Industriële toepassing en onderzoek naar zeldzame aarden bij Philips na 1945

Andries Meijerink

Debye Institute, Departement Scheikunde,
Faculteit Bètawetenschappen, Utrecht University
e-mail: a.meijerink@uu.nl

Inhoud:

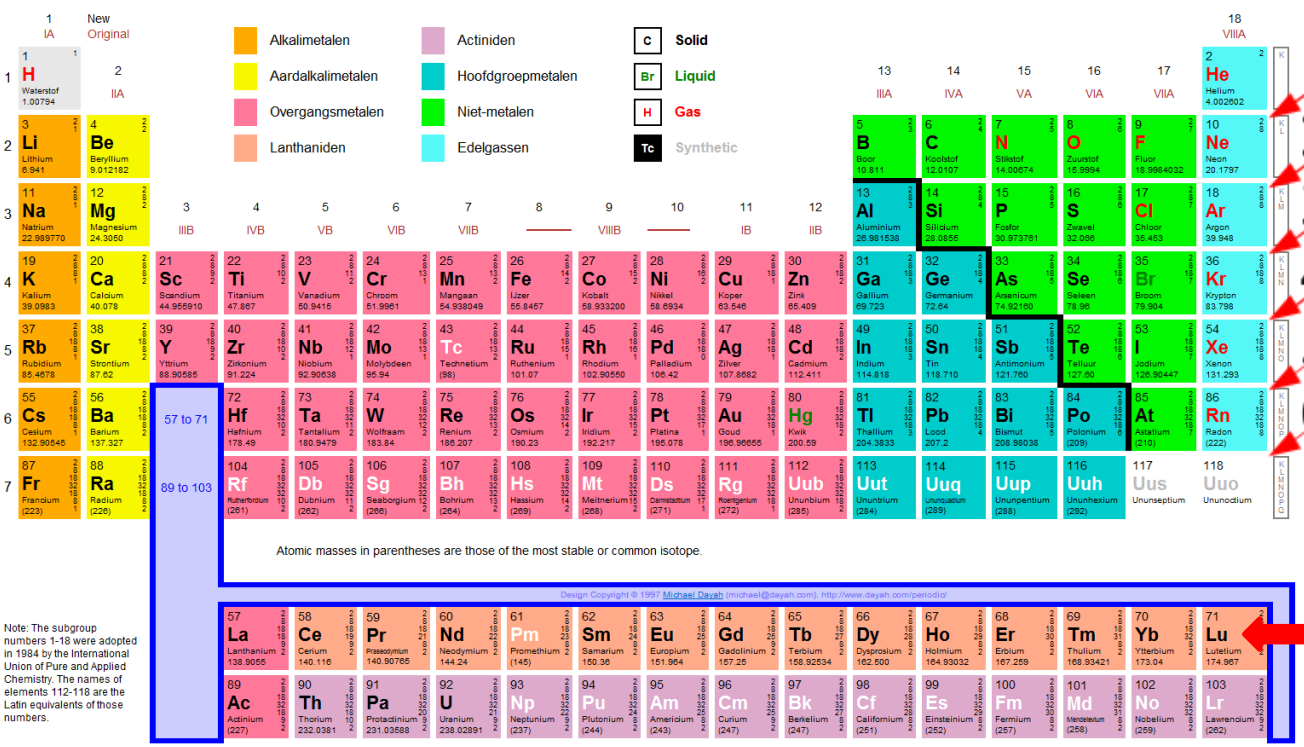
- Inleiding zeldzame aarden
- Toepassingen zeldzame aarden
- Philips, Lampen en Licht
    1. TL-buizen
    2. LED-lampen
    3. Geld
- Conclusies

Zeldzame aarden: Lanthaniden + Sc en Y

Universiteit Utrecht

Lanthaniden afgeleid van het Griekse woord "λανθανειν" wat betekent "verborgen liggen" – verborgen positie onderaan PS:

Periodiek Systeem der Elementen



Opvullen schillen volgens het Afbau principe:

1s
2s 2p
3s 3p 3d
4s 4p 4d 4f
5s 5p 5d 5f …
6s 6p 6d … … …

Ln – 4f binnenschil wordt opgevuld met elektronen

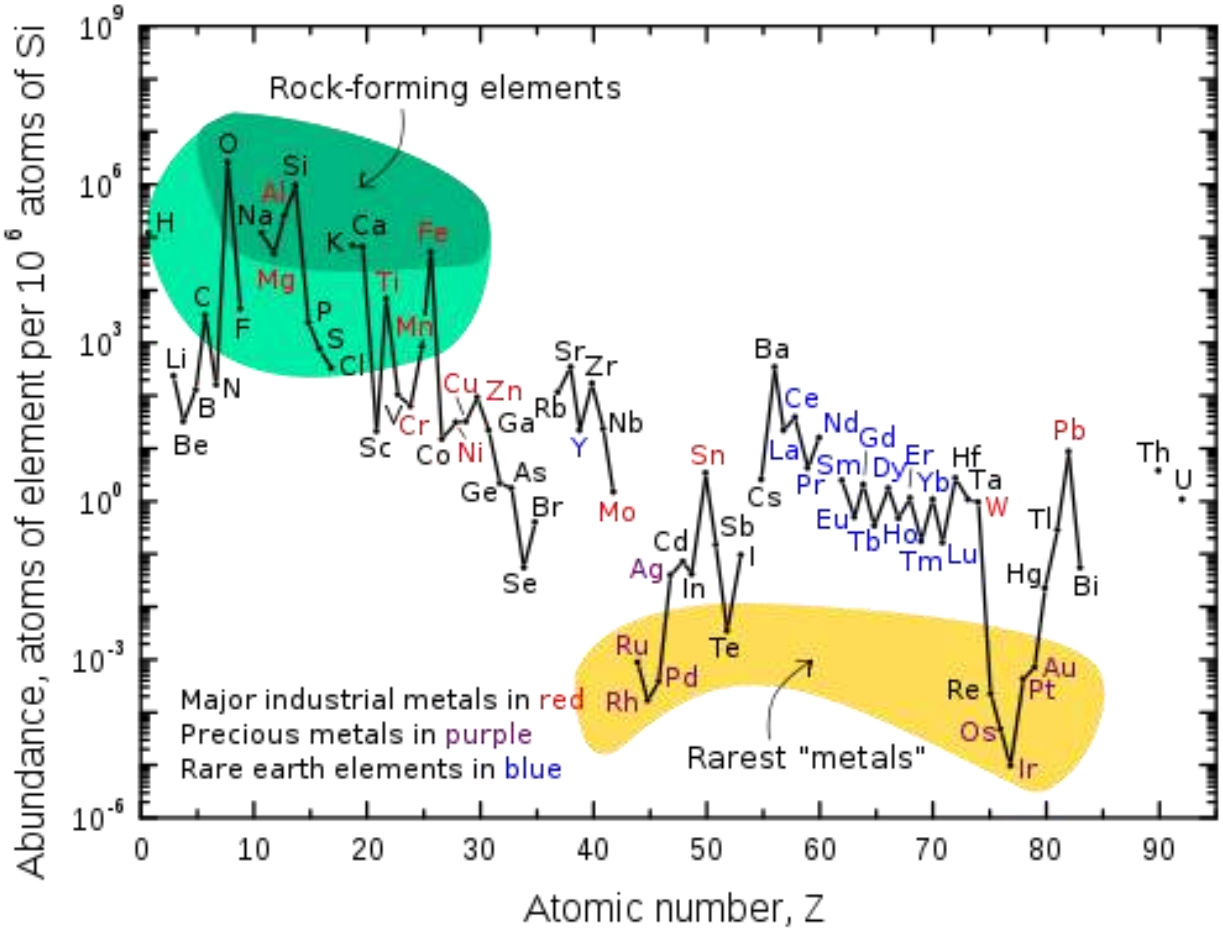
Verborgen elementen?

Sinds kort niet meer:

Snel toenemende high tech toepassingen en Chinese exportbeperkingen hebben zeldzame aarden bekend gemaakt.

Zeldzame elementen?

Al lang niet meer: aanvankelijk werd bij de (late) ontdekking gedacht dat de elementen zeldzaam zijn, maar dat zijn ze niet:



Meest voorkomende:
Ce – nr. 29, 65 ppm

vgl: Cu – 60 ppm,
Zn – 70 ppm

Minst voorkomende:
Tm – nr. 65, 0.2 ppm

Vgl. Ag – 0.08 ppm
Cd - 0.15 ppm
Au - 0.003 ppm

Niet langer verborgen, niet zeldzaam, maar wel **zeldzaam aardig**:

Gedeeltelijk gevulde 4f binnenschil geeft de zeldzame aarden unieke **optische** en **magnetische** eigenschappen

Opvullen 4f-binnenschil: [Xe] $\mathbf{4f^n}5s^2 5p^6$ configuratie met n=0-14.

Voorbeeld: $\mathbf{Tb^{3+}}$ ($4f^8$) – 8 elektronen in 14 mogelijke orbitalen kan op (14 over 8) manieren: 3003 electronen configuraties mogelijk. Laagst-energetische toestand heeft een hoog magnetisch moment doordat de magnetische momenten van de elektronen zoveel mogelijk gelijkgericht zijn:

m_l	-3	-2	-1	0	1	2	3
	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓

Magnetische eigenschappen:

Sterke magneten door groot magnetisch moment van zeldzame aarden en sterke anisotropie door ongepaarde elektronen in 4f binnenschil → sterk paramagnetische centra en hoge remanentie

Probleem: lage Curie temperatuur (T_c) door zwakke interactie tussen 4f orbitalen – ferromagnetisme verdwijnt beneden 300 K.

Oplossing: legeringen met 3d-overgangsmetalen om T_c te verhogen door interactie 3d-4f.

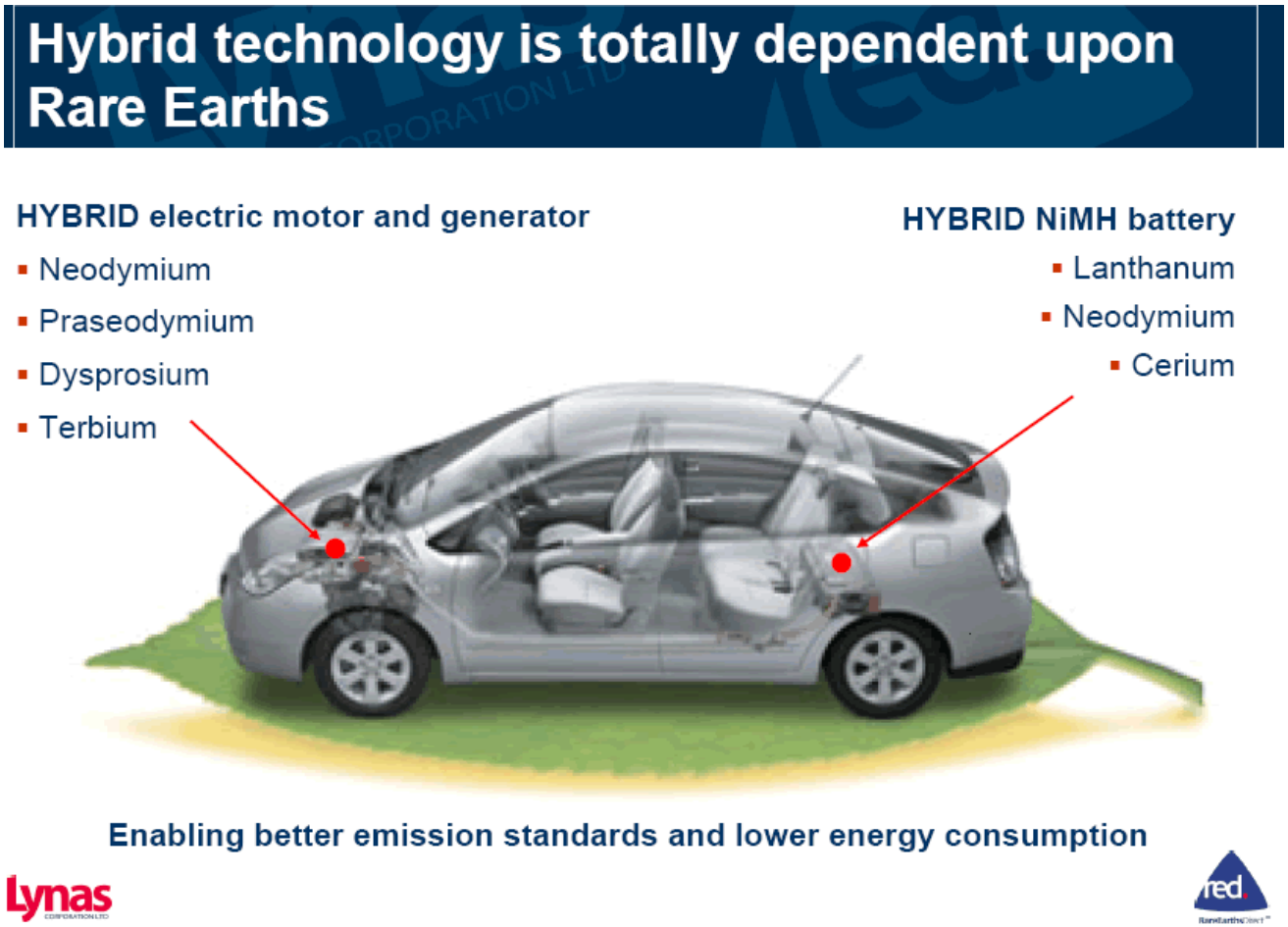
		B_r (T)	T_c (K)
vb.	$SmCo_5$	0.8 – 1.1	600-700
	$Nd_2Fe_{14}B$	1.0 – 1.4	1000
	Fe/Cr/Ni	< 1	400-1000

Invention Nd-Fe magnets: 1982, General Motors

Windmolens

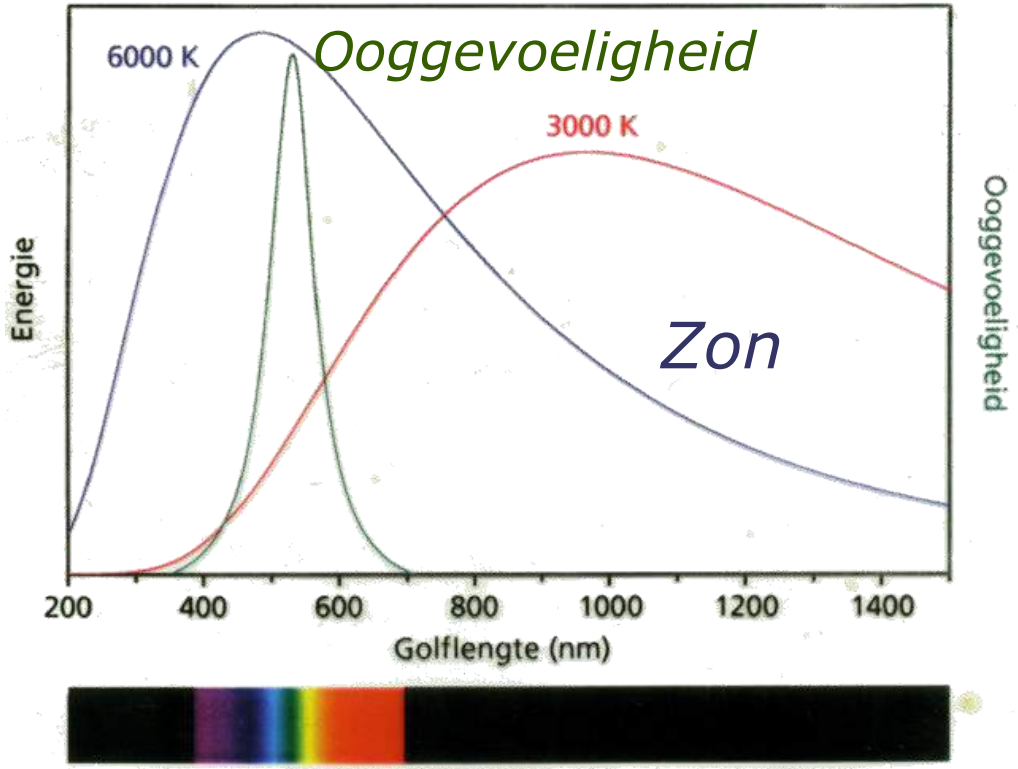
300 kg Nd per windmolen in $Nd_2Fe_{14}B$ magneten

Hybride auto's



Toyota Prius: 1 kg Nd in magneten elektromotor, 10 kg La in batterij

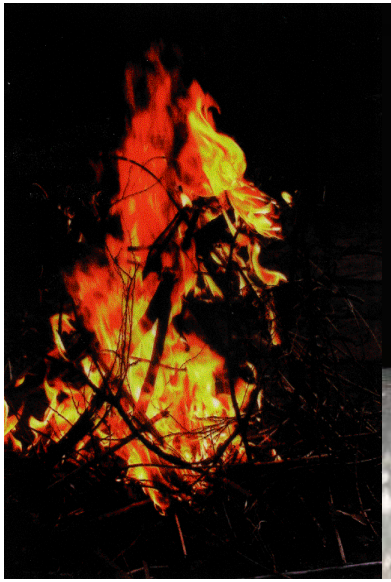
Philips, Lampen en Licht



Geschiedenis verlichting

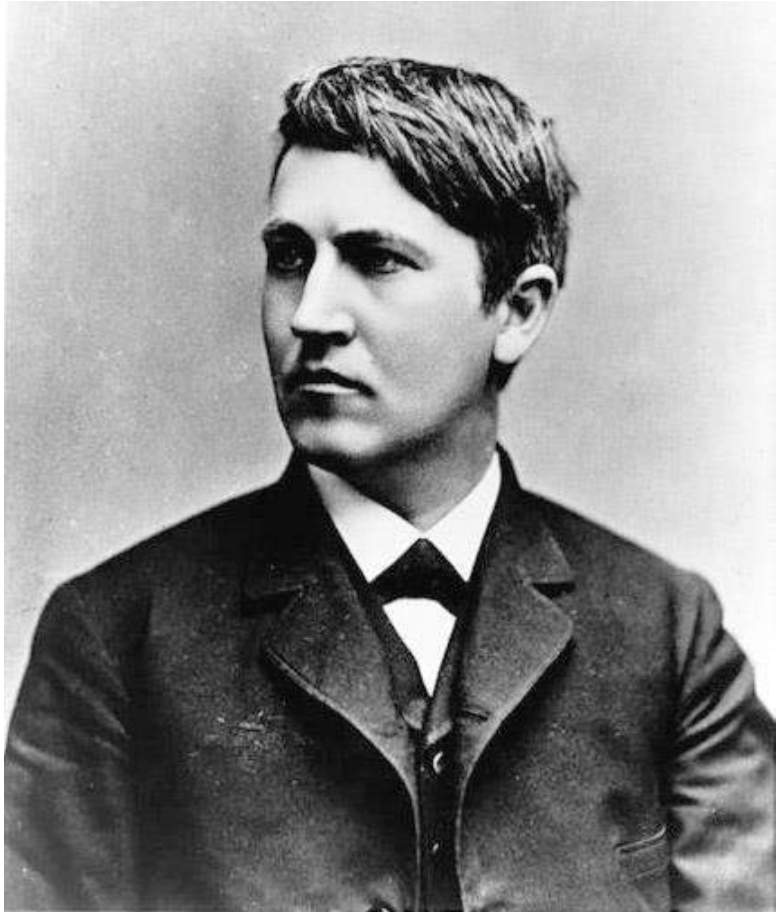
Universiteit Utrecht

790 000 BC	2 000 BC	200 BC	1792 AD	1809 AD
Fire	Oil lamp	Candle	Gas lamp	C-Arc lamp



Energie efficiëntie < 1 %

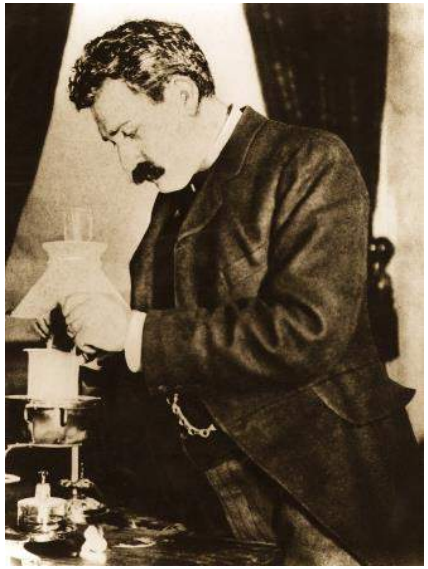
1879: Gloeilamp van Edison

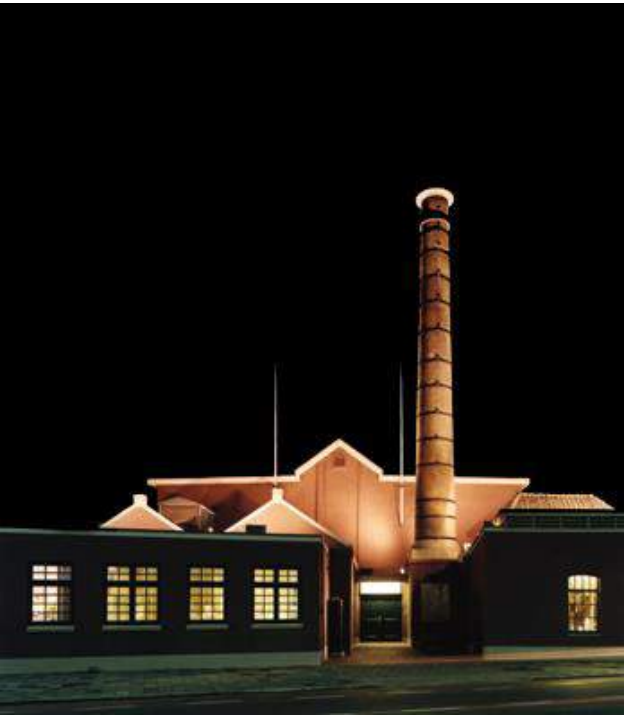


Electriciteit → licht ; Energie efficiëntie ~2-3 %

1891: Gloeilamp van Philips

1891

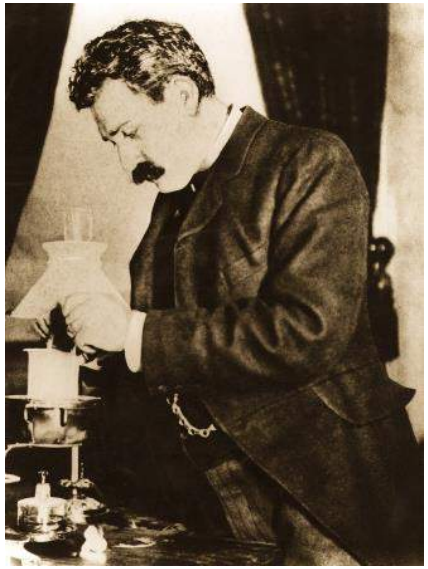




1891 Fabriek - nu museum

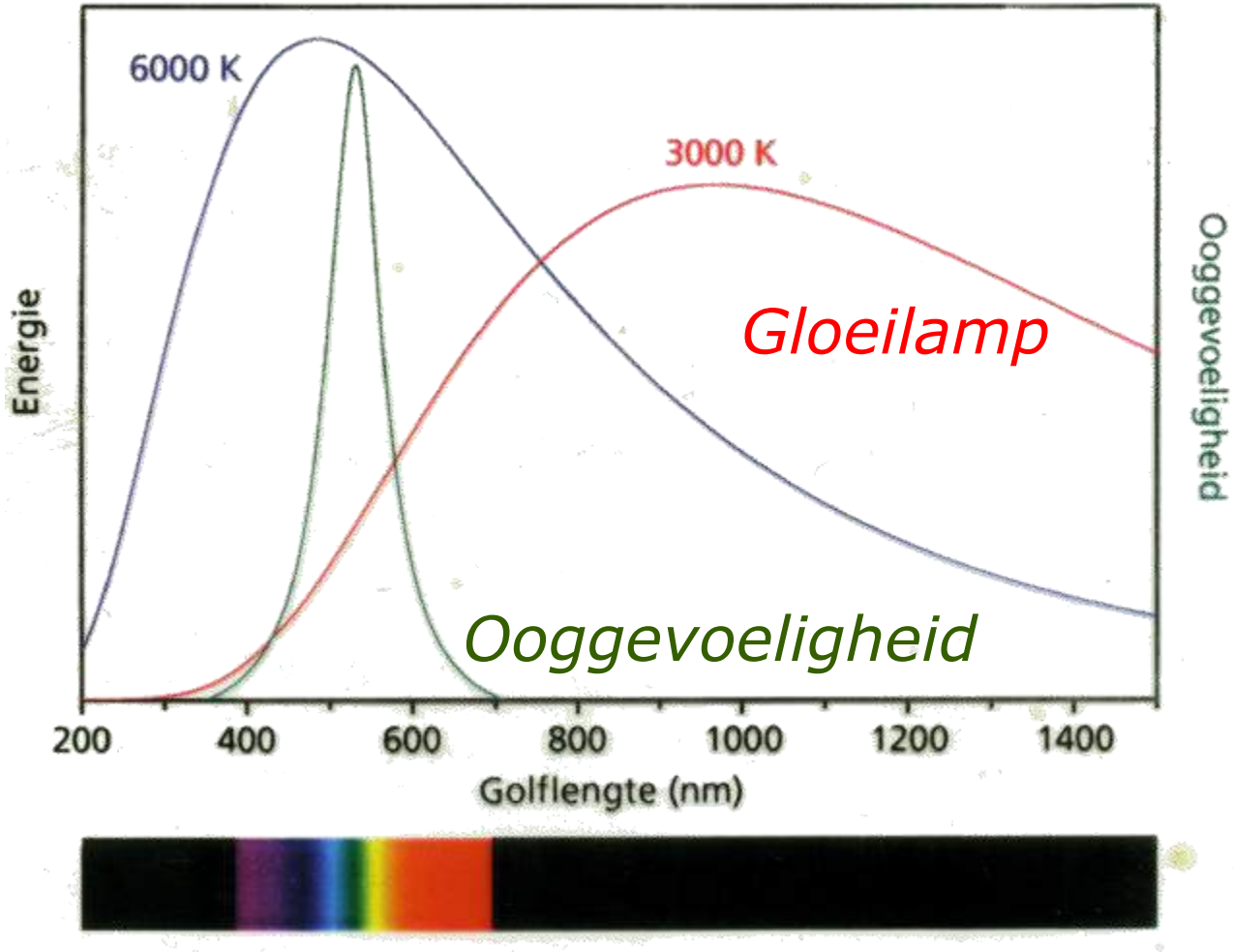
1891: Gloeilamp van Philips

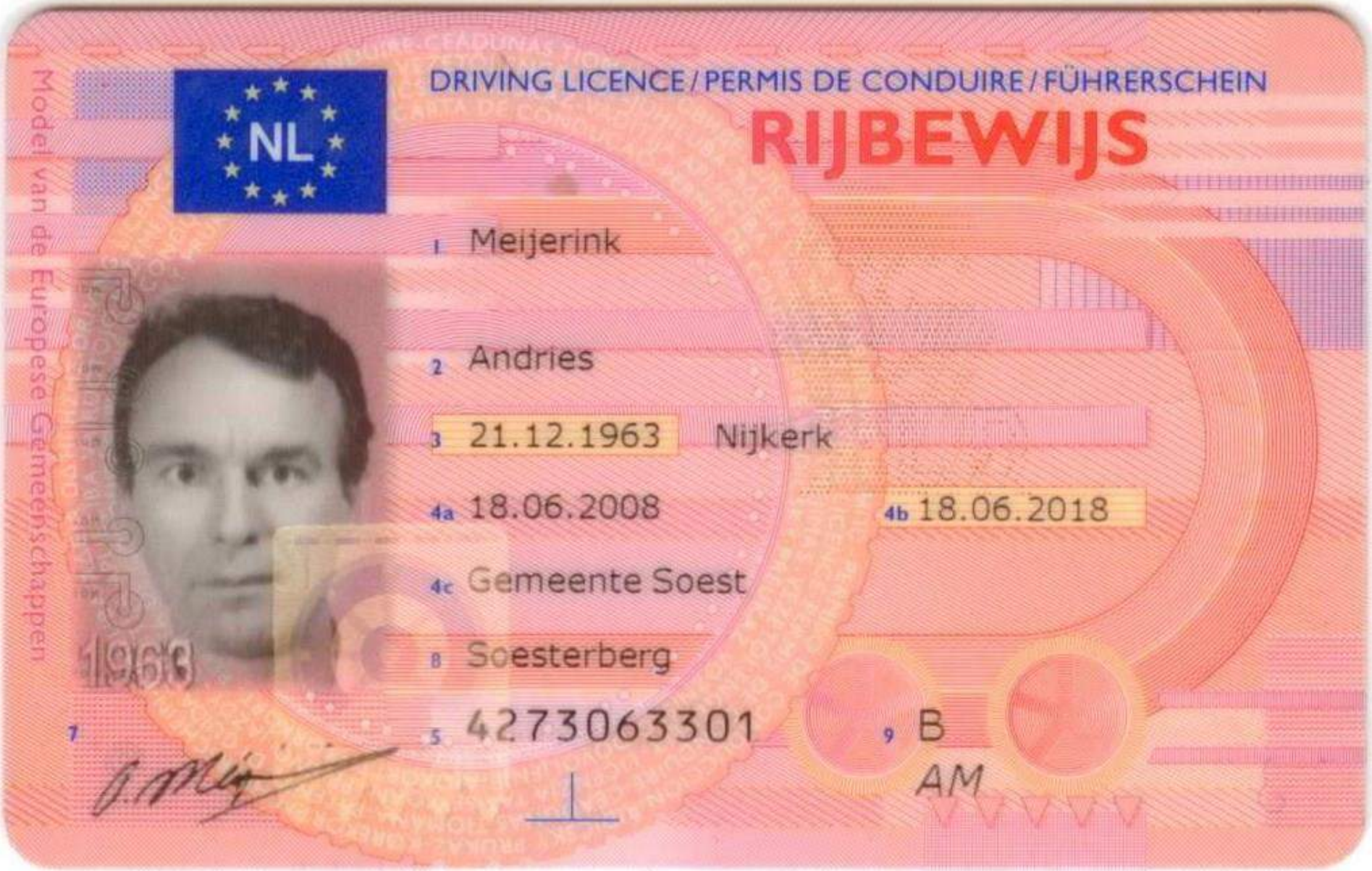
2010



1891 Fabriek – nu museum

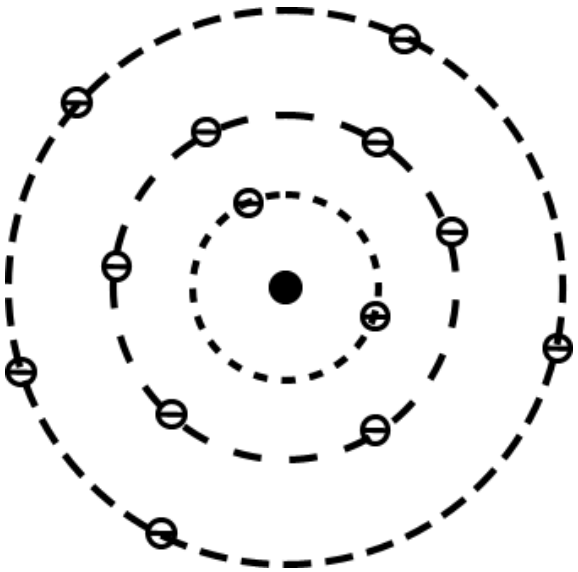
Zwarte straler: gloeilamp

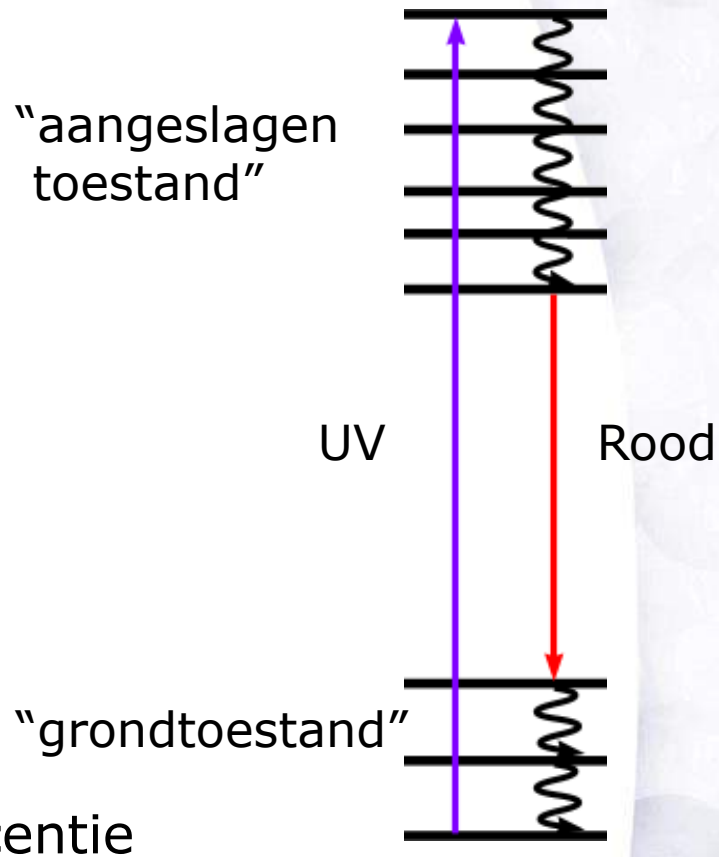



Model van de Europese Gemeenschappen
NL
DRIVING LICENCE / PERMIS DE CONDUIRE / FÜHRERSCHEIN
RIJBEWIJS
1 Meijerink
2 Andries
3 21.12.1963 Nijkerk
4a 18.06.2008
4b 18.06.2018
4c Gemeente Soest
8 Soesterberg
5 4273063301
9 B
AM

Luminescentie

Uitzenden van zichtbaar licht onder invloed van externe stimulatie, anders dan zwarte straler, ‘koud licht’





Luminescentie = fosforescentie+fluorescentie
Luminescerend materiaal = fosfor

Licht-emitterende elementen in Periodiek Systeem

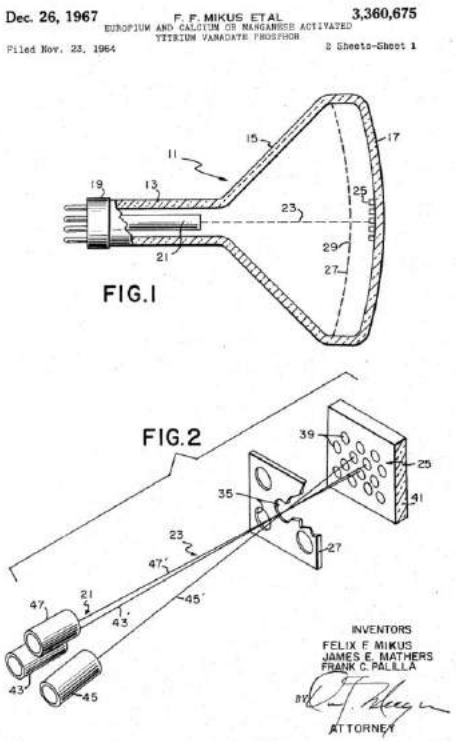
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Zeldzame aarden – kampioen onder de ‘activatoren’

☐ activator elements

Hoe het begon:



Dec. 26, 1967 F. F. MIKUS ETAL 3,360,675
EUROPIUM AND CALCIUM OR MANGANESE ACTIVATED YTTRIUM VANADATE PHOSPHOR
Filed Nov. 23, 1964 2 Sheets-Sheet 1

FIG.1

FIG.2

INVENTORS
FELIX F MIKUS
JAMES E. MATHERS
FRANK C. PALILLA
BY
ATTORNEY

1964 - YVO_4:**Eu^{3+}** rode fosfor voor kleuren TV

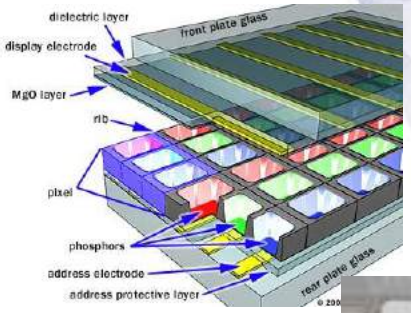
Begin van toepassing Zeldzame Aarden voor verlichting

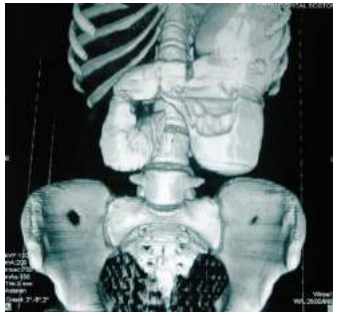
Philips: George Blasse van magneten naar ZA-luminescentie

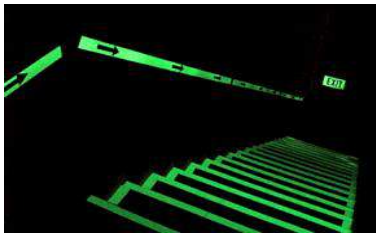
Toepassingen luminescentie zeldzame aarden:

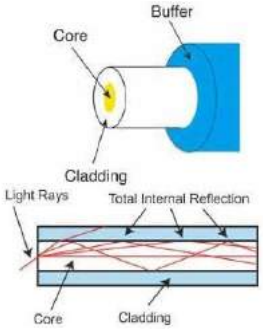
Universiteit Utrecht

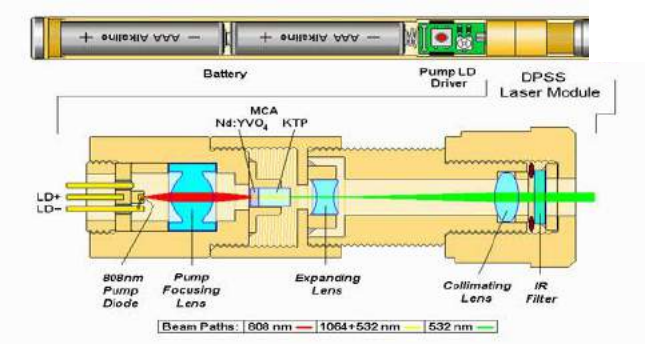
1. TL-buizen en spaarlampen
2. Witte LED-lampen
3. Beeldschermen (PDP, LCD)
4. Scintillatoren, Röntgenfotografie
5. Nalichtende materialen
6. Lasers, fiber versterkers (data transport)
7. Zonnecellen
8. Geld

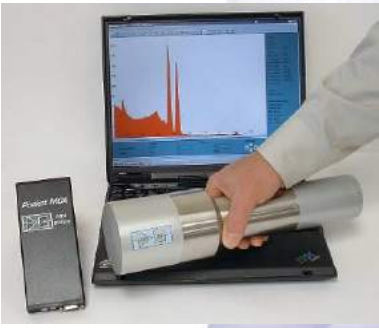




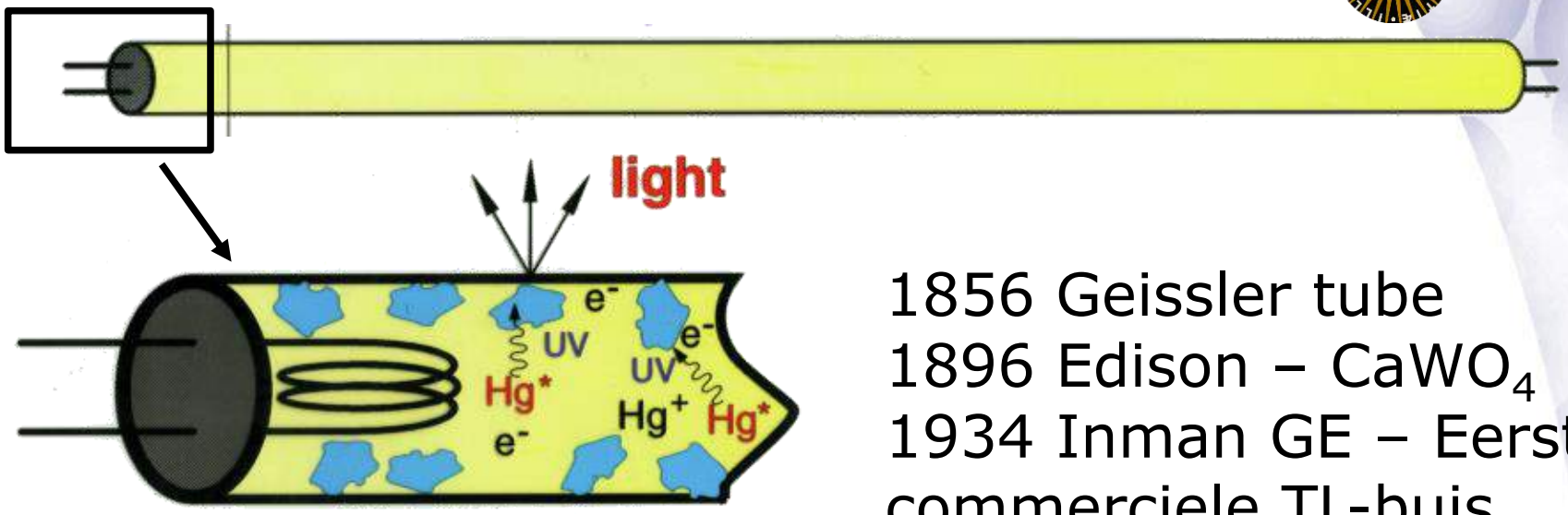








Fluorescent tube



1856 Geissler tube
1896 Edison – $CaWO_4$
1934 Inman GE – Eerste commerciele TL-buis

Eerste commerciële lampfosforen:

$MgWO_4$
$(Zn,Be)_2SiO_4$:**Mn^{2+}**

1948: $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl)$: **Sb^{3+}, Mn^{2+}**

1974, Journal of the Electrochemical Society:

A New Generation of "Deluxe" Fluorescent Lamps, Combining an Efficacy of 80 Lumens/W or More with a Color Rendering Index of Approximately 85

J. M. P. J. Verstegen, D. Radielović, and L. E. Vrenken

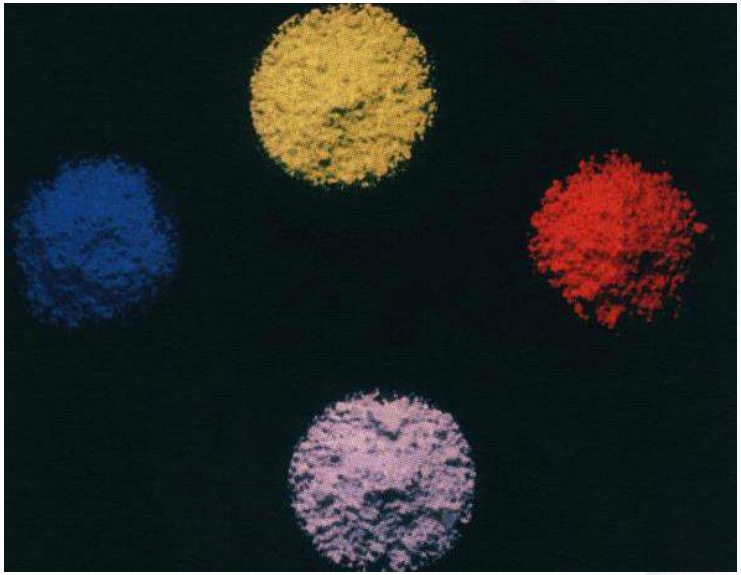
N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Light Division, Eindhoven, The Netherlands

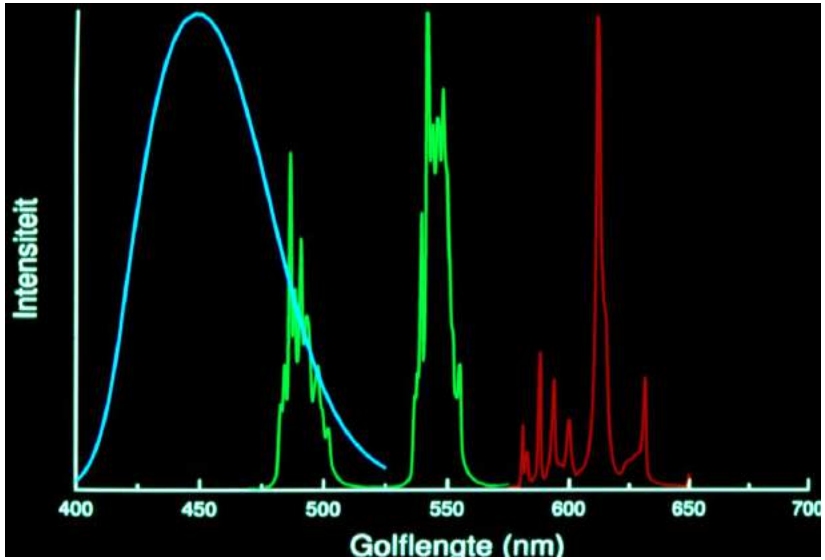
ABSTRACT

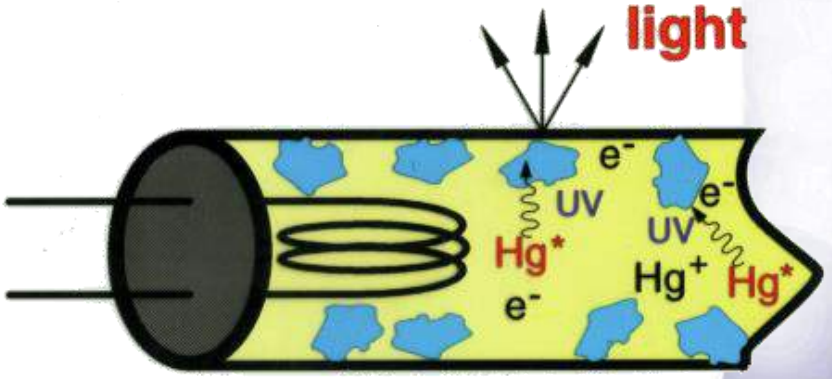
It has been shown previously that color-rendering capability and luminous efficacy of fluorescent lamps depend on the spectral composition of the emitted light. Three spectral regions appear to be of special interest, the blue at 450 nm, the green at 540 nm, and the orange-red at 610 nm. Among the hexagonal aluminates blue-emitting $(Ba,Eu)Mg_2Al_{16}O_{27}$ and green-emitting $(Ce,Tb)MgAl_{11}O_{19}$, together with orange-red-emitting $(Y,Eu)_2O_3$ are particularly suited in a new generation "deluxe" fluorescent lamps. Lamps with a color temperature >2350°K can be made. The efficacy of the lamps ranks from approximately 82 lm/W at 3000°K to 80 lm/W at 6000°K. The color-rendering index R_a is 81-85. A small increase of R_a is achieved when Mn^{2+} is incorporated in $(Ba,Eu)Mg_2Al_{16}O_{27}$, giving rise to an additional green emission at 515 nm. The new blend is compared to other blends and further prospects in fluorescent lamp developments are outlined.

Fosforen in de TL-buis

- Y_2O_3:**Eu^{3+}**
- $LaPO_4$:Ce^{3+},**Tb^{3+}**
- $BaMg_2Al_{16}O_{27}$:**Eu^{2+}**

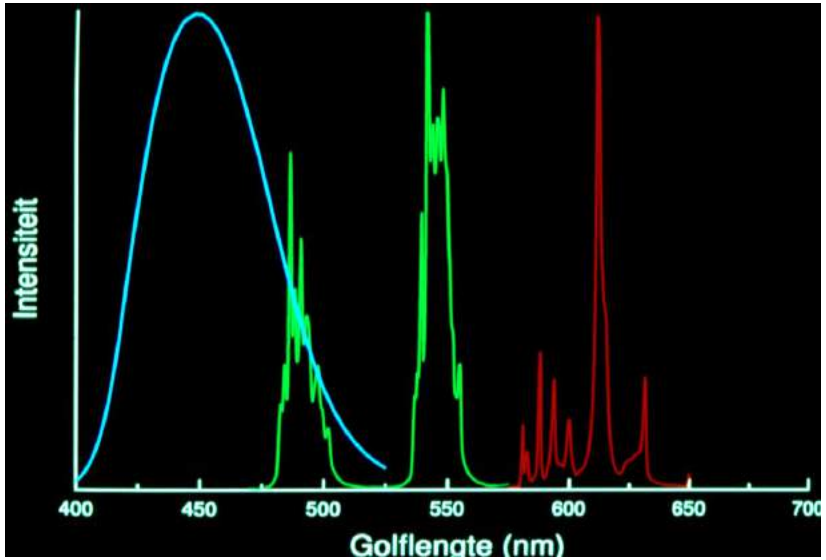






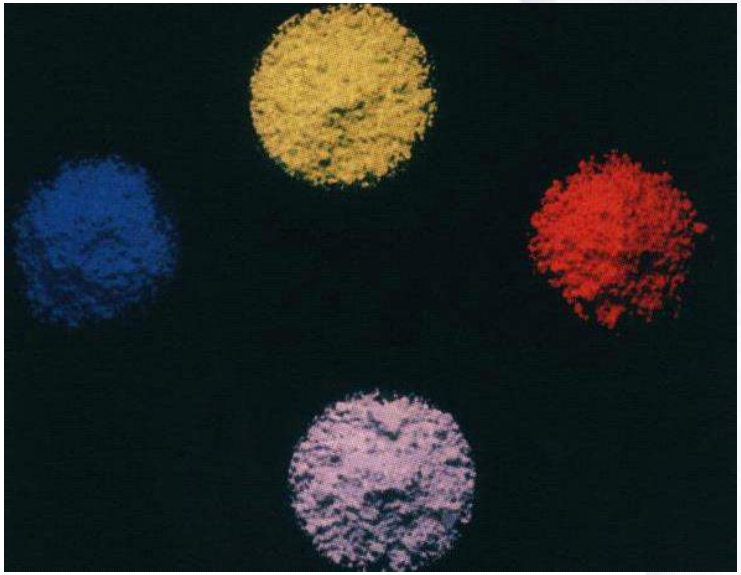
Fosforen in de TL-buis

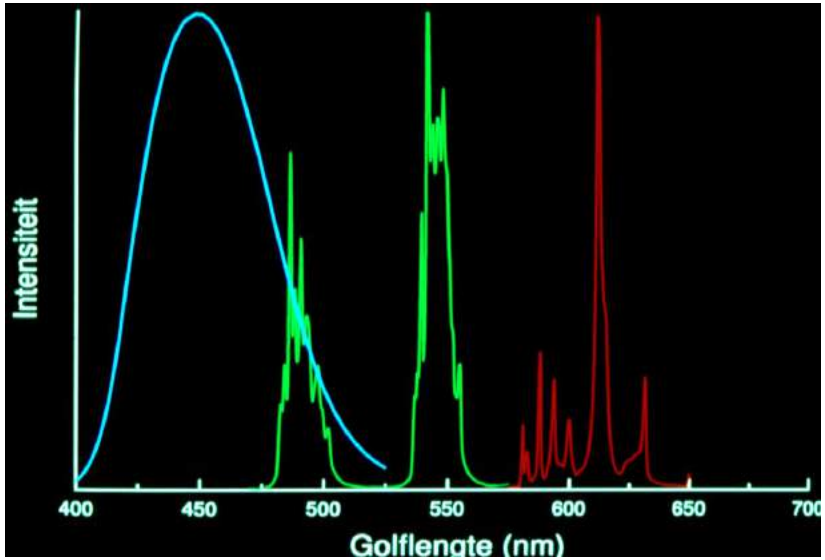
- Y_2O_3:**Eu^{3+}**
- $LaPO_4$:Ce^{3+},**Tb^{3+}**
- $BaMg_2Al_{16}O_{27}$:**Eu^{2+}**



Fosforen in de TL-buis

- Y_2O_3:**Eu^{3+}**
- $LaPO_4$:Ce^{3+},**Tb^{3+}**
- $BaMg_2Al_{16}O_{27}$:**Eu^{2+}**





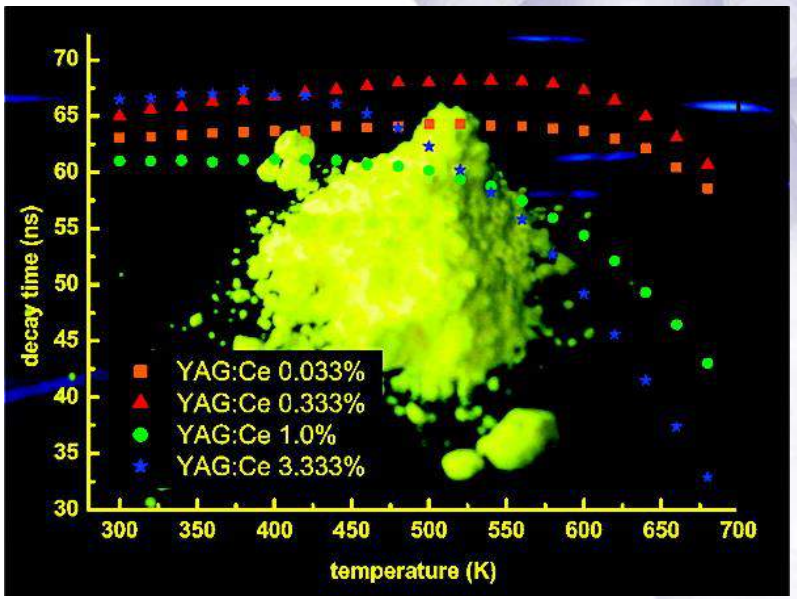
1939!

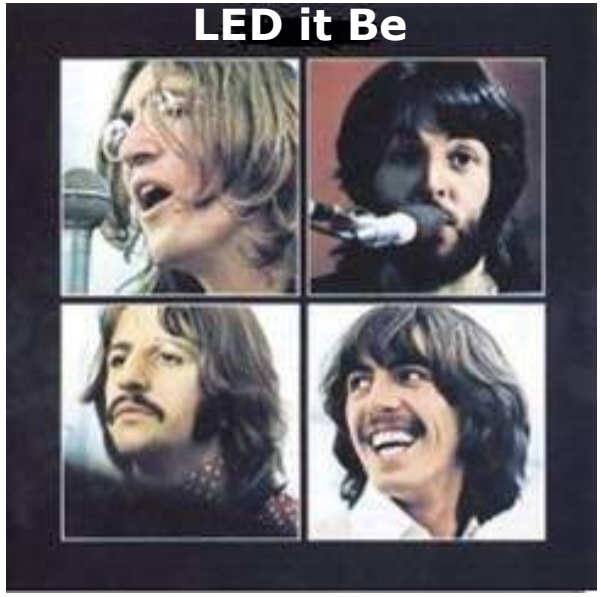
Vers of niet....?

Speciale TL-buizen met veel $Y_2O_3:Eu^{3+}$ laten brood en vlees er vers en mooi rood uitzien

2. Witte LED lampen:

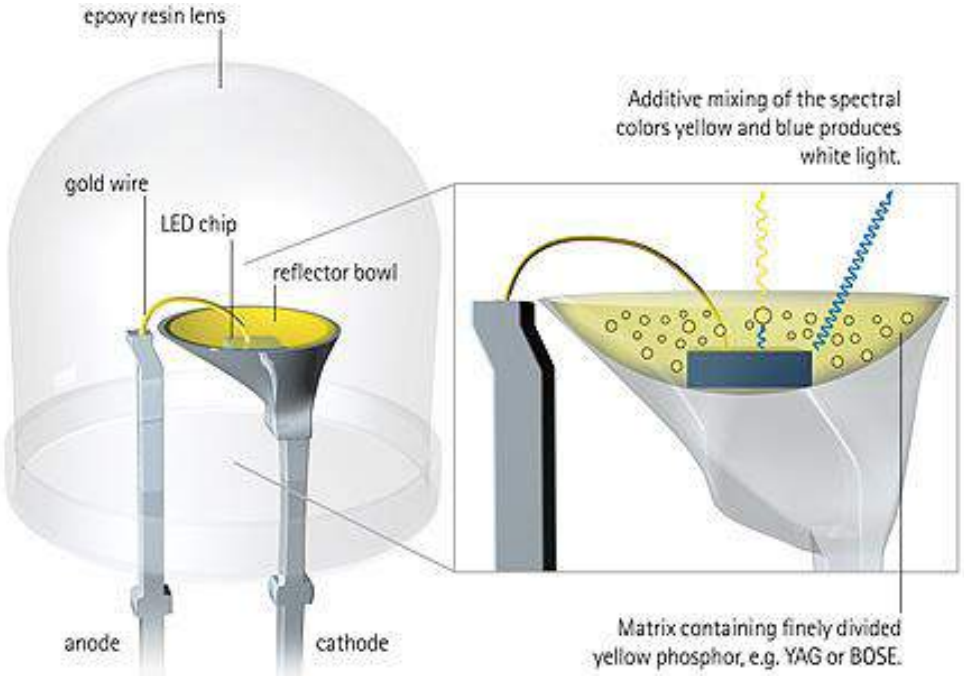
‘LED it Be’

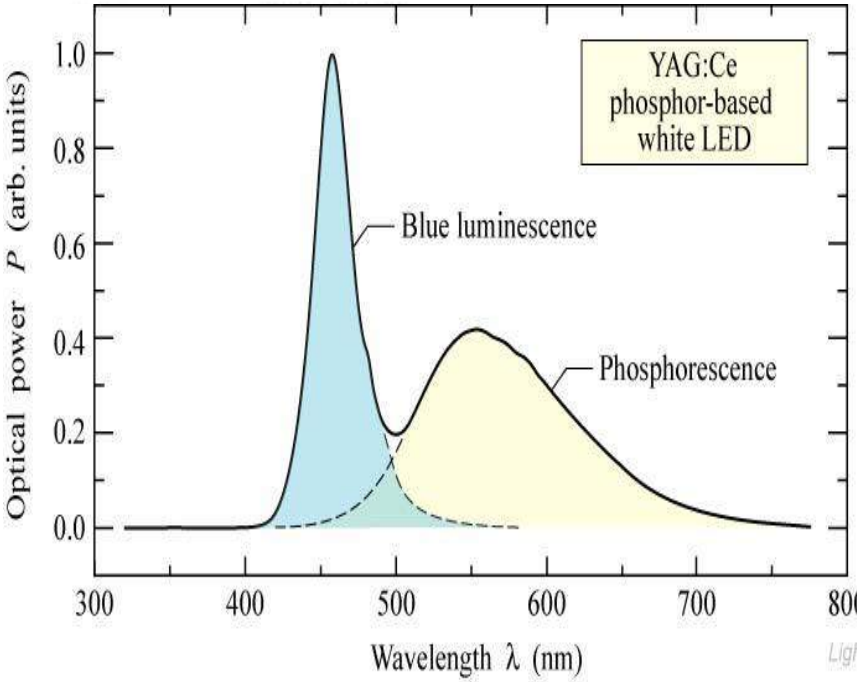




1991: Ontdekking UV/Blauwe LED (In,Ga)N door Nakamura (Nichia, Japan)

Witte LED lamp: (LED) Blauw+Geel - fosfor YAG:Ce^{3+}

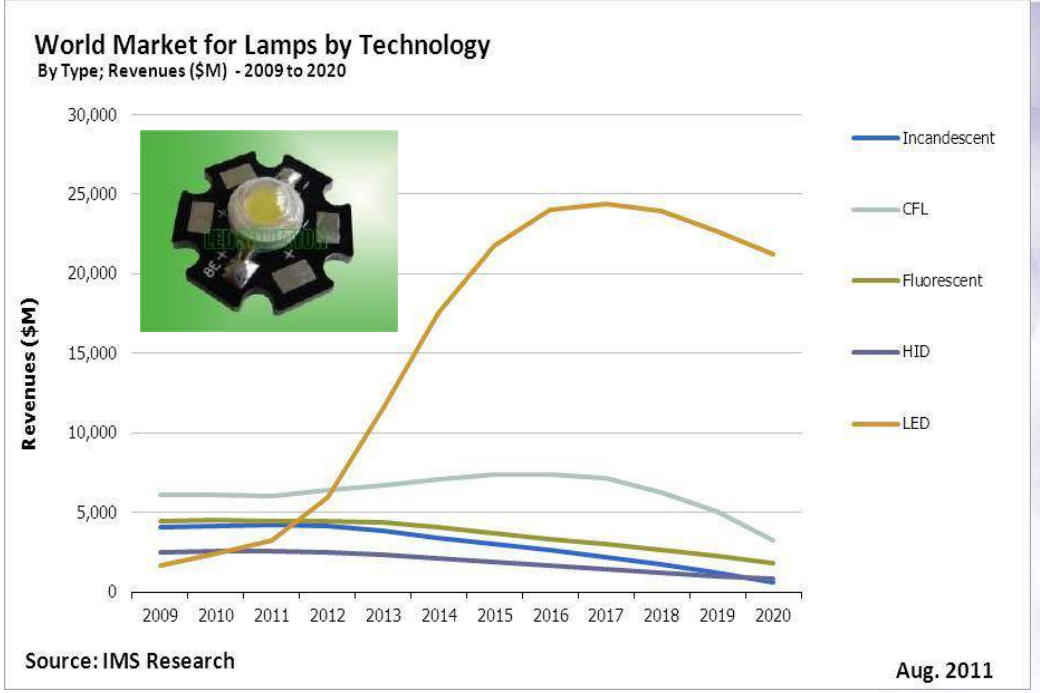




Witte LEDs:
- Efficiënt > 50 lm/W
- Levensduur > 30 000 h

Doorbraak: LEDs voor huiskamerverlichting

‘Revolution in lighting’

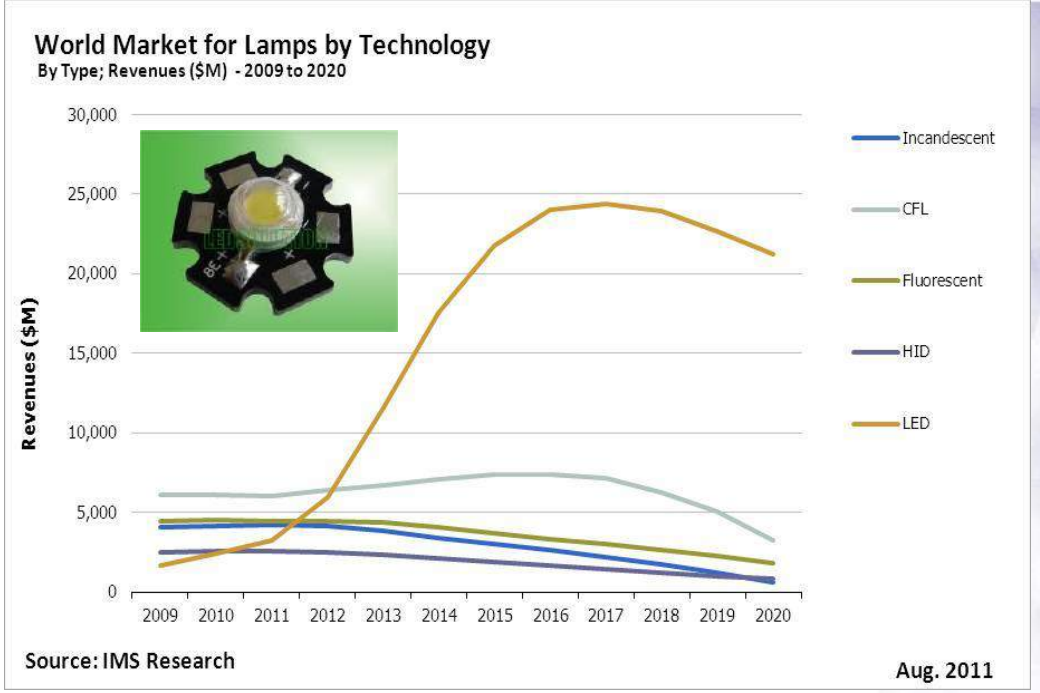


‘Shine until tomorrow, LED it be’

Witte LEDs:
- Efficiënt > 50 lm/W
- Levensduur > 30 000 h

Doorbraak: LEDs voor huiskamerverlichting

'Revolution in lighting'



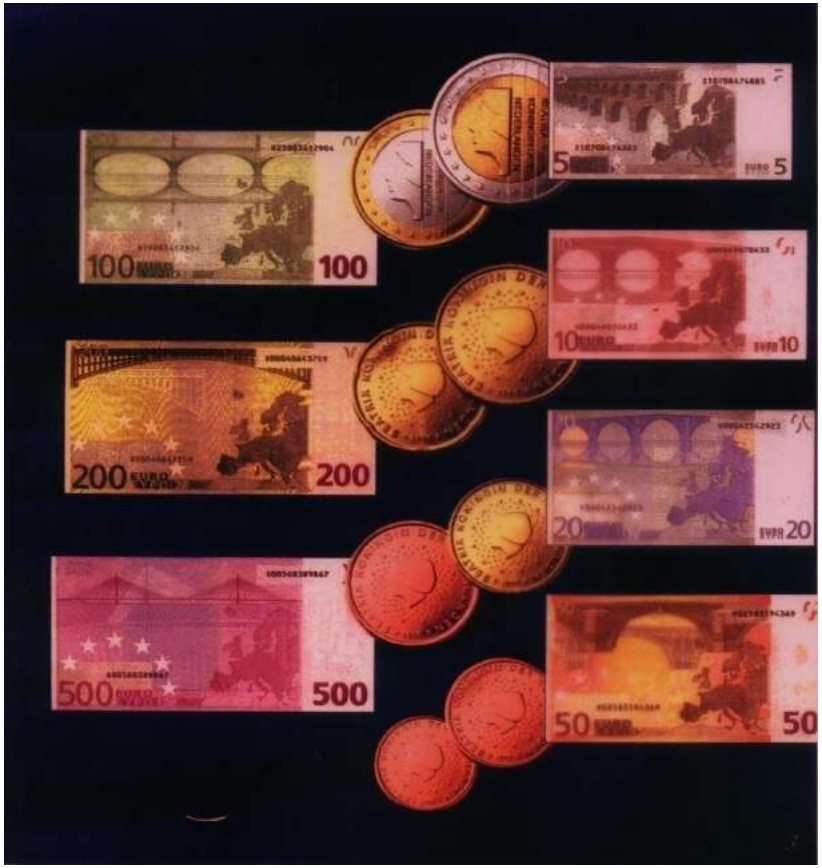
'Shine until tomorrow, LED it be'

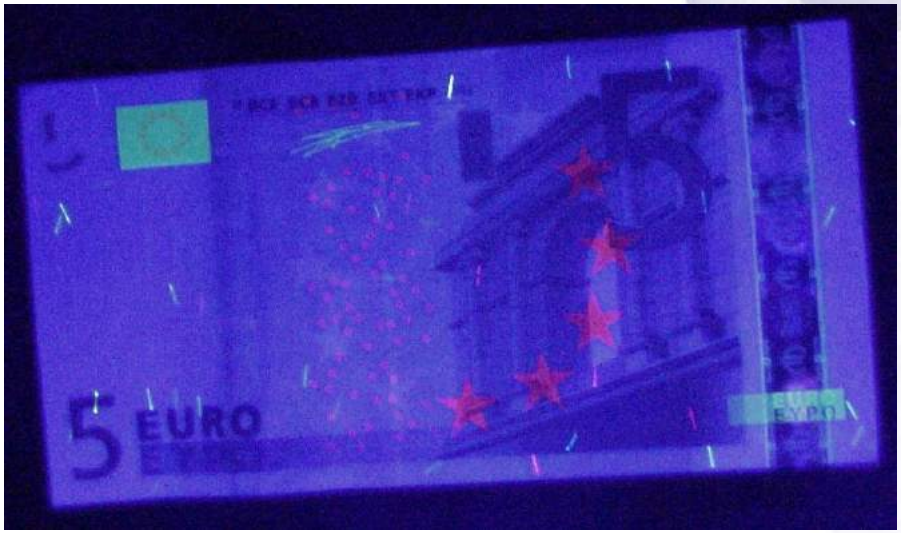
A NEW PHOSPHOR FOR FLYING-SPOT CATHODE-RAY TUBES FOR COLOR TELEVISION: YELLOW-EMITTING $Y_3Al_5O_{12}-Ce^{3+}$

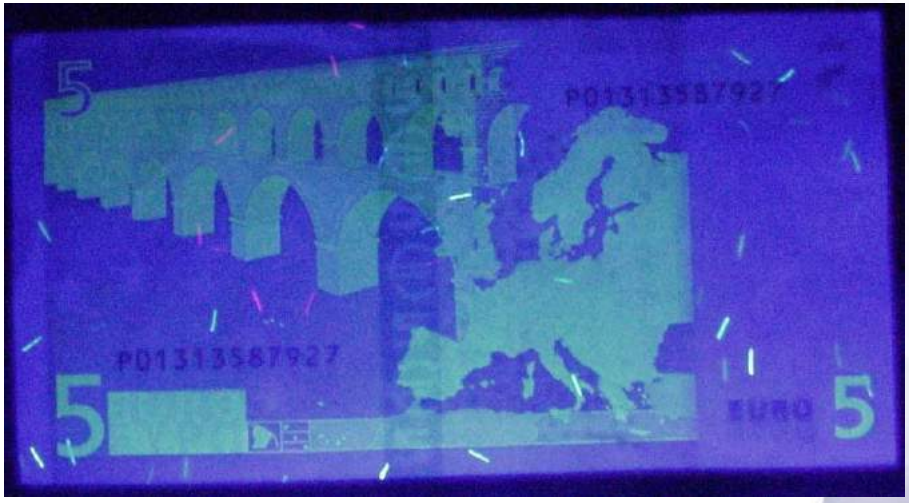
G. Blasse and A. Bril
Philips Research Laboratories
N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken
Eindhoven, The Netherlands
(Received 29 May 1967)

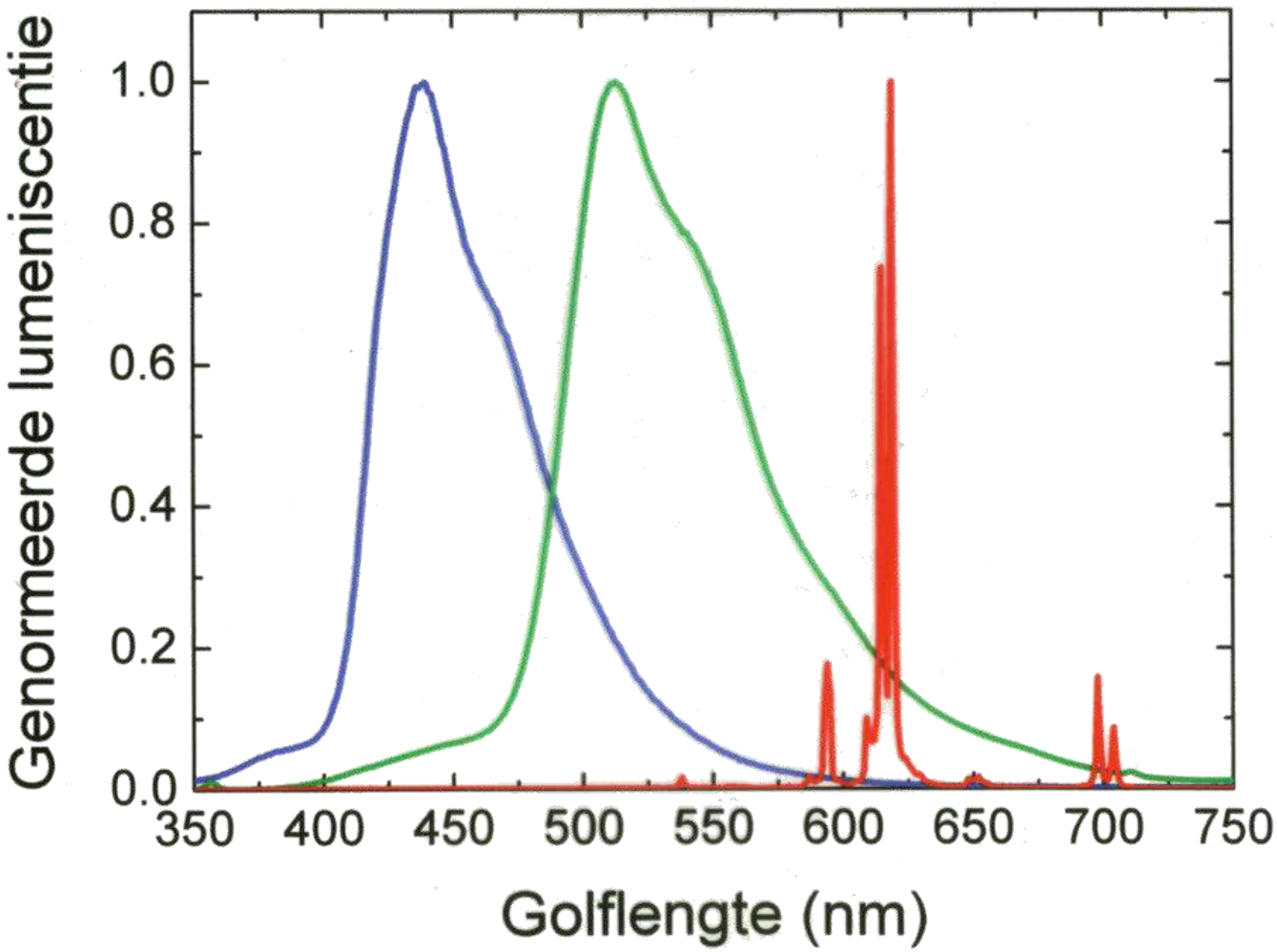
The fluorescence of $Y_3Al_5O_{12}-Ce^{3+}$ under cathode-ray excitation consists of an emission band peaking at 550 nm. The decay time is 0.07–0.08 μsec. In view of these properties this phosphor is very suitable for flying-spot cathode-ray tubes for color television.

3. Geld


100
100
200
200
500
500
10
10
20
20
50
50
5


5 EURO


P01313587927
5
EURO 5



Emissiespectra rode, groene, blauwe fibers en rode sterren in Euro-biljetten

EURO

€UROPIUM BEVEILIGT DE €URO

Onderzoekers uit Utrecht hebben het vijf €uro-biljet tegen het UV-licht gehouden en een aantal opvallende zaken ontdekt. De luminescentie bleek veroorzaakt door verbindingen die europium bevatten. Een stof die wel erg bekend voorkwam.

Freek Suyver en Andries Meijerink, Faculteit Scheikunde, Debye Instituut, Universiteit Utrecht

De euro is van ons allemaal! Het is vrijwel onmogelijk om niet op de hoogte te zijn van de grootste monetaire operatie ooit. Bij de introductie van de nieuwe biljetten is veel aandacht besteed aan de beveiliging. Vervalsen van de €uro-biljetten is niet eenvoudig onder andere door reliëfdruk, watermerk en hologrammen. De echtheid kan worden vastgesteld door: voel, kijk en kantel. Niet iedereen weet dat de €uro-biljetten als extra beveiliging ook luminescerende materialen bevatten. Onder UV-bestraling zien we direct dat een €uro-biljet oplicht in drie kleuren: rood, groen en blauw. Dit licht wordt opgewekt in vezeltjes in het papier. Daarnaast blijkt ook een deel van de 'gewone' drukinkt te luminesceren. Met behulp van luminescentiemetingen hebben wij geprobeerd te achterhalen welke luminescerende materialen (fosforen genaamd) verantwoordelijk zijn voor deze luminescentie.

BEKENDE FOSFOR. Het is niet mogelijk om alleen op basis van het emissiespectrum te bepalen welke verbinding verantwoordelijk moet zijn voor die emissie. Meestal is er meer dan één mogelijkheid. Daarom worden van een luminescerende stof niet alleen emissiespectra maar ook excitatiespectra opgenomen. Een excitatiespectrum toont de intensiteit van de emissie gemeten als functie van de golflengte van de exciterende straling. Het spectrum geeft informatie over de energie van verschillende aangeslagen toestanden die relaxeren naar de lichtemitterende (laagste) aangeslagen toestand. Verder is ook de luminescentielevensduur bepaald. Dit is de tijd waarin de intensiteit van de emissie terugvalt naar 1/e van de beginintensiteit na afbrop van een excitatiepuls. Door de emissie- en excitatiespectra en de levensduur van een fosfor te vergelijken met die van bekende materialen, kan meestal een goed idee verkregen worden over de aard van de fosfor.

De emissiespectra van de drie verschillende vezels in een € 5,- biljet gaven direct aan dat er met het rode licht iets bijzonders aan de hand is. Deze emissie bestaat uit scherpe lijnen. Lijnemissie is karakteristiek voor overgangen binnen de 4f-schil van zeldzame aardionen. Uit de posities van de pieken is het voor een ingewijde direct duidelijk dat de emissie afkomstig is van driewaardig europium (Eu^{3+}). Dezelfde rode europiumemissie wordt ook gebruikt in TL-buizen en kleurentelevisies. Op basis van de extra informatie uit het excitatiespectrum en de levensduur (0.36 ms) is het waarschijnlijk dat het hier een Eu^{3+}-β-diketone complex betreft, waarin het Eu^{3+}-ion geoördineerd wordt door drie O=C–(CH_2)–C=O groepen.

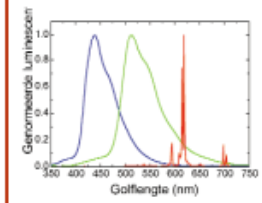
STABILITEIT. De groene en blauwe emissie zijn lastiger te identificeren omdat het een (minder karakteristieke) breedband-emissie betreft. De emissie zou van een organische kleurstof afkomstig kunnen zijn zoals die in de inkt van fluorescerende stiften gebruikt wordt. Een nadeel van luminescerende moleculen is echter de geringe stabiliteit. Omdat bankbiljetten lang mee moeten gaan is het waarschijnlijk dat ook de groene en blauwe emissie van een anorganische verbinding komen. Een goede mogelijkheid voor groen is $SrGa_2S_4$ gedoteerd met Eu^{2+}. In dit materiaal zorgt de overgang van een elektron uit de 5d- naar de 4f-schil van tweewaardig europium voor een brede emissieband. De fosfor $SrGa_2S_4$:Eu^{2+} is bekend vanwege de toepassing in groene 'licht emitterende diodes' (LED's). De emissie- en excitatiespectra en luminescentielevensduur van deze fosfor komen goed overeen met de karakteristieken van de groene vezels. De 'dubbele piek' die in het emissiespectrum te zien is wordt veroorzaakt doordat er twee verschillende posities zijn voor Eu^{2+} in het $SrGa_2S_4$-kristal. De golflengte van de emissie van Eu^{2+} is gevoelig voor de omgeving en daarom ontstaat er Eu^{2+}-emissie bij een iets verschillende golflengte.

Het lastigst is de blauwe vezel omdat er veel materialen zijn die blauw licht uitzenden (ook het papier zelf geeft een zwakke blauwpaarse emissie). We verdenken de €uro-beveiligers ervan dat ze het zeer toepasselijk vonden om europium te gebruiken voor de €uro en daarom ook voor de blauwe fosfor een europiumemissie gebruikt hebben. Wederom zit er veel informatie in het excitatiespectrum en de levensduur. Een goede kandidaat voor de blauwe fosfor is $(BaO)x{\cdot}6Al_2O_3$:Eu^{2+}. Bij de synthese van dit materiaal worden zowel een fase met x = 0.83 als één met x = 1.29 gevormd. De fasen met verschillende waarden voor x geven Eu^{2+}-emissies bij een iets verschillende golflengte, zoals in het emissiespectrum te zien is. Emissie- en excitatiespectra zoals die in de literatuur gepubliceerd zijn komen zeer goed overeen met de door ons gemeten spectra, evenals de korte (sub-microseconde) levensduur van de emissie. Deze blauwe fosfor is overigens nauw verwant aan de blauwe fosfor die in TL-buizen gebruikt wordt om samen met de rode en groene fosfor wit licht te maken.

NEDERLANDSE BANK. Op basis van de luminescentiemetingen hebben we een goed idee gekregen van de luminescerende materialen die de biljetten zo mooi doen oplichten onder een UV-lamp. Eigenlijk hadden we van tevoren wel kunnen bedenken dat een ion met een naam als europium hiervoor verantwoordelijk moest zijn. Om onze antwoorden op hun juistheid te controleren hebben we contact opgenomen met de Nederlandse Bank. Na enige telefoontjes belde een met beveiliging van bankbiljetten belaste onderzoeker op. Het bleek geen onbekende. Enige jaren geleden bezocht hij samen met een collega onze groep, waarbij wij hem zeer veel informatie over luminescerende materialen konden verstrekken. Niet geheel onverwacht kon hij ons niet veel informatie geven. Welke fosforen gebruikt worden voor de beveiligh van de €uro-biljetten is geheim en alleen de direct betrokken onderzoekers zullen weten of onze speurtocht tot een juiste identificatie van de fosforen heeft geleid. Voor een verdere analyse van de samenstelling van de fosforen zijn veelal destructieve technieken vereist en stukmaken van bankbiljetten is verboden, evenals namaken. ◆

We willen Cees Ronde, Celso de Mello Donega en Marieke van Veen bedanken voor hun hulp en suggesties bij het schrijven van dit artikel.

EMISSIESPECTRA



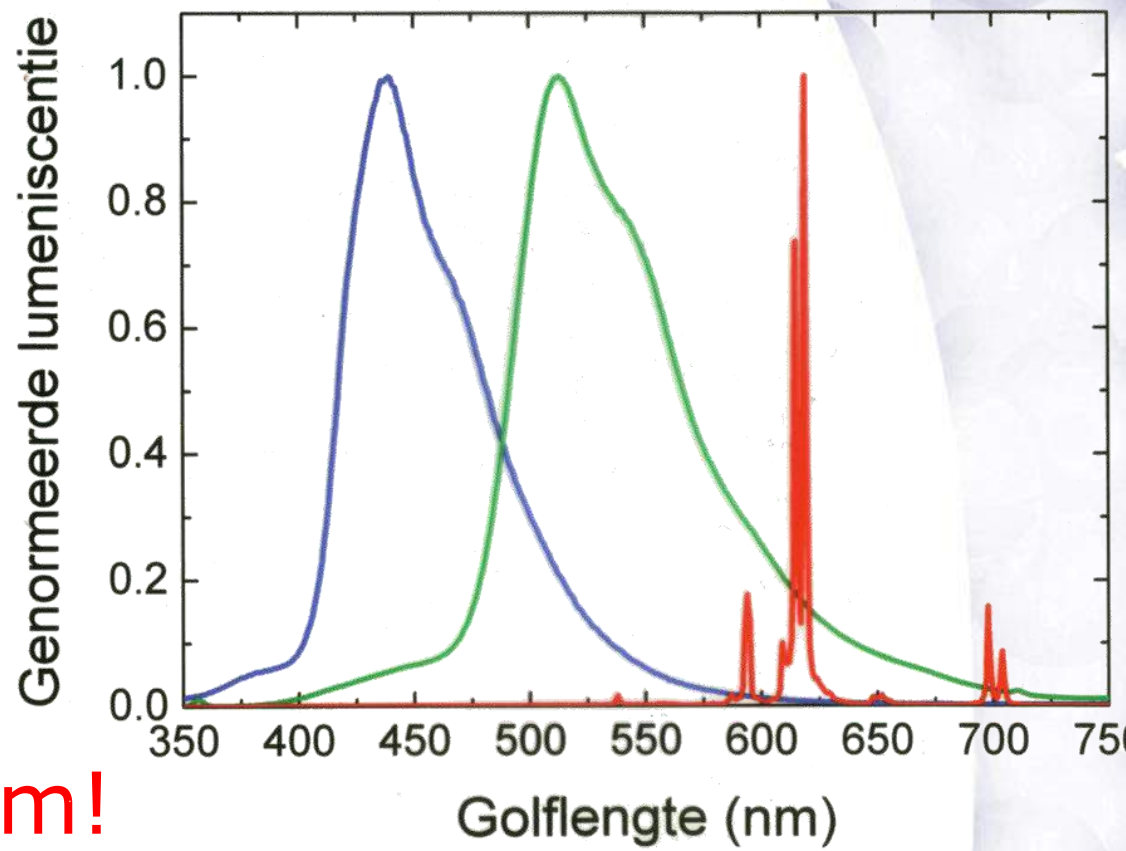
Emissiespectra van de rood, groene en blauw luminescerende vezels in een biljet van 5 €uro. In een emissiespectrum wordt het aantal uitgezonden fotonen als functie van de golflengte weergegeven. De spectra in deze figuur zijn genormeerd op 1 voor het emissiemaximum.

VIER GEZICHTEN

Voor- en achterkant van een vijf €uro-biljet in daglicht (boven) en dezelfde voor- en achterkant onder bestraling met 254 nm UV-straling uit een kwiklamp.

Zeldzame aarden in geld

- Eu^{3+} in een diketon
- Eu^{2+} in sulfide
- Eu^{2+} in aluminaat



Allemaal €uropium!

(geen toeval)

Emissiespectra rode, groene, blauwe fibers en rode sterren in Euro-biljetten

Conclusies

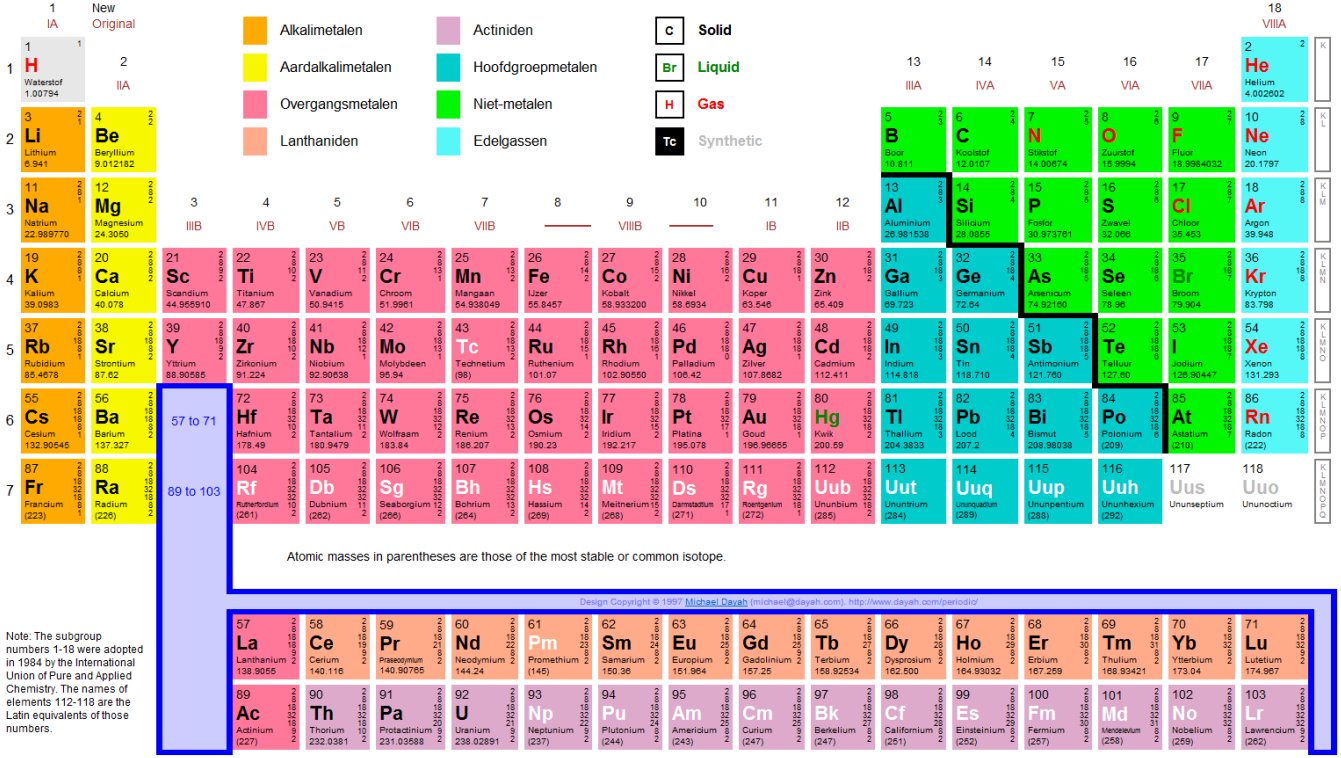
- De unieke en superieure eigenschappen (optisch, magnetisch) van zeldzame aarden hebben geleid tot een breed scala van high-tech toepassingen – alternatieven zijn veelal inferieur.

- Niet de geweldige groei in toepassingen, maar vooral het dreigende tekort zorgen ervoor dat zeldzame aarden niet langer verborgen liggen maar eindelijk zichtbaar zijn.

- Zeldzame aarden zijn ideaal voor het efficiënt omzetten en opwekken van licht, met toepassingen in energiezuinige lichtbronnen, lasers, bankbiljetten, beeldschermen, medische diagnostiek, homeland security, nalichtende fosforen en wellicht efficiëntere zonnecellen.

Verborgen informatie in het periodiek systeem?

Periodiek Systeem der Elementen



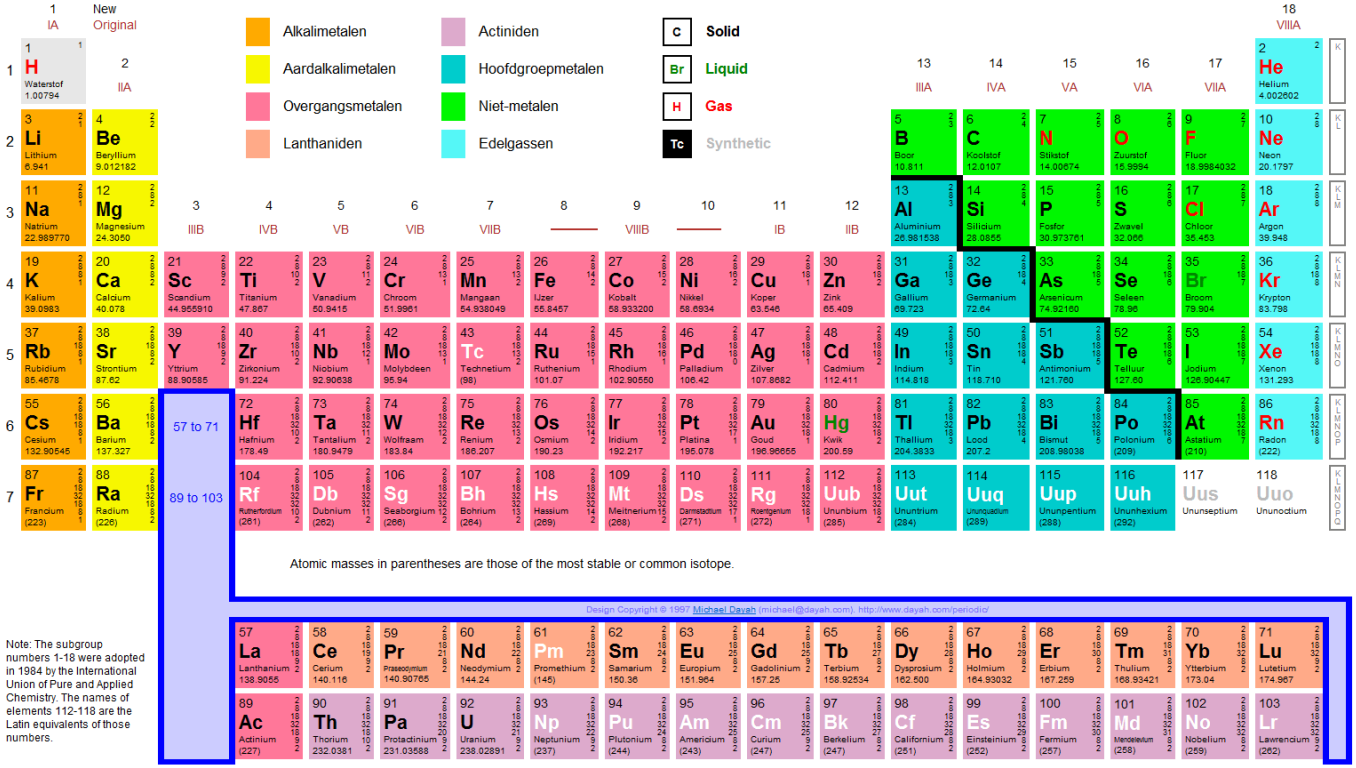
Frans-Duitse dominantie in Europa??

Sarkozy + Merkel = Merkozy = Europa ???

Zorg voor kleine landen

Verborgen informatie in het periodiek systeem?

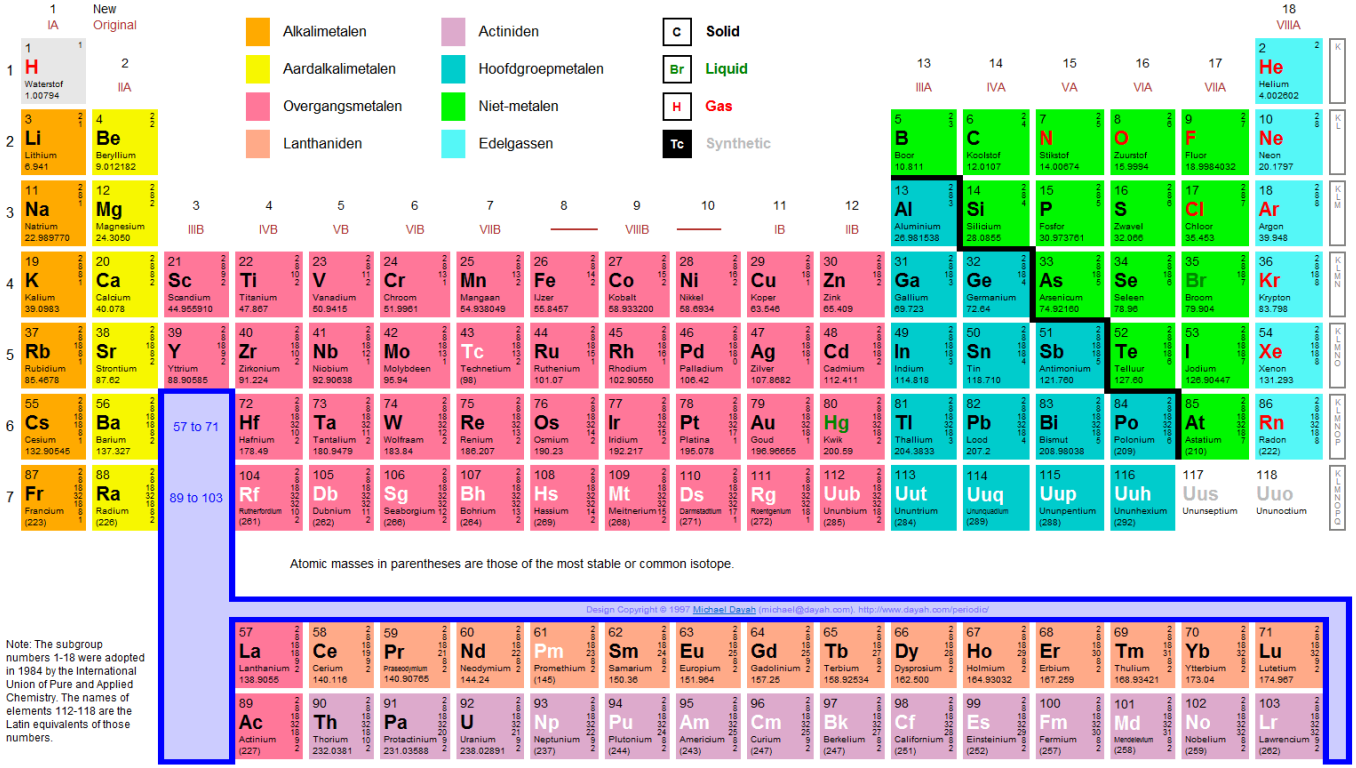
Periodiek Systeem der Elementen



$_{31}Ga + {}_{32}Ge = {}_{63}Eu$ - nb. Eu ontdekt in 1901, lang voor EU!

Frans-Duitse as in Periodiek Systeem?

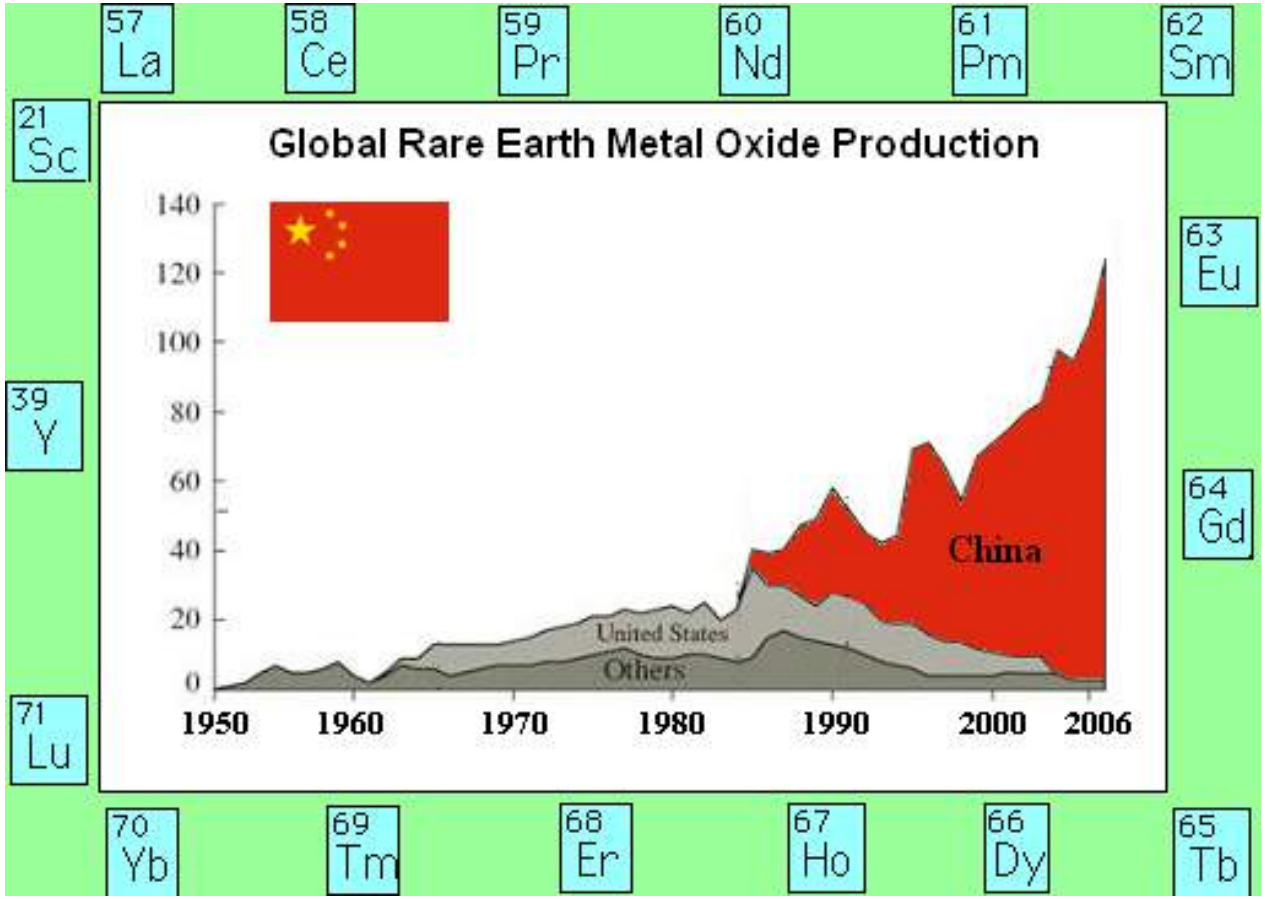
Periodiek Systeem der Elementen



$_{31}Ga + _{32}Ge = _{63}Eu$ (wel toeval, dank aan Andrei Petukhov)

Productie zeldzame aarden

Tot 2009: productie > vraag



Meer dan 90% productie in China
Mijnen in o.a. VS, Australië stilgelegd

Grootste mijn:
Bayan Obo, Binnen-Mongolie

Productie en zuivering zeldzame aarden: geconcentreerd zuur voor oplossen ZA-verbindingen, herhaald zuiveren over kolommen met water/oplosmiddelen:

- Milieuvervuilend
- Energie- en waterintensief
- Radioactief afval (U, Th)

→ productie naar China in jaren '90

7 km breed meer bij Baotou met zuur afvalwater en radioactieve restproducten

Tekort zeldzame aarden:

- Toegenomen vraag (meer toepassingen)
- Beslissing China grote voorraden strategisch belangrijke grondstoffen niet langer (te) goedkoop op de markt te brengen
- Monopoliepositie China

→ Tekorten op korte termijn

Toekomst:

- Nieuwe mijnen buiten China (her)openen
→ opstarttijd > 5 jaar
- Winning is sterk milieubelastend →
nieuwe energie- en waterefficiënte processen
- Recycling zeldzame aarden
- Alternatieven voor zeldzame aarden

Zeldzame aard voorraden in mijnen wereldwijd:

Comparison of some Significant Rare Earth Deposits

Source: IMCOA 2009

Deposit	Resource (million tonnes)	Grade (% TREO)	TREO (million tonnes)	HREE Content (% TREO)	Cut-off Grade
Bayan Obo, China	1,460	3.9%	56	2%	n/a
Kvanefjeld, Greenland	215	1.0%	2.6	14%	0.015% U_3O_8
Mountain Pass, USA	20	9.2%	1.8	1%	5% REO
Nechalacho, Canada	65	2.1%	1.3	20%	1.6% REO
Mt Weld, Australia	12	9.7%	1.2	3%	2.5% REO
Nolans, Australia	30	2.8%	0.9	4%	1.2% REO
Dong Pao, Vietnam	11	6.9%	0.8	n/a	6.9% REO
Bear Lodge, USA	9	4.1%	0.4	n/a	1.5% REO
Hoidas Lake, Canada	1.5	2.6%	0.04	7%	1.5% REO

Note: each company publishes their resources/reserves differently to comply with local rules; accordingly, these figures need to be reviewed with care as they do not necessarily make allowances for the varying recovering associated with each reserve/resource.

Voorraden 30-50% in China: $60*10^6/150*10^3$ → 400 jaar

Belangrijk bij winning zijn ook het Total RE % en het % Heavy RE (Eu-Lu)

Ook voorraden in Brazilië, Zuid-Afrika, Estland

to avoid:

I am the very model of a
modern Major-General

Music by
ARTHUR SULLIVAN

There's [redacted], [redacted] aluminum, [redacted],
And hydrogen and oxygen and nitrogen and [redacted].
And [redacted], [redacted], neptunium, [redacted],
And iron, americium, [redacted], [redacted],
[redacted], [redacted], lutetium, [redacted]
And [redacted] and [redacted] and astatine and radium
And [redacted], protactinium and [redacted] and [redacted]
And iodine and thorium and thulium and [redacted].

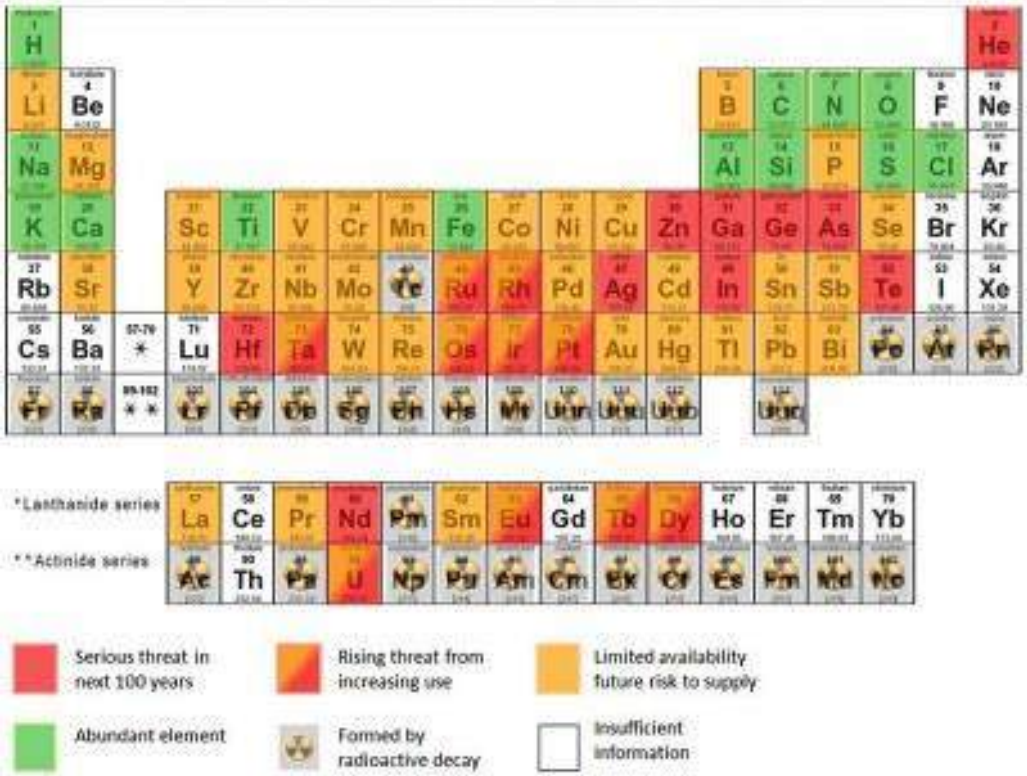
There's yttrium, ytterbium, actinium, rubidium
And [redacted], gadolinium, [redacted], [redacted]
And strontium and silicon and [redacted] and samarium,
And [redacted], bromine, [redacted], beryllium and barium.

There's holmium and [redacted] and [redacted] and erbium
And [redacted] and francium and fluorine and [redacted]
And [redacted] and [redacted], [redacted],
[redacted] and [redacted] and cerium and cesium
And [redacted], [redacted], and [redacted], plutonium,
[redacted], promethium, potassium, polonium, and
[redacted], technetium, titanium, [redacted],
And [redacted] and calcium and [redacted] and curium.

There's sulfur, californium and fermium, berkelium
And also mendelevium, einsteinium, nobelium
And argon, krypton, neon, radon, xenon, [redacted] and [redacted]
And chlorine, carbon, [redacted], [redacted], [redacted], [redacted] and sodium

These are the only ones of which the news has come to Ha'vard,
And there may be many others but they haven't been discavared.

Endangered elements song

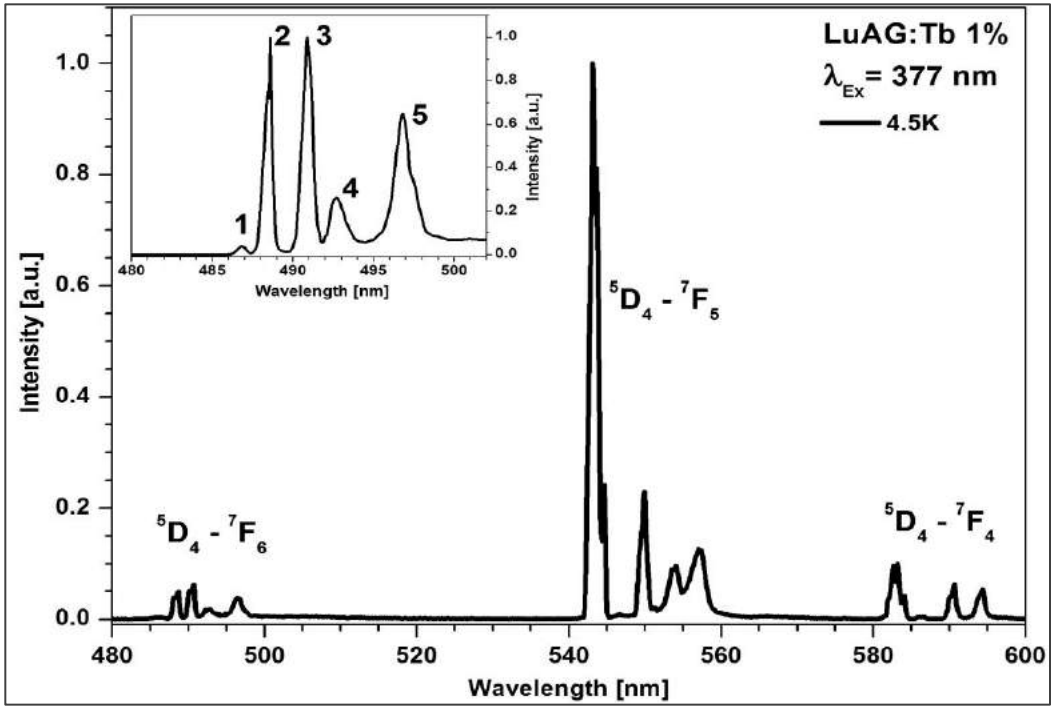


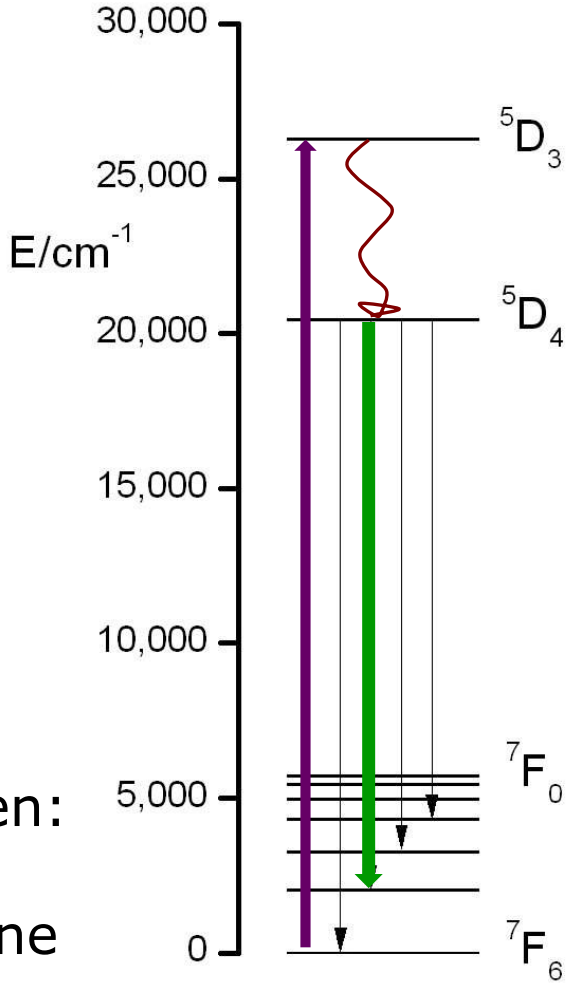
Periodic table of endangered elements

Efficiëntie lampen:

Gloeilamp	10 lm/W
Halogeenlamp	25 lm/W
LED-lamp	50 lm/W
Spaarlamp	50 lm/W
TL-buis	100 lm/W
Na-lamp	150 lm/W

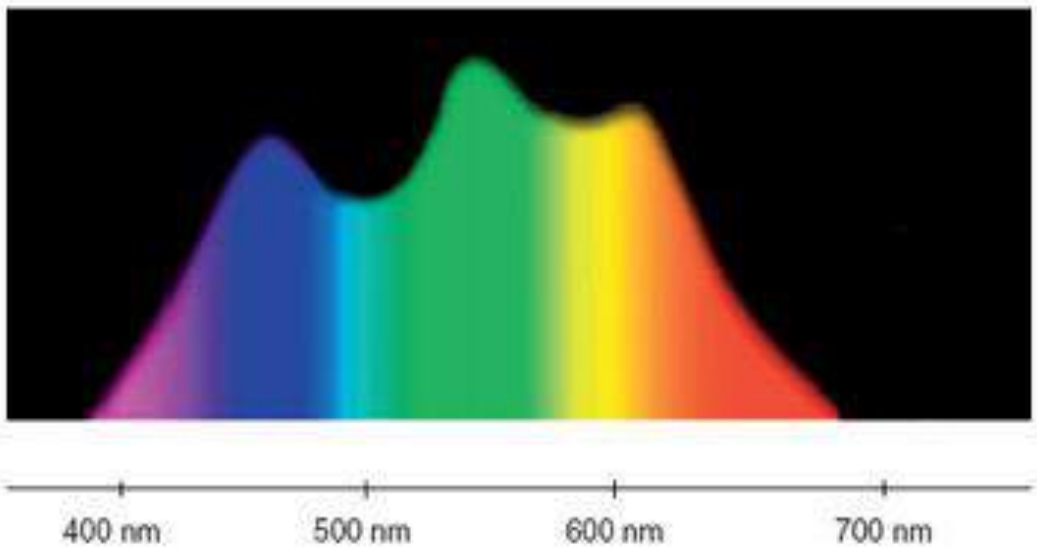
Emissie spectrum Tb^{3+}





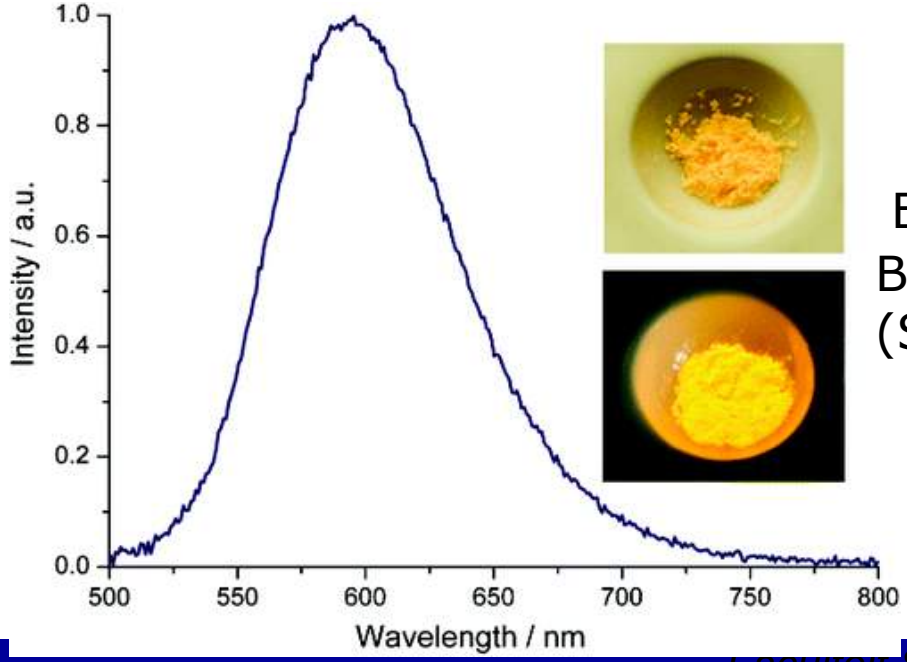
Karakteristieke luminescentie van lanthaniden:
- Scherpe emissielijnen
- Onafhankelijk van de omgeving (bijv. groene emissie Tb^{3+}, rode emissie Eu^{3+})
- Hoge kwantumefficiëntie (>90%)

Narrow band red for more lumen/W



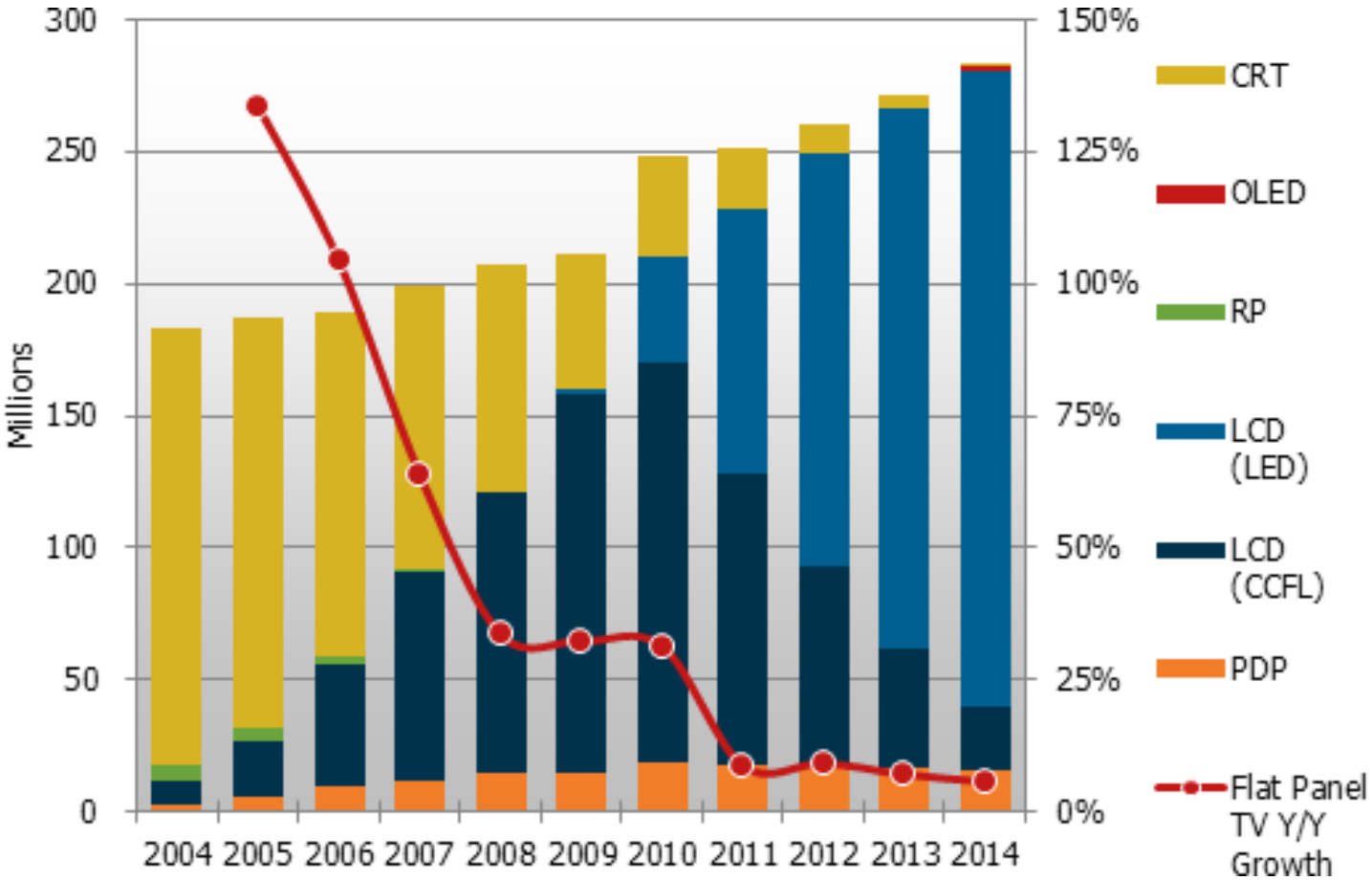
Eye sensitivity curve cones combined – color vision

Drop in eye sensitivity beyond 630 nm gives lower lumen/W efficiency (lumen is measure for intensity light perceived by the eye).



Emission spectrum $Ba_{1.5}Sr_{0.5}Si_5N_8:Eu^{2+}$ (Schnick et. al)

Ontwikkelingen in de beeldschermmarkt:



Bron: http://www.displaysearch.com/

LCD: verschuiving van koude kathode TL-buis naar LED backlight