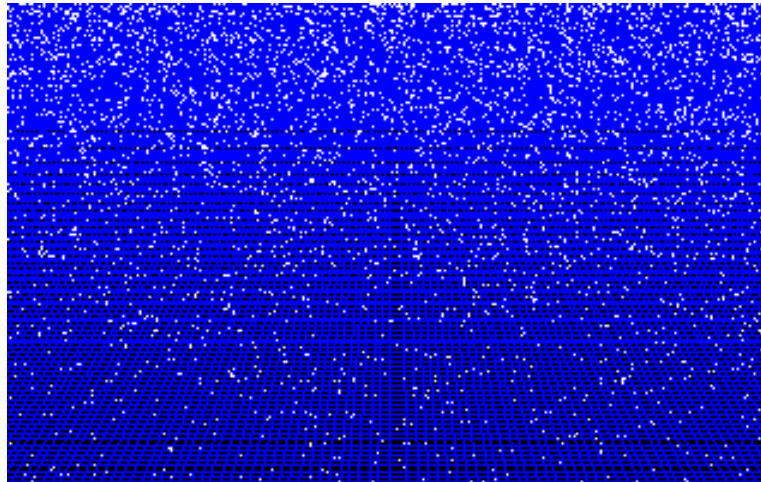


GRAVITATIE EN KOSMOLOGIE

FEW cursus



Jo van den Brand & Jeroen Meidam

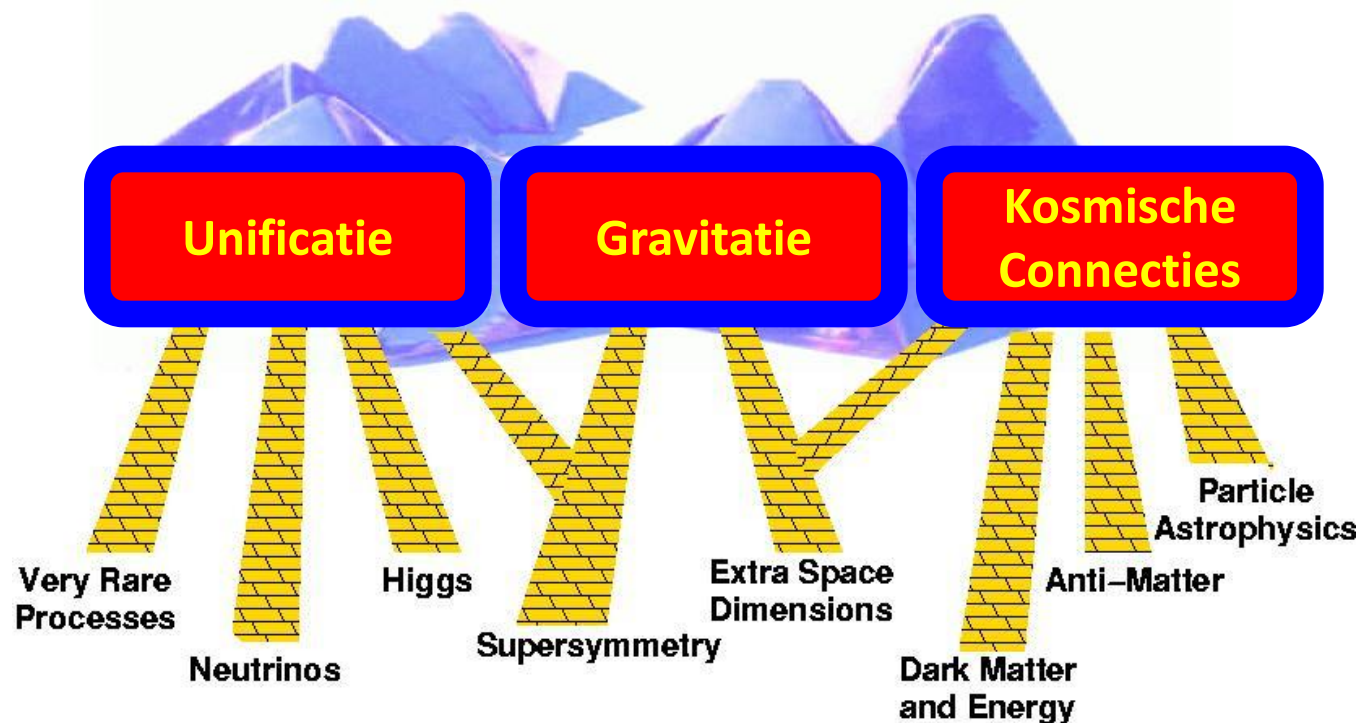
Les 1: 3 september 2012

OVERZICHT

- **Docent informatie**
 - Jo van den Brand, Jeroen Meidam
 - Email: jo@nikhef.nl, j.meidam@nikhef.nl
 - 0620 539 484 / 020 598 7900
 - Kamer: T2.69
- **Rooster informatie**
 - Hoorcollege: maandag 13:30 – 15:15, WN-C668 (totaal 14 keer)
 - Werkcollege: woensdag 09:00 – 10:45, WN-C668 (totaal 14 keer)
 - Tentamen: maandag ? december, ??
- **Boek en website**
 - Dictaat: in ontwikkeling ...
 - Zie website URL: www.nikhef.nl/~jo
- **Beoordeling**
 - Huiswerkopgaven 20%, tentamen 80%
 - Opdracht: scriptie + short presentation?
 - Minimum 5.5 voor elk onderdeel
- **Collegeresponsegroep**

DEELTJES(ASTRO)FYSICA

‘De studie van materie, energie, ruimte en tijd’

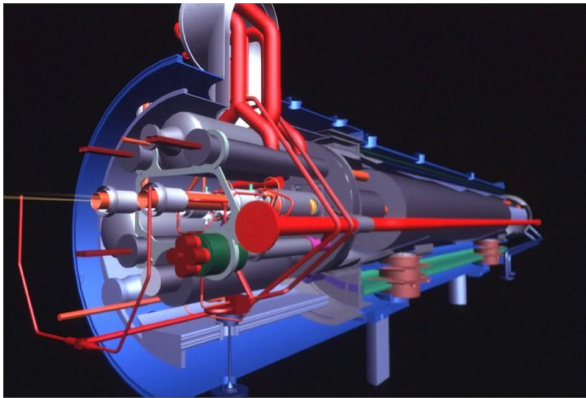


Ambities van de **elementaire** deeltjesfysica

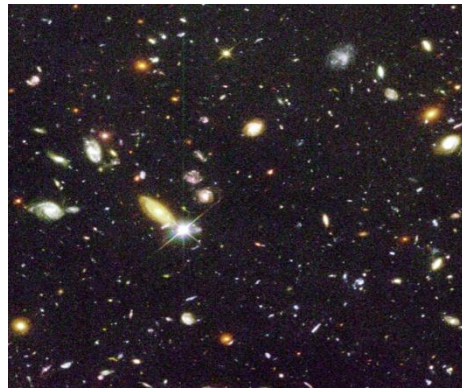


PALET VAN DEELTJES(ASTRO)FYSICA

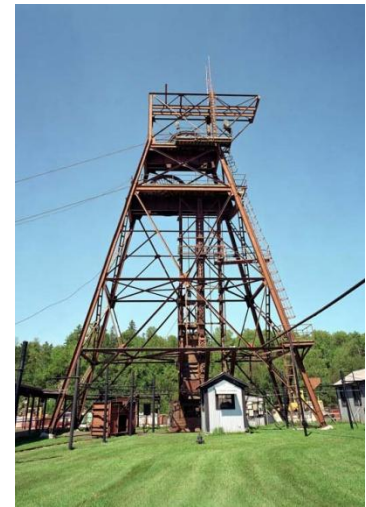
- We hebben veel gereedschap tot onze beschikking van **moderne versnellers** tot **satellieten in de ruimte** tot **experimenten diep ondergronds**.



Accelerator
LHC Magnet



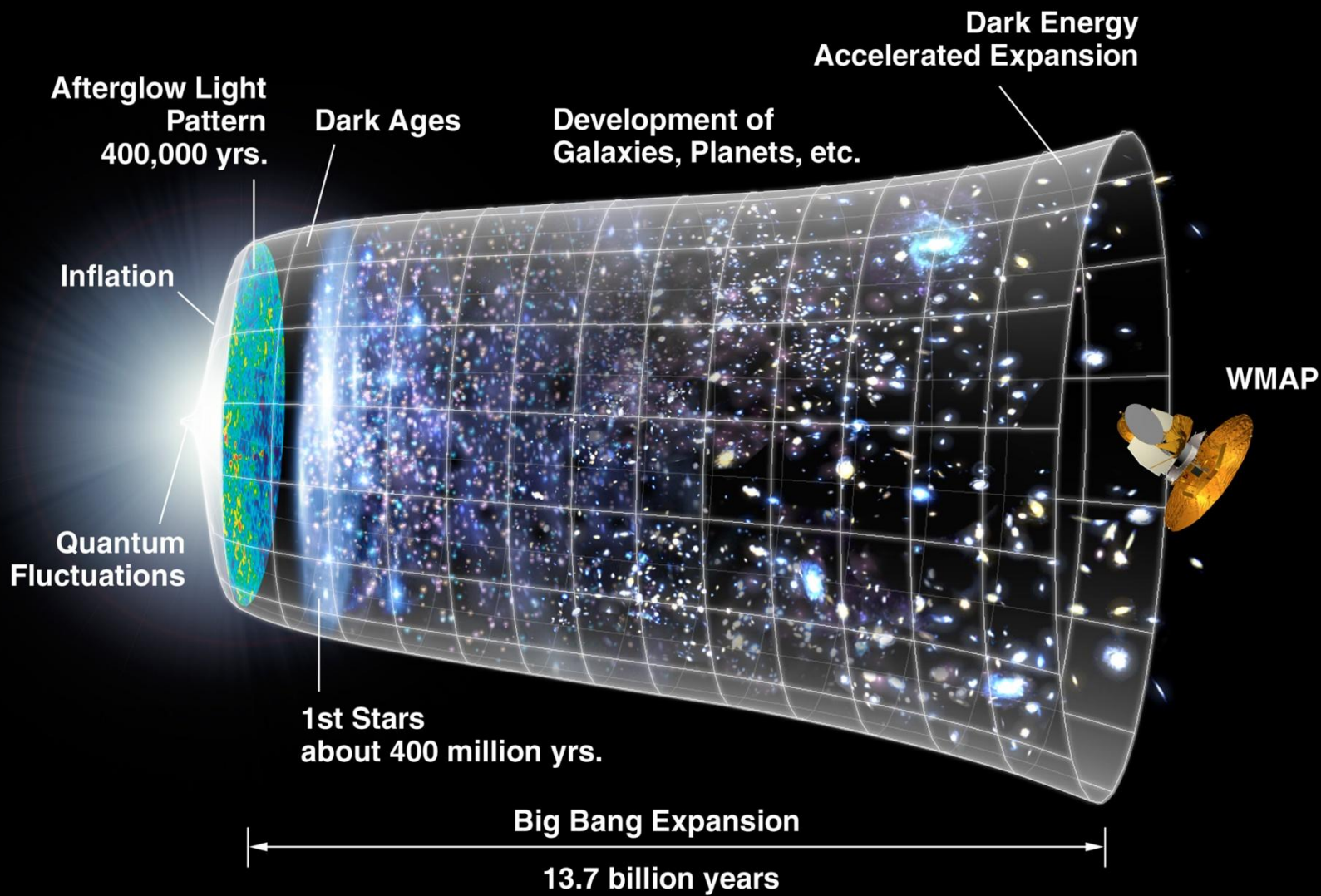
Space



Subterranean
SNO, Antares, Icecube

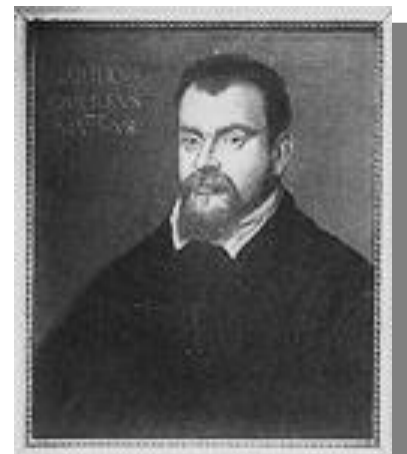
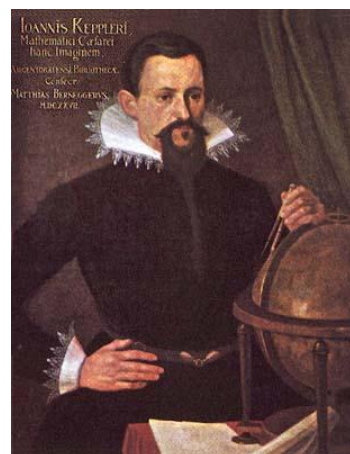
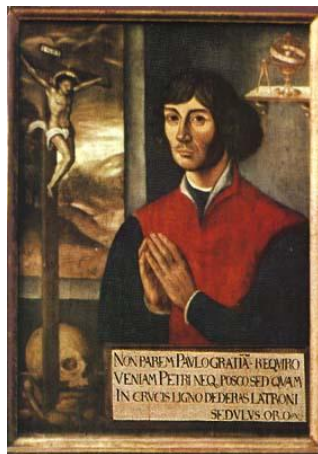
INHOUD

- **Inleiding**
 - Overzicht
- **Klassieke mechanica**
 - Galileo, Newton
 - Lagrange formalisme
- **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



GESCHIEDENIS VAN DE KOSMOLOGIE

- Mythologie vs wetenschappelijke methode
- Kosmos = aarde → zonnestelsel → melkweg → Hubble



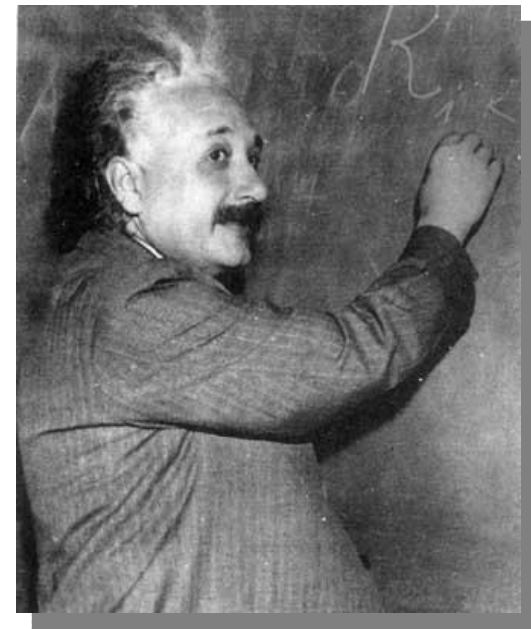
NEWTON: KOSMOLOGIE ALS WETENSCHAP



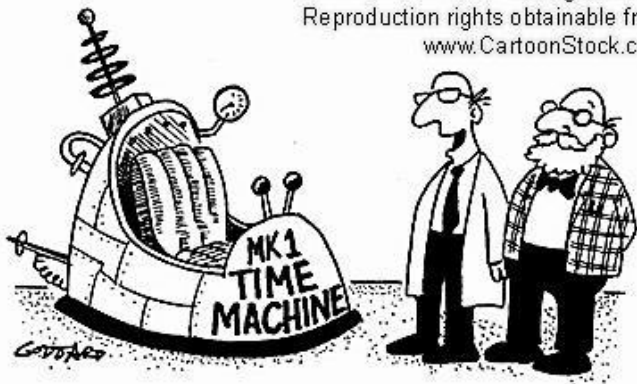
- **Wetten van Newton**
- **Newtons gravitatie: hemellichamen en de aarde volgen hetzelfde principe**
- **Galileo: relativiteit voor Einstein**

EINSTEINS SPECIALE RELATIVITEITSTHEORIE

- Relativiteitsprincipe
- Absolute ruimte en tijd bestaan niet
- Ruimte en tijd: vergeet common sense
- Wat is hier en nu, gelijktijdigheid?



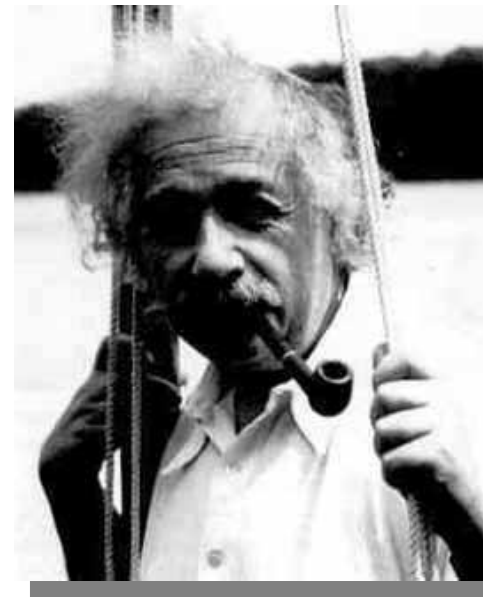
© Original Artist
Reproduction rights obtainable from
www.CartoonStock.com



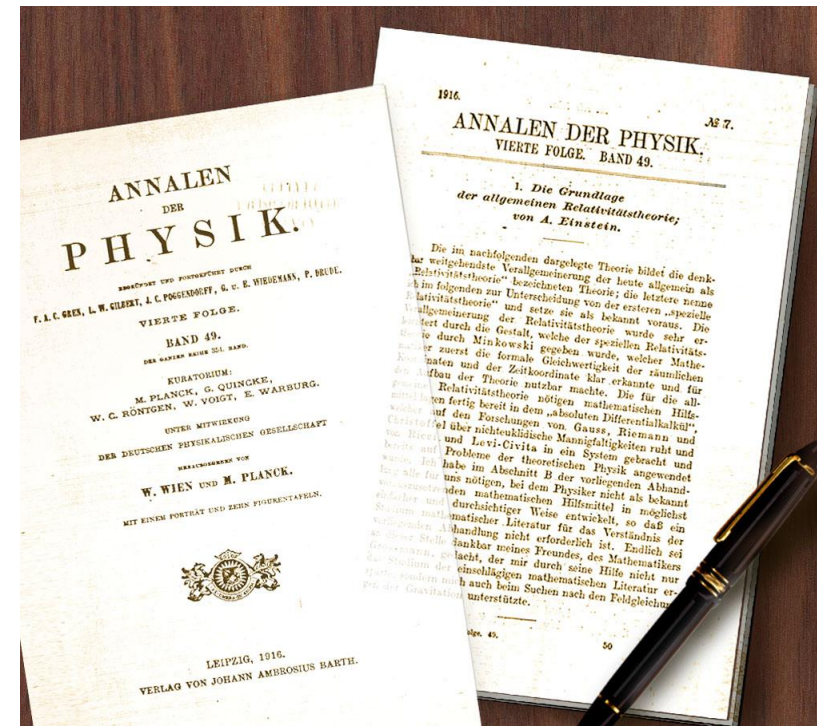
"It takes you back, doesn't it".

Jo van den Brand

EINSTEINS ALGEMENE RELATIVITEITSTHEORIE

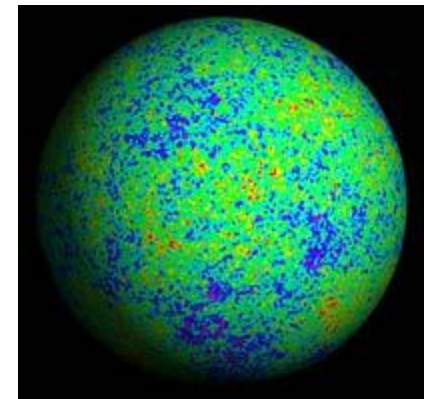
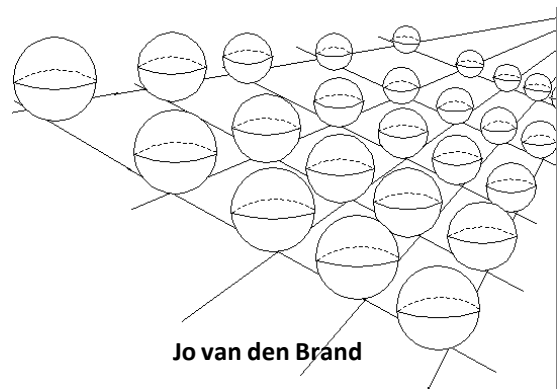
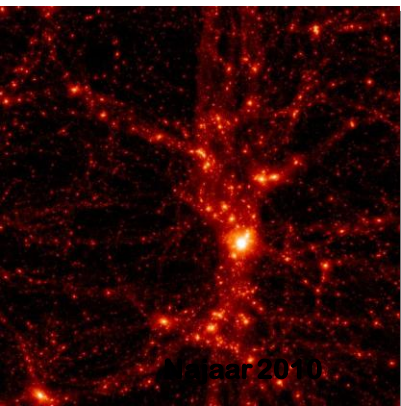
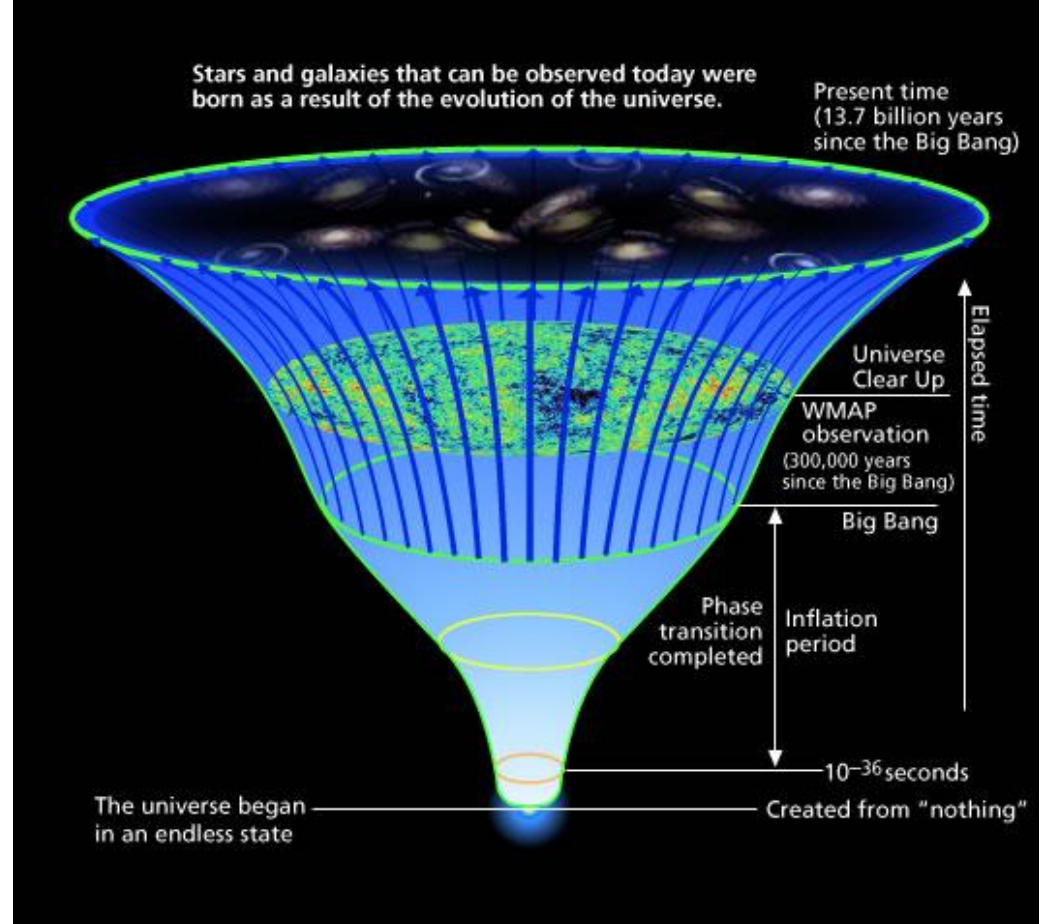


- Zijn massa en massa hetzelfde?
- Equivalentieprincipe
- Gekromde ruimtetijd
- Testen van ART
- Zwarte gaten
- Kosmologie, Big Bang en inflatie



OERKNALMODEL

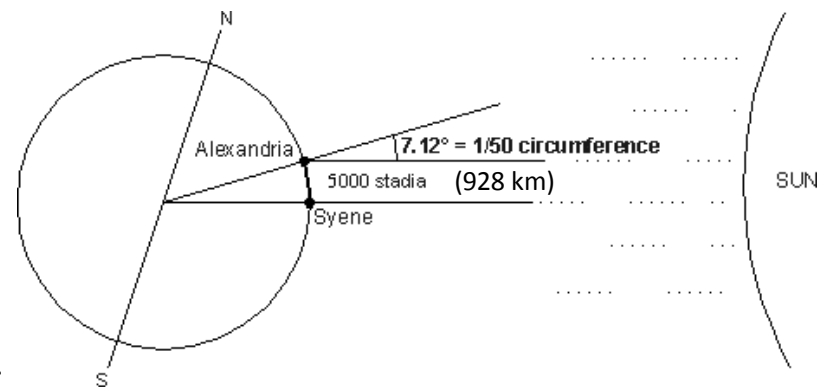
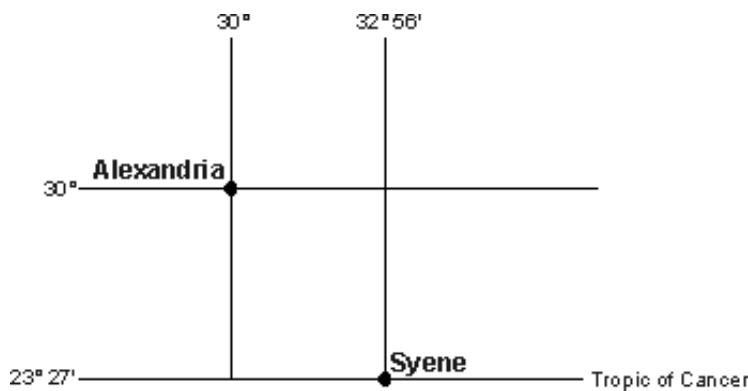
- Expansie van het universum
- Waarom een Big Bang?
- Einsteins grootste blunder
- Inflatie, strings, dimensies
- CMBR: het jonge universum
- Oorspong van elementen
- Massa van het universum
- Donkere materie en energie



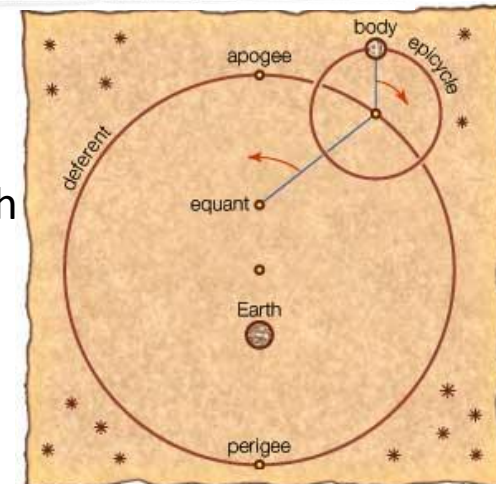
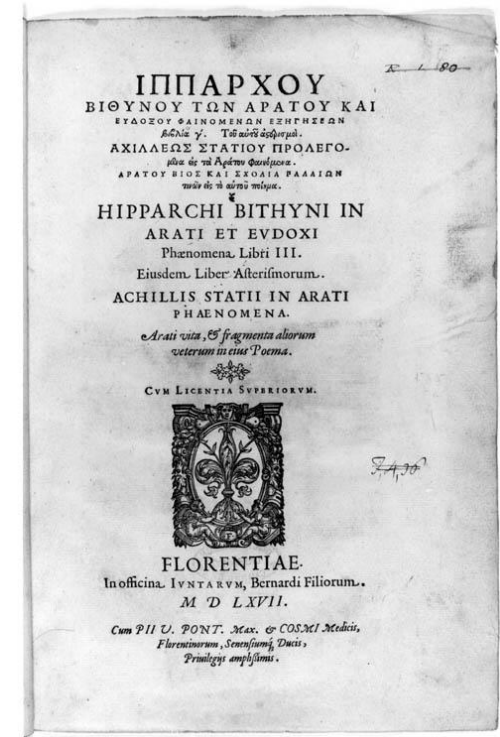
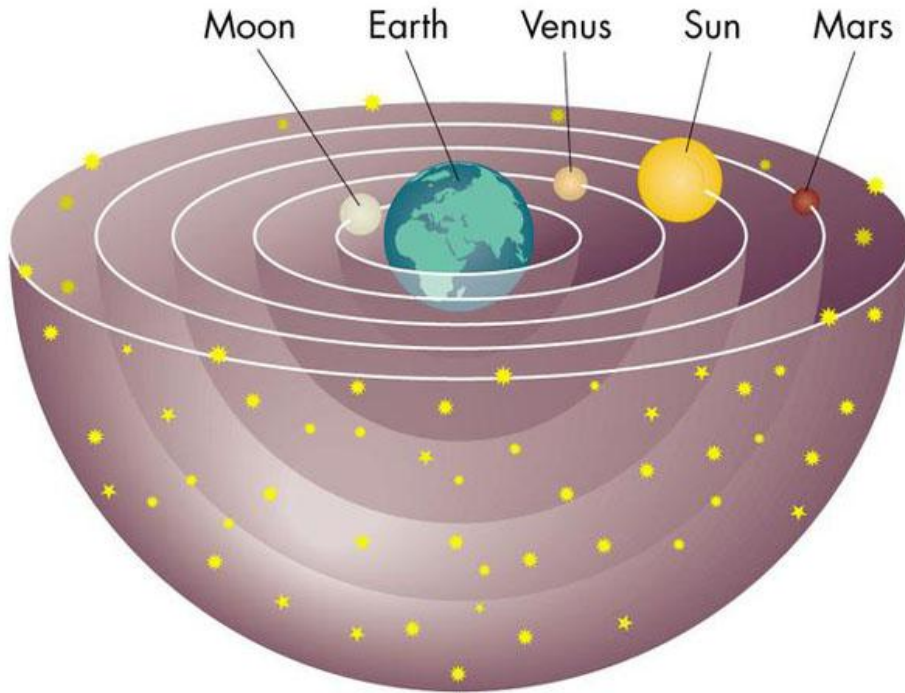
GRIEKSE WETENSCHAP



- Rand van de maan $\Rightarrow$ maan is een bol (Pythagoras ~520 B.C.)
- Ronde schaduw van de aarde tijdens maanverduisteringen $\Rightarrow$ aarde is een bol (Anaxagoras ~ 450 B.C.)
- Eerste meting van de omtrek van aarde (Eratosthenes ~200 B.C.)



EUDOXUS' UNIVERSUM (~350 B.C.)



© 2002 Encyclopædia Britannica, Inc.

- Cirkel en bol zijn perfecte geometrische vormen
 - perfecte symmetrie
- Bolvormige aarde, zon en maan zijn het bewijs voor het geometrisch ontwerp van het universum
- Zon, maan en planeten en de hemelbol draaien rond de aarde in cirkelbanen

Probleem: inconsistent met observaties

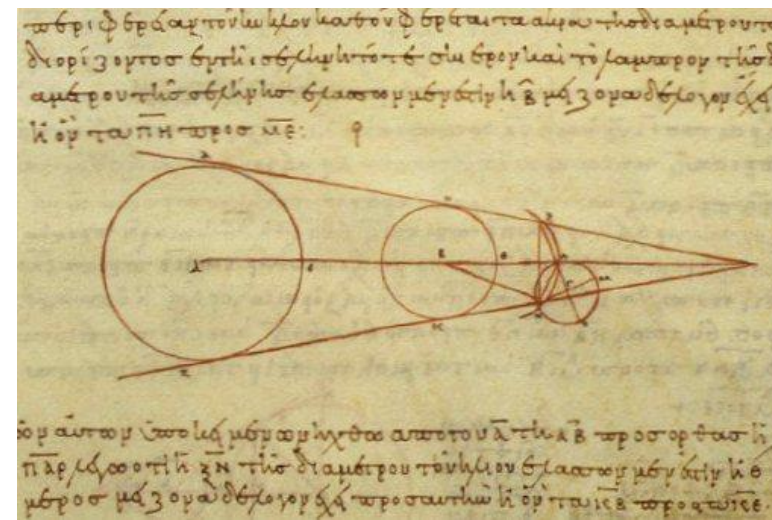
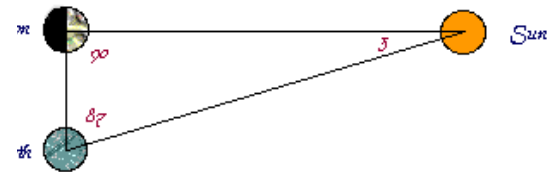
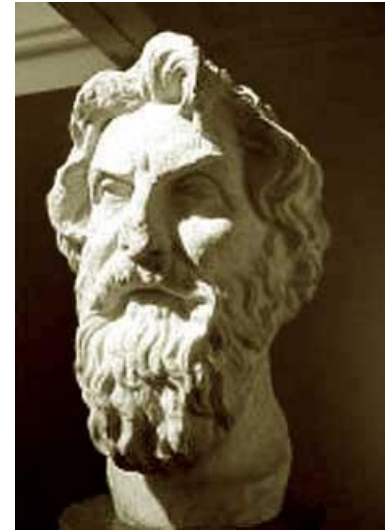
ARISTOTELES (~350 BC): FYSISCH MODEL



- Alles op aarde bestaat uit vier elementen: *aarde, water, lucht en vuur*
- Elk element beweegt anders: aarde naar het centrum van het universum, vuur weg ervan, water en lucht ertussen
- Aarde vormt het centrum van het universum
- Objecten met verschillende samenstelling vallen verschillend
- Het concept kracht: bewegingen die afwijken van de natuurlijke beweging van het element vereisen een kracht
- Hemellichamen bewegen continue op cirkels, bestaan uit ether, en zijn perfect
- Eeuwige en niet veranderende hemel $\Rightarrow$ universum heeft geen begin en einde
- Universum heeft eindige afmeting

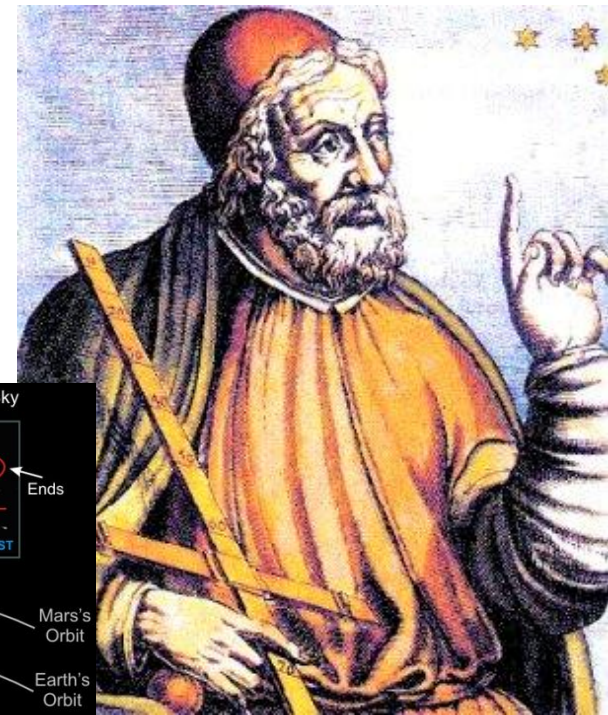
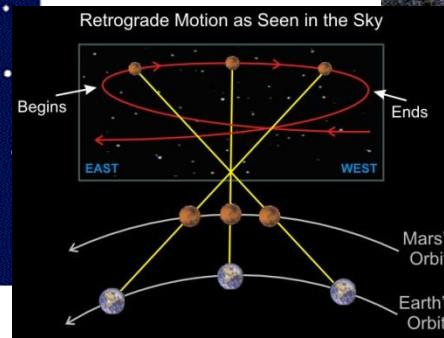
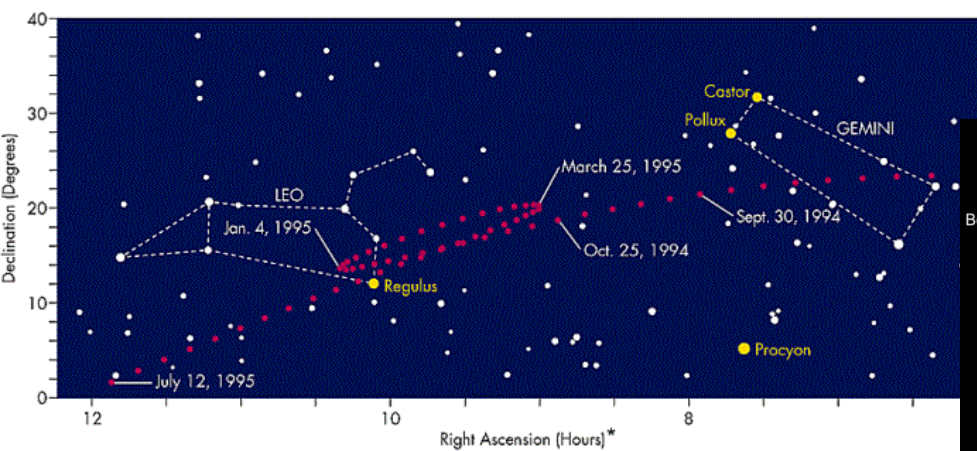
ARISTARCHUS (~250 BC): ZON IN CENTRUM

- Hij kende de grootte van de aarde
- Ook de grootte van de maan en de afstand tussen maan en aarde (van verduisteringen)
- Bepaalde de grootte van en de afstand tot de zon: 19 keer (390 keer) verder weg dan de maan en is 19 keer zo groot
- Conclusie: de zon is het grootste object en staat in het centrum van het universum
- Zijn model was in conflict met de fysica van dat moment, de fysica van Aristoteles
 - Er is geen bewijs dat de aarde roteert
 - Er is geen bewijs dat de aarde beweegt
- Hij werd gezien als een wiskundige



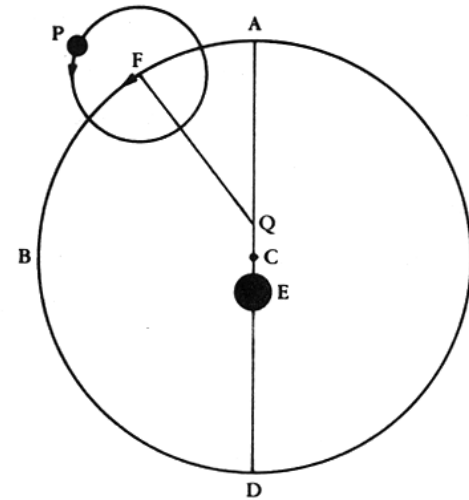
PTOLEMEUS (~100 AD): BEPAALT KOSMOLOGIE VOOR DE VOLGENDE 1500 JAAR

- Verzamelde astronomische kennis: kosmologie van Aristoteles en metingen van Hipparchus $\Rightarrow$ Almagest (Het grote systeem)
- Uitbreiden en verbeteren van de modellen
 - Epicycle theorie
 - Maar eenvoud wordt opgegeven
 - Thomas van Aquino $\Rightarrow$ Christendom doctrine



PROBLEMEN MET MODEL VAN PTOLEMEUS

- Model kan metingen niet verklaren
 - De aarde moet uit het centrum
 - Epicycles op epicycles (~110 stuks)
 - Fouten van graden in voorspelde posities van planeten 1400 AD



Koning Alfonso X: “Als de Heer Almachtig mij geraadpleegd had voordat Hij aan de Schepping begon, had ik hem iets eenvoudigers aangeraden”



DE REVOLUTIE VAN COPERNICUS (~1500)

- 15th century: Griekse wetenschap herontdekt
- Vorm en grootte van de aarde waren zeer bekend onder geschoolde mensen
- Nicholas Copernicus *De revolutionibus orbium coelestium*: plaats de zon in het centrum $\Rightarrow$ heliocentrisch wereldmodel
 - geïnspireerd door het werk van Aristarchus?
- Eenvoudig model verklaart veel feiten
- Diverse problemen met dit model
 - Tegen geschriften van Christendom
 - Voorspelde parallaxen kloppen niet met observatie
 - Probleem dat aarde roteert: mag niet van Aristoteles
 - Minder nauwkeurig dan Ptolemeus' model $\Rightarrow$ zelfs meer epicycles nodig voor redelijke beschrijving
 - Vraag: waarom publiceerde hij dit werk aan het einde van zijn leven: was hij bang voor de autoriteit van de kerk? Of weinig vertrouwen in de nauwkeurigheid?



TYCHO BRAHE (1546-1601)

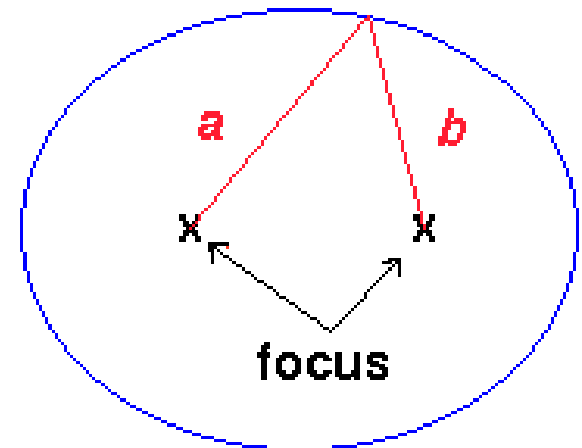
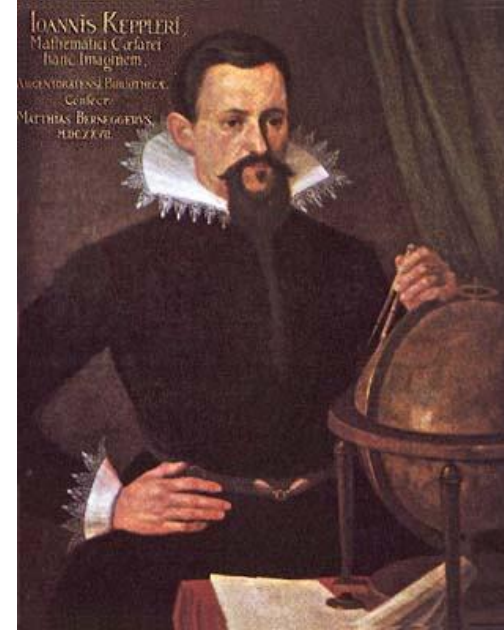
- De laatste waarnemer met het blote oog
- Eerste moderne wetenschapper
 - Zorgvuldig en systematisch
- Aarde in centrum, planeten rond zon
- Meting van Mars' baan gedurende 30 jaar
- Meten van kometen en parallax ervan
 - Kometen achter de baan van de maan
- Waarneming van een supernova
 - Nieuwe ster in Cassiopeia
 - Geen parallax meetbaar $\Rightarrow$ supernova op hemelbol



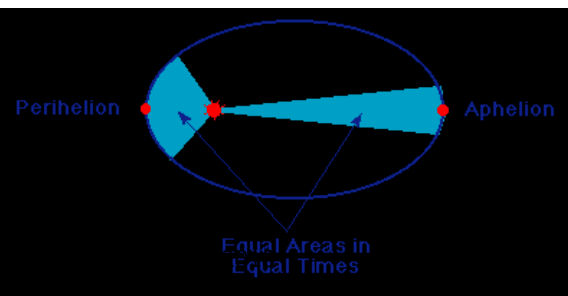
Het idee van Aristoteles van een perfecte, eeuwige, niet veranderende hemel klopt niet

JOHANNES KEPLER (1571-1630)

- Tycho's opvolger in Praag
- Zowel Ptolemeus, Tycho's als het heliocentric model kloppen met data binnen de gewenste nauwkeurigheid
- Voorstel: planeten bewegen op ellipsen
- Wetten van Kepler
 - Zon in een focus, planeten in ellipsen
 - Gelijke oppervlakken in gelijke tijden
 - Periode vs halfassen



(a+b) is constant



$$\frac{P_1^2}{P_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}$$

WAT HEBBEN WE AAN KEPLER III

- **Voorbeeld:**

- Afstand aarde tot de zon: $R_A = 1$ AU
 - Periode van omloop: $P_A = 1$ jaar
 - Periode voor mars: $P_M = 1,88$ jaar
- ⇒ bereken de afstand van mars tot de zon:

$$\frac{R_M^3}{R_A^3} = \frac{P_M^2}{P_A^2} \Rightarrow R_M = 1,88^{2/3} \text{ AU} = 1,52 \text{ AU}$$

- **1781: Herschel ontdekt Uranus**

- Afstand aarde tot de zon: $R_A = 1$ AU
 - Periode van omloop: $P_A = 1$ jaar
 - via parallax: $R_U = 19.2$ AU
- ⇒ Uranus' omlooptijd kan worden berekend:

$$\Rightarrow P_U = 19,2^{3/2} \text{ jaar} = 84 \text{ jaar}$$

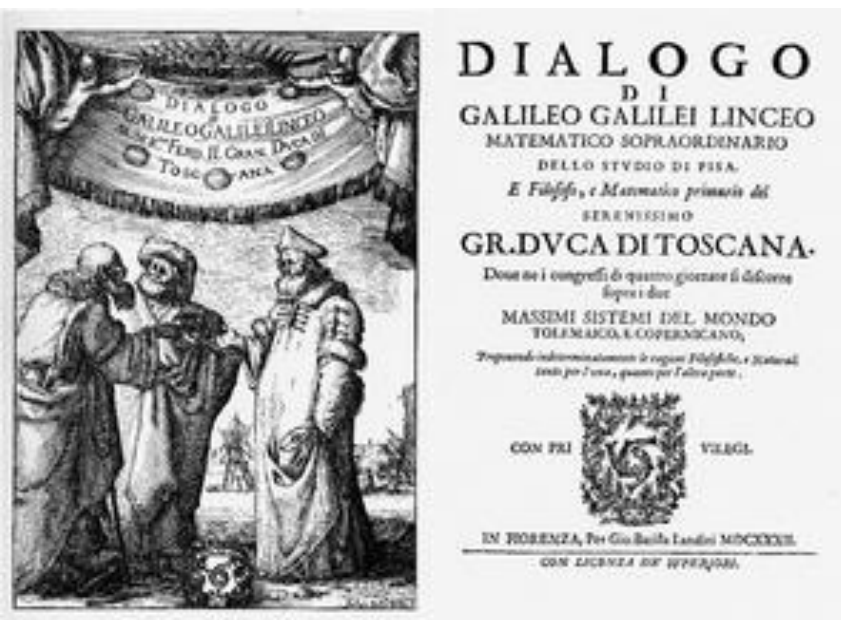
GALILEO GALILEI (1564-1642)



- Heeft de telescoop niet uitgevonden!
- Gebruikte telescoop als astronoom
 - Bergen op de maan, net als op aarde
⇒ geen perfecte bolvormige lichamen
 - Sterren: puntachtig, planeten: bollen
 - Manen van Jupiter ⇒ miniatuur systeem
 - Interpretatie van zonnevlekken ⇒ hemellichamen veranderen
 - Melkweg: zeer veel sterren
- Onderwierp de fysica van Aristoteles aan testen
 - Concepten: inertia en impuls:
 - Aristoteles: kracht is verantwoordelijk voor beweging
 - Galileo: kracht is verantwoordelijk voor *veranderingen* in beweging
 - ⇒ relativiteit van uniforme beweging
 - Valproeven: objecten met verschillende samenstelling vallen hetzelfde ⇒ basis voor Einstein's equivalentieprincipe
- Beroemd door zijn rechtzaak in 1633
- Eerherstel in 1980!

GALILEO'S RECHTZAAK

- Moeilijke, arrogante persoonlijkheid
- Uitstekende spreker en docent
- Publiceerde in het Italiaans
- 1632 beroemd boek *Dialogen betreffende twee belangrijke wereldsystemen*: kosmologie van Aristoteles werd verdedigd door Simplicio, een idioot
- Voorganger: Giordano Bruno



SIR ISAAC NEWTON (1643-1727)

- Fundamentele bijdragen aan optica, fysica en wiskunde:
 - Uitvinder van calculus (met Leibnitz)
 - Uitvinder van de spiegeltelescoop
 - Wit licht bestaat uit gekleurd licht
 - Mechanica
 - Gravitatie
 - Demonstreerde dat de wetten van Kepler een consequentie van de theorie van mechanica en gravitie: *Principia*
- Mechanica
 - Eerste wet: uniforme beweging
 - Tweede wet: $F = ma$
 - Derde wet: actie = reactie



Waarom kun je een tennisbal verder gooien
dan een bowlingbal?

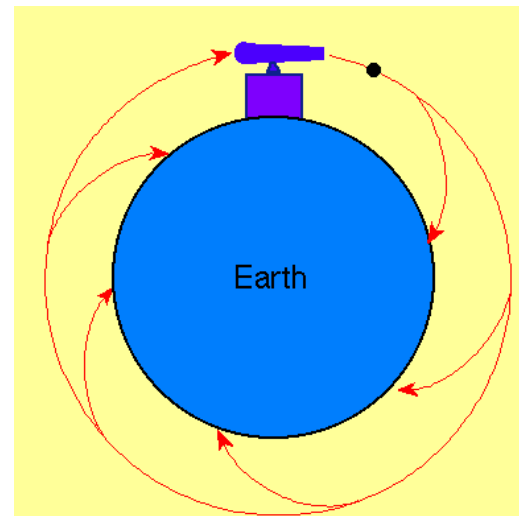


HET VERHAAL VAN DE APPEL

- Observatie 1: de maan beweegt rond de aarde in een cirkelbaan. De maan wordt dus versneld en valt continu naar de aarde
- Observatie 2: een appel valt van een boom
- Inzicht: dezelfde kracht (gravitatie) die ervoor zorgt dat de appel naar beneden valt, zorgt er ook voor dat de maan rond de aarde draait

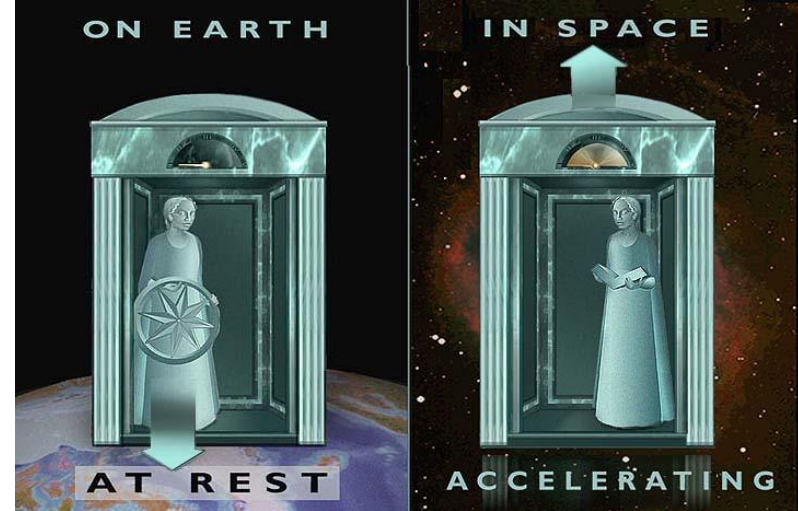
$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

- G: gravitatieconstante $6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$



EQUIVALENTIEPRINCIPE

$$F = ma = \frac{GmM}{r^2} \Rightarrow a = \frac{GM}{r^2}$$



- Versnelling hangt niet van m af, de massa van het object
 - Alle objecten vallen met dezelfde snelheid
 - Linkerkant: “ m ” traagheid van het object
 - Rechterkant: “ m ” gravitationele aantrekking van het object
 $\Rightarrow$ equivalentie van trage en zware massa
- Keplerwetten volgen uit wetten van Newton
 - Hiermee kun je de massa van hemellichamen bepalen

$$\frac{R^3}{P^2} = \frac{G(M + m)}{4\pi^2} \approx \frac{GM}{4\pi^2}$$

$$\frac{R^3}{P^2} = \frac{G(M + m)}{4\pi^2} \approx \frac{GM}{4\pi^2}$$

- Massa van de zon (gebruik consistente eenheden)
 - Omloop periode van aarde rond zon: 1 jaar = $3,15 \times 10^7$ sec
 - Afstand aarde tot de zon: 1 AU = $1,50 \times 10^{11}$ m
 $\Rightarrow$ massa van de zon: $M = 2 \times 10^{30}$ kg
- Massa van de aarde
 - Omloop periode maan rond aarde: 1 maand = $2,4 \times 10^6$ sec
 - Afstand maan tot de aarde: $R = 3,84 \times 10^8$ m
 $\Rightarrow$ massa van de aarde: $M = 6 \times 10^{24}$ kg
- Massa van planeten:
 - Jupiter: meet afstand tussen Jupiter en een van zijn manen, meet de omlooptijd, bereken Jupiter's massa.
 - Venus: pech, Venus heeft geen manen. Mogelijke oplossing: stuur een satelliet in een baan rond Venus
 - Andere toepassingen: massa bepaling van sterren, sterrenclusters, sterrenstelsel, clusters van sterrenstelsels



NEWTONS TRIOMF: ONTDEKKING VAN NEPTUNUS

- 1781: W. Herschel ontdekt Uranus
- Meting van de baan van Uranus om zon geeft kleine afwijkingen van ellips. Kan niet verklaard worden door storing door bekende planeten $\Rightarrow$ **andere planeet?**
- Leverrier en Adams berekenen positie van hypothetische planeet uit de afwijkingen
- Galle (1846) kijkt met een telescoop en vindt de nieuwe planeet (Neptunus) binnen 1° van de voorspelde positie

