

Die topkwark*

R. Tegen

Departement Fisika, Universiteit van die Witwatersrand, Posbus 3, Wits, 2050

Ontvang 28 Oktober 1997; aanvaar 26 Maart 1998

UITTREKSEL

'n Oorsig van die belangrikheid van die onlangs ontdekte topkwark by Fermilab in Chicago word gegee. Daar word aangetoon dat die topkwark belangrik is in fisika van die Oerknal, oftewel "Big Bang", en in die Standaard Model van Elementêredeeltjie-fisika. Toepaslike literatuur vir verdere studie kan van die lys van verwysings in hierdie kort, nietegniese artikel, nagegaan word.

ABSTRACT

The top-quark

The importance of the recent discovery of the top-quark at Fermilab in Chicago is reviewed. It is shown that the top-quark is important for Big-Bang physics as well as for the Standard Model of Elementary Particle Physics. Relevant literature for further reading can be traced from the list of references given in this short, non-technical article.

Op 2 Maart 1995 het die lang soektog na die "finale letter in die alfabet van die Standaard Model van deeltjies" geëindig.^a Twee eksperimentele navorsingsgroepe, die sogenaamde CDF

(Collider Detector by Fermilab)-groep en die D0 (Dec-zero)-groep, wat albei by die Fermilab Tevatron-proton-antiproton-versneller navorsing gedoen het, het op daardie dag aangekondig

* *Opgedra aan professor Richard Lemmer by geleentheid van sy vyf-en-sestigste verjaardag.*

dat hulle die topkwerk finaal gevind het.² Sedert die eerste indirekte bepaling (~ 1989) van die topkwerk (*t*) se massa, het die metings van hierdie massa stelselmatig verbeter na die huidige waarde van $m_t = (180 \pm 12) \text{ GeV}^{3b}$ (sien figuur 1). Die massa van die topkwerk is dus ongeveer dié van 'n goudatoom!

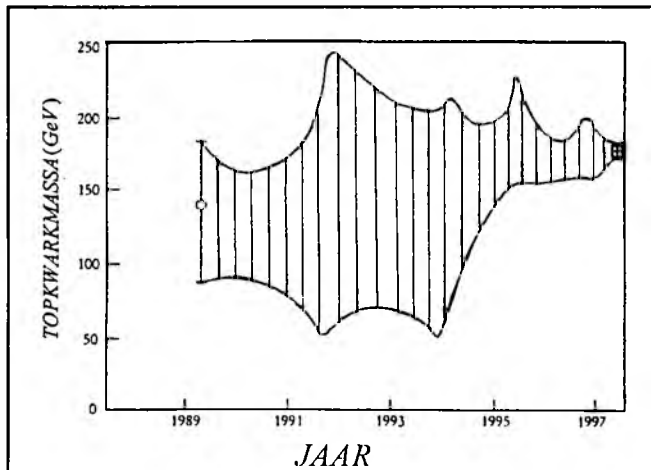
Voordat die eksperimentele metodes van die „jag op die topkwerk” bespreek word, word die rol van die *t*-kwerk binne die raamwerk van die Standaard Model (SM) vir elementêre deeltjies beskou. Die SM beskryf hoe die fundamentele wisselwerkings tussen elementêre deeltjies (kwarke en leptone) voortgeplant word deur die uitruil van „eik”-bosone.^c Beide kwarke en leptone verskyn as drie doeblette van deeltjies soos uiteengesit in figuur 2. So 'n doeblet stel 'n kwark- of lepton-generasie daar. Die lede binne elke doeblet vertoon soortgelyke eienskappe, maar verskil noemenswaardig in massa (sien die massapatroon in figuur 3 en die bespreking in verwysings 4-6). Elke lepton-doeblet bestaan uit 'n elektries-gelaaide deeltjie [elektron (*e*), muon (μ) of die tau lepton (τ)] plus 'n neutrale metgesel, die sogenaamde neutrino (ν).^d Die neutrino's self skyn

amper massaloos te wees: limiete op die neutrino-massas verskyn in figuur 3.

Wisselwerkings tussen elementêre deeltjies kan ingedeel word in (i) sterk kragte (of kernkragte) wat oorgedra word deur massalose „gluone”, (ii) elektromagnetiese kragte wat deur massalose fotone oorgedra word, en (iii) „swak” kragte wat oorgedra word deur die swaar W en Z eikbosone. 'n Verdere belangrike bestanddeel van die SM is die (tans nog hipotetiese) Higgs-boson. Die Higgs-boson veroorsaak dat die W en Z massief word (~ 100 protonmassas), anders sou hulle, net soos die foton, massaloos gebly het. Die feit dat hierdie twee eikbosone massief word, veroorsaak dat daar 'n simmetrieverbreking tussen swak en elektromagnetiese kragte ontstaan. Nog verder, die feit dat die topkwerk se massa numeries soortgelyk is aan die energieskaal (van ongeveer 100 GeV) van die elektro-swak simmetrieverbrekingsmeganisme suggereer dat die massa van die topkwerk saamhang met die oorsprong van die elektro-swak simmetrieverbreking. Die Higgs-meganisme verbind die massa van die topkwerk m_t dus met 'n hele spektrum van moontlike Higgs-massas wat iewers tussen 100 en 500 GeV kan wees.

Die fermione (d.w.s. kwarke en leptone) in afsonderlike generasies dra kwantumgetalle wat verhinder dat hulle maklik omskep kan word in fermione van 'n ander generasie. Byvoorbeeld, die leptone *e*, μ , τ en hul neutrino-metgeselle dra kwantumgetalle $L_{e,\mu,\tau}$ wat eksak behoue bly.^e Die kwarke dra soortgelyke kwantumgetalle. Dit het die gebruik geword om hierdie kwantumgetalle die „kwark-geure”^f te noem. Hulle behels die twee moontlike ladingstoestande (2/3 of -1/3), die vreemdheid („strangeness”) S, sjarme („charm”) C, skoonheid („beauty”, of „bottom”) B, en top („topness”, of „truth”) T. Die kwantumgetalle S,C,B,T neem die waardes ± 1 aan, waar die teken só gekies word dat dit saamval met die teken van die kwark se lading. Volgens figuur 2 is die ladingstoestand van die t-kwerk +2/3, die van die b-kwerk -1/3. Dus is T=+1 vir die t-kwerk, en B=-1 vir die b-kwerk.

In die eenvoudigste kwarkmodelle van hadrone^g word mesone (pion π , omega ω , sigma σ ens.) opgebou uit gebonde kwark-antikwark-pare $q_1\bar{q}_2$, terwyl die barione (proton, neutron, hiperone, ens.) 'n gebonde sisteem van drie kwarke $q_1q_2q_3$ is. Volgens hierdie skema sal die top-meson T^0 (~ 175 GeV) = $t\bar{u}$ (wat terloops nog nie waargeneem is nie) byvoorbeeld, verhinder word om in

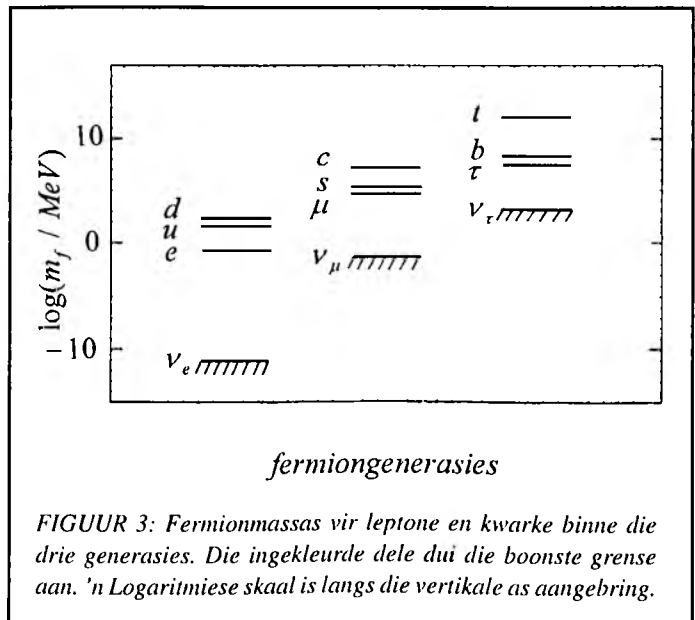


FIGUUR 1: Topkwerk-massa teenoor jaar waarin dit gemeet is. Die ingeleurde oppervlak stel die onsekerheid in die massabepaling voor, wat hier langs die tyd-as as kontinu daargestel word.

Q/e	kwarkgenerasies		
2/3	u	c	t
-1/3	d	s	b

lepton-generasies			
0	ν_e	ν_μ	ν_τ
-1	e	μ	τ

FIGUUR 2: Fermionladings (in eenhede van die basiese lading e) vir die drie generasies.



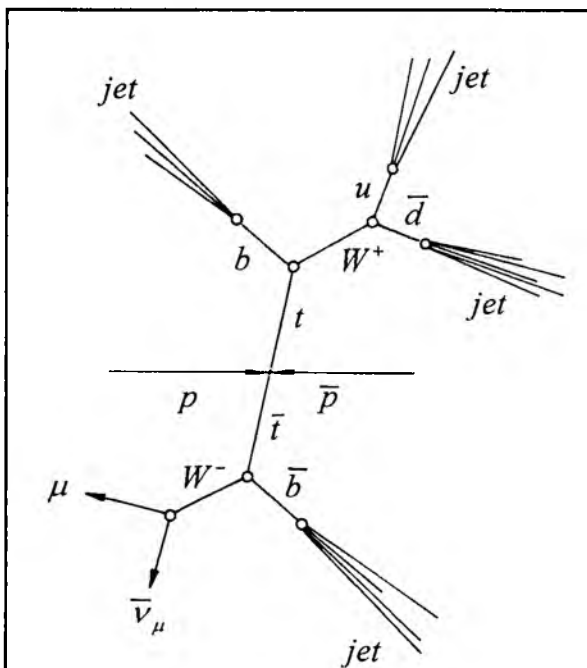
FIGUUR 3: Fermionmassas vir leptone en kwarke binne die drie generasies. Die ingeleurde dele dui die boonste grense aan. 'n Logaritmiese skaal is langs die vertikale as aangebring.

'n veel ligter B-meson, $B^- (\sim 4.5 \text{ GeV}) = b\bar{u}$, te kan verval. Dit sou vereis dat $t\bar{u} \rightarrow b\bar{u}$ wat 'n geurverandering $t \rightarrow b$ sou meebring. Dit kan alleen deur bemiddeling van die swak wisselwerking plaasvind. Dan word die veranderinge $\Delta T \neq 0$ en $\Delta B \neq 0$ toelaatbaar vir die T-meson se verval.

Daar word nou teruggekeer na die deurslaggewende eksperimente wat die ontdekking van die topkwarke tot gevolg gehad het. Soos gemeld is hierdie eksperimente op Fermilab se Tevatron uitgevoer. Die beginsel van hierdie eksperimente is om 'n bundel van hoë-energie protone (900 GeV) 'n kop aan kop botsing te laat ondergaan met 'n bundel antiprotone van dieselfde energie, wat in die teenoorgestelde rigting beweeg, om sodoende $t\bar{t}$ pare (onder andere) op te wek. Hierdie pare verval byna onmiddellik, maar laat "vingerafdrukke" na in die vorm van vervalprodukte,

$$p\bar{p} \rightarrow t\bar{t} + \text{enigiets}, t \rightarrow bW^+, \bar{t} \rightarrow \bar{b}W^-, W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu, W^+ \rightarrow u\bar{d}$$

soos uiteengesit in figuur 4. Die kwarke in die vervalprodukte (\bar{b}, b, u, \bar{d}) veroorsaak kenmerkende, dun bundels ("jets") deeltjies. Hierdie deeltjiesbundels vorm omdat elke kwarke wat geskep word, aansluit^h by 'n metgesel-antikwarke van die opgewekte vakuum, om sodoende hoofsaaklik pione te vorm (sien figuur 5). In hierdie soort opname kan die b -kwarke byvoorbeeld uitgeken word aan of die kort leeftyd daarvan (wat gekenmerk word deur 'n kort deeltjiesbundelspoor wat by die $p\bar{p}$ botsingspunt ontstaan en by die vervalpunt eindig) of deur middel van die (semileptoniese) vervalprodukte. Die b -kwarke se leeftyd is veel langer as dié van die topkwarke. Hierdie feit gee die b genoeg tyd om homself met 'n ligte antikwarke te "klee" (soos in figuur 5) om sodoende 'n B-meson te bou, wat dan 'n kort, maar waarneembare deeltjiespoor in die telapparaat nalaat. Dus kan die B-meson "ge-eien" word deur die ontstaan van 'n kenmerkende vervalpatroon, omtrent een millimeter van die skeppingspunt af. Die W -boson, daarenteen, besit 'n leeftyd soortgelyk aan dié van die topkwarke: dit het 'n kans van 2:3 om in 'n $q\bar{q}$ paar te verval, wat dan hulle teenwoordigheid



FIGUUR 4: Een van die proton-antiproton-botsings wat teruggevoer kon word na 'n top-antitop-paar wat by die wisselwerkingspunt verskyn het. Verwys na die hoofartikel.

aankondig as twee dun deeltjiespore. Vir die oorblywende 1:3 kans verval die W in leptonpare - 'n hoë-energie-gelaaiete lepton wat deur 'n onsigbare neutrino vergesel word, soos aangedui word in figuur 4. Die oorblywende vervalmoontlikhede is

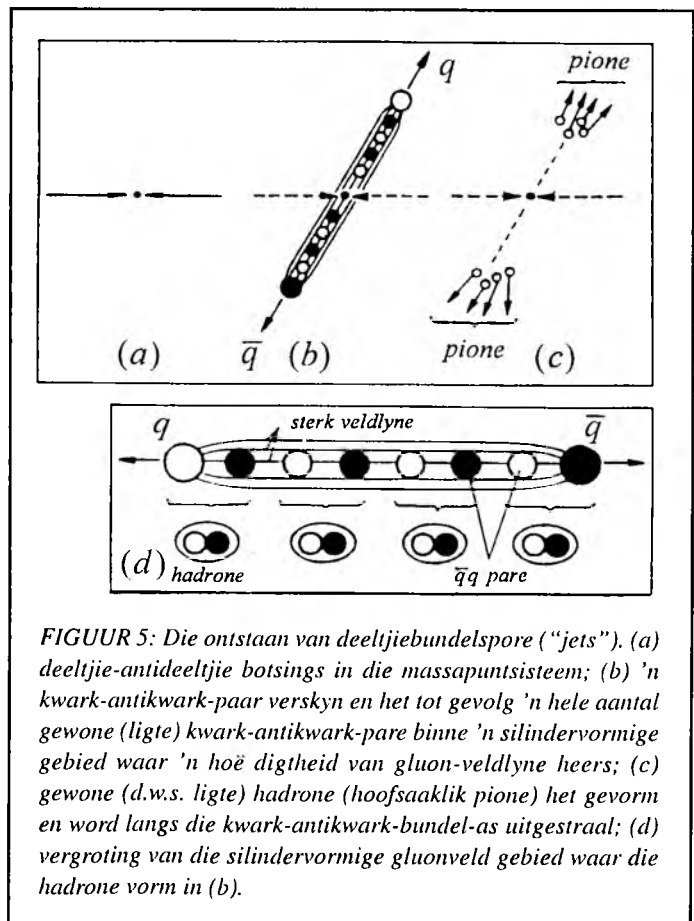
$$t\bar{t} \rightarrow l_1^+ l_2^- b\bar{b} \epsilon_T, l_1^+ l_2^- b\bar{b} \epsilon_T, b\bar{b} \text{ 4 deeltjiespore}$$

waar $l_{1,2} = e, \mu, \tau$. Die simbool ϵ_T is kortskrif om aan te toon dat 'n aansienlike hoeveelheid energie ontbreek in die rigting loodreg op die bundelrigting. Daar word aanvaar dat hierdie energie weggedra word deur die neutrino's.

Die jaar (1995) van die kunsmatige opwekking van die topkwarke by Fermilab was nie die eerste keer dat hierdie deeltjiesy verskyning in die heelal gemaak het nie. Tydens die eerste fase van die Oerknal, oftewel "Big Bang", ruim 10^{10} jaar terug, is topkwarke in groot getalle geskep. Tussen 10^{-35} sekonde (toe die materie-antimaterie-asimmetrie te voorskyn gekom het) en 10^3 sekonde (toe helium en deuterium gevorm is) ná die ontploffing het die heelal 'n fase bereik waar materie bestaan het uit kwarke en leptone in termiese ewewig met die eikbosone van SM. Die termiese energieë het in daardie stadium tussen 10^{14} en 10^4 GeV geval, wat ooreenkom met temperature tussen 10^{27} K en 10^9 K.⁷ Verder word t en \bar{t} kwarke (onder andere) gedurig *virtueel* opgewek en vernietig volgens die kringloop

$$\left(\begin{matrix} \gamma \\ Z^0 \end{matrix} \right) \rightarrow \left(\begin{matrix} t\bar{t} \\ b\bar{b} \\ u\bar{u} \end{matrix} \right) \rightarrow \left(\begin{matrix} \gamma \\ Z^0 \end{matrix} \right) \rightarrow \left(\begin{matrix} t\bar{t} \\ b\bar{b} \\ u\bar{u} \end{matrix} \right) \rightarrow \left(\begin{matrix} \gamma \\ Z^0 \end{matrix} \right) \rightarrow \dots$$

In woorde, die voortplanting van 'n foton of 'n ongelaaiete eikboson Z^0 kan die vakuum opwek (polariseer) deur virtuele kwarke-antikwarke-pare daaruit op te wek. Hierdie pare vernietig mekaar dan weer binne 'n tydskuur wat vasgelê word deur die Heisenberg-onsekerheidsbeginsel, om net weer opgewek te word



FIGUUR 5: Die ontstaan van deeltjiesbundelspore ("jets"). (a) deeltjie-antideeltjie botsings in die massapuntsisteem; (b) 'n kwarke-antikwarke-paar verskyn en het tot gevolg 'n hele aantal gewone (ligte) kwarke-antikwarke-pare binne 'n silindervormige gebied waar 'n hoë digtheid van gluon-veldlyne heers; (c) gewone (d.w.s. ligte) hadrone (hoofsaaklik pione) het gevorm en word langs die kwarke-antikwarke-bundel-as uitgestraal; (d) vergroting van die silindervormige gluonveld gebied waar die hadrone vorm in (b).

ad infinitum. Baie kwalitatief kan ons ons miskien die volgende meganiese beeld van hierdie gebeure voorstel: 'n sterk wind waai oor 'n spieëlgladde see en tel waterdruppels op (kwarke) om sodoende "waterholtes" (antikwarke) in die see se oppervlak te skep. Dan val hierdie druppels terug en die see word weer glad met die lugstroom wat daaroor beweeg.

Soos reeds aangedui (figuur 2), voltooi die topkwarke die derde generasie van kwarke. Maar waarom net drie generasies? Teoreties is dit só dat eikveldteorieë wat "hernormaliseerbaar" is (d.w.s. teoretiese raamwerke waarin die divergensies wat voorkom ten minste hanteerbaar is) 'n streng "anomalie"-voorwaarde neerlê op die fundamentele fermionvelde van daardie veldteorie, naamlik

$$\sum_l Q_l + 3 \sum_q Q_q = 0 \quad (1)$$

Vegelyking (1) verwys gladnie na die lepton of kwarke massas nie. Alleen die leptoniese (Q_l) en kwarkladings (Q_q) is betrokke. Vanselfsprekend geld (1) vir elke generasie afsonderlik,

$$-1 + 0 + 3 \times (2/3 + (-1/3)) = 0$$

sodat vgl. (1) geen beperking op die moontlike aantal generasies vereis nie. 'n Ander interessante aspek van vgl. (1) is die faktor "3" voor die kwarkladings. Elke kwarke kom in drie "kleure" (rooi, groen, blou) voor, sodat byvoorbeeld 'n "u" of op-kwarke se bydrae tot 'n fermionlus drie keer verskyn, aangesien die rooi, groen en blou op-kwarke elk 'n lading van twee derdes bydra.

Terwyl die "anomalie", soos daargestel word deur vgl. (1) ongevoelig is ten opsigte van die aantal generasies, is hierdie stelling onwaar vir die verval⁶ van die Z-boson. Die gemete leeftyd van hierdie boson kan alleen vereenselwig word met die bestaan van drie generasies van fermione. Daarby is dit ook bekend dat die materie-antimaterie-asimmetrie, wat in die huidige heelal waargeneem word, ontstaan as gevolg van 'n baie klein (10^{-4}) ladingsuitruil-pariteitverbreking. Hierdie verbreking vereis ook tenminste drie doeblette. Maar bo en behalwe hierdie eksperimentele waarnemings is daar tans geen deurslaggewende bewys vir net drie generasies binne die raamwerk van SM nie. Dus die antwoord op die vraag "Waarom net drie doeblette?" sal dalk lê in 'n veralgemening van die huidige teorieë, waar materieverde (fermione) en eikvelde (eikbosons) verenig word binne 'n teoretiese raamwerk wat as supersimmetrie bekend staan. Hierdie teorie wag nog op eksperimentele bevestiging.

SUMMARY

The importance of the recent discovery of the top-quark at Fermilab in Chicago is reviewed. The decay signature on the $p\bar{p}$ pairs is discussed which lead to the discovery. It is shown that the top-quark is important for Big-Bang physics as well as for the Standard Model (SM) of Elementary Particle Physics. The top quark completes the third fermion generation and as such renders the SM anomaly-free, which is an important criterion for a renormalizable field theory. The top-quark's mass is

related to the still undiscovered Higgs sector of the SM. The relevant literature for further reading can be traced from the list of references given in this short, non-technical article.

DANKBETUIGING

Richard Lemmer word bedank vir sy bydrae gelewer ten opsigte van taalkundige versorging van die artikel, sowel as gewaardeerde besprekings van die wetenskaplike inhoud van die werk.

VOETNOTE

- a Ongeveer nege maande vroeër was daar reeds voorlopige aanduidings van die bestaan van die topkwarke.¹
- b Tydens die tweejaarlikse internasionale "Rochester"-konferensie (wat hierdie jaar in Warskou, Poland plaasgevind het) is 'n nuwe bepaling van $m_t = (175 \pm 6)$ GeV deur CDF en D0 aangekondig. Die energie-eenheid "1 GeV" is net groter as die rusmassa van die waterstofatoom, wat op sy beurt hoofsaaklik die rusmassa van die proton daarstel.
- c Die term "eik(ing)" verwys na 'n simmetrie-eienskap van sulke bosone, naamlik 'n invariansie onder lokale veranderinge in die fase van hulle toestandsvektor.
- d Tot op hede is dit nog nie bewys dat die leptoniese metgesel ν_e van die topkwarke verskillend is van of die ν_e (elektron-neutrino) of die ν_μ (muon-neutrino) nie. Een eksperimentele bewys hiervoor sou 'n omgekeerde beta-verval-eksperiment vereis, waar geen elektron of muon in die finale toestand verskyn nie.
- e Byvoorbeeld, 'n μ van massa 106 MeV kan nie in 'n elektron van massa 0.5 MeV omskep word tensy dit vergesel word deur 'n lepton van elk van die ander generasies nie.
- f Quark flavours.
- g "Hadron" verwys gemeenskaplik na mesone ($\pi, \omega \dots$ ens.) en barione (proton, neutron, hiperone, ens.).
- h Hierdie proses staan bekend as "hadronisasie", d.w.s. die skepping van hadrone.
- i Sulke deeltjies kan dus nie direk waargeneem word nie.
- j Tegnies sorg hierdie voorwaarde daarvoor dat die divergensies wat ontstaan in hoër orde diagramme (wat fermionlusse bevat wat op hulle beurt die sogenaamde γ_s of "Adler-Bell-Jackiw" anomalie tot gevolg het) eksak uitgekanselleer word.
- k Hierdie verval is 'n twee-stap proses: $Z \rightarrow \sum_{i=1}^6 q_i \bar{q}_i \rightarrow$ hadrone.

LITERATUURVERWYSINGS

1. CERN Courier (1995). *Top quark discovered*, 35(3), 1.
2. Abachi, S. et al. (D0 collaboration) (1995). *Search for high mass top quark production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8\text{TeV}$* , *Phys. Rev. Lett.*, 74, 2422-2426; Abe, F. et al. (CDF collaboration) (1995). *Observation of top quark production in $p\bar{p}$ collisions with the collider detector at Fermilab*, *Phys. Rev. Lett.*, 74, 2626-2631.
3. Barnett, R.M. et al. (Particle Data Group) (1996). *Review of Particle Properties*, *Phys. Rev.*, D54, 1-720.
4. Schwartz, D., Tegen, R. (1992). *Evidence for quarks*, *Spectrum*, 30, 23-29, and references therein.
5. Schwartz, D., Tegen, R. (1993). *A periodic table of hadrons under the quark model*, *Spectrum*, 31, 34-45, and references therein.
6. Tegen, R. (1995). *On the mass hierarchy of fundamental particles*, *S. Afr. J. Sc.*, 91, 265-270.
7. Ellis, J. (1982). *Grand Unified Theories in Cosmology*, *Phil. Trans. Roy. Soc. London A* 307, 21-32.