

Stanisław Mrówczyński

# ABC KWANTOWEJ TEORII POLA



Wydawnictwo  
Uniwersytetu Jana Kochanowskiego  
Kielce 2016

# Spis treści

<b>Przedmowa</b>	<b>IX</b>
Jednostki . . . . .	XII
Notacja . . . . .	XII
<b>1 Próby „zrelatywizowania” mechaniki kwantowej</b>	<b>1</b>
1.1 Równanie Kleina-Gordona . . . . .	2
1.1.1 Postać równania . . . . .	2
1.1.2 Zachowany prąd . . . . .	4
1.1.3 Rozwiązania równania . . . . .	5
1.2 Równanie Diraca . . . . .	7
1.2.1 Postać równania . . . . .	7
1.2.2 Zachowany prąd . . . . .	8
1.2.3 Rozwiązania równania Diraca o zerowym pędzie . . . . .	9
<b>2 Oscylator harmoniczny</b>	<b>11</b>
2.1 Klasyczny oscylator harmoniczny . . . . .	12
2.2 Kwantyzacja . . . . .	14
2.3 Konstrukcja przestrzeni stanów . . . . .	15
<b>3 Pole skalarne</b>	<b>19</b>
3.1 Klasyczne rzeczywiste pole skalarne . . . . .	19
3.2 Kwantowanie rzeczywistego pola skalarne . . . . .	22
3.3 Zespolone pole skalarne . . . . .	25
3.3.1 Pole klasyczne . . . . .	26
3.3.2 Kwantowanie . . . . .	27
<b>4 Pole spinorowe</b>	<b>29</b>
4.1 Klasyczne pole spinorowe . . . . .	29
4.1.1 Kowariantna postać równania Diraca . . . . .	30
4.1.2 Własności transformacyjne spinorów Diraca . . . . .	31
4.1.3 Formalizmy Lagrange’a i Hamiltona pola spinorowego . . . . .	32
4.1.4 Rozwiązania swobodnego równania Diraca . . . . .	34

4.2	Kwantowe pole spinorowe . . . . .	37
4.2.1	Operatory pola . . . . .	37
4.2.2	Przestrzeń stanów . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Związek spinu ze statystyką</b>	<b>41</b>
5.1	Problem z hamiltonianem . . . . .	42
5.2	Mikroprzyczynowość . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Pole elektromagnetyczne</b>	<b>45</b>
6.1	Klasyczne pole elektromagnetyczne . . . . .	45
6.1.1	Formalizm Lagrange'a . . . . .	46
6.1.2	Niezmienniczość względem cechowania . . . . .	48
6.1.3	Cechowanie Lorentza . . . . .	49
6.1.4	Cechowanie Coulomba . . . . .	49
6.1.5	Formalizm kanoniczny . . . . .	51
6.2	Kwantowe pole elektromagnetyczne . . . . .	53
6.2.1	Relacje komutacyjne . . . . .	53
6.2.2	Przestrzeń stanów i własności fotonów . . . . .	55
6.2.3	Ku lorentzowskiej współzmienniczości . . . . .	56
<b>7</b>	<b>Propagatory</b>	<b>59</b>
7.1	Propagator rzeczywistego pola skalarnego . . . . .	60
7.1.1	Definicja teorio-polowa . . . . .	60
7.1.2	Funkcja Greena równania Kleina-Gordona . . . . .	61
7.1.3	Propagator pola skalarnego zespolonego . . . . .	64
7.2	Propagator pola spinorowego . . . . .	64
7.3	Propagator pola elektromagnetycznego . . . . .	66
<b>8</b>	<b>Pola oddziałujące</b>	<b>69</b>
8.1	Samooddziałujące pole skalarne . . . . .	69
8.2	Elektrodynamika kwantowa . . . . .	70
<b>9</b>	<b>Ewolucja czasowa</b>	<b>73</b>
<b>10</b>	<b>Zderzenia, macierz <math>S</math> i przekrój czynny</b>	<b>77</b>
10.1	Macierz $S$ . . . . .	78
10.1.1	Definicja i ogólne własności . . . . .	78
10.1.2	Operator $\hat{T}$ i twierdzenie optyczne . . . . .	79
10.2	Przekrój czynny . . . . .	80
10.2.1	Definicja przekroju . . . . .	80
10.2.2	Postać lorentzowsko niezmiennicza . . . . .	82
10.2.3	Oddziaływanie z nieskończenie ciężkim obiektem . . . . .	83
10.2.4	Przekrój uśredniony i wysumowany po spinach . . . . .	83
10.3	Procesy binarne . . . . .	83

<b>11</b>	<b>Rachunek zaburzeń i proste procesy zderzeniowe</b>	<b>87</b>
11.1	Binarne zderzenia skalarnych bozonów . . . . .	87
11.1.1	Stany . . . . .	88
11.1.2	Amplituda . . . . .	89
11.1.3	Przekrój czynny . . . . .	91
11.2	Rozpraszanie elektronu w polu Coulomba . . . . .	92
11.2.1	Stany . . . . .	92
11.2.2	Amplituda . . . . .	93
11.2.3	Przekrój czynny . . . . .	94
11.2.4	Uśrednianie i sumowanie po spinach . . . . .	94
11.2.5	Przekrój Motta . . . . .	95
11.3	Zderzenie $e^-e^+ \rightarrow e^-e^+$ . . . . .	96
11.3.1	Amplituda . . . . .	97
11.3.2	Przekrój czynny . . . . .	100
11.3.3	Uśrednianie i sumowanie po spinach . . . . .	101
11.3.4	Przekrój Bhabhy . . . . .	103
11.4	Reguły Feynmana . . . . .	104
11.4.1	Przekrój czynny . . . . .	105
11.4.2	Amplitudy i diagramy . . . . .	106
11.4.3	Przykład – rozpraszanie Bhabhy . . . . .	109
11.5	Rozpraszanie Comptona . . . . .	110
11.5.1	Przesunięcie Comptona . . . . .	111
11.5.2	Amplituda i przekrój czynny . . . . .	111
11.5.3	Sumowanie po spinach . . . . .	112
11.5.4	Formuła Kleina-Nishiny . . . . .	114
11.6	Procesy skrzyżowane . . . . .	116
11.6.1	Anihilacja pary elektron-pozyton . . . . .	117
11.6.2	Kreacja pary elektron-pozyton . . . . .	119
11.6.3	Rozpraszanie Møllera . . . . .	119
<b>12</b>	<b>Opis stanów związanych</b>	<b>121</b>
12.1	Sformułowanie problemu . . . . .	121
12.2	Pierwsze przybliżenie i jego poprawki . . . . .	125
<b>13</b>	<b>Zakończenie, czyli co dalej?</b>	<b>127</b>
<b>Dodatki</b>		
<b>A</b>	<b>Szczególna teoria względności</b>	<b>129</b>
A.1	Czterowektor położenia . . . . .	129
A.2	Transformacja Lorentza . . . . .	130
A.3	Wektory, tensory, skalary . . . . .	132
A.4	Czterowektor pędu . . . . .	133

<b>B</b>	<b>Obrazy Schrödingera, Heisenberga i oddziaływania</b>	<b>135</b>
B.1	Obraz Schrödingera . . . . .	135
B.2	Obraz Heisenberga . . . . .	136
B.3	Obraz oddziaływania . . . . .	137
<b>C</b>	<b>Transformacja Lorentza spinorów</b>	<b>139</b>
<b>D</b>	<b>Rozwiązania swobodnego równania Diraca</b>	<b>143</b>
<b>E</b>	<b>Ślady macierzy gamma</b>	<b>147</b>
E.1	$\text{Tr}[\gamma_\mu]$ . . . . .	147
E.2	$\text{Tr}[\gamma_\mu\gamma_\nu]$ . . . . .	148
E.3	$\text{Tr}[\gamma_\mu\gamma_\nu\gamma_\rho]$ . . . . .	148
E.4	$\text{Tr}[\gamma_\mu\gamma_\nu\gamma_\rho\gamma_\sigma]$ . . . . .	149
E.5	$\gamma_\mu\gamma^\mu, \gamma_\mu\gamma^\nu\gamma^\mu, \gamma_\mu\gamma^\nu\gamma^\rho\gamma^\mu, \gamma_\mu\gamma^\nu\gamma^\rho\gamma^\sigma\gamma^\mu$ . . . . .	149
<b>F</b>	<b>Swobodny propagator elektronu wyrażony przez spinory</b>	<b>151</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>155</b>
	<b>Skorowidz</b>	<b>157</b>