

Missende materie:

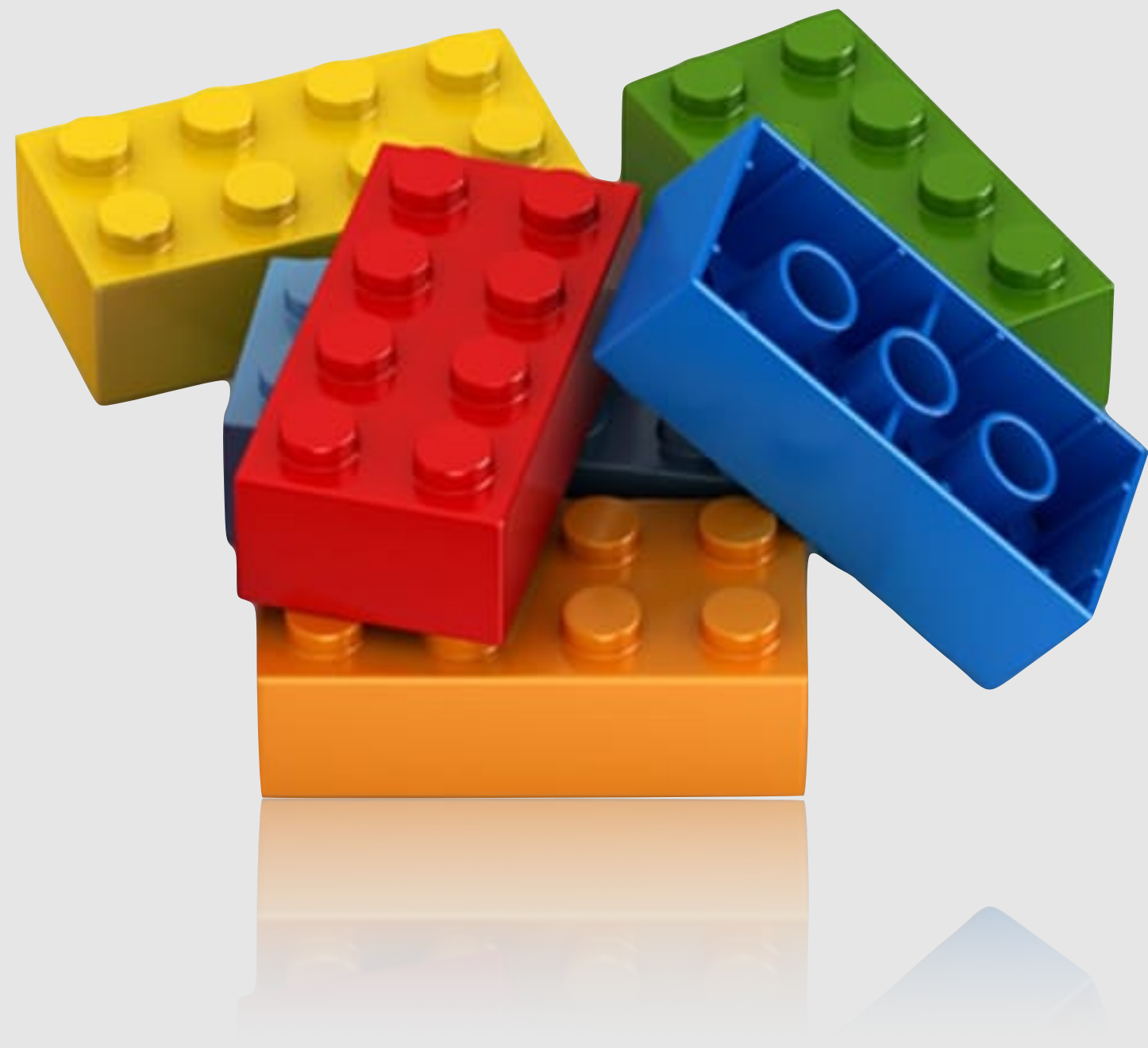
De ongrijpbare bouwsteen van het heelal

Pieter Braat
HOVO bezoek Nikhef
17-02-25

Het Standaardmodel

Het periodiek systeem van deeltjesfysici

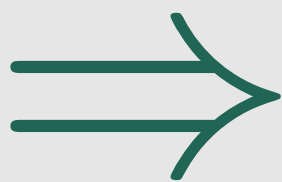
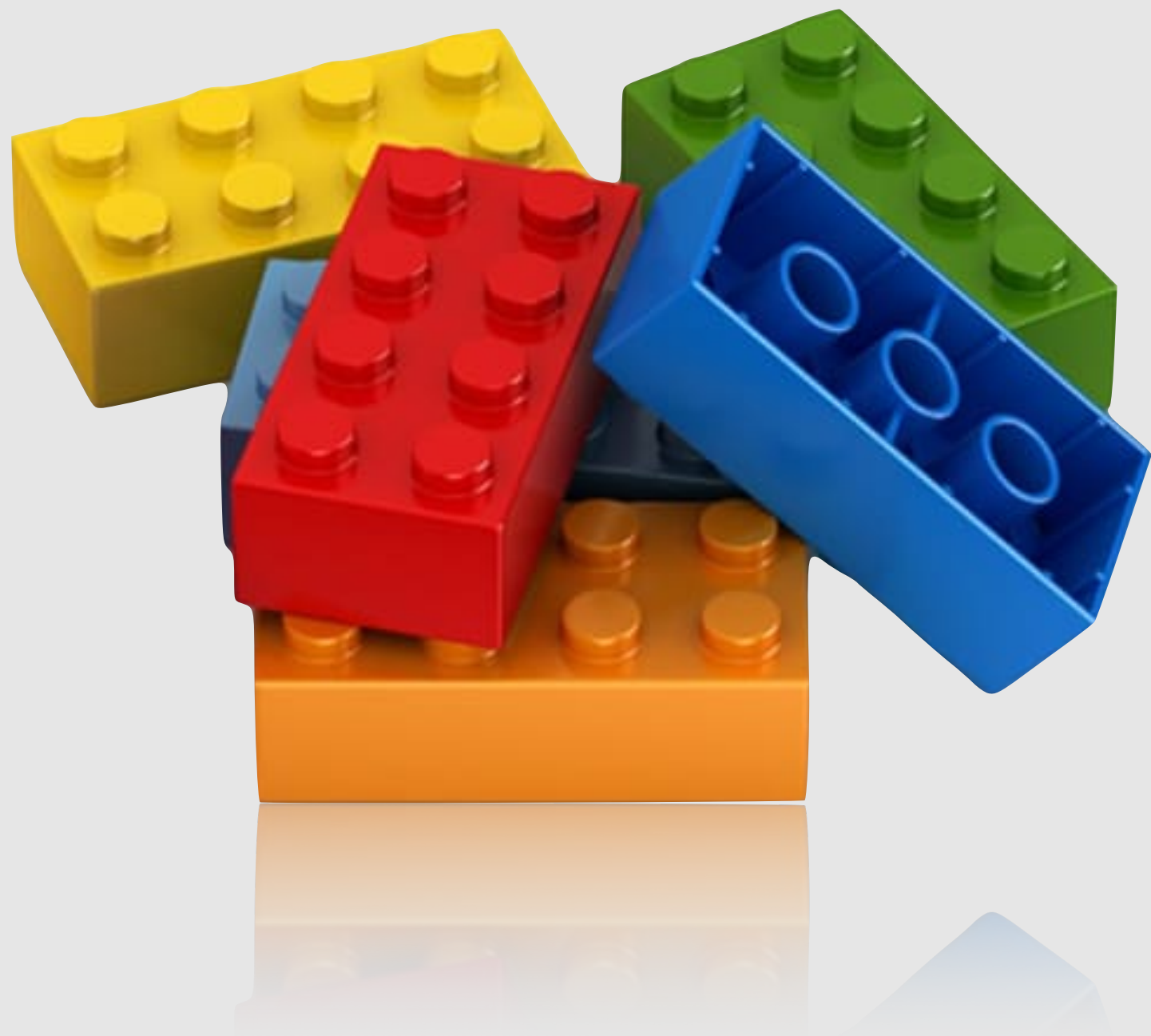
- Beschrijft alle materie (en anti-materie) op de kleinste schaal: elementaire deeltjes
- Beschrijft drie van de vier natuurkrachten



Het Standaardmodel

Het periodiek systeem van deeltjesfysici

- Beschrijft alle materie (en anti-materie) op de kleinste schaal: elementaire deeltjes
- Beschrijft drie van de vier natuurkrachten



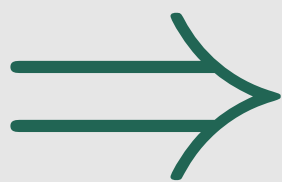
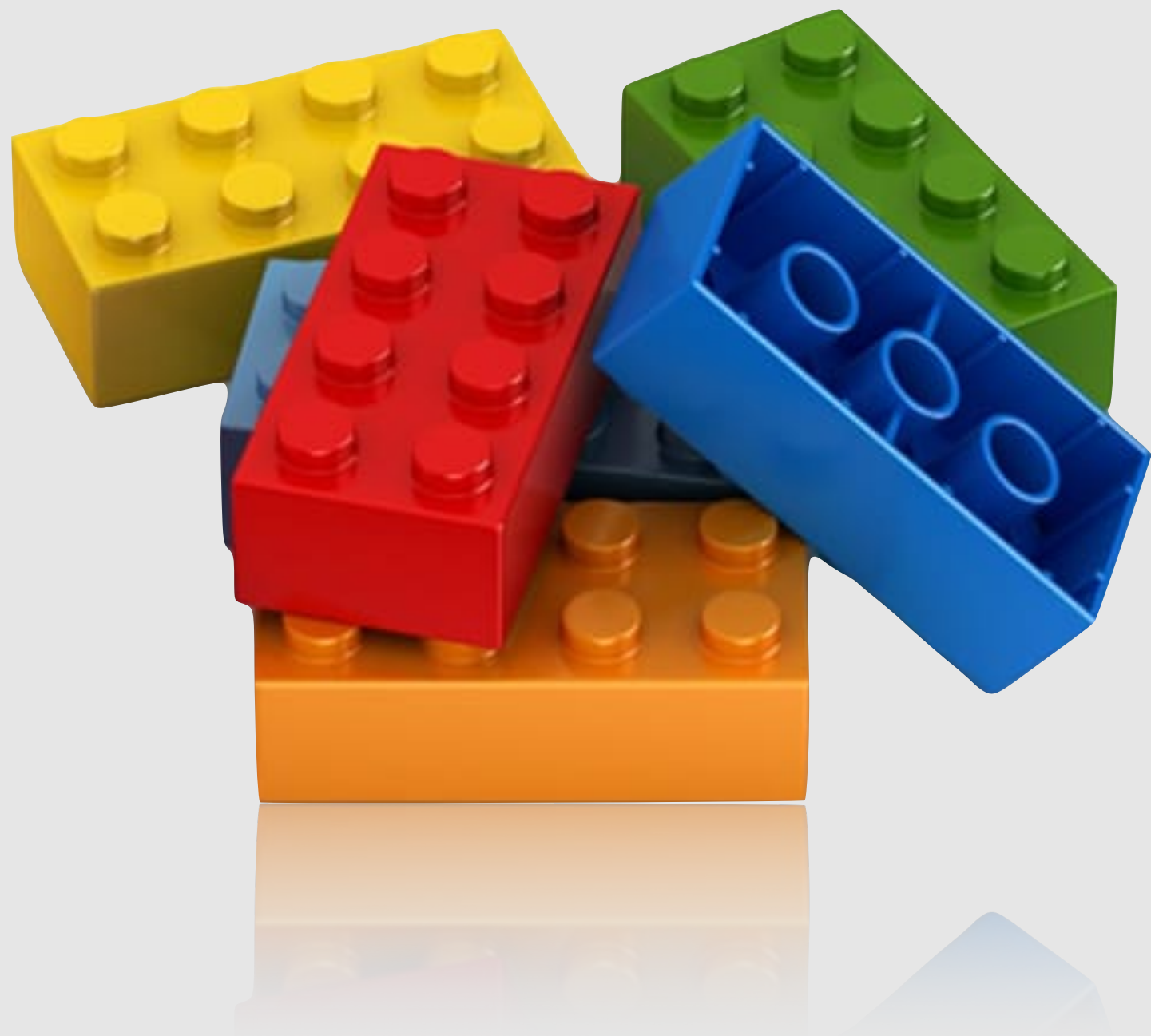
Standaardmodel van de Elementaire Deeltjes

drie generaties van materie (fermionen)			
	I	II	III
QUARKS	massa $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ lading $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ u up	massa $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ lading $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ c charm	massa $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ lading $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ t top
	massa $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ lading $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ d down	massa $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ lading $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ s strange	massa $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ lading $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ b bottom
	massa $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ lading -1 spin $\frac{1}{2}$ e elektron	massa $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ lading -1 spin $\frac{1}{2}$ μ muon	massa $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ lading -1 spin $\frac{1}{2}$ τ tau
	massa $< 1.0 \text{ eV}/c^2$ lading 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_e elektron neutrino	massa $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ lading 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	massa $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ lading 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino

Het Standaardmodel

Het periodiek systeem van deeltjesfysici

- Beschrijft alle materie (en anti-materie) op de kleinste schaal: elementaire deeltjes
- Beschrijft drie van de vier natuurkrachten



Standaardmodel van de Elementaire Deeltjes

drie generaties van materie (fermionen)						interacties / boodschapperdeeltjes (bosonen)	
I			II			III	
massa lading spin	$\approx 2.2 \text{ MeV/c}^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV/c}^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV/c}^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4.7 \text{ MeV/c}^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 96 \text{ MeV/c}^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4.18 \text{ GeV/c}^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1
up			charm			top	
down			strange			bottom	
elektron			muon			tau	
elektron neutrino			muon neutrino			tau neutrino	
gluon			foton			Z-boson	
higgs			W-boson				

QUARKS

LEPTONEN

IJKBOSONEN
VECTOR BOSONEN

SCALAIRE BOSONEN

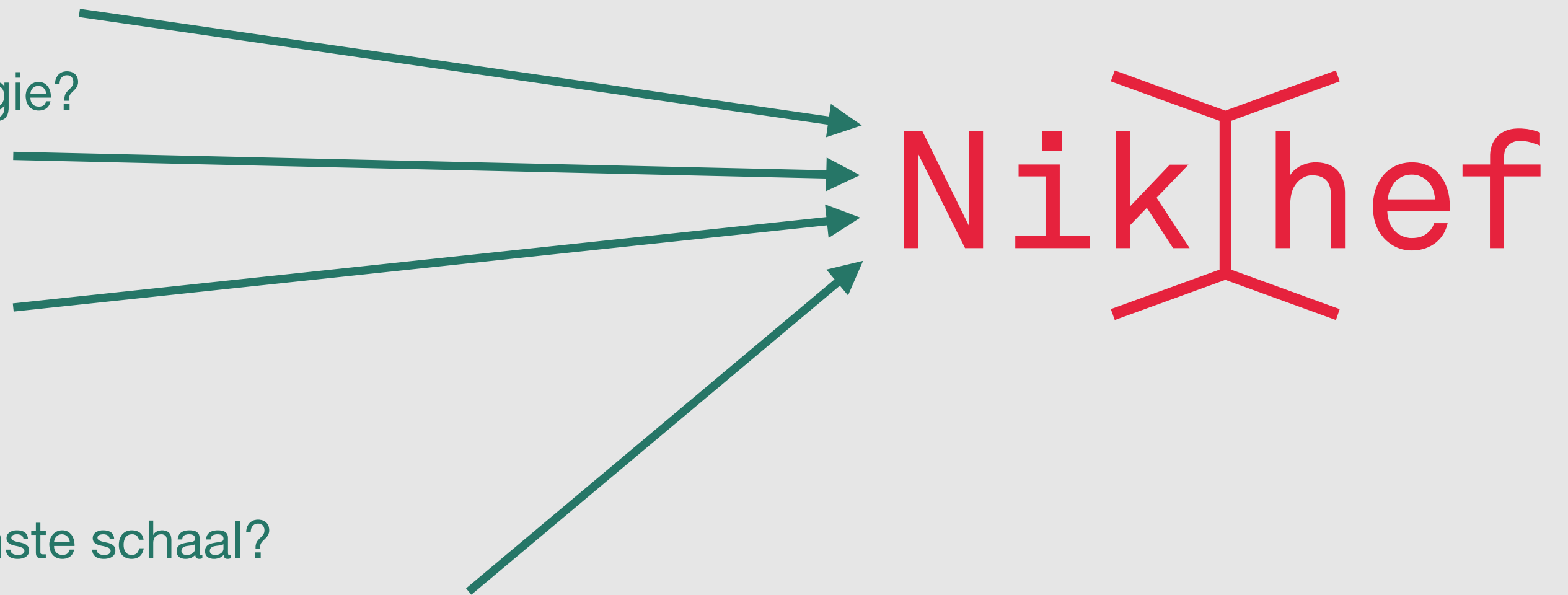
Open vragen in de natuurkunde

- Standaardmodel: drie van de vier fundamentele krachten + alle bekende deeltjes
- Maar ook nog dingen die we niet weten:
 - Wat is donkere materie en donkere energie?
 - Waar is alle anti-materie?!
 - Hoe komen neutrino's aan hun massa?
 - Hoe werkt zwaartekracht op de allerkleinste schaal?
 - Waar komt die hoogenergetische kosmische straling vandaan?

Nikhef

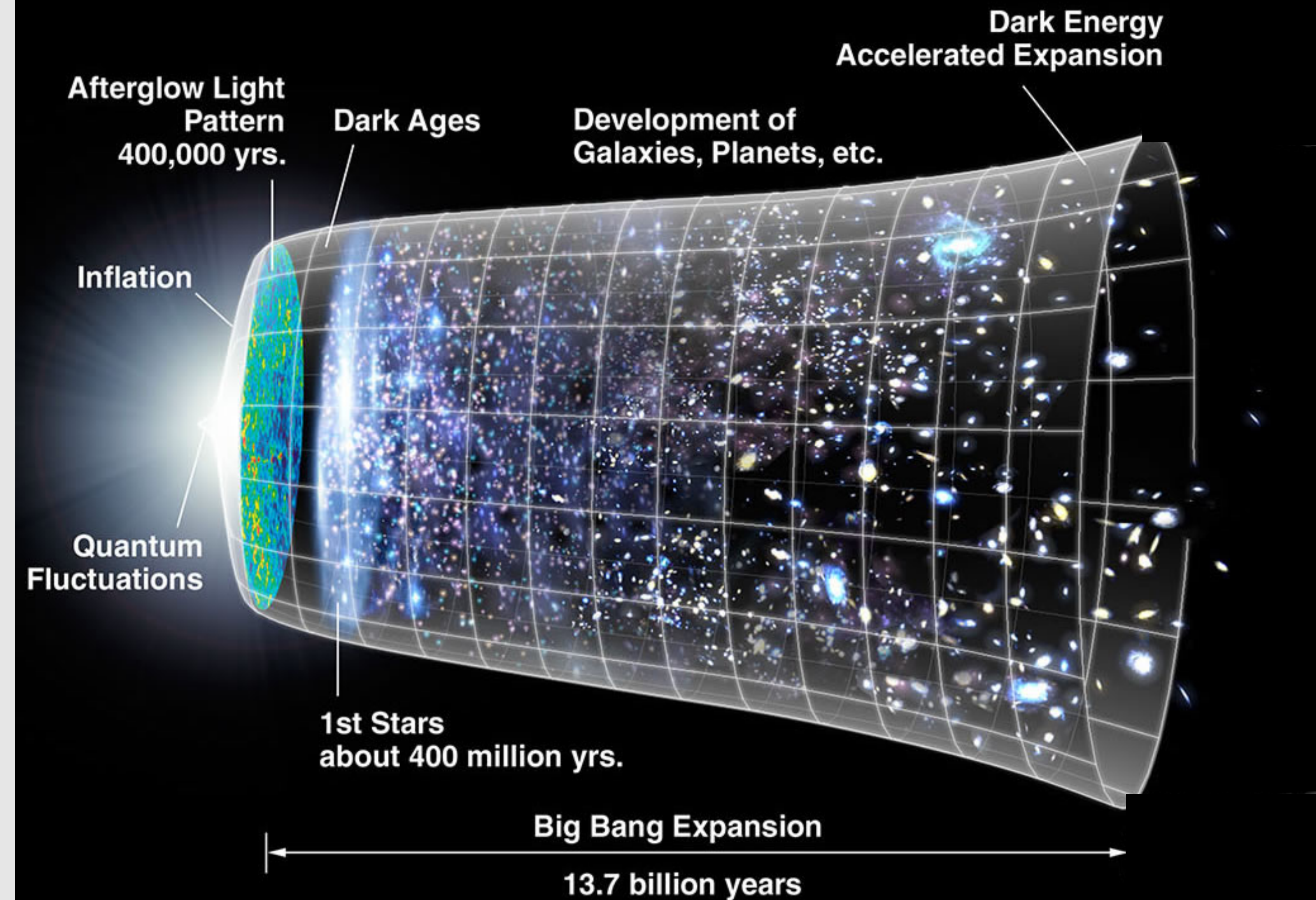
Open vragen in de natuurkunde

- Standaardmodel: drie van de vier fundamentele krachten + alle bekende deeltjes
- Maar ook nog dingen die we niet weten:
 - Wat is donkere materie en donkere energie?
 - Waar is alle anti-materie?!
 - Hoe komen neutrino's aan hun massa?
 - Hoe werkt zwaartekracht op de allerkleinste schaal?
 - Waar komt die hoogenergetische kosmische straling vandaan?



Kosmologie

- Combineert het Standaardmodel en de zwaartekrachtswetten van Einstein (de algemene relativiteitstheorie)
- Gigantische periode: van 1 picoseconde (10^{-12} s) tot vandaag de dag: 13,7 miljard jaar (10^{17} s) later!



Probleem: donkere materie

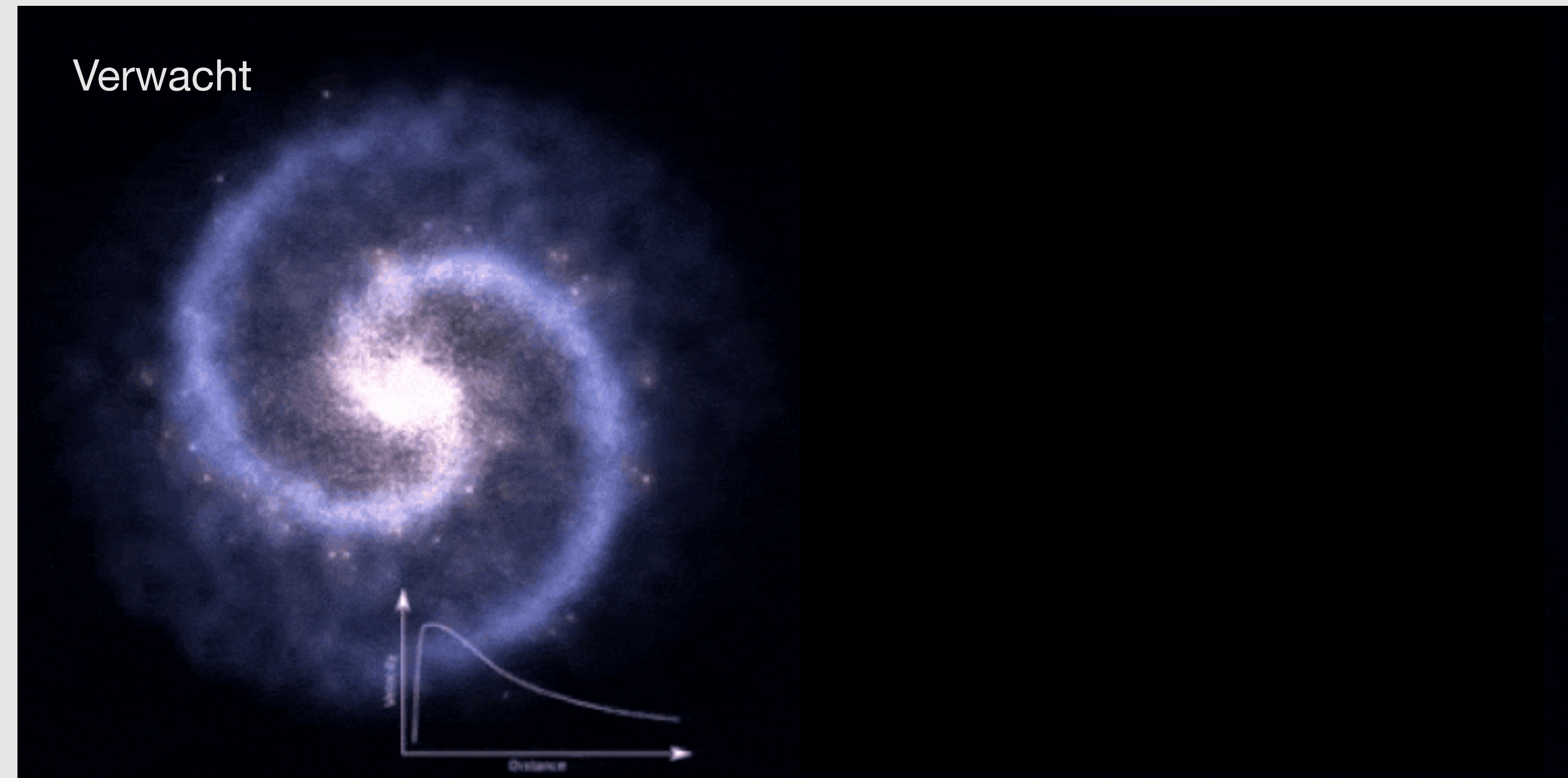
- Sterren in de buitenste delen van een melkwegstelsel draaien veel te snel! 🤯

$$F_{\text{mpz}} = \frac{mv(r)^2}{r}$$

$$F_{\text{grav}} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

$$F_{\text{mpz}} = F_{\text{grav}}$$

$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$



Probleem: donkere materie

- Sterren in de buitenste delen van een melkwegstelsel draaien veel te snel! 🤯

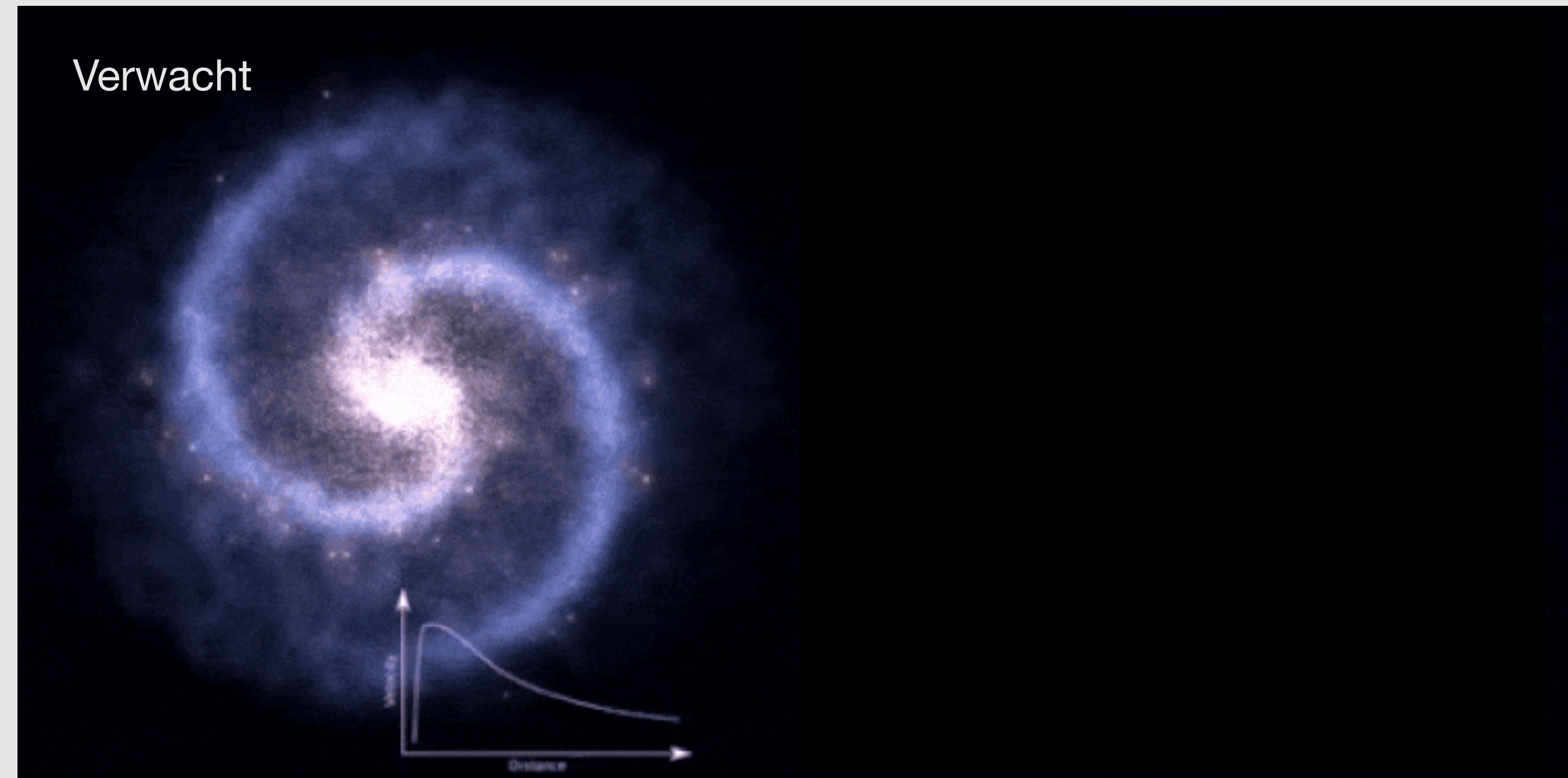
$$F_{\text{mpz}} = \frac{mv(r)^2}{r}$$

$$F_{\text{grav}} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

$$F_{\text{mpz}} = F_{\text{grav}}$$

$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

$$M(r) = \bar{\rho}V(r)$$



Probleem: donkere materie

- Sterren in de buitenste delen van een melkwegstelsel draaien veel te snel! 🤯

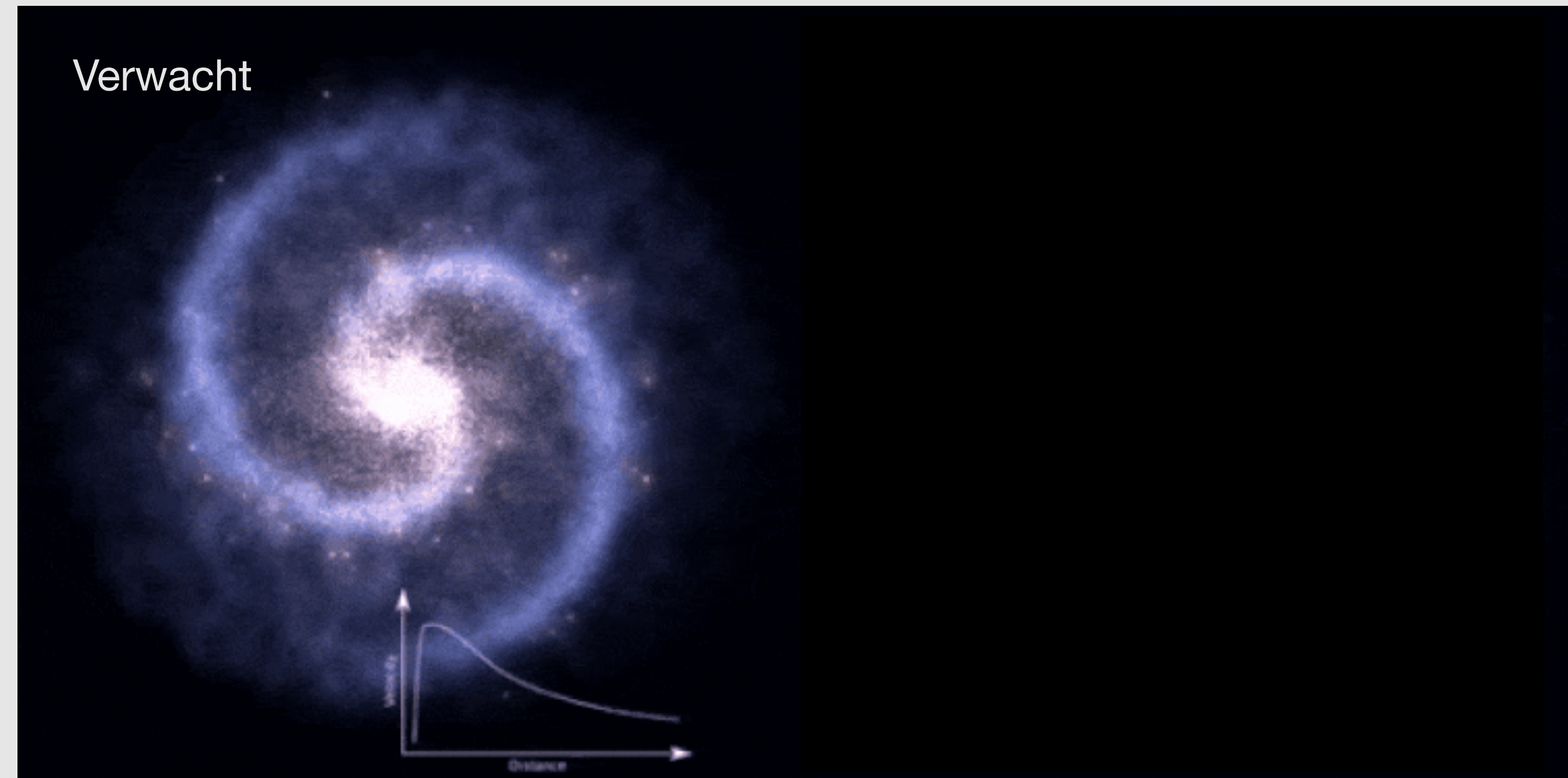
$$F_{\text{mpz}} = \frac{mv(r)^2}{r}$$

$$F_{\text{grav}} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

$$F_{\text{mpz}} = F_{\text{grav}}$$

$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

$$M(r) = \bar{\rho}V(r) = \begin{cases} \frac{4}{3}\pi r^3 \bar{\rho} & r \leq r_s \\ \frac{4}{3}\pi r_s^3 \bar{\rho} & r > r_s \end{cases}$$



Probleem: donkere materie

- Sterren in de buitenste delen van een melkwegstelsel draaien veel te snel! 🤯

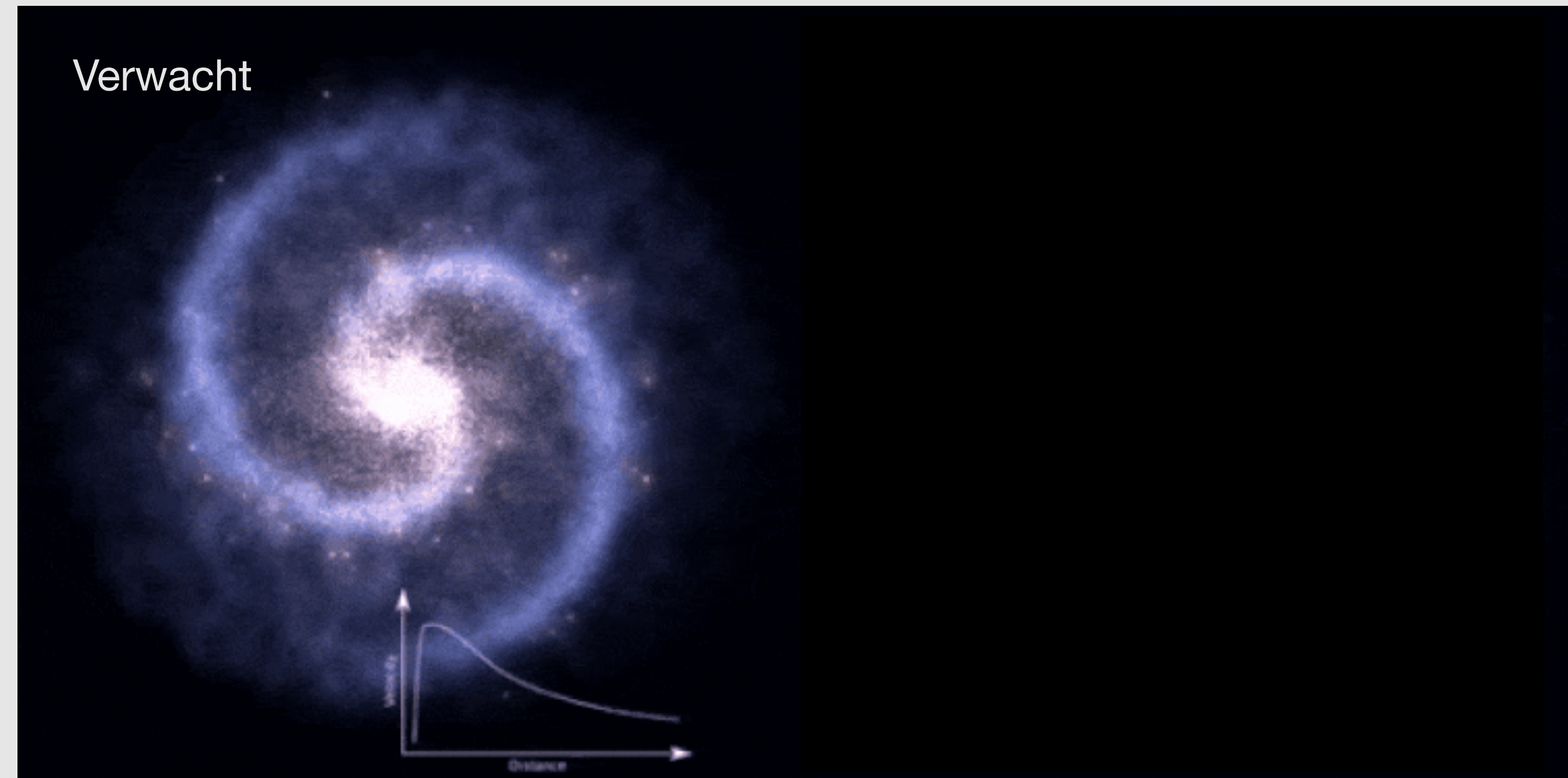
$$F_{\text{mpz}} = \frac{mv(r)^2}{r}$$

$$F_{\text{grav}} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

$$F_{\text{mpz}} = F_{\text{grav}}$$

$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} = \sqrt{\frac{4}{3}\pi G \bar{\rho}} \begin{cases} r & r \leq r_s \\ \sqrt{r_s^3/r} & r > r_s \end{cases}$$

$$M(r) = \bar{\rho}V(r) = \begin{cases} \frac{4}{3}\pi r^3 \bar{\rho} & r \leq r_s \\ \frac{4}{3}\pi r_s^3 \bar{\rho} & r > r_s \end{cases}$$



Probleem: donkere materie

- Sterren in de buitenste delen van een melkwegstelsel draaien veel te snel! 🤯

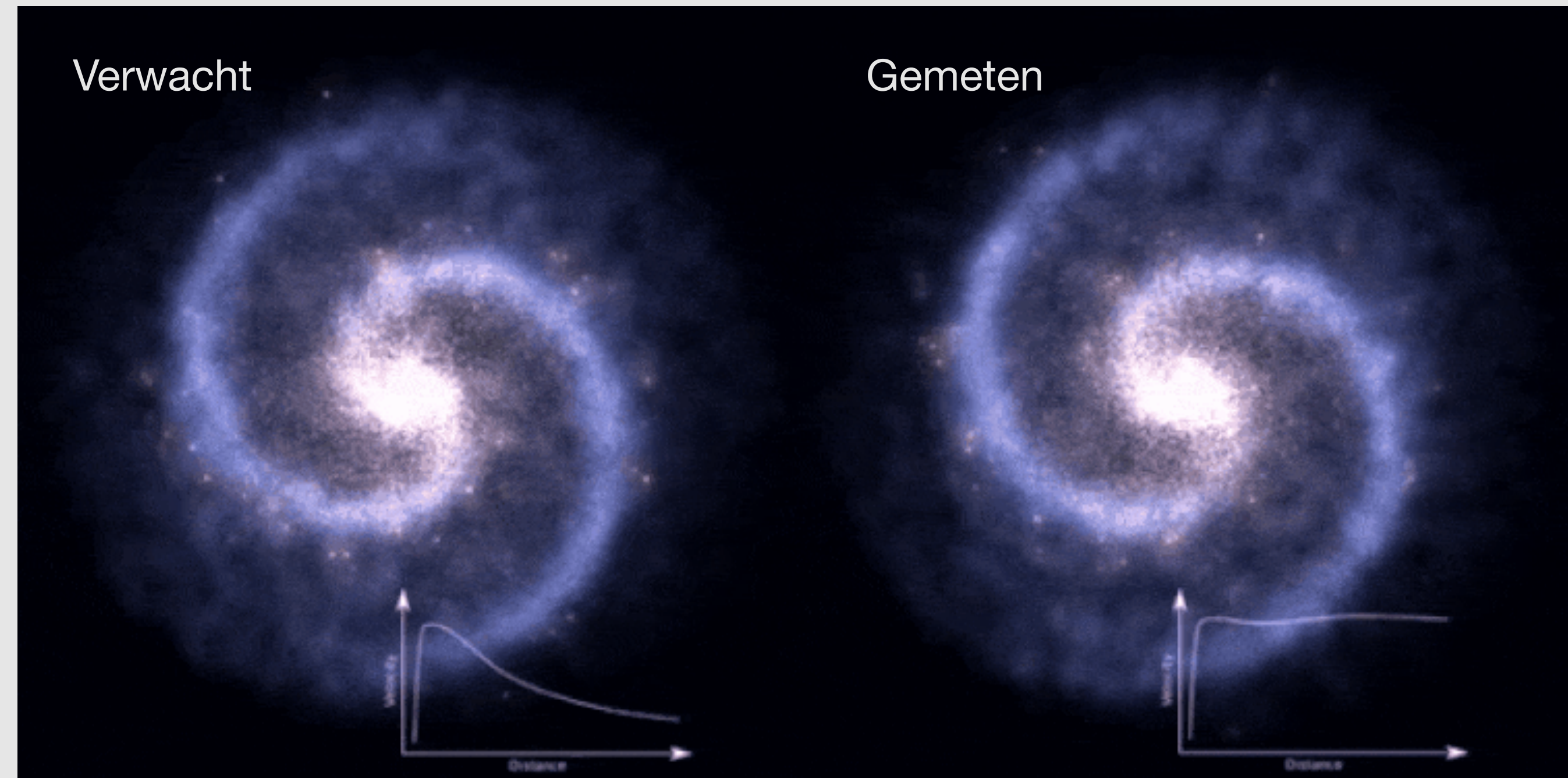
$$F_{\text{mpz}} = \frac{mv(r)^2}{r}$$

$$F_{\text{grav}} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

$$F_{\text{mpz}} = F_{\text{grav}}$$

$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} = \sqrt{\frac{4}{3}\pi G \bar{\rho}} \begin{cases} r & r \leq r_s \\ \sqrt{r_s^3/r} & r > r_s \end{cases}$$

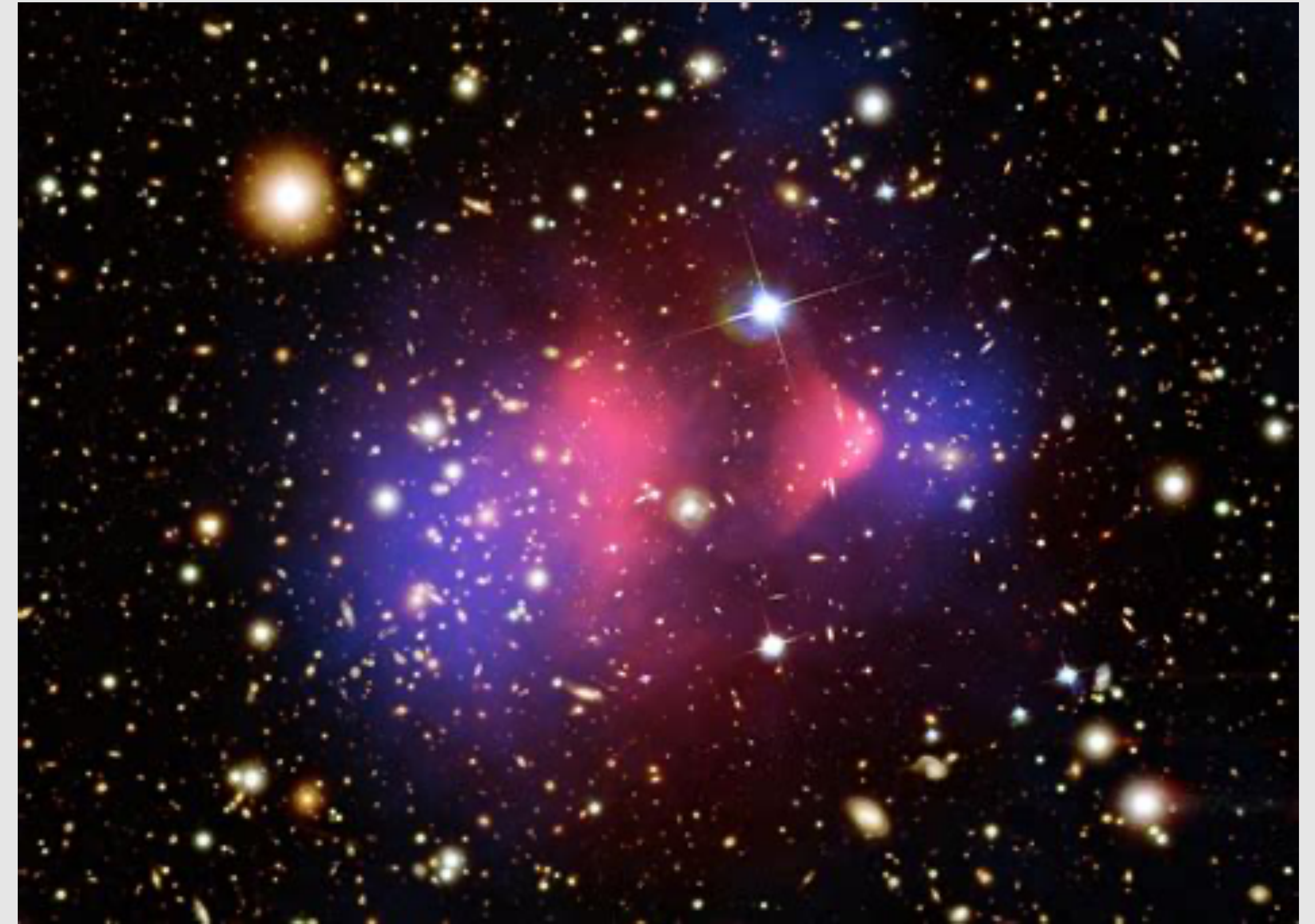
$$M(r) = \bar{\rho}V(r) = \begin{cases} \frac{4}{3}\pi r^3 \bar{\rho} & r \leq r_s \\ \frac{4}{3}\pi r_s^3 \bar{\rho} & r > r_s \end{cases}$$



Conclusie: Er moet extra, onzichtbare materie zijn die de versnelling veroorzaakt!

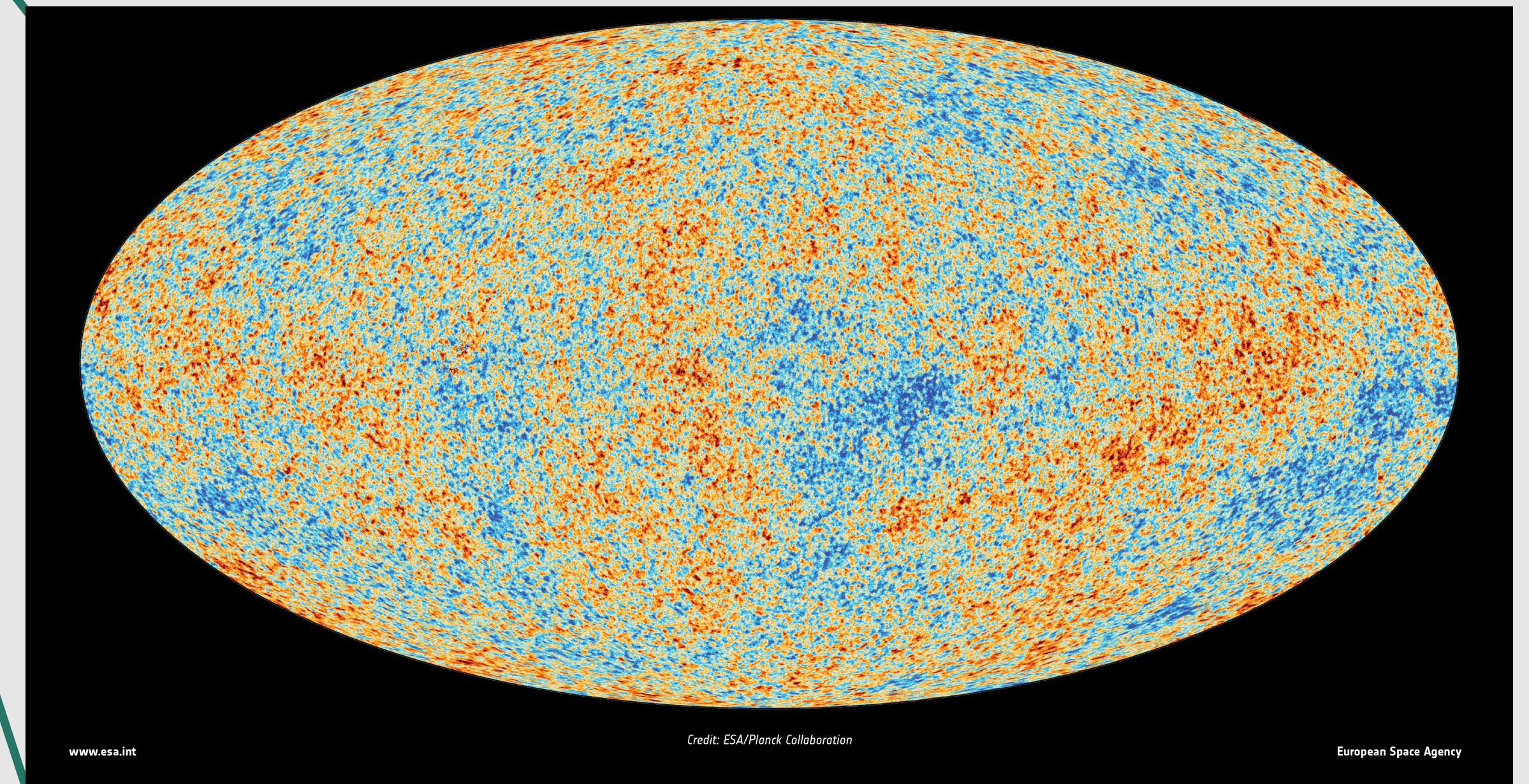
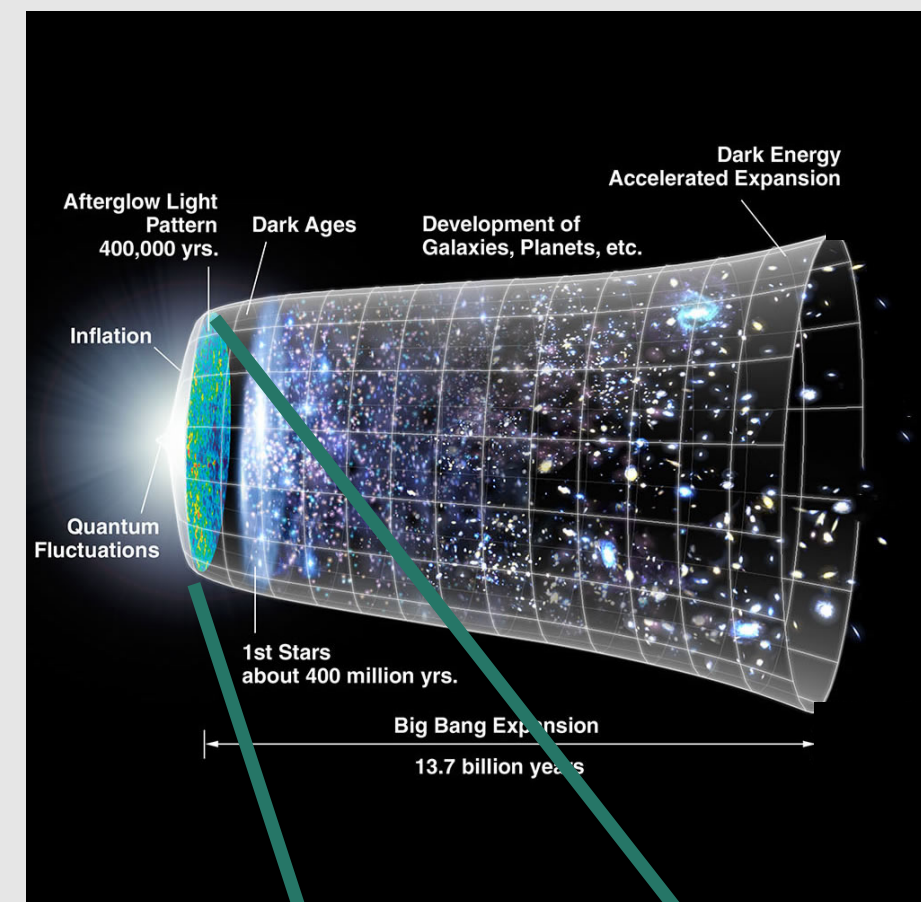
Donkere materie observatie: de Bullet cluster

- Het Bullet cluster is een restant van twee gebotste clusters van melkwegstelsels
- De zichtbare massa (roze) en donkere materie (paars) overlappen niet
- Dit is bewijs voor een deeltje dat nauwelijks interacties met zichzelf, of de zichtbare materie aangaat



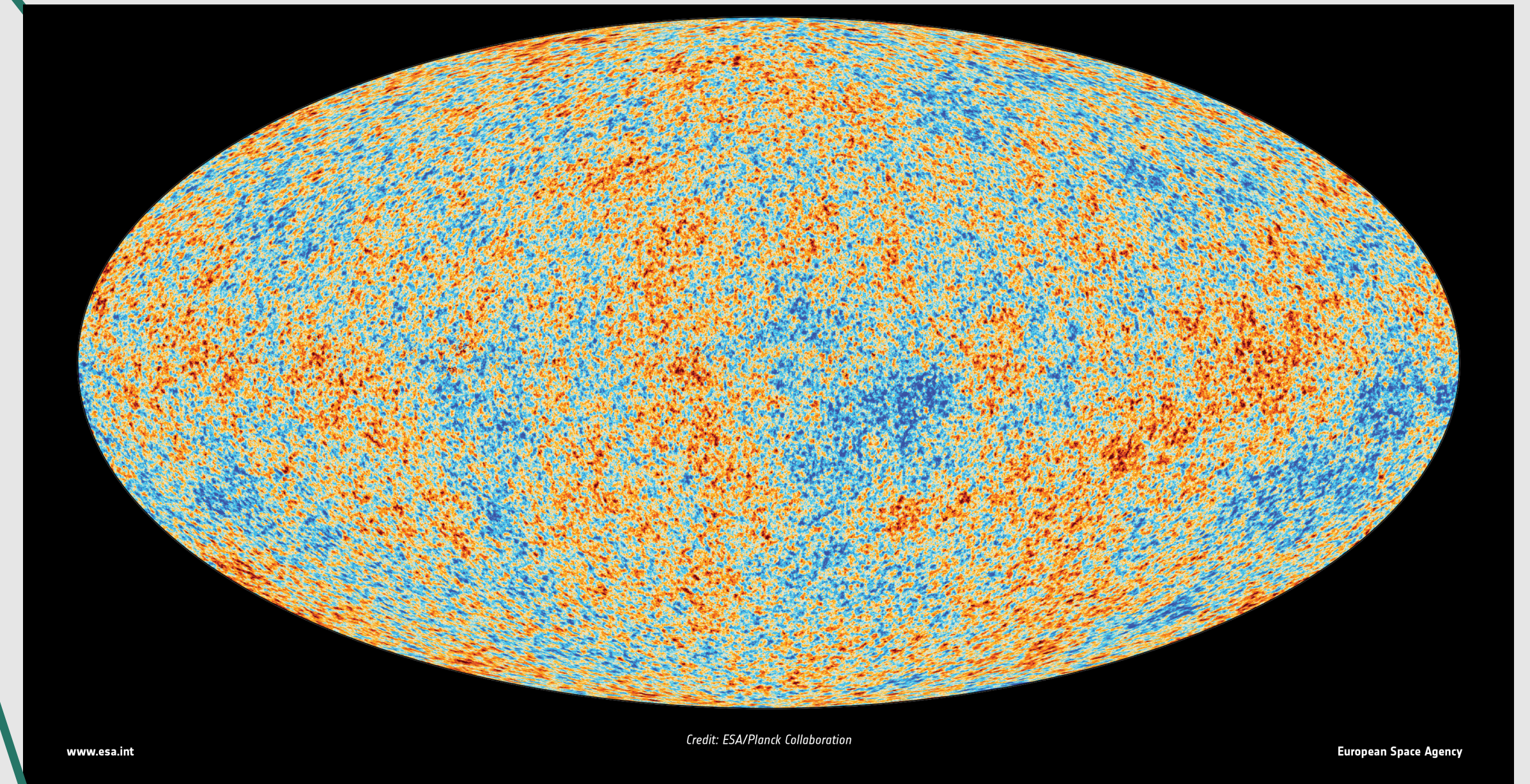
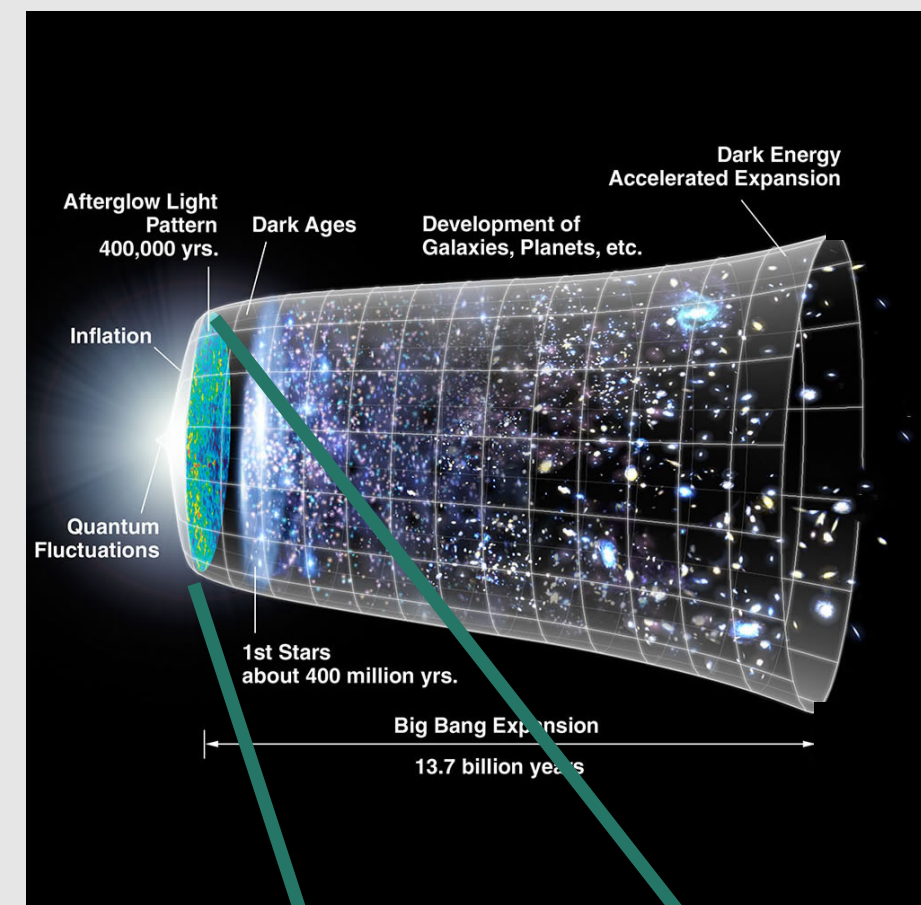
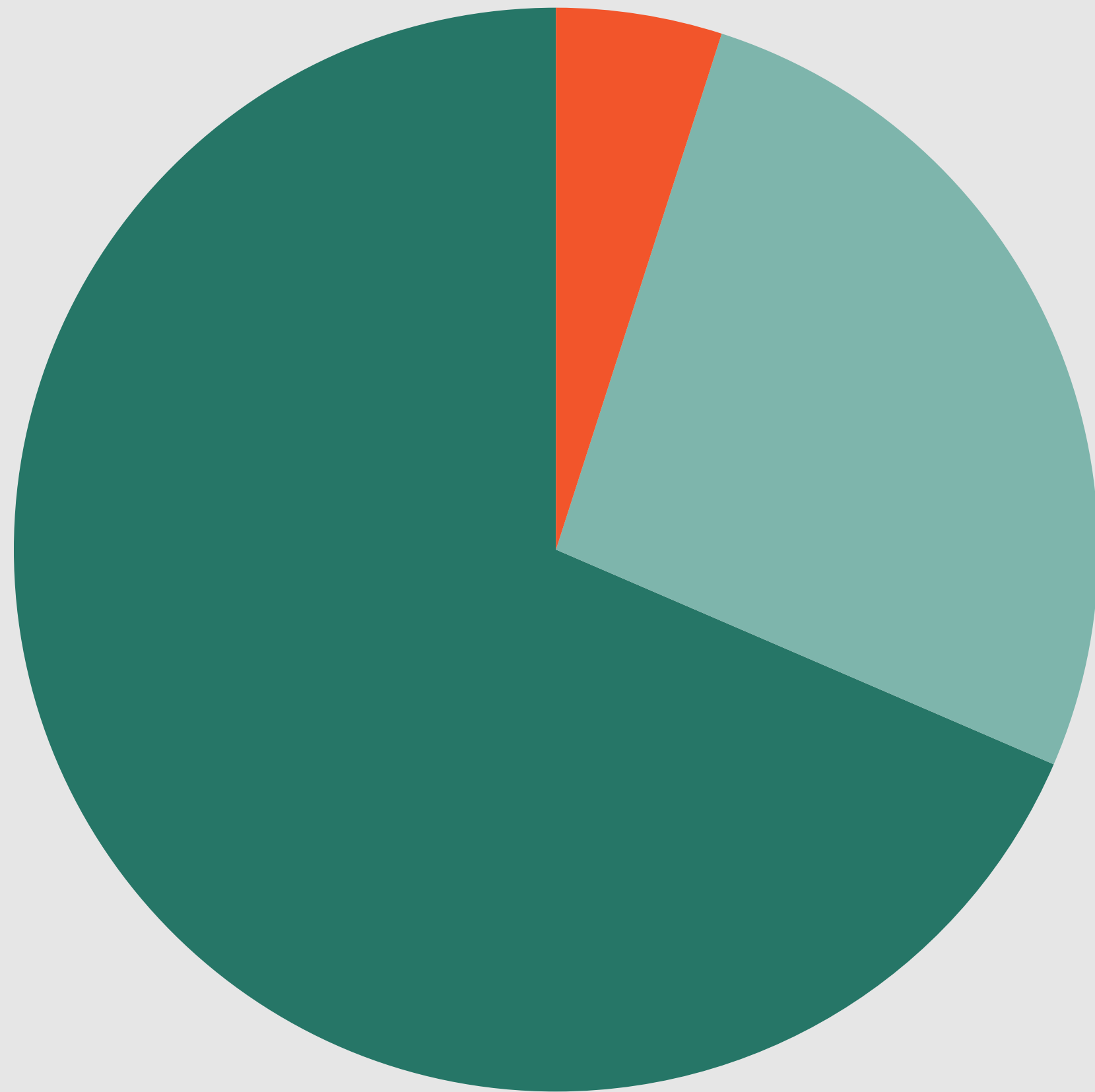
Achtergrondstraling

Uit de achtergrondstraling van de oerknal kunnen we afleiden hoeveel donkere materie er is

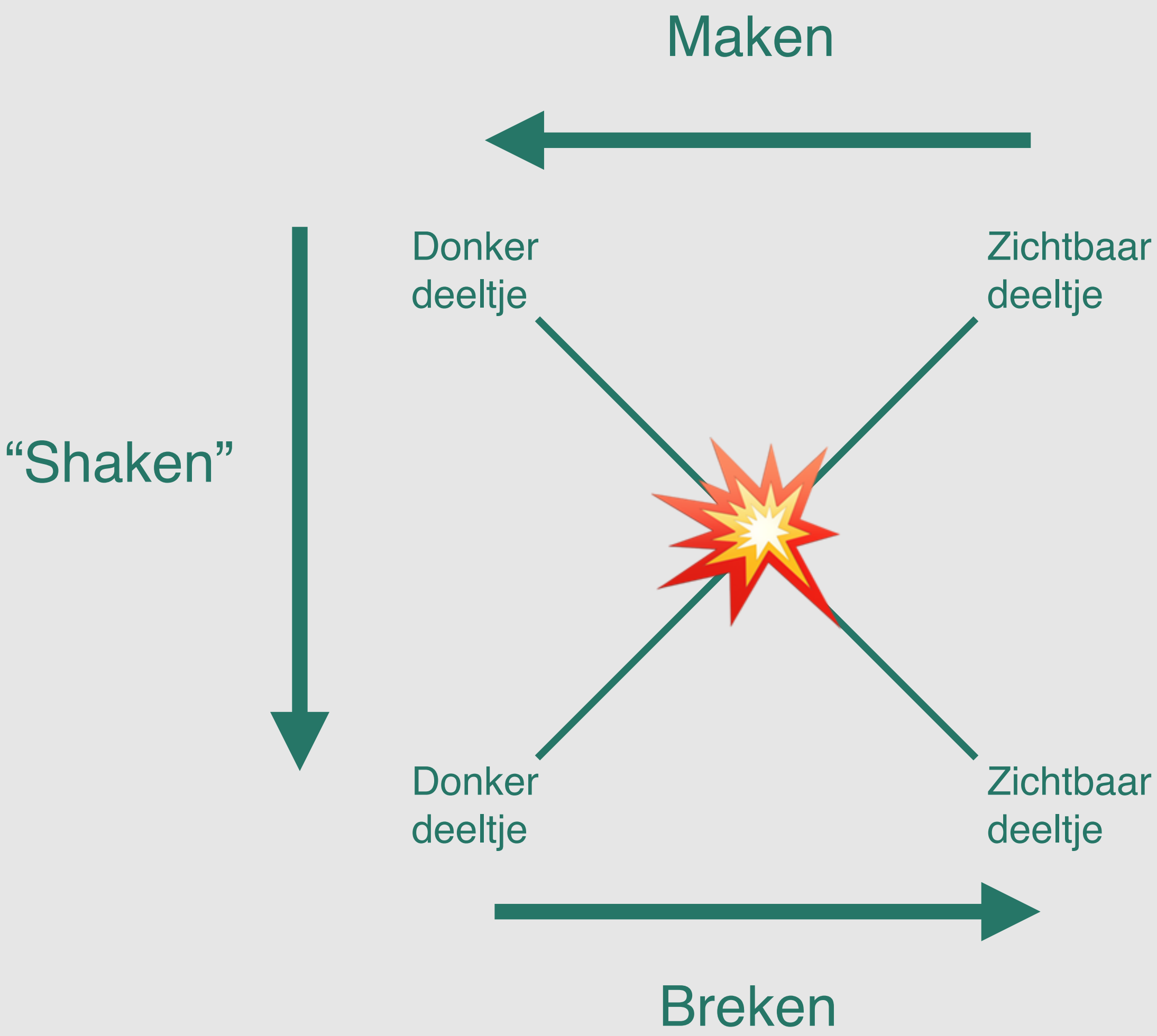


Achtergrondstraling

Uit de achtergrondstraling van de oerknal kunnen we afleiden hoeveel donkere materie er is: 5x zo veel als normale materie!

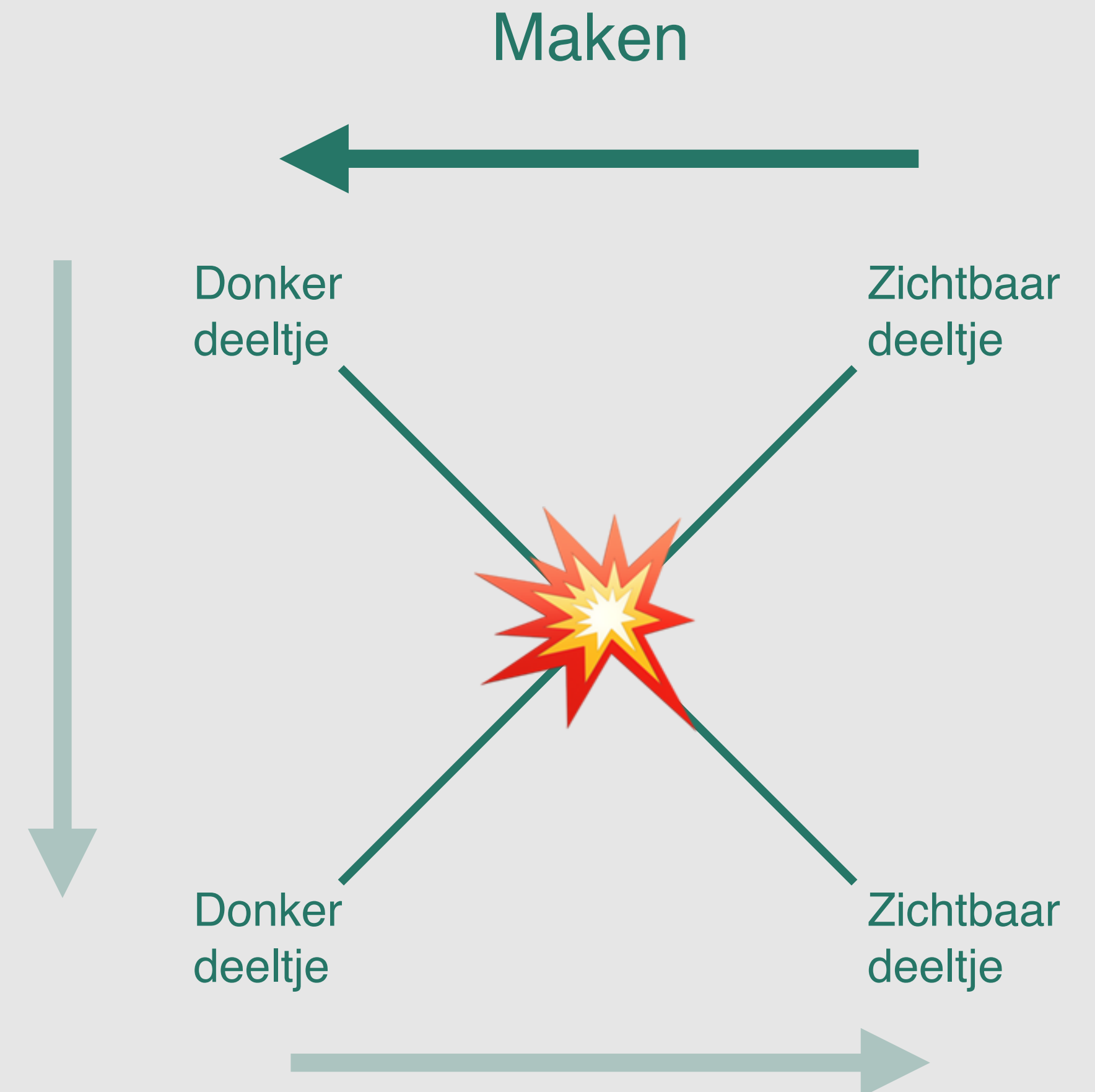


Hoe kunnen we iets leren over donkere materie?



Hoe kunnen we iets leren over donkere materie?

We kunnen donkere materie proberen te maken, bijvoorbeeld bij de deeltjesversneller in Genève

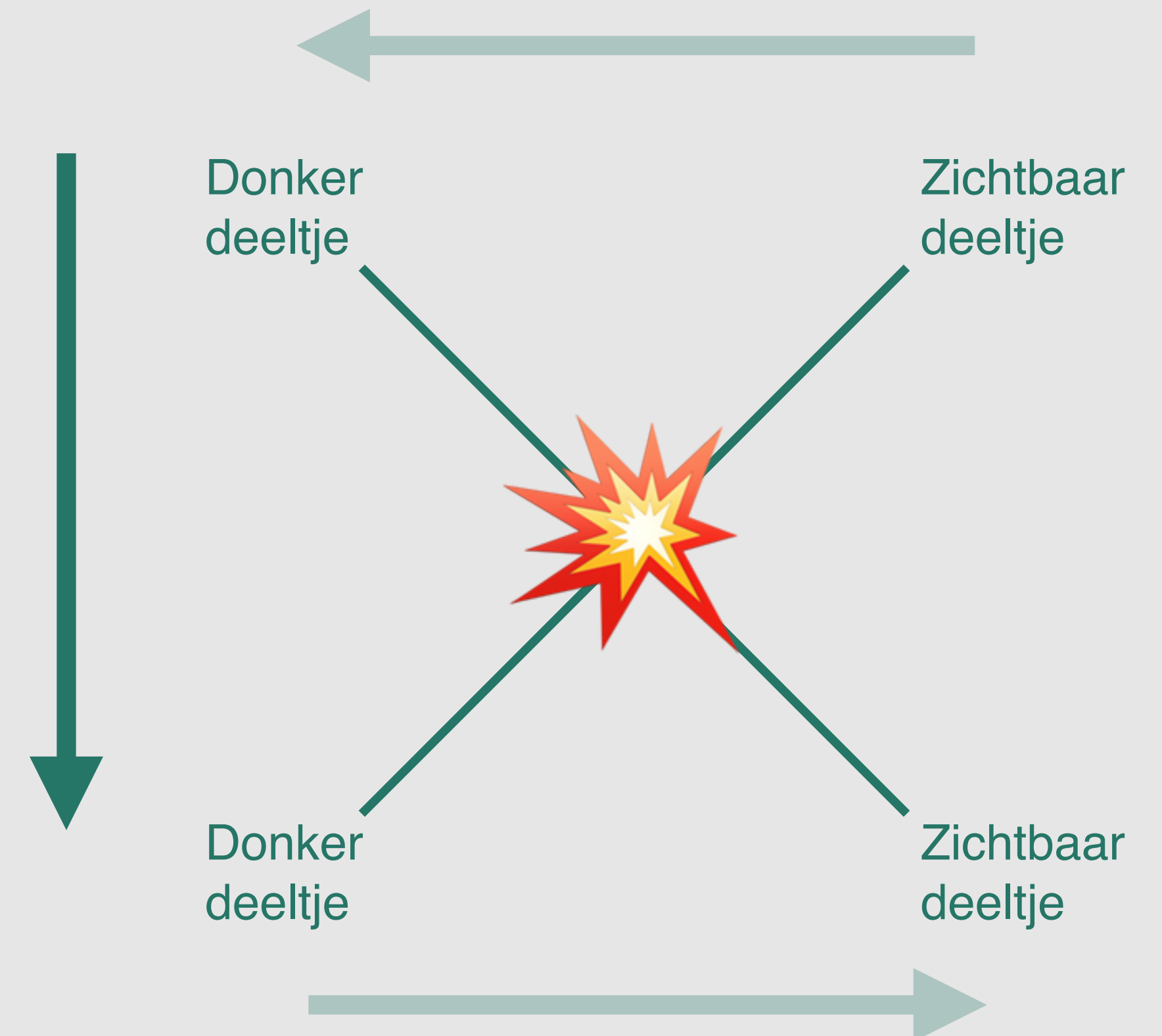


Hoe kunnen we iets leren over donkere materie?

We kunnen wachten tot de donkere materie botst op andere deeltjes, en proberen die botsing waar te nemen

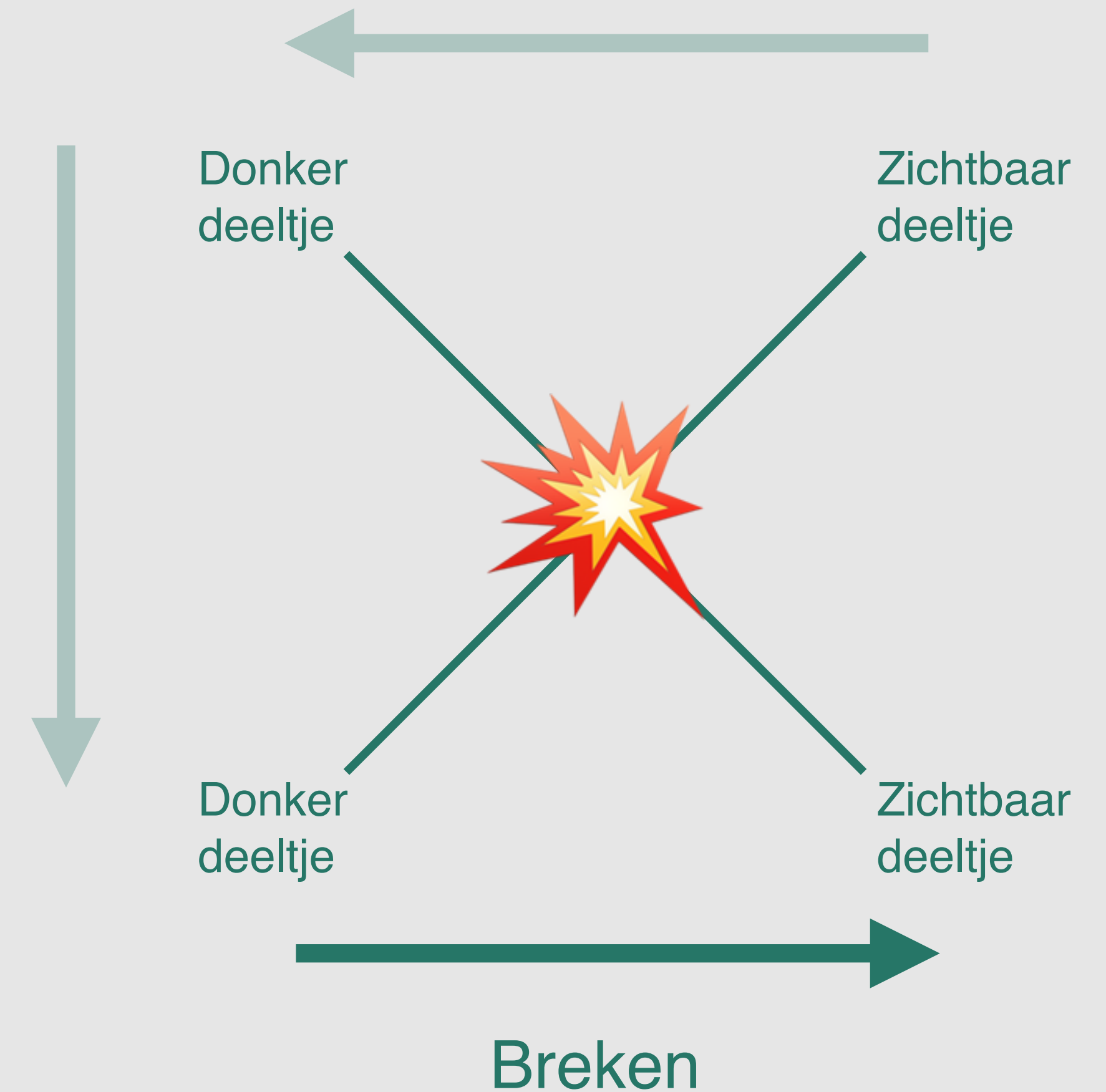


“Shaken”



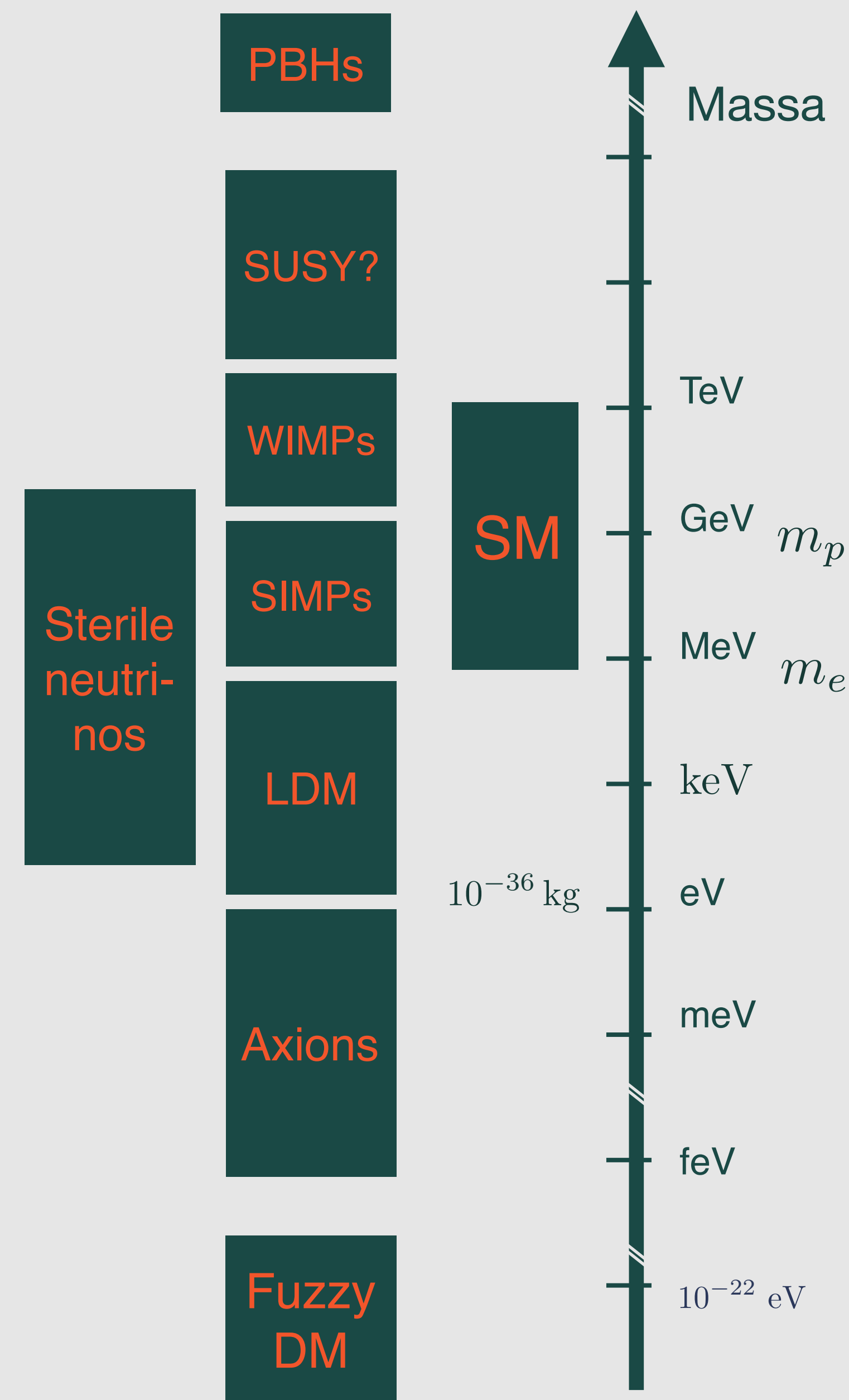
Hoe kunnen we iets leren over donkere materie?

Of we kunnen op zoek gaan naar signalen van donkere materie
annihilaties



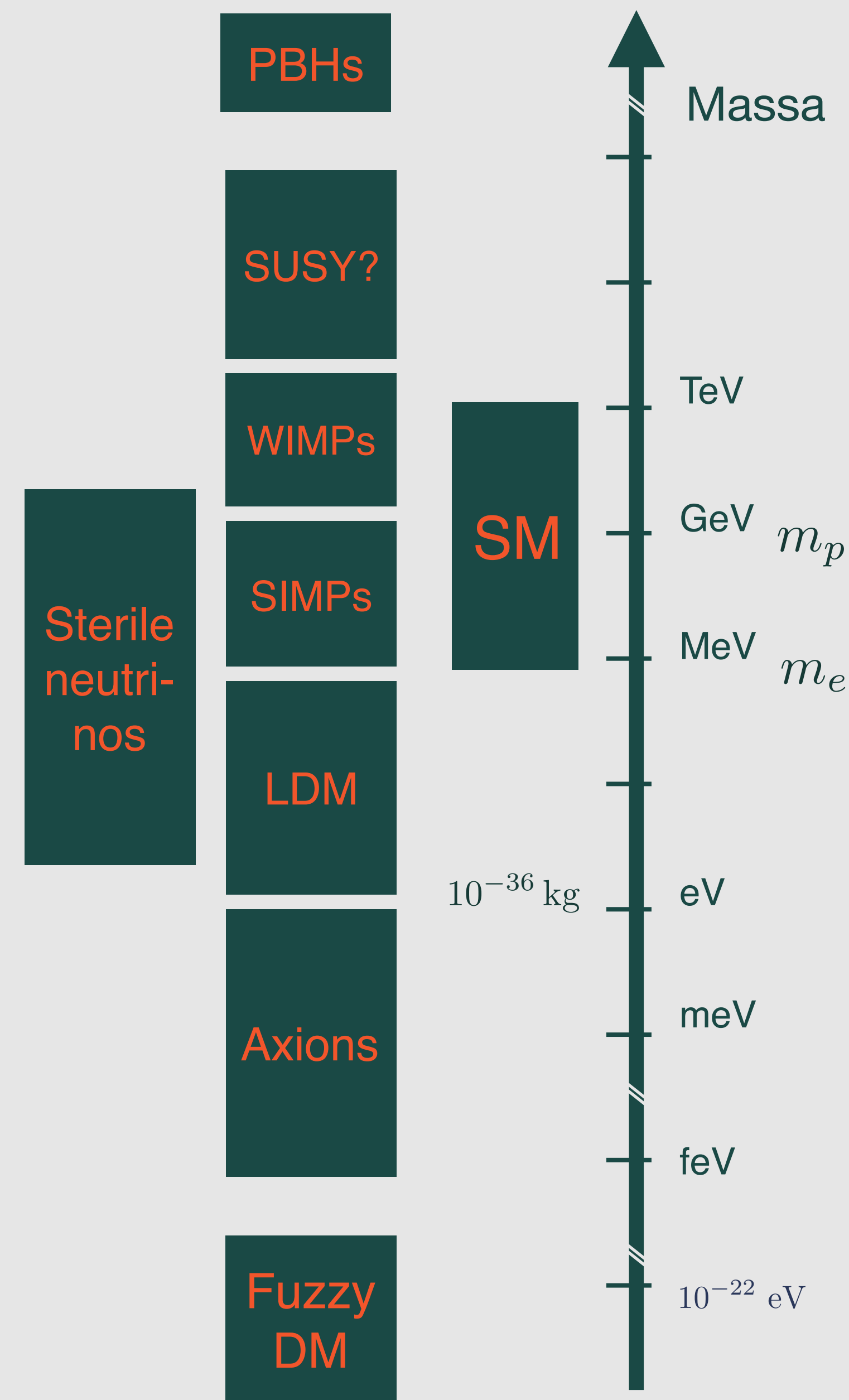
Wat is donkere materie (niet)?

- Het is een deeltje dat geen licht uitzendt; anders hadden we het allang waargenomen!
- Er bestaan verschillende ideeën:
 - De massa is zo groot dat we het nauwelijks kunnen maken bij de deeltjesversneller (WIMP/SUSY)
 - Helemaal geen interactie met het SM (SIMP)
 - Een oer-zwart gat, gemaakt vlak na de oerknal (PBH)
 - Of het is zó licht, dat het veel meer een golf dan een deeltje is (fuzzy DM)



Wat is donkere materie (niet)?

- Het is een deeltje dat geen licht uitzendt; anders hadden we het allang waargenomen!
- Er bestaan verschillende ideeën:
 - De massa is zo groot dat we het nauwelijks kunnen maken bij de deeltjesversneller (WIMP/SUSY)
 - Helemaal geen interactie met het SM (SIMP)
 - Een oer-zwart gat, gemaakt vlak na de oerknal (PBH)
 - Of het is zó licht, dat het veel meer een golf dan een deeltje is (fuzzy DM)
- Of misschien begrijpen we zwaartekracht nog niet helemaal goed: de data wijzen toch op een nieuw deeltje!



Conclusie

- Er is (veel) extra materie in het heelal dat geen licht uitzendt, maar wel zwaartekracht: *donkere materie*
- Verschillende observaties in het vroege en late heelal wijzen erop dat het een deeltje moet zijn, dat niet te veel met zichzelf interacteert
- We kunnen donkere materie op verschillende manieren onderzoeken: maken, breken en shaken
- Er zijn een boel theorieën over wat de donkere materie kan zijn; van deeltjes 10^{30} keer lichter dan een proton, tot oerzwarte gaten!