

Einführung in die  
Kern- und Elementarteilchenphysik

Vorlesung im Wintersemester 2007/2008

H. Kolanoski  
*Humboldt-Universität zu Berlin*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>1 Grundlagen</b>	<b>4</b>
1.1 Einheiten . . . . .	4
1.2 Relativistische Kinematik . . . . .	5
1.2.1 Masse-Energie-Beziehung . . . . .	5
1.2.2 Kinetische Energie . . . . .	5
1.2.3 Vierervektoren und Lorentz-Invarianten . . . . .	6
1.2.4 Lorentz-Transformationen . . . . .	7
1.2.5 Poincaré-Transformationen . . . . .	8
1.2.6 Anwendungen . . . . .	8
1.3 Quantenmechanische Beschreibung von Teilchen . . . . .	10
1.4 Relativistische Wellengleichungen . . . . .	12
1.4.1 Klein-Gordon-Gleichung ( $s = 0$ ) . . . . .	12
1.4.2 Dirac-Gleichung ( $s = 1/2$ ) . . . . .	15
1.5 Wirkungsquerschnitt und Zerfallsbreite . . . . .	20
1.5.1 Definition . . . . .	20
1.5.2 Beispiele für Wirkungsquerschnittsberechnungen . . . . .	22
1.5.3 Quantenmechanische Behandlung des Wirkungsquerschnitts . . . . .	24
1.5.4 Zerfallsbreite und Lebensdauer . . . . .	27
<b>2 Kurzer geschichtlicher Überblick</b>	<b>29</b>
<b>3 Experimentelle Methoden</b>	<b>37</b>
3.1 Beschleuniger . . . . .	37
3.1.1 Linearbeschleuniger: . . . . .	38
3.1.2 Kreisbeschleuniger . . . . .	38
3.1.3 Speicherringe . . . . .	40
3.2 Wechselwirkungen von Teilchen mit Materie . . . . .	41
3.2.1 Energieverlust aufgrund von Ionisation . . . . .	42
3.2.2 Coulomb-Vielfachstreuung . . . . .	47
3.2.3 Elektron-Bremsstrahlung . . . . .	51
3.2.4 Wechselwirkungen von Photonen mit Materie . . . . .	53
3.3 Detektoren . . . . .	55
3.3.1 Detektoren für geladene Teilchen . . . . .	55
3.3.2 Messung der Energie von Elektronen und Photonen . . . . .	61
3.3.3 Messung der Energie von Hadronen . . . . .	62

3.3.4	Beispiele von Detektoren für Teilchenexperimente . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Erhaltungssätze und Symmetrien</b>	<b>67</b>
4.1	In allen Wechselwirkungen erhaltene Größen . . . . .	67
4.2	Symmetrien, Transformationen und Erhaltungssätze . . . . .	70
4.2.1	Invarianz der Hamilton-Funktion . . . . .	70
4.3	Drehungen . . . . .	73
4.3.1	Ganzzahlige Drehimpulse . . . . .	73
4.3.2	Halbzahlige Drehimpulse . . . . .	73
4.3.3	Kopplung von Drehimpulsen . . . . .	75
4.4	Klassifikation von Symmetrien . . . . .	76
4.5	Die diskreten Symmetrien CPT . . . . .	76
4.5.1	Parität . . . . .	77
4.5.2	Ladungskonjugation . . . . .	78
4.5.3	CP-Invarianz . . . . .	78
4.5.4	Zeitumkehrinvarianz und CPT-Theorem . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Quarkmodell und starke Wechselwirkung</b>	<b>83</b>
5.1	Isospin . . . . .	83
5.1.1	Nukleon-Nukleon-Systeme . . . . .	83
5.1.2	Isospin-Multipletts . . . . .	84
5.2	Pion-Nukleon-Streuung . . . . .	86
5.3	Farbladung und Quantenchromodynamik . . . . .	87
5.4	Strangeness . . . . .	93
5.5	Das SU(3)-Modell der leichten Quarks . . . . .	94
5.5.1	Eigenschaften der Quarks . . . . .	94
5.5.2	Mesonen-Multipletts . . . . .	96
5.5.3	Baryonen-Multipletts . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Die Quark-Lepton-Familien</b>	<b>103</b>
6.1	Charm . . . . .	103
6.1.1	Der Cabibbo-Winkel und der GIM-Mechanismus . . . . .	103
6.1.2	Entdeckung des Charm-Quarks . . . . .	105
6.1.3	Charmonium . . . . .	105
6.1.4	Offener Charm . . . . .	107
6.2	Die dritte Fermionen-Familie . . . . .	110
6.2.1	Die Entdeckung des Tau-Leptons . . . . .	110
6.2.2	Bottom . . . . .	112
6.2.3	Top . . . . .	112
6.2.4	Überblick über die drei Fermionen-Familien . . . . .	115
6.2.5	Die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix . . . . .	118
<b>7</b>	<b>Elektromagnetische Struktur der Hadronen</b>	<b>121</b>
7.1	Elastische Elektron-Nukleon-Streuung . . . . .	121
7.1.1	Kinematik der elastischen Elektron-Proton-Streuung . . . . .	121
7.1.2	Der Rutherford-Wirkungsquerschnitt und Formfaktoren . . . . .	122
7.1.3	Rosenbluth-Wirkungsquerschnitt . . . . .	124
7.2	Inelastische Lepton-Nukleon-Streuung . . . . .	128

7.2.1	Kinematik und Wirkungsquerschnitt . . . . .	128
7.2.2	Strukturfunktionen, Partonmodell und Skaleninvarianz . . . . .	130
7.2.3	Verletzung der Skaleninvarianz und QCD . . . . .	135
<b>8</b>	<b>Statische Eigenschaften von Atomkernen</b>	<b>137</b>
8.1	Bindungszustände von Nukleonen . . . . .	137
8.2	Größe und Dichte von Kernen . . . . .	138
8.3	Kernmassen . . . . .	140
8.3.1	Massendefekt und Bindung . . . . .	140
8.3.2	Massenbestimmung . . . . .	142
8.4	Modelle für die A- und Z-Abhängigkeit der Kernmassen . . . . .	142
8.4.1	Der Kern als inkompressible Flüssigkeit . . . . .	142
8.4.2	Schalenstruktur der Kernzustände . . . . .	142
8.4.3	Fermi-Gas-Modell . . . . .	142
8.4.4	Das Tröpfchenmodell und die Weizsäcker-Massenformel . . . . .	144
8.5	Spin, Parität, magnetisches Moment . . . . .	149
8.5.1	Anwendungen der Kernspins . . . . .	149
<b>9</b>	<b>Zerfall instabiler Kerne</b>	<b>153</b>
9.1	Zerfallsgesetz . . . . .	153
9.2	Natürliche Radioaktivität . . . . .	154
9.3	Anwendungen der Radioaktivität . . . . .	154
9.3.1	Datierungsmethoden . . . . .	154
9.3.2	Tracer-Methoden . . . . .	156
9.3.3	Anwendungen in der Technik . . . . .	157
9.3.4	Neutronenaktivierung . . . . .	157
9.3.5	Strahlentherapie . . . . .	159
9.4	Dosimetrie . . . . .	159
9.5	Alpha-Zerfall . . . . .	161
9.6	Kernspaltung . . . . .	164
9.7	Beta-Zerfall . . . . .	165
9.7.1	Zerfallsarten . . . . .	165
9.8	Gamma-Zerfall . . . . .	166
<b>10</b>	<b>Beta-Zerfall und schwache Wechselwirkung</b>	<b>169</b>
10.1	Überblick . . . . .	169
10.2	$\beta$ -Zerfall . . . . .	169
10.2.1	Impulsspektrum beim $\beta$ -Zerfall . . . . .	169
10.2.2	Kernmatrixelemente und Lebensdauern . . . . .	171
10.2.3	Nachweis der Neutrinos . . . . .	173
10.3	Strom-Strom-Wechselwirkung . . . . .	174
10.3.1	Strom-Strom-Kopplung in der QED . . . . .	174
10.3.2	Strom-Strom-Kopplung in der schwachen Wechselwirkung . . . . .	175
10.4	Die Lorentz-Struktur der geladenen Ströme . . . . .	181
10.4.1	Entdeckung der Paritätsverletzung . . . . .	181
10.4.2	Theoretische Beschreibung der Paritätsverletzung . . . . .	181
10.5	Glashow-Salam-Weinberg-Theorie (GSW) . . . . .	187

10.6	Das Standardmodell der Teilchenphysik . . . . .	188
<b>11</b>	<b>Kernreaktionen</b>	<b>189</b>
11.1	Induzierte Kernspaltung . . . . .	189
11.1.1	Kernspaltungsreaktoren . . . . .	192
11.1.2	Brutreaktionen . . . . .	195
11.1.3	Spaltprodukte und nukleare Entsorgung . . . . .	196
11.2	Kernfusion . . . . .	198
11.2.1	Kinematische Bedingungen für Kernfusion . . . . .	198
11.2.2	Sonnenenergie . . . . .	198
11.2.3	Neutrinos von der Sonne . . . . .	199
11.2.4	Technische Nutzung der Kernfusion . . . . .	203