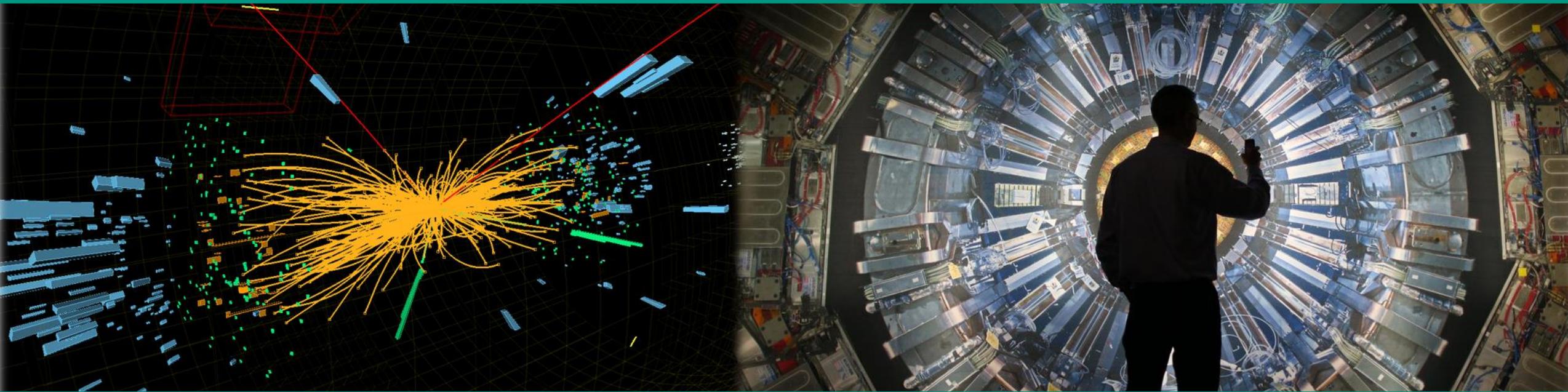


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 6

4.5.2023



Recap: Energieverlustprozesse von Teilchen

■ schwere Teilchen: μ , p , ... (geringfügige radiative Verluste)

- Energieverlust durch Ionisation: **Bethe-Formel** $0,1 < \beta \cdot \gamma < 1000$

- **3 Bereiche**: niedriges $\beta \cdot \gamma$: $dE/dx \sim 1/\beta^2$

$$\beta \cdot \gamma \sim 3 \dots 4 : dE/dx = m.i.p.$$

großes $\beta \cdot \gamma$: '*relativistic rise*'

- Energieverlust in dünnen Absorbern: **Landau-Verteilung** (δ –**Elektronen**)

- **Bragg-Peak**: maximales Bremsvermögen (Ionentherapie, Dotierung)

Reichweiten-Streuung & Vielfachstreuung

■ Vielfachstreuungsprozesse

- statistische Natur von Streureaktionen:
⇒ **Reichweite unterliegt Fluktuationen**

- begrenzt Auflösung für:

Impuls p (Krümmungsradius)

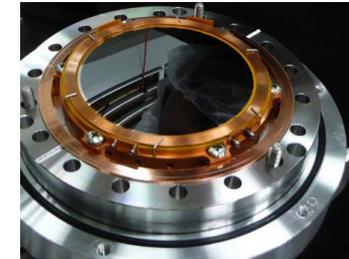
Ursprungskoordinaten r_0 (Vertex)

Energie E (Integration von dE/dx entlang Spur)

- Gegenmaßnahmen:

a) Verwendung 'leichter' Materialien
mit **kleinem Z** (z.B. **Beryllium $Z = 4$**)

b) minimiertes Material in Haltestrukturen

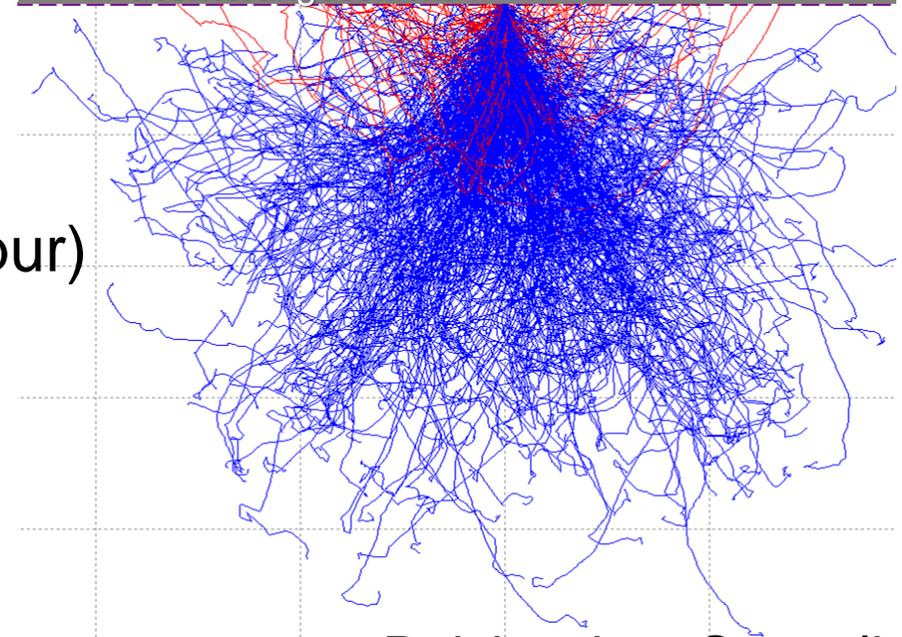


$18,6 \text{ keV } e^-$



KATRIN – MC

Passivierungsschicht



Reichweiten-Straggling

Vielfachstreuung: dicke Absorber

■ Energieverlust ΔE in dicken Absorbern

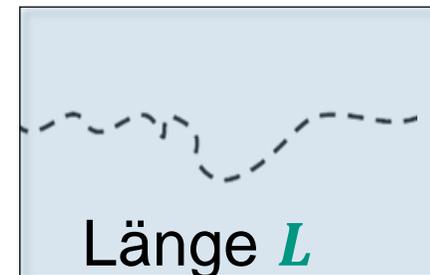
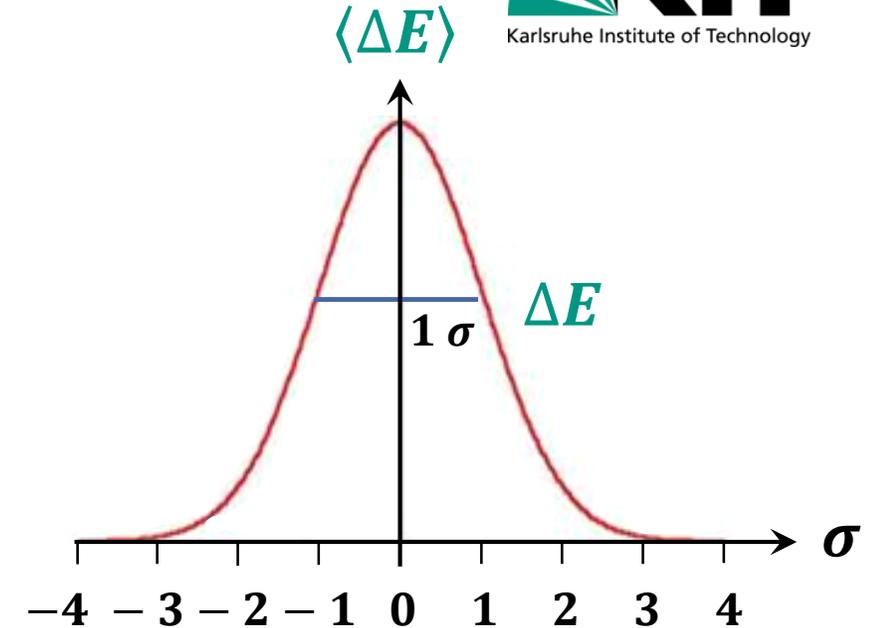
- Summation über Vielfachstreuung in dickem Absorber ergibt mit zentralem Grenzwertsatz der Statistik bzw. Summation über viele Auslenkwinkel eine **gaußförmige Energie-Verlustverteilung** mit charakterist. Breite σ

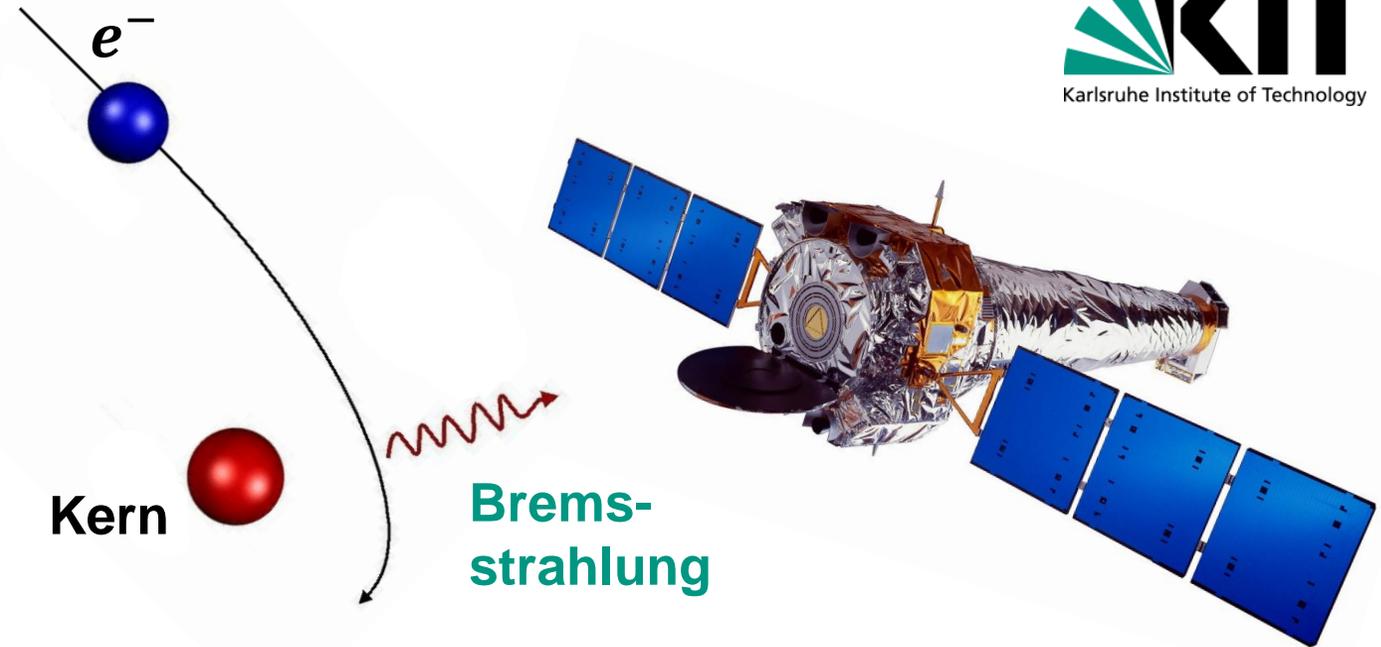
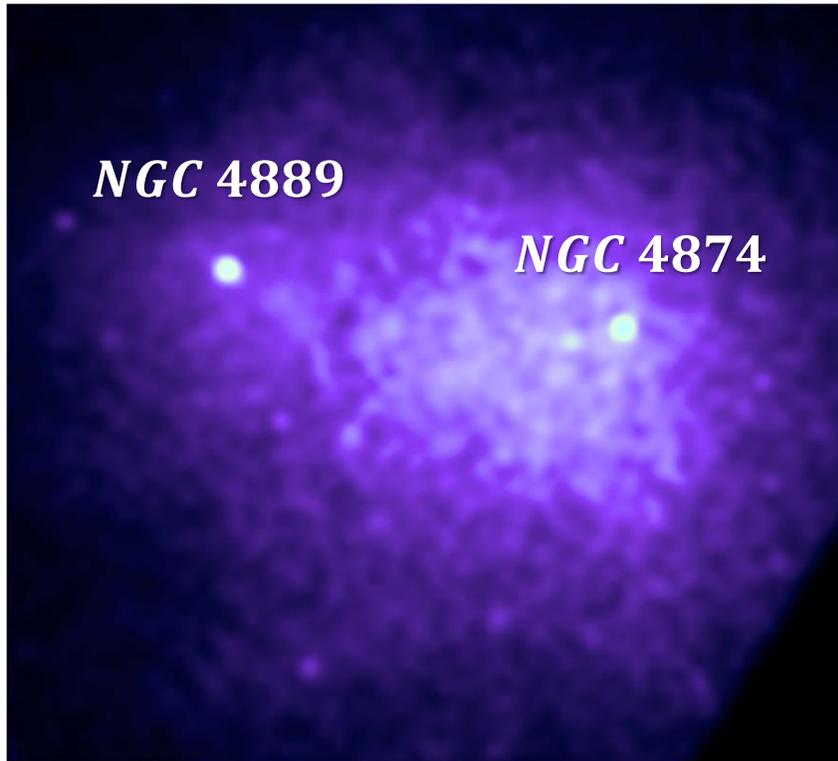
- mittlerer Auslenkwinkel:

$$\sigma_{streu}(rad) \sim p^{-1} \cdot \sqrt{L}$$



Impuls p





KAPITEL 3.2 – ENERGIEVERLUST VON ELEKTRONEN

Energieverlust von Elektronen

■ Energieverlustprozesse von **Elektronen & Positronen**

- **Ionisation:** kleine Modifikation für e^- bei Bethe-Formel, da bei Stößen **ununterscheidbare Teilchen** (Hüllenelektron \leftrightarrow stoßendes Elektron)
- **Bremsstrahlung:** radiativer Prozess von leichten Teilchen durch Ablenkung des e^- bzw. e^+ im Coulombfeld des Kerns (**Abbremsung**)

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

Ionisations-Energieverluste

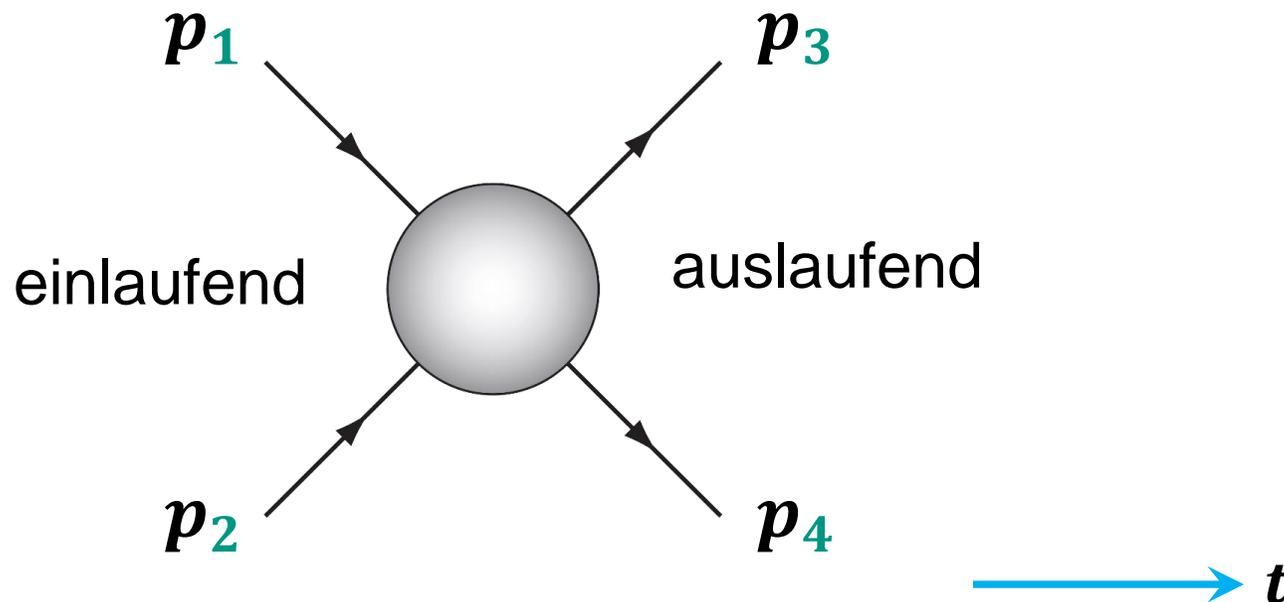
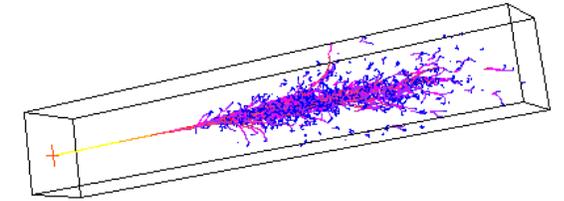
radiative Energieverluste

EINSCHUB: Mandelstam – Variable

■ Lorentz-invariante Beschreibung von Streuprozessen (z.B. in **Schauern**)

s : Quadrat der **Schwerpunktsenergie** (s – Kanal)

t : Quadrat des **Viererimpuls-Übertrags** (t – Kanal)



$$s = (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2$$

$$t = (p_1 - p_3)^2 = (p_4 - p_2)^2$$

$$u = (p_1 - p_4)^2 = (p_3 - p_2)^2$$

$$\begin{aligned} s + t + u &= p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 \\ &= m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 \end{aligned}$$

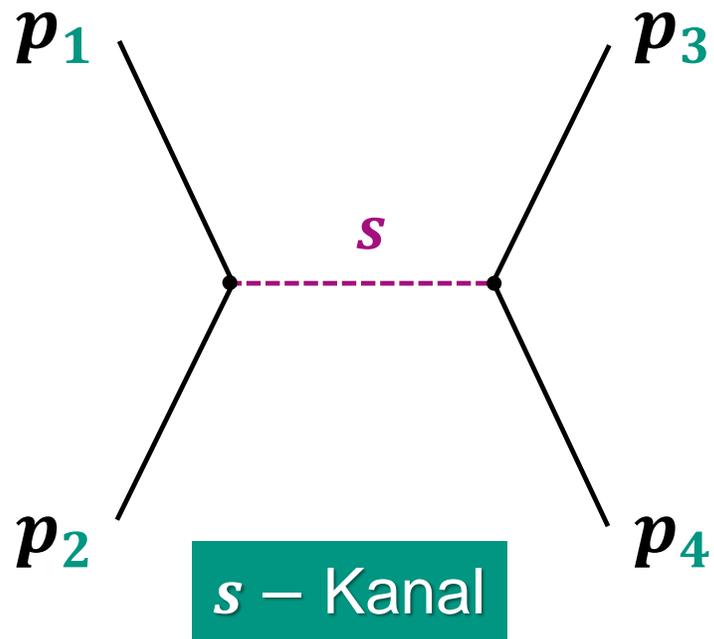
Feynman Diagramme Vertiefung: s , t , u Kanal

■ s –Kanal ($s = \text{space}$), t –Kanal ($t = \text{time}$), u –Kanal



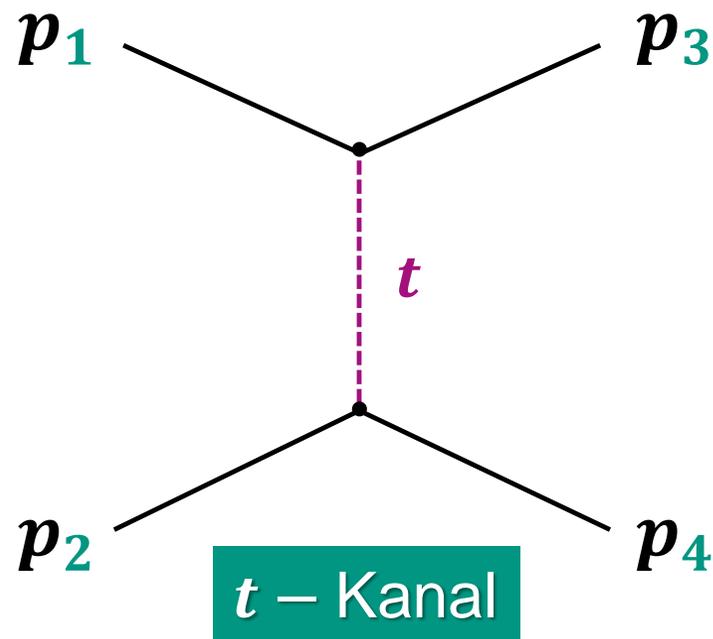
1 und 2 vereinen sich
zu virtuellem Teilchen

⇒ **Resonanz**



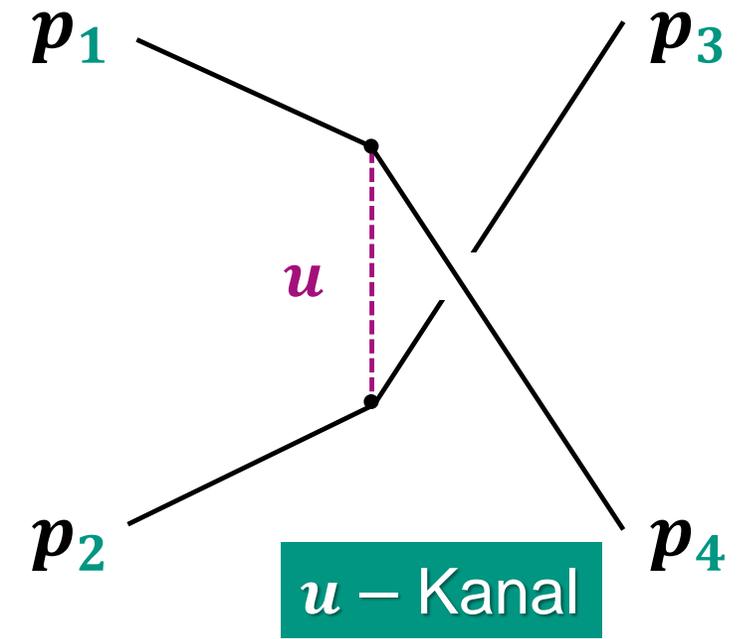
Streuprozess

1 → 3, 2 → 4



Streuprozess

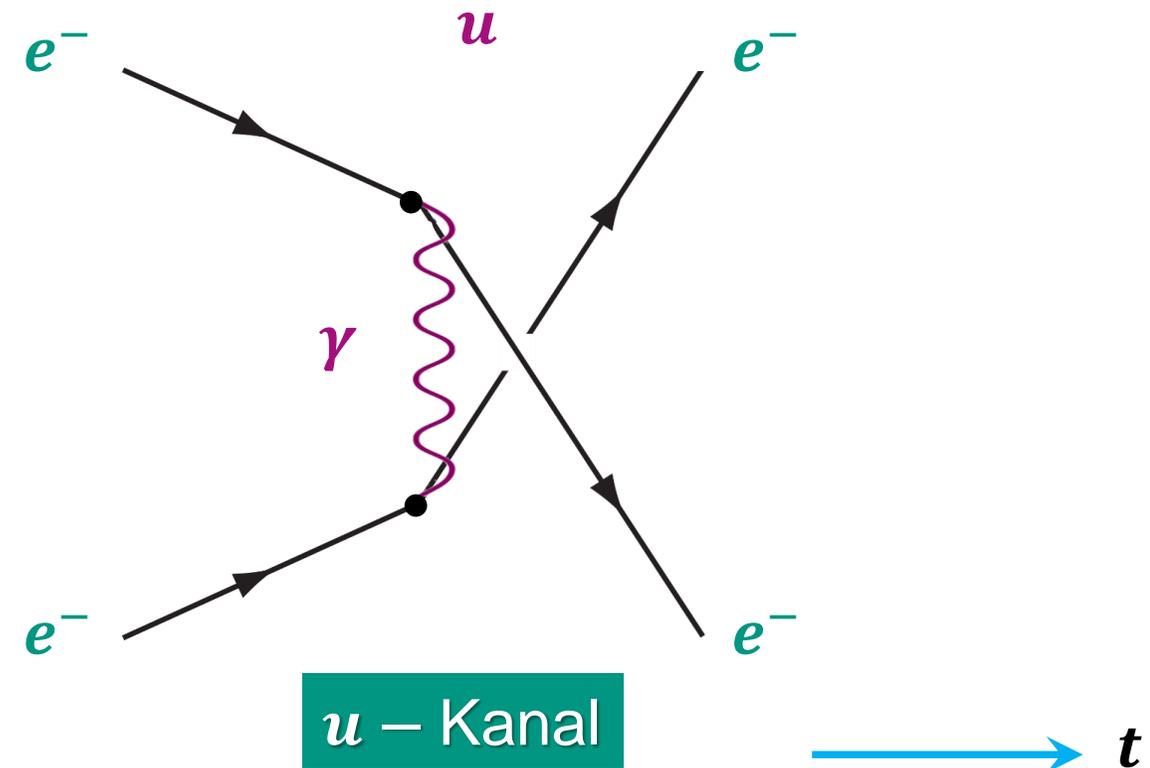
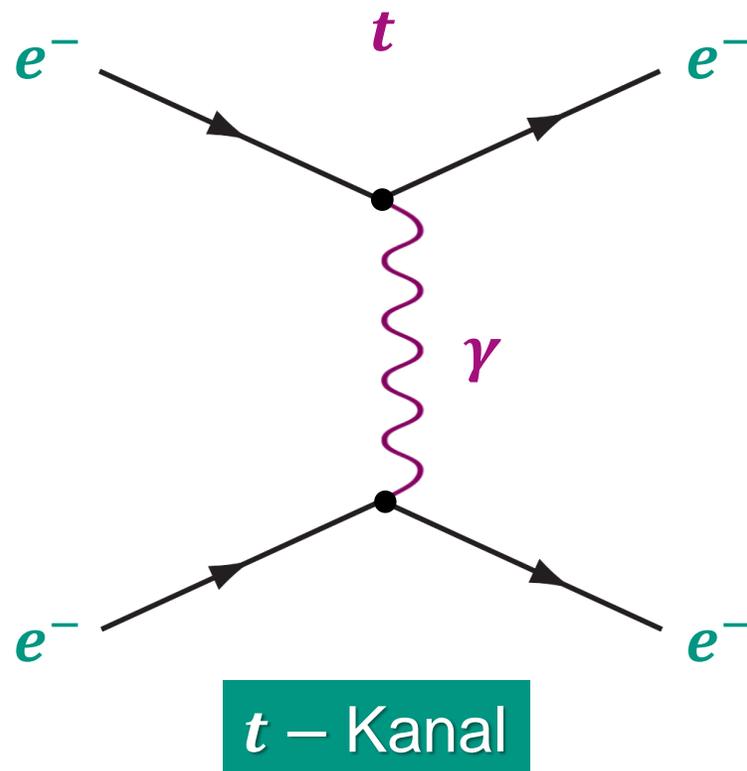
1 → 4, 2 → 3



Elektron-Elektron Stoßprozess: Møller Streuung

■ zwei Feynman-Diagramme tragen bei zum **Stoß-Prozess** $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$

⇒ „**tree level**“ Diagramme mit Austausch eines **virtuellen Photons** γ

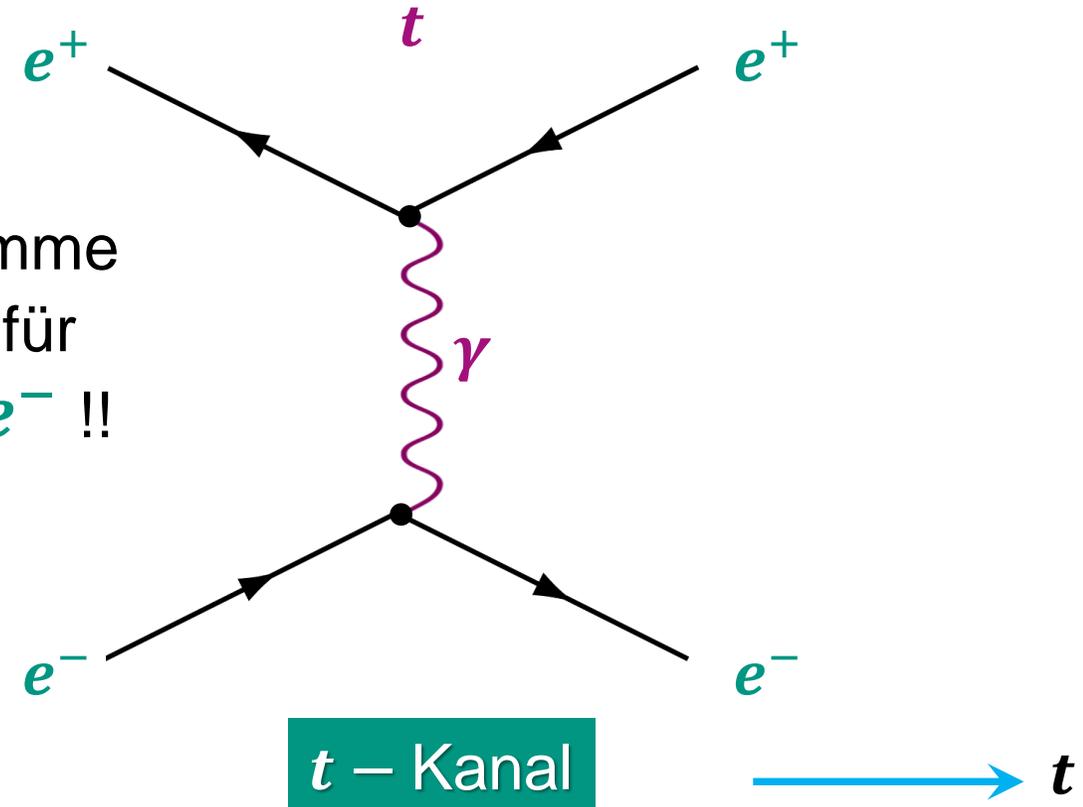
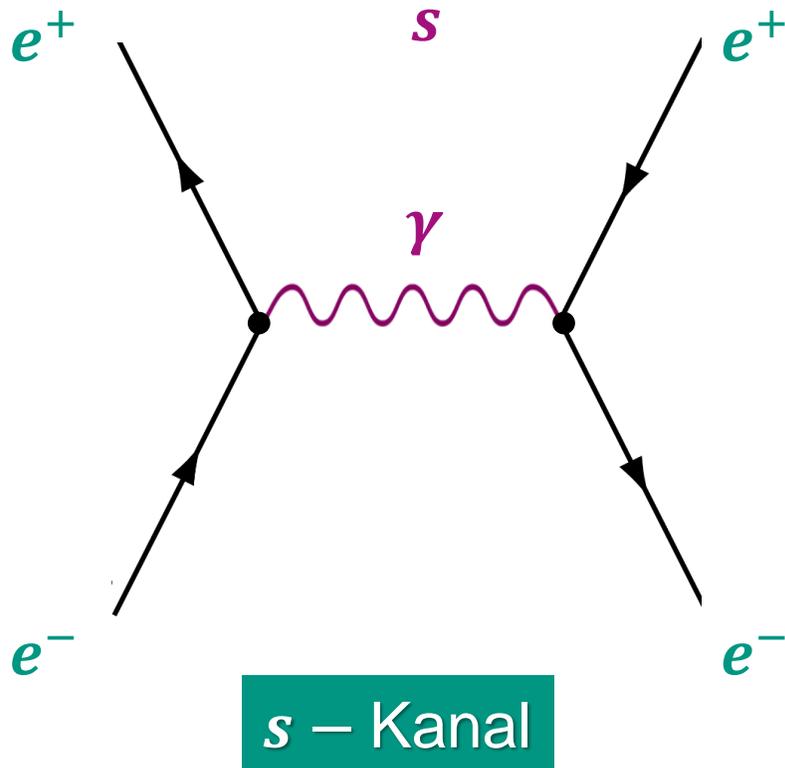


Elektron-Positron Prozess: Bhabha Streuung

- zwei Feynman-Diagramme tragen bei zum Prozess $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

Annihilation (Luminosität in Collidern)

Streuterm



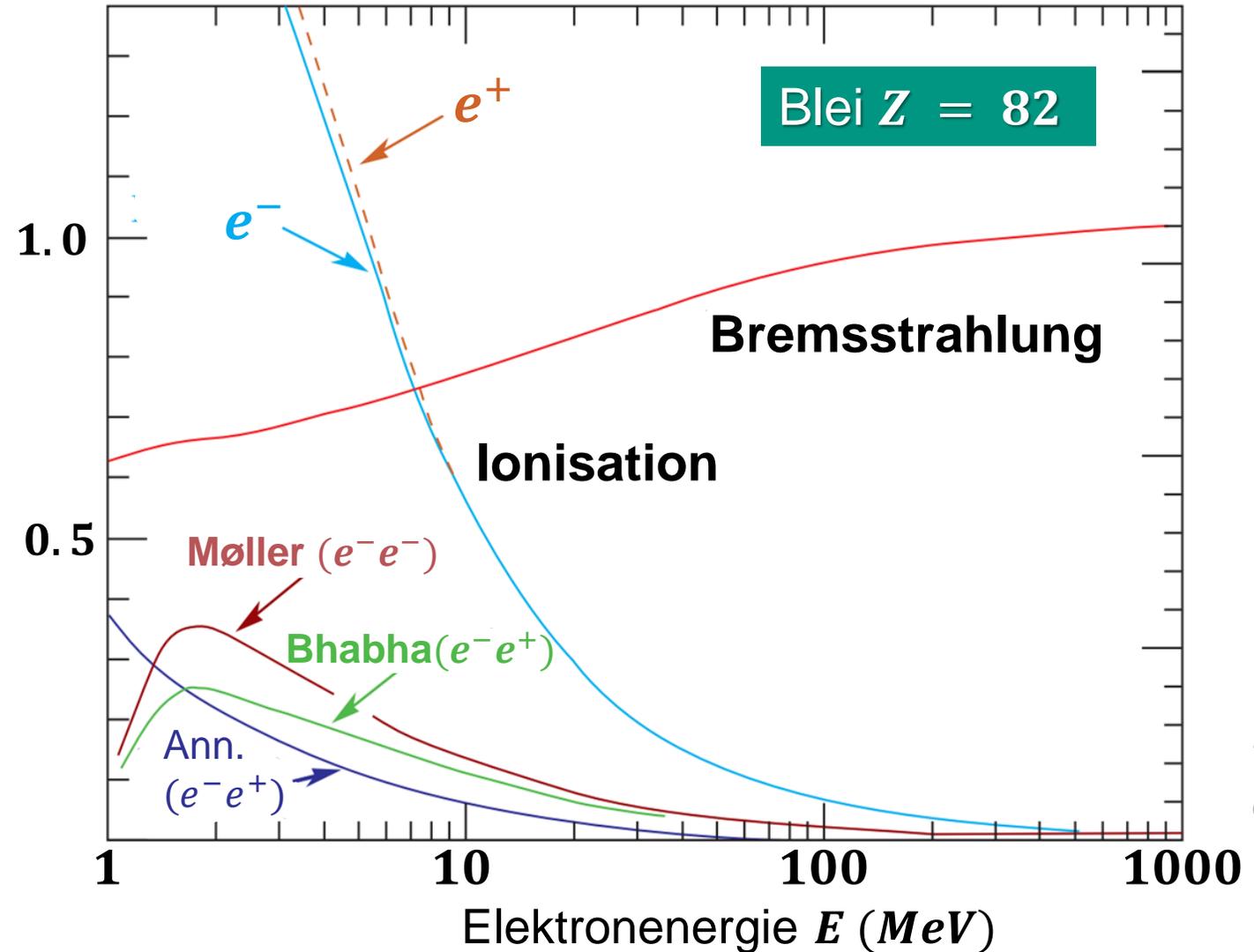
beide Diagramme
interferieren für
 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$!!
 $|\Psi|^2$

Energieverlust von Elektronen

■ Energieverlustprozesse

- **Møller** Streuprozess:
Elektron-Elektron
Stoß
- **Bhabha** Streuprozess:
Elektron-Positron
Stoß
- **normierter Energieverlust**
pro **Strahlungslänge X_0** in
einem **Pb** –Absorber mit
 $X_0(\text{Pb}) = 6,37 \text{ g cm}^{-2}$

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{dE}{dx} (X_0^{-1})$$



Elektronen/Positronen: kritische Energie E_c

■ Definition von E_c

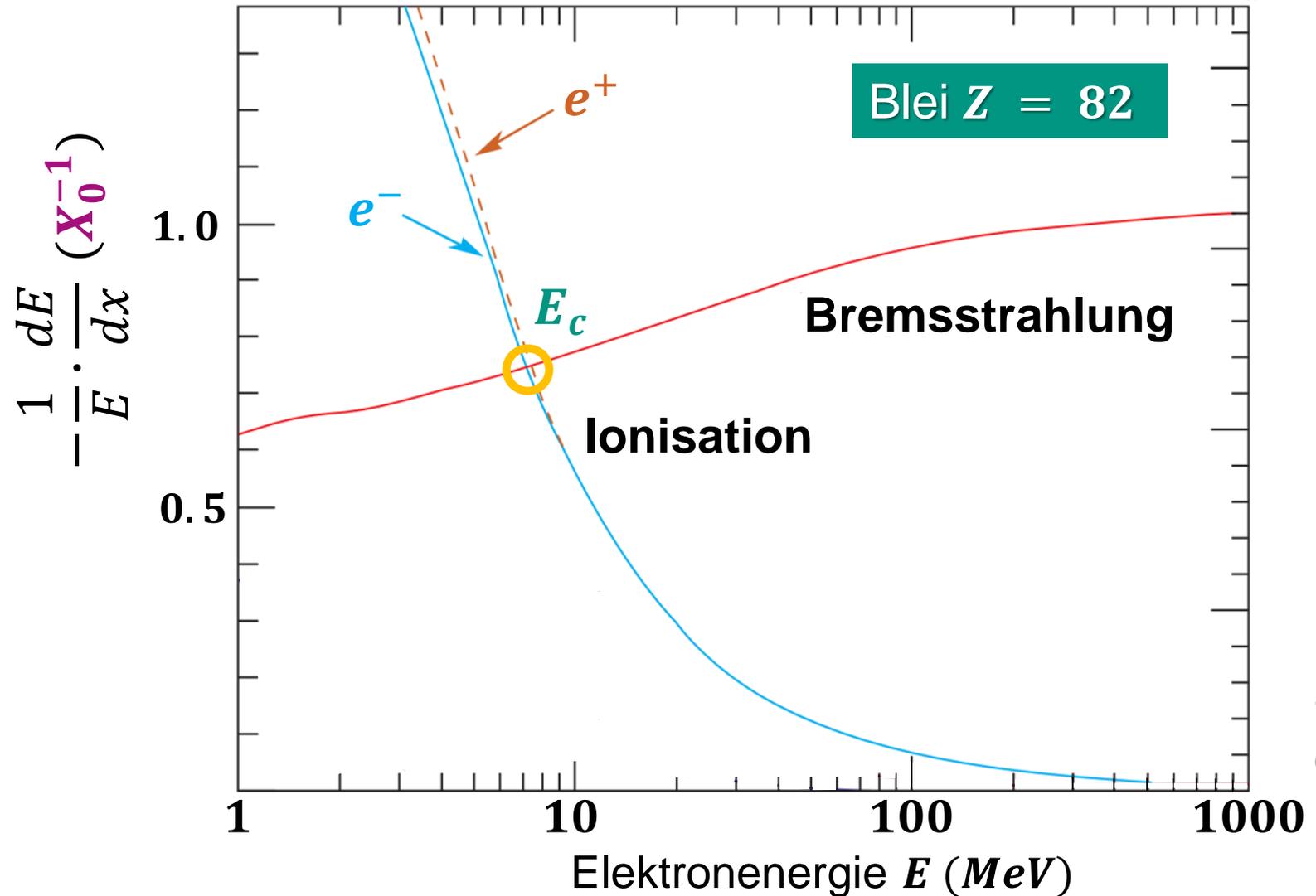
- bei $E = E_c$:

ΔE durch Ionisation &
Abstrahlung ist identisch

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ionis.}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{brems}}$$

- empirische Formel für E_c
für Absorber mit Z :

$$E_c = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1,24}$$



Bremsstrahlung & Strahlungslänge X_0

- radiative Bremsstrahlungs-Energieverluste von leichten e^- dominieren bei hohen Energien

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{brems} = 4 \cdot \alpha \cdot \rho \cdot N_A \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot r_e^2 \cdot \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) \cdot E$$

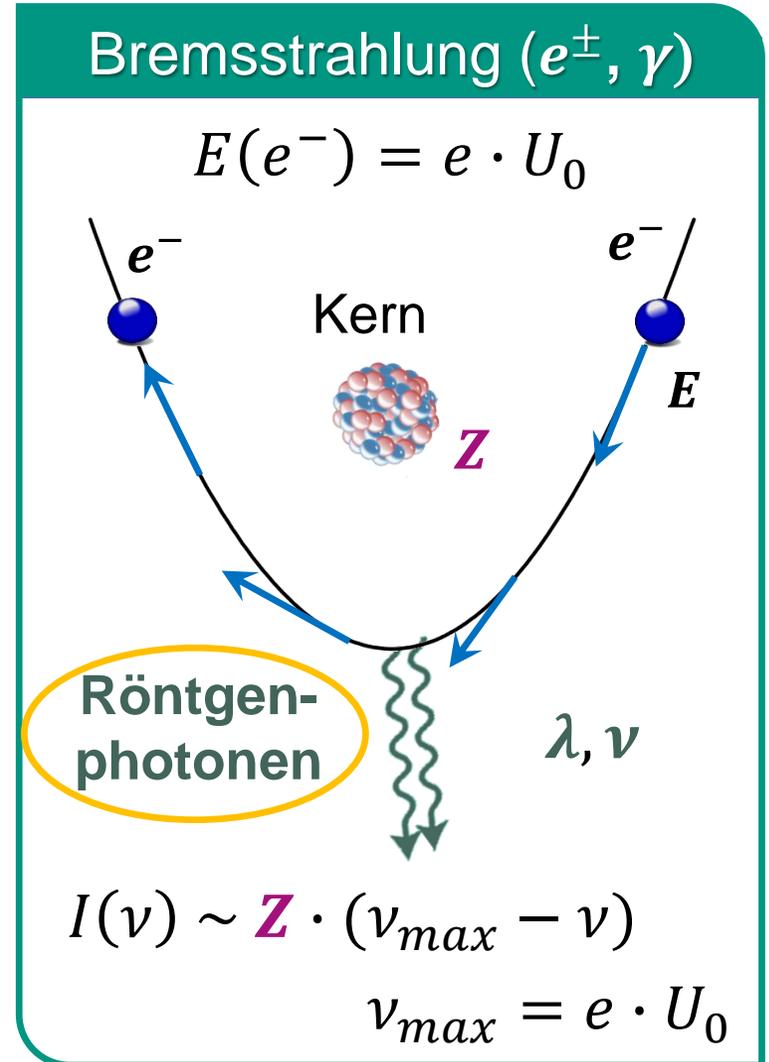
= 1 / Strahlungslänge X_0

N_A = Avogadrozahl

ρ = Targetdichte

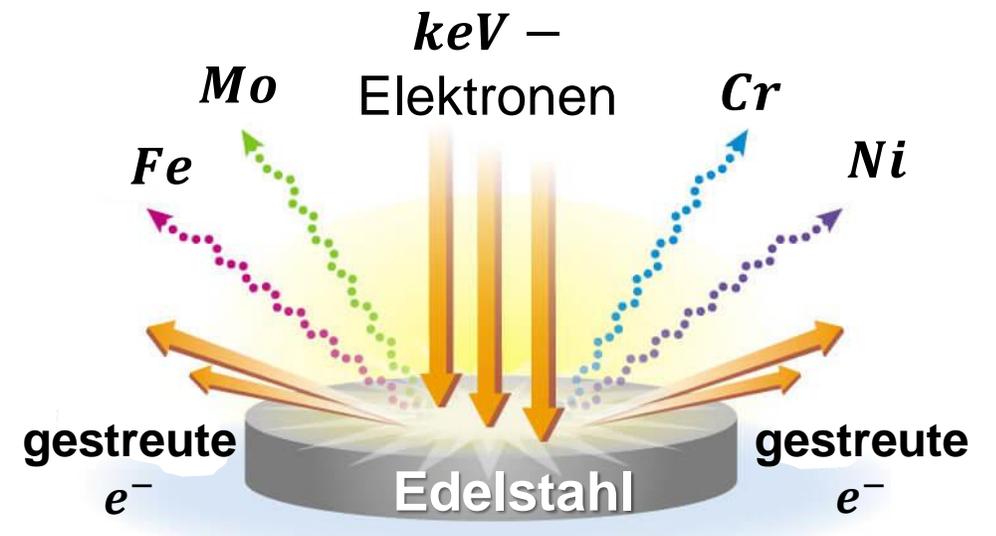
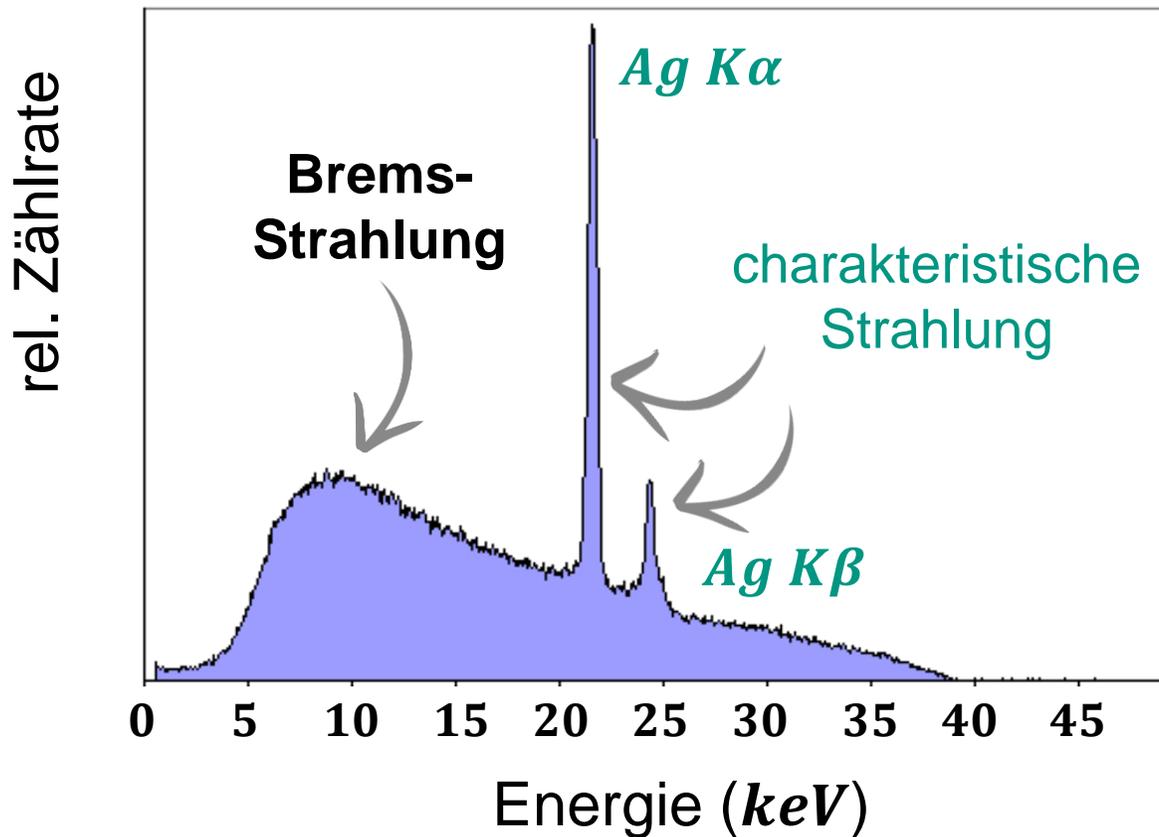
α = Feinstrukturkonstante

r_e = klass. Elektronradius $r_e = \alpha^2 \cdot a_0 = 2,818 \cdot 10^{-15} \text{ m}$



Bremsstrahlung: Anwendung über X – Rays*

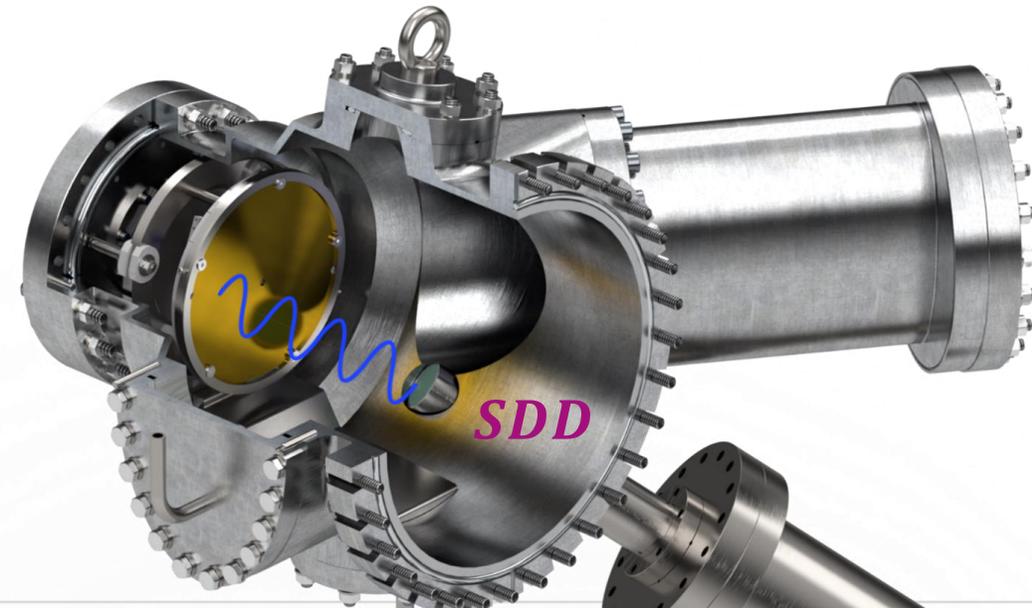
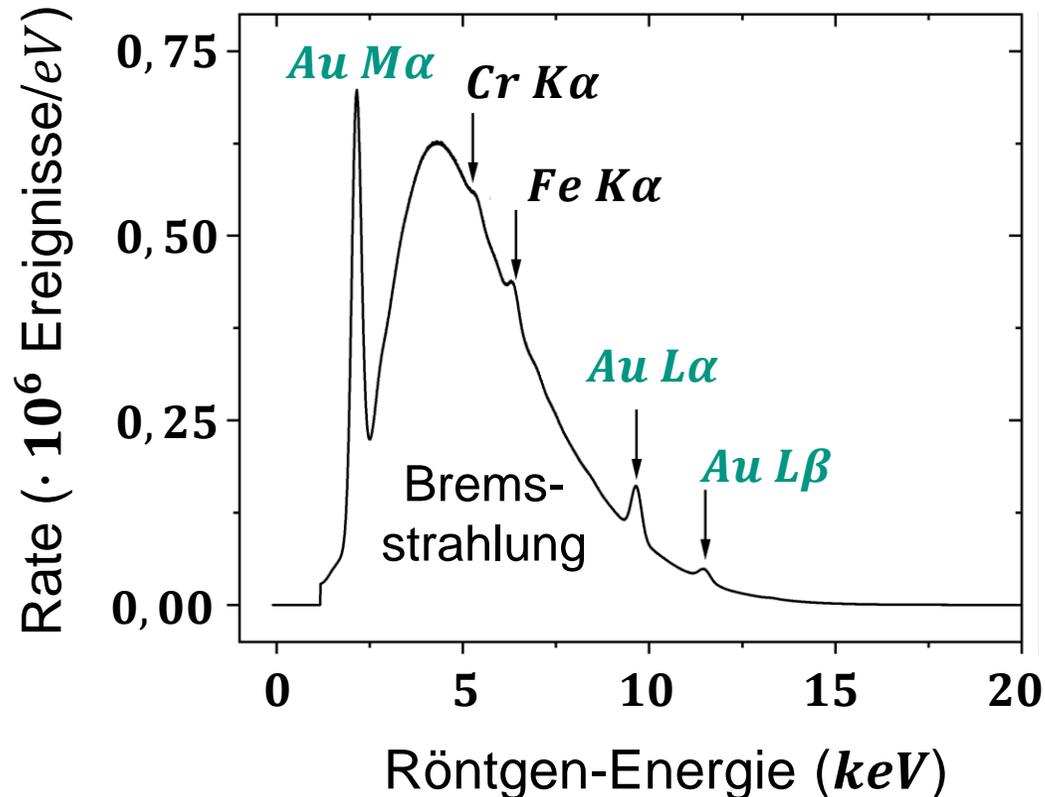
- Kontinuierliches Bremsstrahlungsspektrum & charakteristische Röntgen-Strahlung (**diskrete Peaks**) aus Auffüllen einer **Vakanz** in der Elektronenhülle



Bremsstrahlung im Target:
Röntgenphotonen +
charakteristische Linien

Bremsstrahlung: Anwendung bei *KATRIN*

- Analyse von Röntgenspektren mit hochauflösenden *Silizium-Drift-Detektoren (SDDs)* aus **Elektron-Wechselwirkungen** in einer dünnen **Gold-Edelstahl Schicht (KATRIN Rear Wall)**

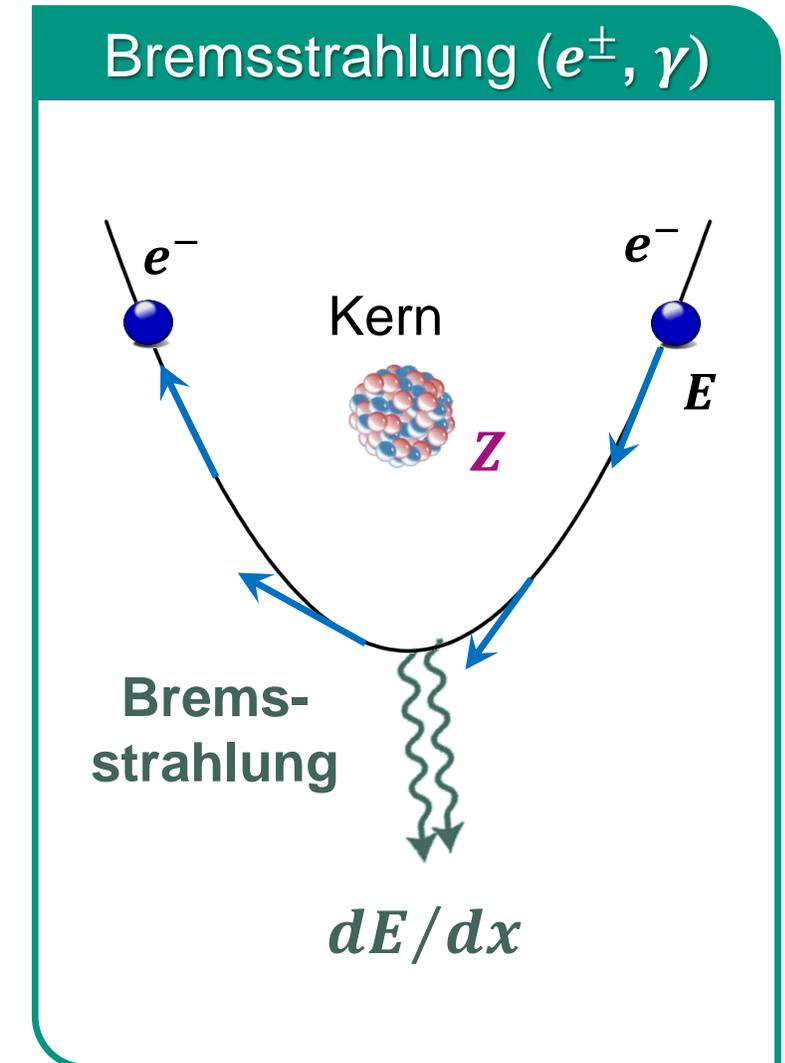


Bremsstrahlung & Strahlungslänge X_0

- radiative Bremsstrahlungs-Energieverluste von leichten e^- dominieren bei hohen Energien

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{brems}} = \frac{1}{X_0} \cdot E$$

- Energieverluste nehmen **linear zu mit Energie E**
- nur wichtig für leichte geladene Teilchen wie Elektronen ($\sim 1/m^4$)
- für $E > E_C$: exponentielle dE/dx – Charakteristik



Strahlungslänge X_0

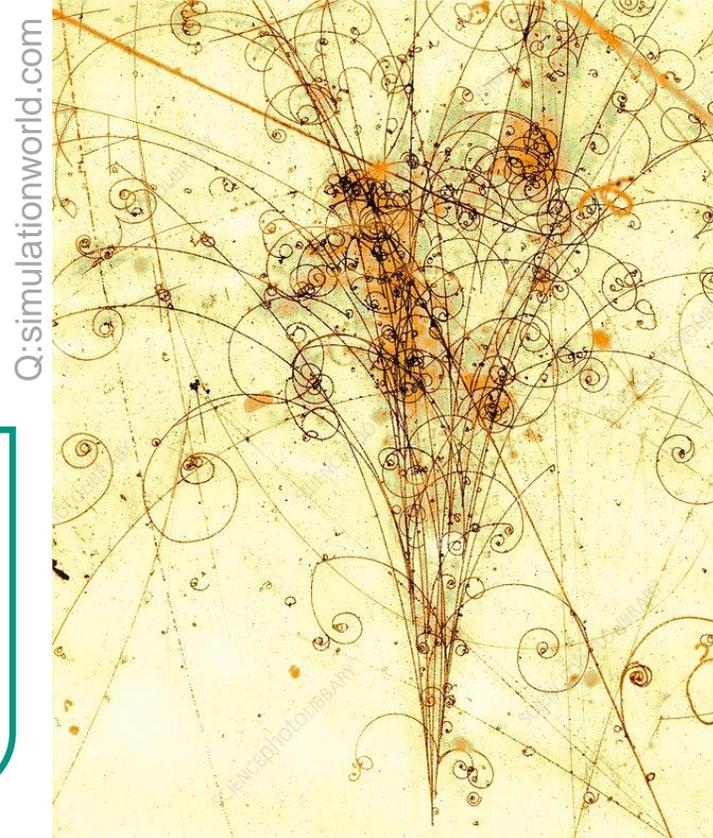
- Elektron-Energie ist nach Durchlaufen von einer Strahlungslänge ($\equiv 1 X_0$) auf $(1/e)$ – tel des Startwerts abgefallen

$$E(X) = E_0 \cdot e^{-X/X_0}$$

- Beschreibung von elektromagnetischen Schauern:

da X_0 angibt, nach welcher Strecke die Energie eines relativistischen e^- auf $(1/e)$ abgefallen ist (bzw. wie groß die **freie Weglänge** Λ eines hochenergetischen γ 's ist), definiert X_0 die **räumliche Entwicklung eines Schauers**

elektromagnet. Schauer



Strahlungslänge X_0

- Elektron-Energie E_0 ist nach Durchlaufen von einer Strahlungslänge ($\equiv 1 X_0$) auf $(1/e)$ – tel des Startwerts abgefallen

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{brems}} = \frac{1}{X_0} \cdot E$$

$$X_0 = \frac{A}{Z^2} \cdot \frac{1}{4 \cdot \alpha \cdot \rho \cdot r_e^2 \cdot N_A} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right)}$$

Strahlungslänge X_0

- meist wird die Strahlungslänge X_0 auf die Targetdichte (**Massenbelegung**) ρ bezogen und in (g/cm^2) angegeben
- die Strahlungslänge X_0/ρ kann bei einer Targetdichte ρ auch in (cm) angegeben werden

Strahlungslänge X_0 - materialspezifisch

■ wichtige material-spezifische Größe für Elektron-Wechselwirkungen

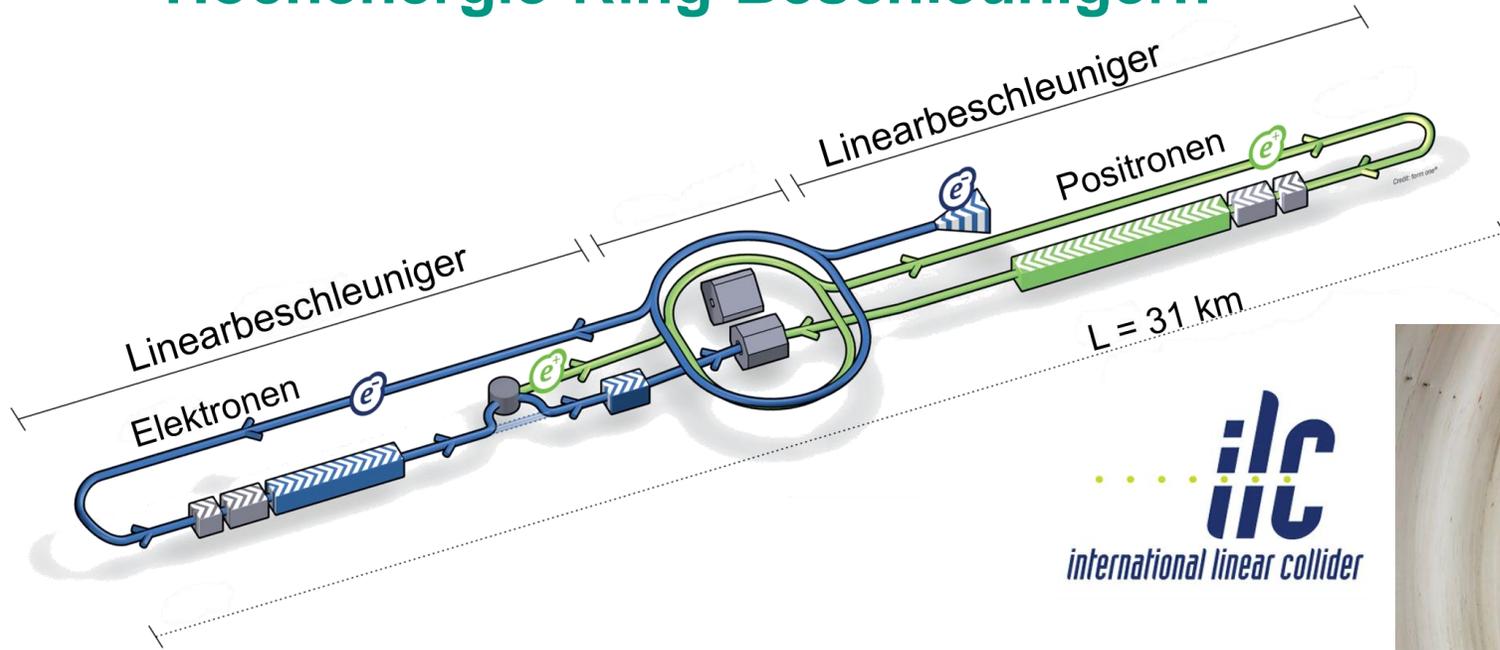
- nimmt ab mit steigender Kernladungszahl Z ($X_0 \sim 1/Z^2$)
- kurzes X_0 in Materialien mit hoher Kernladungszahl wie z.B. **Blei** ($Z = 82$)
⇒ **Pb** ideal als **kompaktes Kalorimeter-Material** bzw. **Abschirmung**

Material	Z	X_0 (g/cm^2)	krit. Energie E_C
H_2	1	63	340 MeV
Ar	18	18,9	35 MeV
Fe	26	13,8	24 MeV
Xe	54	8,5	14,5 MeV
Pb	82	6,37	6,9 MeV
NaJ (Tl)	11 / 53	9,5	12,5 MeV



Radiative Effekte an zukünftigen Beschleunigern

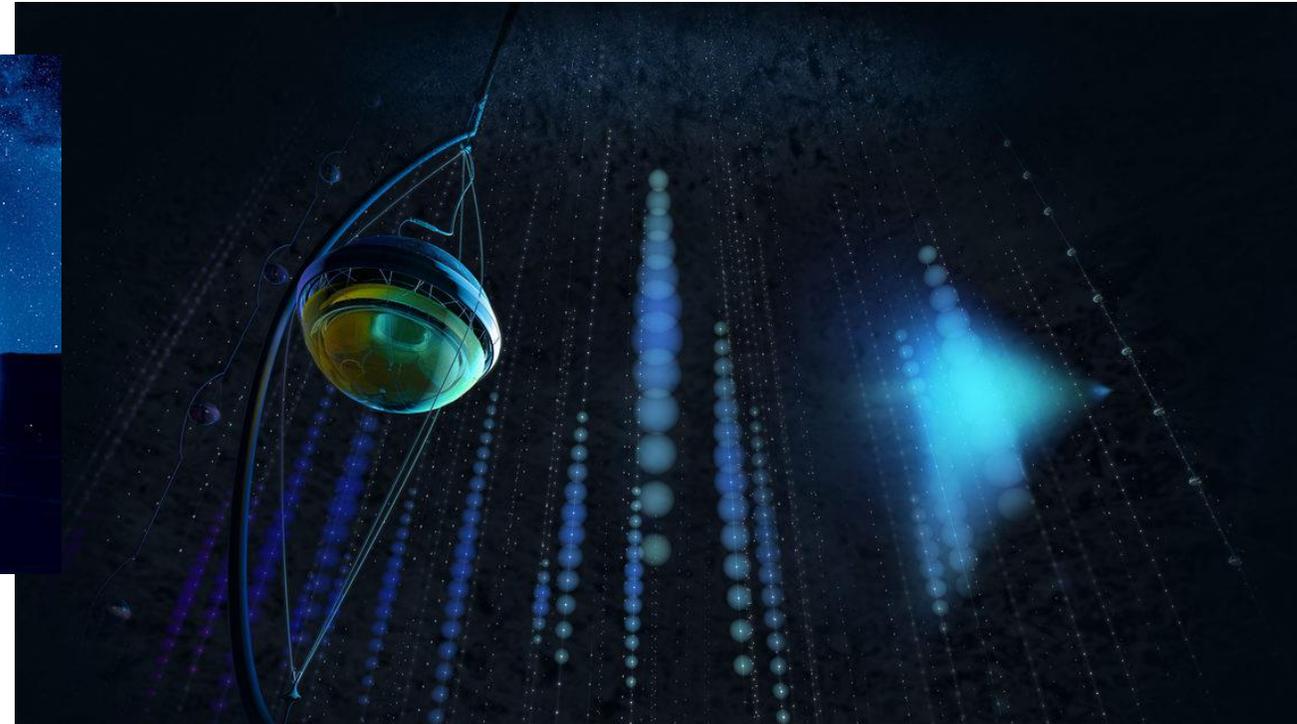
- radiative Energieverluste von Elektronen: sehr groß bei **Hochenergie-Ring-Beschleunigern**



Proton-Collider: keine relevanten Verluste durch Bremsstrahlung, da große Masse $M(p) = 1 \text{ GeV}$



- wichtig bei leichten, geladenen Teilchen, insbesondere bei Elektronen ($\sim 1/m^4$) bei TeV –Energien: \Rightarrow nur e^- – **Linearcollider**



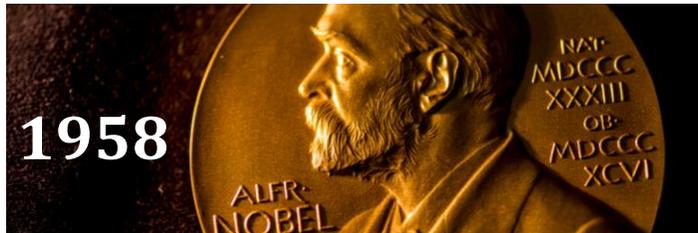
Q: CTA, IceCube

KAPITEL 3.3 – CHERENKOV- UND ÜBERGANGSSTRAHLUNG

Cherenkov* – Strahlung

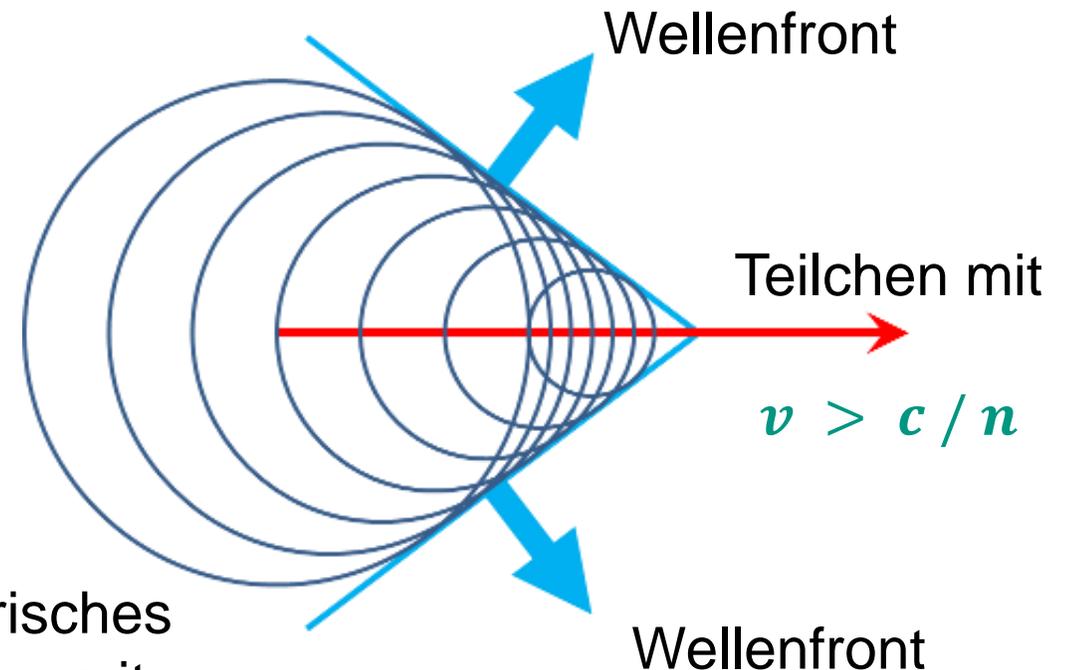
- **Geladenes Teilchen** bewege sich in dielektrischem Medium mit Geschwindigkeit $v = \beta \cdot c > c/n$ (c/n = Phasengeschwindigkeit), d.h. **größer als die Phasengeschwindigkeit des Lichts im Medium**

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



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

Pawel Cherenkov
(1904-1990)



Q: U Sheffield

Cherenkov – Kegel

■ Abstrahlung von Photonen durch Medium, da asymmetrische Polarisation

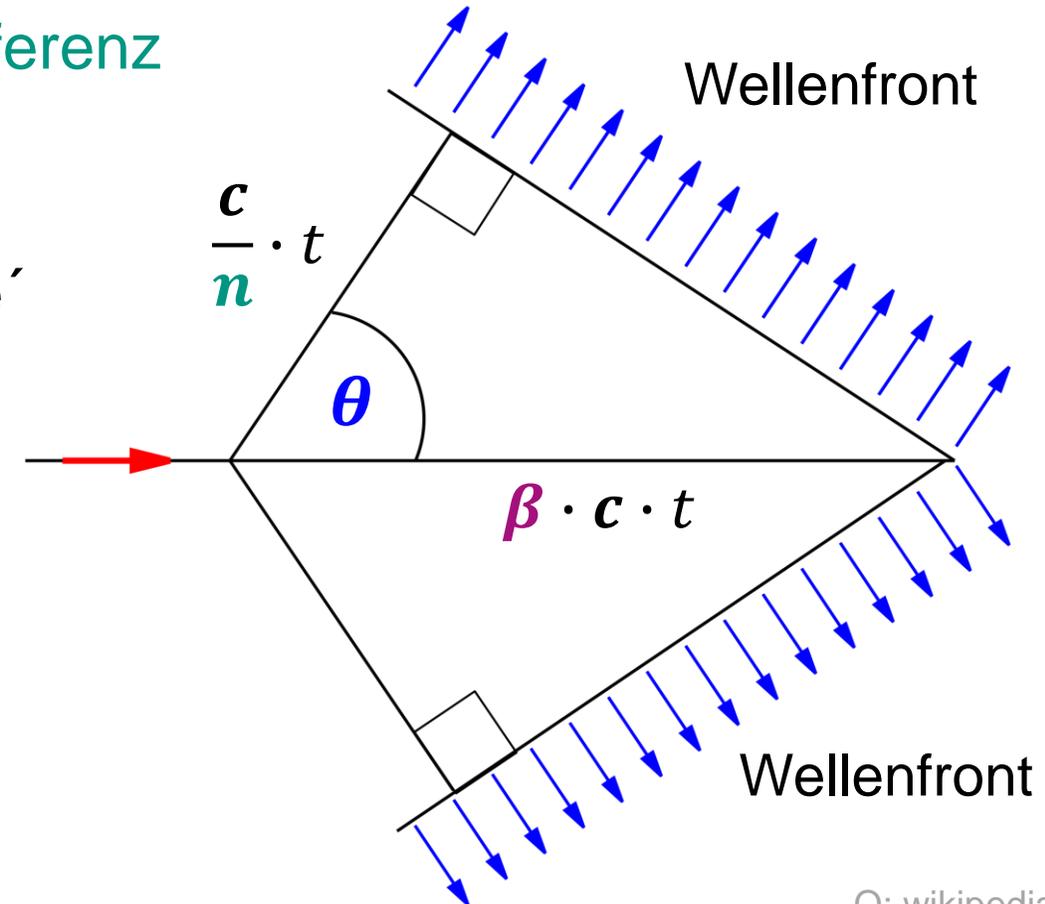
- Huygens'sches Prinzip: konstruktive Interferenz der vom Medium (Radiator) abgestrahlten Photonen

⇒ 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: $\theta = 42^\circ$



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Takaaki Kajita

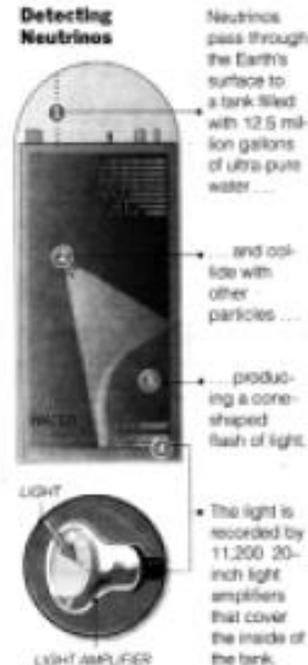
梶田 隆章

“for the discovery of neutrino oscillations, which shows that **neutrinos have mass.**”

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



And Detecting Their Mass
By analyzing the cones of light,



Q: New York Times, Scientific american

50.000 t H₂O

Titelzeile der NYT am 6.6.98

Cherenkov-Kegel: Richtungsinformation (II)

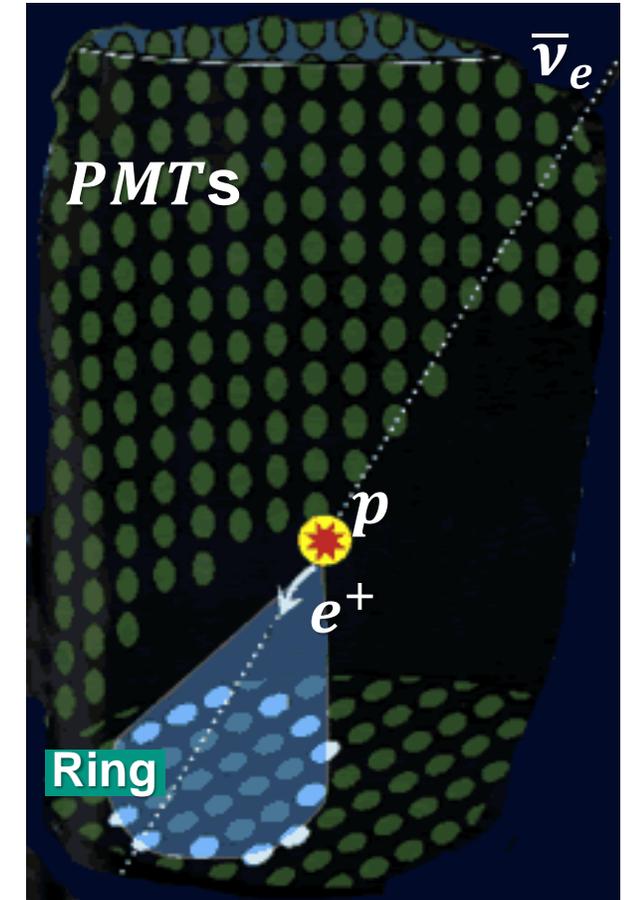
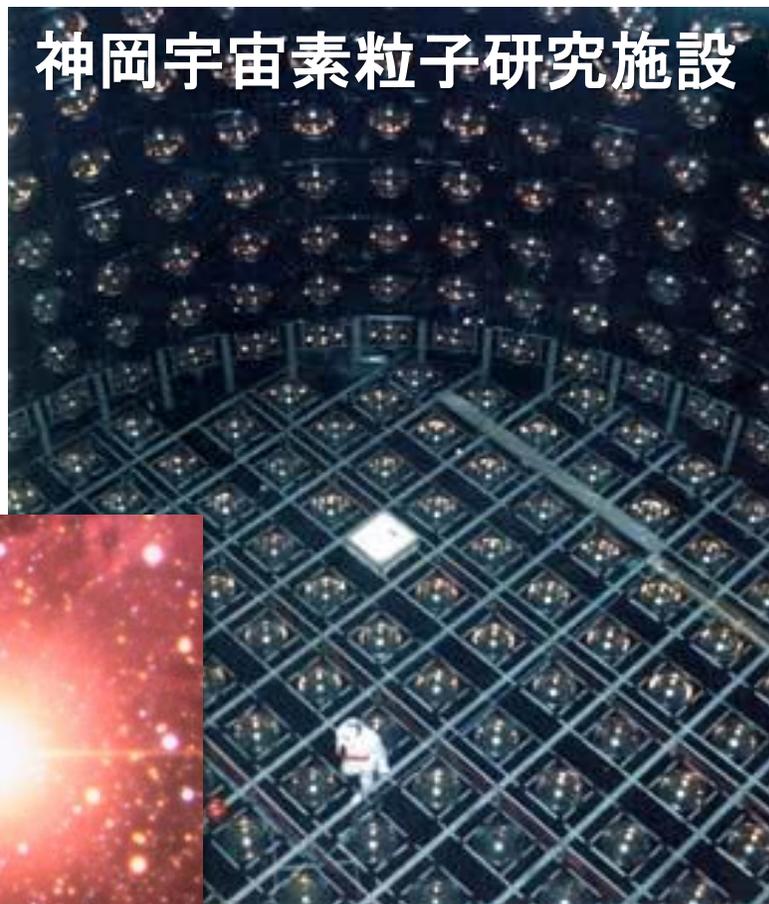
■ Rekonstruktion der Teilchenrichtung von **Supernova-Neutrinos**



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



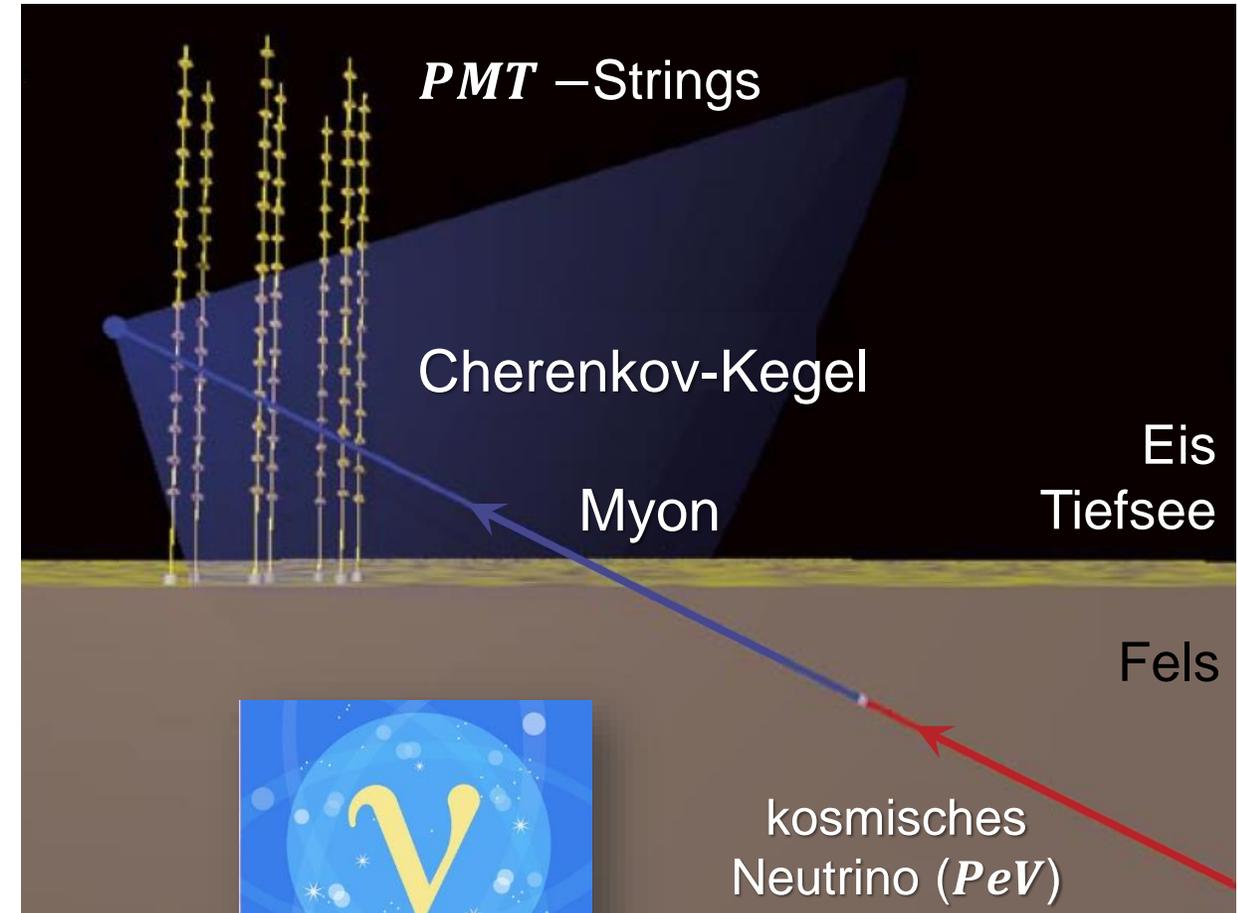
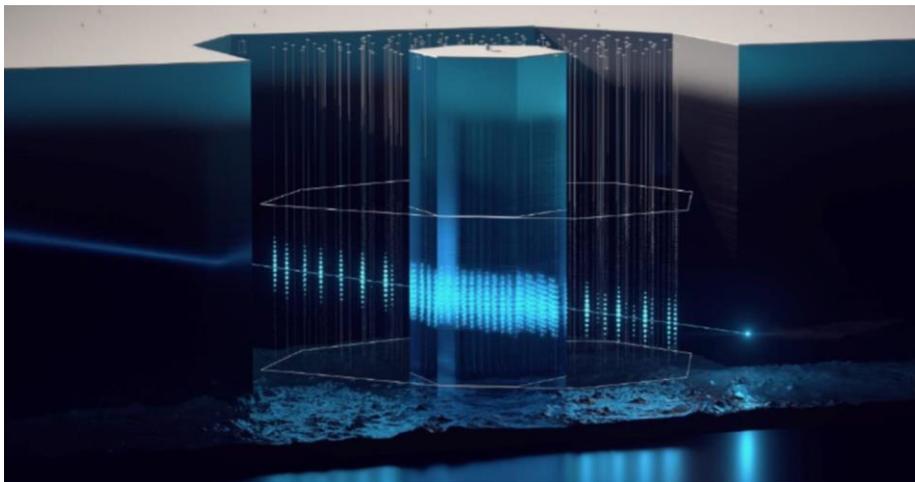
Masatoshi
Koshiwa



Cherenkov-Kegel: Richtungsinformation (III)

■ Rekonstruktion der Teilchenrichtung von PeV – Myonen im Eis

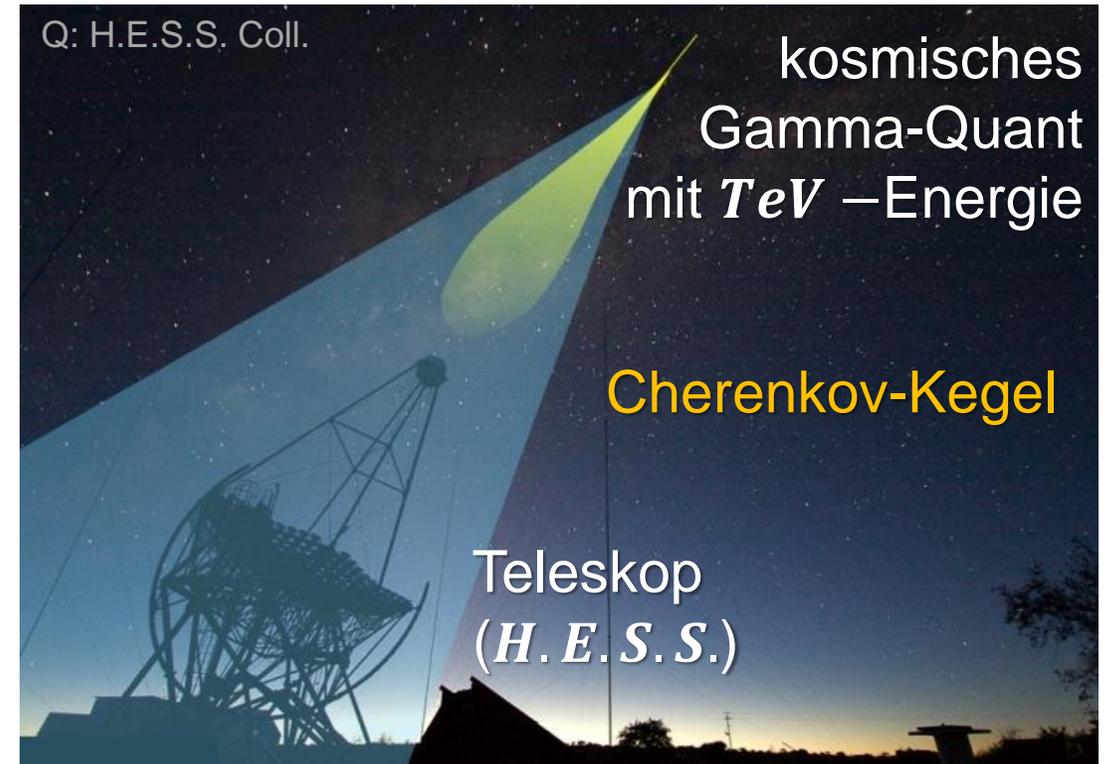
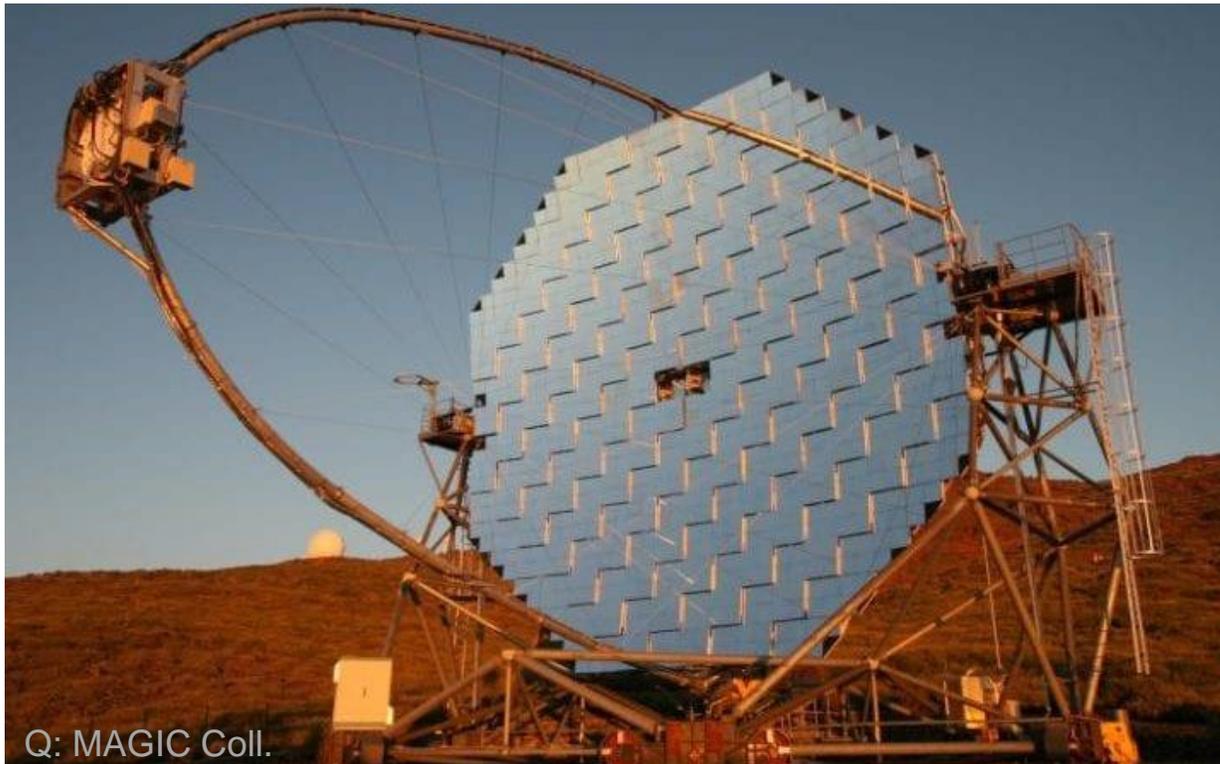
- abbildende Cherenkov-Technik in **Neutrino-teleskopen**: Nachweis des Cherenkov-Lichts in PMT^* -Strings (Tiefsee, Eis am Südpol)
- Beispiel: *IceCube*-Experiment



Cherenkov-Kegel: Richtungsinformation (IV)

■ Rekonstruktion der Teilchenrichtung von TeV – Γ aus der Galaxis

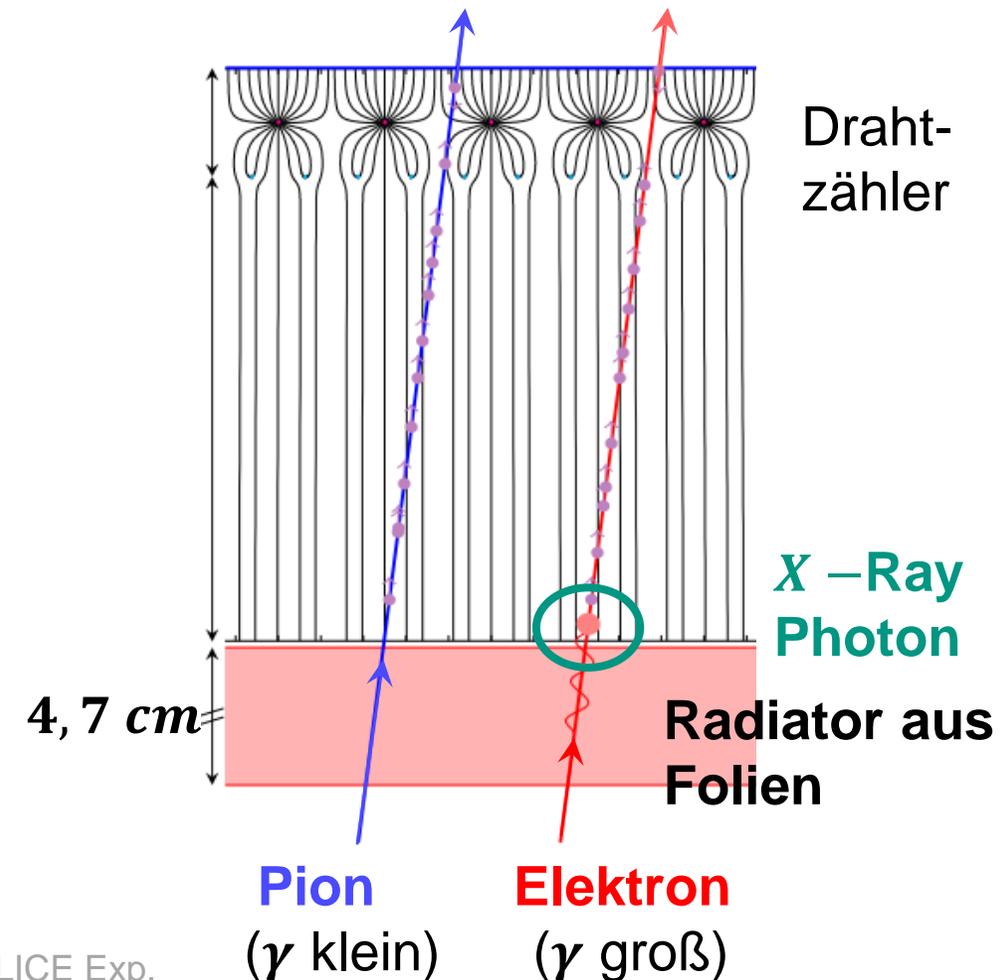
- abbildende Cherenkov-Teleskope für hochenergetische Gammaquanten aus der Galaxis, $n(\text{Luft}) = 1,000292 \Rightarrow \theta \sim 1^\circ$



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 (Masse m_0) durch Übergangsstrahlung in **Folien** (d.h. dem Radiator) ist abhängig von seinem **Lorentz-Faktor γ** mit $\gamma = E / (m_0 \cdot c^2)$



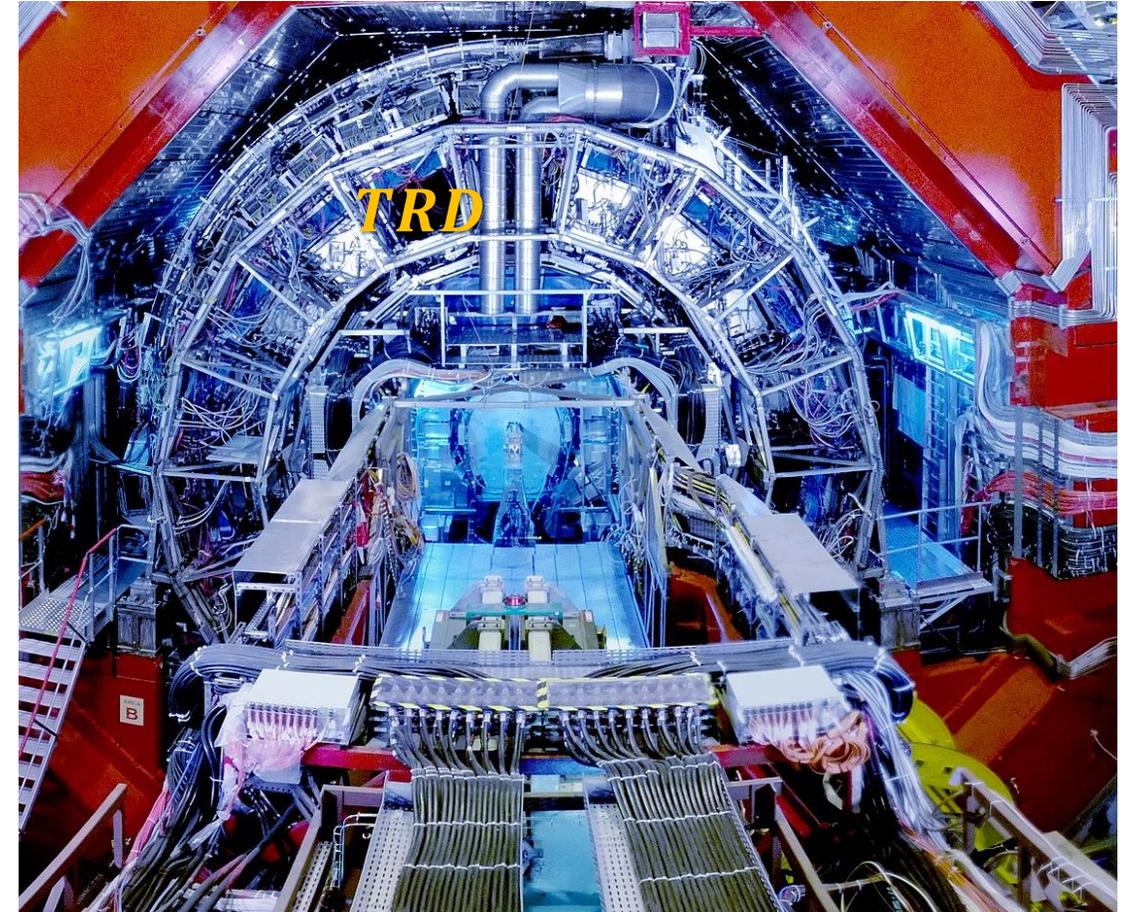
Q: ALICE Exp.

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)



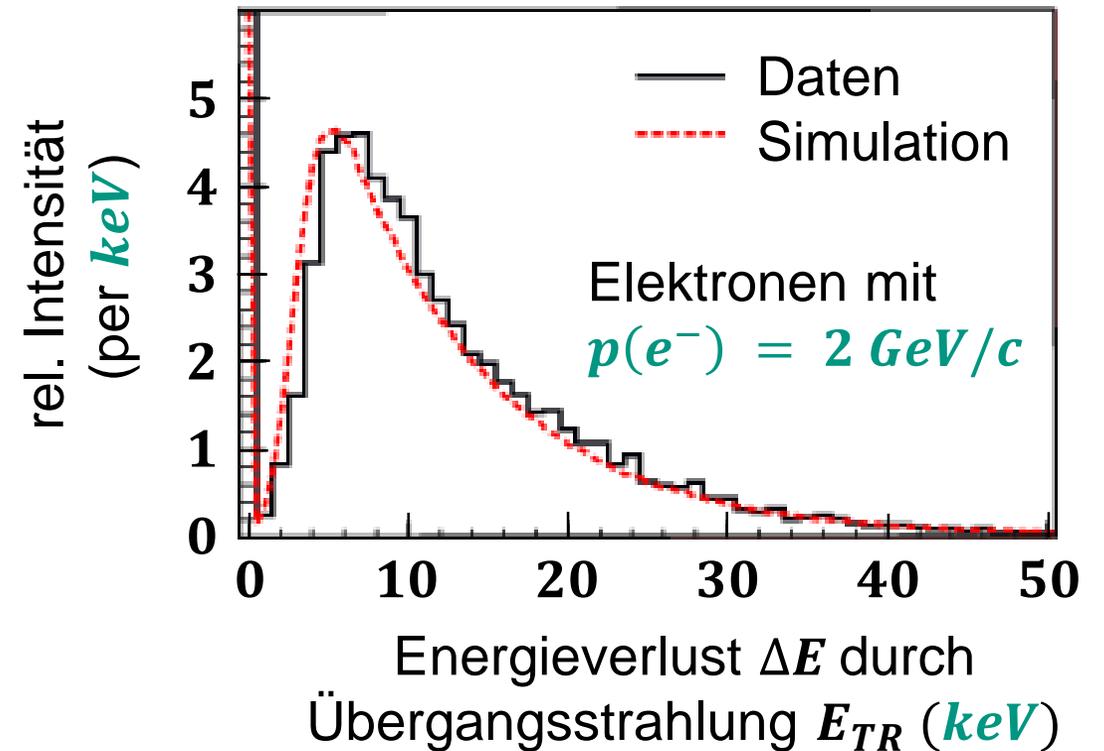
Q: ALICE Exp.

Übergangsstrahlung: Signatur in ALICE

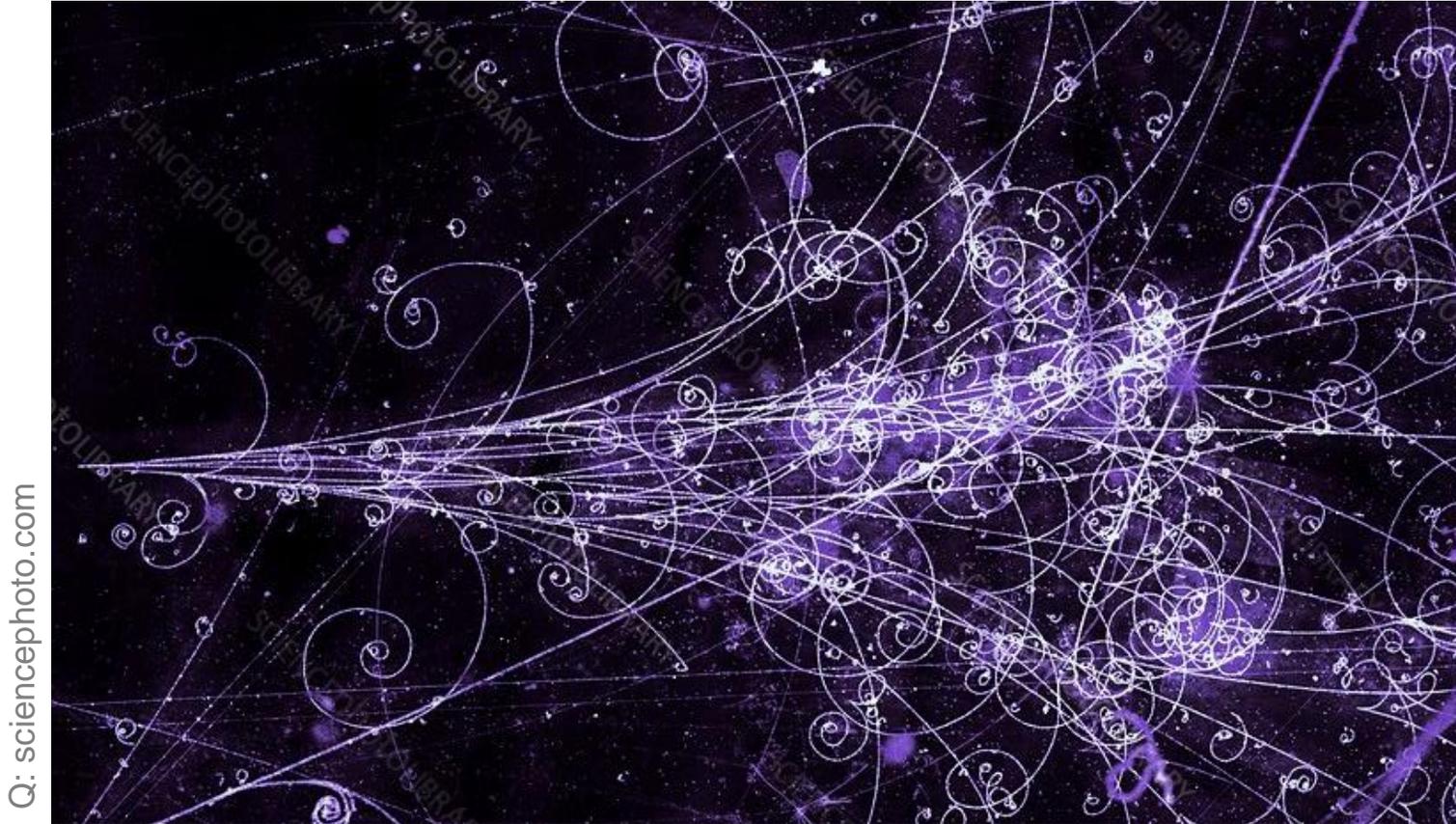
- ultra-relativistisches Teilchen passiert Grenzfläche von Medien mit unterschiedlicher Permittivität ϵ

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

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



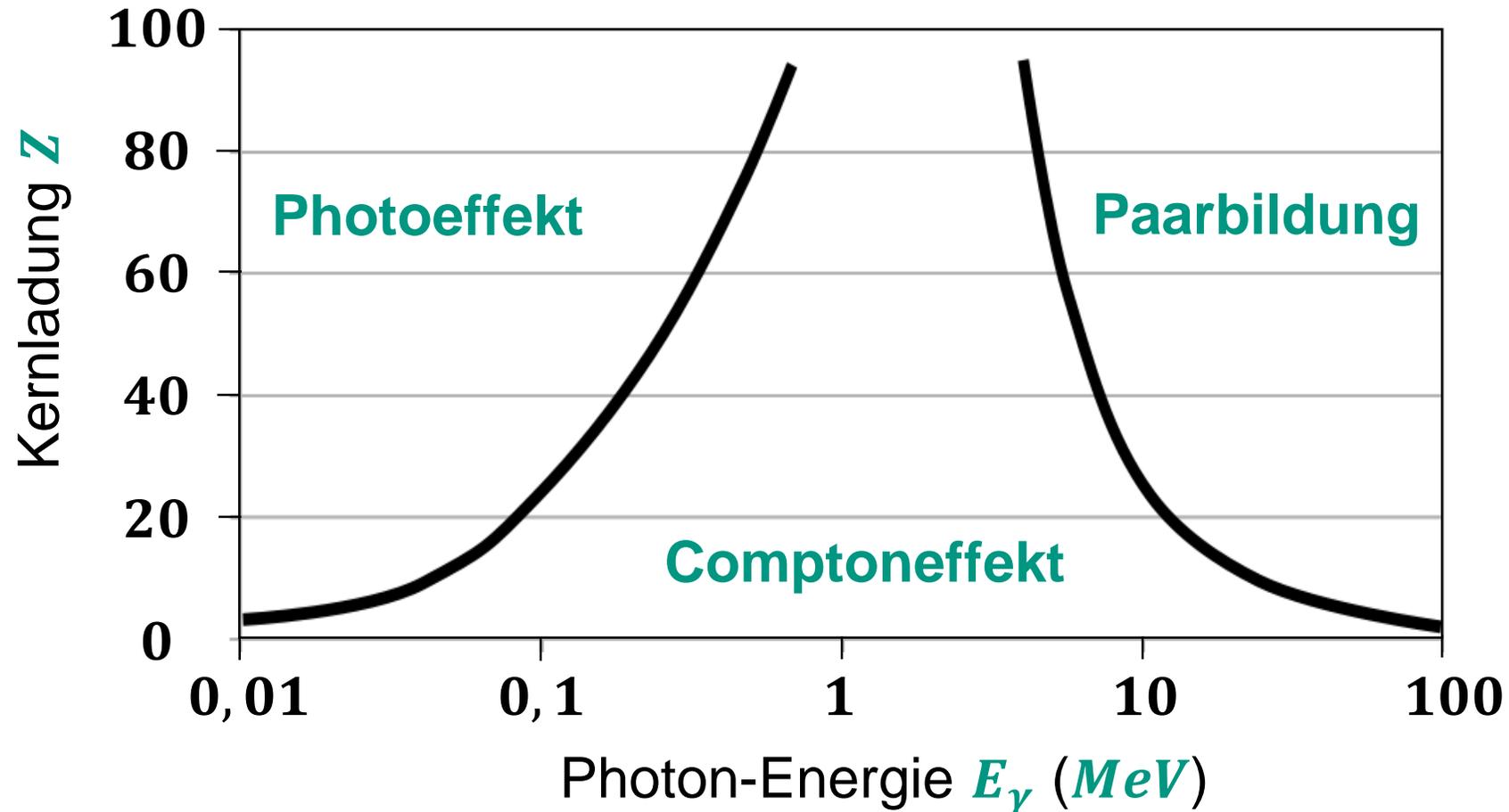
Q: ALICE Exp.



KAPITEL 3.4 – WECHSELWIRKUNG VON STRAHLUNG MIT MATERIE

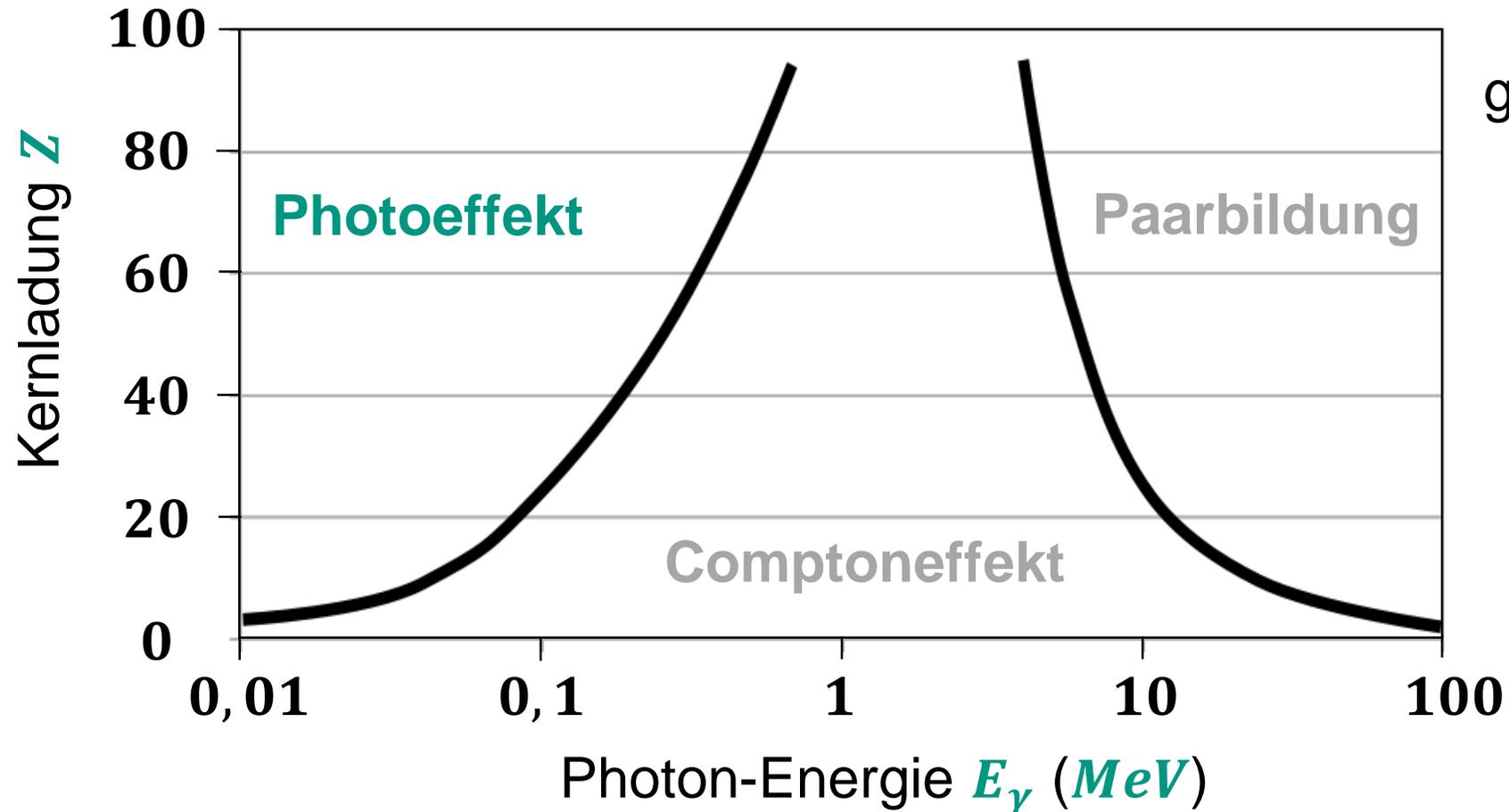
Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

- Drei fundamentale Prozesse: Photoeffekt, Comptonstoss, Paarbildung



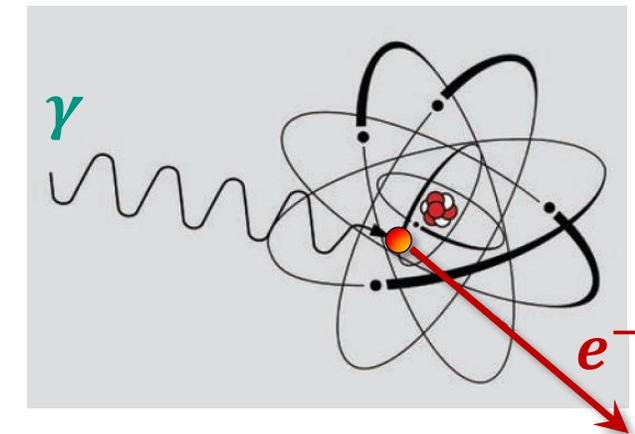
Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

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



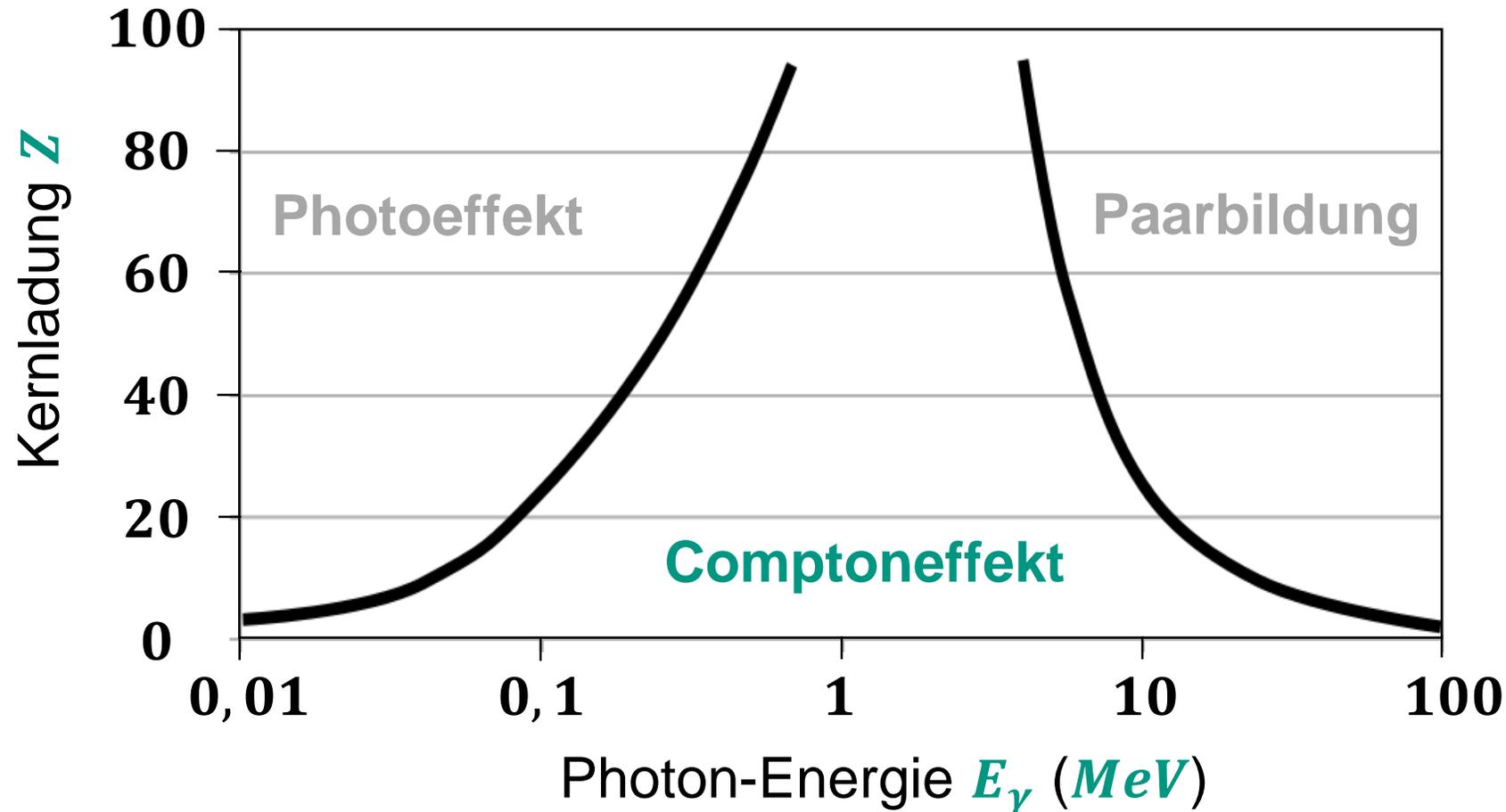
große Kernladung $\sim Z^5$

kleines $E_\gamma \sim E^{-3,5}$



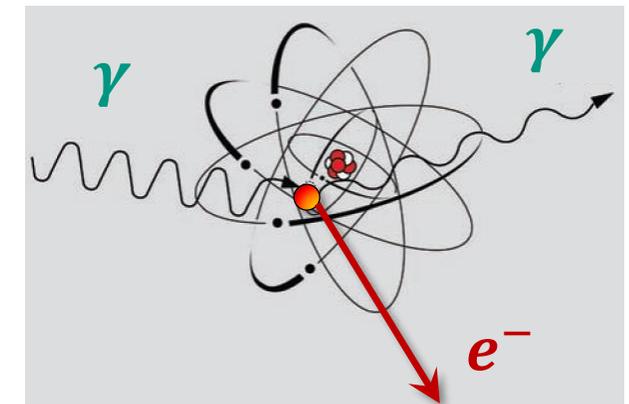
Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

- Drei fundamentale Prozesse: Photoeffekt, Comptonstoss, Paarbildung



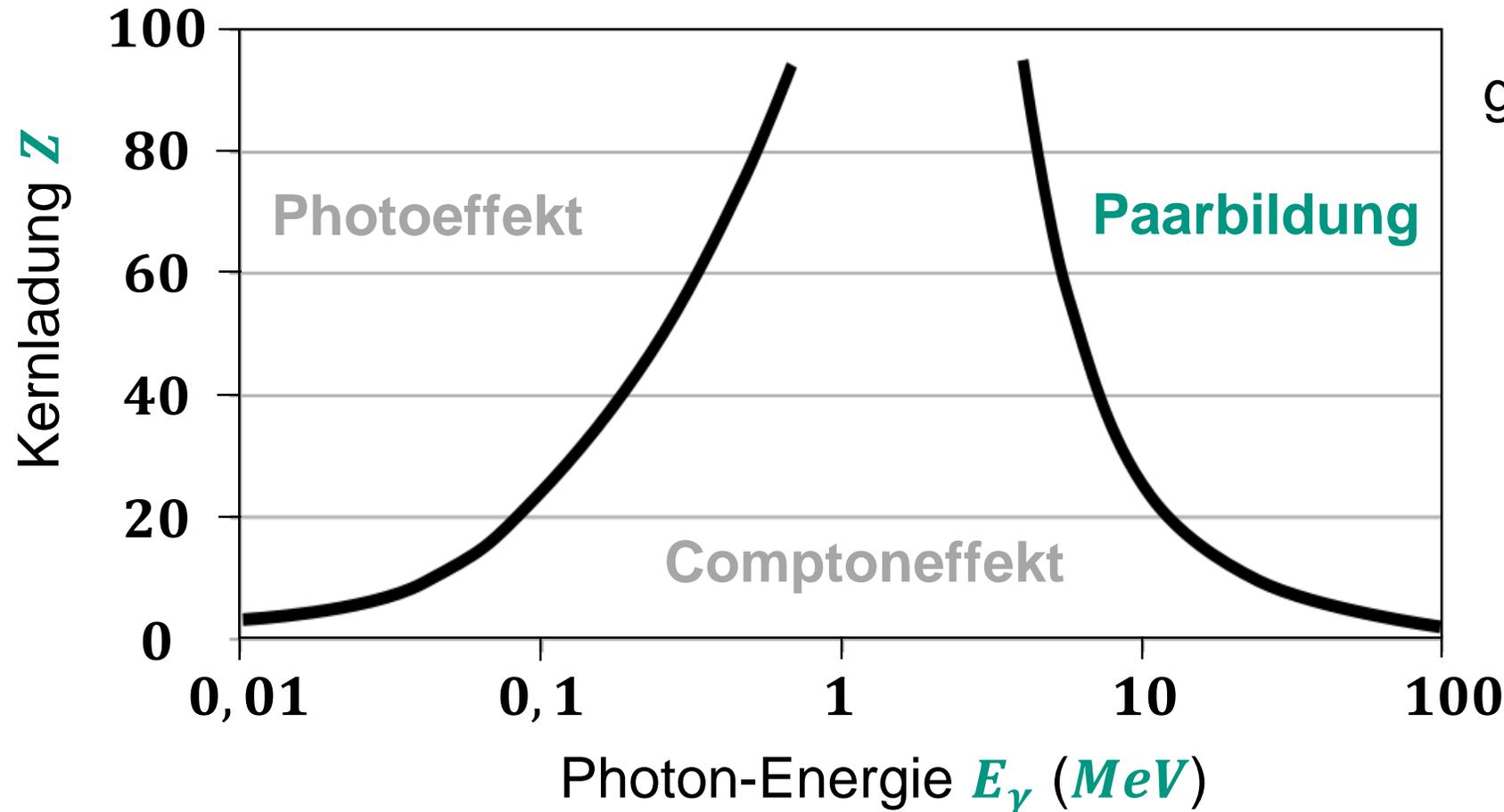
mittlere Kernladung

mittleres E_γ



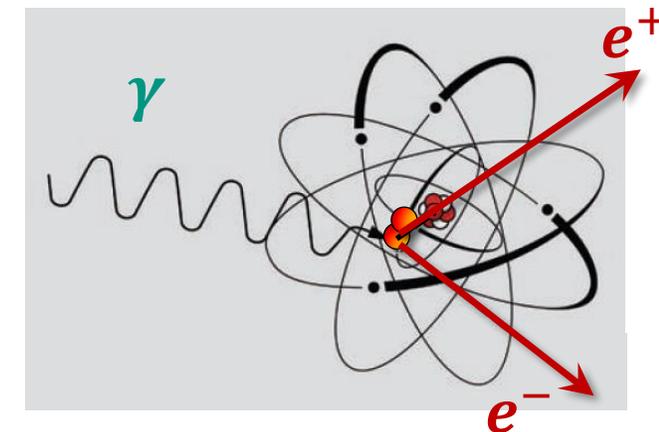
Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

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



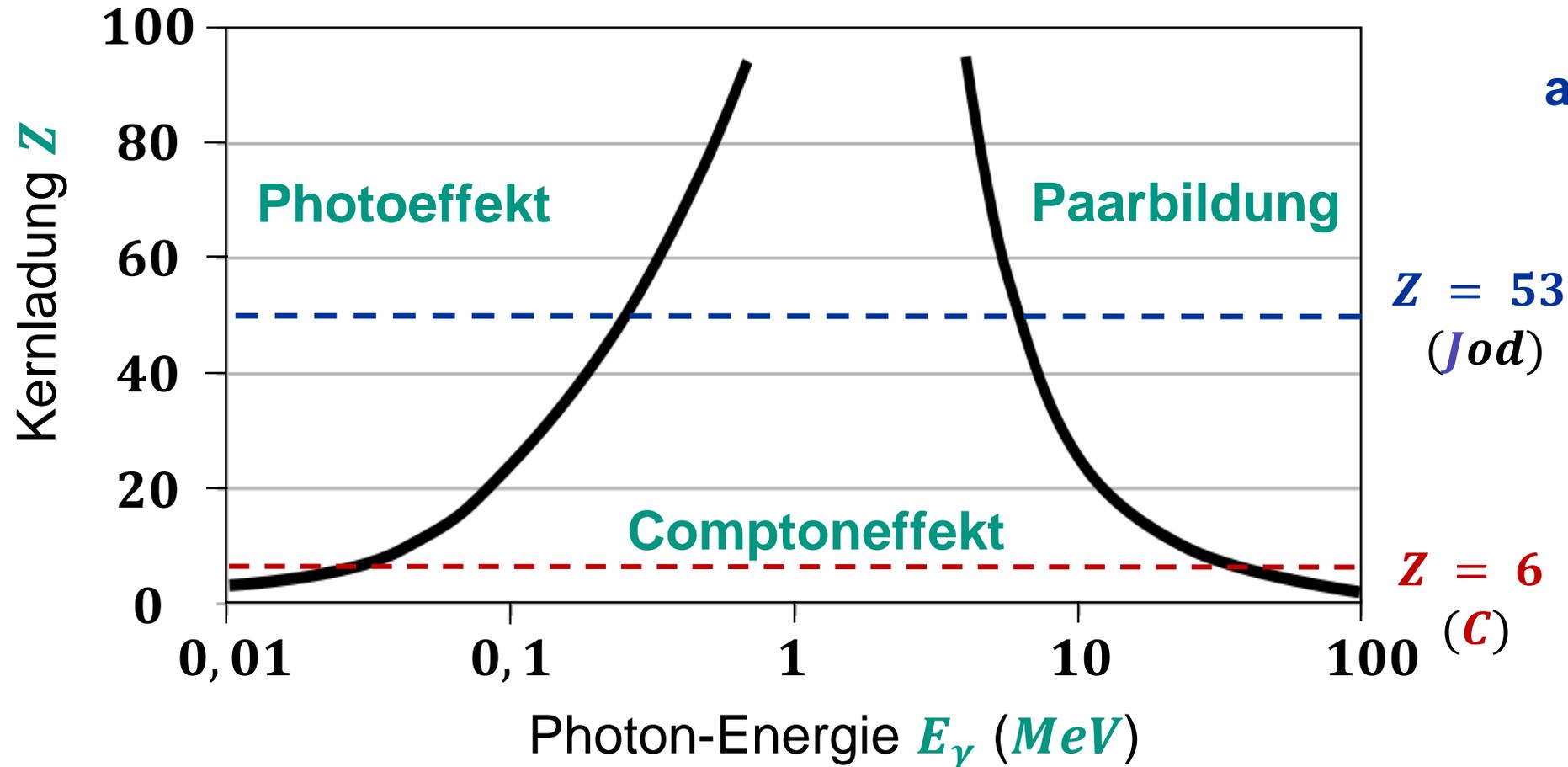
große Kernladung $\sim Z^2$

großes $E_\gamma \rightarrow \sigma_{Grenz}$



Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

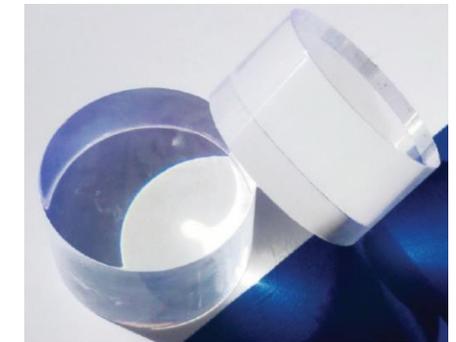
- Drei fundamentale Prozesse: abhängig vom Z des Detektormaterials



anorganischer NaJ



$Z = 53$
(*Jod*)

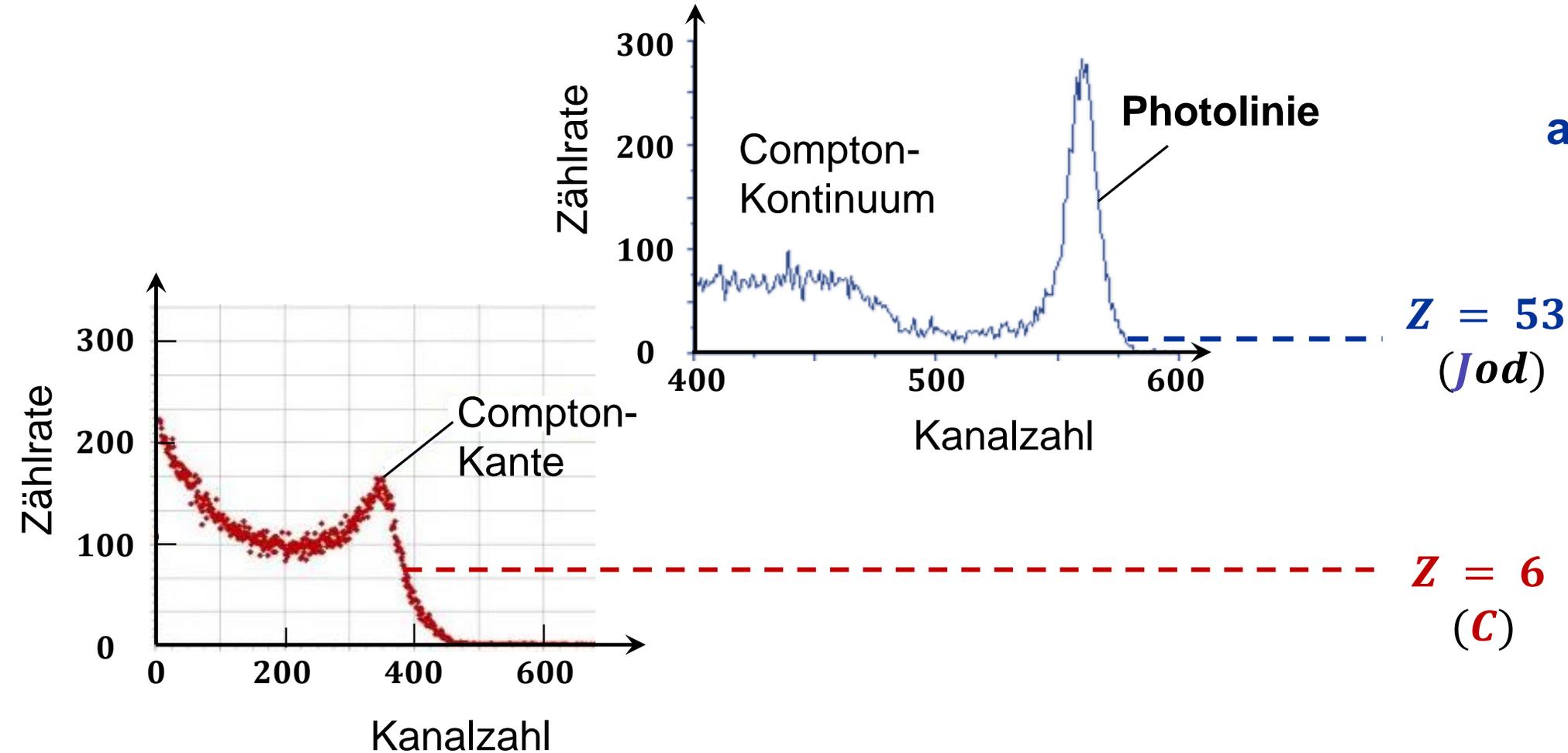


$Z = 6$
(*C*)

organischer CH_2

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

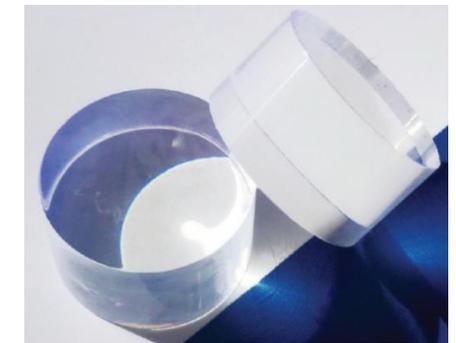
- Drei fundamentale Prozesse: abhängig vom Z des Detektormaterials



anorganischer NaI



$Z = 53$
(*Jod*)

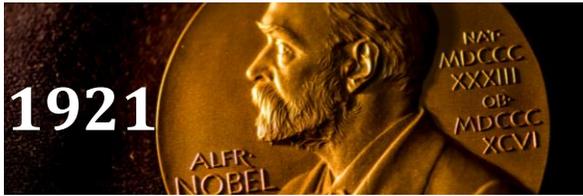


$Z = 6$
(*C*)

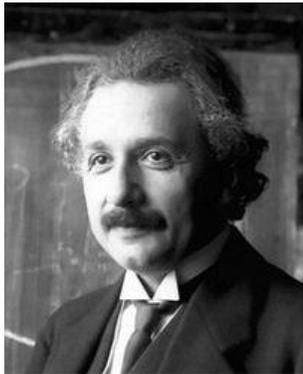
organischer CH_2

Photoeffekt*

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



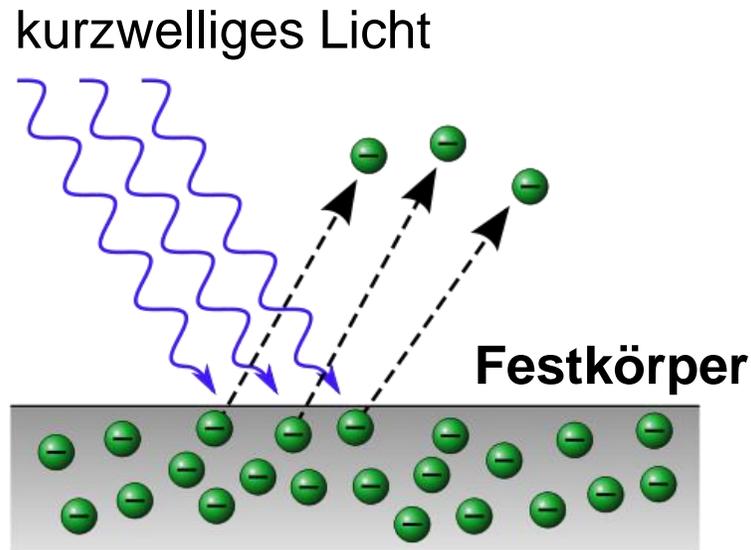
1921
6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.



Albert Einstein

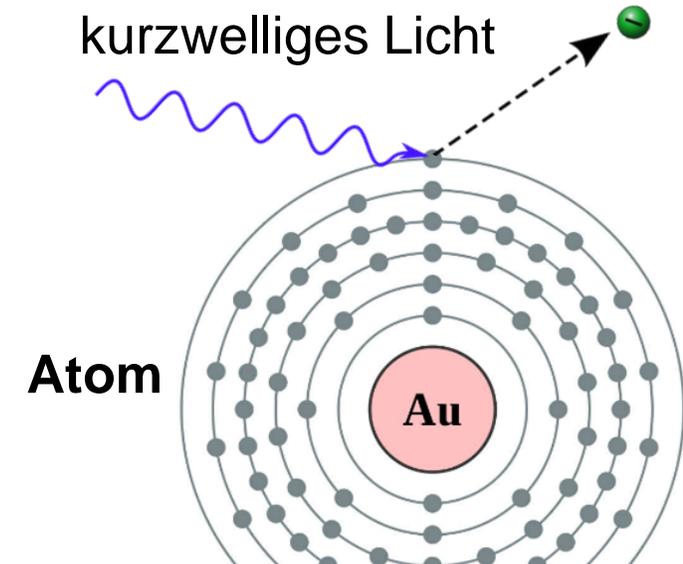
Elektronen aus Metall-
(Halbleiter-) **Oberflächen**

⇒ **Bänderstruktur** im Festkörper
charakteristische Austrittsarbeit



Elektronen von einzelnen
Atomen / Molekülen, z.B. in Gasen

⇒ Struktur der **Elektronenschalen**
charakteristische Ionisationsenergie



Photoeffekt: Wirkungsquerschnitt

■ Energieabhängigkeit des Photoquerschnitts σ_γ

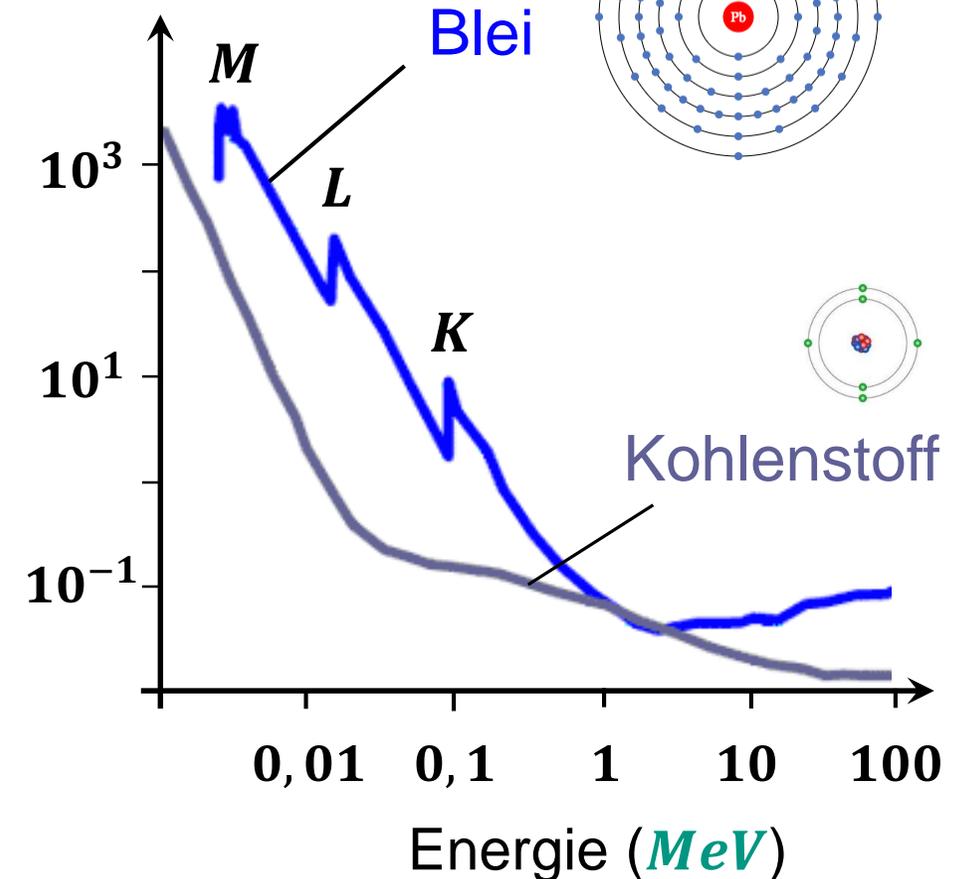
- bei niedrigen Energien ($E_\gamma < 0,5 \text{ MeV}$)

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

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

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

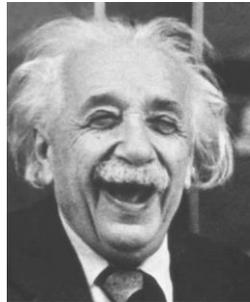
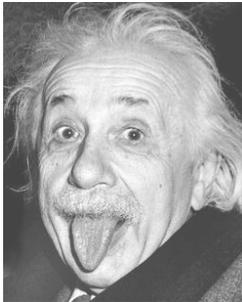
Absorptions-
Koeffizient (cm^2/g)



Quiz: Herr Einstein, auf eine kurze Frage

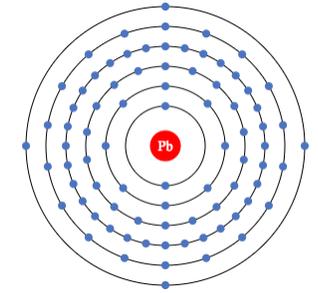
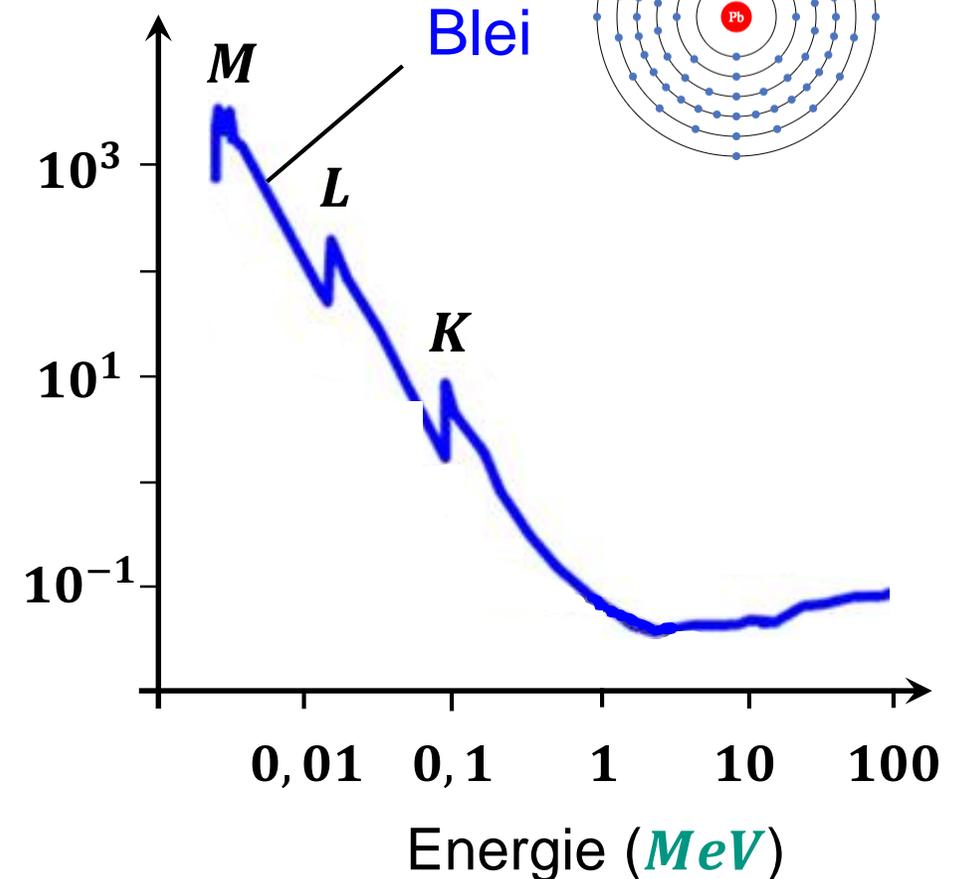
- ... zu den Absorptionskanten beim Wirkungsquerschnitt!
Diese erklären sich, da dort...

- die **Wellenlänge** λ des absorbierten γ 's größer als der **Radius** r der absorbierenden Schale (K, L, M, \dots) wird!



- die **Energie-Impulsrelation** von Photon (masselos) & Elektron (Masse) ab der Energieschwelle eine wichtige Rolle spielt!

Absorptions-
Koeffizient (cm^2/g)

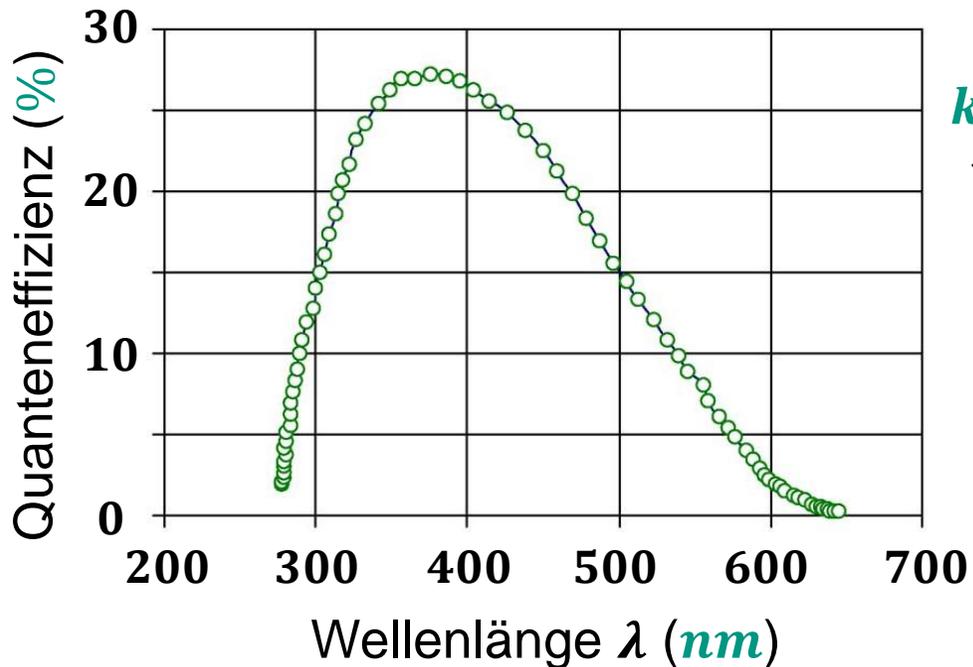
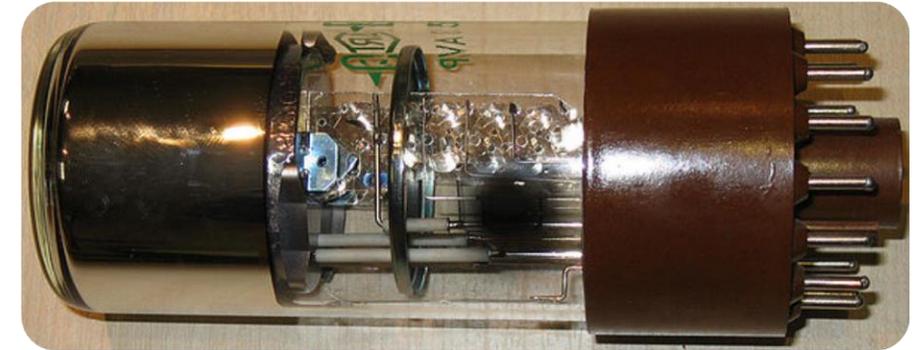


Photoeffekt: Anwendung

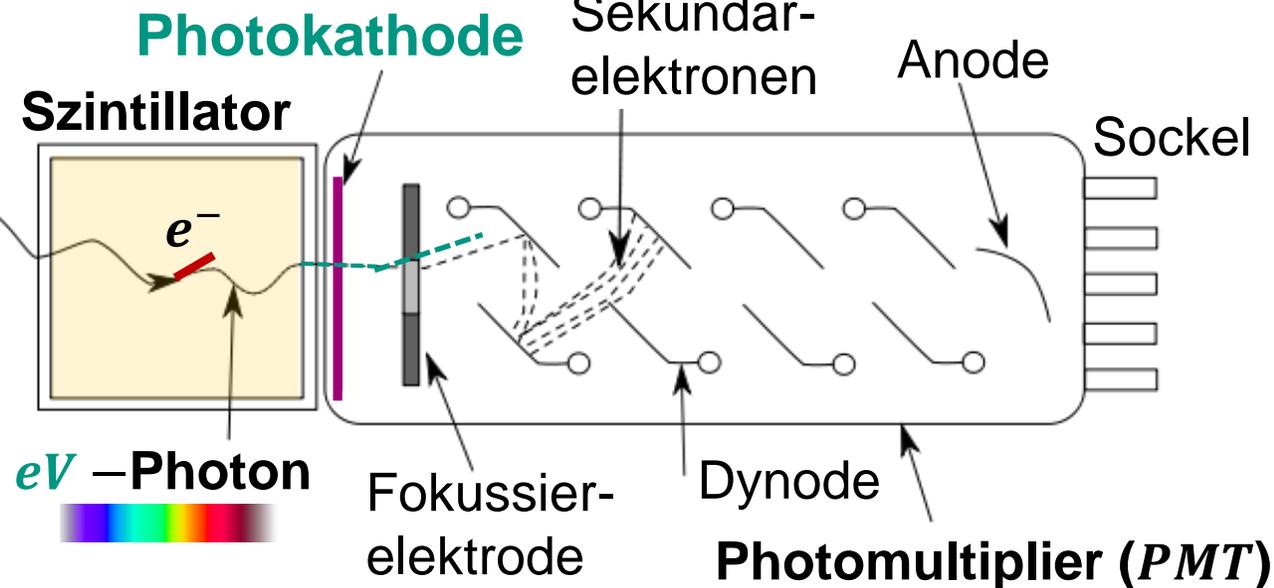
■ *PMTs*: Nachweis von Szintillationslicht (keine X – Rays oder Gammas!)

- *PMTs*: Photoeffekt in dünner
Bialkali-Photokathode

(~25% Effizienz bei $\lambda = 400 \text{ nm}$)

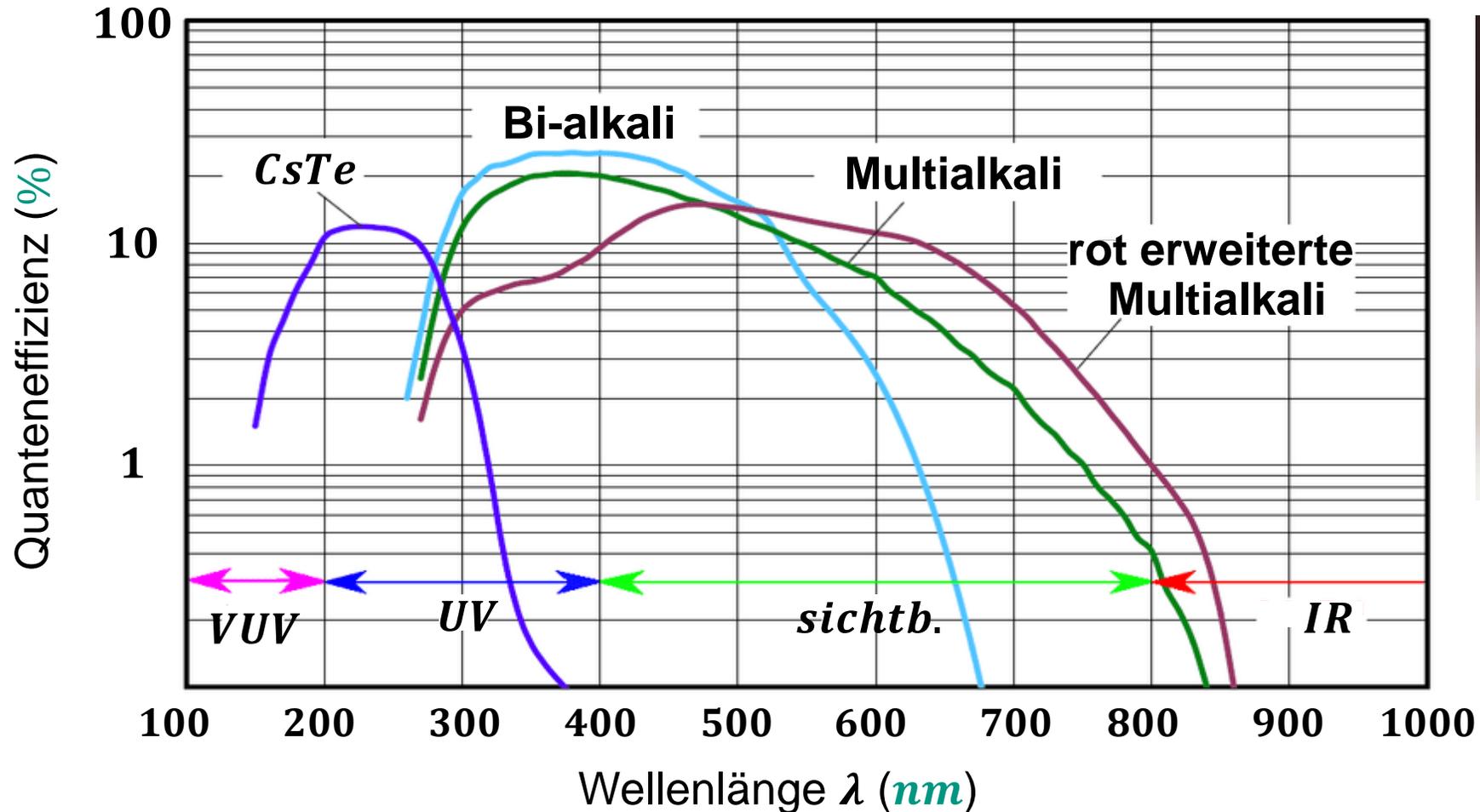


$keV - MeV$
 γ – Quant



Photoeffekt: Anwendung

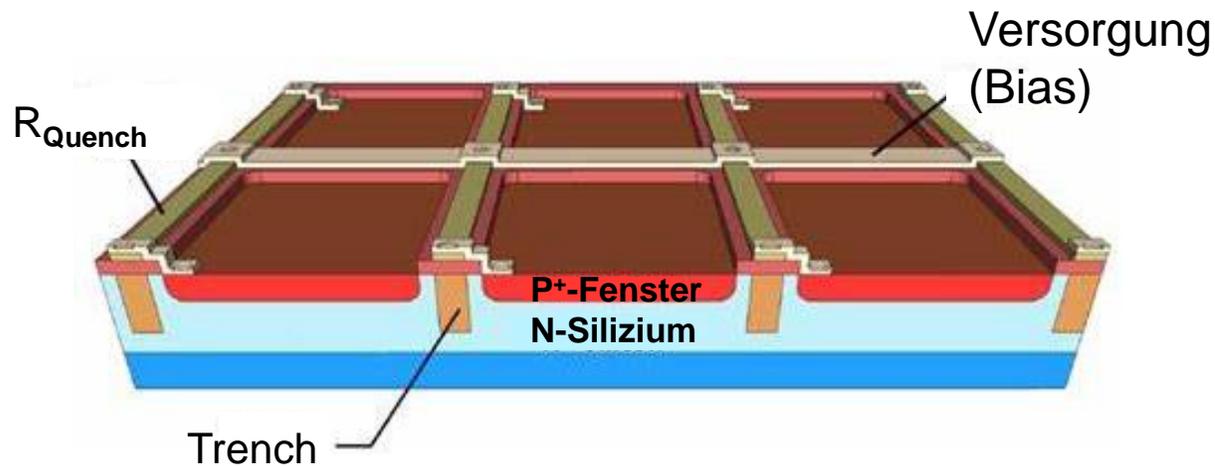
- **PMTs: Nachweis von Szintillationslicht** (keine X – Rays oder Gammas!)



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-*P*hoto-*M*ultiplier (*SiPMs*)



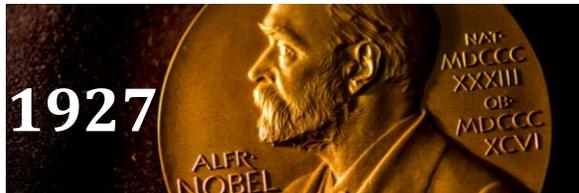
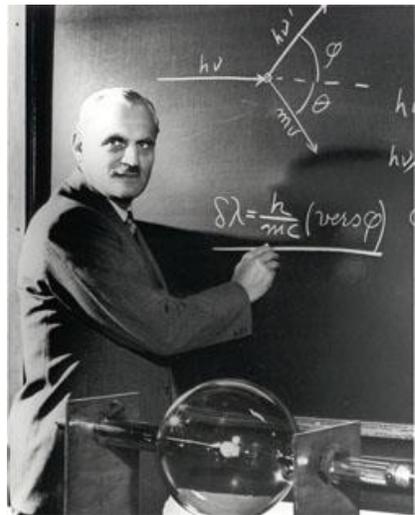
klassische Photomultiplier (*PMTs*)

Comptoneffekt: Grundlagen

■ Inelastische γ – Streuung an einem quasi-freien Hüllenelektron

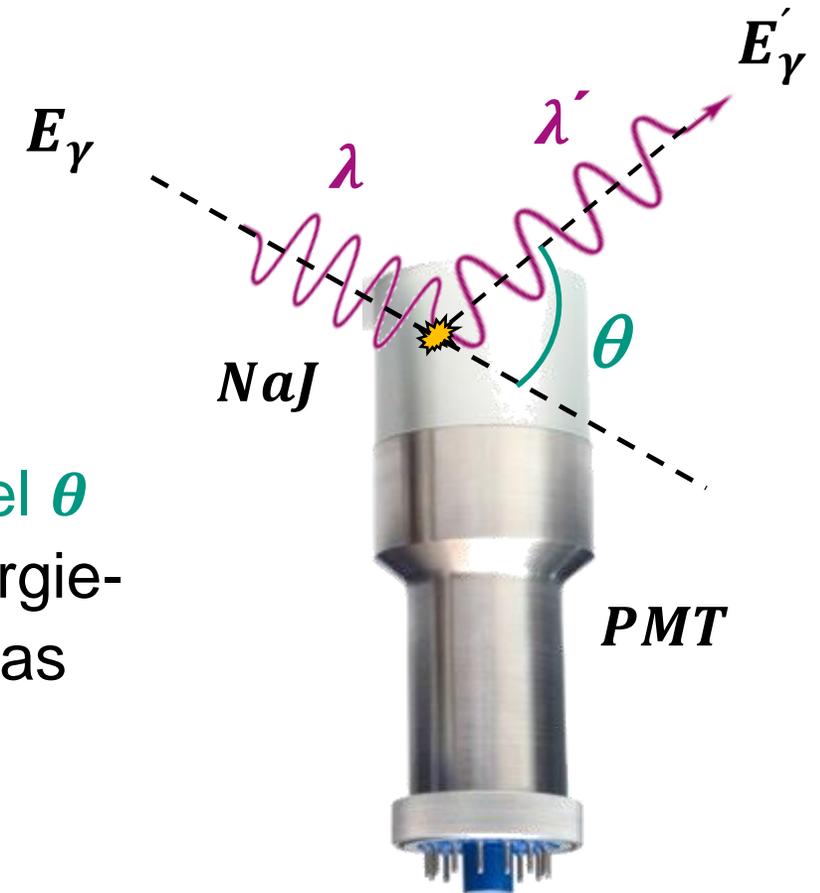
- kontinuierliches γ – Energie-Spektrum*:
abhängig vom Streuwinkel θ

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



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

nur der Streuwinkel θ
bestimmt den Energie-
verlust des Gammas



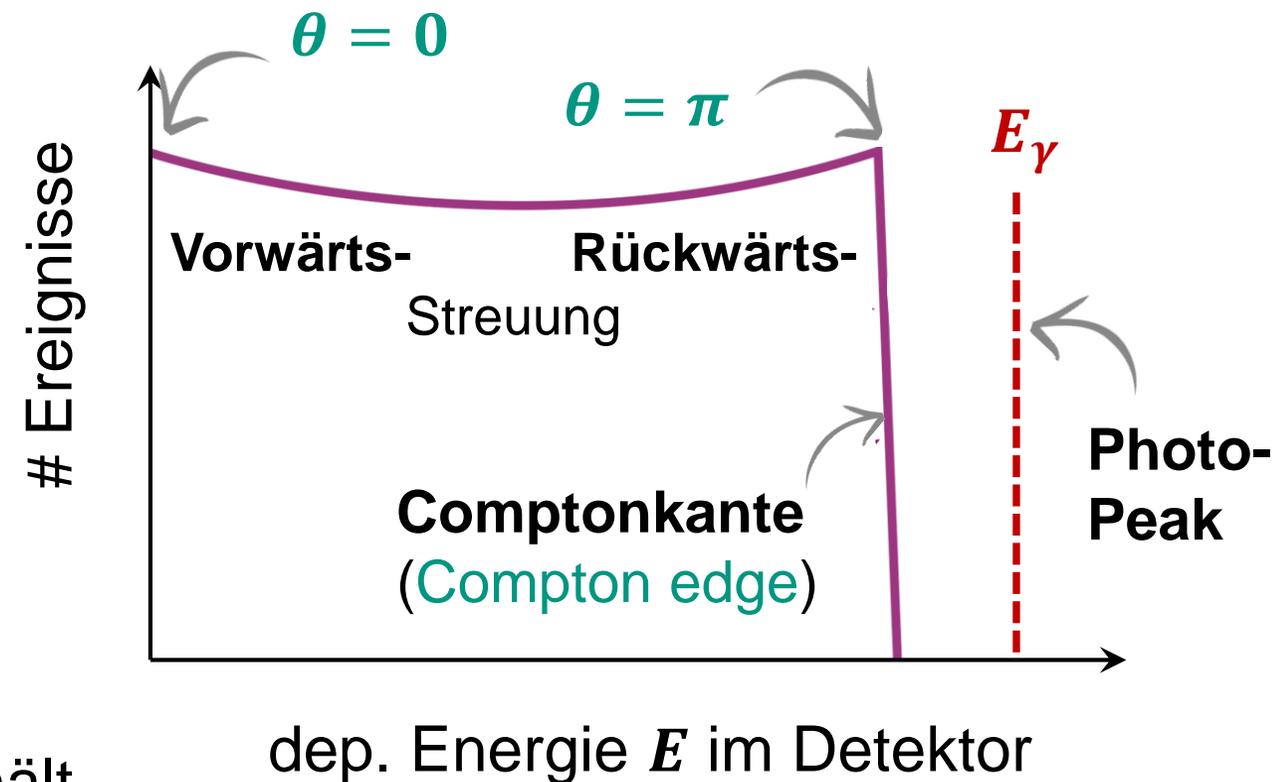
Comptoneffekt: Grundlagen

■ Inelastische γ – Streuung an einem quasi-freien Hüllenelektron

- kontinuierliches γ – Energie-Spektrum:
abhängig vom **Streuwinkel θ**

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

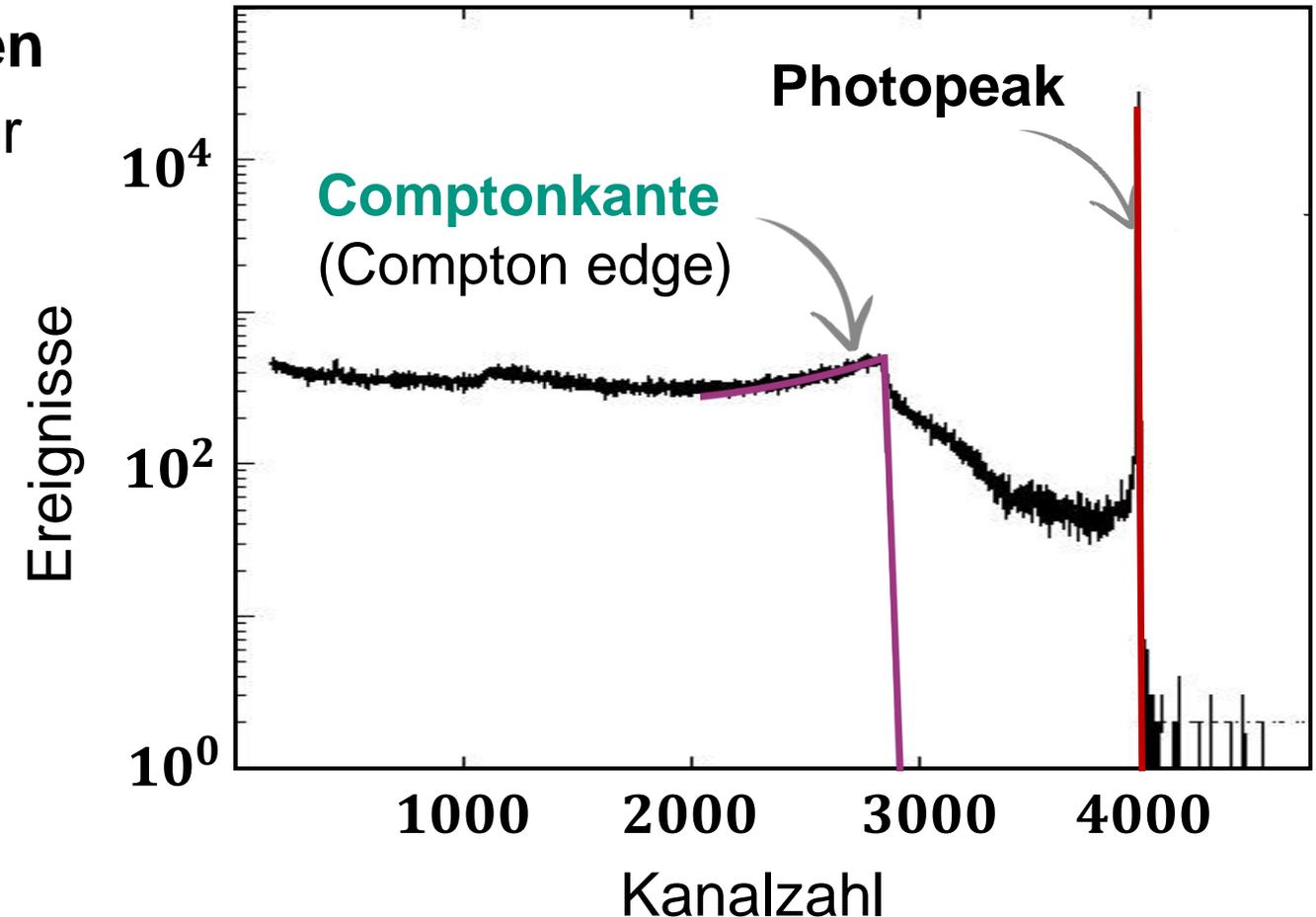
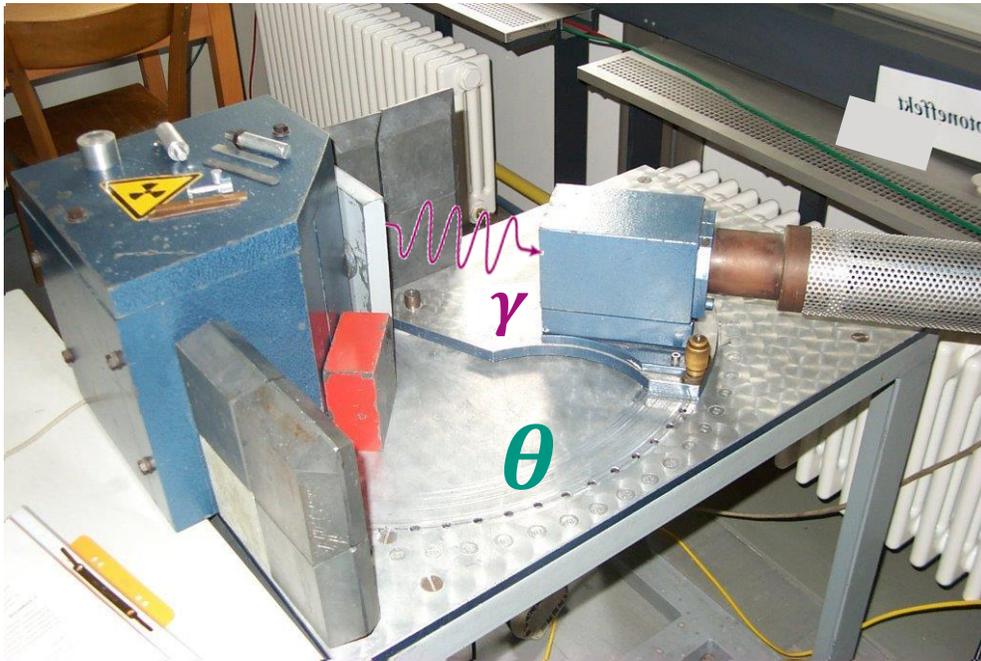
- **Comptonkante bei E'_{γ} (180°):**
 - bei **Rückwärtsstreuung** des γ 's
 - liegt unterhalb des Photopeaks,
da **gestreutes γ** noch Energie behält



Comptoneffekt: Messung im Praktikum!

■ Messung der Energieverteilung von Elektronen nach **Compton-Stoß**

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



Comptoneffekt: energieabhg. Streuquerschnitt

■ abfallender Compton-Streuquerschnitt (*Klein-Nishina*)

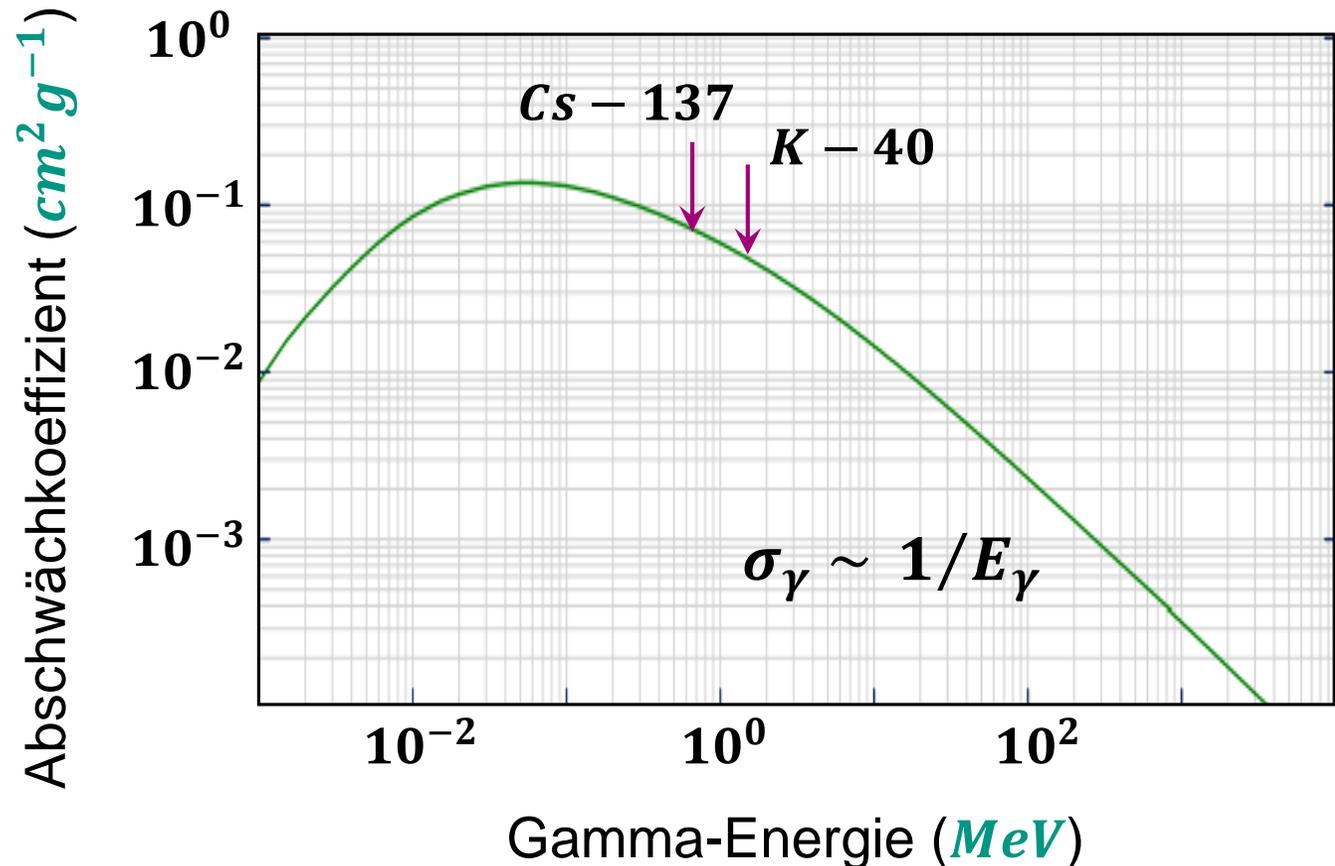
- Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\gamma} \sim Z$
- Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\gamma} \sim 1/E_{\gamma}$
- 1928 aus Dirac-Gleichung (*QED* in niedrigster Ordnung) bestimmt



Oskar Klein



Yoshio Nishina



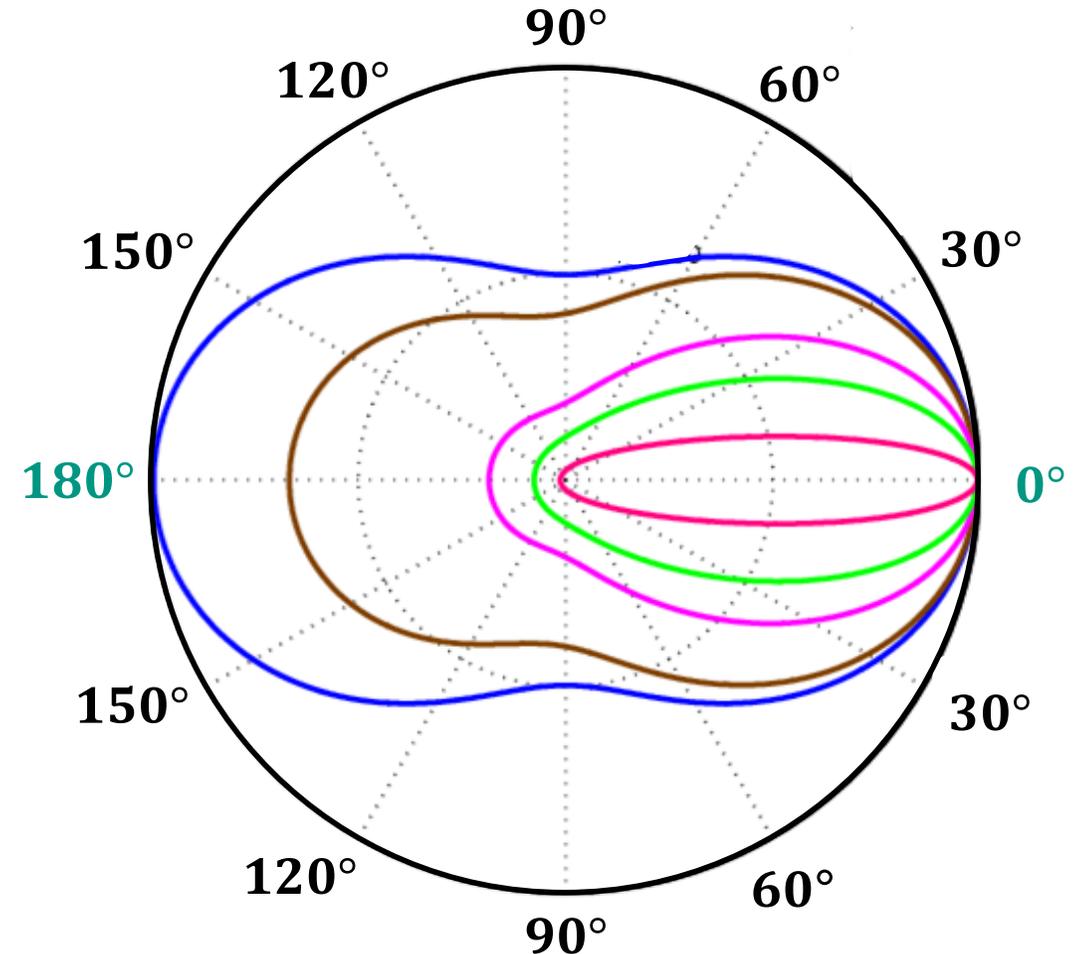
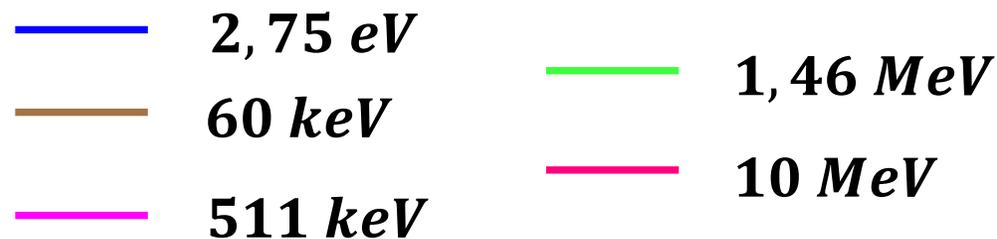
Comptoneffekt: Streuquerschnitt

■ Compton-Streuquerschnitt: Winkelabhängigkeit

- Winkelverteilungen

niedrige Energie:
symmetrisch vorwärts-rückwärts

hohe Energie: asymmetrische,
vorwärts-gepeakte Verteilung



Paarbildung: dominant bei hohen Energien

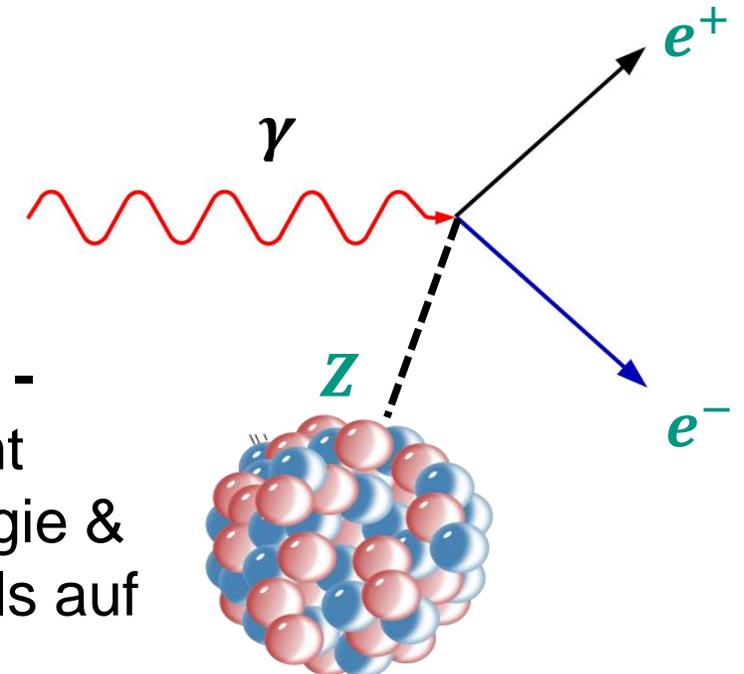
■ Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares im Coulomb-Feld des Kerns Z

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

- Kern nimmt **Energie-Impuls Mismatch** von Gamma und $e^- - e^+$ - Paar auf
⇒ Rückstoß des Kerns

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

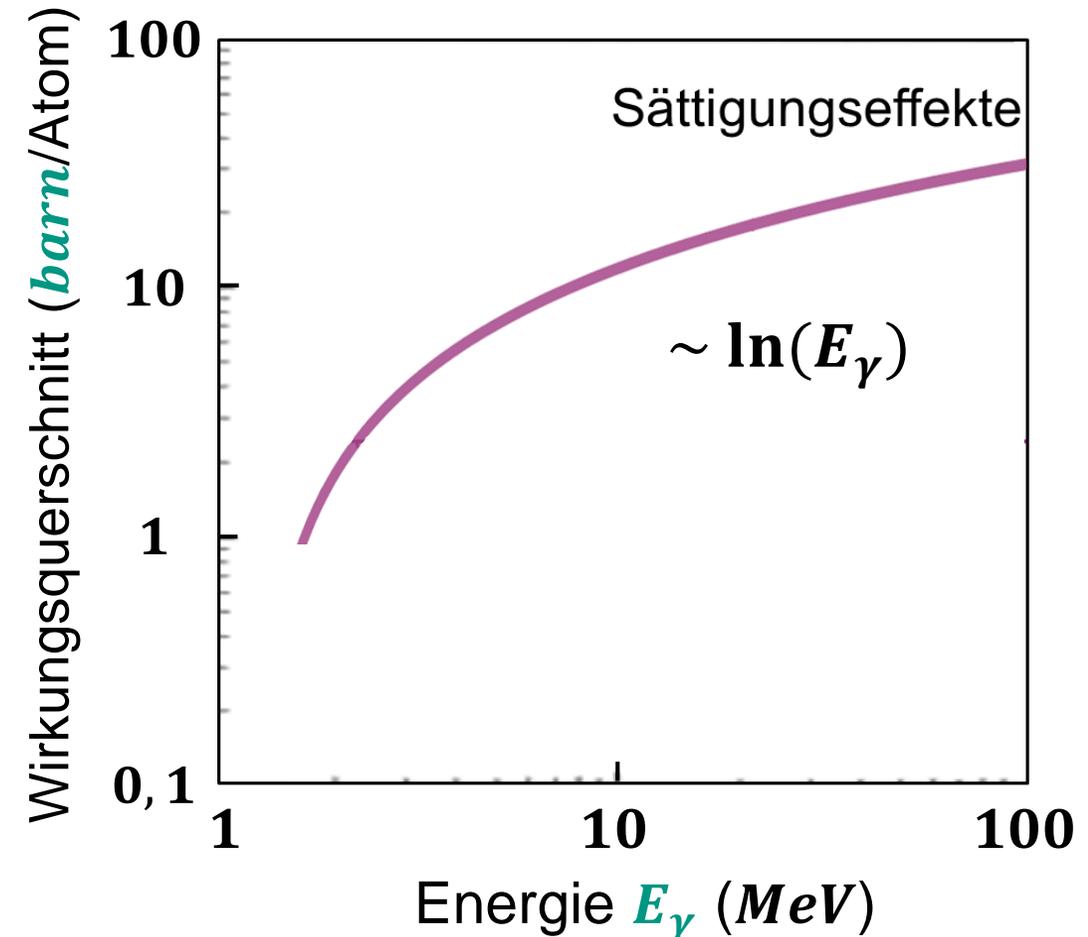
Kern -
nimmt
Energie &
Impuls auf



Paarbildung: dominant bei hohen Energien

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

- Schwellen-Energie E_{thres}
- Kern nimmt **Energie-Impuls Mismatch** von Gamma und $e^- - e^+$ - Paar auf
⇒ Rückstoß des Kerns
- bei $E_\gamma > E_{thres}$:
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)

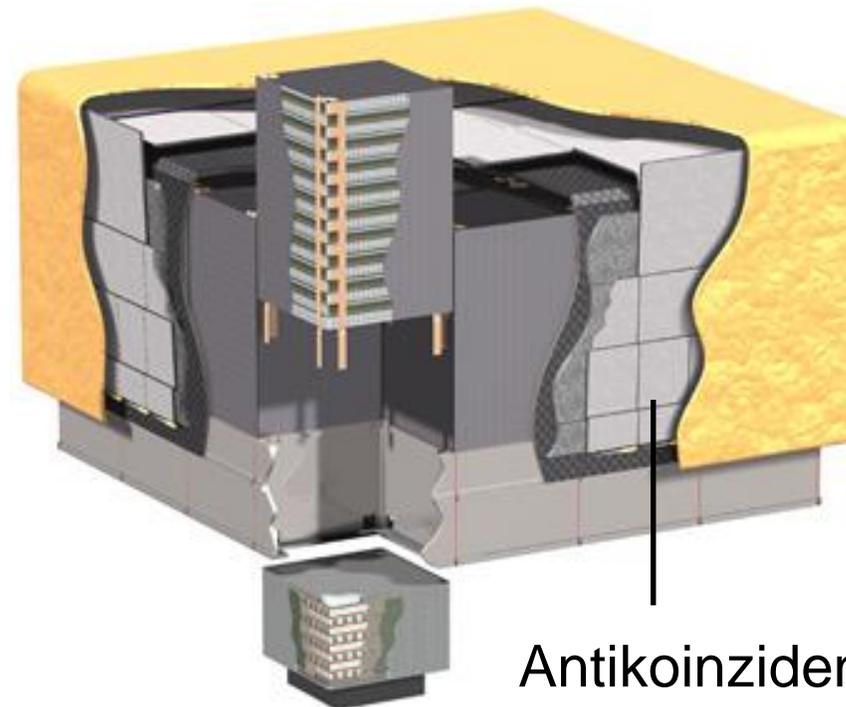
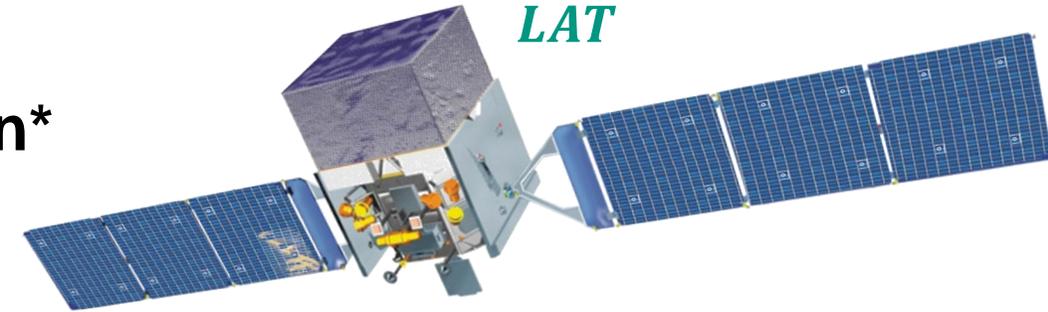
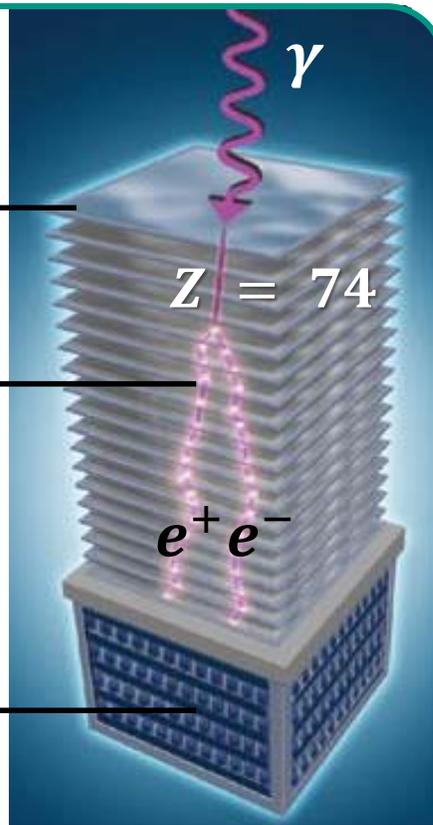
Si – Strips
(Spuren)

Gamma-Richtung

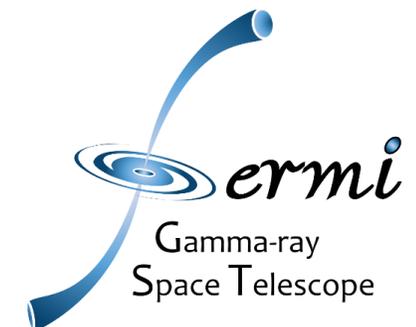
Kalorimeter (8,6 X_0)

CsJ – Kristalle

Gamma-Energie

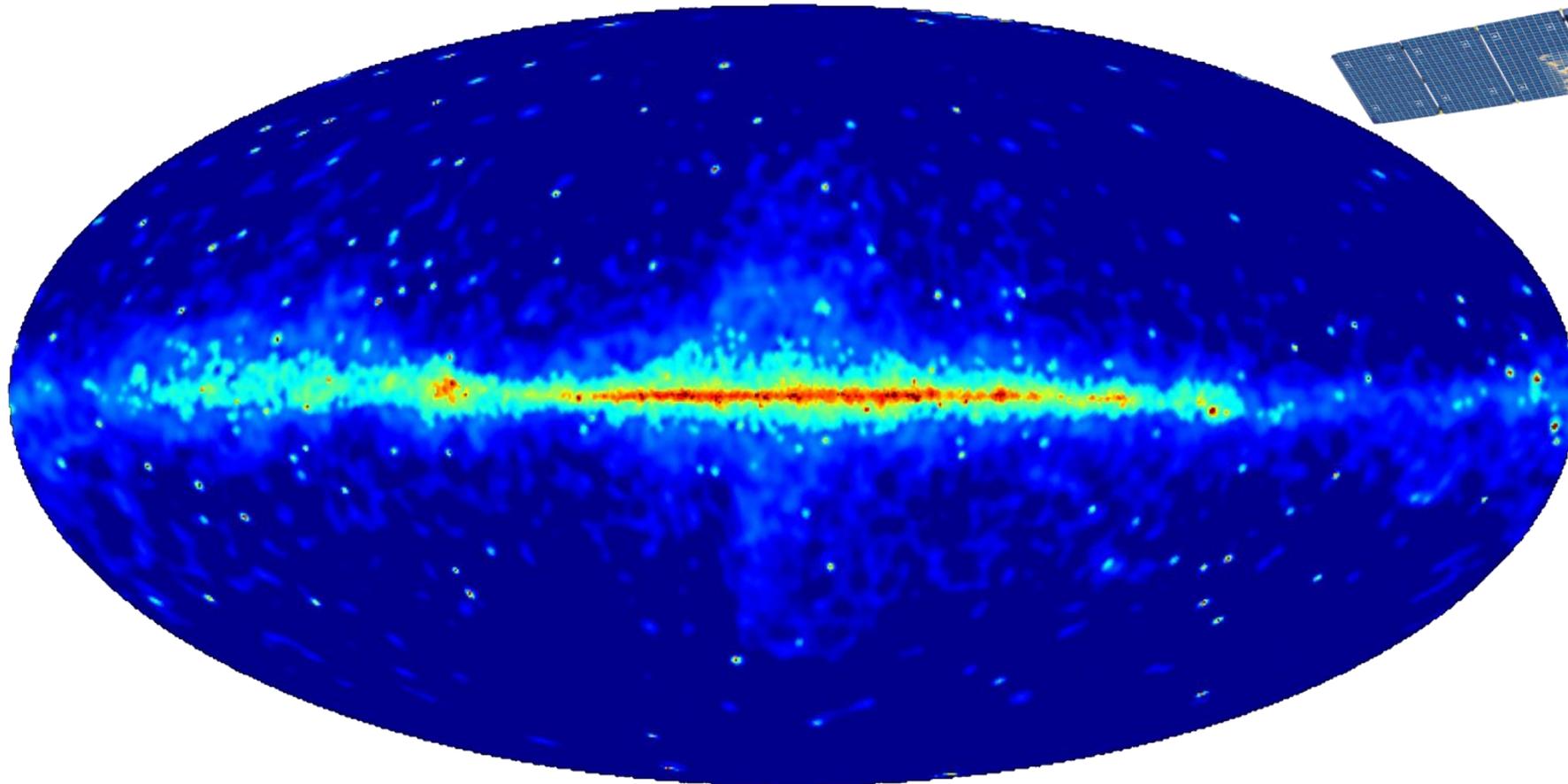
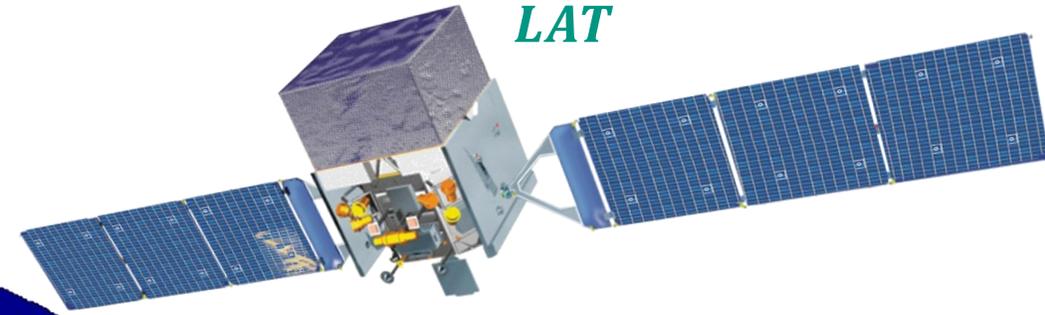


Large
Area
Telescope

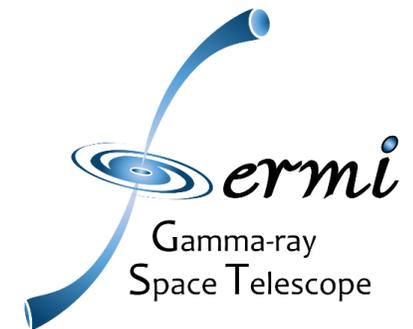


Paarbildung: *FERMI* – Gammateleskop

- *GeV* – Gammastrahlung aus der Ebene der Milchstraße



*Large
Area
Telescope*



Gamma-Absorption: Massenkoeffizient μ

■ Exponentielle Abschwächung von Gammastrahlung in Materie

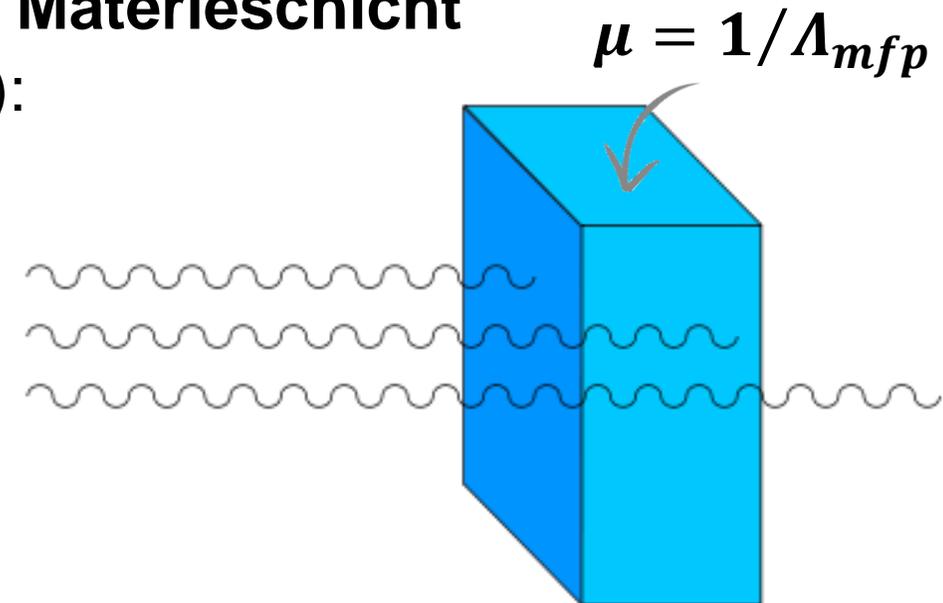
- Gammastrahlung mit **Intensität I_0** treffe auf eine **Materieschicht** (mit **Dicke x** und der **Massenbelegung $X = \rho \cdot x$**):
⇒ Strahlung wird **exponentiell** abgeschwächt

$$I(X) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot X}$$

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot (x \cdot \rho)}$$

- Einheit von $\mu = (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
- $\mu = 1/\Lambda_{mfp}$
= inverse freie γ –Weglänge

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



Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

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

- Energien $< 0.1 \text{ MeV}$

Photoeffekt

hohe γ –Abschwächung

- Energien $\sim 1 \text{ MeV}$

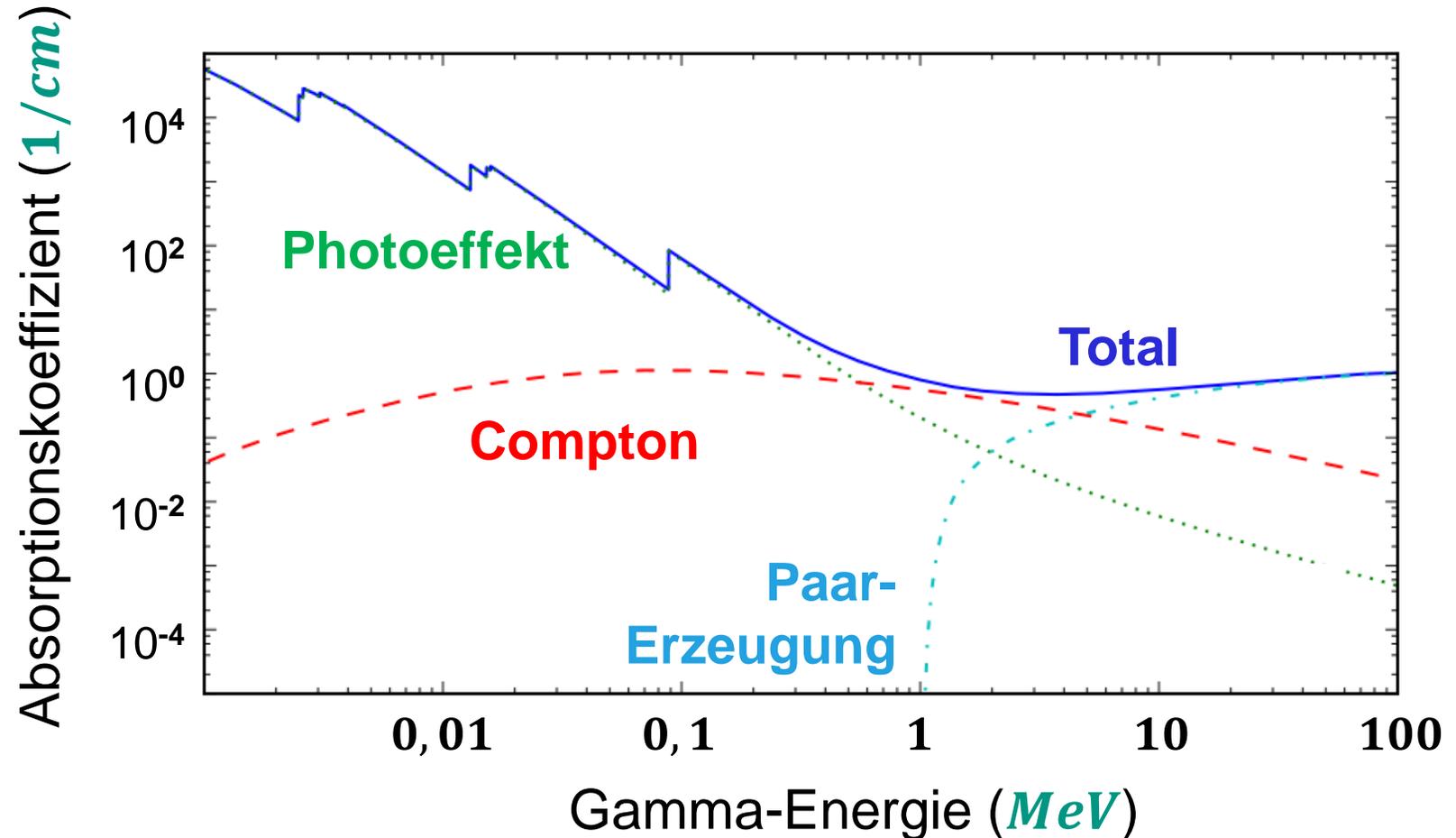
Comptoneffekt

kleine γ – Abschwächung

- Energien $\gg 1 \text{ MeV}$

Paarbildung

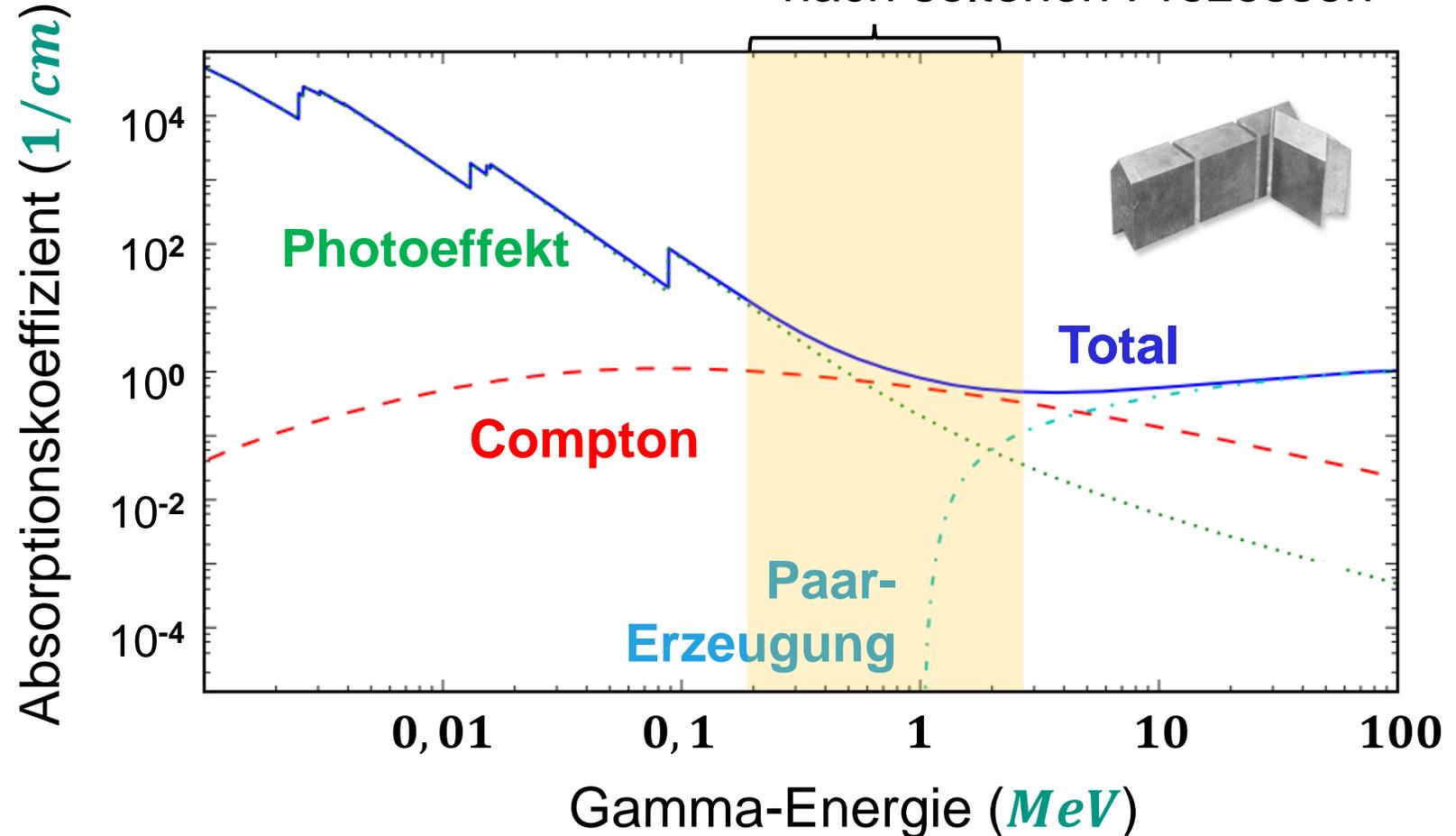
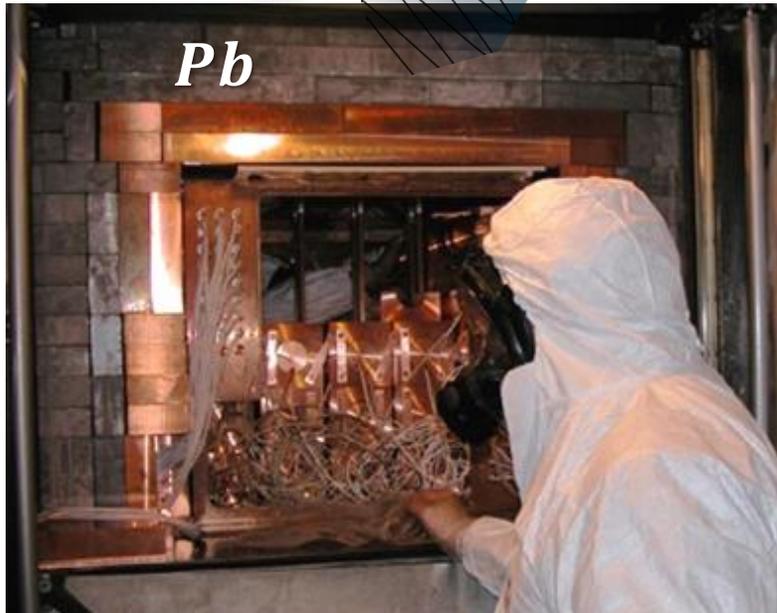
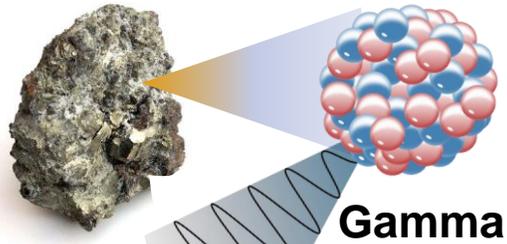
kleine γ –Abschwächung



Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Abschirmung von Experimenten zur **Suche nach seltenen Prozessen***

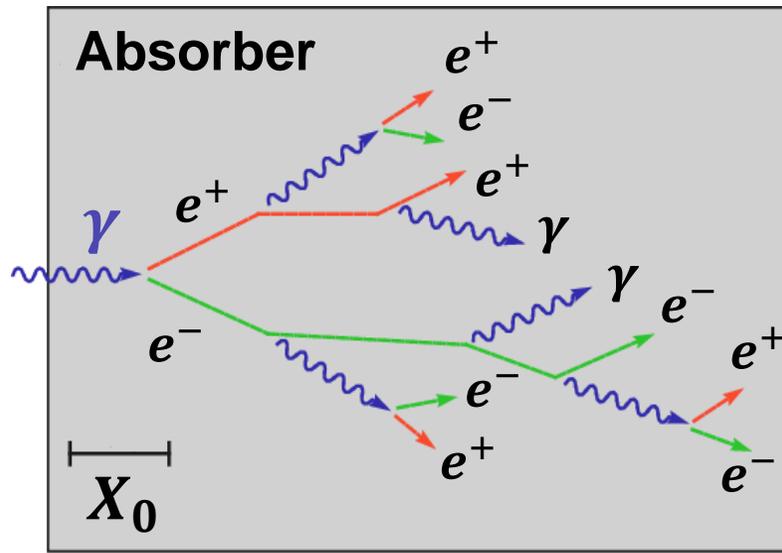
störende Gammas bei Suche nach seltenen Prozessen



Elektromagnetische Schauer

■ Initiierung durch hochenergetische Gammas / Elektronen

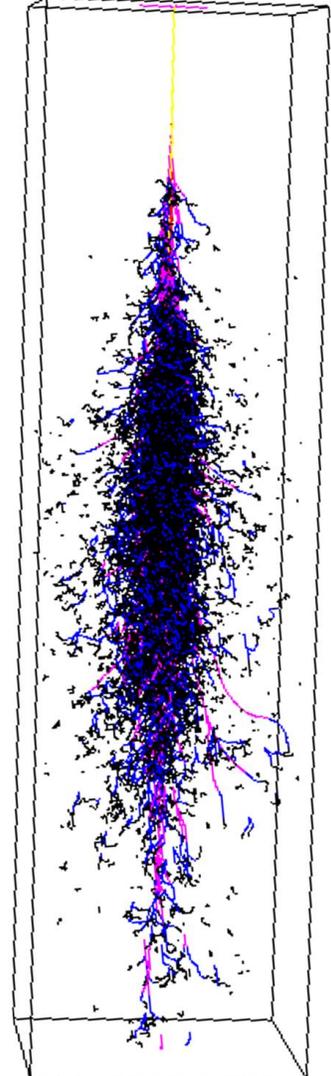
- primäres hochenergetisches Photon γ : $e^- - e^+$ Paarbildung
- primäres hochenergetisches Elektron: **Bremsstrahlung**
- Kaskadenprozess: **Paarbildung** \Leftrightarrow **Bremsstrahlung**



Q: nach aanda.org

Heitler-Modell:

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



Q: MPG

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

- Elektronen

$$E(X) = E_0 \cdot e^{-X/X_0}$$

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

- Hochenergie-Gammas

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

nach λ_{paar} noch
 $1/e$ – tel der Gammas

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

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

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

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