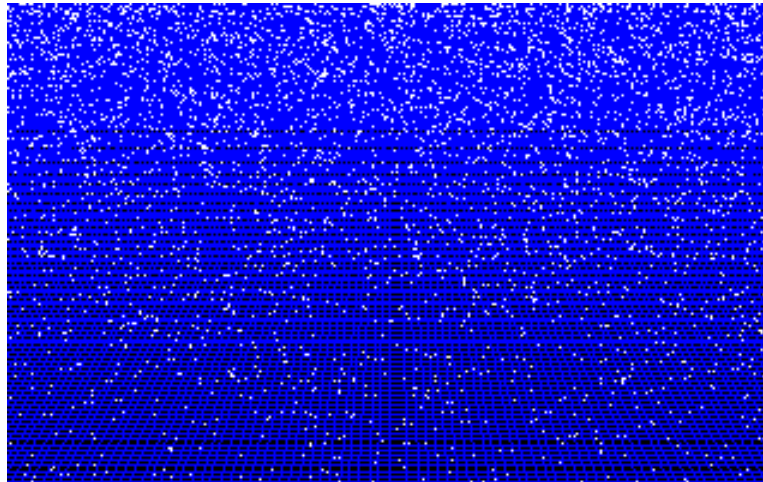


GRAVITATIE EN KOSMOLOGIE

FEW cursus



Jo van den Brand & Laura van der Schaaf
Quantumfysische verschijnselen: 9 september 2014

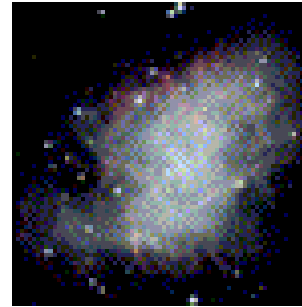
INHOUD

- Inleiding
 - Overzicht
- Klassieke mechanica
 - Galileo, Newton
 - Lagrangeformalisme
- Quantumfenomenen
 - Neutronensterren
- Wiskunde I
 - Tensoren
- Speciale relativiteitstheorie
 - Minkowski
 - Ruimtetijd diagrammen

- Wiskunde II
 - Algemene coördinaten
 - Covariante afgeleide
- Algemene relativiteitstheorie
 - Einsteinvergelijkingen
 - Newton als limiet
- Kosmologie
 - Friedmann
 - Inflatie
- Gravitatiestraling
 - Theorie
 - Experiment

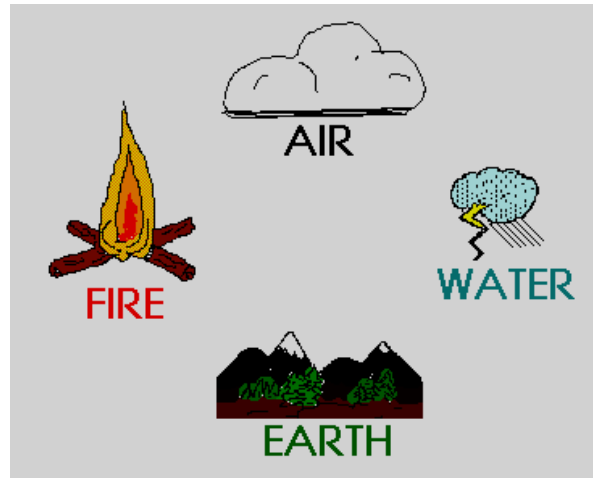
WAAR DE WERELD VAN GEMAAKT IS

- De wereld kent een enorme diversiteit van materialen en vormen van materie.
- Vraag: bestaan er fundamentele bouwstenen? (liefst een klein aantal...)



HET CONCEPT VAN ELEMENTEN

In de filosofie van Aristoteles waren er vier elementen



ELEMENTS			
Hydrogen	1	Strontian	86
Air	5	Barytes	68
Carbon	46	Iron	56
Oxygen	7	Zinc	65
Phosphorus	9	Copper	63
Sulphur	16	Lead	207
Magnesia	24	Silver	197
Lime	28	Gold	197
Soda	23	Platina	197
Potash	40	Mercury	200

Dalton (1808) rangschikte, op gewicht veel van de elementen die we vandaag kennen



HET PERIODIEKE SYSTEEM



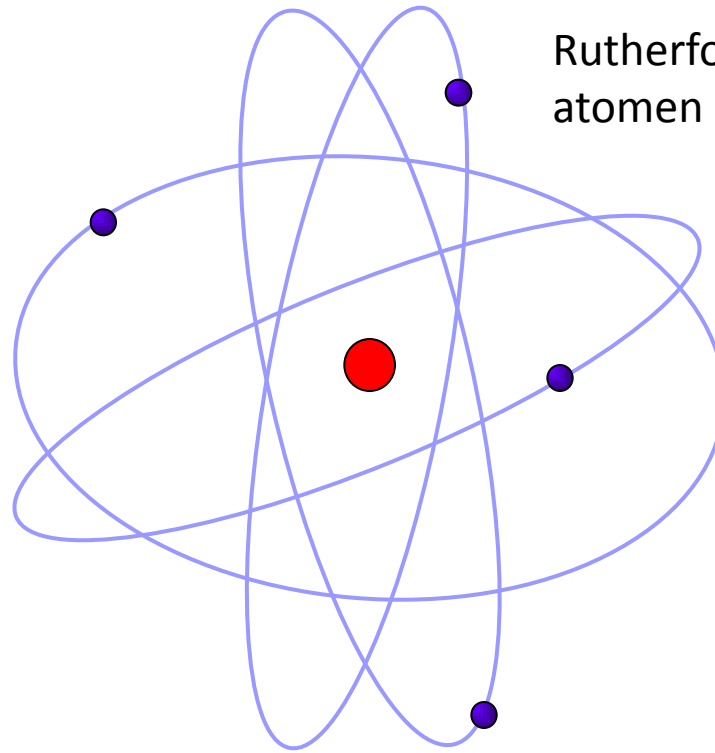
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period																			
1	1 H																	2 He	
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca		21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr		39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
-																			
*Lanthanides			*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
**Actinides			**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

Mendeleev (1869) introduceerde het periodieke systeem

Quantummechanica: spin, Pauli, schillenmodel, L , S , J



DE STRUCTUUR VAN ATOMEN



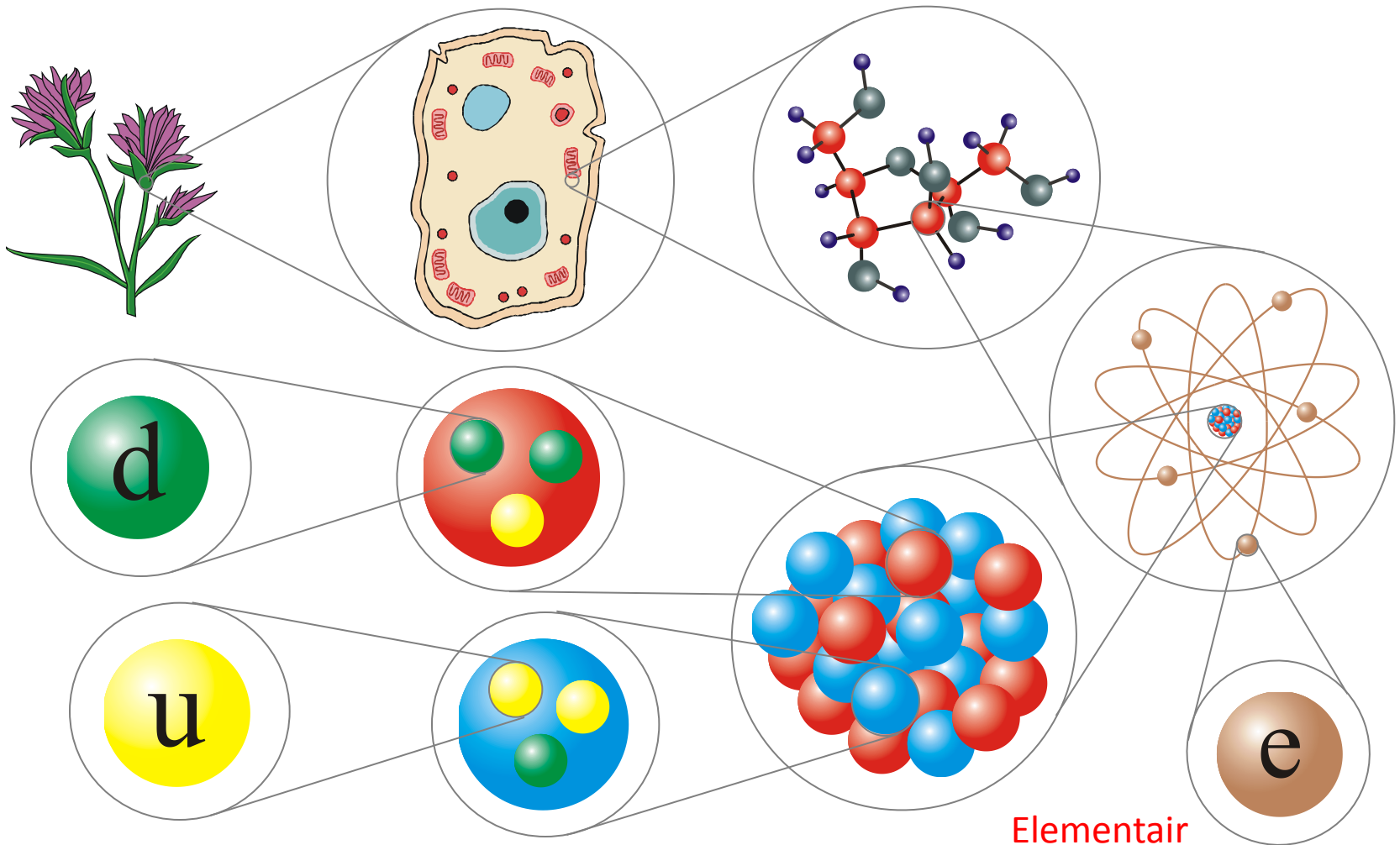
Rutherford (1912) toonde aan dat atomen een centrale kern bevatten

10^{-10} m

Elektronen draaien rond de kern met precies gedefinieerde energie en slecht gedefinieerde posities

Quantummechanica: positie- en impulsoperatoren $\mathbf{x}$ en $\mathbf{p}_x$ commuteren niet

DEELTJESFYSICA



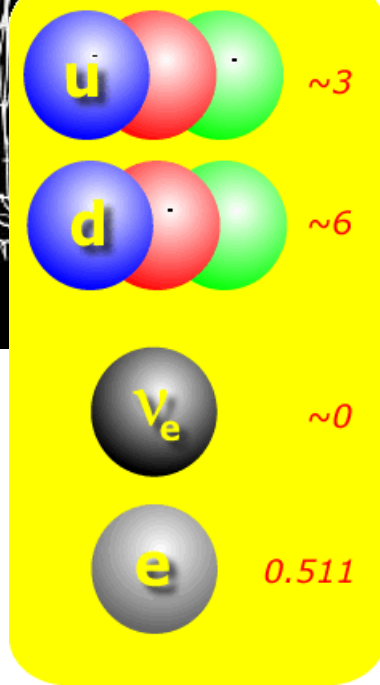
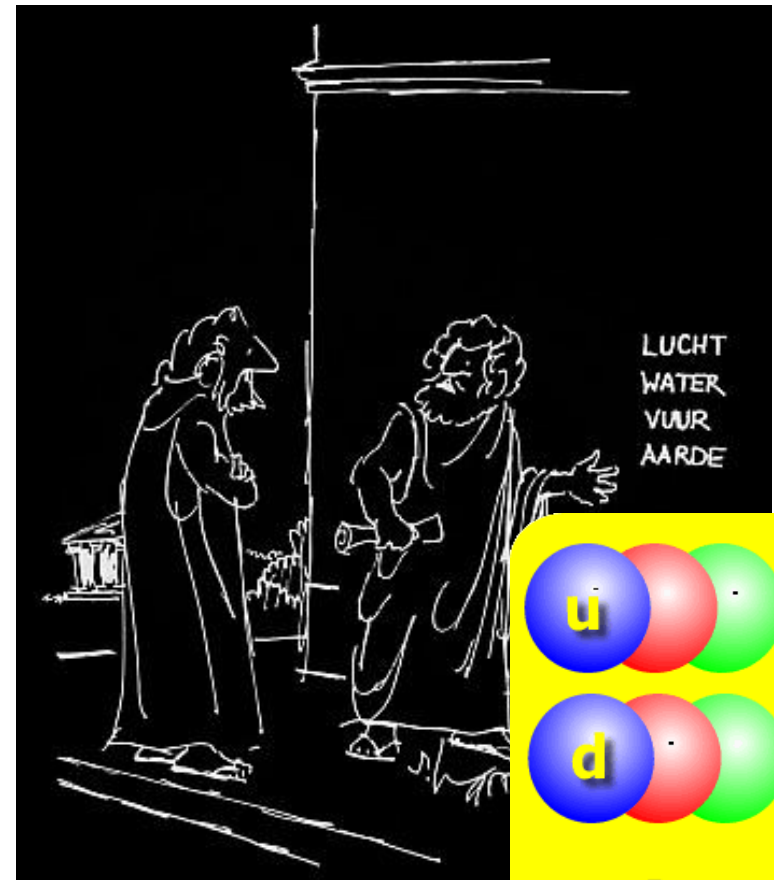
Elementair
sinds
1974

Elementair
sinds
1897



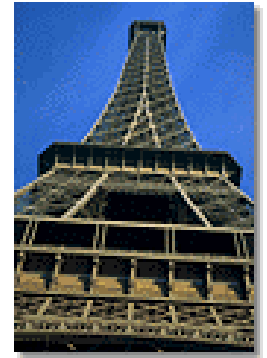
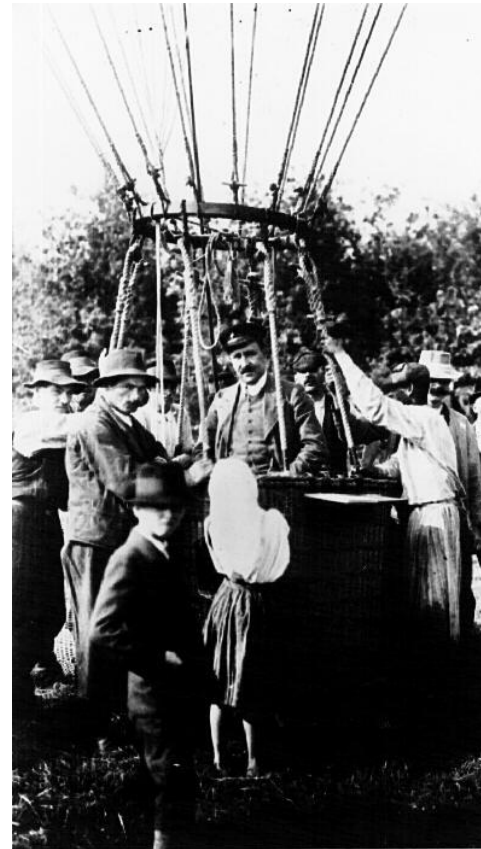
GEWONE MATERIE

- Alle materie: ~100 soorten atomen
- De kern heeft 99.9% van de massa
- Het elektron is puntvormig.
- Protonen en neutronen zijn echter samengestelde deeltjes.
- De quarks lijken weer puntvormig
 - In principe enkel 'up' en 'down' quarks nodig als bouwstenen.
- Verder nog het elektron-neutrino.



KOSMISCHE MATERIE

- Theodore Wulf
 - Jezuit uit Valkenburg
- Victor Hess ontdekt 'kosmische' straling.
- Nieuwe soorten deeltjes worden gevonden: vooral muonen.
- Muon lijkt op elektron
 - maar dan 200 keer meer massa.
 - leeft gemiddeld 2.2 us
 - en vervalt in een elektron en twee neutrale deeltjes.
- De muonen komen van het verval van kortlevende deeltjes, die soms een derde type quark bevatten: het vreemde quark.
- Kosmische materie: naast 'gewone' materie ook muon, muon-neutrino en het vreemde quark.

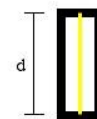
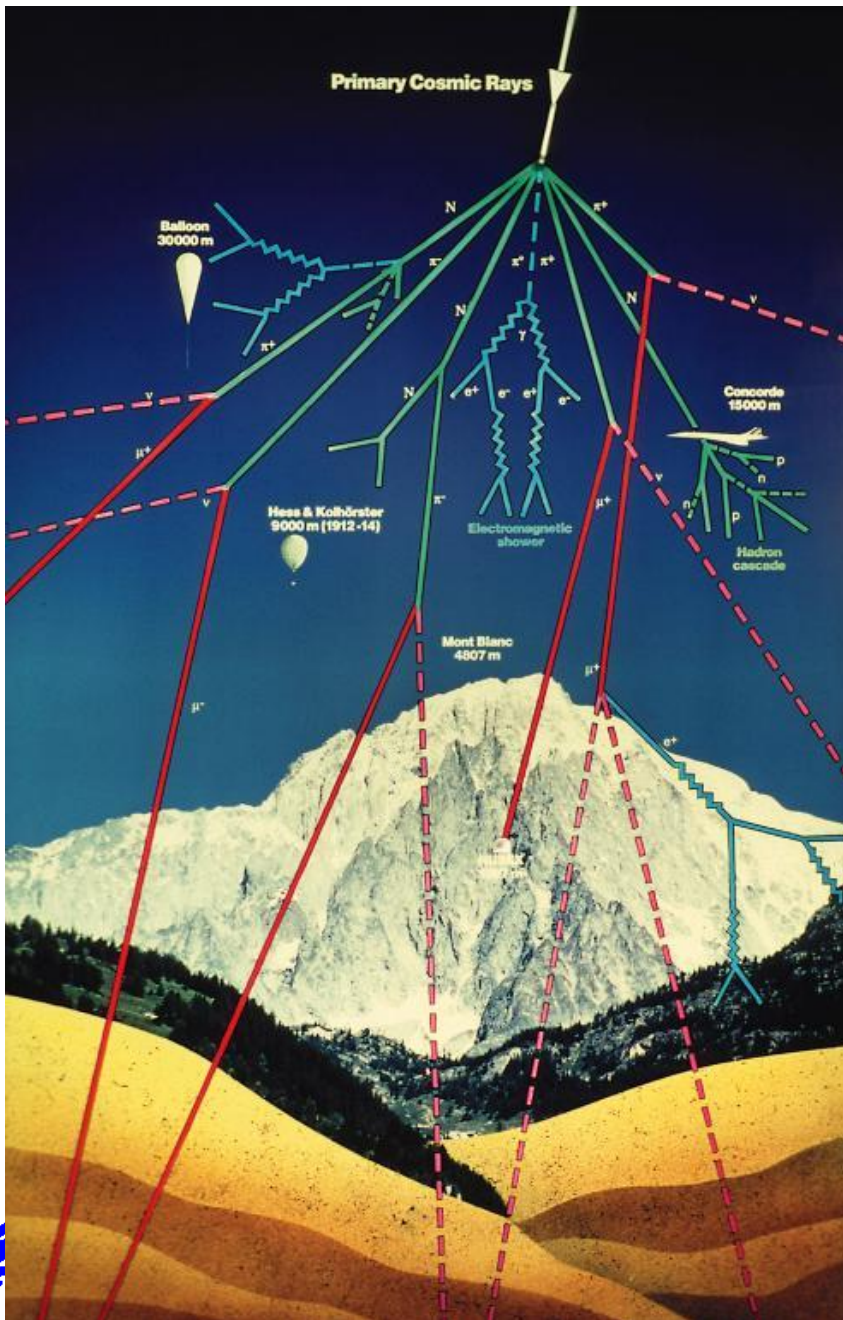


Deeltjes uit de ruimte (kosmische straling) maken een regen van secundaire deeltjes in de atmosfeer

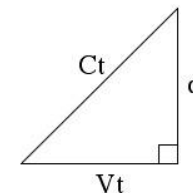
Een muon leeft $2.2 \mu\text{sec}$. Welke afstand kan het dan met de lichtsnelheid bewegend afleggen?

$$(3 \times 10^8 \text{ m/s})(2.2 \times 10^{-6} \text{ s}) = 660 \text{ m.}$$

Toch bereiken muonen het aardoppervlak!

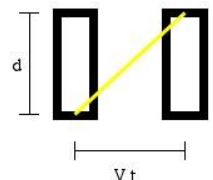


Time per tick:
 $\tau = d/C$



$$(Ct)^2 = (Vt)^2 + d^2$$

$$(C^2 - V^2)t^2 = d^2$$



Time per tick:
 $t = d/\sqrt{(C^2 - V^2)}$



ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955)



Relativiteitstheorie

- Equivalentie van massa en energie:

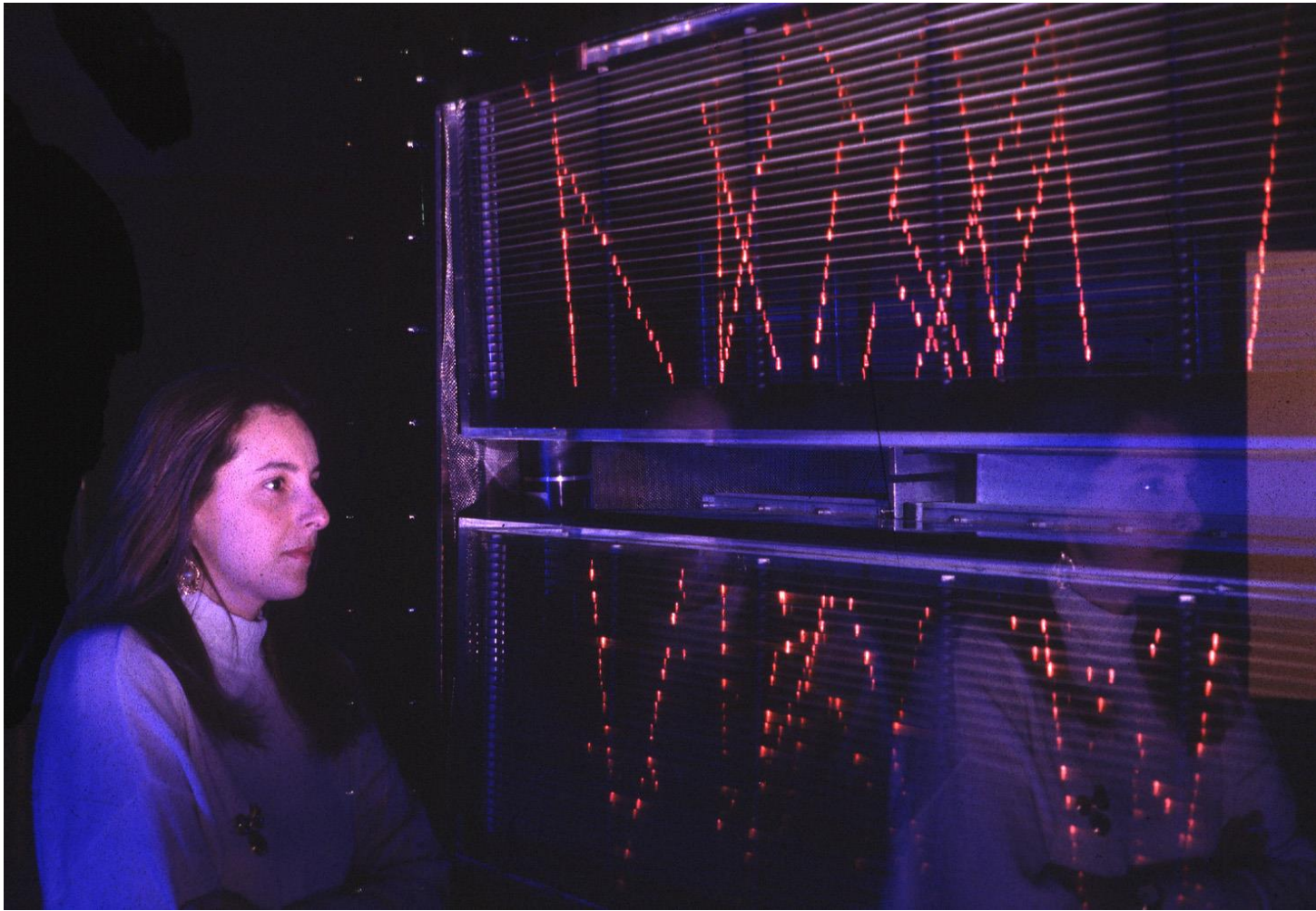
$$E = m c^2$$

- Bewegende klokken lopen langzamer:

$$t = \gamma \tau \quad (\gamma > 1)$$



MUONEN ZICHTBAAR MAKEN MET VONKENKAMER



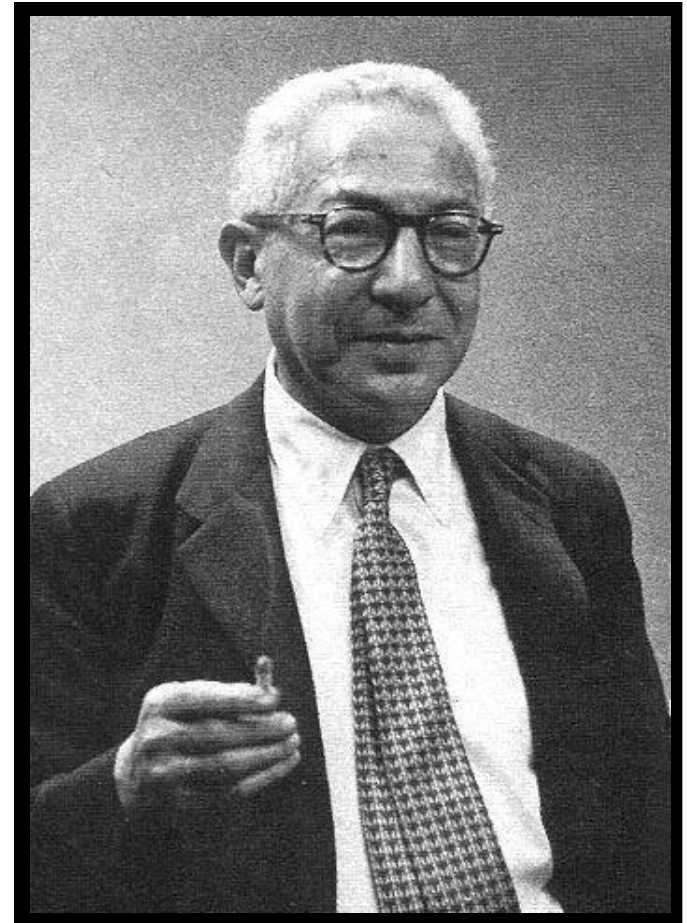
HET MUON

Ontdekt in kosmische straling door
Neddermeyer en Anderson (1936)

Lijkt identiek aan het elektron, maar
200 keer zo massief

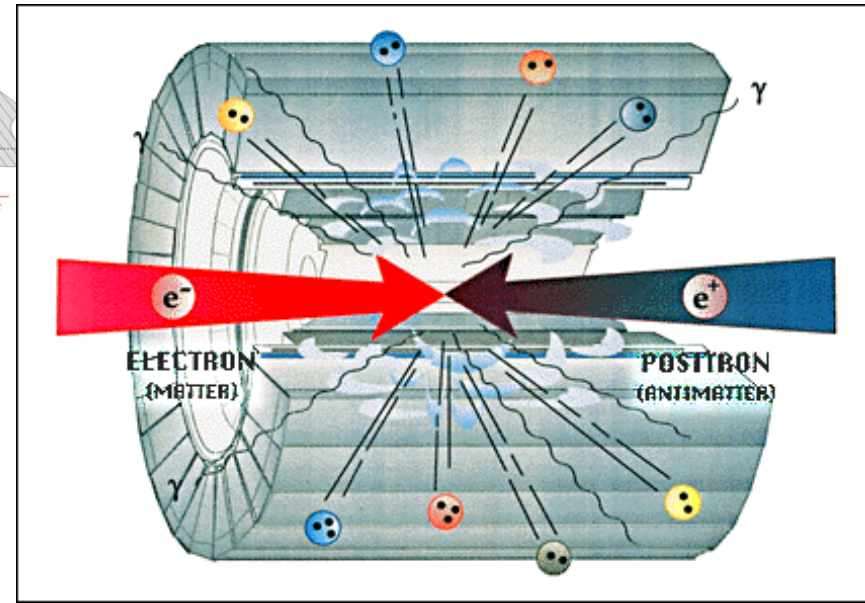
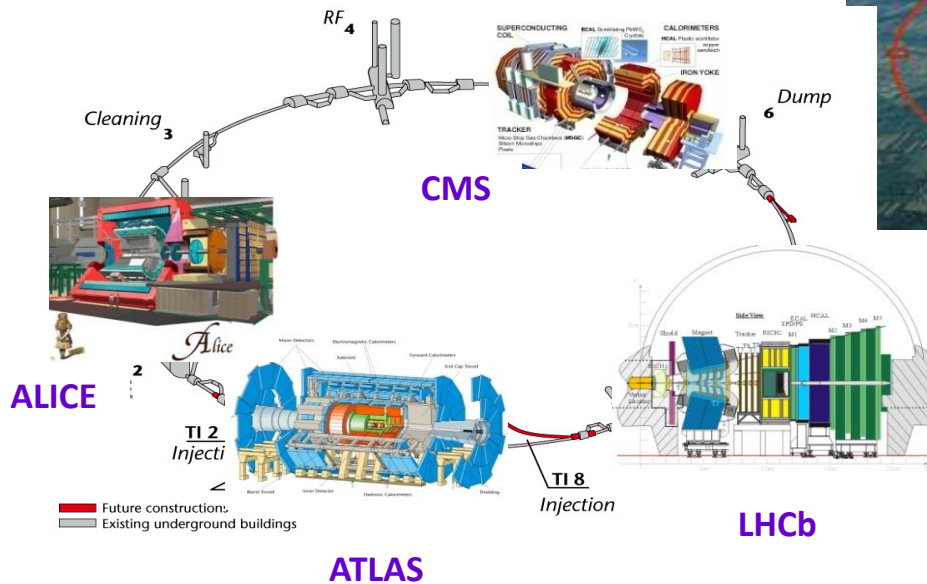
Vervalt binnen 2.2 microseconden

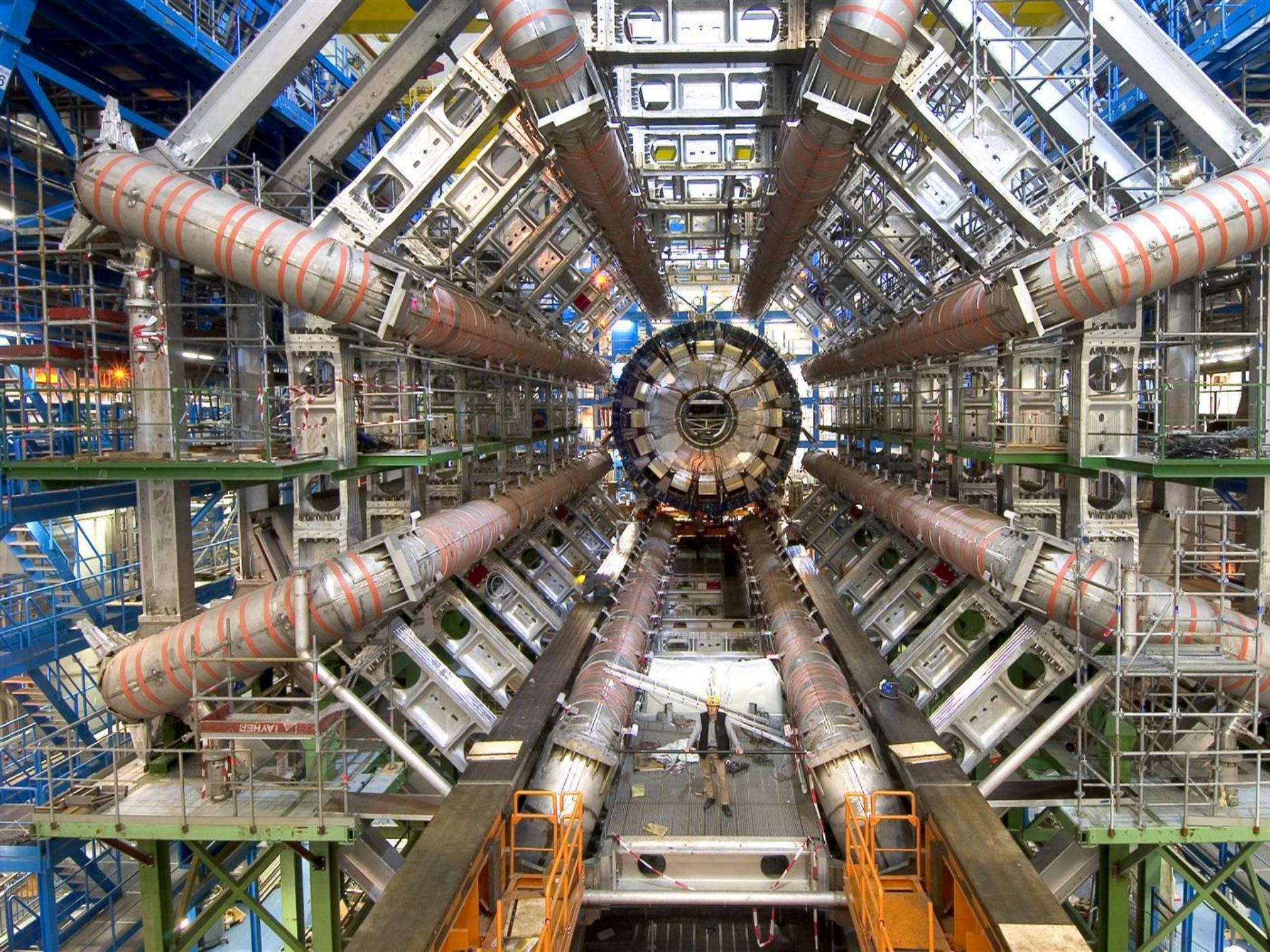
‘Who ordered that?’ - I I Rabi



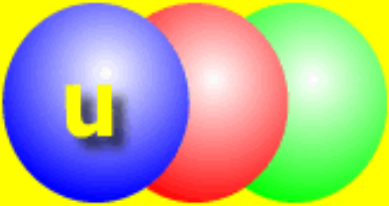
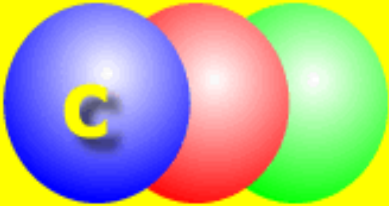
HOGE ENERGIE MATERIE

- In 2013: 8 TeV proton-proton botser
- Hoogste prioriteit in ons vakgebied





DRIE FAMILIES: STANDAARD MODEL

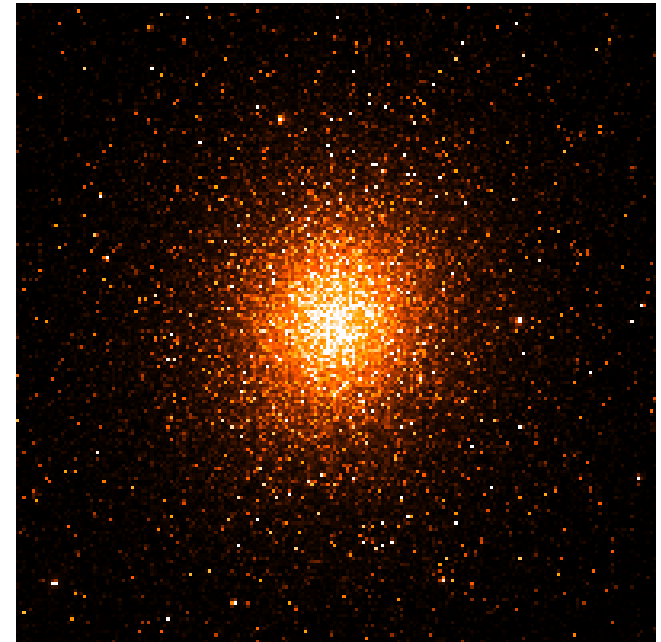
 u	~3	 c	1250	 t	174300
 d	~6	 s	120	 b	4200
 ν _e	~0	 ν _μ	~0	 ν _τ	~0
 e	0.511	 μ	106	 τ	1770

Massa's van deeltjes in MeV;
 $1 \text{ MeV} \approx 1.8 \times 10^{-27} \text{ gram}$

KRACHTEN

- Structuren: van protonen tot sterrenstelsels
- Gravitatie: de bekendste kracht
 - Hierdoor staan we op aarde en
 - bewegen de planeten rond de zon
 - Belangrijk in massieve objecten
- Elektriciteit en magnetisme
 - Veel sterker dan gravitatie!
 - Vormt elektrisch neutrale atomen, moleculen en vaste stoffen en vloeistoffen.
- Nieuwe krachten:
 - Sterke kracht
 - Zwakke kracht
 - Korte dracht: verklaard door het Standard Model

Omega Centauri
globular cluster



STERVORMING

Gravitationele krachten in H_2 gebieden

Protostellaire objecten ontstaan door:

- Dalende potentiële energie

- Stijgende kinetische energie

- Verdichting kern

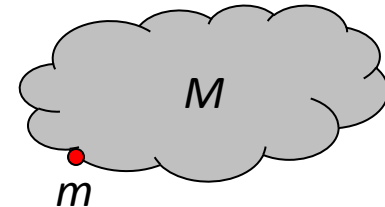
- Verhoging temperatuur en druk



Het gebied dat condenseert dient een minimum afmeting te hebben: Jeans lengte

$$\lambda_{\text{Jeans}} = \left(\frac{\pi k T}{G \rho m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

T , M en r van de gaswolk



Dit volgt bij benadering uit beschouwing energie van een gasmolecuul met massa m

$$\frac{3}{2} k T = \frac{G m M}{R} \rightarrow \frac{3}{2} k T = \frac{4}{3} \pi G m \rho R^2 \rightarrow R = \left(\frac{9 k T}{8 \pi G \rho m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Jeans massa

$$M_J = \frac{4}{3} \pi \rho \lambda_{\text{Jeans}}^3 = \frac{4 \pi^{\frac{5}{2}}}{3} \left(\frac{k T}{G m} \right)^{\frac{3}{2}} \rho^{-\frac{1}{2}}$$

Als dichtheid toeneemt, dan wordt M_J kleiner en fragmenteert de gaswolk

PROTOSTERREN

Sterren ontstaan in de omgeving van sterren

Bij voldoende druk, massa, temperatuur en stabiliteit ontstaat er kernfusie

Druk $\approx$ diameter x gravitatieversnelling

Temperatuur is recht evenredig met de druk

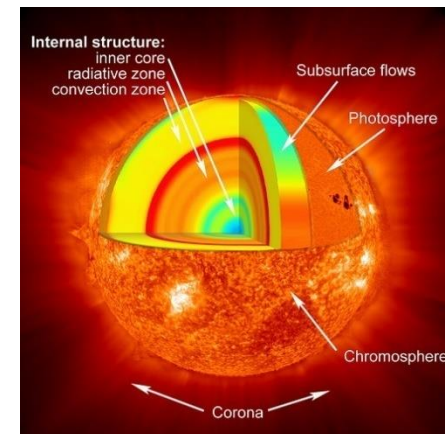


Onze zon $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ kg
ongeveer 10^{57} waterstofatomen
 $m = 1,67 \times 10^{-27}$ kg
 $L_{\odot} = 3,8 \times 10^{26}$ W

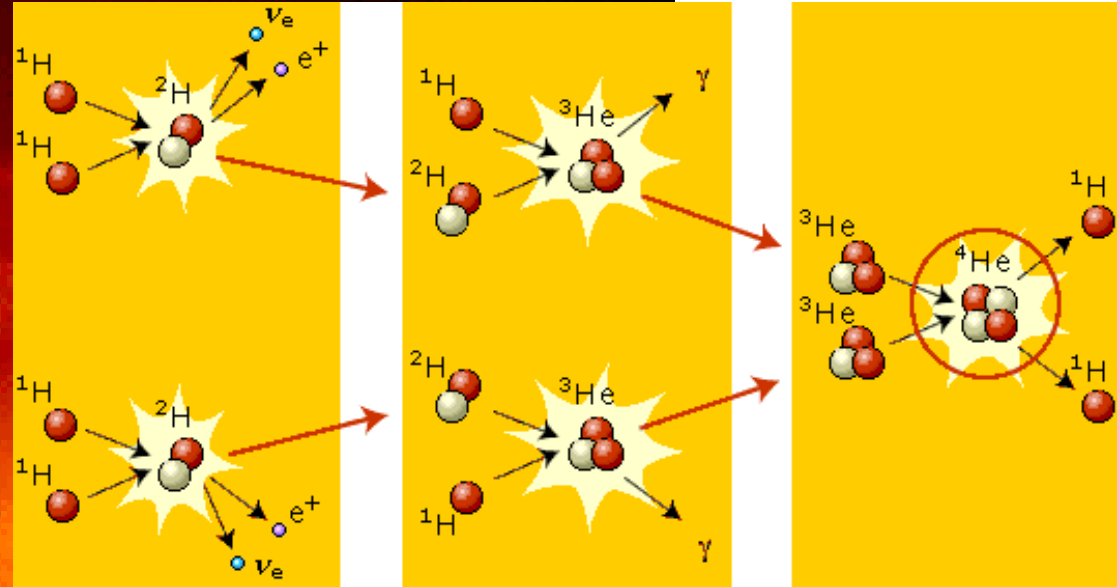
Gravitationele energie $\frac{1}{2}mv_{\text{ontsnapping}}^2 = \frac{GM_{\odot}m}{R_{\odot}} = 3 \times 10^{-16}$ J

Voldoende energie voor miljoenen jaren...

Temperatuur stijgt voldoende om fusie mogelijk te maken

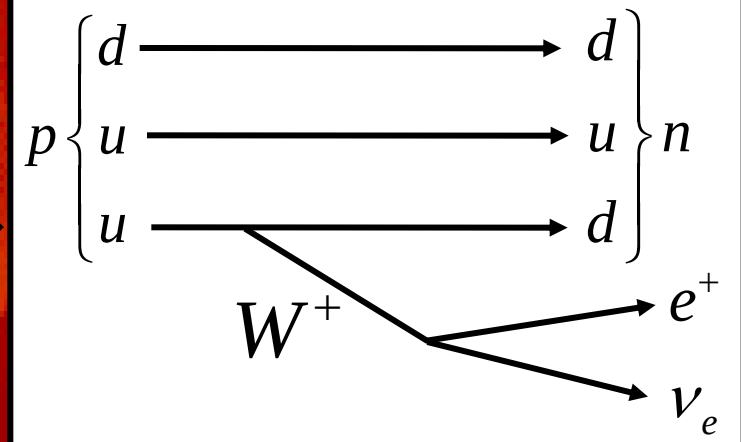


ENERGIEHUISHOUDING IN STERREN



Per seconde zet de zon 570 miljard kg waterstof om

De massa van de zon neemt per seconde af met 4.3 miljard kg!



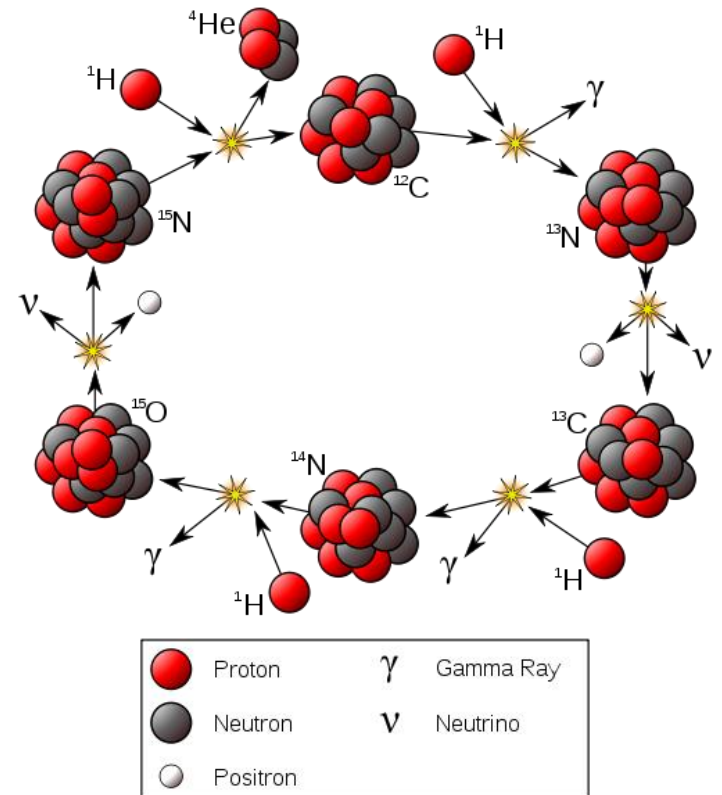
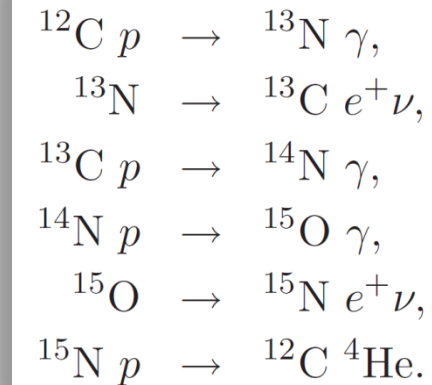
CNO CYCLUS

Koolstof als katalysator

Effectieve reactie $4p \rightarrow {}^4\text{He}$

Energieproductie $Q(4p \rightarrow {}^4\text{He}) = 26,7 \text{ MeV}$

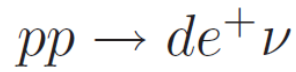
Dominant in *hete* sterren



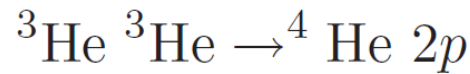
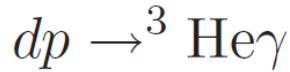
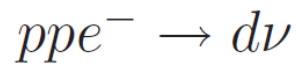
PP CYCLUS

Dominant in de zon (CNO ongeveer 1.6%)
Dezelfde energieopbrengst als CNO

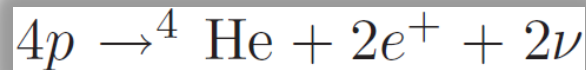
Essentiele stappen



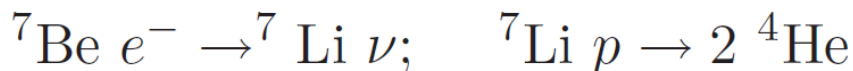
of



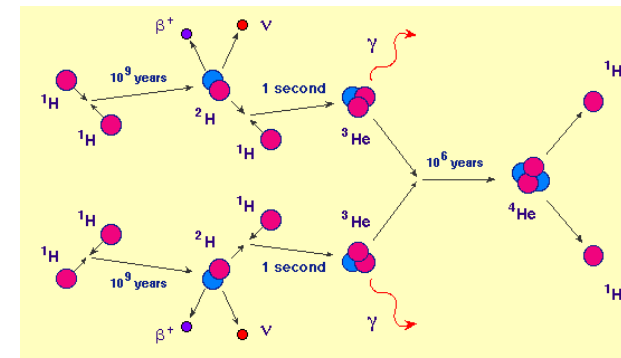
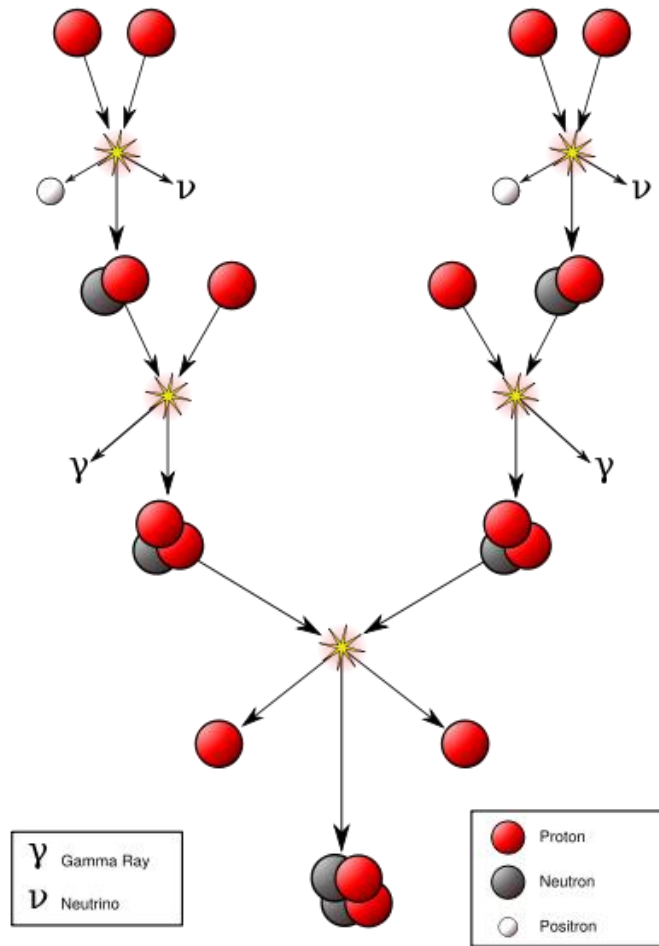
Effectieve reactie



Andere kanalen ${}^3\text{He} {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} \gamma$



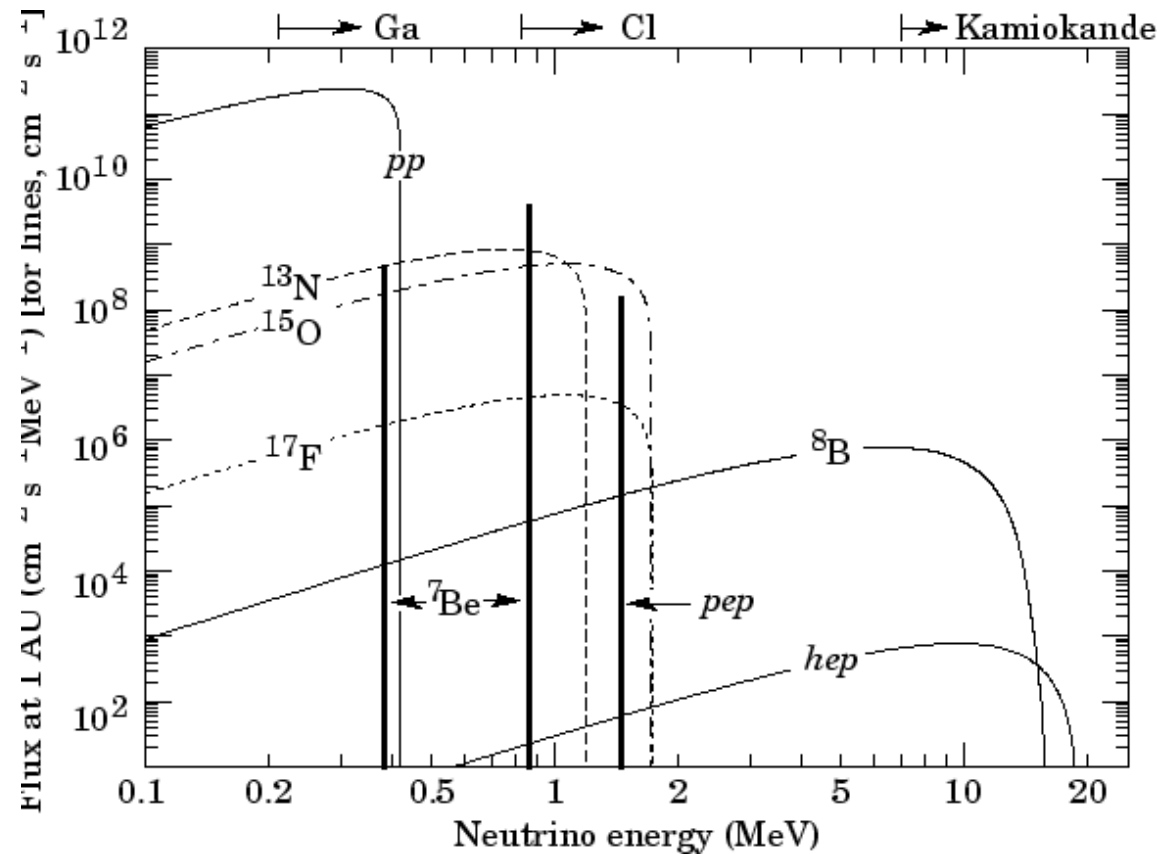
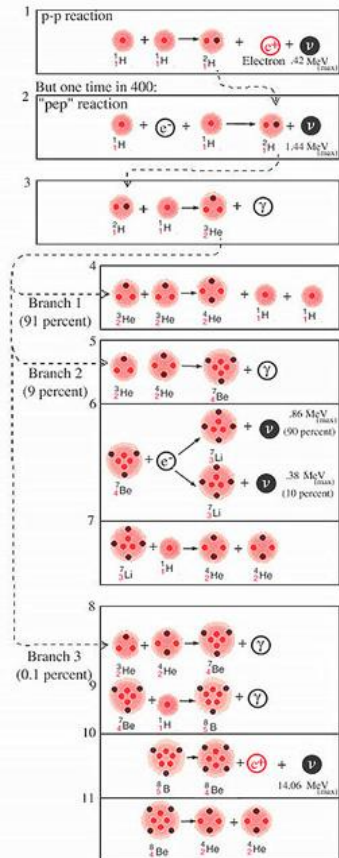
Nucleosynthese en neutrinoproductie



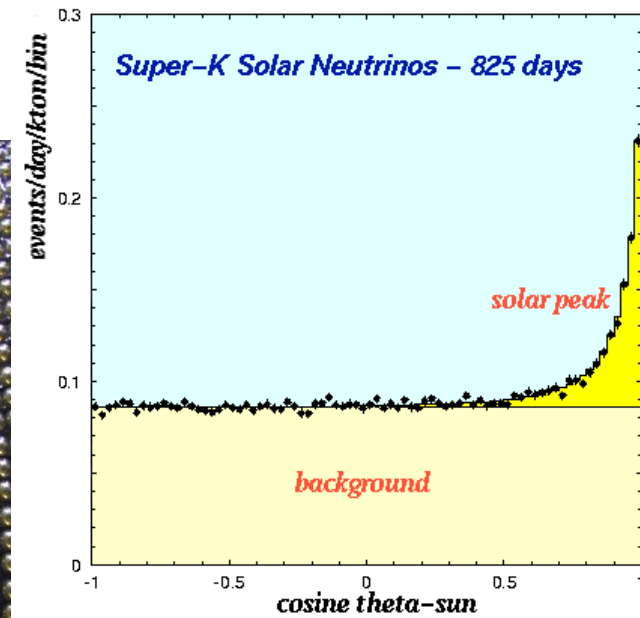
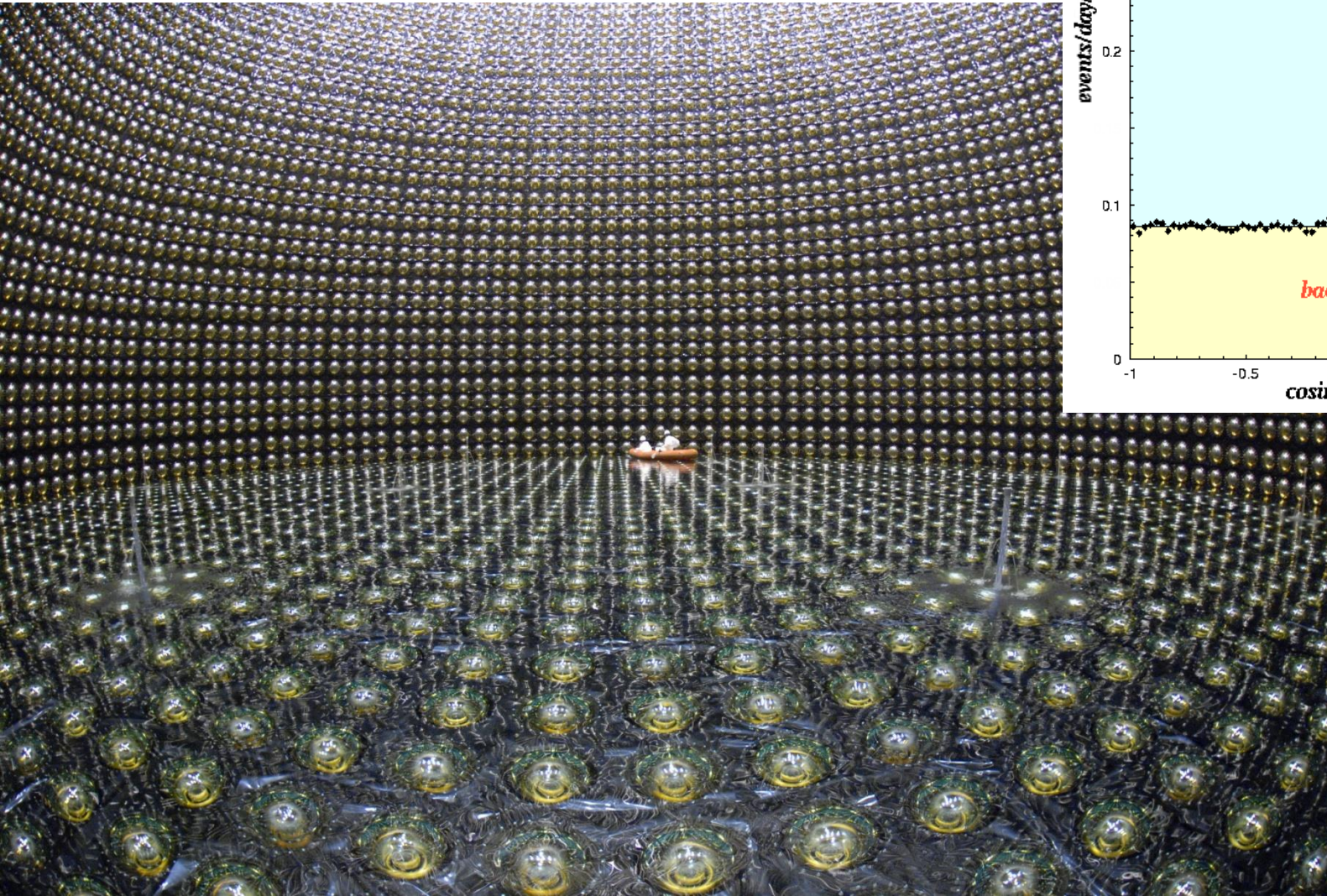
NEUTRINO'S VAN DE ZON

Specifiek energiespectrum van neutrino's
Drempelenergie verschilt per detectiemedium

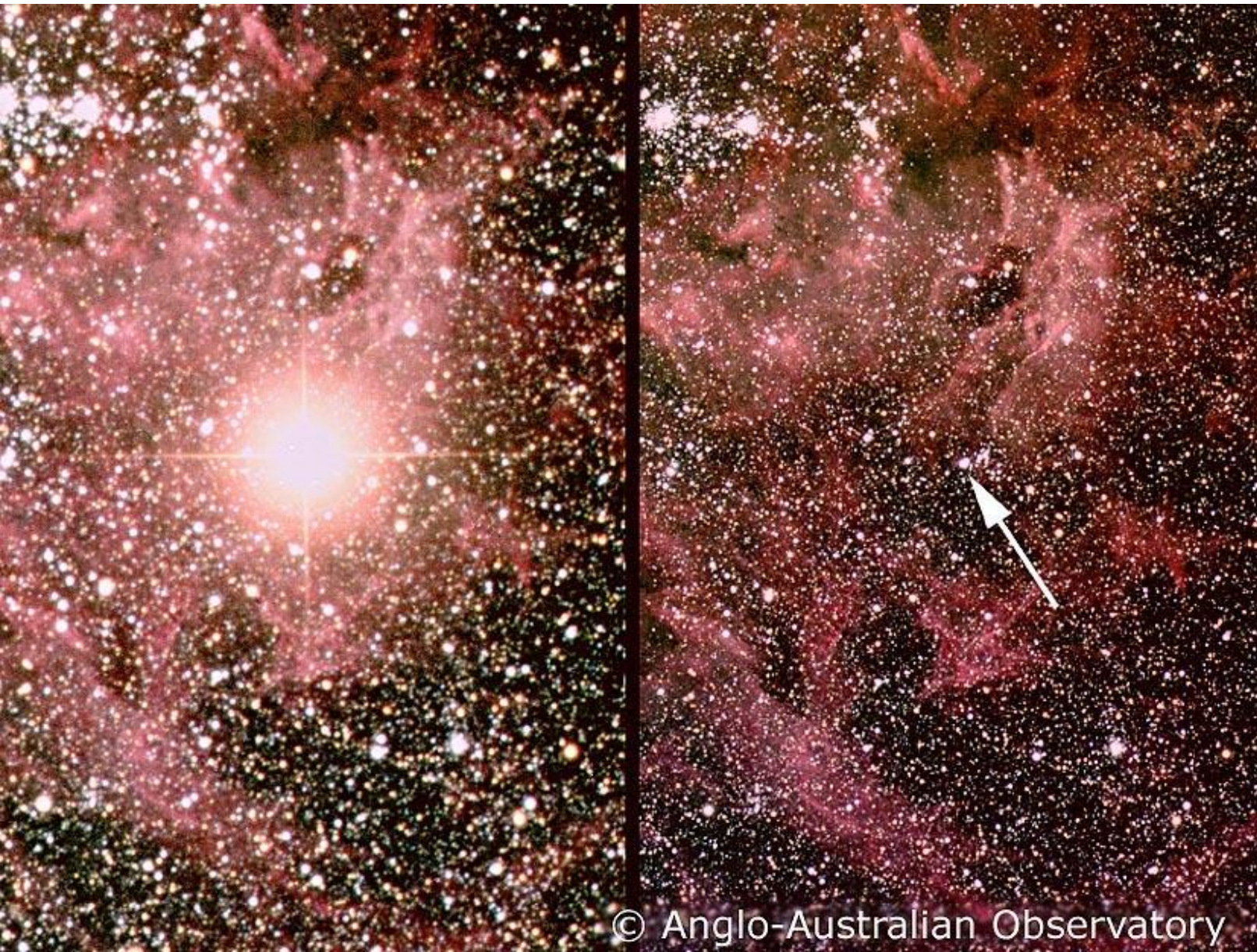
Eerste experimenten gebruikten $\text{Cl}(\nu_e, e^-)\text{Ar}$
Ray Davis, Homestake, South Dakota



SUPERKAMIOKANDE



SN1987A

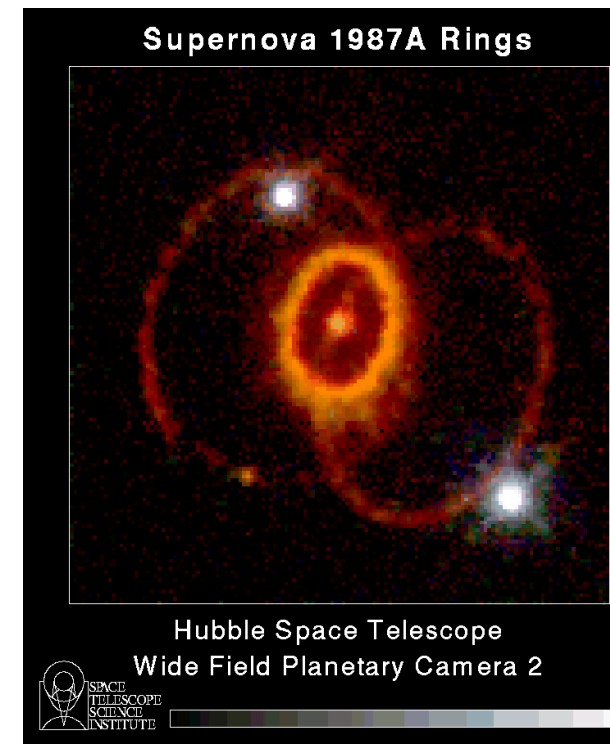
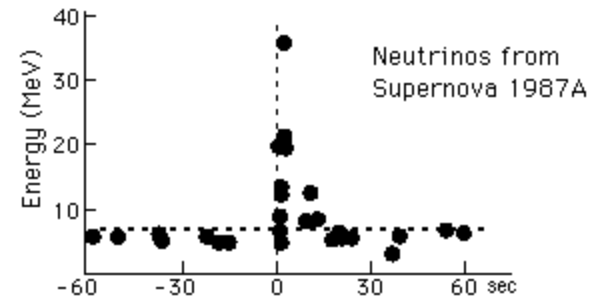


SUPERKAMIOKANDE

Detection of neutrino's from SN1987A

Spectrum in agreement with supernova models

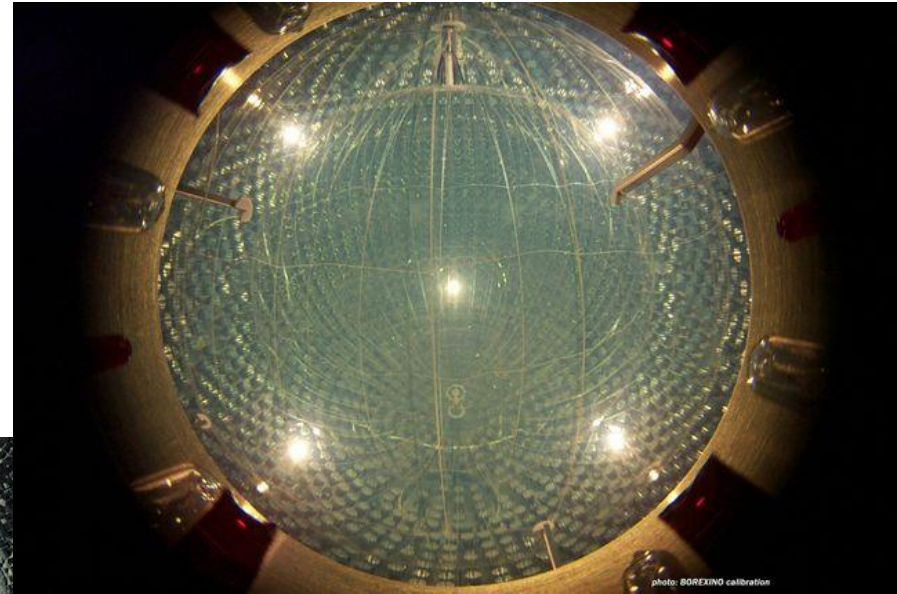
Limit on mass of neutrino



BOREXINO IN GRAN SASSO

Detect low energy (< 1 MeV) neutrino's
from decay of ${}^7\text{Be}$

Check MSW effect: neutrino oscillations are
affected by matter due to the presence of
electrons



OPERA IN GRAN SASSO

Fire muon neutrino's from SPS at CERN to OPERA in Gran Sasso

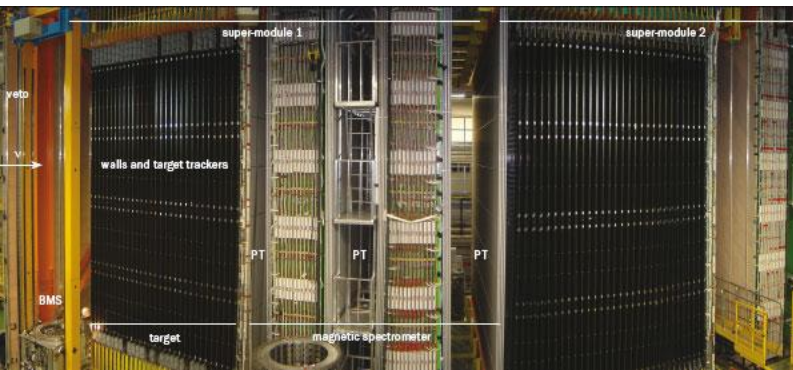
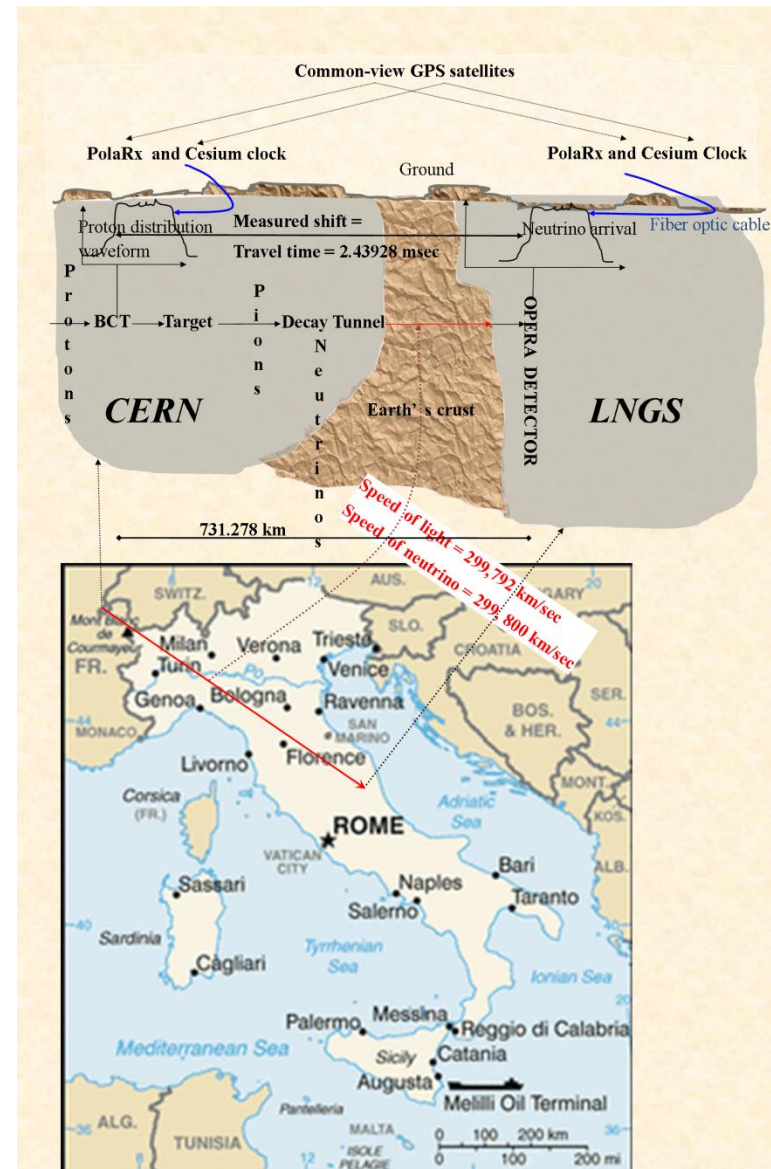
Detect appearance of tau neutrino's

- May 31, 2010
- June 6, 2012
- March 26, 2013

Emulsion in lead sheets and scintillator trigger planes

Neutrino's travel faster than speed of light

- Fiber optic cable problem
- Incorrect clock
- Claim withdrawn in July 2012

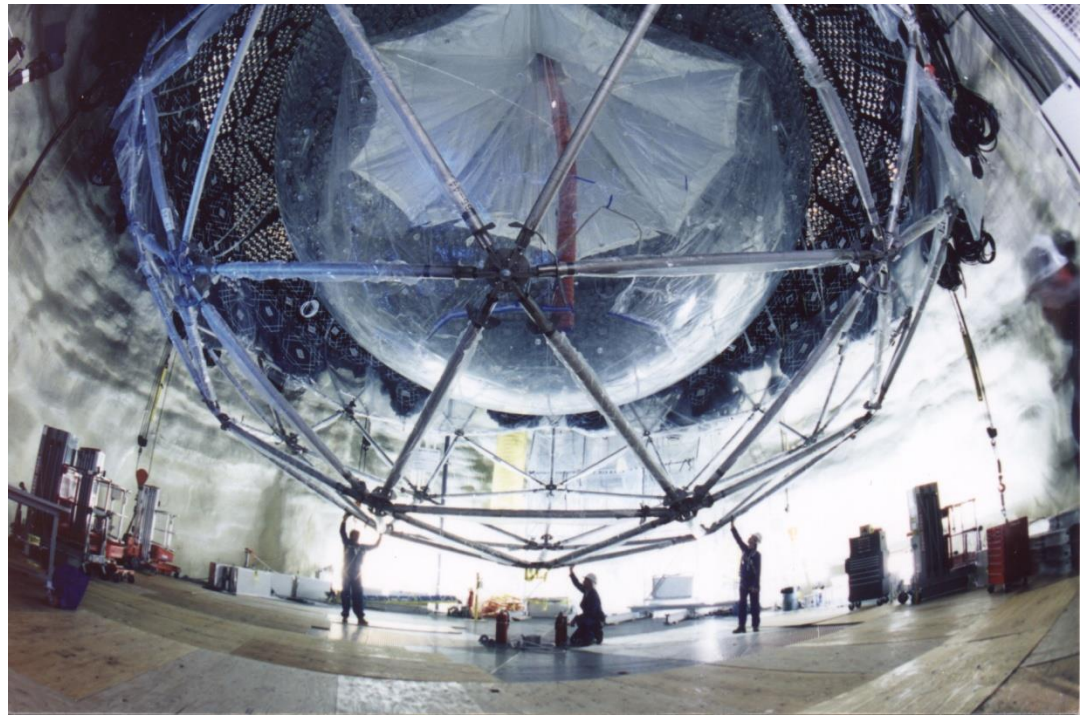
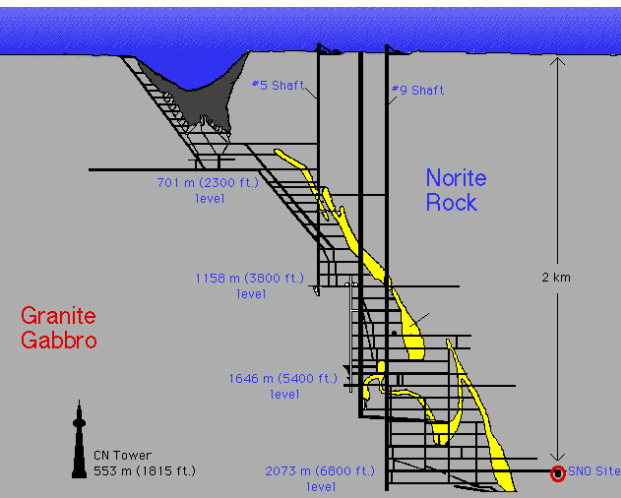
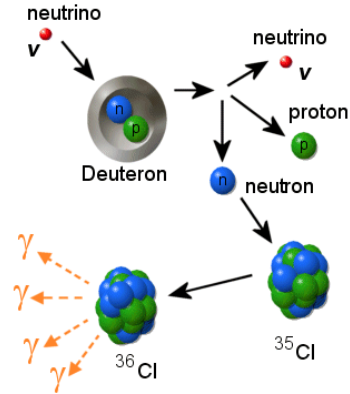
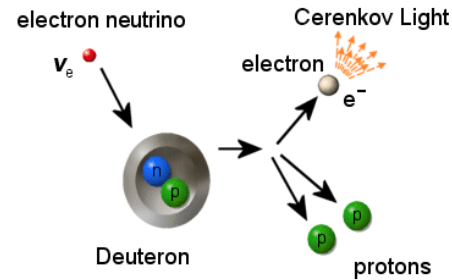


SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY

Heavy water – 1000 tons

Electron-neutrino converts neutron into proton and electron.
Cherenkov radiation from electron is detected

All neutrino species can break-up the deuterium nucleus. The neutron is captured forming tritium and a 6 MeV gamma



SOLAR NEUTRINO PROBLEM

Early (Cl) experiments (1968) showed that the sun did not produce enough neutrino's (by about a factor 3). SNU units are used...

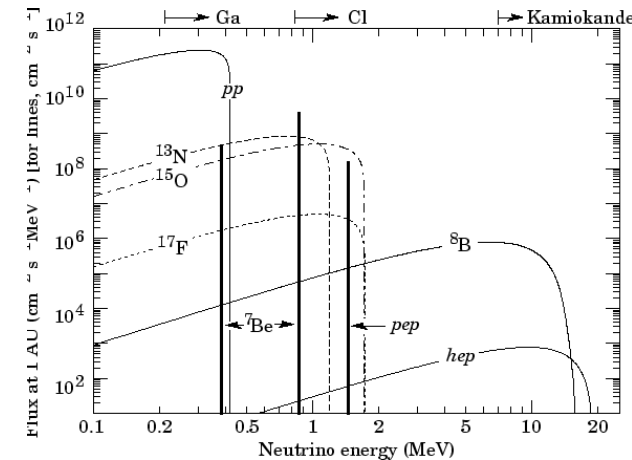
Kamiokande (water; designed for proton decay) sees relatively more neutrino's than the Cl detectors. Problems with expected energy distribution?

Gallium data accounted for by pep and hep

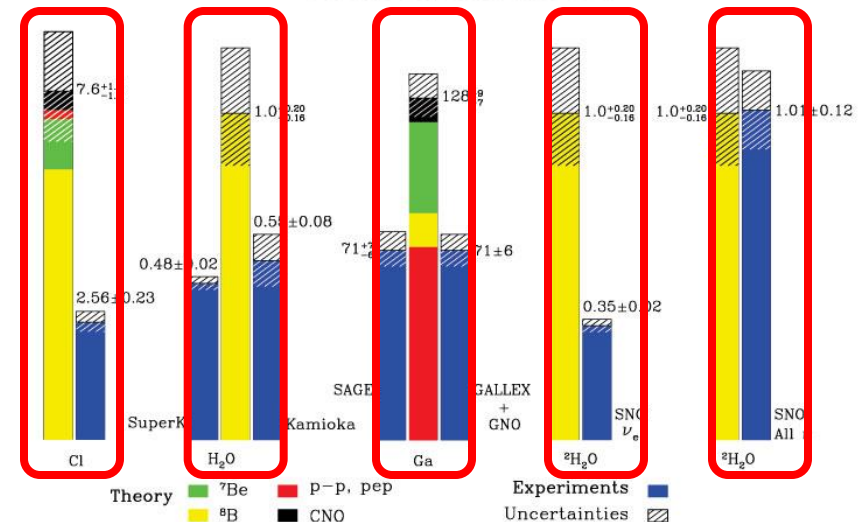
SNO electron neutrino's account for one third of events

SNO is sensitive to all neutrino flavors (through NC interactions) and with all neutrino's in agreement with solar model

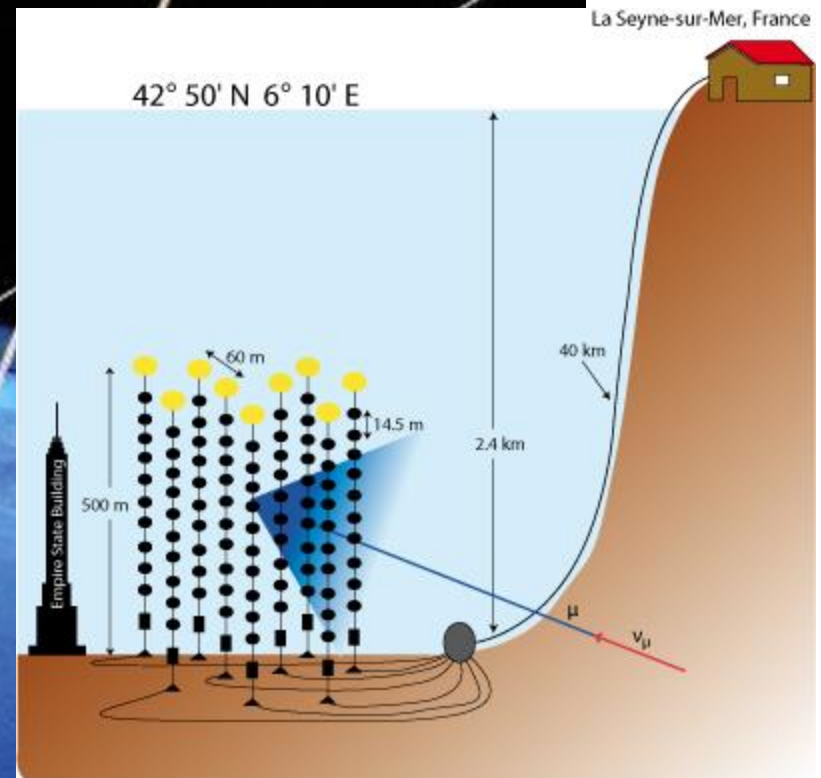
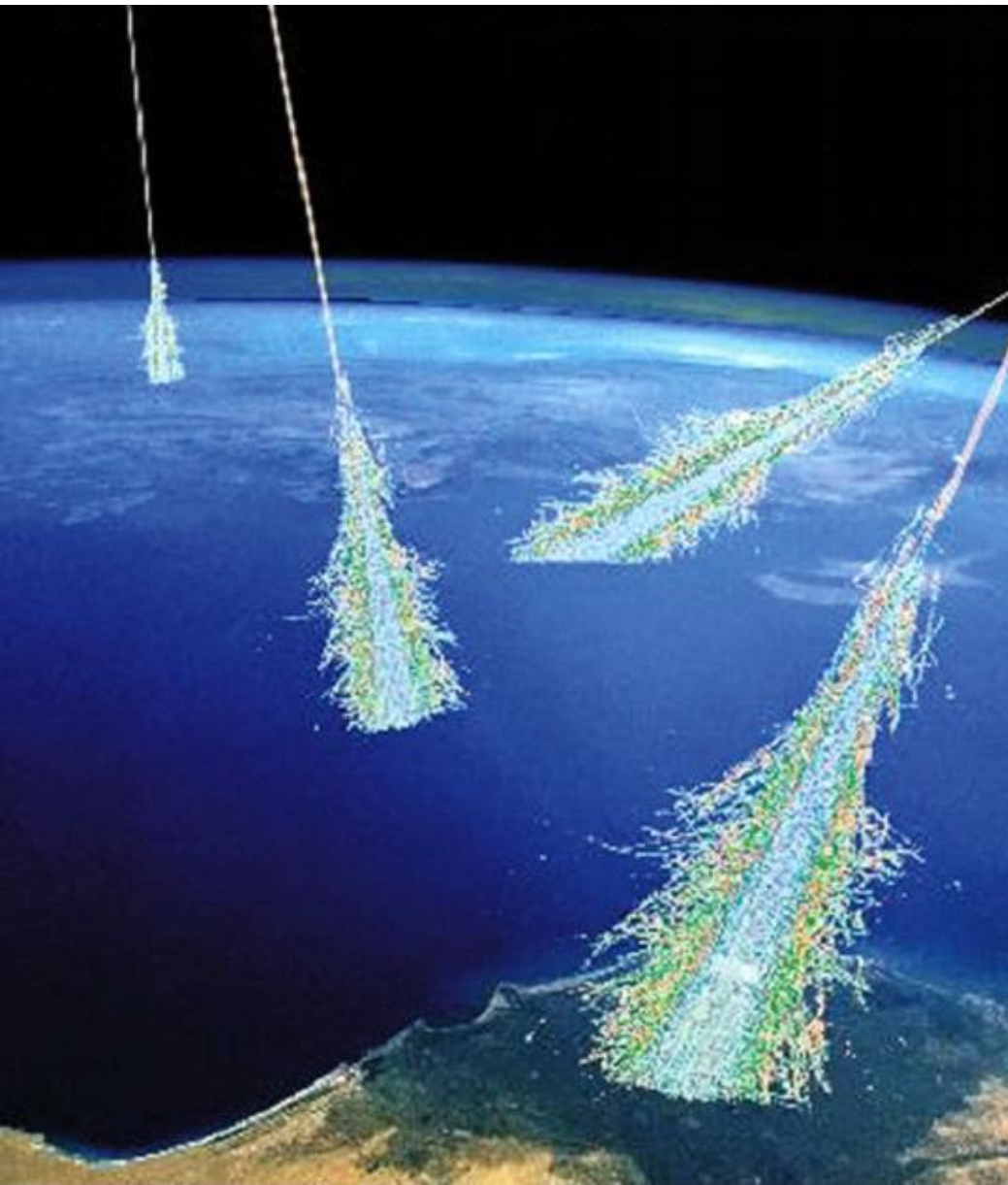
Neutrino's oscillate! (thus have mass)



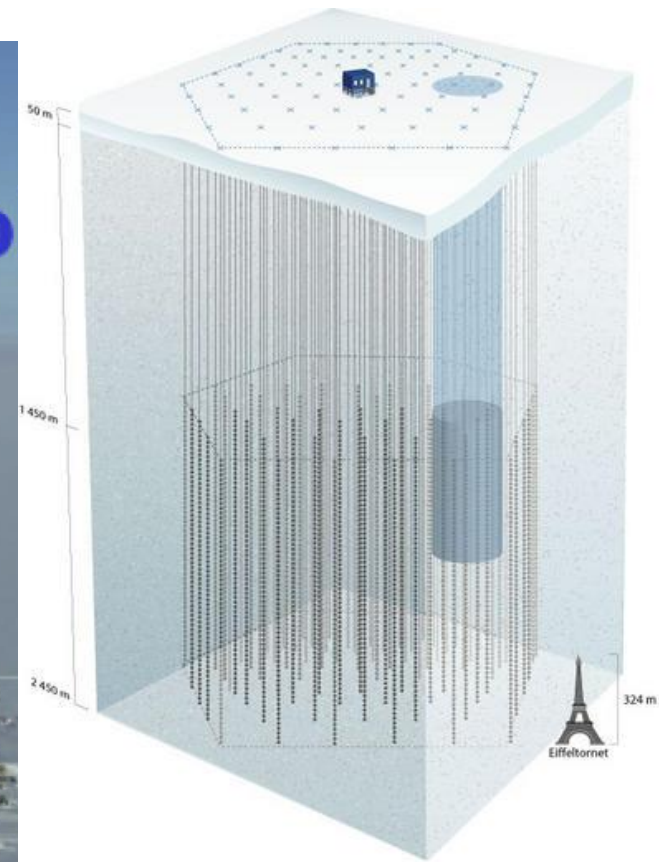
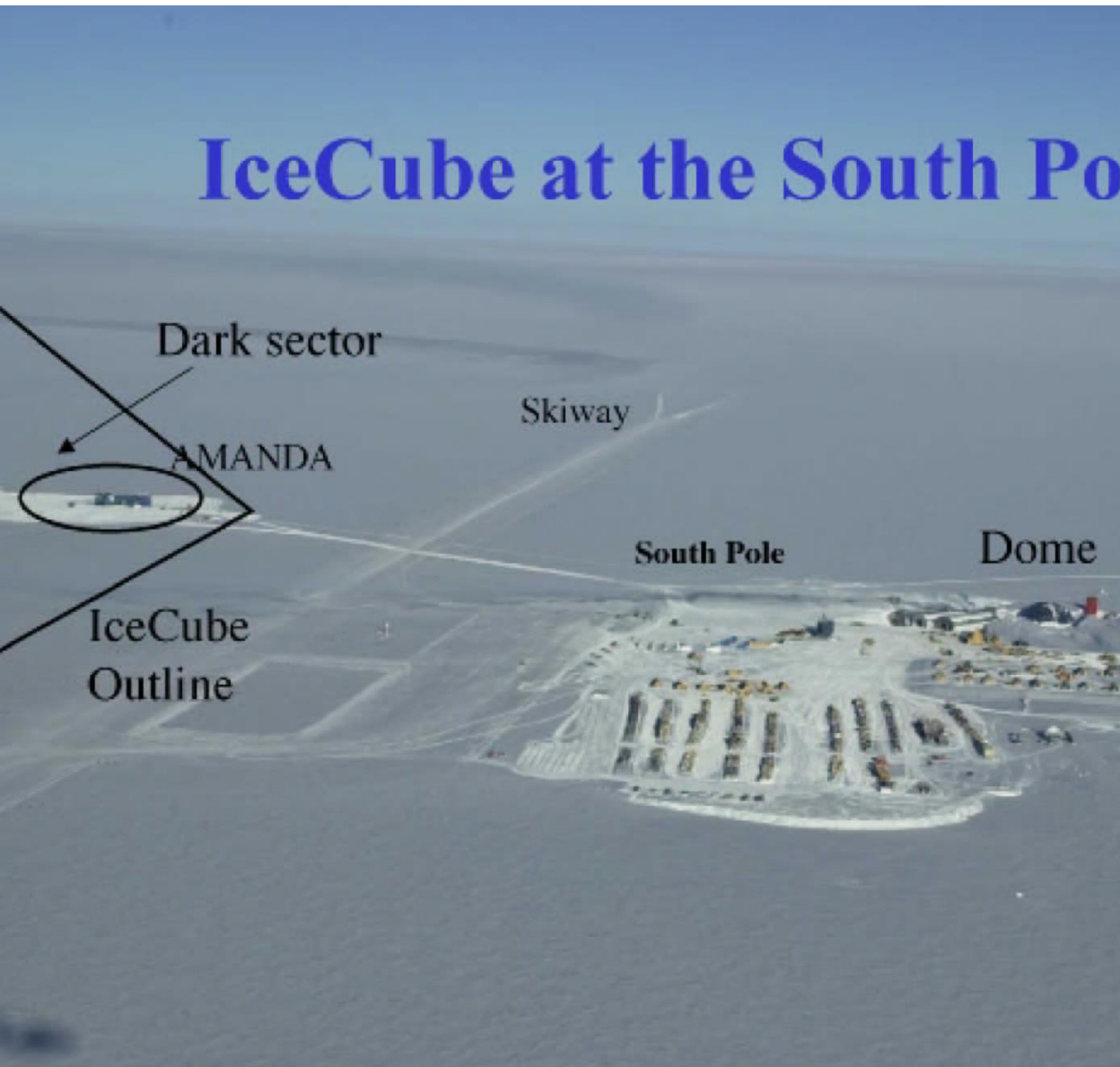
Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



KOSMISCHE NEUTRINO'S – ANTARES EN KM3NET



KOSMISCHE NEUTRINO'S – AMANDA EN ICECUBE



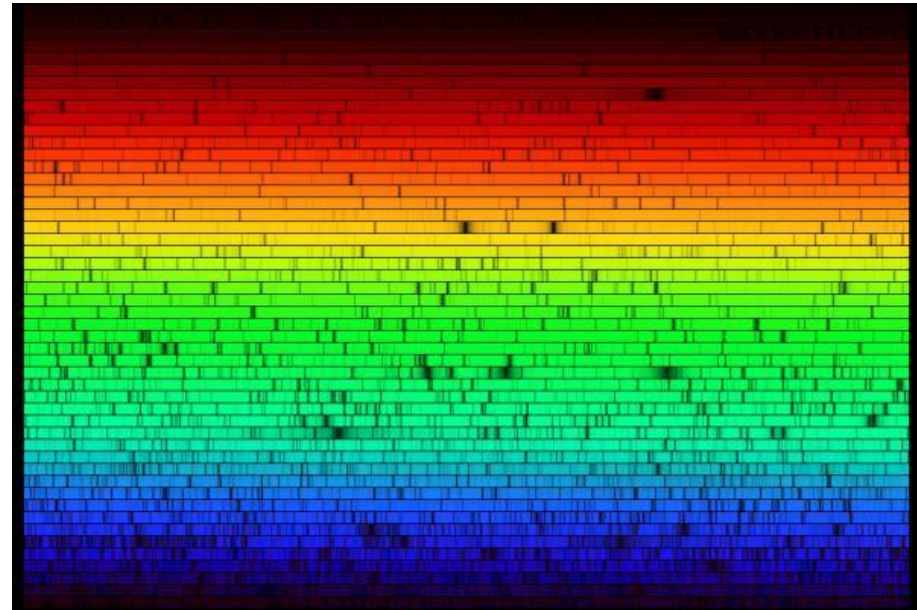
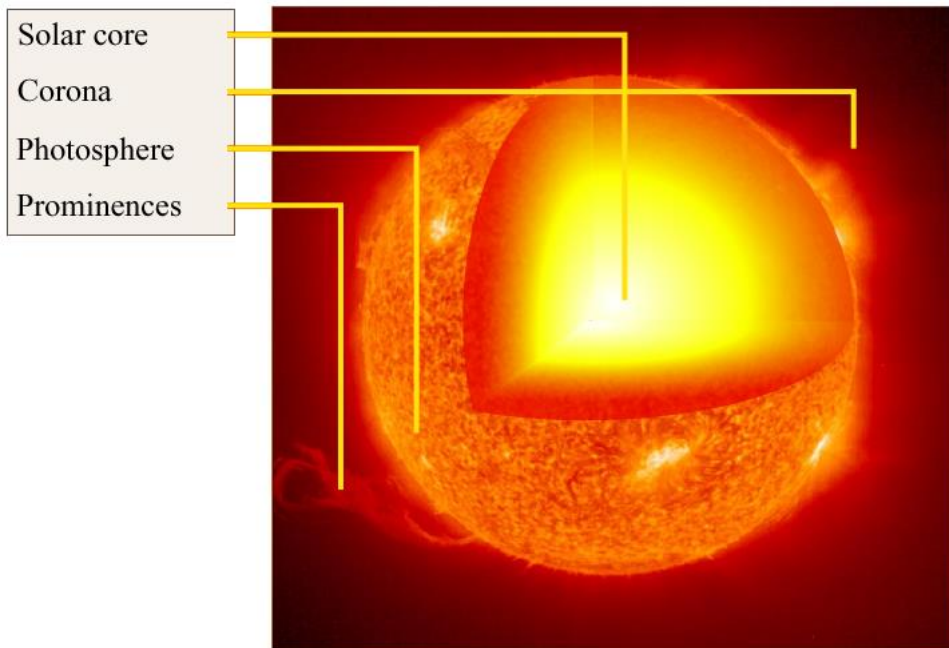
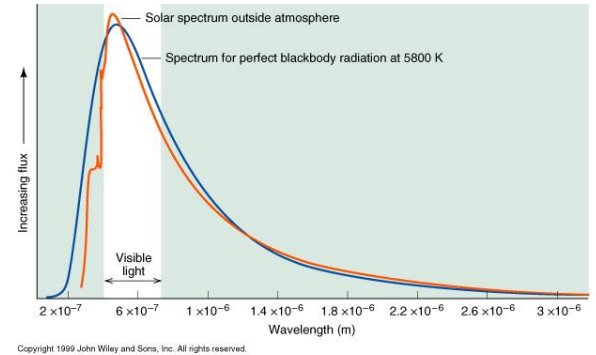
COSMIC RAYS, ...



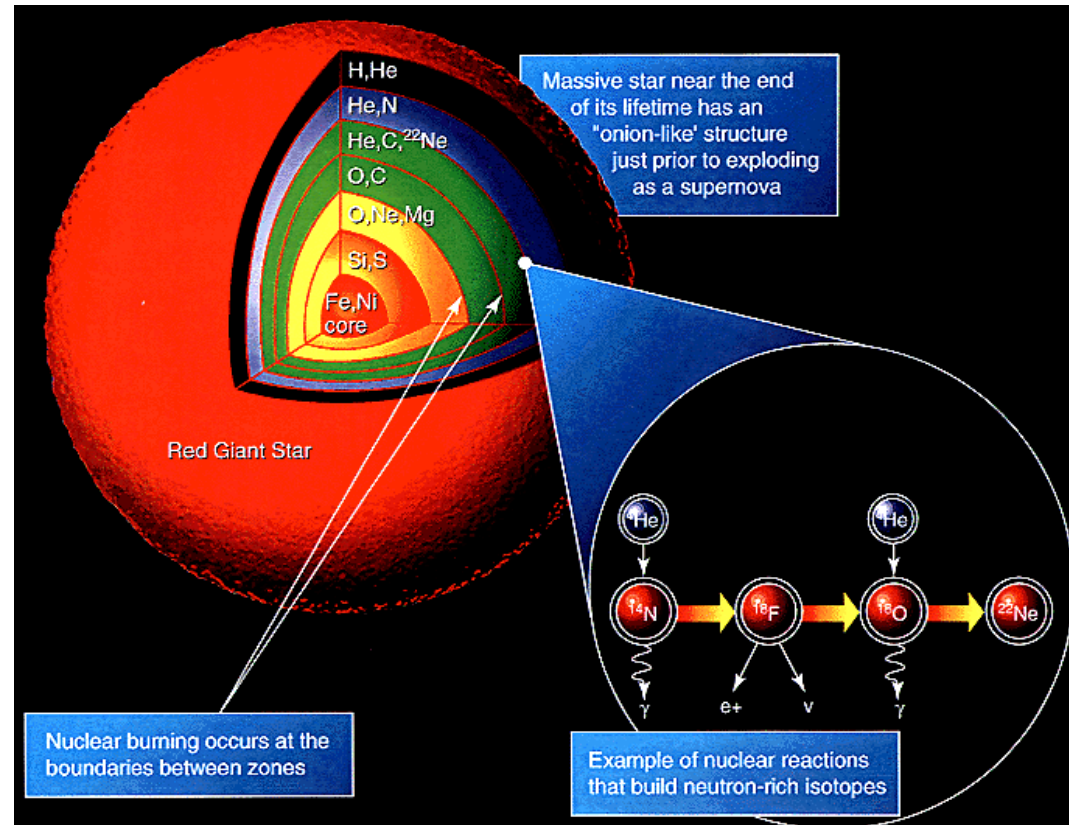
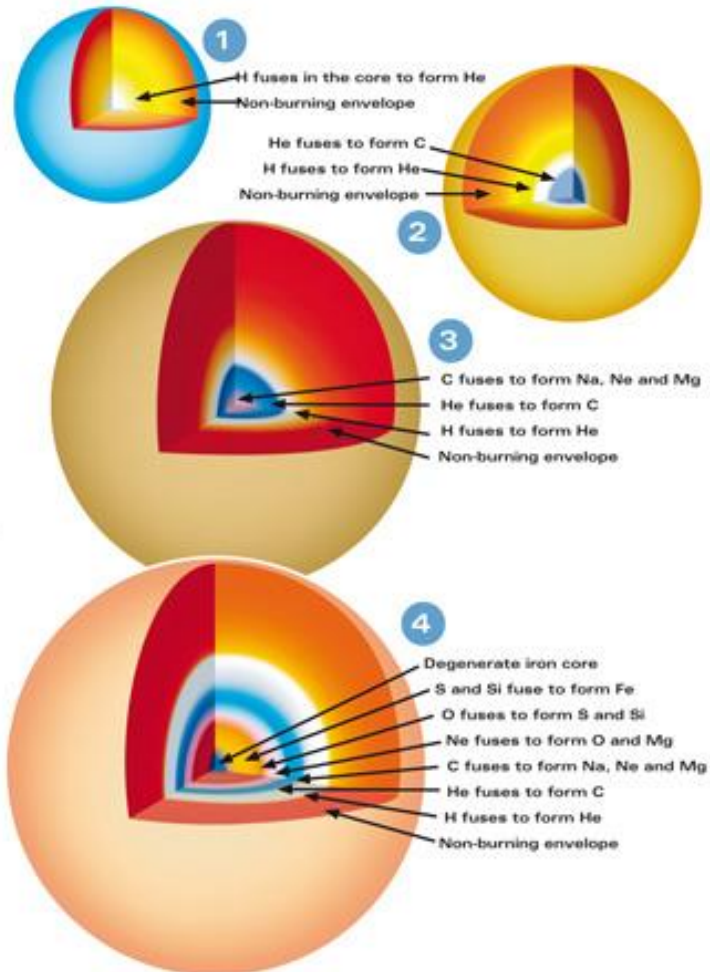
NUCLEOSYNTHESIS: THE SOLAR SPECTRUM

Photosphere: region of the object from which external light is received

The photosphere yields important information about the chemical composition of the sun

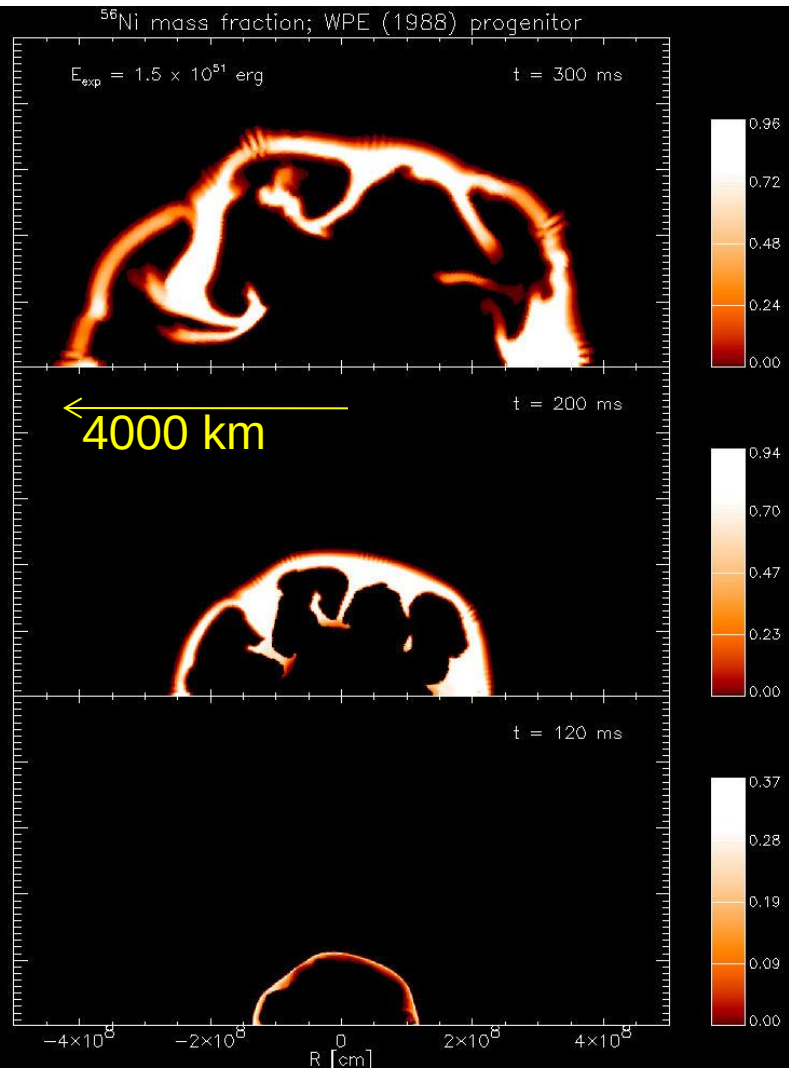


STELLAR NUCLEOSYNTHESIS

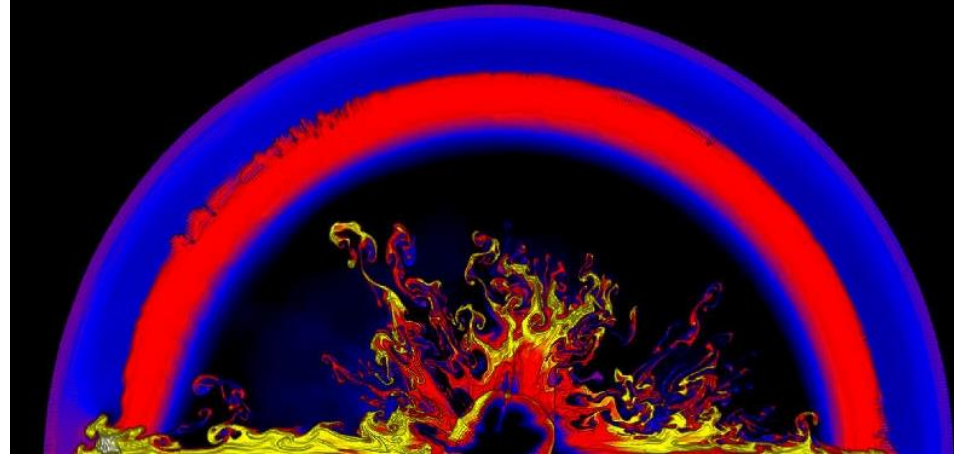


NUCLEOSYNTHESIS IN SUPERNOVAE

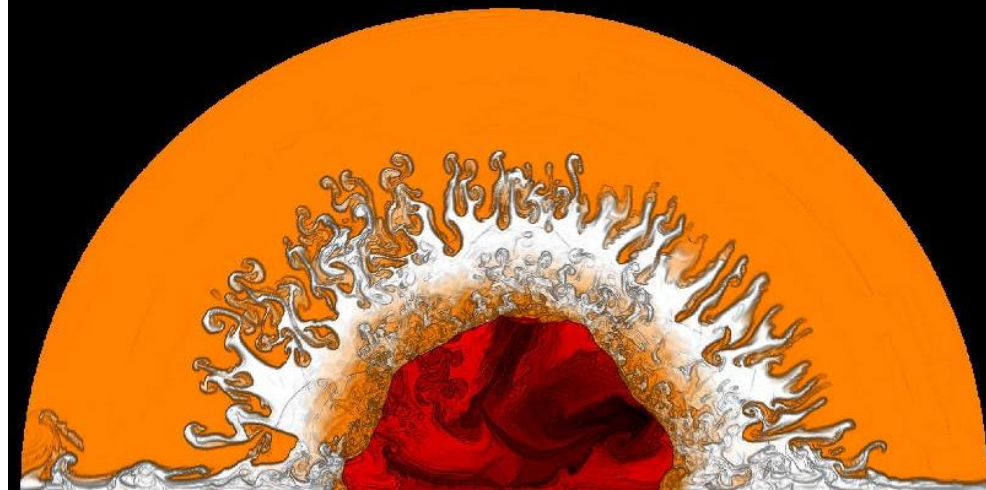
Ni synthesis



$\leftarrow 3 \times 10^6$ km, 300 s



$\leftarrow 32 \times 10^6$ km, 3 uur



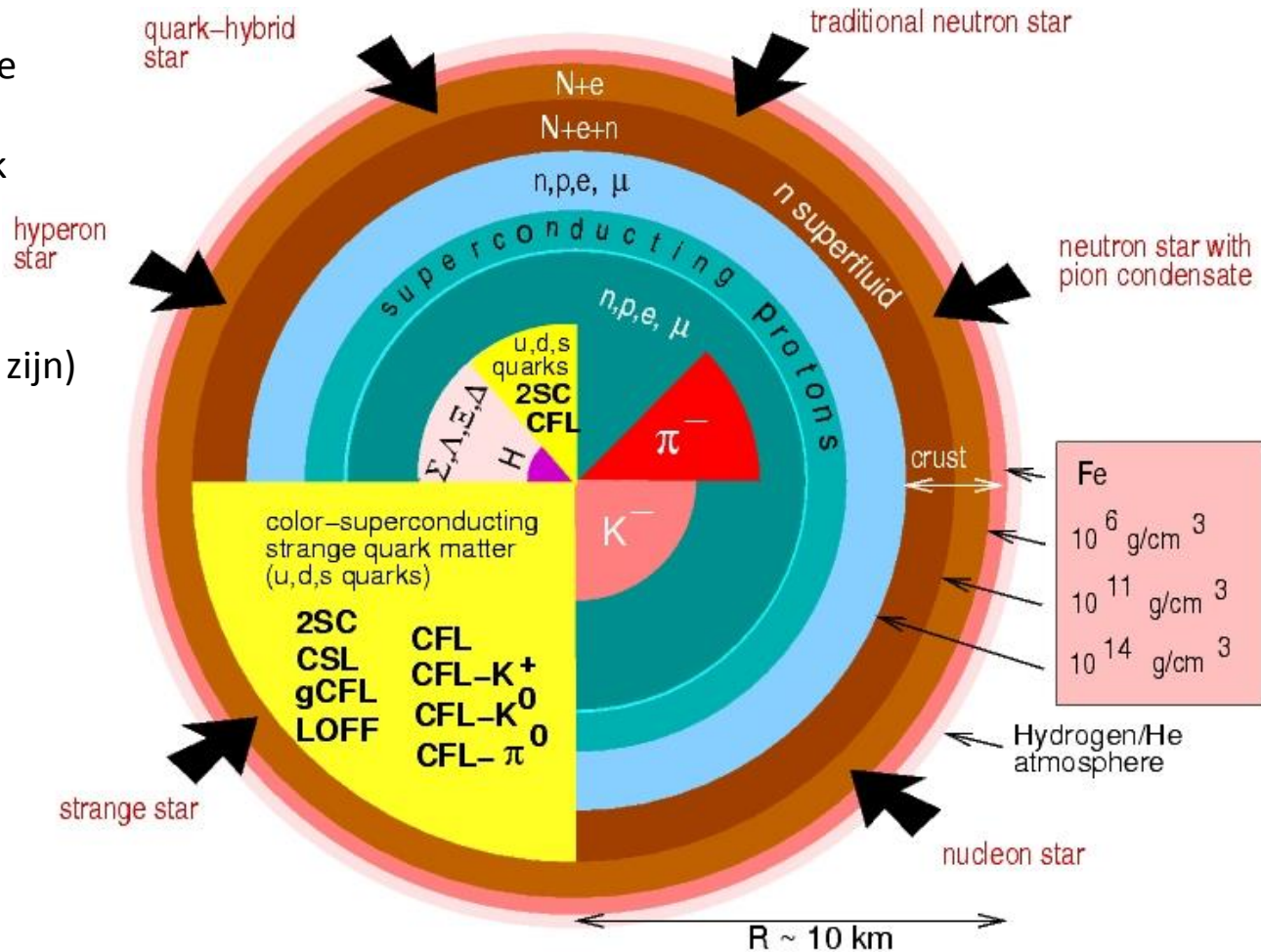
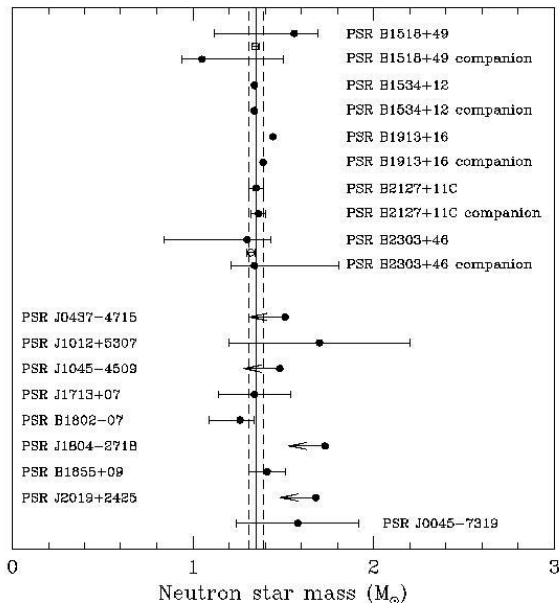
NEUTRONENSTER: SUPERNOVA REMNANT

Een grote atoomkern (tientallen kilometers)

Nucleon-nucleon interactie

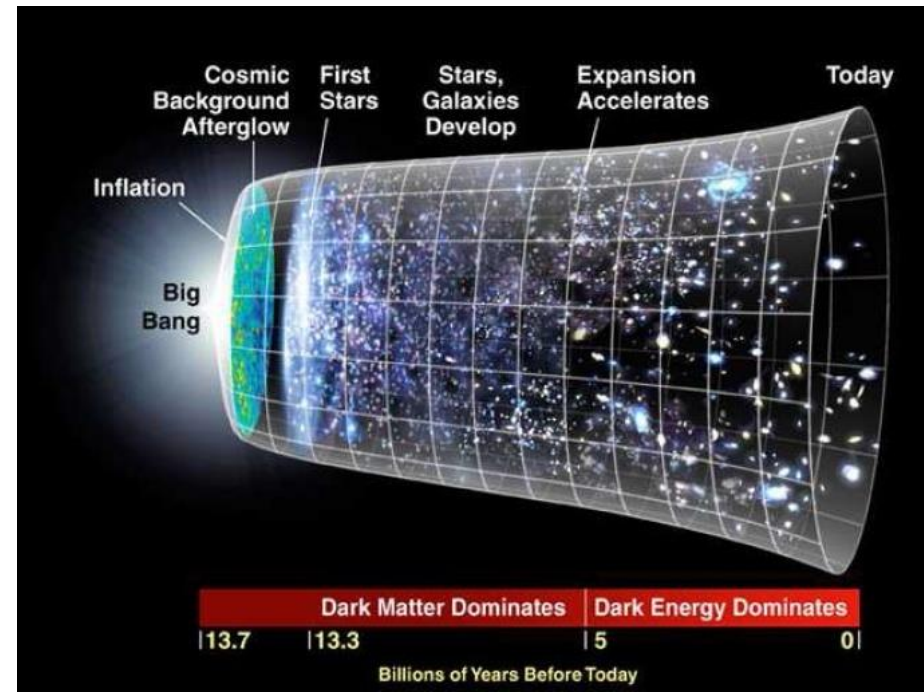
Quantumsysteem van sterk gekoppelde fermionen

Pauli blocking (daardoor kunnen hyperonen stabiel zijn)



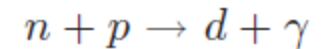
GESCHIEDENIS HEELAL

Gebeurtenis	Fysische gebeurtenis	Energie per foton	Leeftijd
oerknal	begin van het heelal	∞ (?)	0 s
inflatie	heelal dijt versneld uit	?	?
ontkoppeling	elektrozwakke kracht onkoppelt	10^3 GeV	10^{-10} s
baryogenese	quarks vormen baryonen	1 GeV	10^{-4} s
nucleosynthese	baryonen vormen atoomkernen	10^{-3} GeV	100 s
recombinatie	elektronen binden aan atoomkernen	10^{-9} GeV	10^5 jaar
omslag	heelal wordt materiegedomineerd	10^{-9} GeV	10^5 jaar
het heden	fotonen hebben energie van 2,7 Kelvin	10^{-12} GeV	10^{10} jaar



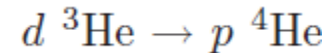
PRIMORDIALE NUCLEOSYNTHESE

Drie minuten ($E = 2.2$ MeV) na oerknal was deuterium stabiel



Neutron- en protonvangst levert ${}^3\text{H}$ en ${}^3\text{He}$

Vorming van ${}^4\text{He}$ door n-vangst en reactie

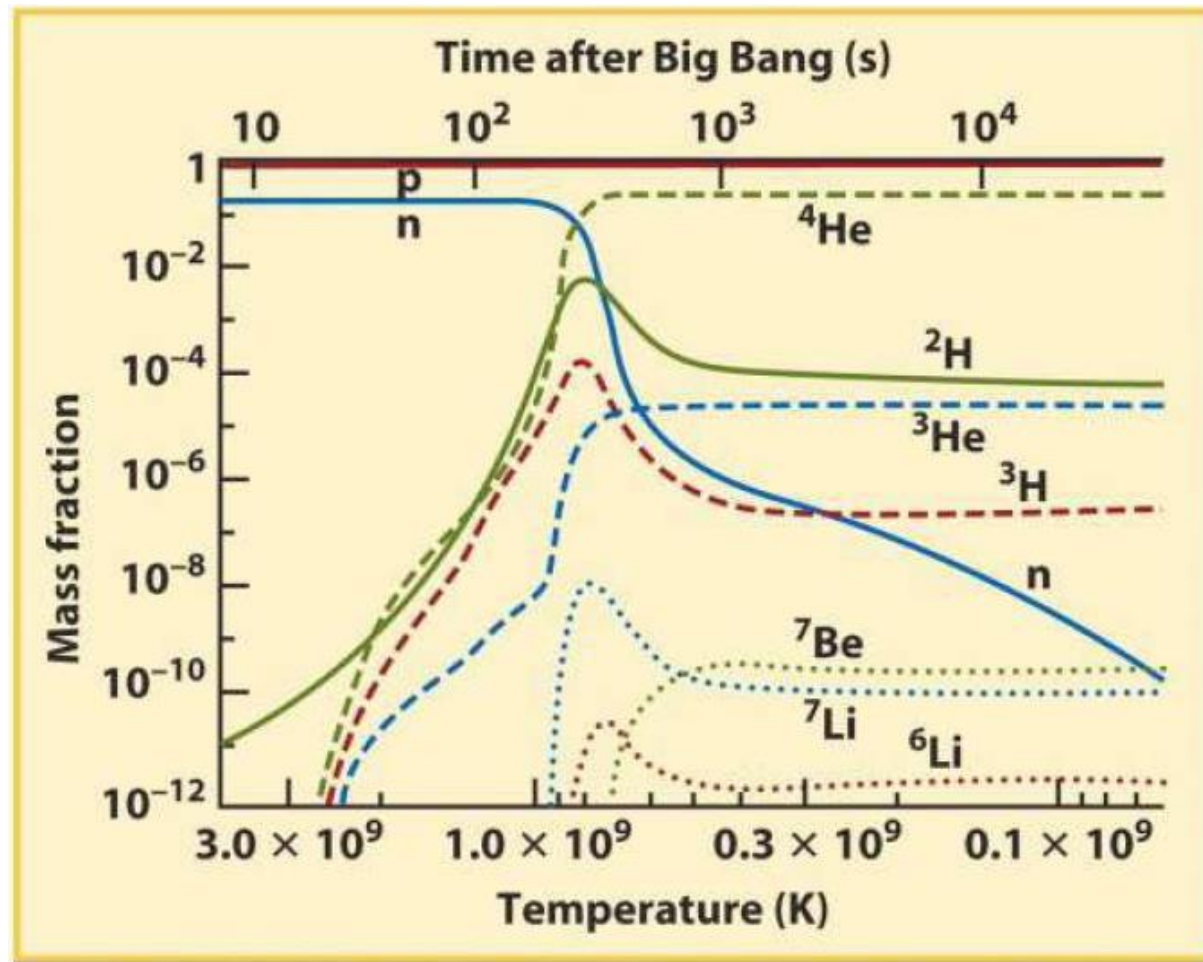


Botsingen van ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ en ${}^4\text{He}$ leveren ${}^7\text{Li}$ en ${}^7\text{Be}$

Hoeveelheden van ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$ en ${}^7\text{Be}$ zijn gevoelig voor baryondichtheid en snelheid van de expansie

Expansiesnelheid neemt toe met aantal neutrinofamilies

Verhouding baryonen tot fotonen $\sim 3 \times 10^{-10}$



BIG BANG NUCLEOSYNTHESIS

Abondantie (massa) van elementen

74% waterstof

24% helium

1.0% zuurstof

0.4% koolstof

Helium abundantie kan niet worden verklaard
door nucleosynthese in sterren

Een sterk argument voor de Big Bang hypothese

