Astrodeeltjesfysica













De kruisbestuiving tussen natuur- en sterrenkunde





- •17e eeuw: een belangrijke kruisbestuiving sterrenkunde en natuurkunde •19e eeuw: uitvinding spectroscopie \rightarrow sterrenkunde wordt astrofysica •we kunnen samenstelling zon & sterren meten!

- •20e eeuw:
 - •telescopen voor radio, infrarood, UV, röntgen en gammastraling •nieuwe natuurkunde beinvloeden onze kijk op het heelal •algemene relativiteitstheorie (zwarte gaten!), kwantumfysica (witte dwergen), deeltjes

 - fysica (neutronen sterren, kernfusie)









- Alternatieve methoden om kosmos te bestuderen:
 - Deeltjes die de Aarde bereiken: kosmische "straling", neutrino's
 - Zwaartekrachtsstraling
- Andere termen: astroparticle physics, multimessenger astrophysics



• Astrodeeltjesfysica: astrofysica met behulp van deeltjes en zwaartekrachtsstraling • Soms valt de zoektocht naar donkere materie deeltjes of vroege heelal eronder



Alle elementaire deeltjes

- •Materie bestaat uit elementaire deeltjes
 - •Kunnen niet verder opgedeeld
 - Deeltjes hebben antideeltjes
- •Bijv.: elektronen & kwarks zijn elementaire deeltjes
- •Protonen niet: bestaat uit *uud* kwarks
- •In natuur deeltjes altijd hele ladingen
- •Kwarks hebben 1/3,2/3 ladingen; komen niet vrij voor
- Kwarks/elektronen/neutrinos in drie "smaken"
 licht, zwaar, zwaarst (bijv u, c, t of e, μ,τ)
- •Protonen en neutron bestaan uit 3 kwarks
- •Er bestaan ook deeltjes met 2 kwarks: mesonen
- Massa deeltjes vaak aangegeven in energie volgens E=mc². Bijv. proton: m=938 MeV/c² (1.67x10⁻²⁷ kg)
 Energiën in eV (electronvolt)





Pi-mesonen (pionen)



Name	Symbol	Content	Mass	Life time	$E_{\rm thr}$	De
			(MeV/c^2)	(S)	(MeV)	proc
pion	π^0	$\frac{d\overline{d}-u\overline{u}}{\sqrt{2}}$	134.98	8.5×10^{-17}	279.7	2
pion	π^+	$u \overline{d}$	139.57	2.6×10^{-8}	291.0	μ^+
pion	π^-	$d\overline{u}$	139.57	2.6×10^{-8}	287.8	μ^-
kaon	K^+	$\mathcal{U}\overline{S}$	493.68	1.2×10^{-8}	1119.2	$\mu^+ u_{\mu}$,
kaon	K^{-}	$S\overline{\mathcal{U}}$	493.68	1.2×10^{-8}	1114.4	$\mu^-\overline{ u}_\mu$.
kaon	K^0	$\frac{d\overline{s}-s\overline{d}}{\sqrt{2}}$	497.61	9.0×10^{-9}	1127.2	$\pi^+\pi^-$
kaon	K^0	$\frac{d\overline{s}+s\overline{d}}{\sqrt{2}}$	497.61	5.2×10^{-8}	1127.2 <i>T</i>	$\pi^{\pm}e^{\mp}v_{ m e},\pi^{\pm}$
eta	η	$\frac{u\overline{u}+d\overline{d}-2s\overline{s}}{\sqrt{6}}$	547.86	5.0×10^{-19}	1255.7	$2\gamma, 3\pi^{0}, 2$

Pion productie (voorbeelden)

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^{0},$$

$$p + p \rightarrow p + n + \pi^{+},$$

$$p + n \rightarrow p + p + \pi^{-},$$

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^{+} + \pi^{-}$$

ecay ducts

Pion verval

 $2\gamma + \nu_{\mu} - \overline{\nu}_{\mu} + \overline{\nu}_{\mu} - \overline{\nu}_{\mu} + \pi^{0}\pi^{+} + \pi^{0}\pi^{0} + \pi^{0}\pi^{0} + \pi^{0}\pi^{0} + \pi^{0}\pi^{0} + \pi^{0}\pi^{0} + \pi^{0}\pi^{0}\pi^{0} + \pi^{0}\pi^{0}\pi^{0}\pi^{0} + \pi^{0}\pi^{0}\pi^{0} + \pi^{0}\pi^{0}\pi^{0} + \pi^{0}\pi^$



Een voorbeeld: zonneneutrinos



- •De zon geeft licht omdat de zon heet is!
- •De zon blijft miljarden heet door kernfusie
 - protonen worden omgezet in helium
 - daarbij komen neutrinos vrij

Productie van neutrino door proton naar helium fusie

Hoofdreactie (86%, Q=26.20 MeV/4He)

 $^{1}\mathrm{H} + ^{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{2}\mathrm{H} + e^{+} + \nu_{\mathrm{e}},$ $E_{\nu} \leq 0.42 \mathrm{MeV}$ $^{1}\mathrm{H} + ^{1}\mathrm{H} + \mathrm{e}^{-} \rightarrow ^{2}\mathrm{H} + \nu_{\mathrm{e}},$ $E_{\nu} = 1.4 \mathrm{MeV}$ $^{2}\mathrm{H}+^{1}\mathrm{H}$ $\rightarrow^{3}\text{He} + \gamma$, $^{3}\text{He} + ^{3}\text{He} \rightarrow ^{4}\text{He} + 2^{1}\text{H},$ • Andere reactie (14%) $^{3}\mathrm{He} + ^{4}\mathrm{He} \rightarrow$ $^{7}\mathrm{Be} + \gamma$ $^{7}\mathrm{Be} + e^{-}$ $\rightarrow^7 \mathrm{Li} + \nu_\mathrm{e},$ $E_{\nu} = 0.86 \text{ or } 0.38 \text{ MeV}$ • 0.11% of ⁷Be: $^{7}\mathrm{Li} + ^{1}\mathrm{H}$ $\rightarrow 2^4$ He. $^{7}\mathrm{Be} + ^{1}\mathrm{H} \rightarrow$ $^{8}\mathrm{B} + \gamma,$ $^{8}\text{Be} + e^{+} + \nu_{e},$ $^{8}\mathrm{B} \rightarrow$ $E_{\nu}^{\rm max} \approx 15 {\rm MeV}$ $^{8}\text{Be} \rightarrow 2^{4}\text{He}.$







Zonneneutrinos: een raadsel



- Homestake mijn-experiment (Raymond Davis & John Bahcall): •gebruik v_e + ³⁷Cl \rightarrow ³⁷Ar + e⁻
- •³⁷Ar is radioactive en een gas: meet radioactiviteit
- •Nadeel: alleen gevoelig voor neutrinos met 0.81 MeV energie (0.11%)
- •Conclusie in 1964-1970s: een tekort aan neutrinos!





- •Berekeningen fout of is er iets aan de hand?
- •Nieuwe experimenten: GALEX en SAGE gevoelig voor lage energie neutrinos
 - •Maar gebaseerd op chemische reacties en minder nauwkeurig
- •Nieuw experiment: (super)Kamiokande -> real time
- •Conclusie:
 - •er is echt een tekort, maar het ligt niet aan de zon
 - •en neutrinos oscilleren!!: ze fluctueren tussen electron/muon/tau neutrinos

Het begin van astrodeeltjesfysica?

- ~1910 Victor Hess ontdekt
 "penetrerende straling" uit de kosmos
- ~1930-40 "straling" blijkt energetisch, geladen deeltjes (bijdrage Nederlander Jacob Clays)
- 1932 Carl Anderson ontdekt het positron in kosmische "straling"





Van Giga- tot 100 Exa- electronVolt



particle km⁻²century⁻¹





Kosmische stralings kaskades



Kosmische Stralings detector: Pierre Auger Observatory (Argentinië)

- •Voor E> 100 TeV: deeltjes worden niet meer direct waargenomen
- •Deeltjes veroorzaken door botsingen productie van veel andere deeltjes: een kaskade!

•Wat gedectectoord wordt: een optische spoor/flits en de secundaire deeltjes op de grond

- Details in spectrum:
 - iets over oorsprong?
- Huidige inzichten:
 - "knie": maximale energie protonenversnellers in Melkweg
 - "enkel": kosmische straling van buiten de Melkweg
 - $4x10^{19}$ eV: maximale energie haalbaar versnellers





Waaraan moeten versnellers voldoen?

- David Hillas (1984):
 - Om te versnellen moet je een deeltje lang in bedwang houden binnen de versneller: je hebt magneetveld nodig
 - Hoe kleiner versneller, hoe sterker magneetveld
 - Elektrische velden worden snel geneutraliseerd
 - Versnelling: snelle bewegingen en hoge magneetvelden
 - Sterkte magneetveld hangt samen met grootte: versnelling in een grote bron met zwak magneetveld, of kleine bron met groot magneetveld



Waarschijnlijke bronnen



- Bronnen moeten voldoende energie hebben en magneetvelden.
- Zo'n 10% gaat naar kosmische straling
- In Melkweg: meest energie komt van supernova(resten)
- Buiten de Melkweg: meest energetische bronnen zijn jets veroorzaakt door superzware zwarte gaten (AGN)



Kosmische versnellers **CERN Large Hadron Collider**



13 teraelectronvolt (1.3x10¹³ eV) mug @ 3 km/uur



M87

tot 100 exaelectronvolt (10²⁰ eV) tennisbal @ 100 km/uur







Van waarvandaan komt kosmische straling?



-0.836732

Voor > 5x10¹⁹eV: kosmische stralingsrichting geeft hints over oorsprong

0.836732

Samenstelling van kosmische straling

- Tot 10¹³ eV: meten van samenstelling kosmische straling
- 99%: atoomkernen; 1%: elektronen
- Samenstelling atomen: extra "oneven elementen" t.o.v. samenstelling zon
 - atoomkernen gaan "kapot" tijdens reis
- Radio-activiteit/samenstelling:
 - Rond 1 GeV: deeltje blijft 15 miljoen jaar reizen in Melkweg
 - Deel van reis door gebieden met weinig gas (halo Melkweg)



De reis van kosmische straling

- In de Melkweg is een zwak magneetveld (0.5 nanoTesla/1 miljoenste aardmagneetveld)
- De kosmische straling wordt afgebogen door dit magneetveld
- Magneetveld enigszins chaotisch: • dus baan deeltjes ook chaotisch
- Boven ~3x10¹⁸eV ("enkel"): deeltjes verdwijnen rechtstreeks uit Melkweg
- Richting van waaruit deeltjes komen zegt niks over oorsprong
- We hebben andere methode nodig om oorsprong te bepalen:
 - Gamma-straling
 - Neutrinos





Gammastraling

Inverse compton verstrooiing







- Pion-verval: 2 fotonen ieder heeft 1/2 energie E=mc²=135 MeV Maar pion heeft veel energie en beweegt bijna met lichtsnelheid: • foton dat onze richting uitgaat heeft deel totale energie pion





Gamma straling

Energy (eV)

Detectie pion verval met Fermi satelliet



Atmosferische Cherenkov Telescopen



- 0.1-200 TeV foton: deeltjeskaskade in atmosfeer • Secundaire deeltje zorgen voor een heldere flits ~nanoseconde (Cherenkovstraling)
- Flits smaller dan door kosmische straling
- Optische telescopen meten de flits en de richting:
 - Meet energie foton: helderheid
 - Richting: triangulatie
 - Voorbeelden: H.E.S.S., MAGIC, VERITAS



Atmosferische Cherenkov Telescopen











Voorbeelden TeV bronnen



Een supernovarest van ~1700 jaar oud op ca. 3000 lichtjaar afstand.

> 2 TeV straling: deeltjes met >20 TeV aan energie



Jet in Centaurus A veroorzaakt door superzwaar zwart gat



Supernovarest Cassiopeia A



- Cassiopeia A: een krachtige supernovarest • Spektrum: duidelijk veroorzaakt door pionen • Raadsel: fotonen niet energetische genoeg om de "knie" te verklaren









- LHAASO is een kosmische straling/gamma-straling detector
- Gebruikt watertanks die deeltjes op de grond meten
- Kan 24/7 detecteren
- Detectie 100-1000 TeV fotonen uit Melkweg: stervormingsgebieden
 - Sterwinden ipv supernovaresten?

LHAASO





De toekomst: Cherenkov Telescope Array







Pauze





- Botsingdoorsnede:
 - hoe kleiner hoe minder kans op een "interactie"
 - geen "interactie" geen detectie!

• Tot voor kort:

- detectie van MeV neutrino's
- zon en supernova's (SN1987A)
- Laatste ~20 jaar: detectie neutrinos > 10 TeV
 - Botsingsdoorsnede groter (fijn!)
 - Maar het aantal neutrino's per seconde is laag!
 - Je hebt een hele grote detector nodig: volume ~ km³
- Belangrijkste doel: de bronnen van (extra)galactische kosmische straling
- Belangrijste hindernissen:
 - weinig detecties
 - atmosferische neutrino's

IceCube & KM3NeT



- Principe: neutrino interactie → muonen/elektronenspoor → Cherenkov straling
- Nodig: neutrino interactie zeldzaam: groot volume, helder medium en donker!
- IceCube (US + partners):
 - gebruik helder ijs op de Zuidpool
 - laat gevoelige detectoren aan draden in het ijs zakken









- Europees project (o.a. Nikhef NL) in aanbouw
- Gebruik helder water diep in de Middellandse Zee

 - Nadeel: bacteriën en algen produceren bioluminscentie
- Drie locaties



• Voordeel: water helderder dus betere detectie en richtings bepaling neutrinos



- Flux van hoge energie neutrinos boven atmosferische "achtergrond"
- Geen duidelijke bronnen
 - mogelijk detectie van een blazar (jet vanuit superzwaar zwart gat)
 - moeilijkheid:
 - nauwkeurigheid richting >graad
 - weinig neutrinos
- Toekomst:
 - IceCube wordt groter
 - KM3NeT heeft betere richtingsbepaling

IceCube resultaten









- Deeltjes als kosmische straling en neutrinos geven ons een andere kijk op de jets van superzware zwarte gaten
- Kosmische straling wijst niet terug naar de bronnen:
 - gammastraling en neutrinos veroorzaakt in de bron nodig
- Zwaartekrachtsstraling vormt het laatst ontgonnen perspectief op het heelal: sinds 2015 ontdekking vele versmeltende zwarte gaten en neutronensterren

Conclusie

processen die zich afspelen in zeer energierijke objecten zoals supernovaresten en