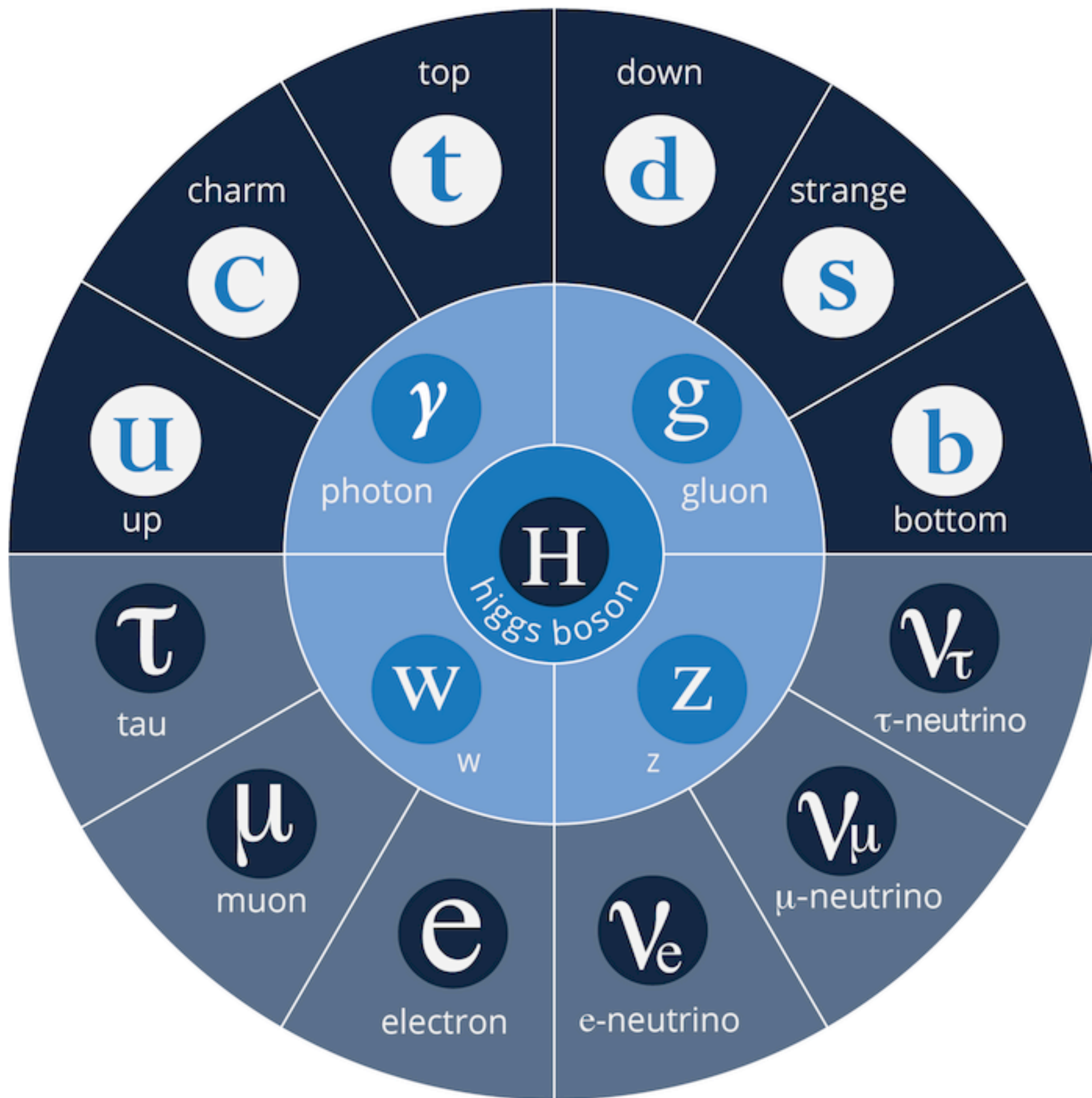


Moderne Experimentalphysik II

Teilchenphysik - Vorlesung 05

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: Experimentelle Methoden

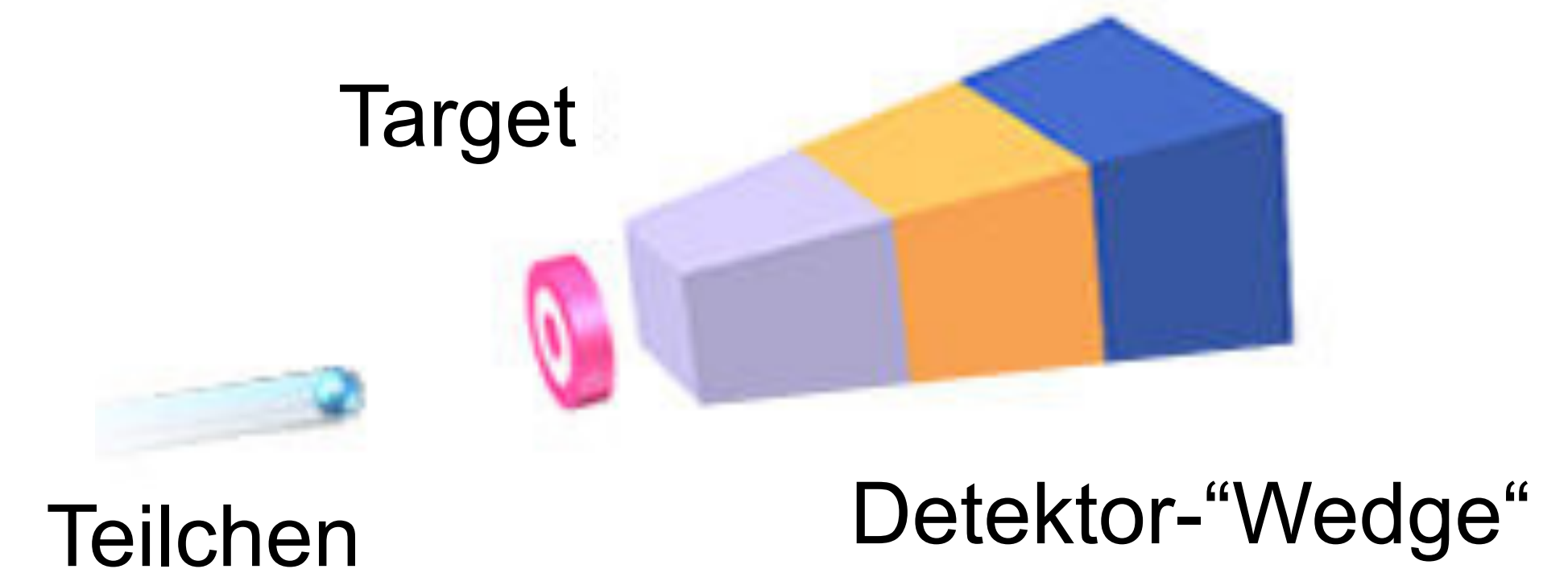
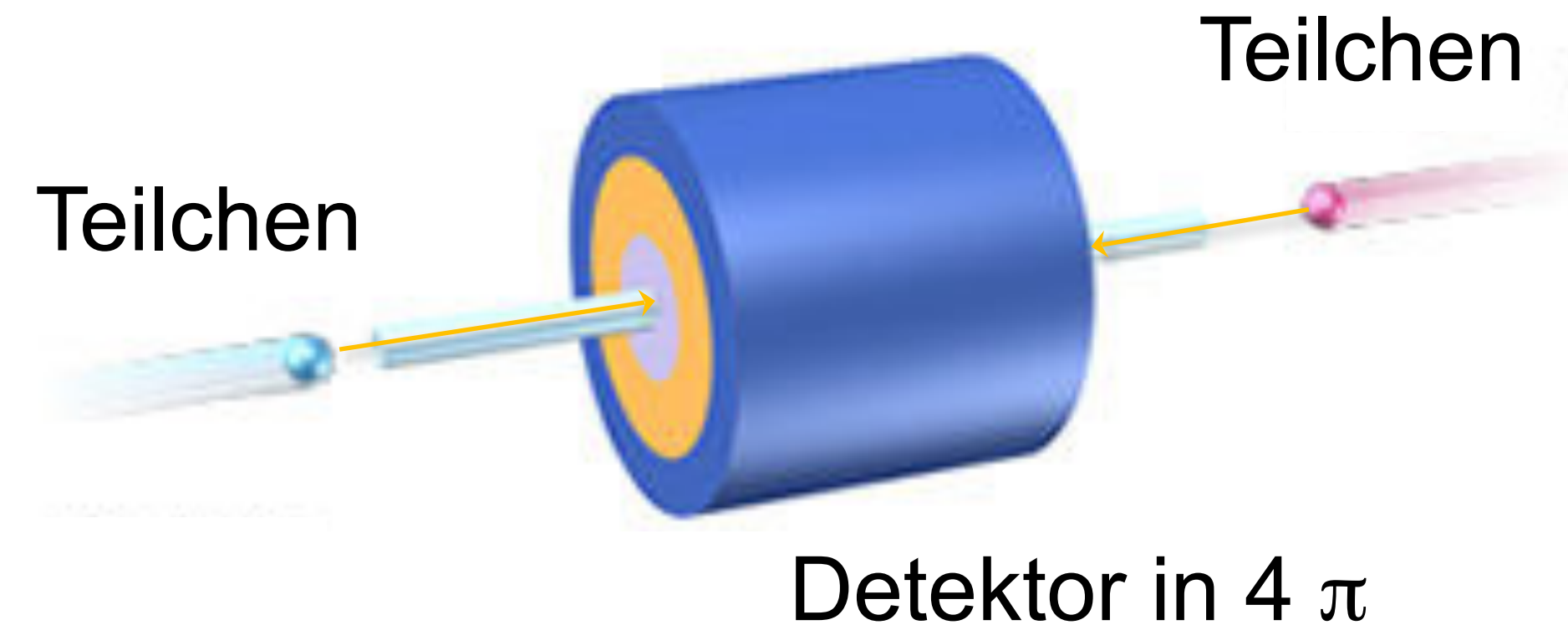
■ Techniken zum Teilchen-Nachweis

- Ionisationskammer, Zeitprojektionskammer (TPC)
- Zählrohr, Vieldrahtkammer (MWPC), **Si-Halbleiterdetektor**
- **Kalorimetrie** (elektromagnetische/hadronische Schauer) bei CMS:
 - ECAL , z.B. PbWO_4 mit $26 X_0$ (Strahlungslängen)
 - HCAL , z.B. Sampling (Szintillator/Messing) mit 6Λ (hadr. Ww.)

- **Wie kann man ein hochenergetisches neutrales pion nachweisen?**
 - 1) mit einem Spurdetektor
 - 2) mit einem elektromagnetischen Kalorimeter
 - 3) mit einem hadronischen Kalorimeter



- **Detektorsysteme sind an die Kinematik am Beschleuniger angepasst**



Collider-Experiment

kollidierende Teilchenstrahlen

Teilchennachweis in alle Richtungen

zylinderförmiger 4π Detektor

Fixed Target Experiment

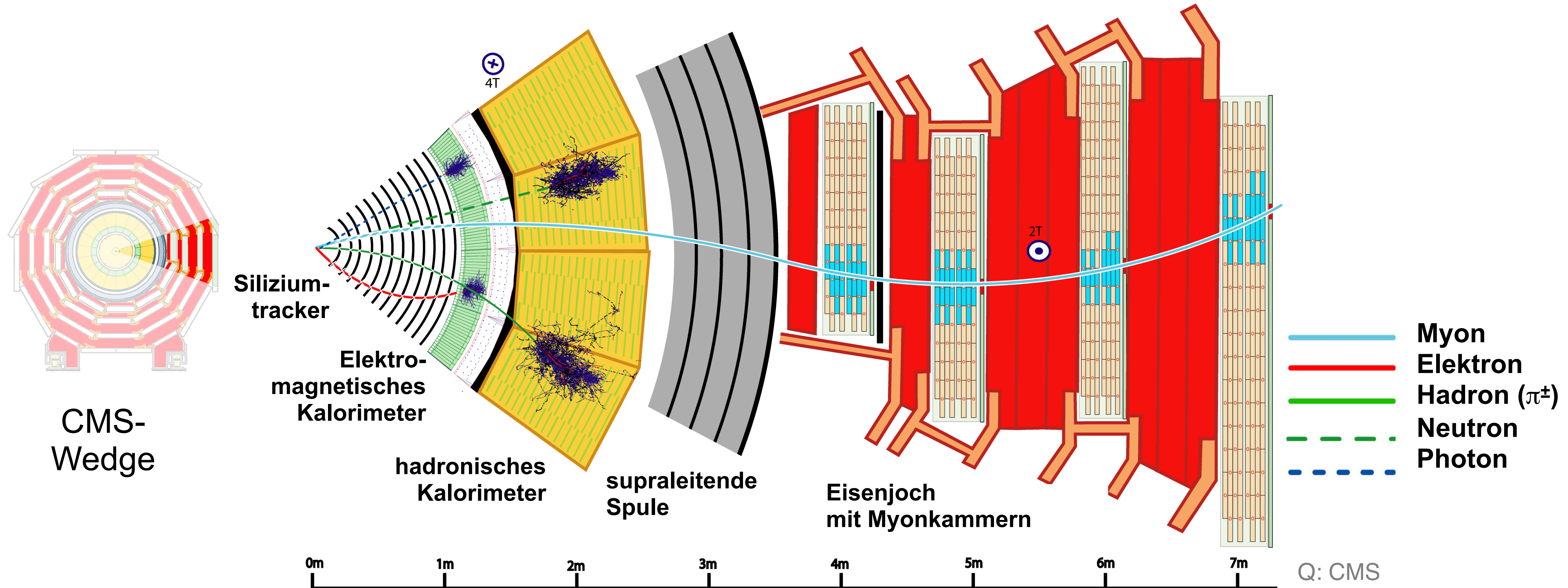
Teilchenstrahl trifft ruhendes Target

Teilchennachweis in Vorwärtsrichtung

Vorwärtsspektrometer

Aufbau eines Collider-Experiments: CMS

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

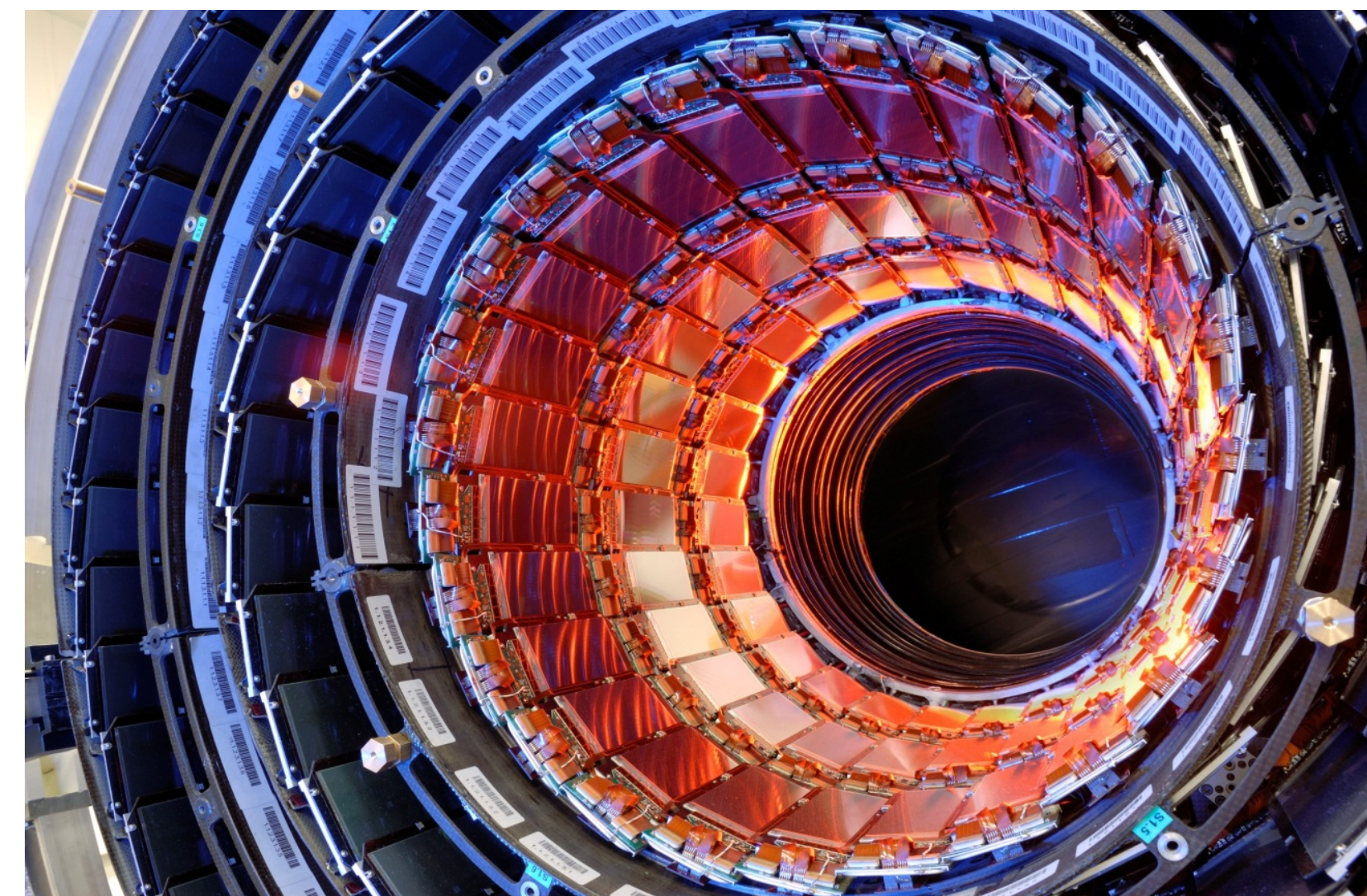
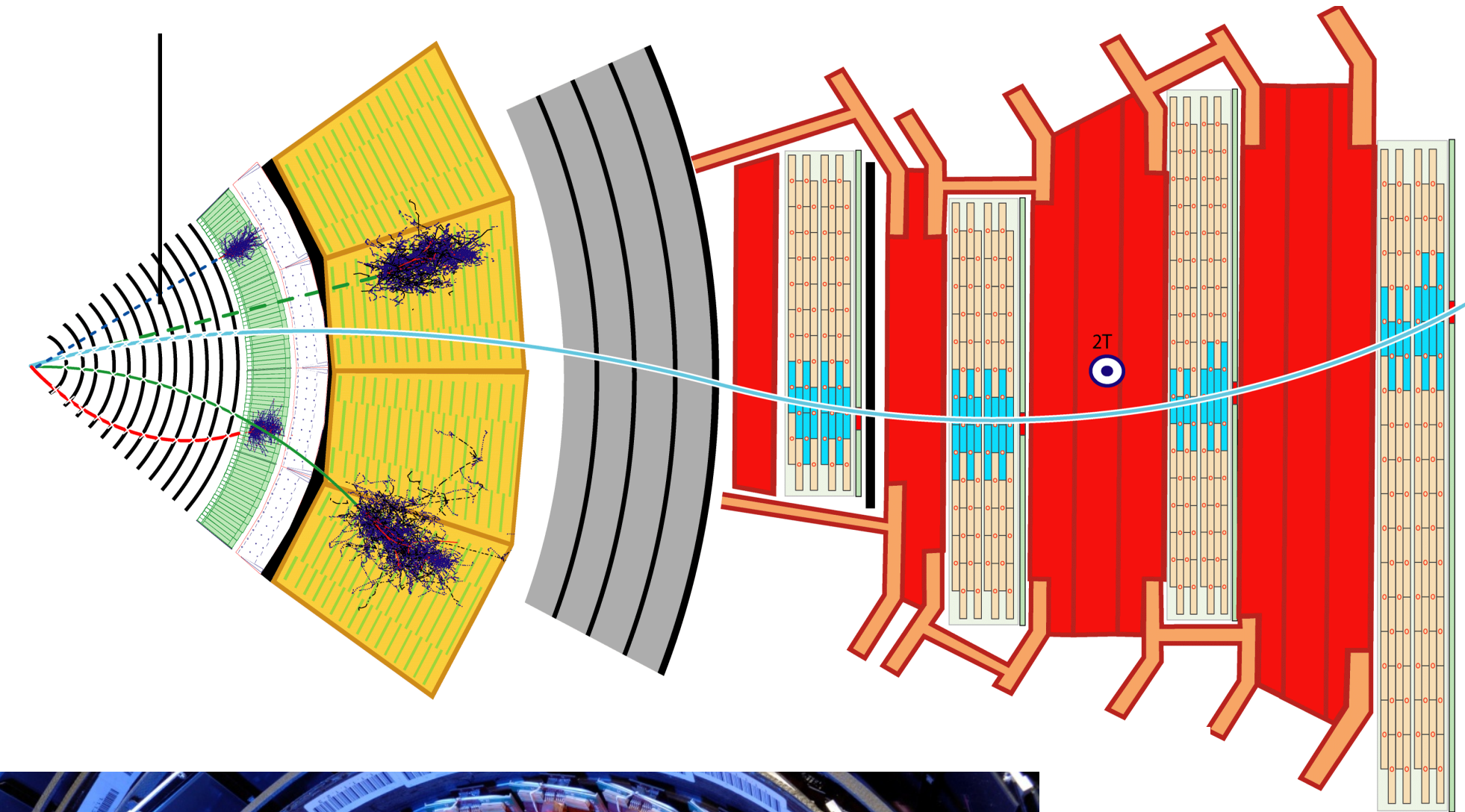


Inner Tracker: Spurrekonstruktion

- **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: $10 \text{ cm} \times 80 \text{ } \mu\text{m}$

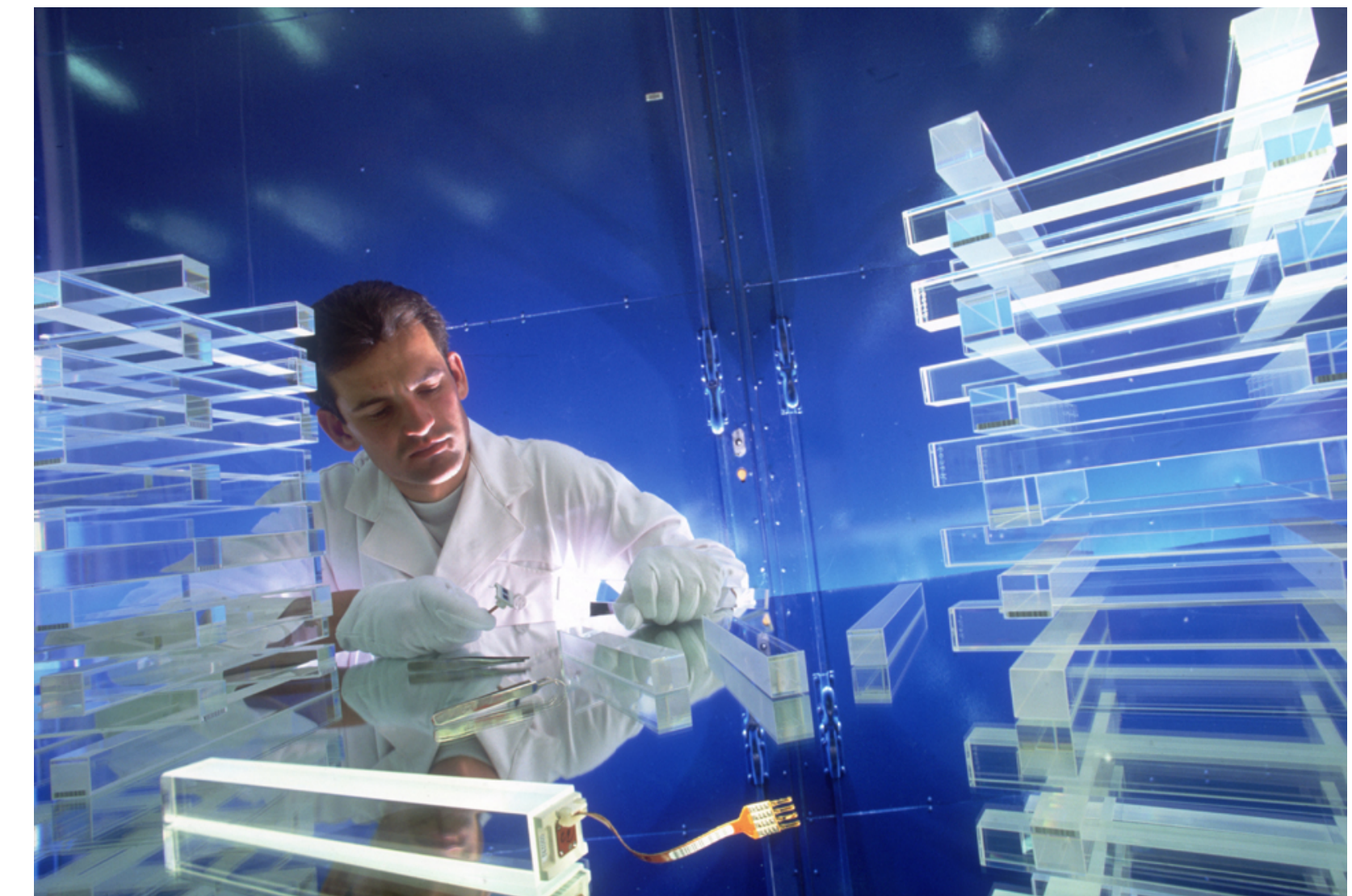
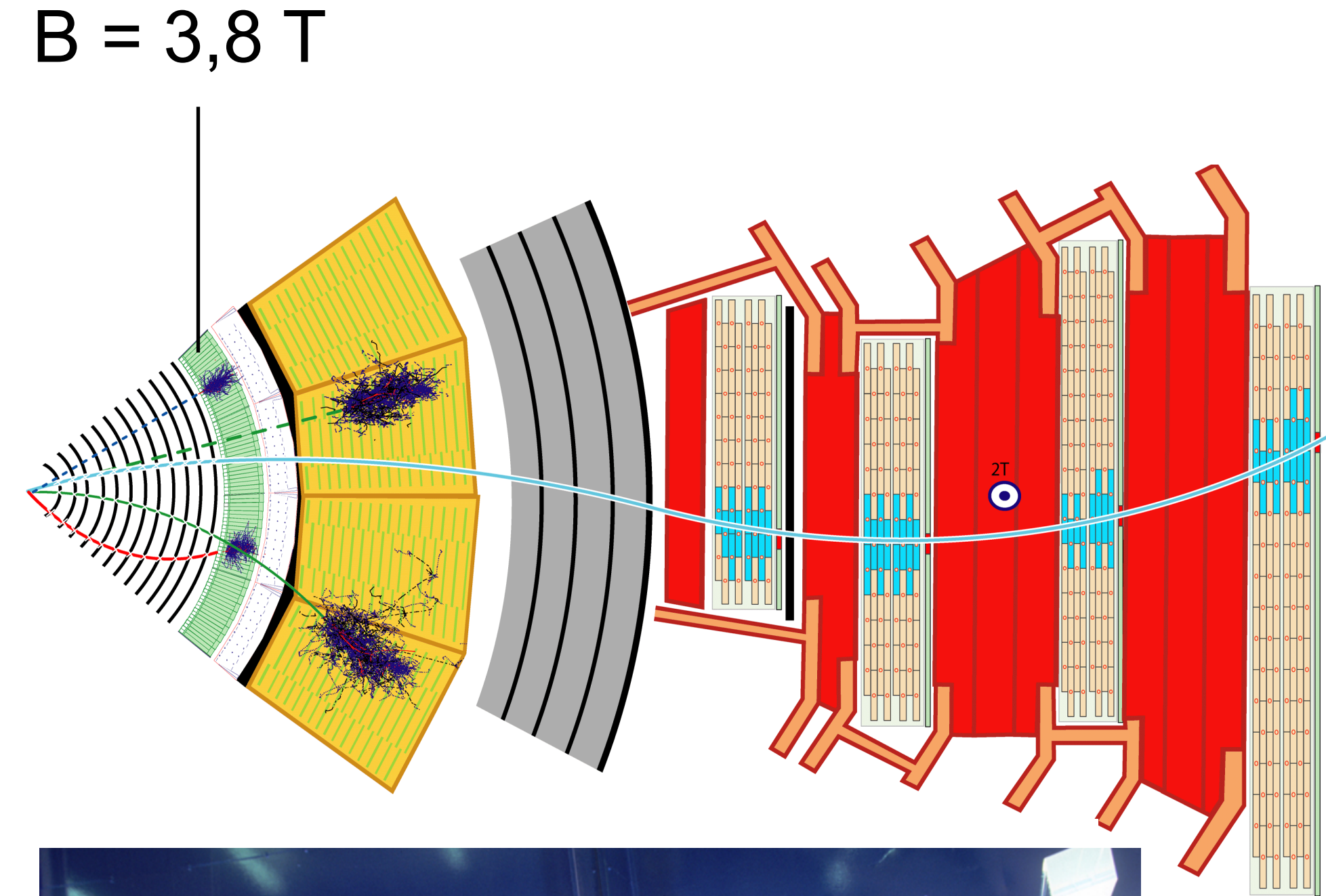
$$B = 3,8 \text{ T}$$



Q: CMS

Elektromagnetisches Kalorimeter

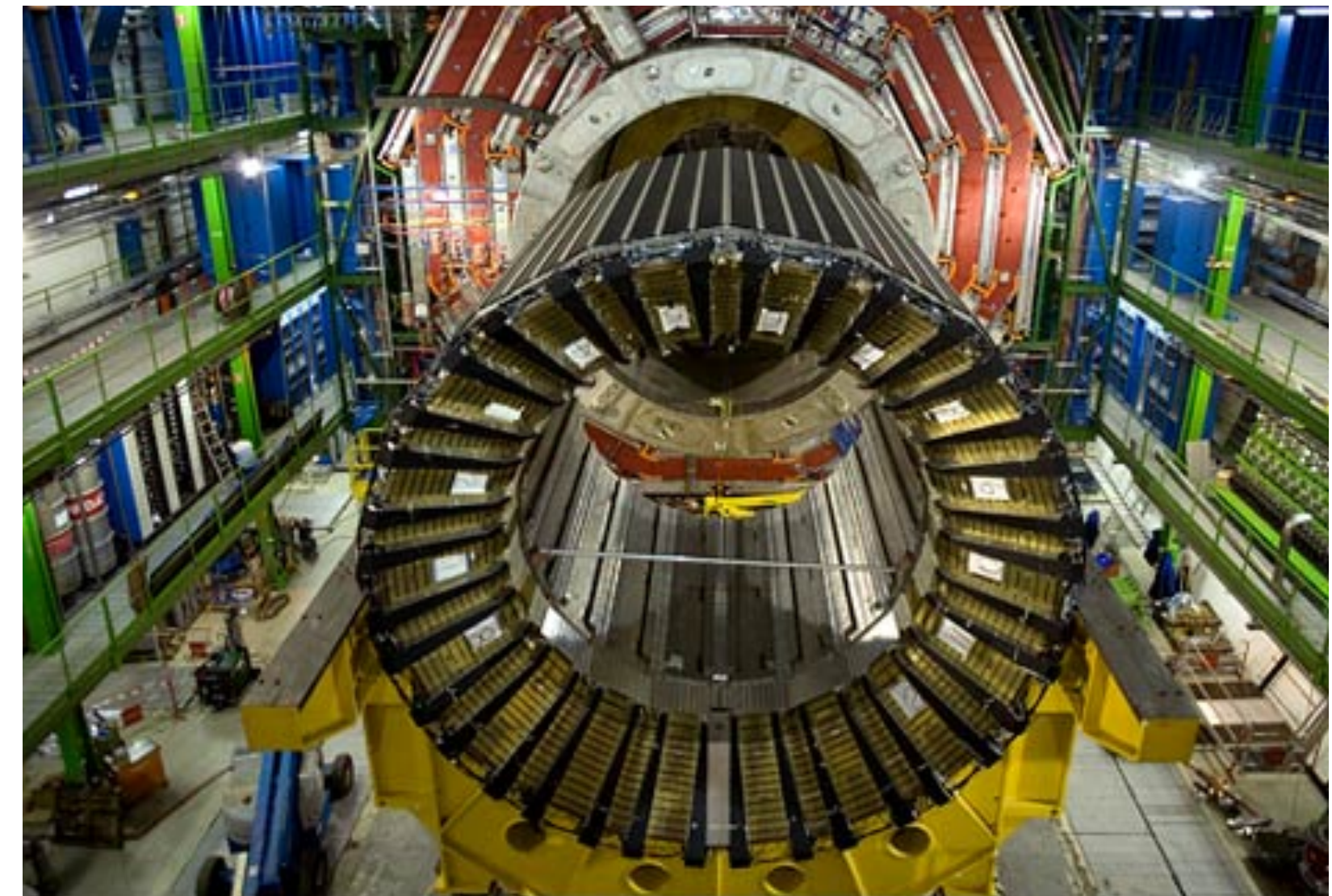
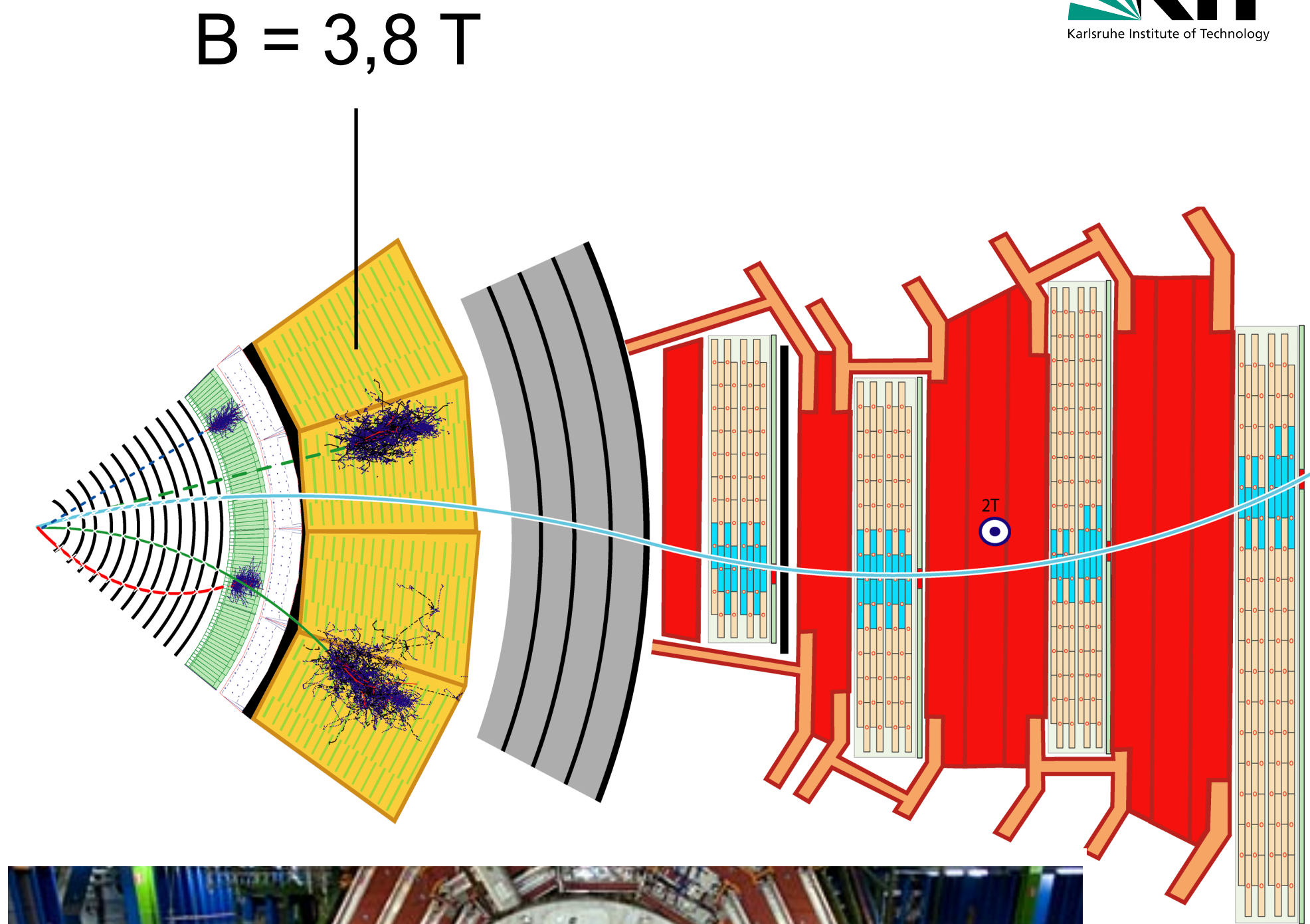
- **ECAL = electromagnetic calorimeter**
 - **Aufgabe:** Bestimmung der elektromagnetischen Energie eines Ereignisses
Teilchen-Identifikation: e^- , e^+ , γ , π^0
 - **Aufbau: kompaktes Kalorimeter** innerhalb des Solenoiden (von $r = 1,1 \text{ m} \dots 1,77 \text{ m}$) mit hoher Dichte $\rho = 8,3 \text{ g / cm}^3$
 - 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 $B = 3.8\text{ T}$

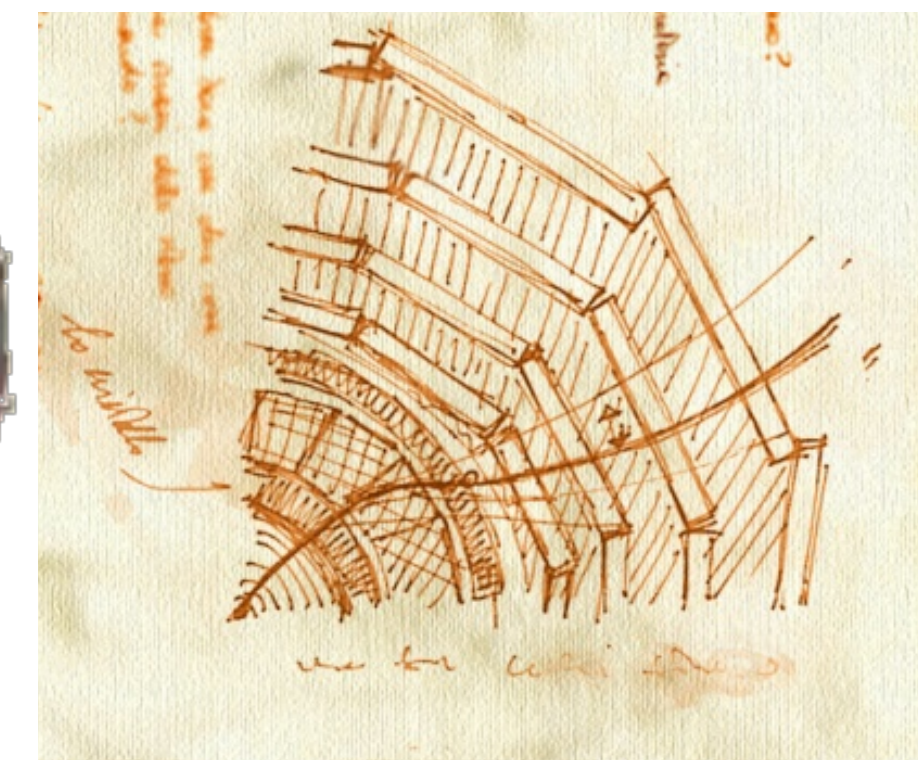
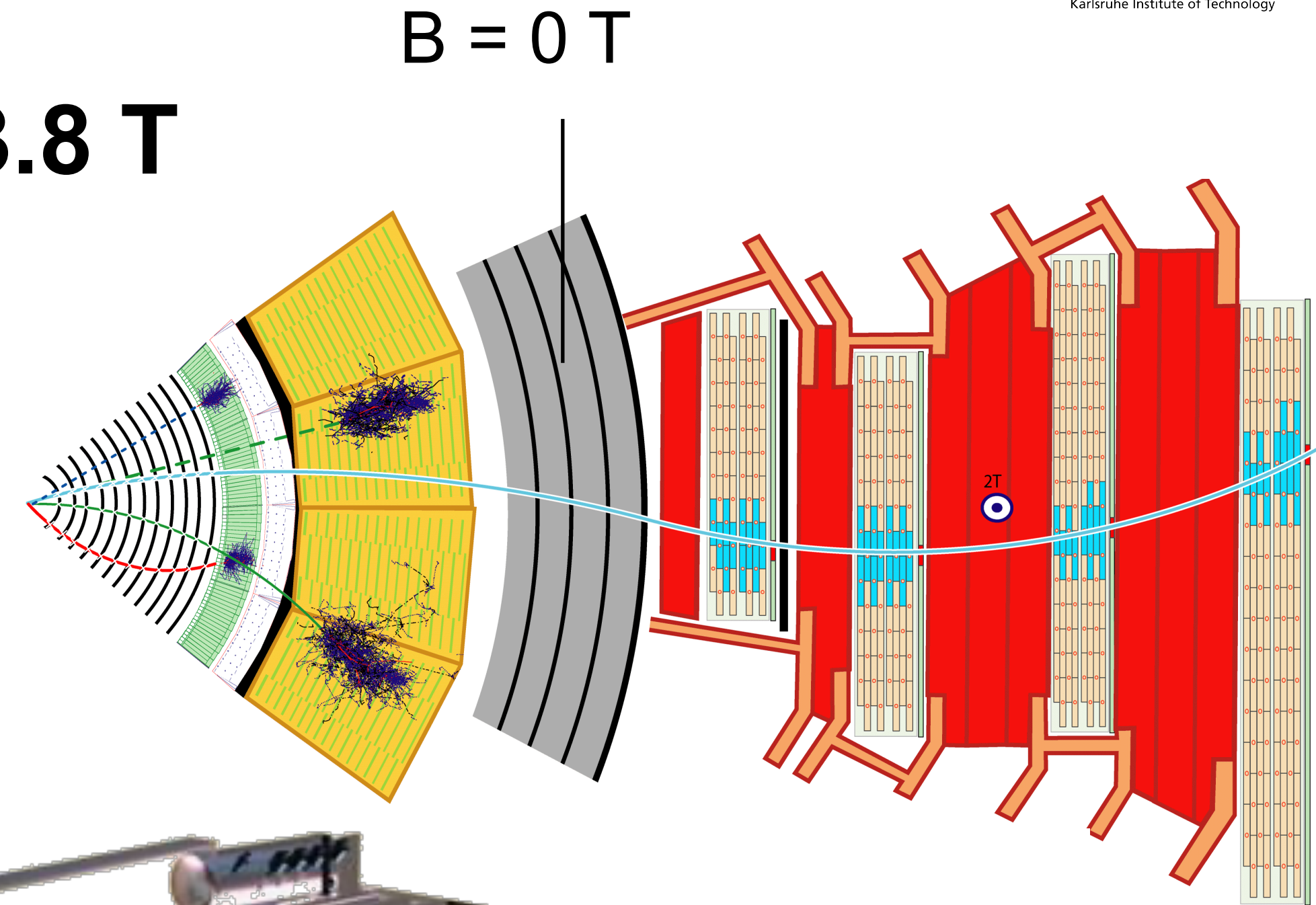
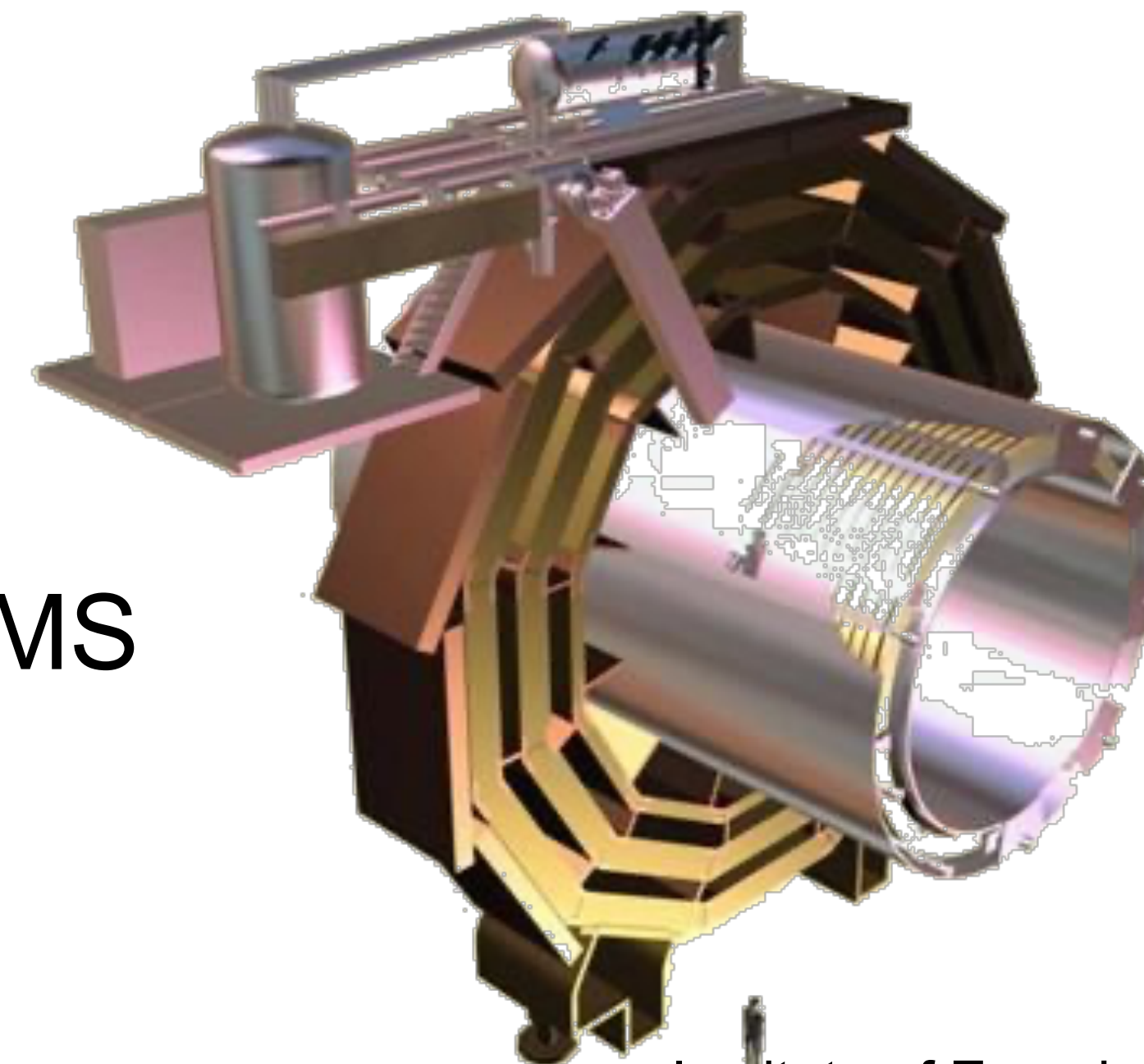
- **Aufgabe:** Erzeugung eines axialen B-Felds mit 4 T bei $I = 19,5\text{ kA}$ ($E_{\text{magn}} = 2,3\text{ GJ}$)

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

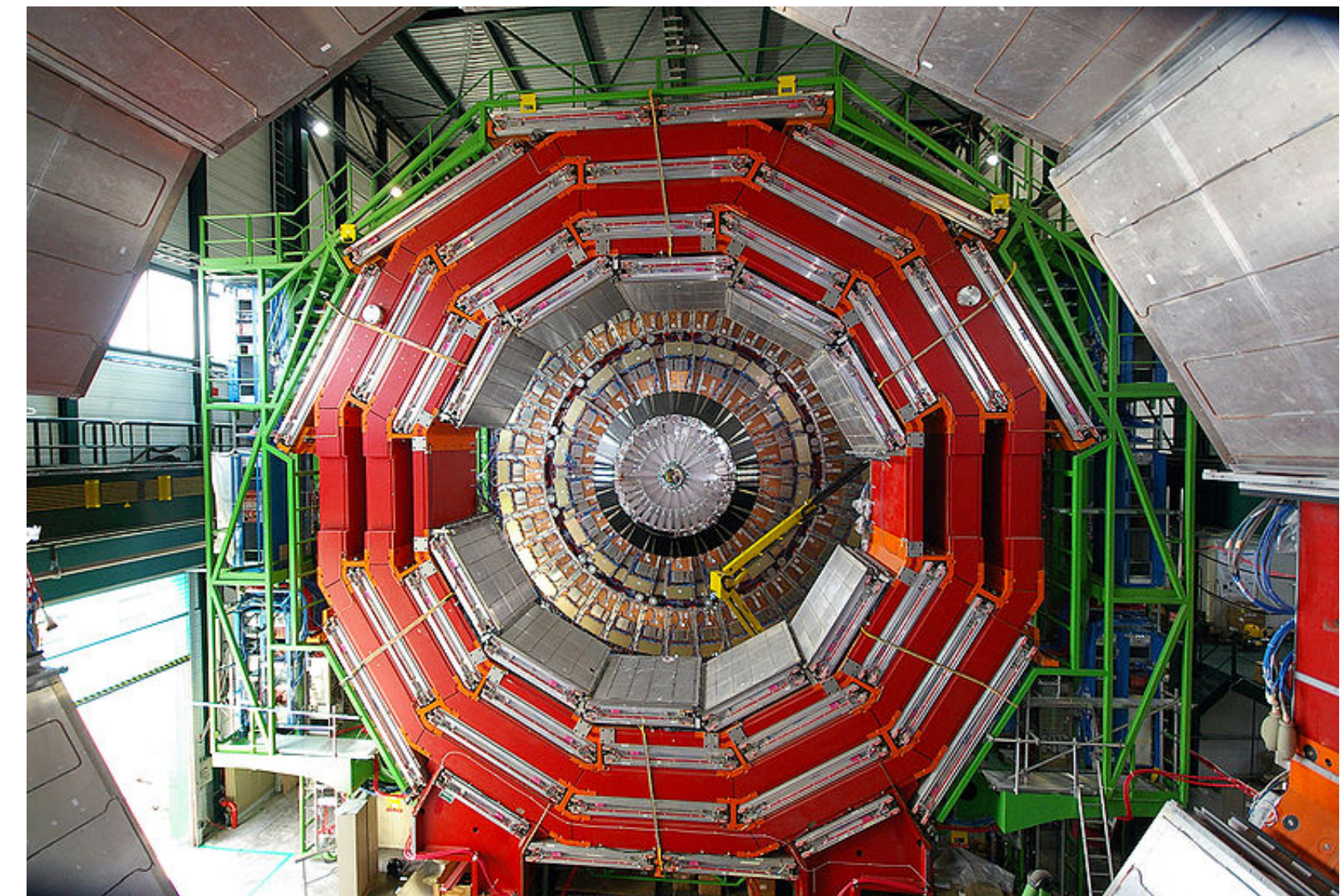
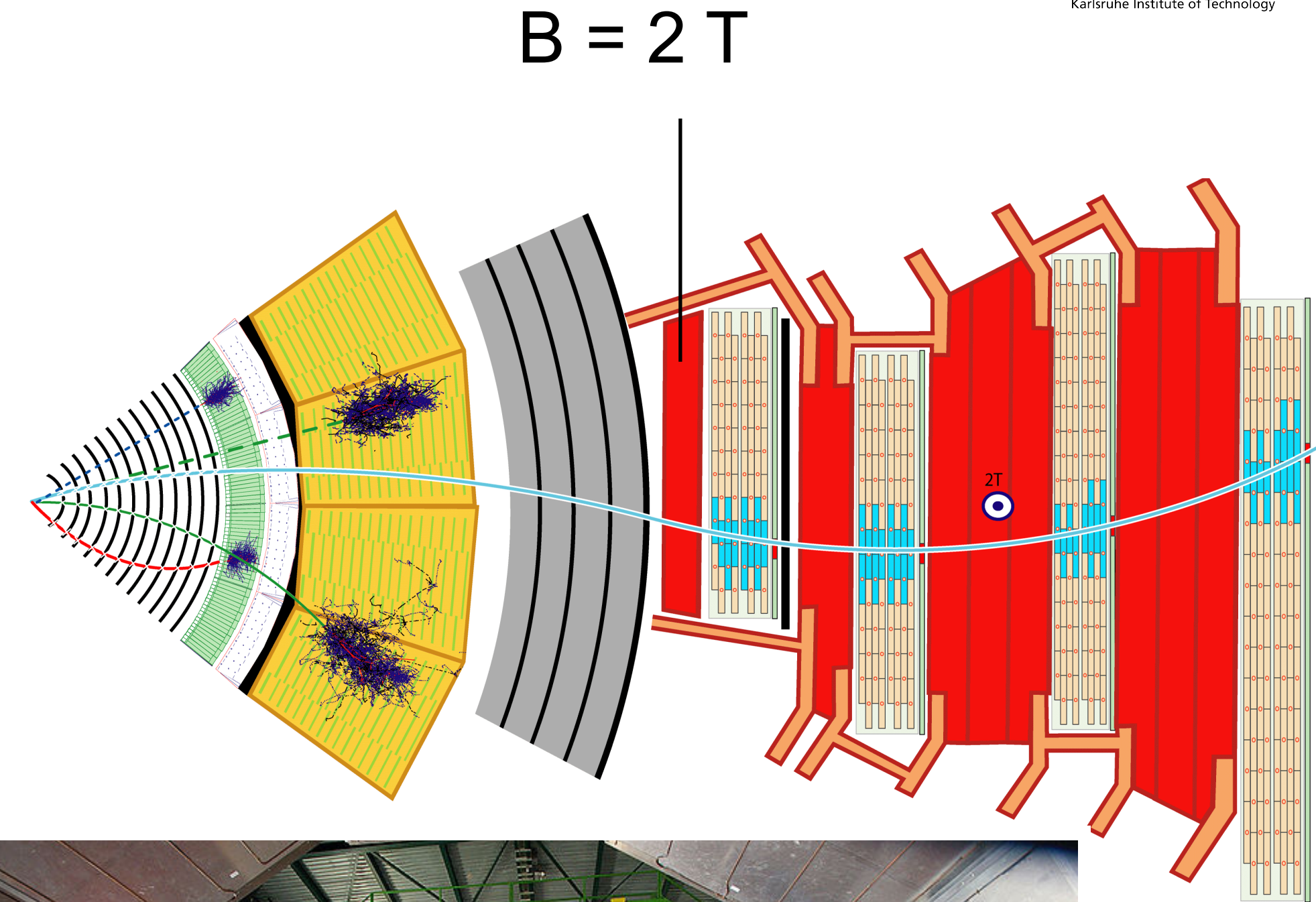
- Kombination: s-förmige μ -Spuren in CMS

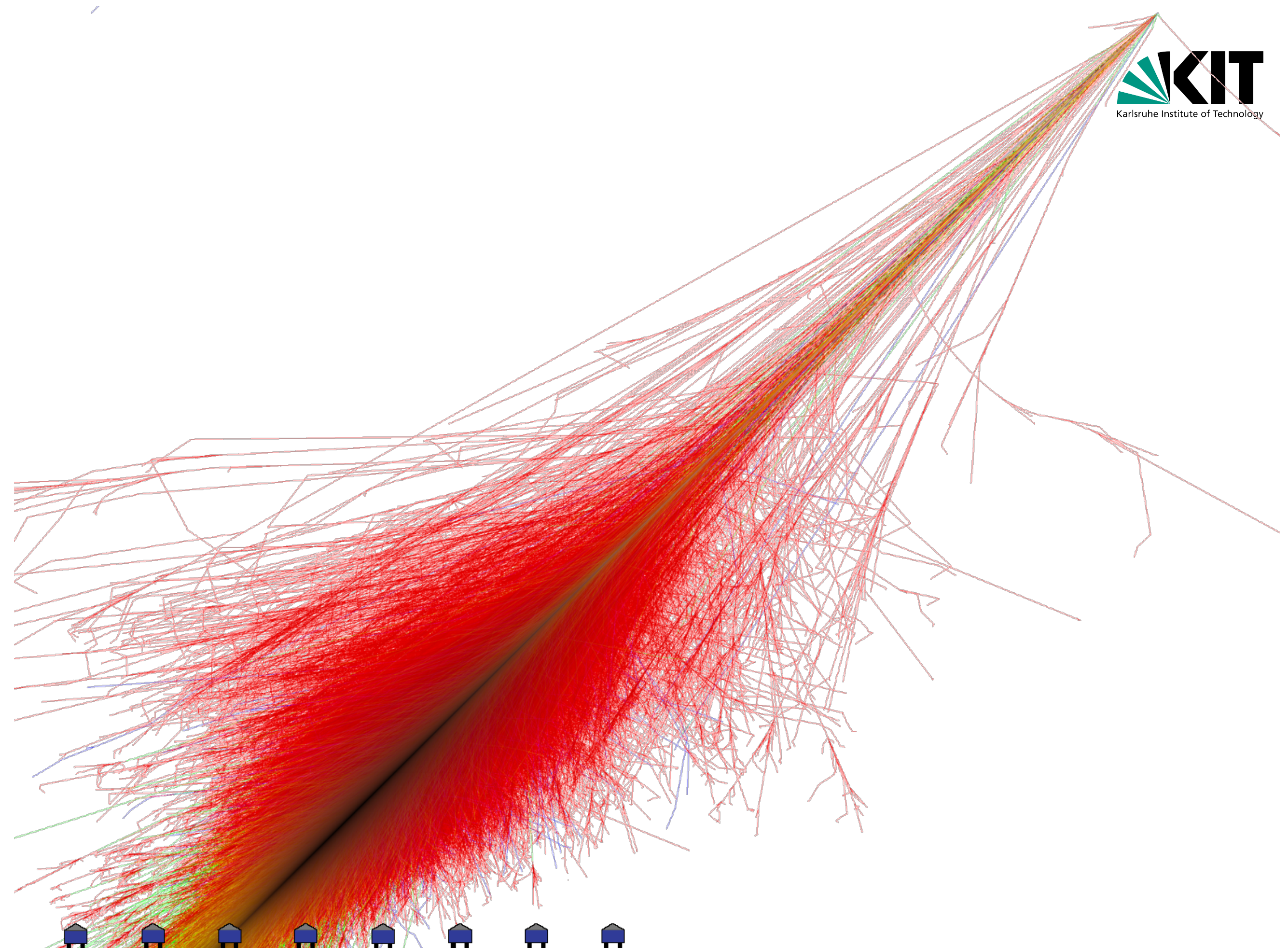
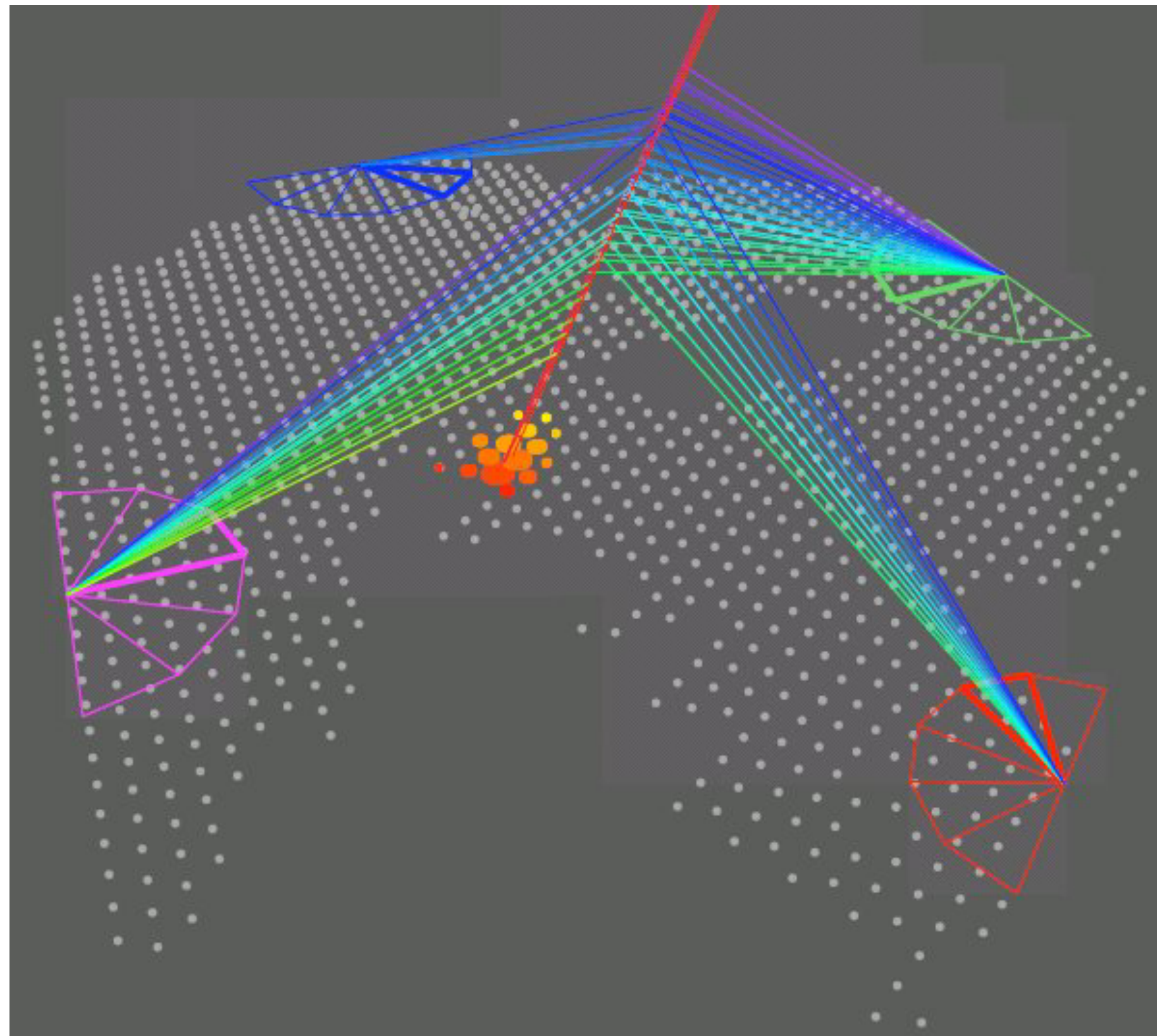


Myondetektor & Eisenjoch

- **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



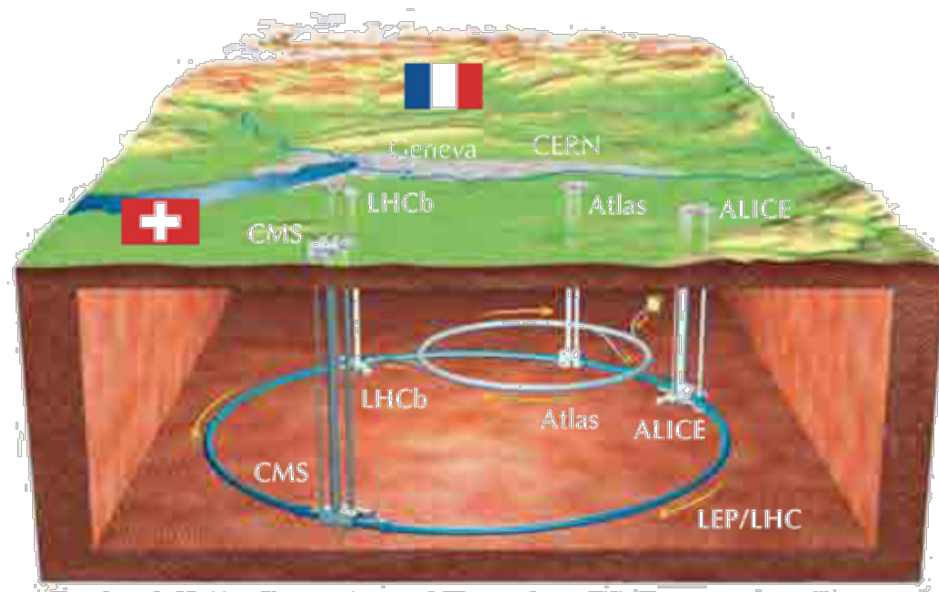


EINSCHUB: LUFTSCHAUER IN DER ATMOSPHÄRE

Q: PAO

Energiemessung durch Schauer

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



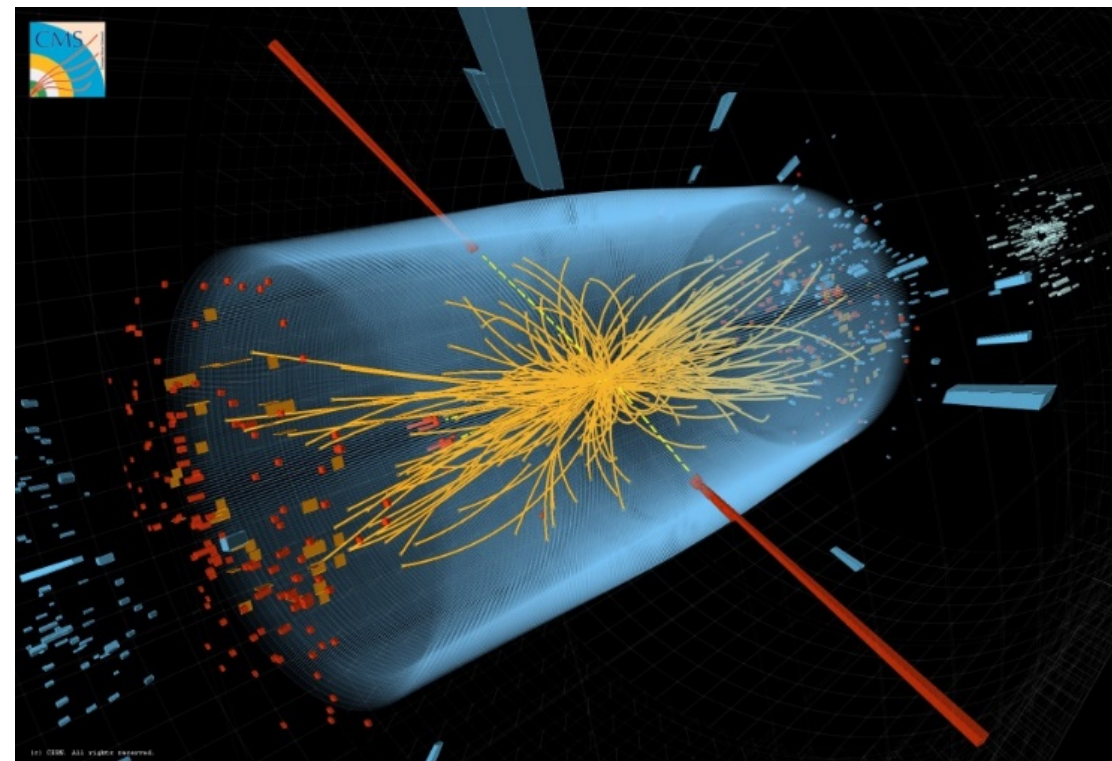
- **Beschleuniger:**
Protonen bis
7 TeV (exakt
bekannte Teilchen)

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



- Abdeckung in
 4π -Geometrie

ECAL und HCAL

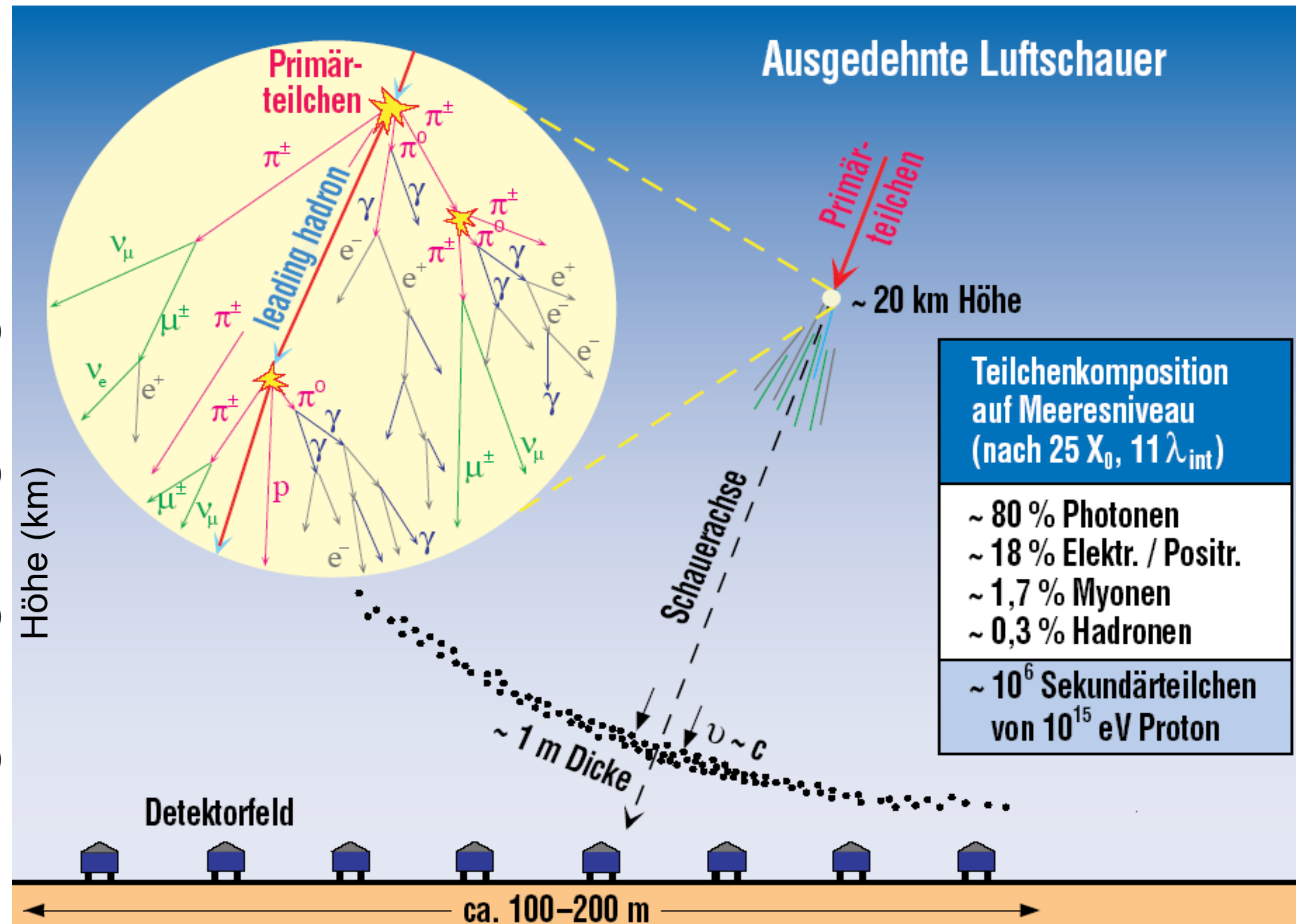
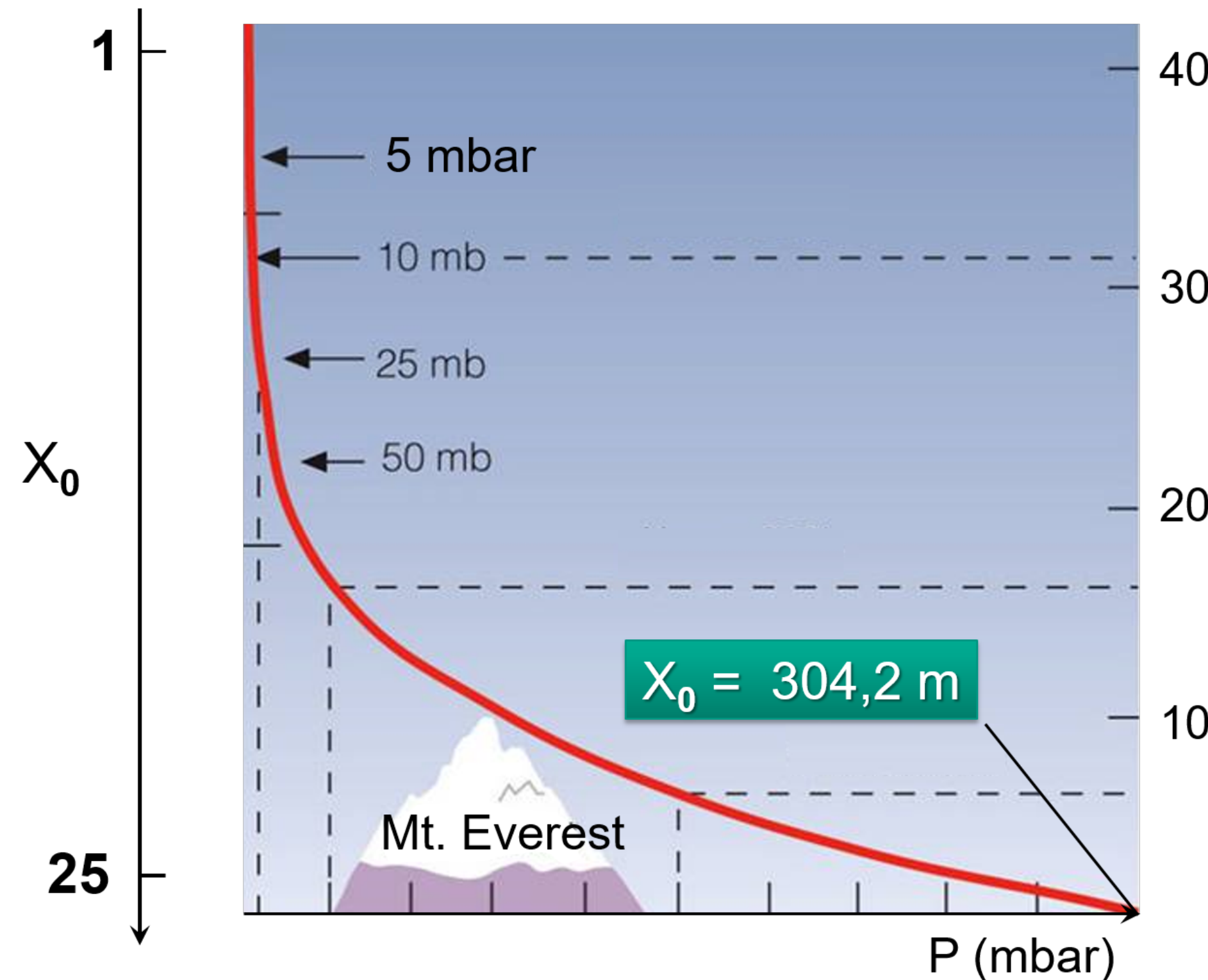


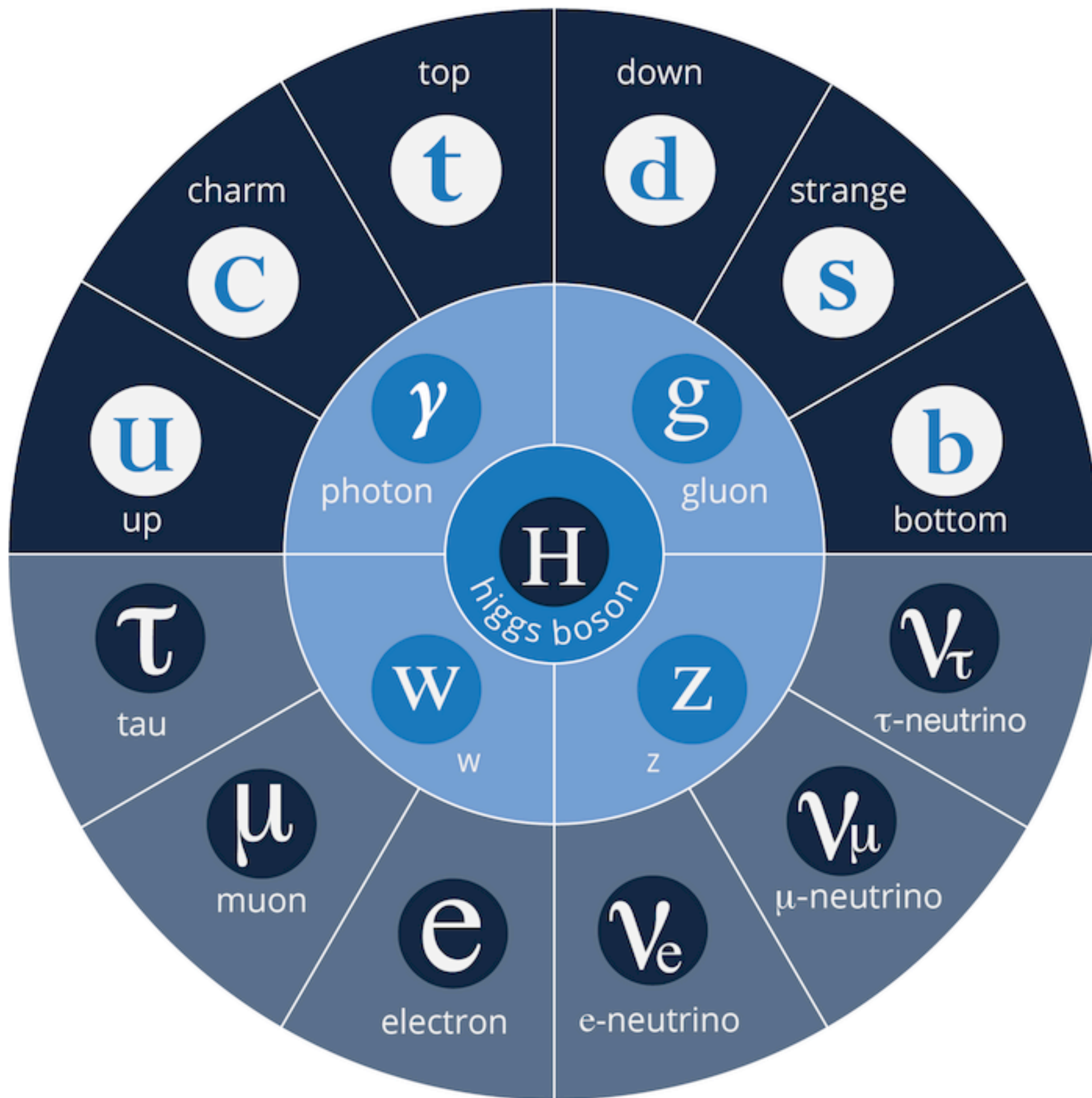
- Abdeckung nur
in enger
Vorwärtsrichtung

Luftschauer in Atmosphäre



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





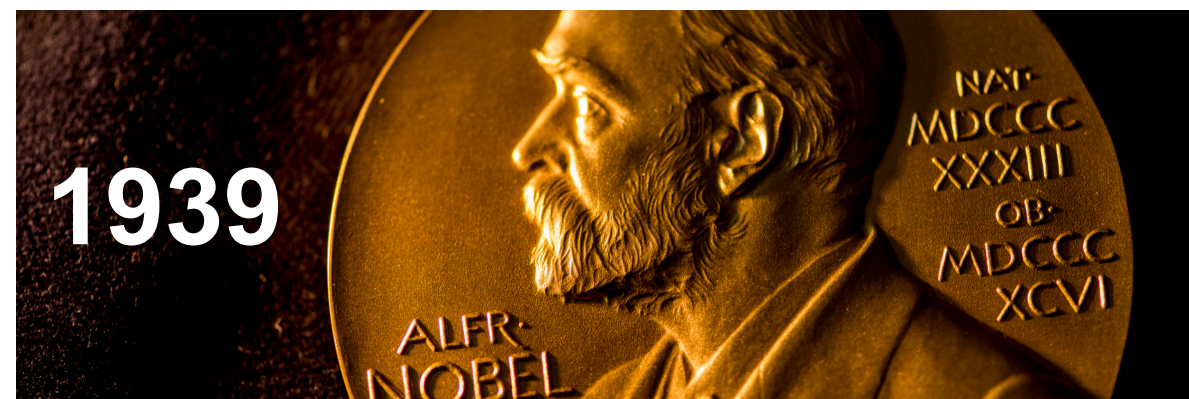
■ 2. Experimentelle Methoden

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

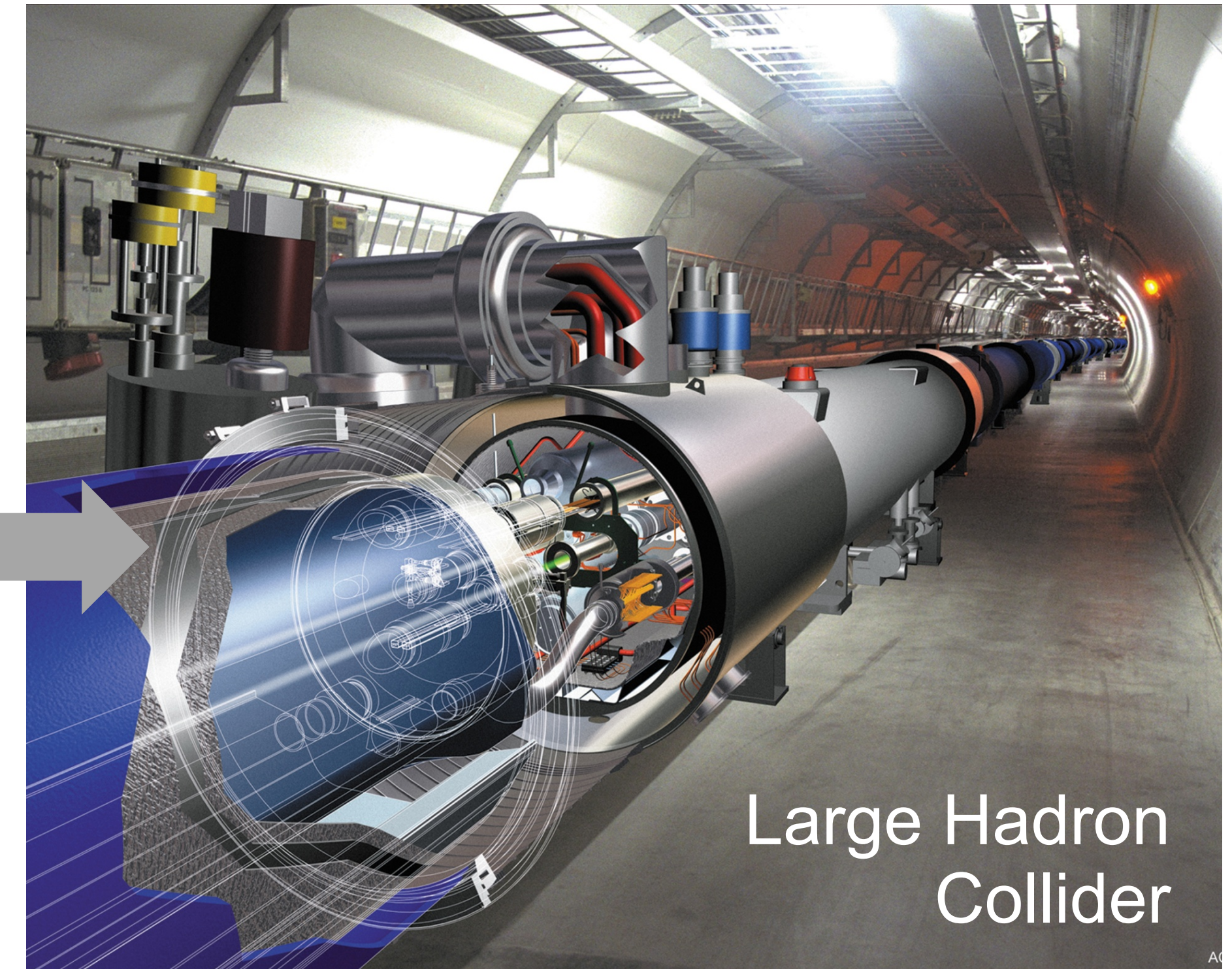
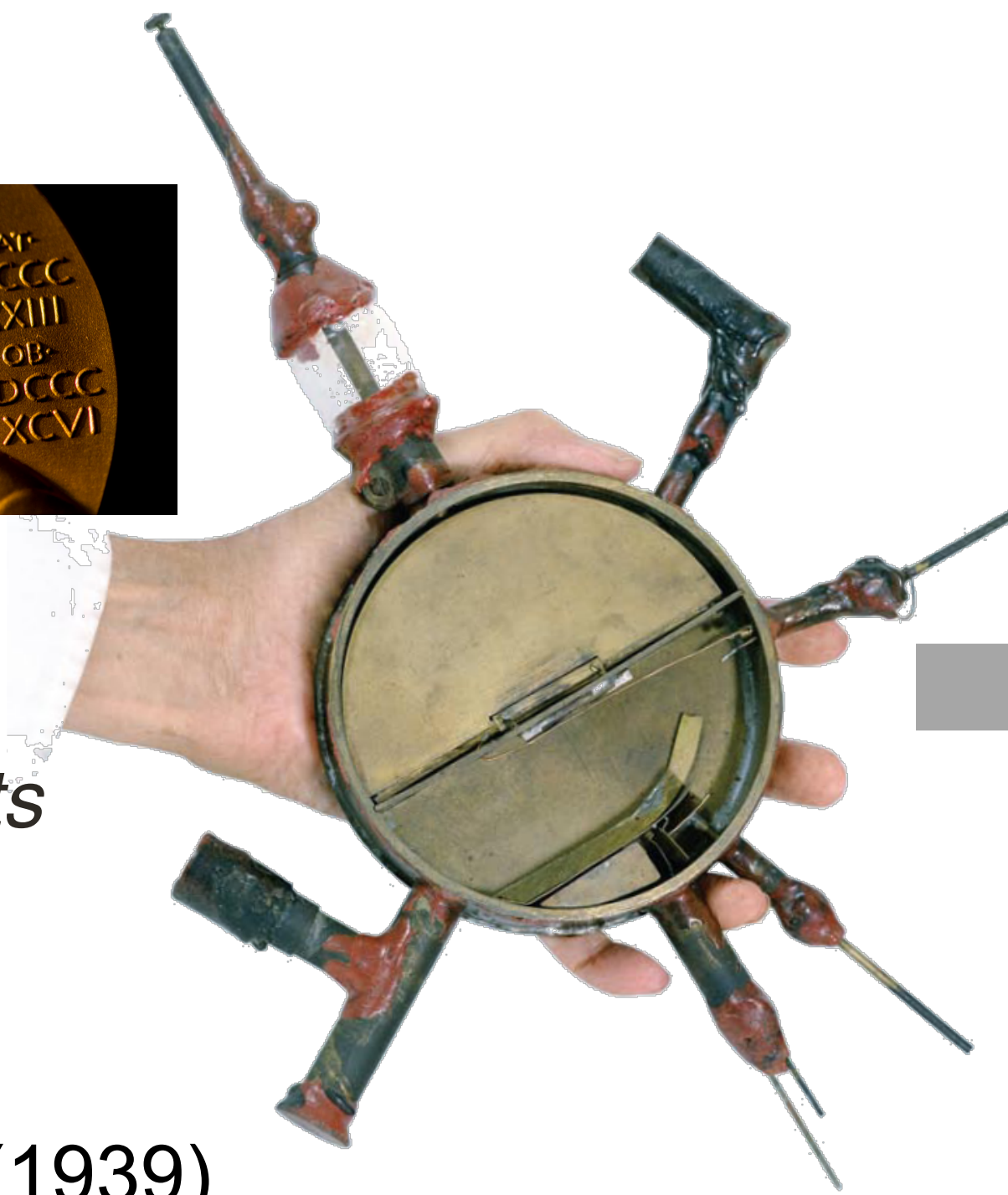
Beschleuniger – Historie

- **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 $E_p = 6,8 \text{ TeV}$



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

■ 19.01.2024 (Freitag), 15:45 Uhr, Lehmann Hörsaal

Prof. Dr. Matthias Fuchs

Laser-Plasma Accelerators: Particle Acceleration in a Nutshell

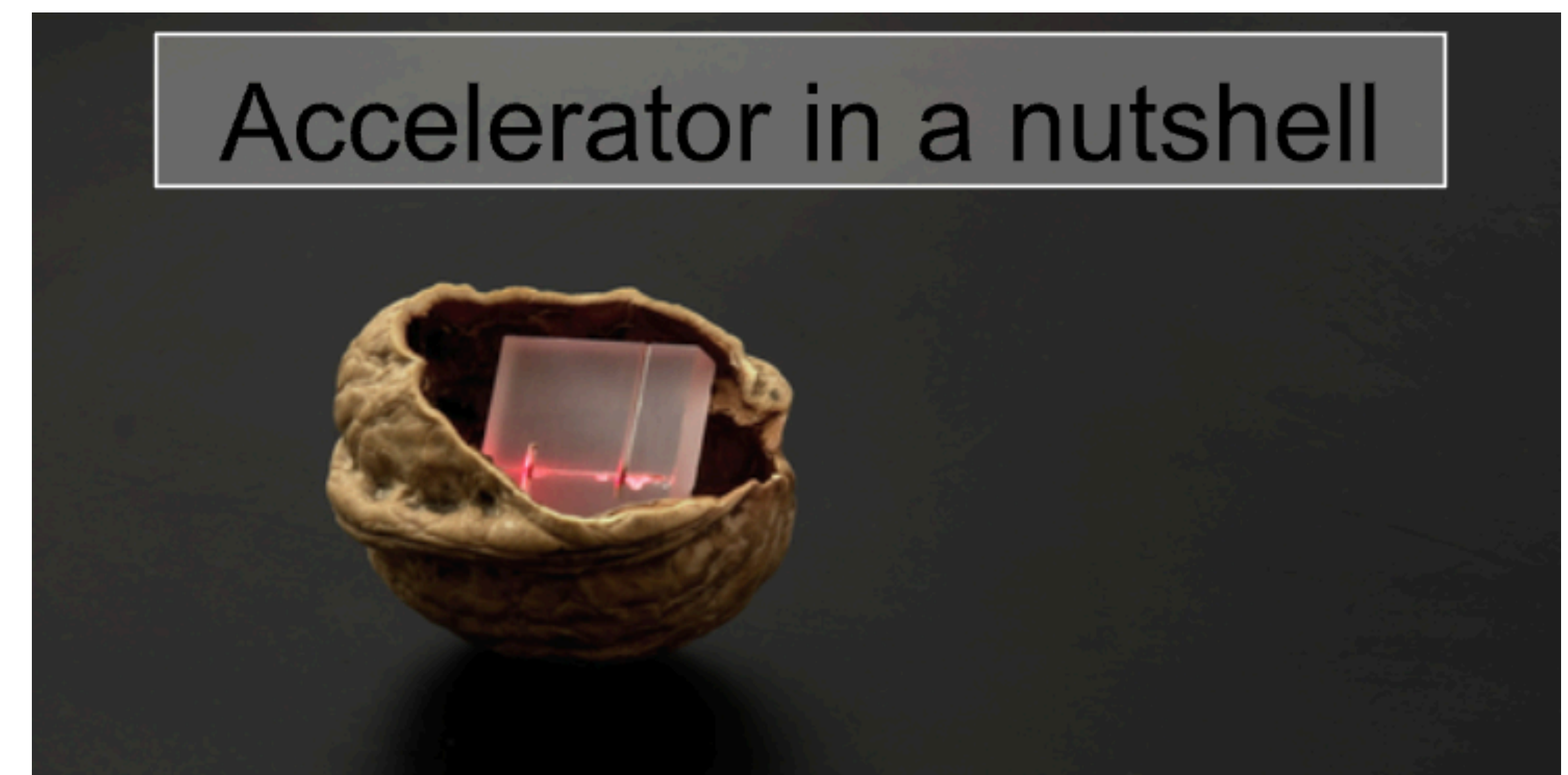
High-power lasers, relativistic electron beams, ultrashort X-ray pulses, plasma accelerators ... Oh My!

In this talk I will discuss laser-plasma accelerators – a novel technology that has the potential to become the next generation of particle accelerators.

Particle accelerators are key drivers for research and innovation and while mostly hidden from view, they have enabled many scientific discoveries and technological breakthroughs that have changed our way of life. However, they are often costly and high-energy machines are kilometer-scale facilities of which only a few exist worldwide.

Laser-plasma acceleration (LPA) can shrink the cost and dimension of accelerators by nearly three orders of magnitude compared to current technology. In LPAs, an ultrashort high-power laser is focused into a plasma, where it generates a plasma wave in its wake. Electrons can be injected into this plasma wave and are accelerated by its massive electric field to relativistic energies over a distance of only a few millimeters to centimeters.

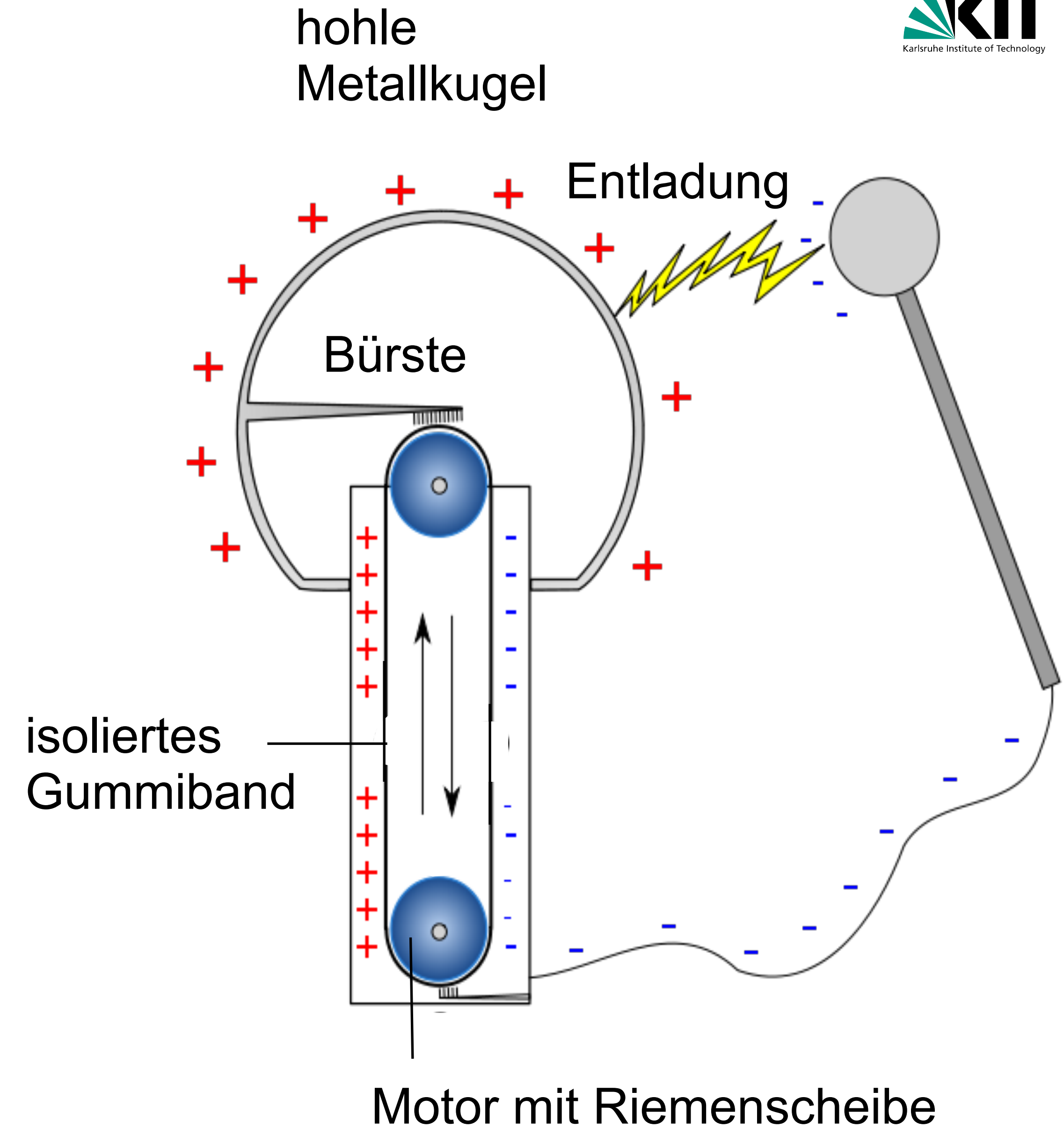
I will present an overview of the field of laser-plasma acceleration and its current state-of-the art, introduce some applications of LPAs, including compact X-ray sources, and give an outlook over future developments.





Elektrostatische Generatoren

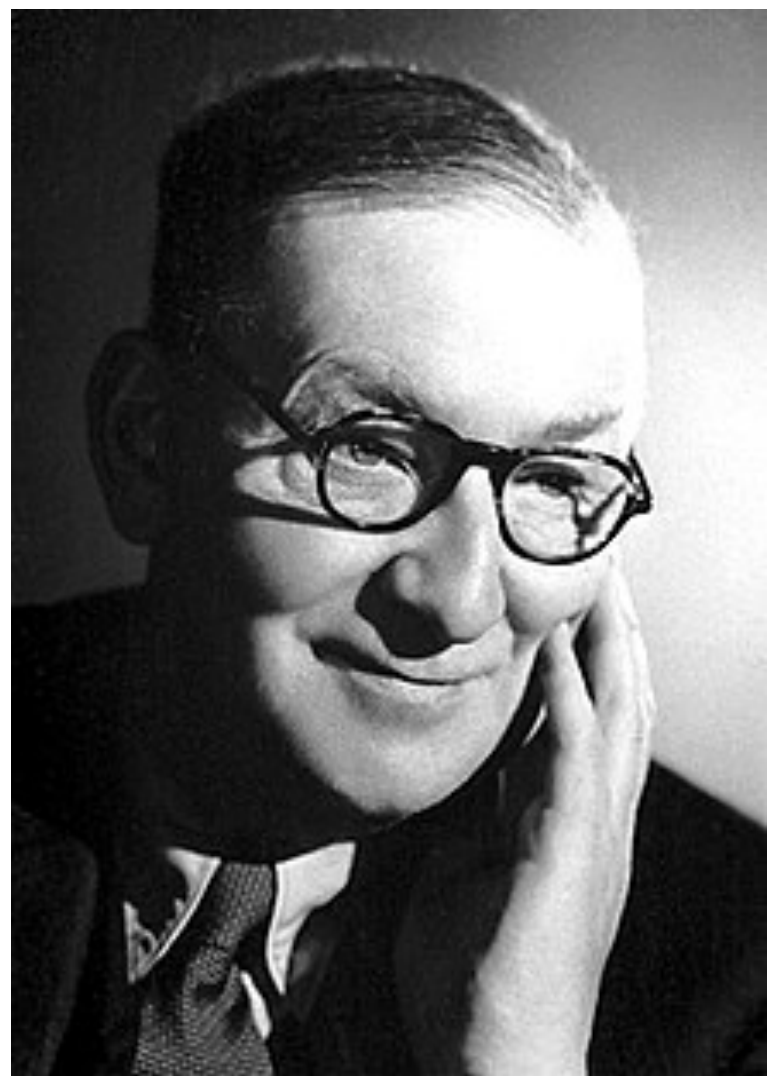
- **Van-de-Graaf- (Band-) Generator**
 - Elektrostatisches Prinzip
 - Aufladung des Bandes durch Reibung oder Aufsprühen:
mechanischer Transport von Q
 - Bürste „streift“ Ladungen ab & überträgt sie auf Metallkugel
 - Kugelinneres = Faraday'scher Käfig
Ladungen an Kugelaußenfläche, ab
 $\sim 12 \text{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



Elektrostatische Generatoren

- **Cockcroft-Walton - Generator**

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



J. Cockcroft

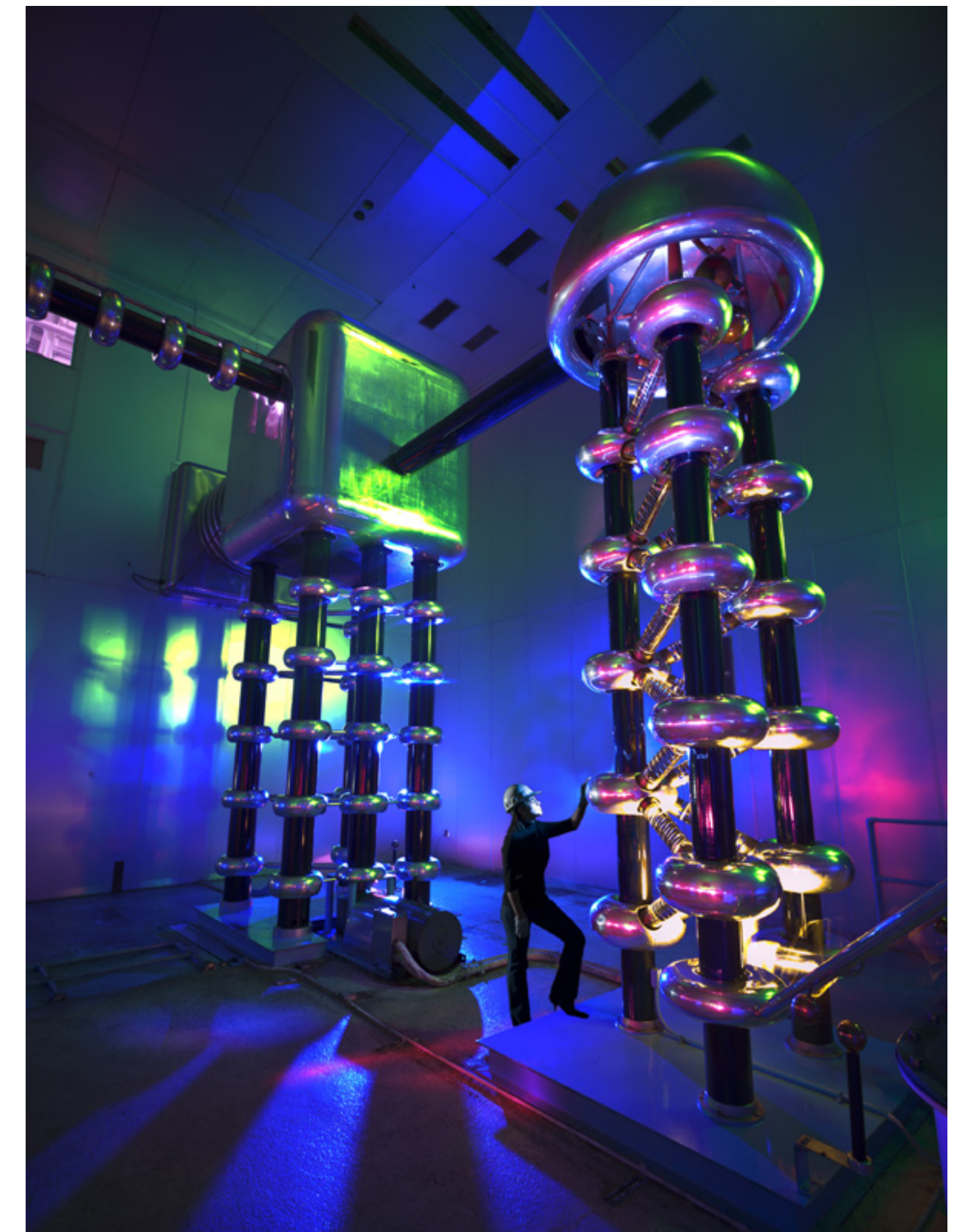


E. Walton



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

Q: Fermilab

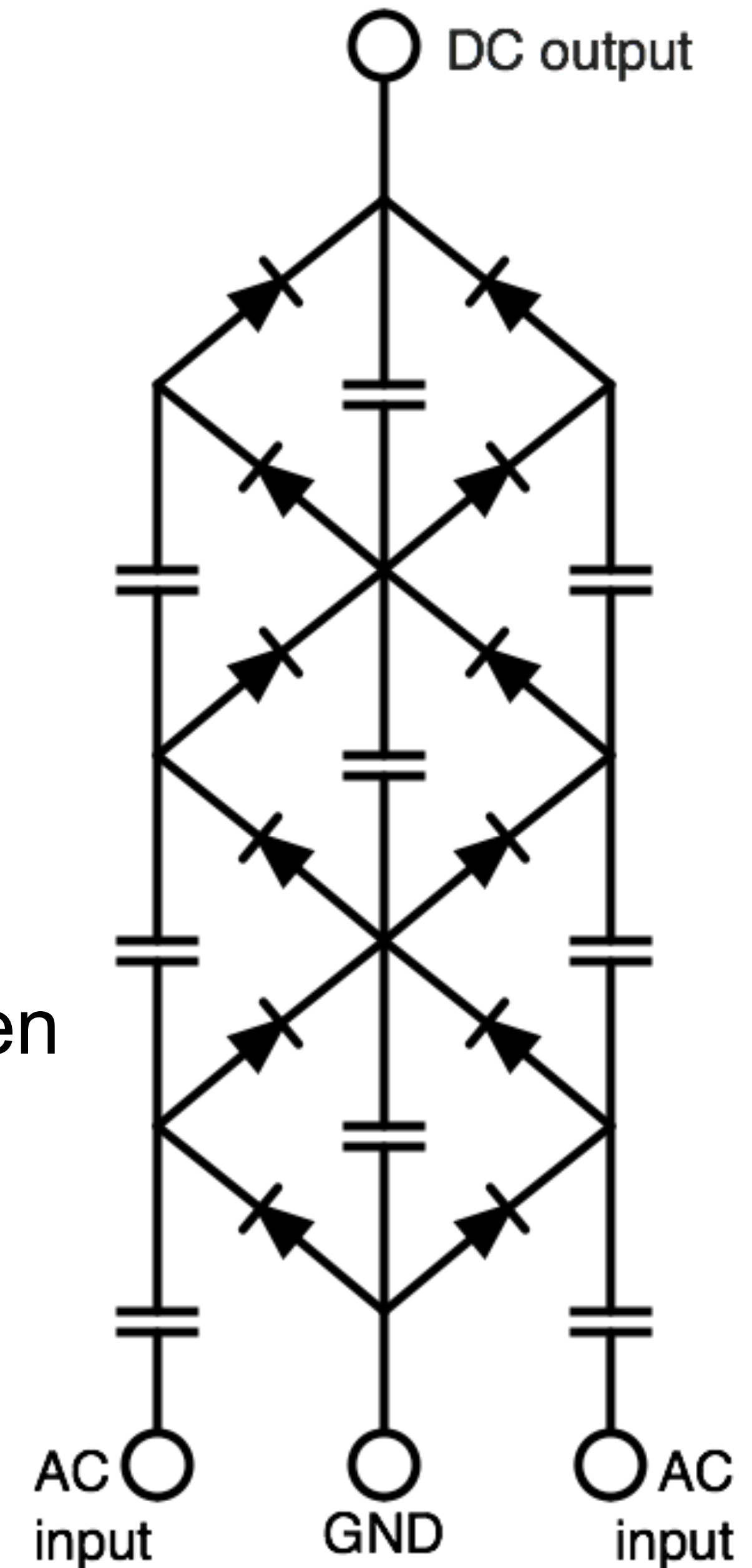
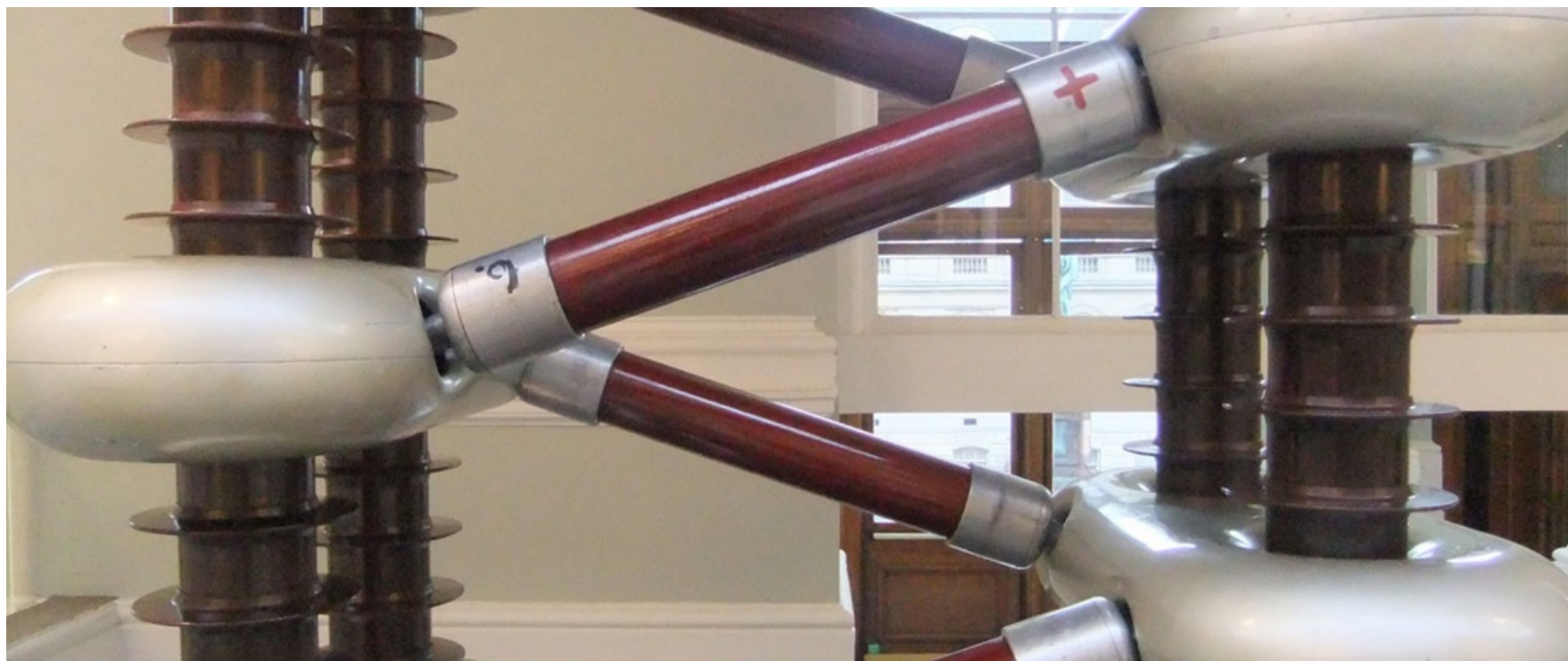


früherer CW am Fermilab

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

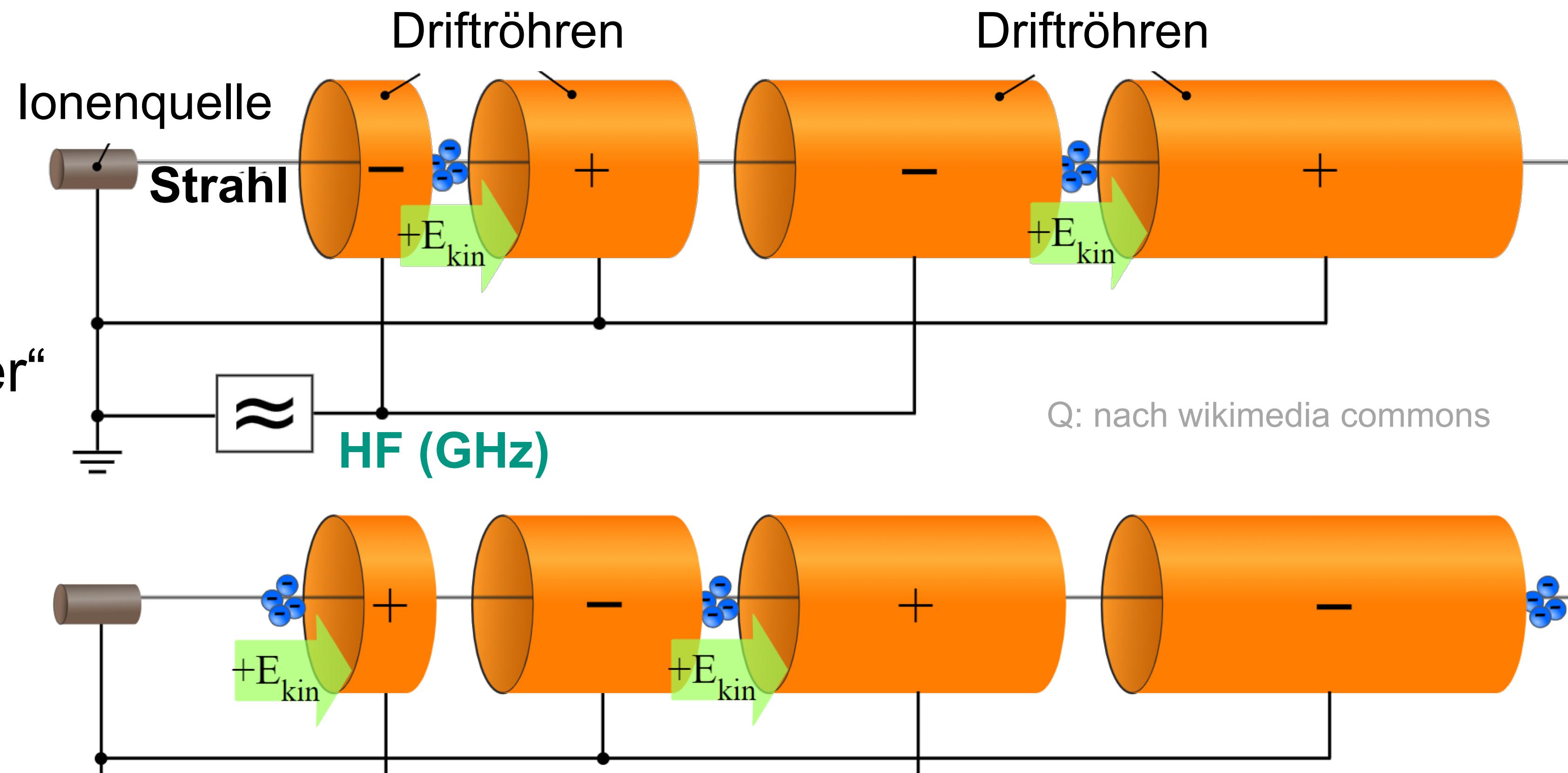


Q: wikipedia

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)

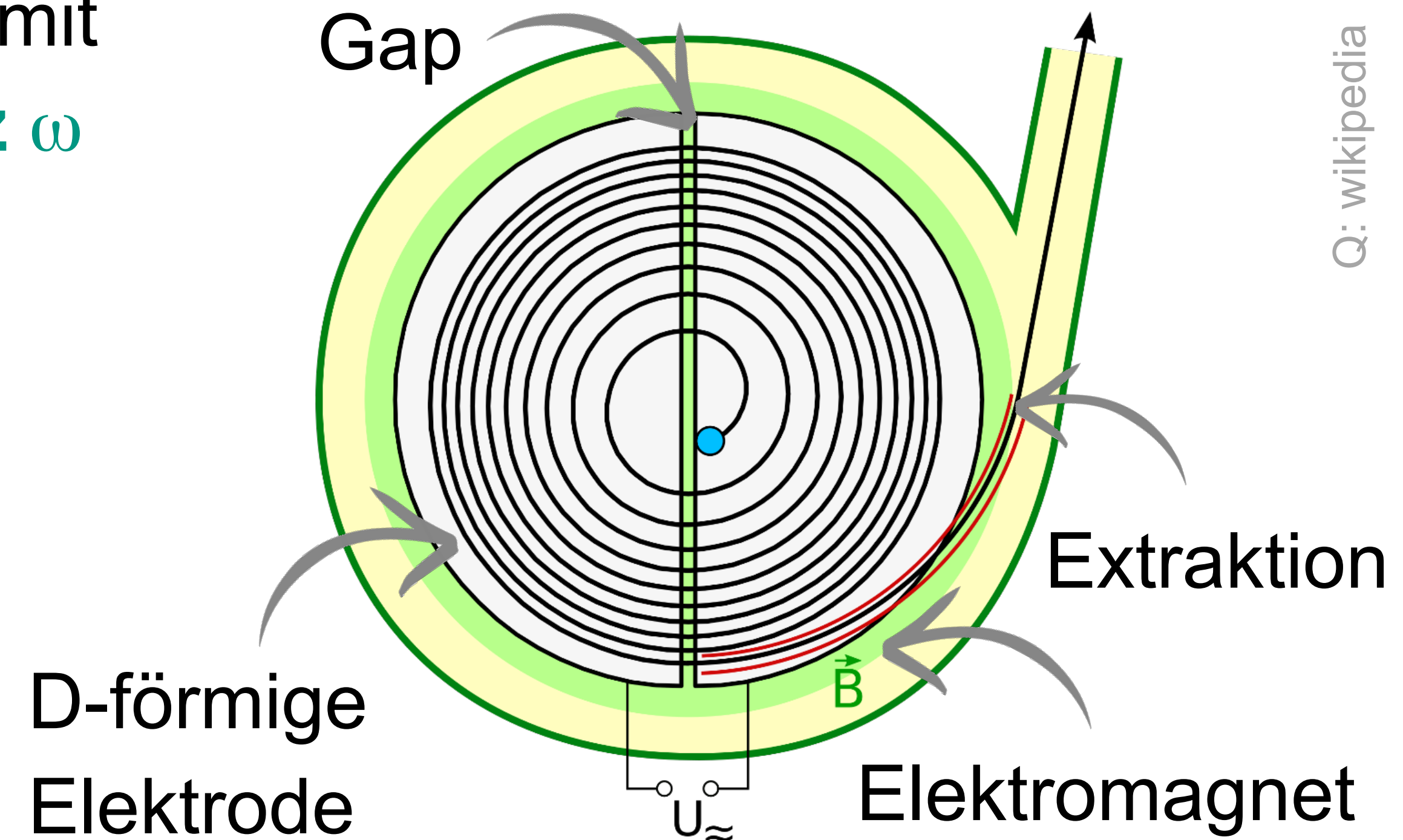
Amplitude & Frequenz: U (10-1000 kV) mit
fester Zyklotron-Frequenz ω



Ernest O. Lawrence

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

ω unabhängig von
Radius r, Impuls m·v

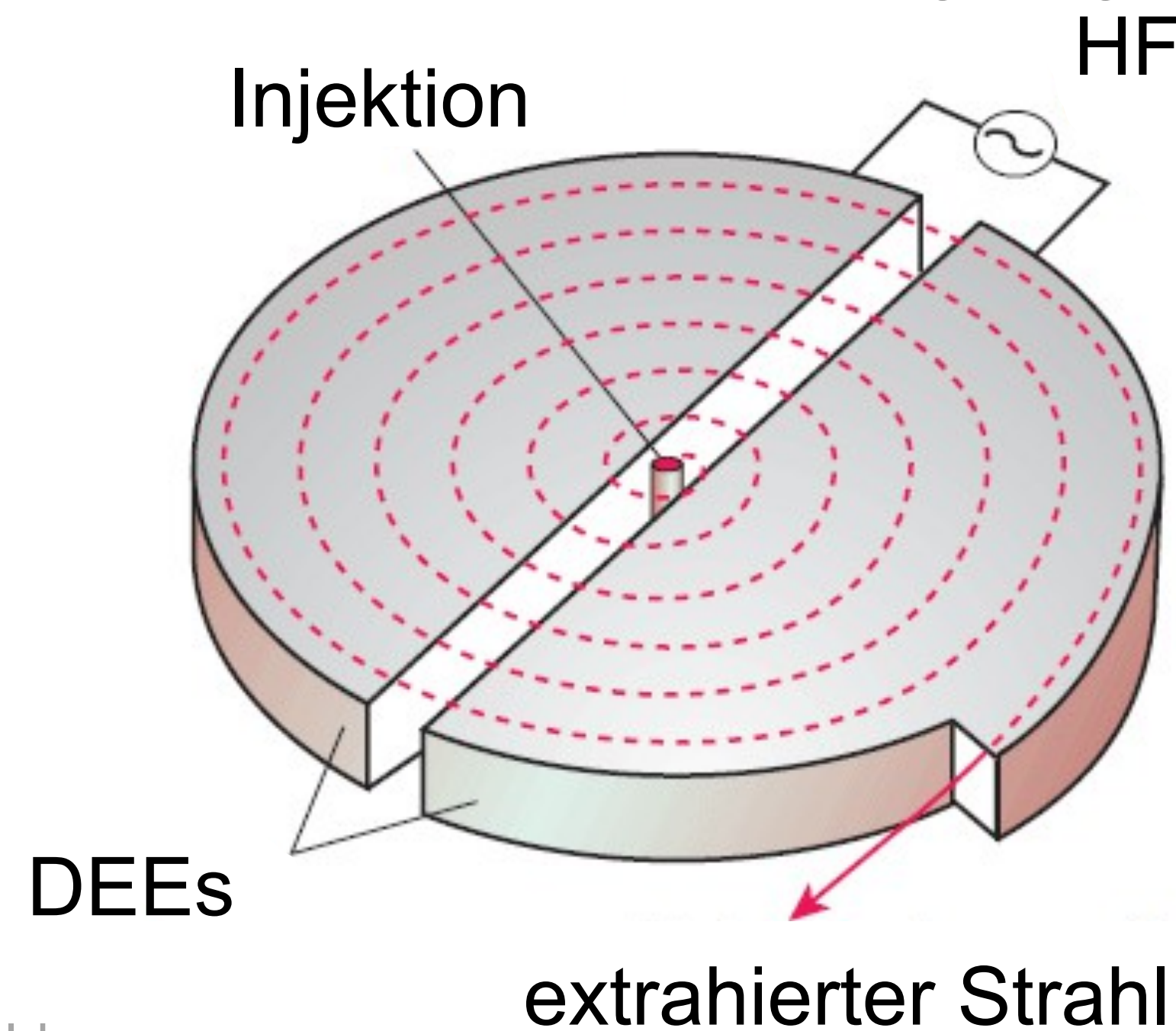


Q: wikipedia

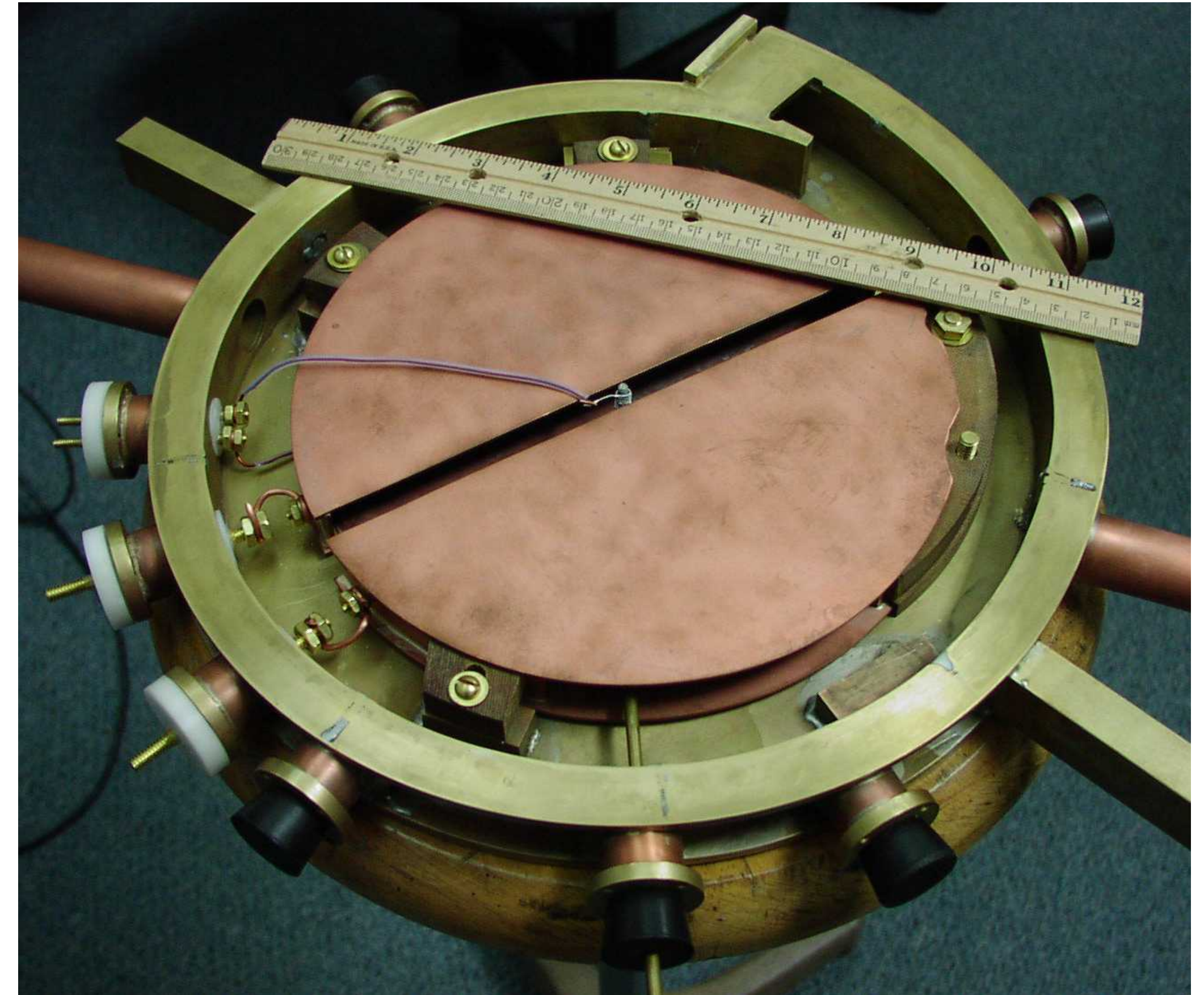
Zyklotron – Anwachsen des Radius limitiert Größe

- **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**

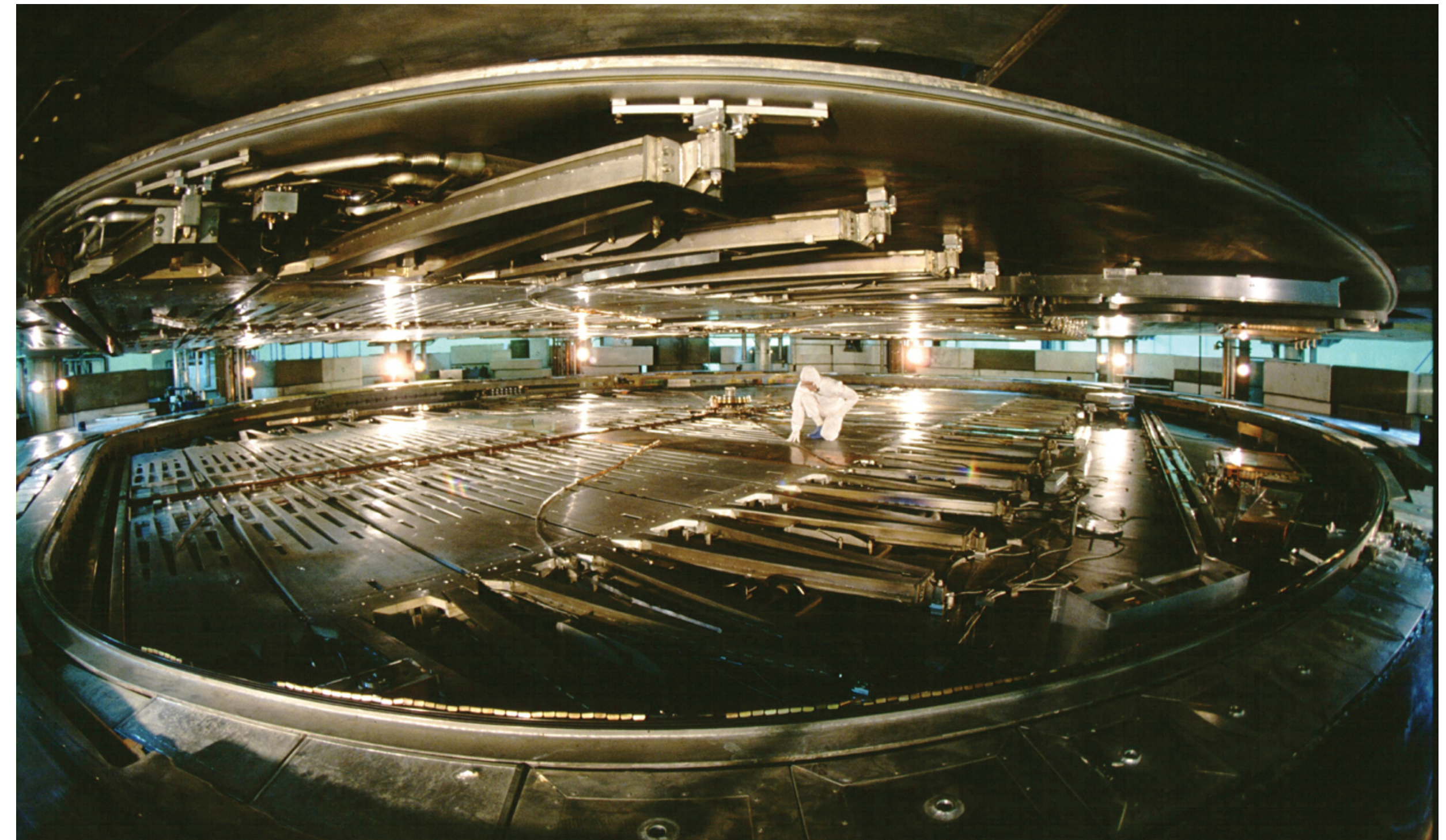
- relativistische Massenzunahme limitiert bei Protonen in einem Zyklotron Energie $E_{\max} < 20 \text{ MeV}$

- **Synchrozyklotron:**
variable Frequenz ω

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

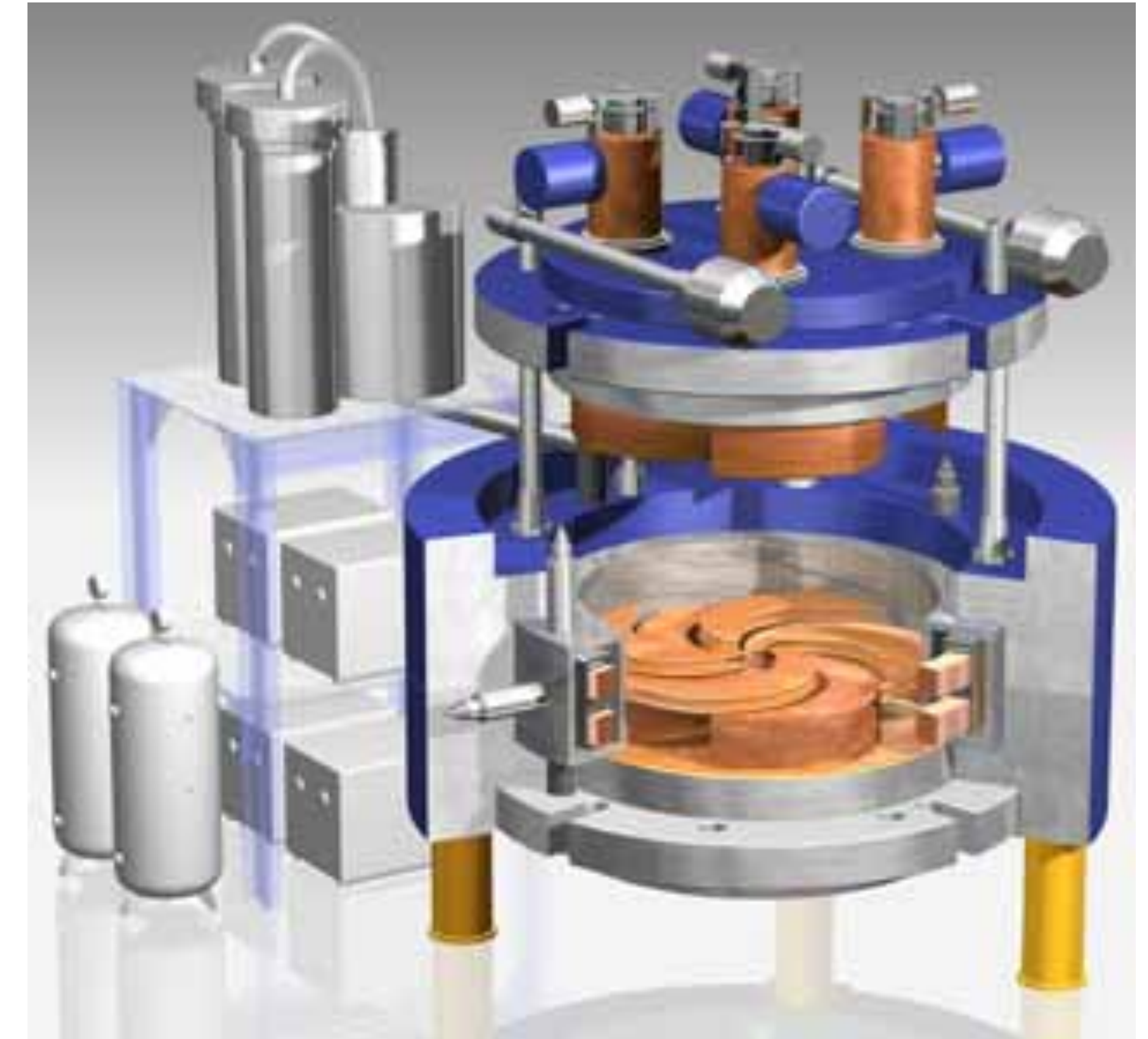
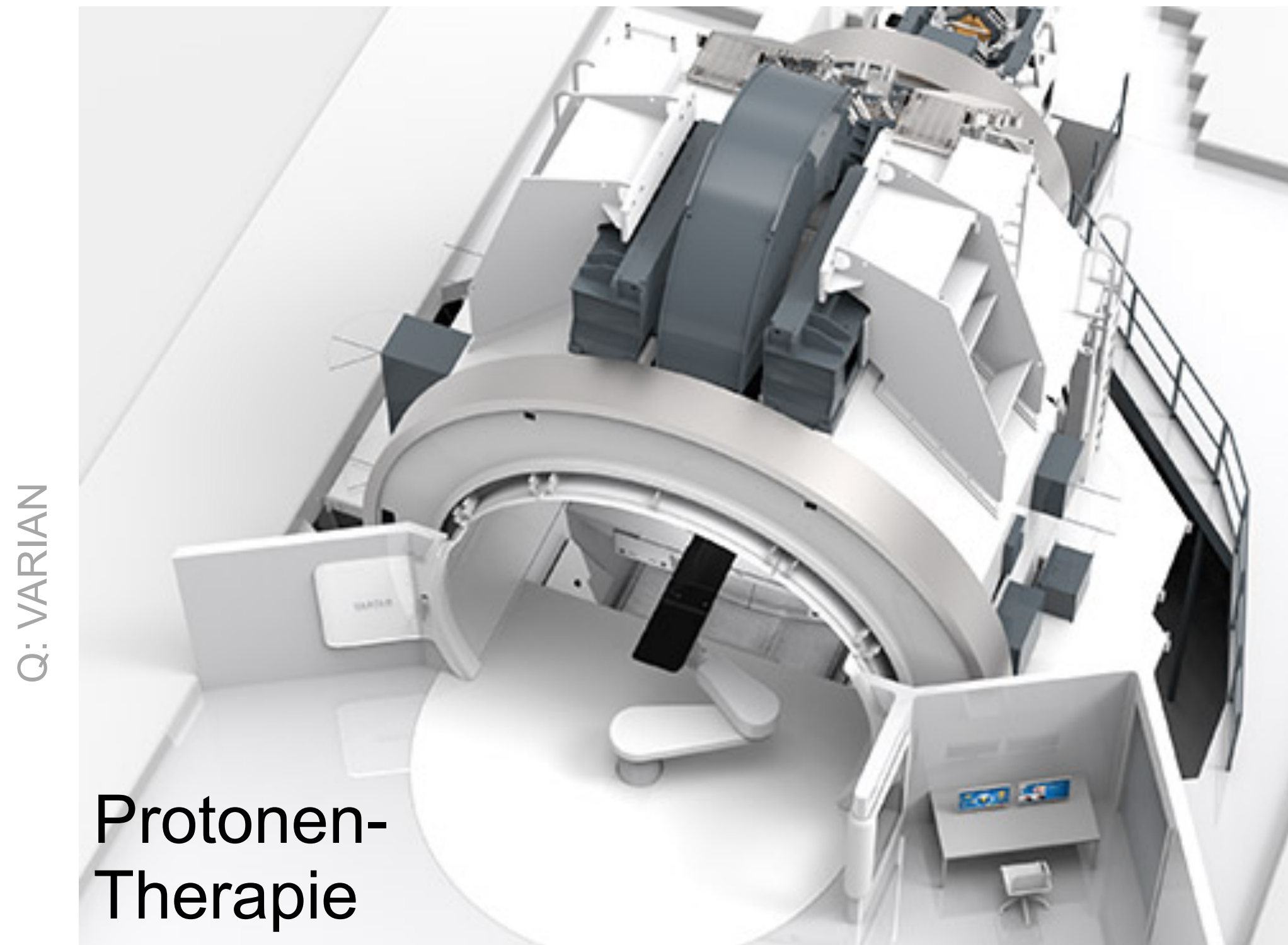
relativistische
Masse

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



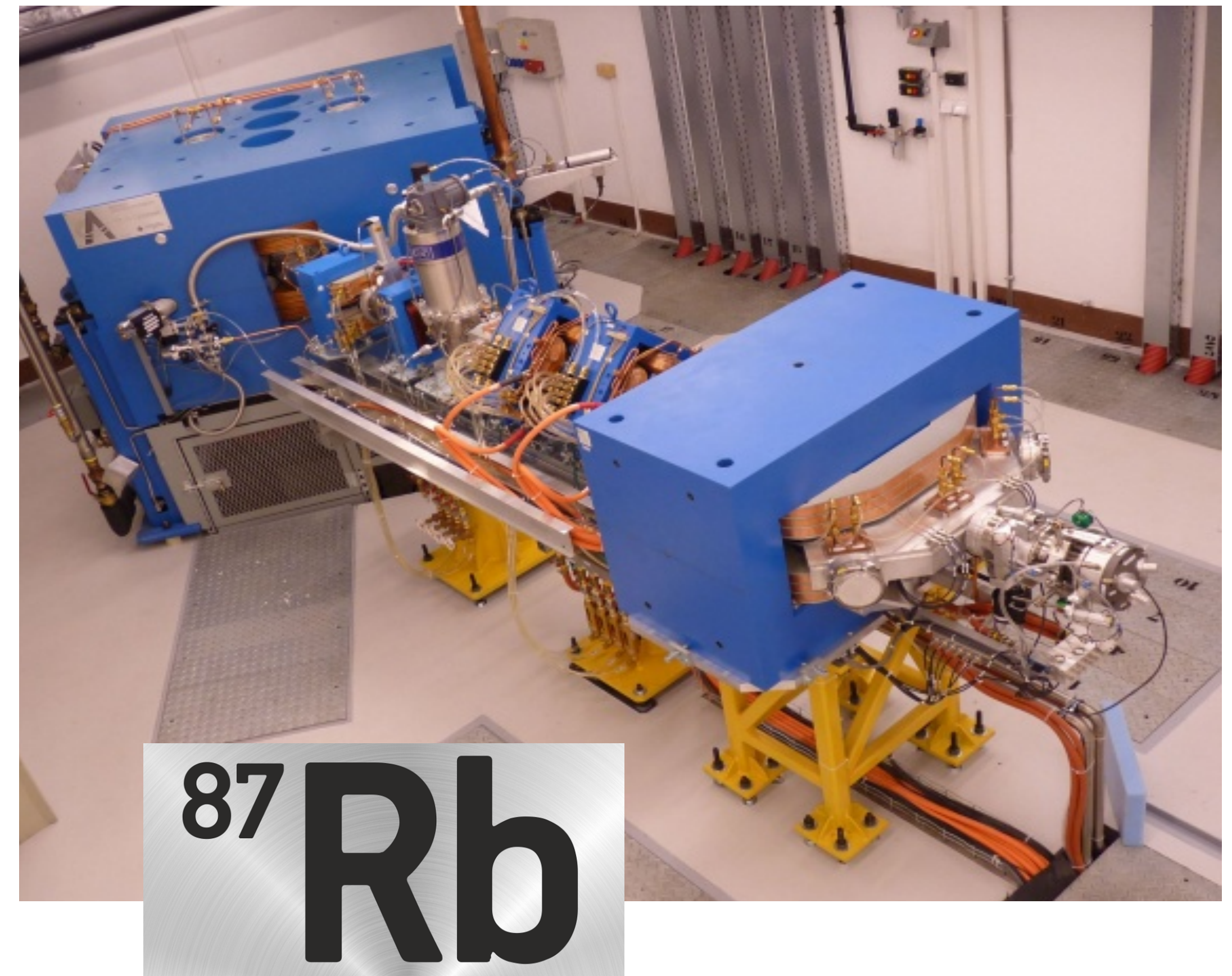
Kompaktzyklotron

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 – Aufbau & Prinzip

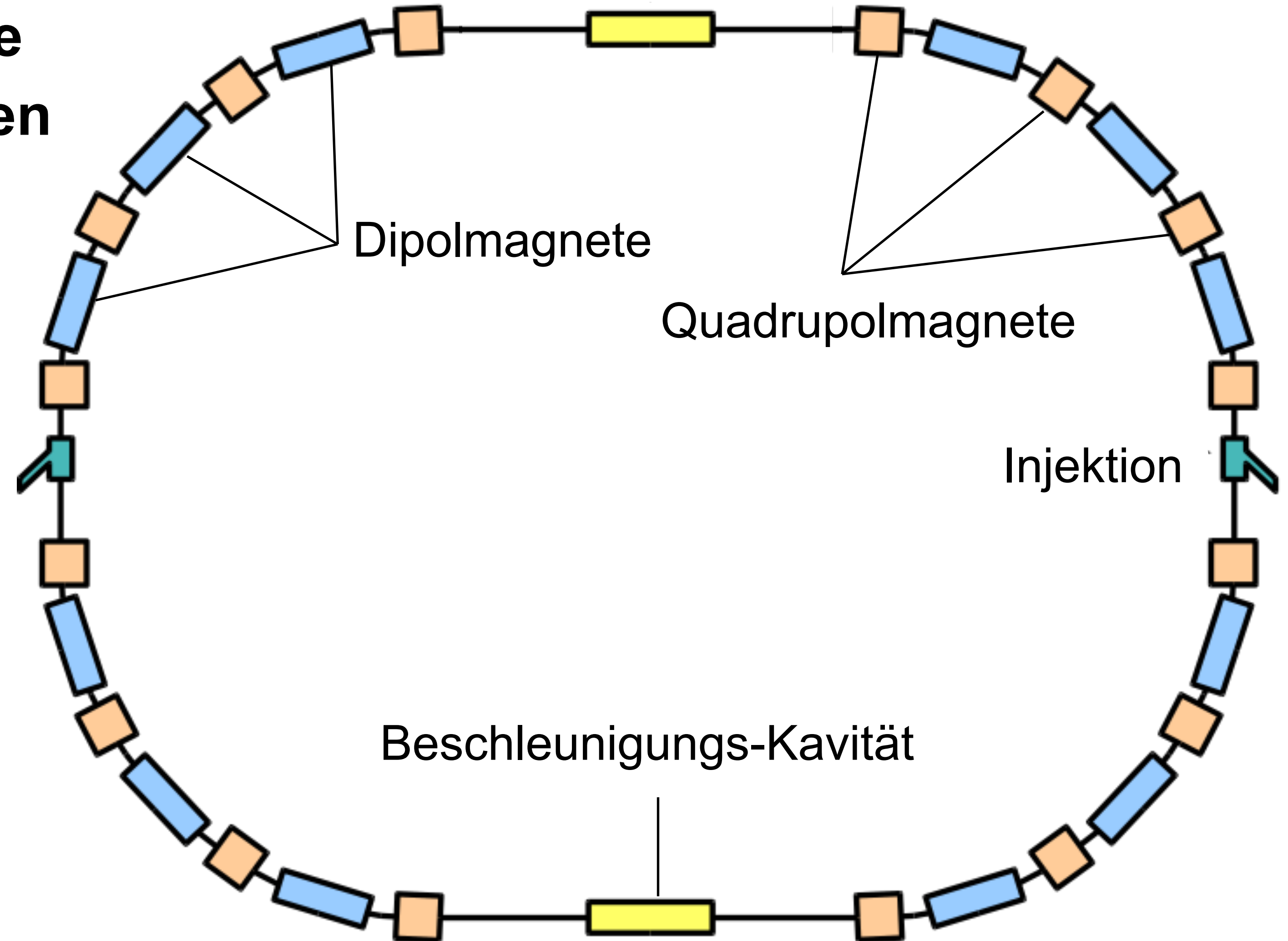
- **Synchrotron:** das magnetische Führungsfeld für den gepulsten Teilchenstrahl wird **synchron** mit der anwachsenden Teilchenenergie E hochgefahren

- zentrale Elemente:

Dipolmagnete

Quadrupolmagnete

Beschleunigungskavitäten



Element Dipolmagnet

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

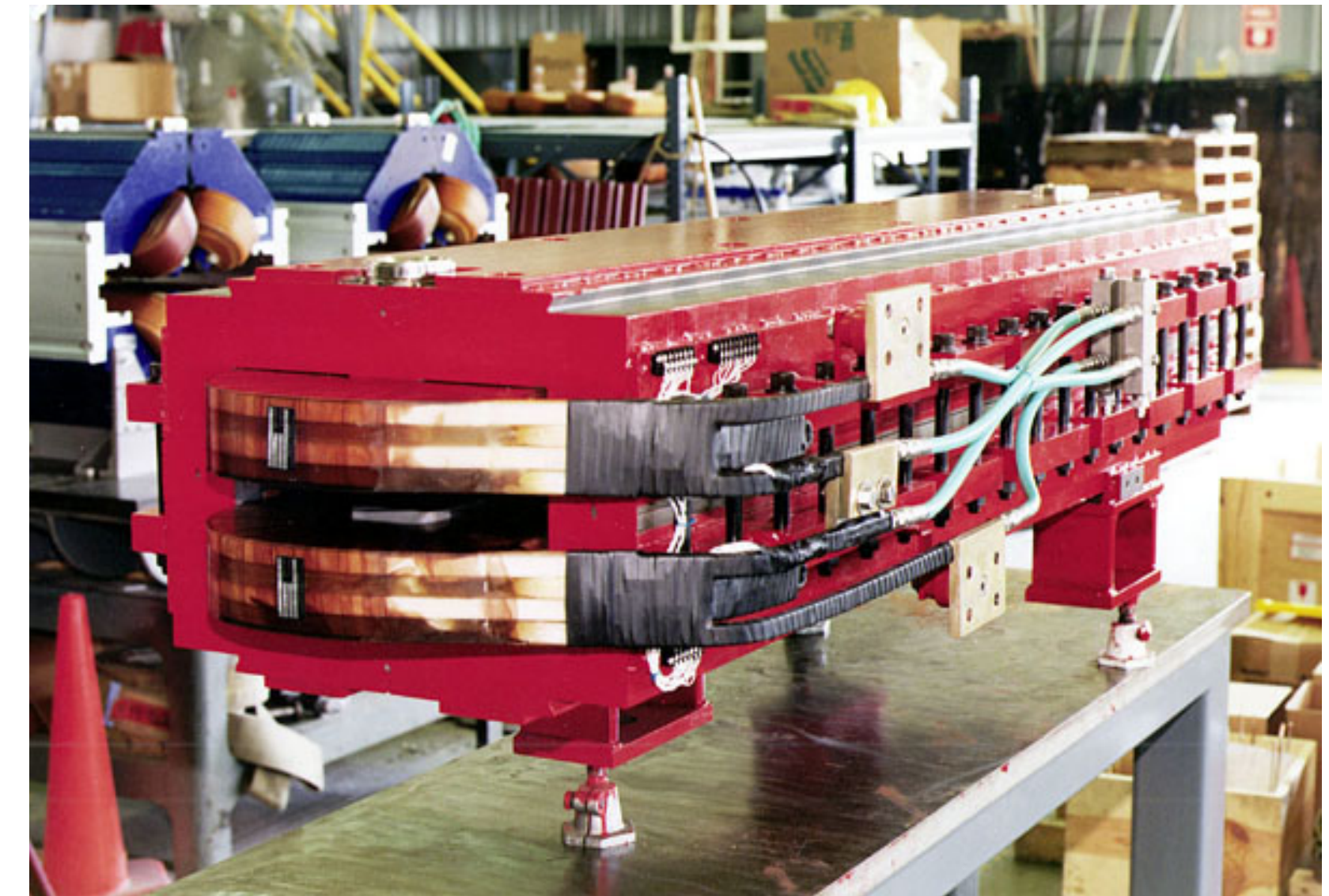
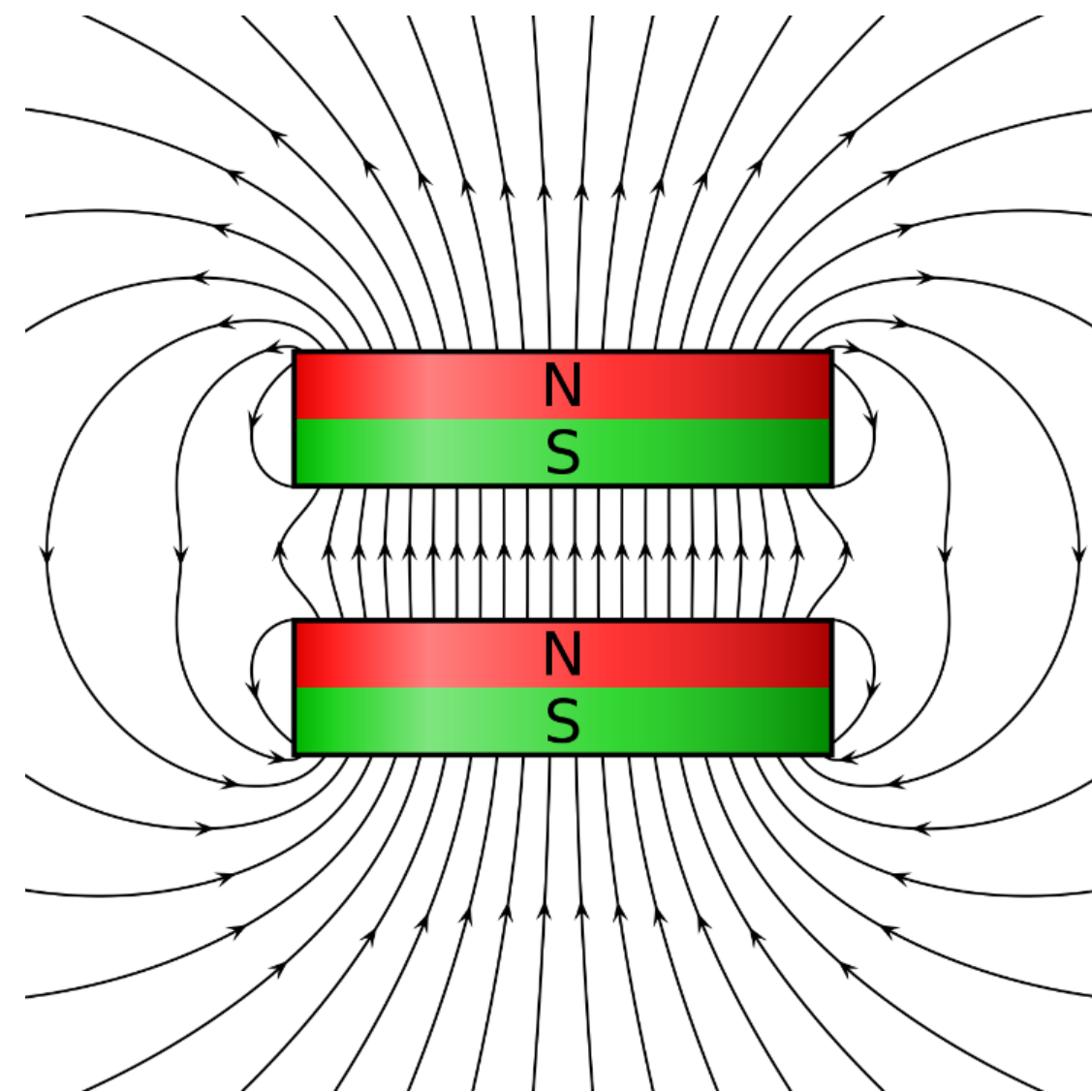
- homogenes B-Feld für Solradius r

Teilchenladung q
Synchrotronradius r

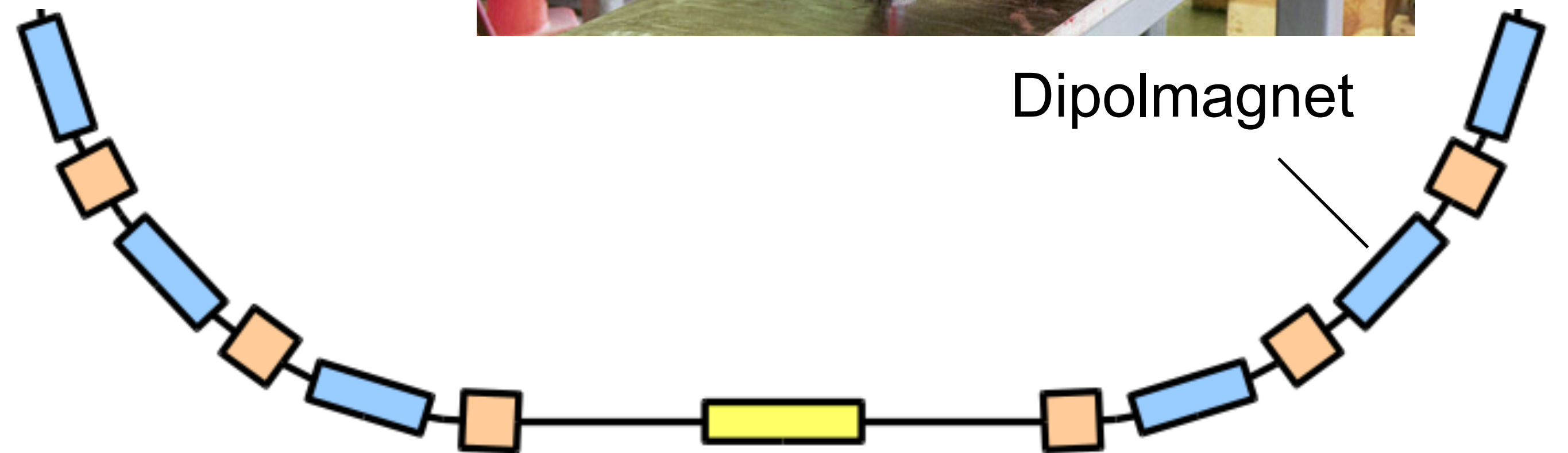
$$p = r \cdot q \cdot B$$

Teilchenimpuls

Dipolfeld B



Dipolmagnet



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

- homogenes B-Feld für Solradius r

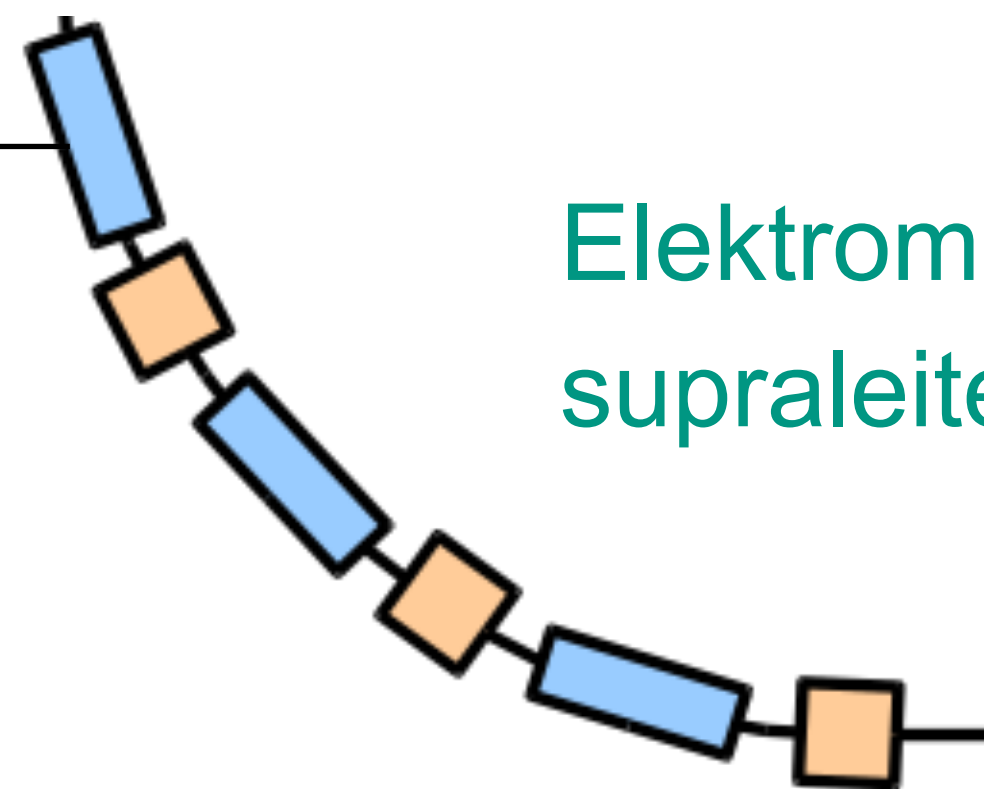
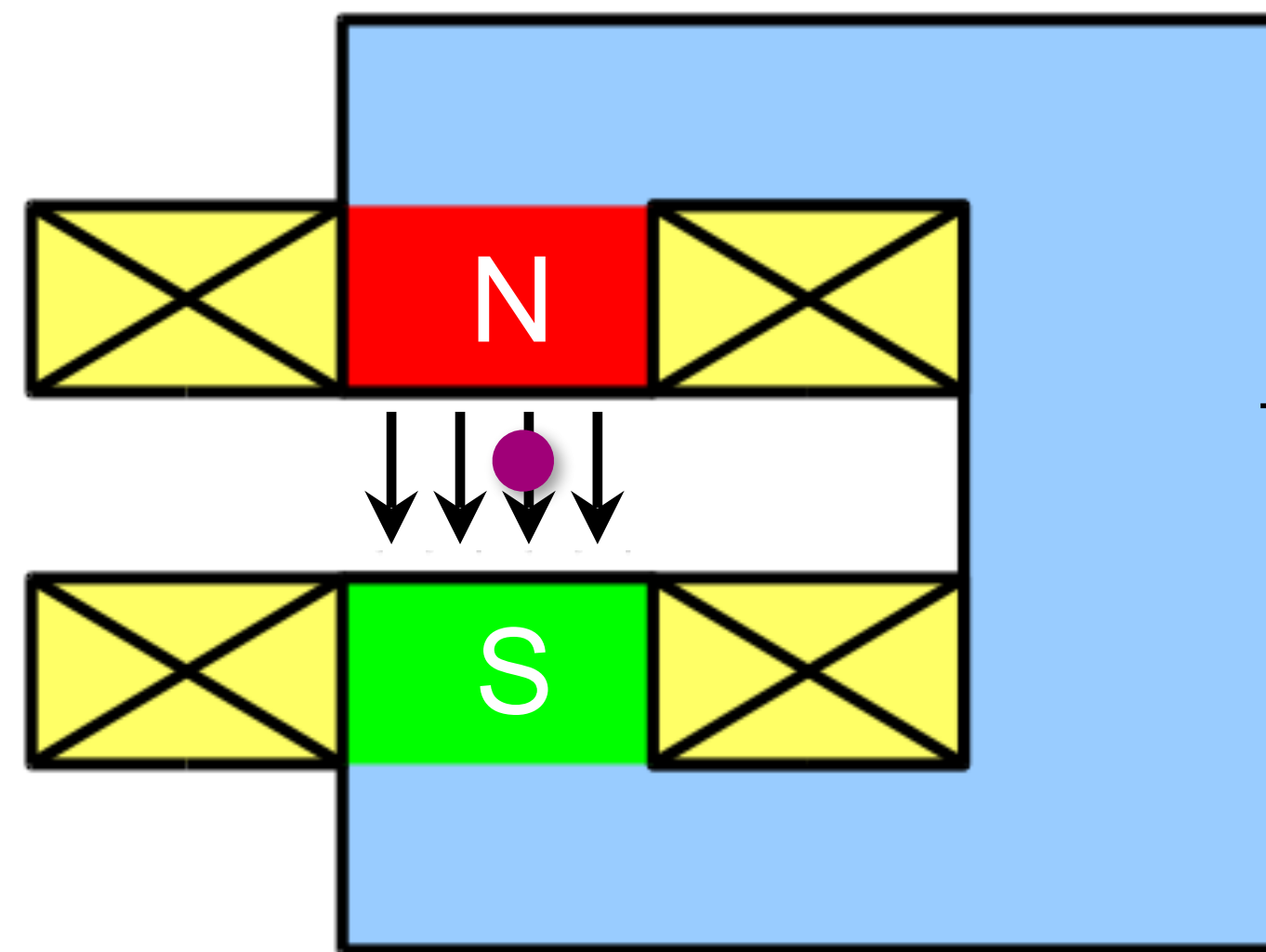
$$p = r \cdot q \cdot B$$

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

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

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

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



Elektromagnet (Eisenjoch)

supraleitender Magnet (LHC)

$B \sim 1 \text{ T}$

$B \sim 9 \text{ T}$

→ aus B,r folgt Teilchenimpuls p

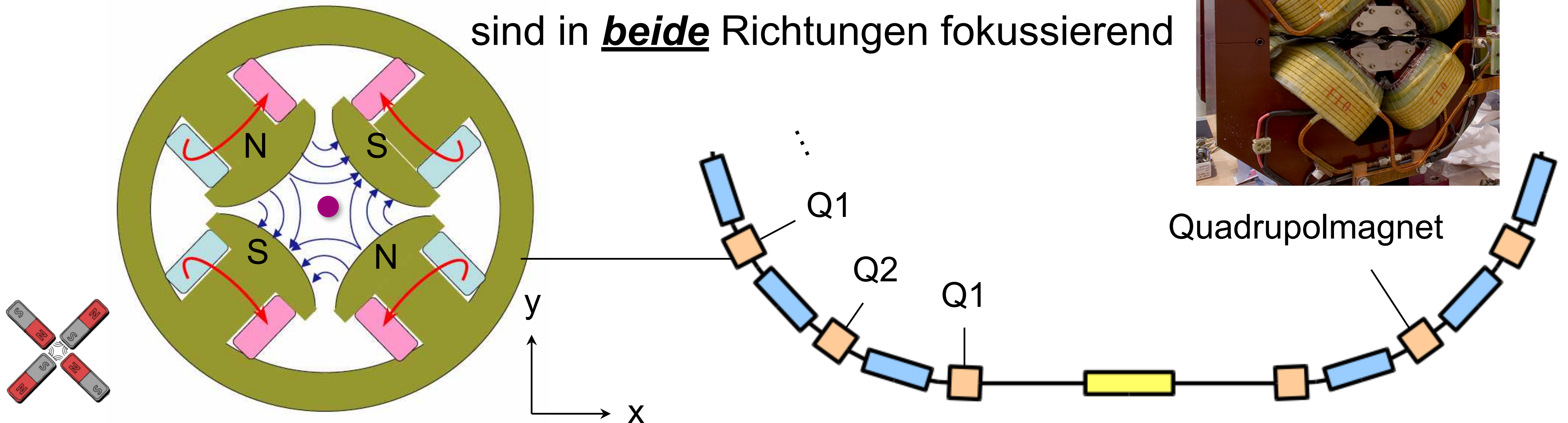
- **Quadrupolmagnete: starke Fokussierung des Teilchenstrahls auf Sollbahn**

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

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

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

sind in **beide** Richtungen fokussierend

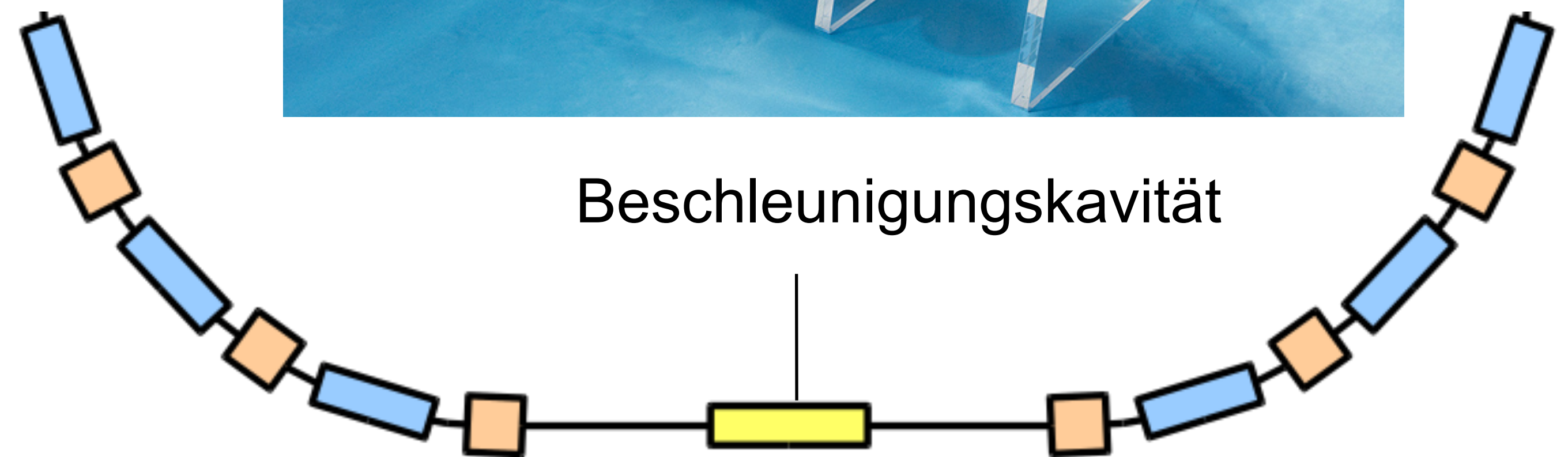
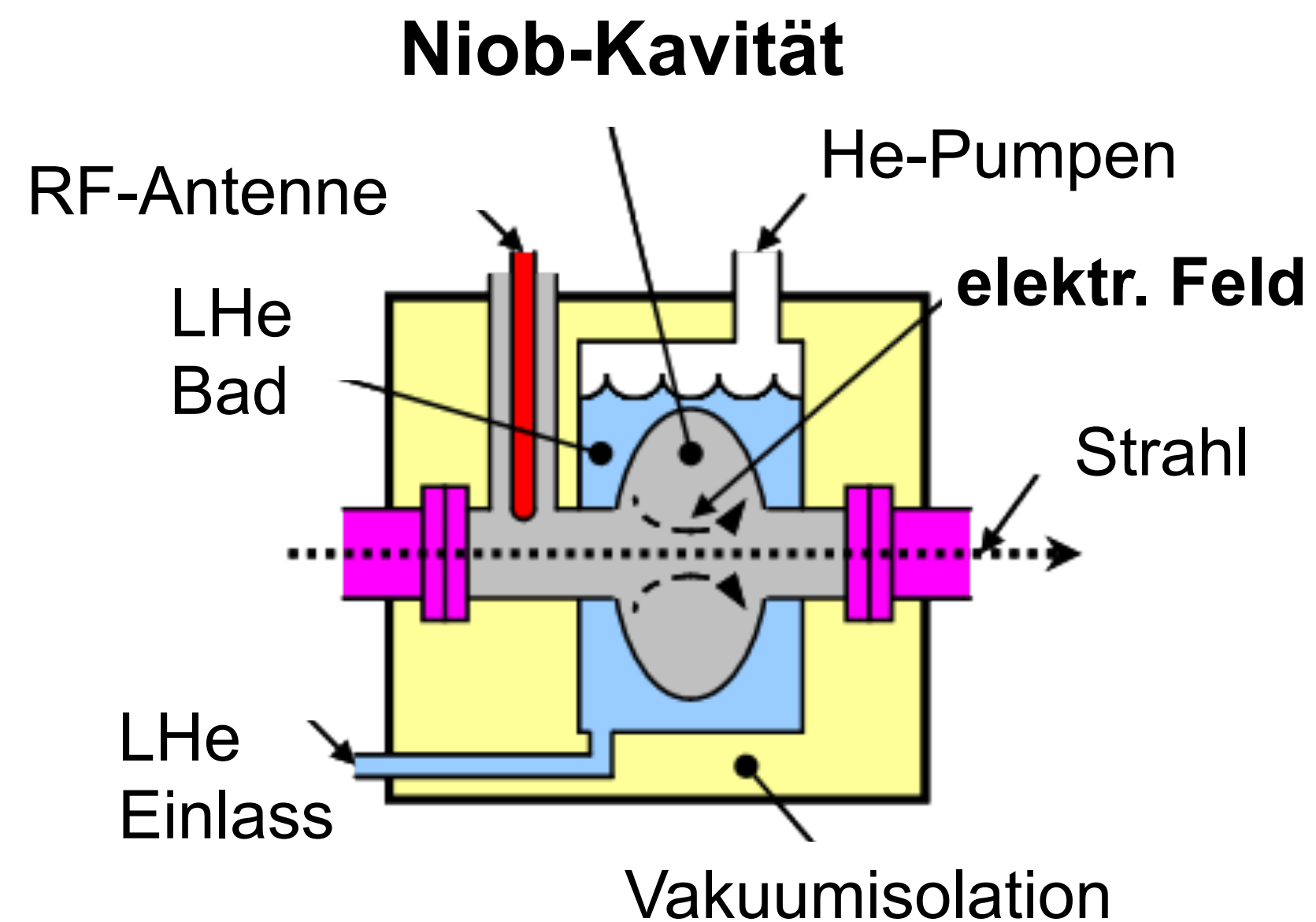
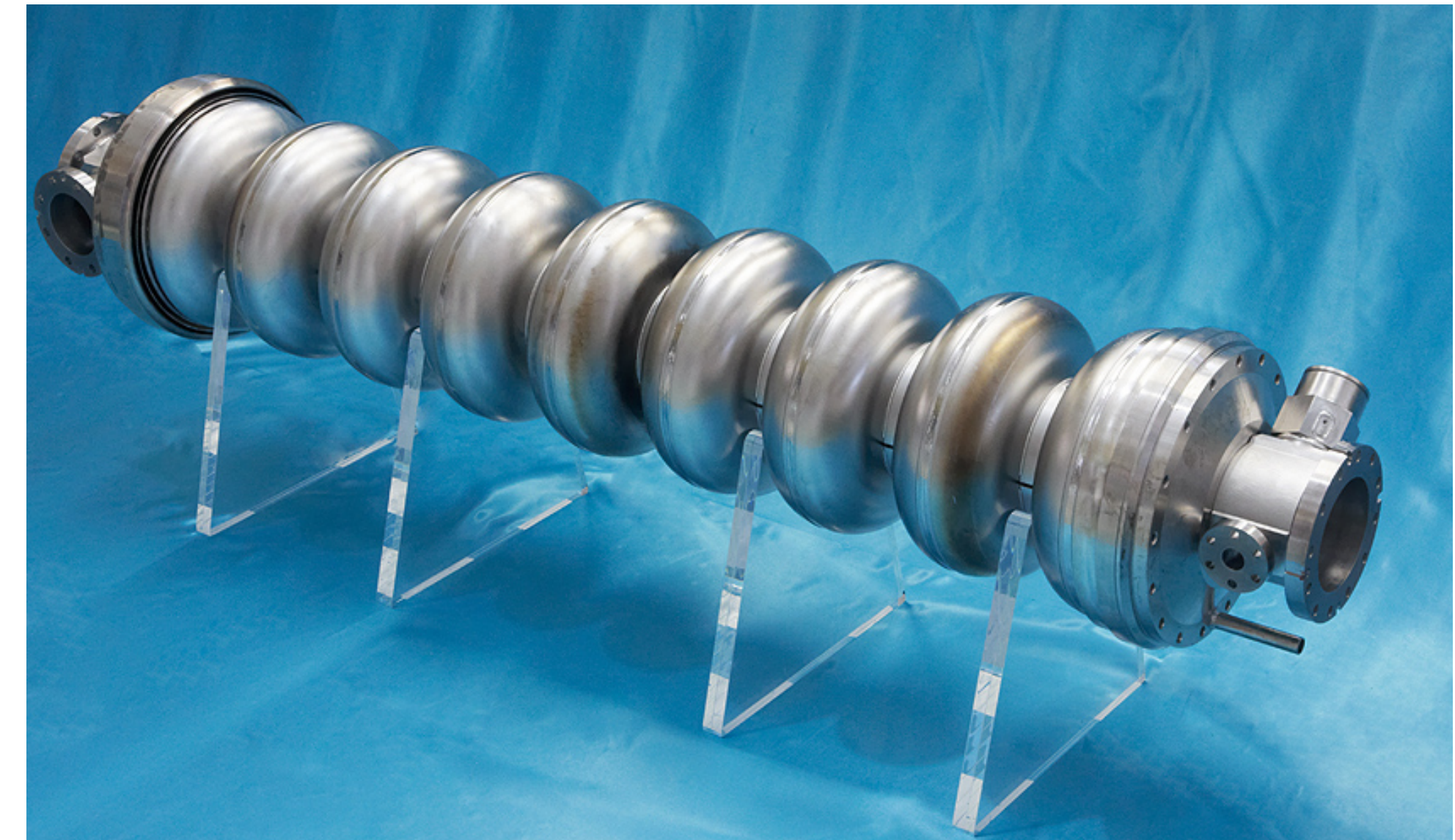


Element Kavität (Hohlraumresonator)

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

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

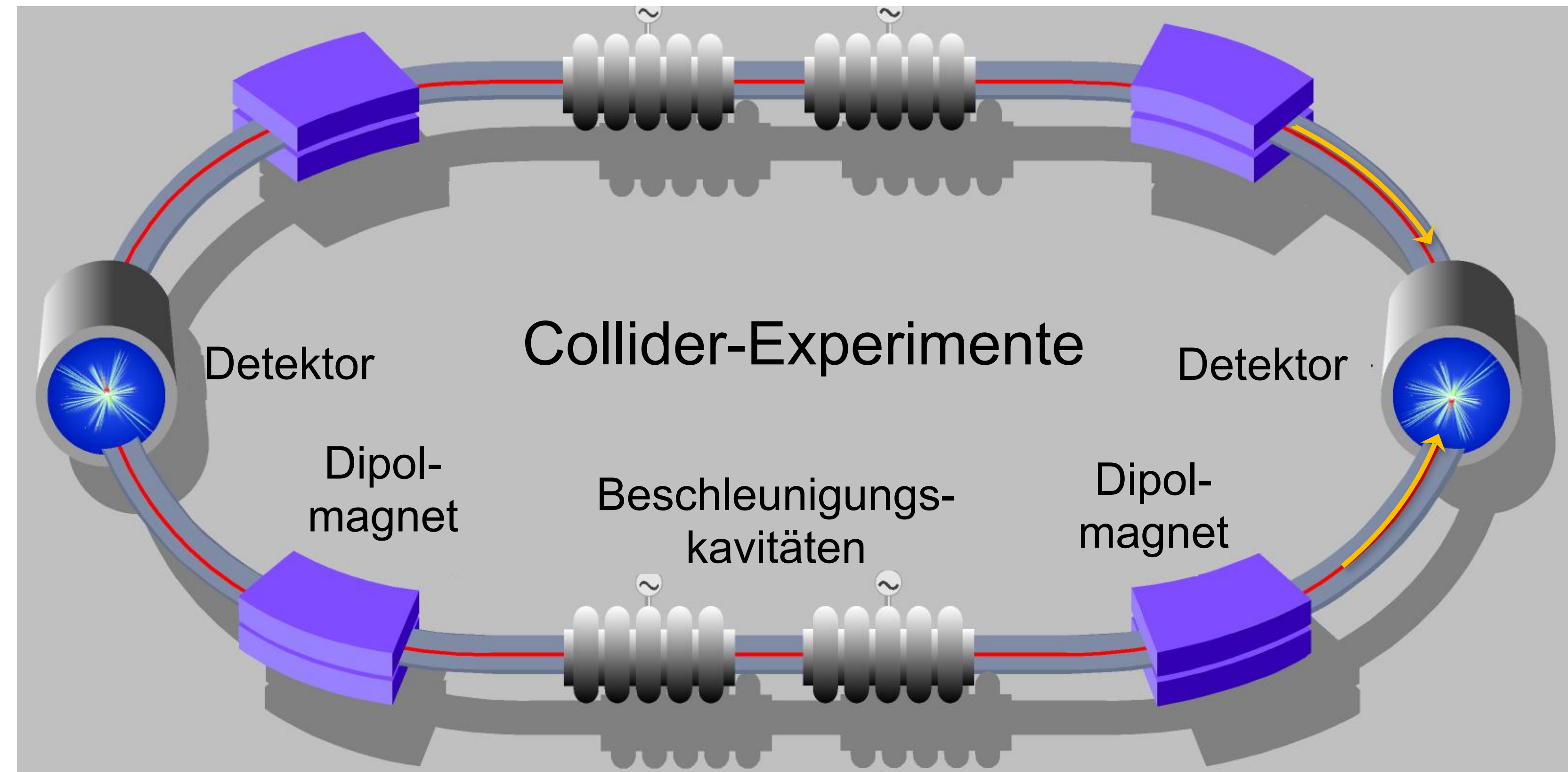
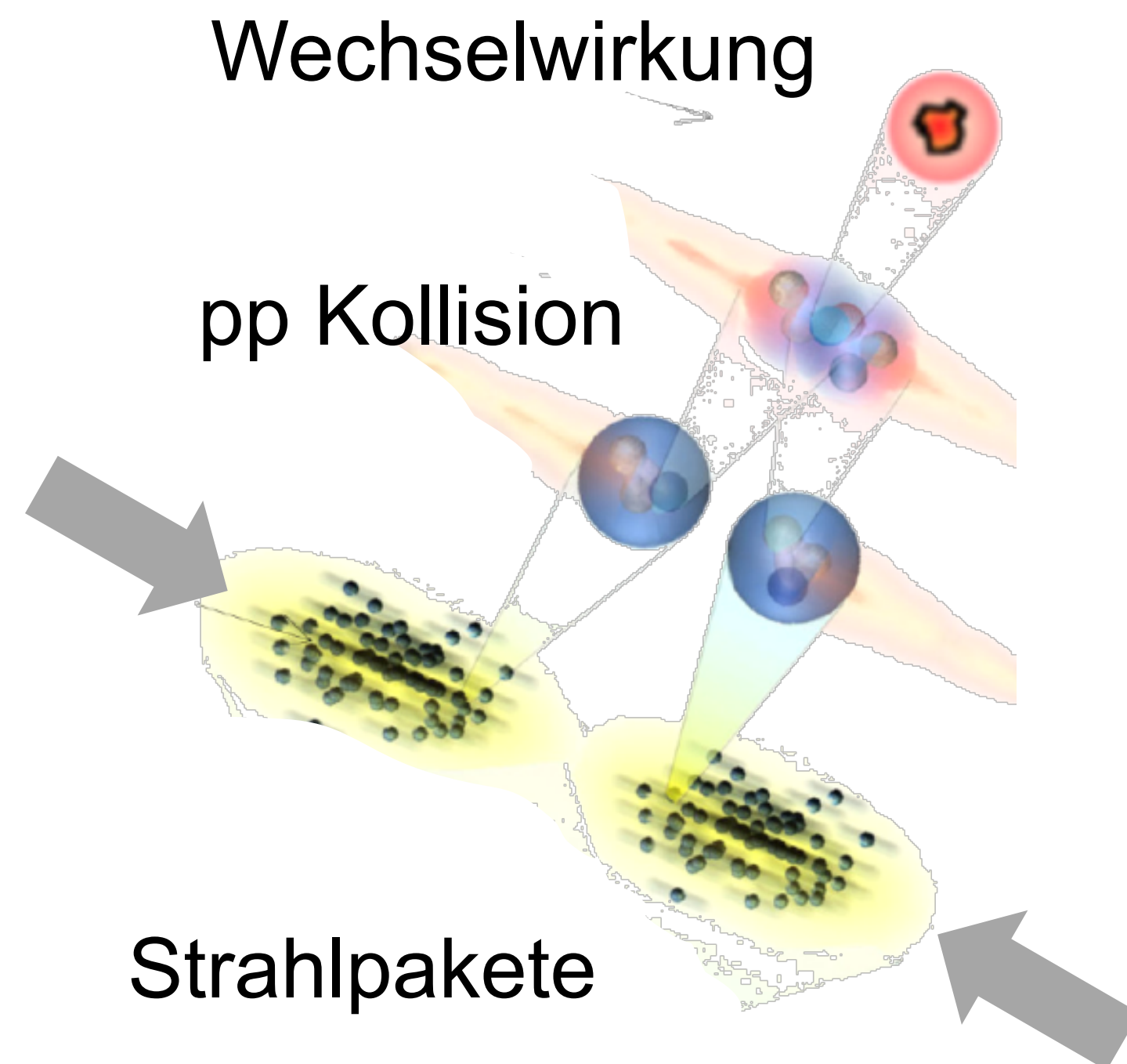
Q: newsline.linearcollider.org



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

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

LHC Physik



Beschleuniger weltweit: USA



SLAC NATIONAL
ACCELERATOR
LABORATORY

Stanford Linear
Accelerator

 **Fermilab**
Tevatron

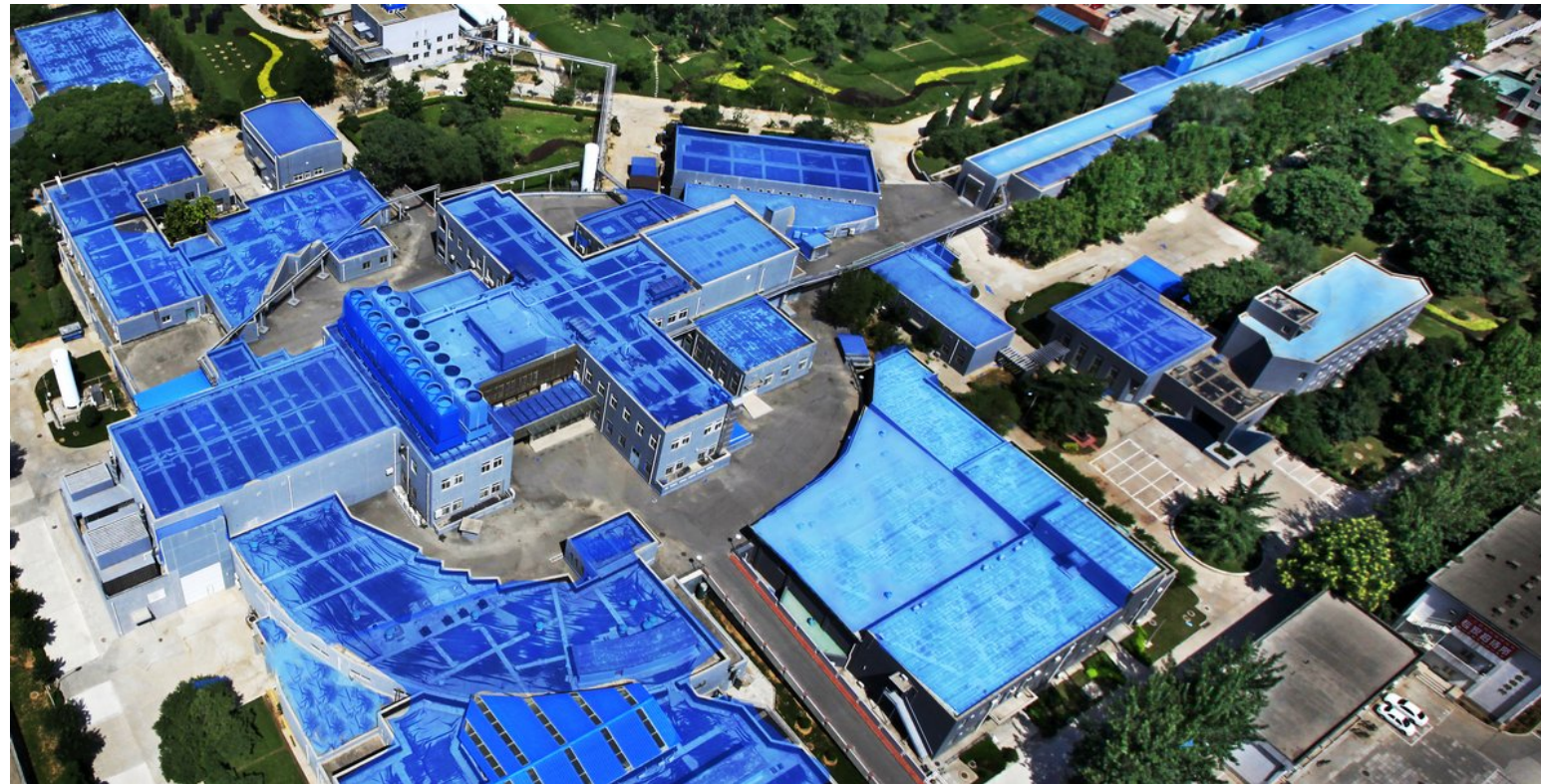


Beschleuniger weltweit: Europa

Large Hadron Collider - LHC



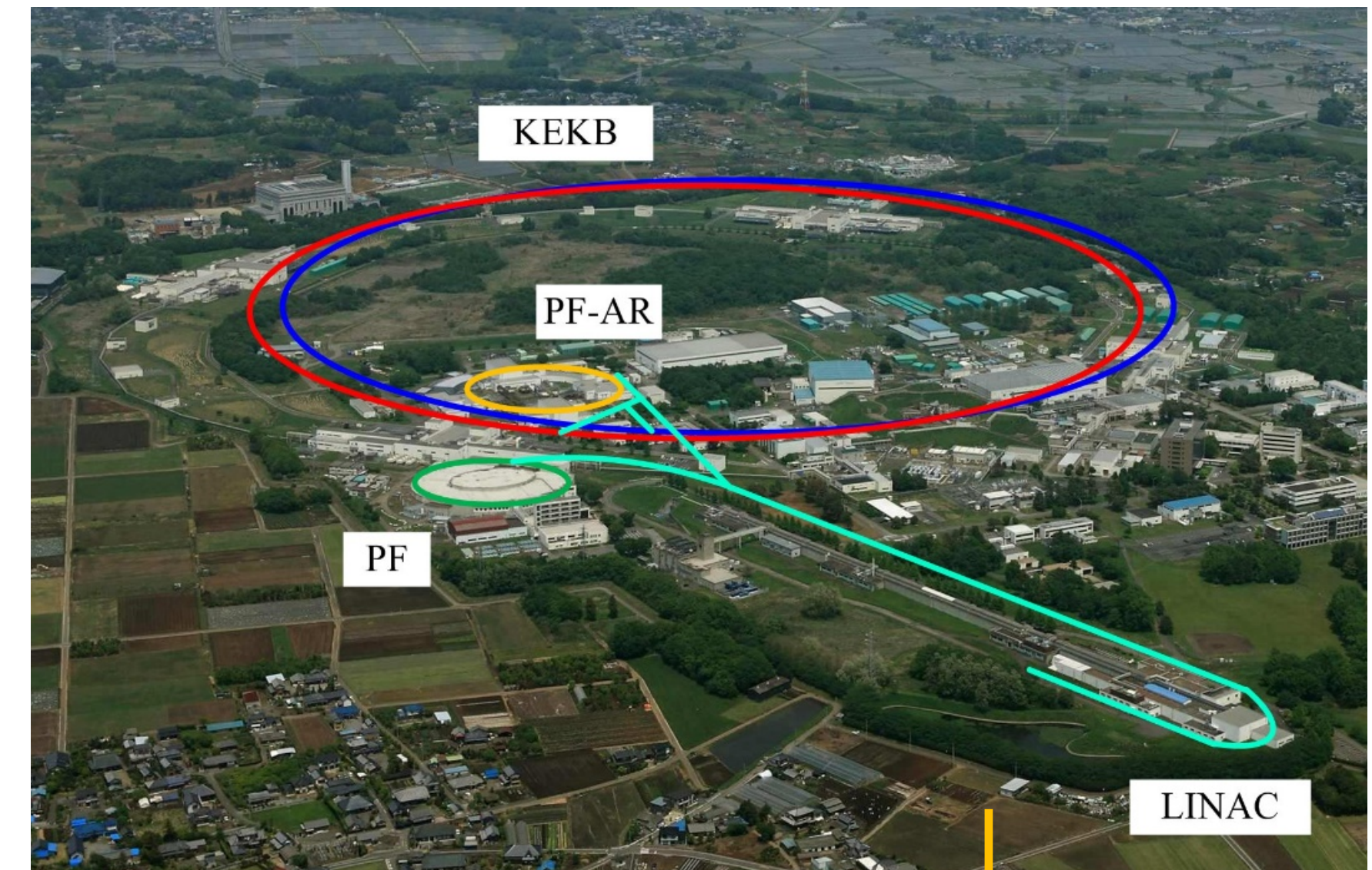
Beschleuniger weltweit: Asien



BEPC II



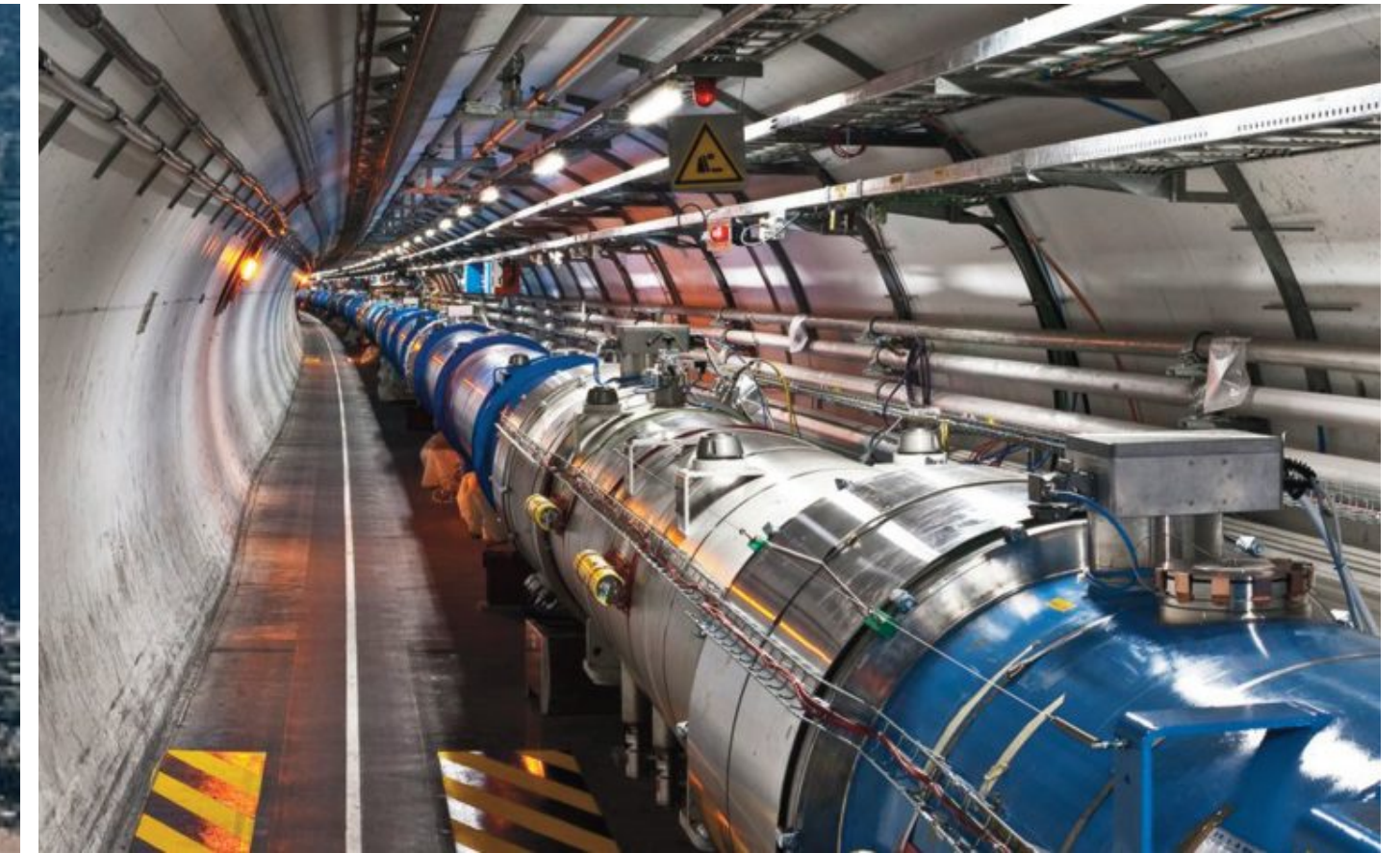
Super-KEKB

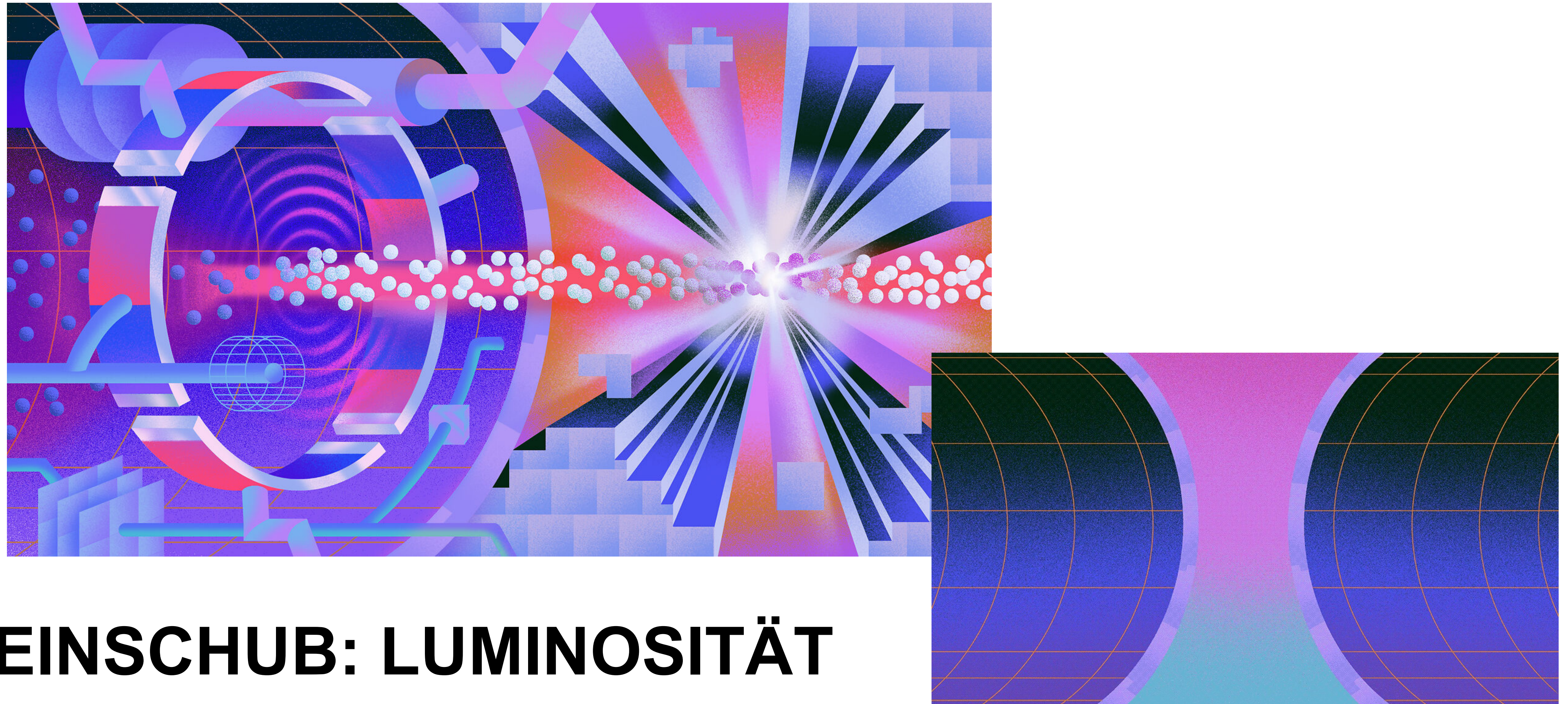


LHC – Large Hadron Collider

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

4 Experimente :
CMS, ATLAS,
ALICE, LHCb





EINSCHUB: LUMINOSITÄT

Q: symmetry magazine

Katzen

■ Coco



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

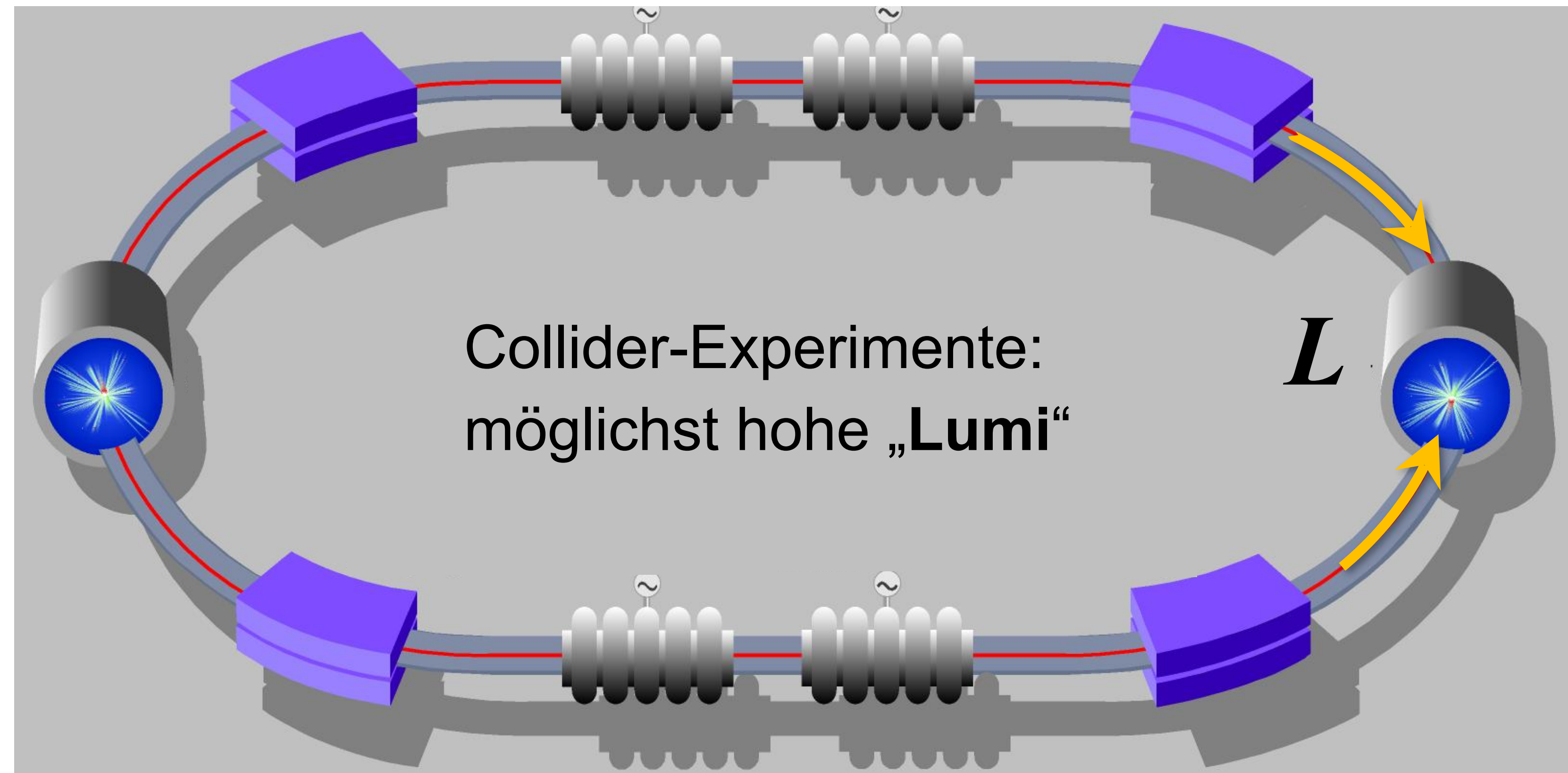
$$R = \frac{dN}{dt} = \sigma \cdot L$$

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

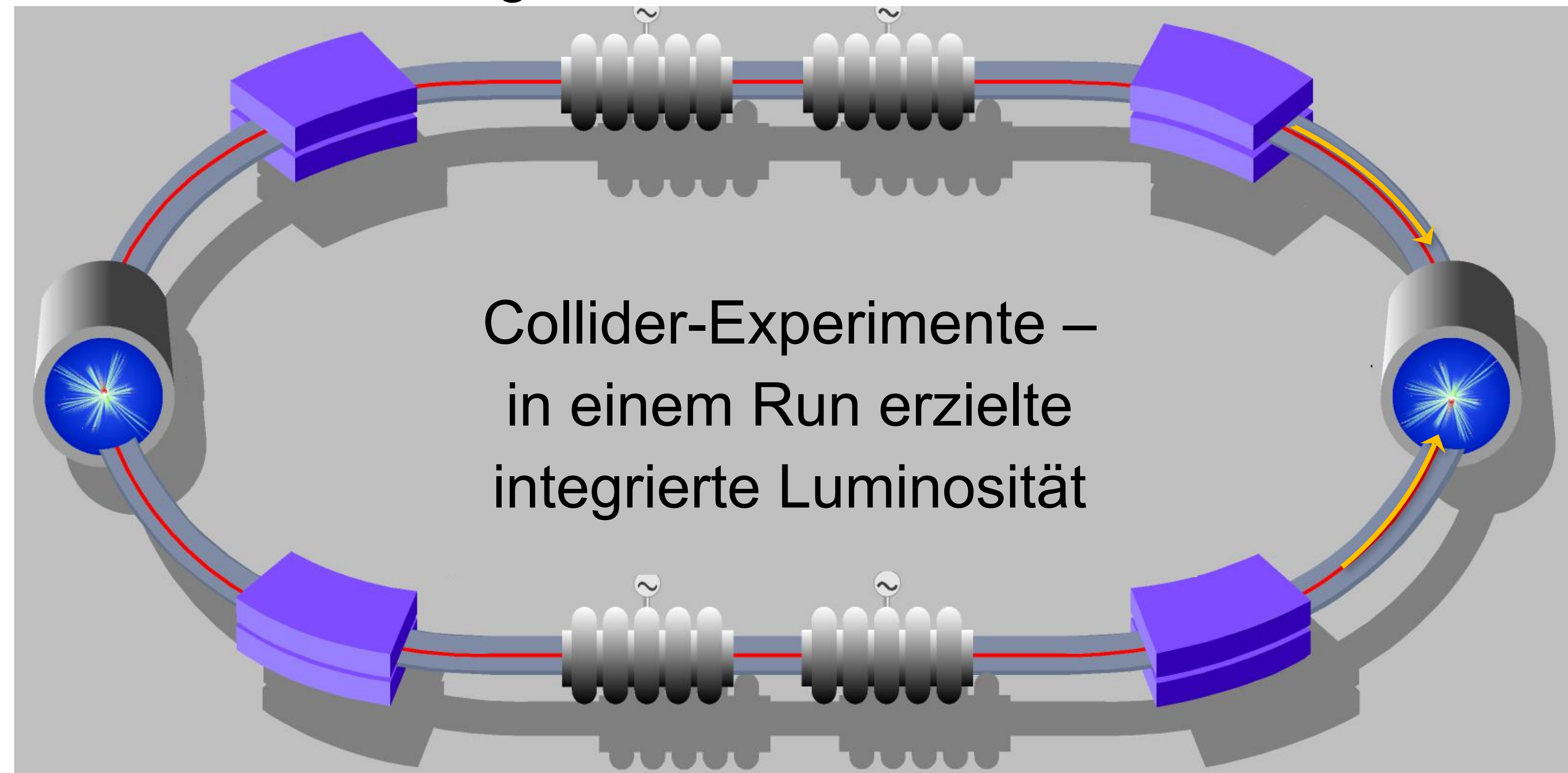
$$N = \sigma \cdot \int L dt$$

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

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

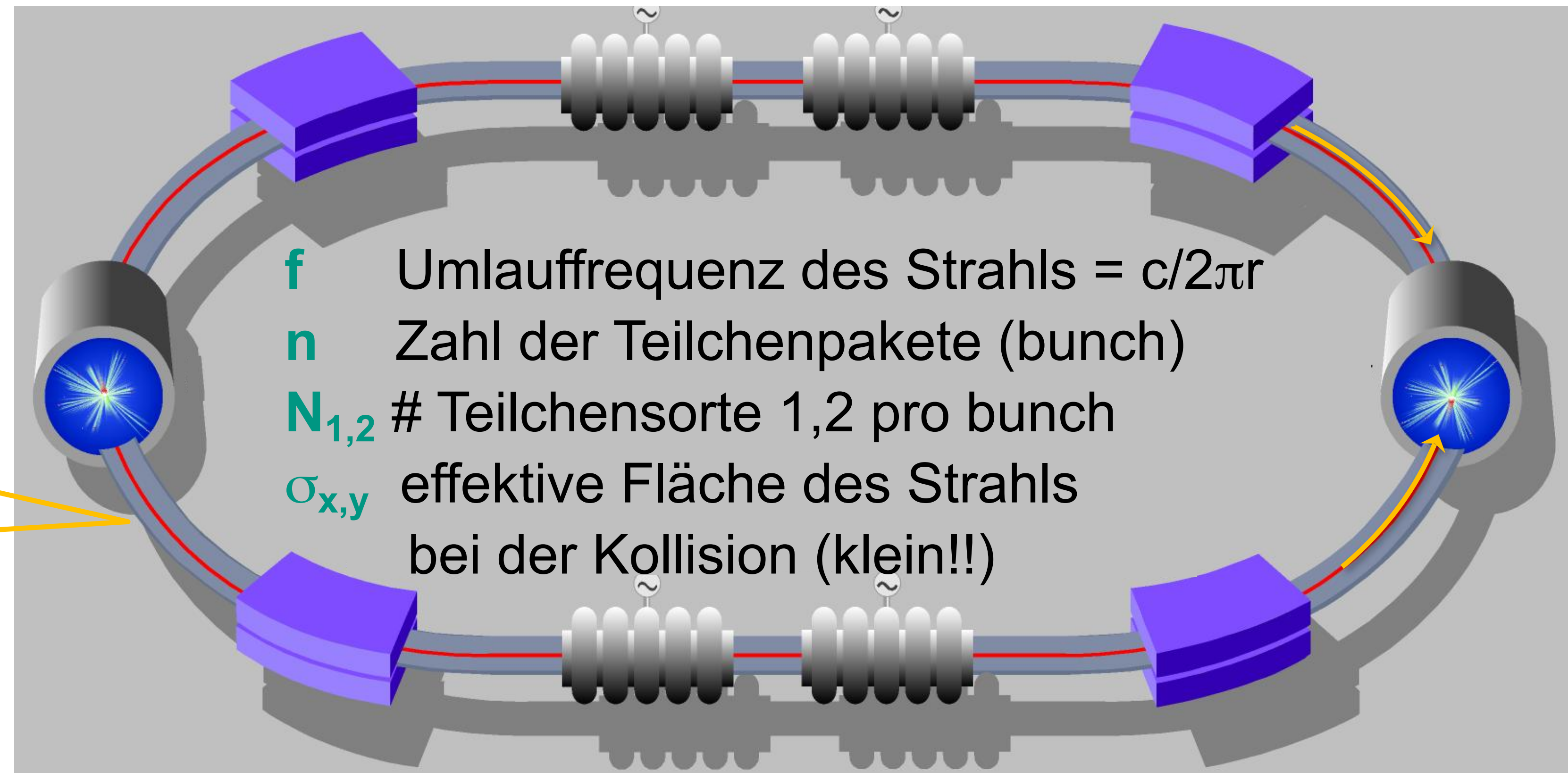
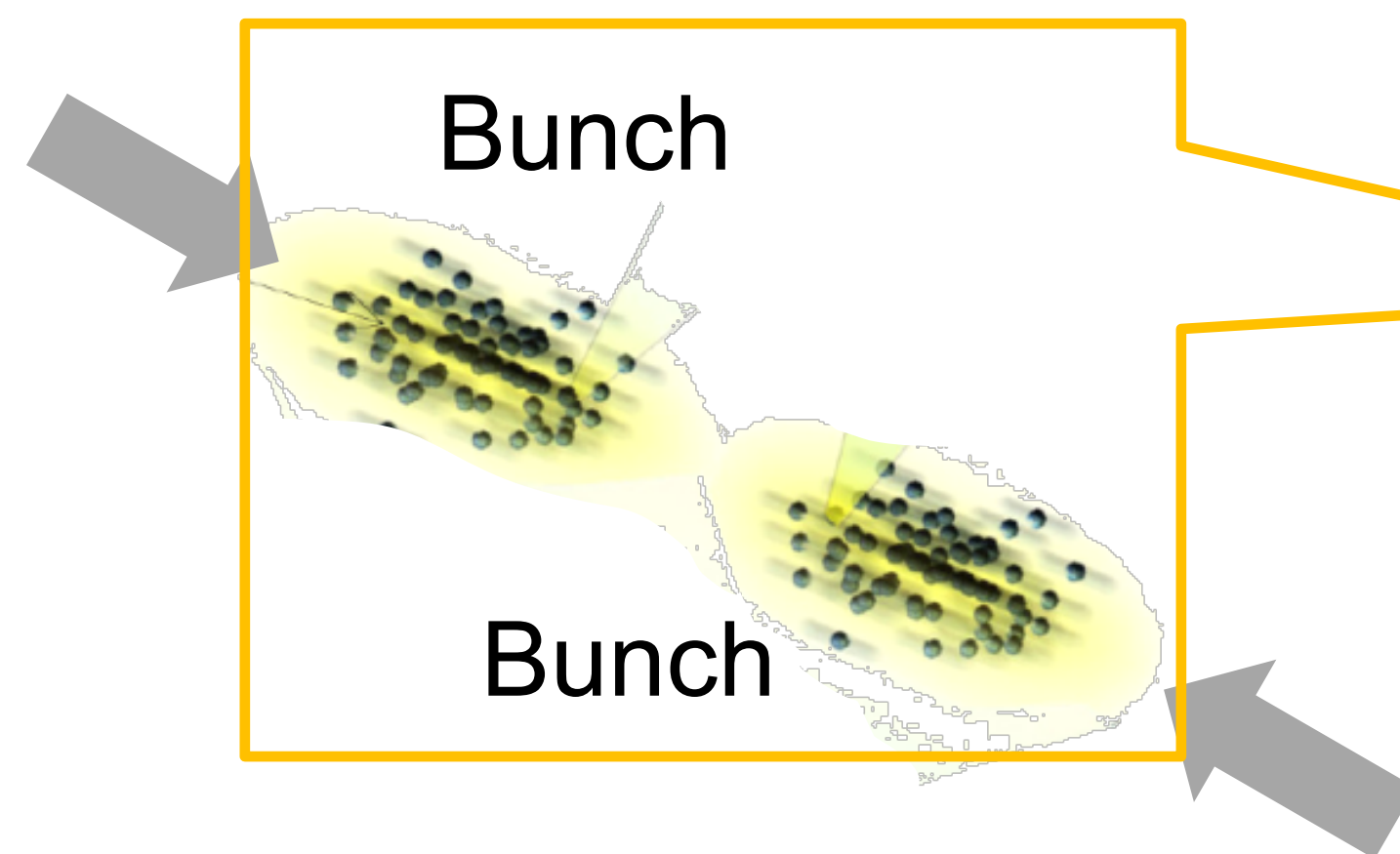
(Einheit: **inverser
Wirkungsquerschnitt**
z.B. inverse fb)

N = # an Streuereignissen über einen „Run“



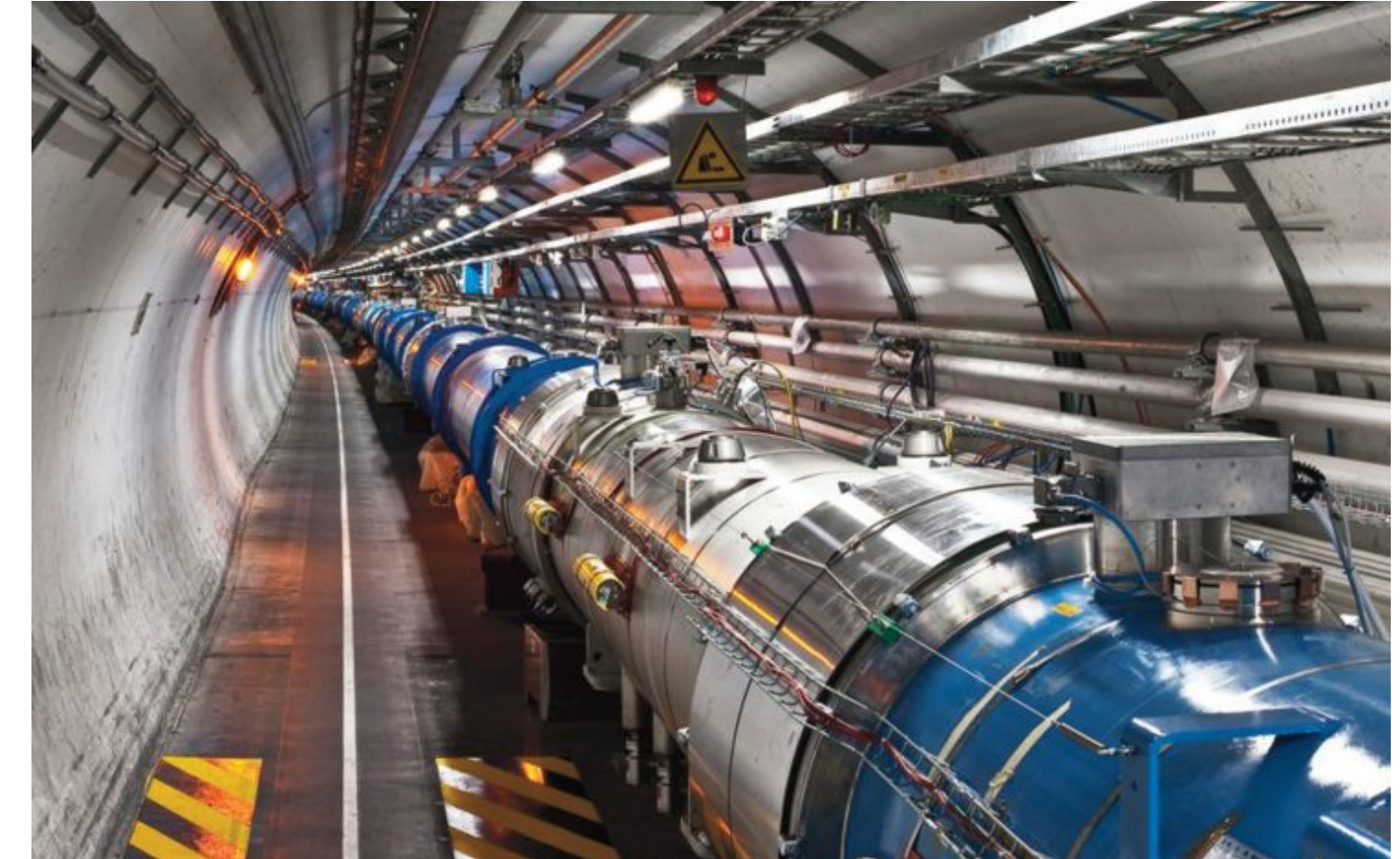
- Luminosität L und Strahlparameter: Anzahl Bunche, Umlauf-Frequenz

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



- 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

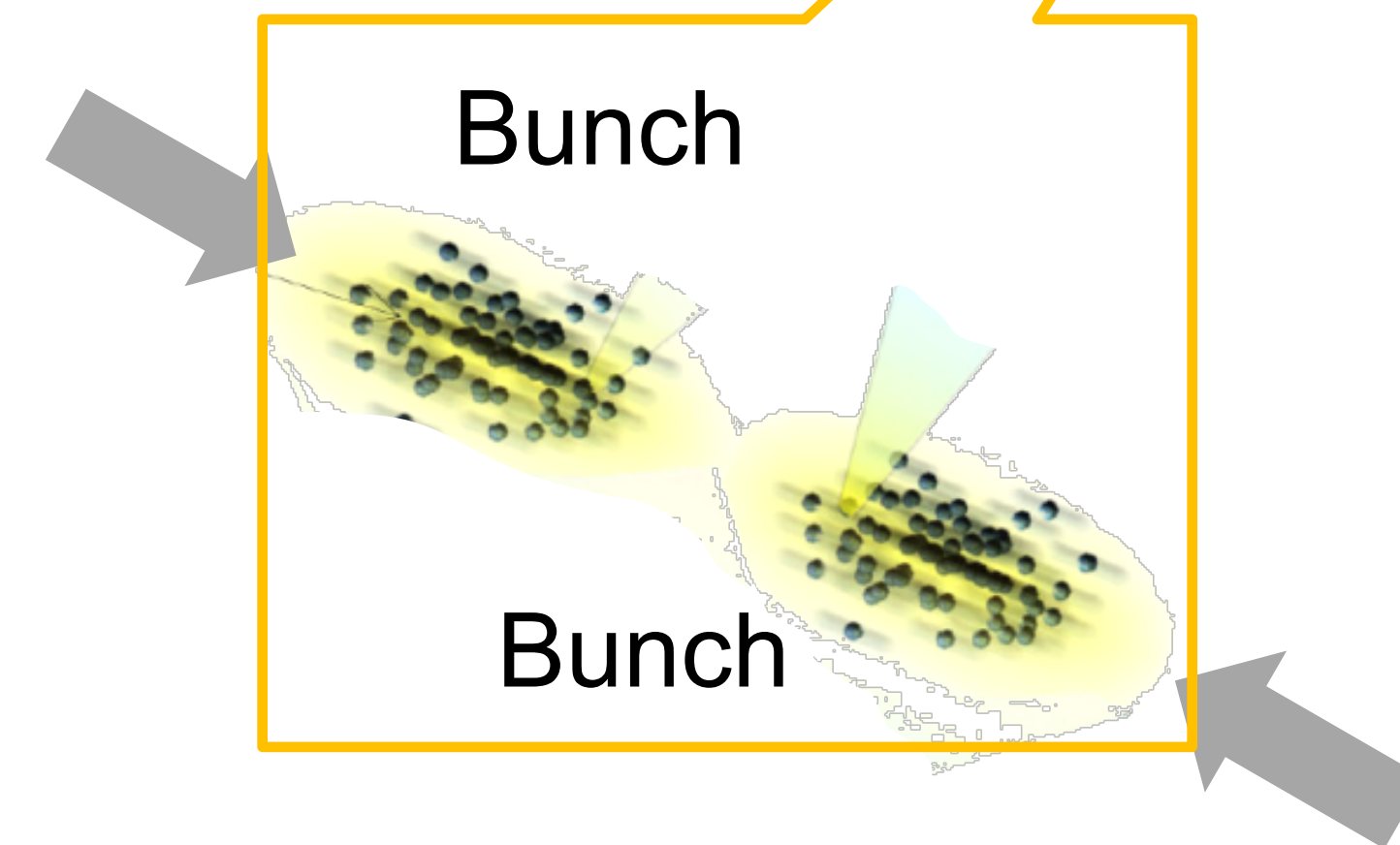
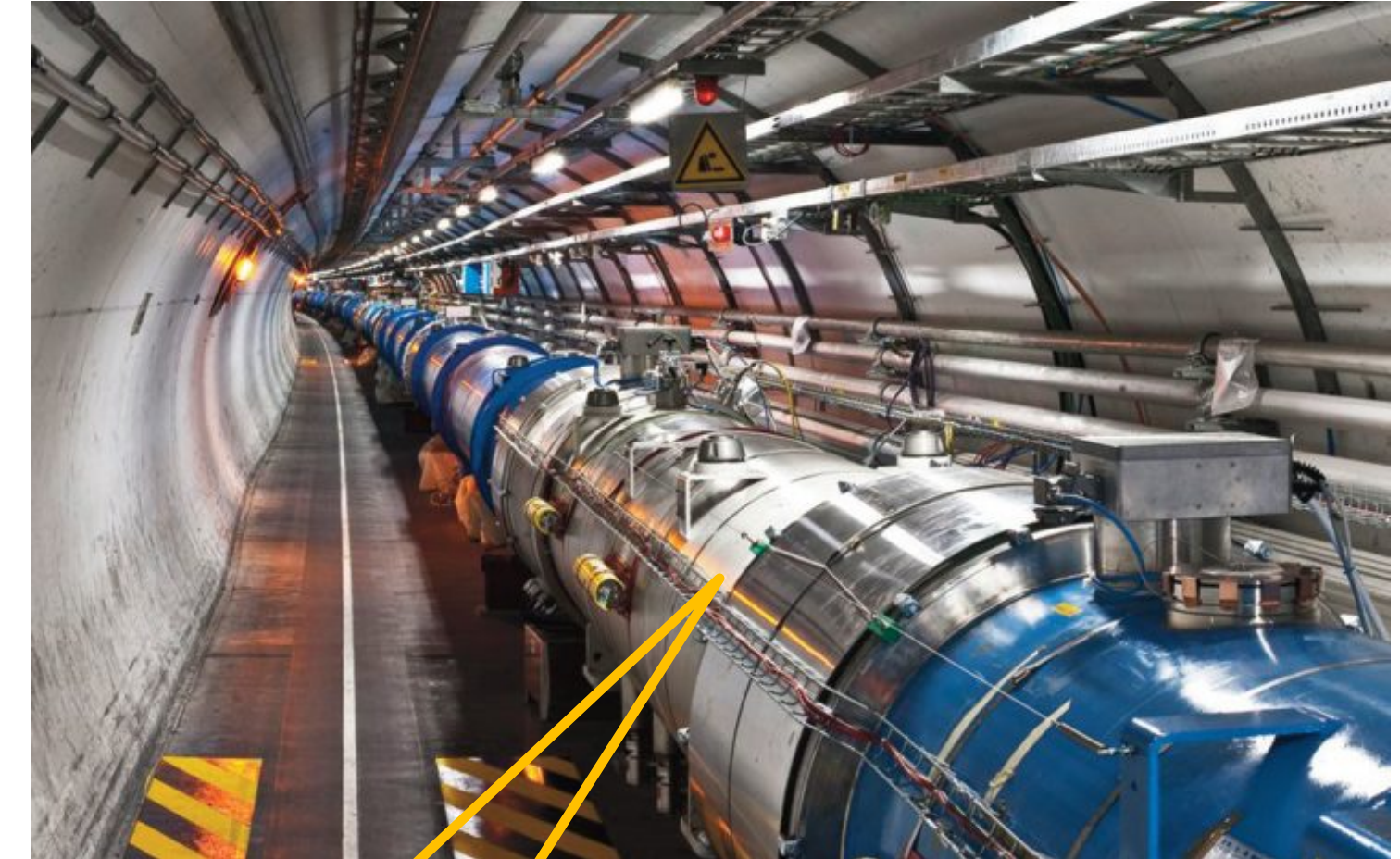
$$L = f \cdot n \cdot \frac{N^2}{4\pi \cdot \sigma_b^2}$$

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

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

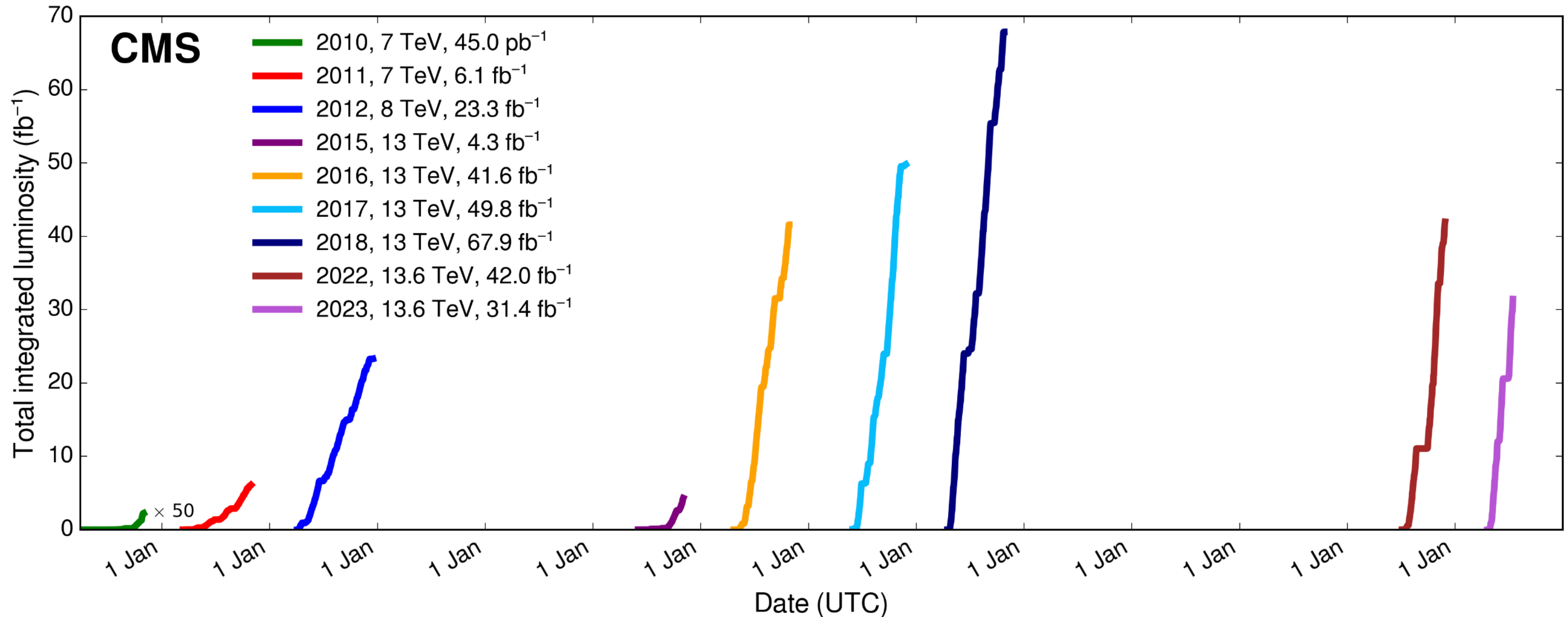
mit $\sigma_{\text{inel}} = 60 \text{ mb}$ beträgt am LHC die Kollisionsrate R der Protonen in ATLAS oder CMS:

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



Integrierte Luminosität des LHC pro Jahr

- Entwicklung der integrierten LHC-Luminosität / Jahr

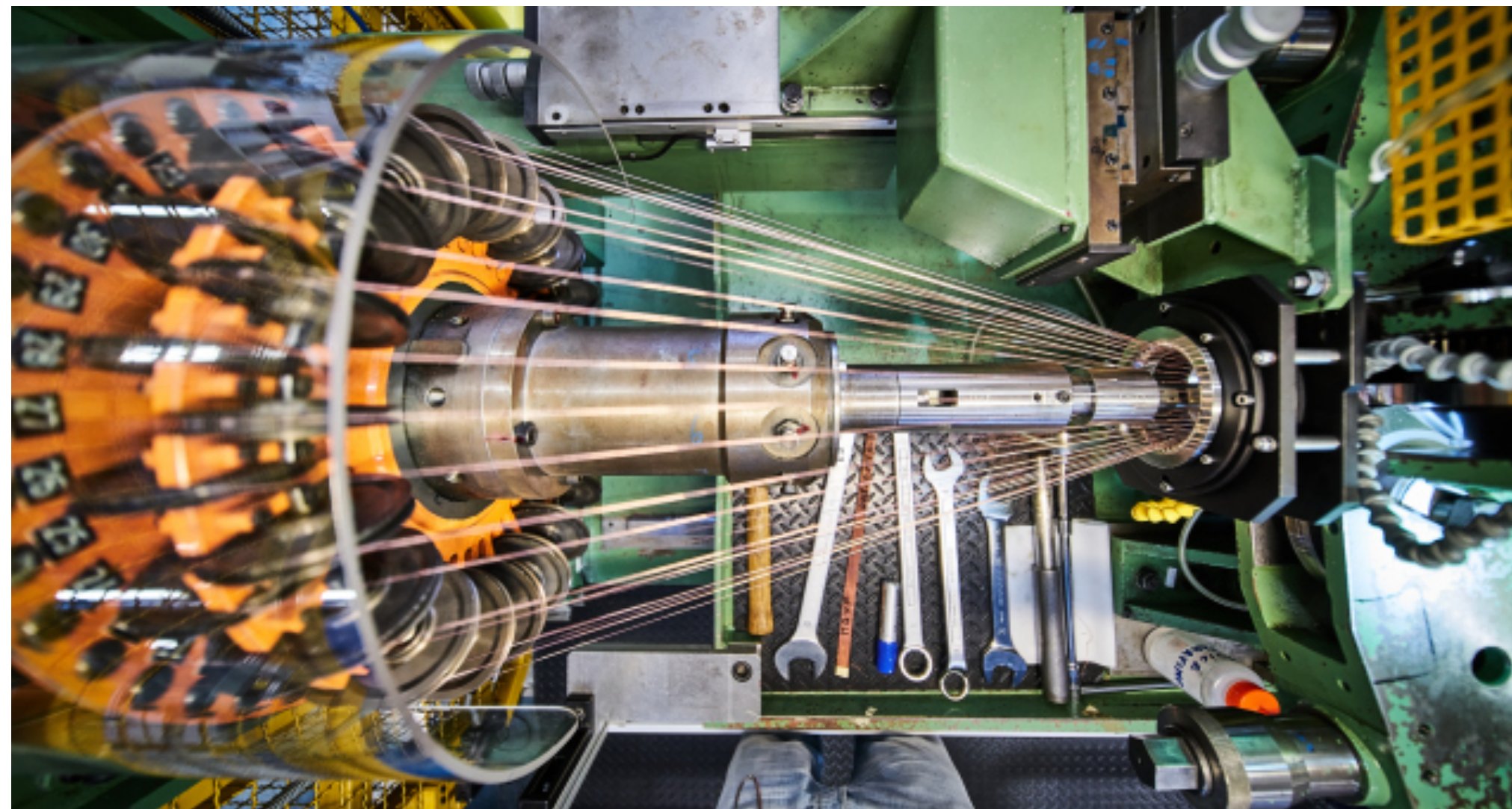


Ausbau des LHC zum HL-LHC

- 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

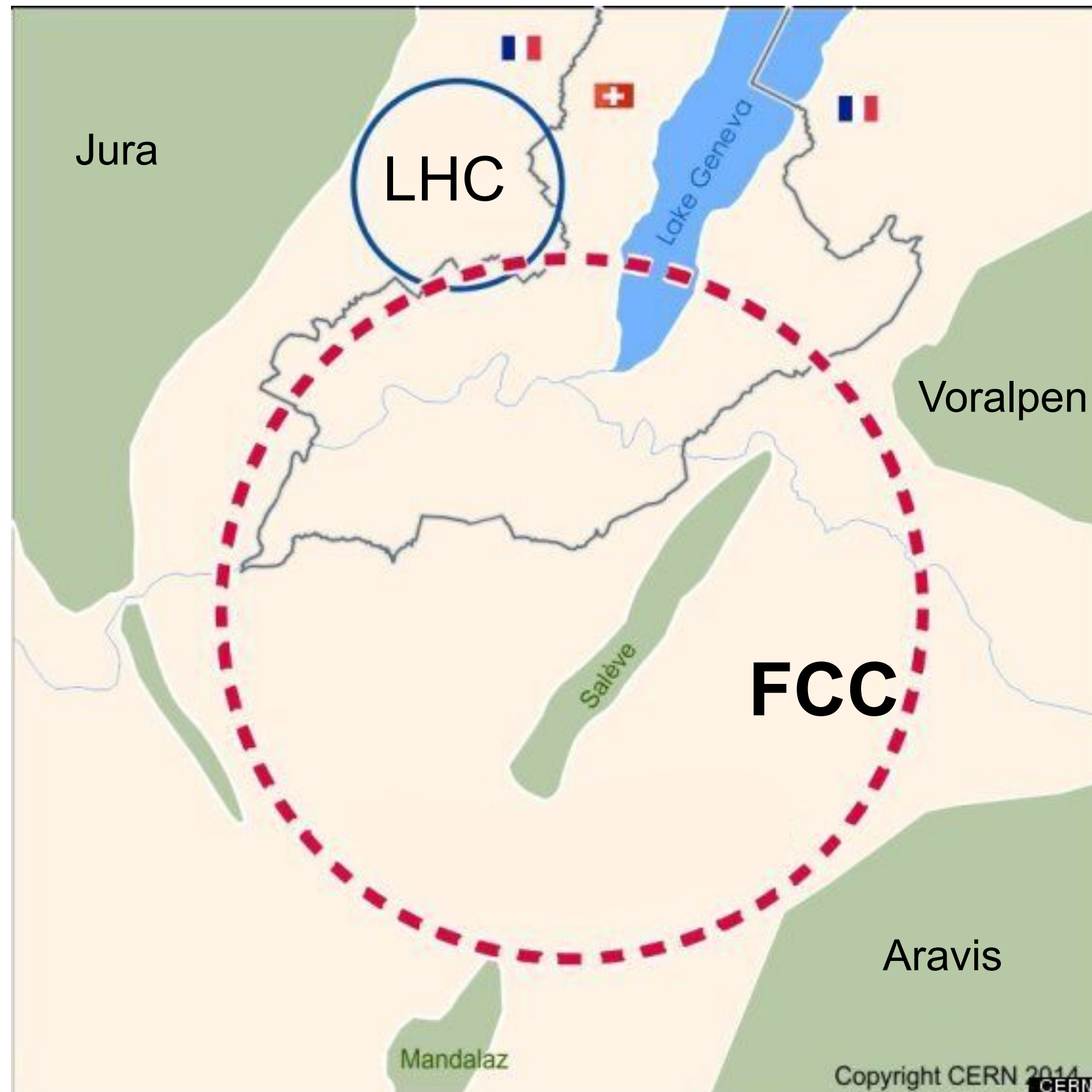


neue Quadrupole bei $B = 12 \text{ T}$

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



- Geplanter Ring für Kollisionen von e^+e^- und hh (pp und Ion-Ion)

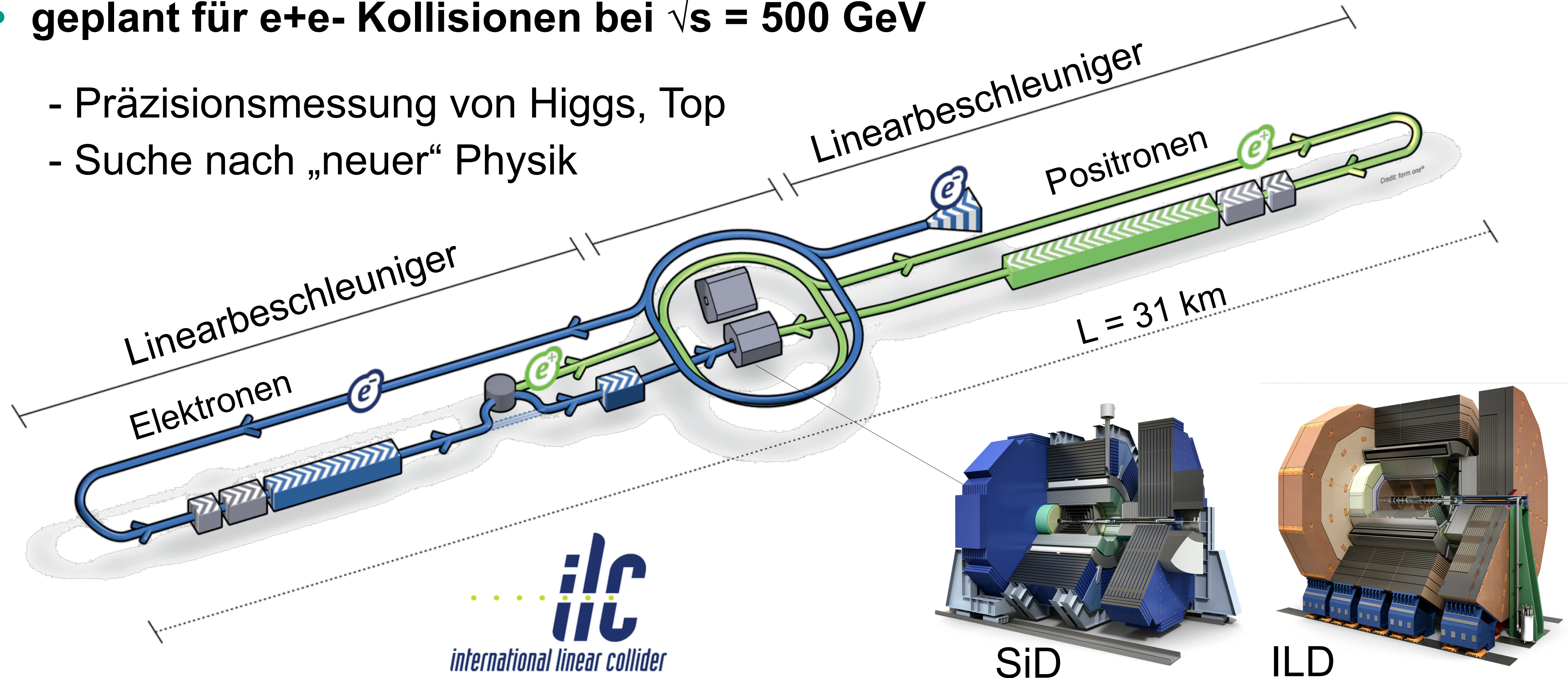


- **ee**: e^+e^- Kollisionen bei $\sqrt{s} = 90\text{-}350$ GeV
- **hh**: pp-Kollisionen bei $\sqrt{s} = 100$ TeV, Ionen



ILC – International Linear Collider

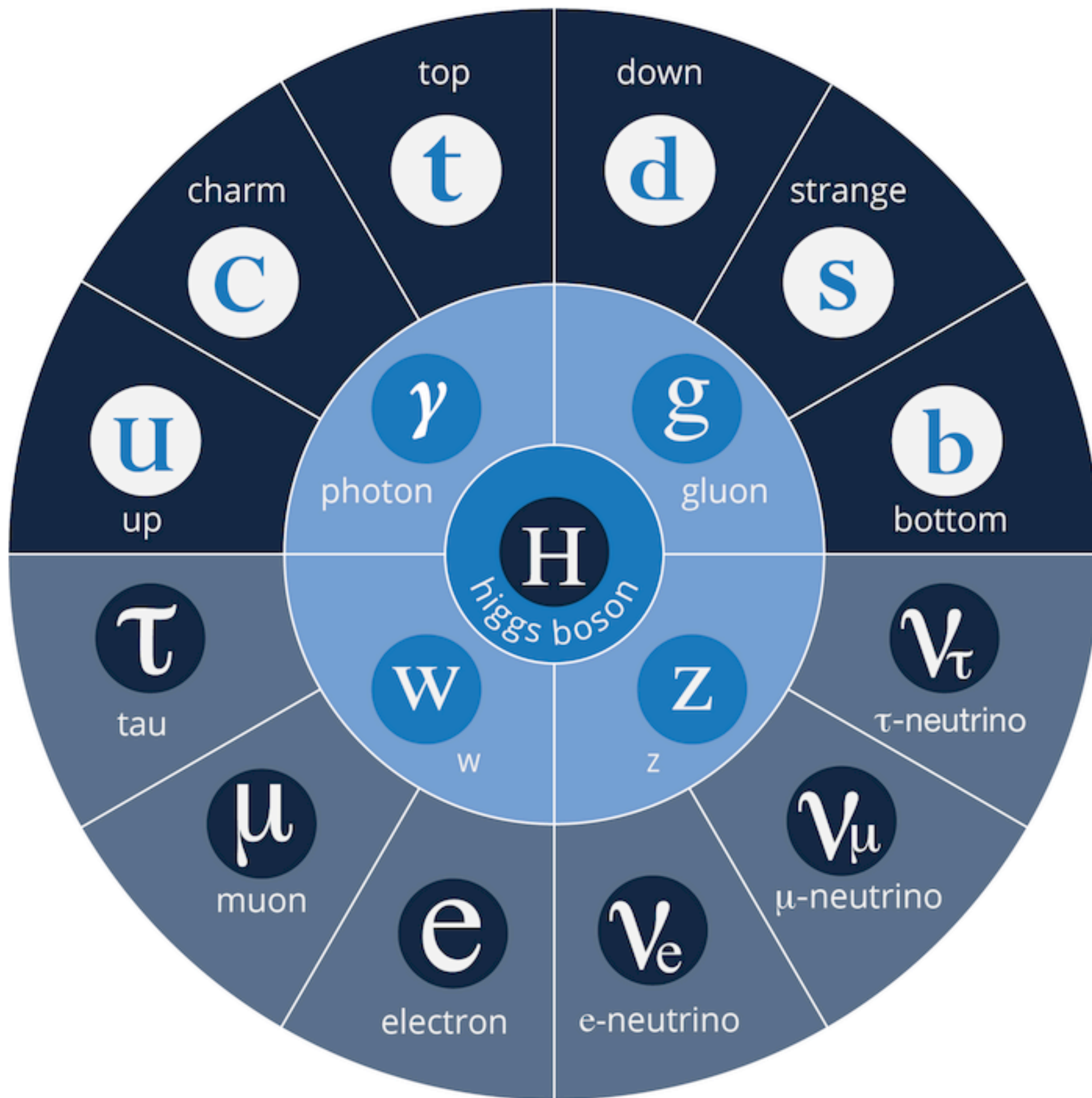
- geplant für e^+e^- Kollisionen bei $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$
 - Präzisionsmessung von Higgs, Top
 - Suche nach „neuer“ Physik



Konzept: Luminosität

- So bauen einen neuen Beschleuniger und wollen die Luminosität erhöhen? Wie können Sie das erreichen?

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

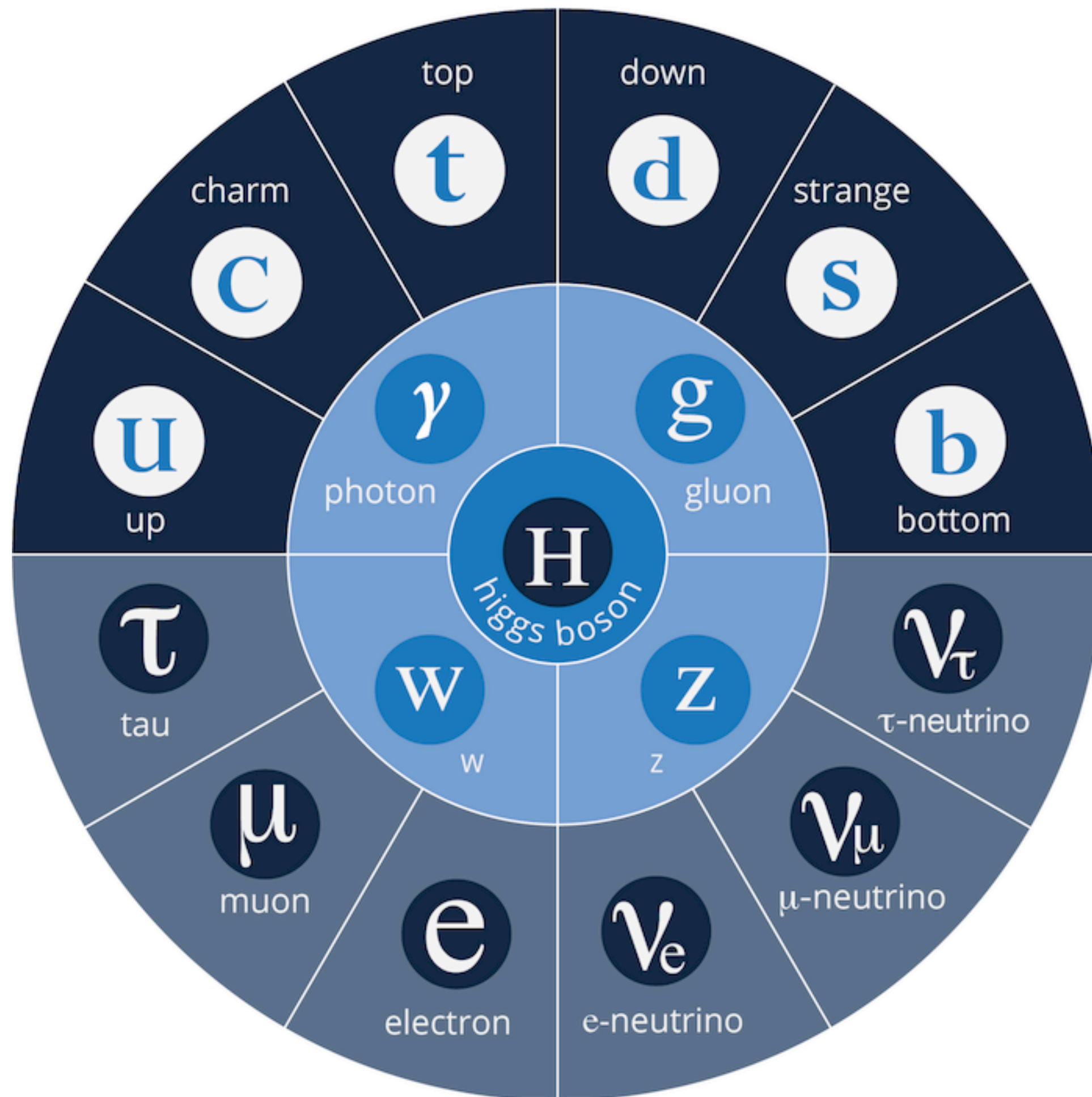


■ 2. Experimentelle Methoden

- 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

■ 3. Struktur der Materie

- 3.1. Rutherford Streuung & Wirkungsquerschnitt
- 3.2. Mott Streuung & Formfaktoren
- 3.3. Struktur von Nukleonen

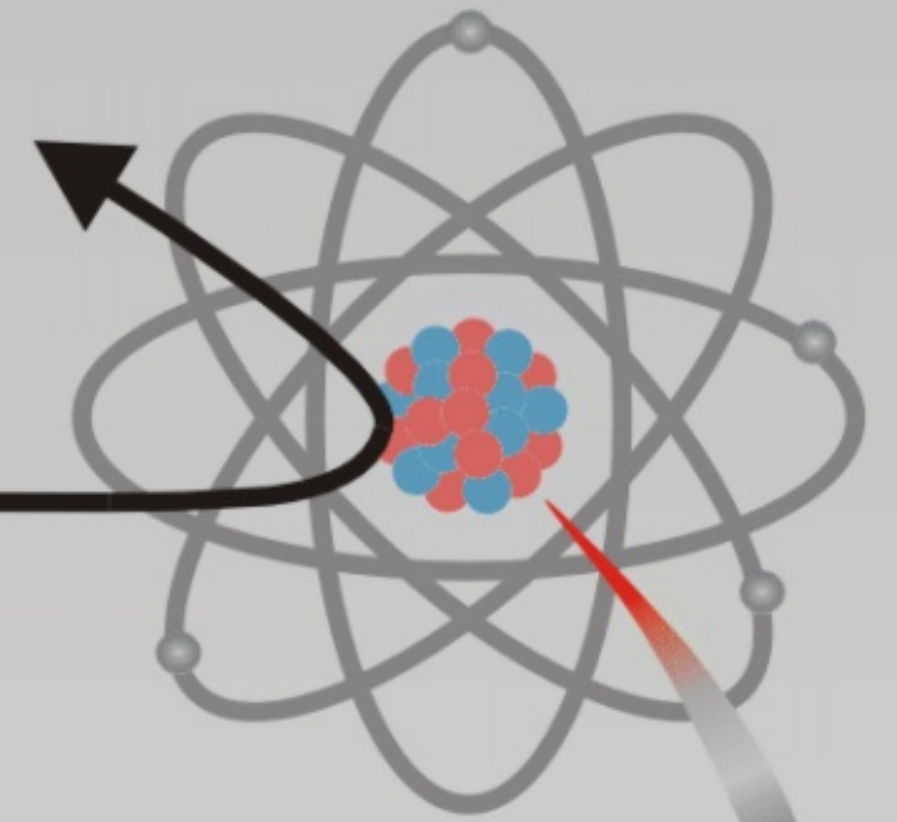


■ Die Aufklärung der Struktur der Materie

- zentrales Leitmotiv:
benutze **Streuexperimente**
- **Rutherford & Marsden:**
 α -Teilchen ($4,8 \text{ MeV}$) aus Quelle zum
Nachweis des punktförmigen Kerns
- **Robert Hofstadter:**
Elektronen (bis $\sim 600 \text{ MeV}$) zum
**Nachweis der Ladungsverteilung
des Kerns & Proton-Formfaktors**

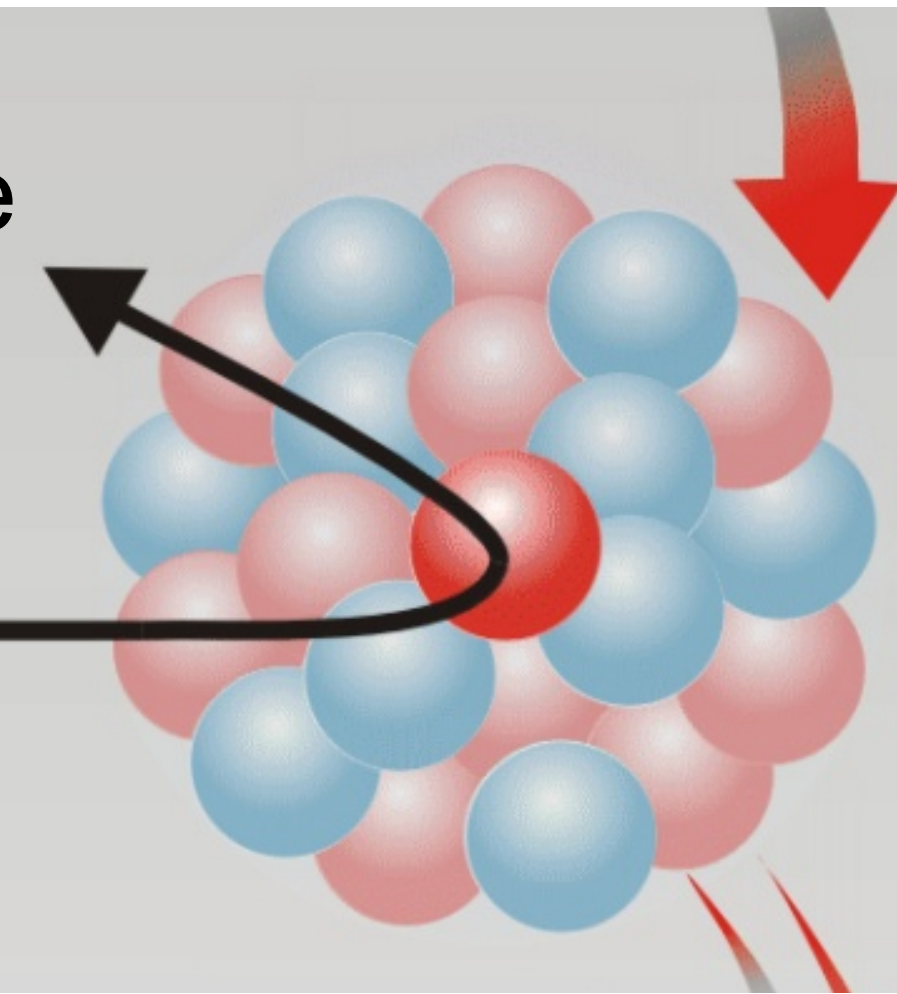
Rutherford, 1908
Entdeckung Atomkern

α -Teilchen



Hofstadter, 1956
Ausdehnung der Kerne
Proton-Formfaktor

Elektronen



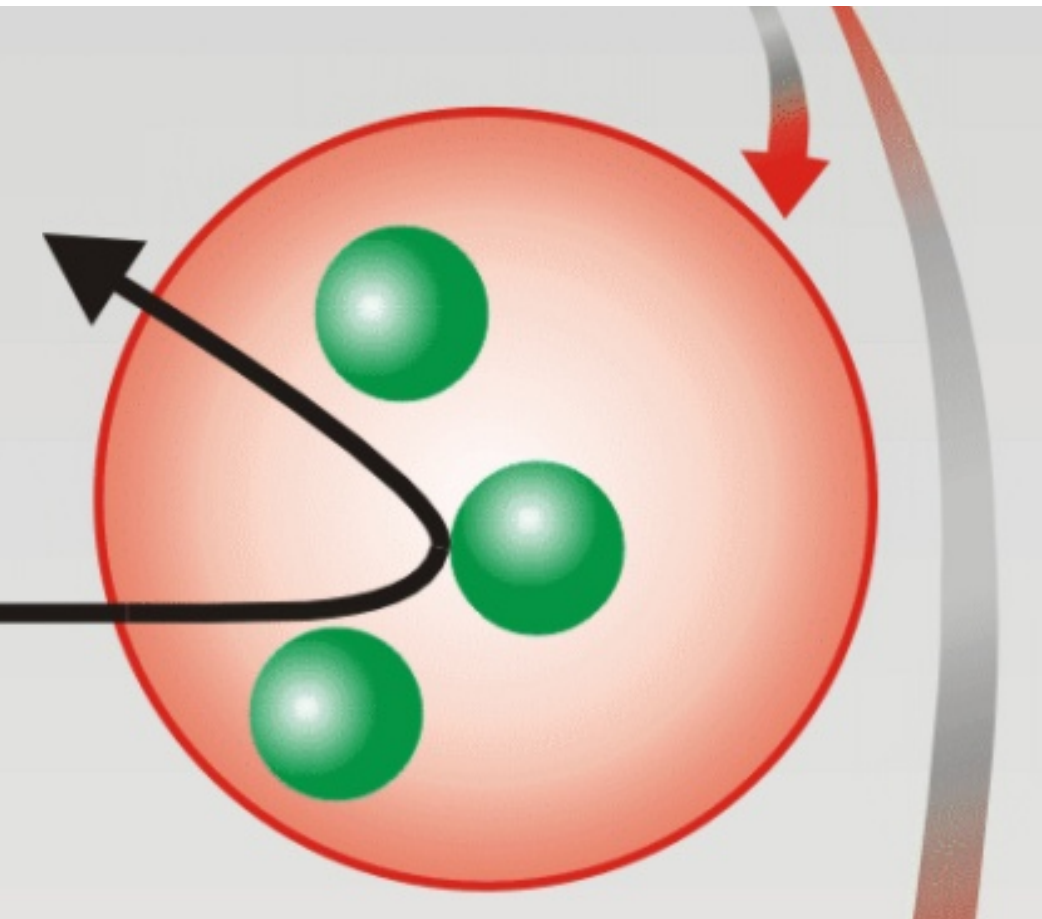
Q: spektrum

■ Die Aufklärung der Struktur der Materie

- Friedman, Kendall, Taylor (1962):
20 GeV Elektronen vom SLAC zum
Nachweis von punktförmigen Quarks
- zahlreiche *HE**-Streuexperimente an
Beschleunigern mit Elektronen,
Myonen und Neutrinos (u.a. DESY):
**Nachweis des komplexen Aufbaus
von Protonen: Gluonen, Seequarks,
(Partonen), Spin-Eigenschaften**

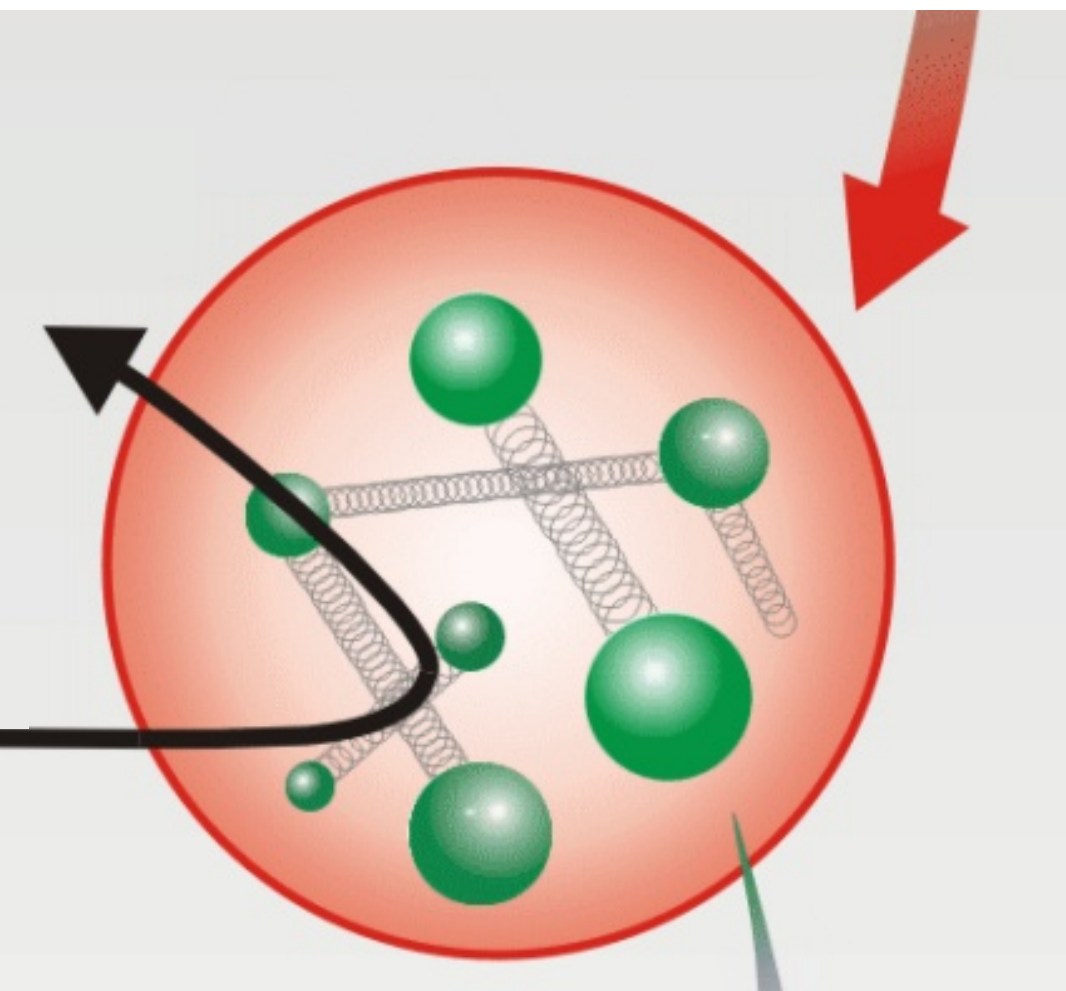
Friedman, 1962
Entdeckung Quarks

Elektronen



HERA (DESY), 1992
Aufbau des Protons

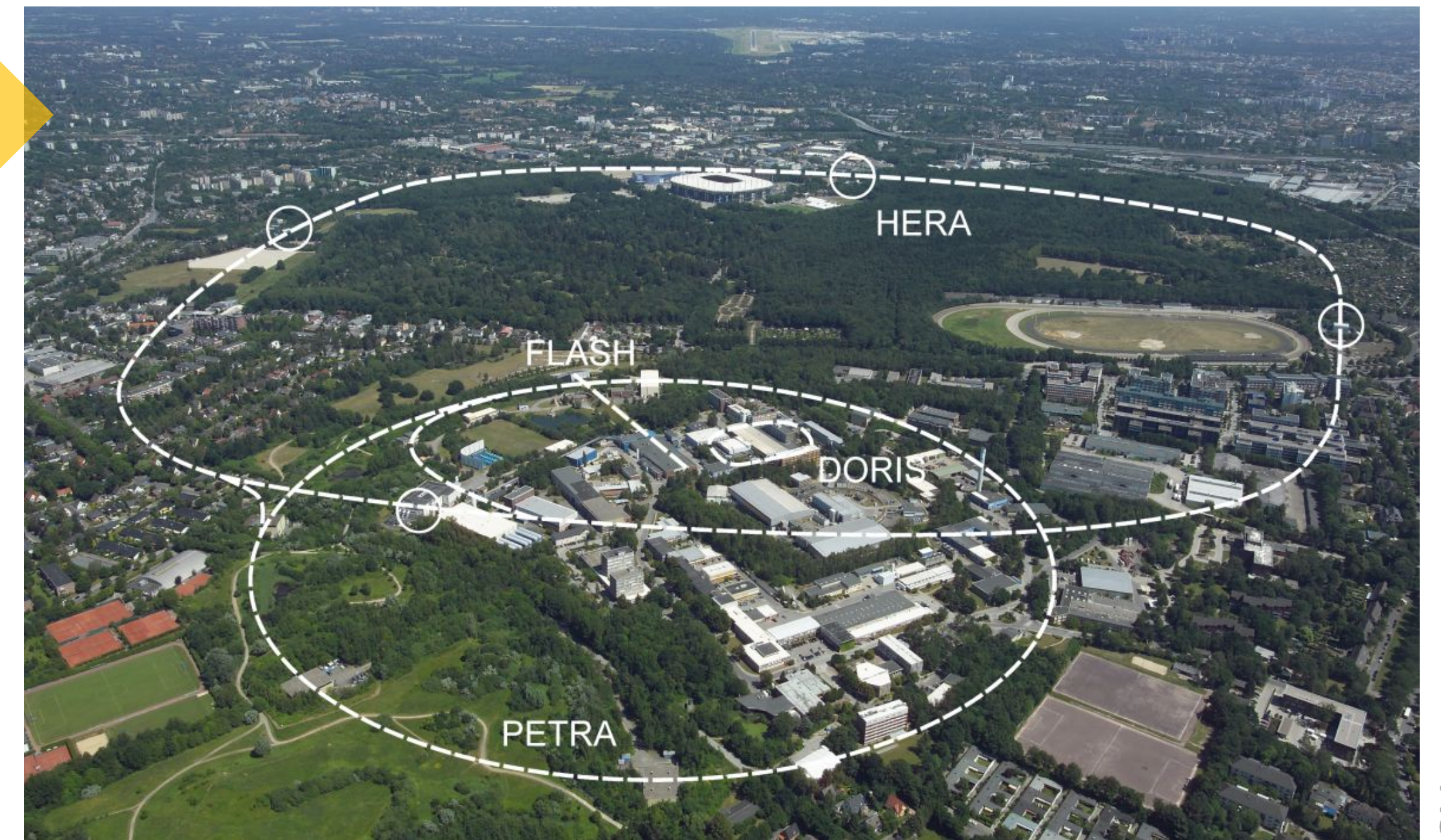
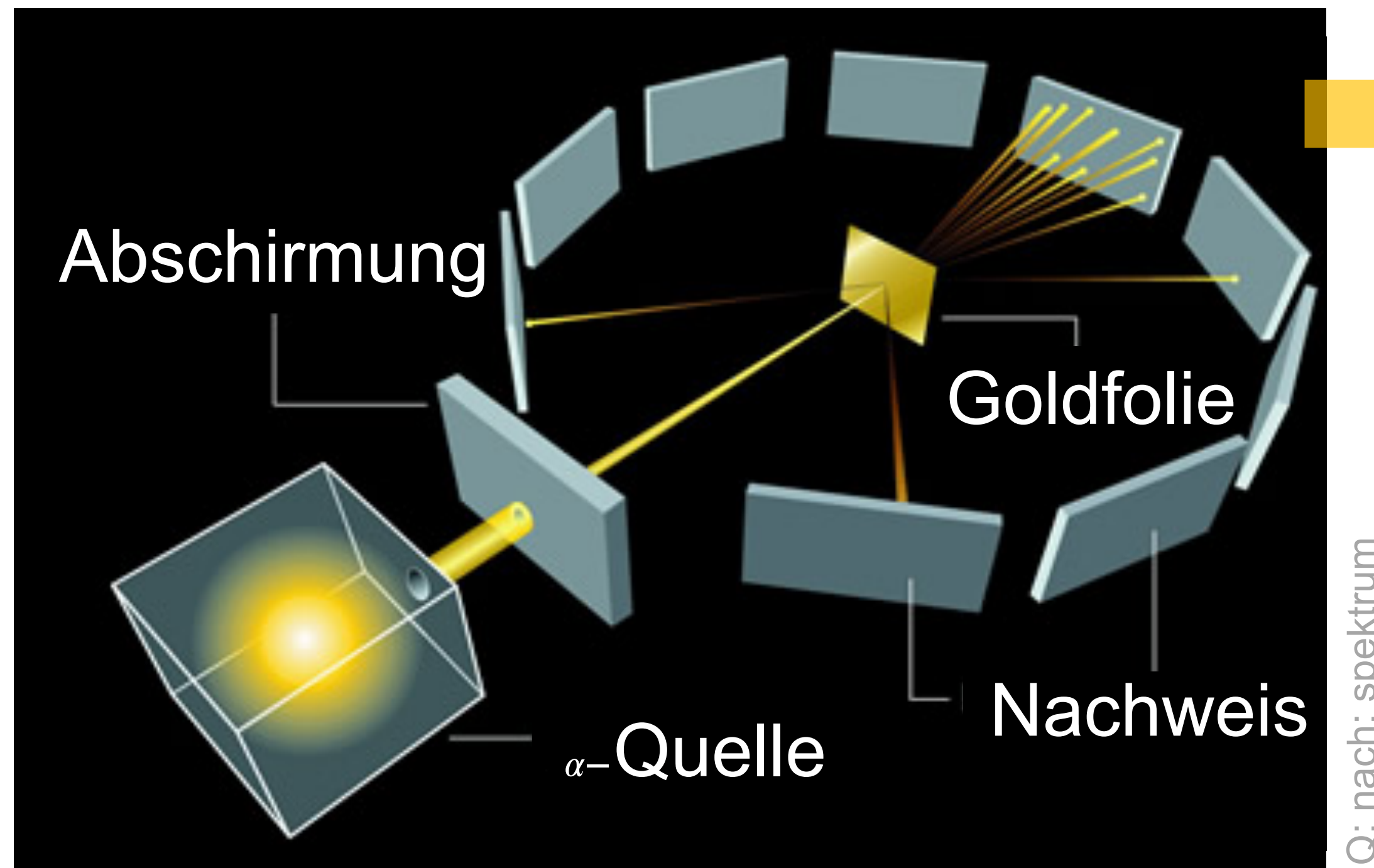
Elektronen, Myonen,
Neutrinos



Q: spektrum

Streuexperimente: Fortschritte

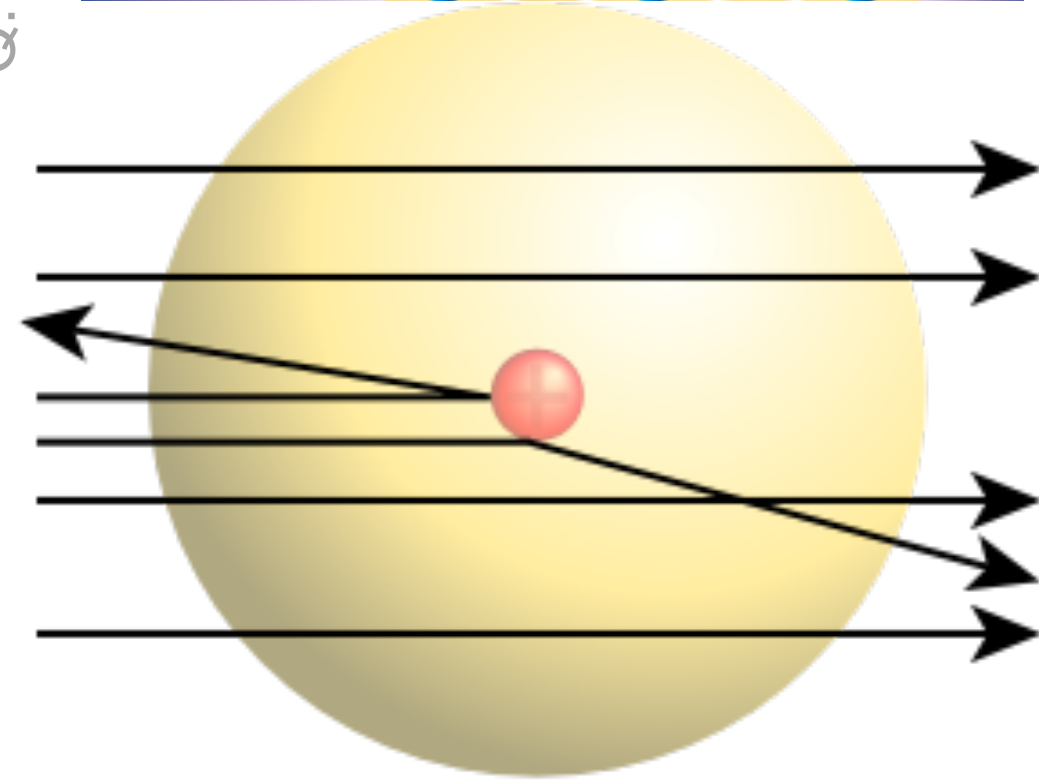
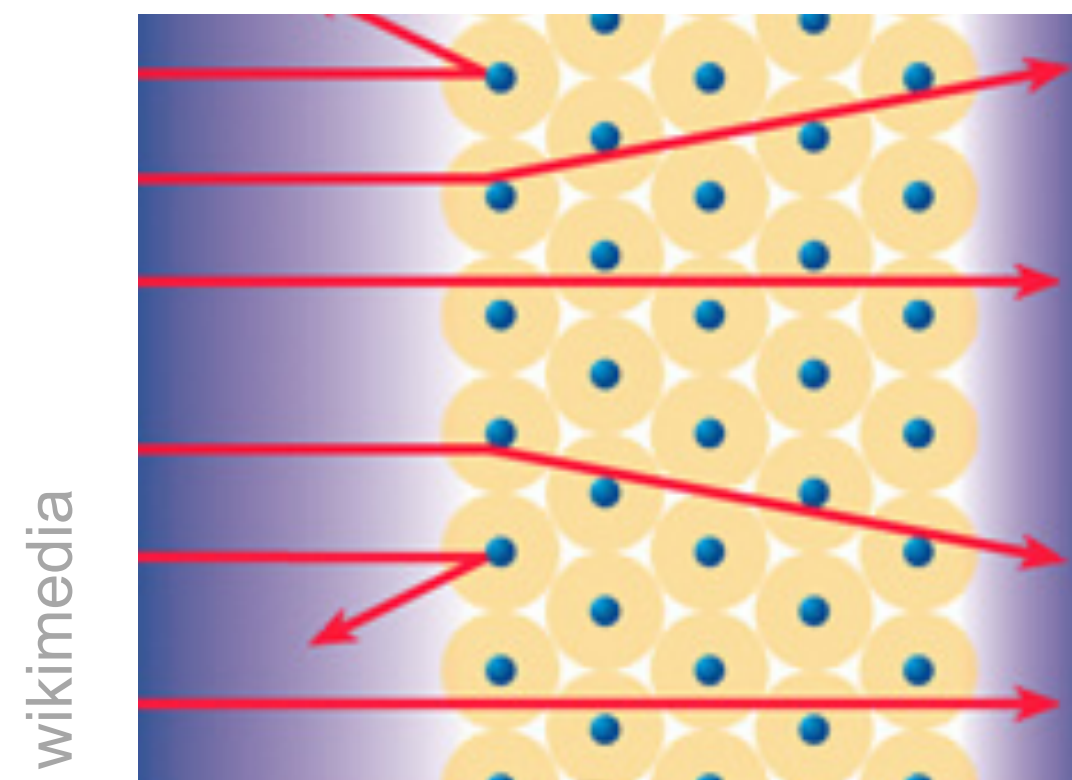
- Streuexperimente: Messungen bei immer höherer Energie
 - moderne Beschleuniger mit immer höherer Energie & besserer Auflösung



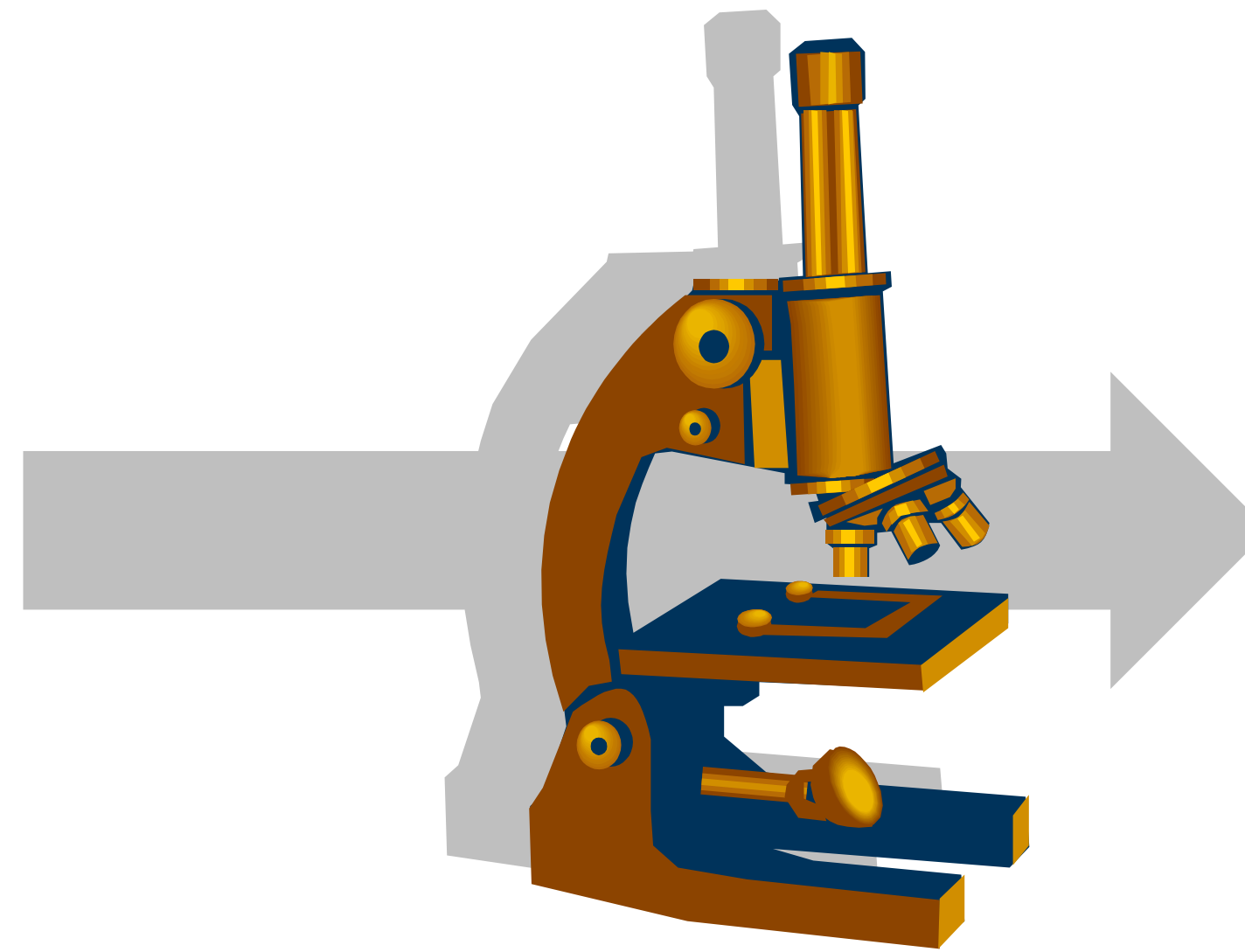
α – Energie: **5 MeV** p – Energie: **800 GeV**
 e^- – Energie: **30 GeV**



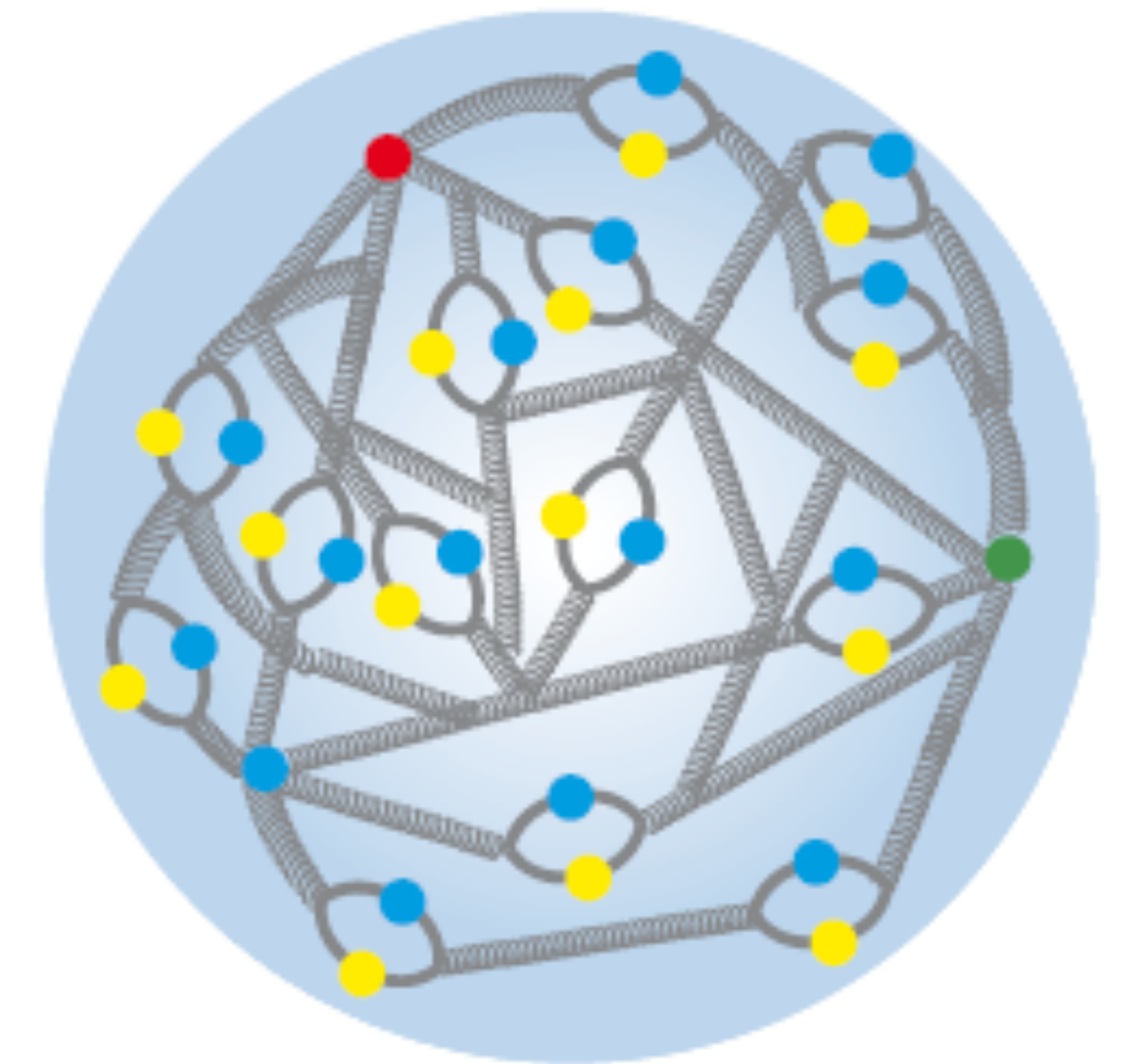
- **Streuexperimente: Messungen bei immer höherer Energie**
 - moderne **Beschleuniger** mit immer höherer Energie & besserer Auflösung



punktförmiger Kern



$$0,197 \text{ fm} \\ = \\ 1 \text{ GeV}^{-1}$$



komplexes Nukleon bestehend
aus Partonen: **Valenzquarks**,
Seequarks, **Gluonen**