

Forschungsmethoden in der Teilchenphysik - Teil 1 -

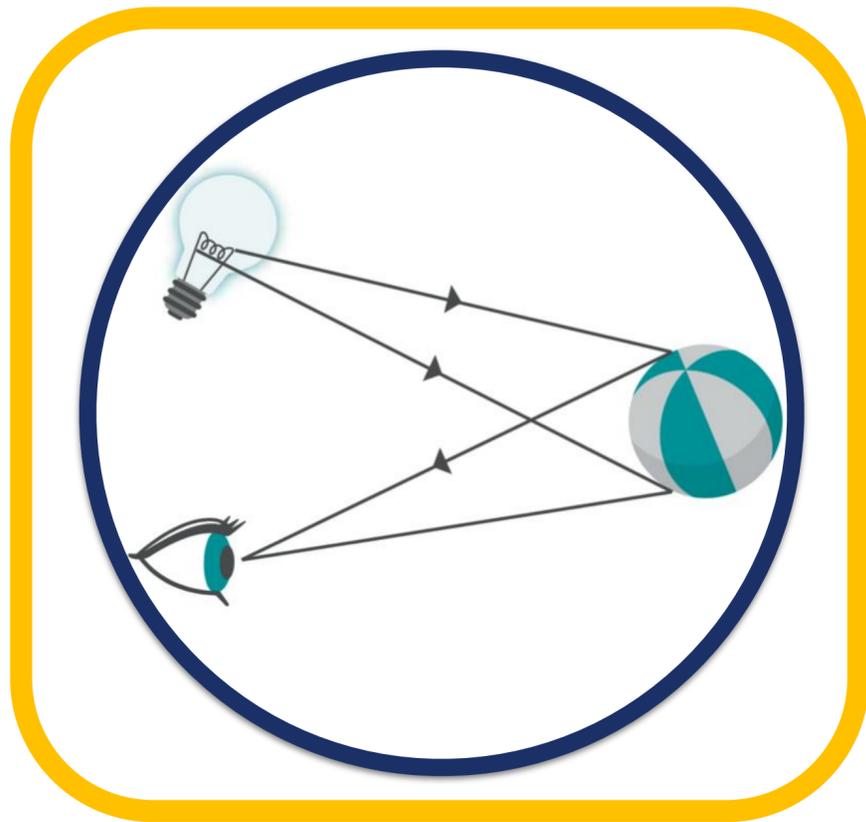
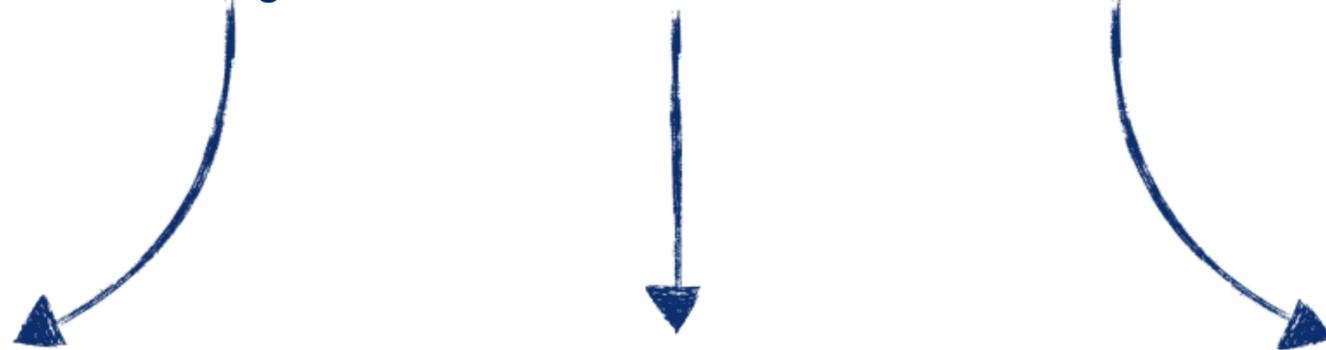
Philipp Lindenau, Tobias Patrick Treczoks

Dillingen | 25.-27.09.2024

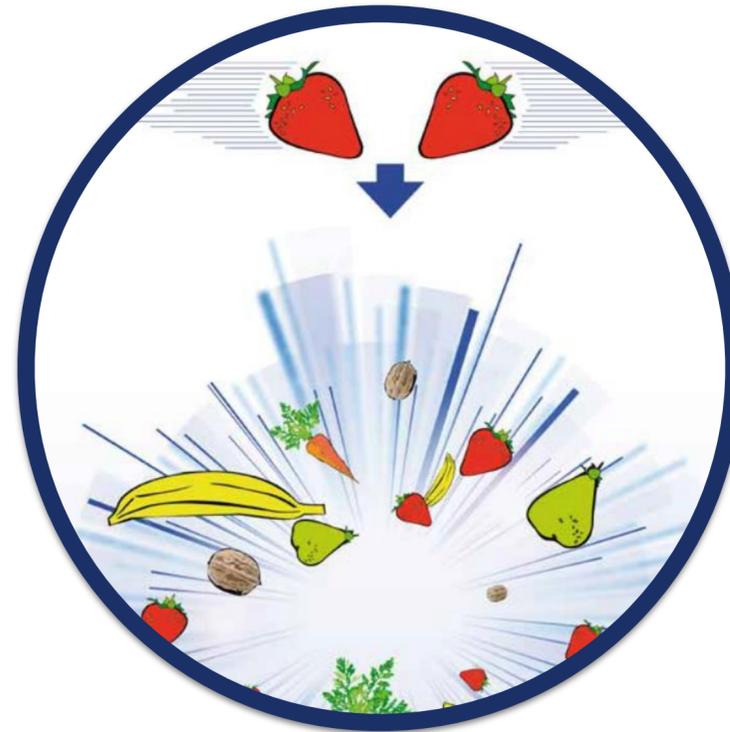


Forschungsziele

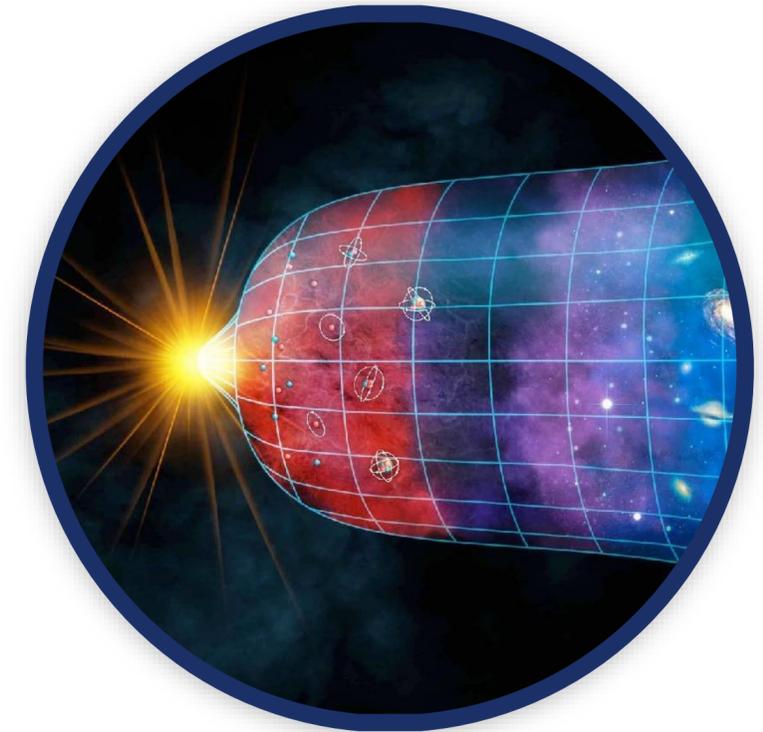
Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



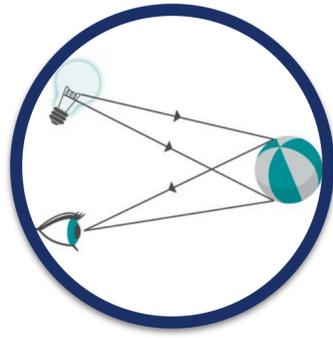
Strukturuntersuchungen



Nachweis neuer Teilchen



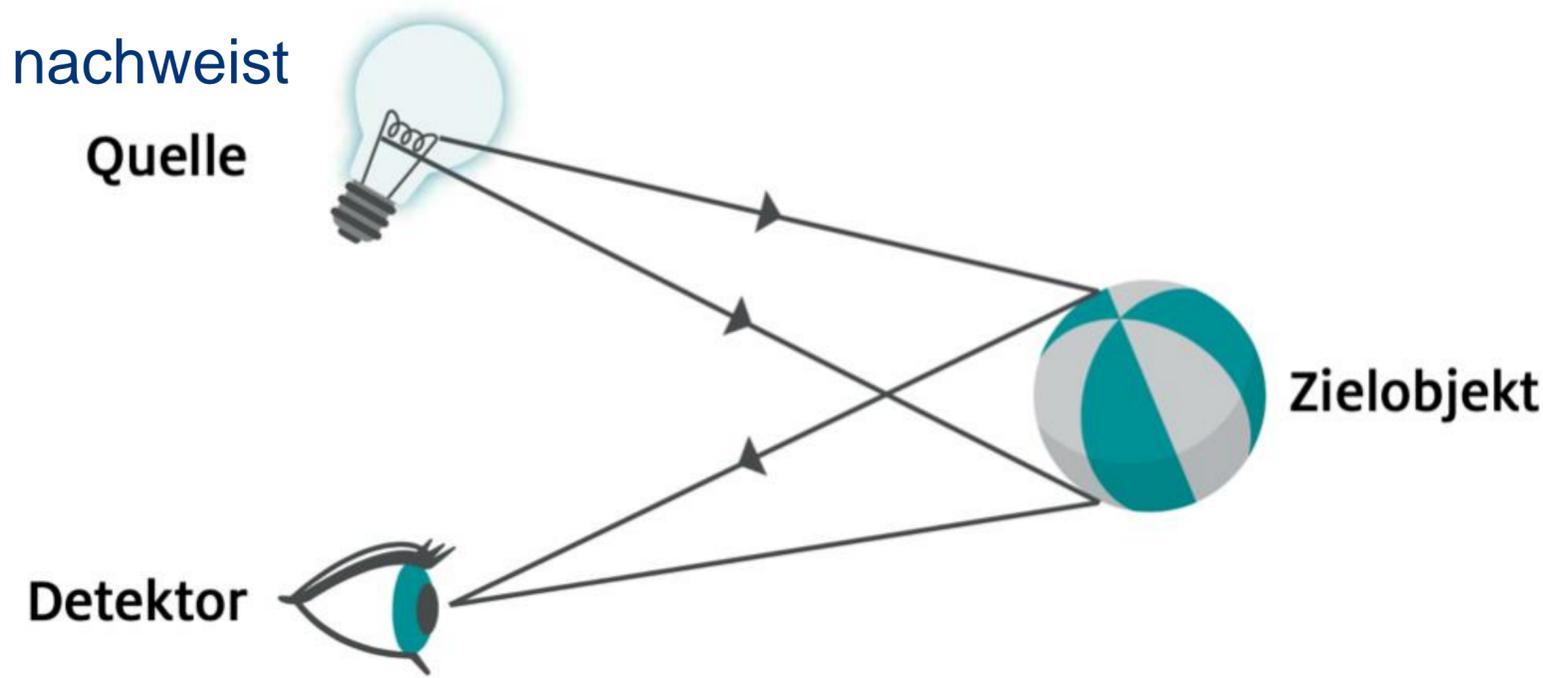
Erzeugung extremer Bedingungen

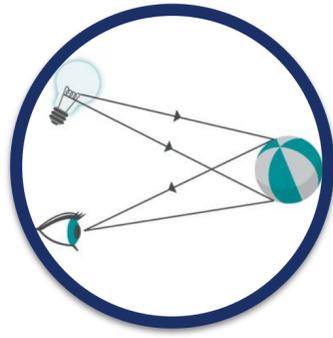


Strukturuntersuchungen

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)



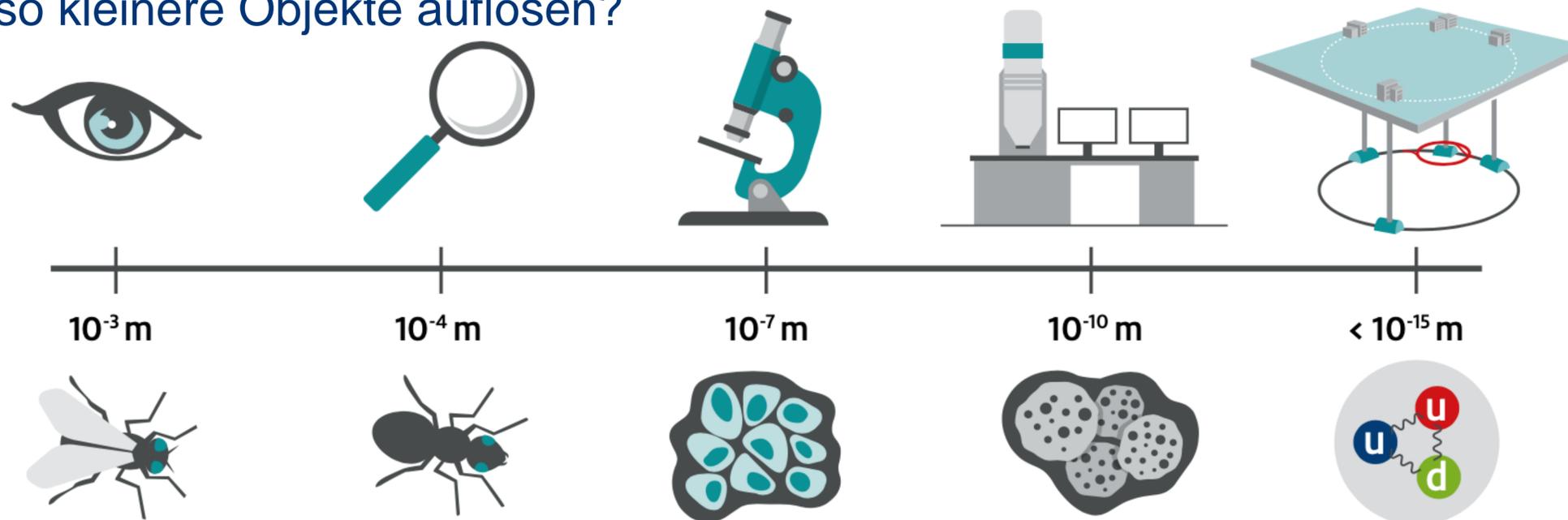


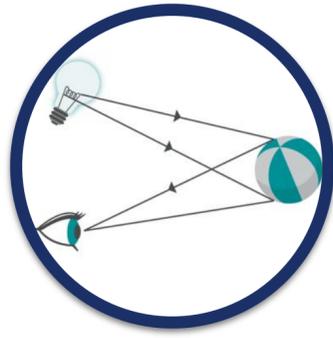
Strukturuntersuchungen

- ▶ 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?





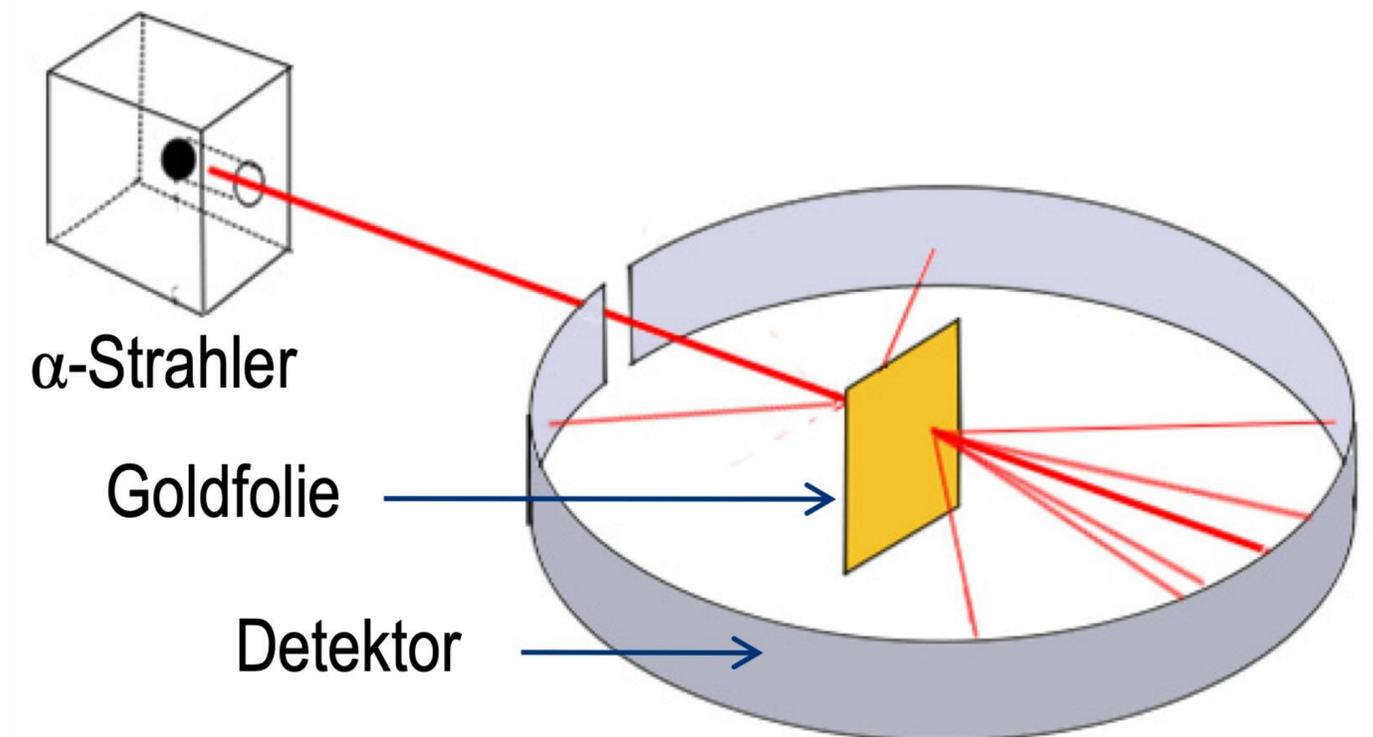
Strukturuntersuchungen

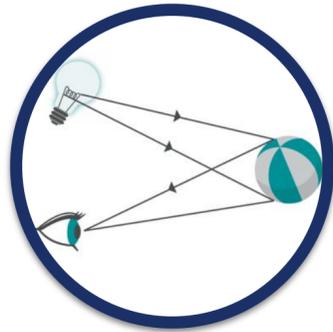
- ▶ Rutherford-Streuexperiment (1911)
- ▶ Streuung von α -Teilchen an Goldatomen
- ▶ Energie des α -Teilchen einige MeV

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

- ▶ 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

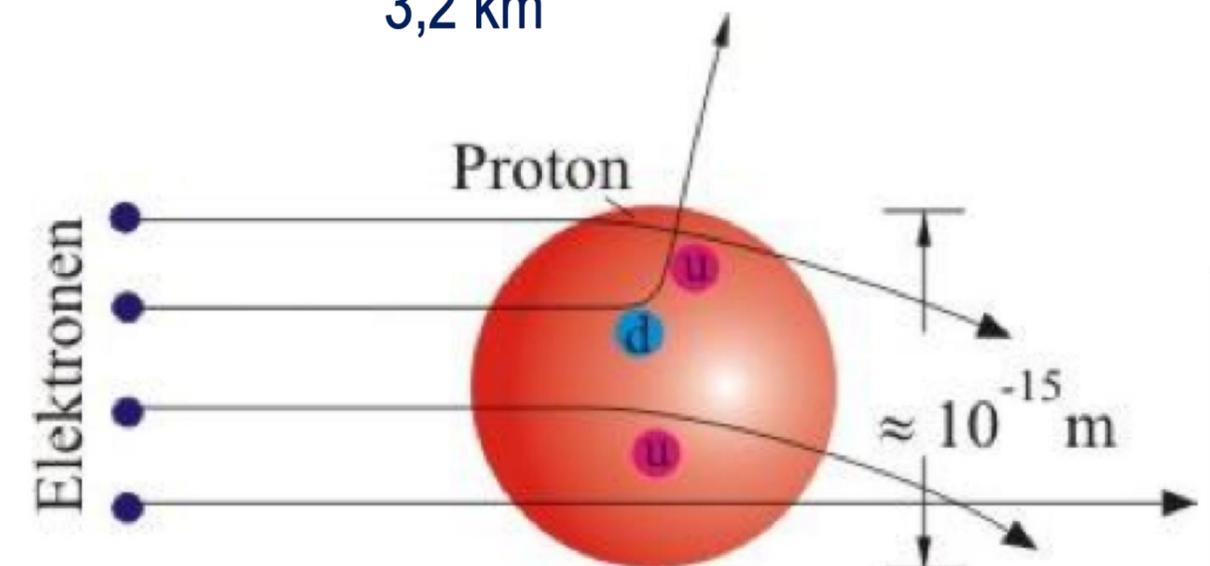
▶ Elektronen Energie bis zu 50 GeV

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

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

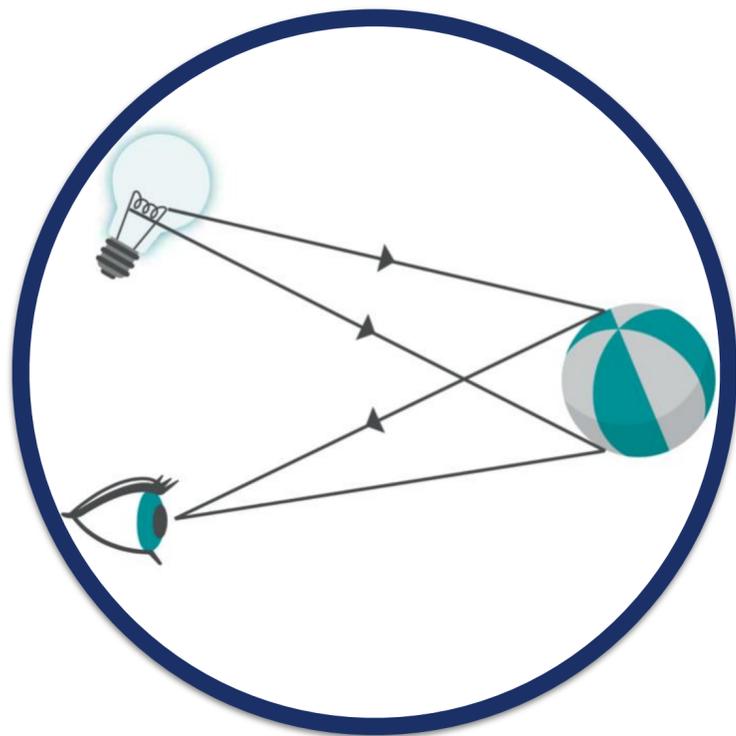


3,2 km

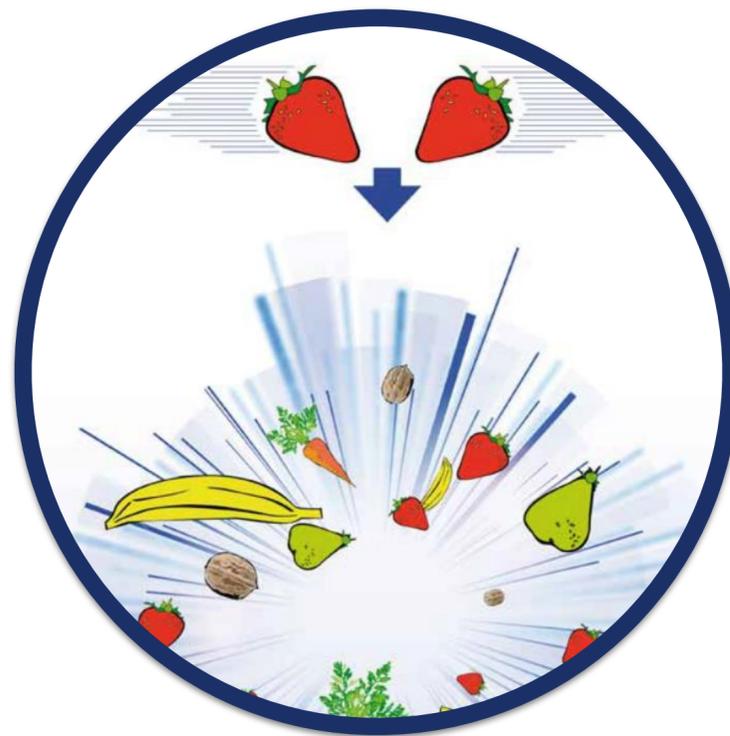


Forschungsziele

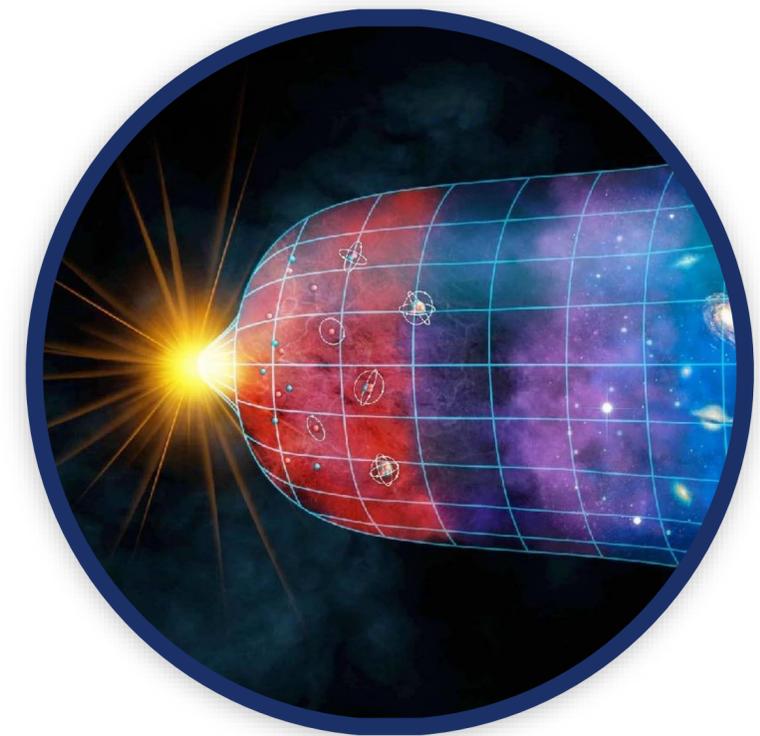
Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



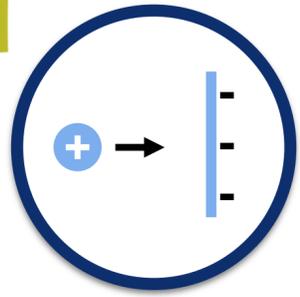
Strukturuntersuchungen



Nachweis neuer Teilchen



Erzeugung extremer
Bedingungen

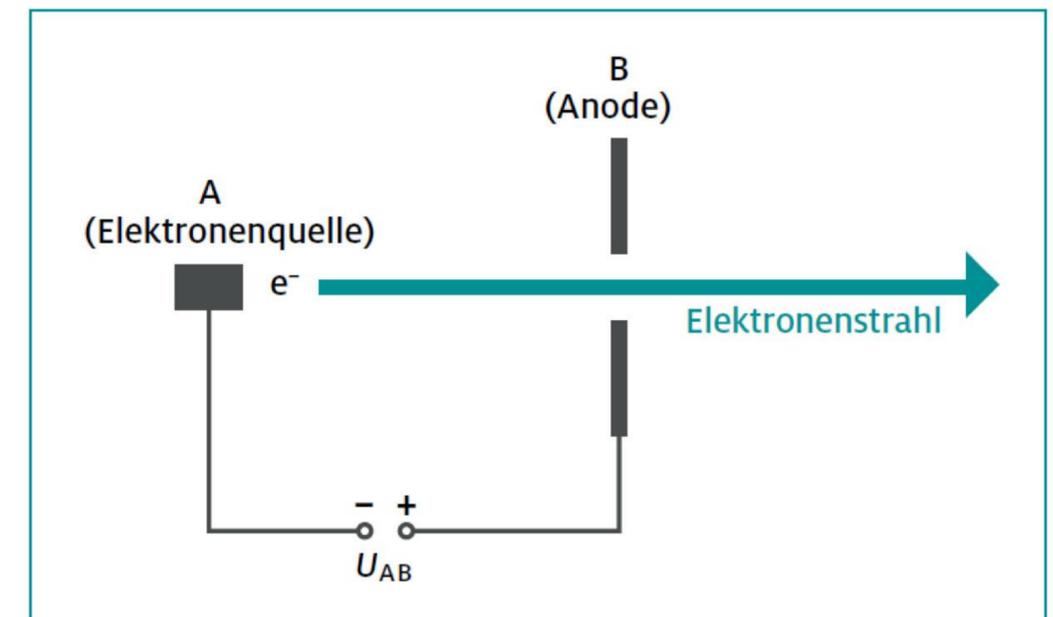
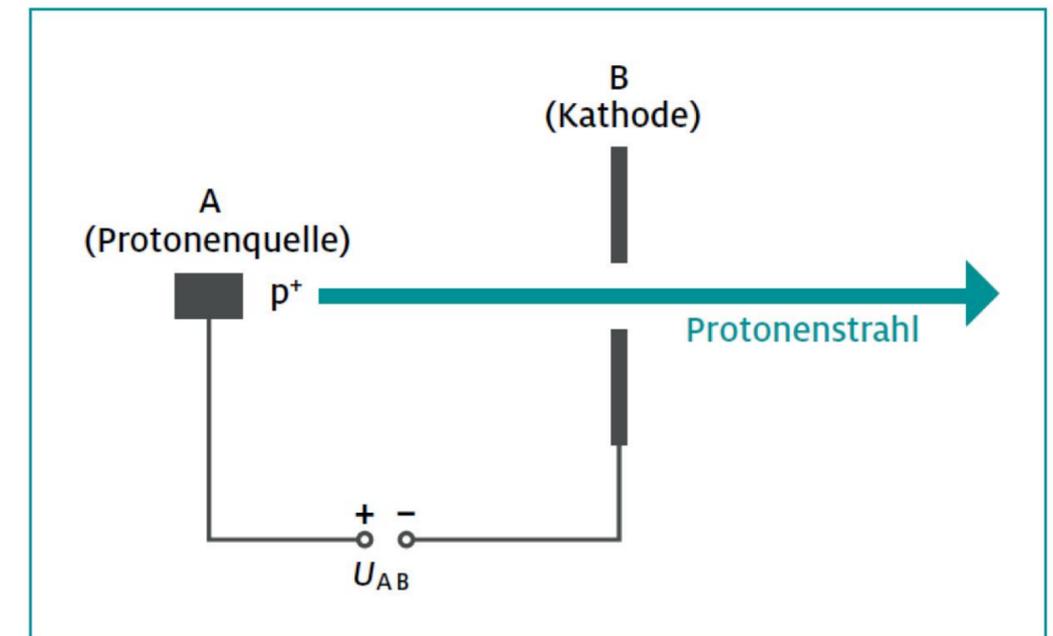


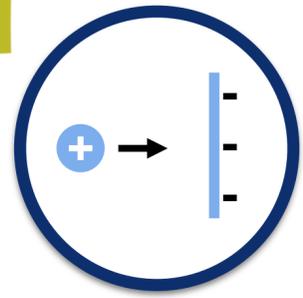
Physik der Beschleuniger

Wie werden die Teilchen beschleunigt?

Konzept Experimente an Beschleunigern:

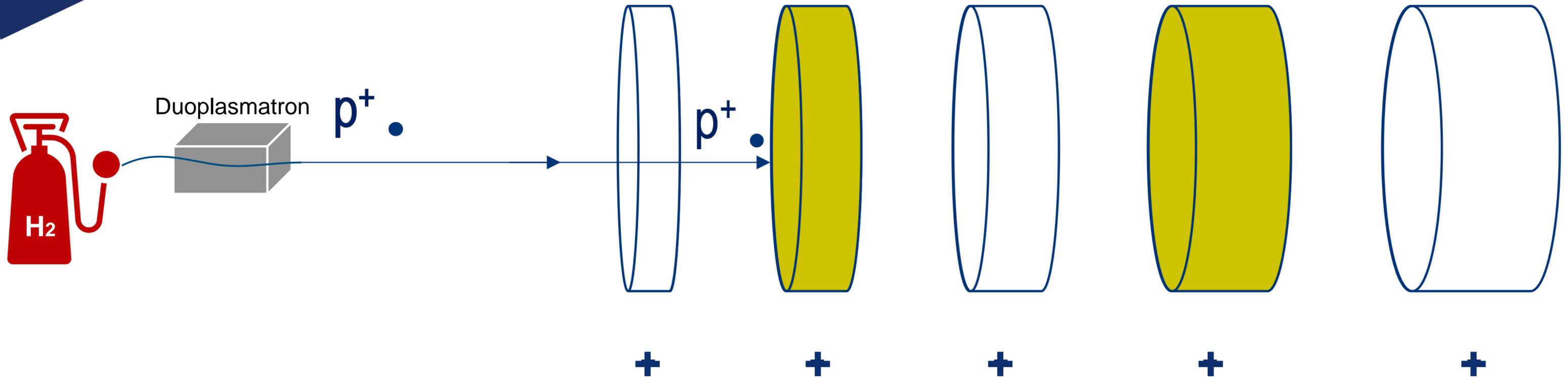
- ▶ **Teilchen erzeugen:**
Elektrisch neutrale Teilchen werden ionisiert
- ▶ **Teilchen beschleunigen:**
Elektrisch geladene Teilchen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- ▶ **Teilchen ablenken und/oder fokussieren:**
Elektrisches oder magnetisches Feld
- ▶ **Teilchen nachweisen:**
Leuchtschirm/Detektor



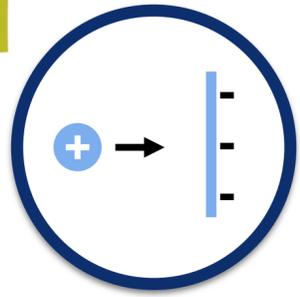


Physik der Beschleuniger

- 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 \rightarrow Driftröhren werden länger

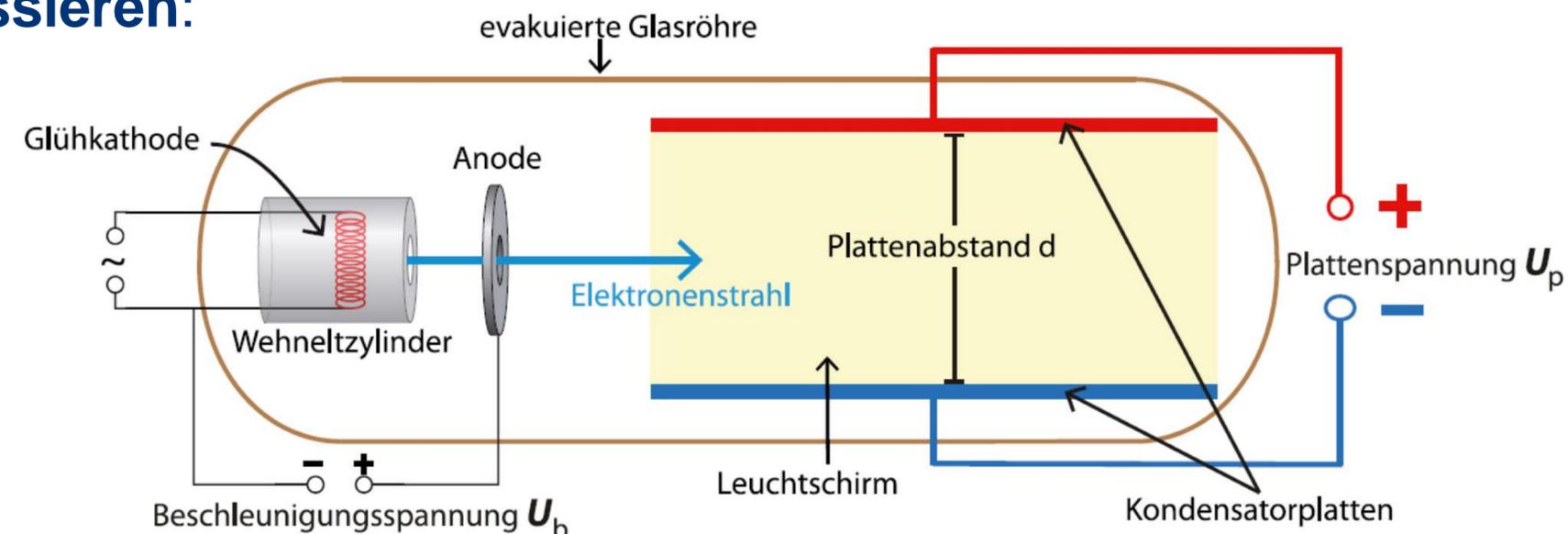


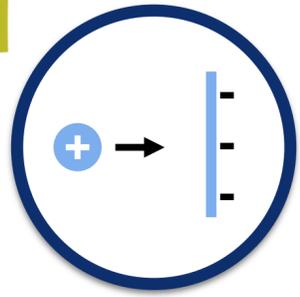
Physik der Beschleuniger

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!





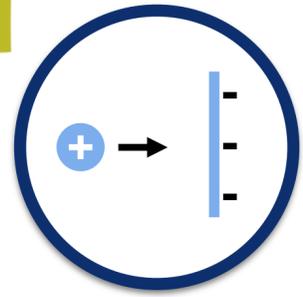
Physik der Beschleuniger

- beschreiben, insbesondere auch in alltagsrelevanten Kontexten, quantitativ die **Bewegung geladener Teilchen in homogenen elektrischen und magnetischen Feldern.** Hierzu wählen sie selbstständig geeignete Modellierungen und physikalische Konzepte. Im Zusammenhang mit hohen Geschwindigkeiten erläutern sie den beschränkten Gültigkeitsbereich der Newton'schen Mechanik und verwenden den relativistischen Impuls sowie die relativistische Energie. Sie erschließen sich zielgerichtet Informationen aus digitalen Lernumgebungen sowie für ihre Zwecke passenden selbst gewählten Quellen. Die recherchierten Informationen fassen sie zielorientiert zusammen und speichern sie strukturiert unter Verwendung geeigneter digitaler Werkzeuge. Sie dokumentieren sie unter Verwendung geeigneter digitaler Werkzeuge und präzisieren schlüssiger physikalischer Argumente.

Lehrplanthema!

Physik Jahrgang 12

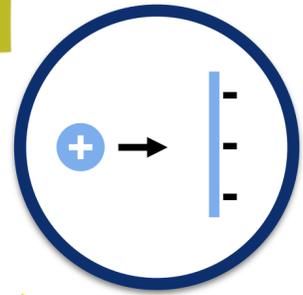
- *EVA – eigenverantwortliches Arbeiten: Lorentzkraft, Beschreibung der Kreisbahnen geladener Teilchen in homogenen Magnetfeldern, Experimentelles Arbeiten: **Bahnen geladener Teilchen im elektrischen und magnetischen Feld***
- *EVA – eigenverantwortliches Arbeiten: technische Anwendungen: Geschwindigkeitsfilter, Massenspektrometer, Hall-Effekt und Funktionsprinzip der Hall-Sonde, **Teilchenbeschleuniger***



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...





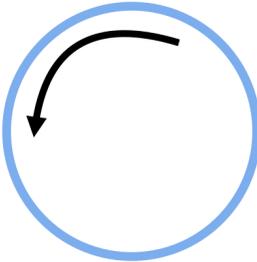
Physik der Beschleuniger

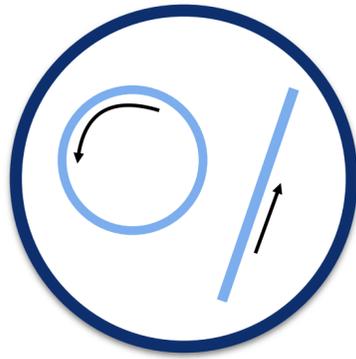
Linearbeschleuniger

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

Kreisbeschleuniger

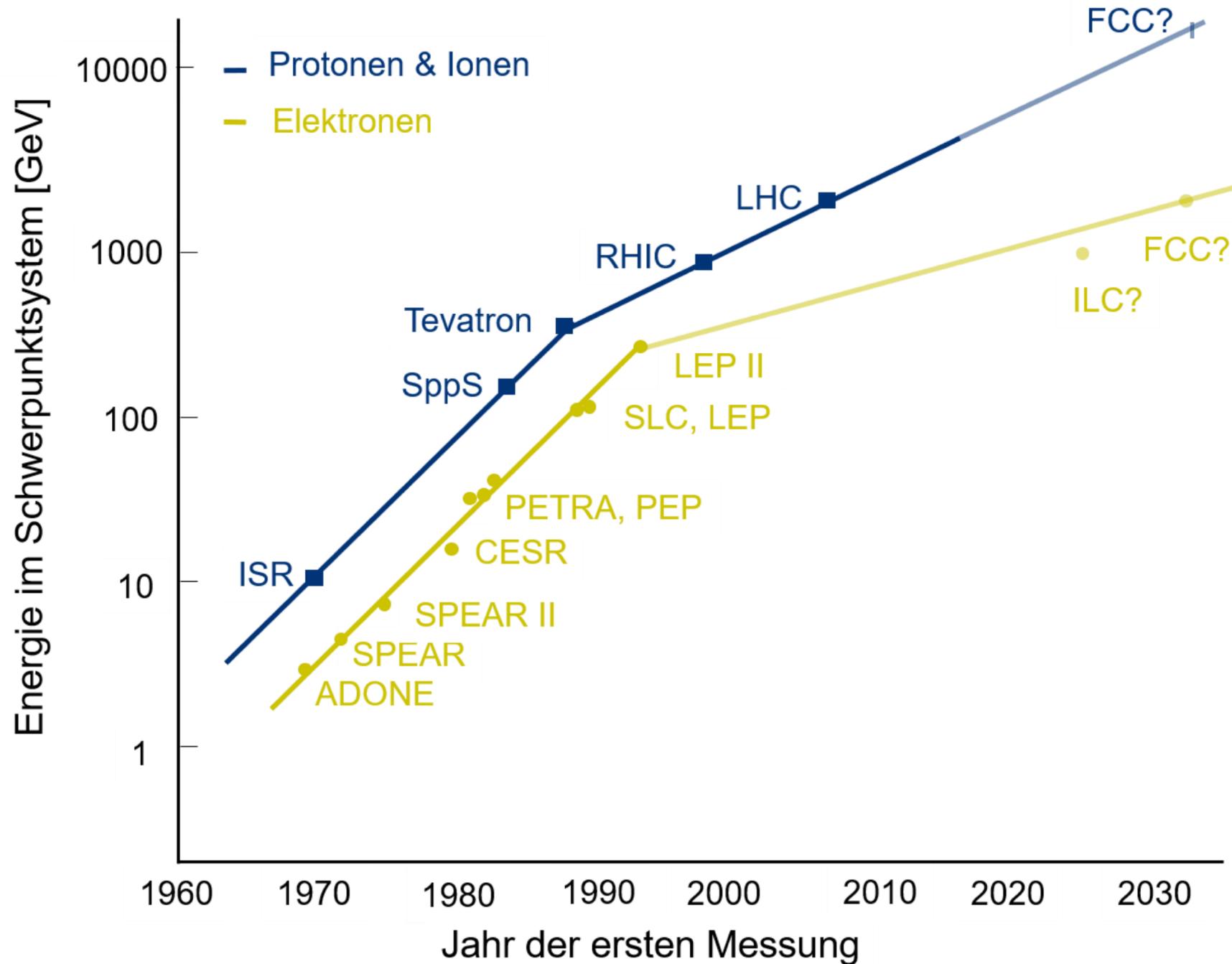
- ▶ Elektrisch geladene Teilchen durchqueren elektrische Felder
- ▶ Magnetische Felder zwingen Teilchen auf Kreisbahn
- ▶ **Vorteile:**
Mehrfaches Durchlaufen der elektrischen Felder
- ▶ **Nachteile:**
Hohe Magnetfeldstärken nötig





Beschleunigerarten

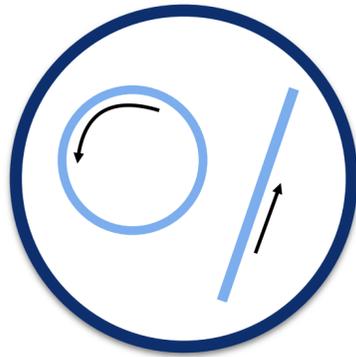
Linear- und Kreisbeschleuniger



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

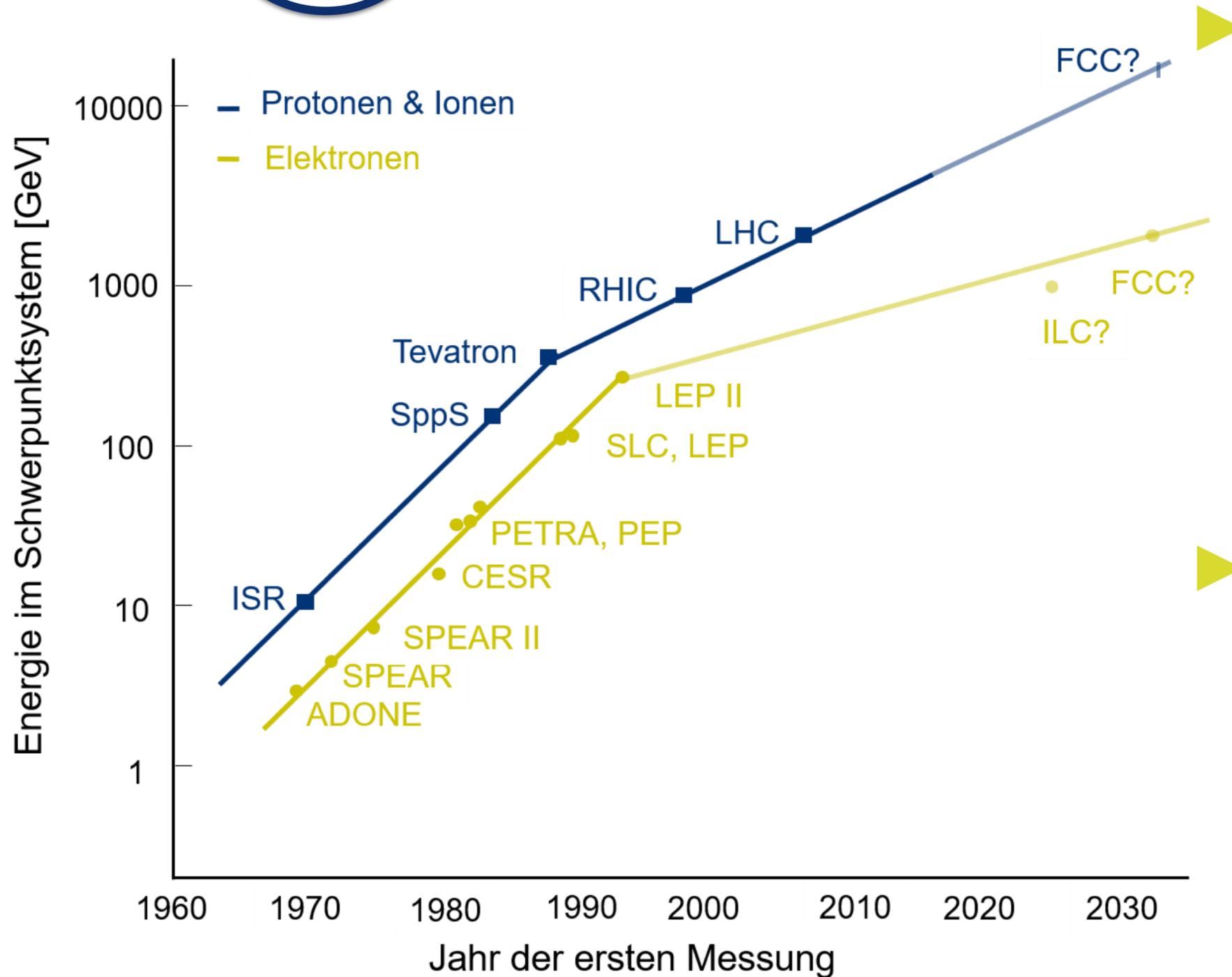
- ▶ Masse der beschleunigten Teilchen in der Regel kleiner
- ▶ **ABER: Synchrotronstrahlung**

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



Beschleunigerarten

Linear- und Kreisbeschleuniger

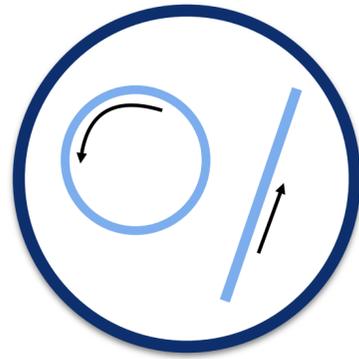


Wofür dann Leptonen-Beschleuniger / -Collider?

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

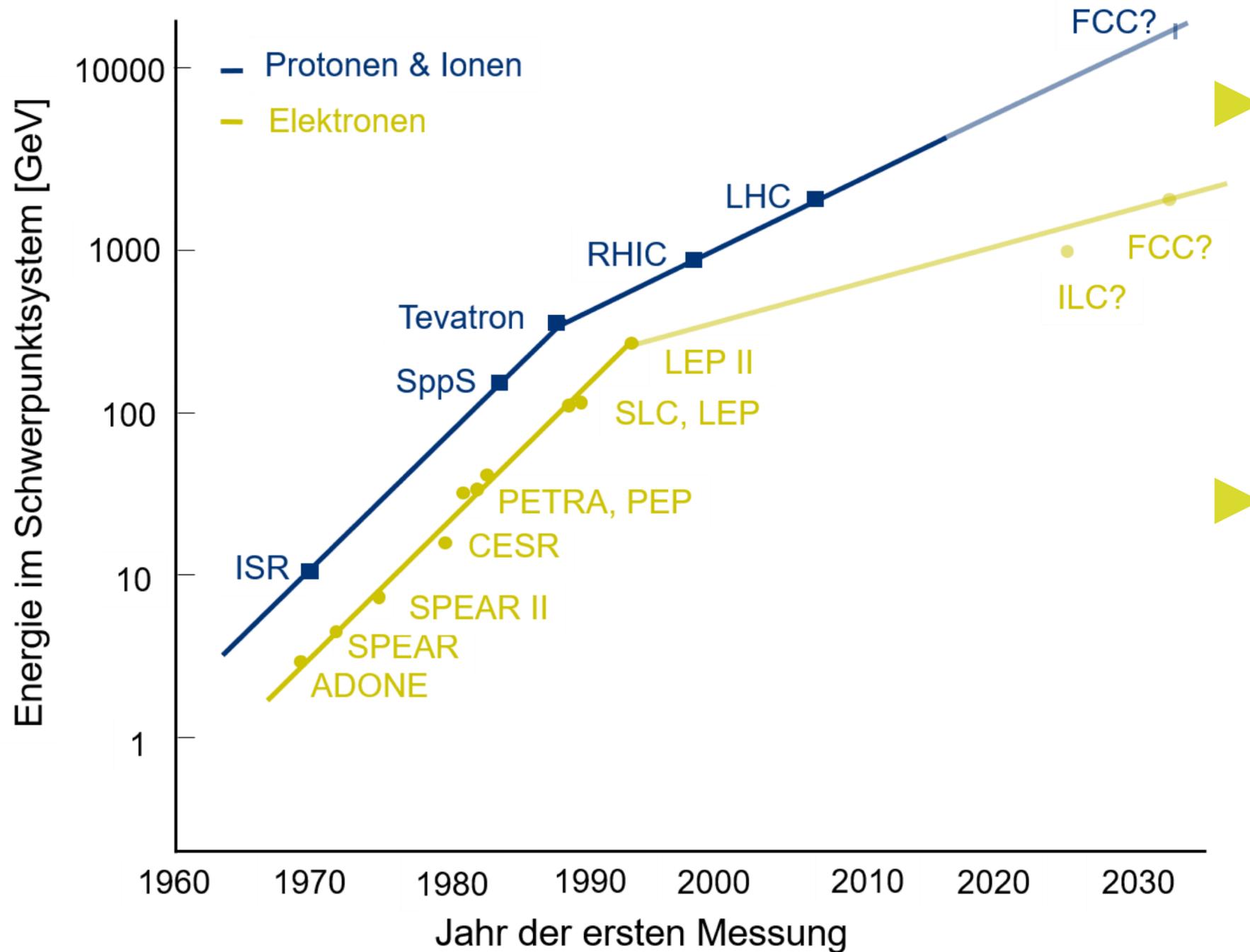
Und Hadronen-Beschleuniger / -Collider?

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



Beschleunigerarten

Linear- und Kreisbeschleuniger



Wofür dann Leptonen-Beschleuniger / -Collider?

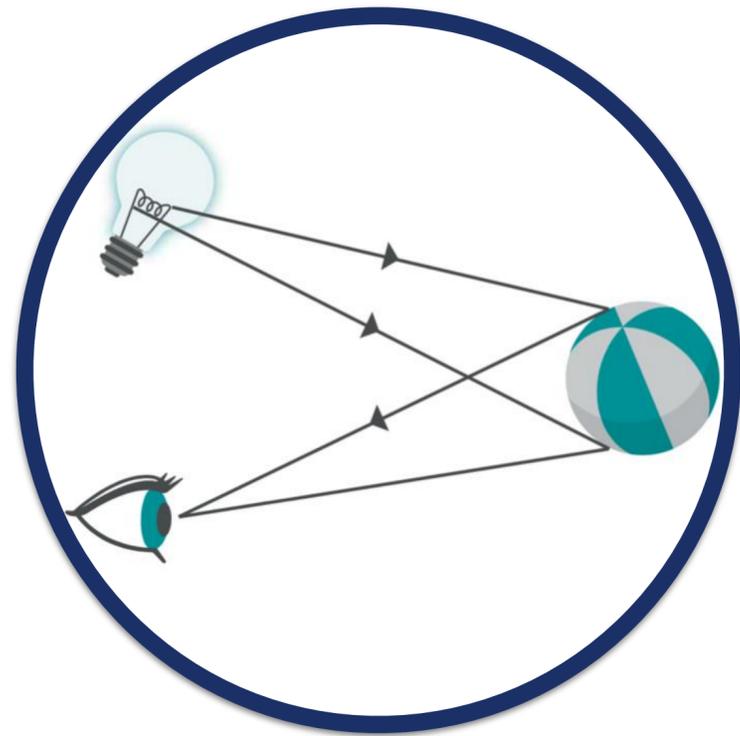
- ▶ Präzise Vermessung von Teilchen

Und Hadronen-Beschleuniger / -Collider?

- ▶ Entdeckung neuer Teilchen

Forschungsziele

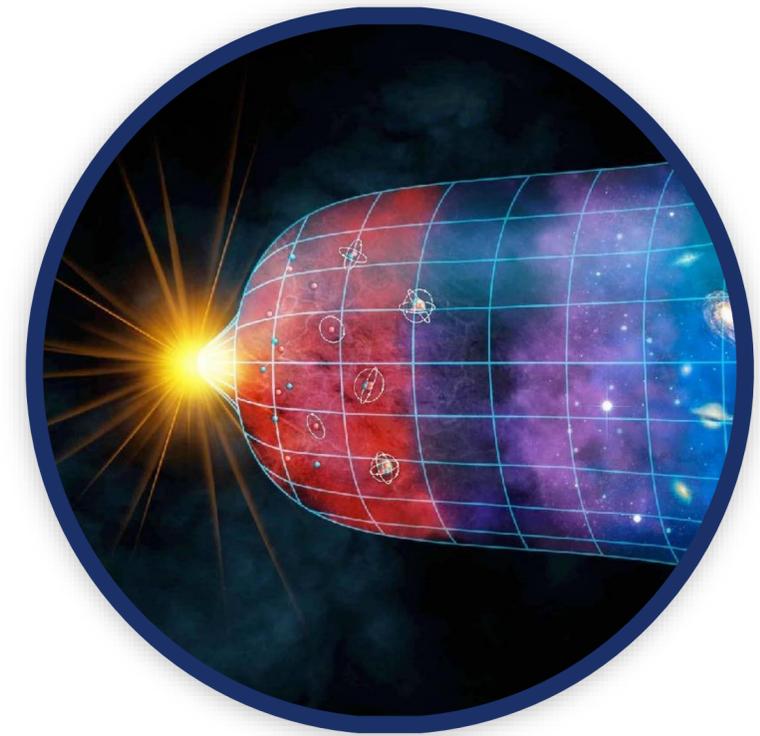
Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



Strukturuntersuchungen



Nachweis neuer Teilchen



**Erzeugung extremer
Bedingungen**

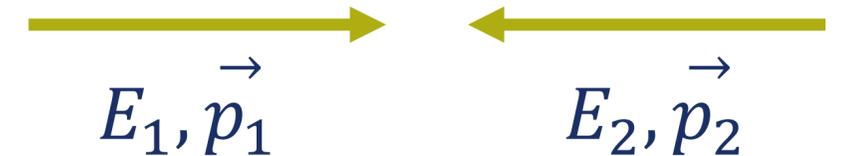


Nachweis „neuer“ Teilchen

- ▶ 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

$$E_0 = mc^2$$



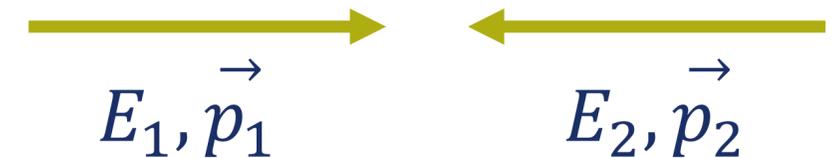


Nachweis „neuer“ Teilchen

- ▶ 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 $E_{kin} = 50 \text{ GeV}$
- ▶ 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 $E_{cm} \approx 7 \text{ GeV} \sqrt{E}$



Wieso das?

$$E_0 = mc^2$$



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)

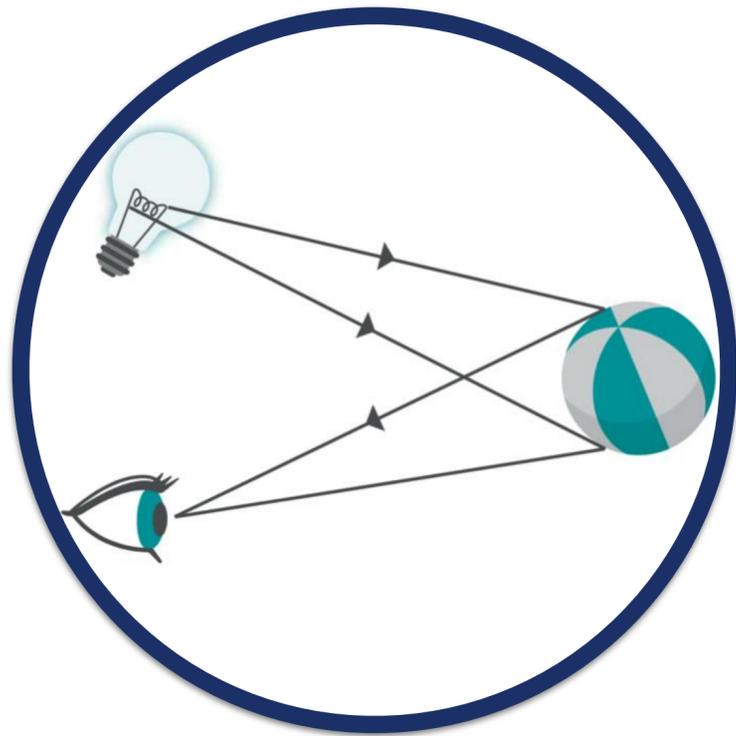
Teilchen nachgewiesen: 20. Januar 1983: $m_W = 83 \pm 3 \text{ GeV} \mid m_Z = 94 \pm 3 \text{ GeV}$

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

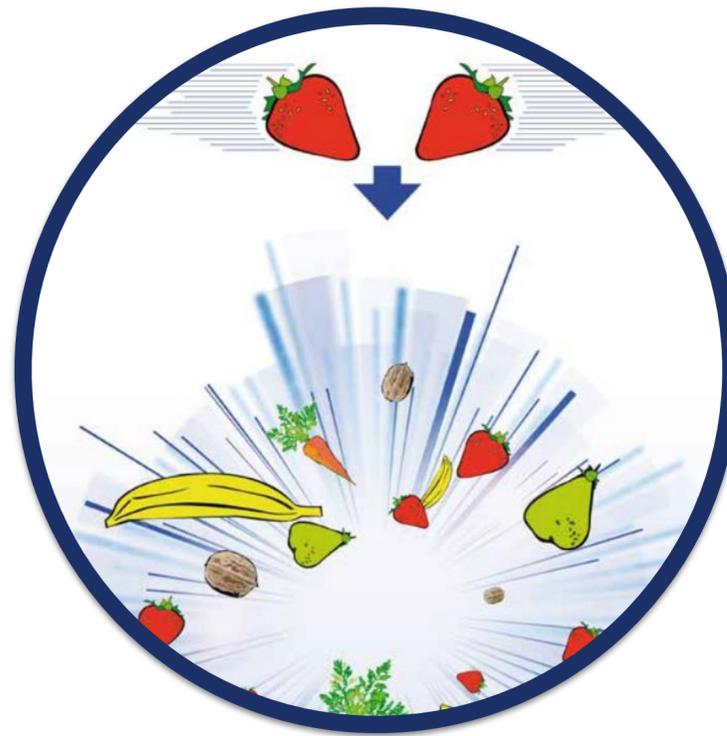


Forschungsziele

Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



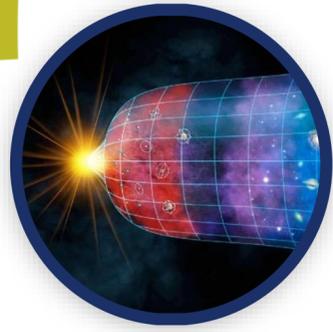
Strukturuntersuchungen



Nachweis neuer Teilchen



**Erzeugung extremer
Bedingungen**



Erzeugung extremer Bedingungen

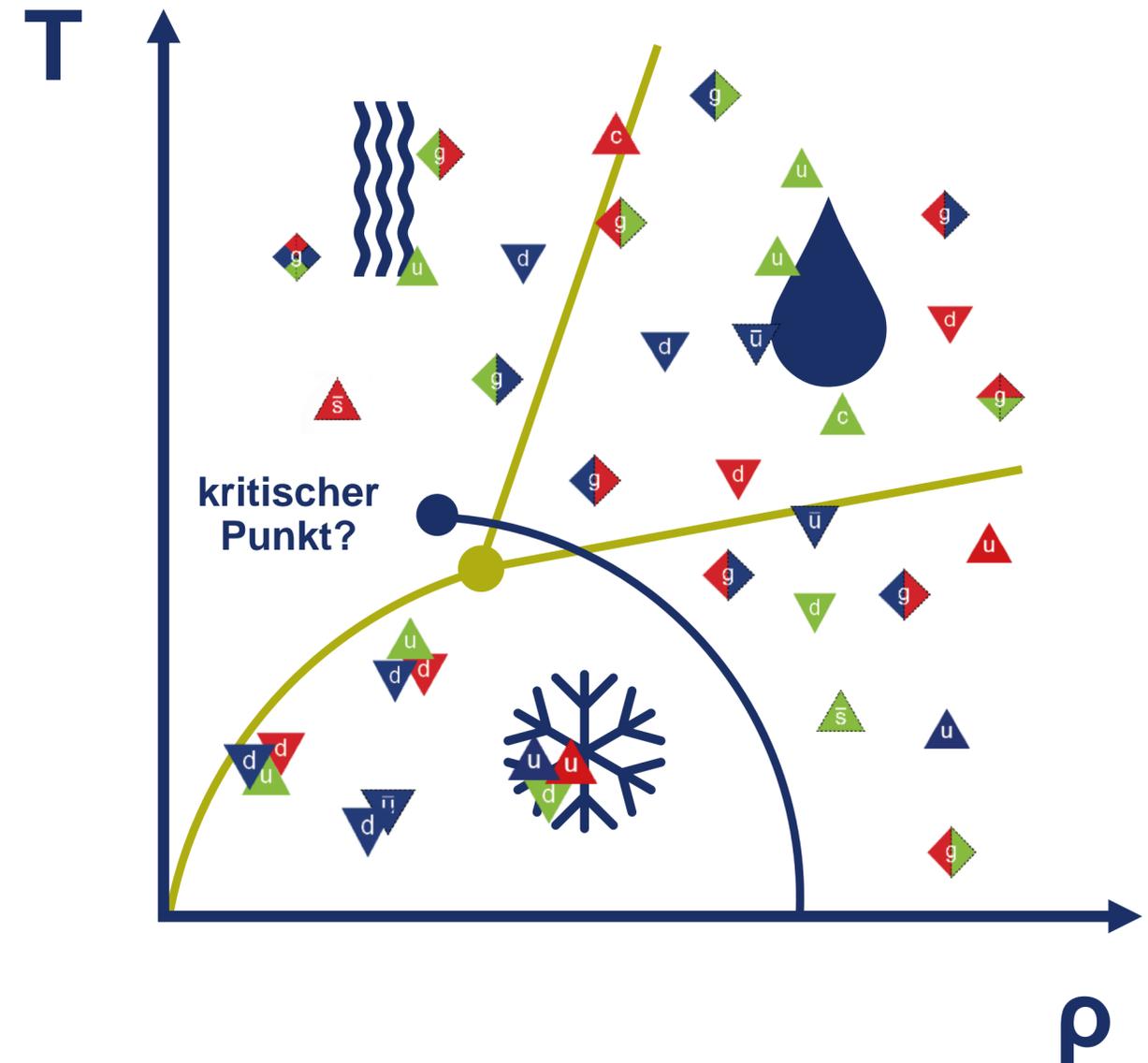
In **Schwerionenkollisionen** werden Temperaturen und Dichten erzeugt, die ähnlich extrem sind wie:

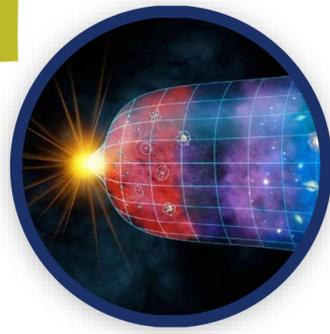
- ▶ Kurz nach dem Urknall
- ▶ In Neutronensternen

Forschungsgegenstand

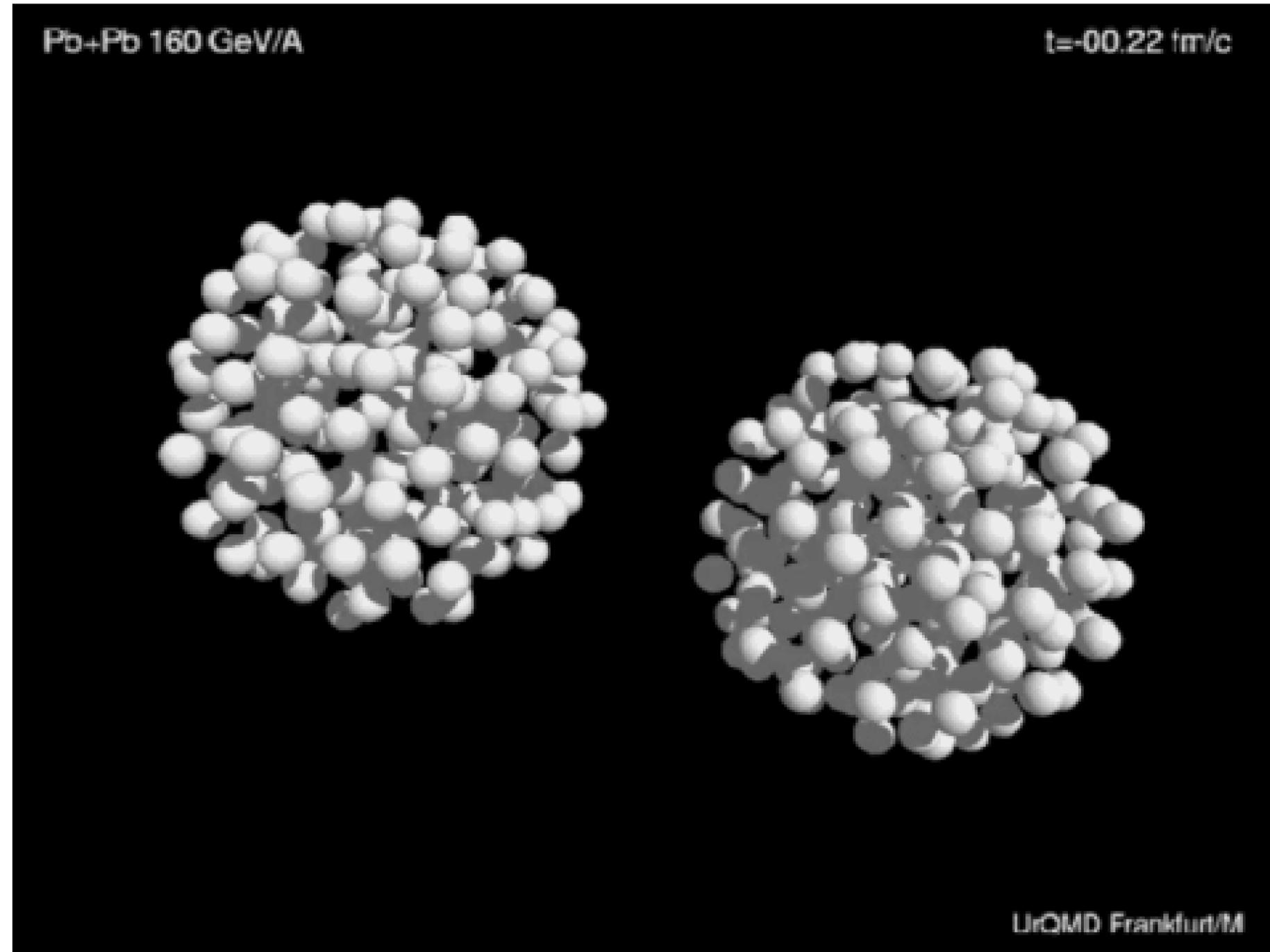
- ▶ Phasenübergang: Quark-Gluonen-Plasma zu Hadronen
- ▶ Kritischer Punkt
- ▶ Expansionsverhalten nach Kollision

Analogie: Phasen von Wasser





Erzeugung extremer Bedingungen



Beschleunigerphysik und das CERN





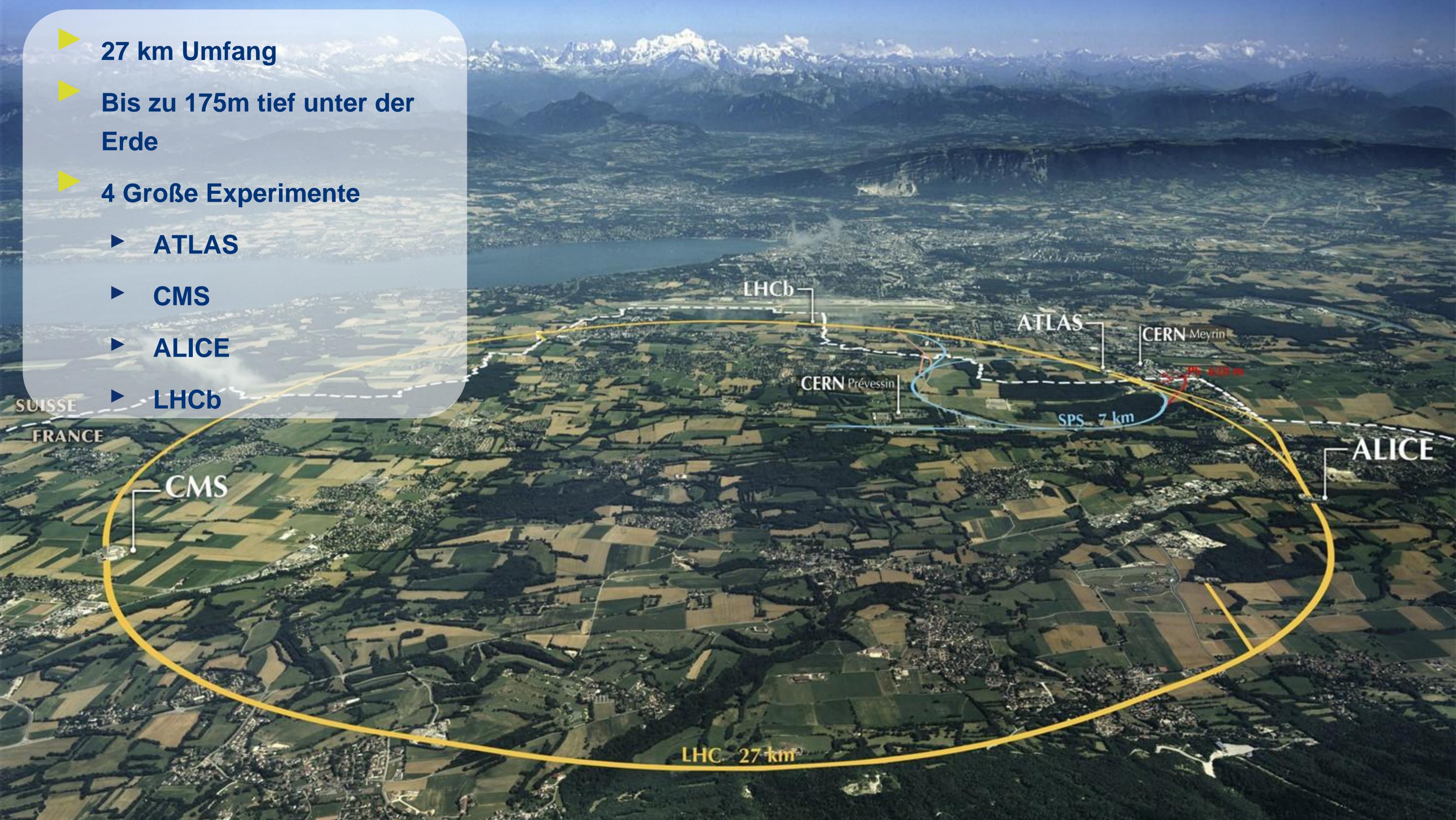
Das CERN

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

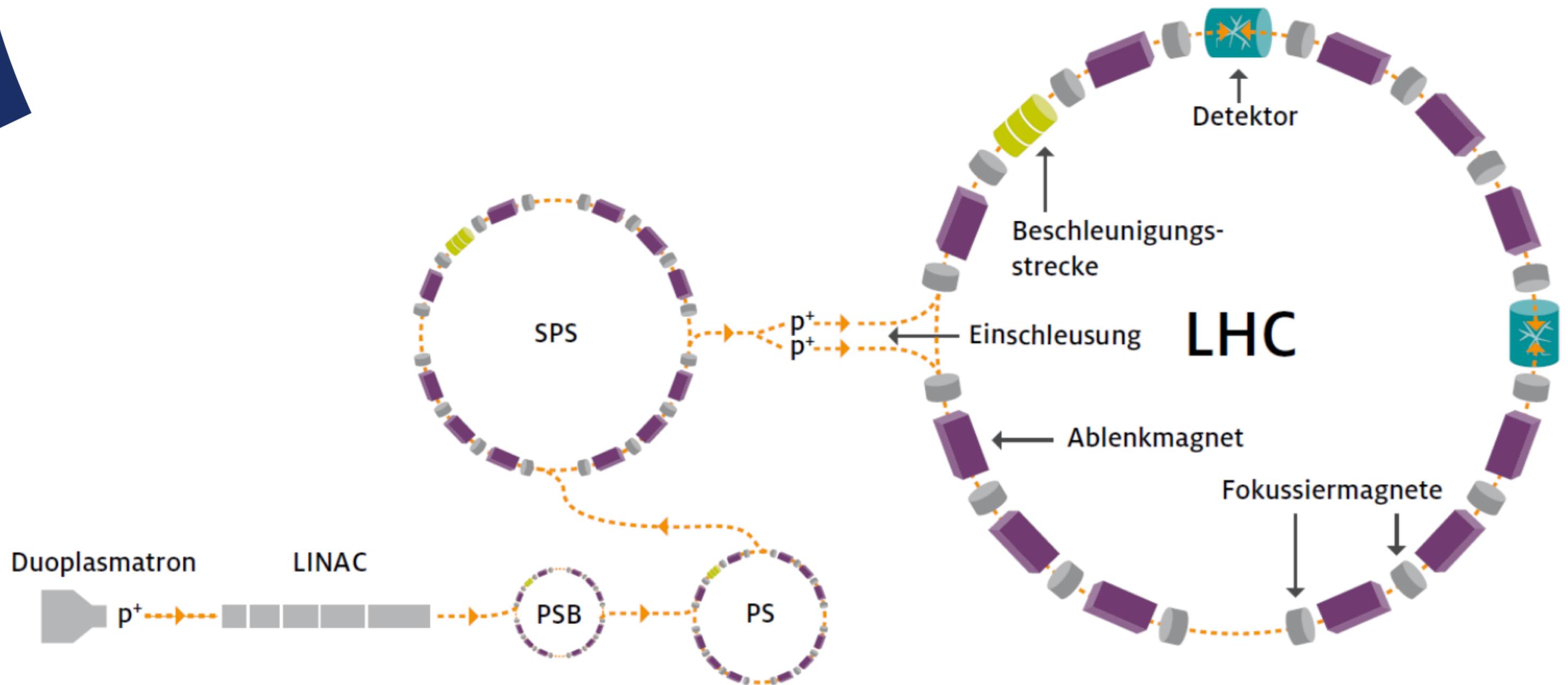
ALICE

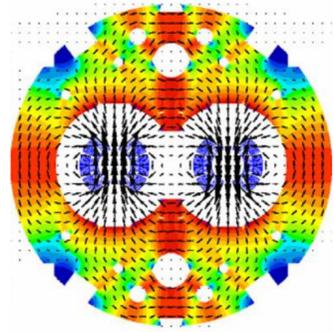
CMS

LHC 27 km



Large Hadron Collider (LHC)

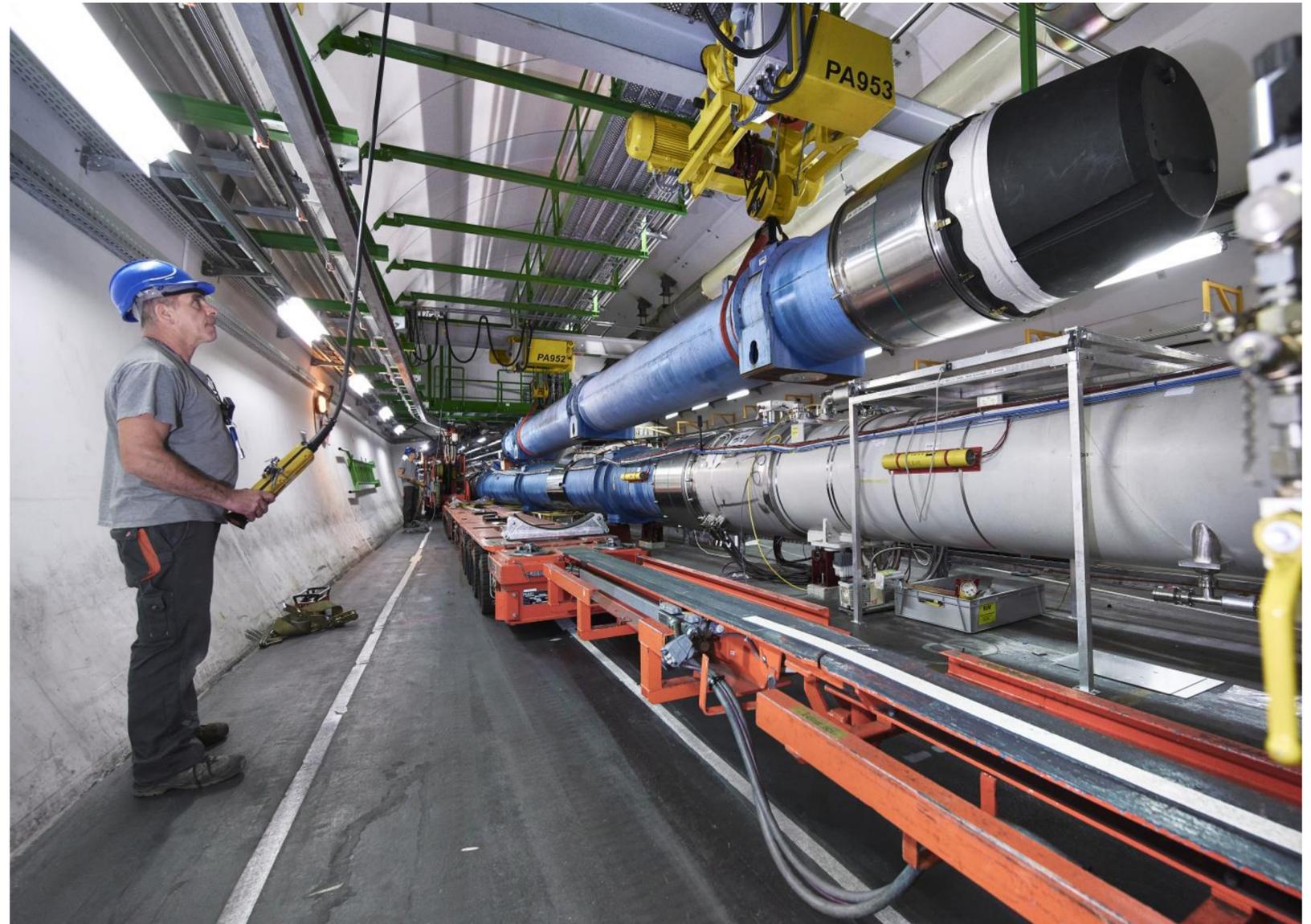




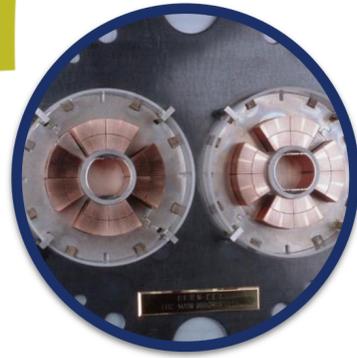
LHC Dipolmagnete

- ▶ **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



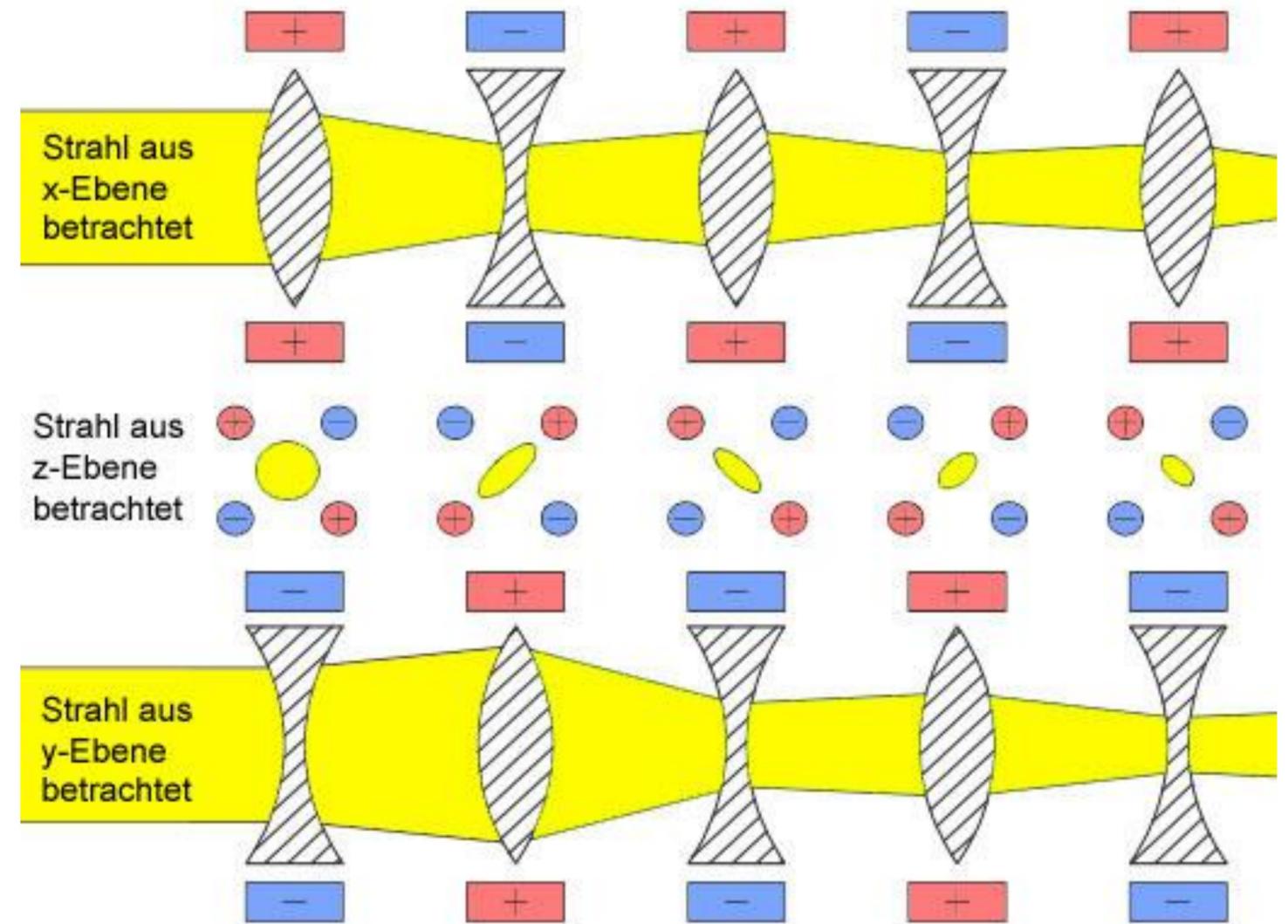
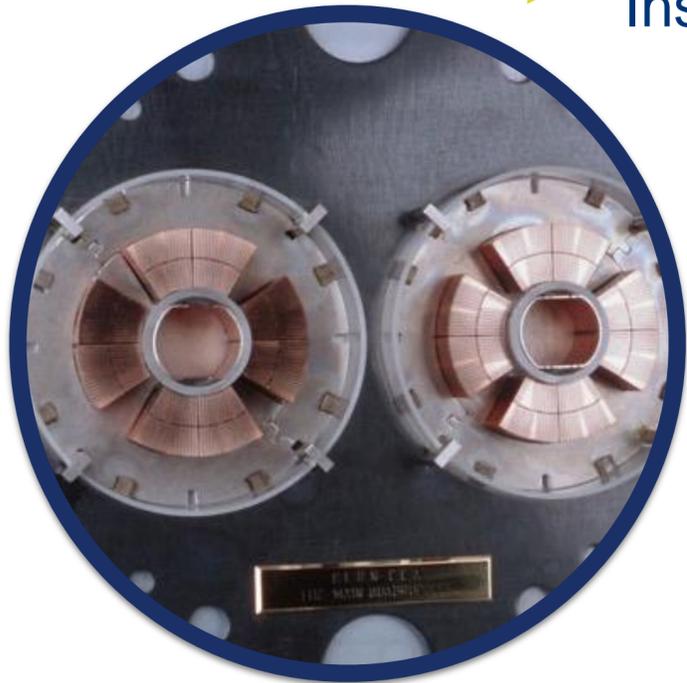
LHC Quadrupolmagnete



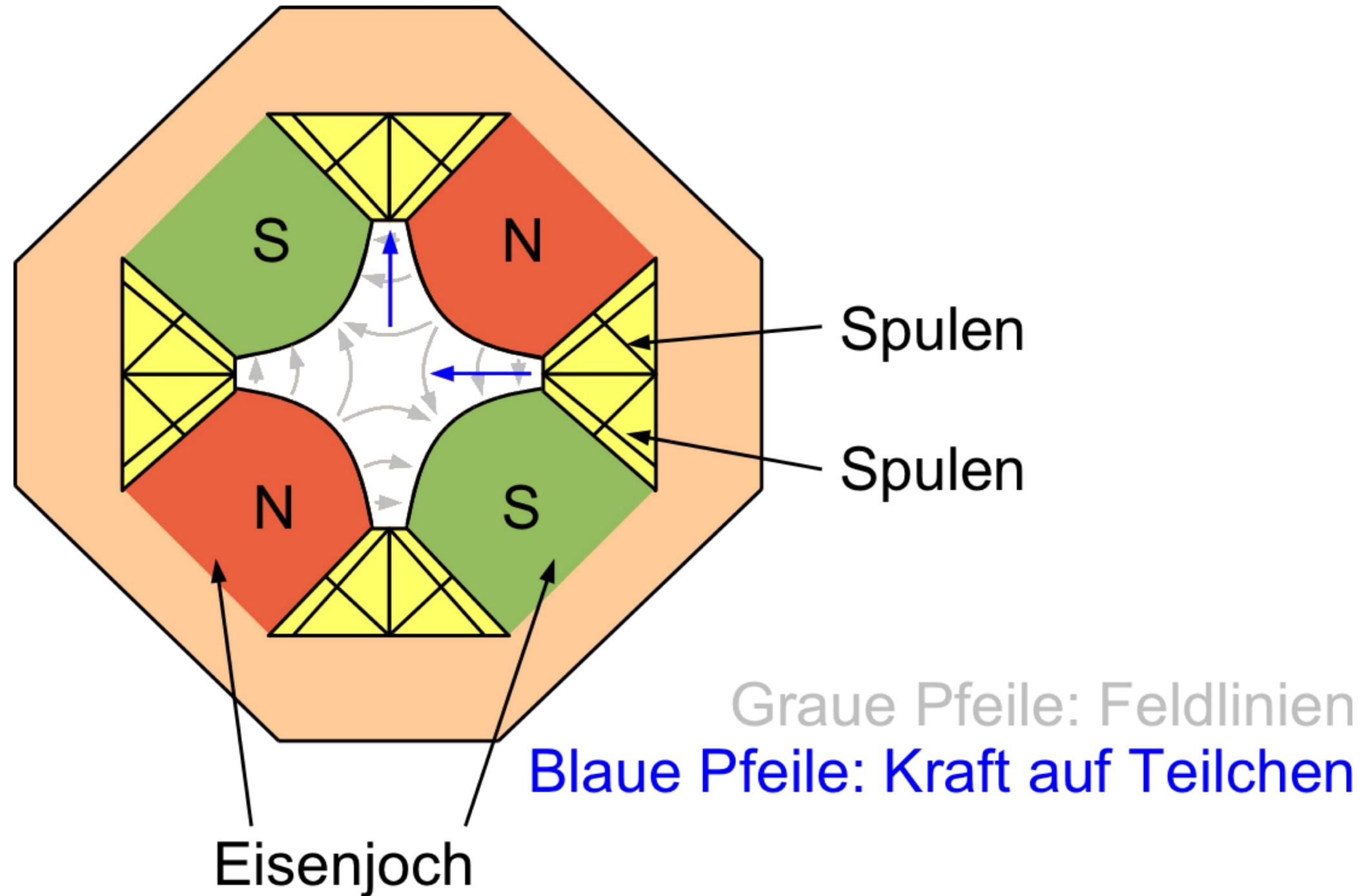
▶ **Coulombkraft** führt zur gegenseitigen Abstoßung der Protonen

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

▶ Insgesamt **392** Quadrupolmagnete



LHC Quadrupolmagnete

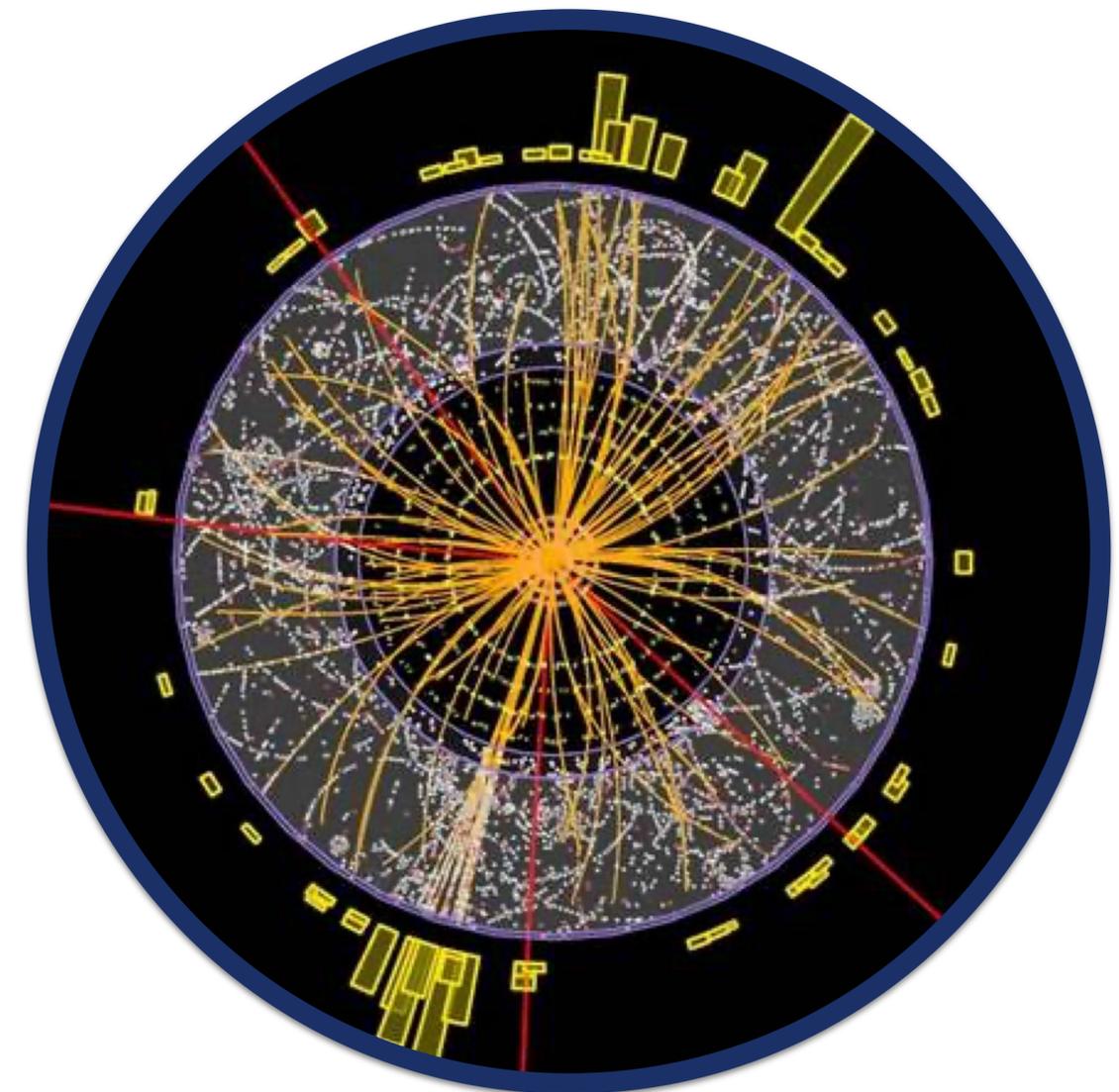




CMS
Compact Muon Solenoid
Solénoïde compact pour

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



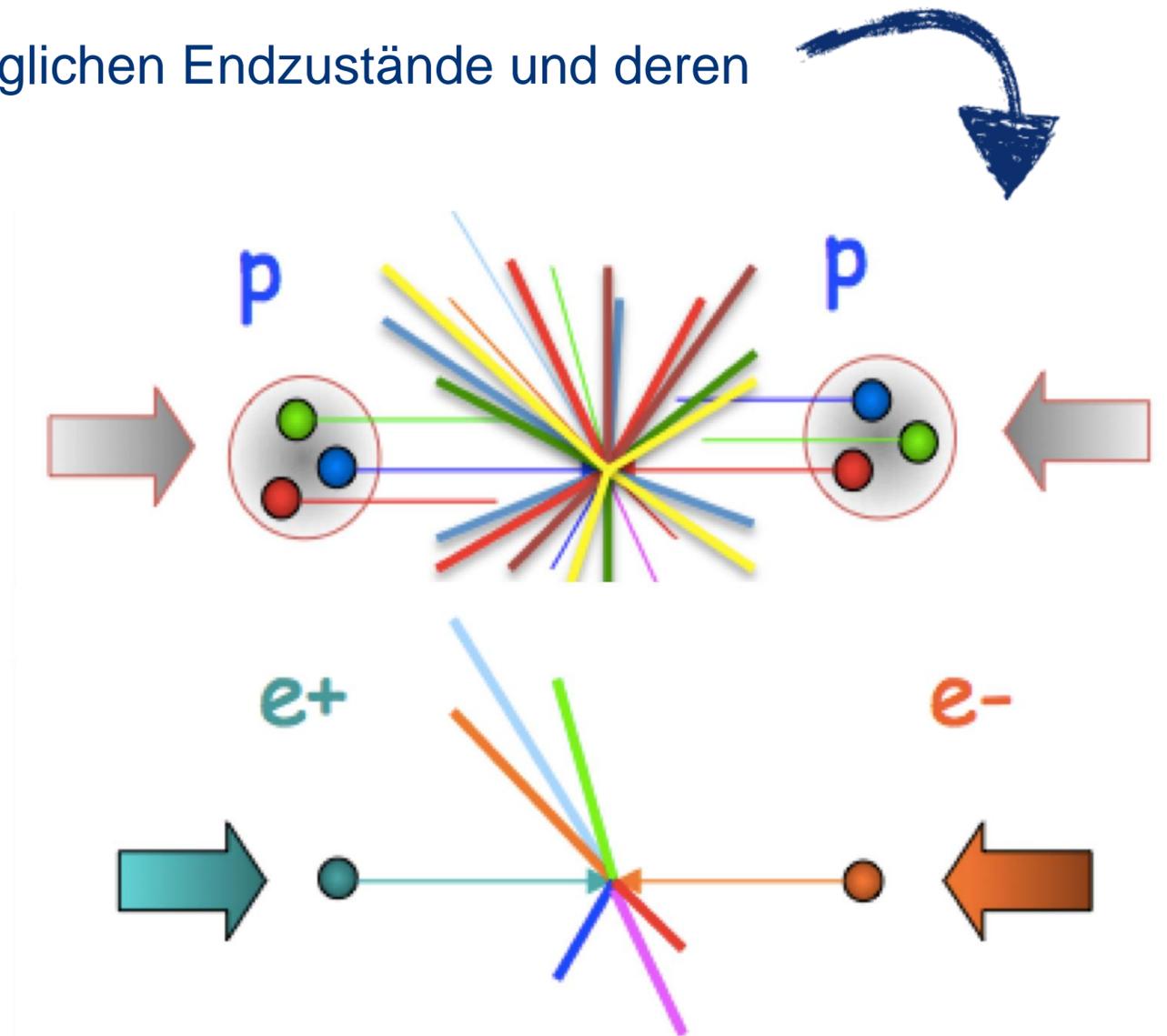
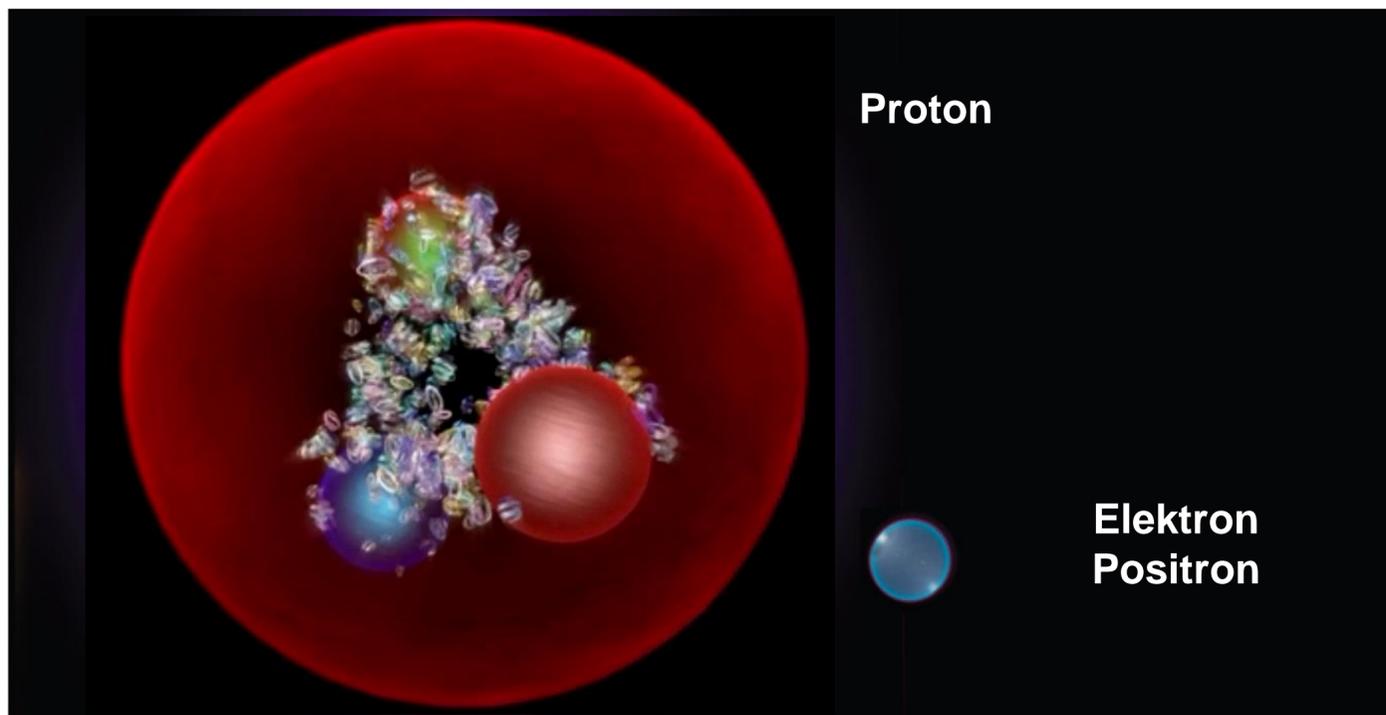
Large Electron-Positron Collider (LEP)

- ▶ 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

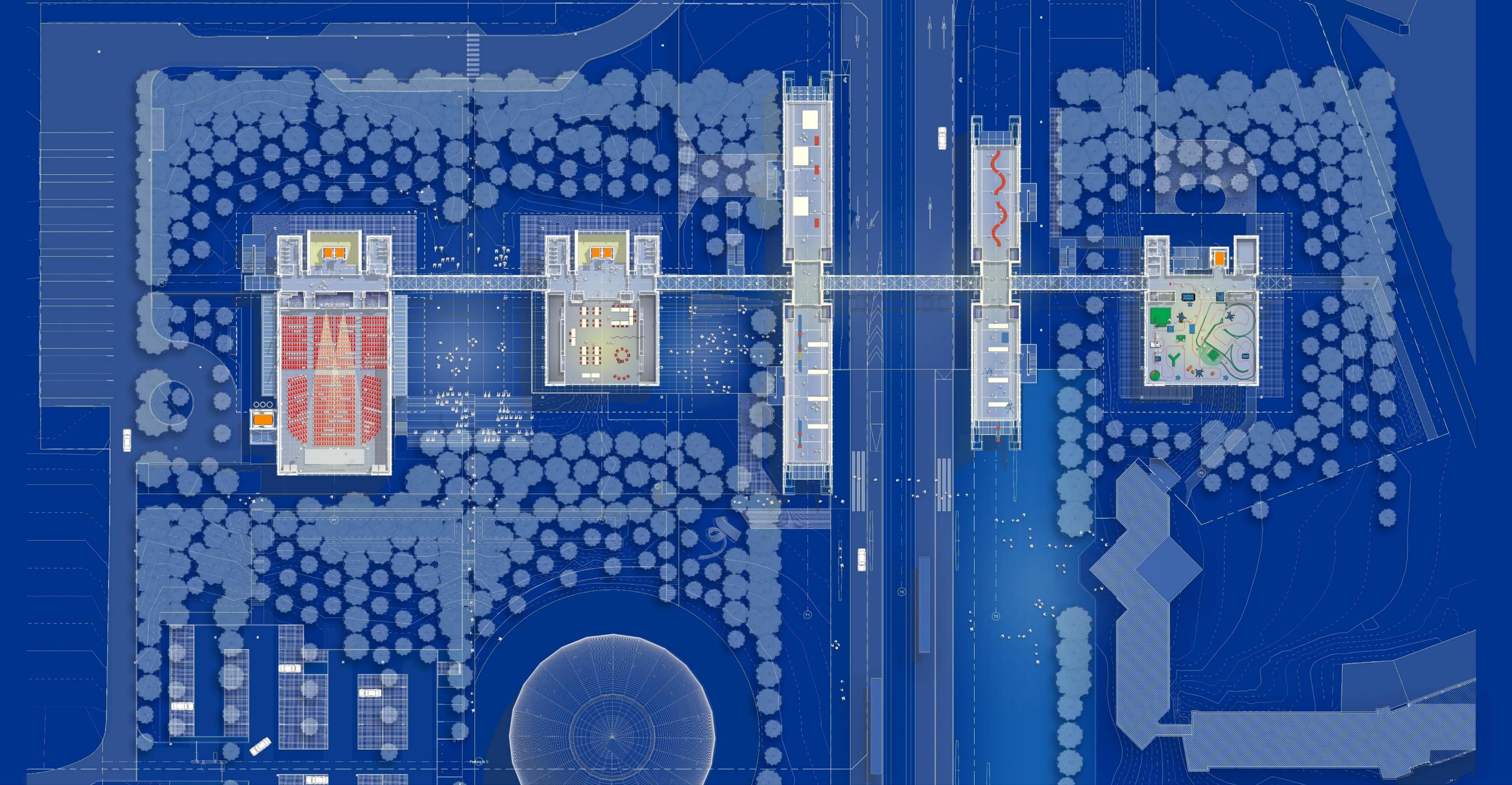
Education • CERN

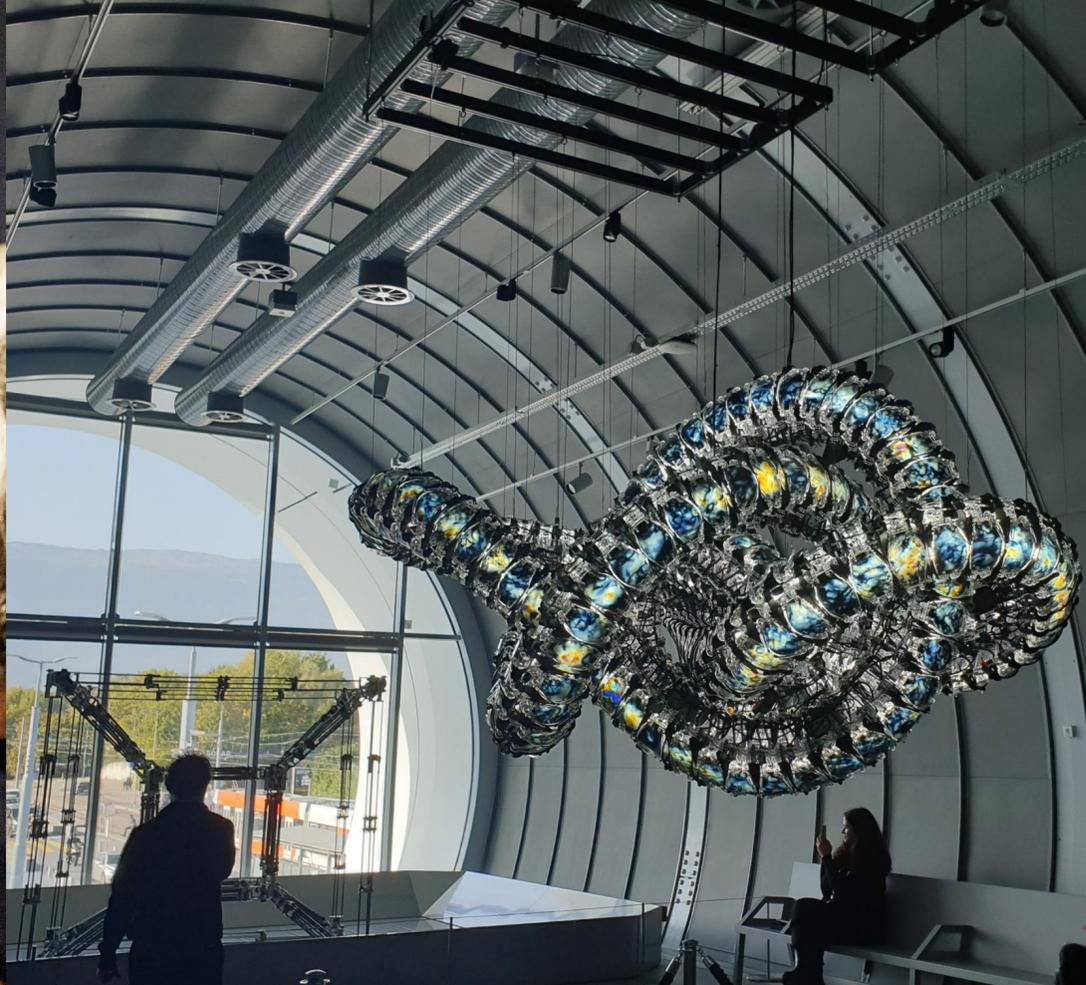


 CERN Science Gateway

The making of a dream: CERN Science Gateway

Education • CERN







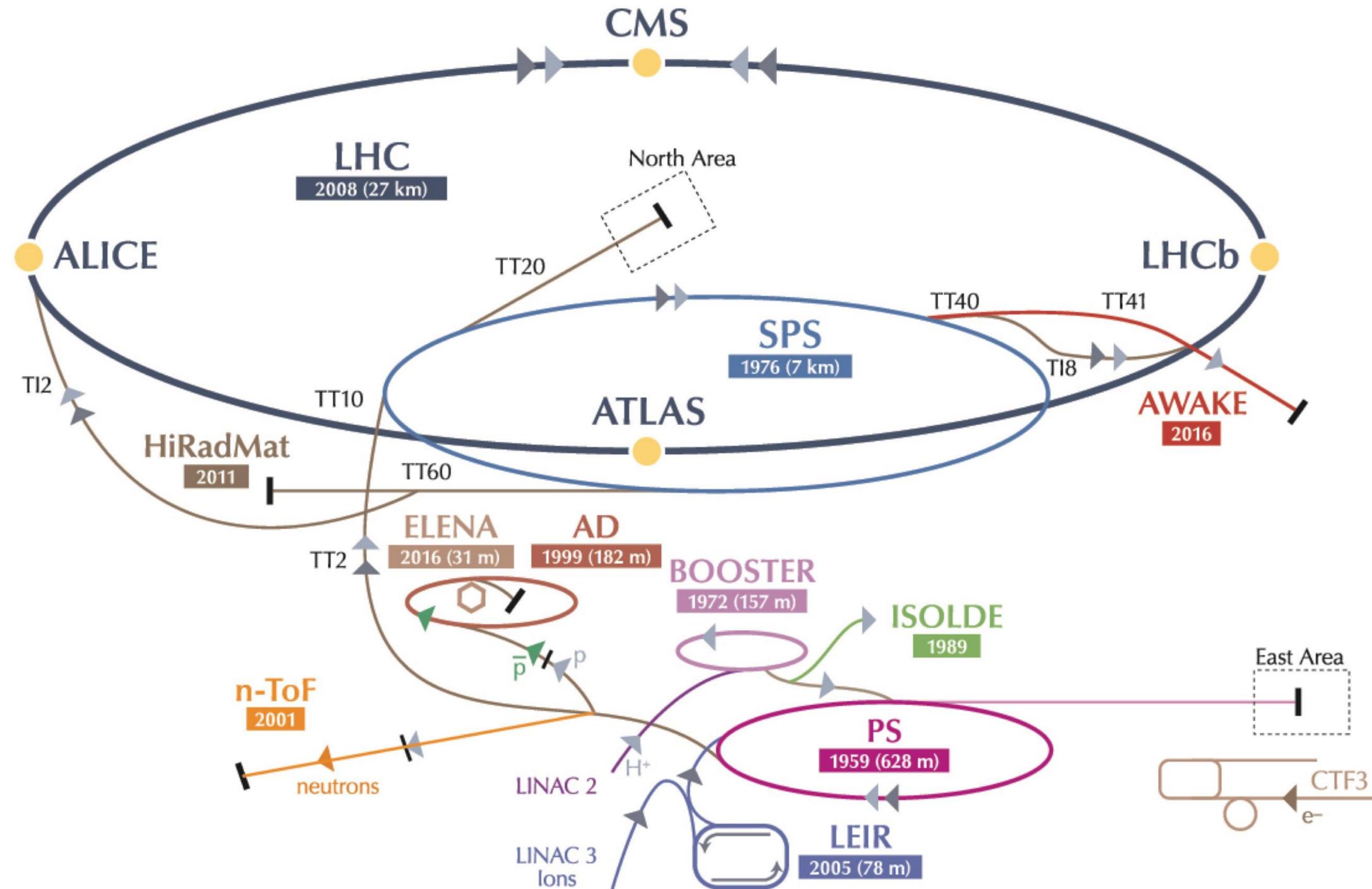
Jetzt:

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:

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

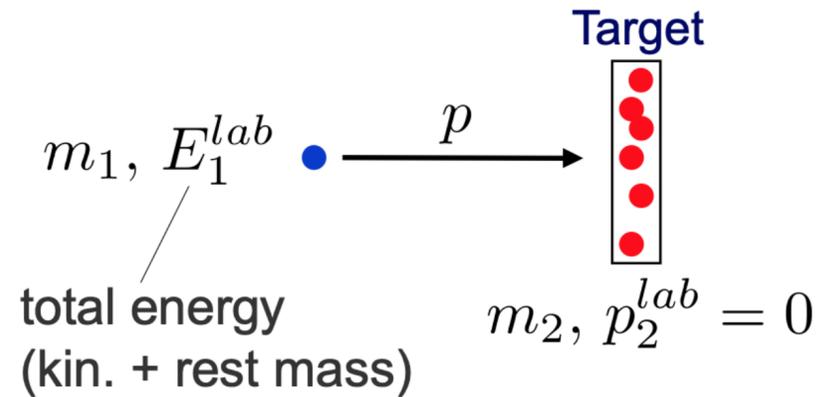
Fixed Target:

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



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 $E \equiv E_1 = E_2$