Flersignalastronomi – Universet sett gjennom flere «vinduer»

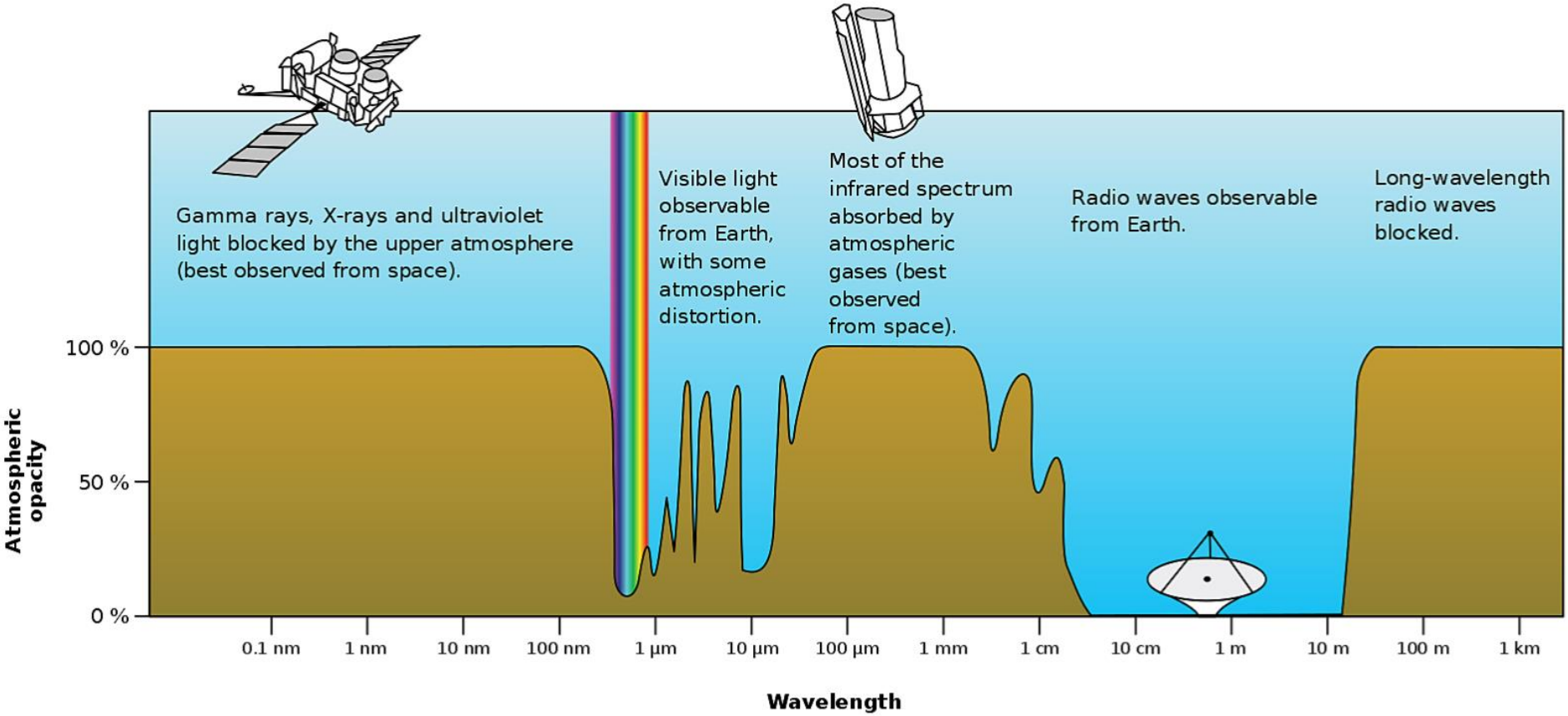
Gravitasjonsbølger og elektromagnetisk stråling fra kolliderende svarte hull og nøytrontjerner.

Øyvind Grøn

Trondheim Astronomiske Forening

3. oktober 2019

We can study the Universe over large parts of the electromagnetic, using observatories on the ground and space laboratories.



I tillegg kan vi nå studere universets egenskaper ved å observere nøytrinoer og gravitasjonsbølger.

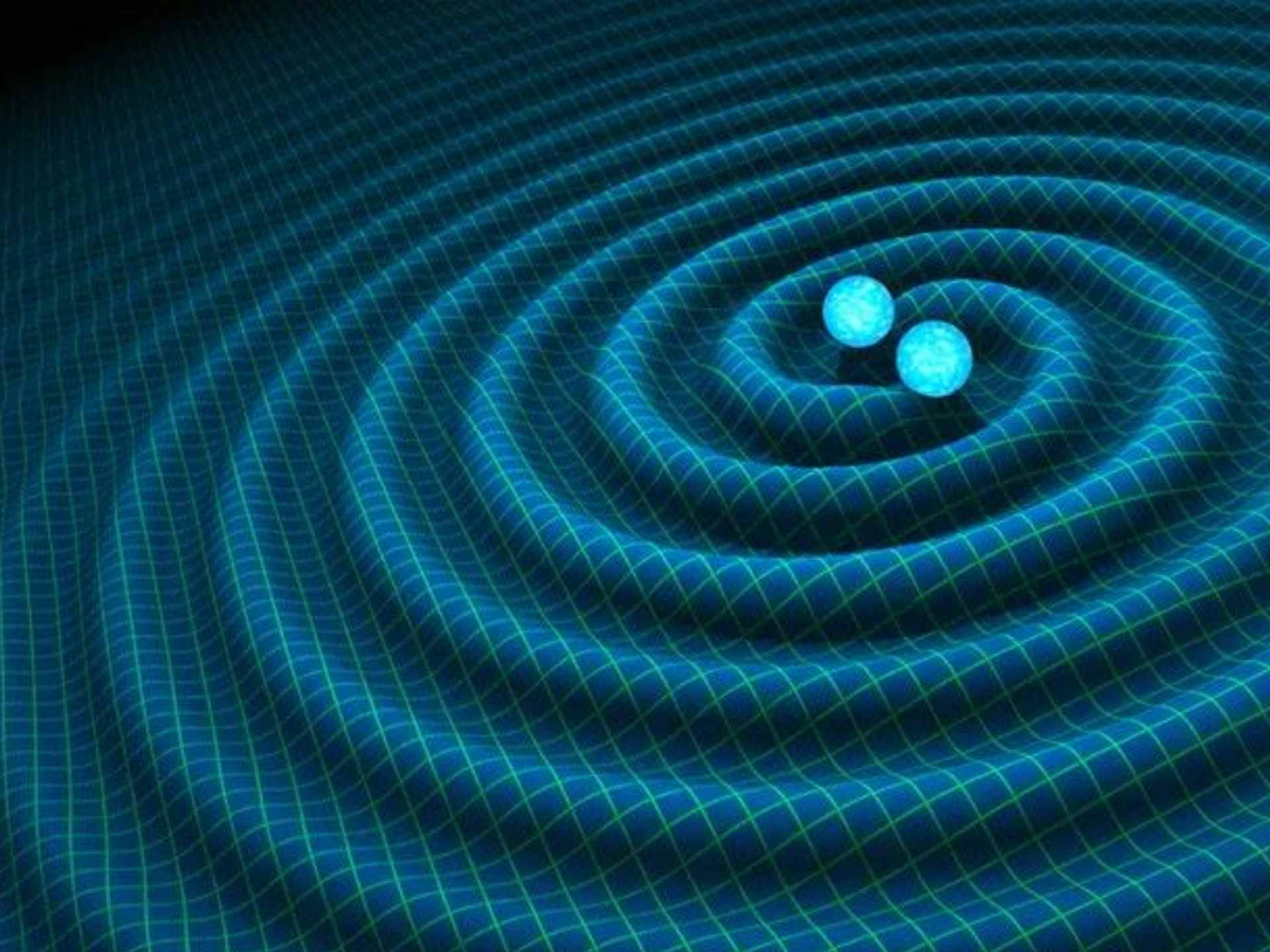
Gravitational waves and gamma ray bursts from the same source

17. august 2017 er en milepæl i flersignal-astronomien.
Denne dagen ble det for første gang observert elektromagnetisk stråling fra kilden til en direkte observert gravitasjonsbølge.

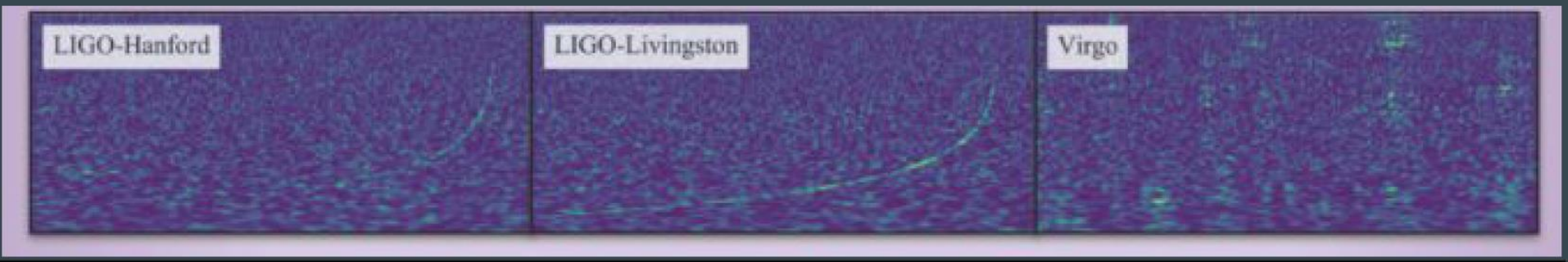
Dermed kunne kilden identifiseres som to kolliderende nøytronstjerner.
Kollisjonen fant sted i en galakse 130 millioner lysår fra jorda.

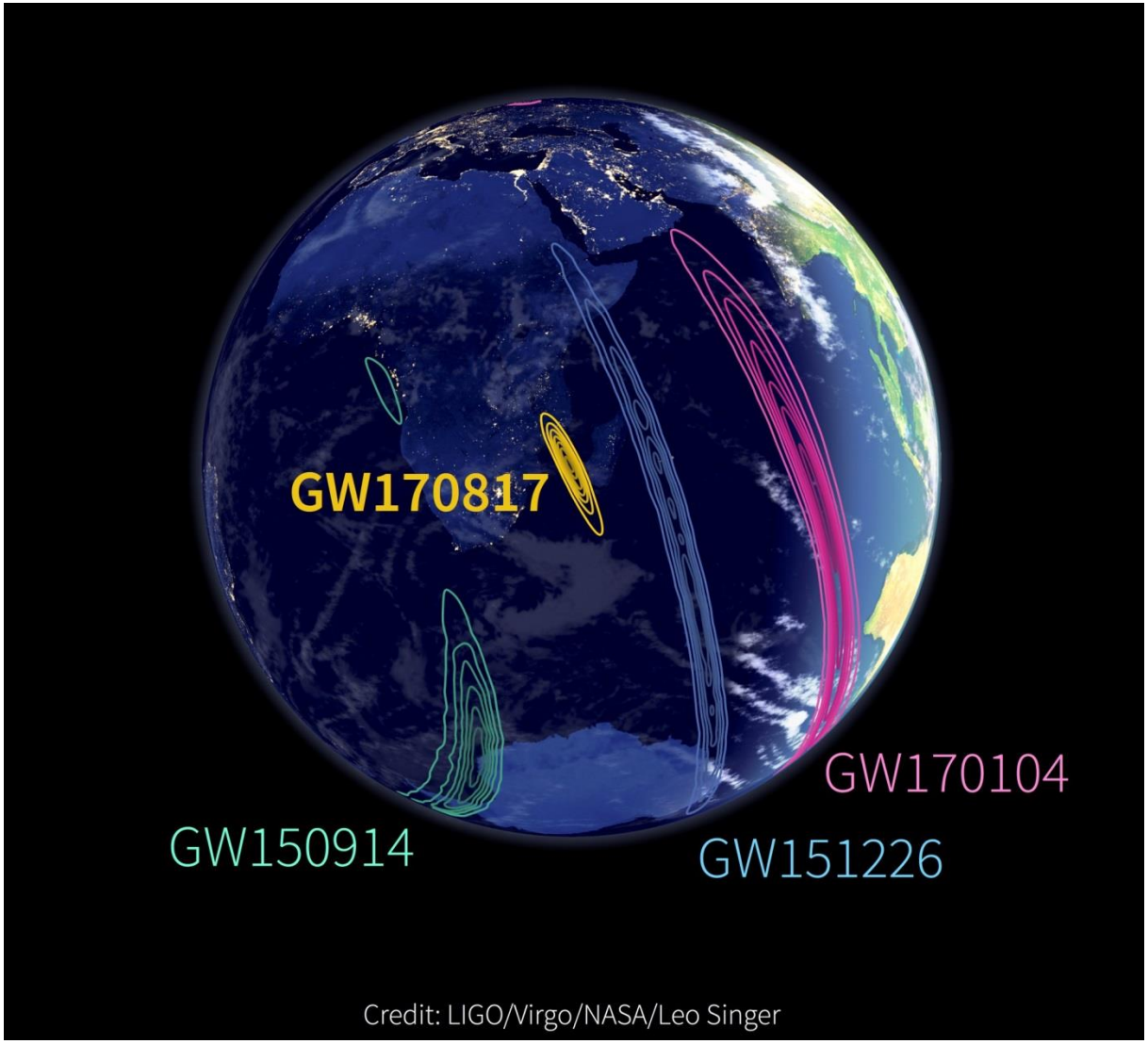
Dette åpnet et nytt felt i astronomien kalt
multi-messenger astronomy,
Eller på norsk: *flersignal-astronomi.*

Ruby
Planet Book 4 Chris Kimmons



Det skjedde egentlig 17. august 2017, 12:41:04 UTC





Lokaliseringen av kilden til de registrerte gravitasjonsbølgene ble vesentlig forbedret da LIGO ble supplert av VIRGO 1. august 2017. De lilla, blå og grønne områdene viser lokaliseringen av kildene da man bare hadde VIRGO. De gule kurvene viser lokaliseringen av kilden til gravitasjonsbølgen GW 170817 etter at Virgo ble operativ.

GW170817

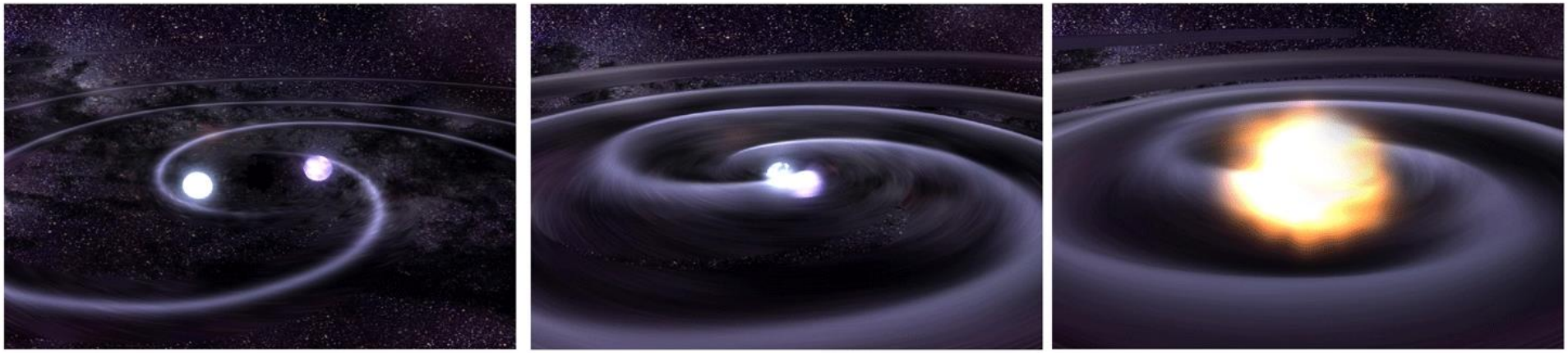
- *T=0:* Virgo, LIGO Livingston og LIGO Hanford fanger opp en gravitasjonsbølge. Den bruker 25 ms på veien fra Italia til staten Washington.
- *1.7 s:* Gammastråleteleskopet Fermi fanger opp et elektromagnetisk signal.
- *40 m:* LIGO/Virgo-kollaborasjonen sender ut et foreløpig "koinsidensvarsel" til astronomer, med omtrentlig posisjon til kilden.
- *4.5 t:* Nøyaktig kildeposisjon sendes ut til astronomimiljøet. Frenetisk leiteaktivitet begynner.
- *10 t 52 m:* Kilden blir funnet i galaksen NGC 4993.
- I løp av de neste ukene blir den observert av over 70 teleskop, på alle kontinent og i rommet, og over hele det elektromagnetiske spektrumet.

First Cosmic Event Observed in Gravitational Waves and Light

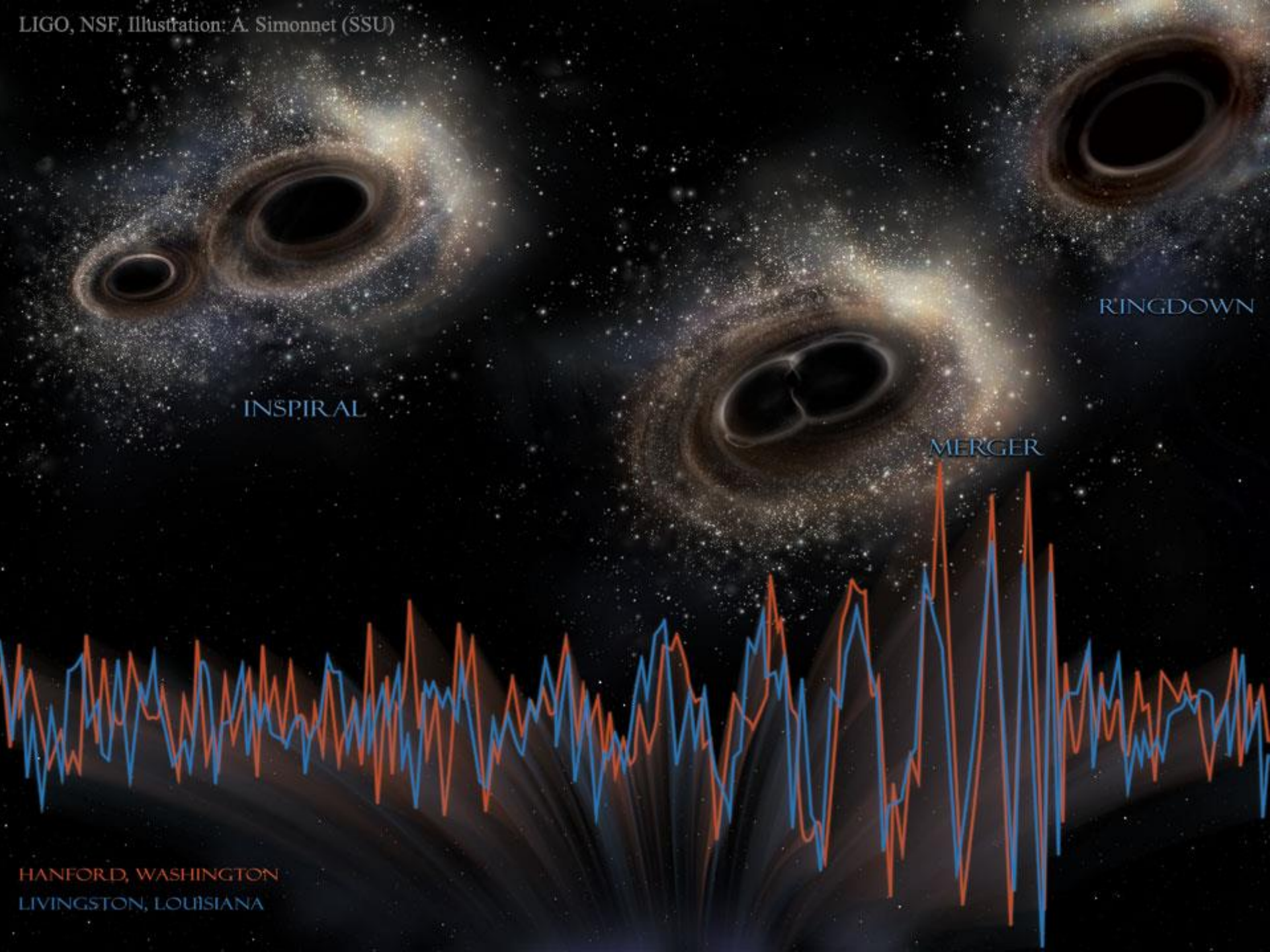
LIGO

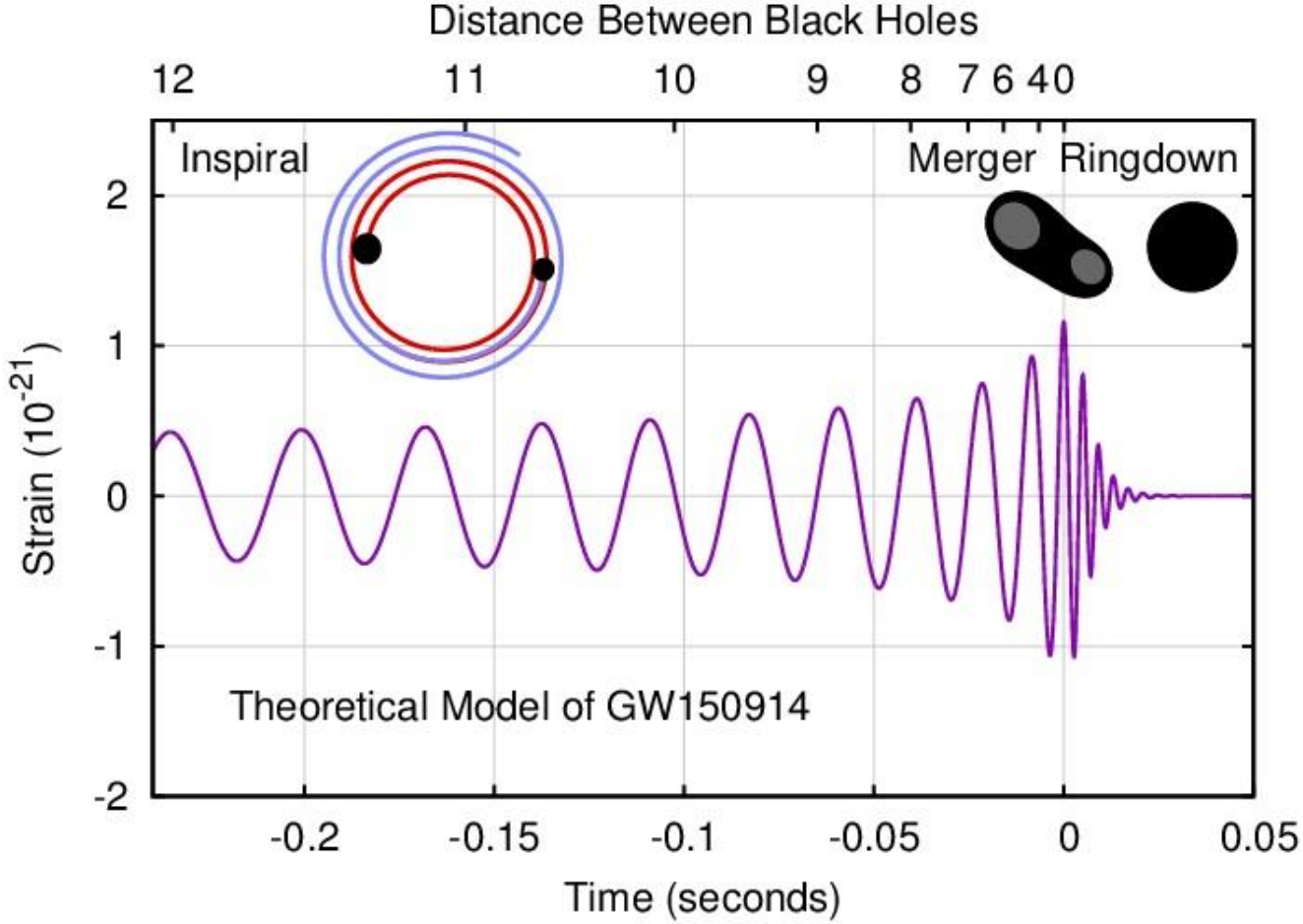
Georgia Tech Center for Relativistic Astrophysics College of Sciences

NSF



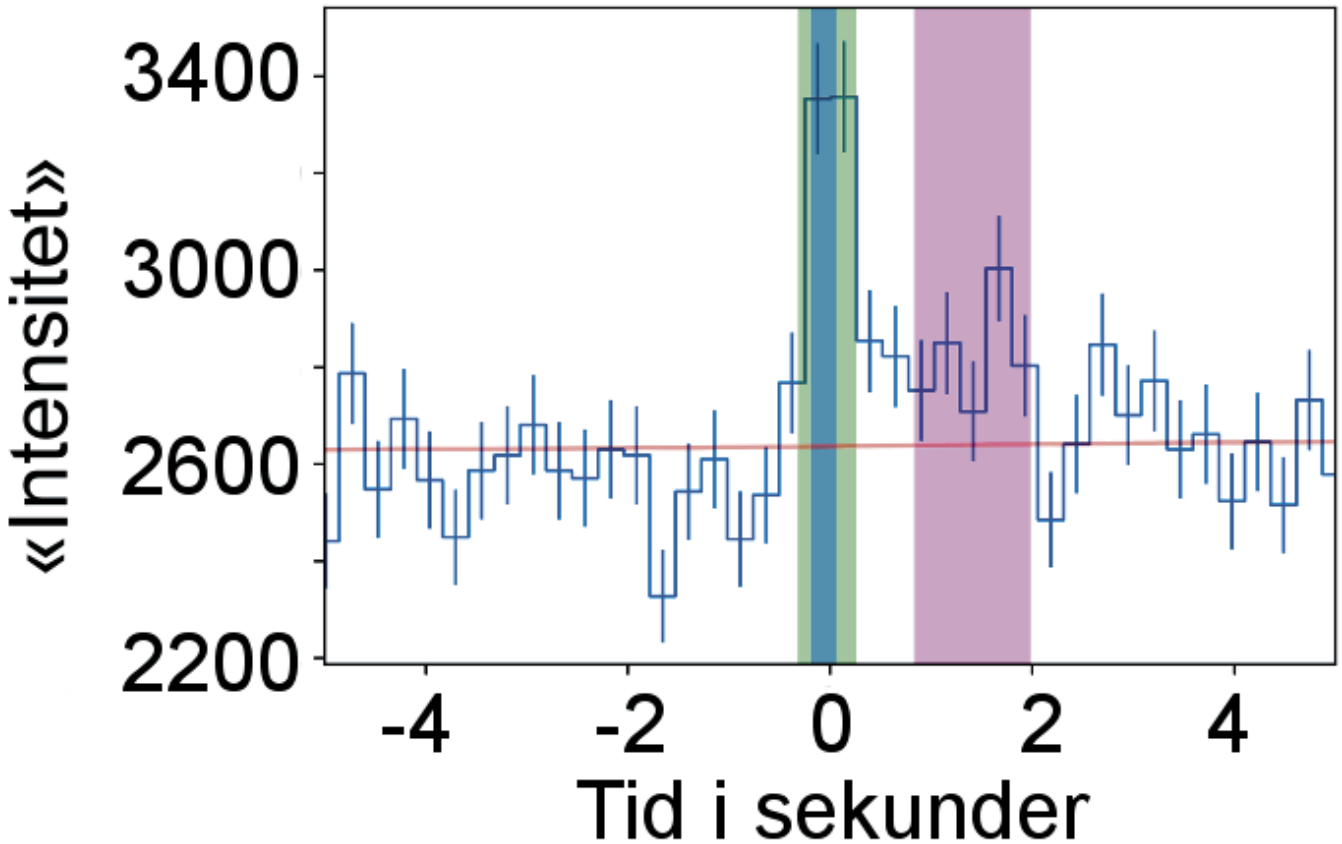
To nøytronstjerner går i spiralbane rundt hverandre mens de sender ut gravitasjonsbølger. Så kolliderer de, og det sendes ut et gammaglimt og etter hvert en etterglød i hele det elektromagnetiske spekteret. Blant annet forårsaker en slik kollisjon et fenomen som er blitt forutsagt, men ikke tidligere observert: en kilonova.


LIGO, NSF, Illustration: A. Simonnet (SSU)
INSPIRAL
MERGER
RINGDOWN
HANFORD, WASHINGTON
LIVINGSTON, LOUISIANA

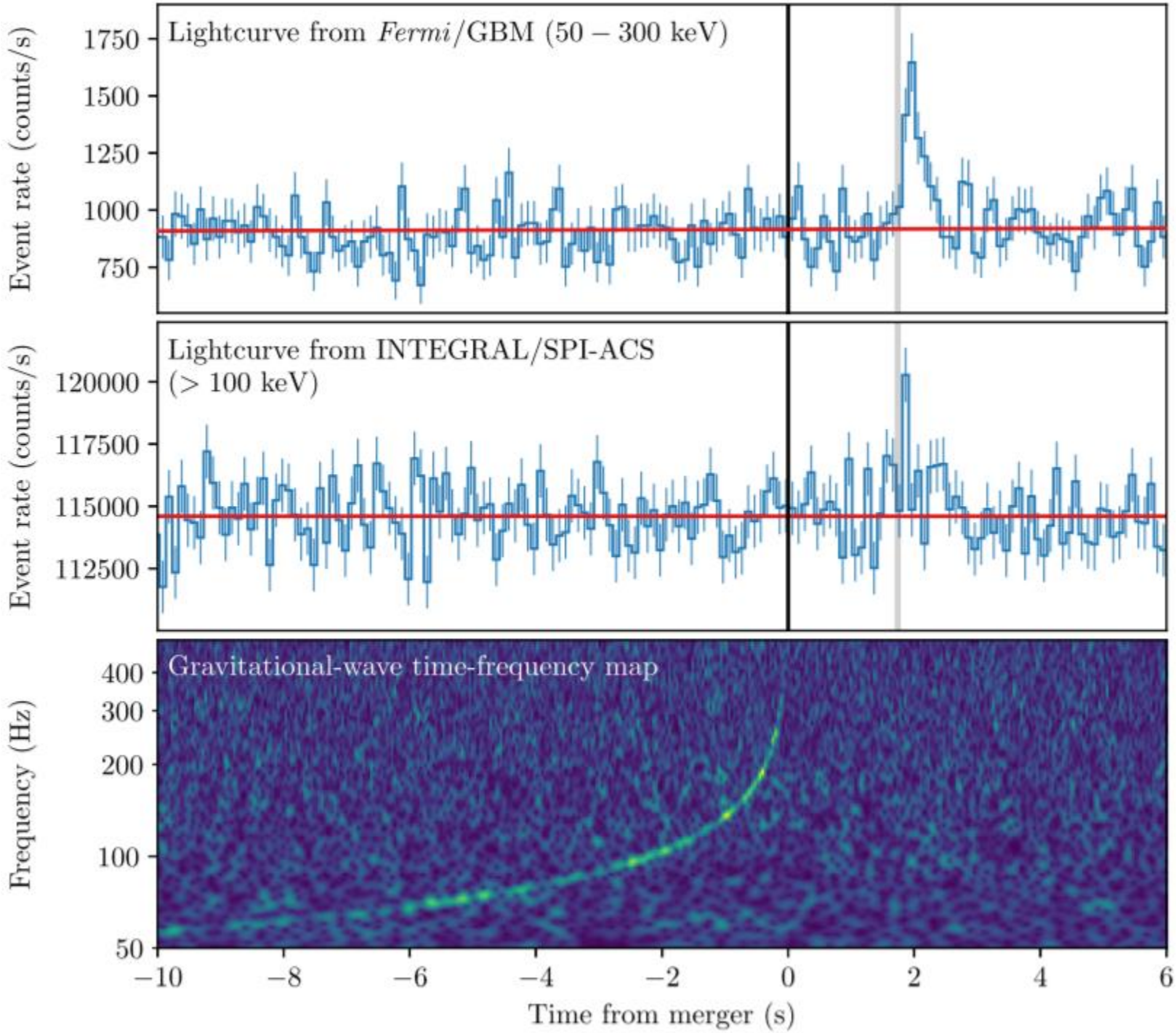


Figuren viser de 3 fasene av gravitasjonsbølgesignalet som kan registreres fra en kollisjon mellom svarte hull og/eller nøytronstjerner. «**Inspiral**» er når legemene nærmer seg hverandre langs spiralformete baner. «**Merger**» er når de har fysisk kontakt, og «**ringdown**» når det svarte hullet som produseres under kollisjonen er i en svingetilstand med dempede svingninger.

Fermi-romobservatoriet registrerte et gammaglimt fra kilden til gravitasjonsbølgen GW 170817 bare 1,7 setter maksimum i det registrerte gravitasjonsbølge-signalet. Glimtet varte i 2 sekunder.



Fermi-observatoriets registrering av gammaglimtet SGRB 170817A.


Lightcurve from *Fermi*/GBM (50 – 300 keV)
Event rate (counts/s)
1750
1500
1250
1000
750
Lightcurve from INTEGRAL/SPI-ACS
(> 100 keV)
Event rate (counts/s)
120000
117500
115000
112500
Gravitational-wave time-frequency map
Frequency (Hz)
400
300
200
100
50
−10
−8
−6
−4
−2
0
2
4
6
Time from merger (s)

Forklaring på at gammaglimtet ankom
1,7 sekunder etter gravitasjonsbølgen

I kollisjons- og kollaps-prosessen ble det umiddelbart sendt ut en kjegleformet jetstrøm av ladde partikler – et plasma – med en akse som dannet en vinkel på omtrent 20 grader med synslinjen til jorda.

Det første 1,7 sekundet var jetstrømmen så tett og varm at fotoner hele tiden ble spredt inni plasmaet. Da var jetstrømmen ugjennomsiktig.

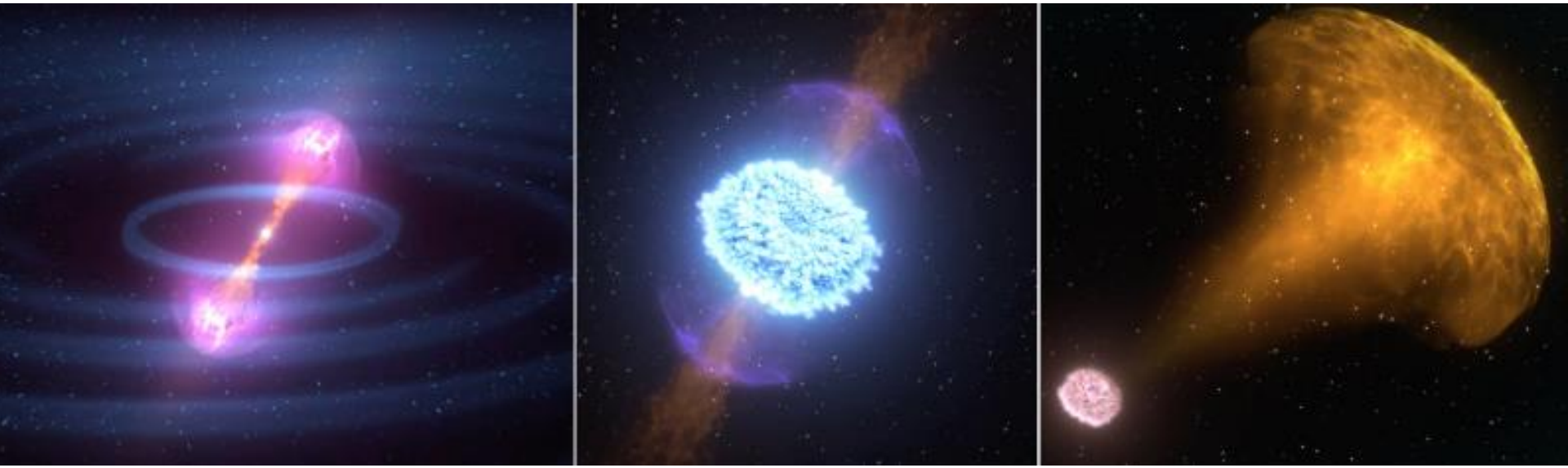
Men i løpet av 1,7 sekunder sankt tettheten og temperaturen i jetstrømmen slik at den ble gjennomsiktig,
og fotonene kunne bevege seg fritt.
Dette forklarer at gammaglimtet ankom jorda
1,7 sekunder etter gravitasjonsbølgen.

Det var 3 grupper av observasjoner med tydelige tegn på at de kom fra samme astronomiske kilde.

GW170817, registrering av passerende gravitasjonsbølger med varighet på rundt 100 sekunder. Svingninger i gravitasjonsbølgeantennen hadde trekk som viste at bølgene kom fra en kollisjon av to nøytronstjerner. Analyse av tidsforskjellene til ankomsten av signalene ved de to LIGO-dektorene i USA og VIRGO-detektoren i Italia ga en posisjonsbestemmelse av kilden.

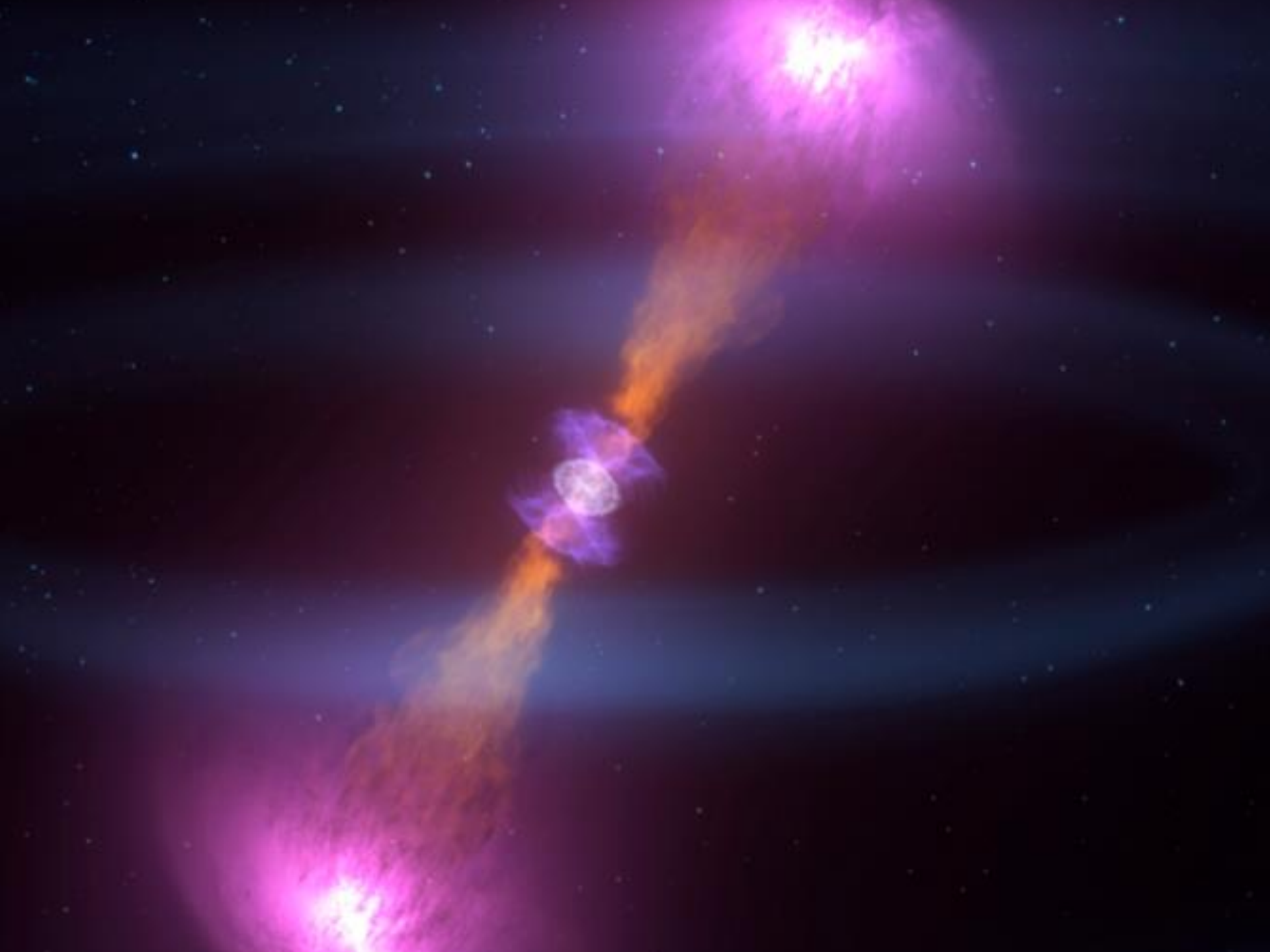
GRB 170817A, et gammaglimt som varte omtrent 2 sekunder, ble registrert av to rom-observatorier 1,7 sekunder etter intensitetstoppen i gravitasjonsbølgesignalet. Posisjonen til gammaglimtets kilde overlappet med posisjonen til gravitasjonsbølgenes kilde.

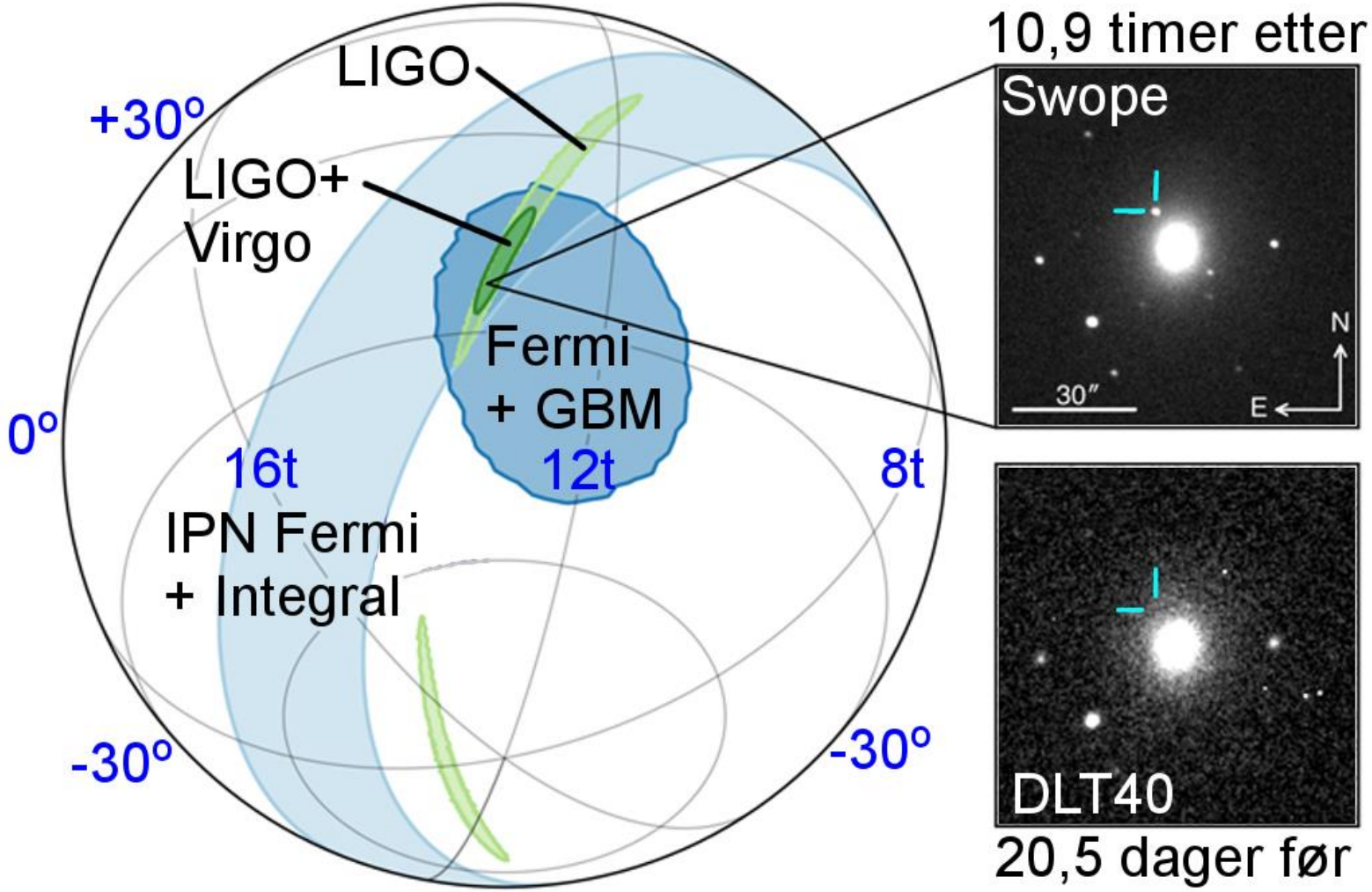
AT 2017gfo, en etterglød registrert 11 timer senere i galaksen NGC4993 som ligger i området til kildene av GW170817 og GRB 170817A . Denne etterglødden ble observert av et stort antall teleskoper i et stort bølgelengdeområde, fra røntgenstrålig til radiobølger . Den hadde varighet fra noen dager i det optiske imrådet av spekteret til flere måneder i radiobølge-området. Etterglødden viste trekk som passet med at strålingen ble sendt ut fra en kollisjon av to nøytronstjerner.



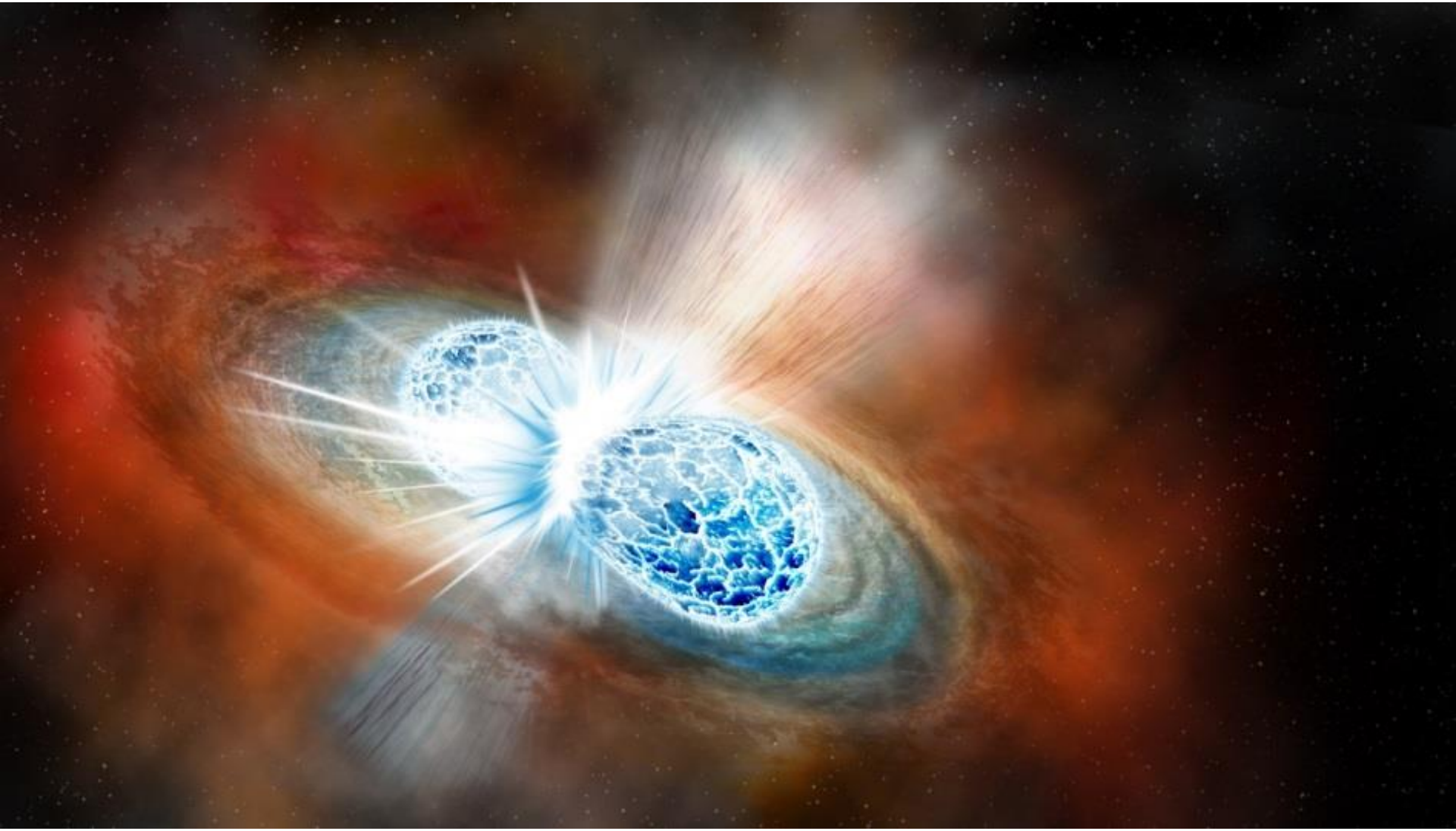
Ulike faser av den elektromagnetiske utstrålingen fra en kollisjon mellom to nøytronstjerner.

Til venstre: Gammaglimt.
I midten: Kilo-nova fra nukleosyntese (vil bli omtalt senere i foredraget).
Til høyre: Etterglød fra materiale sendt ut fra kollisjonen.

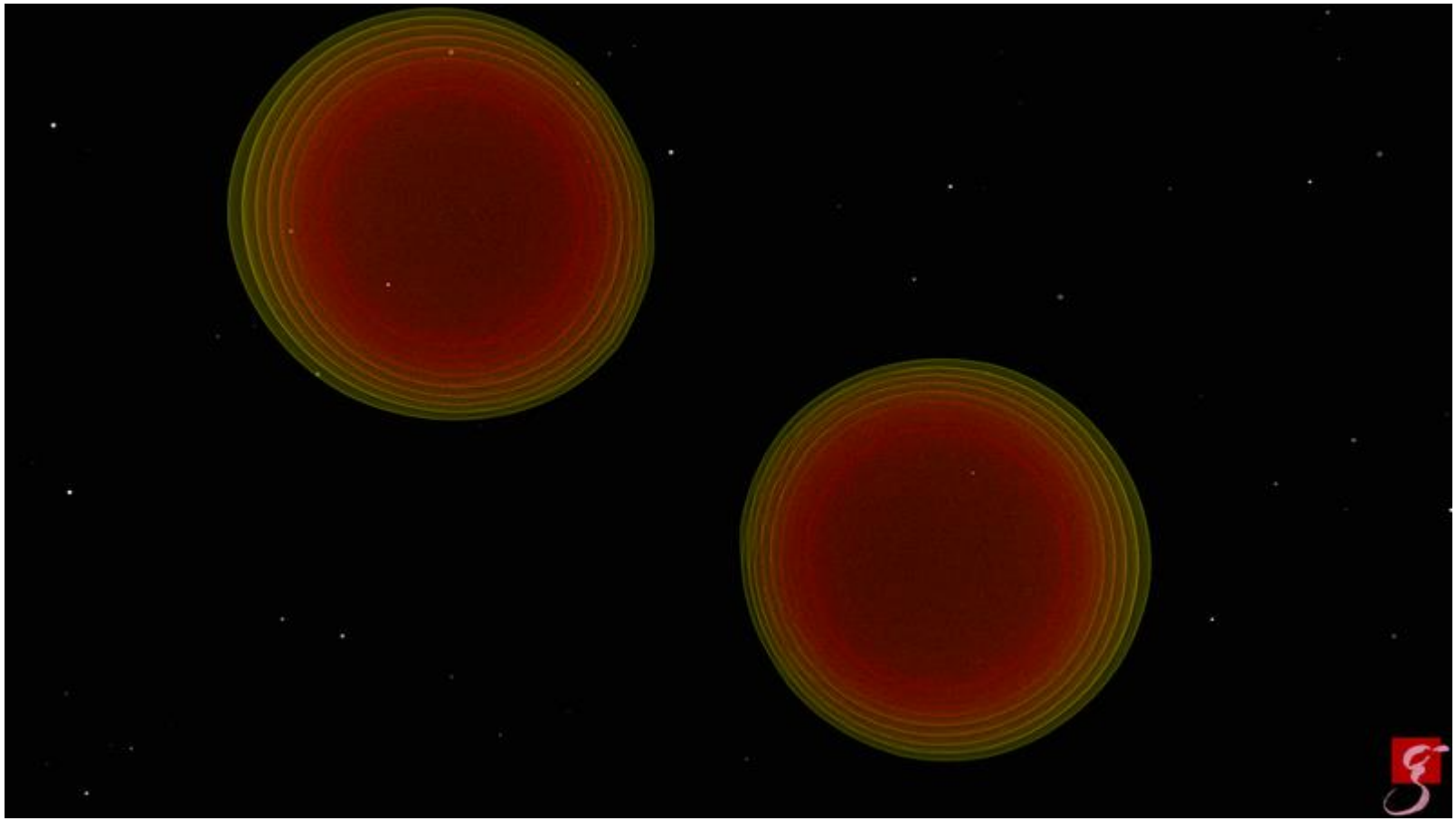




Lokaliseringen på himmelen av GW170817 med gravitasjonsbølge-detektoren LIGO alene og LIGO+Virgo, samt lokaliseringen av kilden til gammaglimtet registrert med Fermi romteleskopet 1,7 sekund etter registreringen av GW170817. Til høyre to optiske bilder av galaksen NGC 4993 og dens nære omgivelser. Nederst er et fotografi tatt 20,5 dager før 17. august 2017, og øverst er et fotografi tatt med Swope 1-meter teleskopet 10,9 timer etter at gammaglimtet var registrert. Her ble etterglødden oppdaget i den optiske delen av spekteret.

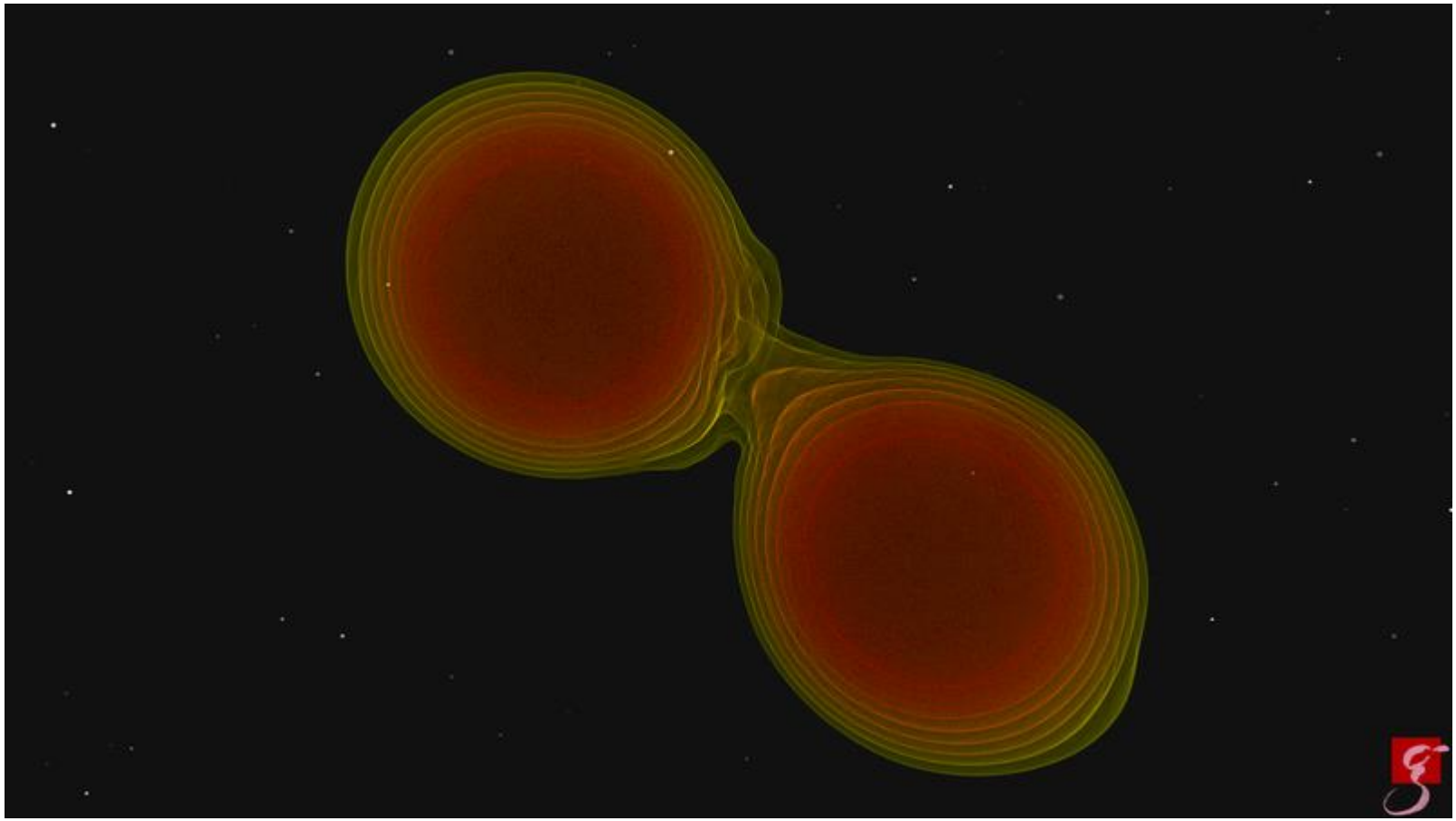


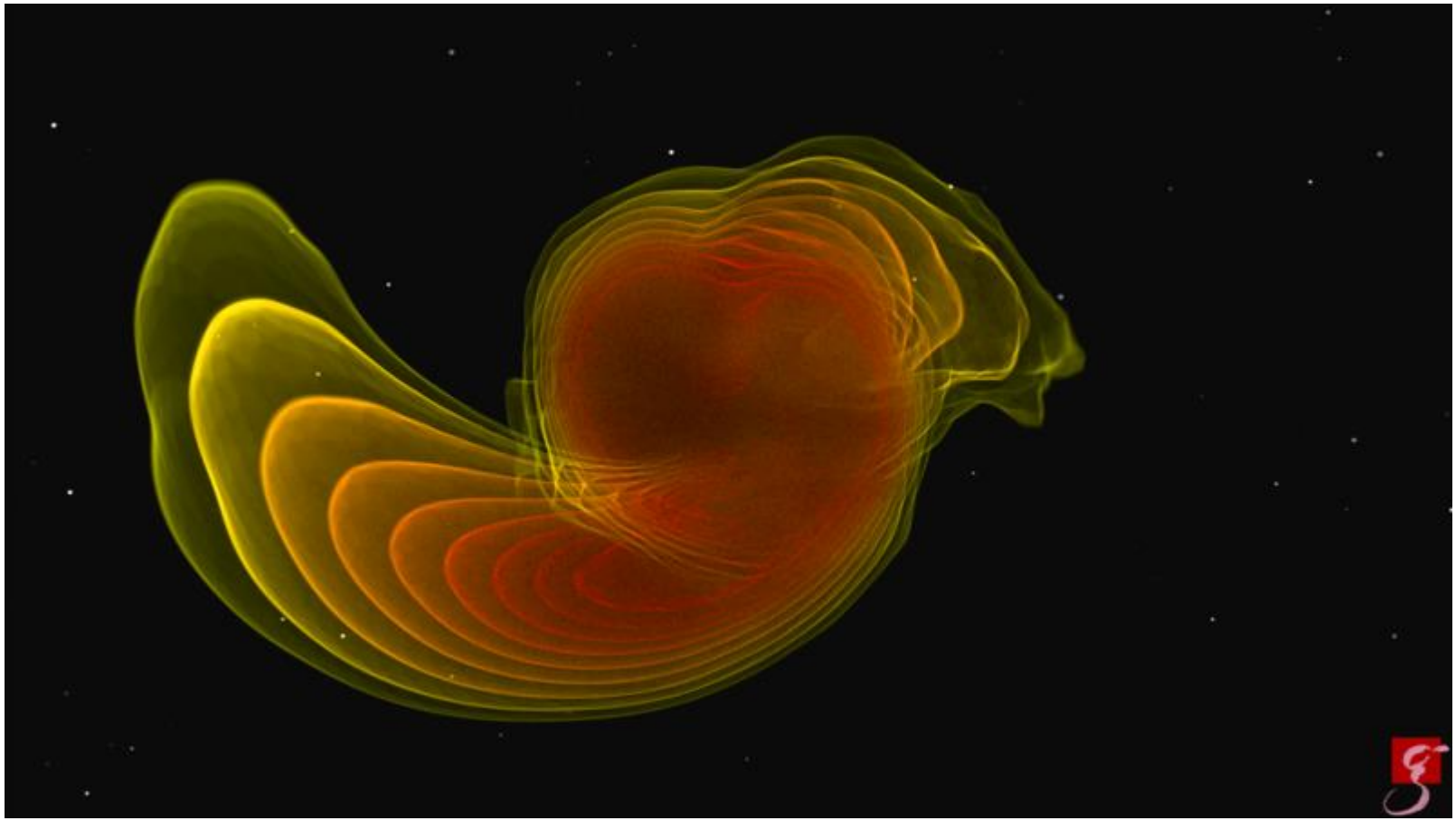
Illustrasjon av kollidende nøytronstjerner.

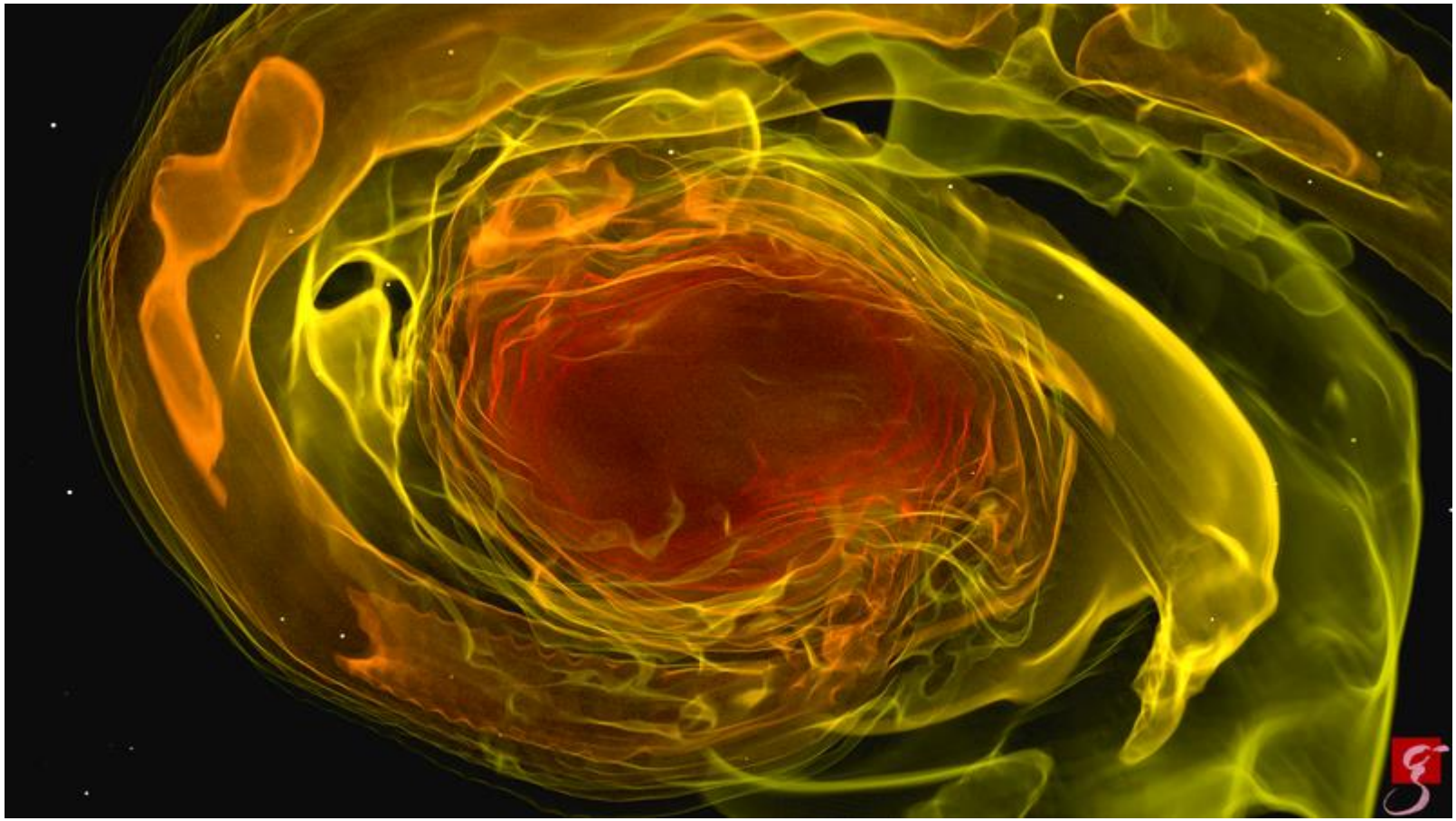


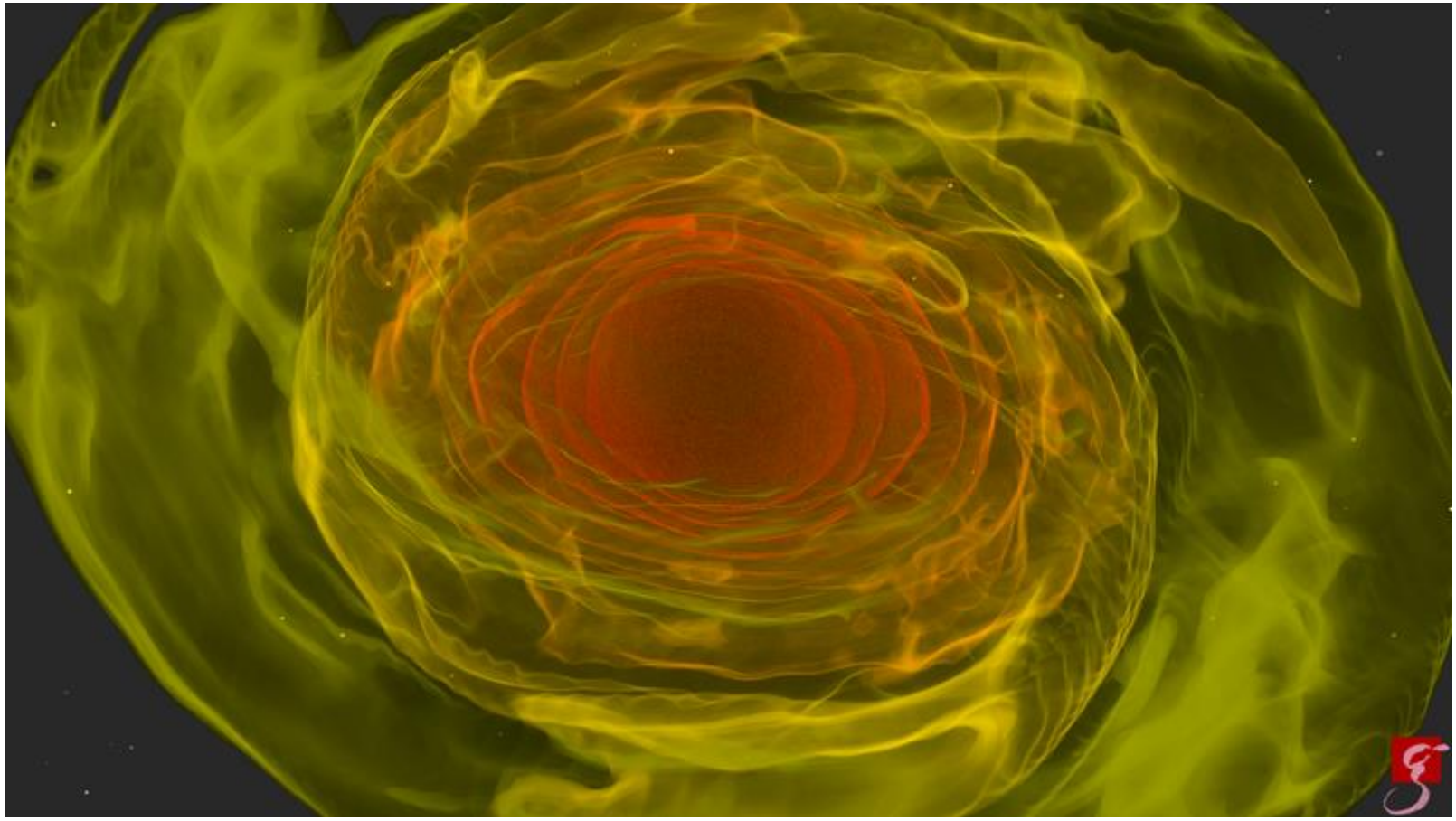
I 7 bilder vises simulering av to nøytronstjerners bevegelse mot hverandre og deres kollisjon.

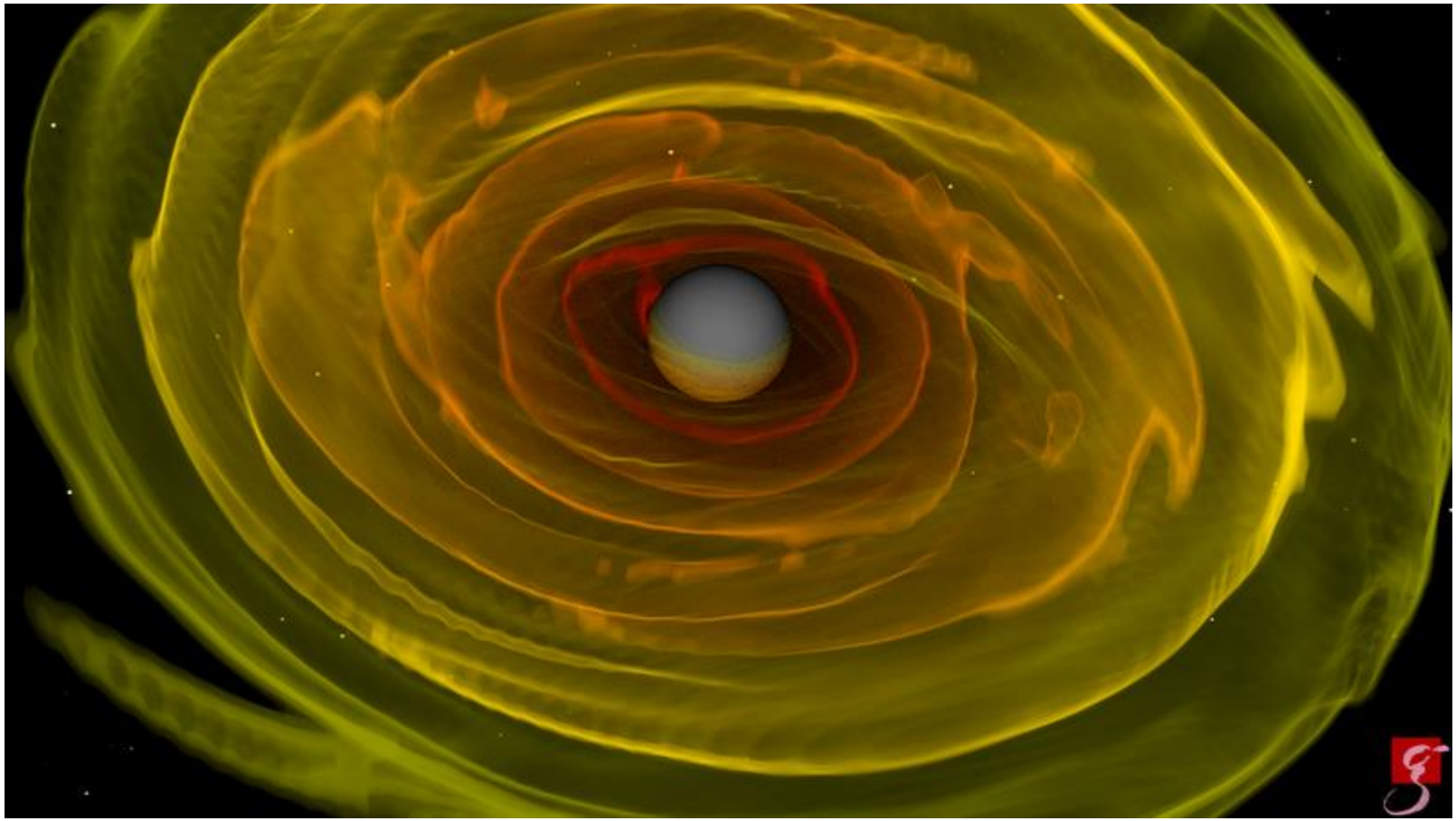
© T. Dietrich, S. Ossokine, H. Pfeiffer, A. Buonanno (Max Planck Institute for Gravitational Physics), BAM collaboration



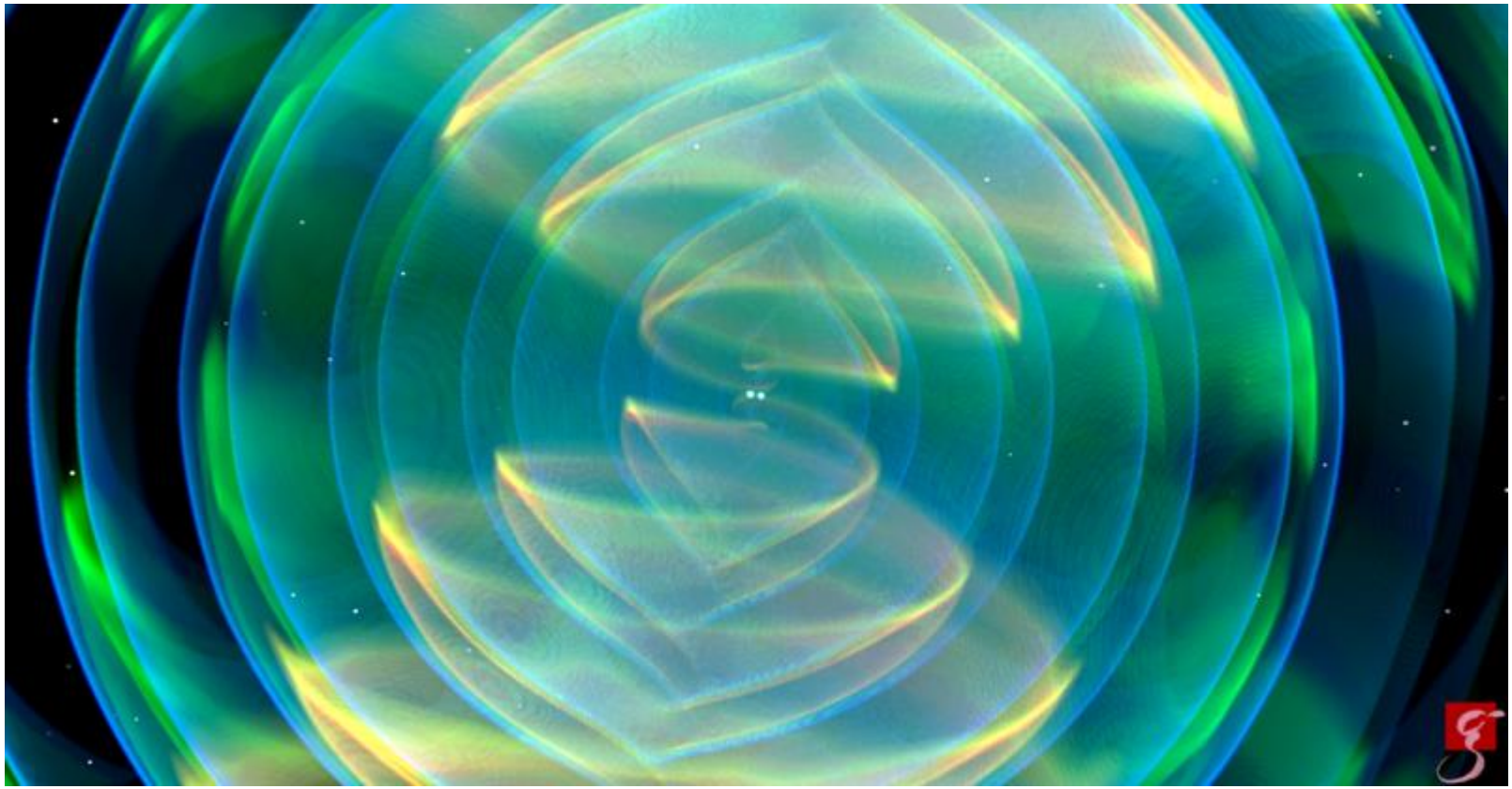




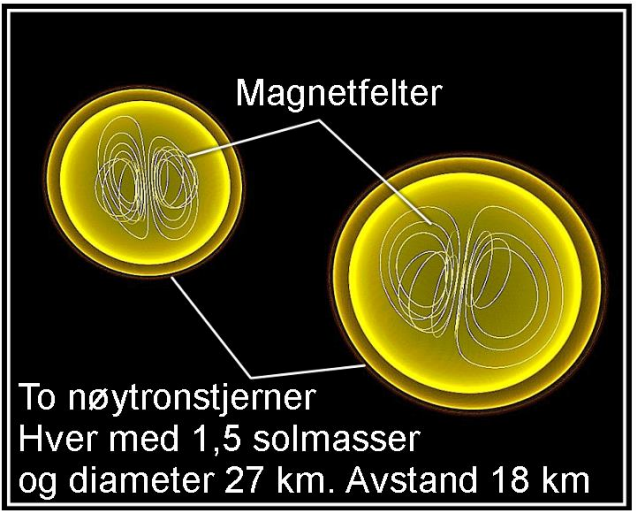




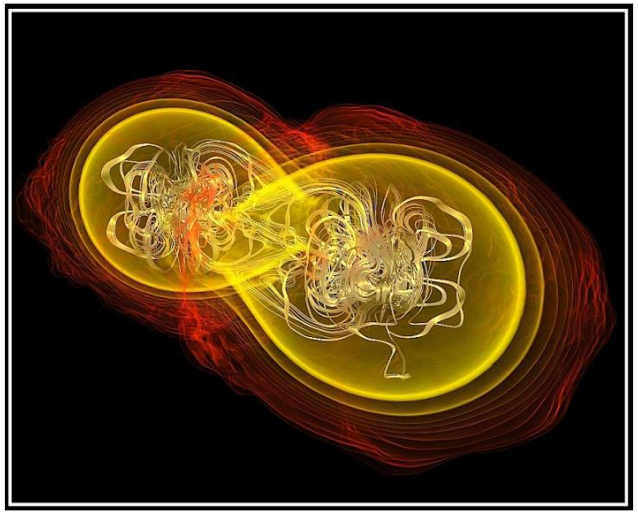
Det dannes et svart hull i sentrum



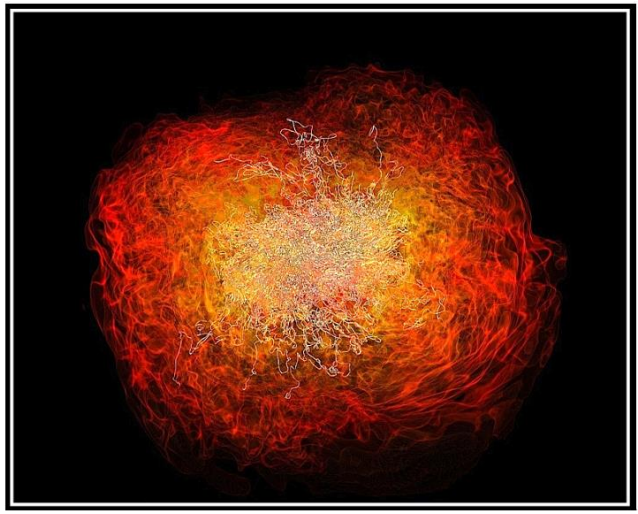
Utstråling av gravitasjonsbølger fra kollisjonen.



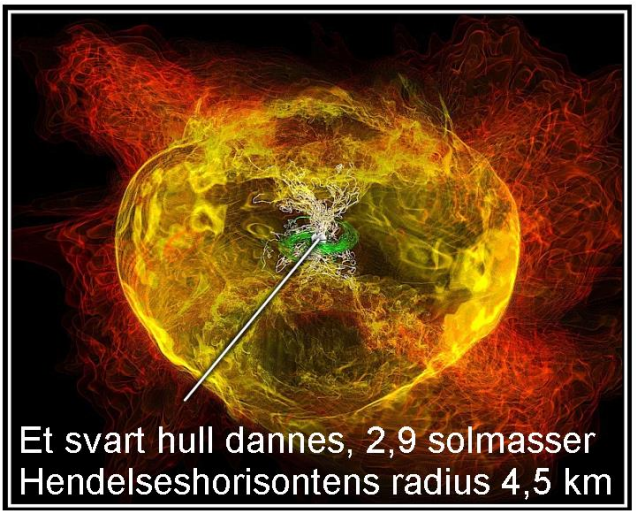
Valgt start-tidspunkt for simuleringen



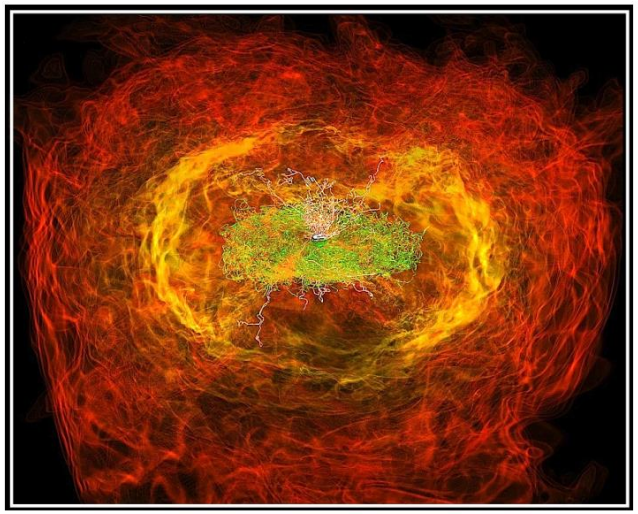
Etter 7,4 millisekunder



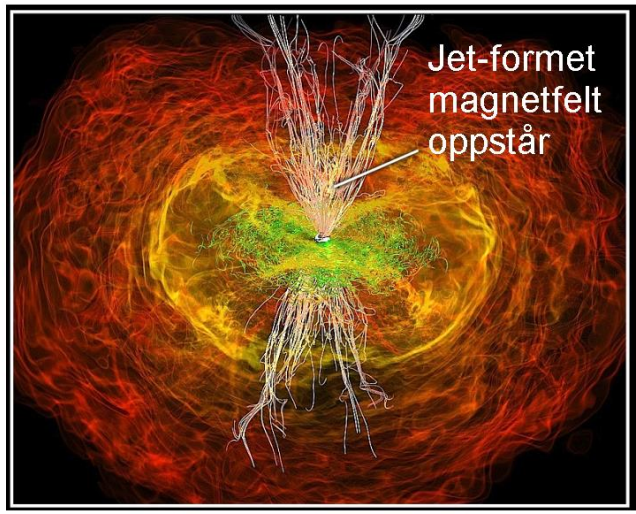
Etter 13,8 millisekunder



Etter 15,3 millisekunder



Etter 21,2 millisekunder



Etter 26,5 millisekunder

Resultat av en annen simulering av kollisjon mellom to nøytronstjerner.

Hvor store er nøytronstjerner?

De nye observasjonene har blant annet vært brukt til å studere hvor store nøytronstjerner er.

Forskerne fant ut at en ikke-roterende nøytronstjerne med 1,4 solmasser har en radius på mellom 11,2 og 13,4 km.

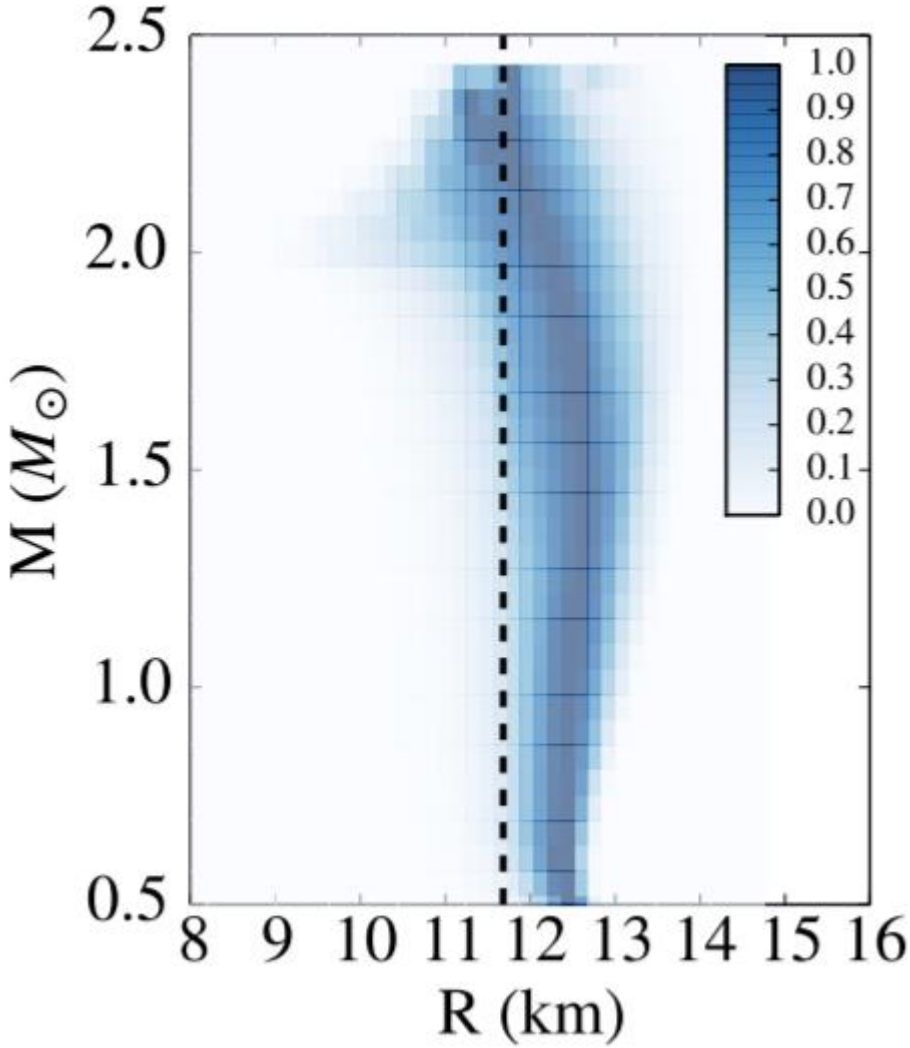
Hvis en ikke-roterende nøytronstjerne får større masse enn 2,16 solmasser, vil den falle sammen til et svart hull.

Rotasjonen gjør nøytronstjernen mer stabil slik at den kan ha større masse før den kollapser til et svart hull. En hurtig roterende nøytronstjerne kan ha opp til 2,6 solmasser.

TIDAL DEFORMABILITY FROM GW170817 AS A DIRECT PROBE OF THE NEUTRON STAR RADIUS

Carolyn A. Raithel, Feryal Özel, & Dimitrios Psaltis
Department of Astronomy and Steward Observatory, University of Arizona, 933 N. Cherry Avenue, Tucson, Arizona 85721, USA

Draft version March 22, 2018



Ble det dannet et svart hull?

Den totale massen til de to nøytronstjernene som kolliderte,
ble bestemt til å være 2,74 solmasser.

Det er estimert at bare mellom 1 og 3 prosent av en solmasse ble sendt
ut under kollisjonen som forårsaket gammaglimtet SGRB 170817A.
Det betyr at objektet som ble dannet under kollisjonen
hadde over 2,7 solmasser.

Dette tyder på at objektet som ble dannet ved kollisjonen,
kollapset til et svart hull.

LIGO-dataene viste at det ble dannet et legeme med 2,7 solmasser etter kollisjonen av to nøytronstjerner. Dette er en tiendedels solmasse over stabilitetsgrensen for nøytronstjerner. Men denne grensen avhenger av egenskapene til nøytronstjernematerialet. Kanskje kan det eksistere nøytronstjerner med 2,7 solmasser.

Objektet som ble dannet ved kollisjonen er enten den tyngste nøytronstjernen man vet om eller det letteste svarte hullet. (Den tidligere rekordholderen har godt og vel 4 solmasser.)

Dersom kollisjonen produserte en nøytronstjerne, viser simuleringer at den vil rotere uhyre raskt – flere hundre ganger i sekundet – og generere et enormt kraftig magnetfelt. En slik nøytronstjerne kalles en *magnetar*.

Ifølge analysen i en artikkel publisert tyder gravitasjonsbølgesignalet etter maksimum på at det opprinnelig *ble* dannet en magnetar, men at den var ustabil og hadde en levetid på bare litt over 5 sekunder. Så kollapset den til et svart hull.

Observational evidence for extended emission to GW170817

Maurice H P M van Putten, Massimo Della Valle
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters.
Published: 4. September 2018

We present observational evidence for a descending chirp for the first five seconds post-merger to GW170817.

It potentially indicates a magnetar as the central engine of GRB170817A.

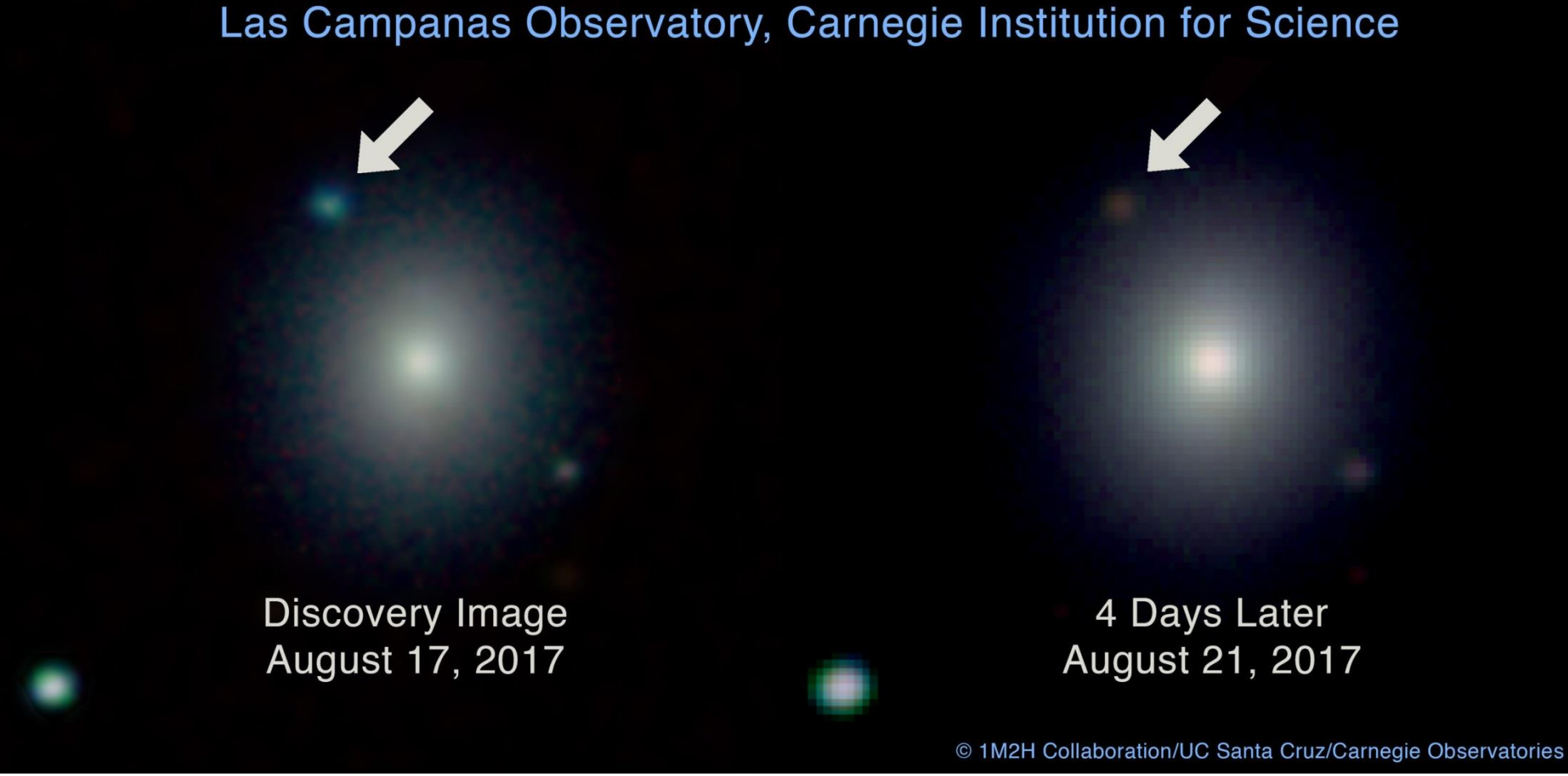
The ultimate fate of the magnetar is uncertain, whether it survives as a pulsar with a spin frequency of 49 Hz or collapses to a black hole at a later stage.

The physical mechanism by which the magnetar is protected against prompt collapse is not well understood, but lifetimes of 10 s such as observed here have been anticipated for proto-magnetars.

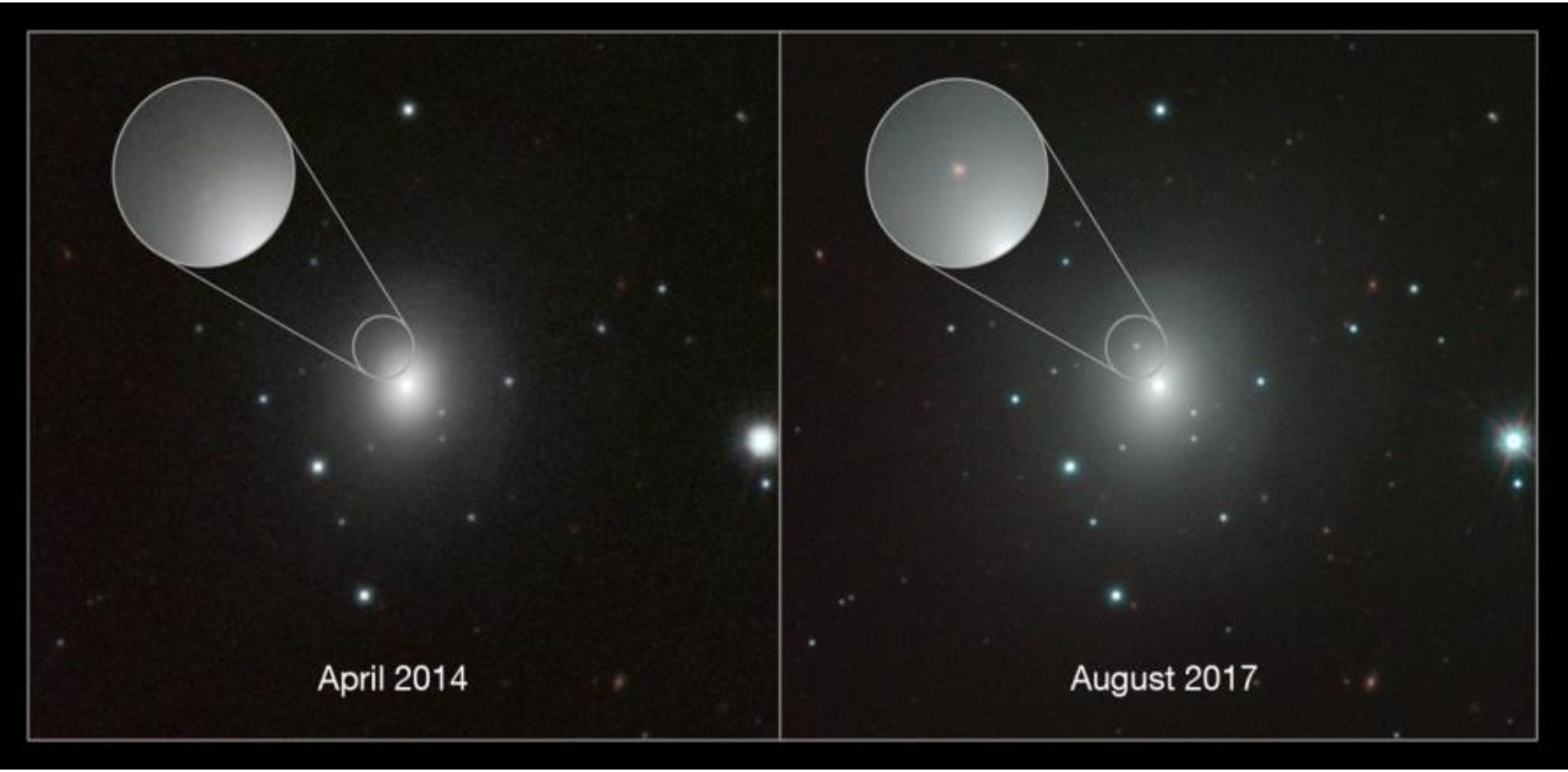
Ettergløden og dens modergalakse

Elleve timer etter at gravitasjonsbølgen GW170817
og gammaglimtet SGRB 170817A ble registrert,
kom området på himmelen som signalene kom fra,
til syne på jordas sydlige halvkule
der mange av de største teleskopene befinner seg.

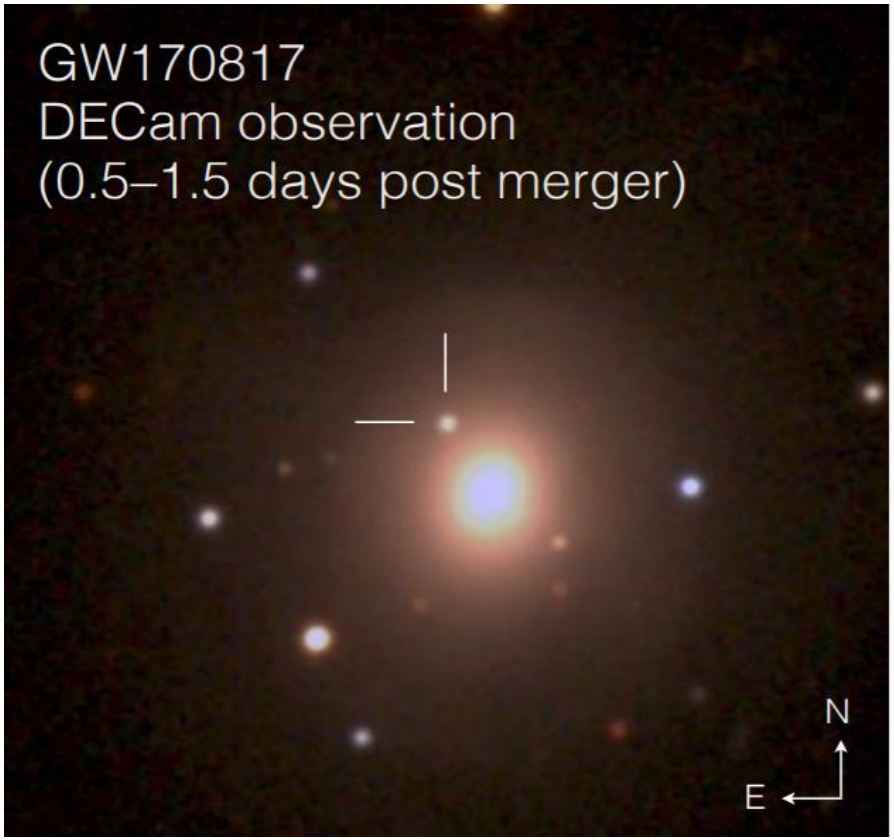
Nesten umiddelbart oppdaget da Swope Supernova Survey (SSS)
en såkalt *optisk transient*, dvs. et flyktig objekt på himmelen
i den synlige delen av det elektromagnetiske spekteret.

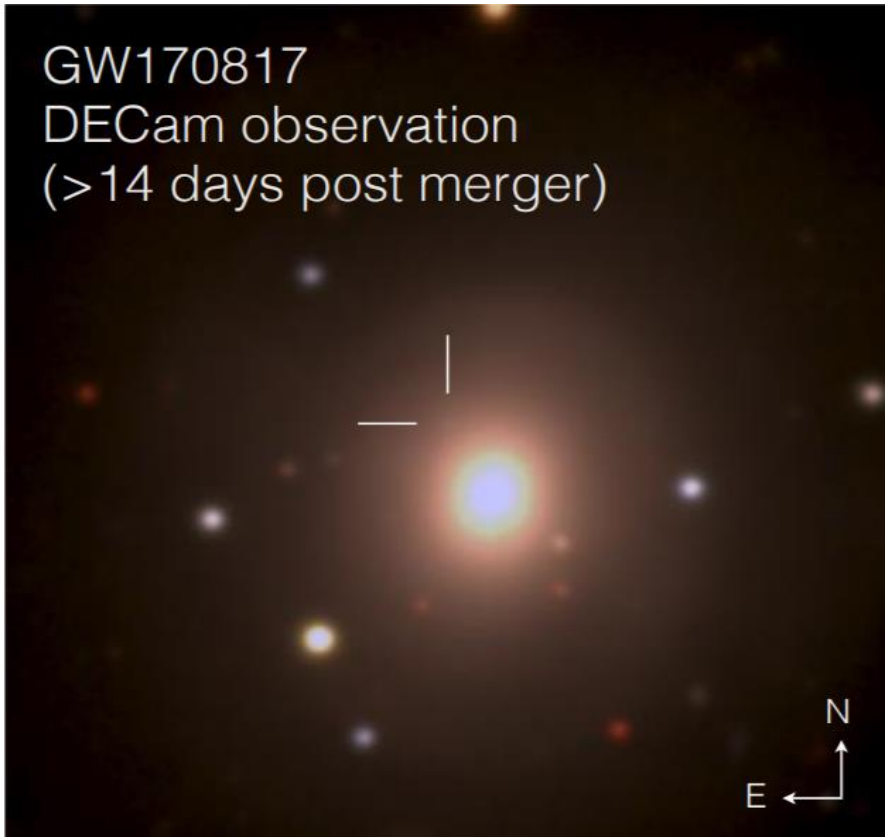


Den optiske kilden, SSS17a, som gravitasjonsbølgen GW170807 kom fra, fotografert med SWOPE og Magellan-teleskopene 11 timer etter at gammaglimtet fra nøytronstjernekollisjonen ankom jorda (til venstre) og 4 døgn etter (til høyre).
Det venstre fotografiet er oppdagerbildet av den optiske etterglødden. Den var blå i starten, ble raskt rødere og ble borte i løpet av en uke.

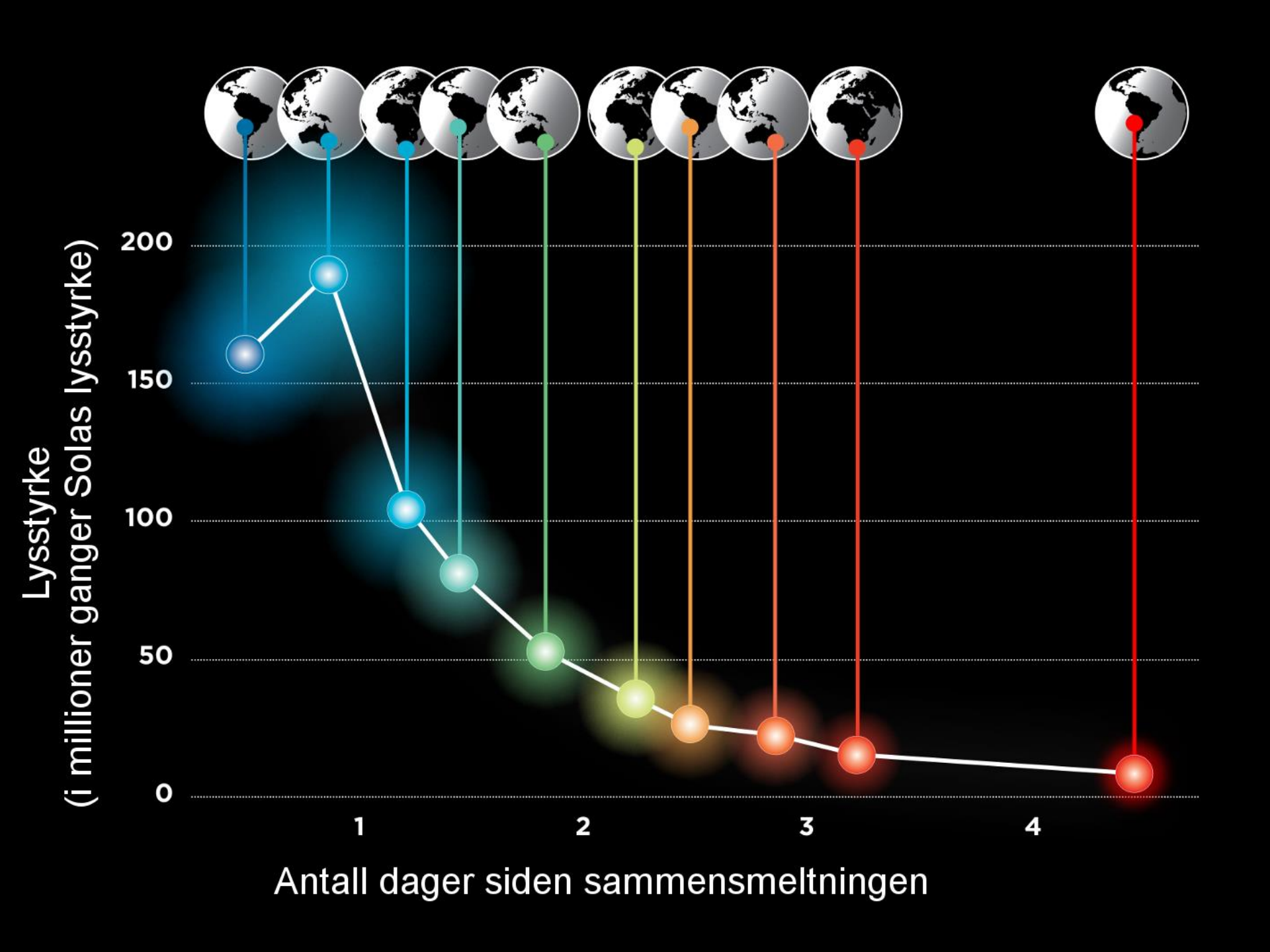


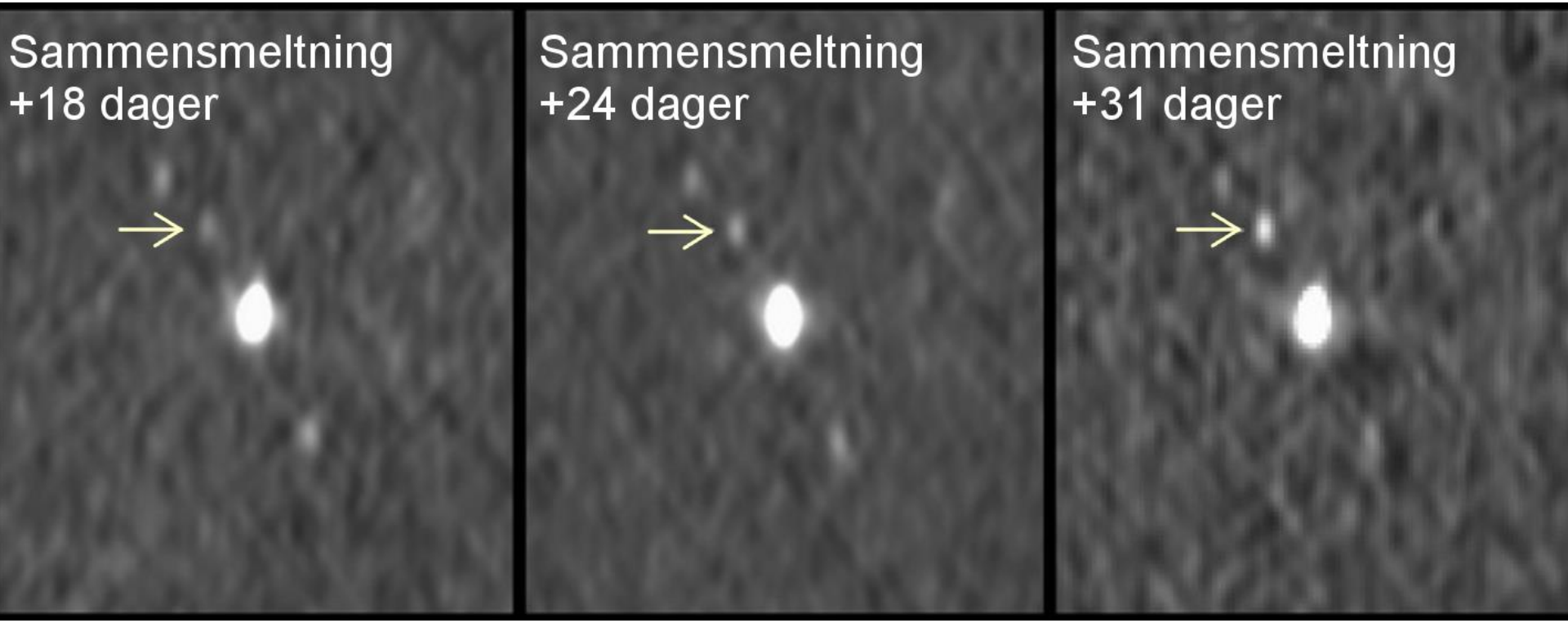
En optisk kilde som kom til syne i galaksen NGC 4993 et par dager etter gammaglimtet fotografert med et European Southern Observatory (ESO) teleskop.



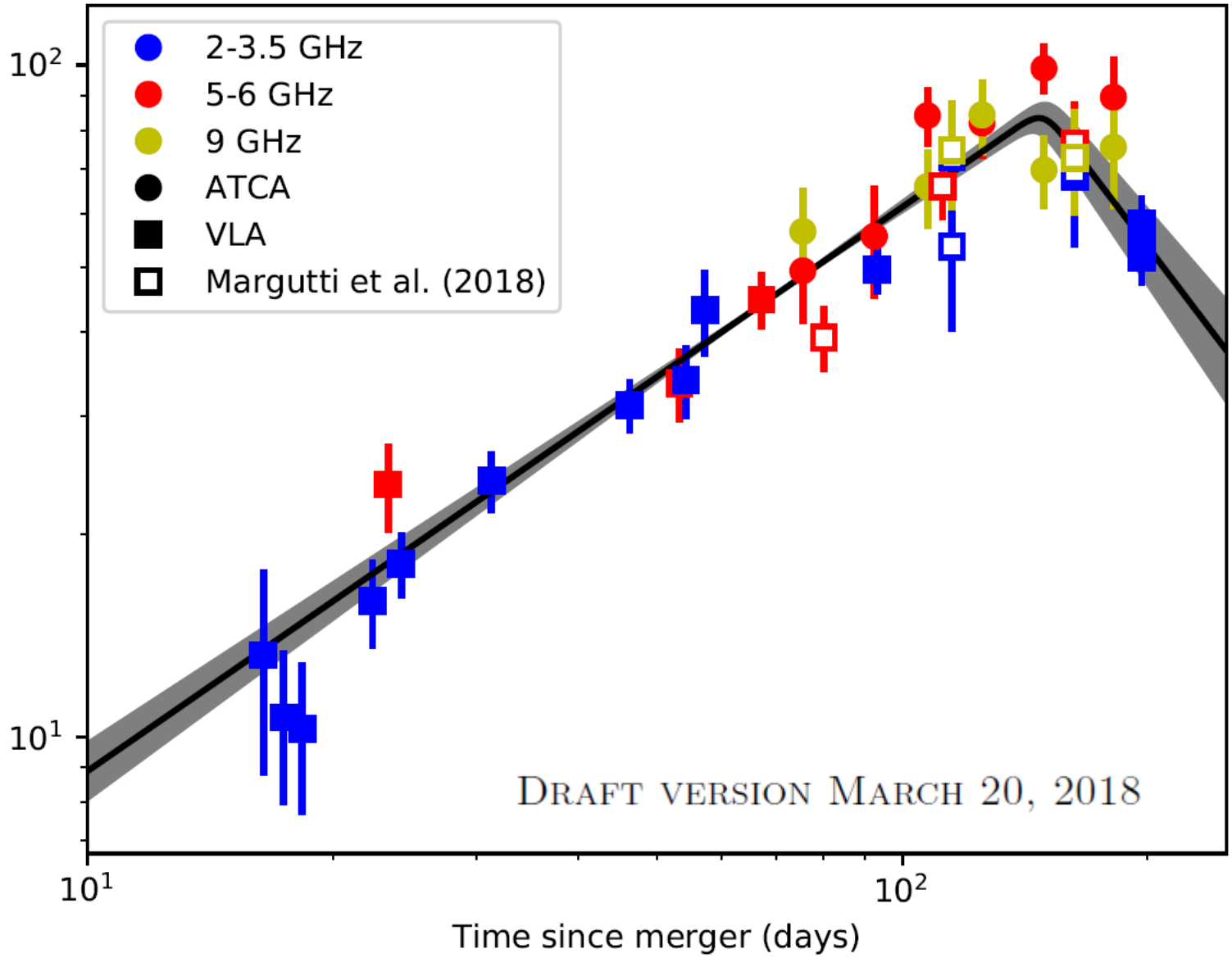


Den optiske kilden fotografert med Dark Energy Camera (DECam) ved Cerro Tololo Inter-American Observatory i Chile. Til venstre et sammensatt bilde av fotografier tatt et halvt døgn og halvannet døgn ettergammaglimtet, til høyre to uker senere.


Lysstyrke
(i millioner ganger Solas lysstyrke)
200
150
100
50
0
1
2
3
4
Antall dager siden sammensmeltningen

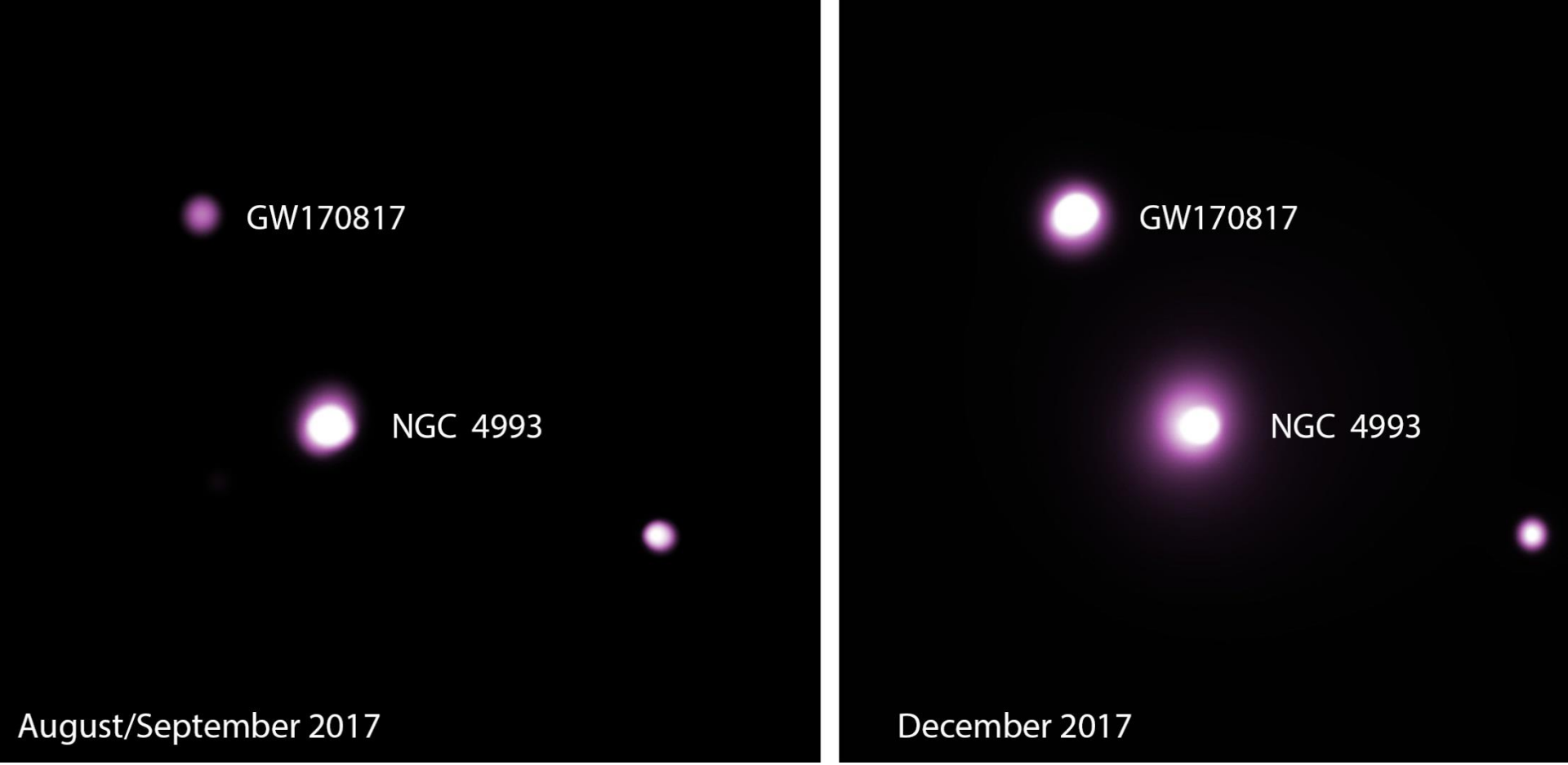


Kilden til gravitasjonsbølgen GW180817 kom til syne i radiodelen av det elektromagnetiske spekteret 16 dager etter registreringen av GW180817. Bildet viser radiokildens utvikling fra 18 dager etter kollisjonen av nøytronstjernene til 31 dager etter fotografert med NRAO-observatoriets Very Large Array radioteleskop.



A turnover in the radio lightcurve of GW170817

the radio afterglow peaked at 149 ± 2 days post-merger and is now declining in flux density.



Røntgen etterglød observert med Chandra romteleskopet.
Intensiteten har fortsatt å øke fire måneder etter nøytronstjernekollisjonen.
Det samme har radioettergløden.
Dette tyder på at radio- og røntgenettergløden har samme kilde.

Kilonova

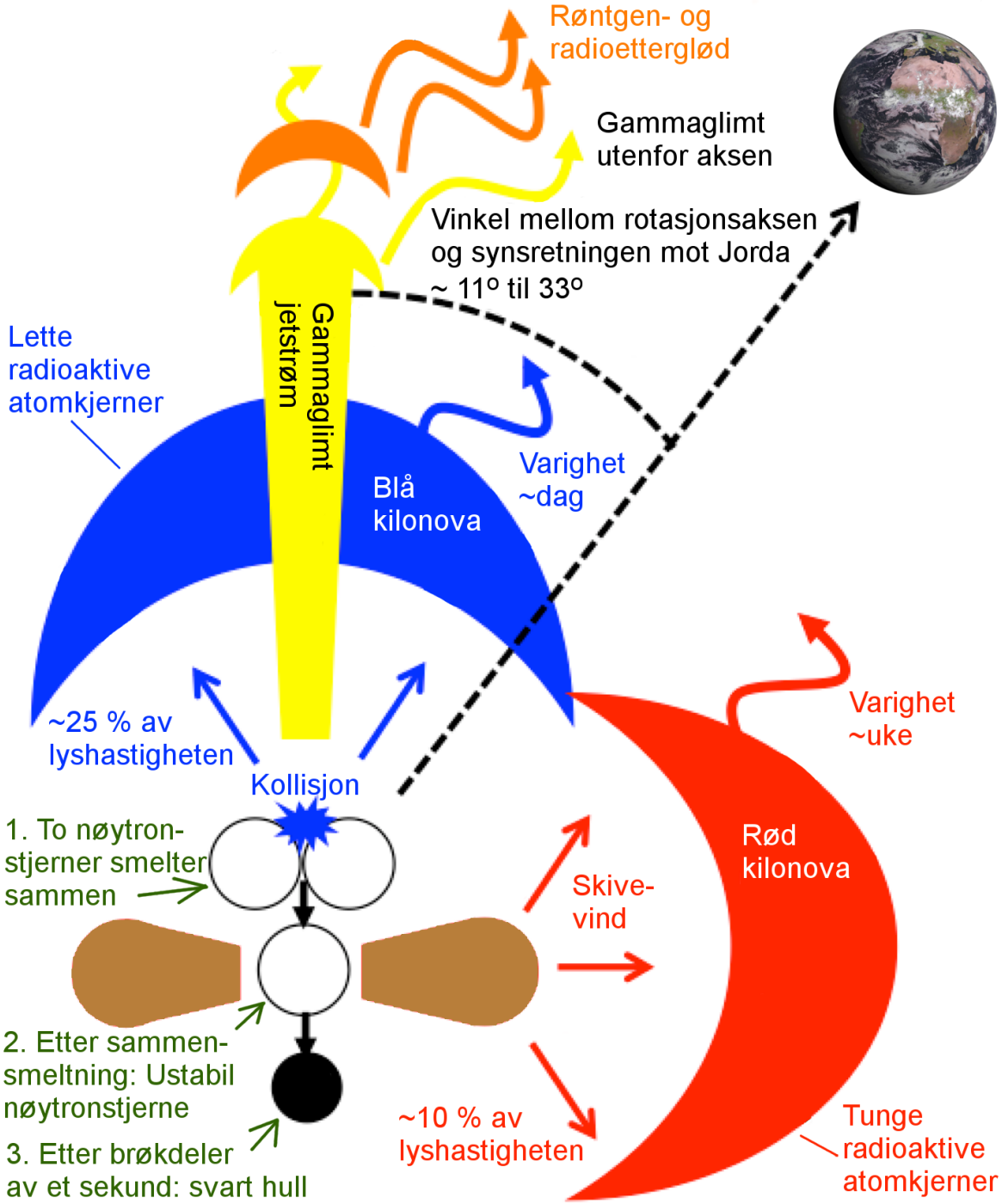
En nova kan ha opp til omtrent hundre tusen ganger større luminositet enn sola. Men etterglødden til gammaglimtet SGRB 170817A hadde på det sterkeste nesten to tusen ganger større enn for en typisk nova.

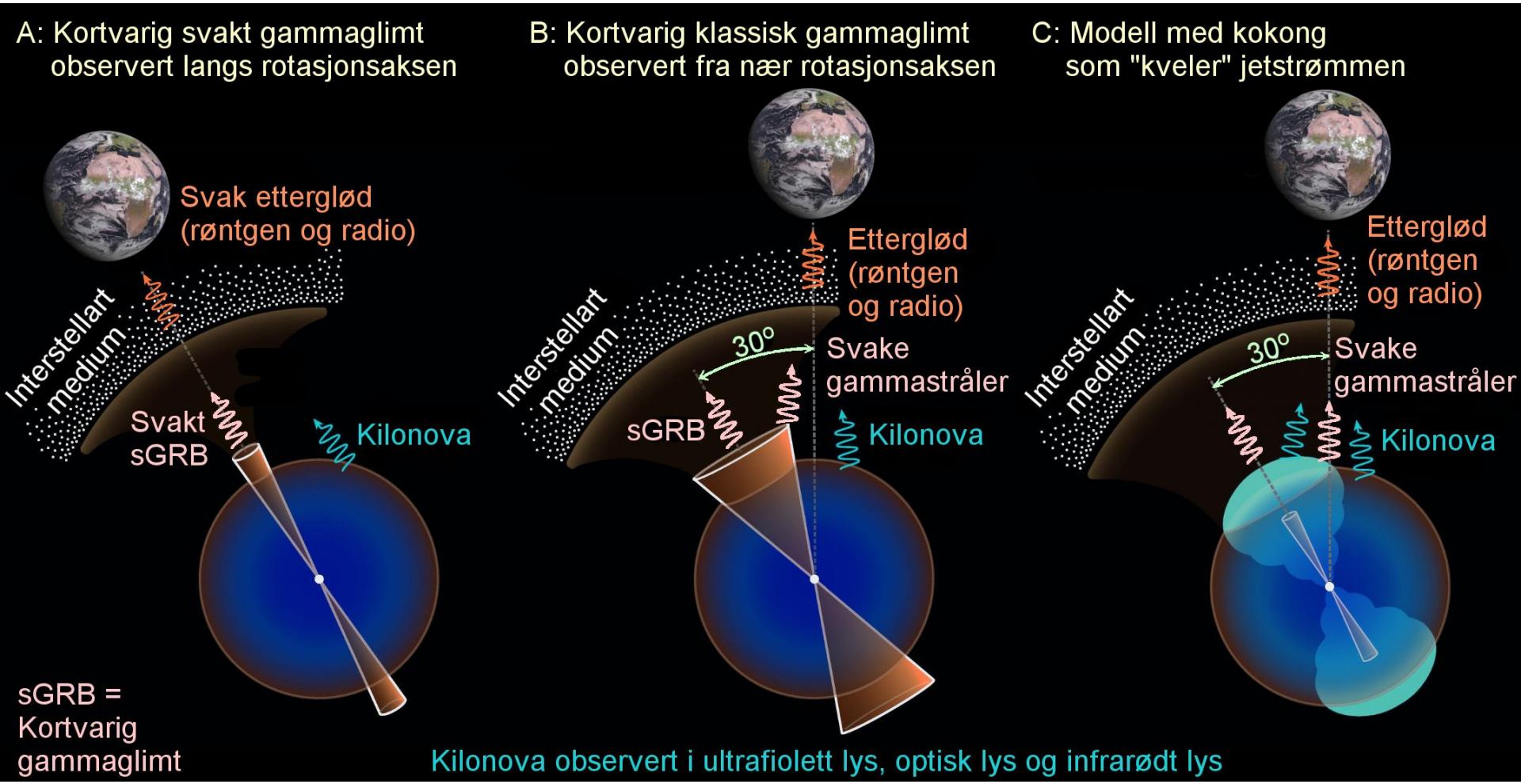
En *kilonova* er et optisk fenomen som kan observeres like etter at to nøytronstjerner eller en nøytronstjerne og et svart hull har kollidert og sendt ut gravitasjonsbølger og et gammaglimt.
Da dannes radioaktive isotoper som sender ut elektromagnetisk stråling når de henfaller til andre isotoper med mindre atomkjerne-energi.
Atomenergi omdannes til elektromagnetisk stråling.
Betegnelsen 'kilonova' ble innført i 2010 av B. D. Metzger og medarbeidere for å karakterisere den maksimale luminositeten til slike objekter som kan være tusen ganger større enn for vanlige novaer.

En supernova kan lyse omtrent hundre ganger sterkere enn en kilonova.

Kilonovaen AT2017gfo

Denne kilonovaen hadde to komponenter.
En blå kilonova ble først observert.
Den dominerte første dag etter registreringen av gammaglimtet,
og hadde en gjennomsnittlig luminositet $5 \cdot 10^{34}$ W.
Det er hundre millioner ganger luminositeten til Sola.
I løpet av denne fasen ble rundt 1/100 av en solmasse sendt ut
på grunn av kollisjonen av nøytronstjernene, i form av
et plasma som beveget seg utover med en hastighet 0,27c.
Neste uke dominerte en rød kilonova.
Den hadde en gjennomsnittlig luminositet $5 \cdot 10^{33}$ W.
I denne fasen ble rundt 4/100 av en solmasse sendt ut.
Den beveget seg utover med en hastighet 0,12c.


Røntgen- og
radioetterglød
Gammaglimt
utenfor aksen
Vinkel mellom rotasjonsaksen
og synsretningen mot Jorda
~ 11° til 33°
Gammaglimt
jetstrøm
Lette
radioaktive
atomkjerner
Blå
kilonova
Varighet
~dag
~25 % av
lyshastigheten
Kollisjon
Varighet
~uke
1. To nøytron-
stjerner smelter
sammen
Rød
kilonova
Skive-
vind
2. Etter sammen-
smeltning: Ustabil
nøytronstjerne
3. Etter brøkdeler
av et sekund: svart hull
~10 % av
lyshastigheten
Tunge
radioaktive
atomkjerner



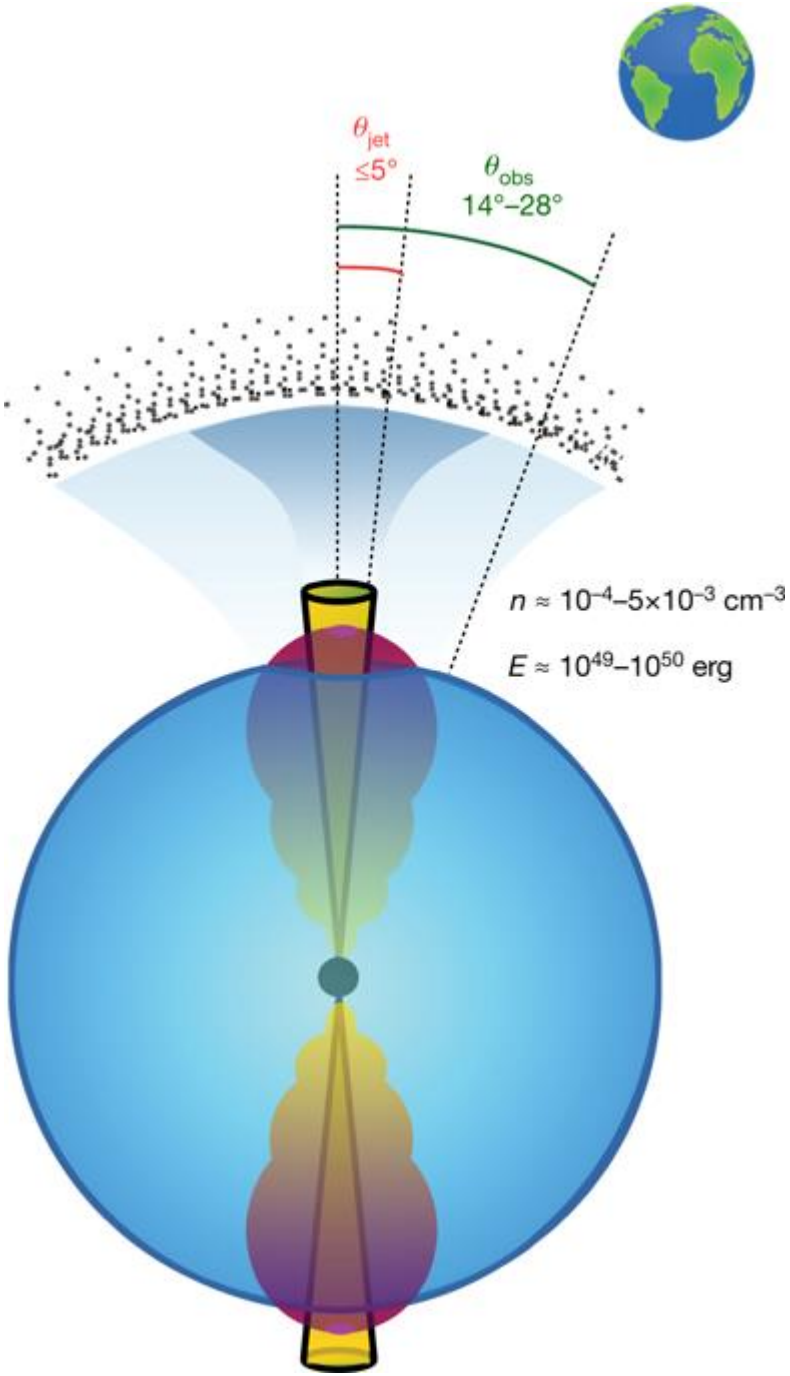
Tre modeller av kilden til en kilonova.

Published: 05 September 2018

Superluminal motion of a relativistic jet in the neutron-star merger GW170817

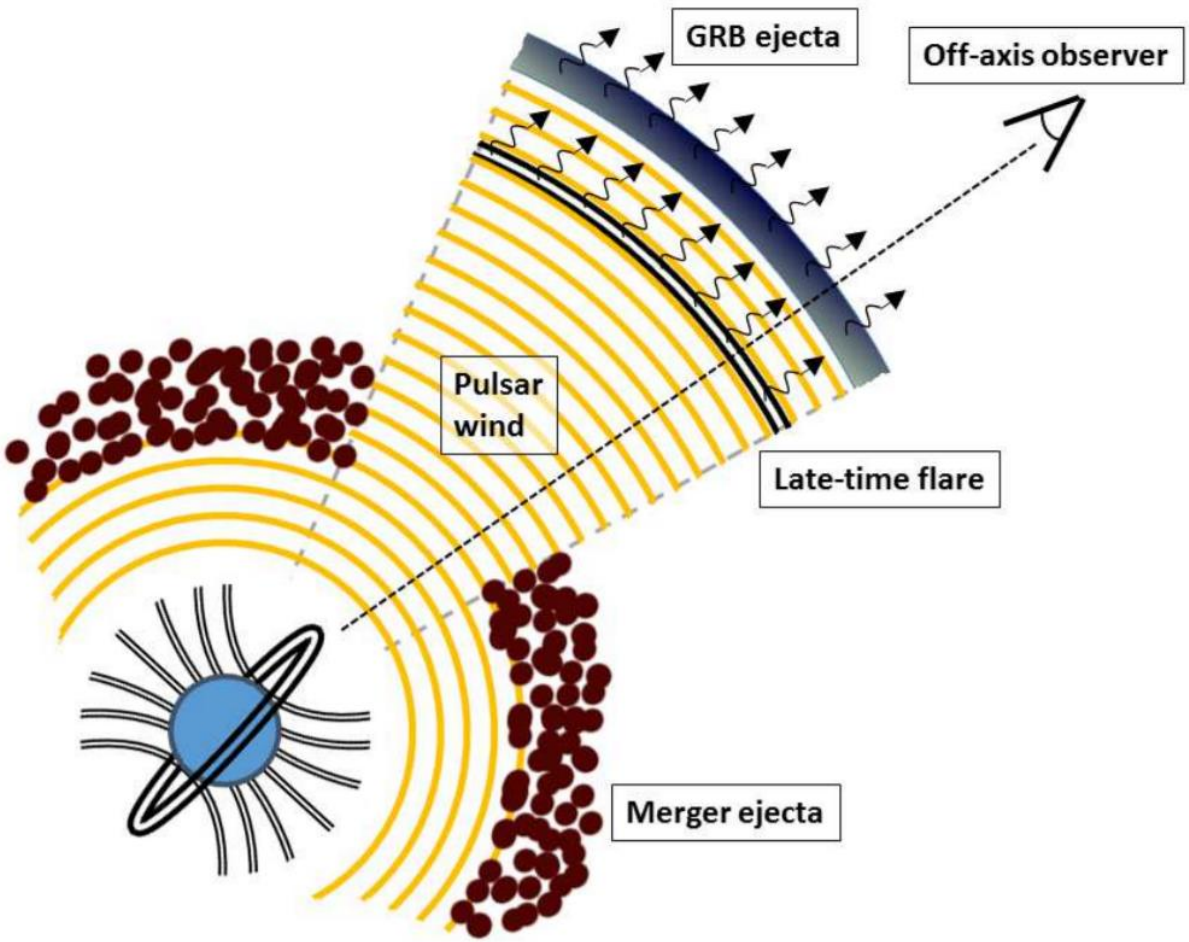
K. P. Mooley, et al.

Nature (2018)



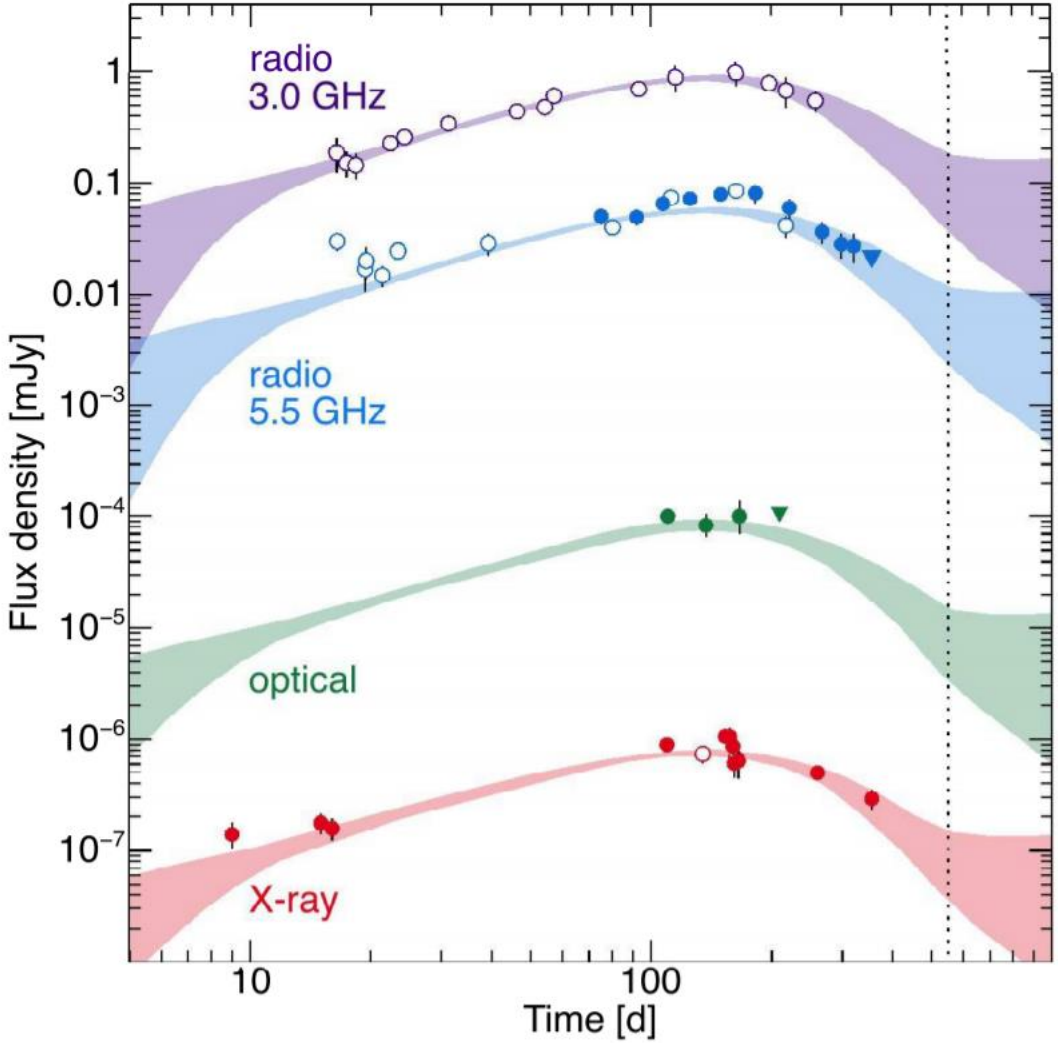
MNRAS 000, 1–10 (2018) Preprint 11 October 2018 Compiled using MNRAS LATEX style file v3.0

A long-lived neutron star merger remnant in GW170817: constraints and clues from X-ray observations



Modell av kilden til etterglødeen. Den magnetiske aksen står vinkelrett på rotasjonsaksen.

Tidsavhengigheten til etterglødden i radio-området av spekteret, optisk stråling (lys) og røntgenstråling



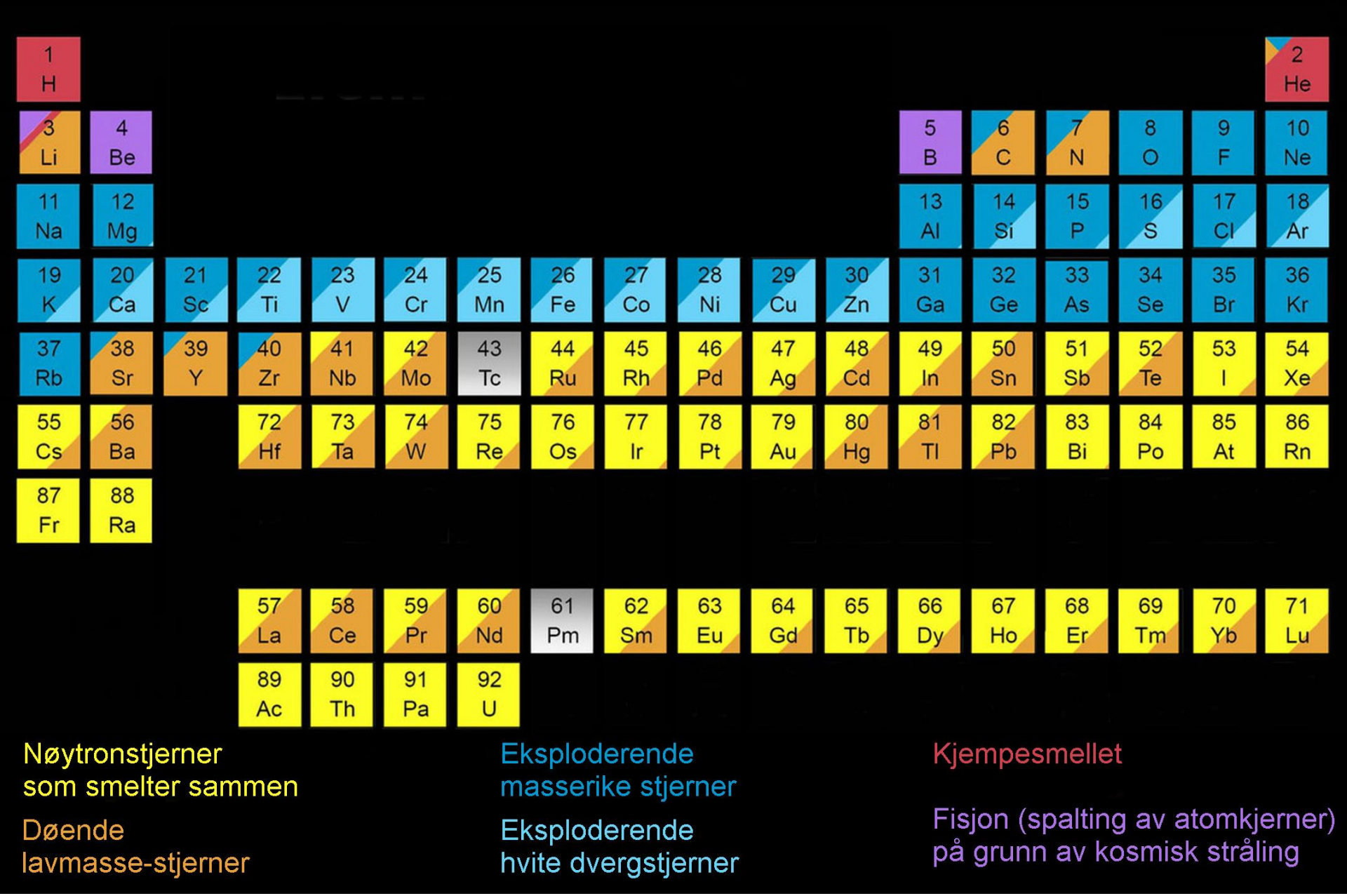
Produksjon av tunge grunnstoffer

De fleste grunnstoffene opp til nummer 37, Rubidium,
er blitt dannet i fusjonsprosesser i eksploderende stjerner, dvs. i
supernovaeksplosjoner eller i gamle stjerner med mindre masse
som dannet planetariske tåker og ble omformet til hvite dvergstjerner.

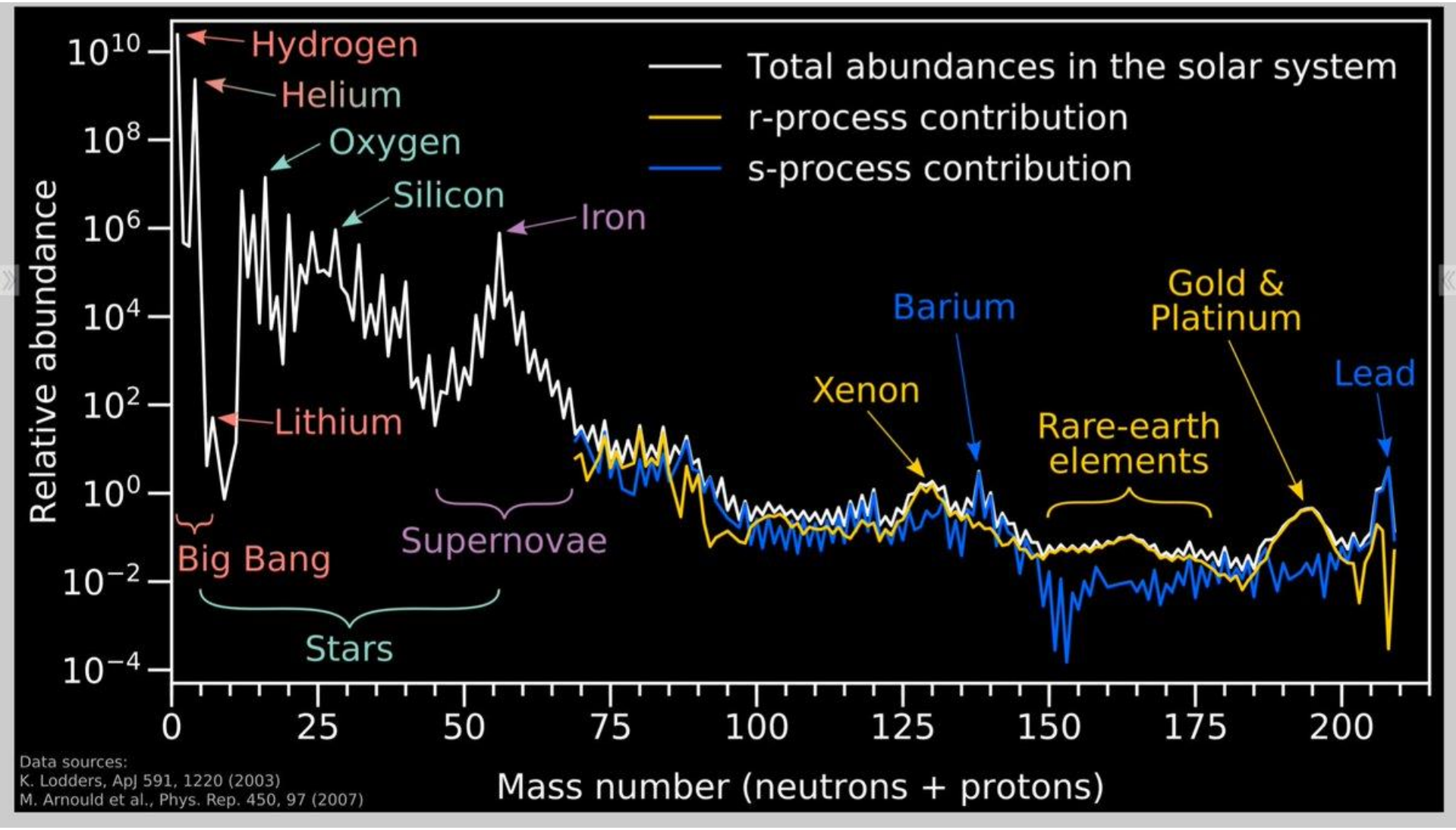
De tyngre grunnstoffene ble ikke dannet i fusjonsprosesser,
men ved innfangning av nøytroner med påfølgende radioaktiv
betastråling, dels i kolliderende nøytronstjerner og dels i gamle stjerner.

Dannelse av tunge grunnstoffer ved nøytronfanging

Når en atomkjerne fanger inn et nøytron
dannes en ny isotop som er radioaktiv.
I en radioaktiv kjerne omdannes nøytroner til protoner og elektroner,
og elektronene sendes ut – radioaktiv betastråling.
Dermed får kjernene et ekstra proton,
og atomnummeret øker med én.
Slik kan tunge grunnstoffer dannes.

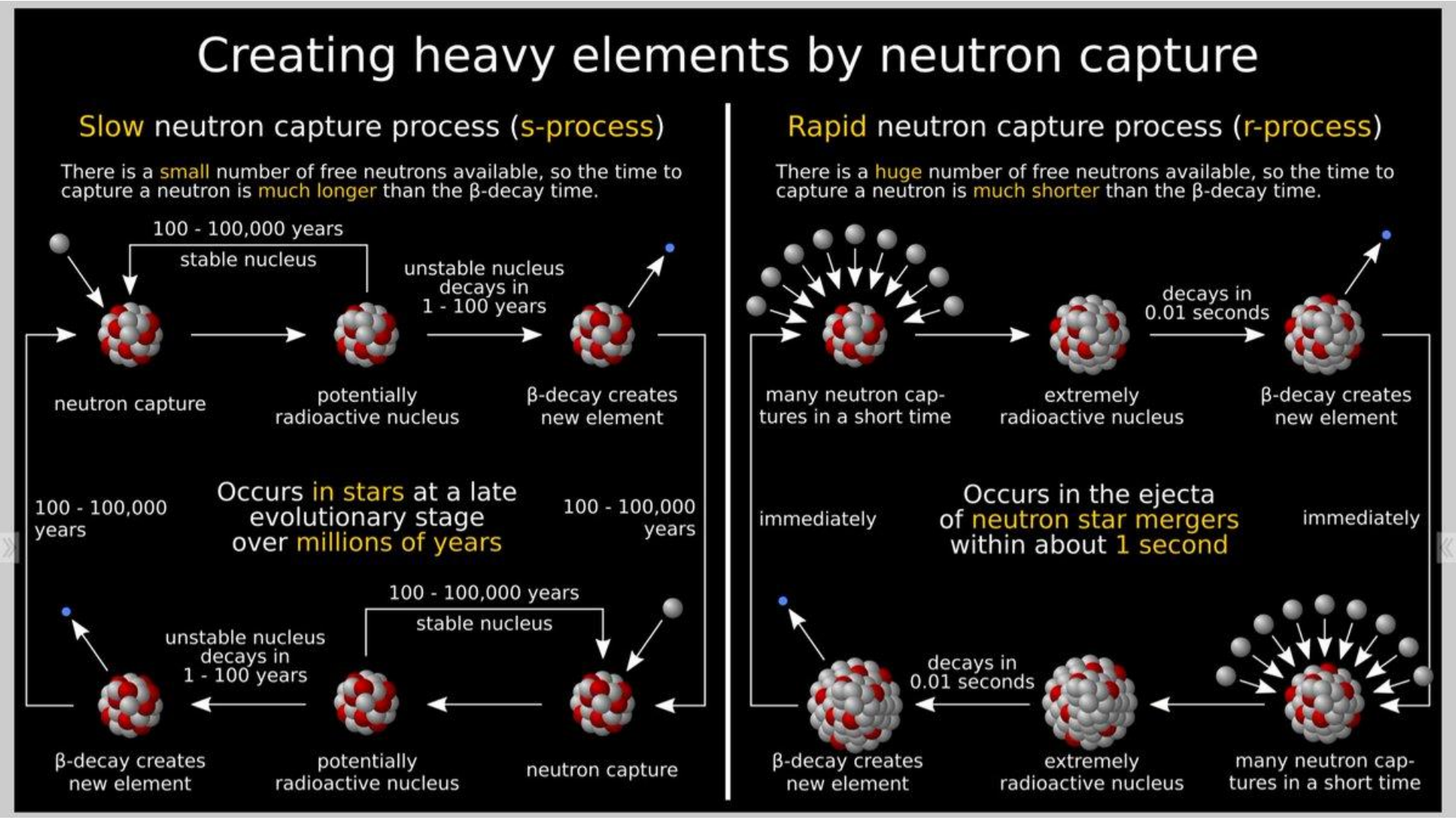


Hvordan forskjellige grunnstoffer er blitt dannet


Total abundances in the solar system
r-process contribution
s-process contribution
Hydrogen
Helium
Oxygen
Silicon
Iron
Lithium
Barium
Gold & Platinum
Lead
Xenon
Rare-earth elements
Big Bang
Supernovae
Stars
Relative abundance
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
10^{0}
10^{-2}
10^{-4}
0
25
50
75
100
125
150
175
200
Mass number (neutrons + protons)
Data sources:
K. Lodders, ApJ 591, 1220 (2003)
M. Arnould et al., Phys. Rep. 450, 97 (2007)

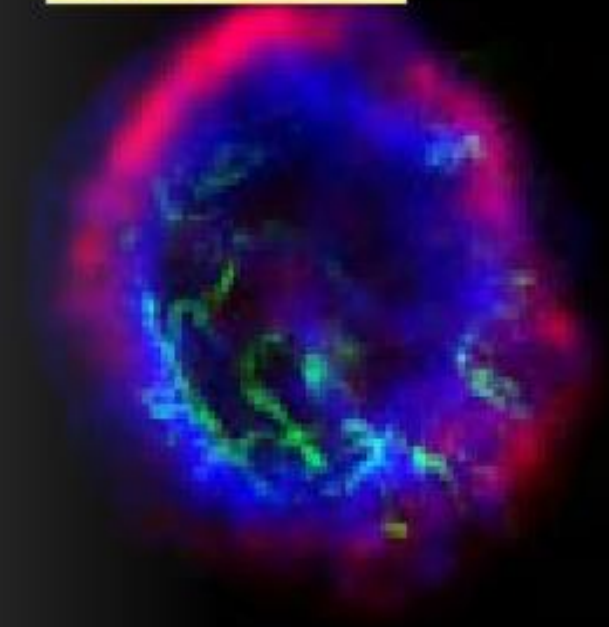
Dannelse av tunge grunnstoffer ved nøytronfanging

Når en atomkjerne fanger inn et nøytron dannes en ny isotop som er radioaktiv. I en radioaktiv kjerne omdannes nøytroner til protoner og elektroner, og elektronene sendes ut – radioaktiv betastråling. Dermed får kjernene et ekstra proton, og atomnummeret øker med én. Slik kan tunge grunnstoffer dannes.


Creating heavy elements by neutron capture
Slow neutron capture process (s-process)
There is a small number of free neutrons available, so the time to capture a neutron is much longer than the β-decay time.
100 - 100,000 years
stable nucleus
unstable nucleus decays in 1 - 100 years
neutron capture
potentially radioactive nucleus
β-decay creates new element
100 - 100,000 years
Occurs in stars at a late evolutionary stage over millions of years
100 - 100,000 years
100 - 100,000 years
stable nucleus
unstable nucleus decays in 1 - 100 years
β-decay creates new element
potentially radioactive nucleus
neutron capture
Rapid neutron capture process (r-process)
There is a huge number of free neutrons available, so the time to capture a neutron is much shorter than the β-decay time.
decays in 0.01 seconds
many neutron captures in a short time
extremely radioactive nucleus
β-decay creates new element
immediately
Occurs in the ejecta of neutron star mergers within about 1 second
immediately
decays in 0.01 seconds
β-decay creates new element
extremely radioactive nucleus
many neutron captures in a short time

r (apid neutron capture) process

Supernovae ?

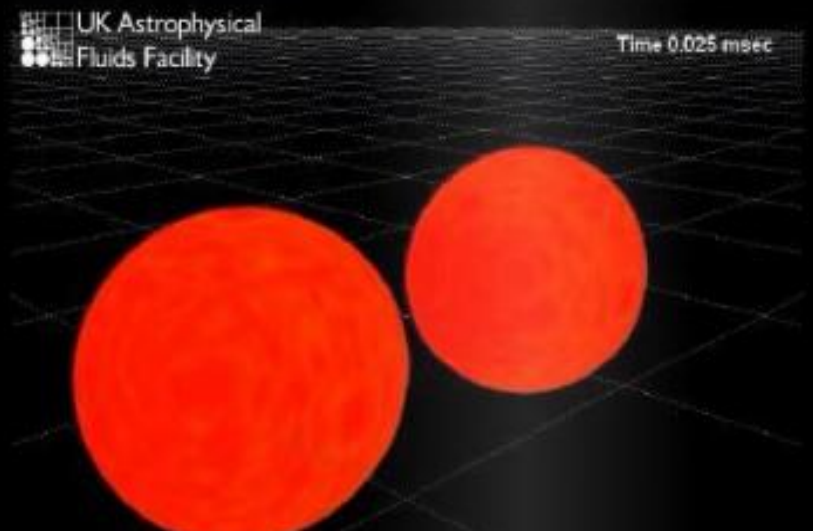


The origin of about half of elements > Fe (including Gold, Platinum, Silver, Uranium)

Open questions:

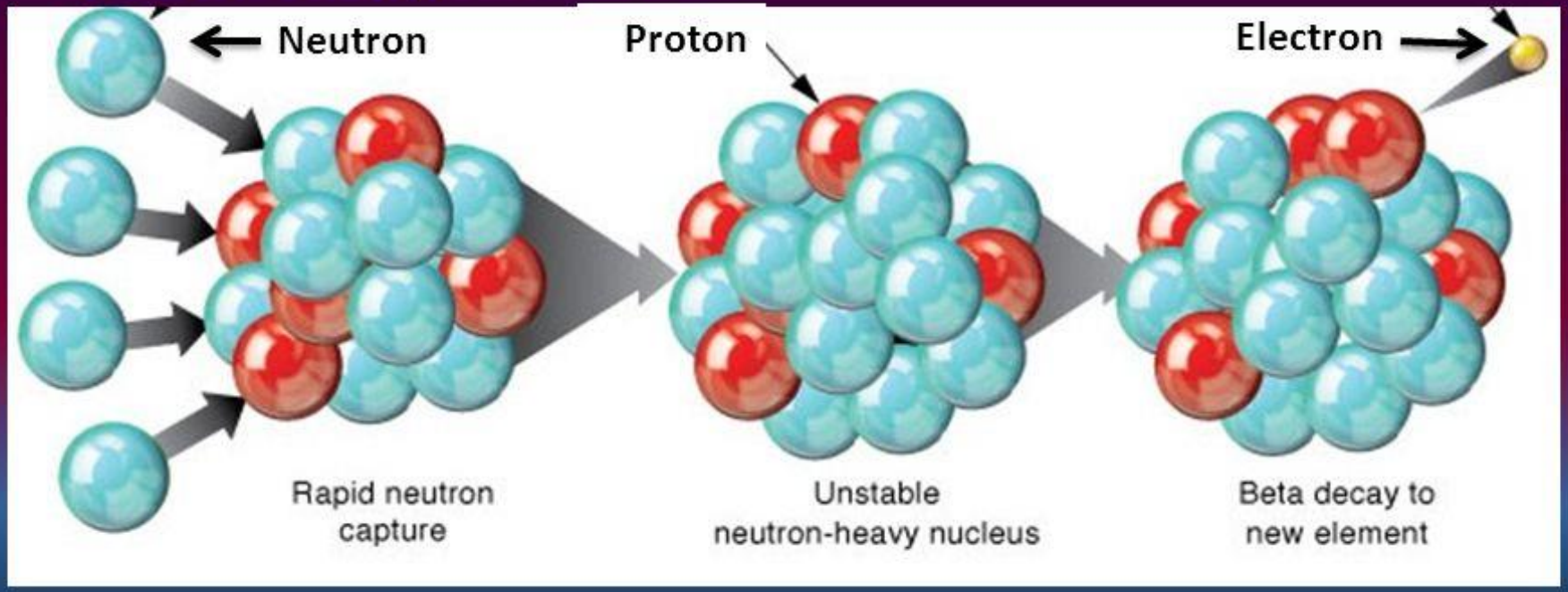
- Where does the r process occur ?
- What are the actual reaction sequences ?
- Are there multiple r-processes and what are their individual contributions ?
- What can the r-process tell us about the physics of extreme environments ?

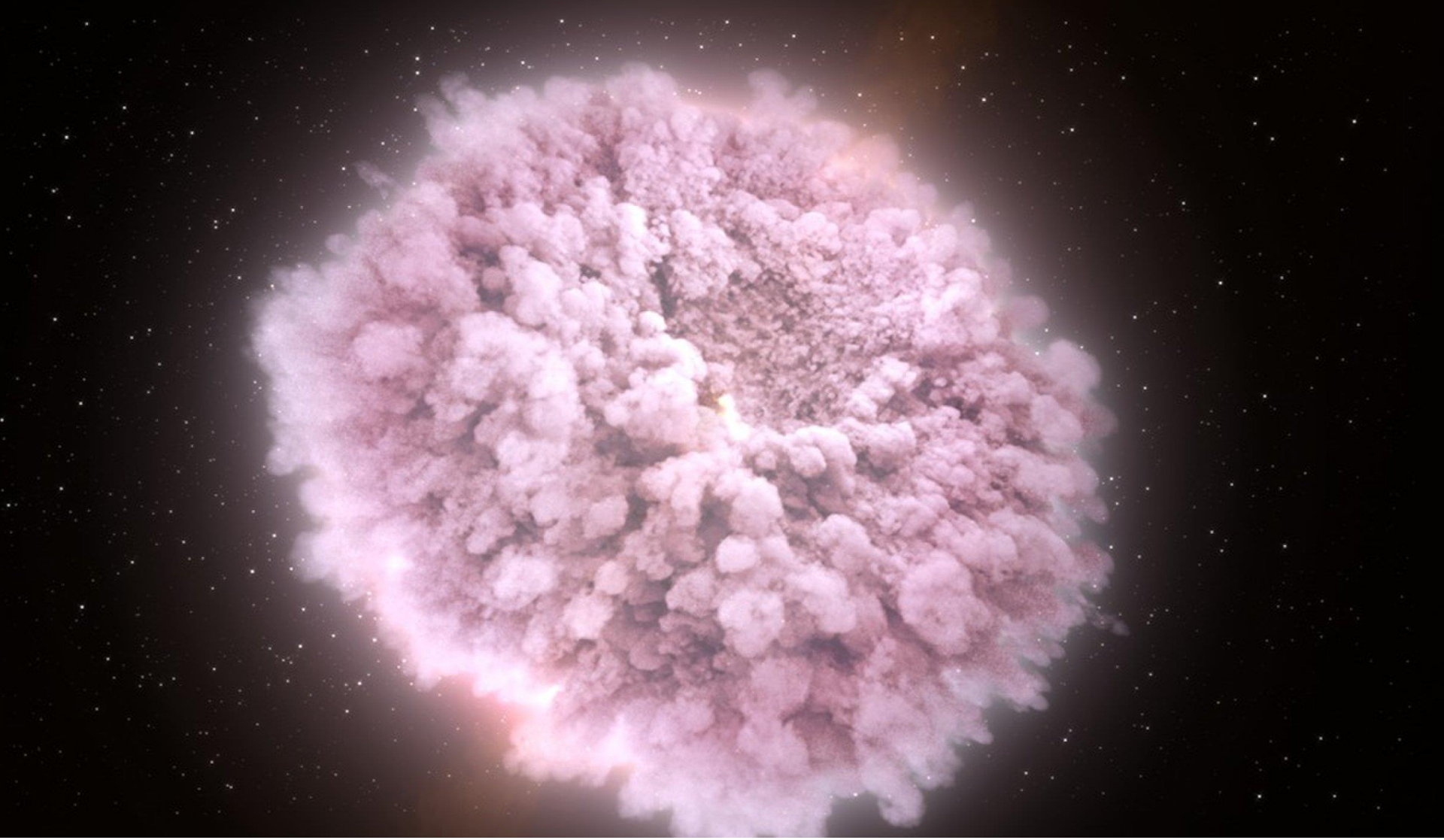
Neutron star mergers ?



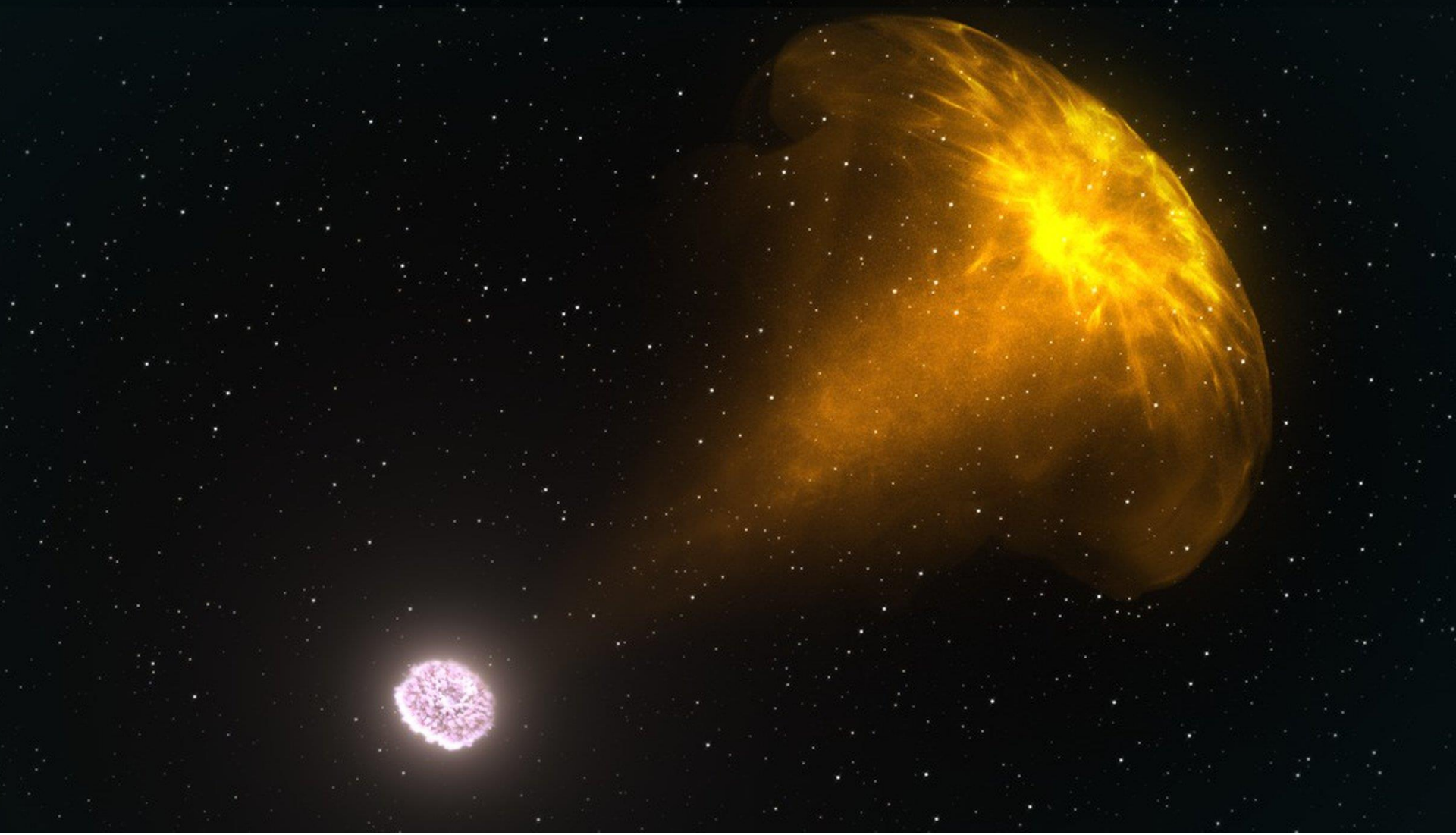
Neutron Capture Process

2) **"R" process neutron capture** occurs during a **supernova** - takes place in just a **few minutes**. So many neutrons are formed that **dozens** of **neutrons** may collide and join a **nucleus** before **beta decay** can occur.





Simulering som viser starten av en prosess der materie sendes ut i rommet ved en kollisjon av to nøytronstjerner

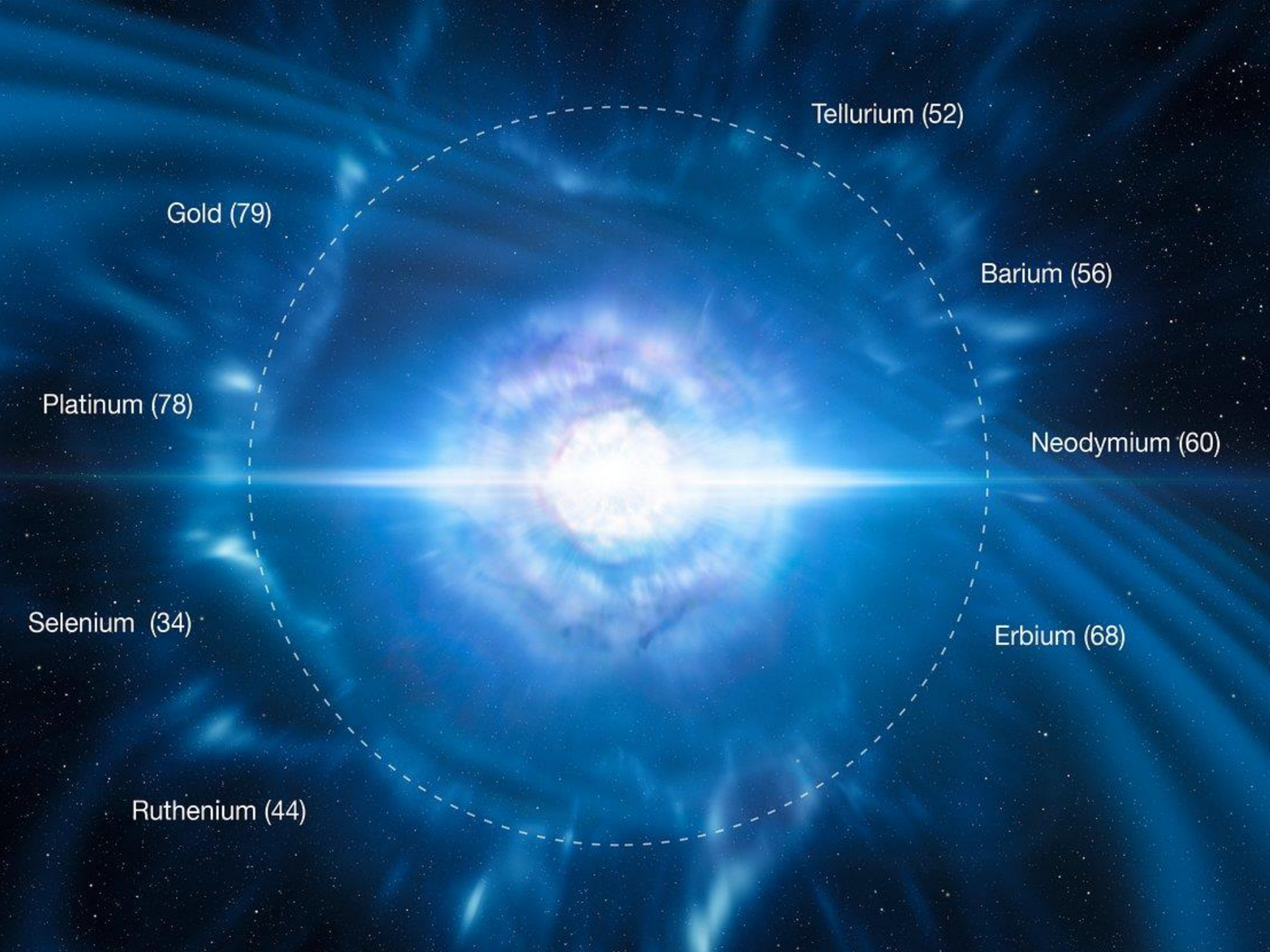


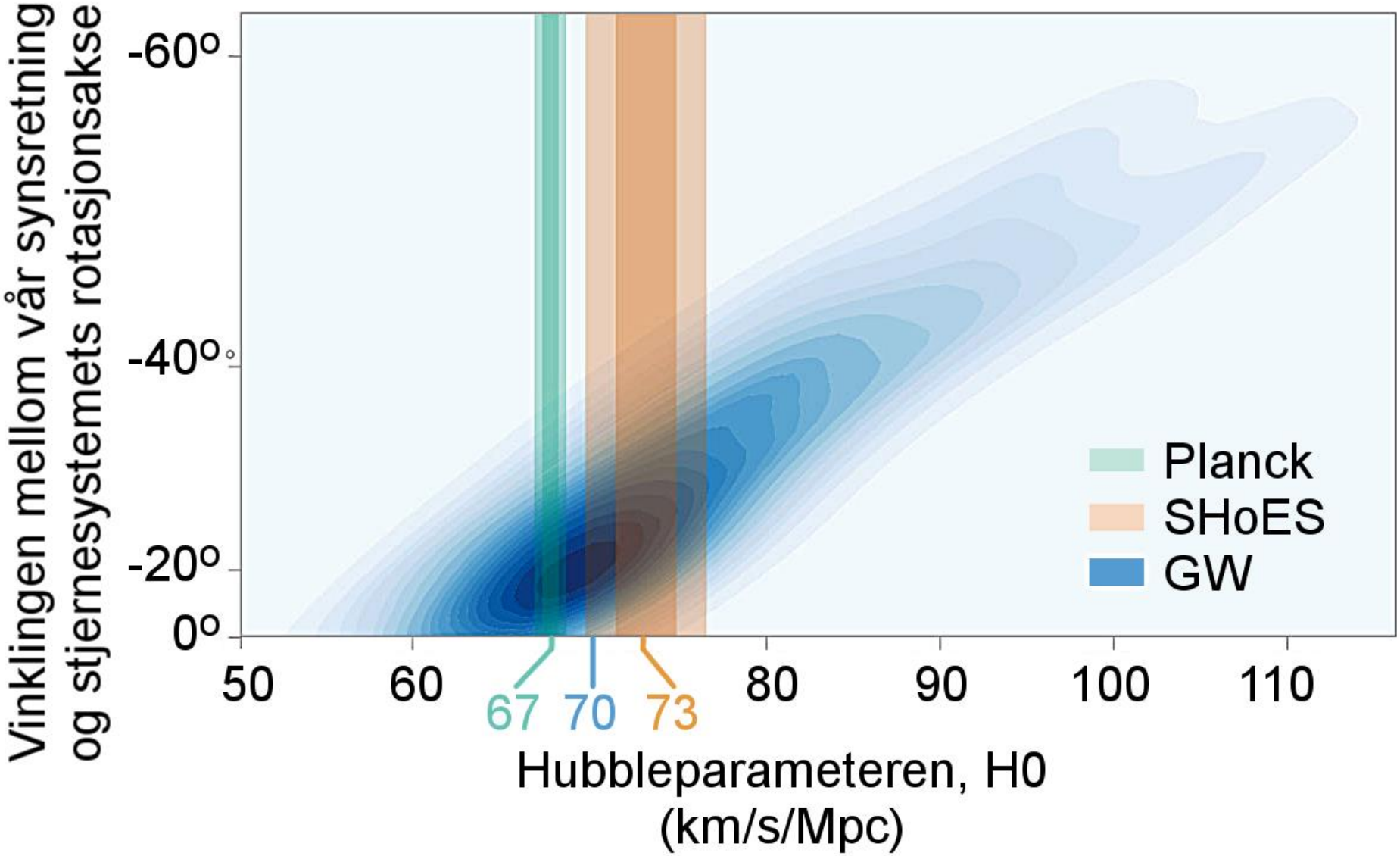
Litt senere i simuleringen.
En jetstrøm av materie sendes ut fra de kolliderende nøytronstjernene.
Den sprer seg og bremses ned når den treffer materie i omgivelsene.

Nå har egenskapene til etterglødden AT2017gfo vist at
at det ble produsert gull og platina i nøytronstjernekollisjonen
– i store mengder.

Fra denne kollisjonen ble det ble sendt ut skyer av materie
med en hundredels solmasse,
eller omtrent ti tusen jordmasser,
som hovedsakelig besto av grunnstoffer tyngre enn jern.

I løpet av noen få sekunder ble det produsert
over 100 jordmasser med gull i eksplosjonen
og over 30 jordmasser med uran.


Tellurium (52)
Gold (79)
Barium (56)
Platinum (78)
Neodymium (60)
Selenium (34)
Erbium (68)
Ruthenium (44)

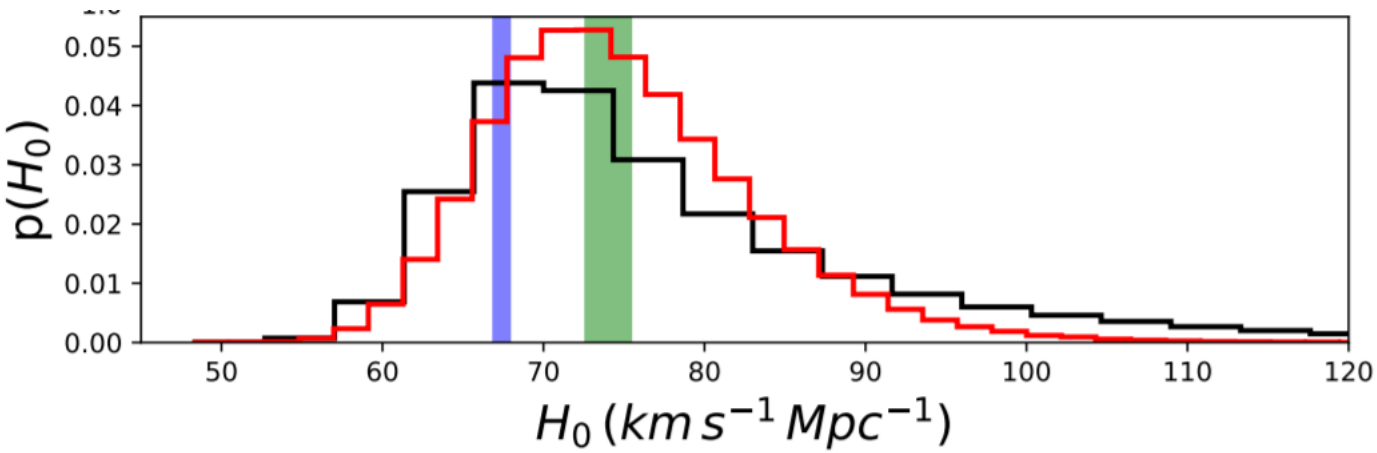

Vinklingen mellom vår synsretning og stjernesystemets rotasjonsakse
-60°
-40°
-20°
0°
50
60
80
90
100
110
67
70
73
Planck
SHoES
GW
Hubbleparameteren, H0
(km/s/Mpc)

Draft version October 1, 2019
Typeset using LaTeX twocolumn style in AASTeX63

Constraining the observer angle of the kilonova AT2017gfo associated with GW170817: Implications for the Hubble constant

S. Dhawan, M. Bulla, A. Goobar, A. Sagués Carracedo, C. N. Setzer[1]

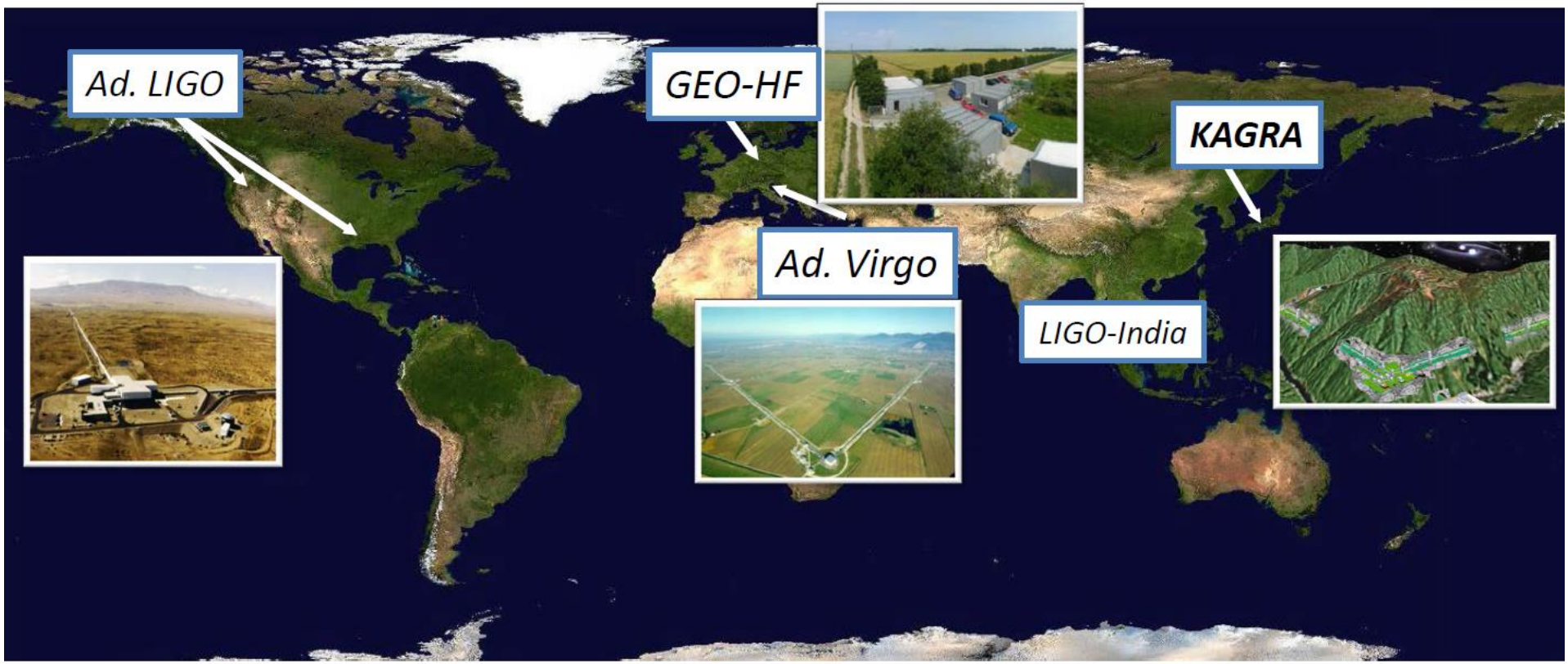
[1] *The Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, Department of Physics, Stockholm University, AlbaNova, 10691 Stockholm, Sweden*



Blå er Planck-verdien og grønn er verdien til Riese og medarbeidere (SHOES). Svart er verdien fra kilonovaobservasjoner uten restriksjoner på synsvinkelen til kilonovaen i forhold til dens rotasjonsakse, og rød når det er tatt hensyn til den nye retningsbestemmelsen.

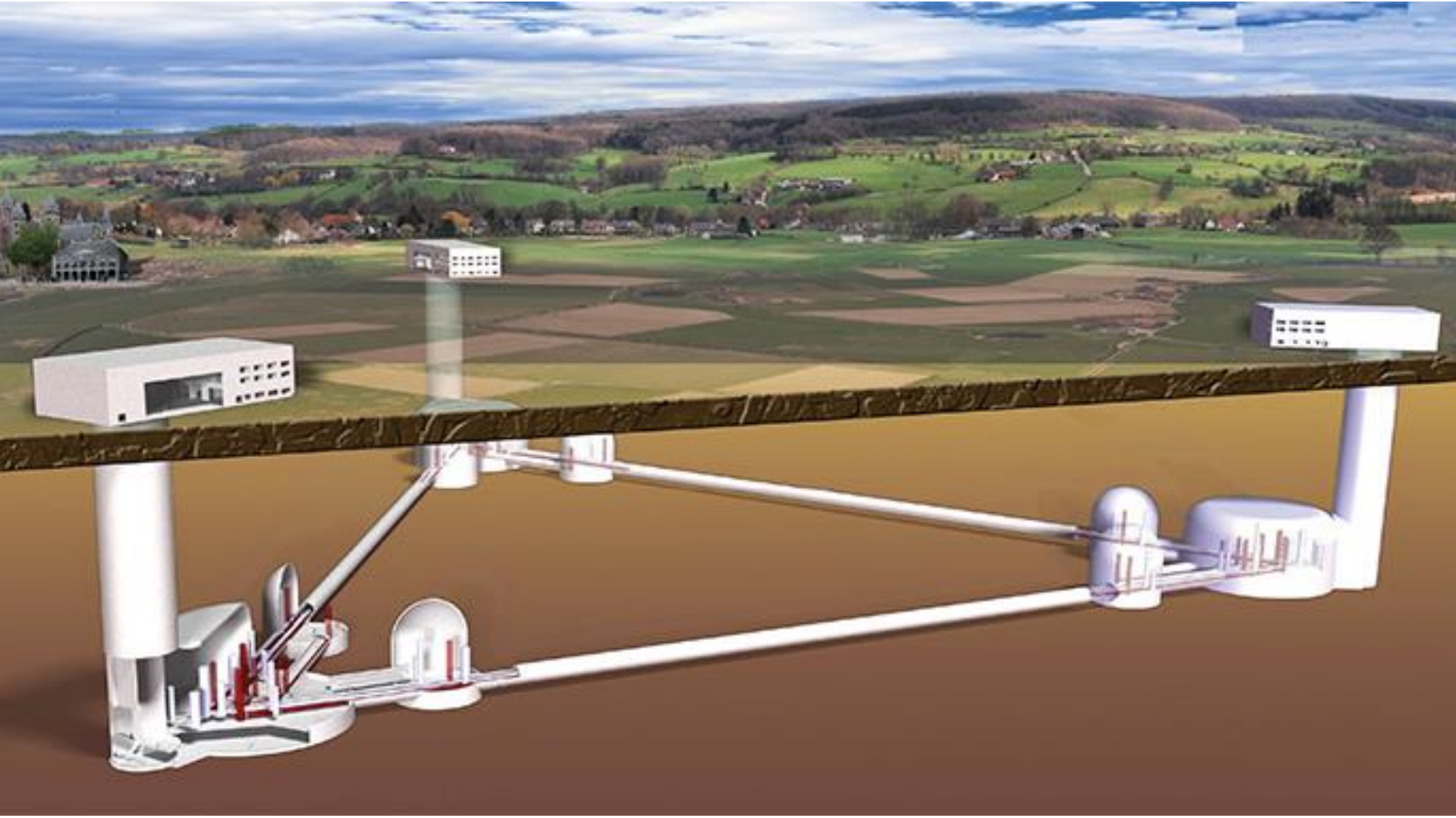
Model fit	H_0 ($km\ s^{-1} Mpc^{-1}$)
Best	$72.4^{+7.9}_{-7.3}$

Joining the global GW network



◆The scientific output will be maximized by the global network.

◆KAGRA has to learn various experiences / technologies from the existing interferometers.



Forslag til en tredje-generasjons gravitasjonsbølgedetektor.
Den består av 3 laboratorier som danner en trekant
med sidekant 10 km.