



THEORETICAL FOUNDATION FOR BLACK HOLES  
AND THE SUPERMASSIVE COMPACT OBJECT AT THE GALACTIC CENTRE

The Nobel Committee for Physics

Sven De Rijcke  
Vakgroep Fysica & Sterrenkunde, UGent

# **Theoretical foundation for black holes and the supermassive compact object at the Galactic centre**

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2020

with one half to

**Roger Penrose**

*for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity*

and the other half jointly to

**Reinhard Genzel and Andrea Ghez**

*for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy*



**John Michell** (1724-1793), rector van de parochie Thornhill, Yorkshire, UK en wetenschapper, mengt in 1783 een aantal inzichten en theorieën:

- Licht bestaat uit **deeltjes** (cf. Isaac Newton, 1704)
- Licht heeft een eindige snelheid  $c \approx 300.000 \text{ km/s}$  (cf. Ole Rømer, 1676)
- Je pad in een zwaartekrachtveld is **onafhankelijk van je massa**

$$\vec{F} = \cancel{m}\vec{a} = -G \frac{M\cancel{m}}{r^2} \vec{e}_r$$

(cf. Isaac Newton, 1687)

Concept van ontsnappingsnelheid: met welke snelheid moet een deeltje bewegen om net tot “op oneindig” te geraken? Behoud van energie leidt meteen tot het antwoord:

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}} = \sqrt{\frac{8\pi G\rho}{3}} r$$

Michell stelde de vraag : hoe groot moet een object met dezelfde dichtheid als de zon zijn opdat  $v_{\text{esc}} > c$ ? Antwoord:

$$r > \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G\rho_{\odot}}} = \sqrt{\frac{R_{\odot}c^2}{2GM_{\odot}}} R_{\odot} \approx 487R_{\odot}$$

In een paper uit mei 1783 van Michell aan Henry Cavendish (in 1784 gepubliceerd door de Royal Society):

42 *Mr. MICHELL on the Means of discovering the*

16. Hence, according to article 10, if the semi-diameter of a sphaere of the same density with the sun were to exceed that of the sun in the proportion of 500 to 1, a body falling from an infinite height towards it, would have acquired at its surface a greater velocity than that of light, and consequently, supposing light to be attracted by the same force in proportion to its vis inertiae, with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it, by its own proper gravity.

Je kan de gelijkheid

$$c = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

ook omkeren om te berekenen hoe klein een object met massa  $M$  moet zijn zodat geen licht meer kan ontsnappen. Antwoord:

$$r = \frac{2GM}{c^2},$$

de **Schwarzschildstraal** (zie later).

Volledige titel van Michells artikel: “On the means of discovering the distance, magnitude, &c. of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their light, in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be farther necessary for that purpose.”

Het concept van een “**donkere ster**” was dus eigenlijk maar een “bijproduct” van zijn paper ...



**Pierre-Simon markies de Laplace** (1749-1827) stuit op een soortgelijk idee en zijn beschrijving wordt in de tweede druk van zijn *Exposition du Système du Monde* uit 1799 beschreven.



348

## EXPOSITION

donc dans l'espace céleste, des corps obscurs aussi considérables, et peut-être en aussi grand nombre, que les étoiles. Un astre lumineux de même densité que la terre, et dont le diamètre seroit deux cent cinquante fois plus grand que celui du soleil, ne laisseroit en vertu de son attraction, parvenir aucun de ses rayons jusqu'à nous; il est donc possible que les plus grands corps lumineux de l'univers, soient par cela même, invisibles. Une étoile qui, sans être de cette

Merk op : beiden gaan voor een “groot” object om het zwaartekrachtveld voldoende sterk te maken. Niemand merkt op dat ook een klein object met ongelooflijk grote dichtheid hetzelfde effect zou kunnen hebben ...

Voor het moderne concept van een zwart gat is het wachten tot de Duitse astronoom/fysicus **Karl Schwarzschild** (1873-1916) in Januari 1916 de eerste exacte oplossing van de veldvergelijkingen van Albert Einstein presenteert.

In de **algemene relativiteitstheorie** wordt zwaartekracht beschreven via de **kromming van ruimte en tijd**:

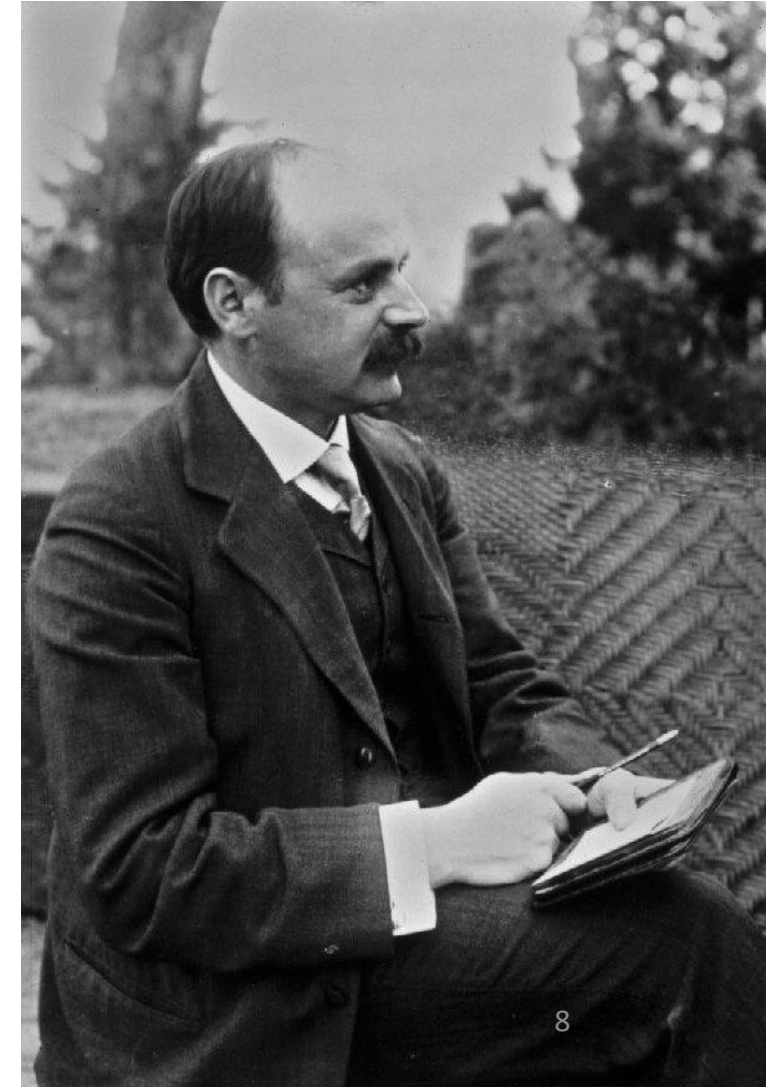
- de gemeten afstand tussen twee posities en
- het tempo waaraan klokken tikken

hangen af van de lokale “sterkte” van het zwaartekrachtveld.

Je mag vrij kiezen vanuit wiens standpunt je het heelal bekijkt. Elke keuze is even goed!

Gegeven de door jouw waarnemer vastgestelde massa- en energieverdeling, produceren de veldvergelijkingen de bijhorende ruimtetijdkromming in de vorm van de **metriek**

$$g_{\mu\nu} = \vec{e}_\mu \cdot \vec{e}_\nu.$$



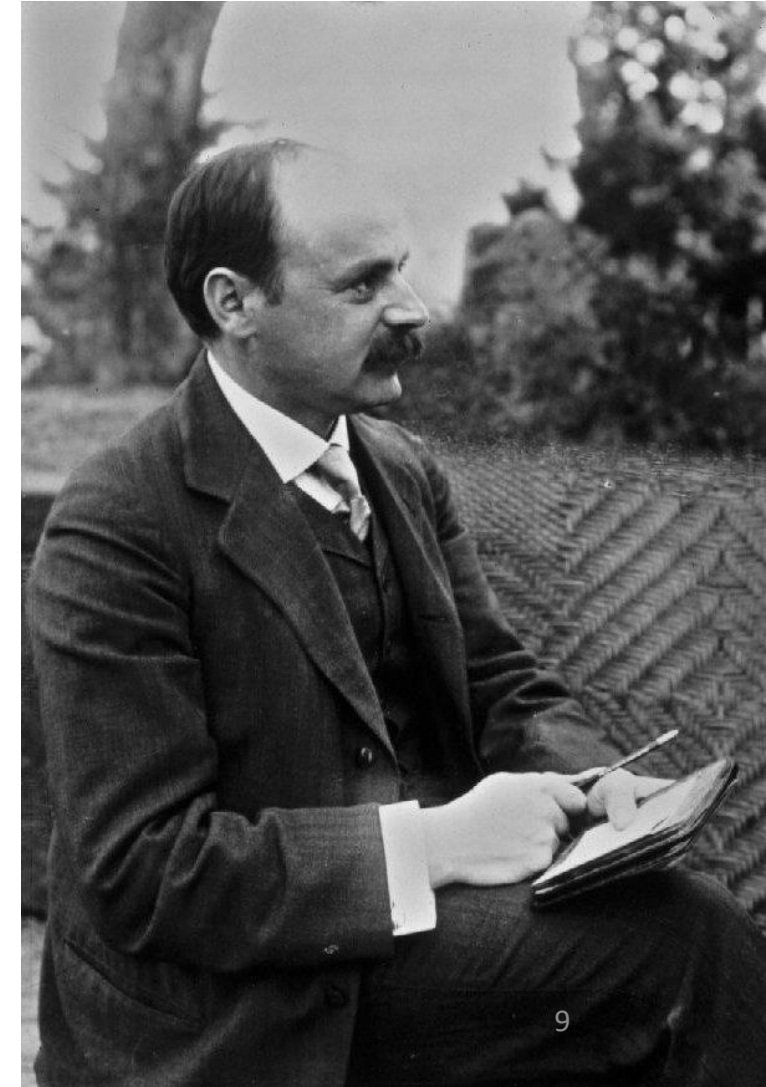


Voor het moderne concept van een zwart gat is het wachten tot de Duitse astronoom/fysicus **Karl Schwarzschild** (1873-1916) in Januari 1916 de eerste exacte oplossing van de veldvergelijkingen van Albert Einstein presenteert.

Gegeven de door jou waarnemer vastgestelde massa- en energieverdeling, produceren de veldvergelijkingen de bijhorende ruimtetijdromming in de vorm van de **metriek**  
 $g_{\mu\nu} = \vec{e}_\mu \cdot \vec{e}_\nu$ .

$g_{\mu\mu} < 0$  :  $x^\mu$  is een **ruimtecoördinaat** (3)

$g_{\mu\mu} > 0$  :  $x^\mu$  is een **tijdscoördinaat** (1)



Schwarzschild's oplossing beschrijft een **compleet lege, statische ruimte**.

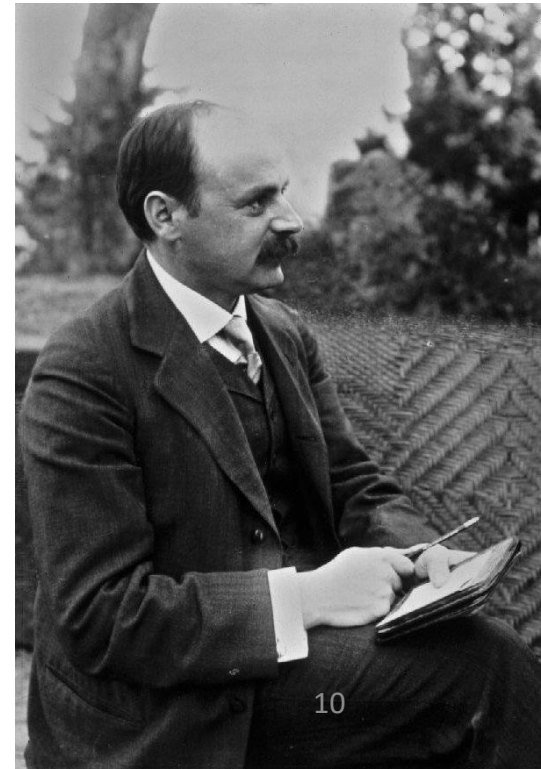
Een lege ruimte is natuurlijk sferisch symmetrisch rondom een gekozen oorsprong dus worden sferische coördinaten  $(r, \theta, \varphi)$  gebruikt om posities vast te leggen.

Einsteins veldvergelijkingen leiden dan tot de oplossing

$$\begin{aligned}g_{rr} &= -\left(1 + \frac{\mu}{r}\right)^{-1} \\g_{\theta\theta} &= -r^2 \\g_{\varphi\varphi} &= -r^2 \sin^2 \theta \\g_{tt} &= c^2 \left(1 + \frac{\mu}{r}\right)\end{aligned}$$

met  $\mu$  een integratieconstante: een wiskundige parameter ...

Echter, voor zwakke zwaartekrachten werkt Newtons theorie voor de zwaartekracht nagenoeg perfect!



De algemene relativiteitstheorie gaat netjes over in Newtons theorie als in een zwak zwaartekrachtsveld

$$g_{tt} = c^2 \left( 1 + \frac{2\Phi}{c^2} \right)$$

met  $\Phi$  de Newtoniaanse zwaartekrachtpotentialiaal.

Nu is

$$\Phi = -\frac{GM}{r}$$

de Newtonpotentialiaal van een puntmassa met massa  $M$ .

Mits de keuze  $\mu = -\frac{2GM}{c^2}$  kunnen we de **Schwarzschildmetriek**

$$g_{rr} = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1}$$

$$g_{\theta\theta} = -r^2$$

$$g_{\varphi\varphi} = -r^2 \sin^2 \theta$$

$$g_{tt} = c^2 \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)$$

dus lezen als de metriek van een compleet lege ruimte die één enkele puntmassa bevat.

Er zijn twee “lastige” punten:

$$r = \frac{2GM}{c^2}, \text{ de Schwarzschildstraal } (g_{rr} \rightarrow \infty)$$

en

$$r = 0 \quad (g_{rr}, g_{tt} \rightarrow \infty)$$

Blijkt : enkel in  $r = 0$  gaat de ruimtetijdkromming naar oneindig.

Dit is een echte **singulariteit**: een punt waar de algemene relativiteitstheorie het laat afweten en een onfysisch antwoord (oneindig!) geeft op een fysische vraag.

Bij de Schwarzschildstraal gebeurt er fysisch niks speciaals of wiskundig oneigenlijks.

Wel: de Schwarzschildstraal markeert de **waarnemingshorizon** en is een “point of no return”; niets kan van binnen naar buiten; ook licht niet!

Het heelal is bijgevolg afgeschermd van de singulariteit bij  $r = 0$ .

**Birkhoffs theorema** stelt dat de Schwarzschildmetriek de ruimtetijdkromming beschrijft rondom elk sferisch symmetrisch object.

Het zwaartekrachtsveld **buiten de zon** wordt dus ook door deze metriek beschreven ...



Rotatie? Gewoon Schwarzschilds aanpak herhalen maar nu voor een rotatiesymmetrische lege ruimte ...

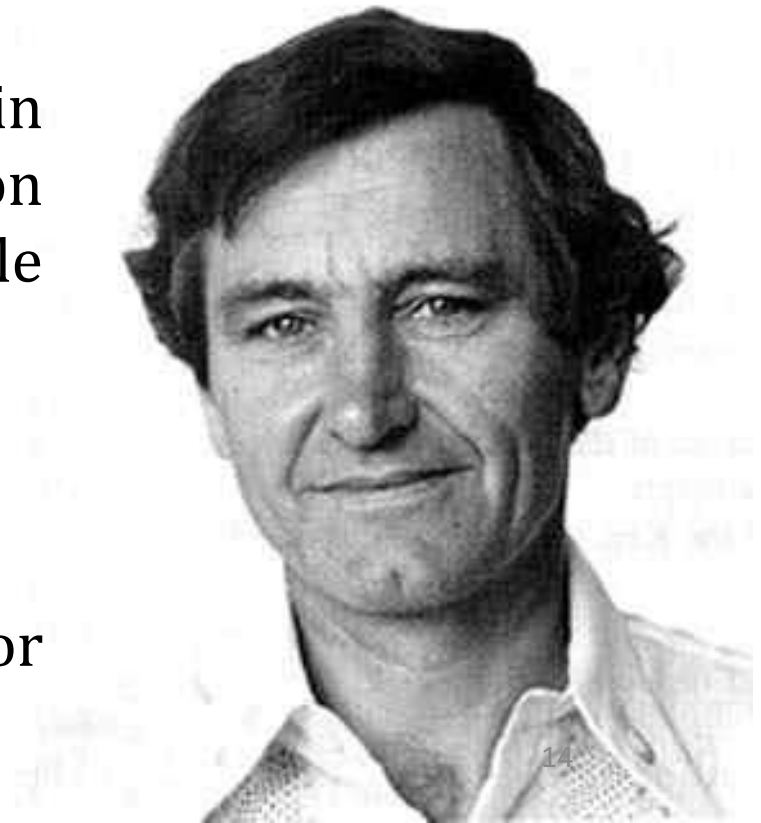
Verschillende pogingen in de jaren 1930 maar probleem bleek wiskundig te moeilijk.

Het vergde enkele wiskundige doorbraken in de jaren 1950 om de Nieuwzeelandse wiskundige **Roy Patrick Kerr** (1934-...) op het juiste pad te zetten.

Hij kon in 1963 een nieuwe vacuümoplossing afleiden waarin een tweede parameter naast de **massa  $M$**  opdook die kon geïnterpreteerd worden als het **draaimoment  $J$**  van de centrale massa.

Deze metriek heeft een **ringvormige singulariteit**.

Als het draaimoment niet te hoog is dan is de singulariteit door een waarnemingshorizon afgeschermd.



In 1964/65 volgde dan de Kerr-Newmanmetriek voor een vacuüm met een elektromagnetisch veld in.

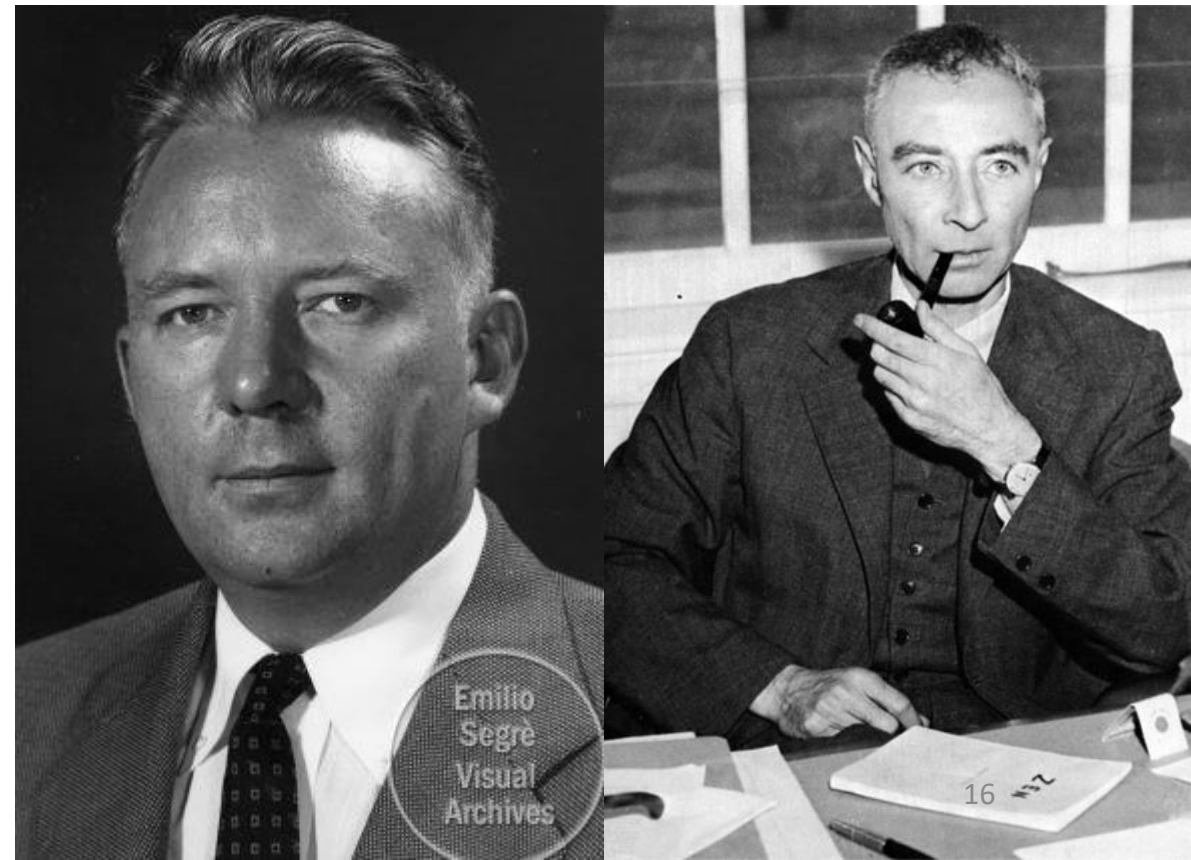
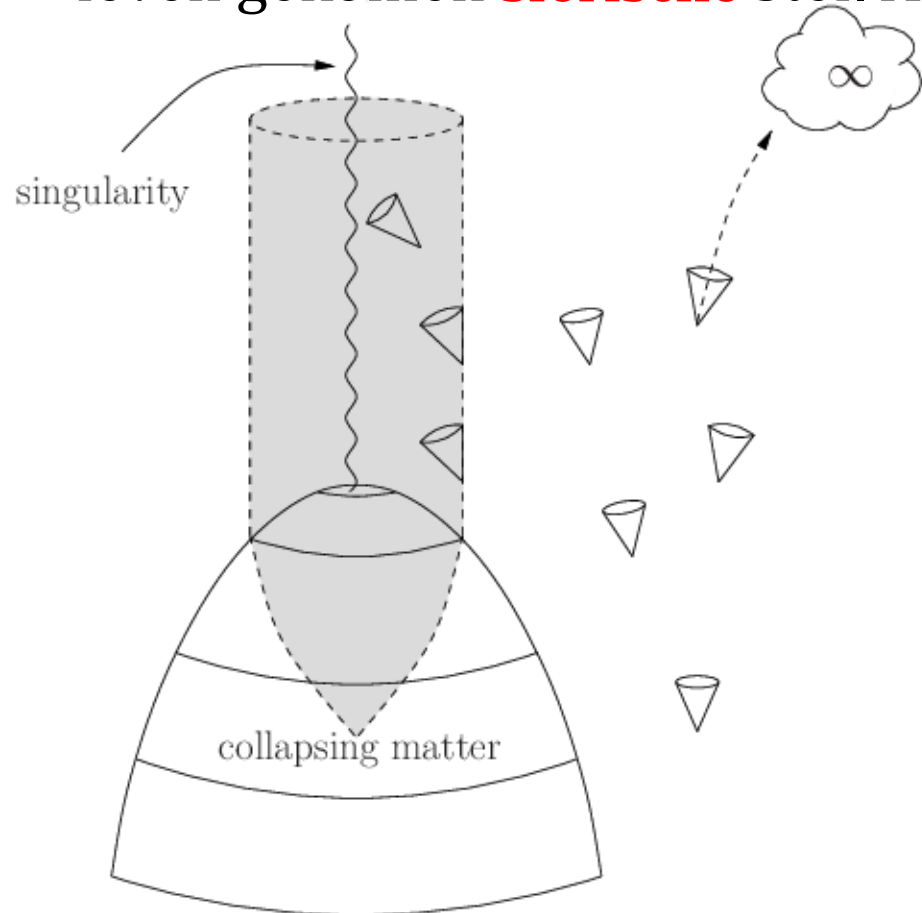
Deze kon geïnterpreteerd worden als de metriek van een **massa  $M$**  met **draaimoment  $J$**  en **elektrische lading  $Q$** .

Ook de Kerr-Newmanmetriek heeft een **ringvormige singulariteit**.

Als het draaimoment en de elektrische lading niet te groot zijn dan is de singulariteit door een waarnemingshorizon afgeschermd.

In 1939 publiceren de Amerikaanse fysici **J. Robert Oppenheimer** (1904-1967) en **Hartland S. Snyder** (1913-1962) een artikel met als titel “On continued gravitational contraction”.

Ze berekenen algemeen-relativistisch de vrije implosie van een op het eind van haar leven gekomen **sferische** ster. Alle materiaal valt naar  $r = 0$  en vormt een singulariteit.



## Open vragen :

- Is de vorming van de centrale singulariteit een gevolg van de perfecte sferische symmetrie?
- Wat als de imploderende ster roteert?
- Hoe noem je zo'n ding?
  - Yakov Zel'dovitsj en Igor Novikov (~1964) : “**frozen star**” omdat voor een buitenstaander een invallend gasdeeltje pas op tijd  $t \rightarrow \infty$  de waarnemingshorizon lijkt te bereiken waardoor alle invallend gas boven de waarnemingshorizon “bevroren” lijkt (maar wel uit het zicht verdwijnt want het uitgestraalde licht wordt steeds sterker roodverschoven).
  - John Archibald Wheeler en Roger Penrose (<1967) : “**gravitationally completely collapsed star**” omdat het gas wel degelijk doorheen de waarnemingshorizon valt en uiteindelijk in de centrale singulariteit terecht komt.

➤ **Wheeler** (1911-2008) *was* *The New York Times*  
 pulsars (toen pas  
 “gravitatie”

Hij merkt  
 “How about  
 december  
 wetenschapp  
 lente van 196

Dat is volgens  
 keer dat de ter  
 wetenschappelijk  
 komt.

Wheeler wordt  
 genoemd als de bec  
 (Carlos Herdeiro &  
 2018)

# John A. Wheeler, Physicist Who Coined the Term ‘Black Hole,’ Is Dead at 96



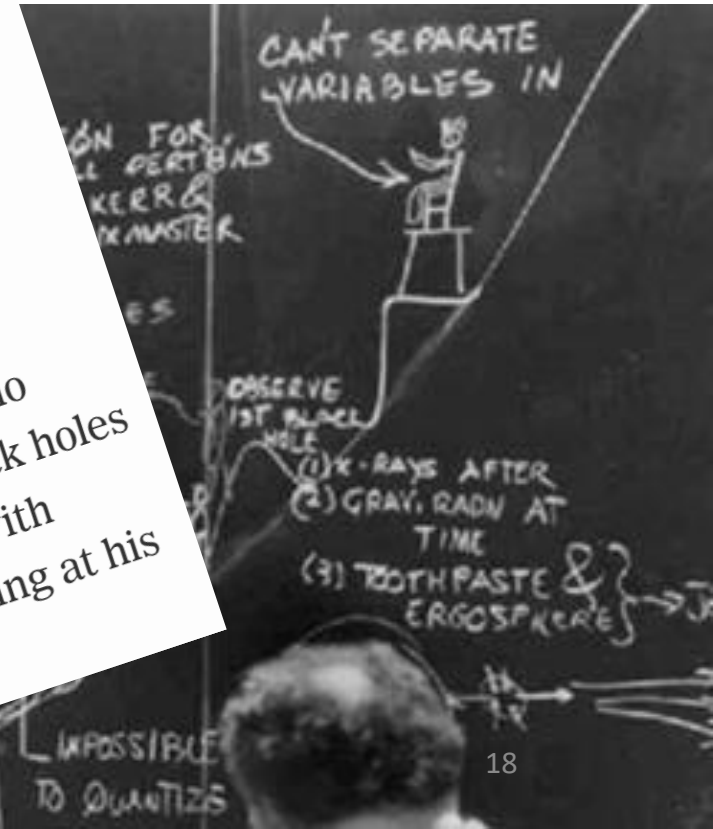
John A. Wheeler at Princeton  
 University in 1967.  
 The New York Times

By **Dennis Overbye**  
 April 14, 2008

John A. Wheeler, a visionary physicist and teacher who helped invent the theory of nuclear fission, gave black holes their name and argued about the nature of reality with Einstein and Niels Bohr, died Sunday morning at his home in Princeton, N.J. He was 96.

57 een conferentie bij over  
 t hart van elke pulsar een

in het publiek merkt op :  
 en gebruikt de term in





➤ In July 1962 wordt hat Texas Symposium on Relat Einstein's theory predicts that if the Dallya gravitational collapse of a star did gedis occur, the collapse would go on and Life l the gravitational field would become eena stronger and stronger until it grew so powerful that it would close in upon itself; ultimately, the escape velocity would equal the speed of light, which is the speed limit of the universe. In that case nothing could get out of the star, not even light waves. Thus, instead of an intensely radiating object, sending out lavish quantities of light and radio energy, gravitational collapse would result in an invisible "black hole" in the universe. (To attain this "black hole" status, the matter comprising the earth would have to be compressed to a

rd in  
wordt  
1964

by ALBERT ROSENFELD

Scientists have suddenly become aware of some things out there in the skies which they had never noticed before, and they could hardly be more excited if they had just zeroed in on a formation of flying saucers. The excitement is clearly justified: the newly discovered things-out-there are fantastic fiery objects as massive as a million suns. They burn with a brightness that would eclipse a hundred-fold our entire galaxy with its 100 billion stars. They appear faint, but only because they are billions of light years away from us. Among them are the most distant celestial bodies yet detected—one six billion light years from earth, one perhaps 10 billion—as well as the most dazzlingly luminous object ever before seen in the universe.

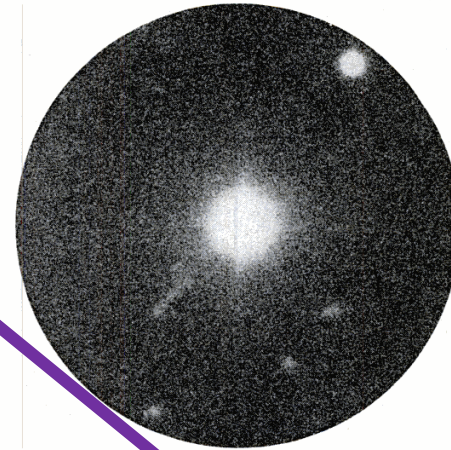
Everything about these newly recognized phenomena is on such a stupendous scale—especially the unheard-of energies they produce—that even the astronomers, accustomed to dealing on a cosmic scale, are caught in a speechless astonishment. Like Hollywood producers suddenly in possession of a movie that is really colossal, scientists find themselves at a loss for adequate superlatives. In place of precise terminology, they resort to poetic description. Physicist Robert Oppenheimer describes them as "incredibly beautiful," as "spectacular events of unprecedented grandeur." Caltech Astronomer Jesse L. Greenstein has called them "perhaps the most bizarre and puzzling objects ever observed through a telescope."

For the moment, because these bizarre and puzzling objects are something like stars (though far too big to be stars) and because they spew out radio waves in reckless profusion, they have been given an unwieldy name: "Quasi-stellar radio sources."

No theory in all astrophysics fully accounts for these quasi-stellar radio sources. Their very existence is an affront and an outrage to all scientific sense and reason. Yet they undeniably exist. To explain them and their behavior, some of the most respected scientists of the Western world recently gathered at the Southwest Center for Advanced Studies in Dallas. There an all-out intellectual effort was made to solve this new mystery of the universe.

Ever since the techniques of radio astronomy were first developed 20 years ago, scientists have been aware that certain regions of the sky emit radio waves. Some of these sources of radio emission turned out to be galaxies. Others appeared to be ordinary stars, but they were identified as exploding stars, called supernovae.

Might, then, such an explosion be the answer? Certainly a single super-



Through 200-inch telescope, mysterious 3C 273, in Constellation Virgo, clearly shows a huge tail.

## What are quasi-stellars? Heavens' New Enigma

narily large quantities of radio waves, millions of times what might be expected, with no way to explain the production of such energies. The mystery was deepened by the belated realization that some of the most intense radio sources were not galaxies at all.

But through the years no one could figure out any process by which any star, or even any galaxy with billions of stars, might possibly produce the energy for these gigantic radio emissions. After a number of preliminary theories were examined and rejected, everyone finally agreed that such extraordinary energies could only be generated by events of catastrophic violence.

But what sort of events? A collision of galaxies was one of the first suggestions. But computations soon made it clear that even colliding galaxies would produce only a piddling fraction of the energy emitted by these radio sources. Astrophysicist Geoffrey Burbidge of the University of California at La Jolla proposed an even bolder idea. He knew that some of the normal radio sources in our galaxy had been identified as exploding stars, called supernovae.

Might, then, such an explosion be the answer? Certainly a single super-

nova could not do the trick. But what about a chain of explosions? An Atomic Bomb explosion is caused by a chain reaction of fissioning atoms when the uranium reaches a certain critical mass. Burbidge theorized that a chain reaction of supernovae might also occur—each one setting off the others around it in turn—when a galaxy reached a certain critical stage in its evolution.

The trouble with this idea was that it called for a highly improbable kind of galaxy with a core of stars ready to explode into supernovae and so densely packed that they could be detonated at the rate of 10 to 1,000 per year. (In our own galaxy a supernova occurs less than once in a century.)

Among those reluctant to accept Burbidge's idea was the celebrated cosmologist, Fred Hoyle of Cambridge University. In collaboration with Physicist William A. Fowler of Caltech, he proposed an even more daring theory: gravitational collapse. The greater an object's mass, the greater its gravitational force. If a star could attain a certain mass—say, a million to 100 million times the mass of our own sun—their gravity would become 100 times as powerful as the forces generated by the strong-

est known nuclear reactions. Such a super superstar, in the normal course of its evolution, would contract. When it contracted to a certain critical volume, the gravitational field would cause the star to collapse in upon itself.

The process would be something like the detonation of a nuclear weapon by implosion—that is, by a number of inward-directed explosions which close in on the fissionable material. As Hoyle theorizes, gravitational collapse would be "catastrophic implosion" on a cosmic scale. In place of Burbidge's chain explosion of supernovae, Hoyle was proposing a single super superstar exploding inward on itself. Such an implosion could conceivably provide the prodigious quantities of energy which intense radio sources need to keep going.

But the Hoyle-Fowler thesis had holes, too. The main criticism is that the most massive stars are no more than 65 times as massive as the sun. But a star would have to be several million times more massive than the sun to achieve gravitational collapse. Moreover, all calculations, including Hoyle's own, indicate that as stars get much bigger than any now known, they become unstable and break apart. Theoretically, if a star could somehow reach the size of Hoyle's hypothetical super superstar, it might achieve stability. But no one could explain how a star might get through all the intermediate, unstable sizes until it attained the requisite proportions.

Another important objection to Hoyle's idea was built into Einstein's general theory of relativity. Gravity, as every one who knows, is what keeps us all from floating off into space. To escape gravity a certain speed is required, so-called "escape velocity." To escape earth gravity, the 25,000 mph achieved by large rockets is enough. To escape from a larger planet like Jupiter, you'd require a greater escape velocity. Now Einstein's theory predicts that if the gravitational collapse of a star did occur, the collapse would go on and the gravitational field would become stronger and stronger until it grew so powerful that it would close in upon itself; ultimately, the escape velocity would equal the speed of light, which is the speed limit of the universe. In that case nothing could get out of the star, not even light waves. Thus, instead of an intensely radiating object, sending out lavish quantities of light and radio energy, gravitational collapse would result in an invisible "black hole" in the universe. (To attain this "black hole" status, the matter comprising the earth would have to be compressed to a

CONTINUED

- De term “black hole” wordt blijkbaar ook gebruikt tijdens een conferentie in Cleveland in december 1963 “by astronomers and physicists who are experts on what are called degenerate stars” ...

De wetenschapsjournaliste Ann Ewing (1921-2010) publiceert daar op 18 januari 1964 een artikel over in Science News.

SCIENCE NEWS LETTER for January 18, 1964



ASTRONOMY

# "Black Holes" in Space

The heavy densely packed dying stars that speckle space may help determine how matter behaves when enclosed in its own gravitational field—By Ann Ewing

➤ SPACE may be peppered with “black holes.”

This was suggested at the American Association for the Advancement of Science in Cleveland by astronomers and experts on what are

Modern tools, such as telescopes on an orbiting space platform, may be used to detect such black holes and to help determine how matter behaves when it is enclosed by its own gravitational field.

The light from the most famous white dwarf star, Sirius B, a companion to Sirius—the brightest star in the heavens—

- De organisator van die Clevelandconferentie, de Chinees-Amerikaanse astrofysicus **Hong-Yee Chiu** (1932-...) (de bedenker van de term quasar) beweert dan weer dat hij wel deze term gebruikte voor het Science News artikel maar er niet de bedenker van is.

Hij verwijst naar de kosmoloog **Robert Dicke** (1916-1997) van de Universiteit van Princeton. Deze zou in 1960 of '61 tijdens zijn lezingen aan het New York Goddard Institute gravitationeel ingestorte sterren vergeleken hebben met het “black hole of Calcutta”.

Dickes kinderen bevestigen dat hun vader telkens iets verloren raakte in huis, zei dat “it must have been sucked into the black hole of Calcutta”.

Dat zwart gat was een beruchte kleine gevangenis in Fort William, Calcutta waar in 1756 123 Britse krijgsgevangenen zijn gestikt in hun overbevolkte cel.





- Het lijkt onmogelijk dat Dicke en Wheeler, collega's in Princeton, nooit onderling de term zouden gebruikt hebben begin jaren '60, zeker gezien Dicke hem veelvuldig gebruikte. Niet iedereen vond de term toen echter gepast, eerder zelfs obscene. Richard Feynman was absoluut geen fan ...

De Braziliaans-Amerikaanse fysicus/filosoof José Acácio de Barros (1967-...) (Francisco State University) vertelde in 2017 tijdens een interview dat Wheeler hem in 1996 had toevertrouwd dat de term "black hole" vaak opdook in discussies met Dicke en dat daar telkens een besmuikte glimlach bij hoorde.

In datzelfde gesprek met Barros zou Wheeler toegegeven hebben dat de persoon die in 1967 "How about black hole?" riep **Robert Dicke** zelf was!

Bevrijd van alle connotaties veroverde de term nadien de wetenschappelijke wereld ...

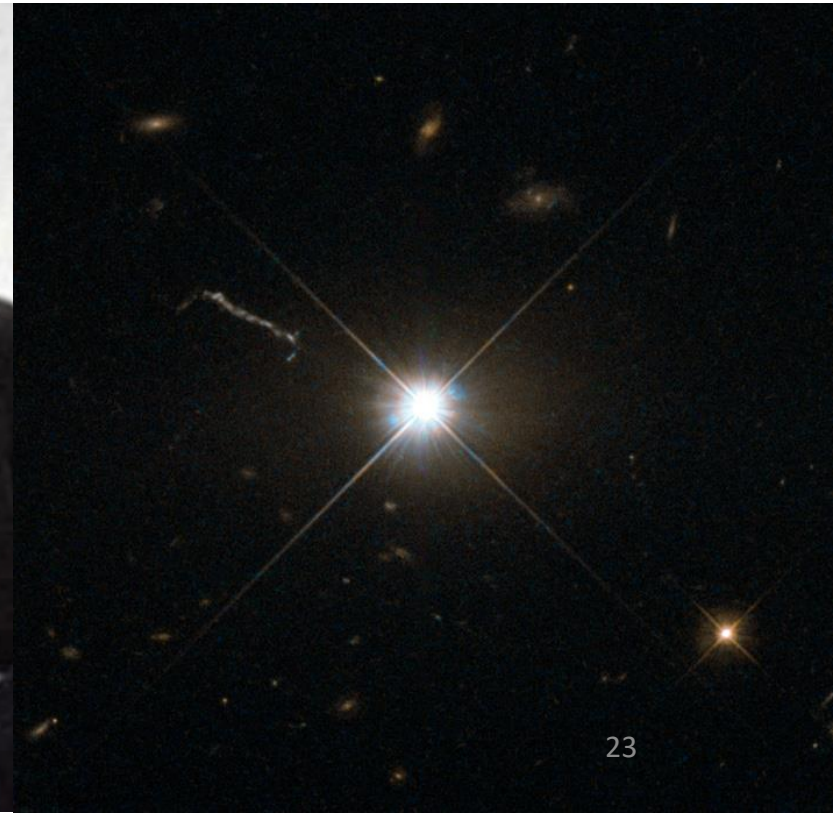


Er waren theoretische hints dat minder symmetrische objecten niet tot een singulariteit zouden instorten.

Aan de andere kant waren er dan weer observationele bewijzen voor het bestaan van zeer compacte, massieve objecten.

De Nederlands-Amerikaanse sterrenkundige **Maarten Schmidt** (1929-...) ontdekt in 1963 de eerste quasar : 3C 273. Dit is een extreem heldere en uiterst compacte lichtbron waar ook nog eens een jet uit spuit.

De gravitationele energie die vrij komt als materiaal in een zwart gat valt, zou de energiebron achter quasars kunnen zijn.

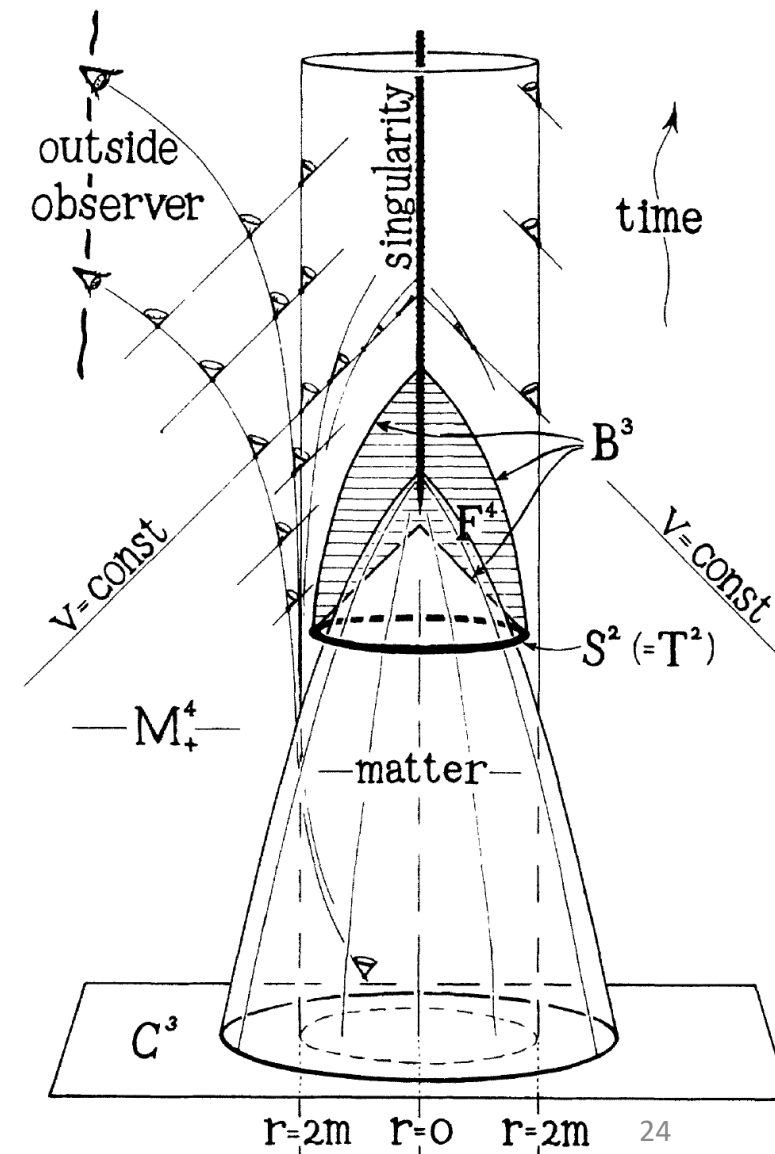
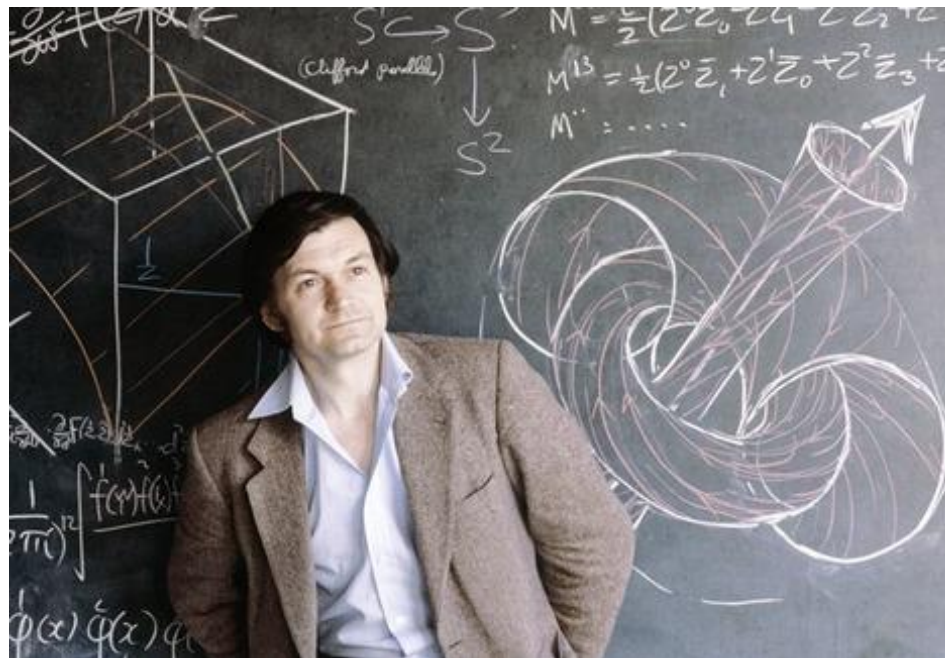




Roger Penrose (1931-...) raakt eind 1964 door zijn gesprekken met Wheeler geïnteresseerd in het bestaan van zwarte gaten en besluit het probleem te analyseren zonder enige symmetrie-aannames.

Zijn eerste diepe inzicht is de kracht van het begrip “trapped surface”.

Een “trapped surface” is een 2D oppervlak met als eigenschap dat alle lichtstralen die er loodrecht door bewegen in de toekomst naar elkaar toe neigen: ze **convergeren**.



“Gravitational collapse and space-time singularities”, Phys. Rev. Lett. 14, 57 (ingediend op 18 december 1964)

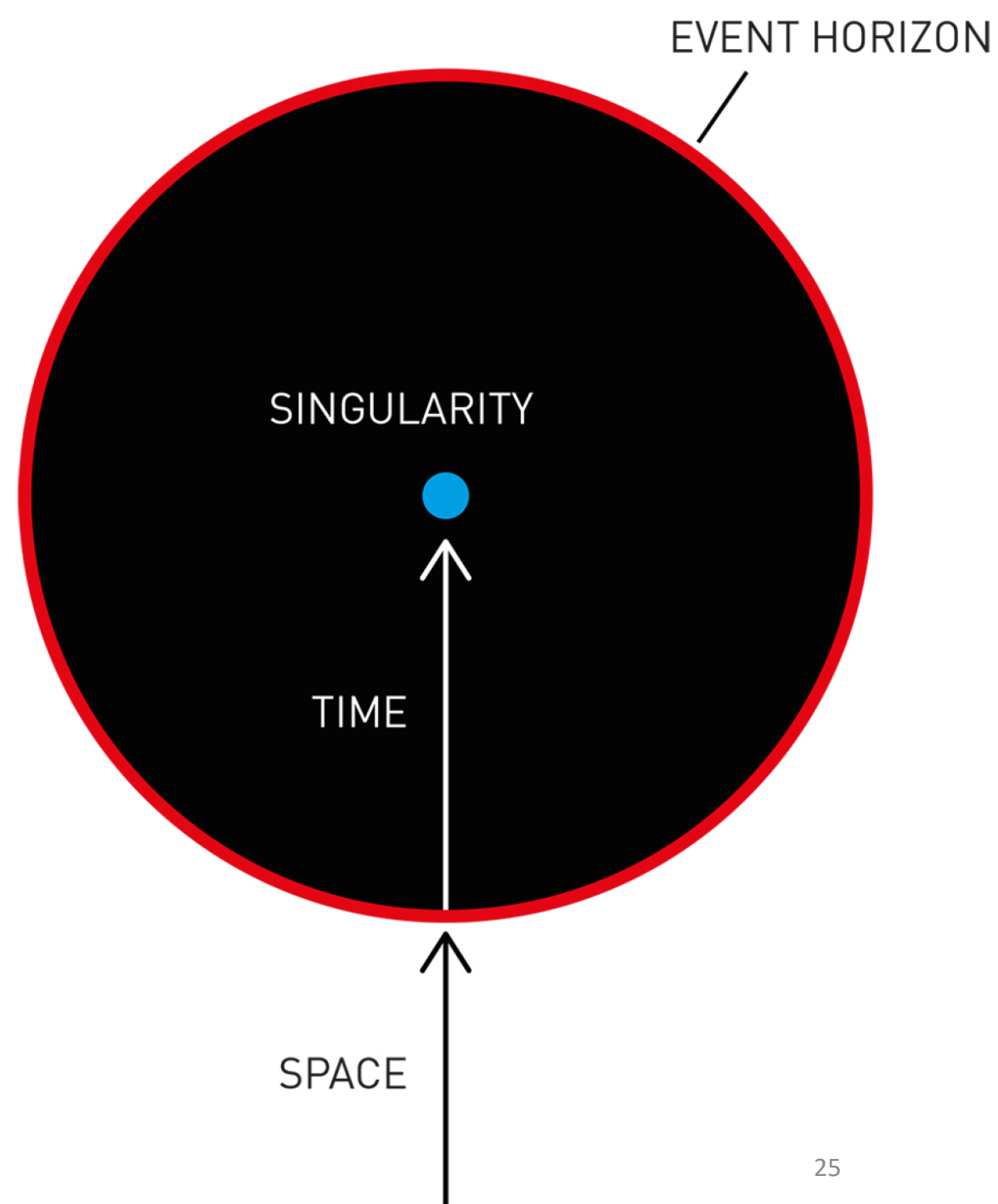
$$g_{rr} = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1}$$
$$g_{tt} = c^2 \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)$$

Buiten de waarnemingshorizon is  $r$  een ruimtecoördinaat en  $t$  een tijdscoördinaat.

Binnen de waarnemingshorizon is  $r$  een tijdscoördinaat en  $t$  een ruimtecoördinaat.

De radiële richting naar de singulariteit wordt de richting van toekomstige tijd.

Iedere sfeer binnen de waarnemingshorizon is dus een “trapped surface”

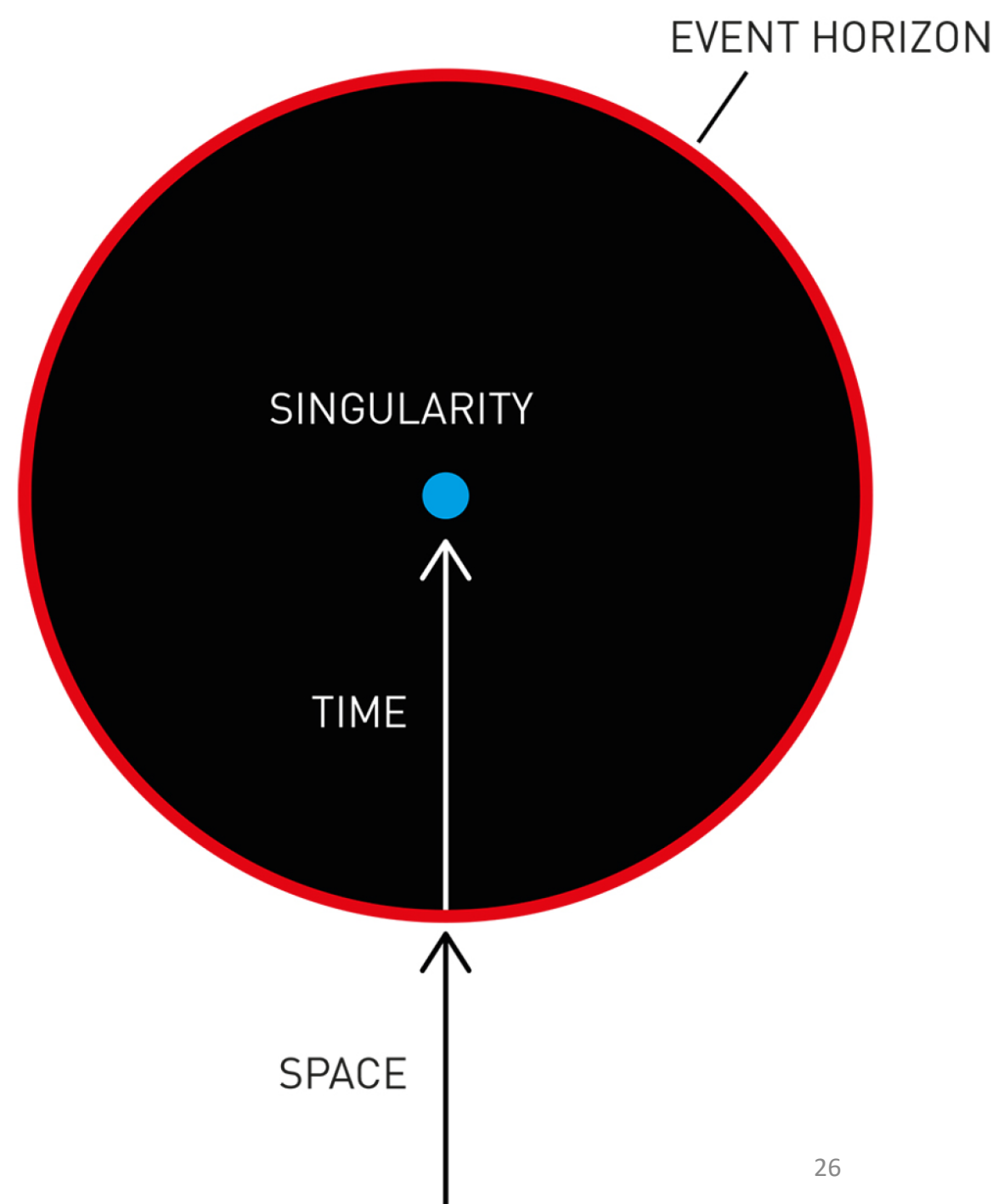


Ook de Kerr-zwarte-gaten bevatten trapped surfaces.

Dergelijke trapped surfaces bestaan onafhankelijk van de symmetrie van de invallende materie (zolang de situatie niet al te zot sterk afwijkt van die van een sferisch instortende ster)

After the matter has contracted within  $r = 2m$ , a spacelike sphere  $S^2$  ( $t = \text{const}$ ,  $2m > r = \text{const}$ ) can be found in the empty region surrounding the matter. This sphere is an example of what will be called here a trapped surface – defined generally as a closed, spacelike, two-surface  $T^2$  with the property that the two systems of null geodesics which meet  $T^2$  orthogonally converge locally in future directions at  $T^2$ . Clear-

ly trapped surfaces will still exist if the matter region has no sharp boundary or if spherical symmetry is dropped, provided that the deviations from the above situation are not too great.



$S^2$  : trapped surface

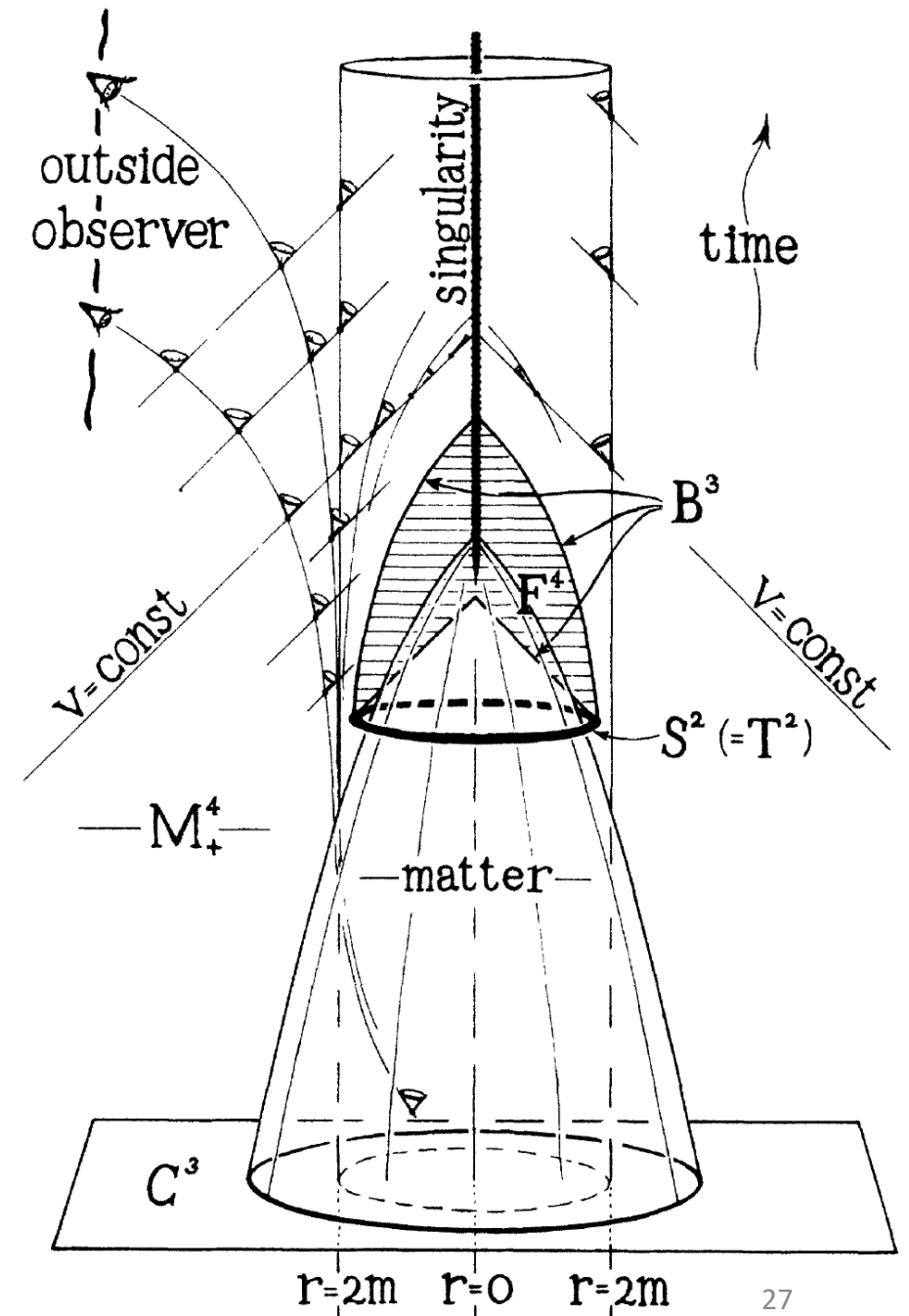
$F^4$  : alle ruimtetijdpunten die via een lichtstraal vanuit  $S^2$  bereikt kunnen worden

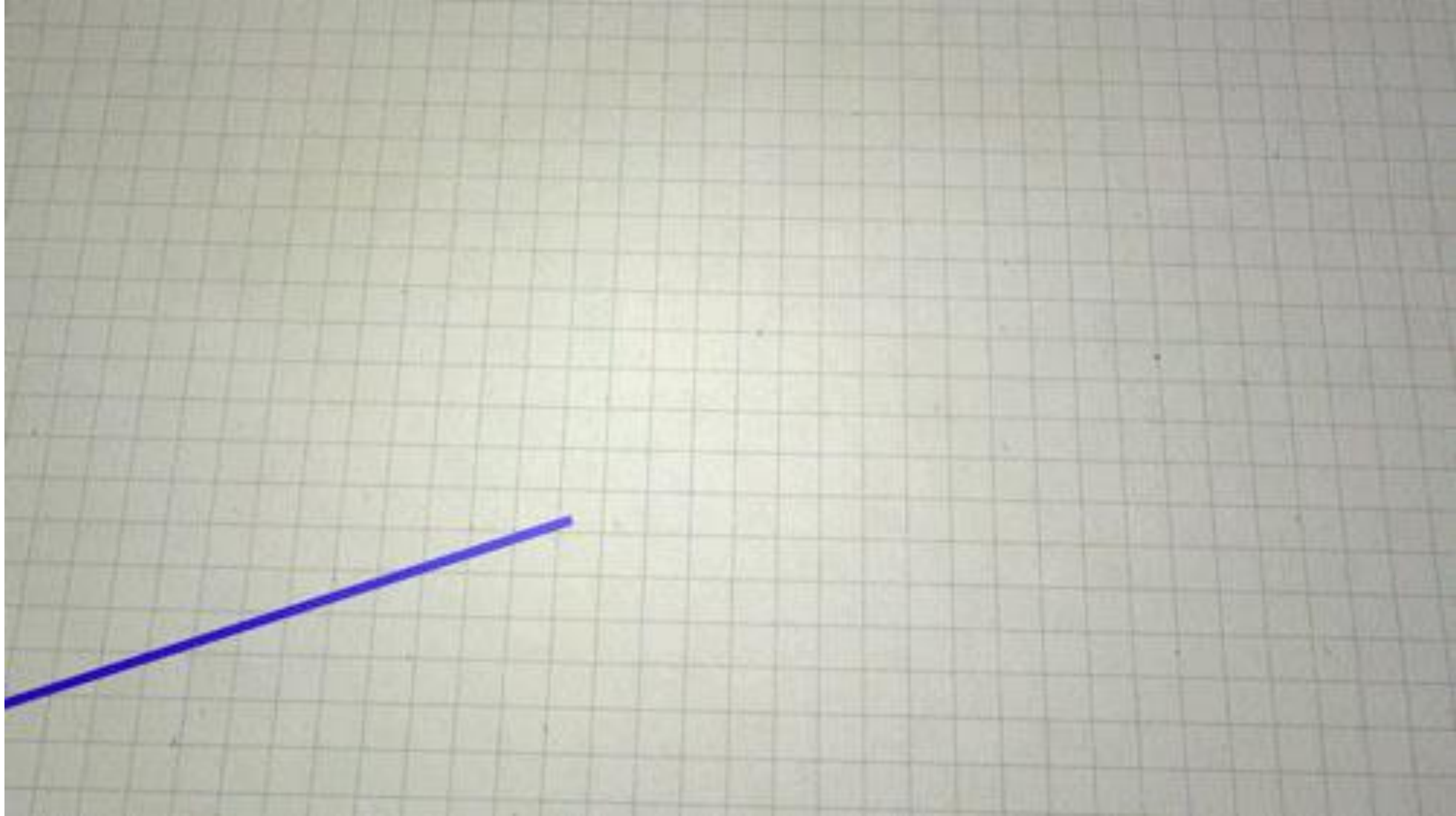
$B^3$  : de rand van  $F^4$

Penrose kan aantonen dat  $B^3$  gesloten (compact) moet zijn als de energiedichtheid van de instortende materie positief is.

Lichstralen vanuit  $S^2$  moeten dus ergens eindigen; ze kunnen niet oneindig lang zijn.

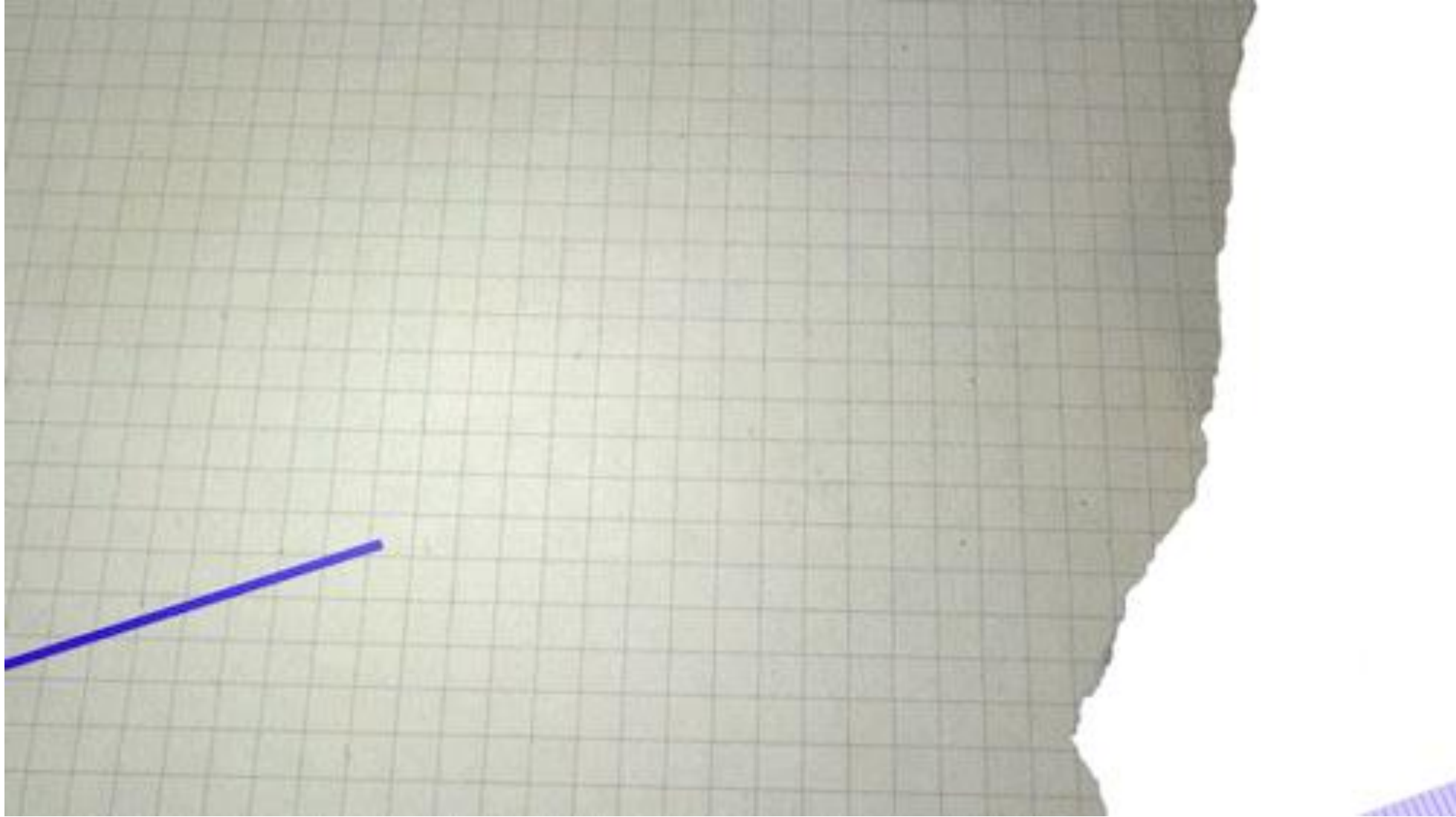
Dat impliceert het bestaan van een singulariteit waar de lichtstralen (of nulgeodeten) op eindigen: een "rand" aan de ruimtetijd ...





Ruimtetime zonder singulariteiten : geodeten (= paden van vrij vallende deeltjes) kunnen ongelimiteerd verlengd worden.



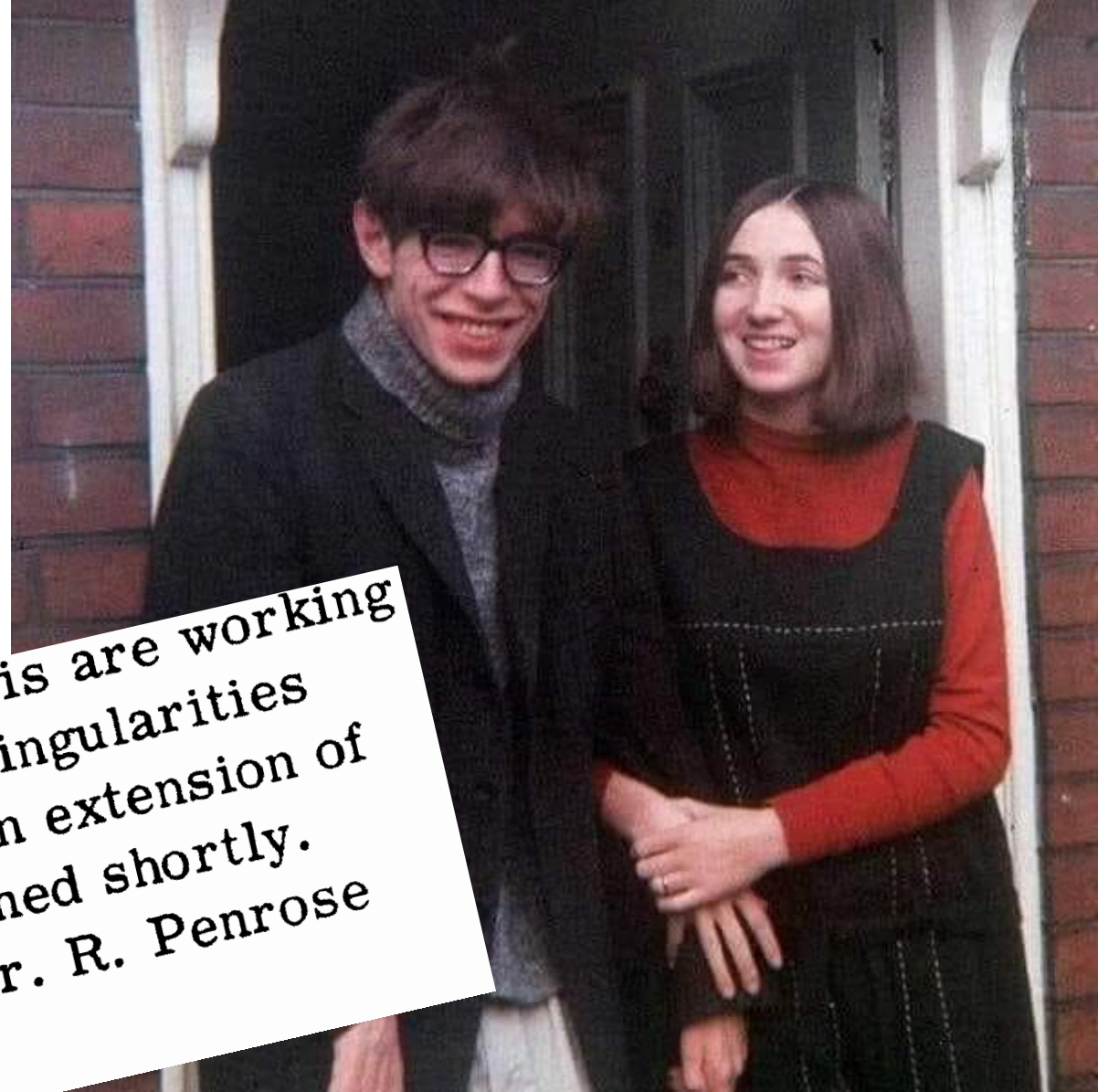


Ruimtetime met een singulariteit (een “rand”) : geodeten (= paden van vrij vallende deeltjes) kunnen niet ongelimiteerd verlengd worden. Het deeltje verdwijnt aan die rand ...

De jonge **Stephen Hawking** (1942-2018), dan nog een doctoraatsstudent moeizaam op zoek naar een interessant onderzoeks-  
onderwerp, raakte danig geïnspireerd door Penroses aanpak.

Hij past die meteen toe op het vroege heelal en kan aantonen dat open heelalmodellen gevuld met gewone materie trapped surfaces bevatten en dus een singularity hun verleden hebben.

*The author and Dr. G. F. R. Ellis are working on a proof of the occurrence of singularities in closed universes. This and an extension of the above results will be published shortly. The author wishes to thank Dr. R. Penrose for his help and advice.*







g voor het bestaan van singulariteiten. Een  
favoriete verklaring voor **Active** de  
rrenstelsels.

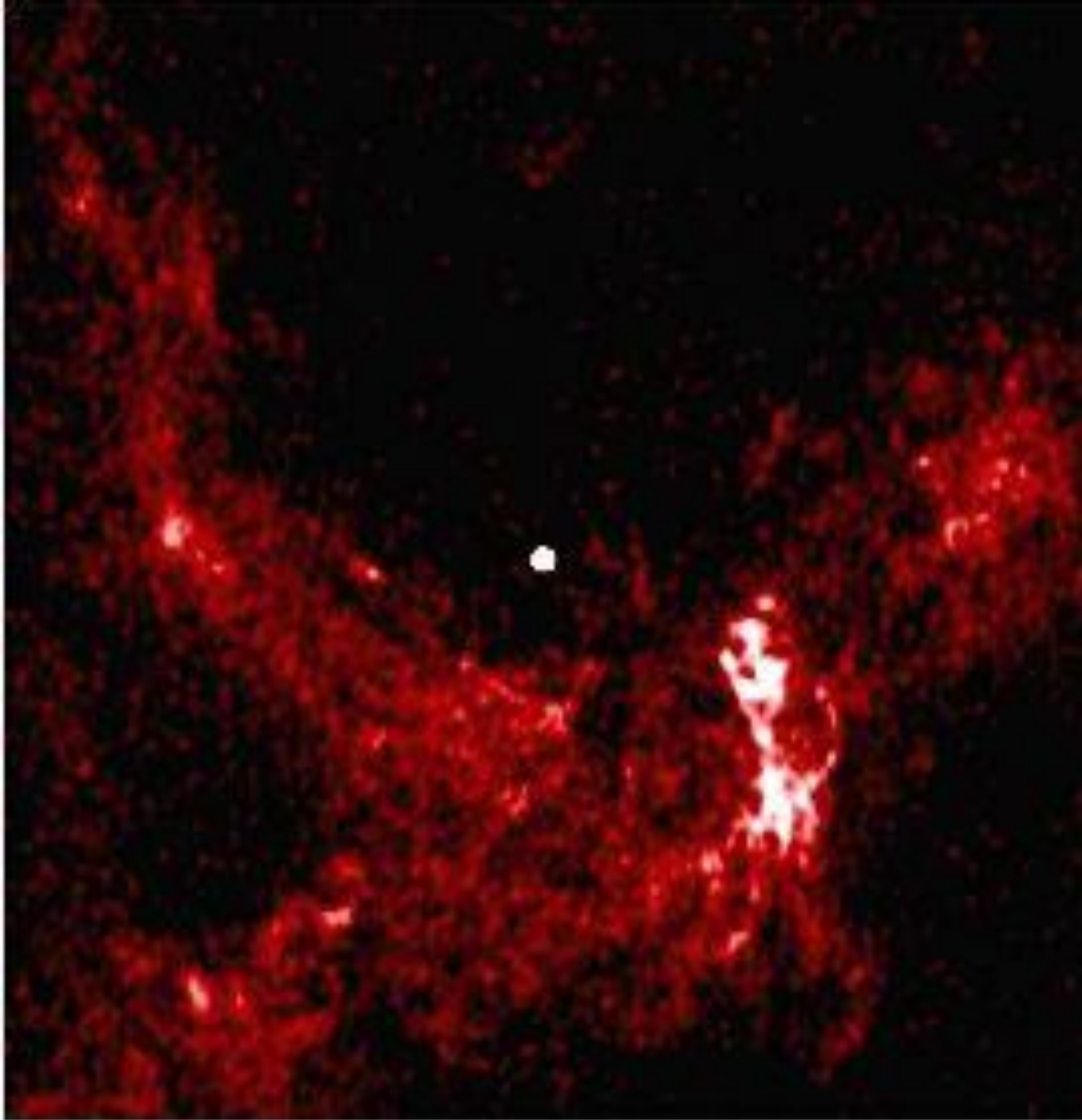
ting zwart gat  
rijf enorm

de

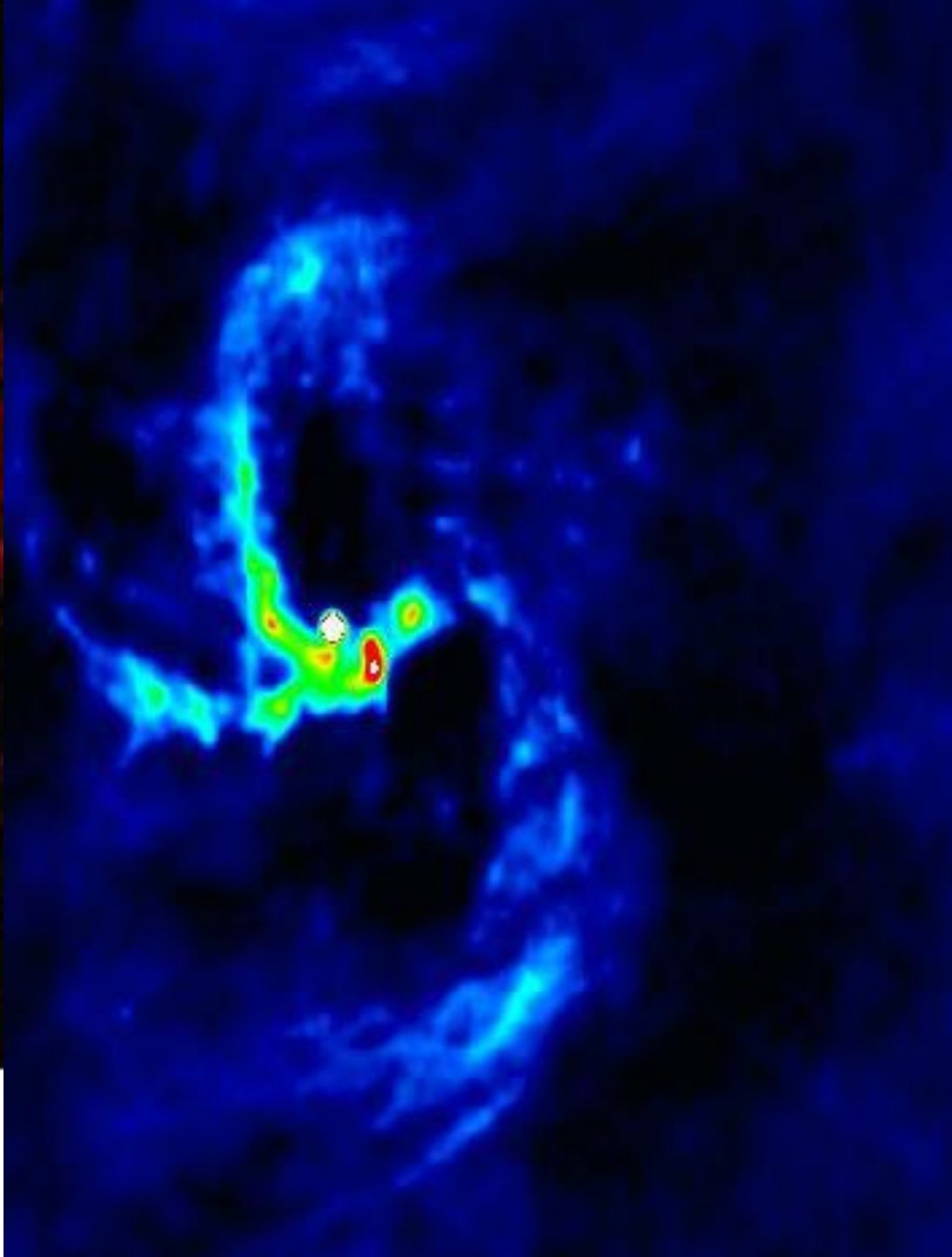
die jets ook gecombineerd over  
honderdduizenden lichtjaren  
afstand.







8 arcsec  
1 light year



*Galactic Center*  
Radio ( $\lambda = 90$  cm) Image  
Lazio, & Hyman 1999

R 0.3+0.0  
al Filaments  
— The Cane  
Background Galaxy  
Nonthermal  
Filaments  
The Pelican  
Sgr E  
Galactic equator  
Tornado (SNR)  
32

Directe methode om de massa van Sgr A\* te bepalen : de Keplerbanen van de sterren binnen 1 boogseconde eromheen opmeten. Komt eigenlijk neer op 3e wet van Kepler gebruiken:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{\text{BH}}} a^3$$

Uitdagingen:

- Het centrum van de Melkweg zit achter alle stof in de schijf verborgen.
- De aardatmosfeer is turbulent en doet sterren “fonkelen” wat resolutie beperkt.

Begin jaren 1990 komen nieuwe telescopen en technologieën voorhanden aan beide kanten van de oceaan:

- Europa neemt in 1989 de **New Technology Telescope** (3.6m) in gebruik waarop technologieën (actieve optica) werden gepioneerd die 10 jaar later in de units van de **Very Large Telescope** (8.2m) werden geïmplementeerd





Begin jaren 1990 komen nieuwe telescopen en technologieën voorhanden aan beide kanten van de oceaan:

- De VS nemen in 1993 de eerste van de twee **Kecktelescopen** (10m) in gebruik.



De Duitse infraroodastronoom **Reinhard Genzel** (1952-...) werkt eerst in de VS en verhuist in 1986 naar het Max Planck Institut für extraterrestrische Physik (MPE).

Hij ziet in dat de nieuwe technologieën kunnen toelaten om het vermoedelijke zwart gat in het hart van de Melkweg te “wegen”.



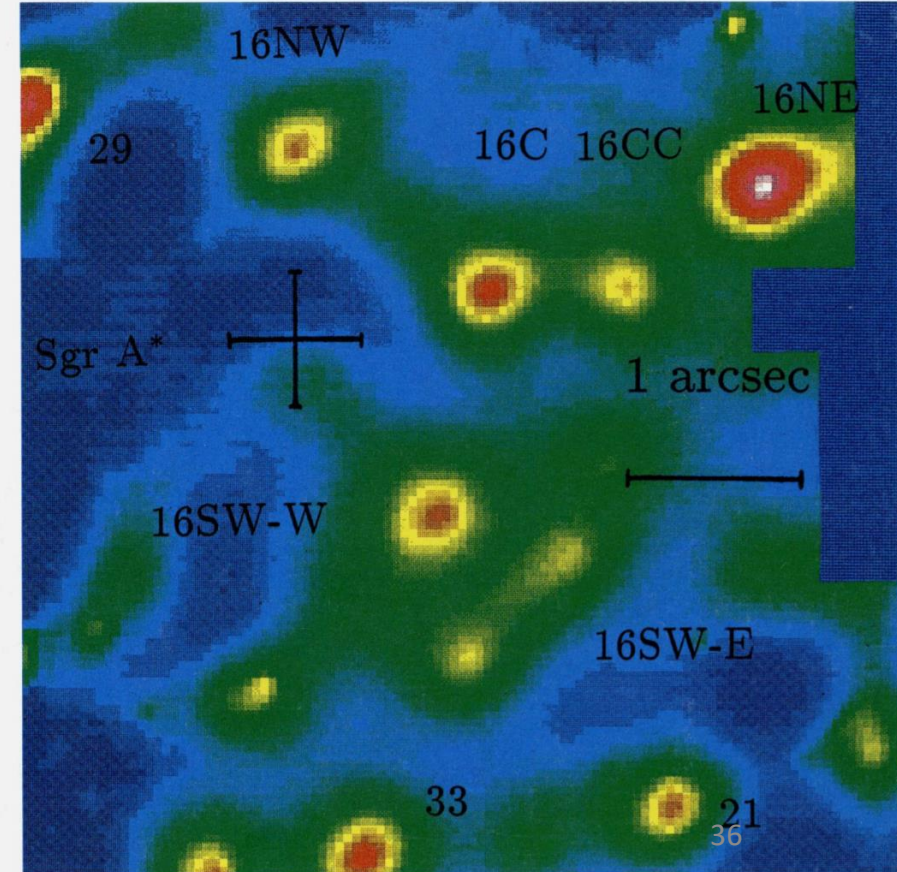
## The GALACTIC CENTRE: Best Images Ever

First Results from SHARP at the NTT

A. ECKART, R. HOFMANN, P. DUHOUX, R. GENZEL, S. DRAPATZ,  
MPE, Garching bei München

At the Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik a System for High Angular Resolution Pictures, SHARP, has been developed during the last 18 months for observations in the near infrared spectral range (1 to 2.5  $\mu\text{m}$ ). It is based on a  $256 \times 256$  HgCdTe NICMOS3 array manufactured by Rockwell Inc. The camera has an image scale of 0.05 arcsec/pixel at the Nasmyth focus of the ESO 3.5-m New Technology Telescope. The electronics and the data acquisition system allow the recording of frame rates up to 10 Hz for speckle observations with a built-in cold shutter. Appropriate software has been developed for on-line quick-look data reduction (long exposure, shift-and-add, etc.). The system sensitivity at 1 Hz data rate allows  $5\sigma$  detection of  $K \approx 9.5$  in  $\approx 1$  arcsec seeing and fainter for better seeing.

The first observing run took place between August 18 and 23, 1991. The figure shows a K-band image of the inner region of the galactic centre ( $6.4 \times 6.4$  arcsec corresponding to  $0.25 \times 0.25$  pc, North is up and East to the right; a scale of 1 arcsec is marked). The image is a result of  $\approx 1000$  frames with 0.5 sec and 1 sec exposure time





De Amerikaanse astronome **Andrea Ghez** (1965-...) specialiseert zich tijdens haar doctoraatsonderzoek in hoge-resolutie-imaging van sterren.

In 1996 past ze deze technieken voor het eerst toe om het centrum van de Melkweg in beeld te brengen.

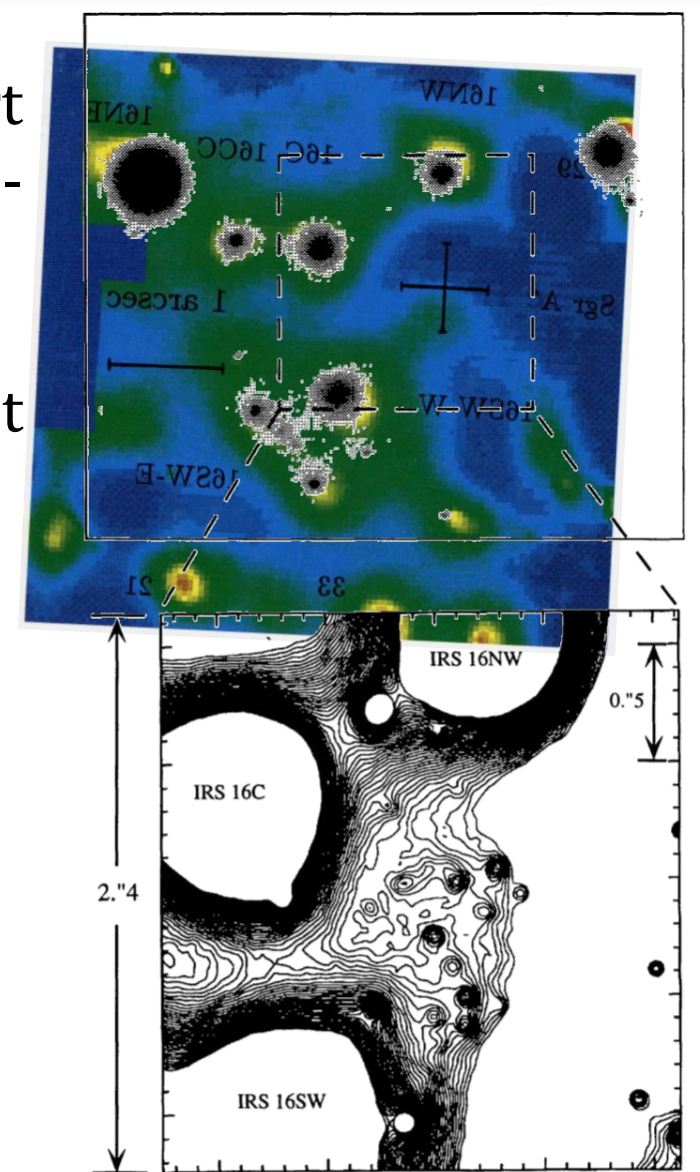
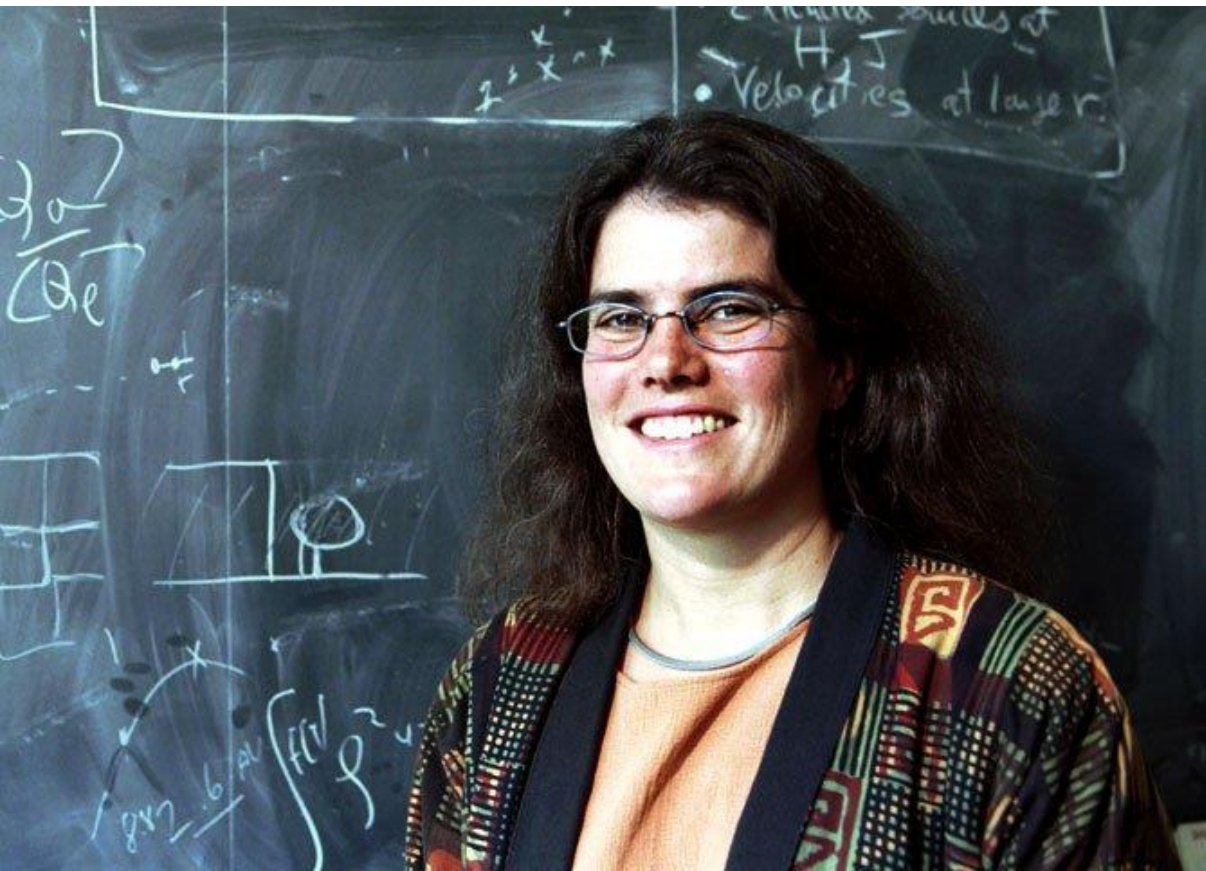


Figure 3: A shift-and-add image of the central  $5'' \times 5''$  comprised of 2,741 seeing selected frames taken in June, 1995. The contours do not correspond directly to flux density levels since these images are not deconvolved. Nonetheless, comparisons with previously published maps at lower resolution indicate that sources as faint as 15th  $K$  mag are easily identified. At the resolution of  $0.''05$  ( $=420$  AU at  $8.5$  Kpc), new isolated point sources are detected.

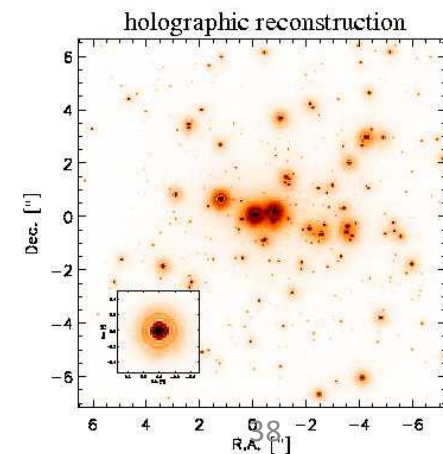
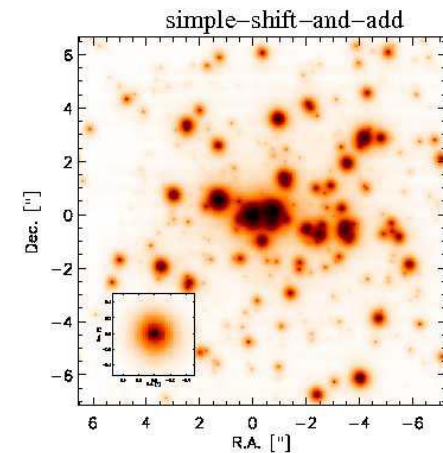
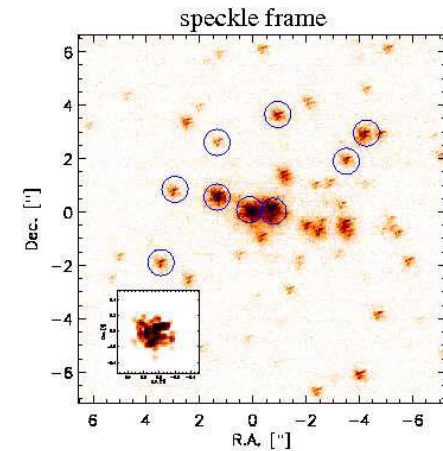
Hun beider aanpak : veel ( $\sim 1000$ ), kortbelichte ( $\sim 0.1$ sec) foto's nemen met een ultragevoelige camera met minipixels ( $< 0.05$  boogseconde).

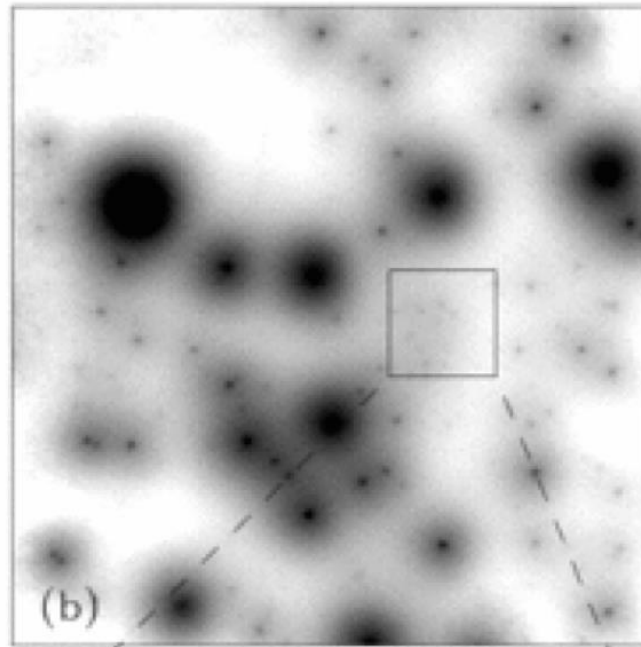
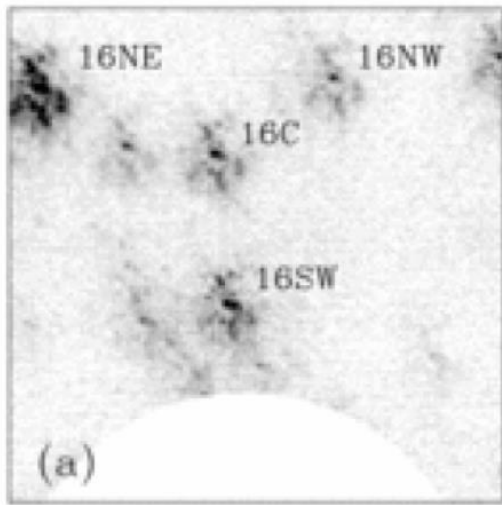
Op elke foto is de seeing "bevroren". Elke ster bestaat uit een aantal vlekken (speckles) en vult geen hele seeingschijf.

In het IR werken, heeft twee voordelen : je kan beter doorheen het stof kijken en de seeing is kleiner dan in het optische.

Deze foto's worden samengesteld tot één beeld dat tweemaal scherper is dan de seeing.

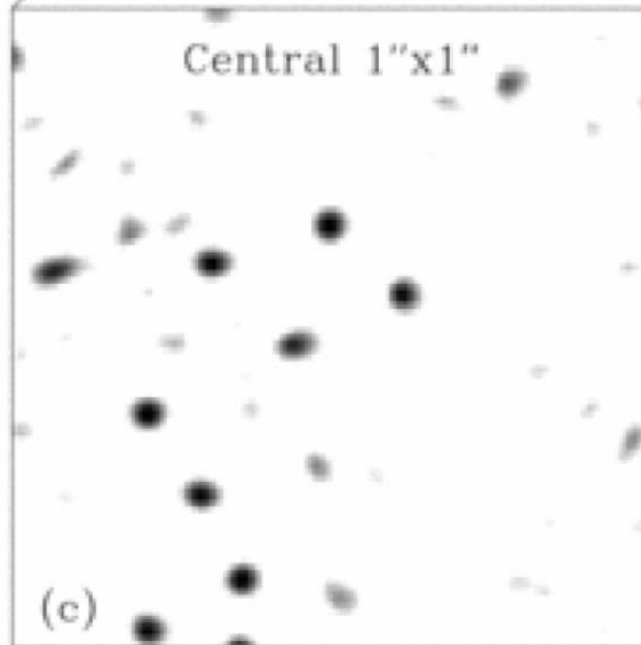
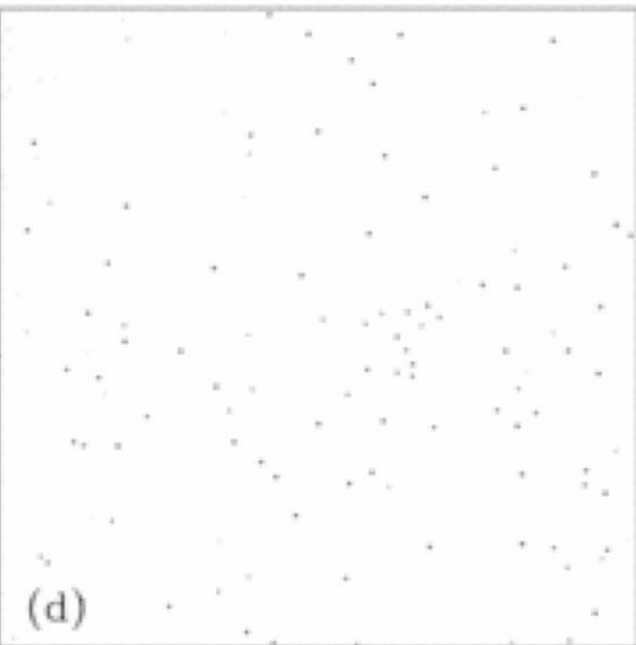
Dat kan door een simpele verschuiving van elk van de foto's waarna ze opgeteld worden of via de ontwikkeling van steeds gesofisticeerder algorithmes om steeds hogere resolutie en positienuwkeurigheid te bereiken.



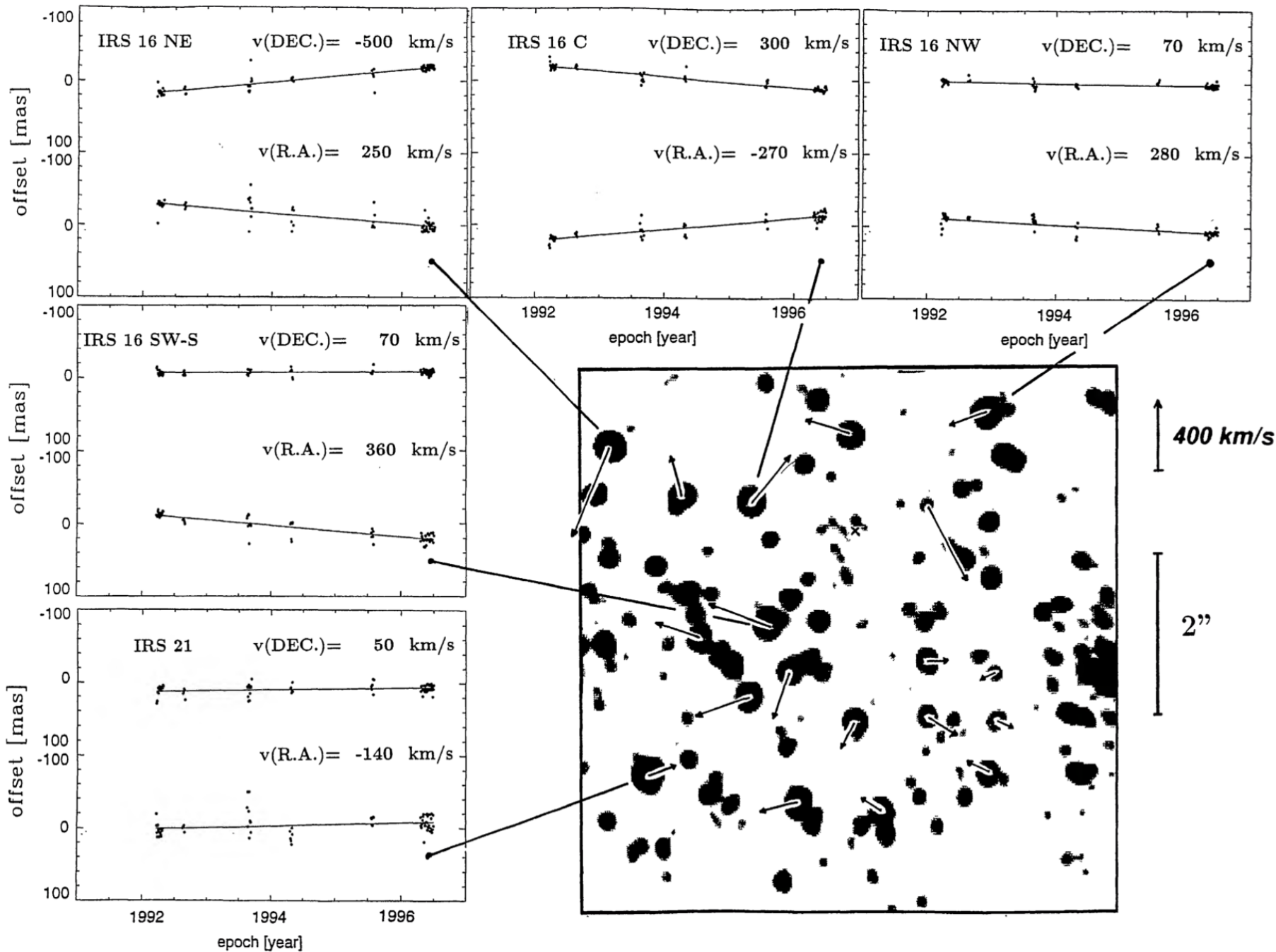


Ghez heeft toegang tot de veel grotere Keck-I-telescoop wat haar team initieel een voordeel oplevert.

Doel is de beweging van de sterren omheen Sgr A\* gedurende opeenvolgende jaren te volgen en hun banen te reconstrueren.

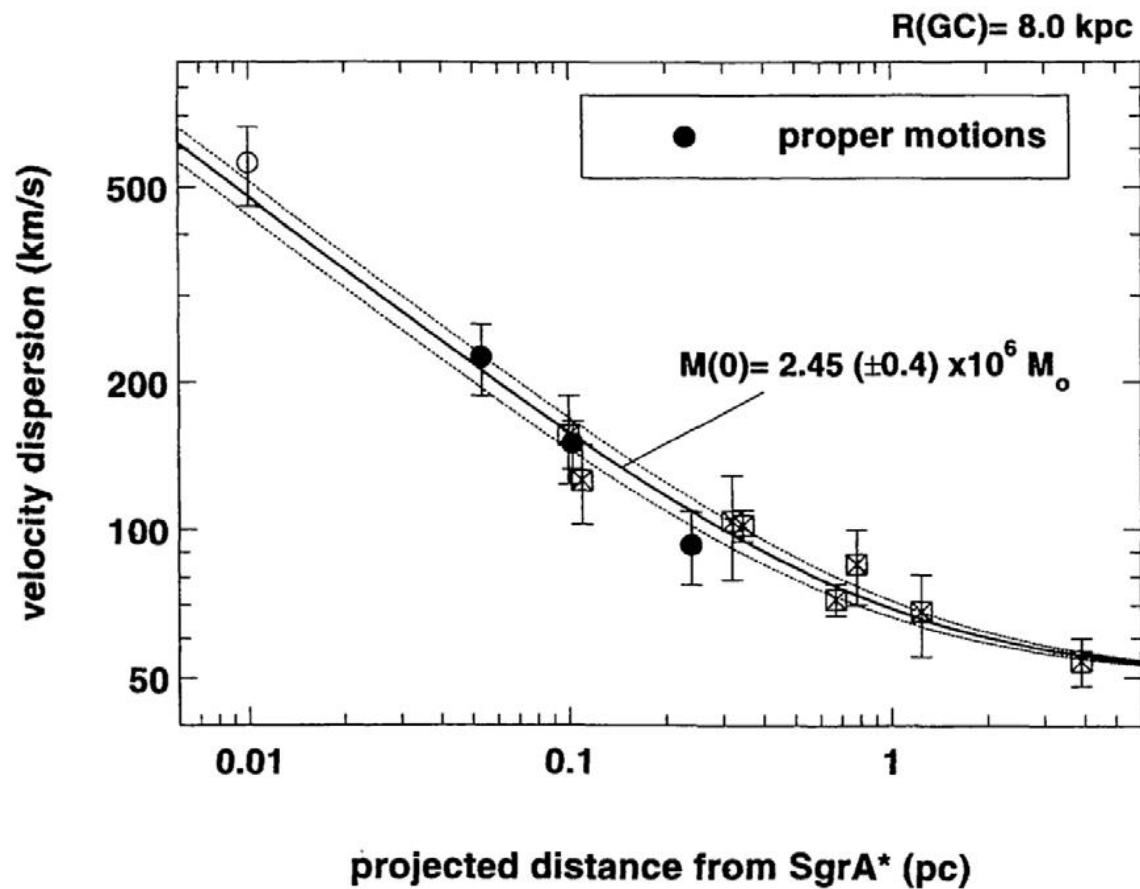






Op basis van 4 jaar aan SHARP-data kan het team-Genzel in 1997 deze kaart van de eigenbewegingen van de sterren rond Sgr A\* publiceren.





metingen aan de allerehelderste sterren toe.

De volgende revolutie : **adaptieve optica** op de Keck en VLT telescopen.

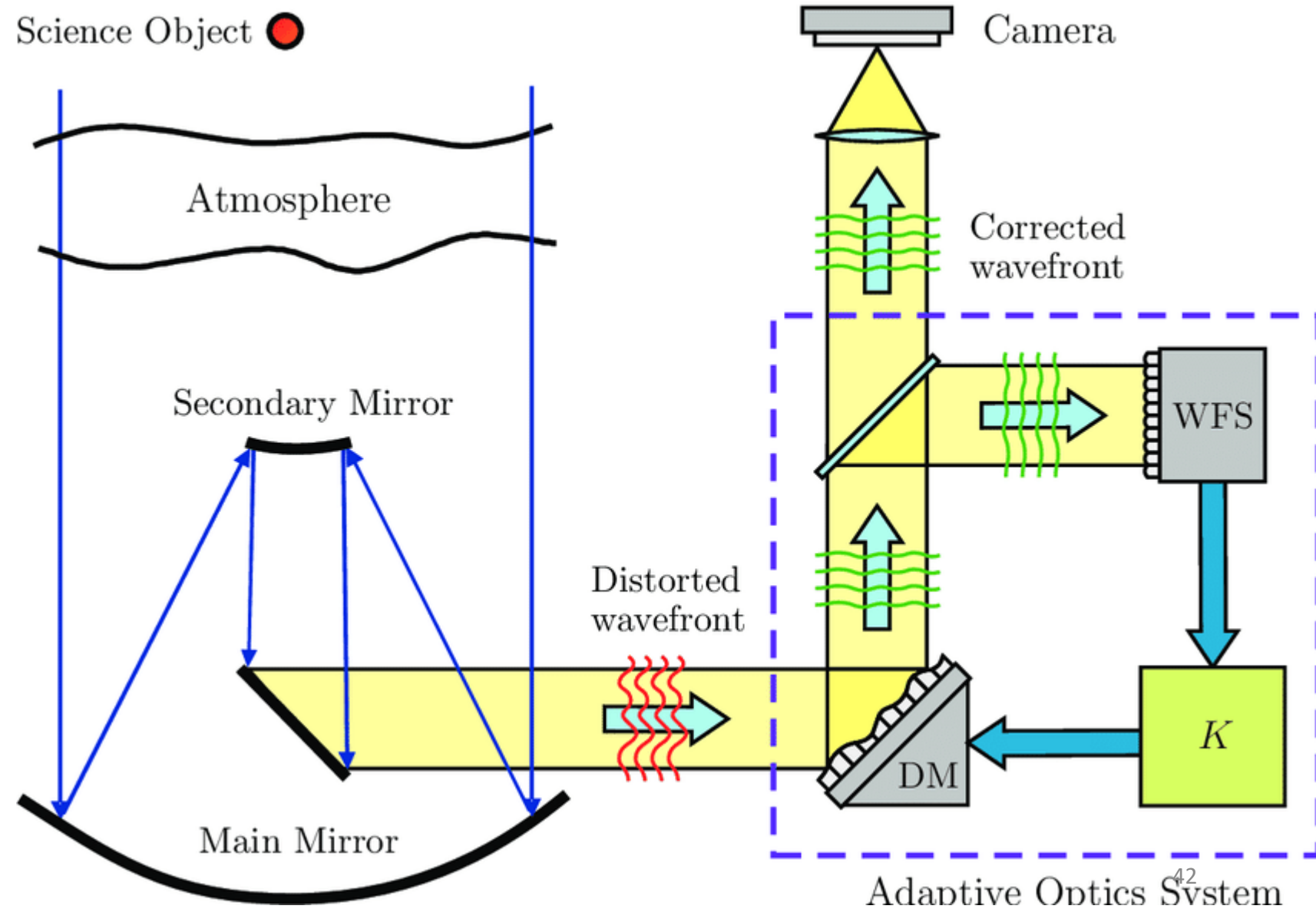
De snelheidsverschillen tussen sterren op verschillende afstanden tot Sgr A\* zijn een maat voor de omsloten massa.

De curve is een voorspelling gebaseerd op een zwart-gatmassa  $M_{\text{BH}} = 2.5 \times 10^6 M_{\odot}$ .

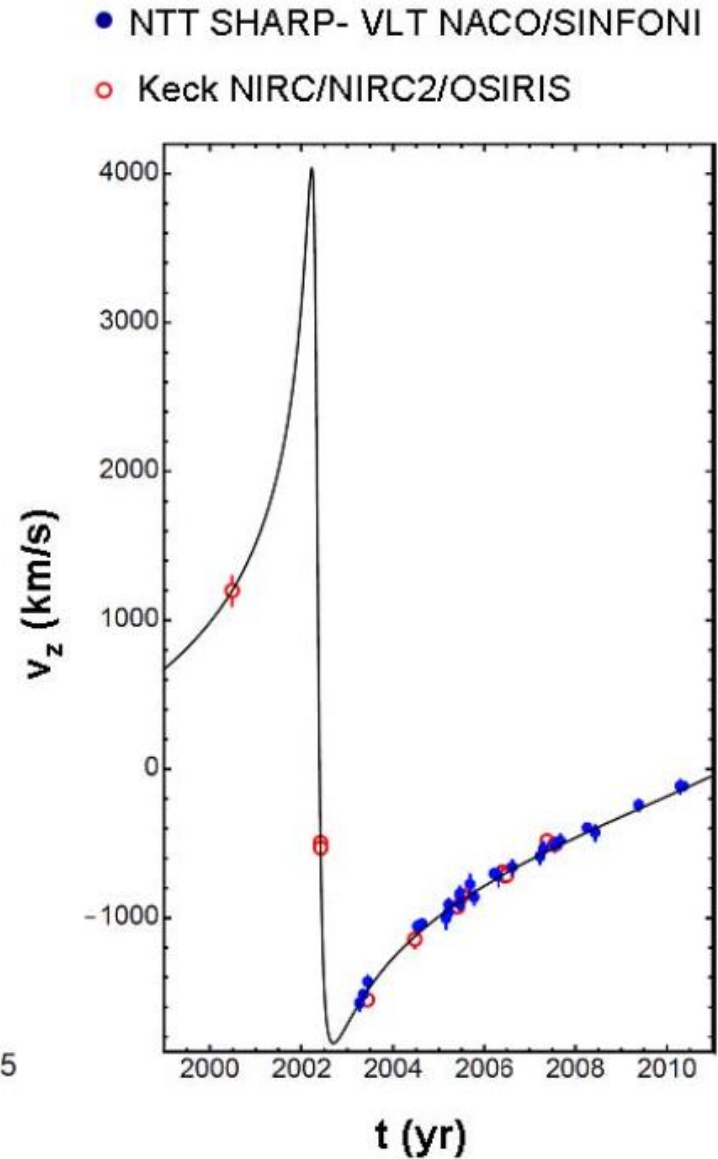
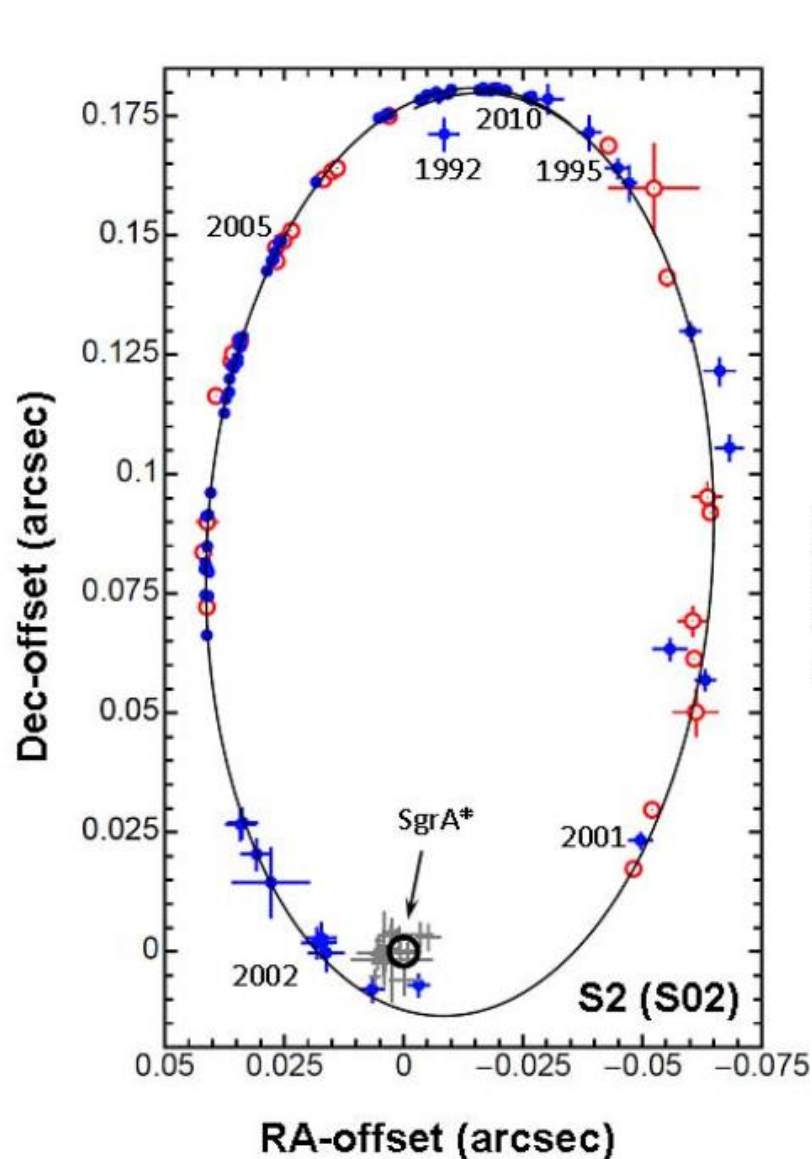
Probleem : jarenlange waarnemingsprogramma's nodig

De ultrakorte belichtingen laten enkel

Deze technologische doorbraak laat vanaf ~2000 toe om statistisch zinvolle samples van ook lichtzwakkere sterren waar te nemen in een veel korter tijdsbestek dan vroeger mogelijk was.



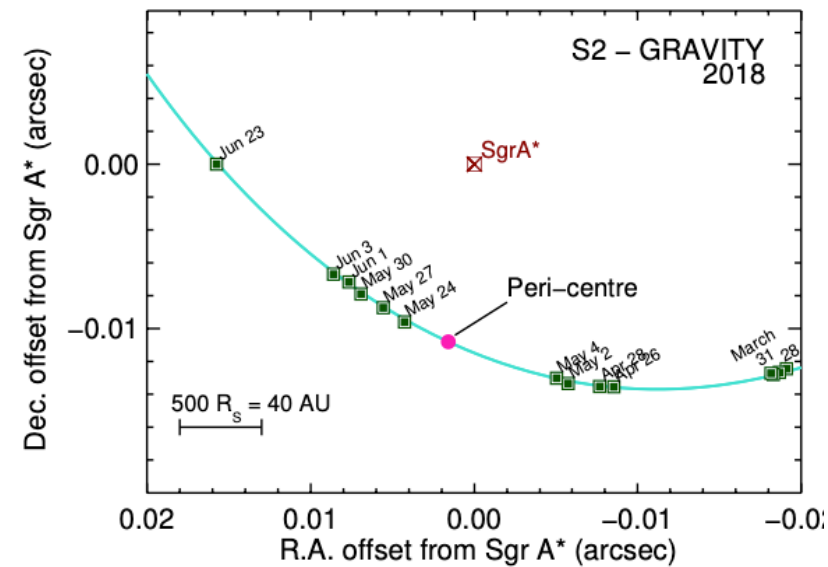
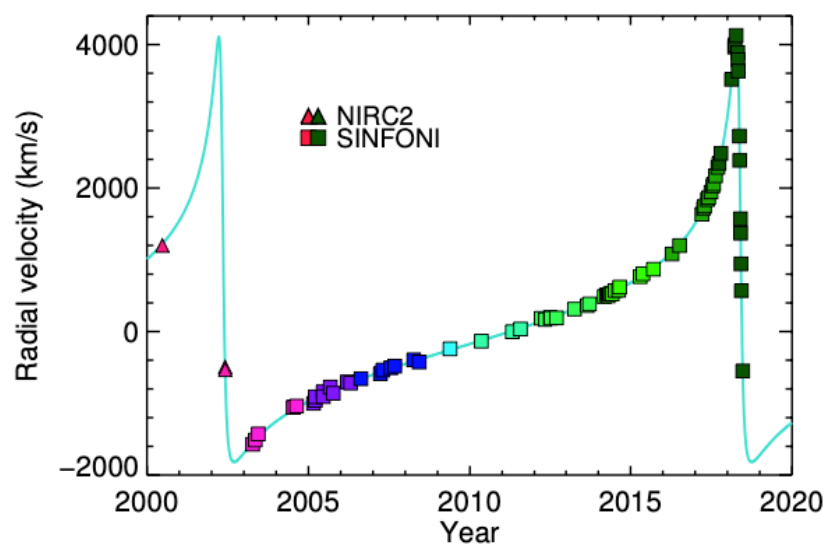
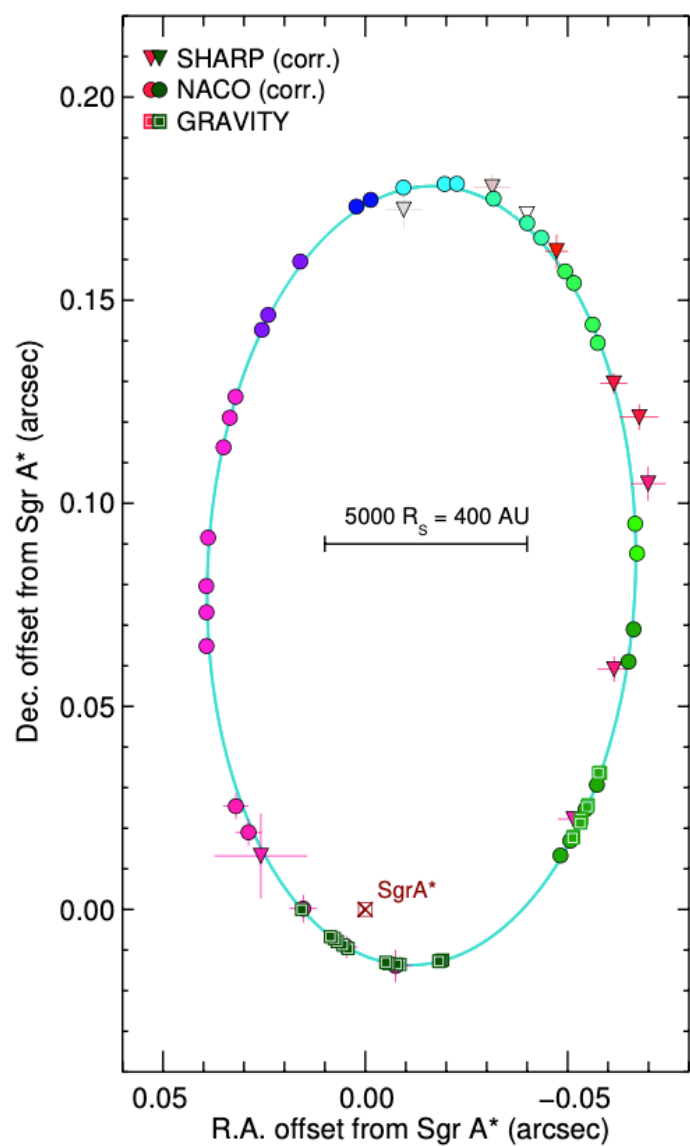
Ster S2 (Genzel) aka S02 (Ghez) blijkt in nog geen 16 jaar 1 toertje rond Sgr A\* af te leggen en nadert Sgr A\* tot op 17 lichtuur in april 2002.



De baan en radiële snelheid van S(0)2 is compatibel met een centrale puntmassa

$$M_{\text{BH}} = 4 \times 10^6 M_{\odot}$$

Deze massa ligt binnen 2 milliboogseconden (= 16 AE = afstand zon-uranus) van de radiobron Sgr A\* .



In mei 2018 ging S2 een tweede keer voorbij pericentrum en konden data van 1992 tot 2018 gecombineerd worden.

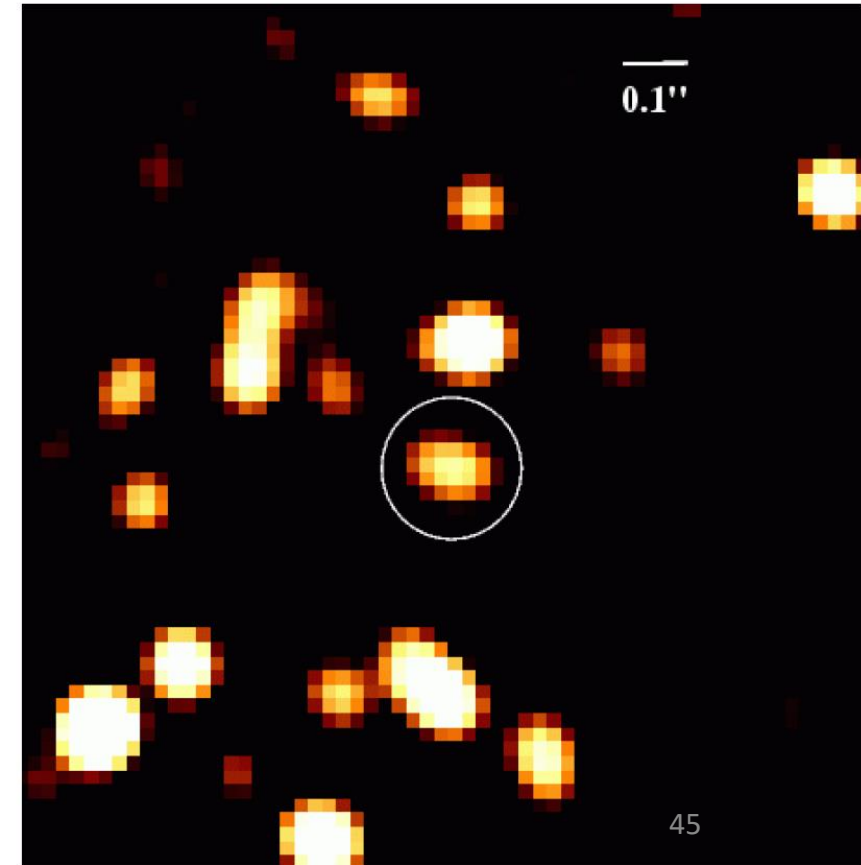
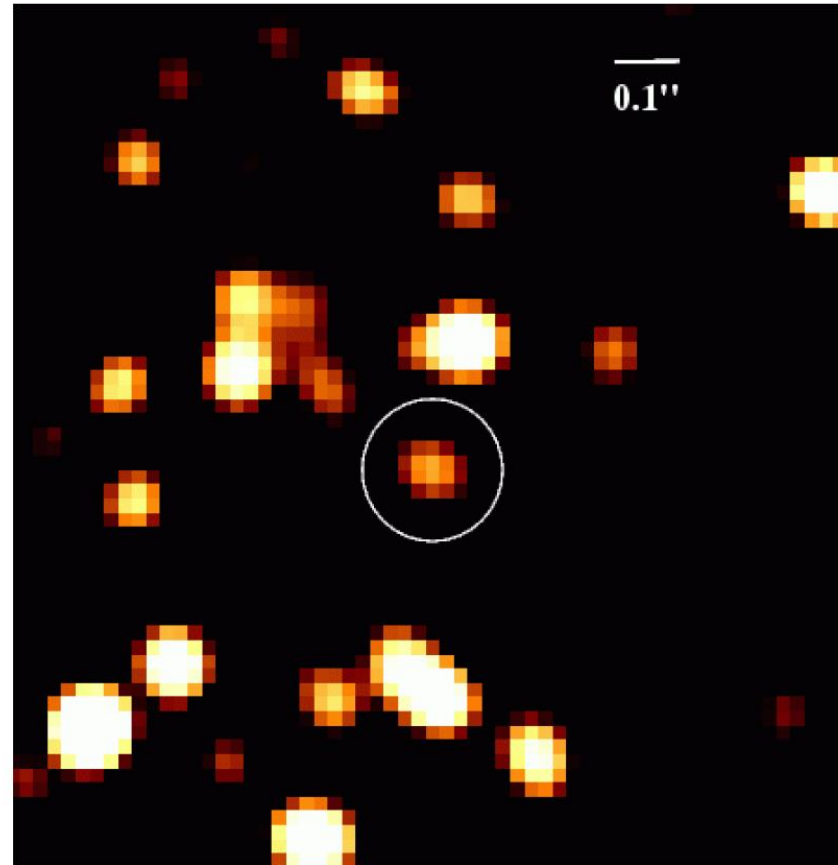
Bij de modellering van de baan en radiële snelheid werden ook relativistische effecten in rekening gebracht.

Zelfs de algemeen-relativistische precessie van de baan werd gedetecteerd met  $20\sigma$  confidentie.

Soms licht Sgr A\* op in het infrarood: een “infrared flare”.

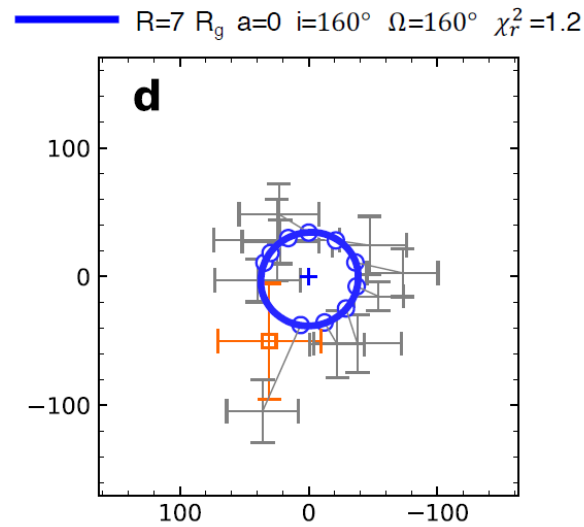
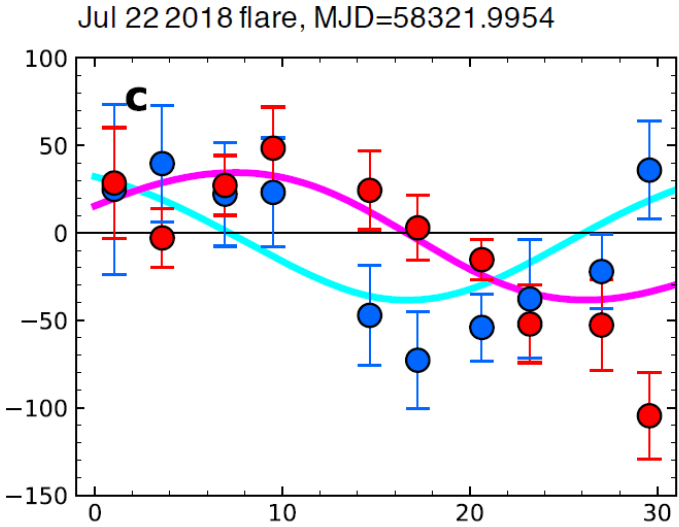
Deze flares werden in 2003 door beide teams ontdekt. Nadien volgden er nog veel.

Interpretatie: “**hot spots**” aan de binnenkant van de accretieschijf nabij de binnenste stabiele cirkelbaan (ISCO) omheen het zwart gat.



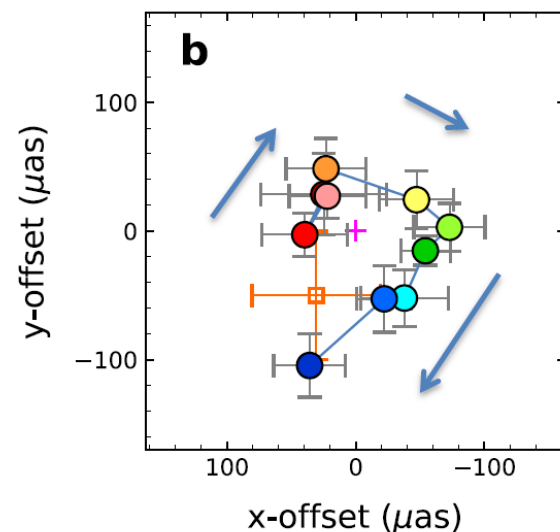
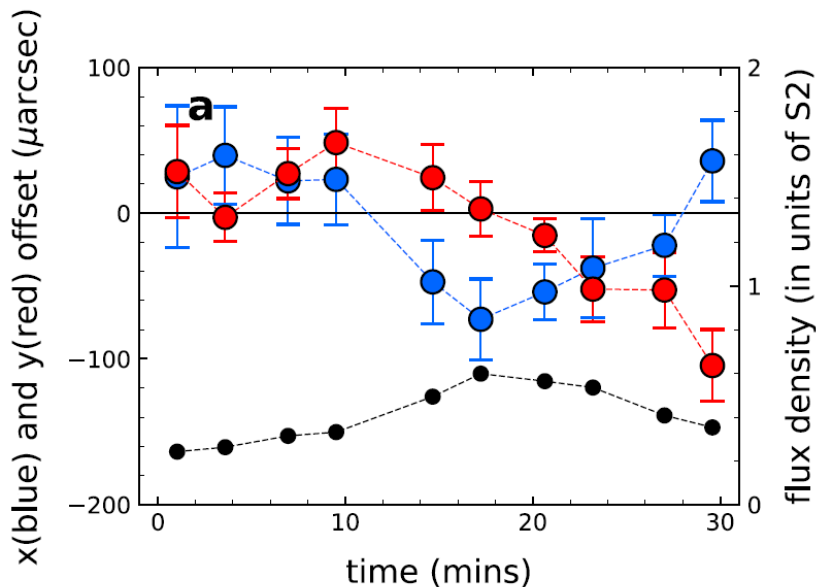


Door het licht van de 4 VLT-units te combineren in een interferometer kunnen nu posities gemeten worden met 20-70 microboogseconden (!) precisie.



Hierdoor kan de beweging van een hotspot omheen Sgr A\* gevolgd worden.

Dat blijkt een nagenoeg face-on cirkelbaan te zijn met een periode van  $\sim 30$ -60 minuten.



Data OK met een Schwarzschild-BH met  $M_{\text{BH}} = 4 \times 10^6 M_\odot$  of een iets lichter maar roterend Kerr-BH met  $M_{\text{BH}} = 3 \times 10^6 M_\odot$ .

## Wat probeert de Nobelprijs eigenlijk te belonen?

“All of my remaining realisable assets are to be disbursed as follows: the capital, converted to safe securities by my executors, is to constitute a fund, the interest on which is **to be distributed annually as prizes** to those who, during the preceding year, have conferred the greatest benefit to humankind. The interest is to be divided into **five equal parts** and distributed as follows: **one part to the person who made the most important discovery or invention in the field of physics**; one part to the person who made the most important chemical discovery or improvement; one part to the person who made the most important discovery within the domain of physiology or medicine; one part to the person who, in the field of literature, produced the most outstanding work in an idealistic direction; and one part to the person who has done the most or best to advance fellowship among nations, the abolition or reduction of standing armies, and the establishment and promotion of peace congresses.”

## Statuten van de Nobelstichting:

“A prize amount may be equally divided between **two works**, each of which is considered to merit a prize. If a work that is being rewarded has been produced by two or three persons, the prize shall be awarded to them jointly. **In no case may a prize amount be divided between more than three persons.**”

Sin 1974 kan een Nobelprijs ook niet meer posthuum worden uitgereikt (behalve als je tussen toekennen en afhalen van de prijs het loodje legt).

Het prijzengeld bedraag nu iets minder dan 1 miljoen euro per “volle” Nobelprijs. Dat is heel veel geld.

Heeft deze manier om wetenschap in de bloemetjes te zetten zin?

- De artificiële beperkingen van de Nobelstichting leiden vaak tot controverses:
  - In 2009 krijgen Willard Boyle en George E. Smith de Nobelprijs voor de uitvinding van de CCD-chip, de basis van elke digitale camera.

In de verantwoording wordt expliciet naar de chip als “imager” verwezen. Boyle en Smith hebben echter enkel de chip uitgevonden. Het was Michael Tompsett die de CCD-camera heeft uitgevonden en gebouwd ...

- In 2013 krijgen Peter Higgs en François Englert de Nobelprijs voor de voorspelling van het Higgsboson via spontane symmetriebreking.

Englerts co-auteur Robert Brout is dan al dood. Er zijn in 1964 drie papers over spontane symmetriebreking geschreven: wat met Gerald Guralnik, C. Richard Hagen en Tom Kibble? In 2010 wonnen ze gezamenlijk de Sakurai Prize for Theoretical Particle Physics van de APS. En wat met CERN, waar het Higgsboson werd ontdekt????

- De artificiële beperkingen van de Nobelstichting leiden vaak tot controverses:
  - De fysicaprijs kan enkel aan mensen en niet aan organisaties worden toegekend. Dus krijgen Reiner Weiss, Kip Thorne en Barry Barish de Nobelprijs 2017 voor hun bijdragen aan LIGO.

Er werken meer dan 1000 wetenschappers en ingenieurs in LIGO ... Thorne: “It is unfortunate that, due to the statutes of the Nobel Foundation, the prize has to go to no more than three people, when our marvelous discovery is the work of more than a thousand.”

- In 1983 wint William Fowler de prijs voor zijn werk aan de kernfusieprocessen die de elementen hebben gevormd.

Waar te beginnen? Margaret en Geoffrey Burbidge? Fred Hoyle (sowieso al een allround genie)? Edwin Salpeter?



- De artificiële beperkingen van de Nobelstichting leiden vaak tot controverses:
  - In 1978 krijgen Arno Penzias en Robert Wilson de prijs voor het ontdekken van de kosmische achtergrondstraling.

Ralph Alpher had erbij moeten zijn: hij had eind jaren 1940 samen met Georg Gamow het bestaan ervan voorspeld!

- In 1974 krijgen Martin Ryle en Antony Hewish de prijs voor hun bijdragen aan de radiosterrenkunde en de ontdekking van pulsars in 1967.

Jocelyn Bell (Hewish' assistente) is er niet bij. Hewish : "I believe it would demean Nobel Prizes if they were awarded to research students, except in very exceptional cases, and I do not believe this is one of them."

Fred Hoyle en Thomas Gold leggen pulsars theoretisch uit als spinnende neutronensterren. Ook niks. Het concept neutronenster is in 1933 door Walter Baade en Fritz Zwicky bedacht. Nada ...

De Nobelprijs draagt nog steeds het beeld uit van de eenzame, geniale wetenschapper die in z'n eentje ongelooflijk slimme dingen zit te doen.

Dat strookt absoluut niet met de werkelijkheid! Vroeger al niet en nu zeker niet.

Genzel en Ghez hadden steeds een team van mede-onderzoekers rond zich.

Ook Penrose werkte niet in een vacuüm (Wheeler, Hawking, ...). BTW: Hawking?????

Wetenschap vordert incrementeel : soms in kleine stapjes, soms in grotere. Door jaarlijks zo één stapje in de bloemetjes te zetten, loop je onvermijdelijk het risico op controverses.

1 M€ is heel veel geld. Ontvangers doen er zowat vanalles mee : het huis afbetalen, de kinderen laten studeren, een zeilboot kopen, zelf een fonds oprichten voor een prijs, goede doelen steunen, onderzoek mee doen, ...

De Nobelstichting speelt meestal op safe: een theoretisch werk krijgt meestal pas een Nobel als er ook experimenteel/observationeel werk ter ondersteuning is.

Dat geeft de indruk dat theoretisch werk “mis” is als het niet in overeenstemming zou zijn met het experiment of de waarneming.

Dat hoeft niet: ook een “fout” theoretisch werk kan ongelooflijk goed gevonden zijn of aanleiding geven tot fantastische andere doorbraken.

Alsof experimenteel werk niet “fout” kan zijn ...



