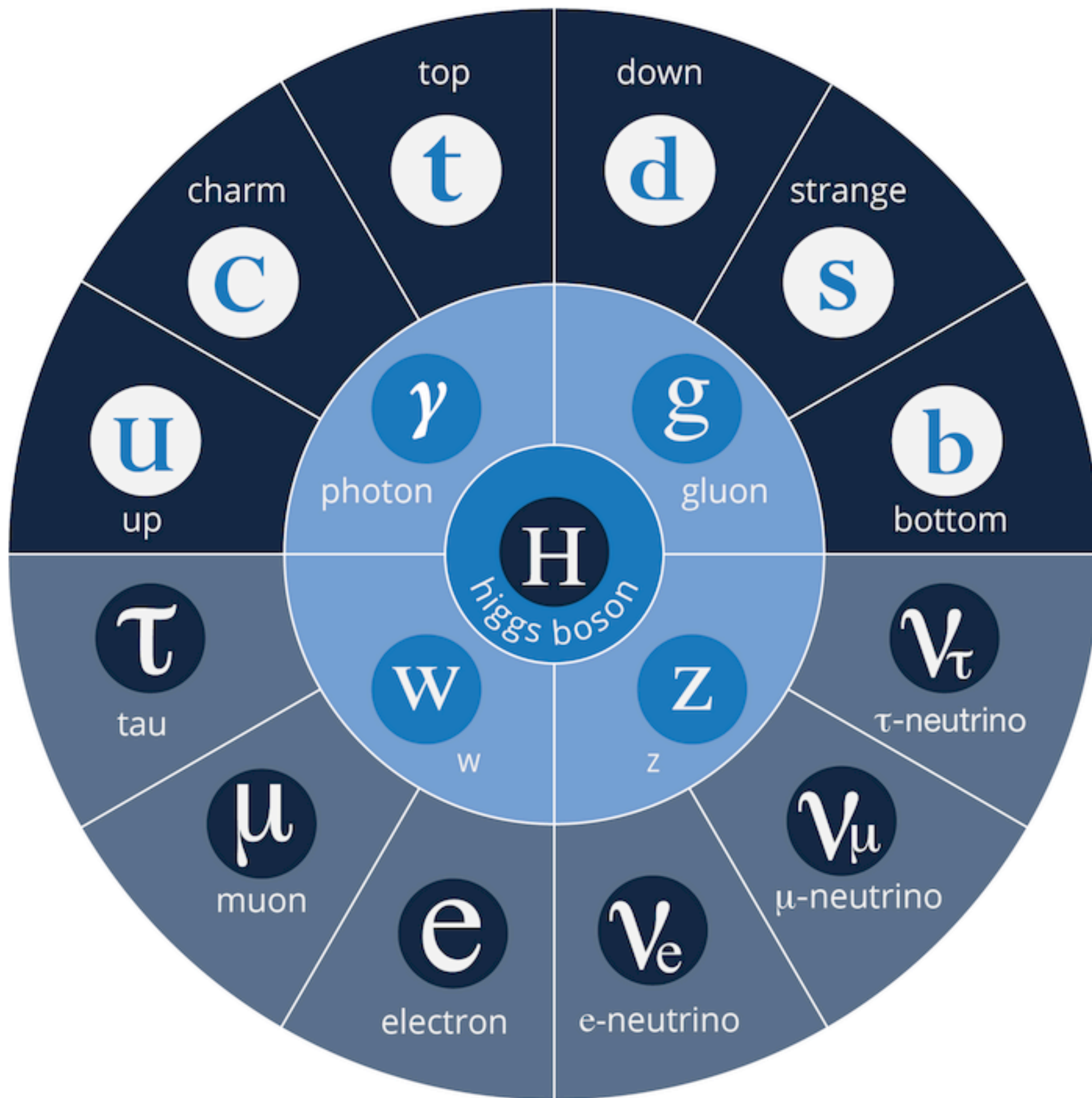


Moderne Experimentalphysik II

Teilchenphysik - Vorlesung 03

Professor Dr. Markus KLUTE (markus.klute@kit.edu)
Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)





■ 2. Experimentelle Methoden

- 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
- 2.2. Energieverlust von Elektronen
- 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahlung
- 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
- 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
- 2.6. Nachweistechniken
- 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
- 2.8. Teilchenbeschleuniger

Recap: Energieverlust geladener Teilchen

- Beeinflusst der Typ des geladenen Teilchens (z.B. Elektron, Proton) die Art und Weise, wie es Energie verliert?
 - A) Ja, der Typ des Teilchens hat einen Einfluss auf den Energieverlust, weil sich Z/A unterscheiden
 - B) Nein, alle geladenen Teilchen verlieren Energie auf die gleiche Weise
 - C) Ja, schwerere Teilchen wie Protonen verlieren Energie hauptsächlich durch ionisierende Kollisionen, während leichtere wie Elektronen auch durch Bremsstrahlung Energie verlieren können
 - D) Nein, die Geschwindigkeit des Teilchens beeinflusst die Art und Weise, wie es Energie verliert
 - E) Keine Ahnung!

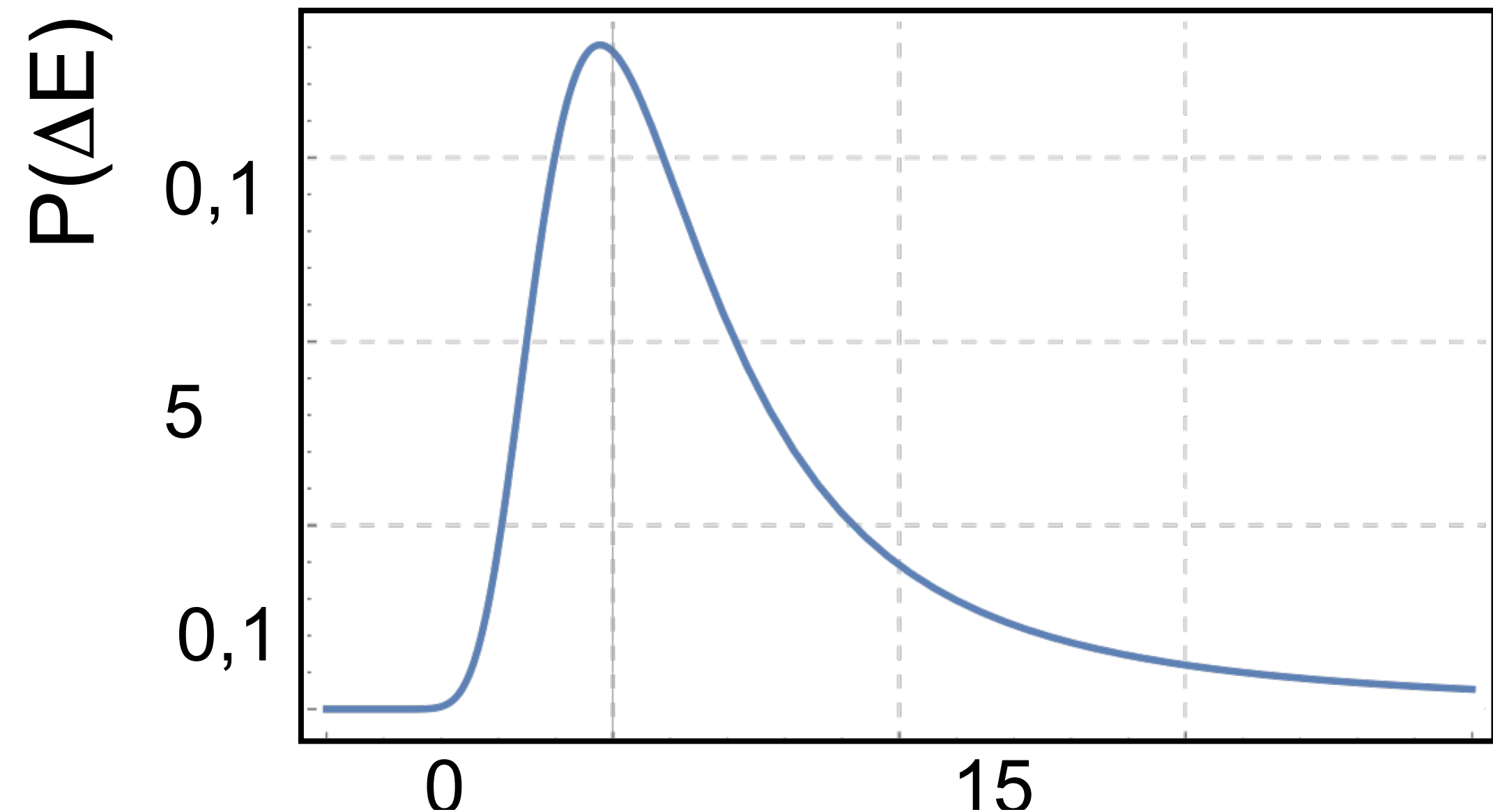


Recap: Energieverlust geladener Teilchen

■ Bethe Gleichung

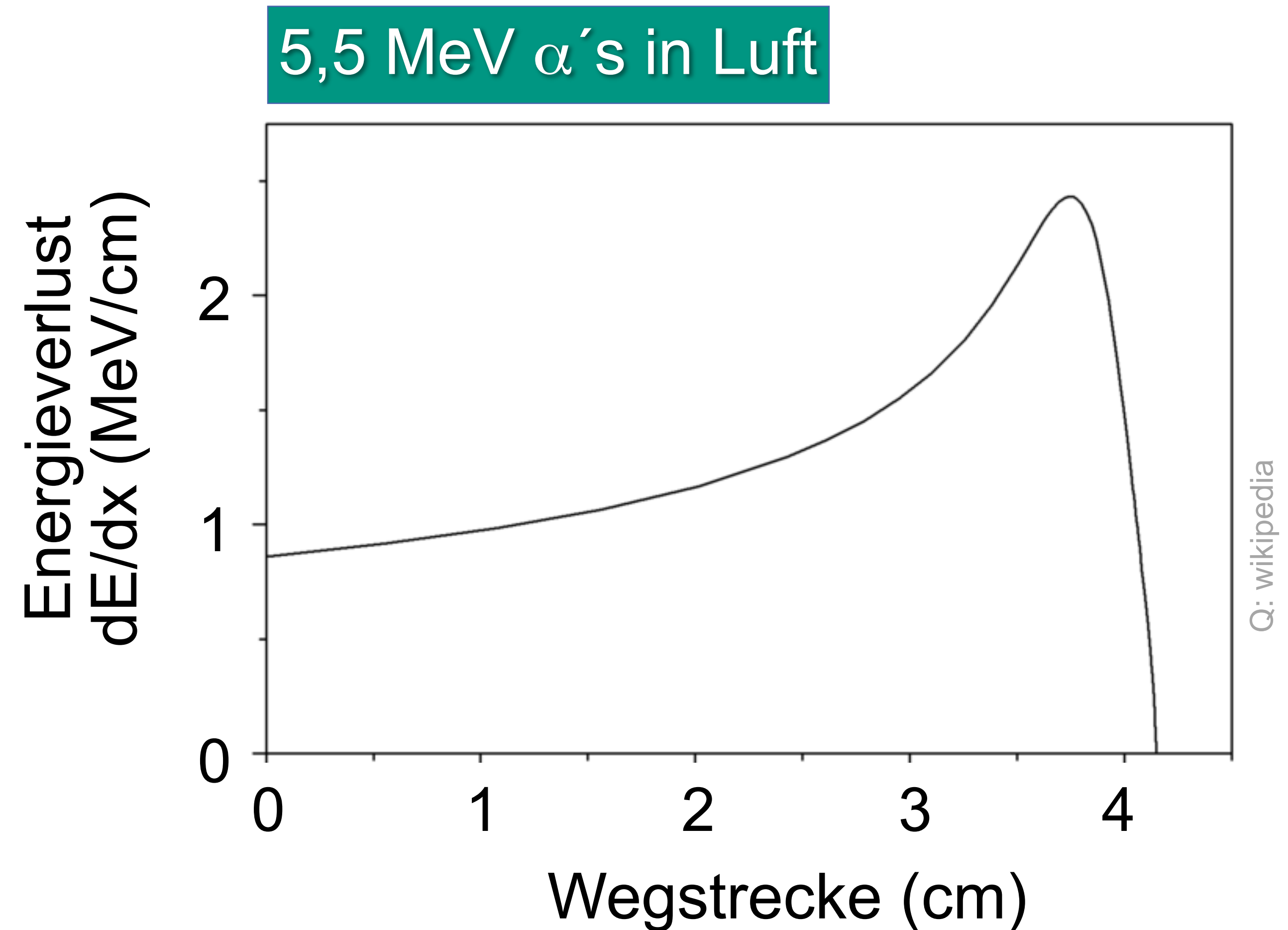
$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot N_0 \cdot m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

■ Verteilung des Energieverlusts - Landau-Verteilung



Recap: Energieverlust geladener Teilchen

- Reichweite und Bragg-Peak
- Energieverlust in dicken Absorber: Gaussförmige Energieverlustverteilung, Streuung



Recap: Energieverlust von Elektronen

■ Bremsstrahlung

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{e^-, e^+} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{ionis.} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{brems}$$

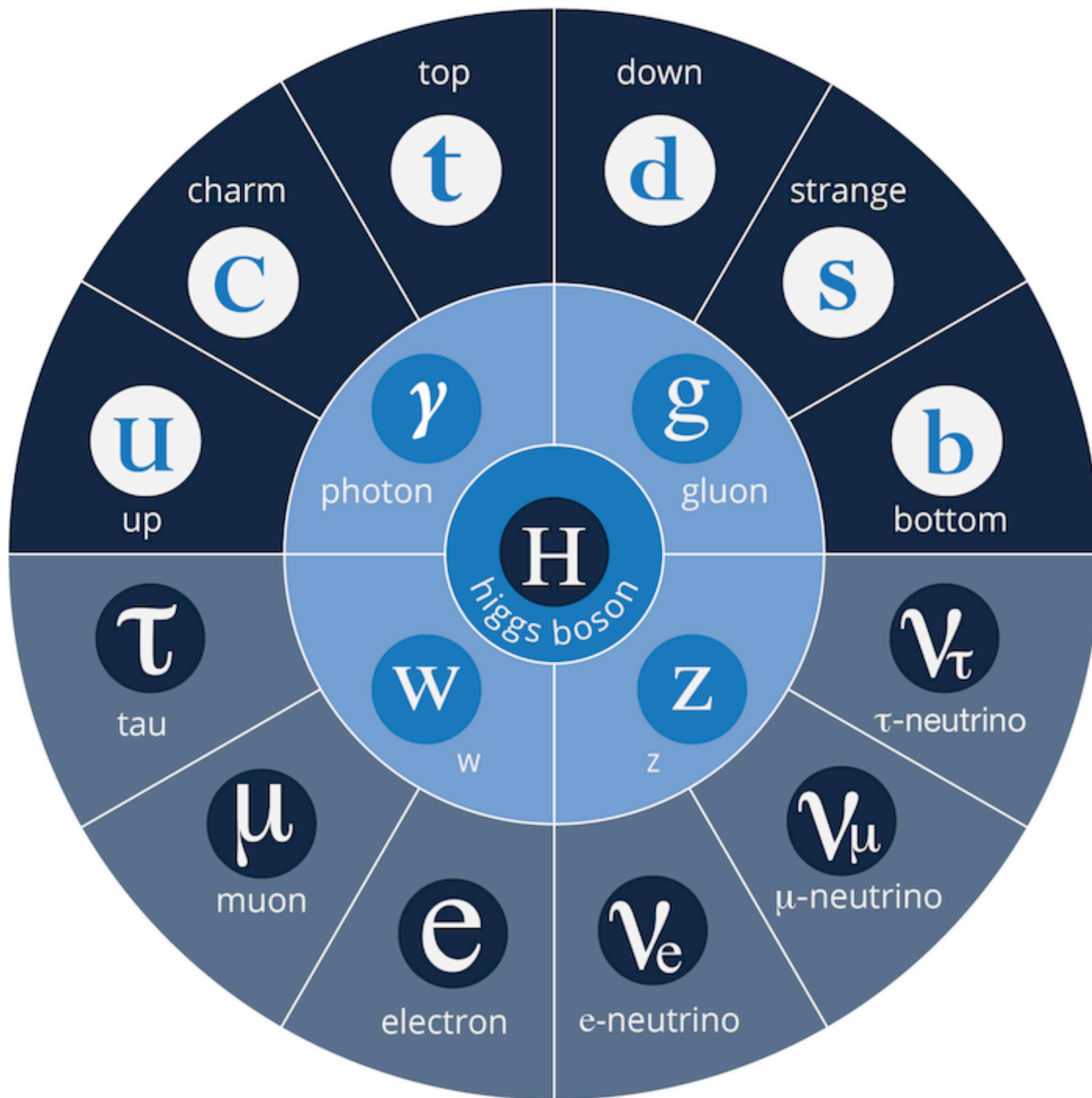
■ Strahlungslänge

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{brems} = \frac{4 \cdot \alpha^3 \cdot N_0}{m^2} \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) \cdot E = \frac{1}{X_0} \cdot E$$

■ Wie ist die kritische Energie definiert?

- A) minimale Ionisationsenergie
- B) Energieverlust durch Ionisation = Bremsstrahlung
- C) Energieverlust von Elektronen = Positronen
- D) keine Ahnung





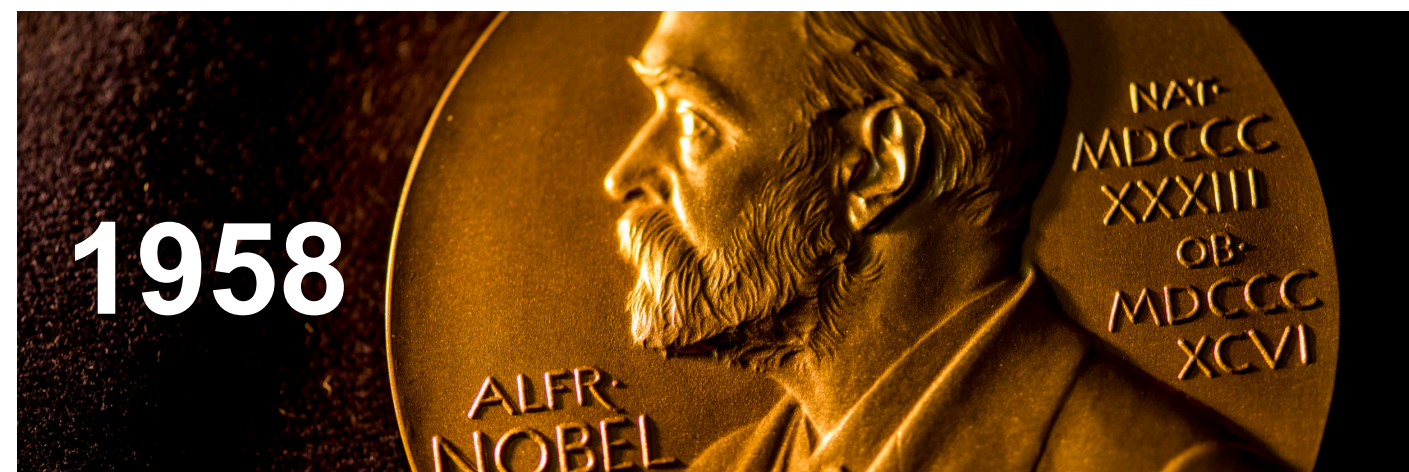
■ 2. Experimentelle Methoden

- 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
- 2.2. Energieverlust von Elektronen
- 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahlung
- 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
- 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
- 2.6. Nachweistechniken
- 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
- 2.8. Teilchenbeschleuniger

Cherenkov* – Strahlung

- **Geladenes Teilchen** bewege sich in dielektrischem Medium mit Geschwindigkeit $v = \beta \cdot c > c / n$ (c / n = Phasengeschwindigkeit), d.h. **größer als die Phasengeschwindigkeit des Lichts im Medium**

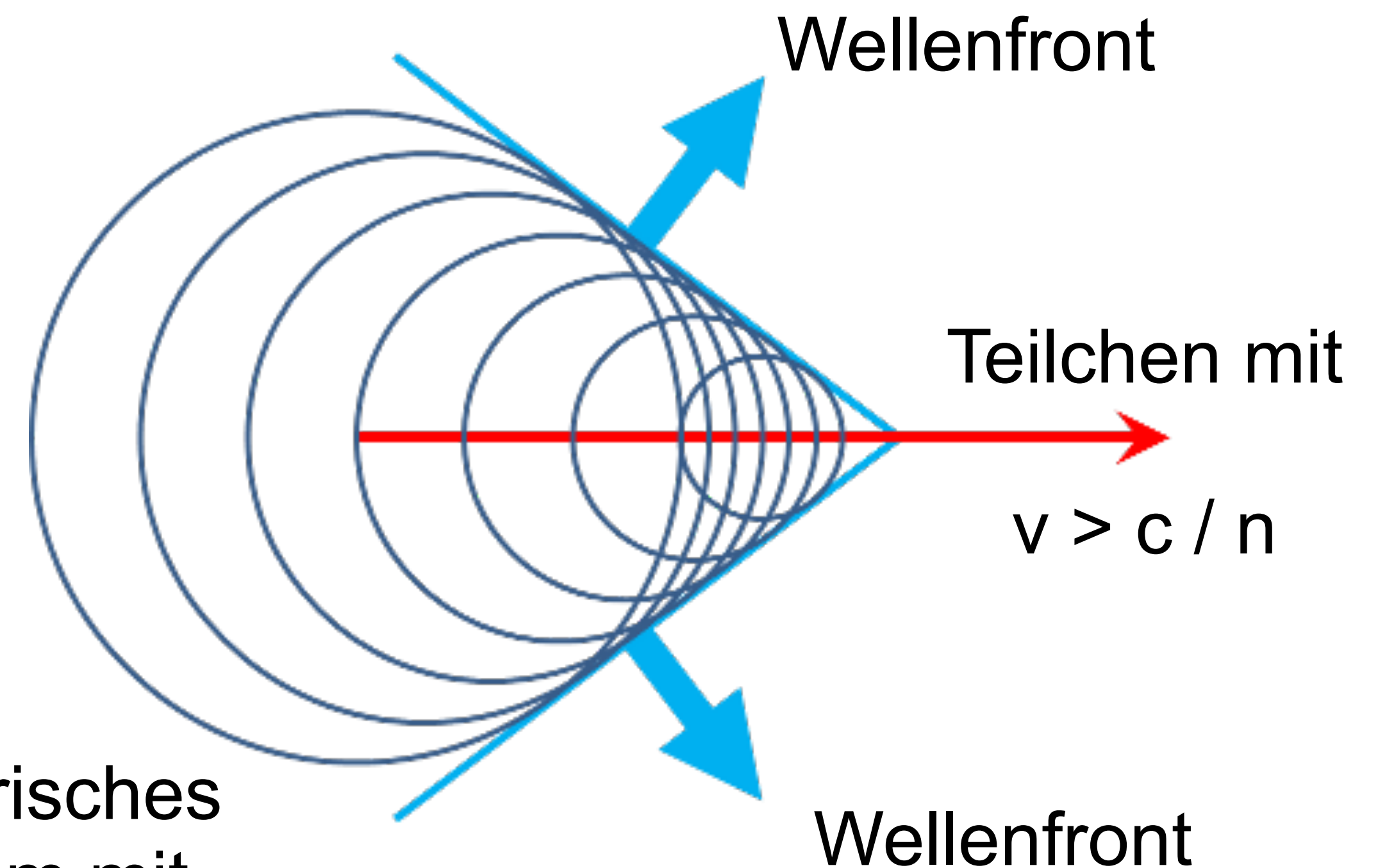
- **Medium** emittiert das Licht,
nicht das Teilchen



'for the discovery and the interpretation of the Cherenkov effect'

Pawel Cherenkov
(1904-1990)

dielektrisches
Medium mit
Brechungsindex n



Q: U Sheffield

■ Abstrahlung von Photonen durch Medium, da asymmetrische Polarisation

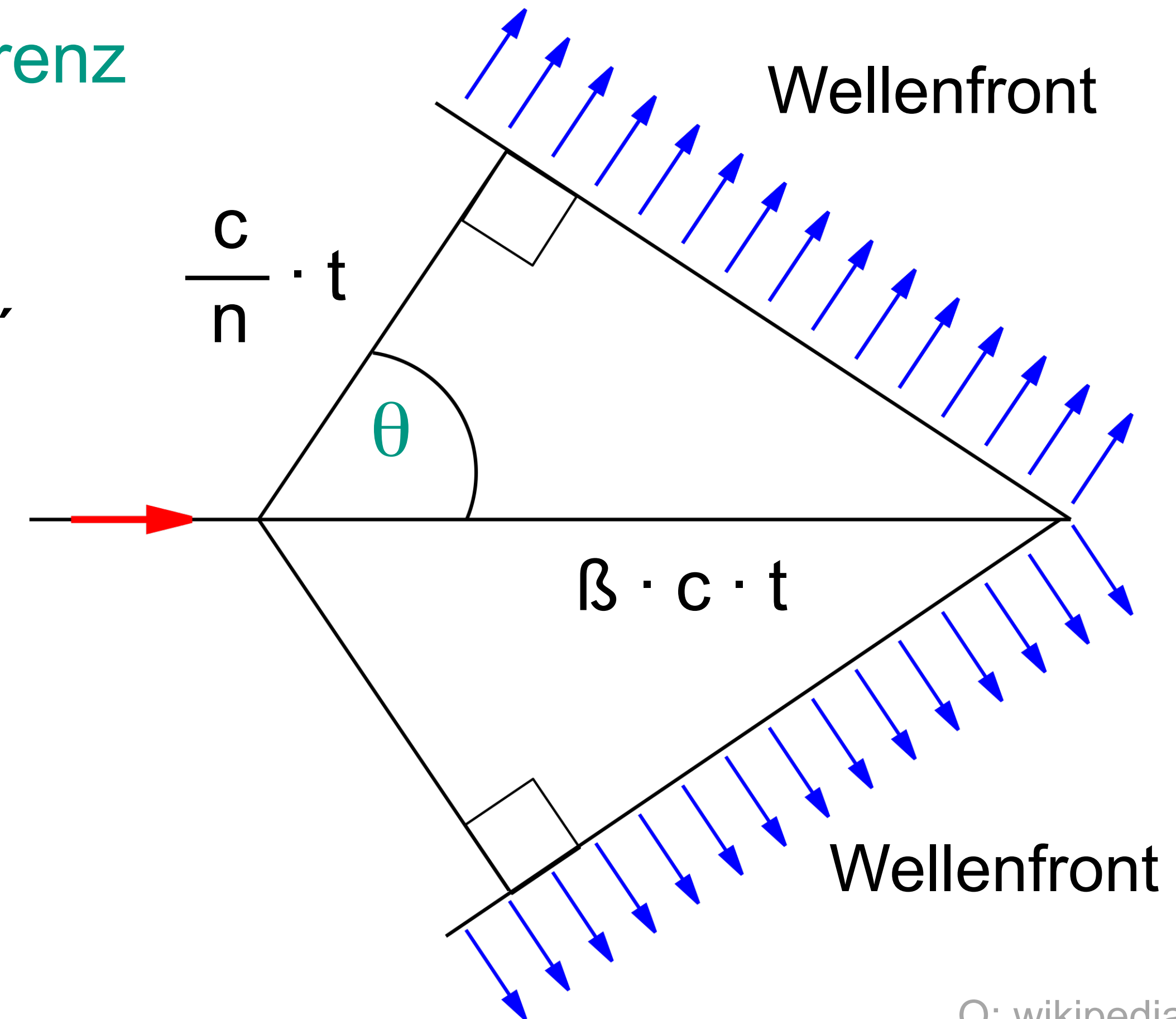
- Huygens'sches Prinzip: **konstruktive Interferenz** der vom Medium (Radiator) abgestrahlten Photonen

⇒ erzeugt eine **'photonische Schockwelle'**

- Öffnungswinkel θ des Lichtkegels:

$$\cos\theta = \frac{c \cdot t / n}{\beta \cdot c \cdot t} = \frac{1}{\beta \cdot n}$$

Teilchen Medium



Q: wikipedia

Cherenkov-Kegel: Richtungsinformation (I)

- Myonspur in Super-Kamiokande: $\theta = 42^\circ$



"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass."



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

Takaaki Kajita

梶田 隆章

Mass Found in Elusive Particle; Universe May Never Be the Same

Discovery on Neutrino Rattles Basic Theory About All Matter

By MALCOLM W. BROWNE

TAKAYAMA, Japan, June 5 — In what colleagues hailed as a historic landmark, 128 physicists from 23 research institutions in Japan and the United States announced today that they had found the existence of mass in a notoriously elusive subatomic particle called the neutrino.

The neutrino, a particle that carries no electric charge, is so light that it was assumed for many years to have no mass at all. After today's announcement, cosmologists will have to confront the possibility that a significant part of the mass of the universe might be in the form of neutrinos. The discovery will also compel scientists to revise a highly successful theory of the composition of matter known as the Standard Model.

Word of the discovery had drawn some 300 physicists here to discuss neutrino research. Among other things, the finding of neutrino mass might affect theories about the formation and evolution of galaxies and

Detecting Neutrinos



And Detecting Their Mass

By analyzing the cones of light,

Neutrinos pass through the Earth's surface to a tank filled with 12.5 million gallons of ultra-pure water ...

... and collide with other particles ...

... producing a cone-shaped flash of light.

The light is recorded by 11,200 20-inch light amplifiers that cover the inside of the tank.



Q: New York Times, Scientific american

50.000 t H₂O

Titelzeile der NYT am 6.6.98

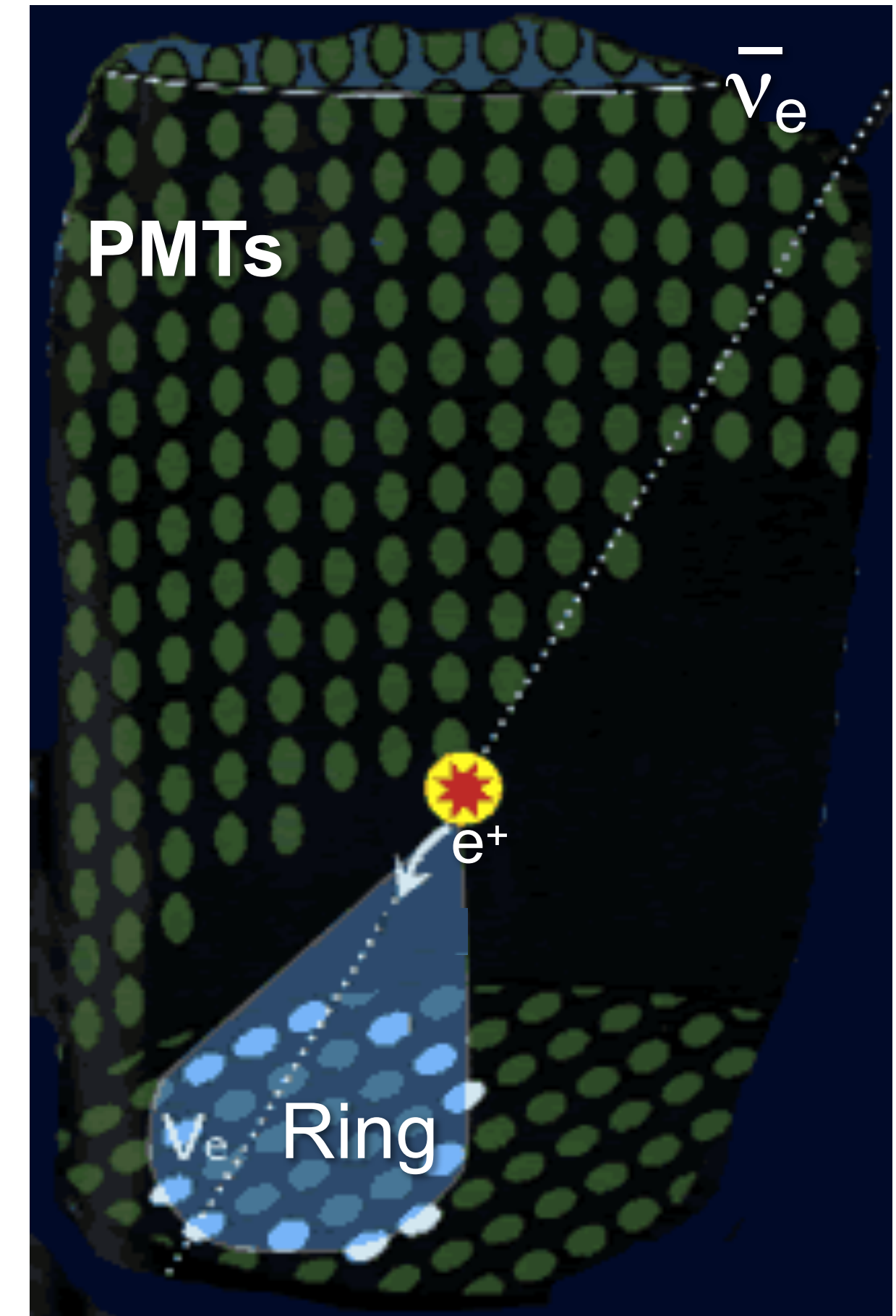
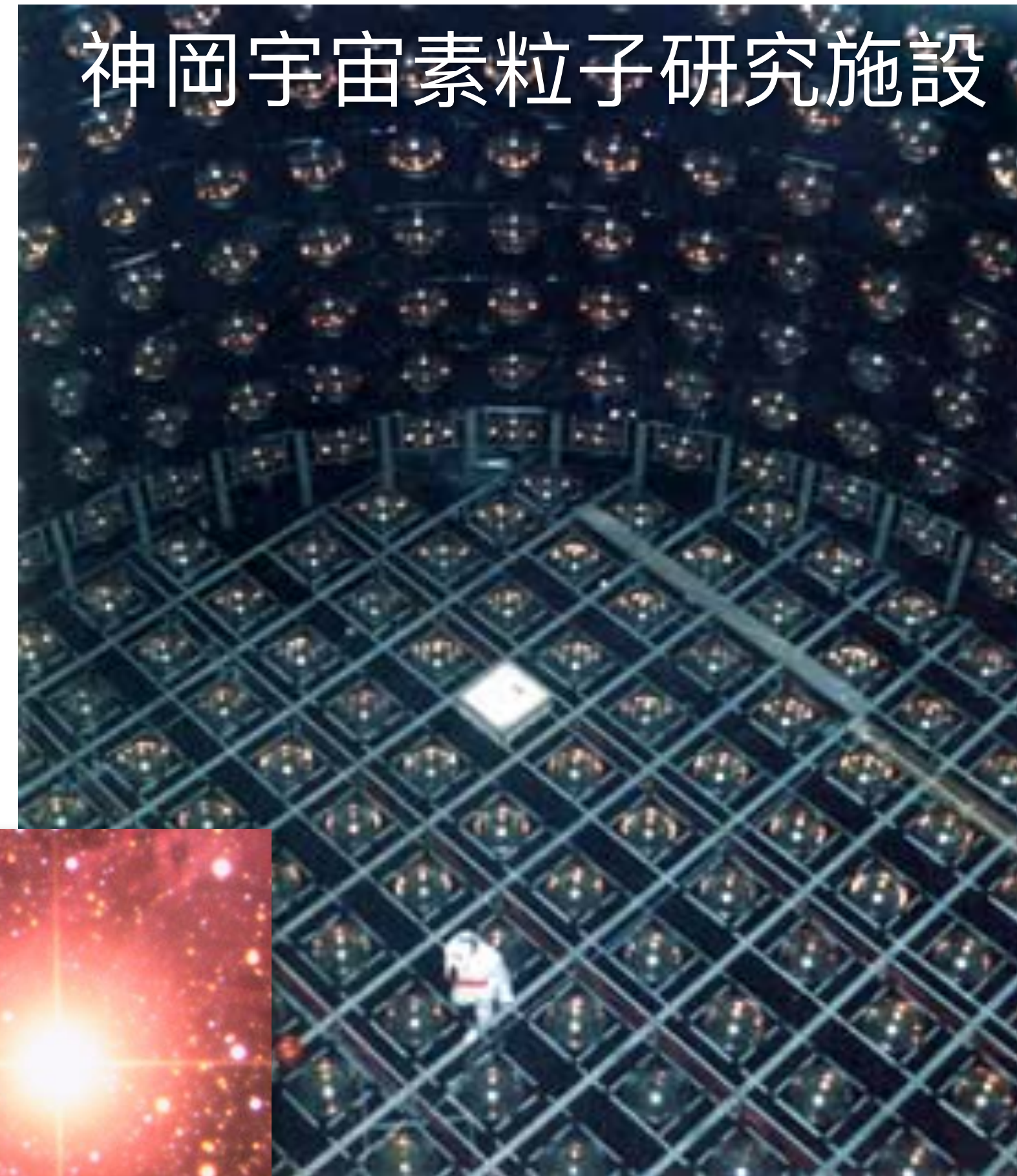
■ Rekonstruktion der Teilchenrichtung von Supernova-Neutrinos



“for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos”

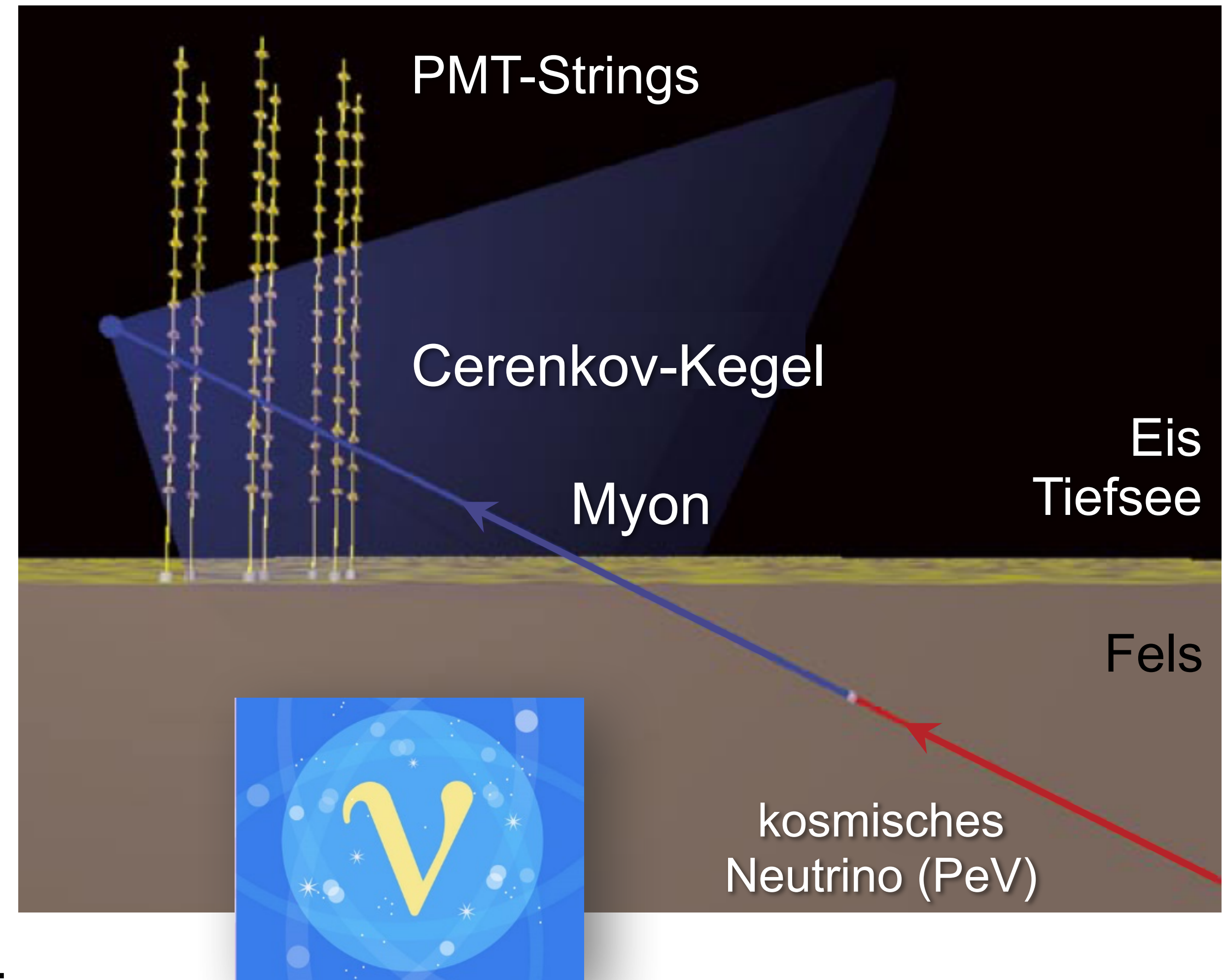
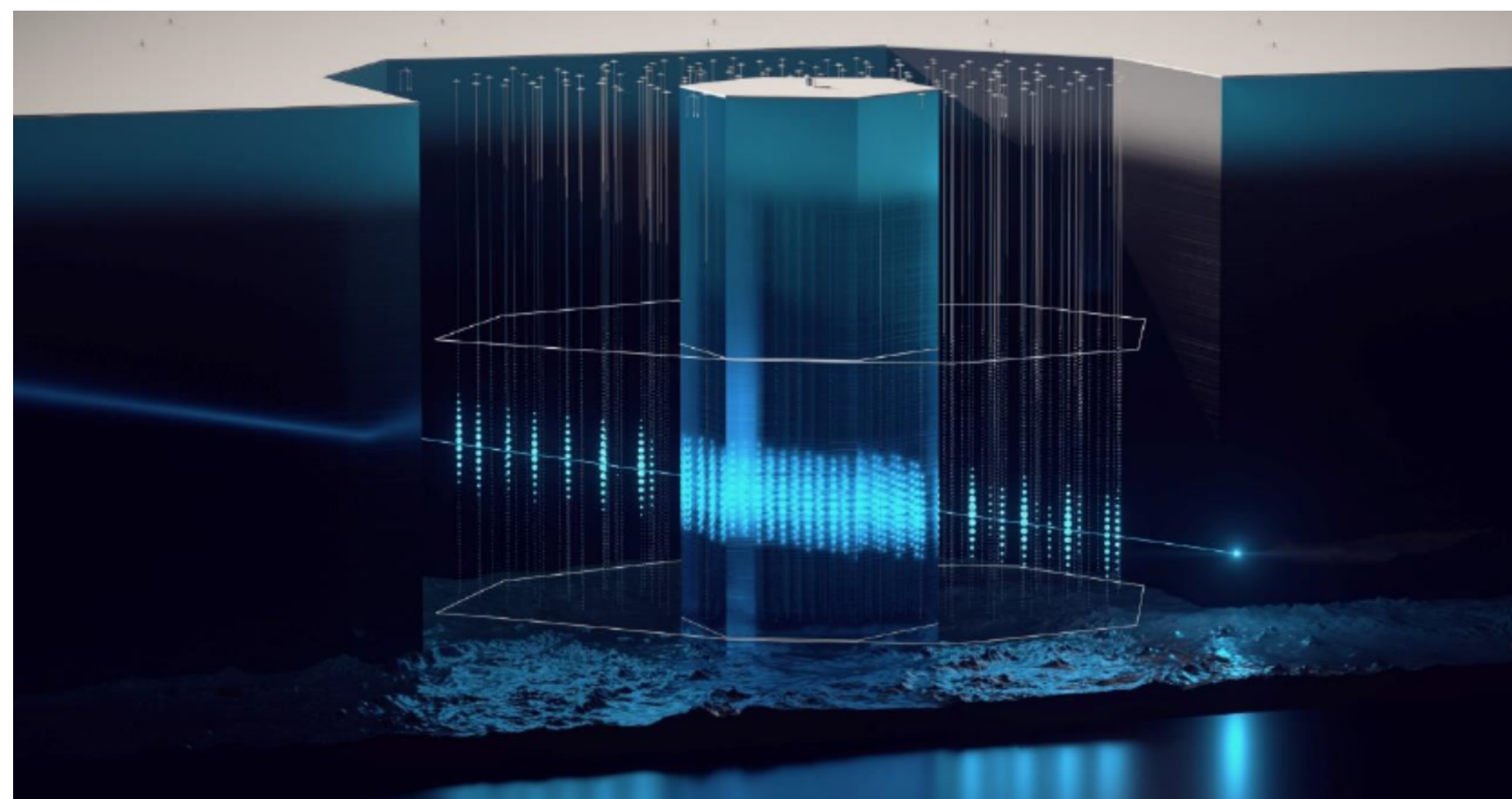


Masatoshi
Koshihara



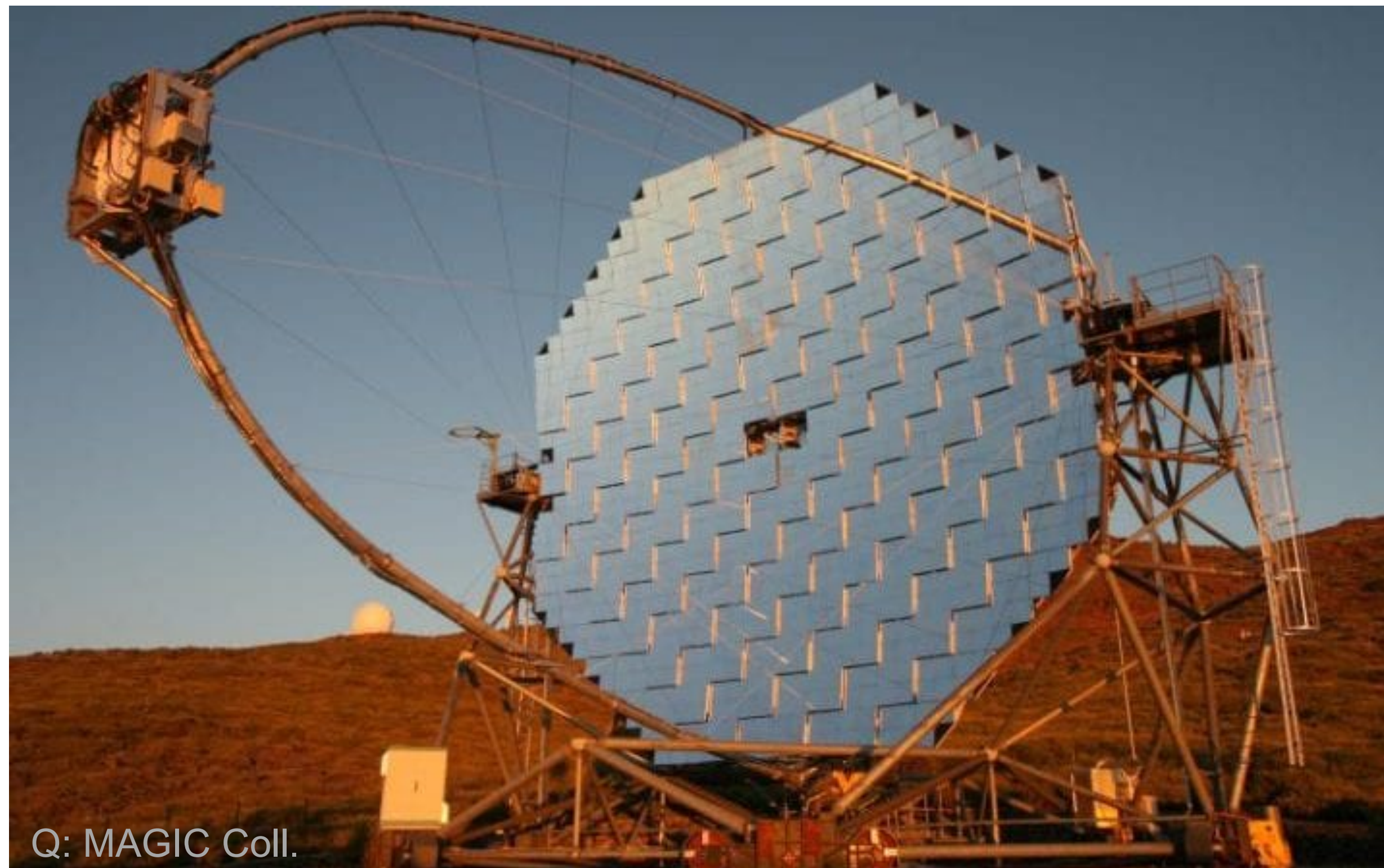
■ Cherenkov-Kegel: Rekonstruktion der Teilchenrichtung eines Myons im Eis

- abbildende Cherenkov-Technik in **Neutrinoobservatorien**: Nachweis des Cherenkov-Lichts in PMT*-Strings (Tiefsee, Eis am Südpol)
- Beispiel: IceCube-Experiment

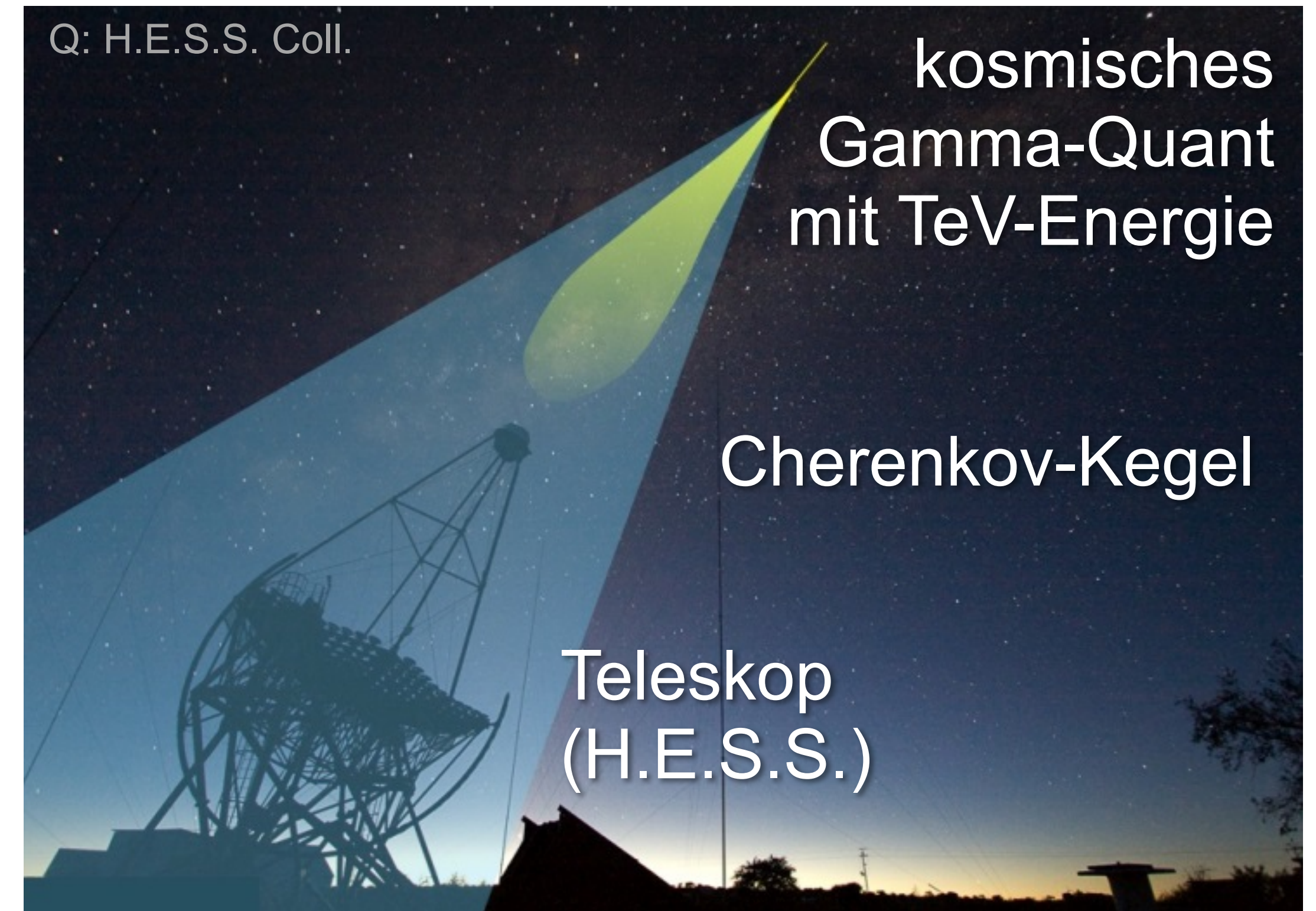


Cherenkov-Kegel: Richtungsinformation (IV)

- **Cherenkov-Kegel: Rekonstruktion der Teilchenrichtung**
 - abbildende Cherenkov-Teleskope für hochenergetische Gammaquanten aus der Galaxis, $n(\text{Luft}) = 1,000292 \Rightarrow \theta \sim 1^\circ$



Q: MAGIC Coll.

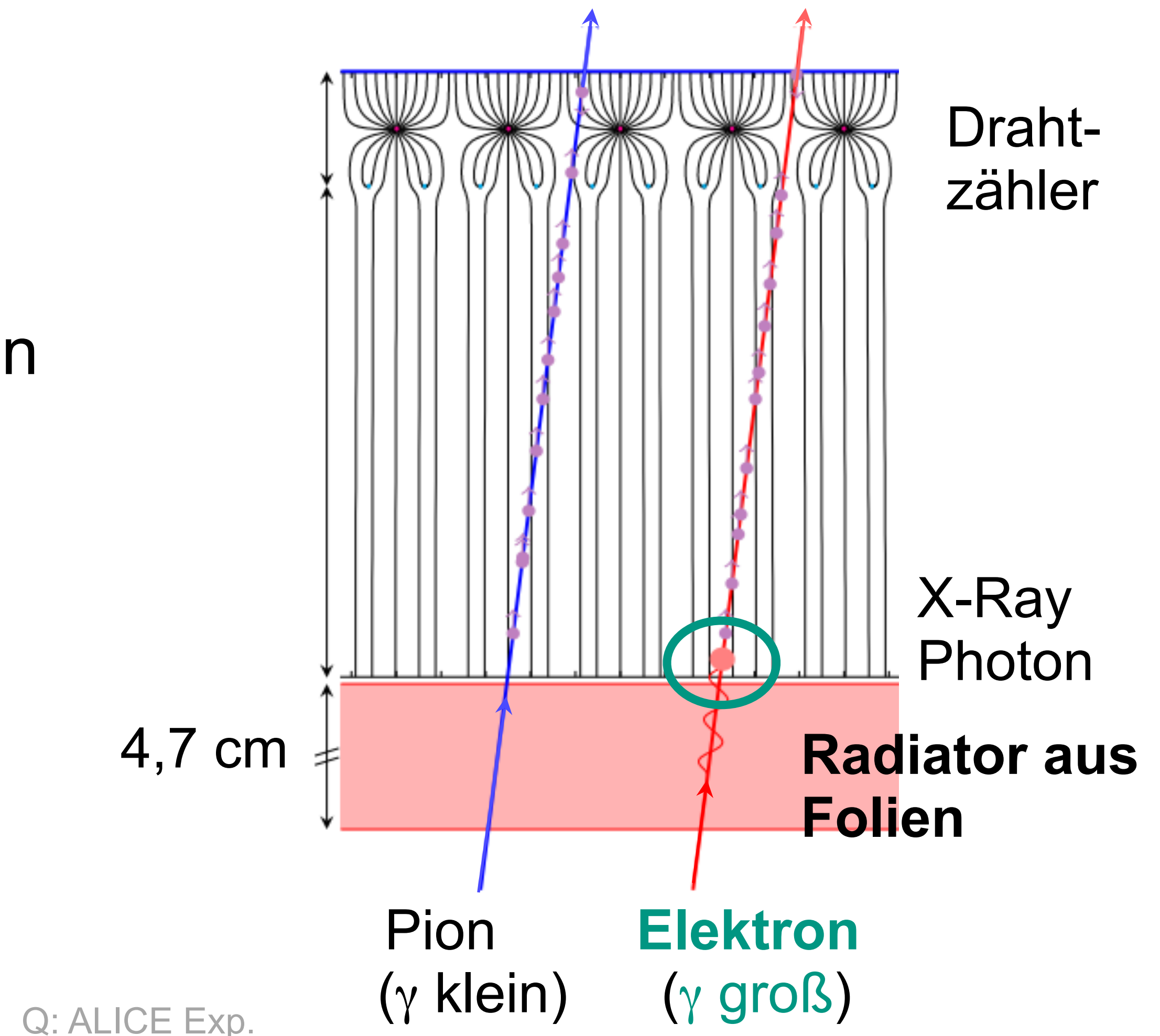


Q: H.E.S.S. Coll.

Übergangsstrahlung für Messung von Lorentz- γ

- **ultra-relativistisches Teilchen passiert Grenzfläche von Medien mit unterschiedlicher Permittivität ε**

- Übergangsstrahlungsdetektoren (**T**ransition **R**adiation **D**etectors, TRD):
viele **dünne Folien** für kohärente Emission
- **radiativer Energieverlust** des Teilchens durch Übergangsstrahlung in Folien (Radiator) ist abhängig von seinem **Lorentz-Faktor γ**
($\gamma = E / mc^2$)



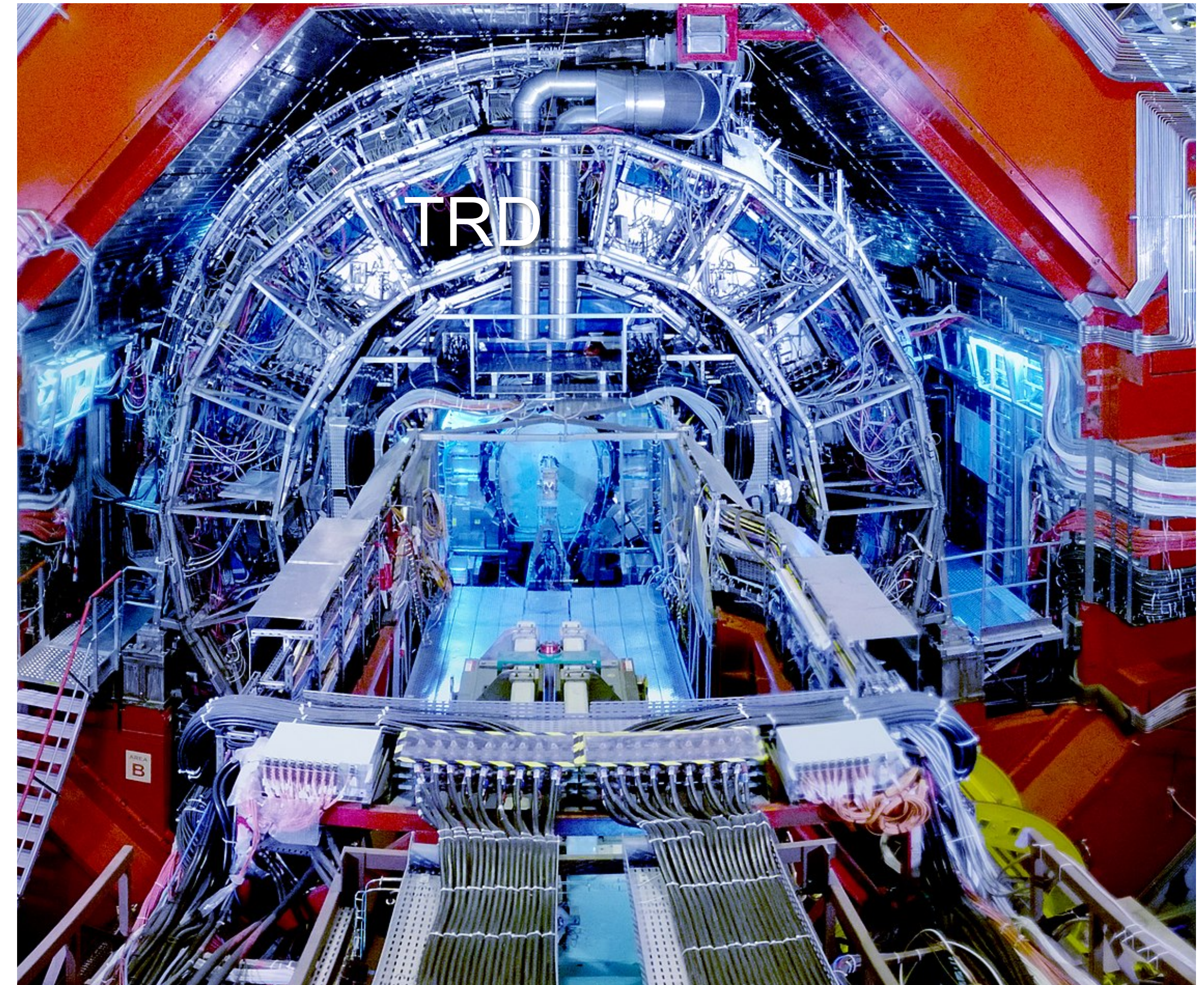
Q: ALICE Exp.

Übergangsstrahlung: Signatur in ALICE*

- ultra-relativistisches Teilchen passiert Grenzfläche von Medien mit unterschiedlicher Permittivität ϵ

- klass. Bild der Entstehung:
Dipol zwischen Ladung &
Spiegelladung am Übergang

⇒ **Emission von keV Photonen
in Vorwärtsrichtung**
(Nachweis in Proportionalzähler)



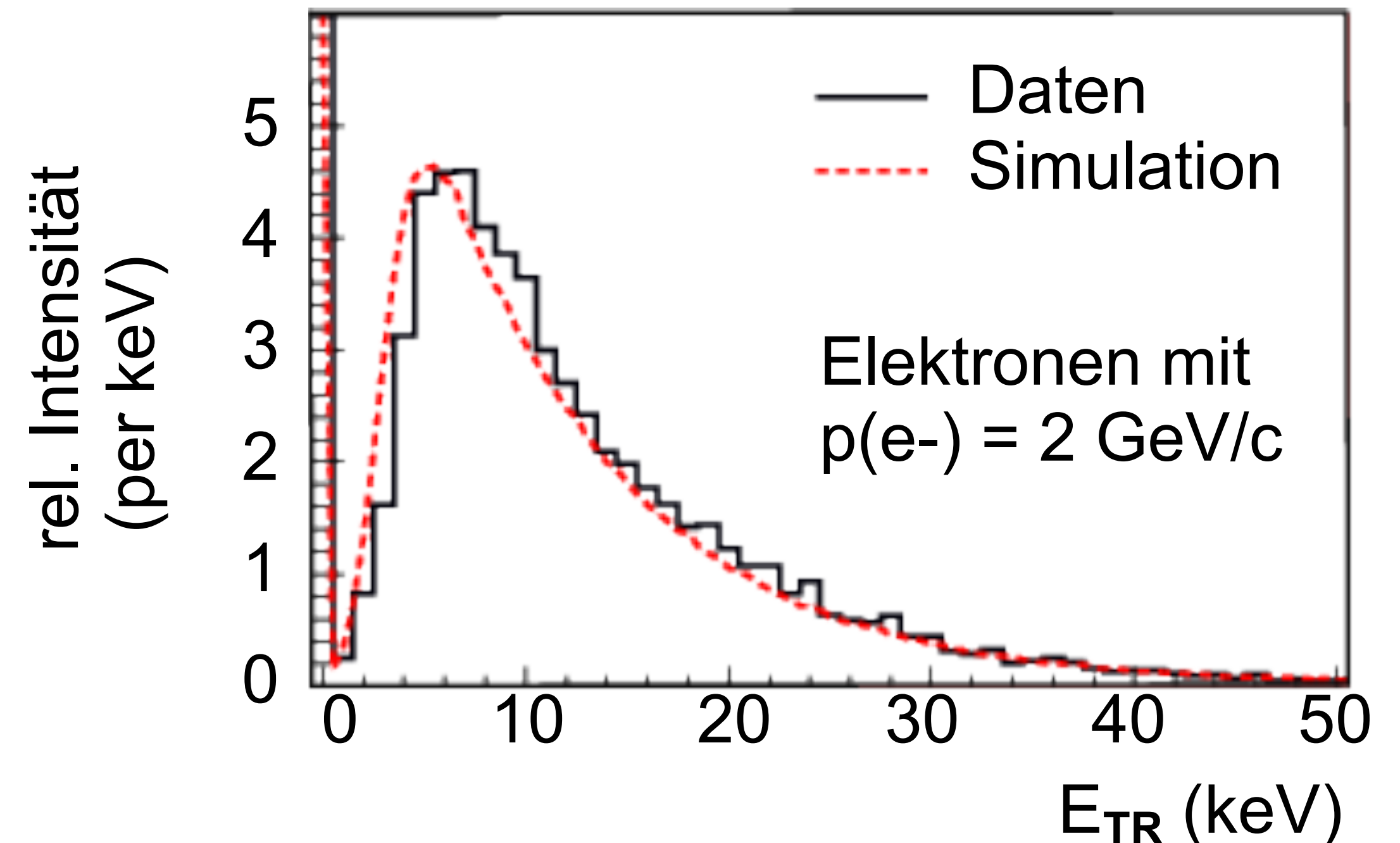
Q: ALICE Exp.

Übergangsstrahlung: Signatur in ALICE

- ultra-relativistisches Teilchen passiert Grenzfläche von Medien mit unterschiedlicher Permittivität ε

- klass. Bild der Entstehung:
Dipol zwischen Ladung &
Spiegelladung am Übergang

⇒ **Emission von keV Photonen
in Vorwärtsrichtung**
(Nachweis in Proportionalzähler)



Q: ALICE Exp.

Fragen zur Cherenkov-Strahlung

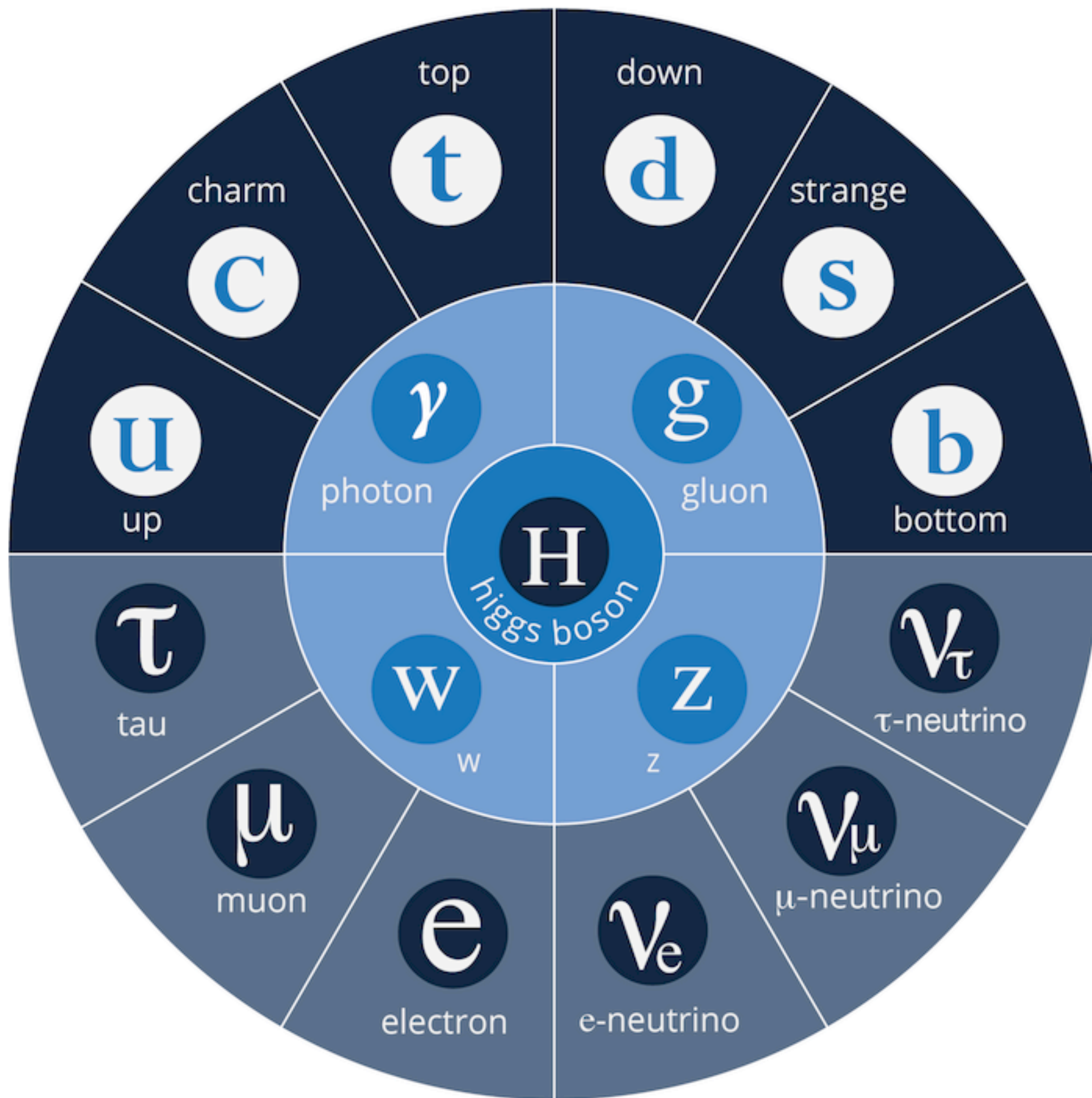
- Was ist Cherenkov-Strahlung und unter welchen Bedingungen tritt sie auf?
 - A) Form der elektromagnetischen Strahlung, die auftritt, wenn ein geladenes Teilchen sich in einem Medium langsamer als das Licht in diesem Medium bewegt
 - B) Form der Wärmestrahlung, die auftritt, wenn ein Körper eine gewisse Temperatur erreicht
 - C) Entsteht wenn ein geladenes Teilchen sich in einem Medium schneller als das Licht in diesem Medium bewegt
 - D) Eine Form der Schallwellen, die entsteht, wenn ein Objekt die Schallgeschwindigkeit überschreitet
 - E) Keine Ahnung



Katzenpause

■ Karlo und Samy

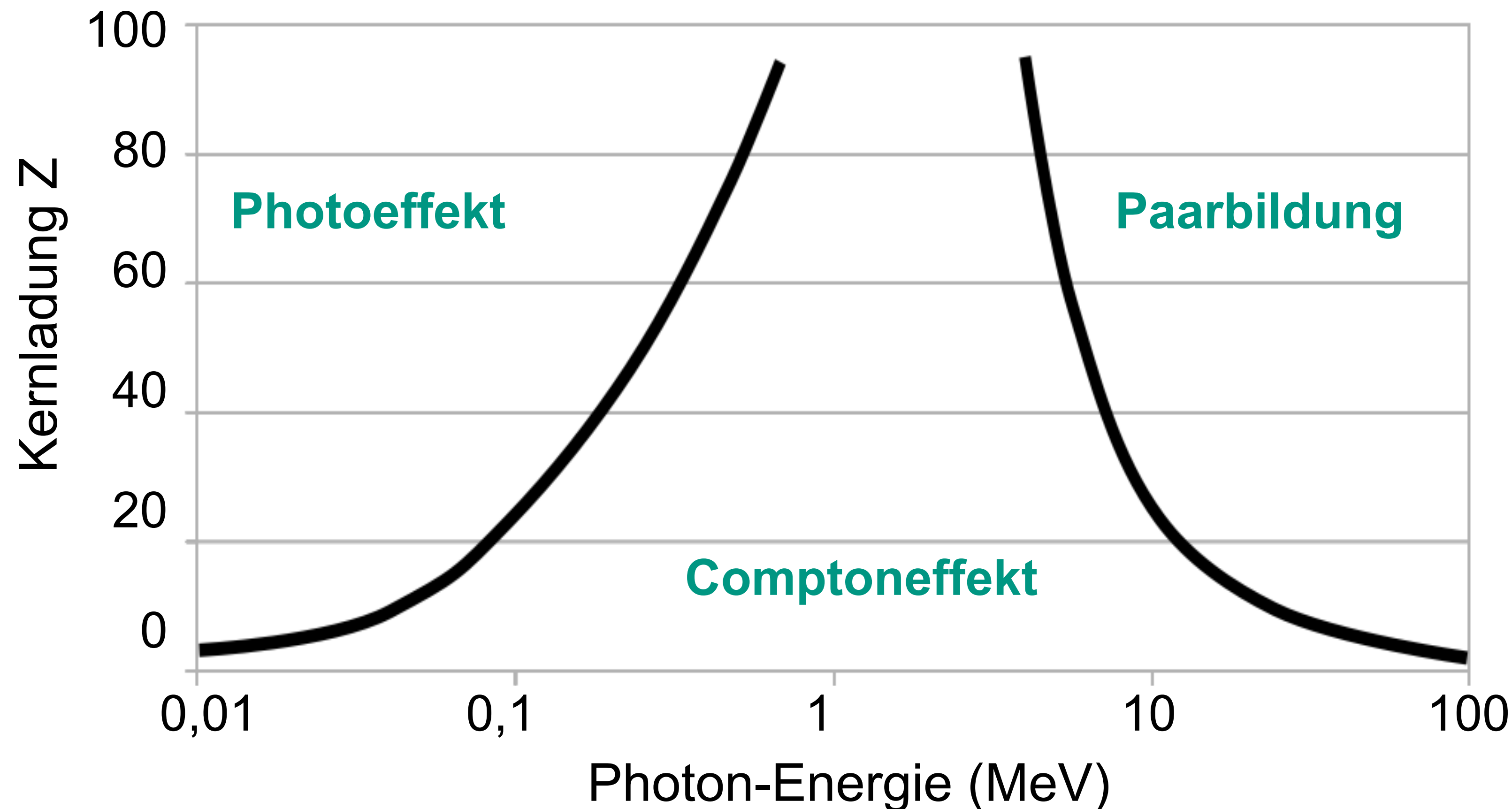




■ 2. Experimentelle Methoden

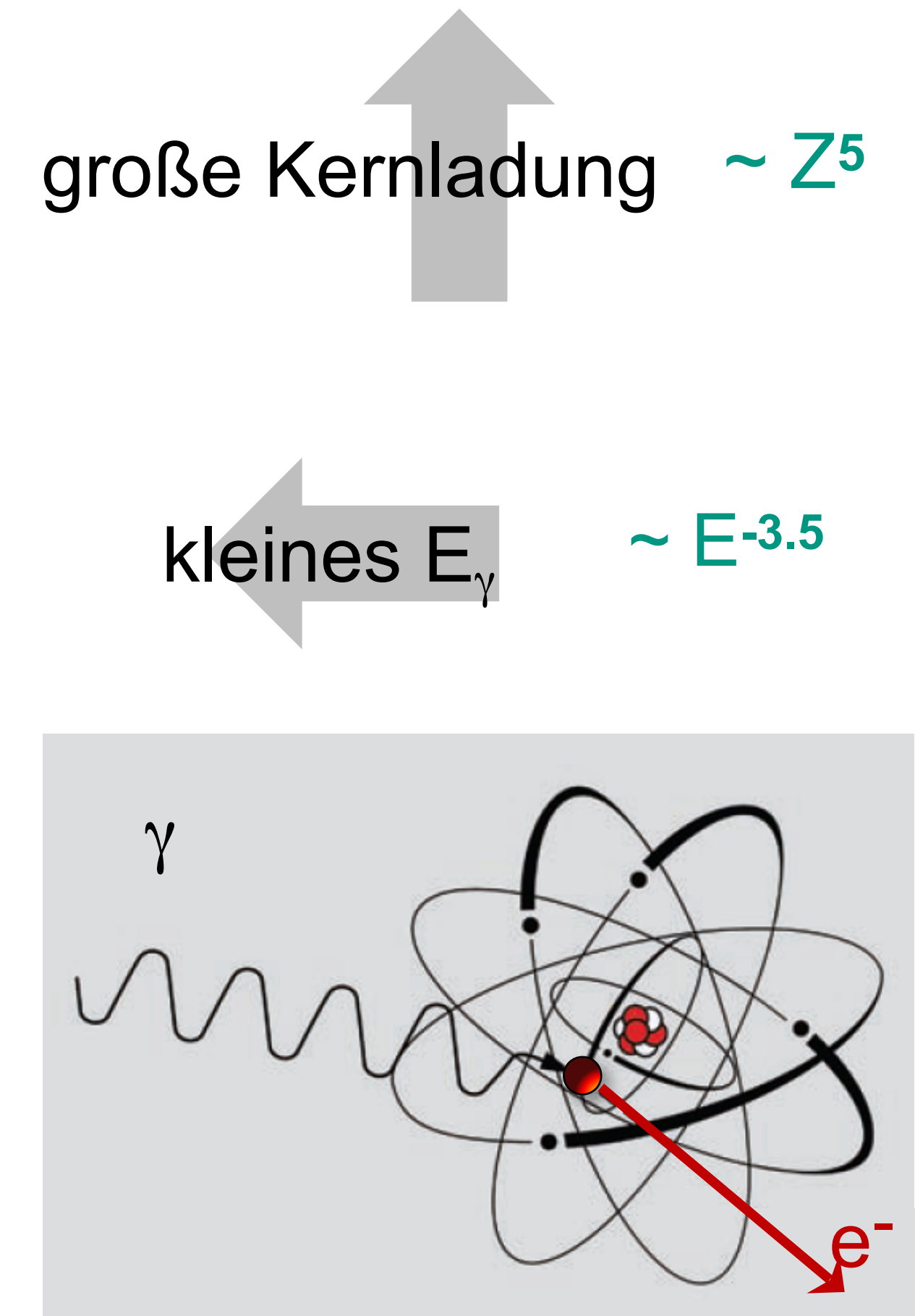
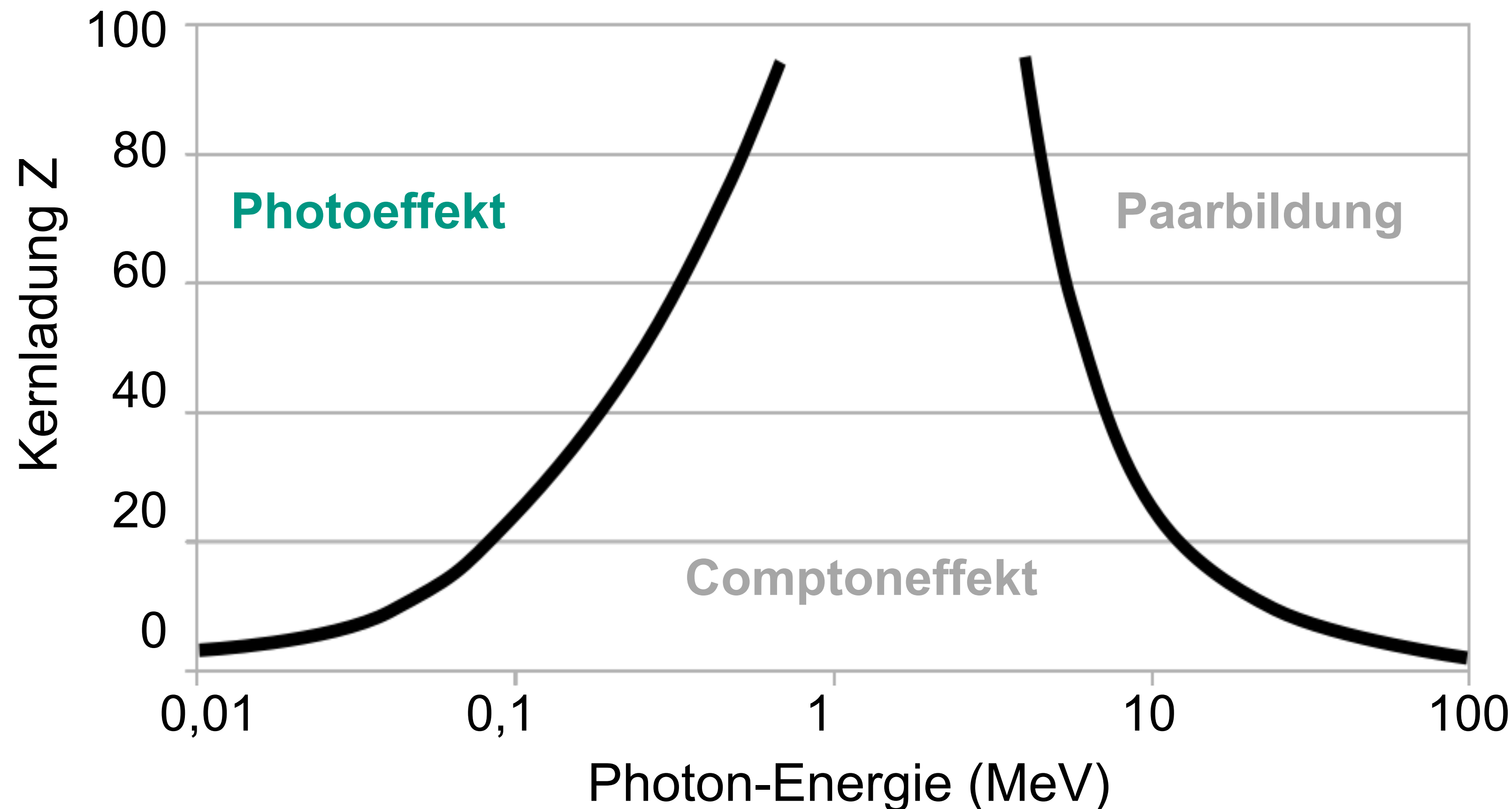
- 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
- 2.2. Energieverlust von Elektronen
- 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahlung
- 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
- 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
- 2.6. Nachweistechniken
- 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
- 2.8. Teilchenbeschleuniger

■ Drei fundamentale Prozesse:
Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung



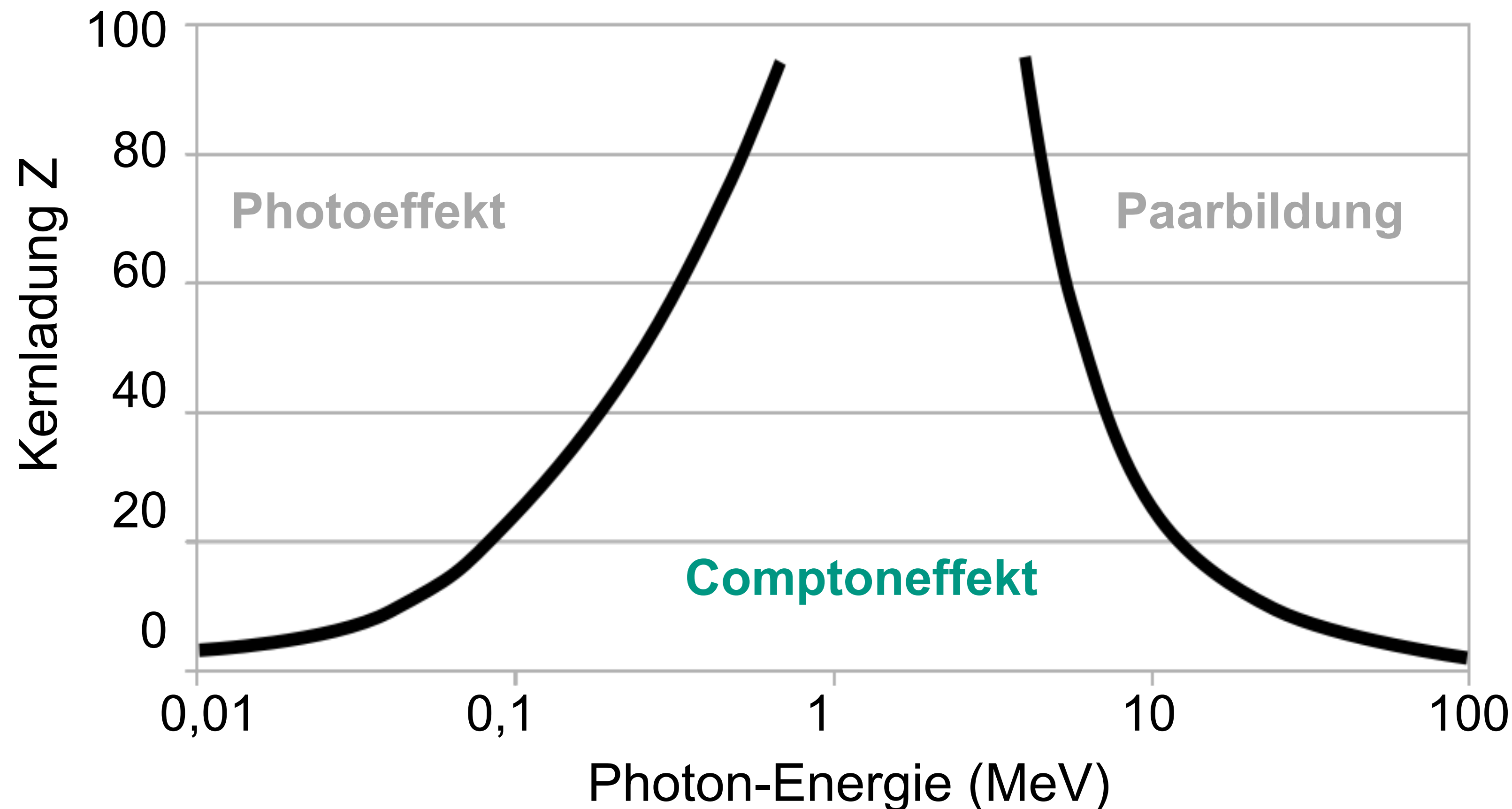
Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

- Drei fundamentale Prozesse:
Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung



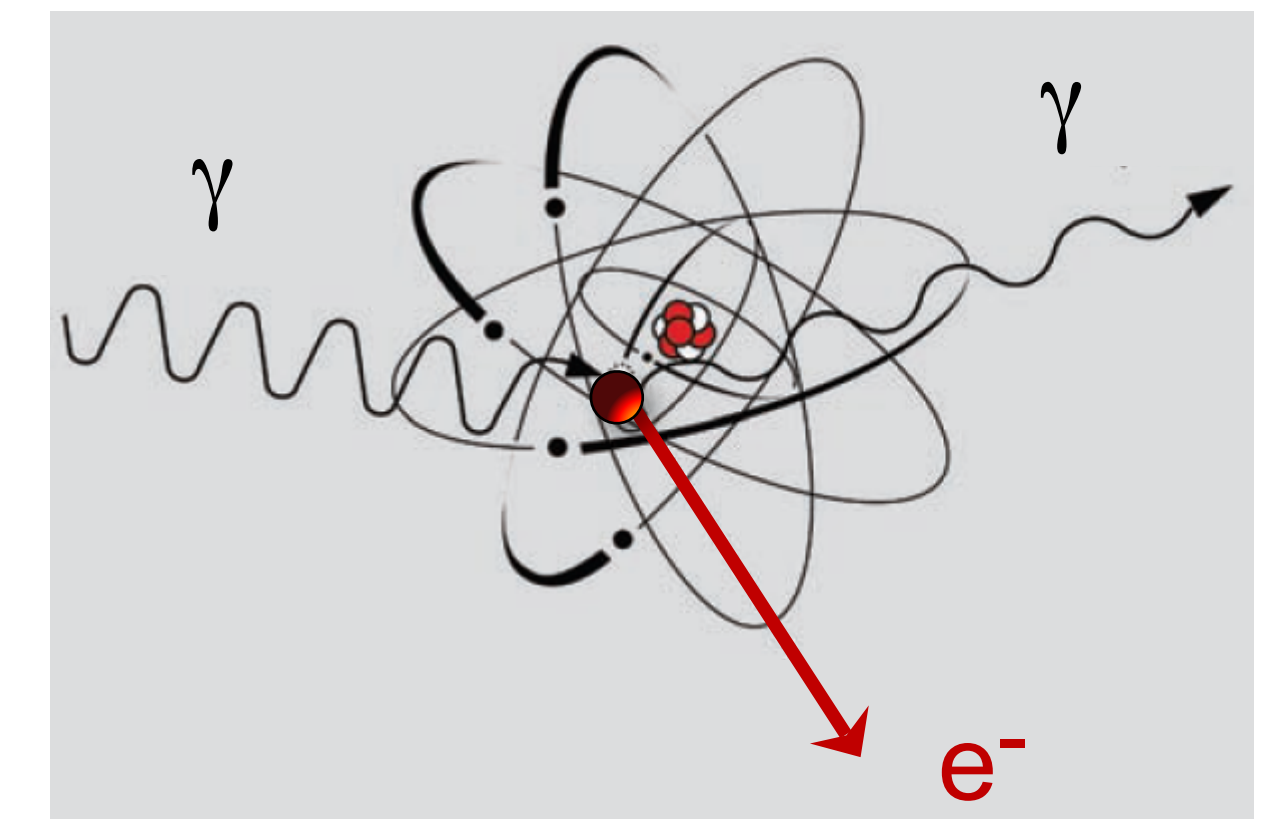
Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

- Drei fundamentale Prozesse:
Photoeffekt, **Comptoneffekt**, Paarbildung



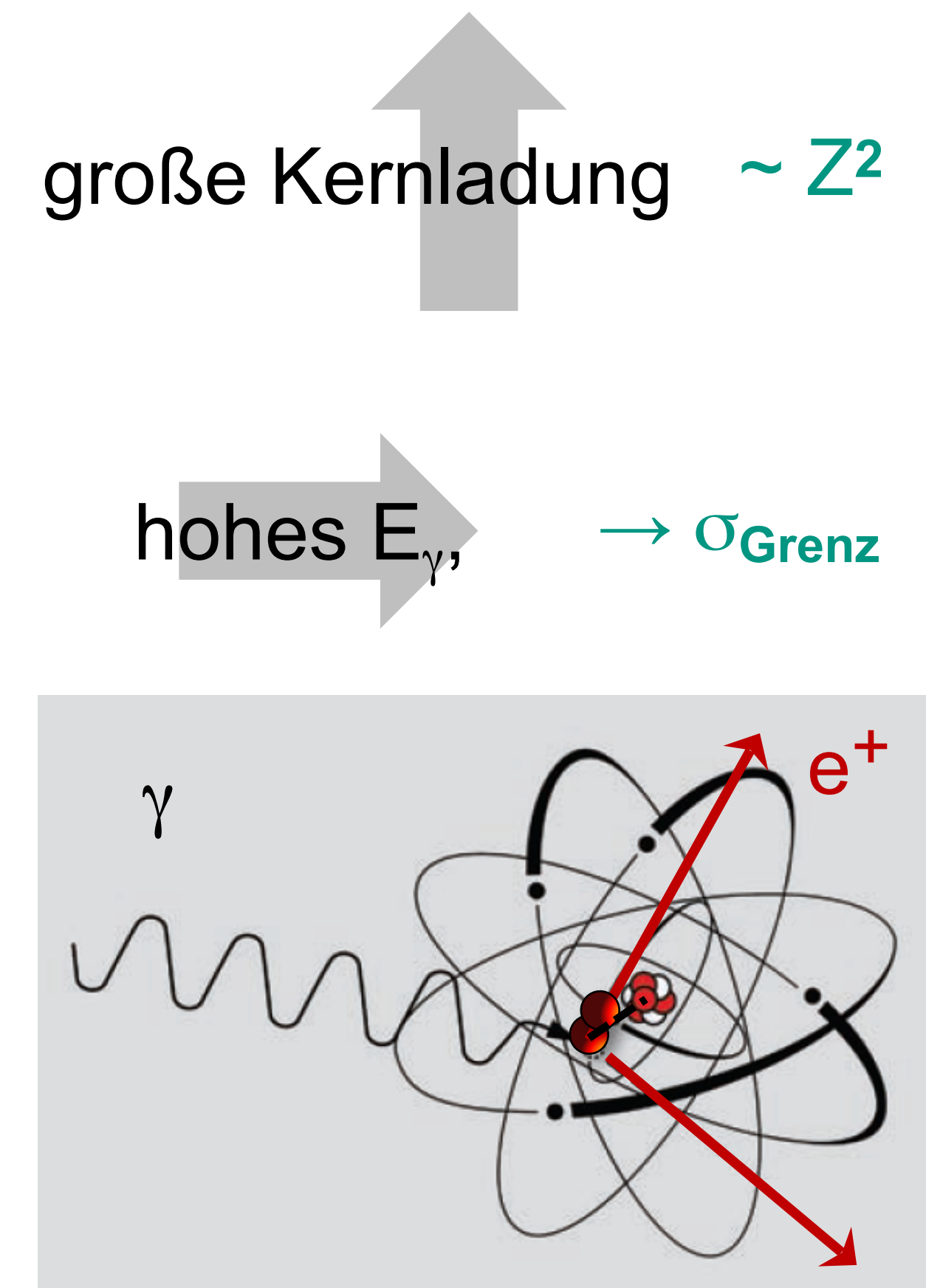
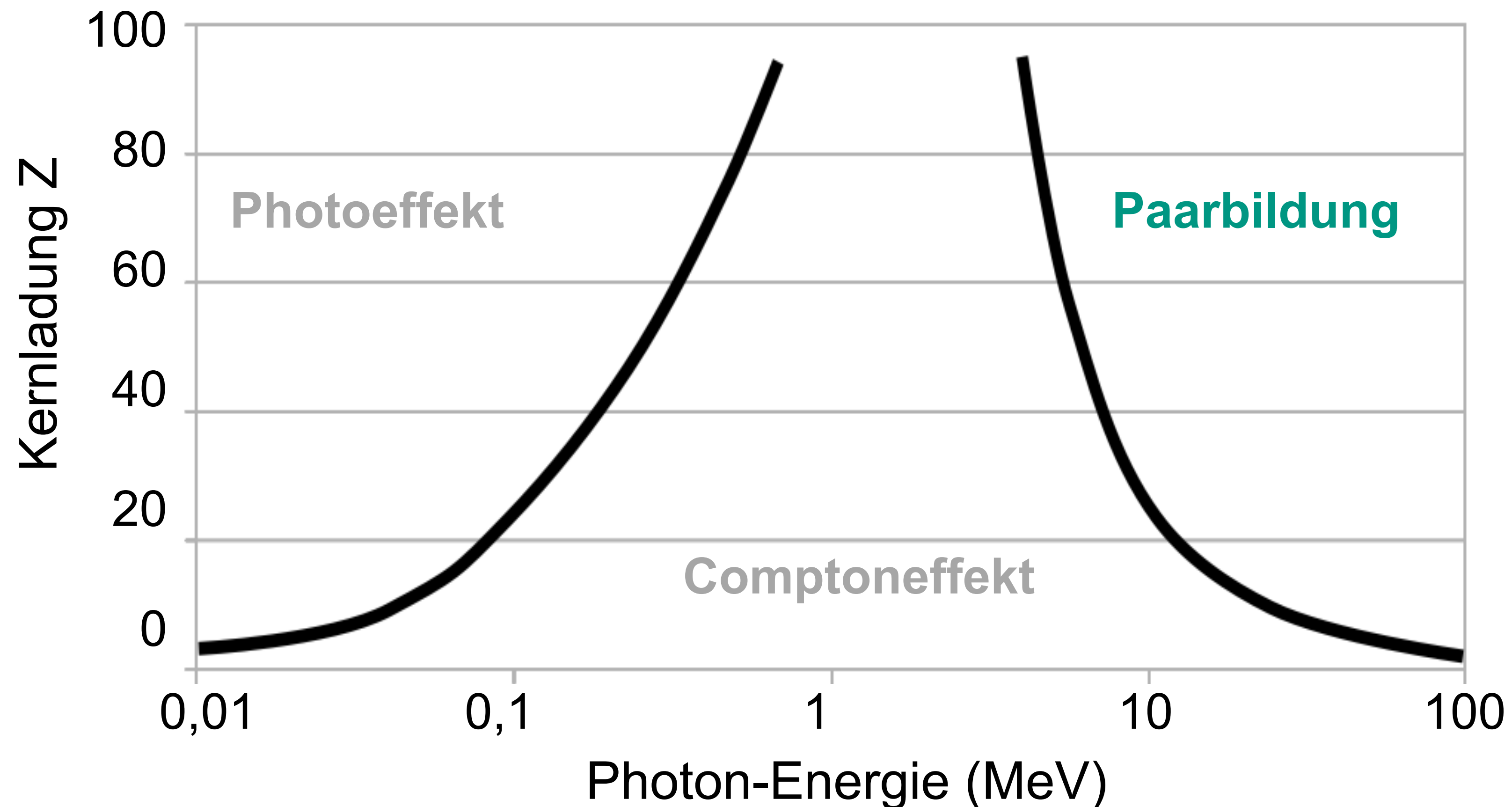
kleine Kernladung

mittleres E_γ

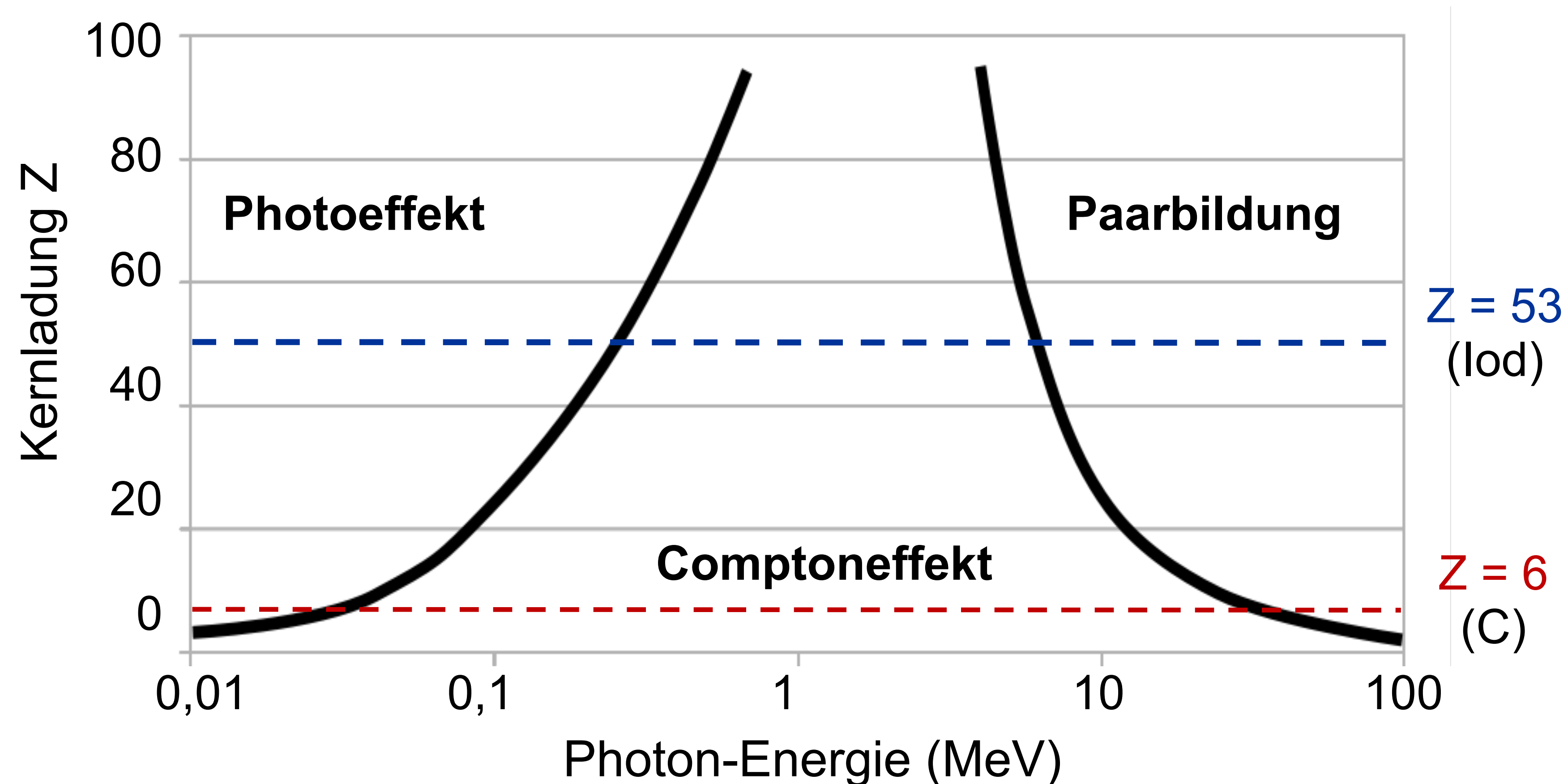


Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

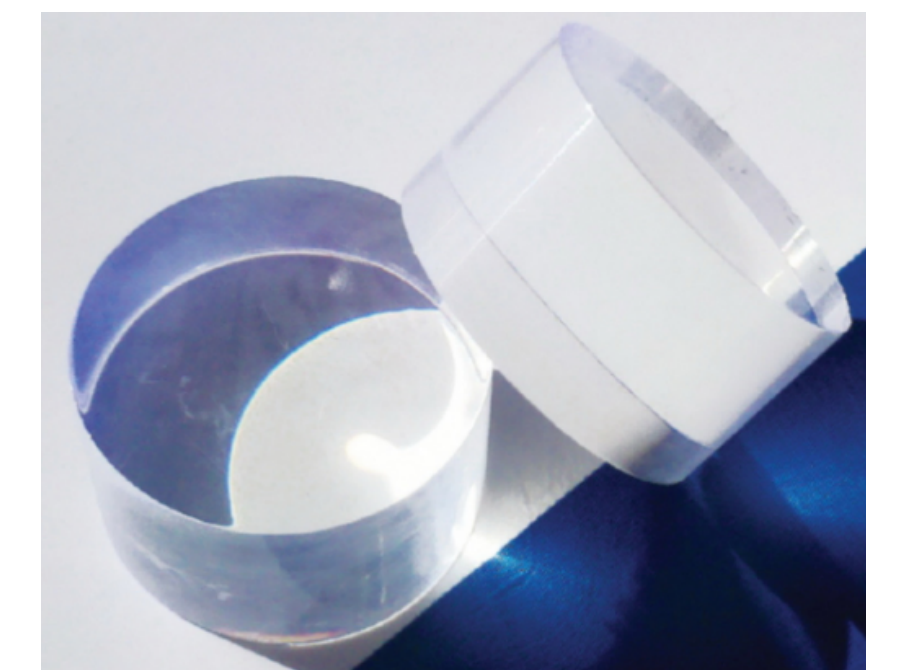
- **Drei fundamentale Prozesse:**
Photoeffekt, Comptoneffekt, **Paarbildung**



- Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung: abhängig vom Z des Detektors

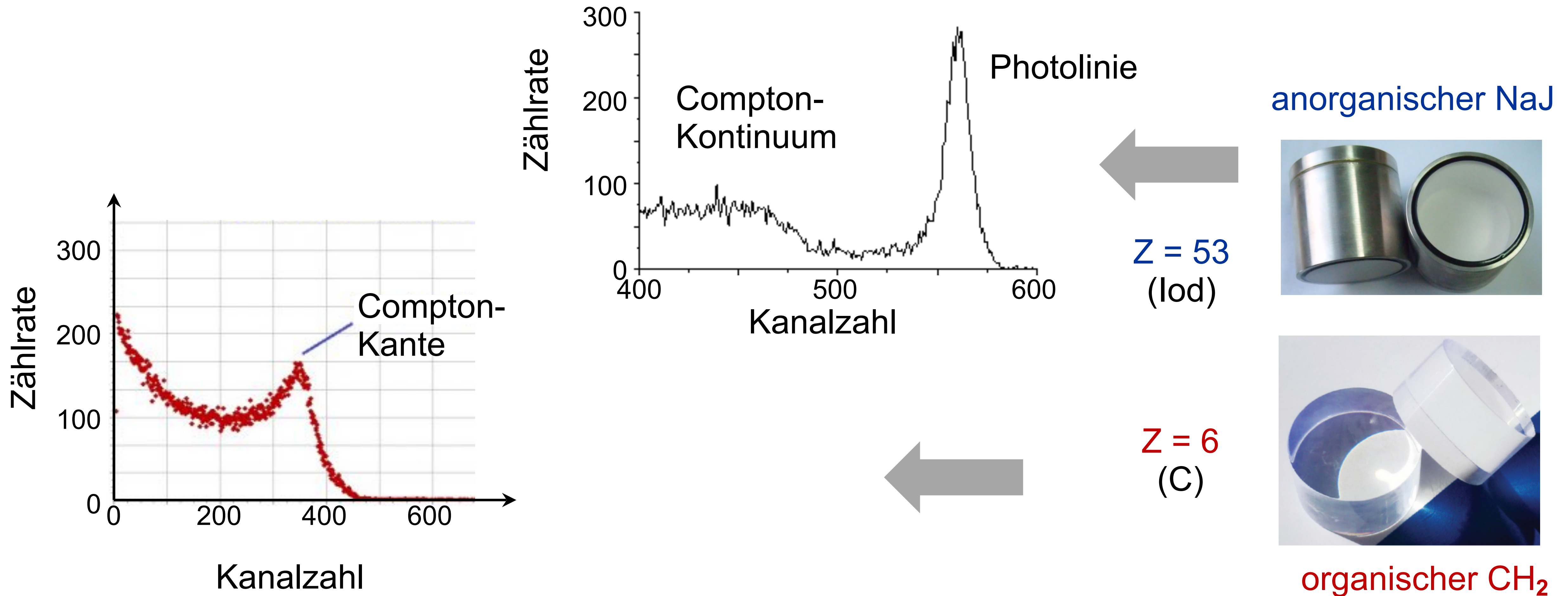


anorganischer NaJ

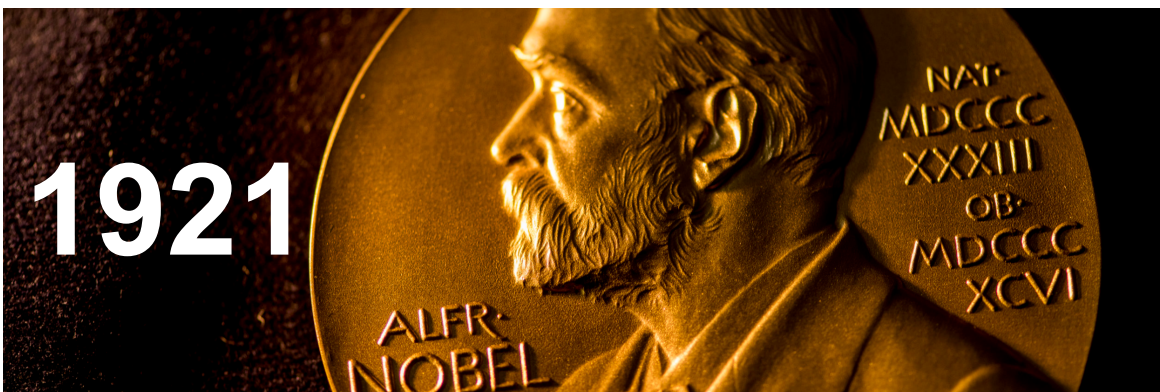


organischer CH_2

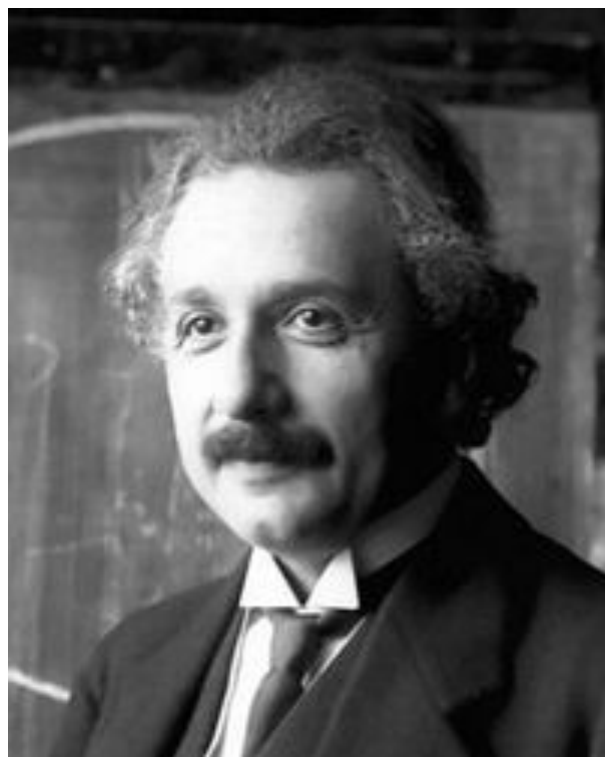
- Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung: abhängig vom Z des Detektors



■ Photo-Emission (Festkörper) & Photo-Ionisation (Atom)

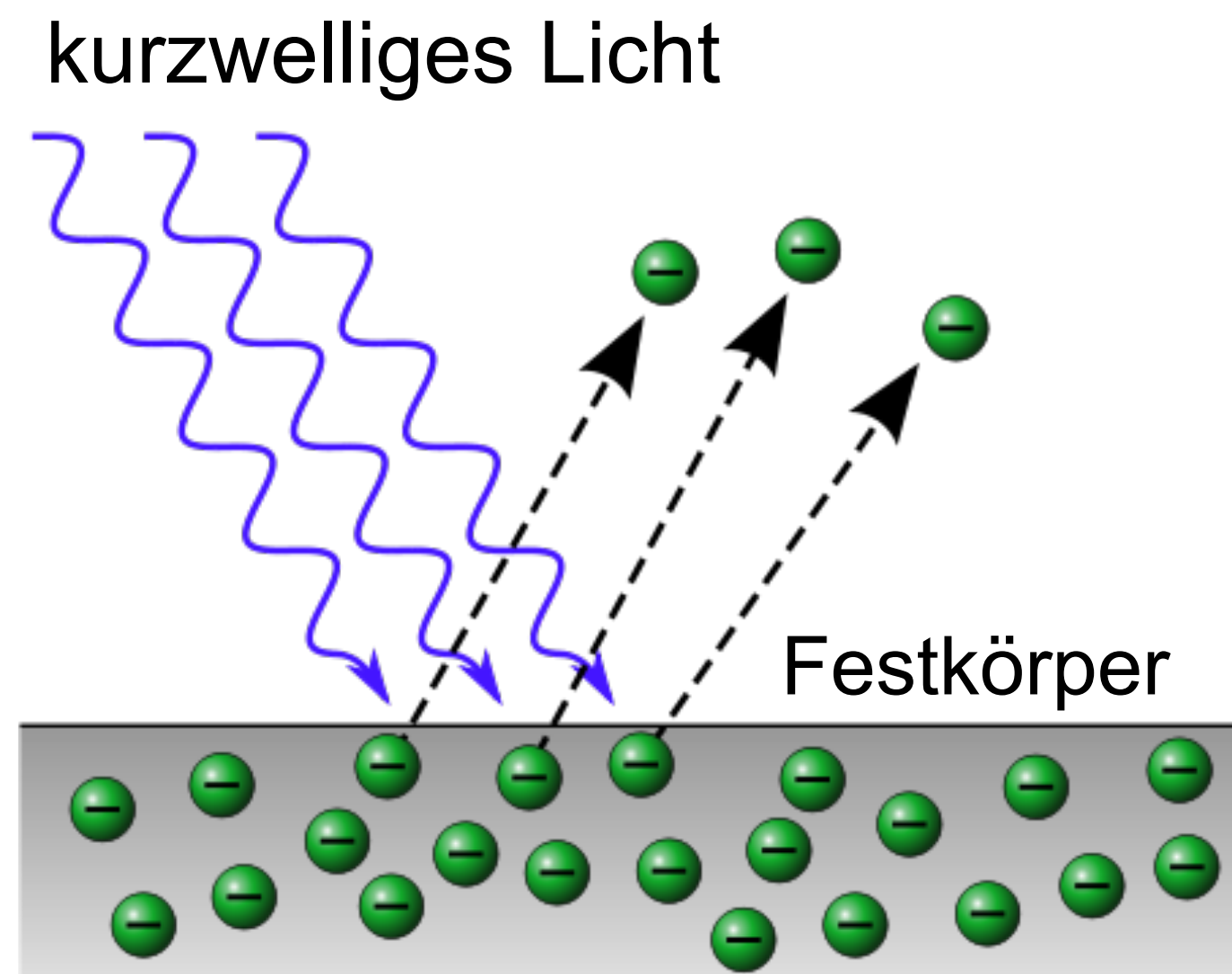


6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.

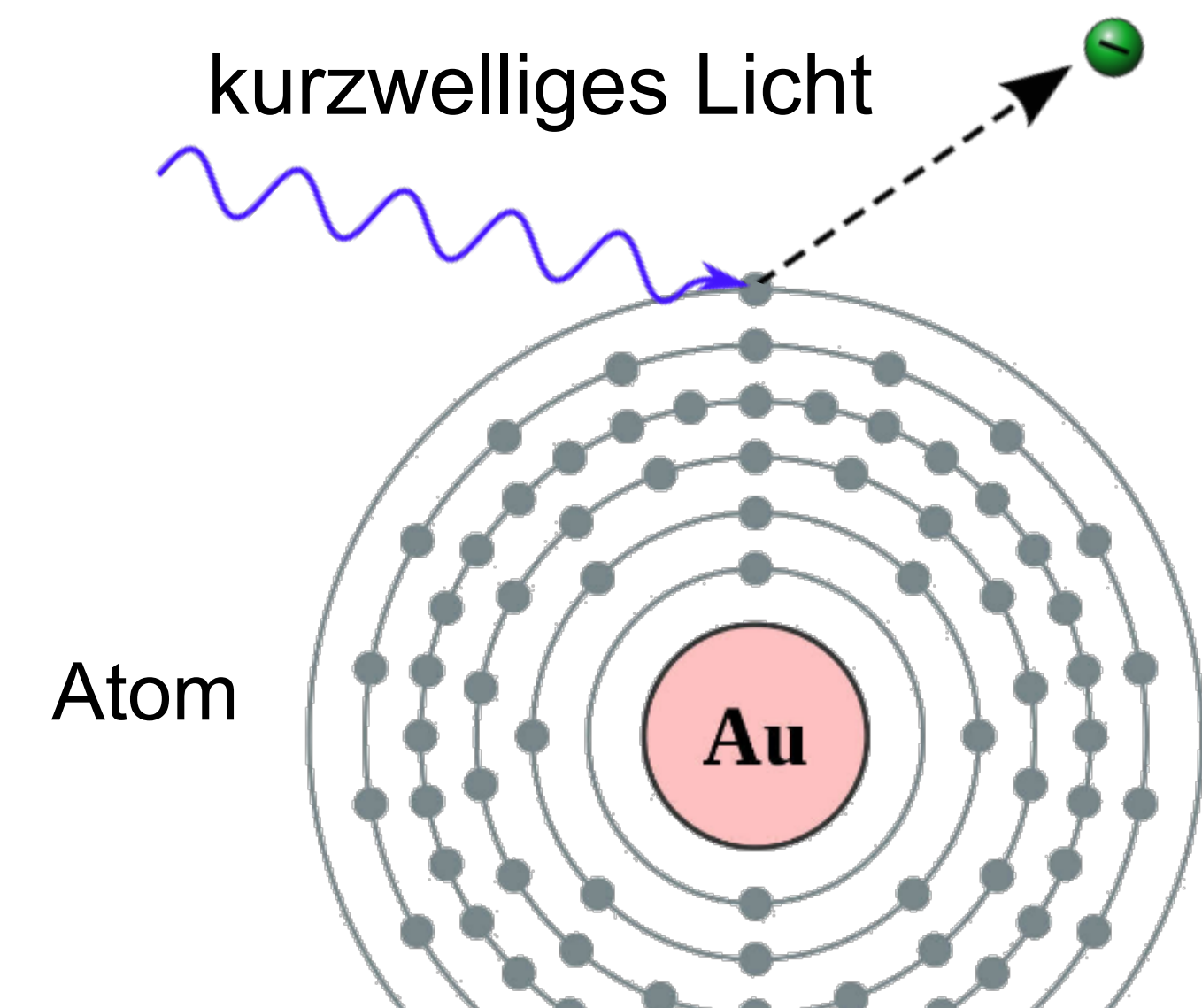


Albert Einstein

Elektronen aus Metall-
(Halbleiter-) Oberflächen
⇒ **Bänderstruktur** im Festkörper
charakteristische Austrittsarbeit



Elektronen von einzelnen
Atomen / Molekülen, z.B. in Gasen
⇒ Struktur der **Elektronenschalen**
charakteristische Ionisationsenergie



Photoeffekt: Wirkungsquerschnitt

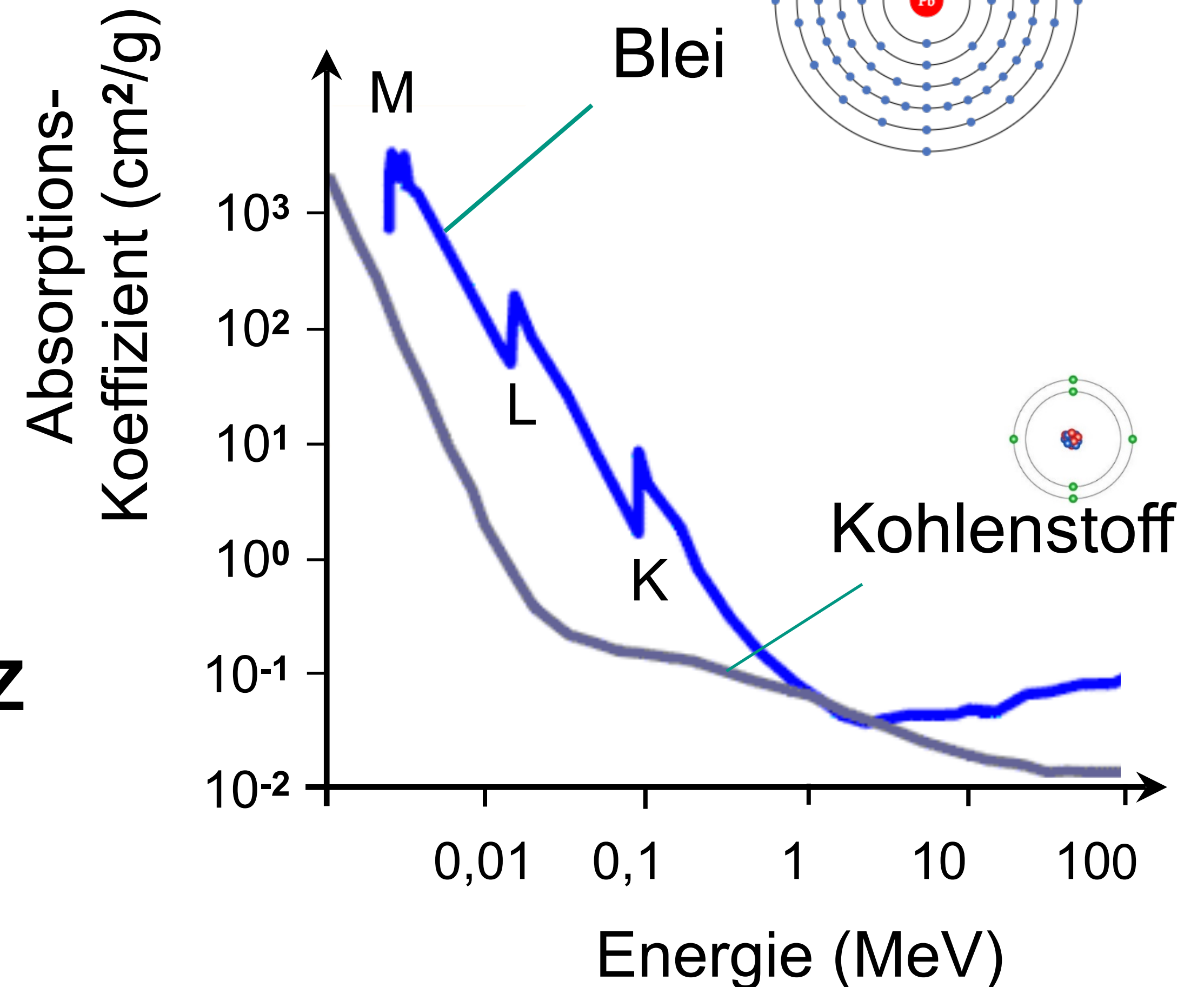
■ Energieabhängigkeit des Photoquerschnitts

- bei niedrigen Energien ($< 0,5$ MeV)

$$\sigma_{\gamma} \sim \alpha^4 \cdot \frac{m_e^{7/2}}{E_{\gamma}^{7/2}}$$

- charakteristische Absorptionskanten
- Abhängigkeit von Z : **wichtig bei großem Z**

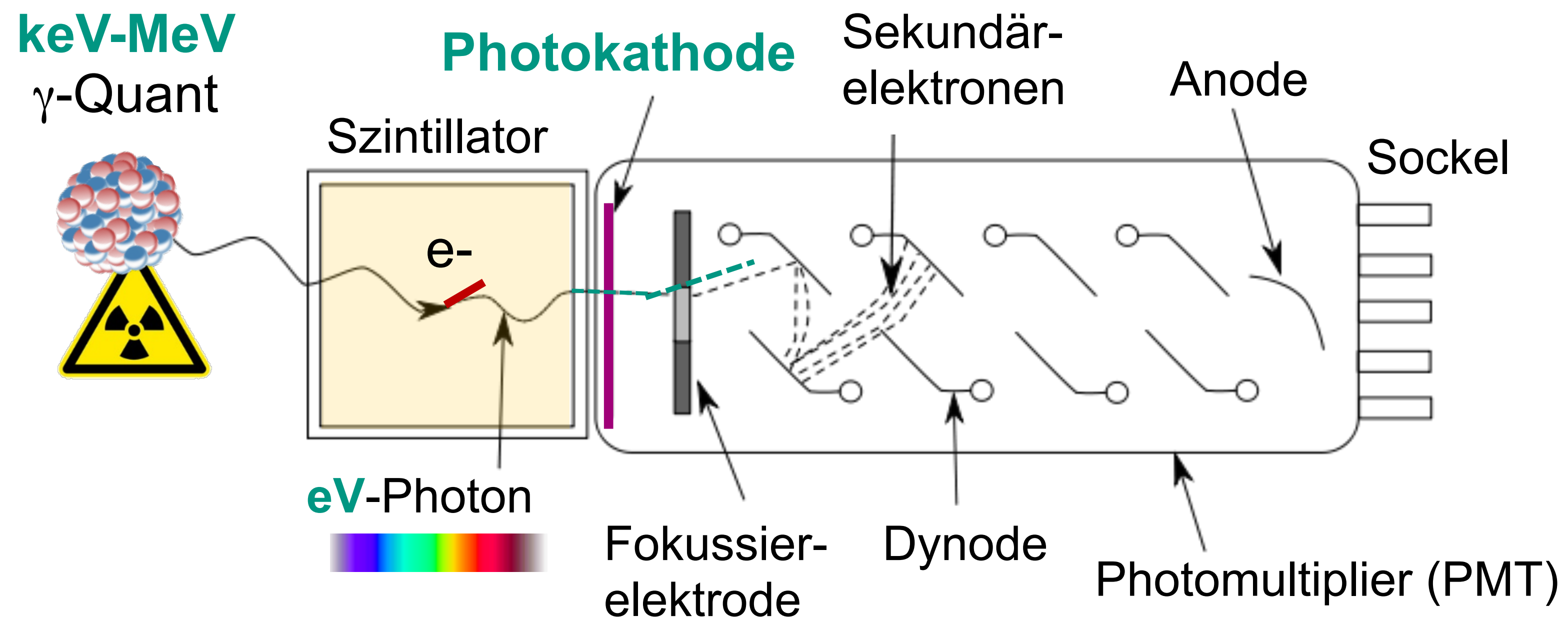
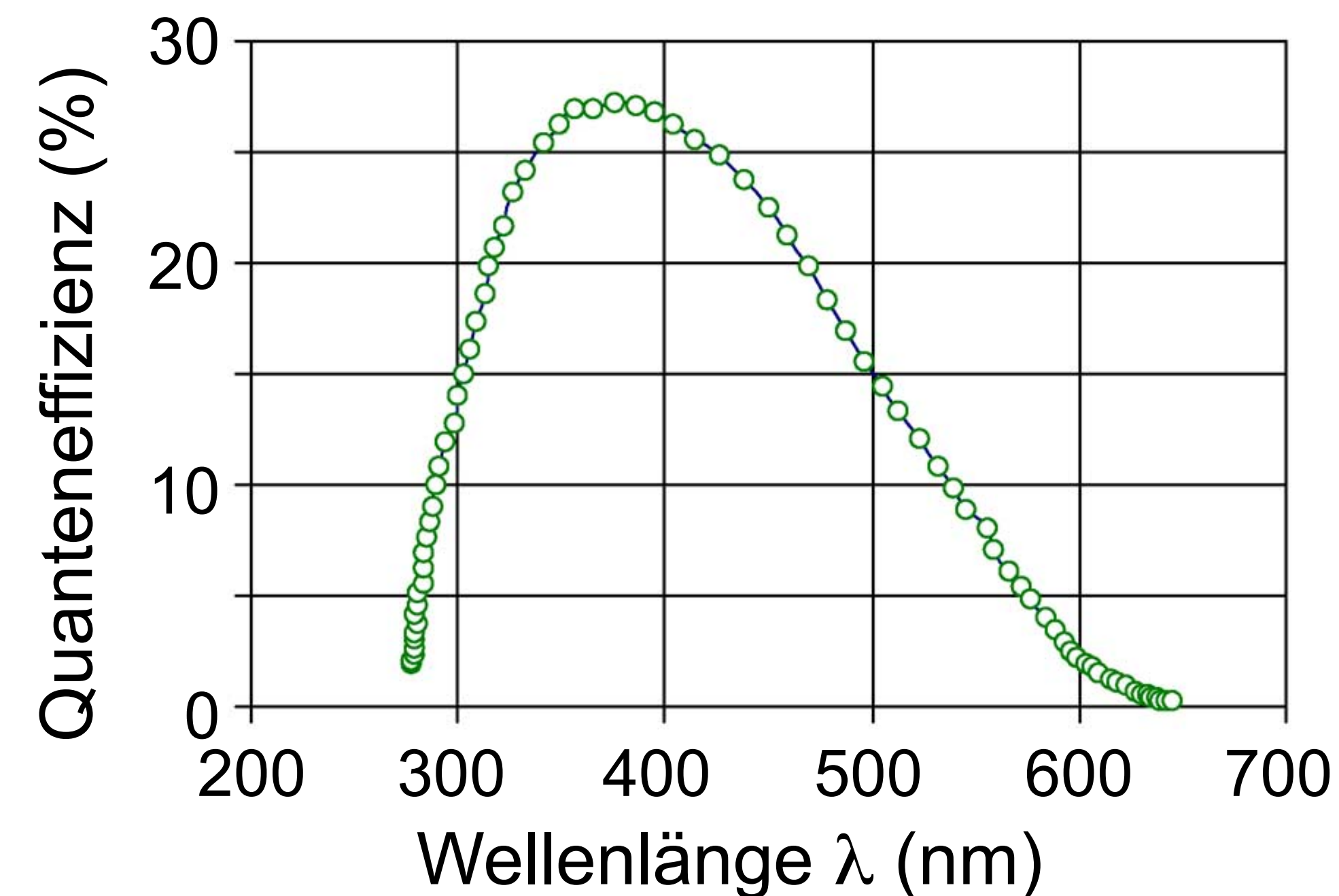
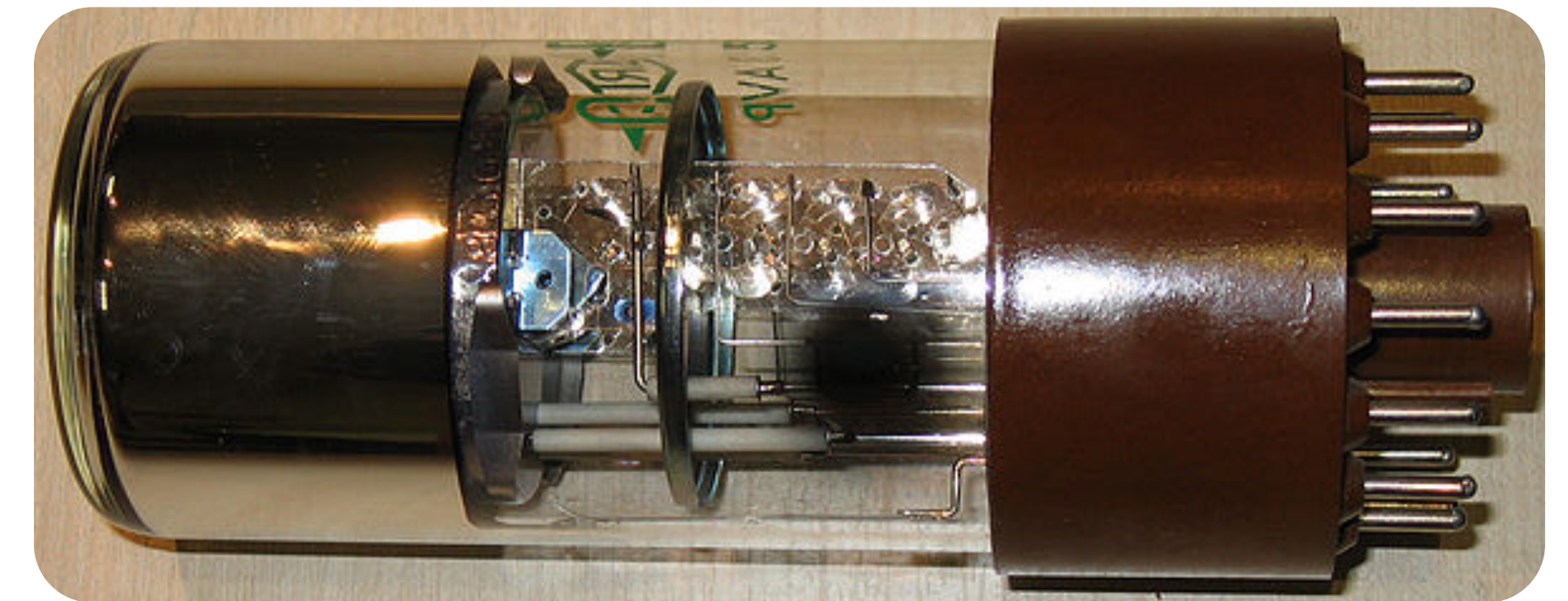
$$\sigma_{\gamma} \sim Z^5$$



Photoeffekt: Anwendung

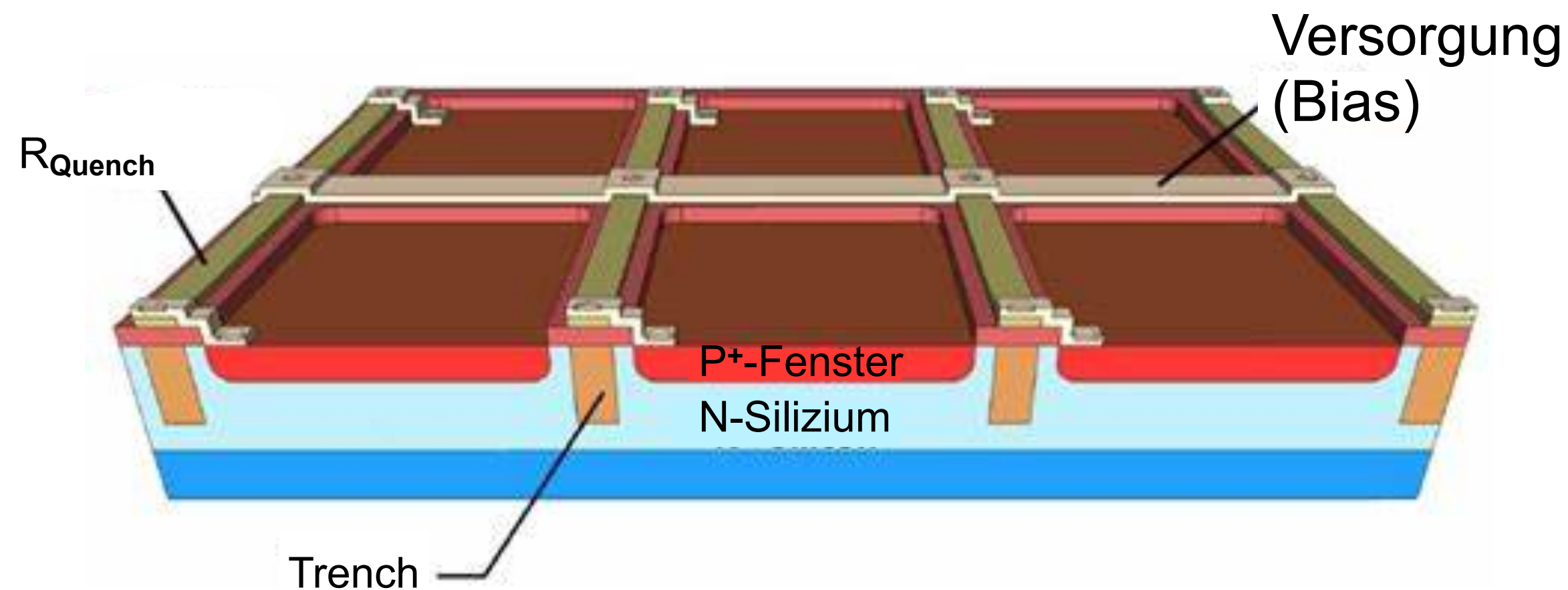
■ PMTs: Nachweis von Szintillationslicht (keine X-Rays oder Gammas!)

- PMTs: Photoeffekt in dünner **Bialkali-Photokathode**
(~25% Effizienz bei $\lambda = 400 \text{ nm}$)



Photomultiplier: Anwendung

- **PMTs: in der (Astro-)Teilchenphysik, Medizintechnik, Optoelektronik,...**
 - zahlreiche Anwendungsgebiete beim extrem sensitiven Lichtnachweis mit großem dynamischem Bereich, z.B. auch von Quantendots,...



Silizium-Photomultiplier (SiPMs)



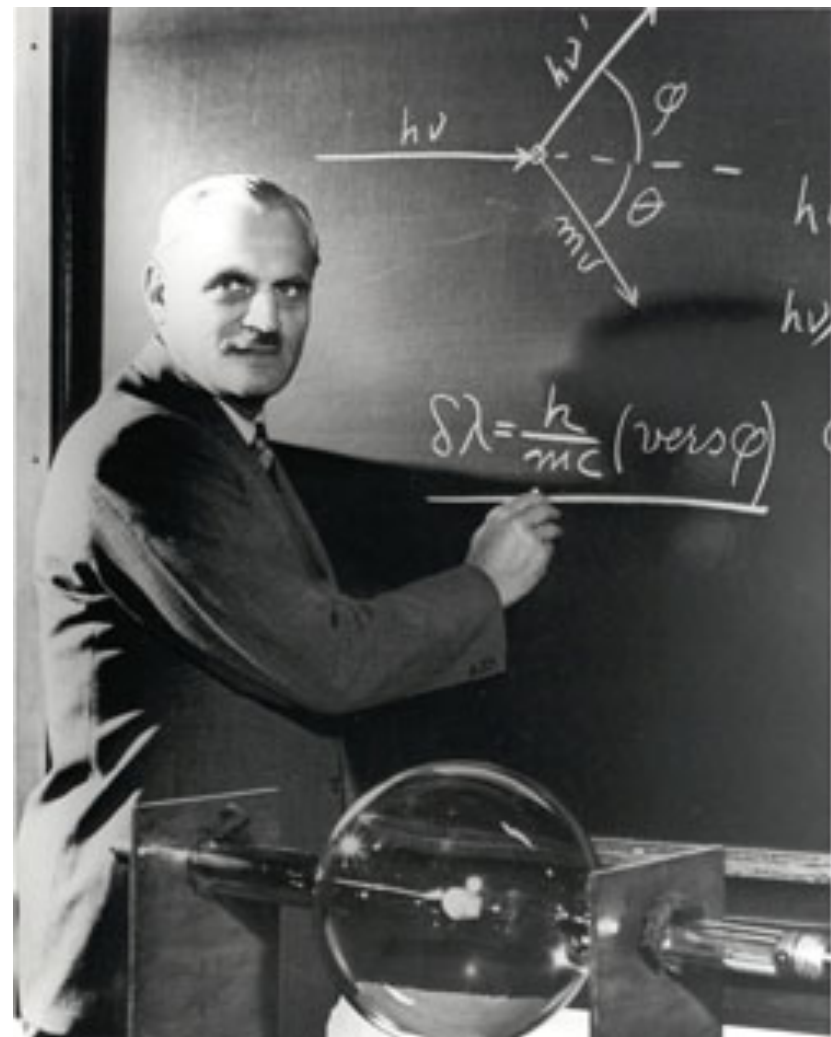
klassische Photomultiplier (PMTs)

Comptoneffekt: Grundlagen

■ Inelastische γ -Streuung an einem quasi-freien Hüllenelektron

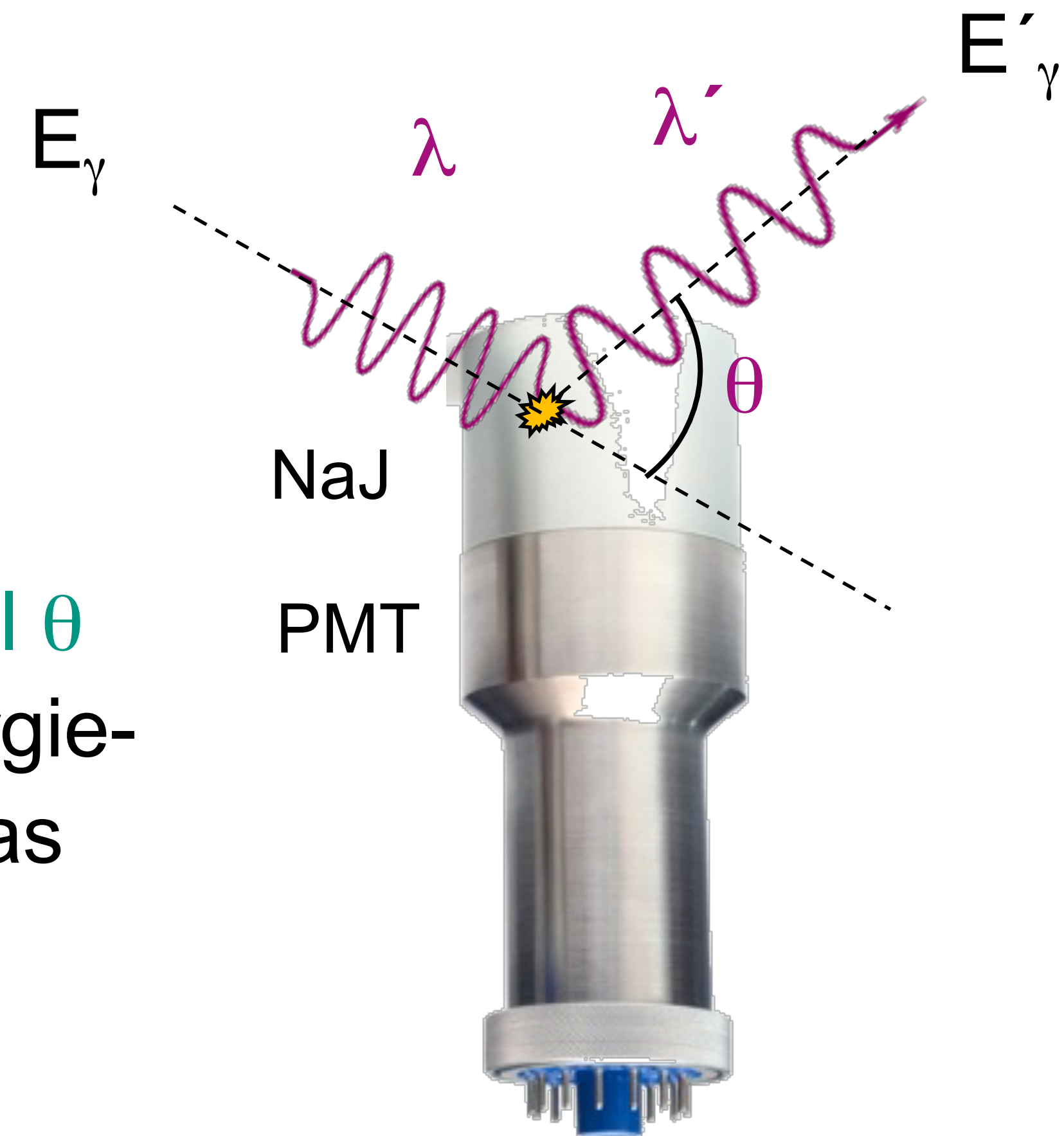
- kontinuierliches Energie-Spektrum:
abhängig vom Streuwinkel θ

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} \cdot (1 - \cos \theta)$$



Arthur H. Compton
*"for his discovery of the
effect named after him"*

nur der **Streuwinkel θ**
bestimmt den Energie-
verlust des Gammas

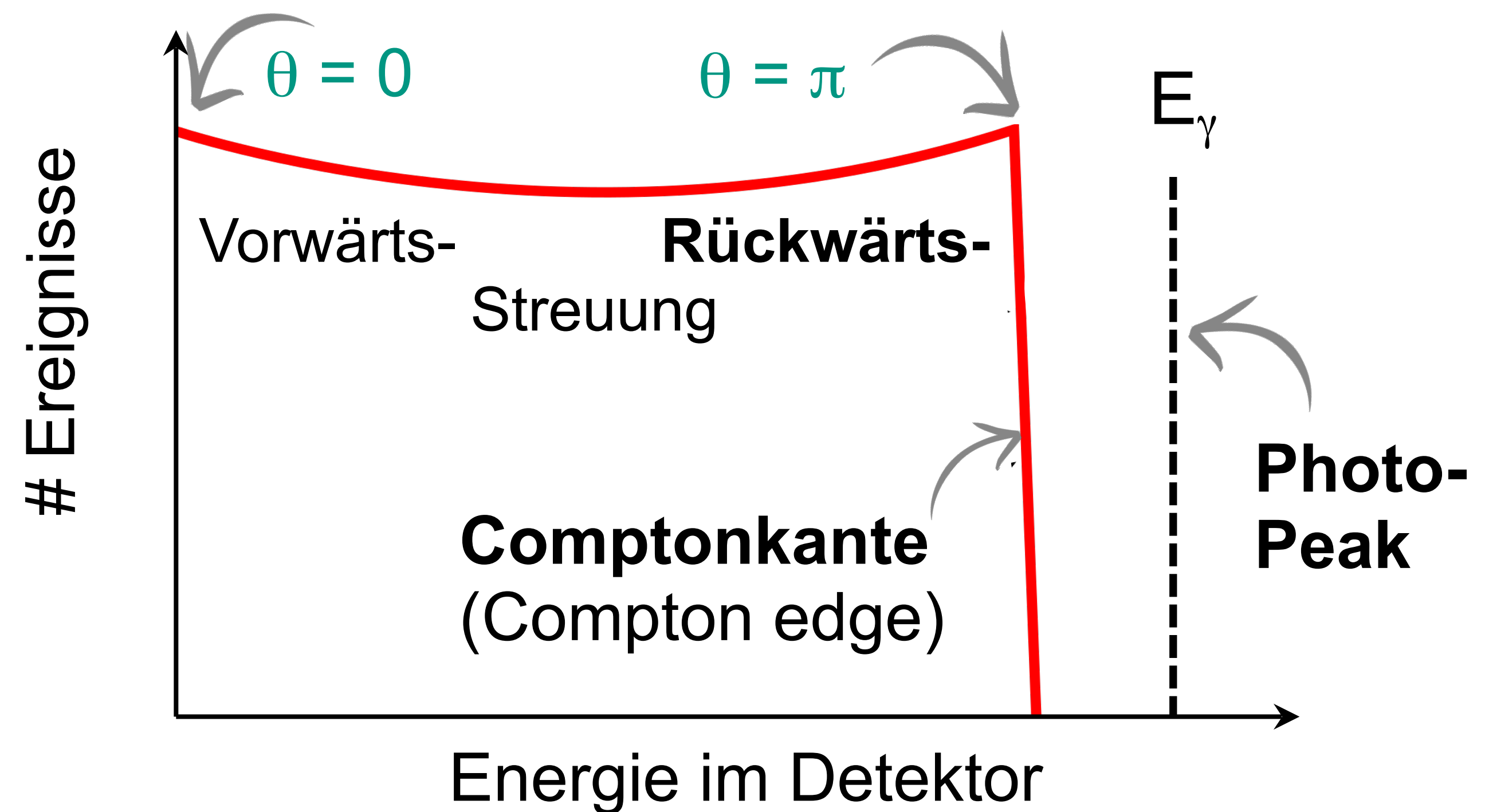


■ Inelastische γ -Streuung an einem quasi-freien Hüllenelektron

- kontinuierliches Energie-Spektrum:
abhängig vom Streuwinkel θ

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \cdot (1 - \cos\theta)}$$

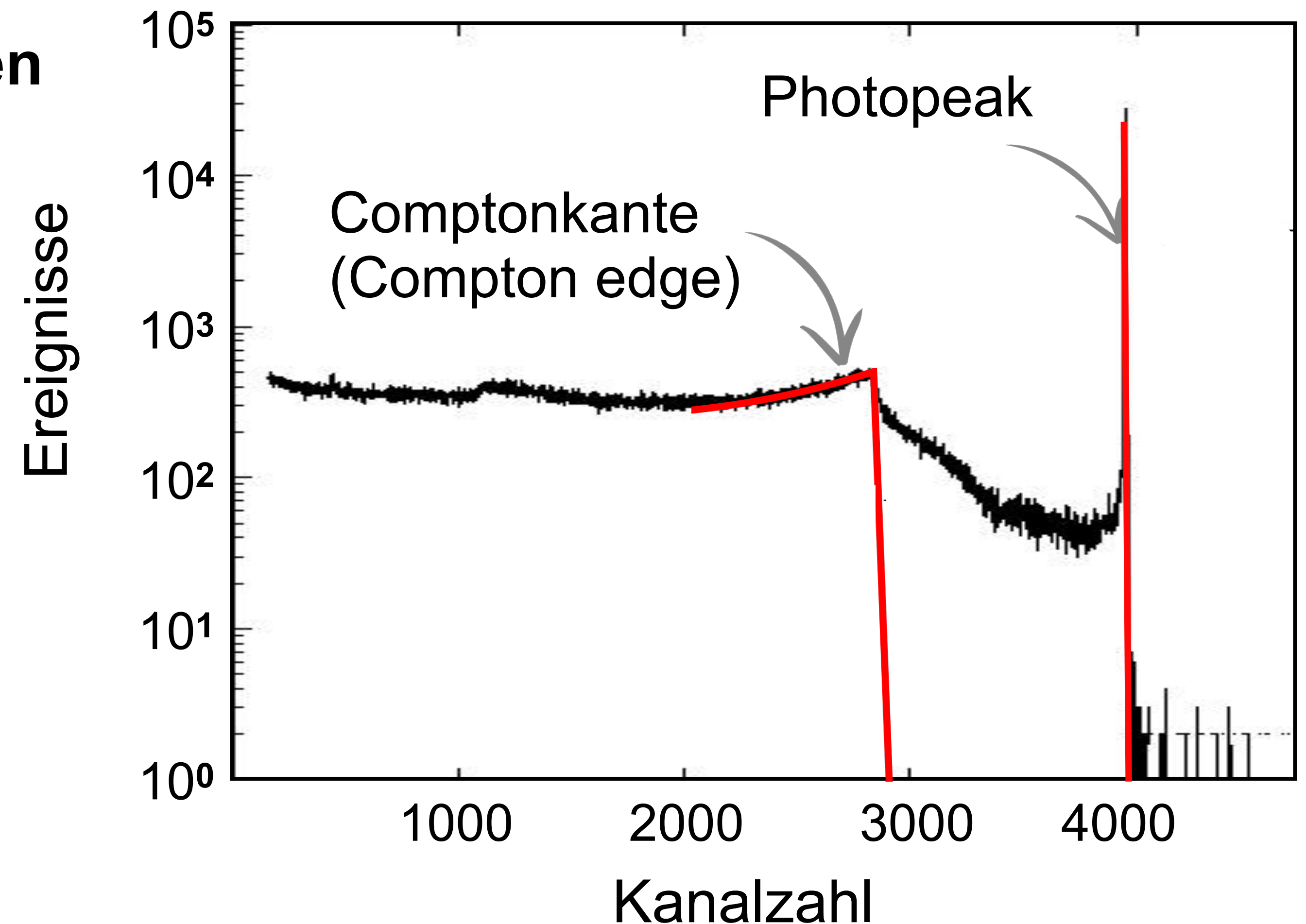
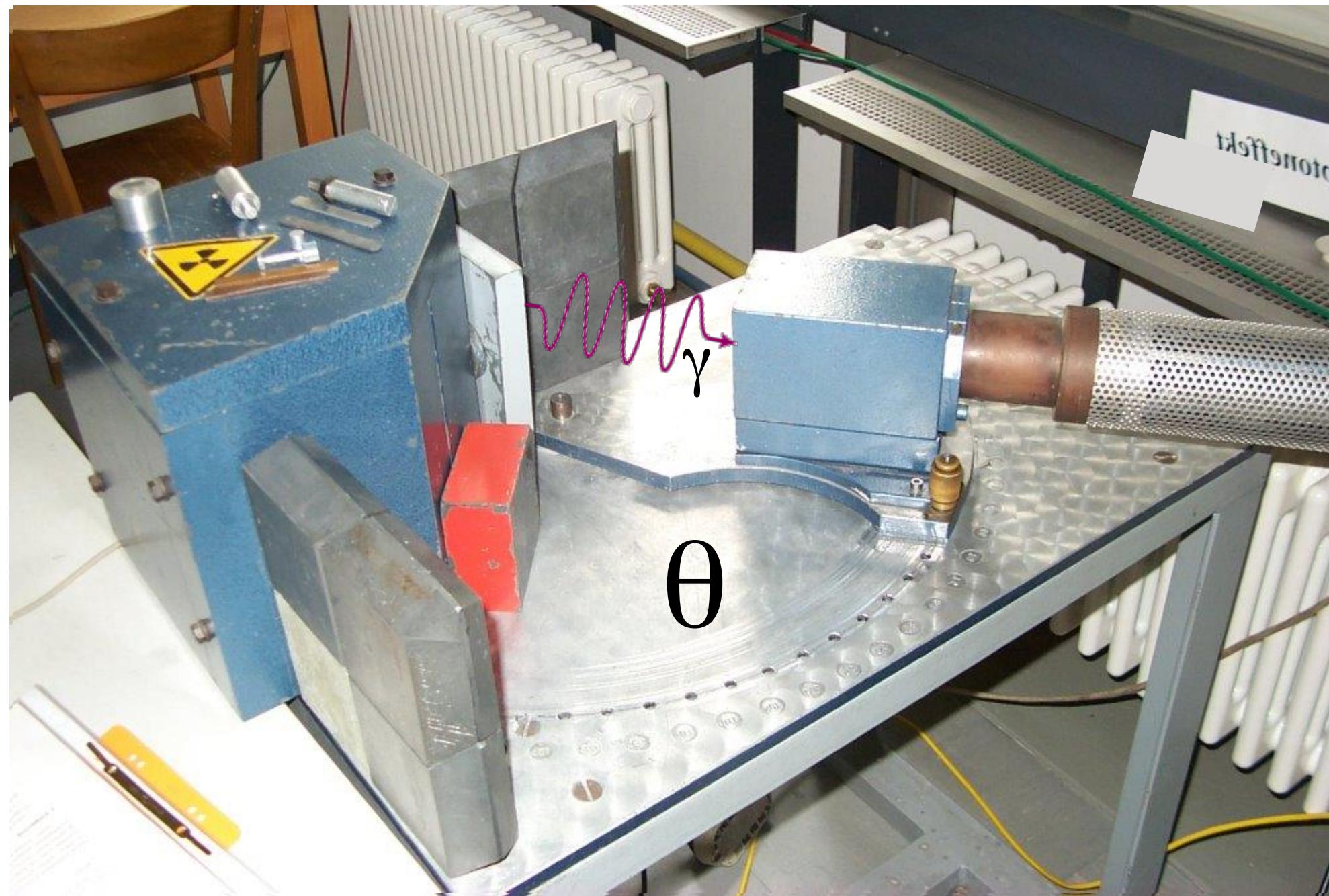
- **Comptonkante bei $E'_\gamma(180^\circ)$:**
 - bei **Rückwärtsstreuung** des γ 's
 - liegt unterhalb des Photopeaks,
da **gestreutes** γ noch Energie behält



Comptoneffekt: Messung im Praktikum!

■ Messung der Energieverteilung von Elektronen nach Compton-Stoß

- Nachweis von **Compton-gestreuten Gamma-Quanten** in NaJ-Detektor



Comptoneffekt: Streuquerschnitt

■ abfallender Compton-Streuquerschnitt (Klein-Nishina)

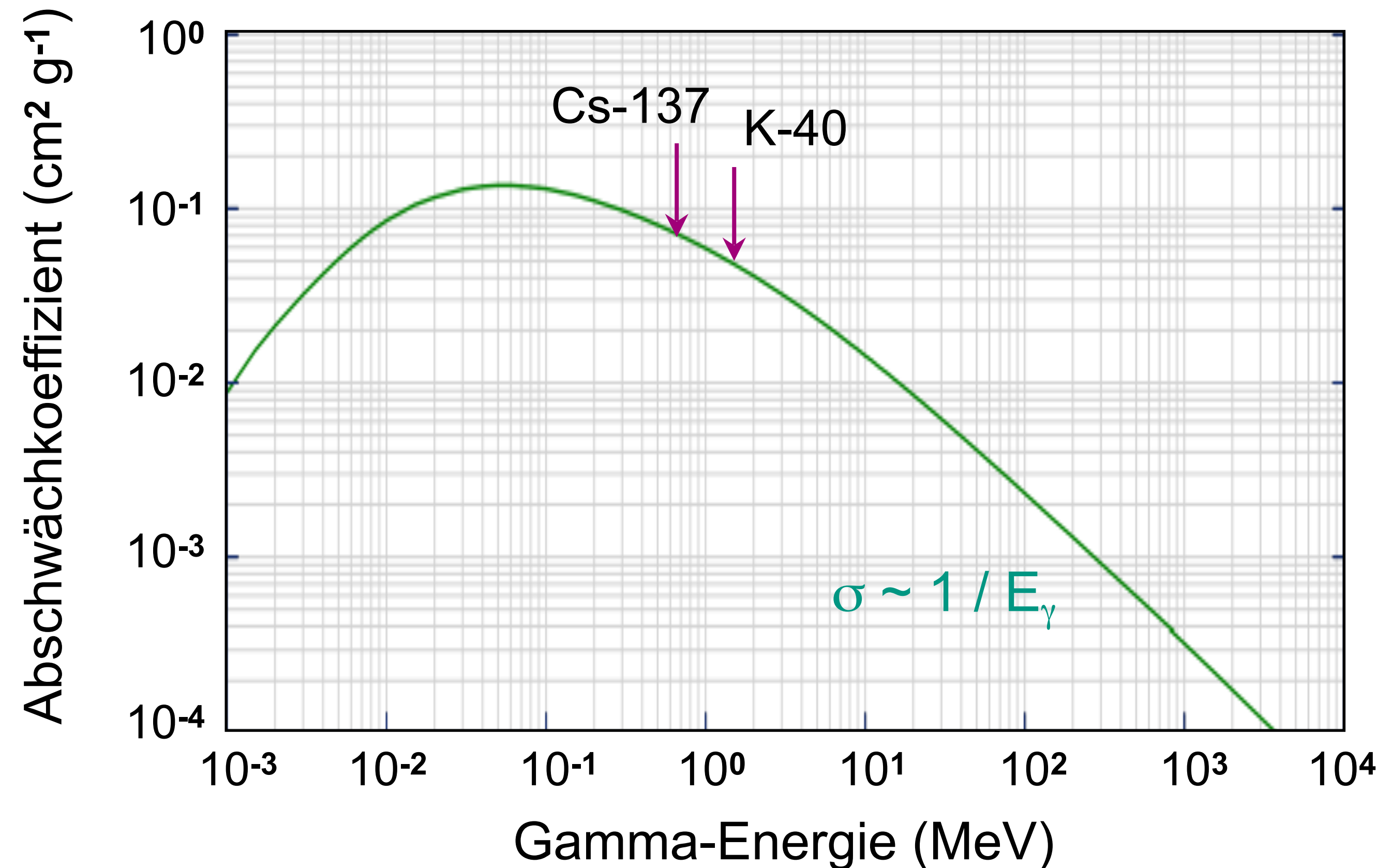
- Wirkungsquerschnitt $\sigma \sim Z$
- Wirkungsquerschnitt $\sigma \sim 1/E_\gamma$
- 1928 aus Dirac-Gleichung (QED in niedrigster Ordnung) bestimmt



Oskar Klein



Yoshio Nishina



■ Compton-Streuquerschnitt: Winkelabhängigkeit

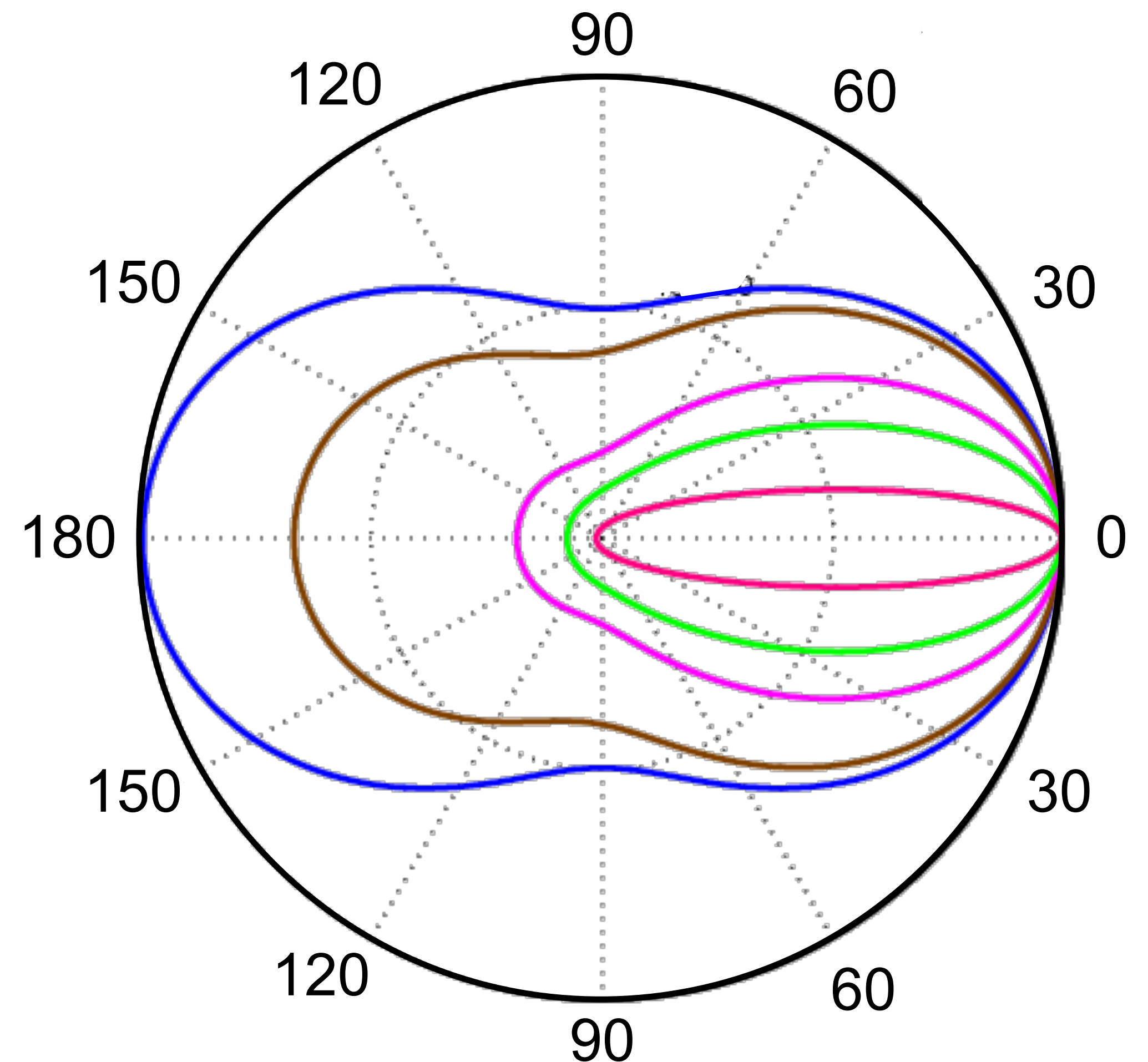
- Wirkungsquerschnitt $\sigma \sim Z$

- **Winkelverteilungen**

niedrige Energie:

symmetrisch vorwärts-rückwärts

hohe Energie: asymmetrische,
vorwärts-gepeakte Verteilung



Paarbildung: dominant bei hohen Energien

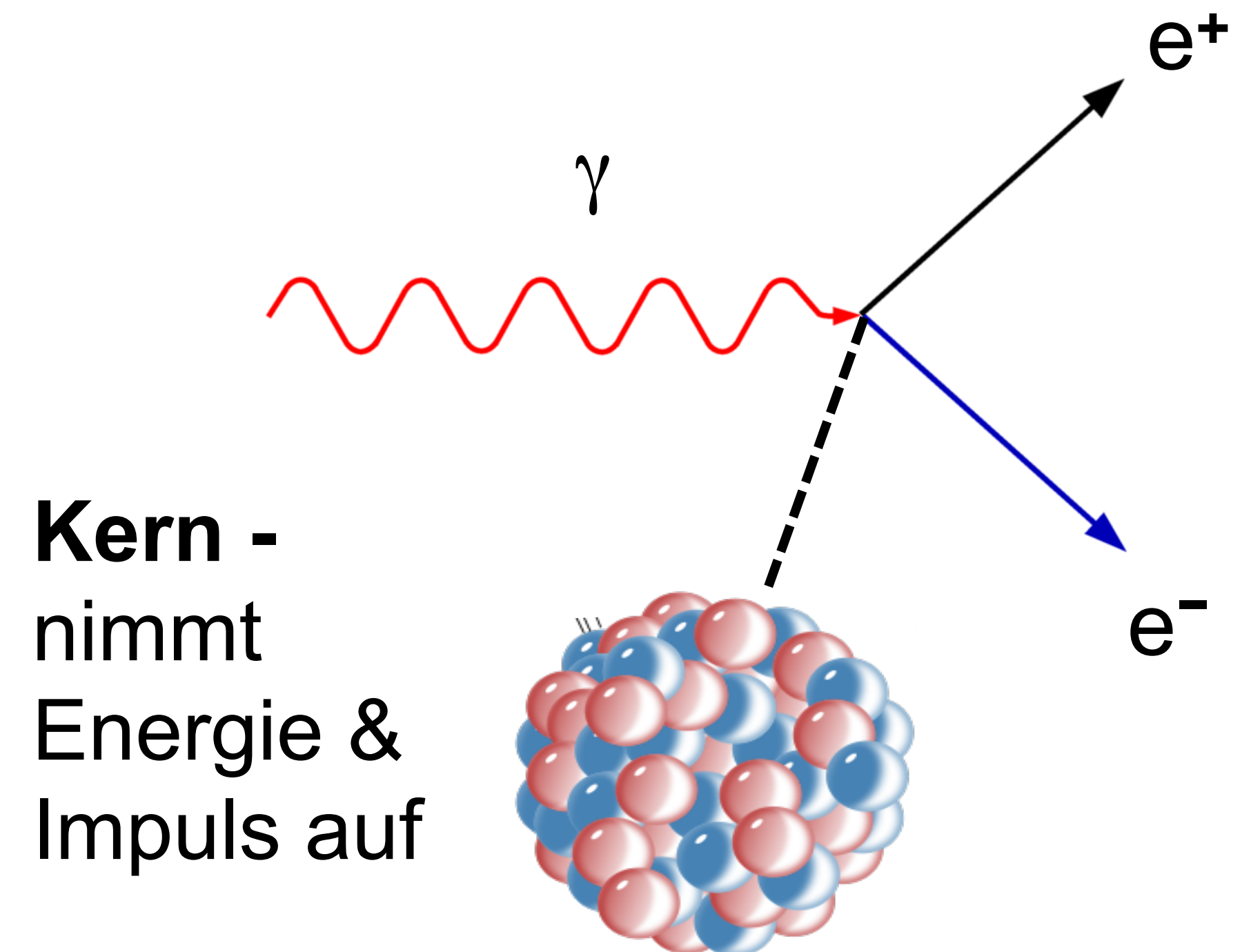
■ Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares im Coulomb-Feld des Kerns

- Schwellen-Energie E_{thres} :

$$E_{\text{thres}} = 2 \cdot m_e + O\left(\frac{m_e^2}{M_{\text{Kern}}}\right) = 1,02 \text{ MeV}$$

- Kern nimmt **Energie-Impuls Mismatch** von Gamma und e^-/e^+ auf
 $\Rightarrow$ Rückstoß des Kerns

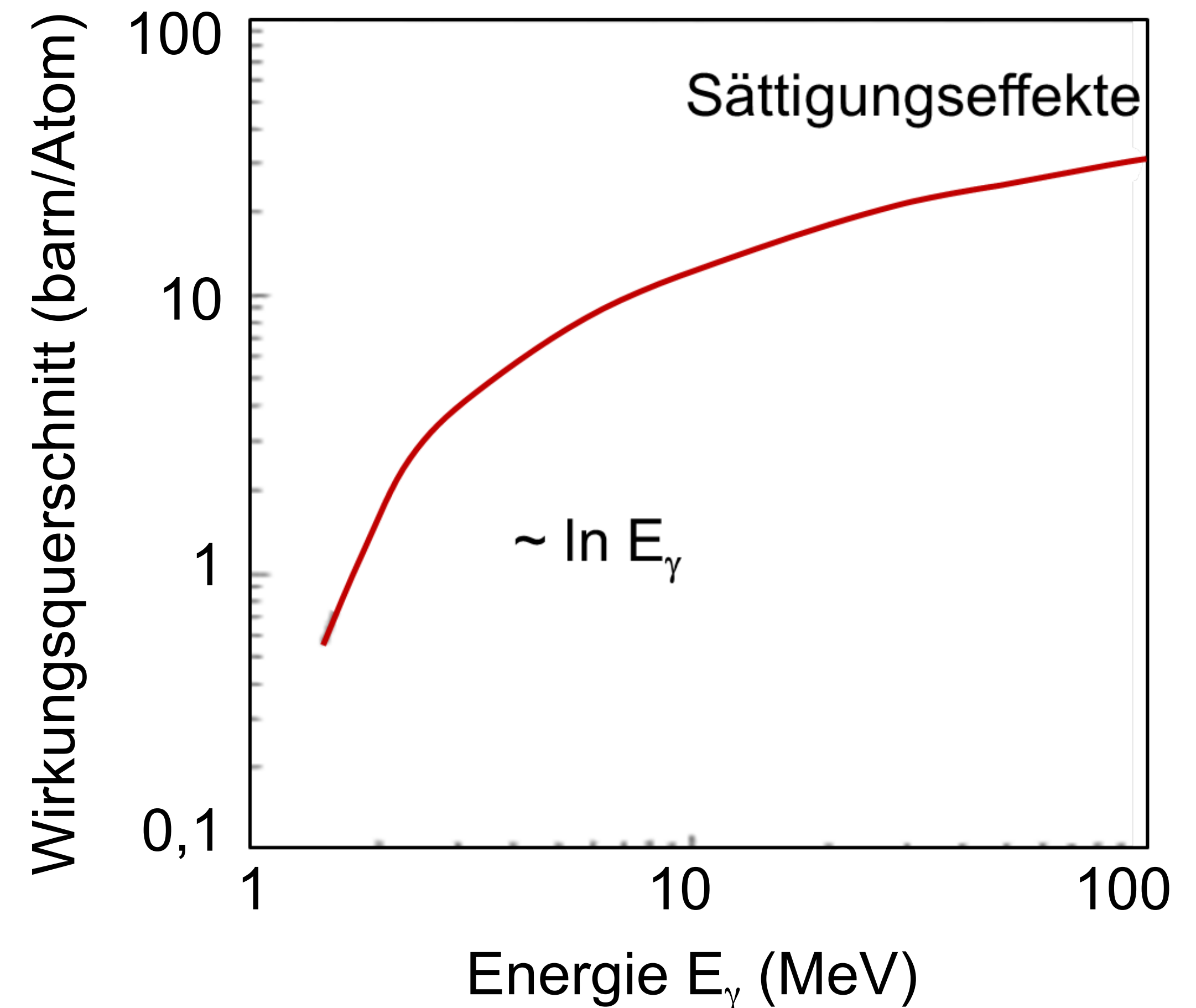
- falls $E_\gamma > E_{\text{thres}}$:
Überschussenergie geht in die kinetische Energie des e^-/e^+ Paares



Paarbildung: dominant bei hohen Energien

■ Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares im Coulomb-Feld des Kerns

- Schwellen-Energie E_{thres}
- Kern nimmt **Energie-Impuls *Mismatch*** von Gamma und e^-/e^+ auf
⇒ Rückstoß des Kerns
- falls $E_\gamma > E_{\text{thres}}$:
Überschussenergie geht in die kinetische Energie des e^-/e^+ Paares



Paarbildung: FERMI-Gammateleskop

- GeV-Gammastrahlung aus dem Universum: e^+e^- Erzeugung in W-Folien*

einzelner Turm

γ -Konversion
(16 W-Folien)

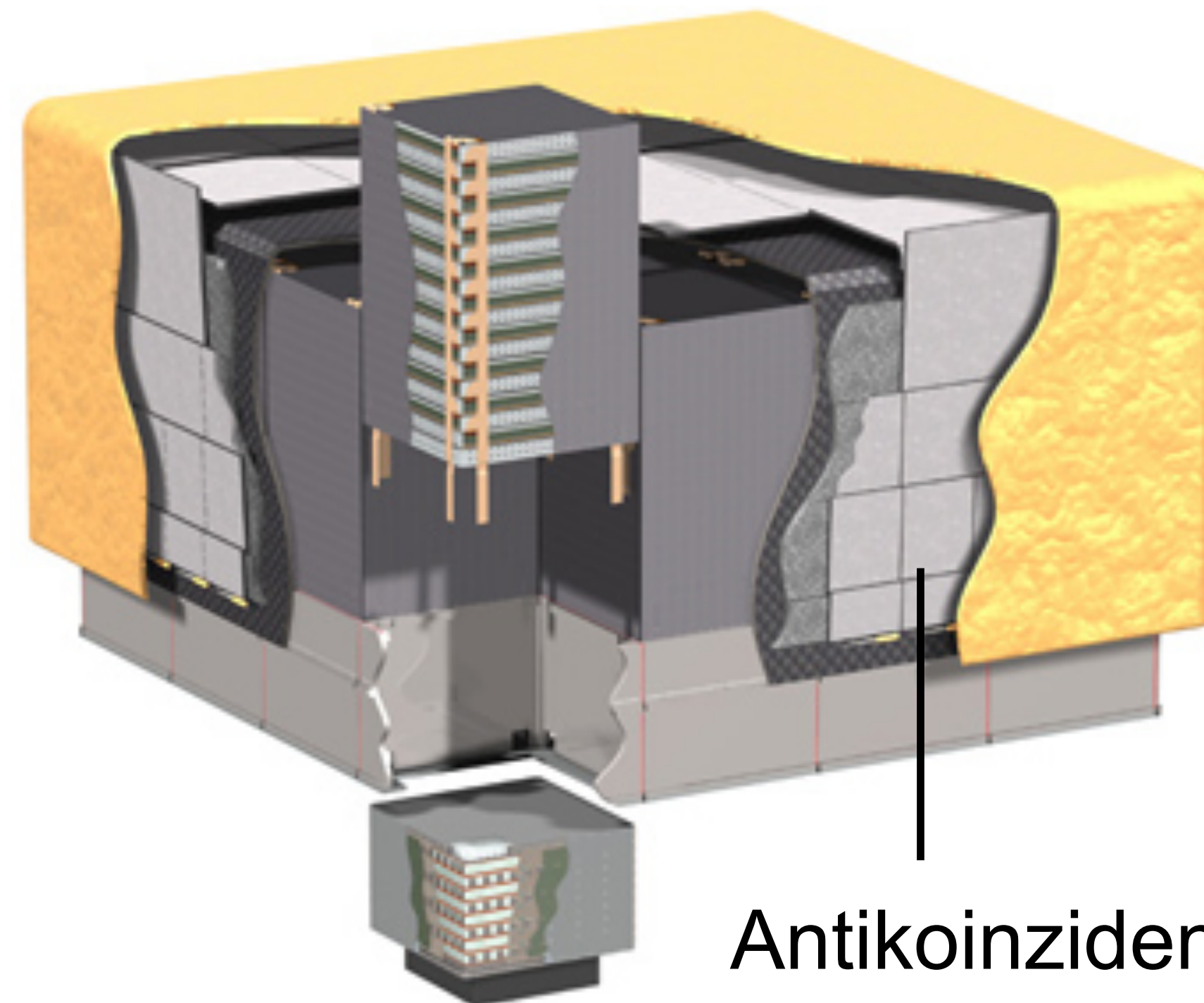
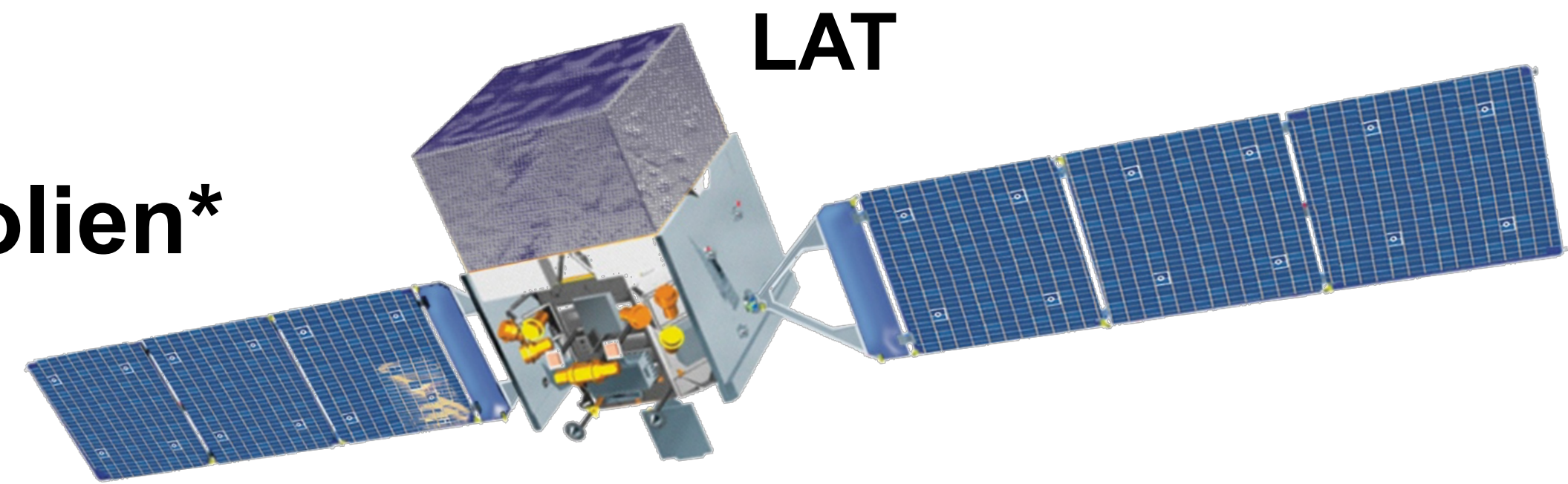
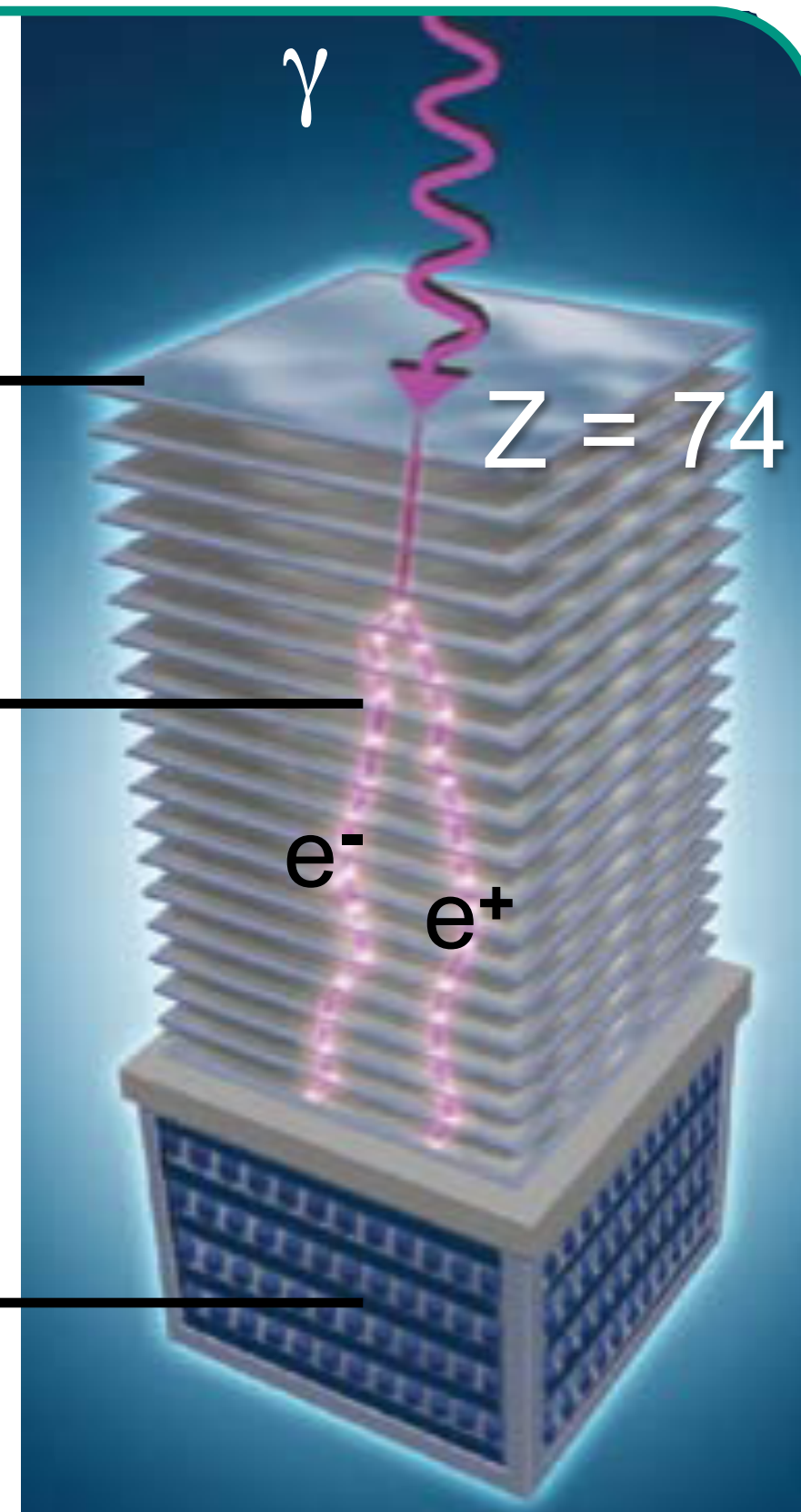
Si-Strips
(Spuren)

Gamma-Richtung

Kalorimeter ($8,6 X_0$)

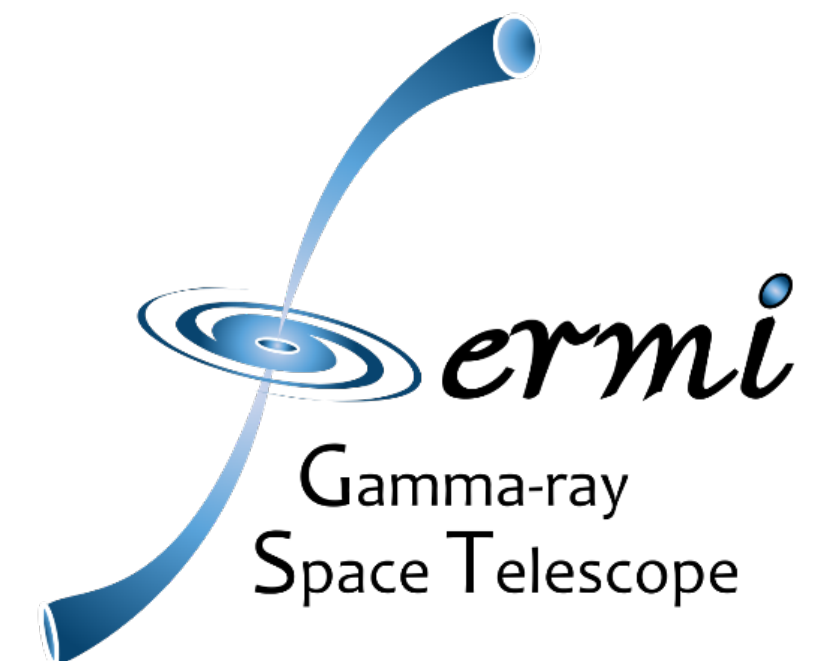
CsJ-Kristalle

Gamma-Energie



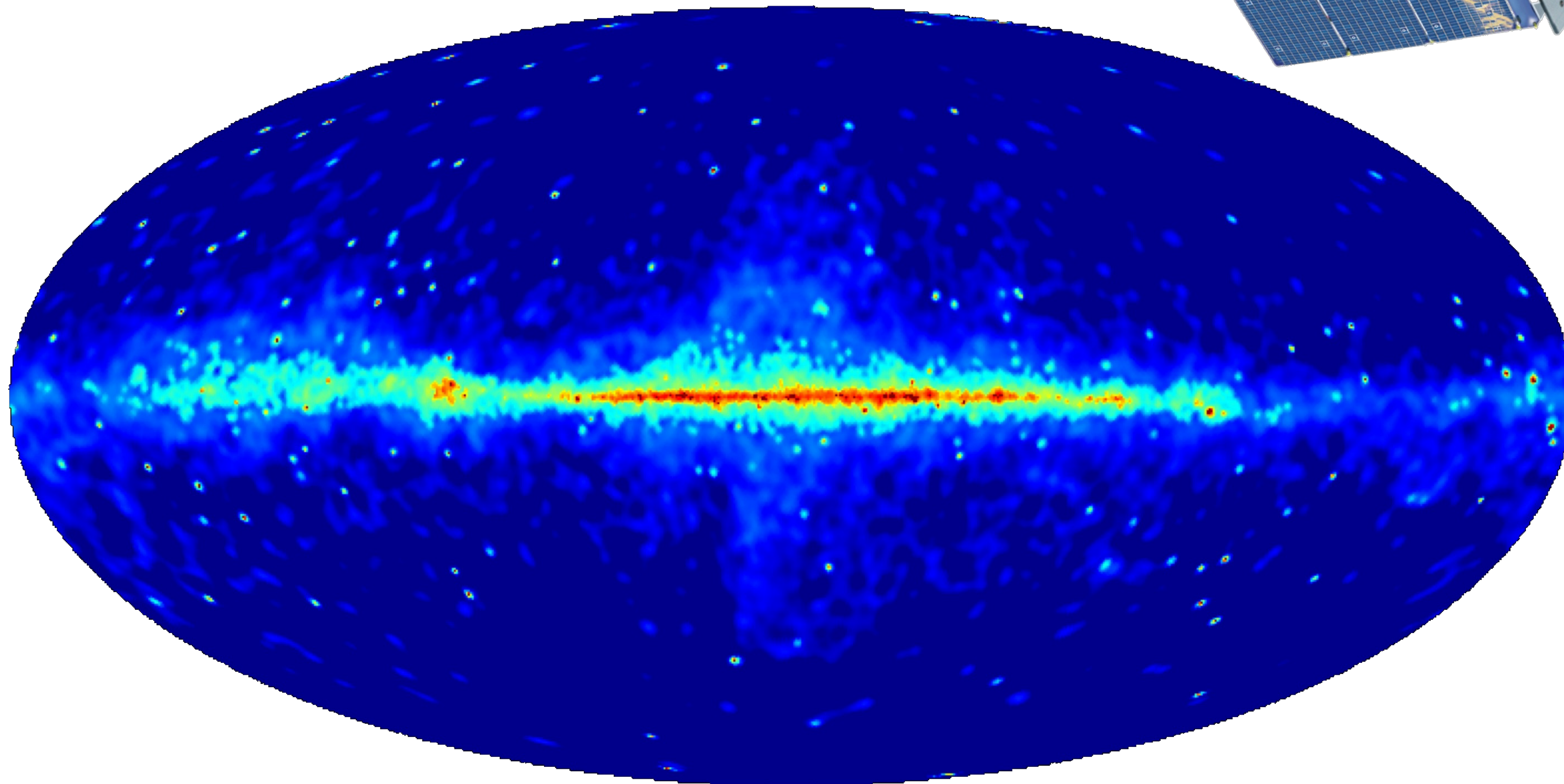
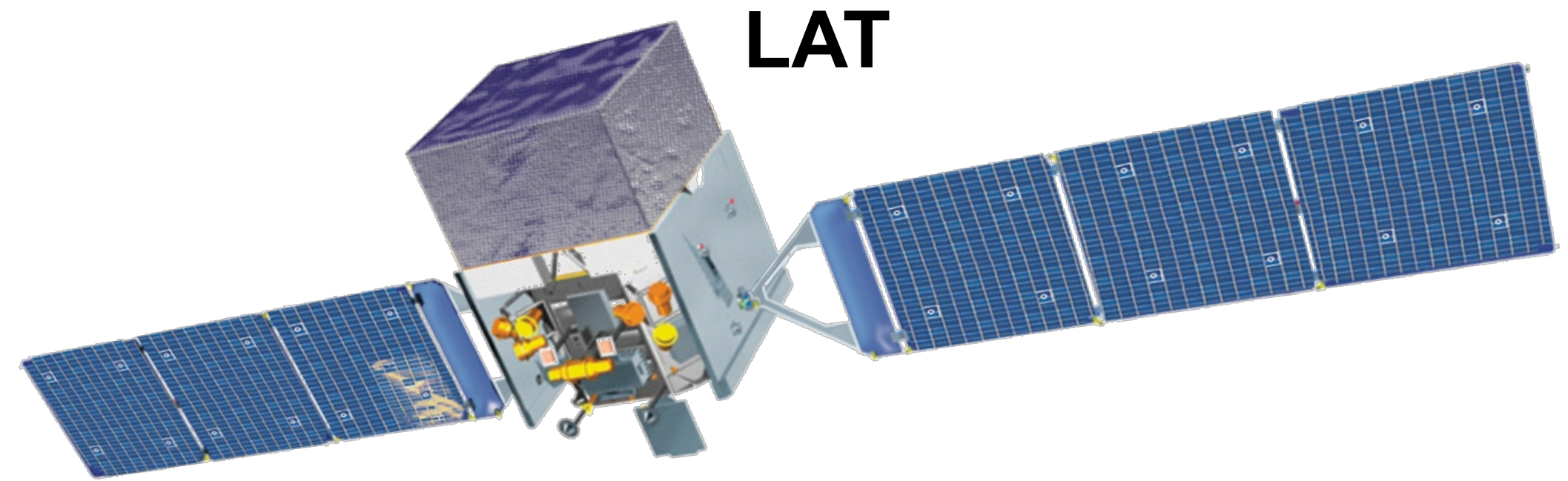
**Large
Area
Telescope**

Antikoinzidenz

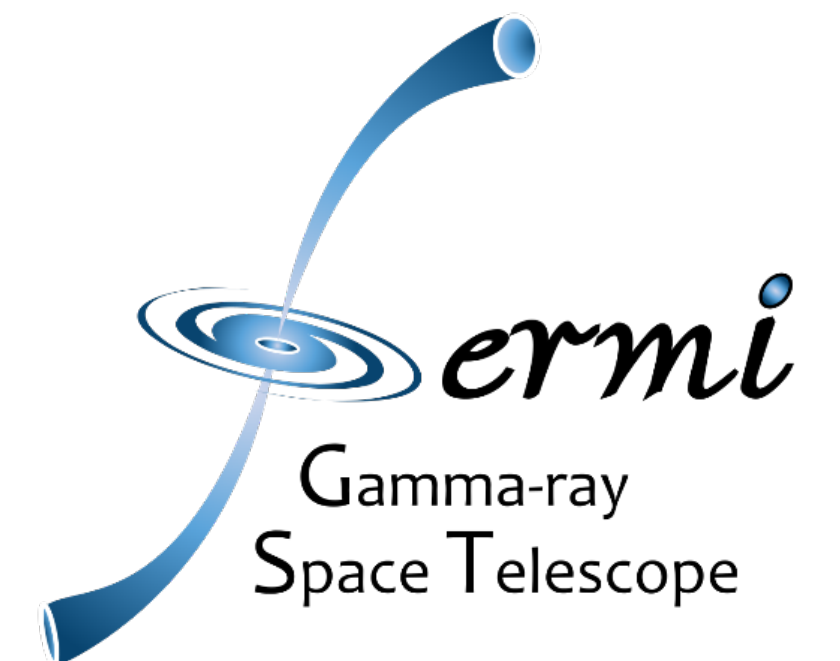


Paarbildung: FERMI-Gammateleskop

- GeV-Gammastrahlung aus der Ebene der Milchstraße



Large
Area
Telescope



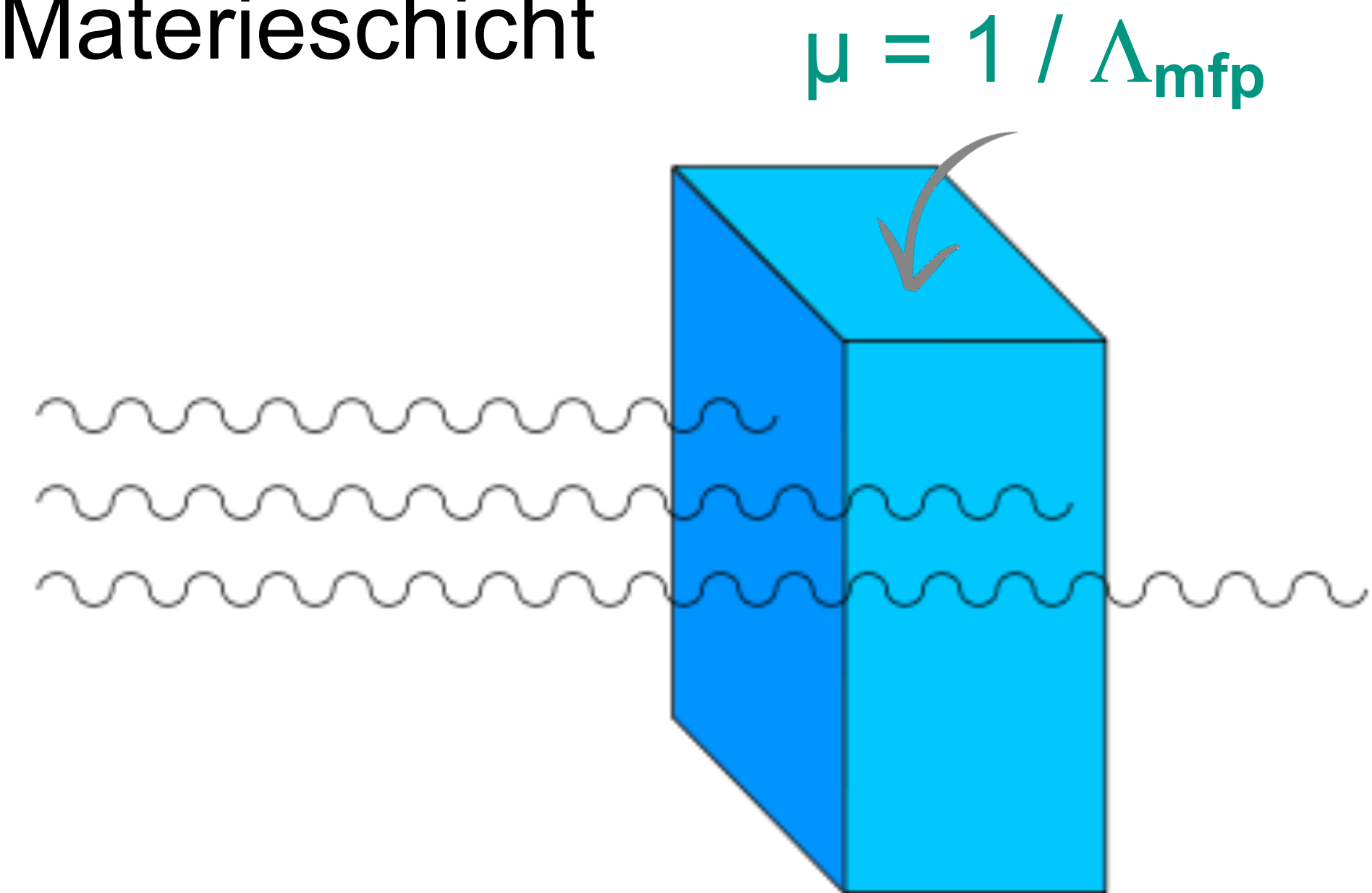
■ Exponentielle Abschwächung von Gammastrahlung in Materie

- Gammastrahlung mit Intensität I_0 treffe auf eine Materieschicht (mit Dicke x und der Massenbelegung $X = \rho \cdot x$):
 $\Rightarrow$ Strahlung wird **exponentiell** abgeschwächt

$$\begin{aligned} I(x) &= I_0 \cdot e^{-\mu \cdot X} \\ &= I_0 \cdot e^{-\mu \cdot (x \cdot \rho)} \end{aligned}$$

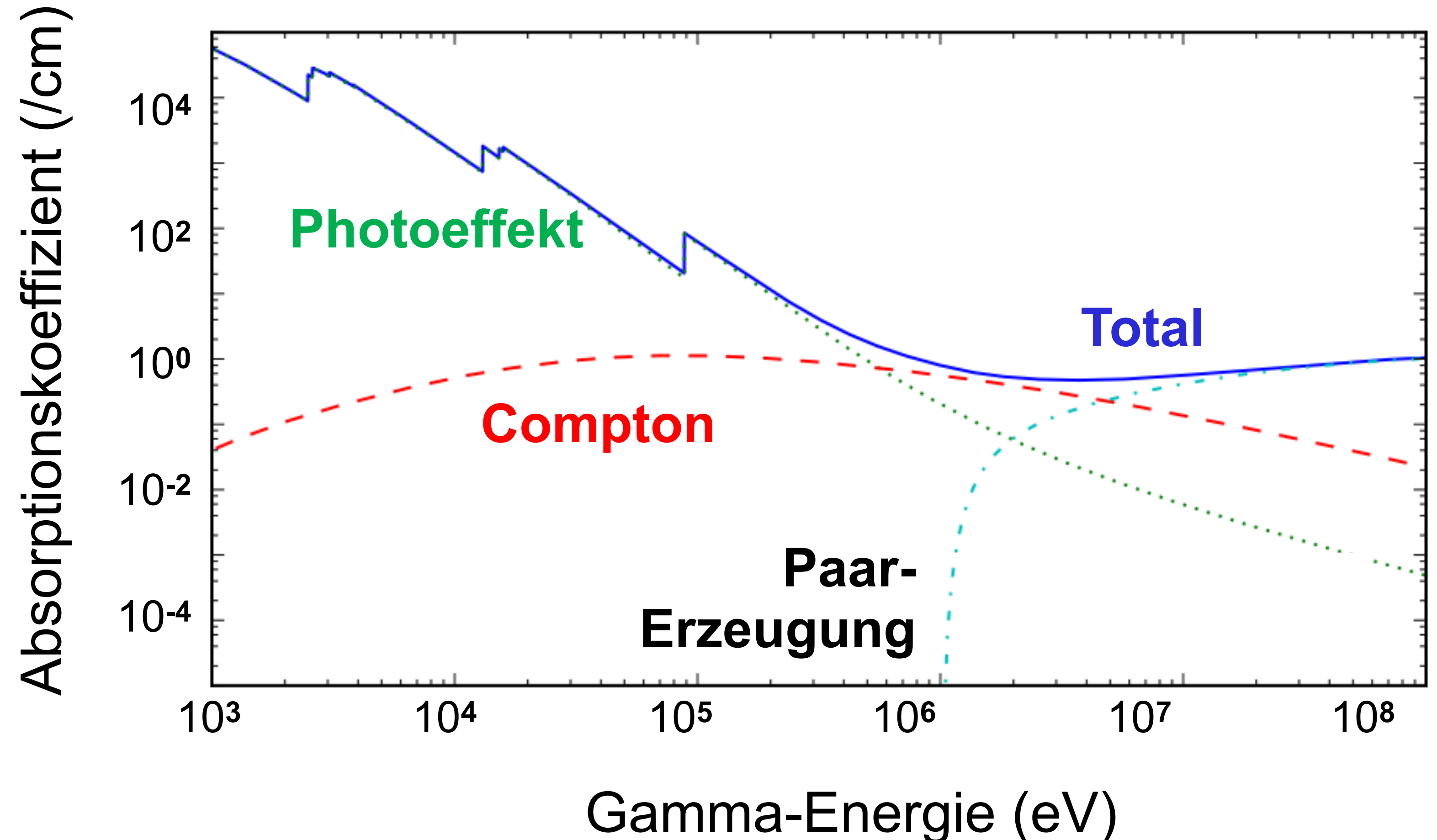
- Einheit von $\mu = [\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$
- **$\mu = \Lambda_{\text{mfp}}^{-1}$**
= inverse freie γ -Weglänge

- $\mu = n \cdot \sigma_\gamma$
mit $n = \#$ der Streuzentren / g
 $[\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$

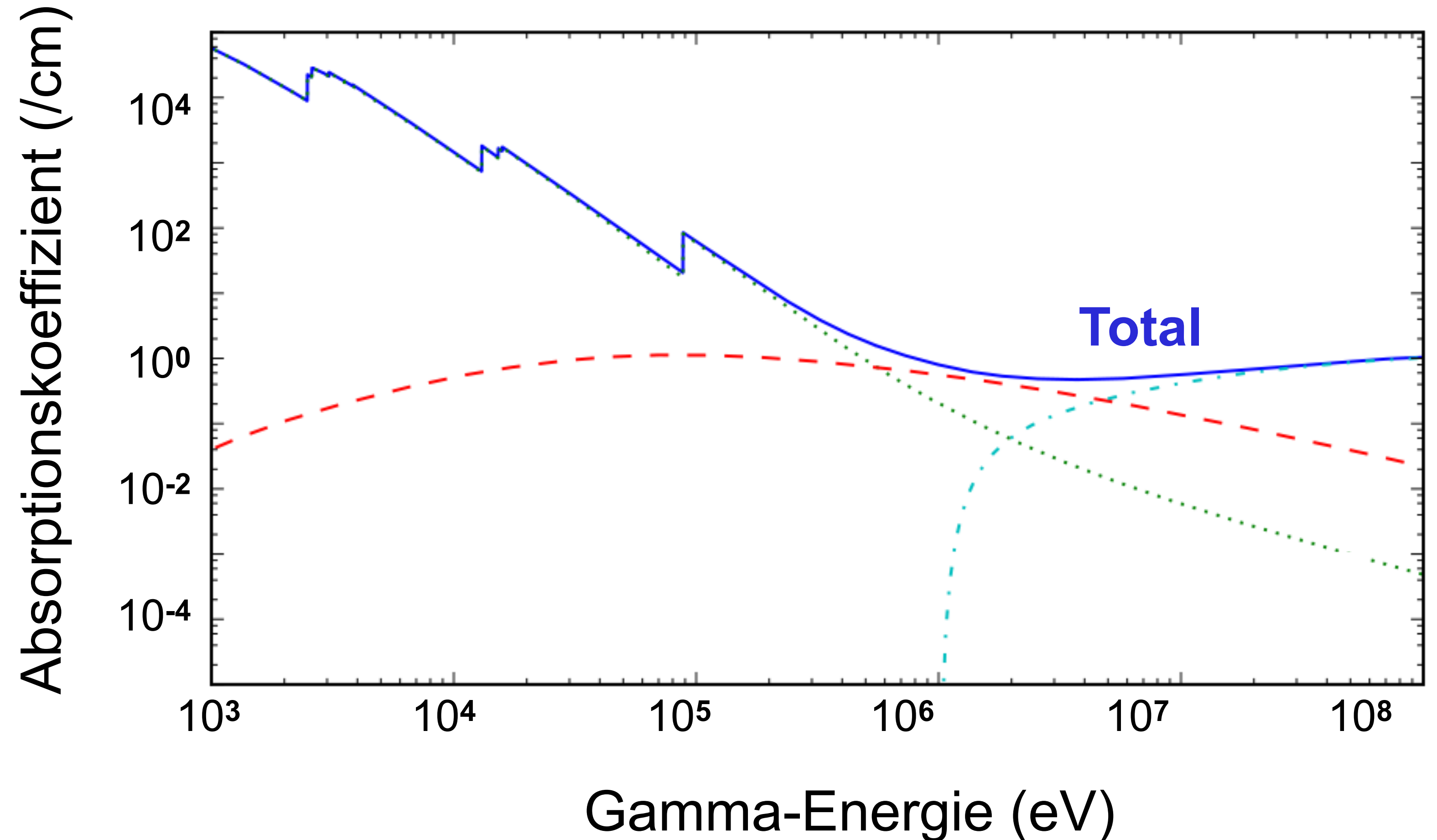
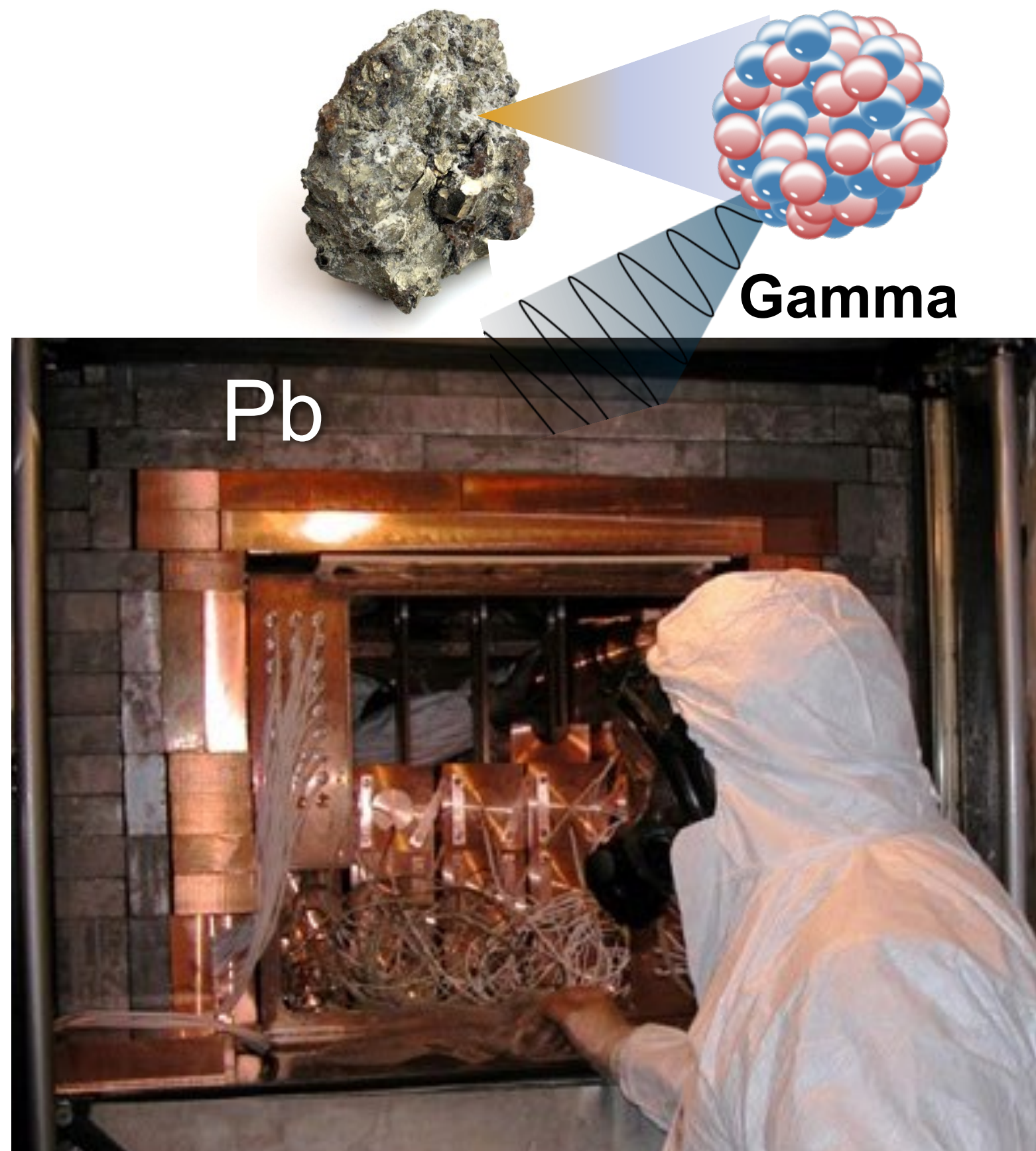


■ Energieabhängige Wirkungsquerschnitte von Gammas: 1 keV...100 MeV

- **Energien < 0.1 MeV**
Photoeffekt
hohe γ -Abschwächung
- **Energien ~ 1 MeV**
Comptoneffekt
kleine γ -Abschwächung
- **Energien > 10 MeV**
Paarbildung
kleine γ -Abschwächung

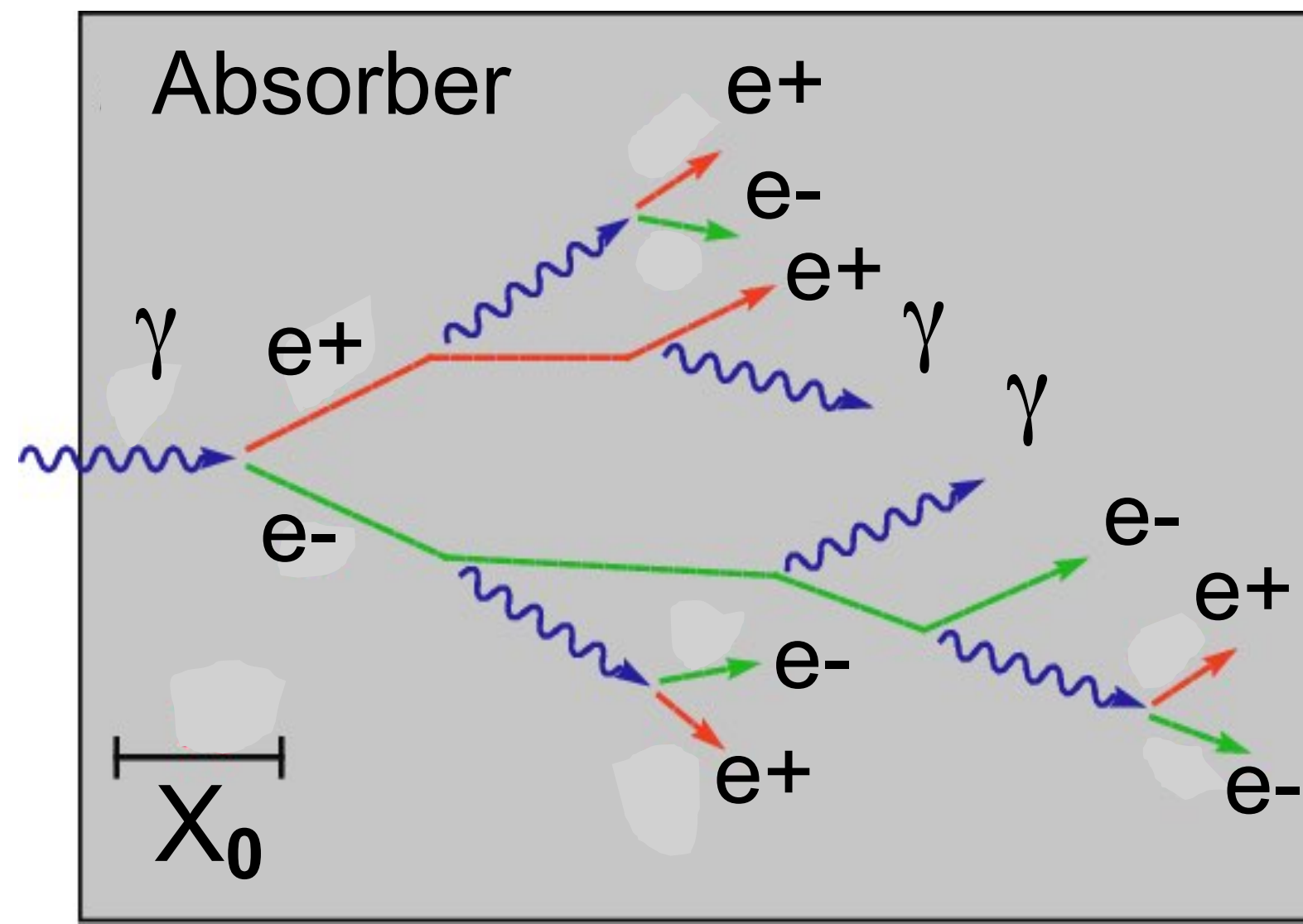


- Abschirmung von Experimenten zur Suche nach seltenen Prozessen*



■ Initiierung durch hochenergetische Gammas / Elektronen

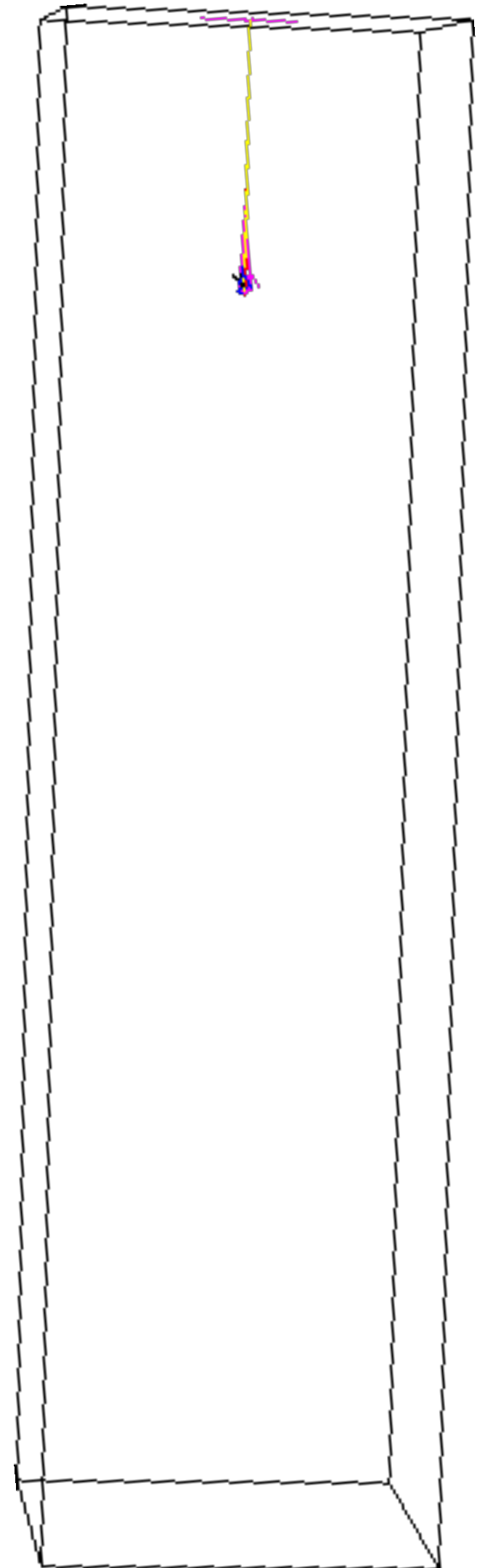
- primäres hochenergetisches Photon: $e^+ e^-$ Paarbildung
- primäres hochenergetisches Elektron: Bremsstrahlung
- Kaskadenprozess: **Paarbildung** $\leftrightarrow$ **Bremsstrahlung**



Q: nach aanda.org

Heitler-Modell:

- Anwachsen der Teilchenzahl (Generation)
- mittlere Energie pro Teilchen nimmt ab
- Erzeugung zahlreicher Sekundärteilchen: niederenergetische e^- , e^+ und Photonen
- Schauer stirbt aus sobald **$E < E_c$**



Q: MPG

- beim Nachweis von **GeV** e⁻, e⁺ und γ : zentrale Größe = Strahlungslänge X_0

- Elektronen

$$E(x) = E_0 \cdot e^{-\frac{x}{X_0}}$$

nach einer **Absorberdicke** $X = X_0$
ist die Energie hoch-relativistischer
Elektronen auf **1/e** abgefallen

- Photonen

$$\lambda_{\text{paar}} = \frac{9}{7} \cdot X_0$$

nach λ_{paar} noch
1/e der Gammas

$$\mu = \frac{7}{9} \cdot \frac{1}{X_0}$$

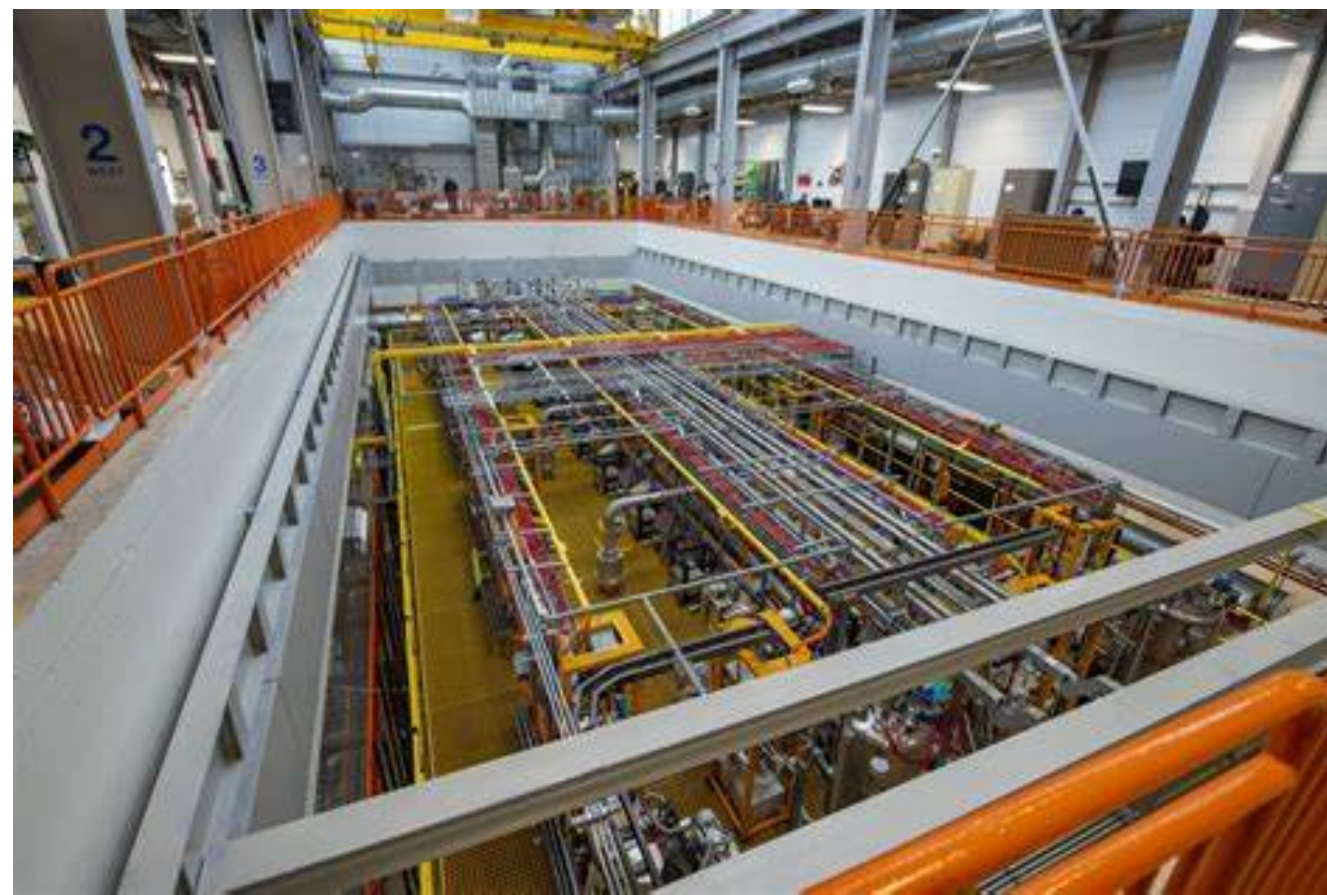
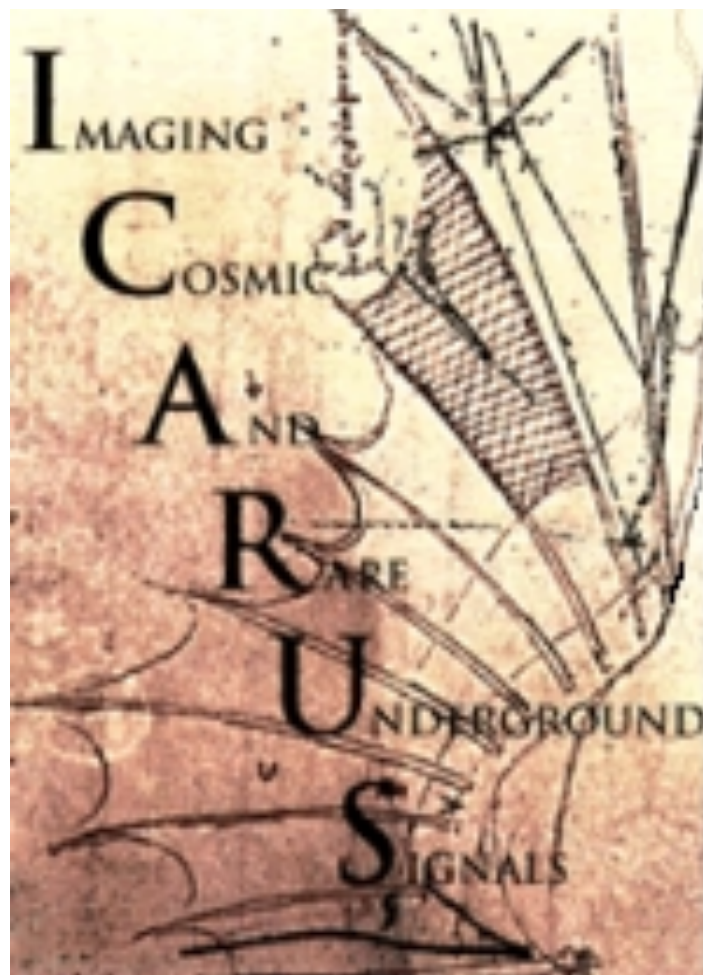
Massenabsorption
 $\mu = 1 / \lambda_{\text{paar}}$

$$I(X_0) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot X_0} = I_0 \cdot e^{-7/9} = 0,46$$

nach **Absorberdicke** $X = X_0$ ist die
 γ -Intensität auf **$\sim 1/2$** abgefallen

Elektromagnetische Schauer: Beispiele

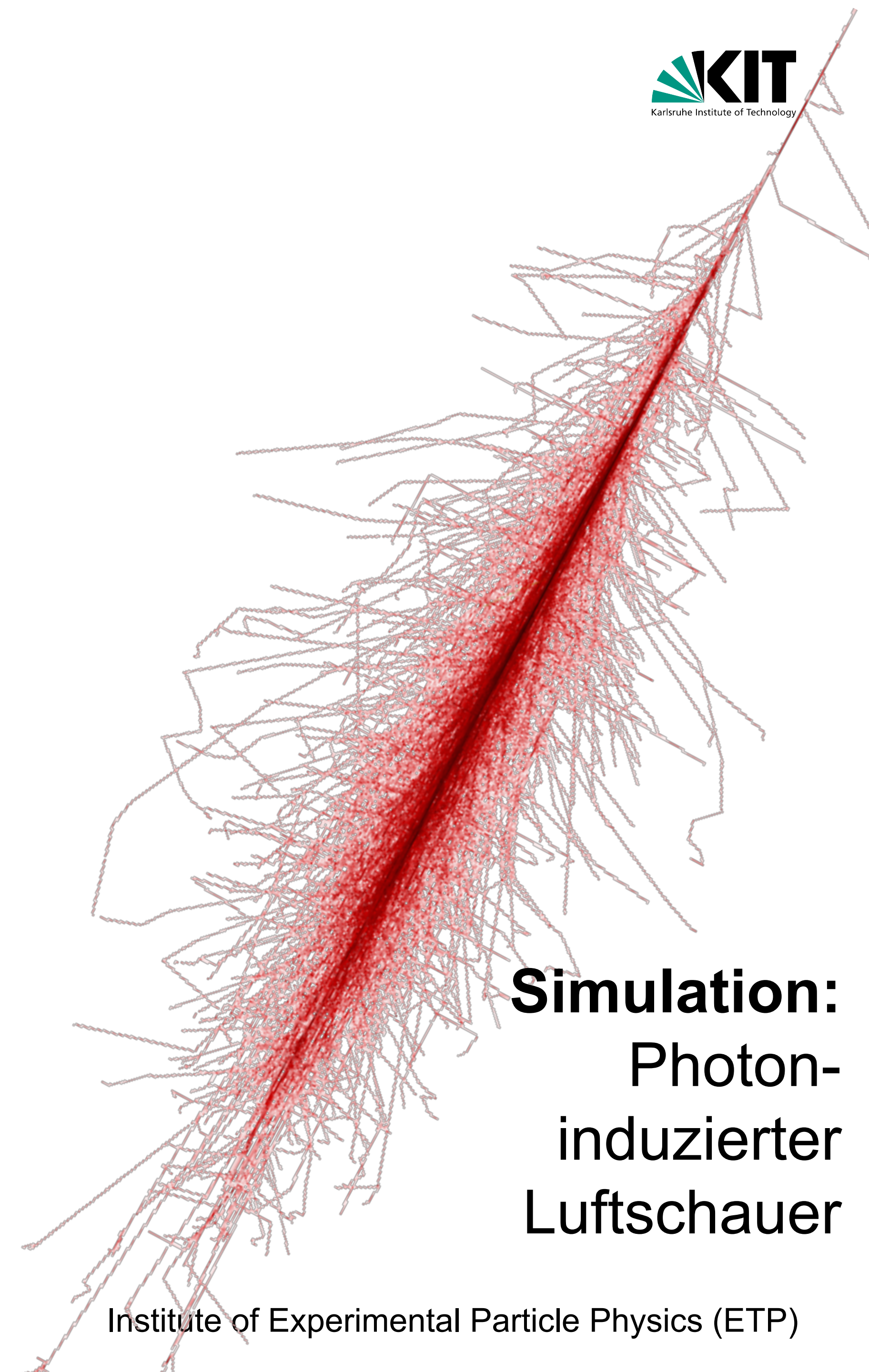
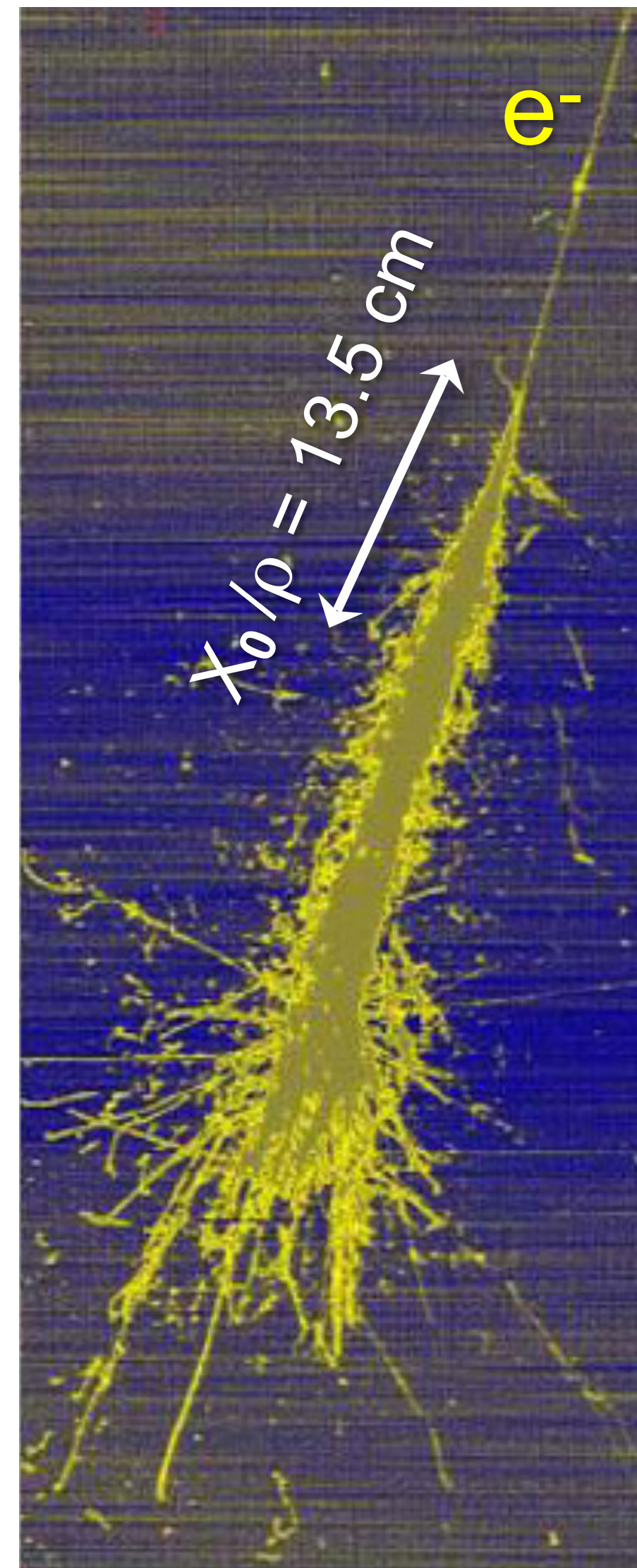
■ Schauer im Experiment & in MC-Simulationen



ICARUS-Experiment:

ν -induzierter Teilchenschauer in einem **Flüssig-Argon Kalorimeter** – Wechselwirkung eines primären e^-

Q: ICARUS

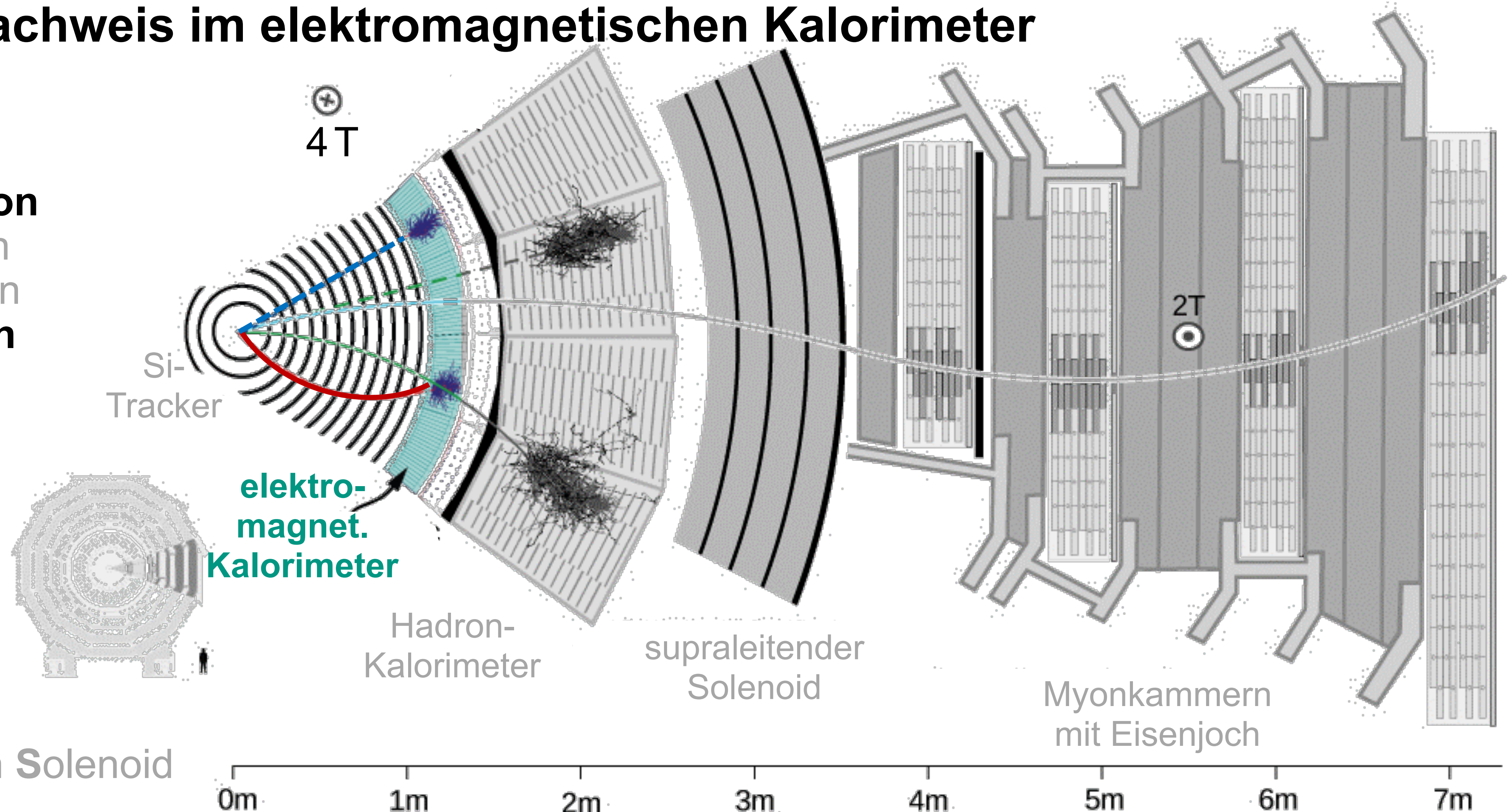


Simulation:
Photon-
induzierter
Luftschauer

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

■ Schauernachweis im elektromagnetischen Kalorimeter (ECAL)

- Myon
- Elektron**
- Hadron
- Neutron
- Photon**



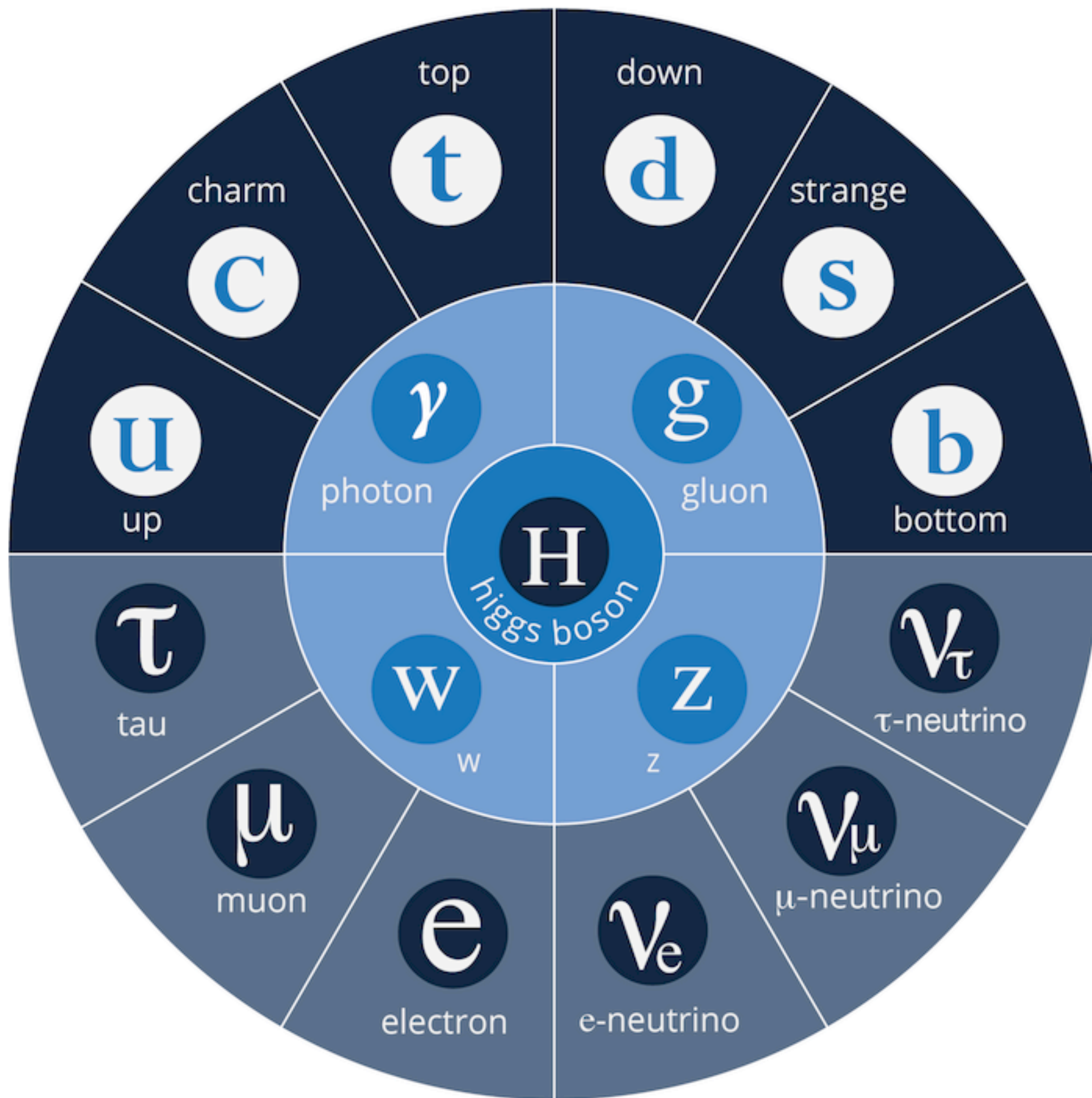
CMS-
Compact Muon Solenoid

Q: CMS

Katzenpause

■ Olivia und Tintin





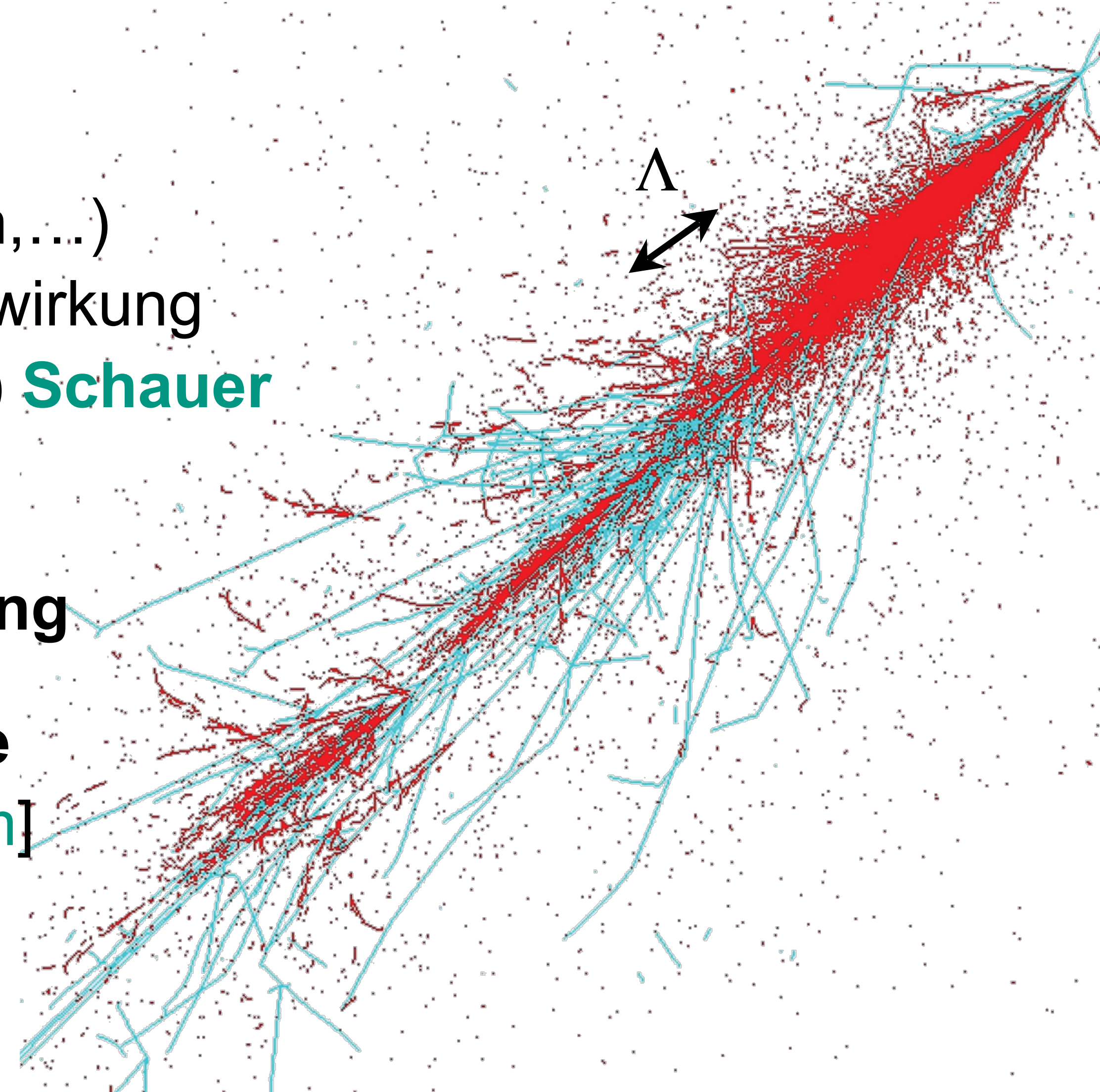
■ 2. Experimentelle Methoden

- 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
- 2.2. Energieverlust von Elektronen
- 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahlung
- 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
- 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
- 2.6. Nachweistechniken
- 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
- 2.8. Teilchenbeschleuniger

■ Wechselwirkung von Hadronen in Materie

- **alle** Hadronen (Protonen, Neutronen, Pionen,...) unterliegen Prozessen der **starken** Wechselwirkung
→ **hadronische** (und elektromagnetische) **Schauer**
- geladene Hadronen (Proton, π^+ , π^- , K^+ , K^-):
→ **& elektromagnetische Wechselwirkung**
- Hadronen charakterisiert durch **hadronische Wechselwirkungslänge** Λ in [**g/cm²** bzw. **cm**]

komplexe hadronische Wechselwirkung eines
500 GeV Protons in Cu, modelliert in GEANT4



■ Wechselwirkung von Hadronen in Materie

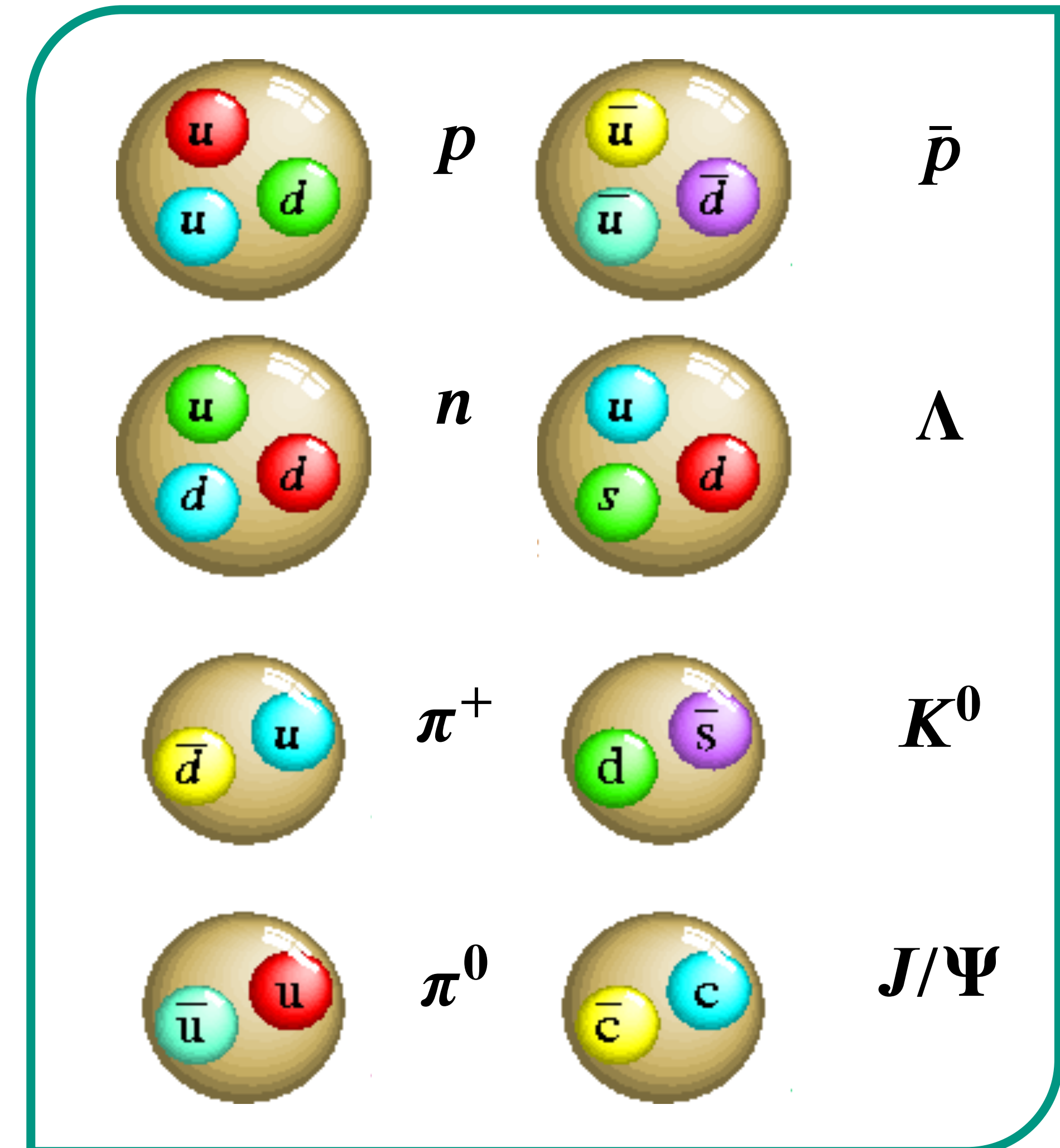
hadronische Wechselwirkungslänge Λ

= mittlere Länge für inelastische Streuung

$$\Lambda = \frac{1}{\sigma \cdot n}$$

σ : Kern-Wirkungsquerschnitt

n : Anzahl der Streuzentren
mit $n = N_A/A$

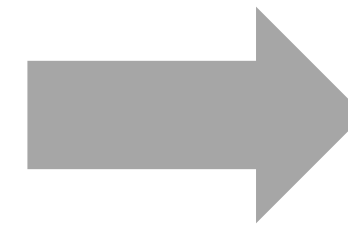
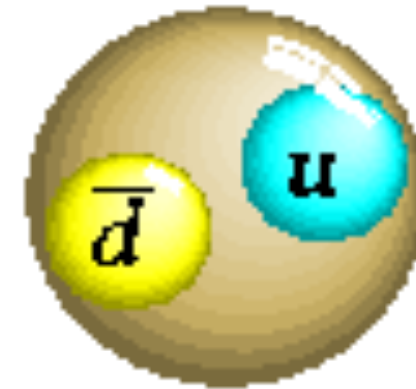


- Produktion **sekundärer Hadronen**, z.B. leichter Pionen: $m(\pi^+) \sim 140 \text{ MeV}$

- **Zerfallsreaktionen**, z.B. von Pionen

Erzeugung von

geladenes Pion π^+
 $\tau = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$

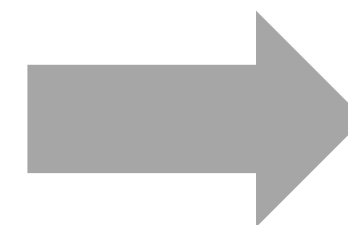
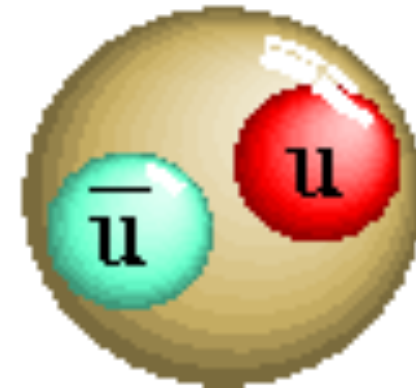


Myon μ^+
Myon-Neutrino ν_μ



m.i.p.

ungeladenes Pion π^0
 $\tau = 8,5 \cdot 10^{-17} \text{ s}$



2 Gammas ($\gamma + \gamma$)



elektromagnet.
sub-Kaskade

- **Kernreaktionen**: Anregung, Abregung, Spaltung, Spallation (n-Abdampfen),...

Hadronische Wechselwirkungslänge Λ

■ Intensitätsverlauf für hadronische Absorption

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-x/\Lambda}$$



Charakteristische Länge: Λ

Charakteristikum hadronischer Prozesse:

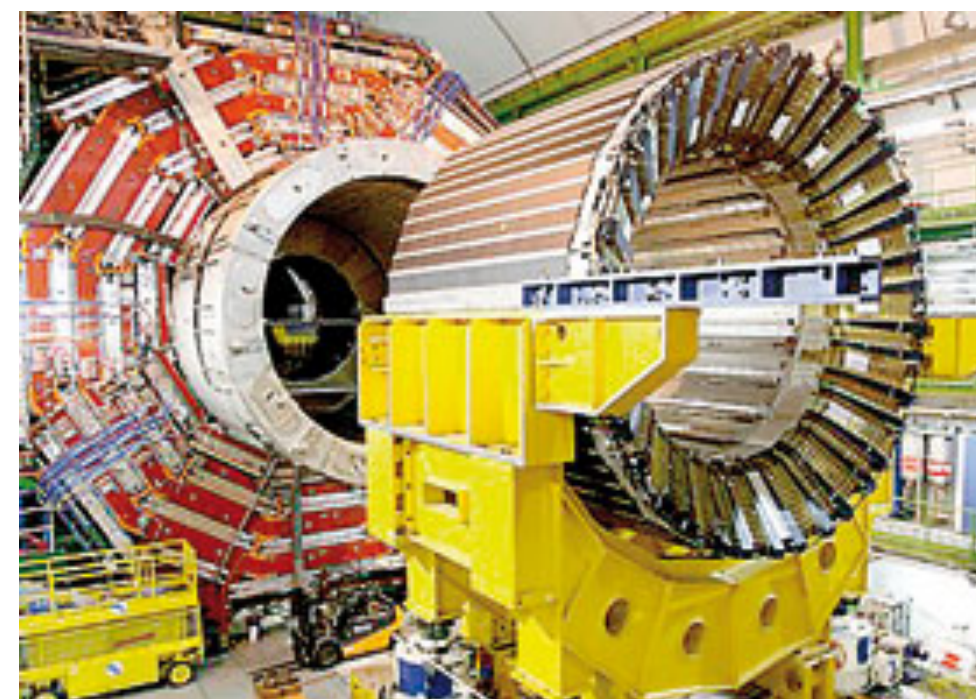
- Λ (Hadronen) ist wesentlich größer als X_0 (e^- , e^+ , γ)
- Beispiel: Erdatmosphäre entspricht: $25 X_0$
aber nur 11Λ
- starke Fluktuationen um Λ

Material	Λ (g cm ⁻²)	Λ / ρ (cm)	X_0 / ρ (cm)
H2 (gasförmig)	52,0	$6,21 \cdot 10^5$	$7,53 \cdot 10^5$
Wasser	83,3	83,3	36,08
Argon (flüssig)	119,7	85,77	14,0
Eisen	132,1	16,77	1,757
Blei	199,6	17,59	0,5612

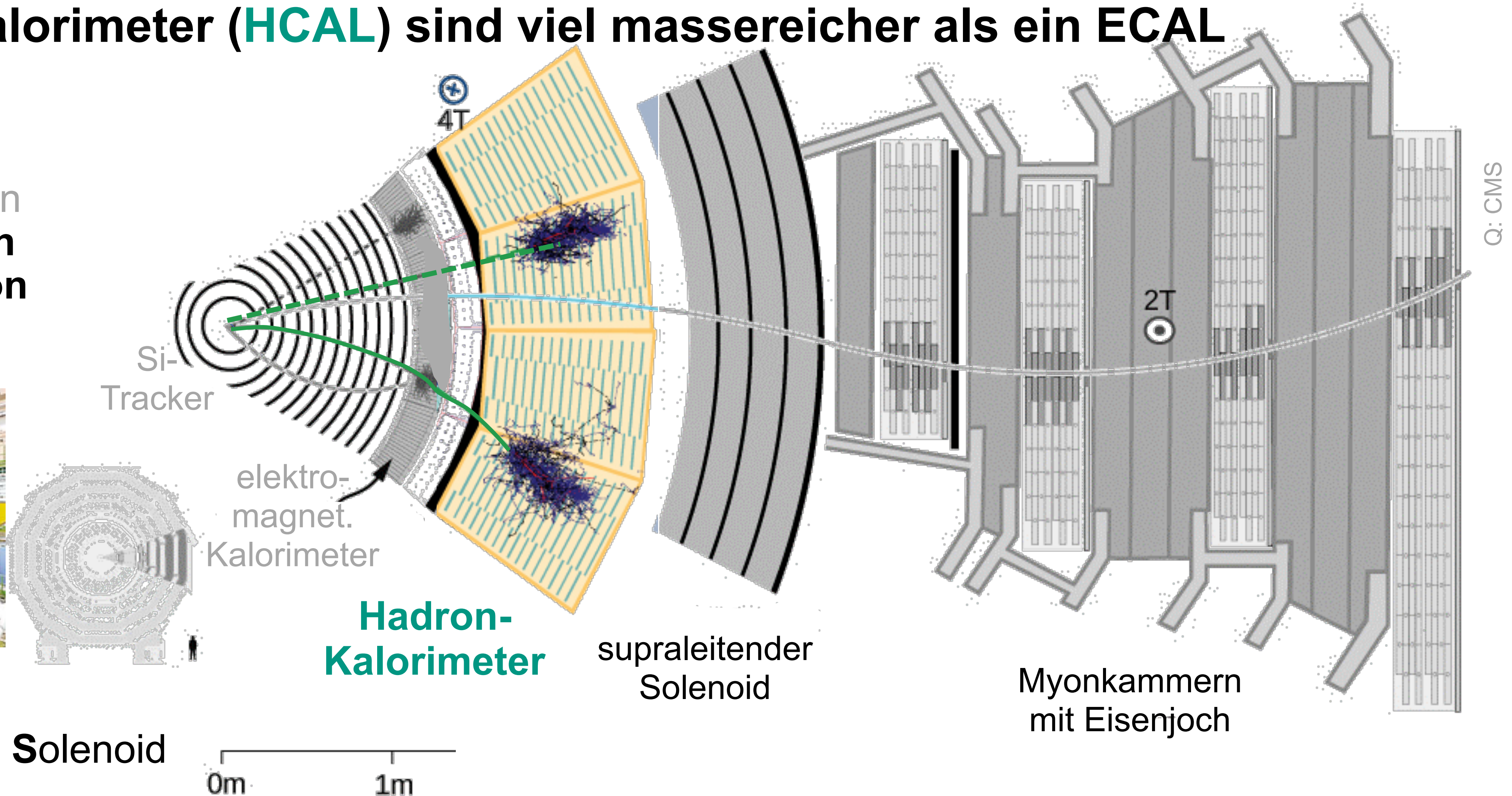
Hadron-Nachweis: Hadronische Kalorimeter

- Hadron-Kalorimeter (**H**CAL) sind viel massereicher als ein ECAL

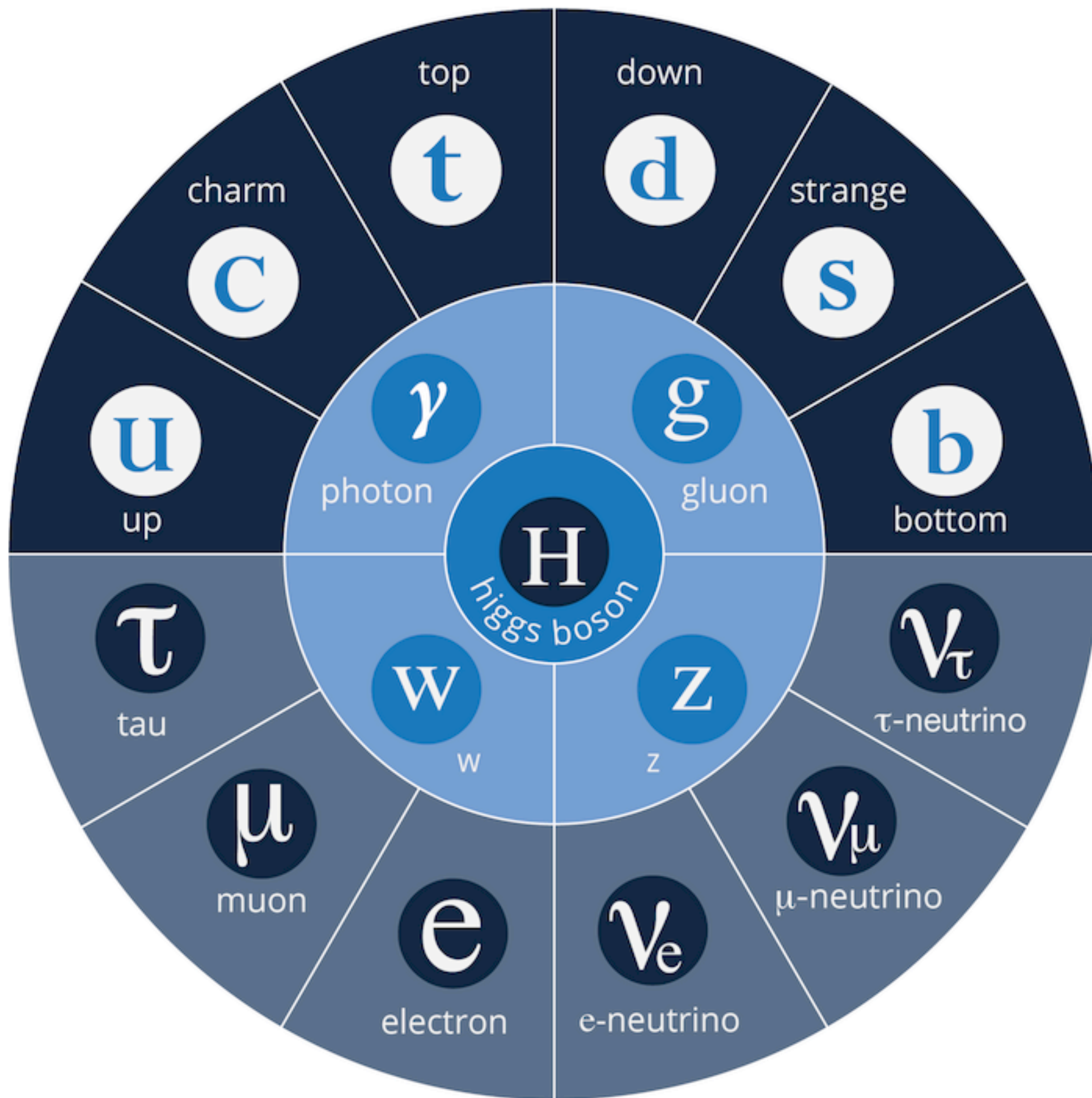
— Myon
— Elektron
— **Hadron**
- - - Neutron
... Photon



**CMS-
Compact Muon Solenoid**



- Warum findet man in Collider-Experimenten das hadronische Kalorimeter “hinten” dem elektromagnetischen?
 - A) Hadronen haben eine größere Masse als Leptonen
 - B) Hadronen müssen bevor sie Wechselwirken zunächst aufgebrochen werden
 - C) Die charakteristische elektromagnetische Wechselwirkungslängen sind deutlich kürzer als hadronische
 - D) Die charakteristische hadronische Wechselwirkungslängen sind deutlich kürzer als elektromagnetische
 - E) kein Ahnung

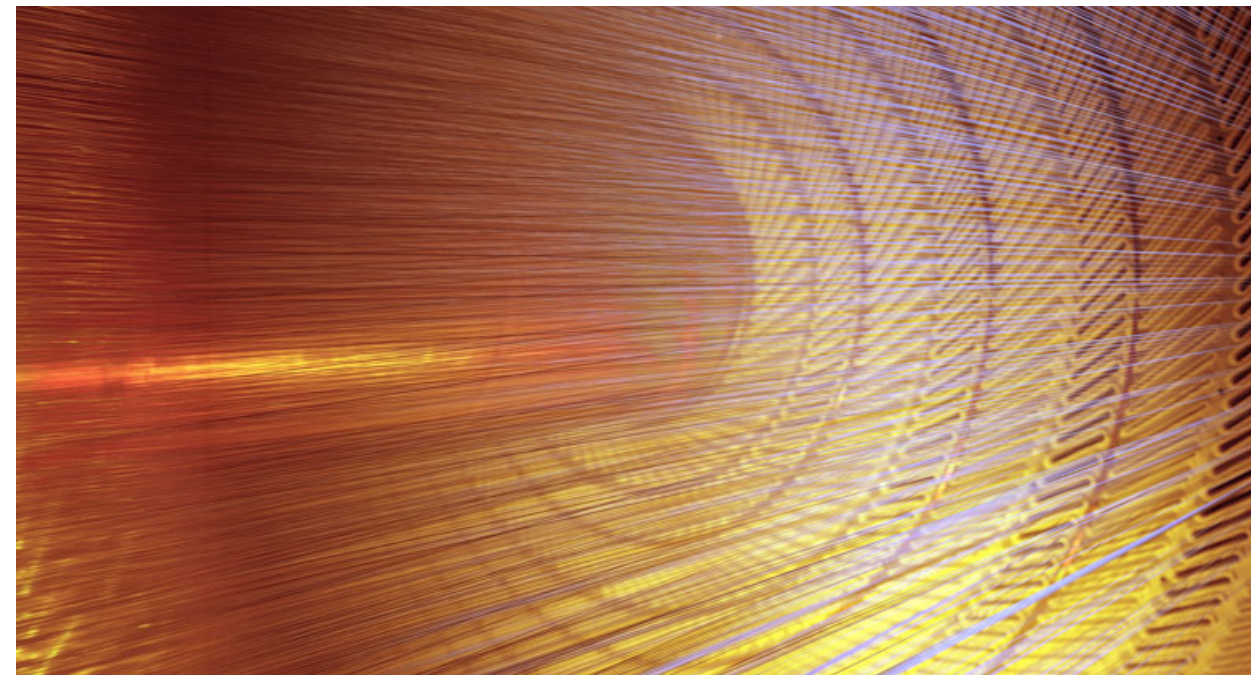


■ 2. Experimentelle Methoden

- 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
- 2.2. Energieverlust von Elektronen
- 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahlung
- 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
- 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
- **2.6. Nachweistechniken**
- 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
- 2.8. Teilchenbeschleuniger

Experimentelle Nachweistechniken: Übersicht

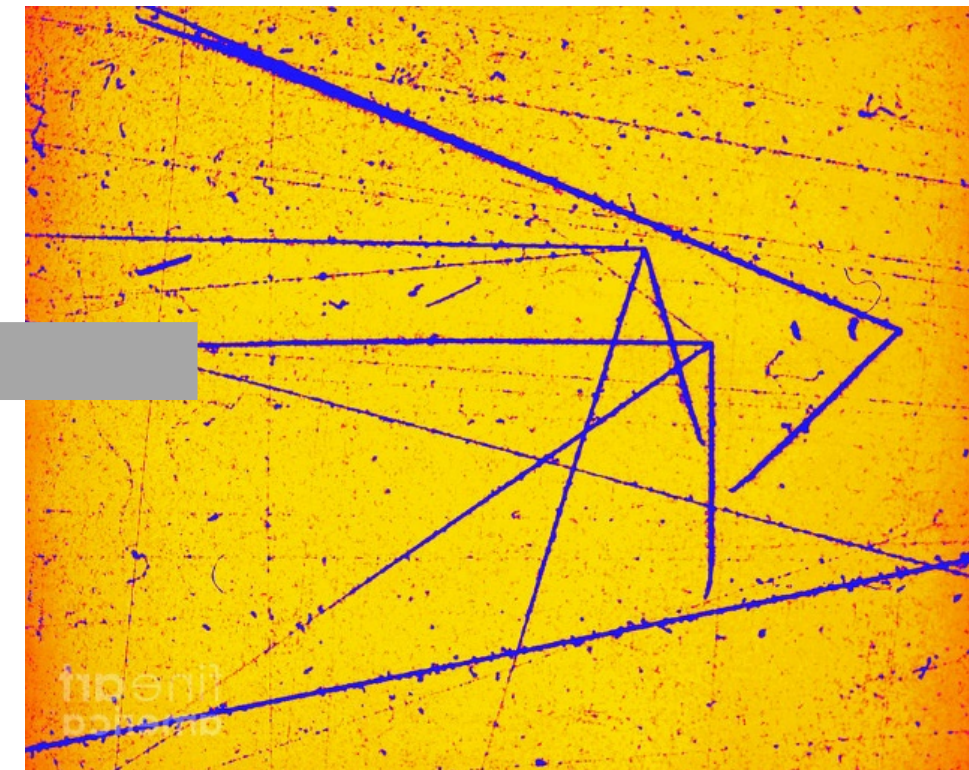
Violdrahtkammer, TPC



Szintillator

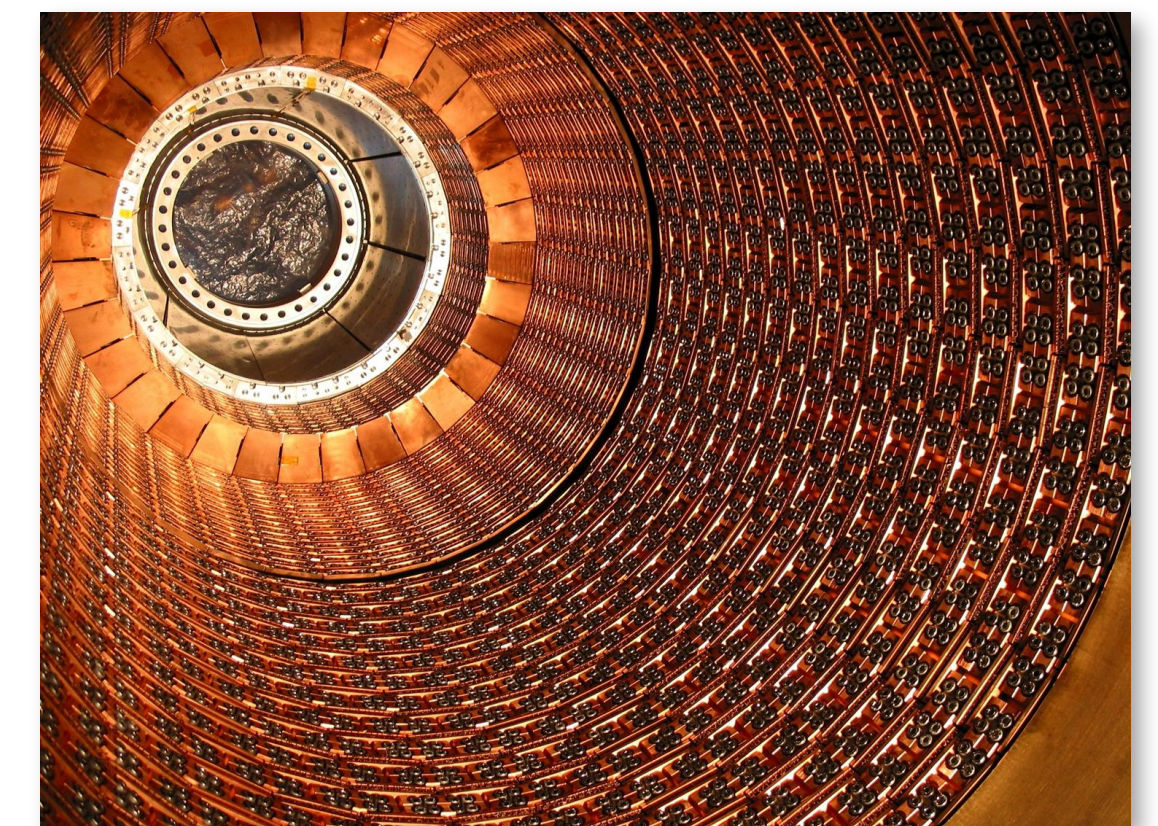
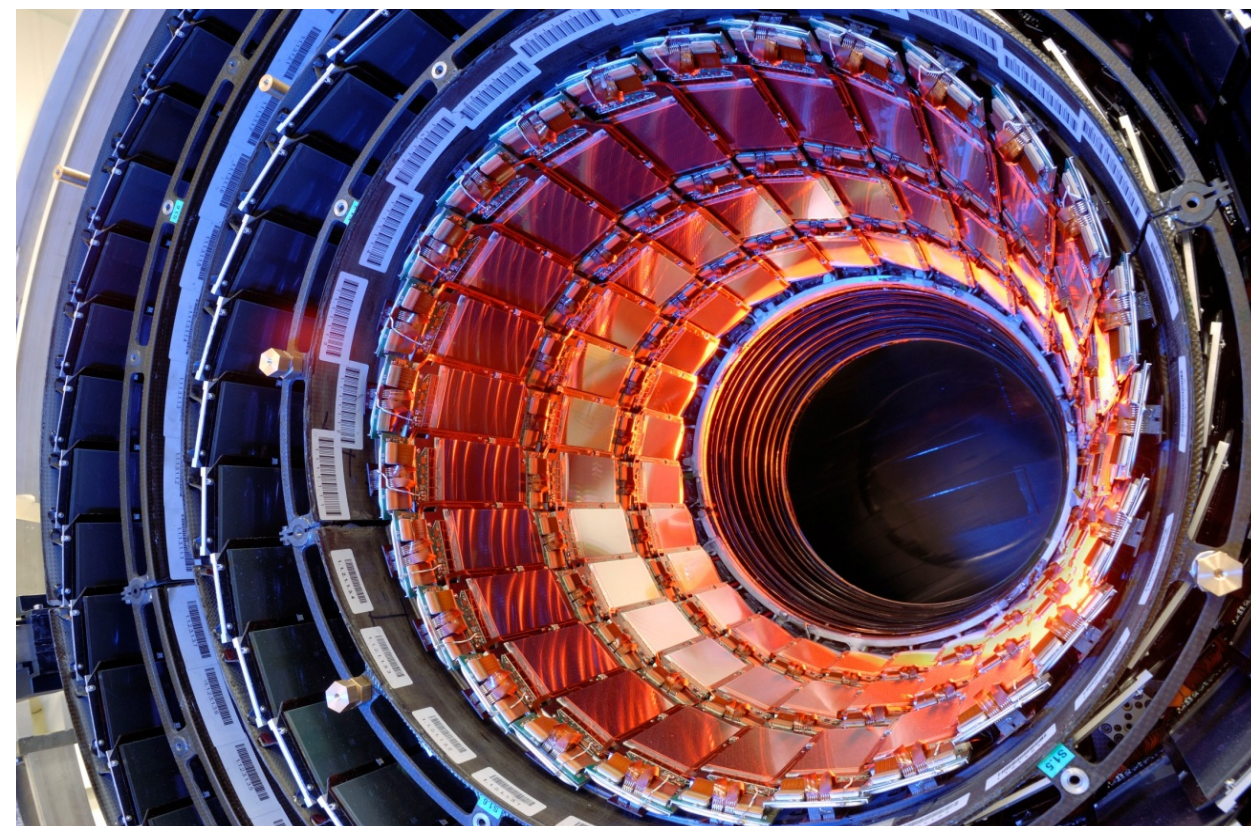


Nachweis



Ort x & Impuls p

Energie E



Si-Pixel-Detektoren

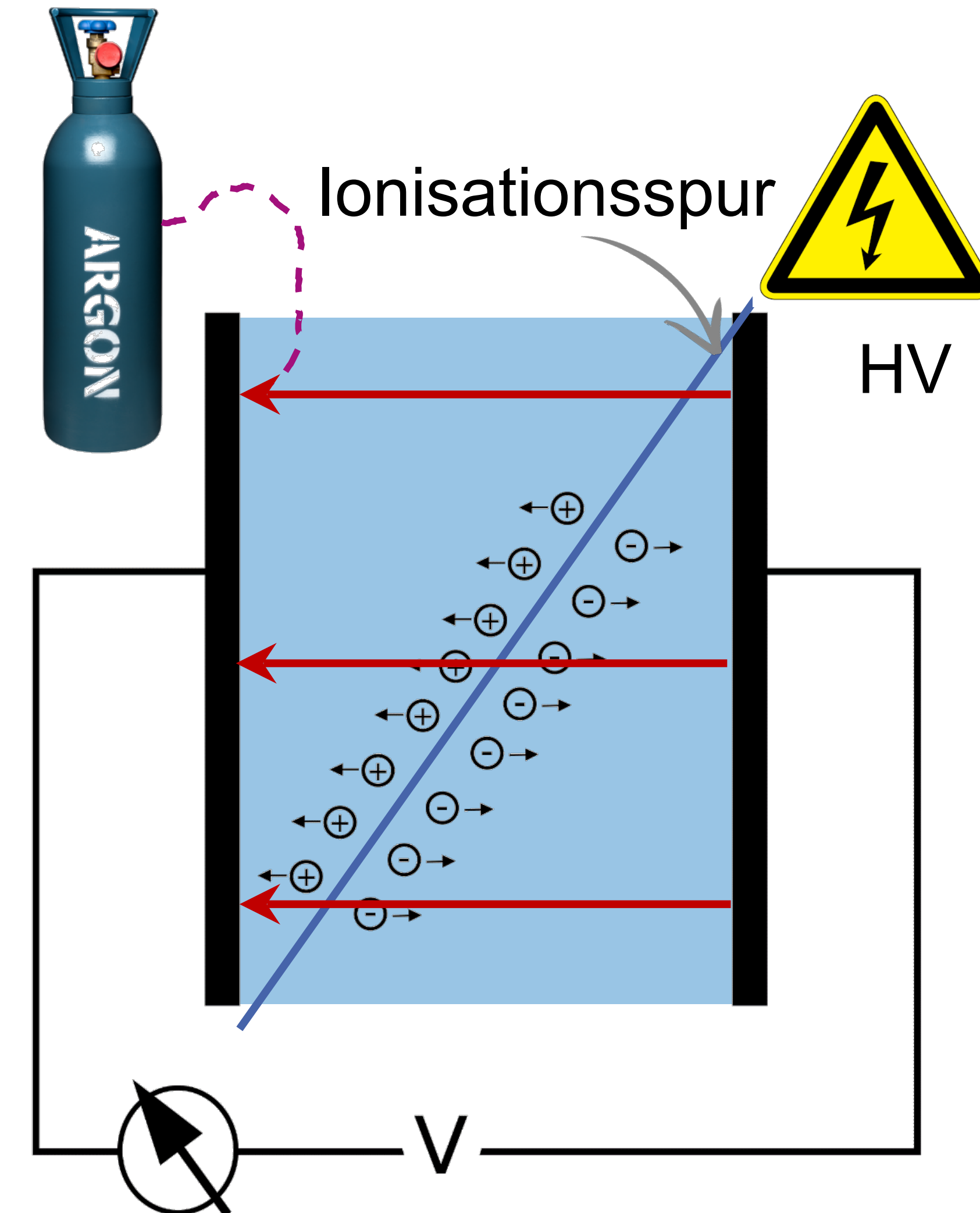
Kalorimeter

von Teilchen

Q: CERN, Fermilab, LNGS, sciencephoto

Ionisationskammer

- **Kammer mit Zählgas (Ar) / Zählflüssigkeit (LAr)**
 - **Medium:** Edelgas (**Argon**, Krypton, Xenon)
 - **Prinzip:** geladenes Teilchen ionisiert Medium
 - **Auslese:** homogenes, konstantes elektrisches **Driftfeld** $\Rightarrow$ Drift der Ladungsträger zu Elektroden (parallele Platten), Anode & Kathode, HV
 - **Aufgabe:** Sammlung aller Sekundärelektronen **Drift über lange Strecken** $\Rightarrow$ hohe Reinheit, keine elektronegativen Verunreinigungen im Medium

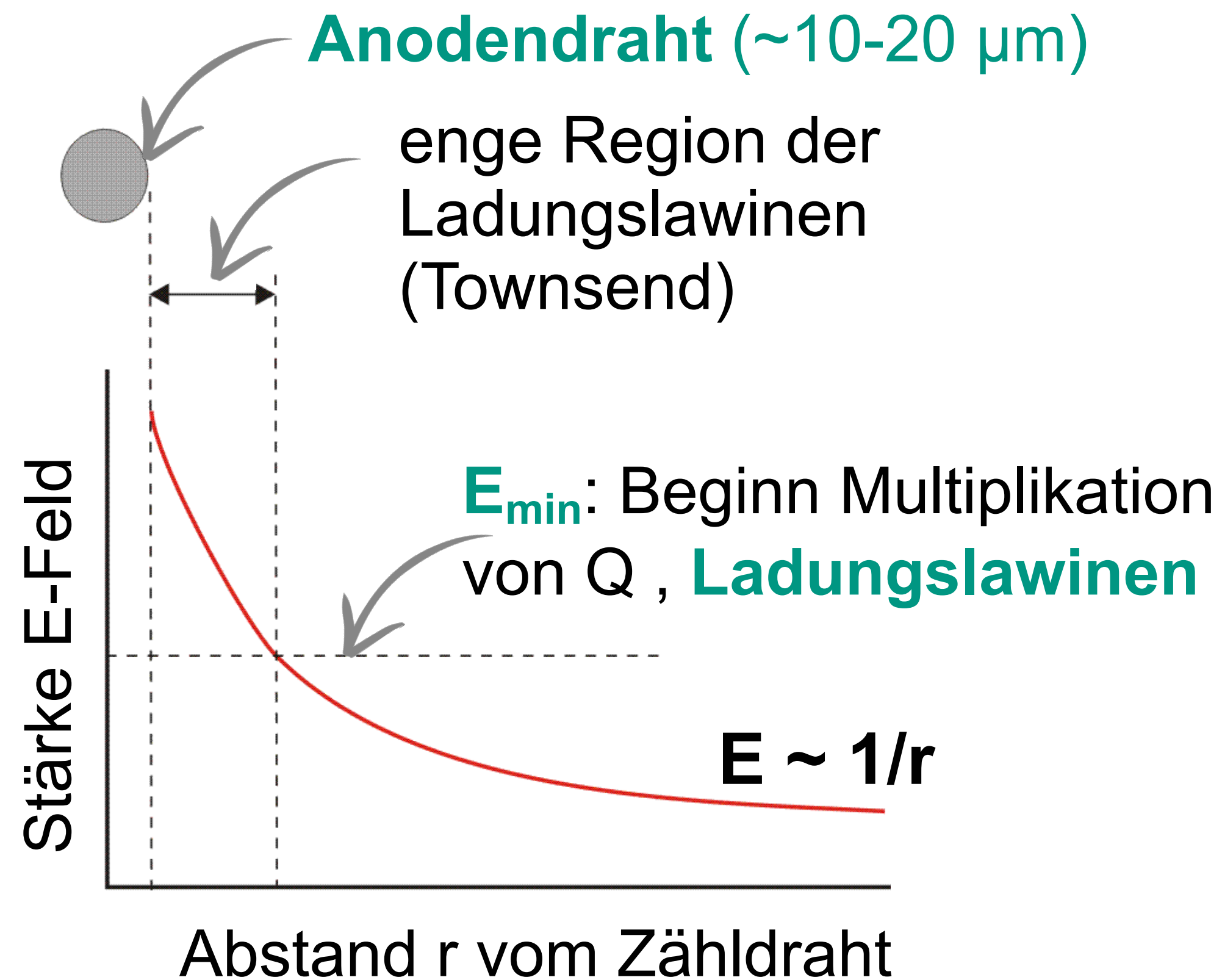


Q: wikipedia

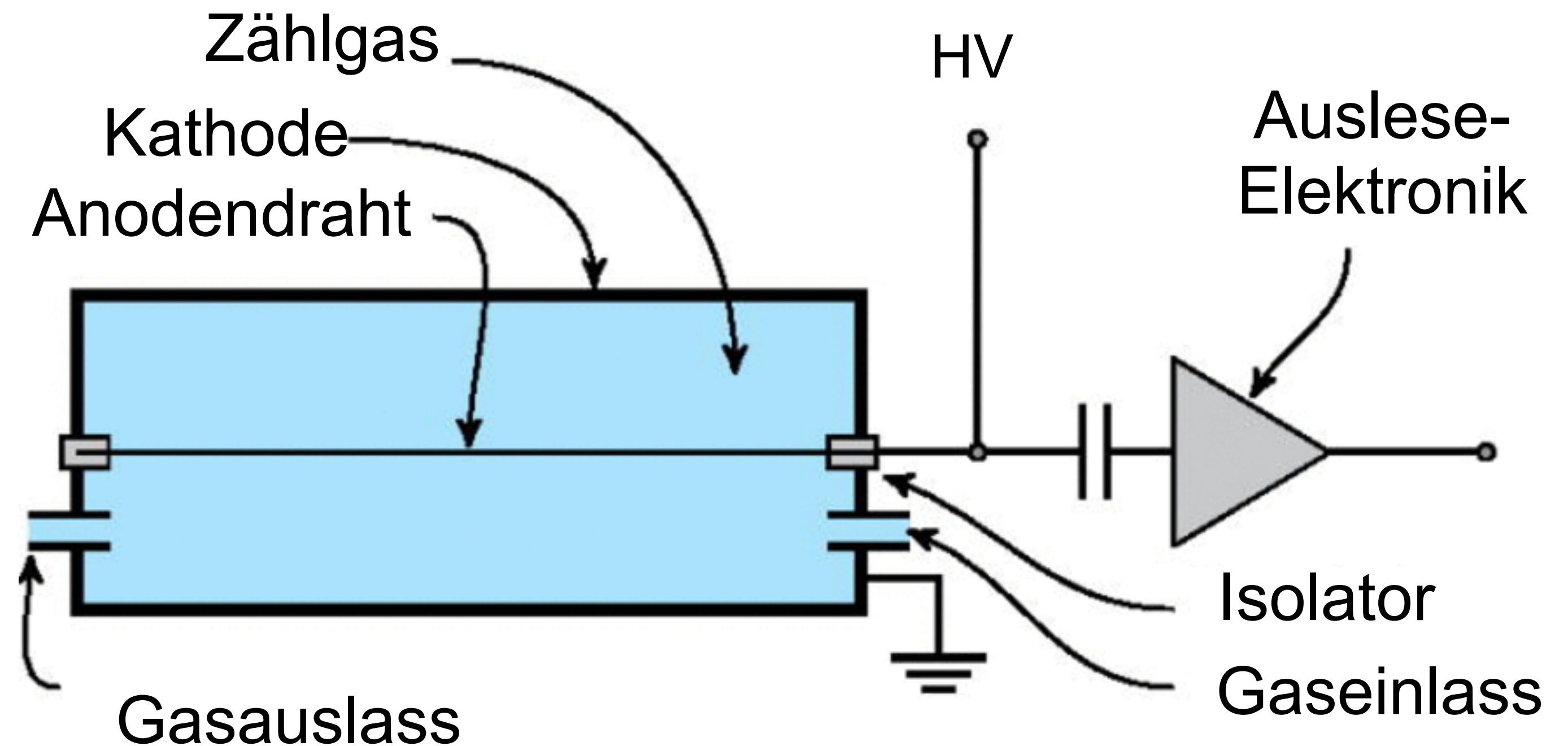
Proportionalrohrzähler: Aufbau

- Pulshöhe des Zählers ist **proportional** zur absorbierten Energie

- Rohr mit Draht auf HV, Zählgas: 90% Argon & 10% Methan (CH₄)



Q: wikipedia

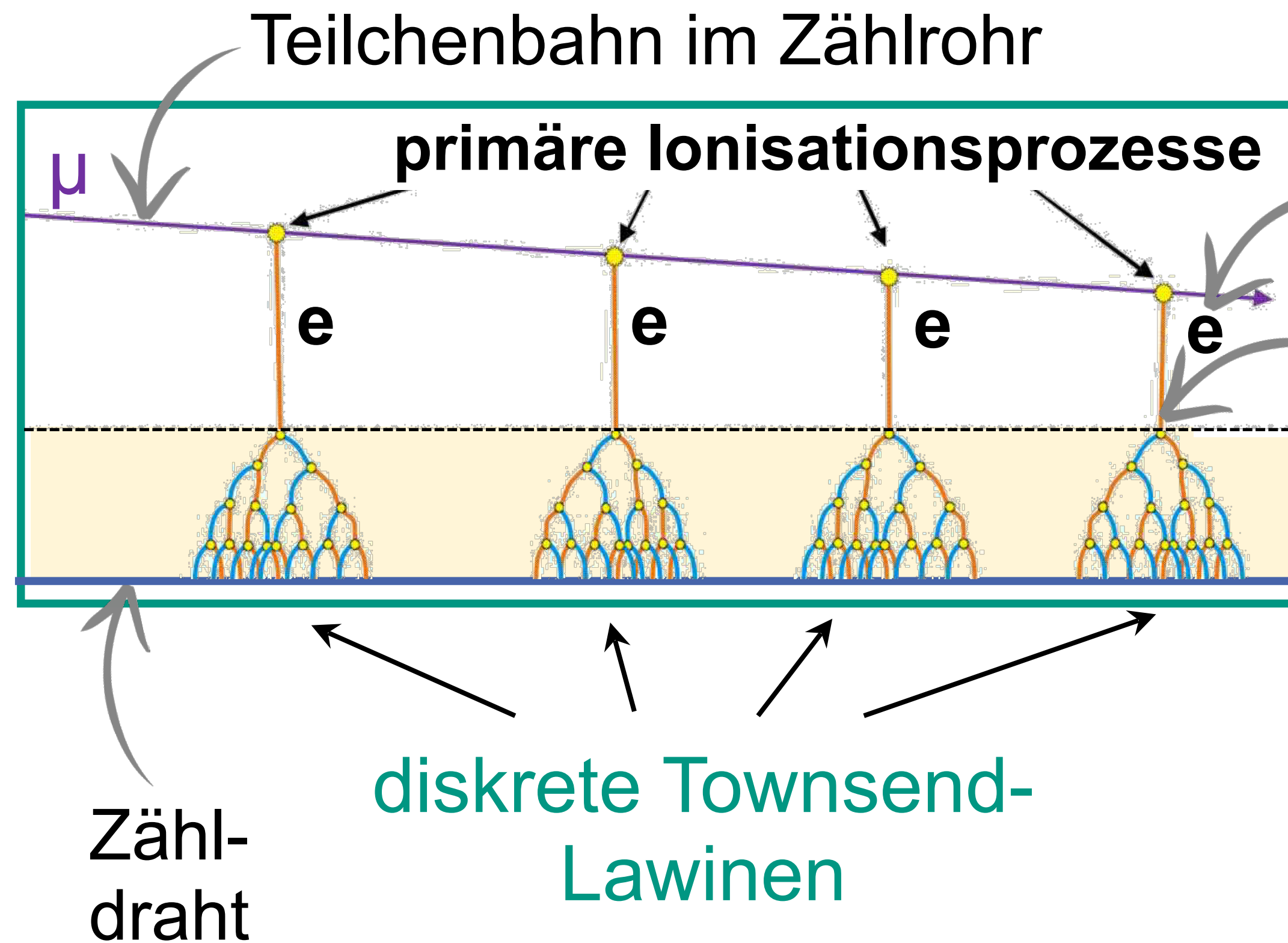


Q: T. Hilden

Proportionalrohrzähler: Townsend-Lawinen

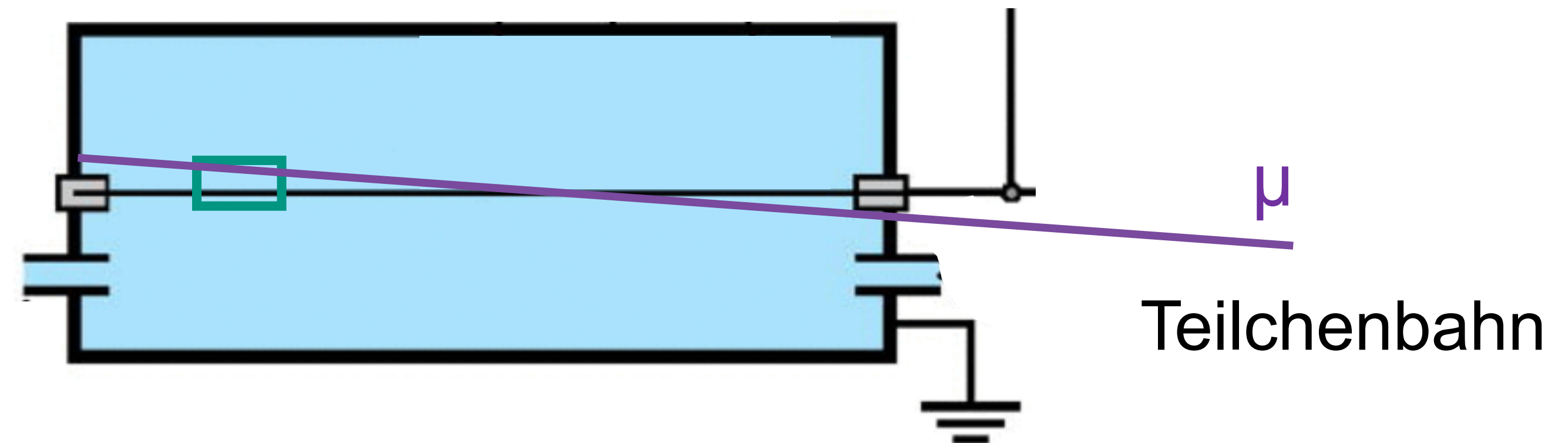
■ Elektronenlawinen erzeugen Gasverstärkung bis Faktor $\sim 10^5$

- Lawinen entstehen nur in **engem Volumen** um Draht mit Feld: $E > E_{\min}$



driftendes
Sekundärelektron

Feldstärke erreicht $E_{\min}$:
Beginn der Ladungsmultiplikation mit Lawinen



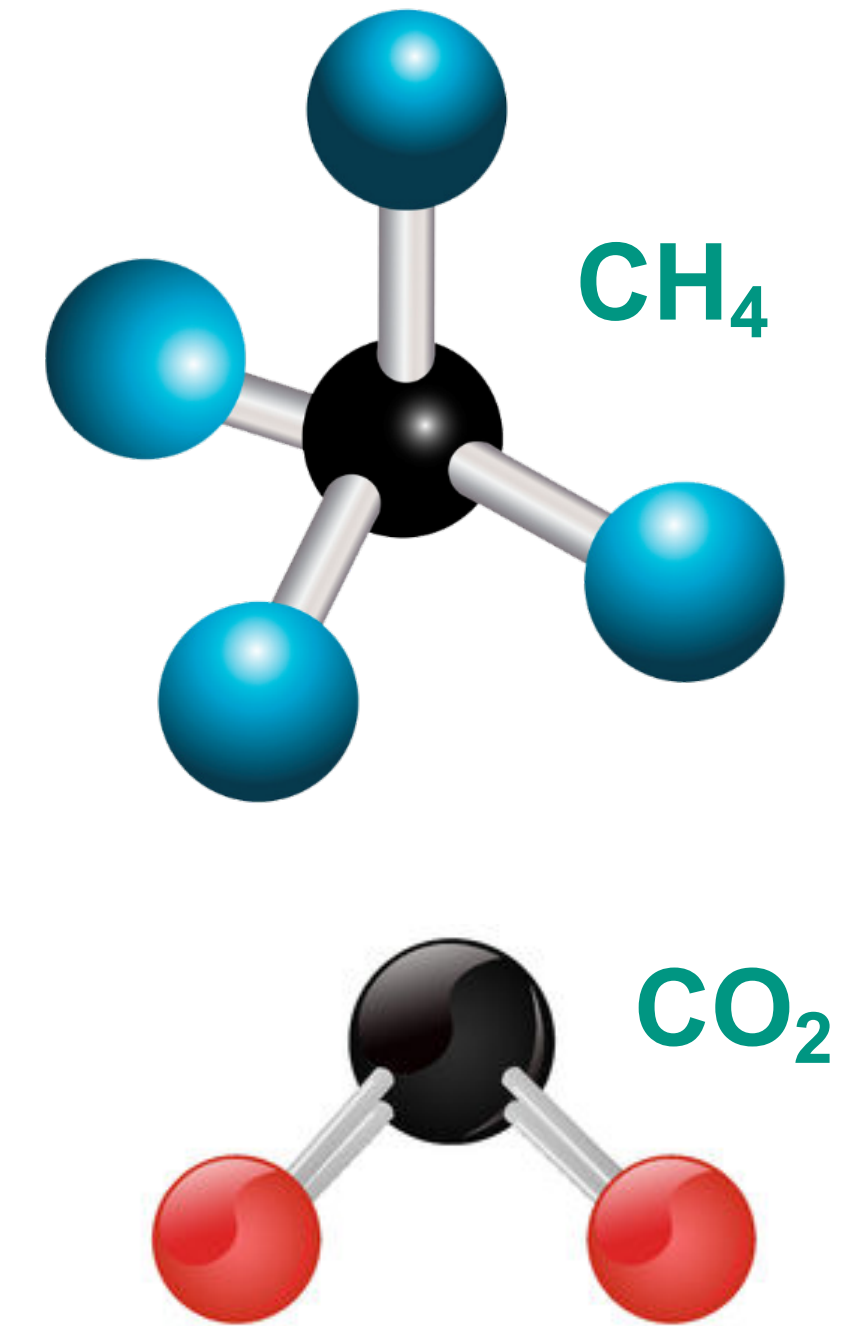
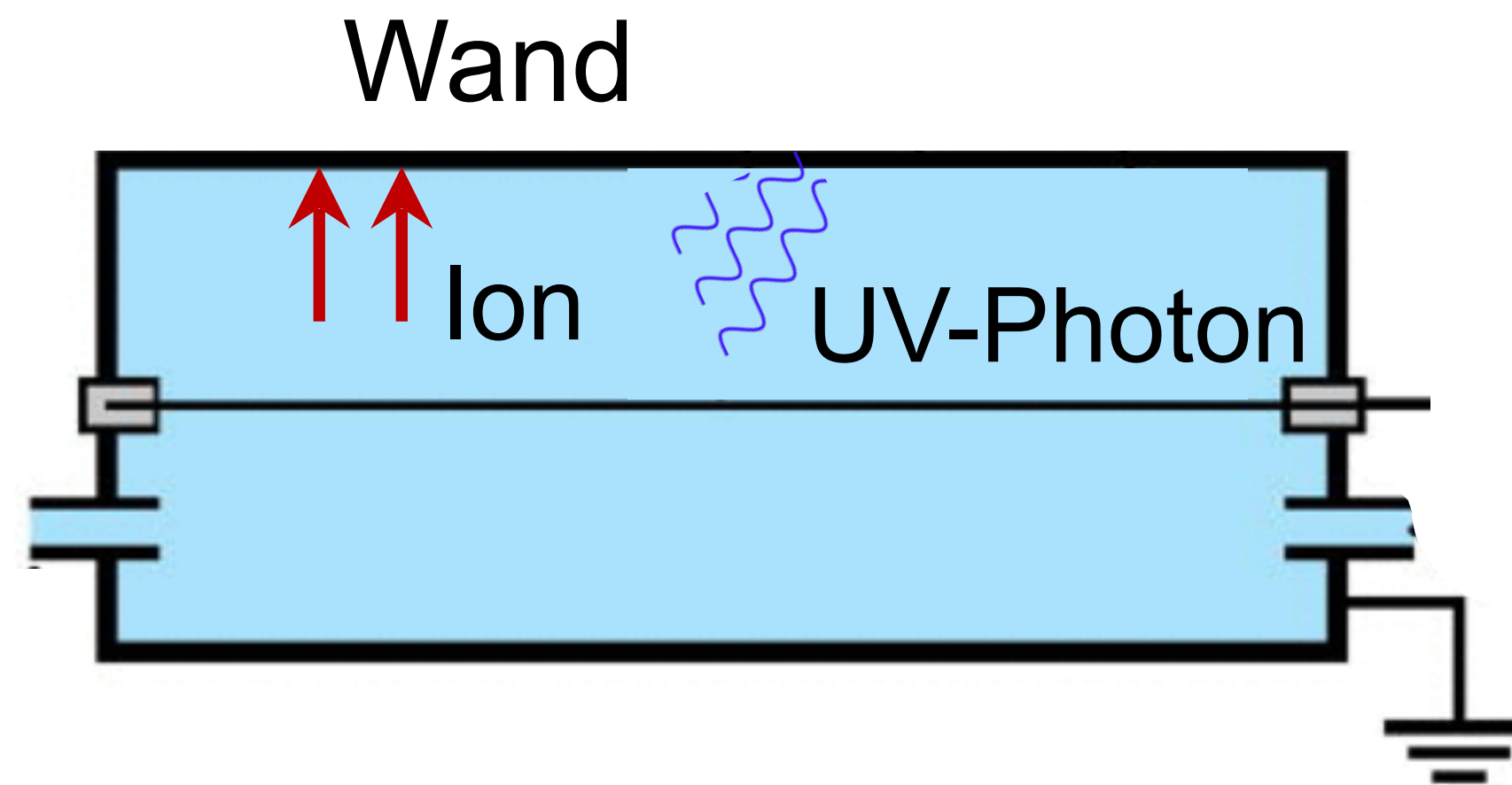
Q: wikipedia

Q: T. Hilden

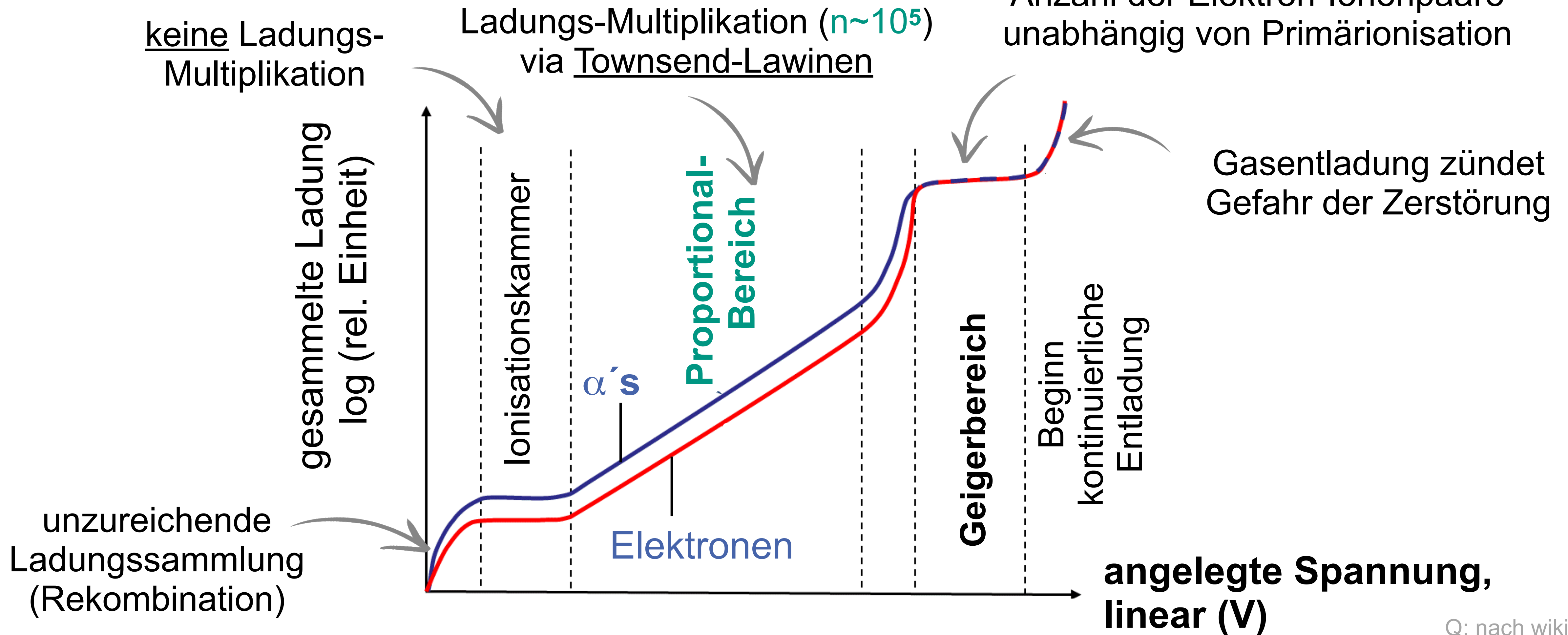
Proportionalrohrzähler: Zusatz von Quenchgas

■ Zählrohrwand darf nicht Ausgangsort weiterer Lawinen sein!

- Rohr mit Draht auf HV, Zählgas: 90% Argon & 10% Methan (CH_4) oder CO_2
- Zählgas wird nicht nur ionisiert sondern auch angeregt
⇒ **UV-Photonen & Ionen** treffen auf Zählrohr-Wand
- dort: ⇒ Entstehung weiterer Lawinen
- CH_4 verhindert, dass Ionen (UV-Photonen) auf die die Wände treffen,
⇒ „**Quenchen**“ von weiteren Lawinenprozessen



■ Charakteristik eines Zählrohres



Q: nach wikipedia

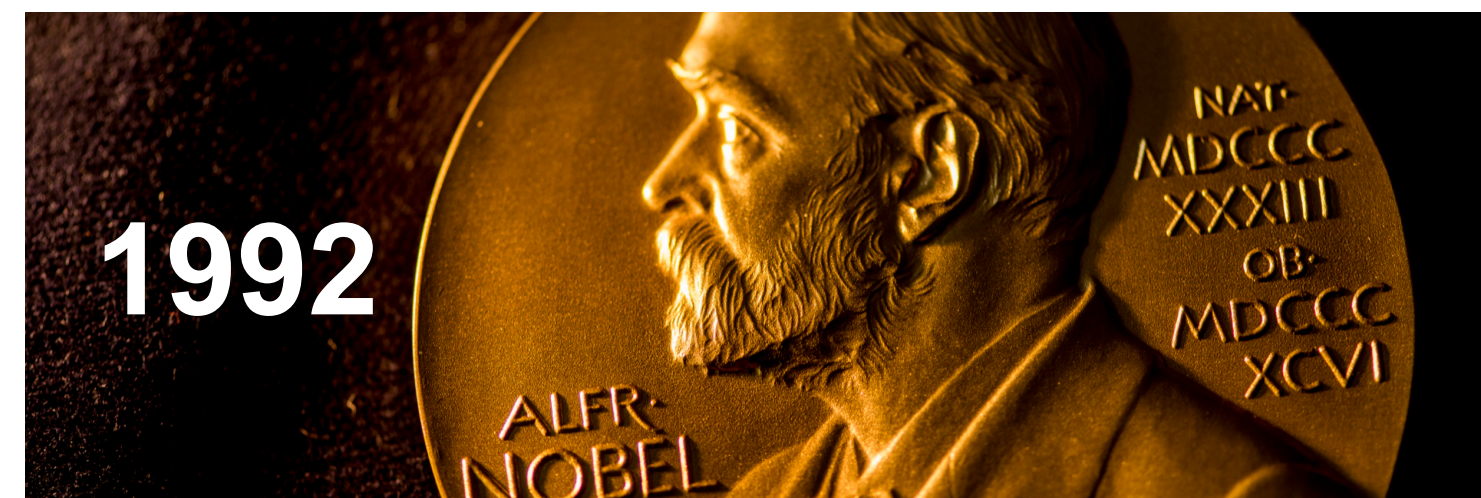
Violdrahtproportionalkammer: MWPC*

■ MWPCs – ein 'Arbeitspferd' der Teilchenphysik zum Spurnachweis

- Aufgabe: **Messung der räumlichen Koordinaten einer Teilchenspur**
- parallele Anodendrähte, $\varnothing = 100 \mu\text{m}$
- Erfinder: **Georges Charpak** (CERN)
ab 1968, ca. 10^6 mal schneller als
klass. Blasenkammer

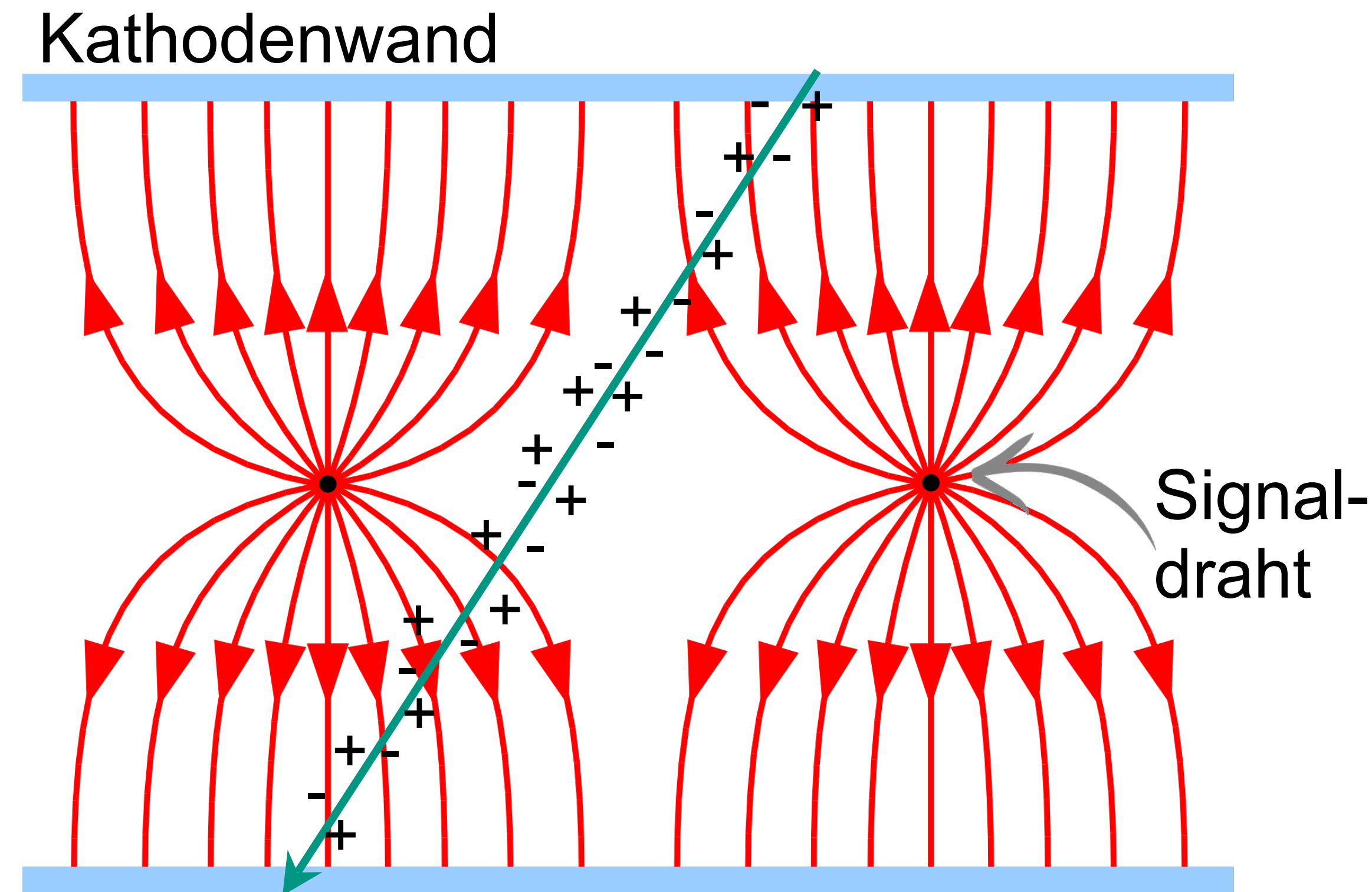


George Charpak



Nobelpreis

*"for his invention and development of particle detectors,
in particular the multiwire proportional chamber."*

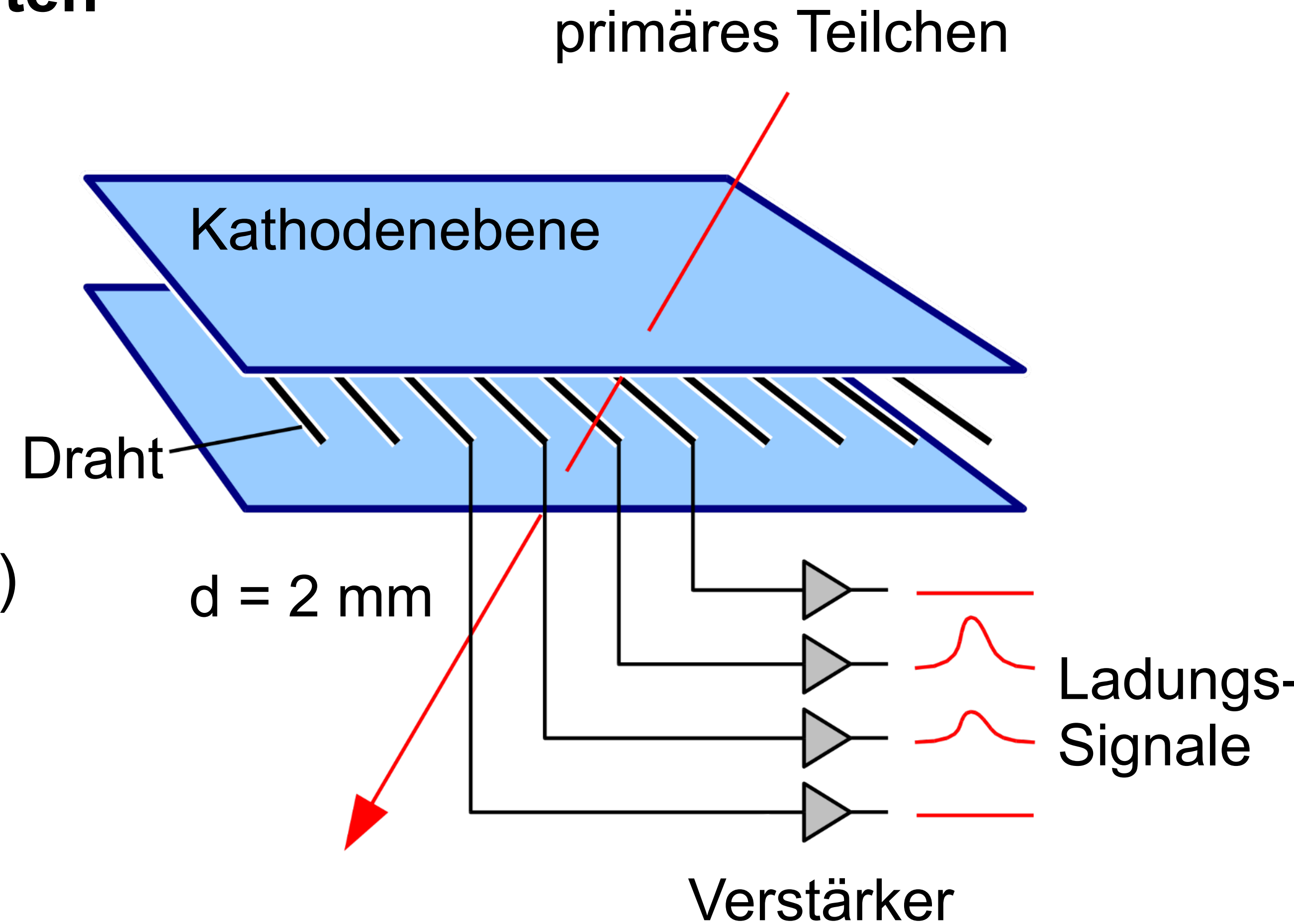


Q: nach wikipedia

***Multi-Wire Proportional Chamber**

■ MWPC: ihre wichtigsten Eigenschaften

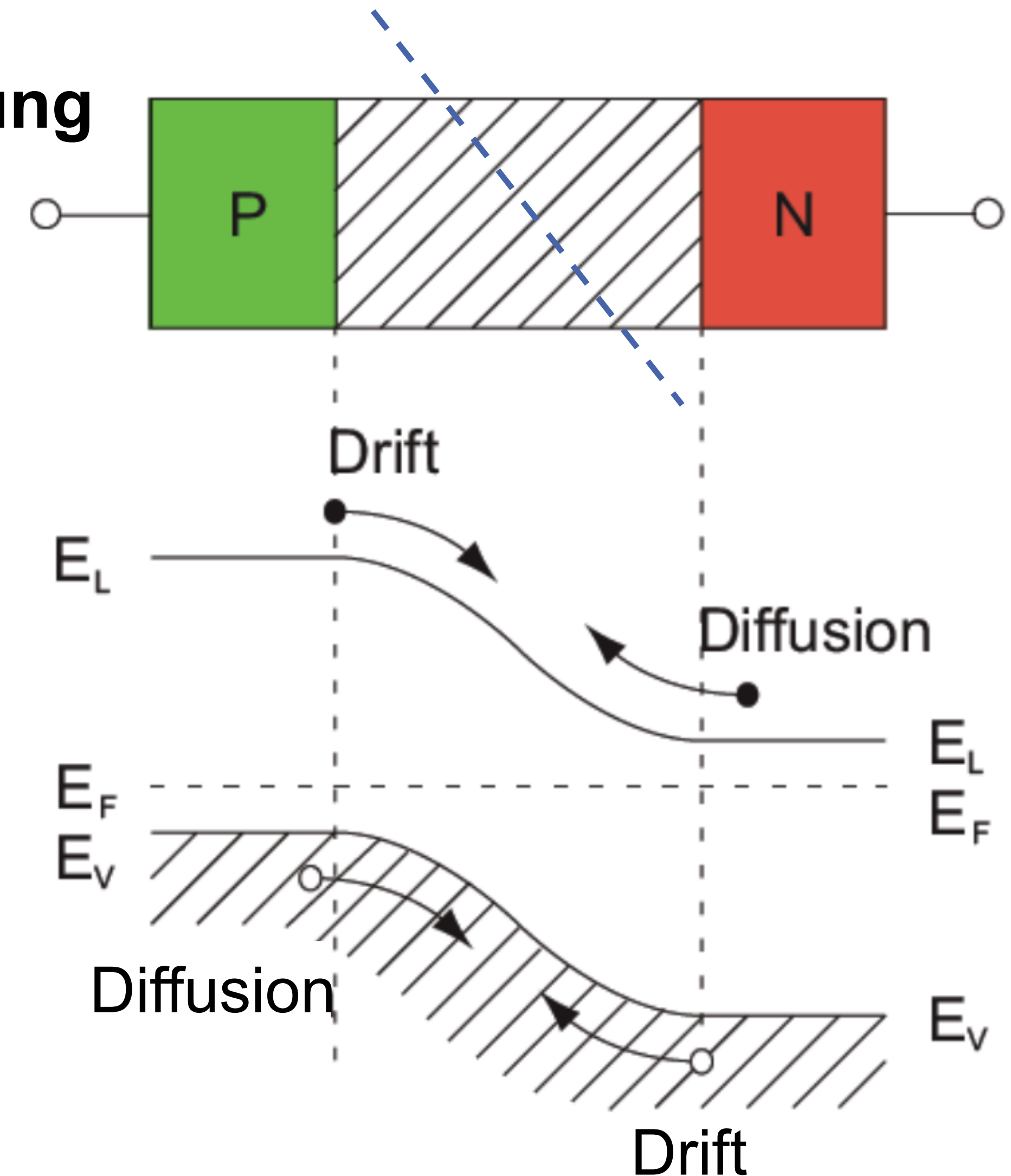
- jeder Anodendraht arbeitet als unabhängiger Proportionalzähler
- **Ortsauflösung:**
für Drahtabstand $d = 2 \text{ mm}$
 $\Rightarrow \sigma_x = 600 \text{ } \mu\text{m}$
(Gewichtung mit Ladungs-Signalen)
- **Zeitaufklärung:**
schnelle Anodensignale
 $\Rightarrow t_{\text{rise}} \sim 0,1 \text{ ns}$



Q: wikipedia

■ Halbleiter-Diode* (p-n Übergang) in Sperrrichtung

- resultierende **Verarmungszone** frei von Ladungsträgern: Drift + Diffusion
⇒ **Rekombination**
- Detektor mit umgekehrter Bias-Spannung (Minuspole am p-dotierten Bereich)
- Teilchendurchgang: **Elektron-Loch-Paare**
- **dünnere Si-Detektor**: Ortsmessung (Pixel)



Q: Kolanoski/Wermes, Husemann

Beispiel: Silizium-Pixel Detektoren

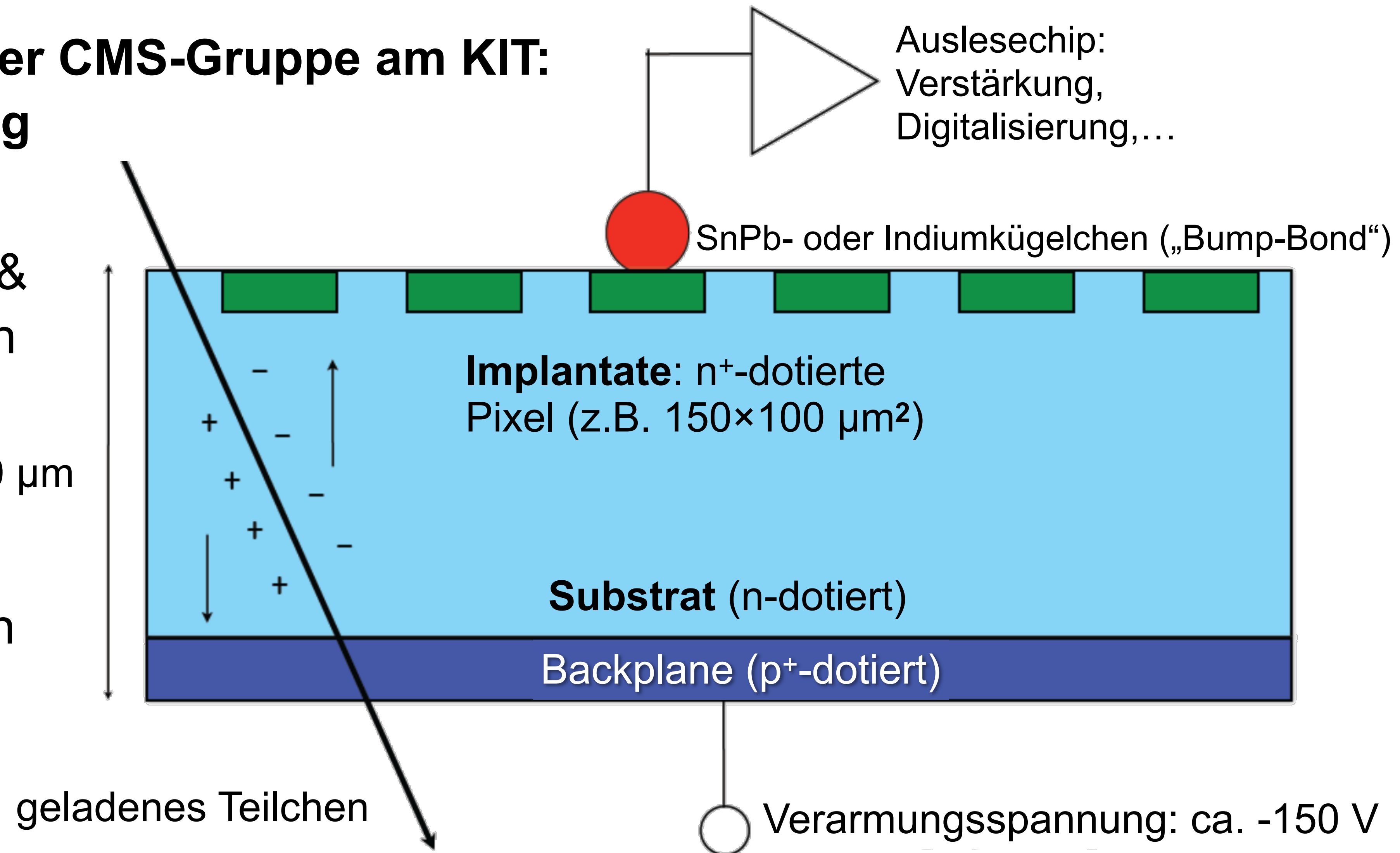
- **Spezialexpertise der CMS-Gruppe am KIT:**
‘hands-on’ training

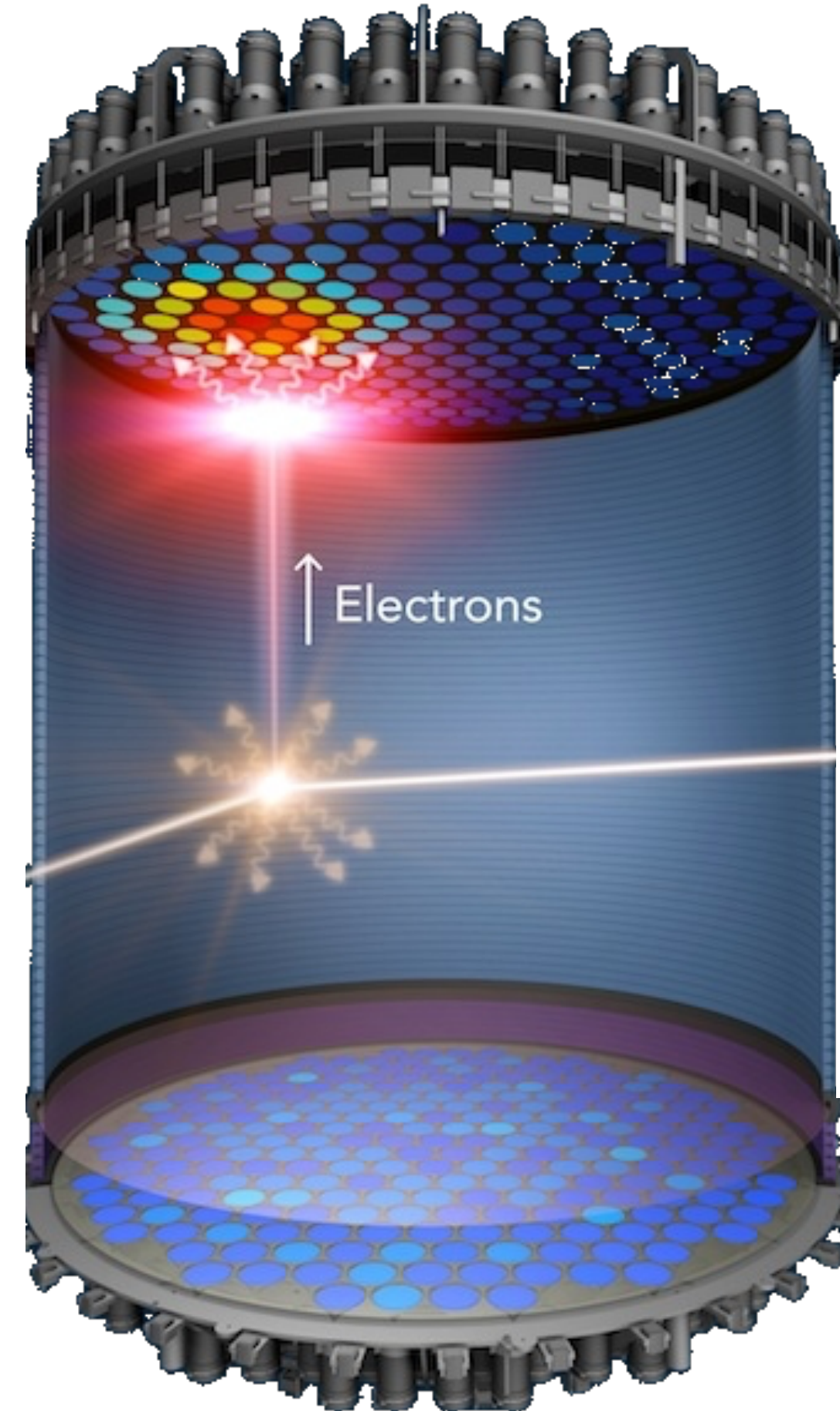
- 14 Lagen zur
Impulsbestimmung &
Vertexrekonstruktion

200-300 μm

- Effizienz für Myonen
~ 100%

Q: U. Husemann





EINSCHUB: ZEITPROJEKTIONSKAMMERN

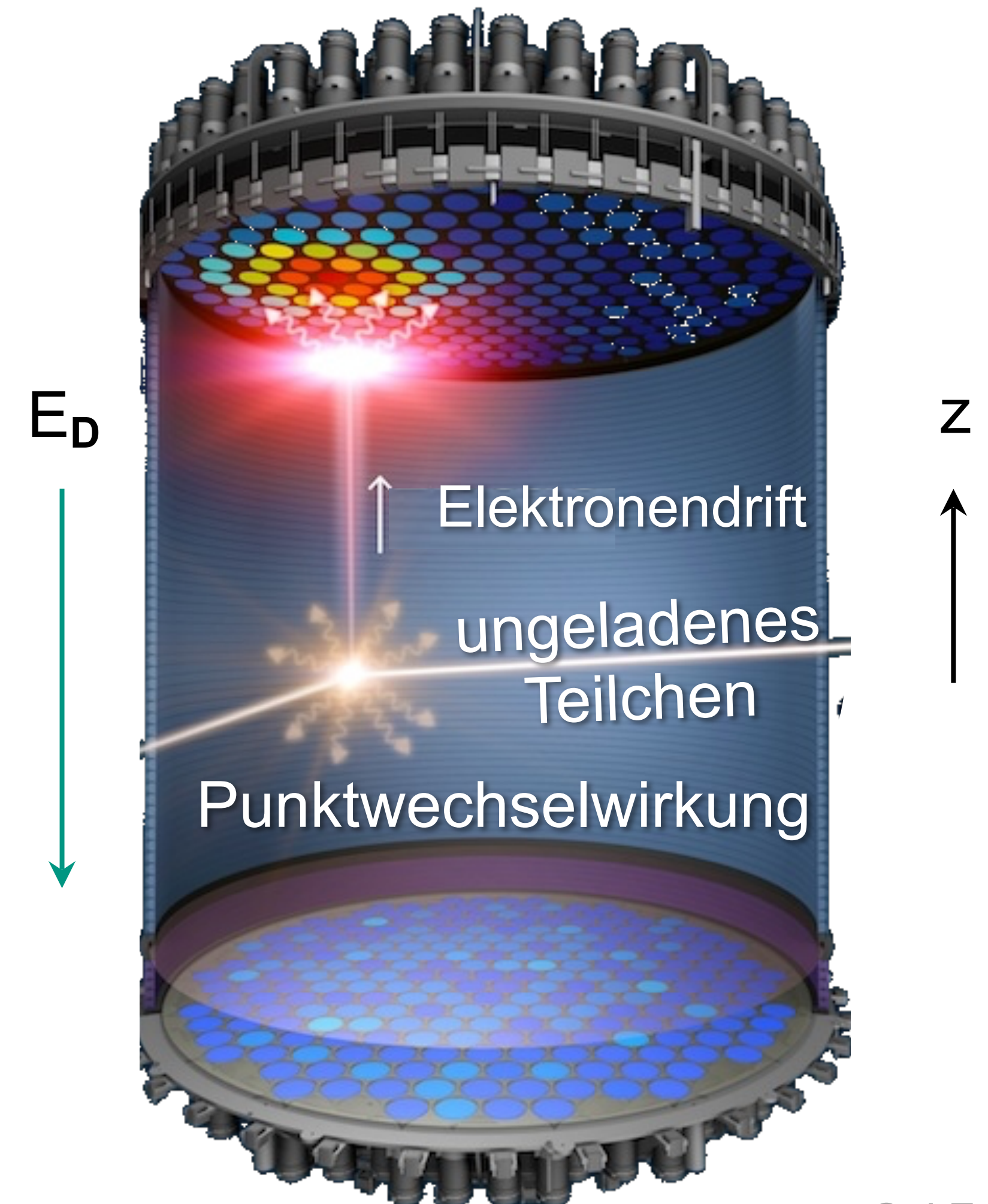
TIME PROJECTION CHAMBERS TPCs

Zeitprojektionskammer

■ Time Projection Chamber - TPC

- Prinzip: **Drift der Ladungsträger** (Elektronen) in einem konstanten elektrischem Driftfeld E_D zwischen Anode und Kathode
- **typische Parameter:**
 - $E_D \sim 0.5 - 1 \text{ kV/cm}$
 - $v_D \sim 1 - 4 \text{ cm} / \mu\text{s}$
- **3D Abbildung der Wechselwirkung**
 - x, y Elektronen an segmentierter Elektrode
 - z Driftzeit t_D mit v_D ergibt z -Koordinate

TPC mit
flüssig-Xe



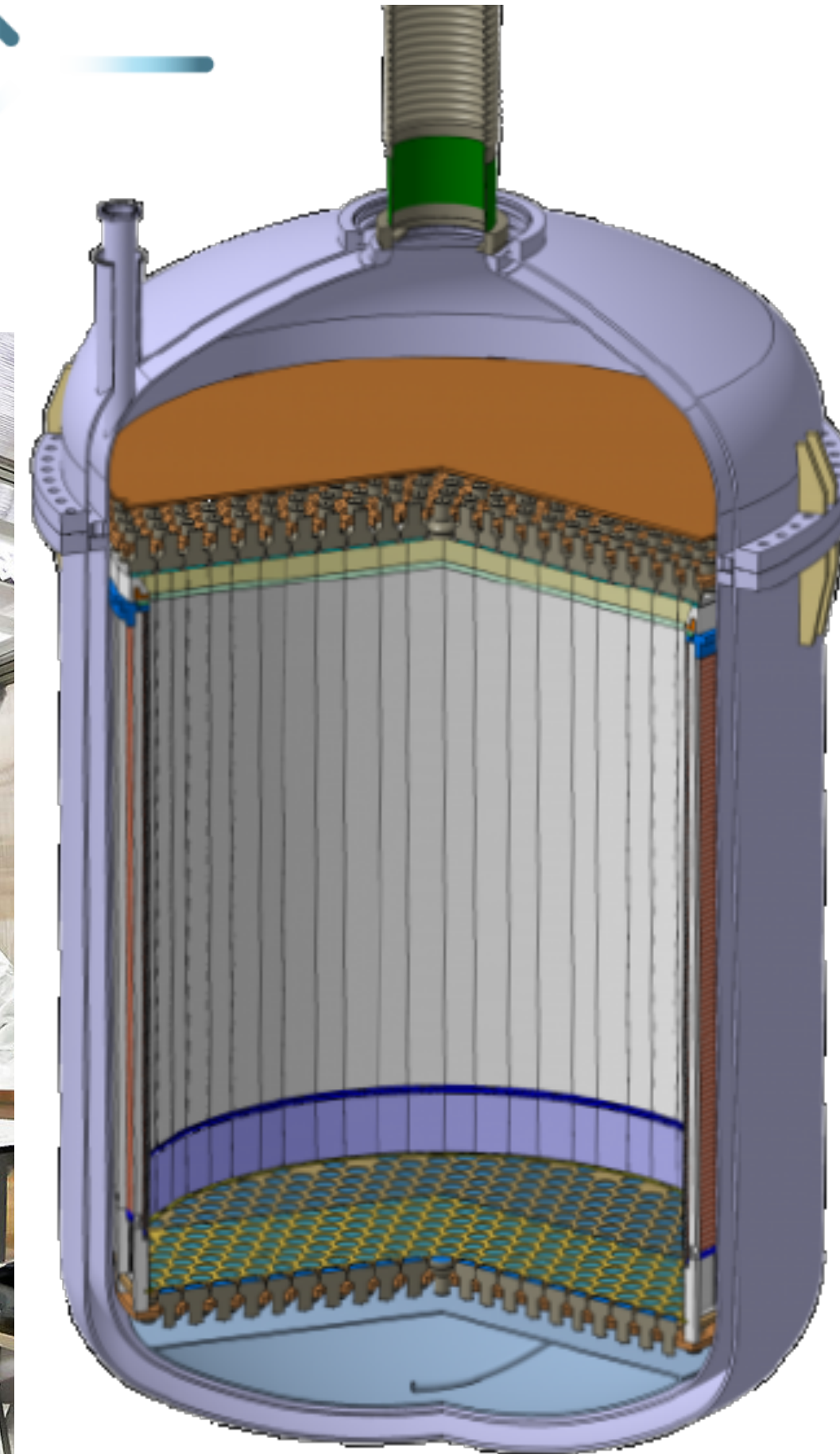
Q: LZ

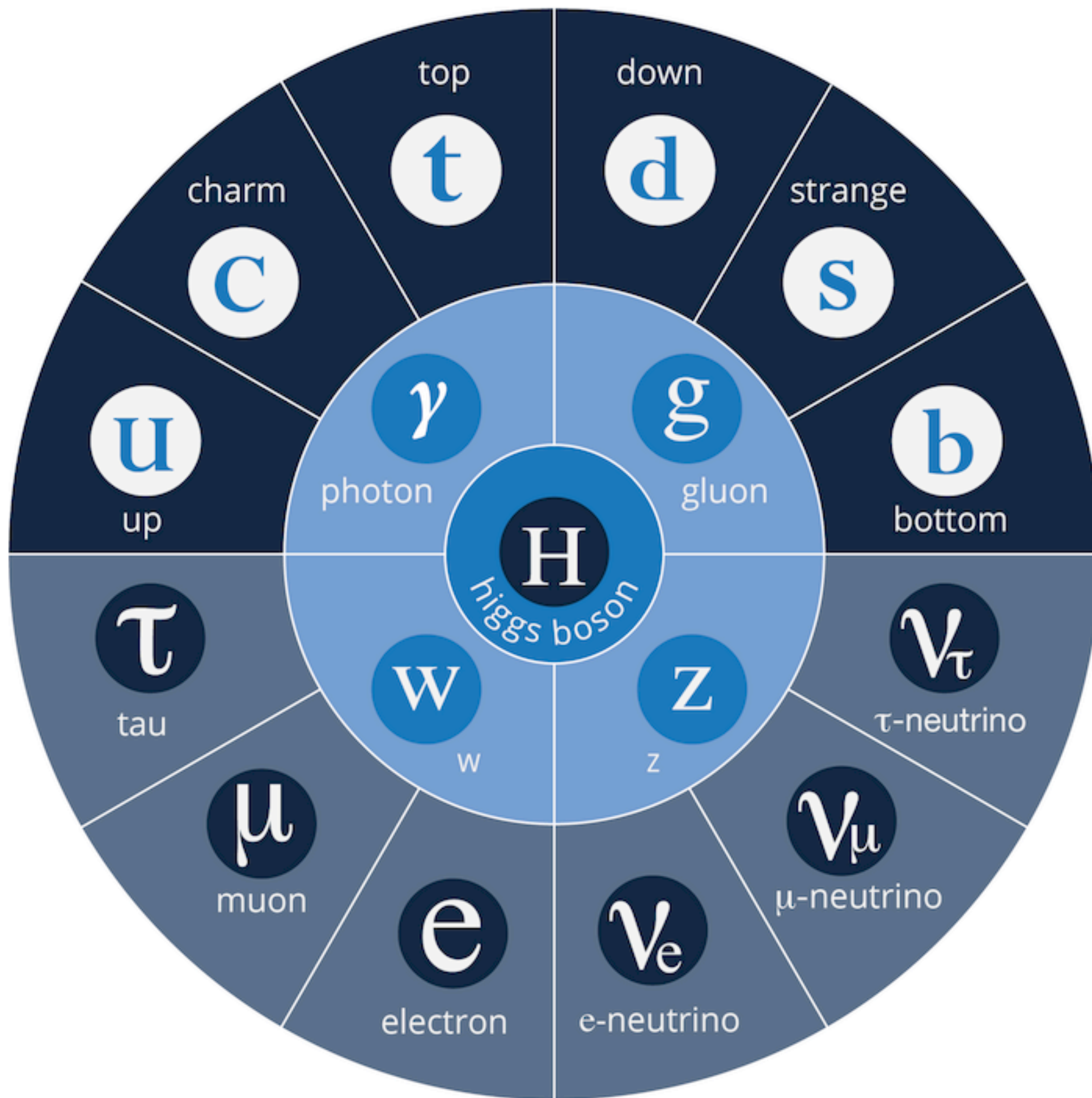
Zeitprojektionskammer: Suche nach WIMPs

- Time Projection Chamber - TPC
 - Detektormaterial: flüssiges Xenon
 - Physikalische Ziele:
 - Suche nach Dunkler Materie
 - Physik jenseits des Standardmodells & neue Physik



DARWIN





■ 2. Experimentelle Methoden

- 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
- 2.2. Energieverlust von Elektronen
- 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahlung
- 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
- 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
- 2.6. Nachweistechniken
- 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
- 2.8. Teilchenbeschleuniger