

Teilchenphysik in a Nutshell

Masterclass Belle II

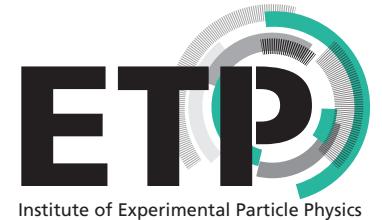
Entdecke die Teilchenphysik am Belle II-Experiment in Japan



CODE DES UNIVERSUMS

A large, white, sans-serif font banner with the words "CODE DES UNIVERSUMS" centered against a dark, colorful background of a galaxy or nebula.

Was sind Elementarteilchen?



Was sind Elementarteilchen?

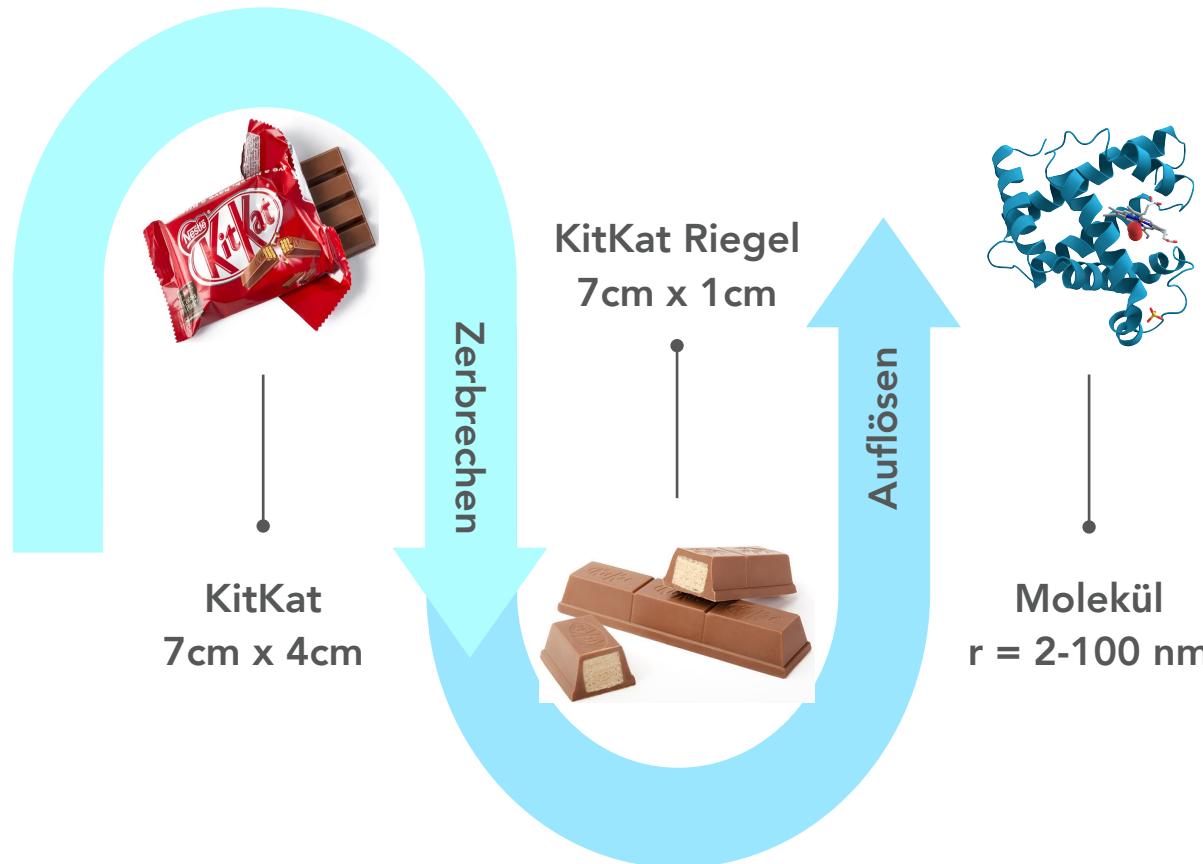


KitKat
7cm x 4cm

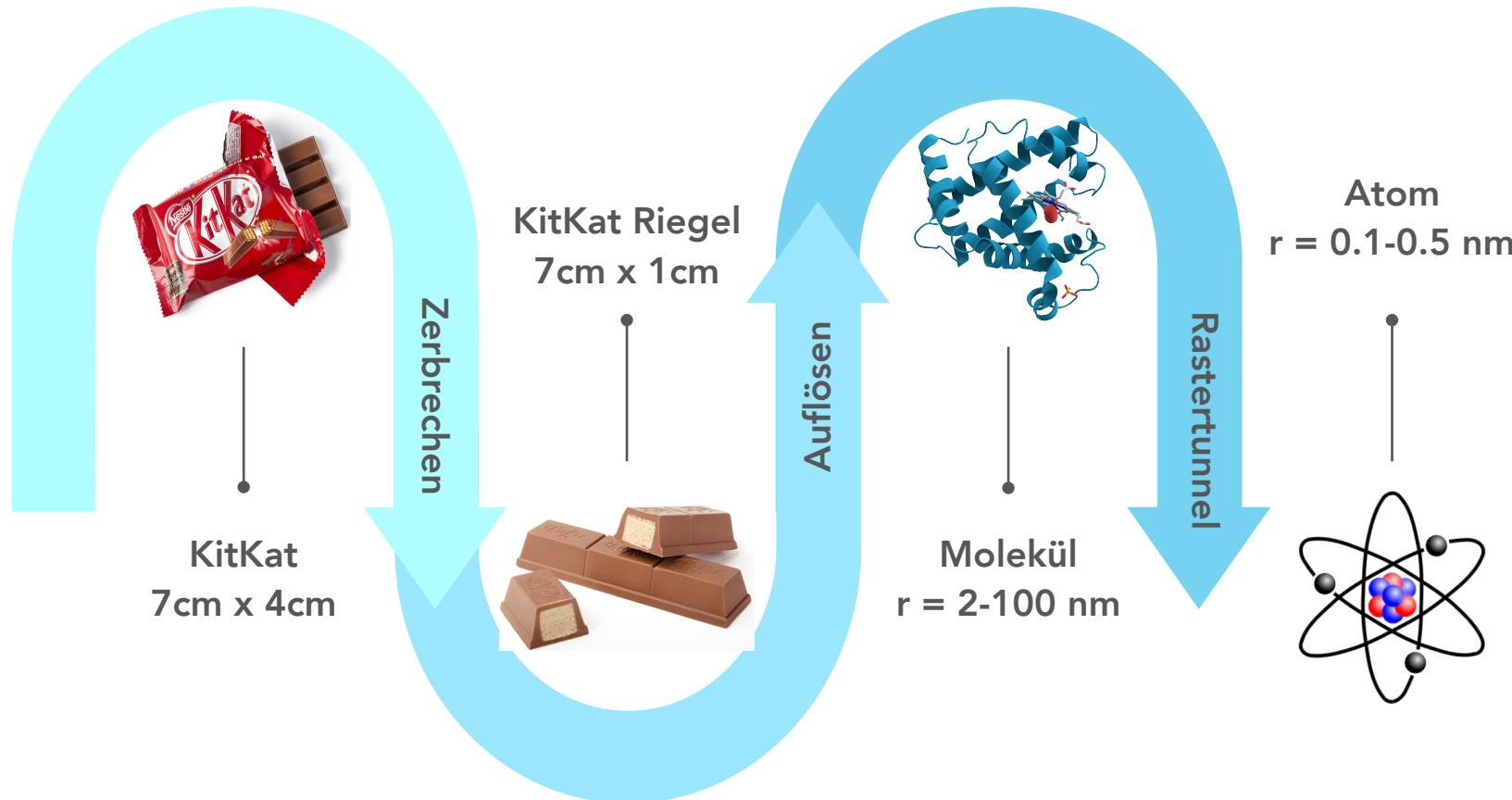
Was sind Elementarteilchen?



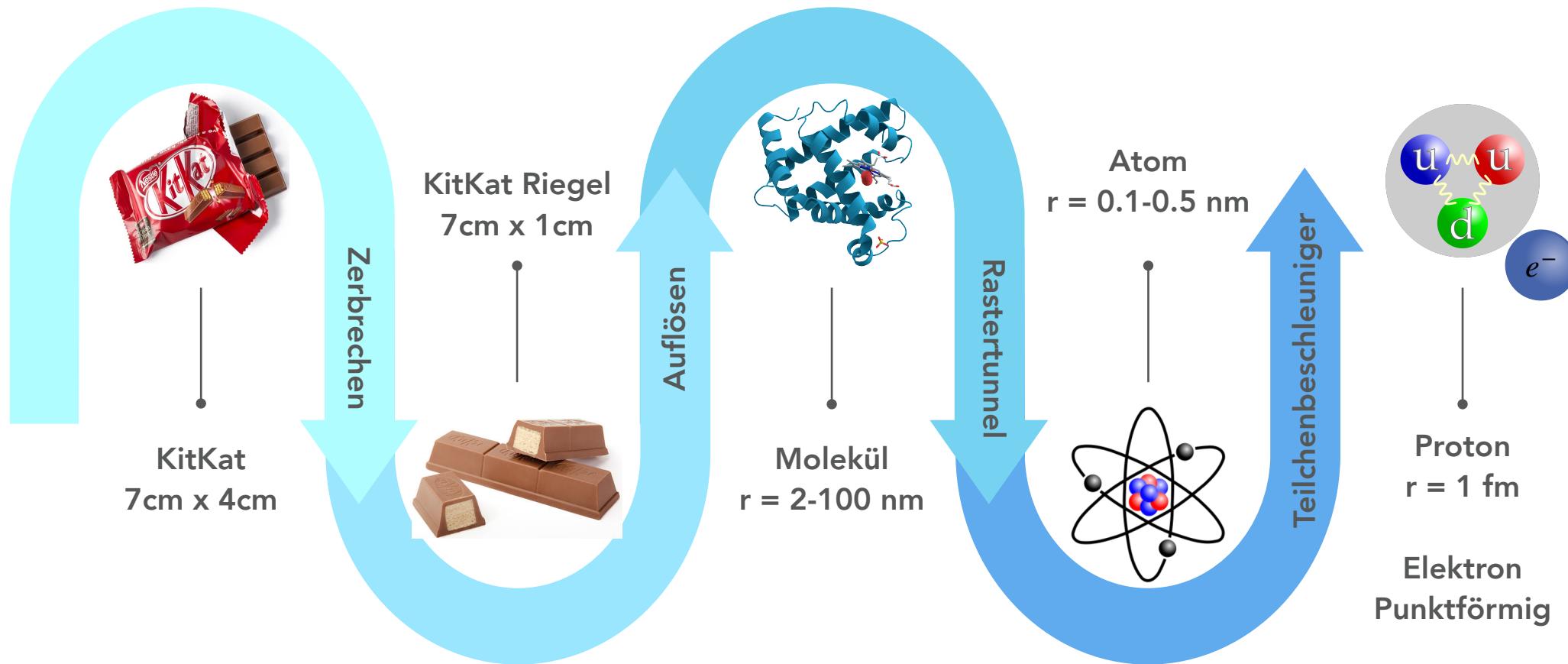
Was sind Elementarteilchen?



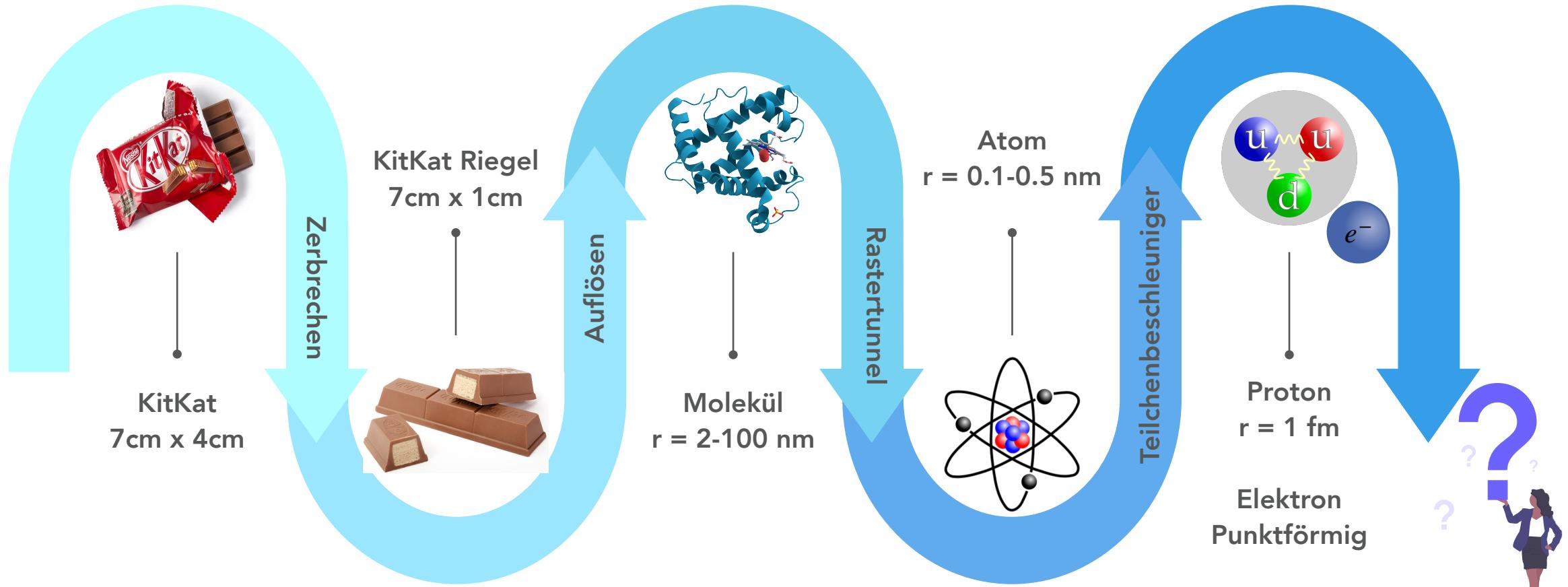
Was sind Elementarteilchen?



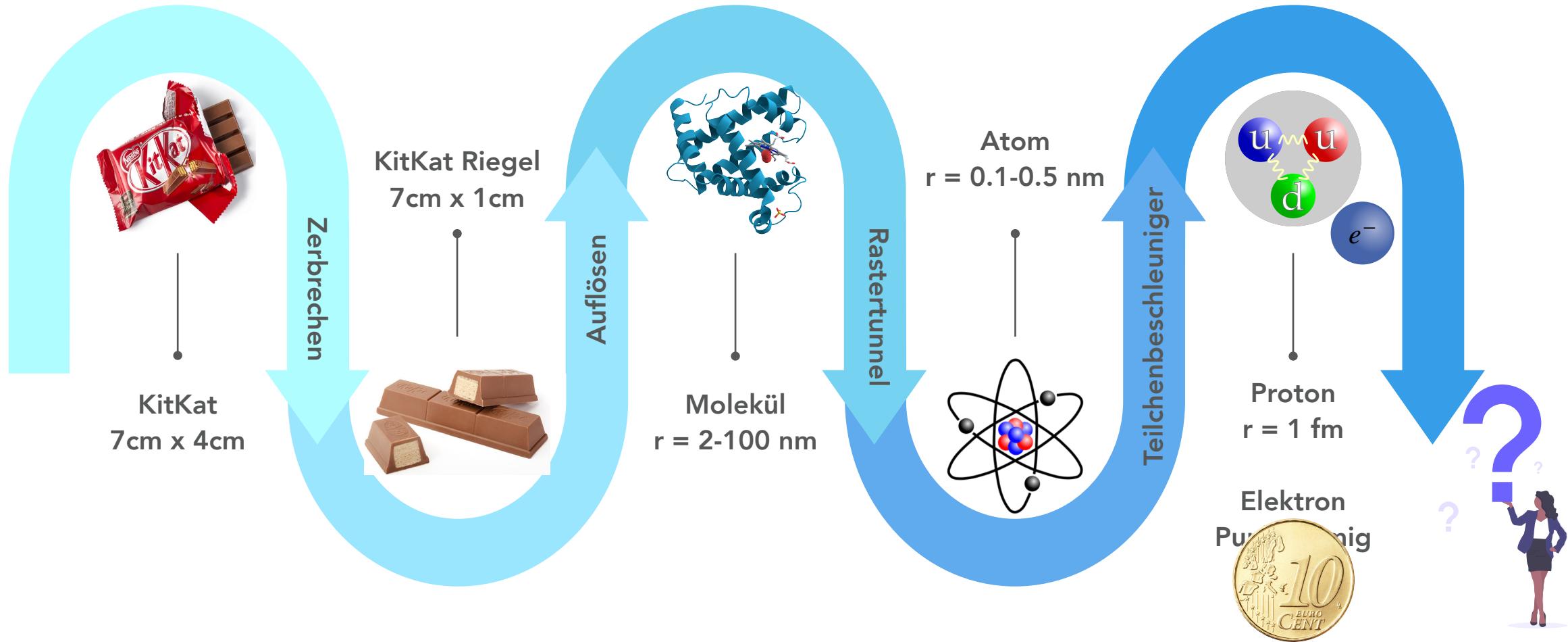
Was sind Elementarteilchen?



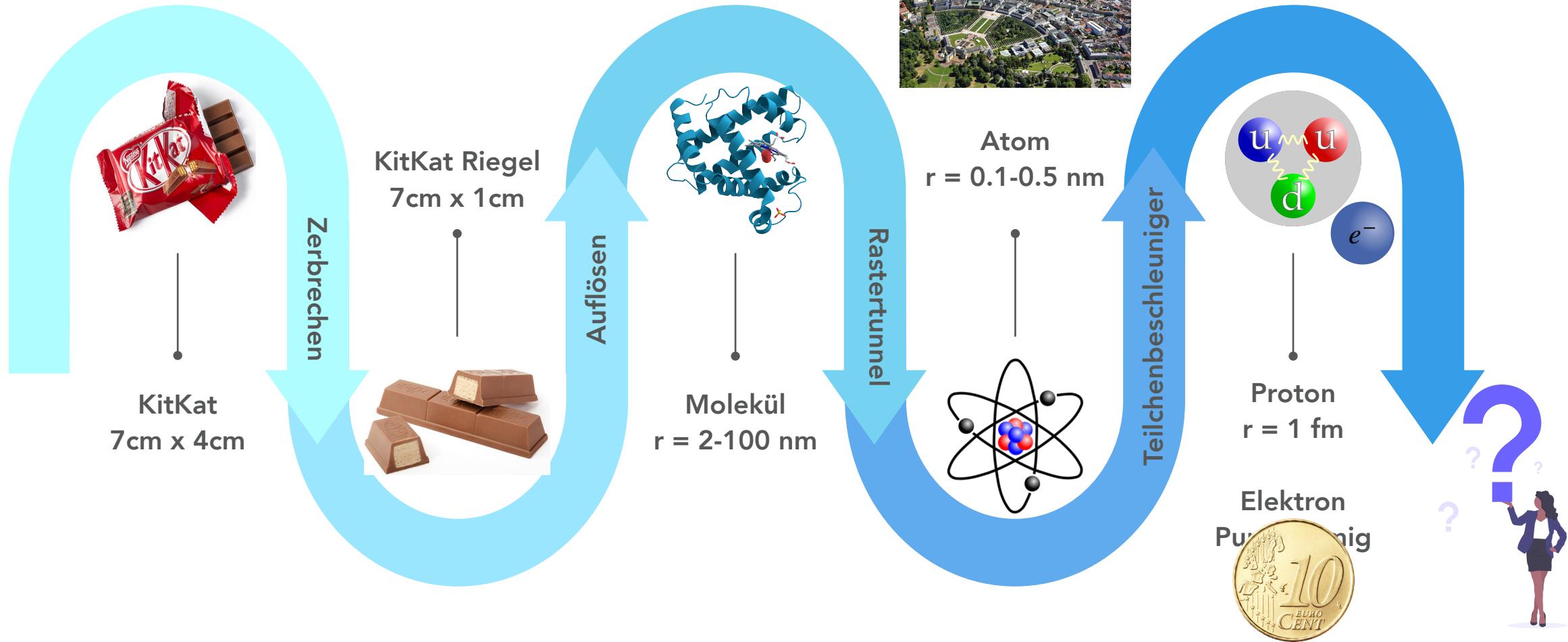
Was sind Elementarteilchen?



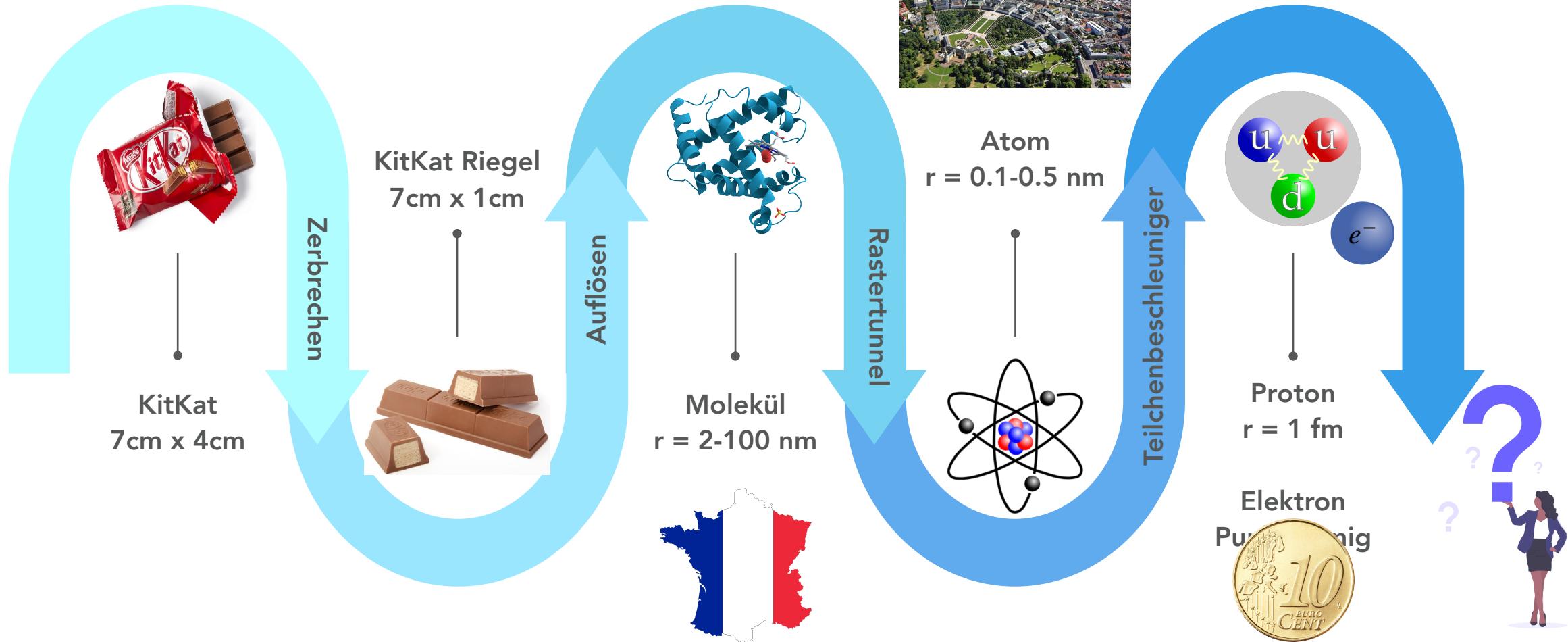
Was sind Elementarteilchen?



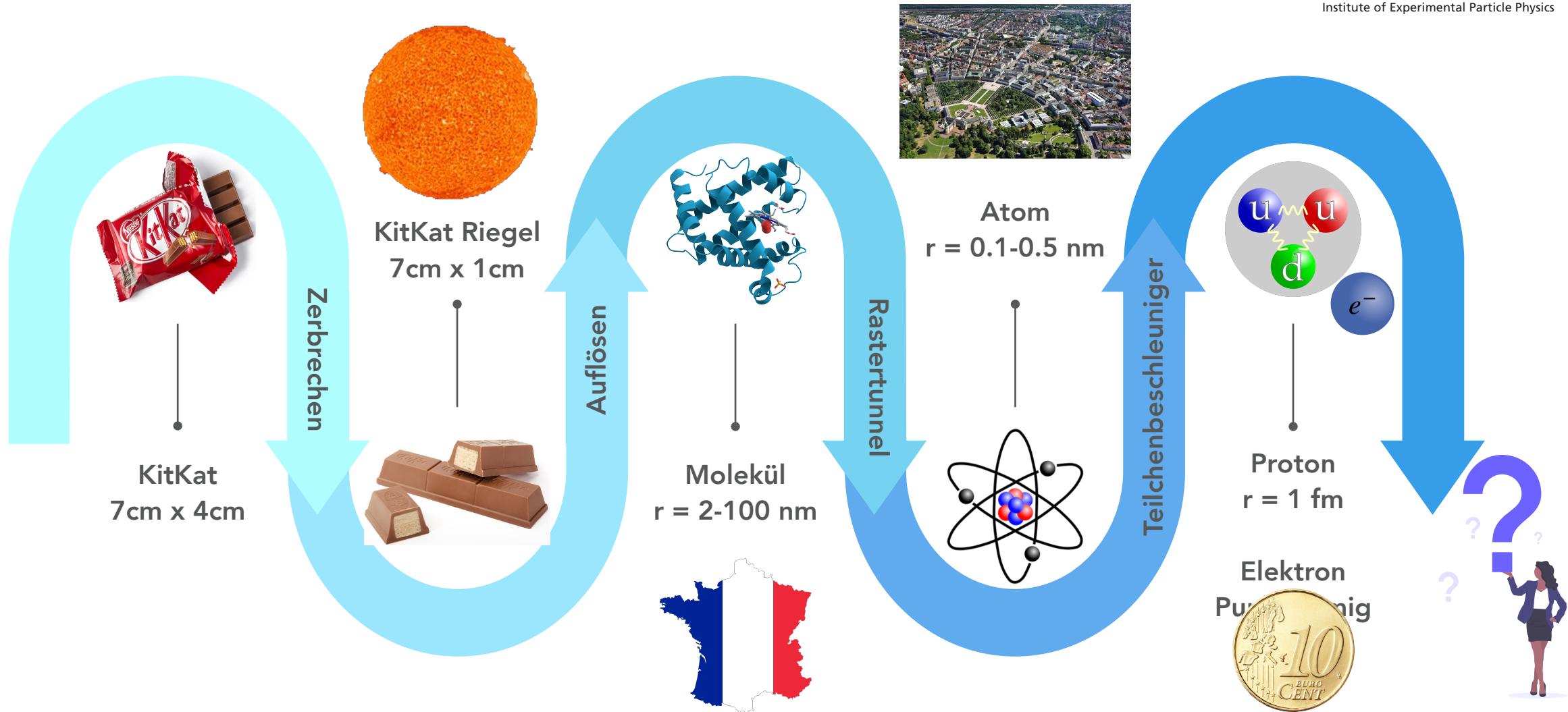
Was sind Elementarteilchen?



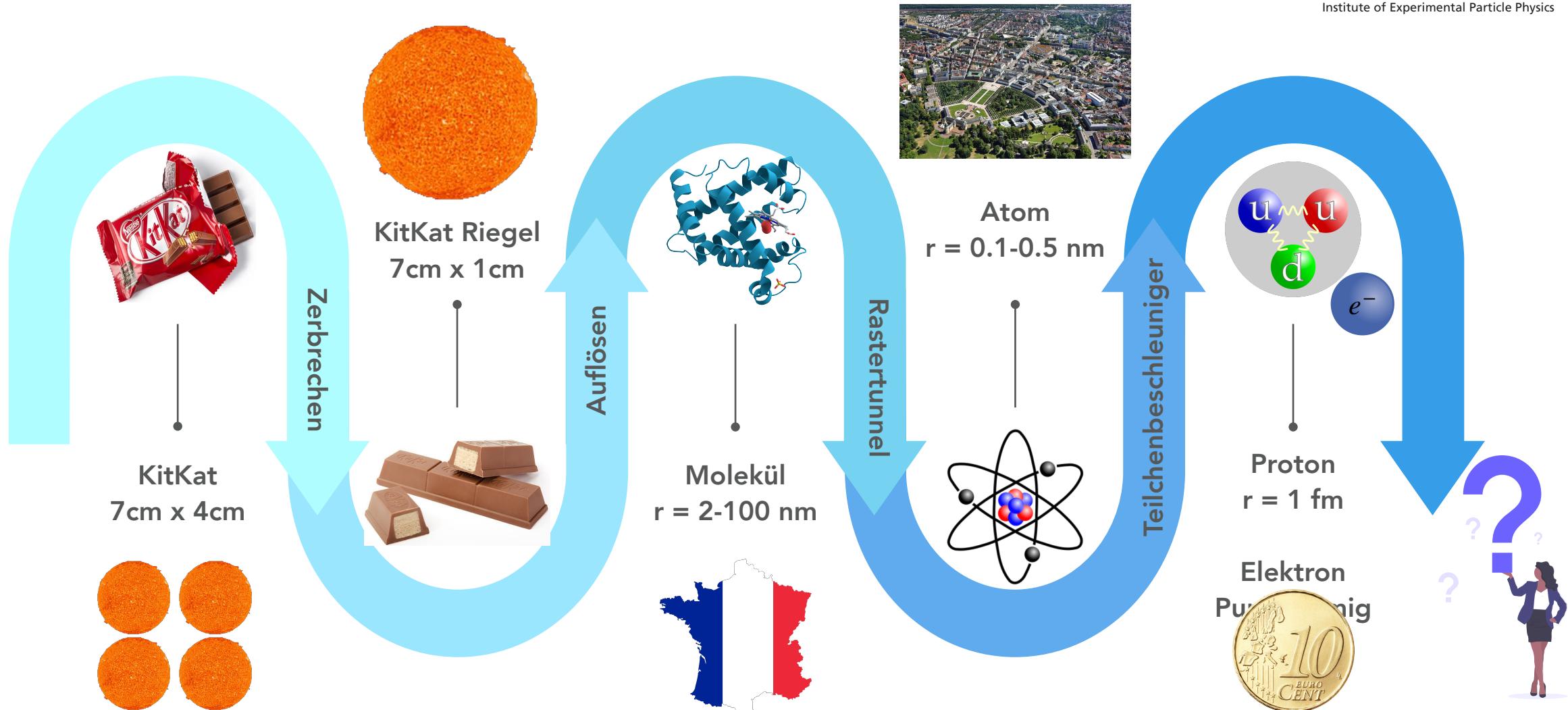
Was sind Elementarteilchen?



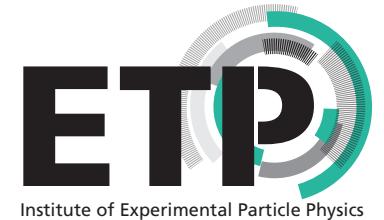
Was sind Elementarteilchen?



Was sind Elementarteilchen?



Was bedeutet “unteilbar”?



Was bedeutet “unteilbar”?

~400 BC



Democritus

Die Welt besteht
aus Atomen.

Griechisch:
átomos -
unteilbar

Was bedeutet “unteilbar”?

~400 BC

~350 BC



Aristotle

Atome sind zu
kompliziert.

4 Elemente:
Luft, Wasser,
Erde, Feuer

Democritus

Die Welt besteht
aus Atomen.

Griechisch:
átomos -
unteilbar



Was bedeutet “unteilbar”?

~400 BC

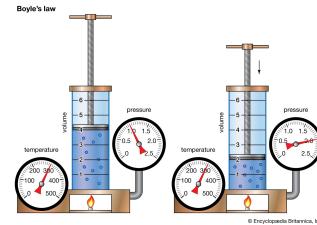
~350 BC

1662



Aristotle
Atome sind zu
kompliziert.

4 Elemente:
Luft, Wasser,
Erde, Feuer



Democritus
Die Welt besteht
aus Atomen.

Griechisch:
átomos -
unteilbar



Robert Boyle
Bei konstantem
 T gilt $pV=p'V'$ für
Gase

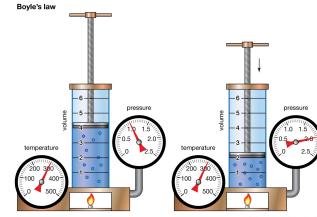
Materie besteht
aus Molekülen,
die aus Atomen
bestehen

Was bedeutet “unteilbar”?



Aristotle
Atome sind zu kompliziert.

4 Elemente:
Luft, Wasser,
Erde, Feuer



John Dalton
Atome eines Elements sind identisch

Chemische Reaktionen = Neuanordnung der Atome

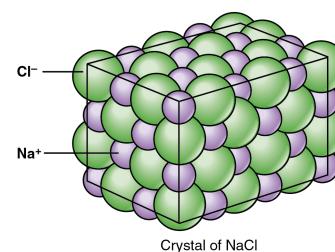
Democritus
Die Welt besteht aus Atomen.

Griechisch:
átomos - unteilbar



Robert Boyle
Bei konstantem T gilt $pV=p'V'$ für Gase

Materie besteht aus Molekülen, die aus Atomen bestehen



Was bedeutet “unteilbar”?

~400 BC

~350 BC

1662

1803

1903

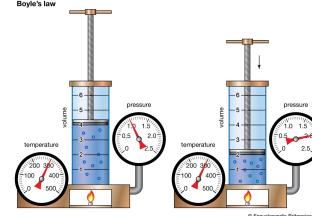


Democritus
Die Welt besteht aus Atomen.

Griechisch:
átomos - unteilbar

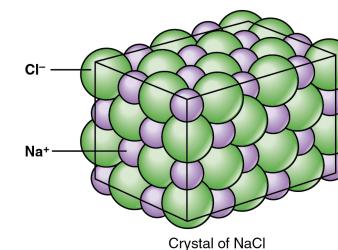


Aristotle
Atome sind zu kompliziert.
4 Elemente:
Luft, Wasser,
Erde, Feuer



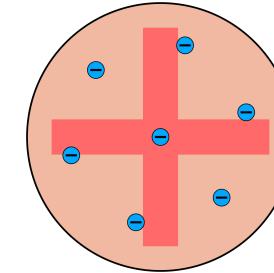
Robert Boyle
Bei konstantem T gilt $pV=p'V'$ für Gase

Materie besteht aus Molekülen, die aus Atomen bestehen



John Dalton
Atome eines Elements sind identisch

Chemische Reaktionen = Neuanordnung der Atome



Joseph John Thomson
Atom besteht aus positiver Masse, in der sich negative Elektronen bewegen

Was bedeutet “unteilbar”?

~400 BC

~350 BC

1662

1803

1903

1909



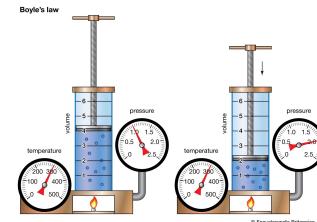
Democritus
Die Welt besteht aus Atomen.

Griechisch:
átomos - unteilbar



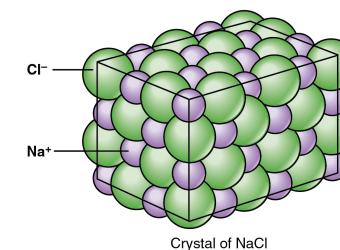
Aristotle
Atome sind zu kompliziert.

4 Elemente:
Luft, Wasser,
Erde, Feuer



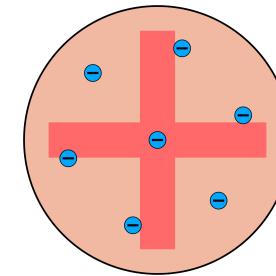
Robert Boyle
Bei konstantem T gilt $pV=p'V'$ für Gase

Materie besteht aus Molekülen, die aus Atomen bestehen

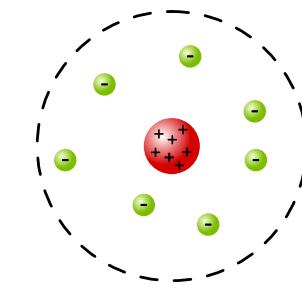


John Dalton
Atome eines Elements sind identisch

Chemische Reaktionen = Neuanordnung der Atome



Joseph John Thomson
Atom besteht aus positiver Masse, in der sich negative Elektronen bewegen



Ernest Rutherford
Positive Ladung ist im Zentrum des Atoms positioniert und macht die Masse aus

Was bedeutet “unteilbar”?

~400 BC

~350 BC

1662

1803

1903

1909

1913



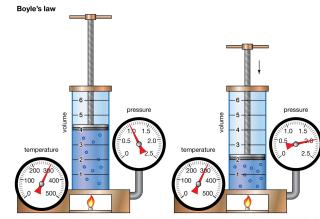
Democritus
Die Welt besteht aus Atomen.

Griechisch:
átomos - unteilbar



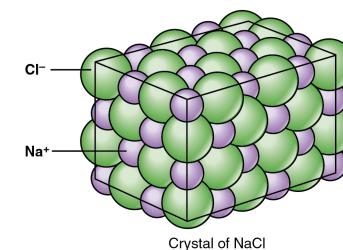
Aristotle
Atome sind zu kompliziert.

4 Elemente:
Luft, Wasser,
Erde, Feuer



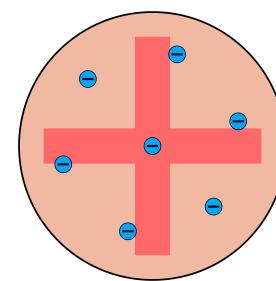
Robert Boyle
Bei konstantem T gilt $pV=p'V'$ für Gase

Materie besteht aus Molekülen, die aus Atomen bestehen

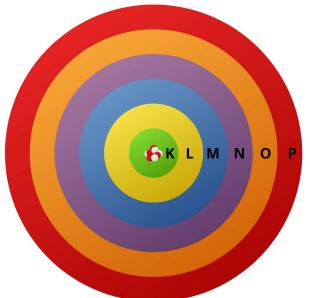


John Dalton
Atome eines Elements sind identisch

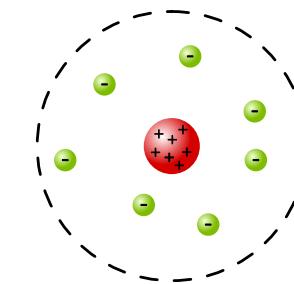
Chemische Reaktionen = Neuanordnung der Atome



Ernest Rutherford
Positive Ladung ist im Zentrum des Atoms positioniert und macht die Masse aus

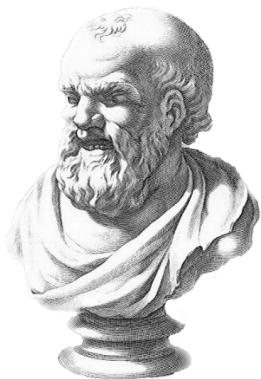


Joseph John Thomson
Atom besteht aus positiver Masse, in der sich negative Elektronen bewegen



Niels Bohr
Elektronen befinden sich auf Schalen um den Atomkern

Was bedeutet “unteilbar”?

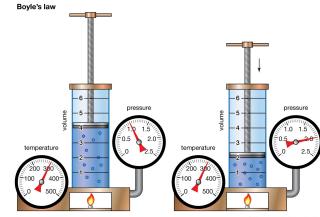


Democritus
Die Welt besteht aus Atomen.

Griechisch:
átomos - unteilbar

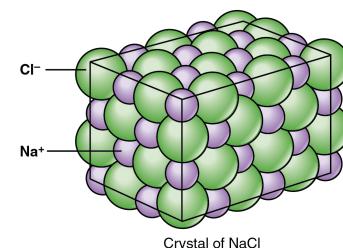


Aristotle
Atome sind zu kompliziert.
4 Elemente:
Luft, Wasser,
Erde, Feuer

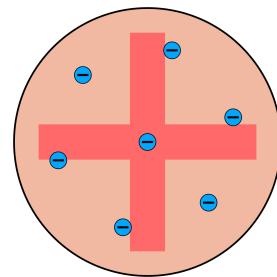


Robert Boyle
Bei konstantem T gilt $pV=p'V'$ für Gase

Materie besteht aus Molekülen, die aus Atomen bestehen



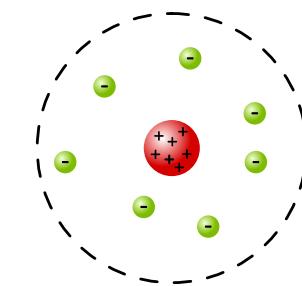
John Dalton
Atome eines Elements sind identisch
Chemische Reaktionen = Neuanordnung der Atome



Ernest Rutherford
Positive Ladung ist im Zentrum des Atoms positioniert und macht die Masse aus

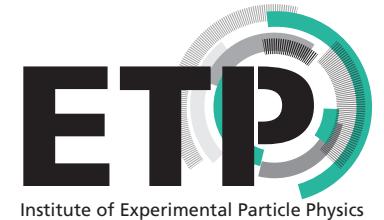


Joseph John Thomson
Atom besteht aus positiver Masse, in der sich negative Elektronen bewegen

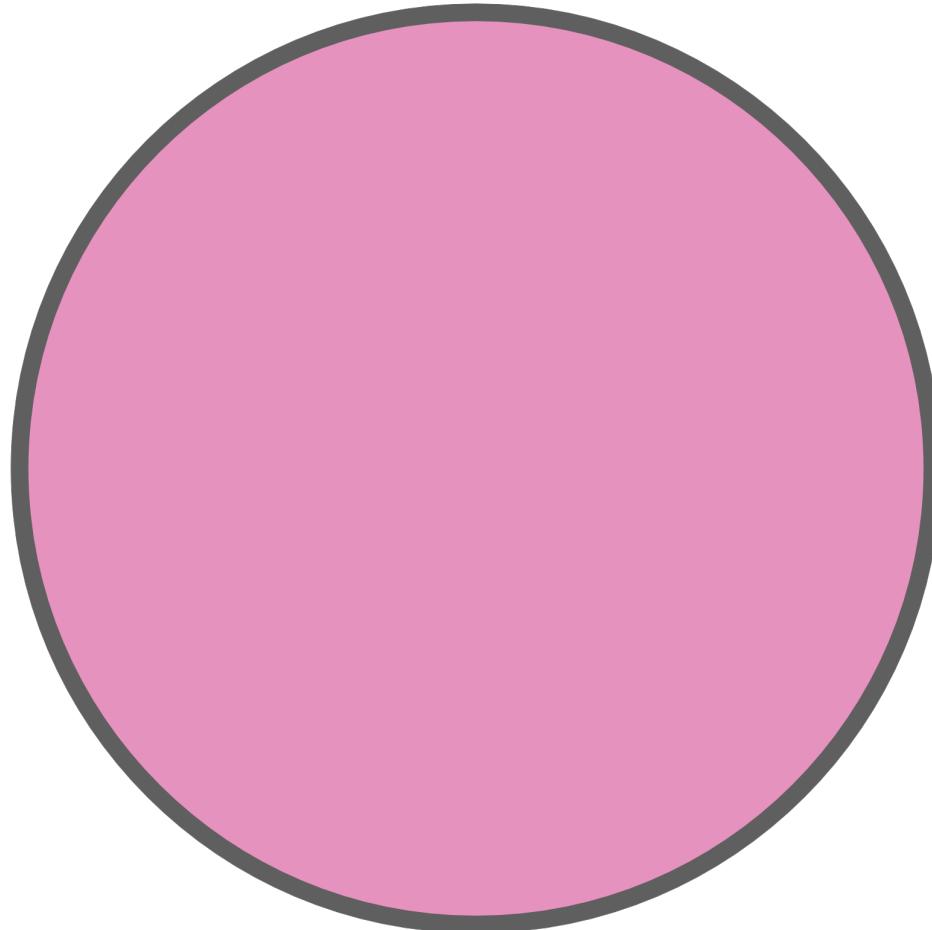


Niels Bohr
Elektronen befinden sich auf Schalen um den Atomkern

Was ist heute “unteilbar”?

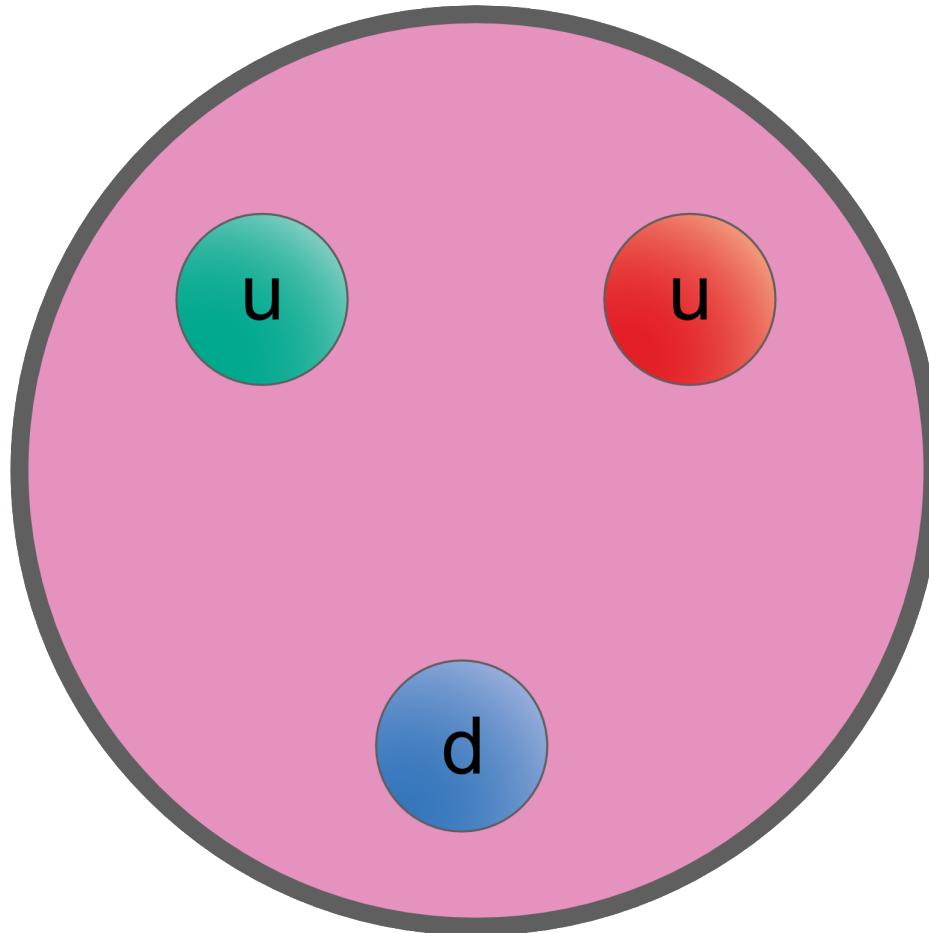


Was ist heute “unteilbar”?



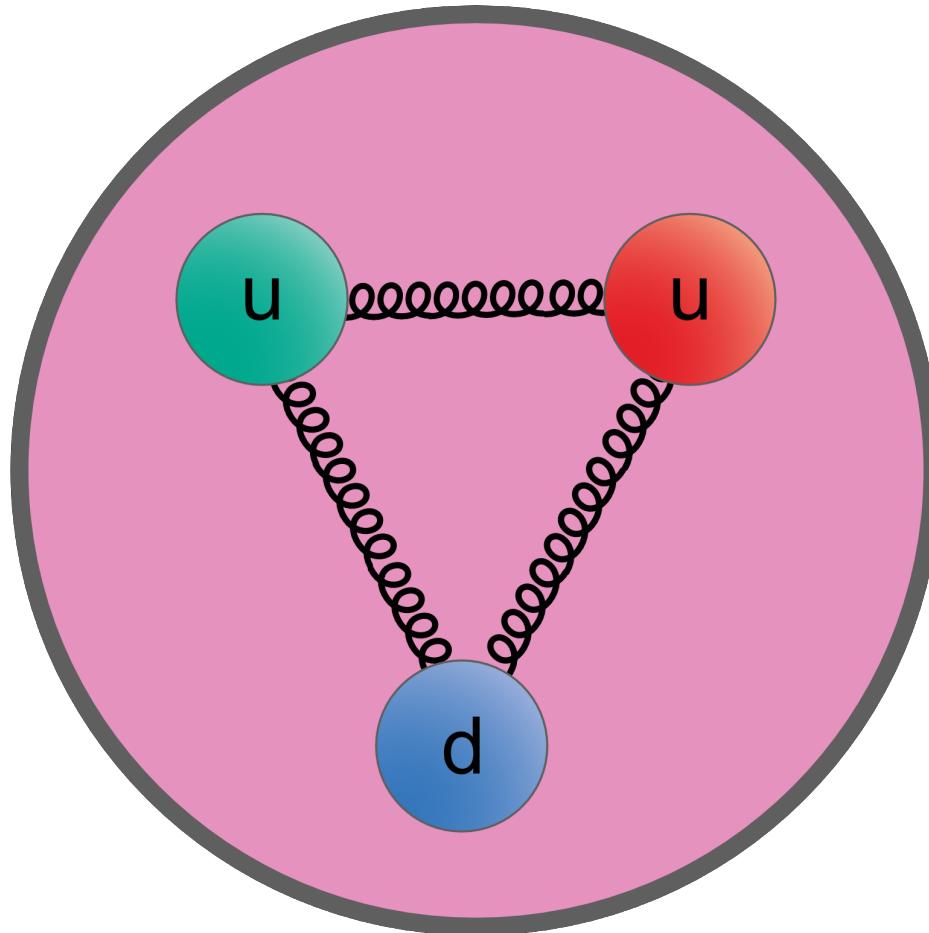
- Das Proton kann auch weiter aufgeteilt werden
in...

Was ist heute “unteilbar”?



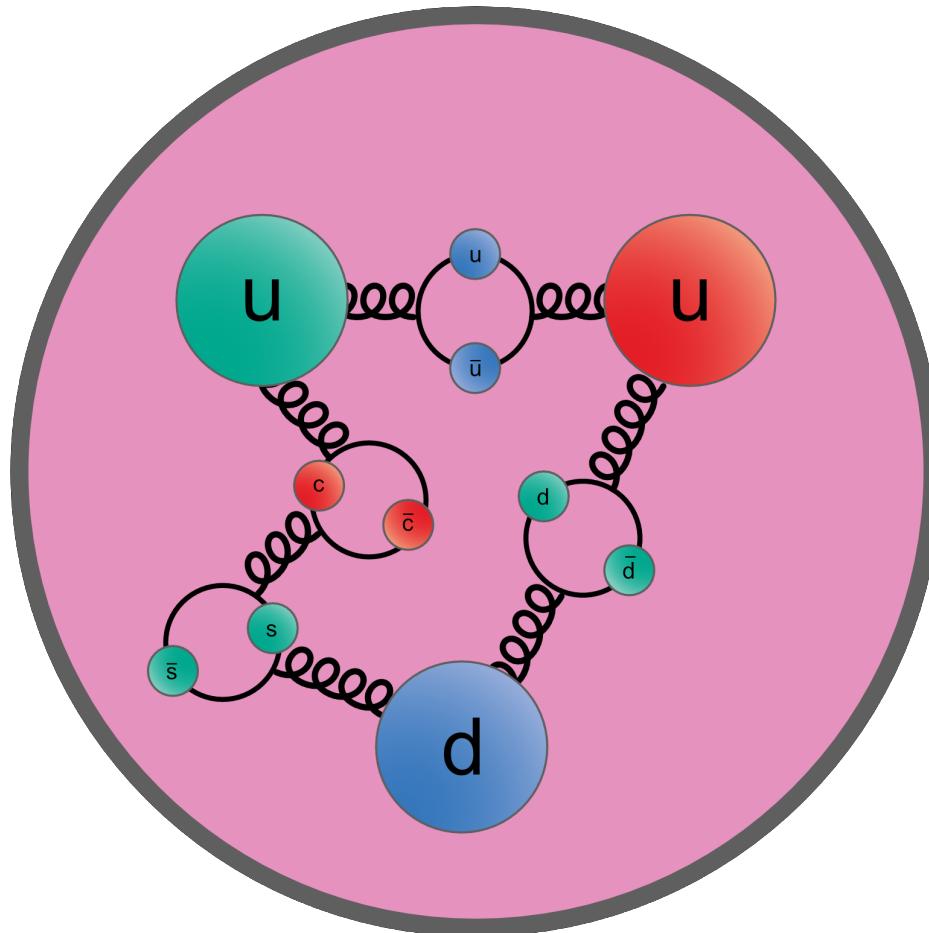
- Das Proton kann auch weiter aufgeteilt werden in...
 - ... Valenzquarks

Was ist heute “unteilbar”?



- Das Proton kann auch weiter aufgeteilt werden in...
 - ... Valenzquarks
 - ... Gluonen

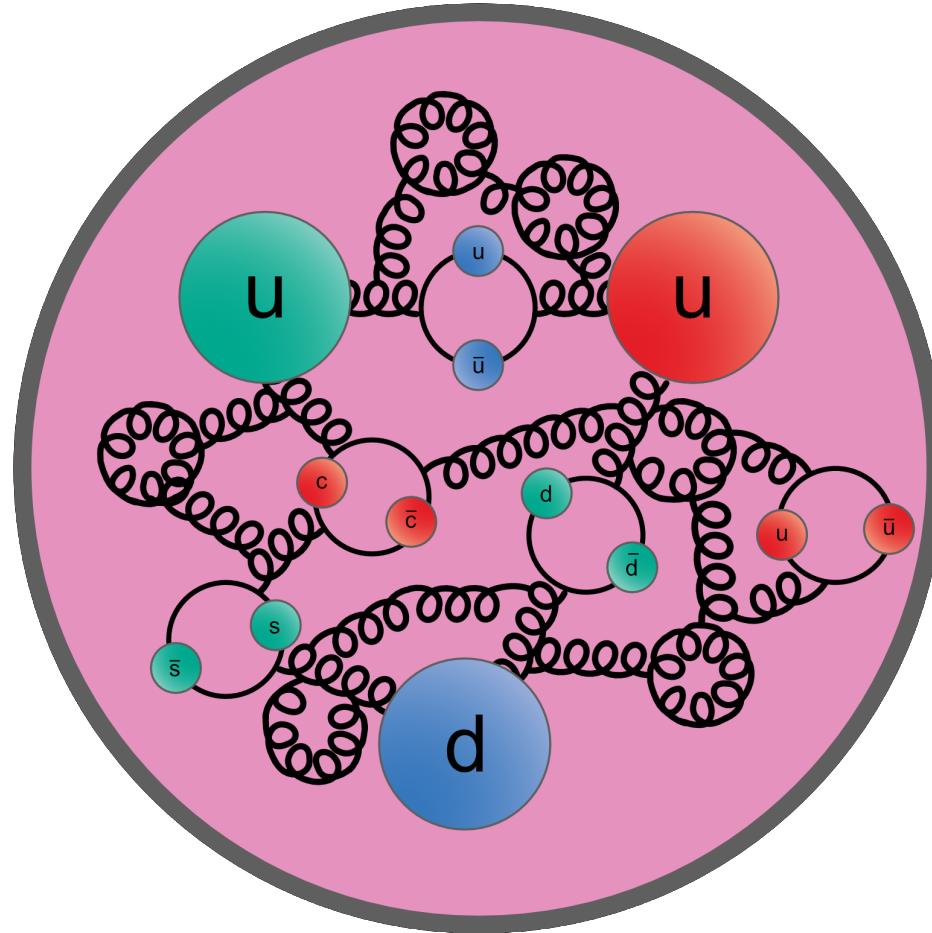
Was ist heute “unteilbar”?



■ Das Proton kann auch weiter aufgeteilt werden
in...

- ... Valenzquarks
- ... Gluonen
- ... Seequarks

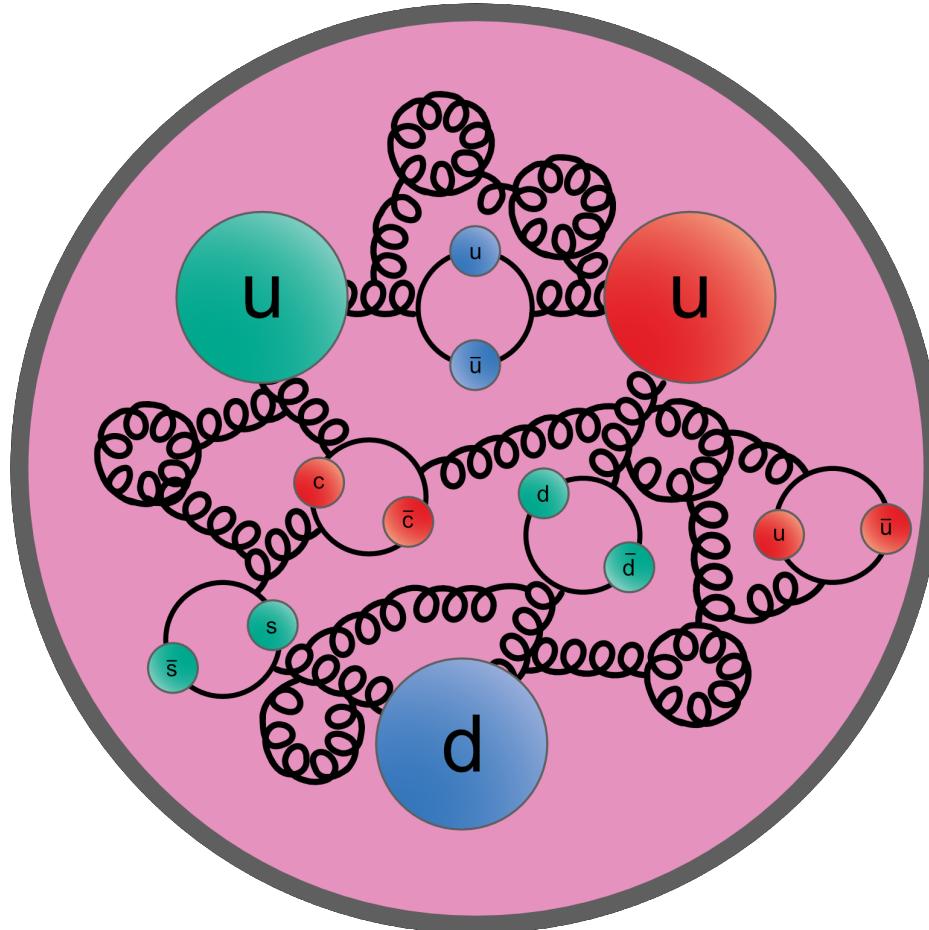
Was ist heute “unteilbar”?



■ Das Proton kann auch weiter aufgeteilt werden
in...

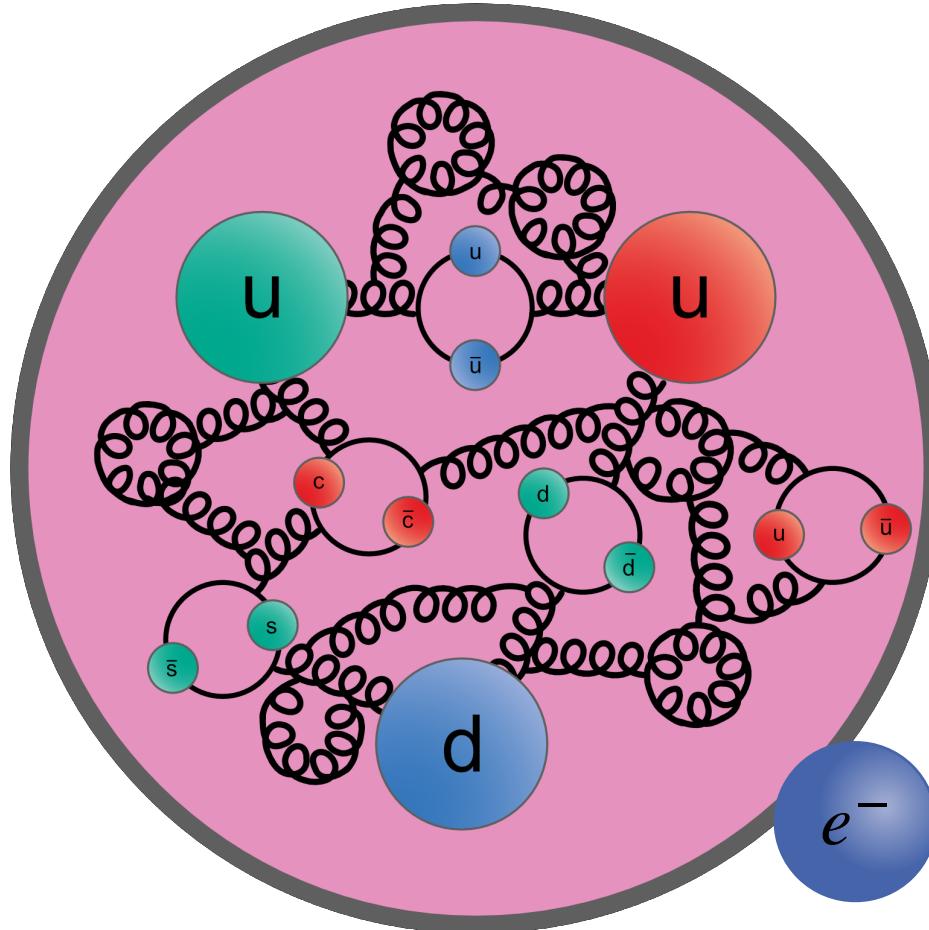
- ... Valenzquarks
- ... Gluonen
- ... Seequarks
- ... Gluonen-Selbst-Wechselwirkung

Was ist heute “unteilbar”?



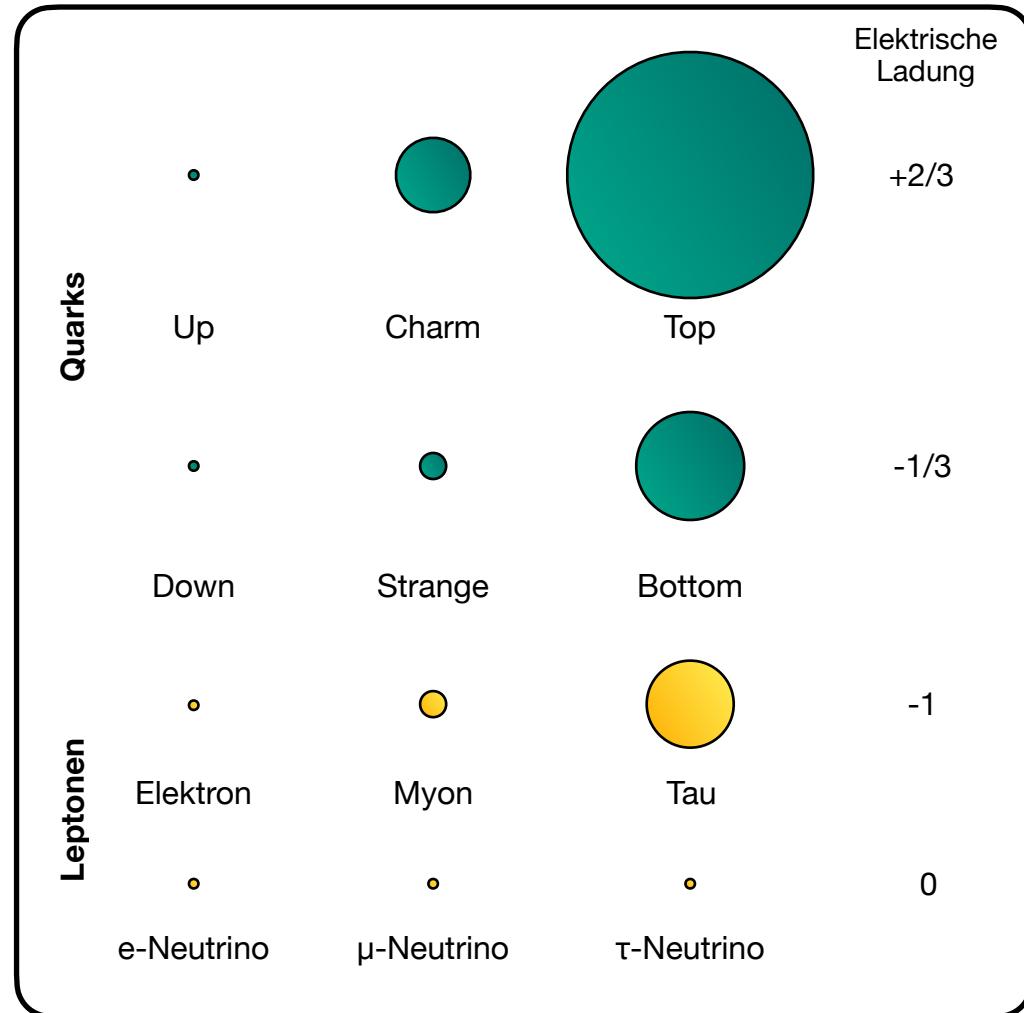
- Das Proton kann auch weiter aufgeteilt werden in...
 - ... Valenzquarks
 - ... Gluonen
 - ... Seequarks
 - ... Gluonen-Selbst-Wechselwirkung
- Woher wissen wir das?
 - Streuexperimente!
 - Die Ruhemasse des Protons ist 80-100 Mal größer als die Ruhemassen aller Valenzquarks, während Gluonen keine Ruhemasse haben

Was ist heute “unteilbar”?

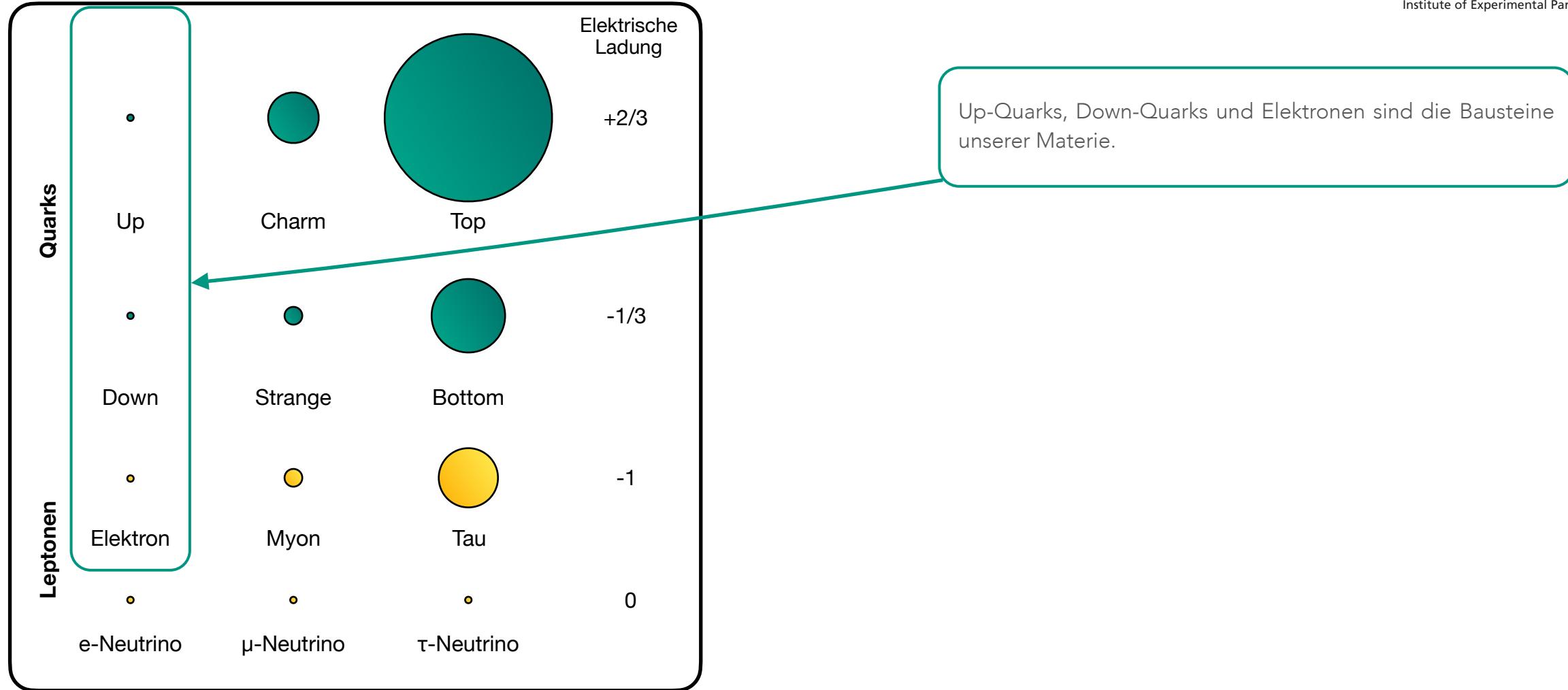


- Das Proton kann auch weiter aufgeteilt werden in...
 - ... Valenzquarks
 - ... Gluonen
 - ... Seequarks
 - ... Gluonen-Selbst-Wechselwirkung
- Woher wissen wir das?
 - Streuexperimente!
 - Die Ruhemasse des Protons ist 80-100 Mal größer als die Ruhemassen aller Valenzquarks, während Gluonen keine Ruhemasse haben

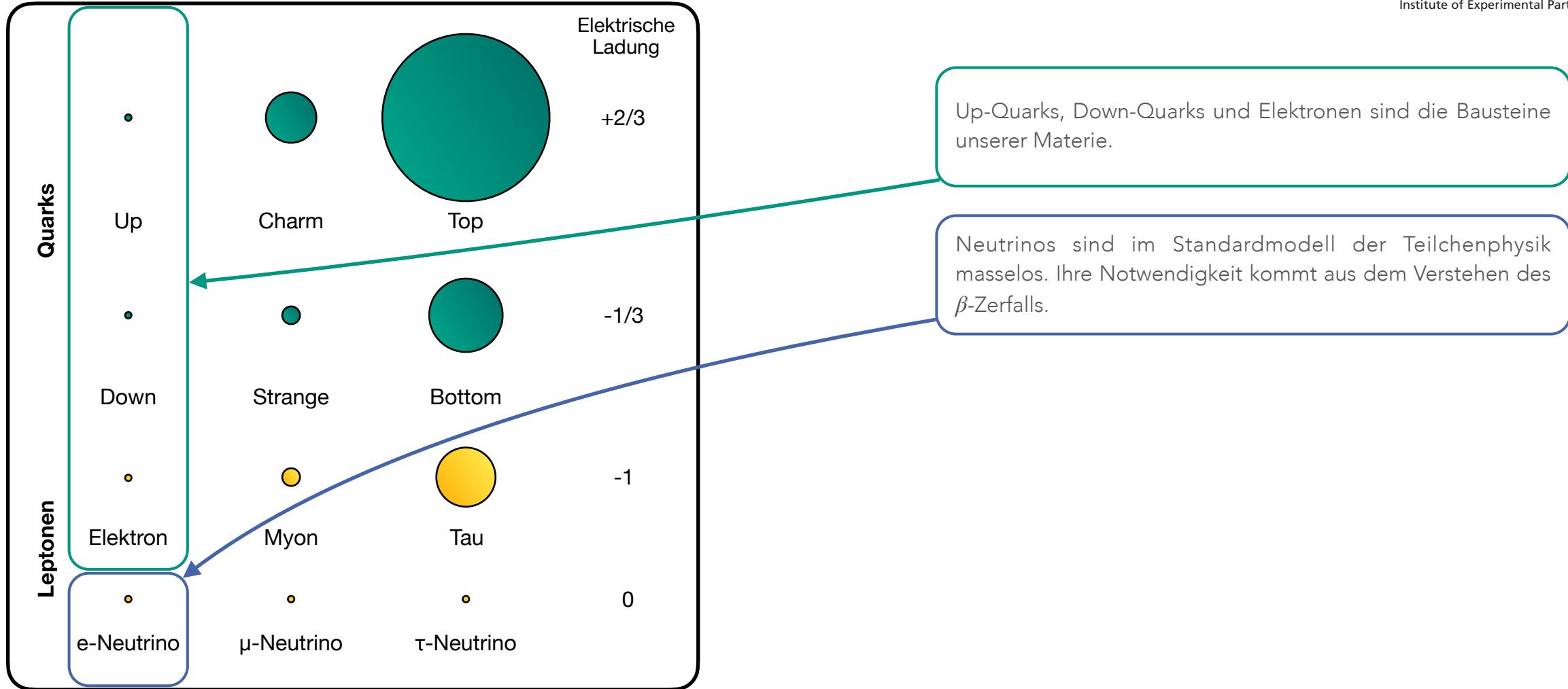
Elementarteilchen



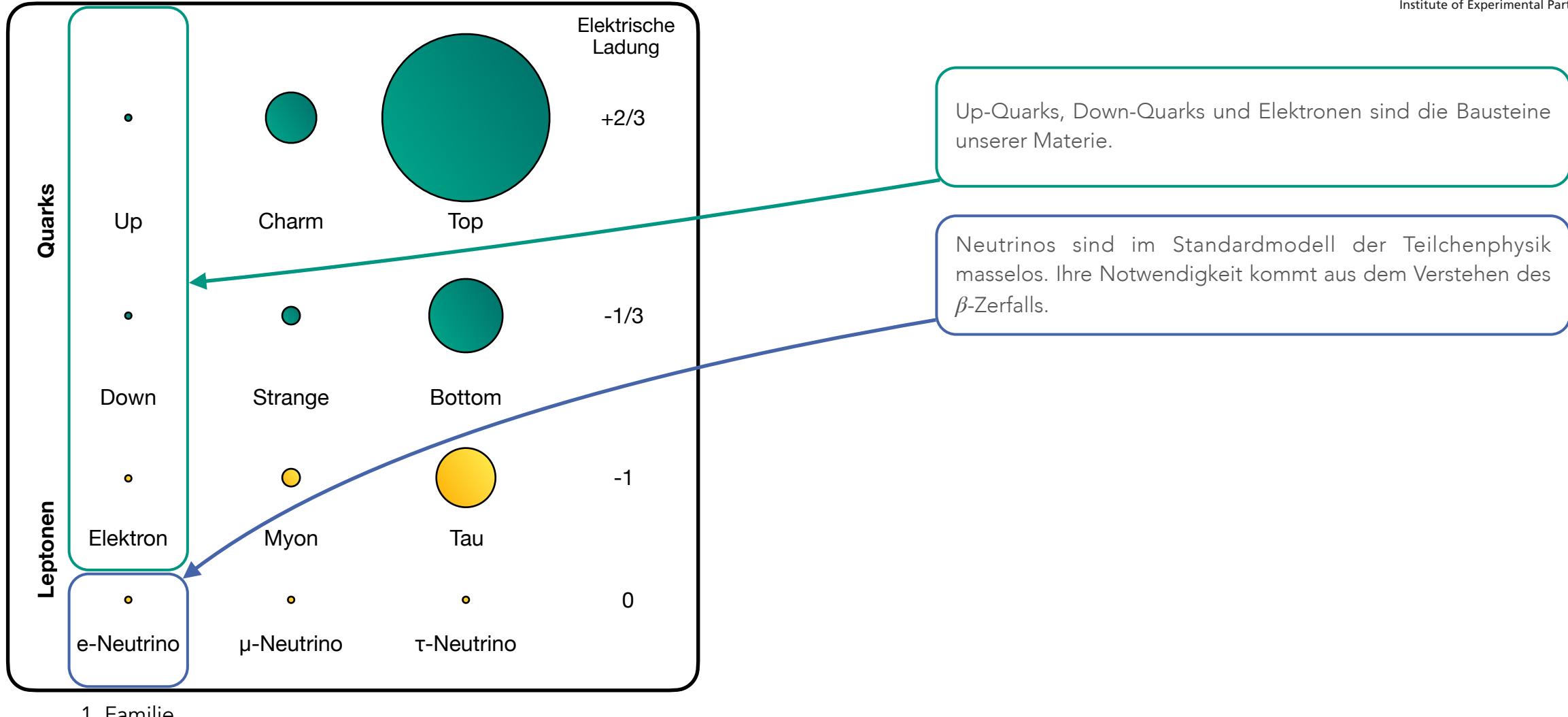
Elementarteilchen



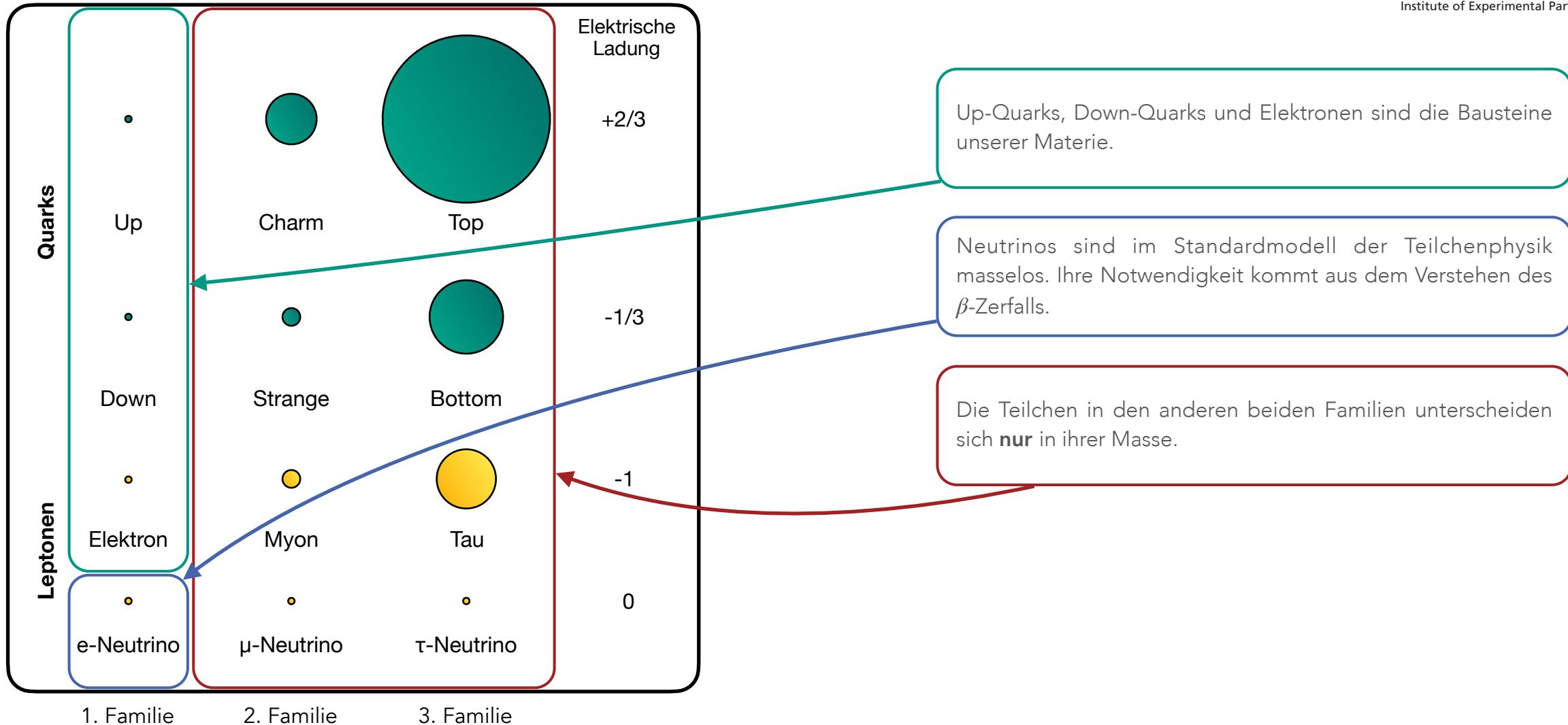
Elementarteilchen



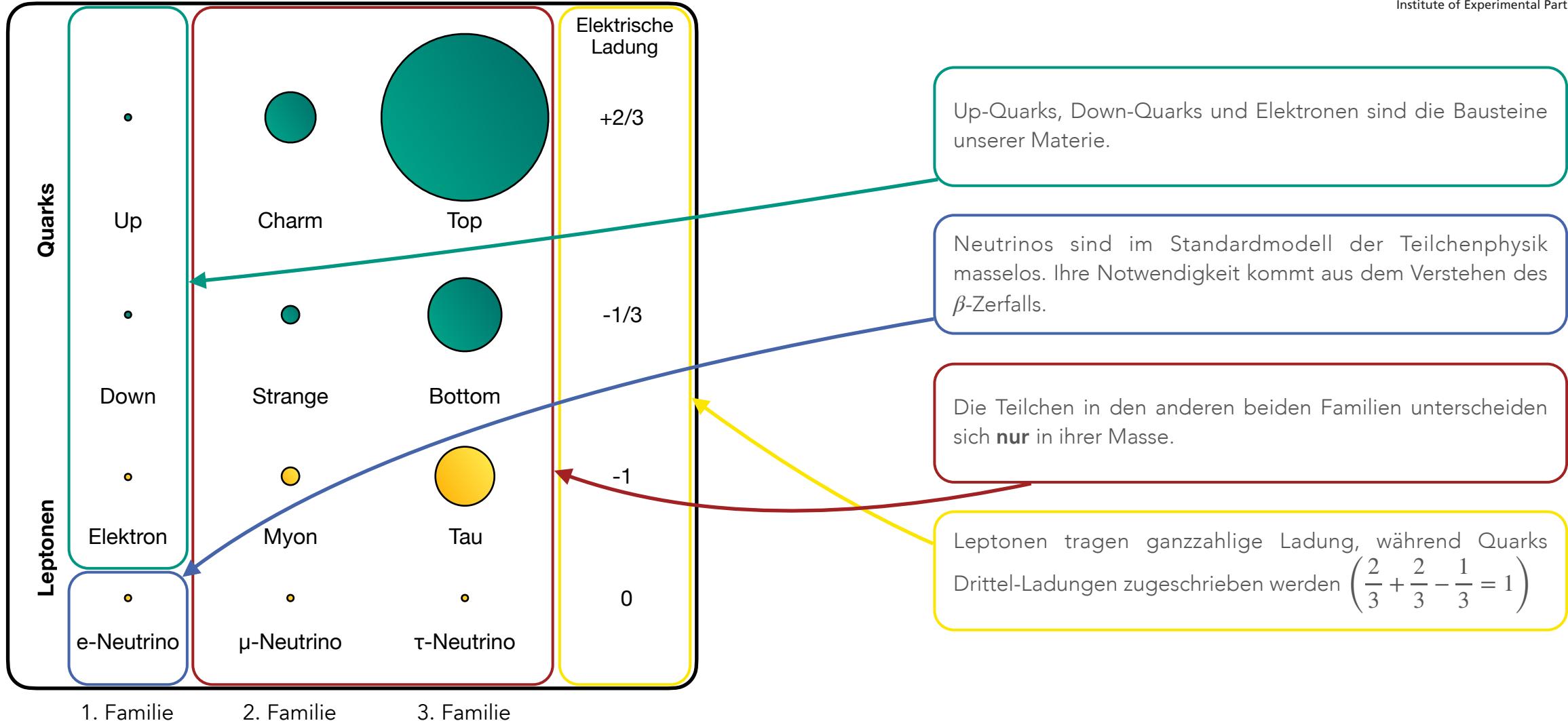
Elementarteilchen



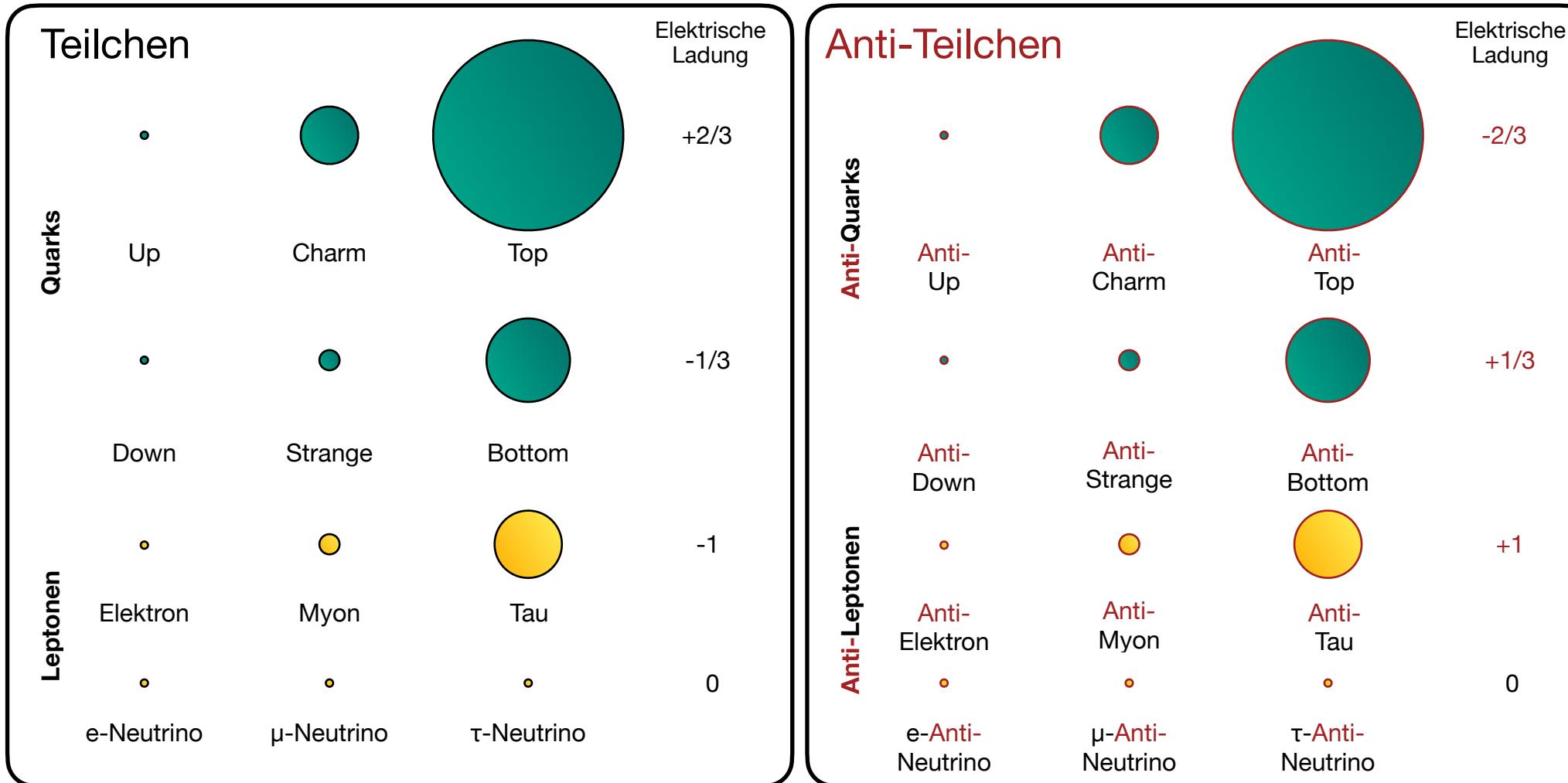
Elementarteilchen



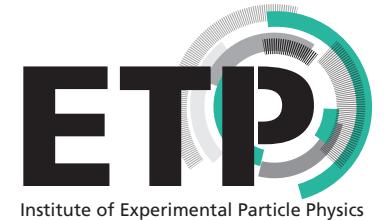
Elementarteilchen



Anti-Elementarteilchen



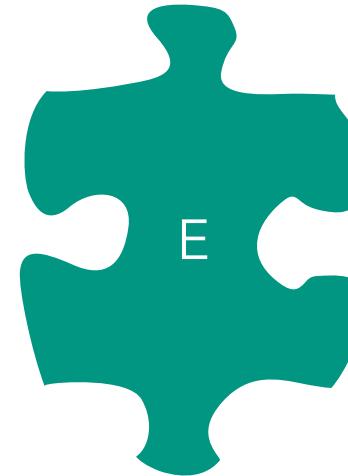
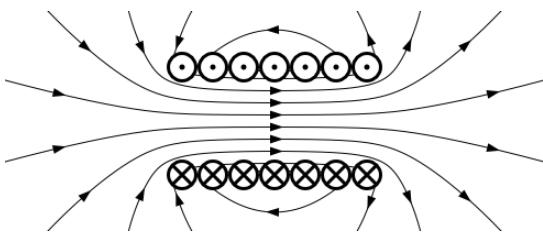
Wechselwirkungen



Wechselwirkungen

Elektromagnetisch

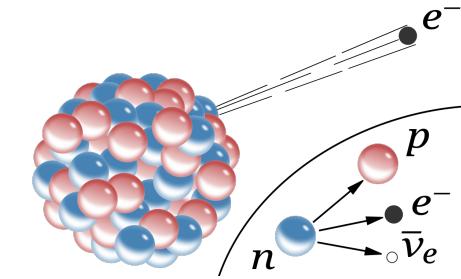
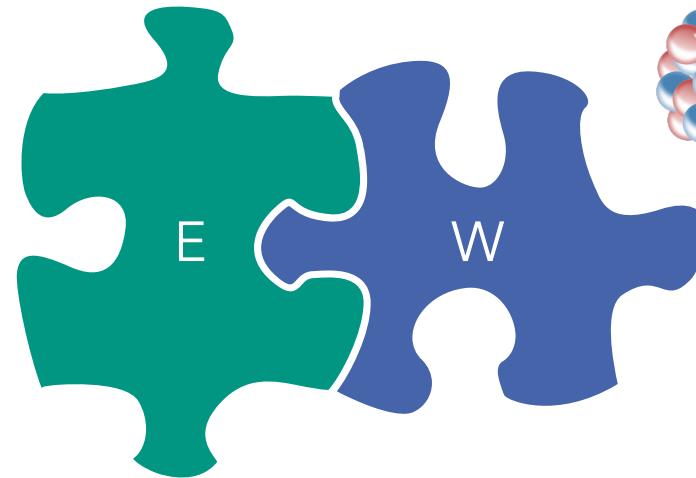
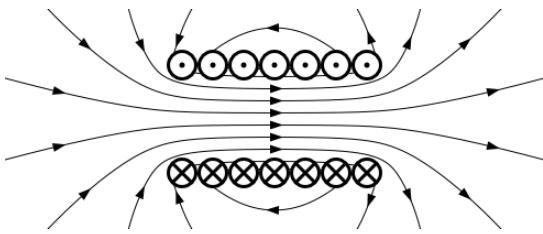
Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen
Reichweite ist praktisch unendlich mit sinkender Kraft
Verantwortlich für Wechselwirkung zwischen Materie und Licht



Wechselwirkungen

Elektromagnetisch

Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen
Reichweite ist praktisch unendlich mit sinkender Kraft
Verantwortlich für Wechselwirkung zwischen Materie und Licht



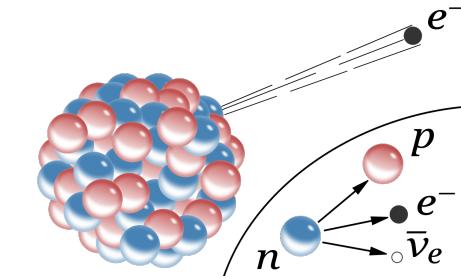
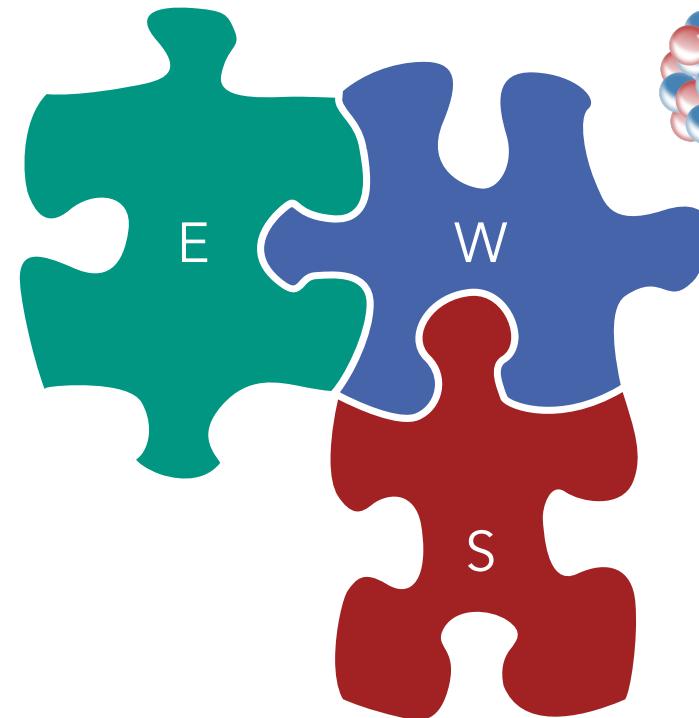
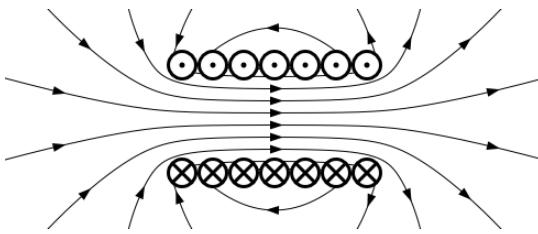
Wechselwirkung zwischen allen Elementarteilchen
Reichweite ist weniger als Durchmesser des Protons
Bekannt aus dem β -Zerfall
Kann die Art des Teilchens ändern



Wechselwirkungen

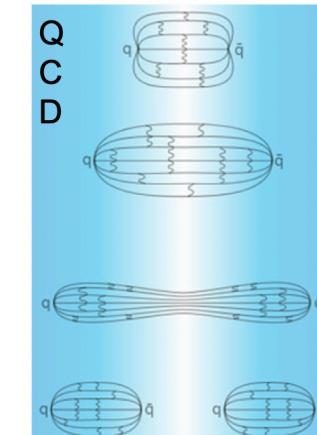
Elektromagnetisch

Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen
Reichweite ist praktisch unendlich mit sinkender Kraft
Verantwortlich für Wechselwirkung zwischen Materie und Licht



Schwach

Wechselwirkung zwischen allen Elementarteilchen
Reichweite ist weniger als Durchmesser des Protons
Bekannt aus dem β -Zerfall
Kann die Art des Teilchens ändern



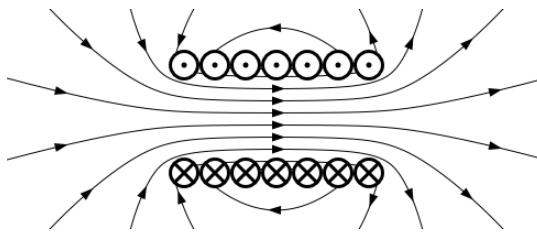
Stark

Wechselwirkung zwischen Quarks
Reichweite ungefähr Radius des Protons
Bei Distanzen viel kleiner 1 fm verhalten sich Quarks wie freie Teilchen
Bei Distanzen ab 1 fm ist es günstiger, ein neues Quarkpaar zu erzeugen

Wechselwirkungen

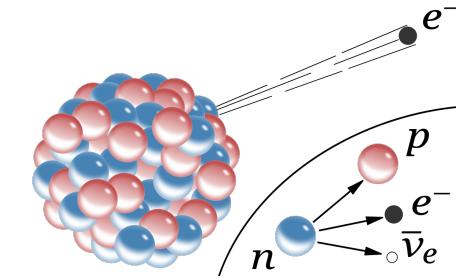
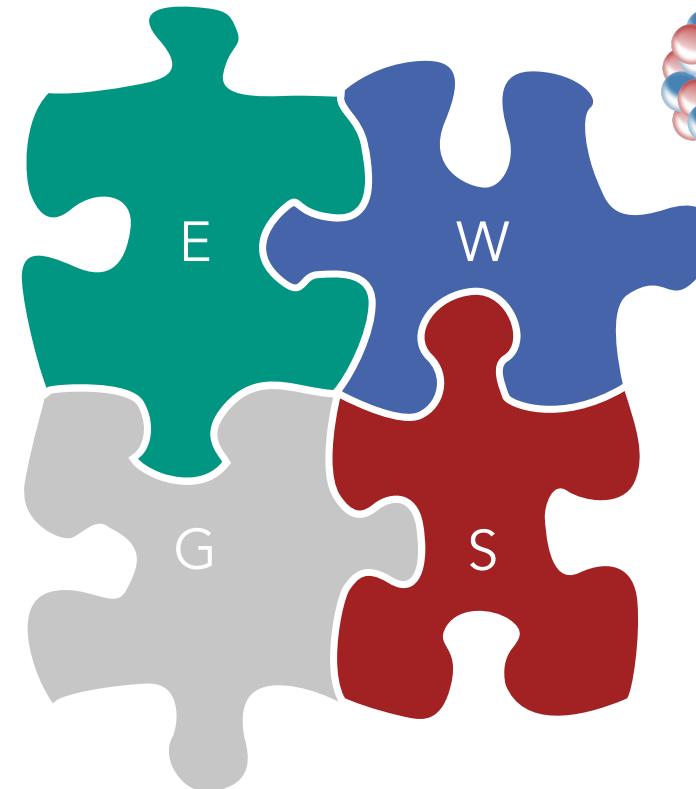
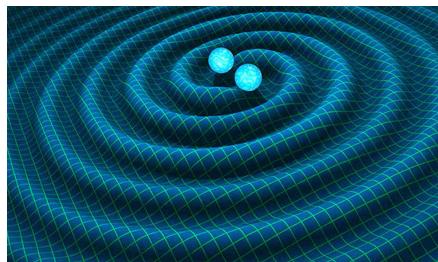
Elektromagnetisch

Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen
Reichweite ist praktisch unendlich mit sinkender Kraft
Verantwortlich für Wechselwirkung zwischen Materie und Licht



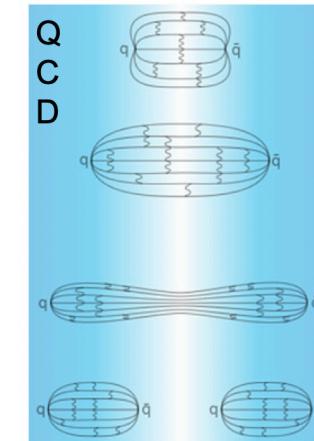
Gravitation

Wechselwirkung mit Masse und Energie
Stärke der Kraft erst signifikant auf großen, makroskopischen Distanzen
Nicht betrachtet in der Teilchenphysik



Schwach

Wechselwirkung zwischen allen Elementarteilchen
Reichweite ist weniger als Durchmesser des Protons
Bekannt aus dem β -Zerfall
Kann die Art des Teilchens ändern



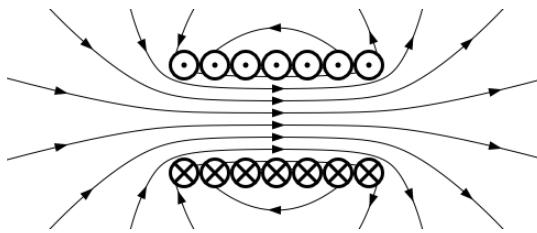
Stark

Wechselwirkung zwischen Quarks
Reichweite ungefähr Radius des Protons
Bei Distanzen viel kleiner 1 fm verhalten sich Quarks wie freie Teilchen
Bei Distanzen ab 1 fm ist es günstiger, ein neues Quarkpaar zu erzeugen

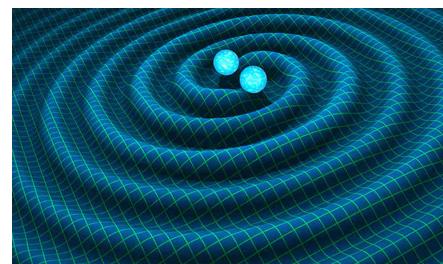
Wechselwirkungen

Elektromagnetisch

Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen
Reichweite ist praktisch unendlich mit sinkender Kraft
Verantwortlich für Wechselwirkung zwischen Materie und Licht

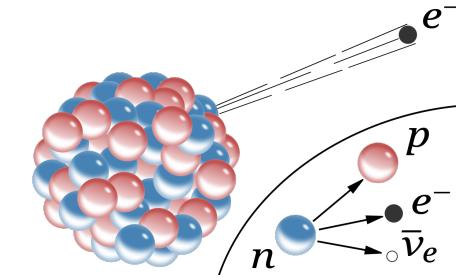
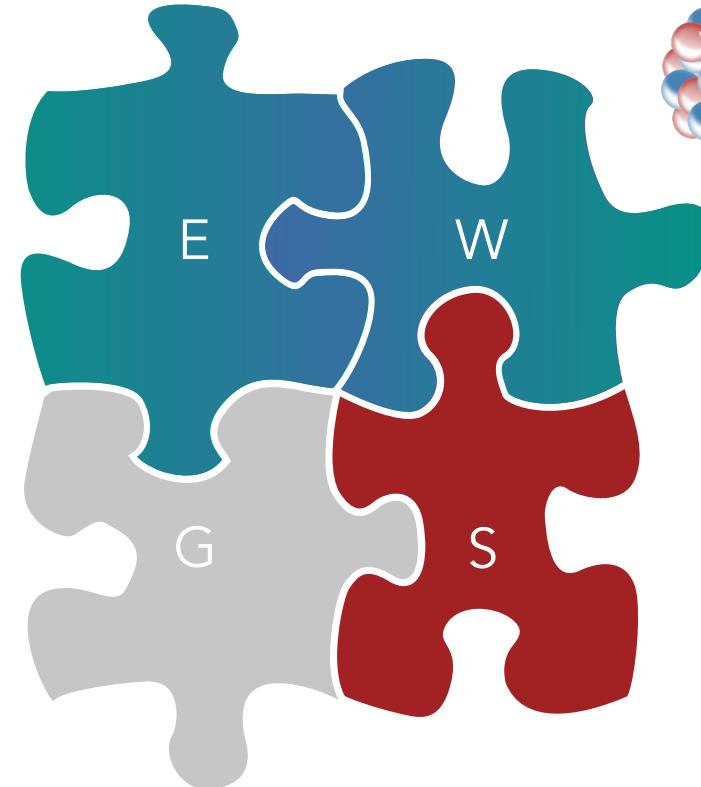


Gravitation



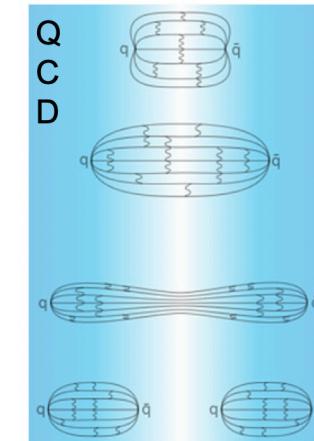
Wechselwirkung mit Masse und Energie
Stärke der Kraft erst signifikant auf großen, makroskopischen Distanzen
Nicht betrachtet in der Teilchenphysik

Elektro-Schwach



Schwach

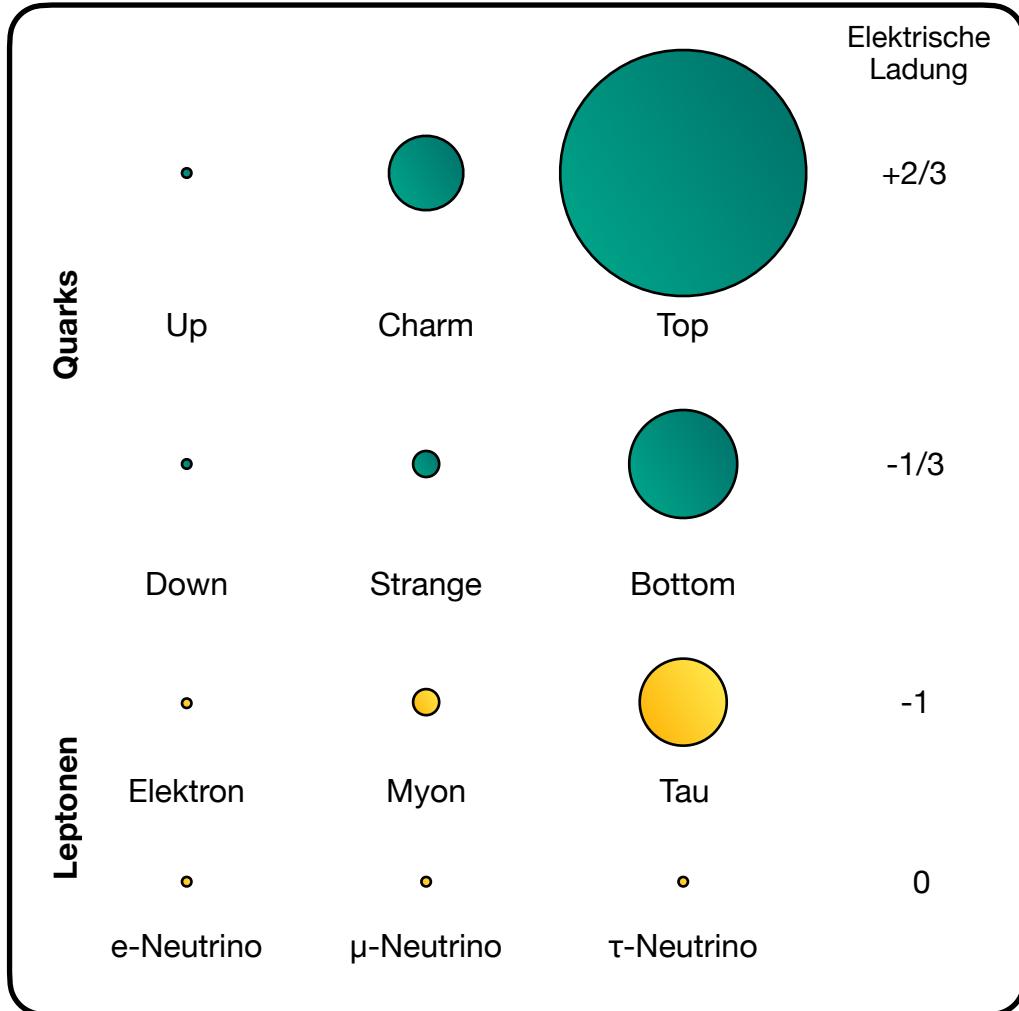
Wechselwirkung zwischen allen Elementarteilchen
Reichweite ist weniger als Durchmesser des Protons
Bekannt aus dem β -Zerfall
Kann die Art des Teilchens ändern



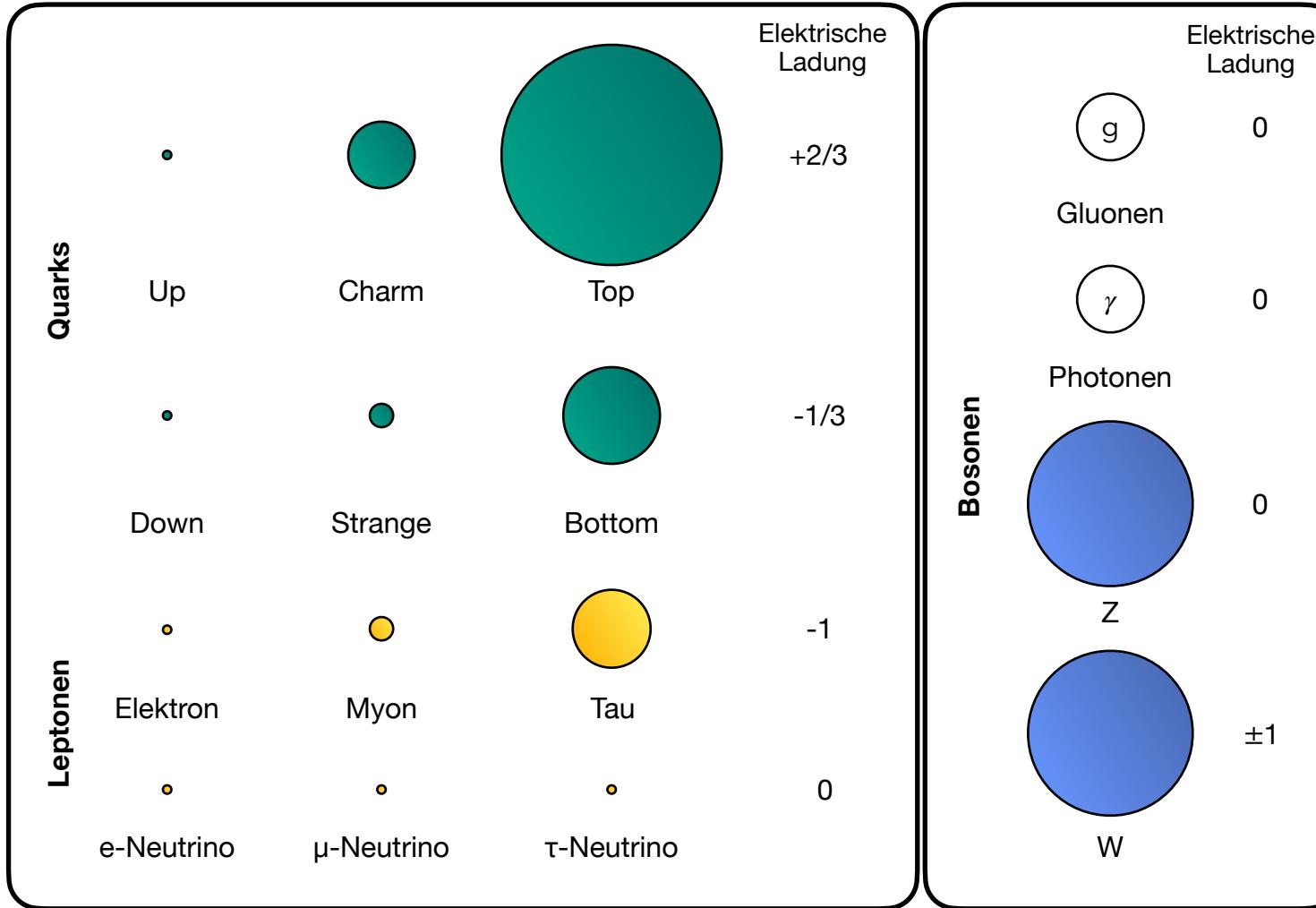
Stark

Wechselwirkung zwischen Quarks
Reichweite ungefähr Radius des Protons
Bei Distanzen viel kleiner 1 fm verhalten sich Quarks wie freie Teilchen
Bei Distanzen ab 1 fm ist es günstiger, ein neues Quarkpaar zu erzeugen

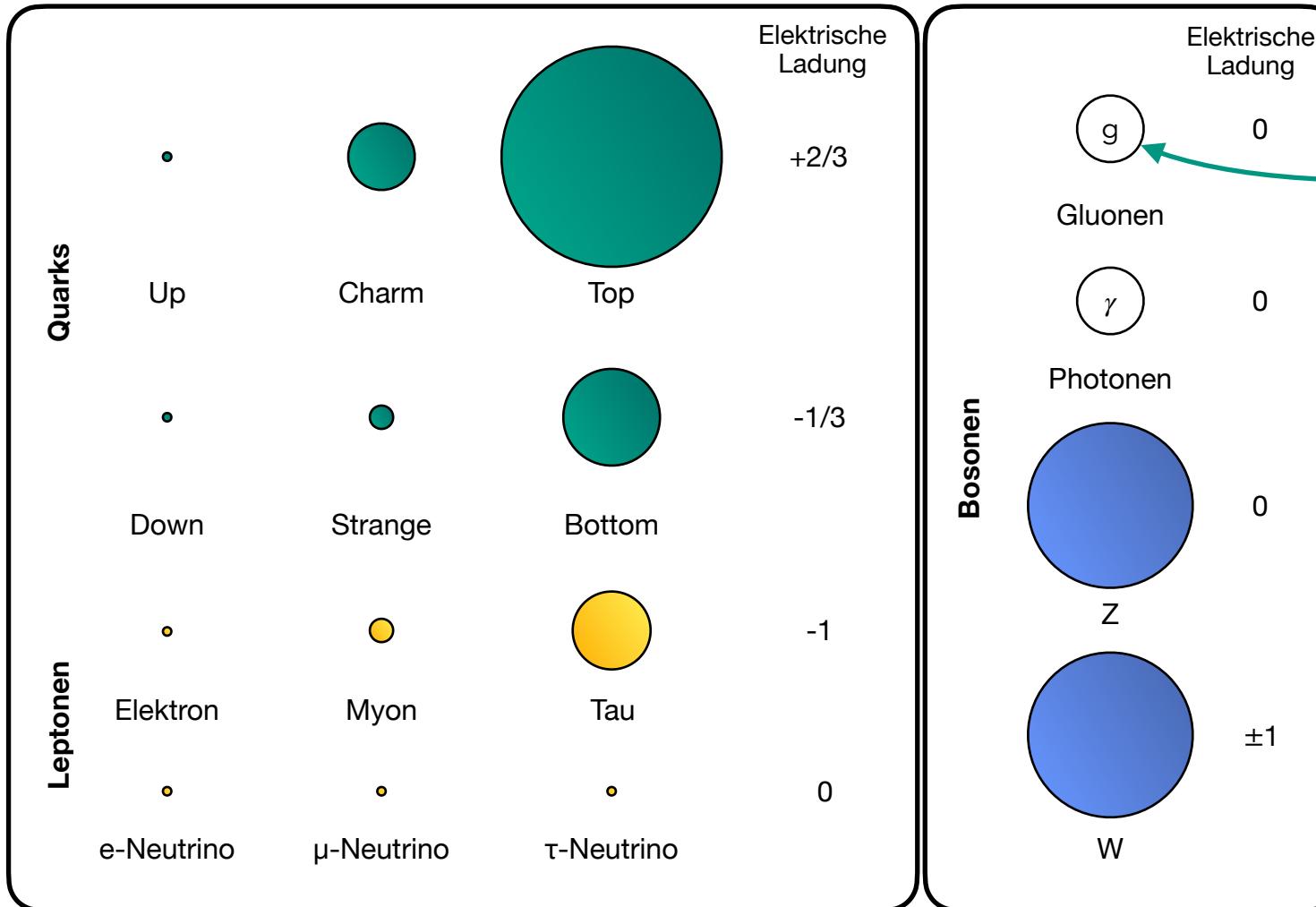
Wechselwirkungsteilchen



Wechselwirkungsteilchen

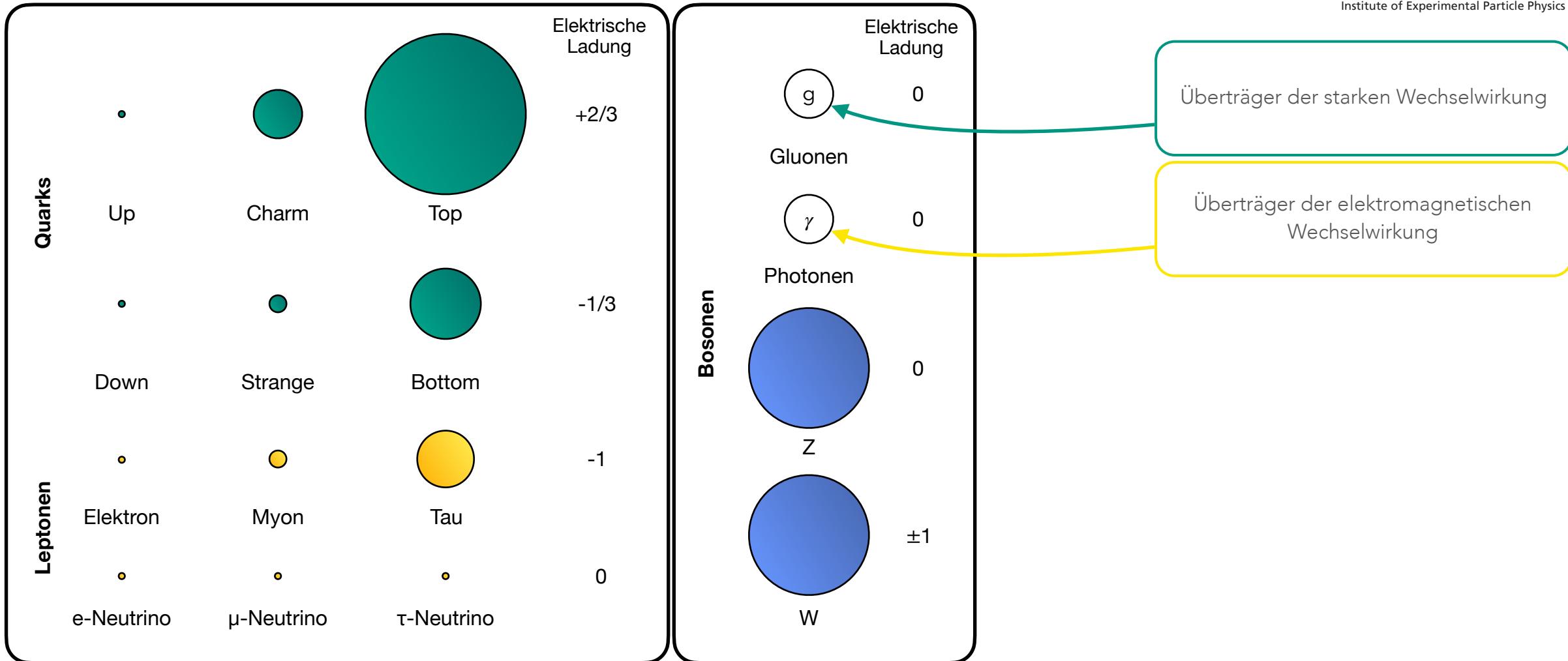


Wechselwirkungsteilchen

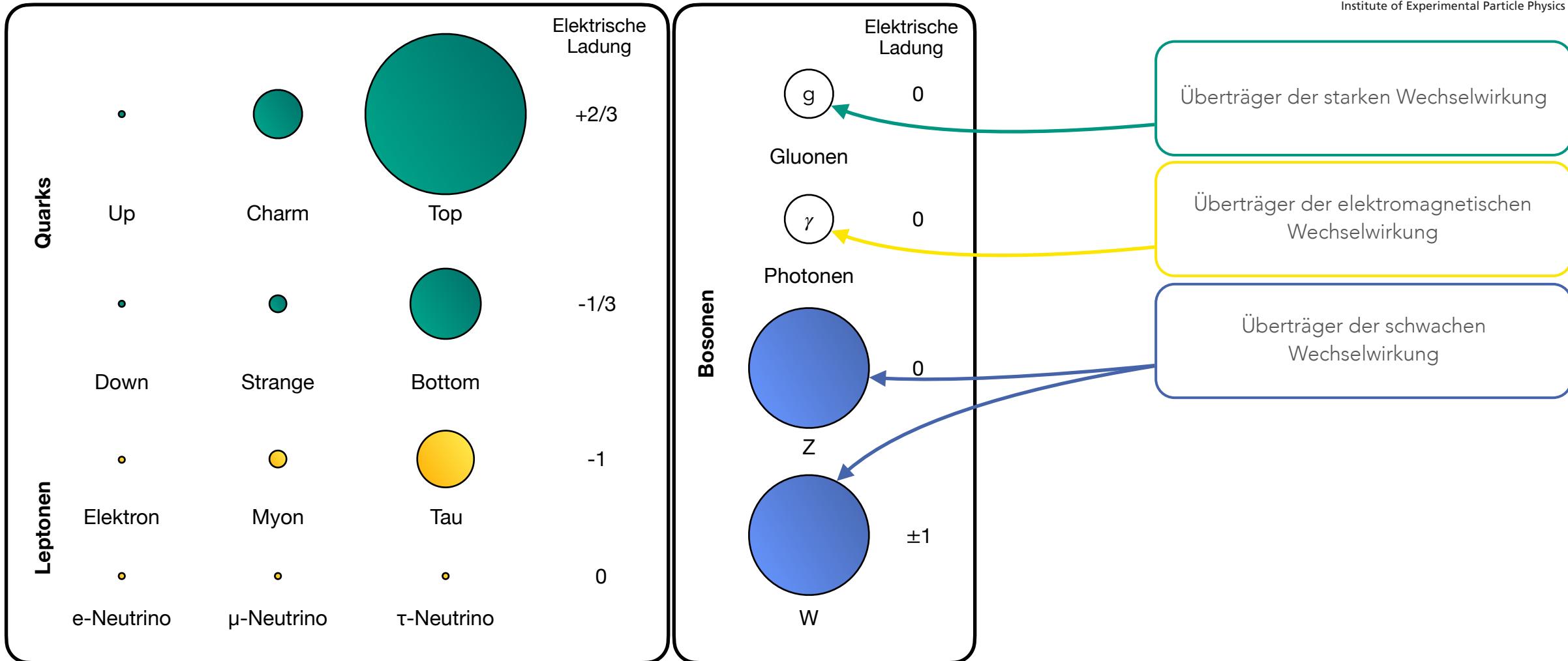


Überträger der starken Wechselwirkung

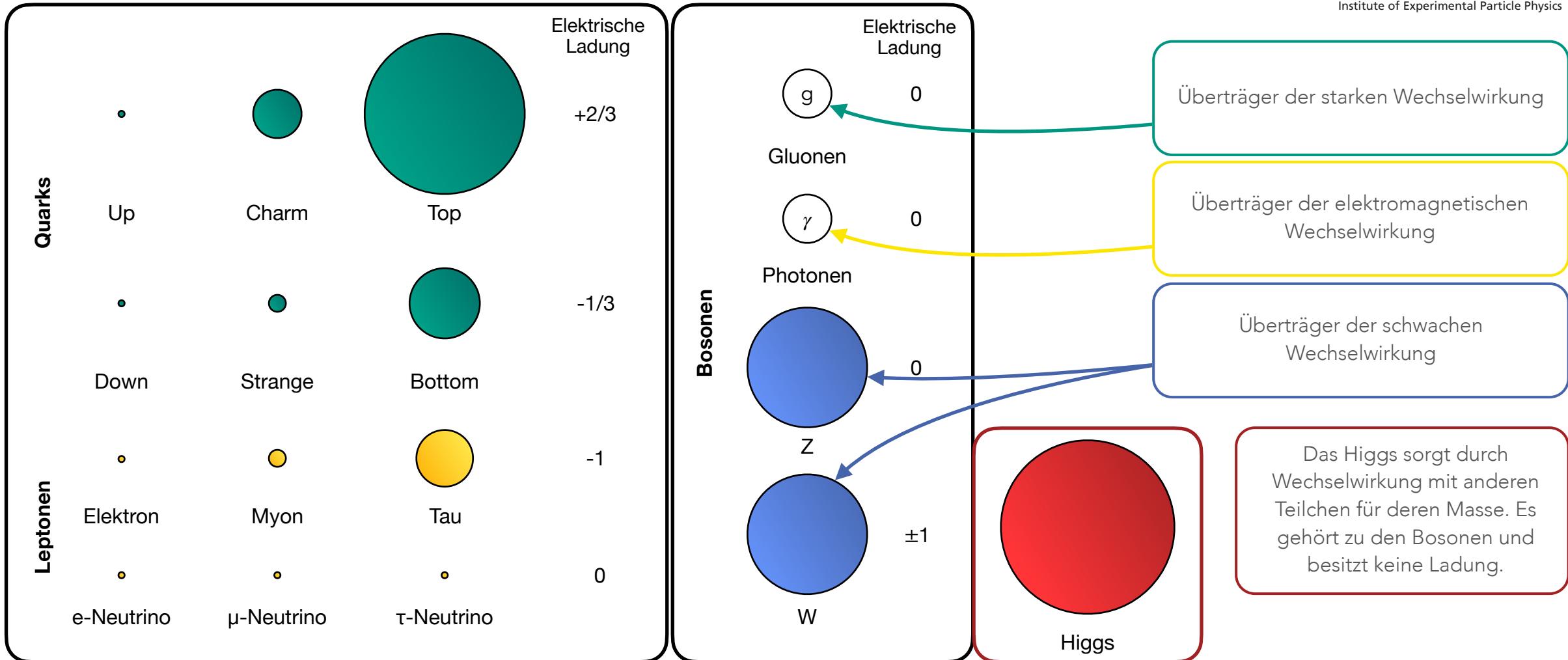
Wechselwirkungsteilchen



Wechselwirkungsteilchen

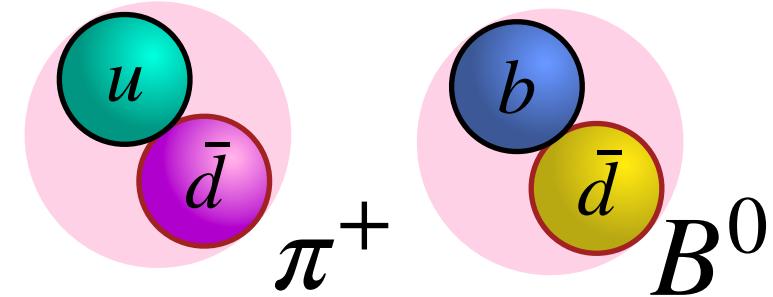
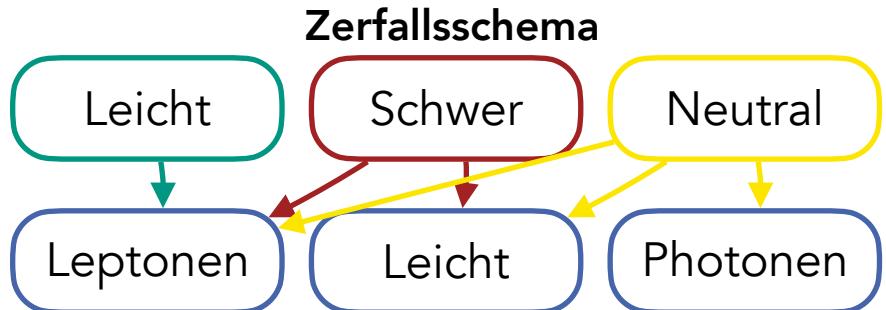


Wechselwirkungsteilchen



Mesonen

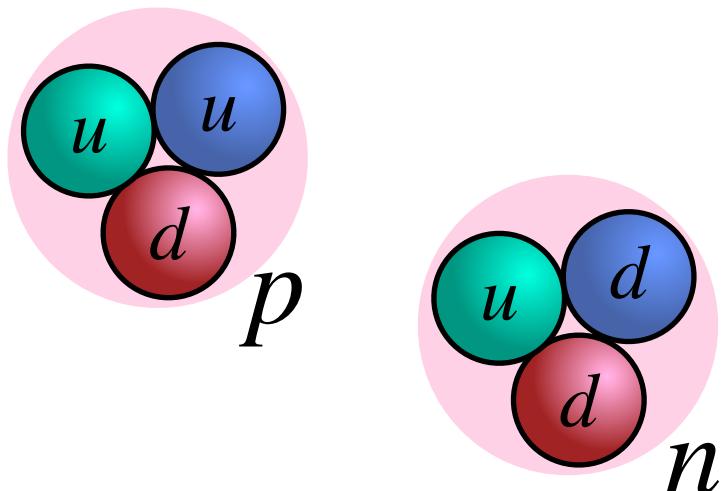
- Aus Quarks und Anti-Quarks können instabile Teilchen gebildet werden, die schnell wieder zerfallen
- Bei der Bildung der sogenannten Mesonen sind einige Regeln der Quantenmechanik zu beachten, ansonsten hat man freie Hand
- Einschränkungen bestehen bei der experimentellen Erzeugung und dem Nachweis schwerer Mesonen, da diese zu kurzlebig sind, um sie nachzuweisen
- Mesonen haben immer die elektrische Ladung 0 oder ± 1



Mesonen	Quarks
π^+, π^-	$u\bar{d}, \bar{u}d$
π^0	$u\bar{u}, d\bar{d}$
K^+, K^-	$u\bar{s}, \bar{u}s$
K^0, \bar{K}^0	$d\bar{s}, \bar{d}s$
ϕ	$s\bar{s}$
J/Ψ	$c\bar{c}$
B^+, B^-	$u\bar{b}, \bar{u}b$
B^0, \bar{B}^0	$b\bar{d}, \bar{b}d$
Υ	$b\bar{b}$

Baryonen

- Baryonen bestehen aus drei Quarks, drei Anti-Quarks oder einer Mischung
- Für ihre Bildung gelten ähnliche Regeln wie bei den Mesonen
- Zusammen mit den Mesonen bilden die Baryonen die sogenannten Hadronen



Baryon resonance particles																	
	Nucleons	Δ particles		Λ particles		Σ particles		Ξ and Ω particles		Charmed particles	Bottom particles						
p	$\frac{1}{2}^+$ ***	$\Delta(1232)$	$\frac{3}{2}^+_+$	***	Λ	$\frac{1}{2}^+$	***	Σ^+	$\frac{1}{2}^+$	***	Ξ_c^0	$\frac{1}{2}^+$	***				
n	$\frac{1}{2}^+$ ***	$\Delta(1600)$	$\frac{3}{2}^+_+$	***	$\Lambda(1405)$	$\frac{1}{2}^-$	***	Σ^0	$\frac{1}{2}^+$	***	Ξ_c^-	$\frac{1}{2}^+$	***				
N(1440)	$\frac{1}{2}^+$ ***	$\Delta(1620)$	$\frac{1}{2}^-$	***	$\Lambda(1520)$	$\frac{3}{2}^-$	***	Σ^-	$\frac{1}{2}^+$	***	$\Xi(1530)$	$\frac{3}{2}^+_0$	***				
N(1520)	$\frac{3}{2}^-$ ***	$\Delta(1700)$	$\frac{3}{2}^-$	***	$\Lambda(1600)$	$\frac{1}{2}^+$	***	$\Sigma(1385)$	$\frac{3}{2}^+_+$	***	$\Xi(1620)$	*	*				
N(1535)	$\frac{1}{2}^-$ ***	$\Delta(1750)$	$\frac{1}{2}^-$	***	$\Lambda(1670)$	$\frac{1}{2}^-$	***	$\Sigma(1480)$	*	***	$\Xi(1690)$	*	*				
N(1650)	$\frac{1}{2}^-$ ***	$\Delta(1900)$	$\frac{1}{2}^-$	***	$\Lambda(1690)$	$\frac{3}{2}^-$	***	$\Sigma(1560)$	*	***	$\Xi(1820)$	$\frac{3}{2}^-$	***				
N(1675)	$\frac{5}{2}^-$ ***	$\Delta(1905)$	$\frac{5}{2}^+_+$	***	$\Lambda(1710)$	$\frac{1}{2}^+$	***	$\Sigma(1580)$	$\frac{3}{2}^-$	***	$\Xi(1950)$	*	*				
N(1680)	$\frac{5}{2}^+$ ***	$\Delta(1910)$	$\frac{1}{2}^+$	***	$\Lambda(1800)$	$\frac{1}{2}^-$	***	$\Sigma(1620)$	$\frac{1}{2}^-$	***	$\Xi(2030)$	$\frac{5}{2}?$	***				
N(1700)	$\frac{3}{2}^-$ ***	$\Delta(1920)$	$\frac{3}{2}^+_+$	***	$\Lambda(1810)$	$\frac{1}{2}^+$	***	$\Sigma(1660)$	$\frac{1}{2}^+$	***	$\Xi(2120)$	*	*				
N(1710)	$\frac{1}{2}^+$ ***	$\Delta(1930)$	$\frac{5}{2}^-$	***	$\Lambda(1820)$	$\frac{5}{2}^+$	***	$\Sigma(1670)$	$\frac{3}{2}^-$	***	$\Xi(2250)$	*	*				
N(1720)	$\frac{3}{2}^+$ ***	$\Delta(1940)$	$\frac{3}{2}^-$	***	$\Lambda(1830)$	$\frac{5}{2}^-$	***	$\Sigma(1690)$	*	***	$\Xi(2370)$	*	*				
N(1860)	$\frac{5}{2}^+$ **	$\Delta(1950)$	$\frac{7}{2}^+_+$	***	$\Lambda(1890)$	$\frac{3}{2}^+$	***	$\Sigma(1730)$	$\frac{3}{2}^+_+$	***	$\Xi(2500)$	*	*				
N(1875)	$\frac{3}{2}^-$ ***	$\Delta(2000)$	$\frac{5}{2}^+_+$	**	$\Lambda(2000)$	*	*	$\Sigma(1750)$	$\frac{1}{2}^-$	***	*	Ξ_c^0	$\frac{1}{2}^+$	***			
N(1880)	$\frac{1}{2}^+$ ***	$\Delta(2150)$	$\frac{1}{2}^-$	*	$\Lambda(2020)$	$\frac{7}{2}^+$	*	$\Sigma(1770)$	$\frac{1}{2}^+$	*	Ω^-	$\frac{3}{2}^+_+$	***	Ξ_c^+	$\frac{1}{2}^+$	***	
N(1895)	$\frac{1}{2}^-$ ***	$\Delta(2200)$	$\frac{7}{2}^-$	***	$\Lambda(2050)$	$\frac{3}{2}^-$	*	$\Sigma(1775)$	$\frac{5}{2}^-$	***	$\Omega(2250)$	*	*	Ξ_c^0	$\frac{1}{2}^+$	***	
N(1900)	$\frac{3}{2}^+$ ***	$\Delta(2300)$	$\frac{9}{2}^+_+$	**	$\Lambda(2100)$	$\frac{7}{2}^-$	***	$\Sigma(1840)$	$\frac{3}{2}^+_+$	***	$\Omega(2380)$	*	*	$\Xi_c(2845)$	$\frac{3}{2}^+_+$	***	
N(1990)	$\frac{5}{2}^+$ **	$\Delta(2350)$	$\frac{5}{2}^-$	**	$\Lambda(2110)$	$\frac{5}{2}^+$	***	$\Sigma(1880)$	$\frac{1}{2}^+$	**	$\Omega(2470)$	*	*	$\Xi_c(2790)$	$\frac{1}{2}^-$	***	
N(2000)	$\frac{5}{2}^+$ **	$\Delta(2390)$	$\frac{7}{2}^+_+$	**	$\Lambda(2325)$	$\frac{3}{2}^-$	***	$\Sigma(1900)$	$\frac{1}{2}^-$	*	*	$\Xi_c(2815)$	$\frac{3}{2}^-$	*	$\Xi_c(2815)$	$\frac{3}{2}^-$	*
N(2040)	$\frac{3}{2}^+$ *	$\Delta(2400)$	$\frac{9}{2}^-$	**	$\Lambda(2350)$	$\frac{9}{2}^+$	***	$\Sigma(1915)$	$\frac{5}{2}^+_+$	***	*	$\Xi_c(2930)$	*	*	$\Xi_c(2930)$	*	*
N(2060)	$\frac{5}{2}^-$ ***	$\Delta(2420)$	$\frac{11}{2}^+$	***	$\Lambda(2585)$	*	*	$\Sigma(1940)$	$\frac{3}{2}^+_+$	*	*	$\Xi_c(2980)$	*	*	$\Xi_c(3055)$	*	*
N(2100)	$\frac{1}{2}^+$ ***	$\Delta(2750)$	$\frac{13}{2}^-$	**	*	*	*	*	$\Sigma(1940)$	$\frac{3}{2}^-$	***	$\Xi(2000)$	$\frac{1}{2}^-$	*	$\Xi_c(3055)$	*	*
N(2120)	$\frac{3}{2}^-$ ***	$\Delta(2950)$	$\frac{15}{2}^+$	**	*	*	*	*	$\Sigma(2000)$	$\frac{1}{2}^-$	*	$\Xi(2030)$	$\frac{7}{2}^+$	*	$\Xi_c(3080)$	*	*
N(2190)	$\frac{7}{2}^-$ ***	*	*	*	*	*	*	*	$\Sigma(2030)$	$\frac{7}{2}^+$	*	$\Xi(2070)$	$\frac{5}{2}^+_+$	*	$\Xi_c(3123)$	*	*
N(2220)	$\frac{9}{2}^+$ ***	*	*	*	*	*	*	*	$\Sigma(2080)$	$\frac{3}{2}^+_+$	*	$\Xi(2100)$	$\frac{7}{2}^-$	*	$\Xi_c(3123)$	$\frac{1}{2}^+$	***
N(2250)	$\frac{9}{2}^-$ ***	*	*	*	*	*	*	*	$\Sigma(2100)$	$\frac{7}{2}^-$	*	$\Xi(2250)$	*	*	$\Xi_c(3277)$	$\frac{3}{2}^+_0$	***
N(2300)	$\frac{1}{2}^+$..	*	*	*	*	*	*	*	$\Sigma(2455)$	*	*	$\Xi(2455)$	*	*	$\Xi_c(3000)$	*	*
N(2570)	$\frac{5}{2}^-$..	*	*	*	*	*	*	*	$\Sigma(2620)$	*	*	$\Xi(2620)$	*	*	$\Xi_c(3065)$	*	*
N(2600)	$\frac{11}{2}^-$..	*	*	*	*	*	*	*	$\Sigma(3000)$	*	*	$\Xi(3000)$	*	*	$\Xi_c(3090)$	*	*
N(2700)	$\frac{13}{2}^+$..	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	$\Xi_c(3120)$	*	*	$\Xi_c(3120)$	*	*
												Ξ_{cc}^+	*	*		*	*
												Ξ_{cc}^{++}	*	*		*	*

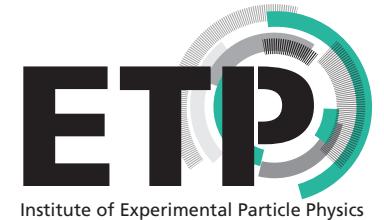
**** Existence is certain, and properties are at least fairly well explored.

... Existence ranges from fairly certain to certain, but further confirmation is desirable and/or quantum numbers, branching fractions, etc. are not well determined.

.. Evidence of existence is only fair.

* Evidence of existence is poor.

Es gibt mehr...

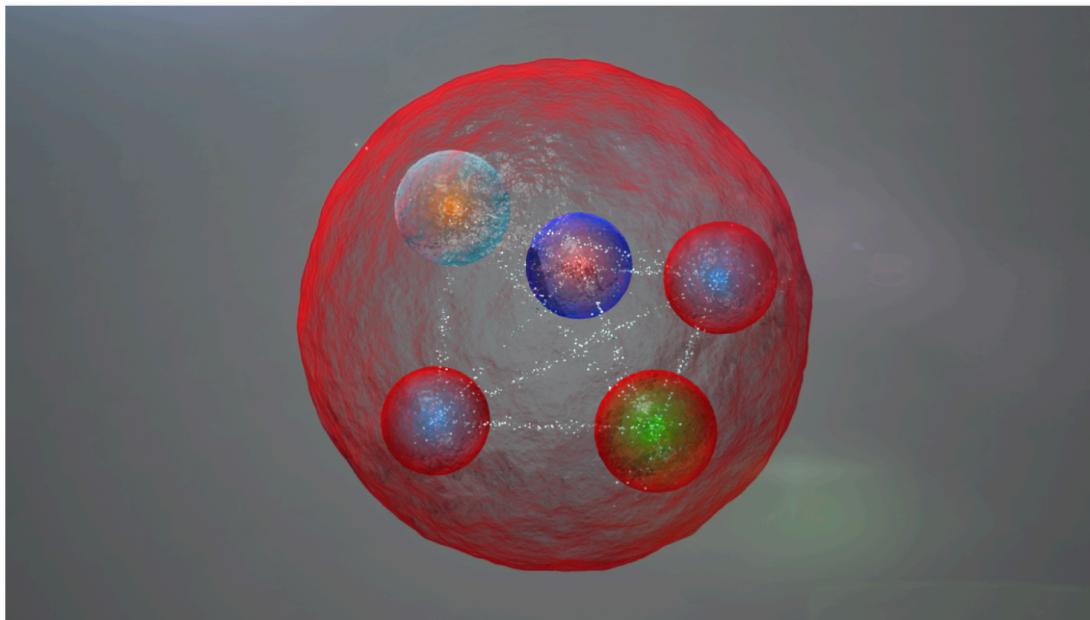


Es gibt mehr...

LHCb experiment discovers a new pentaquark

The LHCb collaboration has observed a new pentaquark particle and has confirmed the pentaquark structure previously reported

26 MARCH, 2019

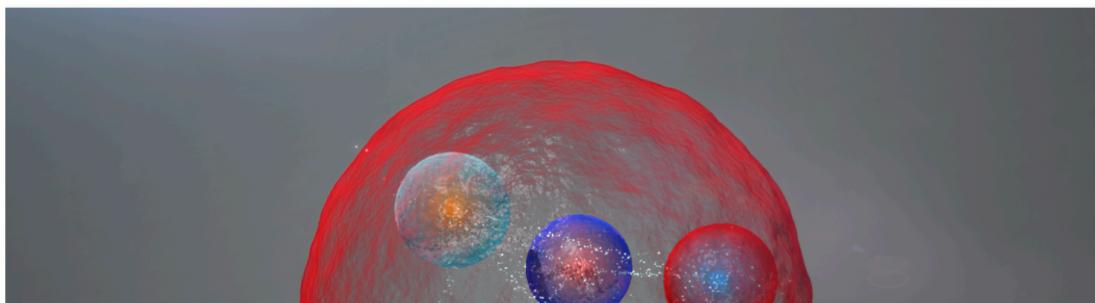


Es gibt mehr...

LHCb experiment discovers a new pentaquark

The LHCb collaboration has observed a new pentaquark particle and has confirmed the pentaquark structure previously reported

26 MARCH, 2019



LHCb discovers three new exotic particles

The collaboration has observed a new kind of “pentaquark” and the first-ever pair of “tetraquarks”

5 JULY, 2022

Es gibt mehr...

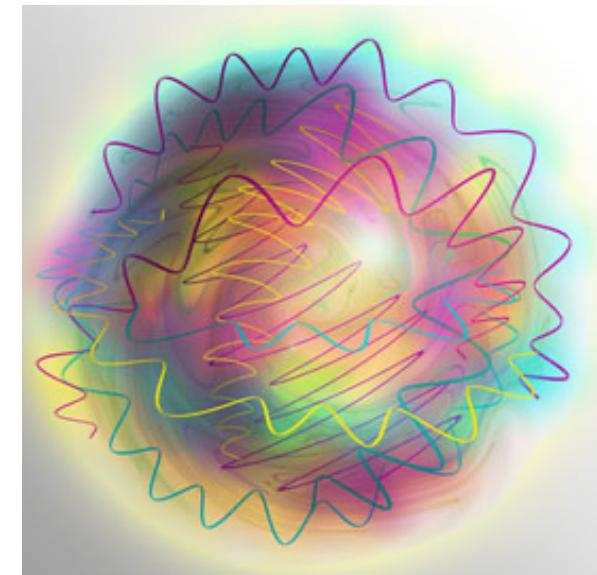
LHCb experiment discovers a new pentaquark

The LHCb collaboration has observed a new pentaquark particle and has confirmed the pentaquark structure previously reported

26 MARCH, 2019



Und vielleicht finden wir auch irgendwann die sogenannten Glueballs...



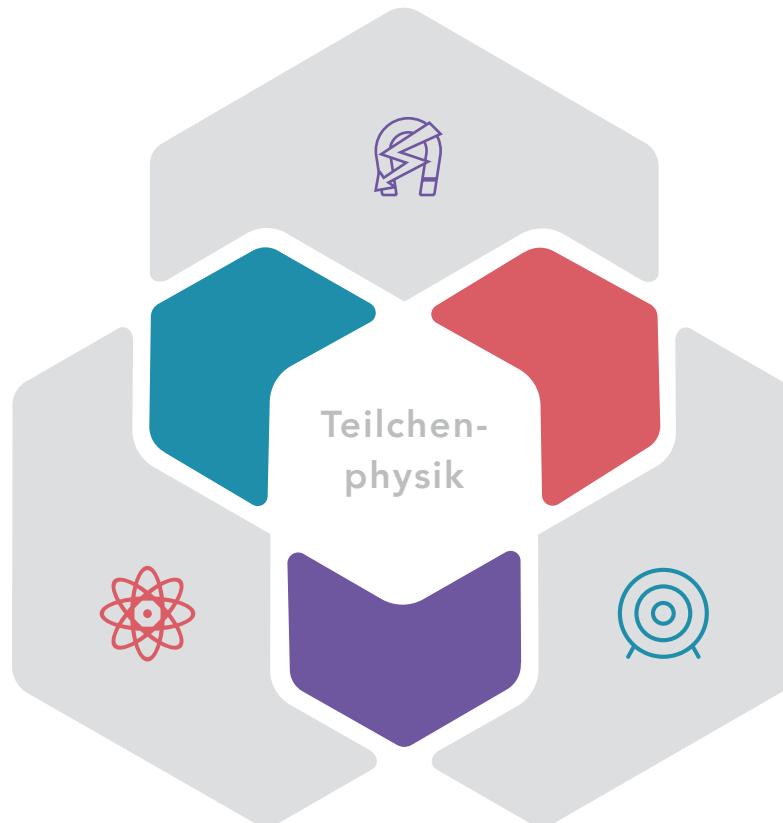


FRAGEN?

Grundlage Experimentelle Teilchenphysik

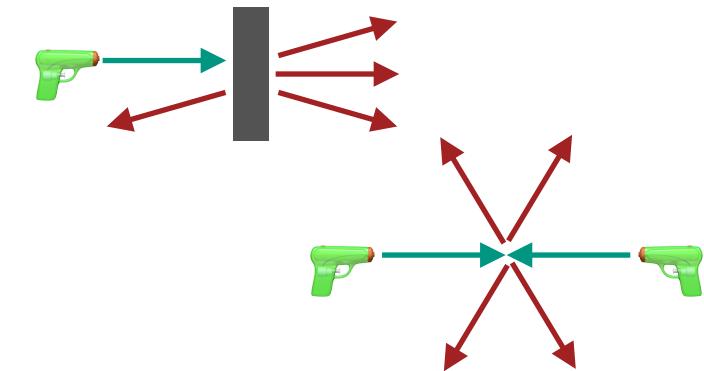


Grundlage Experimentelle Teilchenphysik

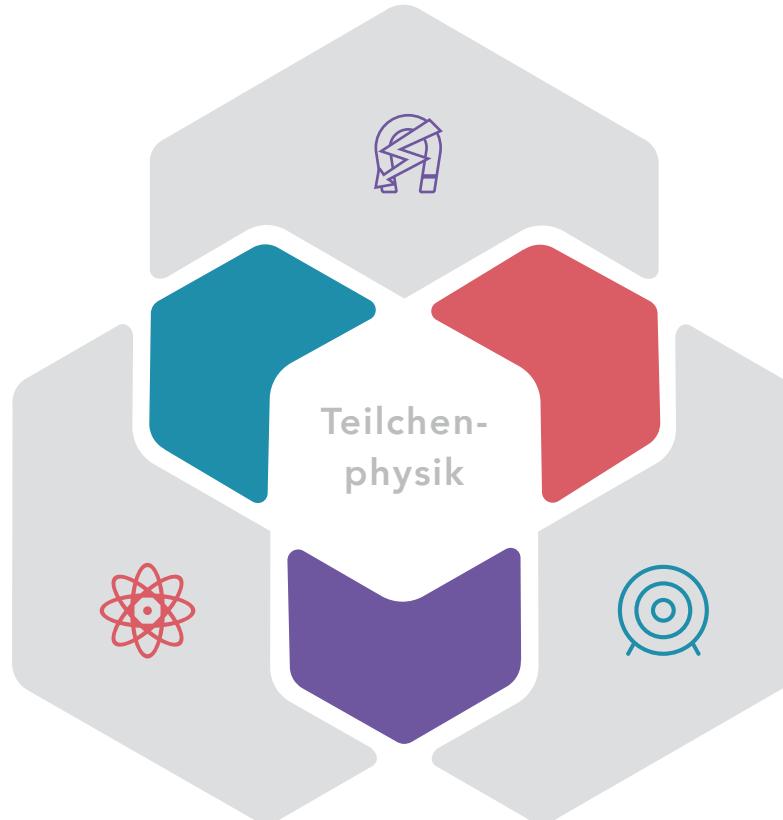


Sachen auf Sachen schießen

Das Grundwerkzeug der Teilchenphysik sind Streuexperimente. Dabei werden Teilchen auf ein Ziel oder auf andere Teilchen geschossen.



Grundlage Experimentelle Teilchenphysik

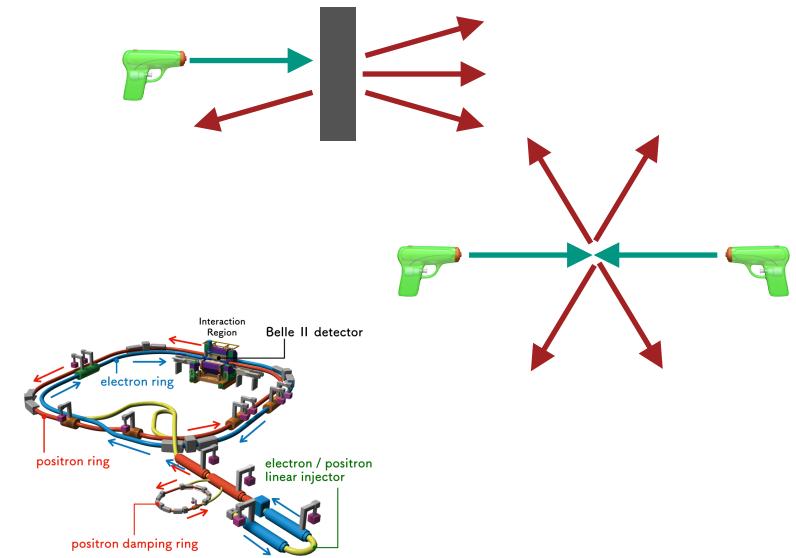


Sachen auf Sachen schießen

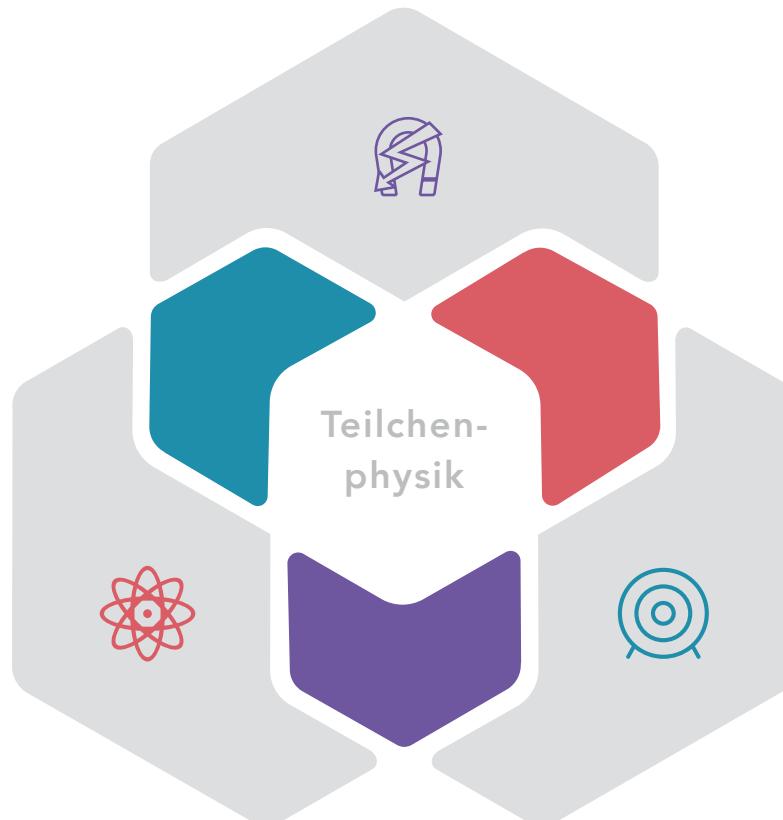
Das Grundwerkzeug der Teilchenphysik sind Streuexperimente. Dabei werden Teilchen auf ein Ziel oder auf andere Teilchen geschossen.

Ringbeschleuniger

Moderne Kollisionsexperimente werden mithilfe von Ringbeschleunigern durchgeführt. Da wird die Lorentzkraft ausgenutzt.



Grundlage Experimentelle Teilchenphysik



Sachen auf Sachen schießen

Das Grundwerkzeug der Teilchenphysik sind Streuexperimente. Dabei werden Teilchen auf ein Ziel oder auf andere Teilchen geschossen.

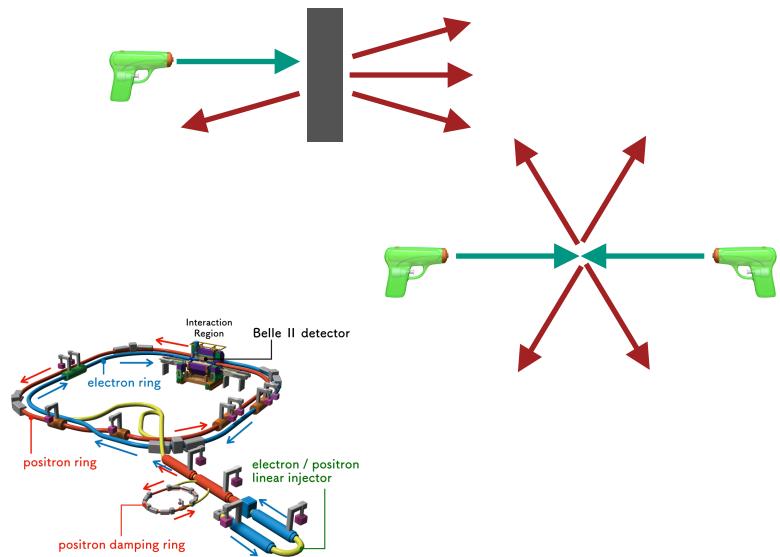
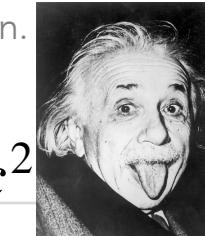
Ringbeschleuniger

Moderne Kollisionsexperimente werden mithilfe von Ringbeschleunigern durchgeführt. Da wird die Lorentzkraft ausgenutzt.

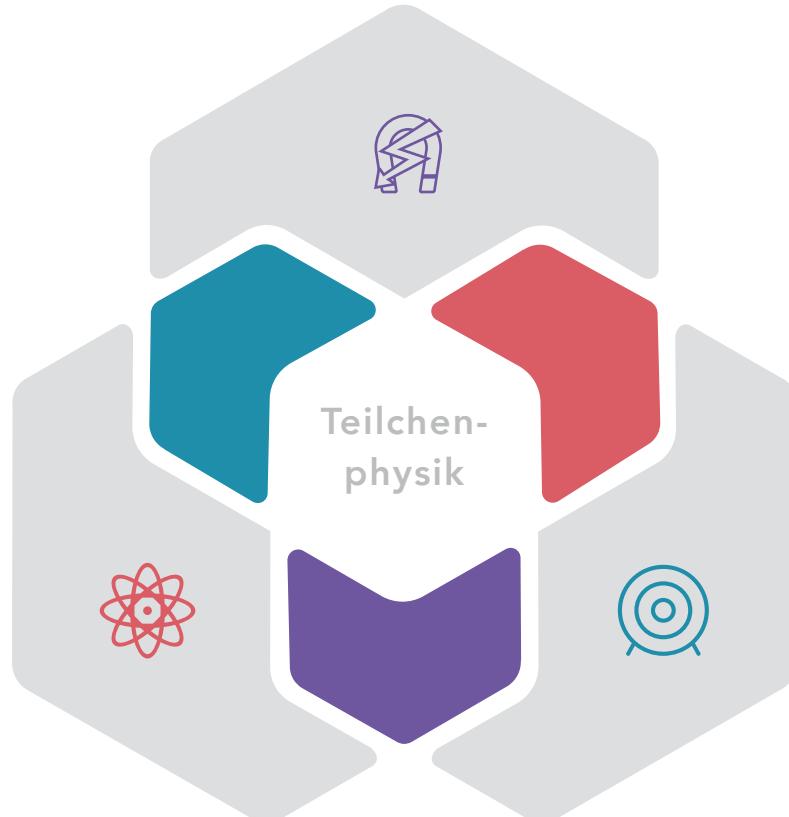
Masse \doteq Energie

Spätestens seit Einstein ist klar, dass bei Kollisionen mit hoher Energie neue Teilchen erzeugt werden können.

$$E = mc^2$$



Grundlage Experimentelle Teilchenphysik



Sachen auf Sachen schießen

Das Grundwerkzeug der Teilchenphysik sind Streuexperimente. Dabei werden Teilchen auf ein Ziel oder auf andere Teilchen geschossen.

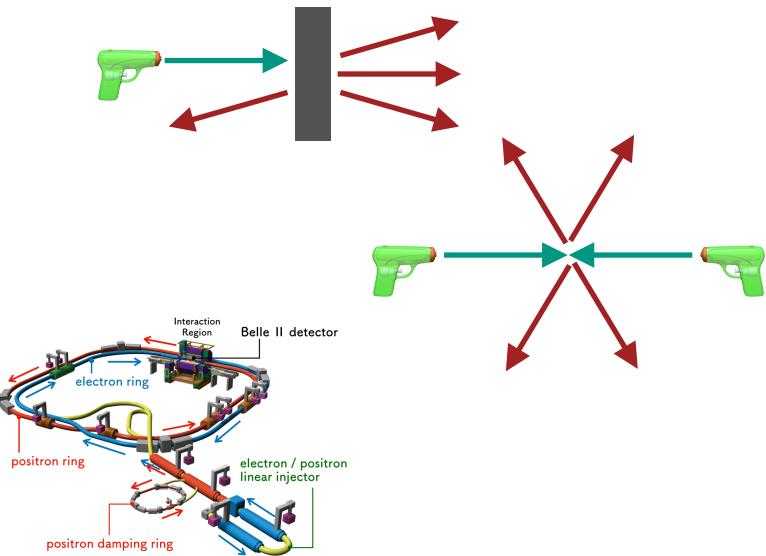
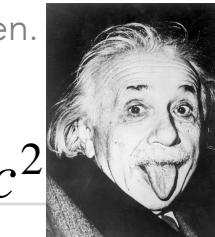
Ringbeschleuniger

Moderne Kollisionsexperimente werden mithilfe von Ringbeschleunigern durchgeführt. Da wird die Lorentzkraft ausgenutzt.

Masse $\hat{=}$ Energie

Spätestens seit Einstein ist klar, dass bei Kollisionen mit hoher Energie neue Teilchen erzeugt werden können.

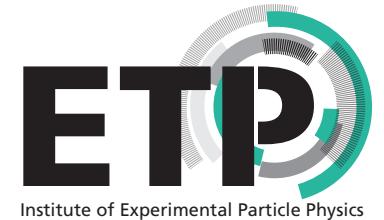
$$E = mc^2$$



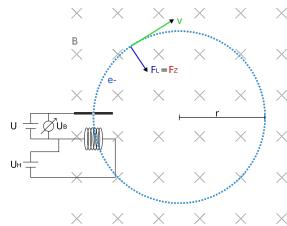
Natürliche Einheiten $c = 1$

- $[E]=[m]=\text{eV}$
- eV - Energie, die ein Elektron bekommt, wenn es aus der Ruhe mit einem Volt beschleunigt wird
- Wir reden meistens von GeV:
 $1 \text{ GeV} = 1\,000\,000\,00 \text{ eV}$

Lorentzkraft



Lorentzkraft

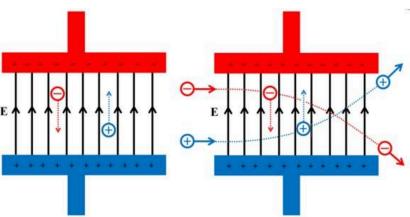


Die Lorentzkraft ist ein wesentlicher Bestandteil der Beschleuniger- und Detektor-Physik.

Mit ihrer Hilfe werden geladene Teilchen beschleunigt, abgelenkt und der Impuls der geladenen Teilchen bestimmt.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Lorentzkraft

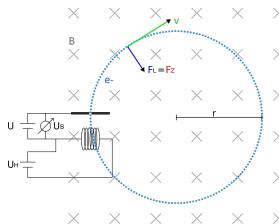


$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Elektrisches Feld

Das elektrische Feld wirkt auf bewegte und unbewegte Ladung.

Geladene Teilchen werden im elektrischen Feld beschleunigt.

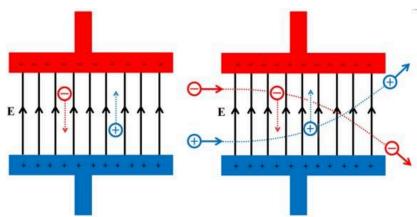


Die Lorentzkraft ist ein wesentlicher Bestandteil der Beschleuniger- und Detektor-Physik.

Mit ihrer Hilfe werden geladene Teilchen beschleunigt, abgelenkt und der Impuls der geladenen Teilchen bestimmt.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Lorentzkraft

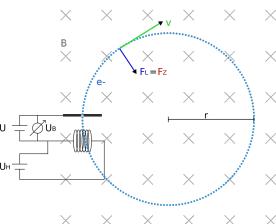


$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Elektrisches Feld

Das elektrische Feld wirkt auf bewegte und unbewegte Ladung.

Geladene Teilchen werden im elektrischen Feld beschleunigt.



Die Lorentzkraft ist ein wesentlicher Bestandteil der Beschleuniger- und Detektor-Physik.

Mit ihrer Hilfe werden geladene Teilchen beschleunigt, abgelenkt und der Impuls der geladenen Teilchen bestimmt.

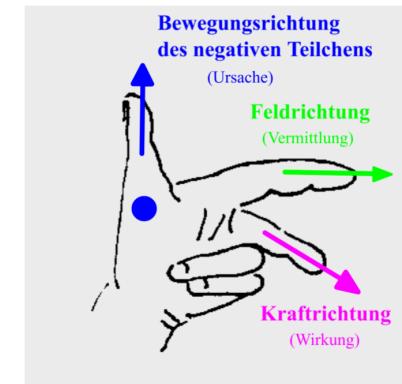
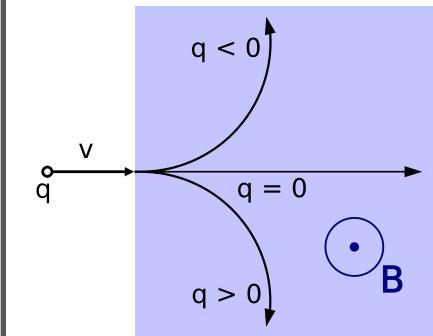
$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

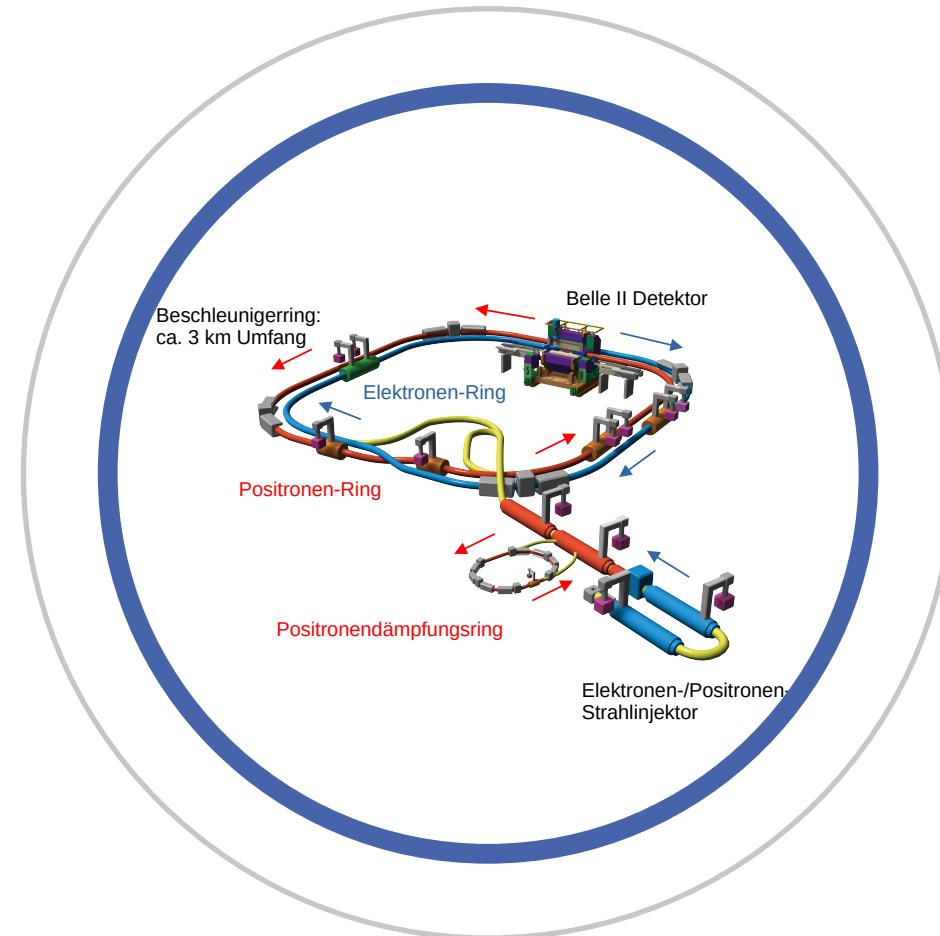
Magnetisches Feld

Das magnetische Feld wirkt auf sich bewegende Ladung.

Geladene Teilchen werden im magnetischen Feld abgelenkt.



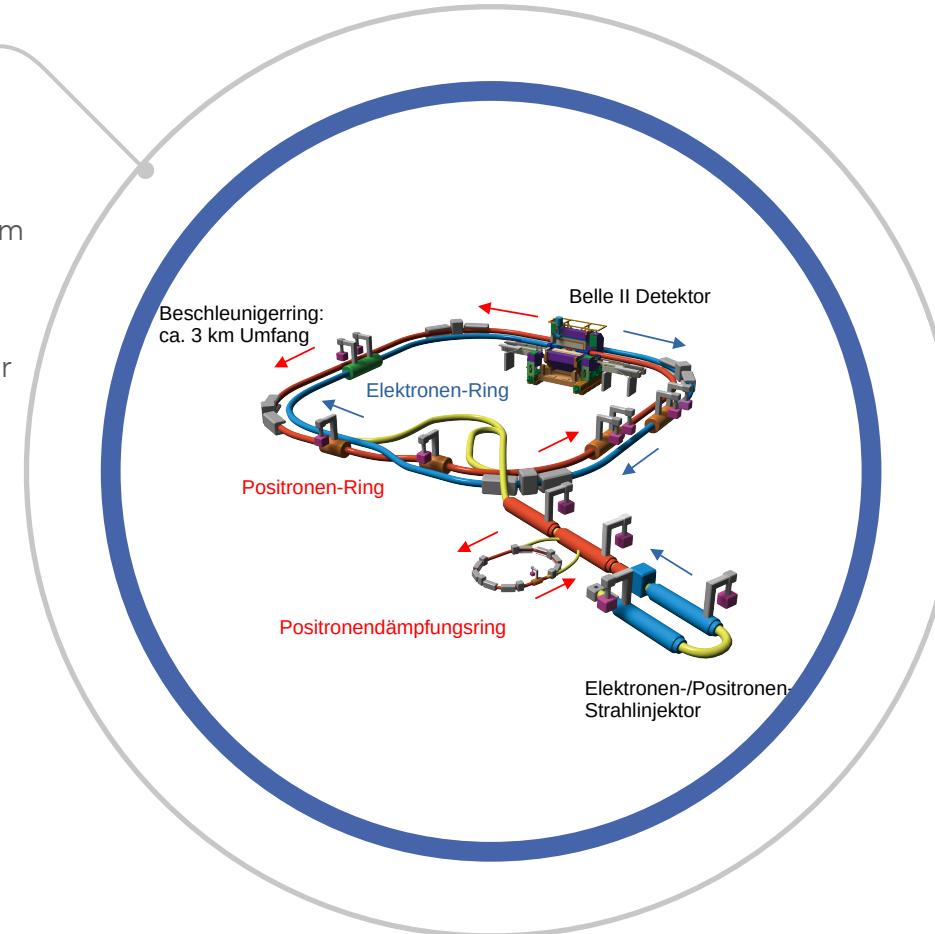
Ringbeschleuniger



Ringbeschleuniger

SuperKEKB/Belle II

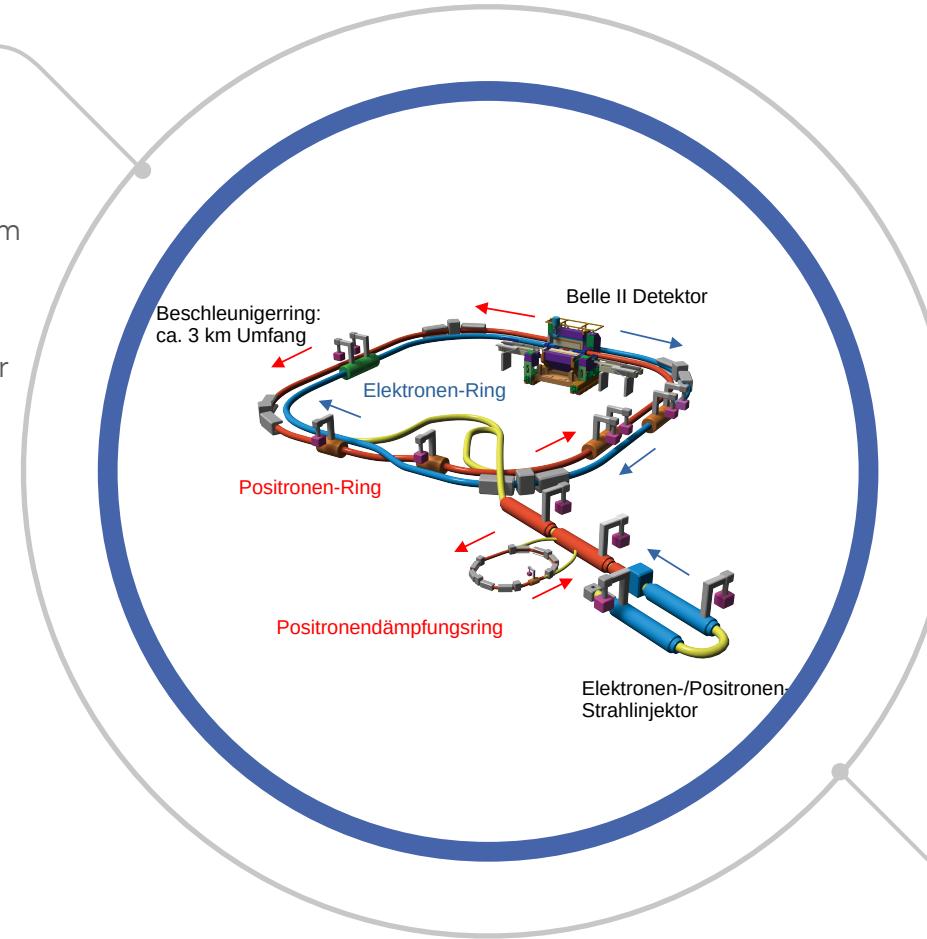
- Der SuperKEKB Beschleuniger beschleunigt Elektronen und Positronen, bis die Kollision mit genug Energie (10.58 GeV) stattfindet, um ein hochenergetisches $b\bar{b}$ -Paar zu erzeugen
 $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$
- Die Kollisionen werden vom Belle II-Detektor aufgenommen



Ringbeschleuniger

SuperKEKB/Belle II

- Der SuperKEKB Beschleuniger beschleunigt Elektronen und Positronen, bis die Kollision mit genug Energie (10.58 GeV) stattfindet, um ein hochenergetisches $b\bar{b}$ -Paar zu erzeugen
 $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$
- Die Kollisionen werden vom Belle II-Detektor aufgenommen



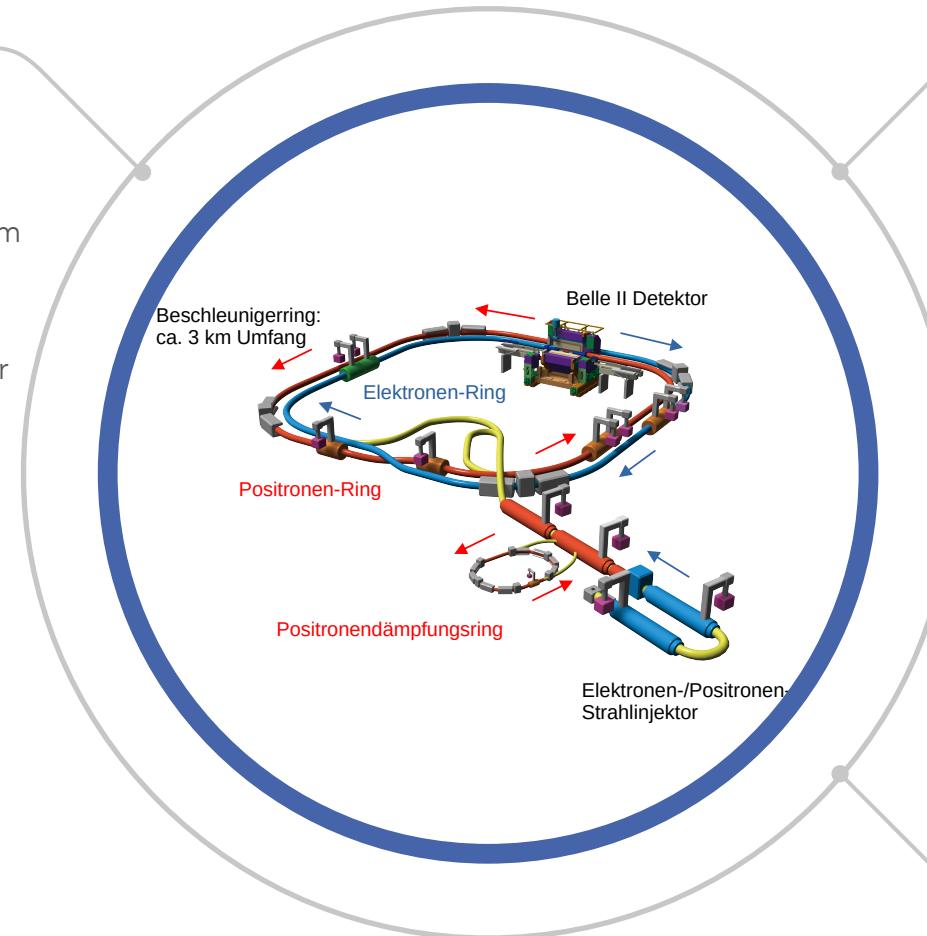
e^+e^-

- Elektronen werden mithilfe einer sogenannten RF Gun bereits gebündelt erzeugt
- Positronen werden durch einen parallel betriebenen Elektronen-Beam aus einem Wolfram Target erzeugt

Ringbeschleuniger

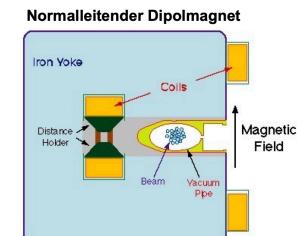
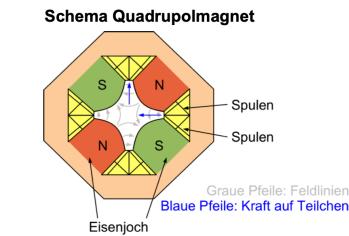
SuperKEKB/Belle II

- Der SuperKEKB Beschleuniger beschleunigt Elektronen und Positronen, bis die Kollision mit genug Energie (10.58 GeV) stattfindet, um ein hochenergetisches $b\bar{b}$ -Paar zu erzeugen
 $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$
- Die Kollisionen werden vom Belle II-Detektor aufgenommen



Magnete

- Dipol-Magnete zur Ablenkung der Elektronen-/Positronen-Beams
- Quadrupol-Magnete und Magnete höherer Ordnung dienen der Fokussierung der Beams



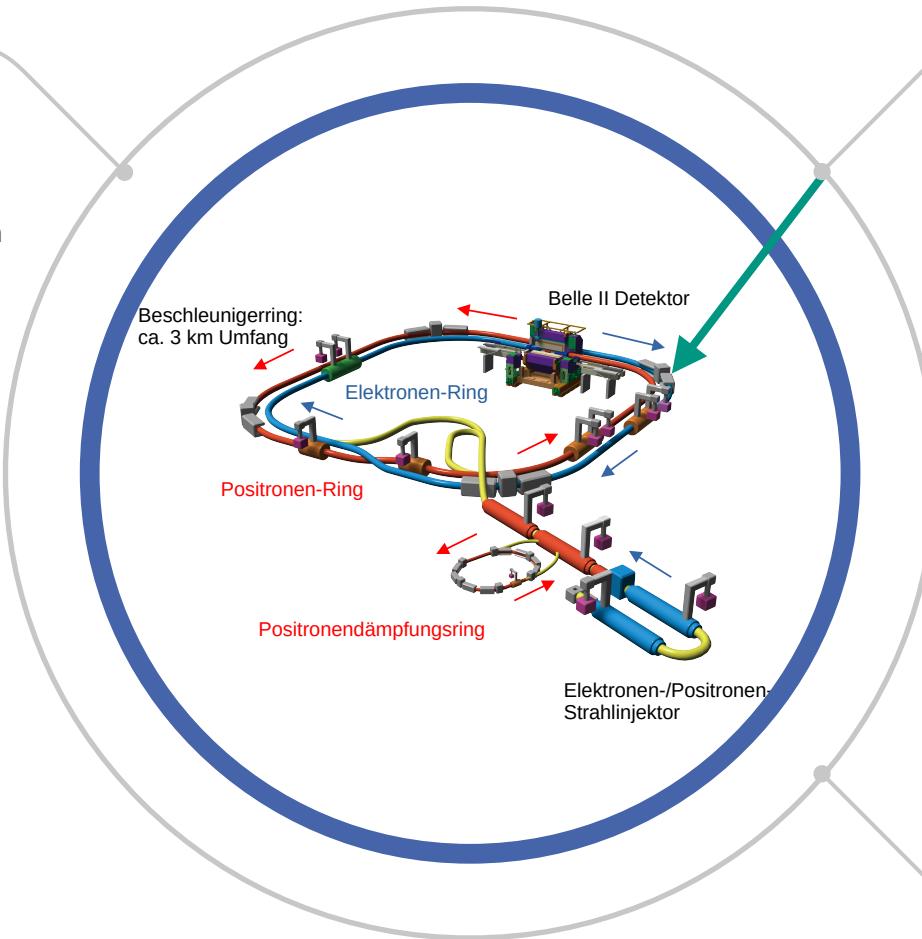
- Elektronen werden mithilfe einer sogenannten RF Gun bereits gebündelt erzeugt
- Positronen werden durch einen parallel betriebenen Elektronen-Beam aus einem Wolfram Target erzeugt

e^+e^-

Ringbeschleuniger

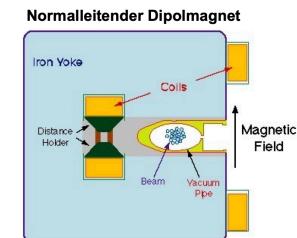
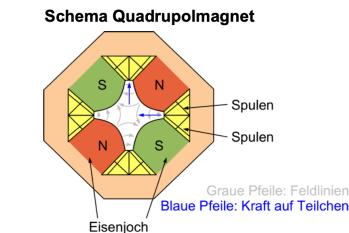
SuperKEKB/Belle II

- Der SuperKEKB Beschleuniger beschleunigt Elektronen und Positronen, bis die Kollision mit genug Energie (10.58 GeV) stattfindet, um ein hochenergetisches $b\bar{b}$ -Paar zu erzeugen
 $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$
- Die Kollisionen werden vom Belle II-Detektor aufgenommen



Magnete

- Dipol-Magnete zur Ablenkung der Elektronen-/Positronen-Beams
- Quadrupol-Magnete und Magnete höherer Ordnung dienen der Fokussierung der Beams



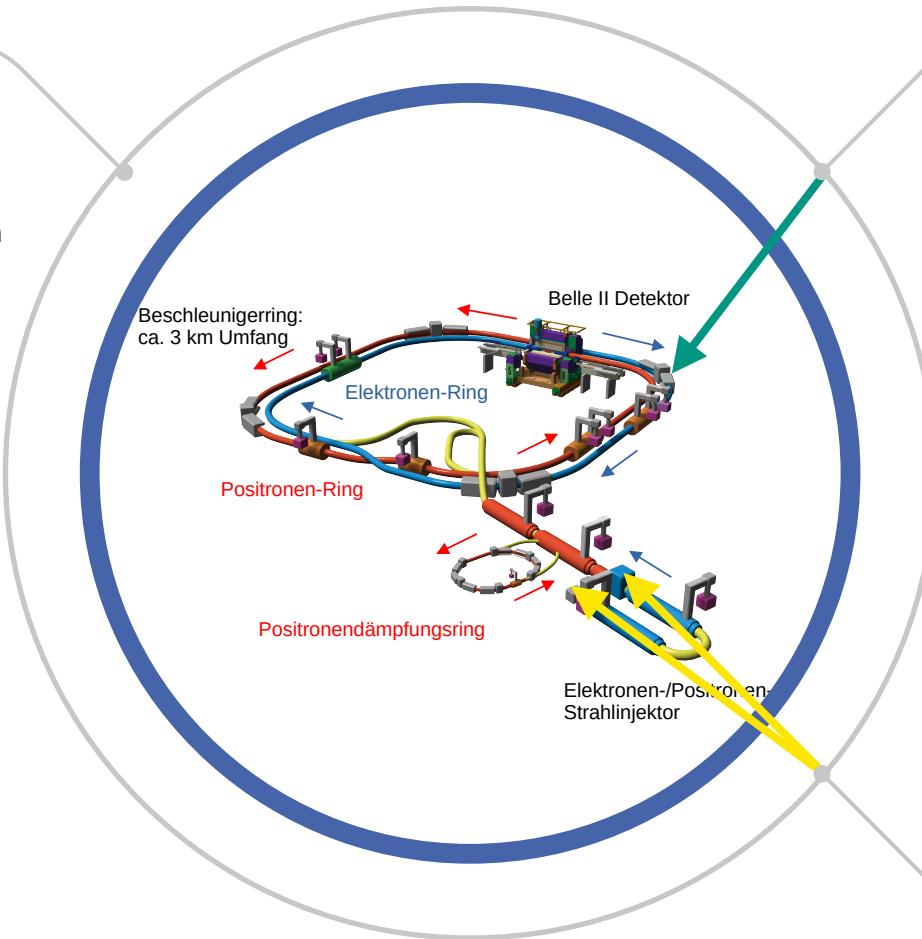
- Elektronen werden mithilfe einer sogenannten RF Gun bereits gebündelt erzeugt
- Positronen werden durch einen parallel betriebenen Elektronen-Beam aus einem Wolfram Target erzeugt

e^+e^-

Ringbeschleuniger

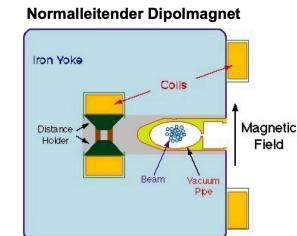
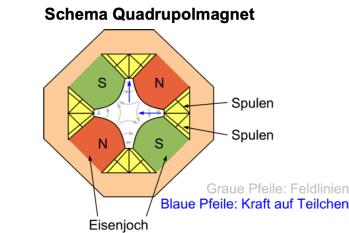
SuperKEKB/Belle II

- Der SuperKEKB Beschleuniger beschleunigt Elektronen und Positronen, bis die Kollision mit genug Energie (10.58 GeV) stattfindet, um ein hochenergetisches $b\bar{b}$ -Paar zu erzeugen
 $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$
- Die Kollisionen werden vom Belle II-Detektor aufgenommen



Magnete

- Dipol-Magnete zur Ablenkung der Elektronen-/Positronen-Beams
- Quadrupol-Magnete und Magnete höherer Ordnung dienen der Fokussierung der Beams



- Elektronen werden mithilfe einer sogenannten RF Gun bereits gebündelt erzeugt
- Positronen werden durch einen parallel betriebenen Elektronen-Beam aus einem Wolfram Target erzeugt

e^+e^-

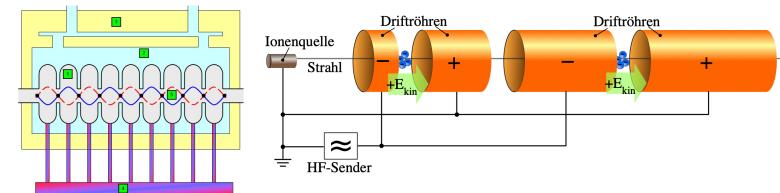
Ringbeschleuniger

SuperKEKB/Belle II

- Der SuperKEKB Beschleuniger beschleunigt Elektronen und Positronen, bis die Kollision mit genug Energie (10.58 GeV) stattfindet, um ein hochenergetisches $b\bar{b}$ -Paar zu erzeugen

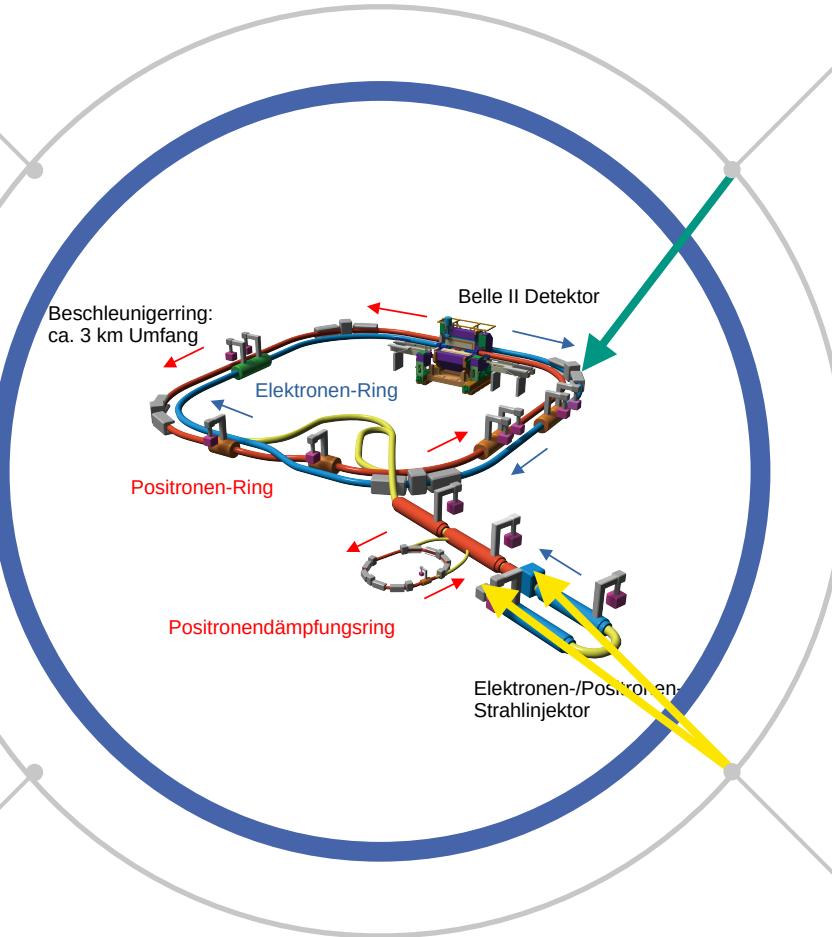
$$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$$

- Die Kollisionen werden vom Belle II-Detektor aufgenommen



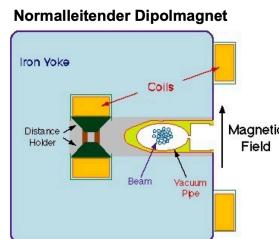
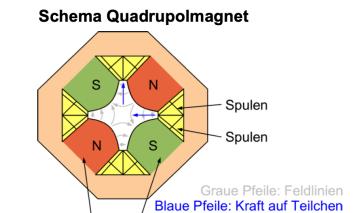
- Linearbeschleuniger und Kavitäten basieren auf dem Prinzip der mehrfachen Anwendung der selben Beschleunigerspannungen

Beschleuniger



Magnete

- Dipol-Magnete zur Ablenkung der Elektronen-/Positronen-Beams
- Quadrupol-Magnete und Magnete höherer Ordnung dienen der Fokussierung der Beams



- Elektronen werden mithilfe einer sogenannten RF Gun bereits gebündelt erzeugt
- Positronen werden durch einen parallel betriebenen Elektronen-Beam aus einem Wolfram Target erzeugt

e^+e^-

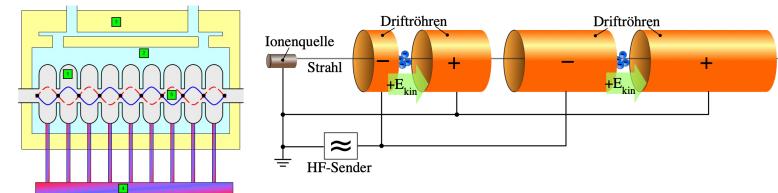
Ringbeschleuniger

SuperKEKB/Belle II

- Der SuperKEKB Beschleuniger beschleunigt Elektronen und Positronen, bis die Kollision mit genug Energie (10.58 GeV) stattfindet, um ein hochenergetisches $b\bar{b}$ -Paar zu erzeugen

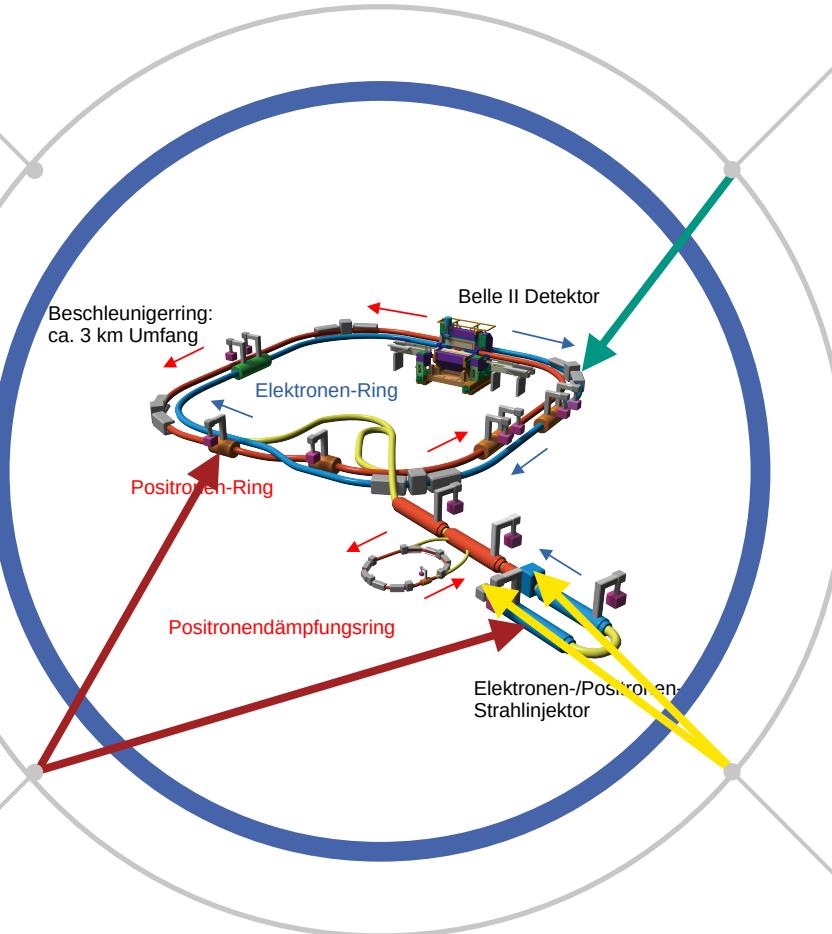
$$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$$

- Die Kollisionen werden vom Belle II-Detektor aufgenommen



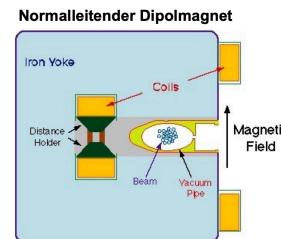
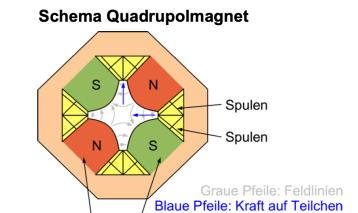
- Linearbeschleuniger und Kavitäten basieren auf dem Prinzip der mehrfachen Anwendung der selben Beschleunigerspannungen

Beschleuniger



Magnete

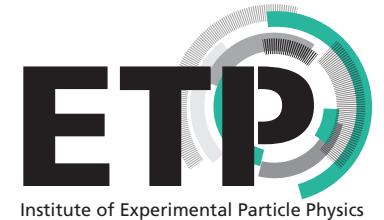
- Dipol-Magnete zur Ablenkung der Elektronen-/Positronen-Beams
- Quadrupol-Magnete und Magnete höherer Ordnung dienen der Fokussierung der Beams



- Elektronen werden mithilfe einer sogenannten RF Gun bereits gebündelt erzeugt
- Positronen werden durch einen parallel betriebenen Elektronen-Beam aus einem Wolfram Target erzeugt

e^+e^-

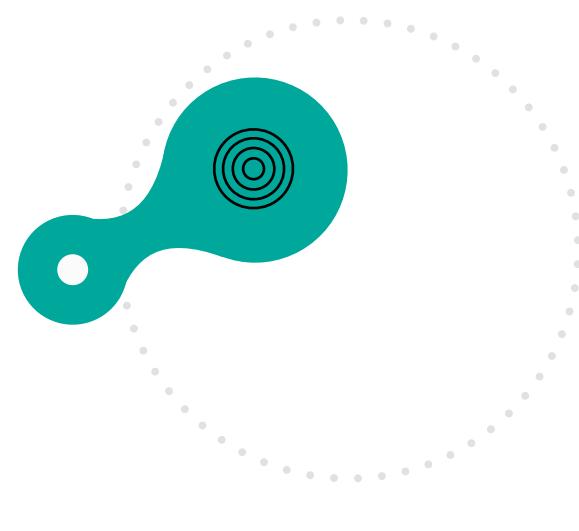
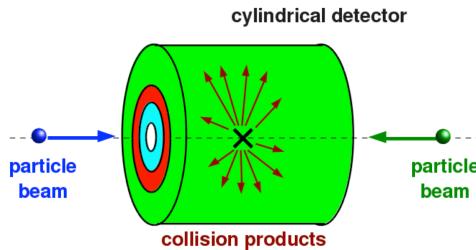
Kollisionsdetektoren



Kollisionsdetektoren

Kollisiondetektoren

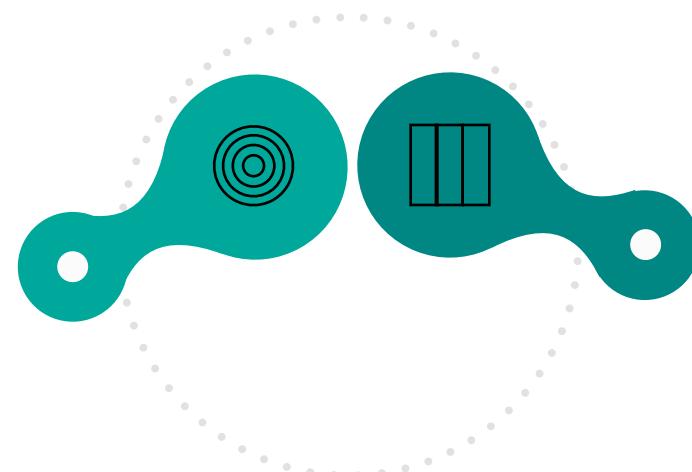
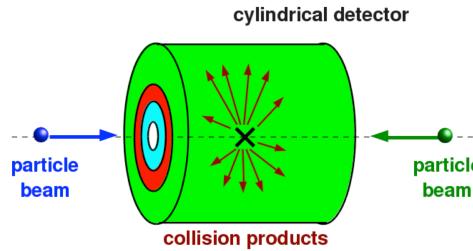
Zylindrischer-
Zwiebelschichten Aufbau um
den Interaktionspunkt



Kollisionsdetektoren

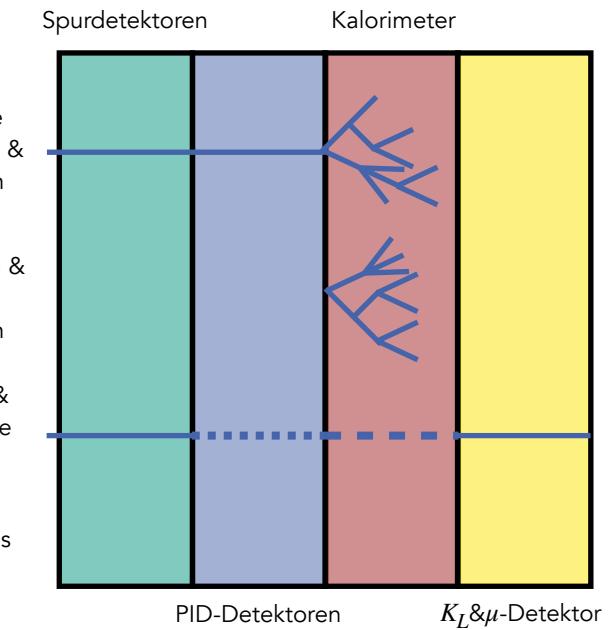
Kollisionsdetektoren

Zylindrischer-Zwiebelschichten Aufbau um den Interaktionspunkt



Schalenprinzip

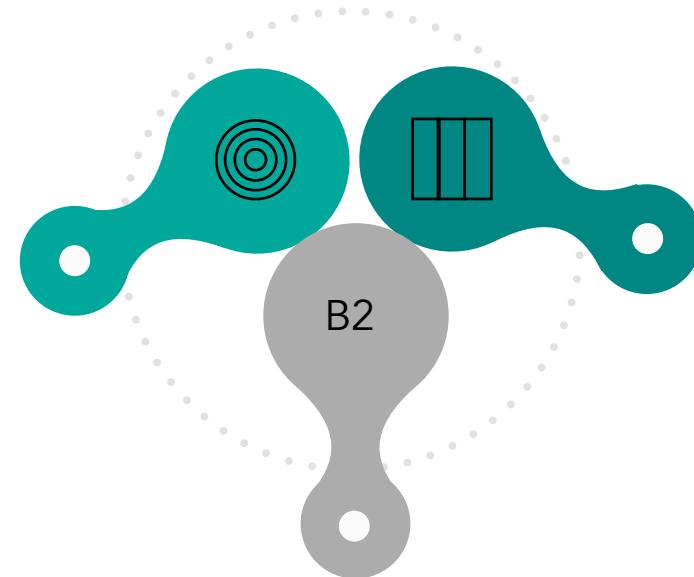
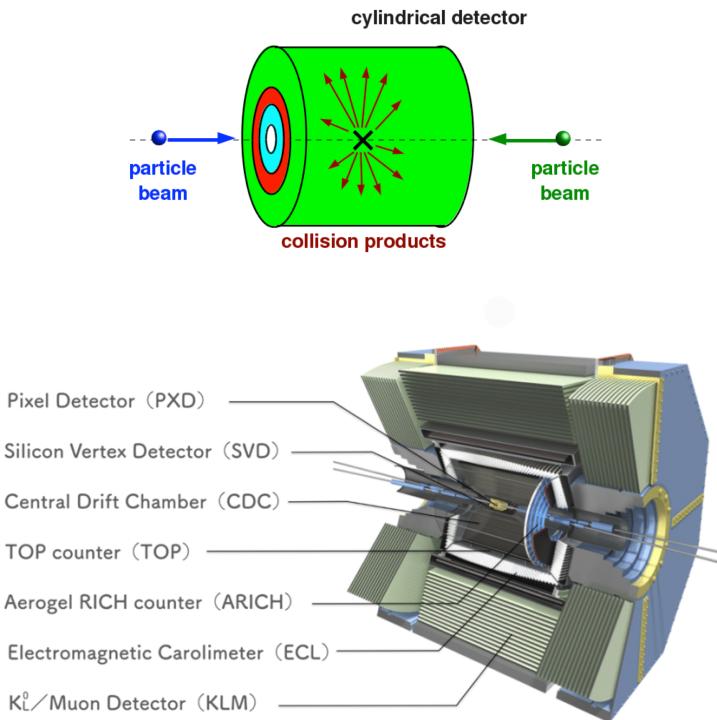
Verschiedene Schichten sind spezialisiert auf verschiedene Aufgaben wie Spurdetektion, Teilchenidentifikation und Energiemessung



Kollisionsdetektoren

Kollisionsdetektoren

Zylindrischer-Zwiebelschichten Aufbau um den Interaktionspunkt

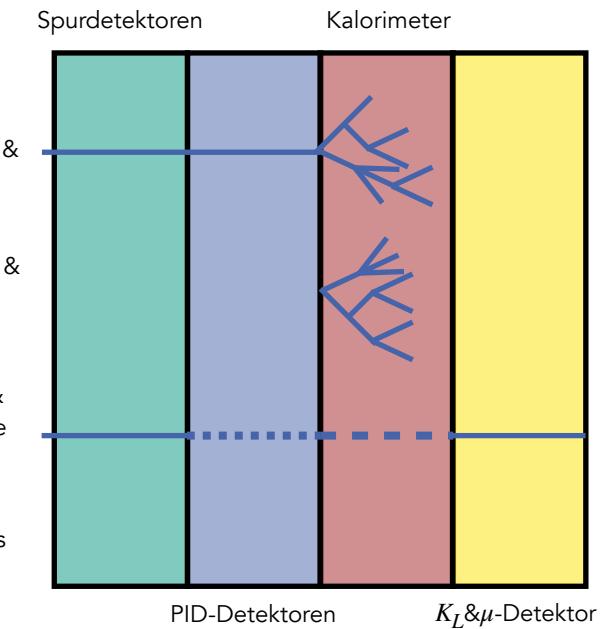


Belle II Detektor

- Detektor asymmetrisch um den Kollisionspunkt aufgrund der ungleichen Strahlenergien
- Ungleiche Strahlenergien ermöglichen die Messung der Lebensdauerdifferenz der B-Mesonen

Schalenprinzip

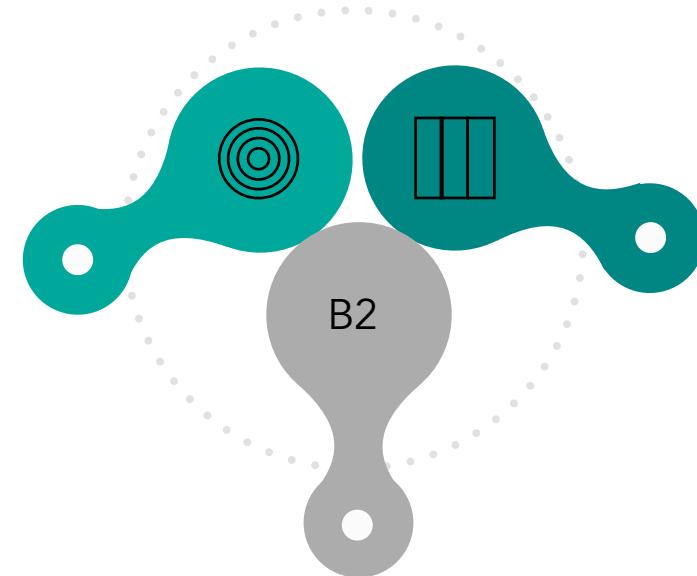
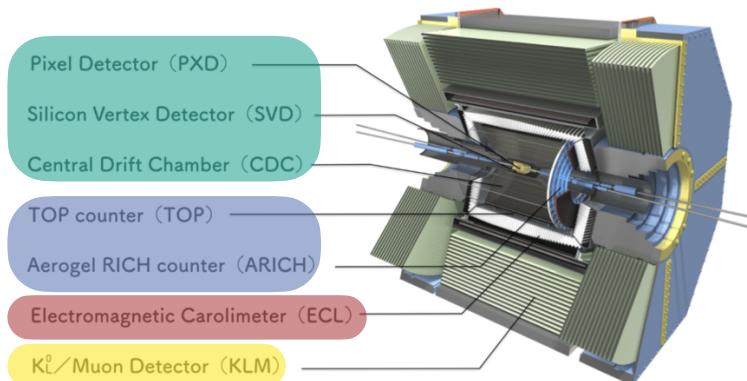
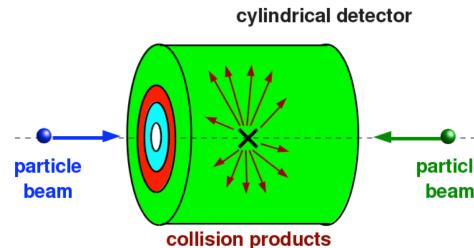
Verschiedene Schichten sind spezialisiert auf verschiedene Aufgaben wie Spurdetektion, Teilchenidentifikation und Energiemessung



Kollisionsdetektoren

Kollisionsdetektoren

Zylindrischer-Zwiebelschichten Aufbau um den Interaktionspunkt

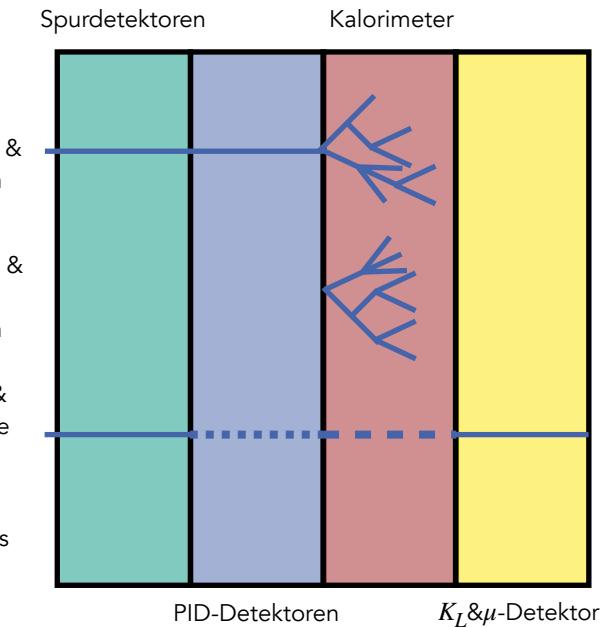


Belle II Detektor

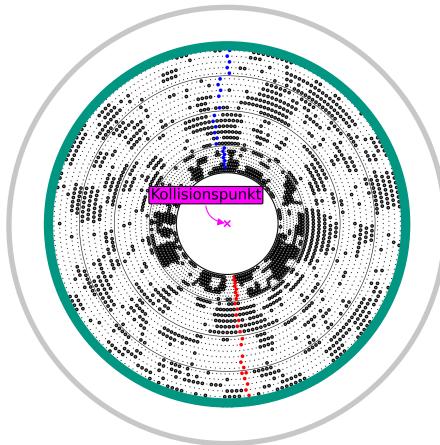
- Detektor asymmetrisch um den Kollisionspunkt aufgrund der ungleichen Strahlenergien
- Ungleiche Strahlenergien ermöglichen die Messung der Lebensdauerdifferenz der B-Mesonen

Schalenprinzip

Verschiedene Schichten sind spezialisiert auf verschiedene Aufgaben wie Spurdetektion, Teilchenidentifikation und Energiemessung



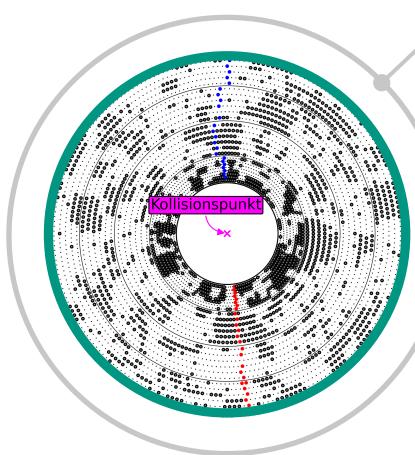
Spurendetektoren



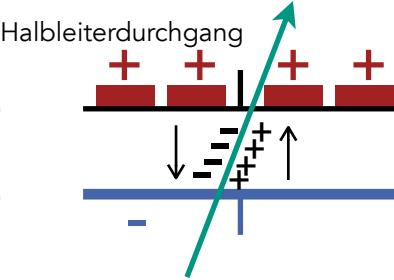
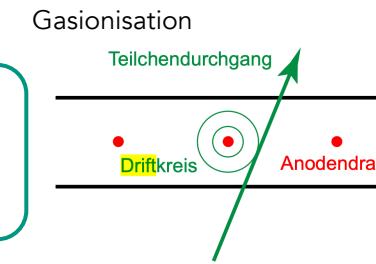
Spurendetektoren



Institute of Experimental Particle Physics



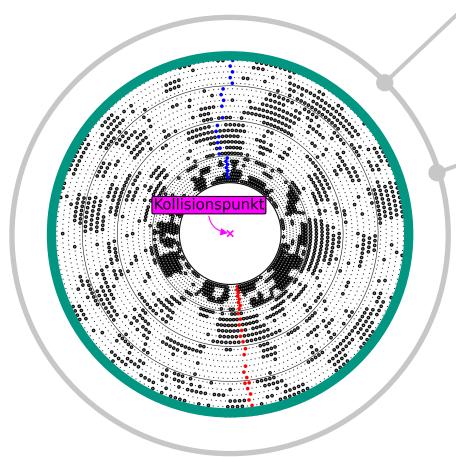
Das Prinzip ist, dass bewegte geladene Teilchen in ihrer Umgebung weitere, geladene Teilchen erzeugen, die gemessen werden können.



Spurendetektoren



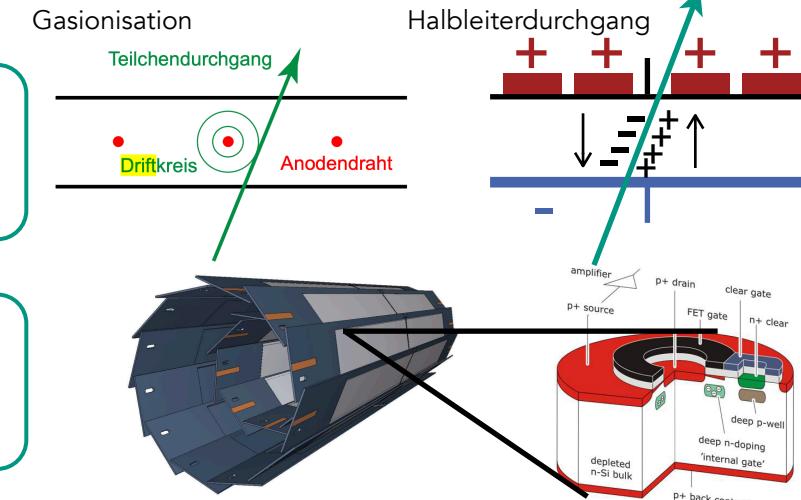
Institute of Experimental Particle Physics



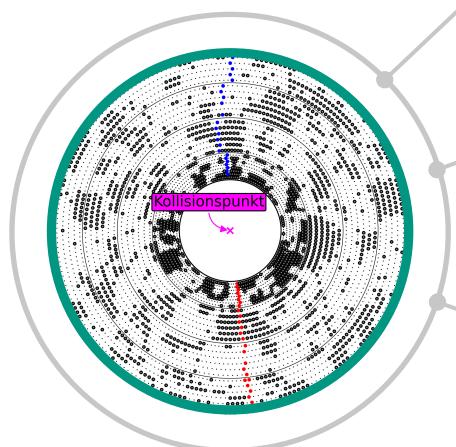
Das Prinzip ist, dass bewegte geladene Teilchen in ihrer Umgebung weitere, geladene Teilchen erzeugen, die gemessen werden können.

Pixel Detector (PXD)

Zwei Schichten an Halbleiter-Pixel-Gittern um den Kollisionspunkt. 8M Pixel à $50 \times 55 \mu\text{m}^2$, $r = 14\text{mm}$ & 22m



Spurendetektoren



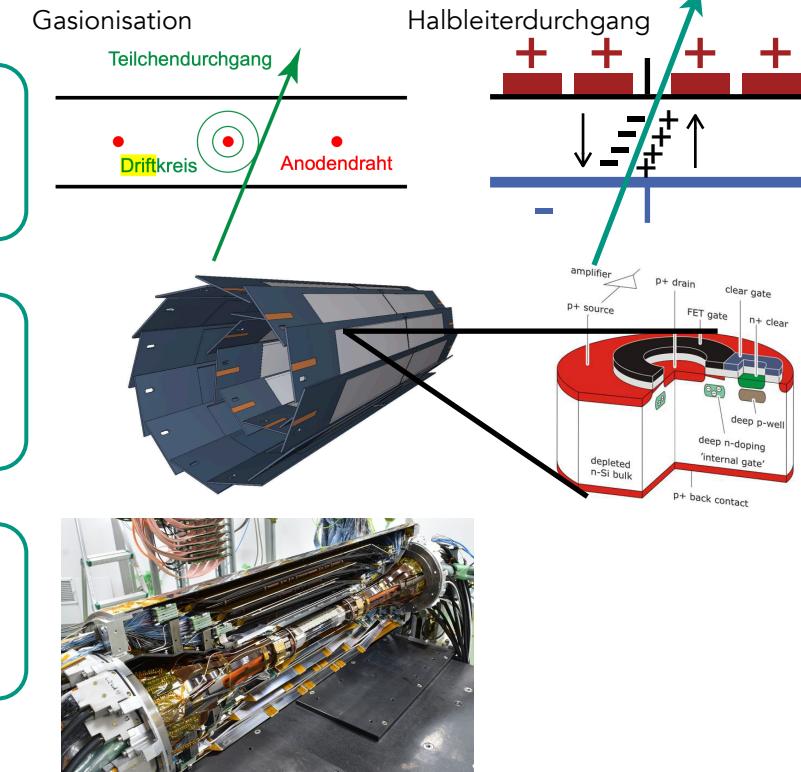
Das Prinzip ist, dass bewegte geladene Teilchen in ihrer Umgebung weitere, geladene Teilchen erzeugen, die gemessen werden können.

Pixel Detector (PXD)

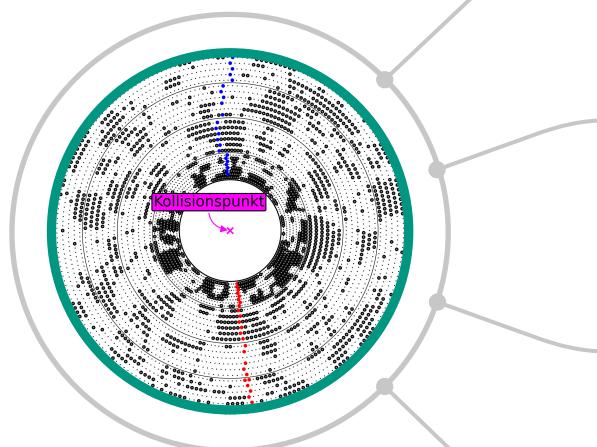
Zwei Schichten an Halbleiter-Pixel-Gittern um den Kollisionspunkt. 8M Pixel à $50 \times 55 \mu\text{m}^2$, $r = 14\text{mm}$ & 22m

Silicon Vertex Detector (SVD)

Vier Schichten von doppelseitigen Silizium-Halbleiter Streifen. Äußerer Radius: 140 mm



Spurendetektoren



Das Prinzip ist, dass bewegte geladene Teilchen in ihrer Umgebung weitere, geladene Teilchen erzeugen, die gemessen werden können.

Pixel Detector (PXD)

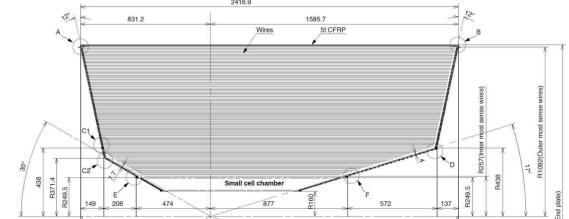
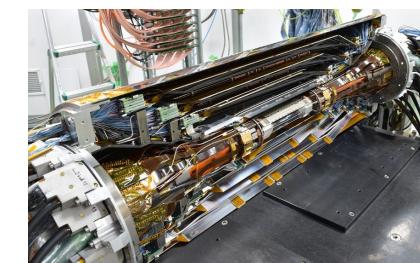
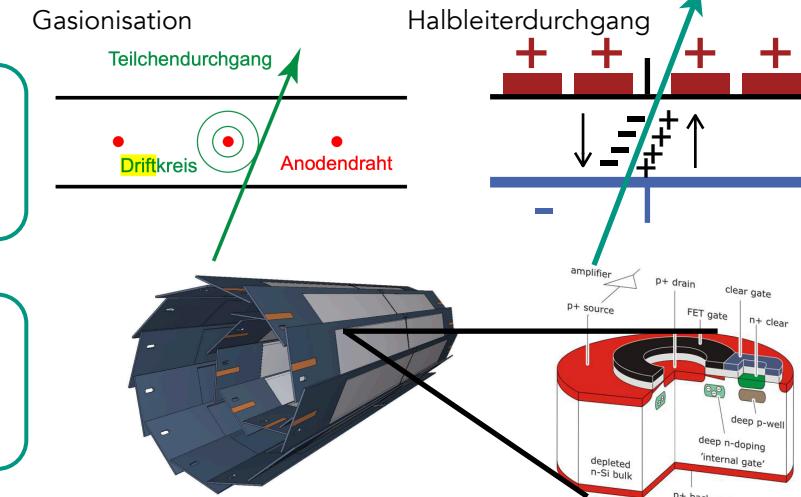
Zwei Schichten an Halbleiter-Pixel-Gittern um den Kollisionspunkt. 8M Pixel $\geq 50 \times 55 \mu\text{m}^2$, $r = 14\text{mm}$ & 22m

Silicon Vertex Detector (SVD)

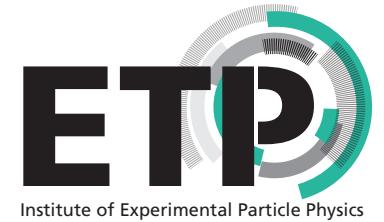
Vier Schichten von doppelseitigen Silizium-Halbleiter Streifen. Äußerer Radius: 140 mm

Central Drift Chamber (CDC)

14 336 Drähte aufgespannt in Helium-Ethan Gas mit dem Ziel der Spurrekonstruktion, Impulsmessung und Teilchenidentifikation



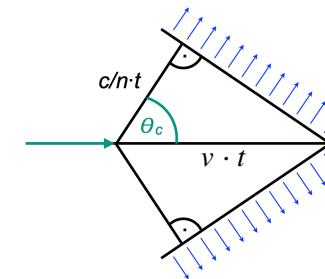
PID-Detektoren



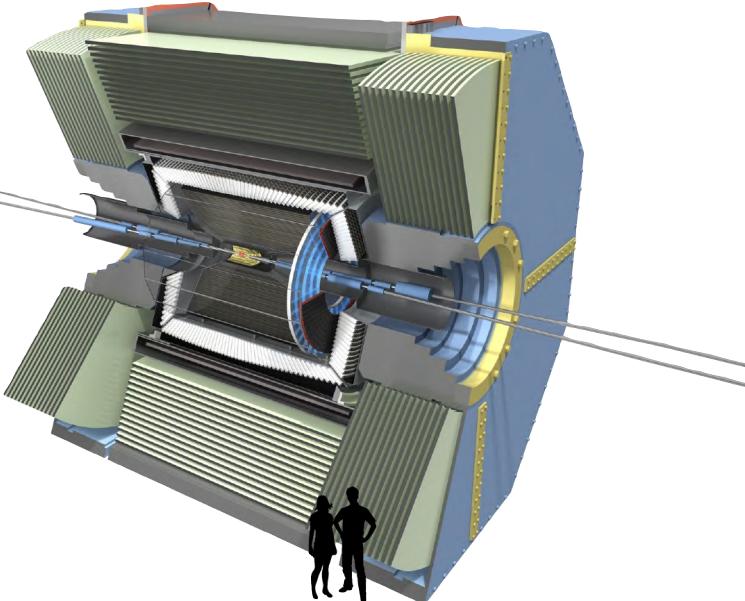
PID-Detektoren

Cherenkov-Strahlung

Wenn geladene Teilchen mit beinahe Lichtgeschwindigkeit durch ein Medium durchgehen, strahlen sie sogenannte Cherenkov-Strahlung aus, da sie ihre Umgebung polarisieren.

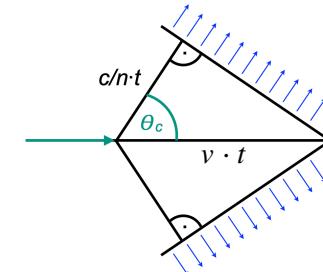


PID-Detektoren



Cherenkov-Strahlung

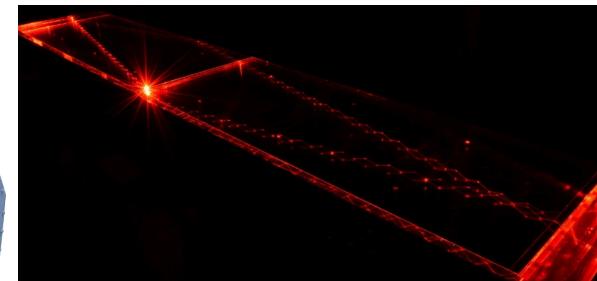
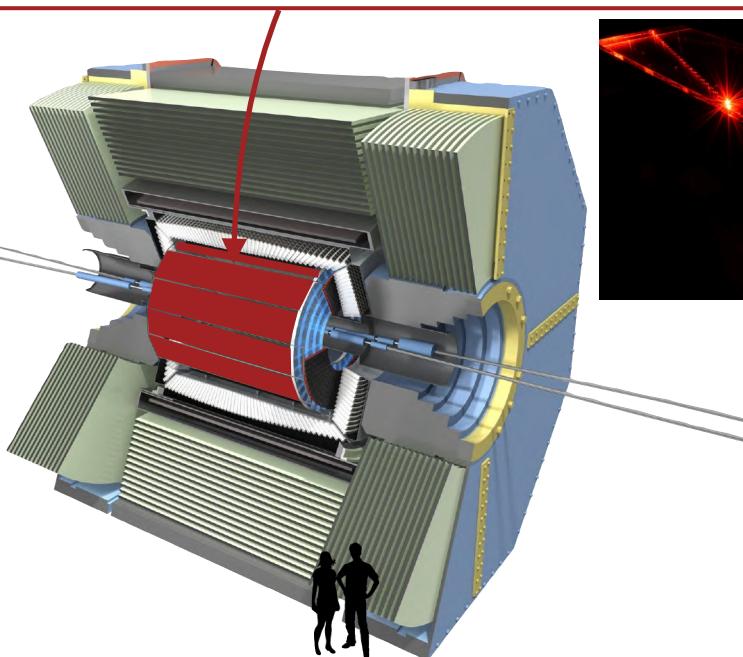
Wenn geladene Teilchen mit beinahe Lichtgeschwindigkeit durch ein Medium durchgehen, strahlen sie sogenannte Cherenkov-Strahlung aus, da sie ihre Umgebung polarisieren.



PID-Detektoren

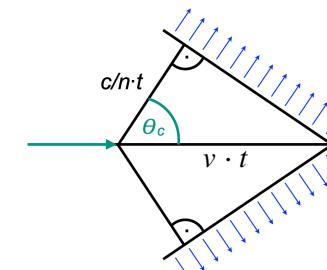
Time-of-Propagation (TOP)

16 Quarz-Barren angeordnet um den Interaktionspunkt. Aus der Position der Cherenkov-Strahlung kann auf die Geschwindigkeit des geladenen Teilchens zurück geschlossen werden und zusammen mit dem gemessenen Impuls auf die Masse des Teilchens.



Cherenkov-Strahlung

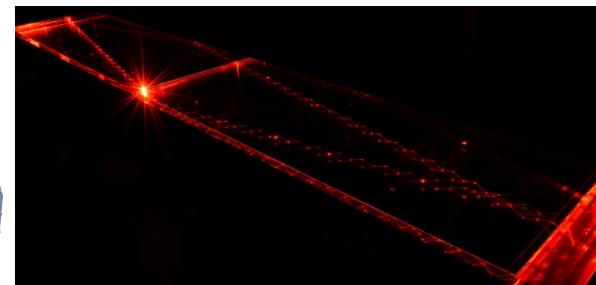
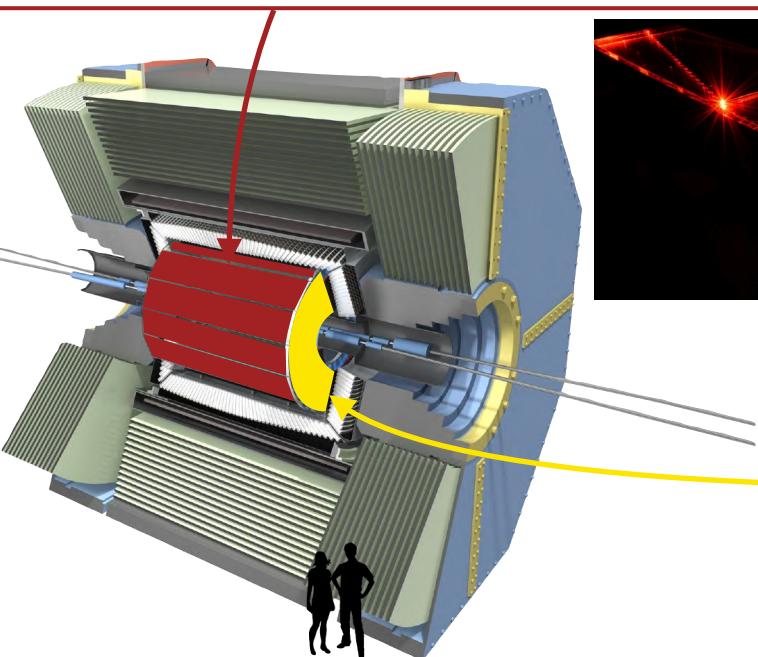
Wenn geladene Teilchen mit beinahe Lichtgeschwindigkeit durch ein Medium durchgehen, strahlen sie sogenannte Cherenkov-Strahlung aus, da sie ihre Umgebung polarisieren.



PID-Detektoren

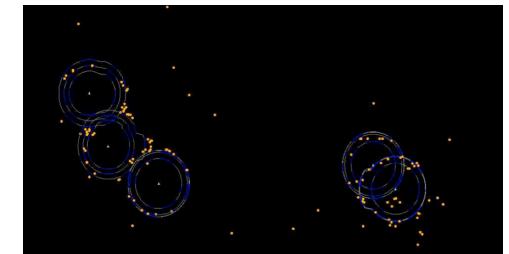
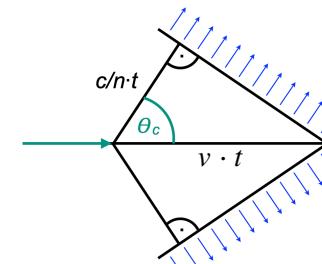
Time-of-Propagation (TOP)

16 Quarz-Barren angeordnet um den Interaktionspunkt. Aus der Position der Cherenkov-Strahlung kann auf die Geschwindigkeit des geladenen Teilchens zurück geschlossen werden und zusammen mit dem gemessenen Impuls auf die Masse des Teilchens.



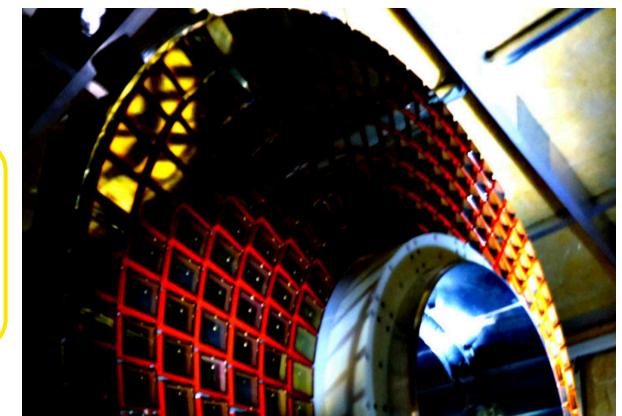
Cherenkov-Strahlung

Wenn geladene Teilchen mit beinahe Lichtgeschwindigkeit durch ein Medium durchgehen, strahlen sie sogenannte Cherenkov-Strahlung aus, da sie ihre Umgebung polarisieren.

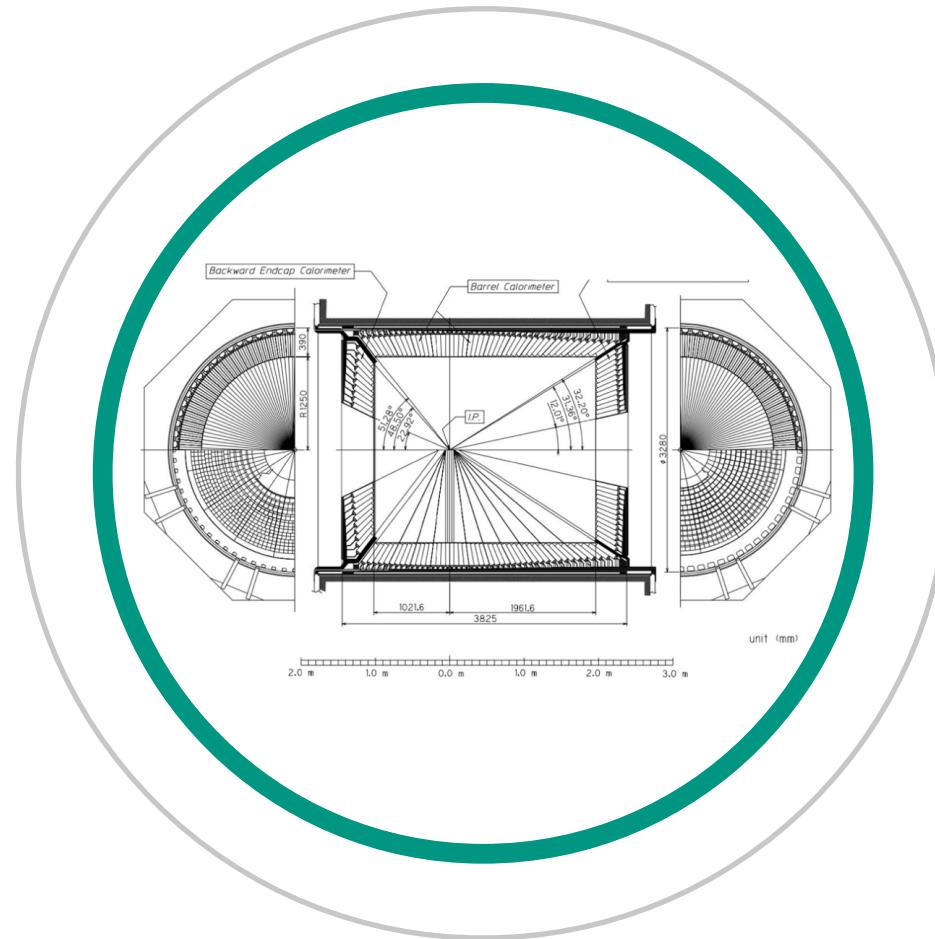


Aerogel Ring-Imaging Cherenkov (ARICH)

Der ausgestrahlte Cherenkov Kegel wird als Kreis aufgenommen, dessen Radius auf die Masse des durchgelaufenen Teilchens schließen lässt



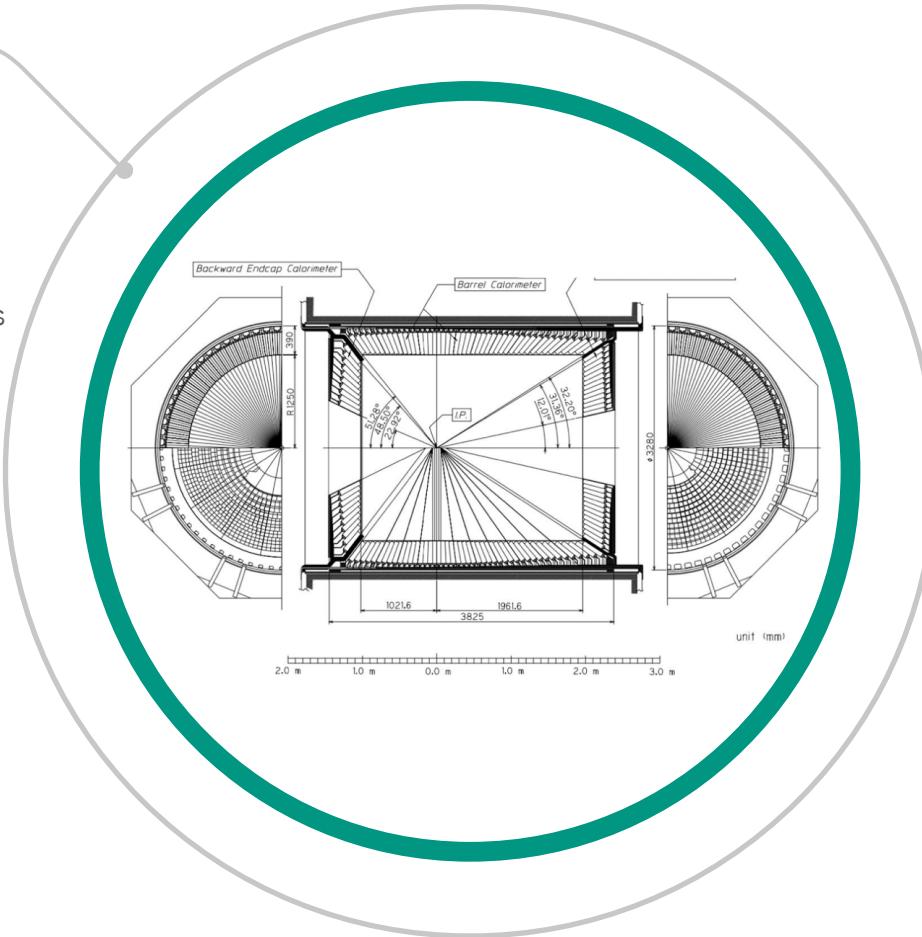
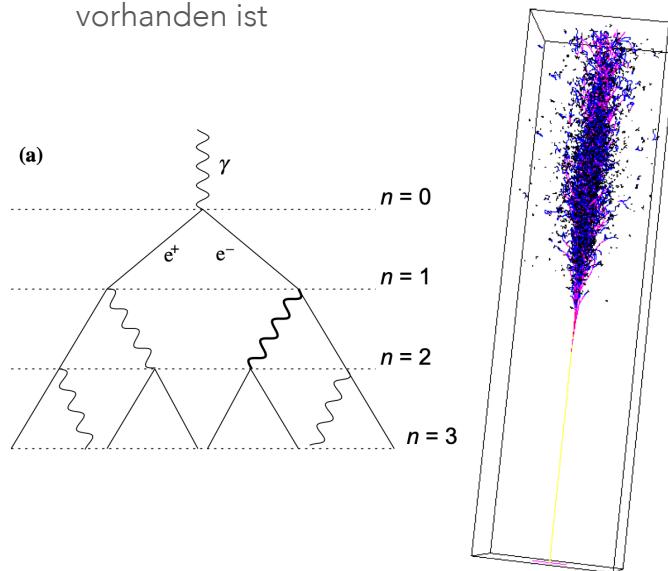
Kalorimeter



Kalorimeter

Schauer

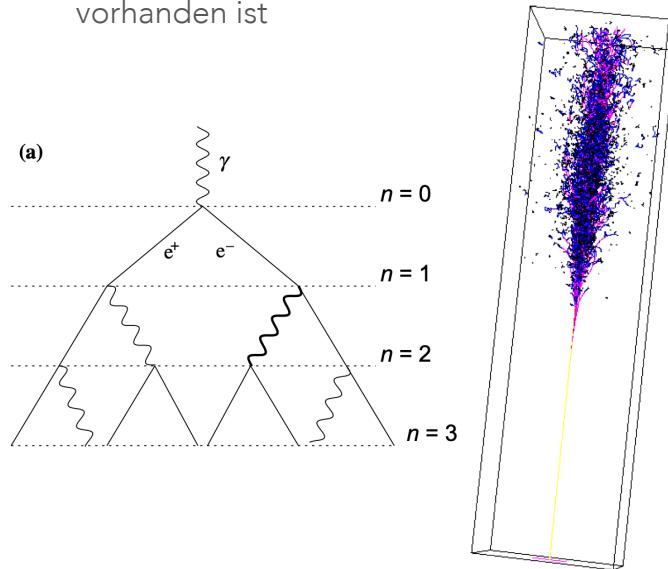
- Bei der Interaktion mit Materie können Teilchen einen sogenannten Schauer bilden
- Dabei zerfällt das Teilchen in andere Teilchen und teilt seine Energie mit ihnen. Die Zerfallsprodukte führen das Gleiche durch, bis nicht mehr genug Energie zum Zerfallen vorhanden ist



Kalorimeter

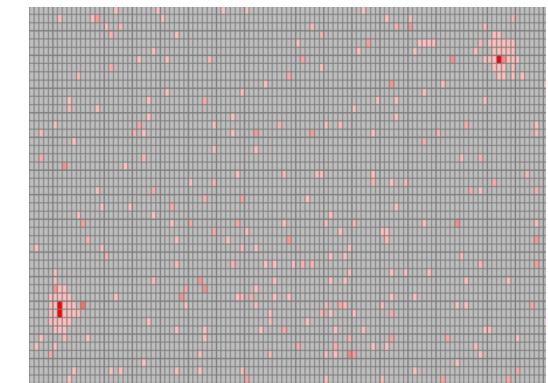
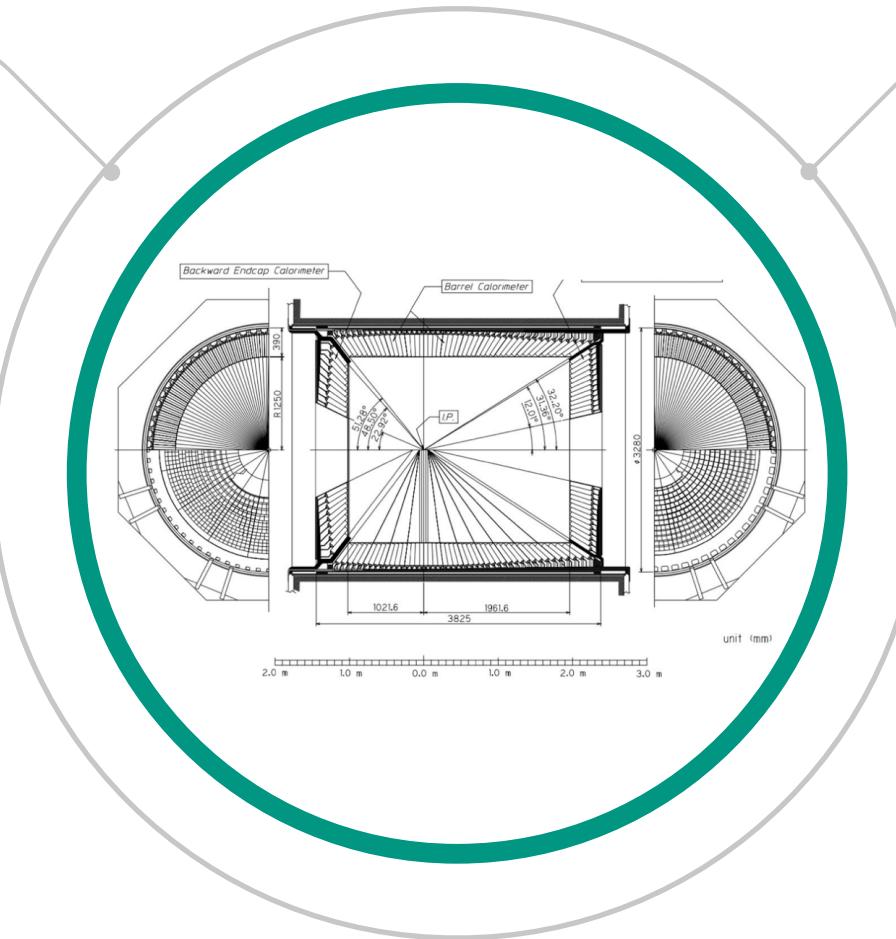
Schauer

- Bei der Interaktion mit Materie können Teilchen einen sogenannten Schauer bilden
- Dabei zerfällt das Teilchen in andere Teilchen und teilt seine Energie mit ihnen. Die Zerfallsprodukte führen das Gleiche durch, bis nicht mehr genug Energie zum Zerfallen vorhanden ist



Kalorimeter

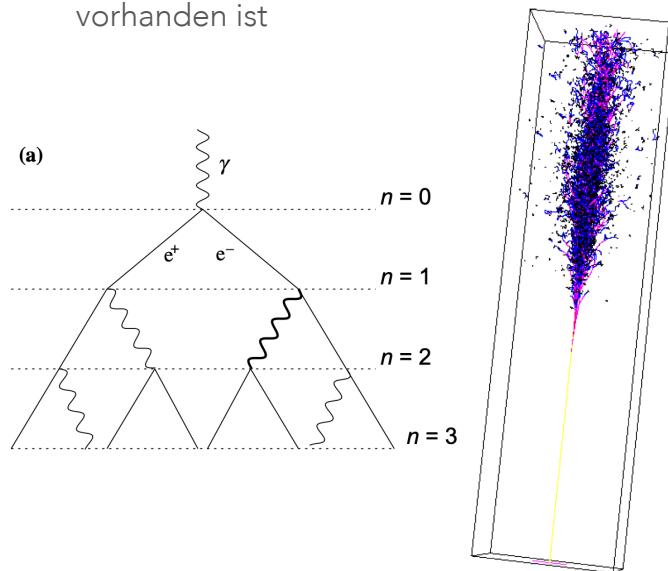
- Kalorimeter messen die Energie der einfallenden Teilchen
- Ziel: Aufnahme und Rekonstruktion des gesamten Schauers



Kalorimeter

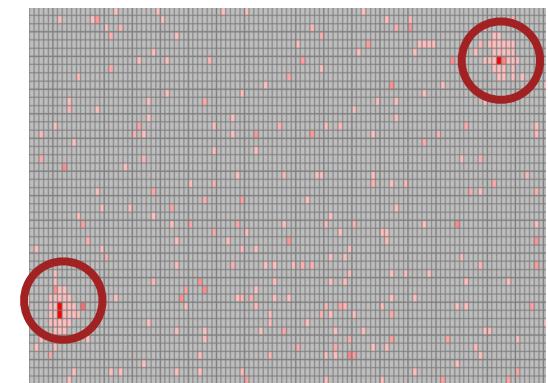
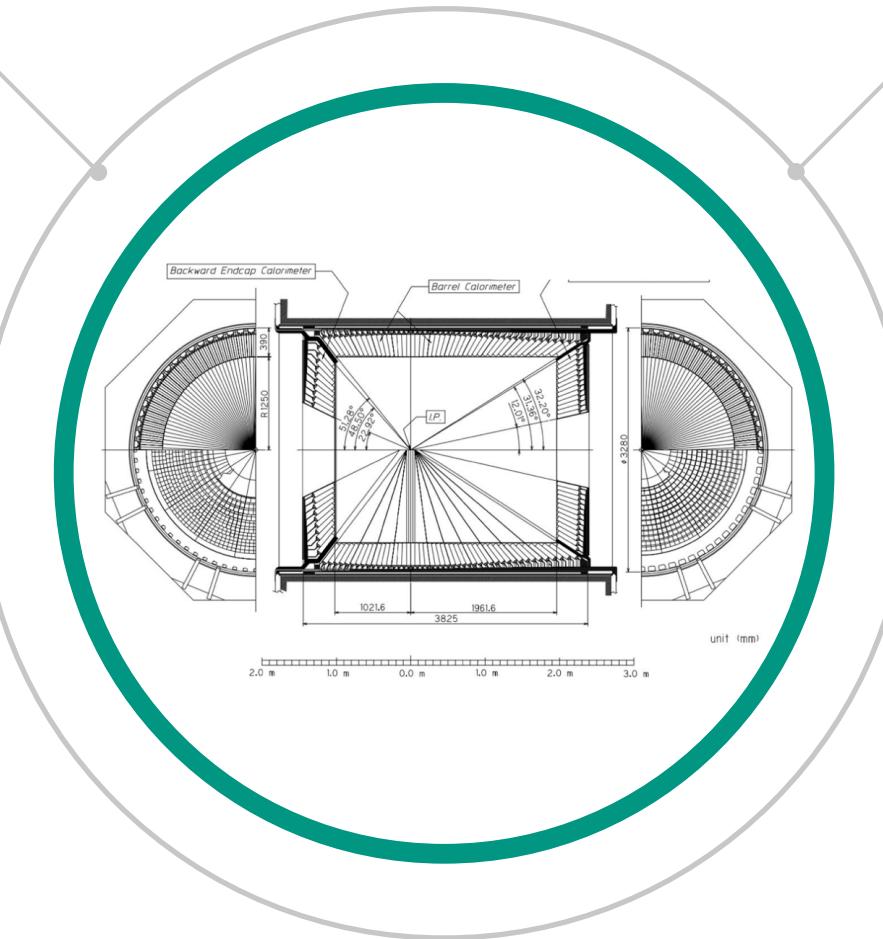
Schauer

- Bei der Interaktion mit Materie können Teilchen einen sogenannten Schauer bilden
- Dabei zerfällt das Teilchen in andere Teilchen und teilt seine Energie mit ihnen. Die Zerfallsprodukte führen das Gleiche durch, bis nicht mehr genug Energie zum Zerfallen vorhanden ist



Kalorimeter

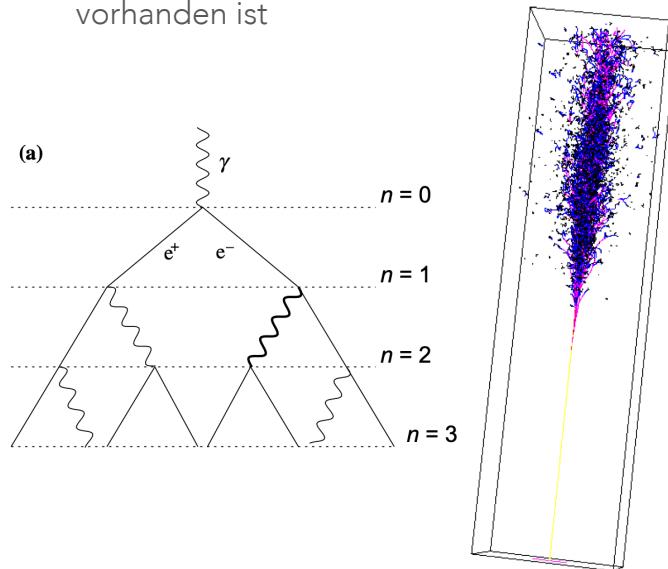
- Kalorimeter messen die Energie der einfallenden Teilchen
- Ziel: Aufnahme und Rekonstruktion des gesamten Schauers



Kalorimeter

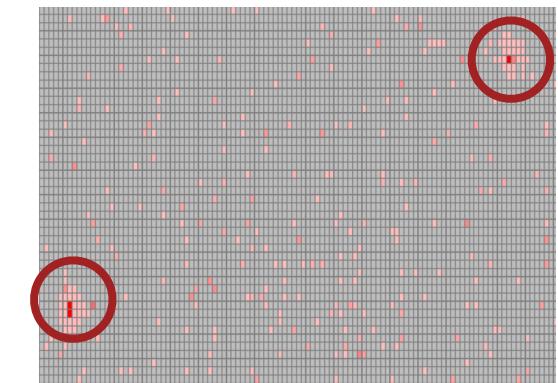
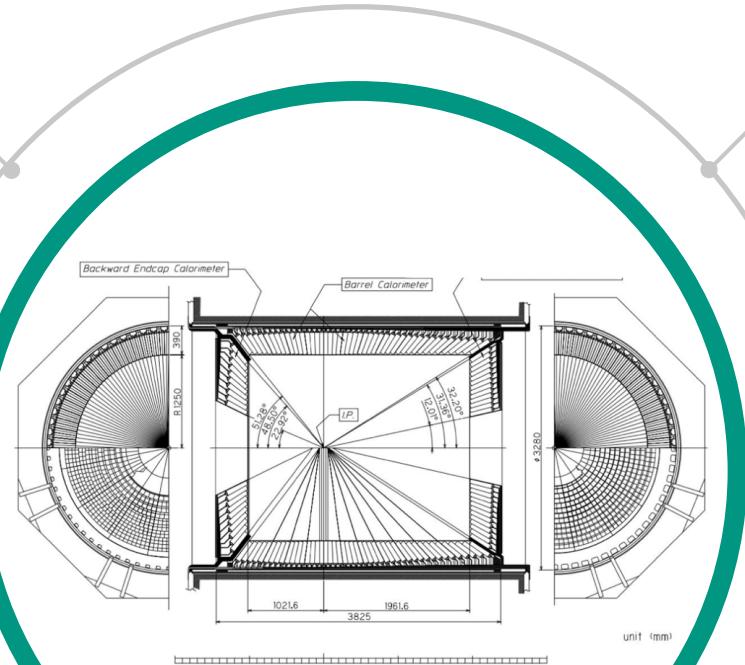
Schauer

- Bei der Interaktion mit Materie können Teilchen einen sogenannten Schauer bilden
- Dabei zerfällt das Teilchen in andere Teilchen und teilt seine Energie mit ihnen. Die Zerfallsprodukte führen das Gleiche durch, bis nicht mehr genug Energie zum Zerfallen vorhanden ist



Kalorimeter

- Kalorimeter messen die Energie der einfallenden Teilchen
- Ziel: Aufnahme und Rekonstruktion des gesamten Schauers

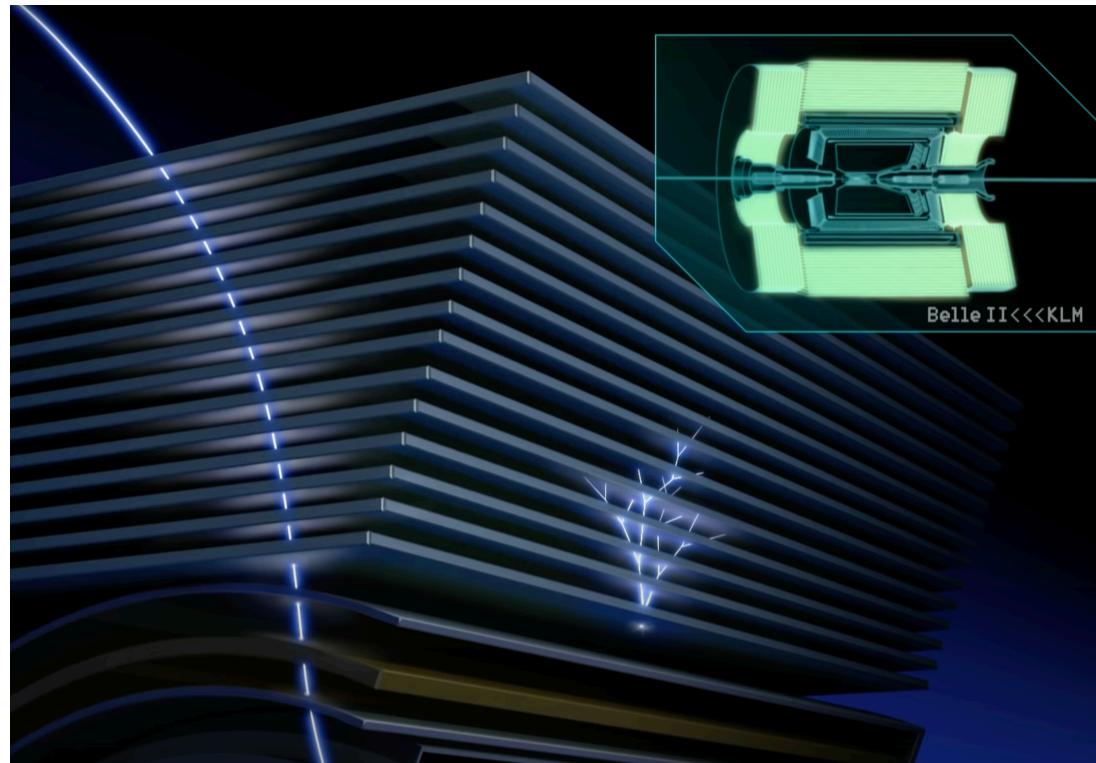


ECL

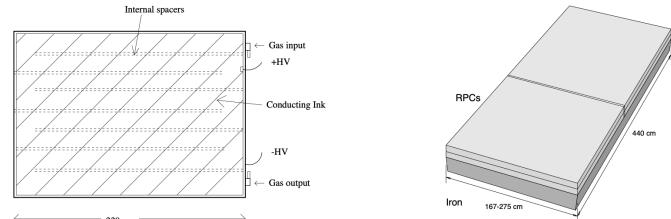
- Das E.M. Kalorimeter des Belle II Detektors besteht aus über 8000 verschiedenen Kristallen in 98 verschiedenen Formen

KLM-Detektor

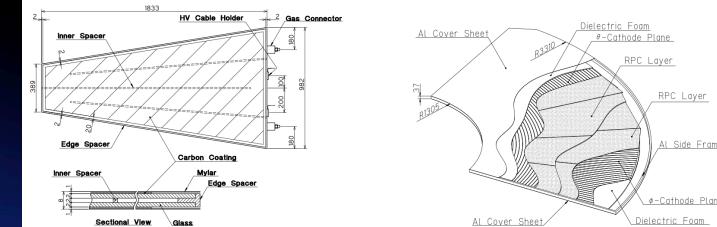
Myonen und andere Teilchen interagieren nicht gerne mit Materie.
Durch abwechselnde Platten von dichter Materie und Detektor können die Teilchen (oder Spuren davon) dennoch detektiert werden.



Barrel-Region

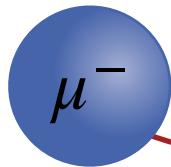


End-Kappen-Region

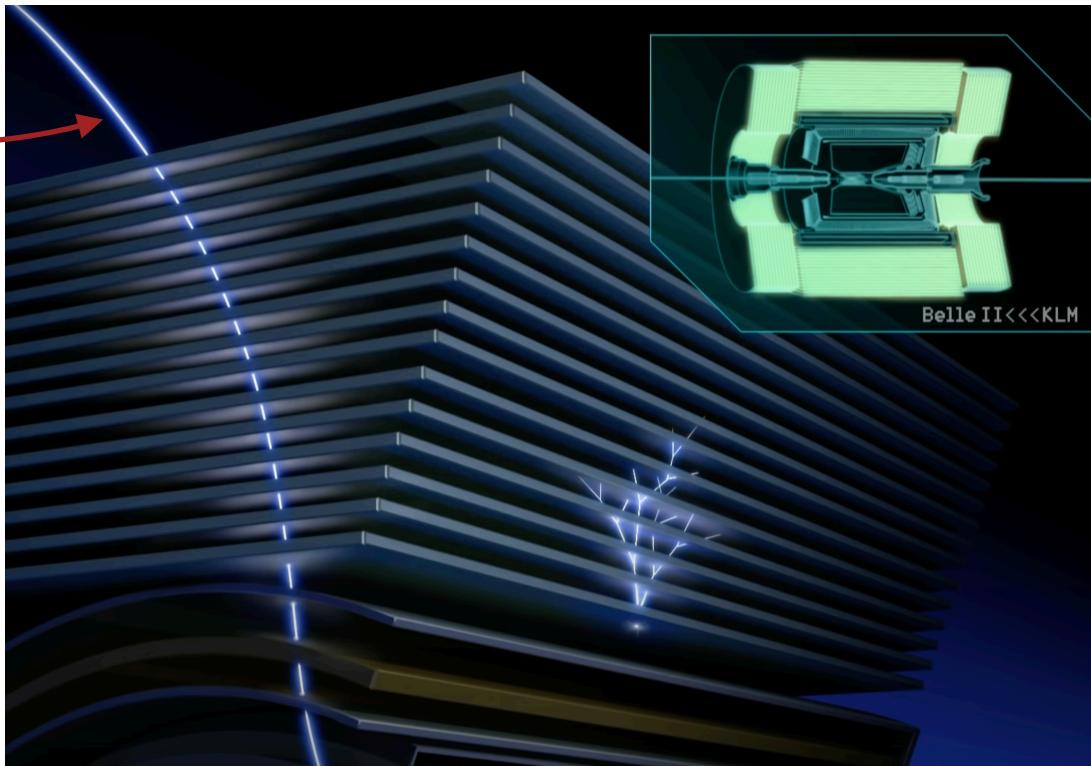


KLM-Detektor

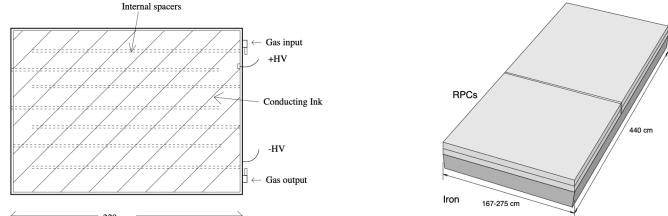
Myonen und andere Teilchen interagieren nicht gerne mit Materie.
 Durch abwechselnde Platten von dichter Materie und Detektor können die Teilchen (oder Spuren davon) dennoch detektiert werden.



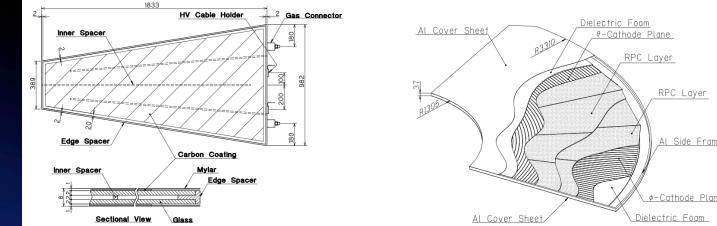
Myonen können meist nicht vollständig detektiert werden.



Barrel-Region

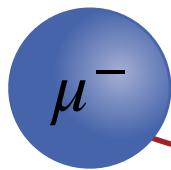


End-Kappen-Region

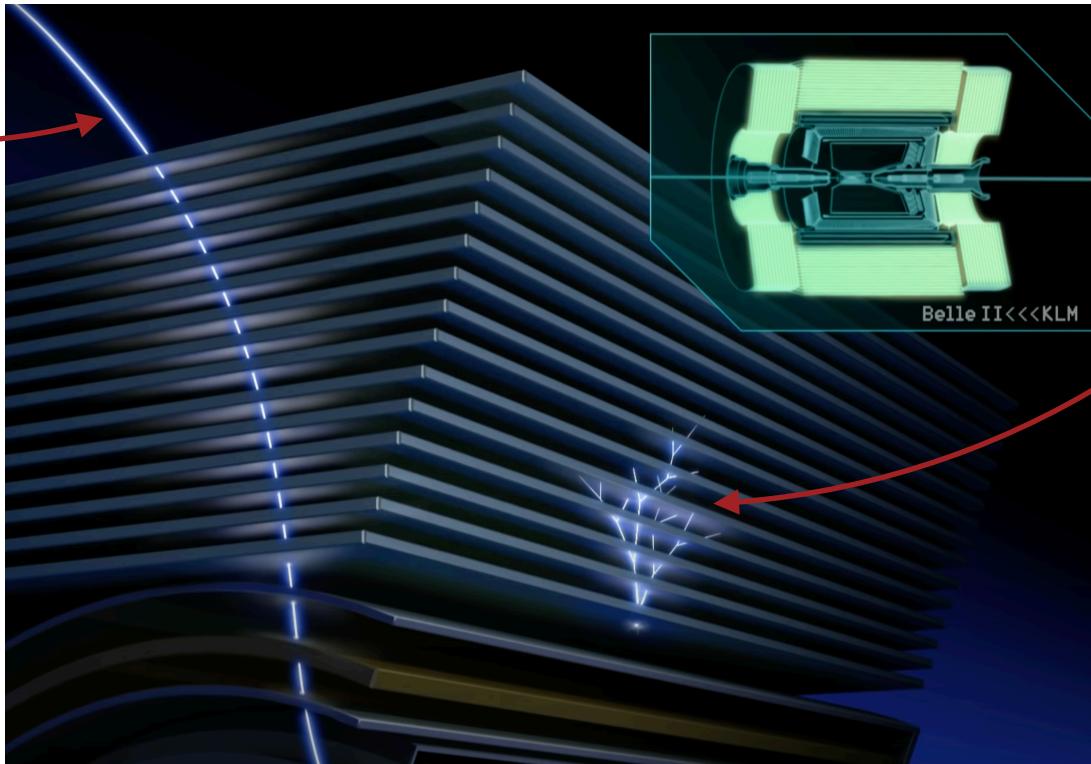


KLM-Detektor

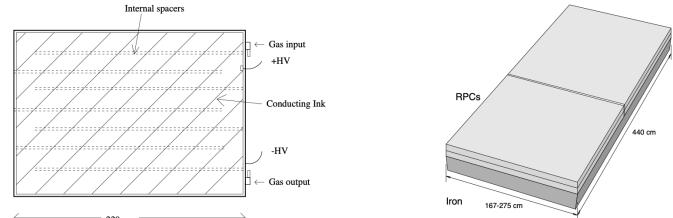
Myonen und andere Teilchen interagieren nicht gerne mit Materie.
Durch abwechselnde Platten von dichter Materie und Detektor können die Teilchen (oder Spuren davon) dennoch detektiert werden.



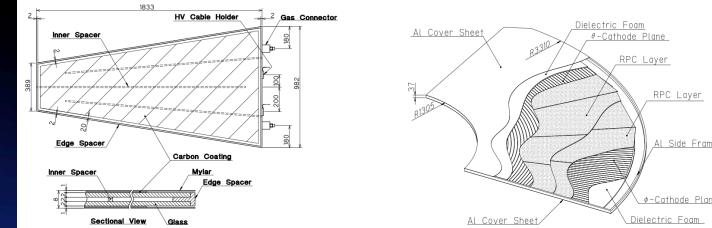
Myonen können meist nicht vollständig detektiert werden.



Barrel-Region



End-Kappen-Region





FRAGEN?