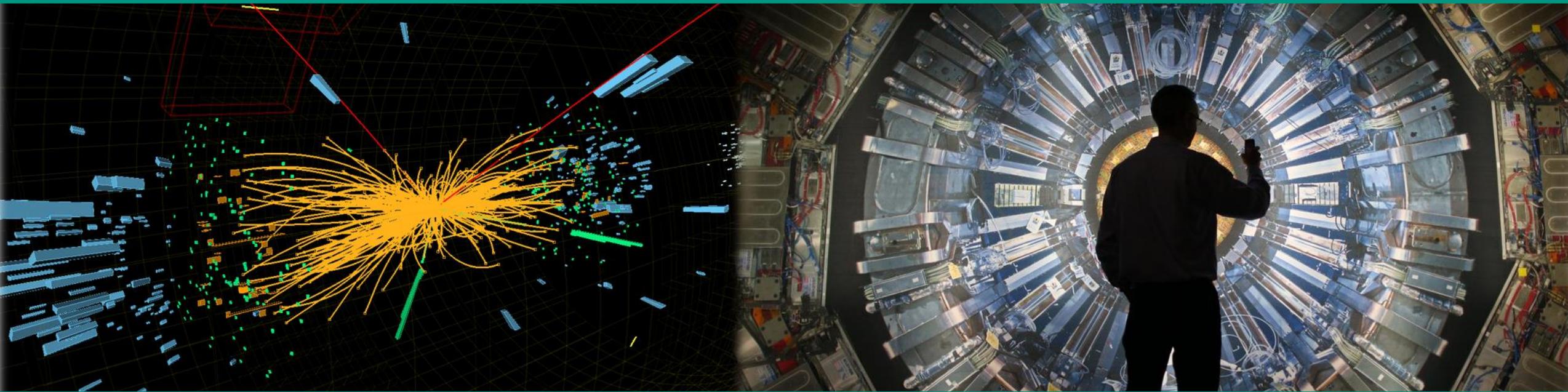


# Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 5

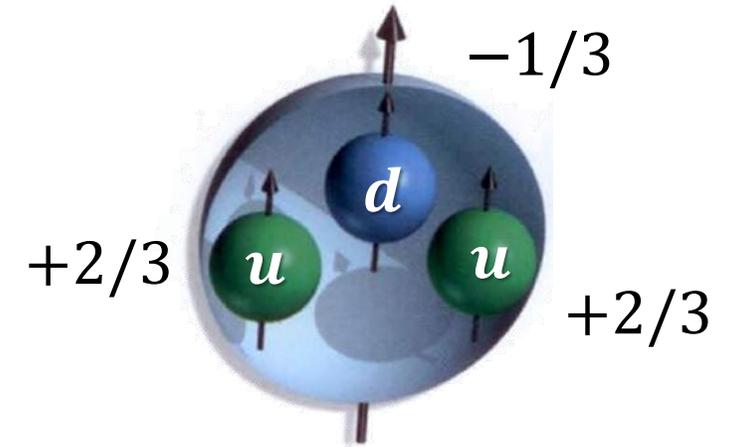
2.5.2023



# Recap: Resonanzen & tiefinelastische Streuung

## ■ Inelastische Streuprozesse: Anregung kurzlebiger Resonanzen (z.B. $\Delta^+$ )

- kinematische Variable: **invariante Masse  $W$**
- $\Delta^+$ : kurzlebige Anregung des Nukleons
- Spin:  $S = 3/2 \Leftrightarrow$  Masse:  **$1232 \text{ MeV}$**



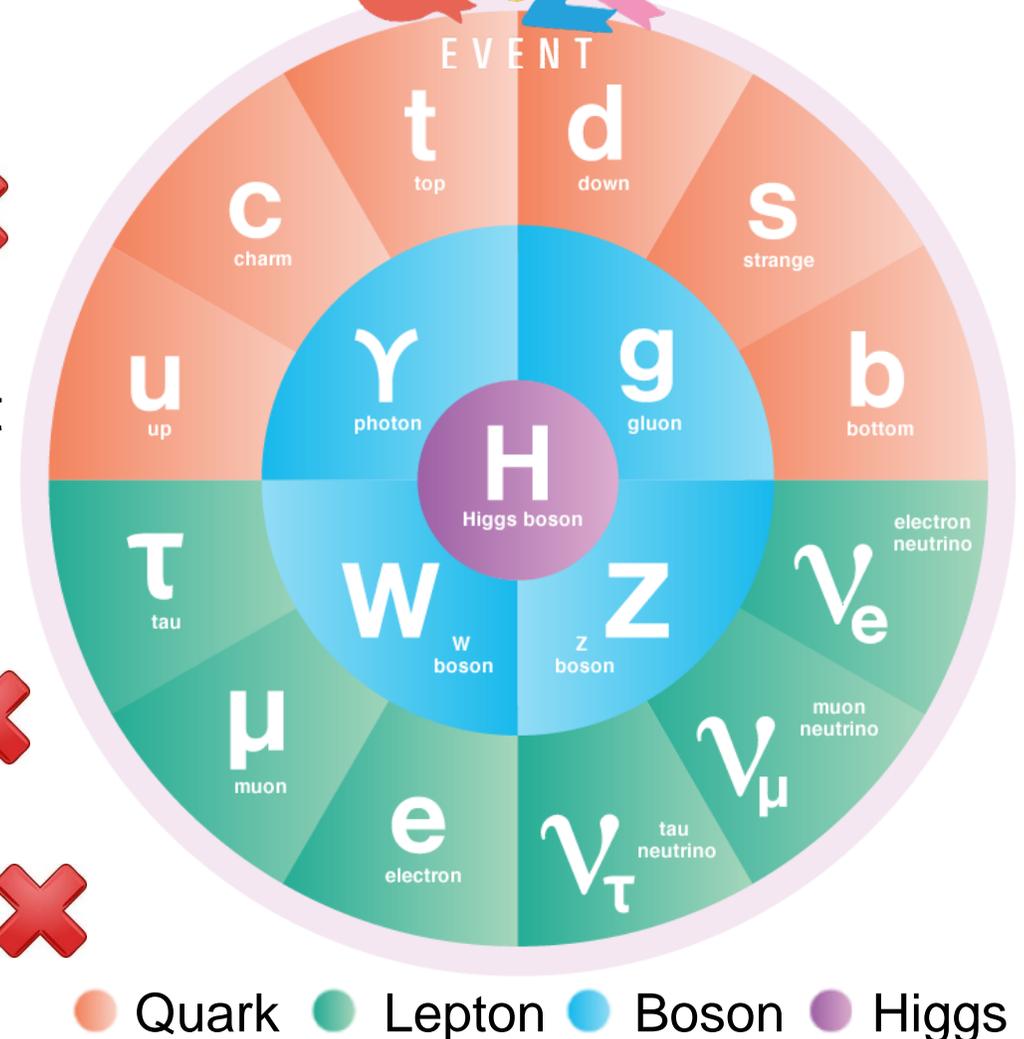
## ■ Tiefinelastische Elektronstreuung: punktförmige Partonen (Quarks)

- kinematische Variable: **Bjorken  $x$**  – Mass an Inelastizität des Prozesses ( $\equiv$  Impulsanteil des Partons [ $0 \dots 1$ ])
- **SLAC**: quasi-freie, punktförmige Konstituenten (**Partonen**) im Nukleon

# Quiz: das Standardmodell

## ■ Was ist 'Standard' im Standardmodell?

- die Elementarladung  $e$  ist die **kleinste** Einheit der Ladung von Teilchen 
- die **Masse** des Austauschteilchens definiert die **Stärke** seiner Wechselwirkung 
- es gibt kein Teilchen, welches an **allen** Austauschwechselwirkungen teilnimmt 
- die **Masse** eines Teilchens lässt sich sehr gut aus der **Higgs-Masse** berechnen 

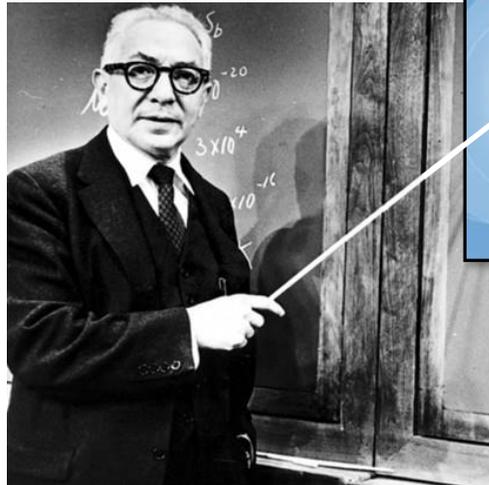




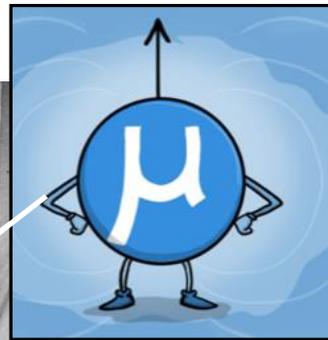
# Elementarteilchen im Standardmodell

## ■ Isidor Rabi: *who ordered that* ?

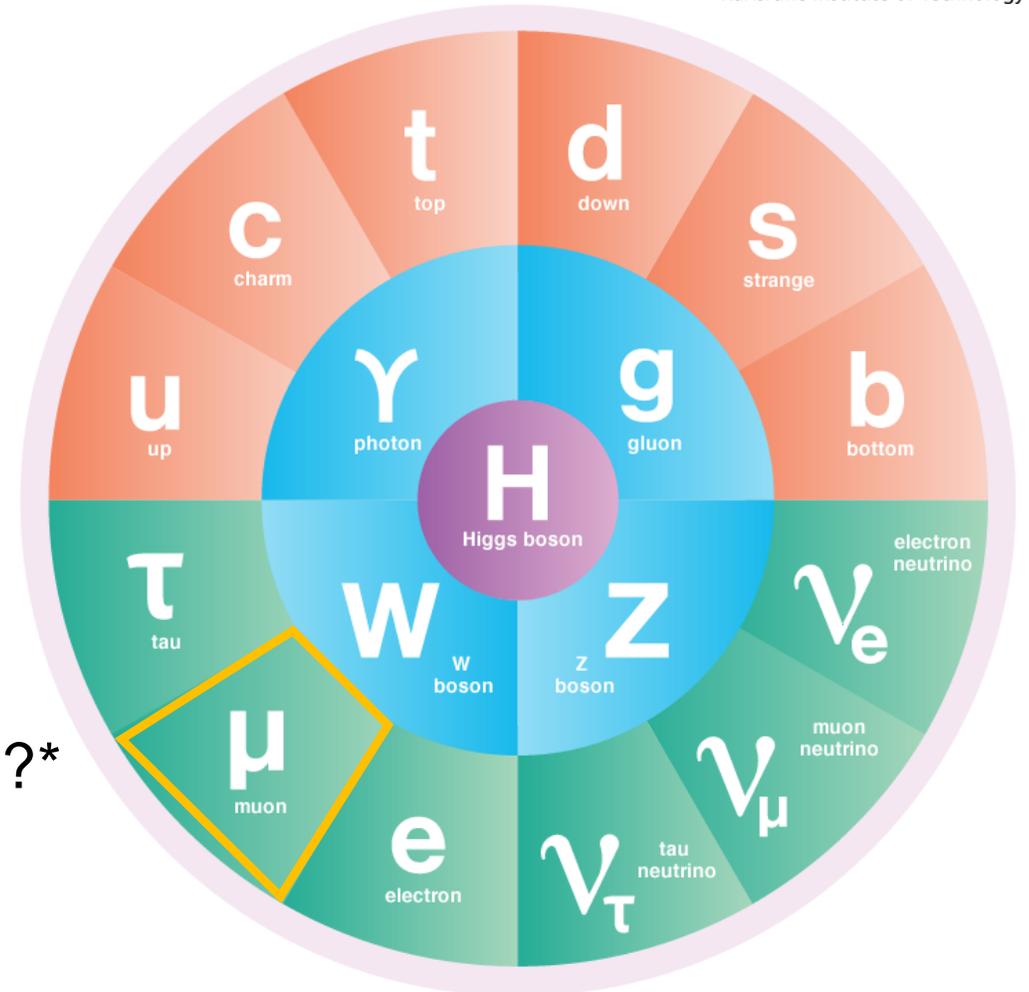
- Warum diese große Vielfalt an Teilchen & Wechselwirkungen?



*Isidor Rabi*



who ordered **the muon**?\*



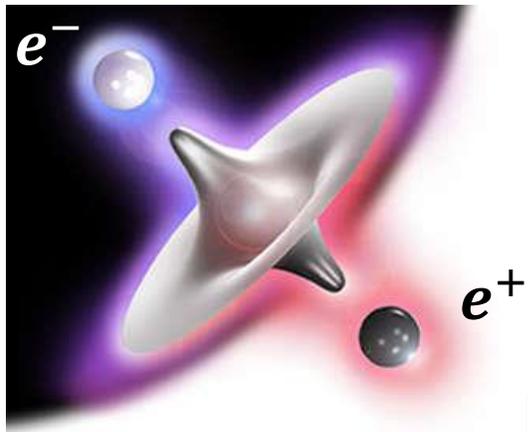
● Quark ● Lepton ● Boson ● Higgs

Q:DOE

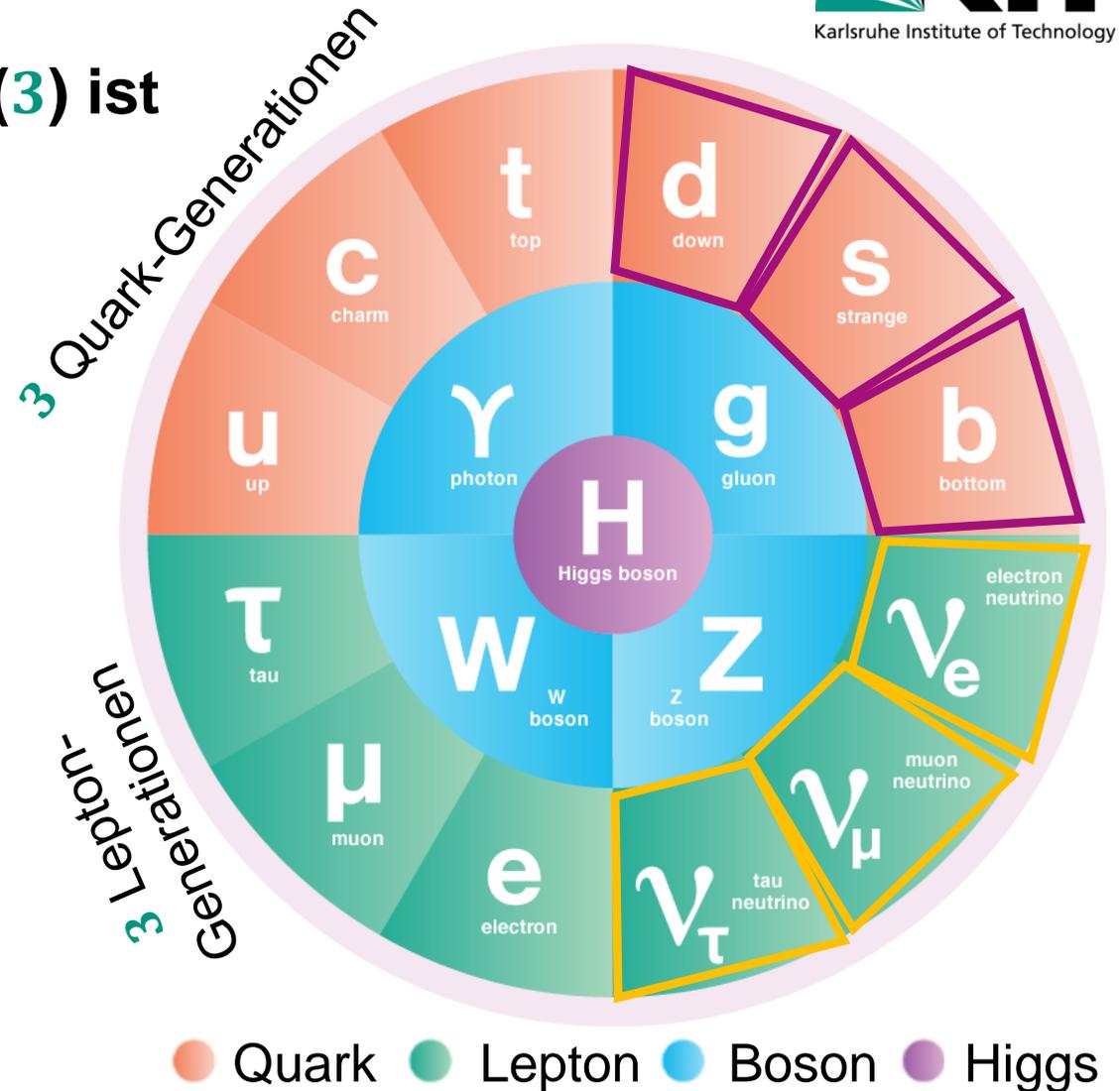
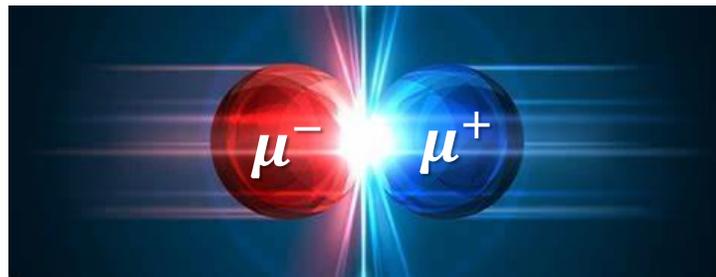
# Elementarteilchen im Standardmodell

## ■ Mischung von Teilchengenerationen (3) ist erforderlich für

- Verletzung der Materie-Antimaterie-Symmetrie (**CP – Symmetrie**)



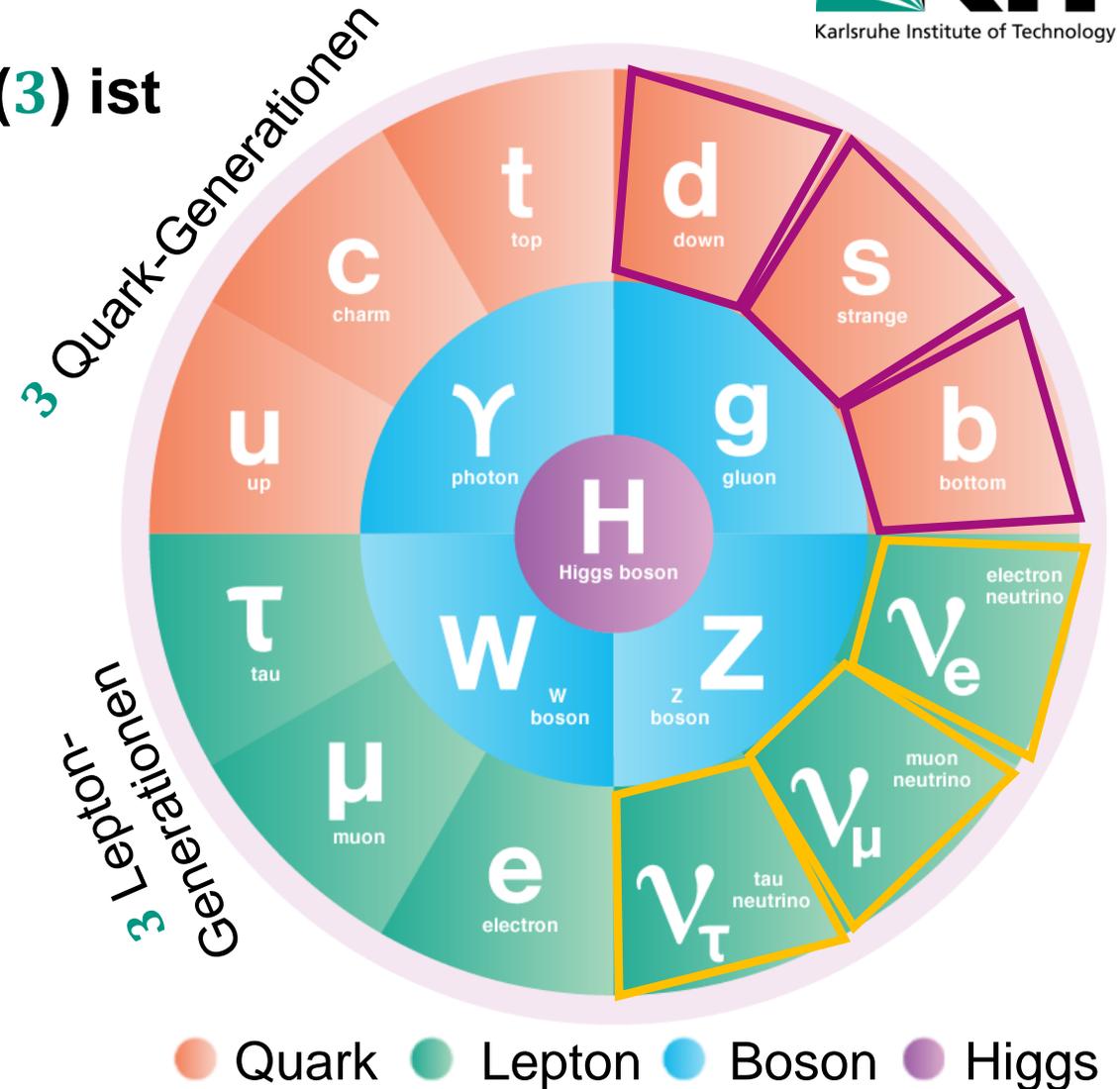
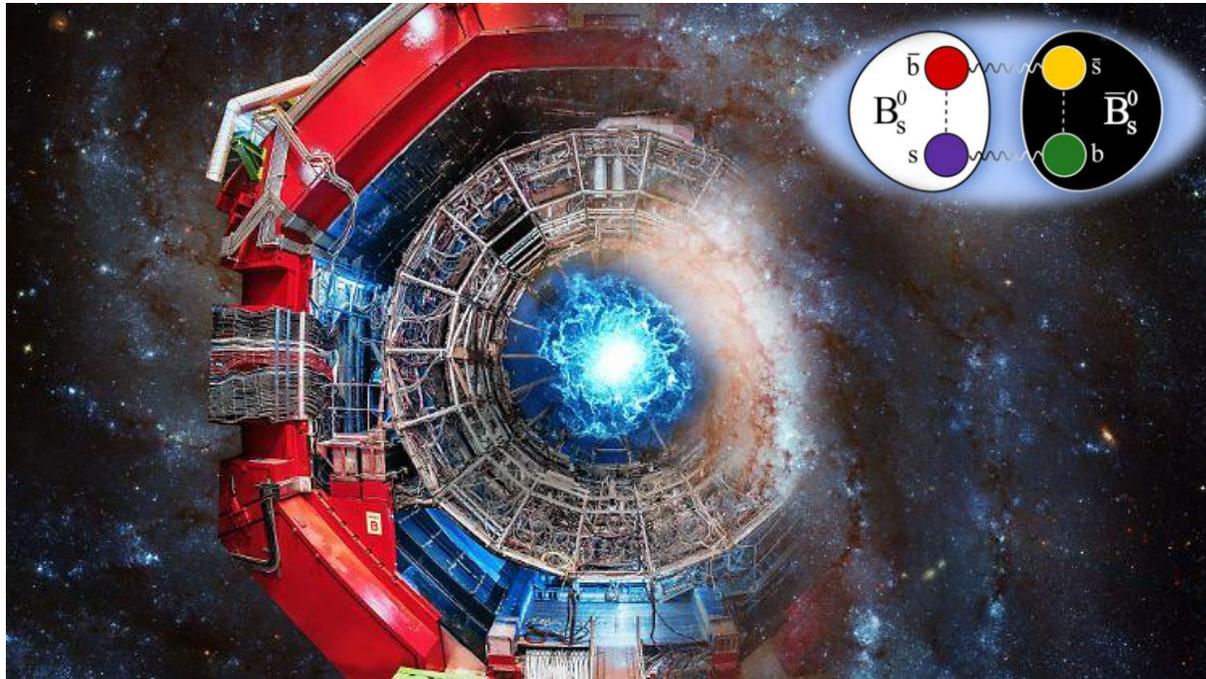
WHY DID MATTER WIN OVER ANTIMATTER?



# Elementarteilchen im Standardmodell

■ Mischung von Teilchengenerationen (3) ist erforderlich für

- Verletzung der Materie-Antimaterie-Symmetrie (**CP – Symmetrie**)\*



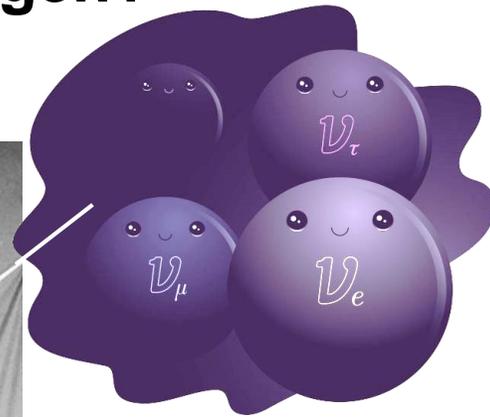
# Elementarteilchen im Standardmodell

## ■ Isidor Rabi: *who ordered that?*

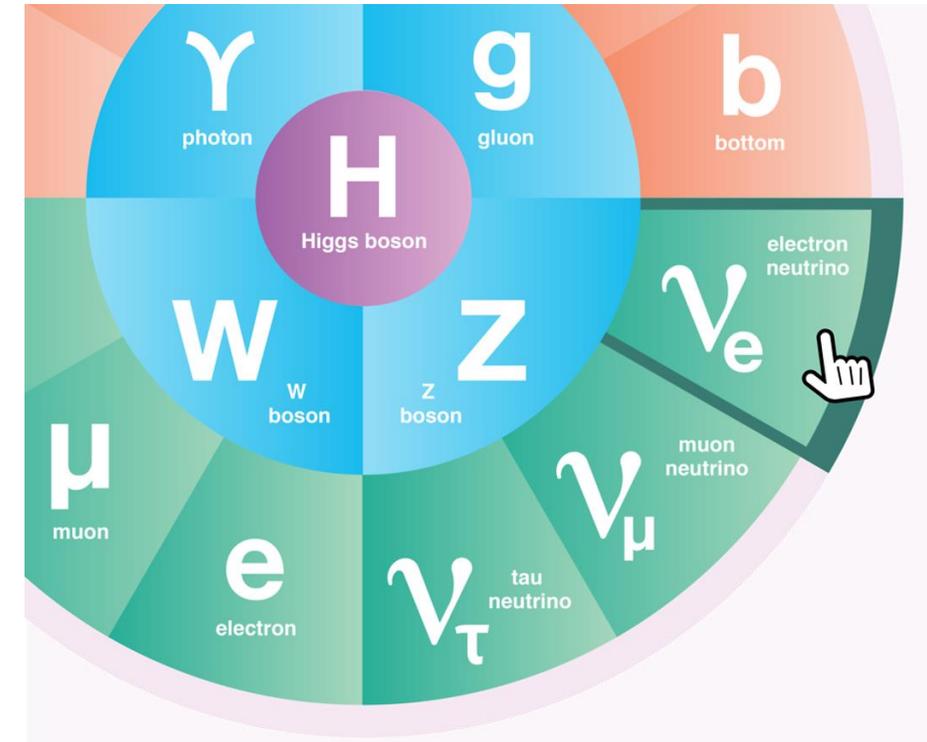
- Warum diese große Vielfalt an Teilchen & Wechselwirkungen?



*Isidor Rabi*



who ordered **the neutrino?**

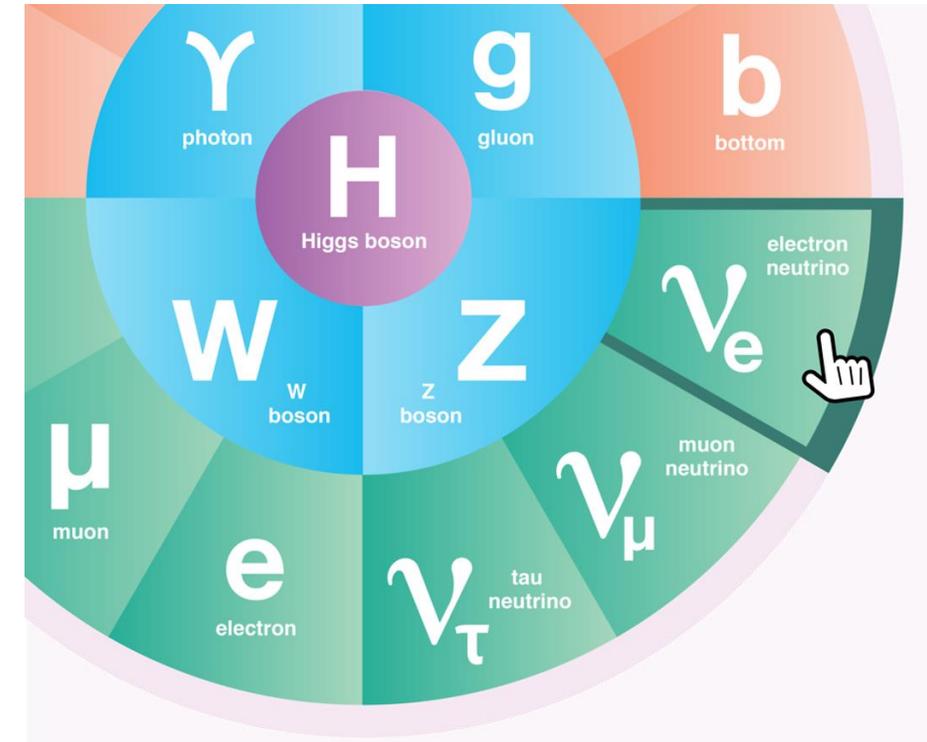
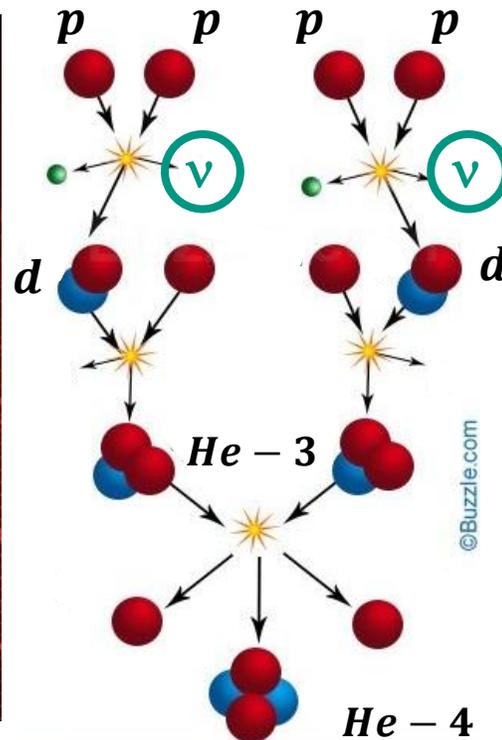
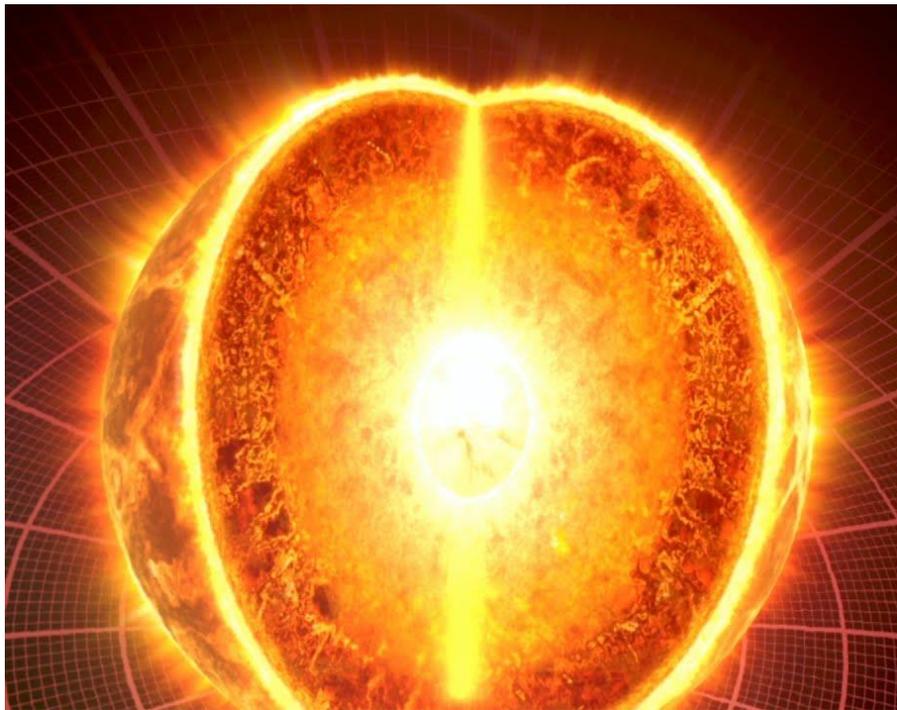


● Quark ● Lepton ● Boson ● Higgs

# Elementarteilchen im Standardmodell

## ■ Isidor Rabi: *who ordered that?*

- ohne Neutrinos keine **langlebigen Sterne** & langsame Fusionsprozesse

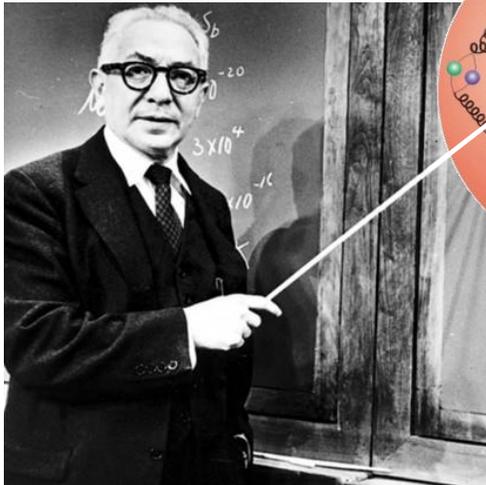


● Quark 
 ● Lepton 
 ● Boson 
 ● Higgs

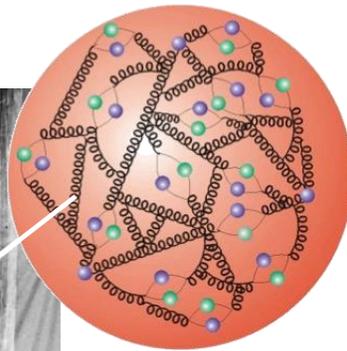
# Elementarteilchen im Standardmodell

## ■ Isidor Rabi: *who ordered that?*

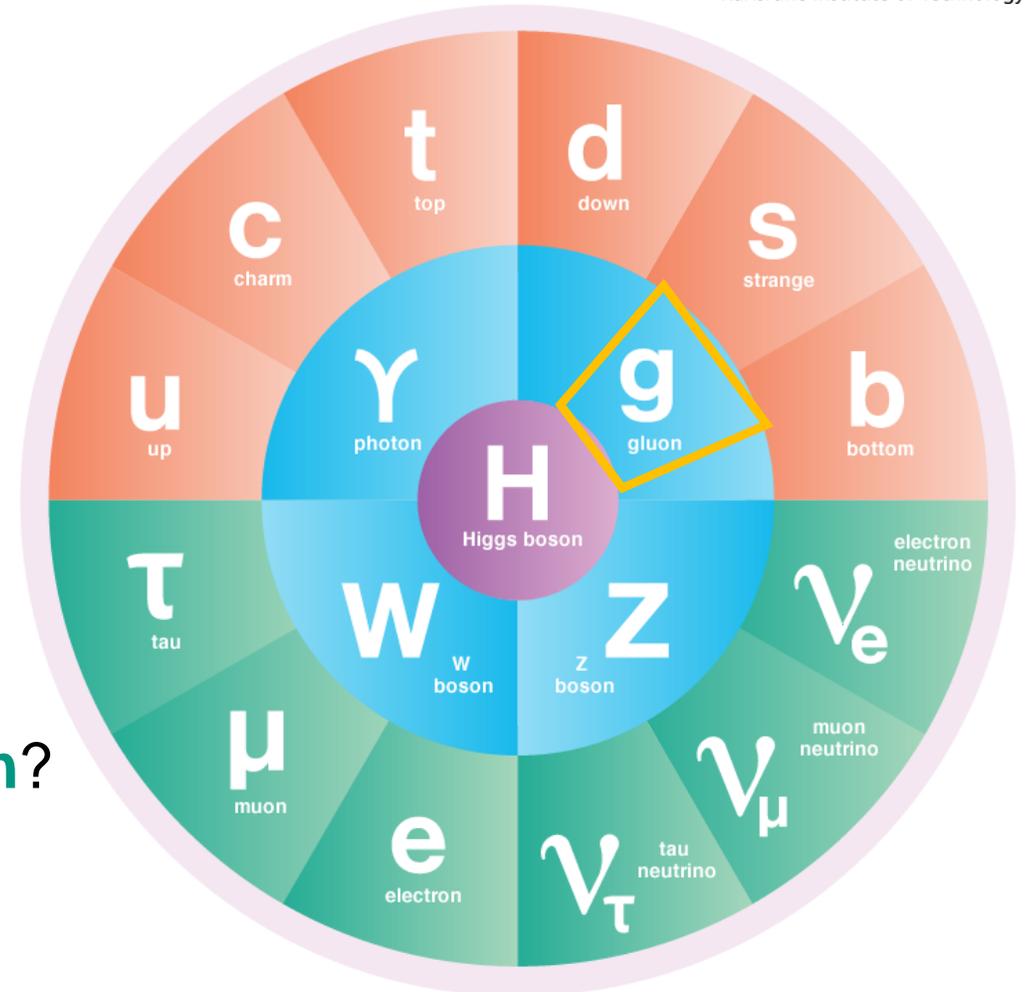
- Warum diese große Vielfalt an Teilchen & Wechselwirkungen?



*Isidor Rabi*



who ordered **the gluon**?

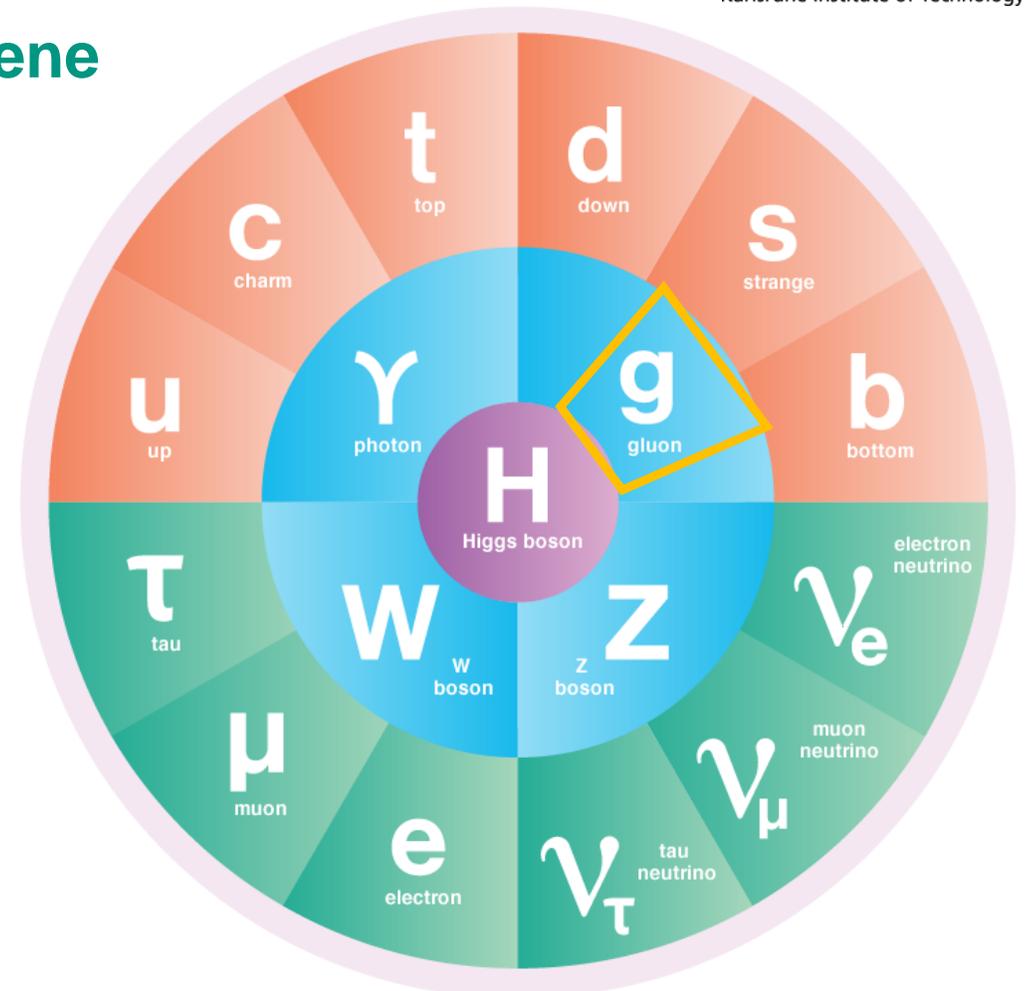
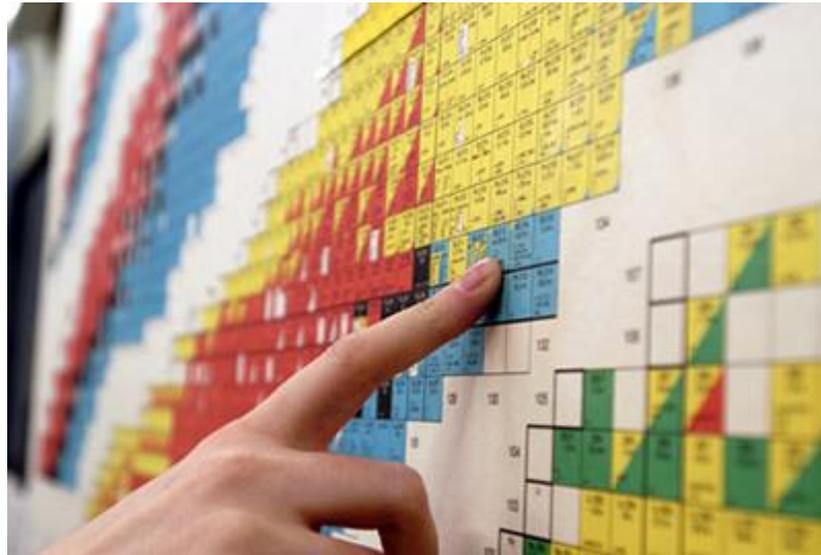
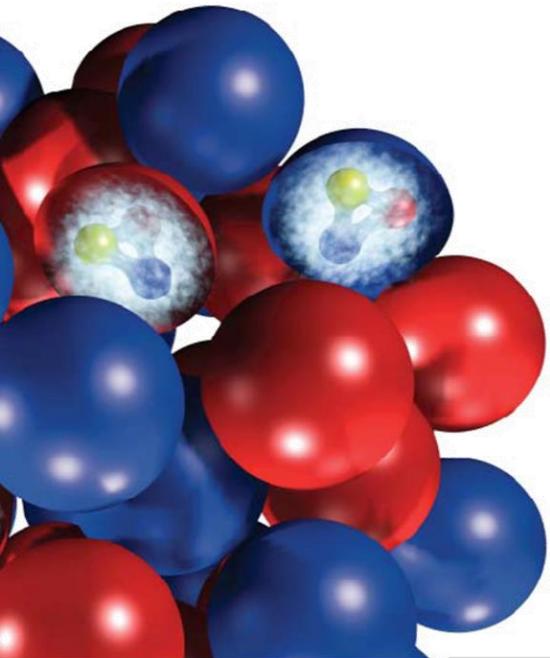


● Quark ● Lepton ● Boson ● Higgs

# Elementarteilchen im Standardmodell

## ■ Starke Kernkraft erforderlich für **gebundene Nukleonen & gebundene Kerne**

- kurzreichweitige, starke Kernkräfte für **Objekte auf  $fm$  –Skala:  $p$ ,  $n$ , Kerne**



● Quark ● Lepton ● Boson ● Higgs

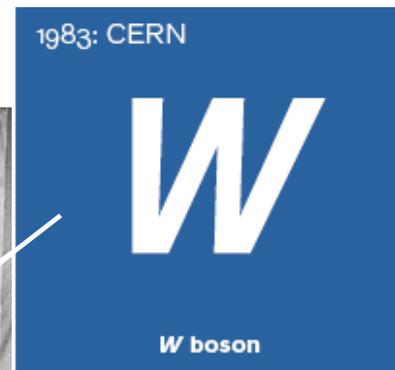
# Recap: Elementarteilchen im Standardmodell

## ■ Isidor Rabi: *who ordered that?*

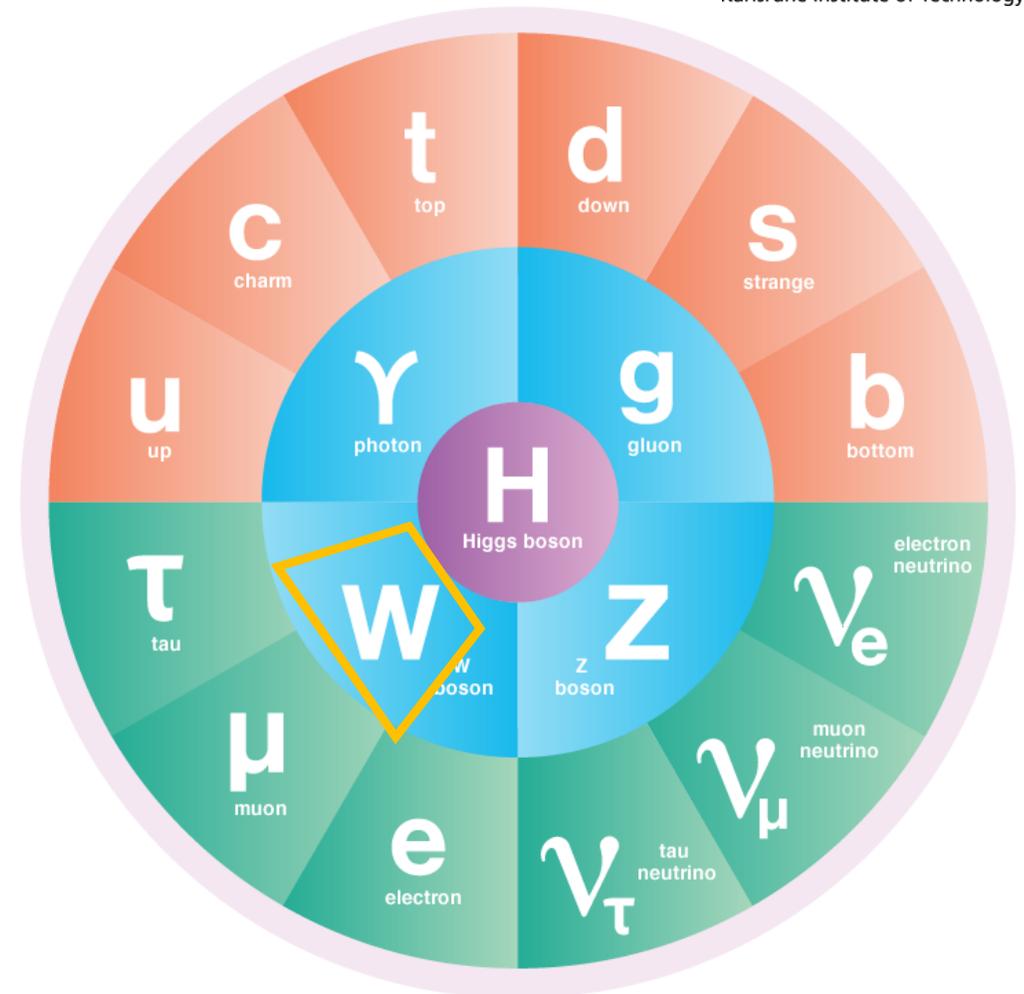
- Warum diese große Vielfalt an Teilchen & Wechselwirkungen?



*Isidor Rabi*



who ordered the **W** – **Boson**?



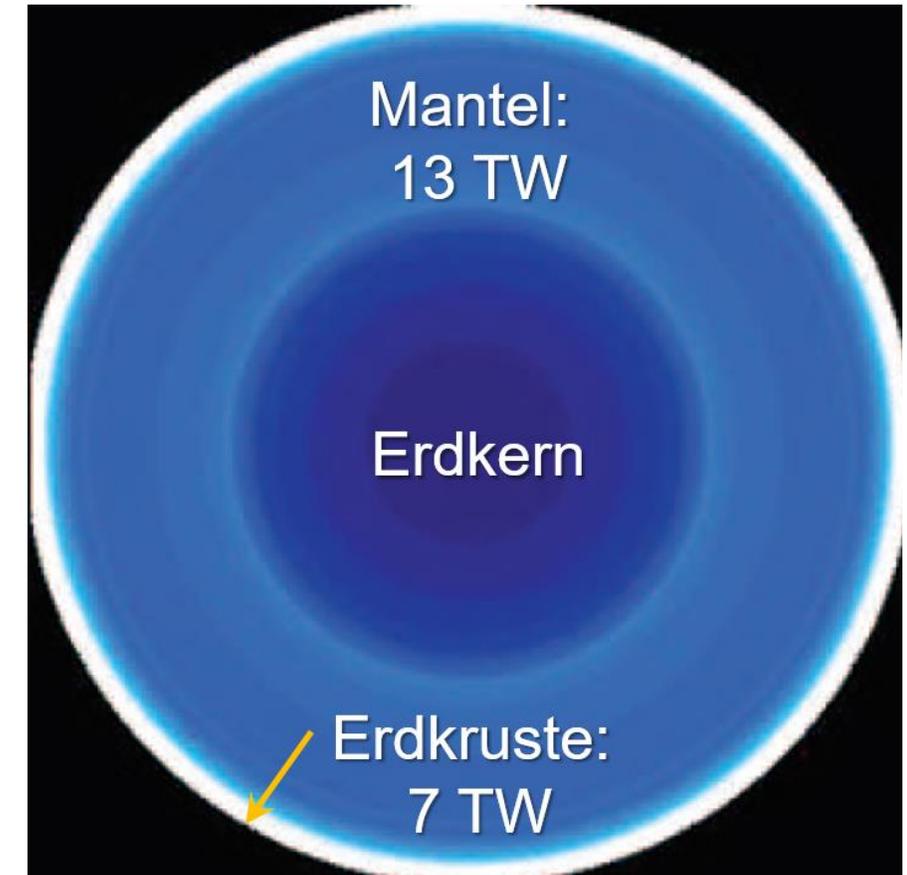
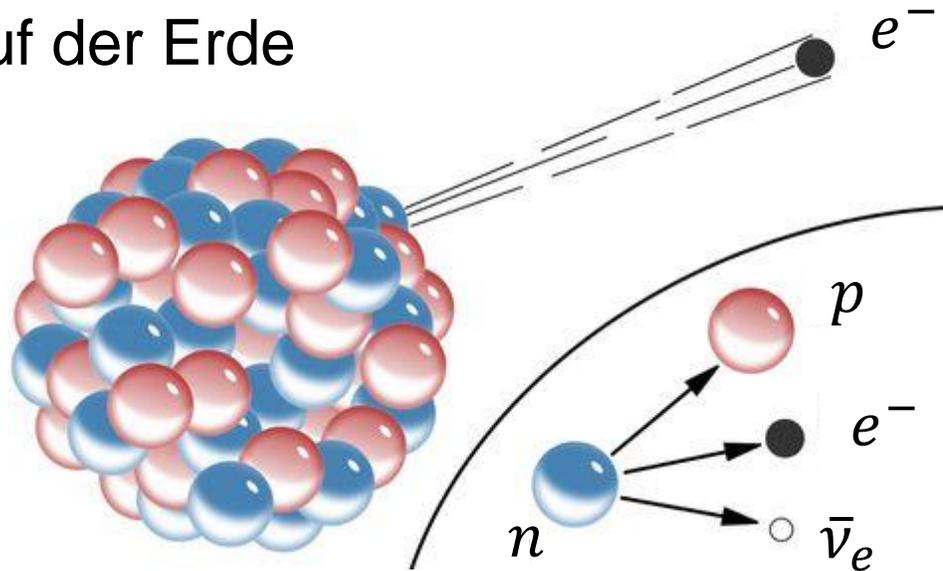
● Quark ● Lepton ● Boson ● Higgs

Q:DOE

# Elementarteilchen im Standardmodell

## ■ schwache, kurzreichweitige Kraft für Teilchen- / Kern-Zerfälle:

- schwache Zerfallsprozesse instabiler Nuklide setzen Energie frei:  $\Rightarrow$  wichtig z.B. für das Aufrechterhalten der **Plattentektonik** auf der Erde



Q:wikipedia

# Recap: Elementarteilchen im Standardmodell

## ■ Isidor Rabi: *who ordered that?*

- Warum diese große Vielfalt an Teilchen & Wechselwirkungen?

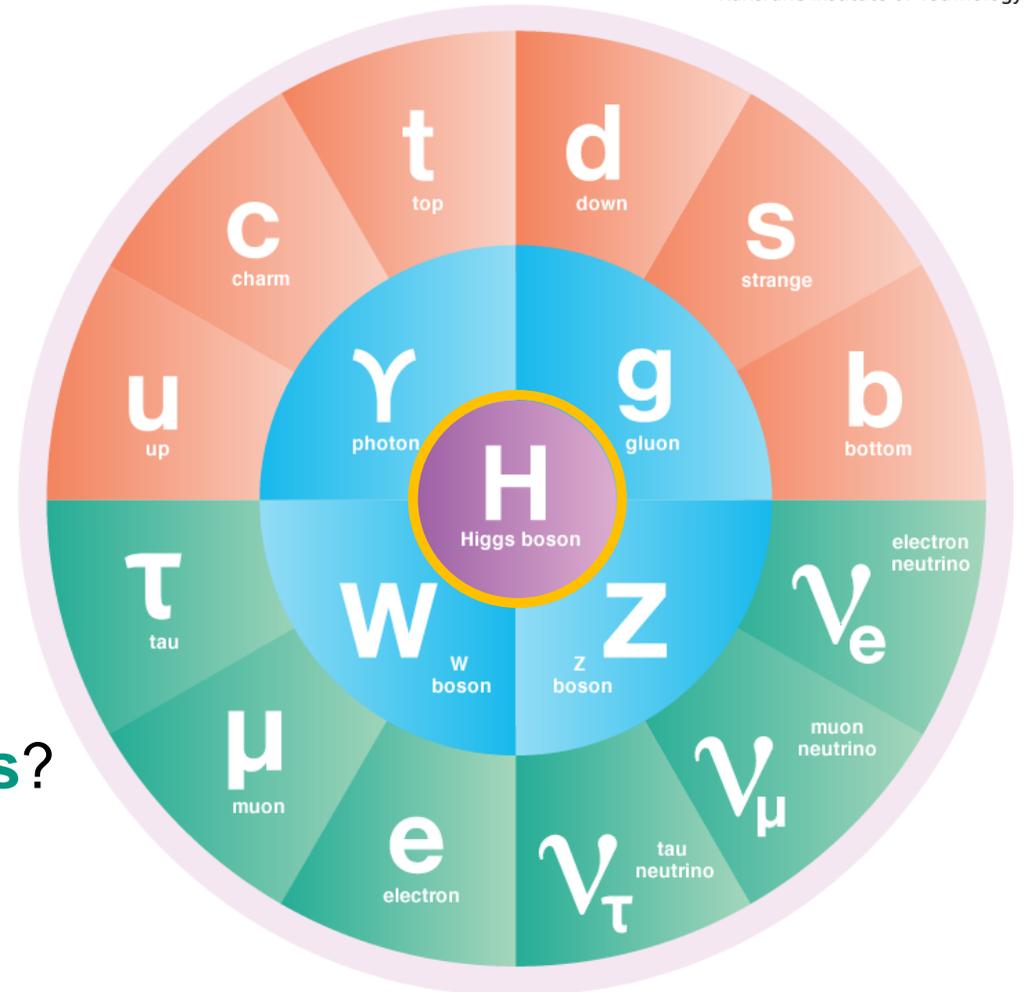


*Isidor Rabi*

THE  
HIGGS  
BOSON



who ordered **the Higgs**?

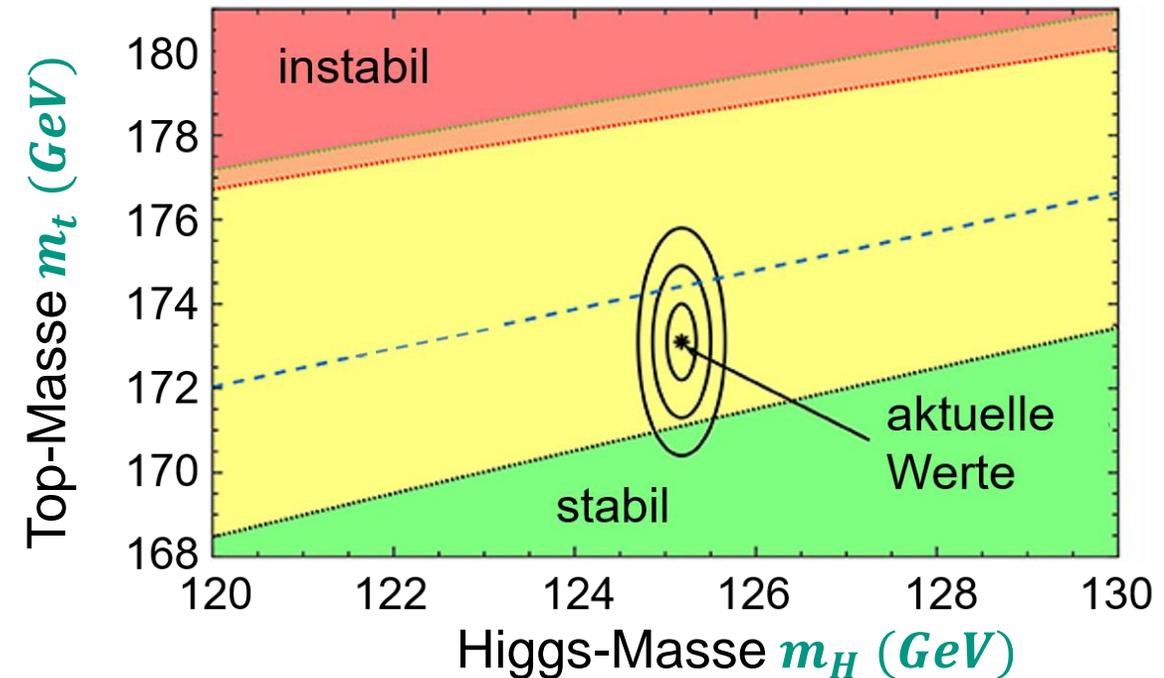
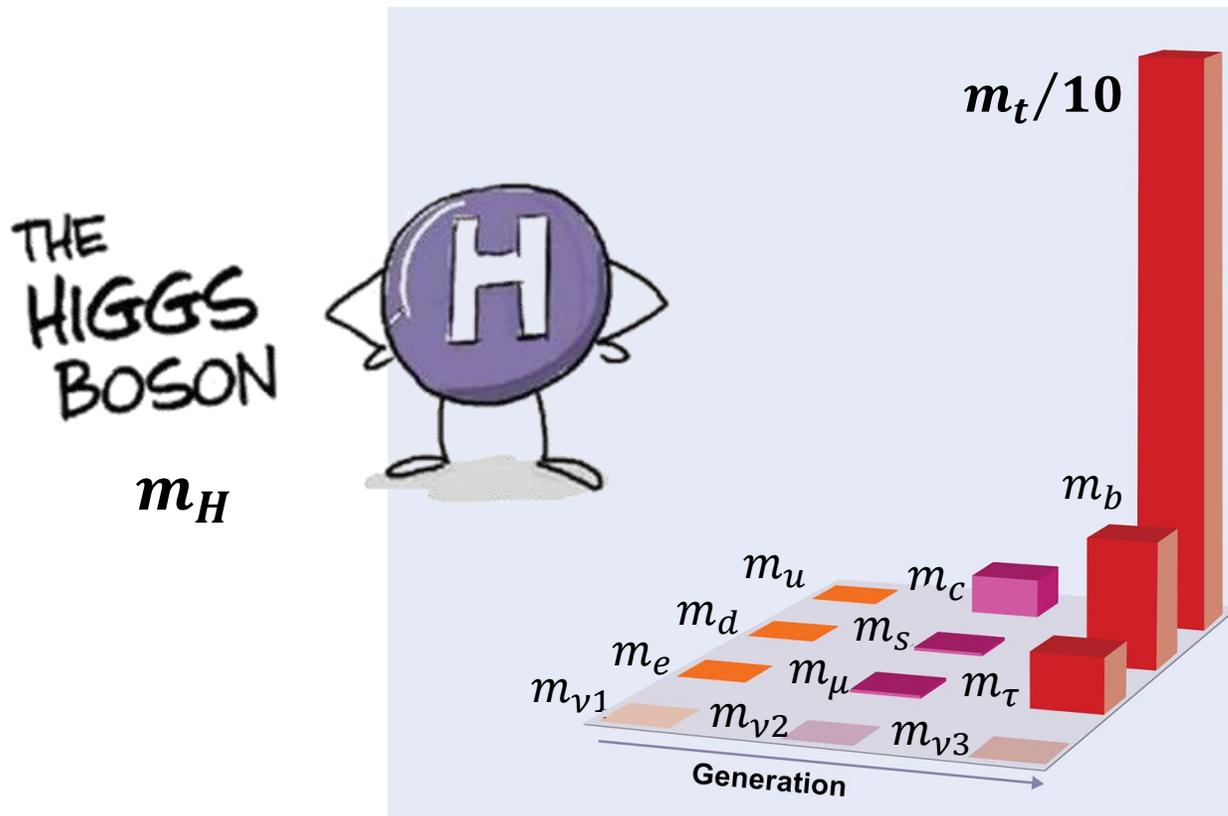


● Quark ● Lepton ● Boson ● Higgs

# Ausblick: Elementarteilchen im Standardmodell

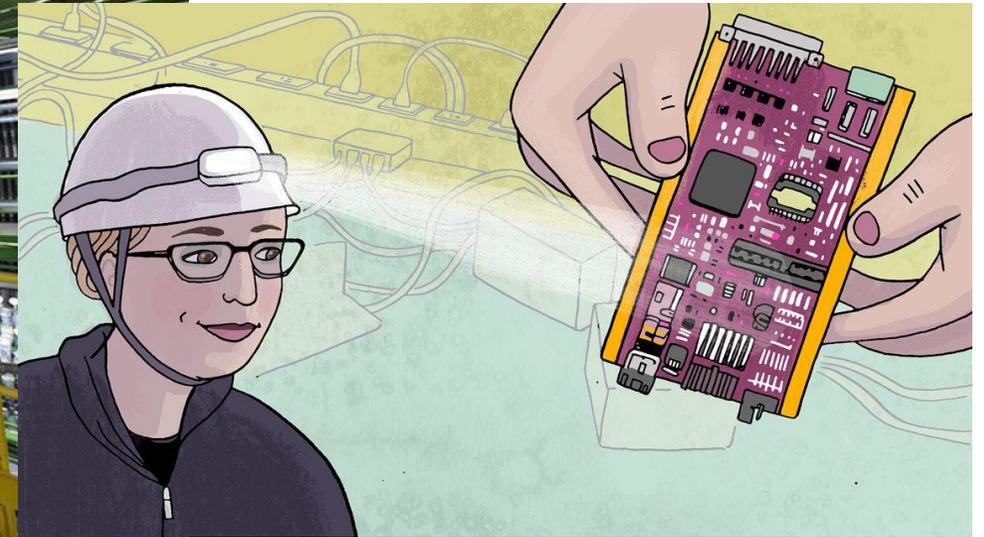
## ■ Isidor Rabi: *who ordered that? and why with these specific values?*

- ein Teilchen, um (fast) allen anderen Teilchen eine **endliche Masse** zu geben



Higgsmasse & Topmasse bestimmen ob unser **Universum stabil** ist

Q: CMS-CERN



# KAPITEL 3 – EXPERIMENTELLE METHODEN

Q: symmetry magazine

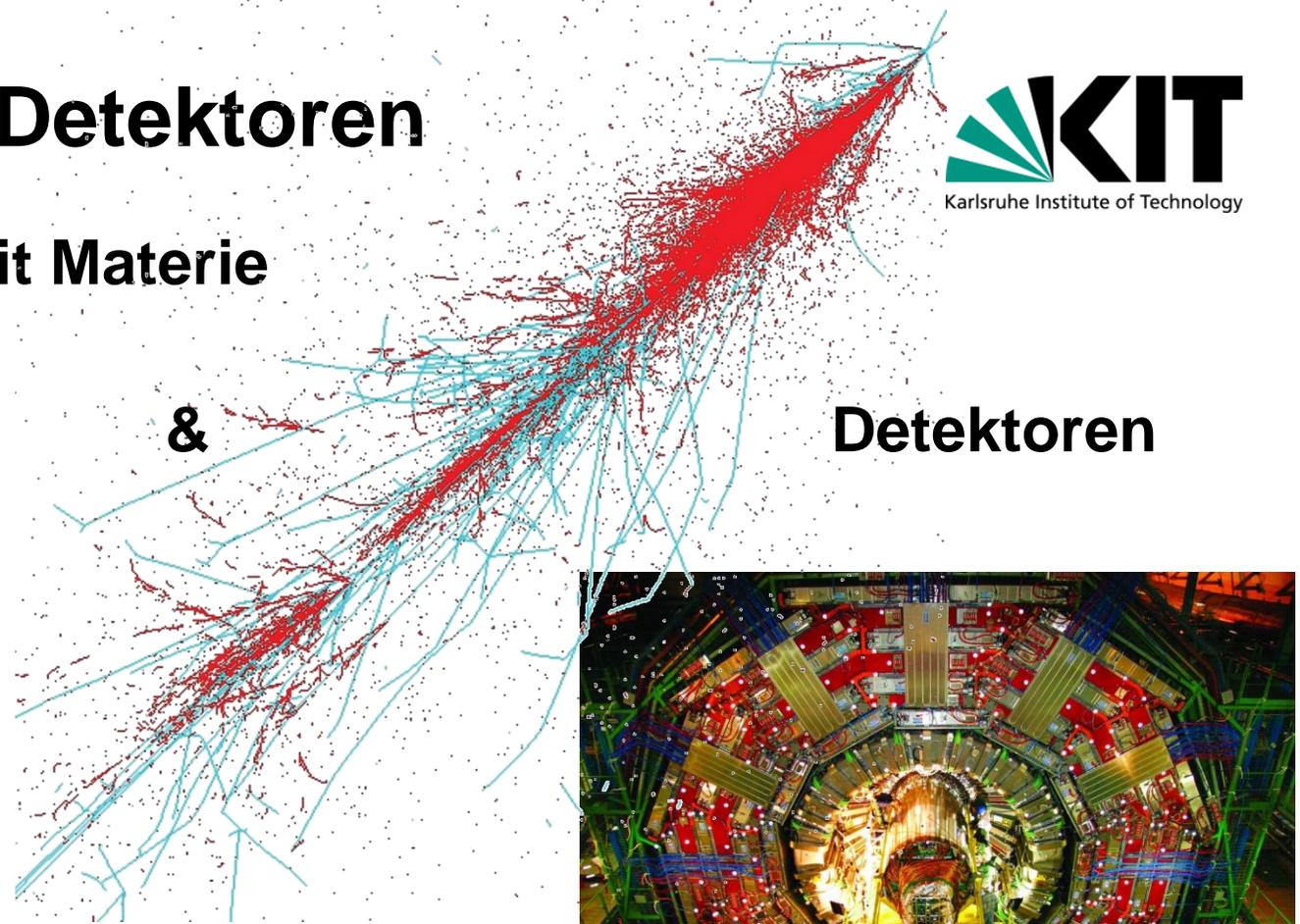
# Tools: Beschleuniger und Detektoren

## ■ Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

### - Prinzipien von Beschleunigern

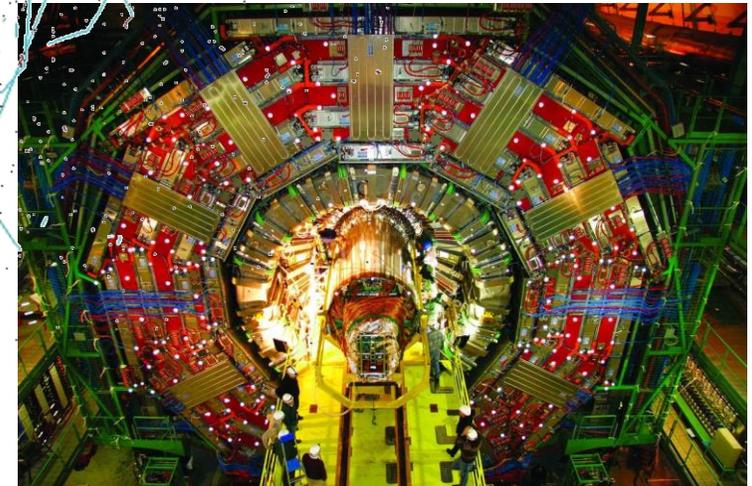


Beschleuniger



&

### Detektoren



Detektoren



# Nachweis von Teilchen: Grundlagen

## ■ Aufgaben von modernen Detektorsystemen in der Teilchenphysik

- Teilchenidentifikation\*:  $e^\pm, \mu^\pm, p, \nu, \gamma, \dots$

Masse, Ladung

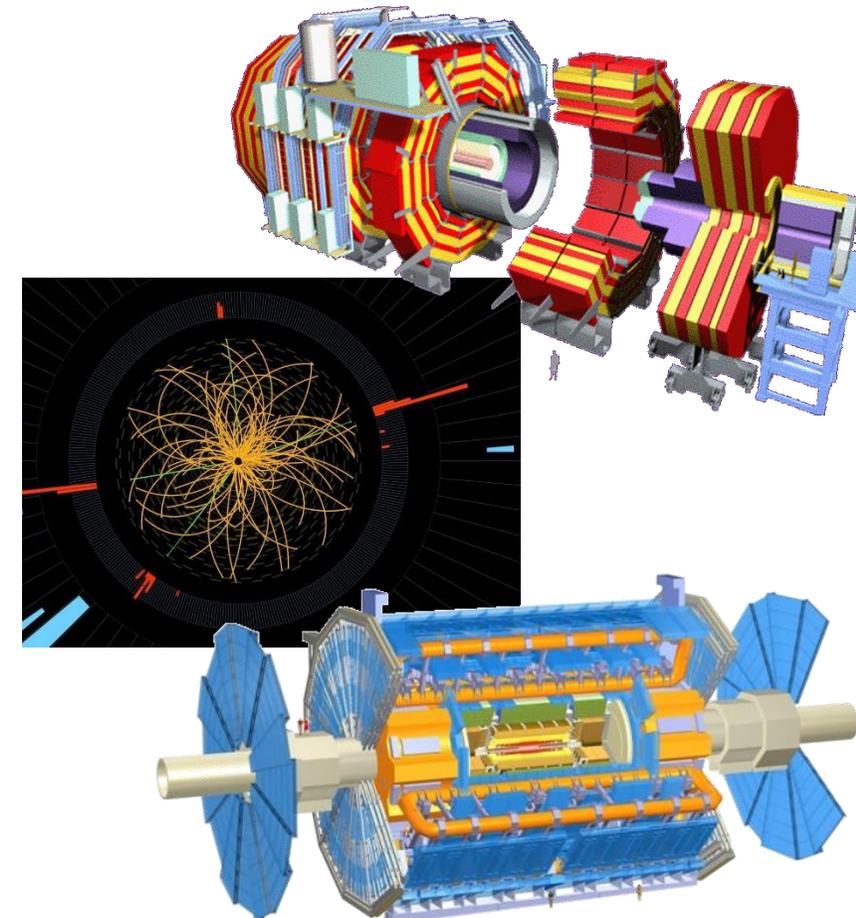
- Teilchenimpuls  $\vec{p}$  (Größe, Richtung: transversal, ...)

Spur in starkem  $B$  – Feld (Solenoid)

- Teilchenenergie  $E_{tot}$  (oft über Kaskade/Schauer)

Nachweis der Energiedeposition

**komplexe Detektorsysteme**



# Wechselwirkungsprozesse von Teilchen

## ■ Reaktionen über starke / schwache / elektromagnetische Wechselwirkung

- Reaktionen sind abhängig von Teilchenart:  
Ladung  $Q$ , Masse  $M$ , Lebensdauer  $\tau$ ,  
**Hadron**, **Lepton**, ...
- Nachweisprozesse sind **energieabhängig**
- spezifische Wahl des **Nachweismediums**
- detaillierte Modellierung mit **MC – Techniken**



Schauerprozess

# Wechselwirkungsprozesse von Teilchen

## ■ Spezifische Eigenschaften des Nachweismediums

- Dichte  $\rho$  , Kernladung  $Z$  , Masse  $A$
- Aggregatzustand (gasförmig, flüssig, fest, Plasma) & Temperatur  $T$
- Ionisationsenergie, Bindungsenergie Elektronen, Gitterstruktur,...
- Strahlungslänge  $X_0$  , hadronische Wechselwirkungslänge  $\Lambda$
- angelegtes Potenzial/Feld:  $E$  –Feld,  $B$  –Feld
- elektrische Leitfähigkeit (supraleitend, Halbleiter,...)



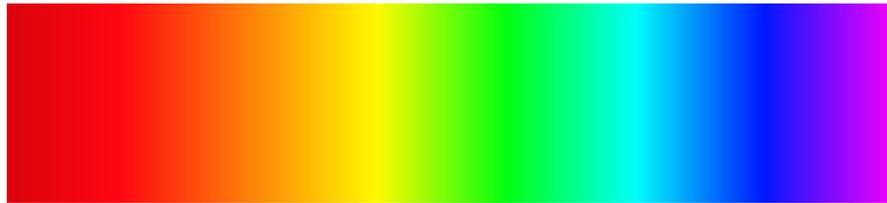
# Teilchen-Wechselwirkungen: $keV \dots EeV$ – Skala

## ■ Beispiele für **Teilchenstrahlung** bei verschiedenen Energieskalen

- $keV$  – Skala: Röntgenstrahlung,  $\beta$  – Strahlung, Auger-Elektronen, ...
- $MeV$  – Skala:  $\alpha$  – Strahlung,  $\gamma$  – Strahlung, Sonneneutrinos, Zyklotron\*
- $GeV$  – Skala: Synchrotron\*, Sekundärteilchen in Luftschauern
- $TeV$  – Skala:  $LHC$ \*, kosmische Strahlung ( $p, \gamma, \dots$ ) aus Galaxis ( $SNae, \dots$ )
- $PeV$  – Skala und höher: kosmische Strahlung ( $p, \gamma, \dots$ ) –  $AGN^{**}s, GRB^{**}s, \dots$

# Teilchenreaktionen: $eV \dots sub - eV$ Energieskala

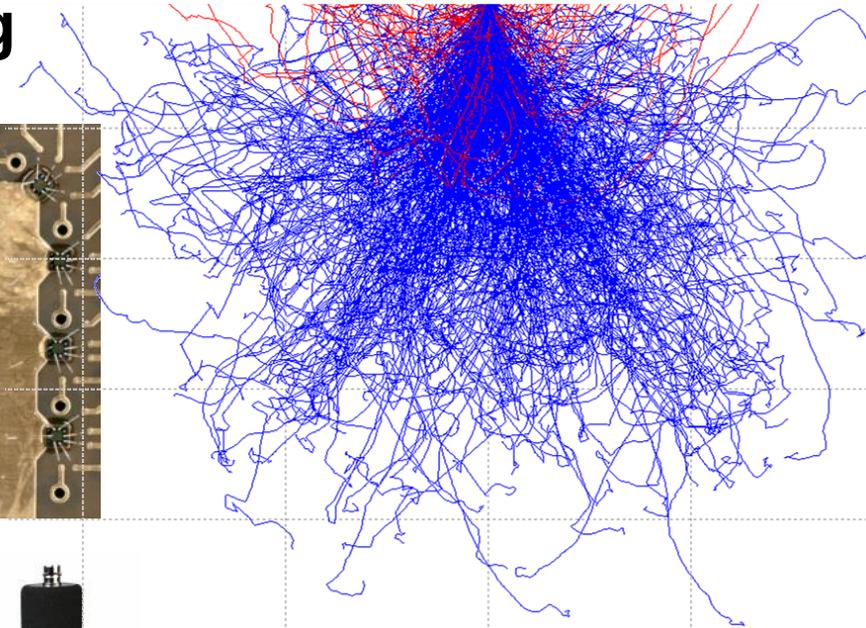
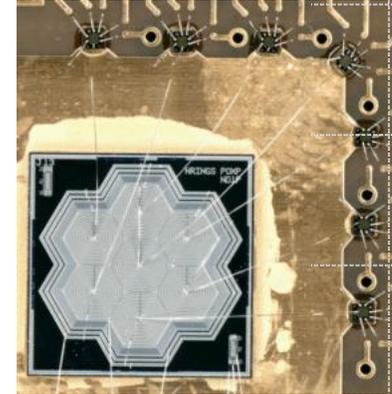
## ■ Nachweis niederenergetischer Teilchenstrahlung



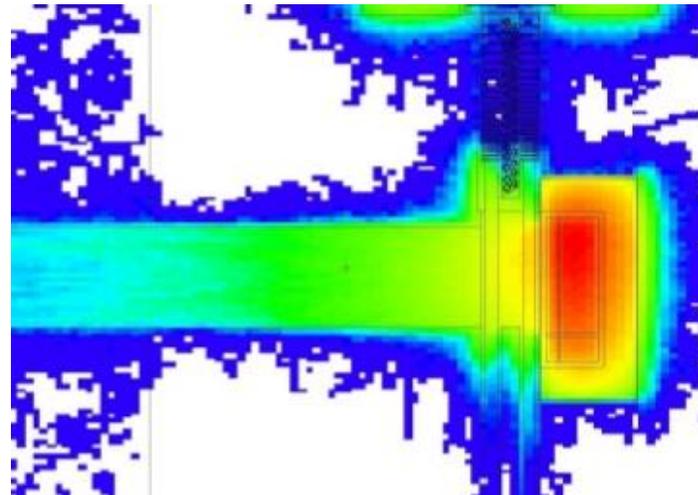
sichtbares Licht



therm. Neutronen

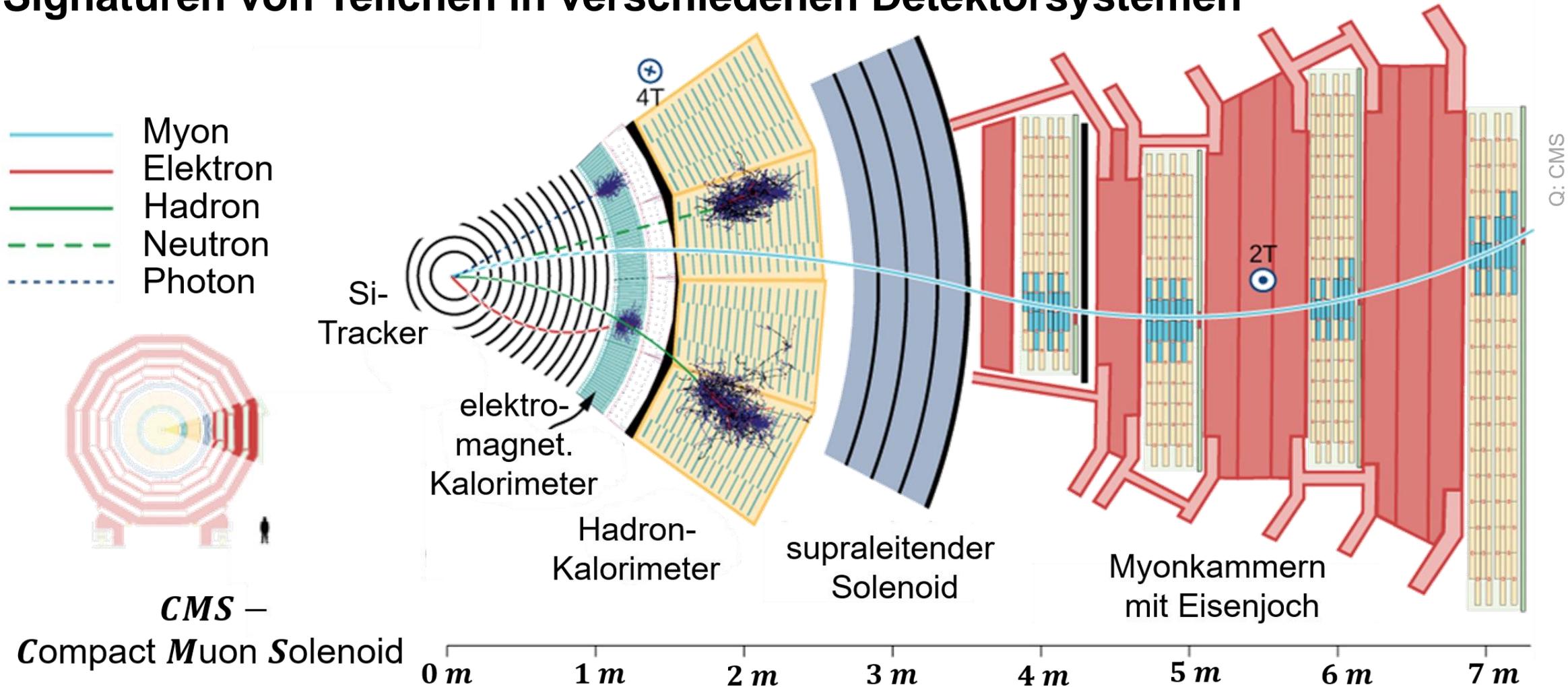


Sekundärelektronen



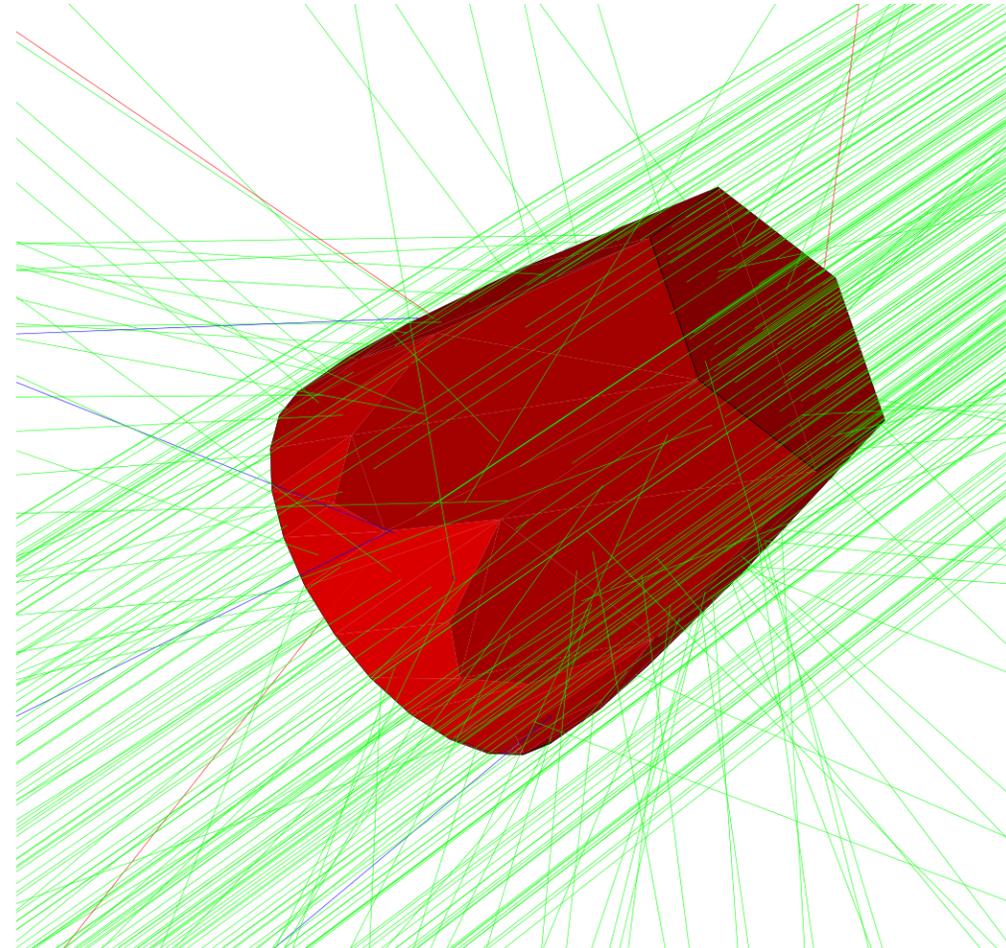
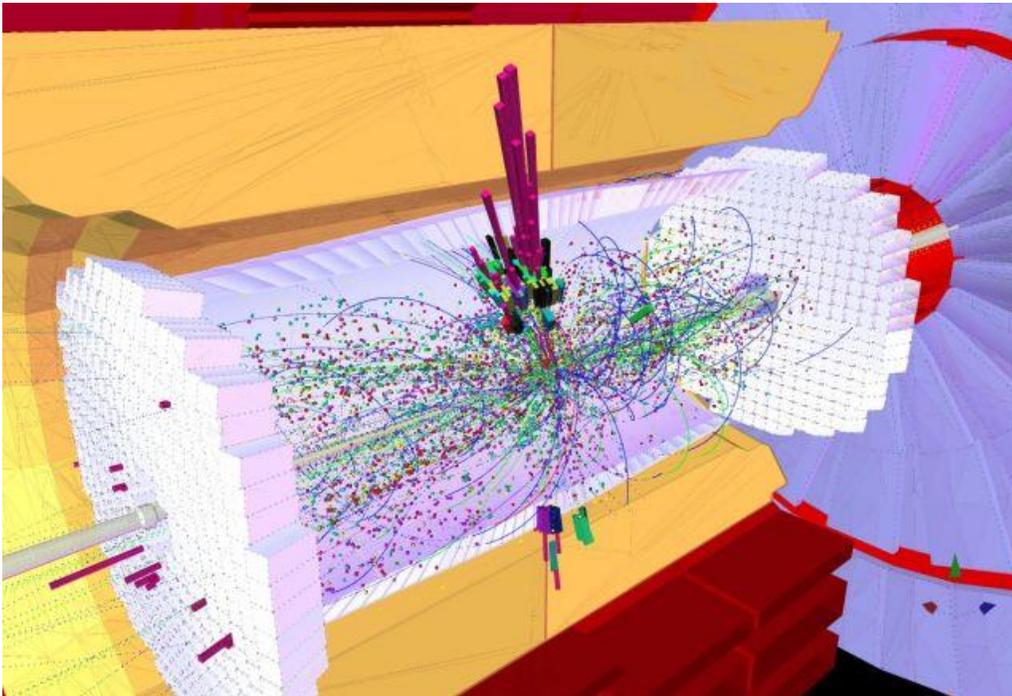
# Teilchenreaktionen: $GeV \dots TeV$ Energieskala

## ■ Signaturen von Teilchen in verschiedenen Detektorsystemen



# Wechselwirkungsprozesse von Teilchen

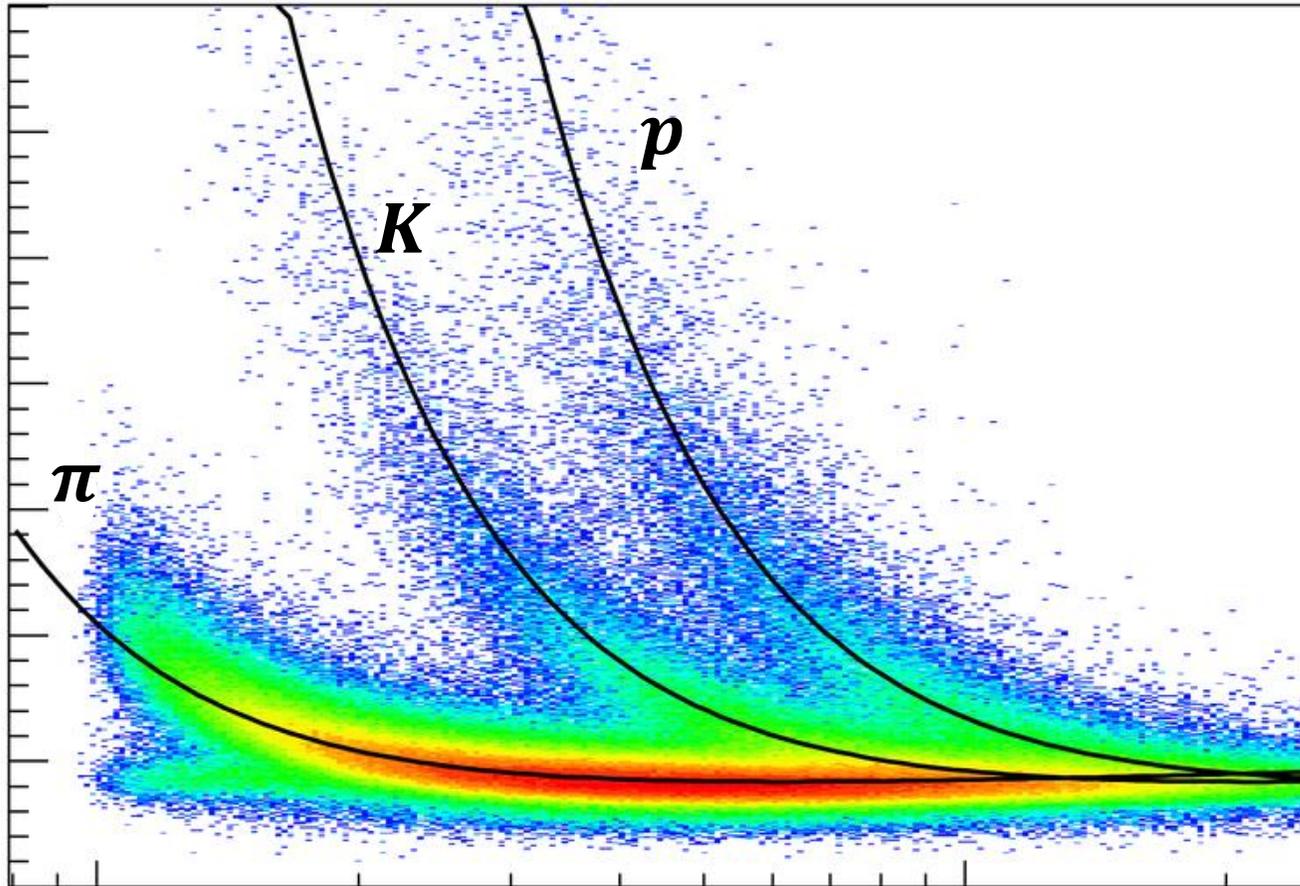
- GEANT4\*: der 'Gold-Standard' für die Modellierung von Teilchenreaktionen



GEANT4



**GEANT4**  
A SIMULATION TOOLKIT

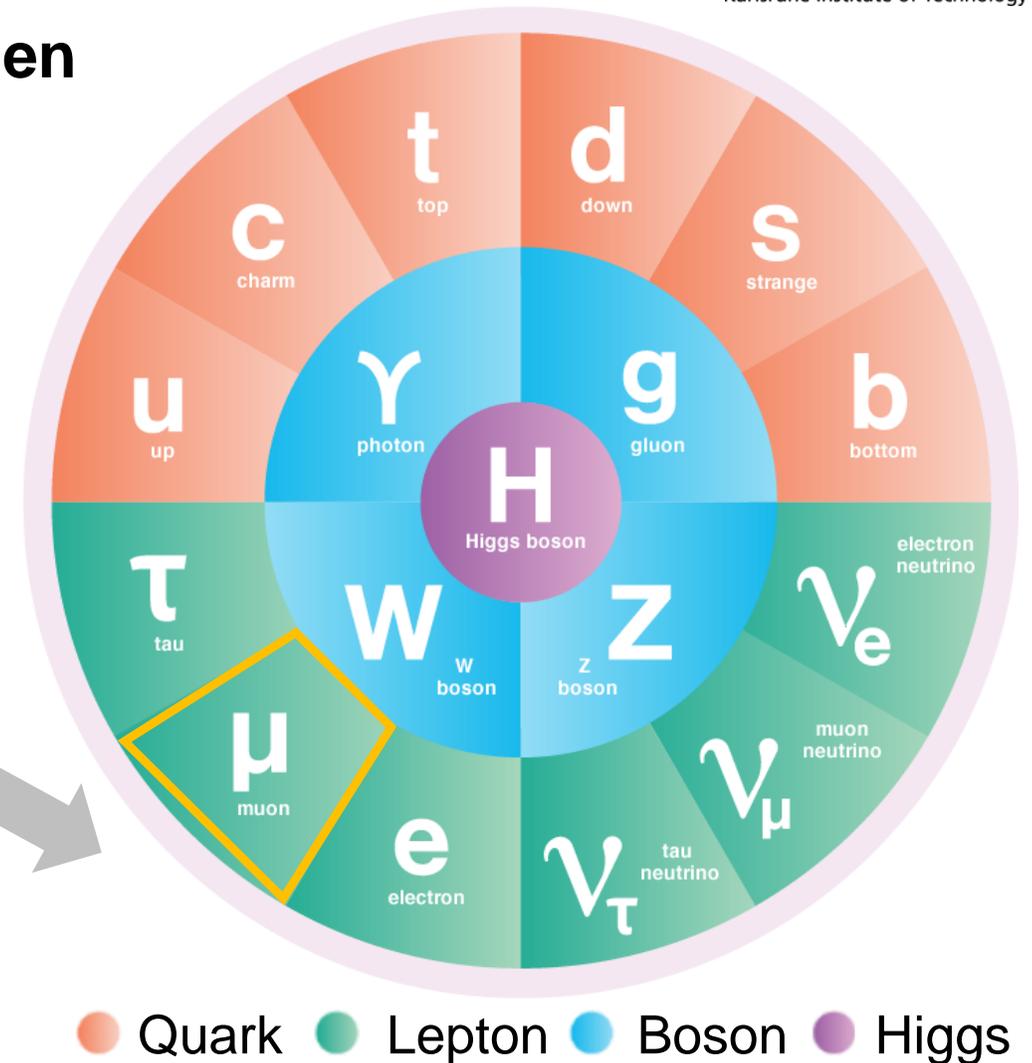
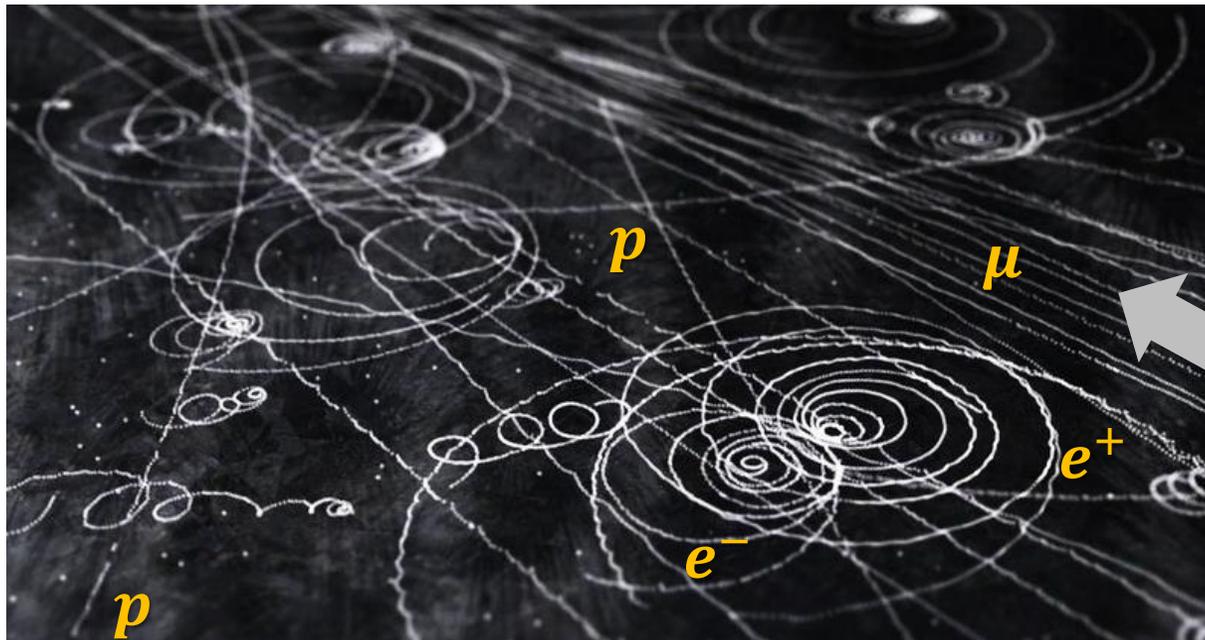


# KAPITEL 3.1 – ENERGIEVERLUST GELADENER TEILCHEN

# Experimentelle Methoden

## ■ Grundlage: experimentelle Beobachtungen von Teilchen & ihren Reaktionen

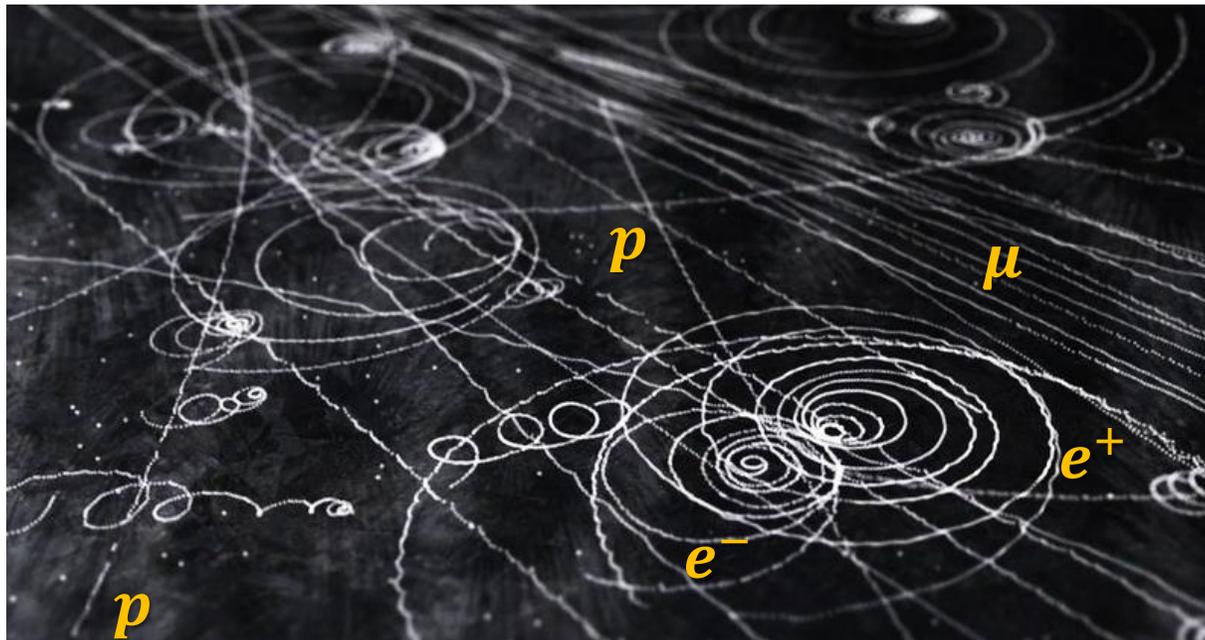
- Teilchennachweis oft über Energieverlust  $dE/dx$  in diversen (Detektor-) Materialien



# Energieverlust geladener Teilchen

## ■ Ionisationsprozesse: Überblick

- in hinreichend dicken Absorbern: Großteil der Teilchen-Primärenergie wird in ein **Ionisationssignal** ( $\Rightarrow$  Detektion) umgewandelt
- dominant bei **schweren Teilchen** ( $\mu, p$ , Ionen,...)



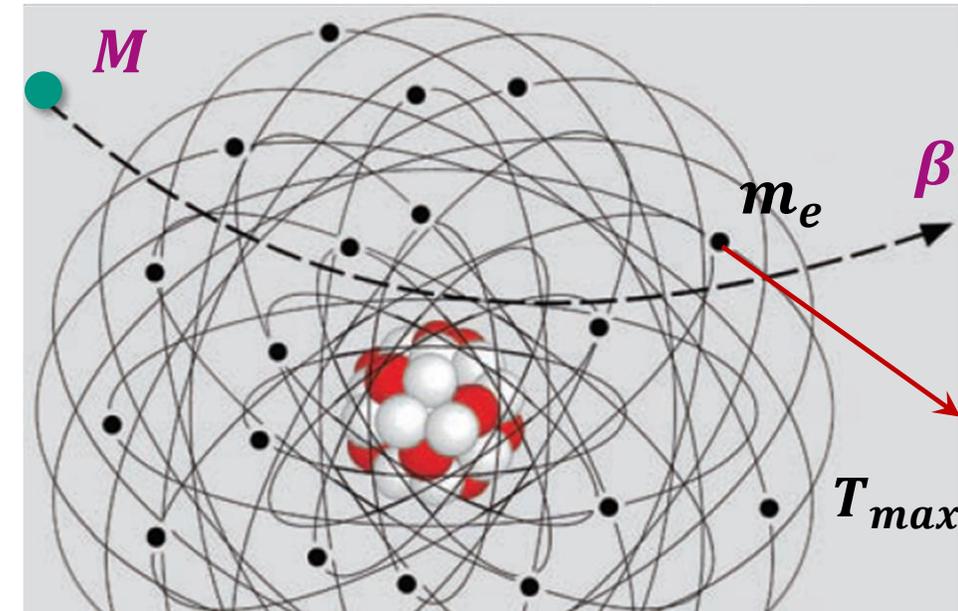
- für Signalgröße entscheidend: der **spezifische Energieverlust  $dE/dx$**  (pro Wegstrecke  $dx$  im Medium)
- Signalauslese: **Drift der Ladungsträger** zu Elektroden (Platten) via  $E$  – **Feld**, bzw. Ladung: Kondensationskerne für **Gasbläschen**

# Energieverlust geladener Teilchen

## ■ Ionisationsprozesse von Atomen in Materie

- **inelastische Streuprozesse** des Primärteilchens mit Hüllenelektronen im Atom:  
hoher Querschnitt  $\sigma_{inel.} \approx 10^{-17} - 10^{-16} \text{ cm}^2$   
⇒ **Anregung** (gebundene Elektronen) &  
⇒ **Ionisation** (freie Elektronen, Ionen)
- maximaler Energieübertrag  $T_{max}$  an  
ruhendes Elektron mit Masse  $m_e$   
(für schwere Primärteilchen):

$$T_{max} = 2 \cdot m_e \cdot \beta^2 \cdot \gamma^2$$

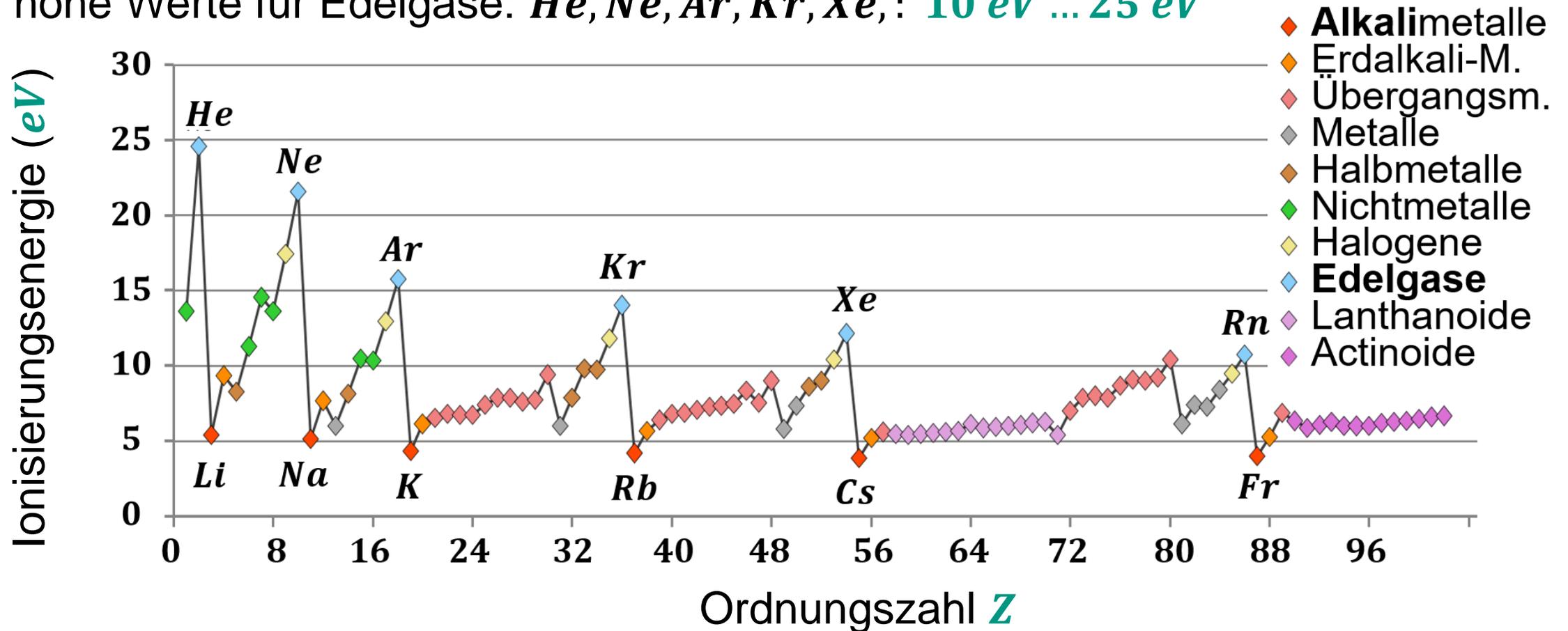


Primärteilchen mit Masse  $M$   
Lorentzparameter:  $\beta, \gamma$

# Energieverlust: atomare Ionisierungsenergien

## ■ Zentraler Parameter für alle Ionisationsdetektoren (Violdrahtkammern,...)

- hohe Werte für Edelgase: *He, Ne, Ar, Kr, Xe*, : **10 eV ... 25 eV**



# Bethe–Gleichung\*

- Beschreibung des mittleren Energieverlusts schwerer Teilchen ( $z$ )

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot n \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \cdot \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

$$= 0,307 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$$

## Konstanten:

klass. Elektronradius mit  $r_e = 2,818 \text{ fm}$

Elektronmasse  $m_e = 0,511 \text{ MeV}$

Elementarladung  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

elektr. Feldkonstante  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s/V} \cdot \text{m}$



Q: wikipedia

Hans Bethe



# Bethe–Gleichung

## ■ Eigenschaften des Targetmaterials

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot n \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \cdot \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

**Target:**

Elektronendichte  $n$

Kernladung  $Z$

Kernmasse  $A$

Target-spezifische Dichte  $\rho$

mittleres Ionisationspotenzial  $I$  (für große  $Z$ :  $I \sim Z \cdot 10 \dots 12 \text{ eV}$ )

Polarisation  $\delta$

$$n = \frac{Z \cdot \rho}{A \cdot u}$$



# Bethe–Gleichung: Bremsvermögen $dE/dX$

- Bremsvermögen  $dE/dX$  des **Targetmaterials**: nahezu identisch für Targets

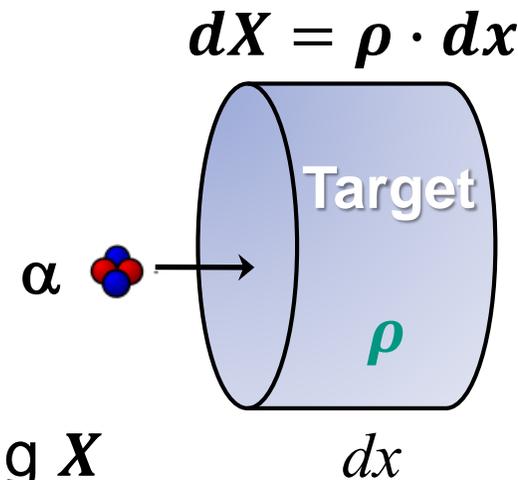
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot n \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \cdot \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

Target mit Dichte  $\rho$ :

$$n = \frac{Z \cdot \rho}{A \cdot u}$$

$$\frac{dE}{dX} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx}$$

**Energieverlust** pro Massenbelegung  $X$   
( $MeV g^{-1}cm^2$ )



Massenbelegung  
 $X = \rho \cdot x$  in ( $g/cm^2$ )

# Bethe–Gleichung

## ■ Eigenschaften des Projektils

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot n \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \cdot \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

### Projektil:

Ladung  $z$ , relativistische Geschwindigkeit  $\beta$

- Energieverlust **nicht** abhängig von Teilchenmasse  $M$
- $dE/dx$  nur abhängig von der **Teilchengeschwindigkeit**  $\beta$ , typisch:  
dargestellt als Funktion des **Impulses**  $p$ , wobei gilt:  $p = \beta \cdot \gamma \cdot M \cdot c$

# Bethe–Gleichung

## ■ Eigenschaften des Projektils

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot n \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \cdot \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

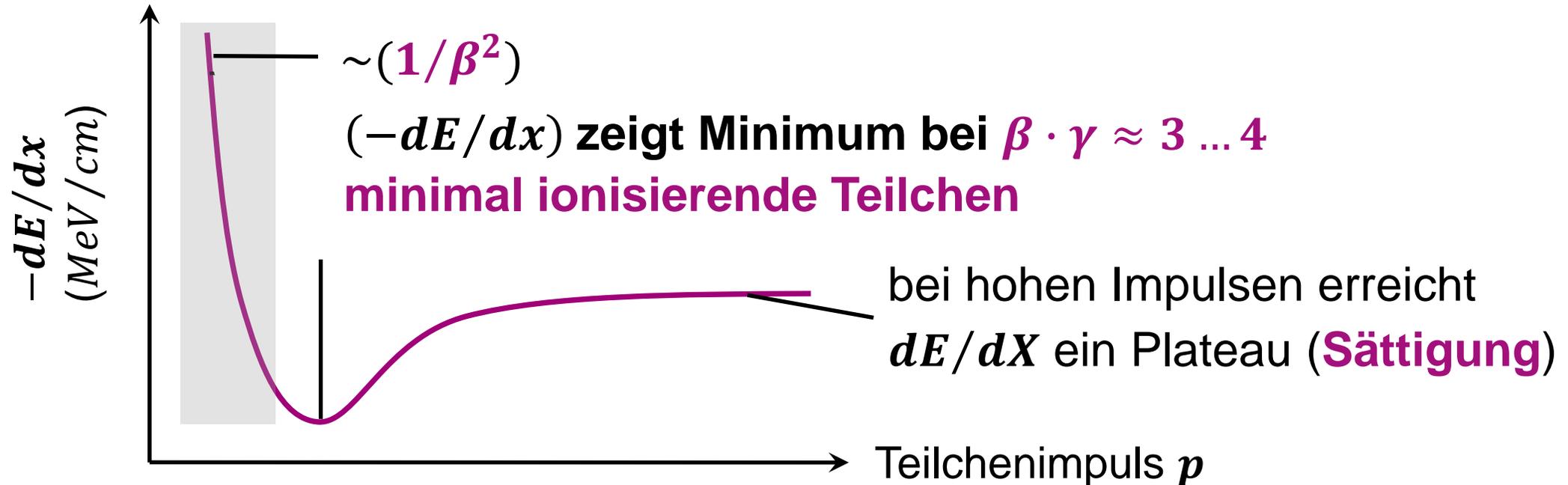
### Projektile:

- Anwendungsbereich für  $dE/dx$ : nur gültig falls  $\beta > v_{Huelle}$  (mit  $v_{Huelle} \sim Z \cdot \alpha$ )  
 $v_{Huelle}$ : Geschwindigkeit der Hüllenelektronen der Target-Atome  $Z$
- gilt nicht für leichte Teilchen wie Elektronen  $e^-$  & Positronen  $e^+$   
da  $m_e \ll m_{p,\mu}$ : zusätzlich bedeutender Energieverlust durch **Bremsstrahlung** (d.h. **radiative Energieverluste** dominieren, s. Kap. 3.2)

# Bethe–Gleichung

- Anwendungsbereich: Projektil mit  $0, 1 < \beta \cdot \gamma < 1000$

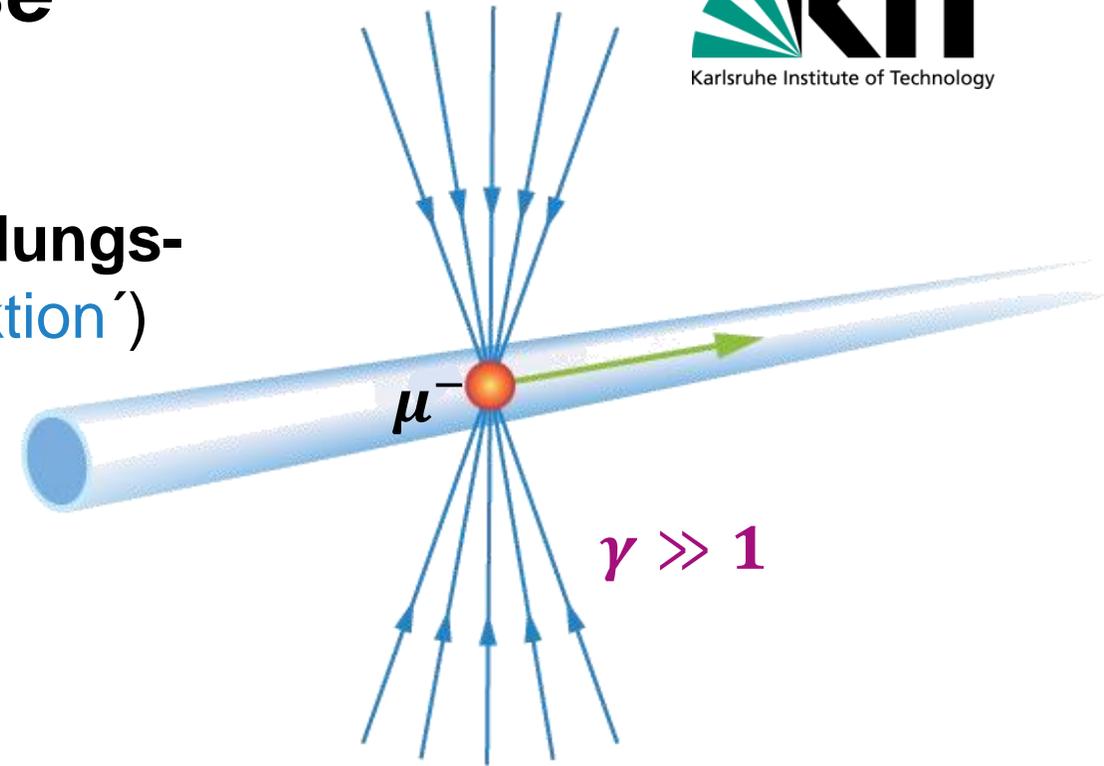
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot n \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \cdot \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$



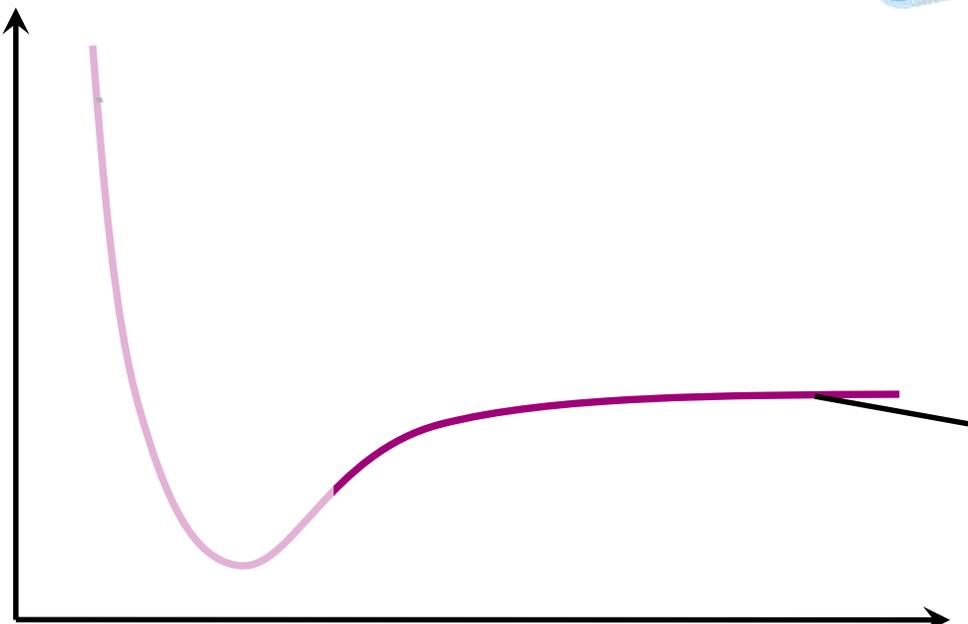
# Bethe–Gleichung: 'relativistic rise'

## ■ Relativistisches Plateau: $\gamma \gg 1$

- elektrisches Feld eines **relativistischen Ladungs-Trägers** 'klappt nach oben' ('**Längenkontraktion**')  
→ größere Ionisationsverluste als bei einem kugelsymmetrischen Feld



$-dE/dx$   
(MeV/cm)



bei hohen Impulsen  $p$  erreicht  $dE/dX$  ein Plateau (**Sättigung**)

Teilchenimpuls  $p$

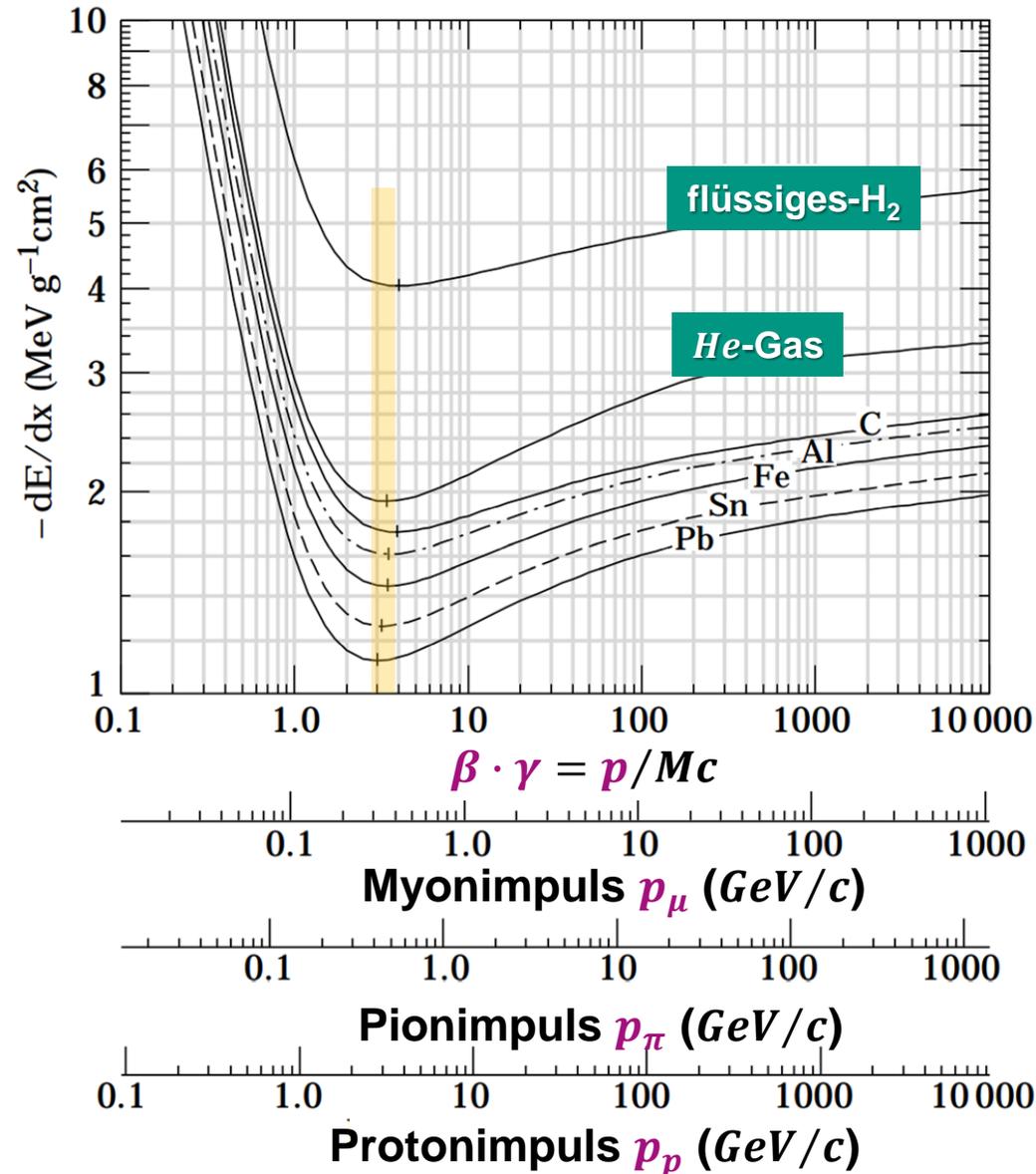
# Spezialfall *m. i. p. s*\*

## ■ Bereich minimaler Ionisation

- wichtiger Bereich in Energieverlustkurve
- bei einer Targetdichte  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ :



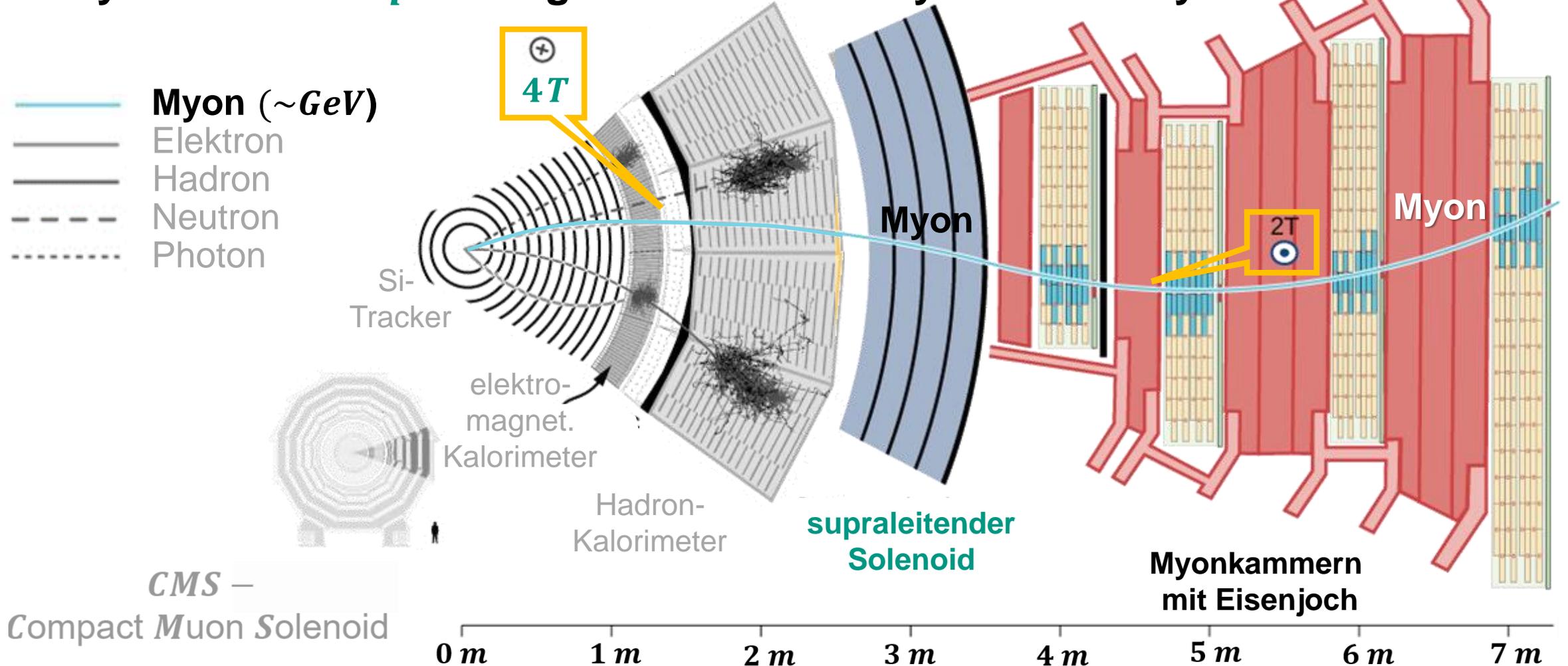
$$dE/dx \sim 2 \text{ MeV/cm}$$



nach PDG, clipart

# Myonen in großen Detektorsystemen

## ■ Myonen als *m.i.p.s* dringen vor bis zum Myonkammersystem

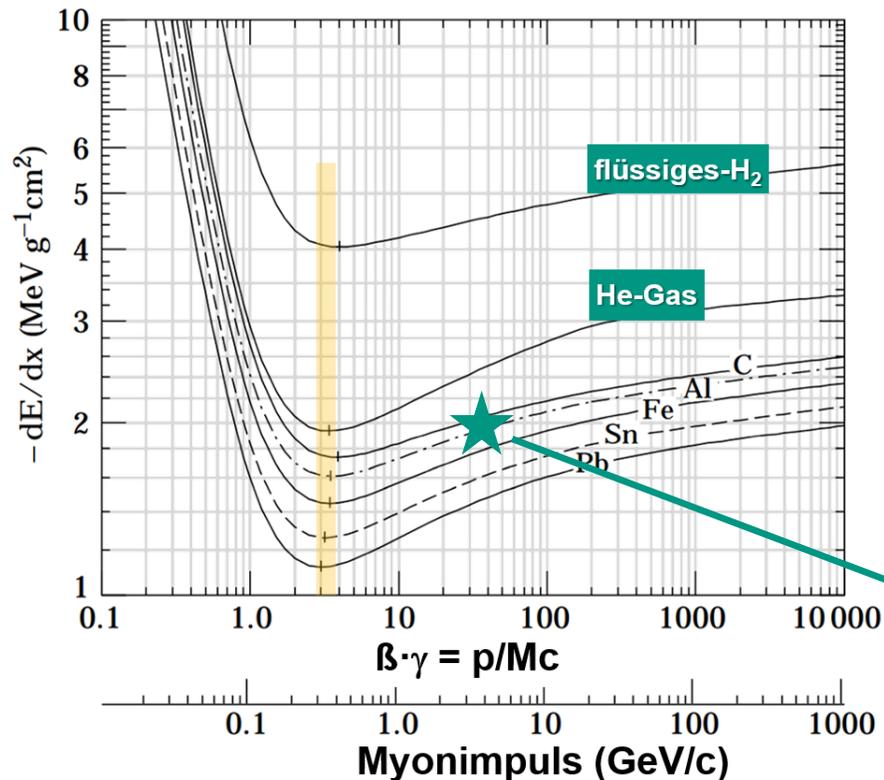




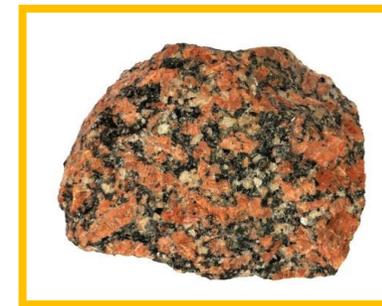
# EINSCHUB: MYON-ABSCHIRMUNG IN UNTERGRUND-EXPERIMENTEN

# Untergrundlabore für seltene Prozesse

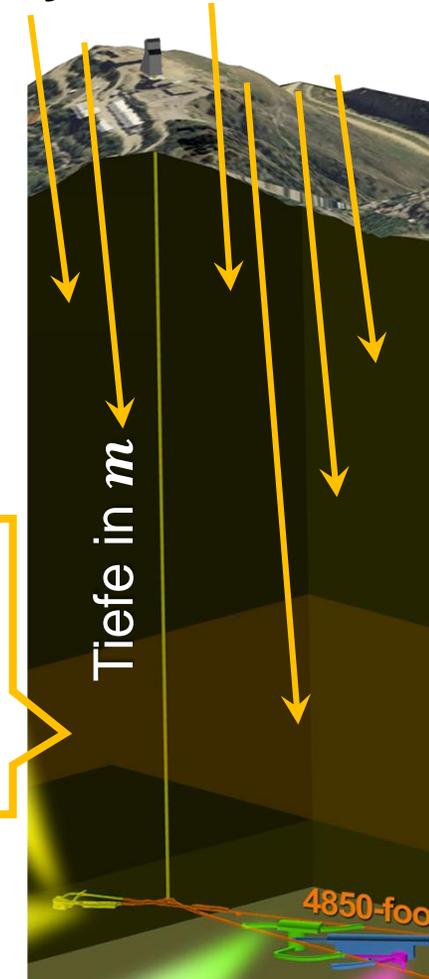
- Suche nach **seltene** Prozessen:  
 Untergrundlabore zur **Abschirmung**  
 vor **kosmischen Myonen** (*m. i. p. s*)



Standardfels  
 $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$



Myonen



kosmische Myonen auf Meereshöhe ( $dE/dx$  in Gestein)

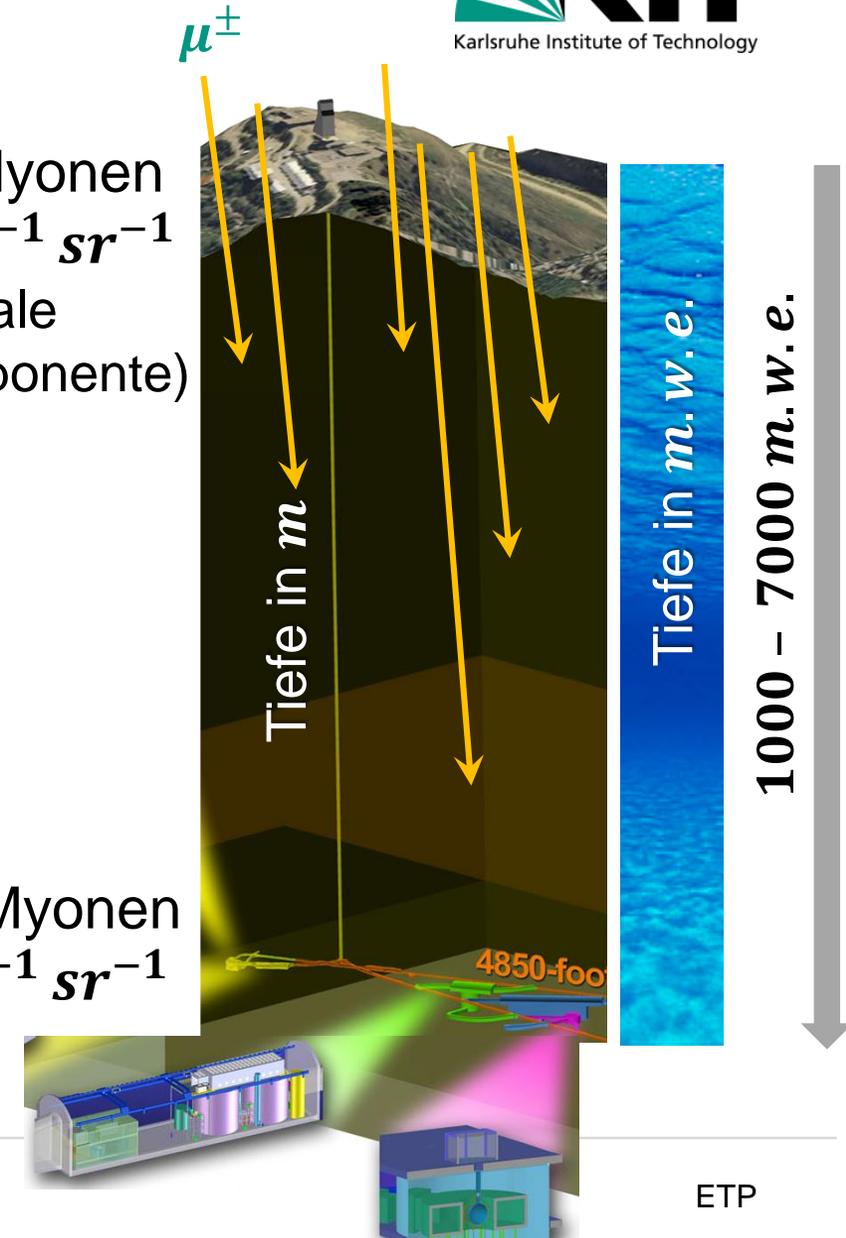
# Untergrundlabore für seltene Prozesse

- Suche nach **seltene** Prozessen:  
Untergrundlabore zur **Abschirmung**  
vor **kosmischen Myonen** (*m. i. p. s*)
  - Myonen aus der Höhenstrahlung  
sind stark durchdringend  $\langle E \rangle \sim 3 \dots 4 \text{ GeV}$
  - Experimente zur Suche nach Dunkler  
Materie nur in tiefen Untergrundlaboren
  - Labore in Tiefen von **1000 – 7000 m. w. e.**  
(*meters water equivalent*) mit  
 $\rho(H_2O) = 1 \text{ g/cm}^3$   
⇒ Minen, dedizierte **Untergrundlabore**

$\mu^\pm$

$\sim 100 \text{ Myonen}$   
 $m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$   
(vertikale  
Komponente)

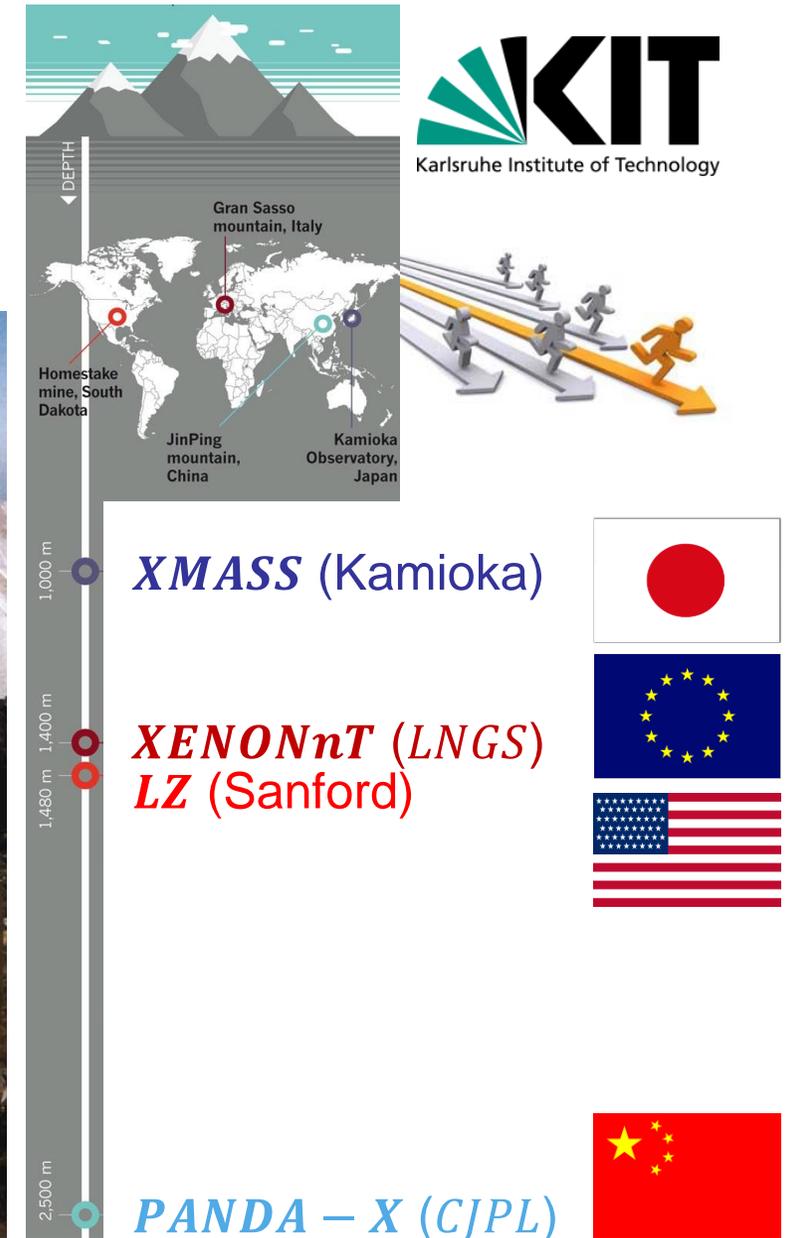
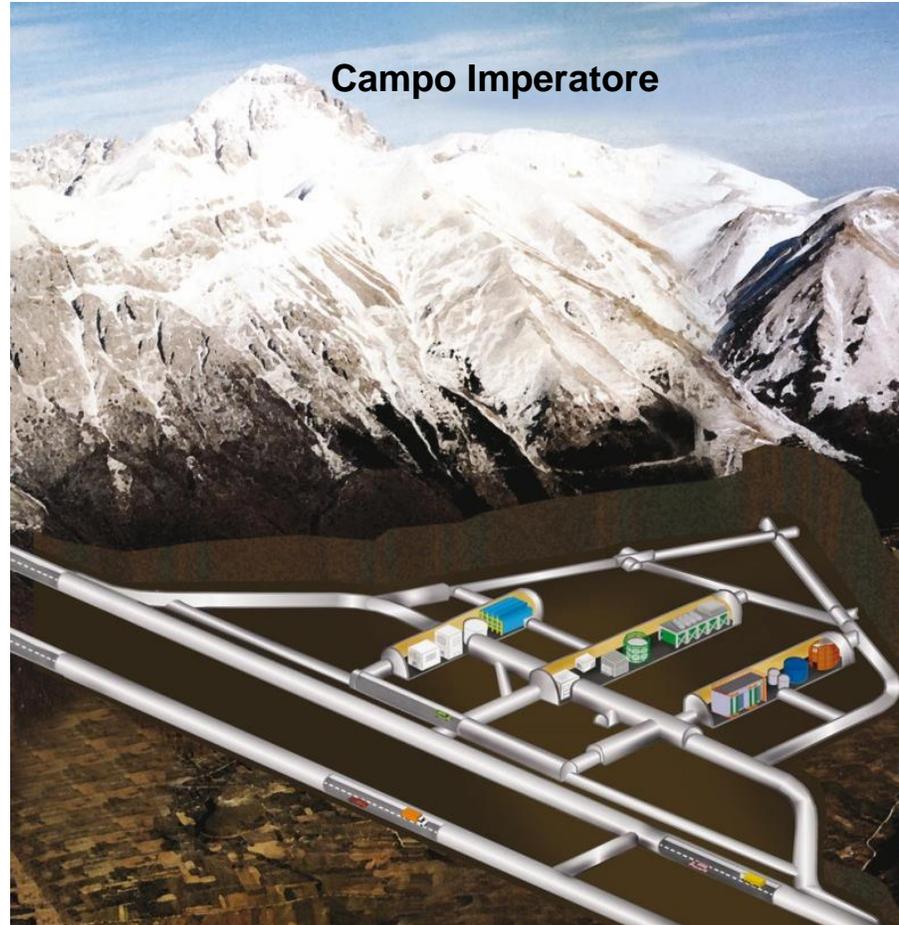
$\sim 10^{-4} \text{ Myonen}$   
 $m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$



# Untergrundlabore: *LNGS*

■ Suche nach **seltenen Prozessen**: Dunkle Materie,...

- größtes Untergrundlabor weltweit mit Fläche  $A = 17300 \text{ m}^2$
- unterteilt in 3 große Experimentierhallen  
 $\mu$ -Rate:  $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$



Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Q: LNGS

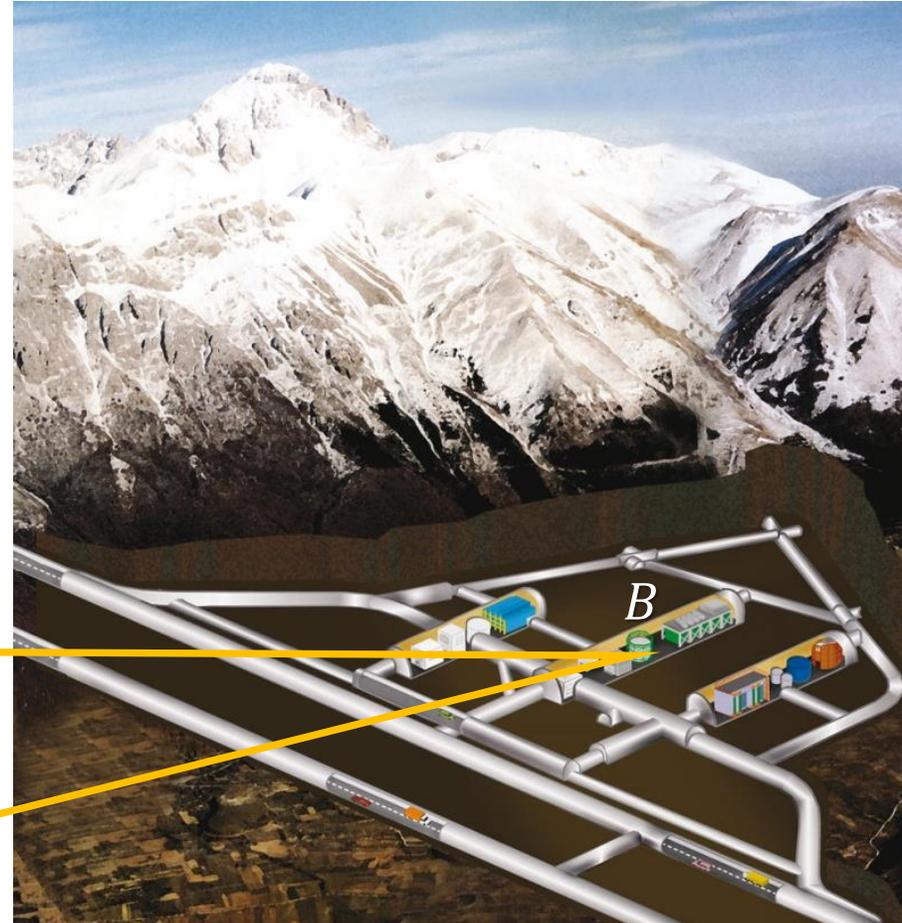
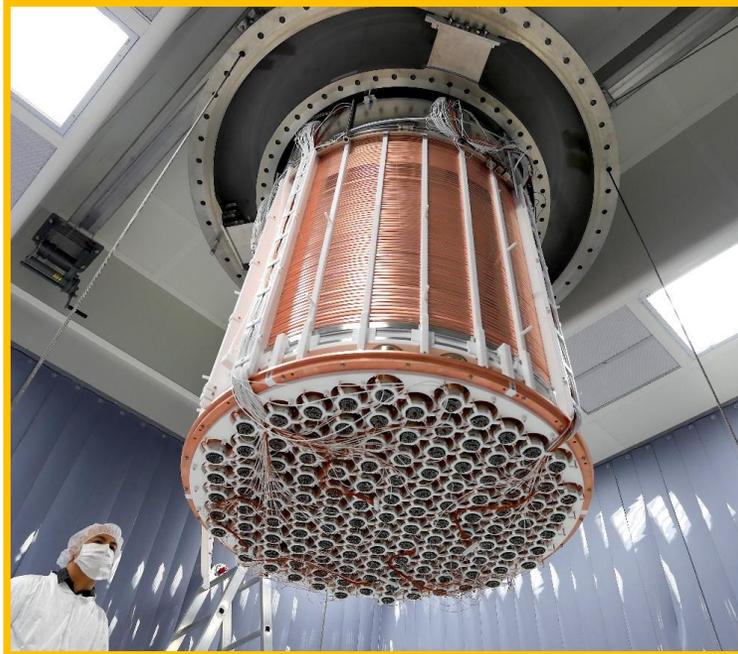
# Untergrundlabore: *LNGS*

- Seit 2020: *XENONnT* Experiment im *LNGS* - Halle *B*

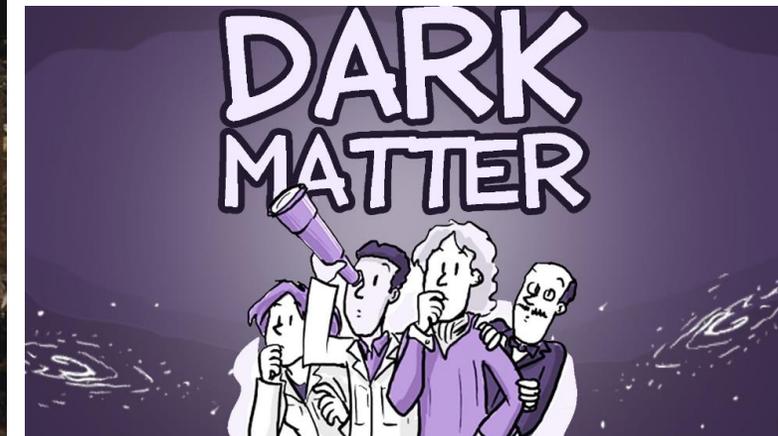


XENON

*XENON1T*



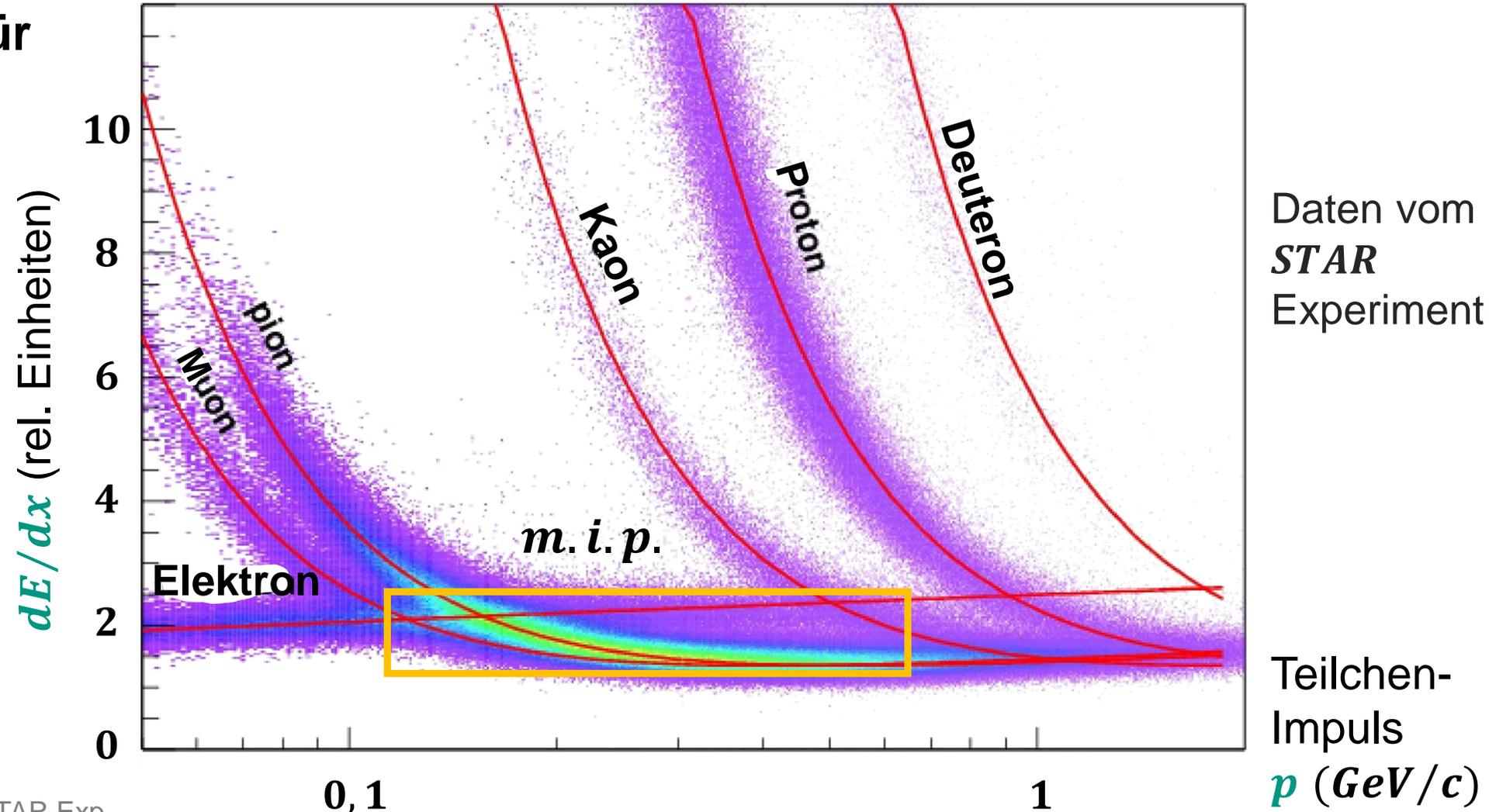
- Suche nach **seltenen Prozessen** möglich nur in **sehr tiefen Untergrundlaboren** mit guter Infrastruktur\*



# Teilchenidentifikation via $dE/dx$

■  $dE/dx$  vs.  $p$  für verschiedene Teilchenarten

- Trennung von Teilchenspezies (Ruhemasse!) in Teilchenphysik oft über  $dE/dx$



Q: nach STAR Exp.

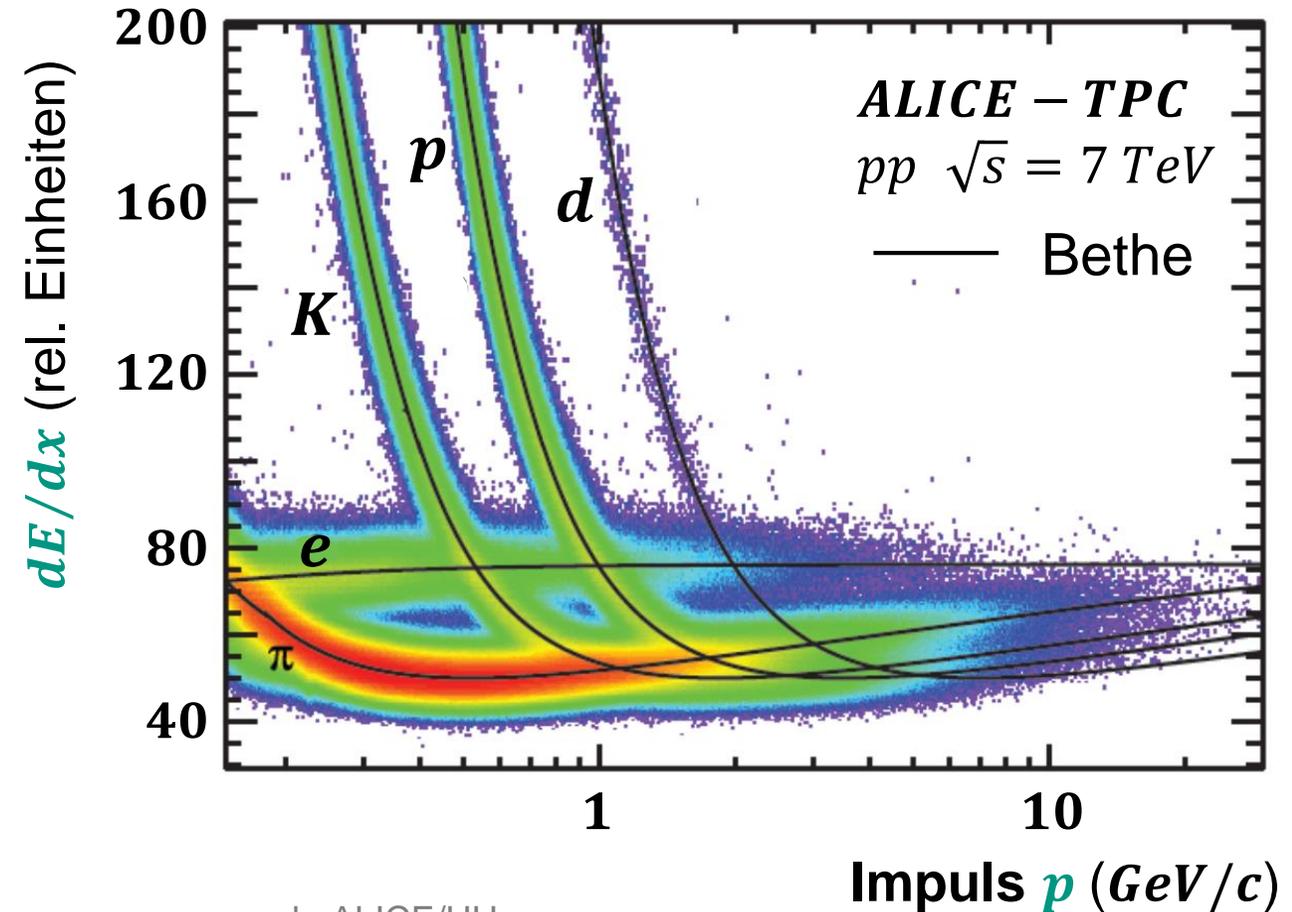
# Teilchenidentifikation via $dE/dx$

- Energieverlust  $dE/dx$ : ein wichtiges Mittel zur **Teilchenidentifikation** (**P**article **I**dentification - **PID**)

- $dE/dx$  entspricht Messung von  $\beta$
- relativistischer Impuls  $p$ :

$$p = \beta \cdot \gamma \cdot M \cdot c = \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot M \cdot c$$

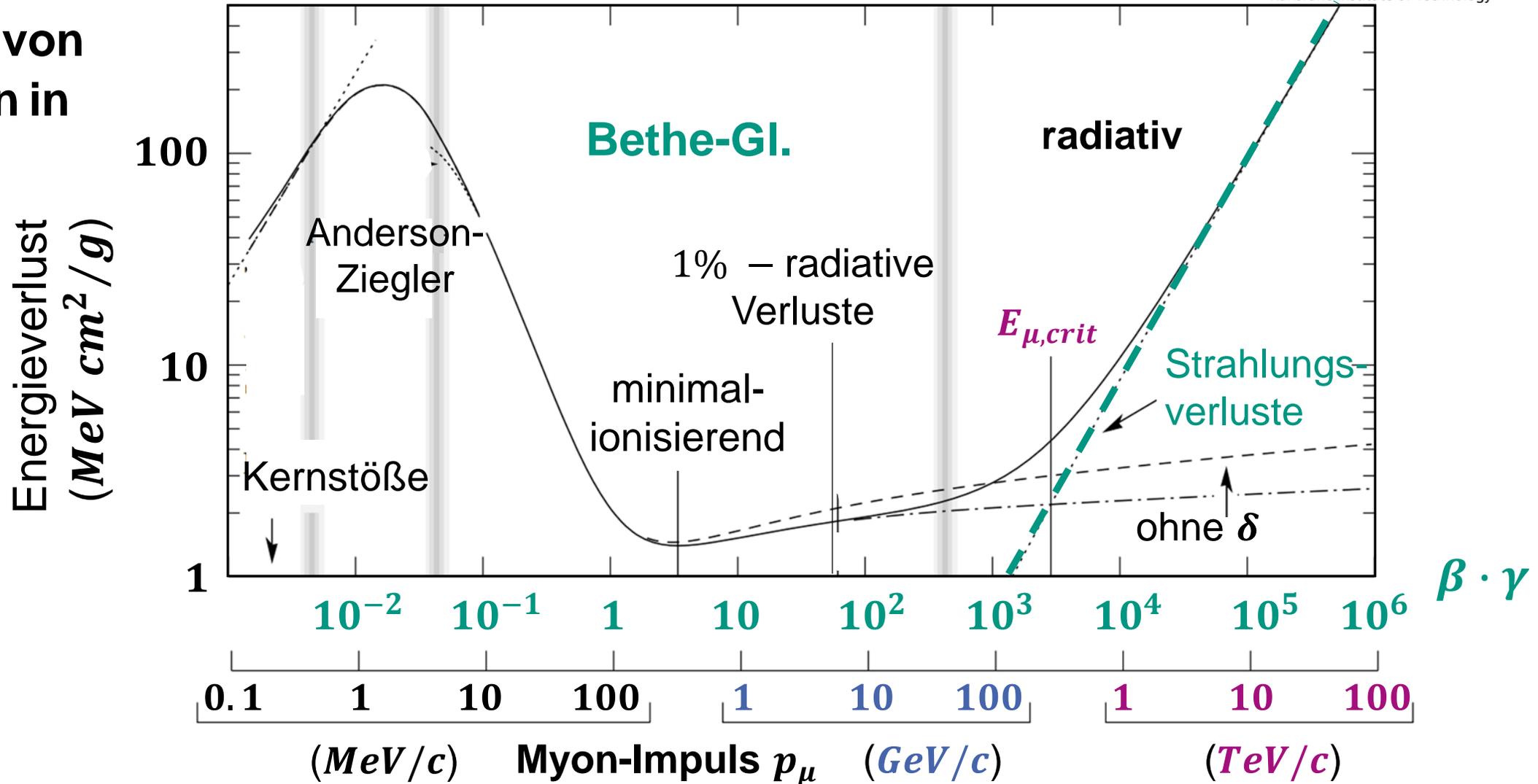
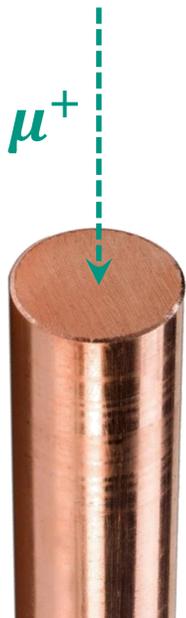
- Tipp: messe  $dE/dx$  und unabhängig davon den relativistischen Impuls  $p$  :  
⇒ **Teilchenmasse  $M$  (damit:  $PID$ )**



nach: ALICE/UH

# Energieverlust geladener Teilchen: Überblick

■  $dE/dX$  von Myonen in Cu

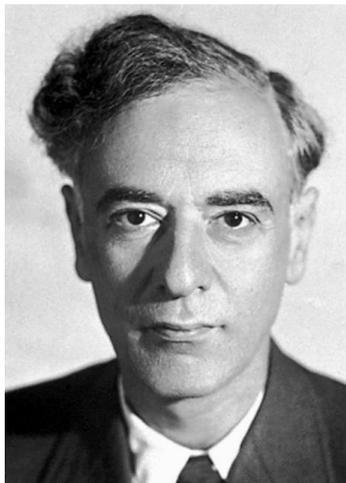


Q: nach PDG

# Energieverlust $dE/dx$ : Fluktuationen

## ■ Landau – Vavilov Verteilung: Energieverlust in dünnen Absorbern

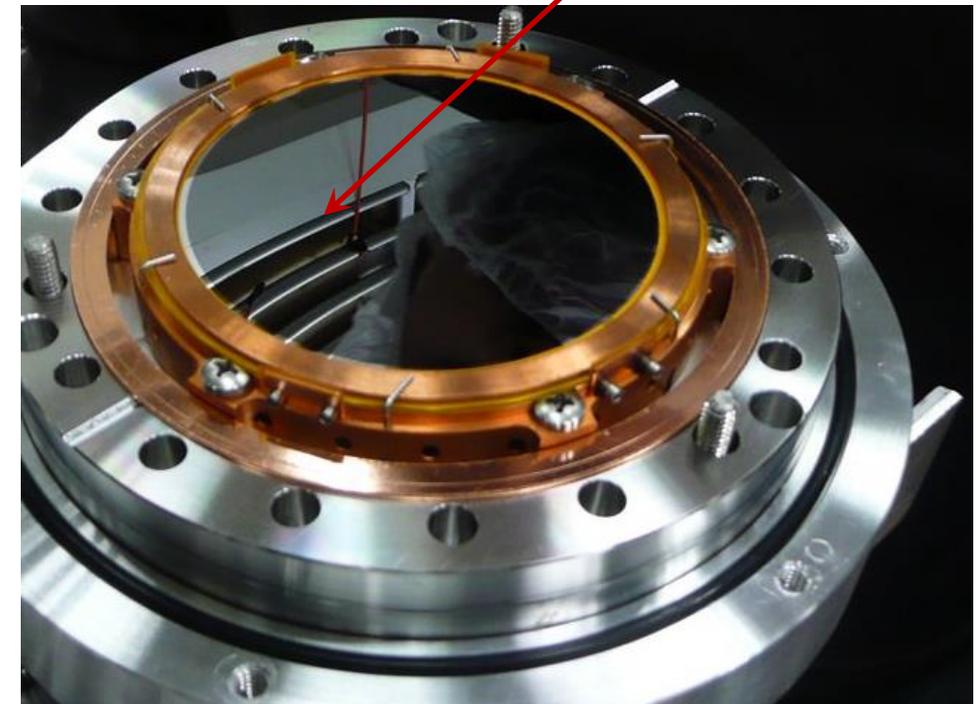
- inelastische Streuungen an Hüllenelektronen sind **statistische Prozesse**:  
zentrale Stöße (**großes  $\Delta E$** )  
sind sehr viel seltener als  
periphere Stöße (**kleines  $\Delta E$** )



*Lev Landau*  
(Nobelpreis 1962,  
**Suprafluide**)

Q: wikipedia

Myon  
(*m. i. p.*)  
durchstößt  
den  
KATRIN  
Detektor



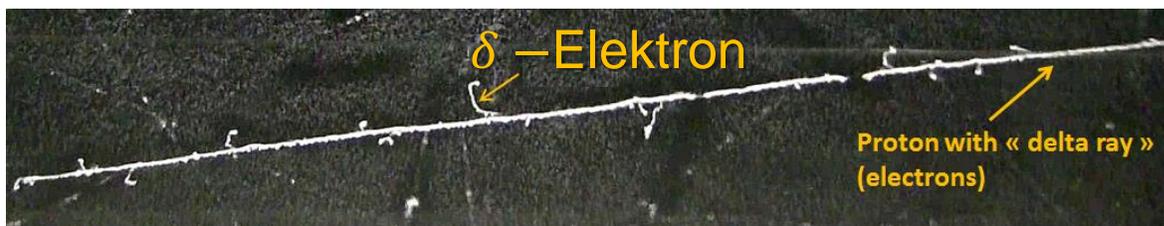
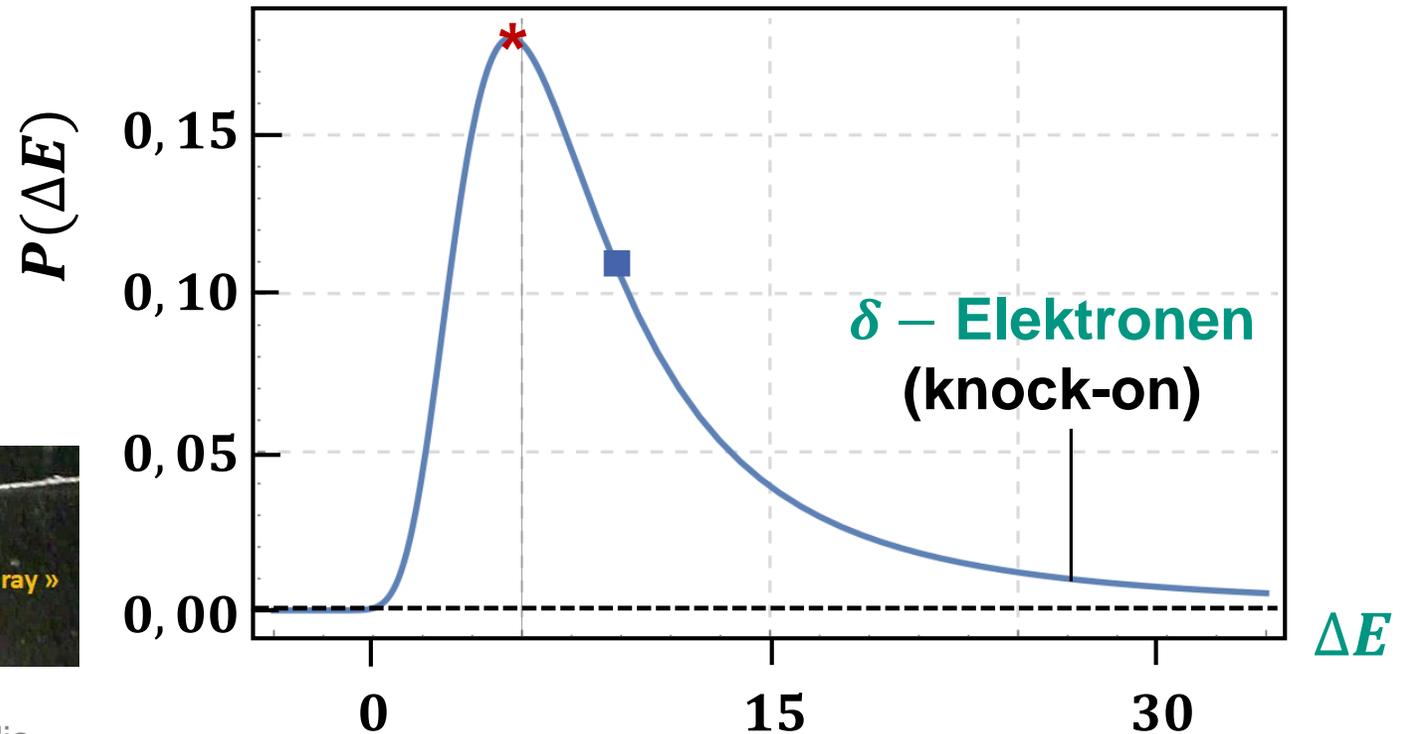
$\Delta x$  dünner Absorber  
Teilchen

# Energieverlustverteilung: 'Landau-Kurve'

## ■ Landau – Vavilov Verteilung für **dünne Absorber**

- 'Landau'-Verteilung:  
**asymmetrische Verteilung**  
Ausläufer hin zu **hohem  $dE/dx$**
- Ursache: Stöße mit kleinem Stoß-Parameter, Erzeugung von ' **$\delta$  – Elektronen**'

\* **wahrscheinlichster** ■ **mittlerer**  
Energieverlust ■ **Energieverlust**



Q: wikipedia

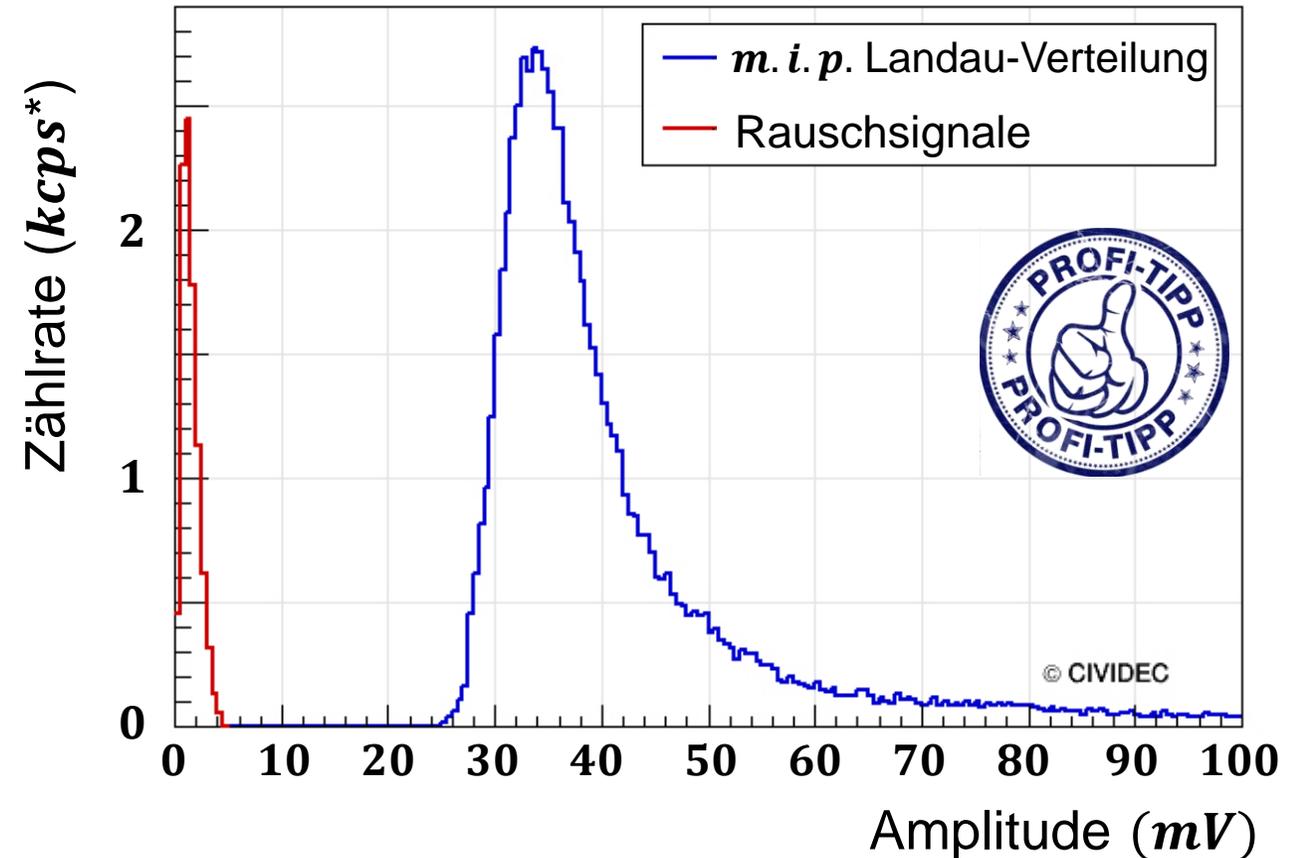
# Häufige Anwendung der 'Landau-Kurve'

## ■ Landau – Vavilov Verteilung: experimentelles Spektrum

- 'Landau'-Verteilung:  
ideal zur Energiekalibration  
von Detektoren über Maximum  
der 'Landau-Kurve'
- typisch: **Myonen als *m. i. p.*** aus  
der kosmischen Höhenstrahlung  
(stets verfügbar 😊)



Q: wikipedia



# Reichweite & Bragg-Peak

## ■ mittlere Reichweite $\bar{R}$ eines Teilchens

- Integration über inverses Bremsvermögen

Stoppenergie  $\rightarrow$

Startenergie  $\leftarrow$

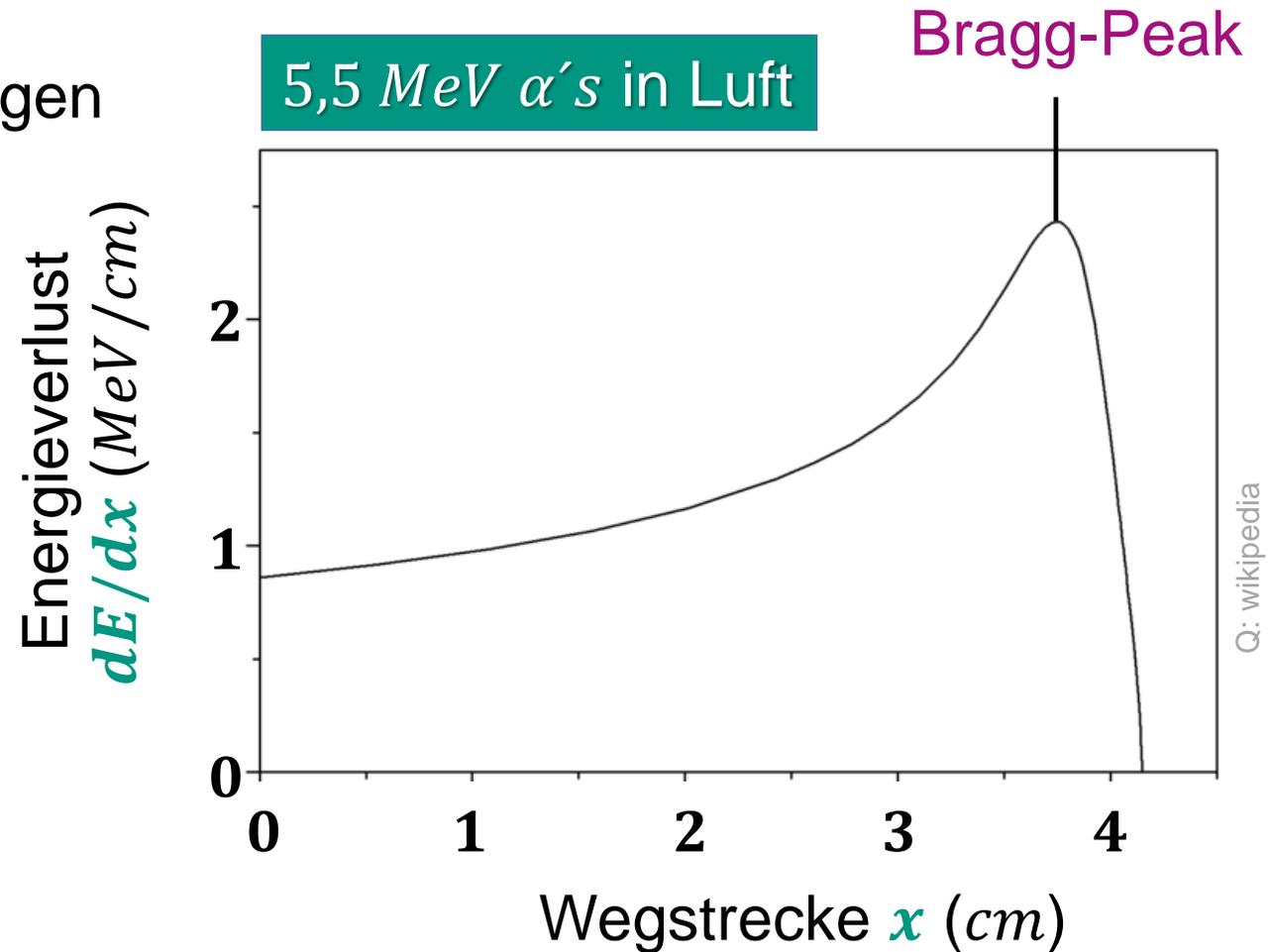
$$\bar{R} = \int_{E_0}^0 \left( \frac{dE}{dX} \right)^{-1} \cdot dE$$

- Beispiel:  $100 \text{ MeV}/c$  Pionen in  $Pb$

$$\bar{R} / \rho \sim 0,8 \text{ cm}$$

- **Bragg-Peak:**

$dE/dx$  erreicht am Ende des Weges ein **scharfes Maximum**



# Reichweite & Bragg-Peak

## ■ mittlere Reichweite $\bar{R}$ eines Teilchens

- Integration über inverses Bremsvermögen

Stoppenergie  $\rightarrow$

$$\bar{R} = \int_{E_0}^0 \left( \frac{dE}{dX} \right)^{-1} \cdot dE$$

Startenergie  $\leftarrow$

- Beispiel:  $100 \text{ MeV}/c$  Pionen in  $Pb$

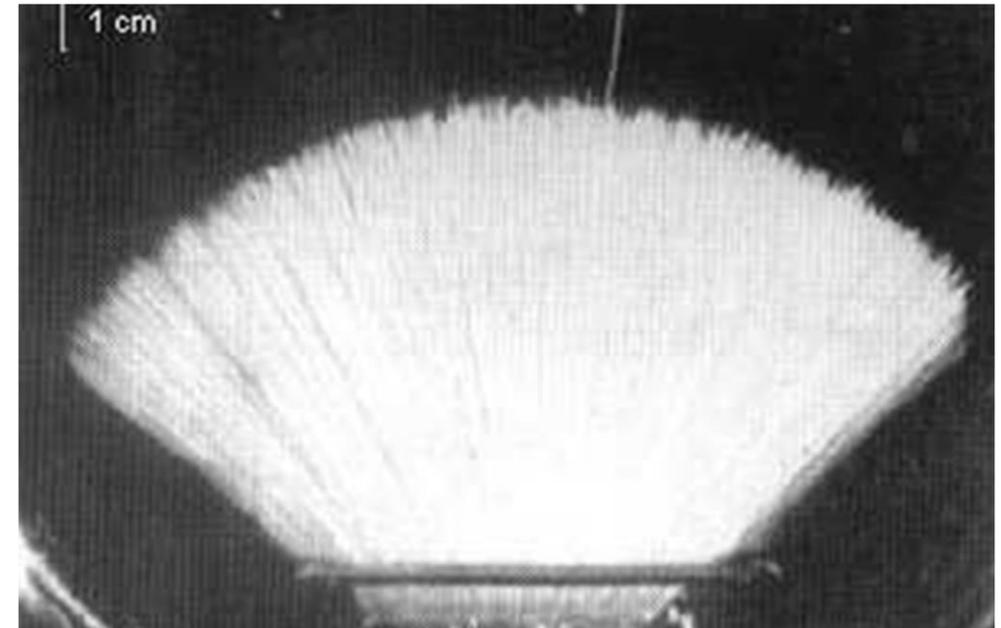
$$\bar{R} / \rho \sim 0,8 \text{ cm}$$

- **Bragg-Peak:**

$dE/dx$  erreicht am Ende des Weges ein **scharfes Maximum**

$$E(\alpha) = 7,69 \text{ MeV}$$

$$t_{1/2} (^{214}\text{Po}) = 164,3 \mu\text{s}$$

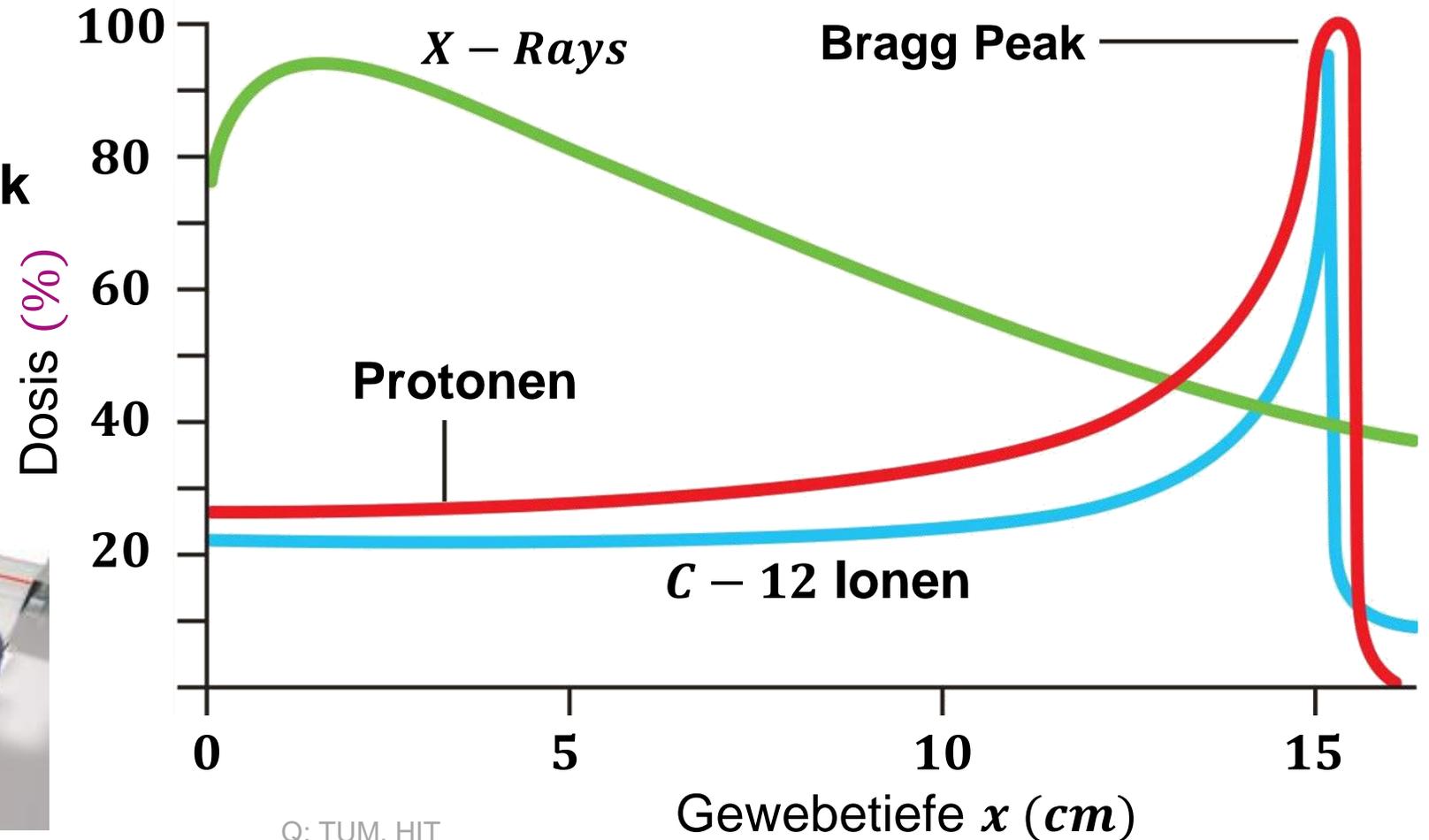
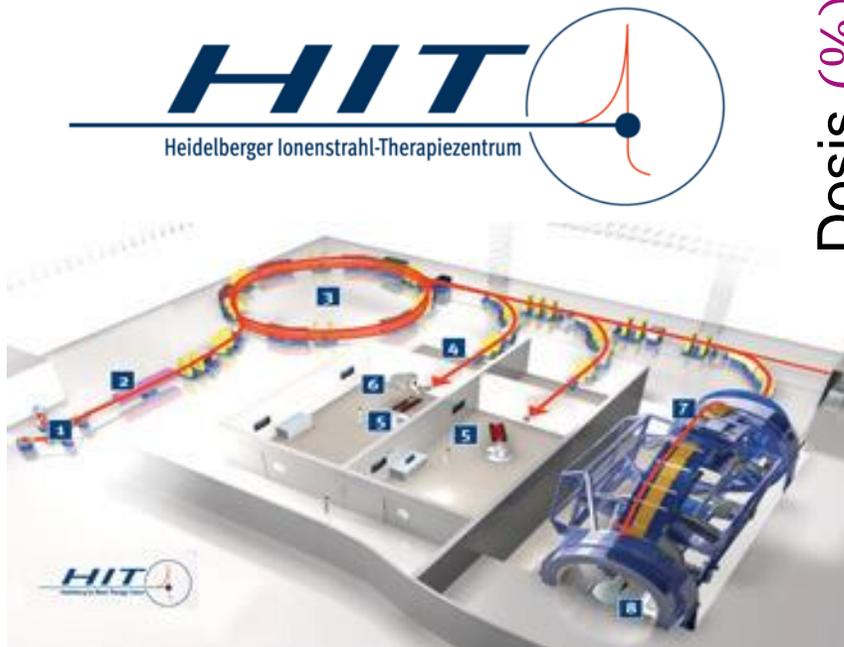


$\alpha$  - Spuren ( $^{214}\text{Po}$ )

# Bragg-Peak: Anwendung

## ■ Therapie mit Protonen/schweren Ionen: 3D – Fokussierung von Strahlen

- *HIT*: Therapiezentrum mit **schweren Ionen**  
⇒ **scharfer Braggpeak**



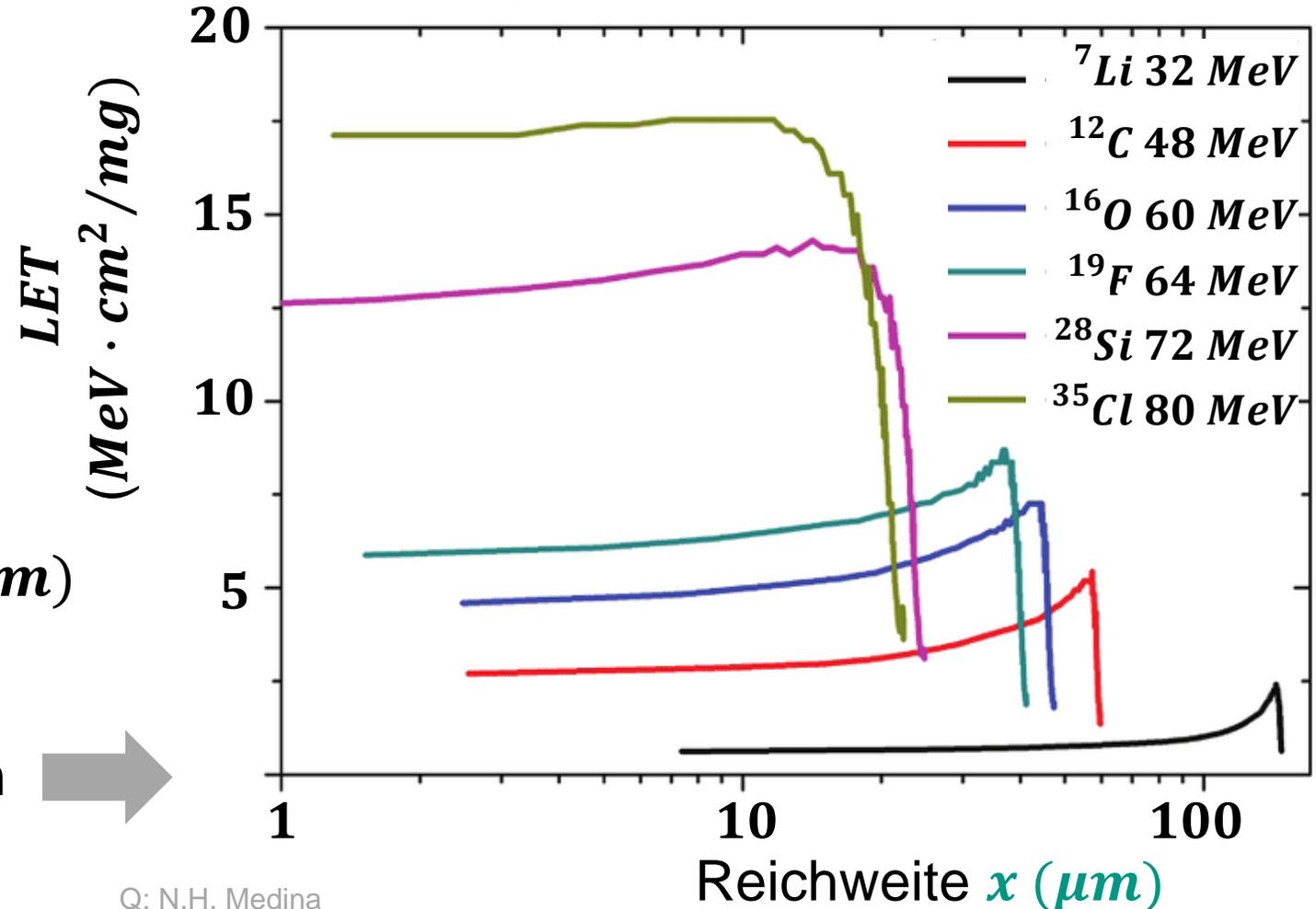
Q: TUM, HIT

# Linearer Energietransfer – *LET*

## ■ *LET*: ein Begriff aus der Dosimetrie (Radiobiologie, Medizinphysik, Chips)

- Energie bzw. Ladung, die ein Ionisierendes Teilchen pro 'Einheitslänge' (hier:  $\mu\text{m}$ ) im Material deponiert, oft in ( $\text{keV}/\mu\text{m}$ ,  $\text{pC}/\mu\text{m}$ )
- in der Physik: **Energieverlust** ( $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ ) bzw. ( $\text{MeV}/\text{cm}$ )

*LET* von schweren Ionen  
Ionen in Silizium als Funktion  
ihrer Reichweite (**Dotieren**)



Q: N.H. Medina