

Forschungsmethoden in der Teilchenphysik - Teil 1 -

Philipp Lindenau, Tobias Patrick Treczoks

Jülich | 15.-17.04.2024



Basierend auf Band 2:

Forschungsziele

Beschleuniger

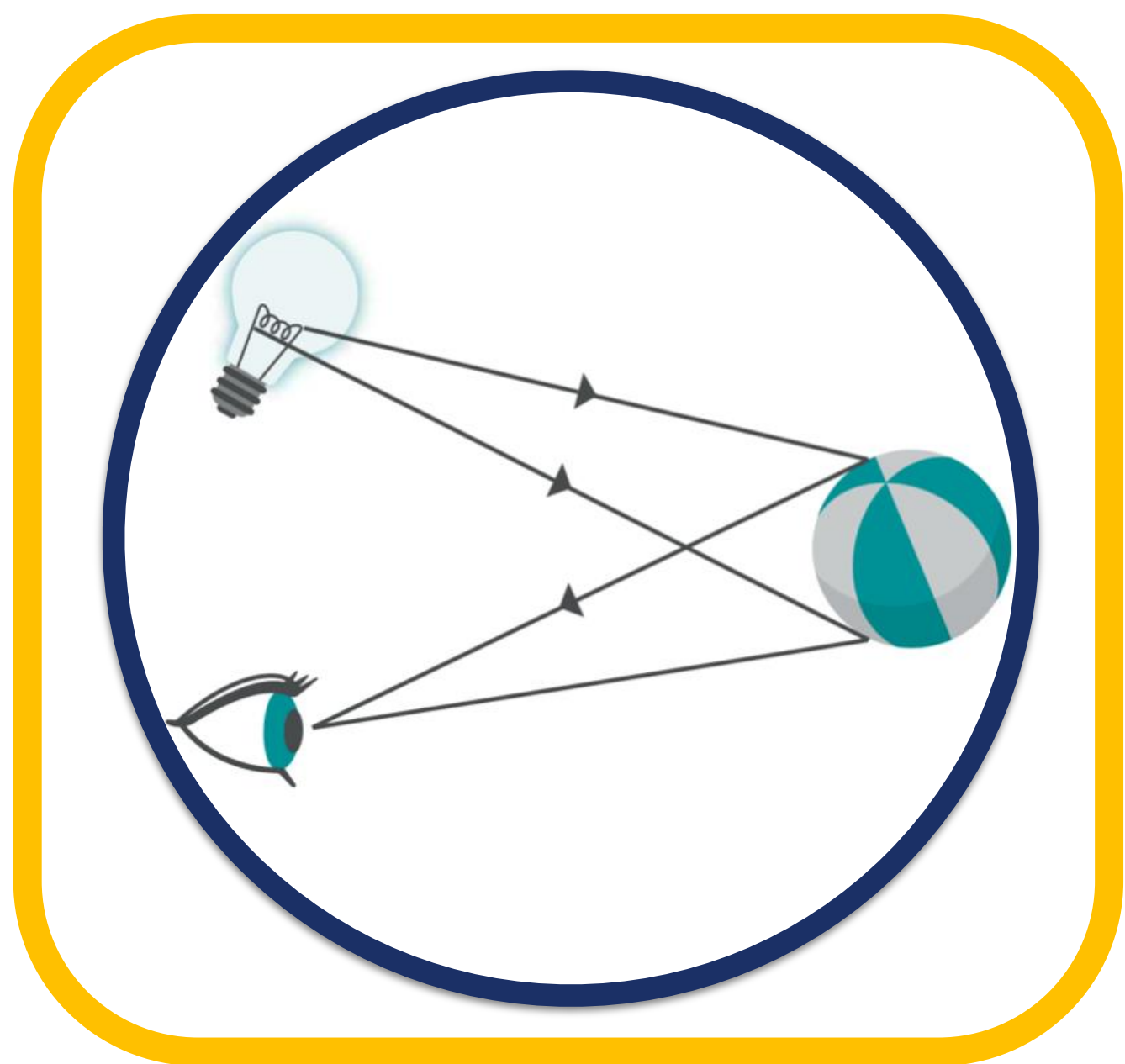
Detektoren

Zahlreiche Aufgaben & Lösungen

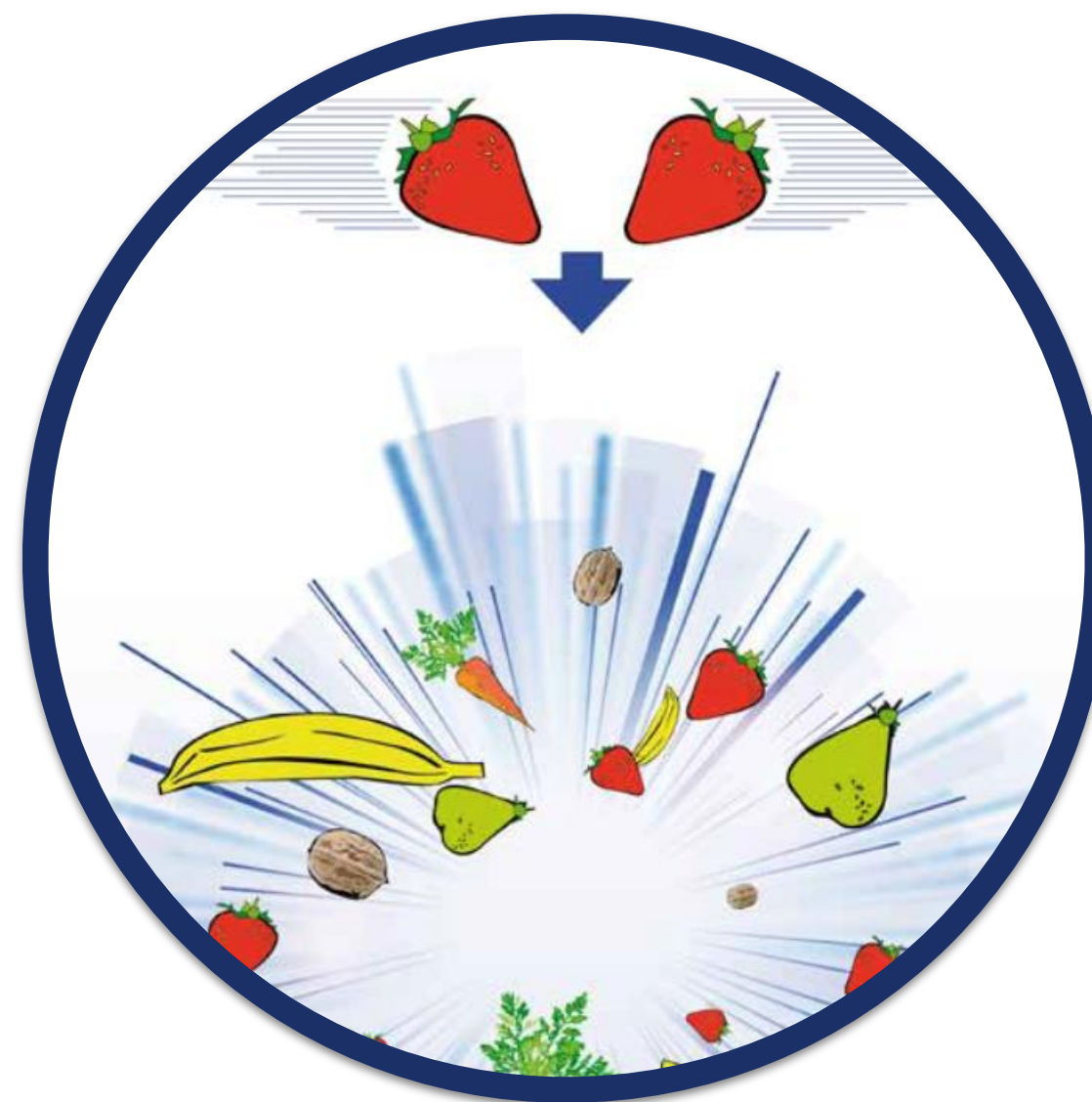


Forschungsziele

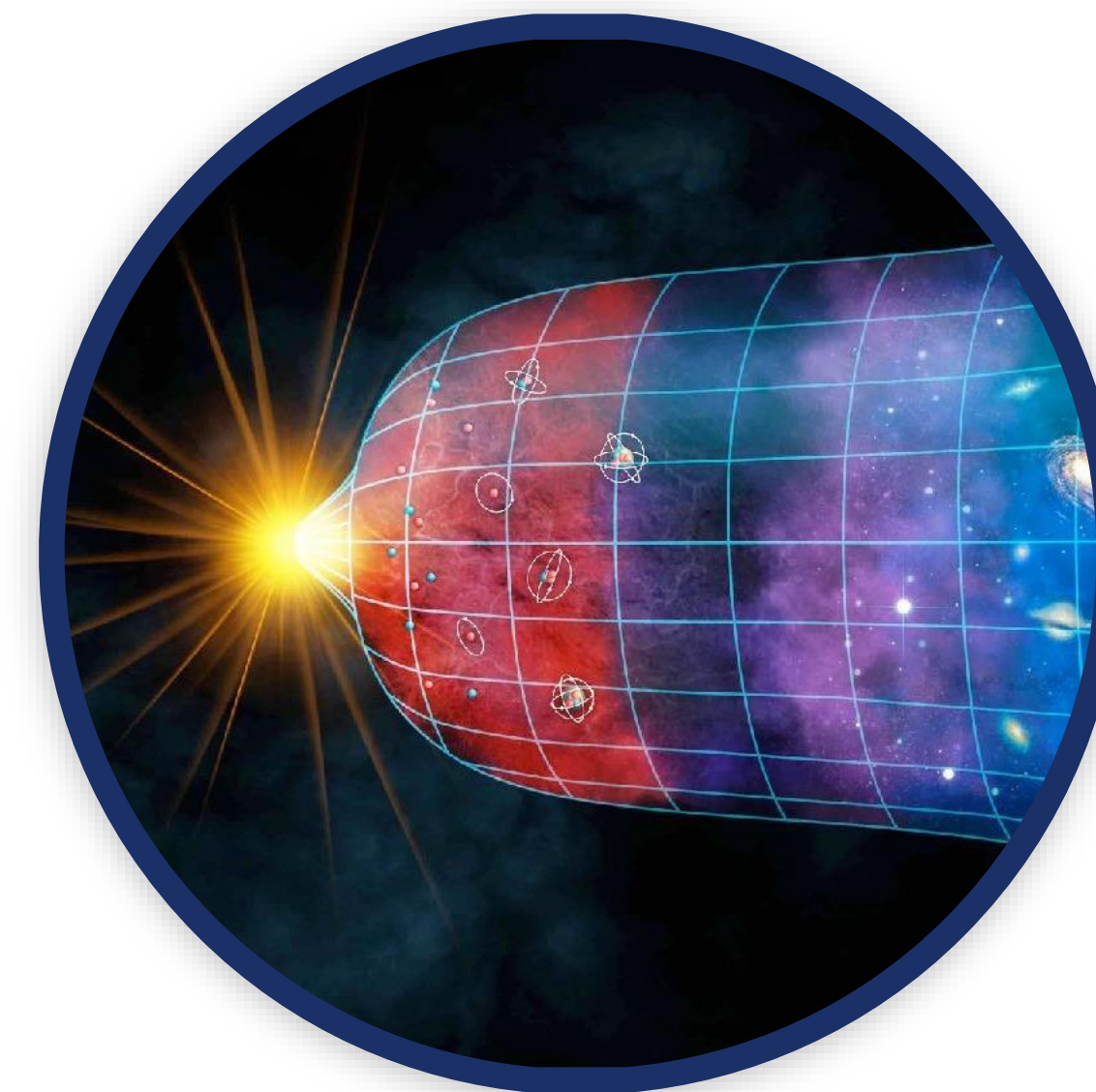
Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



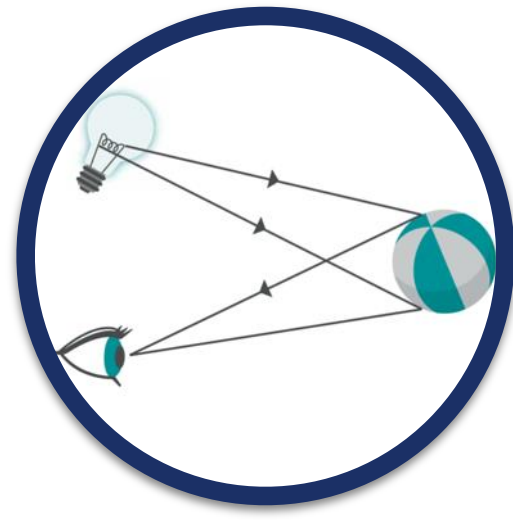
Strukturuntersuchungen



Nachweis neuer Teilchen



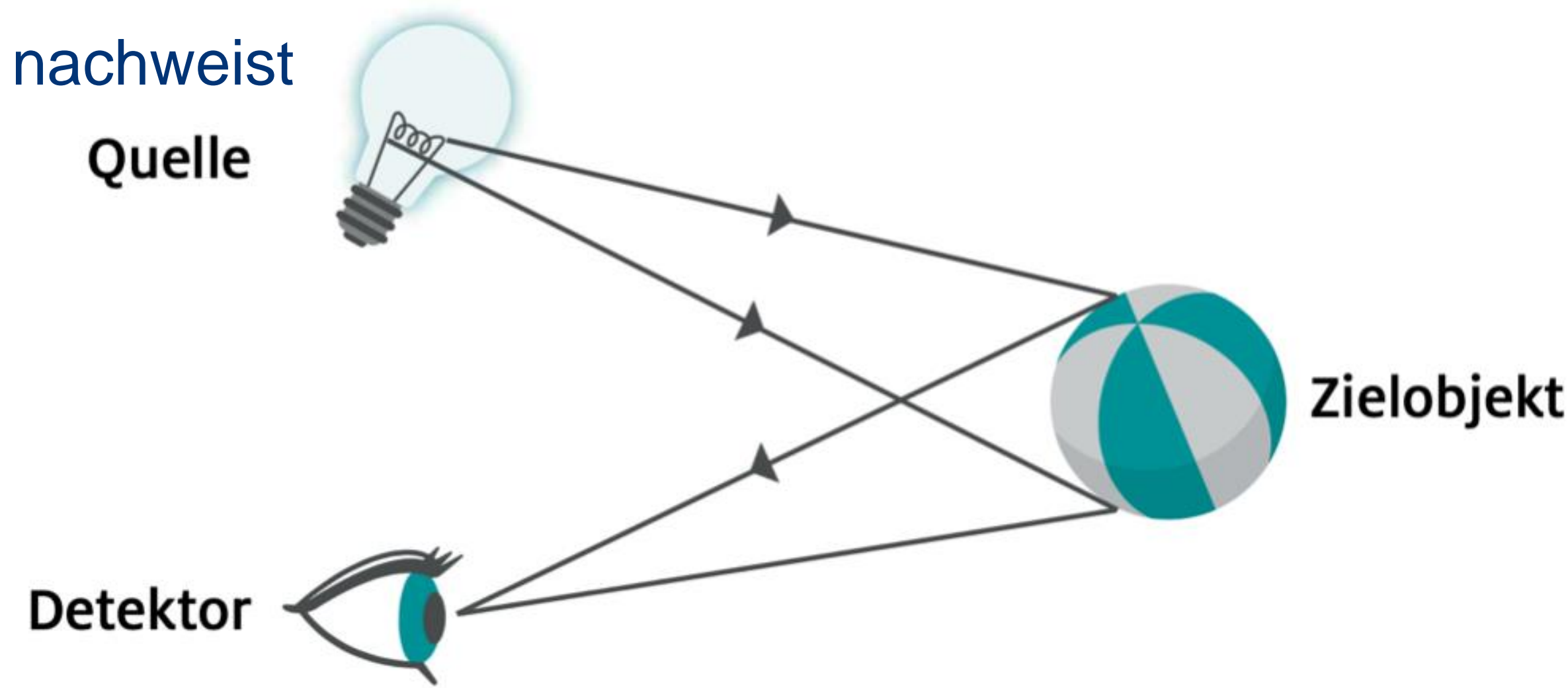
Erzeugung extremer Bedingungen

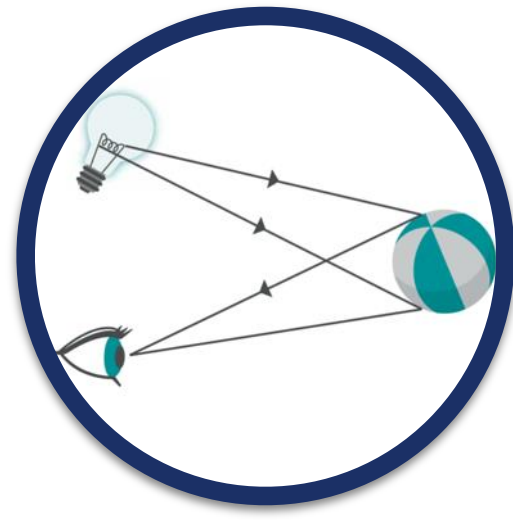


Strukturuntersuchungen

Das Prinzip der Beobachtung von Objekten und Strukturen hat dabei immer drei Komponenten

- ▶ **Projektile**, die aus einer Quelle auf das Zielobjekt treffen (z. B. Photonen aus einer Lichtquelle)
- ▶ Das **Zielobjekt**, das die Projektile reflektiert oder streut (z. B. ein Ball)
- ▶ Einen **Detektor**, der die gestreuten Projektile nachweist (z. B. Auge)



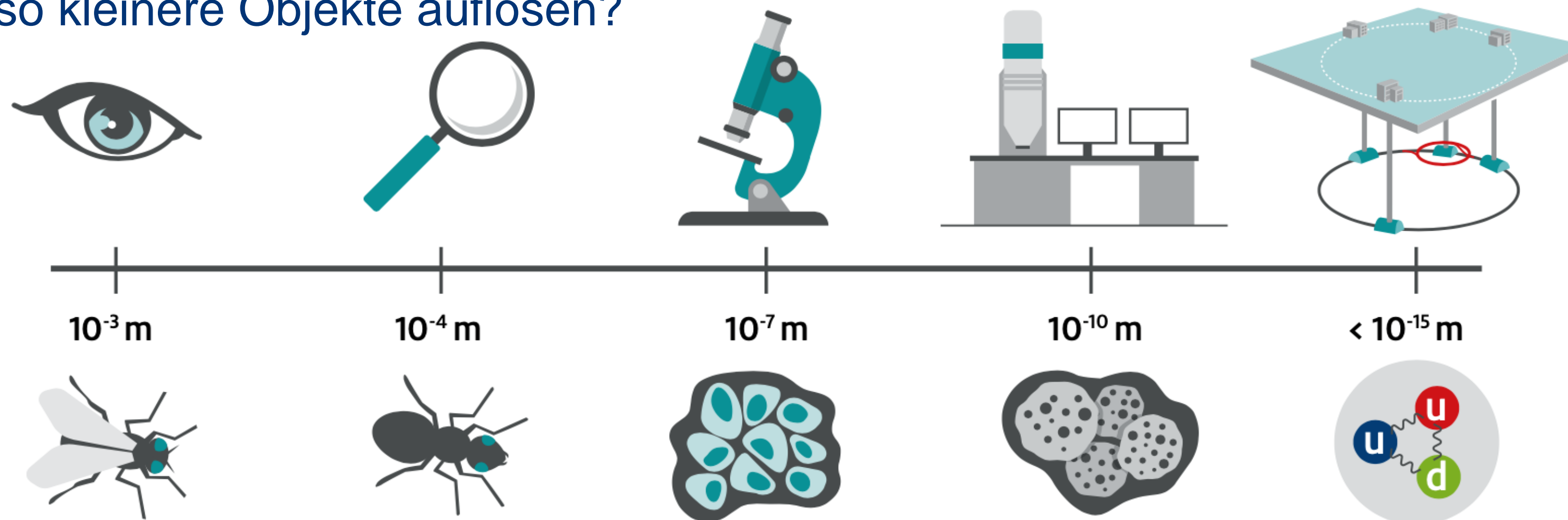


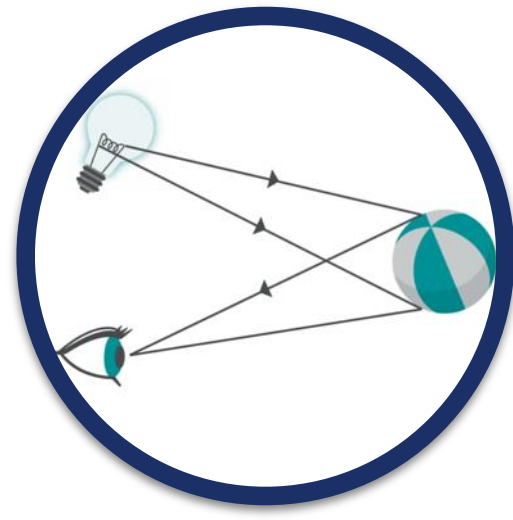
Strukturuntersuchungen

- ▶ Auflösungsgrenze, hängt davon ab wie genau sich das Projektil lokalisieren lässt, mit dem das zu beobachtende Objekt abgetastet wird.
 - ▶ Ernst Abbe & Baron Rayleigh: Linearer Zusammenhang mit λ
- ▶ Bei Licht entspricht das dieser Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h \cdot c}{E}$$

- ▶ Grenze für optisches Licht Größenordnung nm (selbst mit STED-Mikroskopie)
- ▶ Wie also kleinere Objekte auflösen?





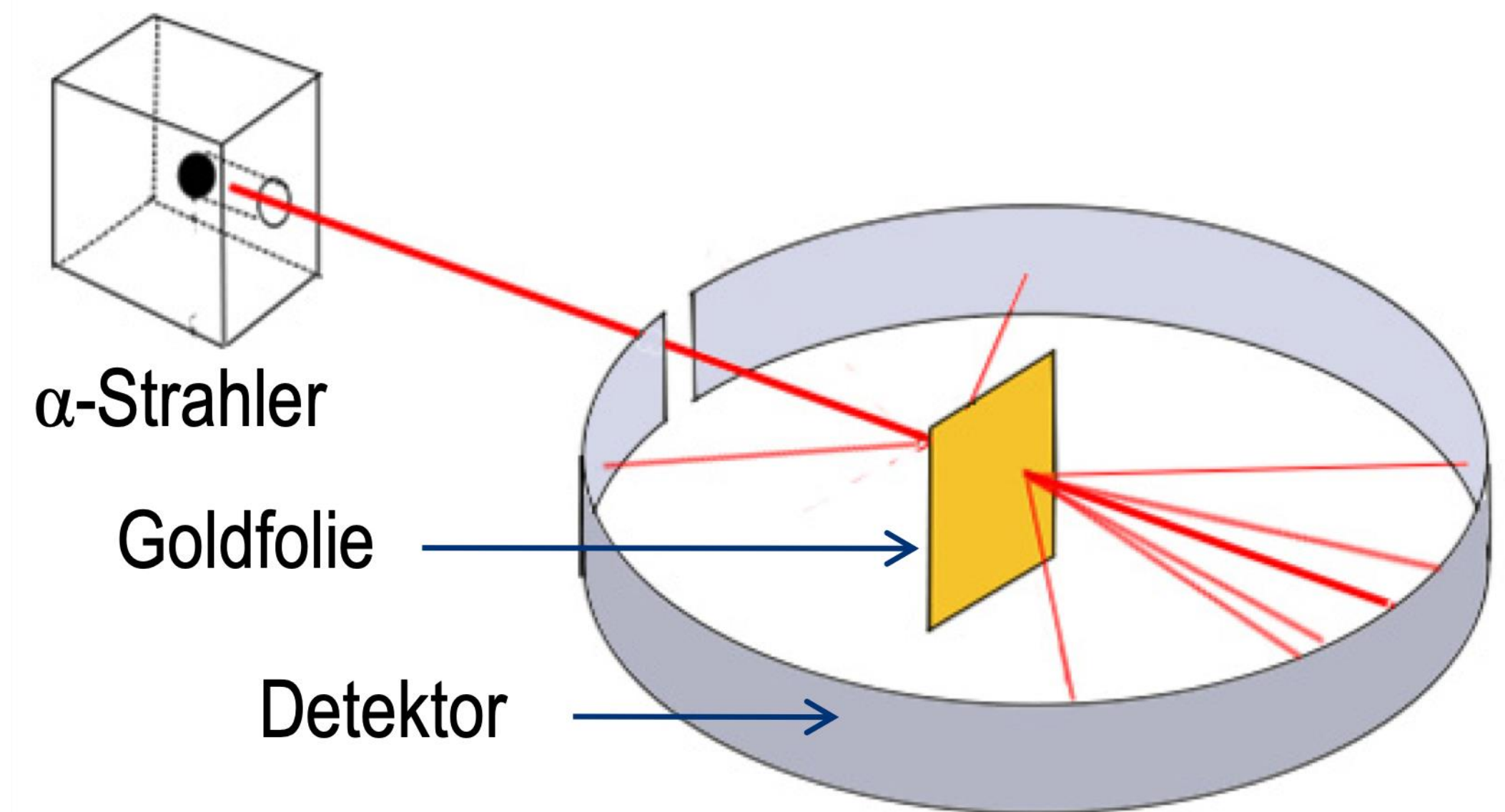
Strukturuntersuchungen

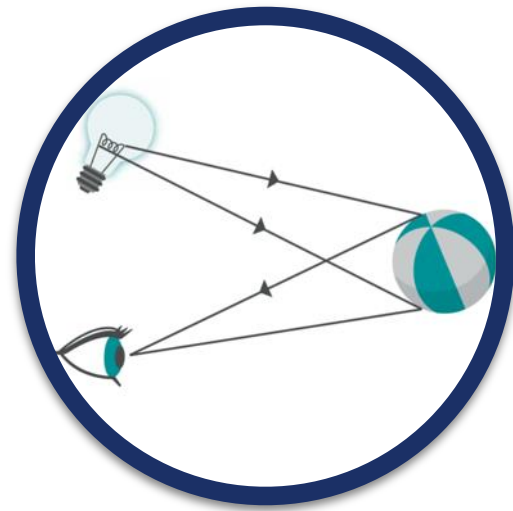
- ▶ Rutherford-Streuexperiment (1911)
- ▶ Streuung von α -Teilchen an Goldatomen
- ▶ Energie des α -Teilchen einige MeV

- ▶
$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{200 \text{ MeV fm}}{1 \text{ MeV}} \approx 200 \text{ fm}$$

- ▶ Größe eines Protons $\sim 1 \text{ fm}$

- ▶ Um kleine Strukturen aufzulösen benötigt man mehr Energie





Strukturuntersuchungen

▶ Experiment am SLAC (1969)

- ▶ Nachweis der Quarks
- ▶ Nobelpreis 1990: Friedman, Kendall und Taylor.

▶ Streuung von Elektronen an Protonen

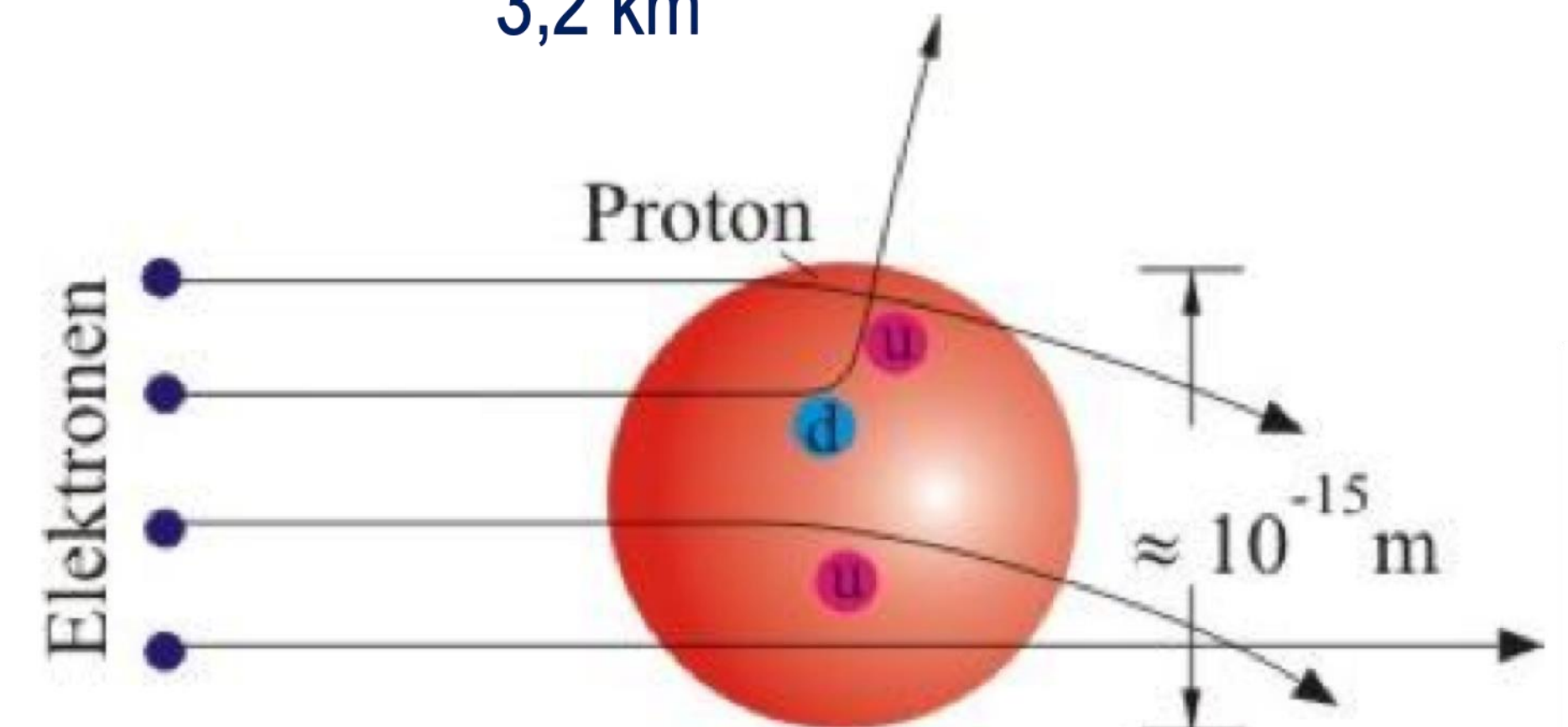
▶ Elektronen Energie bis zu 50 GeV

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{200 \text{ MeV fm}}{50 \text{ GeV}} \approx 0,01 \text{ fm}$$

▶ Um (noch) kleinere Strukturen aufzulösen benötigt man (noch) mehr Energie

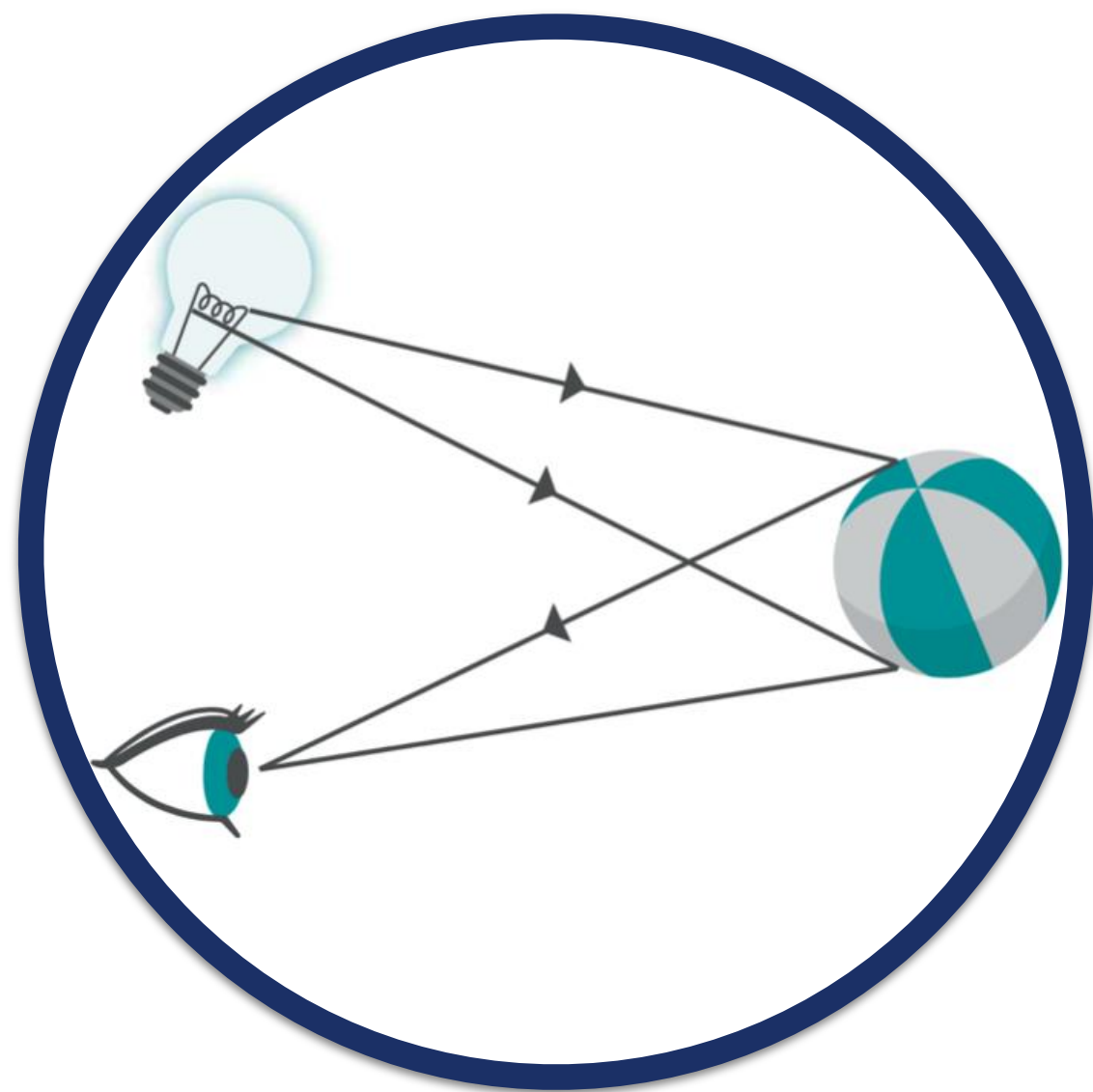


3,2 km

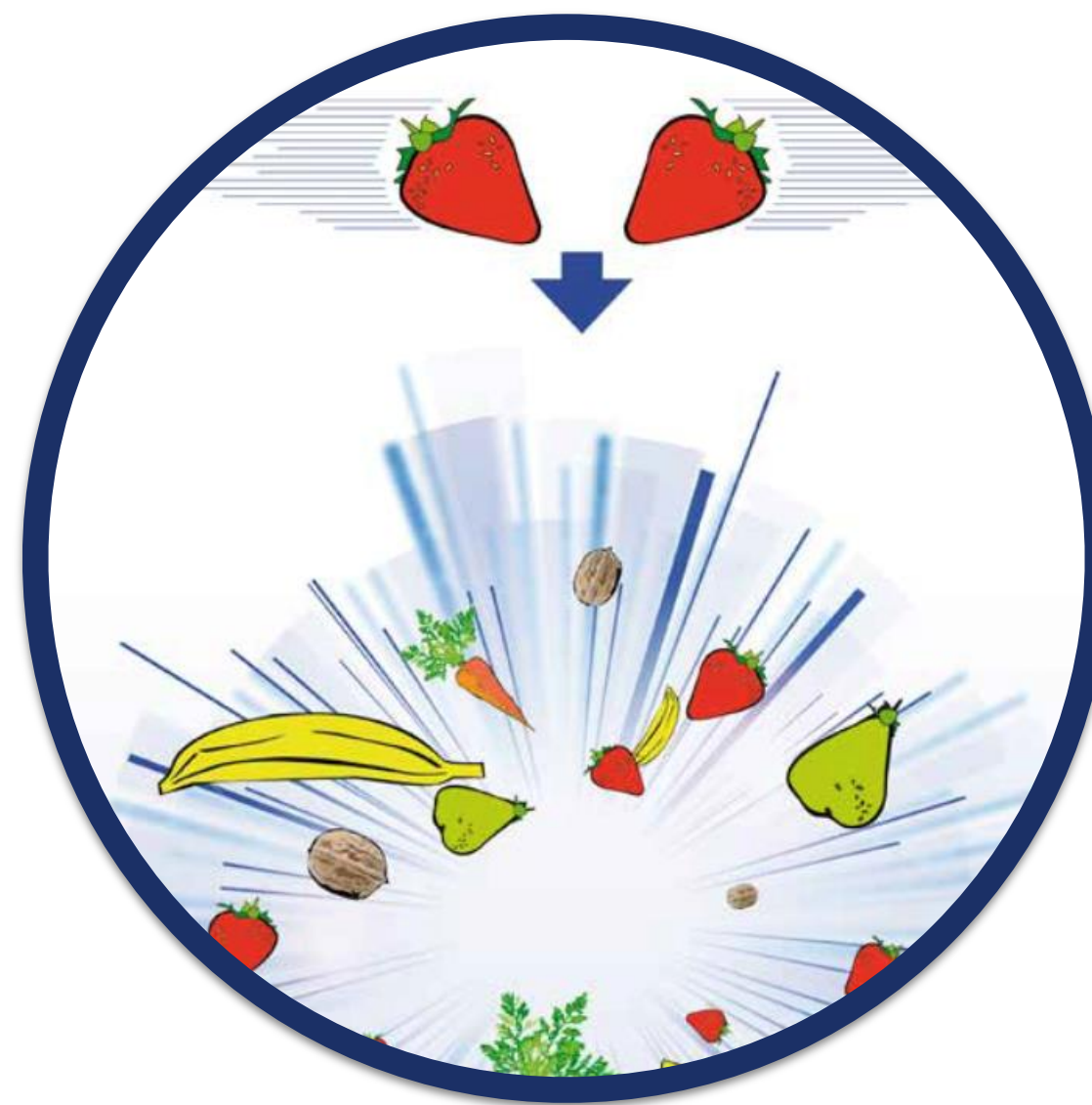


Forschungsziele

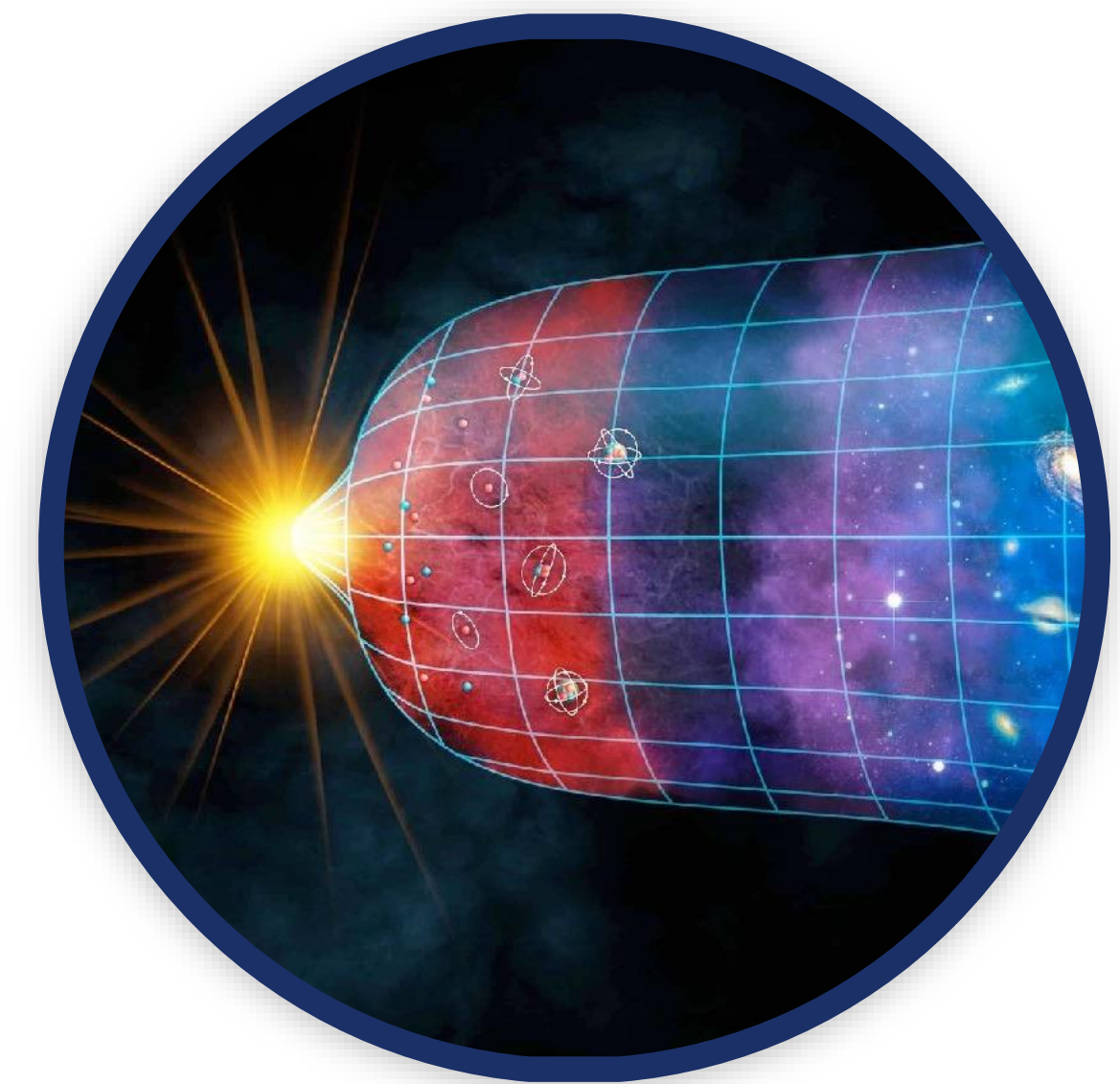
Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



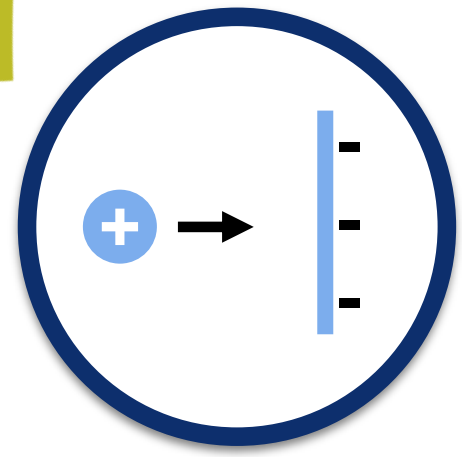
Strukturuntersuchungen



Nachweis neuer Teilchen



Erzeugung extremer
Bedingungen

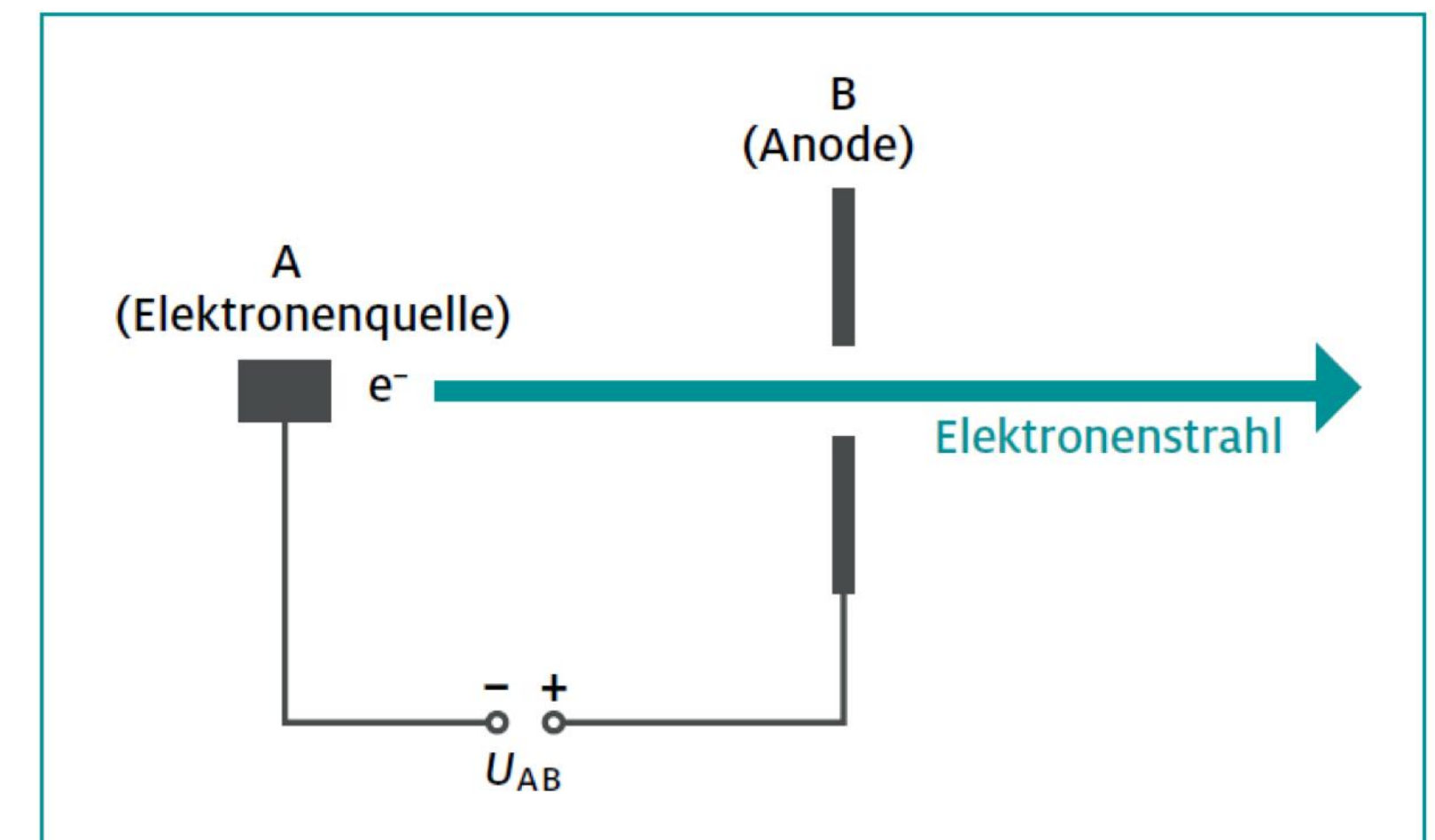
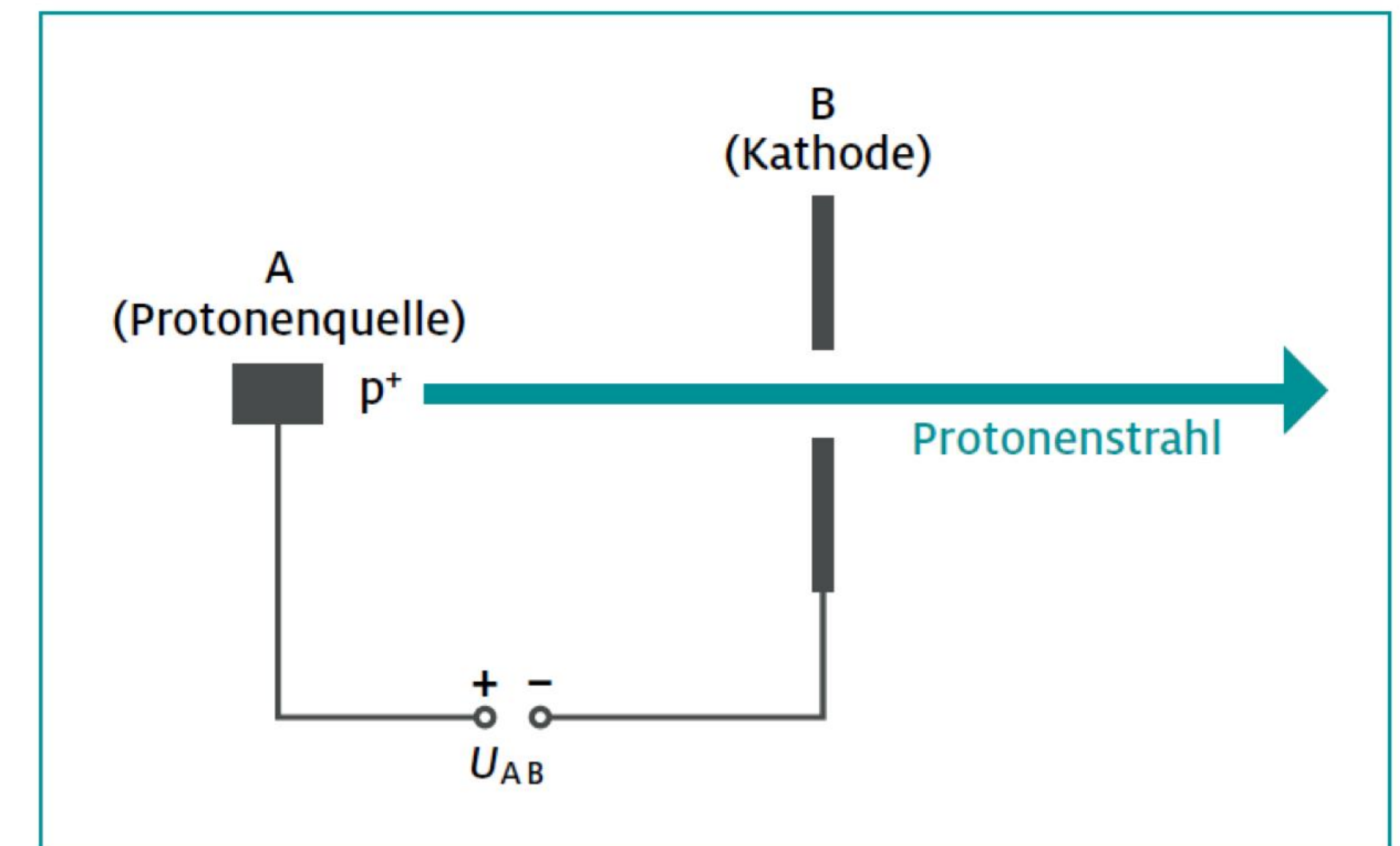


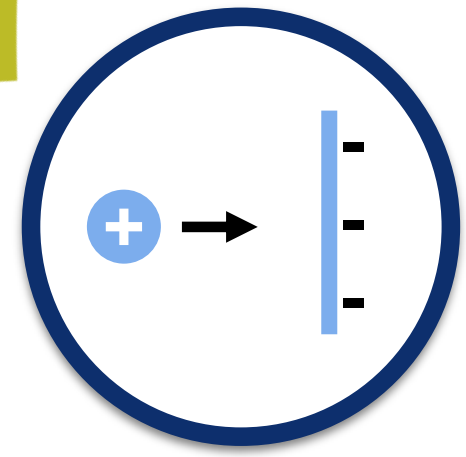
Physik der Beschleuniger

Wie werden die Teilchen beschleunigt?

Konzept Experimente an Beschleunigern:

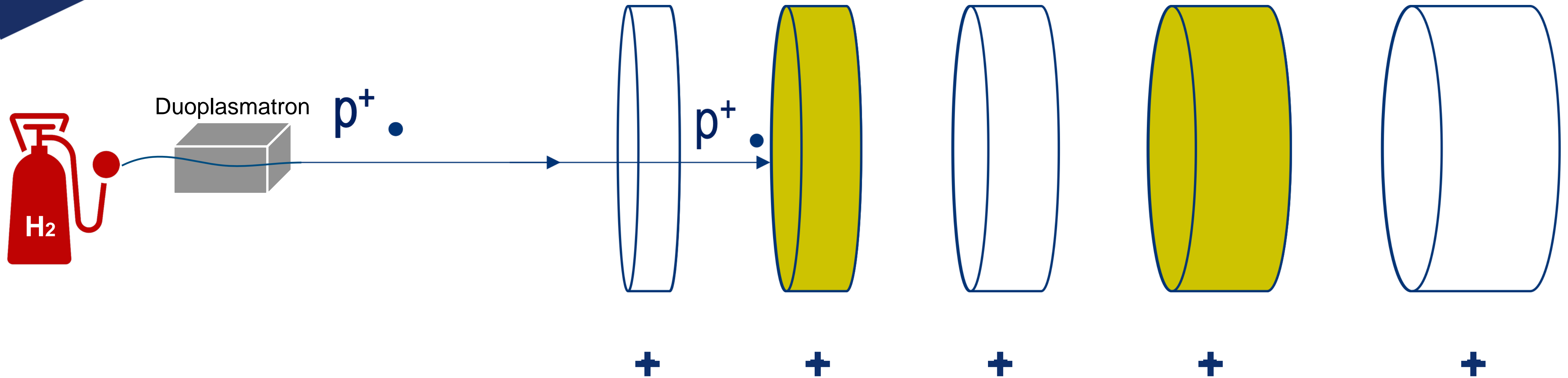
- ▶ **Teilchen erzeugen:**
Elektrisch neutrale Teilchen werden ionisiert
- ▶ **Teilchen beschleunigen:**
Elektrisch geladene Teilchen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- ▶ **Teilchen ablenken und/oder fokussieren:**
Elektrisches oder magnetisches Feld
- ▶ **Teilchen nachweisen:**
Leuchtschirm/Detektor



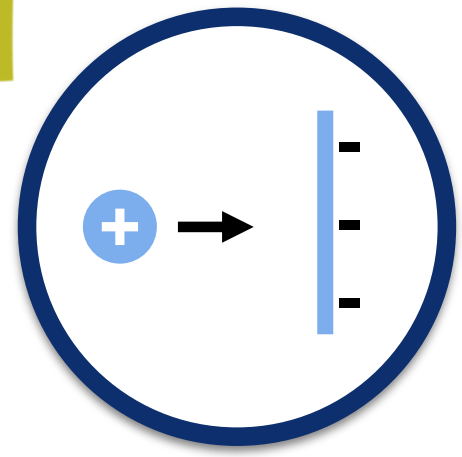


Physik der Beschleuniger

- Um in Teilchenbeschleuniger höhere Energien zu erreichen, durchlaufen sie ein **elektrisch Wechselfeld**:



- Wird die **Polung des elektrischen Feldes** im richtigen Moment umgekehrt, wird das Teilchen beschleunigt.
- Teilchen werden schneller → Driftröhren werden länger

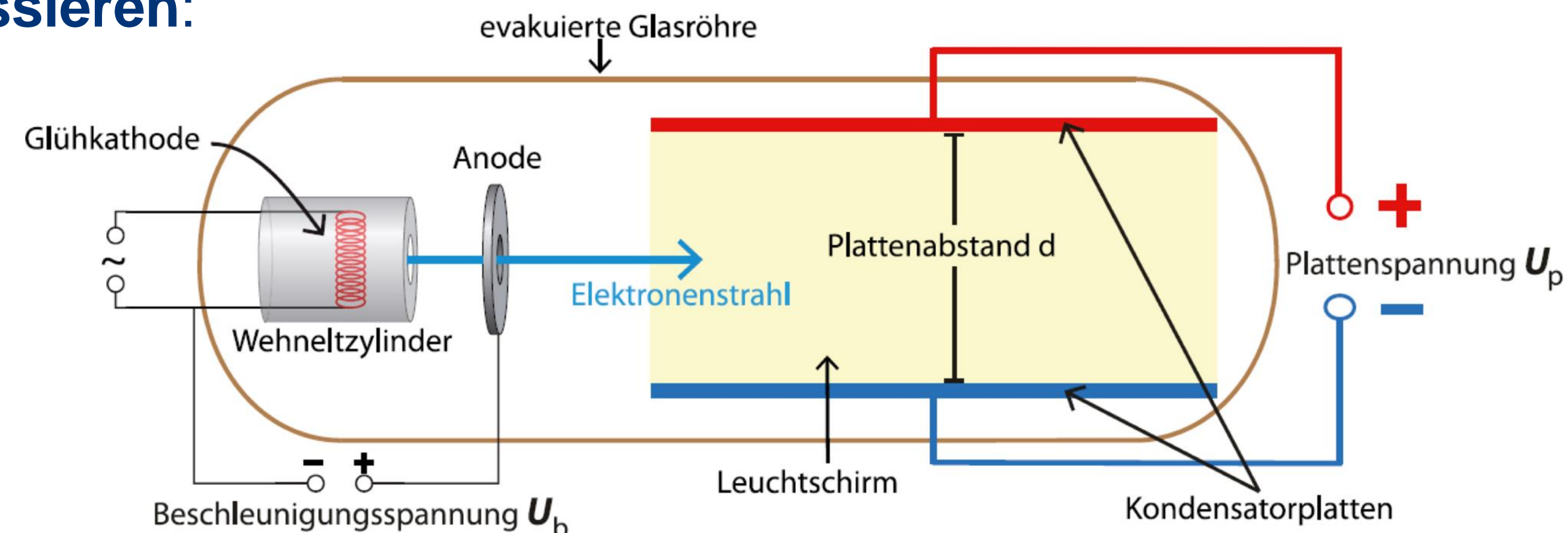


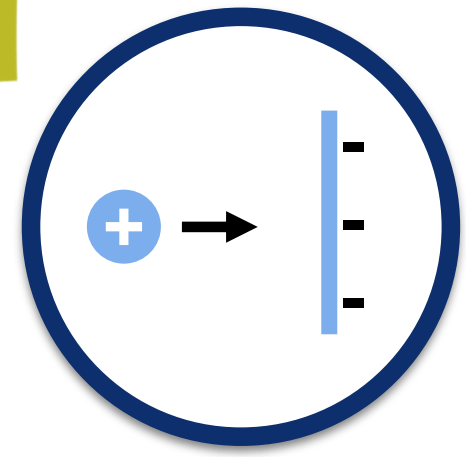
Physik der Beschleuniger

Konzept Experimente an Beschleunigern:

- ▶ **Elektronen erzeugen:**
Elektrisch neutrale Teilchen werden ionisiert
- ▶ **Elektronen beschleunigen:**
Elektronen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- ▶ **Elektronen ablenken und/oder fokussieren:**
Elektrisches oder magnetisches Feld
- ▶ **Teilchen nachweisen:**
Leuchtschirm/Detektor

Lehrplanthema!

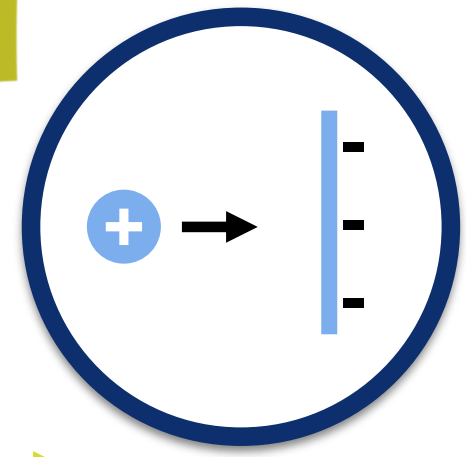




Physik der Beschleuniger

- ▶ Die Produktion von Röhrengeräten wurde im Jahr 2008 eingestellt...
- ▶ Der neue Linearbeschleuniger LINAC4 des CERN hat am 20. August 2020 den alten Linearbeschleuniger LINAC2 abgelöst...





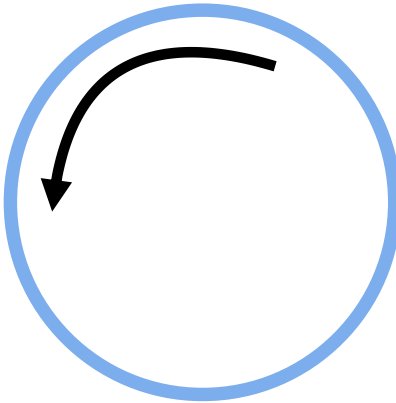
Physik der Beschleuniger

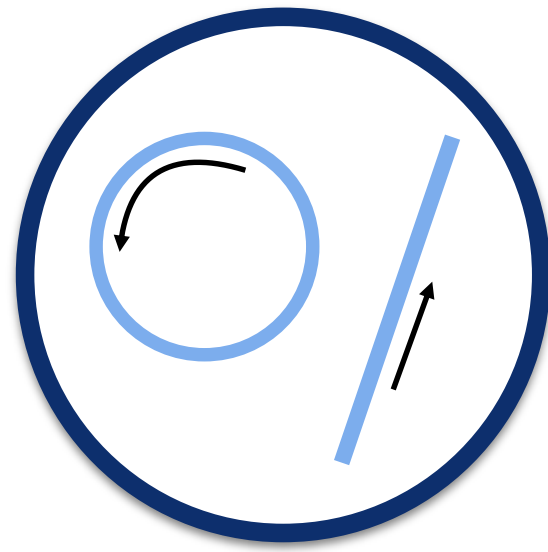
Linearbeschleuniger

- ▶ Elektrisch geladene Teilchen durchqueren elektrische Felder
- ▶ **Vorteile:**
Beschleunigung kann bei „Null“ beginnen
- ▶ **Nachteile:**
Elektrische Felder werden nur einmal genutzt

Kreisbeschleuniger

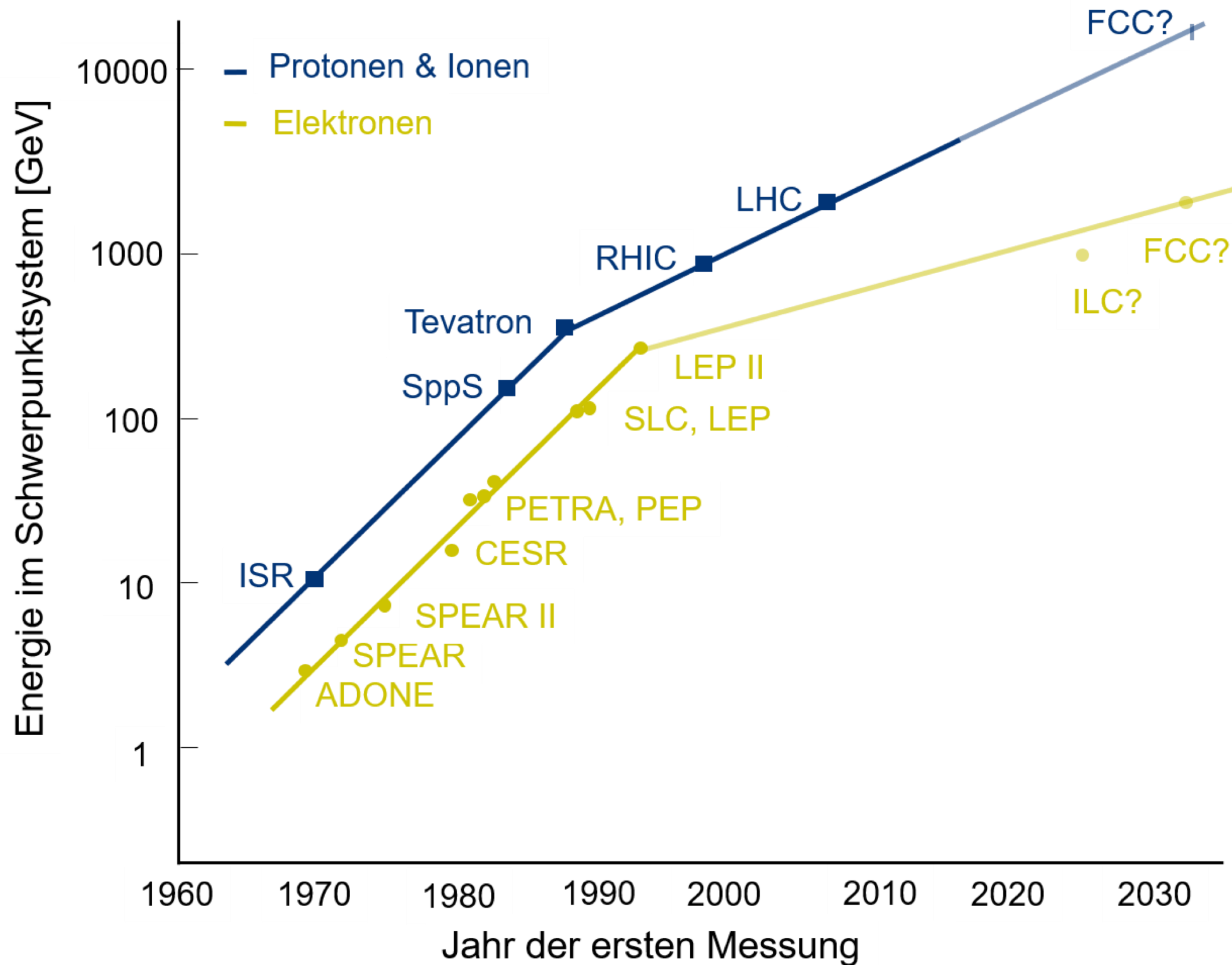
- ▶ Elektrisch geladene Teilchen durchqueren elektrische Felder
- ▶ Magnetische Felder zwingen Teilchen auf Kreisbahn
- ▶ **Vorteile:**
Mehrfaches Durchlaufen der elektrischen Felder
- ▶ **Nachteile:**
Hohe Magnetfeldstärken nötig





Beschleunigerarten

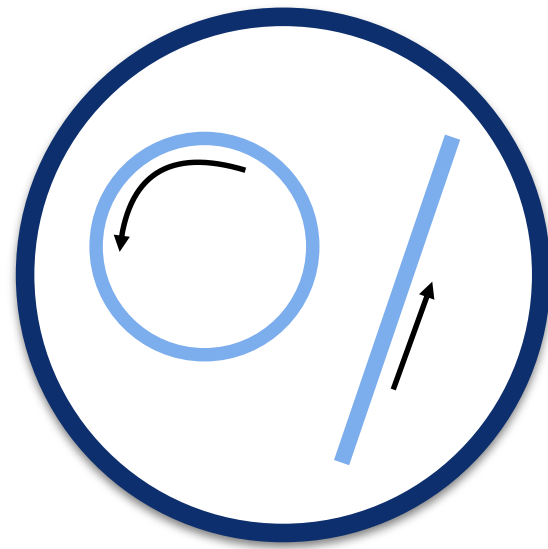
Linear- und Kreisbeschleuniger



Warum erreichen Leptonen-Beschleuniger geringere (Teilchen-)Energien?

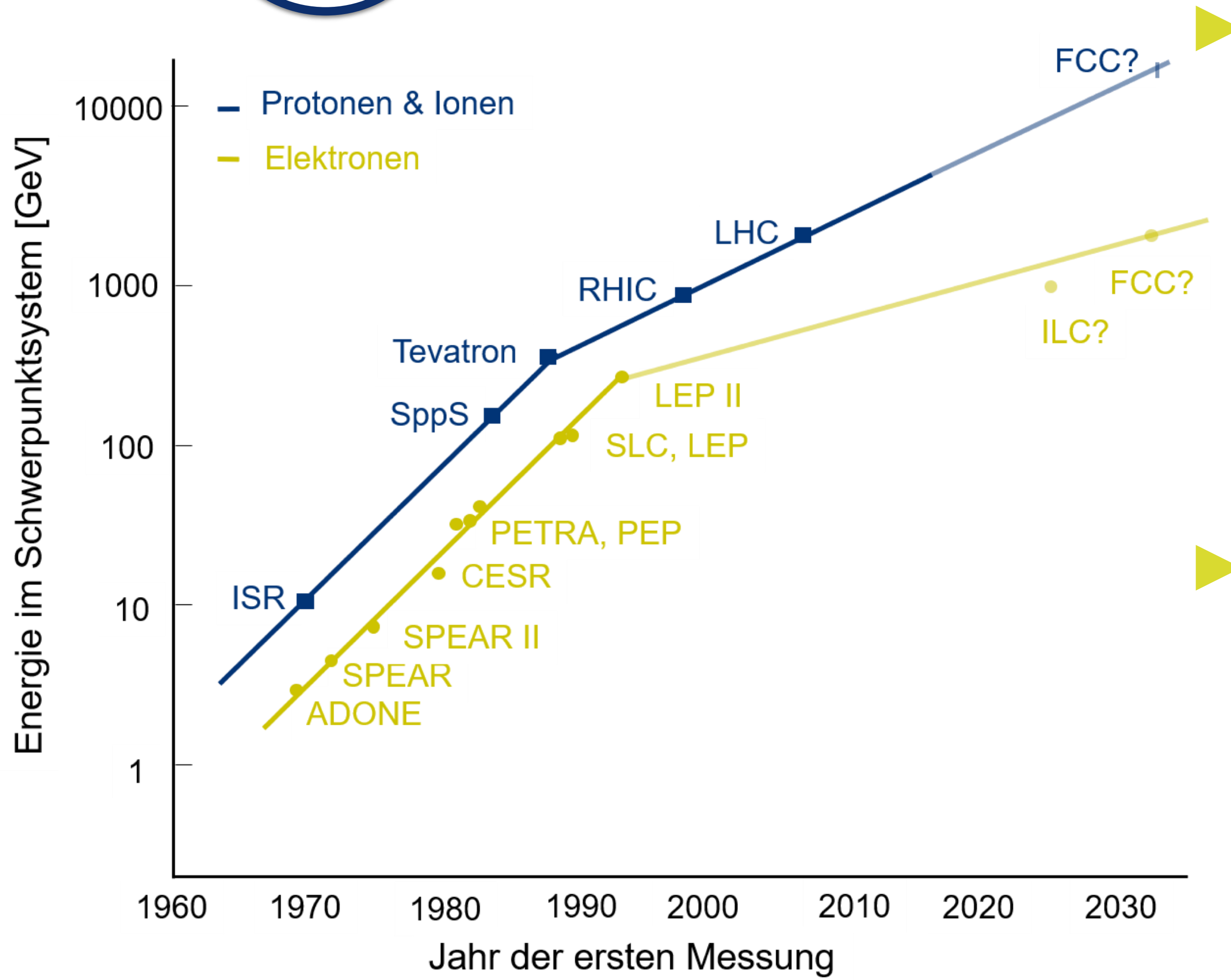
- ▶ Masse der beschleunigten Teilchen in der Regel kleiner
- ▶ **ABER: Synchrotronstrahlung**

$$I \sim \left(\frac{E}{m}\right)^4 \cdot \frac{\text{Current}}{R}$$



Beschleunigerarten

Linear- und Kreisbeschleuniger

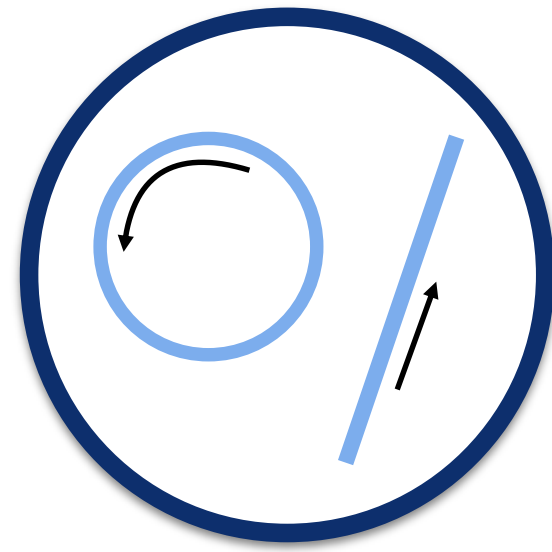


Wofür dann Leptonen-Beschleuniger / -Collider?

- ▶ Leptonen → Elementarteilchen
- ▶ Jedes Teilchen volle Energie
- ▶ Präzise Messungen der Interaktionen möglich

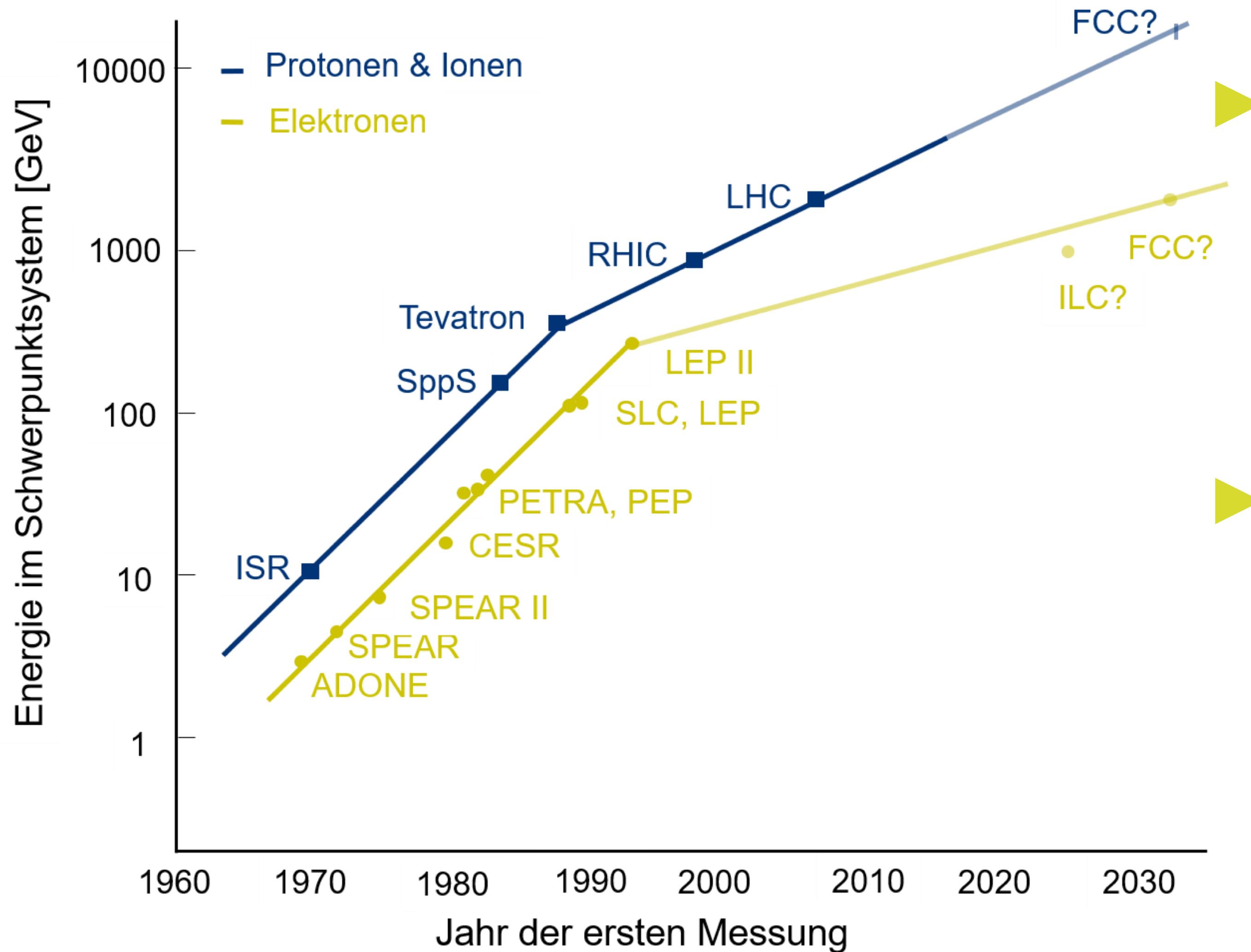
Und Hadronen-Beschleuniger / -Collider?

- ▶ Bestandteile teilen sich Energie
- ▶ Interaktion auf Quark- u. Gluonenebene
- ▶ Kollisionsenergie nicht exakt bestimmt



Beschleunigerarten

Linear- und Kreisbeschleuniger



Wofür dann Leptonen-Beschleuniger / -Collider?

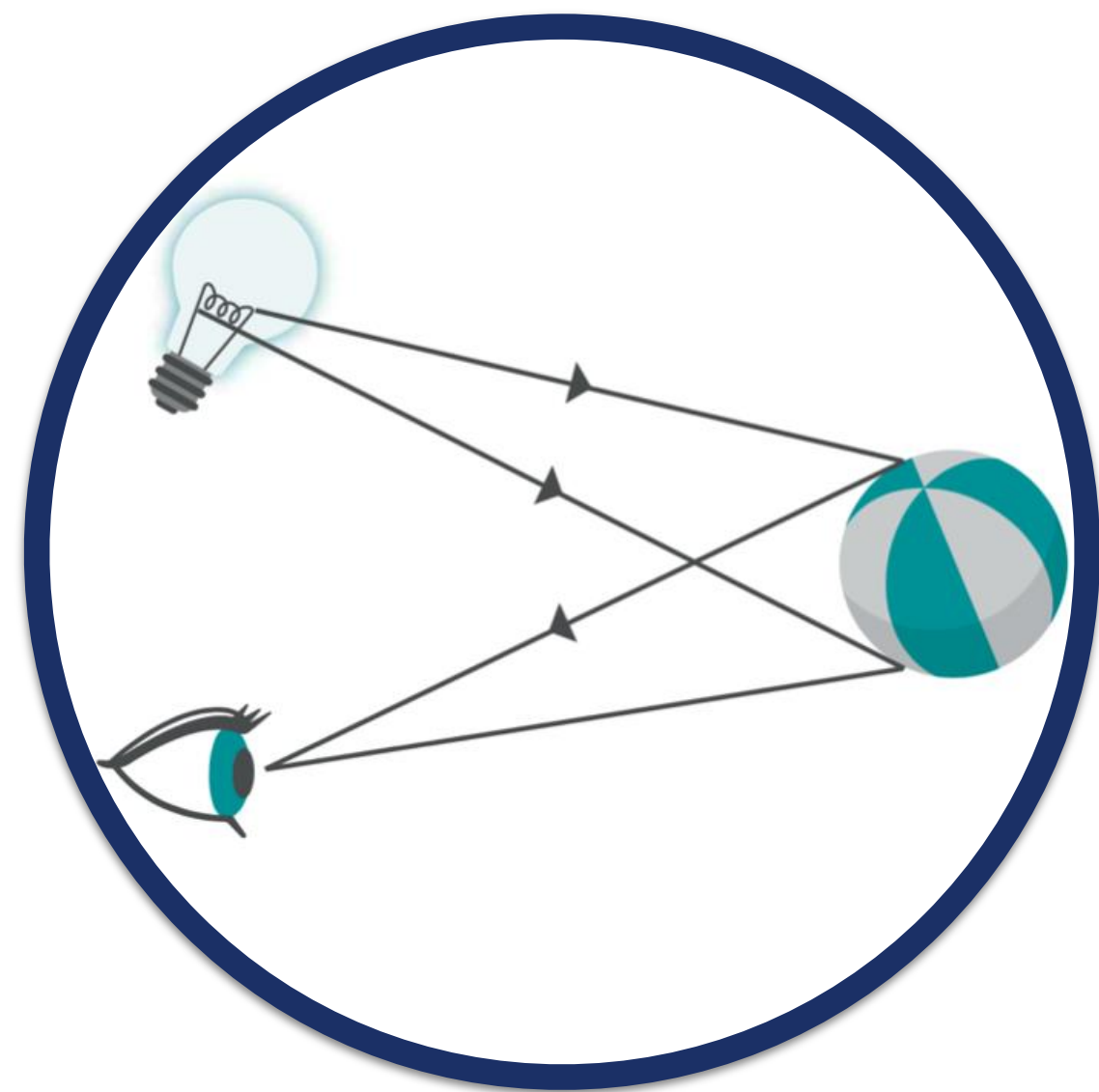
- ▶ Präzise Vermessung von Teilchen

Und Hadronen-Beschleuniger / -Collider?

- ▶ Entdeckung neuer Teilchen

Forschungsziele

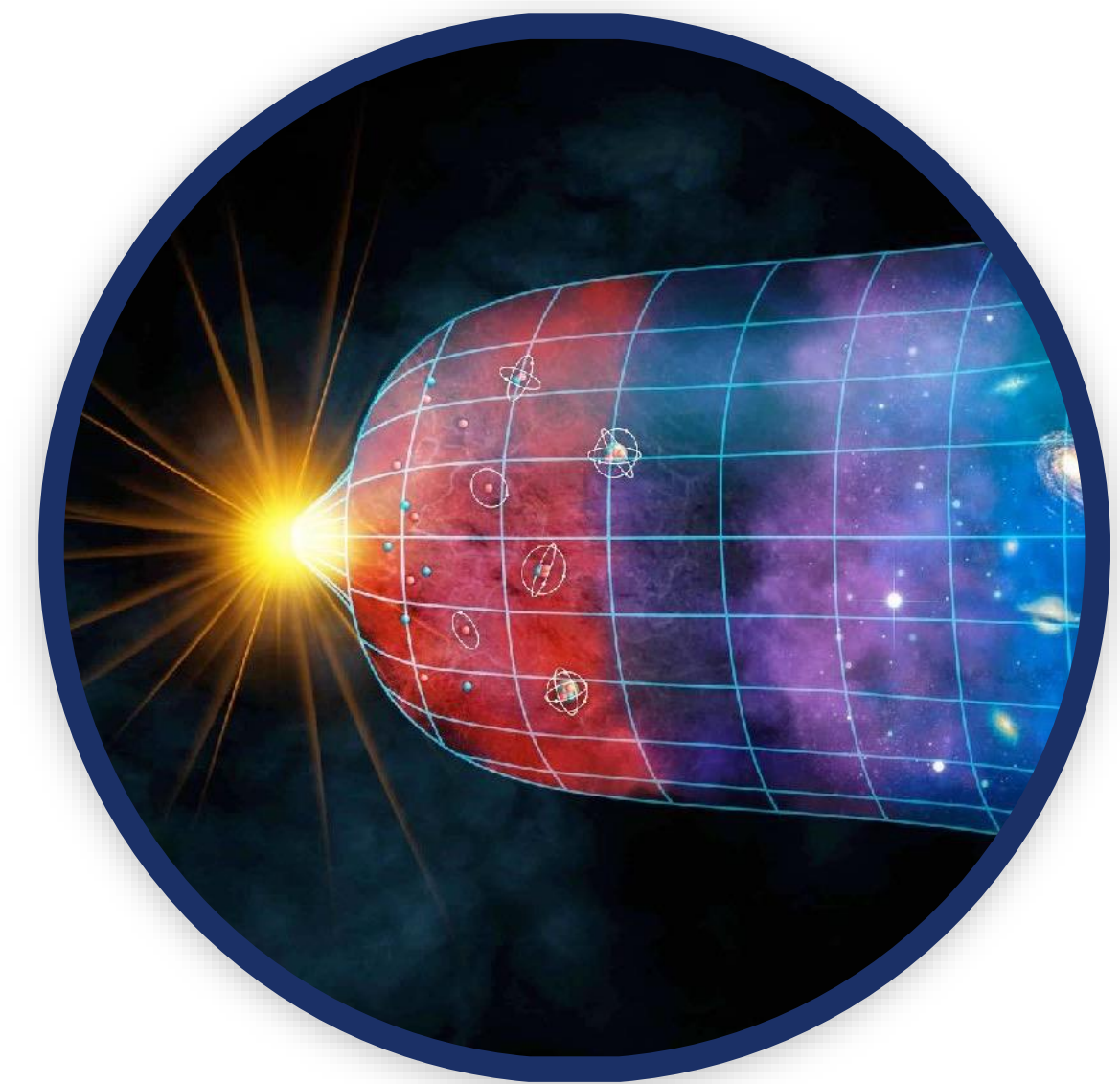
Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



Strukturuntersuchungen



Nachweis neuer Teilchen



Erzeugung extremer Bedingungen

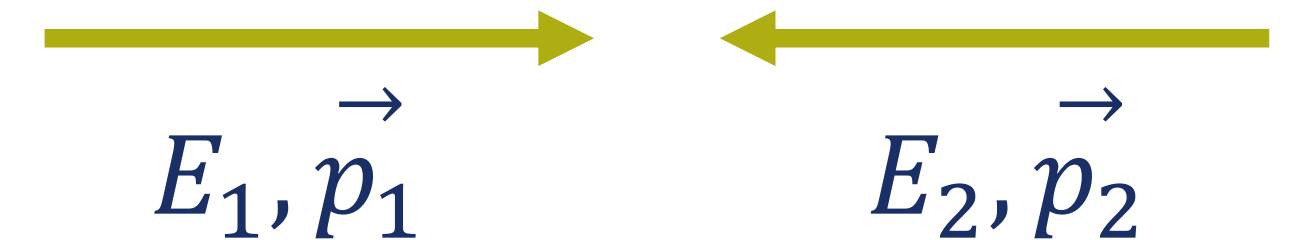


Nachweis „neuer“ Teilchen

- ▶ Teilchenphysik versucht (bisher unbekannte, meist schwere) Teilchen nachzuweisen
- ▶ Annahme: Zwei Teilchen kollidieren, ihre kinetische Energie E_{kin} steht zur Verfügung
- ▶ Bei Teilchen + Antiteilchen sogar gesamte Energie: $E_{tot} = E_{kin} + E_0$ (Annihilation)

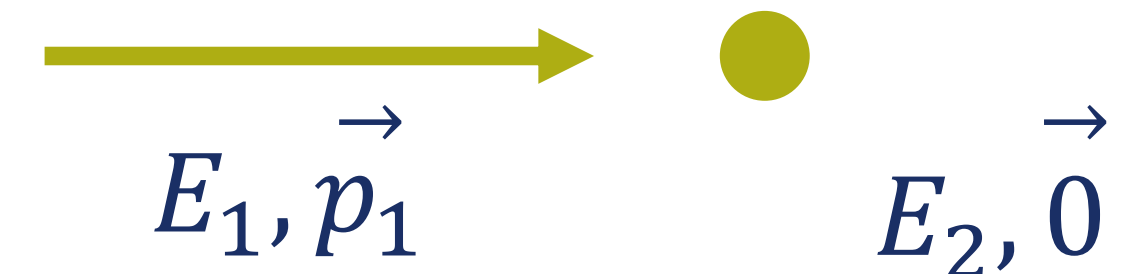
Collider:

- ▶ z. B. Proton + Antiproton mit je $E_{kin} = 50 \text{ GeV}$
- ▶ Energie im Schwerpunktsystem $E_{cm} \approx 100 \text{ GeV}$



Fixed Target:

- ▶ z.B. Proton mit $E_1 = 50 \text{ GeV}$ trifft auf ruhendes Antiproton
- ▶ Energie im Schwerpunktsystem $E_{cm} \approx 7 \text{ GeV}$



Masse-
Ruheenergie-
Äquivalenz

$$E=mc^2$$



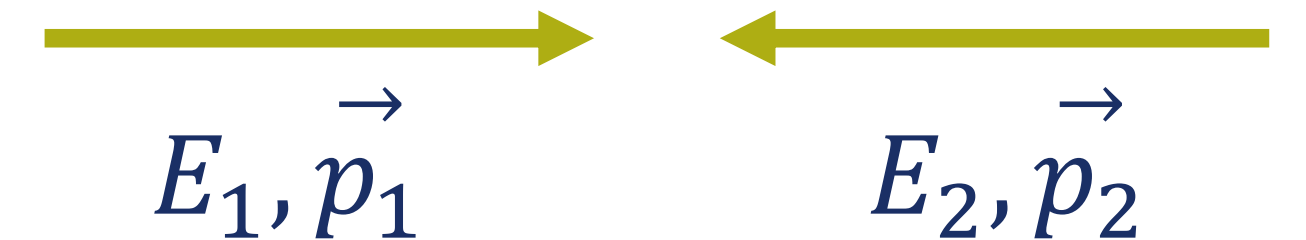


Nachweis „neuer“ Teilchen

- ▶ Teilchenphysik versucht (bisher unbekannte, meist schwere) Teilchen nachzuweisen
- ▶ Annahme: Zwei Teilchen kollidieren, ihre kinetische Energie E_{kin} steht zur Verfügung
- ▶ Bei Teilchen + Antiteilchen sogar gesamte Energie: $E_{tot} = E_{kin} + E_0$ (Annihilation)

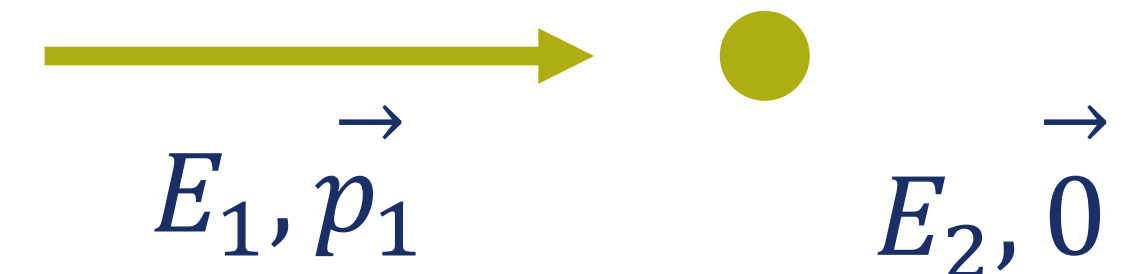
Collider:

- ▶ z. B. Proton + Antiproton mit je $E_{kin} = 50 GeV$
- ▶ Energie im Schwerpunktsystem $E_{cm} \approx 100 GeV$



Fixed Target:

- ▶ z.B. Proton mit $E_1 = 50 GeV$ trifft auf ruhendes Antiproton
- ▶ Energie im Schwerpunktsystem $E_{cm} \approx 7 GeV \sqrt{E}$



Wieso das?

$$E=mc^2$$



Collider vs. Fixed Target

- ▶ Wieso im Fixed Target Experiment nur \sqrt{E} zur Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung?
- ▶ Anschauliche Motivation: Collider \rightarrow kein „Netto“-Impuls, Fixed Target \rightarrow „Netto“-Impuls in Beamrichtung
 - \rightarrow Dieser Anteil muss auch nach Kollision vorhanden sein (Impulserhaltung)
 - \rightarrow Fixed Target theoretisch unmöglich komplette kinetische Energie in neue Teilchen umzusetzen
- ▶ Wichtig: Korrekte, mathematische Begründung über Schwerpunktsenergie \sqrt{s} der N teilnehmenden Teilchen:

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \vec{p}_i\right)^2} \text{ mit Viererimpuls } \vec{p} = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

 Details siehe Anhang

Experimenteller Nachweis W^\pm, Z^0

▶ Beispiel Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung: W^\pm, Z^0

▶ **Massen vorhergesagt 1968**

Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam

$$m_W = 77 \text{ GeV} \mid m_Z = 88 \text{ GeV}$$

Experimenteller Nachweis W^\pm, Z^0

▶ Beispiel Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung: W^\pm, Z^0

▶ **Massen vorhergesagt 1968**

Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam

$$m_W = 77 \text{ GeV} \mid m_Z = 88 \text{ GeV}$$

▶ Existierender Beschleuniger: SPS (CERN)

Protonenstrahl mit $E_{kin} = 400 \text{ GeV}$ ☺

Strahl kollidiert mit **festem Target**

Zur Verfügung stehende Energie im Schwerpunktsystem $\sqrt{E_{kin}} \approx 20 \text{ GeV}$ ☹

Experimenteller Nachweis W^\pm, Z^0

▶ Beispiel Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung: W^\pm, Z^0

▶ **Massen vorhergesagt 1968**

Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam

$$m_W = 77 \text{ GeV} \mid m_Z = 88 \text{ GeV}$$

▶ Existierender Beschleuniger: SPS (CERN)

Protonenstrahl mit $E_{kin} = 400 \text{ GeV}$ ☺

Strahl kollidiert mit **festem Target**

Zur Verfügung stehende Energie im Schwerpunktsystem $\sqrt{E_{kin}} \approx 20 \text{ GeV}$ ☹

Idee: Kollision von Proton und Antiproton

Zur Verfügung stehende Energie im Schwerpunktsystem $\sqrt{E_{kin}} \approx 540 \text{ GeV}$ ($\approx 270 \text{ GeV}$ pro Strahl)

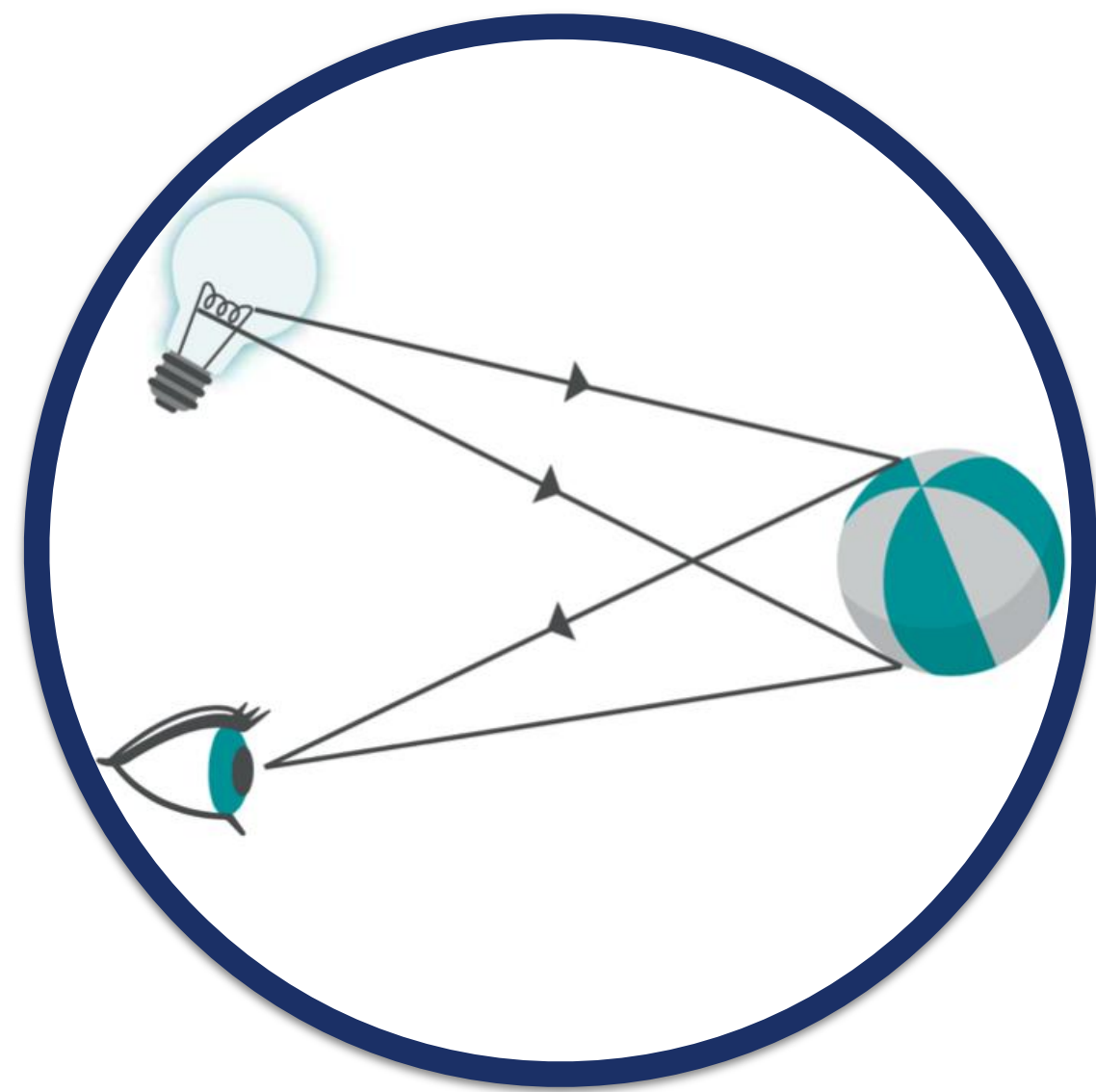
Teilchen nachgewiesen: 20. Januar 1983: $m_W = 83 \pm 3 \text{ GeV} \mid m_Z = 94 \pm 3 \text{ GeV}$

Nobelpreise für Carlo Rubbia und Simon van der Meer (Stochastische Kühlung)

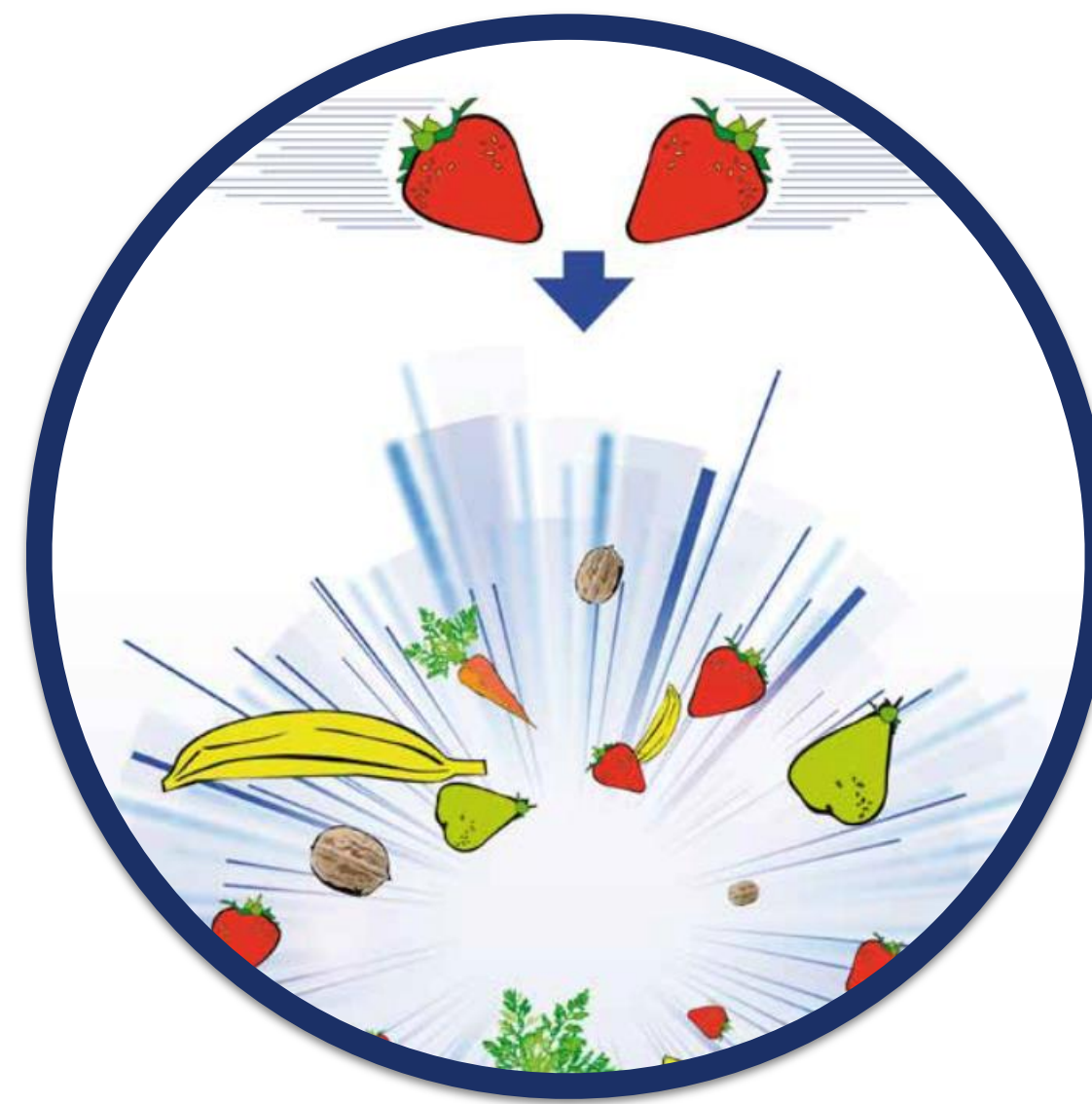


Forschungsziele

Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



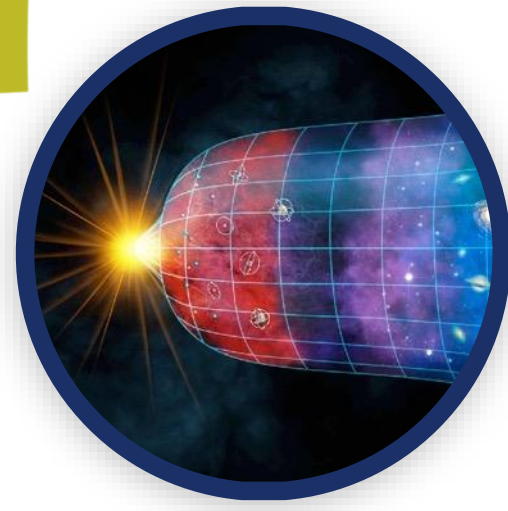
Strukturuntersuchungen



Nachweis neuer Teilchen



Erzeugung extremer Bedingungen



Erzeugung extremer Bedingungen

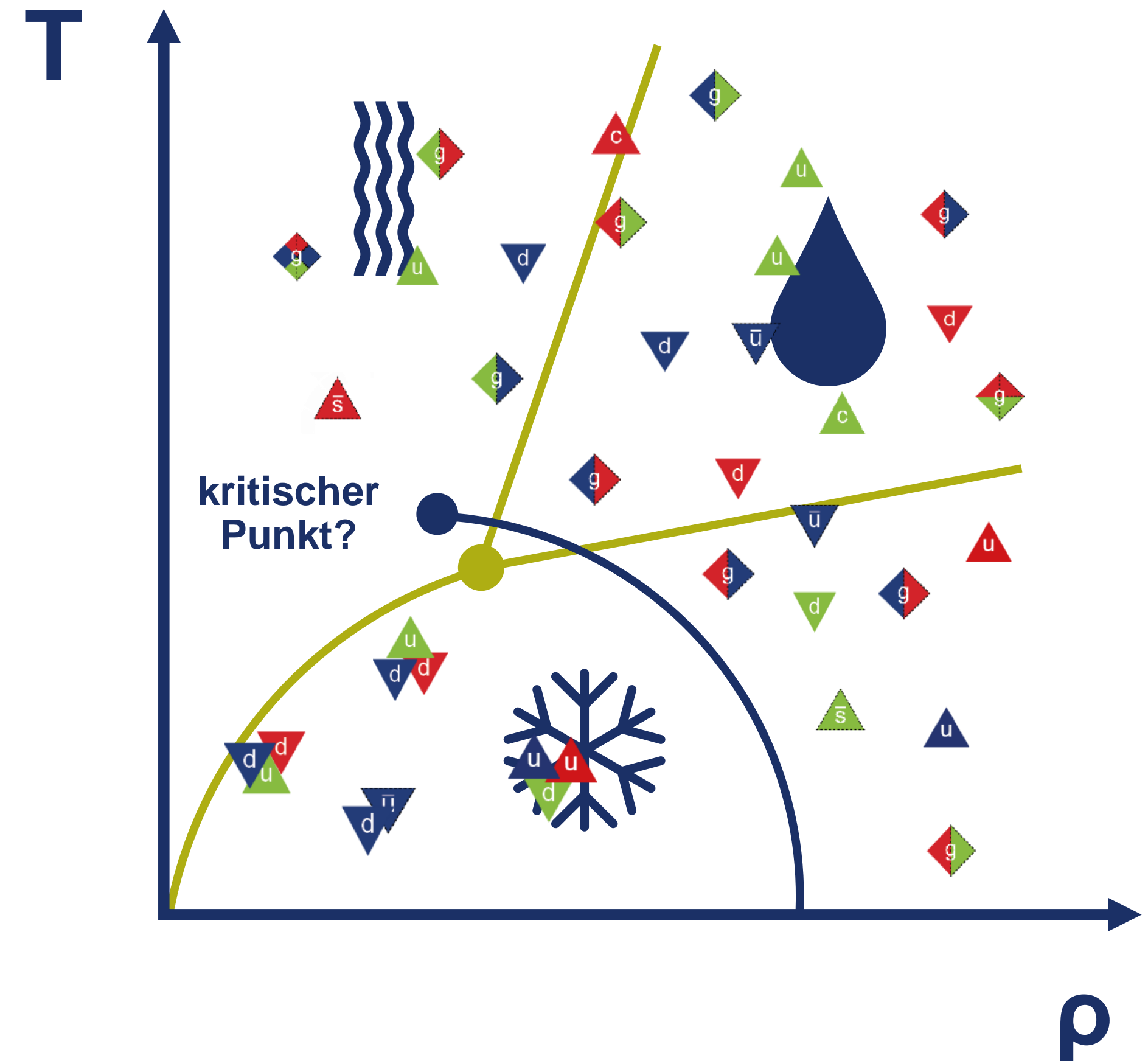
In **Schwerionenkollisionen** werden Temperaturen und Dichten erzeugt die ähnlich extrem sind wie:

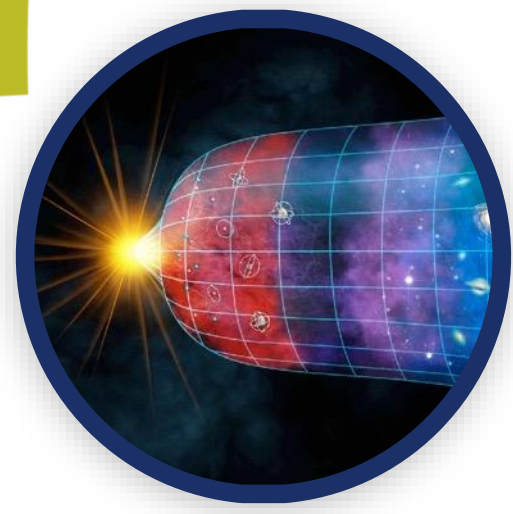
- ▶ Kurz nach dem Urknall
- ▶ In Neutronensternen

Forschungsgegenstand

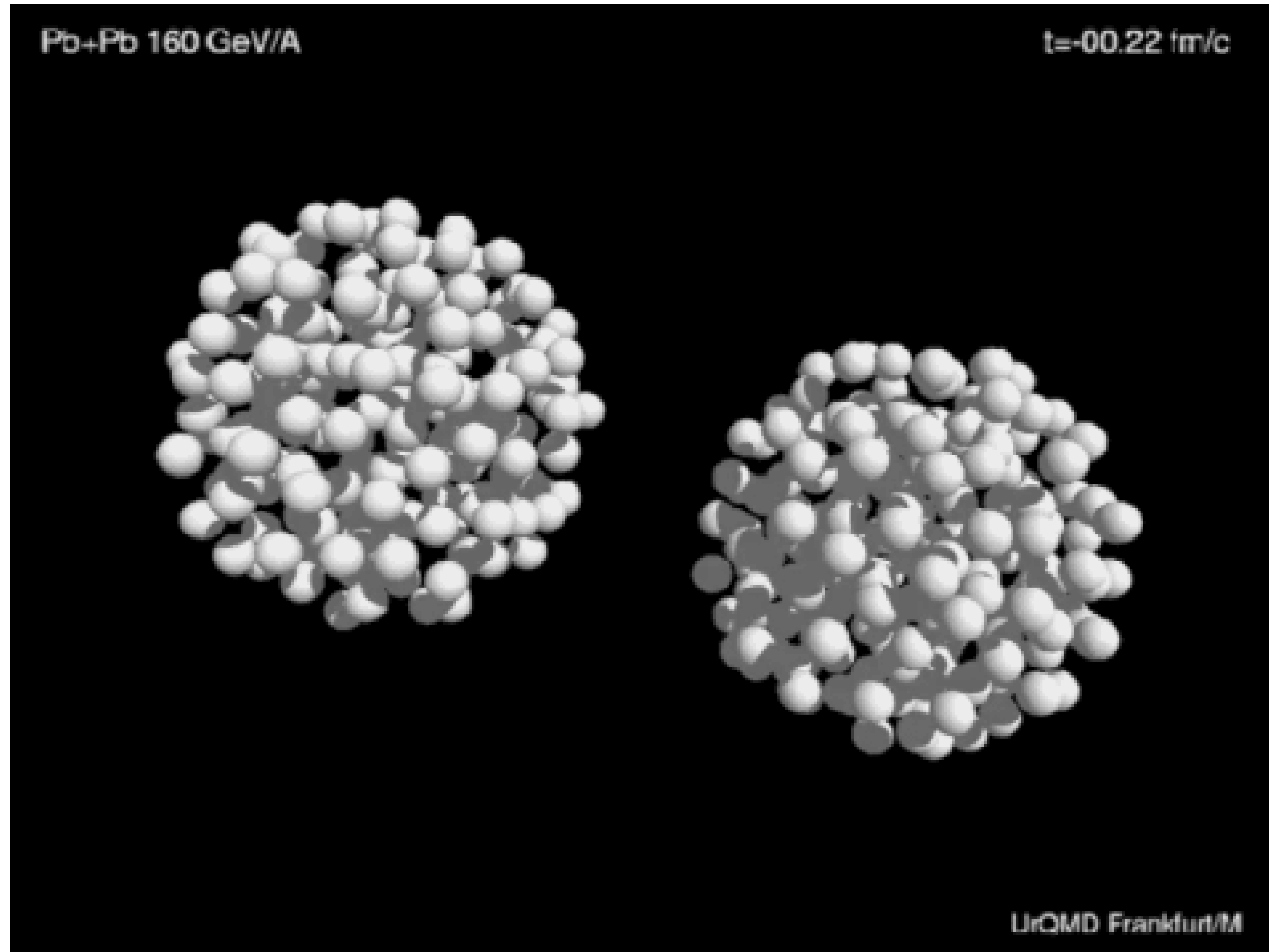
- ▶ Phasenübergang: Quarks-Gluonen-Plasma zu Hadronen
- ▶ Kritischer Punkt
- ▶ Expansionsverhalten nach Kollision

Analogie: Phasen von Wasser





Erzeugung extremer Bedingungen



Beschleunigerphysik und das CERN





Das CERN

Conseil Européen pour
la Recherche Nucléaire

- ▶ Das **größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt** im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich
- ▶ **Gegründet 1954** von 12 europäischen Mitgliedsstaaten
- ▶ Dort arbeiten
 - ▶ **12.500 Wissenschaftler*innen**
 - ▶ Aus 110 Ländern
- ▶ CERN's Jahresbudget 2019 = 1,1 Milliarde CHF
 - ▶ Deutschland zahl etwa 20%
 - ▶ Entspricht 1% des US Militärbudget
 - ▶ Entspricht 1 Cappuccino pro EU Bürger pro Jahr
- ▶ Das CERN selbst macht keine Experimente, sondern stellt nur die (Beschleuniger)Infrastruktur



- ▶ 27 km Umfang
- ▶ Bis zu 175m tief unter der Erde
- ▶ 4 Große Experimente
 - ▶ ATLAS
 - ▶ CMS
 - ▶ ALICE
 - ▶ LHCb



SUISSE
FRANCE

LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

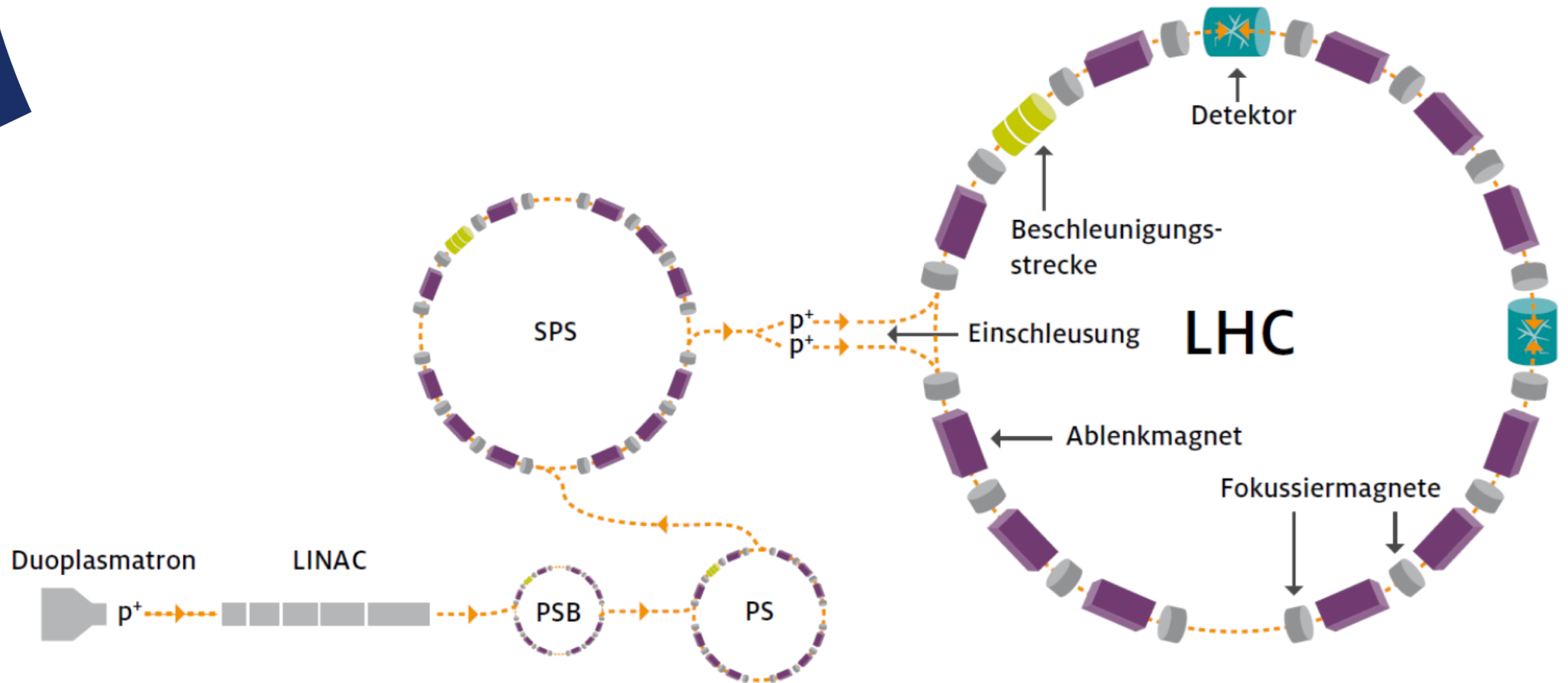
ALICE

CMS

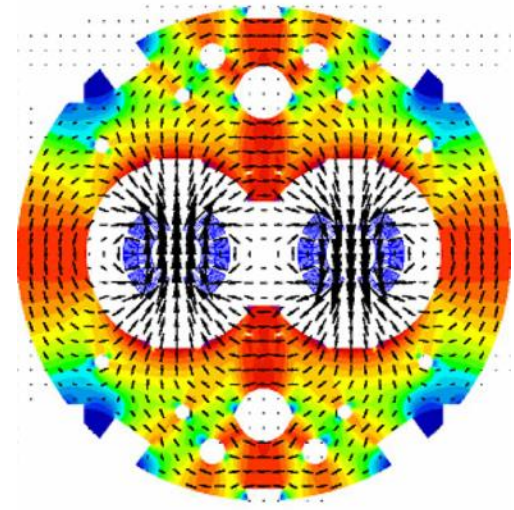
LHC 27 km



Large Hadron Collider (LHC)



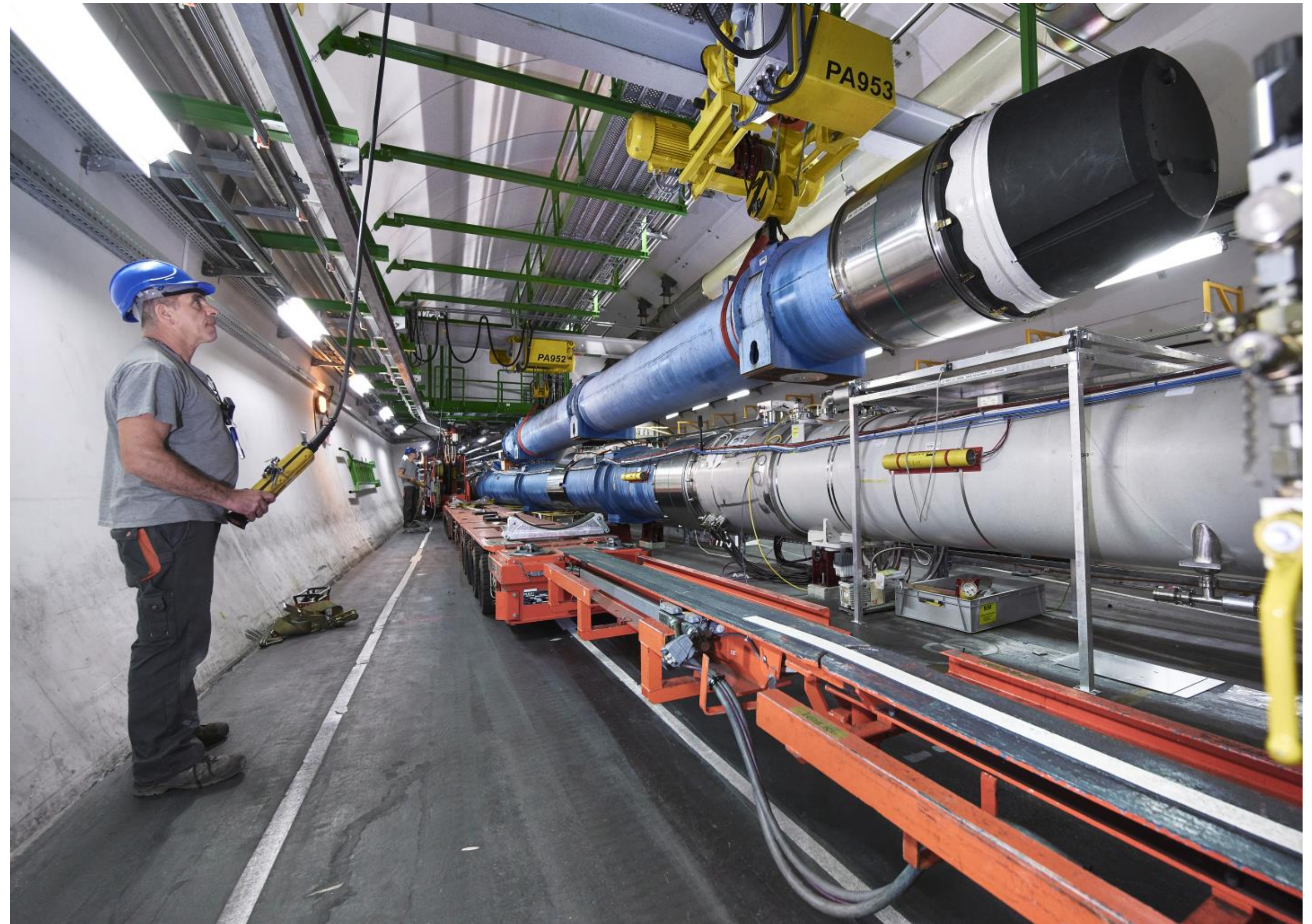




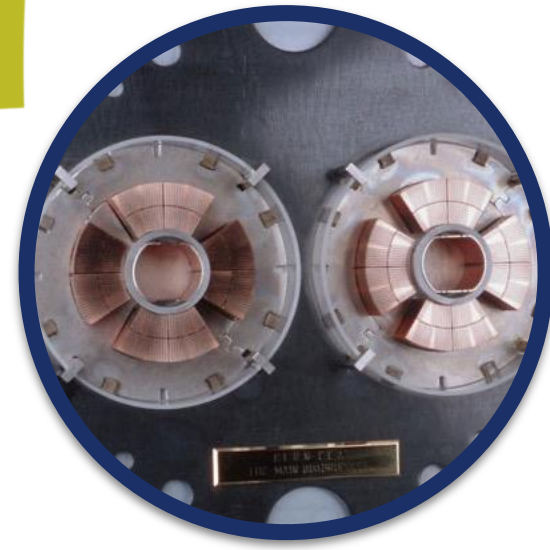
LHC Dipolmagnete

- ▶ **1232 Dipolmagnete** mit kupferverkleideten supraleitenden Niob-Titan Leitern
- ▶ Jeder Magnet ist 15 Meter lang und wiegt 30 Tonnen
- ▶ Betriebstemperatur wird durch das Kühlsystem auf **1,9 K** gehalten
- ▶ Die max. magnetische Flussdichte beträgt **8,36 Tesla**
- ▶ Ohne Supraleiter: 120km Umfang und 30 mal mehr Energie!

0,1 Tesla



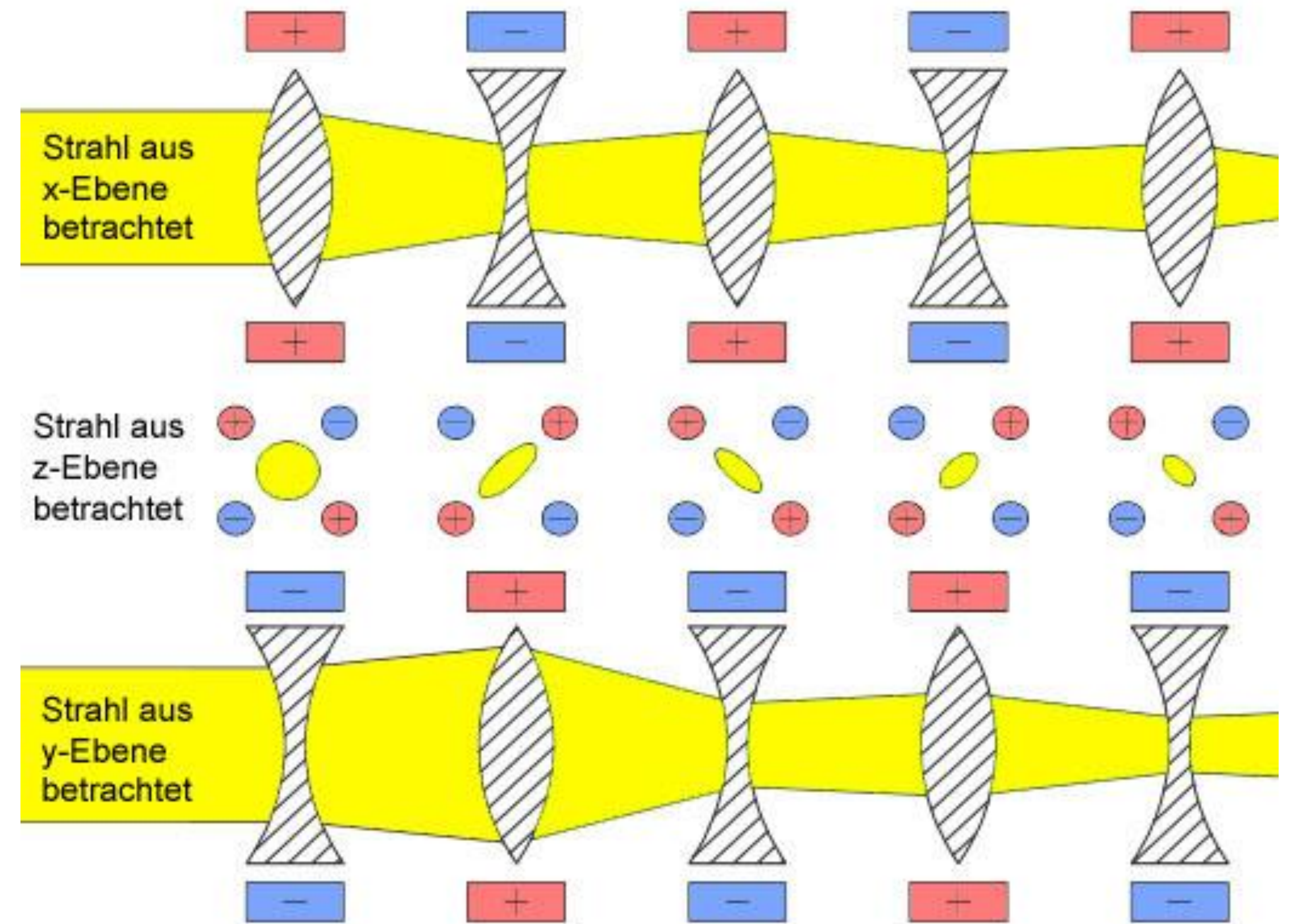
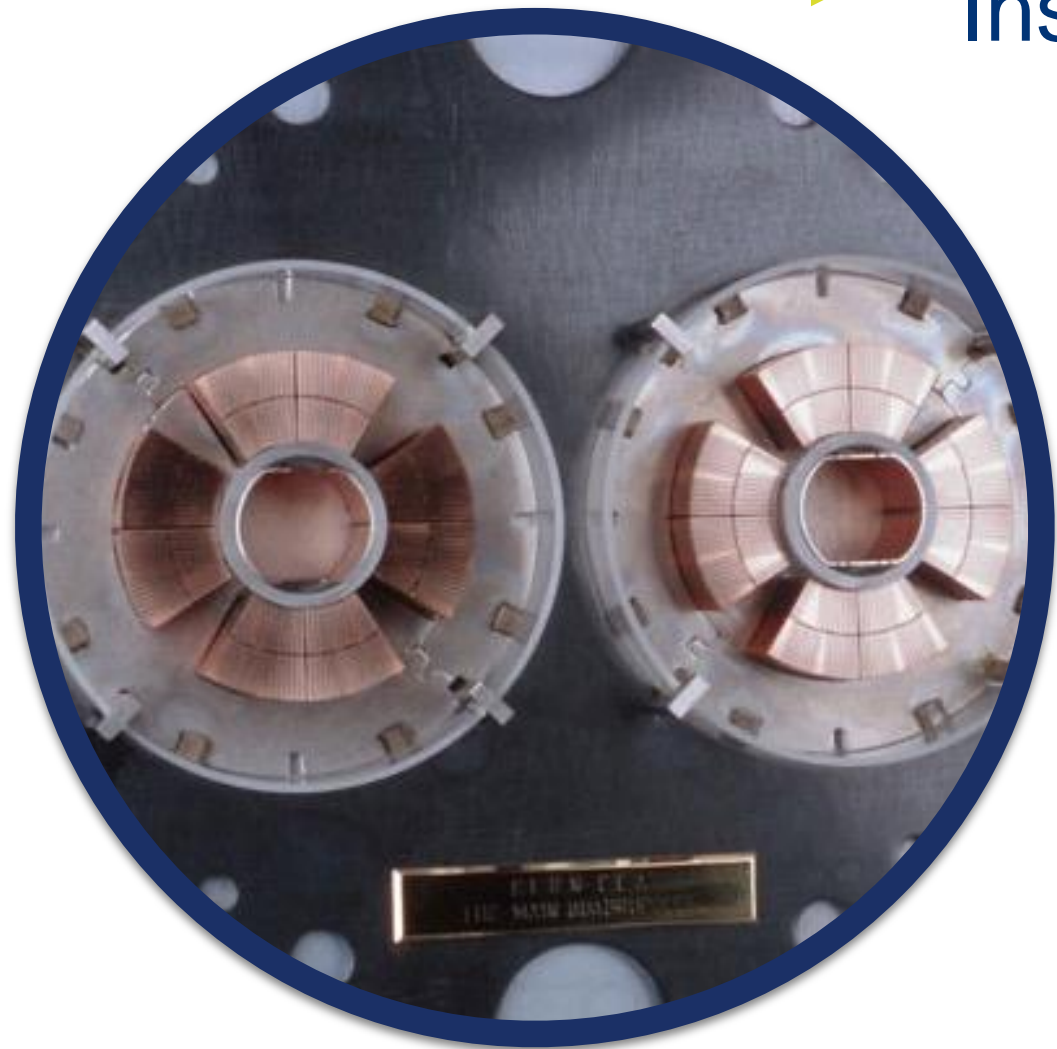
LHC Quadrupolmagnete



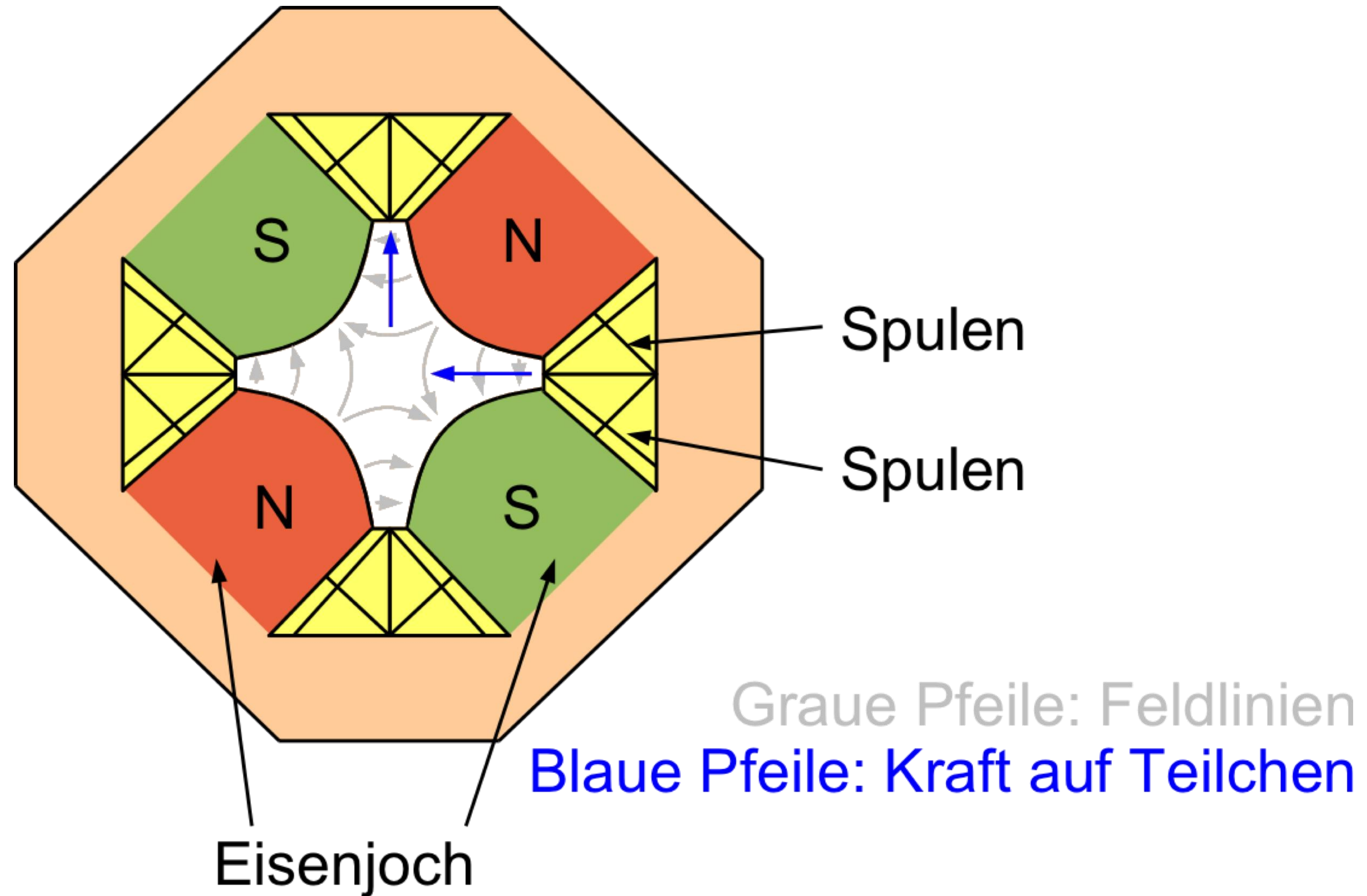
▶ **Coulombkraft** führt zur gegenseitigen Abstoßung der Protonen

▶ Wirkt in Flugrichtung immer durch zwei gegenüberliegende Pole **fokussierend**, während die anderen zwei Pole **defokussierend** wirken

▶ Insgesamt **392** Quadrupolmagnete




LHC Quadrupolmagnete

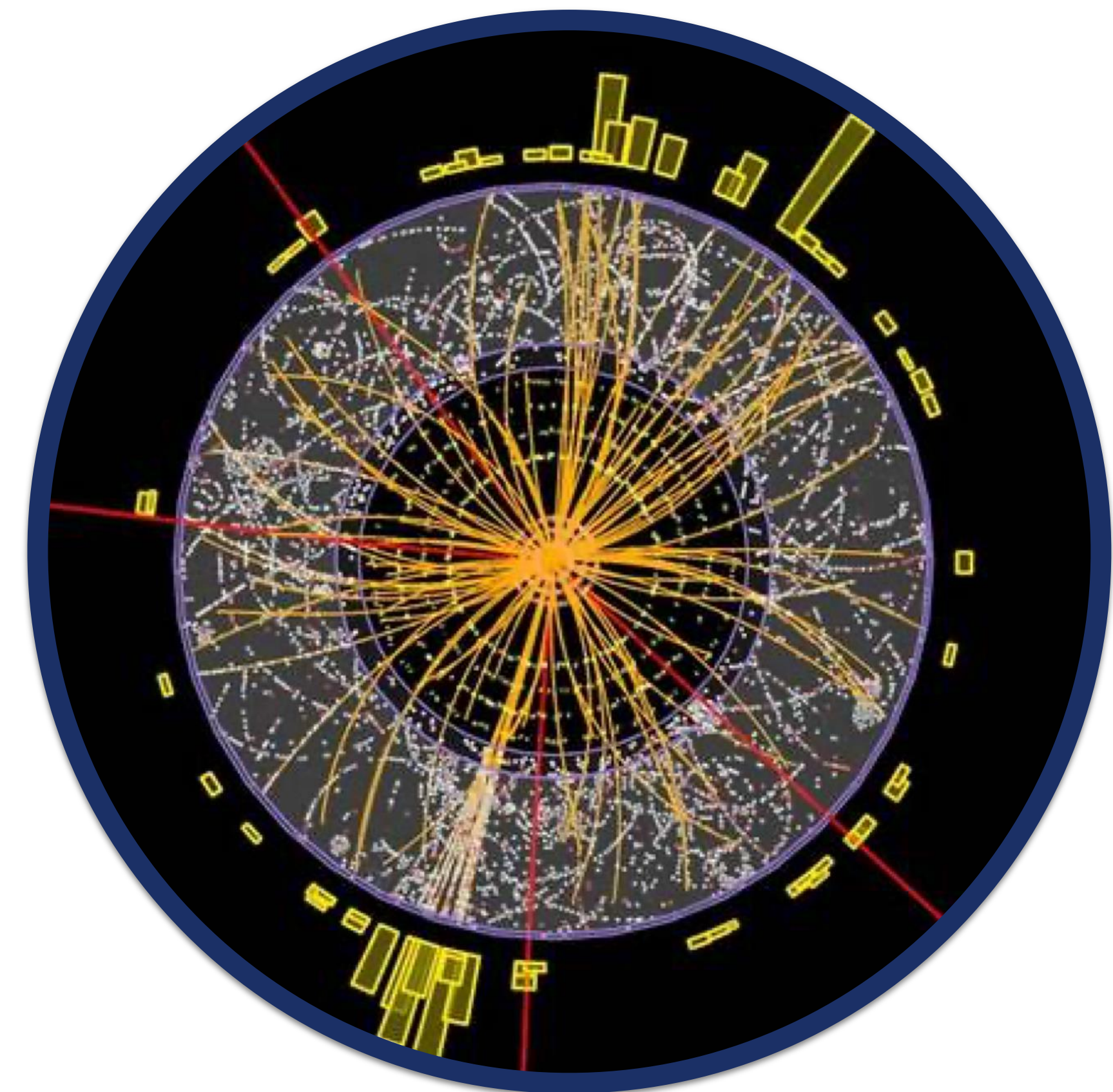




CMS
Compact Muon Solenoid
Solénoïde compact pour

Teilchenkollisionen im LHC

- 
- ▶ **2 gegenläufige Protonenstrahlen**
 - ▶ mit je **1404** Teilchenpaketen und $1,15 \cdot 10^{11}$ Protonen pro Paket
 - ▶ **1 Paket-Kreuzung alle 25 ns**
 - ▶ Im Inneren der 4 Experimente kollidieren zwischen 1(LHCb) - 60 (ATLAS, CMS) Protonenpaare
 - ▶ **600 Millionen Kollisionen pro Sekunde!**
 - ▶ „Interessante“ Teilchen liefern sehr kleinen Beitrag im Modell → statistische Untersuchung erfordert viele Kollisionen
 - ▶ Ergebnis (beobachtete Teilchen im Detektor) einer bestimmten Kollision nicht eindeutig vorhersagbar



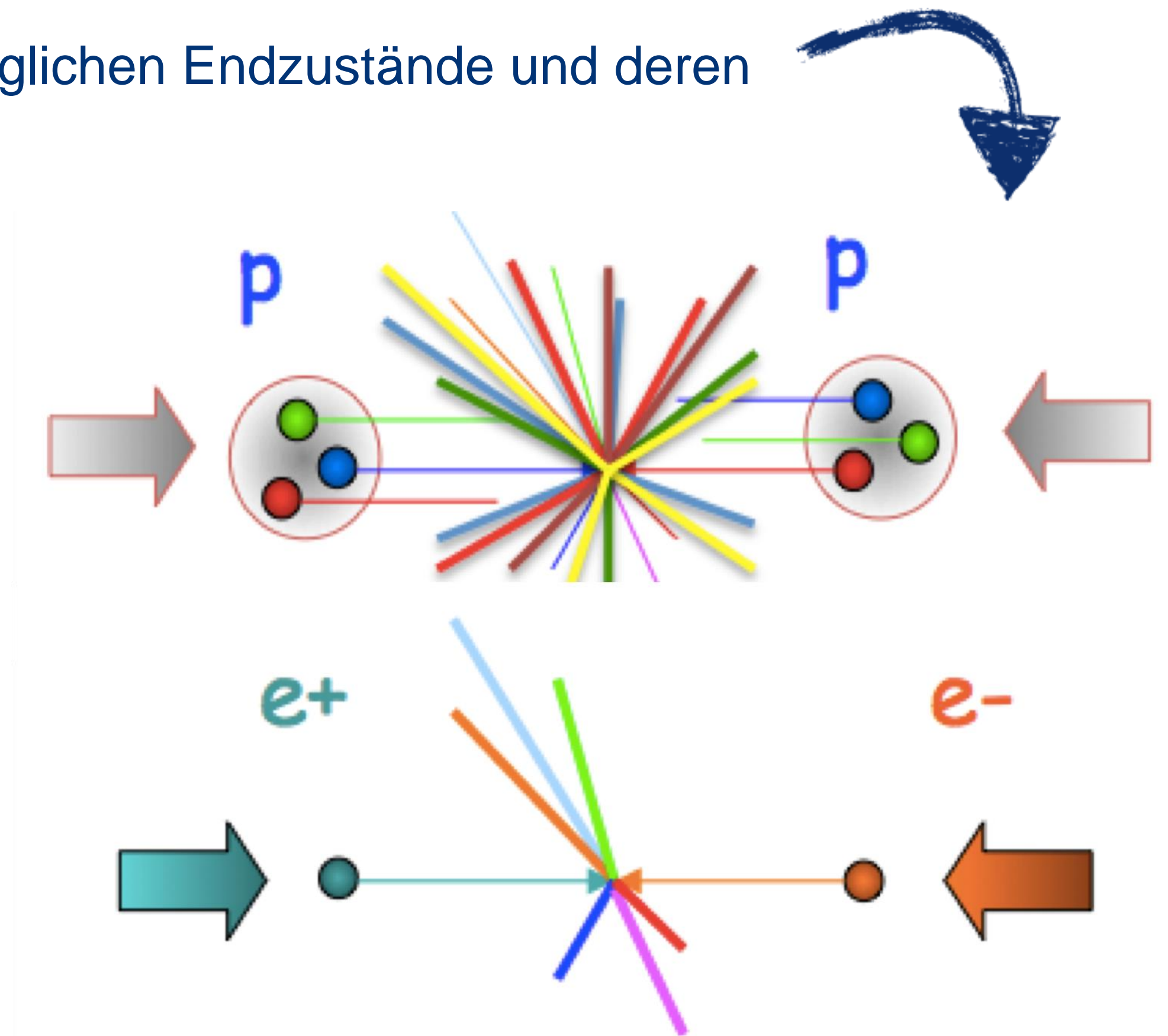
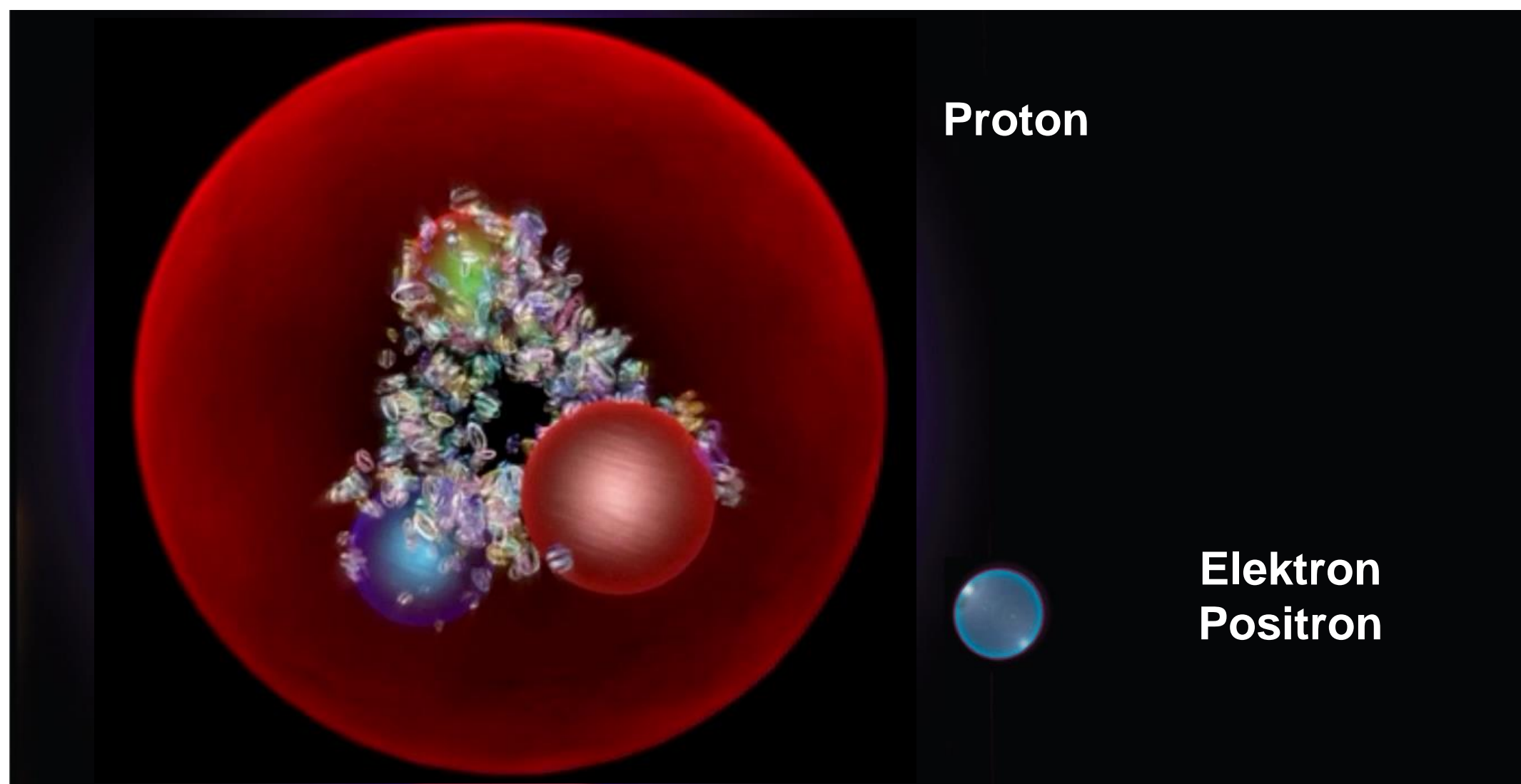
Large Electron-Positron Collider (LEP)

- ▶ Teilchenbeschleuniger, der bis 2000 **im selben Tunnel** wie jetzt der LHC betrieben wurde
- ▶ Kollision von **Elektronen und Positronen** bei Energien von bis zu **104 GeV** pro Teilchen
- ▶ **Präzisionsmessungen:**
 - ▶ Eigenschaften Z-Teilchen (LEP1)
 - ▶ Eigenschaften W-Teilchen (LEP2)



LHC oder LEP in der Schule?

- ▶ LHC zwar aktueller, aber interessante Ereignisse bei LEP einfacher analysierbar
- ▶ **Einfachere Anfangszustände** vereinfachen die möglichen Endzustände und deren Beschreibung



Besuche am CERN

<https://visit.cern/>

Was ist besuchbar?

- ▶ Science Gateway (Di.-So.) (Gruppen 9 Monate vorher buchen)
 - verschiedene Exhibitions mit interaktiven Dingen
 - Education Labs (können für Schulgruppen gebucht werden)
 - Science Shows in Englisch & Französisch (ohne Anmeldung)
- ▶ Visit Points auf dem CERN Gelände (9 Monate vorab buchbar)
- ▶ Kostenfrei
- ▶ Deutschsprachige Guides möglich





CERN Science Gateway





CERN Science Gateway

The making of a dream: CERN Science Gateway

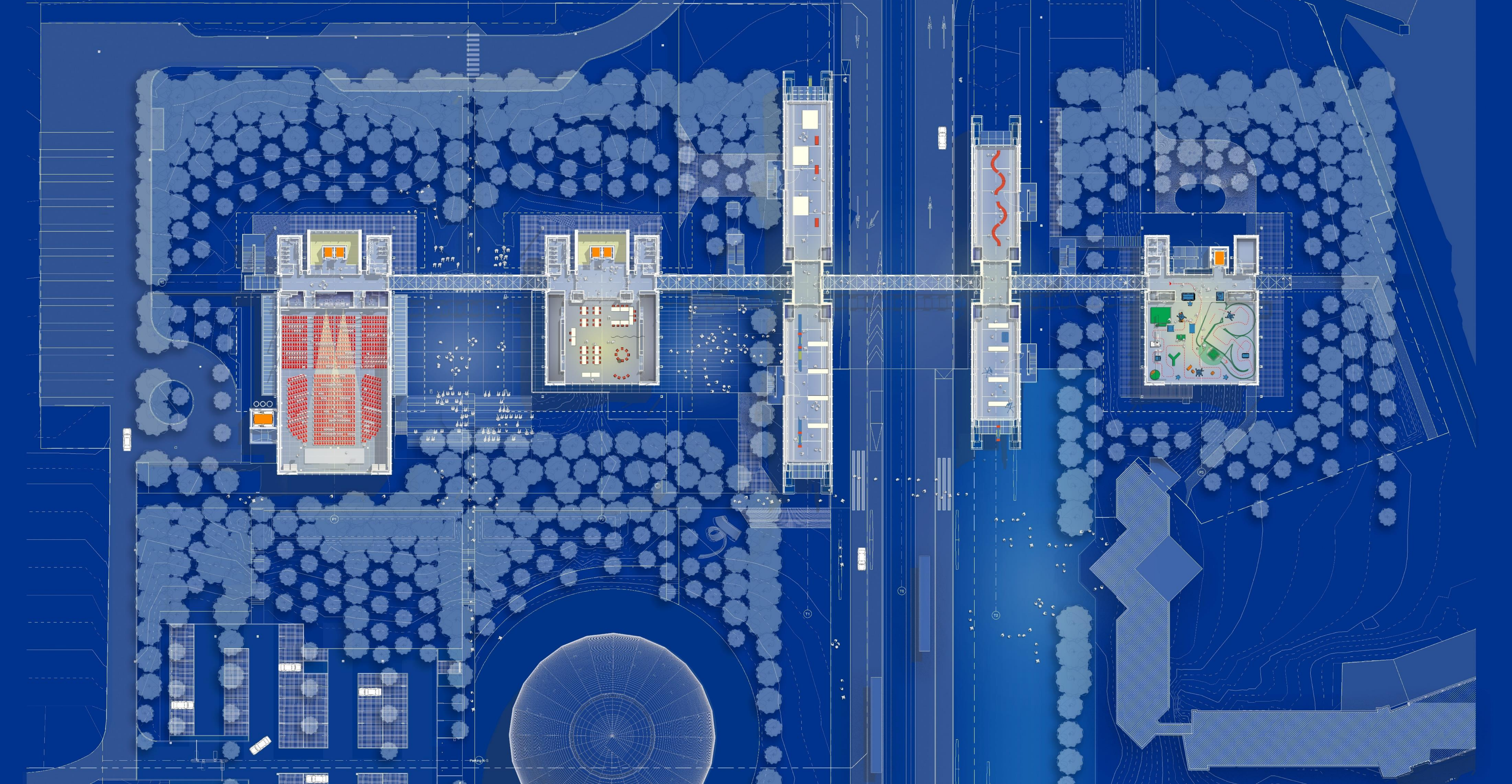
Education • CERN

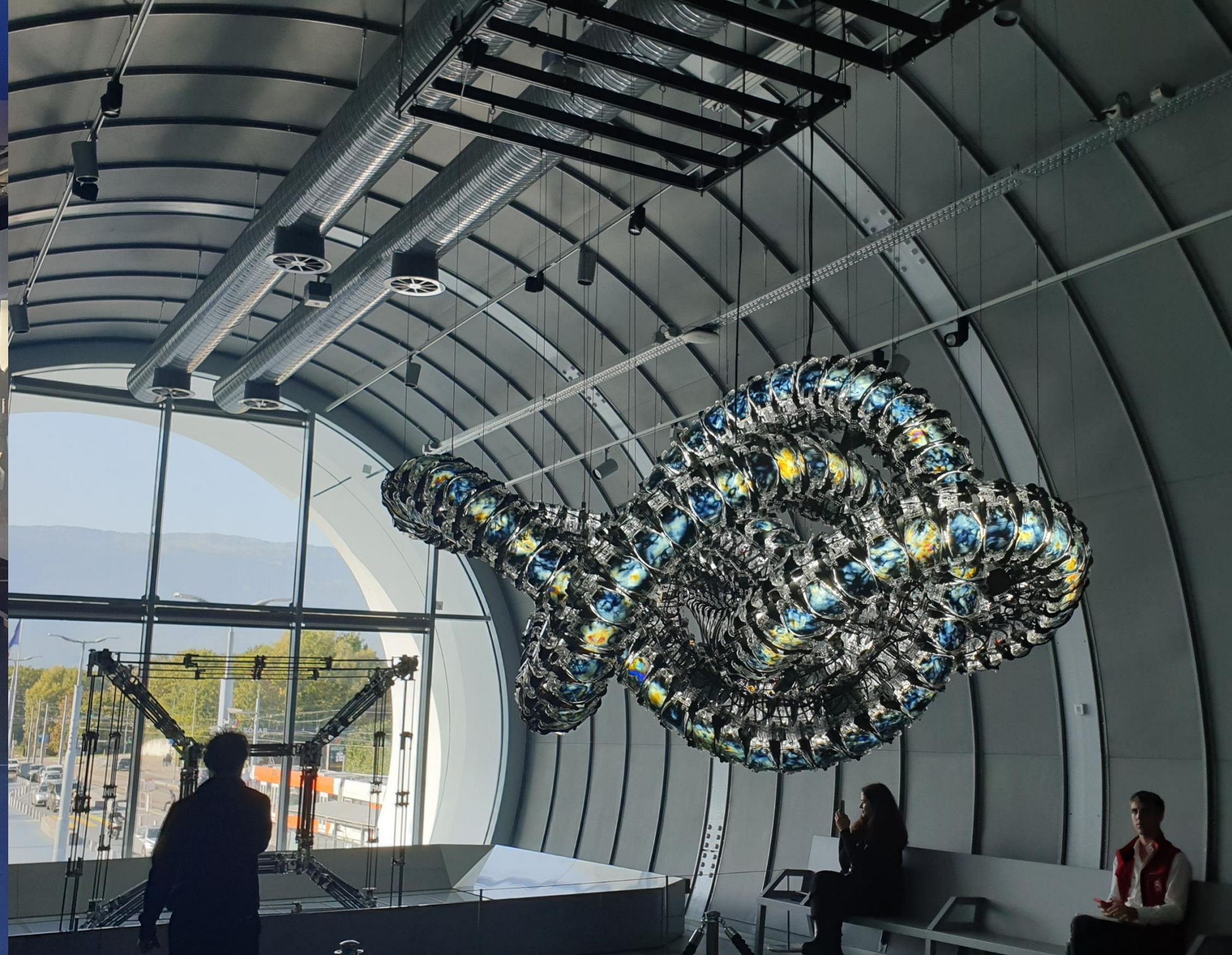


 CERN Science Gateway

The making of a dream: CERN Science Gateway

Education • CERN







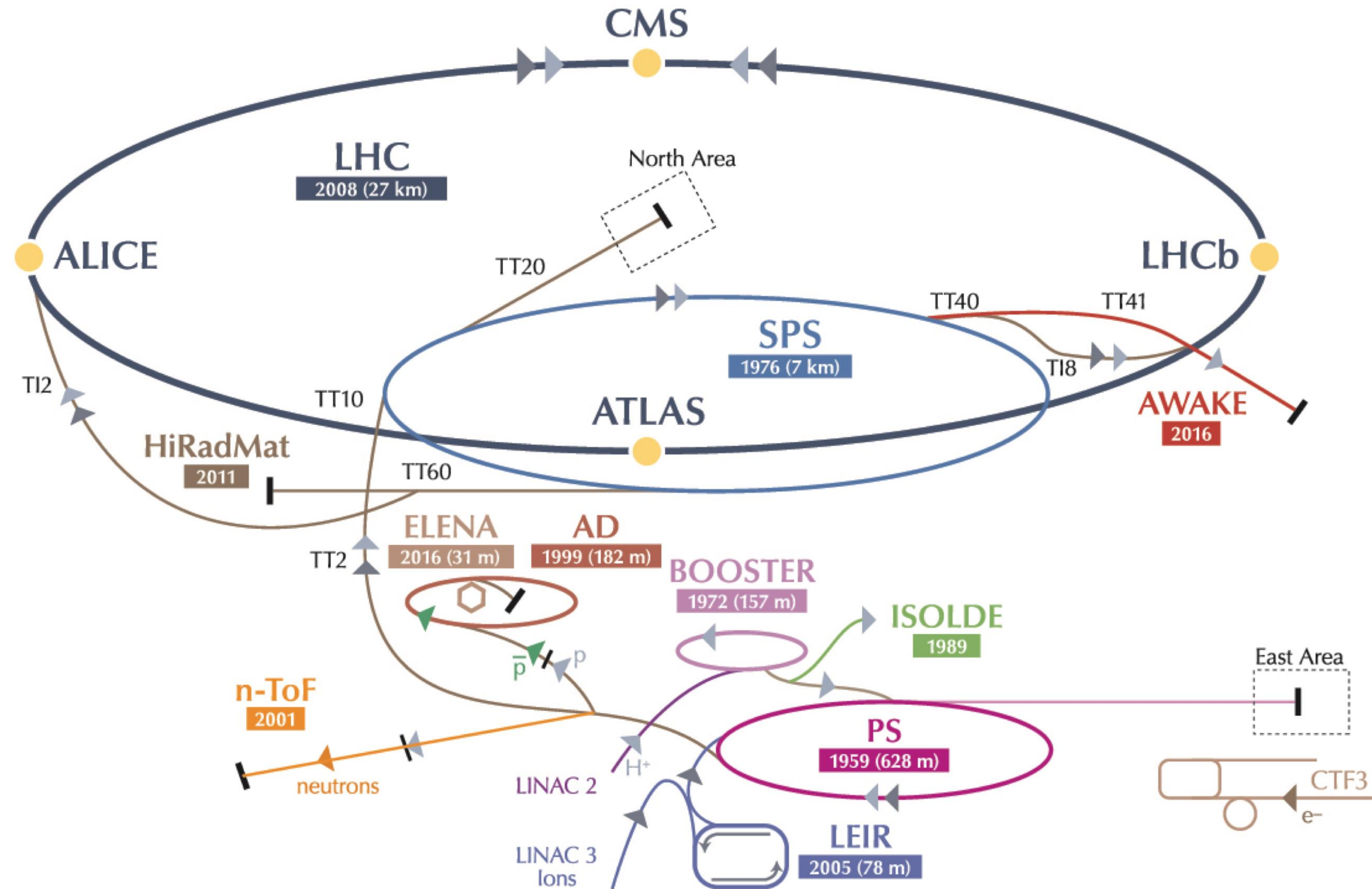
Jetzt:

Detektoren & Eventdisplays



Backup

Large Hadron Collider (LHC)



Collider vs. Fixed Target

▶ Wieso im Fixed Target Experiment nur \sqrt{E} zur Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung?

▶ Anschauliche Motivation: Collider \rightarrow kein „Netto“-Impuls, Fixed Target \rightarrow „Netto“-Impuls in Beamrichtung

\rightarrow Dieser Anteil muss auch nach Kollision vorhanden sein (Impulserhaltung)

\rightarrow Fixed Target theoretisch unmöglich komplette kinetische Energie in neue Teilchen umzusetzen

▶ Mathematische Begründung über Schwerpunktsenergie \sqrt{s} der N teilnehmenden Teilchen:

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \vec{p}_i\right)^2} \text{ mit Viererimpuls } \vec{p} = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \text{ und Minkowskimetrik } \vec{a}^2 = a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 - a_4^2$$

Collider:

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \text{ trifft auf } \vec{p}_2 = \begin{pmatrix} E \\ -p_x \\ -p_y \\ -p_z \end{pmatrix} \rightarrow \sqrt{s} = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E \\ -p_x \\ -p_y \\ -p_z \end{pmatrix}\right)^2} = \sqrt{\begin{pmatrix} 2E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^2}$$
$$= \sqrt{4E^2} = 2E$$

Collider vs. Fixed Target

► Mathematische Begründung über Schwerpunktsenergie \sqrt{s} der N teilnehmenden Teilchen:

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \vec{p}_i\right)^2} \text{ mit Viererimpuls } \vec{p} = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \text{ und Minkowskimetrik } \vec{a}^2 = a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 - a_4^2$$

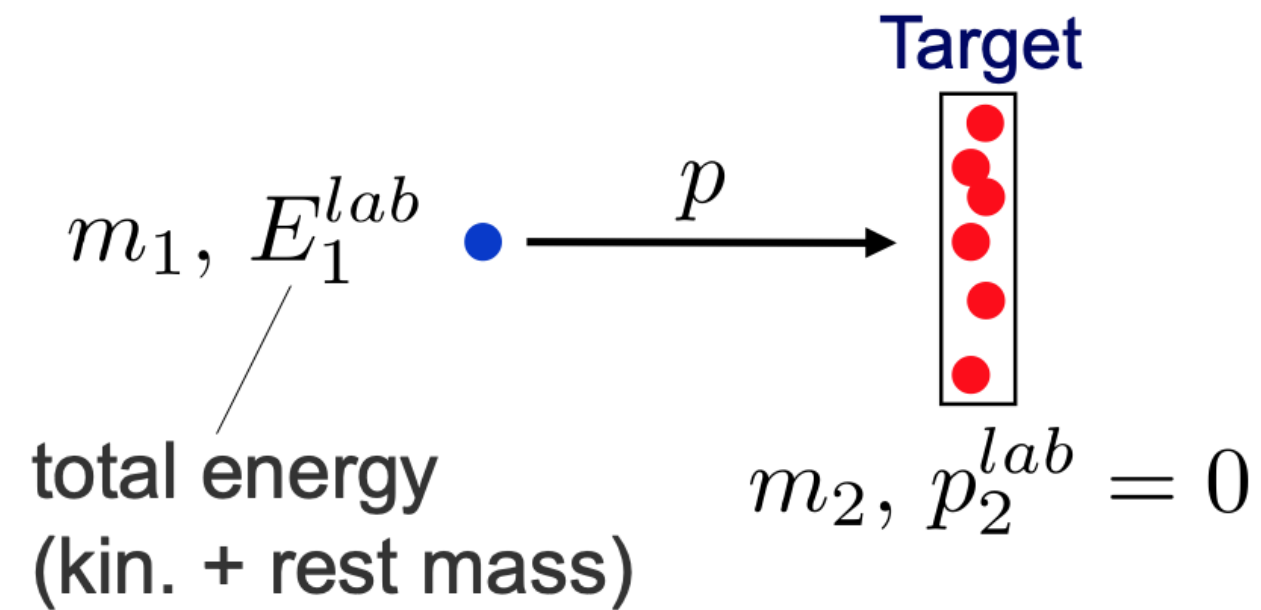
Fixed Target:

$$\begin{aligned} \vec{p}_1 &= \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \text{ trifft auf } \vec{p}_2 = \begin{pmatrix} m \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \sqrt{s} = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right)^2} = \sqrt{\begin{pmatrix} E+m \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}^2} \\ &= \sqrt{(E+m)^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2} \\ &= \sqrt{(E+m)^2 - \vec{p}^2} = \sqrt{E^2 + 2 \cdot E \cdot m + m^2 - \vec{p}^2} \stackrel{\vec{p}^2 = E^2 - m^2}{=} \sqrt{2 \cdot E \cdot m + 2m^2} \sim \sqrt{E} \end{aligned}$$



Fixed-Target vs. Collider

Fixed-target experiment:



$$\begin{aligned}
 s &= \left[\begin{pmatrix} E_1^{lab} \\ \vec{p}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_2 \\ \vec{0} \end{pmatrix} \right]^2 \\
 &= E_1^{lab\ 2} + 2E_1^{lab}m_2 + m_2^2 - p_1^2 \\
 &= m_1^2 + m_2^2 + 2E_1^{lab}m_2
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \sqrt{s}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2E_1^{lab}m_2} \\
 &\stackrel{E_1^{lab} \gg m_1, m_2}{\approx} \sqrt{2E_1^{lab}m_2}
 \end{aligned}$$

Example: Anti proton production

(fixed-target experiment): $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$

Minimum energy required to produce an anti-proton:

In CMS, all particles at rest after the reaction, i.e., $\sqrt{s} = 4 m_p$, hence:

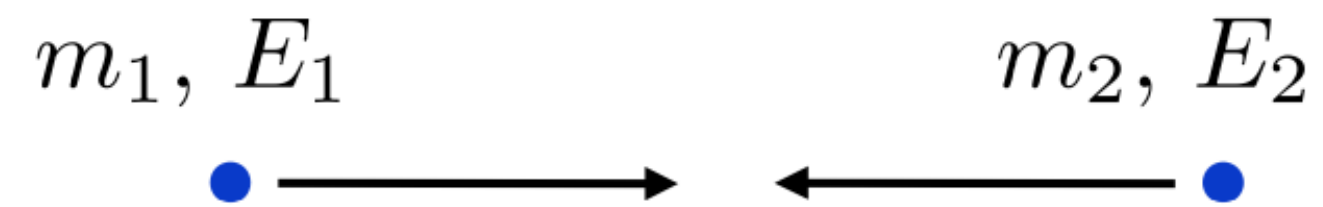
$$4m_p \stackrel{!}{=} \sqrt{2m_p^2 + 2E_1^{lab, \min} m_p} \Rightarrow E_1^{lab, \min} = \frac{(4m_p)^2 - 2m_p^2}{2m_p} = 7m_p$$



Fixed-Target vs . Collider

\sqrt{s} for Fixed-Target und Collider Experiments (II)

Collider:



$$\begin{aligned} s &= (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \\ &= m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 E_2 - 2\vec{p}_1 \vec{p}_2 \end{aligned}$$

for $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$ and $m_1 = m_2$: $\sqrt{s} = 2E$ where $E \equiv E_1 = E_2$