

Nee, elementaire deeltjes staan niet of nauwelijks in het examenprogramma. Dan maar niet doen dus, of toch? In vijf lessen kan een experimentele inleiding gegeven worden, gevolgd door het standaardmodel met de cruciale behoudswetten en reactiediagrammen. We voegen dan geen stukje versplinterde kennis toe, maar iets dat eenheid heeft en generalisatiekracht. Natuurlijk kunt u meer doen, zie bijvoorbeeld hoofdstuk 4 van het Project Moderne Natuurkunde (www.phys.uu.nl/~wwwpmm). Dit hoofdstuk is met een kleine uitbreiding zelfs zeer geschikt als module in het nieuwe bètavak.

Vijf lessen over deeltjesfysica (2)

Inleiding

In het vorige nummer (*NVOX* (2), 55-57) bespraken we lessen 1 en 2. In dit artikel volgen les 3 – 5. Een overzicht van de vijf lessen vindt u in tabel 1.

Tabel 1. Overzicht van lessen.

Les	Beschrijving	Werkblad
1	Rond 1930 leek het erop alsof energiebehoud niet gold voor bètavelval. De uitgezonden elektronen hadden wisselende energieën maar wel met een maximum. Pauli kwam met een typische oplossing: er moet een ander deeltje zijn (neutrino) dat een deel van de energie meeneemt. Het duurde 26 jaar voordat het neutrino ontdekt werd. In werkblad 4.2 worden leerlingen door dit stukje geschiedenis geleid met o.a. de originele brief van Pauli.	4.2
2	Een les over interpretatie van een bellenvatfoto, deze les introduceert deeltjes reacties experimenteel.	4.3
3	In een klassikale inleiding geven we een kort overzicht (20 minuten) van het standaardmodel. Daarna besteden we 10 minuten aan behoudswetten en symmetrieën en kunnen we direct doorgaan met een voorbeeld van een reactievergelijking en lading en tijdomkeer. Dan opgaven 1a en 1b van werkblad 4.4.	4.4
4	Doorgaan met behoudswetten, symmetrieën, en reactievergelijkingen aan de hand van werkblad 4.4.	4.4
5	Afronding van het werkblad en terugblik: wat hebben we geleerd over deeltjes? Wat hebben we geleerd over behoudswetten? Wat hebben we geleerd over interactie tussen theorie en experiment in de natuurkunde?	4.4

Les 3: Standaardmodel

Het standaardmodel van elementaire deeltjes kan worden besproken aan de hand van tabellen 2 en 3. De docent introduceert ook nieuwe eigenschappen van deeltjes: baryongetal en leptongetal en het behoud ervan. De quark-samenstelling van protonen/neutronen komt kort aan de orde, eventueel met een

Tabel 2. Elementaire deeltjes.

Elementaire deeltjes: Fermionen							
Quarks				Leptonen			
generatie	deeltje/smaak	massa (GeV/c ²)	lading (e)	generatie	Deeltje/smaak	massa (GeV/c ²)	lading (e)
1	u up quark	0,003	2/3	1	ν_e elektron neutrino	<1x 10 ⁻⁵	0
	d down quark	0,006	-1/3		e ⁻ elektron	0,000511	-1
2	c charm quark	1,3	2/3	2	ν_μ muon neutrino	<0,0002	0
	s strange quark	0,1	-1/3		μ^- muon	0,106	-1
3	t top quark	175	2/3	3	ν_τ tau neutrino	<0,02	0
	b bottom quark	4,3	-1/3		τ^- tau	1,7771	-1
Elementaire deeltjes: Bosonen							
sterke interactie				elektrozwakke interactie			
	g gluon	0	0		γ photon	0	0
					W ⁻ W-min-boson	80,4	-1
					W ⁺ W-plus-boson	80,4	+1
	graviton (hypothetisch)				Z ⁰ Z boson	91,2	0
<ul style="list-style-type: none"> Ieder deeltje heeft een antideeltje, met dezelfde massa en met tegengestelde lading, en tegengesteld baryon- of leptongetal. Alle genoemde quarks hebben baryongetal 1/3 en leptongetal 0 Alle genoemde leptonen hebben baryongetal 0 en leptongetal 1 Leptonbehoud geldt apart voor elektron/neutrino, muon/neutrino, en tau/neutrino 							

uitweiding over experimenten die dit aantoonen (elektronen-verstrooiing).

Tabel 3. Enkele samengestelde deeltjes.

deeltje	samenstelling	baryon- getal	lepton- getal
p^+ proton	uud	1	0
p^- anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0
n neutron	udd	1	0
\bar{n} anti-neutron	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	-1	0
π^- pi-min-meson	$\bar{u}d$	0	0
π^+ pi-plus-meson	$u\bar{d}$	0	0
π^0 pi-nul-meson	$u\bar{u} / d\bar{d}$	0	0
H waterstofaatom	p^+e^-	1	1

Les 4 – 5 Behoudswetten, symmetrieën en reactiediagrammen met antwoorden

Dit is de kern van het PMN deeltjeshoofdstuk. De leerlingen en uzelf kunnen via het werkblad kennis opbouwen over behoudswetten en reactiediagrammen. U kunt de theorie eventueel apart nalezen in ons eerdere artikel in *NVOX* (Hoekzema et al., 2003) of op onze website, www.phys.uu.nl/~wwwpmn. Klik dan op 4d en 4e.

Snelle feedback

Het werkblad voor les 3-5 gebruikt de snelle-feedbackmethode. Dat is een klassikale methode waarin de docent een serie opdrachten geeft die meestal een individuele schets, tekening, of grafiek als antwoord vereisen (Berg, 2001). De docent kan dan in een oogopslag het antwoord identificeren. De opdrachten worden één voor één gegeven. Bij elke opdracht loopt de docent rond, inspecteert wat leerlingen er van maken. De docent stelt een snelle vraag hier en daar. Als leerlingen eerder klaar zijn, dan kunnen ze hun oplossing vergelijken met die van anderen. Vervolgens keert de docent terug naar het bord, bespreekt zeer kort één of twee veel gemaakte fouten, en geeft een nieuwe opdracht. Het is belangrijk de vaart erin te houden. De opdracht voor leerlingen en het rondlopen van de docent kan 2 of 3 minuten duren. Nabespreking duurt 1 of 2 minuten en het is tijd voor de volgende opdracht. Over een serie van 6 – 8 opdrachten kan een vaardigheid zeer effectief worden 'ingeslepen'. Bovendien heeft de docent op elk moment een redelijk goed beeld van wat leerlingen wel en niet begrijpen en hoever ze zijn. Daarvoor is het noodzakelijk dat de docent voortdurend over de schouders van de leerling meekijkt en indrukken baseert op echt leerlingwerk, dus *niet* gokken op ervaring zonder te kijken naar werk van leerlingen. Het doel van het meekijken van de docent is foute antwoorden te herkennen, oorzaken te begrijpen, en te corrigeren en dus NIET beoordeling. Als dat goed begrepen wordt door leerlingen, dan werkt de methode.

Men zou een uitgebreide inleiding kunnen geven over behoudswetten en symmetrieën of de leerlingen de betreffende pagina's op de PMN website kunnen laten doorlezen en dan pas overgaan op de snelle-feedback oefeningen. Wijzelf geven er de voorkeur aan om zeer korte uitleg en oefening te integreren met het werkblad in de volgende stappen:

- (Docent) We beginnen met de reactievergelijking: $p^+ + e^- \rightarrow H$ en geven een voorbeeld van C -symmetrie door de deeltjes door anti-deeltjes te vervangen: $p^- + e^+ \rightarrow \bar{H}$. Deze anti-waterstofatomen kunnen inmiddels gemaakt wor-

den in Genève. De reactie kan dus echt.

- Leerlingen doen opgave 1a en 1b. De docent loopt rond en identificeert eventuele problemen.
- (Docent) Even 1a bespreken. Vervolgens kunnen we de tijdsymmetrie operatie illustreren door de ionisatie van het waterstof atoom: $H \rightarrow p^+ + e^-$. Tijdsymmetrie is gewoon omkering van de reactiepijl, elke reactie is in principe omkeerbaar in de tijd.
- Leerlingen doen opgave 1c, de docent kijkt over de schouder mee.
- (Docent) Bespreek voorbeeld 1c voorzover nodig en leg kort de kruisingsoperatie uit. De kruisingsoperatie stelt dat we een legitieme reactie krijgen wanneer we een deeltje vervangen door het bijbehorende antideeltje en dat aan de andere kant van de reactiepijl zetten.
- Leerlingen doen opgaven 1d en 1e.
- Docent bespreekt 1c en 1d.
- Et cetera. Opgaven 2 en 3 gaan op soortgelijke manier. Vanaf opgave 4 werken leerlingen individueel in eigen tempo en niet meer met snelle feedback.

Werkblad met aantekeningen

We geven de docenten versie van het werkblad en voegen telkens aantekeningen toe.

Bètaverval

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1)$$

Vraag 1	Antwoord 1
a) Controleer baryon, lepton, en ladingsbehoud in reactie (1)	a) Baryon: $+1 = +1$ Lepton: $0 = +1 - 1$ Lading: $0 = +1 - 1$
b) Pas C -symmetrie toe op (1) en schrijf de resulterende vergelijking	b) $\bar{n} \rightarrow p^- + e^+ + \nu_e$
c) Pas T -symmetrie toe op (1) en schrijf de resulterende vergelijking	c) $p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \rightarrow n$
d) Pas $X(\bar{\nu})$ -symmetrie toe op (1)	d) $n + \nu_e \rightarrow p^+ + e^-$
e) Pas $X(e^-)$ -symmetrie toe op (1)	e) $n + e^+ \rightarrow p^+ + \bar{\nu}_e$

De meest gemaakte fout bij 1b is dat leerlingen gewoon n schrijven, alsof alleen geladen deeltjes anti-deeltjes hebben. Maar n bestaat uit udd en \bar{n} bestaat uit $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$ quarks, neutron en anti-neutron zijn dus duidelijk verschillend.

De reacties verkregen door toepassing van symmetrieën zijn fysisch mogelijk maar niet altijd waarschijnlijk. Reactie 1c is tamelijk onwaarschijnlijk want deze vereist drie verschillende deeltjes binnen een afstand van 10^{-15} m.

Antiprotonen en positronen zijn herkenbaar aan hun lading. Meestal wordt het streepje weggelaten, dus p^- in plaats van \bar{p}^- .

Reacties met pionen

$$\pi^- + p^+ \rightarrow \pi^0 + n \quad (2)$$

Vraag 2	Antwoord 2
a) Controleer voor baryon en ladingsbehoud in reactie (2)	a) Baryon: $0 + 1 = 0 + 1$ Lading: $-1 + 1 = 0 + 0$
b) Pas C -symmetrie toe op (2), waarbij π^+ als antideeltje van π^- genomen wordt en π^0 als antideeltje van zichzelf.	b) $\pi^+ + p^- \rightarrow \pi^0 + \bar{n}$
c) Pas T -symmetrie toe op (2)	c) $\pi^0 + n \rightarrow \pi^- + p^+$
d) Pas $X(n)$ toe op (2)	d) $\pi^- + p^+ + \bar{n} \rightarrow \pi^0$
e) Waarom is de laatste reactie tamelijk onwaarschijnlijk?	e) Het is tamelijk onwaarschijnlijk die drie deeltjes toevallig binnen 1 fm (10^{-15} m) bij elkaar te krijgen.
f) Het π^0 deeltje bestaat uit een up quark en zijn antideeltje ($u\bar{u}$) of een down quark en zijn antideeltje ($d\bar{d}$). Zal het deeltje lang bestaan? Leg uit.	f) Annihilatie kan plaatsvinden tussen u en \bar{u} of tussen d en \bar{d} maar niet tussen twee quarks van verschillende smaak zoals u en \bar{d} en d en \bar{u} .

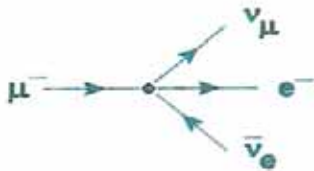
Vraag 2 verloopt redelijk vloeiend. Leerlingen hebben de regels van het spel snel door. Het bijzondere van mesonen is dat ze zijn opgebouwd uit quarks en anti-quarks en dat die niet annihileren zolang ze verschillende smaken hebben. De π^+ en π^- leven 3×10^8 keer langer dan π^0 en produceren zichtbare sporen in bellenvaten en dradenkamers. Het π^0 meson haalt hooguit een spoor van een micron lang.

Muonverval

De reactie voor muonverval is:



Het reactiediagram^{1,2} kan als volgt getekend worden (docent legt uit):



De reactiediagrammen die hier gebruikt worden zijn *gesimplificeerde* Feynmandiagrammen, die een grafische voorstelling van een reactievergelijking geven, maar zonder de wiskundige betekenis ervan en het verband met wisselwerkingen uit te werken. Wel geven de pijlen een verband aan met behoudswetten: Pijlen van gewone deeltjes wijzen naar rechts, pijlen van antideeltjes naar links. Een foton krijgt geen pijl maar een kronkellijn, omdat het zijn eigen antideeltje is.

De docent introduceert de reactie diagrammen en de leerlingen beantwoorden vragen 3a-3g met snelle feedback. Na elke twee of drie items, worden antwoorden en veel voorkomende fouten kort en bondig plenair besproken.

Vraag 4	Antwoord 4
a) Gebruik symmetrieën om een vergelijking af te leiden voor bèta+ verval die resulteert in de emissie van een positron en een neutrino.	a) $X(e^-, \text{antineutrino})$ levert een positron en neutrino op links van de pijl. Dan passen we T toe en keren de pijl om: $p^+ \rightarrow n + \nu_e + e^+$
b) Laat zien dat het niet mogelijk is om met symmetrieën uit (4) een reactie af te leiden waarin uit een neutron o.a. een positron geproduceerd wordt.	b) Door kruisen met alleen de deeltjes in vergelijking (4) kunnen we alleen een positron krijgen aan <i>dezelfde</i> kant van de pijl als het neutron, NIET aan de tegenovergestelde kant.
c) Gebruik de symmetrieën en probeer een reactievergelijking af te leiden waarin een elektron dichtbij de kern wordt ingevangen. (Dit kan in de natuur spontaan gebeuren bij een kern met hoge Z. Niet spontaan kan het ook bij beschieting van kernen met elektronen).	c) Als <i>input</i> moeten we een elektron hebben. Dus we passen tijdsomkeer toe op (4) en verhuizen het antineutrino naar rechts door kruisen: $p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$ We krijgen dit ook door tijdsomkeer toe te passen op het antwoord van 1d.
d) Bekijk de vergelijkingen nog eens. Met welk proces zouden we elektron neutrino's kunnen detecteren? Met welk proces elektron antineutrino's?	d) We kunnen elektronneutrino's detecteren door botsing met neutronen $n + \nu_e \rightarrow p^+ + e^-$ en elektron-antineutrino's door botsing met protonen: $p^+ + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$
e) Reactie (4) kan plaatsvinden in een 'los' neutron, maar meestal gebeurt de reactie juist in een neutron dat deel uit maakt van een kern, bv ${}^{37}_{17}\text{Cl}$. Schrijf reactie (1) op voor Chloor-37.	e) ${}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^- + \bar{\nu}_e$
f) Door kruising van de reactie in chloor 37, krijgen we een reactie die het mogelijk maakt neutrino's te ontdekken wanneer die botsen met een chloor kern. Schrijf die reactie op en voeg een diagram toe.	f) ${}^{37}_{17}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^-$ Dit is de reactie die door Nobelprijswinnaar Davis gebruikt is om 40 jaar lang neutrino's van de zon te detecteren in een tank gevuld met een chloor verbinding.

Vraag 3	Antwoord 3
a) Controleer leptonbehoud in (3)	a) μ -leptons: $+1 = +1$ e -leptons: $0 = +1 - 1$
b) Pas C symmetrie toe op (3)	b) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
c) Pas X(ν_μ) toe op (3)	c) $\mu^- + \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$
d) Pas X($\bar{\nu}_e$) toe op (3)	d) $\mu^- + \nu_e \rightarrow e^- + \nu_\mu$
e) Teken het reactiediagram van 3b	
f) Teken het reactiediagram van 3c	
g) Teken het reactiediagram van 3d	

Nogmaals bètaverval

We gaan nu weer terug naar het bètaverval:



Bij vragen a) en b) wordt het interessant, we kunnen alle vormen van bètaverval afleiden uit die ene vergelijking (4): β^- , β^+ , en K-vangst. We kunnen dus voorspellen dat het invangen van elektronen door een zware kern inderdaad moet kunnen. Wel kan dat elektron dan geen elektron meer blijven. Elektronen in een atoom hebben zo'n grote golflengte dat ze niet in de kern passen. In 1b zien we dat we ook kunnen voorspellen welke reacties **niet** kunnen.

Leerlingen zijn slim en zien gemakkelijk dat in reactie 4a de massa rechts van de pijl groter is dan links. Dan kan die reactie toch niet? Nee, gelukkig niet bij een vrij proton, anders zouden we niet bestaan. Maar de reactie is wel degelijk mogelijk in een kern wanneer er energie beschikbaar is via interacties met andere nucleonen. BINAS tabel 25 vermeldt een groot aantal β^+ stralers.

We hebben nu alle vormen van betaverval afgeleid uit vergelijking (4) door toepassing van eenvoudige operaties. Uit dezelfde vergelijking hebben we reacties afgeleid voor detectie van neutrino's en anti-neutrino's, weer via eenvoudige operaties. Dat is generalisatiekracht! Reactie 4f is 40 jaar lang gebruikt om zonneneutrino's te meten, de enige manier om producten van fusie reacties in de zon te 'zien'. Alleen de neutrino's kunnen rechtstreeks uit het binnenste van de zon ontsnappen. Onder meer op grond van Davis' metingen werd lange tijd gedacht dat er te weinig elektron neutrino's gedetecteerd werden. Onlangs werd dit probleem opgelost via de zo-

genaamde neutrino-oscillatie. Men neemt nu aan dat er drie neutrinomassa eigentstanden zijn met drie verschillende massa's: ν_e , ν_μ en ν_τ . Men is inmiddels vrij ver met kwantitatieve modellen over hoe die neutrino's van de ene vorm in de andere over kunnen gaan. Neutrino's worden tegenwoordig vaak gedetecteerd door Cerenkov-straling. Maar juist de detectie of we te maken hebben met elektron- of muon-neutrino's gaat nog steeds via reacties als 4d. Bijvoorbeeld, de reactie van een proton met een elektron-neutrino geeft twee signalen: Cerenkov-straling van het positron en een paar honderd microseconden later het invangen van het neutron door een proton wat een 2,2 MeV foton oplevert. Dubbele confirmatie (Schwarzschild, 2003).

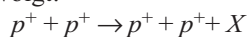
Botsingsprocessen

Ga voor de volgende reactievergelijkingen na of de betreffende reactie mogelijk is of niet. Geef aan waarom.

Vraag 5	Antwoord 5
a) $\pi^+ + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + \bar{n}$	a) baryonbehoud klopt: $0 + 1 = 1 + 1 - 1$. Ook ladingsbehoud is ook OK.
b) $p^+ + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + n$	b) geen baryonbehoud: $2 \neq 3$

Wat voor deeltjes?

Een reactie is als volgt:



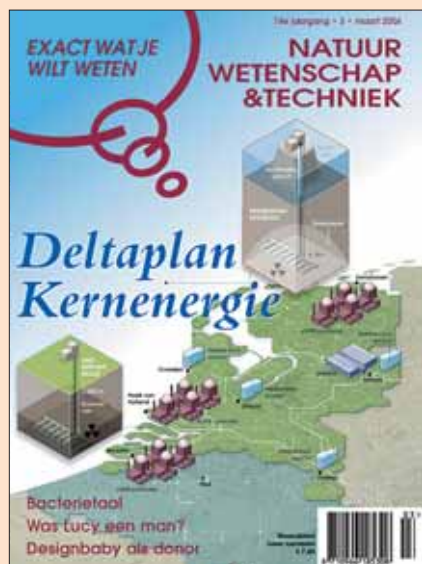
X is een onbekend deeltje.

Vraag 6	Antwoord 6
a) Is het een meson of een baryon? Waarom?	a) X kan geen baryon of anti-baryon zijn want dan klopt het baryonbehoud niet, het kan wel een neutraal meson zijn.
b) Heeft X lading of niet? Waarom?	b) X kan geen lading hebben want dan klopt het ladingsbehoud niet.
c) Kan X een lepton zijn?	c) Het kan geen lepton zijn, want dan klopt het leptonbehoud niet.
d) Beantwoord a), b), en c) voor het geval dat er twee deeltjes (X en Y) gevormd worden.	d) Een baryon en een antibaryon zou ook kunnen. Om aan ladingbehoud te voldoen moeten X en Y dan neutraal zijn, of een tegengestelde lading hebben. Leptonen zou kunnen maar ook dan moeten het een lepton en zijn antideeltje zijn.

Literatuur

- Berg, E. van den en Hoekzema, D. Vijf lessen over deeltjesfysica (1). *NVOX*, 31(2), 55-57.
- Berg, E. van den (2001). Onmiddellijke Diagnose en Feedback in Natuur- en Scheikundelessen. *NVOX*, 26(8), 407-410.
- Hoekzema, D.J., Schooten, G.J., Berg, E. van den (2003). Behoudswetten, Symmetrieën en Elementaire Deeltjes. *NVOX*, 28(5), 230-233.
- Schwarzschild, B. (2003). Antineutrinos from distant reactors simulate the disappearance of solar neutrinos. *Physics Today*, March, 14-16.

In het maartnummer van Natuurwetenschap & Techniek



Deltaplan kernenergie

“Zuerst kommt das Fressen, und dann die Moral”, schreef Friedrich Nietzsche reeds. Vrij vertaald naar de Nederlandse energie-situatie: in 2020, als de gasbel bij Slochteren echt leeg raakt en Nederland geen semi-Opecland meer is, zal de politiek heel anders denken over kernenergie. Een *educated guess*: kernenergie geldt dan als de enige betrouwbare energiebron, vrijwel zonder CO₂-productie en zonder afhankelijkheid van instabiele regimes buiten Eu-

ropa. Nucleair gewetensbezwaarden laten rustig doorrommelen met hun windmolens en zonnepanelen, maar de echte investeringen gaan naar een dozijn nieuwe kerncentrales, een ondergrondse afvalberging bij de Nederlands/Belgische grens en innovatieve industrie rond transmutatie en nieuwe reactortechnologie. Natuurwetenschap & Techniek buigt zich over de kwestie hoe we dat dan het beste kunnen regelen. Waar moeten die kerncentrales komen te staan? Welke technologie moeten we kiezen? Waar halen we de uranium vandaan? Waar brengen we het afval naar toe? Een scenario voor de kenniseconomie.

Bacteriën afluisteren

De enige ambitie van een bacterie is het produceren van twee bacteriën, was lang de heersende gedachte in de microbiologie. We komen er langzamerhand achter dat microben een veel rijker leven hebben: vol sociaal contact, communicatie met andere organismen en samenwerkingsverbanden. Erkenning van hun ware aard kon wel eens het ultieme wapen blijken in de strijd tegen de steeds resistenter wordende bacteriën.

Stille vliegtuigen

De laatste bomen zullen nu wel gekapt zijn op de zes hectaren van het Schinveldse bos.

De protesten van omwonenden en milieu-activisten tegen de laag overvliegende Awacs van een nabijgelegen Navo-basis hebben wat dat betreft niets uitgehaald. Wellicht geeft het wel de aanzet tot het vervangen van de zeer lawaaiige motoren van de Awacs. Een stiller alternatief is namelijk al lang beschikbaar.

Was Lucy een man?

Lucy is met stip onze bekendste voorouder. Deze eerste en meest complete *Australopithecus afarensis* ooit gevonden, wordt beschouwd als onze oermoeder. Maar misschien is ze eerder onze oervader. Paleoantropologen discussiëren daar al enige tijd over, want Lucy's skelet is klein met brede heupen en lijkt dus vrouwelijk, maar ook mannen kunnen klein zijn (zie de moderne mens) en heupbreedte zegt vooral iets als je kunt vergelijken. Lucy's heupen zijn de enige afarensis-heupen ooit gevonden. Hoe herken je een (oer)man of -vrouw?

NB. Wist u dat u als NVON-lid jaarlijks € 10 reductie krijgt op een jaarabonnement? U kunt zich aanmelden bij de lezersservice van NW&T, tel. 023 518 3335. Meld duidelijk dat u lid bent van de NVON.