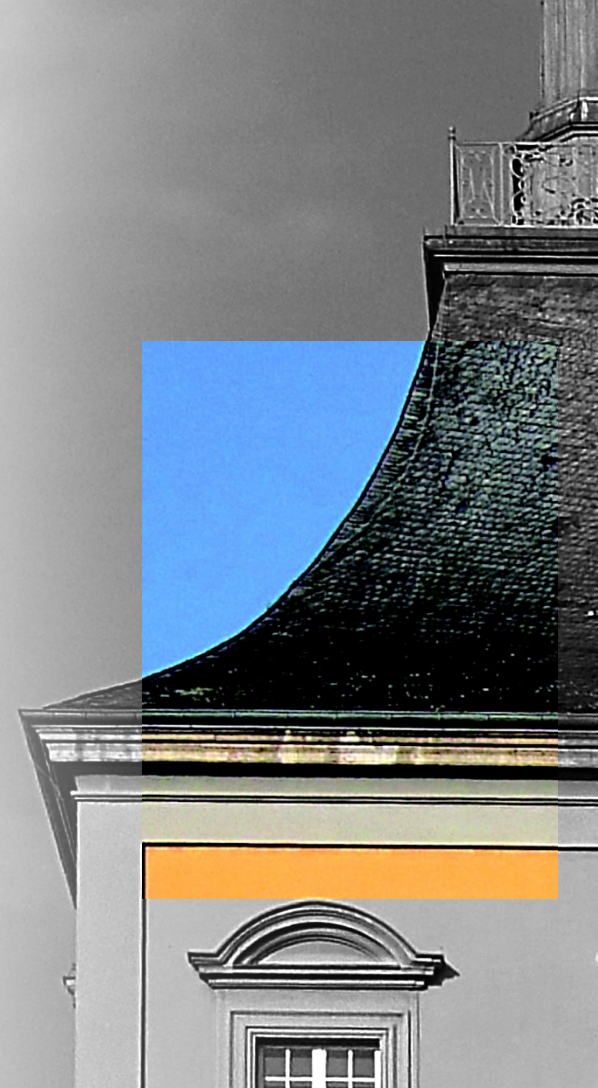


WIE SEHEN WIR TEILCHEN? EINFÜHRUNG IN DIE ANALYSE DER BELLE-II DATEN

Belle II Masterclass



WIE ERZEUGEN WIR TEILCHEN?

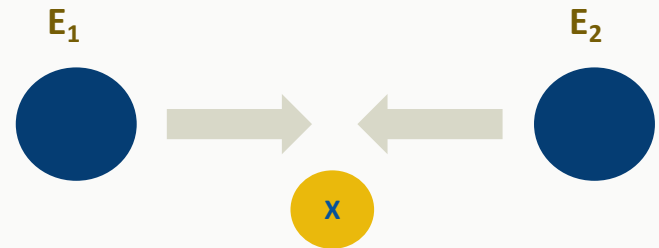
- Prinzip am Beispiel Teilchen X mit bekannter Masse m_X :
 - Wollen die **Äquivalenz von Energie und Masse** nutzen:
$$E = m_X c^2$$
 - Müssen eine Energie **E** aufbringen

WIE ERZEUGEN WIR TEILCHEN?

- Prinzip am Beispiel Teilchen X mit bekannter Masse m_X :
 - Wollen die **Äquivalenz von Energie und Masse** nutzen:

$$E = m_X c^2$$

- Müssen eine Energie **E** aufbringen
- Idee:
 - Zwei Teilchen zur Kollision bringen
 - $E \approx E_1 + E_2$
 - Umwandlung von Energie **E** in Masse

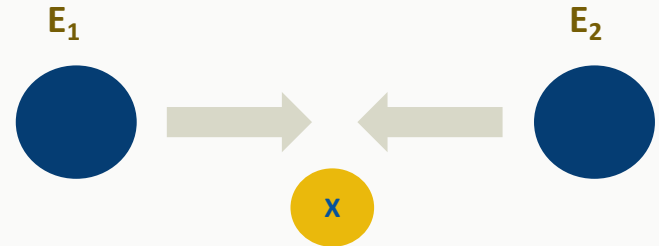


WIE ERZEUGEN WIR TEILCHEN?

- Prinzip am Beispiel Teilchen X mit bekannter Masse m_X :
 - Wollen die **Äquivalenz von Energie und Masse** nutzen:

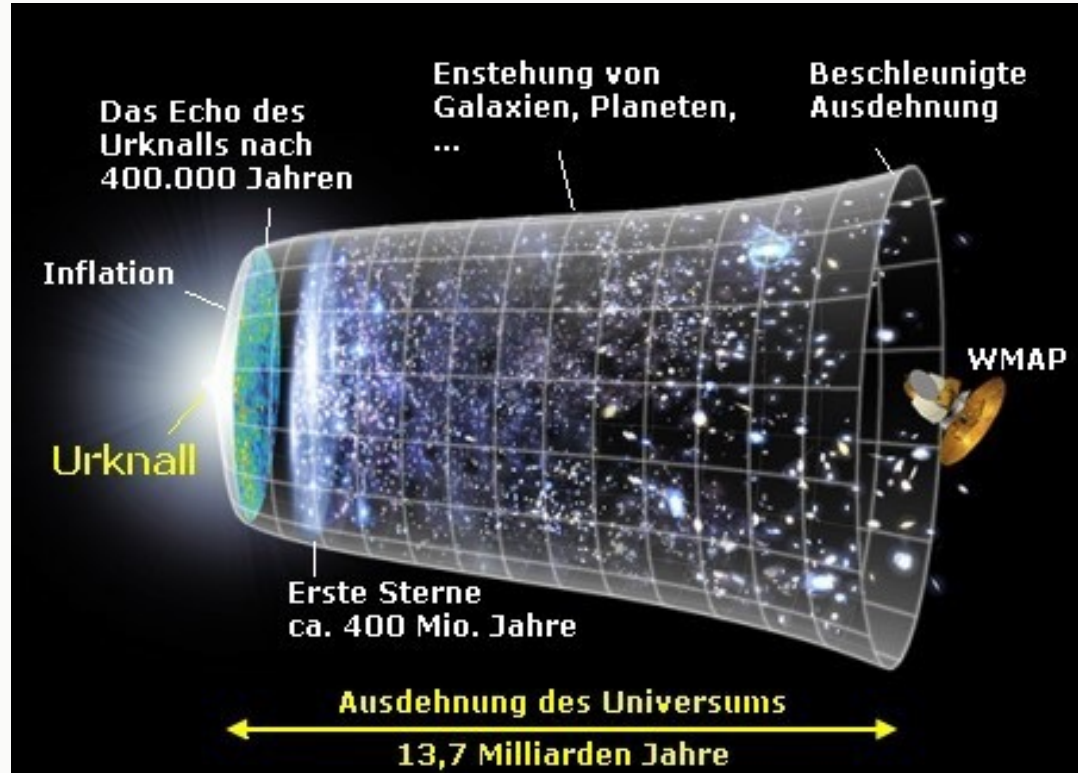
$$E = m_X c^2$$

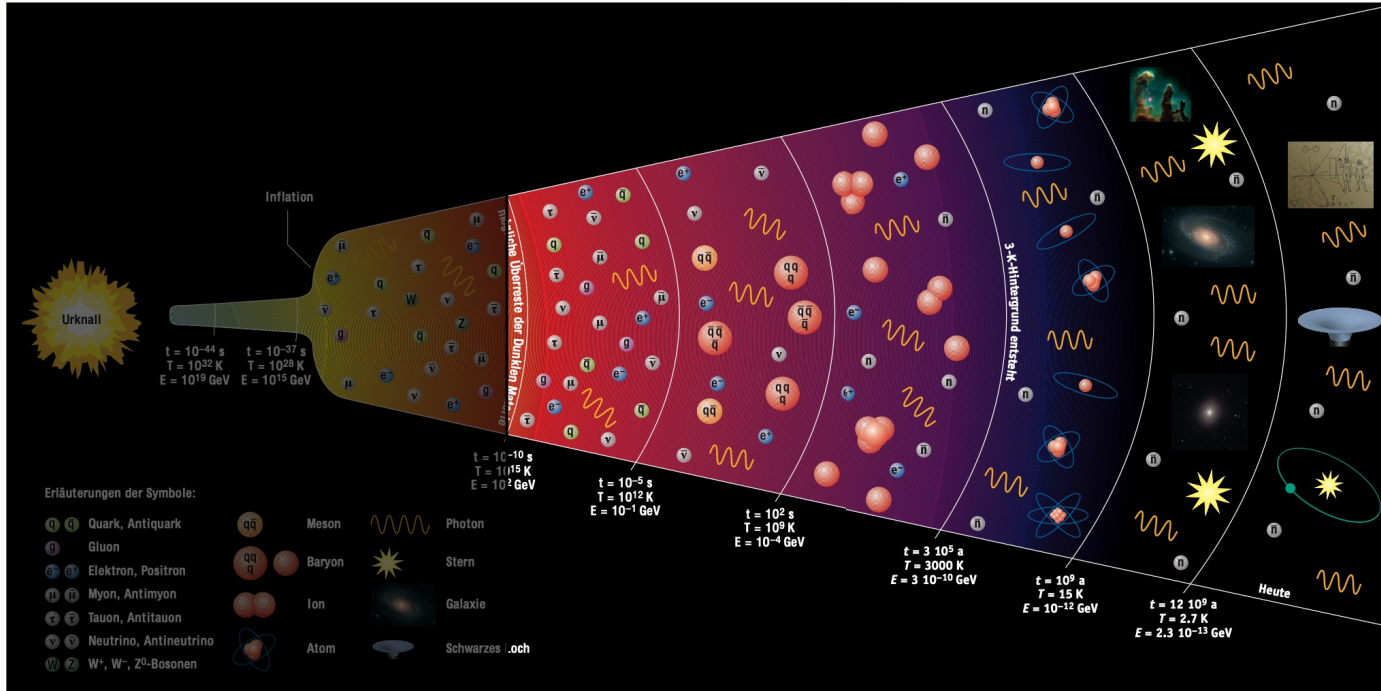
- Müssen eine Energie **E** aufbringen
- Idee:
 - Zwei Teilchen zur Kollision bringen
 - $E \approx E_1 + E_2$
 - Umwandlung von Energie **E** in Masse
- Teilchen müssen **beschleunigt** werden!



Berühmte Beispiele?

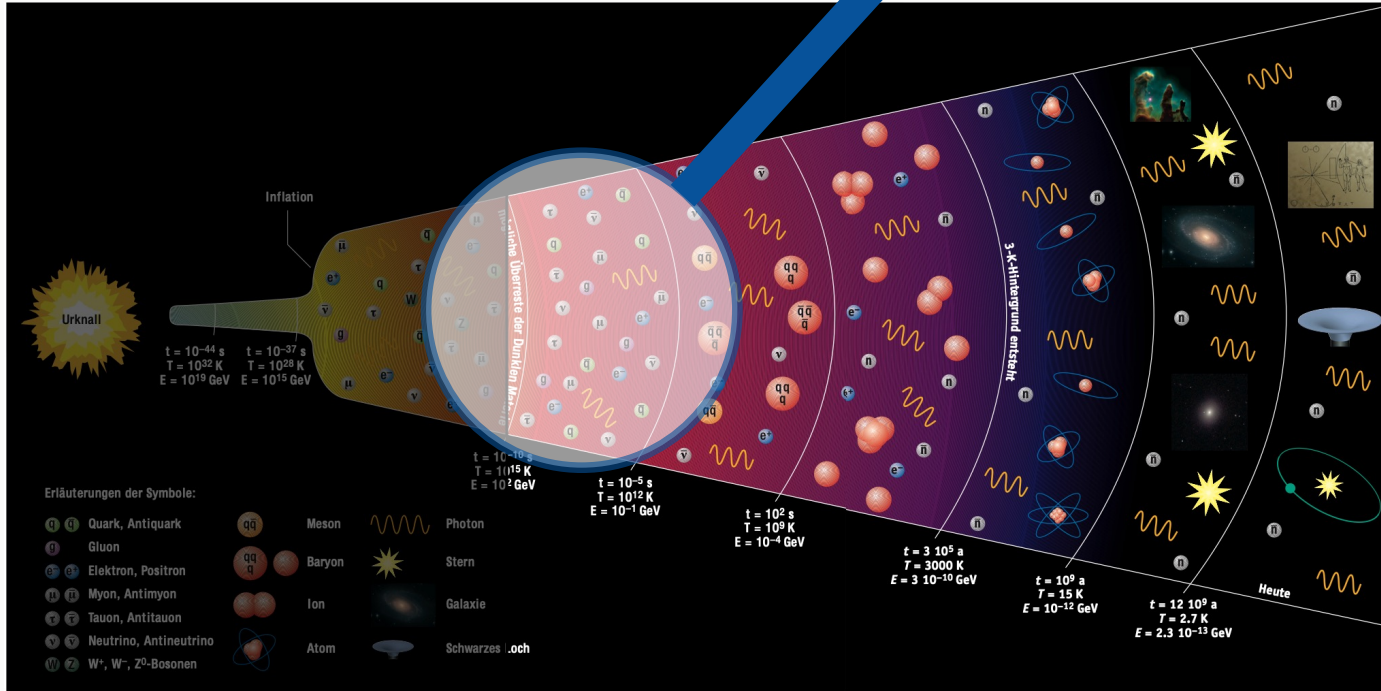
VIEL ENERGIE AUF EINEM PUNKT





Theorie

Experiment



Theorie

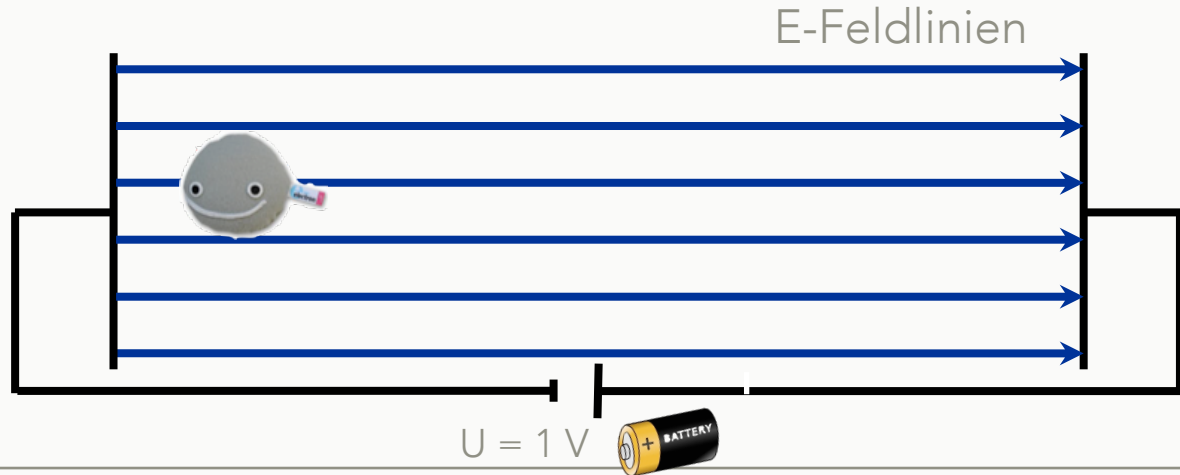
Experiment

BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

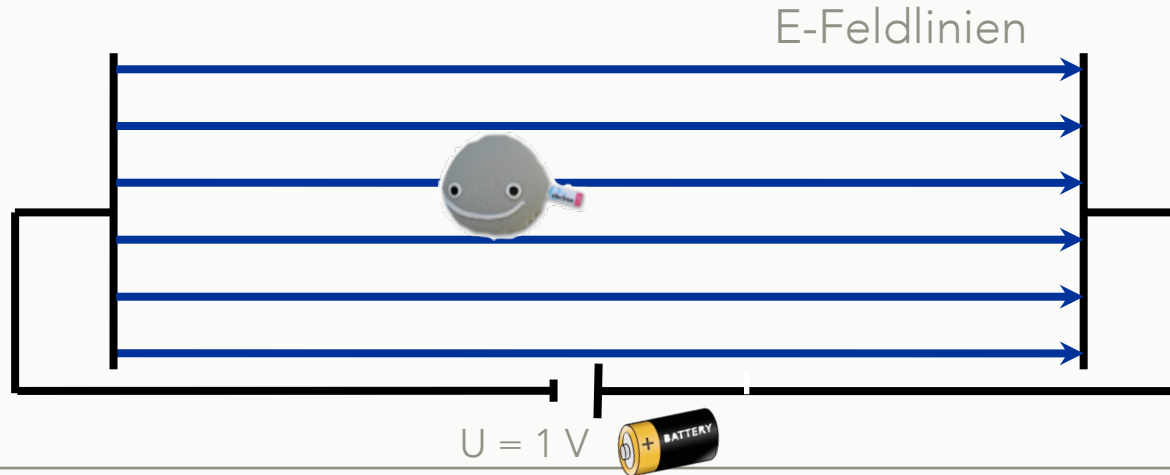
– Ein euch bekanntes Prinzip:

BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

- Ein euch bekanntes Prinzip:
 - **E-Feld** wird angewendet
 - Geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden entlang der Feldlinien beschleunigt

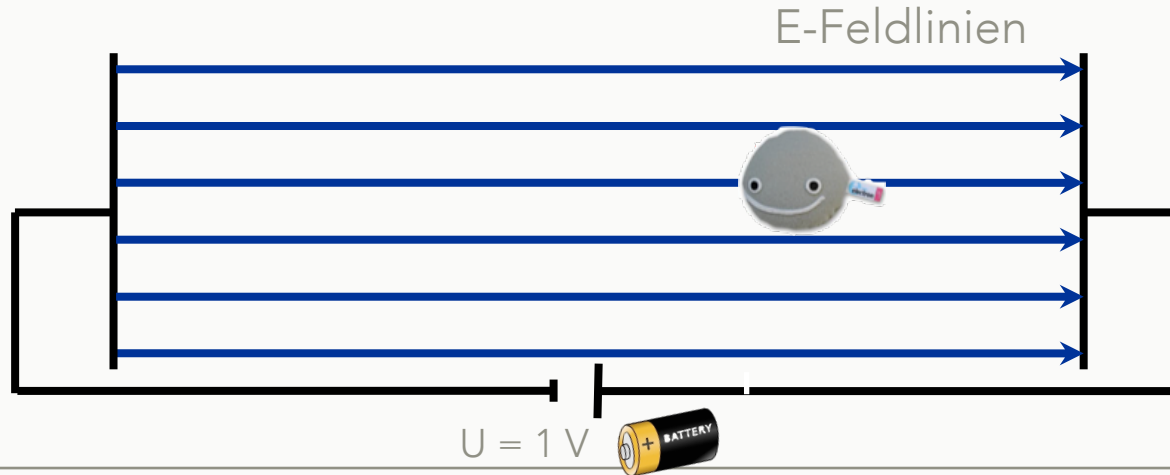


- Ein euch bekanntes Prinzip:
 - **E-Feld** wird angewendet
 - Geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden entlang der Feldlinien beschleunigt



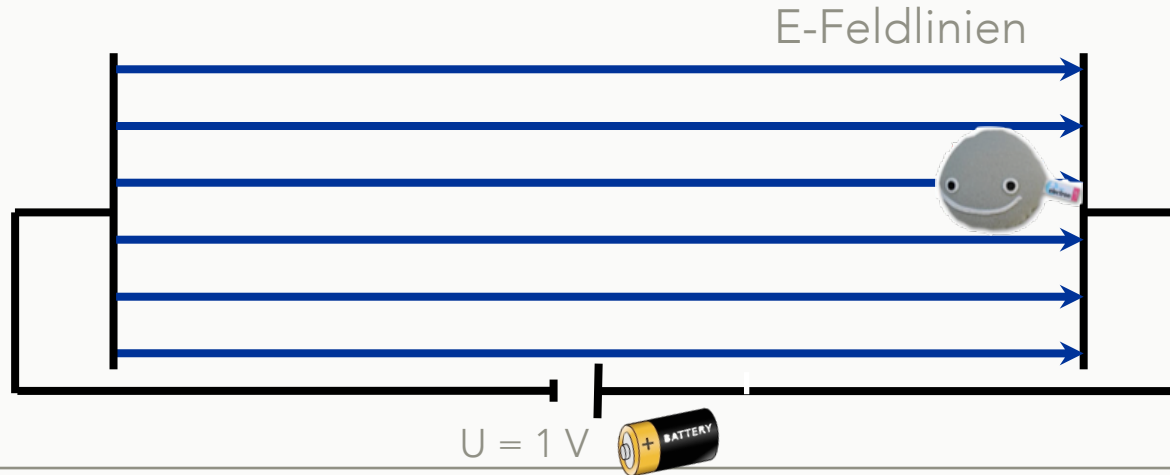
BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

- Ein euch bekanntes Prinzip:
 - **E-Feld** wird angewendet
 - Geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden entlang der Feldlinien beschleunigt



BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

- Ein euch bekanntes Prinzip:
 - **E-Feld** wird angewendet
 - Geladene Teilchen (z.B. Elektronen) werden entlang der Feldlinien beschleunigt

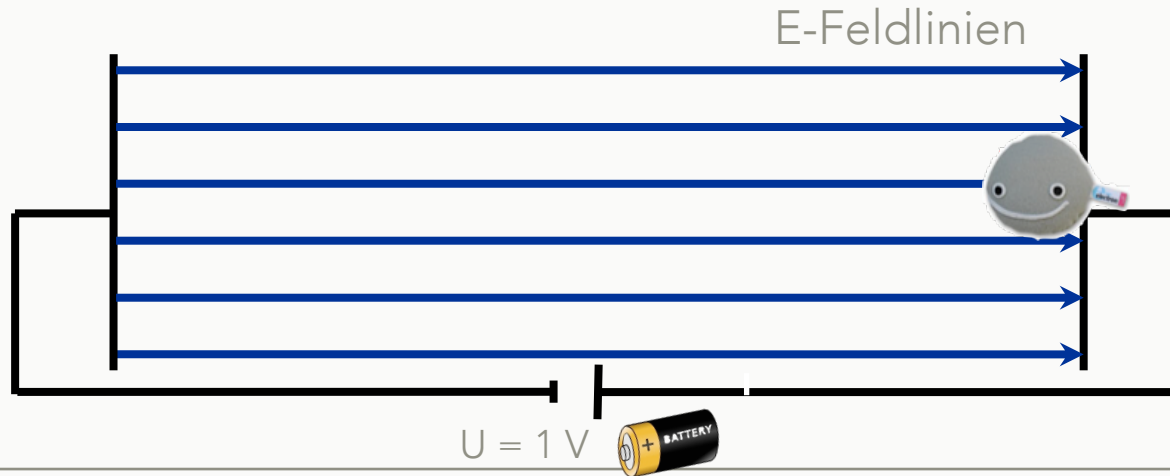


BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

- Erhalten die Energie $E = q \cdot U$

Hier: $E = 1 \text{ eV}$

- **Wie kriegen wir mehr Energie?**

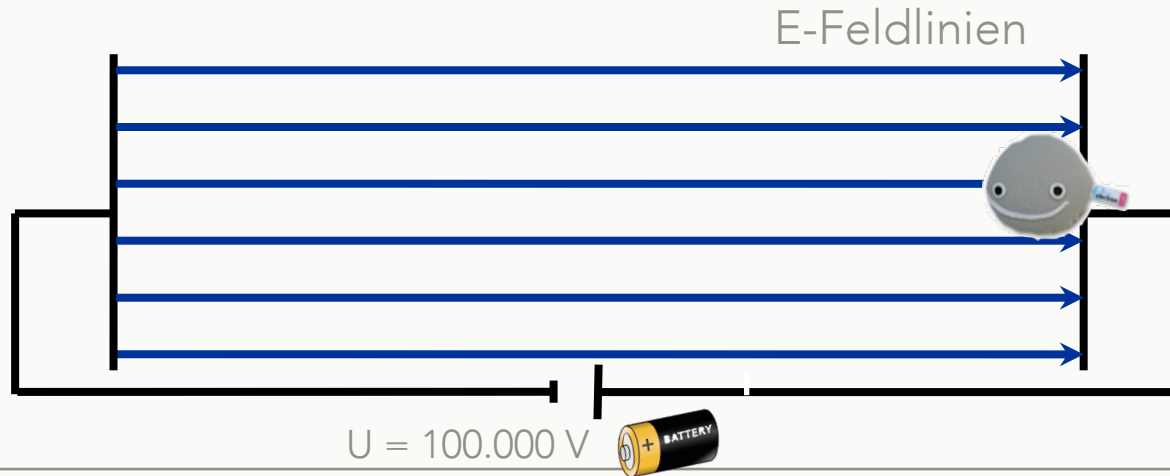


BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

- Erhalten die Energie $E = q \cdot U$

Hier: $E = 100 \text{ keV}$

- **Wie kriegen wir mehr Energie?**

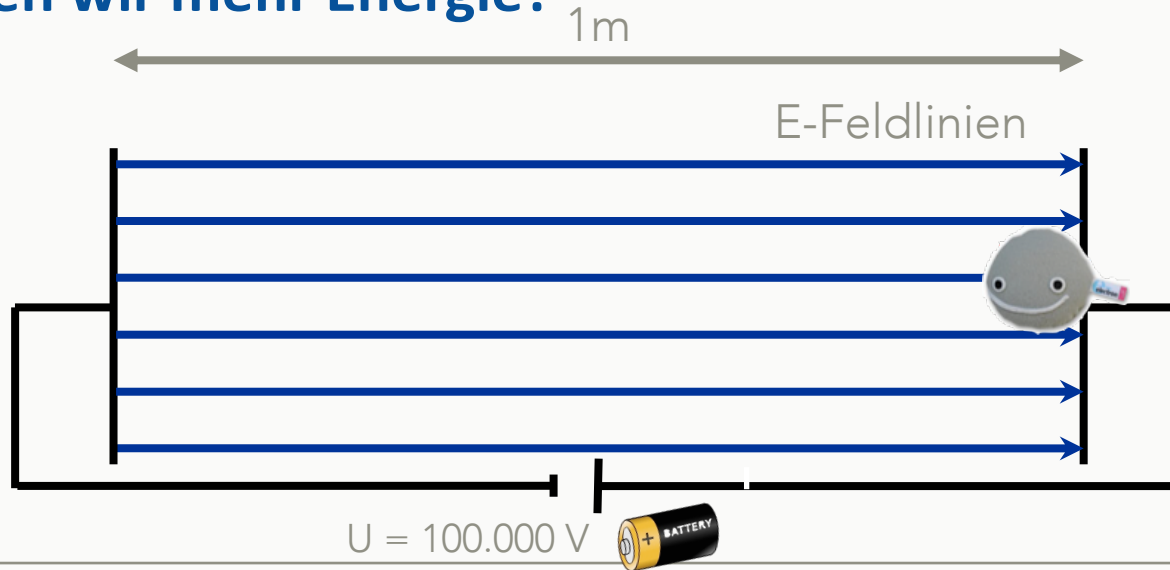


BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

– Erhalten die Energie $E = q \cdot U$

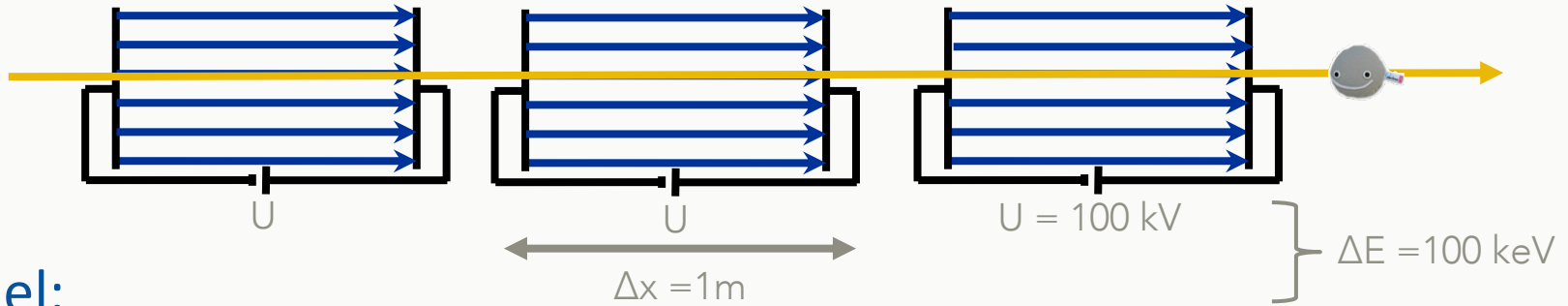
Hier: $E = 100 \text{ keV}$

- **Wie kriegen wir mehr Energie?**



LINEARBESCHLEUNIGER

– Können viele dieser Zellen hintereinander anwenden

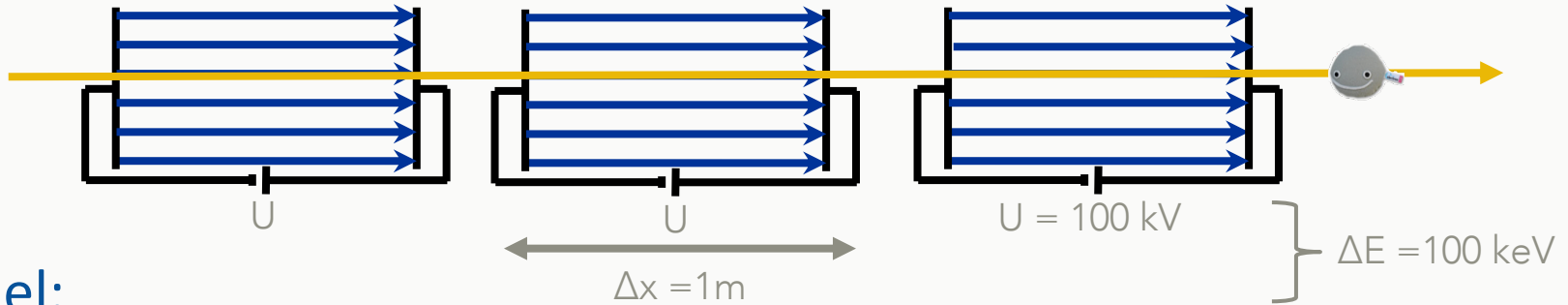


Beispiel:

Teilchen X mit $m_X = 11\text{ GeV}/c^2 = 11.000.000\text{ keV}/c^2$. Wie viele Zellen brauchen wir?

LINEARBESCHLEUNIGER

– Können viele dieser Zellen hintereinander anwenden



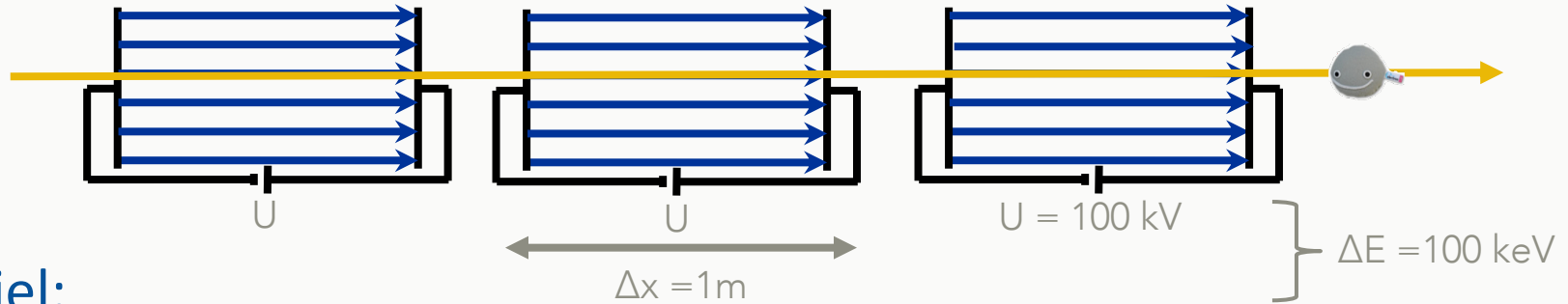
Beispiel:

Teilchen X mit $m_X = 11 \text{ GeV}/c^2 = 11.000.000 \text{ keV}/c^2$. Wie viele Zellen brauchen wir?

– Benötigte Energie $E = m_X c^2 = 11.000.000 \text{ keV}$

LINEARBESCHLEUNIGER

- Können viele dieser Zellen hintereinander anwenden



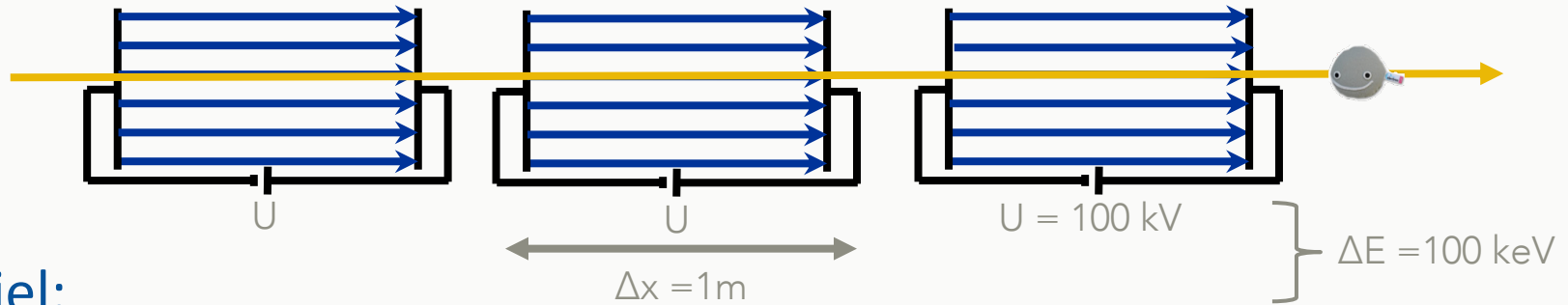
Beispiel:

Teilchen X mit $m_X = 11 \text{ GeV}/c^2 = 11.000.000 \text{ keV}/c^2$. Wie viele Zellen brauchen wir?

- Benötigte Energie $E = m_X c^2 = 11.000.000 \text{ keV}$
- Anzahl Zellen $N = E/\Delta E = 110.000$ Zellen

LINEARBESCHLEUNIGER

- Können viele dieser Zellen hintereinander anwenden



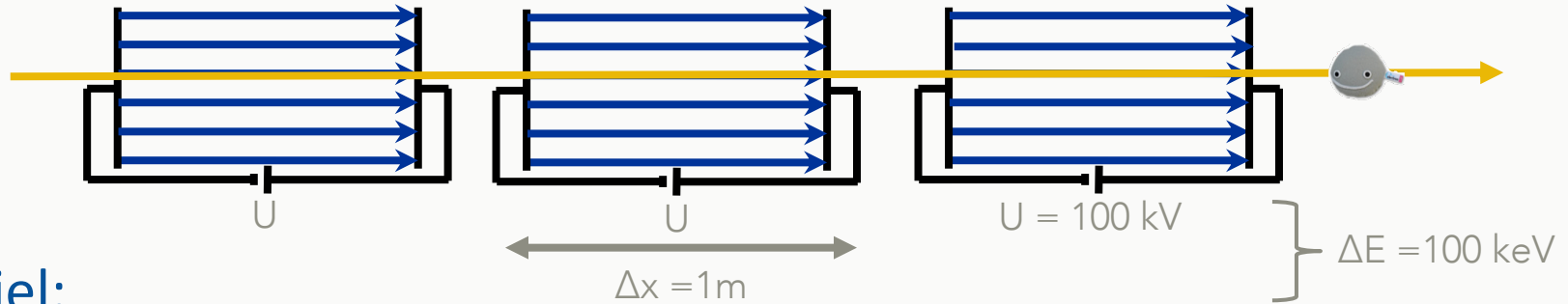
Beispiel:

Teilchen X mit $m_X = 11 \text{ GeV}/c^2 = 11.000.000 \text{ keV}/c^2$. Wie viele Zellen brauchen wir?

- Benötigte Energie $E = m_X c^2 = 11.000.000 \text{ keV}$
- Anzahl Zellen $N = E/\Delta E = 110.000$ Zellen
- Länge $L = N \cdot \Delta x = 110 \text{ km}$

LINEARBESCHLEUNIGER

- Können viele dieser Zellen hintereinander anwenden



Beispiel:

Teilchen X mit $m_X = 11 \text{ GeV}/c^2 = 11.000.000 \text{ keV}/c^2$. Wie viele Zellen brauchen wir?

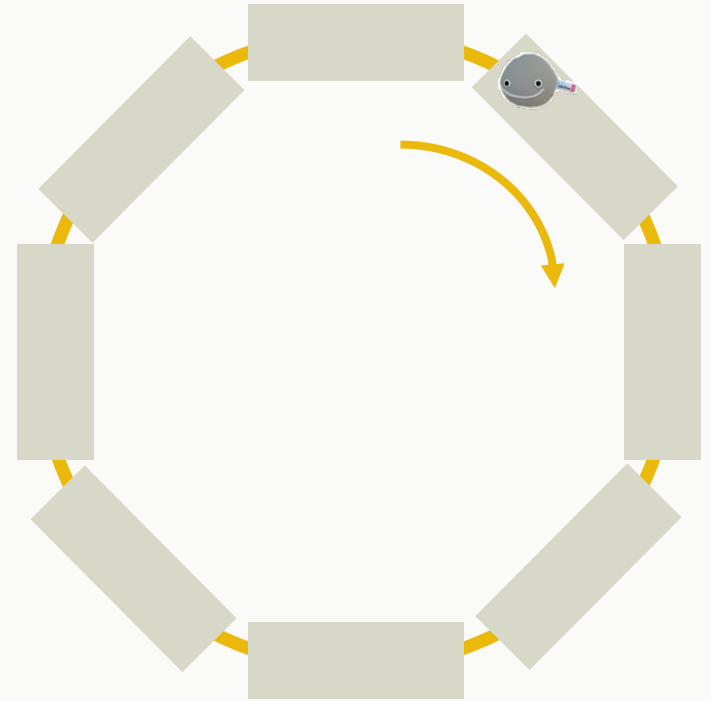
- Benötigte Energie $E = m_X c^2 = 11.000.000 \text{ keV}$
- Anzahl Zellen $N = E/\Delta E = 110.000$ Zellen
- Länge $L = N \cdot \Delta x = 110 \text{ km}$



- Hohe Energien brauchen sehr lange Beschleuniger
- **Bessere Idee?**

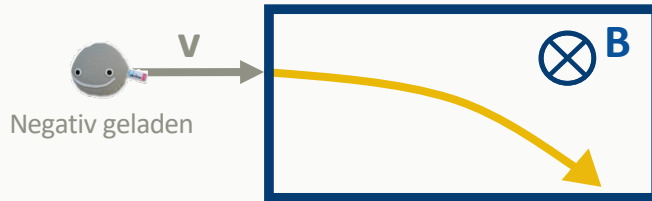
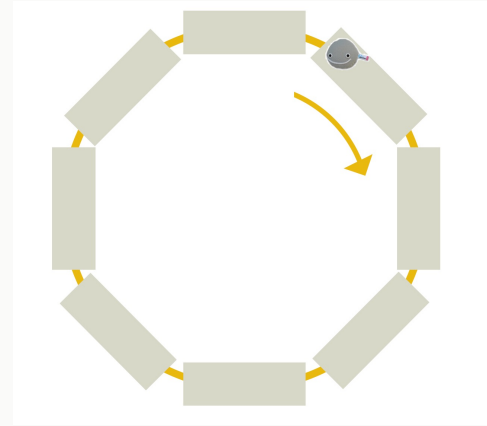
RINGBESCHLEUNIGER

- Die Zellen **kreisförmig** anordnen
 - Können so mehrmals durchlaufen werden
- Aber wie lenkt man Teilchen auf eine Kreisbahn?

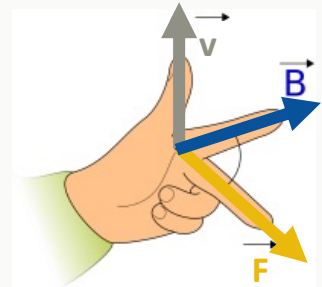


RINGBESCHLEUNIGER

- Die Zellen **kreisförmig** anordnen
- Können so mehrmals durchlaufen werden
- Aber wie lenkt man Teilchen auf eine Kreisbahn?
- Lorentzkraft: $F = qv \times B$



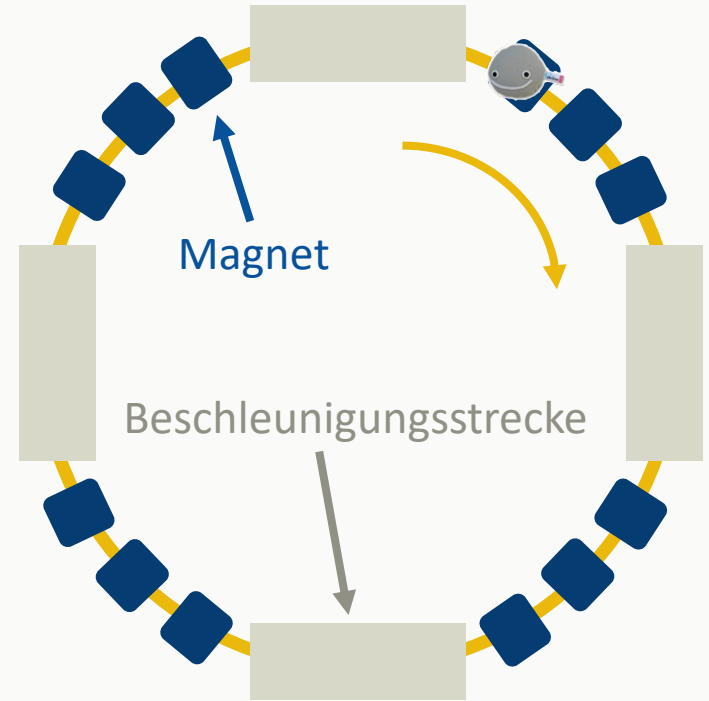
Linke Hand Regel:



RINGBESCHLEUNIGER

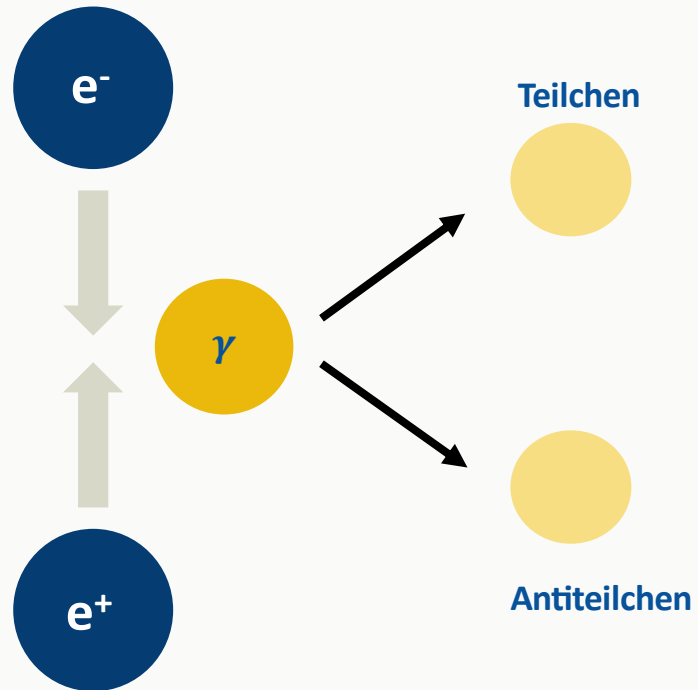
- Im Endeffekt:
 - Gerade Strecken zum Beschleunigen
 - Gekrümmte Strecken zum Ablenken

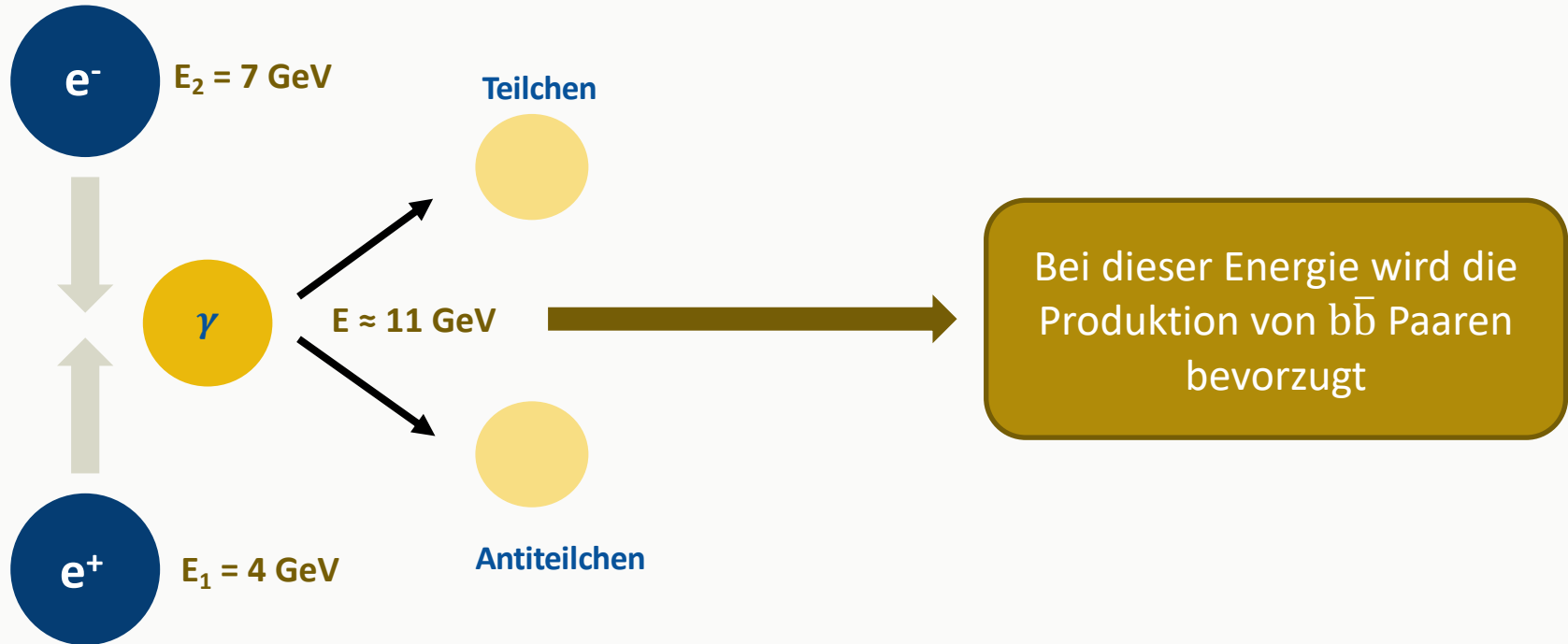
- Kennt ihr Beispiele für Ringbeschleuniger?

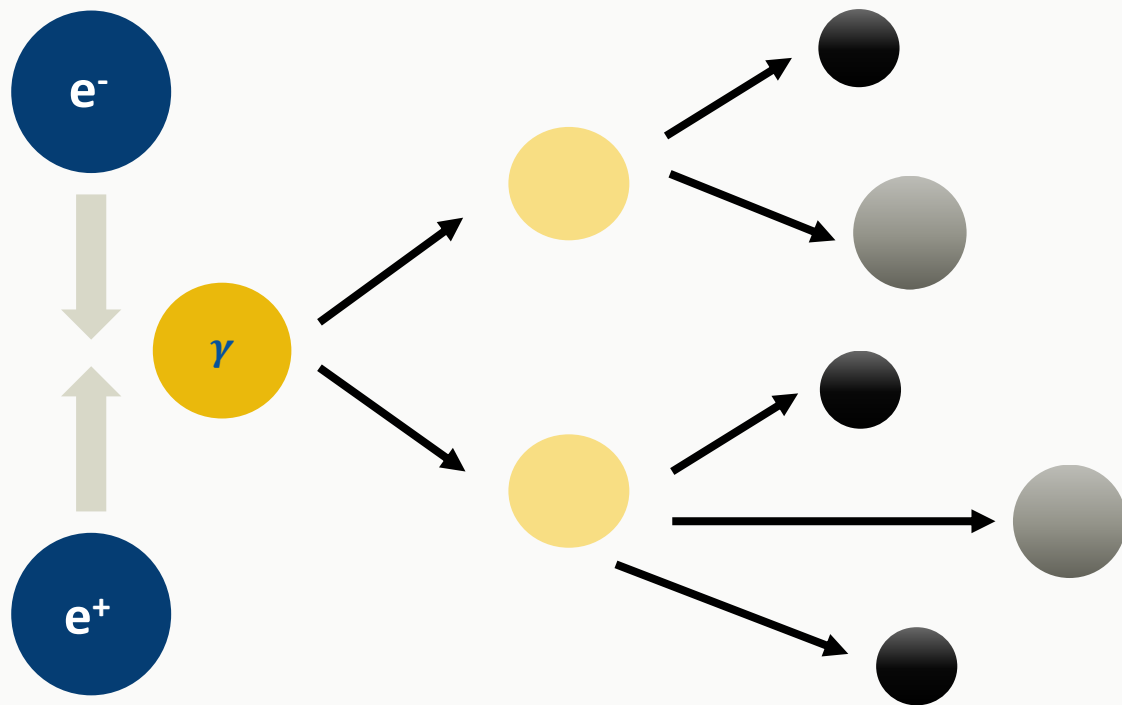


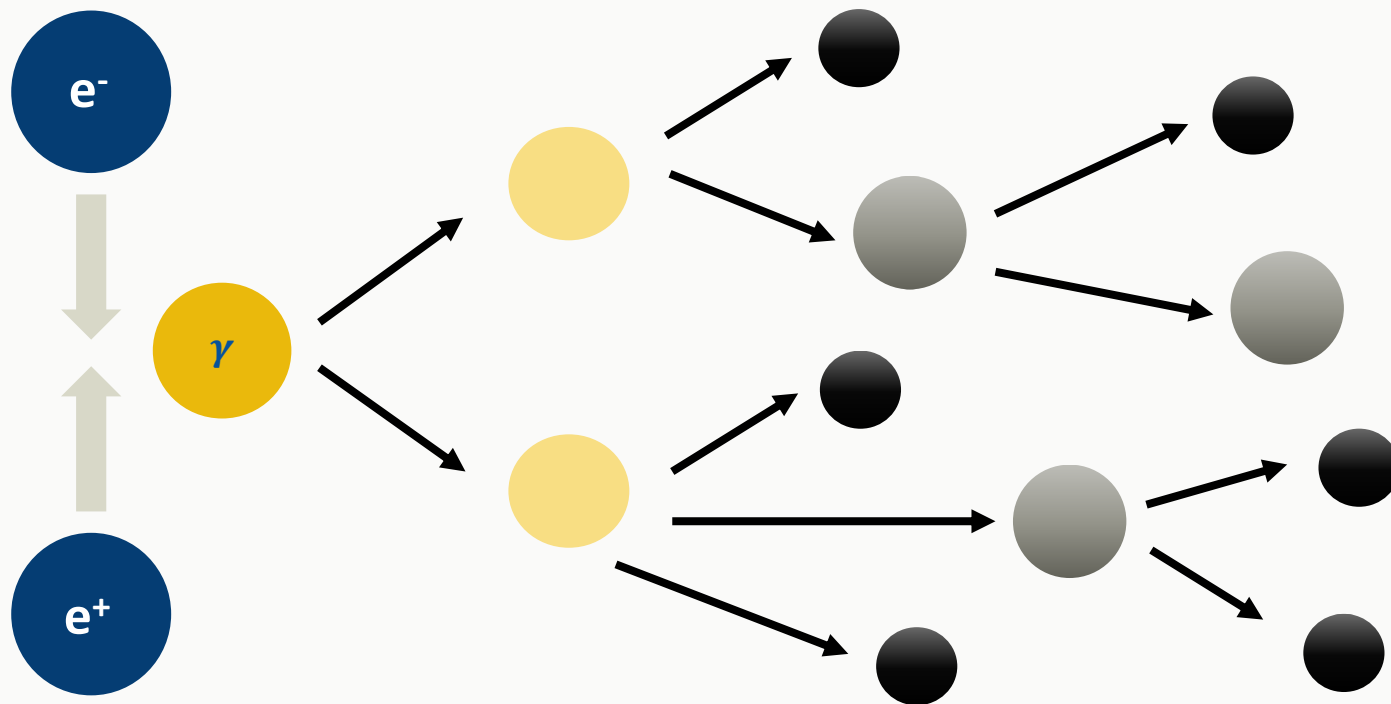
- Beschleuniger am KEK Forschungszentrum in Tsukuba, Japan
 - Ca. 80 km nördlich von Tokio
- Positronen und Elektronen werden jeweils auf 4 und 7 GeV beschleunigt
- Ringe haben Umfang von 3 km
- Tunnel ist 10 m unter der Erde

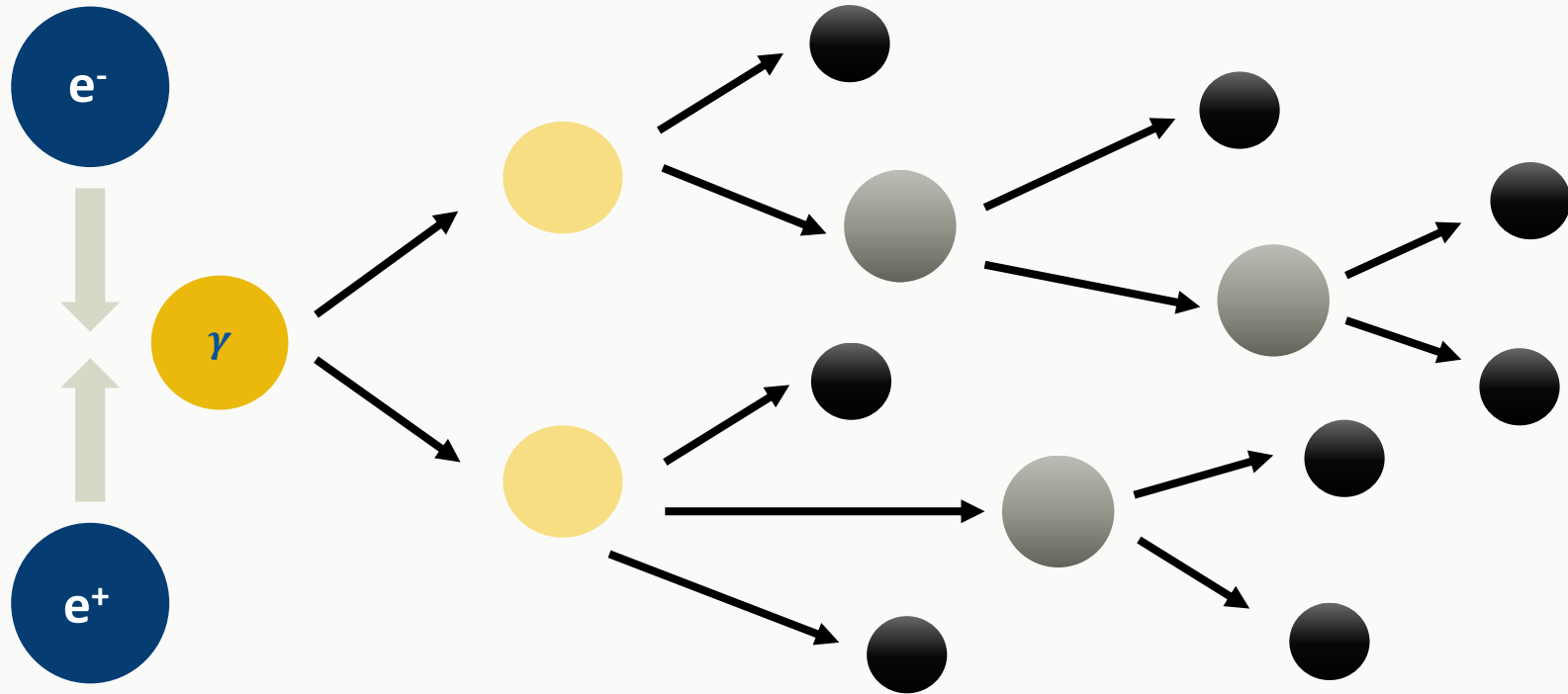


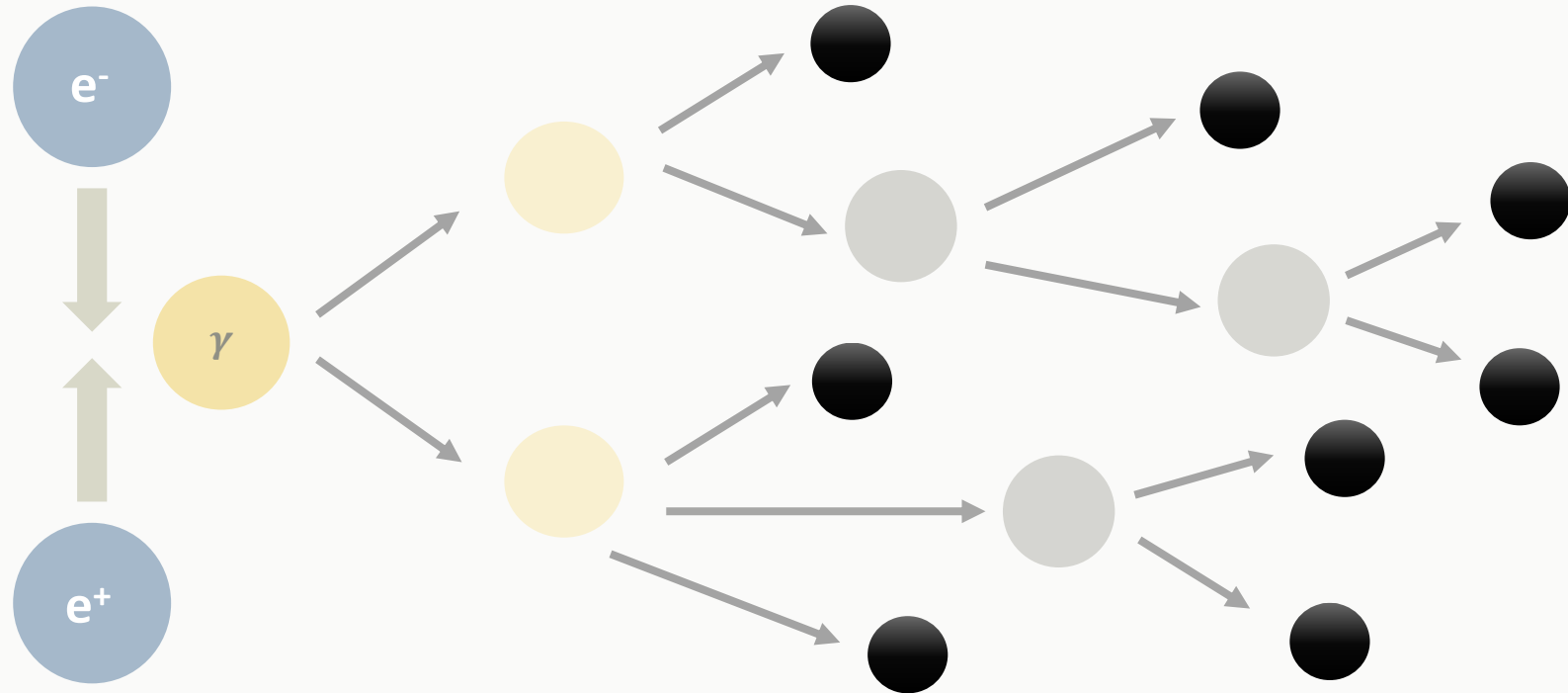










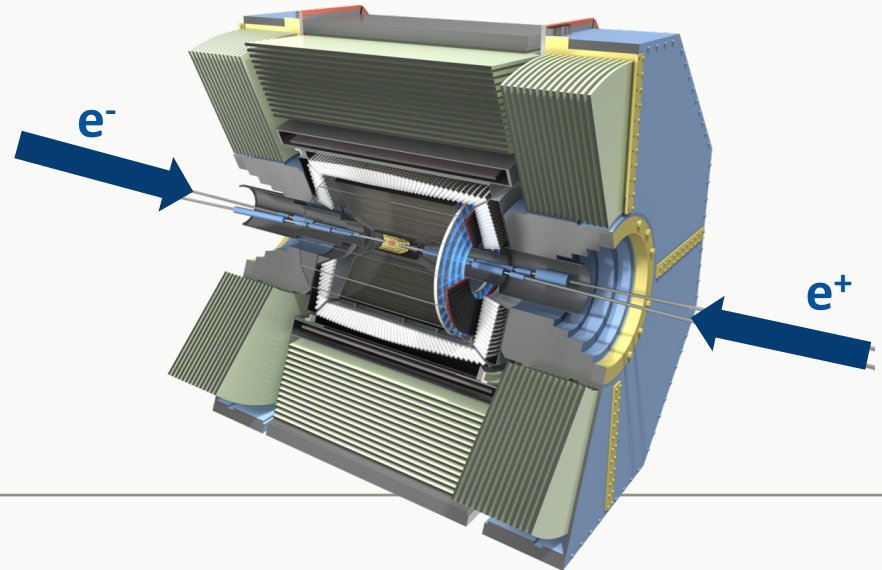
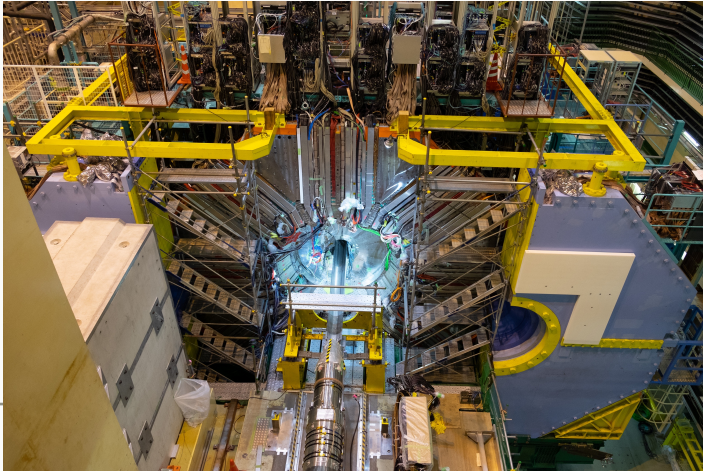


- Stellt euch einen Autounfall vor
 - **Trümmerteile** fliegen durch die Gegend und bleiben irgendwo liegen
 - Aus der **geflogenen Distanz** und der **Farbe** lassen sich die Geschwindigkeiten der Autos bestimmen

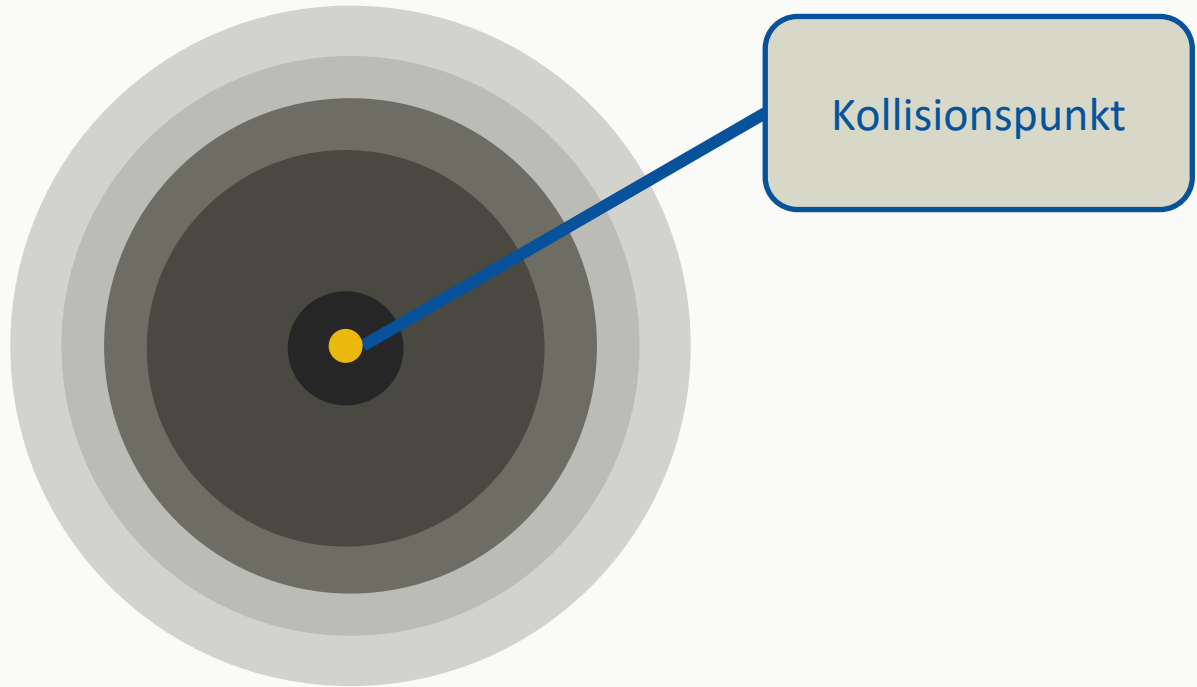


DER BELLE II DETEKTOR

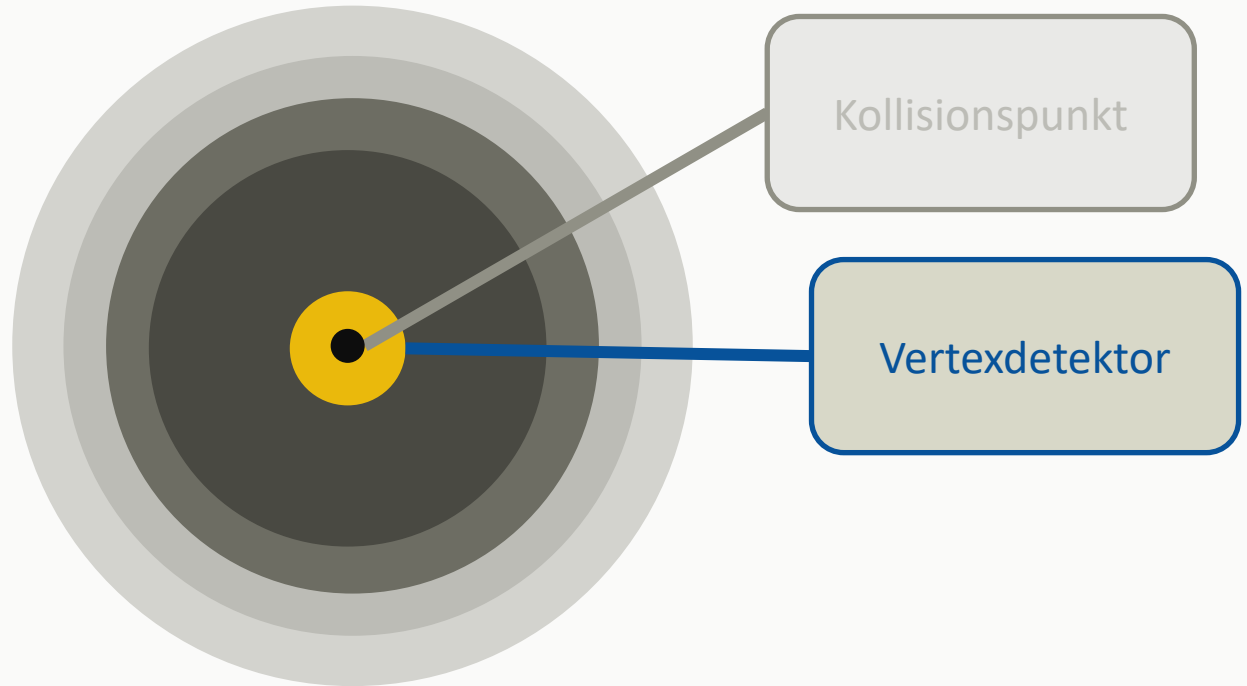
- Bauen um den Kollisionpunkt einen Detektor
- Natürlich **sehen** wir die Teilchen nicht im direkten Sinn
- Man muss aus einzelnen Informationsstücken die Teilchen „zusammenbasteln“



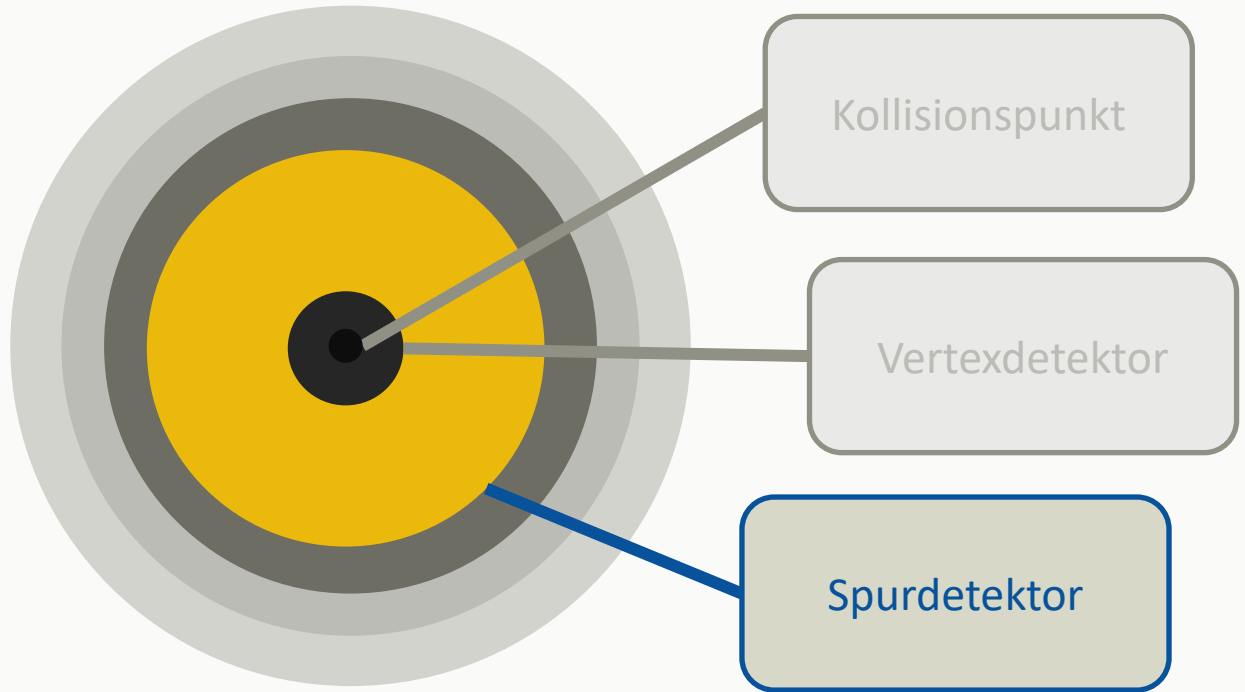
- Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt



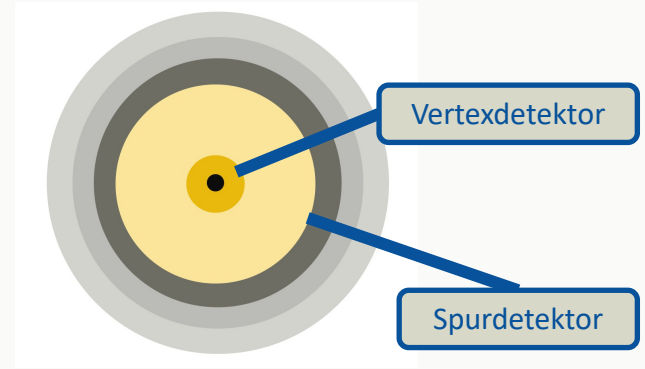
– Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt



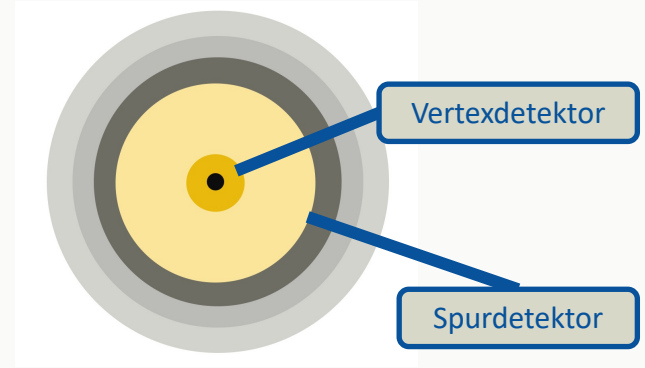
– Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt



- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale

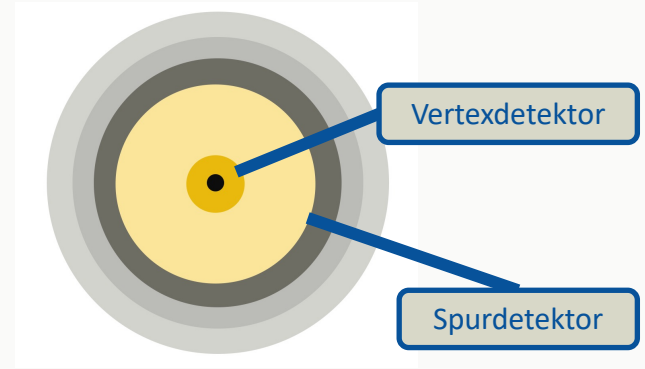


- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale

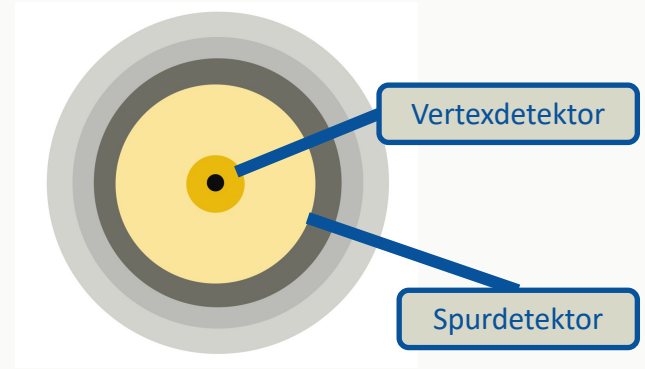
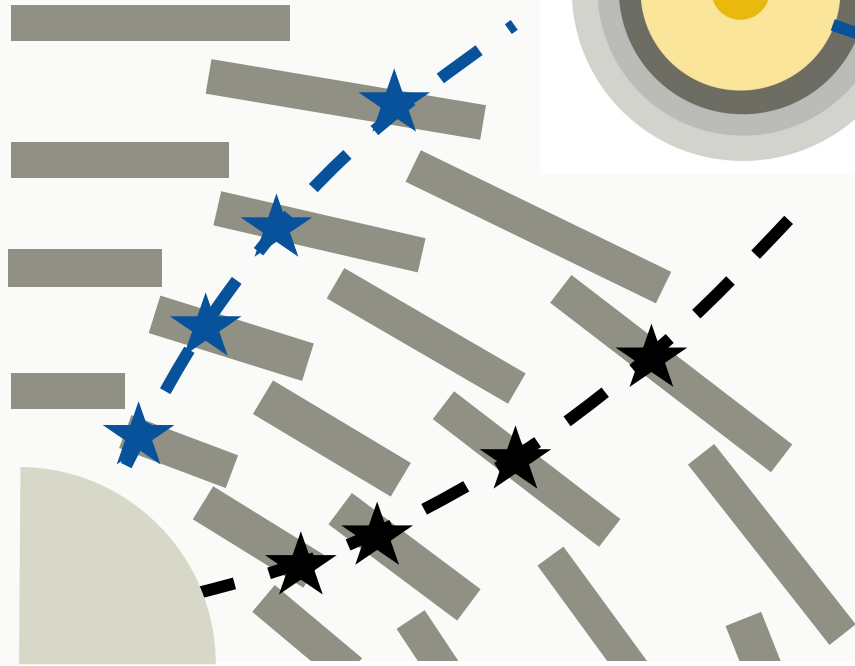


- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale

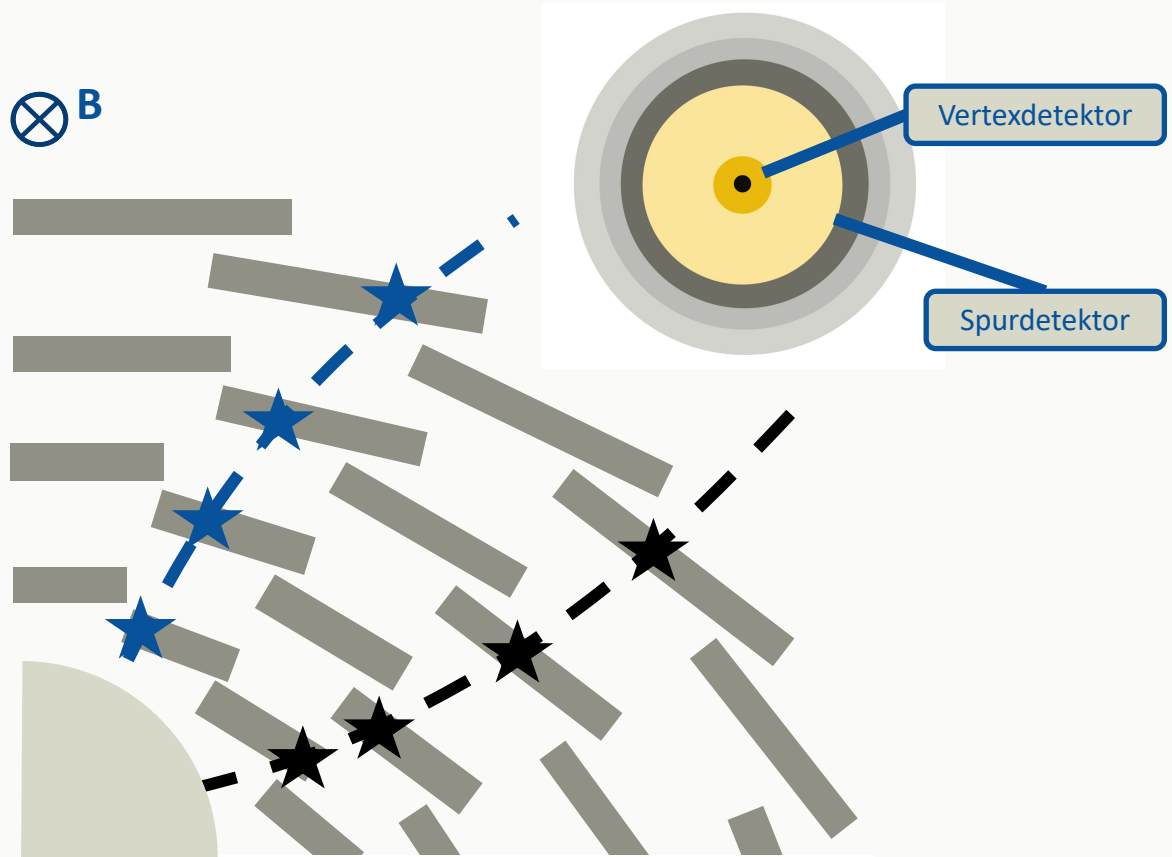
\otimes B



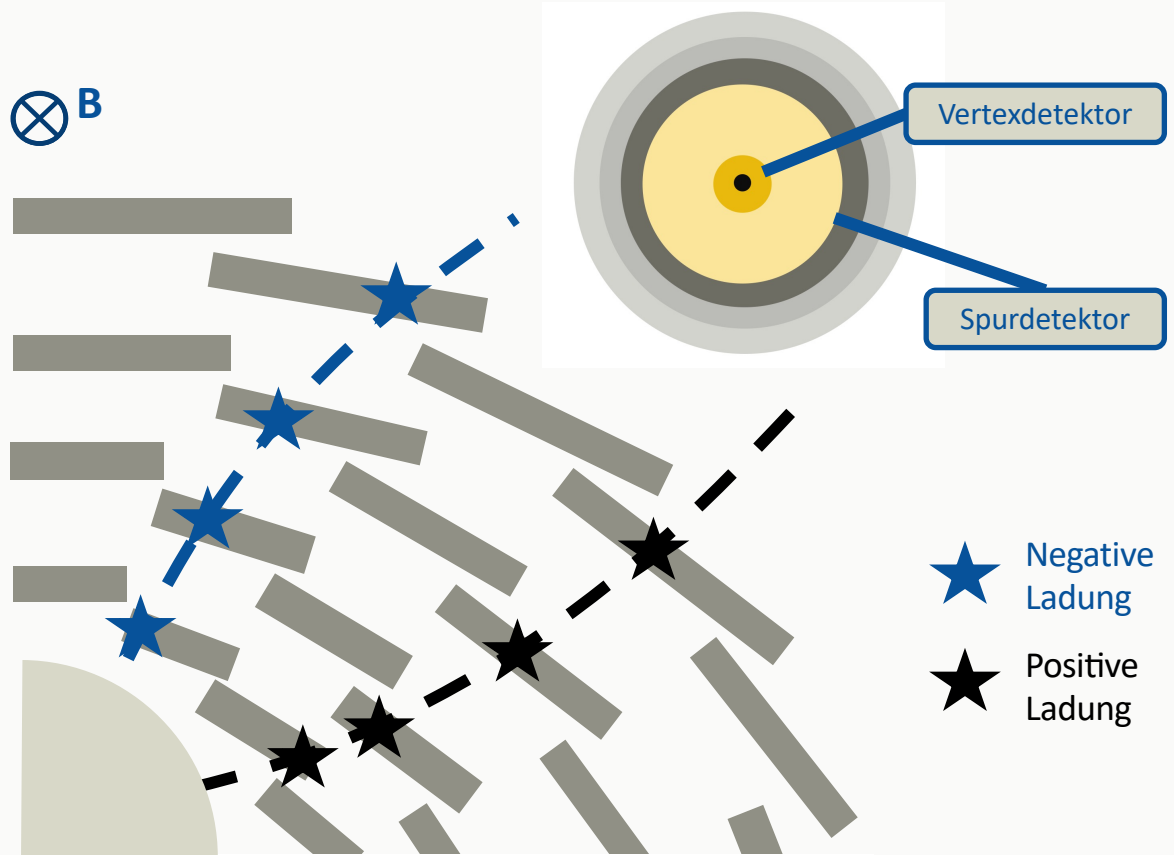
- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale
- Daraus können Spuren rekonstruiert werden



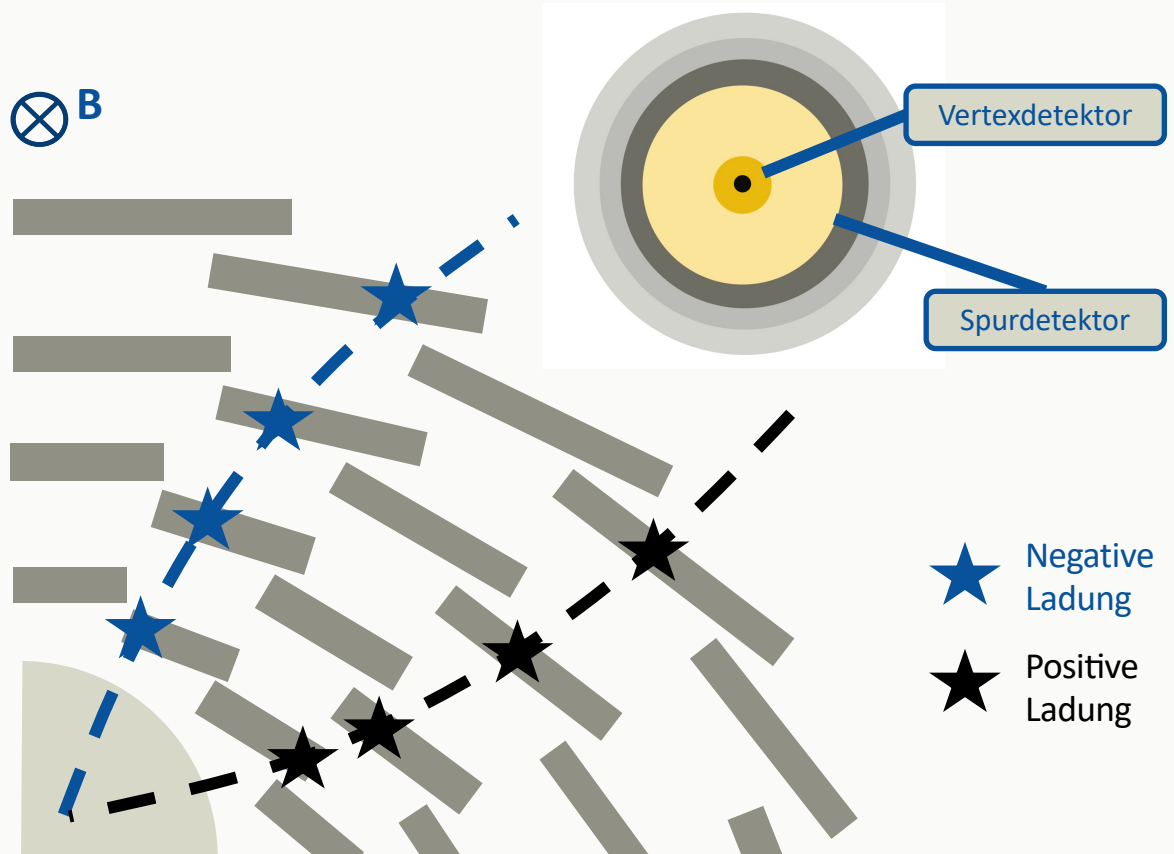
- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale
- Daraus können Spuren rekonstruiert werden
- Welche Ladung hat das blaue Teilchen?



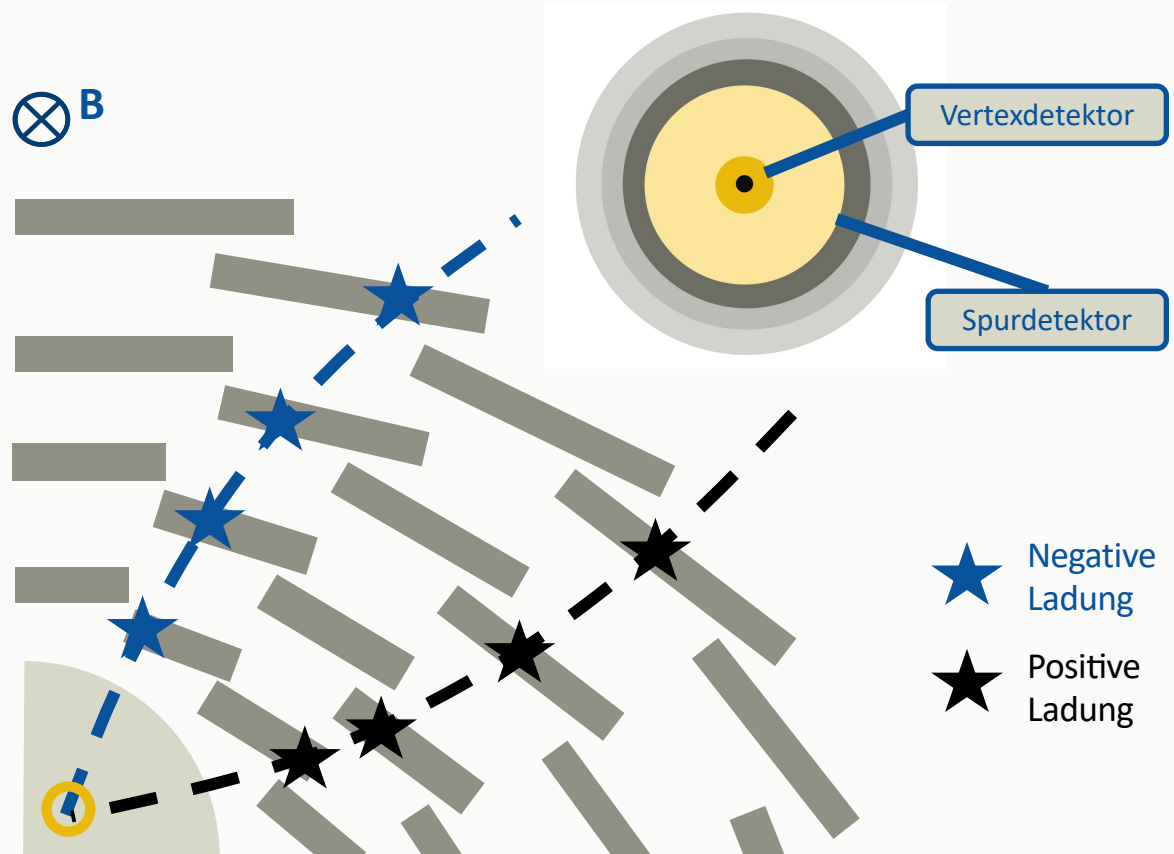
- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale
- Daraus können Spuren rekonstruiert werden
- Welche Ladung hat das blaue Teilchen?



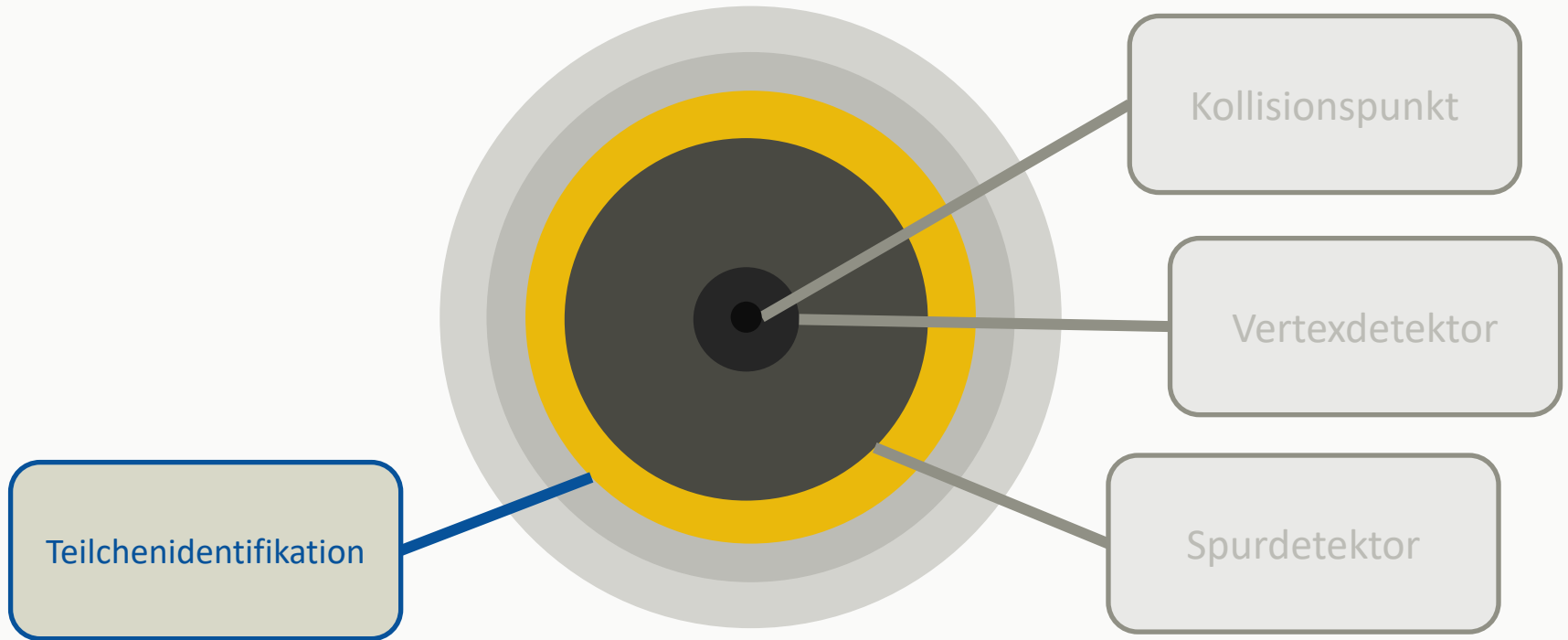
- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale
- Daraus können Spuren rekonstruiert werden
- Zusätzlich kann der Vertex definiert werden



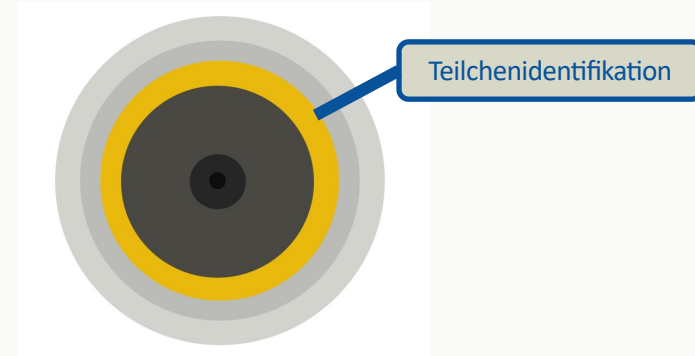
- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale
- Daraus können Spuren rekonstruiert werden
- Zusätzlich kann der Vertex definiert werden



– Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt

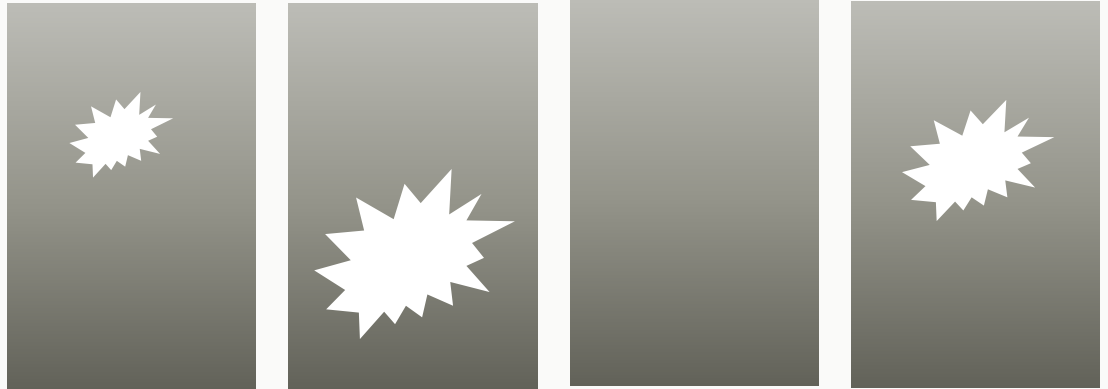


- Teilchen haben unterschiedliche Masse
- Gleiche Geschwindigkeit führt zu unterschiedlichen Impulsen: $p = mv$

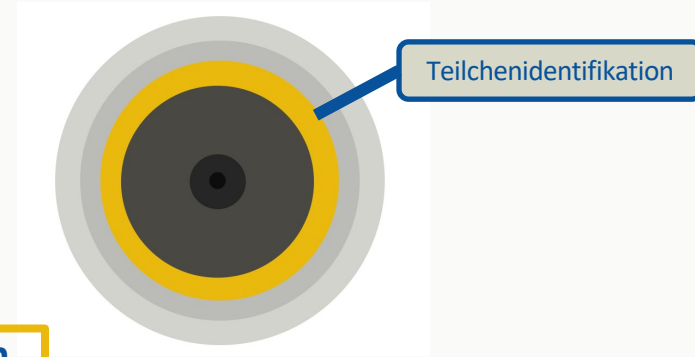


- Beispiel:

- **Fußball, Tennisball, Golfball und Tischtennisball** treffen eine Glasscheibe
- Bei gleicher Geschwindigkeit ganz unterschiedliche Schäden



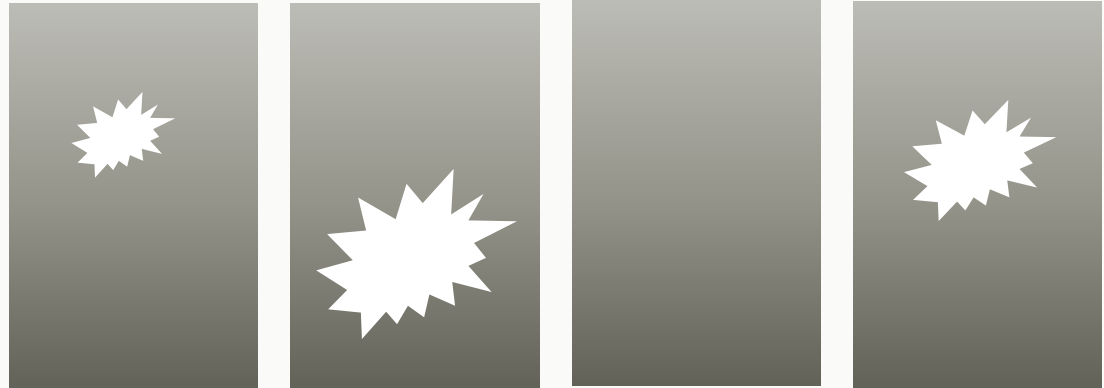
- Teilchen haben unterschiedliche Masse
- Gleiche Geschwindigkeit führt zu unterschiedlichen Impulsen: $p = mv$



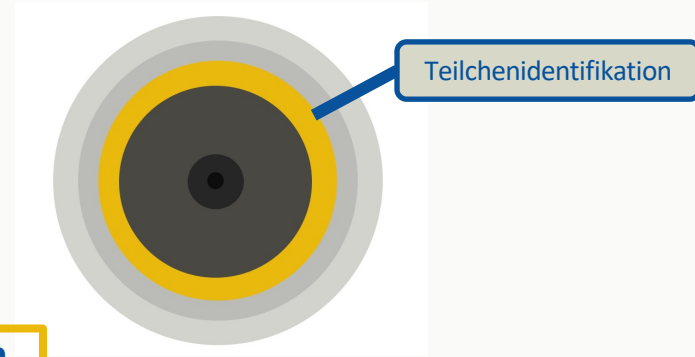
- Beispiel:

Welcher Ball hat wohl welchen Schaden verursacht?

- **Fußball, Tennisball, Golfball und Tischtennisball** treffen eine Glasscheibe
- Bei gleicher Geschwindigkeit ganz unterschiedliche Schäden



- Teilchen haben unterschiedliche Masse
- Gleiche Geschwindigkeit führt zu unterschiedlichen Impulsen: $p = mv$



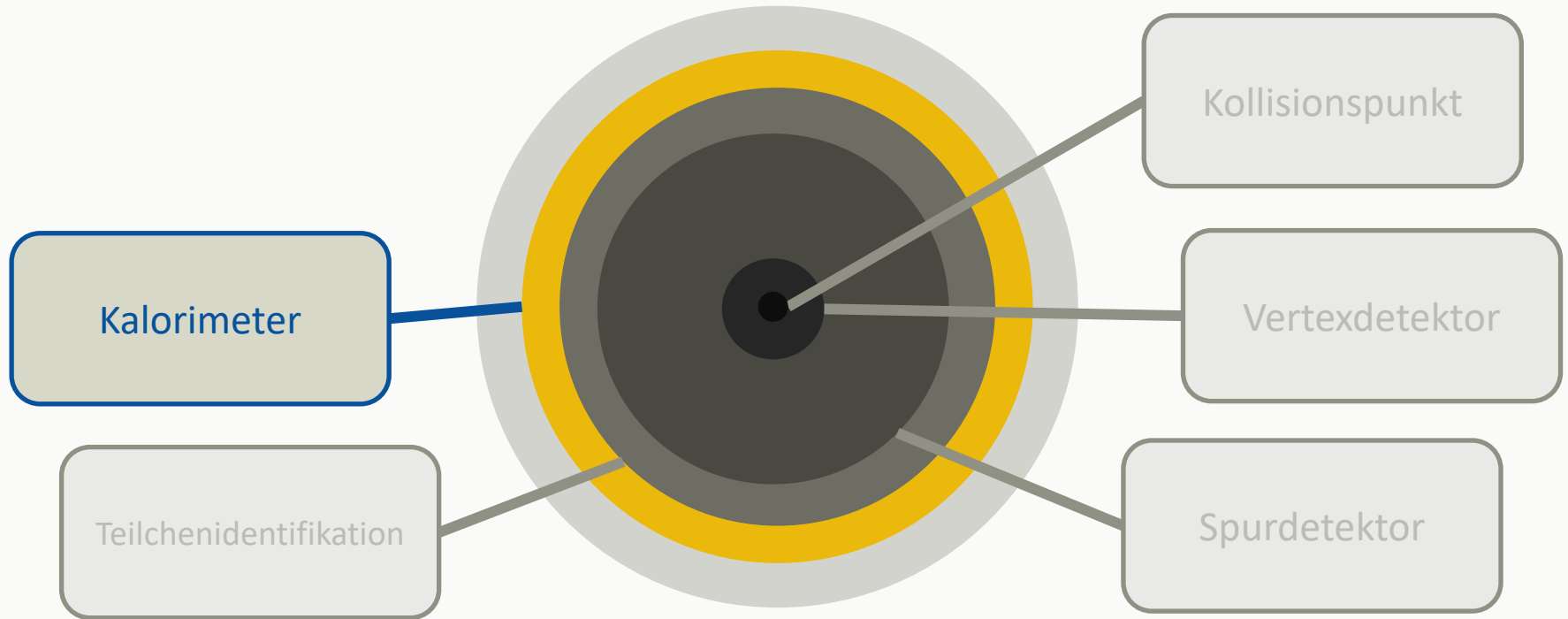
• Beispiel:

Welcher Ball hat wohl welchen Schaden verursacht?

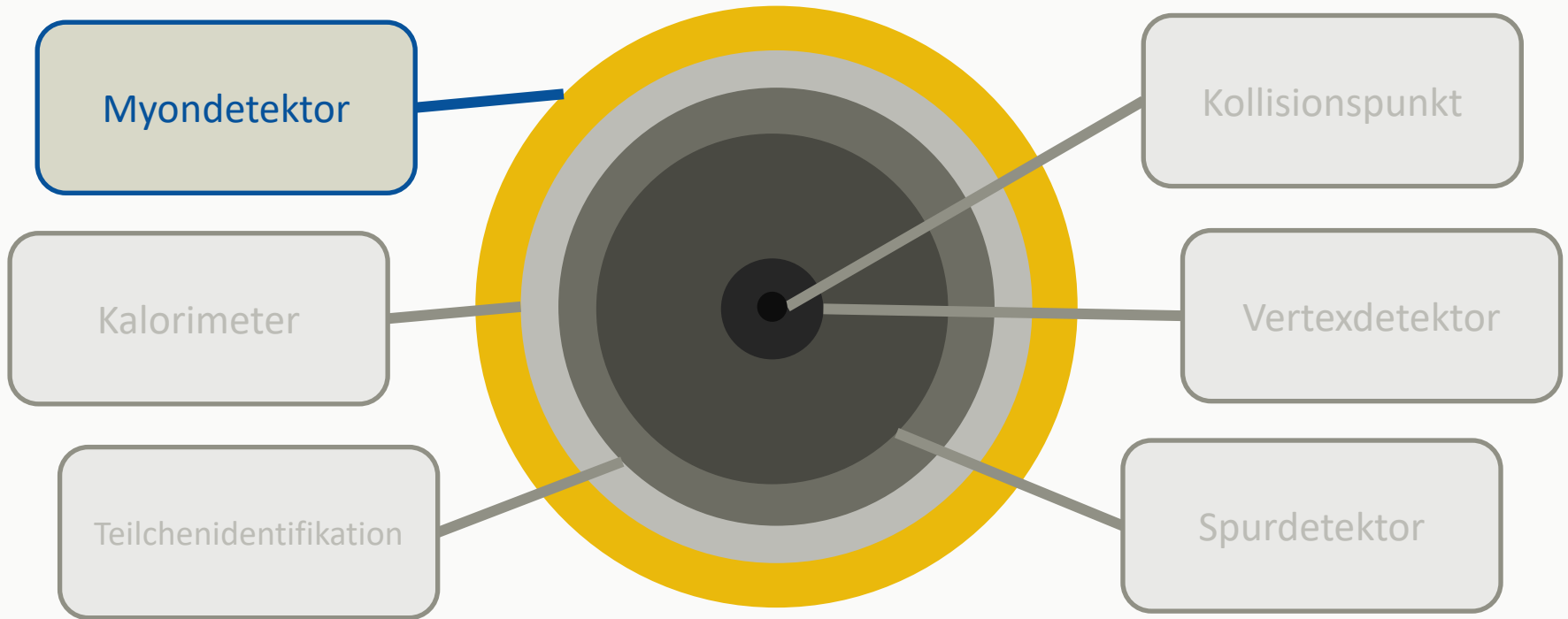
- **Fußball, Tennisball, Golfball und Tischtennisball** treffen eine Glasscheibe
- Bei gleicher Geschwindigkeit ganz unterschiedliche Schäden



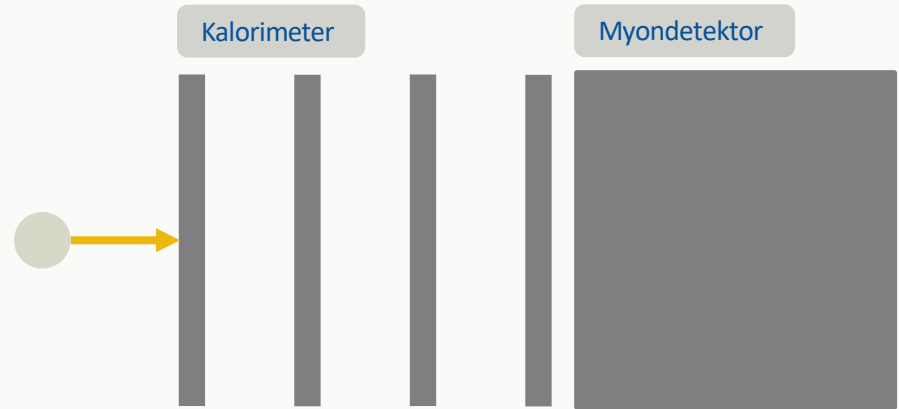
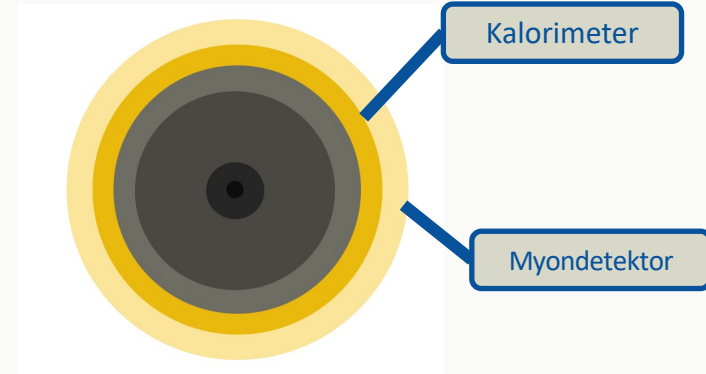
– Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt



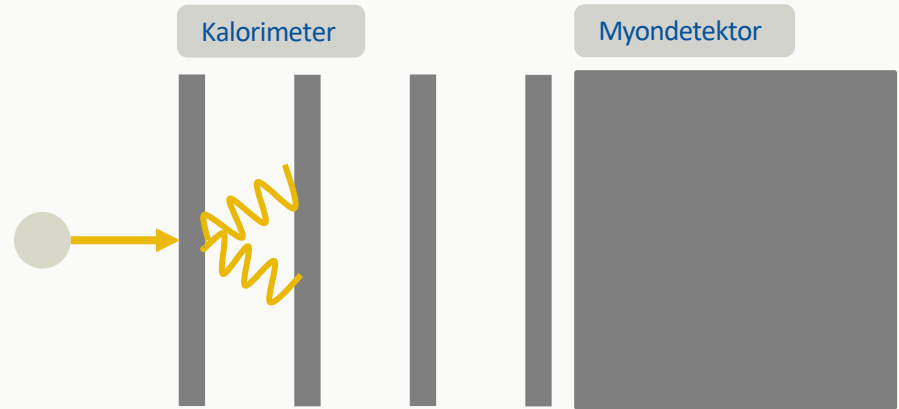
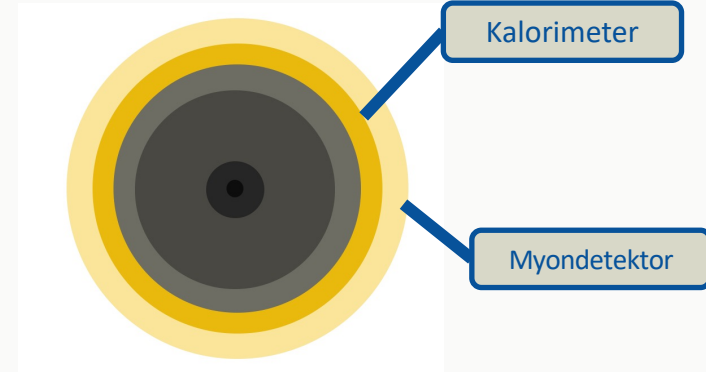
– Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt



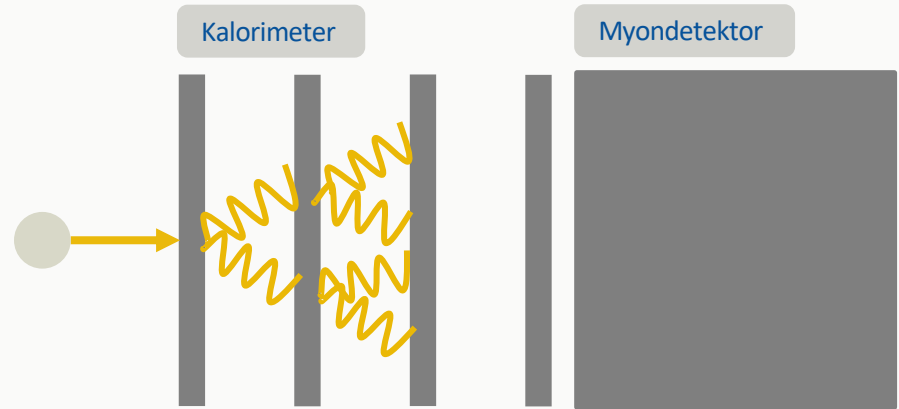
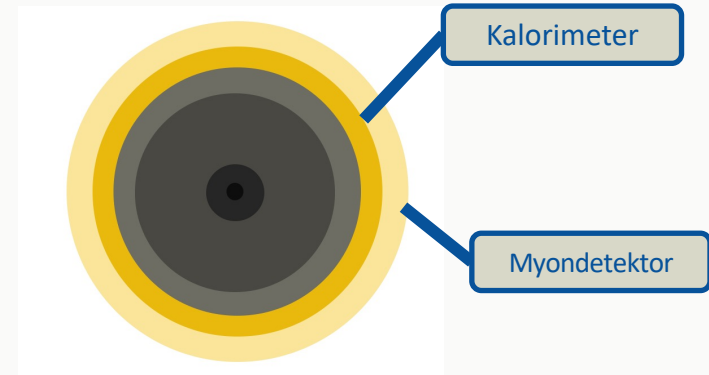
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie



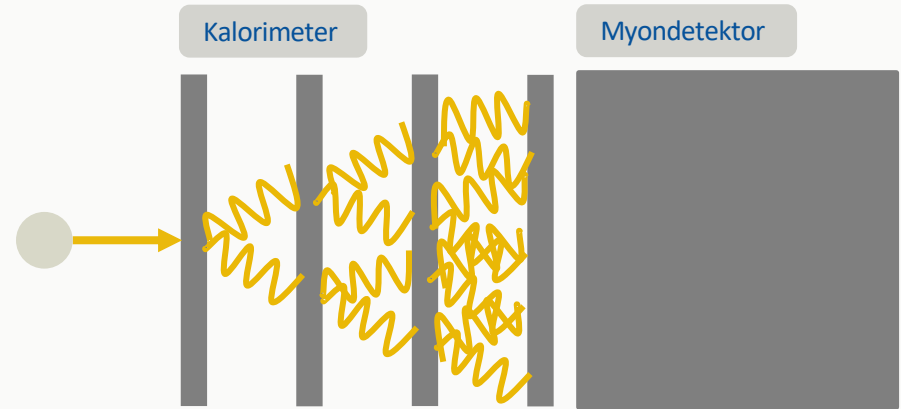
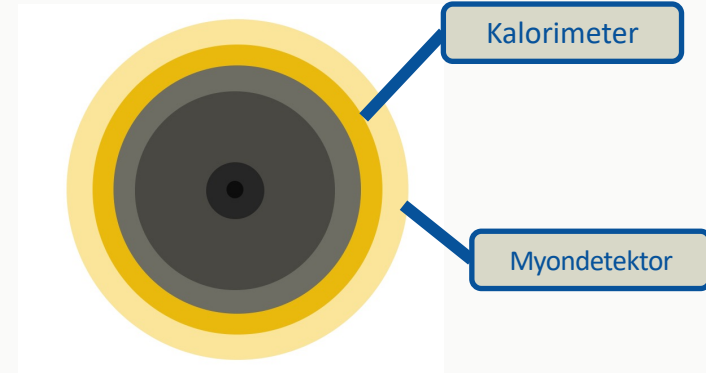
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie



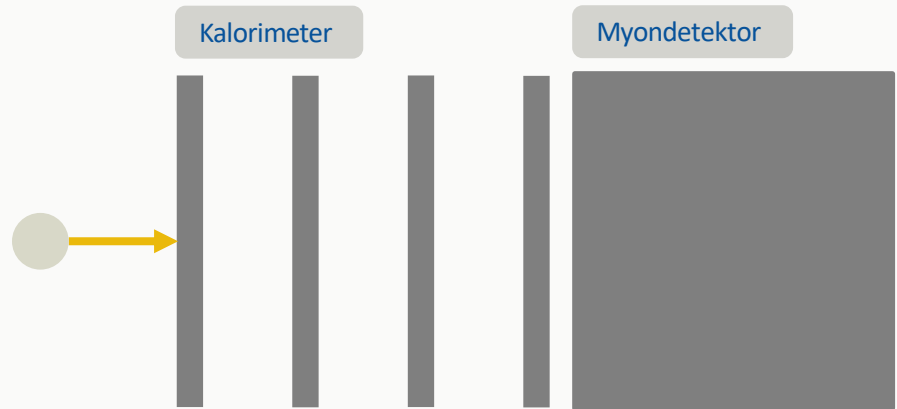
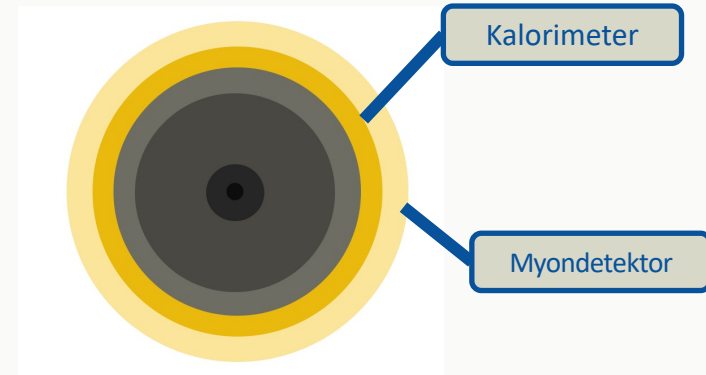
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie



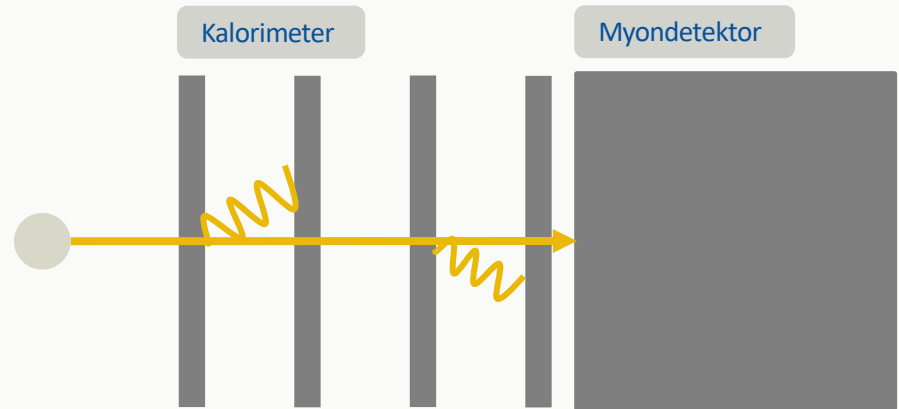
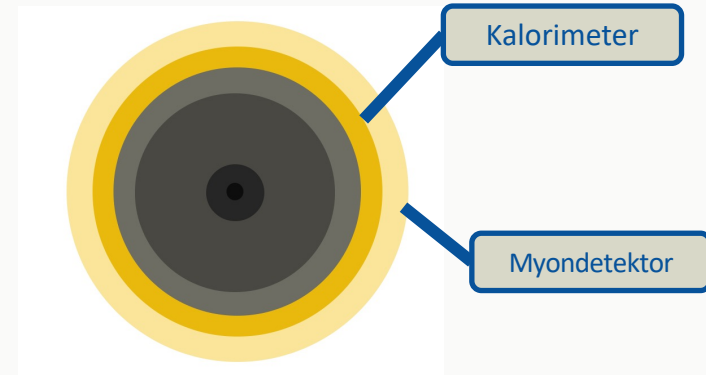
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie
 - Und werden hier gestoppt



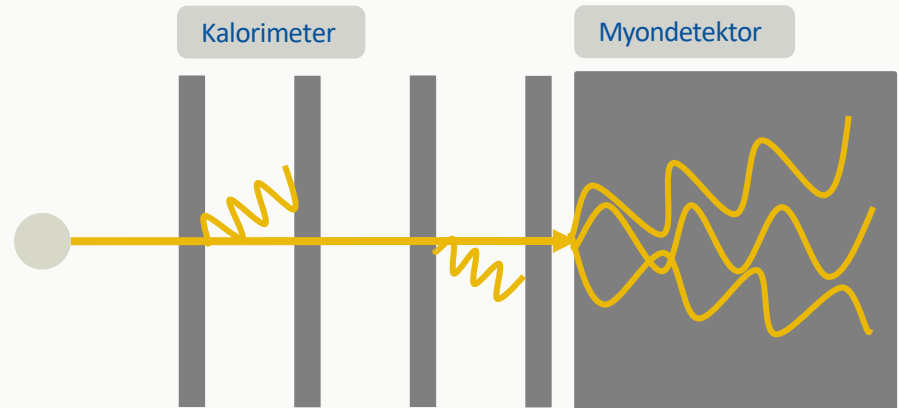
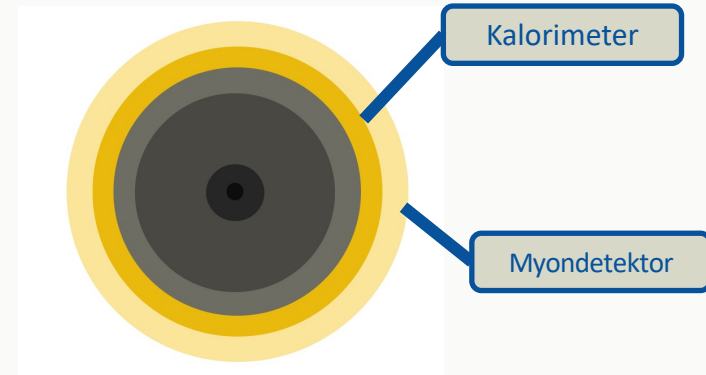
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie
 - Und werden hier gestoppt
- Myondetektor:
 - Myonen interagieren kaum und verlassen das Kalorimeter



- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie
 - Und werden hier gestoppt
- Myondetektor:
 - Myonen interagieren kaum und verlassen das Kalorimeter



- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie
 - Und werden hier gestoppt
- Myondetektor:
 - Myonen interagieren kaum und verlassen das Kalorimeter
 - Hinterlassen Signal im Myondetektor



1. Sammeln die Signale
2. Rekonstruieren das Ereignis
3. Wiederholen dies so oft es geht

Warum reicht es nicht ein Event zu finden?

1. Sammeln die Signale
2. Rekonstruieren das Ereignis
3. Wiederholen dies so oft es geht

Warum reicht es nicht ein Event zu finden?

- Es gibt statistische Schwankungen
- Jede Messung beinhaltet Messfehler
- Je mehr Messpunkte desto kleiner der Fehler

WIE VIELE FARBEN HAT EIN QUARK?

- Letztes mal haben wir gelernt, wie der R-Wert und damit die Anzahl der Quark-Farben berechnet werden kann.

WIE VIELE FARBEN HAT EIN QUARK?

- Letztes mal haben wir gelernt, wie der R-Wert und damit die Anzahl der Quark-Farben berechnet werden kann.

$$R = \frac{N(\text{leichte Quarks})}{\frac{1}{2} \cdot [N(\text{Myonen}) + N(\text{Tauonen})]} = N_c \cdot \frac{10}{9}$$

WIE VIELE FARBEN HAT EIN QUARK?

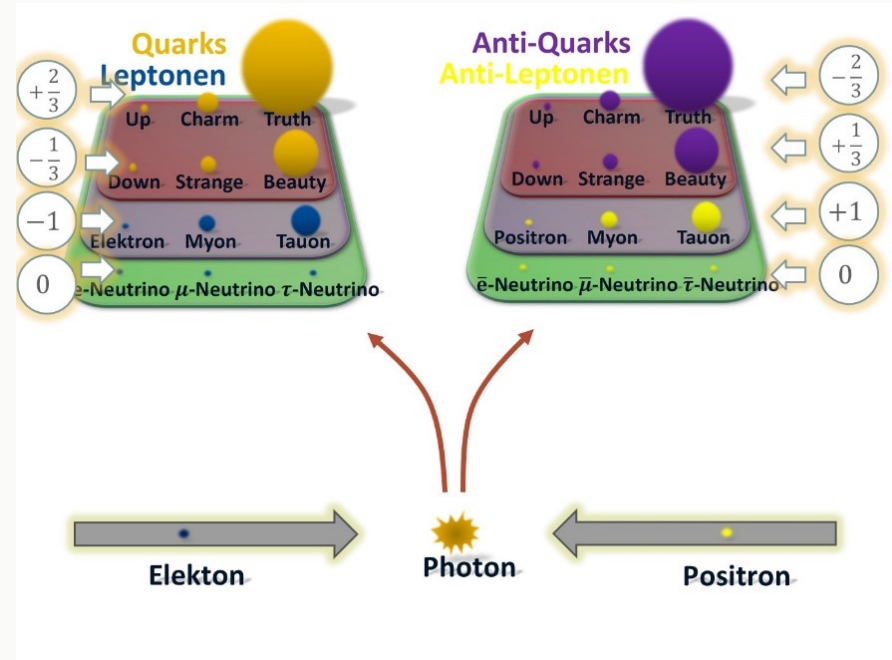
- Letztes mal haben wir gelernt, wie der R-Wert und damit die Anzahl der Quark-Farben berechnet werden kann.

$$R = \frac{N(\text{leichte Quarks})}{\frac{1}{2} \cdot [N(\text{Myonen}) + N(\text{Tauonen})]} = N_c \cdot \frac{10}{9}$$

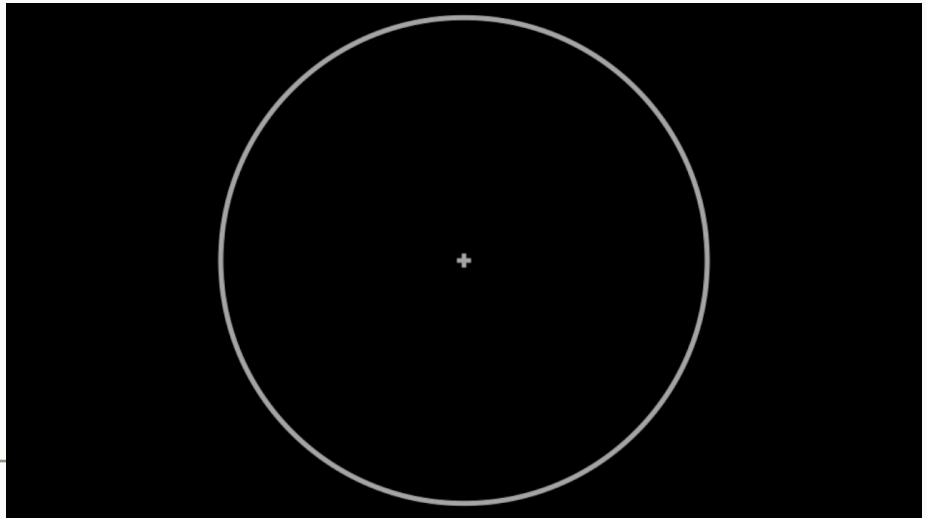
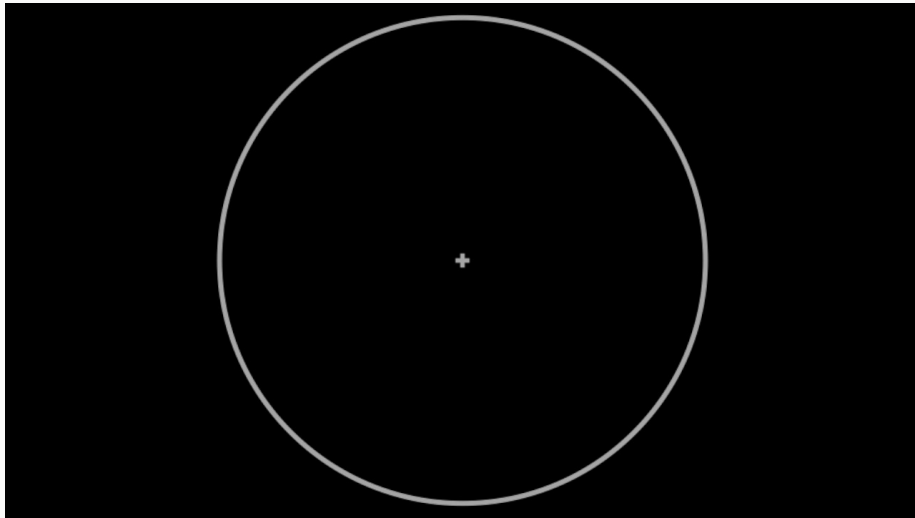
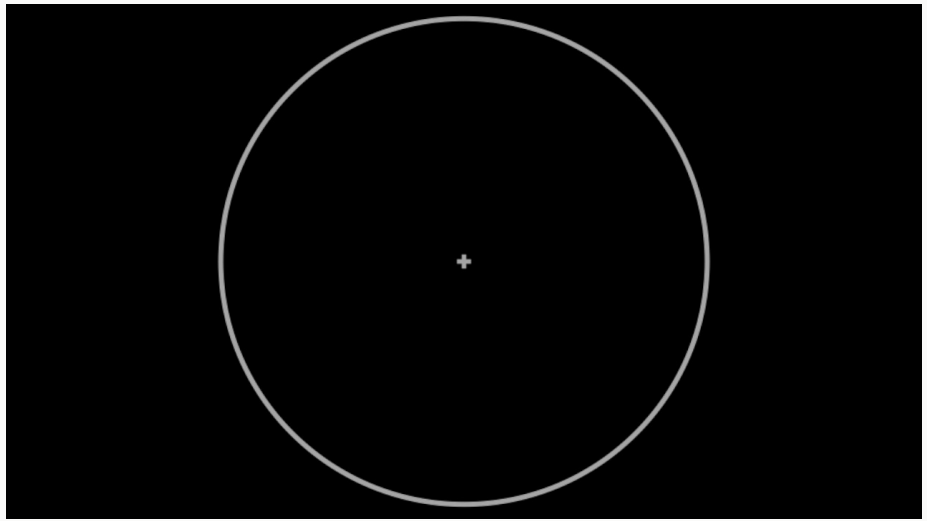
- Um die Anzahl der Farben zu bestimmen, müssen wir die Anzahl der verschiedenen Ereignisse bestimmen.
- Deswegen:
 - Wollen wir lernen, die einzelnen Ereignisse im Detektor voneinander zu unterscheiden

WAS PASSIERT HIER EIGENTLICH GENAU?

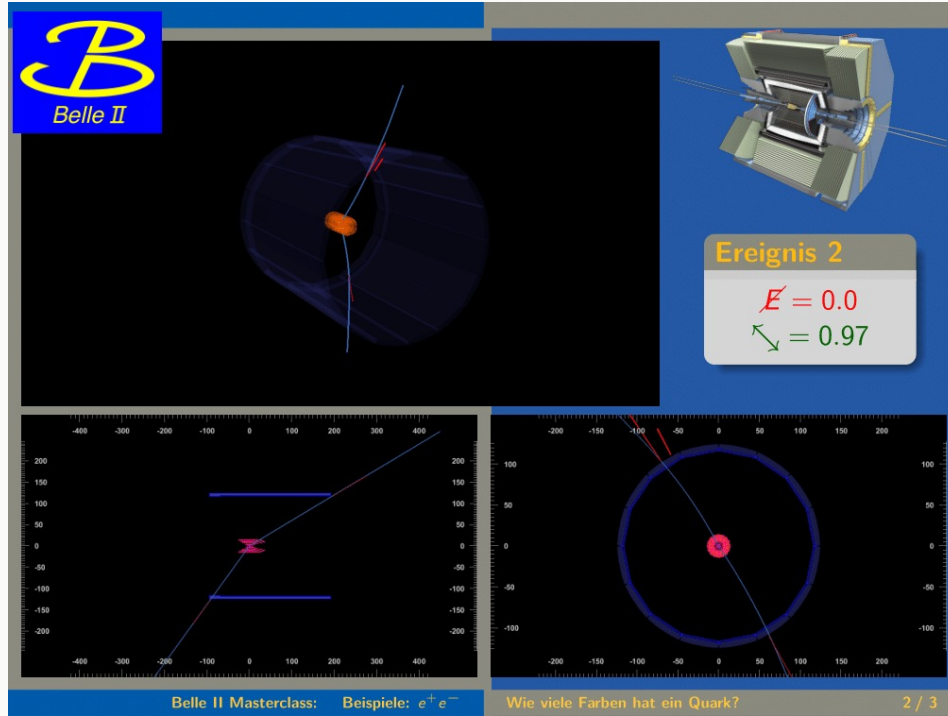
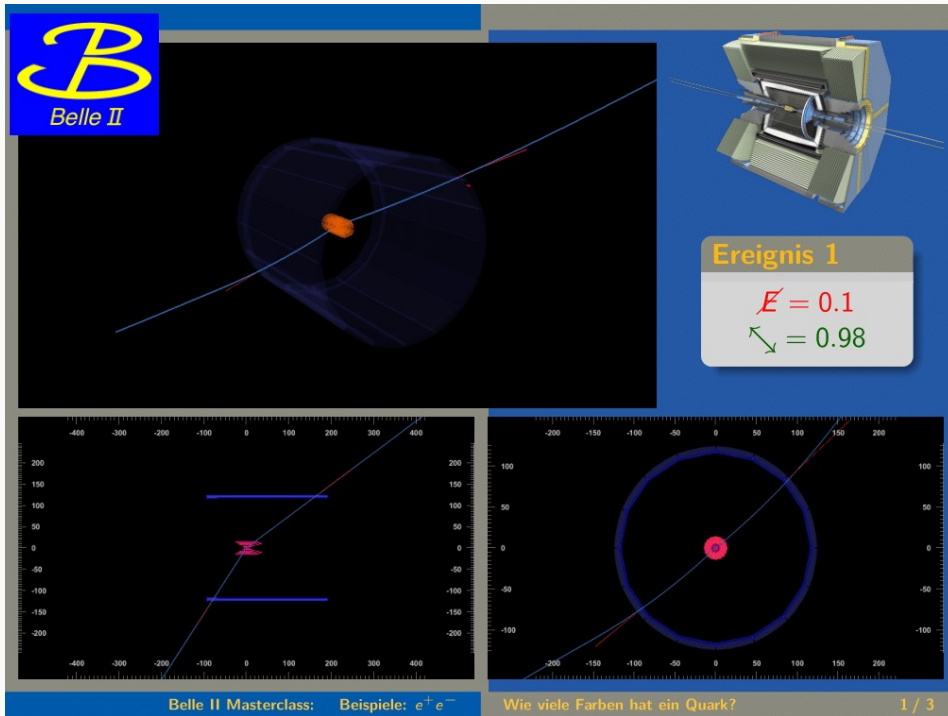
- $e^+e^- \rightarrow$ „reine Energie“ \rightarrow Teilchen/Antiteilchen
- Leptonpaare:
 - **Elektron-Positron** Ereignisse
 - **Myon-Antimyon** Ereignisse
 - **Tauon-Antitauon** Ereignisse
- Quarkpaare:
 - **Leichte Quark-Antiquark** Ereignisse
 - **$b\bar{b}$ Quark** Ereignisse

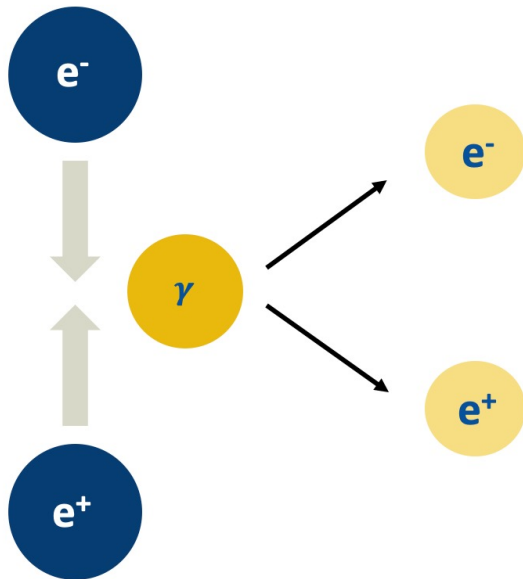


ELEKTRON/POSITRON- EREIGNISSE



ELEKTRON/POSITRON-EREIGNISSE





- **Zwei** klar zu erkennende **Spuren**
- Energiedeposition im Kalorimeter (rotes Signal nahe der Spur)

Warum fehlen Elektron/Positron- Ereignisse in unserer Formel für den R-Wert?

$$R = \frac{N(\text{leichte Quarks})}{\frac{1}{2} \cdot [N(\text{Myonen}) + N(\text{Tauonen})]}$$

Warum fehlen Elektron/Positron- Ereignisse in unserer Formel für den R-Wert?

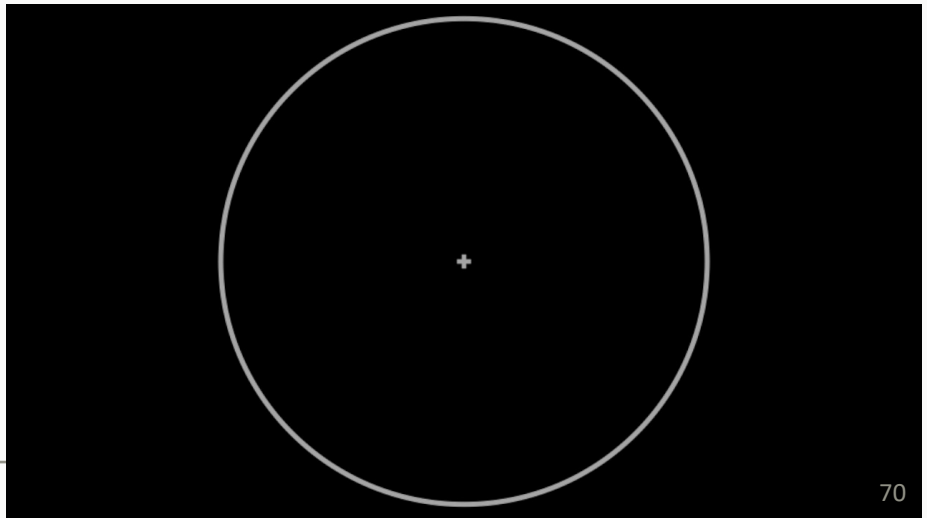
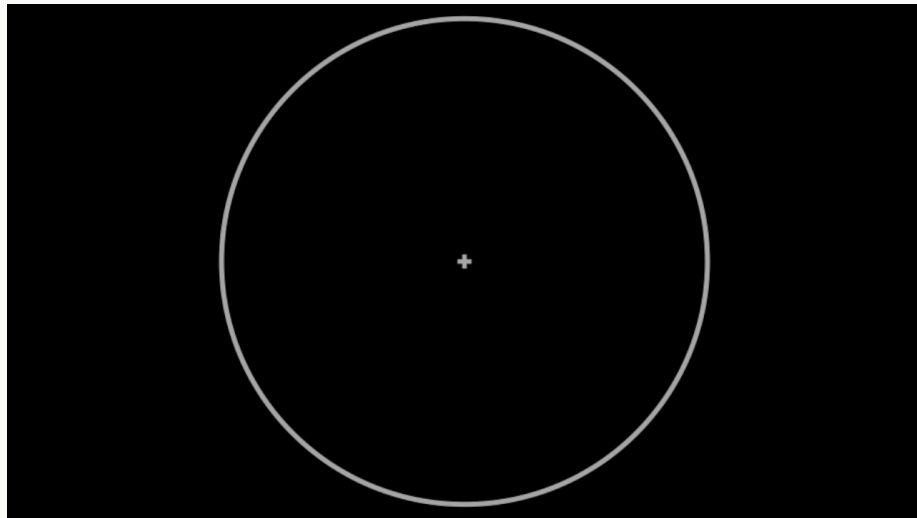
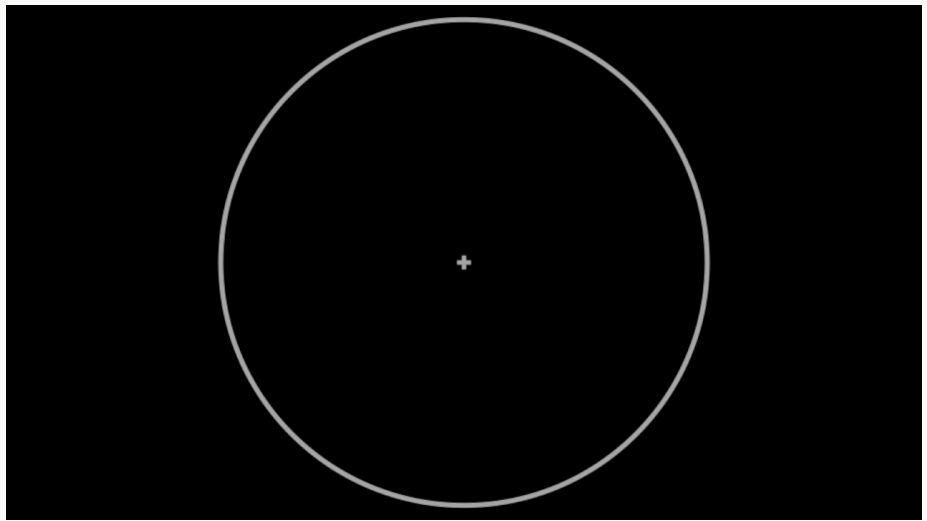
$$R = \frac{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \bar{u}u, \bar{d}d, \bar{s}s, \bar{c}c)}{\frac{1}{2} [N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-) + N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+\tau^-)]}$$

Warum fehlen Elektron/Positron- Ereignisse in unserer Formel für den R-Wert?

$$R = \frac{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \bar{u}u, \bar{d}d, \bar{s}s, \bar{c}c)}{\frac{1}{2} [N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-) + N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+\tau^-)]}$$

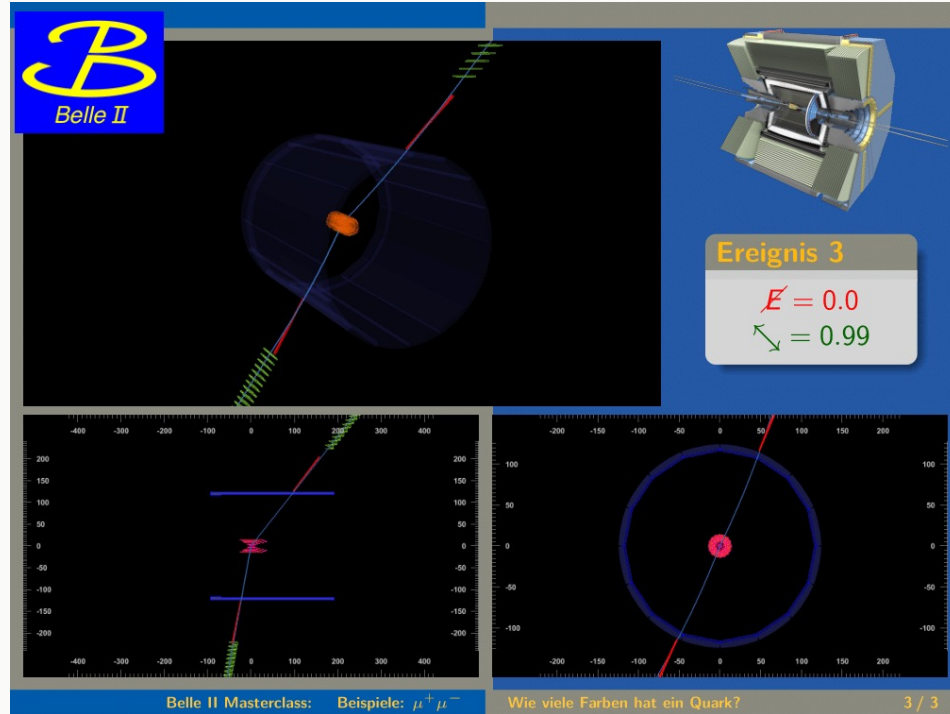
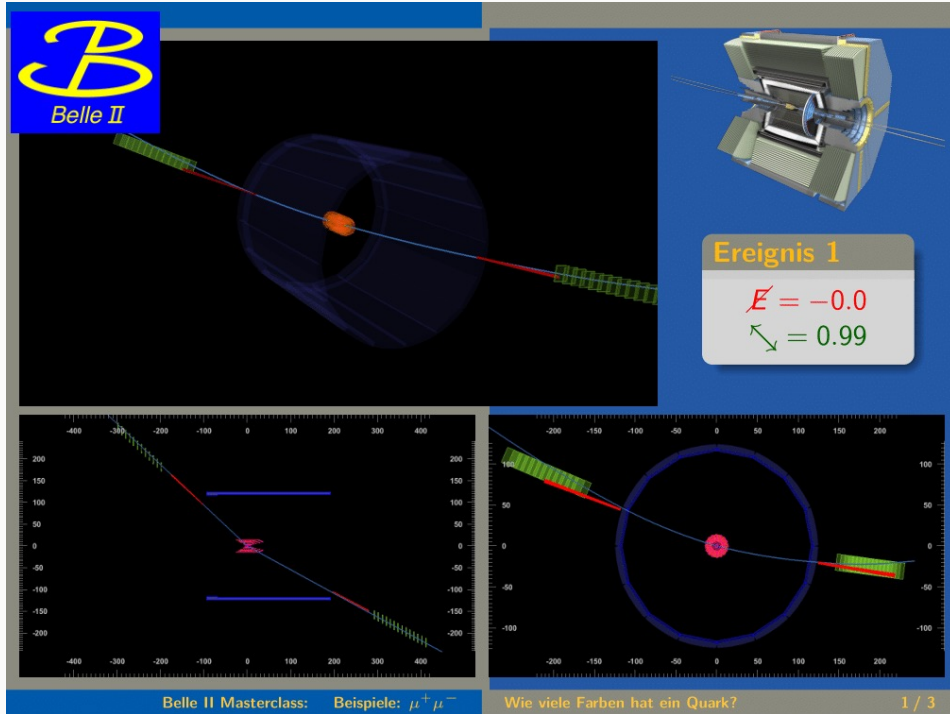
→ Häufig Elektron/Positron- Streuung

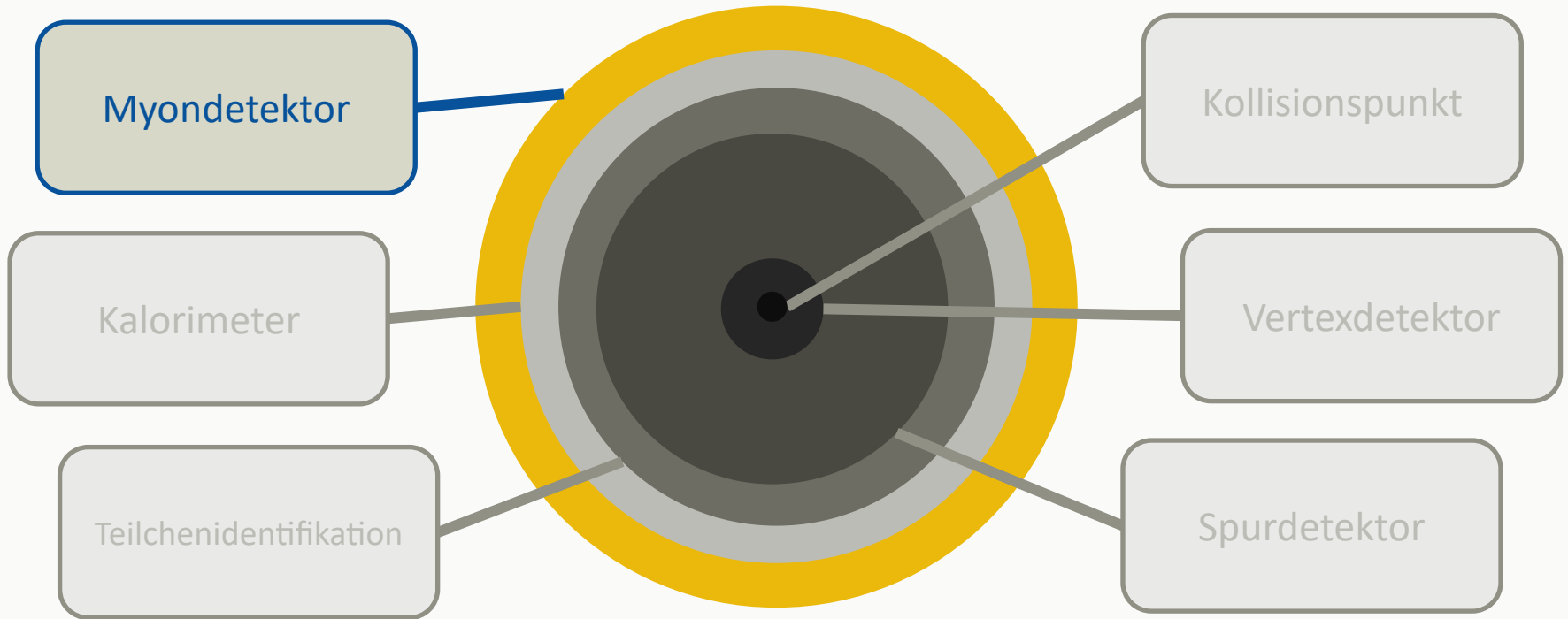
MYON/ANTIMYON- EREIGNISSE

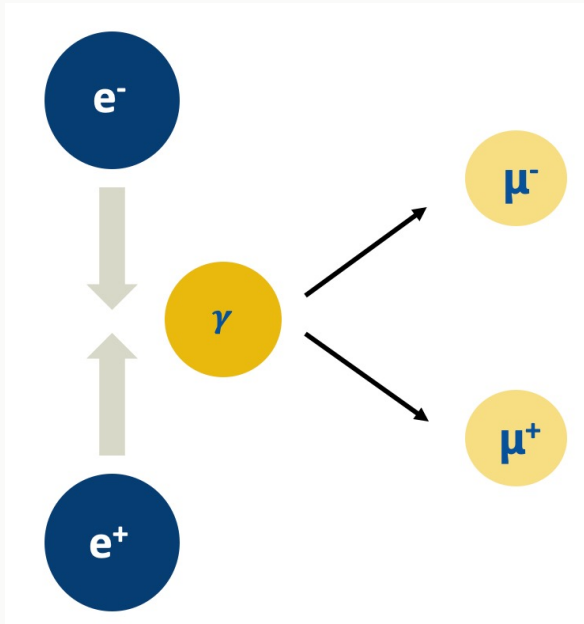




MYON/ANTIMYON-EREIGNISSE

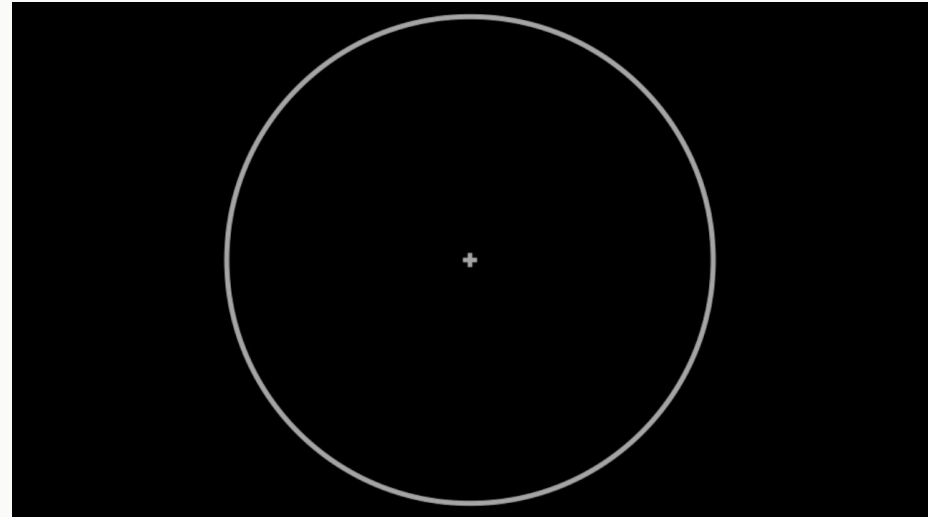
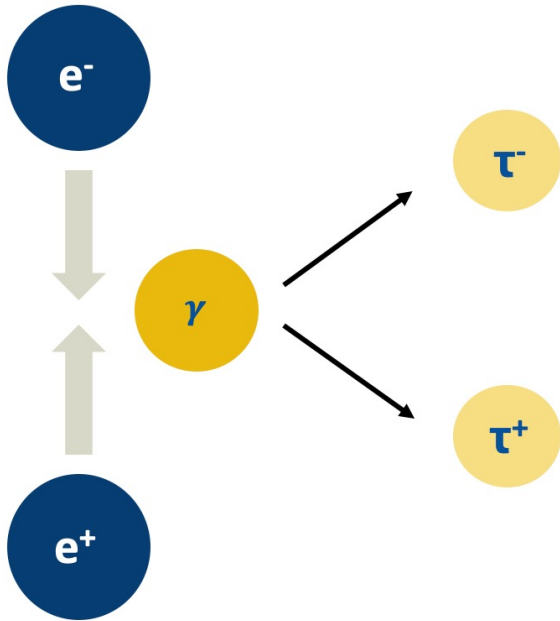




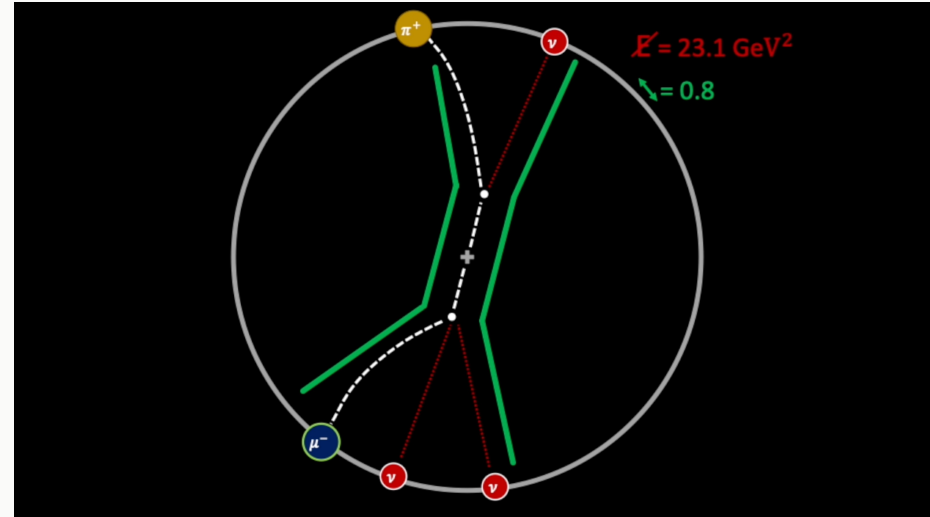
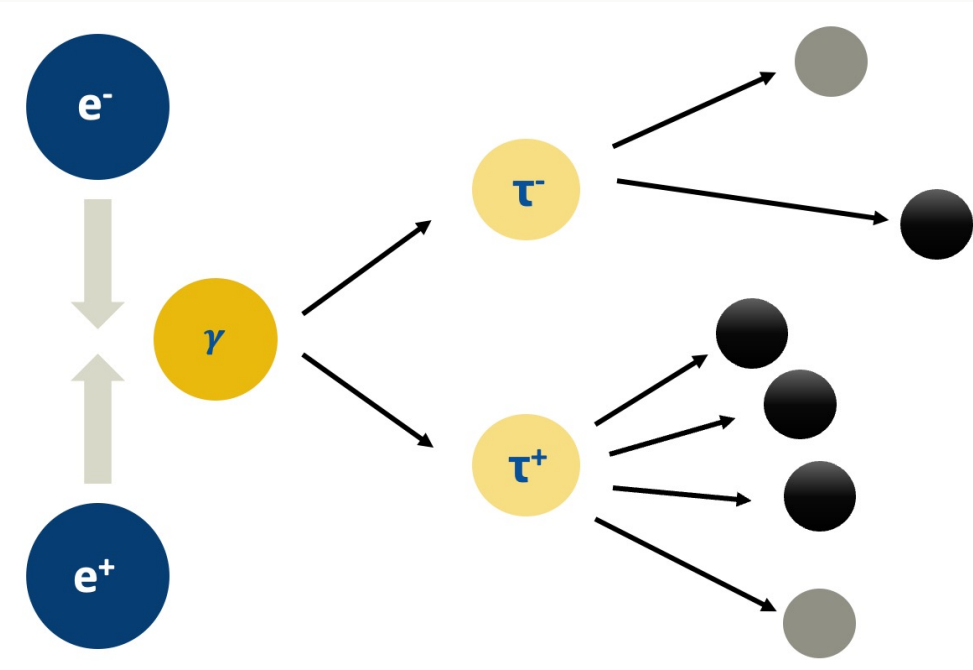


- **Zwei** klar zu erkennende **Spuren**
- Energiedeposition im Kalorimeter (rotes Signal nahe der Spur)
- Energiedeposition im Myondetektor (**grünes Signal nahe der Spur!**)

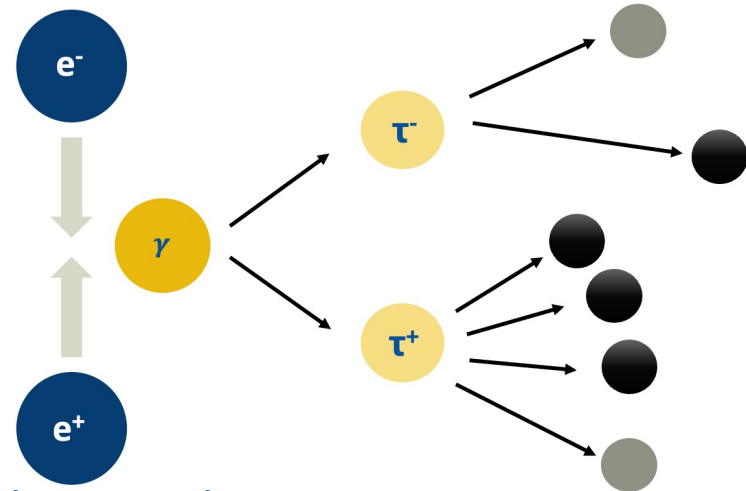
TAUON/ANTITAUON-EREIGNISSE



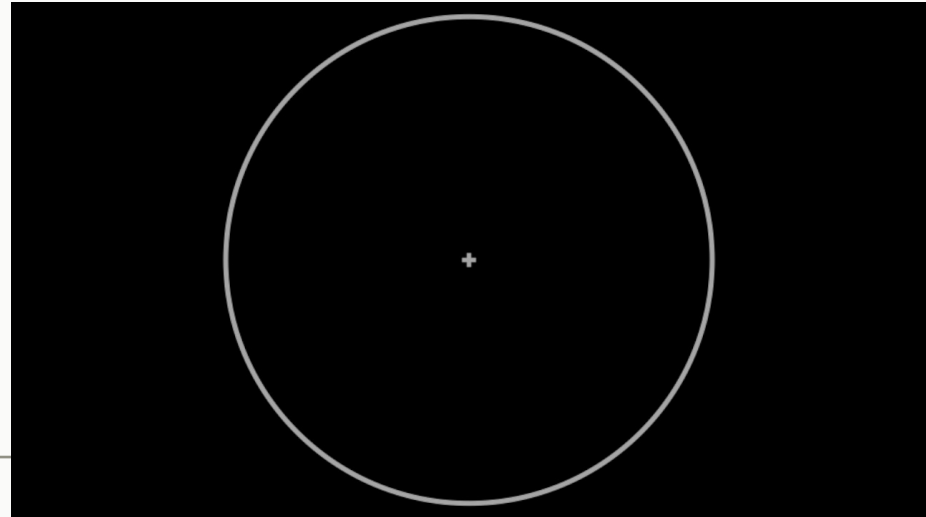
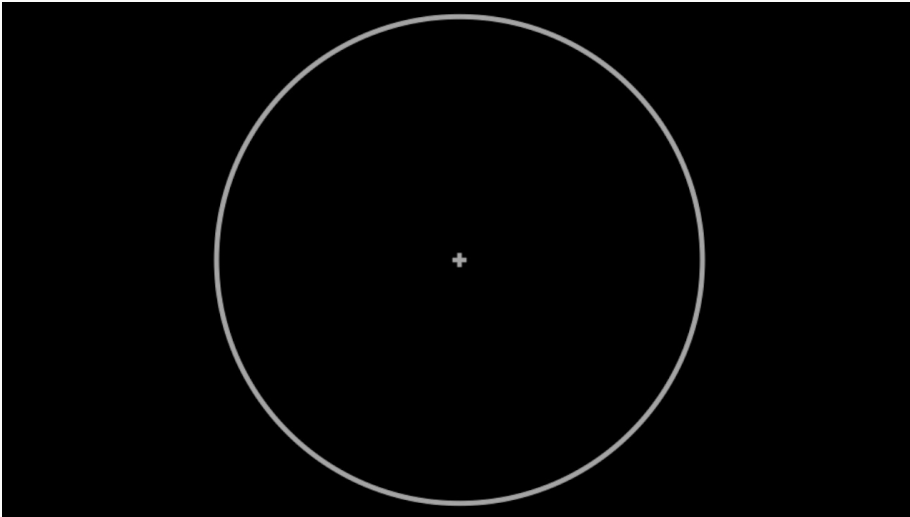
TAUON/ANTITAUON-EREIGNISSE



- Die Tauonen **zerfallen** kurz nach ihrer Entstehung im Detektor.
- Gibt mehrere Zerfallsmöglichkeiten:
- In geladene Leptonen + Neutrinos

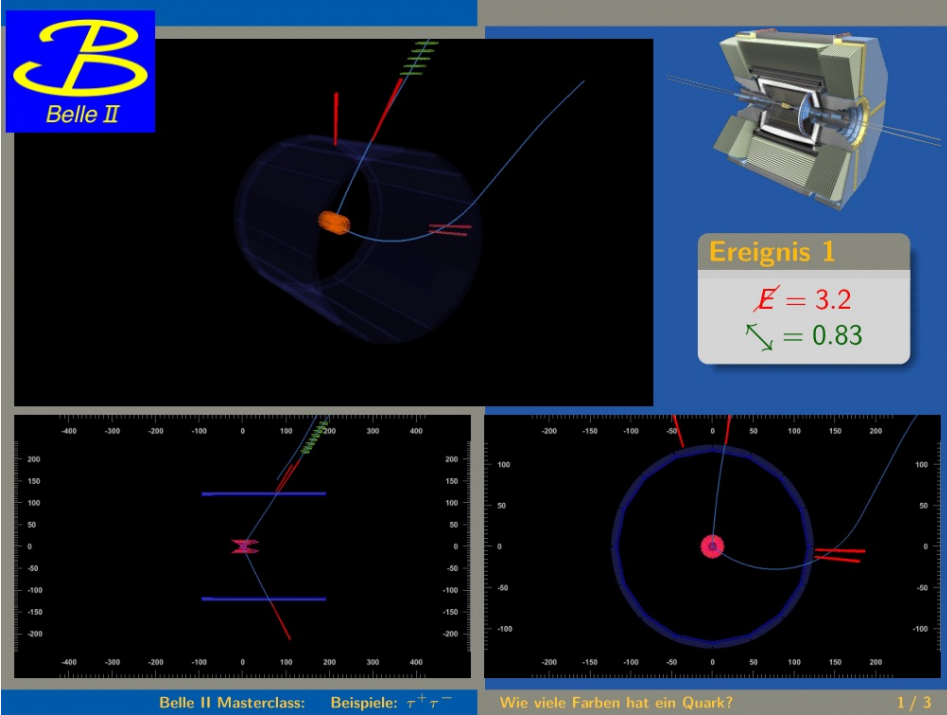


- In leichte Quarks + Neutrinos



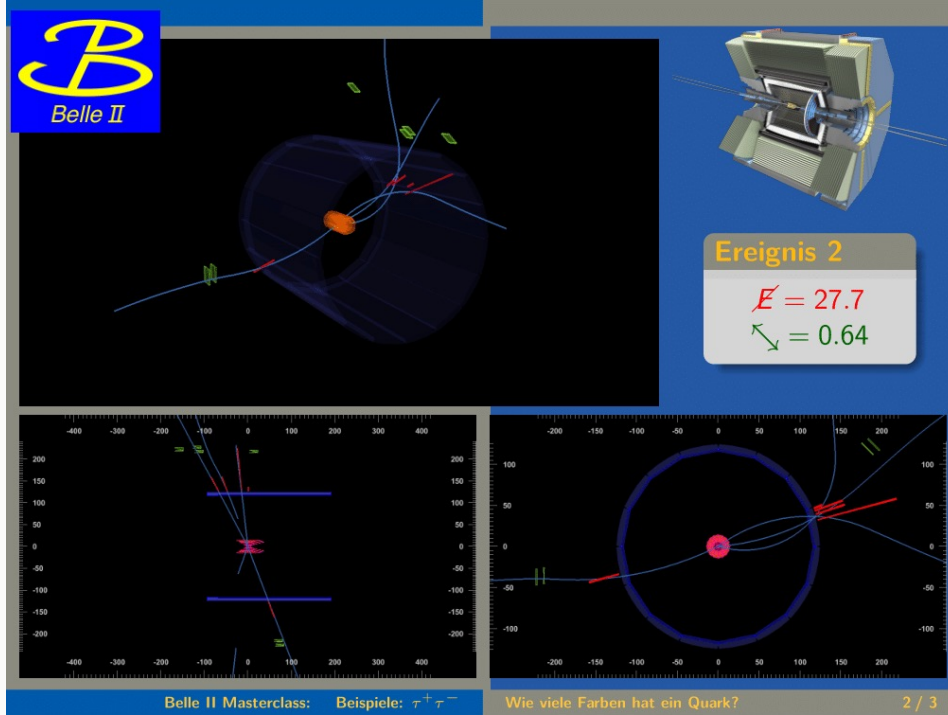


TAUON/ANTITAUON-EREIGNISSE



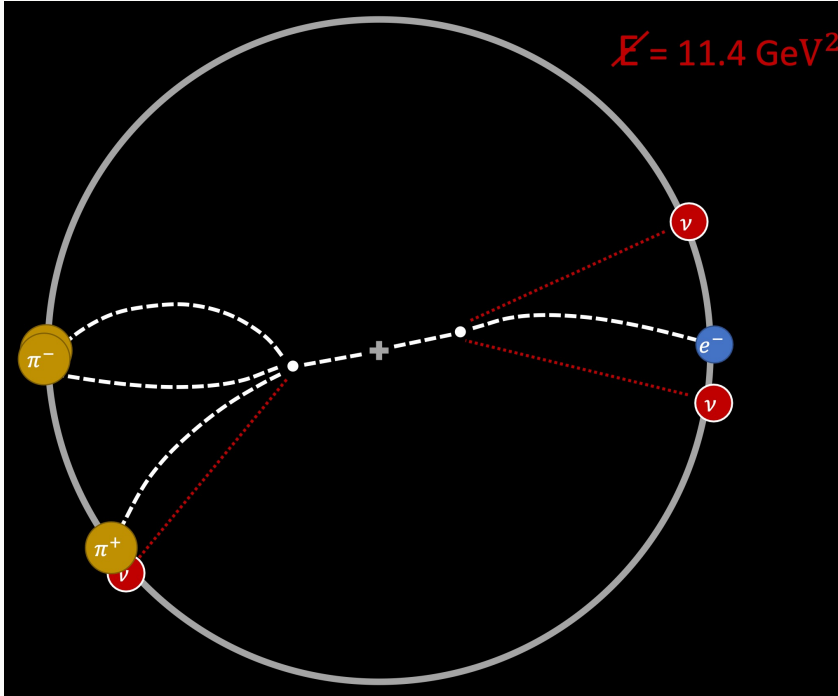
Belle II Masterclass: Beispiele: $\tau^+\tau^-$

Wie viele Farben hat ein Quark?

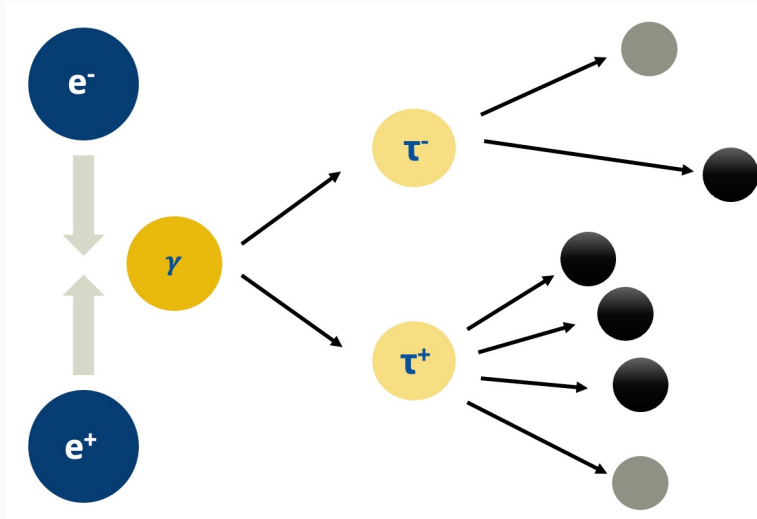


Belle II Masterclass: Beispiele: $\tau^+\tau^-$

Wie viele Farben hat ein Quark?



- **Neutrinos wechselwirken nicht** und sind nicht detektierbar \rightarrow Teilchen gehen verloren
- Wir kennen die Energie im Beschleuniger (Anfangszustand)
- **Energie-/Impulserhaltung $\rightarrow \cancel{E}$**



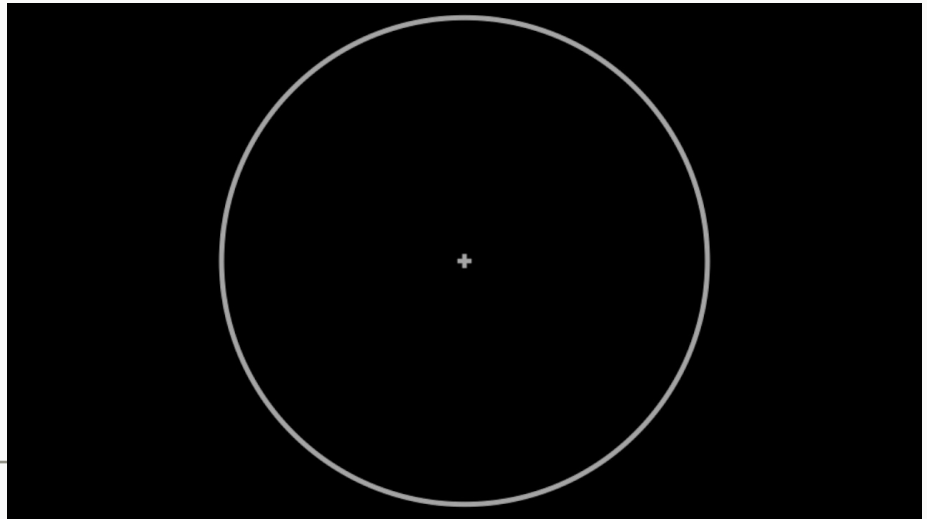
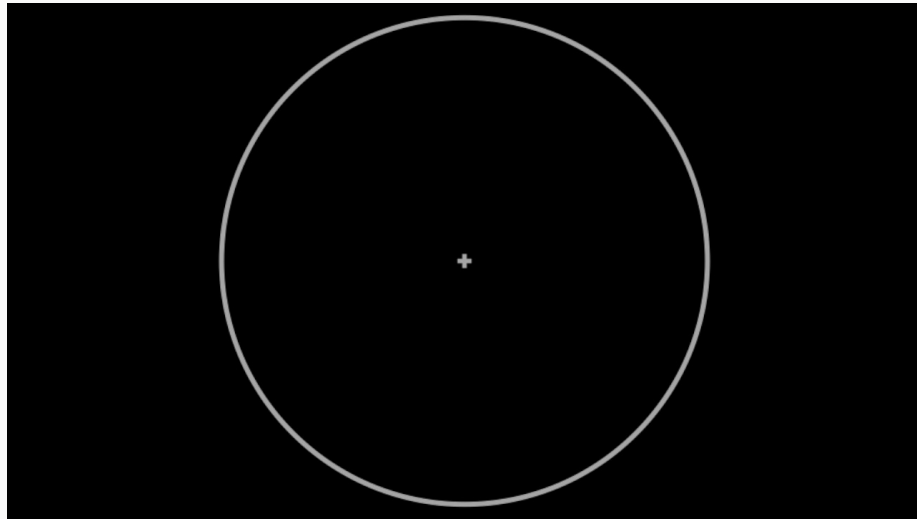
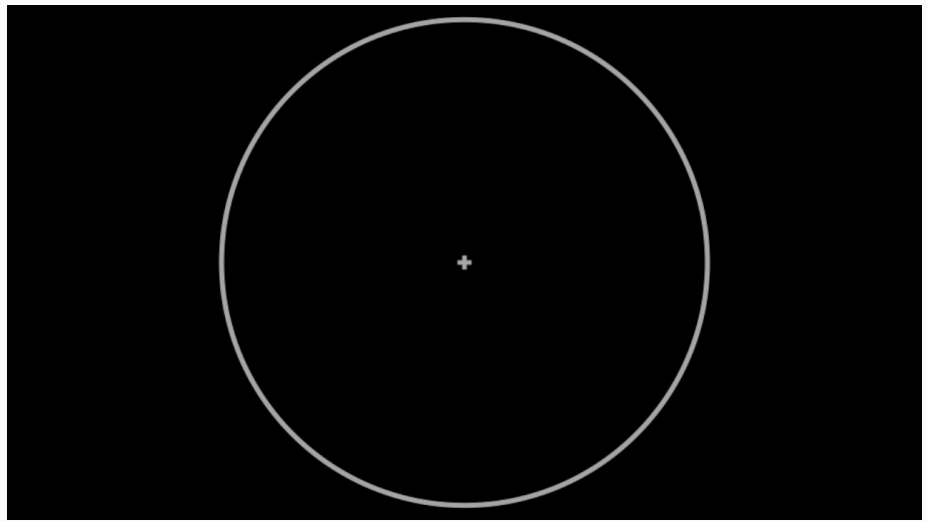
- Zerfälle führen zu **keiner einheitlichen Spuranzahl**
 - **2 oder 4 (+ Gabelstruktur)** am häufigsten
- Abhängig vom Zerfall Energiedeposition in Kalorimeter und Myondetektor
- **Hohe fehlende Energie** (durch beim Zerfall entstehende Neutrinos)



UNIVERSITÄT **BONN**

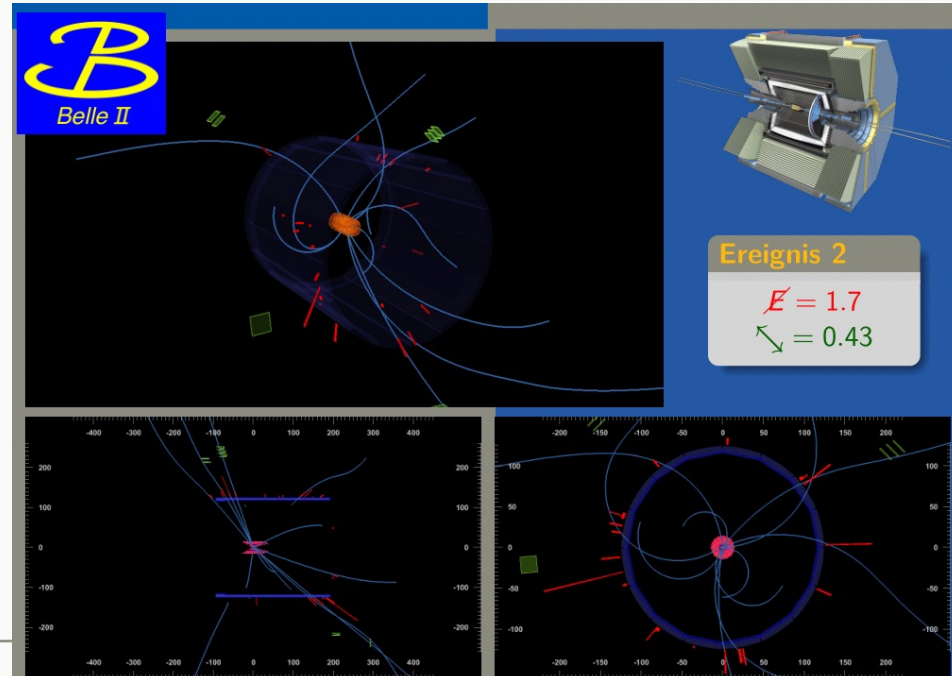
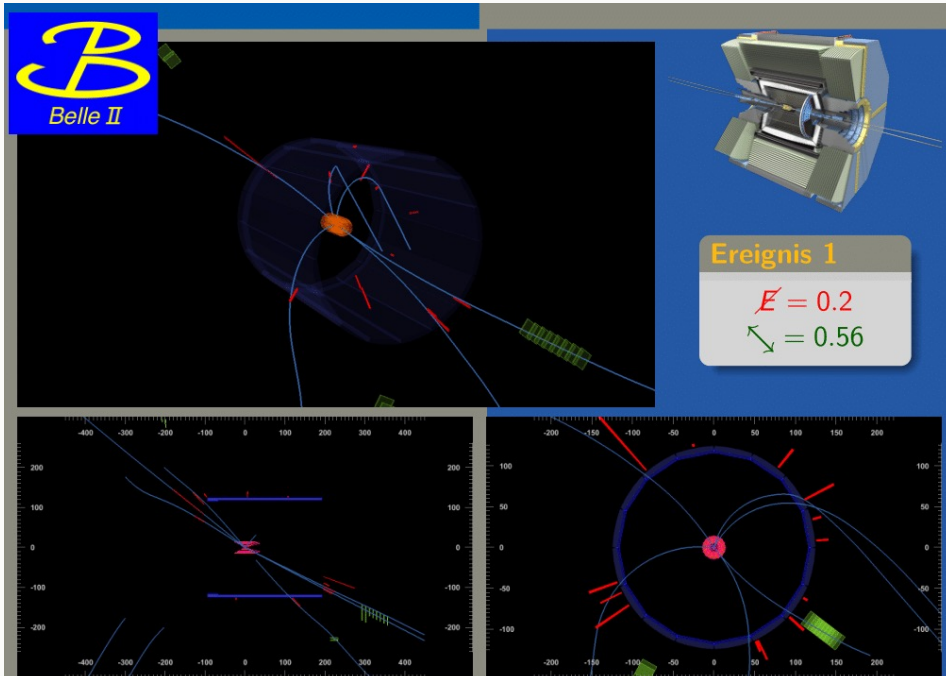
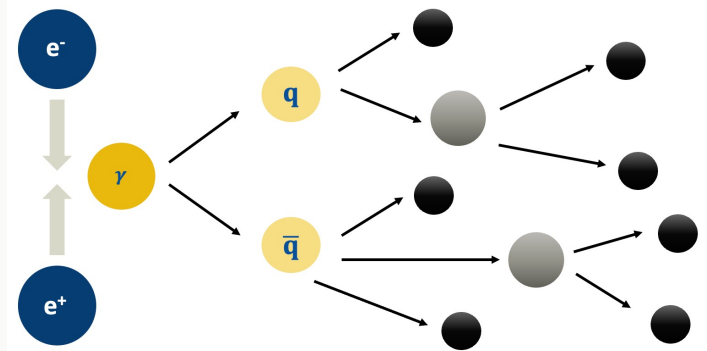
Belle II

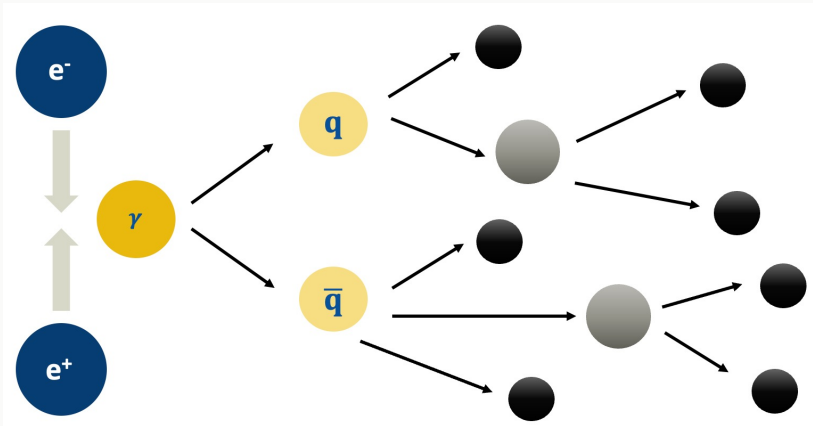
LEICHTE QUARK/ANTIQUARK- EREIGNISSE



LEICHTE QUARK/ANTIQUARK-EREIGNISSE

- Zerfall in viele mögliche Endzustände





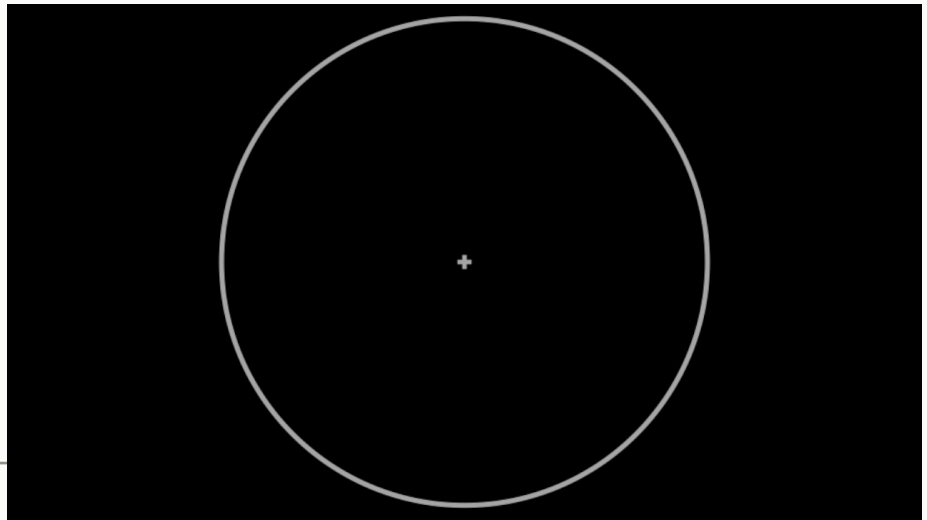
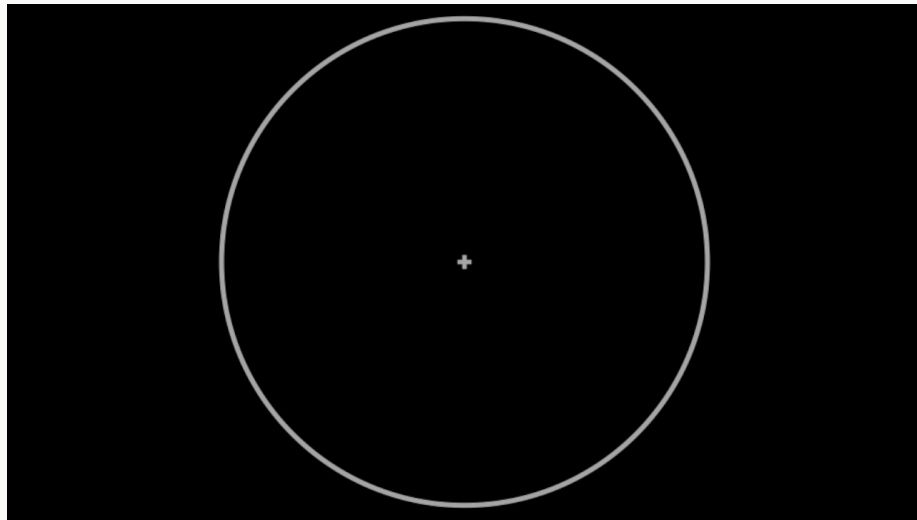
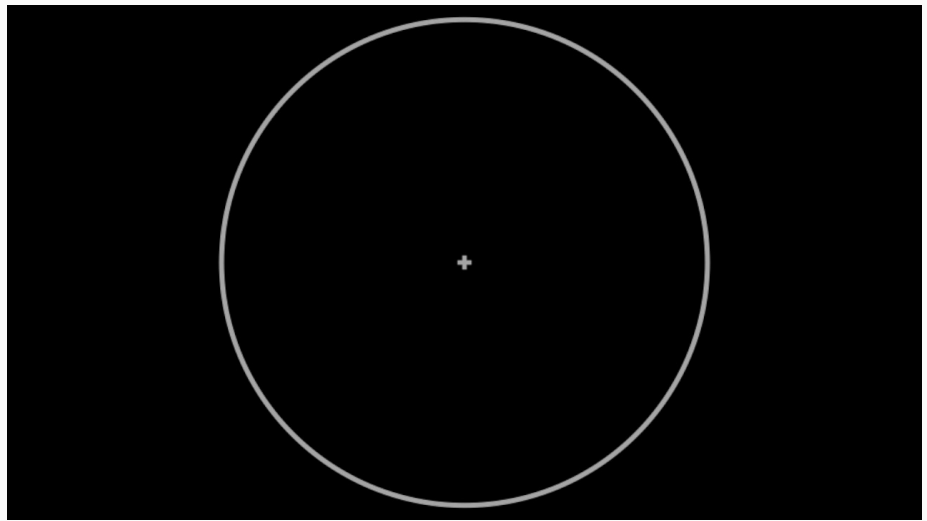
- Zerfallskaskaden führen zu **keiner einheitlichen Spuranzahl**
 - **Hohe Anzahl** häufig
- Weniger fehlende Energie durch weniger Neutrinos
- Zerfälle in mehr verschiedene Richtungen als bei den Leptonen



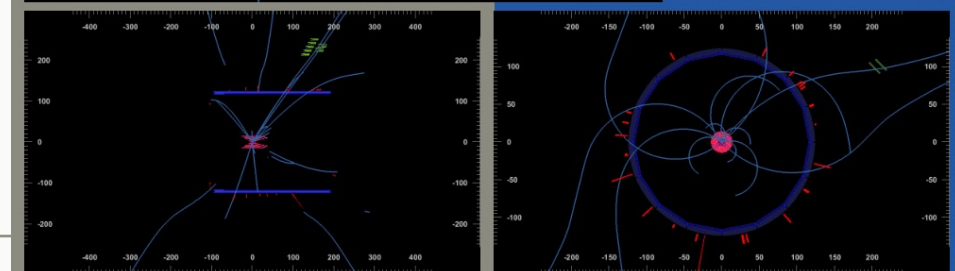
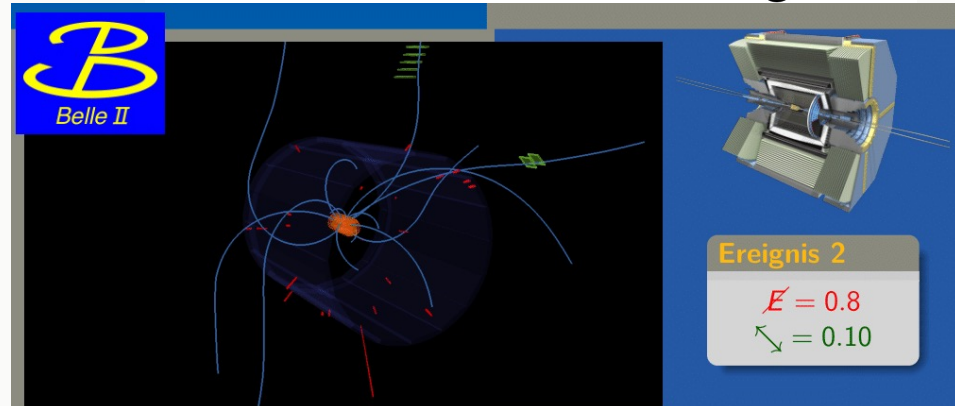
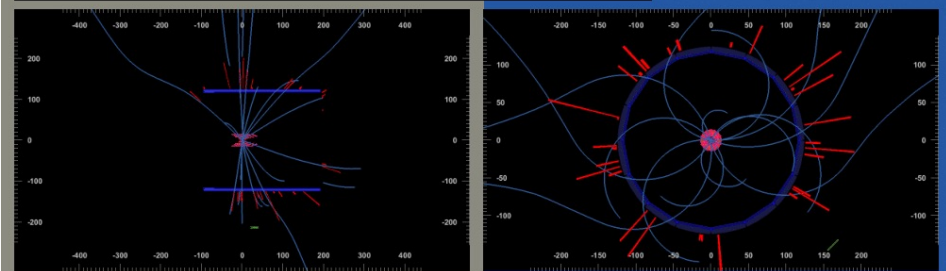
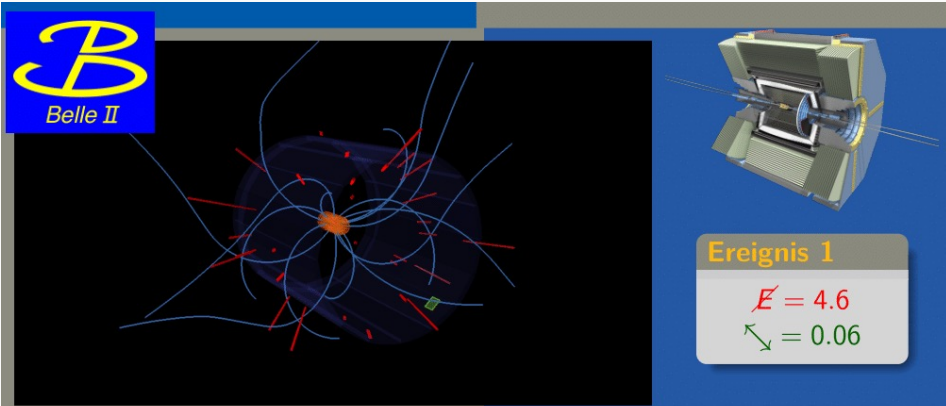
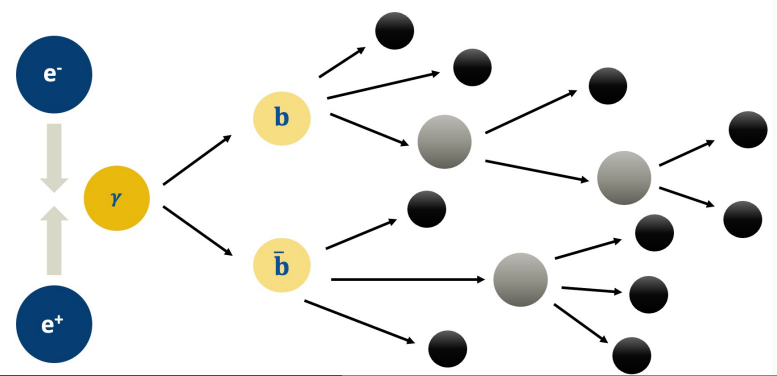
UNIVERSITÄT **BONN**

Belle II

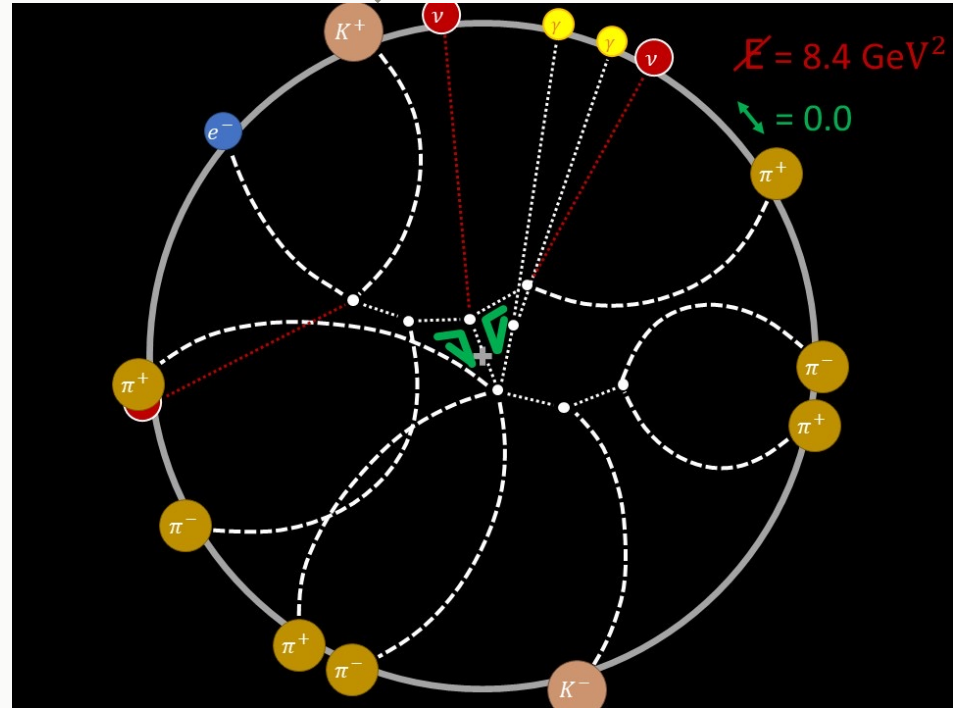
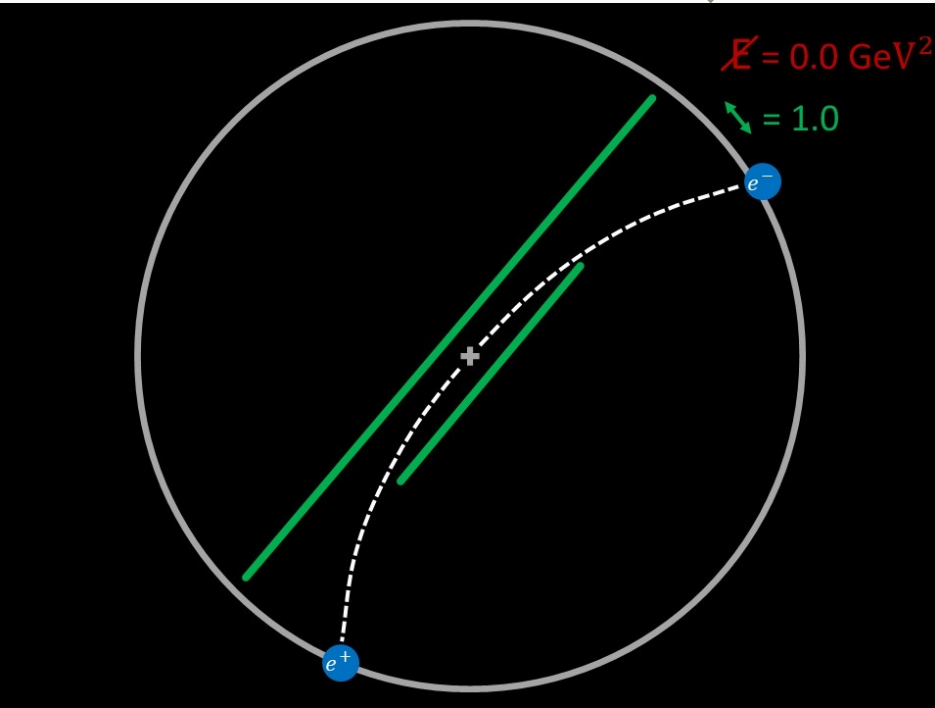
b/ANTI-b QUARK- EREIGNISSE



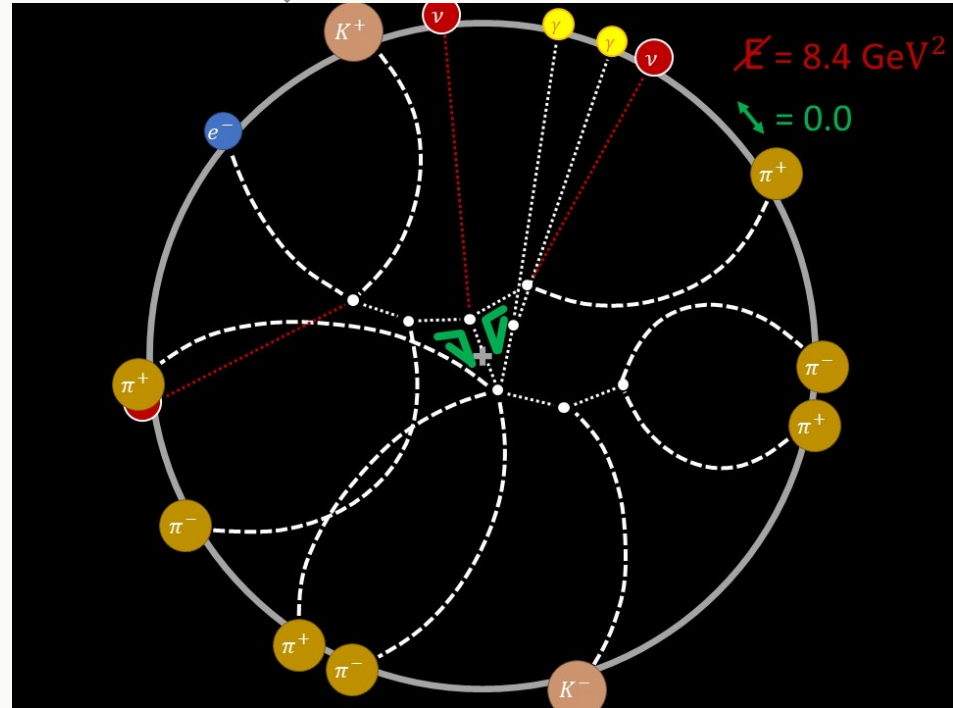
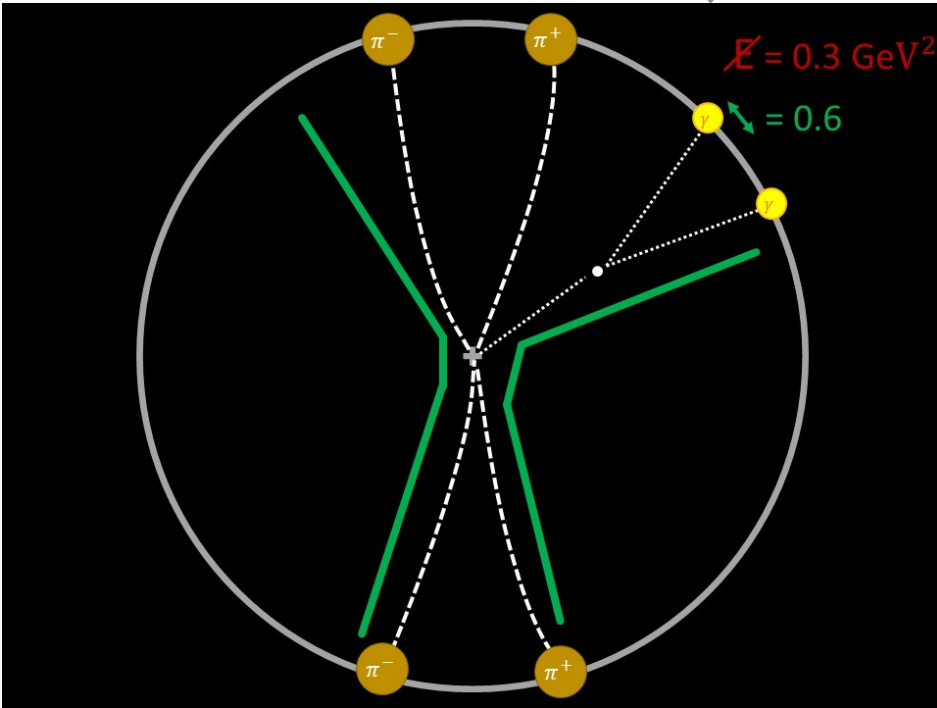
b/ANTI-b QUARK-EREIGNISSE



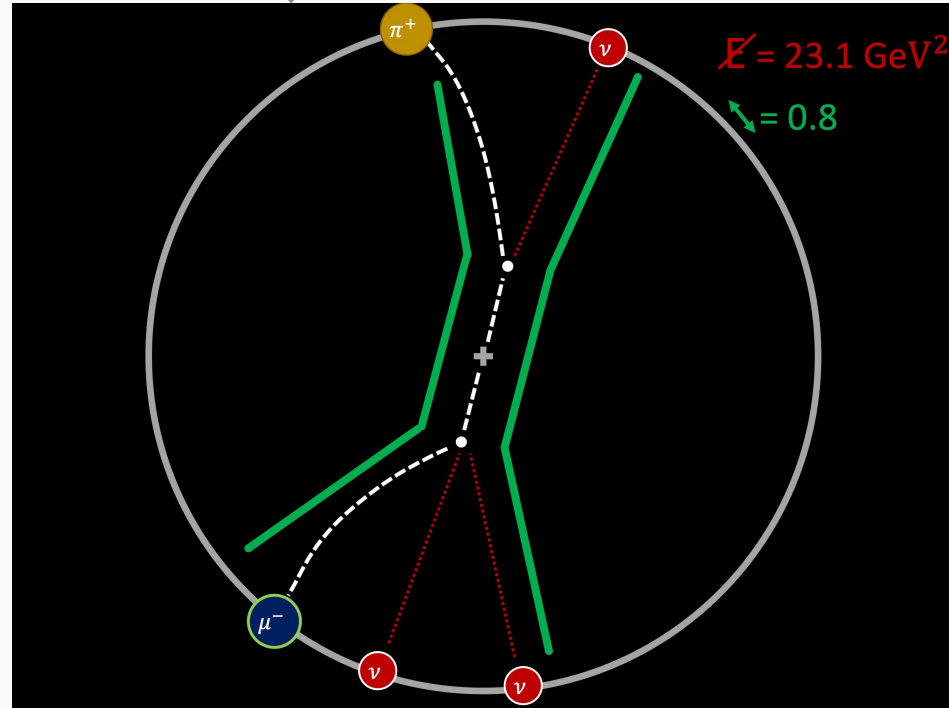
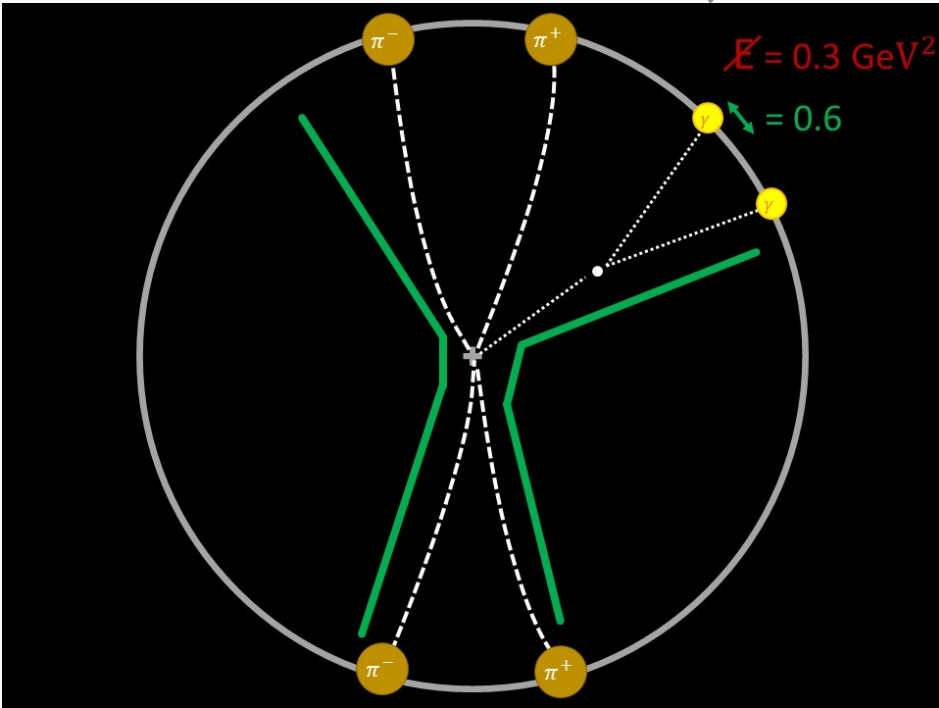
GERADLINIGKEIT: ↘
ELEKTRON/POSITRON VS b-QUARKS

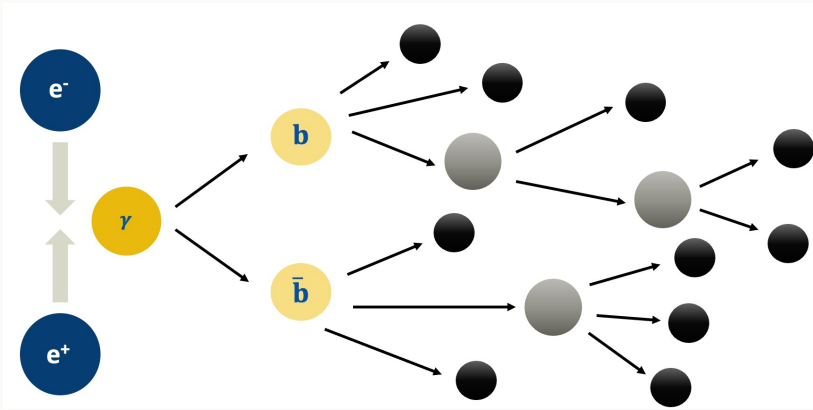


GERADLINIGKEIT: ↘
LEICHTE QUARKS VS b-QUARKS



GERADLINIGKEIT: ↘
LEICHTE QUARKS VS TAUONEN





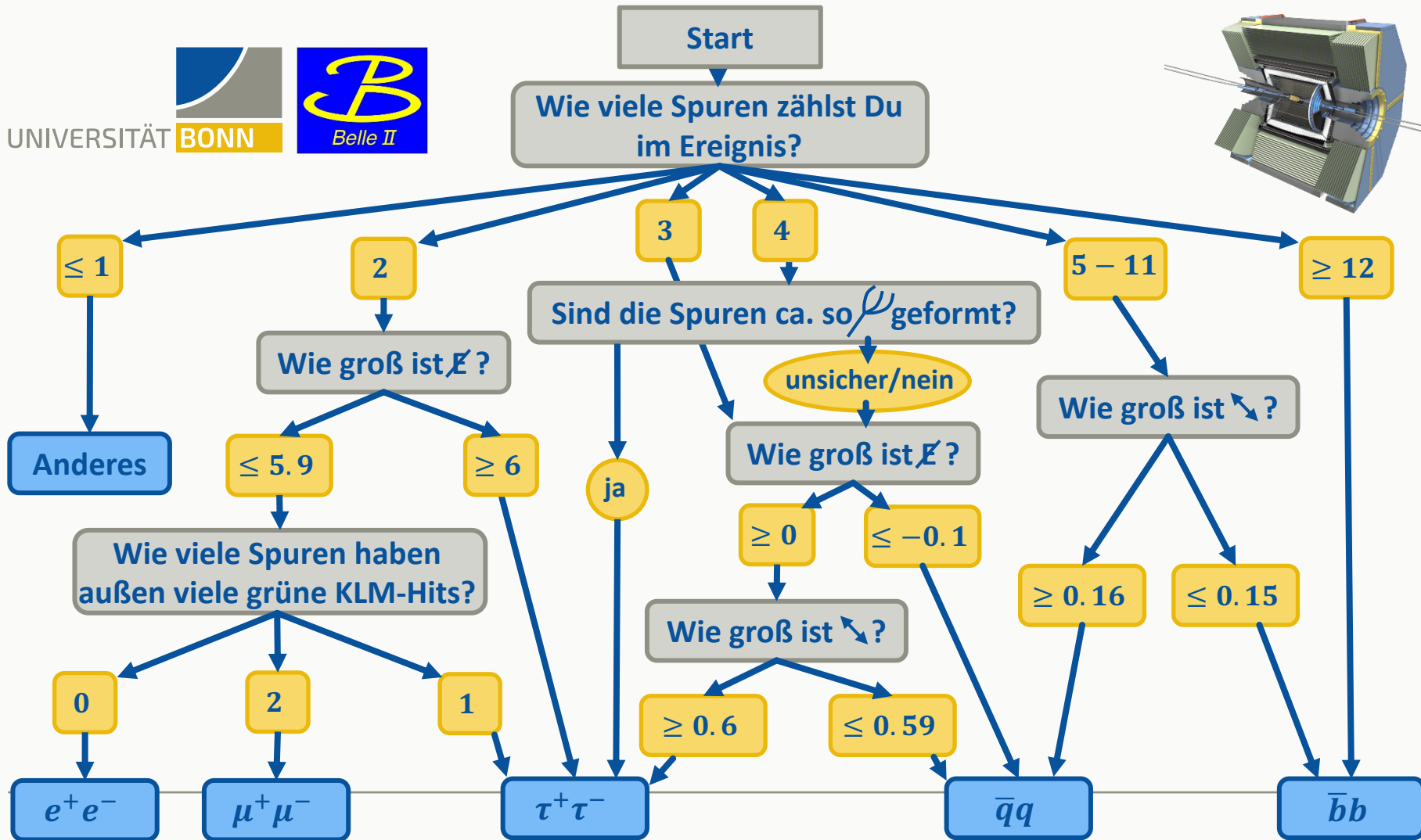
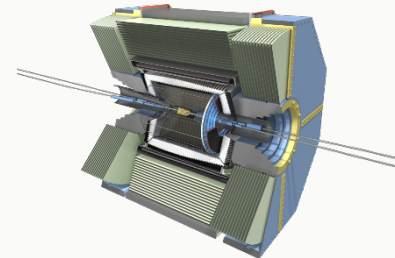
- Schwerstmögliche Teilchen
- Zerfallen in viele Teilchen und **alle Richtungen**
- Viel Energie \rightarrow viele Teilchen \rightarrow **viele Spuren**
- **Niedrige Geradlinigkeit** ↘

b-Quark- Antiquark- Ereignisse sind auch nicht in der R-Wert Formel enthalten!

$$R = \frac{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \bar{u}u, \bar{d}d, \bar{s}s, \bar{c}c)}{\frac{1}{2} [N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-) + N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+\tau^-)]}$$

→ Belle-II ist „B-Fabrik“: Produziert häufig schwere „B-Mesonen“ mit b-Quarks
(Kollisionsenergie des SuperKEKB- Beschleunigers „auf Resonanz eingestellt“)

NOCHMAL ALLES IM ÜBERBLICK



Ihr seid an der Reihe!