

Grundlagen Teilchenphysik

Anna von Karstedt, Hannes Richardt

Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
Universität Hamburg

26. Januar 2025

Gliederung

1. Standardmodell

1.1 Fermionen

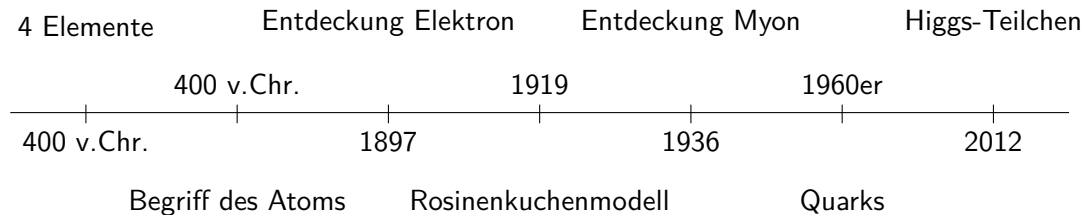
1.2 Bosonen

2. Teilchenbeschleuniger

3. Wirkungsquerschnitt

4. Phasenraumintegration

Woraus besteht Materie?



Elementarteilchen

- Teilchenzoo
- Standardmodell der Teilchen
- kleinsten unteilbaren Bestandteile von Materie
- Fermionen und Bosonen
- Durchmesser Null

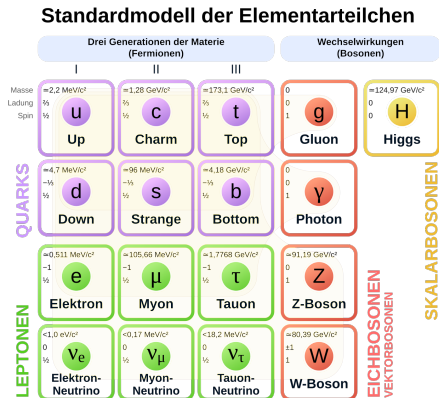
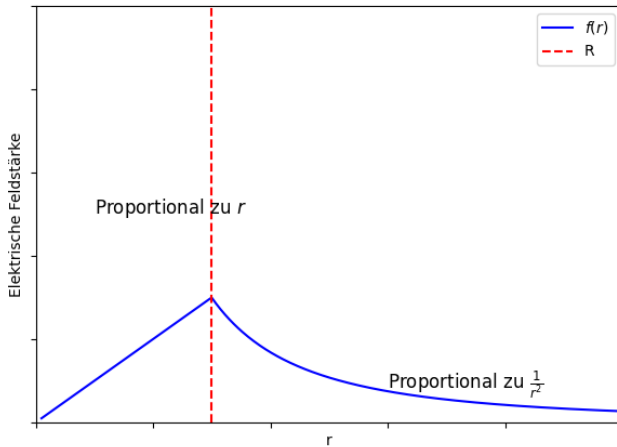


Abbildung: Standardmodell

Durchmesser Null



Fermionen

- Grundlage der Materie
- halbzahliger Spin
- magnetische Spinquantenzahl
- Helizität
- Masse
- Ladung
- Zustandsvektor $|\psi_1\rangle$
- Pauliprinzip

Antisymmetrische Wellenfunktion

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle - |\psi_2\rangle \otimes |\psi_1\rangle)$$

Wenn: $|\psi_1\rangle = |\psi_2\rangle$

$$\Rightarrow |\Psi\rangle = 0$$

Quarks



Abbildung: Neutron



Abbildung: Proton

	1. Generation	2. Generation	3. Generation
	Up	Charm	Top
Ladung in e	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{2}{3}$
Masse in MeV	$2,16 \pm 0,07$	$1273,0 \pm 4,6$	172570 ± 290
	Down	Strange	Bottom
Ladung in e	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
Masse in MeV	$4,7 \pm 0,07$	$93,5 \pm 0,8$	4183 ± 290

Tabelle: Quarks

Baryonen

- 3 Quarks

Baryonenzahl

Jedem Baryonen wird die Baryonenzahl 1 und jedem Antibaryonen die Zahl -1 zugeordnet

- Erhaltungsprinzip
- Bsp. $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

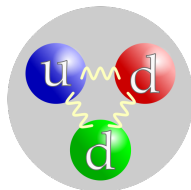


Abbildung: Neutron

Leptonen

	1. Generation	2. Generation	3. Generation
	Elektron	Myon	Tauon
Ladung in e	-1	-1	-1
Masse in MeV	0,511	105,66	1777
Lebensdauer	stabil	$2,197 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-13}$
	Elektron-Neutrino	Myon-Neutrino	Tauon-Neutrino
Ladung in e	0	0	0
Masse in MeV	$< 9 \cdot 10^{-7}$	$< 0,17$	$< 15,5$
Lebensdauer	stabil	stabil	stabil

Myonen

- 200 mal größere Masse als ein Elektron
- entstehen bei Höhenstrahlung
- instabil Lebensdauer 2,2 Mikrosekunden
- spezielle Relativitätstheorie

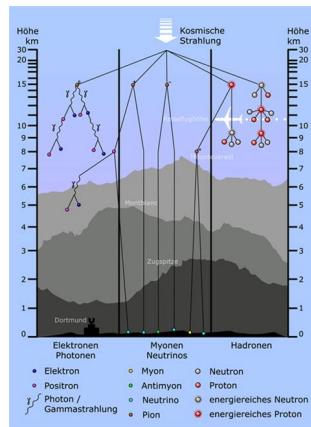


Abbildung: Höhenstrahlung

Neutrino

- Antwort auf die fehlende Energie beim Betazerfall
- ungeladen und sehr leicht
- kaum Reaktion
- werden von Sternen abgestrahlt



Abbildung: Supernova

Antiteilchen

- Jedes Fermion hat ein Antiteilchen

Dirac-Gleichung

$$(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi = 0$$

Hierbei sind:

- \hbar das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum,
- γ^μ die Gamma-Matrizen,
- ∂_μ der kovariante Ableitungsoperator,
- m die Masse des Teilchens,
- ψ der Dirac-Feldvektor.

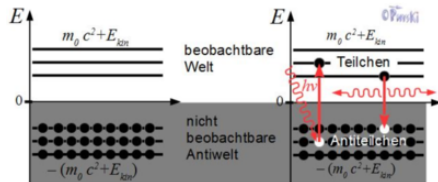


Abbildung: Positron

Feynman Diagramme







Fermion	
Antifermion	
Photon	
W-,Z-Boson	
Gluon	
Skalarboson	

Tabelle: Symbole im Feynmandiagramm

Feynman Diagramme







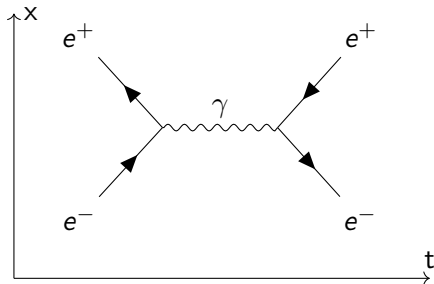
Fermion	
Antifermion	
Photon	
W-,Z-Boson	
Gluon	
Skalarboson	

Tabelle: Symbole im Feynmandiagramm



Bosonen Überblick

Spin von Bosonen

Bosonen haben immer einen ganzzahligen Spin (0, 1, 2, ...)

Arten von Bosonen

- Mesonen (Zusammengesetzte Teilchen)
- Elementarteilchen (siehe Abb.)

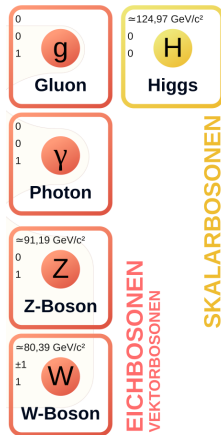


Abbildung: Bosonen Überblick

Mesonen

- Untergruppe der Hardonen
- instabile Teilchen
- Baryonenzahl = 0

Beispiele für Mesonen

- Pion (siehe Abb.)
- Tetraquarks
- Psion

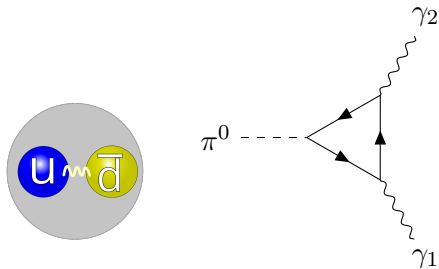


Abbildung: Pion

Eichbosonen

Definition

Vermittlung der fundamentalen Wechselwirkungen (außer Gravitation)

Spin: $s = 1$

Boson	Photon γ	W^{\pm}/Z^0 -Boson	Gluon g
Wechselwirkung	Elektromagn.	Schwache	Starke
Eichgruppe	$U(1)$	$SU(2)$	$SU(3)$
Bosonenanzahl	1	3	8
Ladung	elek. Ladung	schacher Isospin	Farbladung

Tabelle: Eichbosonen

Eichgruppen

Symmetriegruppen

- $U(1)_Y \rightarrow$ Schwache Hyperladung
- $SU(2)_L \rightarrow$ Flavour
- $SU(3)_C \rightarrow$ Farbladung

Eichgruppen

Symmetriegruppen

$U(1)_Y \rightarrow$ Schwache Hyperladung | $SU(2)_L \rightarrow$ Flavour | $SU(3)_C \rightarrow$ Farbladung

Generatoren

- jede Gruppe besitzt Generatoren
- Anzahl der Generatoren =
Anzahl der Eichbosonen

Eichgruppen

Symmetriegruppen

$U(1)_Y \rightarrow$ Schwache Hyperladung | $SU(2)_L \rightarrow$ Flavour | $SU(3)_C \rightarrow$ Farbladung

Generatoren

- jede Gruppe besitzt Generatoren
- Anzahl der Generatoren =
Anzahl der Eichbosonen

Starke Wechselwirkung

= $SU(3)_C$

- 8 Generatoren (Oktett)

Eichgruppen

Symmetriegruppen

$U(1)_Y \rightarrow$ Schwache Hyperladung | $SU(2)_L \rightarrow$ Flavour | $SU(3)_C \rightarrow$ Farbladung

Generatoren

- jede Gruppe besitzt Generatoren
- Anzahl der Generatoren = Anzahl der Eichbosonen

Starke Wechselwirkung

= $SU(3)_C$

- 8 Generatoren (Oktett)

Elektroschwache Wechselwirkung

= $SU(2)_L \times U(1)_Y$

Elektromagnetismus

- $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$
- $Q = T_3 + \frac{1}{2} Y_W$
- 1 Generator (Singlet)

Schwache Wechselwirkung

- 3 Generatoren (Triplet)

Photon

Korrespondierende Ladung

Elektromagnetische Ladung

$$Q = T_3 + \frac{1}{2}Y_W$$

- Ruhemasse: $m_0 = 0$
- Geschwindigkeit: $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

Entstehung

- Synchrotronstrahlung
- Energieniveau-Übergang
- Annihilation

Photon

Korrespondierende Ladung

Elektromagnetische Ladung

$$Q = T_3 + \frac{1}{2} Y_W$$

- Ruhemasse: $m_0 = 0$
- Geschwindigkeit: $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

Entstehung

- Synchrotronstrahlung
- Energieniveau-Übergang
- Annihilation

Teilchen der elektromagn. Strahlung

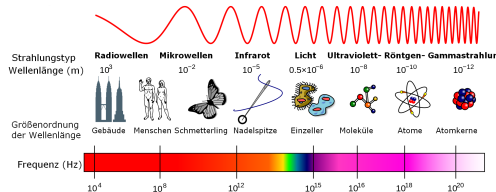


Abbildung: Elektromagnetische Strahlung

Photon: Feynman-Diagramme

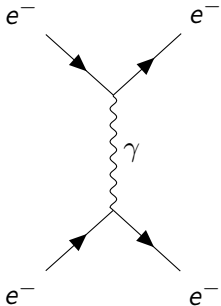


Abbildung: Abstoßung von 2 Elektronen

Photon: Feynman-Diagramme

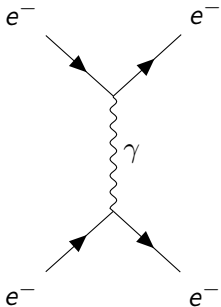


Abbildung: Abstoßung von 2 Elektronen

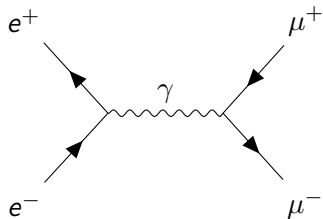


Abbildung: Anihilation von einem Elektron und Positron

W- und Z-Bosonen

Korrespondierende Ladung

Schwacher Isospin T_3

- Teilchen: W^+ , W^- , Z^0
- W^\pm übertragen elek. Ladung
- hohe Masse: $m_0 > 80 \frac{\text{GeV}}{c^2}$
 \implies geringe Reichweite

Vorkommen

- W^\pm : Beta+/- Zerfall
- Z^0 : elastische Neutrino Streuung

W- und Z-Bosonen

Korrespondierende Ladung

Schwacher Isospin T_3

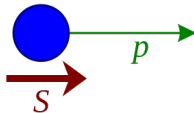
- Teilchen: W^+ , W^- , Z^0
- W^\pm übertragen elek. Ladung
- hohe Masse: $m_0 > 80 \frac{\text{GeV}}{c^2}$
 \implies geringe Reichweite

Vorkommen

- W^\pm : Beta+/- Zerfall
- Z^0 : elastische Neutrino Streuung

	Rechtshändig	Linkshändig
Helizität	positiv	negativ
Spinrichtung	in \vec{p} Richtung	entgegen \vec{p}
Interaktion	Antiteilchen	Teilchen

Right-handed:



Left-handed:

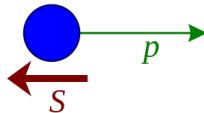


Abbildung: Helizität eines Teilchen

W- und Z-Bosonen: Feynman-Diagramme

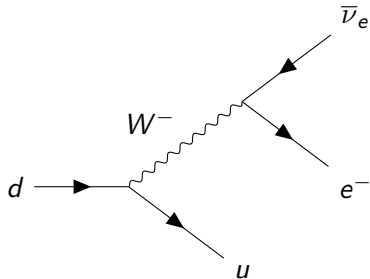


Abbildung: Beta-Minus-Zerfall

W- und Z-Bosonen: Feynman-Diagramme

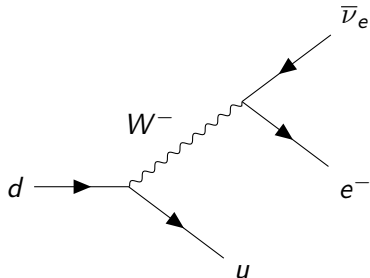


Abbildung: Beta-Minus-Zerfall

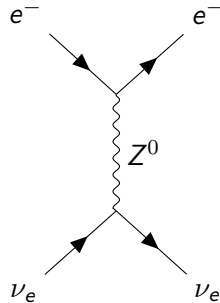


Abbildung: Neutrino-Elektron-Interaktion via Z^0 Boson

Gluon

Korrespondierende Ladung

Farbladung C

- als masselos angenommen
- es gibt 8 Gluonen mit verschiedenen Farbzuständen
- Gluonen besitzen immer eine Farbe und Antifarbe
- sie übertragen Farbladung
- Experimenteller Nachweis (1979): PETRA am Desy (3-Jet-Struktur)

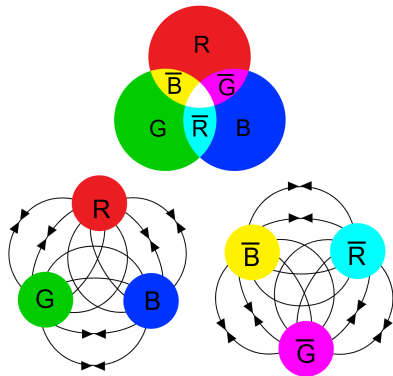


Abbildung: Farbladung

Gluon: Feynman-Diagramme

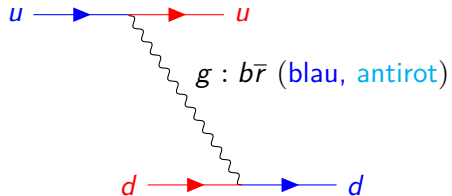


Abbildung: Gluon Austausch

Gluon: Feynman-Diagramme

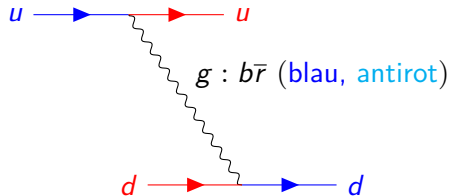


Abbildung: Gluon Austausch

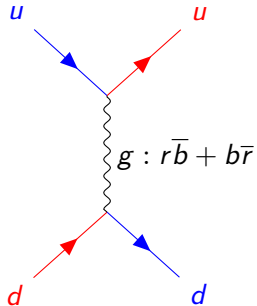


Abbildung: Gluon Austausch

Higgs-Boson

Funktion

Elementarteilchen erhalten ihre Masse durch Interaktion mit dem Higgs-Feld

Eigenschaften

- Spin: $s = 0 \implies$ Skalarboson
- hohe Masse: $m_0 = 124.97 \frac{\text{GeV}}{c^2}$

\implies spontane Symmetrie Brechung bei der elektro-schwachen WW wodurch W^\pm, Z^0 Masse erhalten

Higgs-Boson

Funktion

Elementarteilchen erhalten ihre Masse durch Interaktion mit dem Higgs-Feld

Eigenschaften

- Spin: $s = 0 \implies$ Skalarboson
- hohe Masse: $m_0 = 124.97 \frac{\text{GeV}}{c^2}$

\implies spontane Symmetrie Brechung bei der elektro-schwachen WW wodurch W^\pm, Z^0 Masse erhalten

Entdeckung

- **1964**: Theorie: Higgs-Mechanismus
- **1984**: Bau des LHC am CERN
- **2008**: Inbetriebnahme des LHC
- **2010**: Datensammlung durch ATLAS und CMS startet
- **2011**: Hinweise auf Higgs-Boson bei $125 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ gefunden
- **2012**: Higgs-Entdeckung mit 5σ bestätigt
- **2013**: Nobelpreis: Higgs, Englert

Higgs-Boson: Feynman-Diagramme

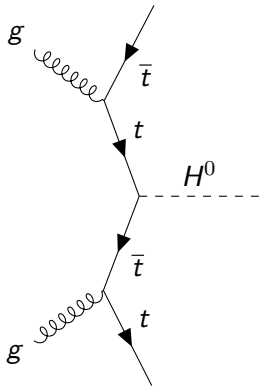


Abbildung: Erzeugung eines Higgs-Bosons
durch 2 Gluonen

Higgs-Boson: Feynman-Diagramme

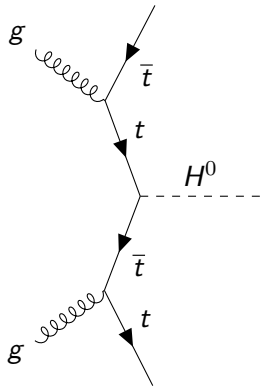


Abbildung: Erzeugung eines Higgs-Bosons durch 2 Gluonen

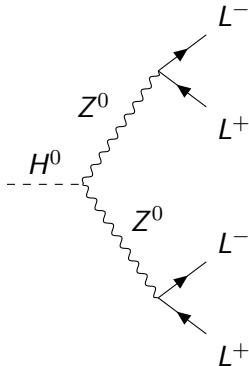


Abbildung: Zerfall eines Higgs-Bosons in 4 Leptonen

Standardmodell

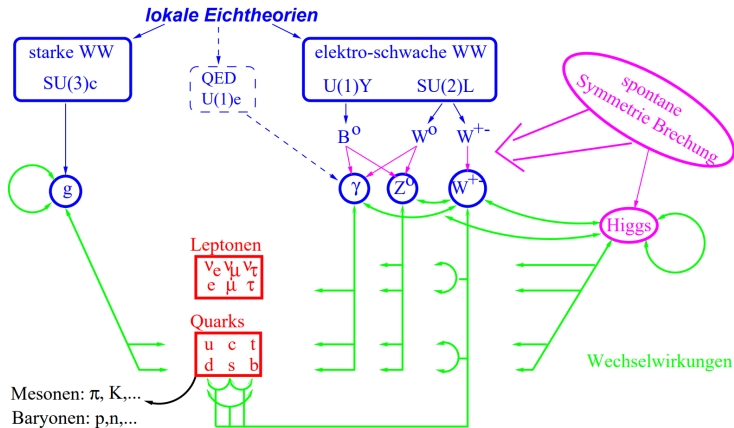


Abbildung: Standardmodell

Fundamentale Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Reichweite	relative Stärke	Austauschteilchen
Starke (QCD)	$\sim 10^{-15}m$	1	Gluonen
Elektromagnetische (QED)	∞	10^{-2}	Photonen
Schwache	$\sim 10^{-18}m$	10^{-15}	W- und Z-Bosonen
Gravitative	∞	10^{-41}	Graviton (hypothetisch)

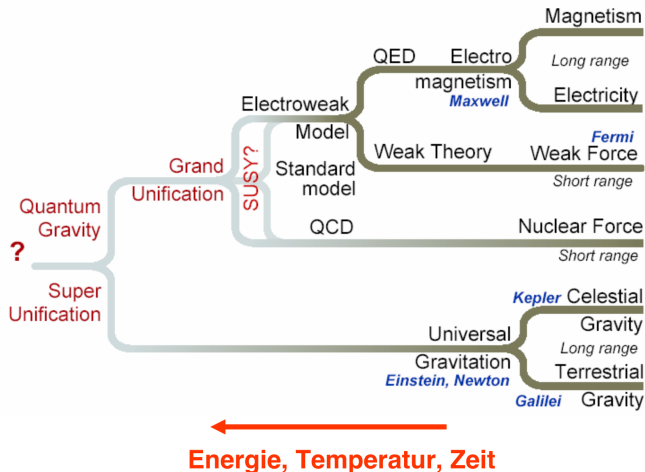
Tabelle: Fundamentale Wechselwirkungen

Fundamentale Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Quarks	Leptonen ohne Neutrinos	Neutrinos
Starke (QCD)	✓	✗	✗
Elektromagnetische (QED)	✓	✓	✗
Schwache	✓	✓	✓
Gravitative	✓	✓	✓

Tabelle: Fundamentale Wechselwirkungen

Theory of Everything?



Streuexperimente

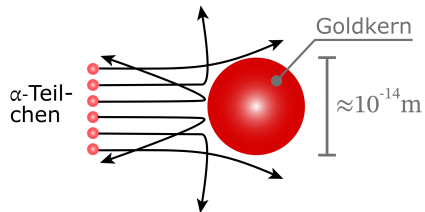


Abbildung: Streuung am Goldkern

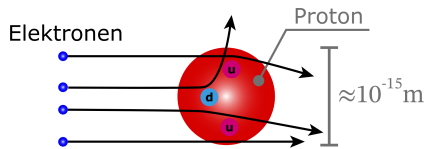


Abbildung: Streuung an Quarks

Teilchenbeschleuniger

- annähernd Lichtgeschwindigkeit
- Spurendetektor Ionisation am Halbleiter
- Kalorimeter
- Identifikation
- Rekonstruktion

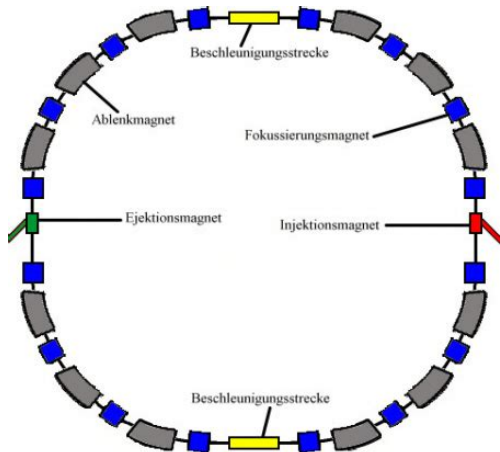


Abbildung: Synchrotron

Wirkungsquerschnitt

- Maß für Wahrscheinlichkeit für Wechselwirkung
- Dimension einer Fläche
- Einheit Barn $1b = 10^{-28}cm^2$
- $w = \sigma \frac{N_T}{F}$. $\implies \sigma = w \frac{F}{N_T}$

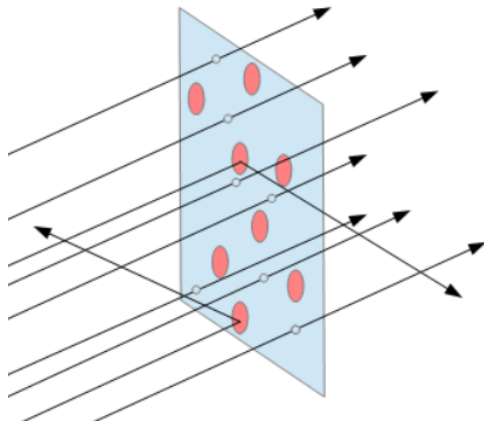


Abbildung: Wirkungsquerschnitt

Wirkungsquerschnitt

- Versuch am Petra Beschleuniger
- Elektron + Positron zu Myon Paar
- differentielle Wirkungsquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}$
- Vergleich mit Standartmodell

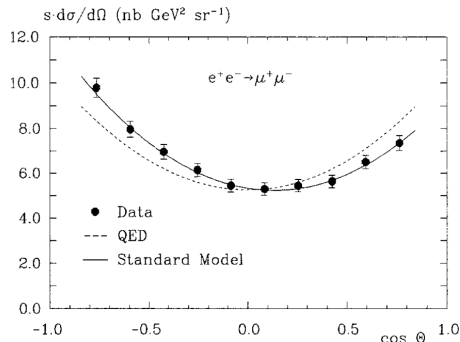


Abbildung: Daten Petra Beschleuniger

Phasenraum

Definition

Der Phasenraum beschreibt alle möglichen Zustände eines physikalischen Systems

Phasenraum in der Teilchenphysik

- umfasst die Impulse \vec{p} und Energien E der beteiligten Teilchen
- Integration zur Berechnung physikalischer Größen

Phasenraum

Definition

Der Phasenraum beschreibt alle möglichen Zustände eines physikalischen Systems

Phasenraum in der Teilchenphysik

- umfasst die Impulse \vec{p} und Energien E der beteiligten Teilchen
- Integration zur Berechnung physikalischer Größen

System von n Teilchen im Endzustand

$$d\Phi_n = \prod_{i=1}^n \frac{d^3 p_i}{(2\pi)^3 2E_i} \cdot (2\pi)^4 \delta^4 \left(p_{\text{initial}} - \sum_{i=1}^n p_i \right),$$

$d\Phi_n$: differentiell Phasenraumelement

$p_i = (E_i, \vec{p}_i)$: Viererimpuls des i -ten Teilches

Phasenraum: Beispiel

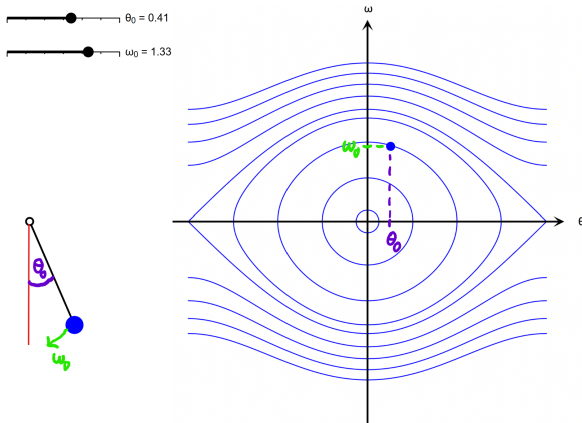


Abbildung: Phasenraum eines Fadenpendels ohne Energieverluste

Phasenraumintegration

Integration über den Viererimpuls
 $p_i = (E_i, \vec{p}_i)$ von n Teilchen

Verwendung

Berechnung physikalischer Größen

- Wirkungsquerschnitte (σ) für Streuprozesse
- Zerfallsraten (Γ) für Teilchenzerfälle

Methoden

Analytische Integration

- für einfache Prozesse
- z.B. Zwei-Teilchen-Zerfall

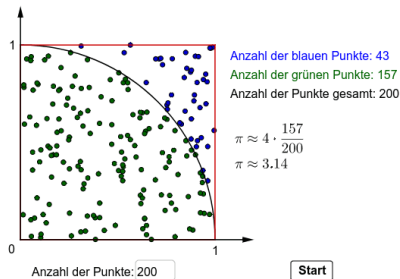
Numerische Methoden

- für komplexe Prozesse
- mit mehreren Endzustandsteilchen
- z.B. mit Monte-Carlo-Integration

Monte-Carlo Methode

Beispiel: Näherung von π

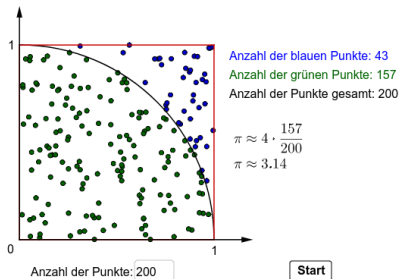
1. Generation zufälliger Punkte (x, y) in einem Quadrat mit Seitenlänge 1
2. Prüfe, ob der Punkt innerhalb des Viertelkreises liegt: $x^2 + y^2 \leq 1$.
3. Verhältnis der Punkte im Kreis zu allen generierten Punkten entspricht $\pi/4$.



Monte-Carlo Methode

Beispiel: Näherung von π

1. Generation zufälliger Punkte (x, y) in einem Quadrat mit Seitenlänge 1
2. Prüfe, ob der Punkt innerhalb des Viertelkreises liegt: $x^2 + y^2 \leq 1$.
3. Verhältnis der Punkte im Kreis zu allen generierten Punkten entspricht $\pi/4$.



Übertragung auf die Teilchenphysik

- Integration über den Phasenraum mit zufälligen Proben
- \implies effizientes Lösen von Mehrteilchen-Endzuständen

Myon-G-2 Experiment

- Messung des anomalen magnetischen Moments des Myons
- Abweichung vom Standardmodell
- Hinweis auf neue Physik

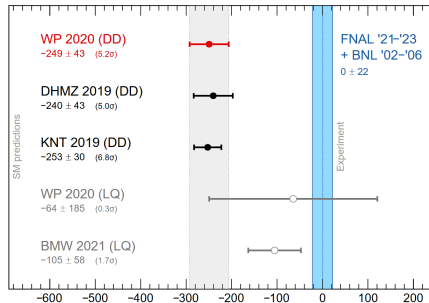


Abbildung: Myon magnetisches Moment

Literaturverzeichnis I



Bopp, F. W. (1997).

Kerne, Hadronen und Elementarteilchen.

Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.



LEIFIPhysik (n.d.).

Streuexperiment - grundwissen.

<https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/kernphysik-grundlagen/grundwissen/streuexperiment>.

Zugriff am 25. Januar 2025.



Maheria, V. (2022).

Semi- and Fully-Inclusive Phase-Space Integrals at Four Loops.

PhD thesis, Universität Hamburg.

Abgerufen: 2025-01-27.

Literaturverzeichnis II



Philipsen, O. (n.d.).

Quantum field theory 1 - lecture notes.

Abgerufen: 2025-01-27.



Quarks.de (2025).

Was du über elementarteilchen wissen musst.

Abgerufen am 26. Januar 2025.



Schleper, G. (2015).

Teilchenphysik, kapitel 4a.

Abgerufen am 26. Januar 2025.



Schleper, P. (2013).

Teilchenphysik für fortgeschrittene - vorlesungsskript.

Abgerufen: 2025-01-27.

Literaturverzeichnis III



Uwer, P. (n.d.).

Physik v vorlesungsskript: Kapitel iic.

<https://physi.uni-heidelberg.de/~uwer/lectures/PhysikV/Vorlesung/Kapitel-IIc.pdf>.

Zugriff am 25. Januar 2025.