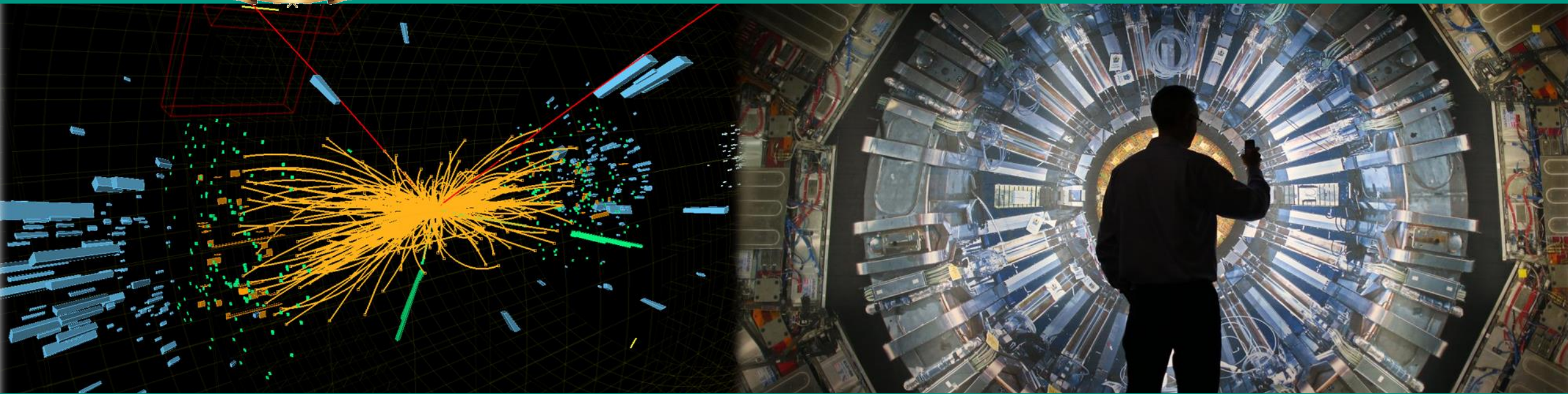


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung  20 6.7.2023



Recap: moderne Teilchenphysik

■ vom *GIM* über *CKM* zur unsichtbaren Z^0 – Breite & *B* – Fabriken

- *GIM* – Mechanismus: Postulat des 4. Quarks c zur Unterdrückung von *FCNC* durch Cabibbo–Mischung von 2 Isospin–Dubletts bei $\bar{K}^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$
- *CKM*: 3 Quarkgenerationen – 3 Euler-Winkel θ_{12} θ_{23} θ_{13} & 1 *CP* – Phase*
- *LEP* $e^+ - e^-$ Collider am *CERN*: challenges, Linienbreite des Z^0
- unsichtbare Linienbreite: # Neutrino–Generationen $N_\nu = 2,984 \pm 0,055$
- Super*KEKB*: asymmetrischer $e^+ - e^-$ Collider für $\Upsilon(4S)$ Resonanz
- Anwendung: Synchrotronstrahlung für THz – Strahlung, Bsp. *KARA*

Anwendungen: Synchrotronstrahlung

■ Emission von Synchrotron–Strahlung: Grundlagen

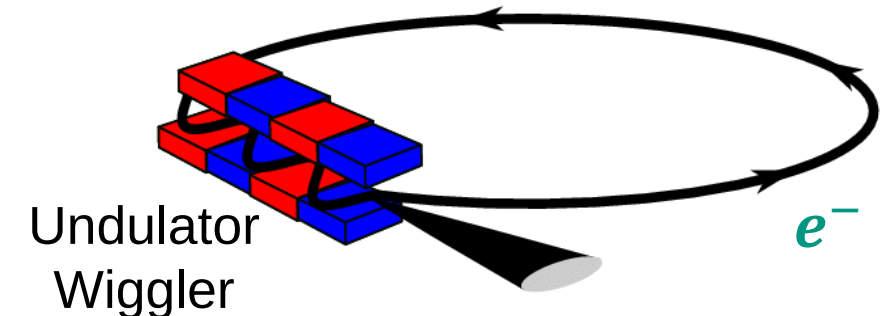
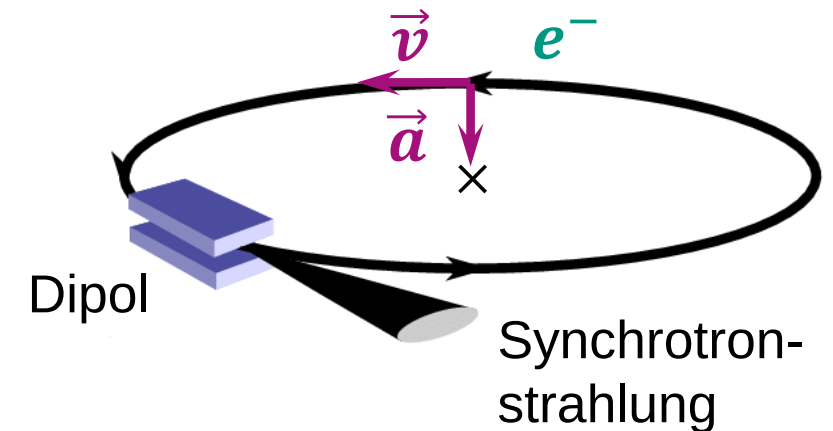
- Bedingung: relativistische e^- erfahren Beschleunigung $\vec{a} \perp \vec{v}$
- abgestrahlte Leistung P_γ

$$P_\gamma \sim a^2 \cdot \gamma^4$$

rel. Lorentz–Faktor

Beschleunigung die auf e^- einwirkt

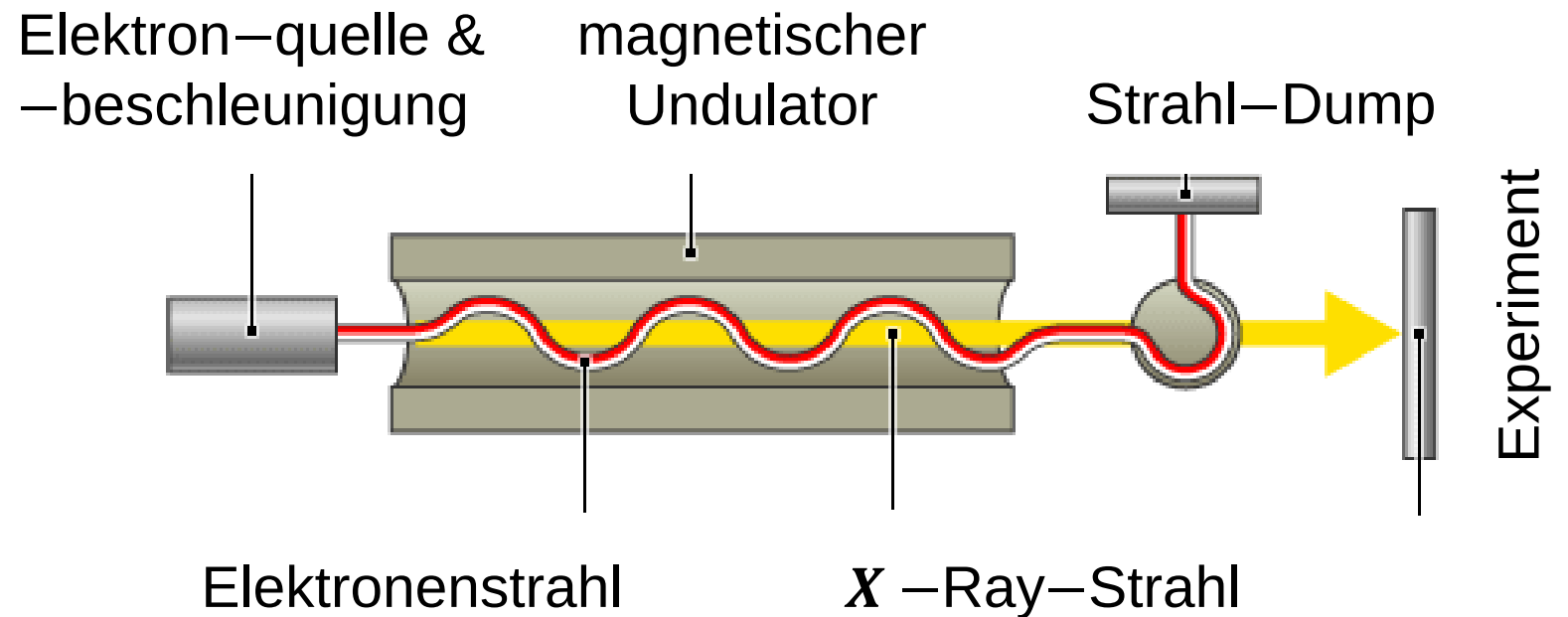
- lineare Polarisation der emittierten Strahlung



Anwendungen: Lepton–Beschleuniger

■ European **XFEL**: **X** – Ray **F**ree – **E**lectron **L**aser mit Pulsdauern $t < 100 \text{ fs}$

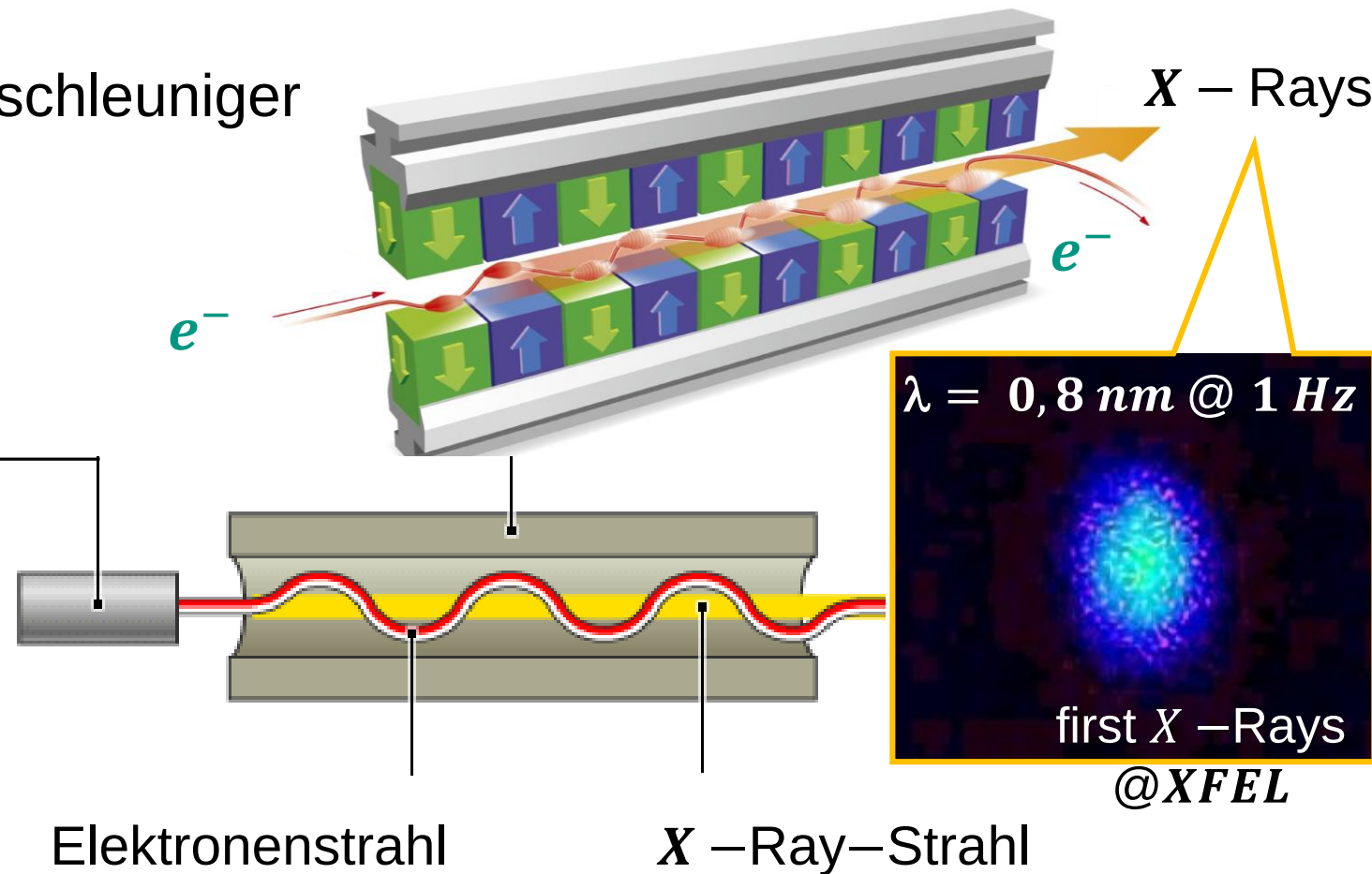
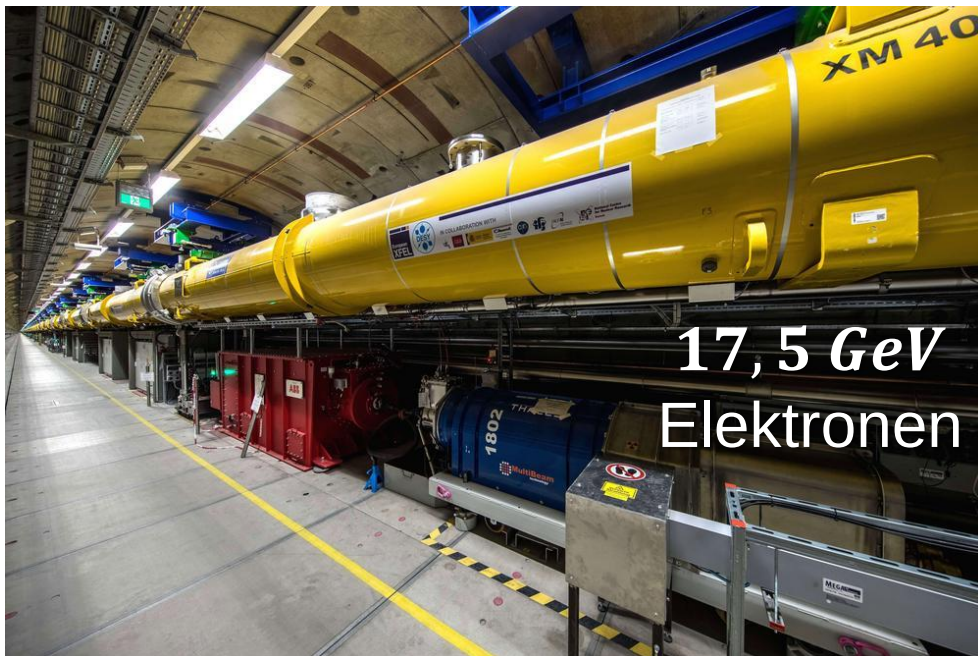
- ein **1,7 km** langer Linearbeschleuniger am **DESY** für e^- mit $E = 17,5 \text{ GeV}$
- Undulator–Strukturen zur Erzeugung von **X – rays** mit $\lambda = 0,05 \dots 4,7 \text{ nm}$



Anwendungen: Lepton–Beschleuniger

■ European *XFEL*: *X* – Ray *F*ree – *E*lectron *L*aser (seit 2017)

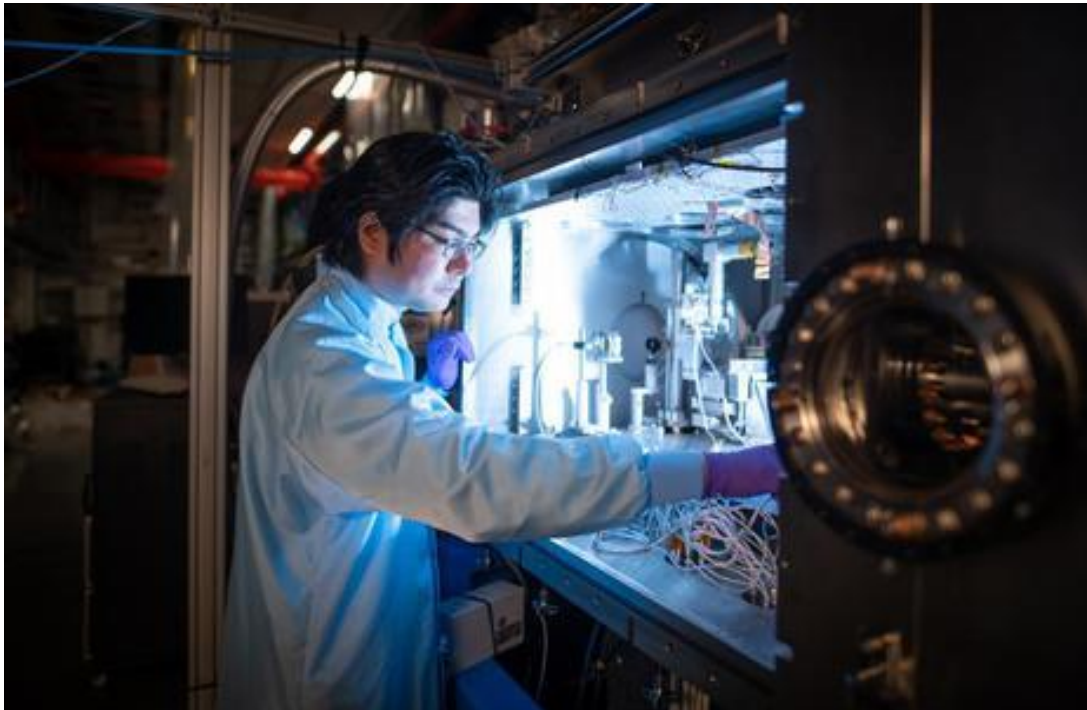
- ein 1,7 *km* langer Linearbeschleuniger
- Undulator–Strukturen



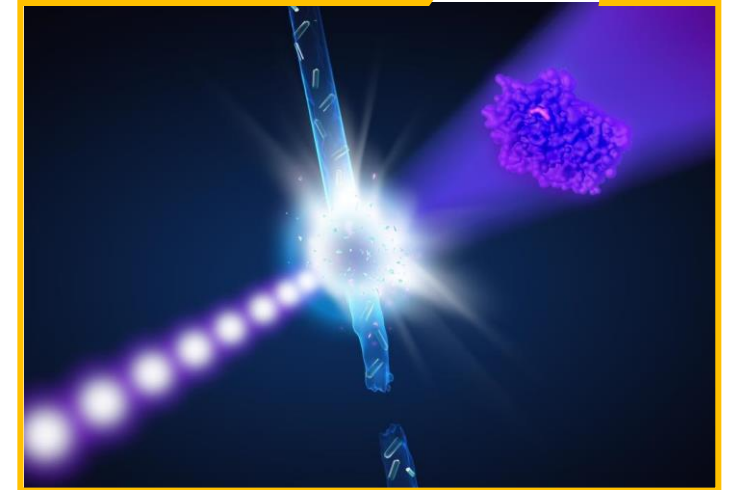
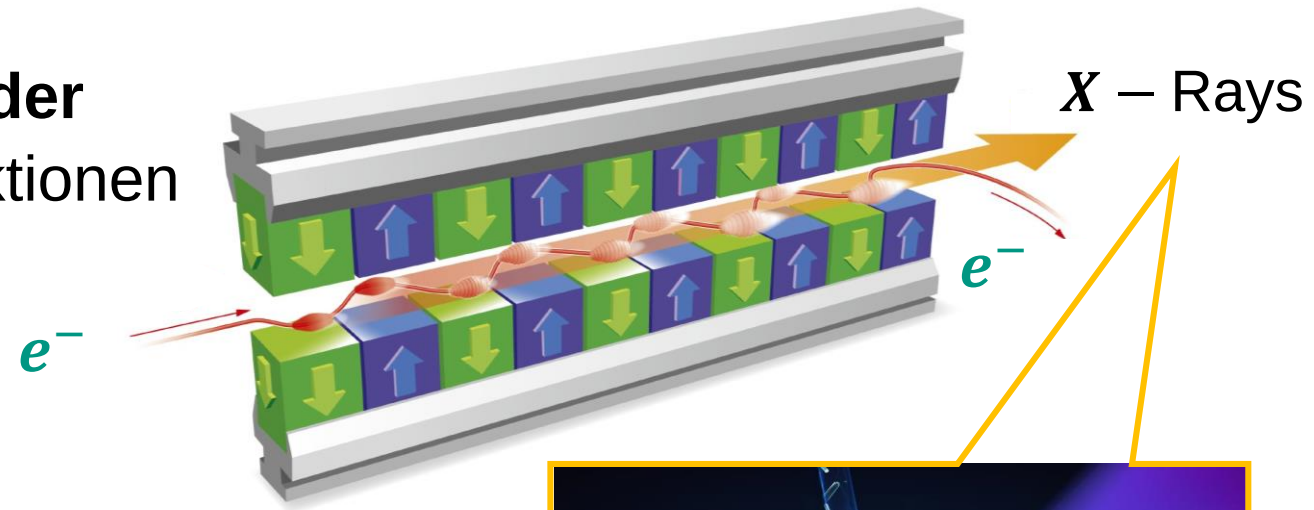
Anwendungen: Lepton–Beschleuniger

■ European *XFEL*: *X* – Ray *F*ree – *E*lectron *L*aser (seit 2017)

- 27000 Röntgenblitze / s : 3 *D* – Bilder von Molekülen, Ablauf chem. Reaktionen



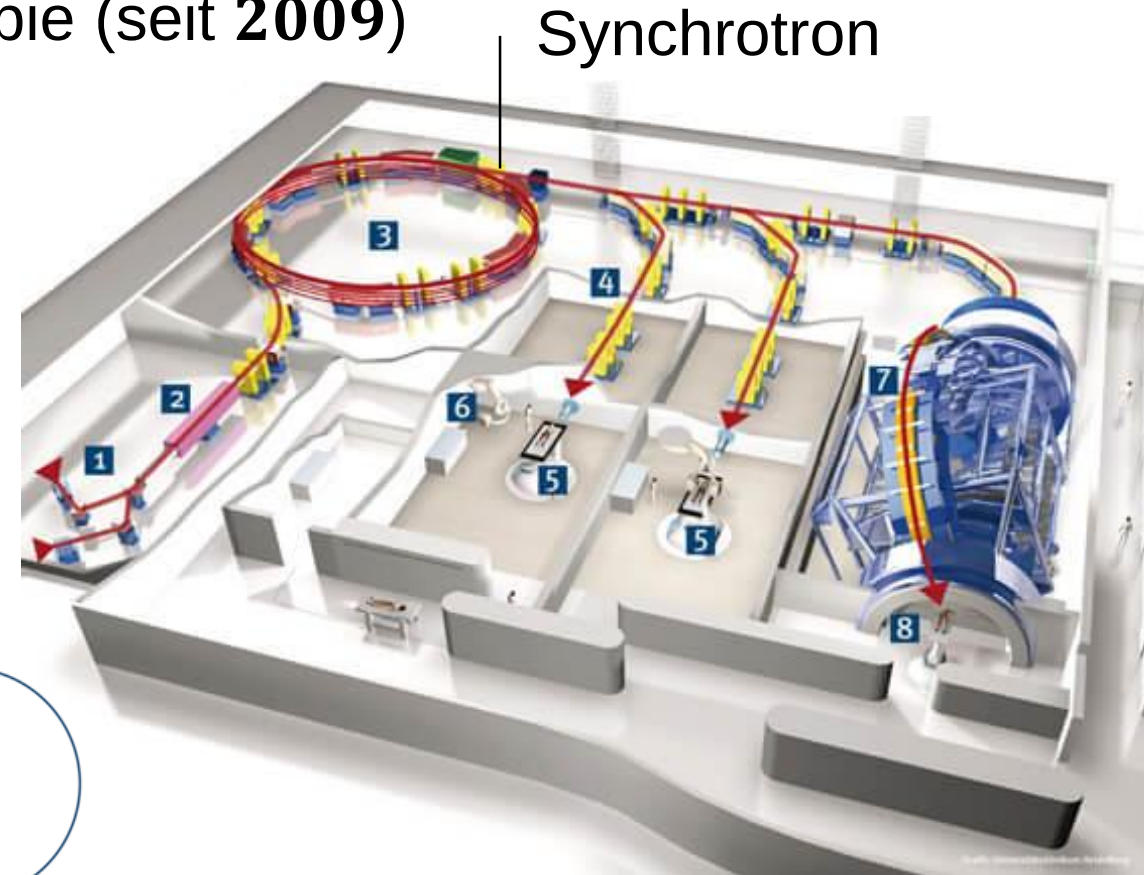
Präparationsarbeiten
an Probenkammer

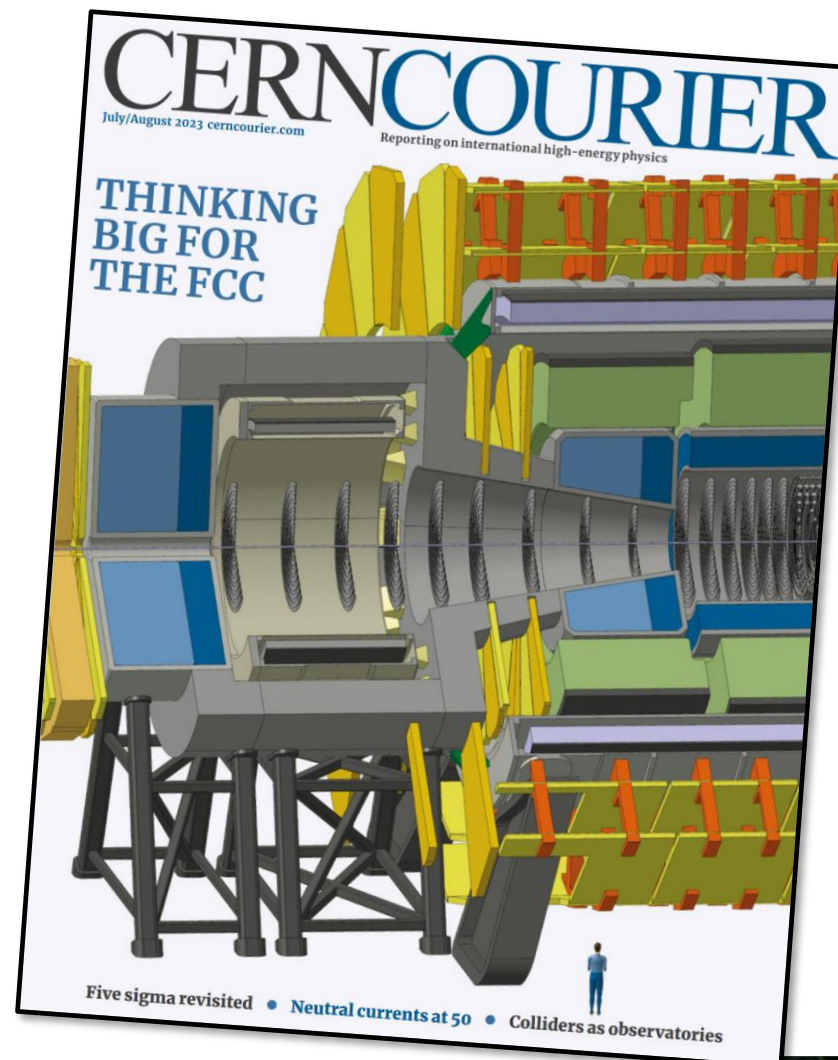
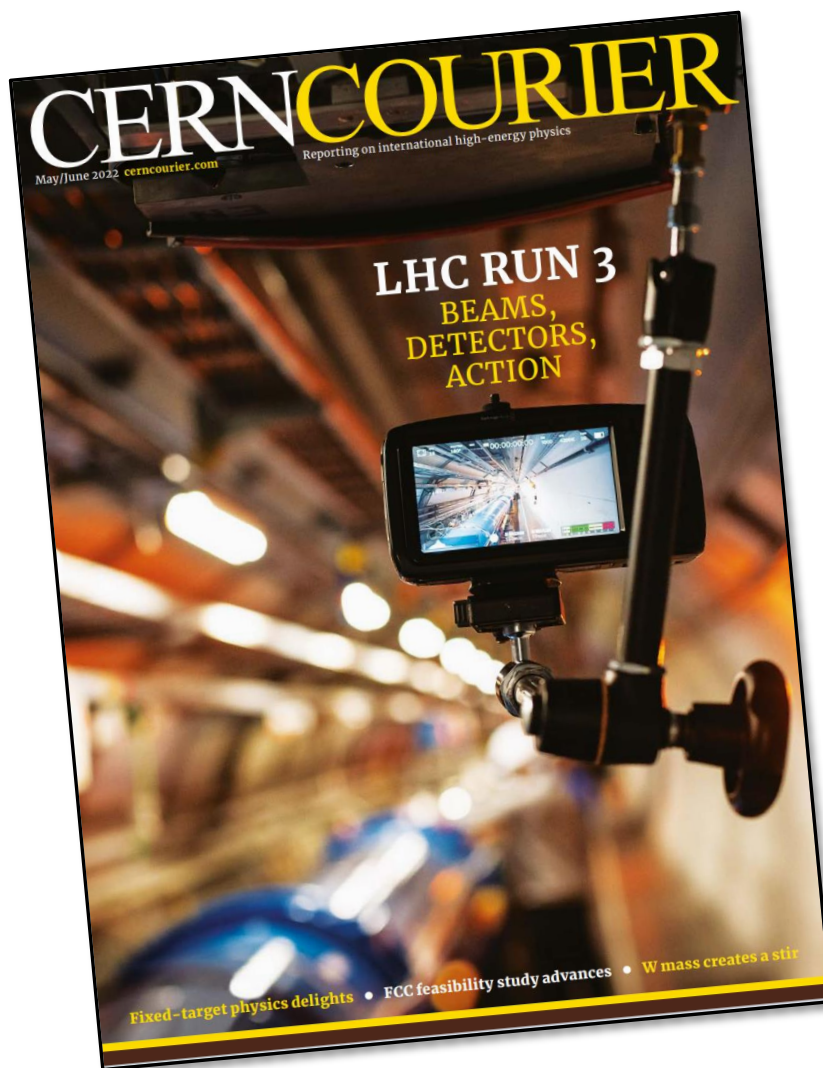


Anwendungen: Hadron–Beschleuniger

■ Therapie mit Hadronen: von Protonen zu **Schwerionen**

- **HIT**: **H**eidelberger–**I**onenstrahl–**T**herapie (seit 2009)
- **Tumorthherapie** mit
Protonen $E_p = 48 - 221 \text{ MeV}$
und **Schwerionen** (**C** – 12,...)
Kohlenstoff: $E_{C-12} = 1,06 \dots 5,16 \text{ GeV}$
- Nutzung des **Bragg–Peaks** bei der
Energie–Deposition im Gewebe





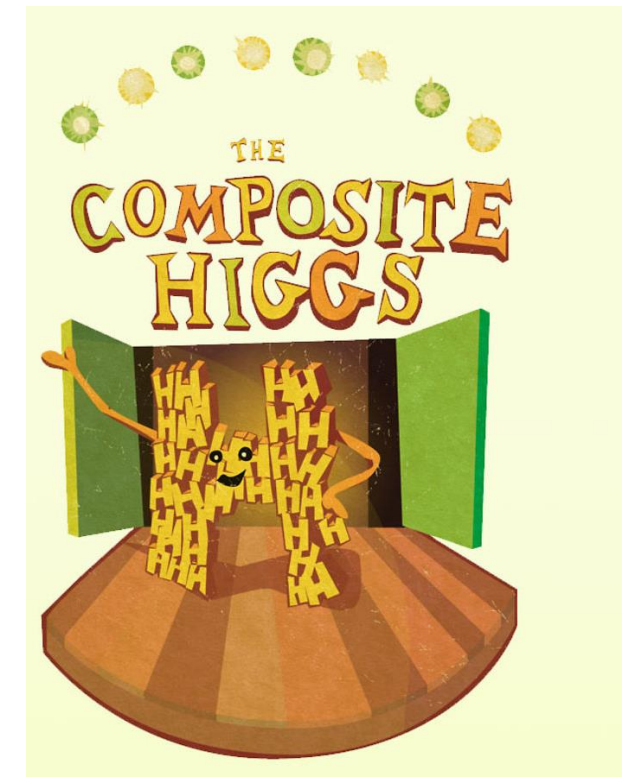
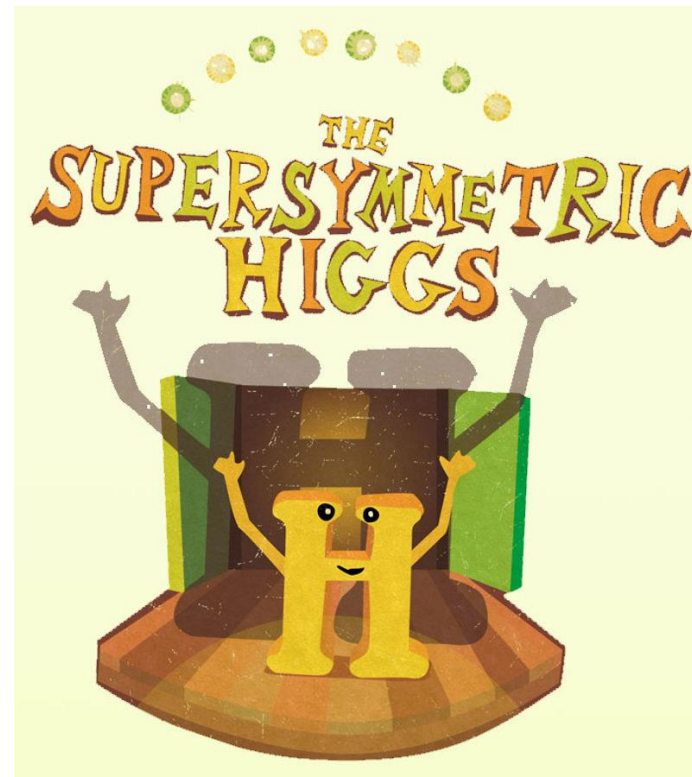
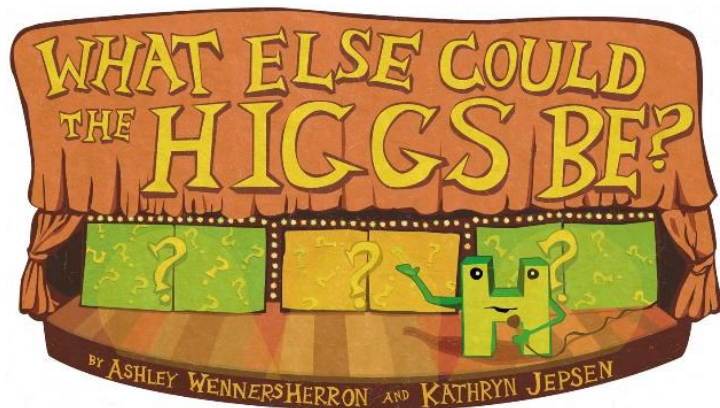
KAPITEL 8.2 : PHYSIK AN HADRON COLLIDERN



Aktuelle Fragestellungen am *LHC*

■ Erweiterte Higgs–Modelle: Suche nach weiteren **skalaren Teilchen**

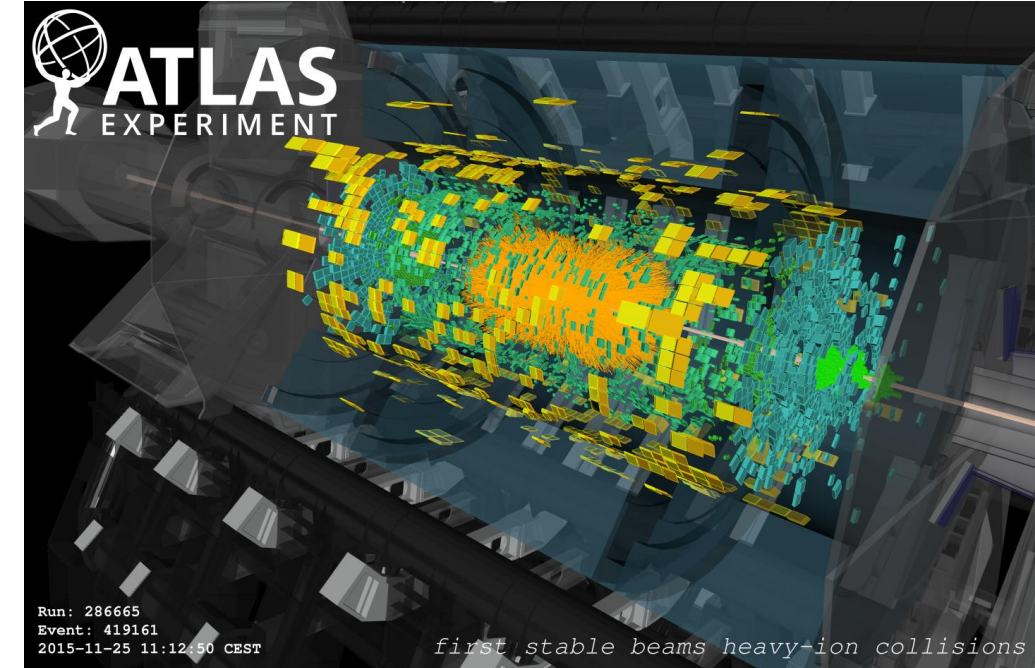
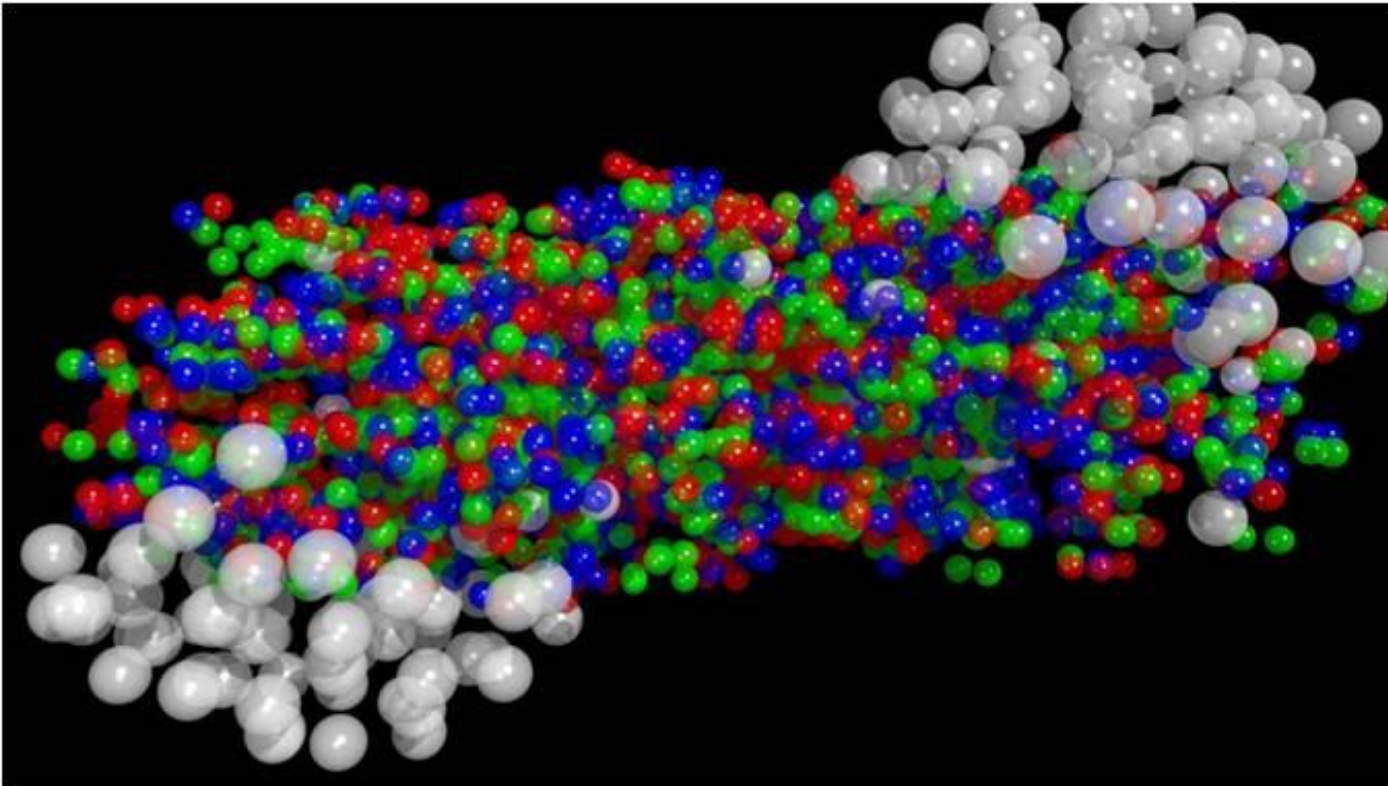
- erweiterte Modelle (Supersymmetrie) sagen **4 weitere Higgs–Zustände** vorher:
intensive Suche am *LHC*
- viele weitere Modelle, in denen das **Higgs** nicht elementar, sondern **zusammengesetzt** ist



Aktuelle Fragestellungen am *LHC*

■ hohes T bzw. ρ : existiert Phasenübergang zum **Quark–Gluon Plasma (QGP)**?

- mit Schwerionenstößen auf der Spur des **QGP**

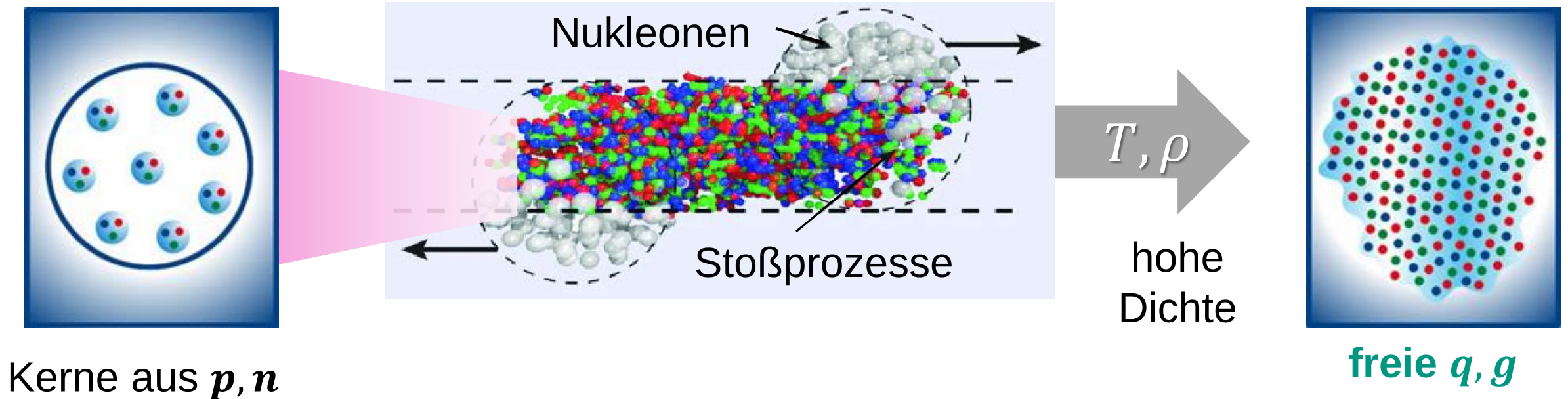


- ultra-relativistische **Pb – Pb –**
Kollisionen am **LHC** im **ATLAS**
Experiment: Signal eines **QGP**?

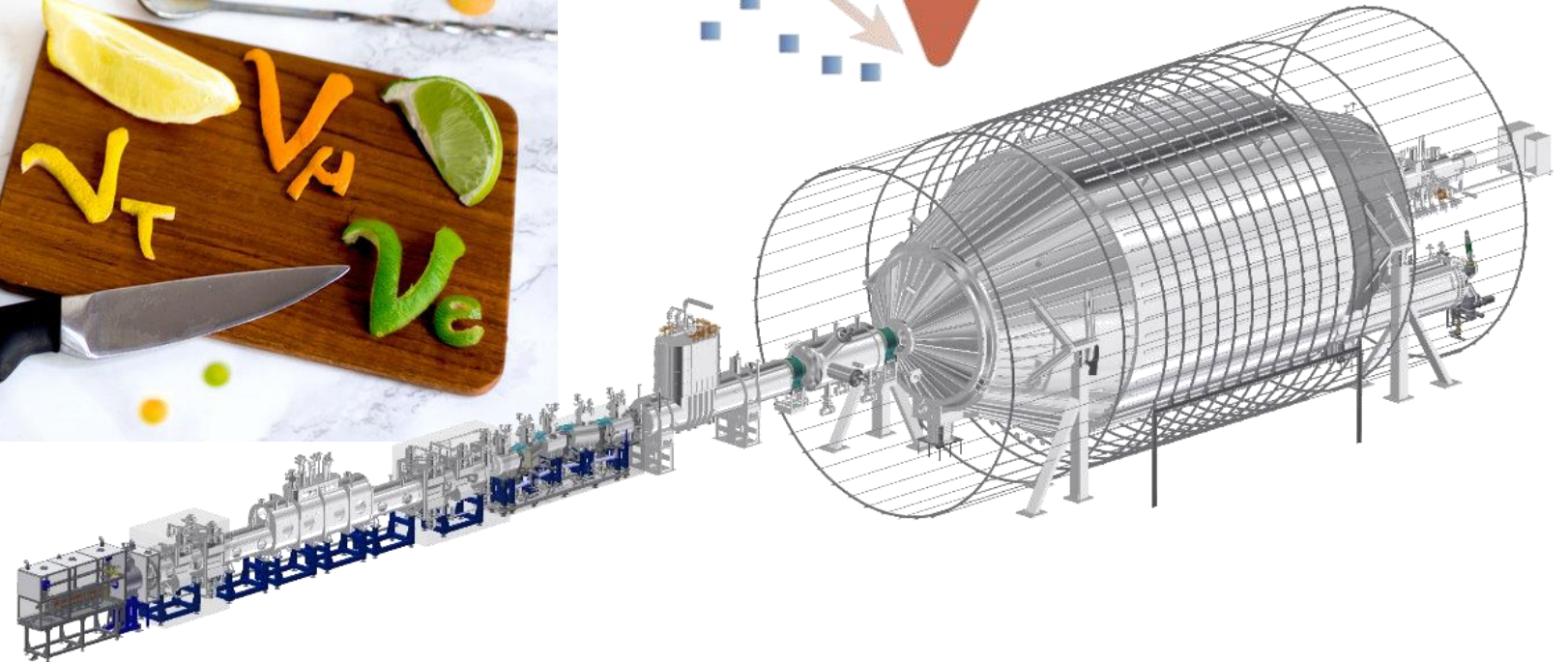
Manifestation des Quark–Gluon Plasmas?

- Materie bei niedrigem T, ρ : Quarks gebunden in Nukleonen (*Confinement*), Kernen gebunden durch QCD – ‘Restwechselwirkung’ (Pion–Austausch)

- Materie unter extremen Bedingungen: *QGP*?



Q: wikipedia, GSI, spektrum



KAPITEL 8.3 : NEUTRINO–PHYSIK

Projekt Poltergeist: erster Nachweis des Neutrinos

■ *Fred Reines* gelingt der lange ersehnte **experimentelle Durchbruch**

- Projekt Poltergeist: der erste **definitive** Nachweis durch **Koinzidenztechnik***



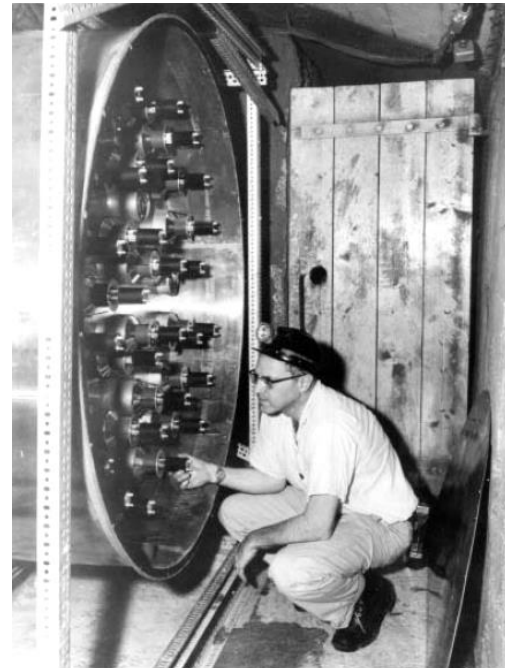
"for the detection of the **neutrino**"



Fred Reines
1918-1998

Herr Auge

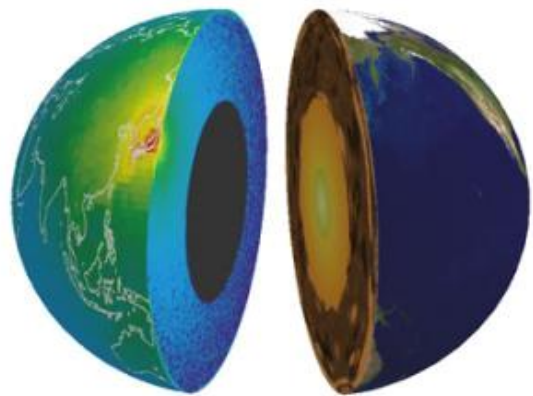
Hanford 1954: erster Neutrinodetektor 'Herr Auge'
300 ℓ Flüssigszintillator mit 90 *PMTs*!



Neutrinos: Nachweisprozesse auf MeV – Skala

■ die 'klassische' inverse β – Zerfallsreaktion

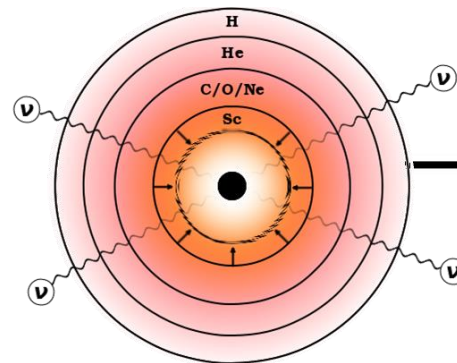
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad \sigma \sim 10^{-41} \text{ cm}^2 \text{ im } MeV \text{ – Bereich}$$



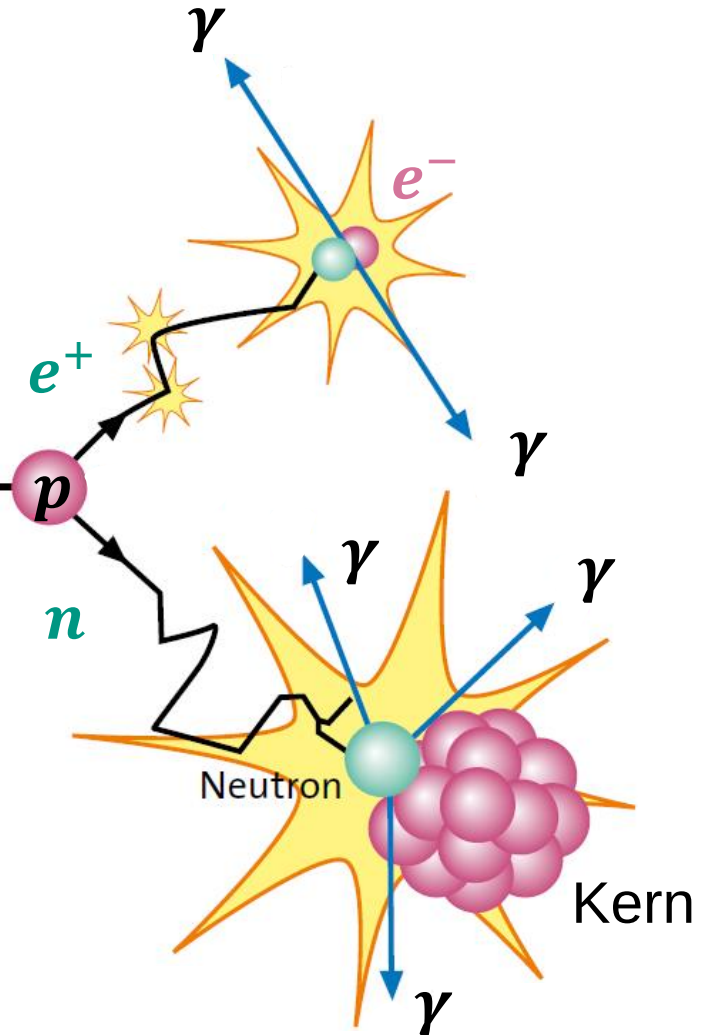
Geo- ν 's



Reaktor- ν 's



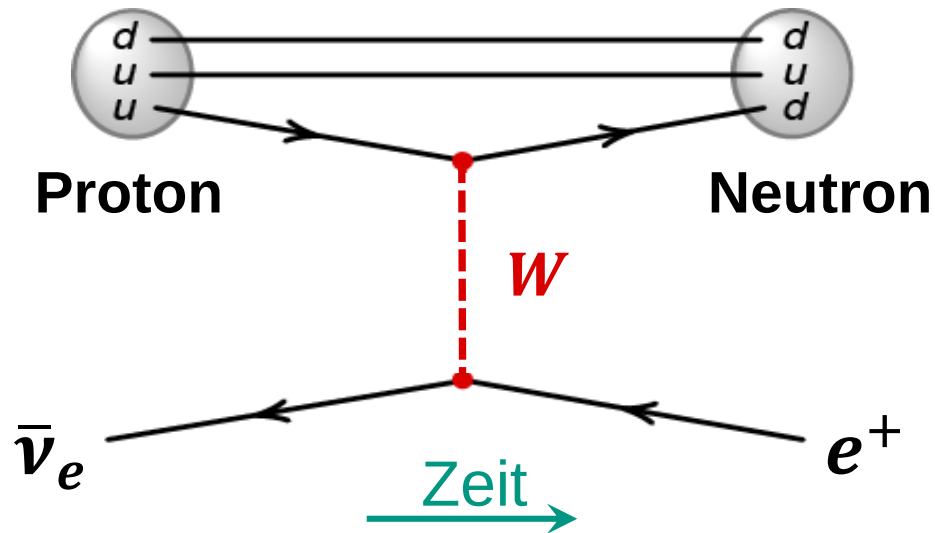
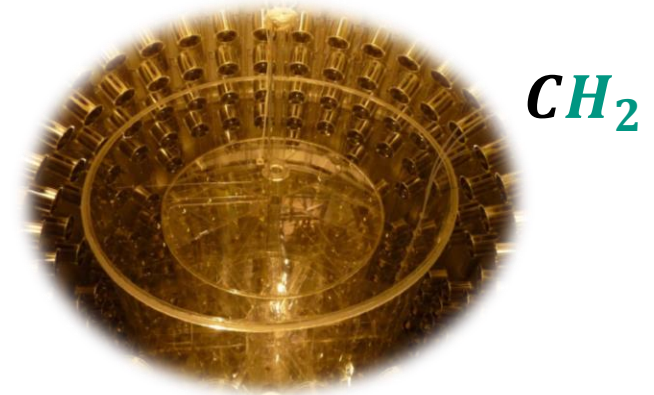
Supernova- ν 's



Neutrinos: Nachweisprozesse auf MeV – Skala

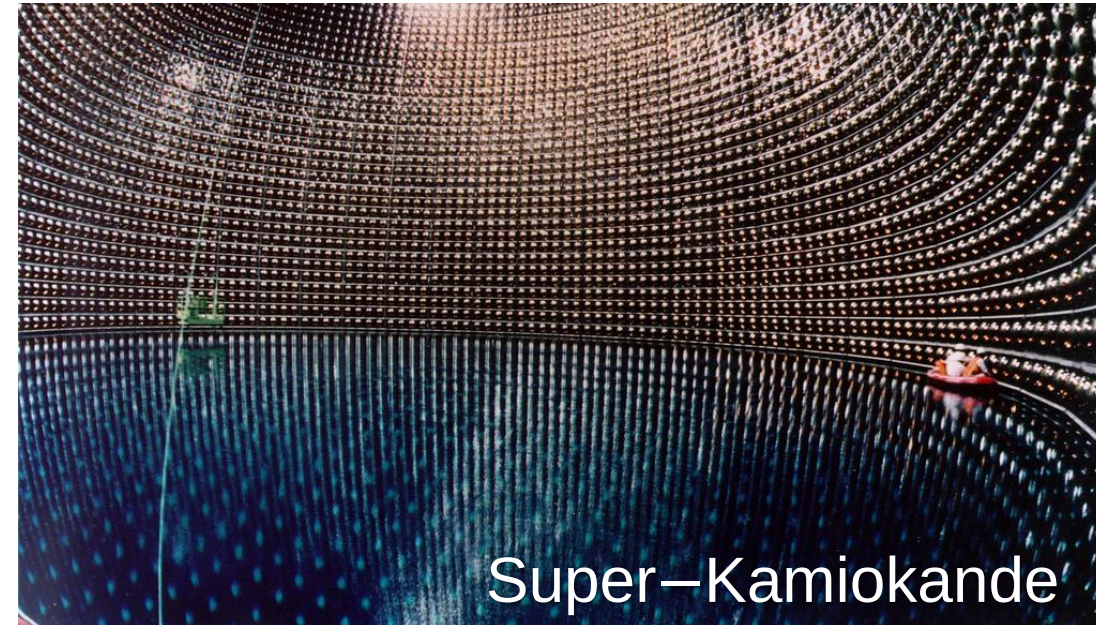
■ die 'klassische' inverse β – Zerfallsreaktion

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad \sigma \sim 10^{-41} \text{ cm}^2 \text{ im } MeV \text{ – Bereich}$$



Targets mit
freien
Protonen:

H_2O



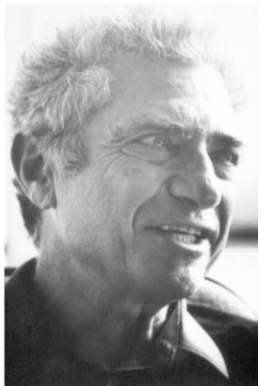
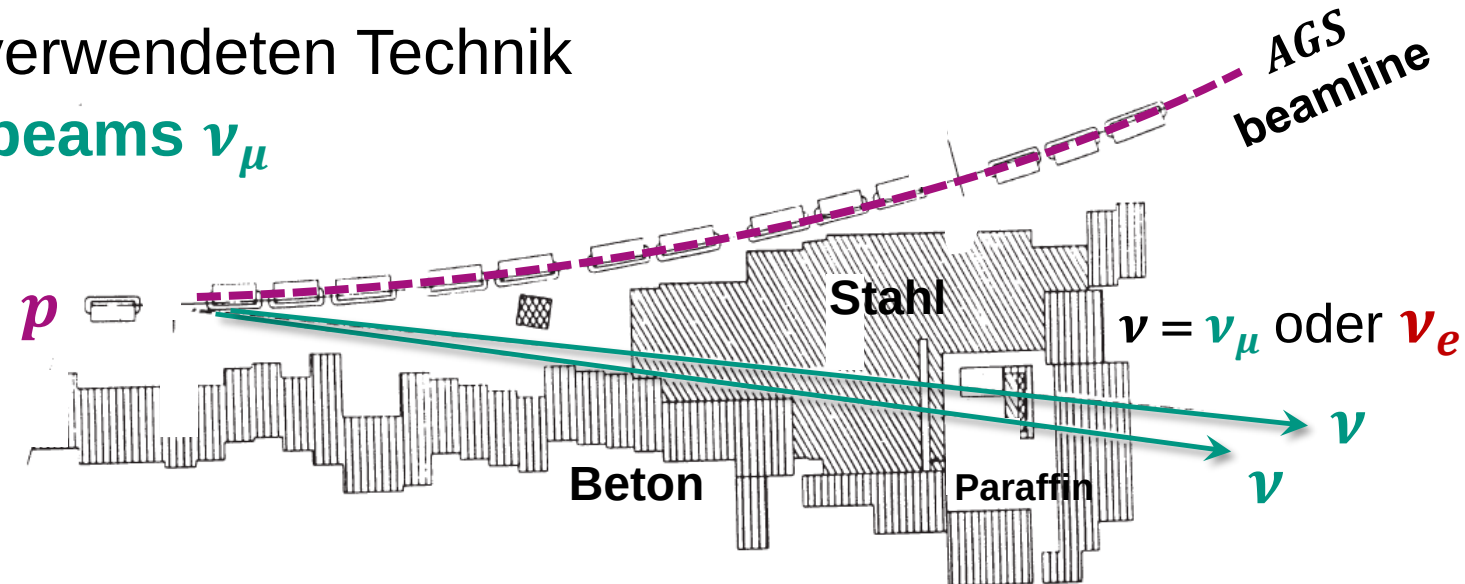
Nachweis der 2. Neutrino-Generation ν_μ am *AGS**

■ Lederman, Schwartz & Steinberger auf der Spur des *Flavourzustands* ν_μ

- Entwicklung der noch heute verwendeten Technik zur Erzeugung von *Neutrino beams* ν_μ

- p – Strahl trifft auf Target:
Zerfall $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

- Beobachtung: im ν – Strahl werden nur μ^- erzeugt!



Leon Lederman,
Mel Schwartz, Jack Steinberger

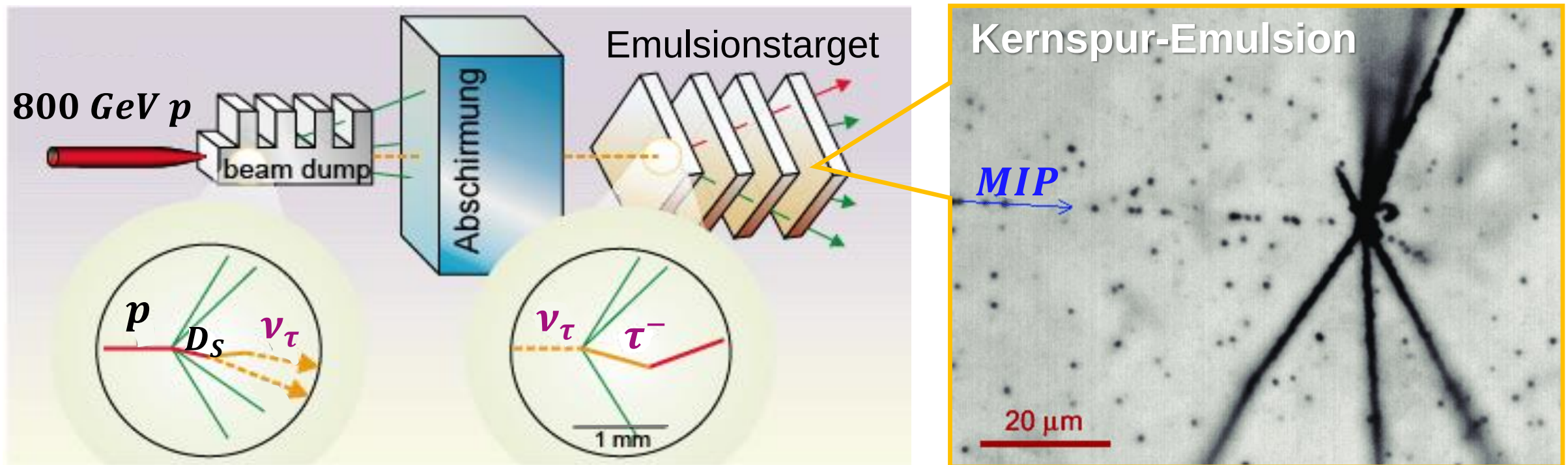
*"for the *neutrino beam* and the demonstration of the doublet structure of the leptons through the *discovery of the muon neutrino*"*



Nachweis der 3. ν – Generation am Fermilab

■ Direkter Nachweis des ν_τ durch das *DONUT** Experiment

- **Fermilab**: hochenergetischer (50 GeV) Strahl von ν_τ aus Zerfällen von Mesonen mit **Charm** c – Quarks (D_S)



Nachweis der 3. ν – Generation am Fermilab

■ Direkter Nachweis des ν_τ durch das *DONUT** Experiment

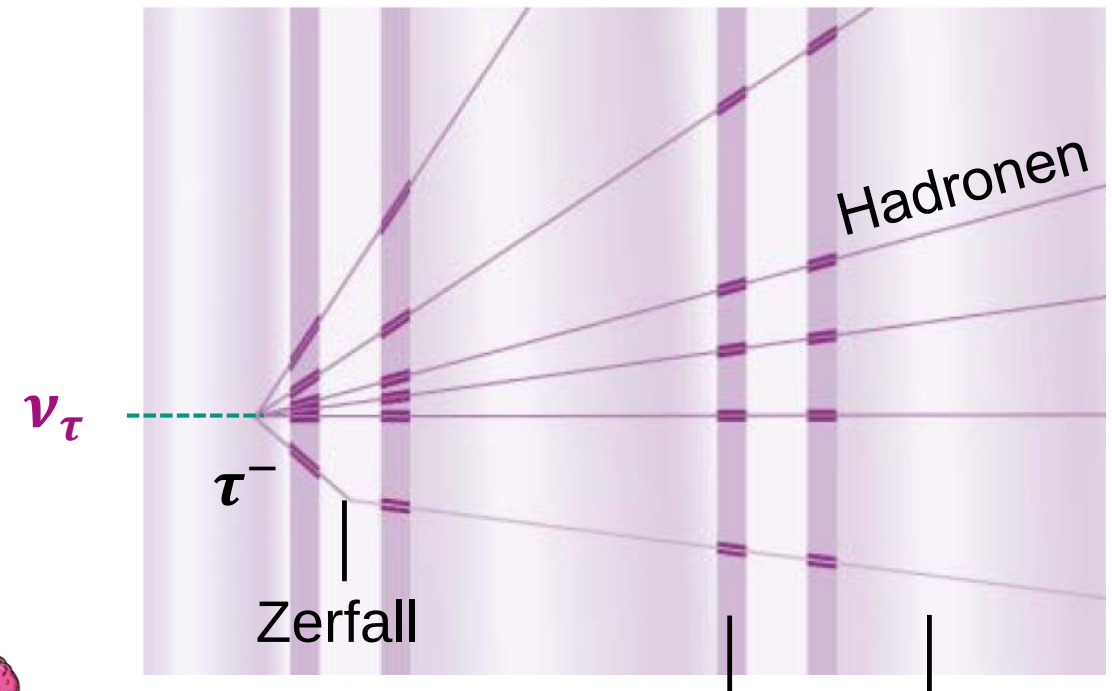
- Nachweis der ν_τ in ´Sandwich´-Struktur aus Kernemulsion / Edelstahl

- wichtig: weiteres Detektor–System aus Szintillatoren & Spurdetektoren zum Nachweis der Spuren geladener Teilchen

- Spursystem identifiziert ´interessante´ Ereignisse → Entwicklung der Emulsion

- **1997: 4 Signalereignisse aus ν_τ** mit
 $N_{bg} = (0,35 \pm 0,05)$ d.h. $3,5 \sigma$

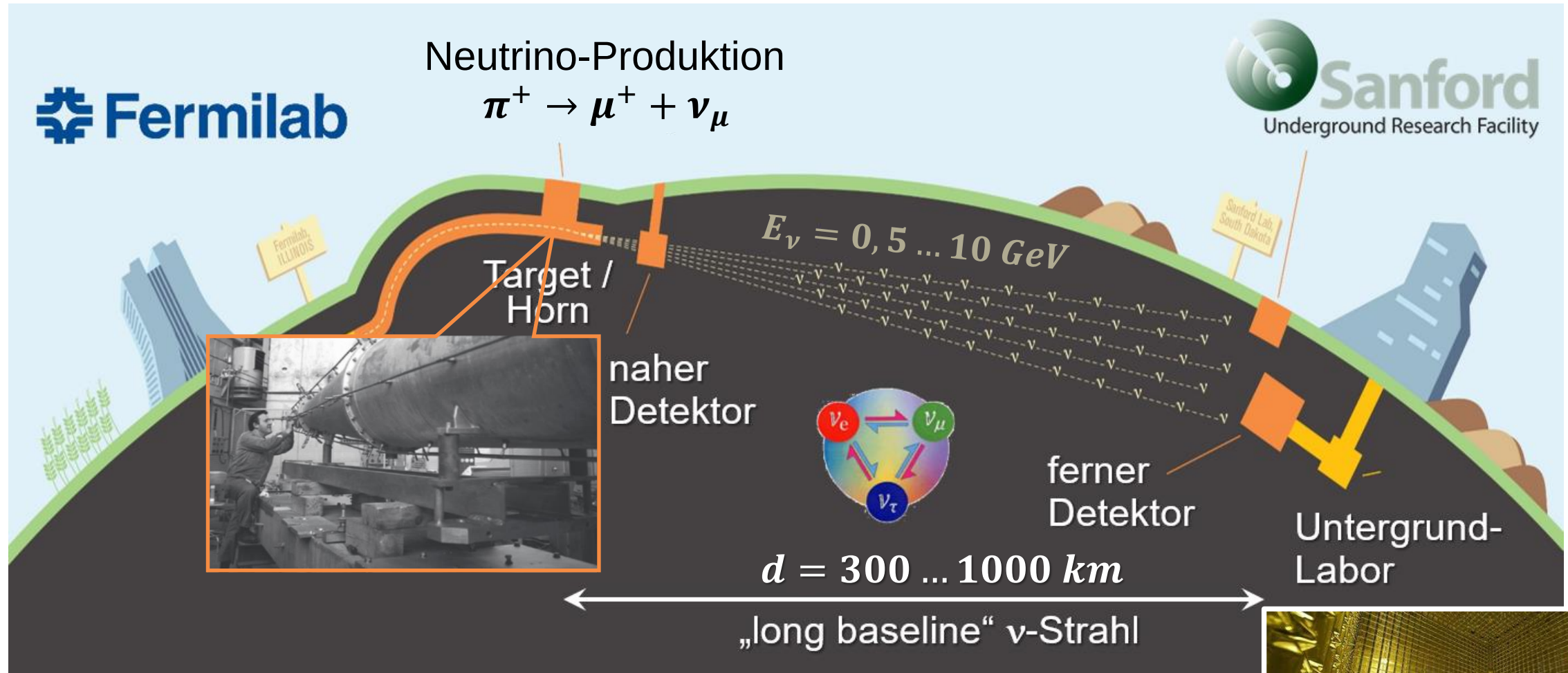
*



100 μm Film–Emulsion + 1 mm Stahl

Beschleuniger–Neutrinos

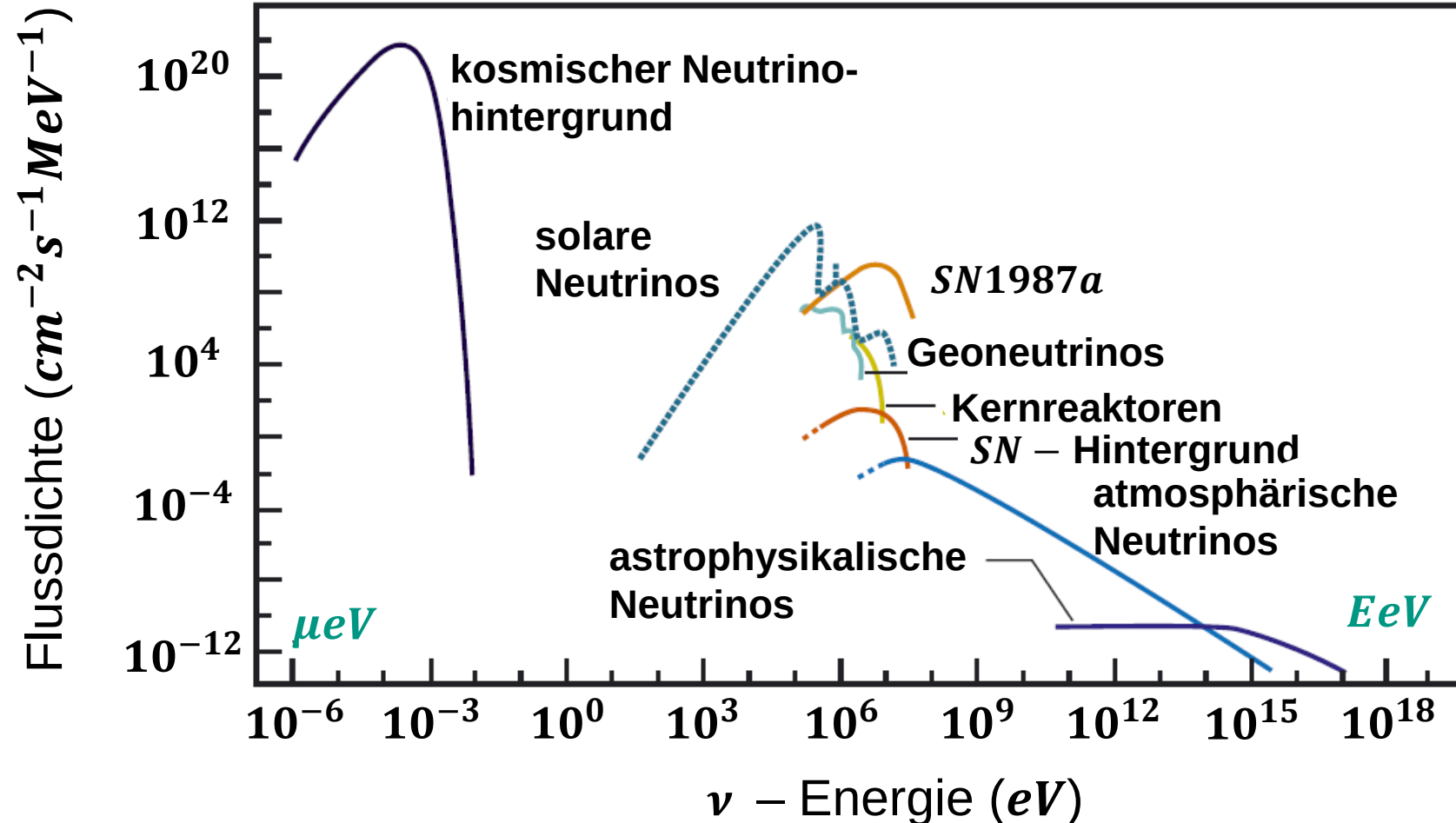
- eine wichtige Neutrino–Quelle zum Studium ihrer Eigenschaften



Neutrinos aus dem Kosmos

■ ein breites Energiespektrum von μeV bis zu EeV

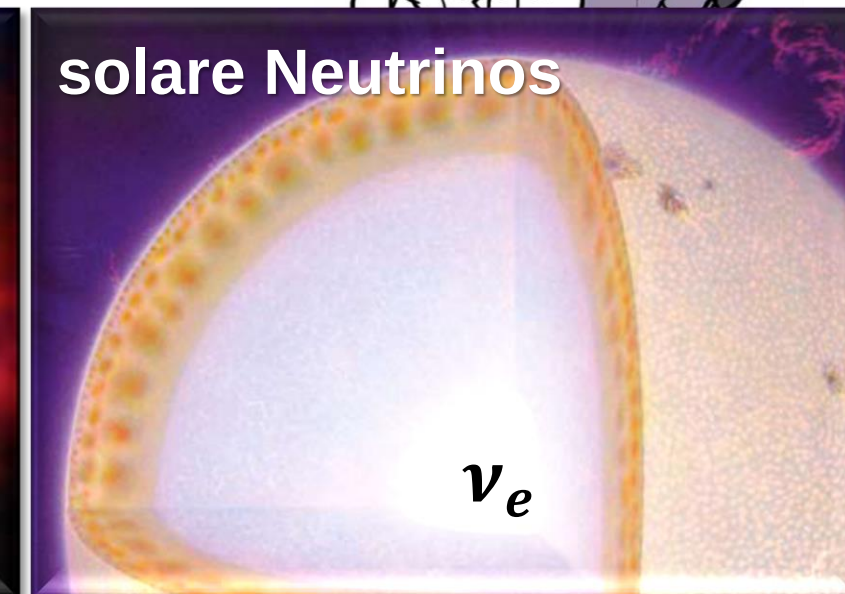
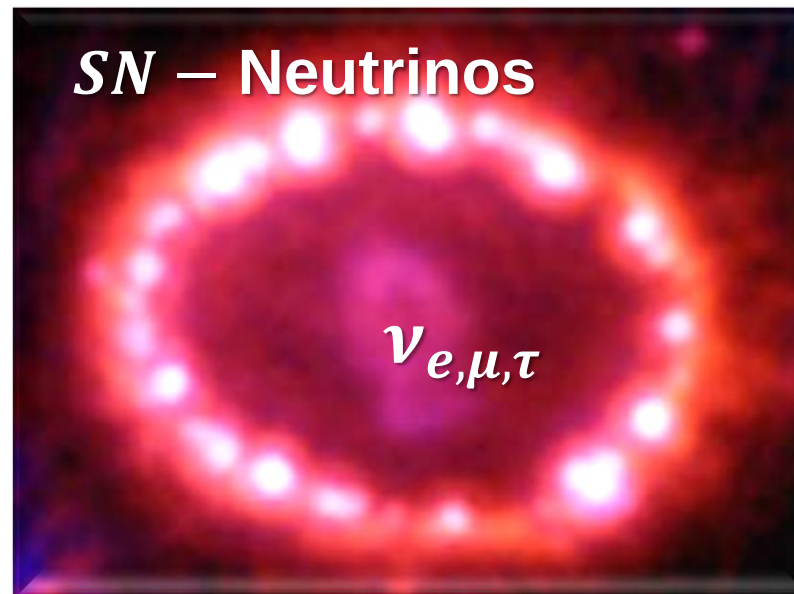
- ν 's als **Messengers**:
Information aus
den 'verborgenen'
Regionen im **Kosmos**

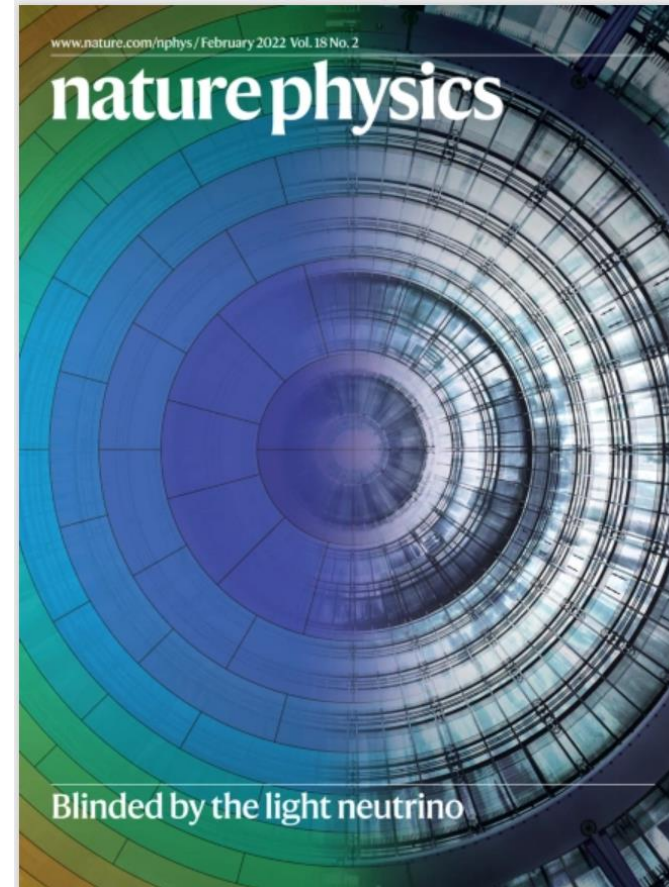
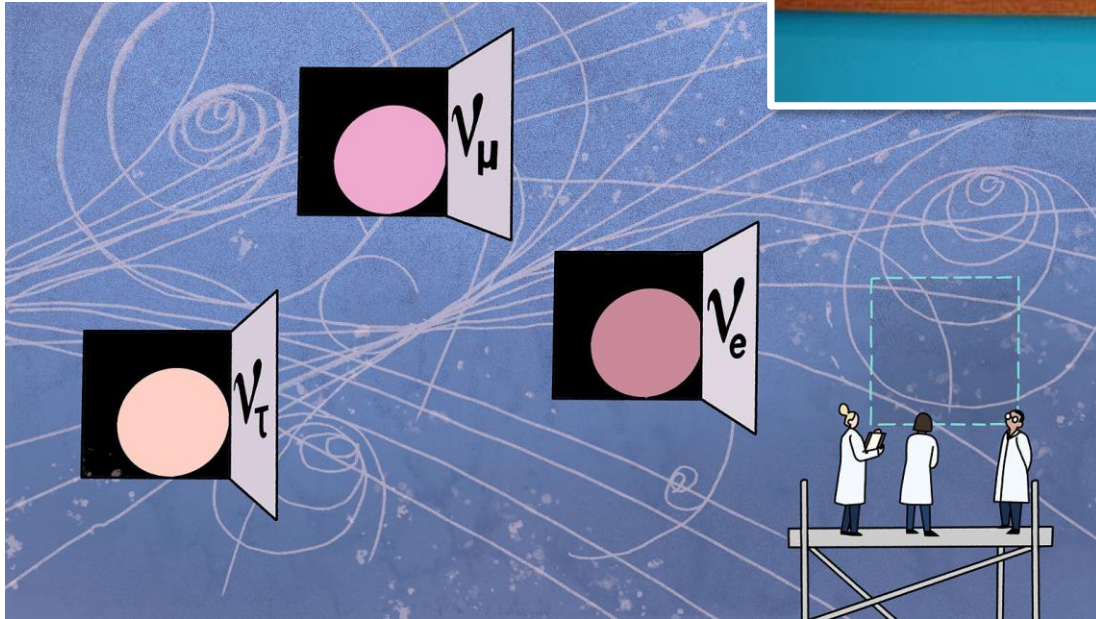


Neutrinos aus dem Kosmos

■ ein breites Energiespektrum von μeV bis zu EeV

- ν 's als **Messengers**:
Information aus
den 'verborgenen'
Regionen im **Kosmos**
- ν 's als **Messengers**:
Information über
ihre 'verborgenen'
inneren Eigenschaften –
⇒ neue Physik jenseits
des Standardmodells





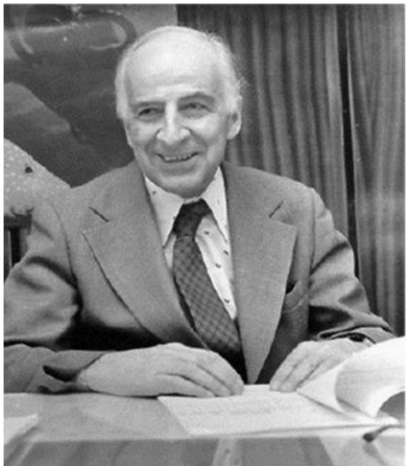
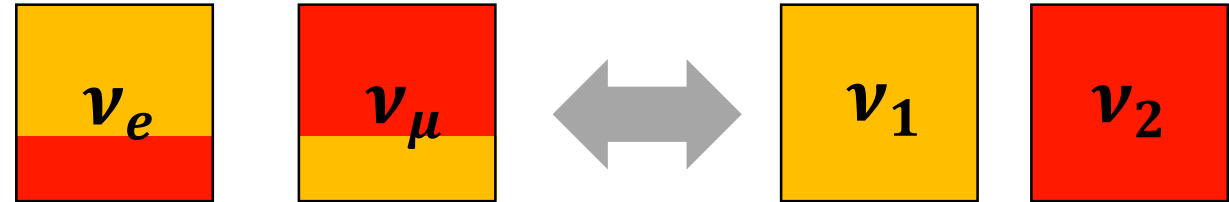
KAPITEL 8.4 : NEUTRINOS – OSZILLATIONEN UND MASSE

Neutrino–Oszillation: Grundlagen

■ Masseneigenzustände $(\nu_1, \nu_2) \neq$ Flavour–Eigenzustände (ν_e, ν_μ)

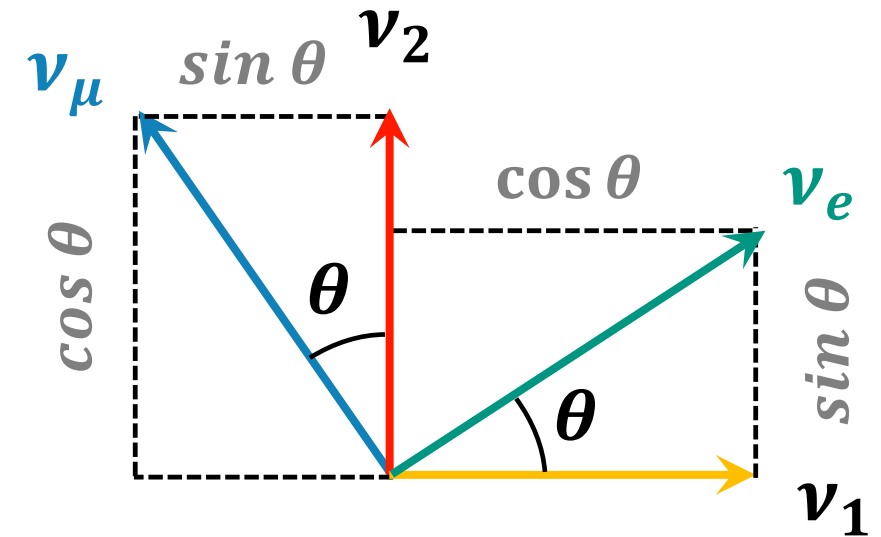
2 –Flavour–Mischung:

enge Analogie zur *CKM* – Mischung
der linkshändigen Quarks



Bruno Pontecorvo

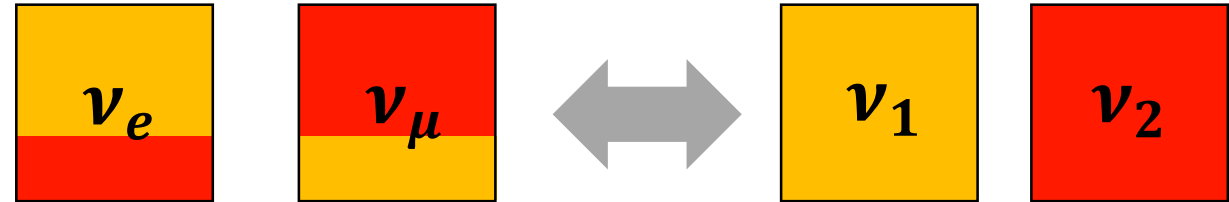
$$\begin{array}{c} \text{Flavourzustände} \\ | \\ \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \end{array} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \begin{array}{c} | \\ \text{Massenzustände} \end{array}$$



Neutrino–Oszillation: Grundlagen

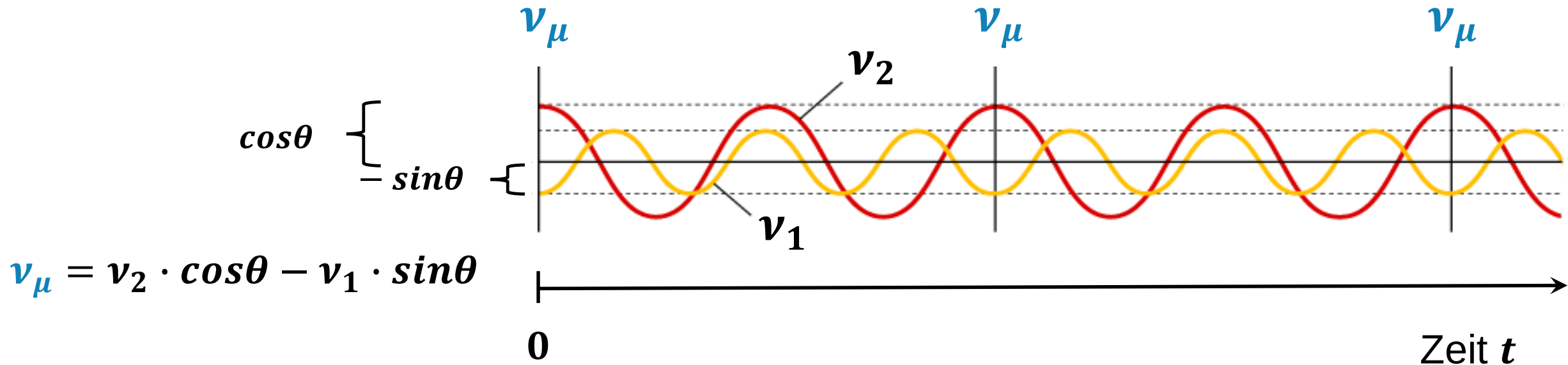
■ Masseneigenzustände $(\nu_1, \nu_2) \neq$ Flavour–Eigenzustände (ν_e, ν_μ)

2 –Flavour–Mischung bei Propagation:



Überlagerung von (ν_1, ν_2) :

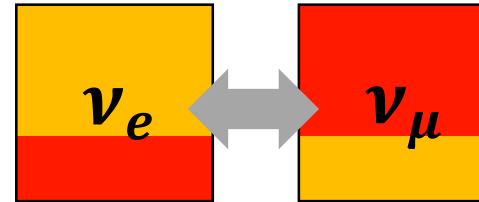
Oszillation zwischen (ν_e, ν_μ)



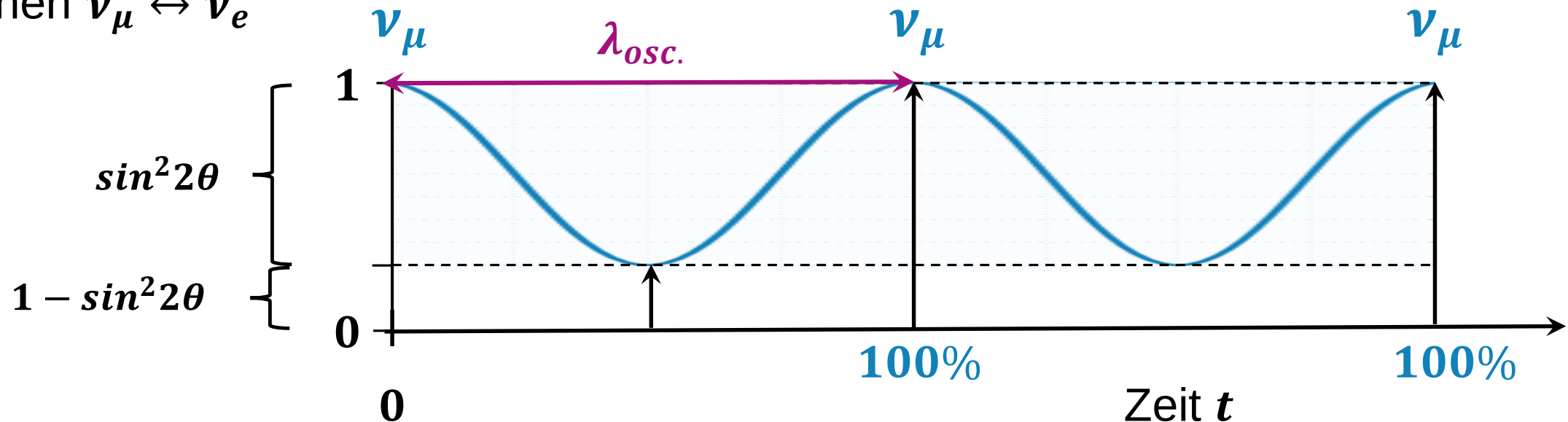
Neutrino–Oszillation: Grundlagen

■ Masseneigenzustände $(\nu_1, \nu_2) \neq$ Flavour-Eigenzustände (ν_e, ν_μ)

2 –Flavour–Mischung bei Propagation:



Periodische Variation der
 ν_μ – Intensität, da Flavour-
Oszillationen $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$



Neutrino–Oszillation: 2 – Flavour – Formel

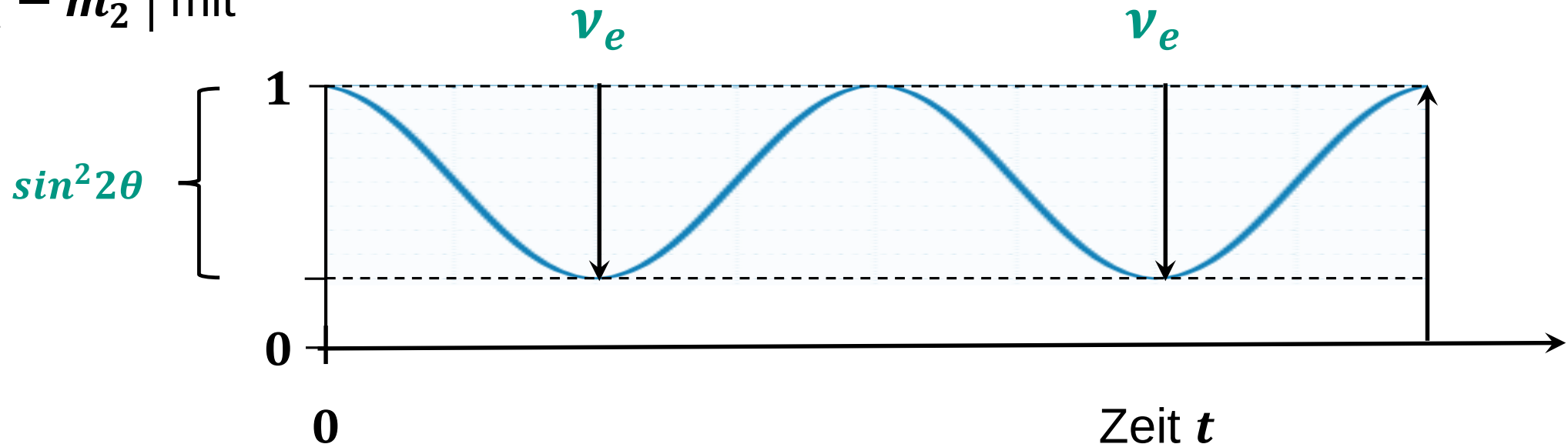
■ Wahrscheinlichkeit P für das Auftauchen (‘*appearance*’) eines neuen Flavours

Parameter:

- Mischungswinkel θ
- Massenparameter
 $\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$ mit
 m_1 von ν_1
 m_2 von ν_2

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1,27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L_\nu}{E_\nu} \right)$$

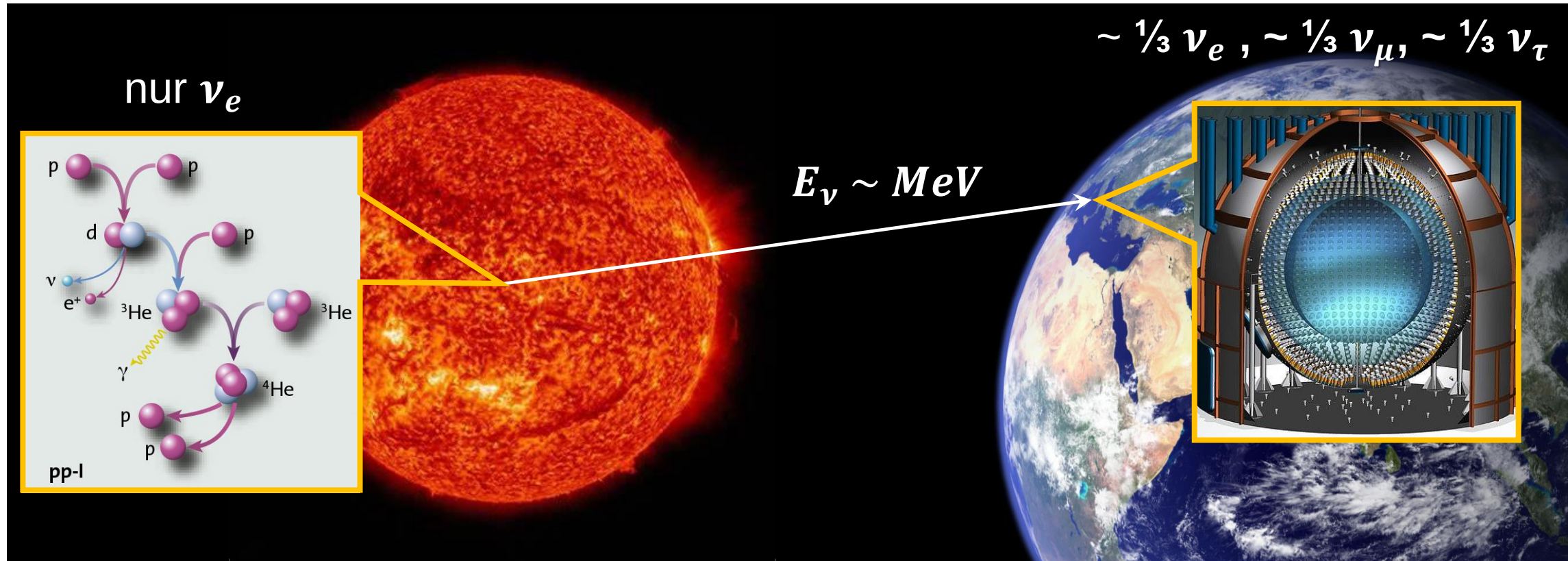
— in m
— in MeV



Neutrino-Oszillation: solare & atmosphärische ν 's

■ große Mischungseffekte bei den solaren ν 's*

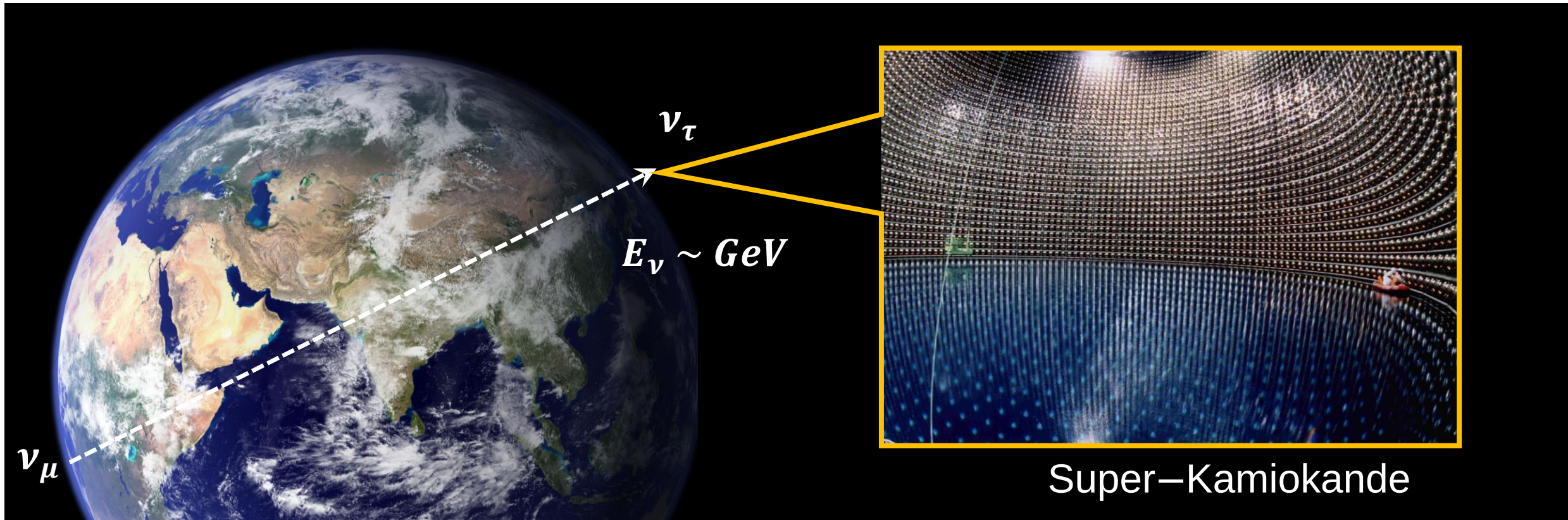
- viele Jahrzehnte: '**solares Neutrino-Problem**', d.h. deutliches Defizit an ν_e



Neutrino-Oszillation: solare & atmosphärische ν 's

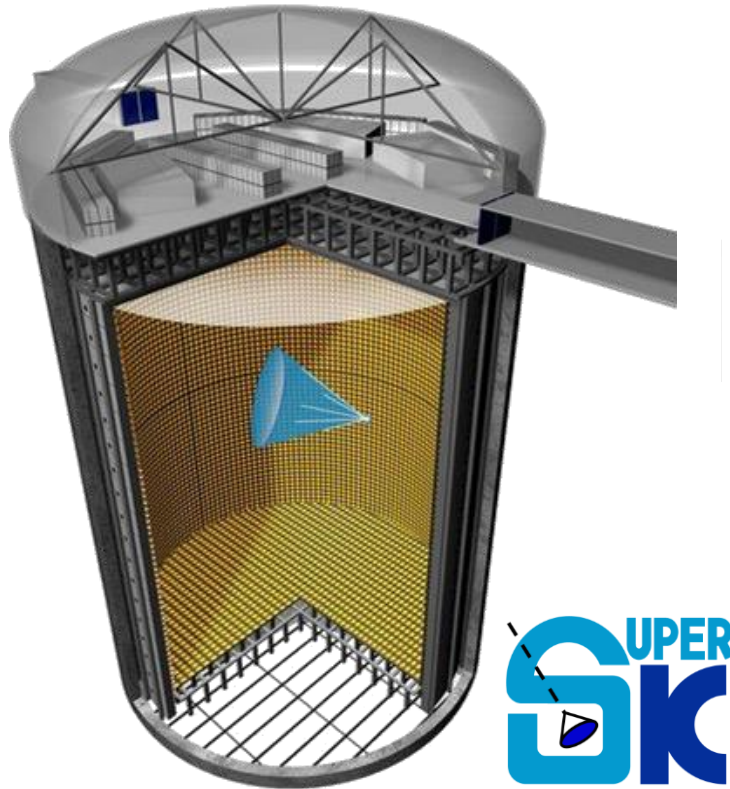
■ maximale Mischungseffekte bei den atmosphärischen ν 's*

- viele Jahrzehnte: 'atmosphärisches Neutrino**problem**', d.h. Flavouranomalie



ν – Oszillationen: Nobelpreis 2015

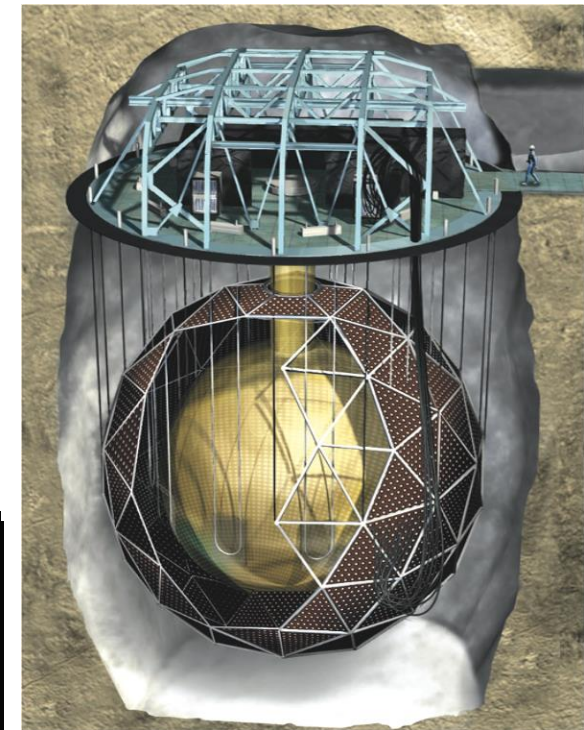
■ Implikation – Teil II: erste Physik jenseits des Standardmodells



2015 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

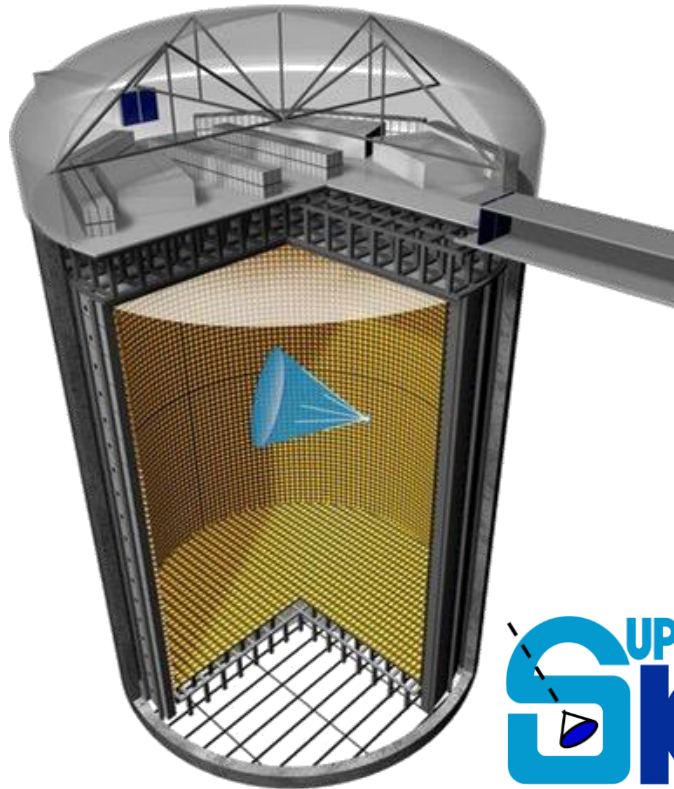


Takaaki Kajita and
Arthur B. McDonald



ν – Oszillationen: Nobelpreis 2015

■ Implikation – Teil II: erste Physik jenseits des Standardmodells



Takaaki



im *kl. HS A*

Master–VL: Leptonische Mischungsmatrix

- Matrix 'entkoppelt' wie bei den Quarks in 3 separate Mischungsterme

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{1. \& 2. Generation}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix}}_{\text{2. \& 3. Generation}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix}}_{\text{1. \& 3. Generation}}$$

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

δ = CP –
verletzende
Phase

1. & 2. Generation

2. & 3. Generation

1. & 3. Generation

$$\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu$$

$$\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$$

$$\nu_e \Leftrightarrow \nu_\tau$$

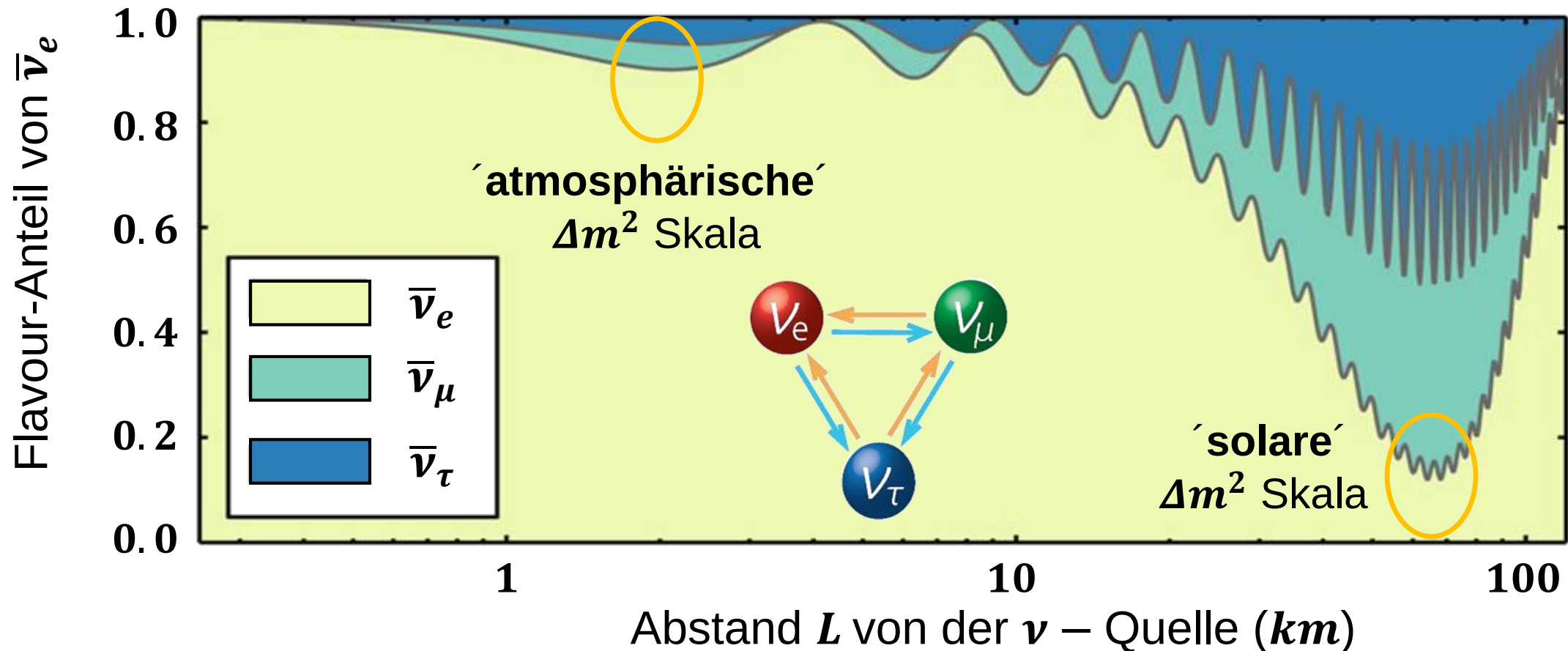
$$\sin^2 2\theta_{12} = 0,861 \quad \sin^2 2\theta_{23} = 0,97 \quad \sin^2 2\theta_{13} = 0,10$$

- erste Hinweise auf deutliche CP – Verletzung bei den neutralen Leptonen

Master–VL: 3 – Flavour–Mischungseffekte

■ Berechnete Entwicklung eines Strahls von $\bar{\nu}_e$ im MeV – Energiebereich

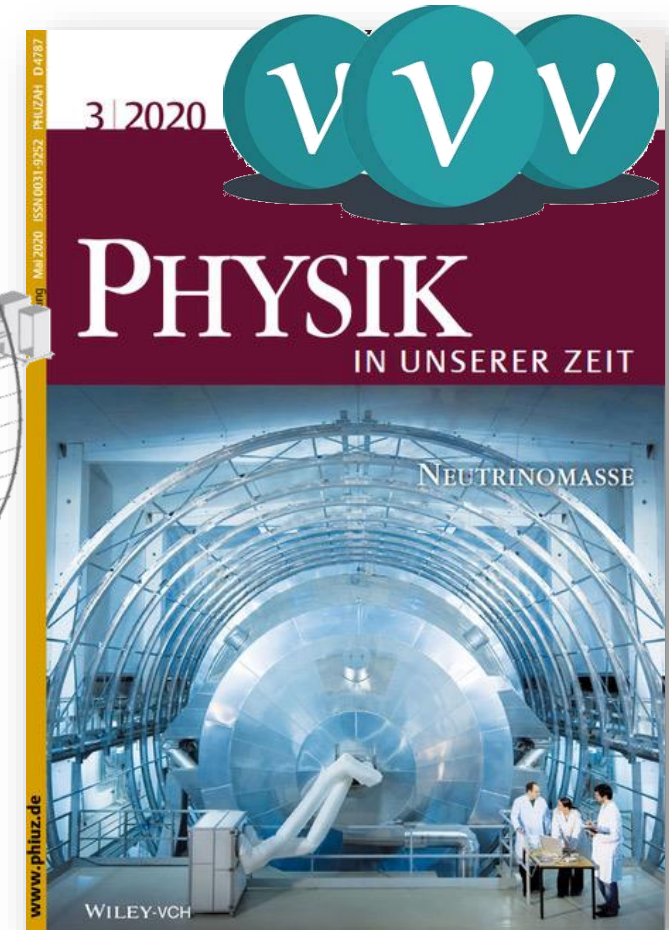
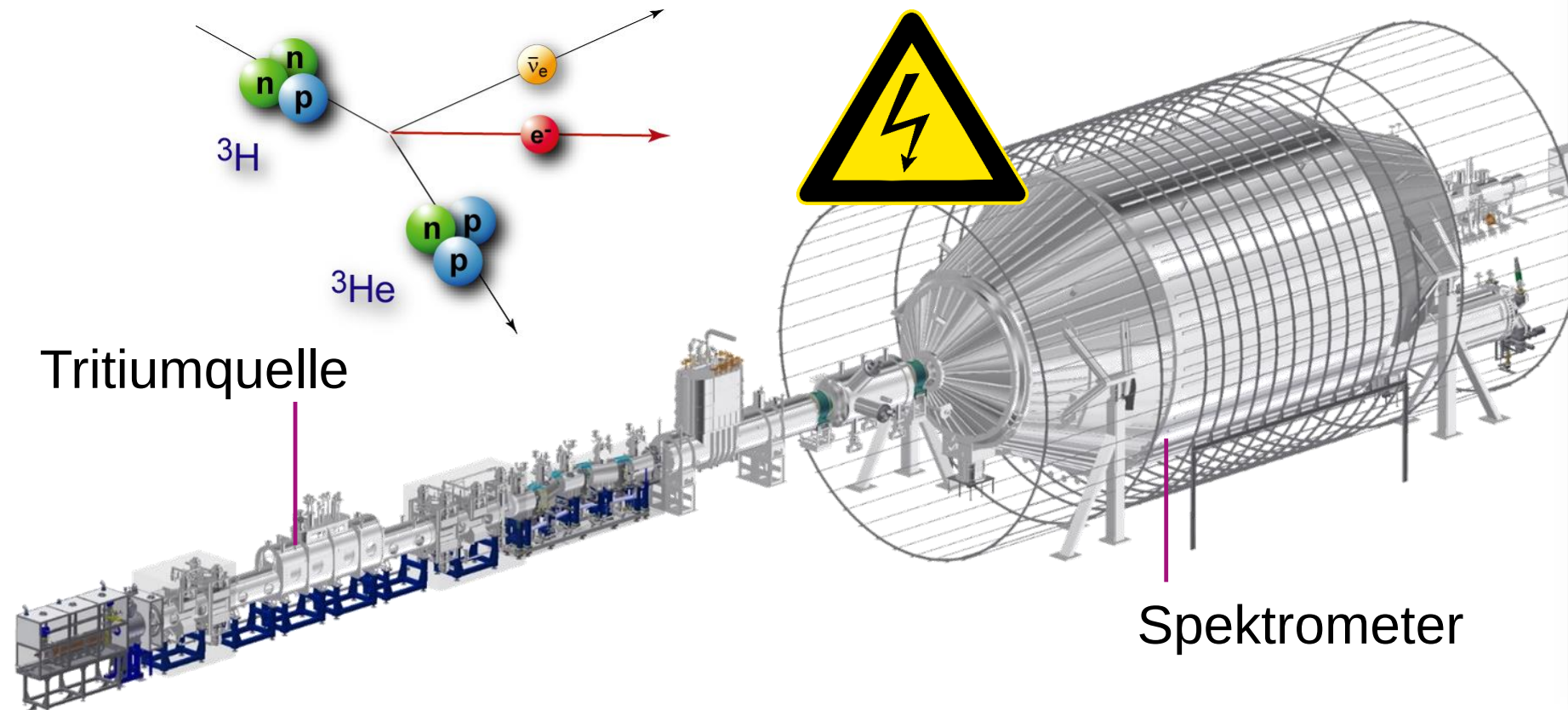
⇒ Zusammensetzung des Strahls abhängig von L



KATRIN Experiment: Messung der ν – Masse

■ direkte, modellunabhängige Messung der Masse des Neutrinos

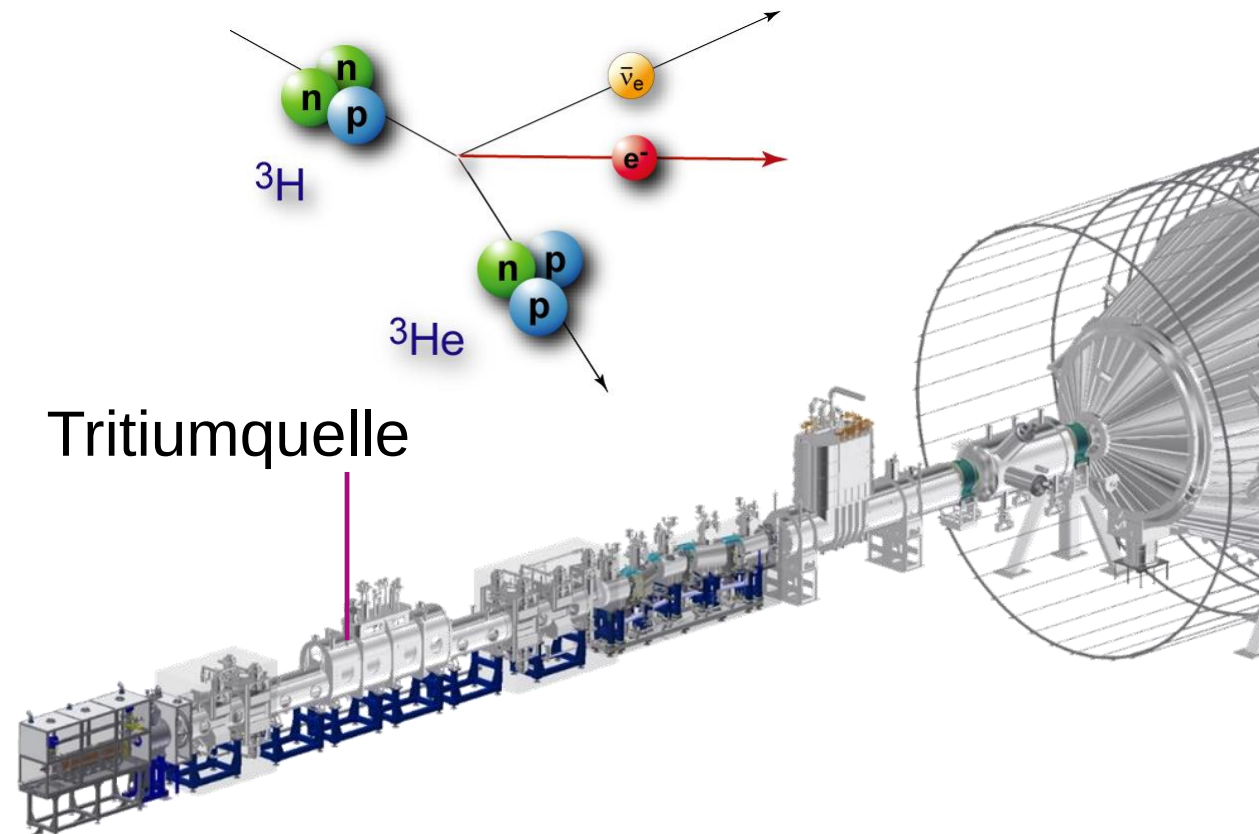
- ein 70 m langer Experimentieraufbau am Campus Nord



KATRIN Experiment: Messung der ν – Masse

■ direkte, modellunabhängige **Messung der Masse des Neutrinos**

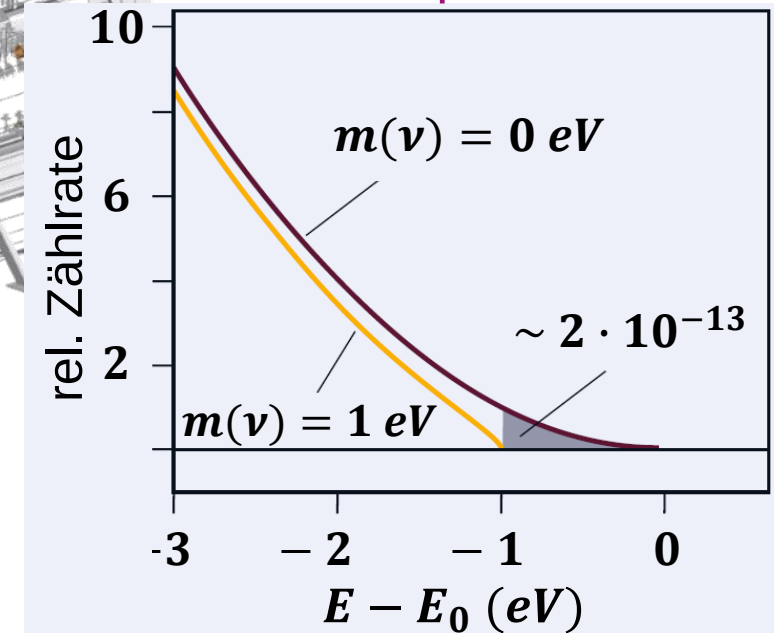
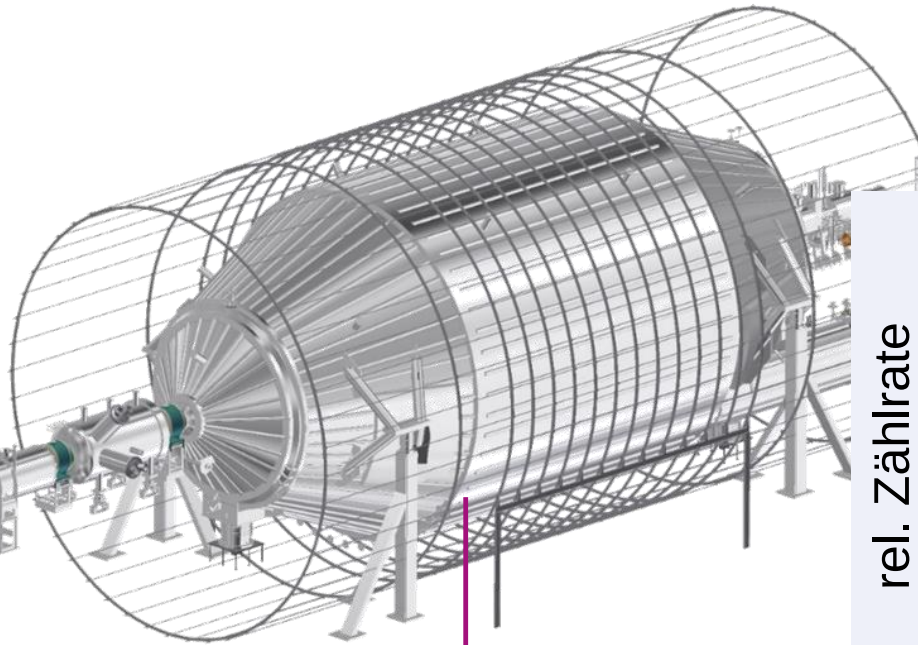
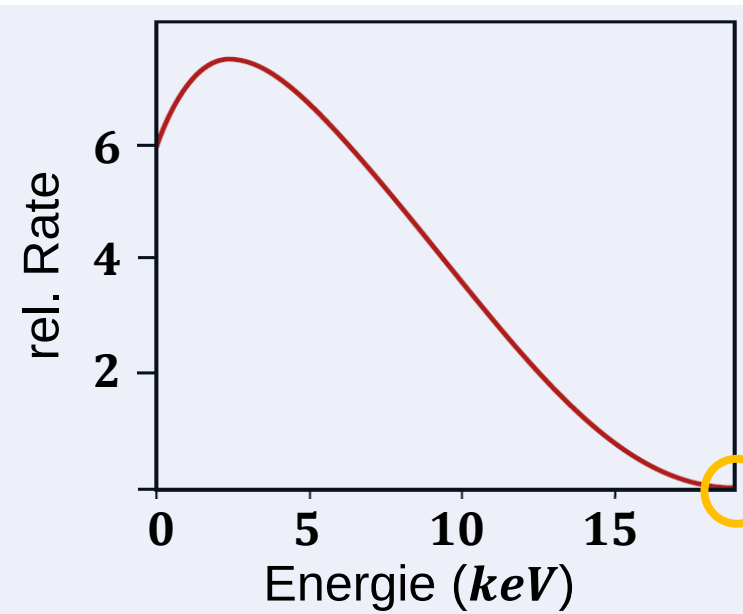
- ein **70 m** langer Experimentieraufbau: großes elektrostatisches Spektrometer



KATRIN Experiment: Messung der ν – Masse

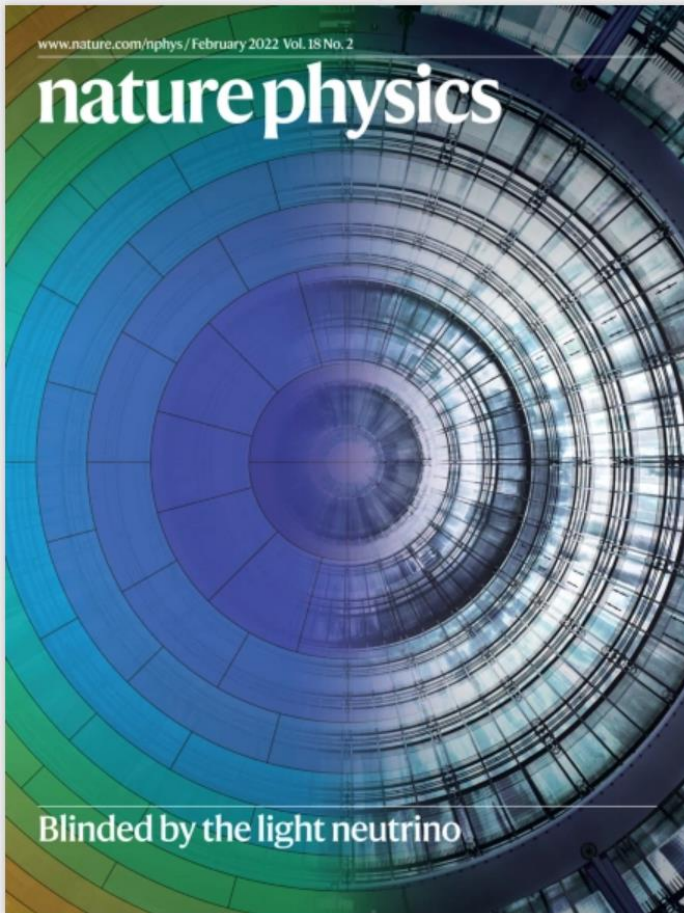
- Masse des Neutrinos: sehr kleine **spektrale Modifikation am Endpunkt E_0**

- mehrjährige Messung der Form des Spektrums

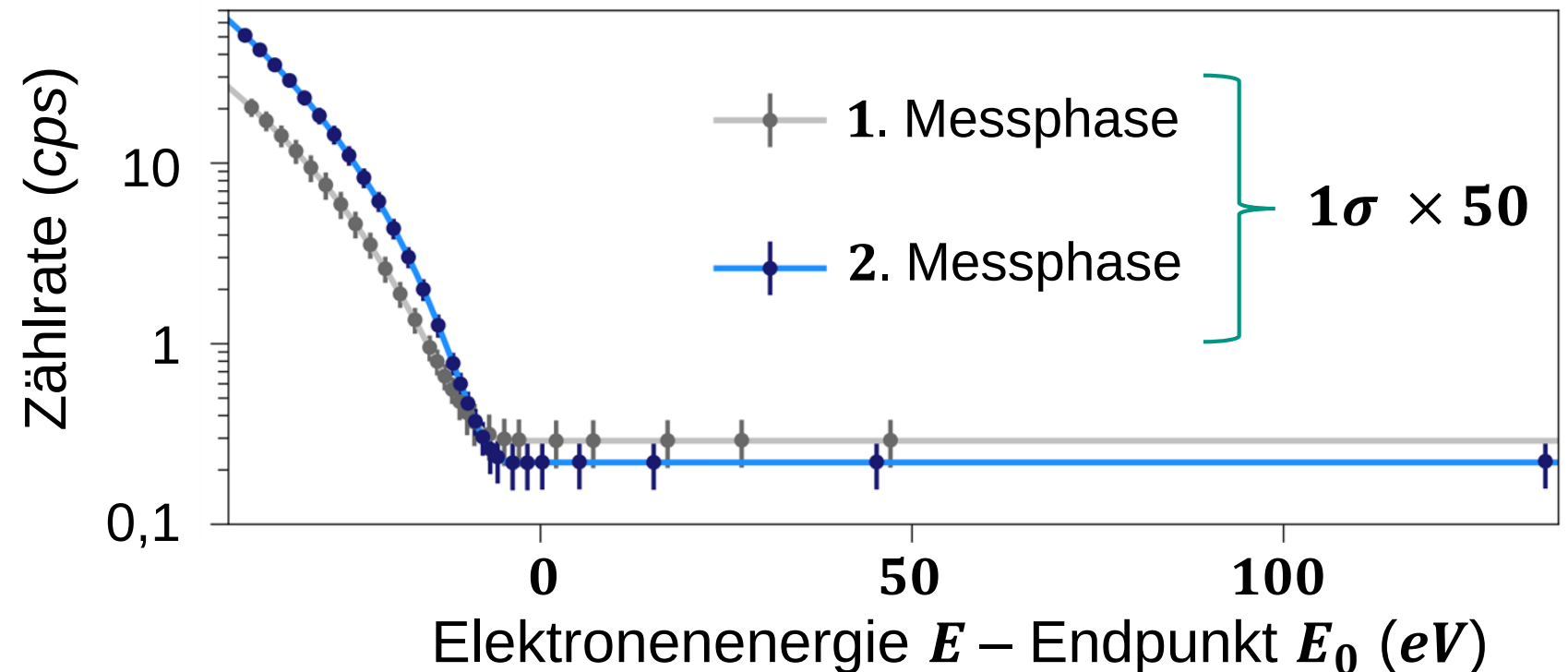


KATRIN Experiment: Messung der ν – Masse

■ aktuelle Obergrenze, publiziert in Nature Physics: $m(\nu) < 0,8 \text{ eV}$ (90% CL)



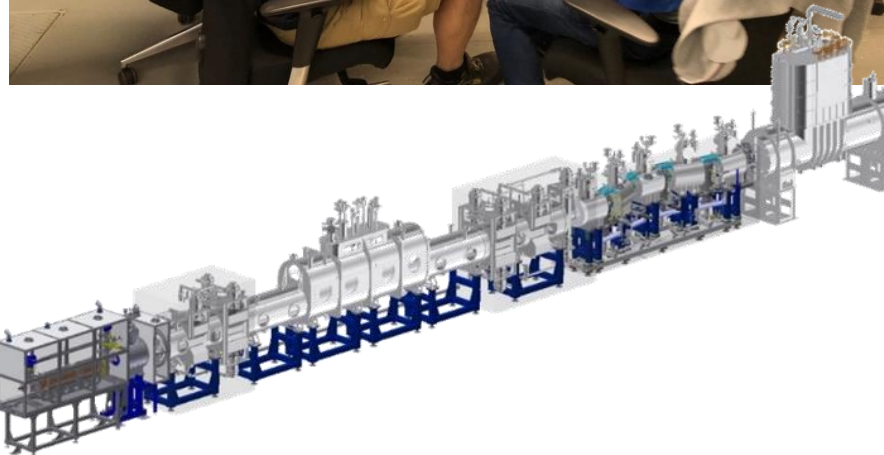
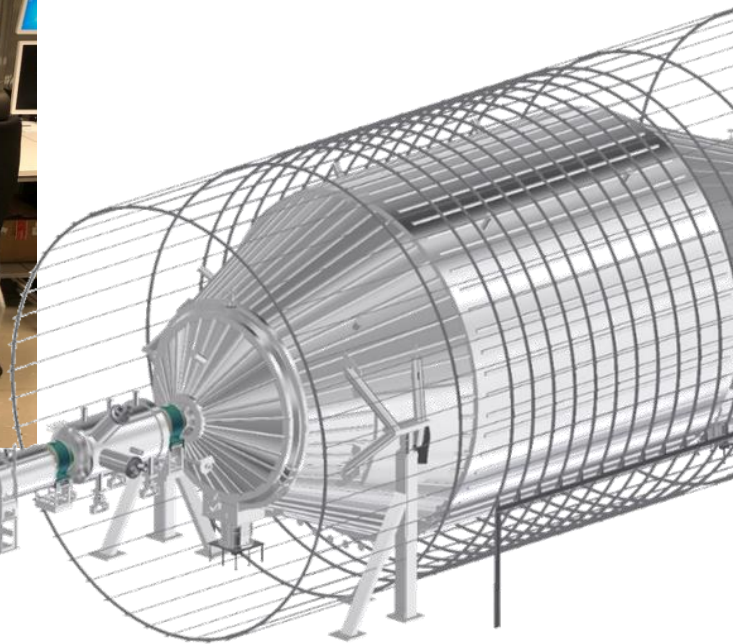
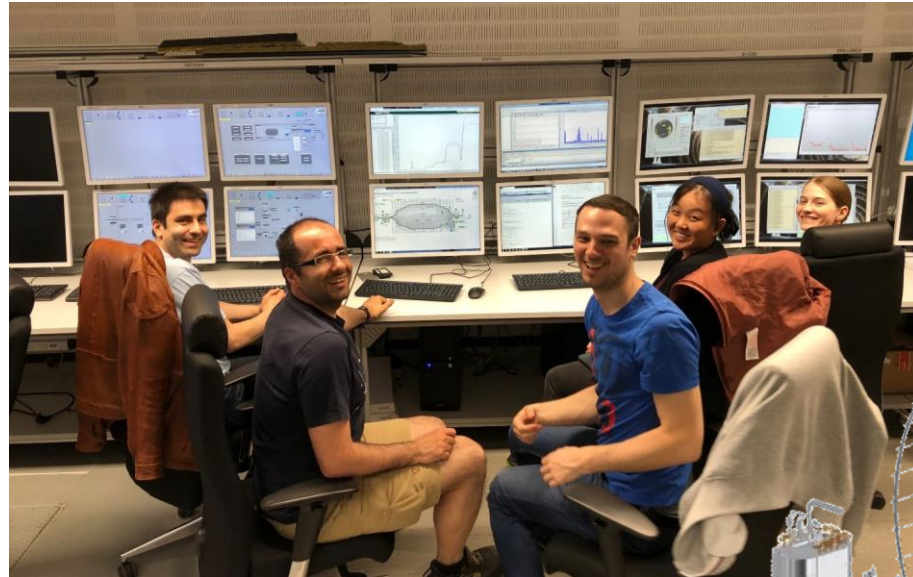
- basiert auf 7% der erwarteten gesamten Datenmenge
- kontinuierliche Verbesserung Signal rel. zu Untergrund

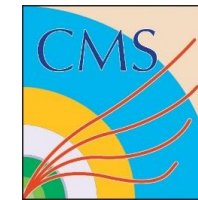


KATRIN Experiment: Messung der ν – Masse

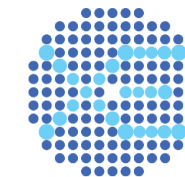
■ weitere Messungen zu **Neutrinos aus dem Big Bang, sterile Neutrinos...**

- Visite vor Ort am Campus Nord geplant

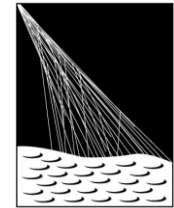




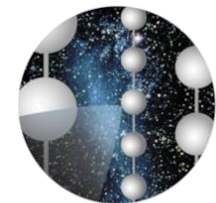
DARWIN



XENON

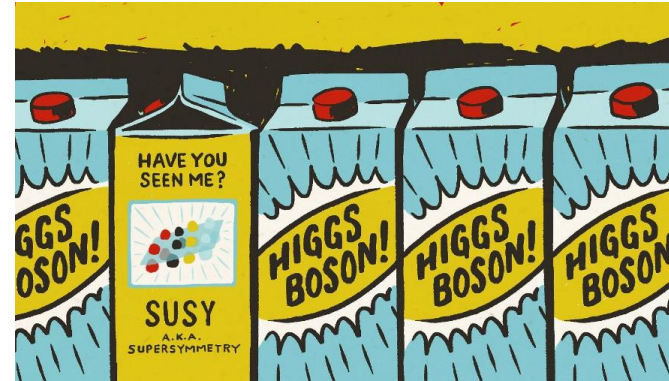
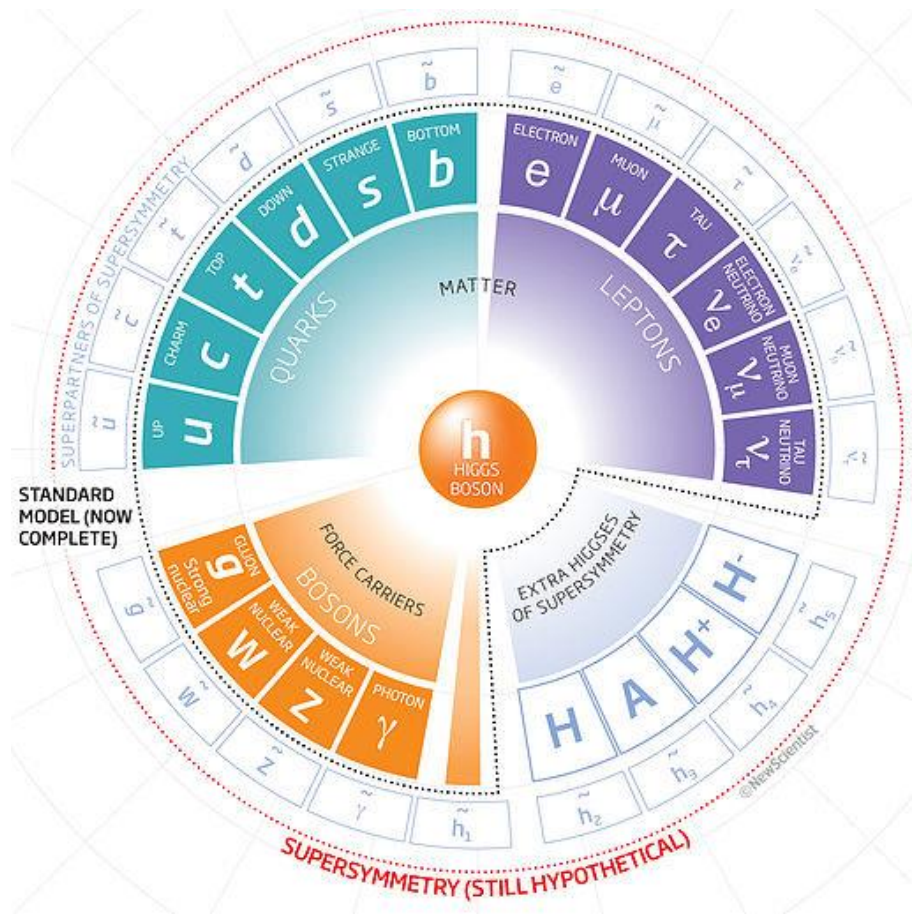


PIERRE
AUGER
OBSERVATORY



IceCube

KAPITEL 9 : QUERVERBINDUNGEN UND OFFENE FRAGESTELLUNGEN

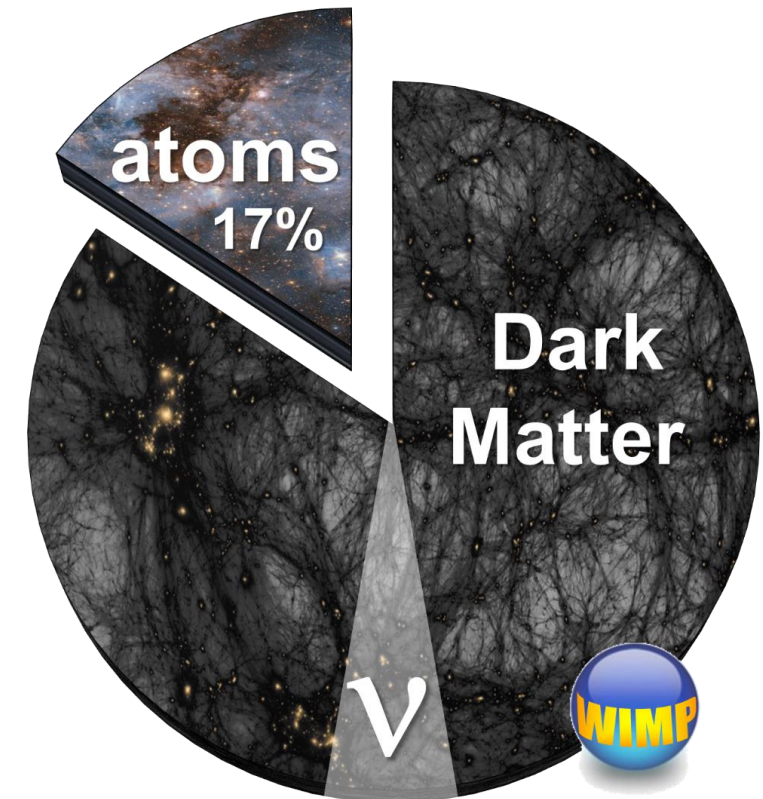
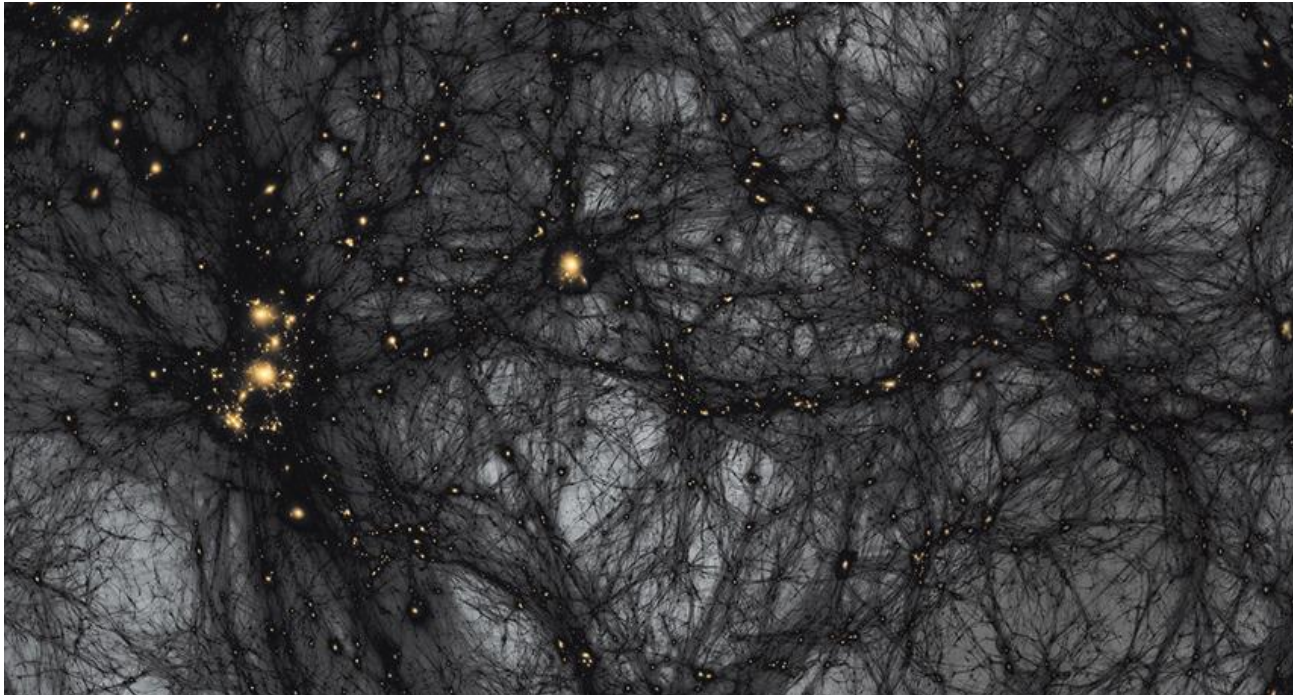


KAPITEL 9.1 : JENSEITS DES STANDARDMODELLS

Suche nach Dunkler Materie*

■ Astrophysikalische Beobachtungen: **Dunkle Materie dominant**

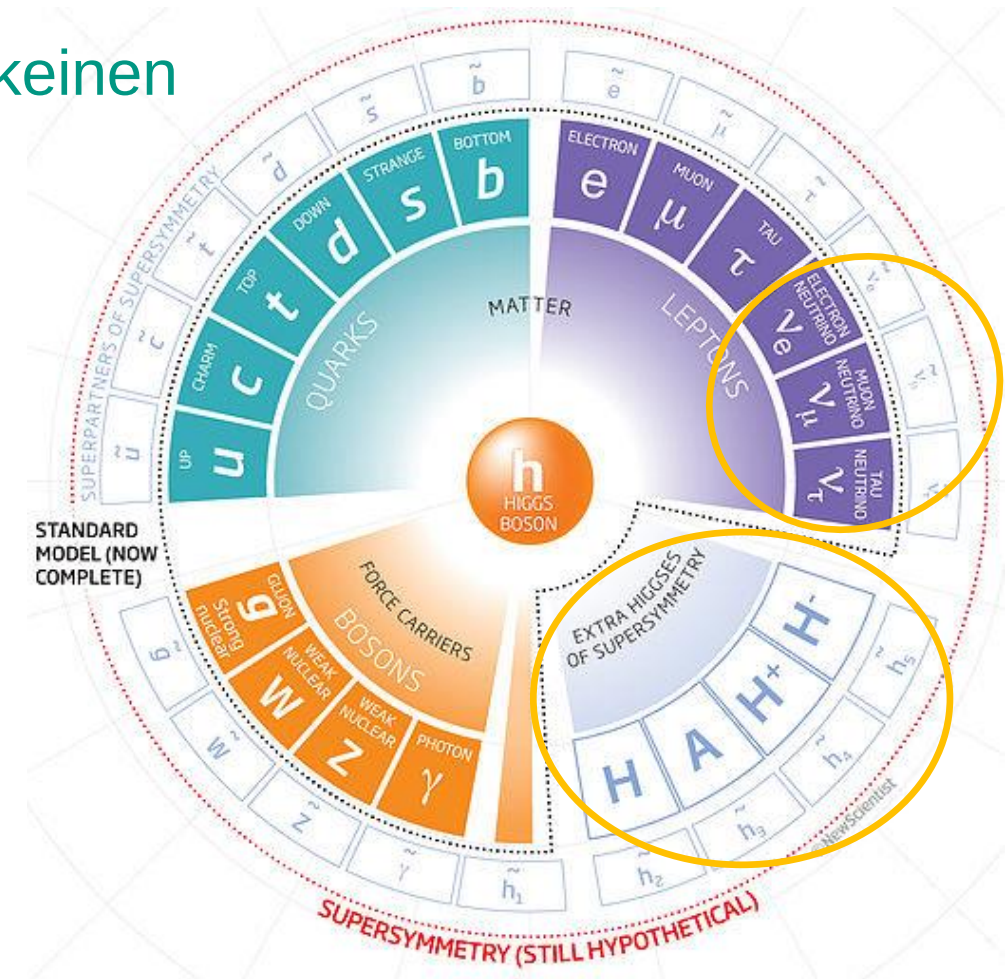
- Rotationskurven von Galaxien, Dynamik von Galaxienhaufen & Nachweis von Gravitationslinsen: **Dunkle Materie** bestimmt die Dynamik der Materie auf allen Skalen im Universum



Suche nach Dunkler Materie

■ Teilchenphysikalischer Ursprung der Dunklen Materie?

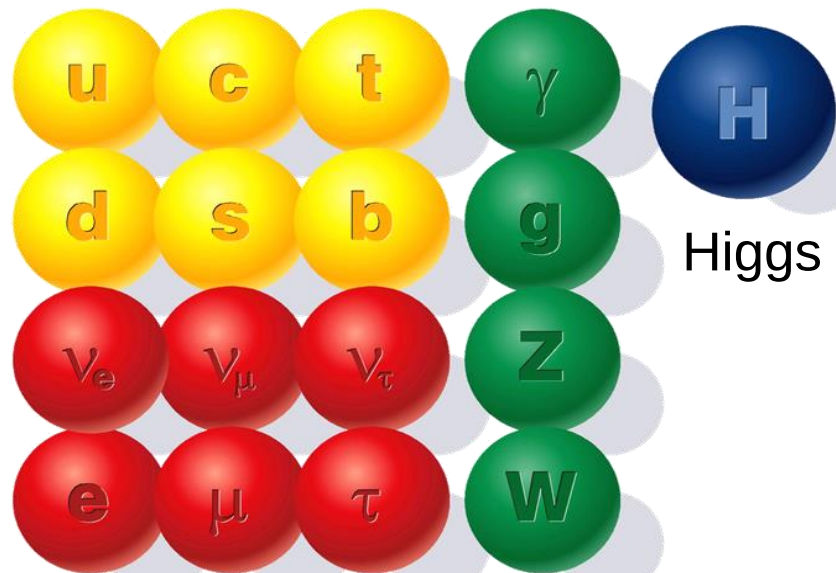
- Standardmodell (SM) enthält (bis auf $\nu_{e,\mu,\tau}$) **keinen Kandidaten für die Dunkle Materie (DM)**
- **Neutrinos $\nu_{e,\mu,\tau}$** : Masse ist extrem klein, daher **sub-dominanter Beitrag** zur DM
- **Neutrinos $\nu_{e,\mu,\tau}$** : ideale 'Blaupause' für DM – Teilchen: neutral, keine starke Ww., **interagiert nur über schwache Ww.**
- viele **Theorien jenseits des SM** mit Kandidaten für Dunkle Materie (existiert ein '**Dunkler Sektor**'?)



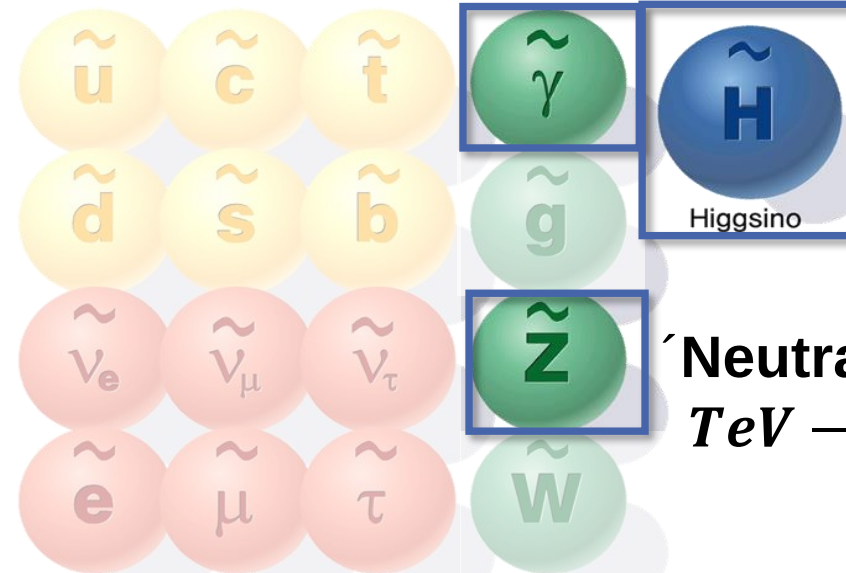
Supersymmetrie – eine Theorie jenseits des SM

■ $SUSY$ enthält einen 'idealen' Kandidaten für Dunkle Materie: das $WIMP$

- $WIMP$: W eakly I nteracting M assive P article auf der $GeV \dots TeV$ – Skala
- $WIMP$: Massenzustand, d.h. Mischung von Flavours



Higgs



'Neutralino' mit TeV – Massen



Quarks

Leptonen

Eichbosonen

Squarks

Sleptonen

Gauginos

Supersymmetrie – eine Theorie jenseits des SM

■ das $WIMP$ – ‘miracle’: thermische Erzeugung von $WIMPs$ im Big Bang*

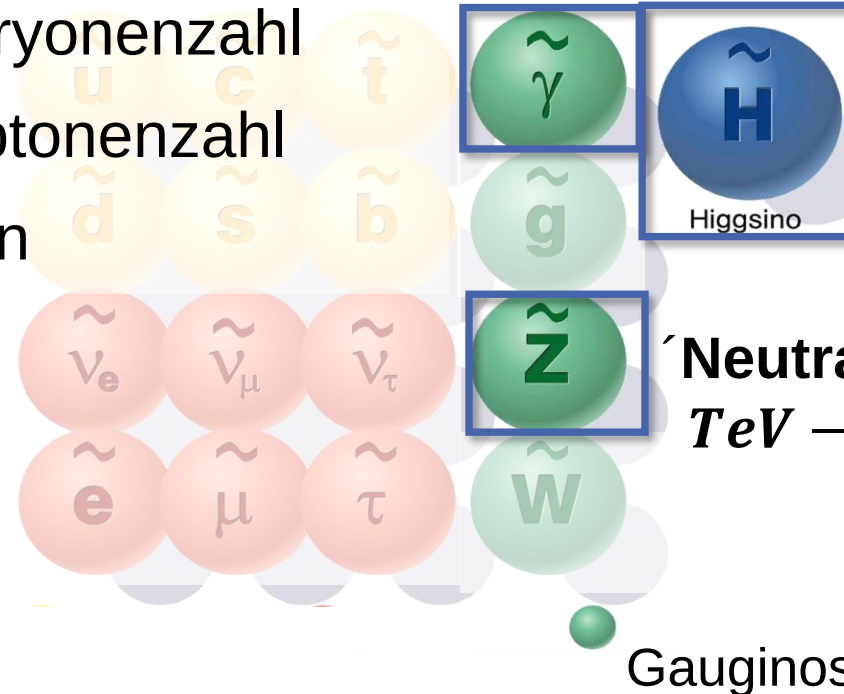
- $WIMP$: Erzeugung mit **korrekter Dichte** Ω_{DM} falls $\sigma = \text{schwache Ww.}$
- $WIMP$: kosmologisch stabil durch Symmetrie auf Basis:



B : Baryonenzahl

L : Leptonenzahl

S : Spin



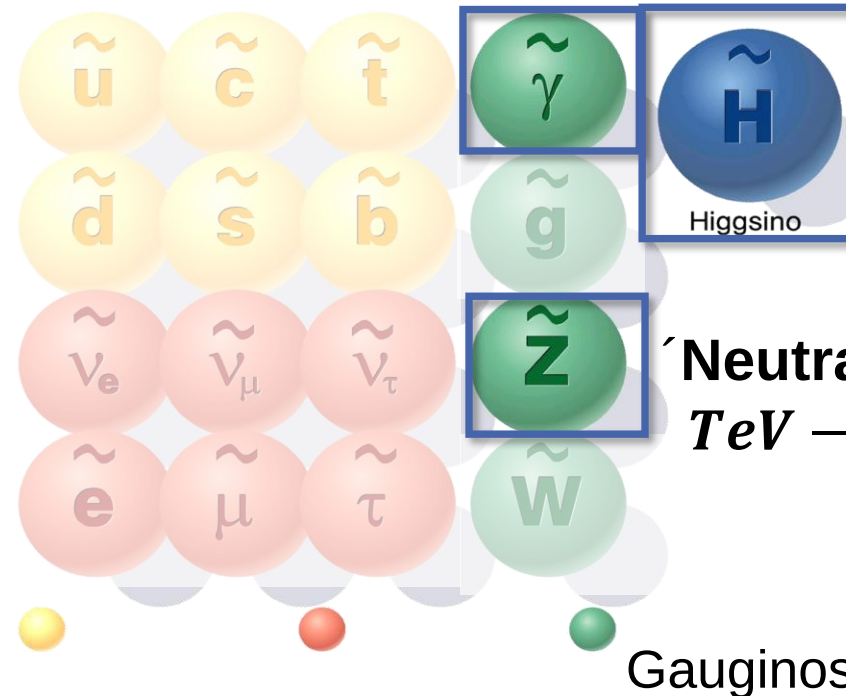
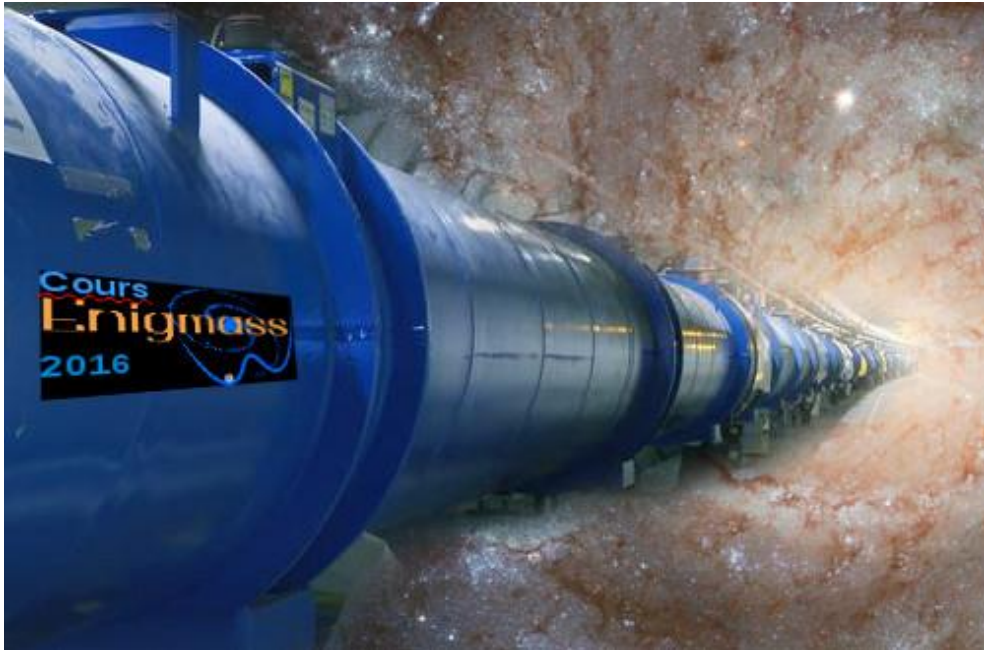
‘Neutralino’ mit
 TeV – Massen



Supersymmetrie – eine Theorie wird getestet

■ das *WIMP* & *SUSY* auf dem Teststand am *LHC* des *CERN*

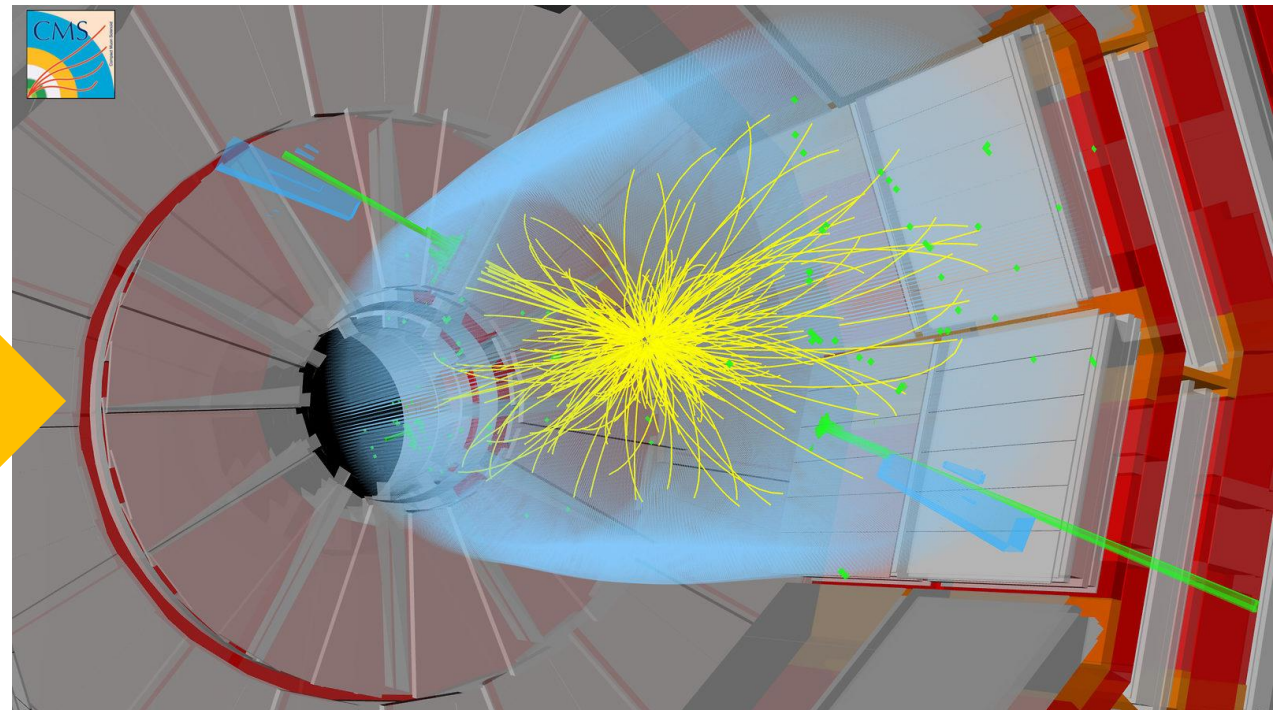
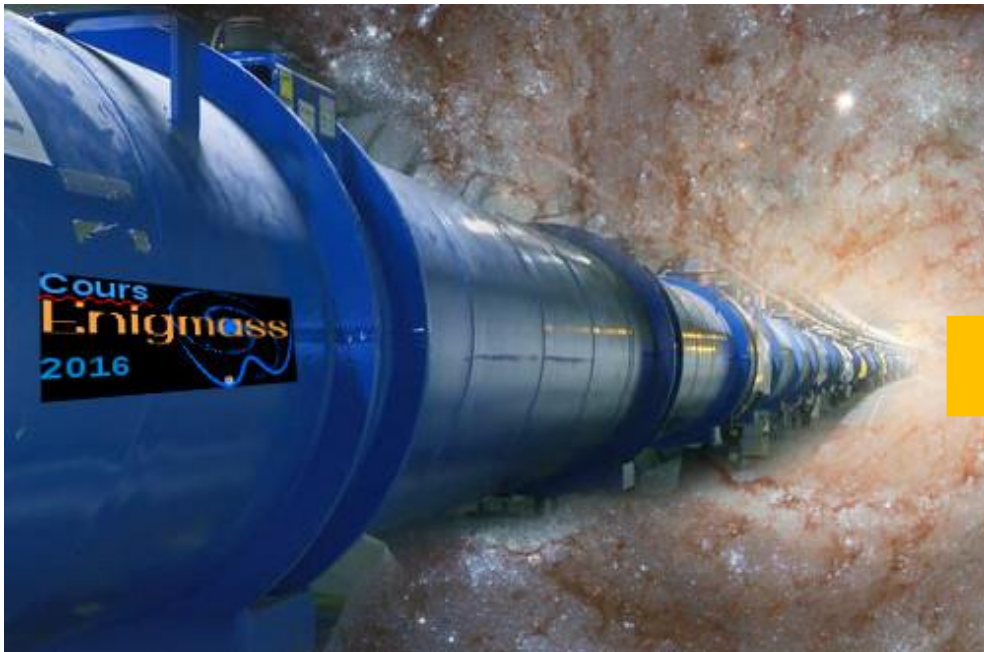
- Erzeugung von *SUSY* – Teilchenpaaren in *pp* – Kollisionen bei hohem $\sqrt{s}$
- *WIMP*: am Ende einer *SUSY* – Zerfallskette



Supersymmetrie – eine Theorie wird getestet

■ das *WIMP* & *SUSY* auf dem Teststand am *LHC* des *CERN*

- Erzeugung von *SUSY* – Teilchenpaaren: extrem seltene Prozesse
- *WIMP*: am Ende einer *SUSY* – Zerfallskette via **fehlende Transversalenergie**



Supersymmetrie – eine Theorie wird getestet

■ das *WIMP* & *SUSY* auf dem Teststand am *LHC* des *CERN*

- Erzeugung von *SUSY* – Teilchenpaaren: extrem selten
- *WIMP*: am Ende einer *SUSY* – Zerfallskette



**NO
SIGNAL**

yet...





KAPITEL 9.2 : ASTROTEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

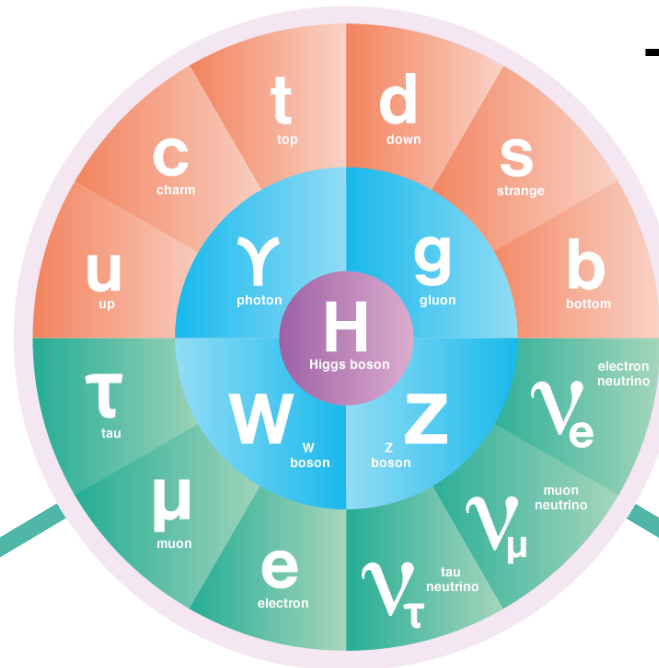
Astro Teilchen Physik – Themengebiete

■ ein neues & spannendes

Themengebiet*

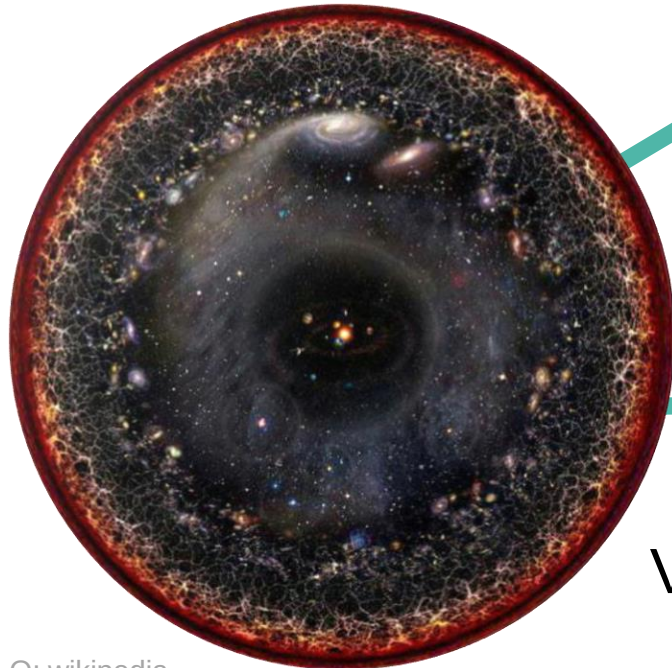
Teilchen-

physik



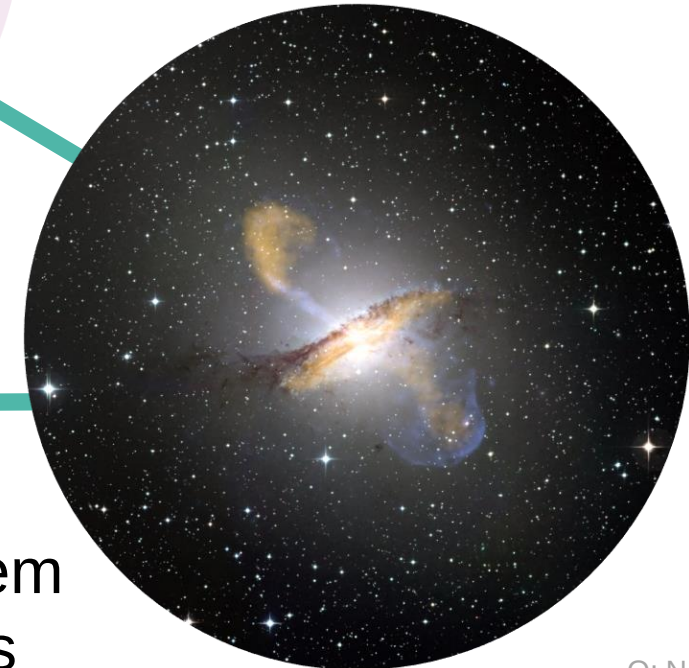
Q: Symmetry Magazine

Kosmo-
logie



Q: wikipedia

Verbindung zwischen dem
Mikro- & Makrokosmos

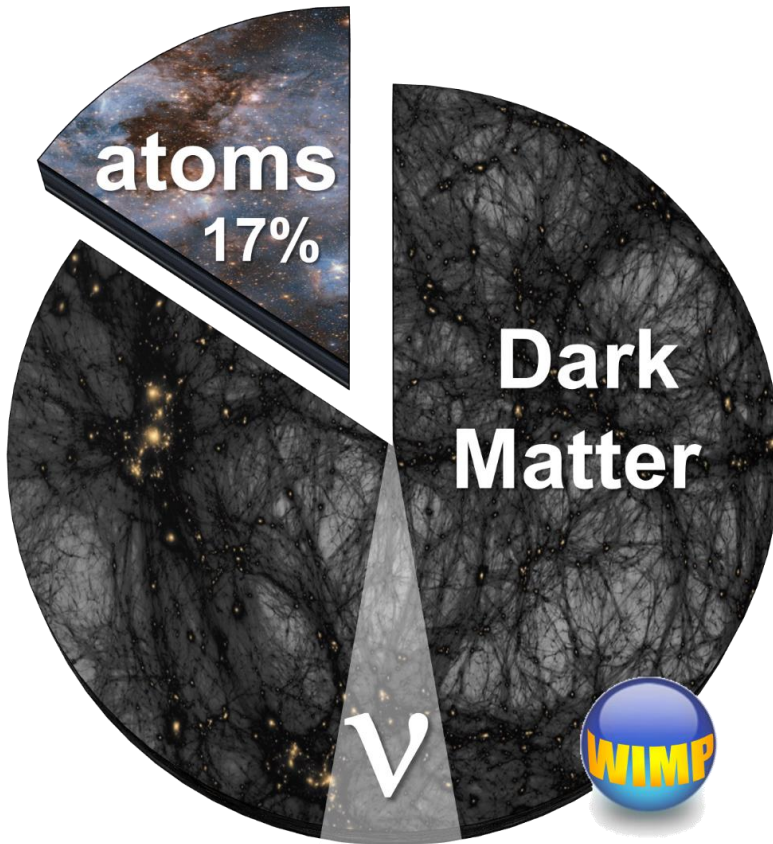


Q: NASA

Astro-
physik

Kosmologie: Dunkle Materie & Neutrinos

■ Neutralinos (*WIMPs*) & Neutrinos aus dem Universum: Rolle & Eigenschaften



- massive Neutralinos als **Kalte Dunkle Materie**
- massebehaftete Neutrinos als **Heiße Dunkle Materie**



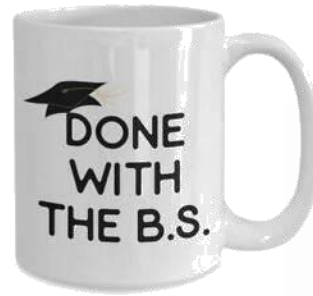
Supernovae: ein faszinierendes Thema

■ Neutrinos als effektivste Sternkühlung im Universum



- Neutrinos lassen uns live ins 'Herz' einer **Kernkollaps–Supernova** blicken
- neue Detektoren (Hyper–Kamiokande) schauen über unsere Galaxis hinaus





Bachelorarbeit
Masterstudium



KAPITEL 10 : ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

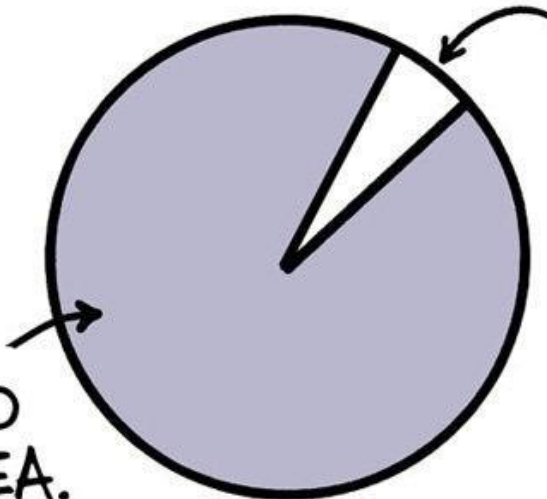
Teilchen– & Astroteilchenphysik: ein Ausblick

- Es gibt noch viel zu erforschen, nicht nur im Bachelor!

THE UNIVERSE AS WE KNOW IT:

Dunkle Materie
Neutrinos und Masse
**erweiterte Higgs-
Eigenschaften**

WE HAVE NO
FREAKING IDEA.



Atome & Kerne
***QCD* – Farbkraft**
Strukturfunktionen

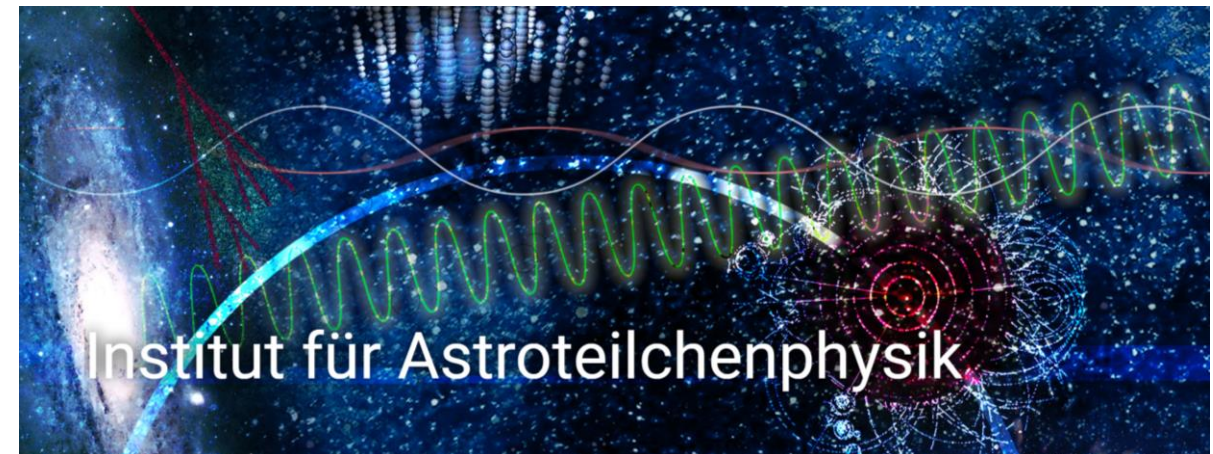
***ETP & IAP* bieten tolle Themen!**



Teilchen– & Astroteilchenphysik: ein Ausblick

- spannende Forschungsthemen, nicht nur im Bachelor!

- zwei forschungsstarke Institute am *KIT* mit einer gemeinsamen Motivation:
auf der Suche nach **neuen Phänomenen und Effekten jenseits des SM**

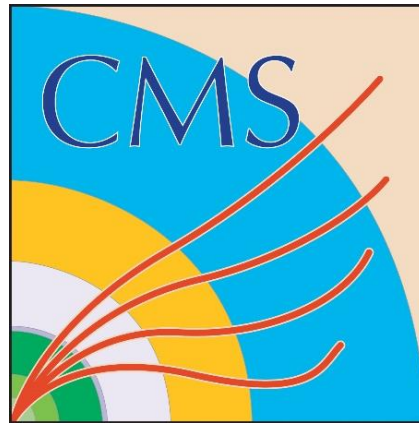


Forschungsthema: Teilchenphysik am *LHC*

■ Hochenergiephysik mit dem *CMS* Experiment am **Large Hadron Collider**



Markus Klute



Ulrich Husemann



Günter Quast

...Datenanalyse / Computing / *CMS* –Hardware–Upgrades...

Forschungsthema: Teilchenphysik an *BELLE – II*

■ Flavourphysik mit dem *BELLE II* Experiment am Super*KEKB* Collider



Thorben Ferber



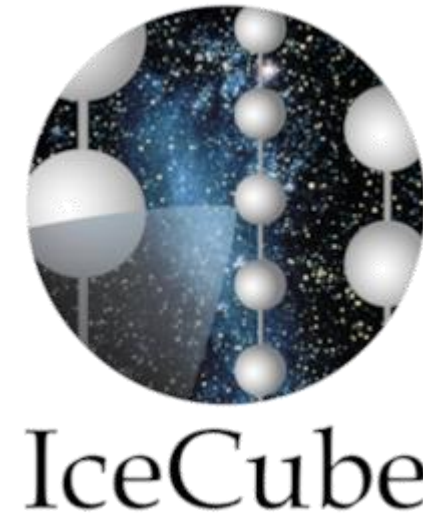
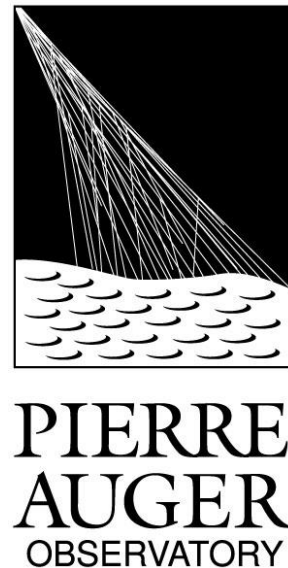
...Datenanalyse / Flavourphysik / *DM* – Suche...

Forschungsthema: Cosmic Rays & *UHE* Neutrinos

■ Astroteilchenphysik mit den Observatorien Pierre Auger & IceCube



Ralph Engel



...Datenanalyse / Cosmic Ray & *UHE* – ν – Physik / Hardware...

Forschungsthema: Neutrinos & Dunkle Materie

■ *Astroteilchenphysik mit den Experimenten KATRIN, XENON, DARWIN,...*



Guido Drexlin



Kathrin Valerius

...Datenanalyse / ν – Physik / Suche nach **DM** / Hardware / **FuE**...

Masterstudium: ideal hier am *KIT* – es lohnt sich!

■ eine extrem forschungsstarke Fakultät: **Teilchen & Astroteilchenphysik**

Teilchenphysik

TP:

Teilchenphysik I

TP – II – Flavourphysik

TP – II – Top-Quarks/Jets

TP – II – *W*, *Z*, Higgs

Datenanalyse

Detektoren

MC Generatoren

Hauptseminar *TP* & *TTP*

Hauptseminar Collider

Astroteilchenphysik

ATP:

Astroteilchenphysik I

Kosmologie

ATP – II – Teilchen & Sterne

ATP – II – Gammas & ν 's

ATP – II – Kosmische Strahlung

Beschleunigerphysik

Detektoren

Messmethoden / Elektronik

Hauptseminar *ATP*

Modulhandbuch
Physik Master 2015 (Master of Science)

SPO 2015

Sommersemester 2023

Stand 09.03.2023

KIT-FAKULTÄT FÜR PHYSIK



KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

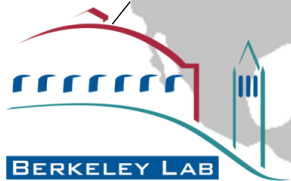
www.kit.edu

Masterstudium & beyond: internationale Kontakte!

■ Beyond *KIT*: wichtige Erfahrungen sammeln bei unseren weltweiten Partnern



KATRIN



Carnegie
Mellon
University



DARWIN

Laboratori Nazionali del Gran Sasso



CERN

CMS



BELLE – 2

AUGER



PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

■ Unterstützung durch



IceCube

DAAD



THE END

■ von dieser Vorlesung ... auf zu einer erfolgreichen Karriere!!



Danke für ihr Interesse & ihre Aufmerksamkeit !