



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

Belle II Masterclass

Prepared by Bonn Univeristy



WIE ERZEUGEN WIR TEILCHEN?

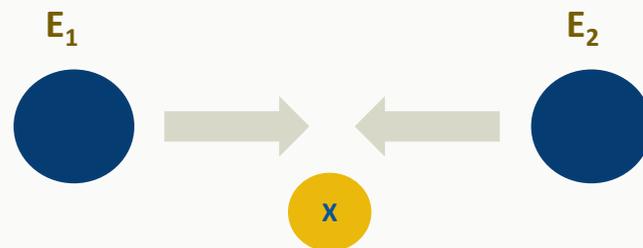
- Prinzip am Beispiel Teilchen X mit bekannter Masse m_X :
 - Wollen die **Äquivalenz von Energie und Masse** nutzen:
$$E = m_X c^2$$
 - Müssen eine Energie **E** aufbringen

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

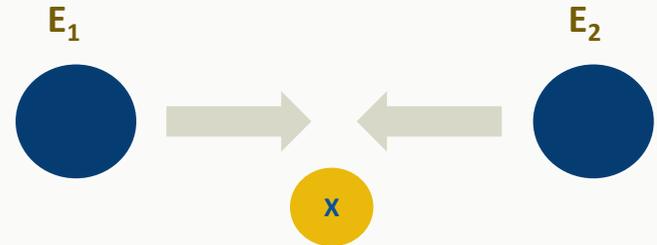


WIE ERZEUGEN WIR TEILCHEN?

- 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!



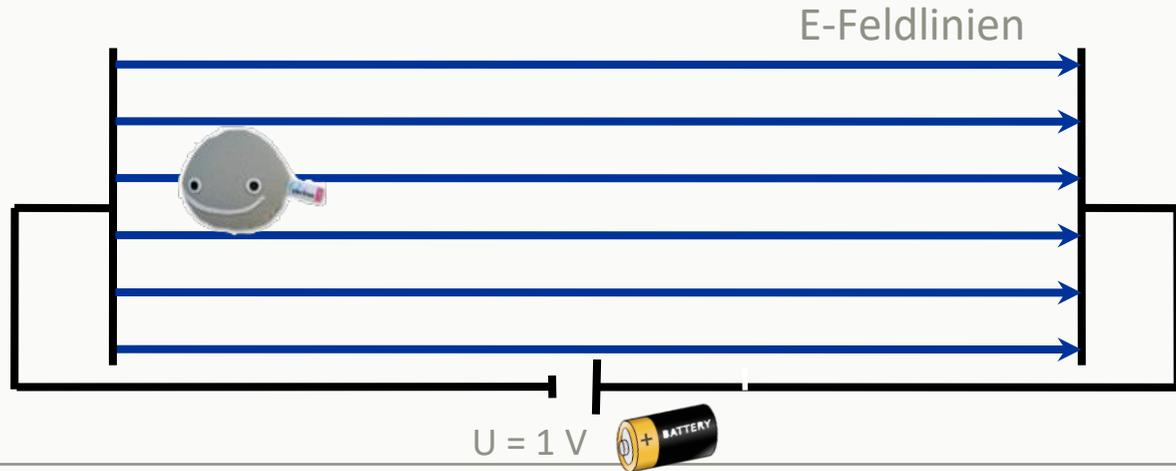


BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

– Ein euch bekanntes Prinzip:

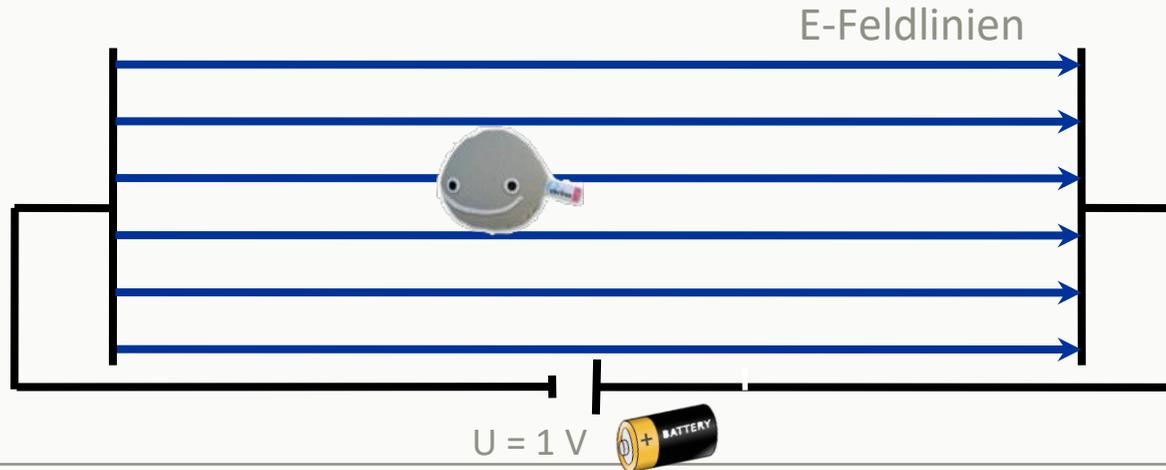
BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

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



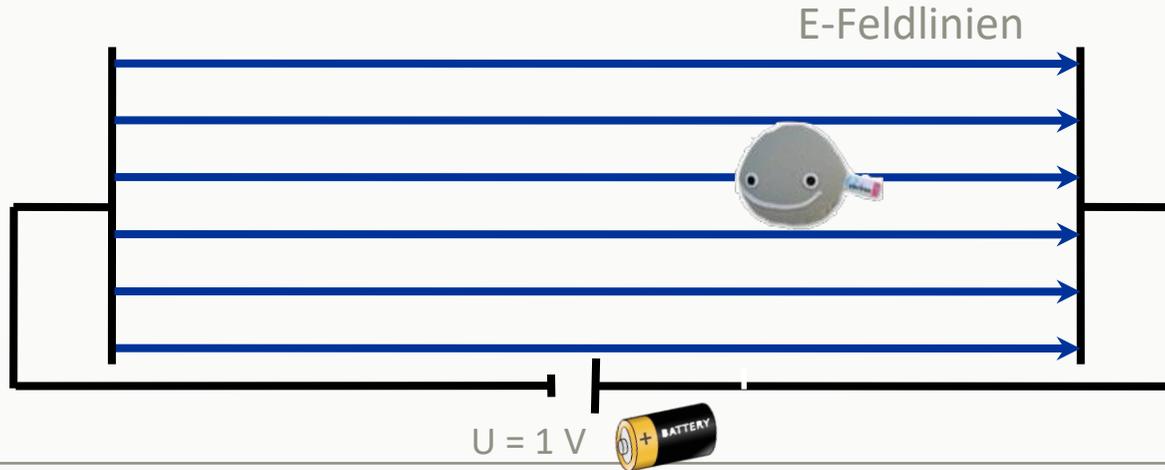
BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

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



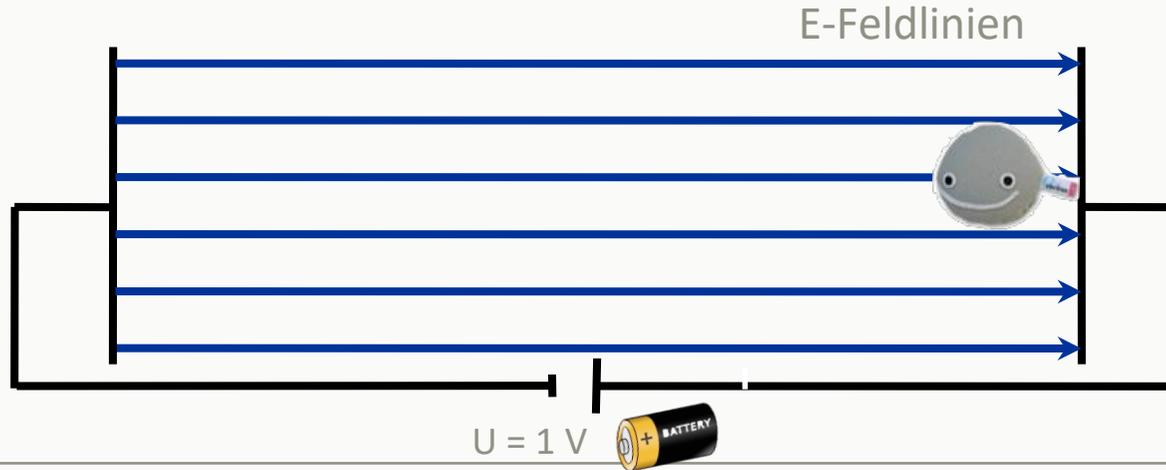
BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

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



BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

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

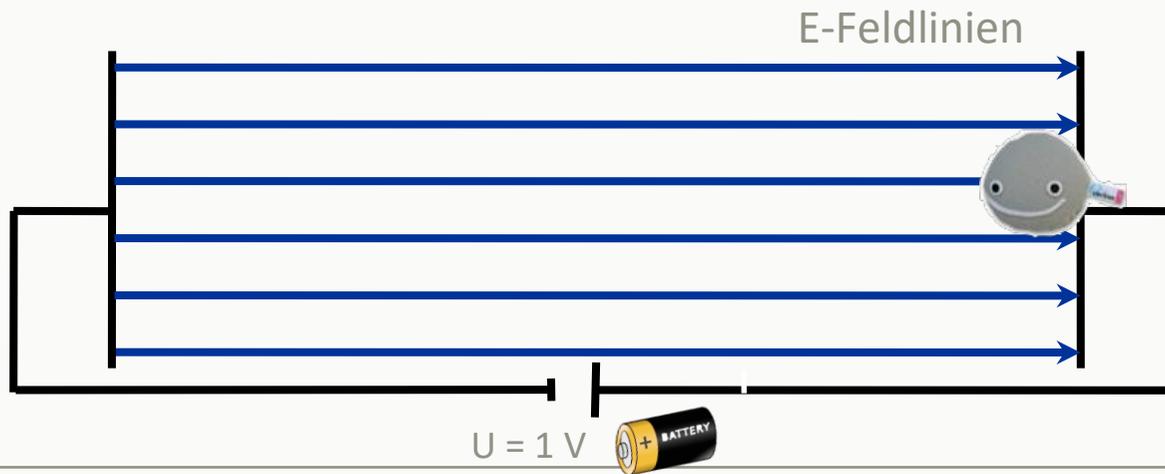


BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

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

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

- **Wie kriegen wir mehr Energie?**

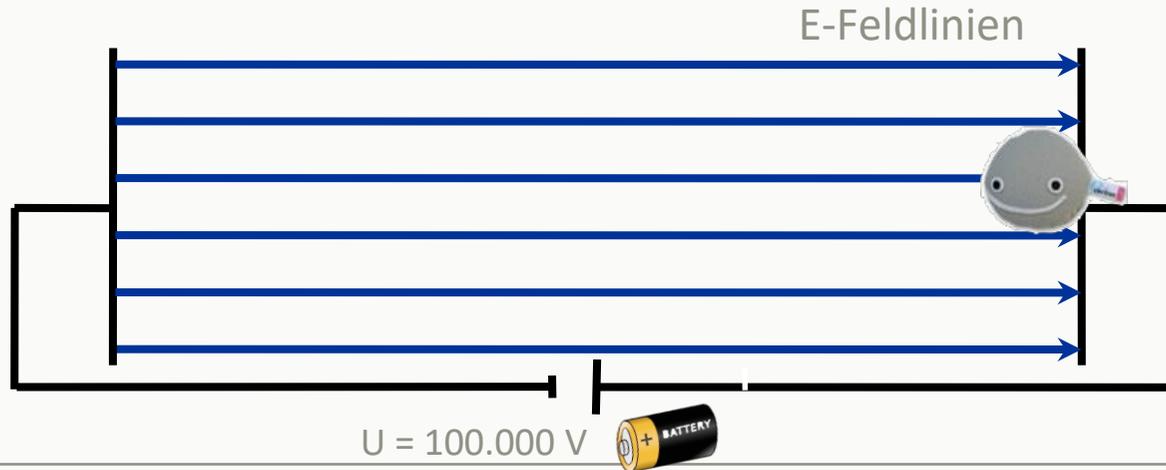


BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

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

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

- **Wie kriegen wir mehr Energie?**

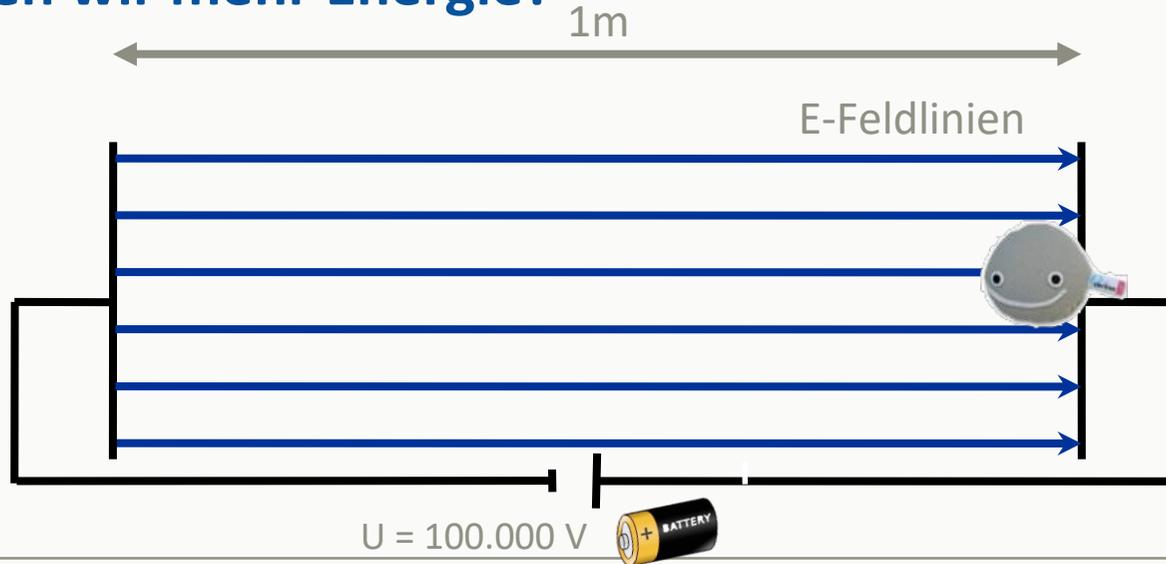


BESCHLEUNIGUNG DER TEILCHEN

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

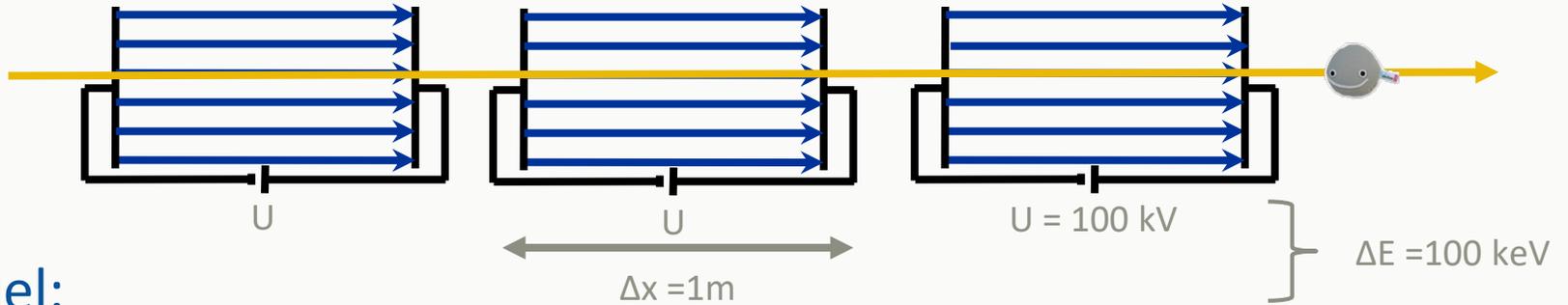
Hier: $E = 100 \text{ keV}$

- **Wie kriegen wir mehr Energie?**



LINEARBESCHLEUNIGER

– Können viele dieser Zellen hintereinander anwenden

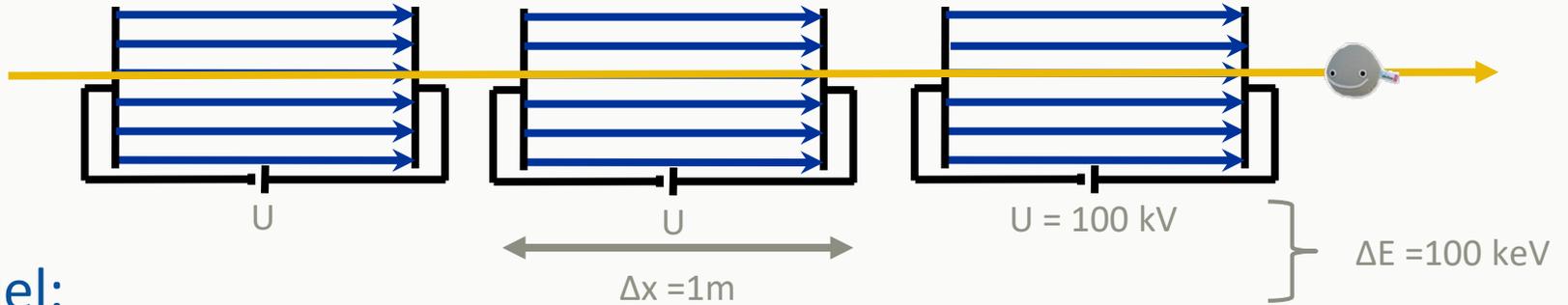


Beispiel:

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



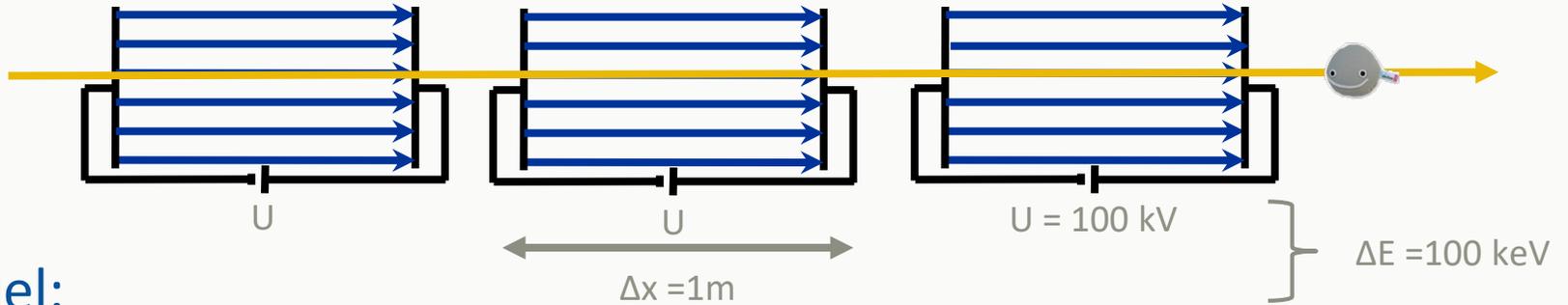
Beispiel:

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



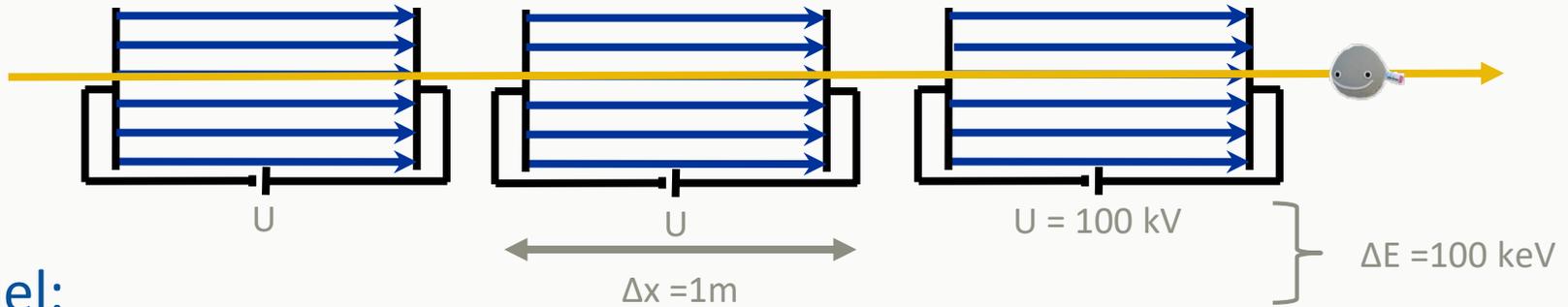
Beispiel:

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 $N = E/\Delta E = 110.000 \text{ Zellen}$

LINEARBESCHLEUNIGER

- Können viele dieser Zellen hintereinander anwenden



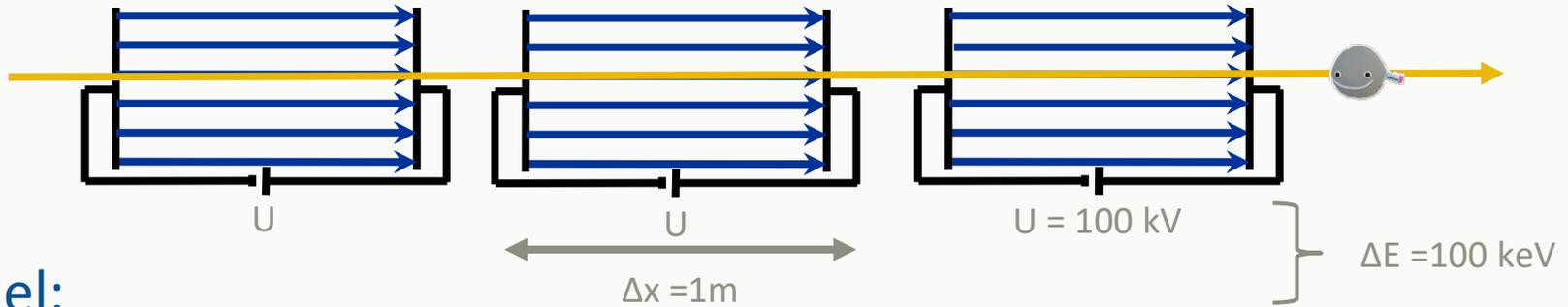
Beispiel:

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 $L = N \cdot \Delta x = 110 \text{ km}$



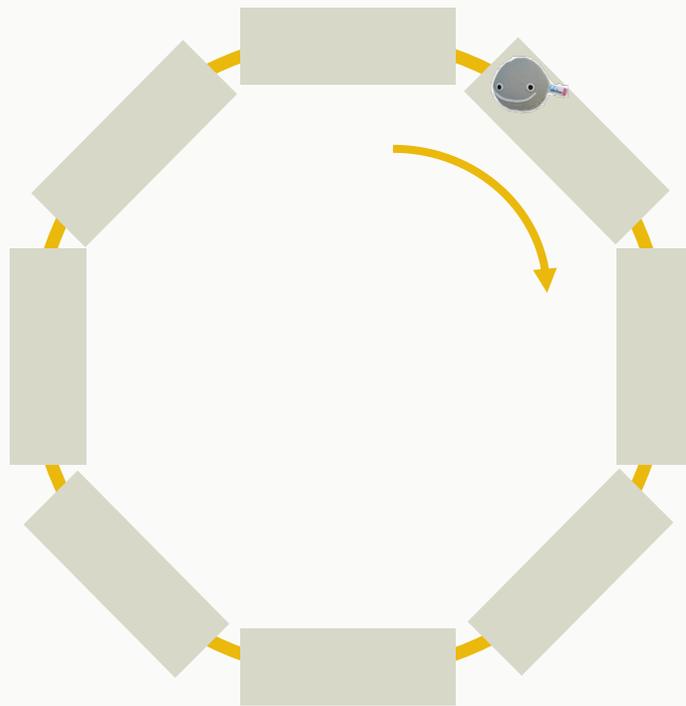
- Hohe Energien brauchen sehr lange Beschleuniger
- **Bessere Idee?**



WAS KÖNNEN WIR STATTDESSEN MACHEN?

RINGBESCHLEUNIGER

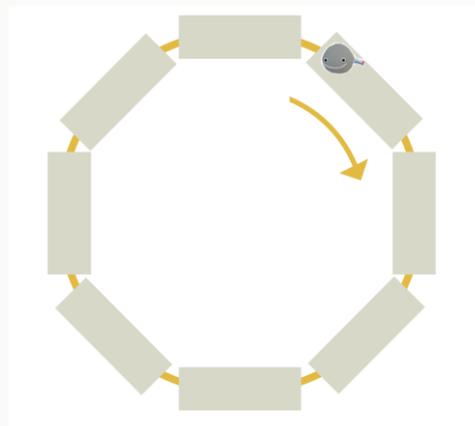
- Die Zellen **kreisförmig** anordnen
 - Können so mehrmals durchlaufen werden
- Aber wie lenkt man Teilchen auf eine Kreisbahn?



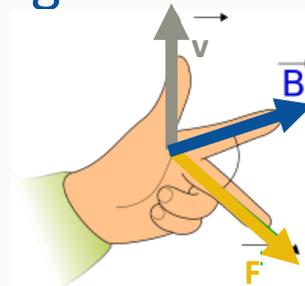
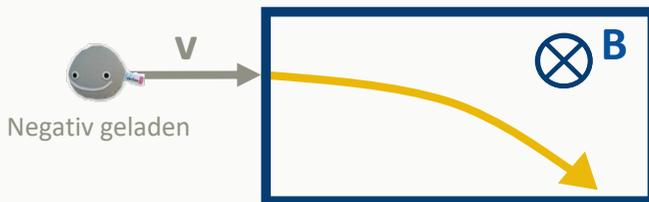
WAS KÖNNEN WIR STATTDESSEN MACHEN?

RINGBESCHLEUNIGER

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

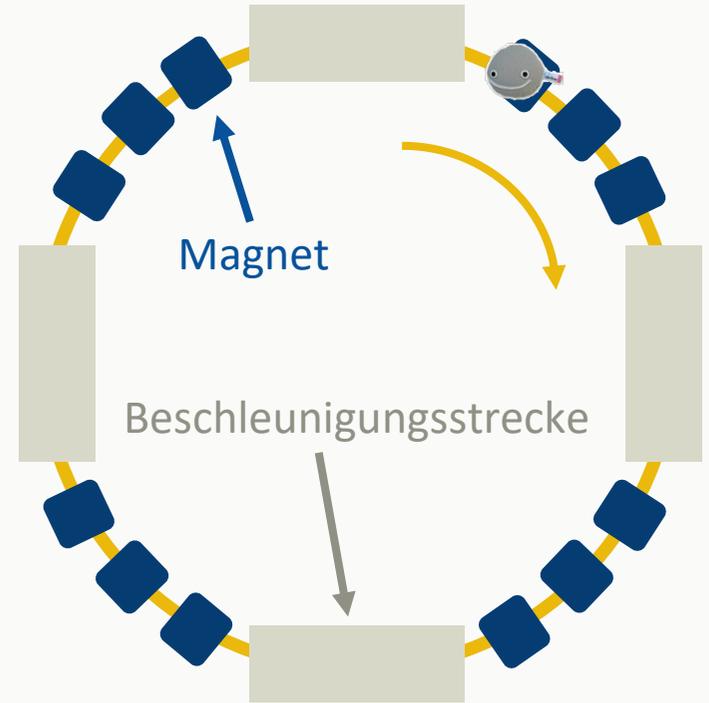


~~Rechte~~ Linke Hand Regel:



RINGBESCHLEUNIGER

- Im Endeffekt:
 - Gerade Strecken zum Beschleunigen
 - Gekrümmte Strecken zum Ablenken
- Kennt ihr Beispiele für Ringbeschleuniger?





LHC

- Beschleuniger am CERN Forschungszentrum in Genf, Schweiz
- Protonen werden jeweils auf 7 TeV beschleunigt
- Ringe haben einen Umfang von 27 km
- Tunnel ist 100 m unter der Erde
- Beschleuniger mit der höchsten Energie



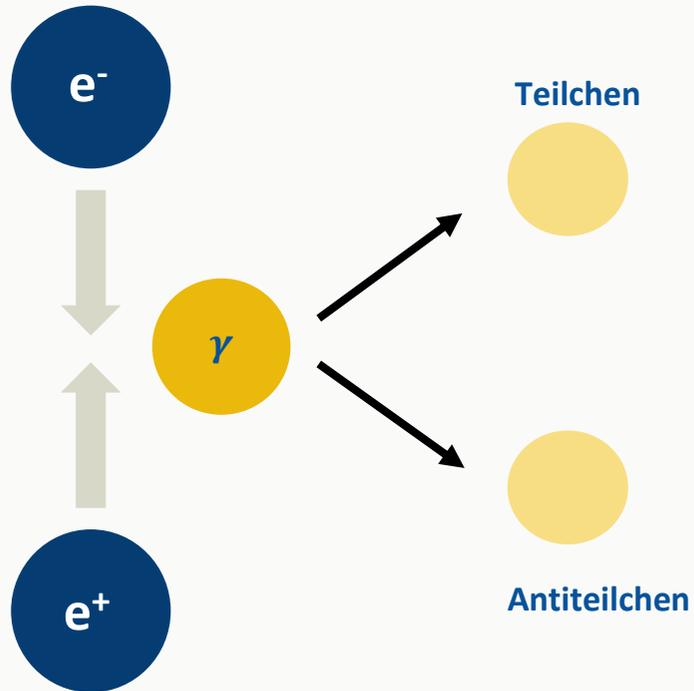


SUPER-KEKB

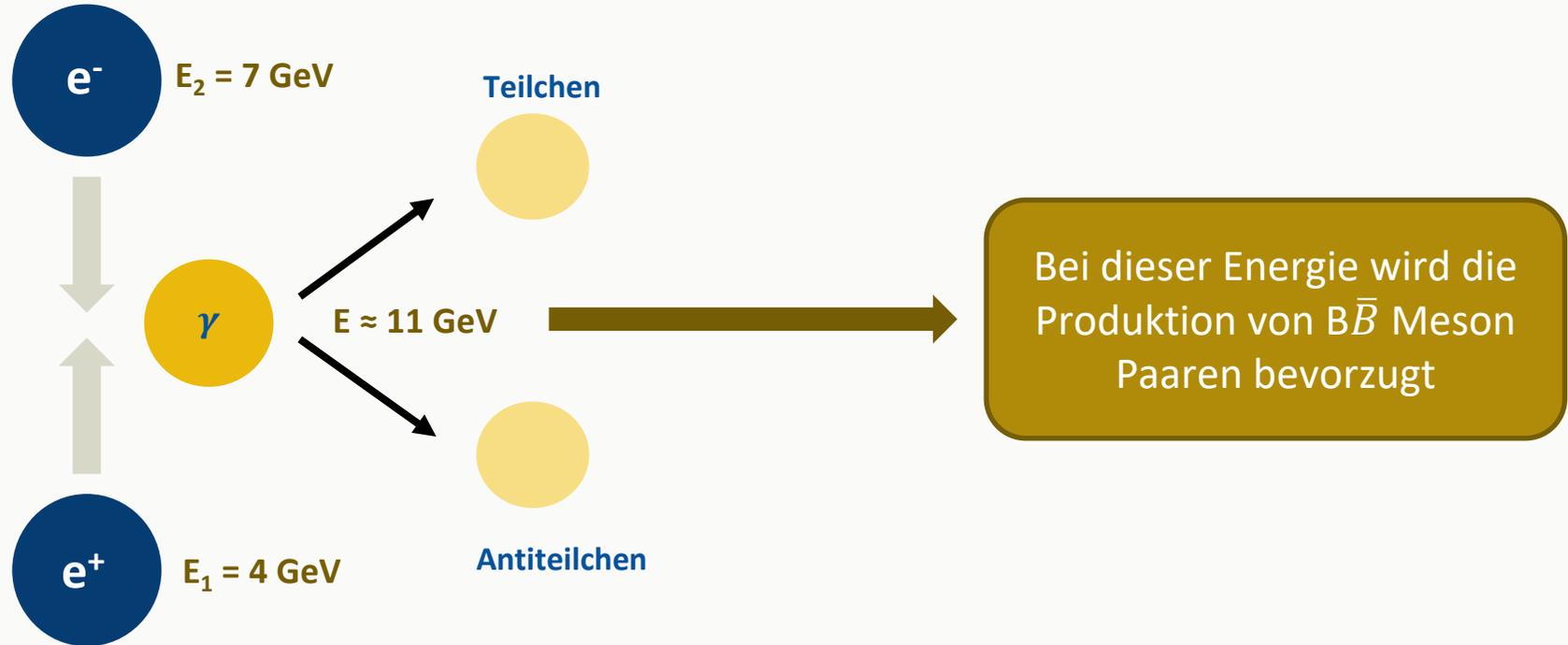
- Beschleuniger am KEK Forschungszentrum in Tsukuba, Japan
 - Ca. 80 km nördlich von Tokio
- Positronen und Elektronen werden jeweils auf 4 und 7 GeV beschleunigt
- Ringe haben einen Umfang von 3 km
- Tunnel ist 10 m unter der Erde
- Beschleuniger mit der höchsten Luminosität



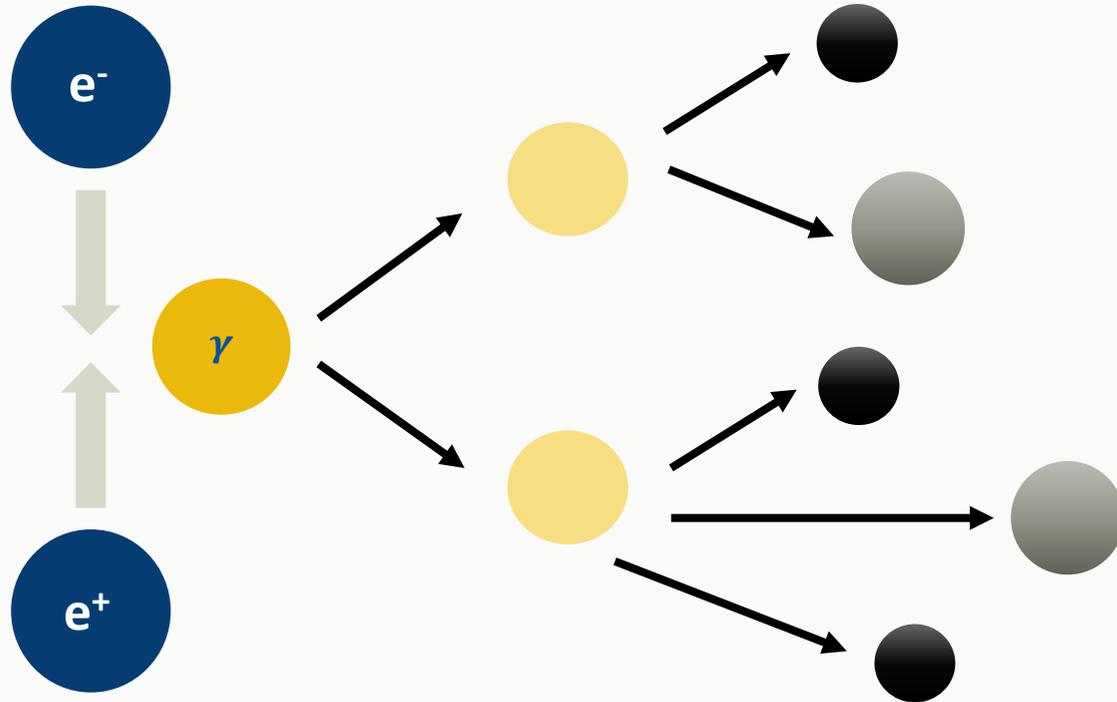
WAS PASSIERT BEI DER KOLLISION?



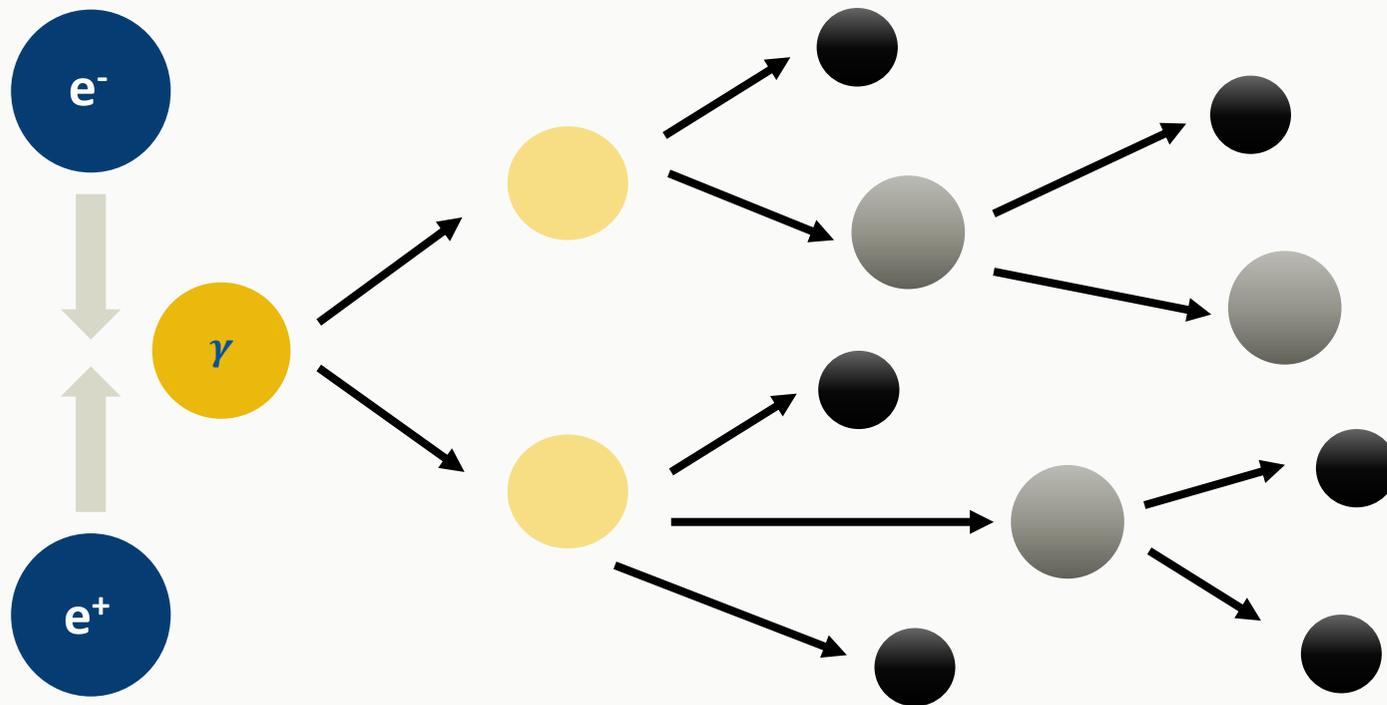
WAS PASSIERT BEI DER KOLLISION?



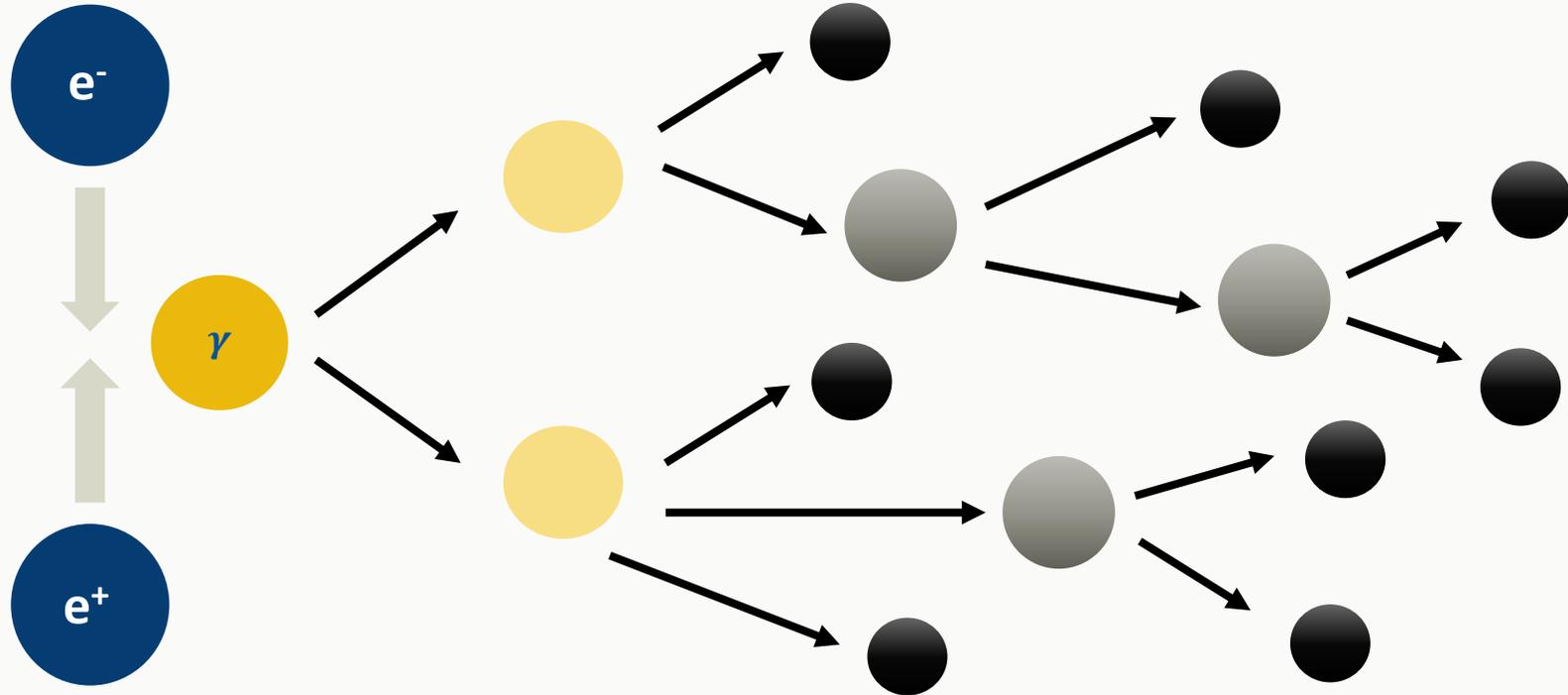
WAS PASSIERT BEI DER KOLLISION?



WAS PASSIERT BEI DER KOLLISION?

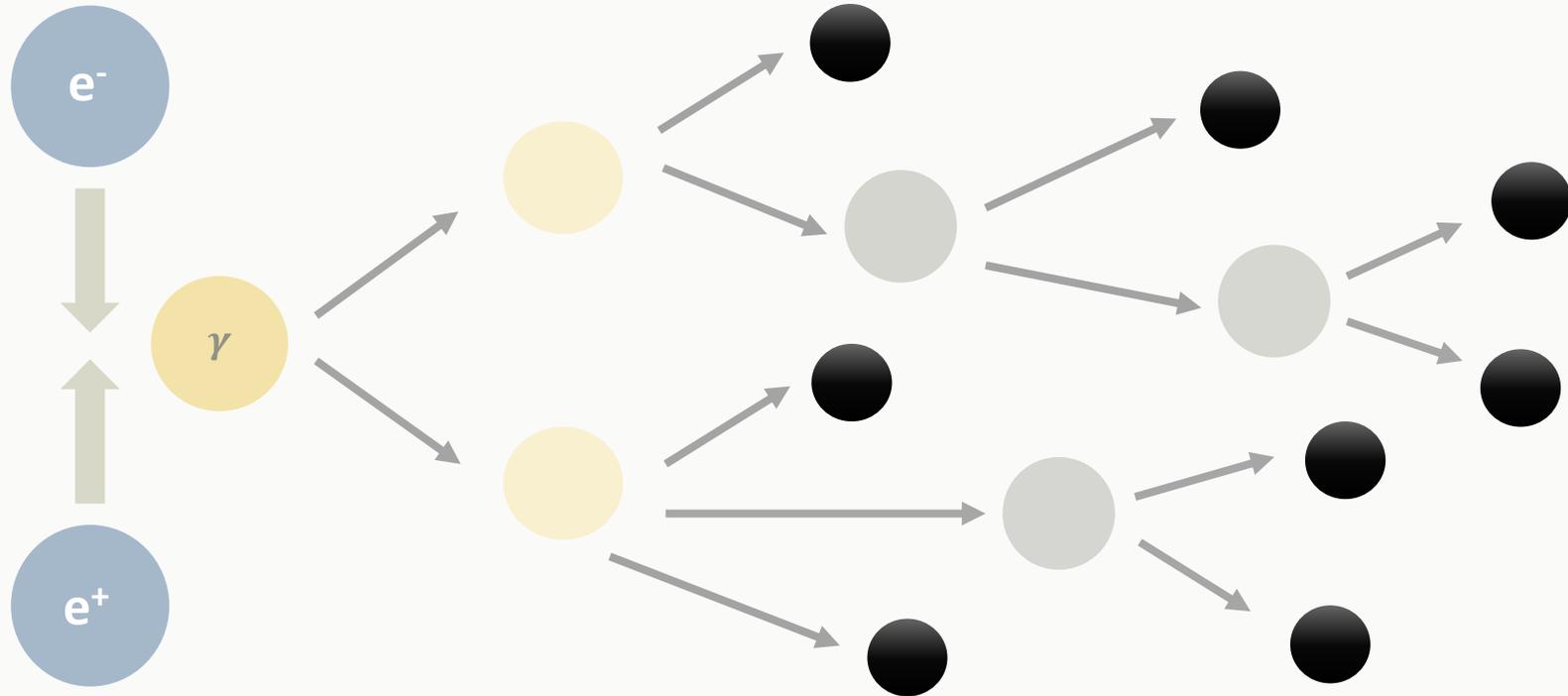


WELCHE TEILCHEN SEHEN WIR?



WELCHE TEILCHEN SEHEN WIR?

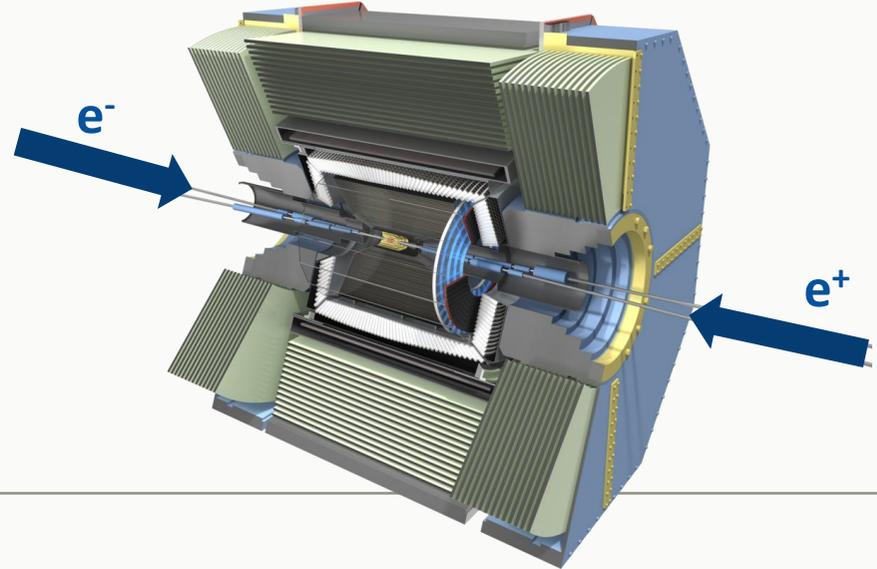
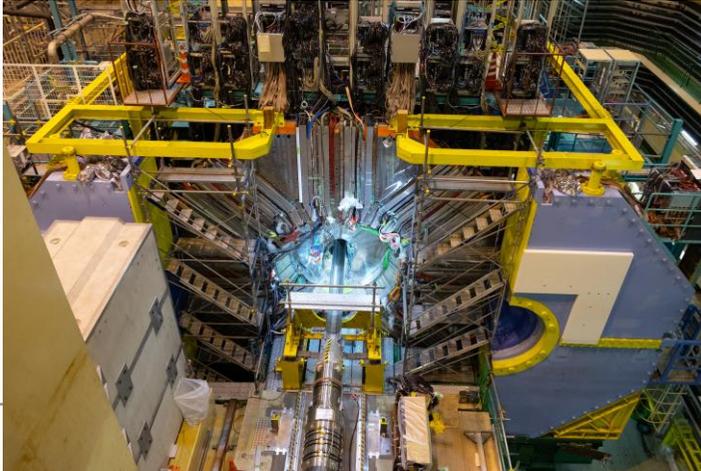
Langlebige Teilchen





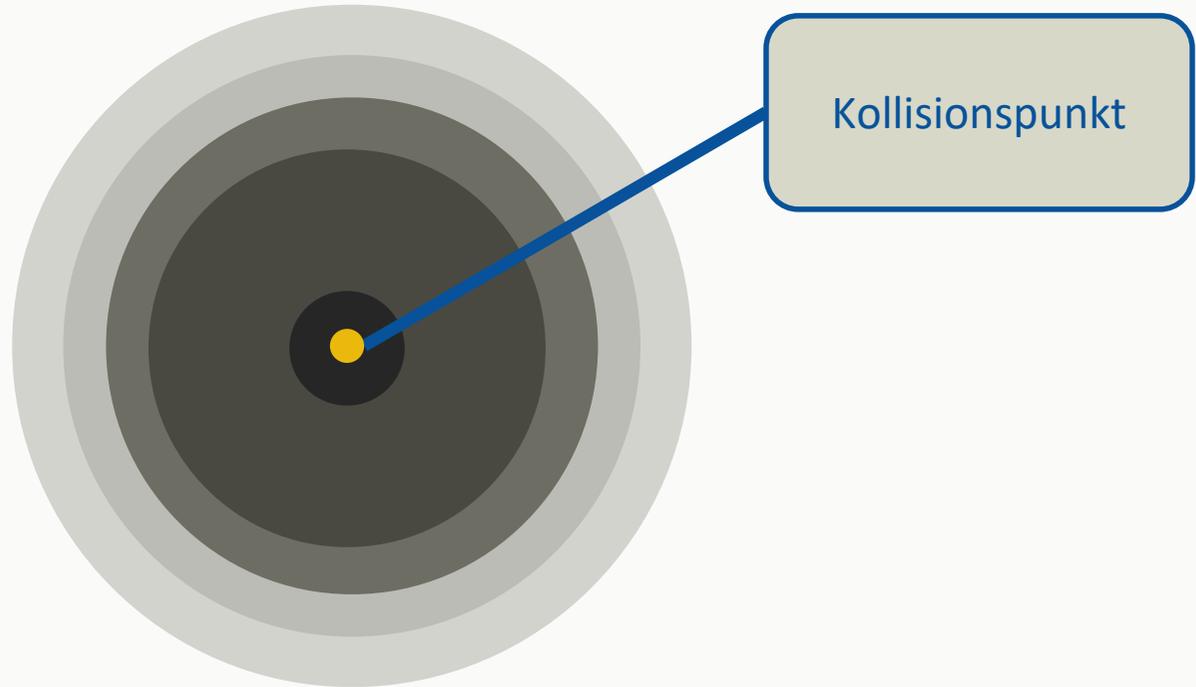
DER BELLE II DETEKTOR

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



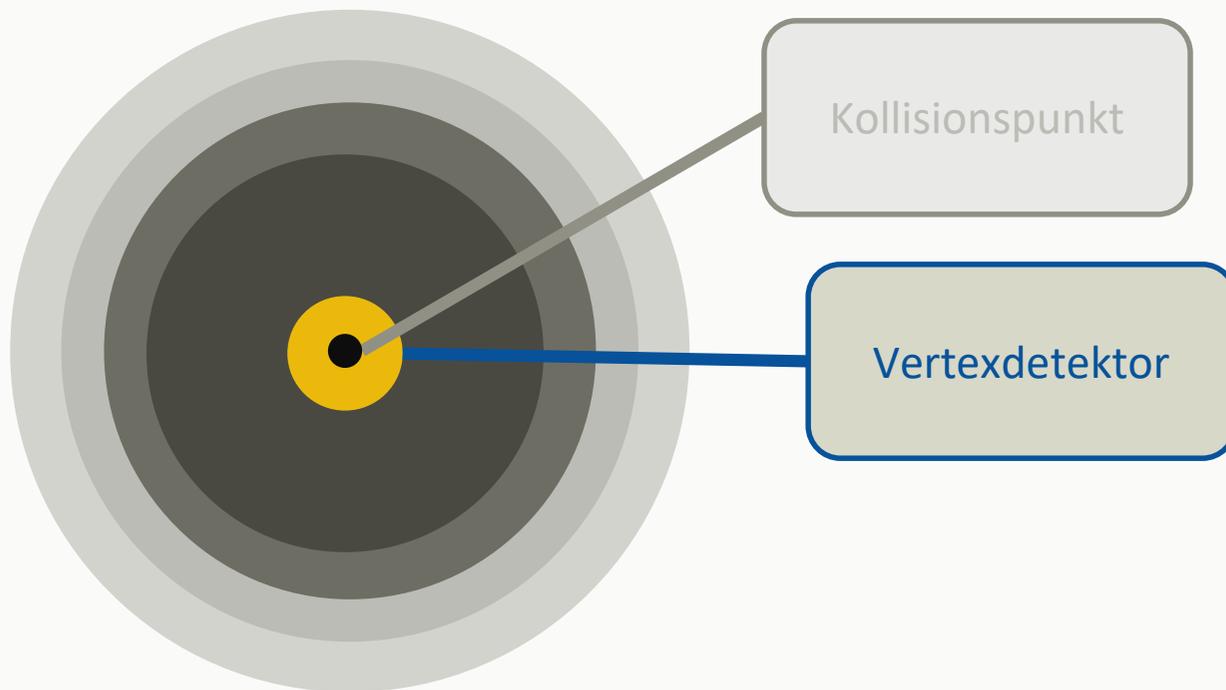
UND WOHER KOMMEN NUN DIESE SIGNALE?

- Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt



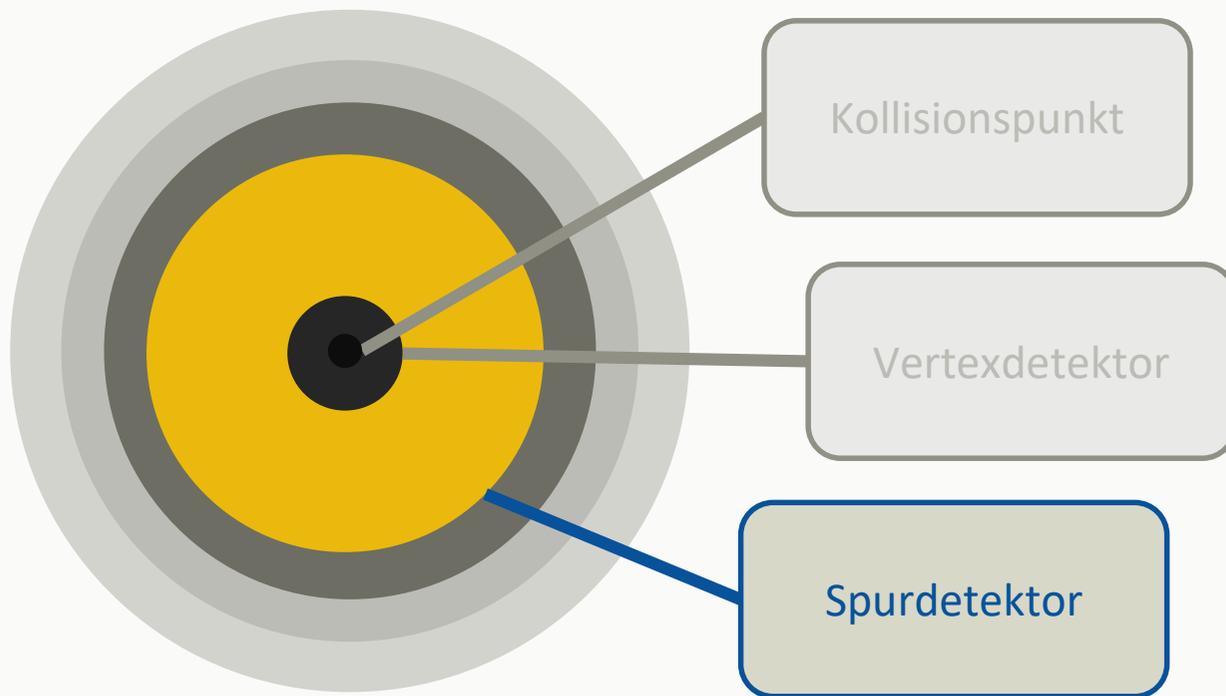
UND WOHER KOMMEN NUN DIESE SIGNALE?

- Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt



UND WOHER KOMMEN NUN DIESE SIGNALE?

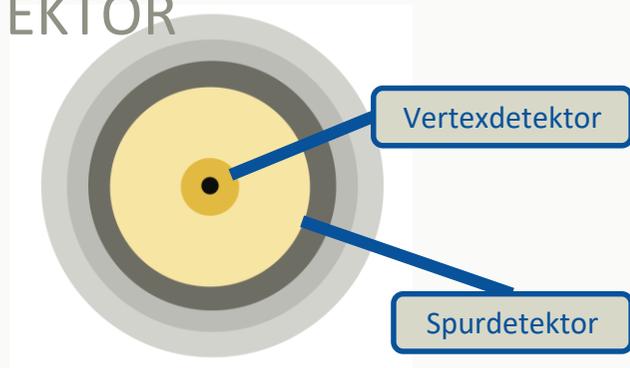
- Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt





- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale

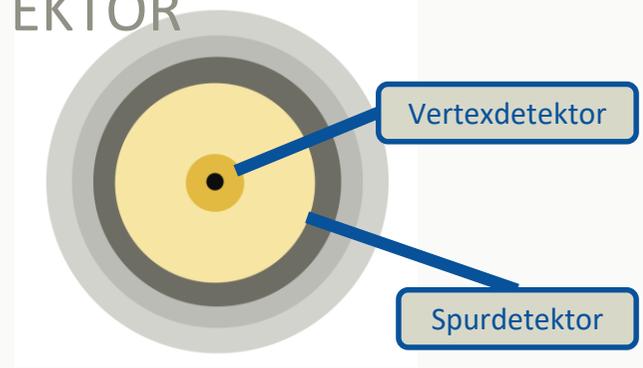
VERTEX- UND SPURDETEKTOR





- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale

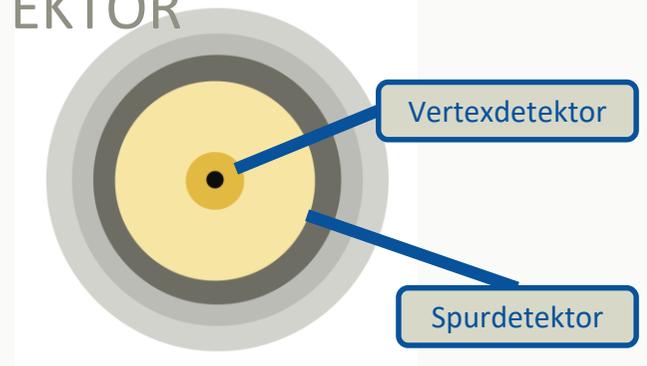
VERTEX- UND SPURDETEKTOR





- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale

VERTEX- UND SPURDETEKTOR



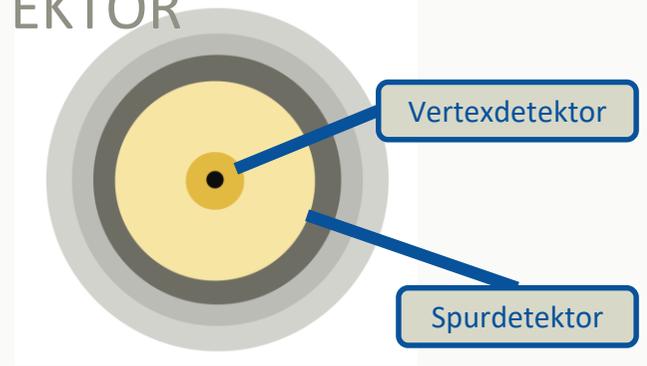
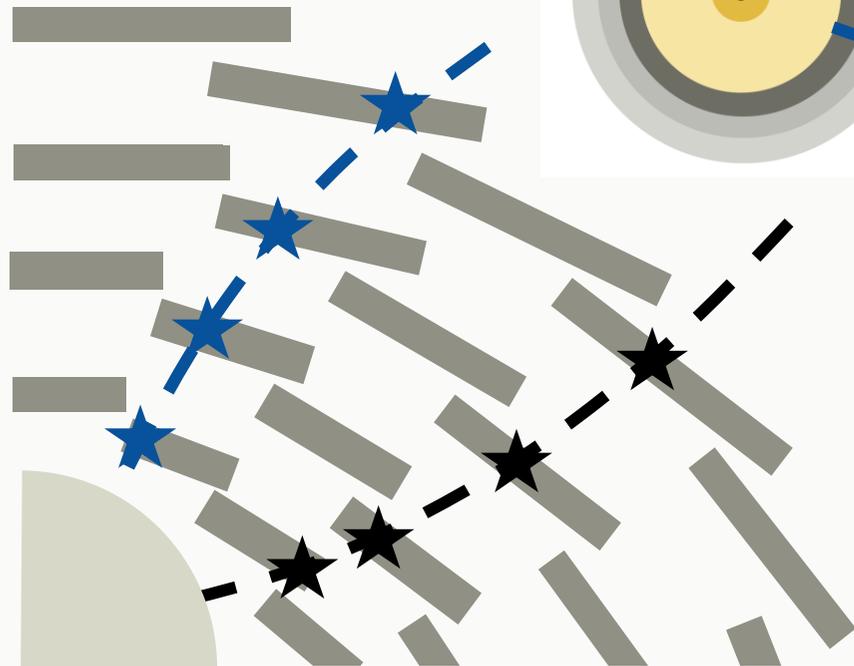
Vertexdetektor

Spurdetektor



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

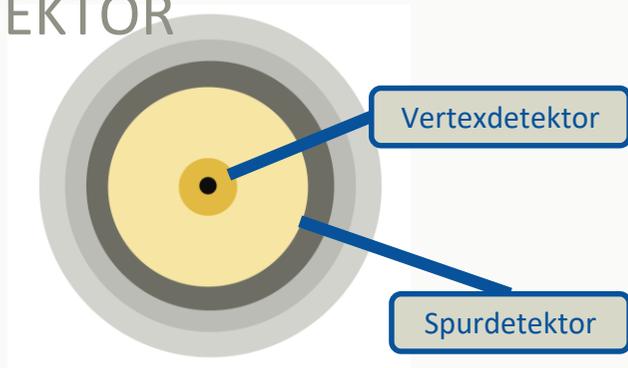
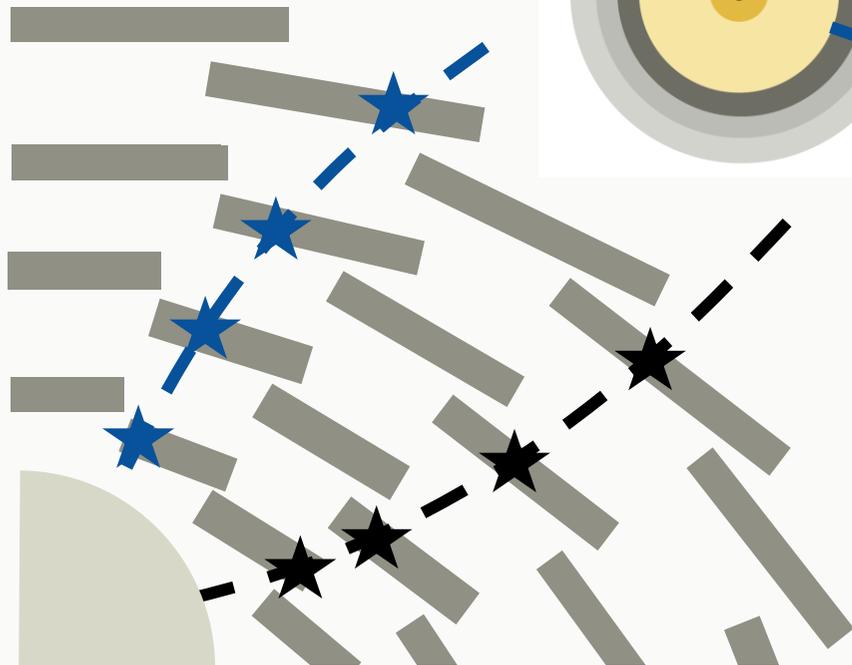
VERTEX- UND SPURDETEKTOR





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

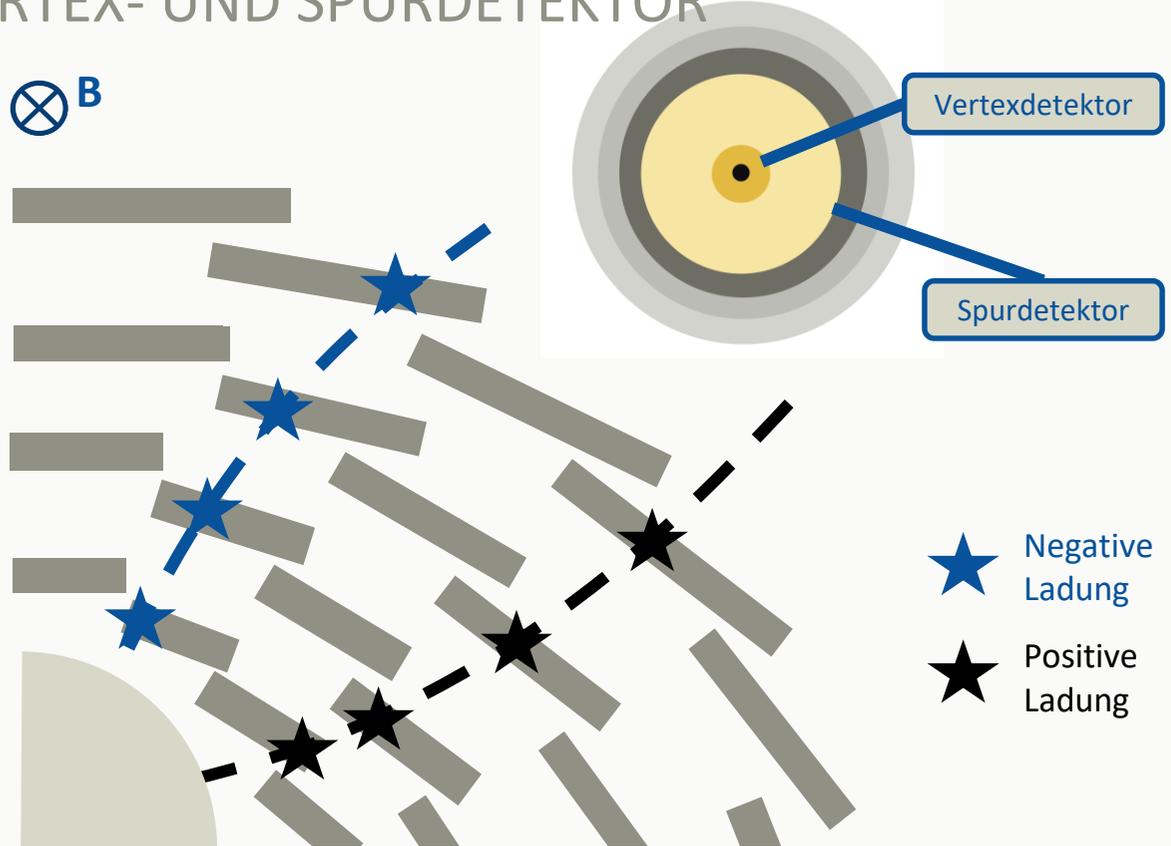
VERTEX- UND SPURDETEKTOR





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

VERTEX- UND SPURDETEKTOR

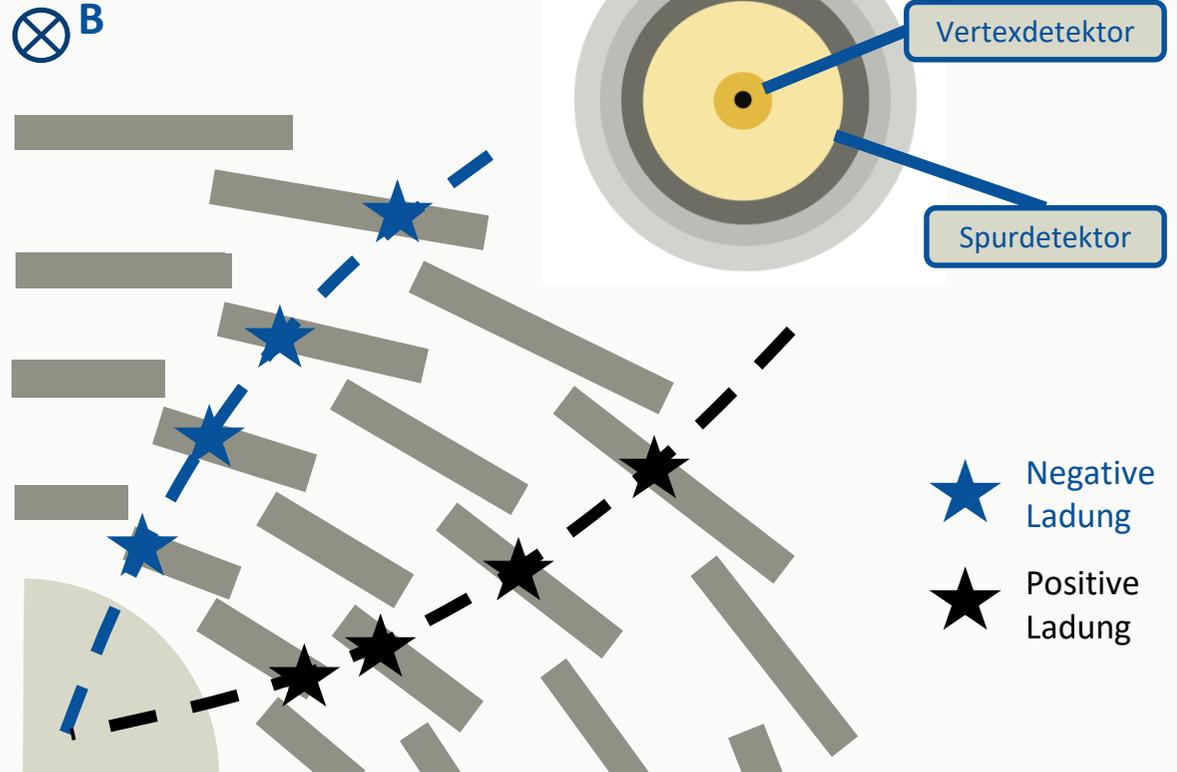


- ★ Negative Ladung
- ★ Positive Ladung



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

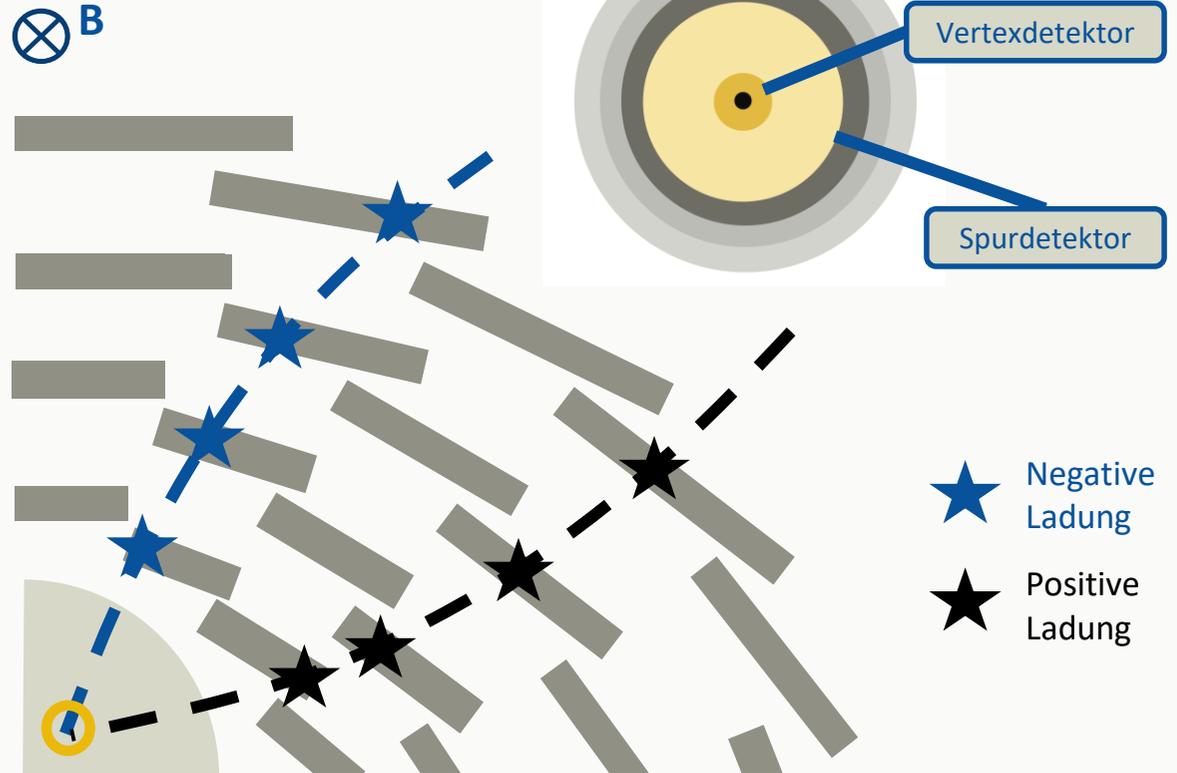
VERTEX- UND SPURDETEKTOR





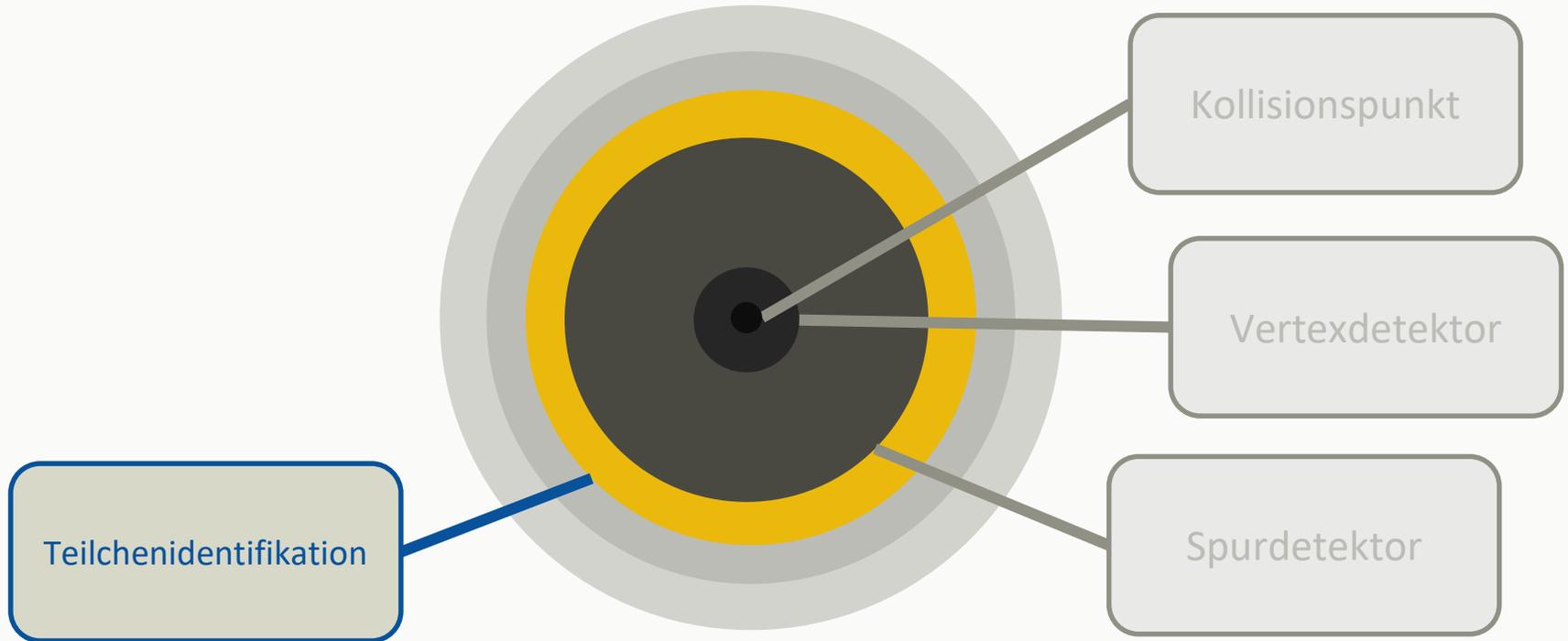
- Geladene Teilchen hinterlassen elektrische Signale
- Daraus können Spuren rekonstruiert werden
- Zusätzlich kann der Vertex definiert werden

VERTEX- UND SPURDETEKTOR



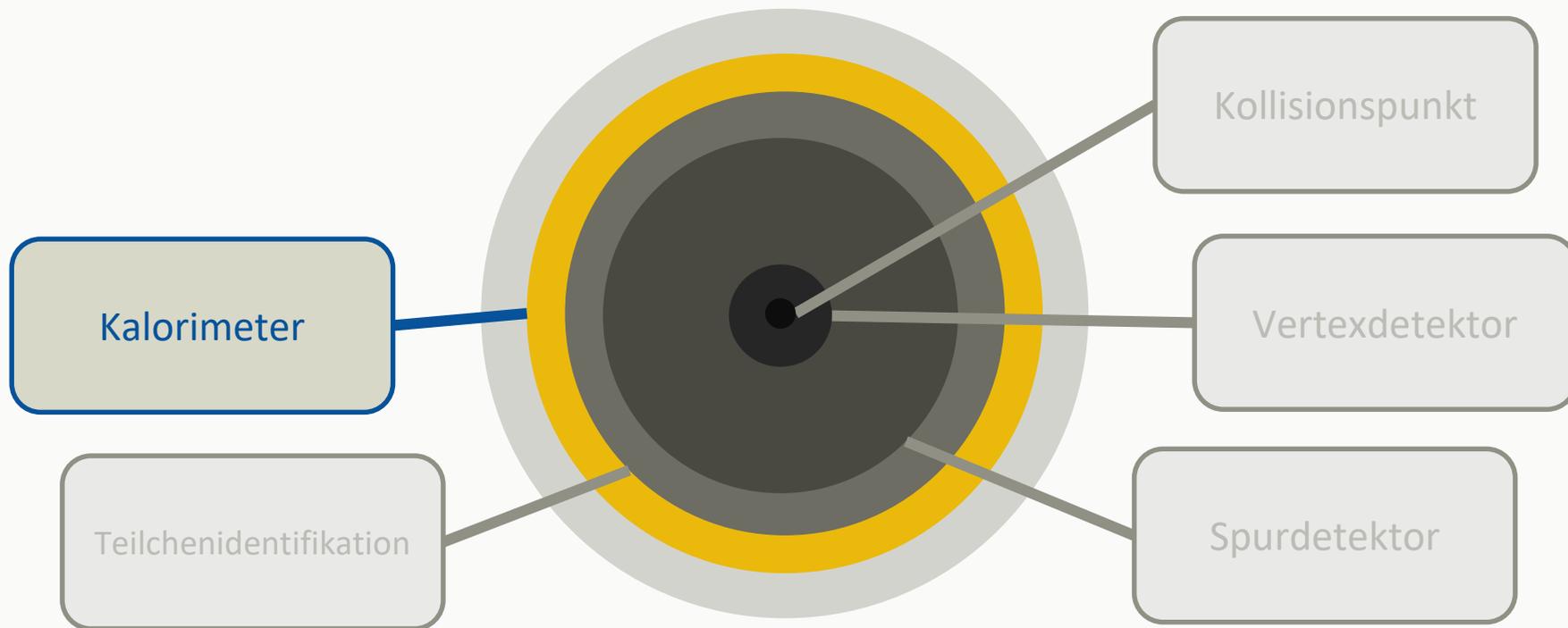
UND WOHER KOMMEN NUN DIESE SIGNALE?

- Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt



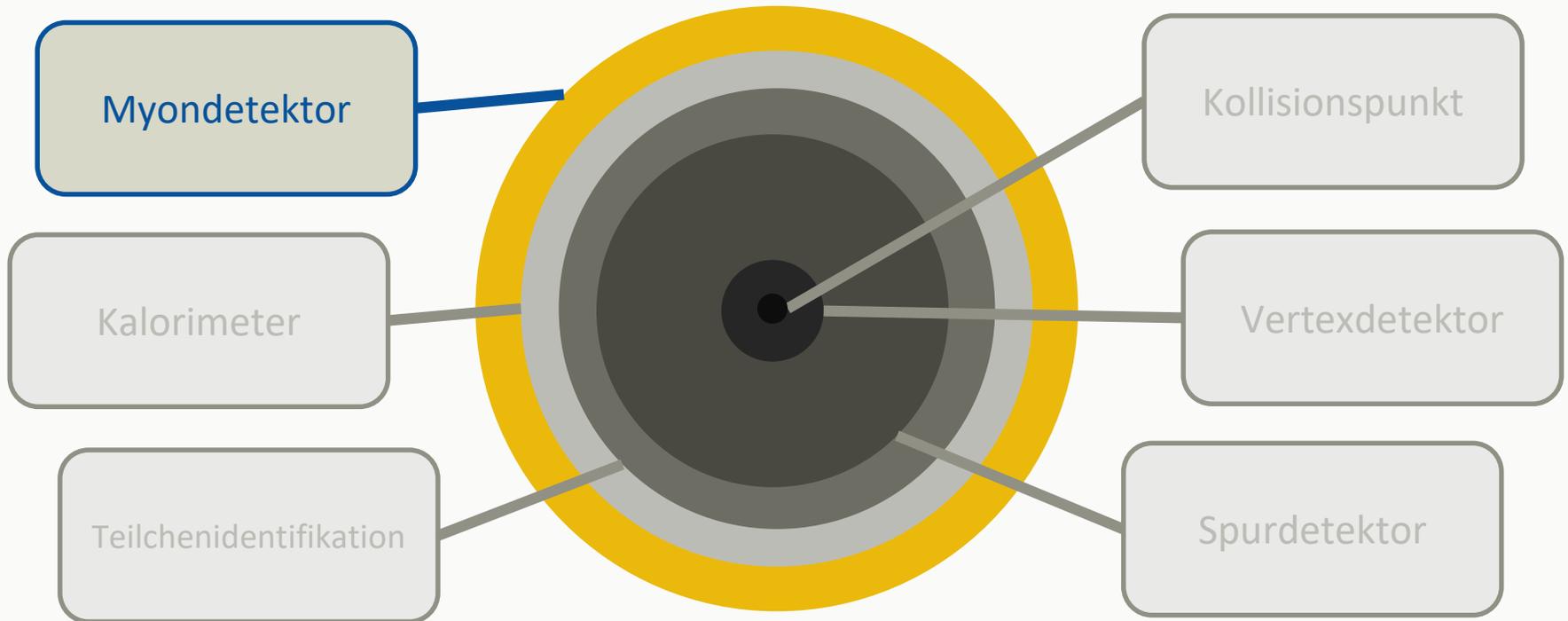
UND WOHER KOMMEN NUN DIESE SIGNALE?

- Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionpunkt



UND WOHER KOMMEN NUN DIESE SIGNALE?

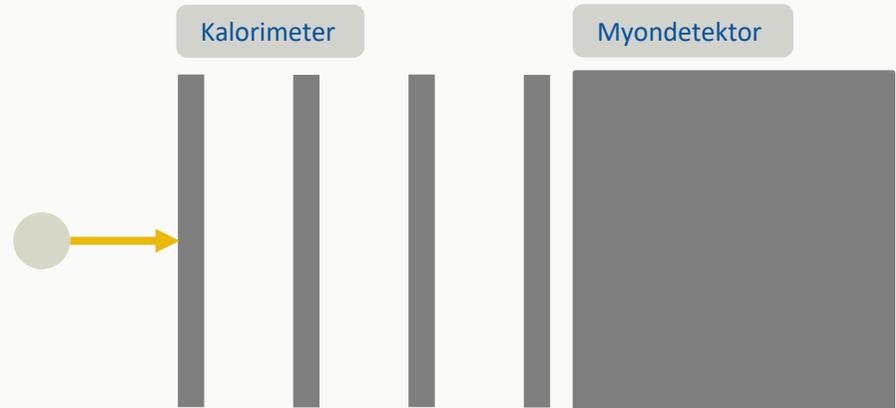
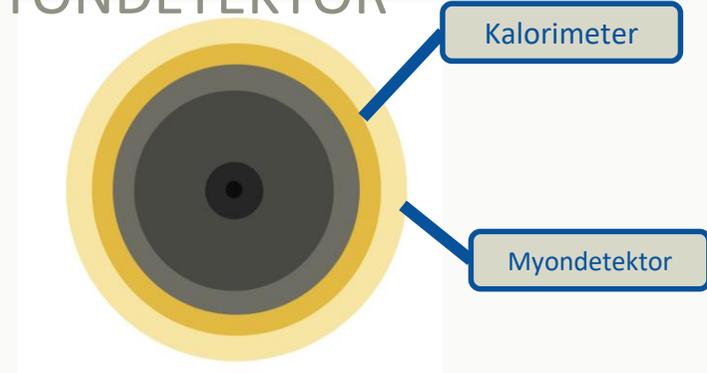
- Detektor im Zwiebelschalenprinzip um den Kollisionspunkt





KALORIMETER UND MYONDETEKTOR

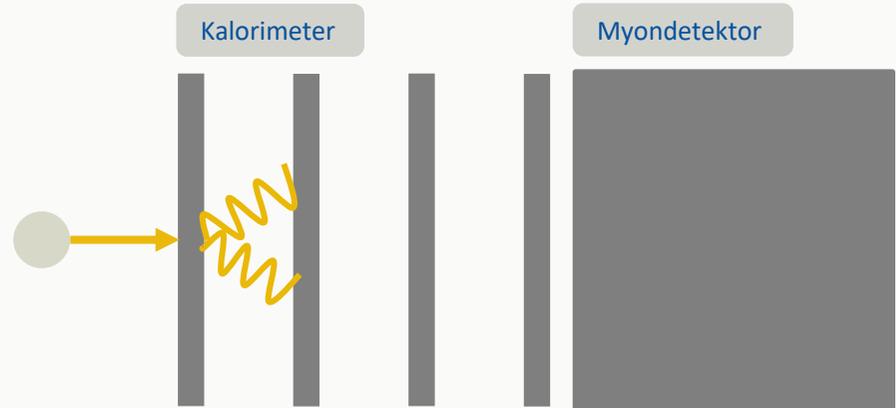
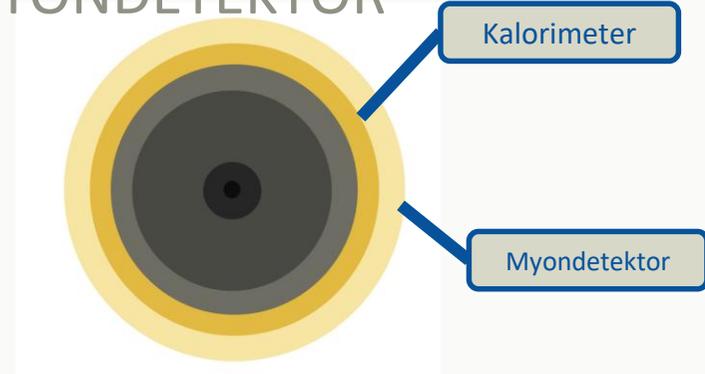
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie





KALORIMETER UND MYONDETEKTOR

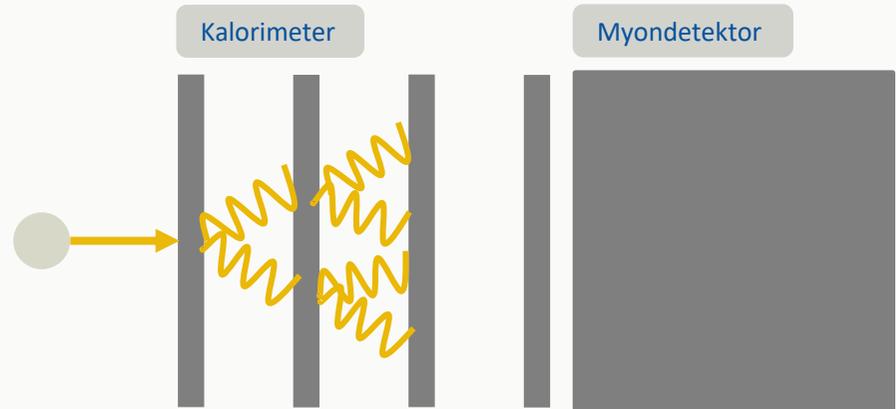
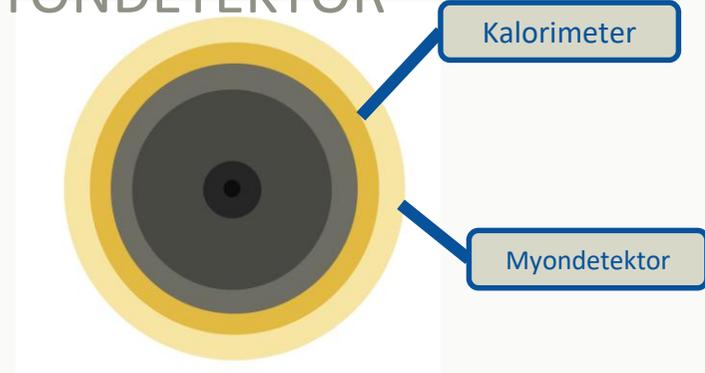
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie





KALORIMETER UND MYONDETEKTOR

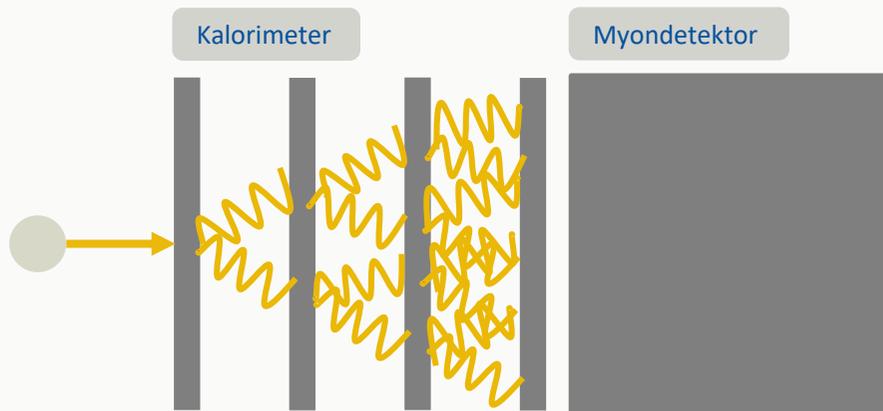
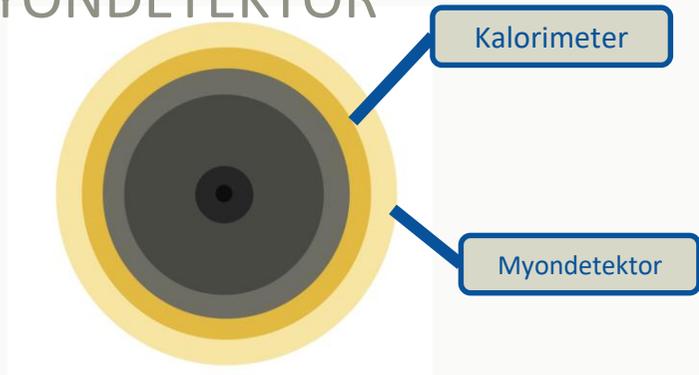
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie





KALORIMETER UND MYONDETEKTOR

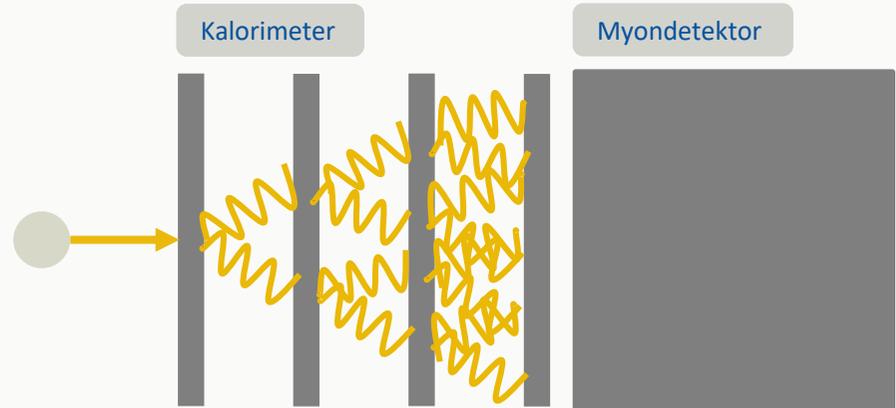
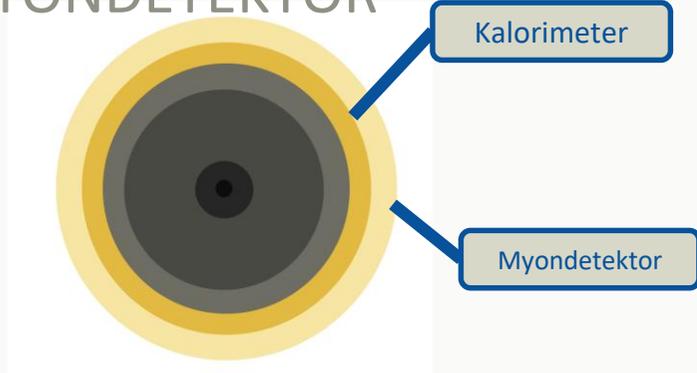
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie
 - Und werden hier gestoppt





KALORIMETER UND MYONDETEKTOR

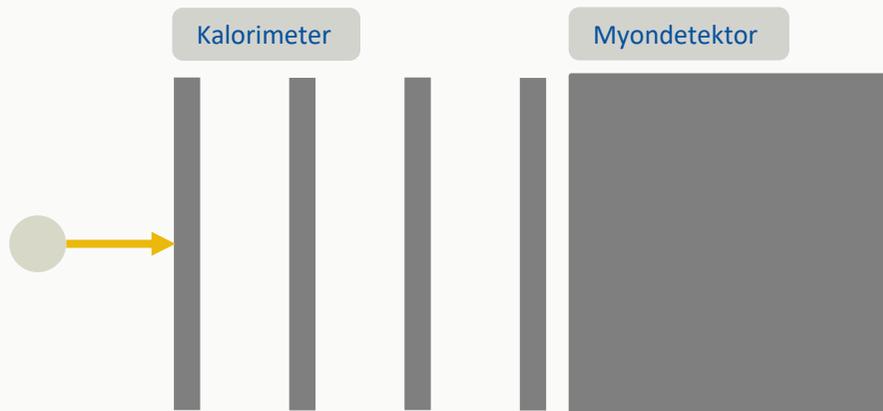
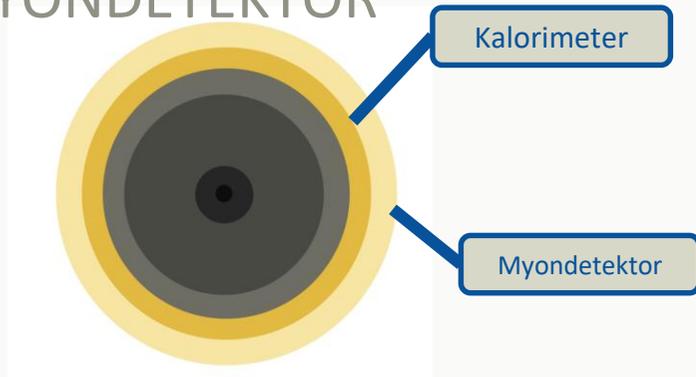
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie
 - Und werden hier gestoppt
 - Es gibt Kalorimeter für Elektronen und Photonen (kurze Reichweite, CsI)
 - Und für Hadronen (lange Reichweite, Eisen)





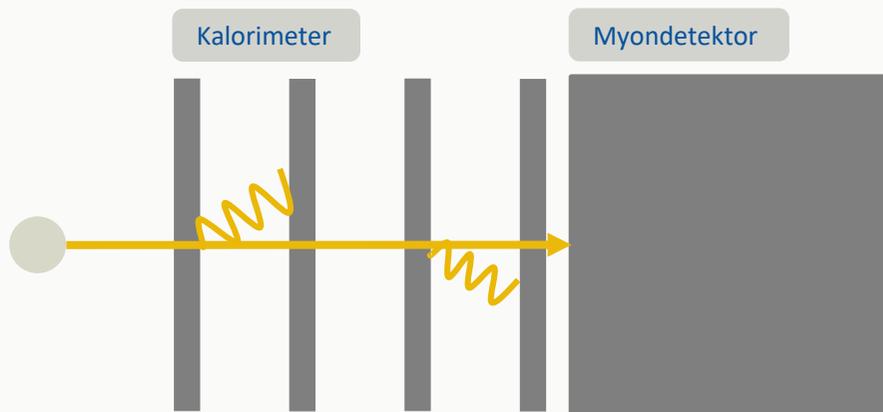
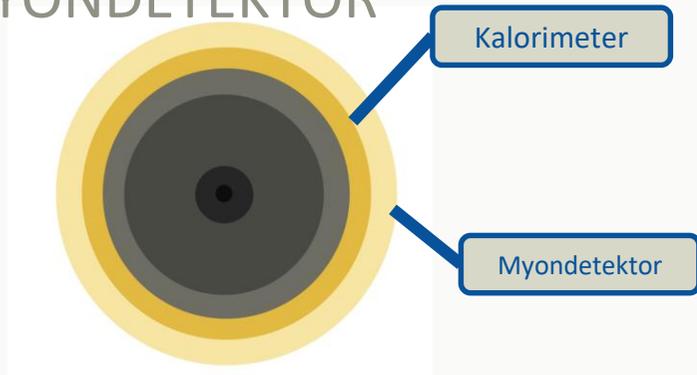
KALORIMETER UND MYONDETEKTOR

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



KALORIMETER UND MYONDETEKTOR

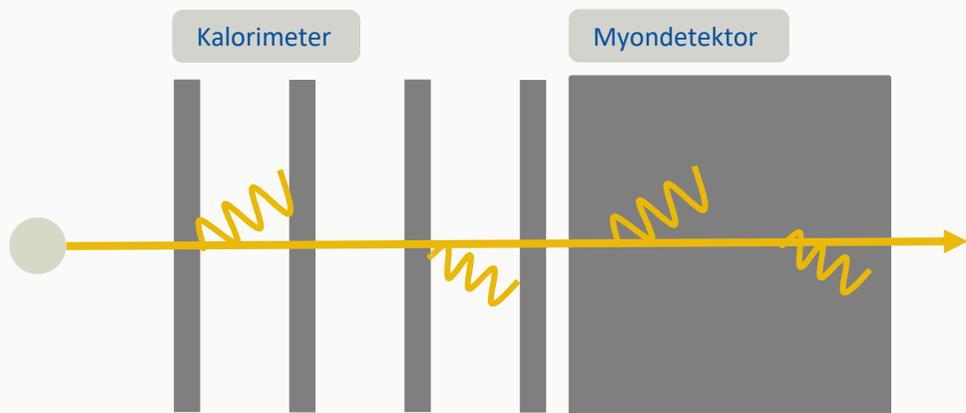
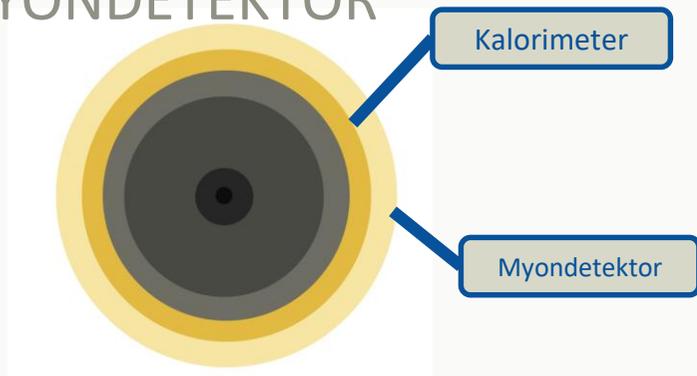
- Kalorimeter:
 - Die meisten Teilchen verlieren gesamte Energie
 - Und werden hier gestoppt
- Myondetektor:
 - Myonen wechselwirken kaum und verlassen das Kalorimeter





KALORIMETER UND MYONDETEKTOR

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





UND WAS MACHEN WIR MIT DIESEN SIGNALEN?

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

Warum reicht es nicht ein Event zu finden?



UND WAS MACHEN WIR MIT DIESEN SIGNALEN?

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

Warum reicht es nicht ein Event zu finden?

- Die Rekonstruktion ist nicht immer eindeutig
- Untergrundereignisse sind den echten Signalen oft ähnlich
- Man braucht einen statistisch signifikanten Überschuss



BEISPIELE FÜR EREIGNISSEKLASSEN

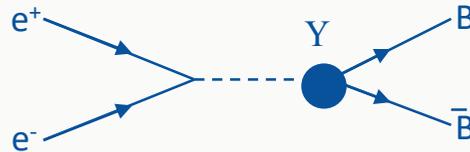
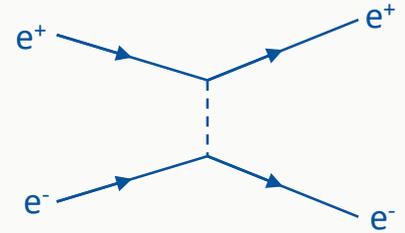
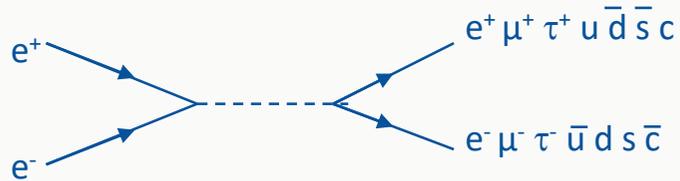
1) $e^+ e^- \Rightarrow e^+ e^-$

2) $e^+ e^- \Rightarrow \mu^+ \mu^-$

3) $e^+ e^- \Rightarrow \tau^+ \tau^-$

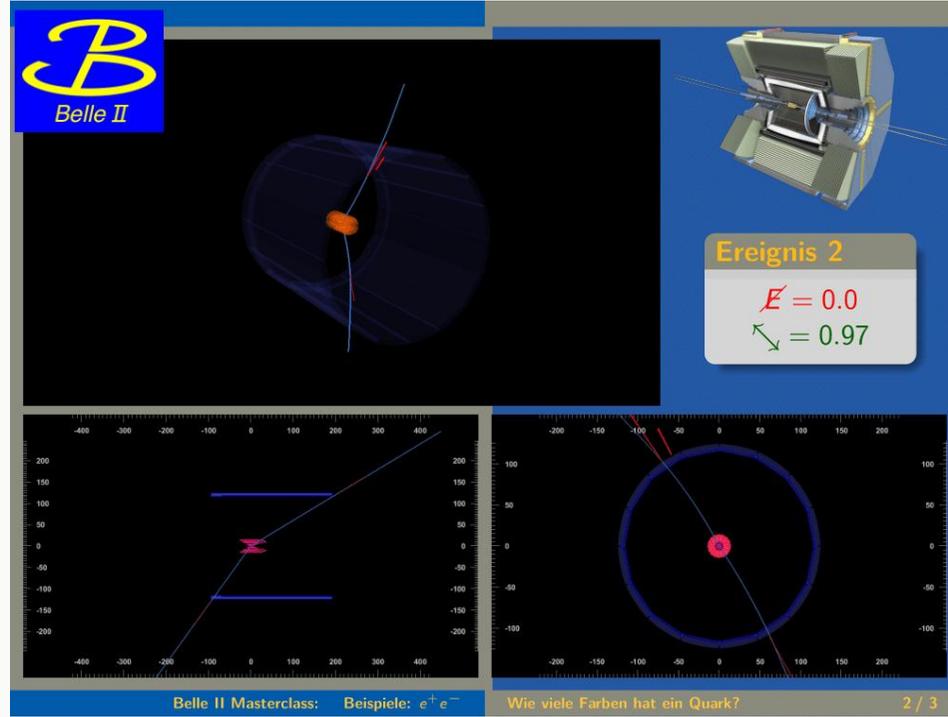
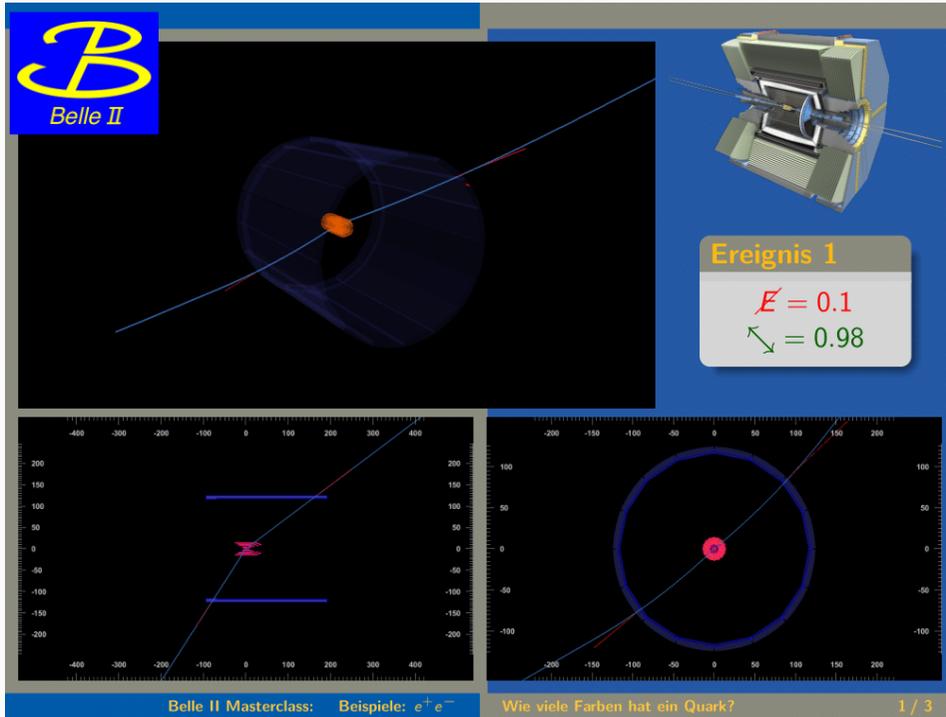
4) $e^+ e^- \Rightarrow q \bar{q}$ ($q = u, d, s, c$)

5) $e^+ e^- \Rightarrow Y \Rightarrow B \bar{B}$

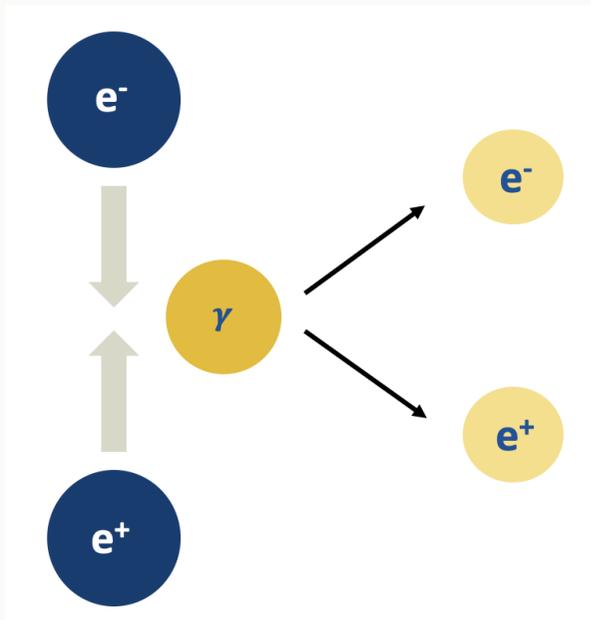




ELEKTRON/POSITRON-EREIGNISSE



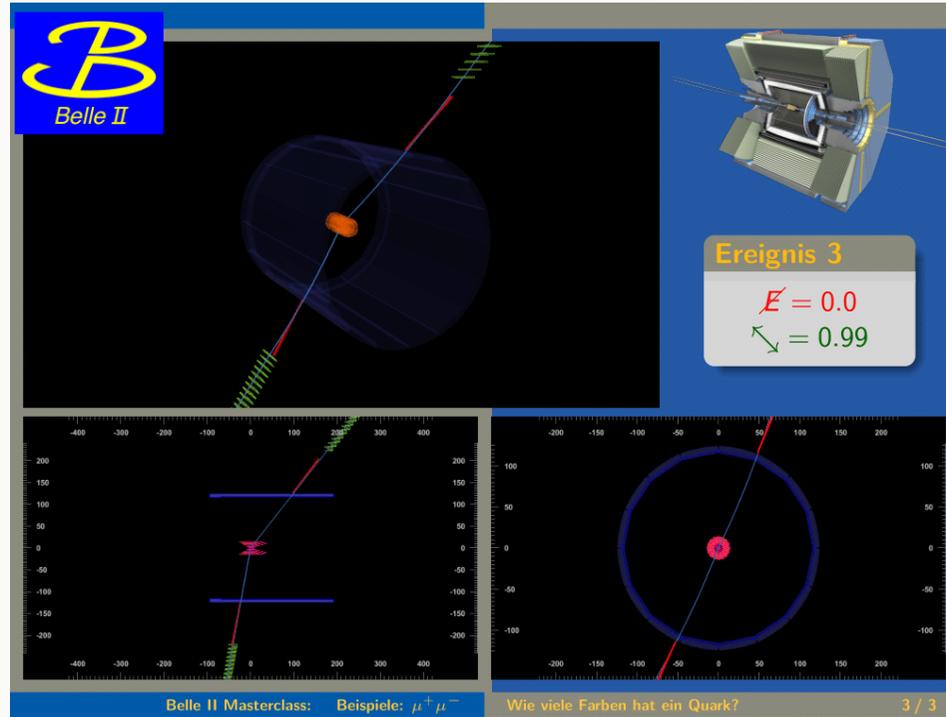
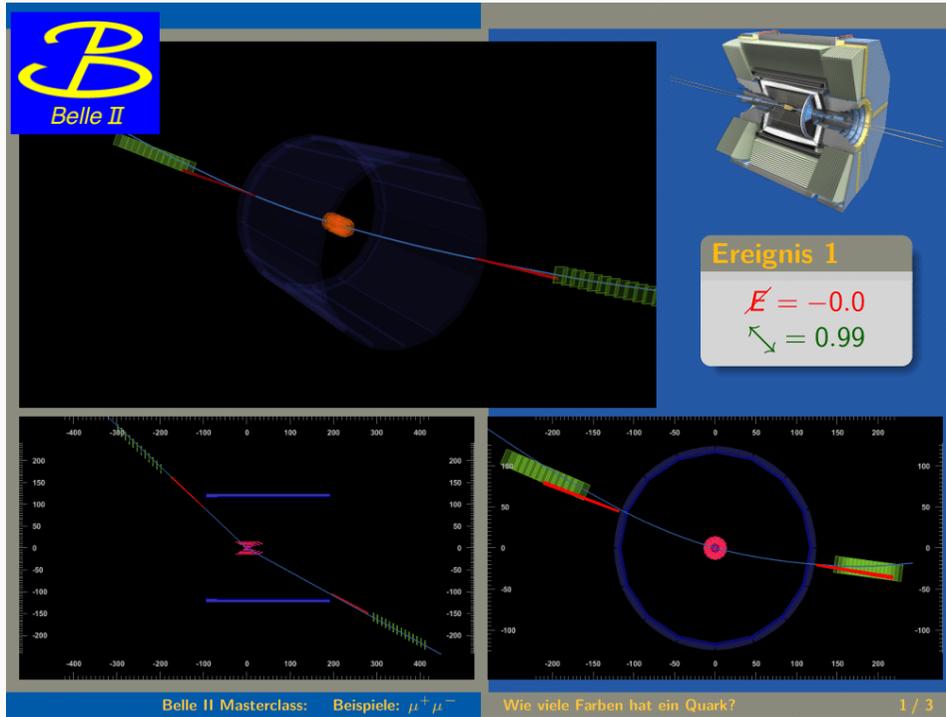
ELEKTRON/POSITRON-EREIGNISSE



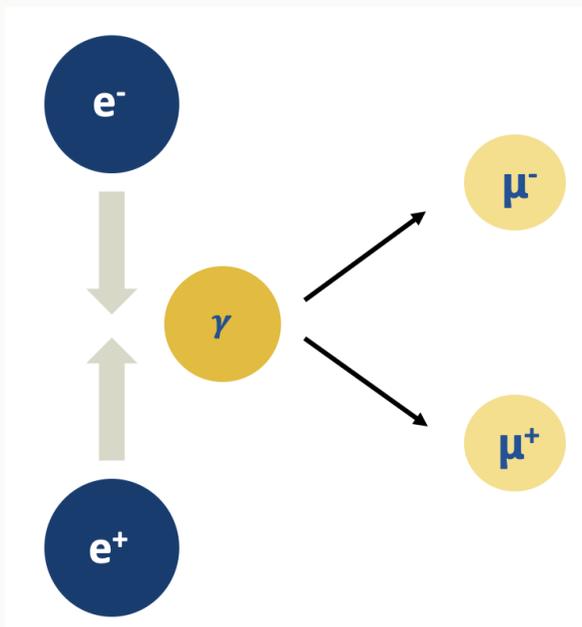
- **Zwei** klar zu erkennende **Spuren**
- Energiedeposition im Kalorimeter (rotes Signal nahe der Spur)



MYON/ANTIMYON-EREIGNISSE



MYON/ANTIMYON-EREIGNISSE

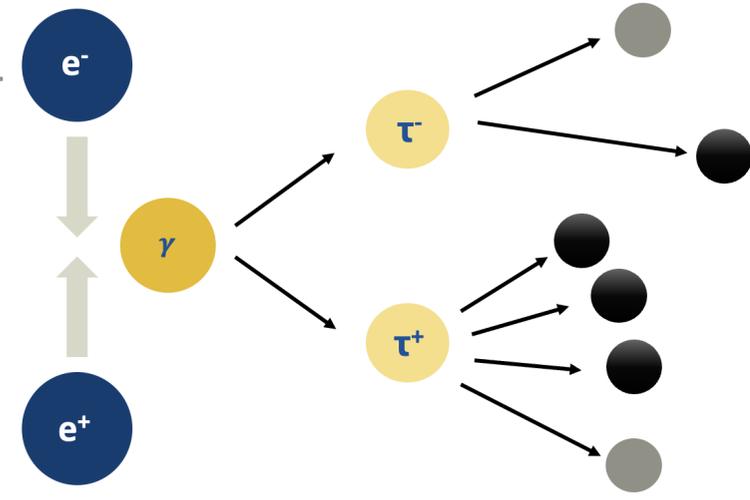


- **Zwei** klar zu erkennende **Spuren**
- Energiedeposition im Kalorimeter (rotes Signal nahe der Spur)
- Energiedeposition im Myondetektor (**grünes Signal nahe der Spur!**)

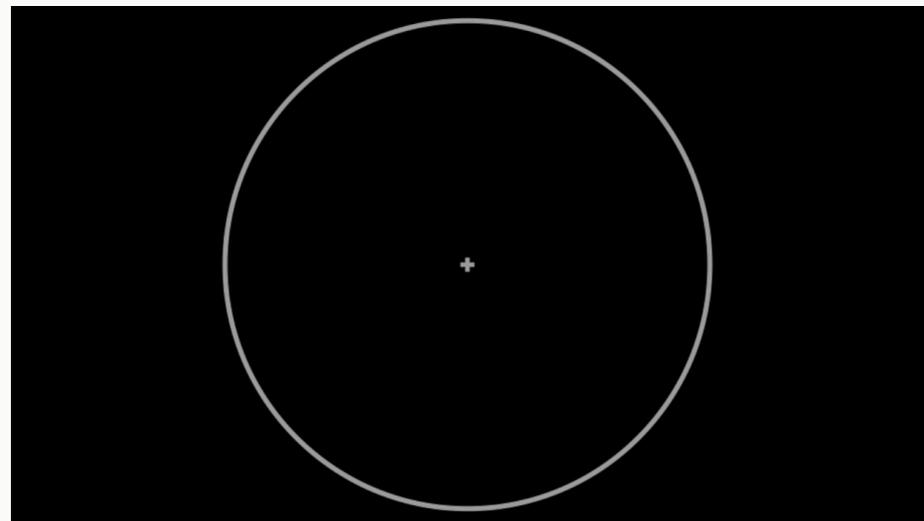
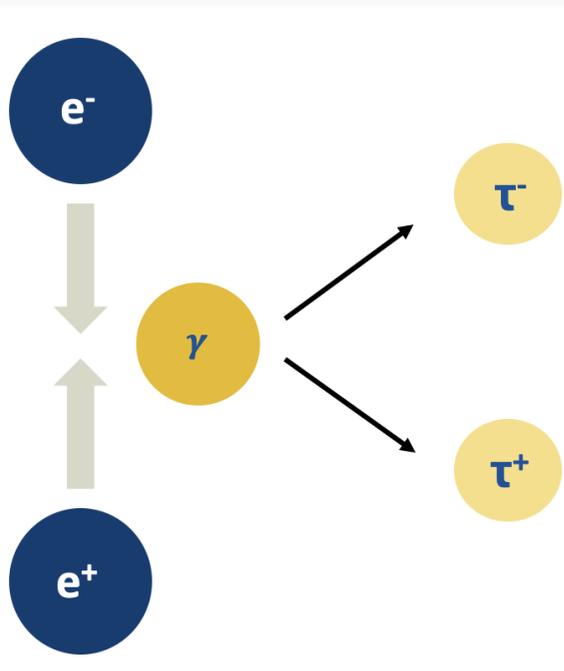


TAUON/ANTITAUON-EREIGNISSE

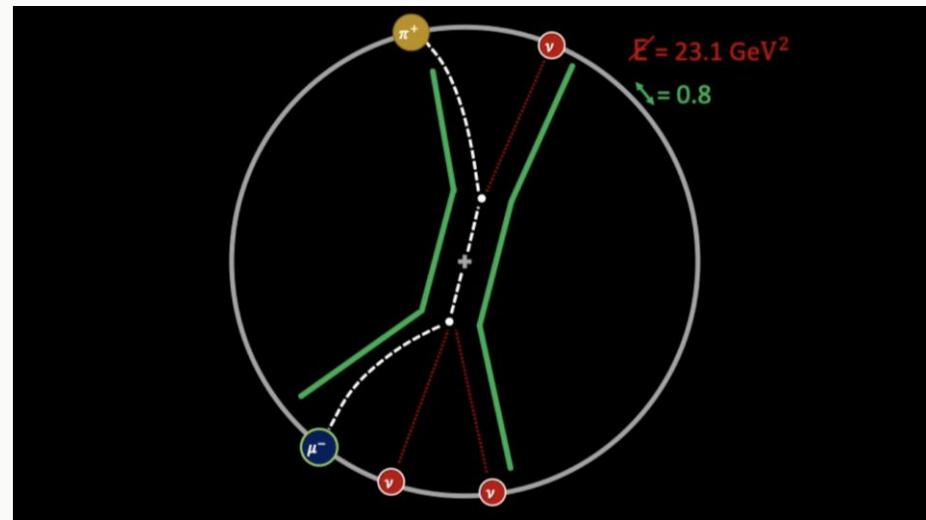
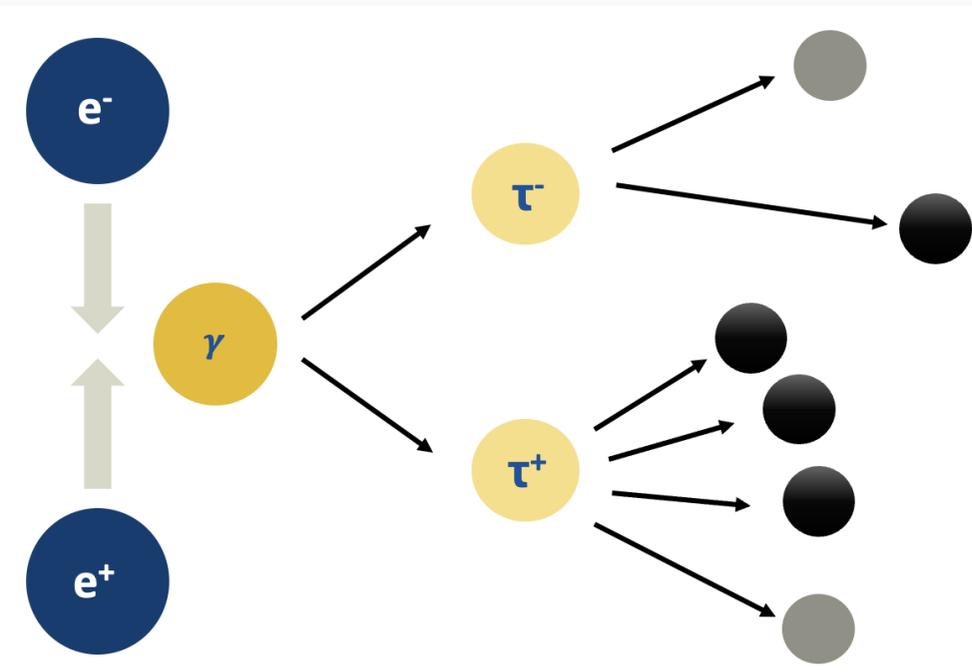
- Die Tauonen **zerfallen** kurz nach ihrer Entstehung im Detektor.
- Gibt mehrere Zerfallsmöglichkeiten:
 - In geladene Leptonen + **Neutrinos**
 - In leichte Quarks + **Neutrinos**



TAUON/ANTITAUON-EREIGNISSE

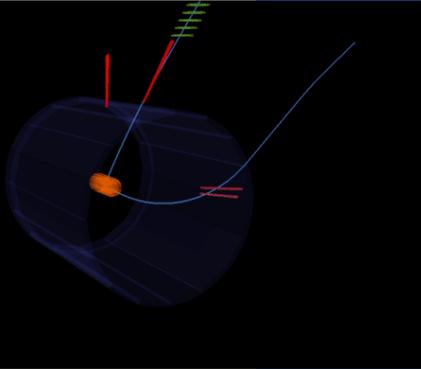


TAUON/ANTITAUON-EREIGNISSE



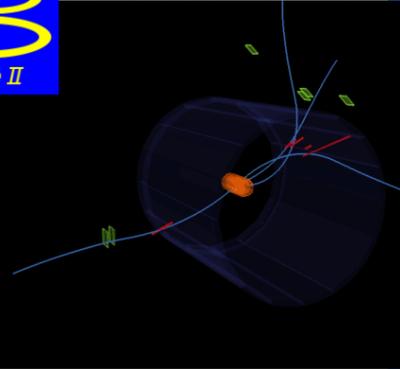
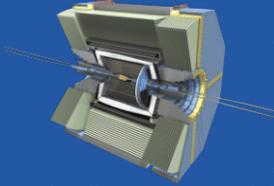


TAUON/ANTITAUON-EREIGNISSE



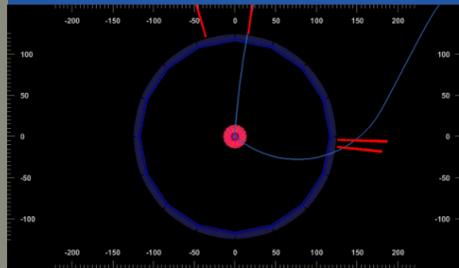
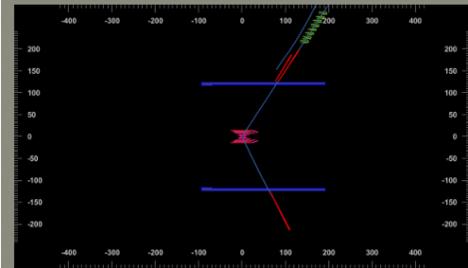
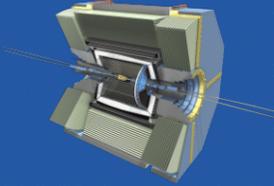
Ereignis 1

$$\mathcal{E} = 3.2$$
$$\sqrt{s} = 0.83$$



Ereignis 2

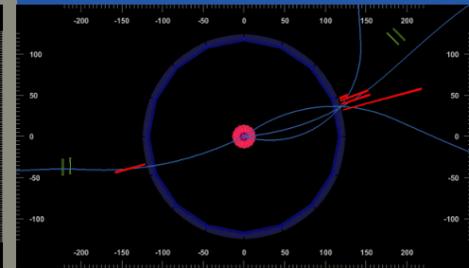
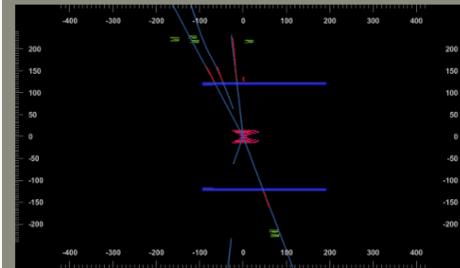
$$\mathcal{E} = 27.7$$
$$\sqrt{s} = 0.64$$



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

Wie viele Farben hat ein Quark?

1 / 3

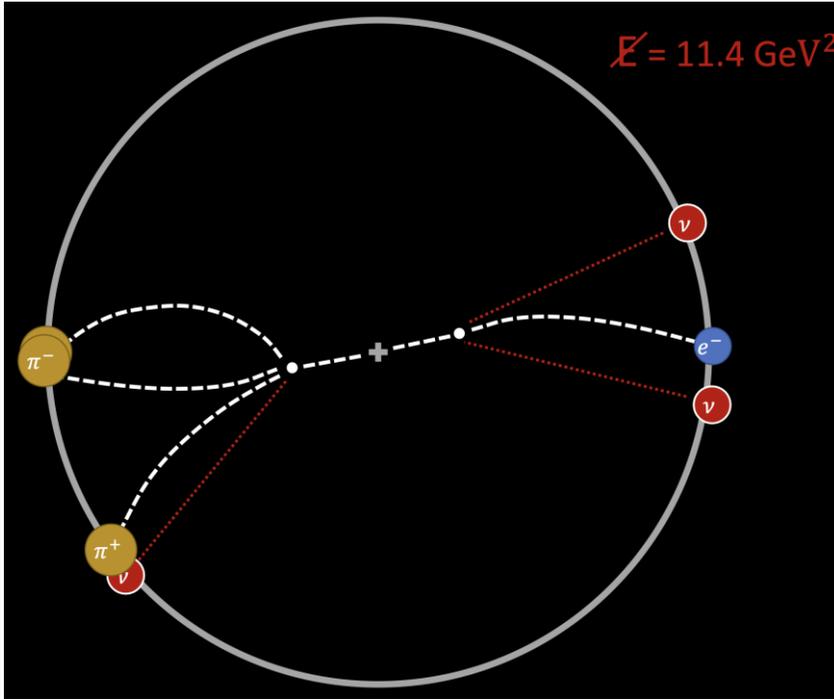


Belle II Masterclass: Beispiele: $\tau^+\tau^-$

Wie viele Farben hat ein Quark?

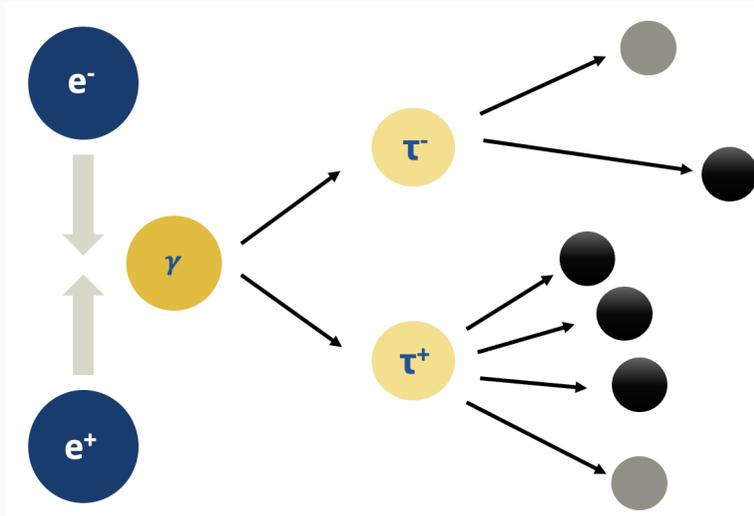
2 / 3

FEHLENDE ENERGIE: \cancel{E}



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

TAUON/ANTI-TAUON-EREIGNISSE

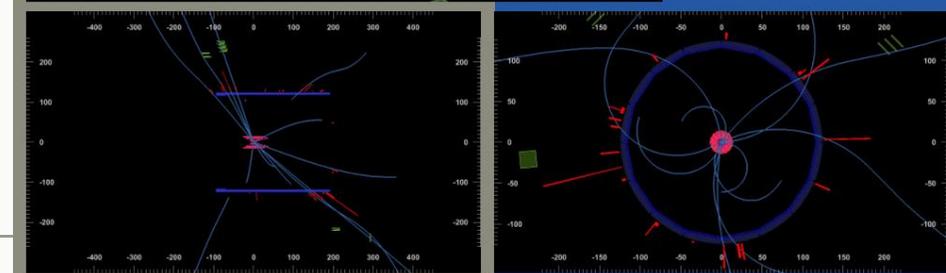
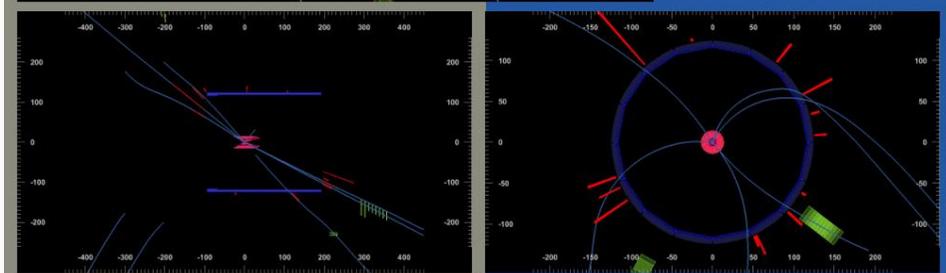
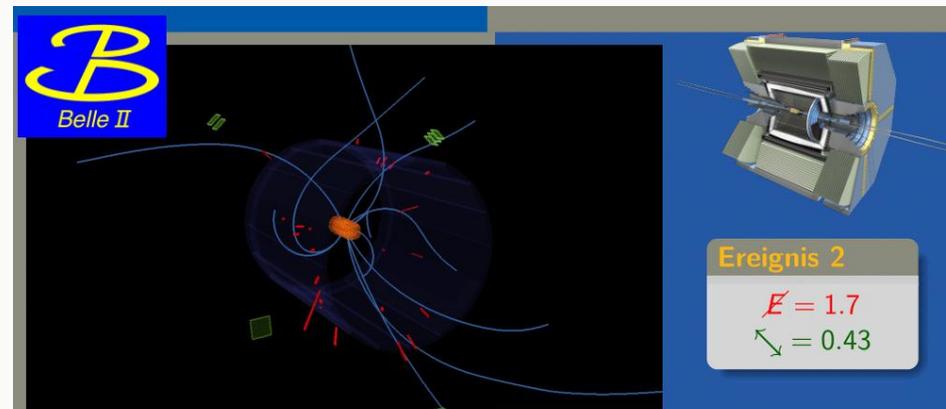
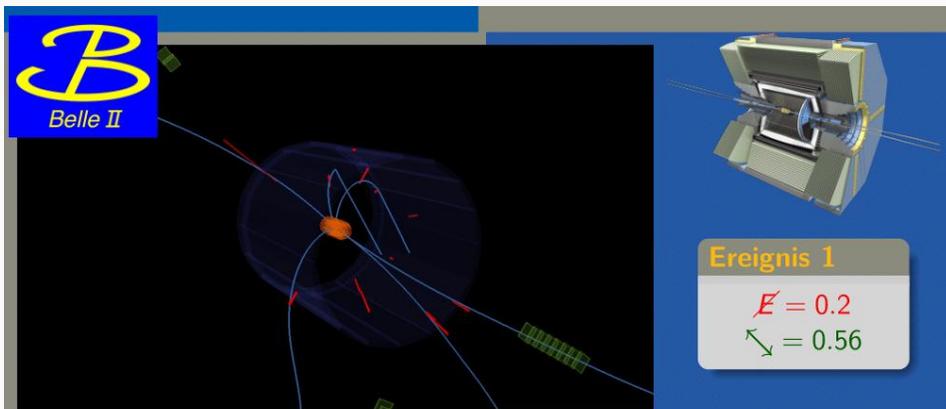
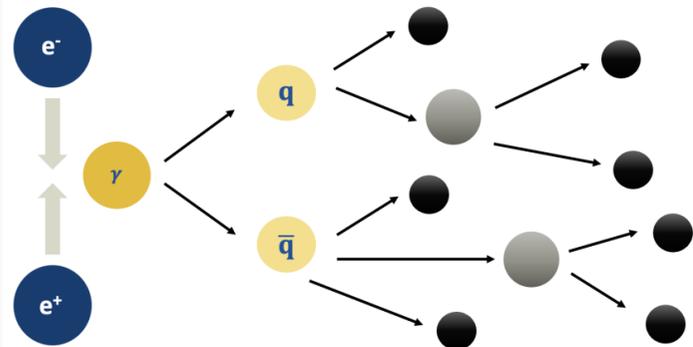


- Zerfälle führen zu **keiner einheitlichen Spuranzahl**
 - **2 oder 4 (+ Gabelstruktur)** am häufigsten
- Abhängig vom Zerfall Energiedeposition in Kalorimeter und Myondetektor
- **Hohe fehlende Energie** (durch beim Zerfall entstehende Neutrinos)

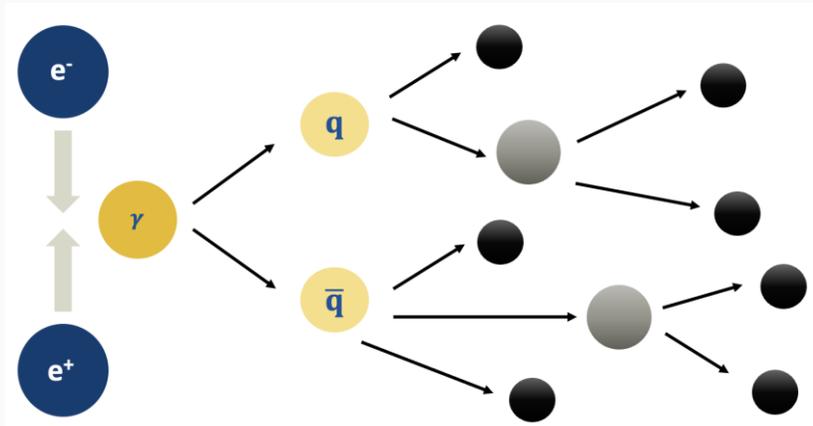


LEICHTE QUARK/ANTIQUARK-EREIGNISSE

- Zerfall in viele mögliche Endzustände



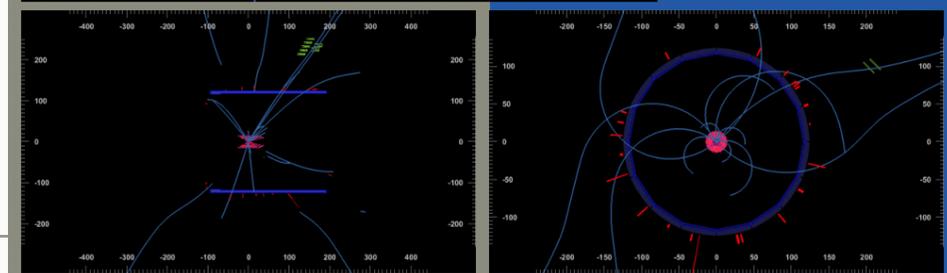
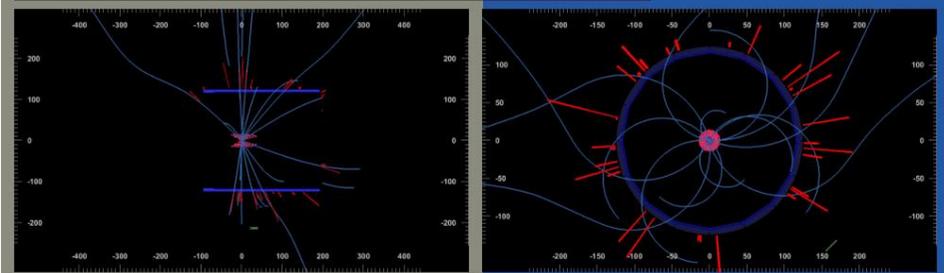
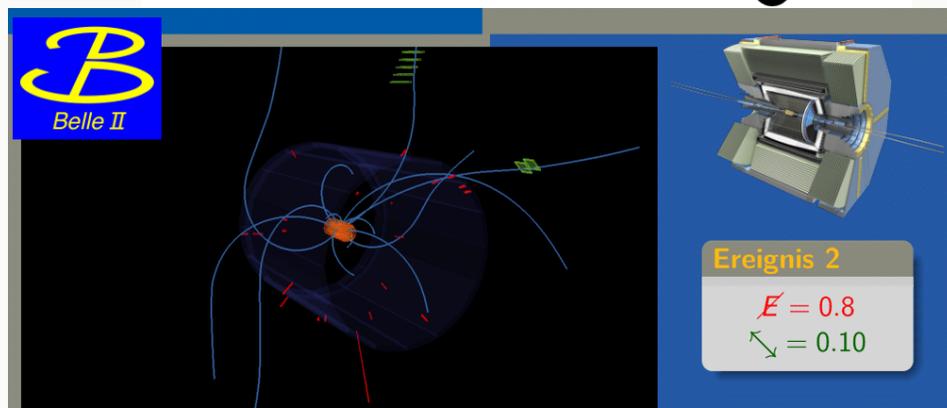
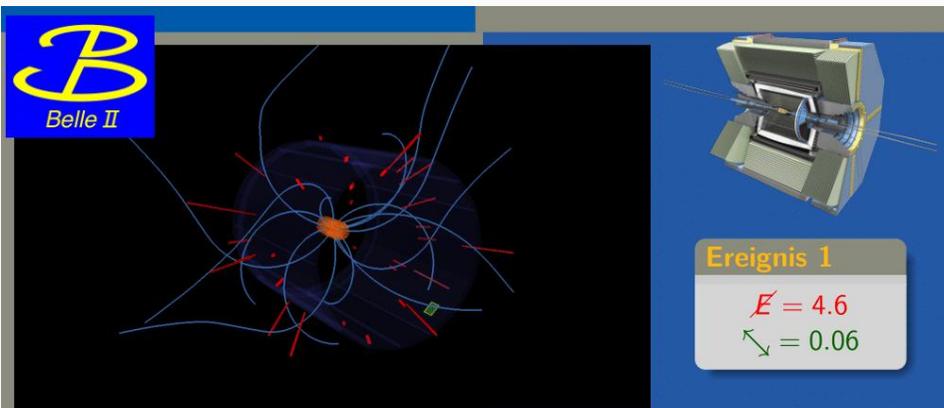
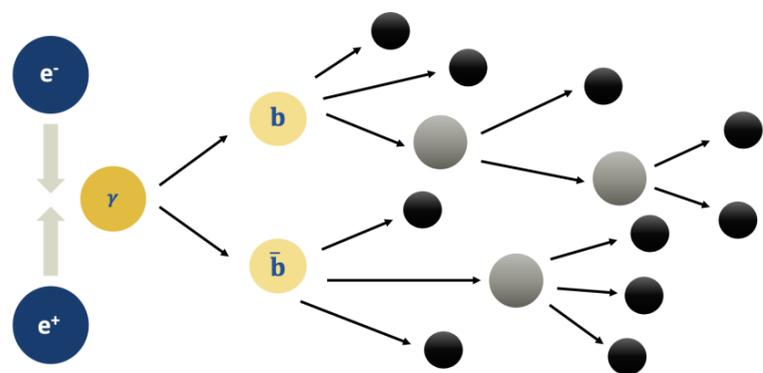
LEICHTE QUARK/ANTIQUARK-EREIGNISSE



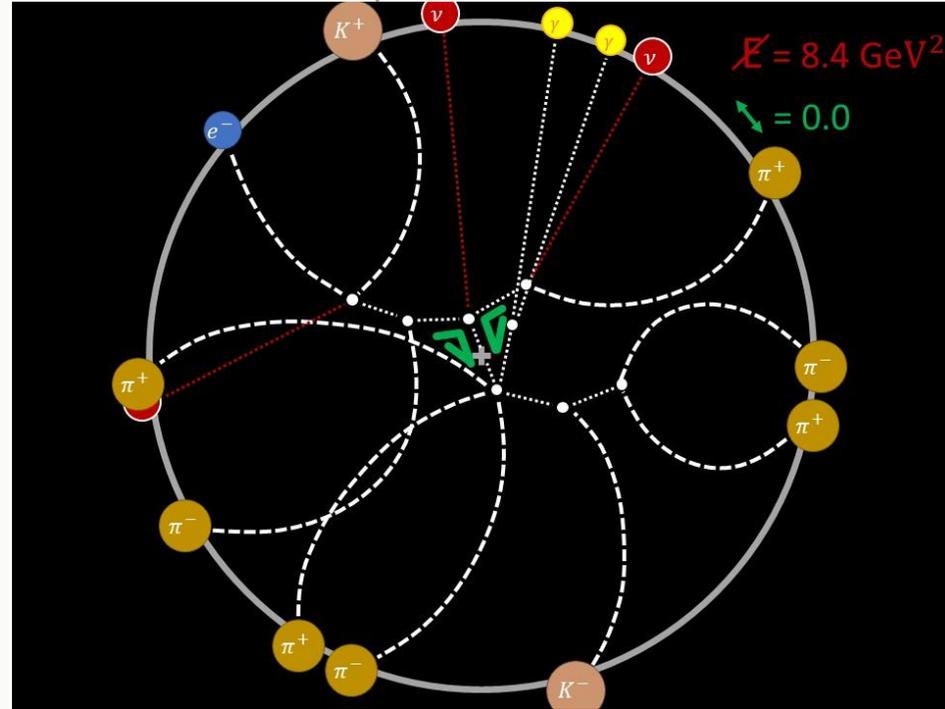
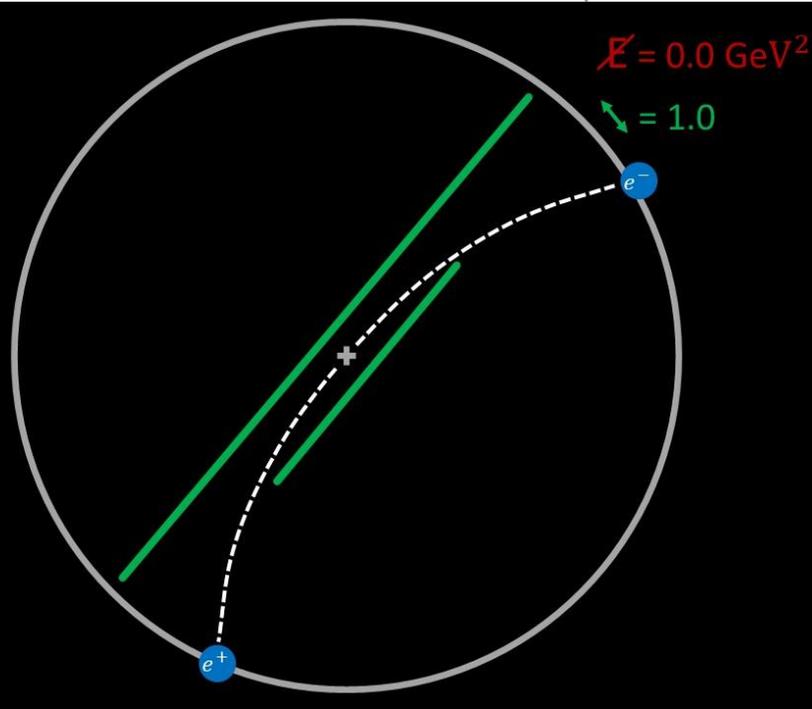
- Zerfallskaskaden führen zu **keiner einheitlichen Spuranzahl**
 - **Hohe Anzahl** häufig
- Weniger fehlende Energie durch weniger Neutrinos
- Zerfälle in mehr verschiedene Richtungen als bei den Leptonen



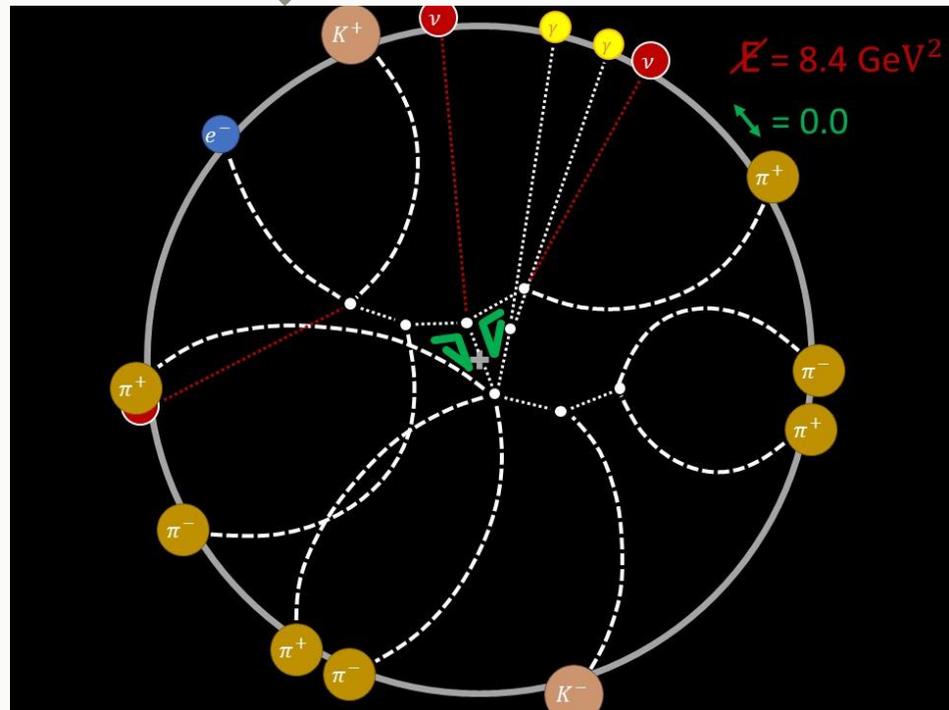
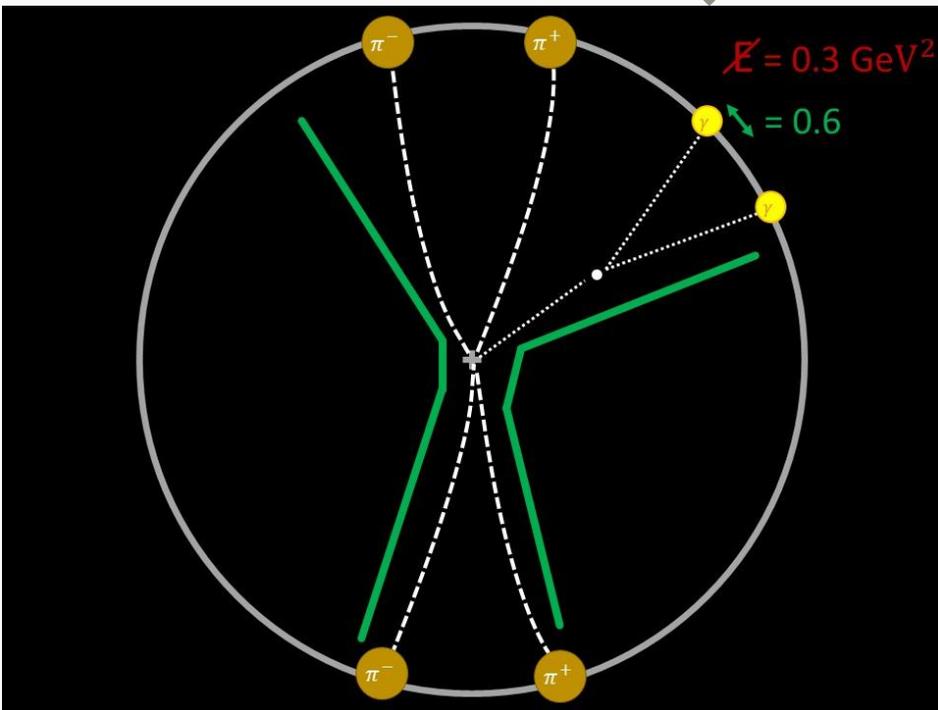
b/ANTI-b QUARK-EREIGNISSE



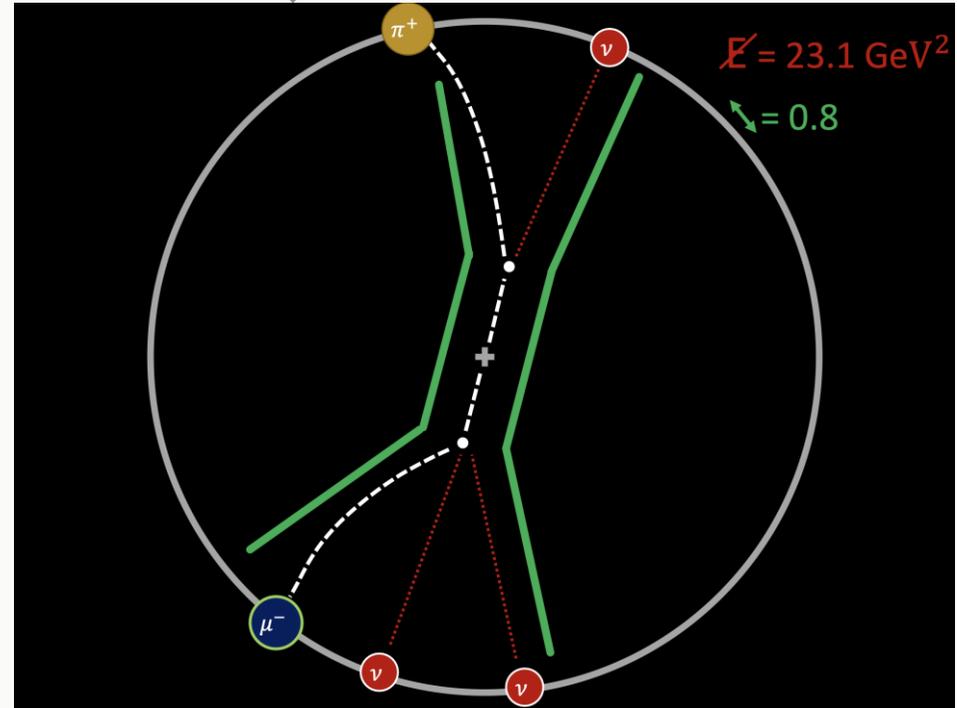
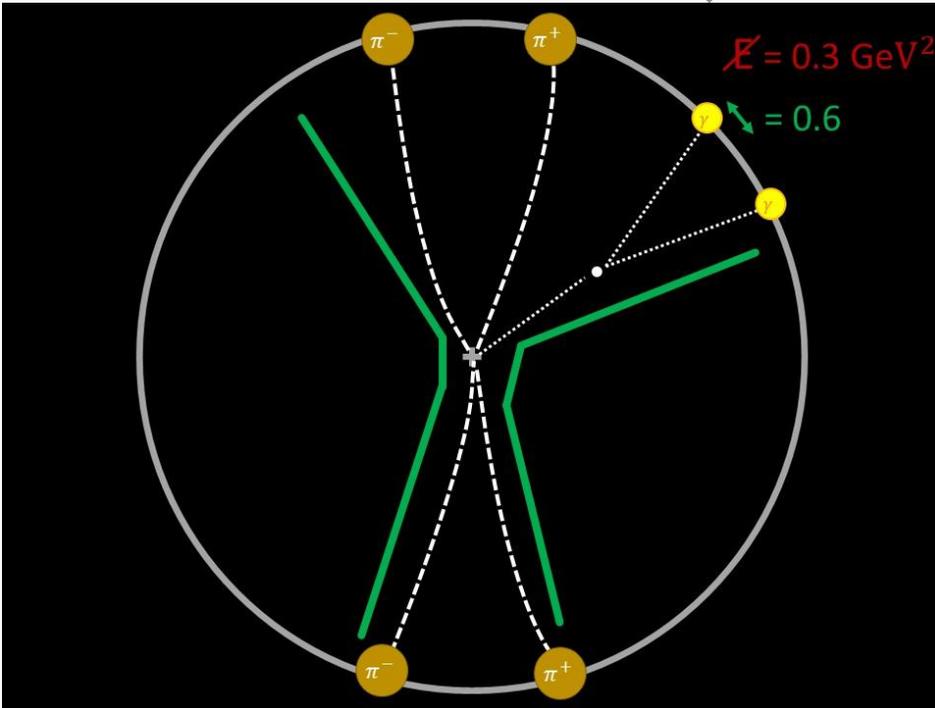
GERADLINIGKEIT (THRUST): ELEKTRON/POSITRON VS b-QUARKS



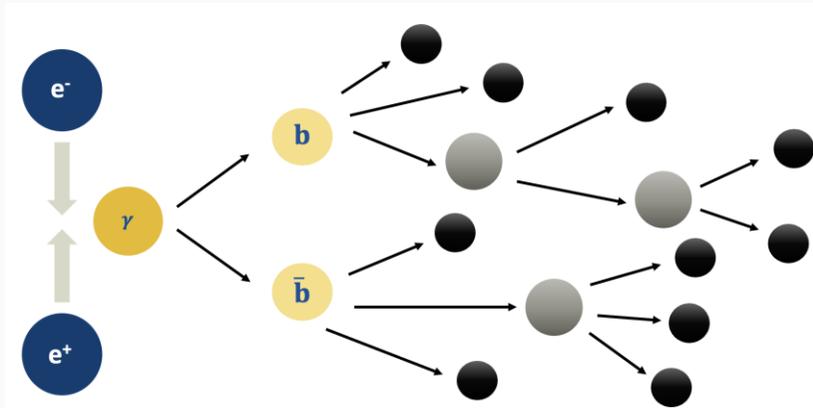
GERADLINIGKEIT: ↘
LEICHTE QUARKS VS b-QUARKS



GERADLINIGKEIT: ↘
LEICHTE QUARKS VS TAUONEN



b/ANTI-b QUARK- EREIGNISSE



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





ZUSAMMENFASSUNG

Erzeugung von Teilchen in Beschleunigern: $E = mc^2$

Teilchen zerfallen

Zerfallsprodukte werden in Detektoren nachgewiesen und vermessen

Aus diesen Zerfallsprodukten kann das Ursprungsteilchen rekonstruiert werden