

# INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD .....	1
DANKWOORD.....	2
INHOUDSOPGAVE .....	3
INLEIDING TOT DE VERWONDERING .....	18
HET ONTZZETTEND GROTE BELANG VAN DE WISKUNDE .....	23
DEEL I VOORAFGAANDE INLEIDING TOT HET STANDAARDMODEL VAN DE NATUURKUNDE.....	27
<b>INLEIDING: ONZEKERHEID EN RELATIVITEIT SLUIPT DE WERELD BINNEN .....</b>	<b>28</b>
<b>I.1 HET STANDAARDMODEL VAN DE NATUURKUNDE .....</b>	<b>31</b>
<i>I.1.1 INLEIDING.....</i>	<i>31</i>
<i>I.1.2 DE VIER FUNDAMENTELE KRACHTEN EN HUN DEELTJES .....</i>	<i>37</i>
<b>I.2 DE ZWAARTEKRACHT.....</b>	<b>39</b>
Het grote verschil tussen Einsteins theorie en Newtons theorie .....	41
Snelheid van het zwaartekrachtveld .....	41
Zwaartekrachtgolven.....	42
Anti-zwaartekracht .....	42
Problemen met de huidige theorieën van zwaartekracht.....	42
<b>I.3 VERGELIJKING, BEREIK EN KRACHTVERHOUDING VAN DE 4 GROTE NATUURKRACHTEN .....</b>	<b>44</b>
<i>I.3.1 DE FIJNSTRUCTUURCONSTANTE <math>\alpha</math> ALS VERGELIJKING VAN DE WISSELSTERKTE .....</i>	<i>45</i>
<i>I.3.2 DE KARAKTERISTIEKE STERKTE VAN DE WISSELWERKING.....</i>	<i>46</i>
<i>I.3.3 ENKELE SPECIFIEKE VOORBEELDEN .....</i>	<i>46</i>
De Coulomb – eenheid van elektrische lading - is een zeer grote eenheid. ....	46
Vergelijken we de Coulombkracht met betrekking tot de afstotingskracht van 2 metalen massa's waarop een lading q is aangebracht. ....	47
De elektromagnetische Lorentzkracht .....	49
<i>I.3.4 DE POTENTIËLE ENERGIE VAN EEN LADING .....</i>	<i>52</i>
Potentiële energie buiten de sfeer (bv. in punt C) .....	52
Potentiële energie binnen de sfeer (bv. in punt B).....	52
<i>I.3.5 BOLCOÖRDINATEN EN BOLVOLUME .....</i>	<i>54</i>
<b>I.4 DE UNIFICATIE THEORIE OF THEORIE VAN ALLES .....</b>	<b>54</b>
DEEL II REVOLUTIONAIRE ONTDEKKINGEN 1900-1922.....	58
II.1 PLANCK STEEKT IN 1900 DE LONT AAN DE QUANTUM FYSICA .....	59

II.1.1	EINDE VAN DE 19e EEUW: EEN ZOEKTOCHT NAAR DE AARD VAN HET LICHT, DE KLEURTEMPERATUUR EN DE MINIMALE WARMTE ENERGIE VERLIEZEN VAN GLOEILAMPEN .....	59
II.1.2	DE ZWARTE LICHAAMSSTRALING .....	63
II.1.3	DE STRALINGSWET VAN WILHELM WIEN (1893), VAN LORD RAYLEIGH & SIR JEANS (1900-1905) ALS VOORLOPERS VAN DE WET VAN PLANCK .....	65
II.1.4	DE ZWARTE LICHAAM STRALINGSWET VAN MAX PLANCK (1900) ....	66
II.1.5	EEN REVOLUTIONAIR CONCEPT: "HET ENERGIE QUANTUM VAN PLANCK" .....	70
II.1.6	GEVOLGEN VOOR DE FUNDAMENTELE GROOTHEDEN VAN DE QUANTUM FYSICA, DE IMPULS VAN EEN DEELTJE (bv. FOTON).....	71
II.1.7	VERGELIJKING VAN DE DRIE VERSCHILLENDE WETTEN VOOR DE ZWARTE LICHAAMSSTRALING .....	72
<b>II.2</b>	<b>YOUNG EN HET TWESPLETEN EXPERIMENT BEWIJST DEFINITIEF HET GOLFCHARAKTER VAN HET LICHT .....</b>	<b>74</b>
II.2.1	STUDIE VAN EN BEWONDERING VOOR DE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT.....	75
II.2.2	HET BELANGRIJKE TWESPLETEN EXPERIMENT VAN THOMAS YOUNG (1801) EN HET BEWIJS DAT HET LICHT UIT (ELEKTROMAGNETISCHE) GOLVEN BESTAAT .....	77
<b>II.3</b>	<b>DE ONTDEKKING VAN DE SPECTRAALLIJNEN, DE STREEPJESCODE VAN LICHT EN ATOMEN EN HET ELEKTRONSPIN .....</b>	<b>80</b>
II.3.1	DE LIJNEN VAN FRAUNHOFER (1814).....	82
	Spectraallijnen van waterstof .....	83
	De reeksen of energieniveaus van de banen van waterstof .....	84
	De Rydberg-Ritz formule (1888) voor het berekenen van de waterstof reeksen .....	85
II.3.2	HET ZEEMAN- & STARK-EFFECT EN DE ONTDEKKING VAN HET ELEKTRONEN QUANTUM SPIN .....	87
	Het Zeeman-effect (bij een magnetisch veld).....	88
	Het Stark-effect (bij een elektrisch veld) .....	88
II.3.3	HET EXPERIMENT VAN OTTO STERN EN WALTER GERLACH IN 1922: BEWIJS VAN HET QUANTUM ELEKTRONENSPIN .....	89
<b>II.4</b>	<b>MAXWEL EN YOUNG EN DE EERSTE NATUURKRACHT .....</b>	<b>91</b>
II.4.1	DE ELEKTROMAGNETISCHE STRALING (1865) .....	91
II.4.2	DE WETTEN VAN MAXWELL (1865), een HUZARENSTUK! .....	91
<b>II.5</b>	<b>WAT IS ER AAN DE HAND MET DE LICHTSNELHEID? .....</b>	<b>96</b>
II.5.1	EEN NIEUWE KIJK OP DE WETTEN VAN MAXWELL.....	96
II.5.2	OBSERVATIE VAN DE LICHTSNELHEID.....	97
II.5.3	HET MICHELSON-MORLEY-EXPERIMENT VAN 1887 .....	99
II.5.4	HET TREIN GEDACHTEN EXPERIMENT VAN EINSTEIN: EEN BEWEGENDE KLOK LOOPT TRAGER!.....	100
	De tweeling paradox.....	103

II.5.5	EEN NIEUWE KIJK OP DE WETTEN VAN MAXWELL DOOR EINSTEIN DOOR EINSTEIN .....	104
II.5.6	DE LORENTZTRANSFORMATIE EN DE LORENTZCONTRACTIE (1892) .....	108
	De snel bewegende meetlatten worden korter .....	109
	Samenhang tussen lengtecontractie en tijddilatatie .....	110
	Ook de snel bewegende massa wordt zwaarder .....	110
	En wat met de fotonen, de elektromagnetische golven of deeltjes zonder massa.....	111
II.5.7	DE EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN OF DE EPR-PARADOX .....	113
<b>II.6</b>	<b>HET FOTO-ELEKTRISCH EFFECT VOLGENS EINSTEIN .....</b>	<b>114</b>
II.6.1	HET LICHT EN DE FOTONEN GEDRAGEN ZICH DAN TOCH ALS DEELTJES .....	114
II.6.2	HET BEGRIP "COMPLEMENTARITEIT" VAN HET LICHT .....	118
<b>II.7</b>	<b>DE EERSTE ATOOMMODELLEN VAN THOMSON (1897) EN RUTHERFORD (1911).....</b>	<b>121</b>
II.7.1	ONTDEKKING VAN HET ELEKTRON IN 1897 DOOR J.J. THOMSON ...	121
II.7.2	HET GOUDFOLIE EXPERIMENT VAN HANS GEIGER-ERNEST MARSDEN EN DE ONTDEKKING VAN DE NUCLEUS (1909).....	123
II.7.3	HET ATOOMMODEL VAN ERNEST RUTHERFORD LOST EEN AANTAL PROBLEMEN OP.....	124
<b>II.8</b>	<b>HET ATOOMMODEL VAN NIELS BOHR IN 1913: DE QUANTISERING VAN HET ATOOMMODEL, DE KOPENHAAGSE INTERPRETATIE EN DE UITBREIDING DOOR DE BROGLIE (1924).....</b>	<b>126</b>
II.8.1	BELANG VAN DE ELEKTRONEN IN EEN ATOOM.....	129
	De quantisatie van het draaimoment volgens Bohr .....	131
	De quantisatie van de kinetische energie volgens Bohr .....	132
II.8.2	LOUIS VICTOR DE BROGLIE VERALGEMEENT DE GOLFDEELTJES DUALITEIT NAAR ALLE MATERIE (1924) .....	134
II.8.3	WAT IS DE SNELHEID VAN EEN ELEKTRONEN-GOLF.....	135
II.8.4	WAT NOEMT BOHR EEN GOLFPAKKET!.....	136
<b>II.9</b>	<b>BEREKENING VAN HET COMPTON EFFECT EN HET BEWIJS VAN HET DEELTJESKARAKTER VAN HET LICHT.....</b>	<b>138</b>
II.9.1	BEGINSELEN RELATIVITEITSLEER: DE VIERVECTOR (Wiskunde theorie) .....	138
II.9.2	BIJZONDER GEVAL: ELEKTRON IN RUST VÓÓR DE BOTSING .....	140
II.9.3	ALGEMEEN GEVAL: ELEKTRON NIET IN RUST VÓÓR DE BOTSING....	144
<b>II.10</b>	<b>HOEVER STAAT HET MET DE QUANTUM THEORIE IN DE JAREN TWINTIG VORIGE EEUW?.....</b>	<b>147</b>
II.10.1	MAX BORN GEEFT ONS EEN INTERPRETATIE VAN DIT EXPERIMENT	148
II.10.2	DE PROEF VAN THOMAS YOUNG NADER BEKEKEN: HET TWEESPLETEN EXPERIMENT OMVAT ALLES WAT DE QUANTUM FYSICA INHOUDT!.....	150

II.10.3	<i>QUANTUM MECHANISCHE BENADERING VAN HET ATOOM-MODEL</i>	154
II.10.4	<i>EVEN EEN TIME-LAP NAAR 1932... EEN COMPACTE + KERN</i>	156
<b>II.11</b>	<b>ELEKTRONEN CONFIGURATIE VAN HET ATOOM</b>	<b>156</b>
	<i>QUANTUM GETALLEN</i>	157
	Het hoofd quantum getal $n$ (hoofdschil)	158
	Het neven quantum getal of impulsmoment quantum getal $\ell$ (subschil)	159
	Het magnetische quantum getal $m$ of $m_\ell$ van de baan	159
	Het magnetisch spin-quantum getal $m_s$ van het elektron zelf ( $-\frac{1}{2}; +\frac{1}{2}$ )	160
	Het kernspin quantum getal $s$ (0, 1, ...) van de atoomkern	162
	Het quantum getal van het totale impulsmoment (atoomkern)	162
	Pariteit $P$	162
	Meer elektronen systemen	162
	Hoeveel quantum getallen?	163
II.11.2	<i>DE EIGENLIJKE CONFIGURATIE VAN DE ELEKTRONENSCHILLEN</i>	164
	De theoretische benadering van Sommerfeld	164
	De volgorde van opvulling van de schillen wordt bepaald door het energieniveau	166
	Elektronen schillen voor alle elementen uit de tabel van Mendelejev	168
II.11.3	<i>VORM VAN DE ORBITALEN</i>	168
<b>DEEL III</b>	<b>DE QUANTUM FYSICA KRIJGT STILAAAN VASTE VORM IN DE JAREN TWINTIG EN WORDT VOLWASSEN</b>	<b>170</b>
	<b>INLEIDING</b>	<b>171</b>
<b>III.1</b>	<b>WOLFGANG PAULI FORMULEERT HET UITSLUITINGS-PRINCIPE VOOR FERMIONEN (1925)</b>	<b>174</b>
III.1.1	<i>GEVOLGEN</i>	175
III.1.2	<i>STABILITEIT EN VASTHEID VAN MATERIE</i>	176
III.1.3	<i>ASTRONOMIE: van witte dwergen tot zwarte gaten</i>	177
<b>III.2</b>	<b>SCHRÖDINGER ONTWERPT ZIJN GOLFMECHANICA (1926) EN STUURT ZIJN KAT</b>	<b>178</b>
III.2.1	<i>DE GOLFFUNCTIE VAN SCHRÖDINGER</i>	178
III.2.2	<i>ENKELE BEGRIPPEN EN DEFINITIES IN HET KORT VOORAF</i>	180
	Eigenfuncties en eigenwaarden (zie hst X.3.11)	180
	De Hamiltoniaan	181
	De nieuwe quantum fysica vervangt de klassieke Newtoniaanse fysica	181
	Samenvatting van de belangrijkste operatoren	183
III.2.3	<i>ENKELE TOEPASSINGEN VOOR HET BEREKENEN VAN DE HAMILTONIAAN</i>	185
	De niet relativistische golfvergelijking en golf functie van Schrödinger	185
	De integrale Schrödingervergelijking	187
III.2.4	<i>SCHRÖDINGER STUURT ZIJN KAT!</i>	189
<b>III.3</b>	<b>HEISENBERG BRENGT IN 1926 DE MATRIXMECHANICA EN IN 1927 DE ONZEKERHEID BINNEN IN DE QUANTUM FYSICA</b>	<b>192</b>
III.3.1	<i>DE MATRIXMECHANICA VAN HEISENBERG IN 1926</i>	193

III.3.2	DE KOPENHAAGSE VOORSTELLING VAN DE ONZEKERHEIDS-RELATIE VAN HEISENBERG IN 1927.....	194
	Onzekerheid van plaats en impuls (snelheid) en tijd.....	195
	Onzekerheid van energie (massa) en tijd .....	196
III.3.3	COMPLEMENTAIRE GROOTHEDEN.....	196
III.3.4	DE EXACTE BENADERING VAN HEISENBERG IN 1927 .....	197
III.3.5	VERSCHIL TUSSEN DE OPLOSSING VAN SCHRÖDINGER EN HEISENBERG .....	200
III.3.6	DE ORTHODOXE STATISTISCHE INTERPRETATIE? .....	200
<b>III.4</b>	<b>DE KOPENHAAGSE INTERPRETATIE VAN HET ATOOM MODEL VAN BOHR EN DE COMPLEMENTARITEIT WORDT MEER EN MEER DOMINEREND ...</b>	<b>202</b>
III.4.1	INVLOED VAN DE WAARNEMING VAN HET SYSTEEM .....	202
III.4.2	HET QUANTUM POSTULAAT.....	203
III.4.3	COMPLEMENTARITEIT GOLFDEELTJE .....	204
<b>III.5</b>	<b>DE GROTE DISCUSSIES M.B.T. DE QUANTUM THEORIE TUSSEN HEISENBERG, BOHR, SCHRÖDER EN EINSTEIN IN DE LATE JAREN TWINTIG</b>	<b>207</b>
III.5.1	DRIE GROTE IDEEËN OVER DE QUANTUM FYSICA.....	207
III.5.2	VERSCHIL TUSSEN DE OUDE FYSICA VAN NEWTON EN MAXWELL EN DE NIEUWE FYSICA VAN HET QUANTUM .....	208
III.5.3	BOHR EN EINSTEIN EN DE SOLVAY CONFERENTIE VAN OKTOBER 1927 IN BRUSSEL .....	209
III.5.4	15 MAY 1935, TIJDSCHRIFT "PHYSICAL REVIEW": DE EPR-PARADOX .....	214
III.5.5	EINSTEIN BLIJFT TWIJFELEN.....	217
III.5.6	VERSTRENGELING OF "ENTANGLEMENT" EN HET VERLIES VAN "LOKALE REALITEIT" .....	218
III.5.7	COMPLEMENTARITEIT ALS ALGEMEEN PRINCIPE VAN EMPIRISCHE KENNIS.....	221
III.5.8	SCHEMATISCHE VOORSTELLING QUANTUM FYSICA VERSUS KLASIEKE FYSICA.....	222
<b>DEEL IV</b>	<b>ENKELE TOEPASSINGEN EN RELATIVITEIT IN DE QUANTUM FYSICA</b>	<b>224</b>
<b>IV.1</b>	<b>DE QUANTUM FYSICA VAN ENKELVOUDIGE DEELTJES.....</b>	<b>225</b>
IV.1.1	INLEIDING.....	225
IV.1.2	ENKELE EENVOUDIGE QUANTUM OEFENINGEN VOOR GOLFDEELTJES .....	227
IV.1.3	EEN DEELTJE OPGESLOTEN IN EEN SMALLE PIJP OF KOKER (ATOOM) .....	231
	Eén-dimensionele bewegingsvrijheid.....	232
	Enkele typische voorbeelden van berekening van een vrij deeltje in een koker .....	237
	Wat in geval van meerdere dimensies of in dit geval een driedimensionale pijp? .....	238
	Veronderstel nu een deeltje opgesloten in een kubus.....	239

IV.1.4	DE HARMONISCHE OSCILLATOR .....	240
	Bepalen van de energie Hamiltoniaan van het systeem .....	240
	Bepalen van de energie eigenfuncties en eigenwaarden van het systeem ..	241
	Oplossing eigenwaarden $E_x$ en eigenfuncties $\Psi_x$ .....	242
	Grondtoestand van het systeem .....	243
IV.1.5	HET DRAAI-IMPULSMOMENT $L$ (ANGULAR MOMENTUM) .....	246
IV.1.6	HET MODEL VAN HET WATERSTOFATOOM .....	247
	De potentiële energie .....	247
	De kinetische energie .....	248
	De oplossing voor de radiaal golf functie $R(r)$ .....	249
	Enkele grafische toestanden van de golffuncties van waterstofatoom .....	251
IV.1.7	HET WATERSTOF-ION .....	252
	Berekenen van de Hamiltoniaan .....	252
	Resultaten .....	254
IV.1.8	VERDERE STUDIE VAN ELEMENTAIRE DEELTJES .....	255
IV.1.9	DE $H_2$ MOLECULE .....	256
IV.1.10	SLOTBESCHOUWING .....	258
<b>IV.2</b>	<b>DE GROTE INVLOED VAN DIRAC IN DE QUANTUM FYSICA .....</b>	<b>258</b>
IV.2.1	ZIJN BELANGRIJKSTE VERWEZENLIJKINGEN .....	258
IV.2.2	DE DIRACNOTATIE IN DE QUANTUM FYSICA .....	260
IV.2.3	HET INPRODUCT .....	260
<b>DEEL V</b>	<b>DE QUANTUM VELDEN THEORIE .....</b>	<b>262</b>
	<b>INLEIDING TOT DE QUANTUM VELDEN THEORIE .....</b>	<b>263</b>
<b>V.1</b>	<b>DE QED OF QUANTUMELEKTRODYNAMICA, DE QUANTUM VELD THEORIE VAN DE ELEKTROMAGNETISCHE KRACHT .....</b>	<b>263</b>
V.1.1	BETEKENIS VAN DE QED, DE QUANTUM VELD THEORIE VAN DE ELEKTROMAGNETISCHE KRACHT .....	263
V.1.2	DE FIJNSTRUCTUUR EN HYPER-FIJNSTRUCTUUR, EEN NIEUW FENOMEEN IN 1947, DE LAMB-VERSCHUIVING BIJ WATERSTOF ....	264
	De fijnstructuur constante $\alpha$ .....	266
	De theorie van het elektron kreeg een nieuwe boost, de renormalisatie! ..	267
V.1.3	RENORMALISATIE VAN DE QUANTUM VELDTHEORIE .....	269
V.1.4	RICHARD FEYNMAN LEGT DE BASIS VOOR DE QED QUANTUM ELEKTRODYNAMICA, HET JUWEEL VAN DE NATUURKUNDE .....	272
	Geschiedenis .....	273
	De Feynman –diagrammen .....	274
<b>V.2</b>	<b>DE ZWAKKE WISSELWERKING .....</b>	<b>278</b>
V.2.1	VERKLARING VAN DE ZWAKKE WISSELWERKING .....	278
	Symmetrie en pariteit .....	279
	De schending van pariteitsymmetrie van de zwakke wisselwerking .....	281
V.2.2	IJKVRIJHEID OF SYMMETRIE-THEORIE .....	282
V.2.3	SUSY OF SUPERSYMMETRIE OF SPIN-SYMMETRIE .....	283
	Het massaprobleem bij de zwakke wisselwerking en het Higgs-deeltje .....	286
V.2.4	RADIOACTIVITEIT .....	287
	Geschiedenis .....	287

	Radioactief verval .....	288
	Soorten radioactief verval .....	288
	Belangrijkste verval of stralingswijzen (zie verder in detail-V.2.6) .....	289
	Berekening van het radioactief verval (Poisson-verdeling) .....	290
	Enkele voorbeelden van halfwaardetijden van nucleïden.....	291
	Eenheden.....	292
V.2.5	<b>ISOTOPEN</b> .....	293
	Relatieve atoommassa .....	293
	Rustmassa van een atoom, rustenergie en bindingsenergie .....	293
	Bindingsenergie van de kern .....	294
	Isotopen .....	296
	Massagetal en atoomnummer .....	298
V.2.6	<b>VOORBEELDEN VAN RADIOACTIEF VERVAL VAN ISOTOPEN</b> .....	299
	Alfaverval ( $\alpha$ ) $ZAX \rightarrow Z - 2A - 4X + \alpha$ .....	300
	Bèta- verval.....	300
	Bèta- verval ( $\beta^-$ ).....	301
	Bèta+ verval ( $\beta^+$ ).....	301
	Dubbel bèta- verval ( $2\beta^-$ ).....	302
	Elektron-invang (EC, $\epsilon$ ) .....	302
	Dubbele elektron-invang (ECEC, 2EC, 2 $\epsilon$ ) .....	302
	Isomere transitie (IT) .....	303
	Spontane splijting (SF) .....	303
	Emissie van een zware kern.....	303
	Proton emissie (p) .....	304
	Neutron emissie (n).....	304
	Bèta vertraagde emissie ( $\beta^-x$ , $\beta^+x$ ) .....	304
	Elektron-invang vertraagde emissie (ECx) .....	304
	Gamma emissie ( $\gamma$ ) $ZA * X \rightarrow ZAX + \gamma$ .....	305
V.2.7	<b>KOOLSTOF ISOTOOP DATERING</b> .....	305
	Mechanisme .....	306
	Kalibratie .....	307
V.2.8	<b>STRALING VAN RADIOACTIEVE MATERIE</b> .....	311
V.2.9	<b>GEVAAR VAN IONISERENDE STRALING BIJ RADIOACTIVITEIT</b> .....	312
V.2.10	<b>ALFA (<math>\alpha</math>) STRALING</b> .....	314
	Ontstaan alfaverval .....	314
	Quantum tunneling en radioactief verval als zuivere quantum mechanica! .....	314
	Gevaar van $\alpha$ -deeltjes .....	317
V.2.11	<b>BETA (<math>\beta</math>) STRALING</b> .....	318
	$\beta^-$ -straling .....	318
	$\beta^+$ -straling .....	320
	Bijzonder geval van $\beta^+$ -straling: elektronenvangst (EV) .....	320
	Brachytherapie als voorbeeld van een moderne geneeskundige toepassing .....	322
	Voorbeeld: brachytherapie van de prostaat.....	324
	Voorbeeld: SIRT: Selectieve Interne Radiotherapie (of SIRS) voor levertumoren.....	327
V.2.12	<b>HADRONEN (protonen) THERAPIE</b> .....	329
V.2.13	<b>GAMMA (<math>\gamma</math>) STRALING</b> .....	332
	Frequentie en Energie .....	333

	Productie .....	333
	Voorbeeld: verval van 60-Cobalt .....	334
	Toepassing: medische fysica .....	334
V.2.14	<i>NEUTRONENSTRALING</i> .....	335
	Neutronenactivering (NC of neutron capture) .....	335
V.2.15	<i>KOSMISCHE STRALING</i> .....	337
V.2.16	<i>GATEN IN DE BINNEN (K)-SCHIL: RÖNTGEN EMISSIE EN HET AUGER-EFFECT</i> .....	340
	Normale röntgenstraling emissie .....	341
	AUGER-elektron emissie .....	342
<b>V.3</b>	<b>DE STERKE KERNKRACHT</b> .....	<b>342</b>
V.3.1	<i>HET QUARK MODEL EN ZIJN ZES SMAKEN</i> .....	342
V.3.2	<i>DE QCD OF DE QUANTUM CHROMODYNAMICA OF DE KLEURENPRACHT VAN QUARKS</i> .....	347
V.3.3	<i>KERNENERGIE, KERNFUSIE EN KERNSPLIJTING</i> .....	349
	Wat historiek .....	349
	De eerste atoombom .....	350
V.3.4	<i>KERNSPLIJTING</i> .....	351
	Scheiding van de isotopen van uranium .....	355
	Maatschappelijk debat over kernenergie .....	356
V.3.5	<i>KERNFUSIE</i> .....	359
	De fusiereactor .....	362
	De H-bom of waterstof(fusie) bom .....	363
V.3.6	<i>DE KLASSIEKE DEELTJESVERSNELLERS</i> .....	364
V.3.7	<i>DE CYCLOTRON</i> .....	365
	Niet relativistische benadering .....	365
	Relativistische benadering .....	366
	Historie .....	367
V.3.8	<i>DE BETATRON OF DE INDUCTIEVERSNELLER</i> .....	369
V.3.9	<i>DE SYNCHOTRON</i> .....	370
V.3.10	<i>SYNCHROTRONSTRALING</i> .....	372
V.3.11	<i>De LHC LARGE HADRON COLLIDER (CERN, Zwitserland)</i> .....	377
	Gebruik .....	377
	Geschiedenis .....	378
V.3.12	<i>CHINA GAAT GROOTSTE DEELTJESVERSNELLER BOUWEN</i> .....	380
<b>V.4</b>	<b>HET STANDAARDMODEL VAN DE NATUURKUNDE</b> .....	<b>381</b>
V.4.1	<i>STRUCTUUR VAN HET STANDAARDMODEL VAN DE NATUURKUNDE</i> .....	382
V.4.2	<i>BESCHRIJVING VAN HET STANDAARDMODEL VAN DE NATUURKUNDE</i> .....	386
V.4.3	<i>DE KRACHTVELD DEELTJES of BOSONEN</i> .....	388
	De quantum theorie .....	389
	Definities .....	389
V.4.4	<i>HET FOTON EN HET ELEKTROMAGNETISME</i> .....	390
V.4.5	<i>DE ZWAKKE KERNKRACHT (<math>Z^0, W^\pm</math>- BOSONEN), VERANTWOORDELIJK VOOR O.A. RADIOACTIVITEIT</i> .....	392



	Het gluon, verantwoordelijk voor de sterke kernkracht.....	395
	Het Higgs-boson (Englert-Brout), verantwoordelijk voor de vorming van massa.....	396
	Het graviton, het hypothetisch deeltje voor de zwaartekracht? .....	396
	Andere bosonen: de mesonen .....	397
<b>V.4.6</b>	<b>MATERIEDEELTJES OF FERMIONEN .....</b>	<b>397</b>
	Quarks .....	399
	CERN ontdekt pentaquarks .....	401
	Leptonen .....	402
	Het merkwaardige neutrino .....	403
	Het elektron.....	406
	Het muon.....	408
	Het tau-deeltje .....	409
<b>V.4.7</b>	<b>HADRONEN OF DE QUARK FAMILIE .....</b>	<b>409</b>
	Baryonen, bestaan uit 3 quarks .....	410
	Mesonen: quark en antiquark, zijn dus bosonen .....	414
<b>V.4.8</b>	<b>ANTIMATERIE EN ANNIHILATIE VAN BARYONEN .....</b>	<b>418</b>
<b>V.4.9</b>	<b>HET HIGGS-DEELTJE OF HET BROUT-ENGLERT-HIGGS-DEELTJE EN DE QUANTUMSTROOP VOOR DE MASSAVORMING VAN DEELTJES. ....</b>	<b>420</b>
	Massa van het Higgs-boson .....	422
<b>DEEL VI</b>	<b>RELATIVISTISCHE QUANTUM MECHANICA .....</b>	<b>424</b>
<b>VI.1</b>	<b>INLEIDING TOT DE RELATIVISTISCHE QUANTUM MECHANICA .....</b>	<b>425</b>
	<i>VI.1.1 AANPASSING VAN DE SCHRÖDINGERVERGELIJKING .....</i>	<i>426</i>
<b>VI.2</b>	<b>KLEIN-GORDONVERGELIJKING .....</b>	<b>427</b>
	De Diracvergelijking en het bestaan van antimaterie.....	428
	De spinor-golffunctie .....	431
	De probability current J .....	431
	De DIRAC-zee en negatieve energie of antideeltjes .....	432
<b>VI.3</b>	<b>RELATIVISTISCHE QUANTUM VELD THEORIE .....</b>	<b>433</b>
<b>VI.4</b>	<b>FOCKRUIMTE .....</b>	<b>433</b>
<b>VI.5</b>	<b>FORMALISME: WAT IS EEN VELD? .....</b>	<b>435</b>
	Veldoperatoren .....	435
	Heisenberg beeld.....	435
	Hamiltoniaan voor bosonen .....	436
	Feynman-diagrammen .....	437
	Casimir effect.....	438
<b>VI.6</b>	<b>TOT SLOT .....</b>	<b>440</b>
<b>VI.7</b>	<b>ENKELE EENVOUDIGE VOORBEELDEN VAN RELATIVISTISCHE BEREKENINGEN .....</b>	<b>440</b>
<b>DEEL VII</b>	<b>BIJZONDERE QUANTUM VERSCHIJNSELEN, INTERPRETATIES EN TOEKOMSTMODELLEN .....</b>	<b>447</b>
<b>VII.1</b>	<b>SUPERGELEIDING .....</b>	<b>448</b>
	Geschiedenis .....	449

	Kamerlingh Onnes experiment in 1911 .....	450
	Definitief bewijs.....	450
	Theorieën voor supergeleiding en het MEISSNER EFFECT in 1933 .....	451
	Ginzburg-Landau theorie uit 1950 .....	451
	Verklaring volgens BCS-theorie: Cooper-Paren (1957) en het Bose-Einstein- condensaat .....	452
	Het Meissner-effect en magnetische levitatie (Maglev treinen) .....	455
	'Warme' supergeleiders.....	457
	Toepassingen .....	458
	Waterstofsulfide (HS) onder hoge druk tot -70 graden Celsius weerstandsloos .....	460
<b>VII.2</b>	<b>BOSE-EINSTEIN CONDENSATEN OF SUPER-ATOMEN .....</b>	<b>461</b>
	Stilstaand licht en overdracht van quantum informatie in het condensaat	465
<b>VII.3</b>	<b>DE VERBORGEN VARIABELEN THEORIE VAN EINSTEIN TEGENOVER QUANTUM VERSTRENGELING .....</b>	<b>466</b>
<b>VII.4</b>	<b>QUANTUM VERSTRENGELING .....</b>	<b>467</b>
	Toepassingen .....	469
	Einsteins twijfel m.b.t. de spookachtige werking op afstand .....	469
	Quantum verstrengeling experimenteel bewezen, de stelling van BELL.....	470
<b>VII.5</b>	<b>DE STELLING VAN BELL, QUANTUM LIMieten EN DE EPR-PARADOX.....</b>	<b>471</b>
<b>VII.6</b>	<b>HET EXPERIMENT VAN ALAIN ASPECT IN 1982, HET BEWIJS VAN BELLS THEOREMA EN DEFINITIEF BEWIJS VAN DE QUANTUM VERSTRENGELING THEORIE.....</b>	<b>476</b>
<b>VII.7</b>	<b>Q-BITS OF QUBITS OF QUANTUMBITS EN QUANTUM COMPUTERS .....</b>	<b>478</b>
	QUANTUM CRYPTOGRAFIE.....	483
<b>VII.8</b>	<b>QUANTUM DOTS (QD) .....</b>	<b>484</b>
<b>VII.9</b>	<b>QUANTUM TELEPORTATIE: SCIENCE FICTION OF TOEKOMSTVISIE? .....</b>	<b>487</b>
	Theoretische werking .....	488
	Praktische en filosofische problemen.....	488
	Oorsprong.....	489
	Laatste gegevens: Quantum teleportatie verwijst bezwaren Einstein naar prullenbak .....	490
	<b>DEEL VIII DE (QUANTUM)-ZWAARTEKRACHT EN DE ALGEMENE RELATIVITEITSTHEORIE.....</b>	<b>492</b>
<b>VIII.1</b>	<b>INLEIDING: NAAR EEN QUANTUM GRAVITY THEORIE? .....</b>	<b>493</b>
<b>VIII.2</b>	<b>QUANTA VAN DE RUIMTE?.....</b>	<b>494</b>
	Het graviton .....	495
	Aard van de zwaartekracht.....	497
	Zwaartekrachtgolven .....	498
	Anti-zwaartekracht .....	499
	Ook problemen met de Einsteins theorieën van de zwaartekracht .....	499
	Einstein krijgt gelijk van satelliet Gravity Probe B .....	499
<b>VIII.3</b>	<b>DE EINSTEINVELDVERGELIJKING VOOR HET ZWAARTEKRACHTVELD ....</b>	<b>500</b>

Achtergrond .....	500
De Einsteinvergelijking .....	501
Oplossing van de Einsteinvergelijking rondom een puntmassa: de Schwarzschildmetriek.....	502
<b>VIII.4 ZWARTE GATEN .....</b>	<b>504</b>
De oplossing van Schwarzschild .....	506
Quasars.....	507
De Hawking-quantum zwaartekrachtstraling rond een zwart gat .....	508
<b>VIII.5 DONKERE MATERIE (DARK MATTER).....</b>	<b>513</b>
Donkere materie en afgeplatte spiraalstelsels .....	514
<b>VIII.6 LOOP-QUANTUMZWAARTEKRACHT .....</b>	<b>520</b>
<b>VIII.7 DE SNAAR- OF STRINGTHEORIE .....</b>	<b>521</b>
Historiek van de snaartheorie .....	521
Quantum muziek .....	522
Extra dimensies .....	523
Open en gesloten snaren en D-branen.....	524
Vijf types snaartheorieën die allemaal consistent zijn .....	525
De M-theorie van Eduard Witten .....	526
Supersymmetrie en de vierdimensionale (n = 4) supergravitatie theorie ....	527
Nog geen experimentele bewijzen voor de snaartheorie! .....	531
<b>VIII.8 QUANTUM KOSMOLOGIE .....</b>	<b>531</b>
De big bang van een singulariteit .....	531
Sterke inflatie .....	532
Een gigantische annihilatie .....	534
De kosmische microgolf achtergrondstraling .....	535
Vorming van zwaardere materie .....	536
Anti-zwaartekracht of donkere energie .....	538
<b>VIII.9 SAMENVATTING VAN DE HUIDIGE STAND VAN ZAKEN EN HET BELANG VAN DE STRINGTHEORIE .....</b>	<b>539</b>
Het standaardmodel is een quantum theorie .....	540
Het belang van Einsteins algemene relativiteitstheorie (ART) .....	541
Waarom de stringtheorie? .....	541
Het graviton en de stringtheorie .....	542
Soorten symmetrieën en de stringtheorie .....	543
<b>VIII.10 BESLUIT MBT DE THEORIE VAN ALLES OF UNIFICATIE THEORIE.....</b>	<b>545</b>
Problemen bij unificatie .....	545
Geschiedenis .....	546
Kandidaten voor een theorie van alles .....	548
<b>VIII.11 FILOSOFISCHE BESCHOUWINGEN M.B.T. HET MULTIVERSUM OF MULTIVERSA EN HET SUPERHEELAL .....</b>	<b>549</b>
Multiversum in de quantum fysica en kosmologie.....	550
De quantum computer .....	551
Kritiek t.o.v. het multiversum .....	551

<b>DEEL IX</b>	<b>DE HUIDIGE TOEPASSINGEN IN DE QUANTUM WERELD EN ENKELE AANVERWANTE DOMEINEN .....</b>	<b>553</b>
<b>IX.1</b>	<b>INLEIDING AANVERWANTE QUANTUM DOMEINEN .....</b>	<b>554</b>
<b>IX.2</b>	<b>QUANTUM COMPUTER.....</b>	<b>555</b>
<b>IX.3</b>	<b>QUANTUM CHEMIE.....</b>	<b>556</b>
	Hybridisatie.....	557
	Quantum benadering van chemische bindingen .....	558
	Moderne berekeningsmethoden.....	558
	De Hartree-Fockmethode (HF) .....	559
<b>IX.4</b>	<b>QUANTUM BIOLOGIE .....</b>	<b>560</b>
	Toepassingen .....	561
	De absorptie van frequentie specifieke straling zoals bijvoorbeeld fotosynthese.....	562
	Magnetoreceptie bij dieren .....	564
	Brownse motoren in vele cellulaire processen.....	566
<b>IX.5</b>	<b>QUANTUM NANOTECHNOLOGIE.....</b>	<b>567</b>
	Toepassingen .....	569
	Medische techniek.....	570
	Chiptechnologie.....	570
	Geheugenchips .....	571
	Fotovoltaïsche cellen .....	571
	Foto(elektro)chemie: coatings.....	571
	Biomoleculen en bio-geïnspireerde toepassingen.....	572
	Voedsel .....	572
	Chemie en energietechniek: katalysatoren .....	573
	Milieutechniek .....	573
	Polymeren .....	573
	Kritiek op de nanotechnologie.....	573
<b>IX.6</b>	<b>QUANTUM OPTICA OF FOTONICA .....</b>	<b>574</b>
<i>IX.6.1</i>	<i>Enkele toepassingen .....</i>	<i>575</i>
	LED.....	575
	LASER .....	577
	AMOLED SCHERM.....	579
	PLASMASCHERM.....	580
	TFT (dunne filmtechniek)-schermen.....	583
	LCD (vloeibare kristallen displays) .....	584
	CCD chip (ladingsgekoppelde devices) camera's .....	584
	FOTODIODE .....	586
<b>IX.7</b>	<b>DE FOTOVOLTAÏSCHE ZONNECEL.....</b>	<b>587</b>
<i>IX.7.1</i>	<i>WERKING .....</i>	<i>587</i>
<i>IX.7.2</i>	<i>GESCHIEDENIS FOTOVOLTAÏSCHE ZONNECEL .....</i>	<i>589</i>
<i>IX.7.3</i>	<i>TOEPASSINGEN .....</i>	<i>590</i>
	Ruimtevaart .....	590
	Aardse toepassingen .....	590
<i>IX.7.4</i>	<i>GRONDSTOFFEN .....</i>	<i>591</i>

Silicium als bulkmateriaal .....	591
Amorf silicium in de dunnelaagtechnologie .....	592
CIS of $\text{CuInSe}_2$ .....	593
CIGS of dunne-laag composieten .....	593
IX.7.5 <i>PRODUCTIE</i> .....	594
IX.7.6 <i>AFWERKING</i> .....	594
IX.7.7 <i>RENDEMENT</i> .....	595
Lichtzeven .....	595
Bundelen van zonlicht .....	595
IX.7.8 <i>TOEKOMSTVERWACHTINGEN</i> .....	596
<b>IX.8 AKOESTO-OPTICA .....</b>	<b>598</b>
<b>IX.9 QUANTUM SPINTRONICA .....</b>	<b>599</b>
IX.9.1 <i>QUANTUM ELEKTRONEN MICROSCOPIE</i> .....	600
IX.9.2 <i>QUANTUM SCANNING-TUNNELING MICROSCOPIE (STM)</i> .....	601
IX.9.3 <i>DE ATOOMKRACHT MICROSCOOP (AFM), EEN SPECIALE METHODE VAN DE STM</i> .....	602
<b>IX.10 KUNSTMATIGE INTELLIGENTIE .....</b>	<b>603</b>
<b>IX.11 NIEUWE QUANTUM MATERIALEN (GRAFEEN, ...) .....</b>	<b>605</b>
QUANTUM GRAFEEN .....	605
<b>DEEL X ENKELE BELANGRIJKE THEORETISCHE BEGRIPPEN .....</b>	<b>606</b>
<b>X.1 OVER EENHEDEN EN CONSTANTEN IN DE NATUURWETTEN .....</b>	<b>607</b>
X.1.1 <i>INLEIDING</i> .....	607
X.1.2 <i>DE ZEVEN SI-BASIS EENHEDEN VAN DE NATUURLIJKE GROOTHEDEN EN ENKELE AFGELEIDE CONSTANTEN ZOALS DE SECONDE, METER, KG, AMPÈRE, KELVIN, MOL, CANDELA</i> .....	608
X.1.3 <i>AFGELEIDE EENHEDEN</i> .....	611
De elektronvolt (afkorting eV) .....	611
X.1.4 <i>ANDERE EENHEDENSTELSELS</i> .....	612
Atomaire eenheden .....	612
Planck-eenheden .....	613
Relativistische eenheden .....	614
X.1.5 <i>VEREENVOUDIGING VAN NOTATIE VAN ZEER GROTE EN ZEER KLEINE EENHEDEN</i> .....	615
X.1.6 <i>EEN AANTAL BELANGRIJKE AFGERONDE EENHEDEN EN CONSTANTEN IN DE DEELTJESFYSICA</i> .....	616
<b>X.2 DE WETTEN VAN MAXWELL EN DE "ETHER" .....</b>	<b>617</b>
X.2.1 <i>DE ALGEMENE MAXWELLVERGELIJKINGEN</i> .....	618
X.2.2 <i>DE MAXWELLVERGELIJKINGEN IN HOMOGENE OF LINEAIRE MEDIA</i> .....	619
X.2.3 <i>DE MAXWELLVERGELIJKINGEN IN VACUÛM</i> .....	620
X.2.4 <i>RELATIVISTISCHE FORMULERING</i> .....	620
<b>X.3 BASISTHEORIE: OVER MATRIXEN, COMPLEXE VECTOREN, VIERVECTOREN, NOTATIES, OPERATOREN, INWENDIG PRODUCT EN HERMITIAAN ... .....</b>	<b>621</b>

X.3.1	MATRIXLEER VIERKANTE MATRIXEN (kort) .....	621
X.3.2	COMPLEXE GETALLEN, VECTOREN EN FUNCTIES IN T KORT.....	623
X.3.3	INWENDIG PRODUCT VOOR COMPLEXE VECTOREN EN FUNCTIES .	625
X.3.4	EEN GEBEURTENIS OF EEN POSITIE-VECTOR .....	628
X.3.5	AFSTAND $\Delta S$ TUSSEN TWEE GEBEURTENISSEN .....	628
X.3.6	INWENDIG PRODUCT VAN 2 RUIMTE VECTOREN $r_1, r_2$ OF $r_A, r_B$ .....	629
X.3.7	INDEXNOTATIE.....	629
X.3.8	DE LORENTZTRANSFORMATIE .....	630
X.3.9	ANDERE NOTERING VAN HET INPRODUCT VAN TWEE VIERVECTOREN .....	631
X.3.10	OPERATOREN.....	631
X.3.11	EIGENFUNCTIES EN EIGENWAARDEN.....	634
X.3.12	HERMITISCHE OPERATOREN.....	637
	Hermitische operatoren hebben volgende belangrijke eigenschappen: .....	637
	Diracnotaties .....	638
	De hermitische geconjugeerde.....	638
	Enkele eenvoudige kenmerken van hermitische operatoren, die belangrijk zijn in de quantum mechanica.....	639
<b>DEEL XI</b>	<b>BIJLAGEN .....</b>	<b>644</b>
<b>XI.1</b>	<b>BIJLAGE 1: SPECTRUM VAN ELEKTROMAGNETISCHE GOLVEN .....</b>	<b>645</b>
<b>XI.2</b>	<b>BIJLAGE 2: HOE GROOT IS "GROOT" EN HOE KLEIN IS "KLEIN" .....</b>	<b>646</b>
<b>XI.3</b>	<b>BIJLAGE 3: SI – EENHEDENSTELSEL VAN 7 ONAFHANKELIJKE VARIABELEN .....</b>	<b>649</b>
<b>XI.4</b>	<b>BIJLAGE 4: TABEL VAN ENKELE UNIVERSELE CONSTANTEN .....</b>	<b>650</b>
<b>XI.5</b>	<b>BIJLAGE 5: NOBELPRIJSWINNAARS SINDS 1900 .....</b>	<b>651</b>
<b>XI.6</b>	<b>BIJLAGE 6: MIJLPALEN/TIJDSLIJN VAN DE QUANTUM FYSICA .....</b>	<b>660</b>
<b>XI.7</b>	<b>BIJLAGE 7: TABEL VAN MENDELEJEV.....</b>	<b>668</b>
<b>XI.8</b>	<b>BIJLAGE 8: WERELDVERGELIJKEN .....</b>	<b>669</b>
	<b>BIBLIOGRAFIE &amp; BRONNEN .....</b>	<b>670</b>
	<b>INDEX .....</b>	<b>676</b>
	<b>RECENSIES, NOVEMBER 2015.....</b>	<b>688</b>

**UITGEWERKTE OEFENINGEN (\*) MBT DE QUANTUM THEORIE**

(\*) Voor de wiskundig gevormde lezer.

1. Vergelijking en sterkte van de 4 grote natuurkrachten (hst I.3)
2. Berekening van Einsteins trein gedachtenexperiment (hst II.5.4)
3. Thomson: Berekening van de verhouding  $m/q$  van het elektron (hst II.7.1)
4. De kwantisatie van het draaimoment en de energie (hst II.8.1)
5. Beginselen relativiteitsberekeningen: de relativistische energie-impuls viervector (hst II.9.1)
6. Compton effect: botsing tussen een foton en een elektron (hst II.9)
7. Eigenfuncties, eigenwaarden en operatoren (hst III.2.2)
8. De niet relativistische Schrödingervergelijking (hst III.2.3)
9. Eenvoudige quantum oefeningen van golfdeeltjes (hst IV.1.2)
10. Golfdeeltje opgesloten in een smalle pijp of koker (hst IV.1.3)
11. Harmonische oscillator (hst IV.1.4)
12. Draai-impulsmoment (hst IV.1.5)
13. Waterstofatoom (hst IV.1.6)
14. Waterstofion (hst IV.1.7)
15. Waterstofmolecule (hst IV.1.9)
16. Berekening Poisson-verdeling van het radioactief verval (hst V.2.4)
17. Brachytherapie van de prostaat (hst V.2.11)
18. De cyclotron (hst V.3.7)
19. Enkele eenvoudige relativistische oefeningen (hst VI.7)
20. Basistheorie en oefeningen over matrixen, complexe vectoren, viervectoren, notaties, operatoren en inwendig product (hst X.3)
21. Eigenfuncties en eigenwaarden (hst X.3.11)
22. Hermitische operatoren (hst X.3.12)

\* \* \* \* \*