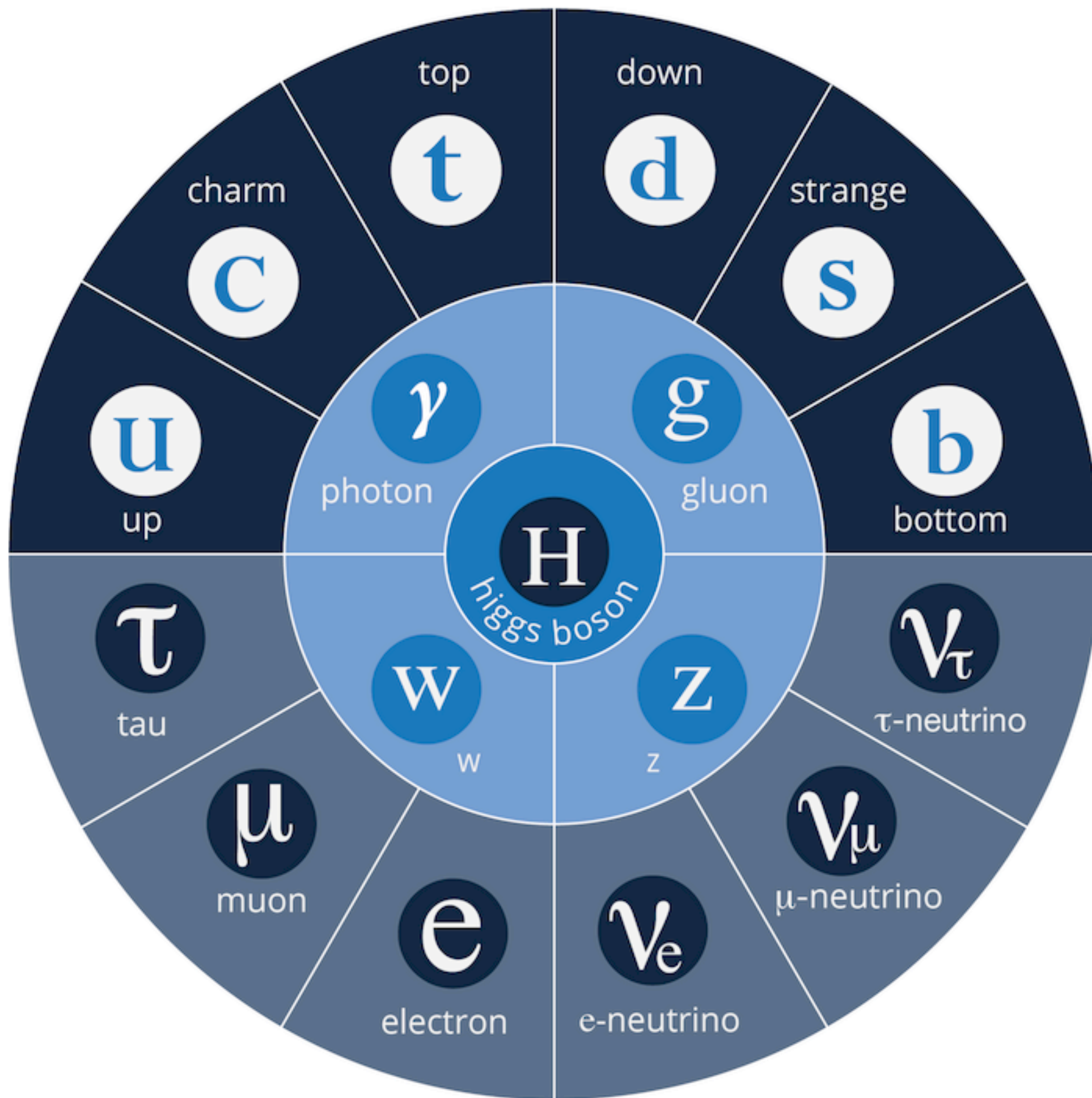


Moderne Experimentalphysik II

Teilchenphysik - Vorlesung 04

Professor Dr. Markus KLUTE (markus.klute@kit.edu) / Dr. Roger Wolf (roger.wolf@kit.edu)
Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)





■ 2. Experimentelle Methoden

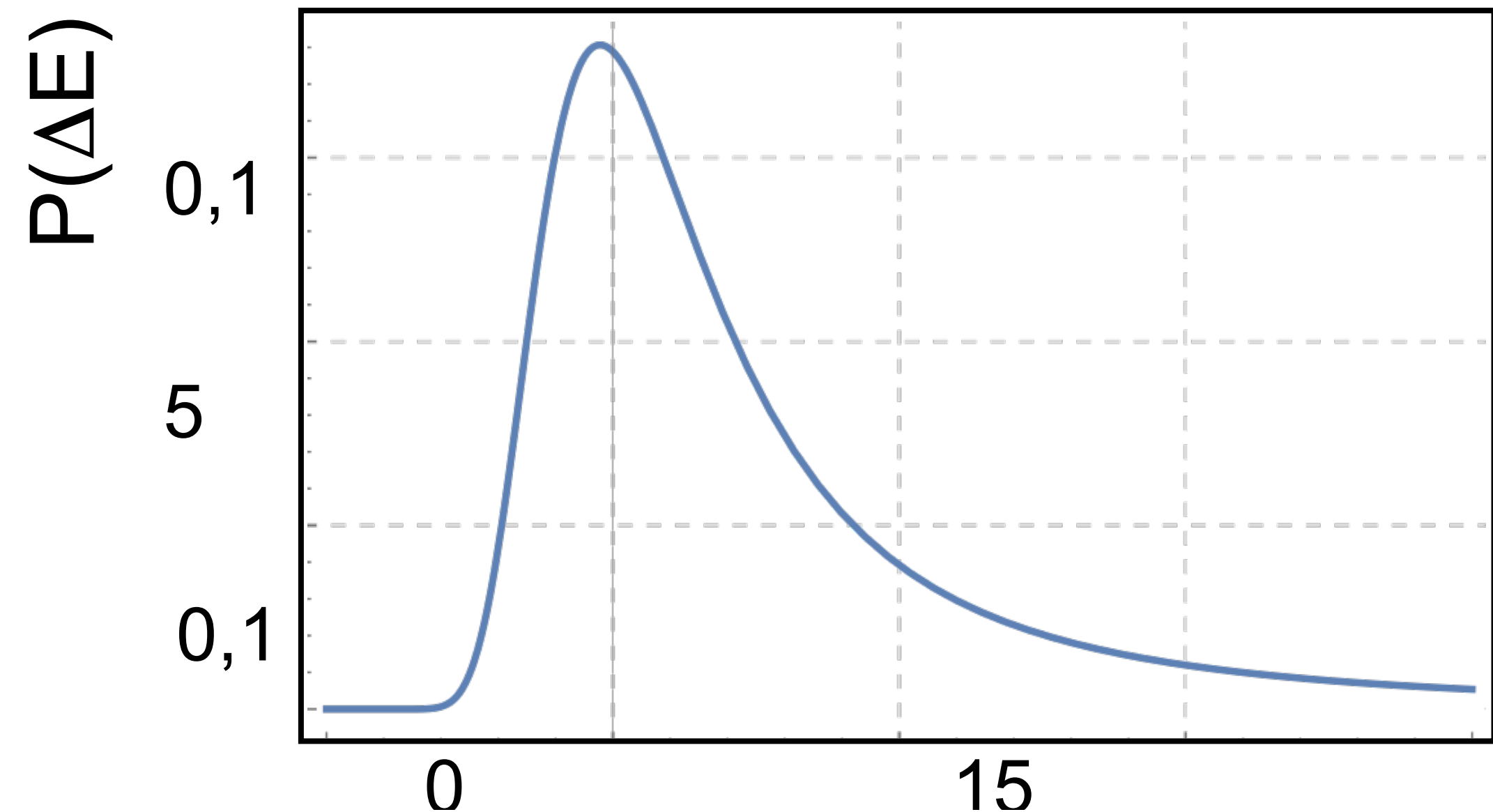
- 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
- 2.2. Energieverlust von Elektronen
- 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahlung
- 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
- 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
- 2.6. Nachweistechniken
- 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
- 2.8. Teilchenbeschleuniger

VL2 Recap: Energieverlust geladener Teilchen

■ Bethe Gleichung

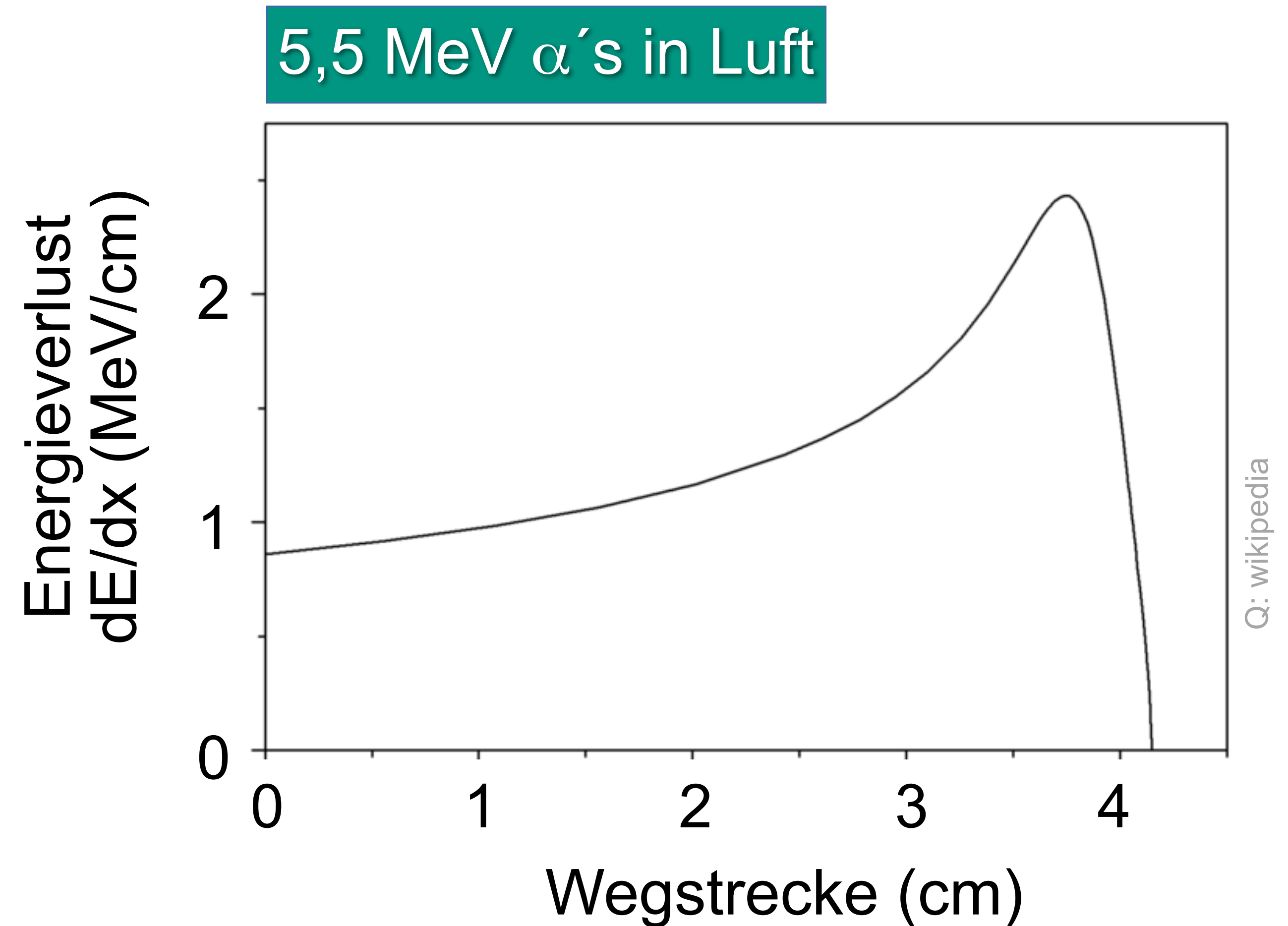
$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot N_0 \cdot m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

■ Verteilung des Energieverlusts - Landau-Verteilung



VL2 Recap: Energieverlust geladener Teilchen

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



- Bremsstrahlung

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

- Strahlungslänge

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

- Kritische Energie E_c

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{brems}$$

$$E_c = \frac{610 MeV}{Z + 1.24}$$

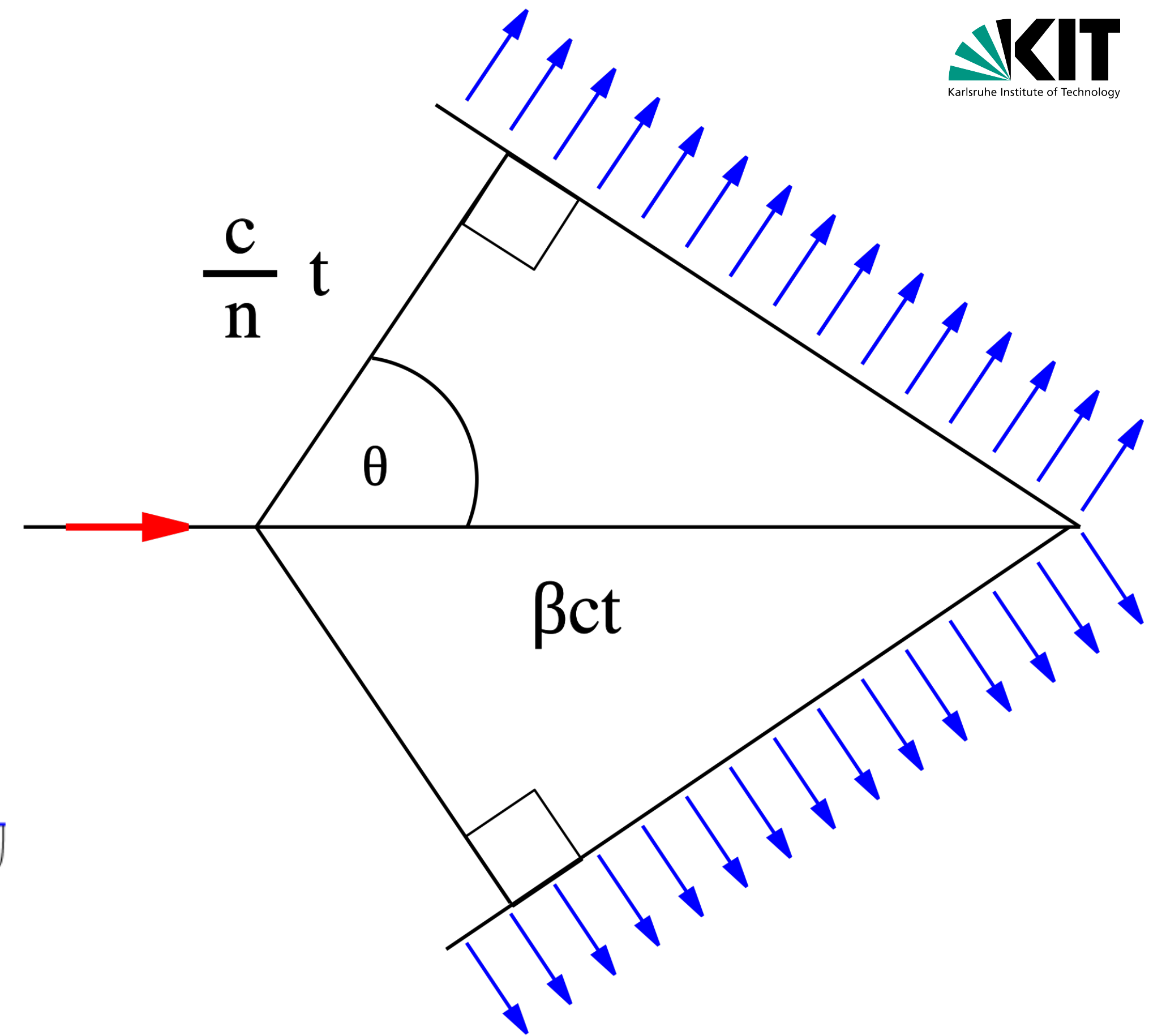
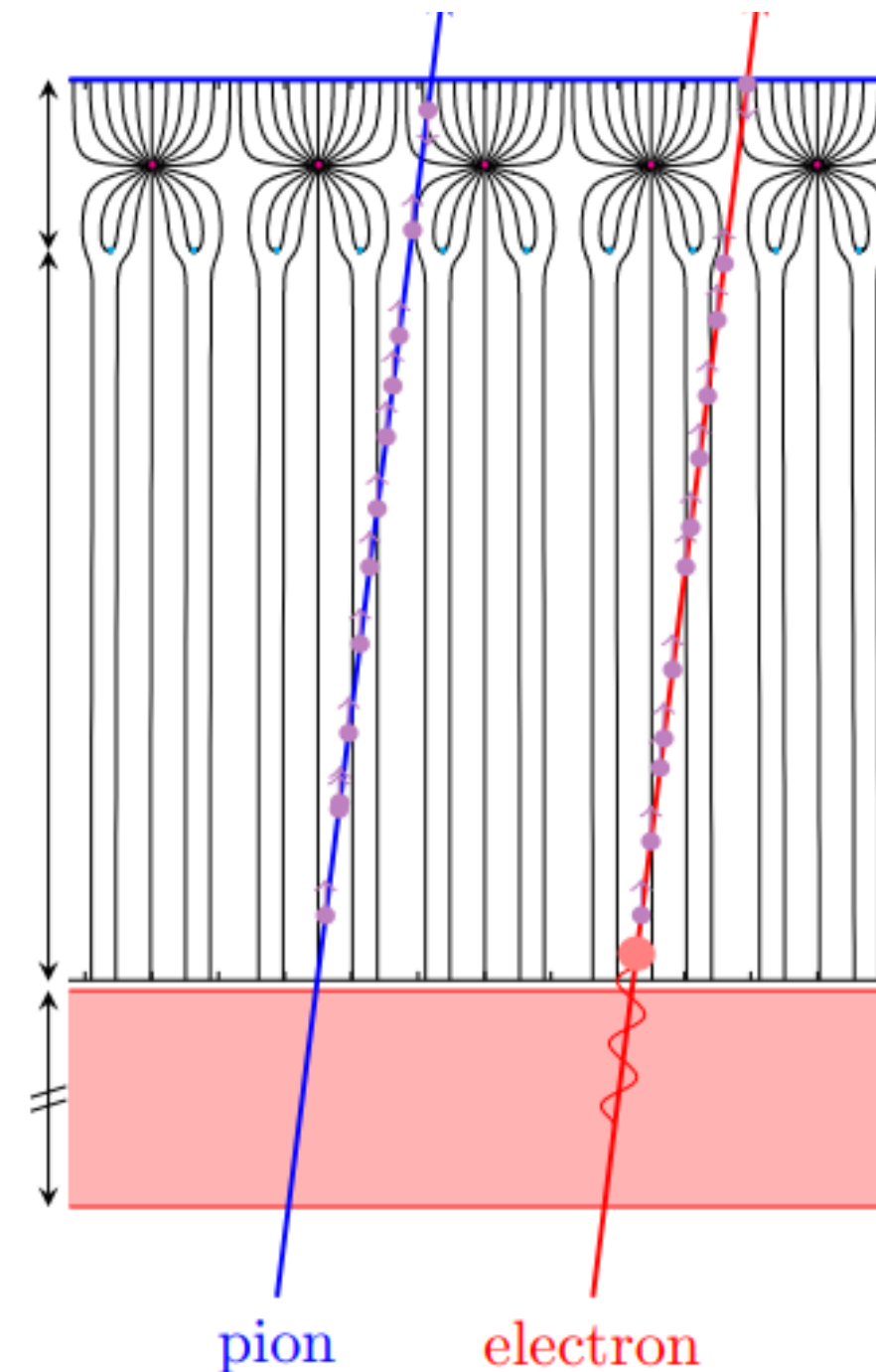
VL3 Recap

■ Cherenkov-Strahlung

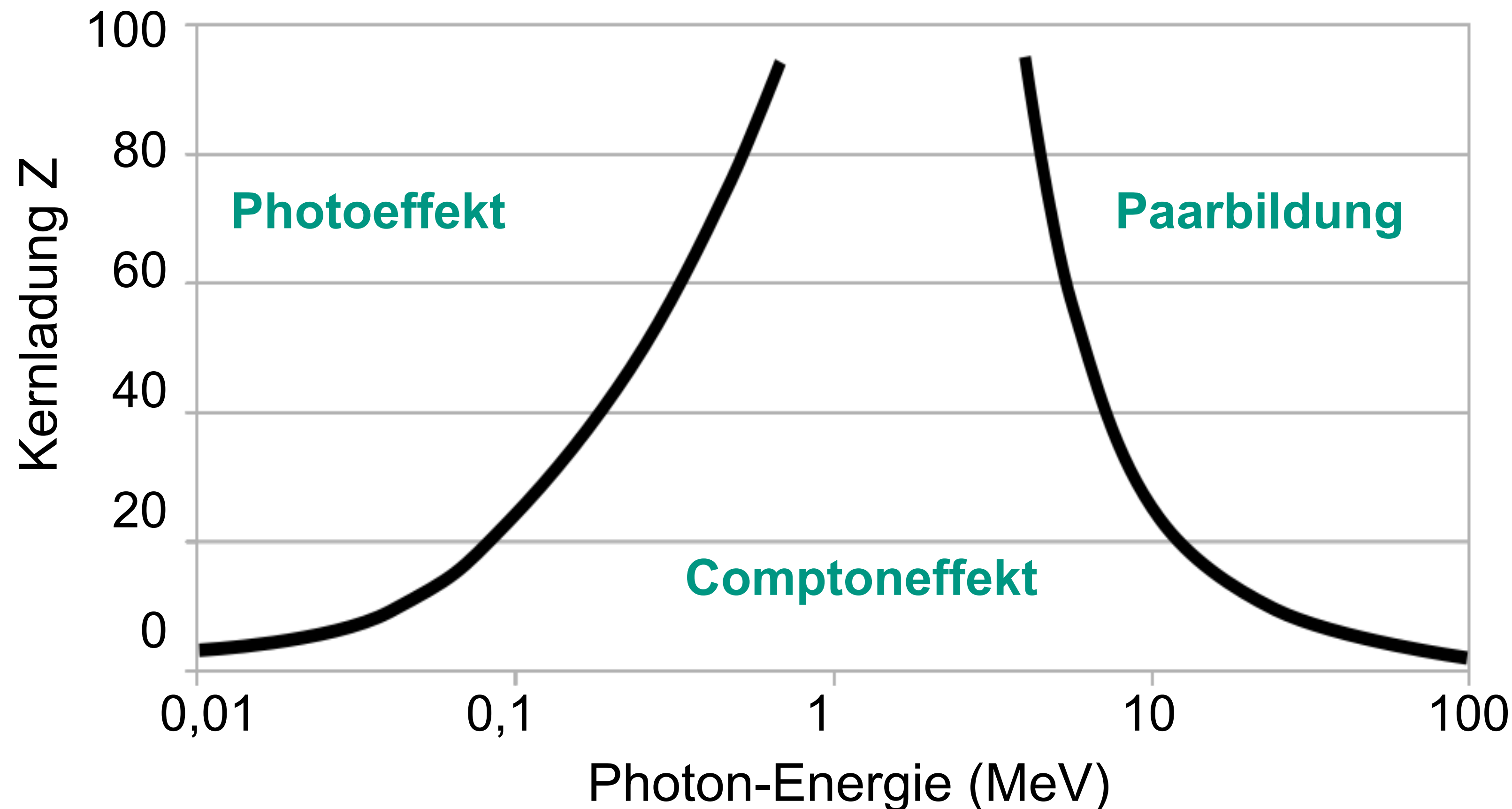
- Öffnungswinkel θ des Lichtkegels:

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

■ Übergangsstrahlung



- Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
 - drei fundamentale Prozesse:
Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung



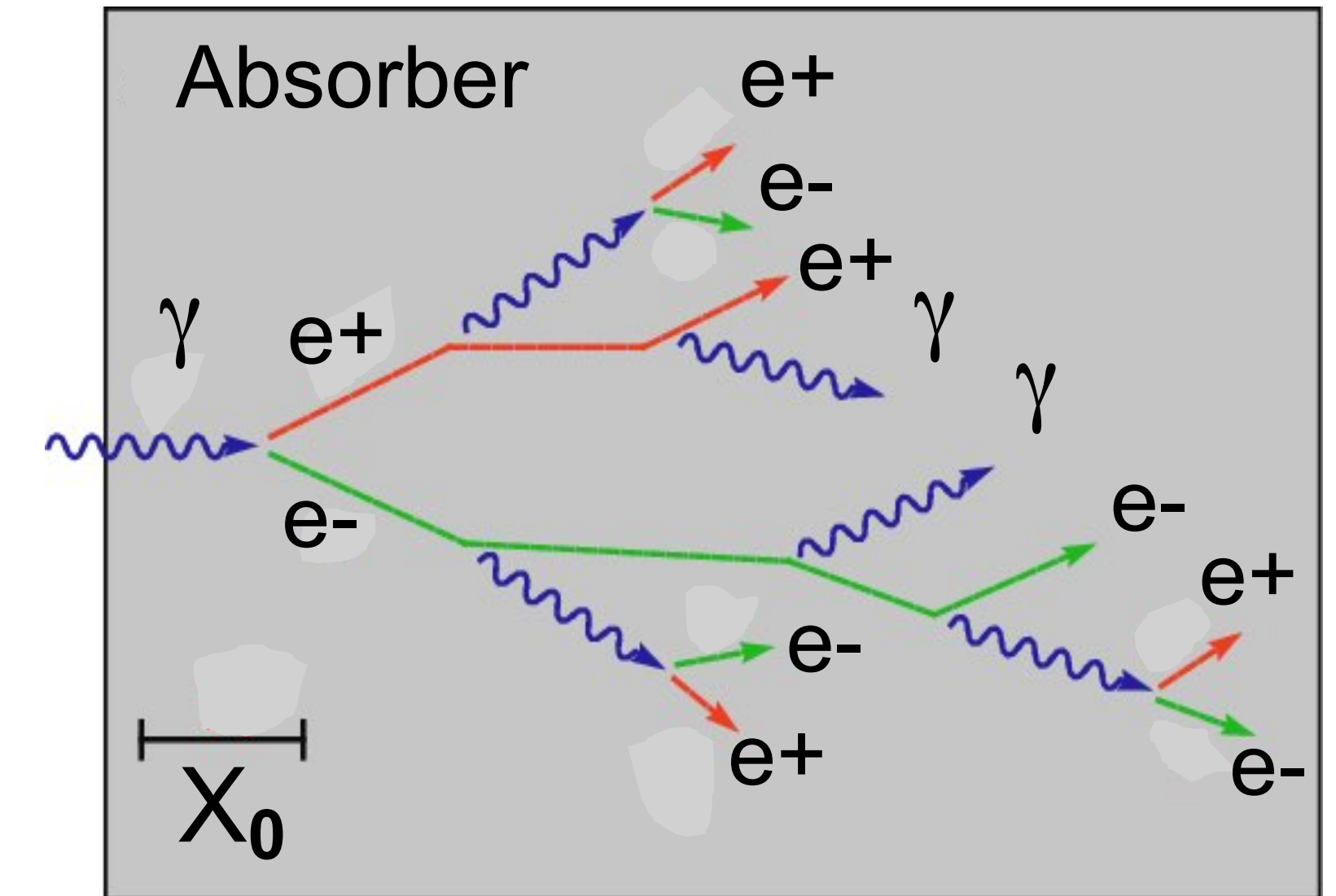
VL3 Recap

■ Elektromagnetische Schauer

- Heitler Model

■ Hadronische Schauer

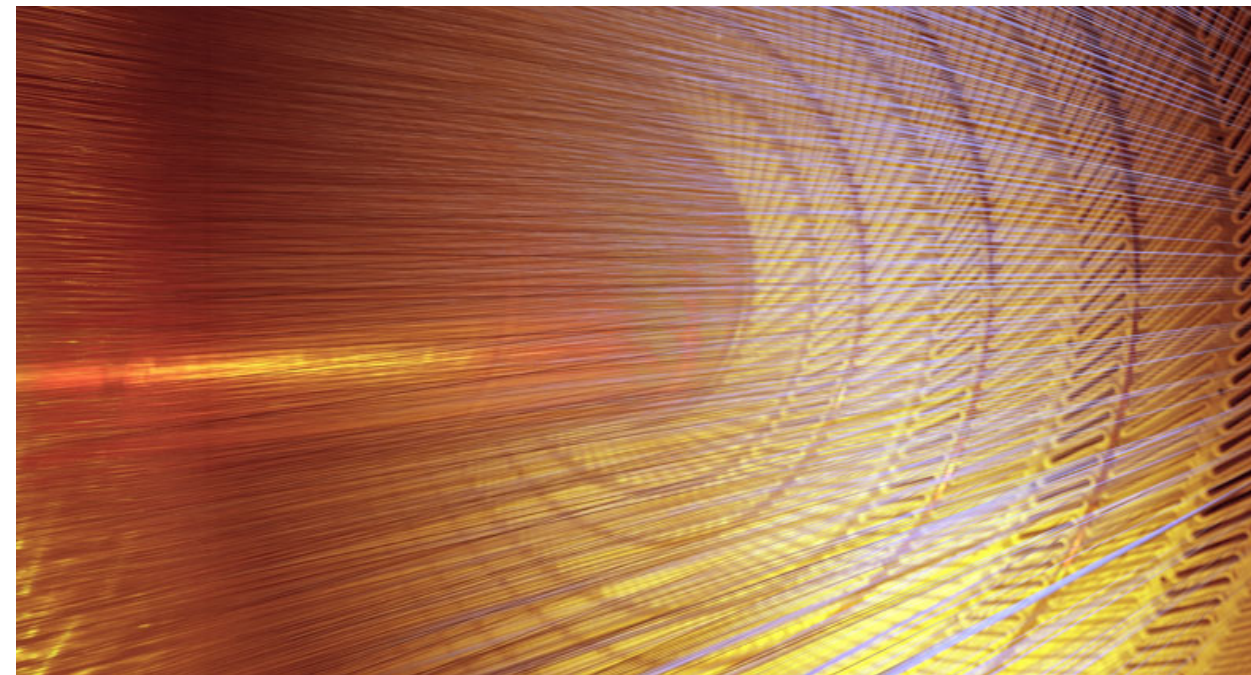
- Wechselwirkungslänge wesentlich länger als elektromagnetische Wechselwirkungslänge
- Unregelmässigere Schauer
- Wechselwirkung von geladenen Hadronen und elektromagnetischer Wechselwirkung



Q: nach aanda.org

Experimentelle Nachweistechniken: Übersicht

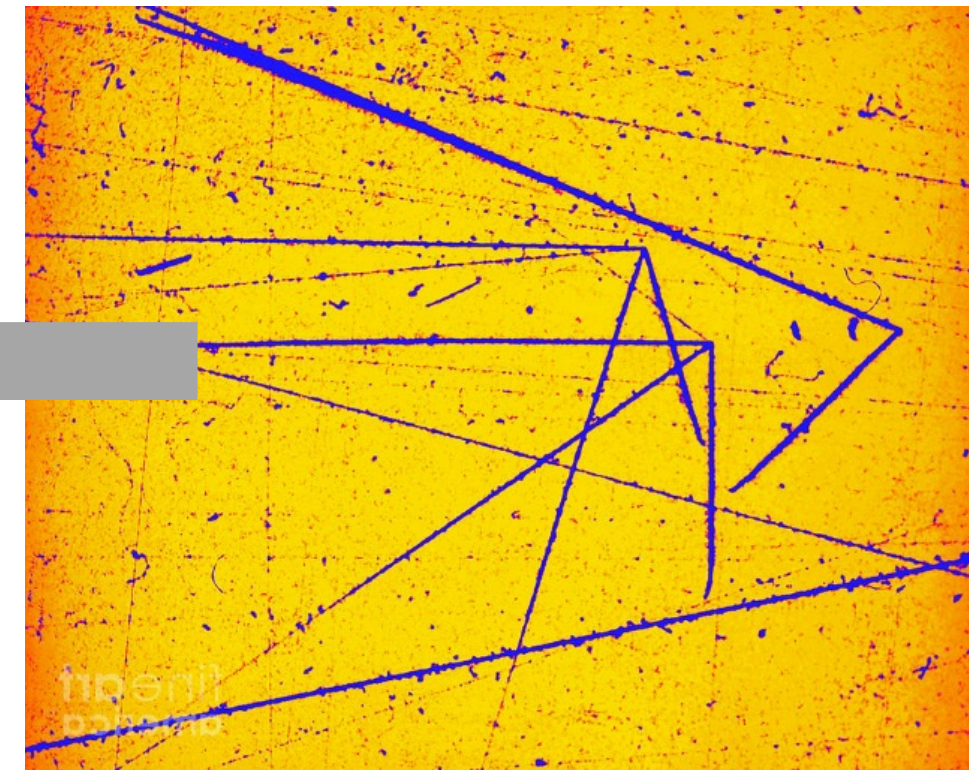
Violdrahtkammer, TPC



Szintillator

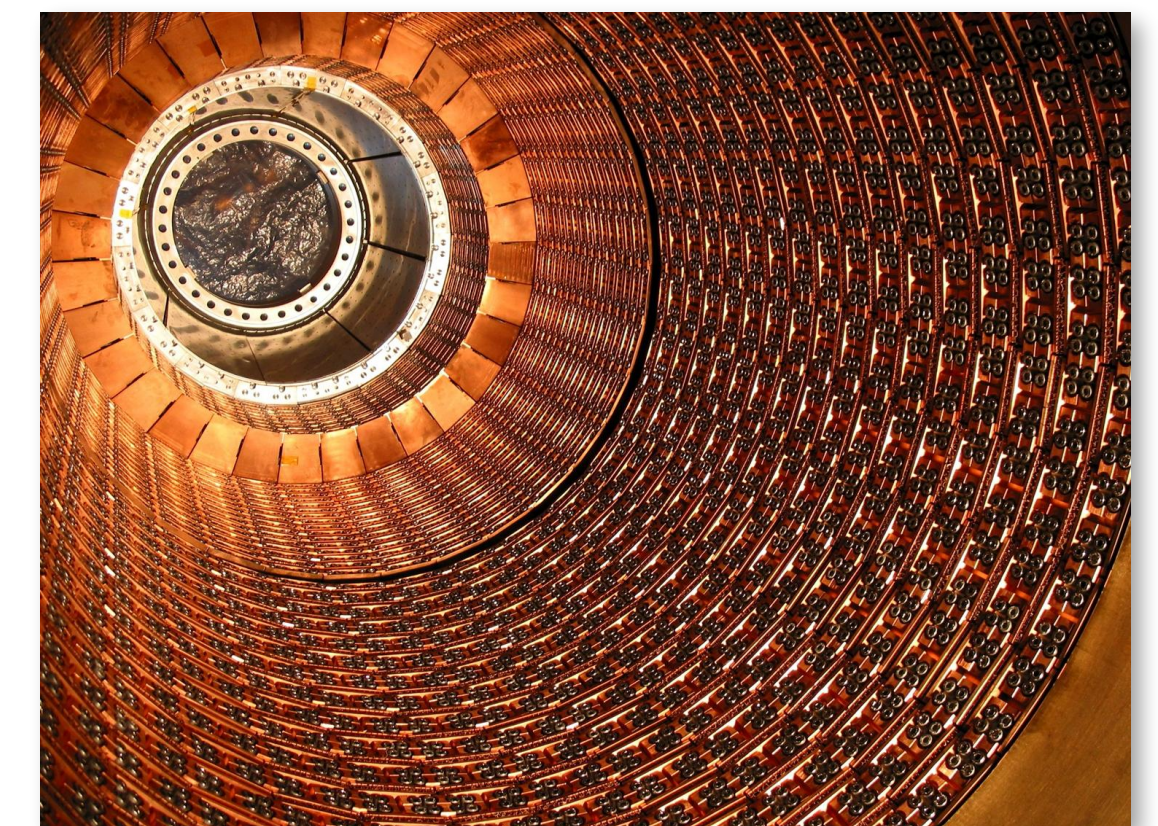
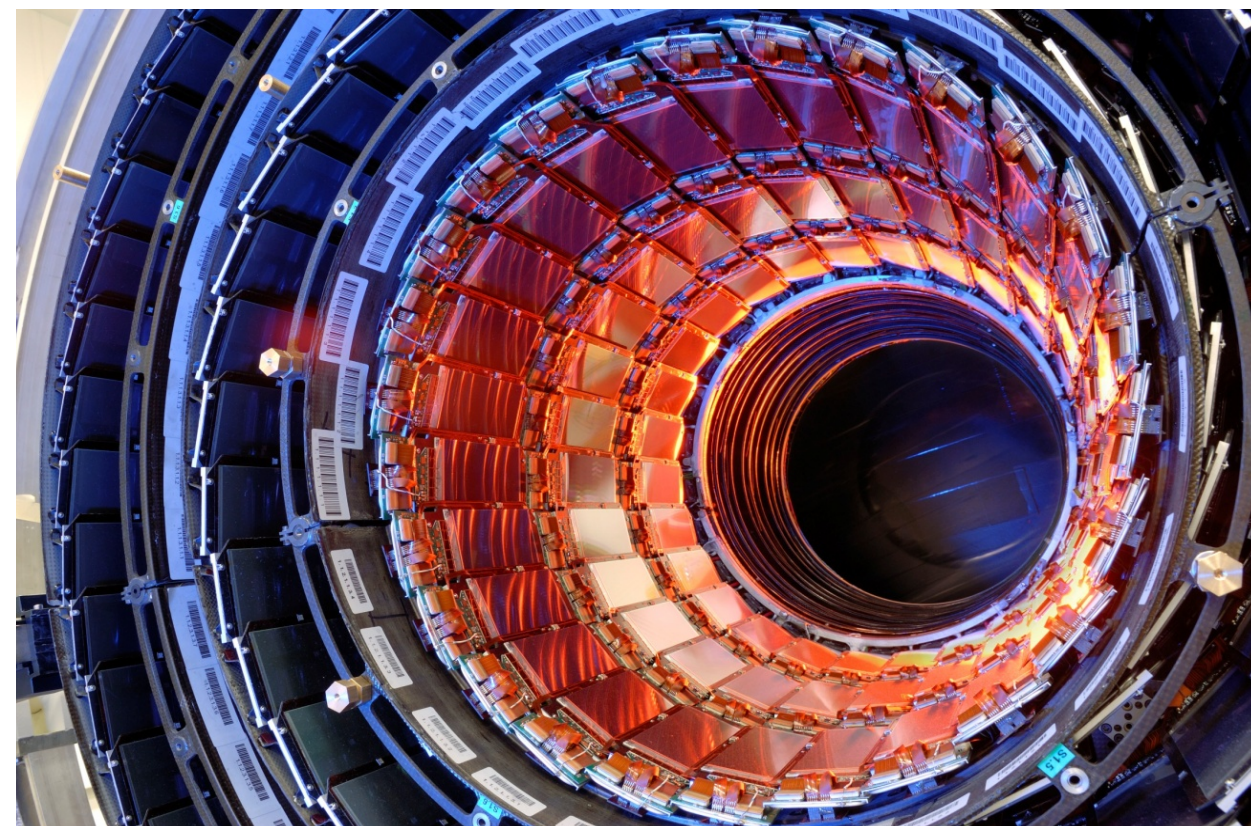


Nachweis



Ort x & Impuls p

Energie E

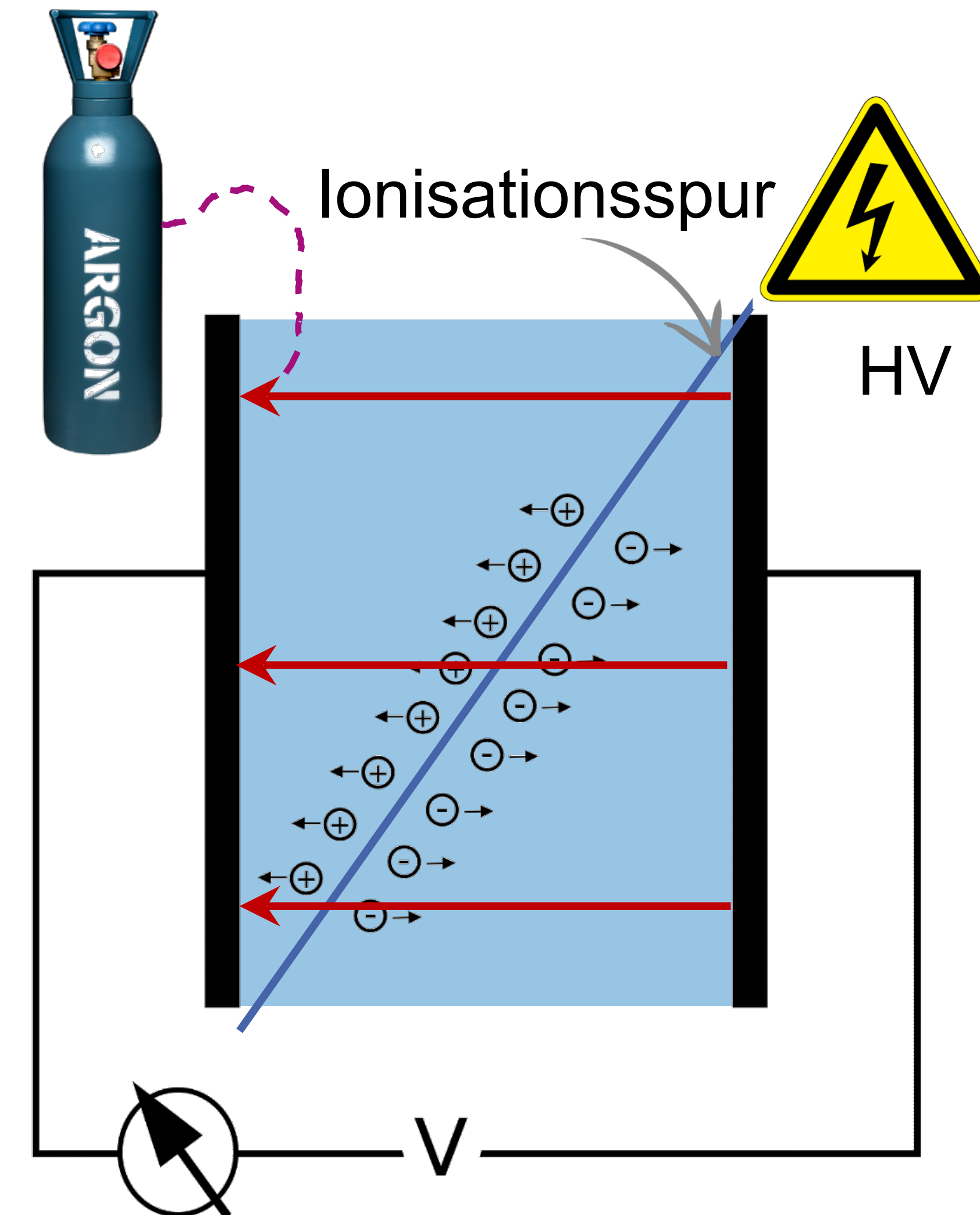


von Teilchen

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

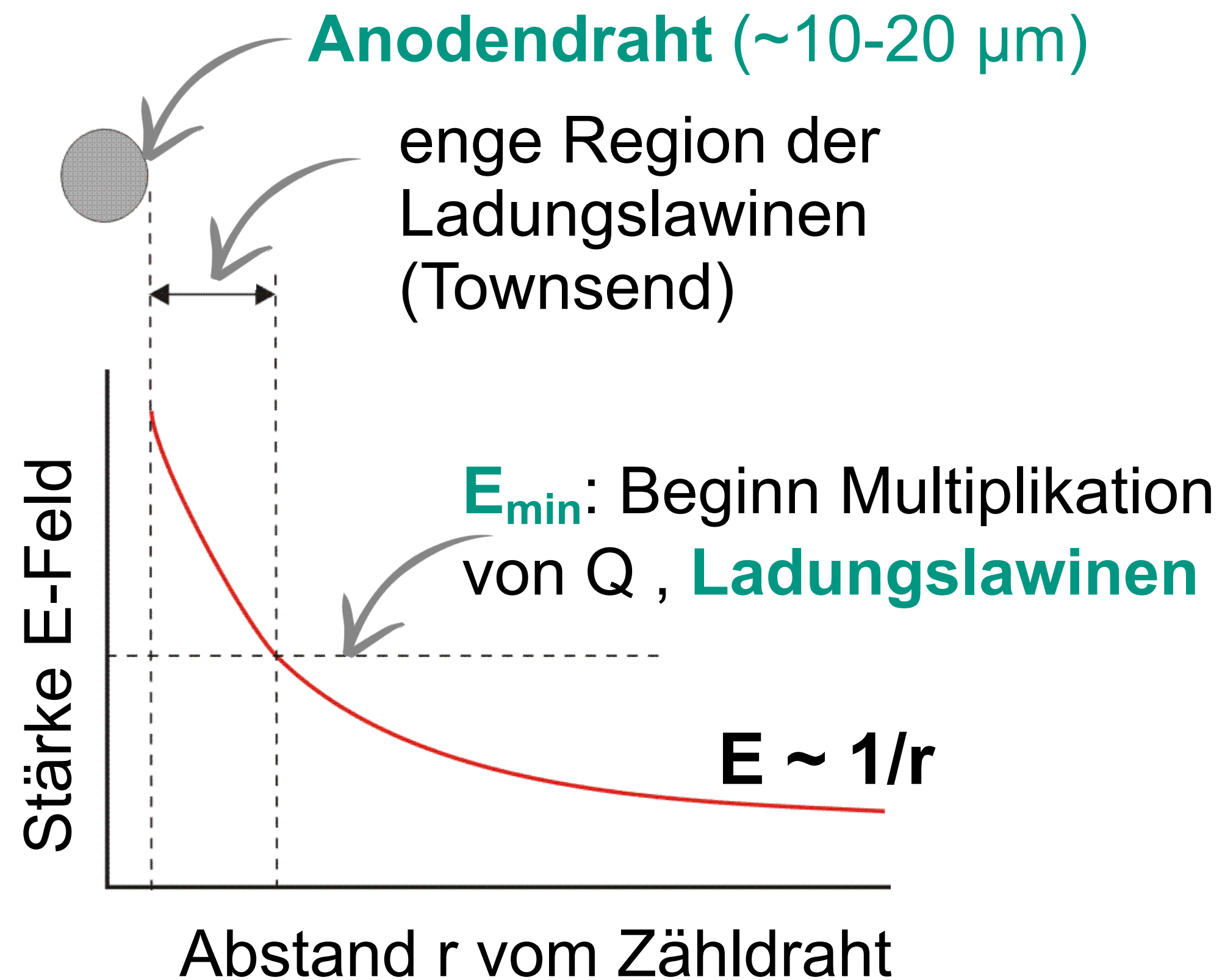


Q: wikipedia

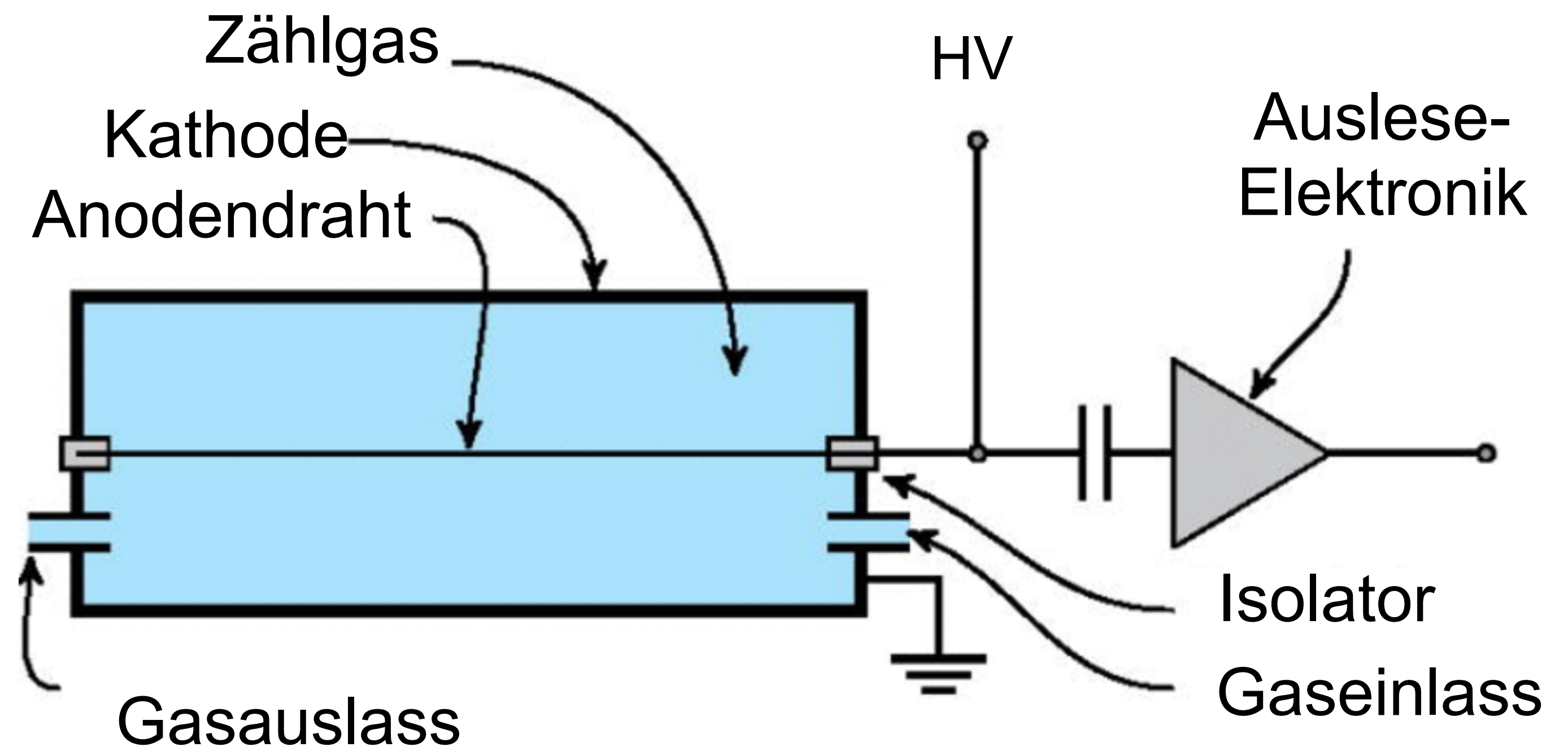
Proportionalrohrzähler: Aufbau

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

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



Q: wikipedia

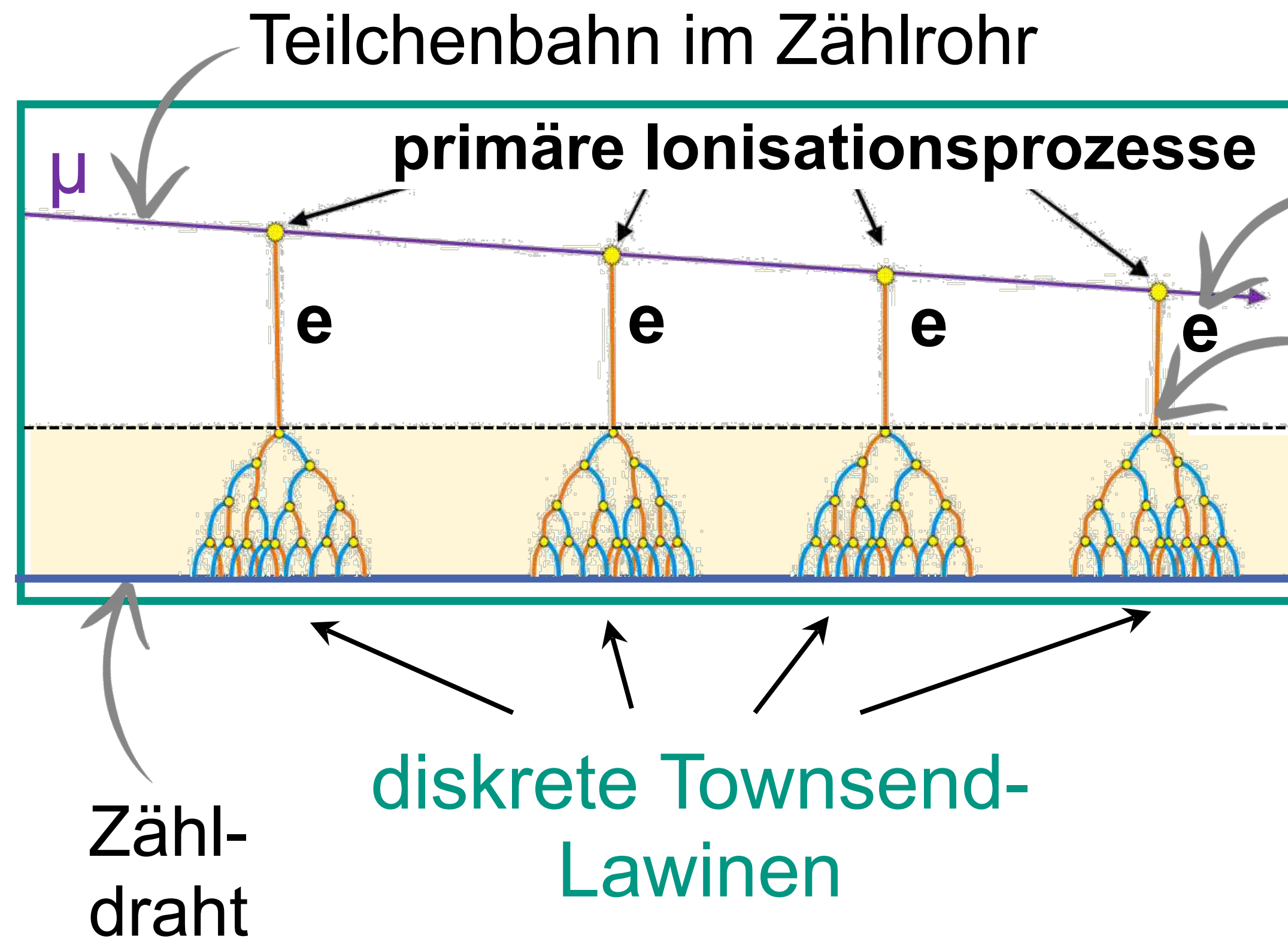


Q: T. Hilden

Proportionalrohrzähler: Townsend-Lawinen

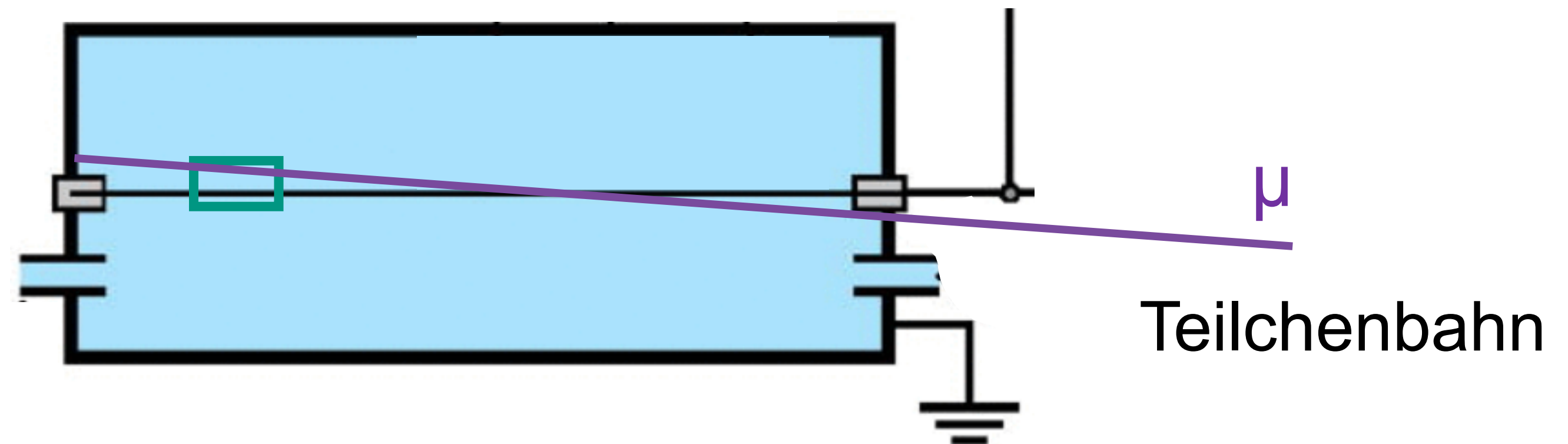
- Elektronenlawinen erzeugen Gasverstärkung bis Faktor $\sim 10^5$

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



driftendes
Sekundärelektron

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



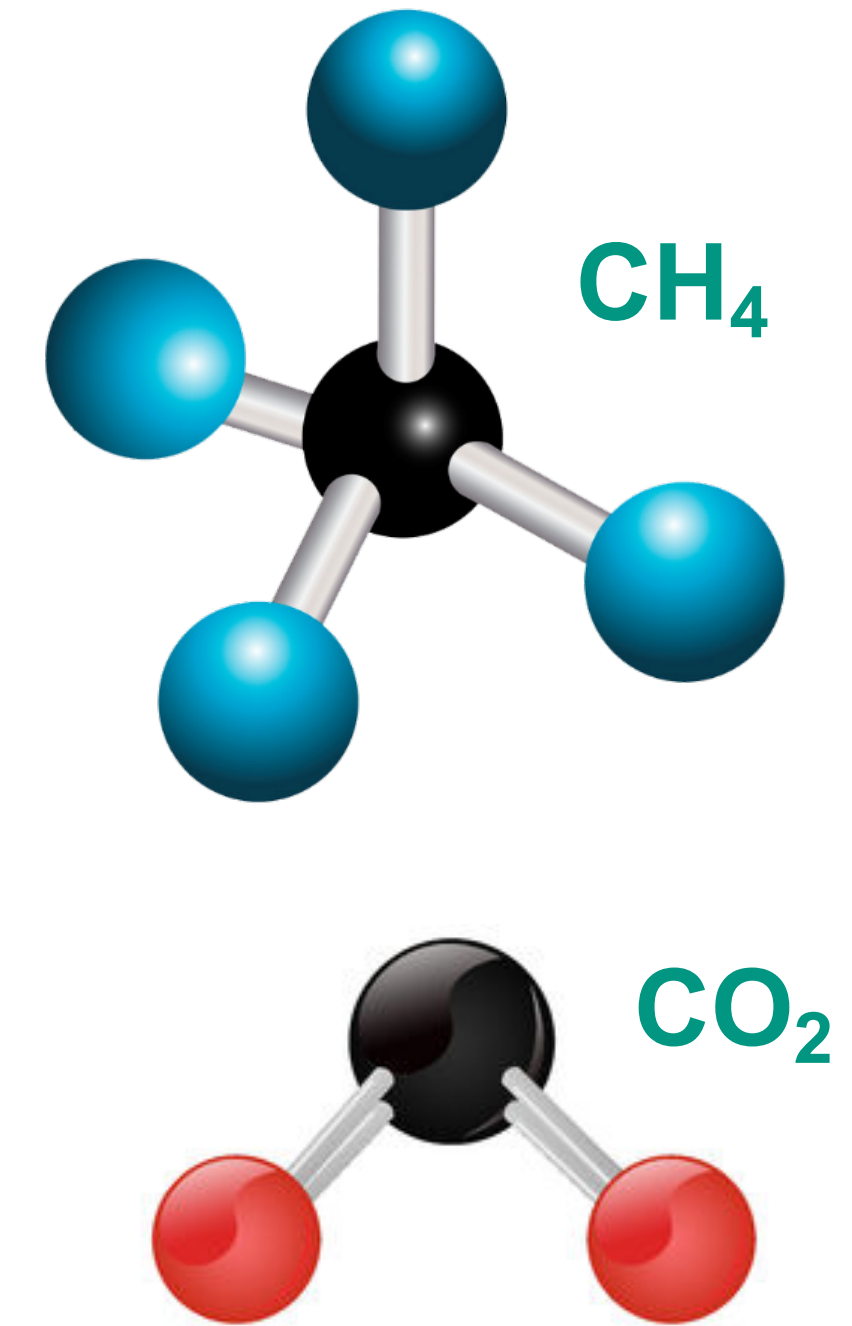
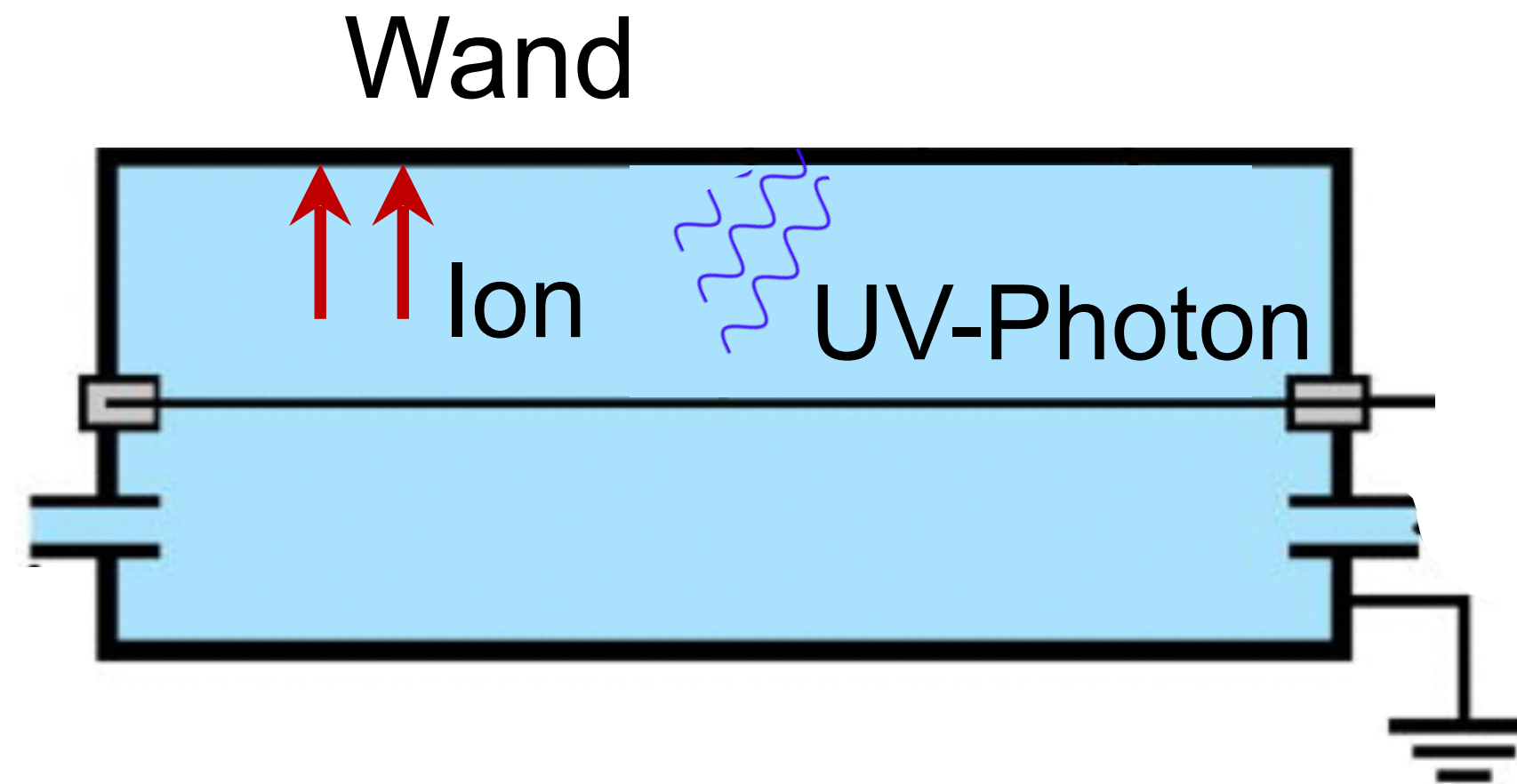
Q: wikipedia

Q: T. Hilden

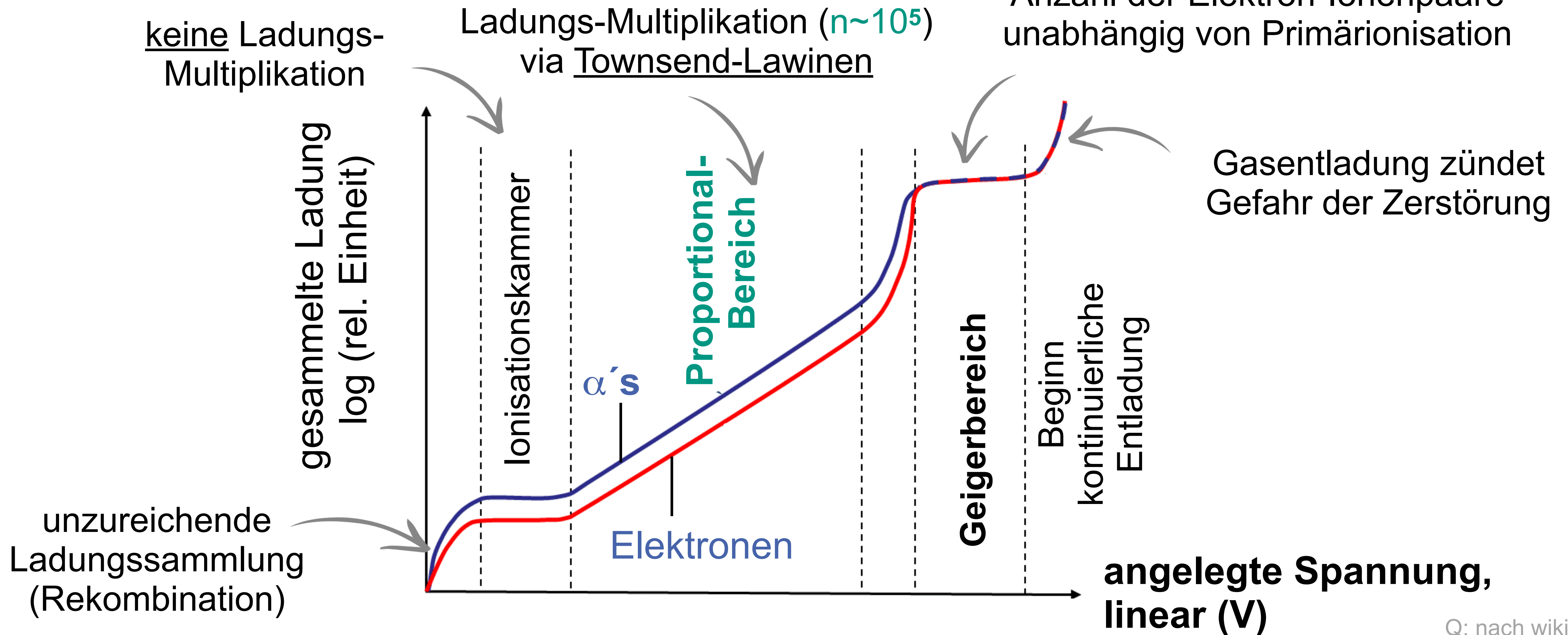
Proportionalrohrzähler: Zusatz von Quenchgas

■ 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

Viendrahtproportionalalkammer: 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

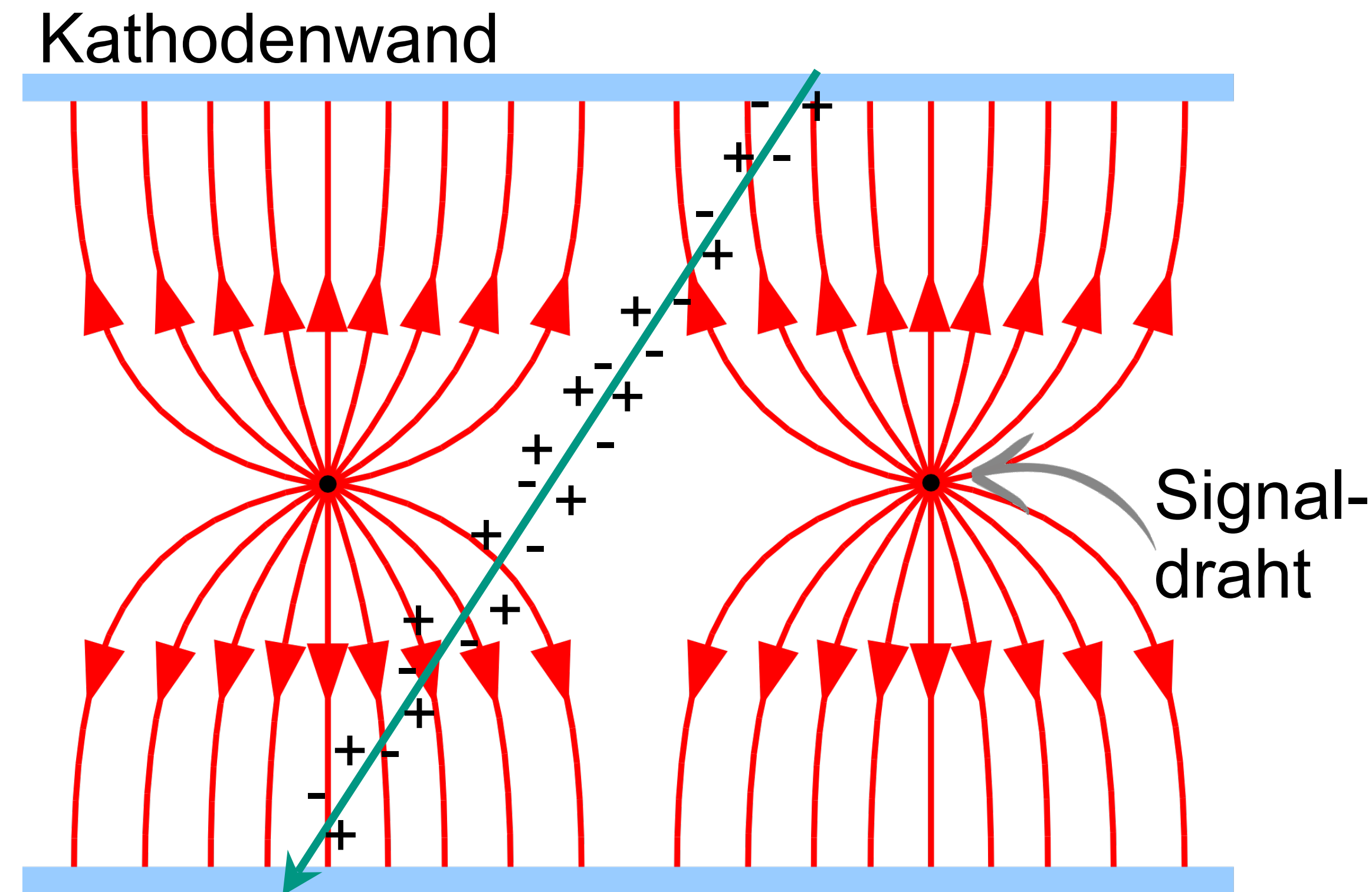


George Charpak



Nobelpreis

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

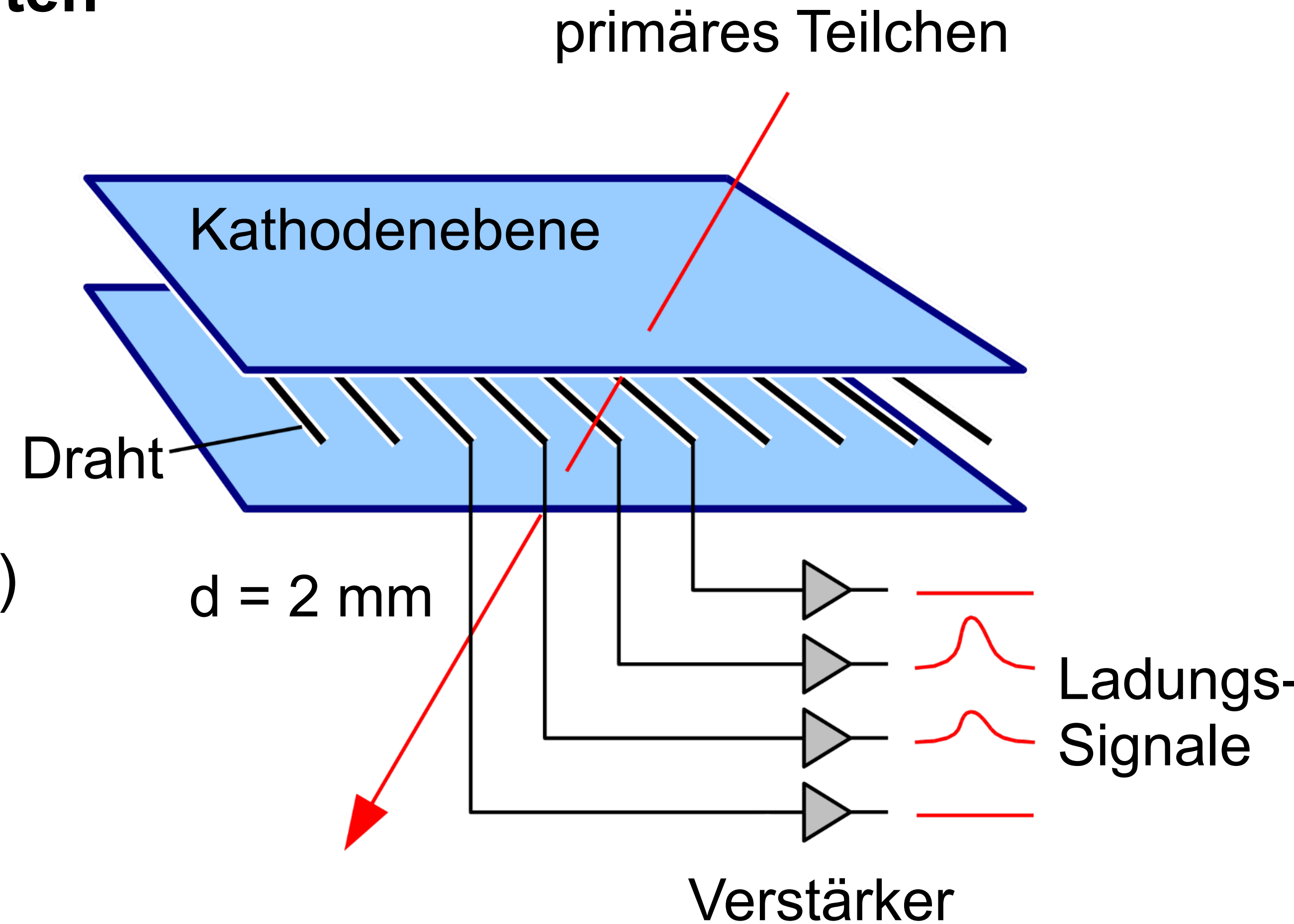


Q: nach wikipedia

***Multi-Wire Proportional Chamber**

■ MWPC: ihre wichtigsten Eigenschaften

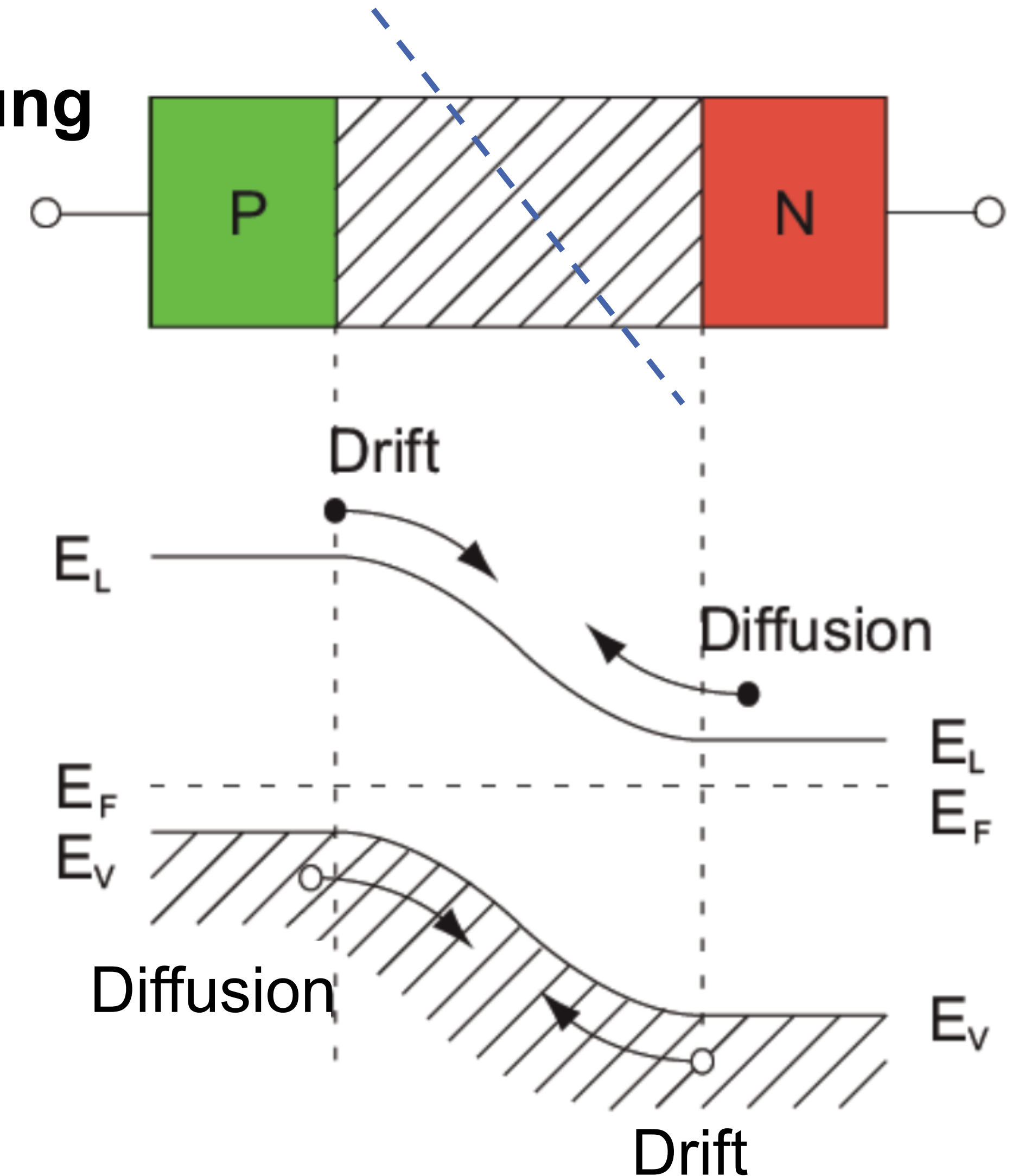
- jeder Anodendraht arbeitet als unabhängiger Proportionalzähler
- **Ortsauflösung:**
für Drahtabstand $d = 2 \text{ mm}$
 $\Rightarrow \sigma_x = 600 \text{ } \mu\text{m}$
(Gewichtung mit Ladungs-Signalen)
- **Zeitaufklärung:**
schnelle Anodensignale
 $\Rightarrow t_{\text{rise}} \sim 0,1 \text{ ns}$



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

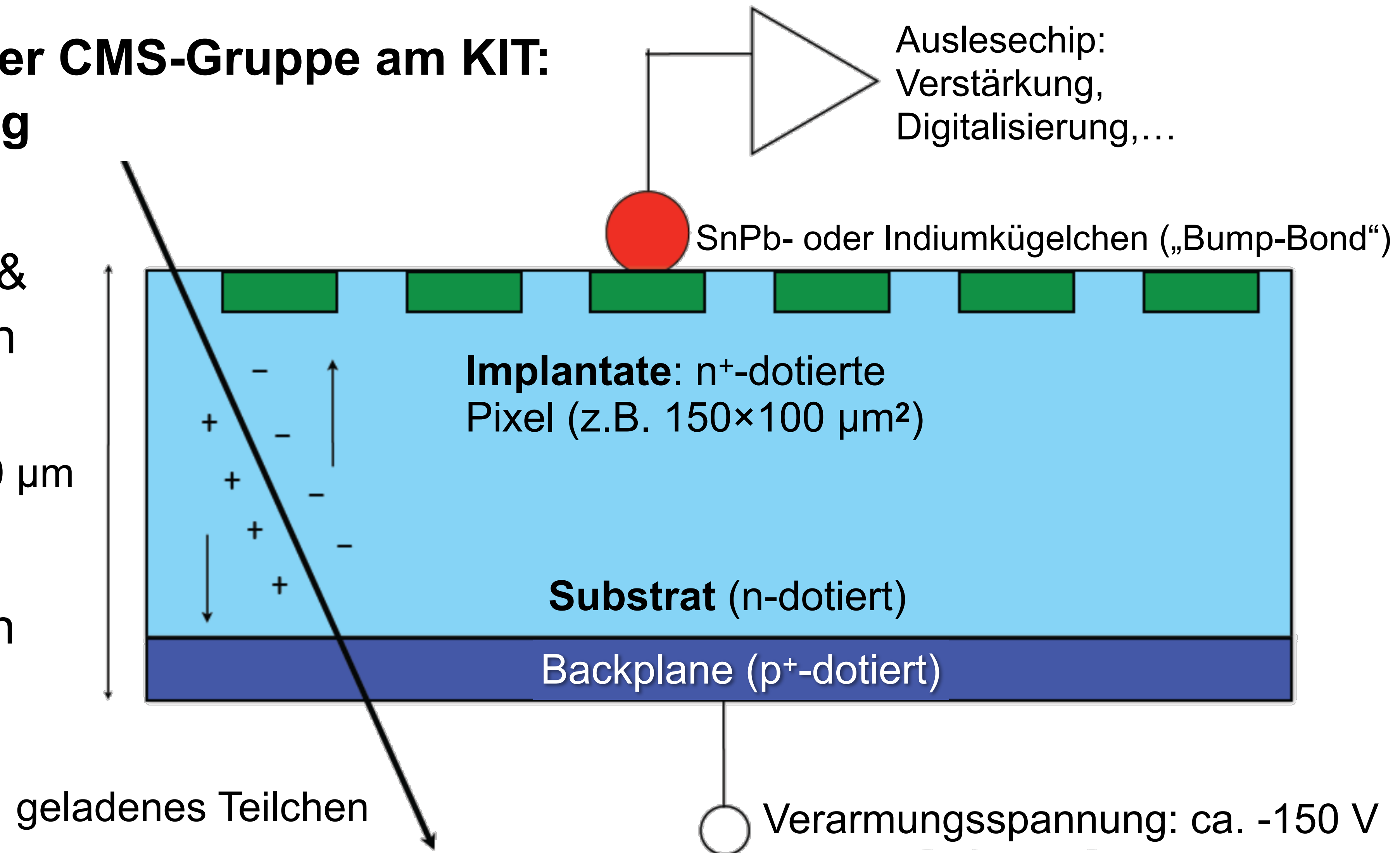
- **Spezialexpertise der CMS-Gruppe am KIT:**
‘hands-on’ training

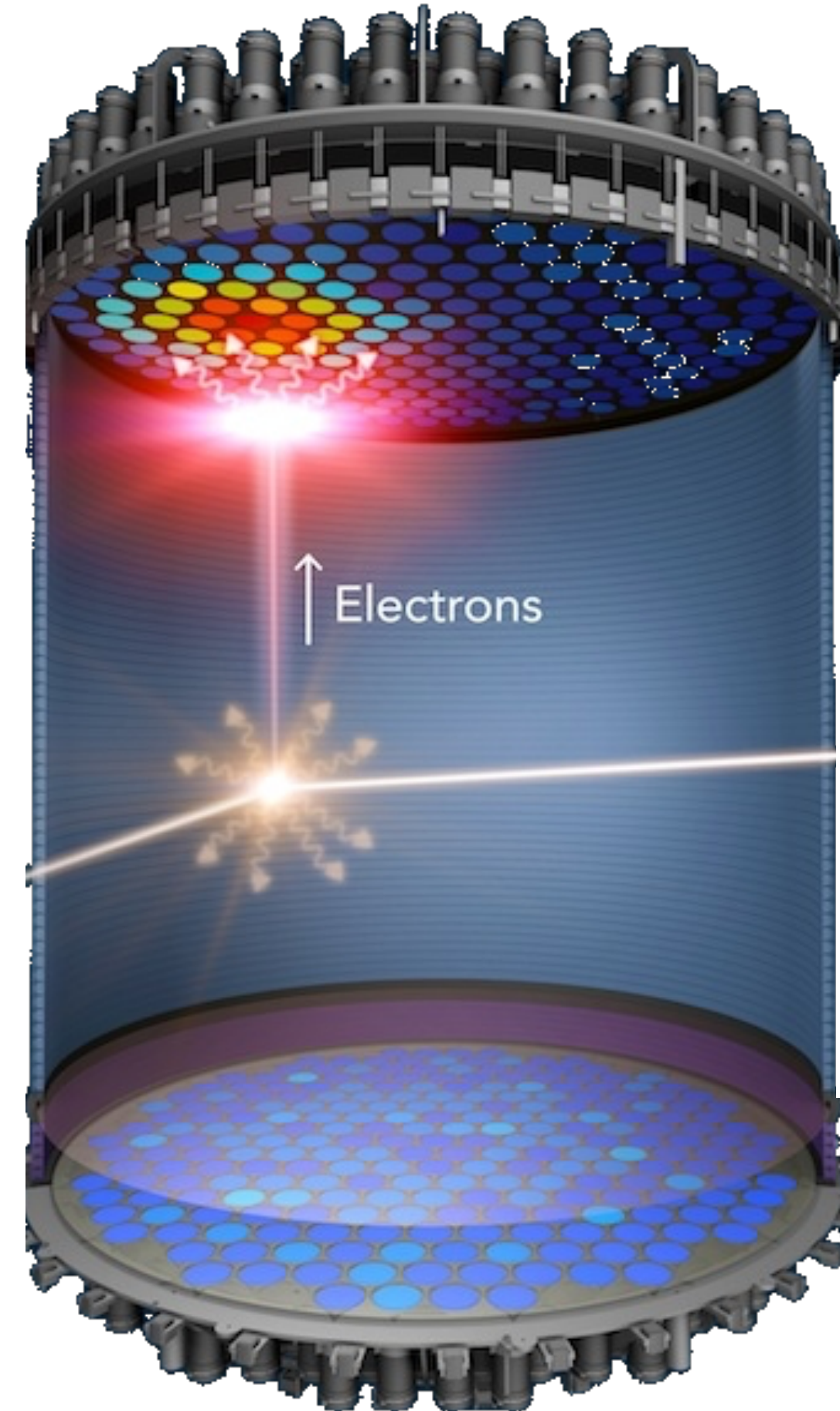
- 14 Lagen zur
Impulsbestimmung &
Vertexrekonstruktion

200-300 μm

- Effizienz für Myonen
~ 100%

Q: U. Husemann





EINSCHUB: ZEITPROJEKTIONSKAMMERN

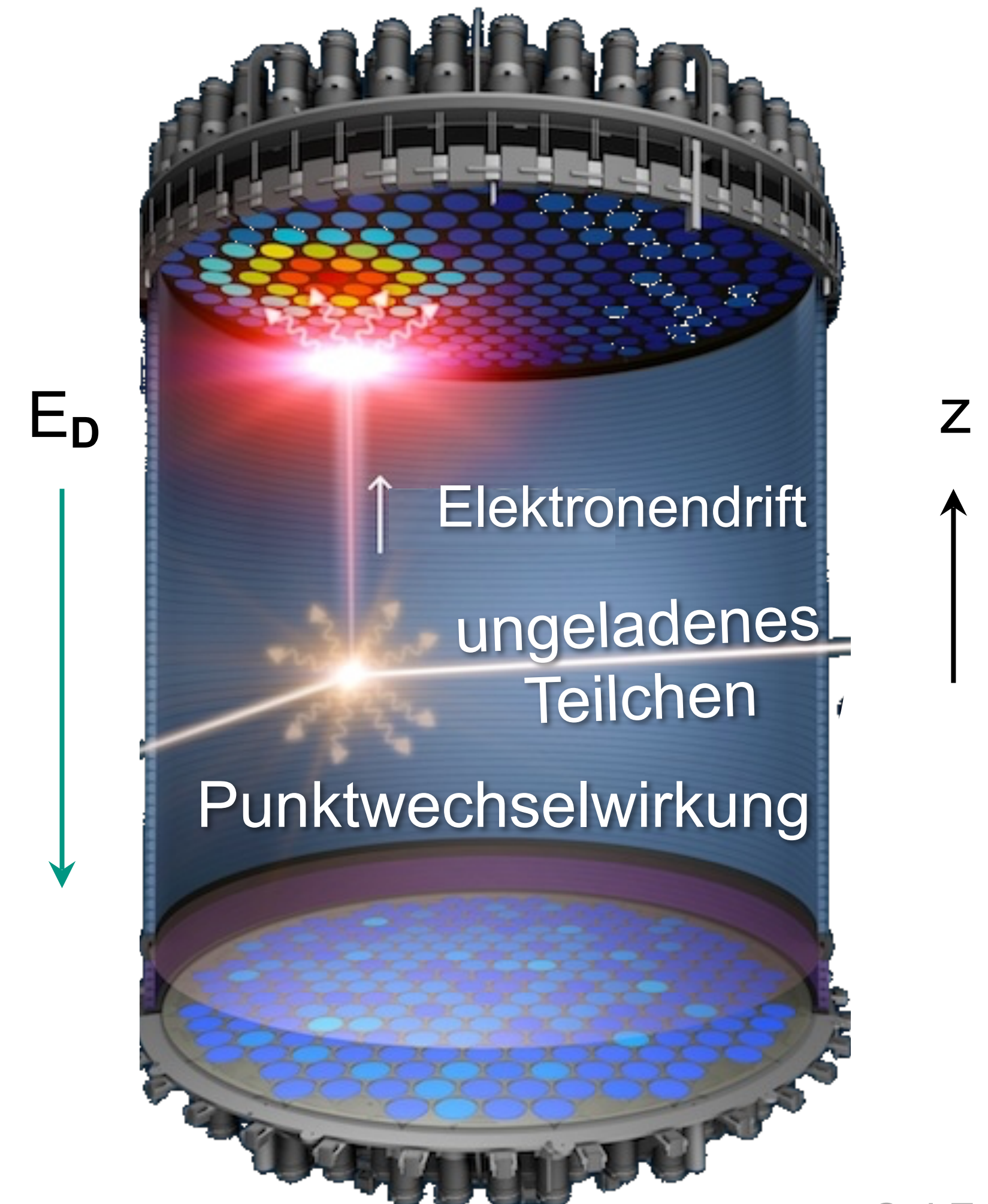
TIME PROJECTION CHAMBERS TPCs

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



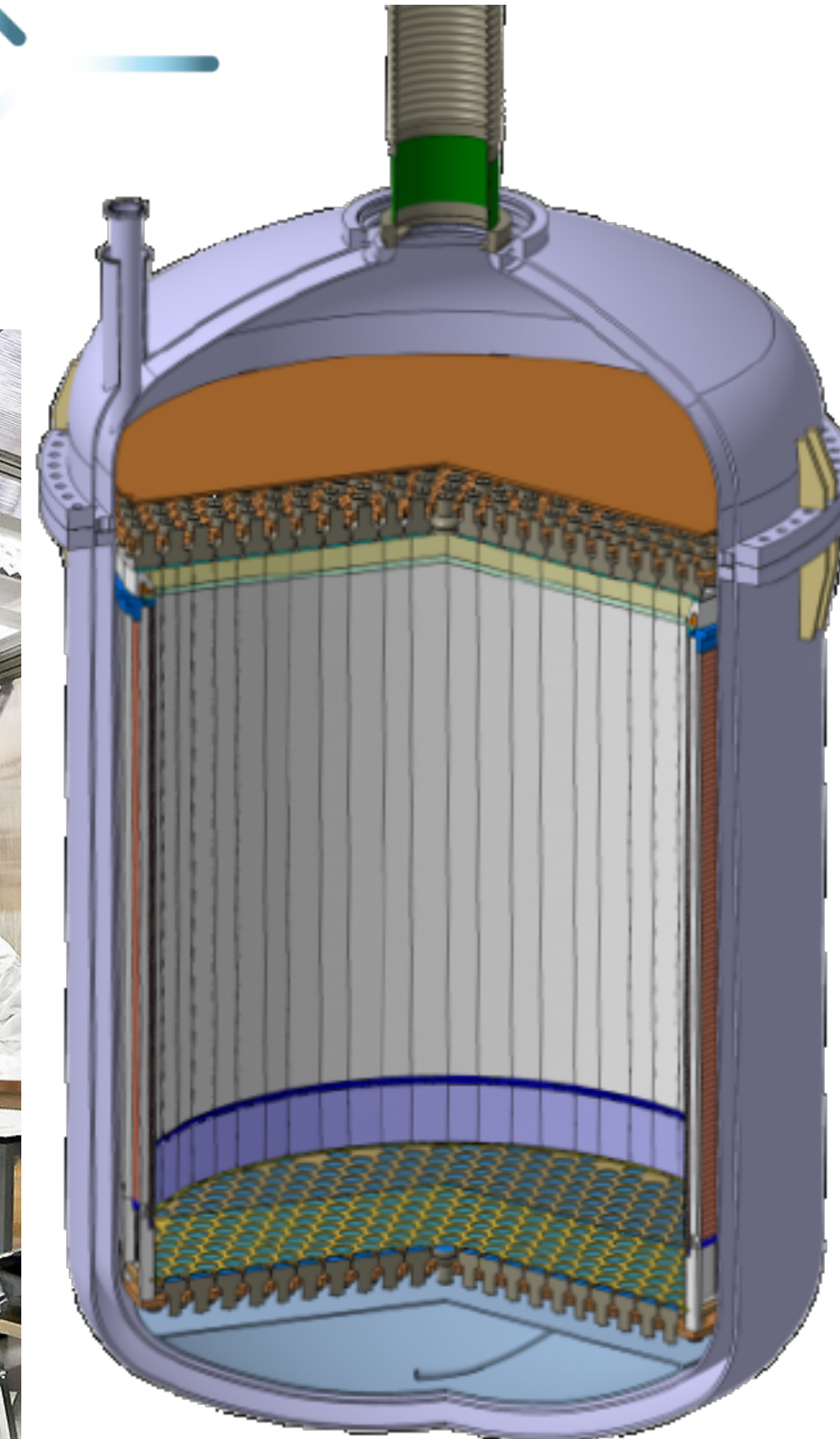
Q: LZ

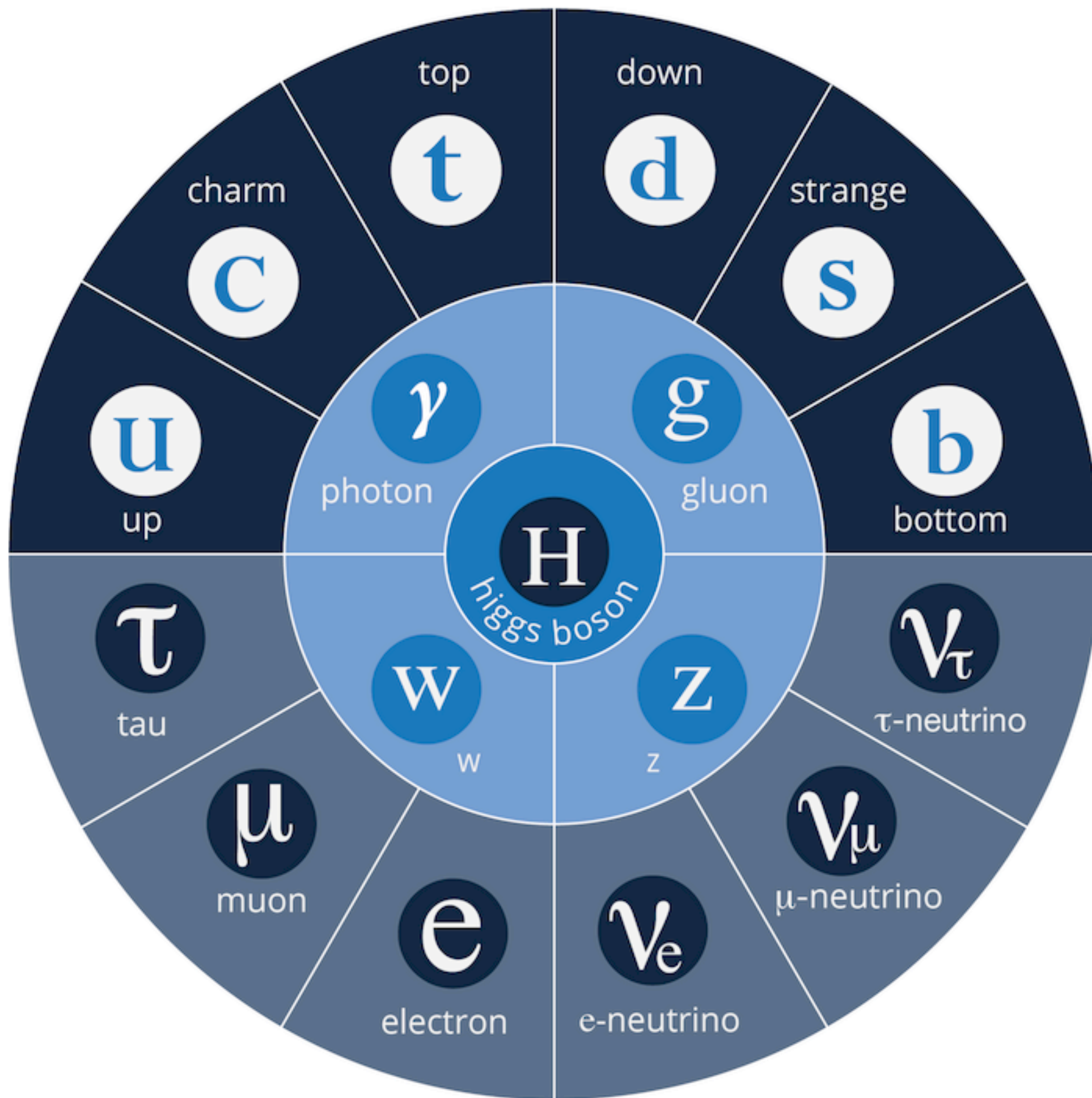
Zeitprojektionskammer: Suche nach WIMPs

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



DARWIN

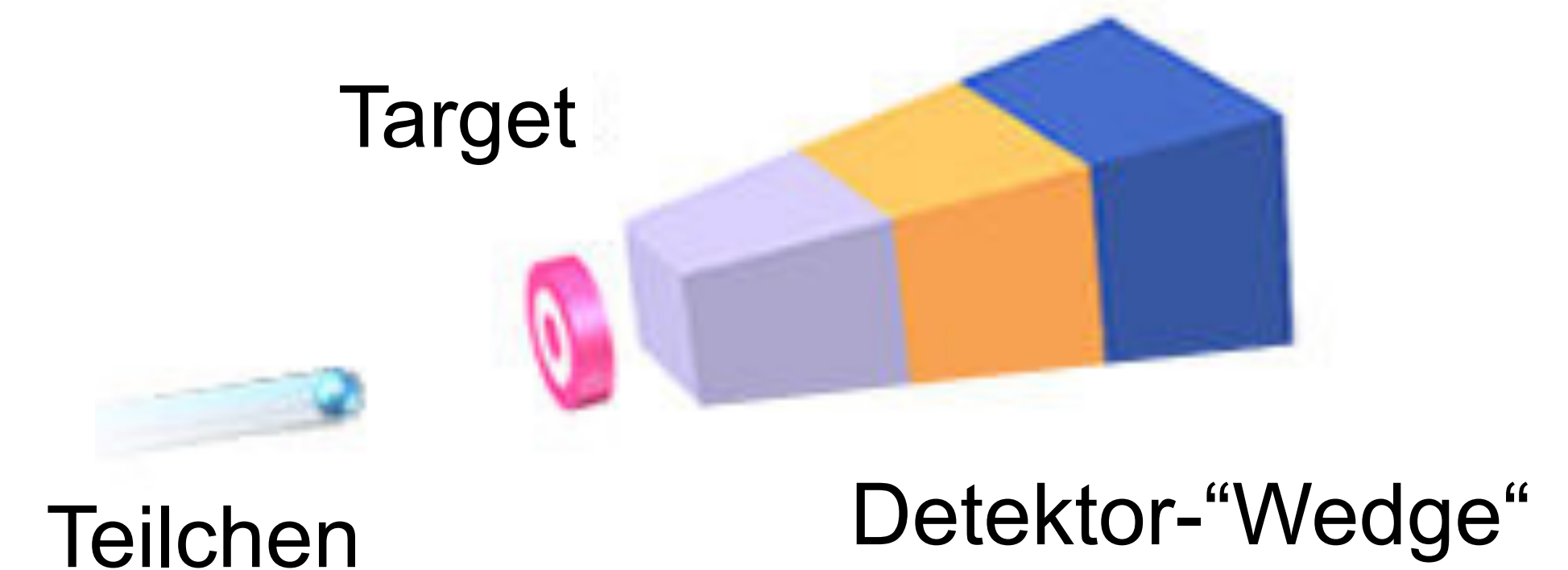
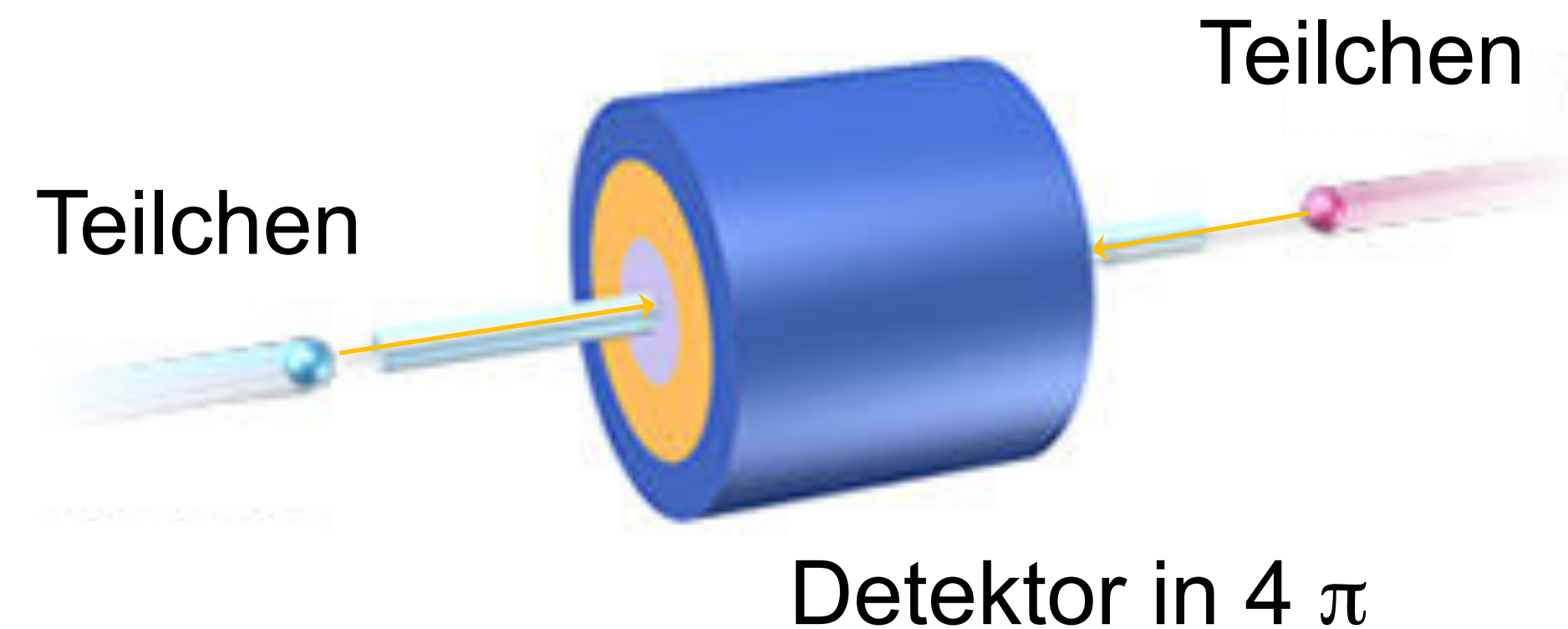




■ 2. Experimentelle Methoden

- 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

- Detektorsysteme sind an die Kinematik am Beschleuniger angepasst



Collider-Experiment

Fixed Target Experiment

kollidierende Teilchenstrahlen

Teilchenstrahl trifft ruhendes Target

Teilchennachweis in alle Richtungen

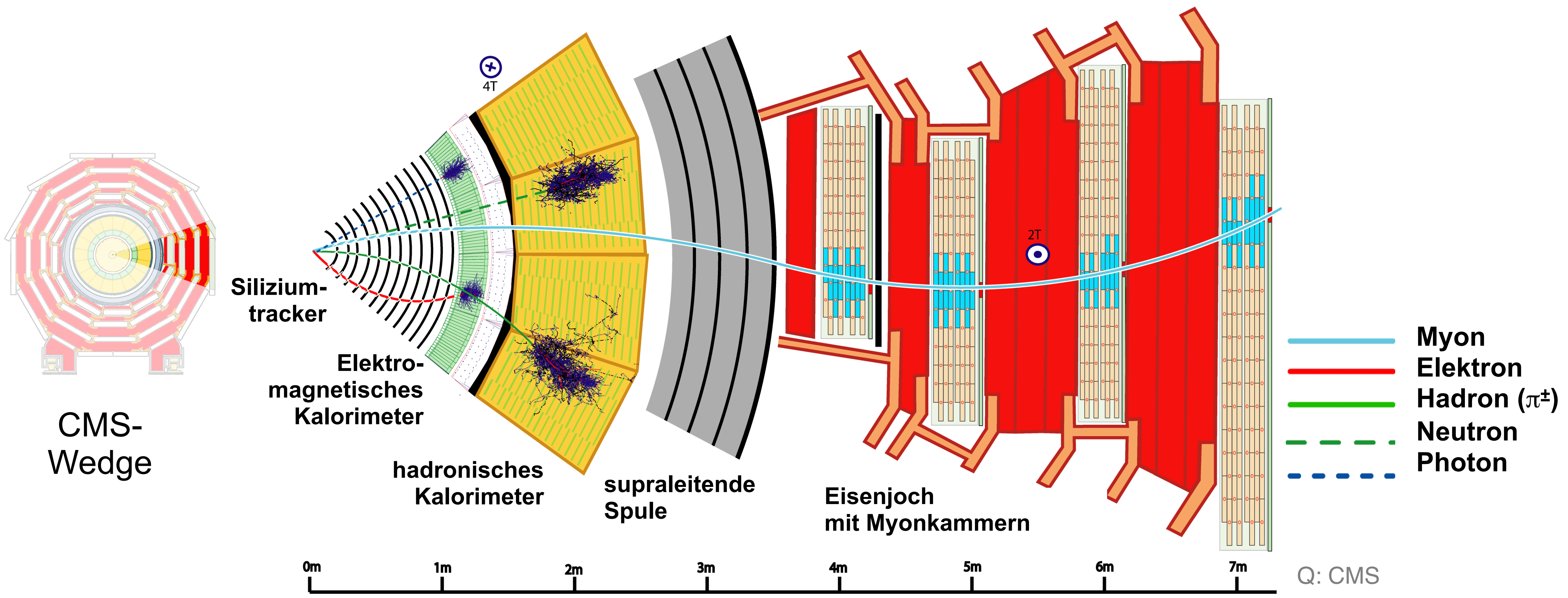
Teilchennachweis in Vorwärtsrichtung

zylinderförmiger 4π Detektor

Vorwärtsspektrometer

Aufbau eines Collider-Experiments: CMS

- Aufgaben: Spurrekonstruktion (Impuls, Q), Energie, Ereignistopologie

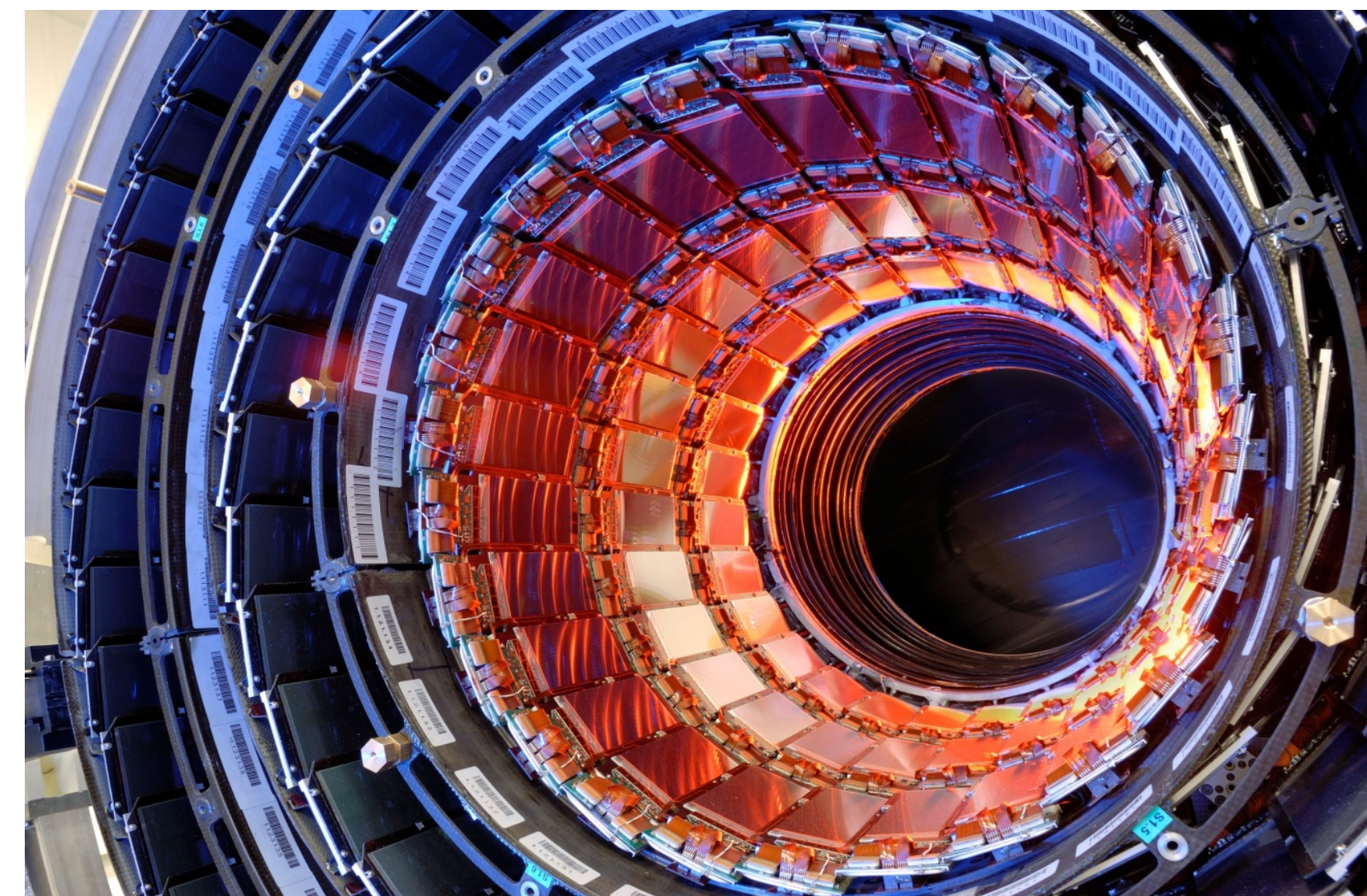
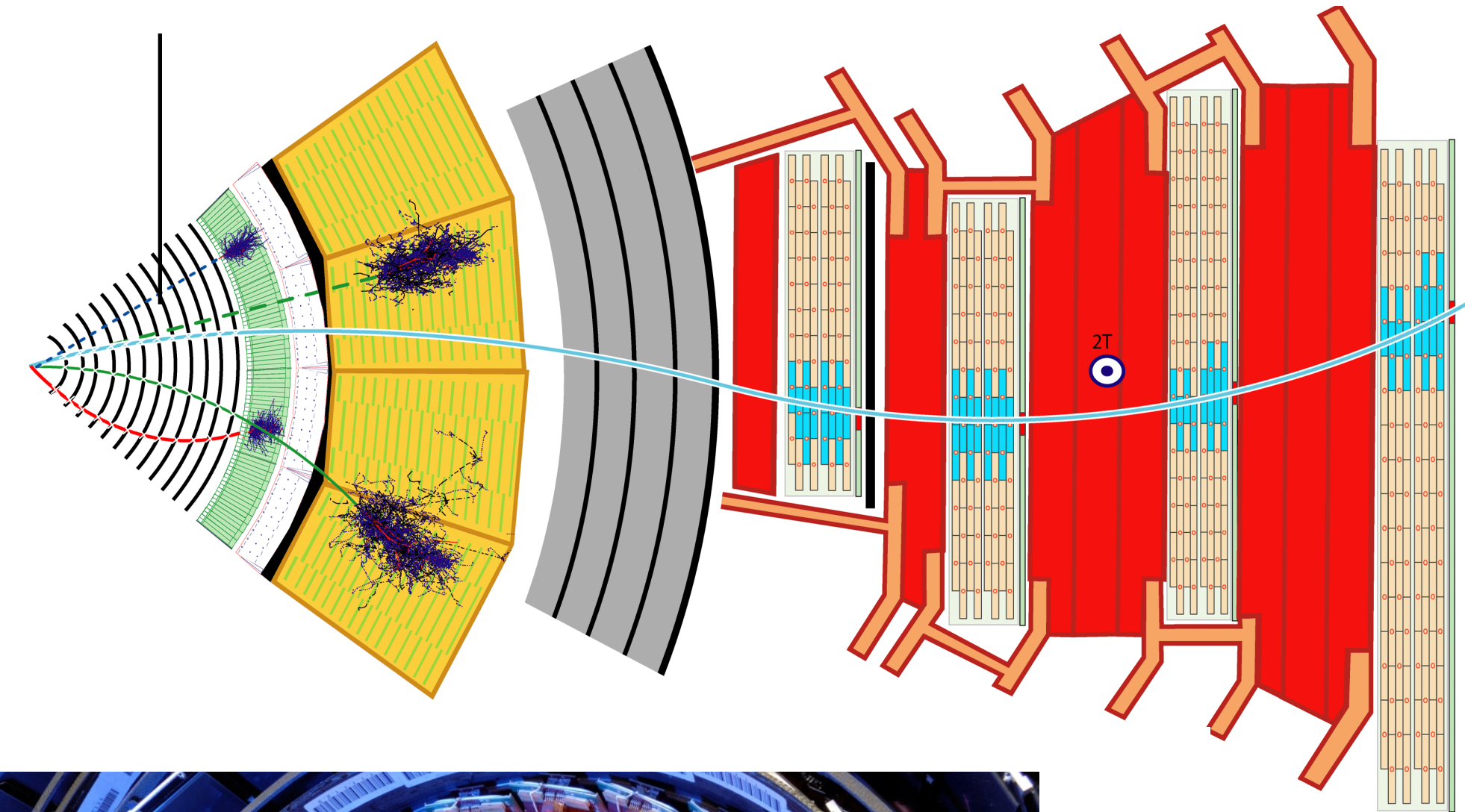


Inner Tracker: Spurrekonstruktion

- **Mehrlagiger Spurdetektor**

- Aufgabe: Rekonstruktion der Spuren von geladenen Teilchen nahe am primären Eventvertex
- Mustererkennung und χ^2 -Spurfit
- weltgrößter Si-Tracker $A = 206 \text{ m}^2$
- 125 Mio. Auslesekanäle **Si-Pixel**
2 D: $150 \text{ } \mu\text{m} \times 100 \text{ } \mu\text{m}$
- 10 Mio. Auslesekanäle **Si-Streifen**
1 D: $10 \text{ cm} \times 80 \text{ } \mu\text{m}$

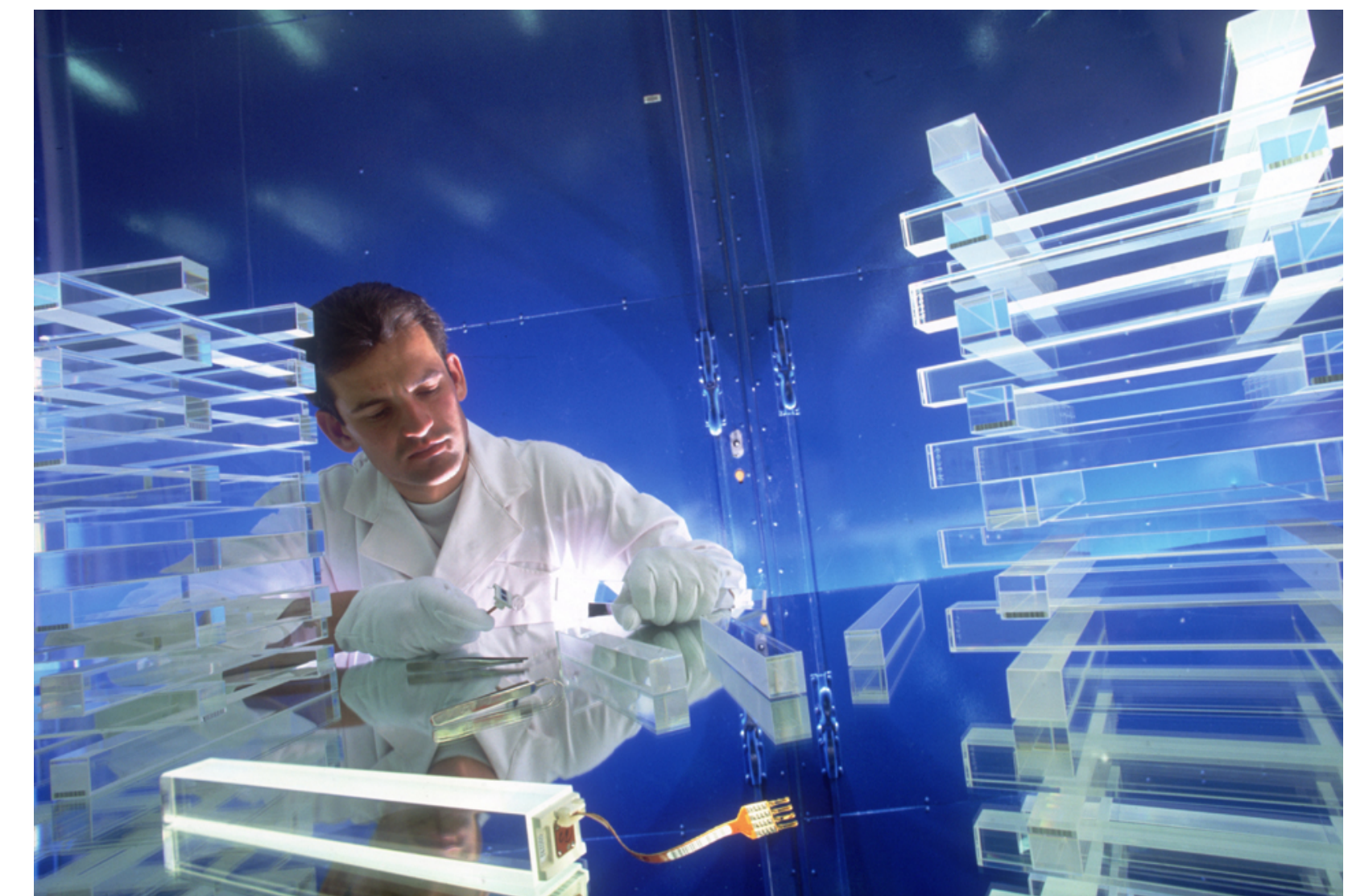
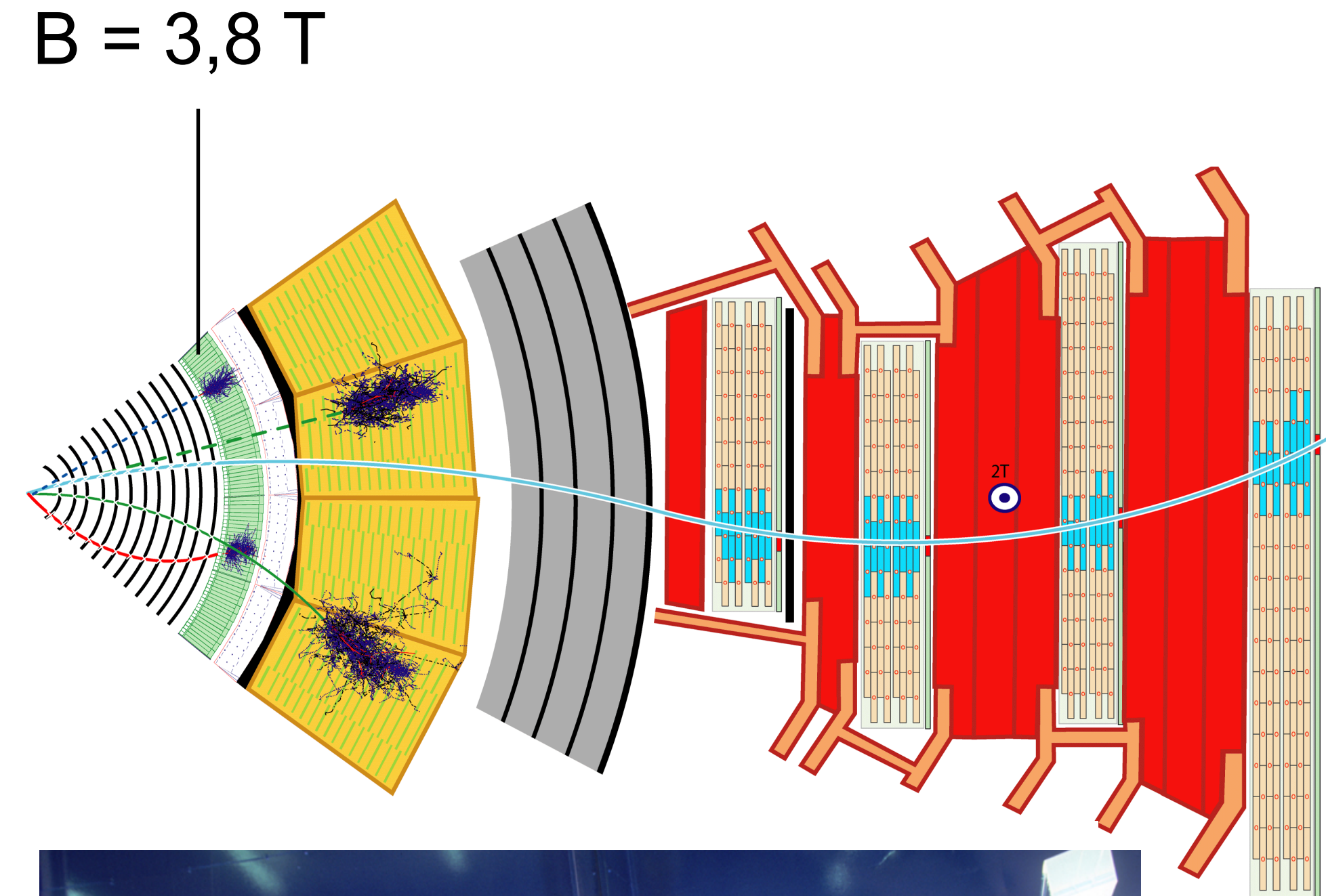
$$B = 3,8 \text{ T}$$



Q: CMS

Elektromagnetisches Kalorimeter

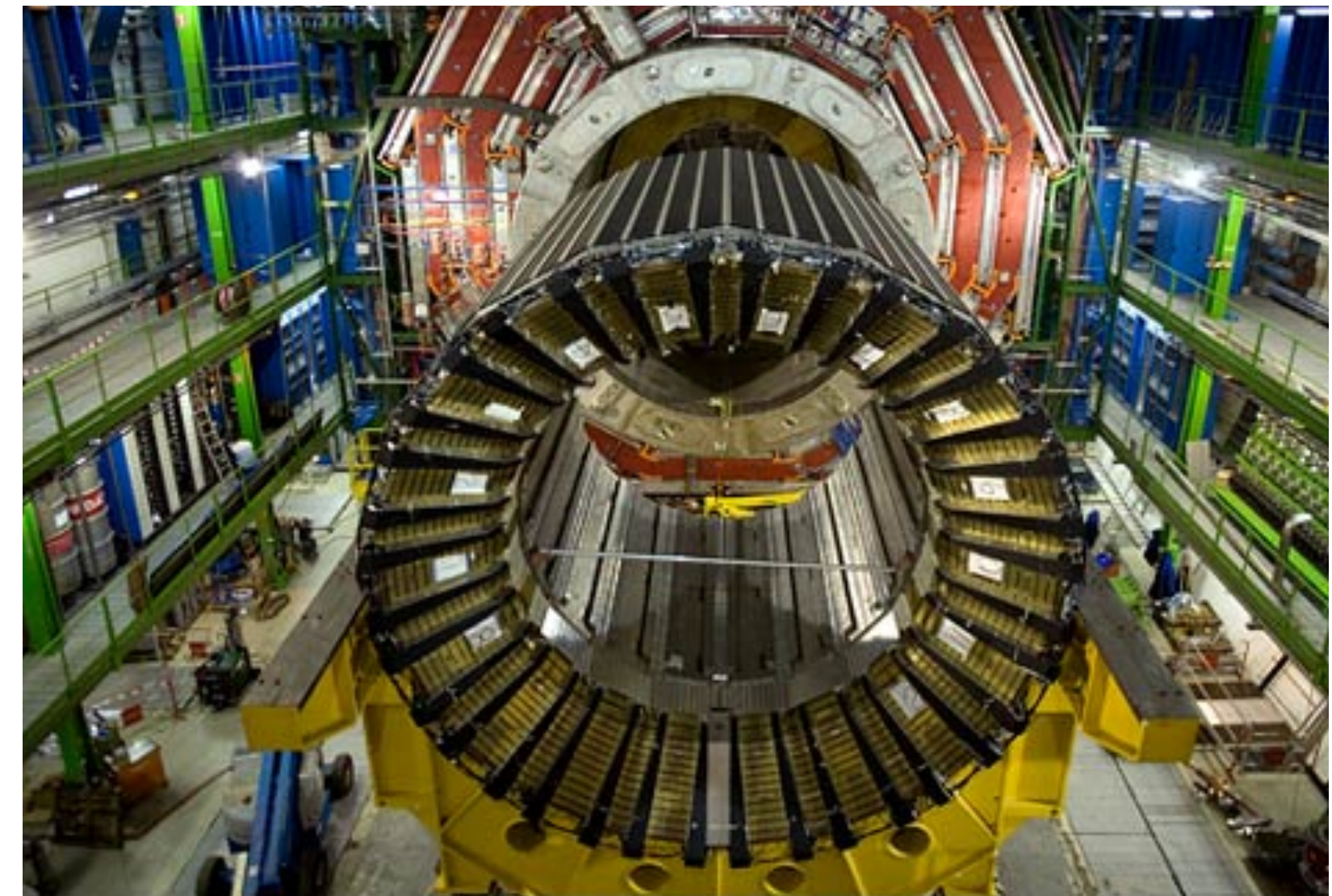
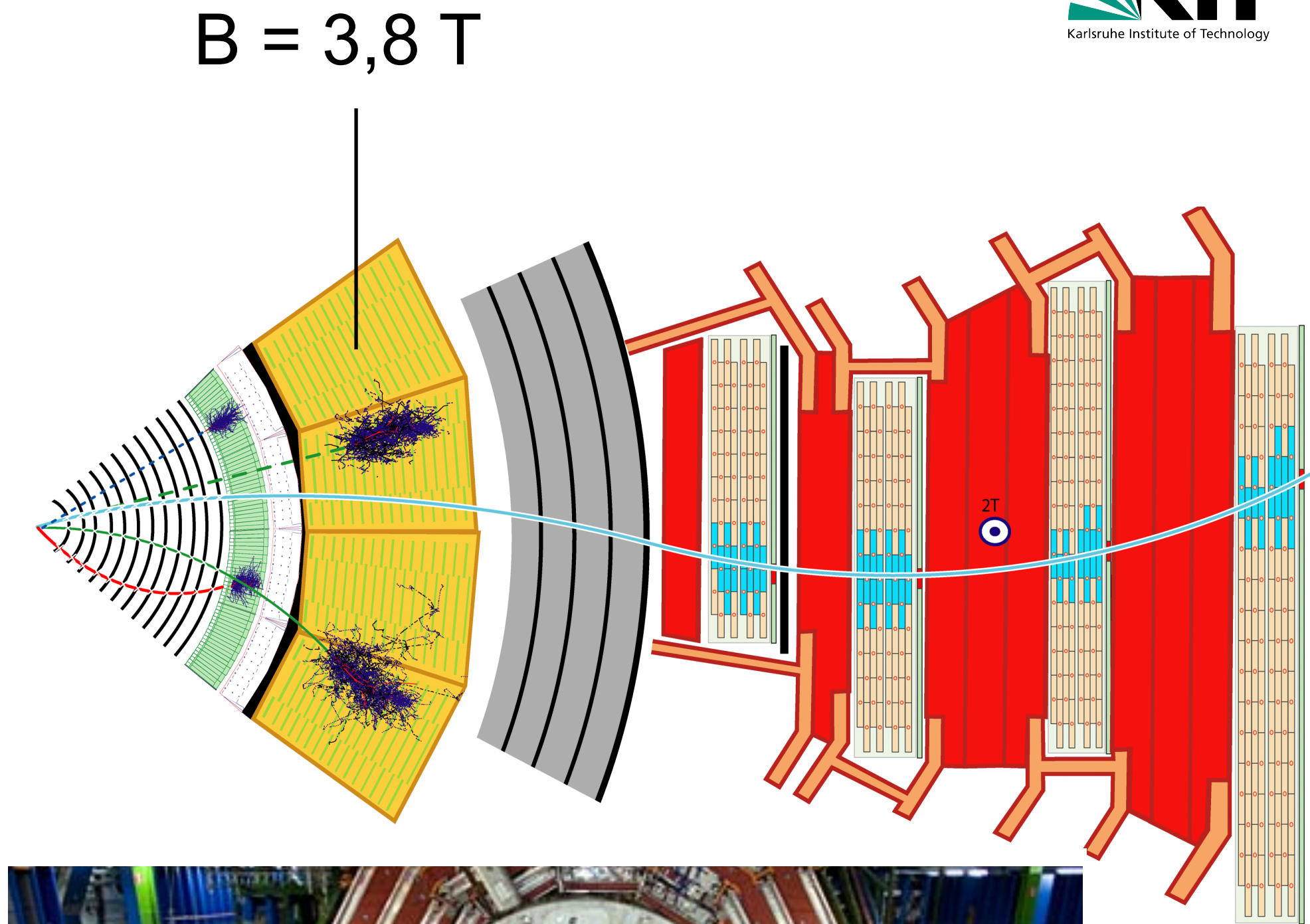
- **ECAL = electromagnetic calorimeter**
 - **Aufgabe:** Bestimmung der elektromagnetischen Energie eines Ereignisses
Teilchen-Identifikation: e^- , e^+ , γ , π^0
 - **Aufbau: kompaktes Kalorimeter** innerhalb des Solenoiden (von $r = 1,1 \text{ m} \dots 1,77 \text{ m}$) mit hoher Dichte $\rho = 8,3 \text{ g / cm}^3$
 - 61200 PbWO_4 **Blei-Wolframat Kristalle**
 - kurze Strahlungslänge $X_0 = 0,89 \text{ cm}$
 - vollständige **Absorption** da **$25,8 X_0$**



Q: CMS

Hadronisches Kalorimeter

- **HCAL = hadronic calorimeter**
 - **Aufgabe:** Bestimmung der hadronischen Energie eines Ereignisses
Rekonstruktion von **Jets** (Hadronenbündel)
 - **Aufbau:** kompaktes Kalorimeter innerhalb des Solenoiden (von $r = 1,77 \text{ m} \dots 2,95 \text{ m}$)
 - **Sampling-Kalorimeter:**
alternierende Lagen eines passiven Absorbers (Messing) und eines aktiven Szintillators (Plastikszintillator mit Fasern)
 - hadronische Wechselwirkungslängen: **6 Λ**



Q: CMS

Supraleitender Solenoid

■ Weltgrößter Solenoid ($\varnothing = 6\text{ m}$) mit $B = 3.8\text{ T}$

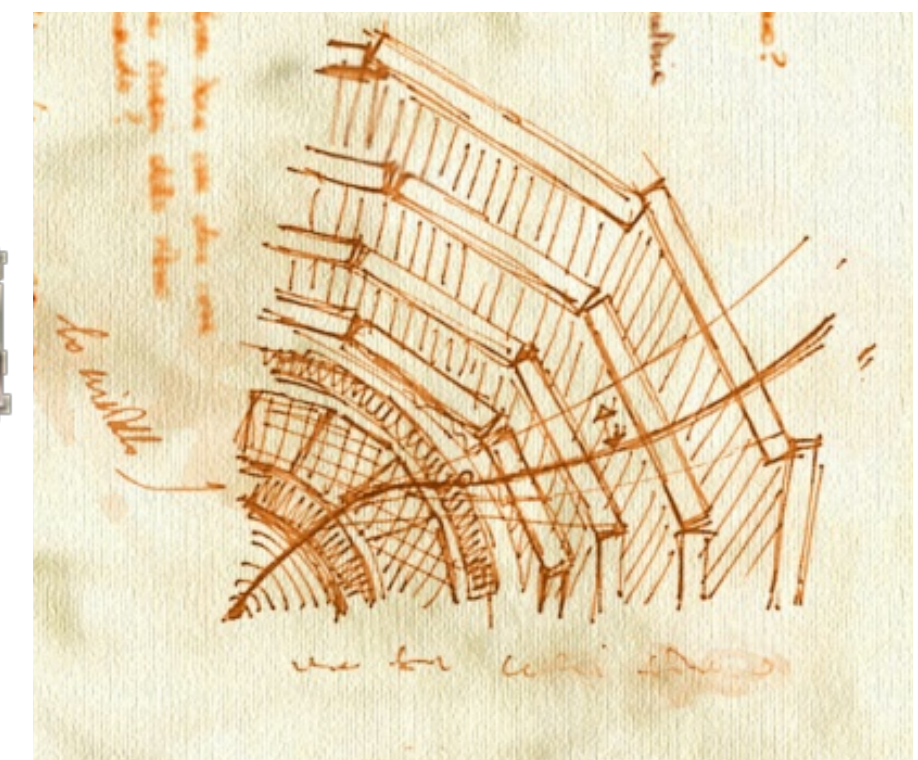
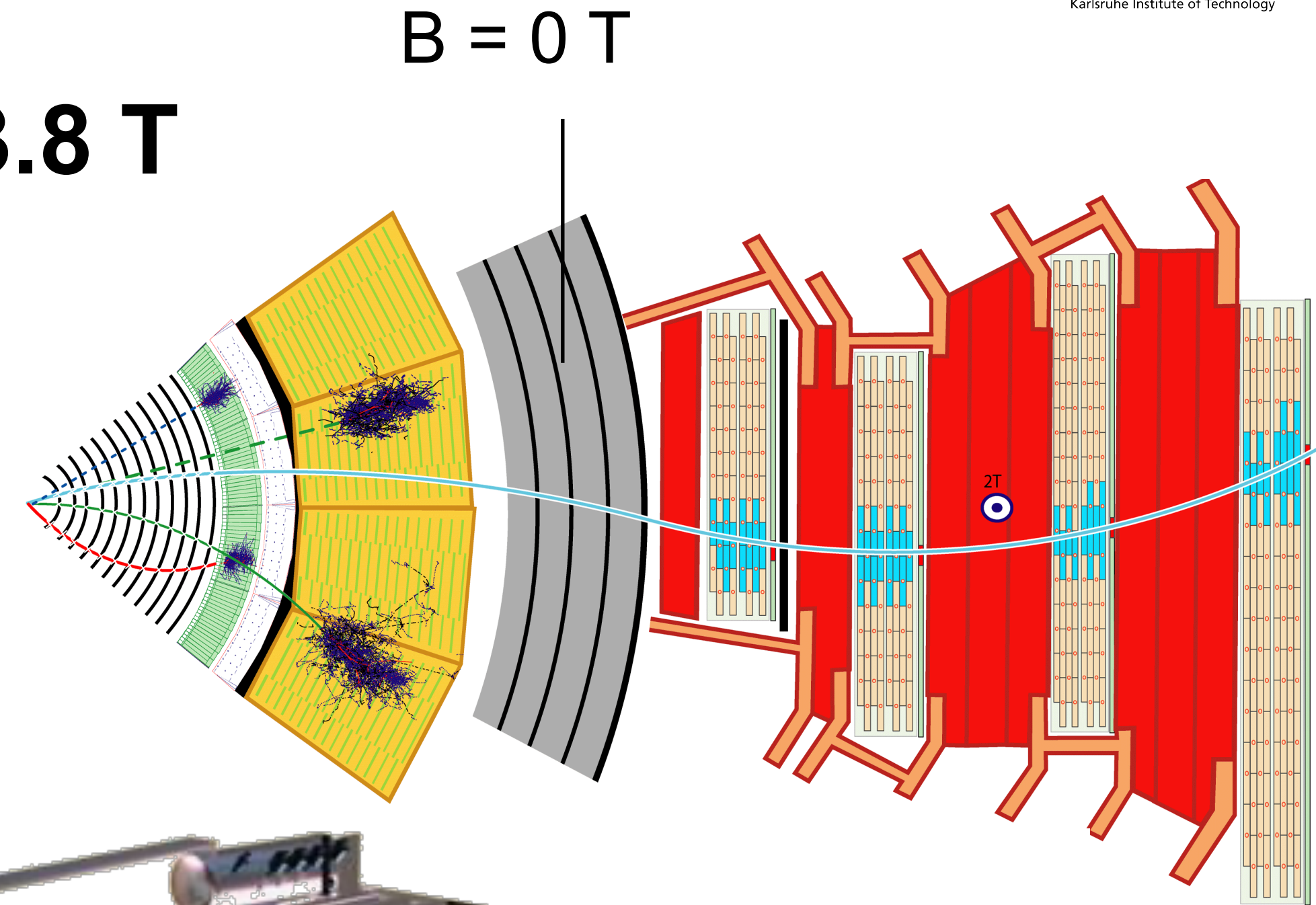
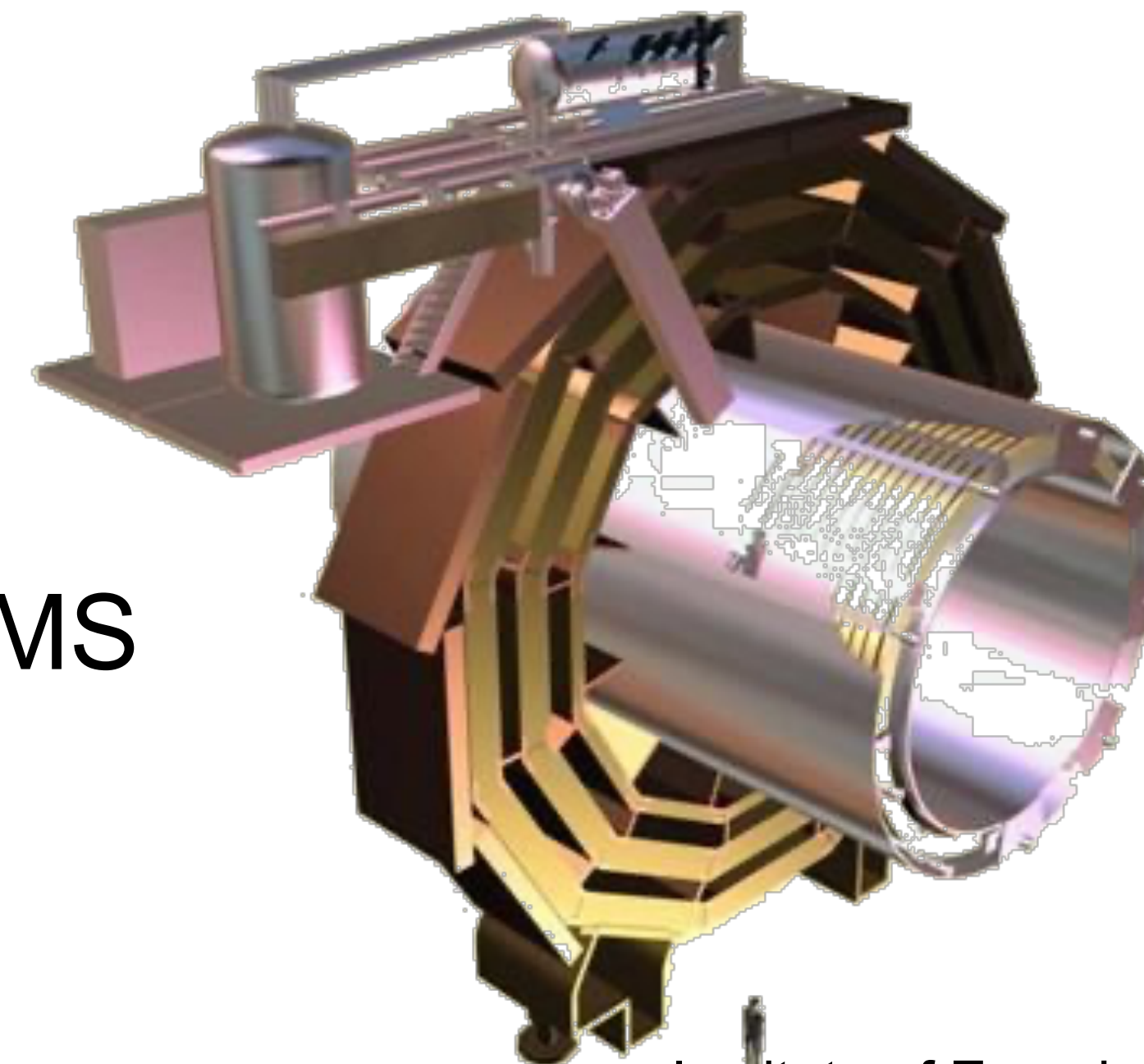
- **Aufgabe:** Erzeugung eines axialen B-Felds mit 4 T bei $I = 19,5\text{ kA}$ ($E_{\text{magn}} = 2,3\text{ GJ}$)

- **Impulsauflösung** $\Delta p/p \sim 1/(B \cdot L^2)$
besser als 10% für 1 TeV Myonen

- innen: $B \cdot L^2 = 36\text{ Tm}^2$

- außen: $B \cdot L^2 = 5\text{ Tm}^2$

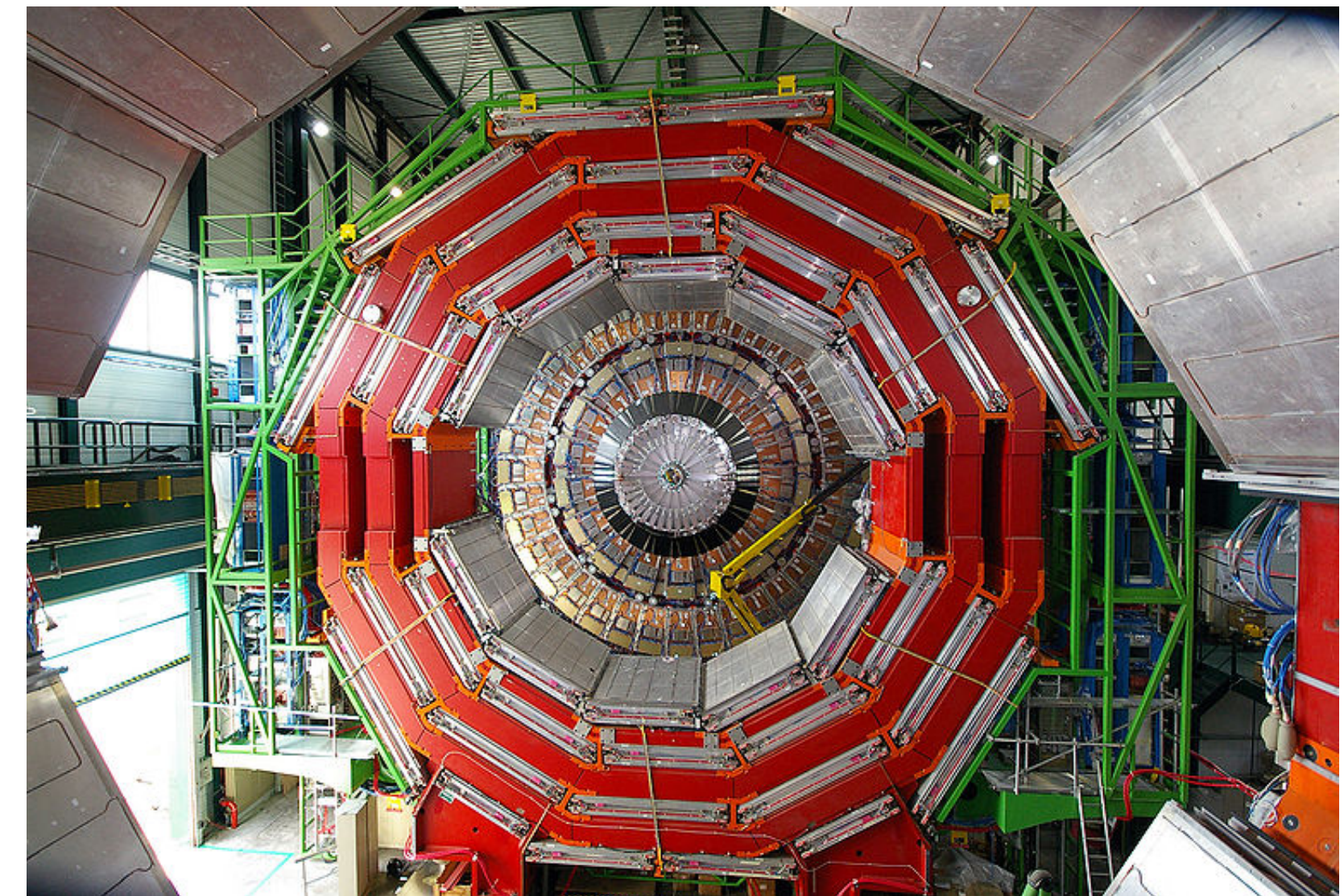
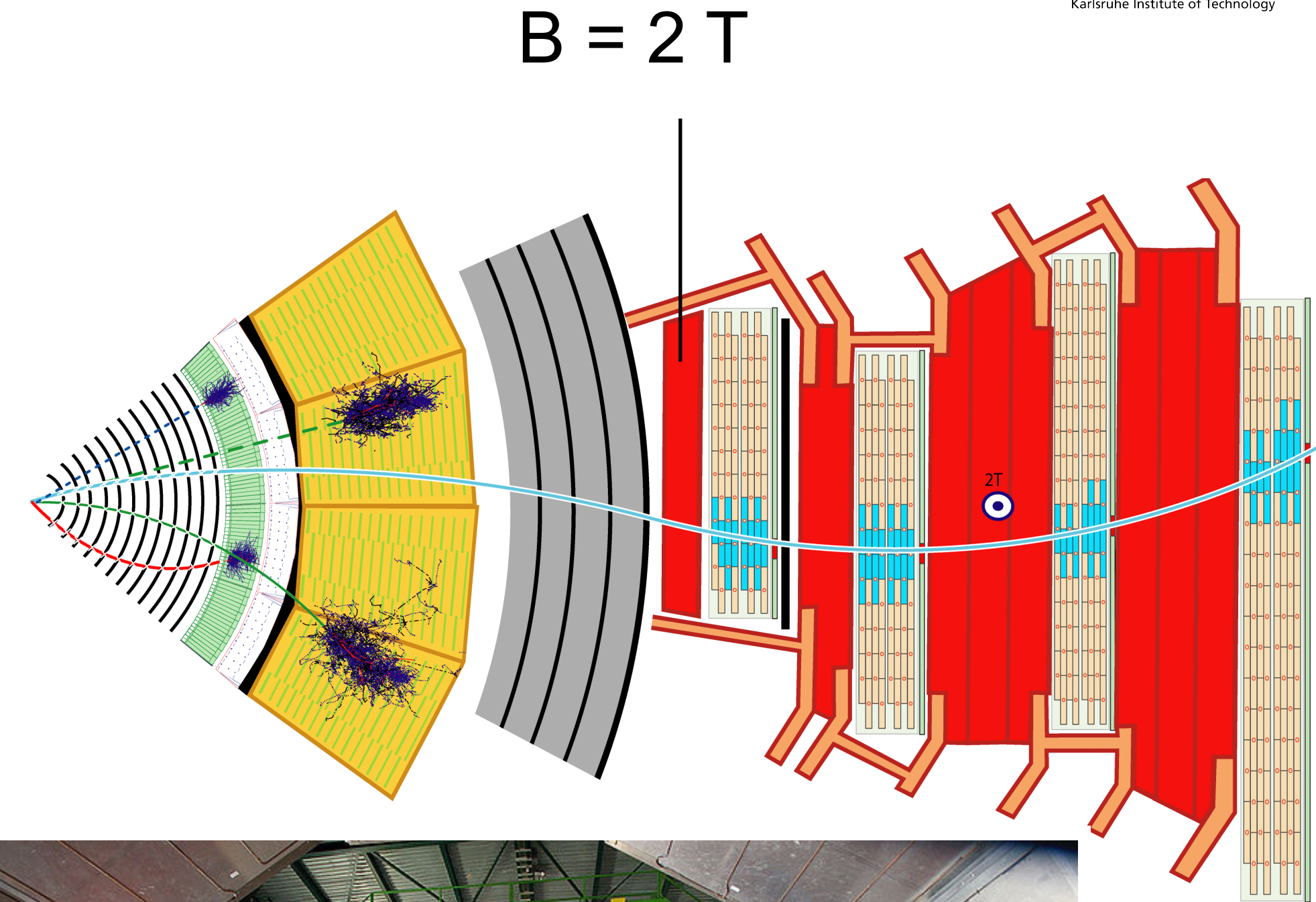
- Kombination: s-förmige μ -Spuren in CMS

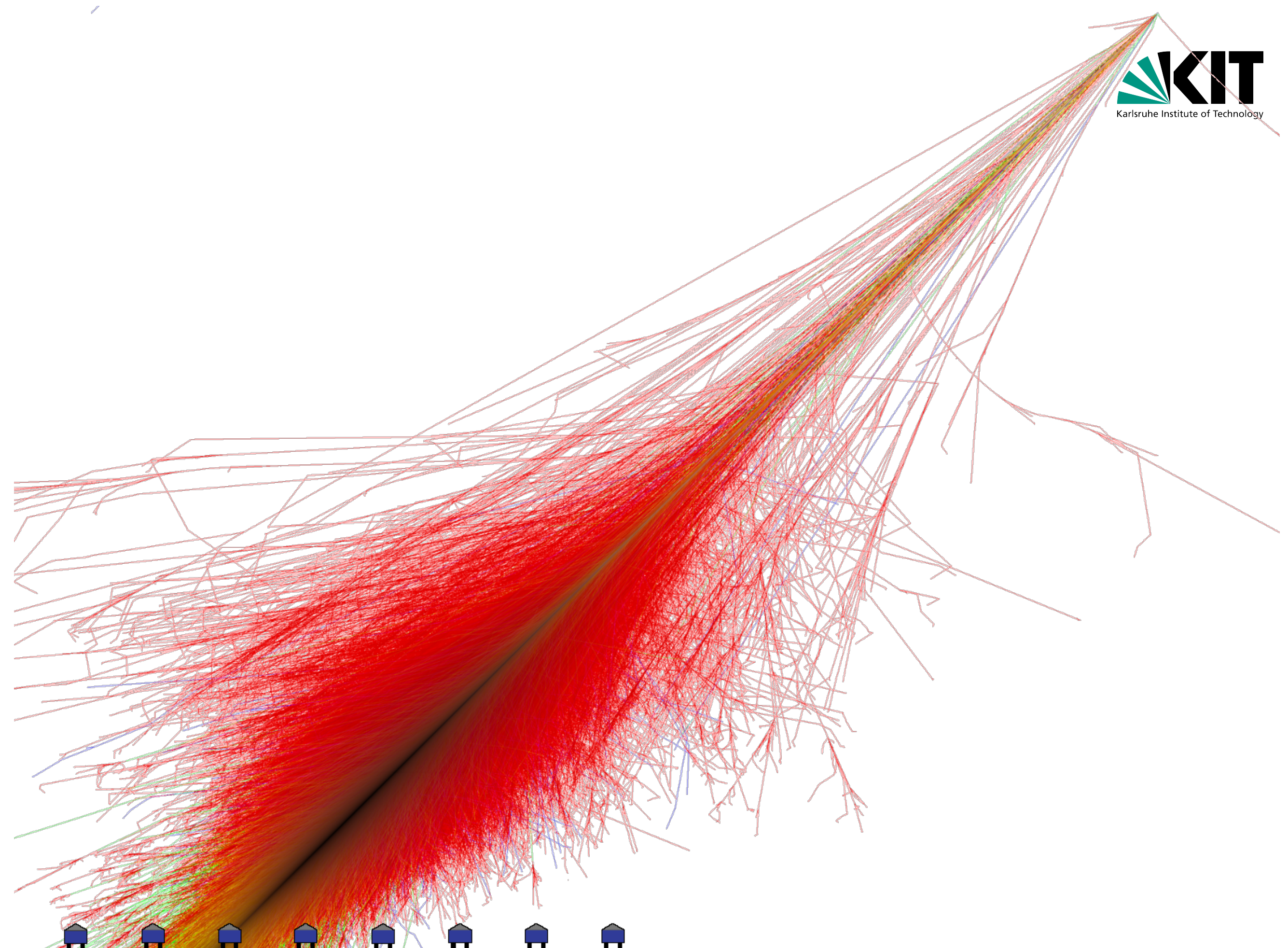
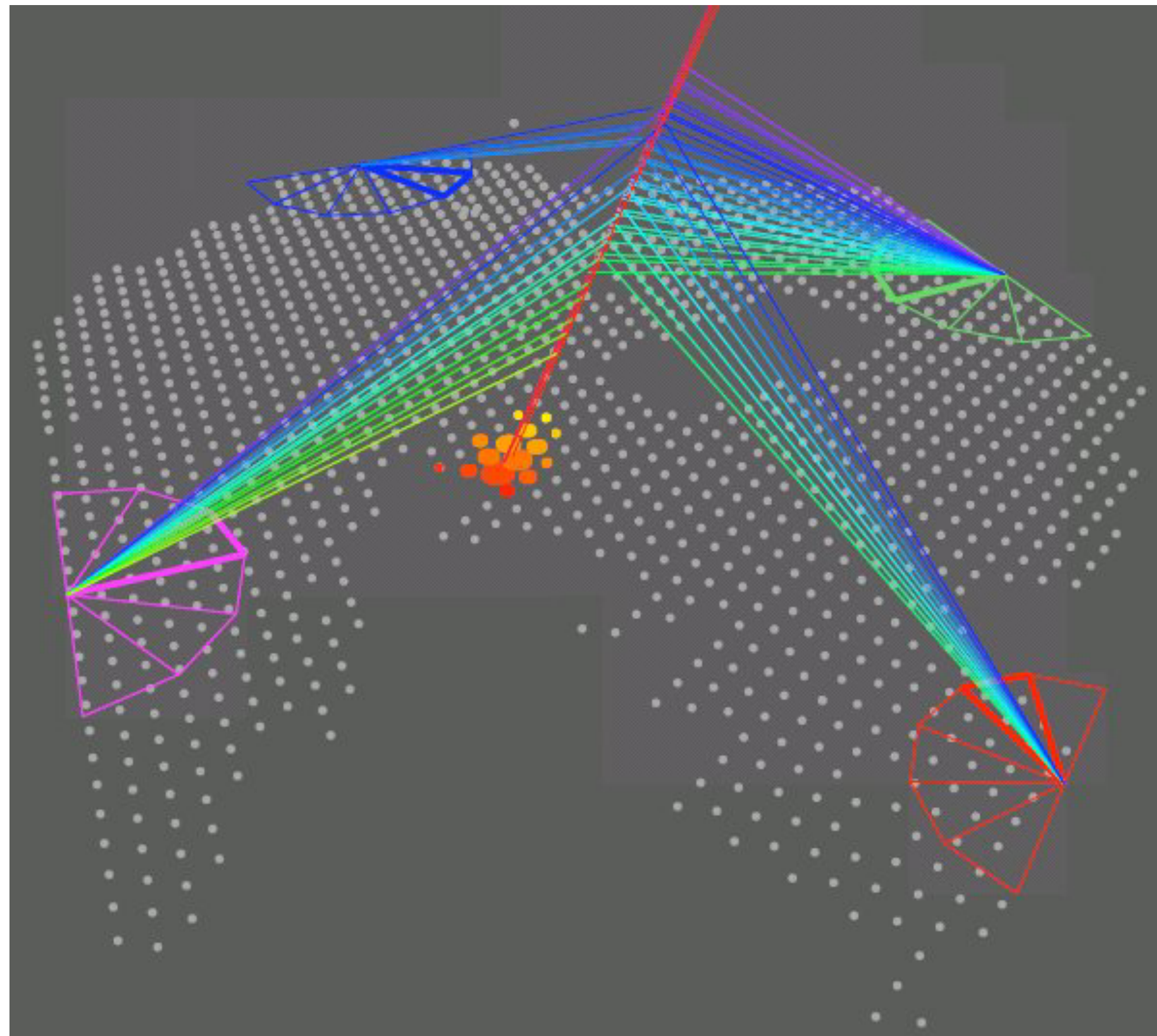


Myondetektor & Eisenjoch

- **Bestimmung von Myonen & Rückflussjoch**

- **Aufgabe:** Identifikation von Myonen und Bestimmung ihres Impulses, Rückführung des magnetischen Flusses, Abschirmung vordringender Hadronen
- **Aufbau:** 1400 Myonkammern im Rückflussjoch des Solenoiden ($B = 2\text{ T}$)
 - Myonkammern: gasgefüllte Systeme
 - **Myonen $> 100\text{ GeV}$ sind m.i.p.s** nur geringe Energiedeposition in ECAL und HCAL



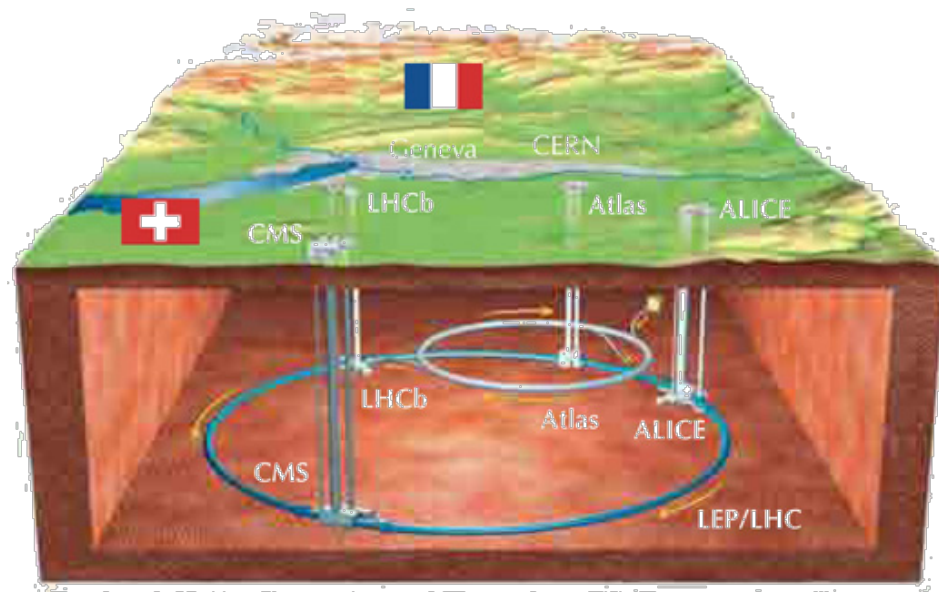


EINSCHUB: LUFTSCHAUER IN DER ATMOSPHÄRE

Q: PAO

Energiemessung durch Schauer

- **Schauer am LHC Collider und in der Atmosphäre**



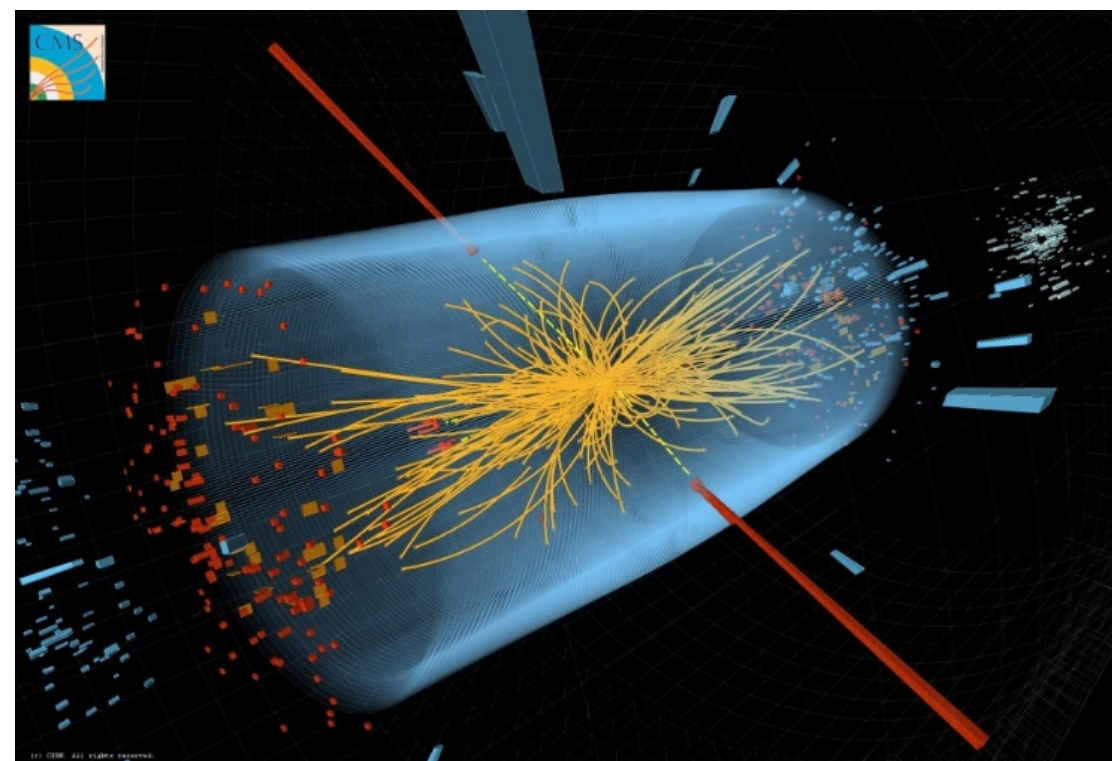
- **Beschleuniger:**
Protonen bis
7 TeV (exakt
bekannte Teilchen)

- **AGN-Beschleuniger:**
Protonen bis
 10^{20} eV oder Kerne
(Primärteilchen ist
unbekannt)



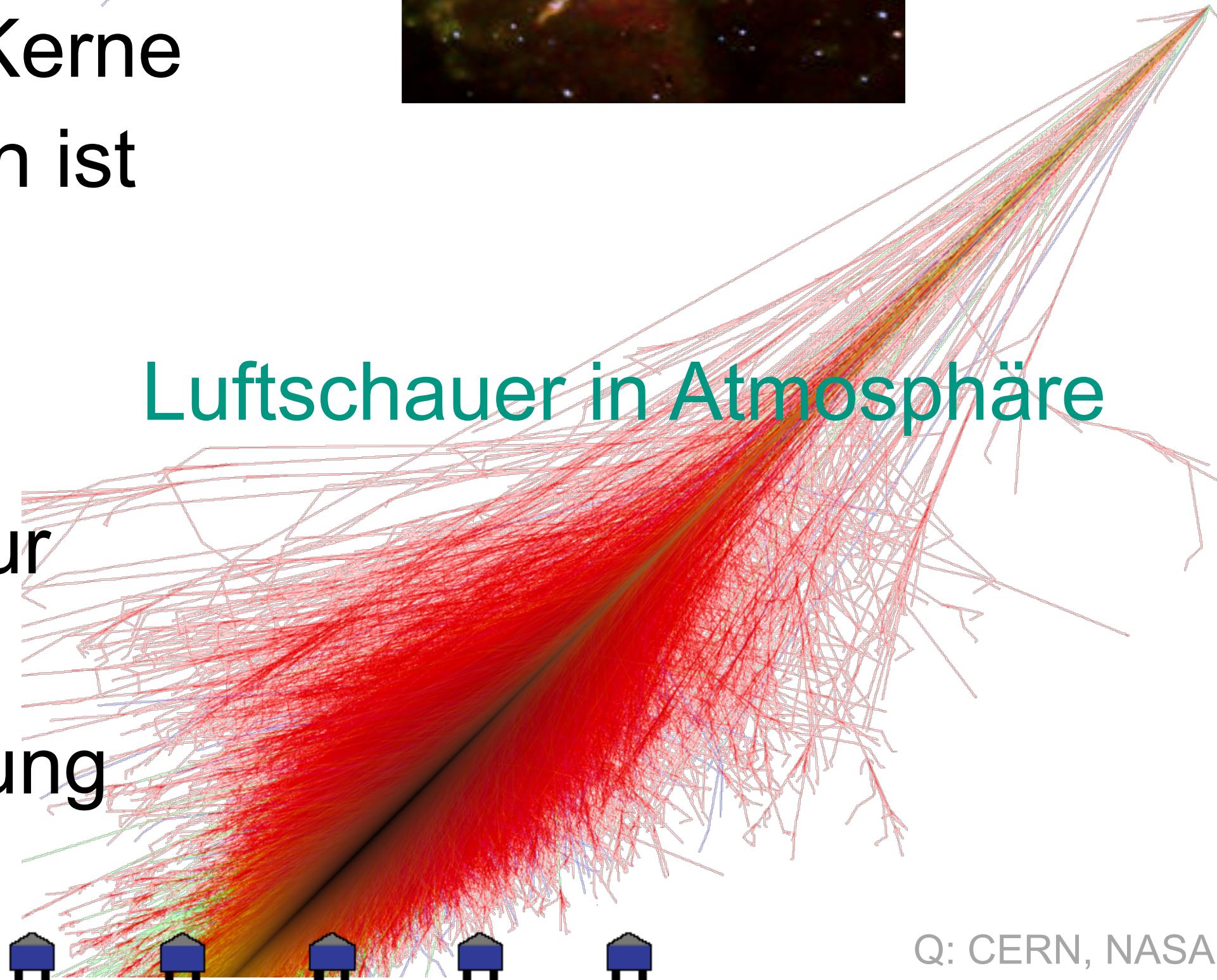
- Abdeckung in
 4π -Geometrie

ECAL und HCAL

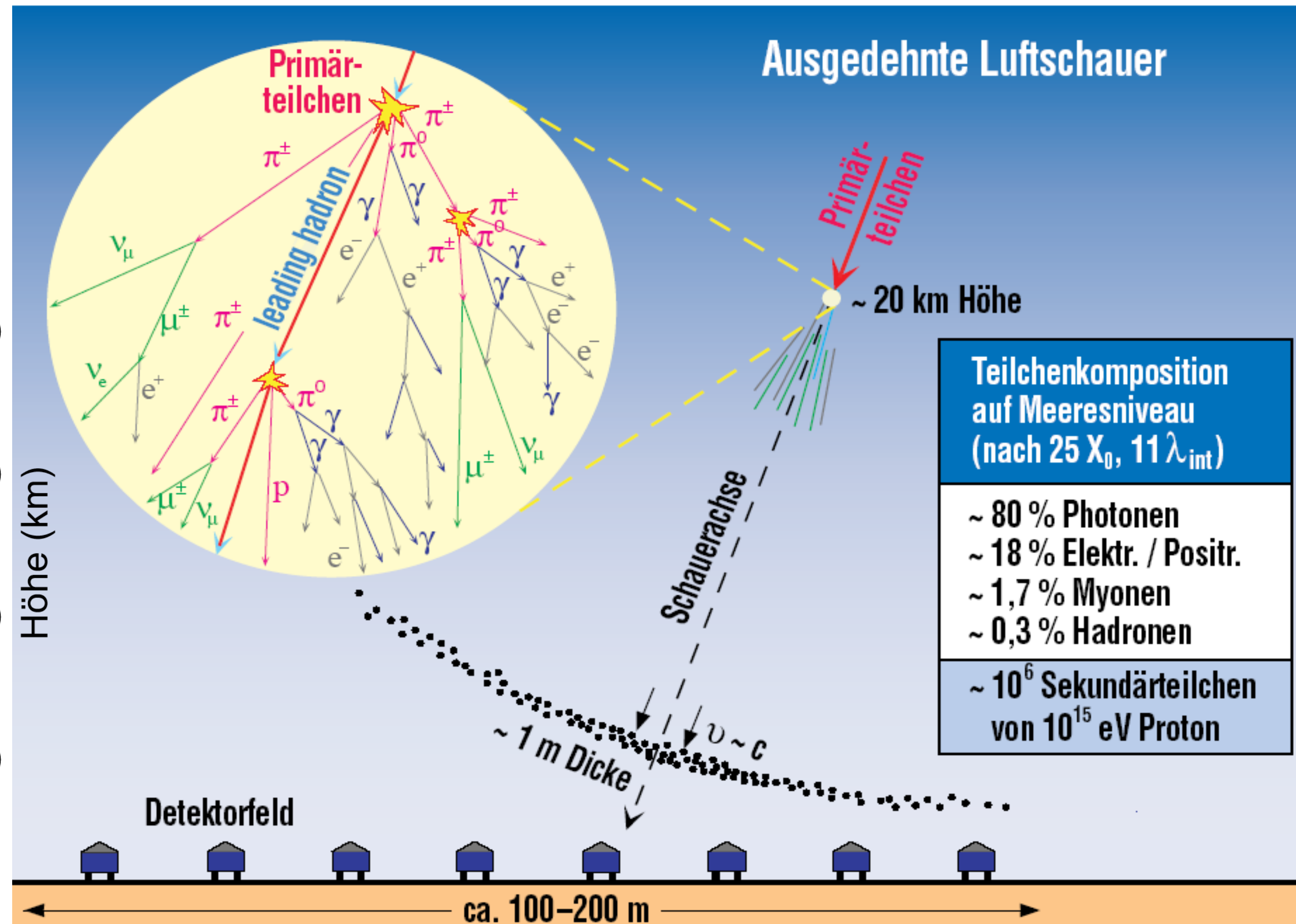
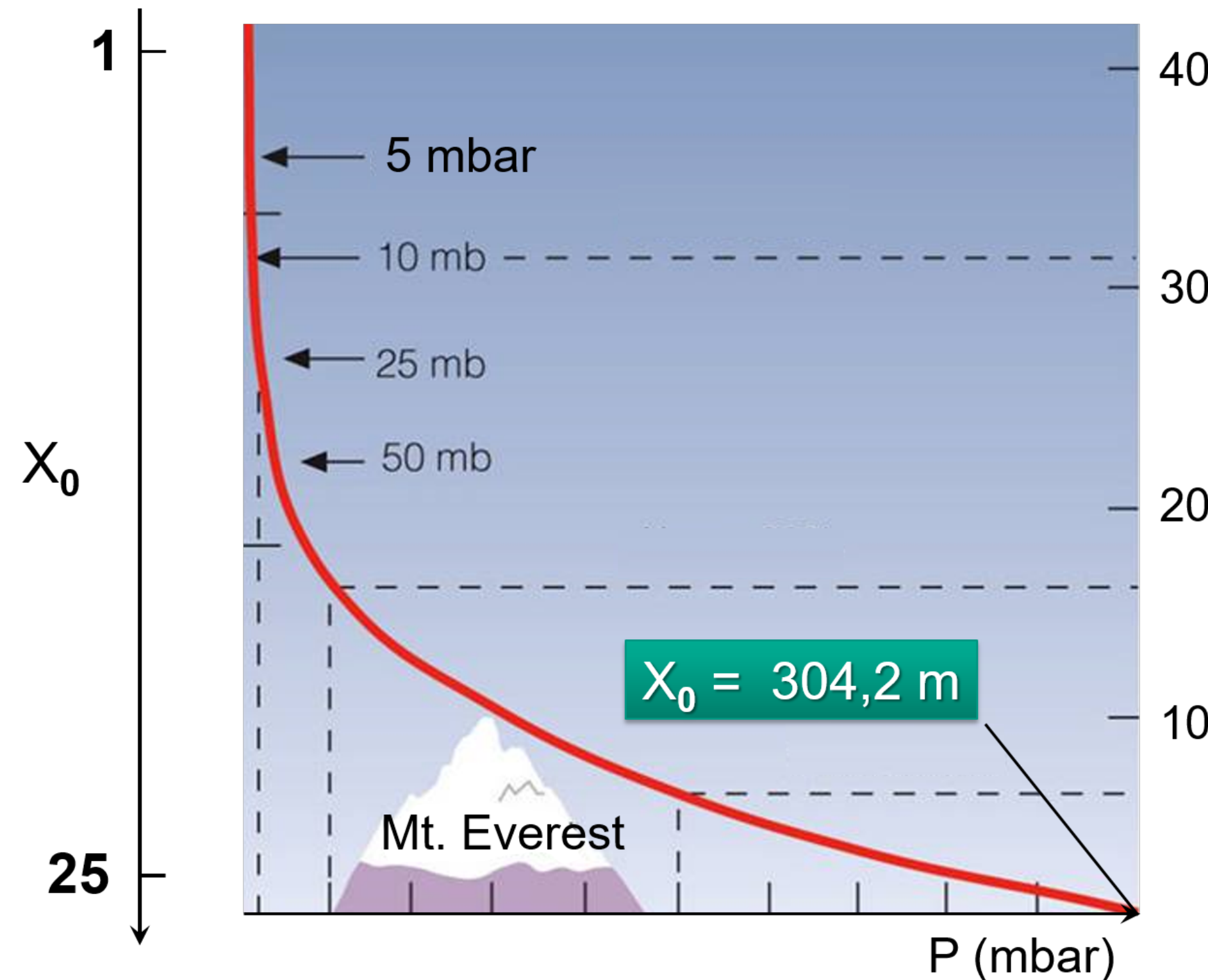


- Abdeckung nur
in enger
Vorwärtsrichtung

Luftschauer in Atmosphäre



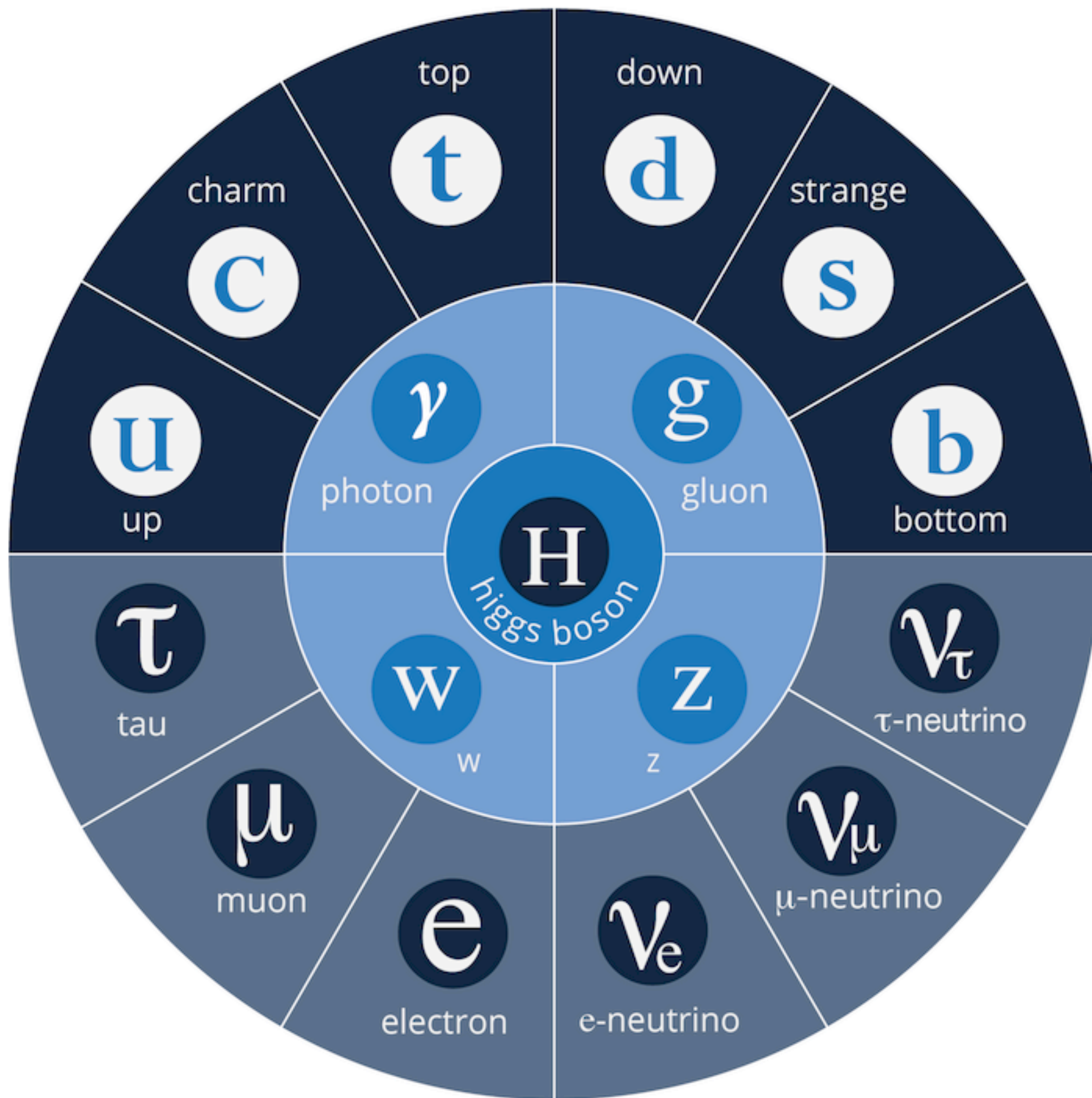
- **Physik der Luftschauer**
 - Modellierung der sehr vielen Sekundärteilchen



Katzen

■ Coco





■ 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

- Grundlagen der Beschleunigertechnik

$$\vec{F}L = q \cdot \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

- **Beschleunigung** von geladenen Teilchen:
elektrisches Feld (parallel zur Bewegungsrichtung),
Energiegewinn nur abhängig von **Ladung q** des Teilchens
 - elektrostatisches Feld: Hochspannung
 - **HF**-Wechselfelder (**RF**: **R**adio **F**requency): linear oder ringförmig
- **Führung** von geladenen Teilchen:
magnetisches Dipolfeld (senkrecht zur Bewegungsrichtung),
kein Energiegewinn
Quadrupolfelder zur Strahlformung (kleiner Strahlquerschnitt)

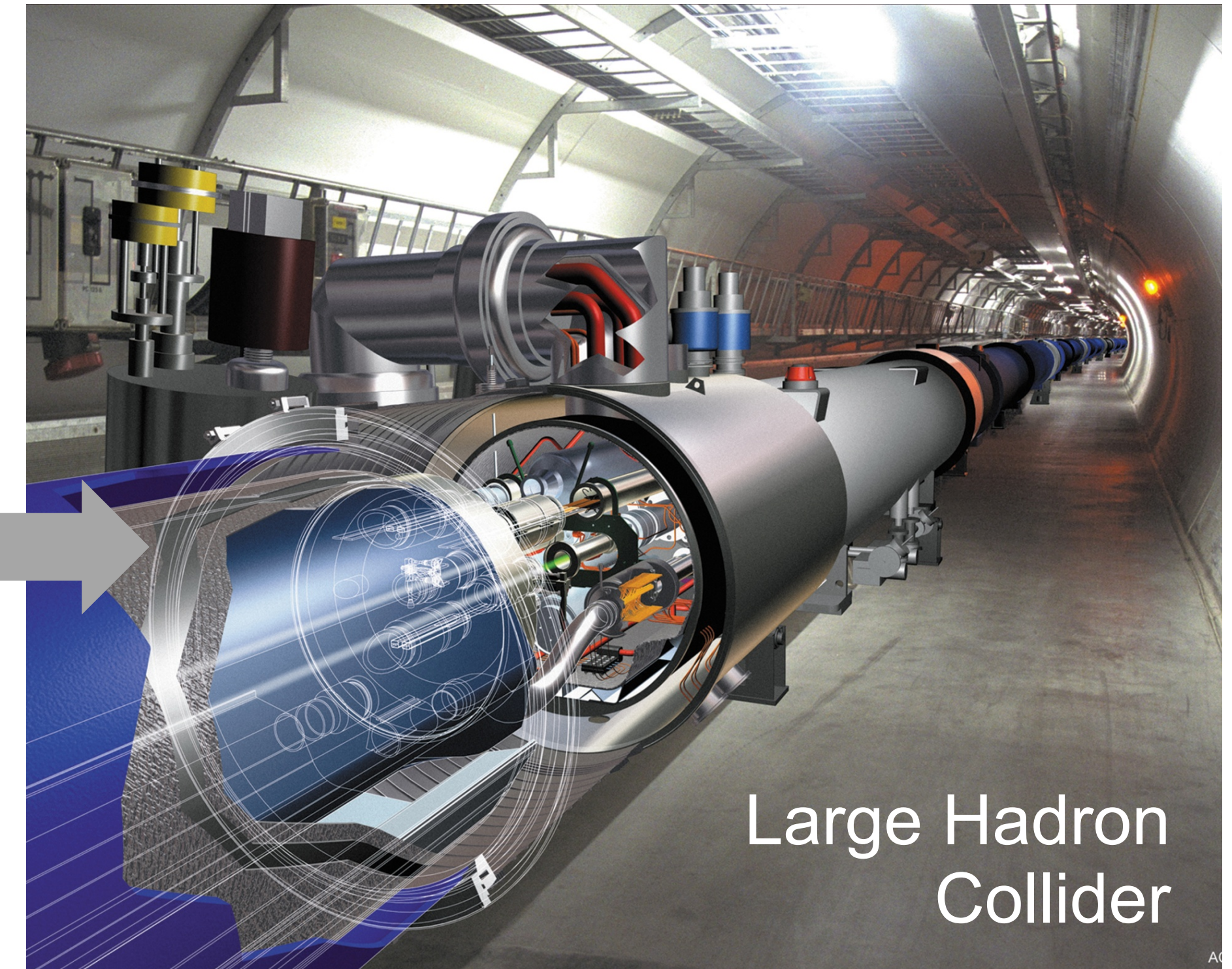
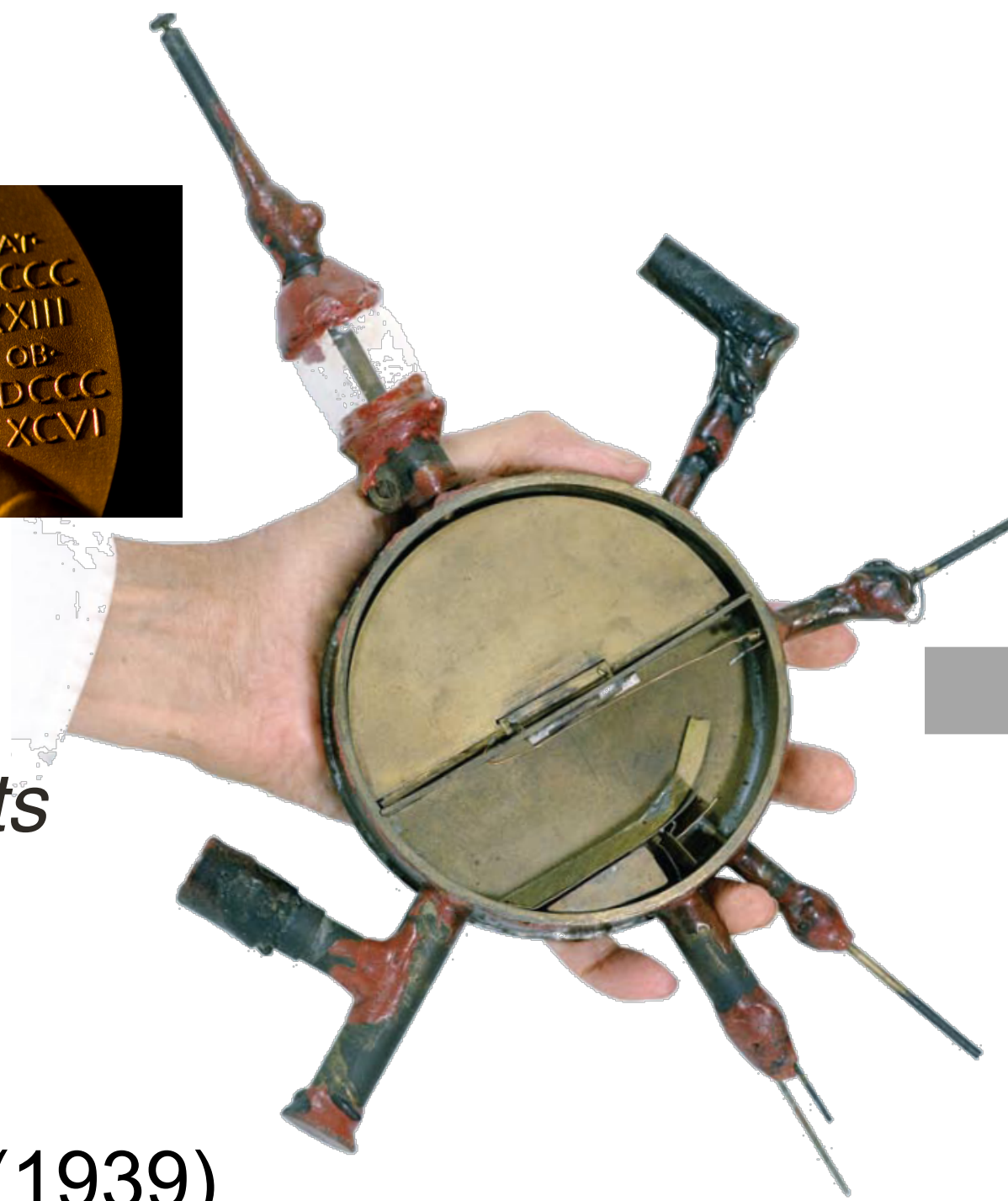
Beschleuniger – Historie

- **Fortschritt in der Beschleunigertechnologie: Faktor $\sim 10^8$ in 85 Jahren**
 - 1930: E.O. Lawrence baut das erste Zyklotron $\varnothing = 13 \text{ cm}$ mit $E_p = 80 \text{ keV}$
 - 2015: CERN erreicht nach Upgrade des LHC $\varnothing = 8,5 \text{ km}$ ein $E_p = 6,5 \text{ TeV}$



for the invention and development of the cyclotron and for results obtained with it

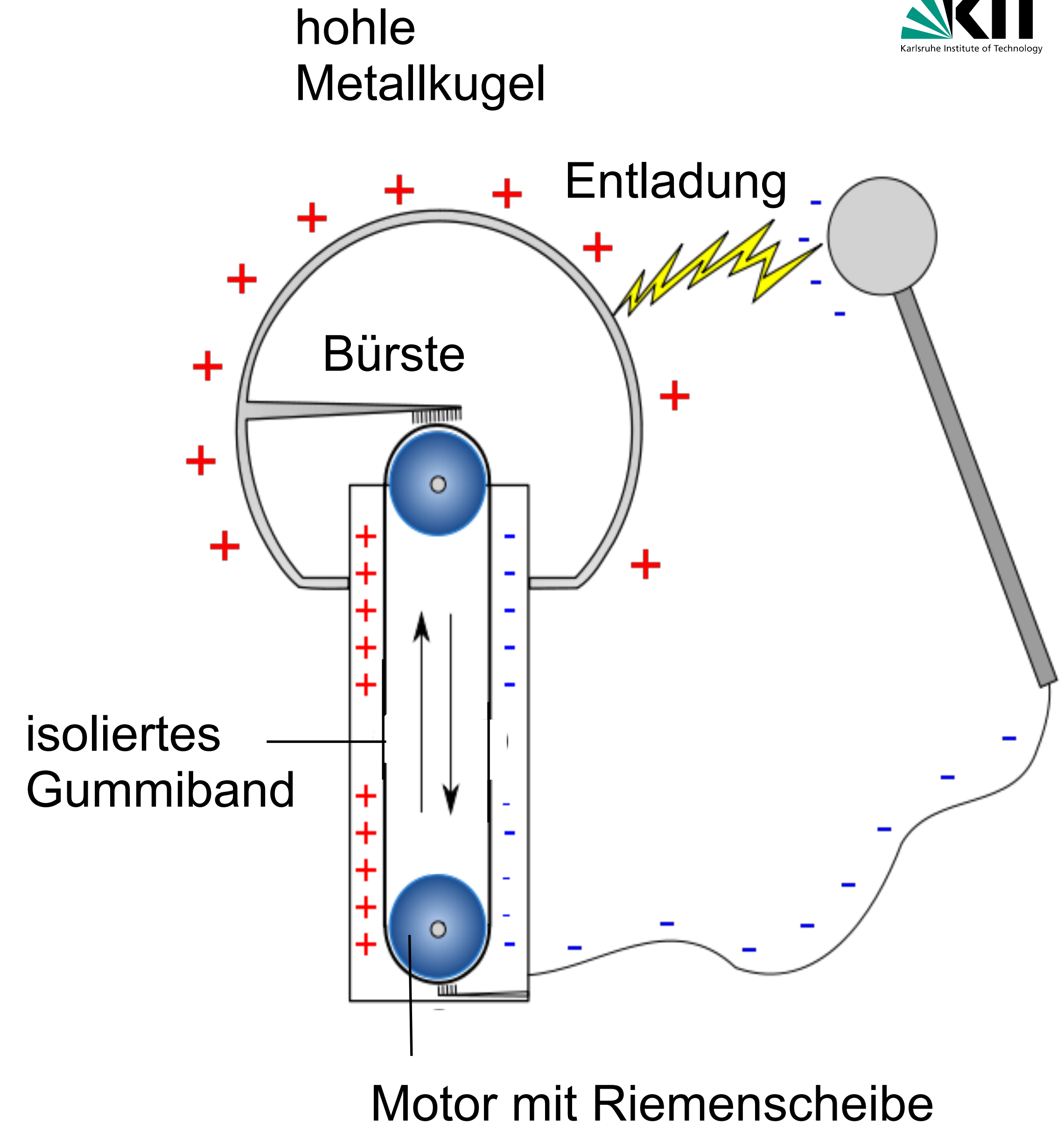
Ernest O. Lawrence
Lawrence Berkeley National Laboratory (1939)



Large Hadron Collider

Elektrostatische Generatoren

- **Van-de-Graaf- (Band-) Generator**
 - Elektrostatisches Prinzip
 - Aufladung des Bandes durch Reibung oder Aufsprühen:
mechanischer Transport von Q
 - Bürste „streift“ Ladungen ab & überträgt sie auf Metallkugel
 - Kugelinneres = Faraday'scher Käfig
Ladungen an Kugelaußenfläche, ab
 $\sim 12 \text{ MeV}$ elektrostatische Entladungen



Elektrostatische Generatoren

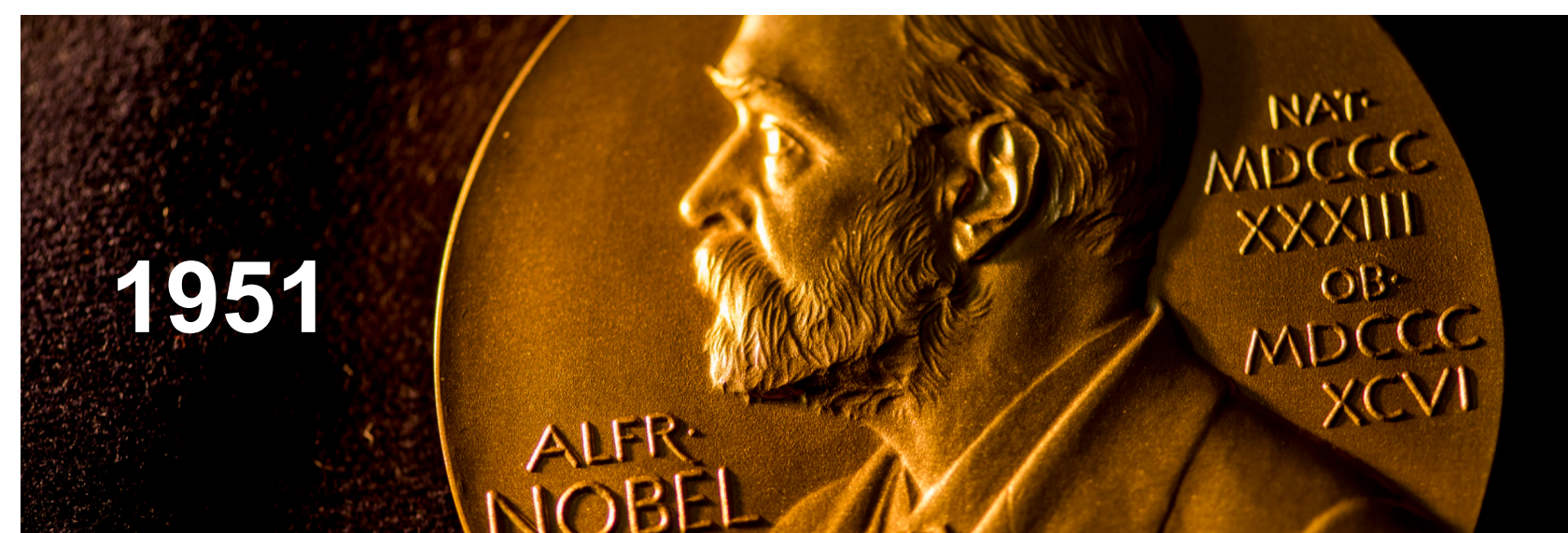
- **Cockcroft-Walton - Generator**
 - Prinzip der Spannungsvervielfachung mit Dioden & Kapazitäten
(Hochspannungskaskade, nach H. Greinacher)



J. Cockcroft



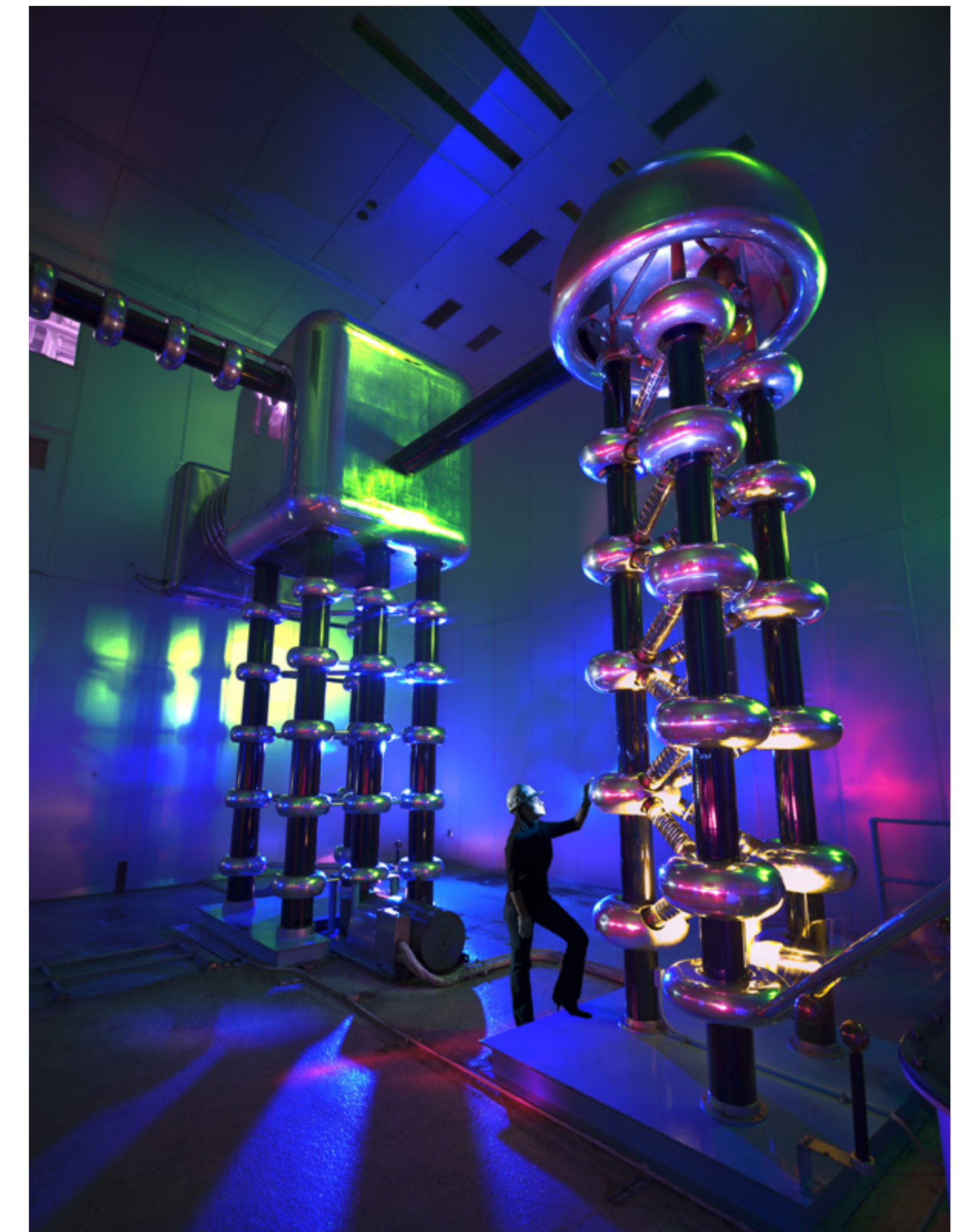
E. Walton



1951

"for their pioneer work on the transmutation of atomic nuclei by artificially accelerated atomic particles."

Q: Fermilab

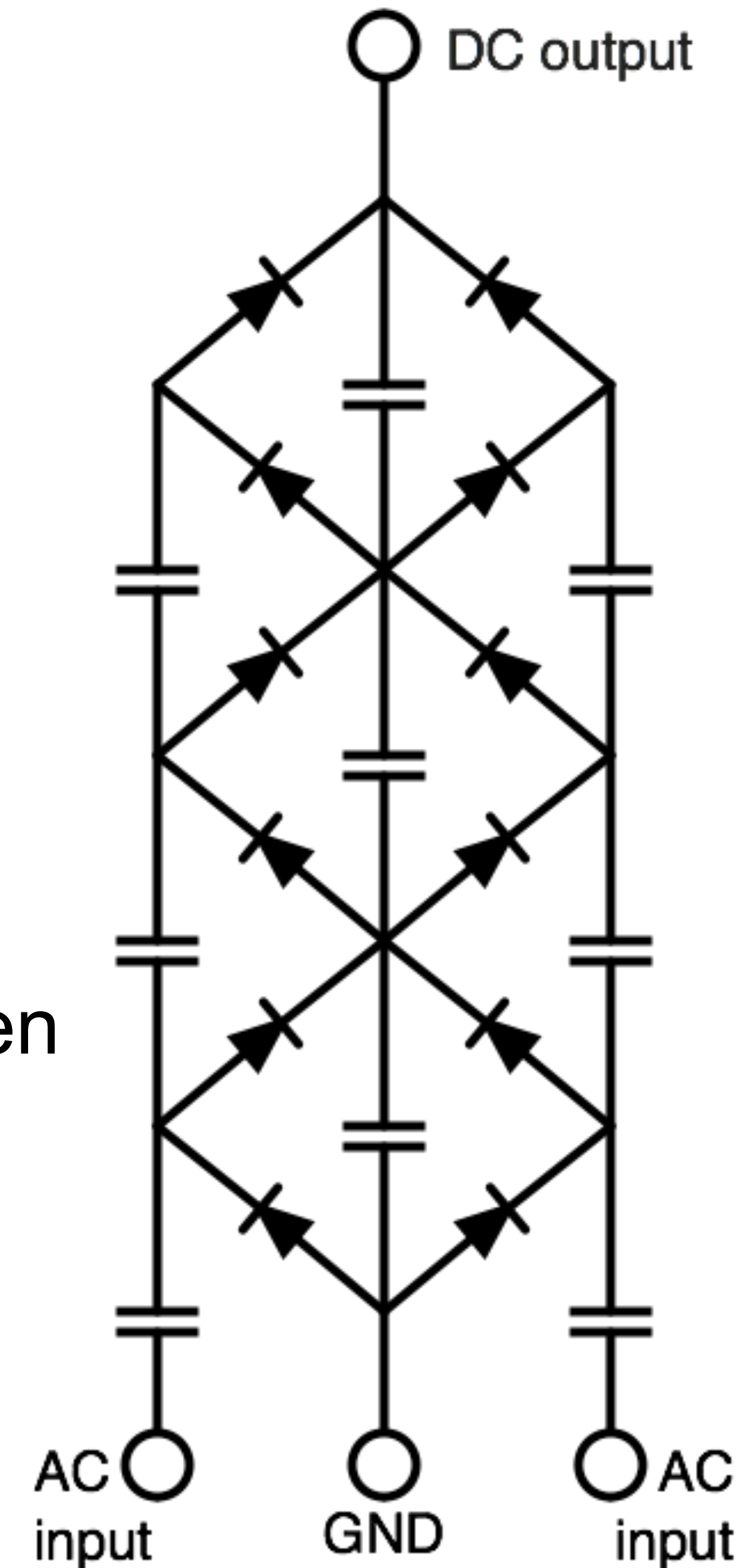
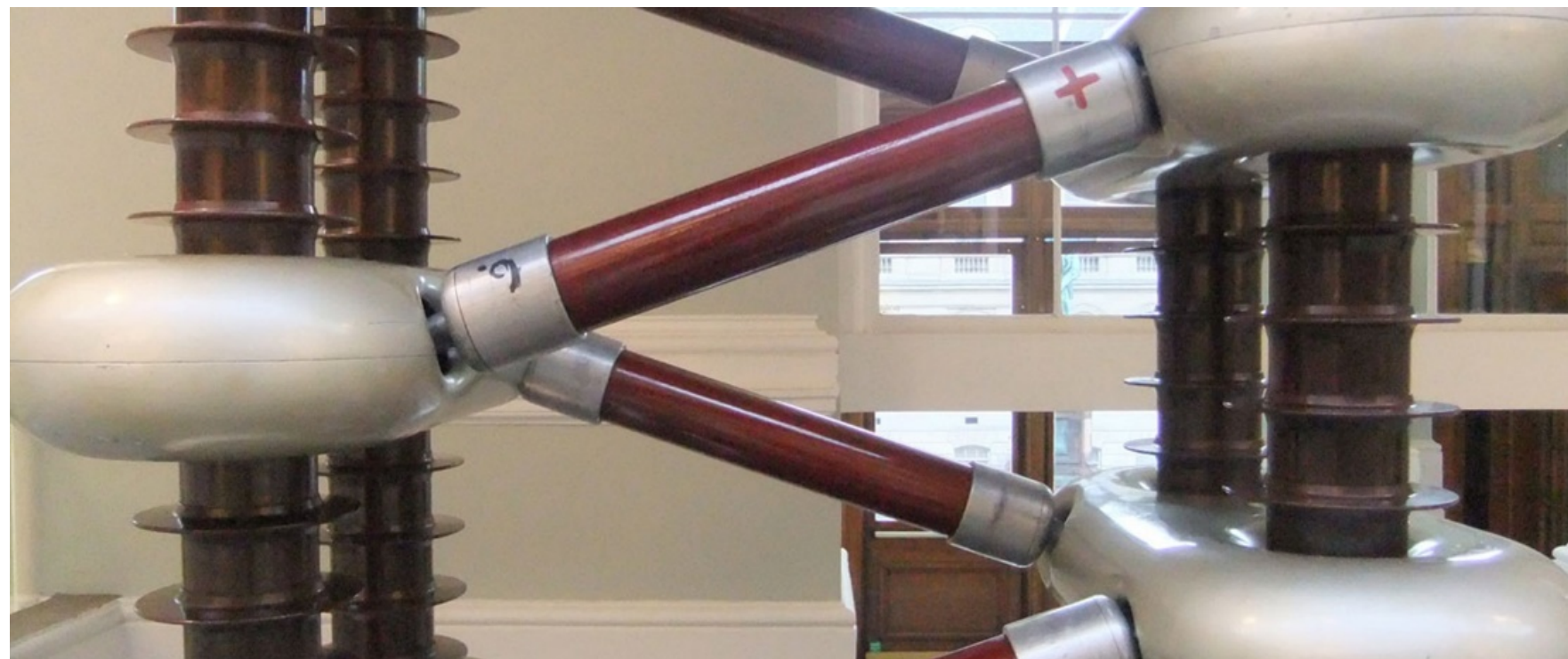


früherer CW am Fermilab

Elektrostatische Generatoren

- **Cockcroft-Walton - Generator**
 - **Spannungsvervielfältiger** auf Basis von Dioden (Gleichrichtung) & Kondensatoren
 - DC Ausgangssignal bis **1 MV**, limitiert durch elektrostatische Entladungen
 - CW's dienen (teilweise noch heute) als Injektoren

Q: nms.ac.uk

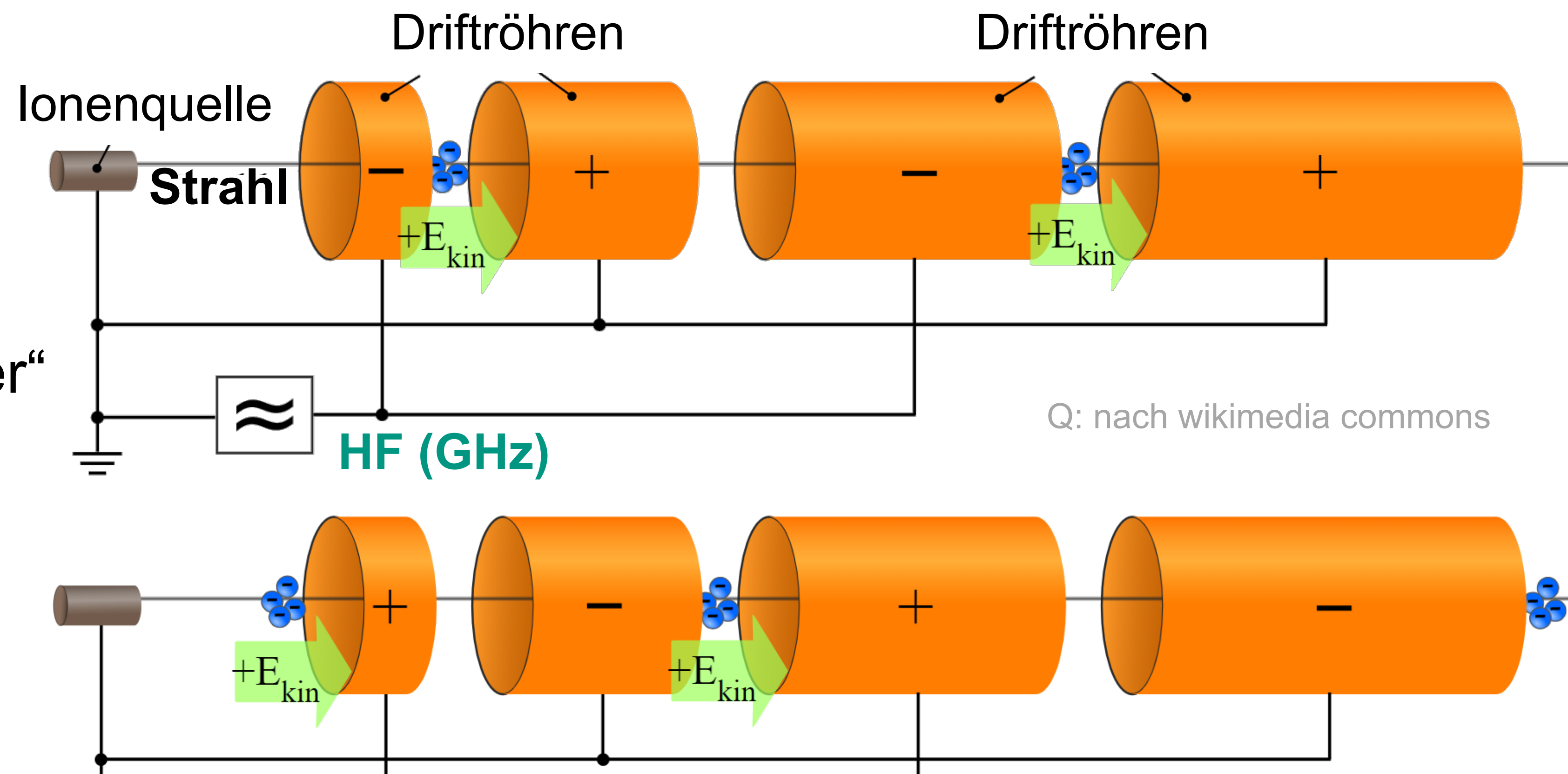


Q: wikipedia

Linearbeschleuniger – (LINAC = linear accelerator)

- **HF-Wechselfelder** hoher Frequenz (0,1- einige GHz) erlauben mehrfache Nutzung der Beschleunigungs-Spannung

- **LINAC** Prinzip nach R. Wideröe
- **Beschleunigung** in den Gaps zwischen Driftröhren bei „richtiger“ HF-Polung



- **Abschirmung** in Driftröhren während „falscher“ HF-Polung

Zyklotron – der erste Ringbeschleuniger

- **Aufbau & Prinzip:** geladenes Teilchen wird in der Mitte des Zyklotrons injiziert

Ablenkung: im homogenen B-Feld - Teilchen auf Spiralbahn

Beschleunigung: im **Gap** der D-förmigen Elektroden (DEEs)

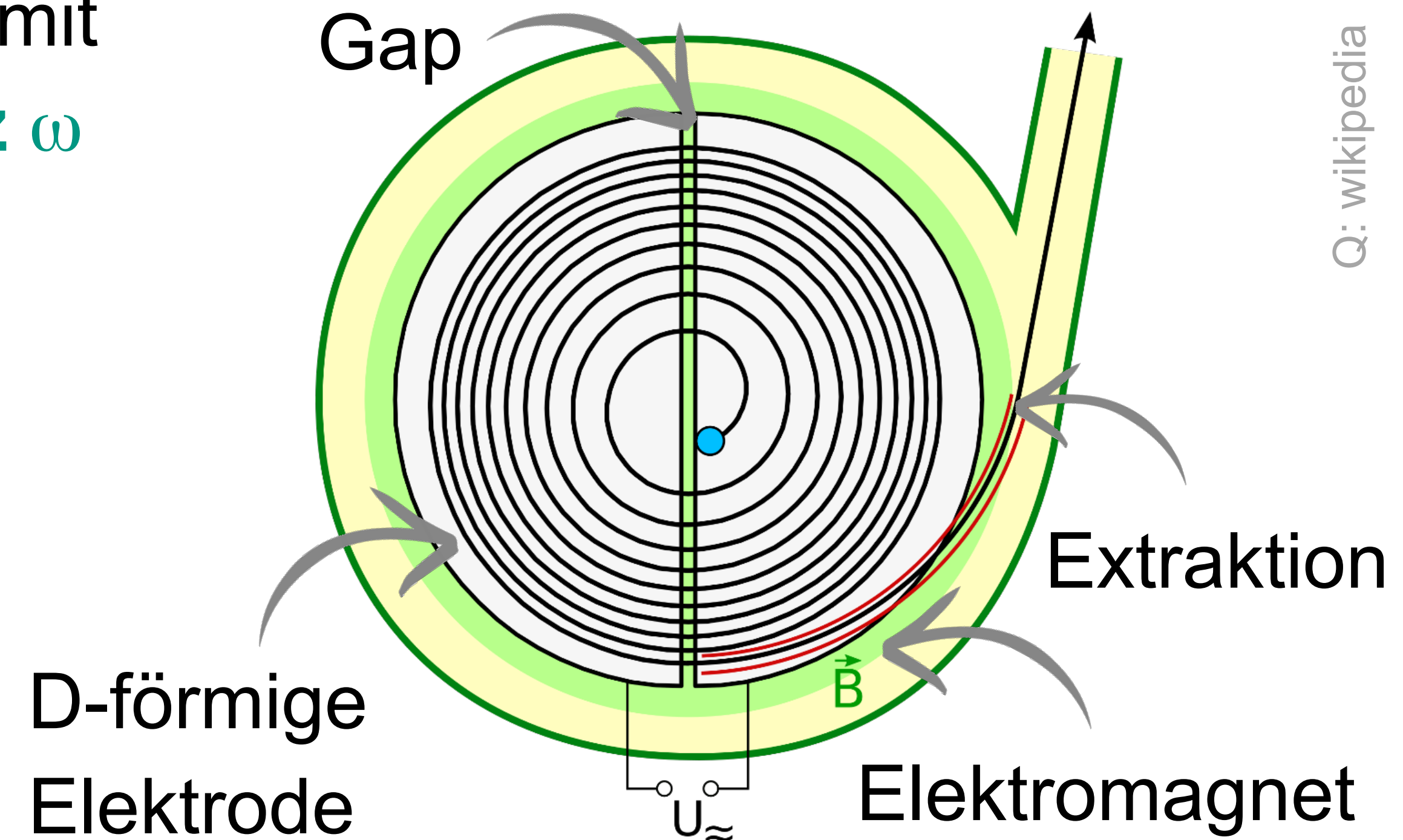
Amplitude & Frequenz: U (10-1000 kV) mit
fester Zyklotron-Frequenz ω



Ernest O. Lawrence

$$\omega = \frac{q}{m} \cdot B$$

ω unabhängig von
Radius r, Impuls m·v

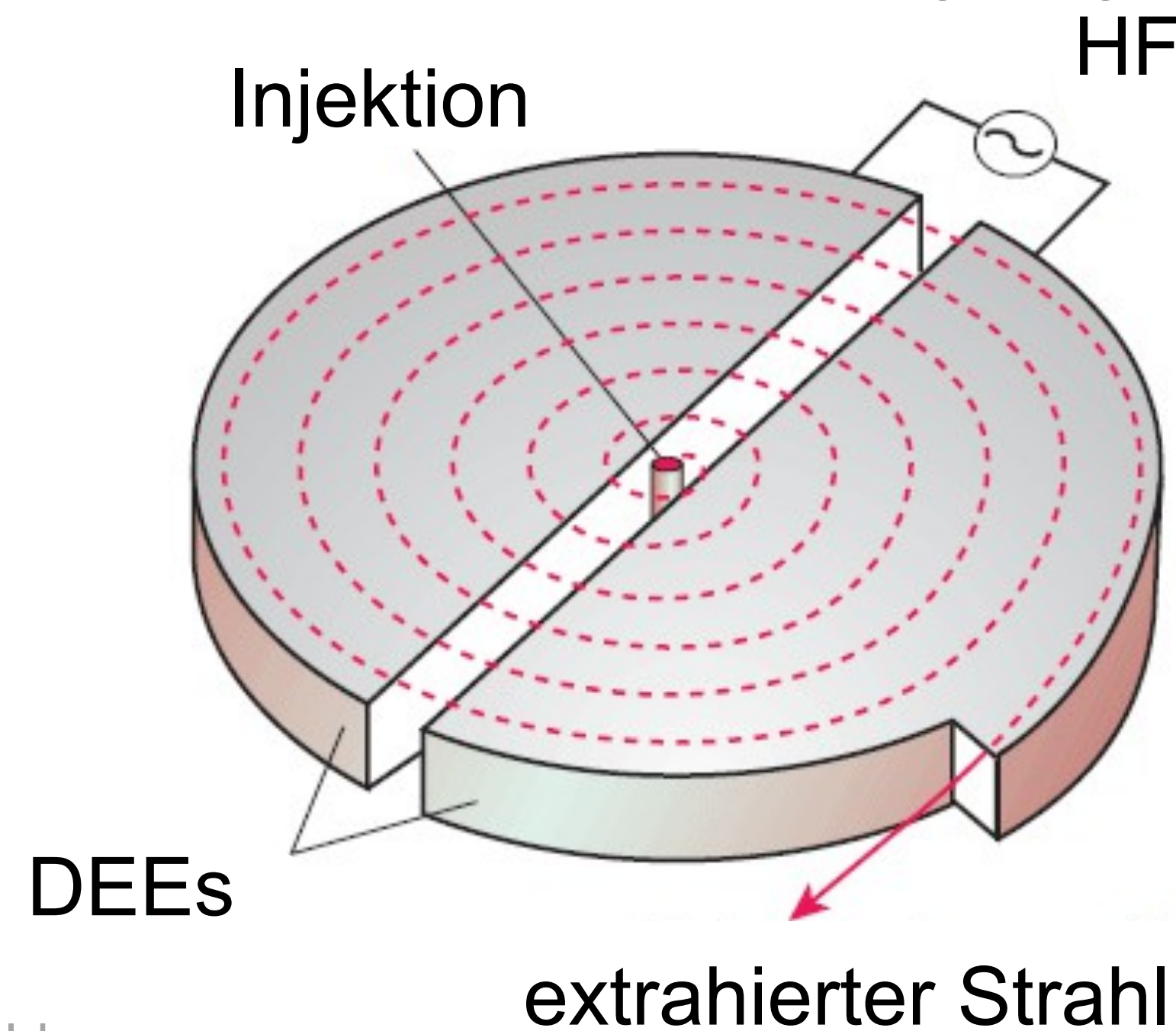


Q: wikipedia

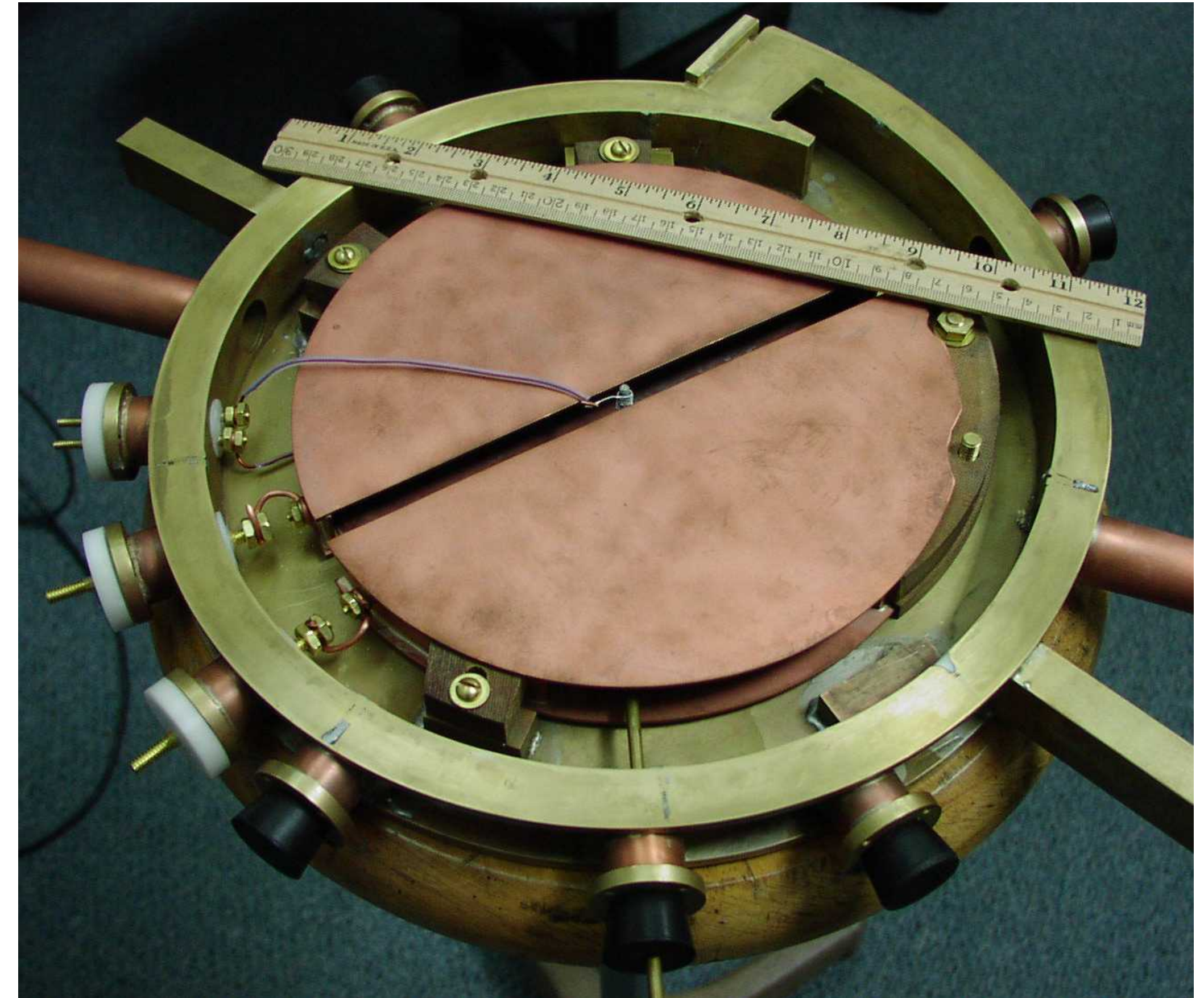
Zyklotron – Anwachsen des Radius limitiert Größe

- **Prinzip: feste Beschleunigungsfrequenz ω (Zyklotronfrequenz)**

- lineares Anwachsen des Radius mit dem Impuls: $r \sim m \cdot v$
- festes T für Beschleunigung im Gap



Q: revisionworld



Q: U of Knoxville, student project

- **Relativistische Effekte: variable Beschleunigungsfrequenz ω**

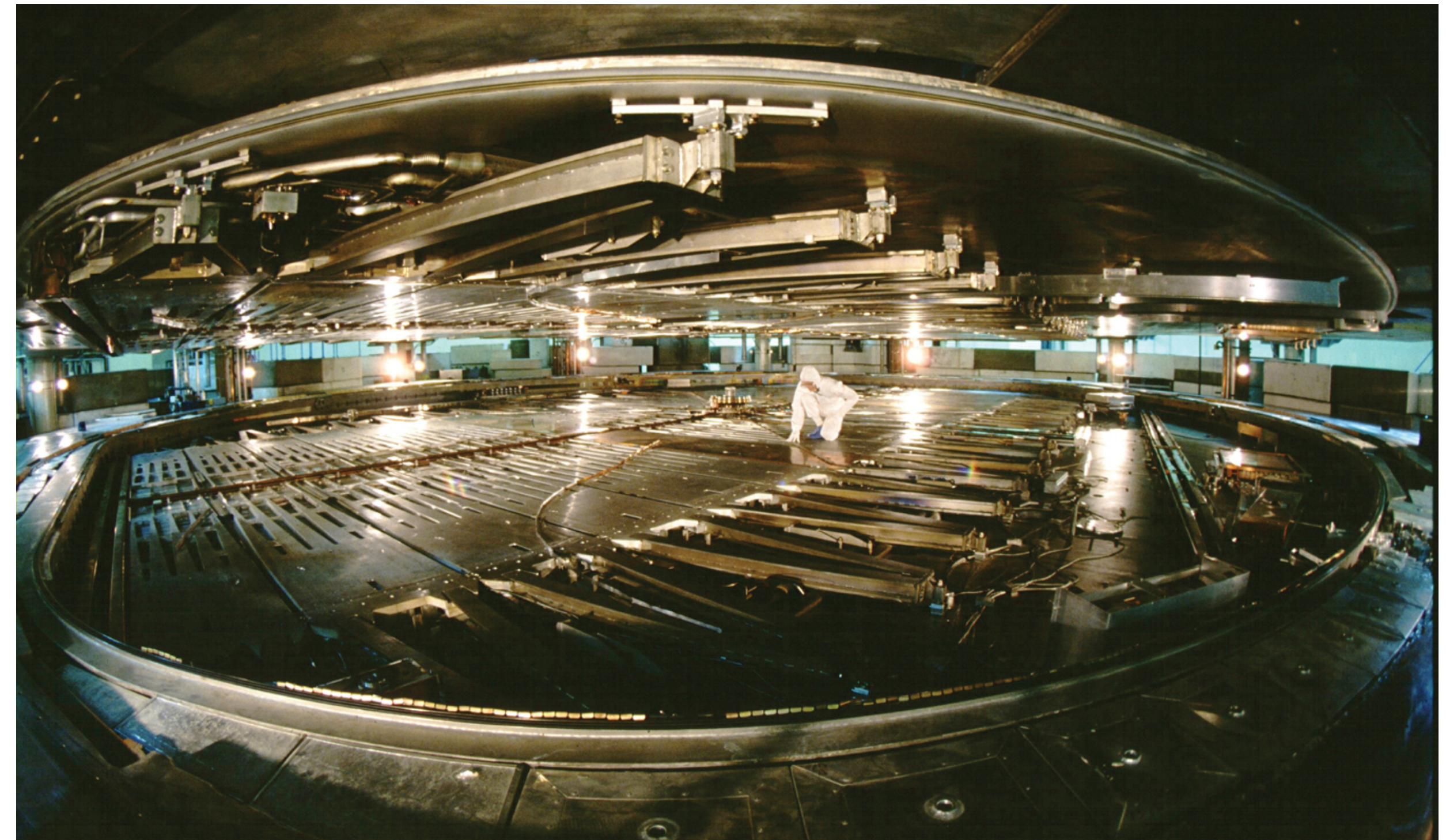
- relativistische Massenzunahme limitiert bei Protonen in einem Zyklotron Energie $E_{\max} < 20 \text{ MeV}$

- **Synchrozyklotron:**
variable Frequenz ω

$$\omega = \frac{q}{\gamma \cdot m} \cdot B$$

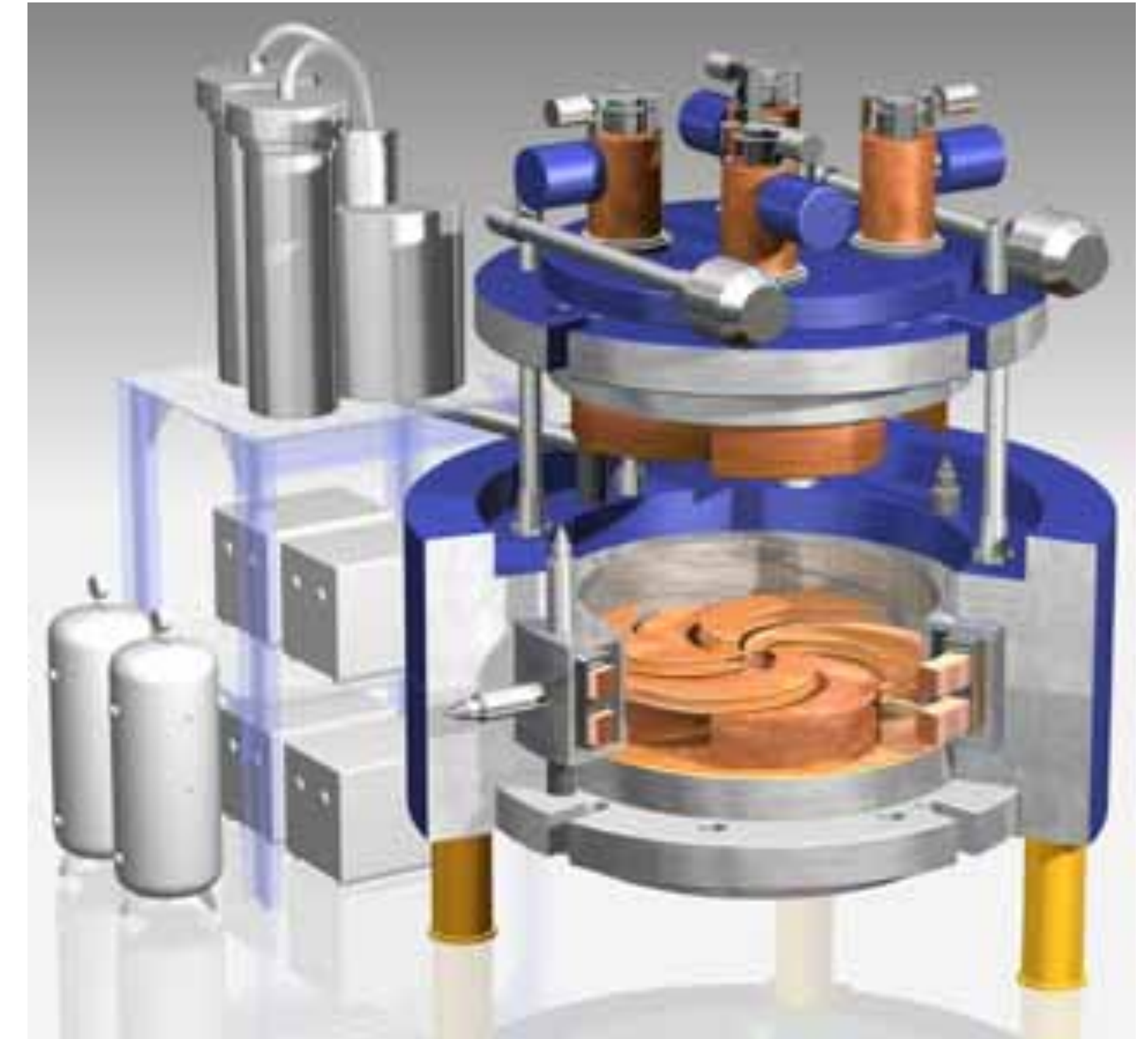
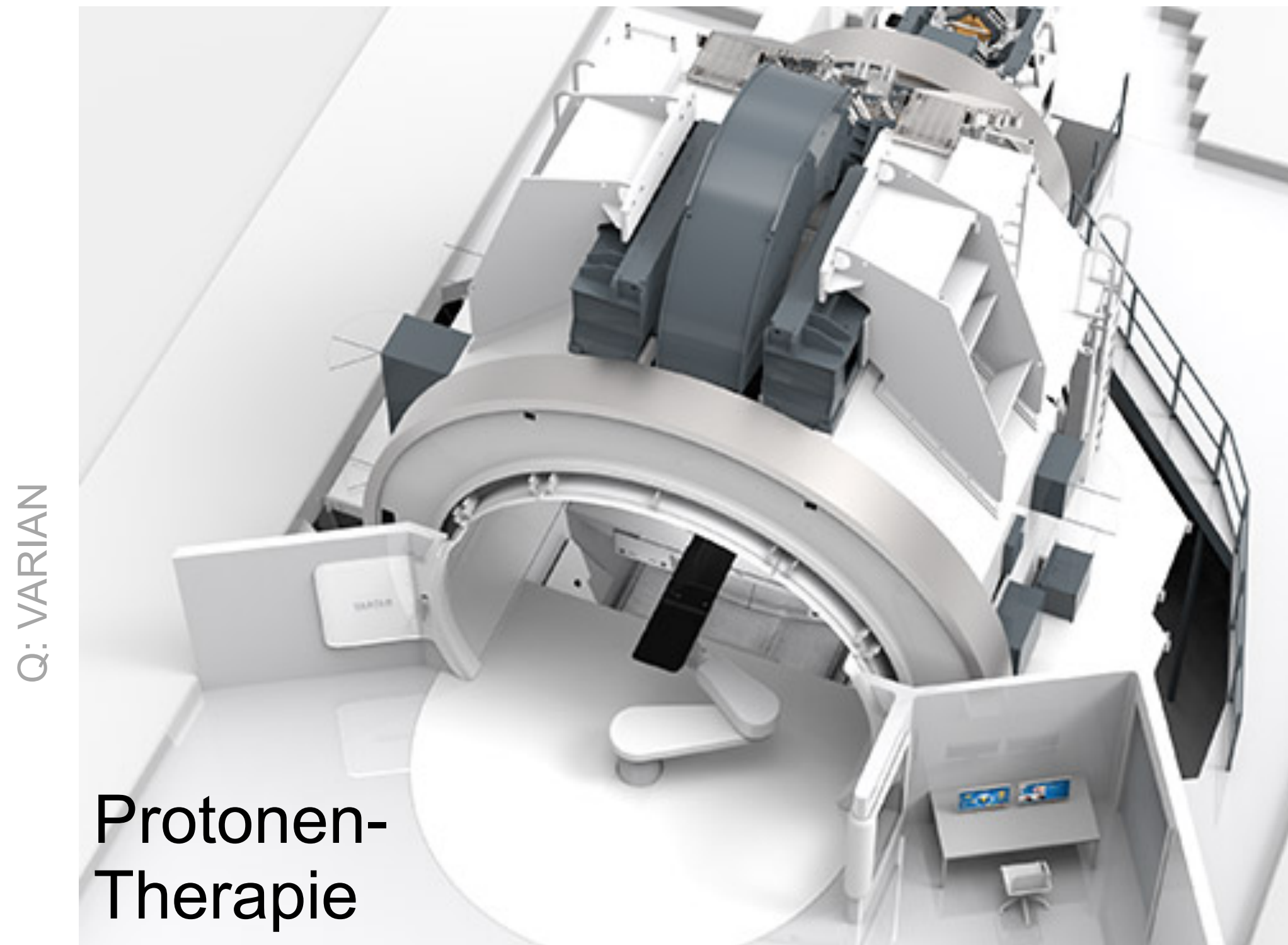
relativistische
Masse

weltgrößtes Zyklotron $\varnothing = 18 \text{ m}$ $\omega = 23 \text{ MHz}$



Q: TRIUMPF Labor, Kanada

- **Moderne Kompakt-Zyklotrone für Radioisotope & zur Strahlentherapie**
 - Einsatz zur Erzeugung medizinisch nutzbarer Radioisotope ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) & für Protonentherapie



Kompaktzyklotron

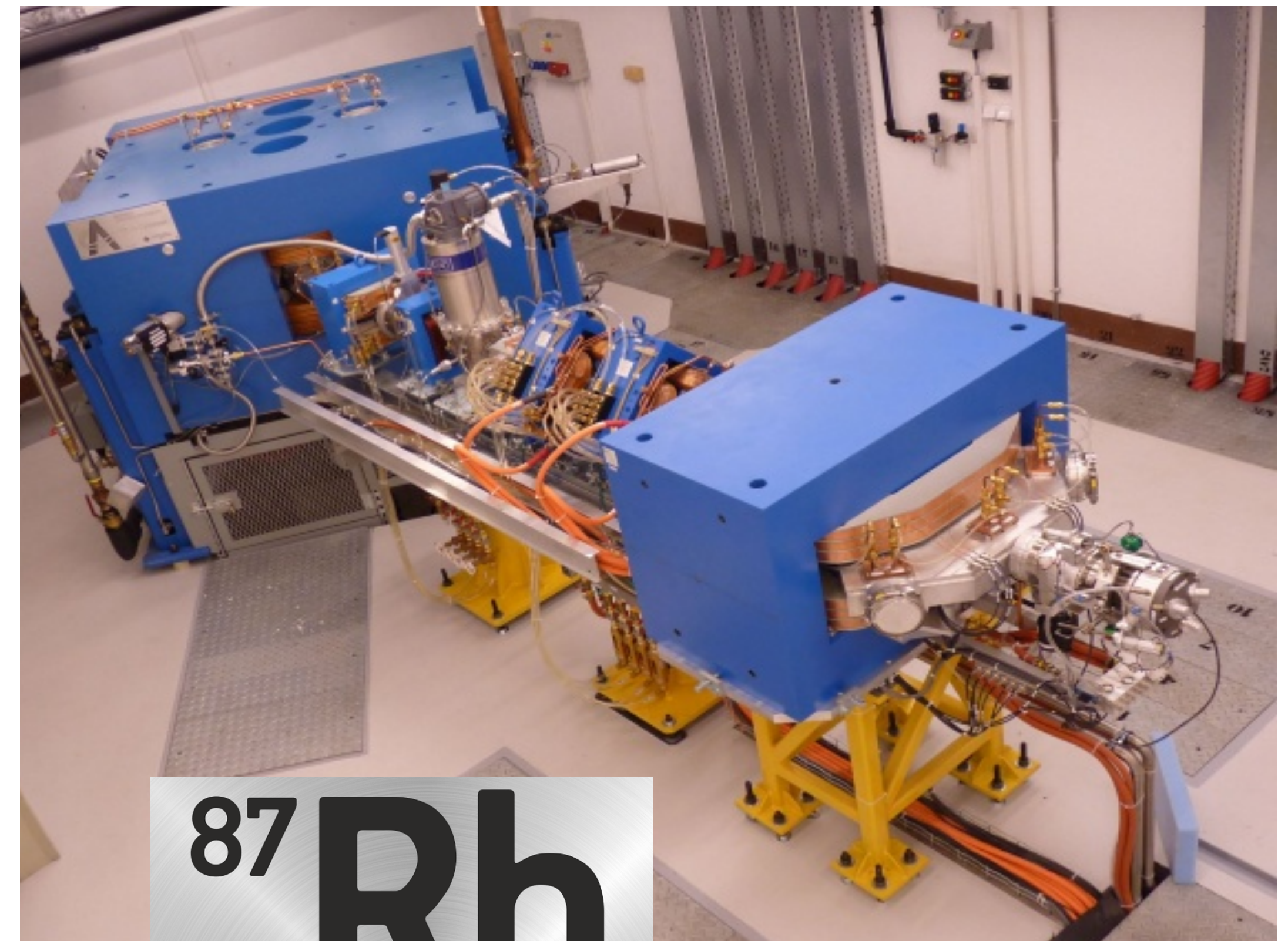
Q: ACCEL

Anwendung: spezielles Isotop für KATRIN

- Zyklotron in Rez produziert p für ^{83}Rb -Eichquelle für KATRIN (10 GBq)
monoenergetische Elektronen aus $^{83\text{m}}\text{Kr}$ -Tochterisotop



Q: NPI Rez bei Prag



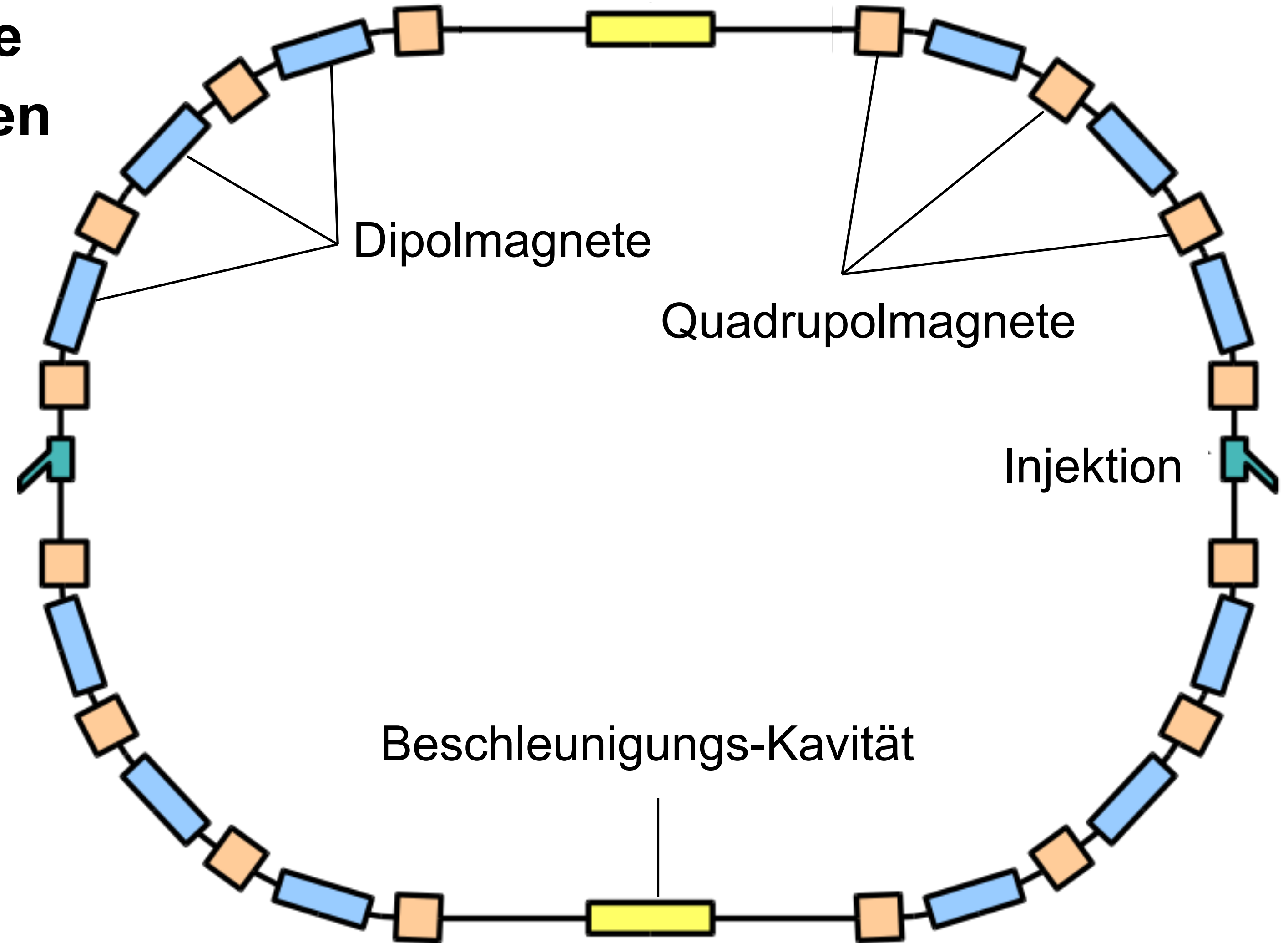
- **Synchrotron: das magnetische Führungsfeld für den gepulsten Teilchenstrahl wird **synchron** mit der anwachsenden Teilchenenergie E hochgefahren**

- zentrale Elemente:

Dipolmagnete

Quadrupolmagnete

Beschleunigungskavitäten



Element Dipolmagnet

- **Dipolmagnet: Ablenkung des Teilchenstrahls mit festem Radius R**

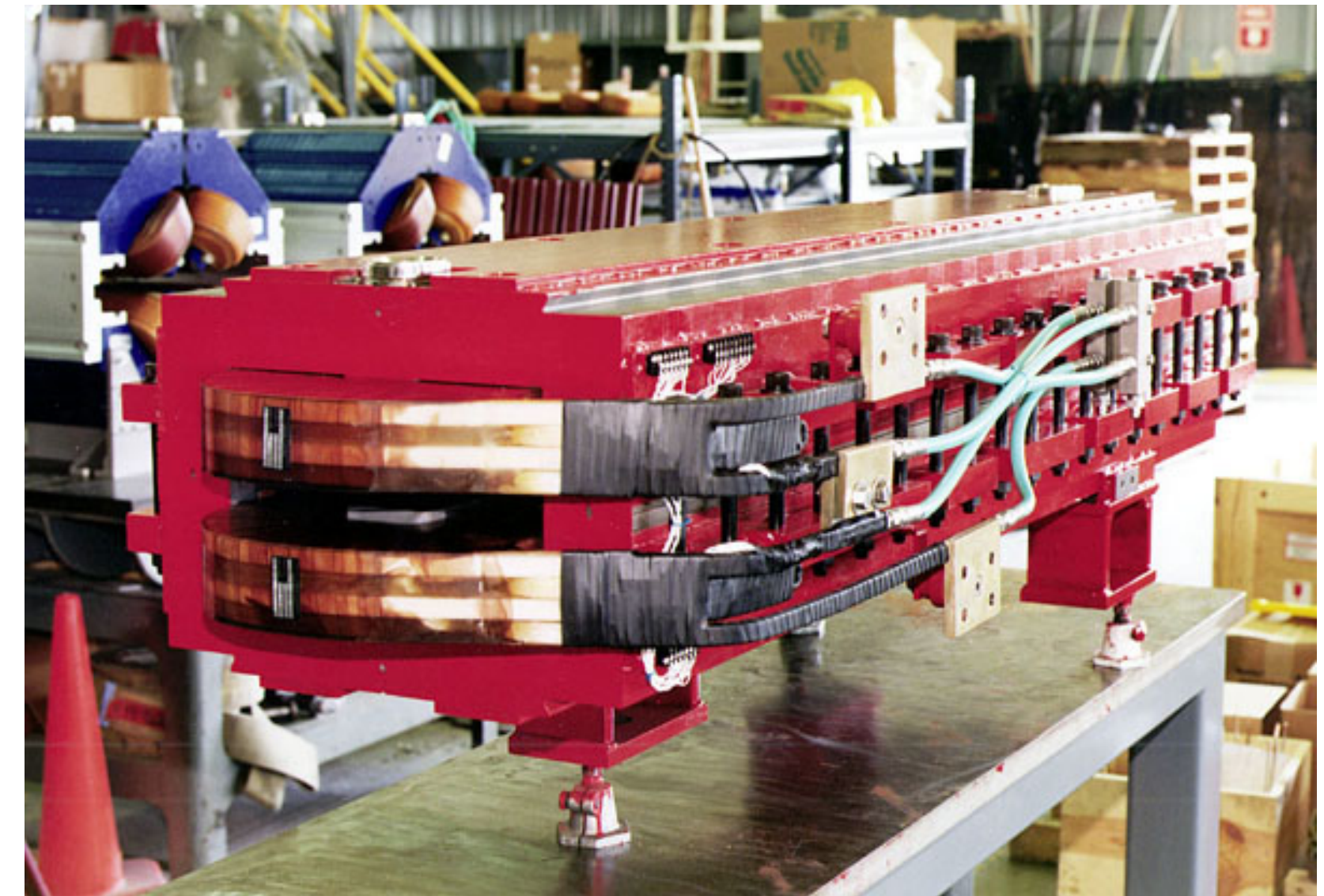
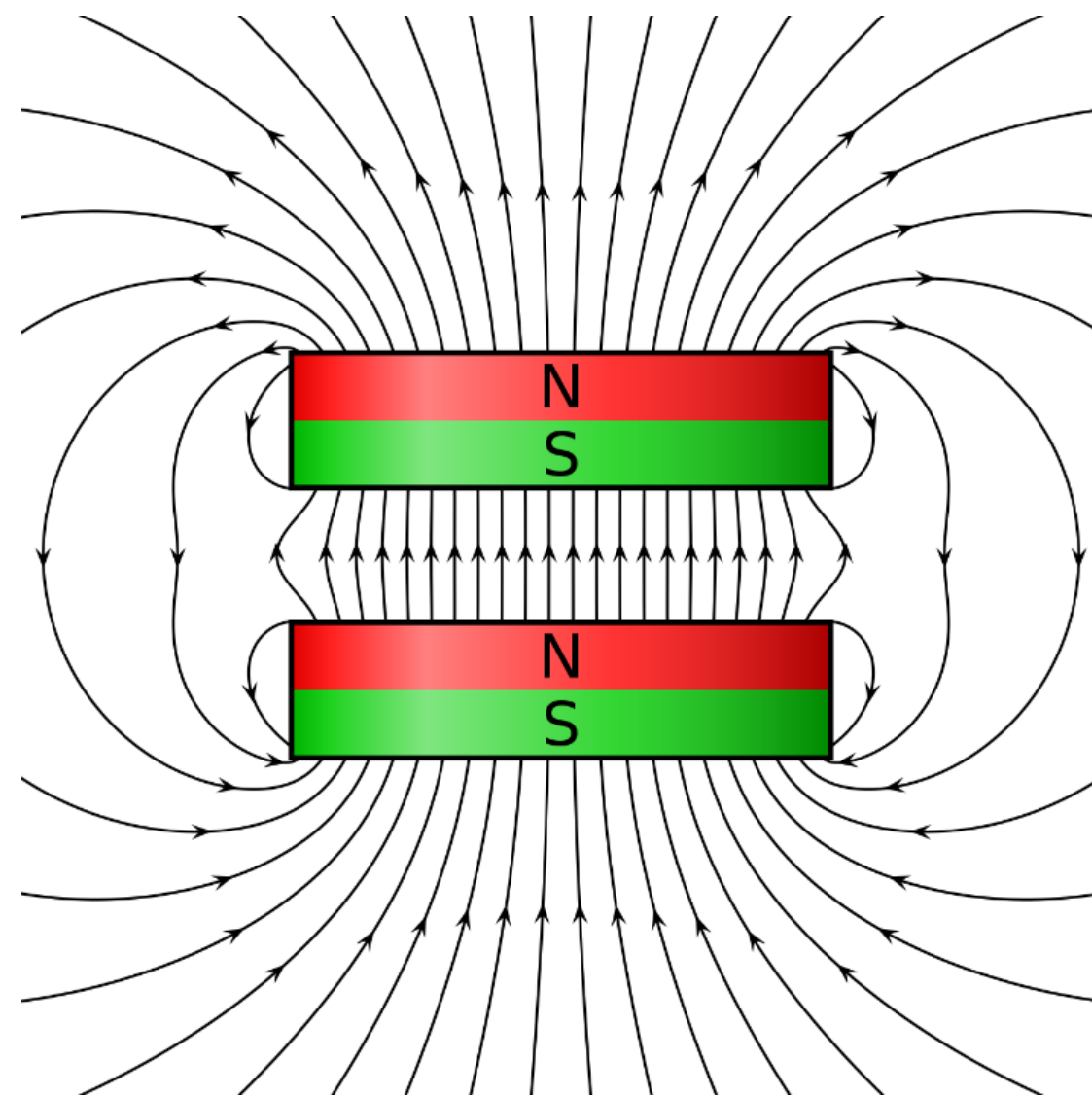
- homogenes B-Feld für Solradius r

Teilchenladung q
Synchrotronradius r

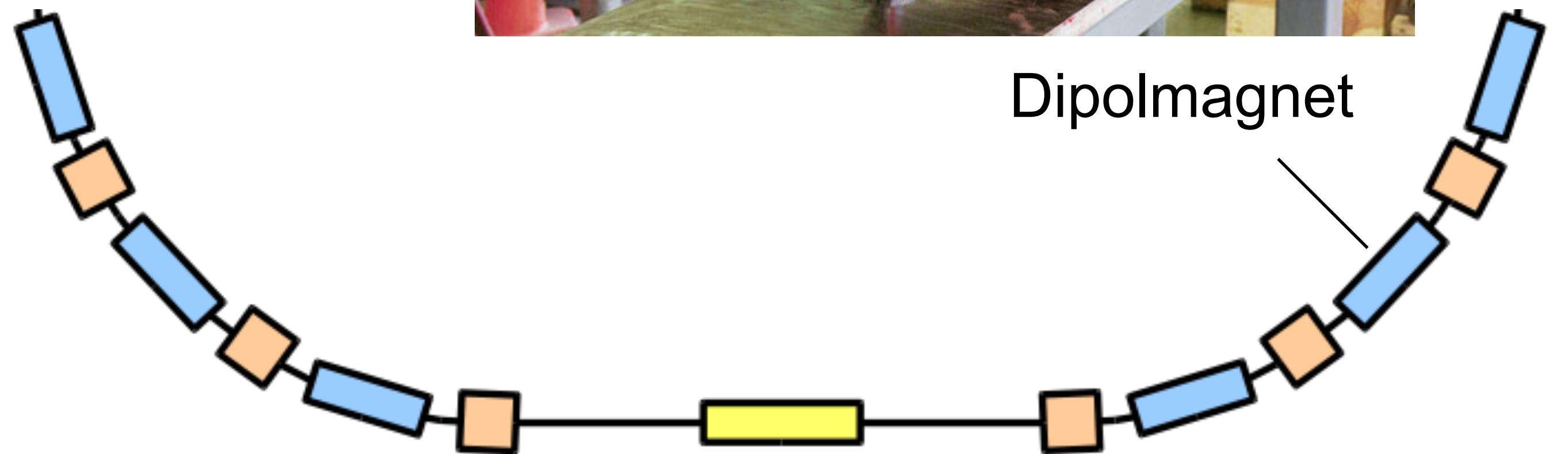
$$p = r \cdot q \cdot B$$

Teilchenimpuls

Dipolfeld B



Dipolmagnet



- **Dipolmagnet: Ablenkung des Teilchenstrahls mit festem Radius R**

- homogenes B-Feld für Solradius r

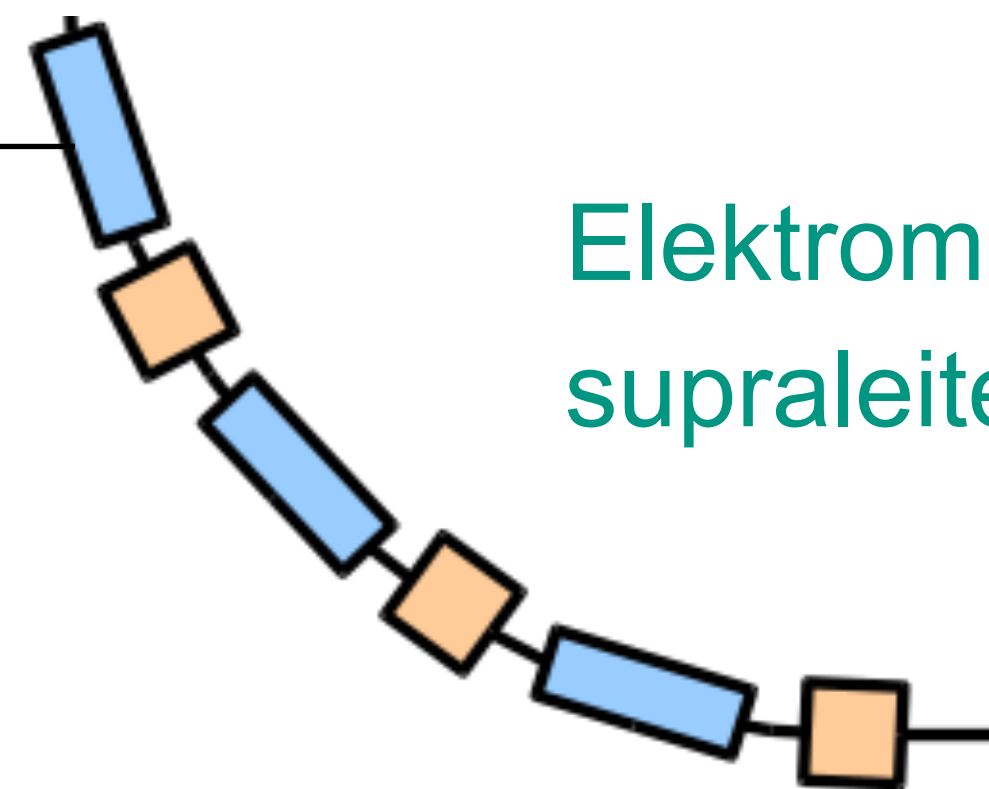
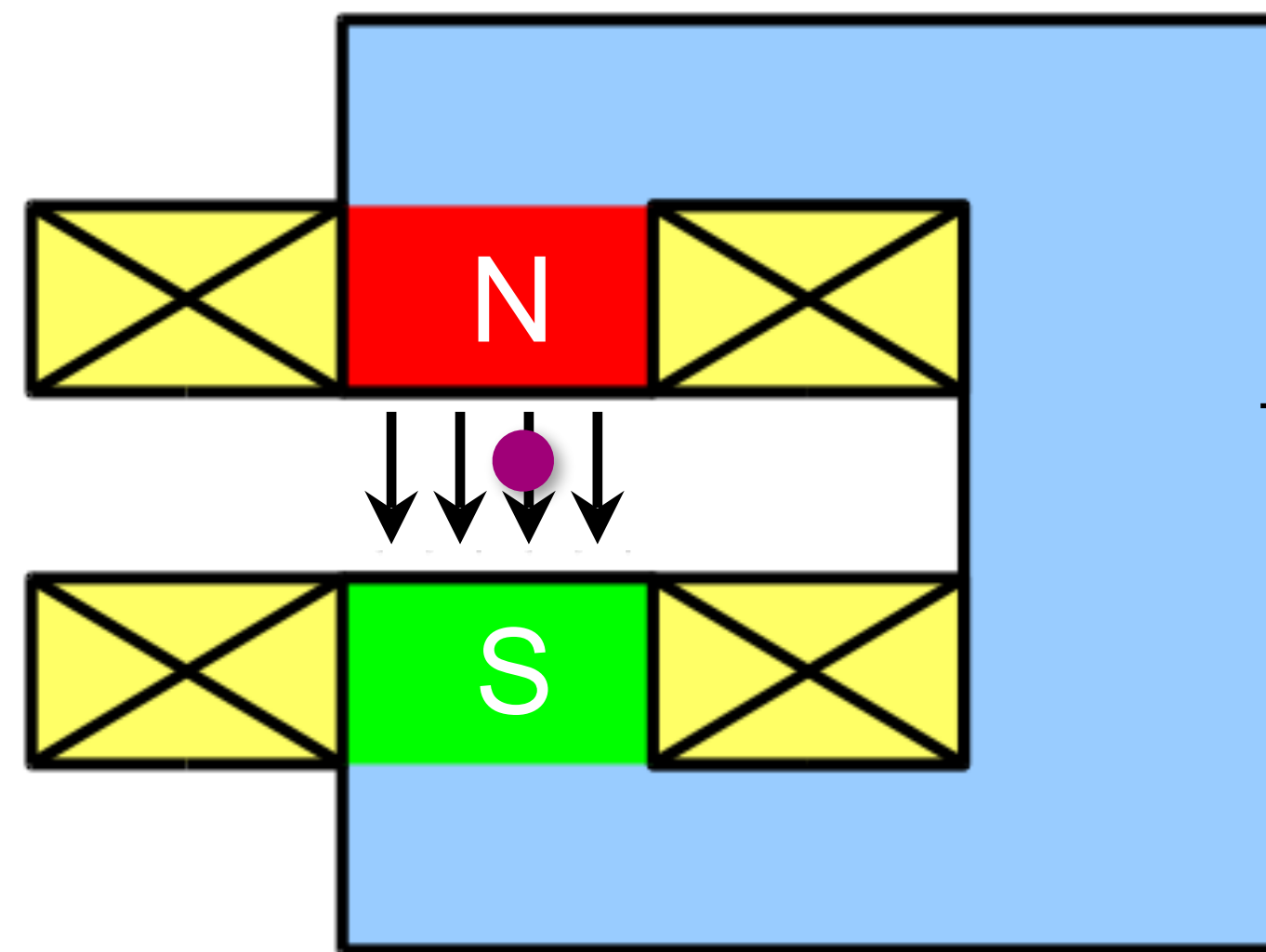
$$p = r \cdot q \cdot B$$

$$\xrightarrow{q = e \cdot z}$$

$$c \cdot p = c \cdot r \cdot z \cdot B$$

$$= 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot r [\text{m}] \cdot z \cdot B [\text{T}]$$

$$p [\text{GeV} / c] = 0,3 \cdot z \cdot B [\text{T}] \cdot r [\text{m}]$$



Elektromagnet (Eisenjoch)

supraleitender Magnet (LHC)

$B \sim 1 \text{ T}$

$B \sim 9 \text{ T}$

→ aus B,r folgt Teilchenimpuls p

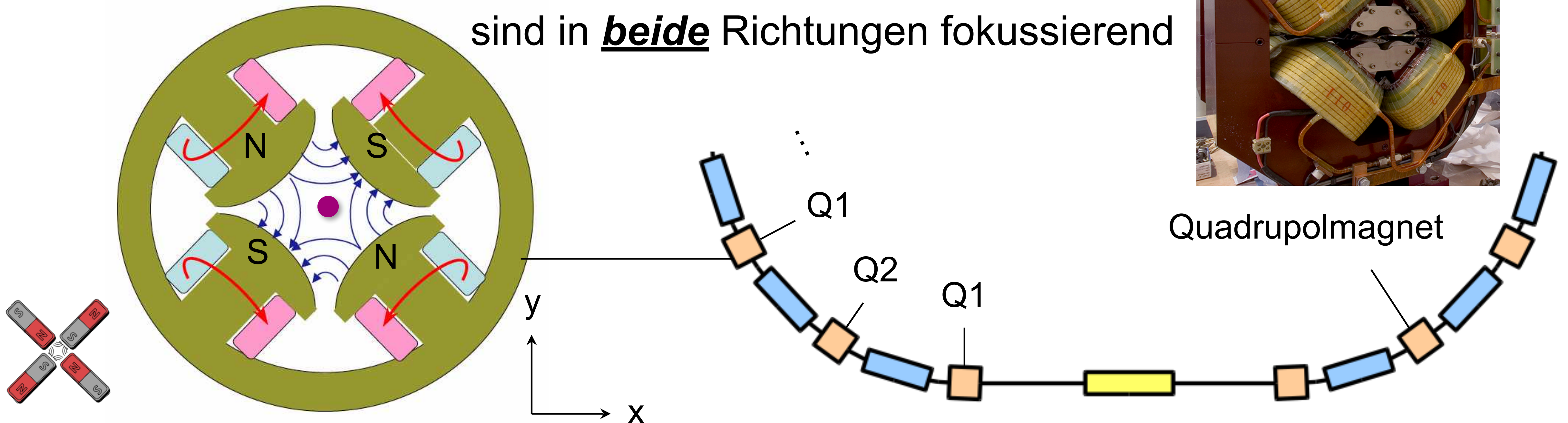
- **Quadrupolmagnete: starke Fokussierung des Teilchenstrahls auf Sollbahn**

- **Q1**: Fokussierung in x, Defokussierung in y

- **Q2**: Defokussierung in x, Fokussierung in y

- gegeneinander gedrehte Quadrupole **Q1**, **Q2**

sind in **beide** Richtungen fokussierend

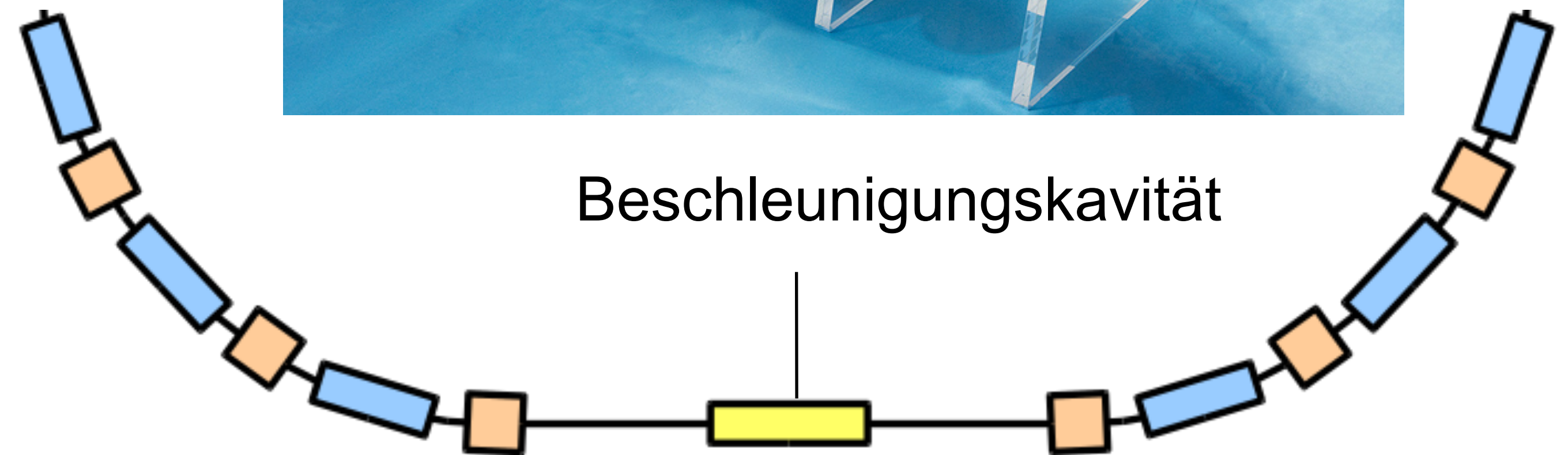
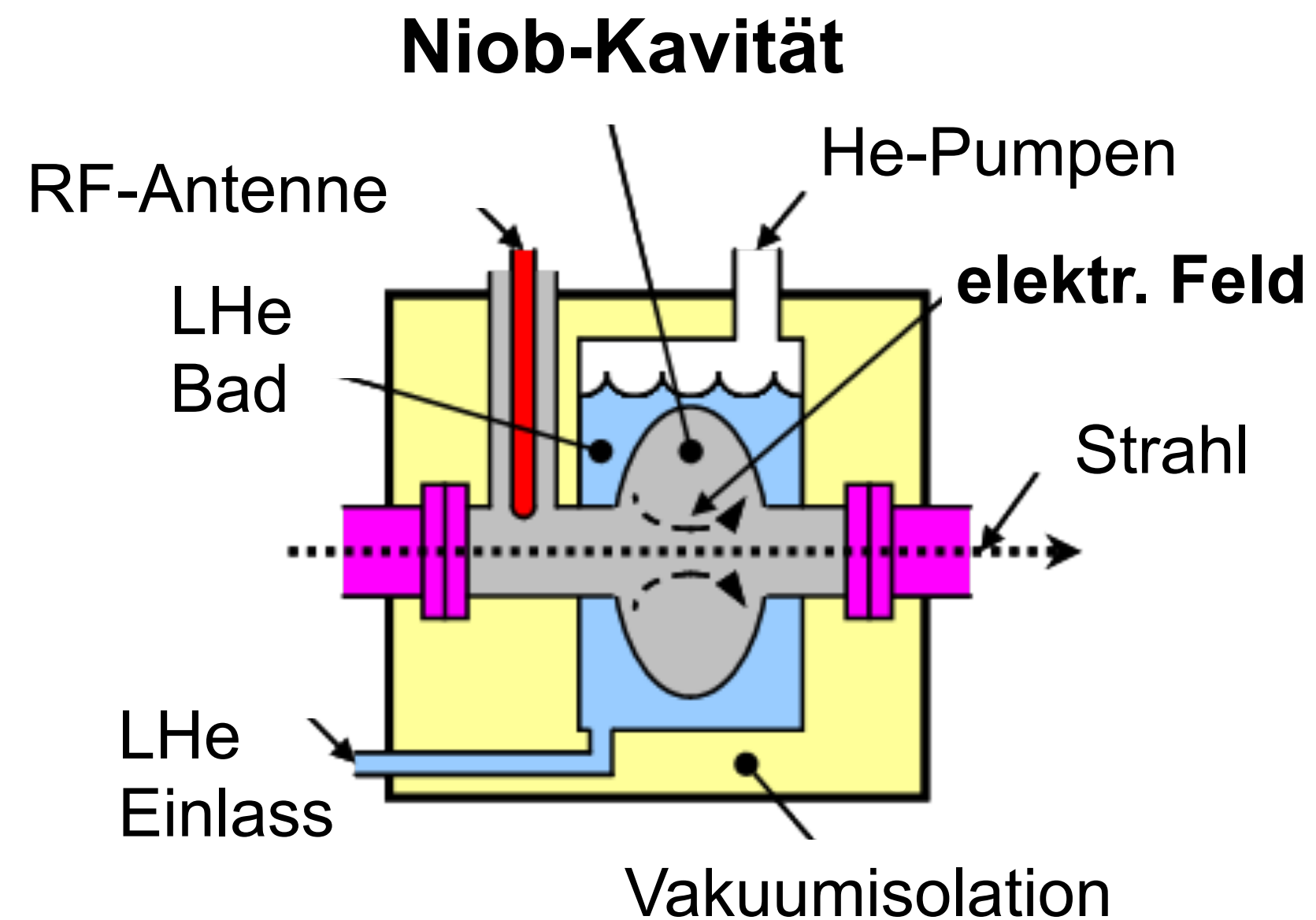
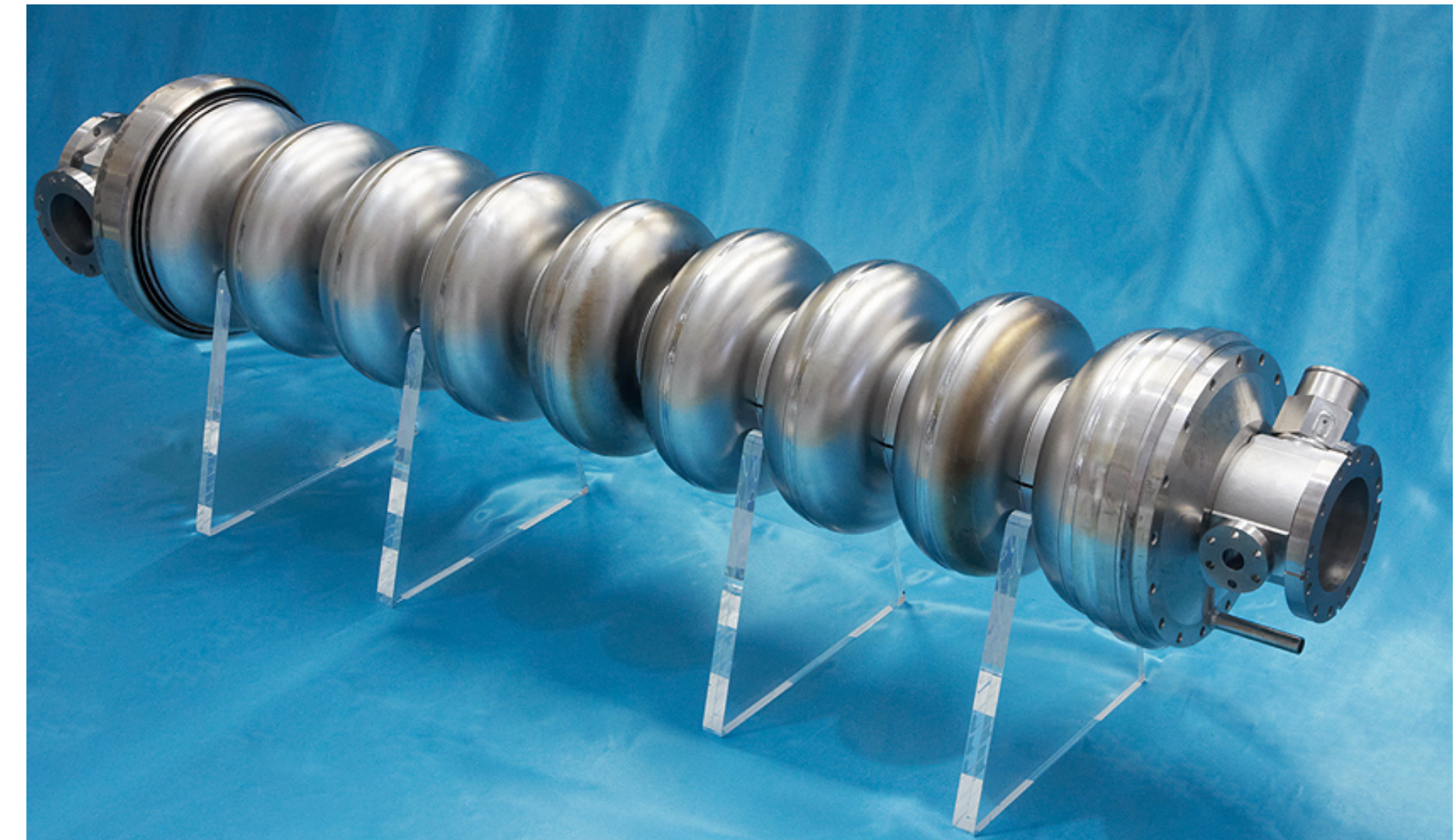


Element Kavität (Hohlraumresonator)

- **Kavität: Anregung resonanter elektrischer Felder via HF-Einkopplung**

- Beschleunigung: TM01 Mode
- normalleitend (Cu@300 K): **Verluste**
- supraleitend (Niob@1,8 K): **$Q = 10^{10}$**

Q: newsline.linearcollider.org



- **Collider – Kollision von gegenläufigen Teilchenstrahlen (Bunches)**

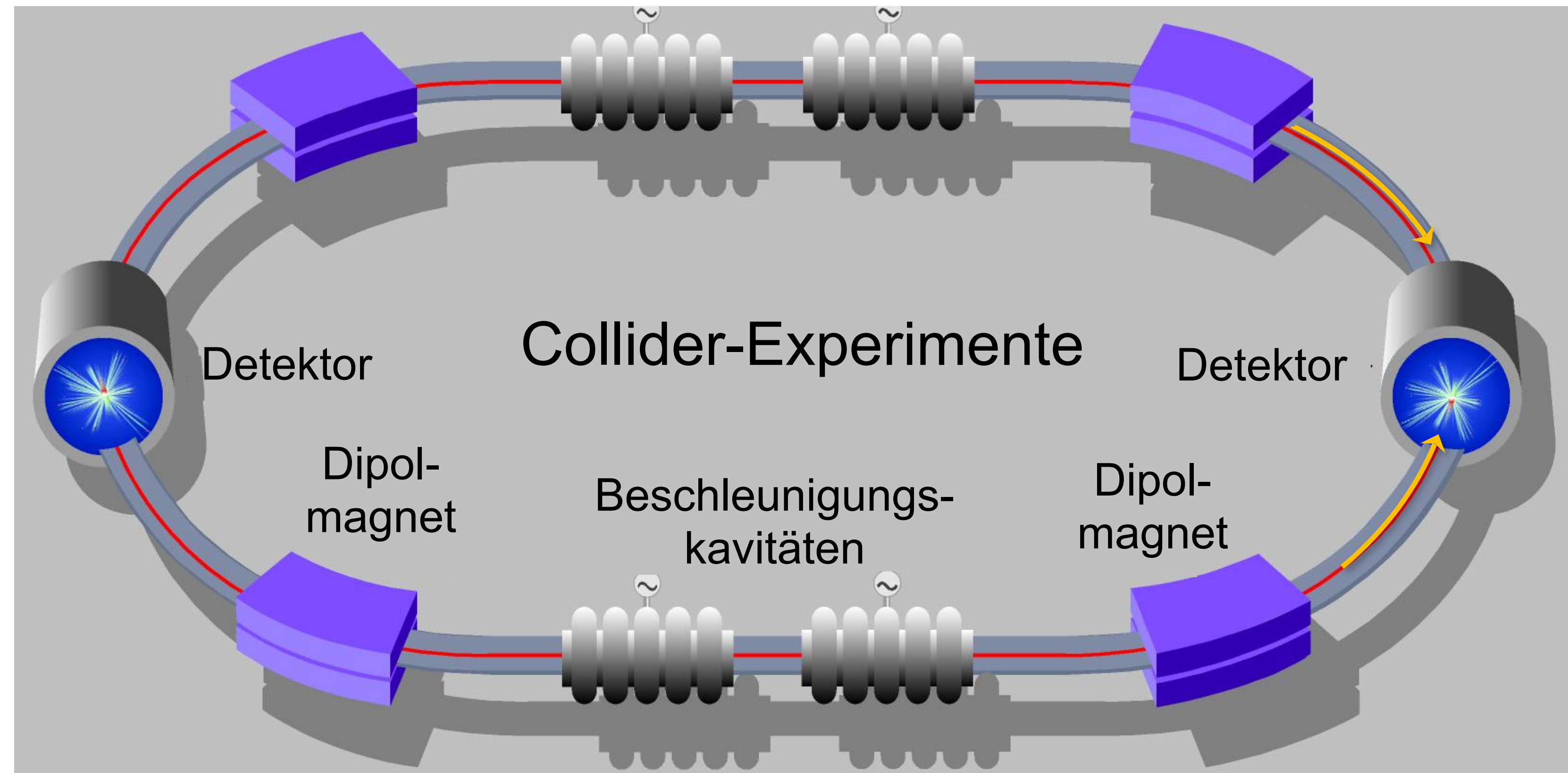
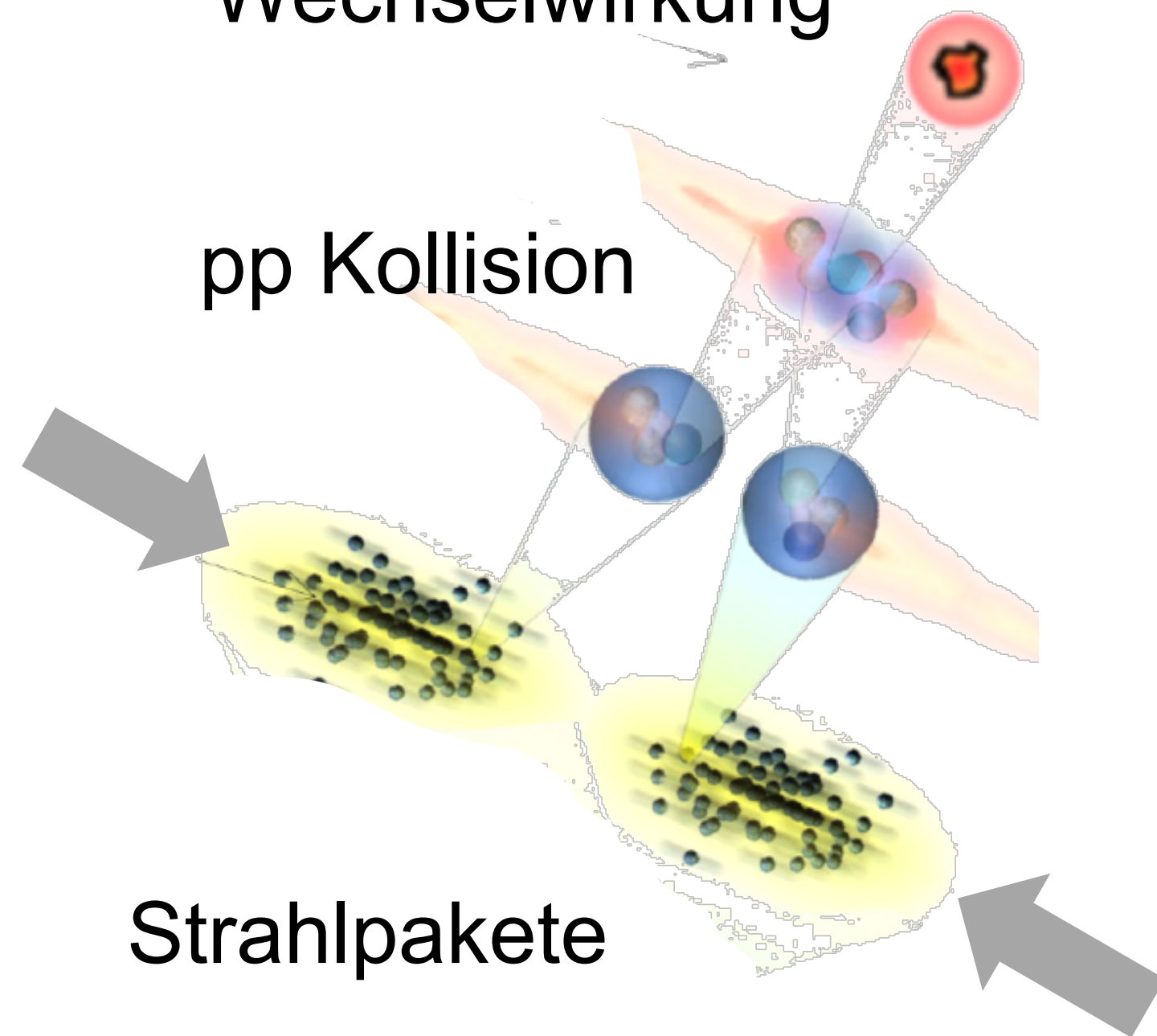
- **Lepton**-Collider: $e^+ e^-$ (LEP), **Hadron**-Collider: $p p$ (LHC) oder $p \bar{p}$ (SPS)

LHC Physik

Wechselwirkung

pp Kollision

Strahlpakete



Beschleuniger weltweit: USA



SLAC NATIONAL
ACCELERATOR
LABORATORY

Stanford Linear
Accelerator

 **Fermilab**
Tevatron

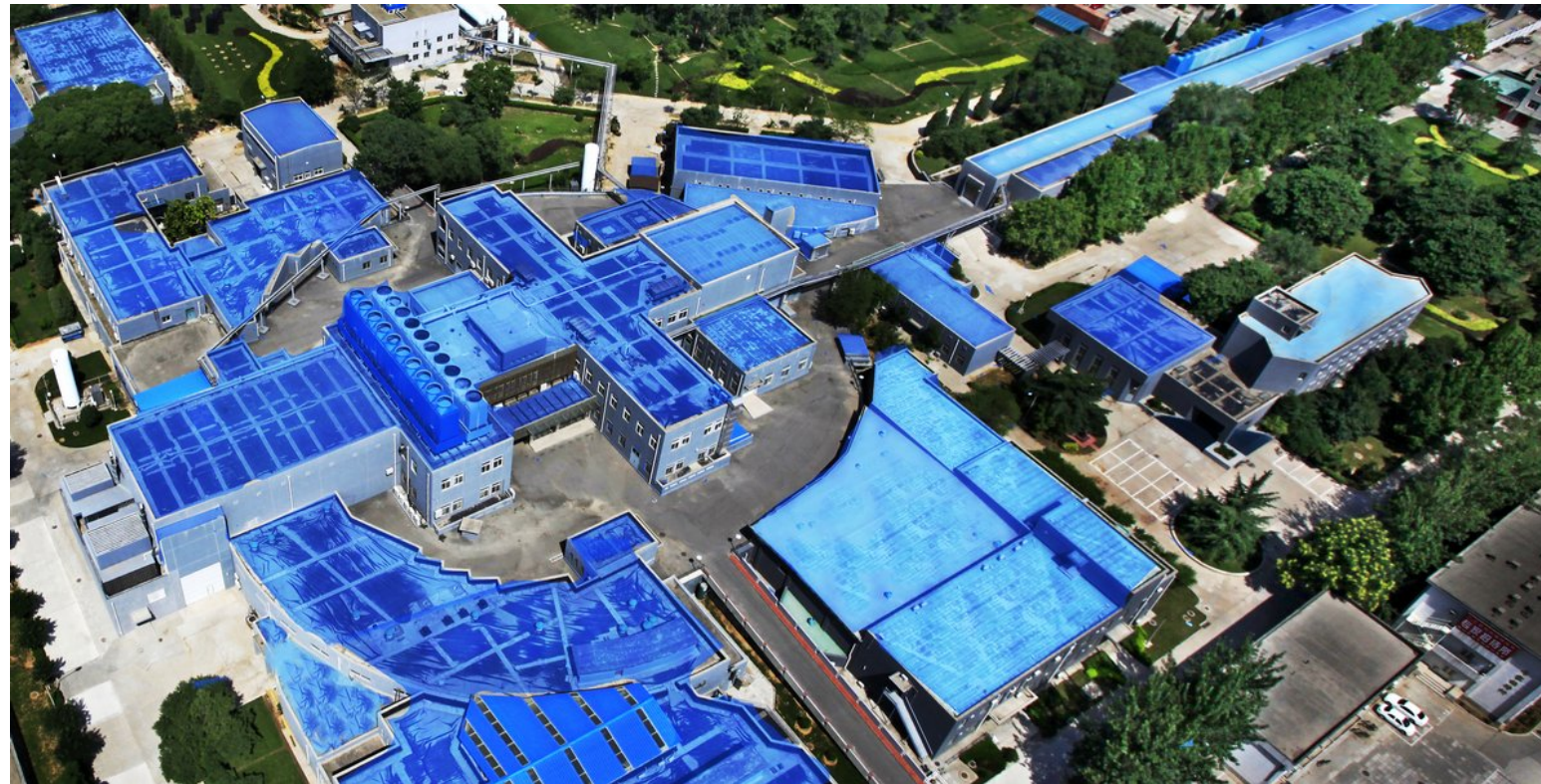


Beschleuniger weltweit: Europa

Large Hadron Collider - LHC



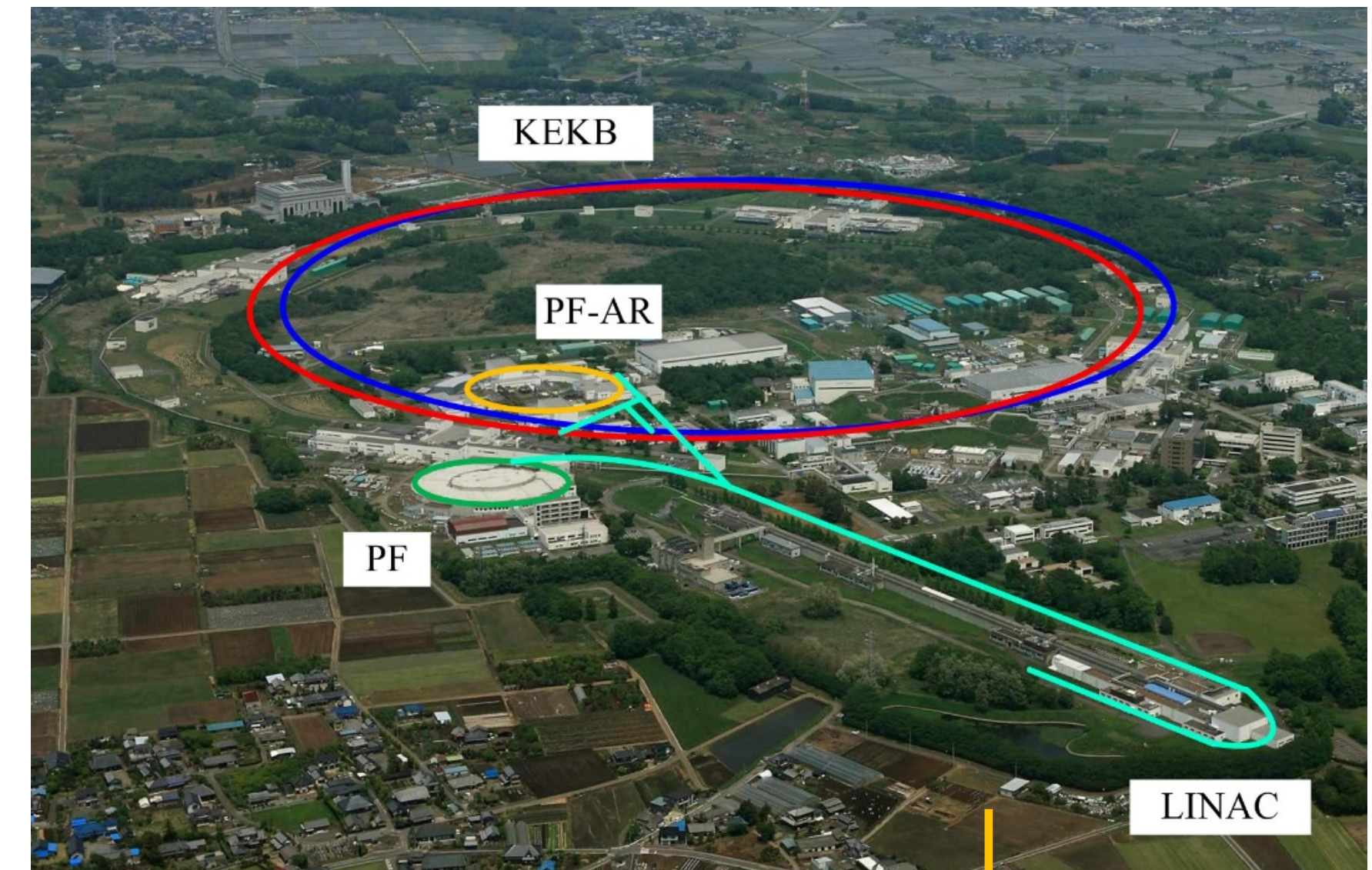
Beschleuniger weltweit: Asien



BEPC II



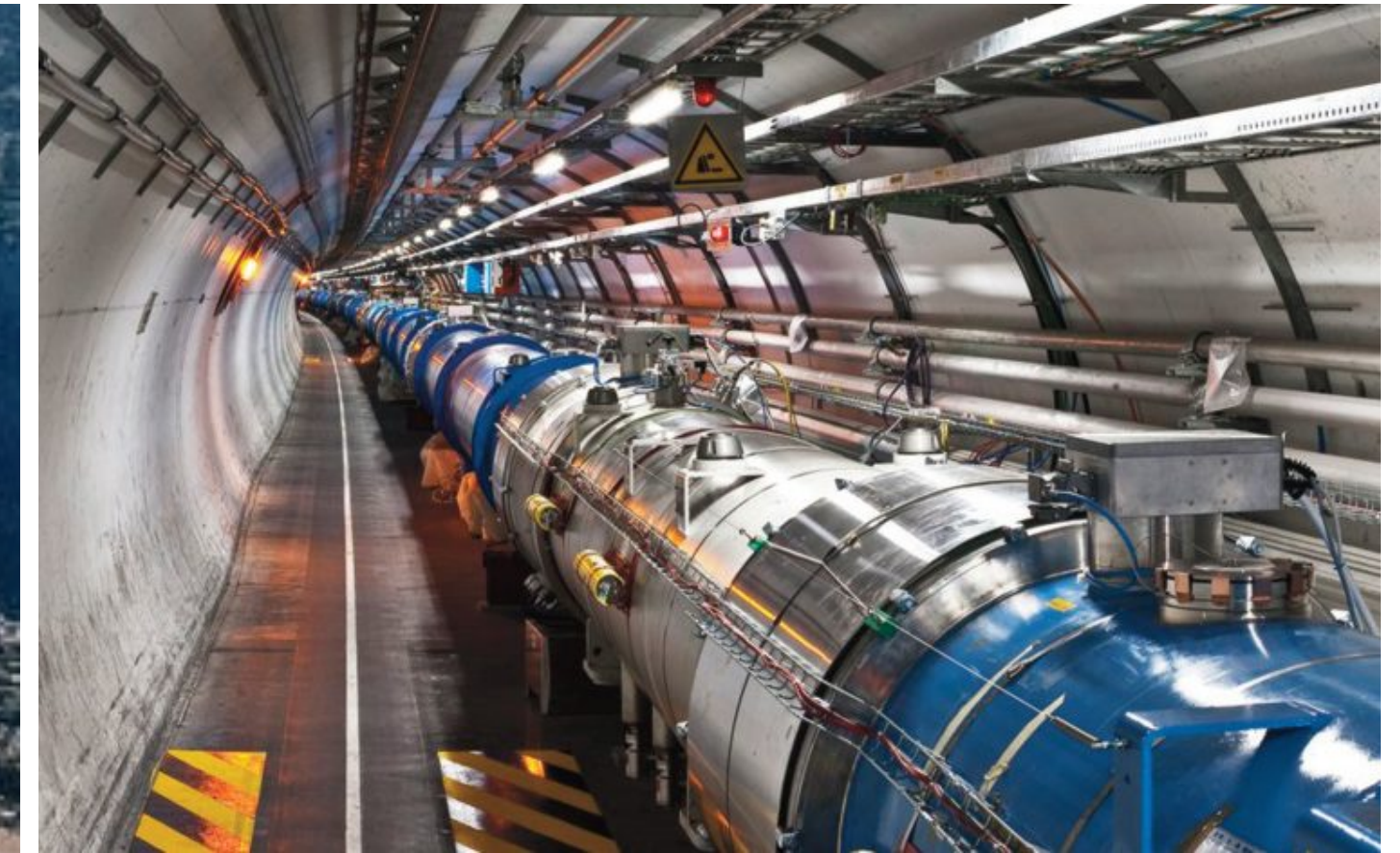
Super-KEKB

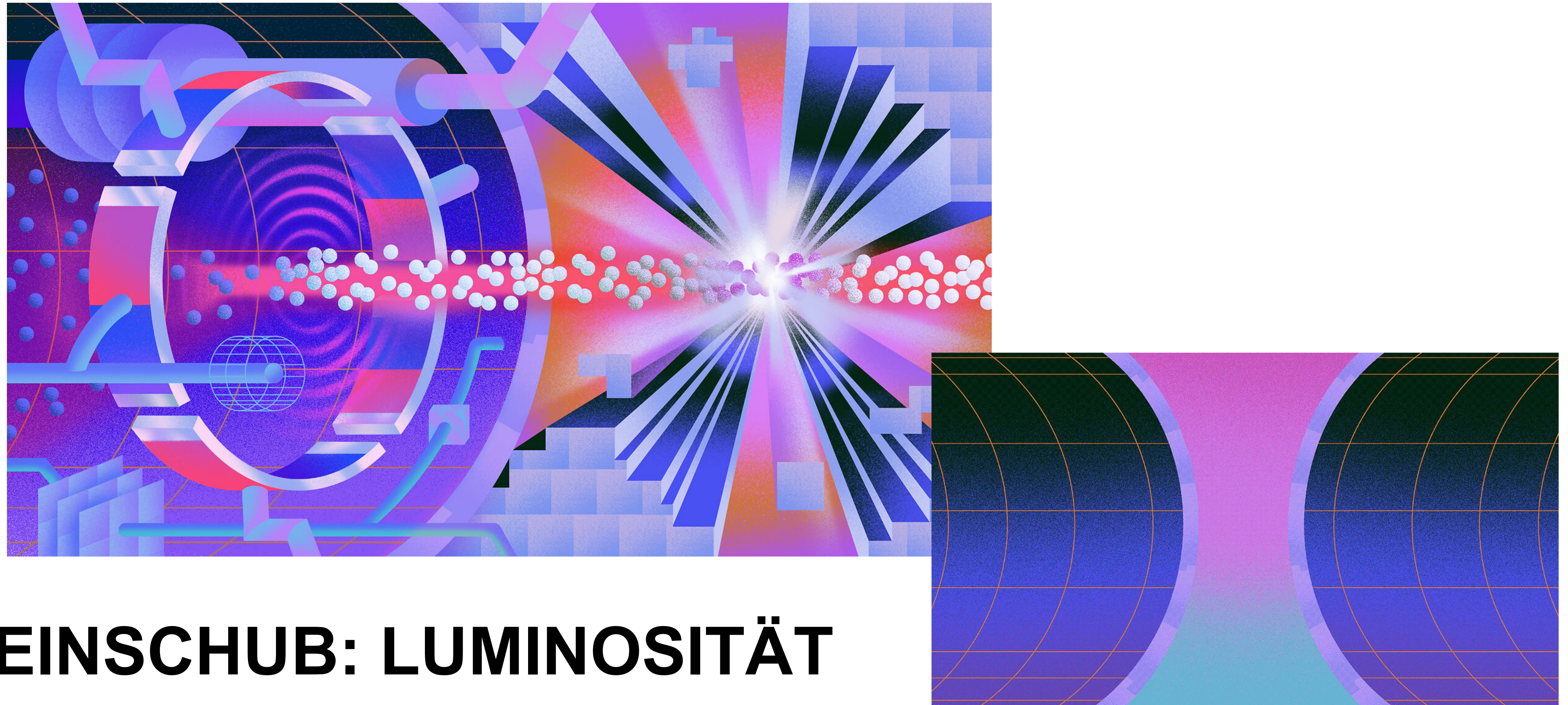


LHC – Large Hadron Collider

- Proton – Proton Kollisionen bei Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$

4 Experimente :
CMS, ATLAS,
ALICE, LHCb





EINSCHUB: LUMINOSITÄT

Q: symmetry magazine

- **Luminosität L** – wichtiges Merkmal für die Leistungsfähigkeit eines Colliders

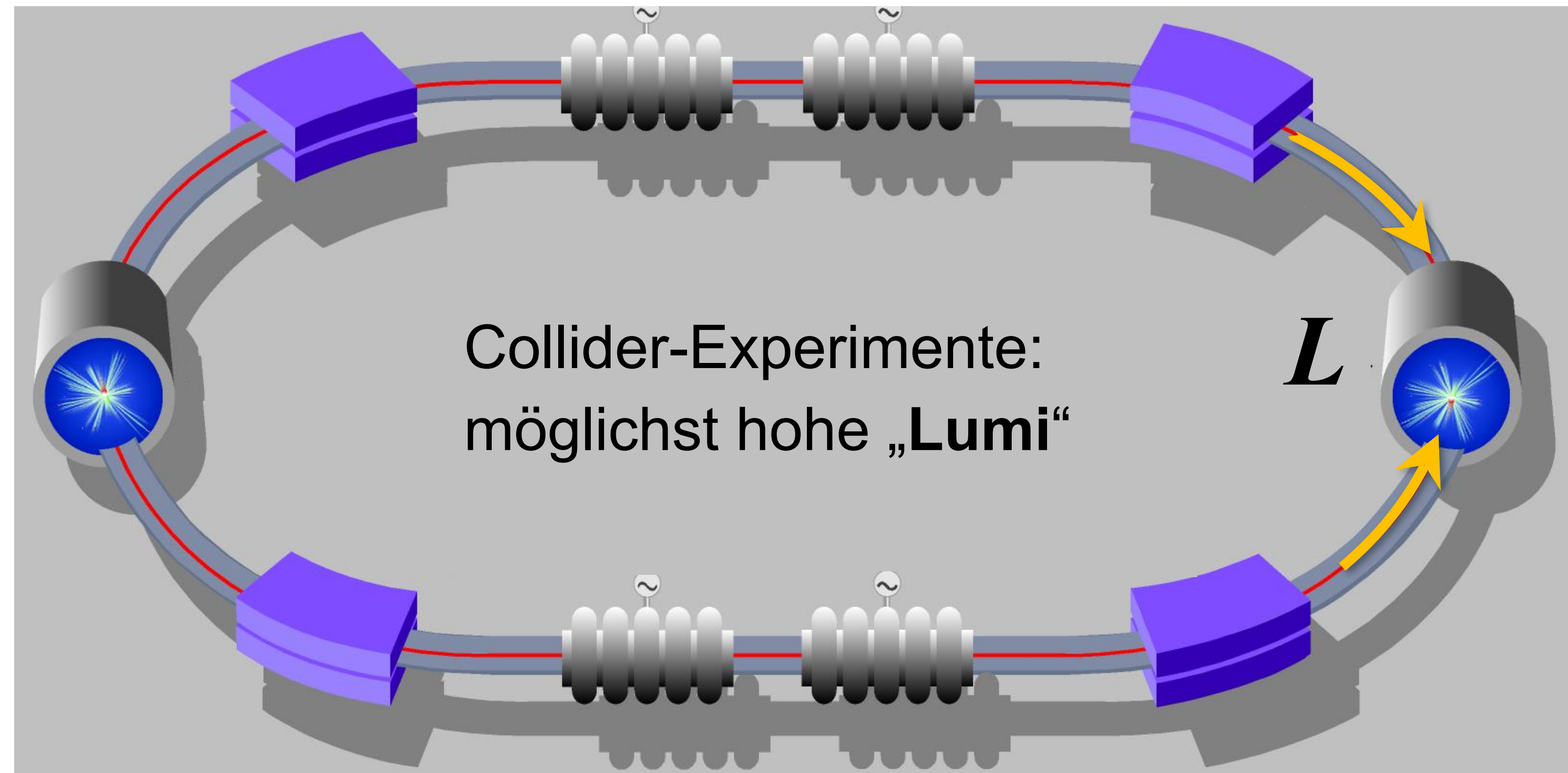
$$R = \frac{dN}{dt} = \sigma \cdot L$$

σ = Wirkungs-
querschnitt (cm^2)

L = Luminosität ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

L = Anzahl der
Kollisionen in einem
Detektor pro cm^2
pro sec

R = Rate = # an Streuereignissen pro Zeiteinheit (s^{-1})



Collider-Experimente: integrierte Luminosität

- **integr. Luminosität** $\int L dt$ – ein Merkmal für einen „Datensatz“ an Collidern

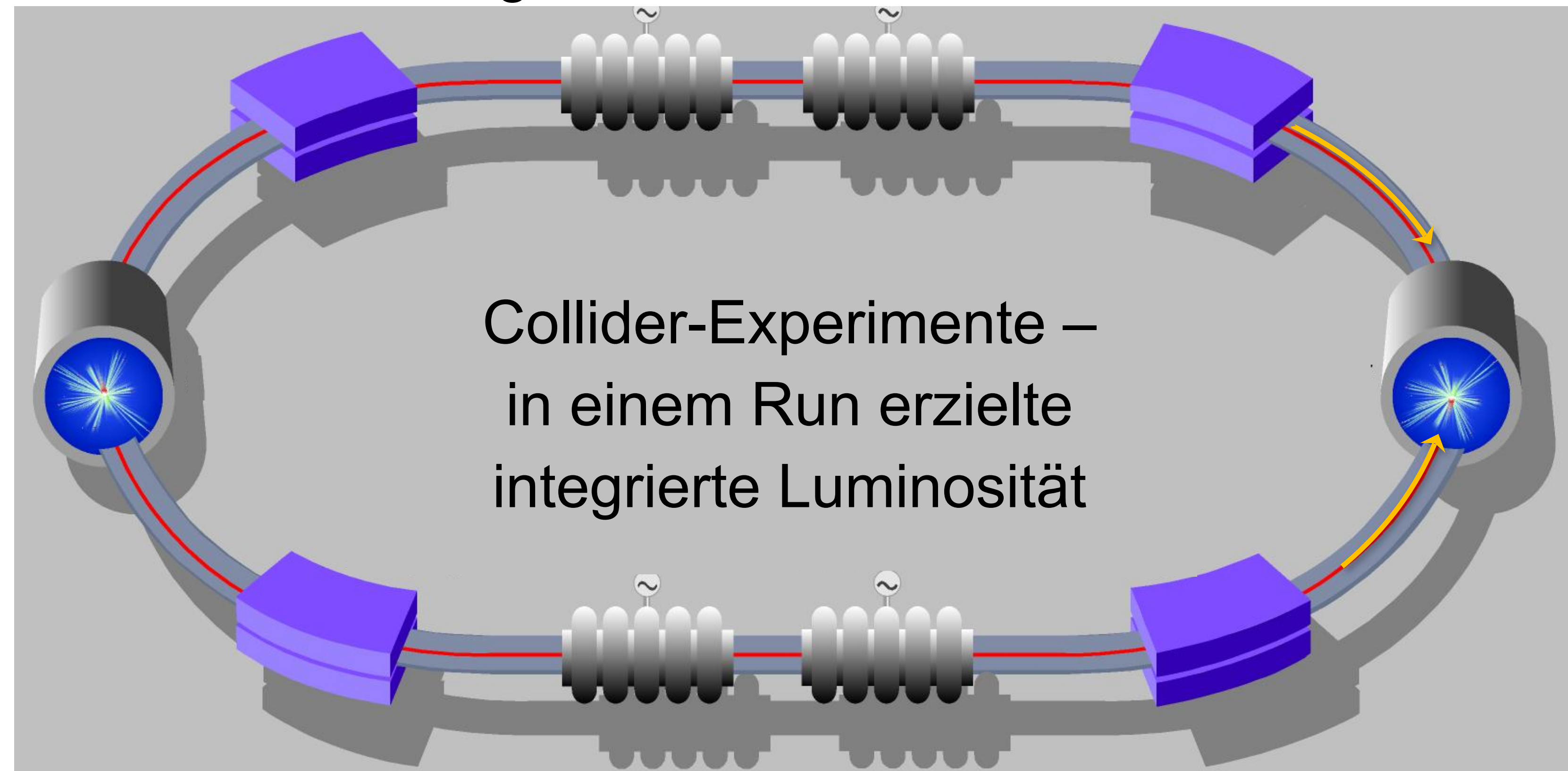
$$N = \sigma \cdot \int L dt$$

zeitintegrierte Größe
(z.B. 1 Monat, 1 Jahr)

$\int L dt$ = integrierte
Luminosität (cm^{-2})

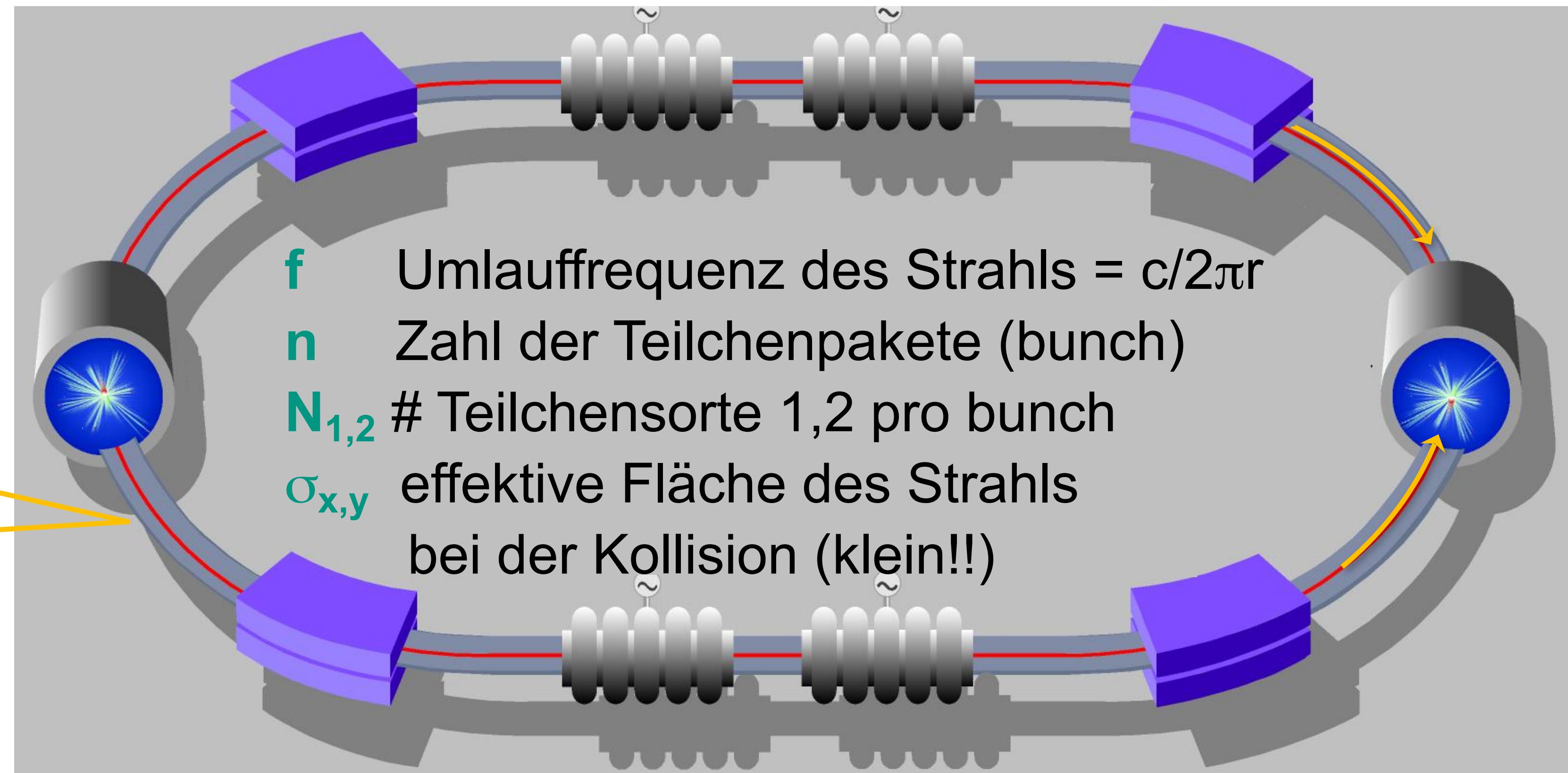
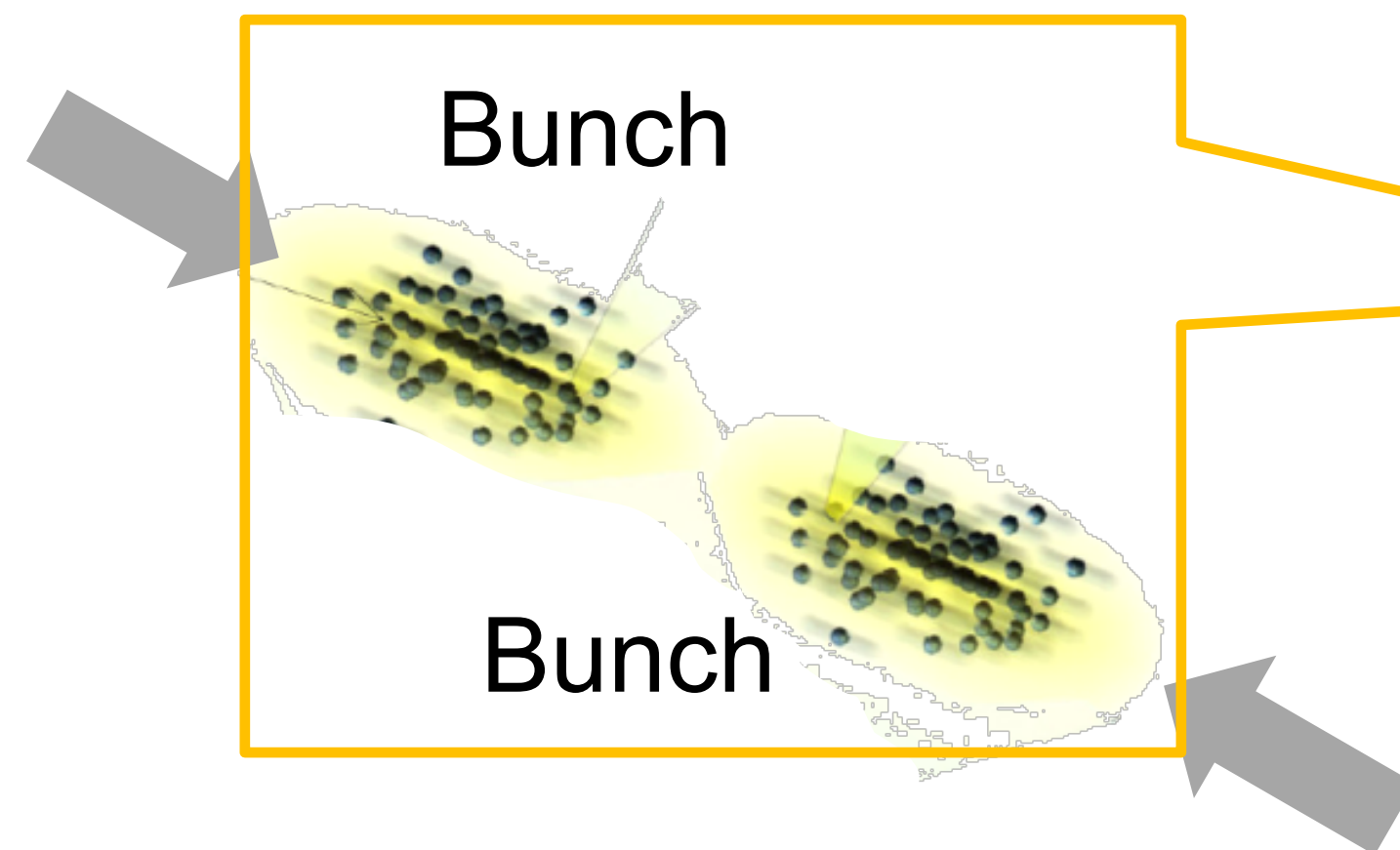
(Einheit: **inverser**
Wirkungsquerschnitt
z.B. inverse fb)

N = # an Streuereignissen über einen „Run“



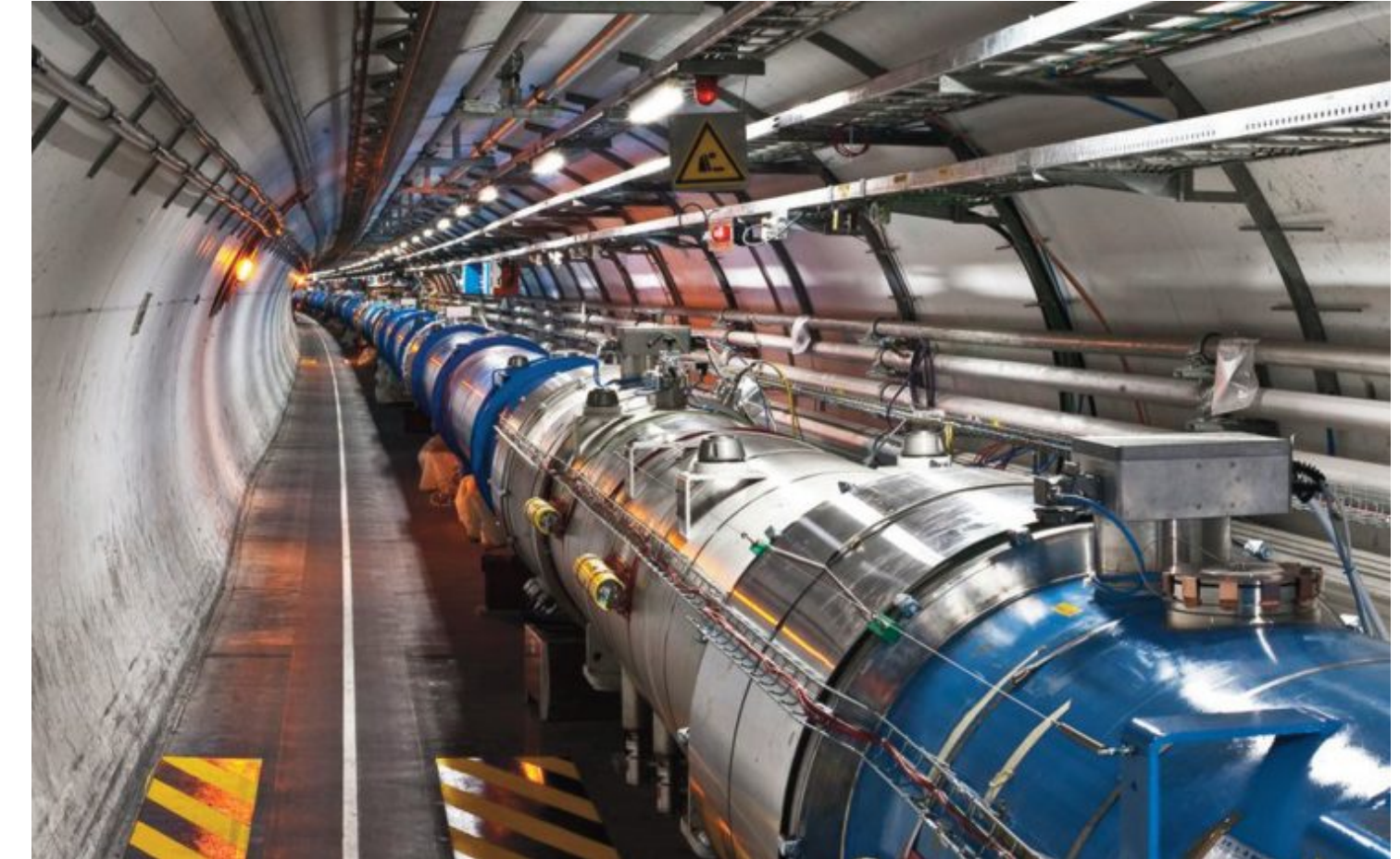
- Luminosität L und Strahlparameter: Anzahl Bunche, Umlauf-Frequenz

$$L = f \cdot n \cdot \frac{N_1 \cdot N_2}{4\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}$$



- Design-Luminosität L des Large Hadron Colliders

$$L = f \cdot n \cdot \frac{N^2}{4\pi \cdot \sigma_b^2} \quad L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



f	Umlauffrequenz des Strahls = $c/2\pi r$	$\sim 10^4 \text{ s}^{-1}$
n	Zahl der Teilchenpakete	$= 2808$
N	# Protonen pro bunch	$= 1,15 \cdot 10^{11}$
σ_b	transversale Größe des Strahls bei der Kollision (klein!!)	$= 16 \text{ }\mu\text{m}$

- Design-Luminosität L des Large Hadron Colliders

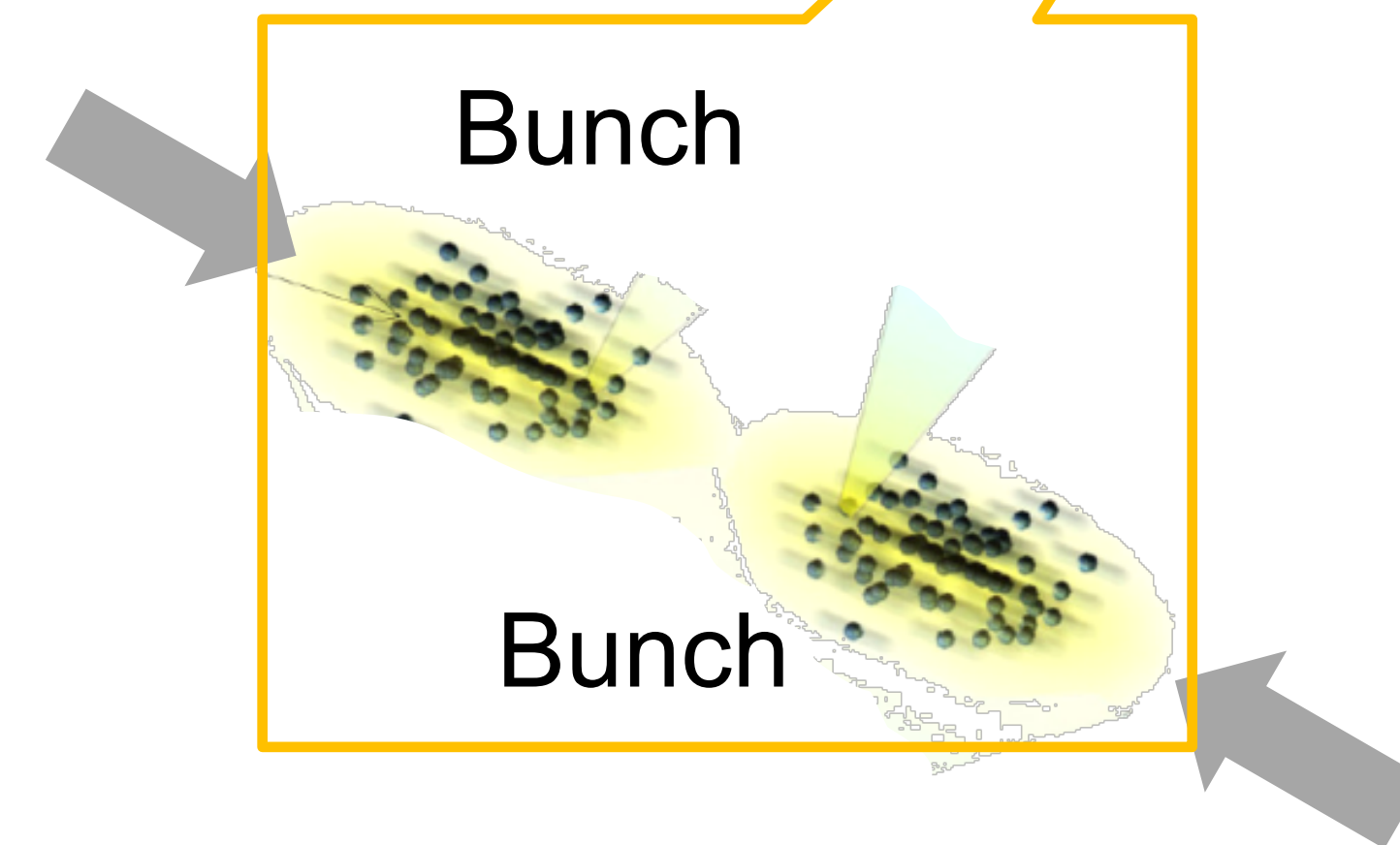
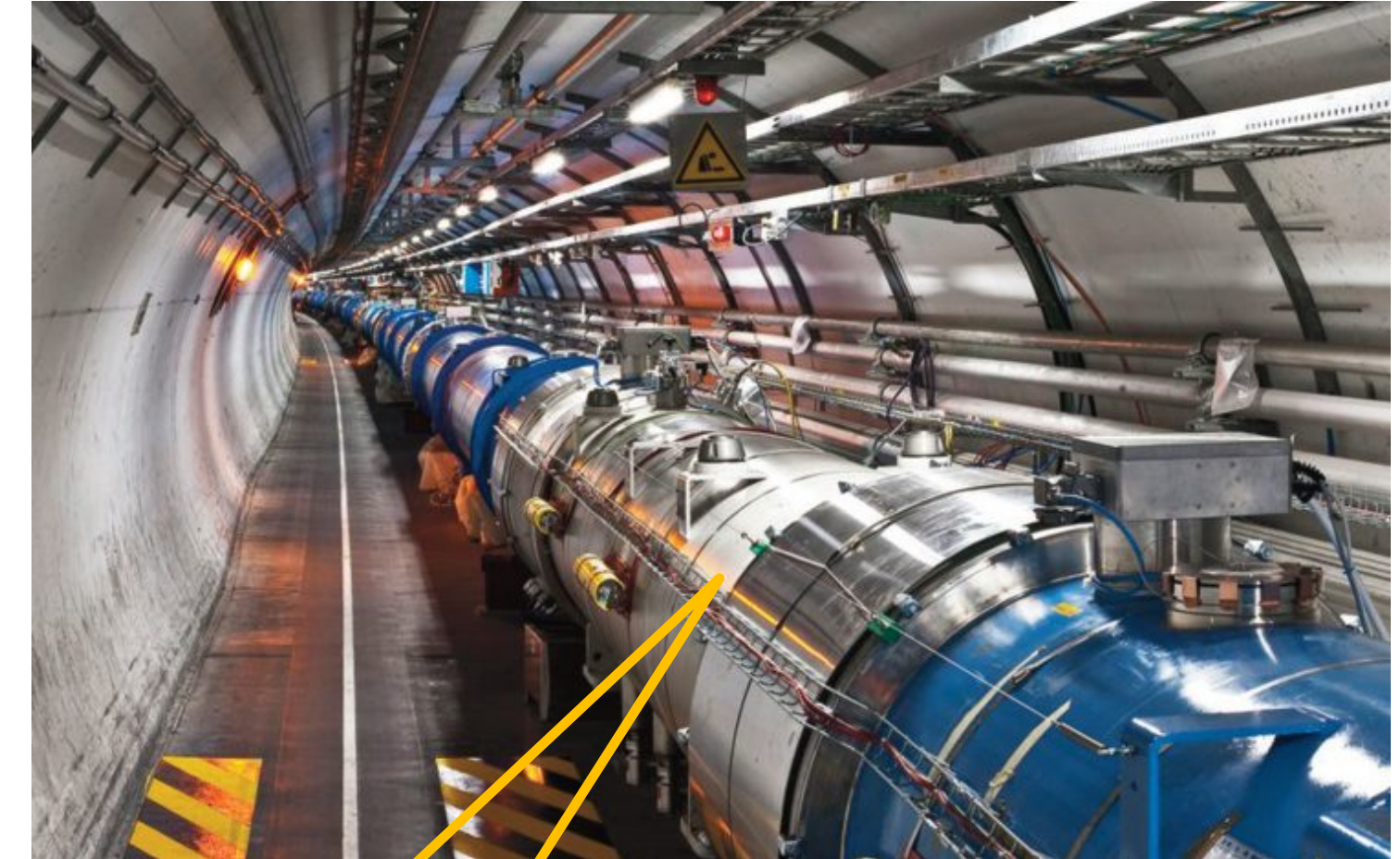
$$L = f \cdot n \cdot \frac{N^2}{4\pi \cdot \sigma_b^2}$$

$$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$R = \frac{dN}{dt} = \sigma \cdot L$$

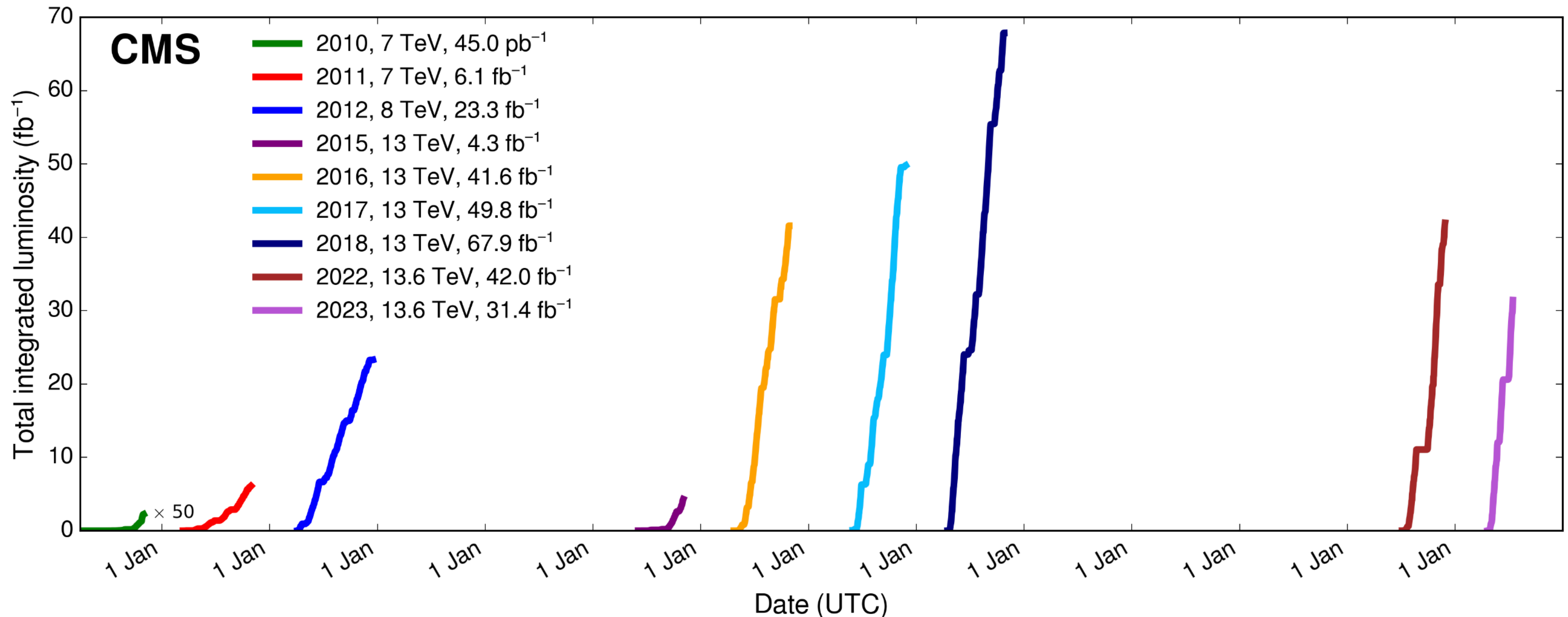
mit $\sigma_{\text{inel}} = 60 \text{ mb}$ beträgt am LHC die Kollisionsrate R der Protonen in ATLAS oder CMS:

$$R = \sigma_{\text{inel}} \cdot L \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$$



Integrierte Luminosität des LHC pro Jahr

- Entwicklung der integrierten LHC-Luminosität / Jahr

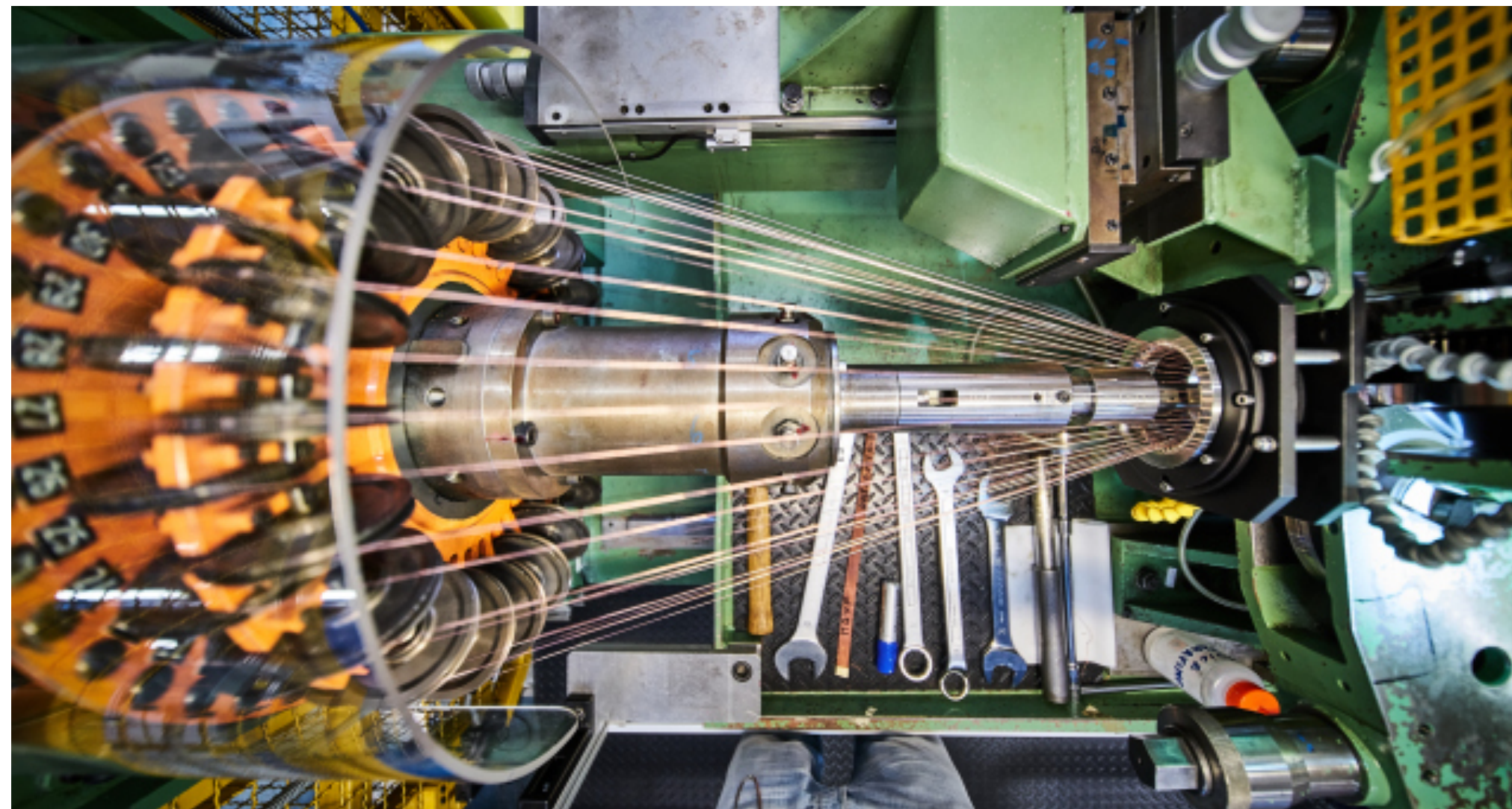


Ausbau des LHC zum HL-LHC

- **Erhöhung der Luminosität des LHC auf $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$**
 - 2025-27: Einbau neuer Quadrupol-Magnete, Kavitäten,...



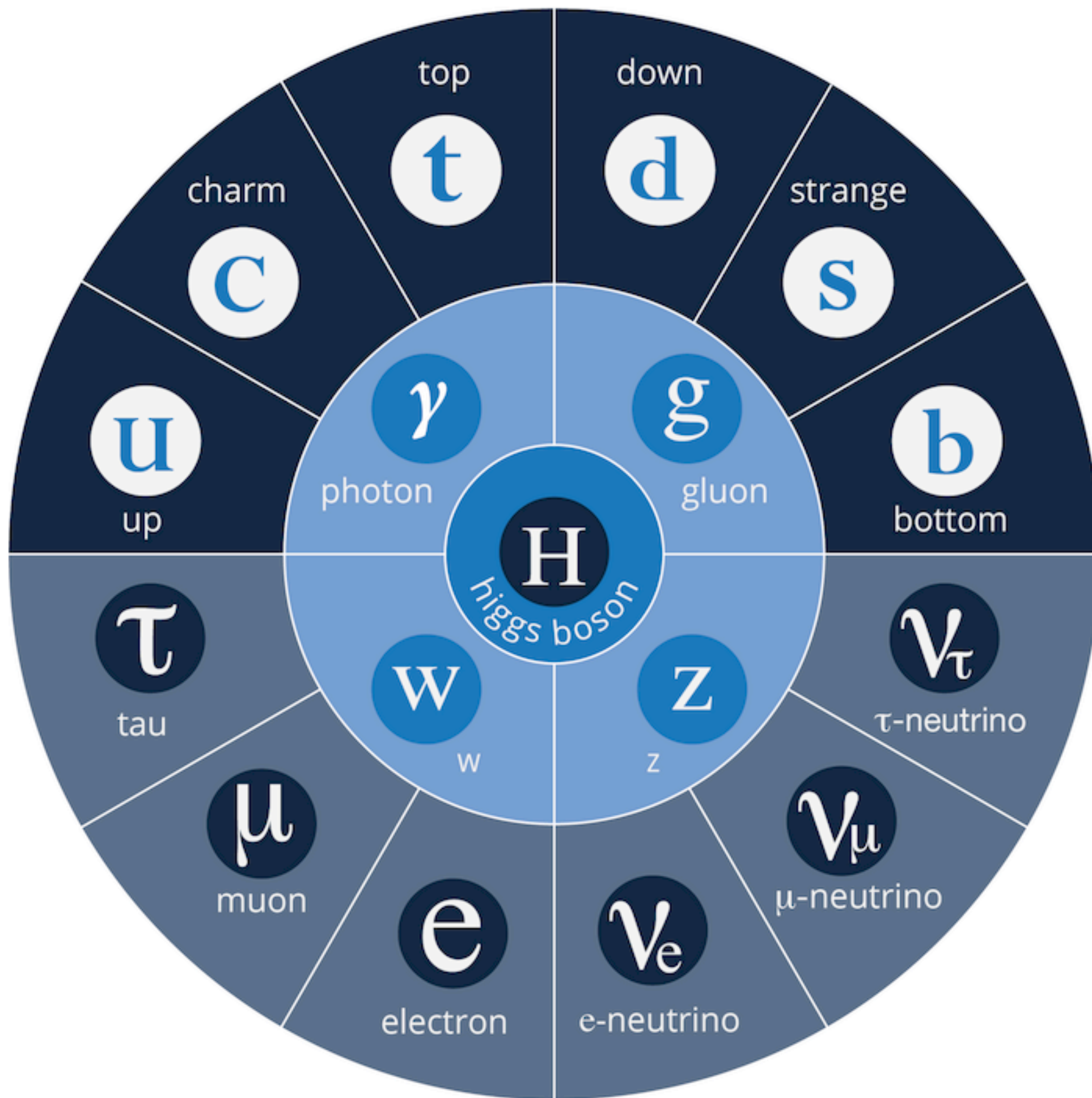
erste von 16 neuen Kavitäten



neue Quadrupole bei $B = 12 \text{ T}$

$$L = 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$





■ 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