

Nucleosynthese

Claude Doom



- 1. Kernreacties
- 2. Sterren
- 3. Weinig neutronen
- 4. Veel neutronen
- 5. De Oerknal

Neutronen en protonen en andere elementaire deeltjes

● Proton

Massa: $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg
938 MeV/c²
Lading: +1
Stabiel (?)

● Neutron

Massa: $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg
940 MeV/c²
Lading: 0
Gebonden: stabiel
Vrij: 880 s (14 m)

● Positron

Massa: $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg
0,511 MeV/c²
Lading: + 1
Stabiel

● Elektron

Massa: $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg
0,511 MeV/c²
Lading: - 1
Stabiel

● (Elektron) Neutrino

Massa: $< 4,5 \cdot 10^{-36}$ kg
 $< 2,5$ eV/c²
Lading: 0
Stabiel
("oscillaties")

Atoomkernen bestaan uit protonen en neutronen

1 H waterstof																	2 He helium						
3 Li lithium	4 Be beryllium																	5 B boor	6 C koolstof	7 N stikstof	8 O zuurstof	9 F fluor	10 Ne neon
11 Na natrium	12 Mg magnesium																	13 Al aluminium	14 Si silicium	15 P fosfor	16 S zwavel	17 Cl chloor	18 Ar argon
19 K kalium	20 Ca calcium	21 Sc scandium	22 Ti titanium	23 V vanadium	24 Cr chrom	25 Mn mangaan	26 Fe ijzer	27 Co kobalt	28 Ni nikkel	29 Cu koper	30 Zn zink	31 Ga gallium	32 Ge germanium	33 As arsen	34 Se seleen	35 Br broom	36 Kr krypton						
37 Rb rubidium	38 Sr strontium	39 Y yttrium	40 Zr zirkonium	41 Nb niobium	42 Mo molybdeen	43 Tc technetium	44 Ru ruthenium	45 Rh rhodium	46 Pd palladium	47 Ag zilver	48 Cd cadmium	49 In indium	50 Sn tin	51 Sb antimoon	52 Te telluur	53 I jodium	54 Xe xenon						
55 Cs cesium	56 Ba barium	→		72 Hf hafnium	73 Ta tantaal	74 W wolfram	75 Re renium	76 Os osmium	77 Ir iridium	78 Pt platina	79 Au goud	80 Hg kwik	81 Tl thallium	82 Pb lood	83 Bi bismut	84 Po polonium	85 At astaat	86 Rn radon					
87 Fr francium	88 Ra radium	→		104 Rf rutherfordium	105 Db dubnium	106 Sg seaborgium	107 Bh bohrium	108 Hs hassium	109 Mt meitnerium	110 Ds darmstadtium	111 Rg roentgenium	112 Cn copernicium	113 Nh nihonium	114 Fl flerovium	115 Mc moscovium	116 Lv livermorium	117 Ts tennessine	118 Og oganesson					

alkalimetalen
aardalkalimetalen
overgangsmetalen



andere metalen
niet-metalen
edelgassen

lanthaniden
actiniden

→	57 La lanthaan	58 Ce cerium	59 Pr praseodymium	60 Nd neodymium	61 Pm promethium	62 Sm samarium	63 Eu europium	64 Gd gadolinium	65 Tb terbium	66 Dy dysprosium	67 Ho holmium	68 Er erbio	69 Tm thulium	70 Yb ytterbium	71 Lu lutetium
→	89 Ac actinium	90 Th thorium	91 Pa protactinium	92 U uranium	93 Np neptunium	94 Pu plutonium	95 Am americium	96 Cm curium	97 Bk berkelium	98 Cf californium	99 Es einsteinium	100 Fm fermium	101 Md mendelevium	102 No nobelium	103 Lr lawrencium

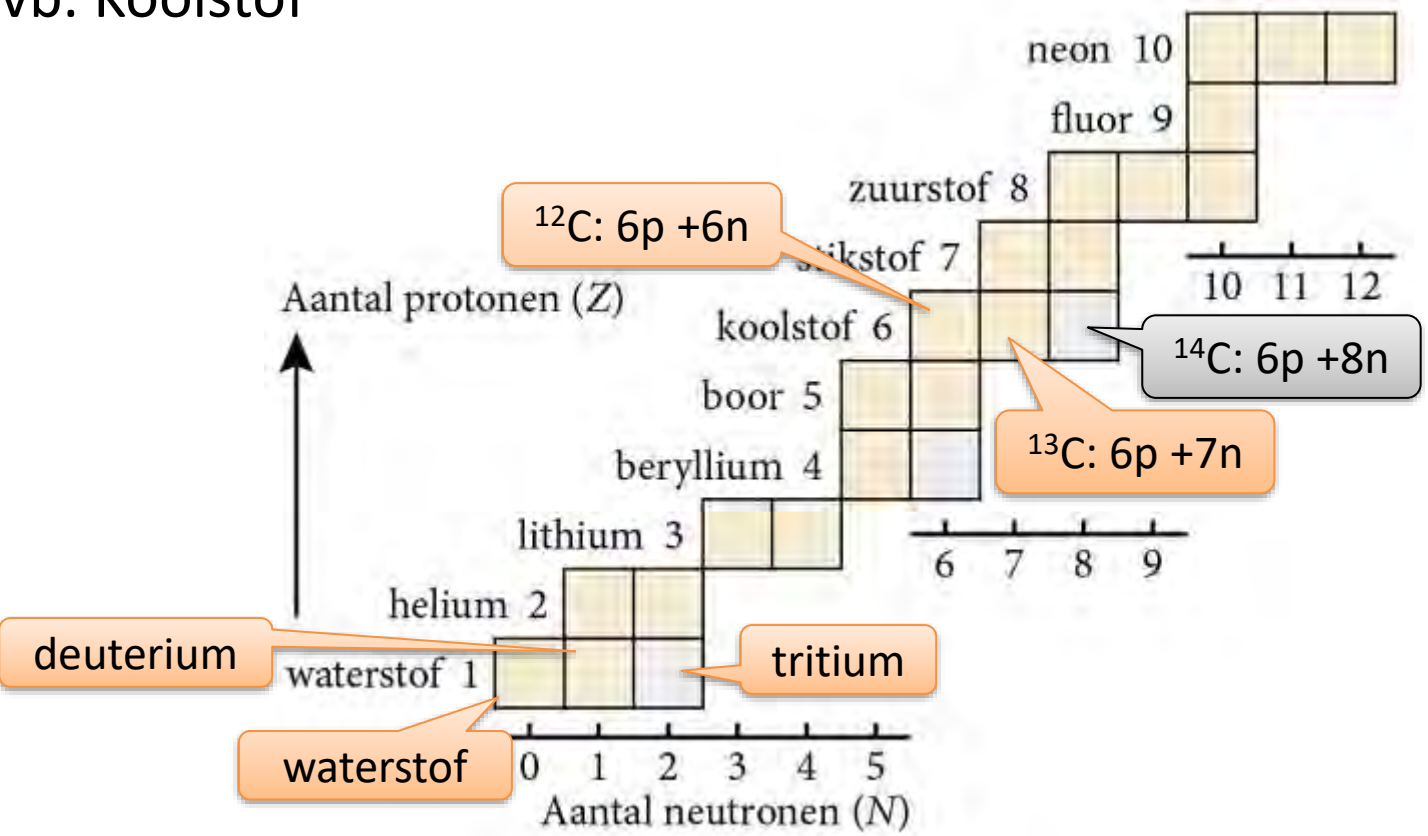
Isotopen zijn 'versies' van dezelfde atoomkern

Zelfde aantal protonen (= zelfde element, zelfde atoomnummer)

Ander aantal neutronen (=ander atoommassa)

vb. Deuterium = H + 1 neutron, Tritium = H + 2 neutronen

vb. Koolstof

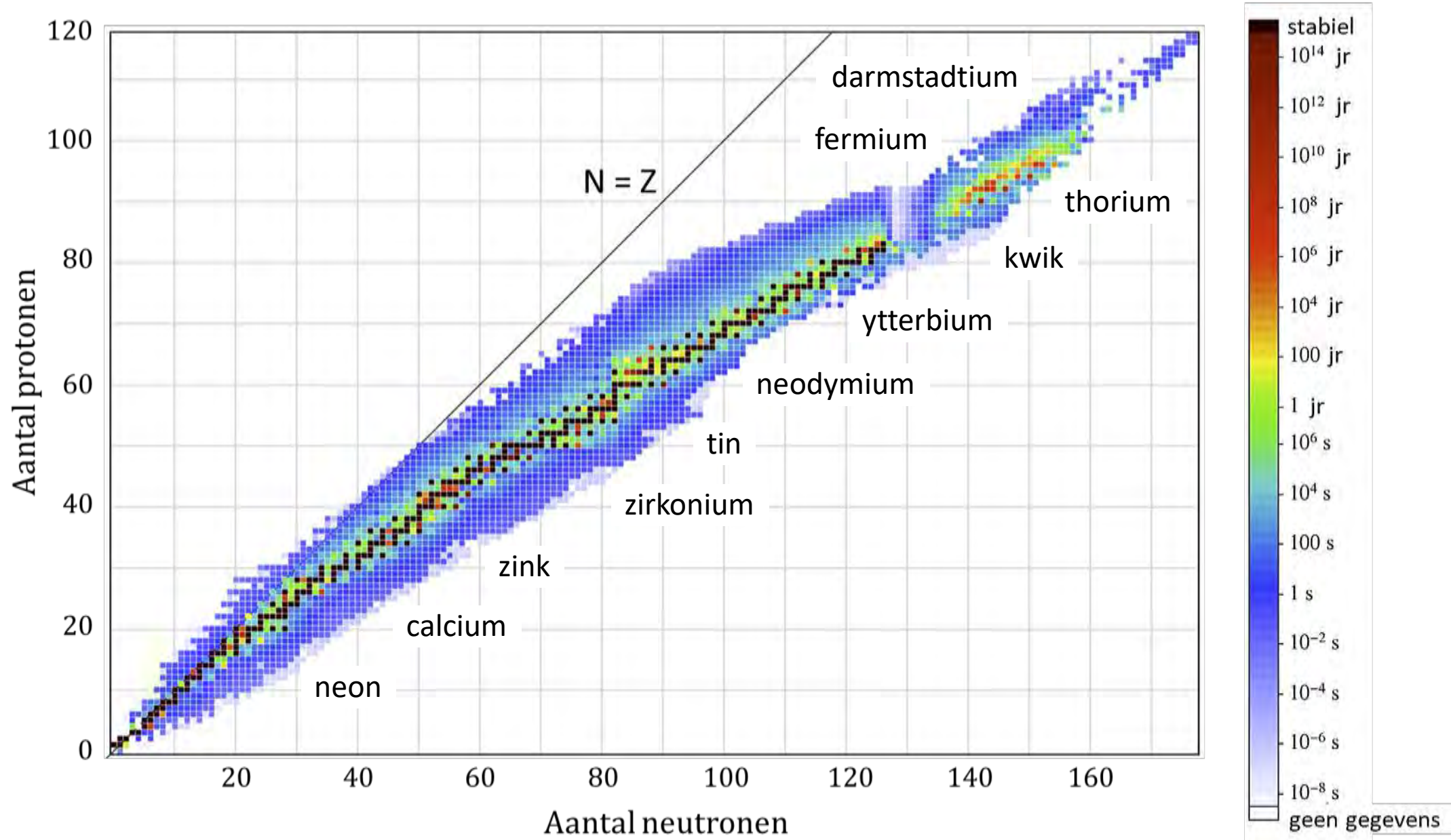


14C

Element =
Aantal protonen

Aantal nucleonen
(protonen + neutronen)

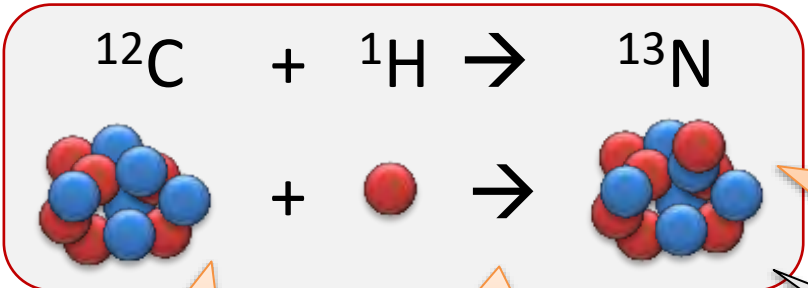
Isotopendiagram



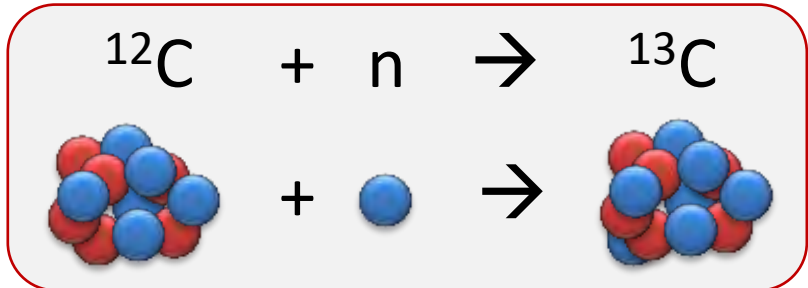
Kernreacties



Fusiereacties: smensmelting van atoomkernen (sterke wisselwerking)

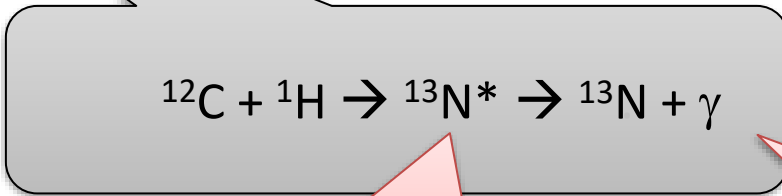


Behoud van:
Nucleonen
Energie
Spin



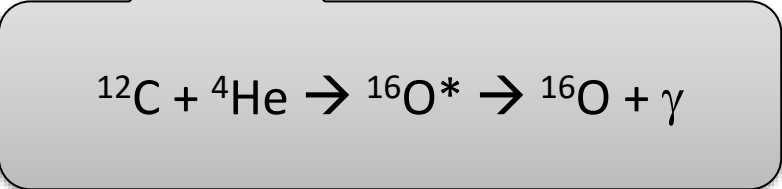
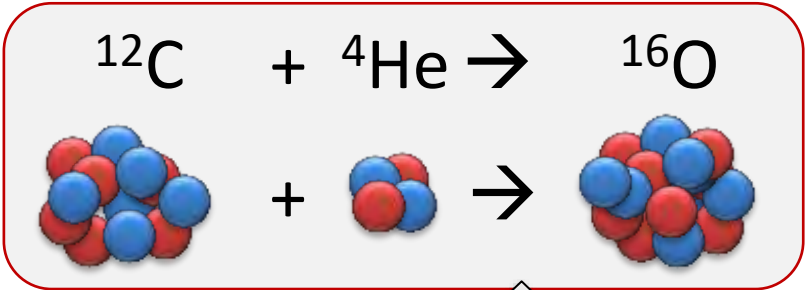
Twee deeltjes

Produceert energie (γ)



Aangeslagen toestand
(meer energie)

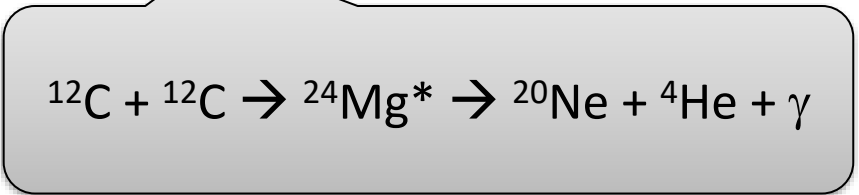
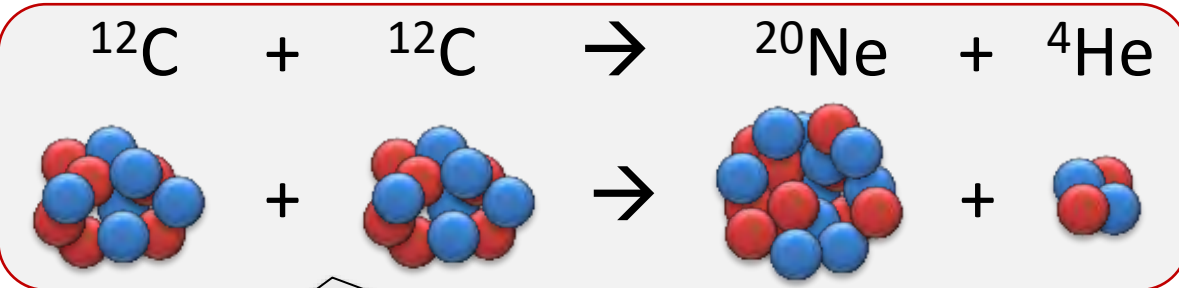
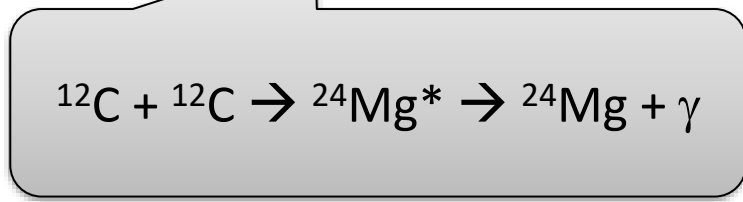
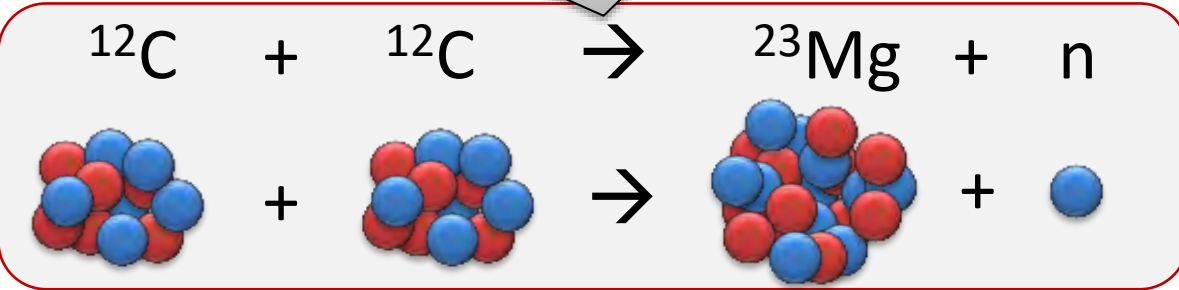
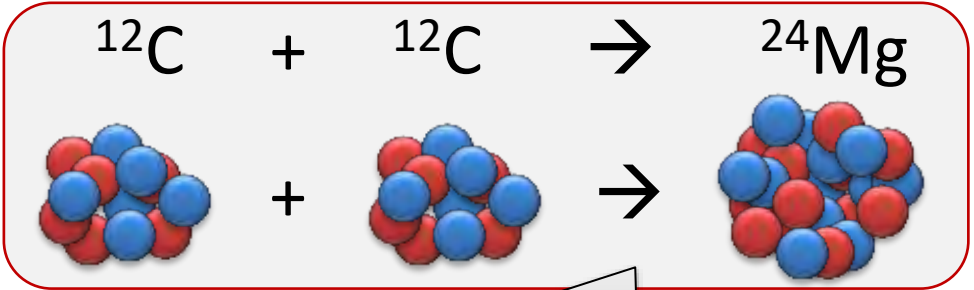
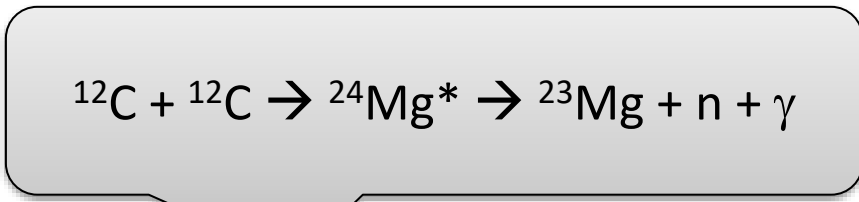
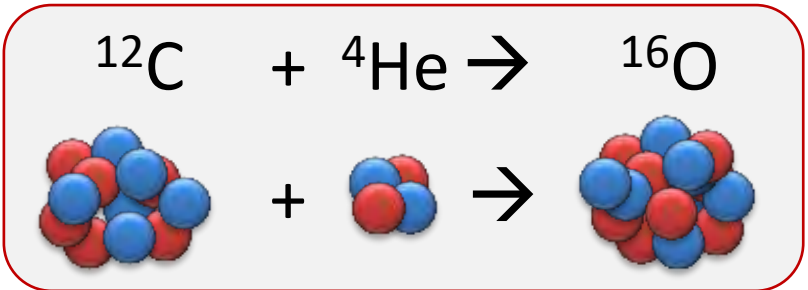
Vervalt naar grondtoestand
(energieverschil = γ -foton)



Bevat al de energie van de ingrediënten (^{12}C en ^1H)

...dat is méér dan de energie van ^{13}N in grondtoestand

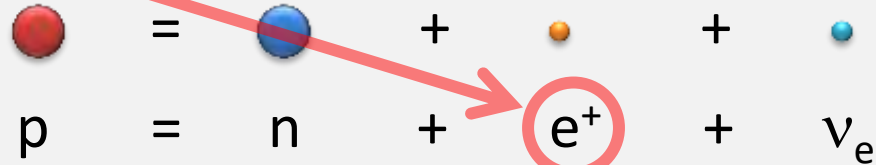
Fusiereacties: smensmelting van atoomkernen (sterke wisselwerking)



Verval van onstabiele isotopen (zwakke wisselwerking)

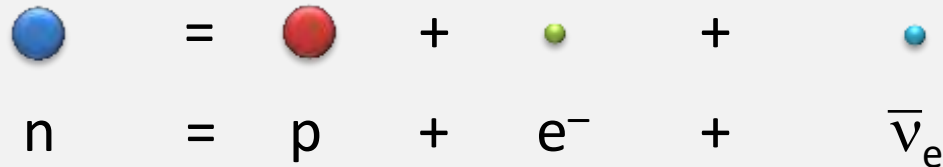
Binnenin atoomkernen

β^+ proton = neutron + positron + neutrino



Behoud van energie
Behoud van spin

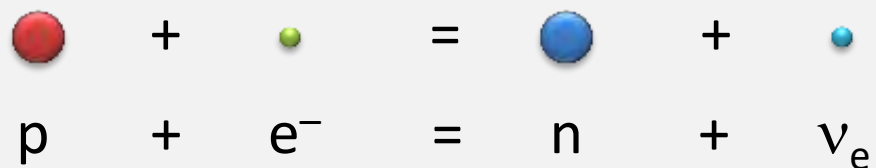
β^- neutron = proton + elektron + (anti)neutrino



Ook vrij neutron

elektronenvangst

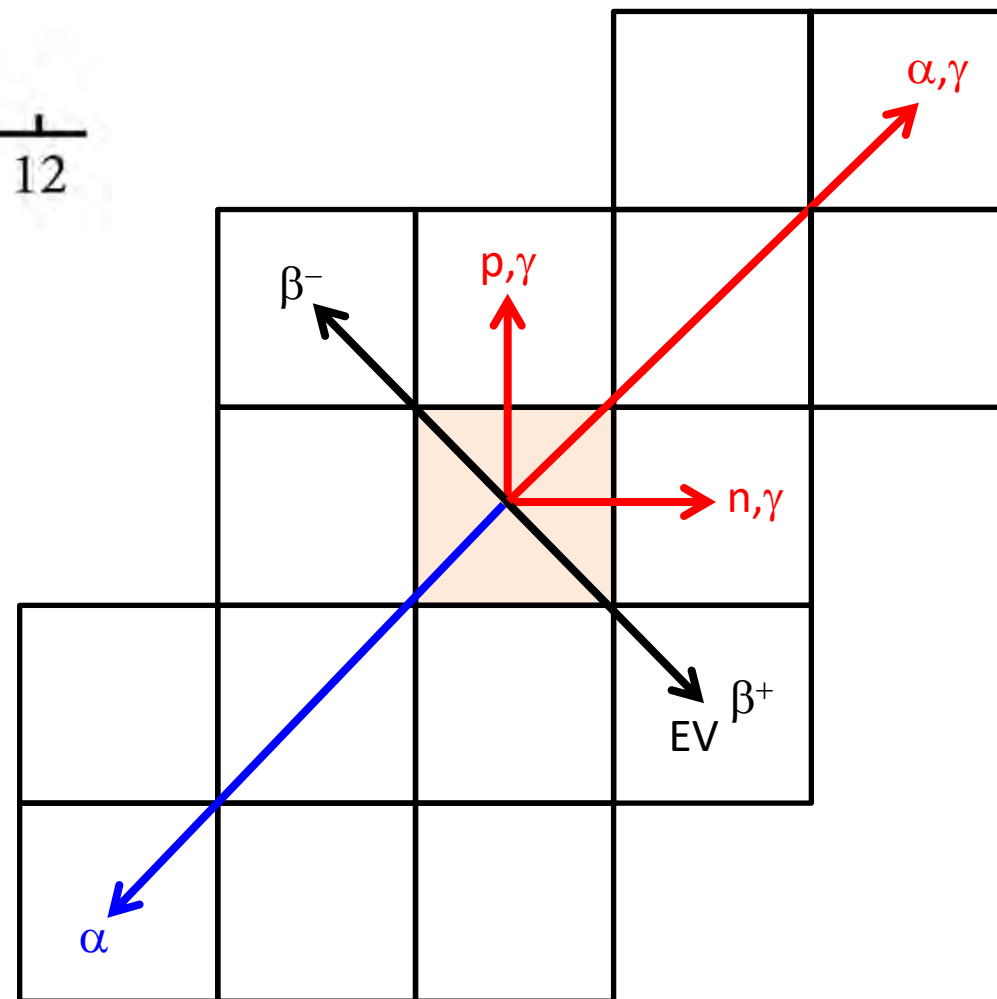
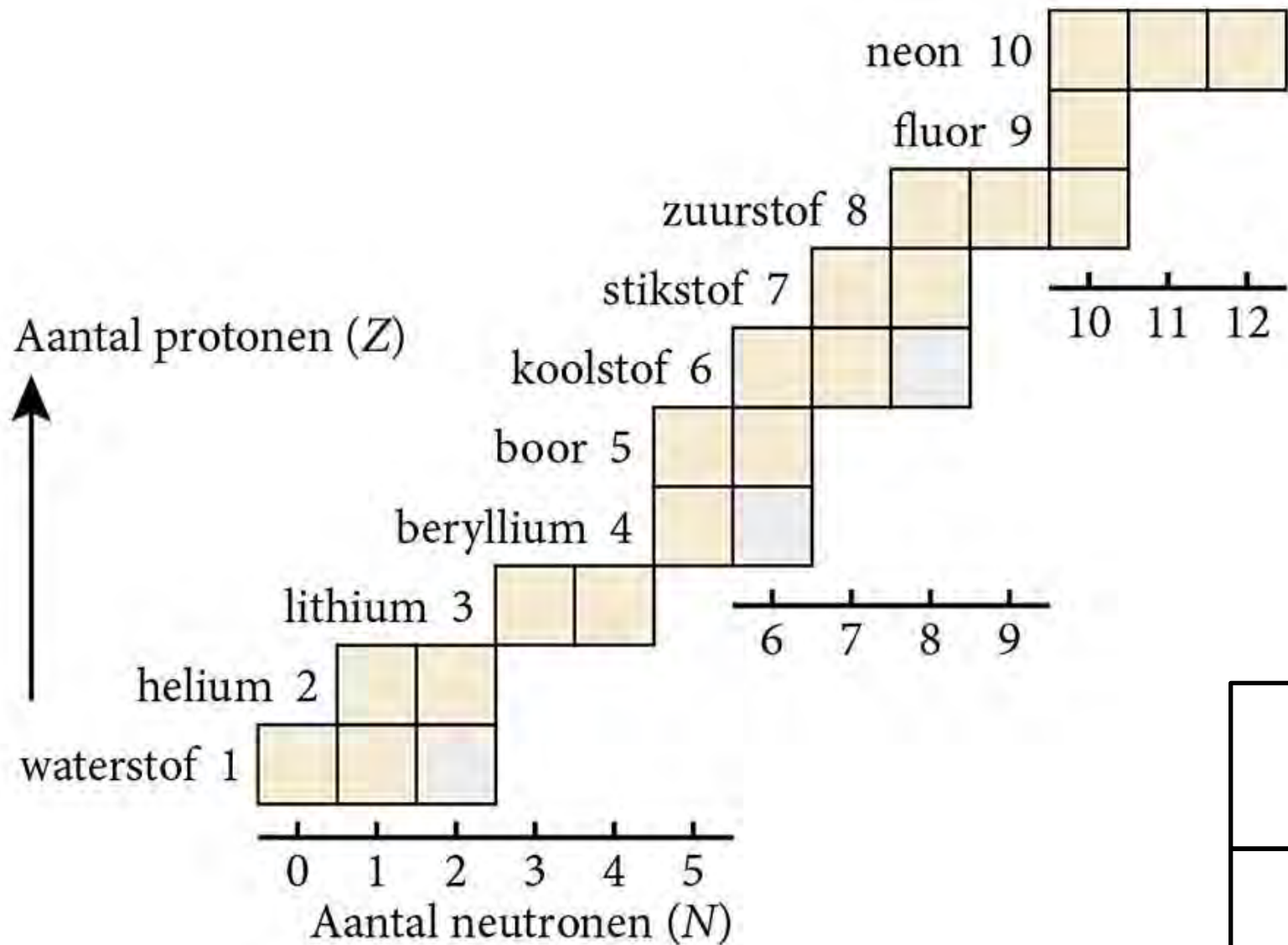
EV proton + elektron = neutron + neutrino



Niet te verwarren met *atoomsplitsing*
(= atoom breekt in twee delen)

Enkel sterke wisselwerking

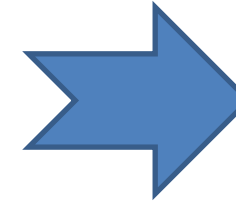
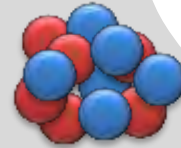
Kernreacties in het isotopendiagram



Werkzame doorsnede thermonucleaire reacties

Thermonucleair:
door hoge temperatuur
(en hoge snelheid deeltjes)

 ${}^4\text{He}$

 ${}^{12}\text{C}$

 ${}^{16}\text{O}$

Werkzame doorsnede:
Aantal reacties per seconde
per atoomkern in het doel

 $\# \text{ s}^{-1}$
 \div

flux van aanstormende deeltjes

 $\# \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$
 σ

Aantal deeltjes
per seconde
per m^2



Werkzame doorsnede
oppervlakte: *barn* (10^{-28} m^2)

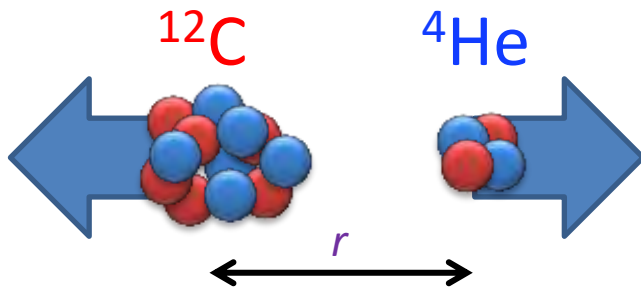
1 barn = $10^{-14} \times 10^{-14} \text{ m}$
Atoomkernen:
H: $d = 0,24 \cdot 10^{-14} \text{ m}$
C: $d = 0,54 \cdot 10^{-14} \text{ m}$
U: $d = 1,48 \cdot 10^{-14} \text{ m}$

Grotere werkzame doorsnede
=
Meer kans op reactie



Geladen deeltjes, Coulomb en de sterke wisselwerking

Wet van Coulomb



Coulombkracht: afstotend

↑ Z deeltjes

↓ r ($\sim 1/r^2$)

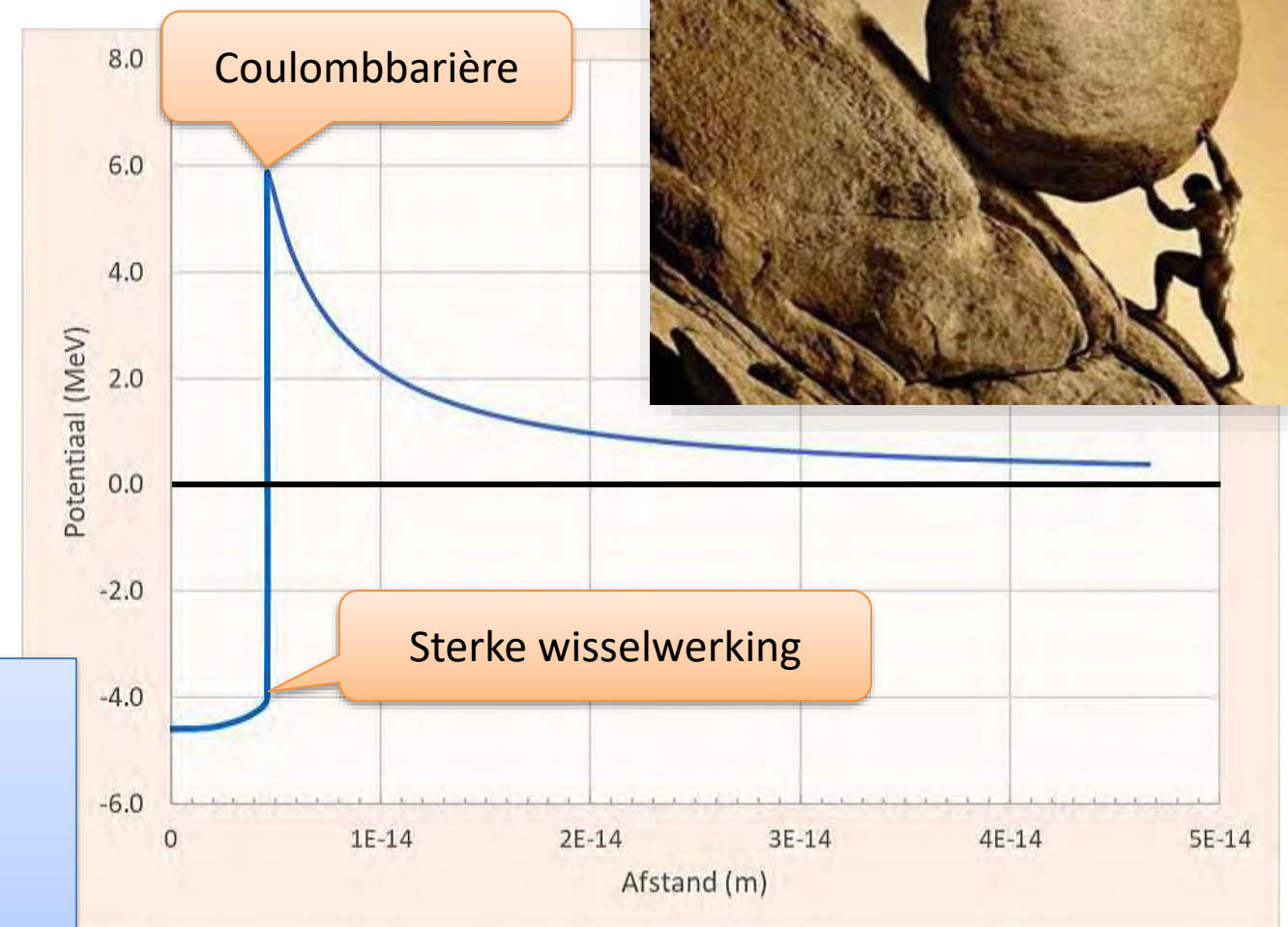
DE ELEKTRONVOLT

Energie: één elektron, één volt

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Kleine eenheid:  = $3,6 \cdot 10^{24} \text{ eV}$

Coulombbarrière: potentiaal V_C



Geladen deeltjes

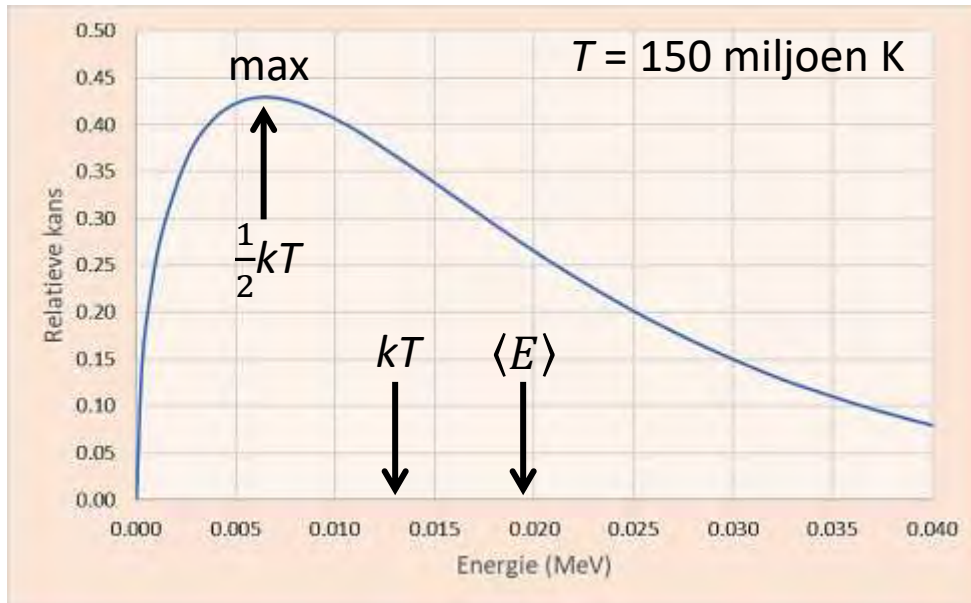
Barrière overschrijden?

Gemiddelde energie deeltje:

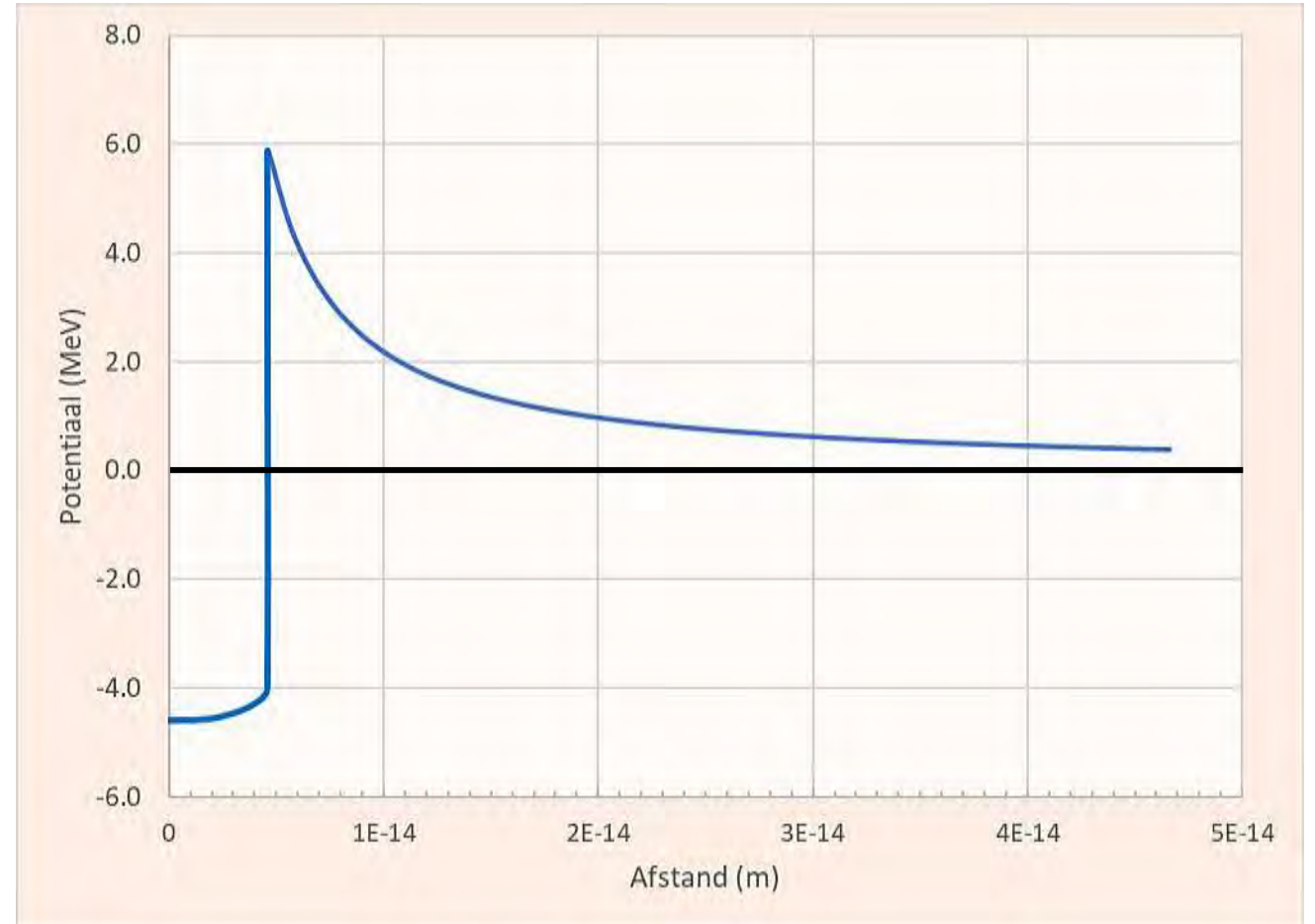
$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT$$

$$k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$\langle E \rangle = 6 \text{ MeV}$ voor $T = 46 \text{ miljard K}$



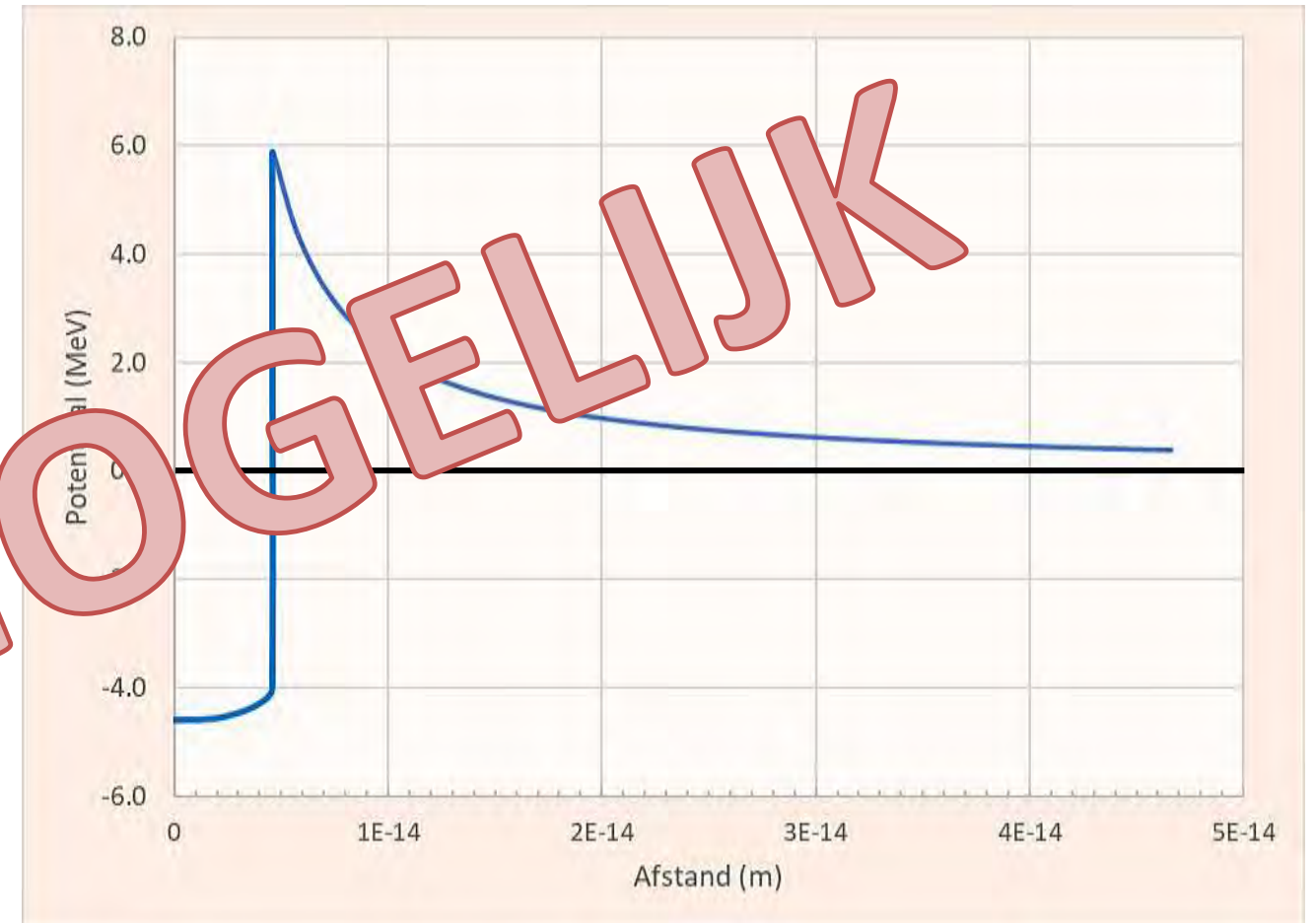
Coulombbarrière: potentiaal V_C



Geladen deeltjes

Barrière overschrijden?

Coulombbarrière: potentiaal V_C



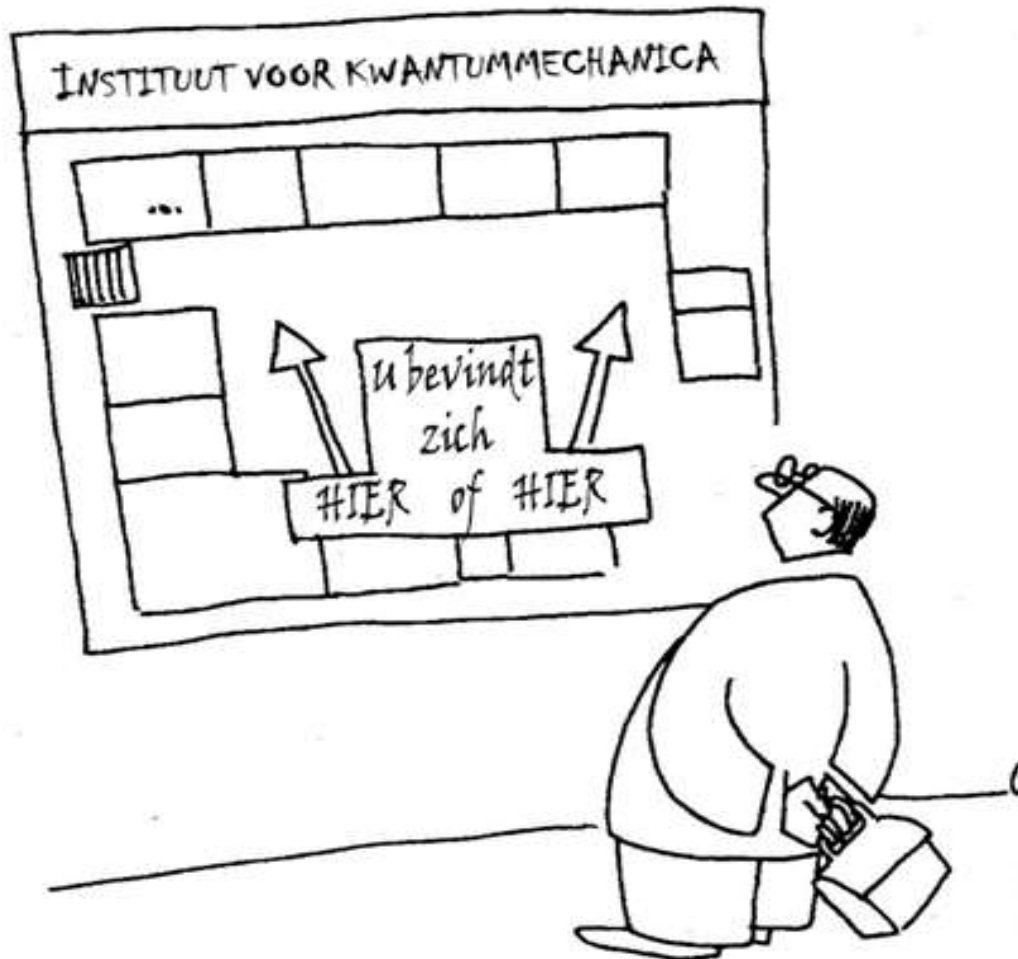
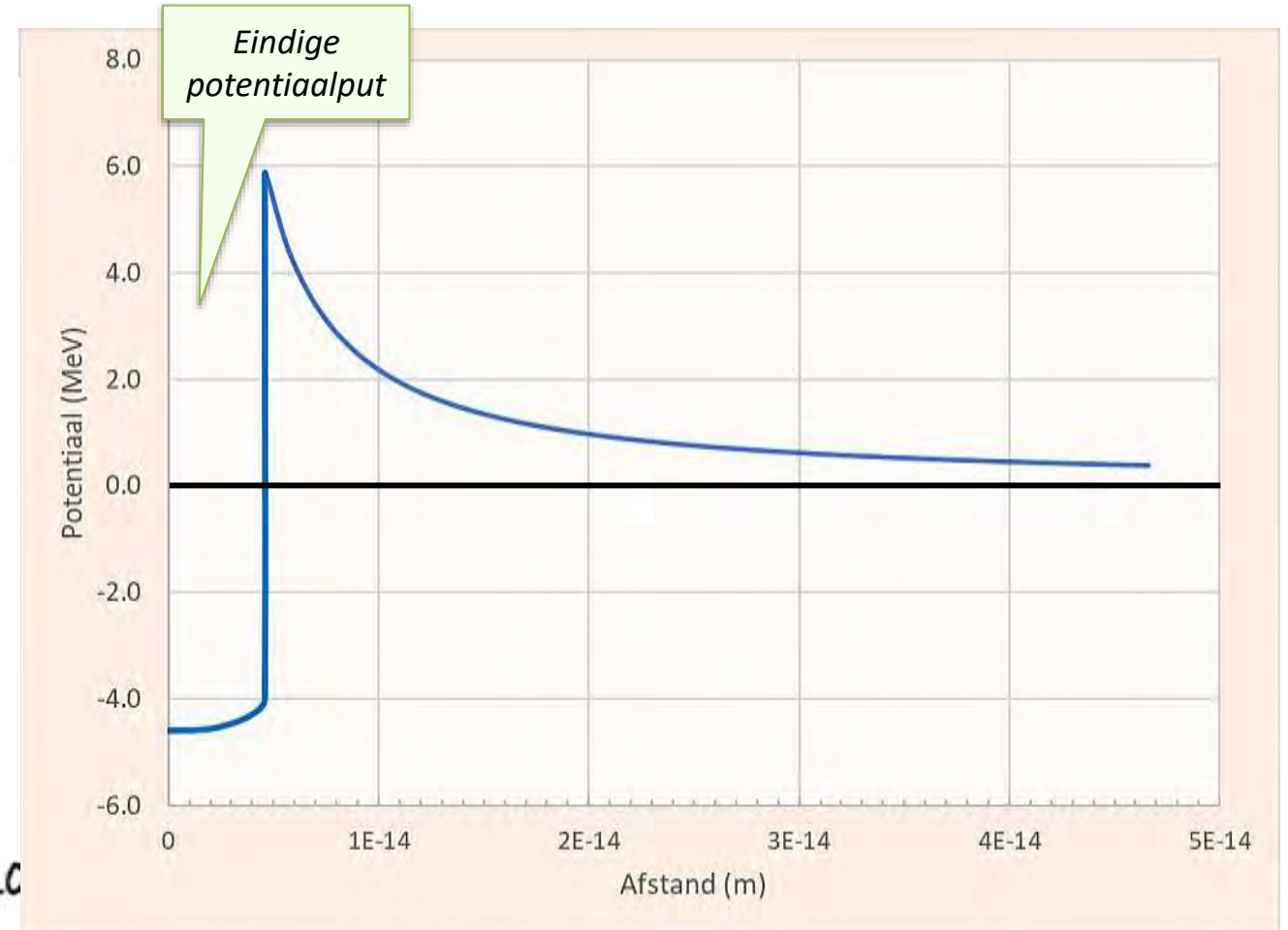
...Staart snelheidsdistributie...



Het tunneleffect en de Coulombbarrière

Barrière overschrijden?
...Kwantummechanica

Coulombbarrière: potentiaal V_C



Het tunneleffect en de Coulombbarrière

Barrière overschrijden?

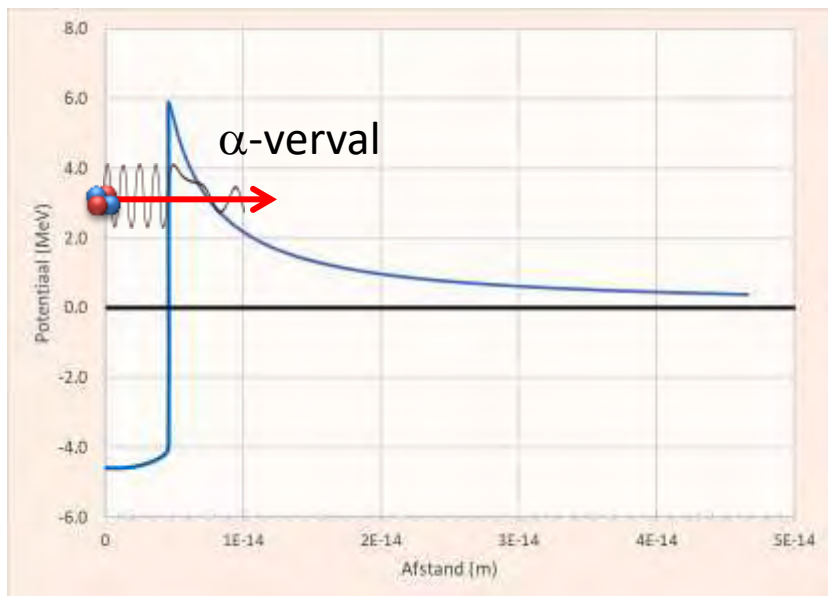
...Kwantummechanica

Energie \ll barrière

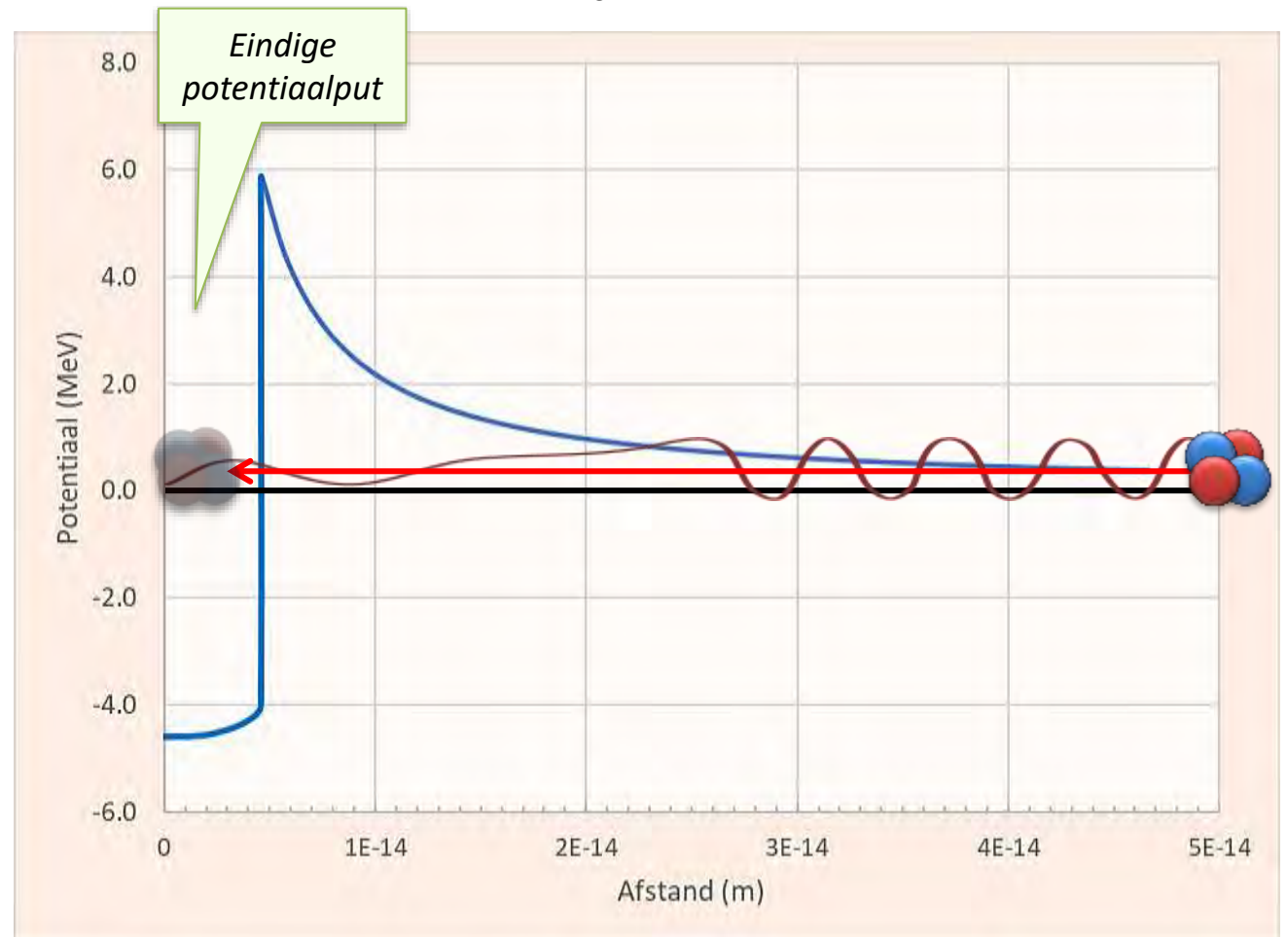
gebonden = gefusioneerd

Vrij deeltje ("buiten") kan zich toch binnen bevinden

"Tunneleffect"



Coulombbarrière: potentiaal V_C

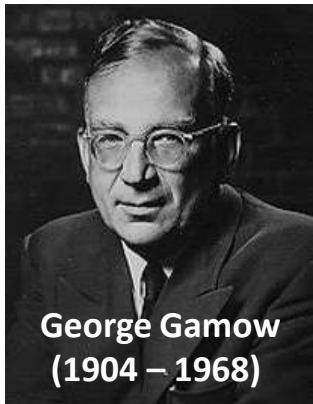


Het tunneleffect en de Coulombbarrière

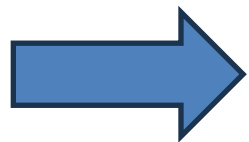
Vrij deeltje (“buiten”) kan zich toch binnen bevinden

“Tunneleffect”

Stijgt met stijgende snelheid (energie)
Daalt voor grotere kernladingen (Z)

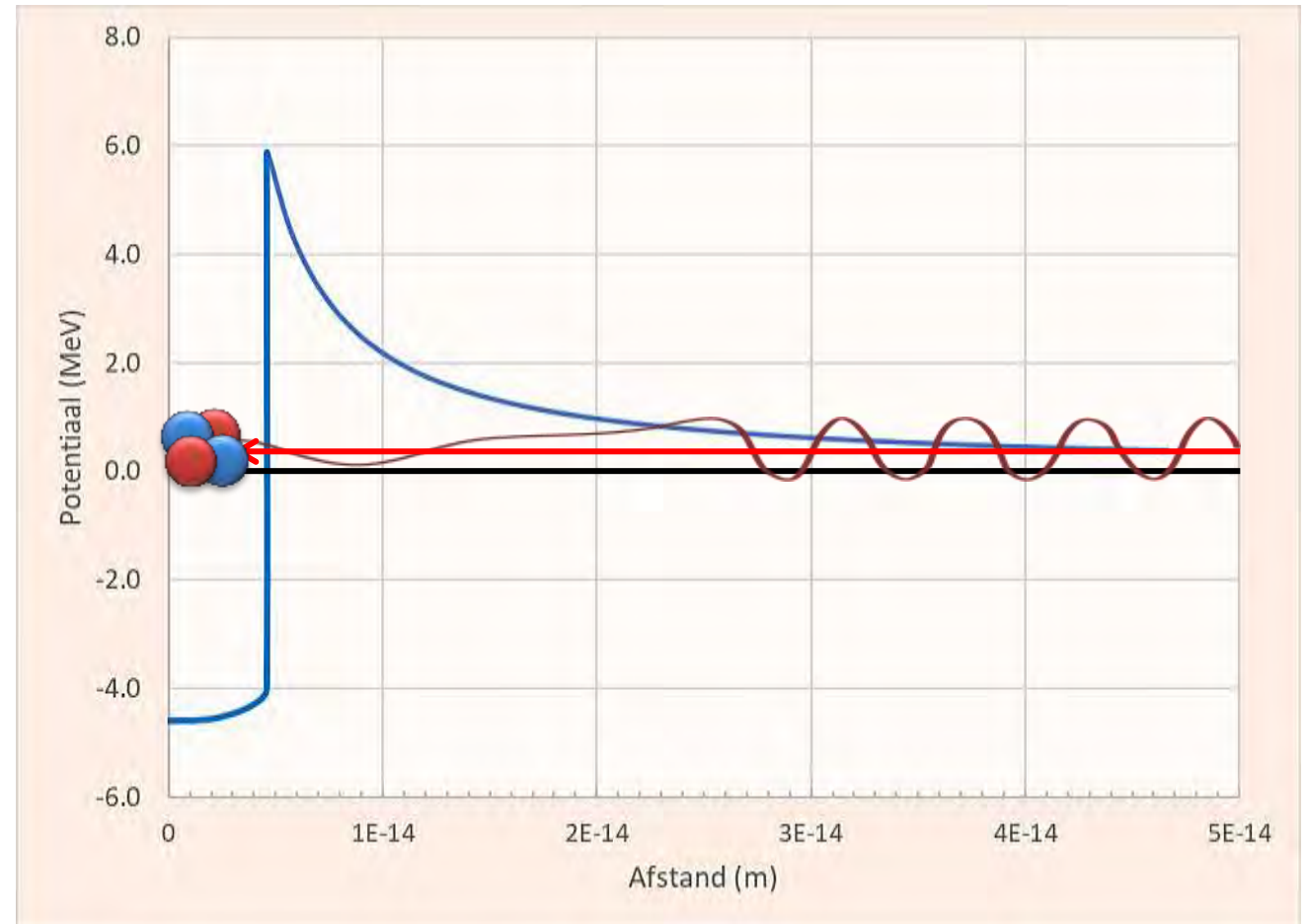


Kans op tunneleffect
=
“Penetratiefactor” $P(E)$



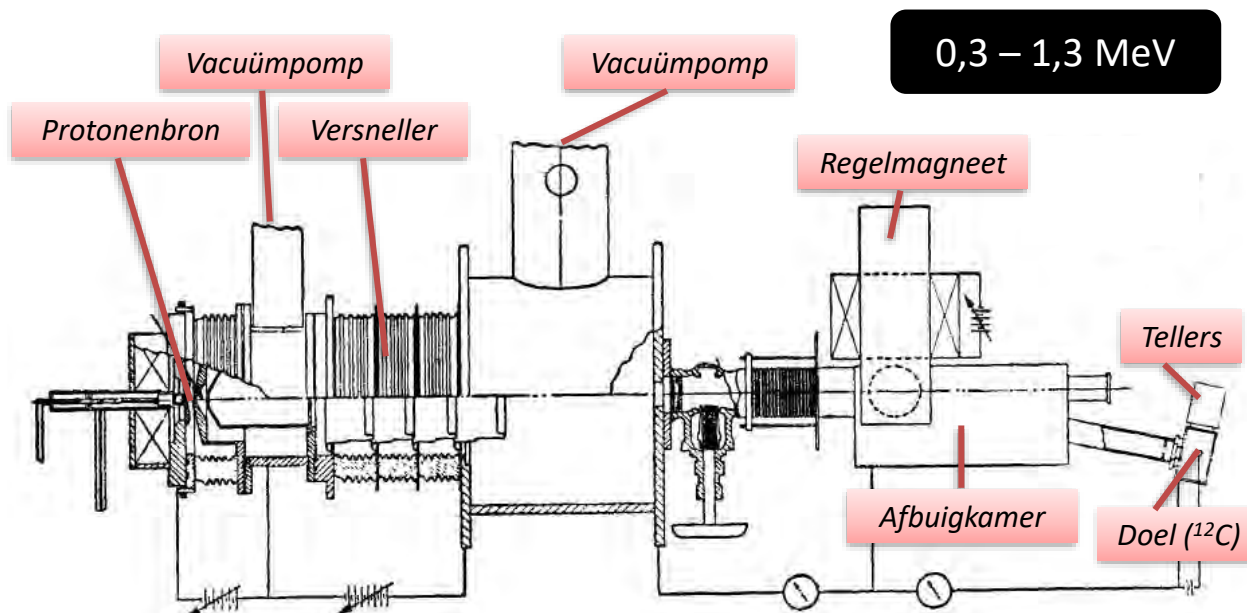
Kernreacties mogelijk bij “lagere” temperatuur (150 mln K)

Coulombbarrière: potentiaal V_C



Metingen werkzame doorsnede

Kellogg Laboratory, Californië, 1950

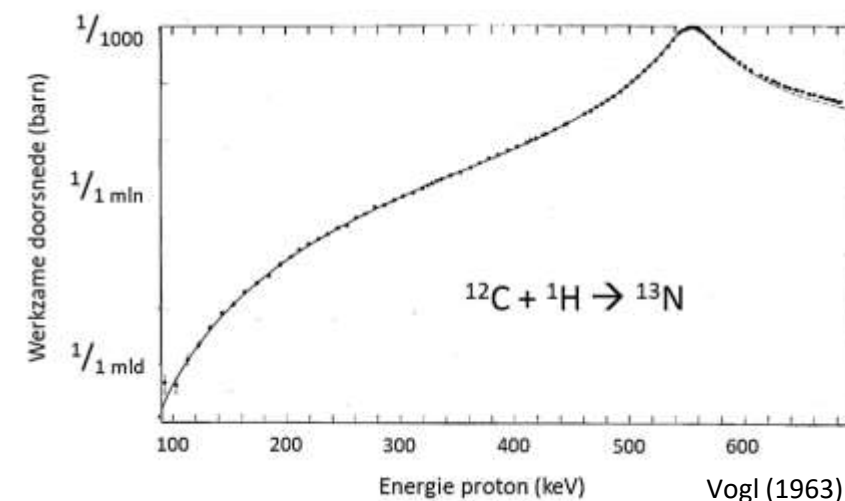
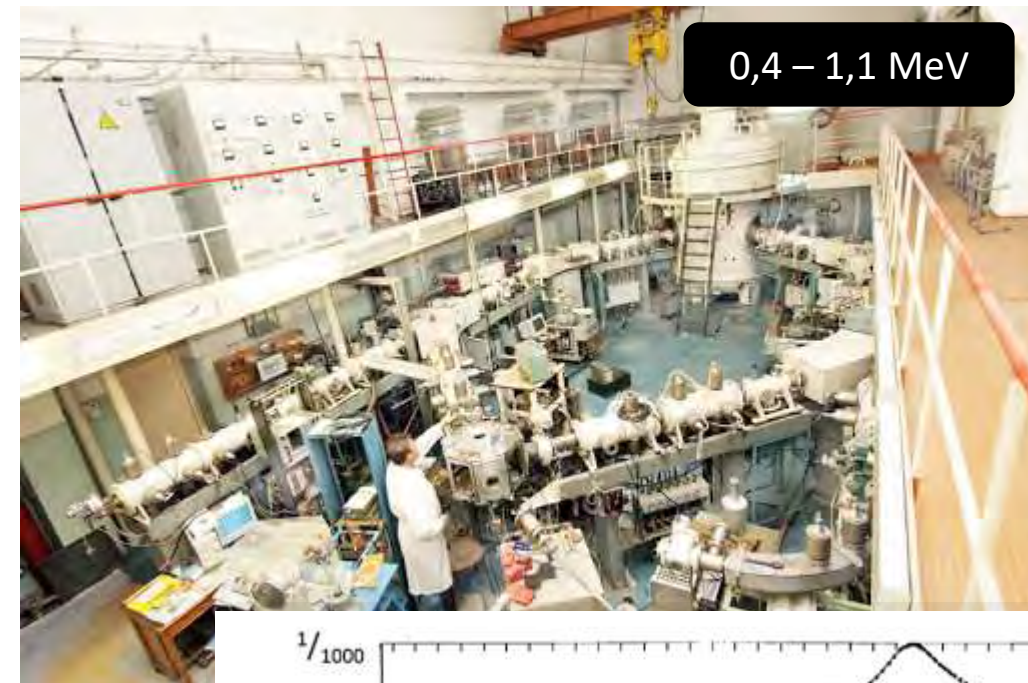


Bestraling roet of grafiet met protonen

Meting radioactief verval ^{13}N (10 min, 1,2 MeV)

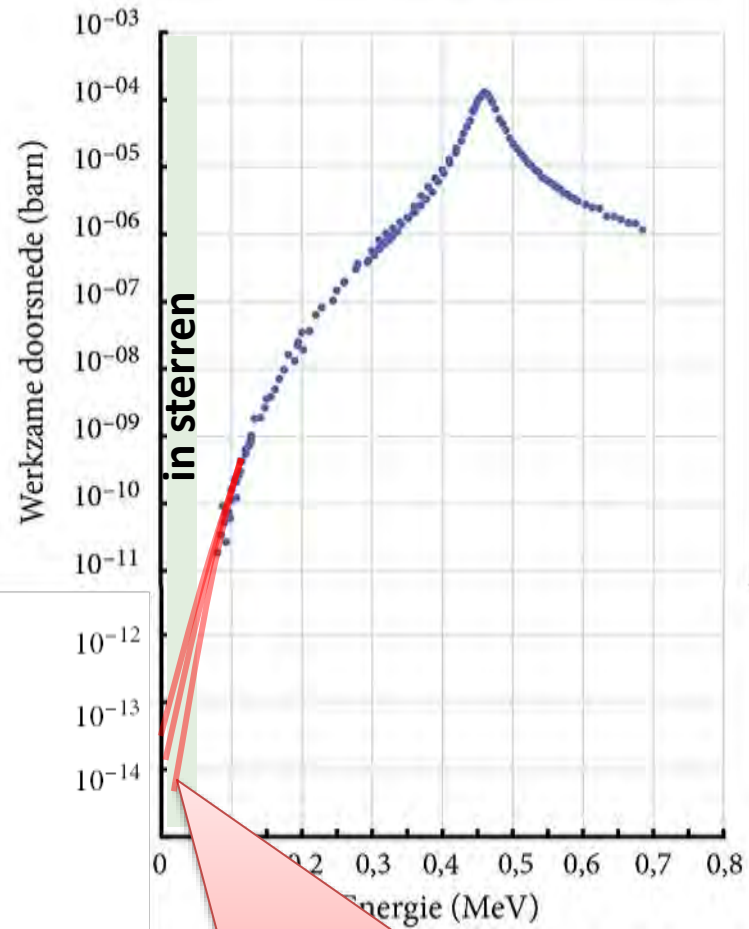
Meting gammastraling (1 foton per reactie)

UKP-2-1, Instituut kernfysica Kazakstan, 2008



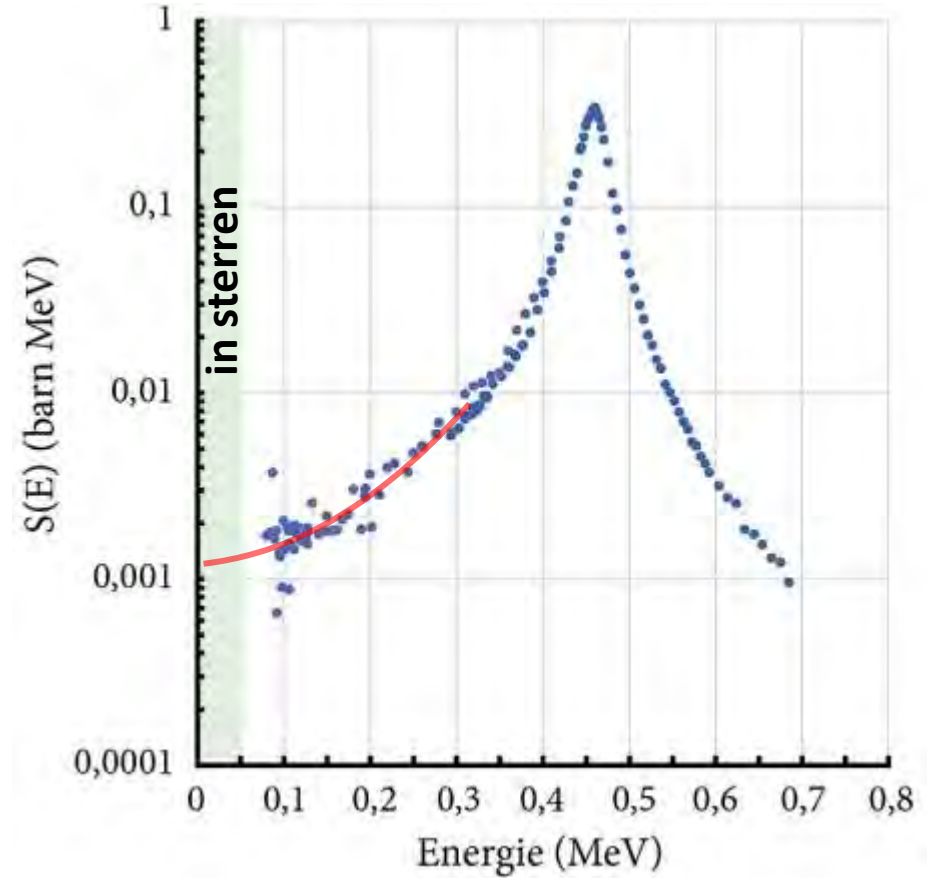


Gemeten werkzame doorsnede $\sigma(E)$

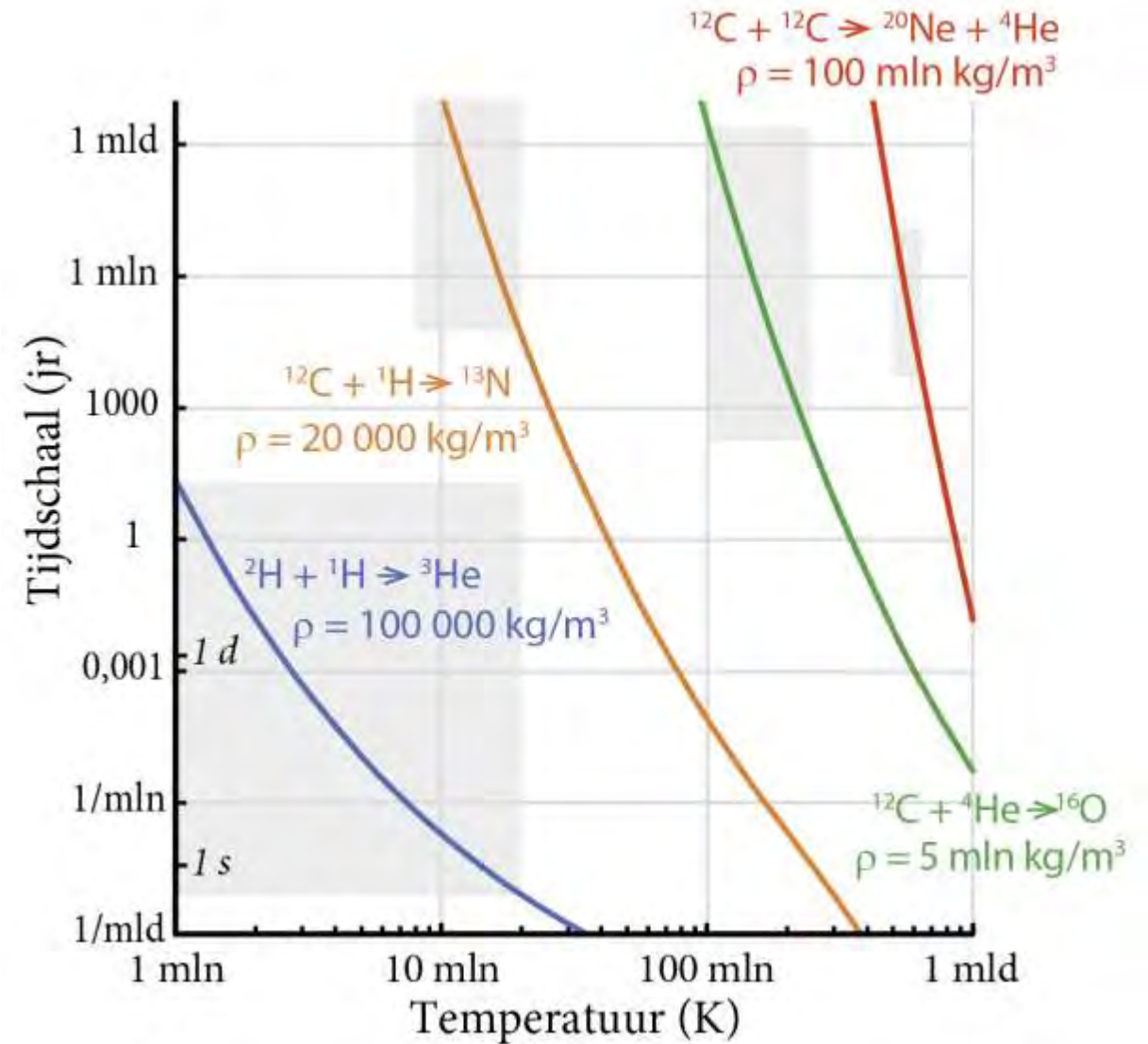
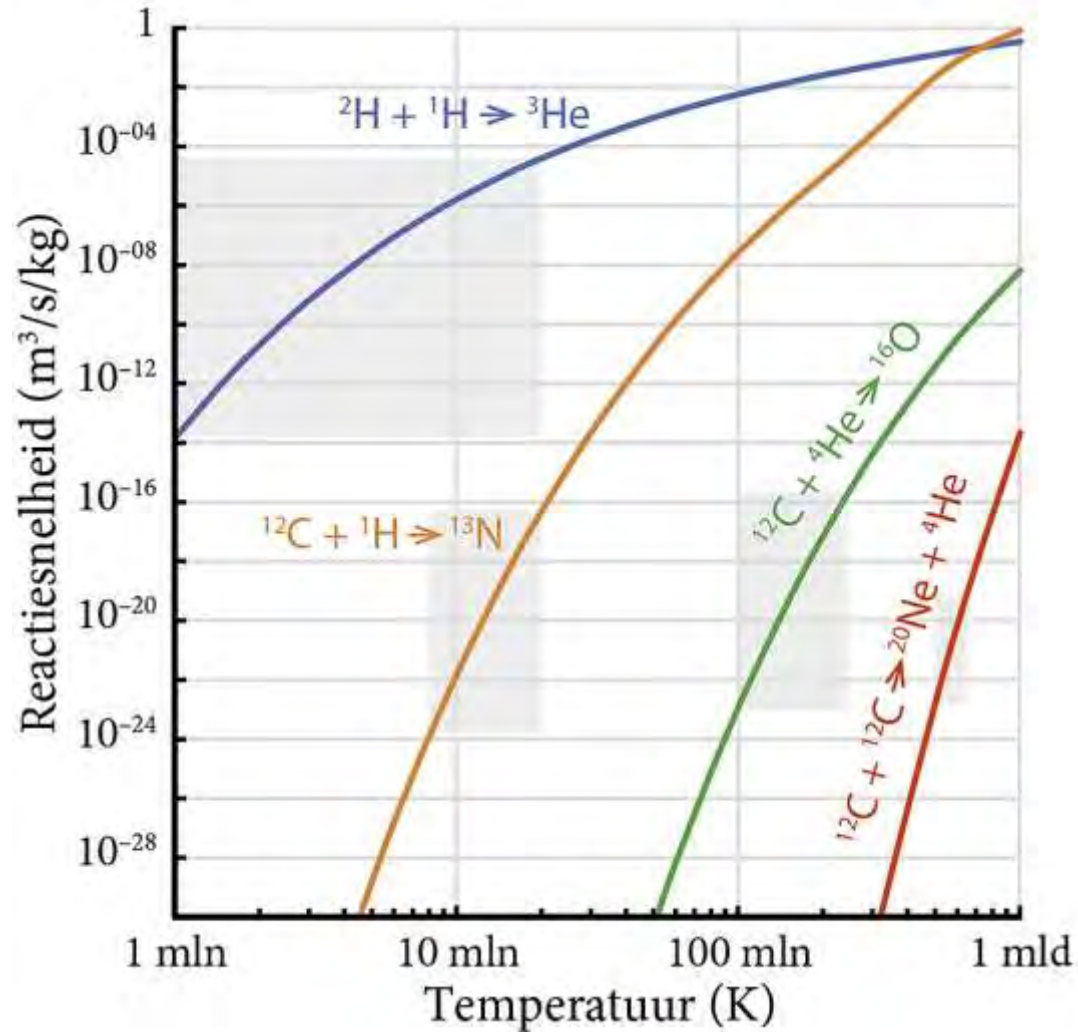


Lage energie: onvoldoende reacties om snelheid in labo te meten

$$S(E) = E \frac{\sigma(E)}{P(E)}$$



Reactiesnelheid en tijdschaal



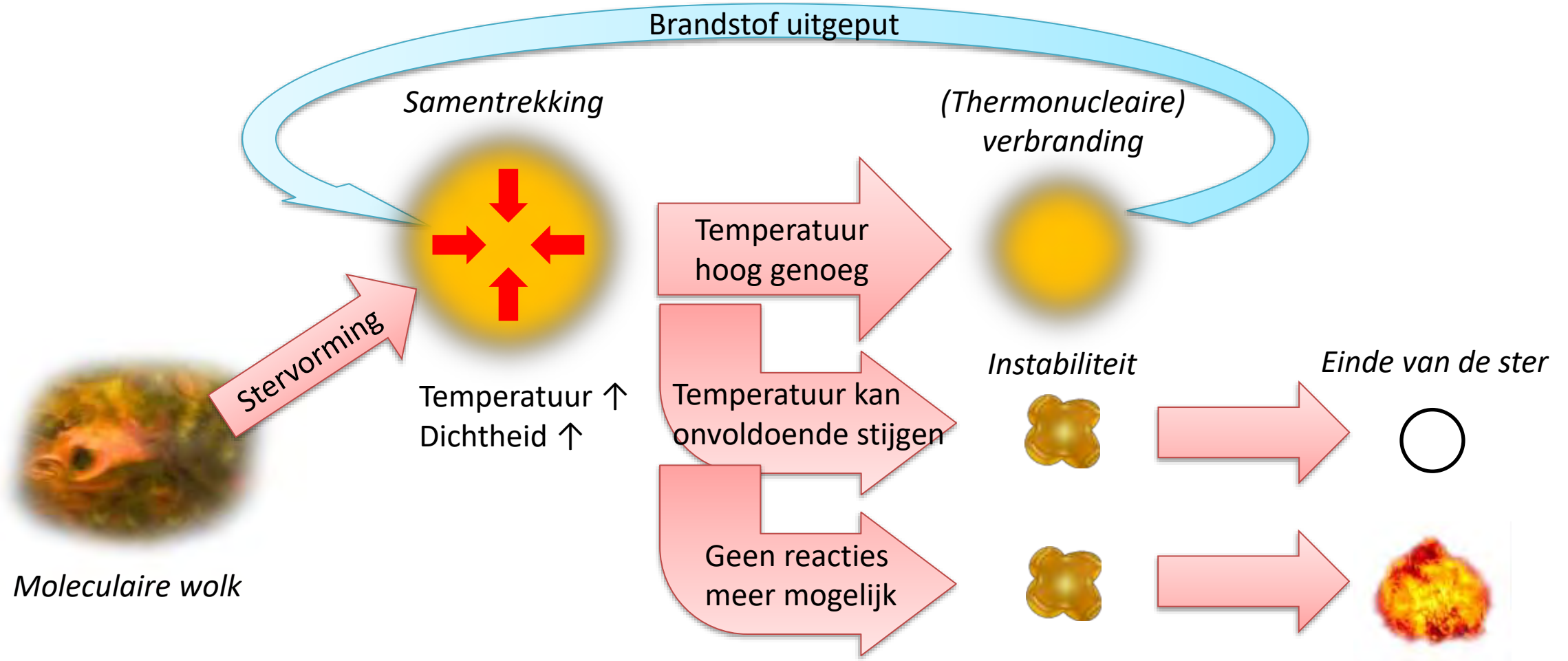


Sterren

Fasen van nucleaire verbranding in sterren

Basisprincipes

- Zwaardere sterren → Hogere temperaturen
- Brandstof uitgeput → Ster trekt samen



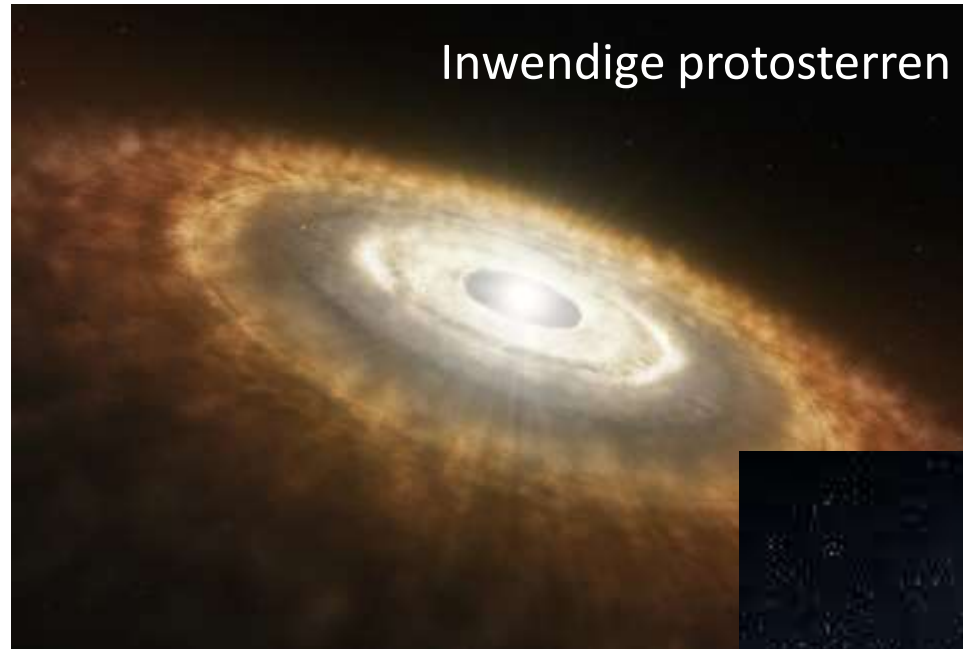
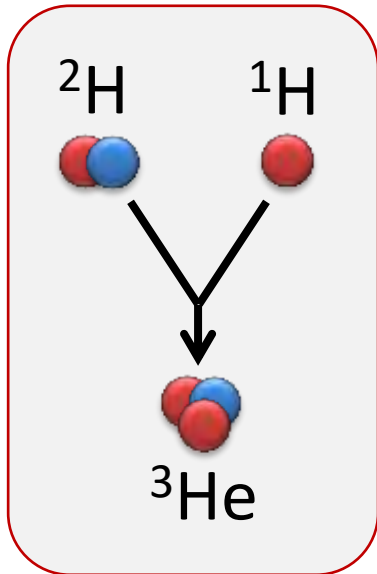
Fasen van nucleaire verbranding in sterren

Deuteriumverbranding

$T = 1 - 5 \text{ mln K}$

$t = 1 - 100\% \text{ totaal}$

$M > 0,013 M_{\text{zon}}$



Fasen van nucleaire verbranding in sterren

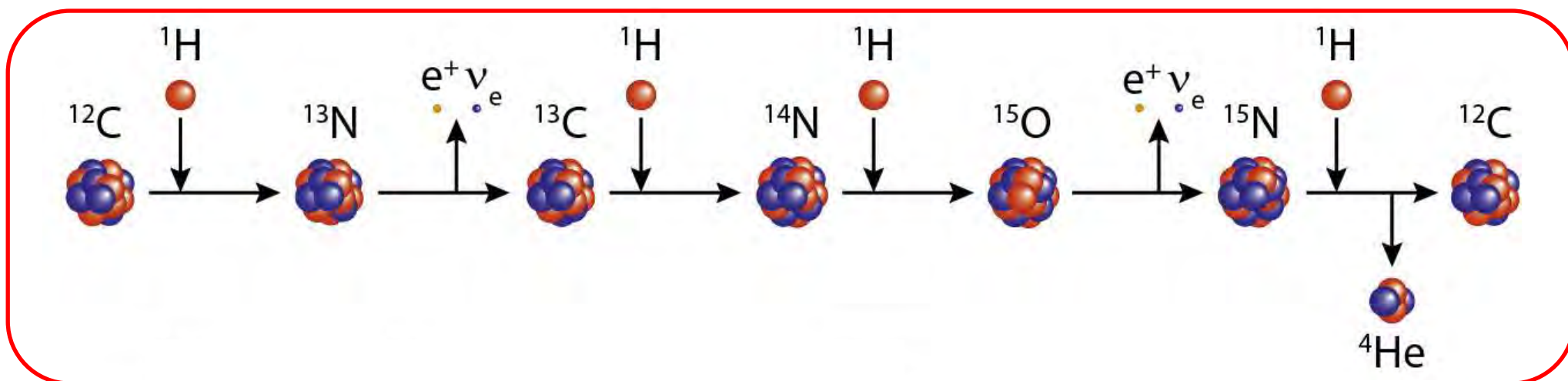
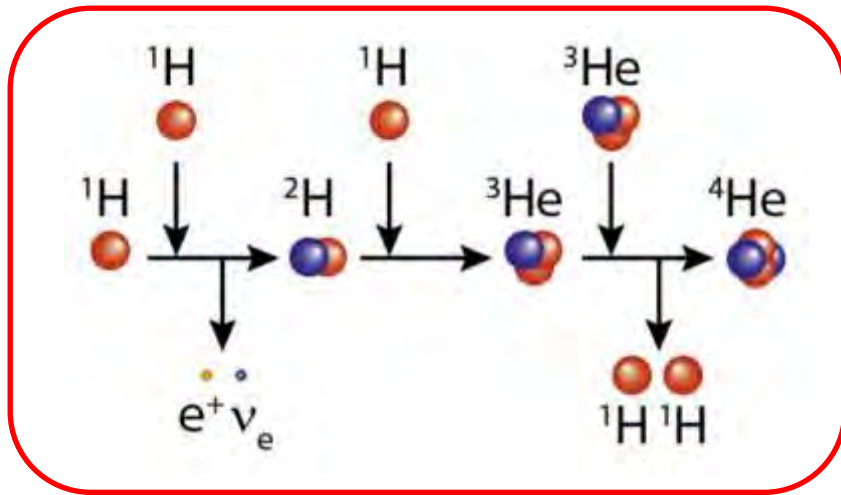
Waterstofverbranding

$T = 10 - 60 \text{ mln K}$

$t = 90\% \text{ totaal}$

$M > 0,075 M_{\text{zon}}$

proton-proton



CN(O)



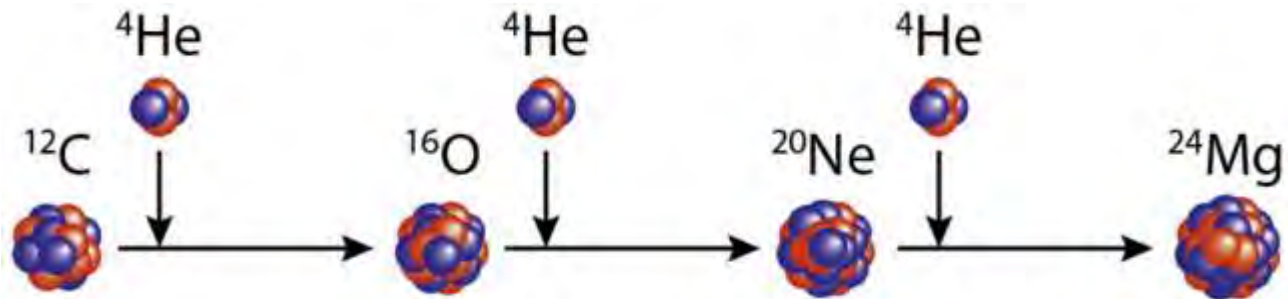
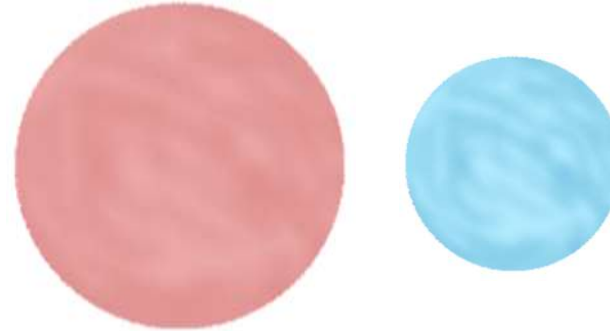
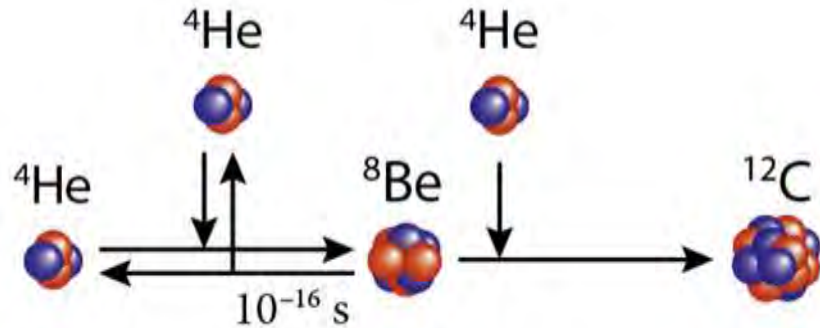
Fasen van nucleaire verbranding in sterren

Heliumverbranding

$T = 100 - 300 \text{ mln K}$ $t = 10\% \text{ totaal}$

$M > 0,8 M_{\text{zon}}$

3α



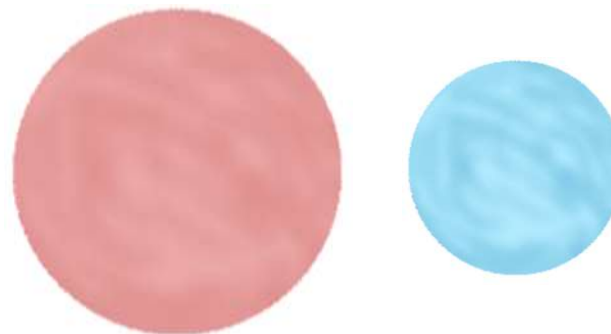
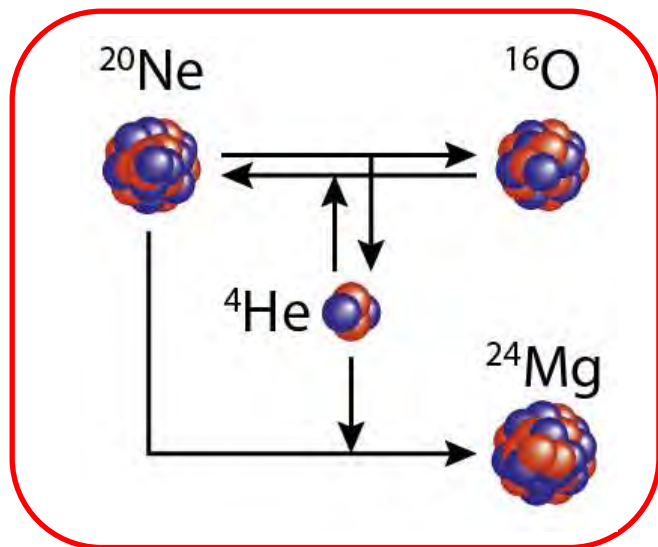
Fasen van nucleaire verbranding in sterren

Neondesintegratie

$T = 1$ mld K

t enkele jaren

$M > 9 M_{\text{zon}}$

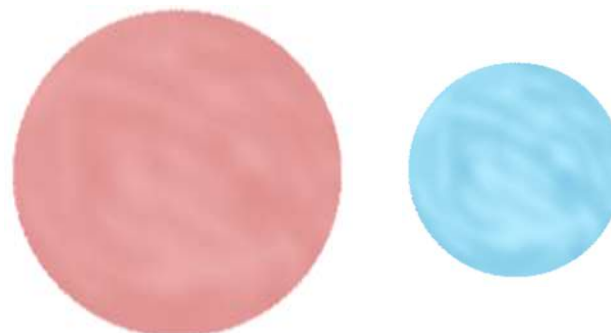
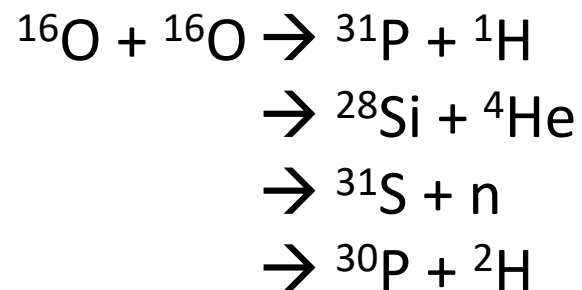


Zuurstofverbranding

$T = 1,5 - 2$ mld K

t enkele jaren

$M > 9 M_{\text{zon}}$



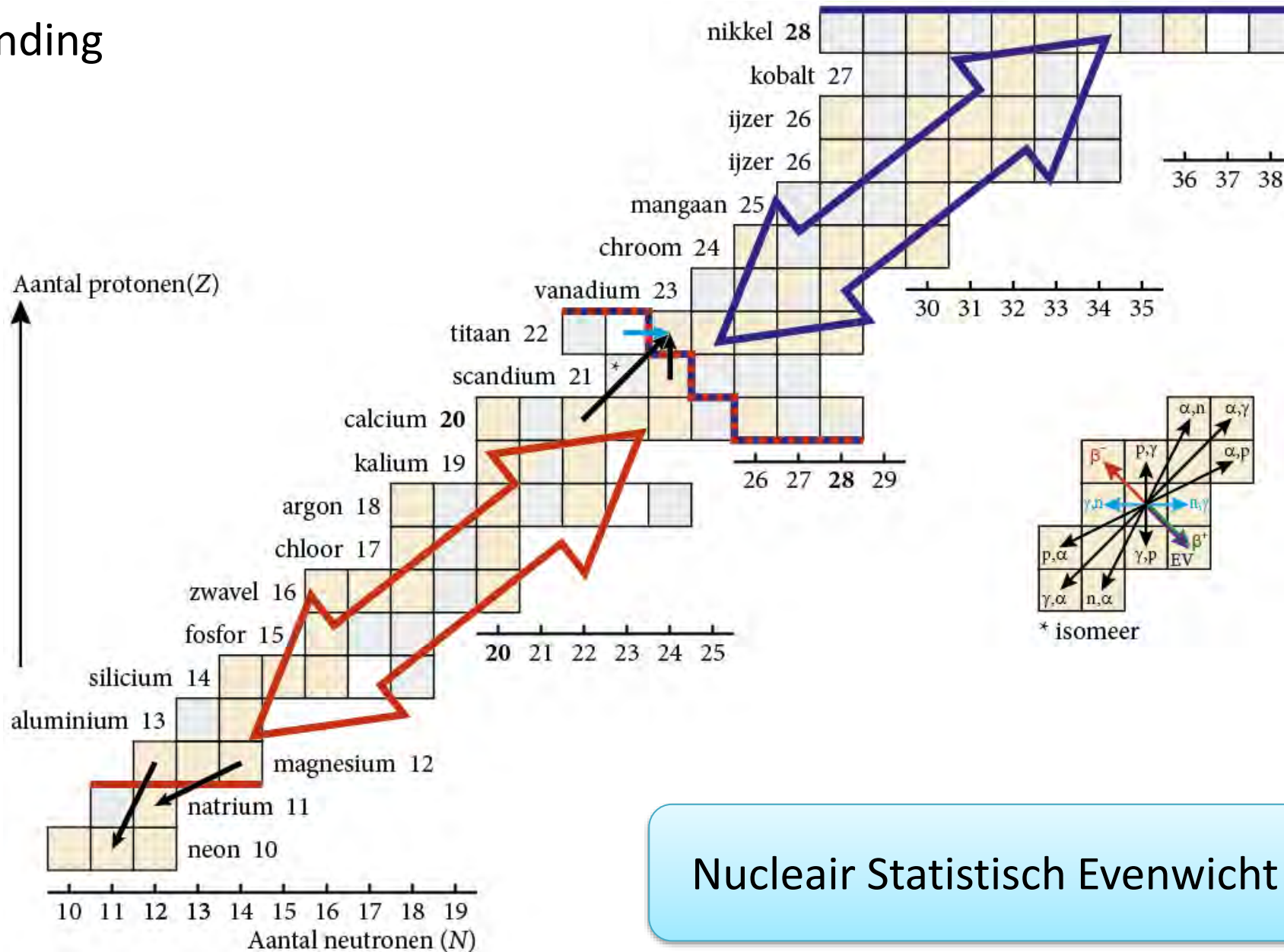
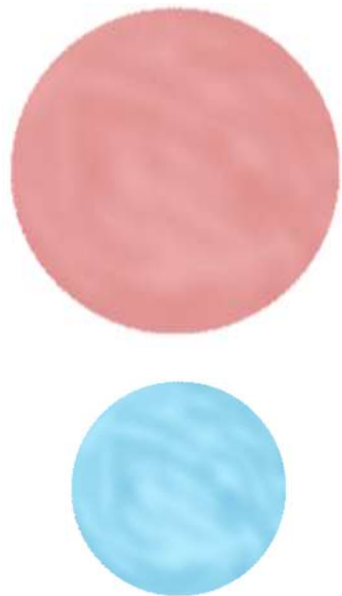
Fasen van nucleaire verbranding in sterren

Siliciumverbranding

$T = 3 \text{ mld K}$

t enkele dagen

$M > 9 M_{\text{zon}}$



Nuclear Statistisch Evenwicht

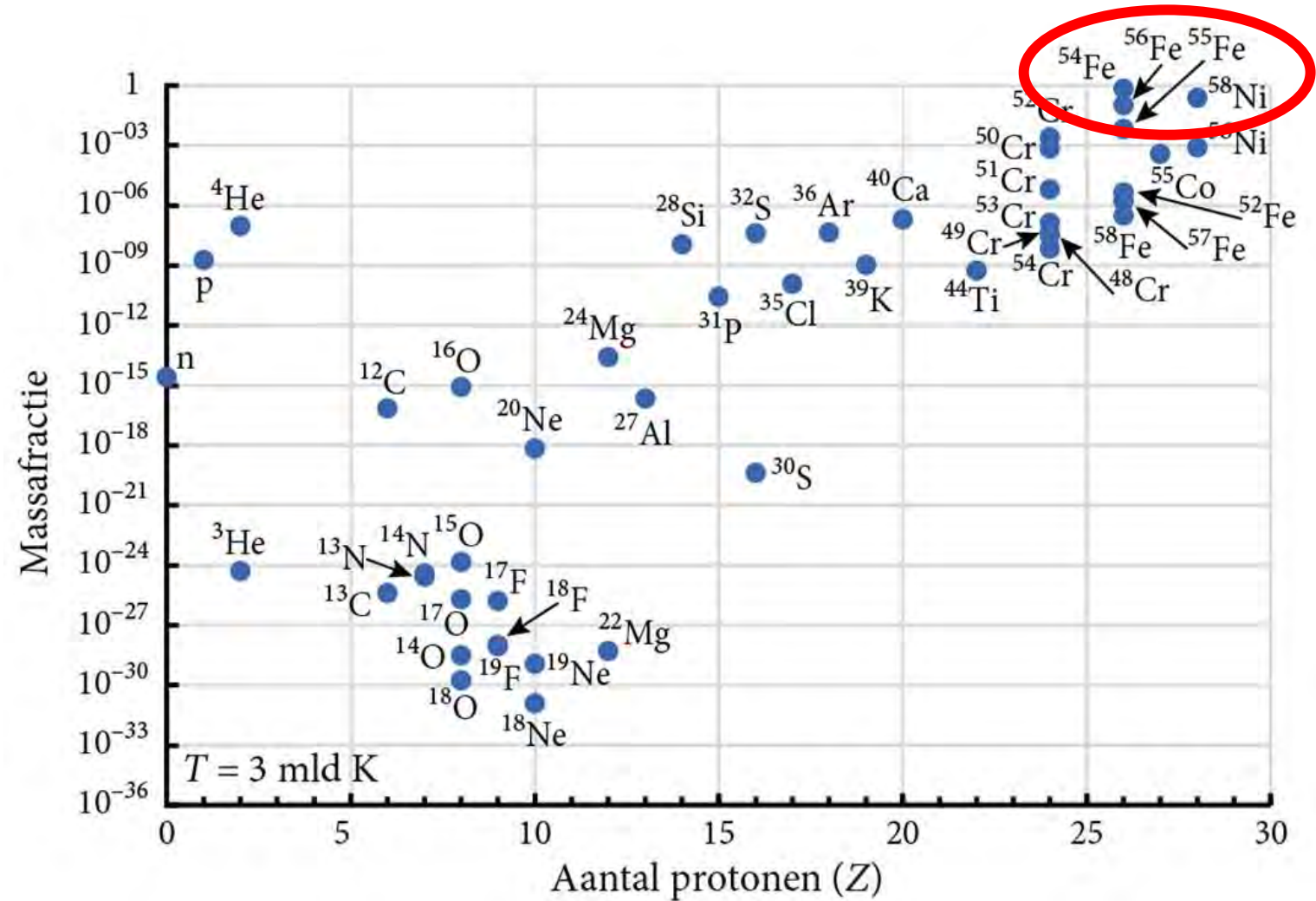
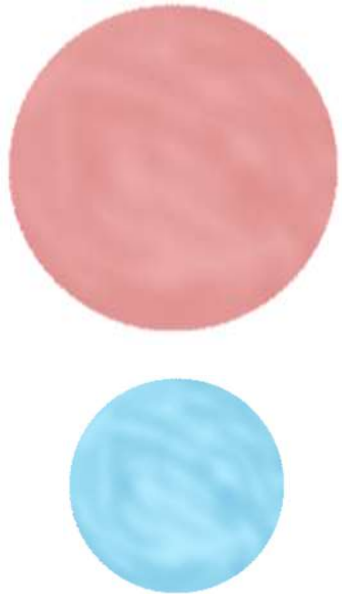
Fasen van nucleaire verbranding in sterren

Siliciumverbranding

$T = 3 \text{ mld K}$

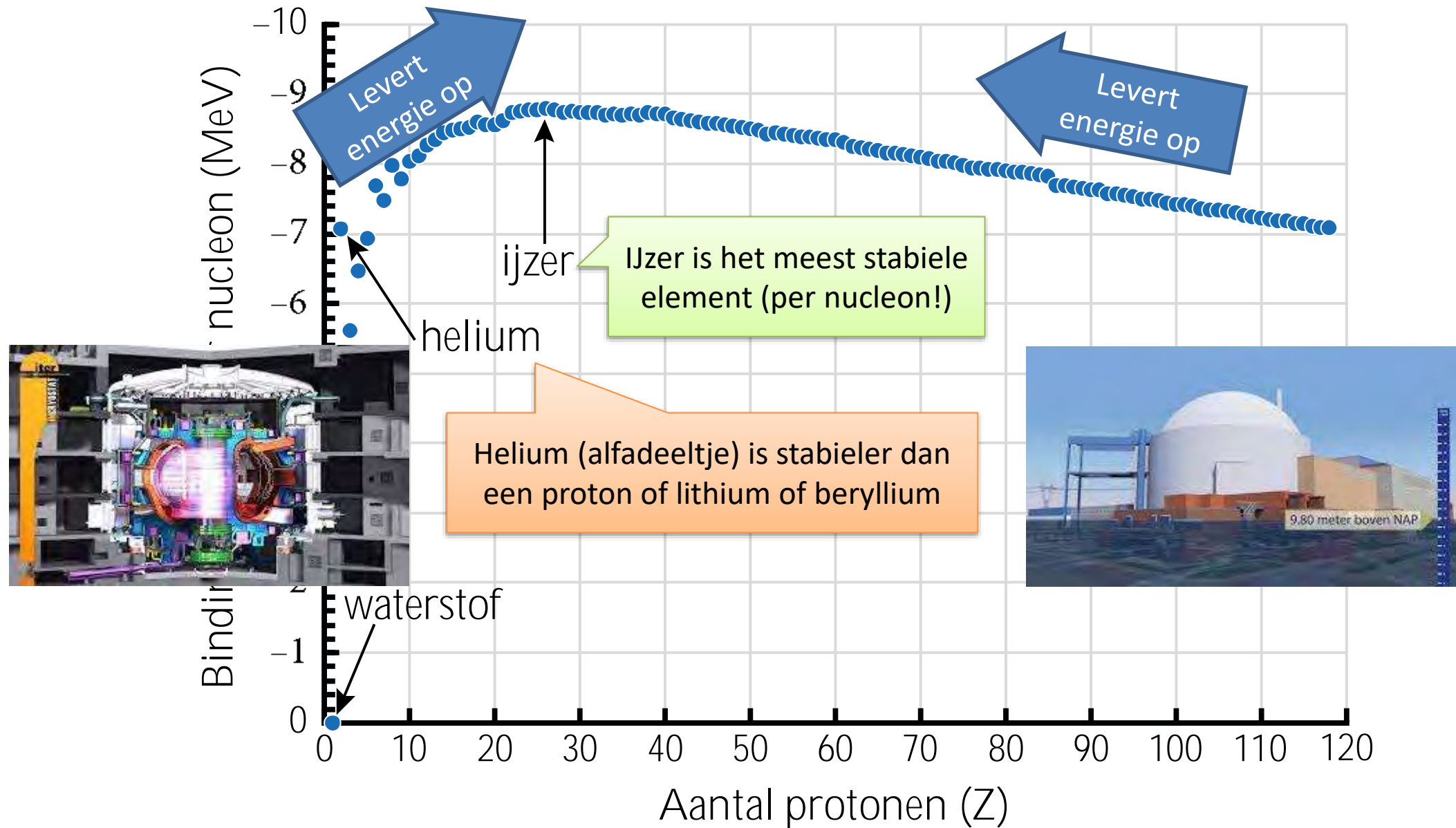
t enkele dagen

$M > 9 M_{\text{zon}}$



Nuclear Statistisch Evenwicht

Kernfusie tot ijzer: bindingsenergie per nucleon





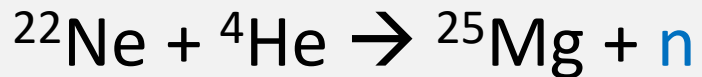
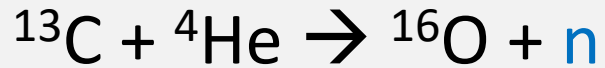
Pauze



Weinig neutronen en sterren

Het s-proces

Productie neutronen: heliumverbranding, koolstofverbranding



Vrije neutronen



Stabiele verbrandingsfase

Vrij weinig neutronen ($10^{13} - 10^{18} / \text{m}^3$)

Lange duur ($10^3 - 10^6$ jaar)

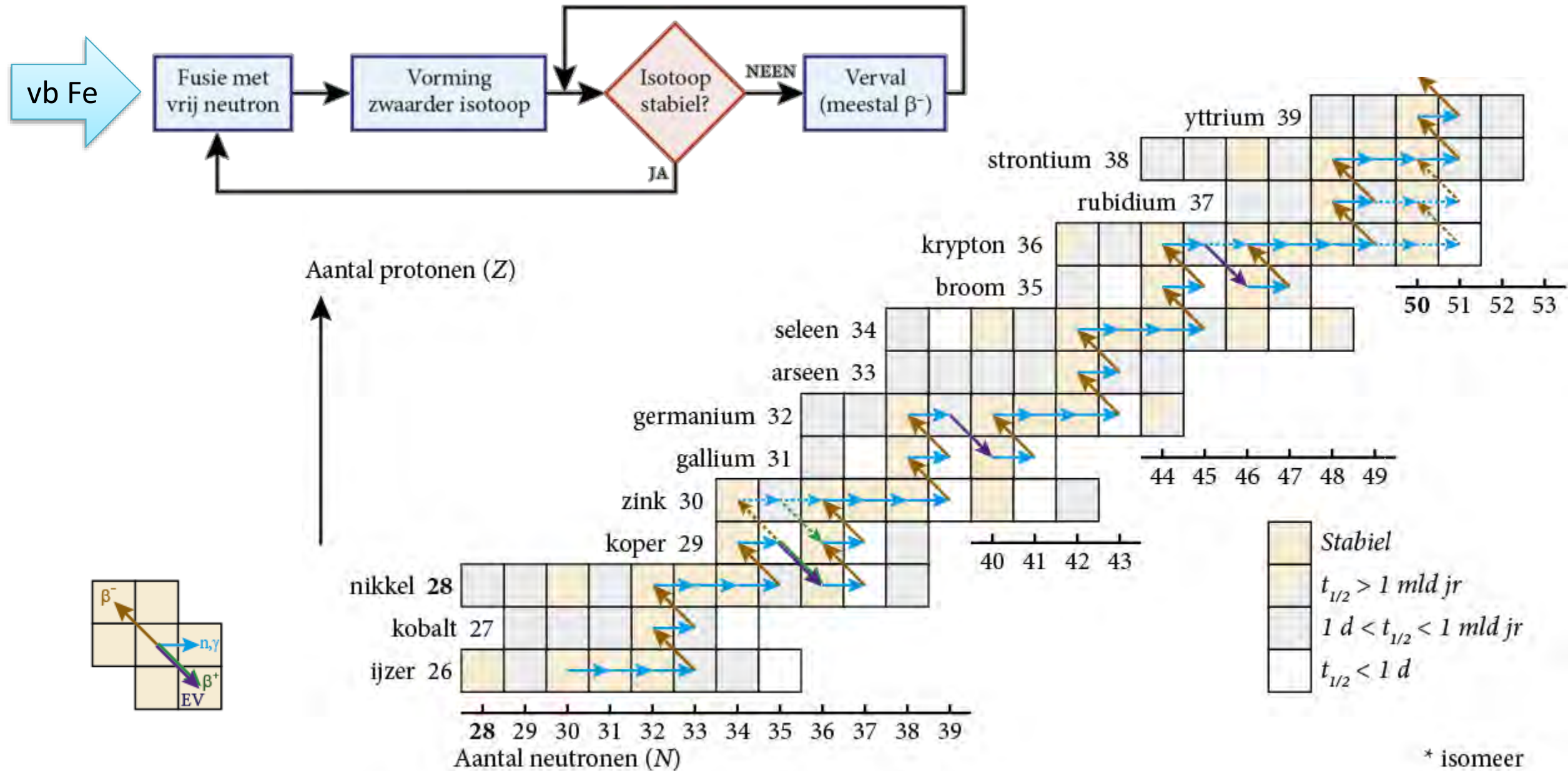
Neutronenvangst langzamer
dan β -verval

s-proces (s = "slow")

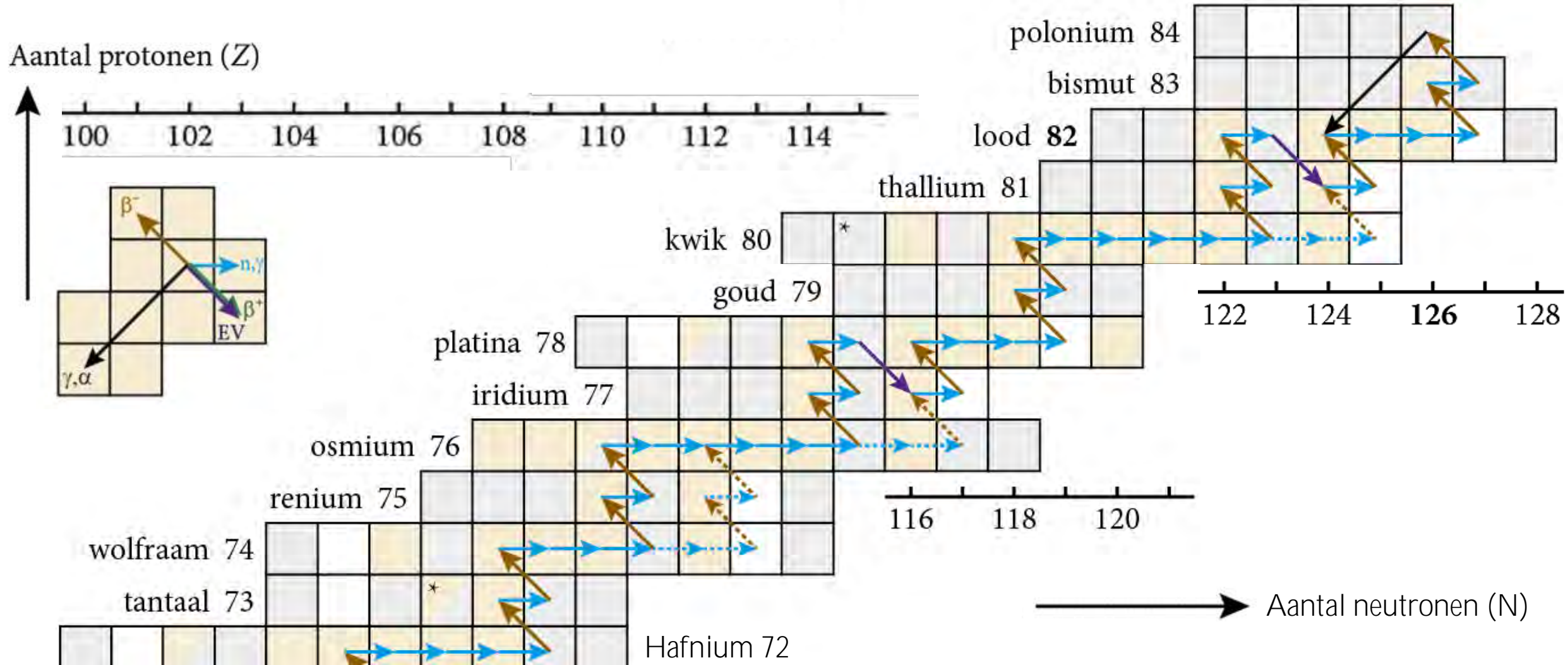
ELEKTRISCH NEUTRAAL
GEEN COULOMBBARRIÈRE

FUSIONEREN GEMAKKELIJK MET (ZWARE) ATOOMKERNEN

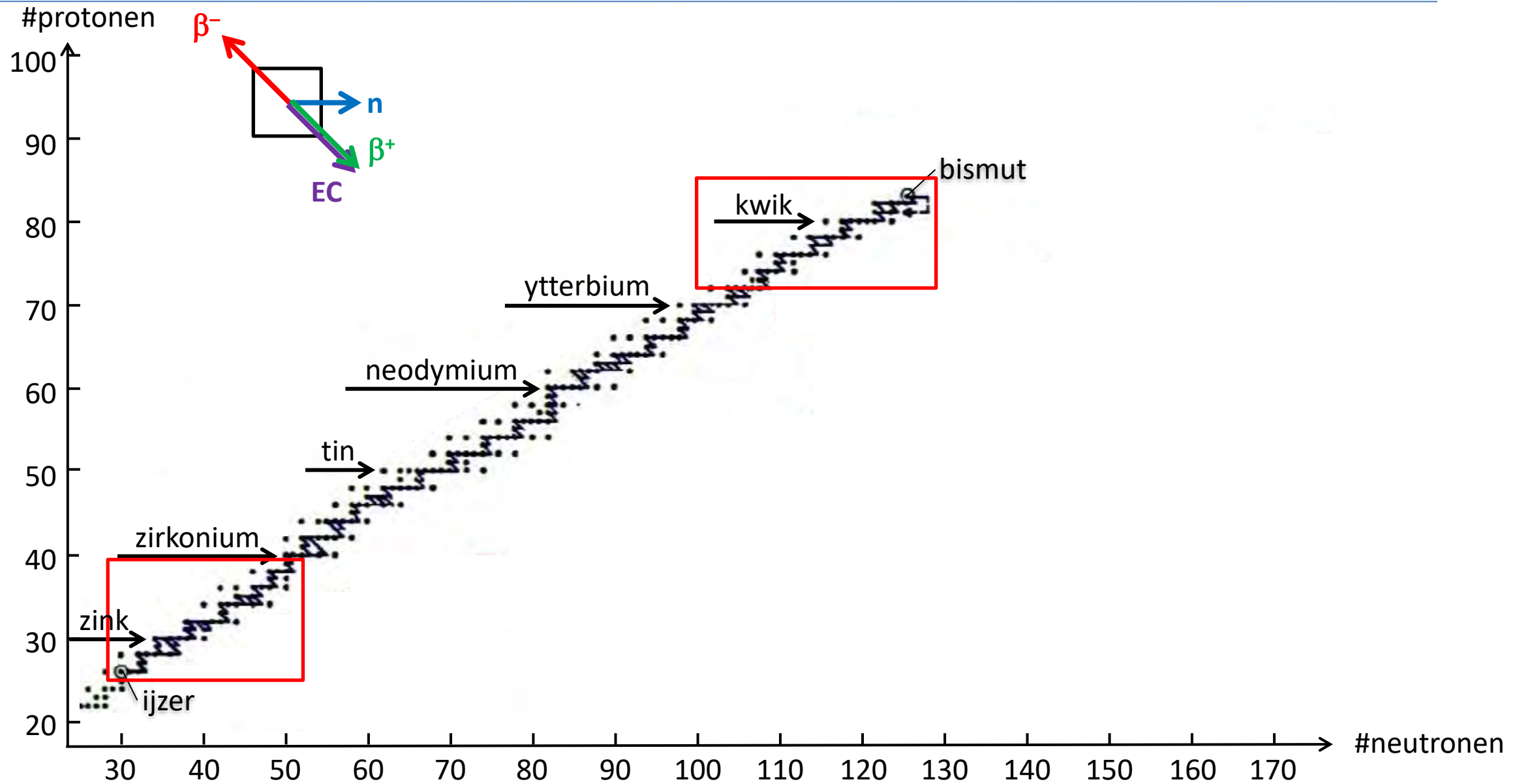
Het s-proces (s = "slow" – traag)



Het s-proces (s = "slow" – traag)

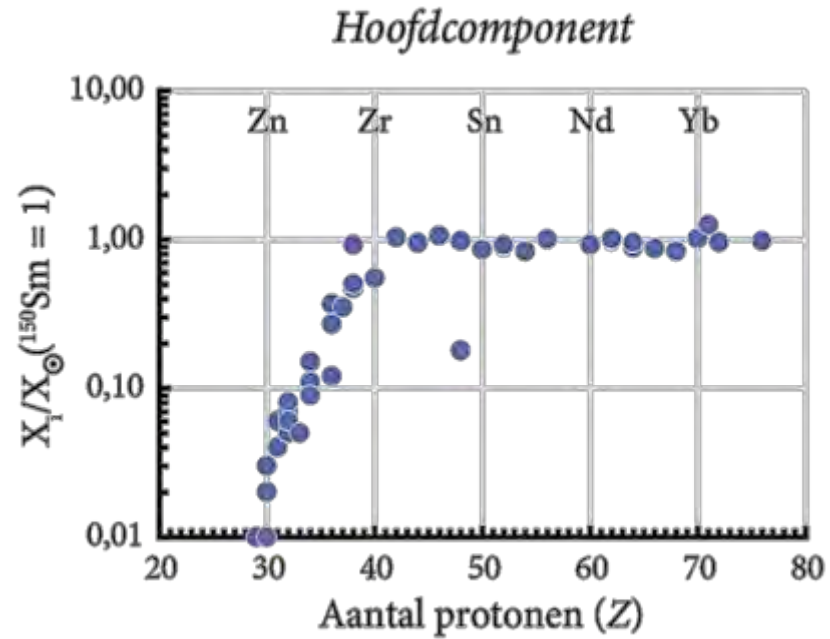


Meer neutronen dan normaal

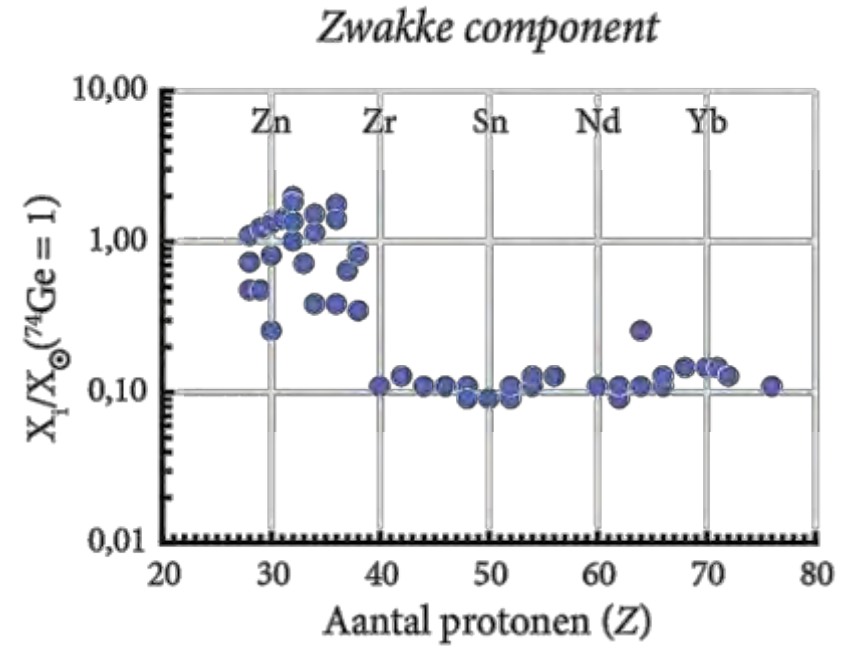


Productie elementen door s-proces: waar?

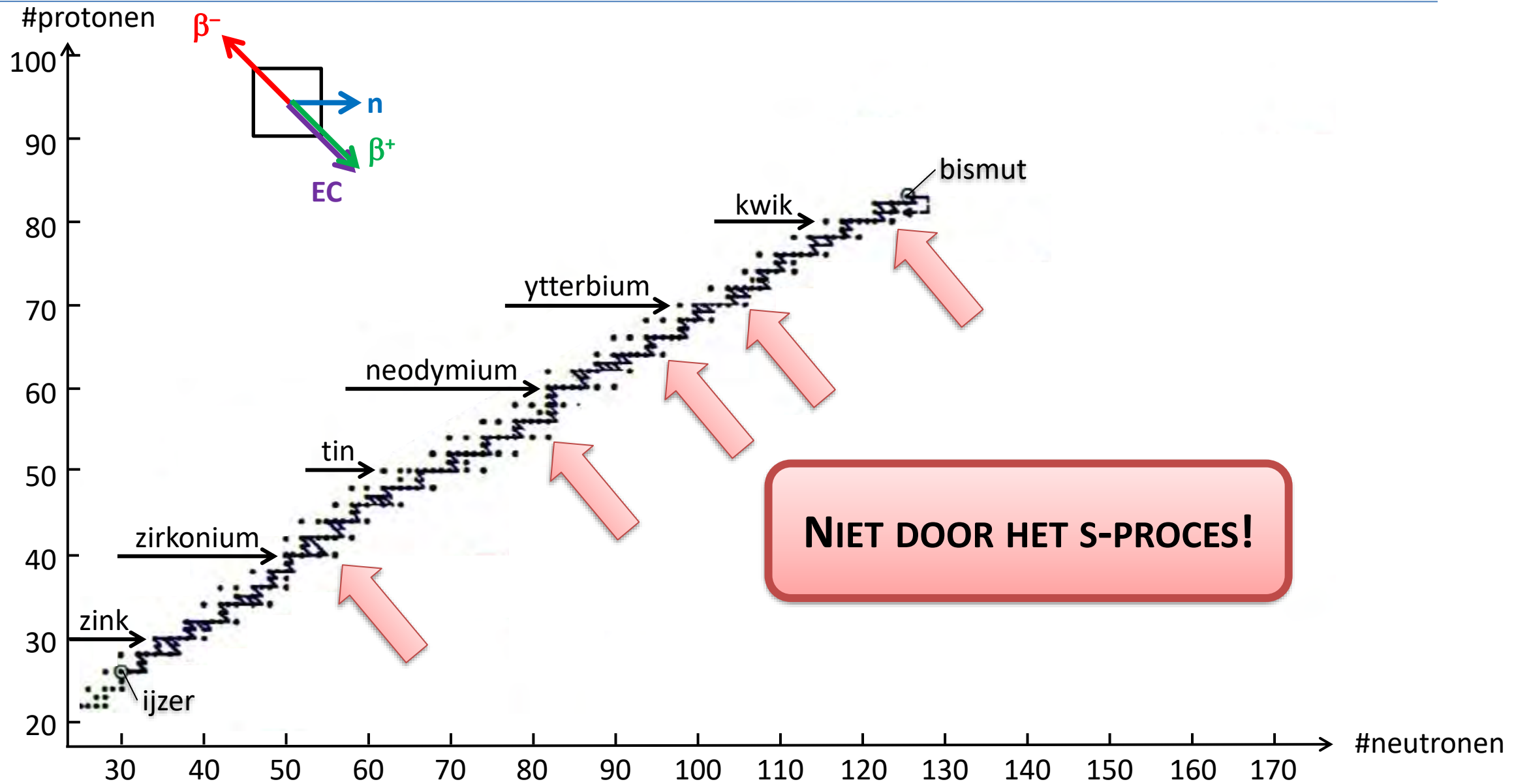
In pulserende lichte sterren

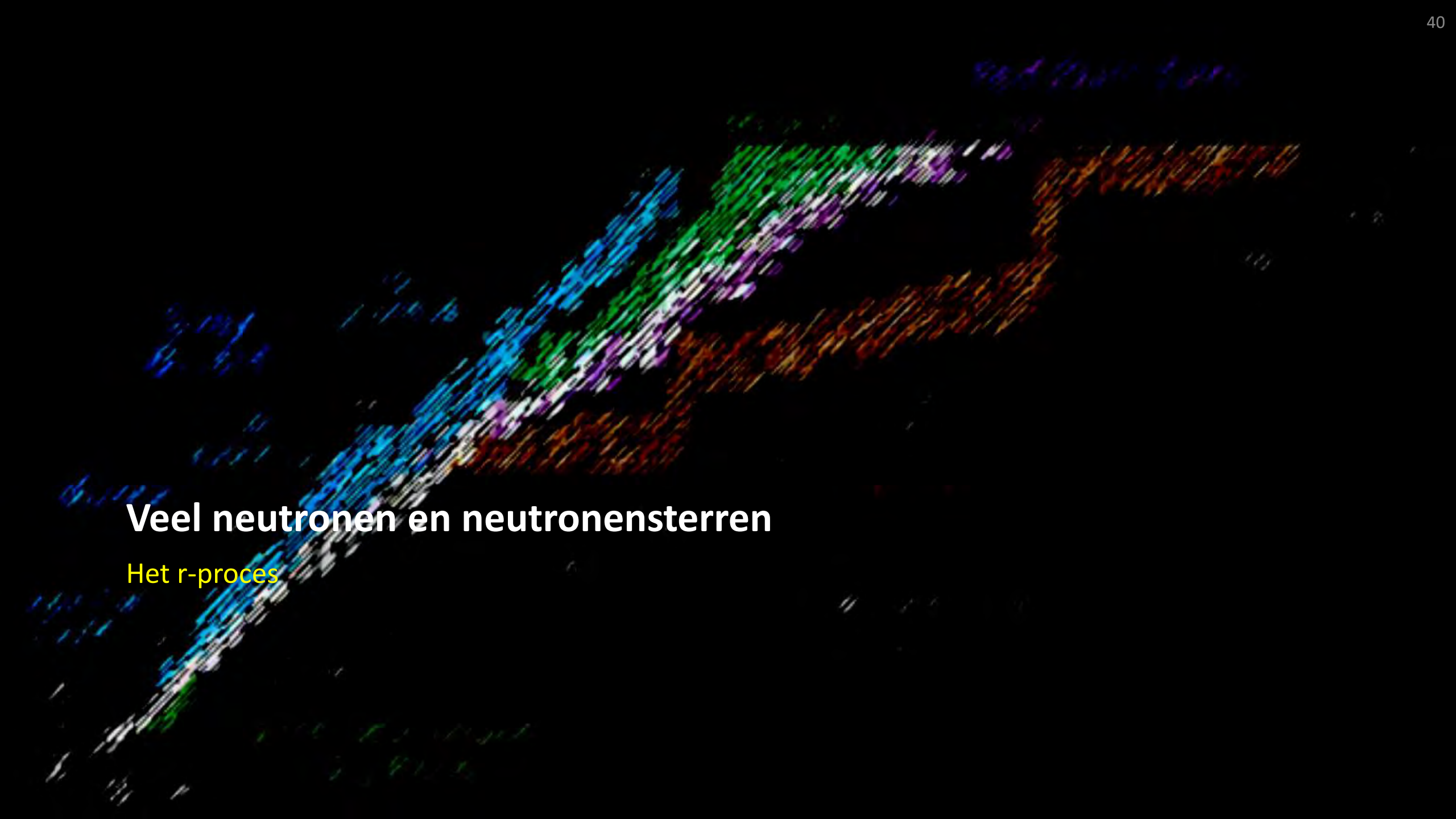


In zware sterren (He, C-verbranding)



Isotopen met relatief veel neutronen

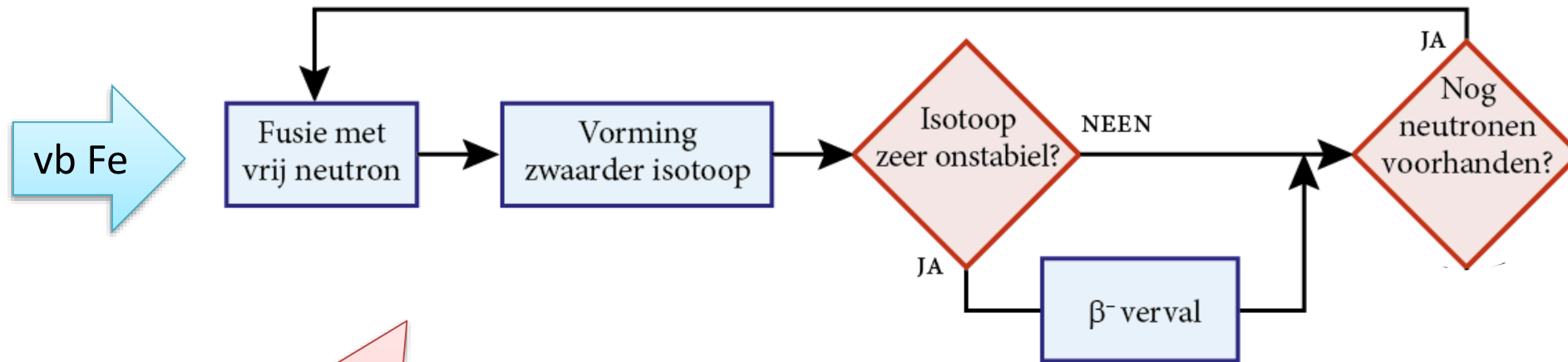




Veel neutronen en neutronensterren

Het r-proces

Het r-proces (r = “rapid” – snel)



“Cataclysmische” fase

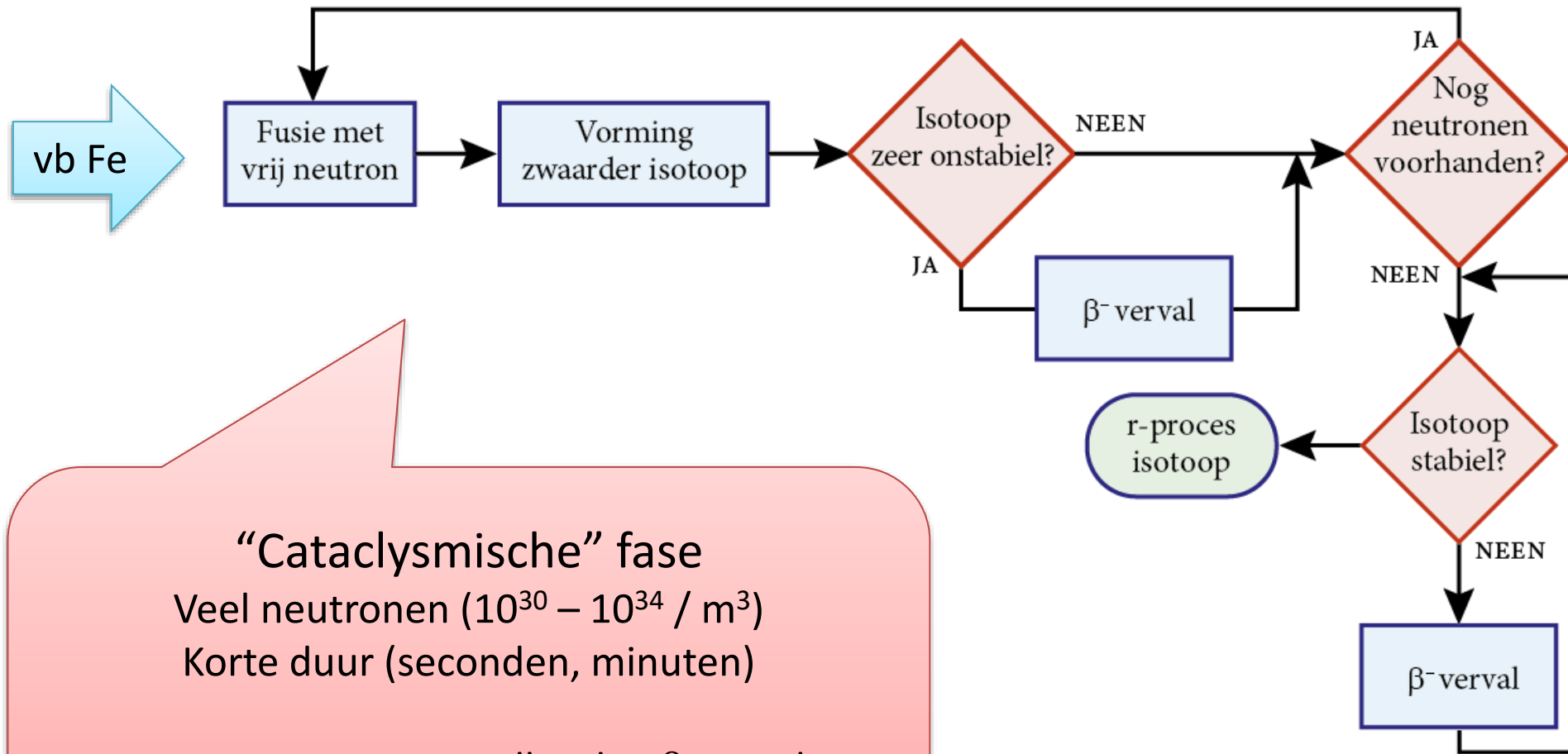
Veel neutronen ($10^{30} - 10^{34} / \text{m}^3$)

Korte duur (seconden, minuten)

Neutronenvangst sneller dan β -verval

r-proces (r = “rapid”)

Het r-proces (r = "rapid" – snel)



“Cataclysmische” fase

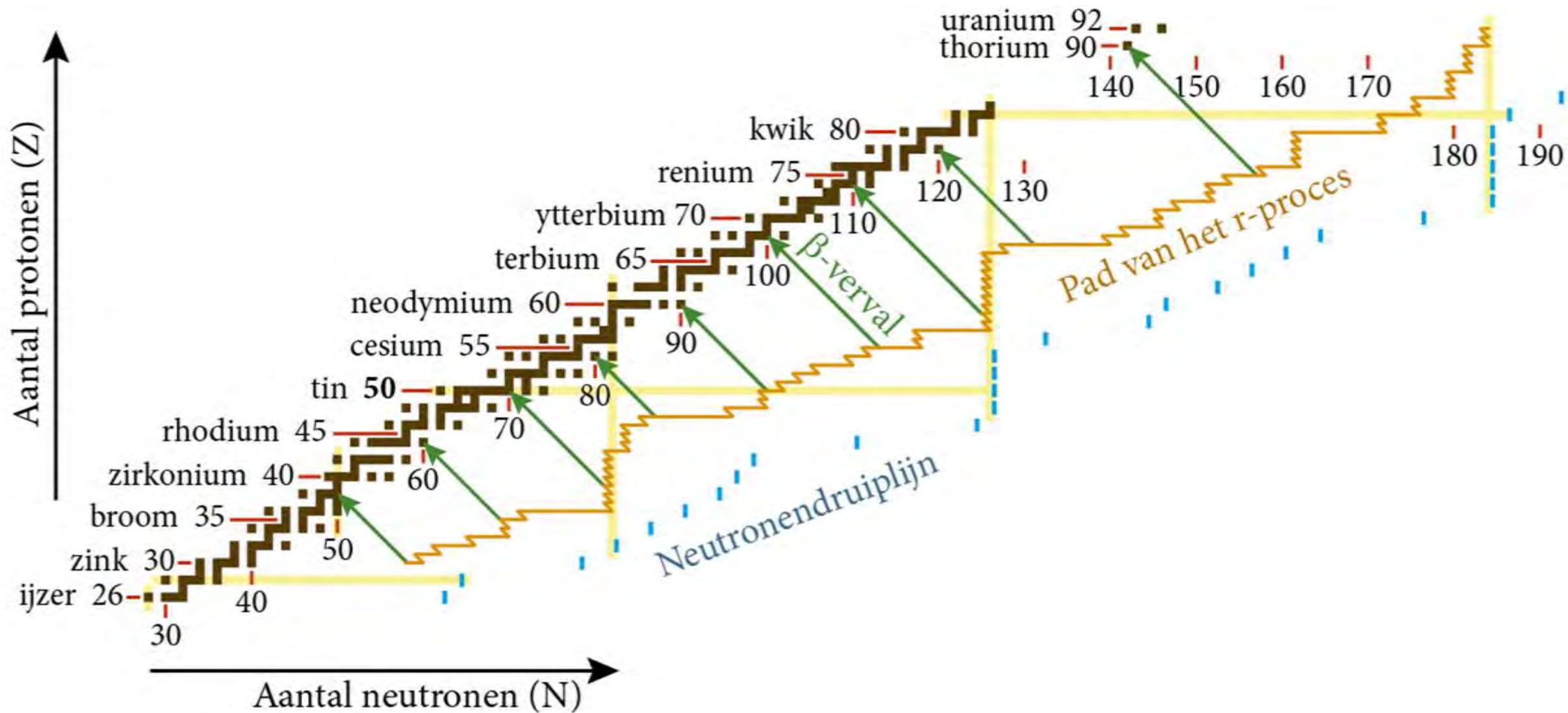
Veel neutronen ($10^{30} - 10^{34} / \text{m}^3$)

Korte duur (seconden, minuten)

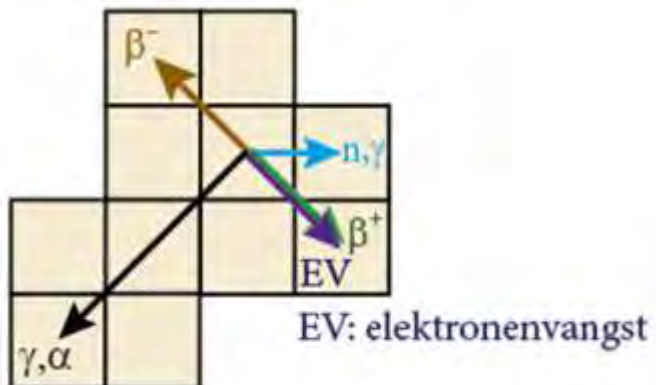
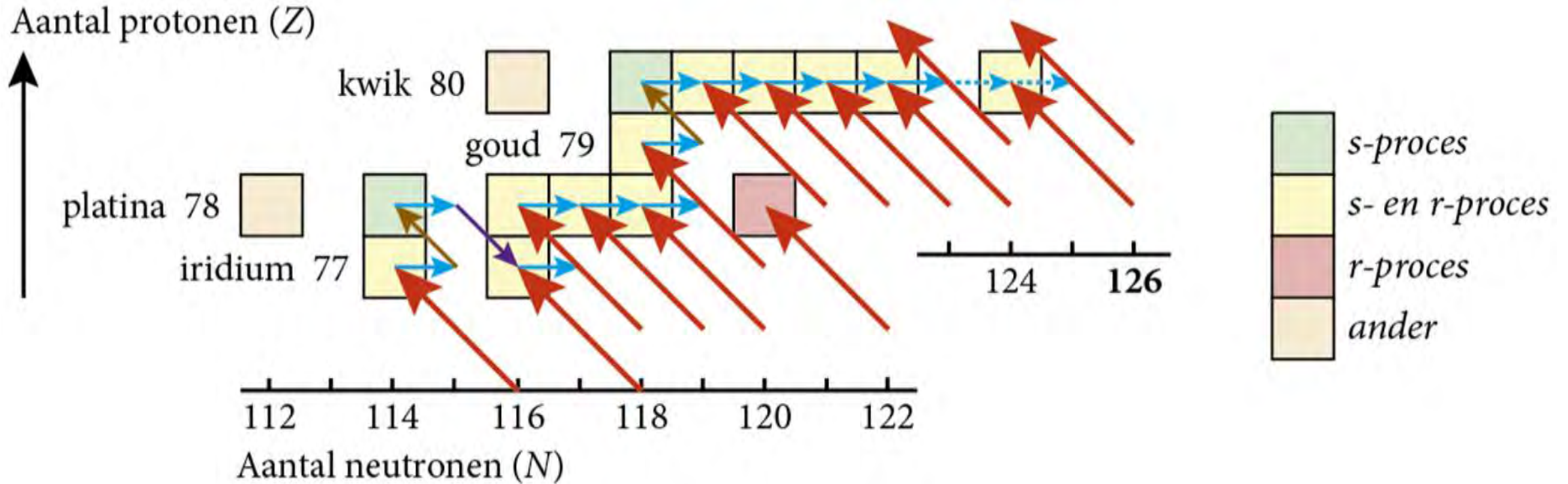
Neutronenvangst sneller dan β -verval

r-proces (r = “rapid”)

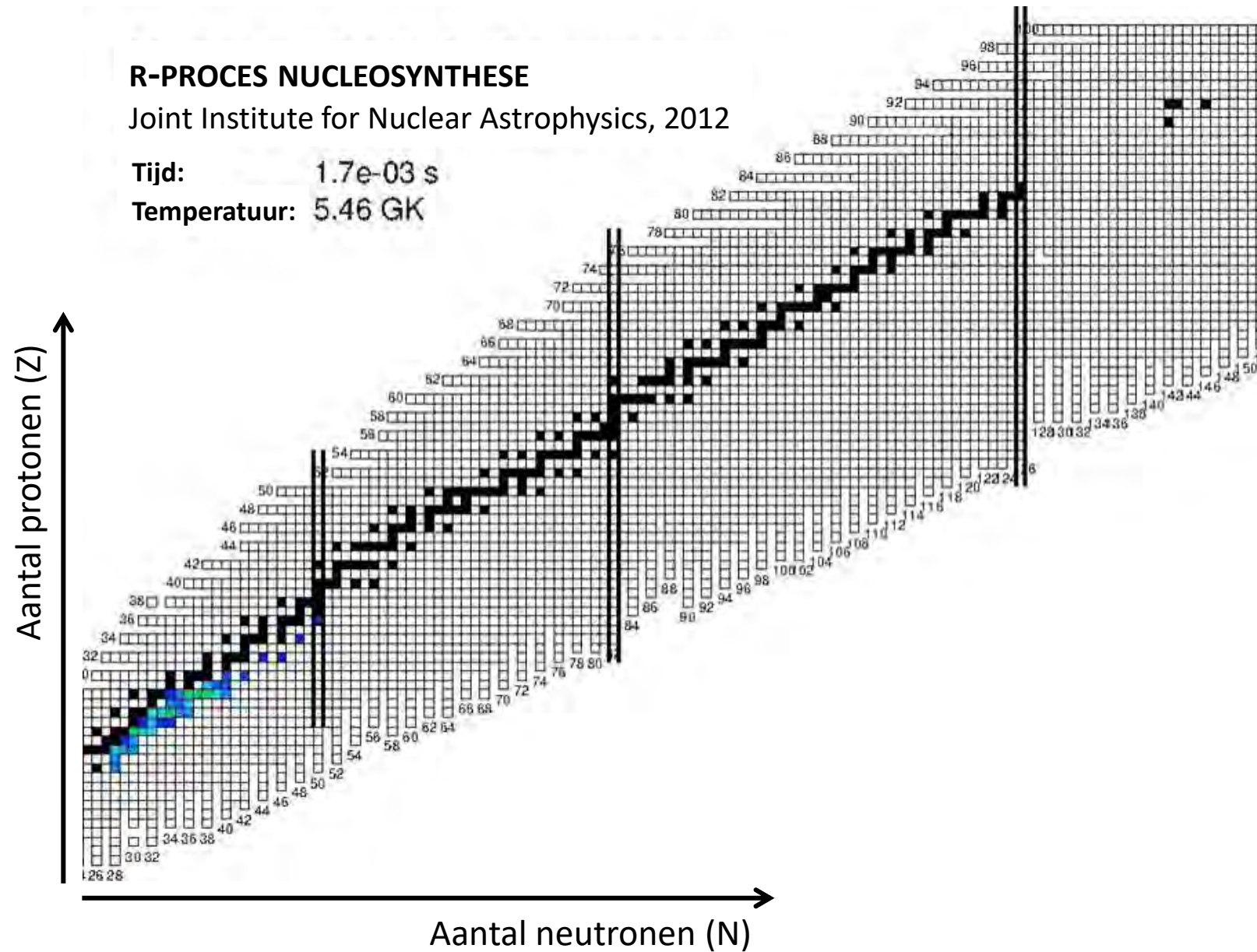
Het r-proces in het isotopendiagram



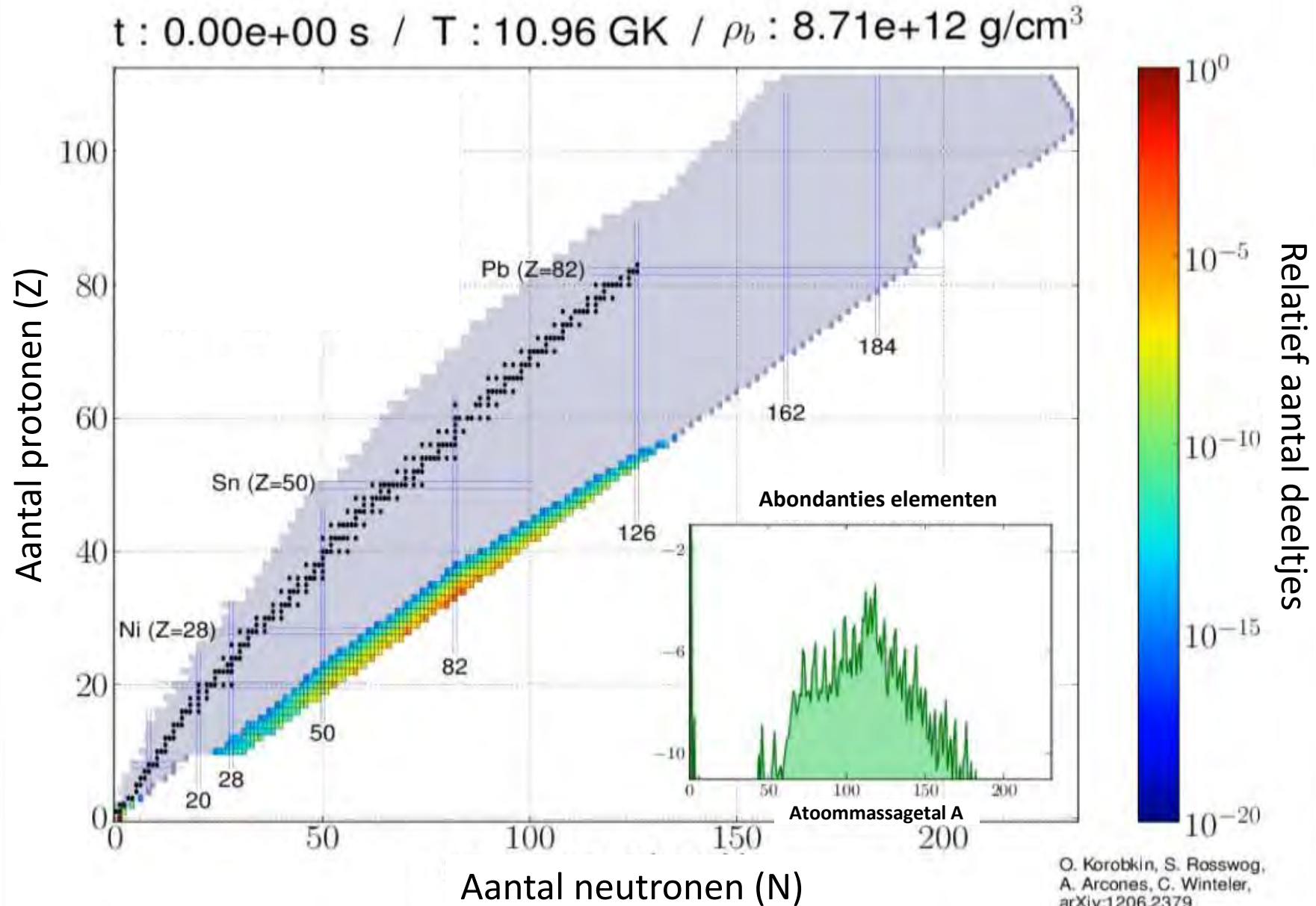
Vorming van (stabiele) r-proces elementen



Het r-proces in het isotopendiagram: neutronenvangst

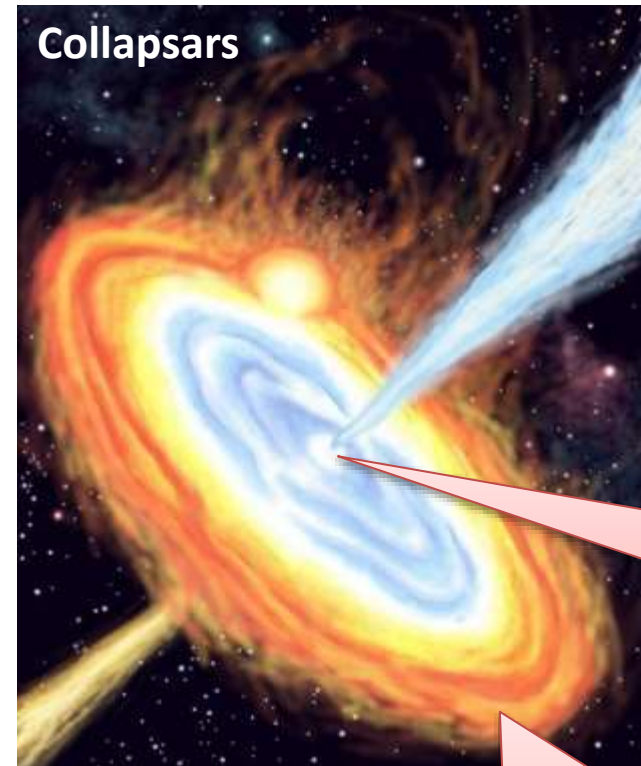
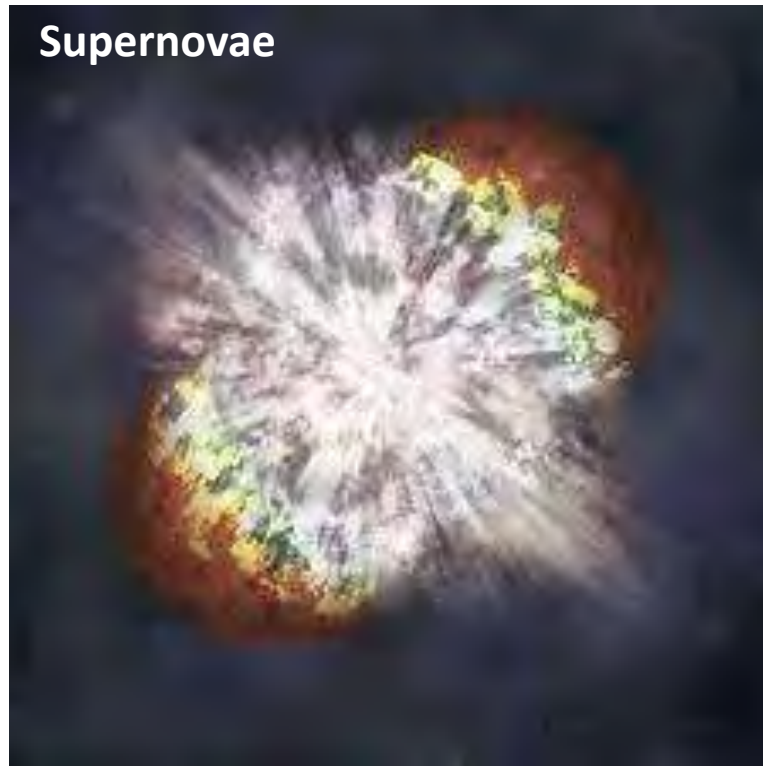


Het r-proces in het isotopendiagram: verval tot stabiele isotopen



Vorming van r-proces elementen: supernova-explosies

Waar?



Zware ster die
ineenstort tot zwart gat

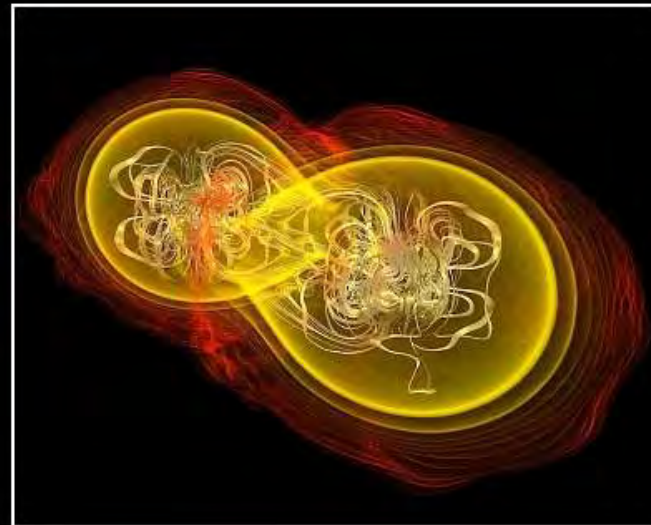
r-proces materiaal
uitgeworpen via schijf

Vorming van r-proces elementen: samensmeltende neutronensterren

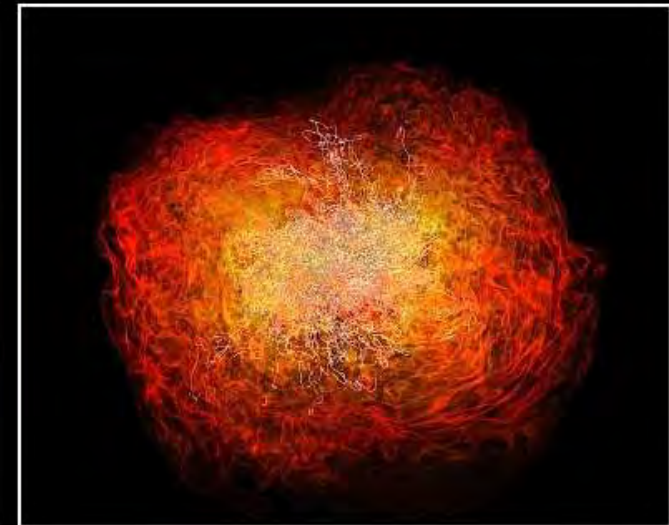
Vorming van r-proces elementen: samensmeltende neutronensterren



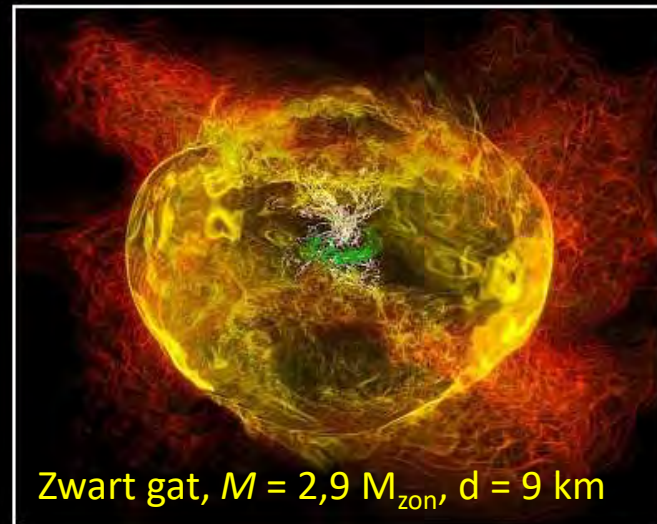
$t = 0$



$t = 7,4 \text{ ms}$



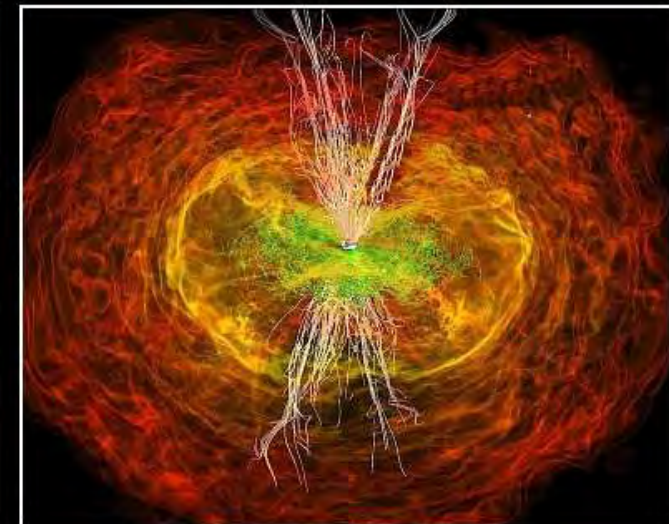
$t = 13,8 \text{ ms}$



$t = 15,3 \text{ ms}$

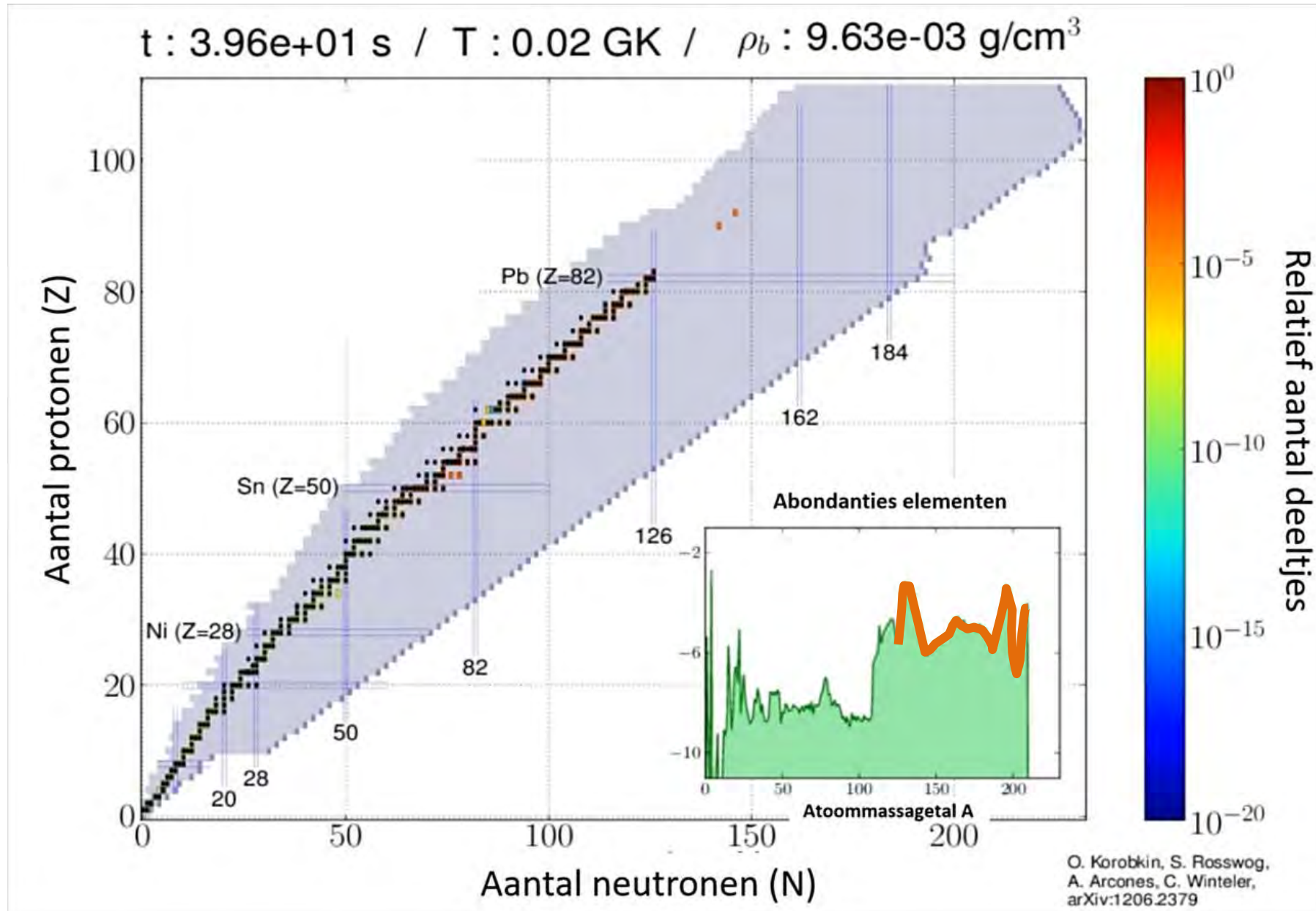


$t = 21,2 \text{ ms}$



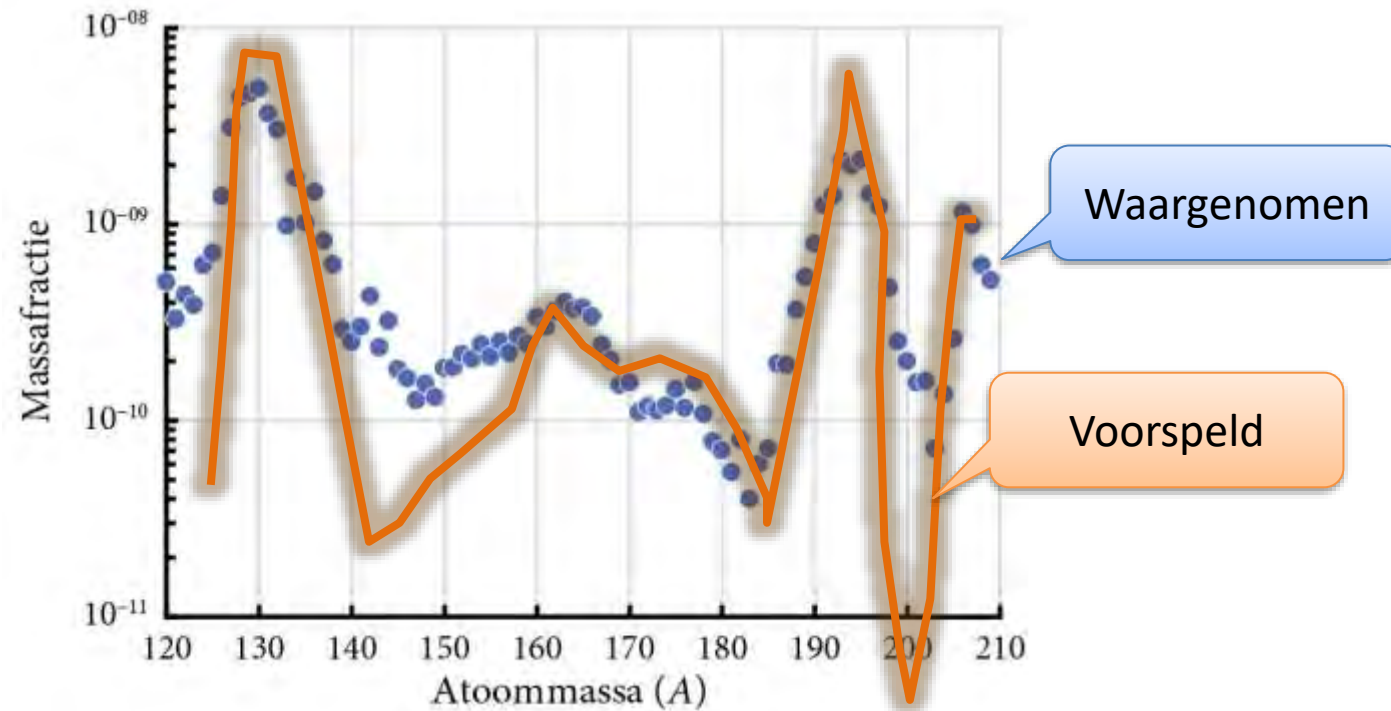
$t = 26,5 \text{ ms}$

Het r-proces in het isotopendiagram: verval tot stabiele isotopen



Vorming van r-proces elementen

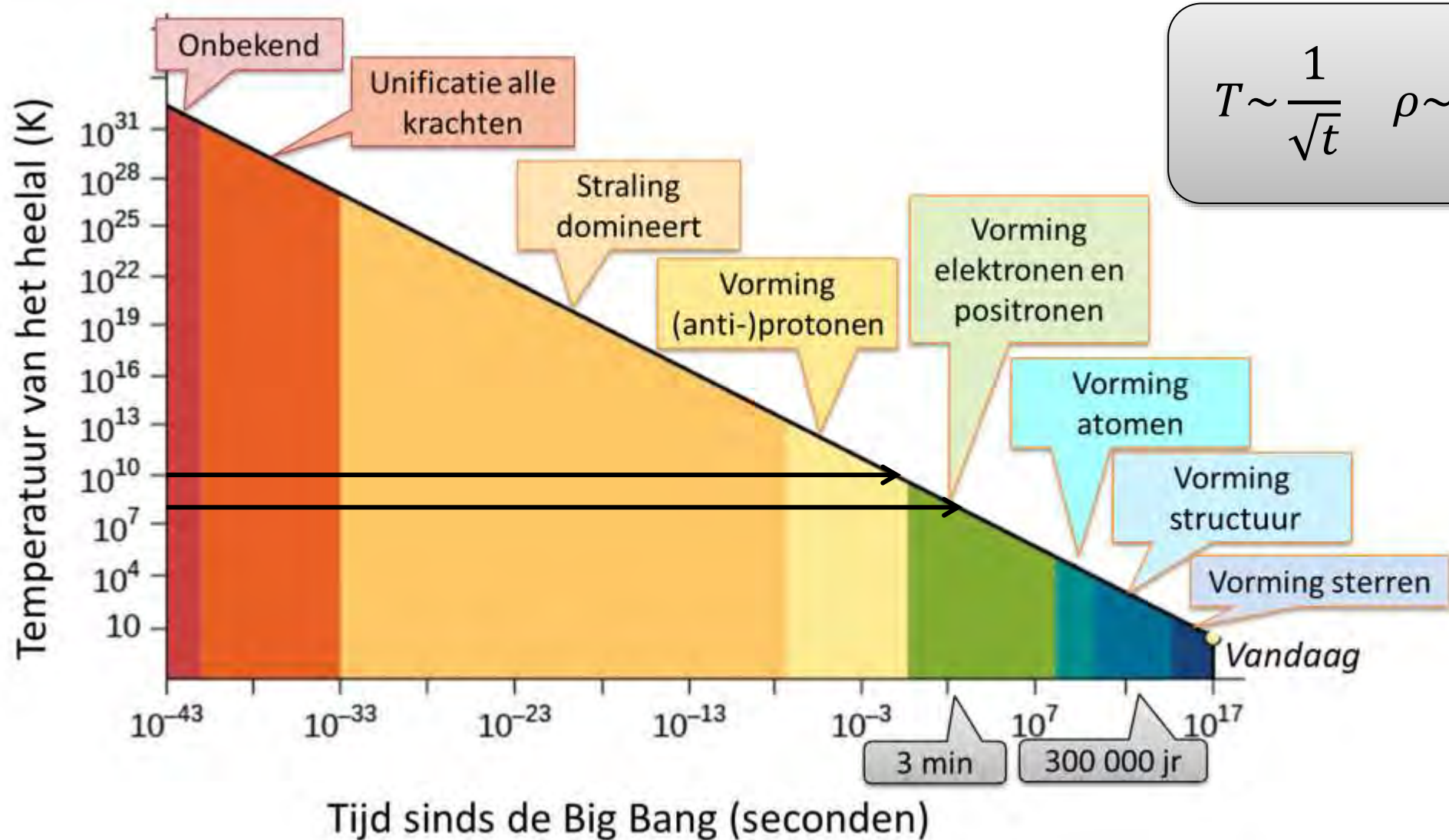
Hoeveel?



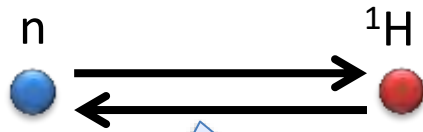


De oerknal

De oerknal



Nucleosynthese bij de oerknal

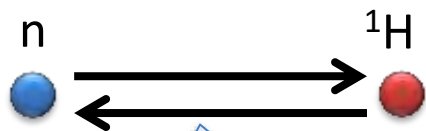


$n \leftrightarrow p$ verbroken bij 8 mld K
(1,5 s ná de Big Bang)
 $N_n/N_p = 0,16$

$m_p < m_n$, zodat $N_p > N_n$
 $T \uparrow\uparrow, N_p \approx N_n$
 $T \downarrow, N_p > N_n$

Hoeveel waterstof?
Hoeveel helium?

Nucleosynthese bij de oerknal



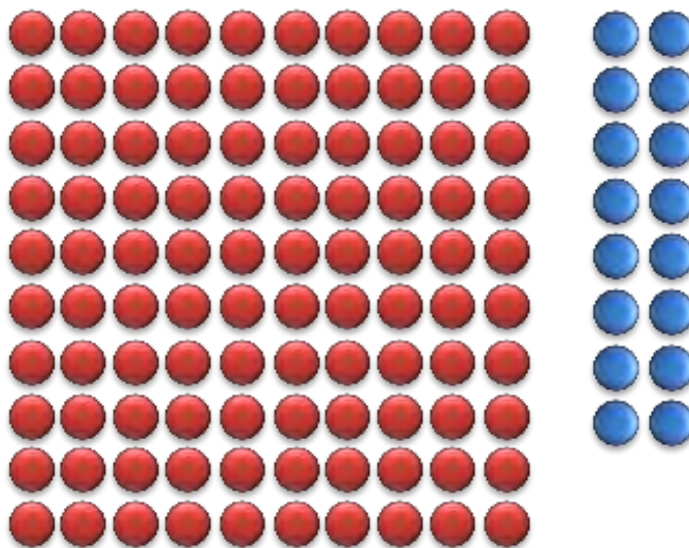
$n \leftrightarrow p$ verbroken bij 8 mld K
(1,5 s ná de Big Bang)
 $N_n/N_p = 0,16$

$m_p < m_n$, zodat $N_p > N_n$
 $T \uparrow\uparrow, N_p \approx N_n$
 $T \downarrow, N_p > N_n$

72%

$$84 \times 1 = 84$$

84 waterstof



28%

$$8 \times 4 = 32$$

8 helium

Nucleosynthese bij de oerknal



Niét de “klassieke” ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$

Vervaltijd vrij
neutron (15 m)
is langer dan
reactietijd

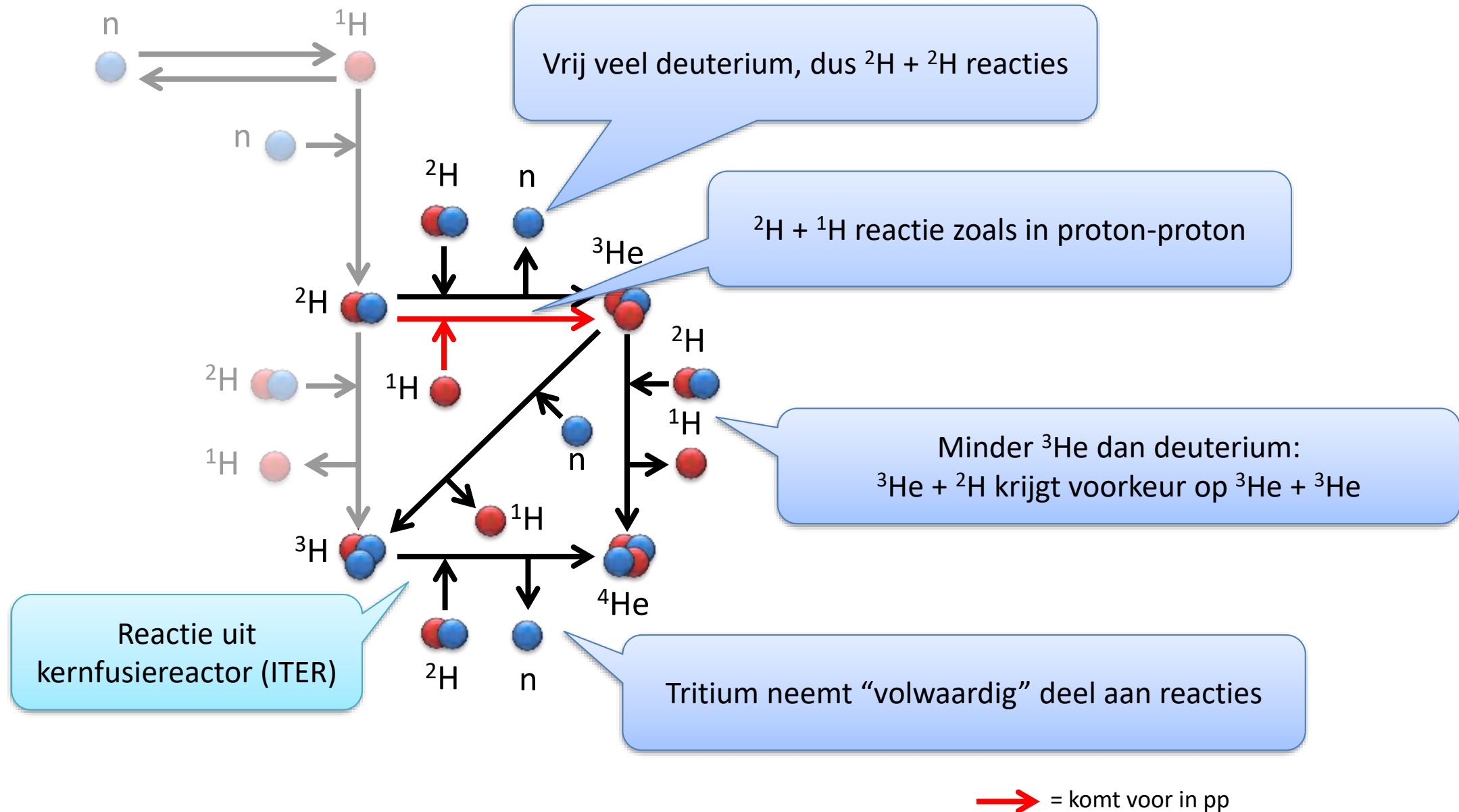
Neutronenreactie omdat zeer veel neutronen (14%)
Snelle reactie (geen coulombbarrière), dus relatief veel deuterium

Vrij veel deuterium, dus ${}^2\text{H} + {}^2\text{H}$ reacties

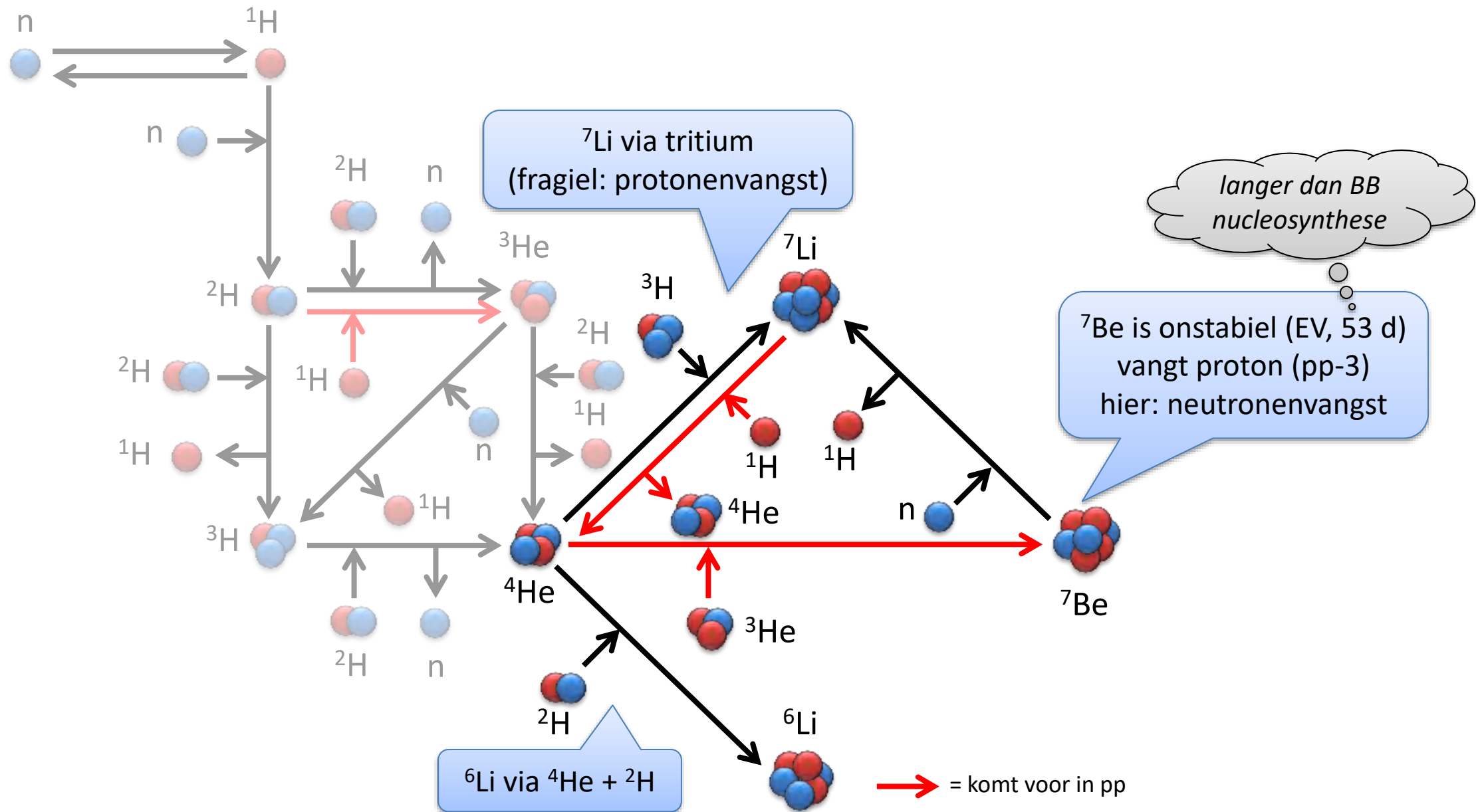
Tritium is onstabiel (halfwaarde 12 jaar, langer dan tijdschaal)



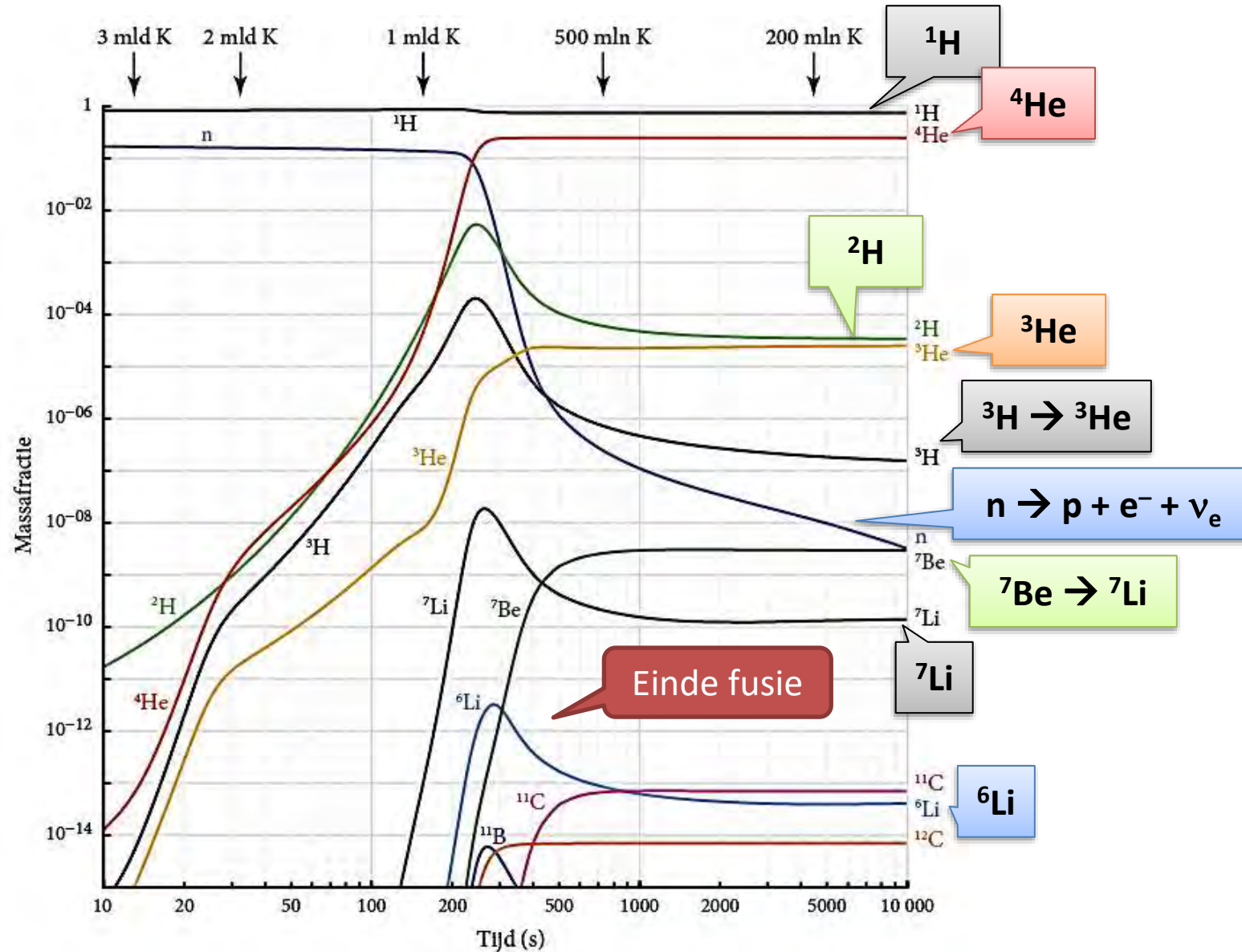
Nucleosynthese bij de oerknal



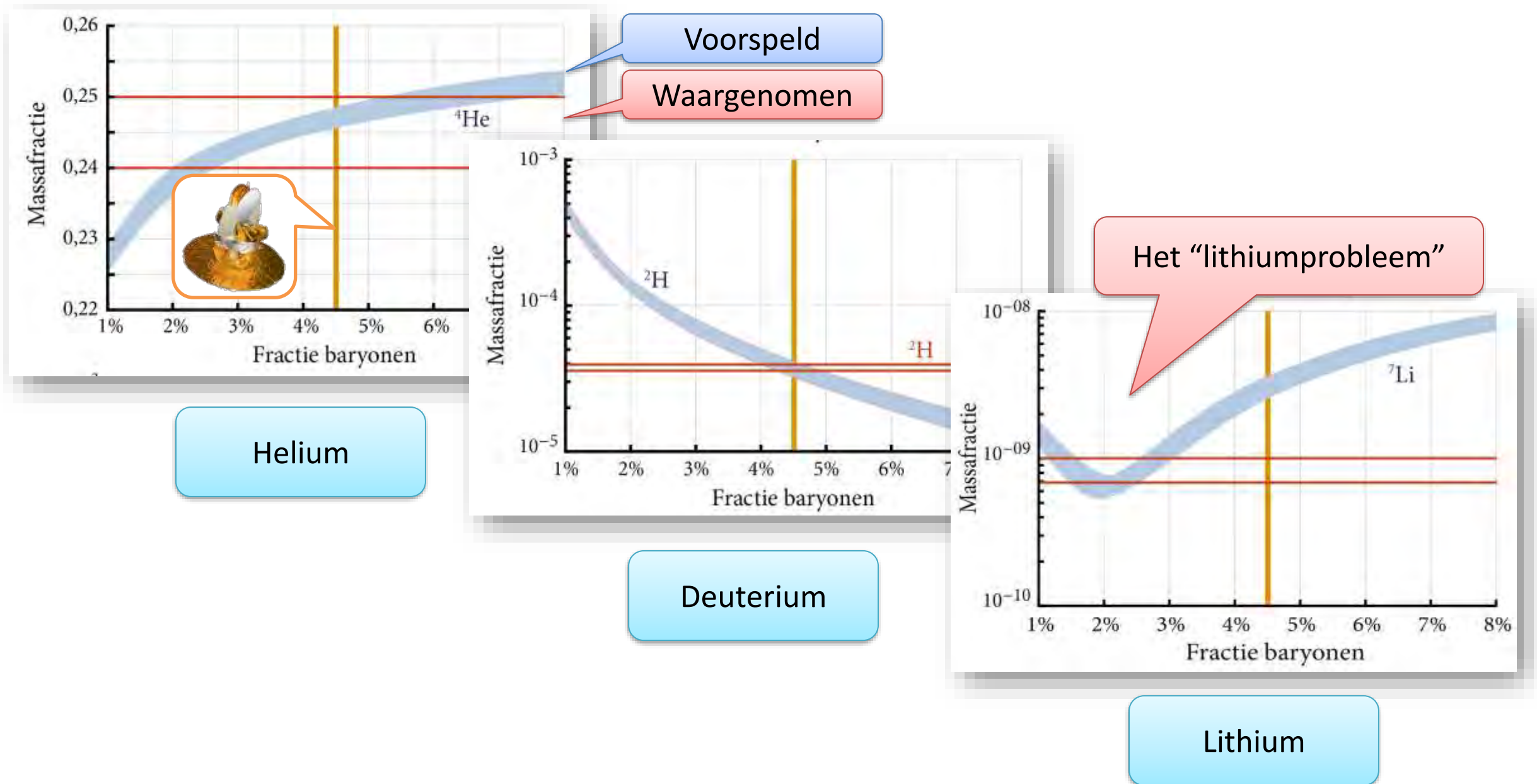
Nucleosynthese bij de oerknal



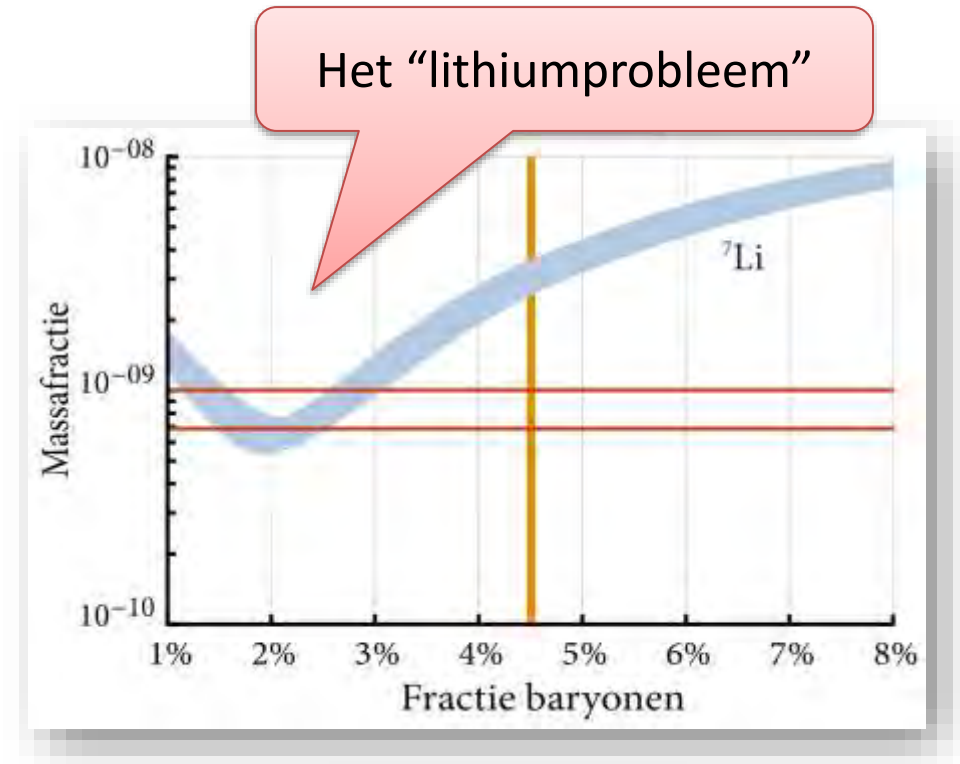
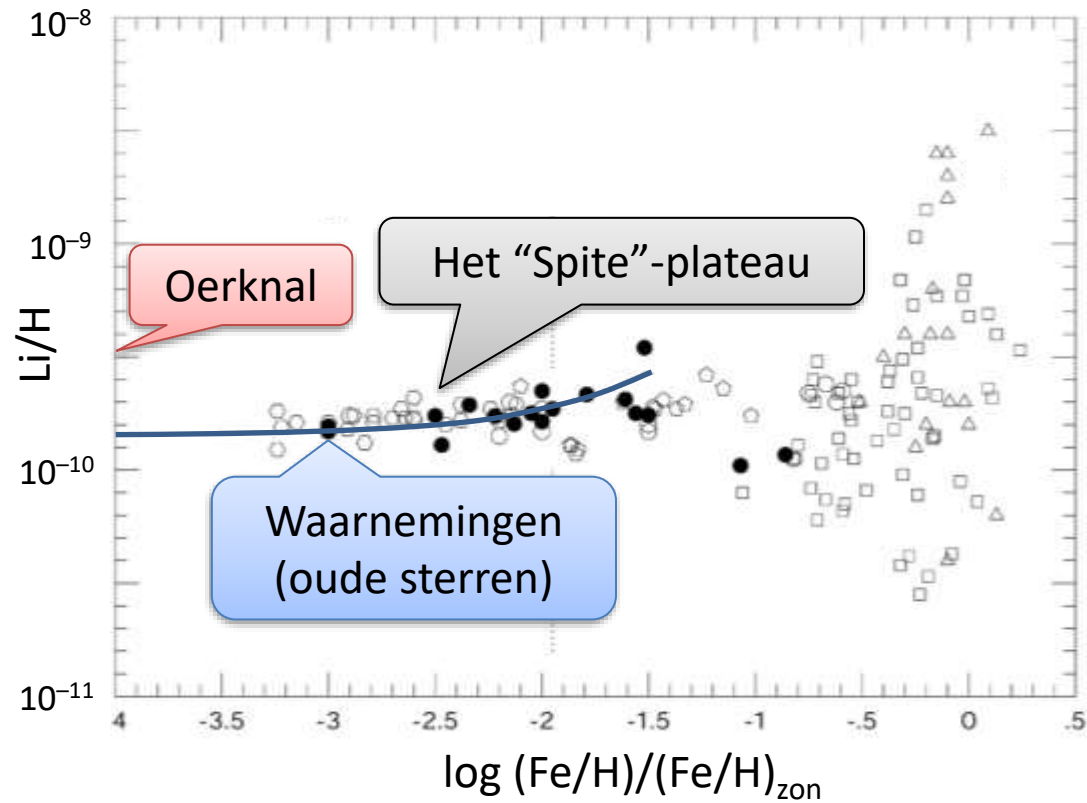
Nucleosynthese bij de oerknal: eindproducten



Vergelijking nucleosynthese oerknal met waarnemingen



Het lithiumprobleem

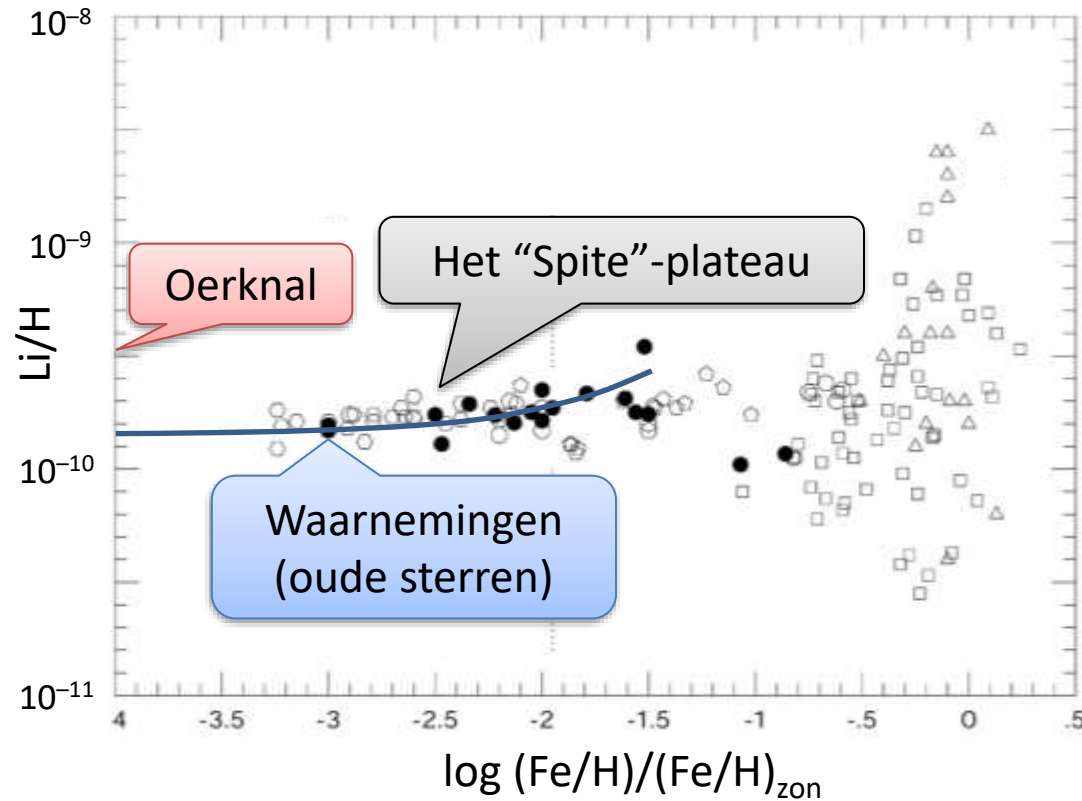


Lithium



*François en Monique Spite
Observatoire de Meudon*

Het lithiumprobleem: oplossingen



1. Waarnemingen verkeerd?
Onwaarschijnlijk
Zelfs nog lagere waarden gemeten

2. Voorspelling Big Bang verkeerd?
Onwaarschijnlijk
Natuurkunde zeer goed gekend
Verborgen resonantie in ${}^7\text{Li} + {}^1\text{H}$?

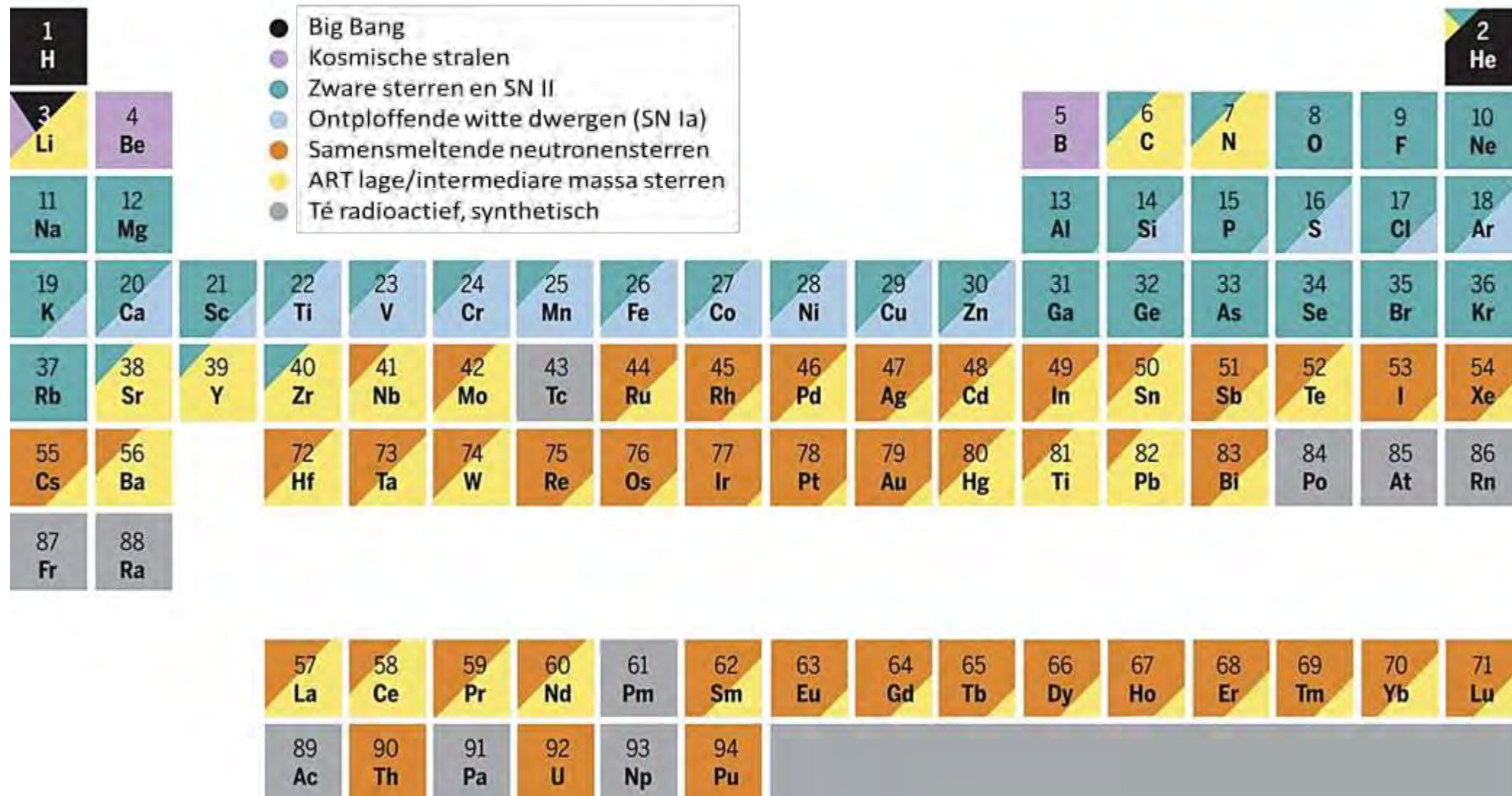
3. Nieuwe natuurkunde?
Donkere materie, supersymmetrie
Wijzigingen natuurconstanten
Andere kosmologische modellen

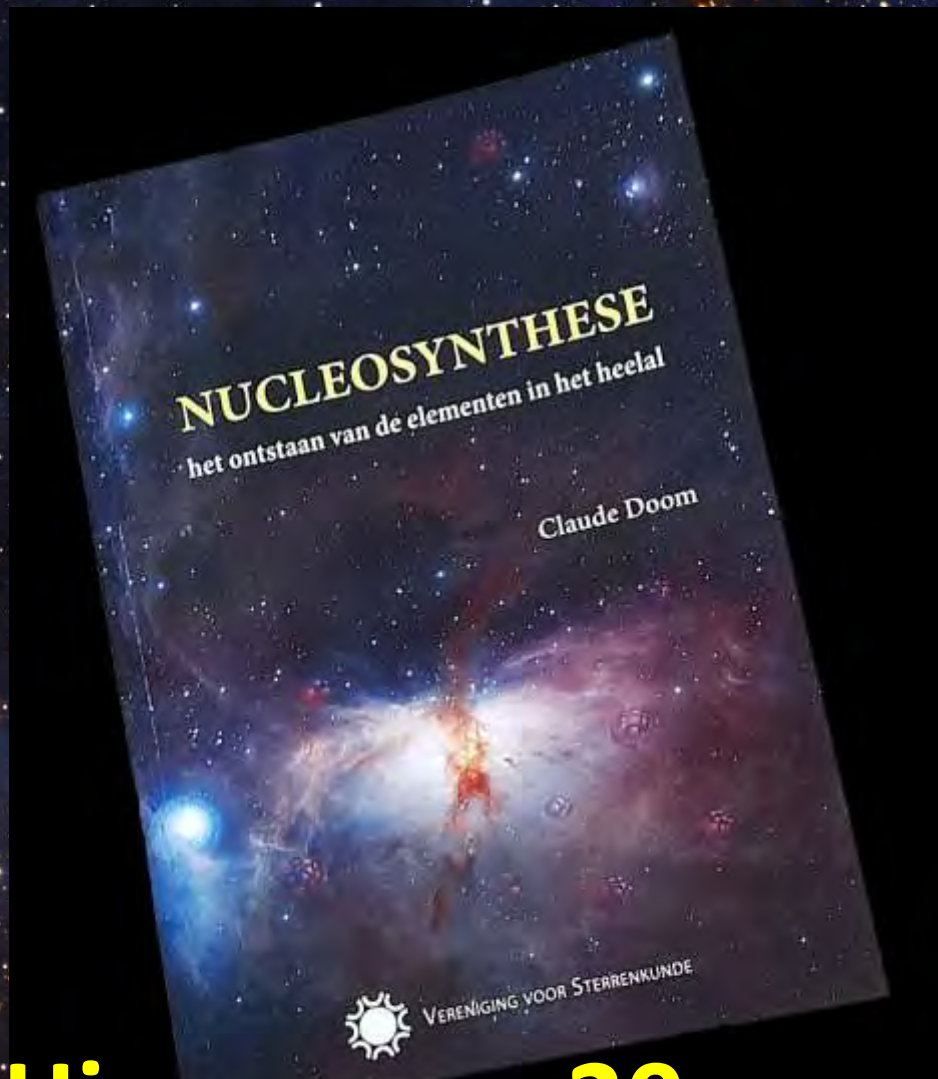
4. Li toch afgebroken in oude sterren?
Diffusie?
Menging door rotatie?



Tot slot

De vorming van de elementen





Hier en nu: 20 euro

~~VVS website: 20 euro~~

Dank u

Vragen?



KU LEUVEN