

The background of the slide is a deep space image featuring a dense field of galaxies, stars, and nebulae. A prominent bright star with a four-pointed diffraction pattern is located in the upper left quadrant. Another similar star is visible in the lower left. A large, glowing orange sphere with a blue ring around it is positioned on the right side. The overall color palette is dark with various shades of blue, orange, and white.

Generell Relativitet

Jostein B. Johansen

05.11.2012

Newton's gravitasjonslov

- To legemer tiltrekker hverandre med en kraft som er proporsjonal med massene deres, og omvendt proporsjonal med avstanden mellom dem.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$G = 6.7 * 10^{-11} N * m^2 / kg^2$$

Standing on the shoulders of giants

- Galileo:
 - Det er ikke mulig å detektere absolutt bevegelse (men tid er et fast begrep)
- Michael Faraday:
 - Det er en sammenheng mellom elektrisitet og magnetisme som beskrives som felt.
- James Clerk Maxwell:
 - Teorien om elektromagnetisme.

Maxwells ligninger

- Endringer i et magnetisk felt fører til endringer i et elektrisk felt, og ligningene beskriver sammenhengene mellom disse.
- La til "the displacement current" for å få teorien matematisk konsistent.
- Dyp sammenheng mellom elektrisitet og magnetisme.

Maxwells oscillerende felter

- Ligningene kan omformuleres til bølgligninger hvor oscillerende elektriske og magnetiske felt sameksisterer og opprettholder hverandre.
- Hastigheten bølgene beveger seg fremover med er lik forholdet mellom styrkene av de elektriske og magnetiske feltene, og dette kan lett måles.
- Resultatet er:

299 792 458 meter/sekund

Lysets hastighet

- Maxwell hadde snublet over forklaringen på selve lyset!
- Lysets hastighet fremstår nærmest som en naturkonstant i ligningene.
- Ingen input for hastigheten til sender eller mottaker.

Albert Einstein

- Var vel bevandret i Maxwells ligninger.
- Bestemte seg for å ta på alvor konseptene om at bevegelse er relativt og at lysets hastighet er konstant, og utledet ut i fra dette konsekvensene dette ville ha.
- Dette arbeidet førte frem til den spesielle relativitetsteori

Einsteins spesielle relativitetsteori

- Tiden går senere for ting i bevegelse
- Objekter i bevegelse krymper i bevegelsesretningen
- Energi og masse er ekvivalente
- Ingenting kan bevege seg fortere enn lysets hastighet som er 299 792 458 m/s i vakuum
- Selve strukturen av tid og rom er av en slik art at det er helt umulig å bryte denne fartsgrensen

$$E = mc^2$$

Høna og egget

- Lorentz transformasjon av det elektriske felt fra en ladning i bevegelse til en stasjonær observatørs referanseramme resulterer i et matematisk begrep som man vanligvis kaller det magnetiske felt.
- Eller sett motsatt, det magnetiske felt generert av en ladning i bevegelse forsvinner og bli til et rent elektrostatisk felt i referanserammen til ladningen.

Einsteins generelle relativitetsteori

- Et relativt kjent fenomen satte Albert Einstein på sporet
 - Alle gjenstander faller mot bakken med samme akselerasjon
 - Galileo og det skjeve tårn i Pisa
 - Kommandør David Scott, Apollo 15



Picture: NASA

Ekvivalensprinsippet

- Einsteins tankeeksperiment
 1. Sveve vektløs i en heis i verdensrommet
 2. Begynner å akselerere heisen
 3. Blir presset mot gulvet, og kan ikke skille dette fra å være i ro i et tyngdefelt på jorden!
 1. Heis i ro
 2. Kabler ryker
 3. Som om tyngdekraften blir stått av!

Krummet tidrom

- Einstein innså at ved å definere tidrommet som krummet kan man fjerne hele gravitasjonskraften!
- Gravitasjon er slett ikke en kraft, men en endring av geometrien i tid og rom.
- Det er tilstedeværelse av masse og energi i tidrommet som gir denne krumningen.

Tidrom

- Tid er relativt og rom (avstand) er relativt
- Tidrom er 4-dimensjonalt med rom i 3 dimensjoner og tid som den 4. dimensjon.
- Minkowski's avstandsformel beskriver en distanse s i tidrom som alle kan være enige om uavhengig av egen og andres bevegelse.

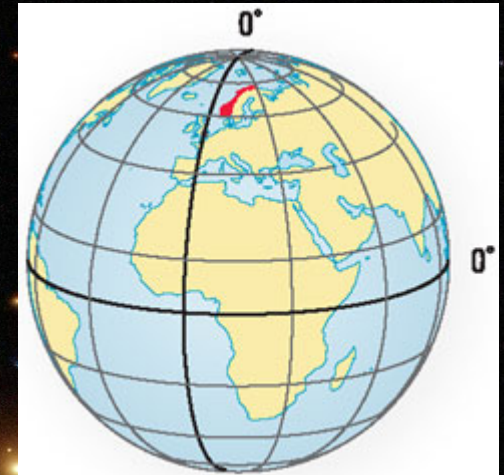
$$s^2 = (ct)^2 - x^2$$

Miniheiser i fritt fall!

- Tidrommet deles i bitte små biter hvor tidrommet vil være uendret og det samme overalt, og hvor Minkowski's avstandsformel derved kan anvendes.
- Sammenhengen mellom tilstedeværelse av masse og energi og krumningen til rommet er beskrevet i Einsteins feltligninger, som er et system av partielle differensialligninger.

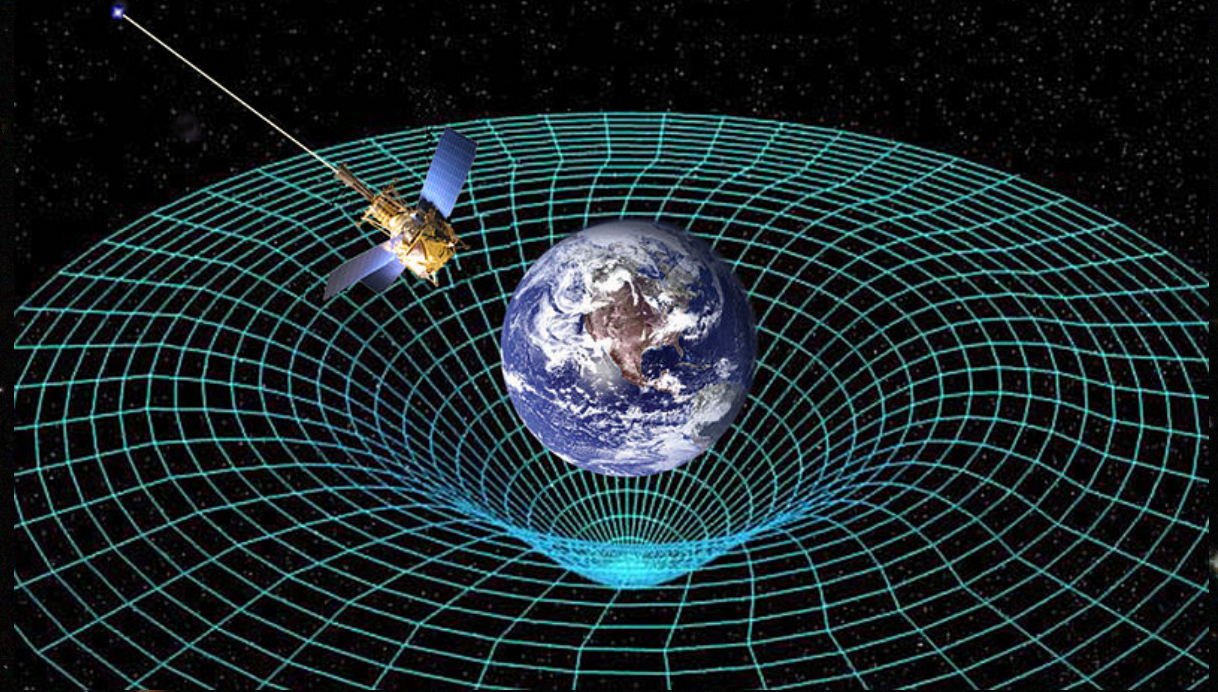
Analogi: Krummet jordoverflate

- Jordoverflaten deles i lengdegrader og breddegrader, hvor lengdegradene går fra pol til pol.
- To personer som starter ut fra ekvator langs parallelle lengdegrader vil oppdage at de kommer nærmere hverandre når de beveger seg langs sin lengdegrad mot en pol.
- Dette kan tolkes som en "kraft" som trekker personene mot hverandre hvis en ikke ser for seg jorden som krummet/rund.



Todimensjonal analogi

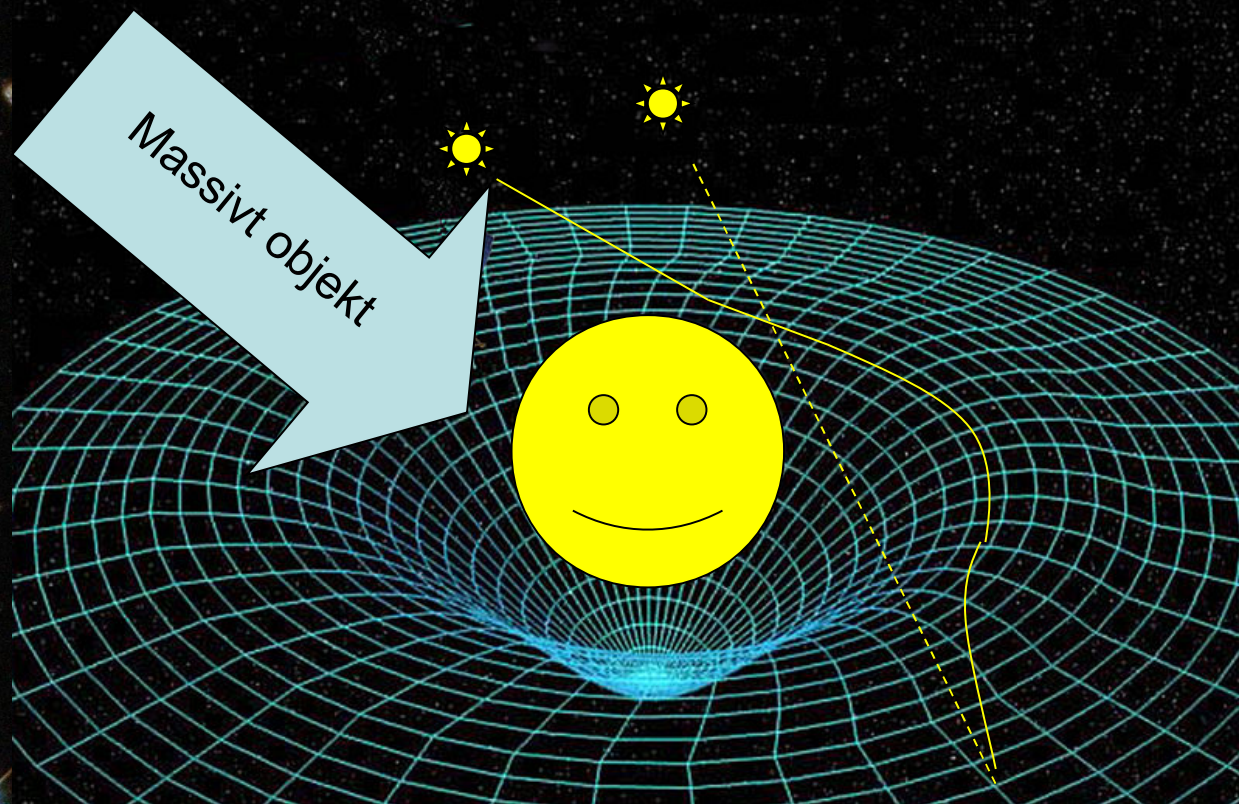
- Nettet representerer det koordinat-systemet lagt inn i det krummete tidrommet som som ville vært ortogonalt i flat romtid



Picture: NASA

Jostein B. Johansen, 2012

Test: Avbøyning av lys



Einsteins ligninger

$$G = \frac{8\pi G}{c^4} T$$

G = The Einstein tensor som beskriver aspekter av rommets krumning

T = Energy-momentum tensor som angir masse og energi

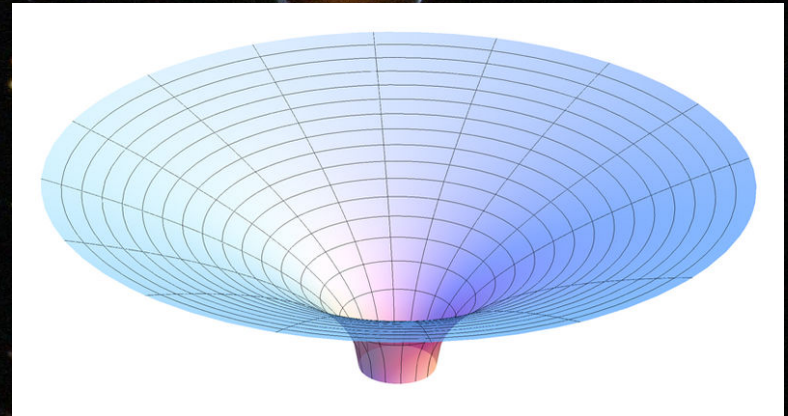
G = Gravitasjonskonstanten

c = Lysets hastighet i vakuum

G og **T** er bestemt av flere funksjoner av koordinater i romtiden.

Eksakte løsninger av ligningene

- Schwarzschild løsningen (1916)
 - Beskriver gravitasjonsfeltet som virker på små objekter utenfor en sfærisk, uladd og ikke-roterende masse. Er også en god tilnærming for et sakteroterende objekt som jorden og solen.
 - Flamm's paraboloid:



Picture: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Flamm.jpg>

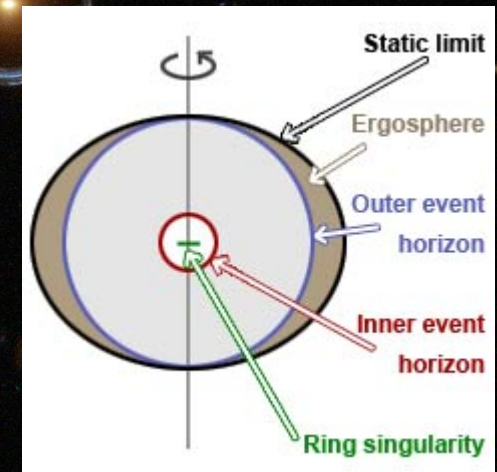
Kerr-løsningen (1963)

- Eksakt løsning for roterende svarte hull, og andre roterende objekter
 - Løsningen viser bla. at roterende objekter påvirker romtiden med såkalt "frame dragging"
 - Gravity probe B designet for å måle denne effekten rundt jorden.

	Non-rotating ($J = 0$)	Rotating ($J \neq 0$)
Uncharged ($Q = 0$)	Schwarzschild	Kerr
Charged ($Q \neq 0$)	Reissner-Nordström	Kerr-Newman

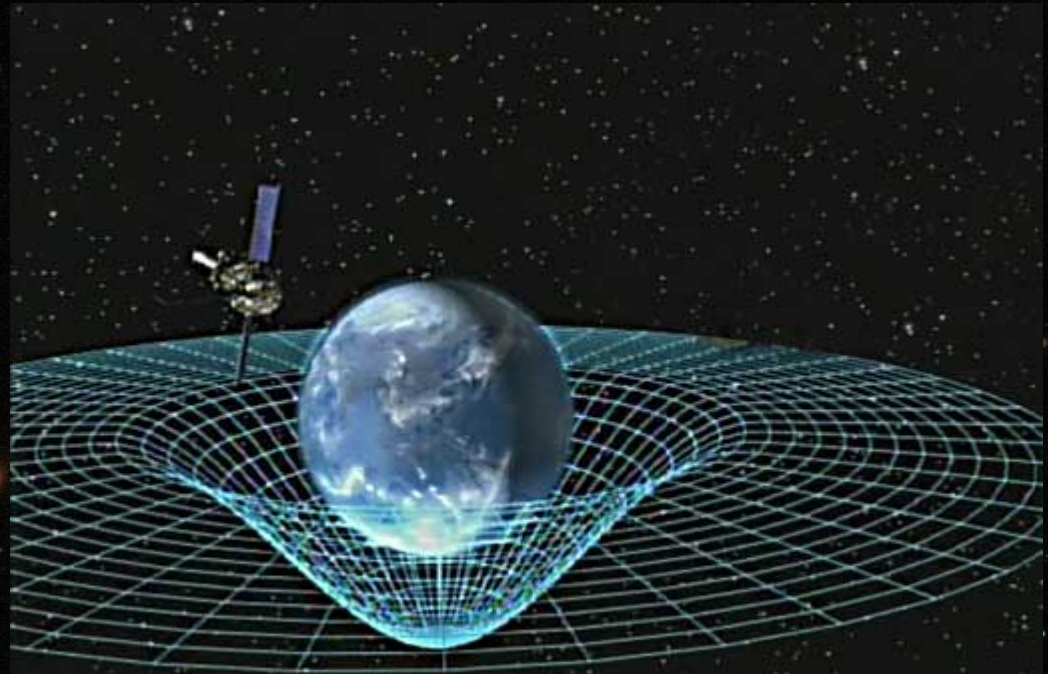
Ergosphere (Kerr)

- Frame dragging rundt roterende svarte hull
 - Lys kan gå i bane
 - Objekter i disse banene kan rotere raskere enn lyset
 - Lys som går ”mot strømmen” kan være tilsynelatende stasjonært i forhold til omkringliggende rom
 - Penrose process



Gravity Probe B

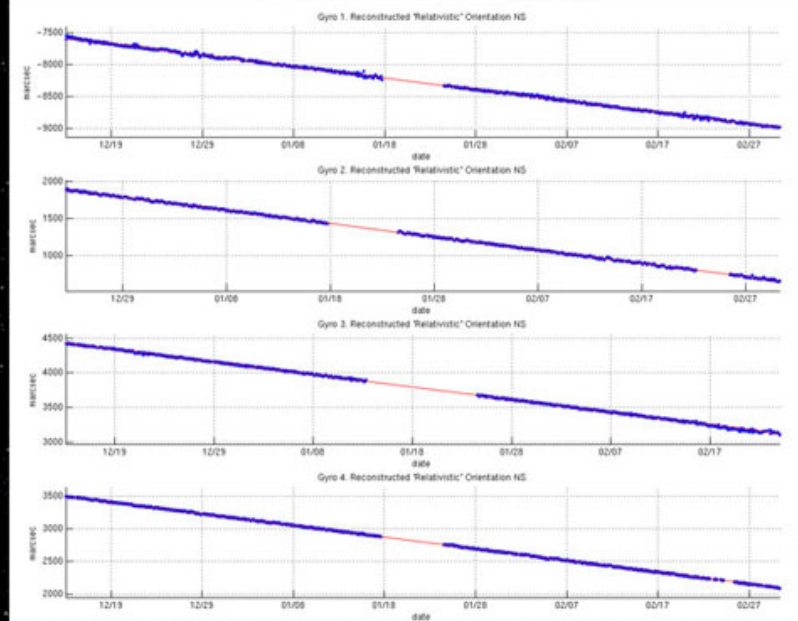
- GPB skal påvise en "geodetic" og en "frame dragging" effekt som postulert ved hjelp av generell relativitetsteori.
- Verdens mest nøyaktig fremstilte kuler benyttes i gyroskopene.
- I følge Newtons gravitasjon vil spinnaksen til et gyroskop holde seg i samme retning så lenge det ikke virker krefter på det.
- Ved å anvende generell relativitetsteori kan det vises at et gyroskop i bane rundt jorden vil endre spinnakse som følge av rommets krumning.
- Rommet krummer seg og dras også med av jordens masse og dens bevegelse.



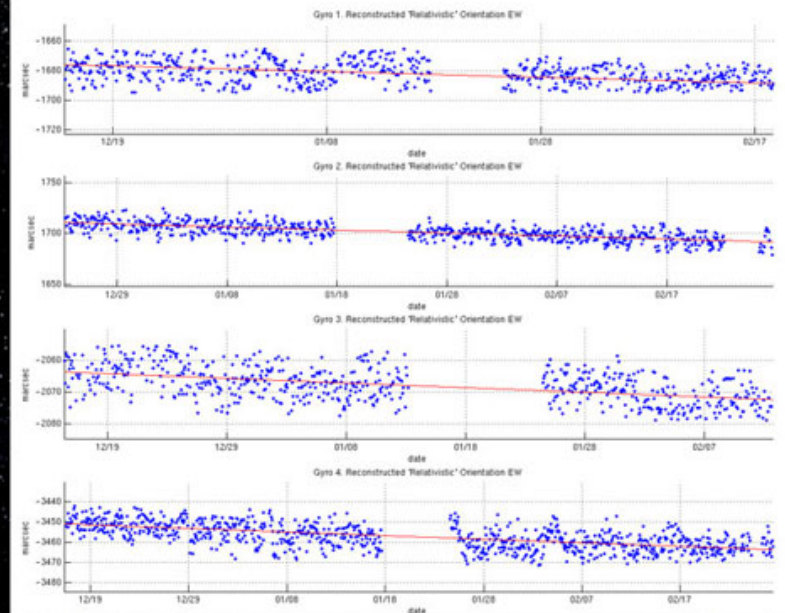
Gravity Probe B – Foreløpige resultater



Geodetic Effect (N-S)



Frame-Dragging Effect (E-W)



G1

G2

G3

G4

Full Model Results as of September 2009

(Note: Different Y-Axis Scale for Geodetic and Frame-Dragging Plots)

”Frame dragging clearly visible”. (Feilmargin 14%)

Jostein B. Johansen, 2012

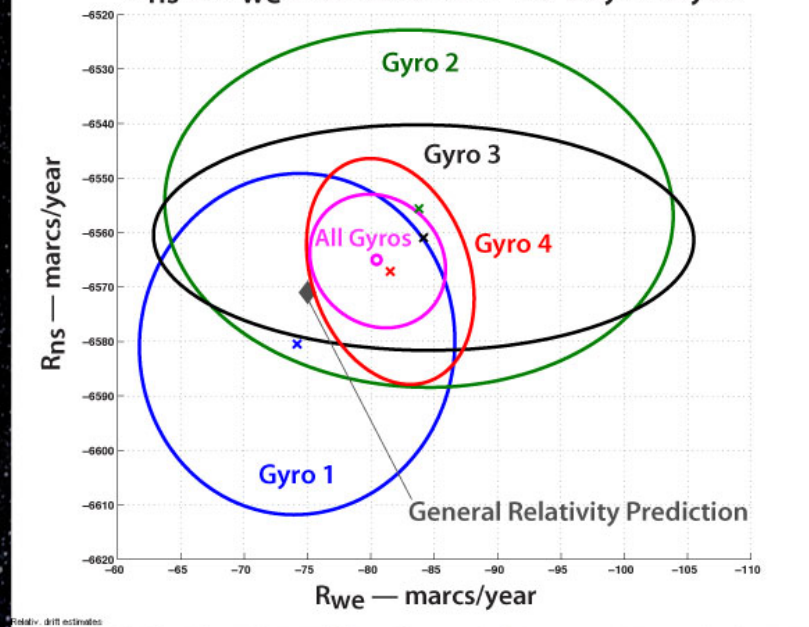
Gravity Probe B – Sammenligning av gyroer



The Gravity Probe B
EXPERIMENT

SAC#19: September 2009

R_{NS} vs R_{WE} Estimates from 170-Day Analysis



Individual and 4-Gyro- Combined Results, 50% Error Ellipses

Einstein Predictions (including Solar GR Effects & Guide Star Motion):
Geodetic (NS): -6571 ± 1 MarcSec/yr. Frame-Dragging (EW): -75 ± 1

Gravitasjonell rødforskyvning

- Pound–Rebka experiment (1960)
 - Påviste frekvensskift som følge av forskjell i potensiell energi i et gravitasjonsfelt.
 - Delta $h = 22.6$ meter in the Jefferson Towers, Harvard University



Picture: Harvard Univ. & Physics in Perspective 2, 224 (2000)

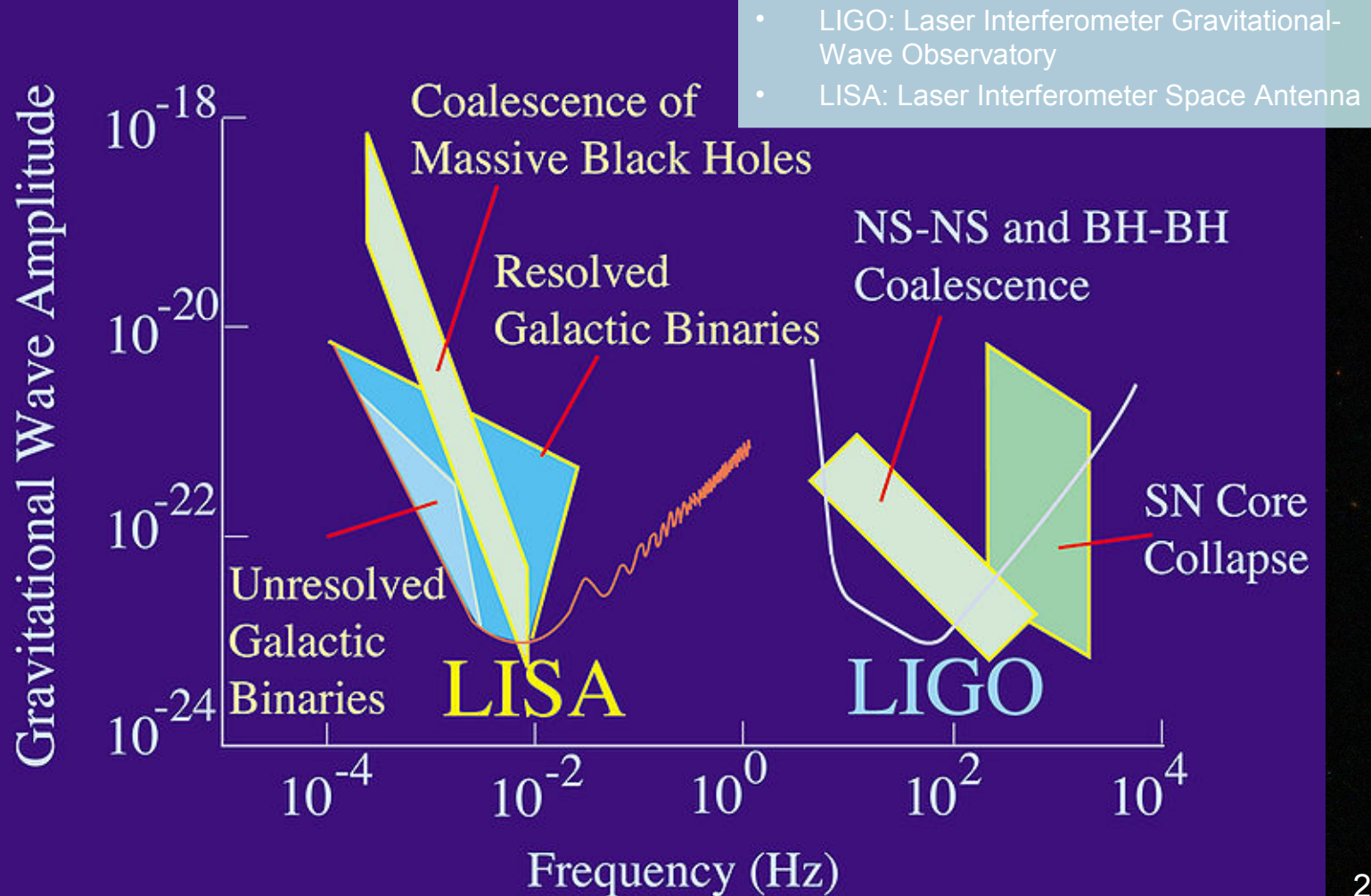
Gravitasjonsbølger

- Bølger i tid-rommet, nesten som bølger på en sjø.
- Dannes av masser i bevegelse.
- Massive objekter i hurtige bevegelse.
 - To nøytronstjerner eller to svarte hull som kretser rundt hverandre
- Bølgene avtar med avstand, så de er normalt veldig svake når de når jorden.

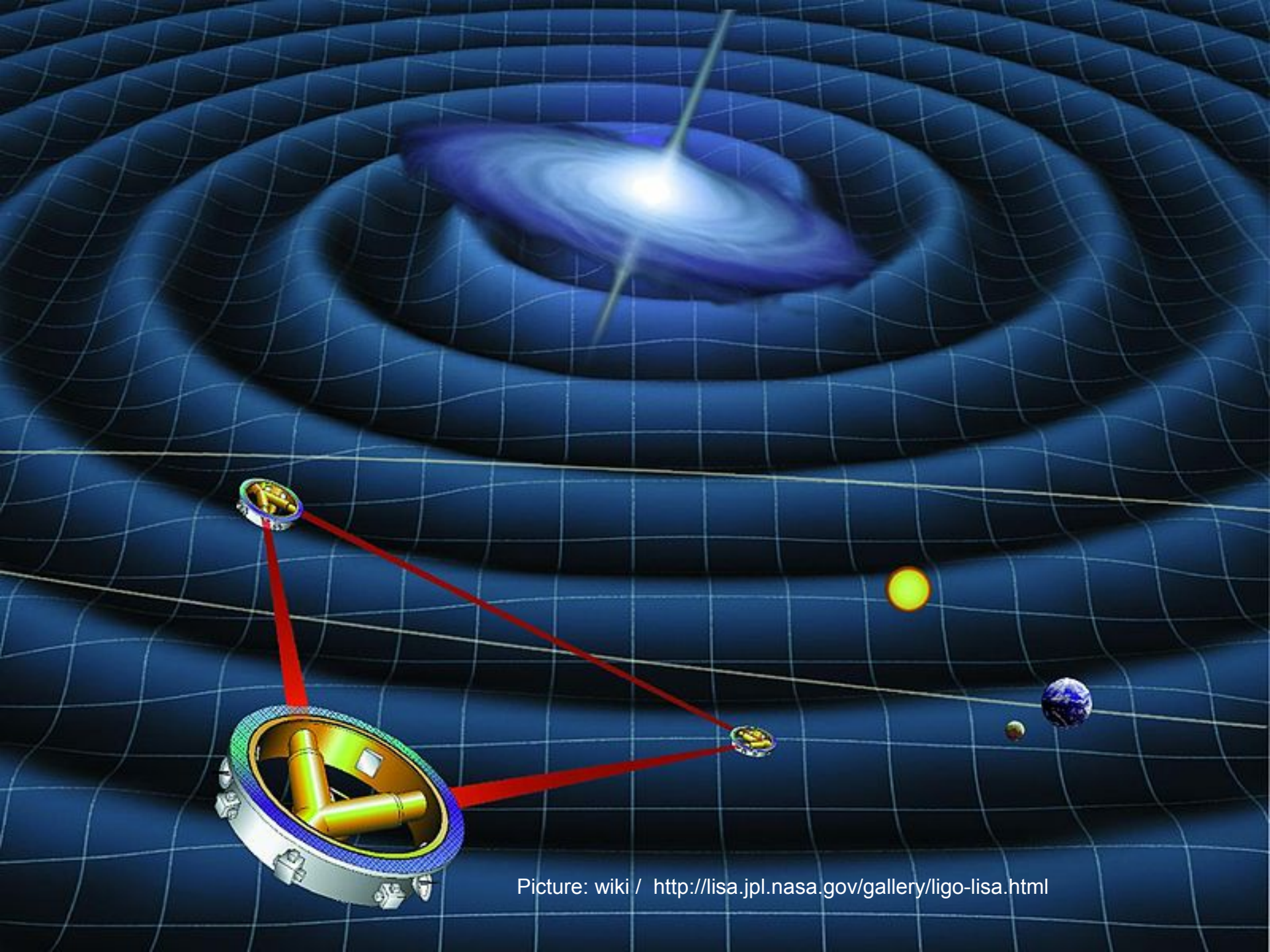
Animasjon

- <http://www.black-holes.org/explore2.html>
(caltec)
 - blackhole2.qt.mov
 - CombinedMovie_360_bp30.mp4

Deteksjon av gravitasjonsbølger



- LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
- LISA: Laser Interferometer Space Antenna



Picture: wiki / <http://lisa.jpl.nasa.gov/gallery/ligo-lisa.html>

LISA description

NASA's description:

The three LISA spacecraft will be placed in orbits that form a triangular formation with center 20° behind the Earth and side length 5 million km. (The figure showing the formation is not to scale.)

Each spacecraft will be in an individual Earth-like orbit around the Sun. The orbits are chosen to minimize changes in the lengths of the sides of the triangle. The orbits of the three spacecraft have a relationship between inclination and eccentricity that inclines the plane of the formation by 60° with respect to the ecliptic. The nodal longitudes of the three orbits are shifted by 120° to create the triangle. The heliocentric orbit offers a particularly quiet environment, critical for the control of disturbances on the test masses defining the interferometer arms. The test masses are free-falling and shielded by the enclosing spacecraft from disturbances of the solar wind and photon pressure. The orientation of the spacecraft with respect to the Sun changes very slowly. The Sun appears to move along a cone with a 30° half angle aligned with the spacecraft's cylindrical axis once per year, giving constant illumination. The major source of disturbance in the measurement band is the variation in the solar constant caused by the Sun's normal modes of oscillation, amounting to less than 10 ppm in intensity.

The orbital motion of the antenna sweeps its sensitivity lobes across the sky, giving an amplitude modulation dependent on a source's angular coordinates. Similarly, the Doppler effect gives a phase modulation dependent on a source's angular coordinates. The two effects combine to give directional information about every source. Most of the sources observable by LISA are periodic or quasi-periodic and can be observed for at least a year. The angular position accuracy depends on the signal-to-noise ratio. For the strongest sources, the direction to the source can be determined to about 1 arc minute.

Gravitasjonslinser



Beskrivelse bakgrunnsbilde

- A Horseshoe Einstein Ring from Hubble
- Image Credit: ESA/Hubble & NASA
- Explanation: What's large and blue and can wrap itself around an entire galaxy? A gravitational lens mirage. Pictured above, the gravity of a luminous red galaxy (LRG) has gravitationally distorted the light from a much more distant blue galaxy. More typically, such light bending results in two discernible images of the distant galaxy, but here the lens alignment is so precise that the background galaxy is distorted into a horseshoe -- a nearly complete ring. Since such a lensing effect was generally predicted in some detail by Albert Einstein over 70 years ago, rings like this are now known as Einstein Rings. Although LRG 3-757 was discovered in 2007 in data from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS), the image shown above is a follow-up observation taken with the Hubble Space Telescope's Wide Field Camera 3. Strong gravitational lenses like LRG 3-757 are more than oddities -- their multiple properties allow astronomers to determine the mass and dark matter content of the foreground galaxy lenses.
- (APOD 2011 December 21)

Image sources/credits

- 800px-GPB_circling_earth.jpg:
 - Description Artist concept of Gravity Probe B orbiting the Earth to measure space-time, a four-dimensional description of the universe including height, width, length, and time.
 - Date 18 May 2008
 - Source http://www.nasa.gov/mission_pages/gpb/gpb_012.html
 - Author NASA
 - Permission (Reusing this file)
 - Original work of NASA
- Lengdegrader: Gyldendal
- as15_hfd_1.gif:
 - NASA
 - http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_15_feather_drop.html
- <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Flamm.jpg>
- Ergosphere: mod3_q3_3.jpg
 - http://hubblesite.org/explore_astronomy/black_holes/encyc_mod3_q3.html
- I4_5.jpg
 - http://www.relativity.li/en/epstein2/read/i0_en/i4_en/
 - The picture shows Glen Rebka at the lower end of the Jefferson Towers,
- Harvard University
- Bbh_Embedding_0093r_360_bp30.mp4 Merging black holes:
 - <http://www.black-holes.org/explore2.html> (caltec)
- 800px-LIGO-LISA.jpg
 - Wiki / <http://lisa.jpl.nasa.gov/gallery/ligo-lisa.html>
- 800px-LISA-waves.jpg
 - <http://en.wikipedia.org/wiki/File:LISA-waves.jpg> redirects to <http://lisa.jpl.nasa.gov/gallery/lisa-waves.html>