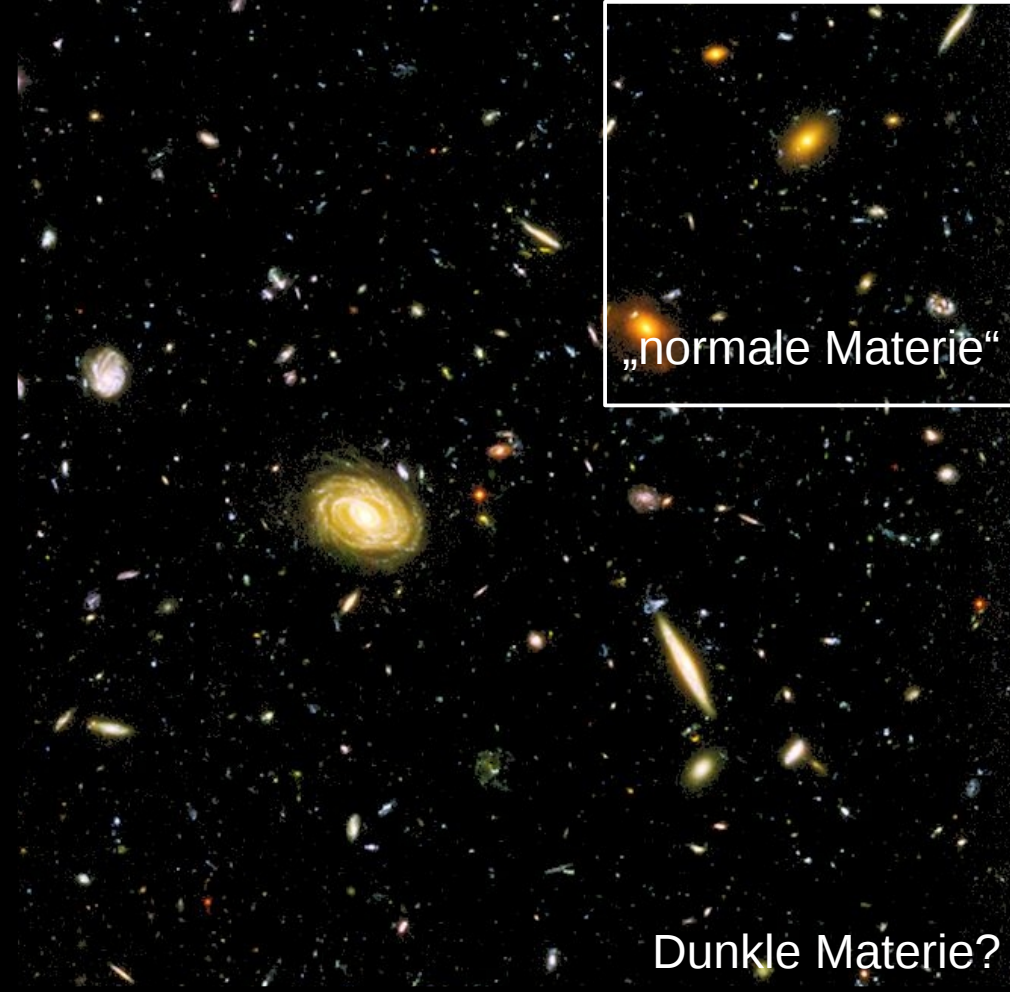
**u<sup>b</sup>**

b  
**UNIVERSITÄT  
BERN**

**AEC**  
ALBERT EINSTEIN CENTER  
FOR FUNDAMENTAL PHYSICS



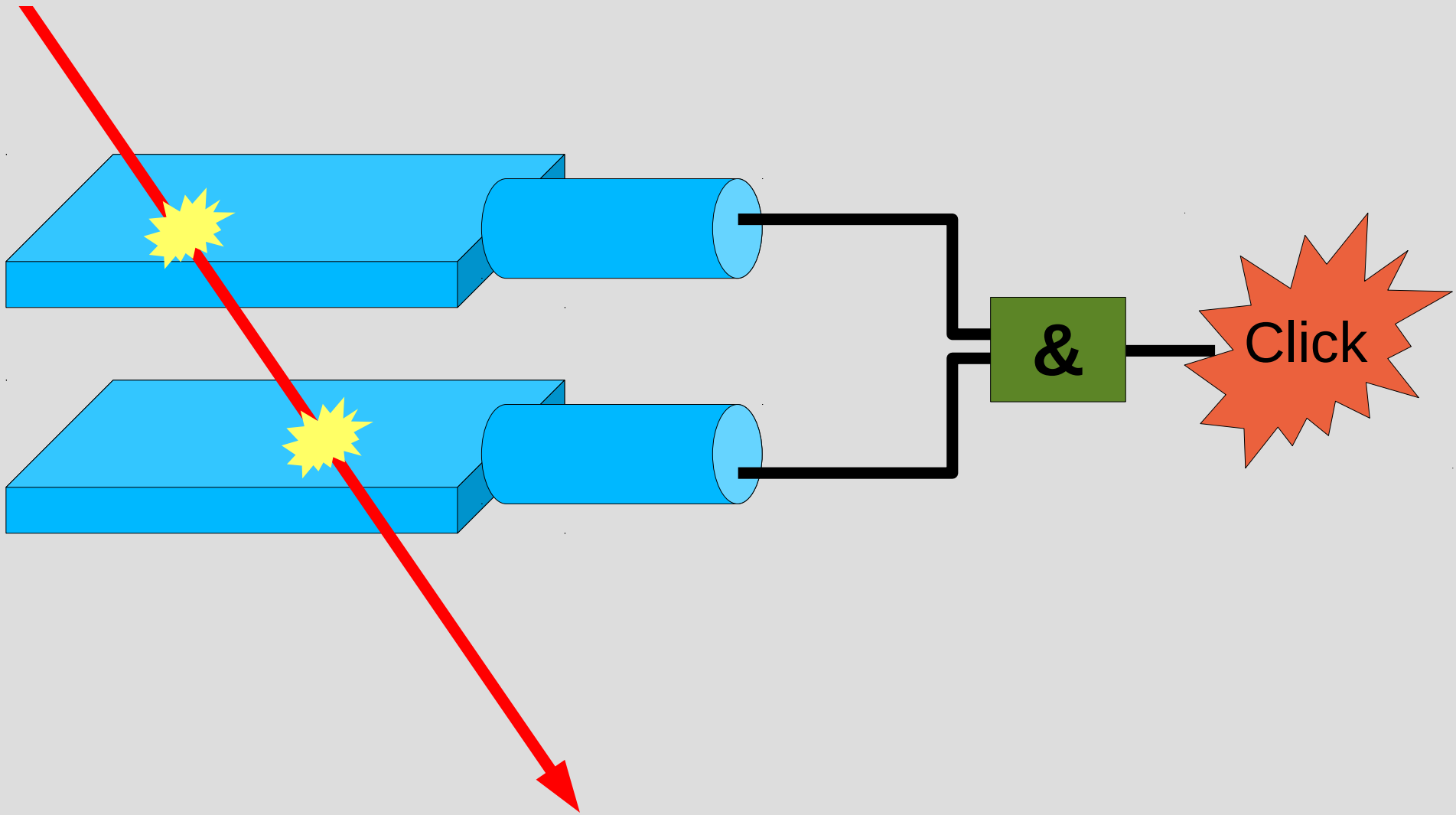
**95% des  
Universums  
ist dunkel**



Dunkle Energie????



**pro Sekunde treffen etwa  
100'000 Teilchen der Dunklen  
Materie auf eine Fläche von 1 cm<sup>2</sup>**

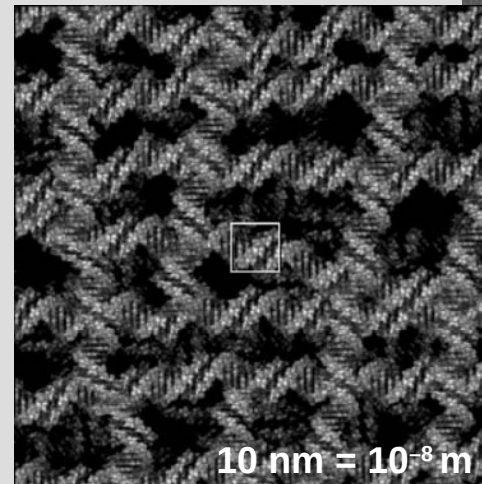
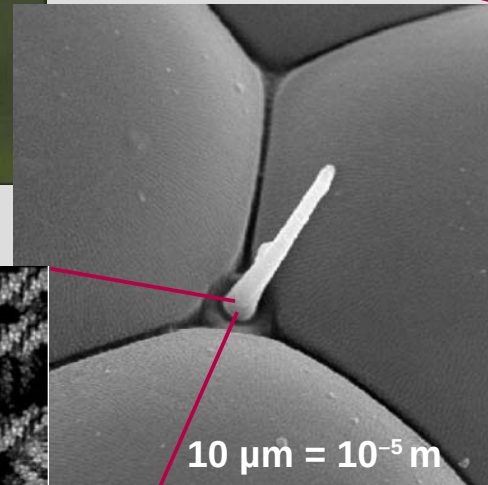
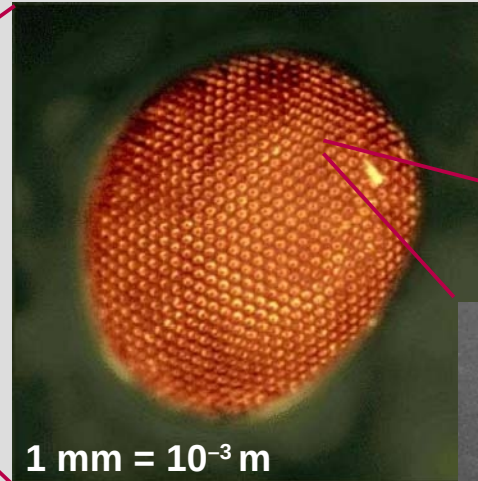
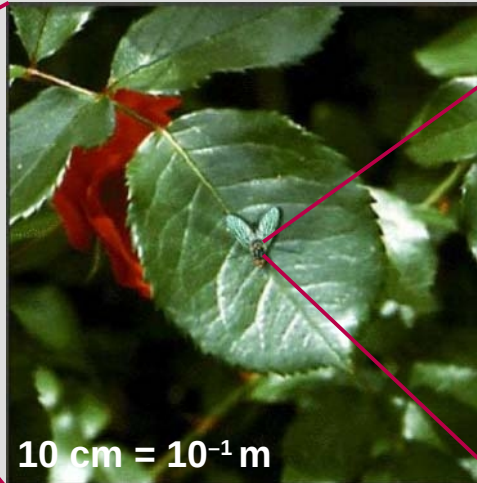
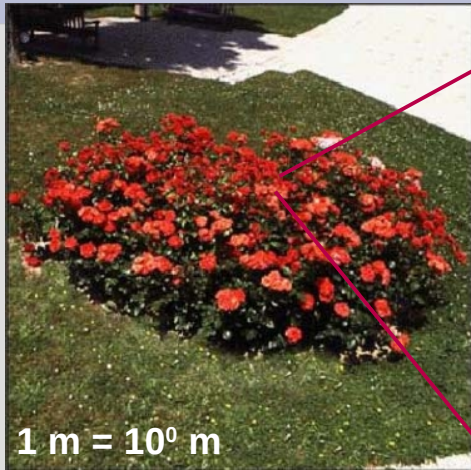




## Was ist (Dunkle) Materie?

- Woher wissen wir, dass es Dunkle Materie gibt?
- Wie suchen wir nach Dunkler Materie?

# „Normale“ Materie



# Chemie

**Periodensystem der Elemente**

Alkalimetalle
Erdalkalimetalle
Halogene
Edelgase
Übergangsmetalle

Metalle
Halbmetalle
Nichtmetalle
Lanthanoide
Actinoide

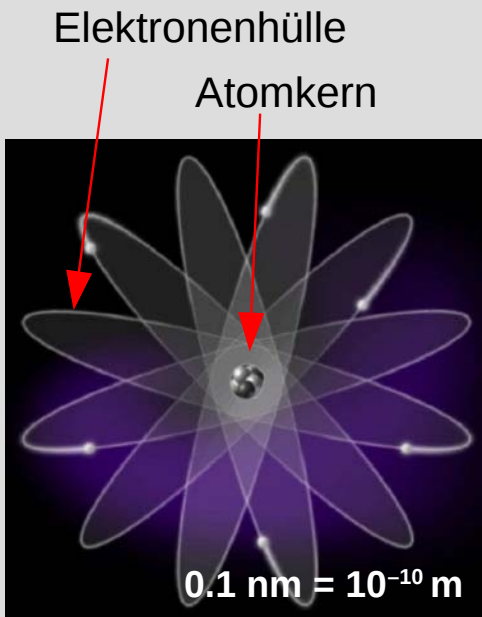
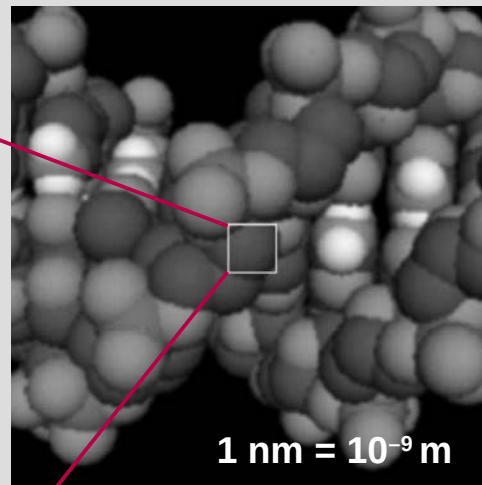
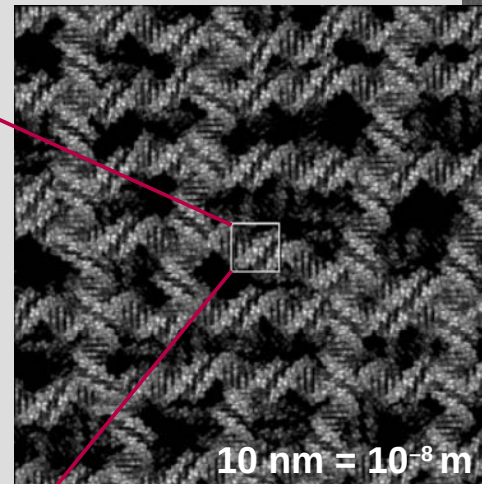
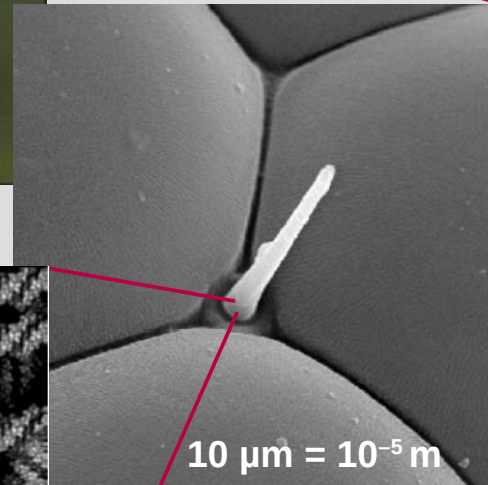
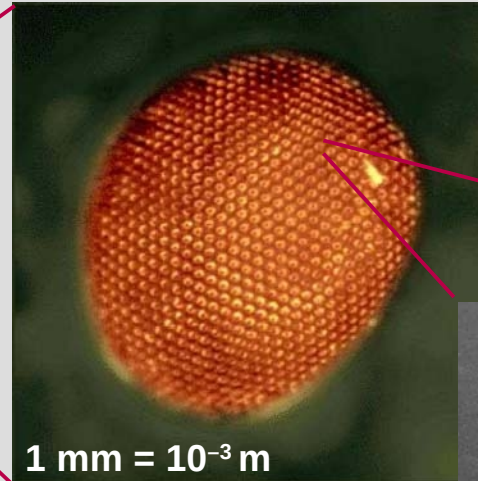
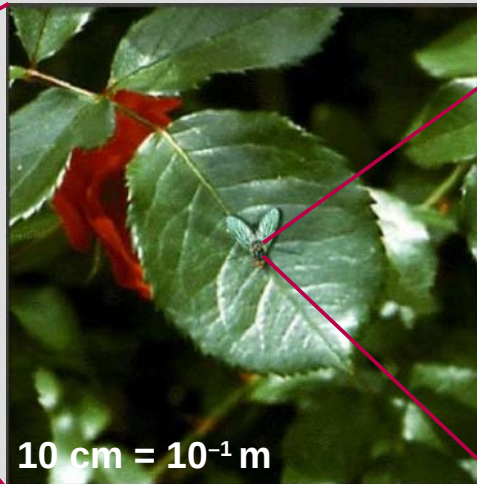
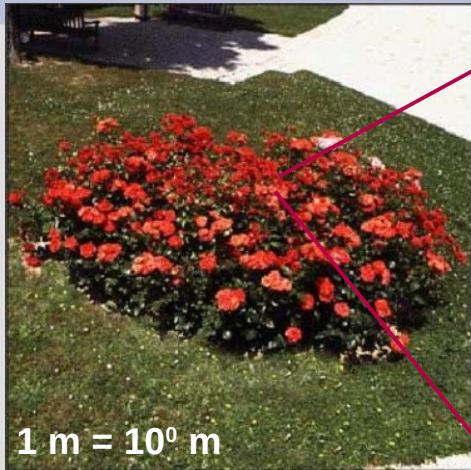
1	IA											IIA											IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	
	1,0079																												4,0026
1	2,2 <b>H</b> Wasserstoff																												<b>He</b> Helium
2	0,98 <b>Li</b> Lithium	4 9,0122 <b>Be</b> Beryllium																						5 10,811 <b>B</b> Bor	6 12,011 <b>C</b> Kohlenstoff	7 14,007 <b>N</b> Stickstoff	8 15,999 <b>O</b> Sauerstoff	9 18,998 <b>F</b> Fluor	10 20,180 <b>Ne</b> Neon
3	0,93 <b>Na</b> Natrium	12 24,305 <b>Mg</b> Magnesium																						13 26,982 <b>Al</b> Aluminium	14 28,086 <b>Si</b> Silicium	15 30,974 <b>P</b> Phosphor	16 32,065 <b>S</b> Schwefel	17 35,453 <b>Cl</b> Chlor	18 39,948 <b>Ar</b> Argon
			IIIB		IVB		VB		VIB		VIIB		VIII B				IB		IIB										
4	0,82 <b>K</b> Kalium	20 40,078 <b>Ca</b> Calcium	21 44,956 <b>Sc</b> Scandium	22 47,867 <b>Ti</b> Titan	23 50,942 <b>V</b> Vanadium	24 51,996 <b>Cr</b> Chrom	25 54,938 <b>Mn</b> Mangan	26 55,845 <b>Fe</b> Eisen	27 58,933 <b>Co</b> Cobalt	28 58,693 <b>Ni</b> Nickel	29 63,546 <b>Cu</b> Kupfer	30 65,39 <b>Zn</b> Zink	31 69,723 <b>Ga</b> Gallium	32 72,64 <b>Ge</b> Germanium	33 74,922 <b>As</b> Arsen	34 78,96 <b>Se</b> Selen	35 79,904 <b>Br</b> Brom	36 83,80 <b>Kr</b> Krypton											
5	0,82 <b>Rb</b> Rubidium	0,95 <b>Sr</b> Strontium	1,22 <b>Y</b> Yttrium	1,33 <b>Zr</b> Zirkonium	1,6 <b>Nb</b> Niob	2,2 <b>Mo</b> Molybdän	1,9 <b>Tc</b> Technetium	2,2 <b>Ru</b> Ruthenium	2,28 <b>Rh</b> Rhodium	2,2 <b>Pd</b> Palladium	1,93 <b>Ag</b> Silber	1,69 <b>Cd</b> Cadmium	1,78 <b>In</b> Indium	1,96 <b>Sn</b> Zinn	2,05 <b>Sb</b> Antimon	2,1 <b>Te</b> Tellur	2,66 <b>I</b> Iod	2,6 <b>Xe</b> Xenon											
6	0,79 <b>Cs</b> Cäsium	0,89 <b>Ba</b> Barium	*	1,3 <b>Hf</b> Hafnium	1,5 <b>Ta</b> Tantal	1,7 <b>W</b> Wolfram	1,9 <b>Re</b> Rhenium	2,2 <b>Os</b> Osmium	2,2 <b>Ir</b> Iridium	2,2 <b>Pt</b> Platin	2,4 <b>Au</b> Gold	1,9 <b>Hg</b> Quecksilber	1,8 <b>Tl</b> Thallium	1,8 <b>Pb</b> Blei	1,9 <b>Bi</b> Bismut	2 <b>Po</b> Polonium	2,2 <b>At</b> Astat	<b>Rn</b> Radon											
7	0,7 <b>Fr</b> Francium	0,9 <b>Ra</b> Radium	**	104 (267) <b>Rf</b> Rutherfordium	105 (268) <b>Db</b> Dubnium	106 (271) <b>Sg</b> Seaborgium	107 (270) <b>Bh</b> Bohrium	108 (277) <b>Hs</b> Hassium	109 (276) <b>Mt</b> Meitnerium	110 (281) <b>Ds</b> Darmstadtium	111 (280) <b>Rg</b> Roentgenium	112 (285) <b>Cn</b> Copernicium	113 (287) <b>Uut</b> Ununtrium	114 (289) <b>Uuq</b> Ununquadium	115 (288) <b>Uup</b> Ununpentium	116 (289) <b>Uuh</b> Ununhexium	117 (291) <b>Uus</b> Ununseptium	118 (293) <b>Uuo</b> Ununoctium											
	* Lanthanoide																												
	57 138,91 1,1 <b>La</b> Lanthan	58 140,12 1,12 <b>Ce</b> Cer	59 140,91 1,13 <b>Pr</b> Praseodym	60 144,24 1,14 <b>Nd</b> Neodym	61 (145) 1,13 <b>Pm</b> Promethium	62 150,36 1,17 <b>Sm</b> Samarium	63 151,86 1,2 <b>Eu</b> Europium	64 157,25 1,2 <b>Gd</b> Gadolinium	65 158,93 1,1 <b>Tb</b> Terbium	66 162,50 1,22 <b>Dy</b> Dysprosium	67 164,93 1,23 <b>Ho</b> Holmium	68 167,26 1,24 <b>Er</b> Erbium	69 168,93 1,25 <b>Tm</b> Thulium	70 173,04 1,1 <b>Yb</b> Ytterbium	71 174,97 1,27 <b>Lu</b> Lutetium														
	** Actinoide																												
	89 (227) 1,1 <b>Ac</b> Actinium	90 232,04 1,3 <b>Th</b> Thorium	91 231,04 1,5 <b>Pa</b> Protactinium	92 238,03 1,7 <b>U</b> Uran	93 (237) 1,3 <b>Np</b> Neptunium	94 (244) 1,28 <b>Pu</b> Plutonium	95 (243) 1,1 <b>Am</b> Americium	96 (247) 1,3 <b>Cm</b> Curium	97 (247) 1,13 <b>Bk</b> Berkelium	98 (251) 1,3 <b>Cf</b> Californium	99 (252) 1,3 <b>Es</b> Einsteinium	100 (257) 1,3 <b>Fm</b> Fermium	101 (258) 1,3 <b>Md</b> Mendelevium	102 (259) 1,6 <b>No</b> Nobelium	103 (262) 1,3 <b>Lr</b> Lawrencium														

Ordnungszahl → 39 88,906 ← Atommasse in u

Elektronegativität → 1,22 ← Symbol

Elementname → Yttrium

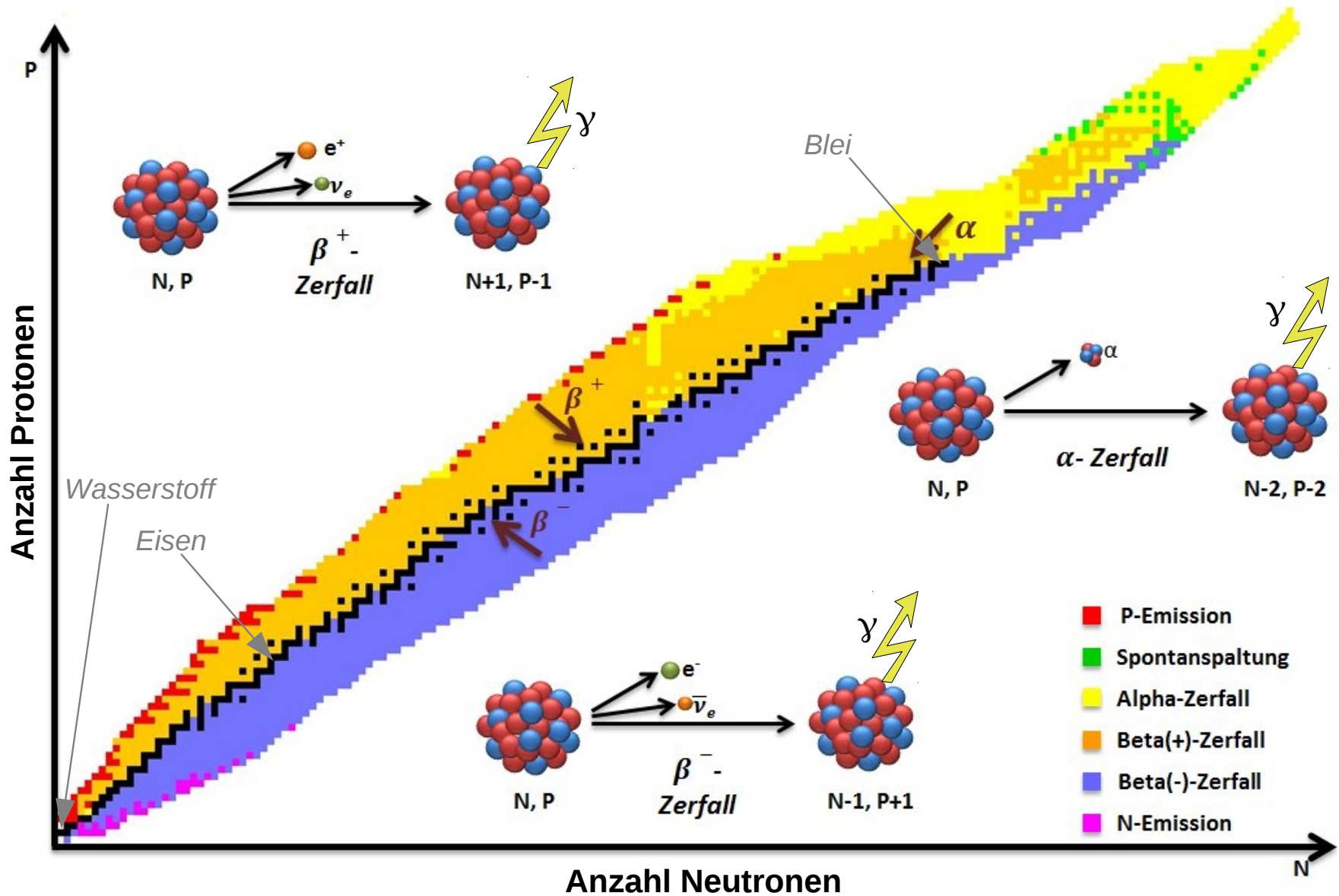
# „Normale“ Materie



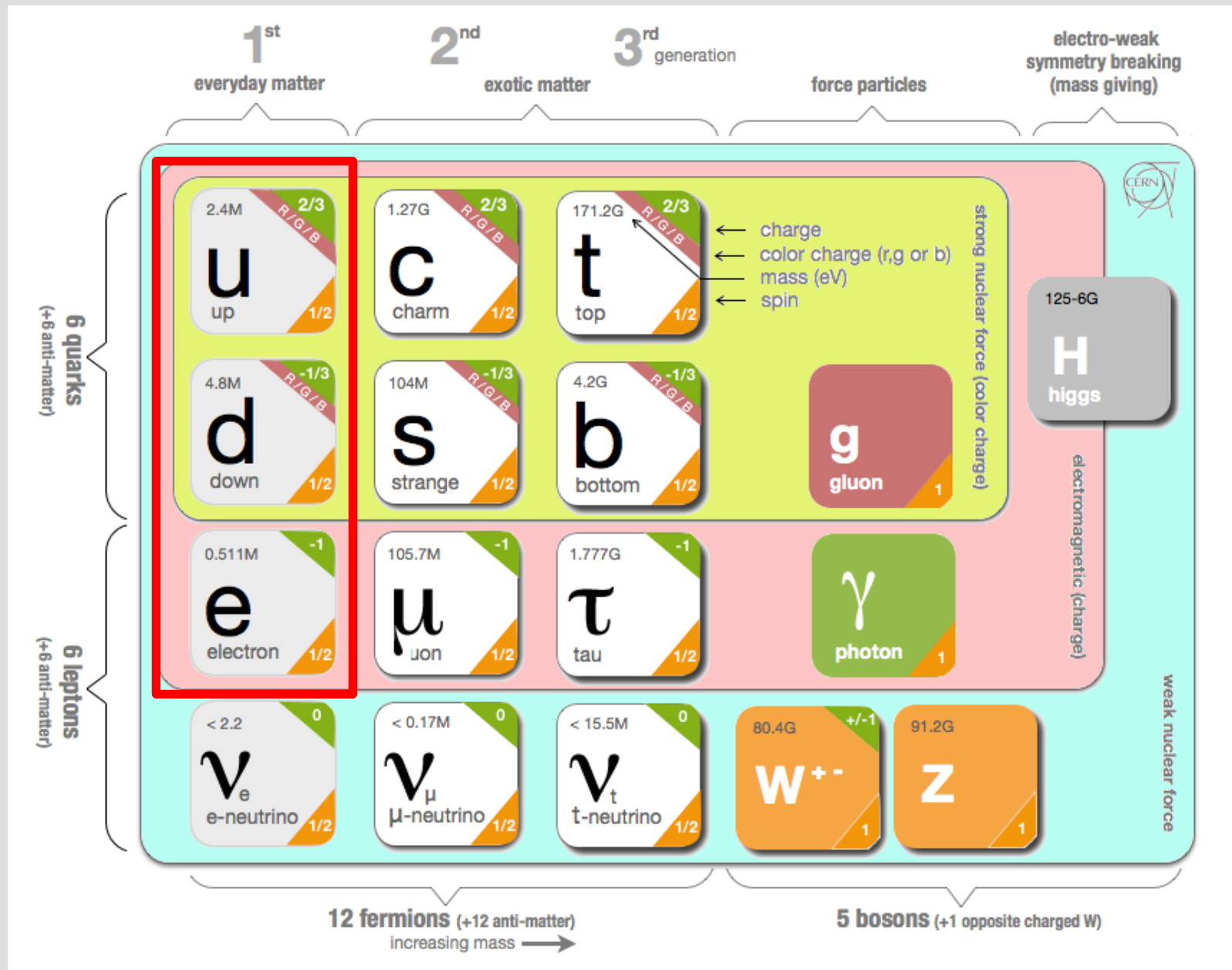


# Kernphysik und Radioaktivität

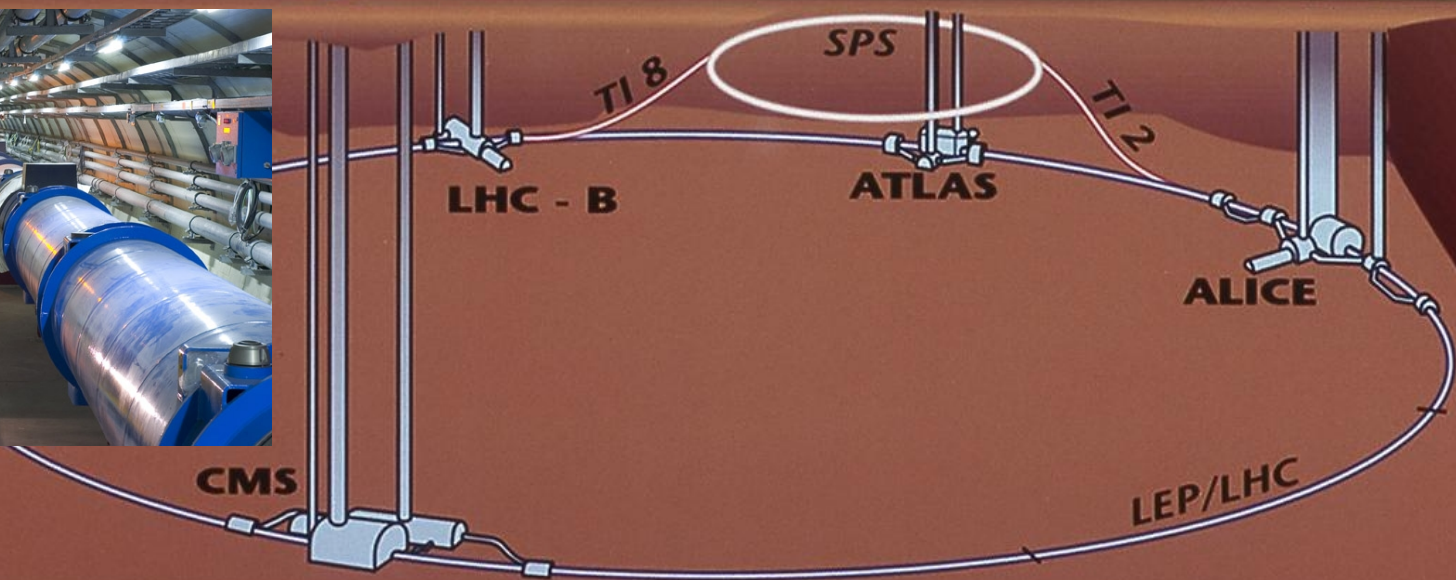
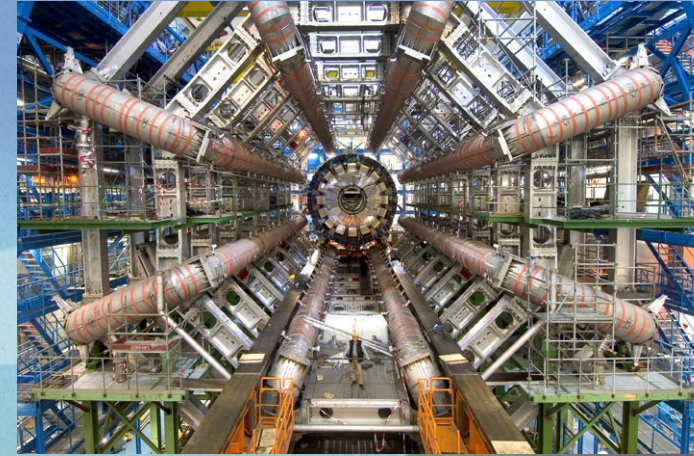
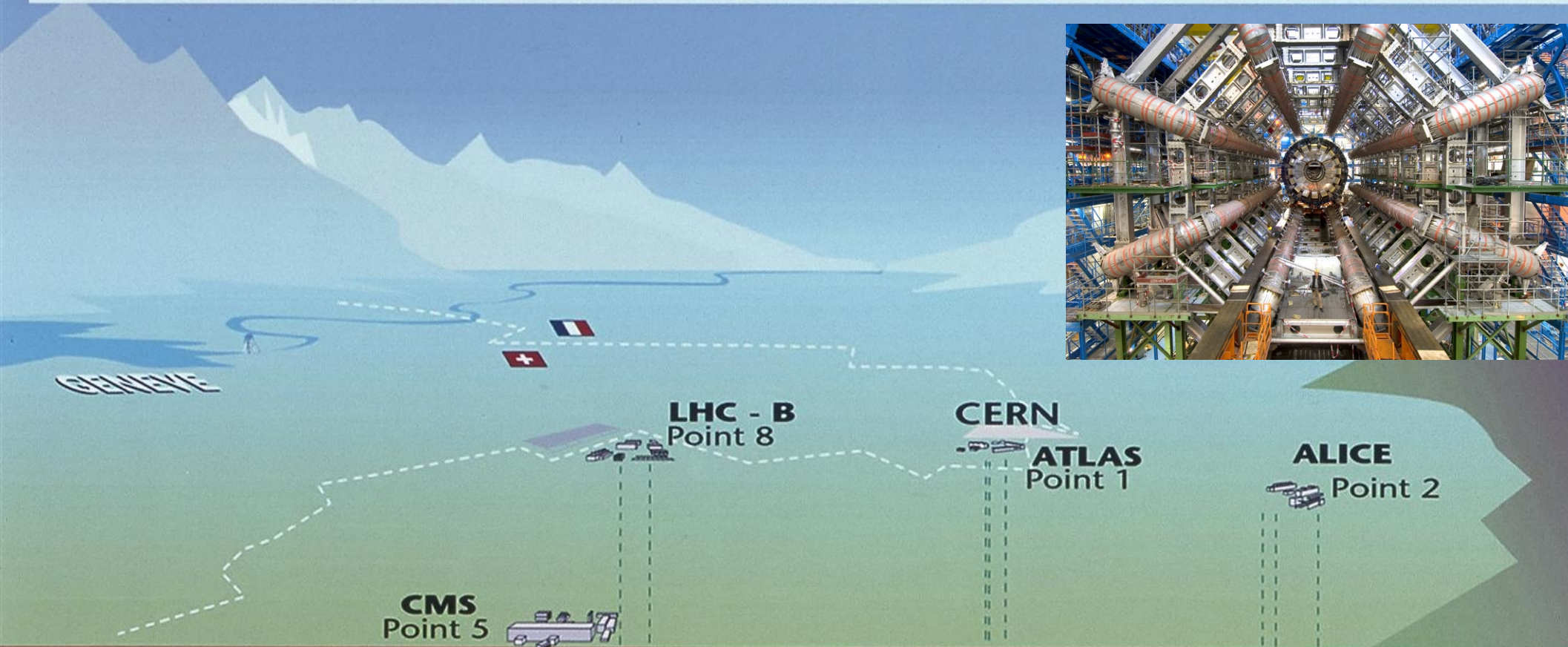
Die Nuklidkarte

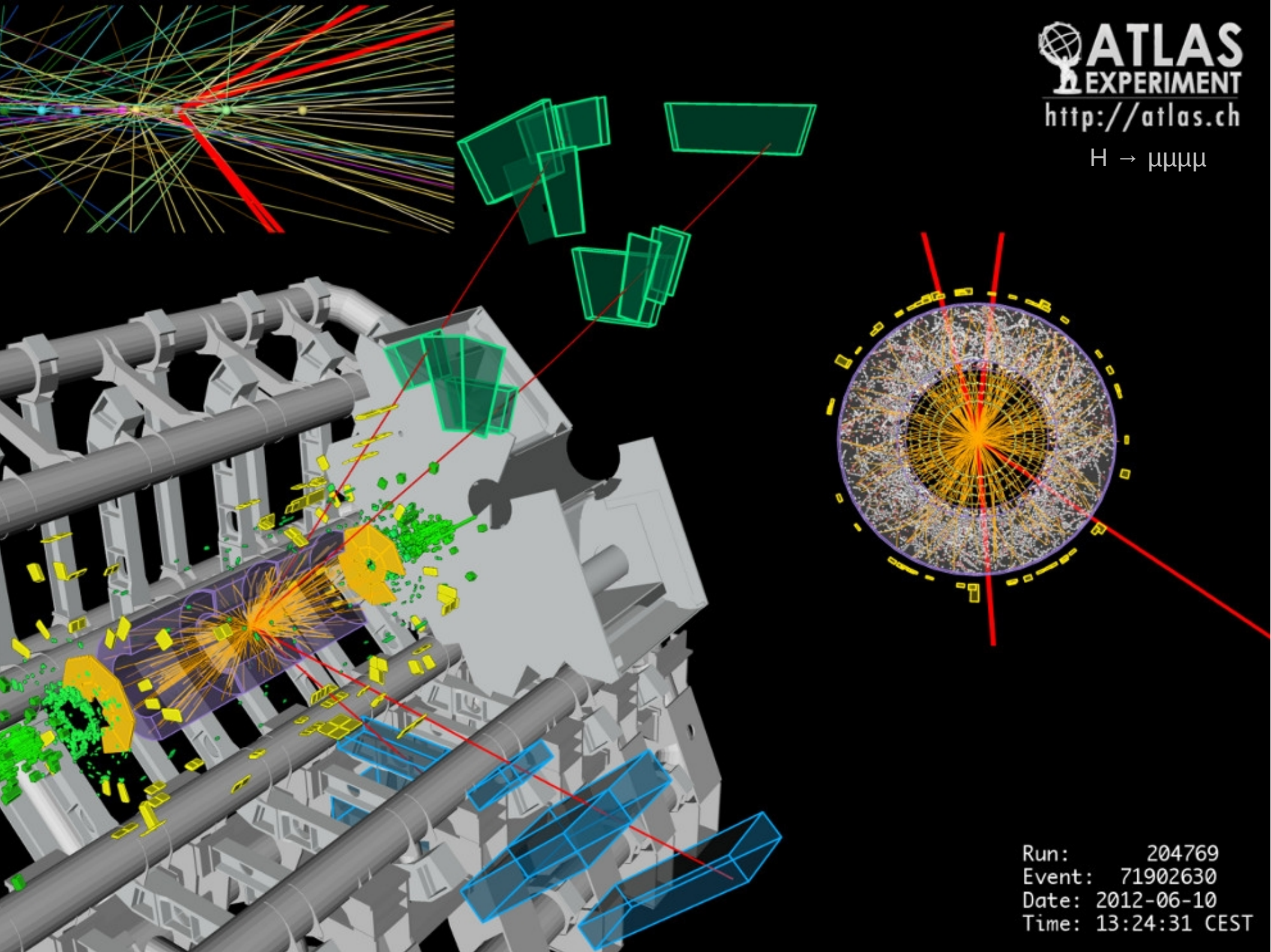


# Teilchenphysik



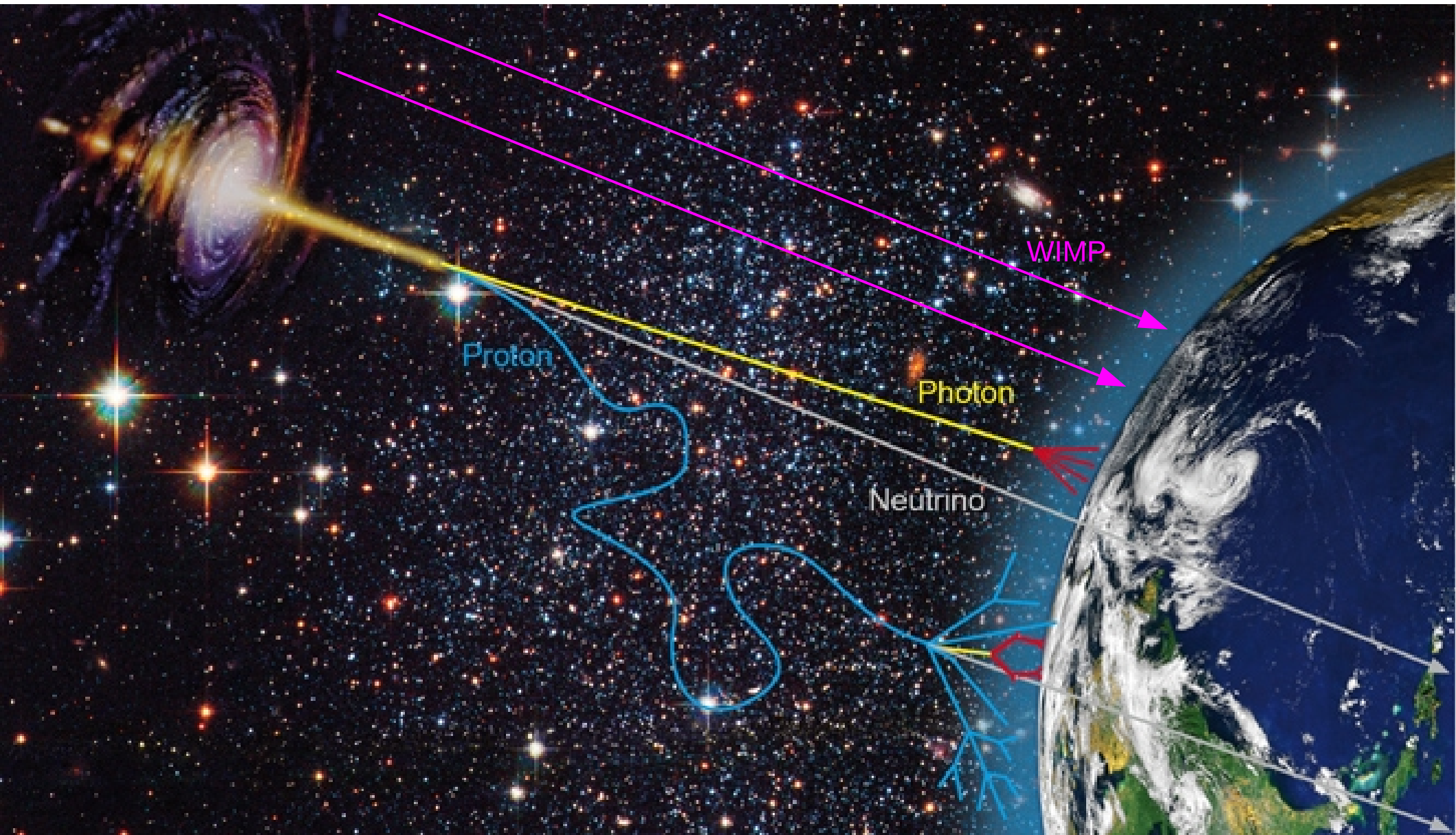
# Overall view of the LHC experiments.





Run: 204769  
Event: 71902630  
Date: 2012-06-10  
Time: 13:24:31 CEST

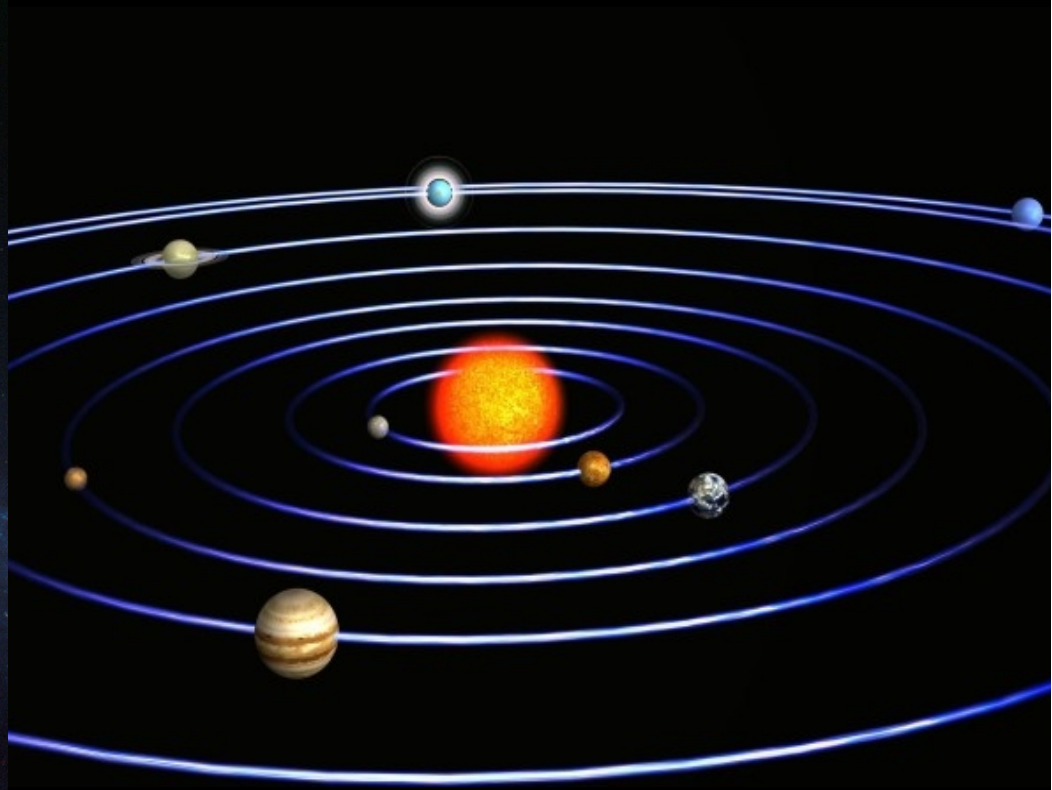
# Astroteilchenphysik



A blurred, green-tinted photograph of a busy tunnel or underground facility. Several workers wearing hard hats and safety gear are visible, some in the foreground and others further back. The scene is illuminated by overhead fluorescent lights, creating a sense of motion and activity. The overall atmosphere is industrial and somewhat mysterious.

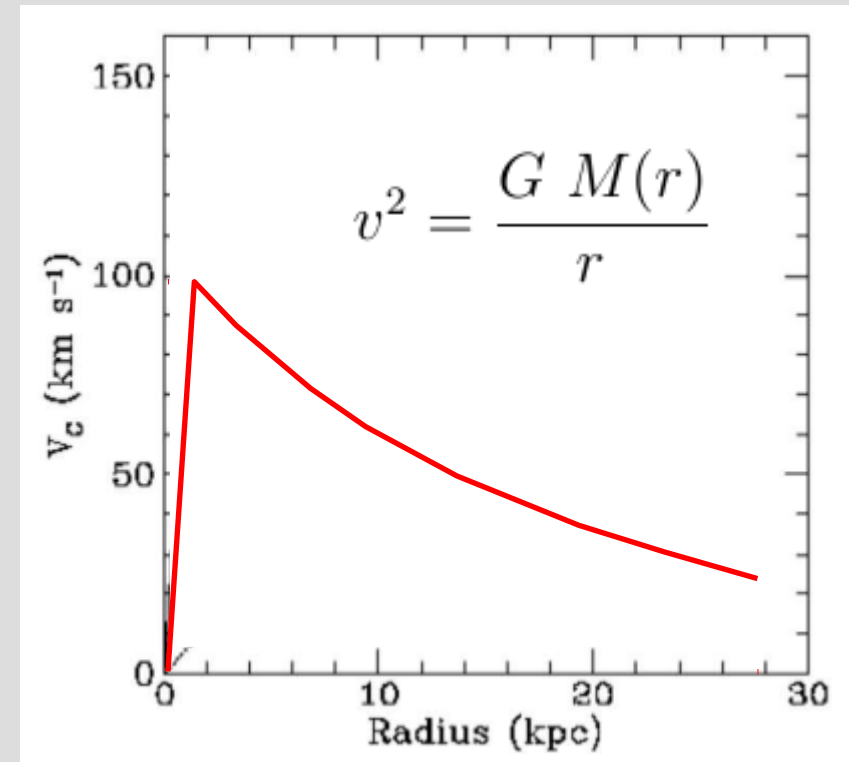
**Was ist (Dunkle) Materie?**

- **Woher wissen wir, dass es Dunkle Materie gibt?**
- **Wie suchen wir nach Dunkler Materie?**



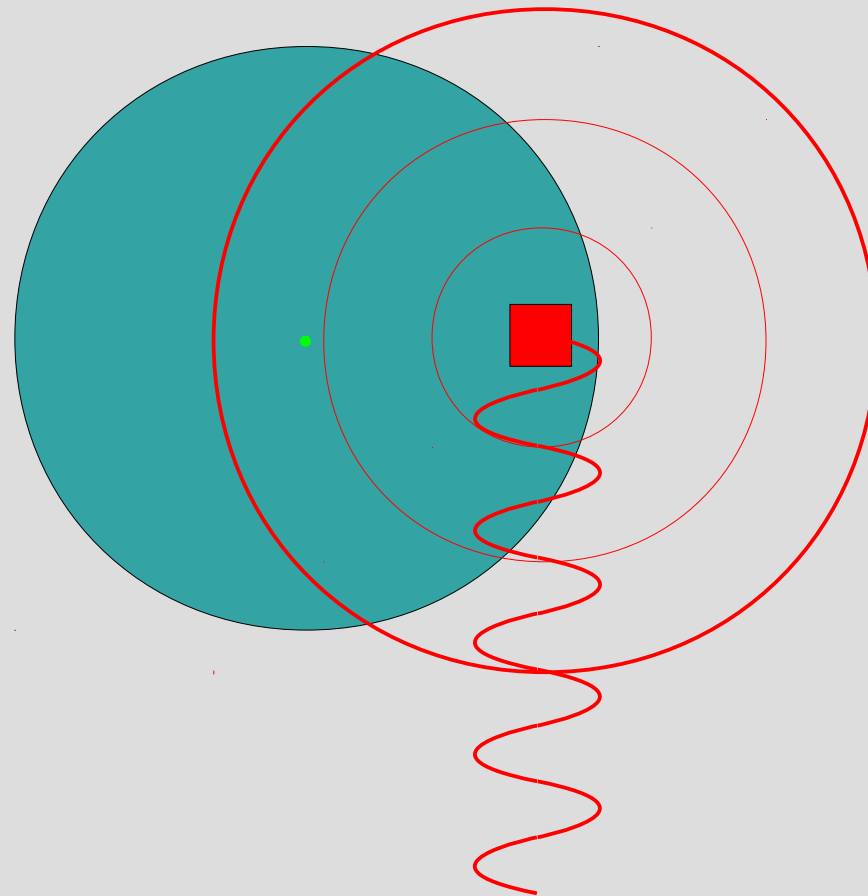
# Galaktische Rotationskurven

Erwartung: Kepler Rotation (wie Sonnensystem)

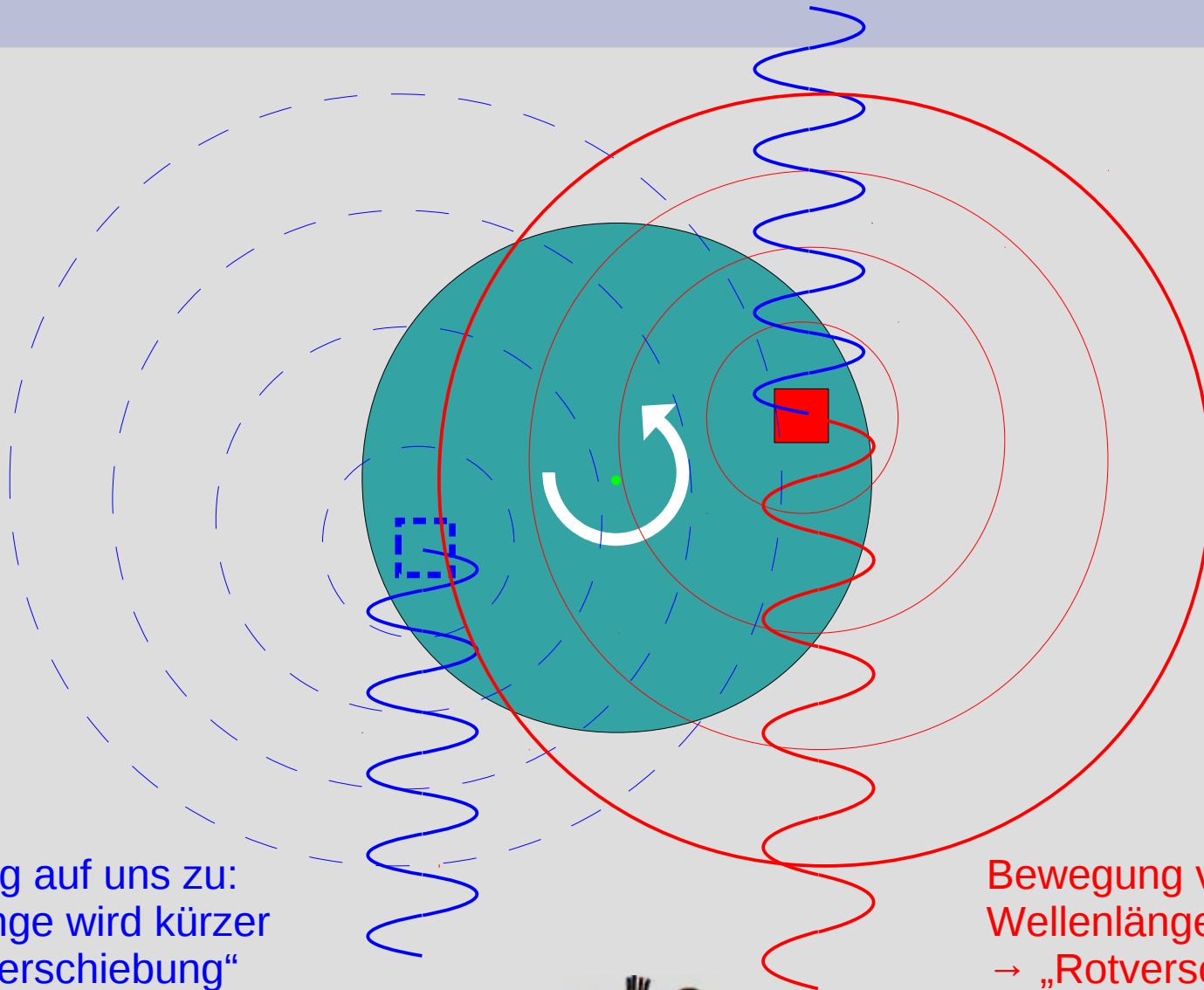




# Doppler Effekt



# Doppler Effekt



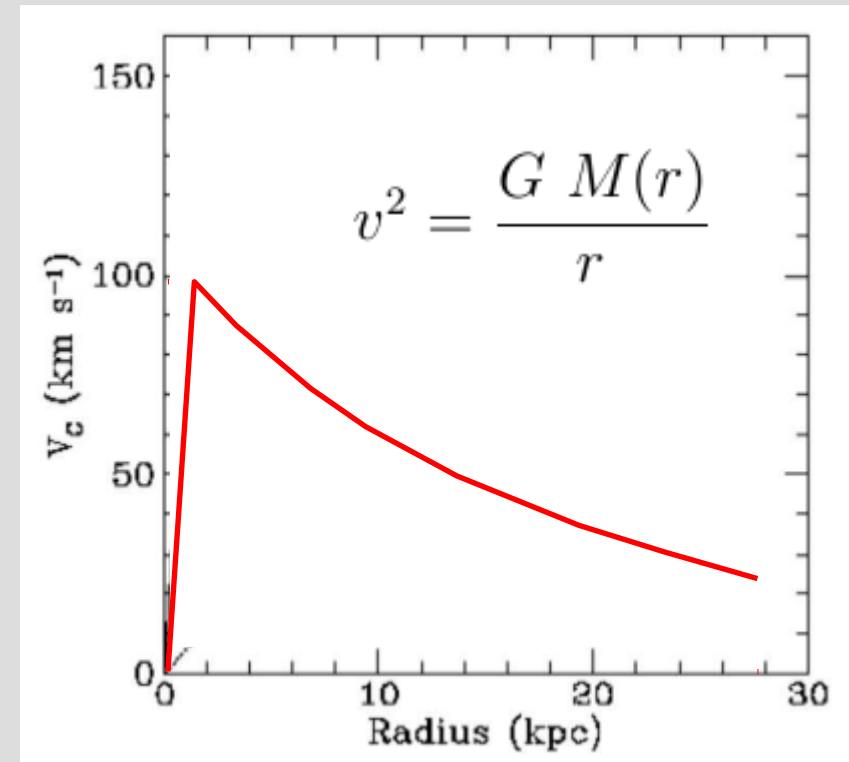
Bewegung auf uns zu:  
Wellenlänge wird kürzer  
→ „Blauverschiebung“  
→ **Ton höher**

Bewegung von uns weg:  
Wellenlänge wird länger  
→ „Rotverschiebung“  
→ **Ton tiefer**



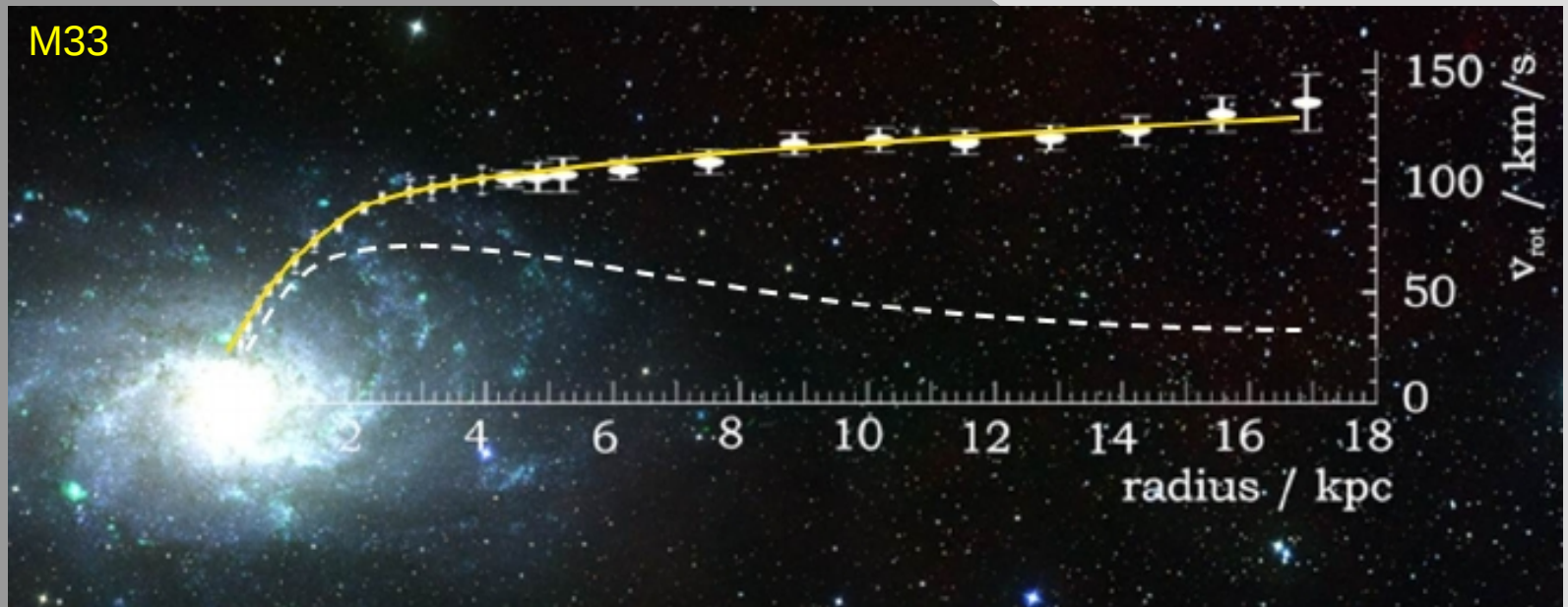
# Galaktische Rotationskurven

Erwartung: Kepler Rotation (wie Sonnensystem)



# Galaktische Rotationskurven

Messung: flaches Rotationsprofil



„Halo“ aus dunkler Materie  
(*isothermal sphere*,  $\rho \sim 1/r^2$ )



**Nicht alles was nicht „leuchtet“...**



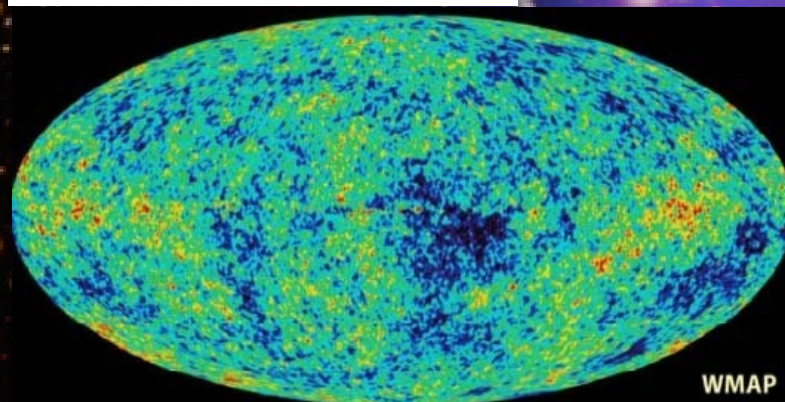
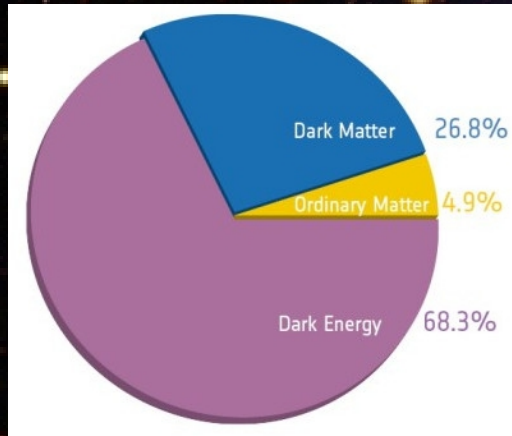
**... ist auch dunkel**



## Beobachtete Eigenschaften von Dunkler Materie:

- „unsichtbar“
- „kalt“ (= „langsam“)
- kaum Kollisionen
- stabil

Kein bekanntes Teilchen hat diese Eigenschaften  
→ **wir brauchen etwas Neues...**



# THE DM CANDIDATES ZOO

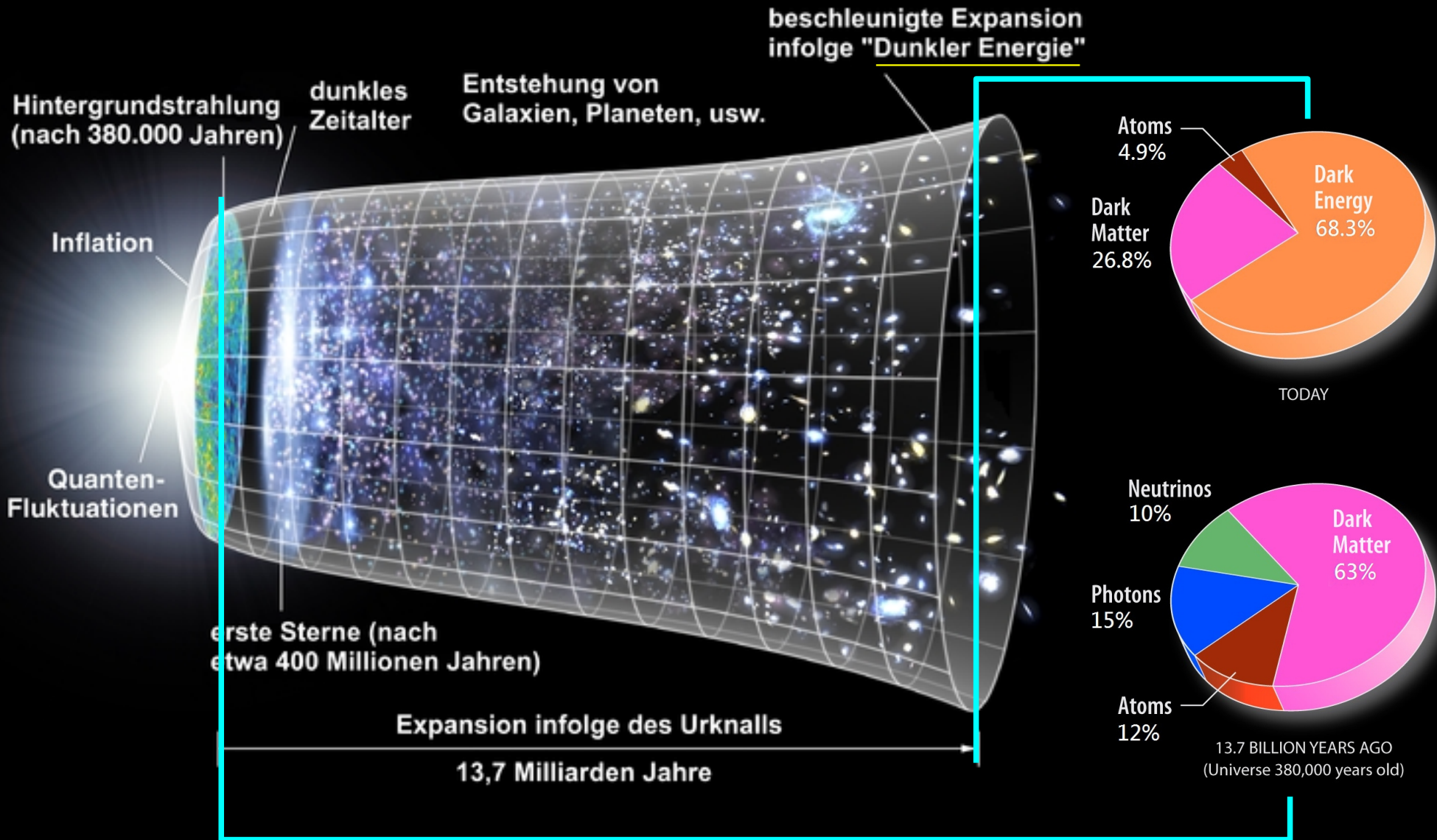
## WIMPs

= weakly interacting massive particles  
(schwach wechselwirkende massive Teilchen)





# Dunkle Energie?

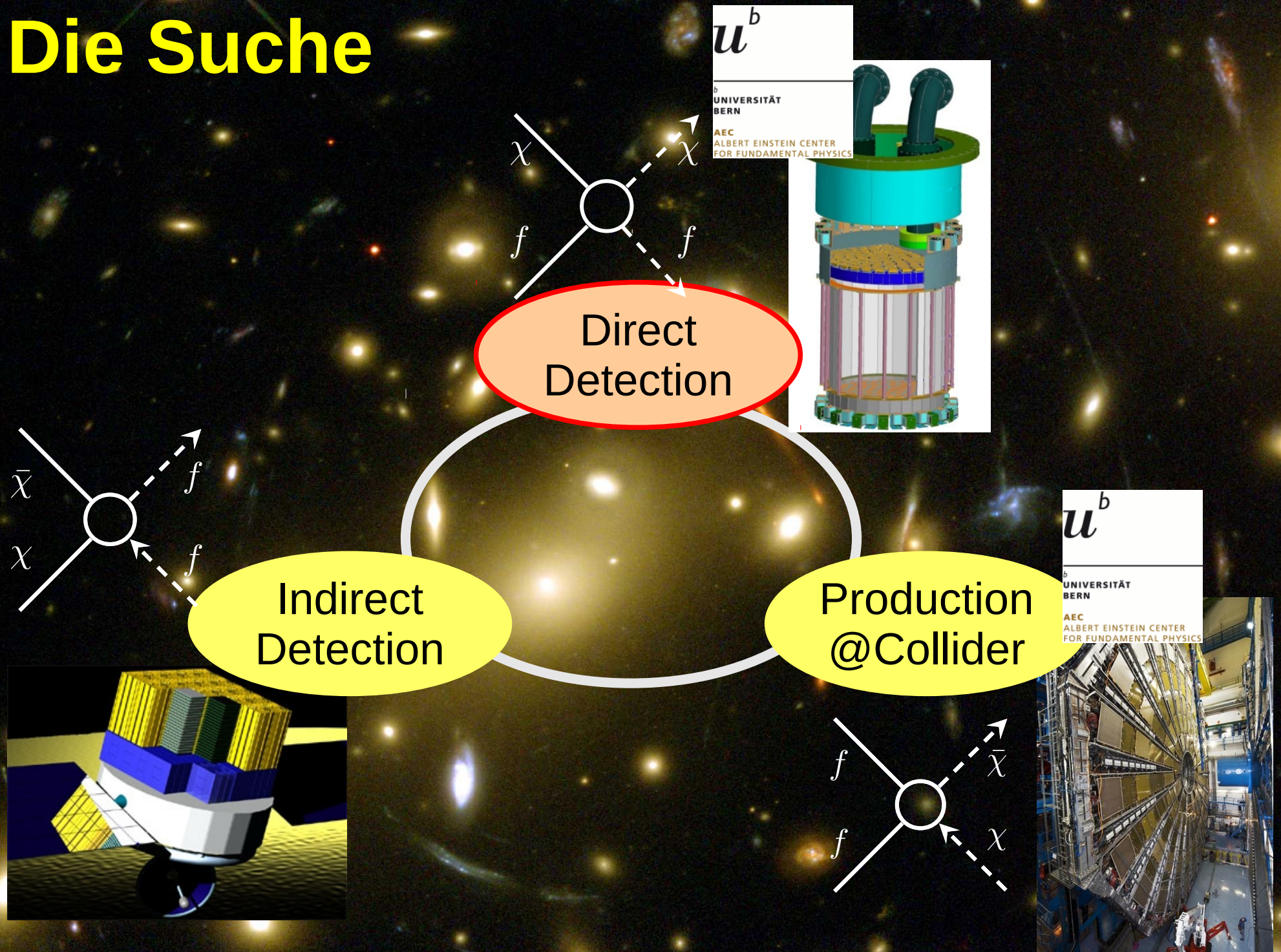


A blurred photograph of a laboratory or industrial setting. Several people are visible, some wearing hard hats, working at a long table or counter. The scene is lit with bright, overhead fluorescent lights, creating a sense of motion and activity. The overall color palette is dominated by cool blues and greys, with some warmer tones from the lights.

## Was ist (Dunkle) Materie?

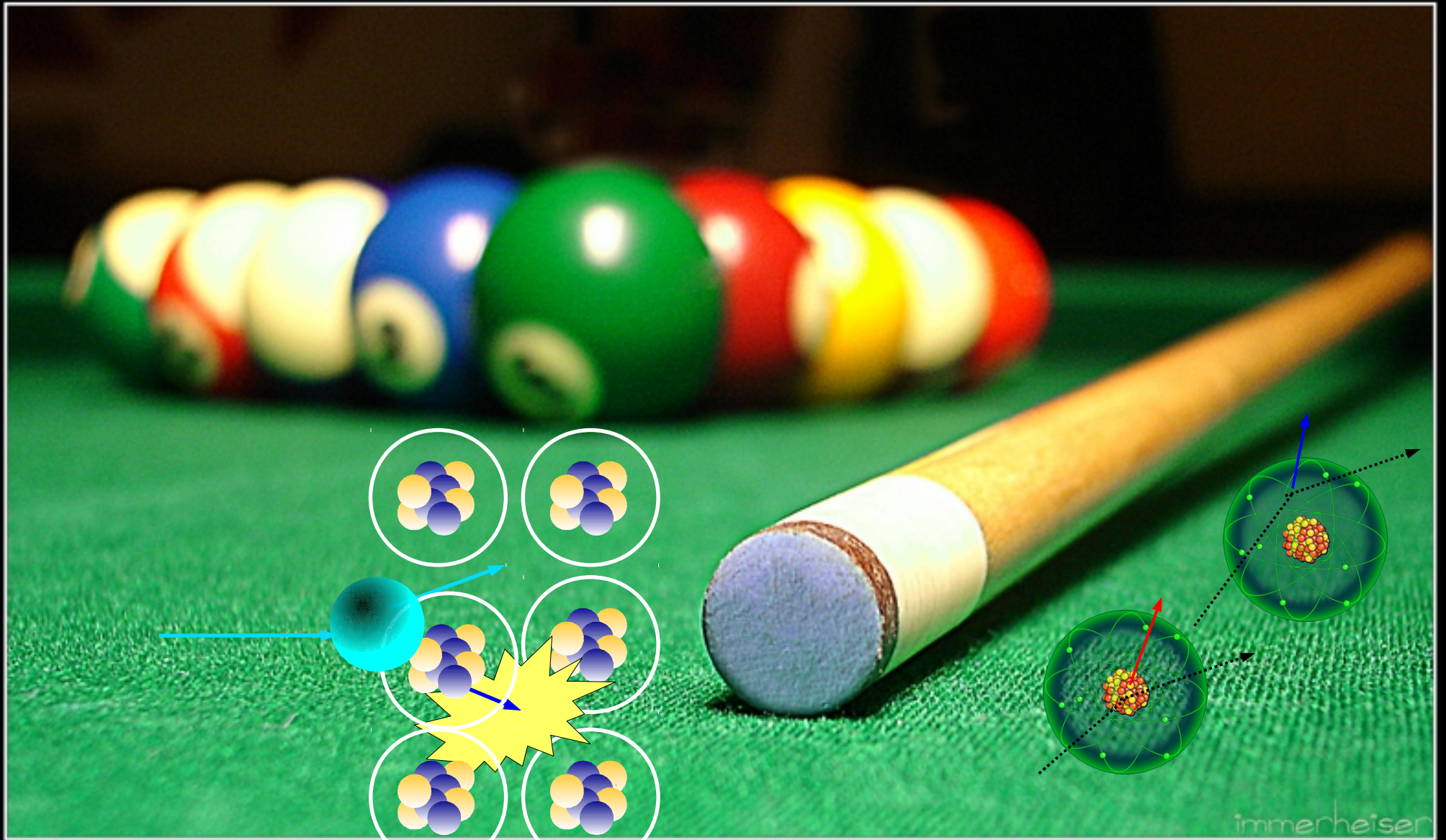
- Woher wissen wir, dass es Dunkle Materie gibt?
- Wie suchen wir nach Dunkler Materie?

# Die Suche



# Direkte Suche nach Dunkler Materie





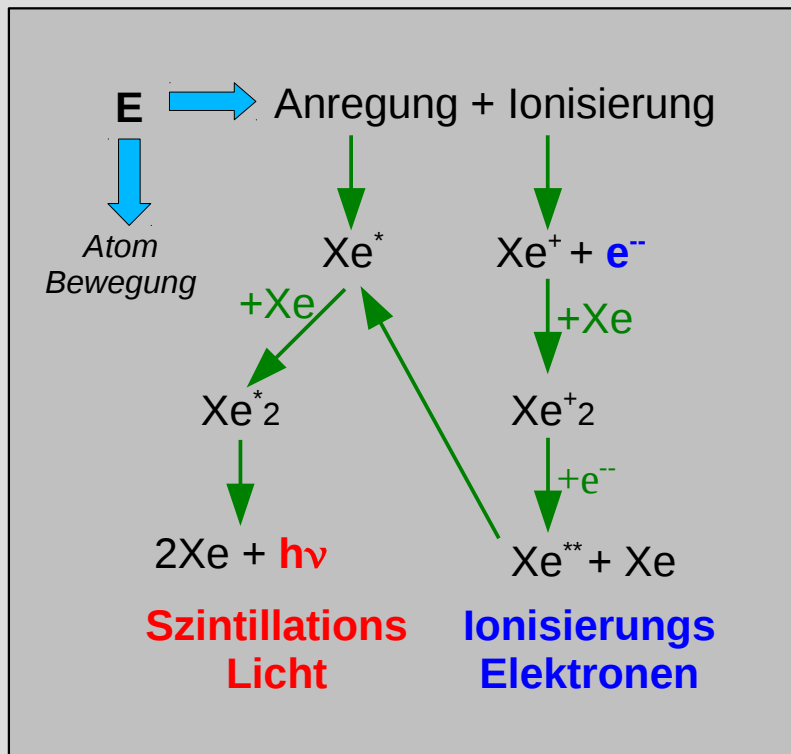
immerheisen

take your shot

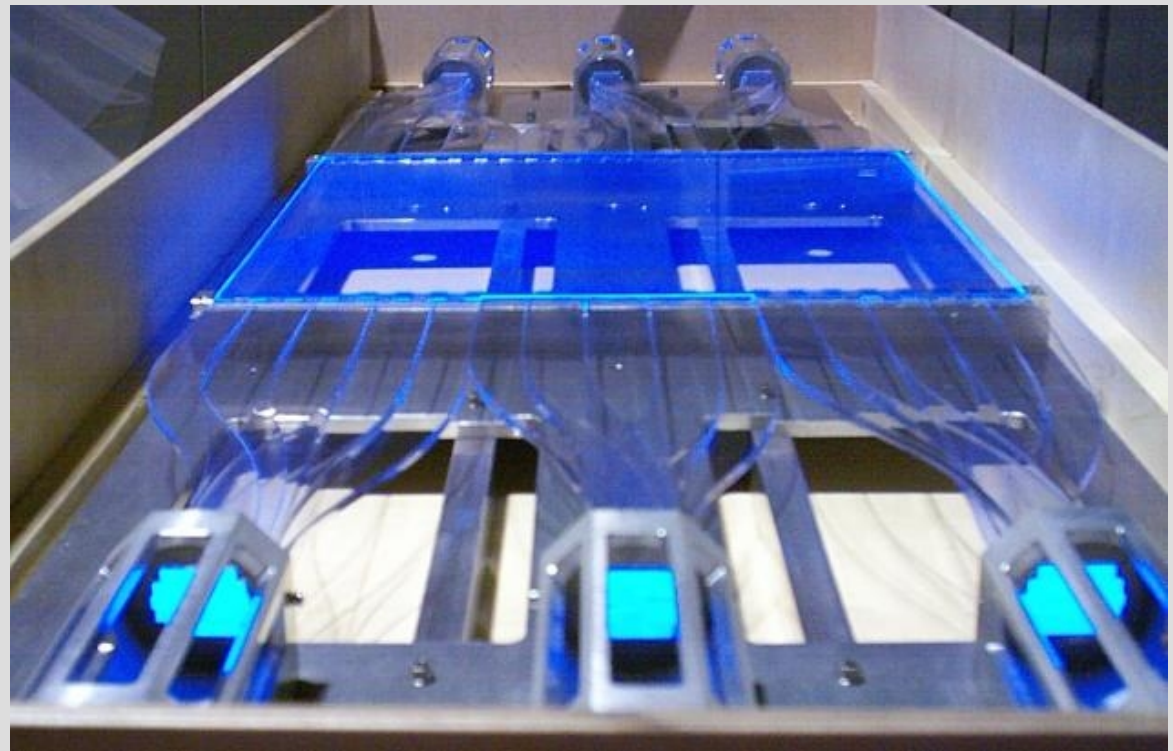
# Szintillatoren

**Szintillator:** Materialien, die eine Energiedeposition durch Teilchenstrahlung in Licht umwandeln

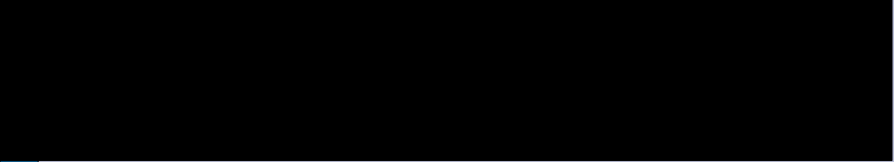
Es gibt: Flüssig-, Edelgas-, Kristall-, Plastik-Szintillatoren



Vorgänge in Xenon

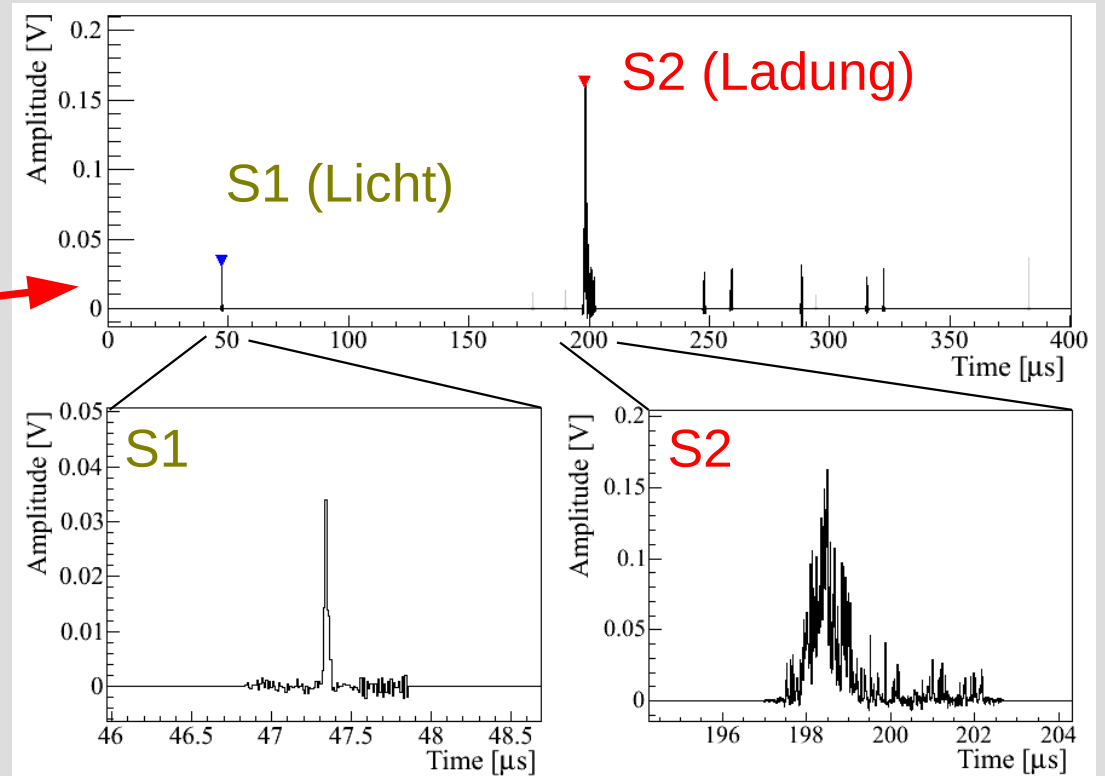
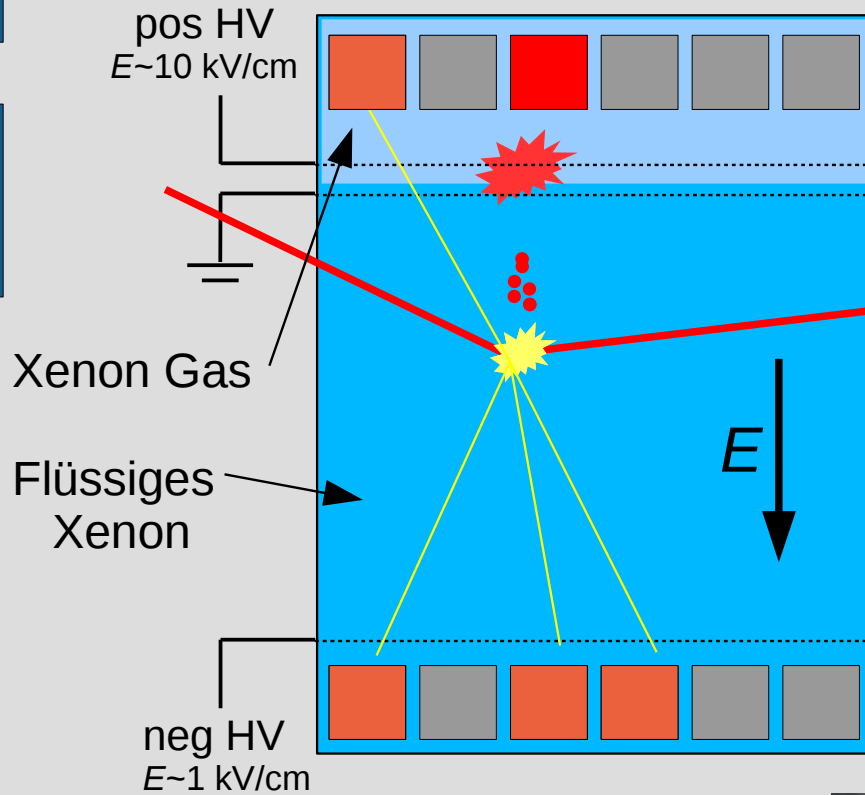


Plastikszintillator



# Dual Phase TPC

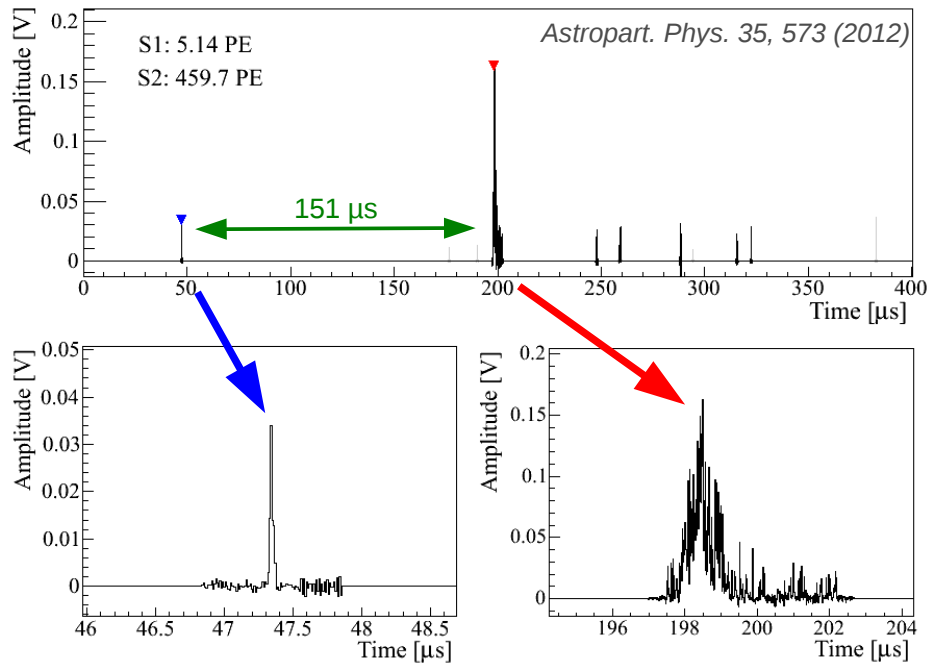
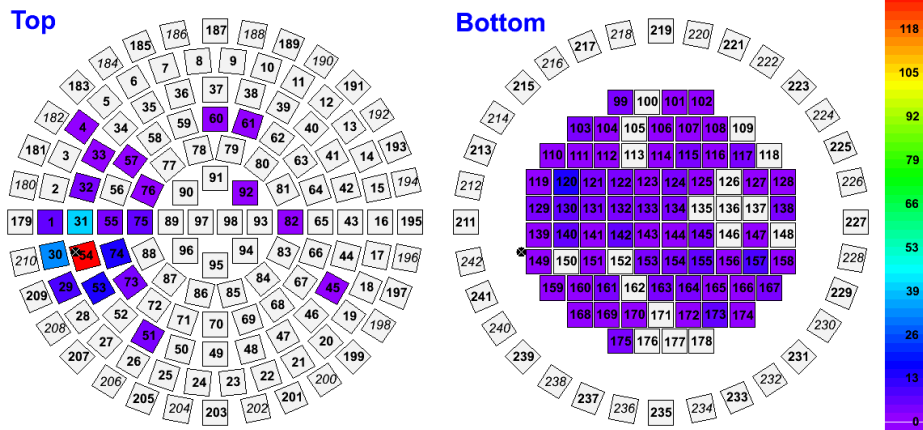
TPC = time projection chamber  
= „Zeit-Projektionskammer“



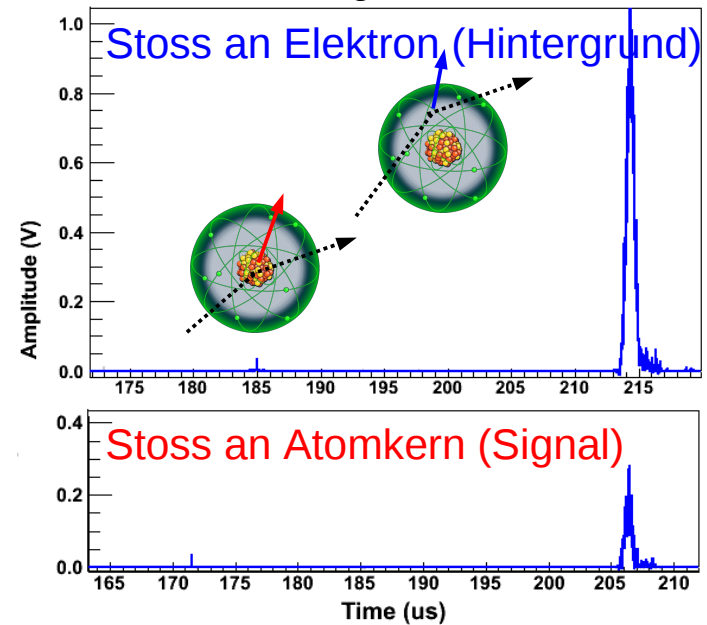
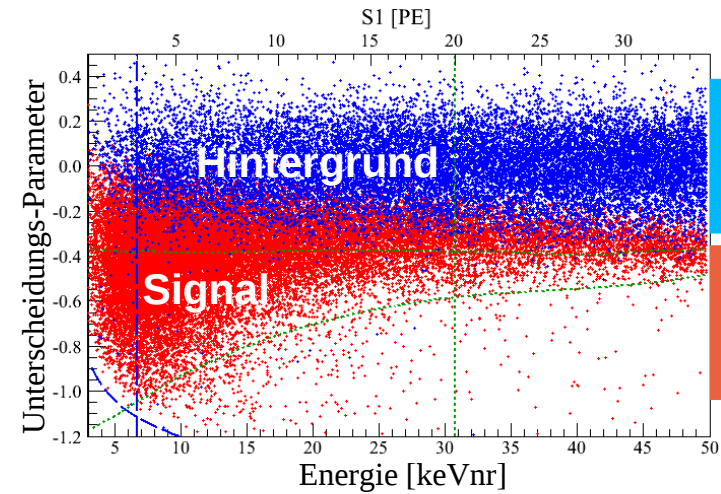


# Dual Phase TPC

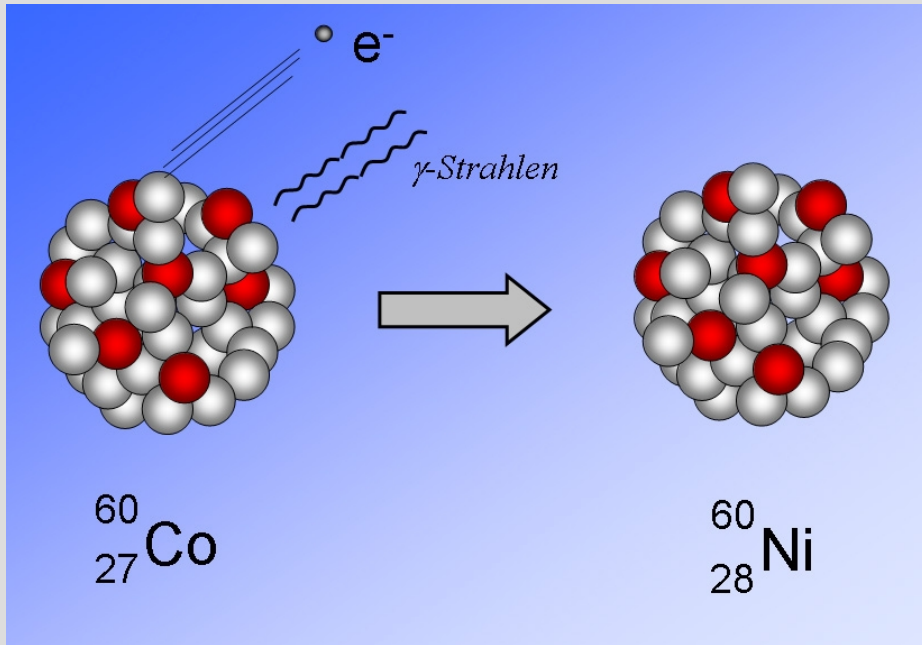
## Wo hat das Ereignis stattgefunden?



## Unterscheidung Signal/Hintergrund



# Radioaktivität



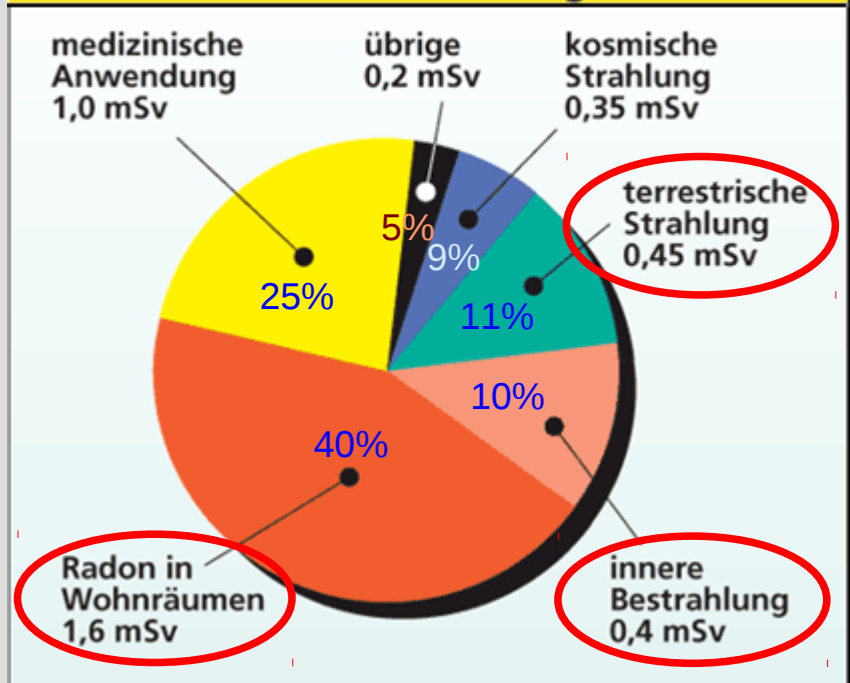
Viele Atomkerne sind instabil („natürliche Radioaktivität“)  
→  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , Neutronen-Strahlung

Hochenergetische Teilchen aus dem All  
→ kosmische Strahlung

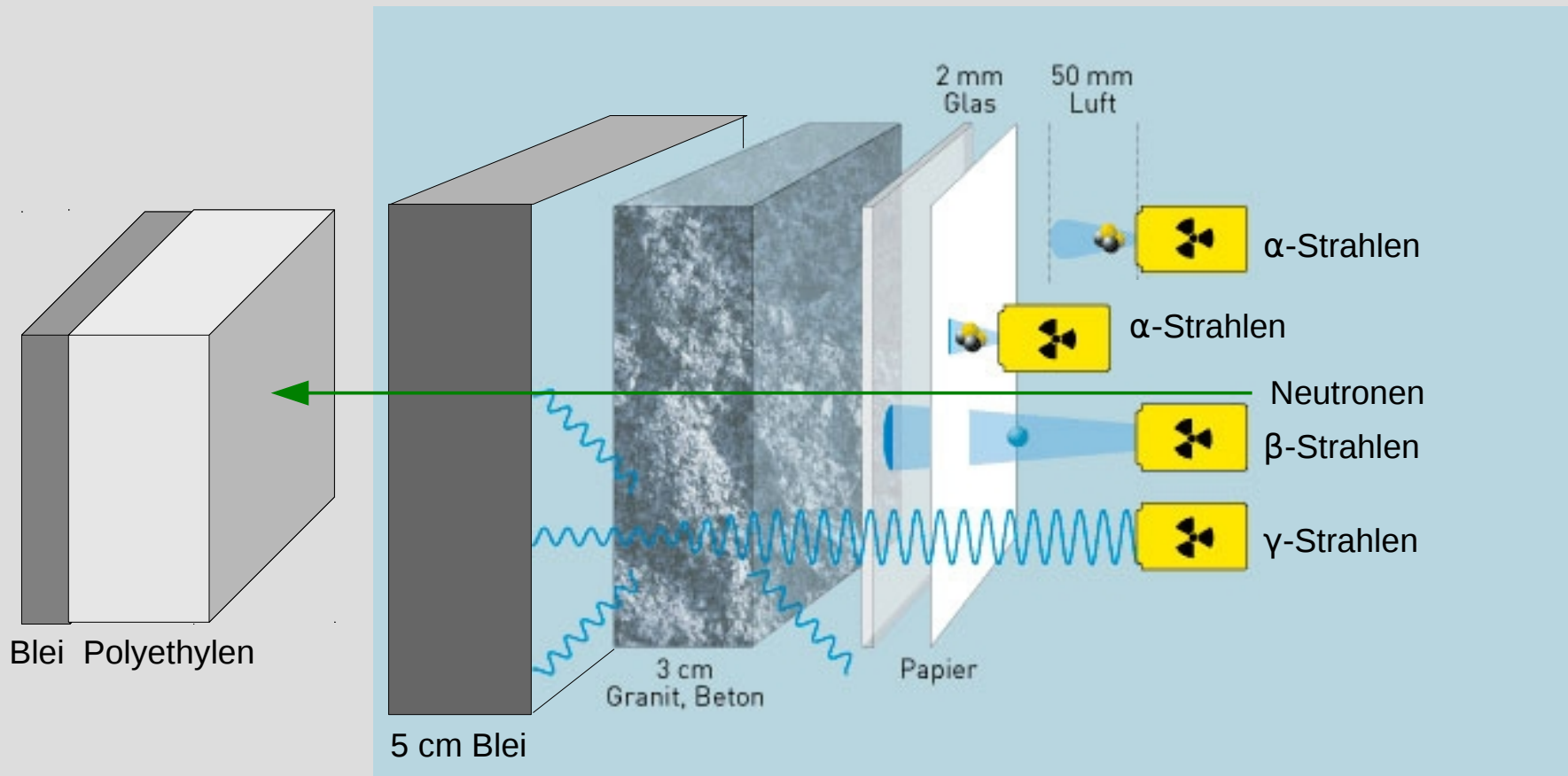
Radioaktivität  
= unerwünschter Hintergrund  
bei der Suche nach seltenen  
Ereignissen

## Mittlere Jahresdosis der Schweizer Bevölkerung

Quelle: BAG

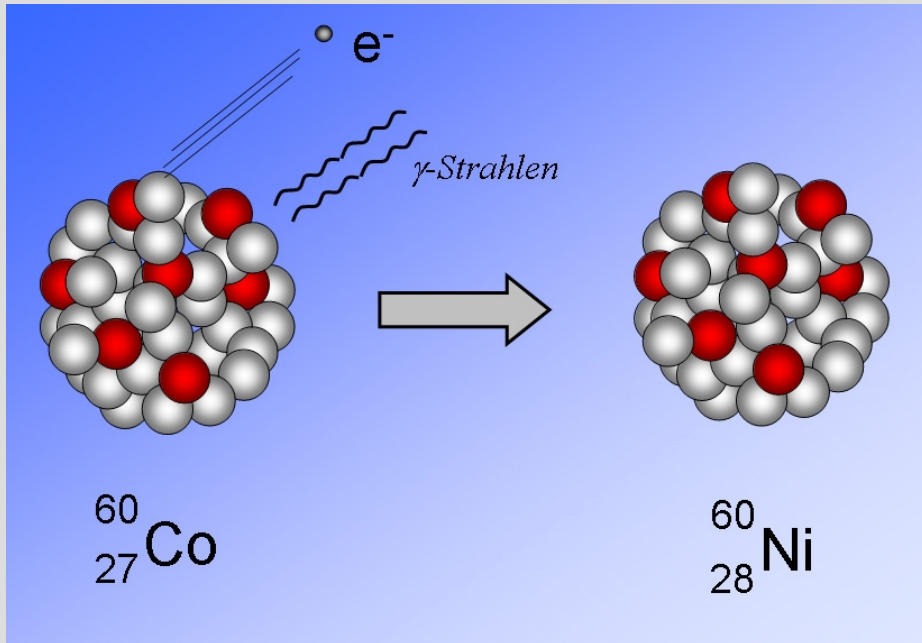


# Abschirmung



Alternative: mehrere Meter Wasser

# Radioaktivität



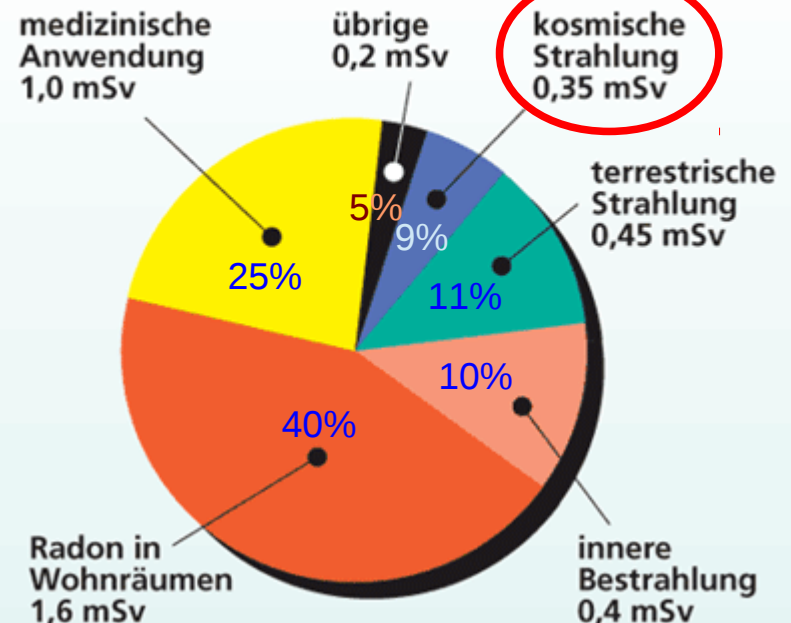
Radioaktivität  
= unerwünschter Hintergrund  
bei der Suche nach seltenen  
Ereignissen

Viele Atomkerne sind instabil  
(„natürliche Radioaktivität“)  
→  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , Neutronen-Strahlung

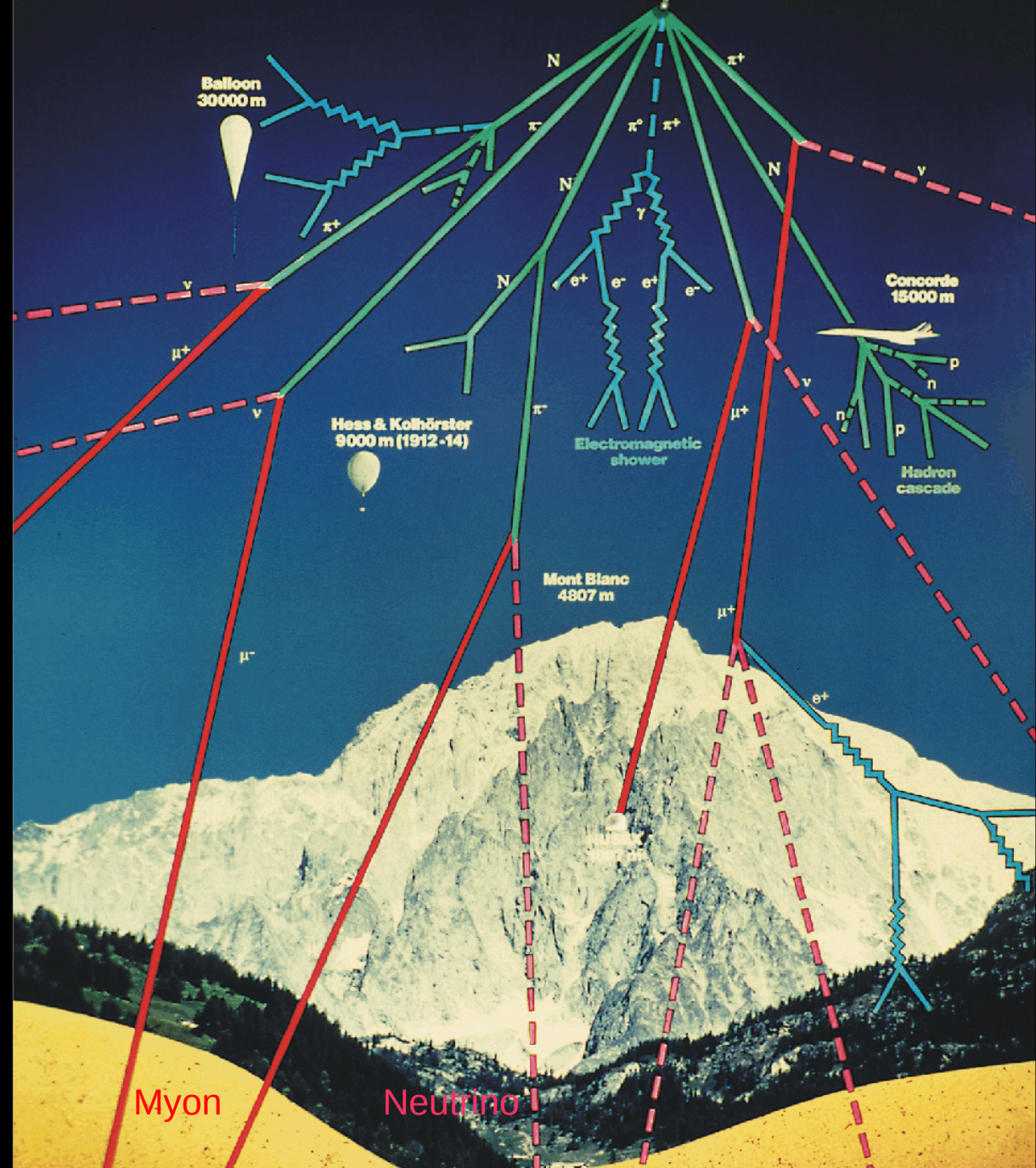
Hochenergetische Teilchen aus dem All  
→ kosmische Strahlung

## Mittlere Jahresdosis der Schweizer Bevölkerung

Quelle: BAG



# Primary Cosmic Rays



Myon

Neutrino





ADARN  
ASSTORAD OXYGEN  
LUD.ZONE





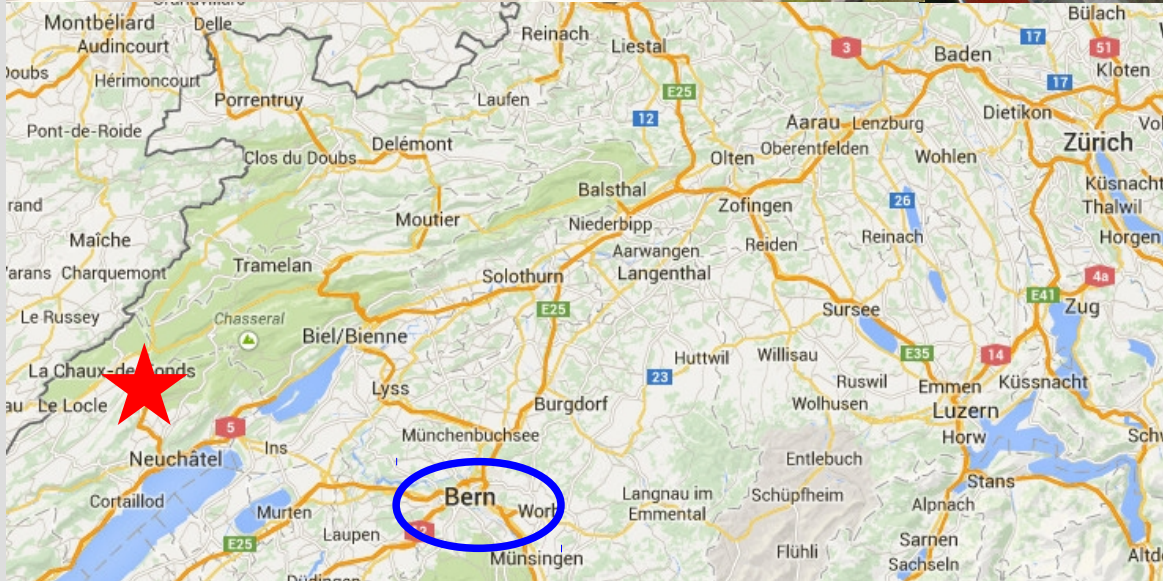
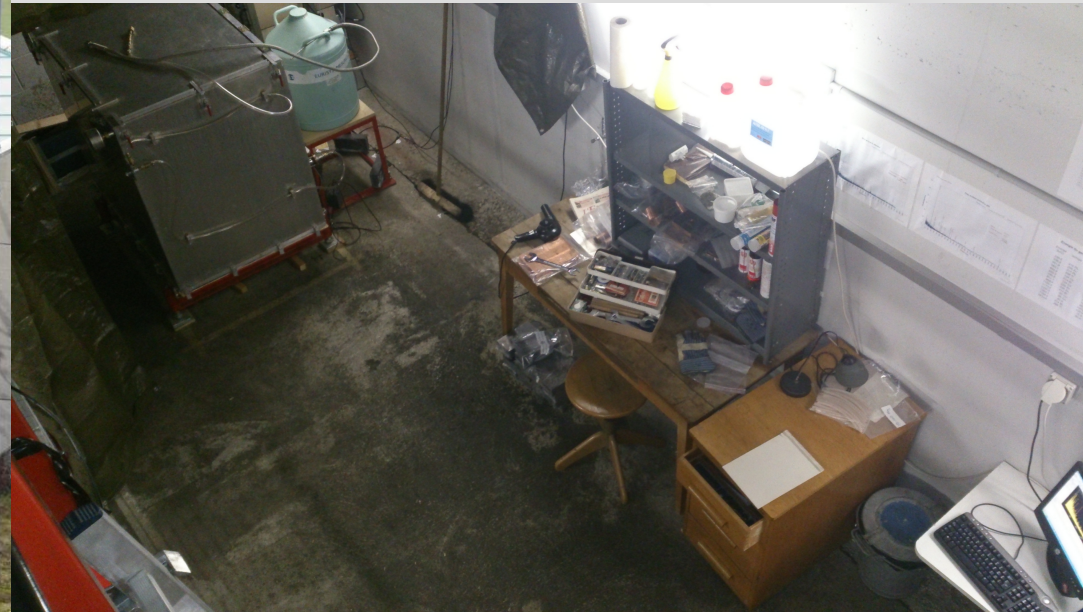
# Laboratori Nazionali del Gran Sasso

LNGS: 1.4km rock  
(3700 mwe)





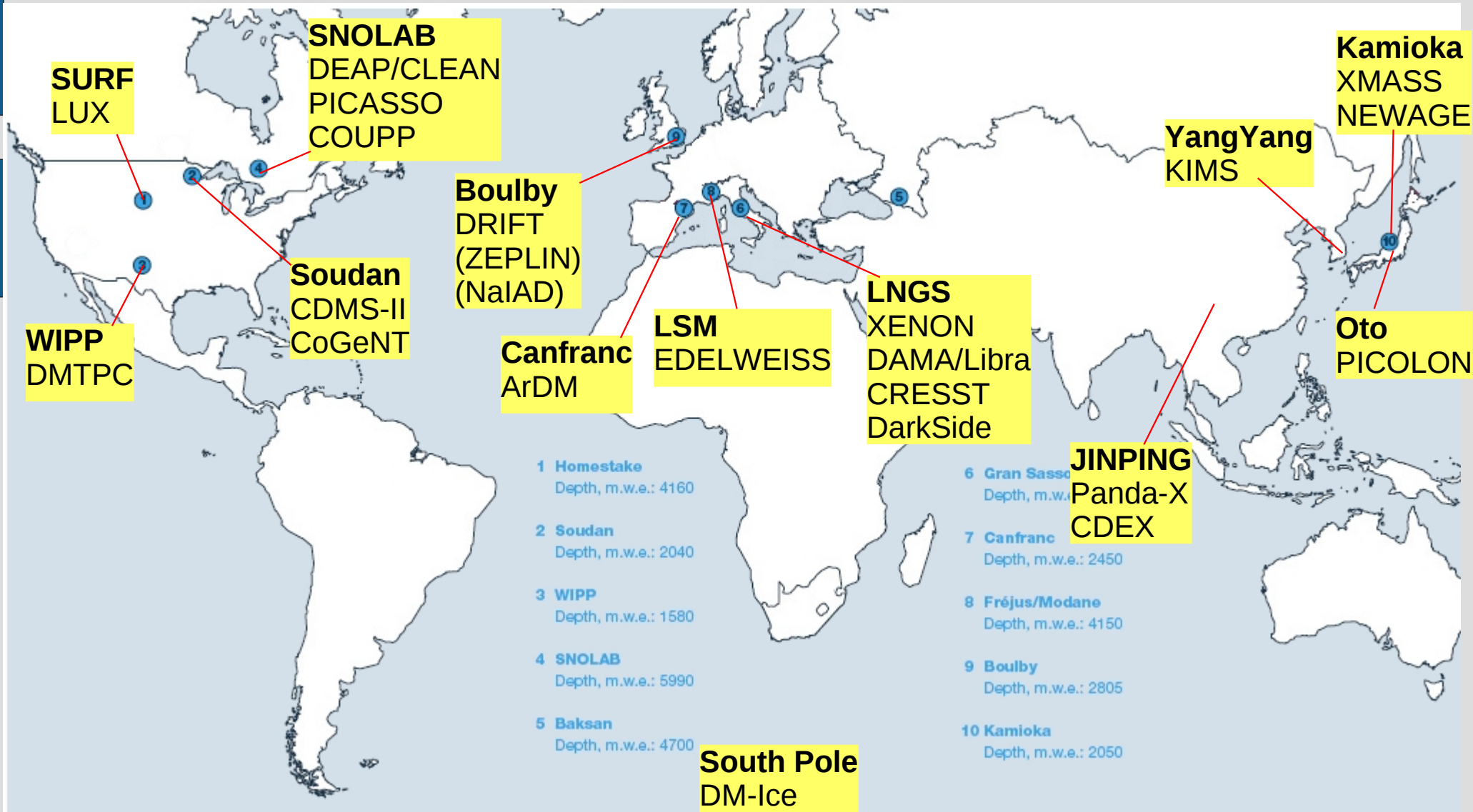
# Scheizer Untergrundlabore



Teilchenphysik möglich in:

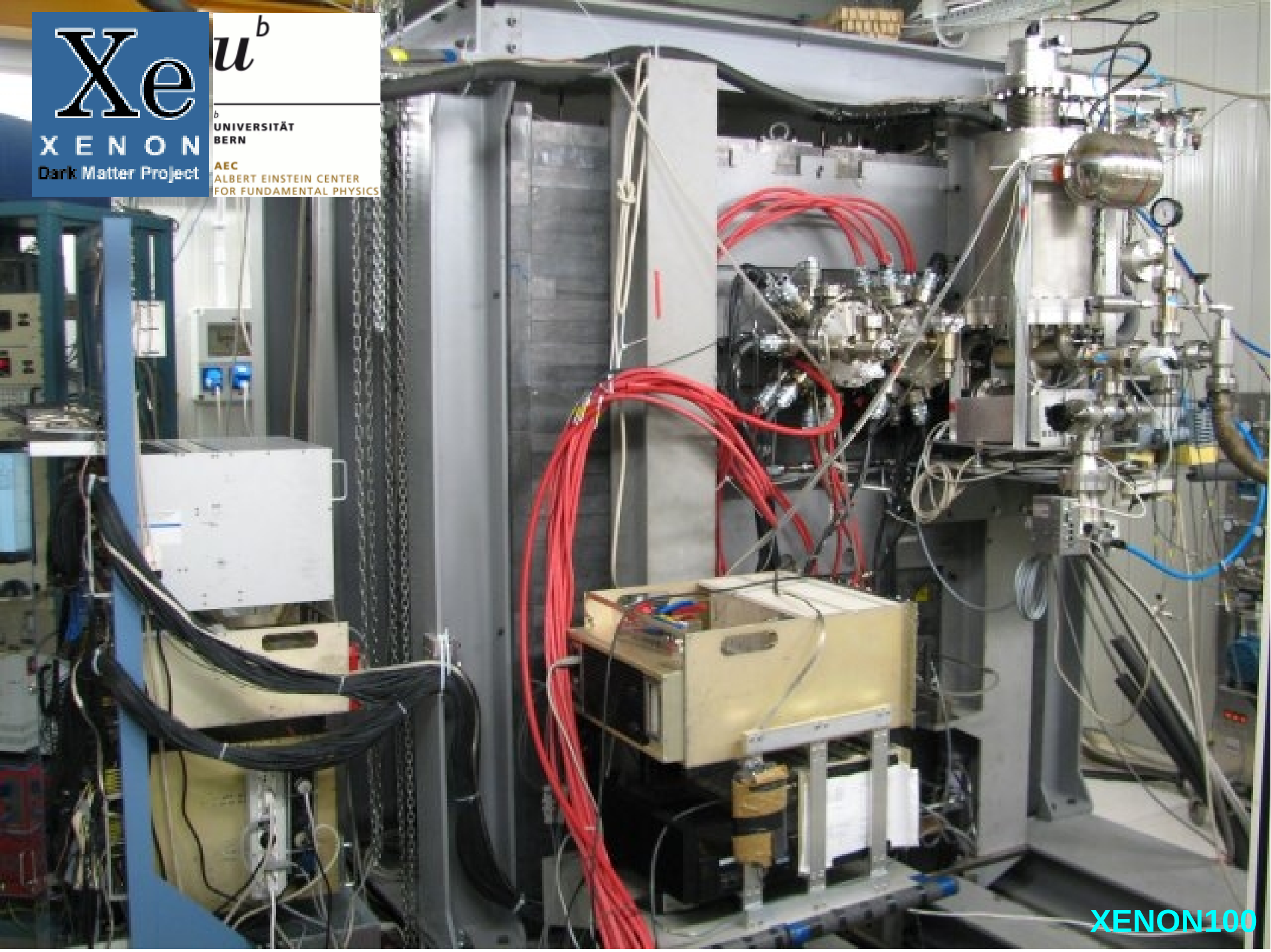
- Tieflabor Bern (70 mwe)
- **Vue des Alpes Tunnel (600 mwe)**
- Gotthard Tunnel (3000 mwe)

# Alle Welt sucht nach Dunkler Materie



**Xe**  
**XENON**  
Dark Matter Project

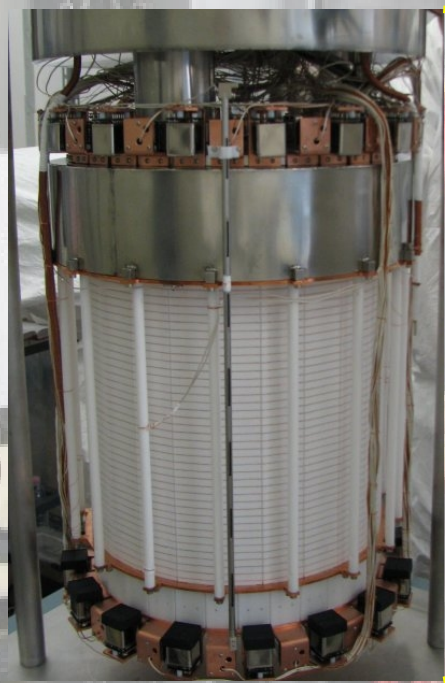
$u^b$   
UNIVERSITÄT  
BERN  
AEC  
ALBERT EINSTEIN CENTER  
FOR FUNDAMENTAL PHYSICS



**XENON100**

**Xe**  
**XENON**  
Dark Matter Project

**u<sup>b</sup>**  
UNIVERSITÄT  
BERN  
AEC  
ALBERT EINSTEIN CENTER  
FOR FUNDAMENTAL PHYSICS



**XENON100**

# Physiker bei der Arbeit...

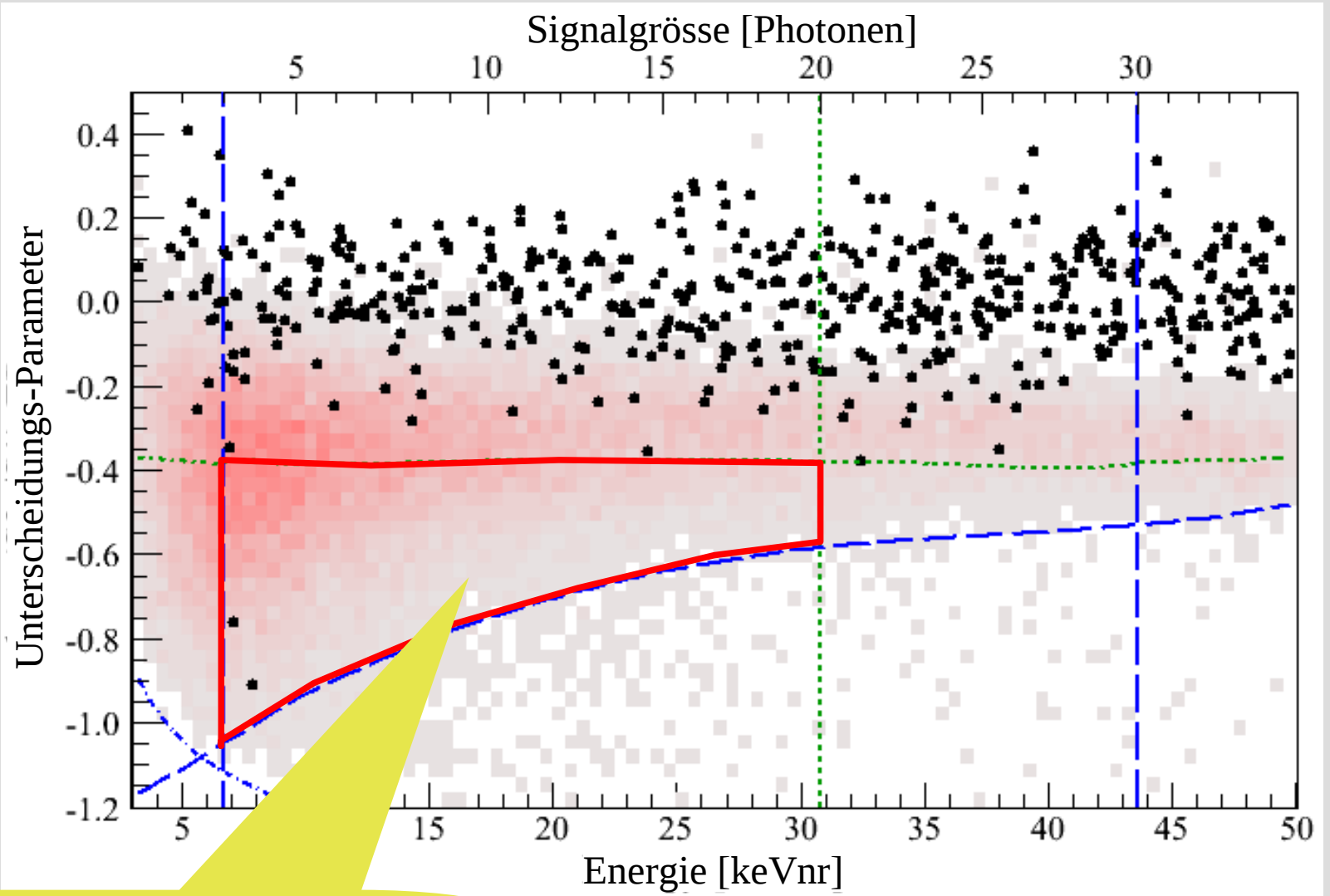


# XENON100 Resultat

... bislang kein Zeichen von Dunkler Materie gefunden!

↑  
 sieht mehr wie  
 radioaktiver  
 Hintergrund aus

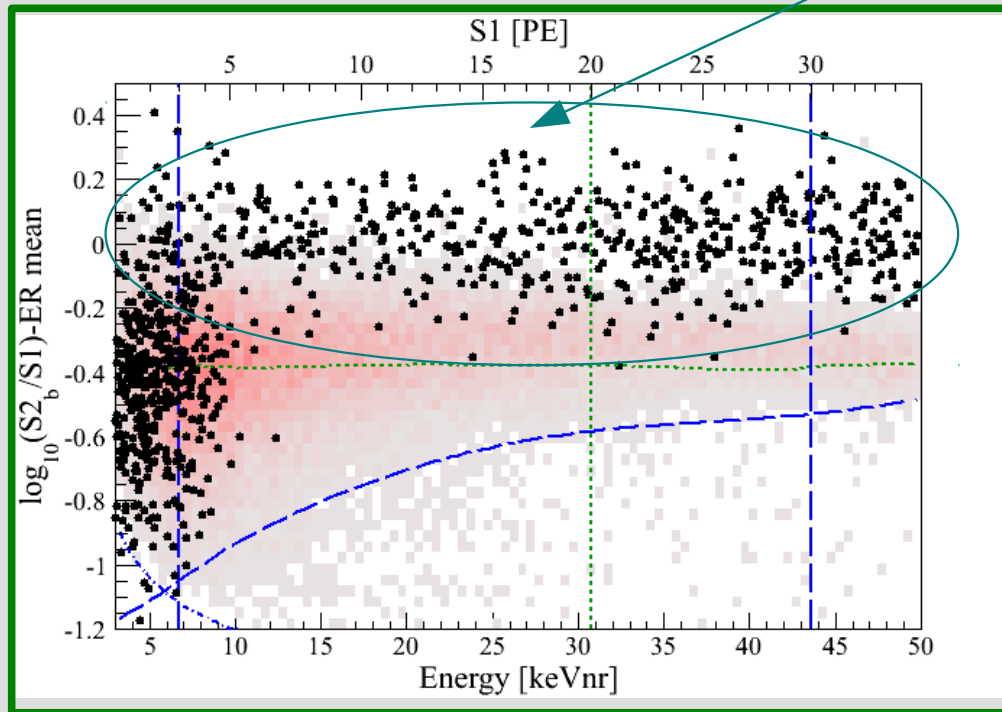
↓  
 sieht mehr  
 wie ein Signal  
 aus



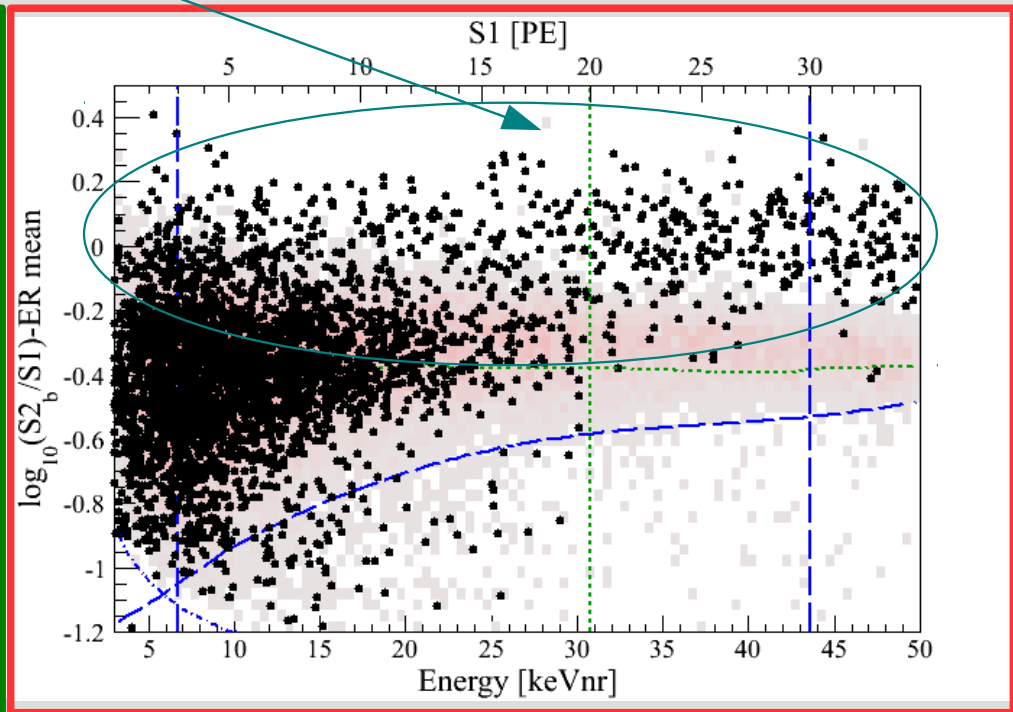
**(1.0 ± 0.2) Ereignisse erwartet**

# Wie sähe ein Signal aus?

radioaktiver Untergrund nach 34 kg  $\times$  225 Tagen Messung



„leichte“ Dunkle Materie



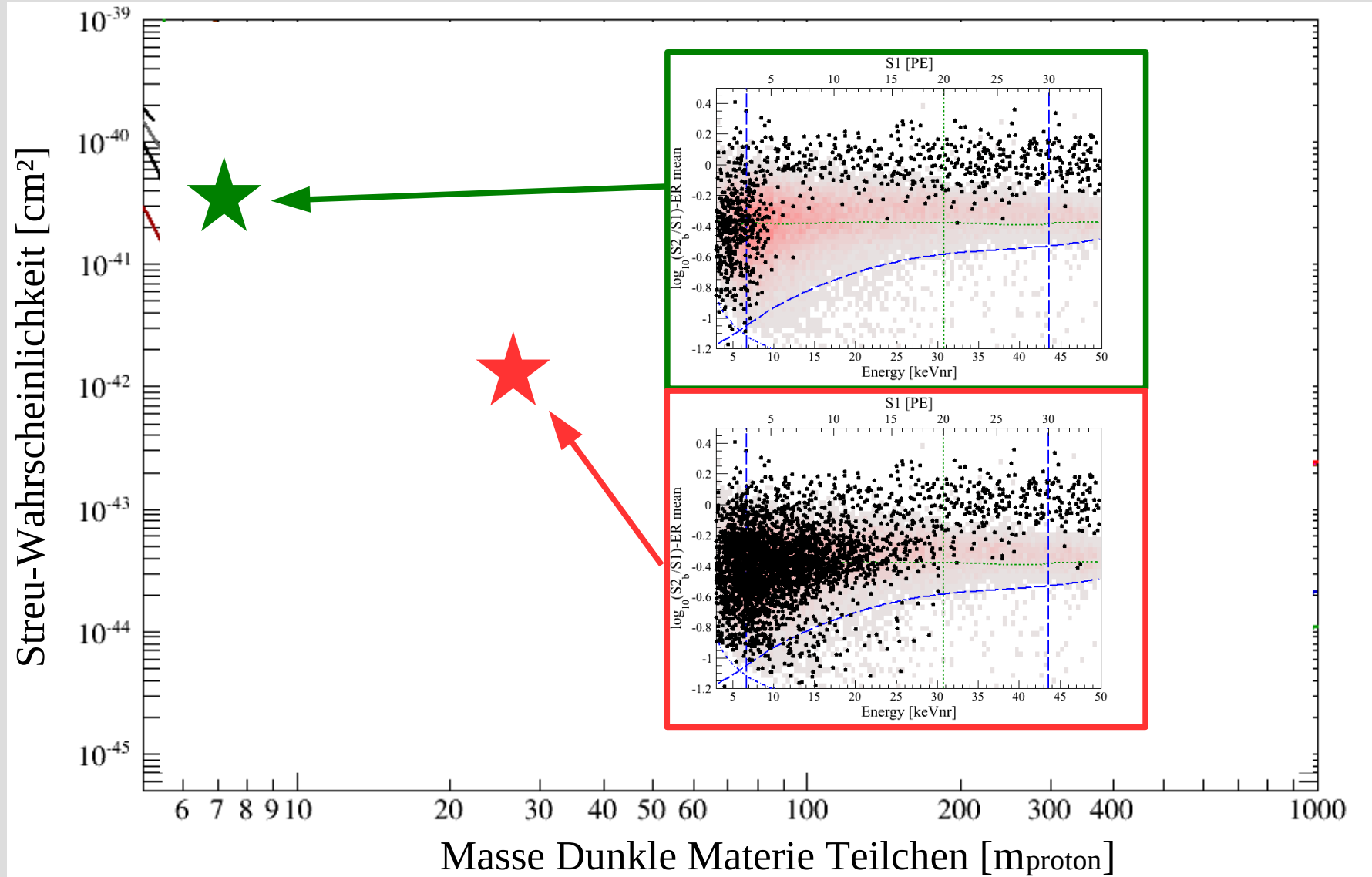
„schwere“ Dunkle Materie

# Nichts gefunden und doch glücklich???

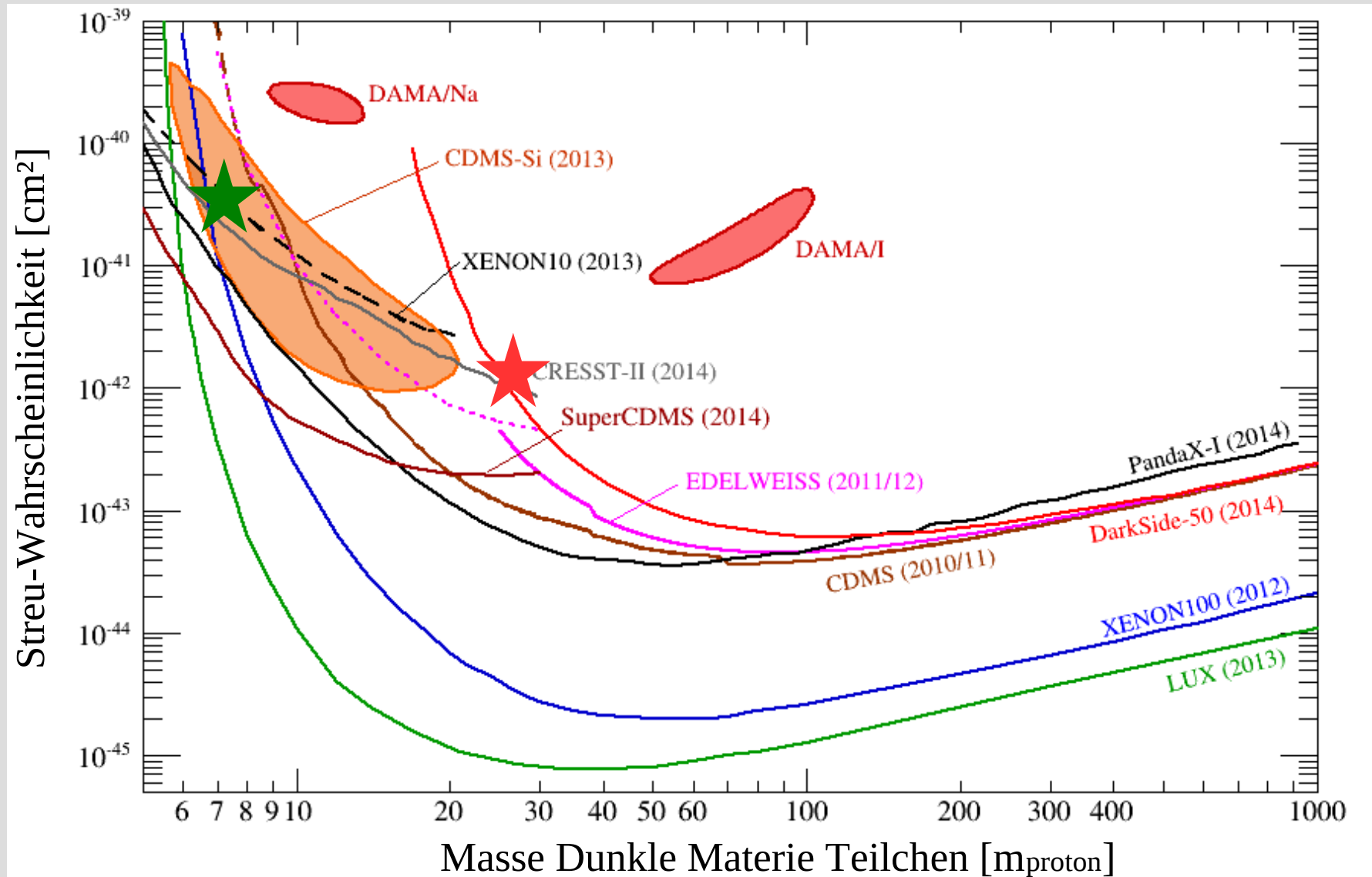




# Der aktuelle Stand der Dinge



# Der aktuelle Stand der Dinge



# XENON1T @ LNGS

Xe  
XENON  
Dark Matter Project



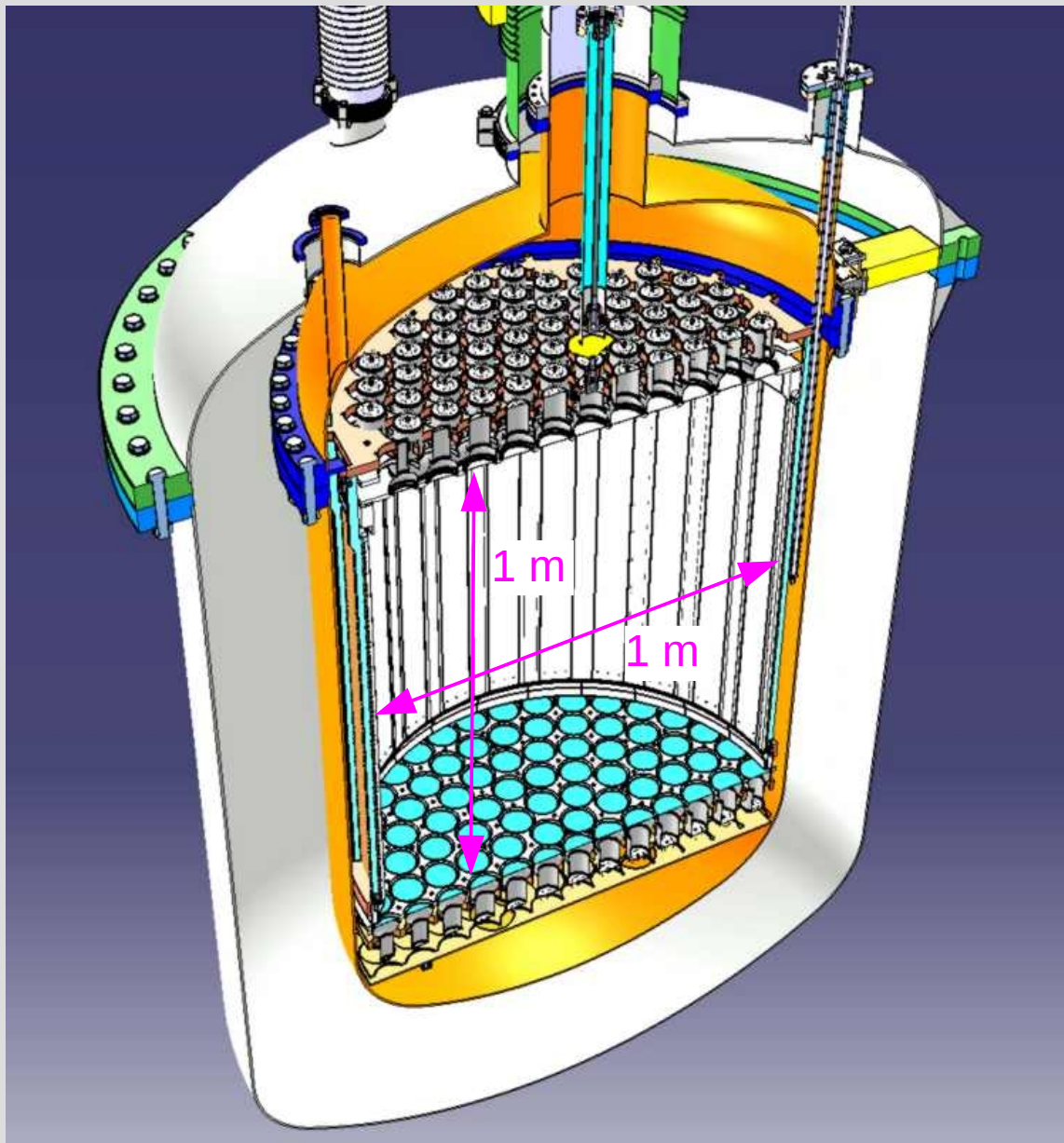
XENON  
enlighten  
XENON  
Dark Matter Project

PROJECT HANDBOOK  
t.40





# XENON1T



3.3 t flüssiges Xenon,  
2.0 t davon „aktiv“

248 hochsensitive  
Photosensoren

100x sensitiver als  
vorheriges Experiment

130 Wissenschaftler aus  
18 Ländern

Start ist für  
Mitte/Ende 2015 geplant

Die Berner Gruppe ist  
verantwortlich für:  
Design des Detektors (TPC)  
Daten-Auslese System

# Take Home Messages



- 95% des Universums ist dunkel.
- 27% davon ist Dunkle Materie.  
Das wissen wir durch astronomische Messungen
- Wir wissen nicht, was Dunkle Materie ist.
- Viele Wissenschaftler suchen nach Dunkler Materie.  
Die Uni Bern ist ganz vorne mit dabei.
- **Bislang haben wir noch nichts gefunden...**

# Warum???



*u*<sup>b</sup>

<sup>b</sup>  
**UNIVERSITÄT  
BERN**

**AEC**  
ALBERT EINSTEIN CENTER  
FOR FUNDAMENTAL PHYSICS