

Η ακτινοβολία των μελανών οπών

Μια μικρή παρουσίαση για τα πιο εξωτικά αντικείμενα του σύμπαντος

Γιάννης Νταλιάνης (ΕΚΠΑ)

14 Σεπτεμβρίου 2022, ΚΕΡΚΥΡΑ, EISA

Περίληψη

- ❖ Βαρύτητα
- ❖ Ταχύτητα του φωτός
- ❖ Θεωρία της Γενικής Σχετικότητας
- ❖ Βαρυτική Κατάρρευση
- ❖ Μελανές οπές στο Σύμπαν
- ❖ Ακτινοβολία Hawking
- ❖ Βαρυτική ακτινοβολία

Η παγκοσμιότητα της βαρύτητας

Από το Principia του Νεύτωνα

- “Για να διατηρηθεί ένα σώμα σε τροχιά πρέπει να υπάρχει μία συγκεκριμένη δύναμη με κατεύθυνση προς το κέντρο της τροχιάς “ (κεντρομόλος)
- “ Η Σελήνη κινείται με τη βαρύτητα προς τη γη και με τη δύναμη της βαρύτητας διατηρείται στην τροχιά της και δεν εκτελεί ευθύγραμμη κίνηση
- “ Η δύναμη από την οποία η σελήνη διατηρείται στην τροχιά της ισοδυναμεί με τη δύναμη της βαρύτητας εδώ στη Γη και άρα είναι η ίδια δύναμη που γενικά αποκαλούμε βαρύτητα”

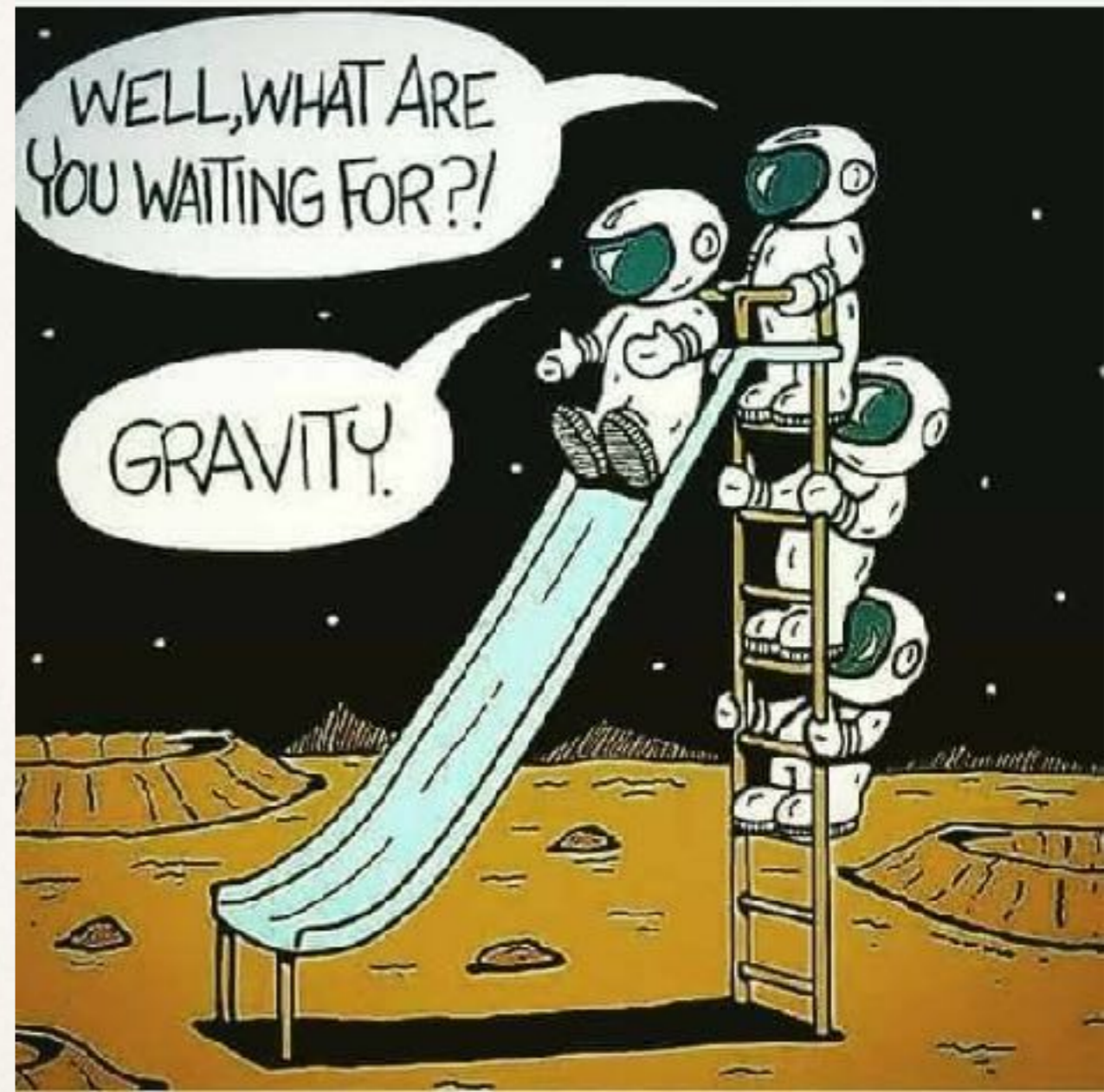




Γιάννης Νταλιάνης, 2022

Η βαρύτητα

Σχετίζεται με τη μάζα ενός σώματος



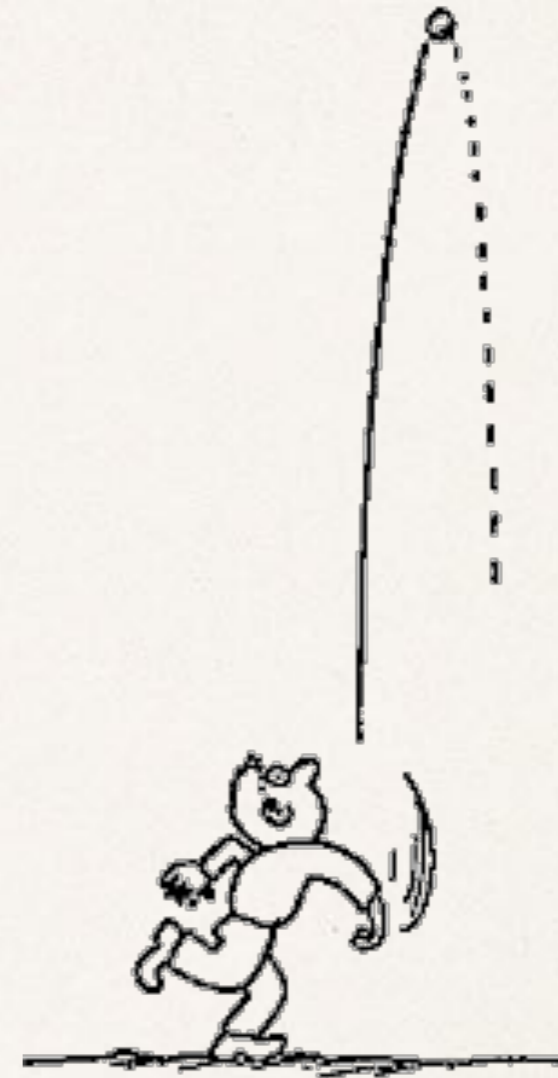


Βαρύτητα

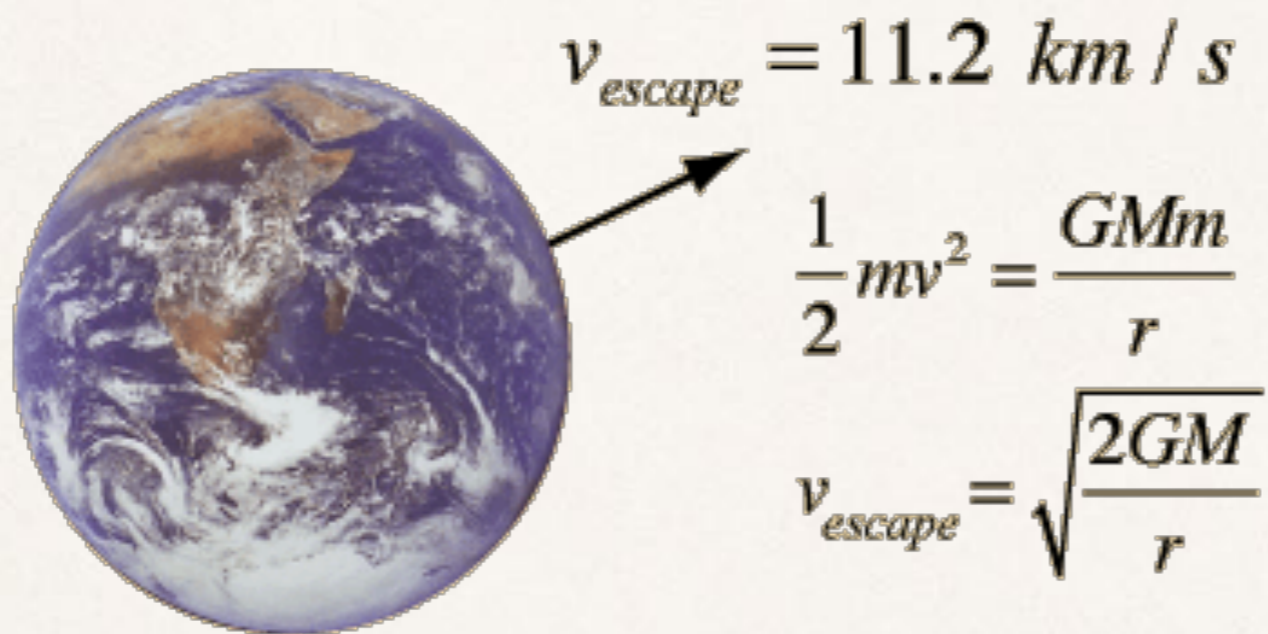
Γιάννης Νταλιάνης, 2022

Μελανές Οπές ;

- Το 1783 ο Τζον Μίτσελ παρουσίασε μία εργασία που πρότεινε ότι αν ένα άστρο ήταν αρκετά μεγάλο η βαρυτική του έλξη θα γίνονταν τόσο ισχυρή που “όλο το φως που εκπέμπεται από ένα τέτοιο σώμα θα επέστρεφε σε αυτό, με τη δική του βαρύτητα”. [...]“Ένα άστρο 500 φορές μεγαλύτερο και το ίδιο πυκνό”
- Το 1798 ο Λαπλάς έφτασε σε ένα παρόμοιο συμπέρασμα



Η Γη και οι Μελανές Οπές



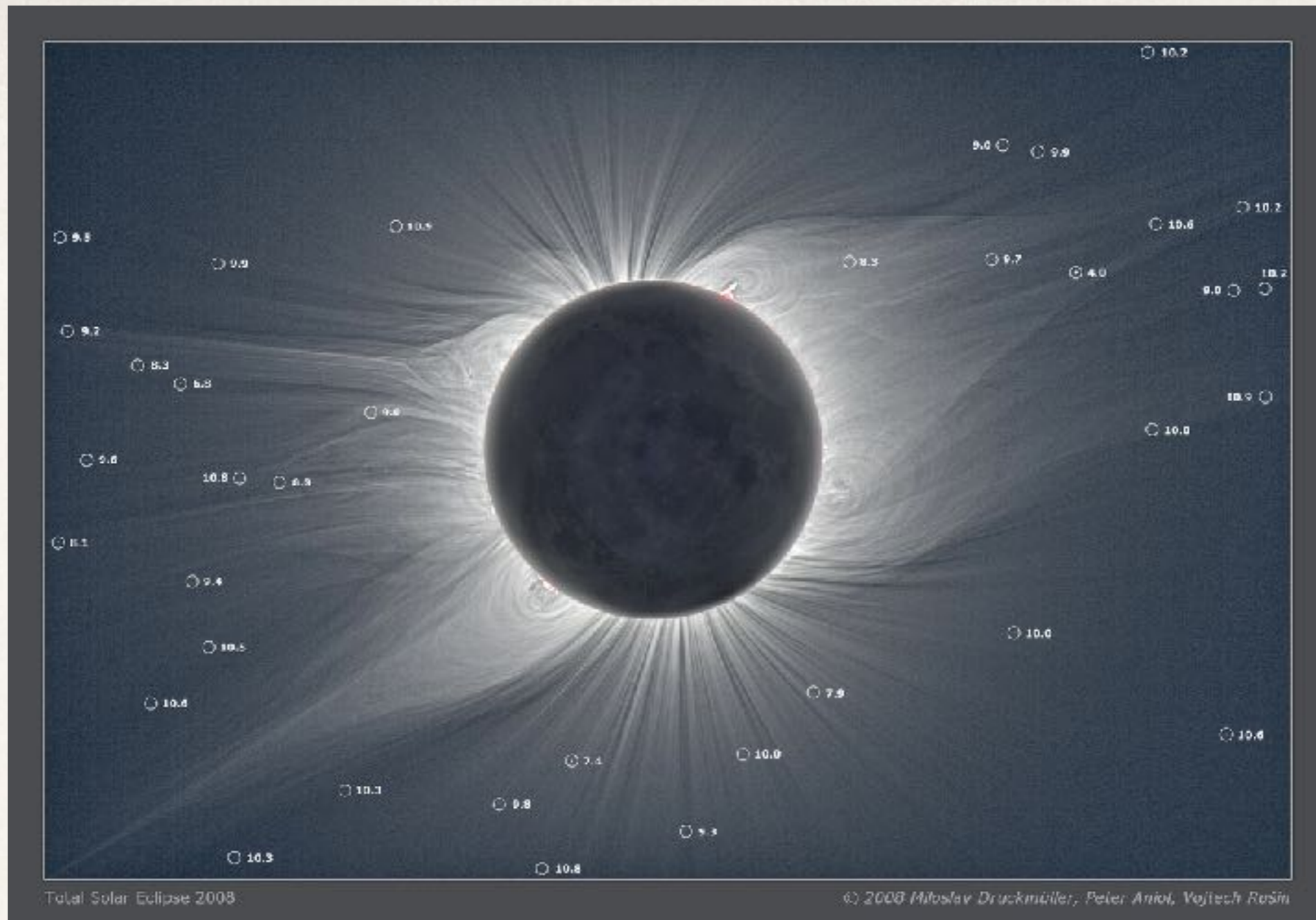
$$R_{MO} = \left(\frac{v_{esc}^2}{c} \right)^2 R_{\gamma\eta} \sim 10^{-5} m$$



Βαρύτητα = Χωρόχρονος

Αλβέρτος Αϊνστάιν





Οι μαζες καμπυλώνουν την τροχιά του φωτός

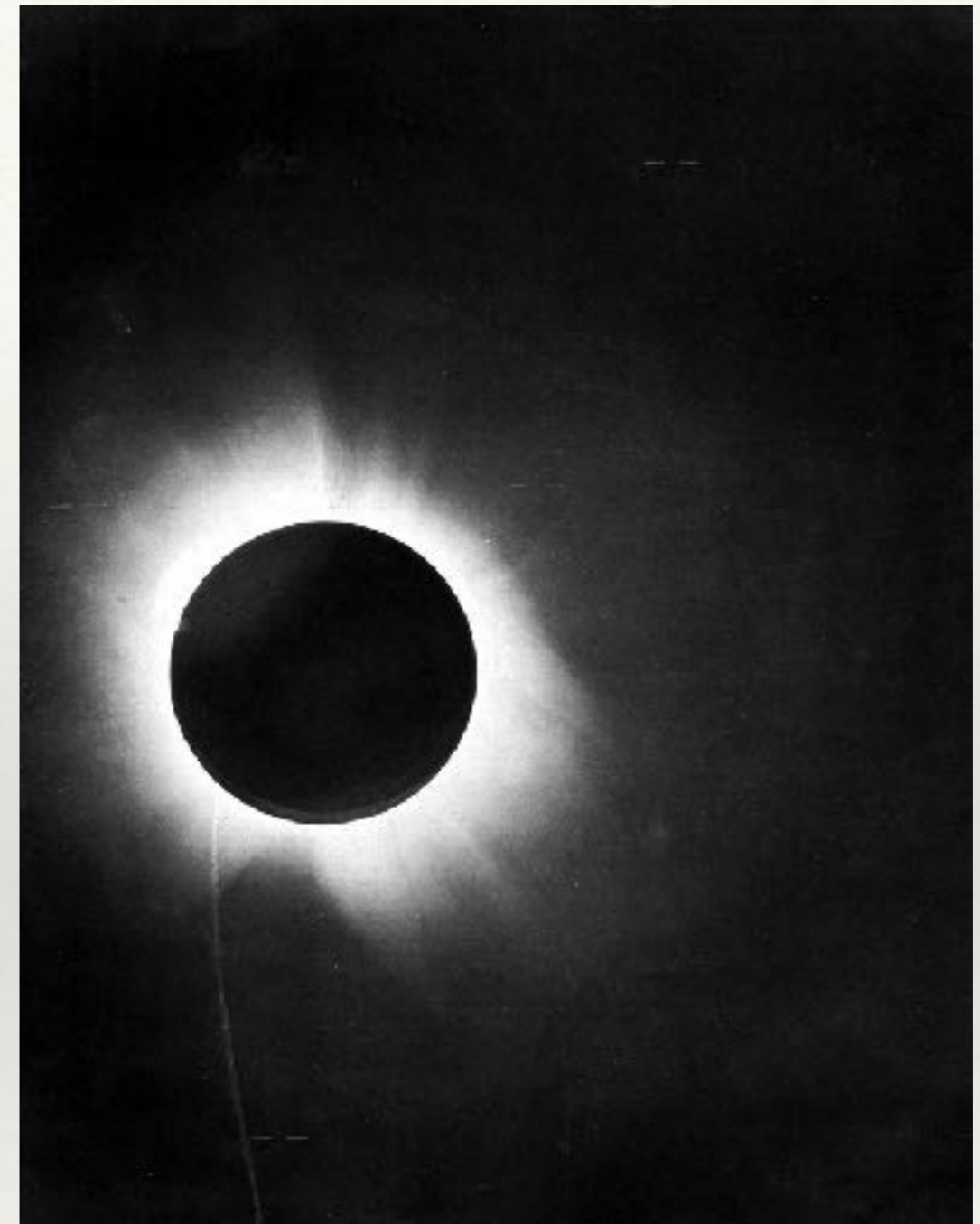
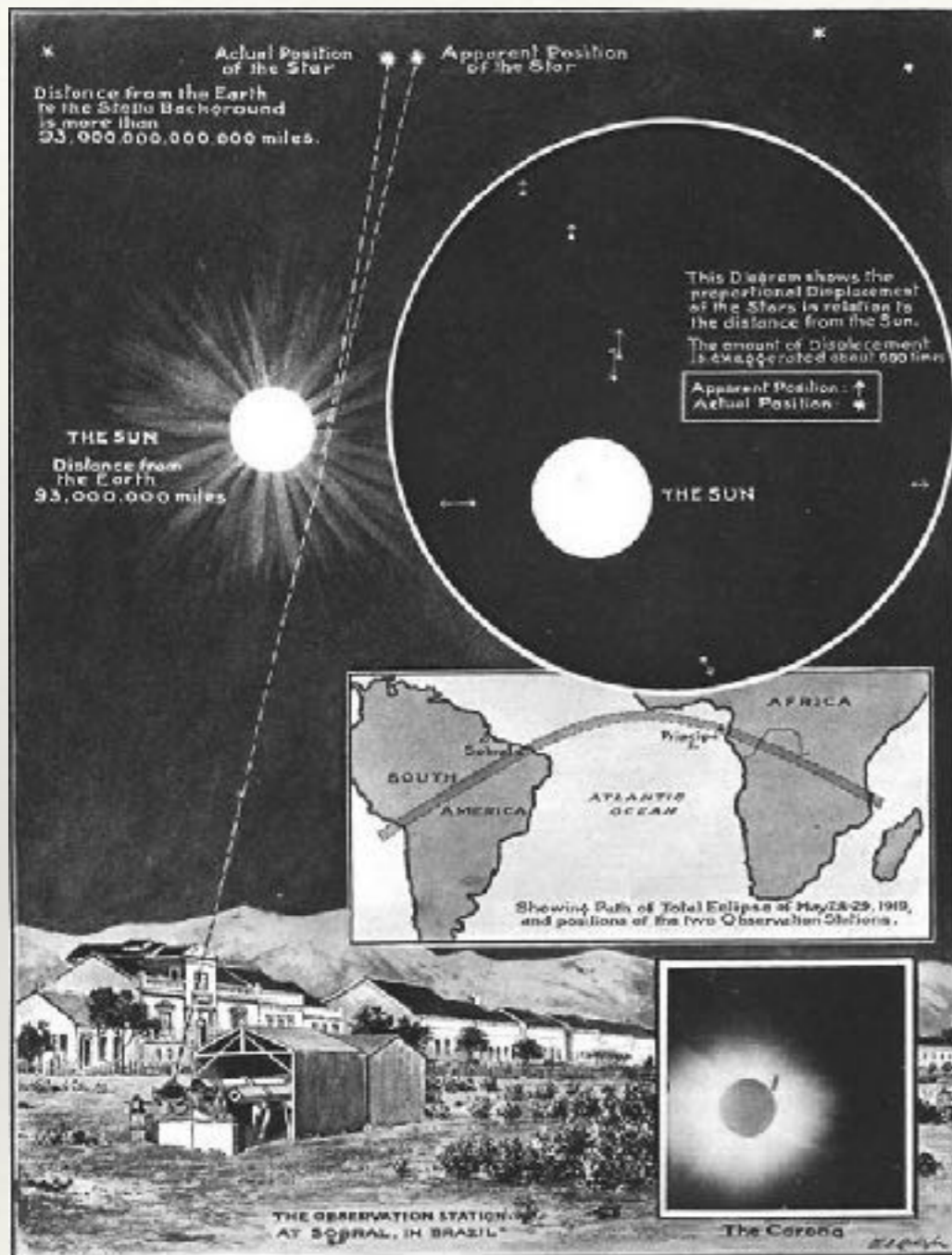
Albert Einstein

1915

Γιάννης Νταλιάνης, 2022

Οι μάζες καμπυλώνουν την τροχιά του φωτός

- Το 1915 ο Αϊνστάιν εισήγαγε τη γενική του θεωρία για τη σχετικότητα
 - Η ΓΘΣ μετέτρεπε τον χωροχρόνο σε απτή οντότητα, το γεωμετρικό σχήμα της οποίας καθορίζεται από την ύλη που υπάρχει μέσα της
 - Ο Αϊνστάιν έγινε παγκοσμίως διάσημος όταν το 1919, τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν κατά τη διάρκεια μιας **ηλιακής έκλειψης** φανέρωσαν ότι το φως των αστέρων πράγματι καμπυλώνεται γύρω από τον Ήλιο
-
- Αν ο νόμος της βαρύτητας ήταν Νευτώνειος, η φαινομενική μετατόπιση ενός αστερά είναι $0'', 87$ προς τα έξω
 - Αν η πορεία μιας ακτίνας φωτός βρίσκεται σε συμφωνία με τη ΓΘΣ αυτό οδηγεί σε μία φαινομενική μετατόπιση ενός άστρου $1'', 75$ προς τα έξω.
-
- Η θεωρία του ουσιαστικά επιβεβαιώθηκε από την κίνηση του **περιηλίου του Ερμή** το οποίο υπερβαίνει την τιμή του Νεύτωνος κατά $43''$ τόξου ανά αιώνα.



Αποστολές στο Σομπράλ και στο Πρίνσιπε το 1919

Γιάννης Νταλιάνης, 2022

Βαρυτική Κατάρρευση

Λευκοί Νάνοι

- Το 1844 ο Friedrich Bessel προτείνει την ύπαρξη ενός άορατου συνοδού του Σείριου, ο επονομαζόμενος **Σείριος Β**.
- Ο Adams (Αστεροσκοπείο Όρους Wilson) το 1915 παρατήρησε ότι τα φασματικά χαρακτηριστικά του αστέρα είναι αυτά ενός αστέρα θερμοκρασίας 25 000 K
- Ο Eddington συμπέρανε ότι ένα τόσο αμυδρό αστέρι μπορεί να είναι τόσο θερμό αν έχει πολύ μικρή επιφάνεια, όση περίπου εκείνη της Γης
- Αυτά τα άστρα ονομάστηκαν **λευκοί νάνοι**.
- Ο Ralf Fowler, το 1926, συνειδητοποίησε ότι οι **στατιστικοί νόμοι της κβαντομηχανικής** (Φέρμι - Ντιράκ) προβλέπουν μία πίεση που αντιστέκεται στην περαιτέρω συμπύκνωση.

Αστέρες Νετρονίων

- Το 1931 ο Chandrasekhar συμπέρανε ότι υπάρχει ένα **κρίσιμο όριο** στην μάζα ενός λευκού νάνου (1.4 Ηλιακές μάζες) που όταν ξεπεραστεί ο νάνος καταρρέει.
- Ο Lev Landau έφτασε στο ίδιο αποτέλεσμα ανεξάρτητα: “Δεν υπάρχει στην κβαντική θεωρία κάποια αιτία που να εμποδίζει την κατάρρευση του συστήματος μέχρι ενός σημείου.”
- Chandrasekhar: “Όταν οι κεντρική πυκνότητα είναι αρκετά μεγάλη οι σχηματισμοί θα έχουν τόσο μικρές ακτίνες που θα πάψουν να έχουν οποιαδήποτε πρακτική σημασία για την αστροφυσική”
- Eddington: **Νομίζω ότι θα έπρεπε να υπάρχει ένας νόμος της Φύσης που θα εμπόδιζε ένα άστρο να συμπεριφέρεται με τόσο παράλογο τρόπο!**”
- Το 1933 Baade και Zwicky: το άστρο θα μπορούσε να καταλήξει σε μικροσκοπική **σφαίρα νετρονίων**
- Οι αστέρες νετρονίων παρέμειναν για 3 δεκαετίες θεωρητικές επινοήσεις μέχρι που το πρώτο πάlsαρ ανακαλύφθηκε το 1967

Μελανές Οπές

- Το 1916 ο Schwarzschild αναρωτηθηκε τι θα συνέβαινε αν όλη η μάζα ενός αντικειμένου όπως ο Ήλιος συμπιεζόταν μέχρι ενός σημείου
- Ανακάλυψε ότι γύρω από αυτό το υποθετικό σημείο (ιδιομορφία) μπορούσε να προσδιοριστεί μια σφαιρική περιοχή από την οποία δεν θα μπορούσε να διαφύγει τίποτε
- Αυτό το σύνορο, (το σημείο χωρίς επιστροφή) έγινε γνωστό ως **ορίζοντας γεγονότων**
- Το 1939 ο Oppenheimer και οι φοιτητές του Serber & Volkoff καθόρισαν ότι αν ο πυρήνας του εσωτερικού του άστρου είναι βαρύτερος από μια συγκεκριμένη μάζα (περίπου **2.3 ηλιακές μάζες**) θα συρρικνώνεται επ άπειρο Tolman–Oppenheimer–Volkoff όριο

Ανέφεραν: Ο χωροχρόνος περιελίσσεται τόσο πολύ γύρω από το άστρο που έχει καταρρεύσει, ώστε κυριολεκτικά αποκλείεται από το υπόλοιπο σύμπαν. Μόνο το βαρυτικό του πεδίο απομένει.

- Το 1967 ο Γουίλερ υιοθέτησε το ασυνήθιστο όνομα **μελανή οπή**.
- Η πρώτη ένδειξη για κάποια μελανή οπή έφτασε με την εξέλιξη της αστρονομίας ακτίνων X και την παρατήρηση του διπλού αστέρα στον κύκνο X-1 : Ένας γαλάζιος γίγαντας συνοδεύεται από έναν αόρατο συνοδό που περιστρέφεται γύρω του κάθε 5,6 ημέρες. Το 1972 η μάζα του μετρήθηκε σε τουλάχιστον 10 φορές αυτή του Ήλιου.

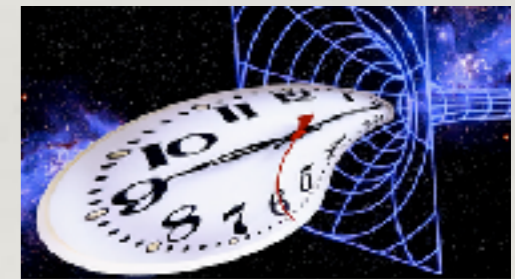
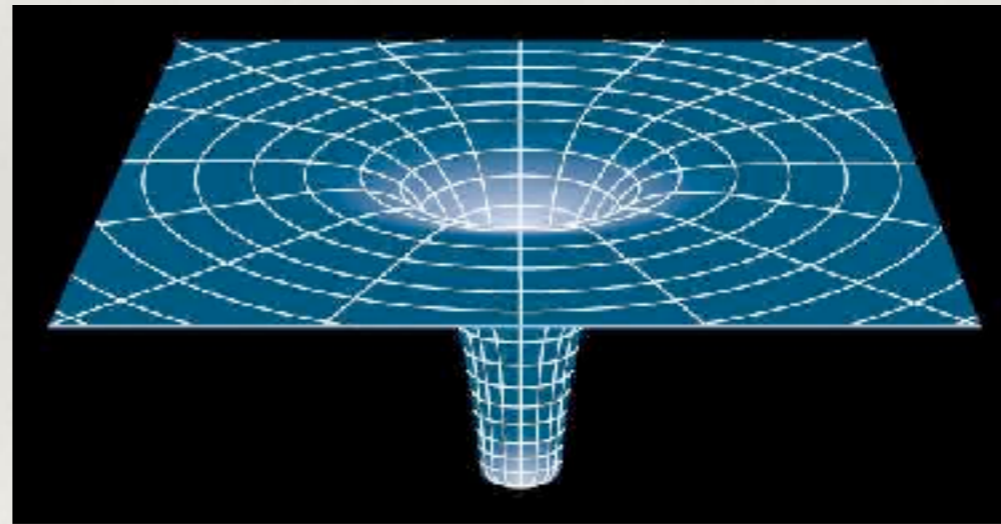


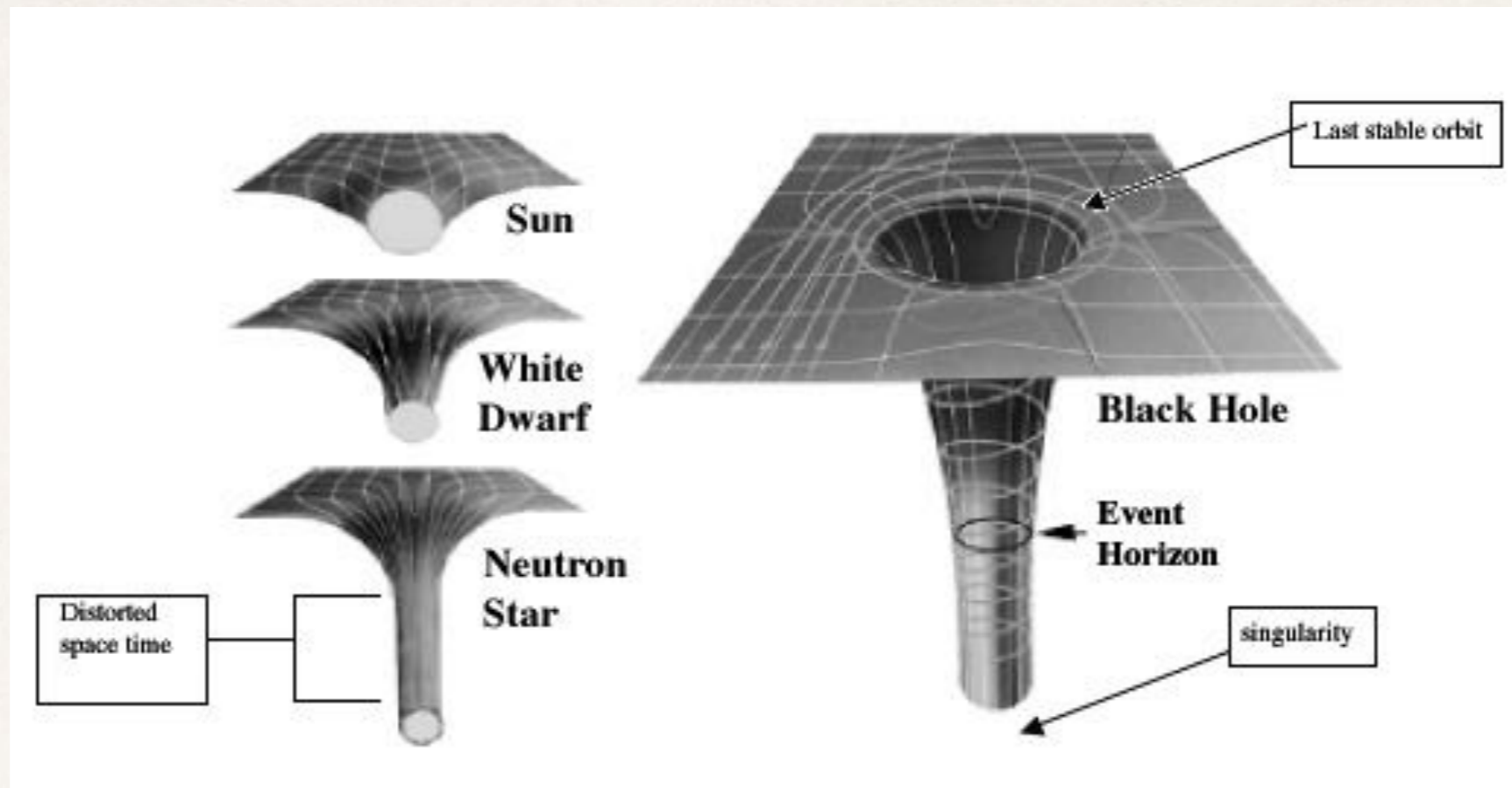
Οι βαρυτικές εξισώσεις του Αϊνστάιν περιορίζουν τις φυσικά επιτρεπτές καμπυλώσεις του χωροχρόνου

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Μετρική Schwarzschild

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -\left(1 - \frac{2GM}{r^2}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

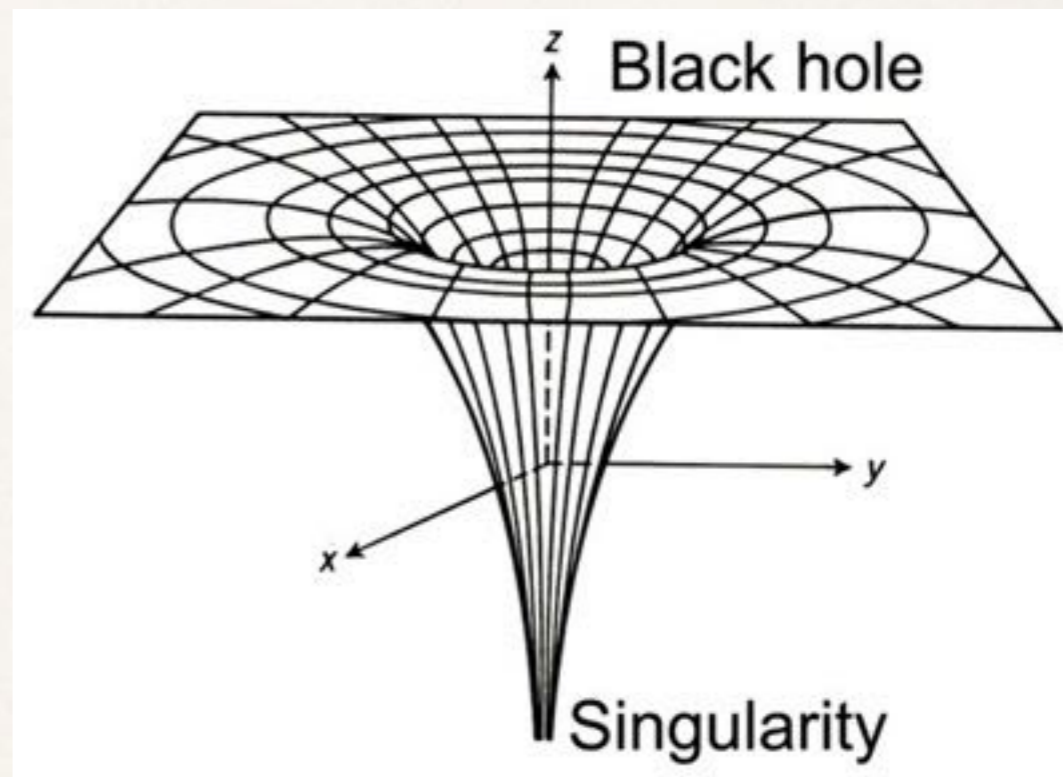




Καμπυλώσεις του χωροχρόνου

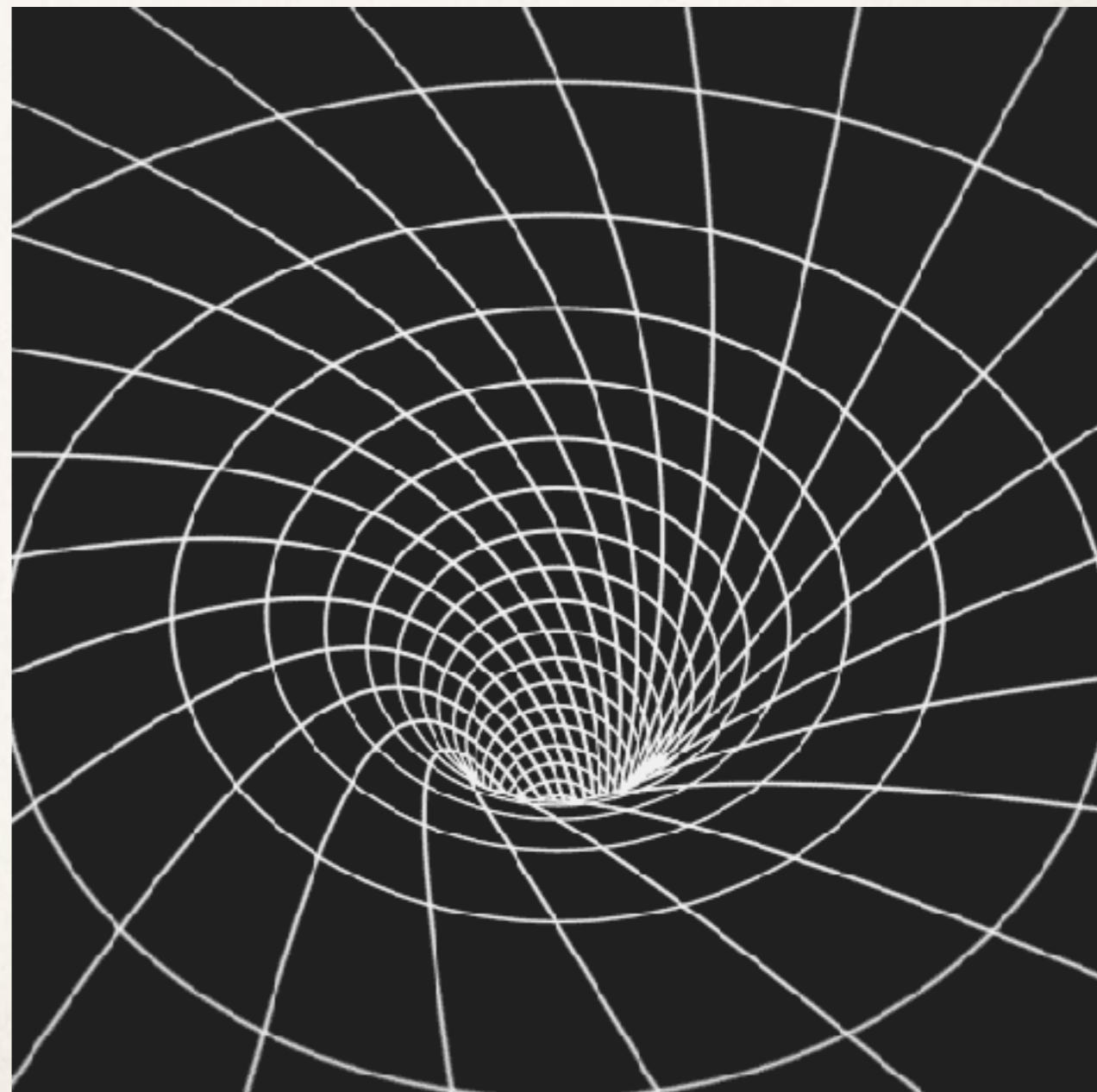
Μελανές Οπές ή Μαύρες Τρύπες

Μελανή οπή (ή μαύρη τρύπα) ονομάζεται η περιοχή του χωροχρόνου, στην οποία οι βαρυτικές δυνάμεις είναι τόσο μεγάλες, ώστε τίποτε -ούτε το φως- να μην μπορεί να ξεφεύγει από αυτήν.



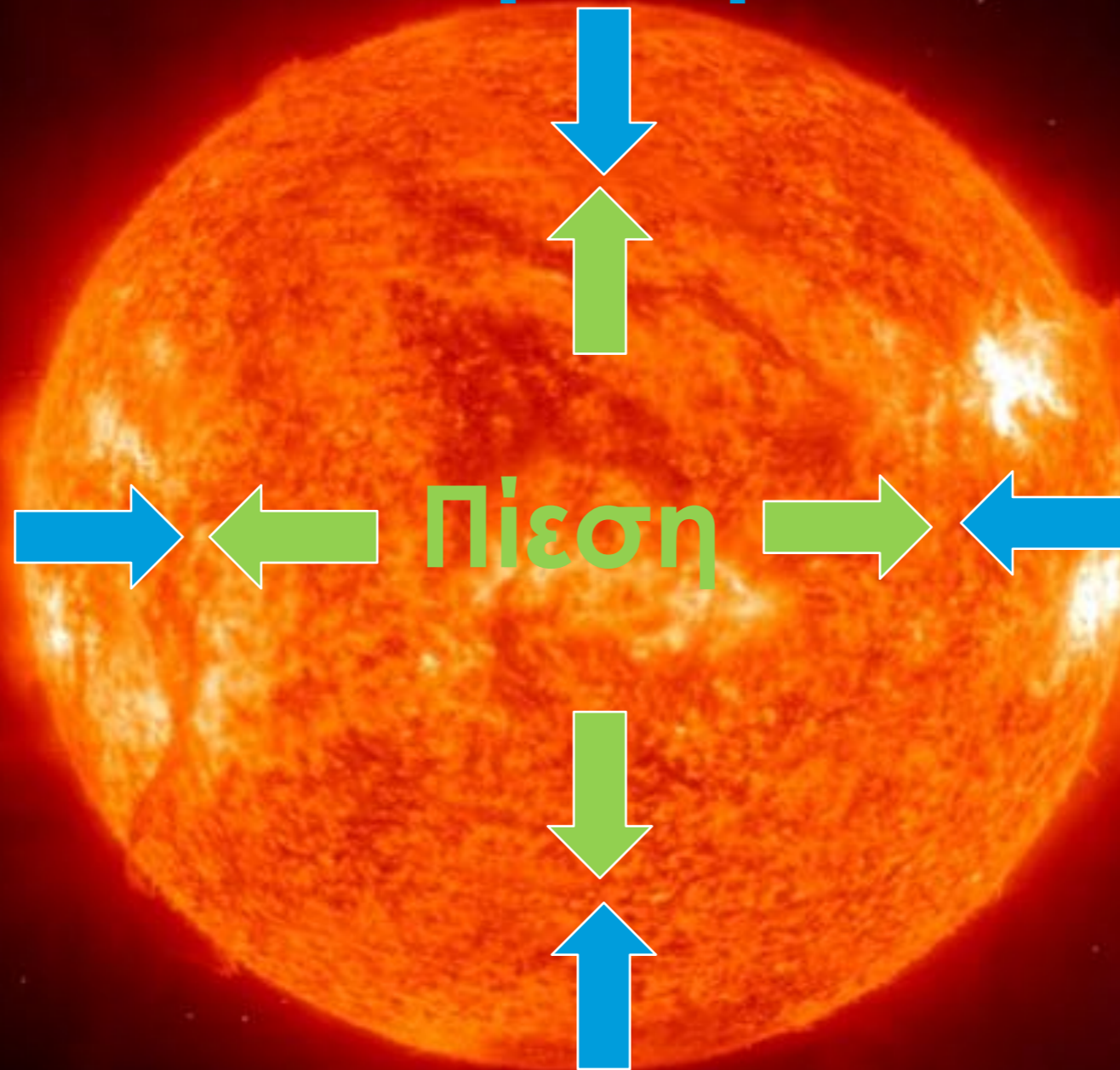
Μελανές Οπές ή Μαύρες Τρύπες

Μελανή οπή (ή μαύρη τρύπα) ονομάζεται η περιοχή του χωροχρόνου, στην οποία οι βαρυτικές δυνάμεις είναι τόσο μεγάλες, ώστε τίποτε -ούτε το φως- να μην μπορεί να ξεφεύγει από αυτήν.

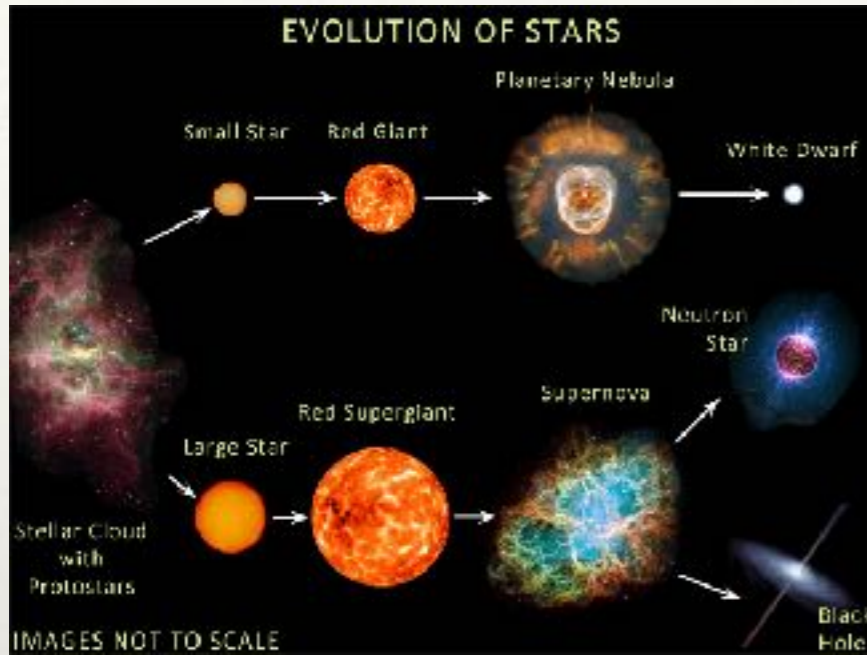


Σχηματισμός Μελανών Οπών

Βαρύτητα



Σχηματισμός Μελανής Οπής



Λευκός Νάνος

Αστέρας Νετρονίων

Μελανή Οπή

0

5

10

15

20

25

30

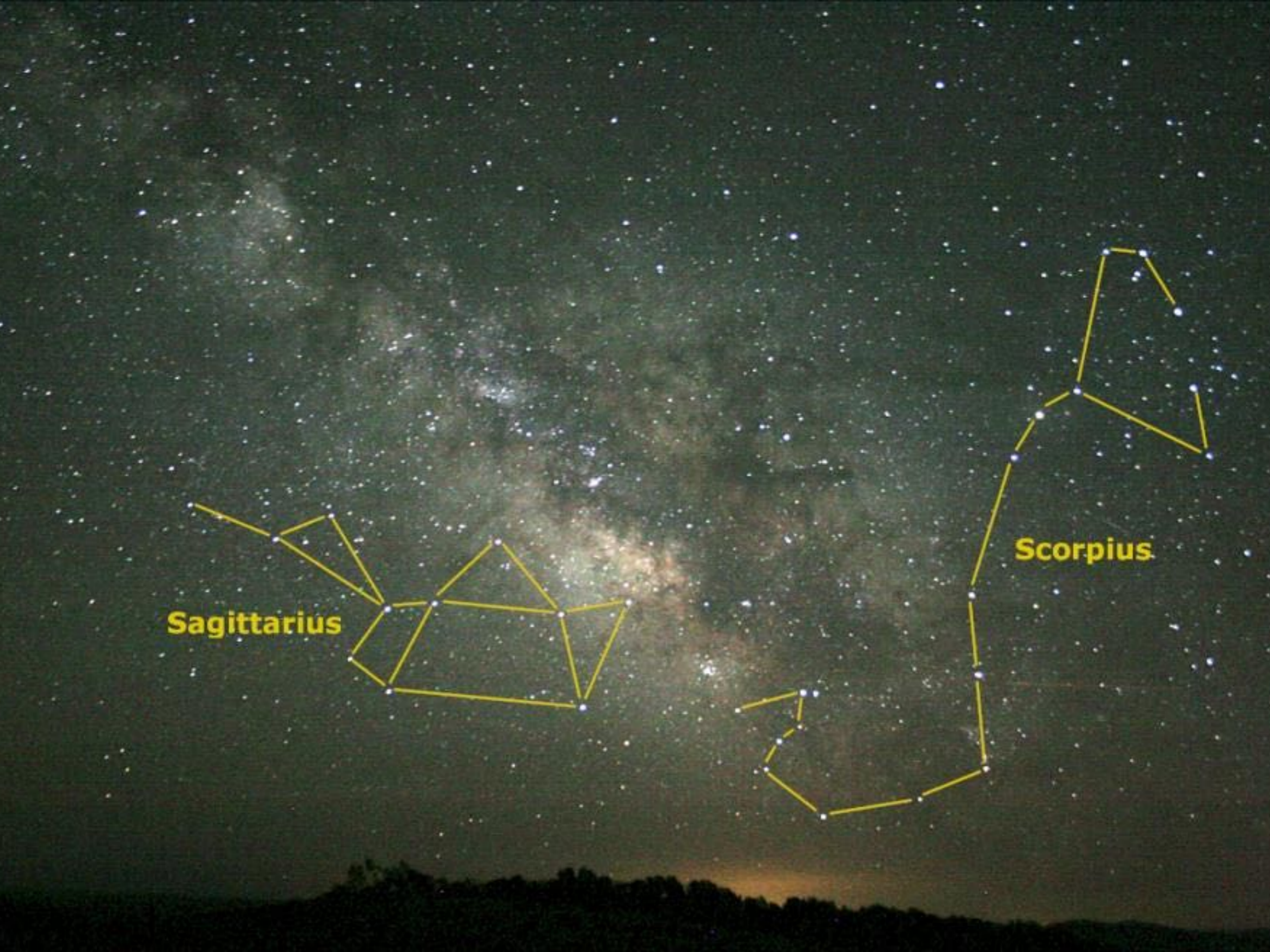
35...

Ηλιακές Μάζες



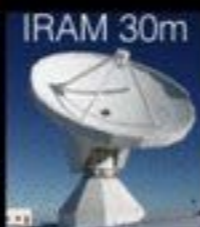
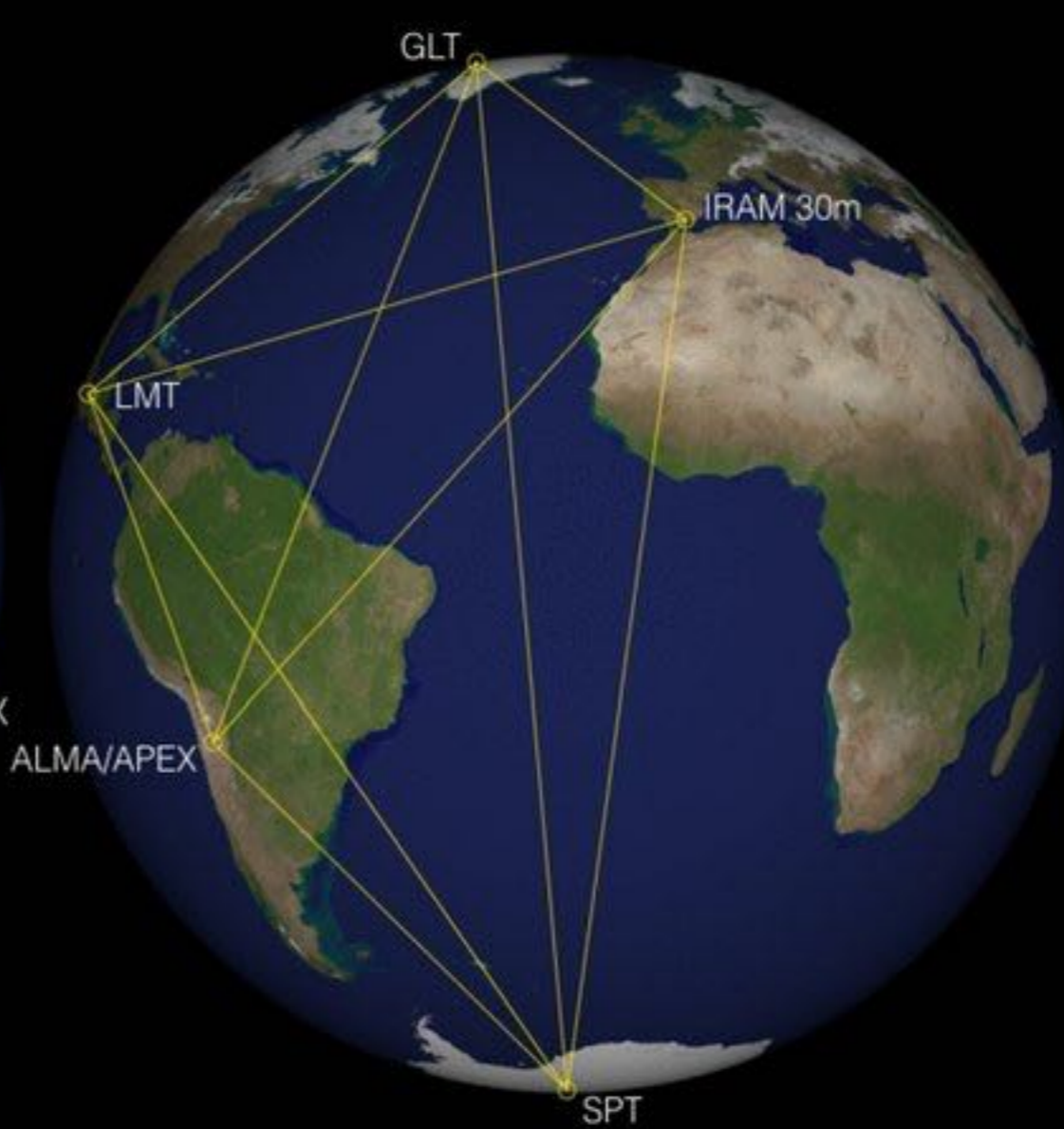
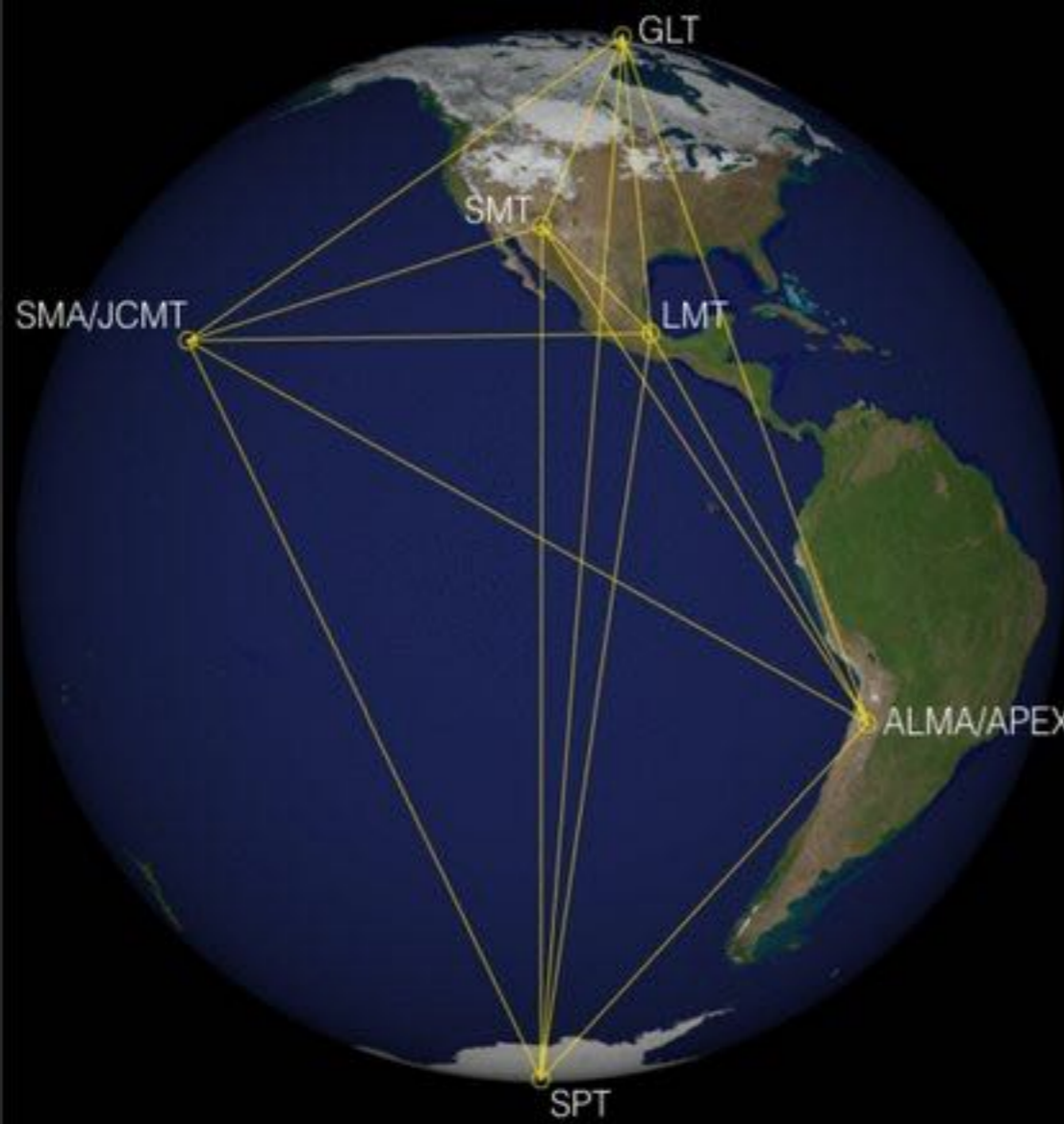
Sagittarius

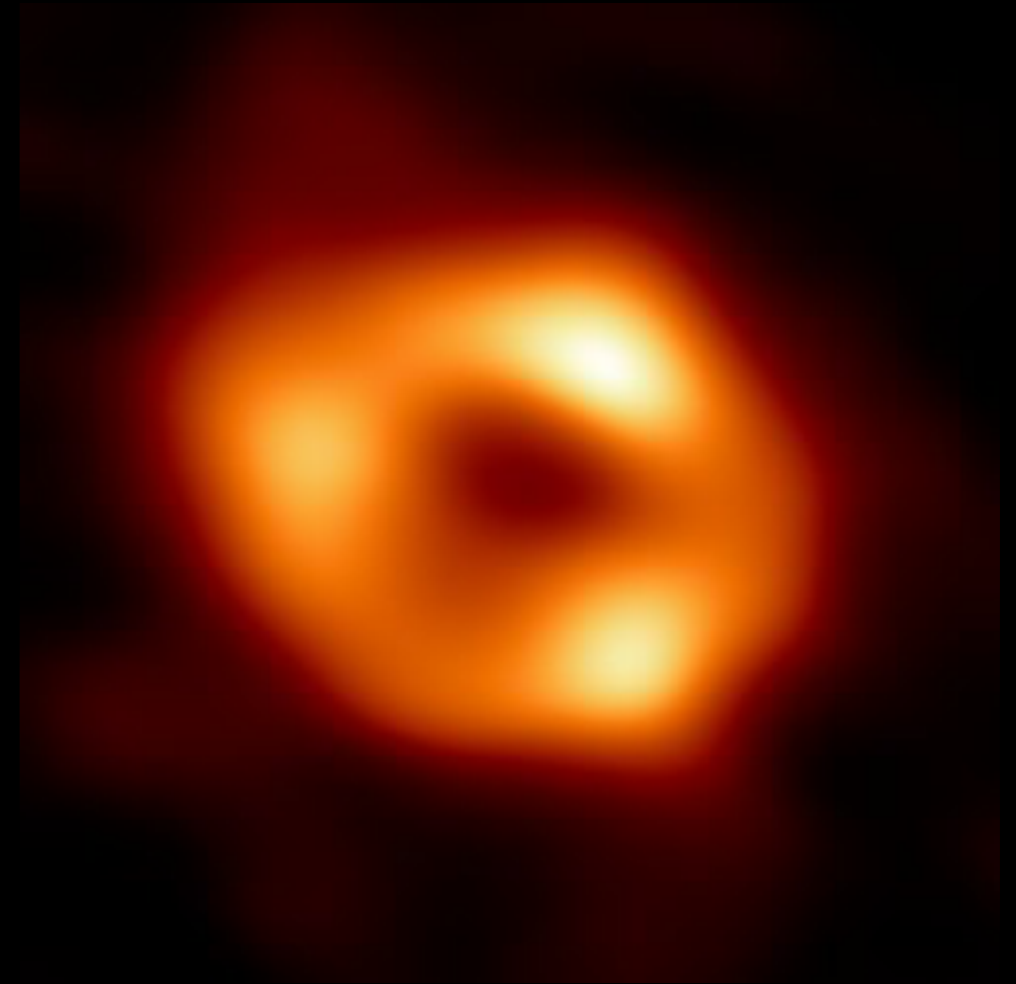
Scorpius





Εστιάζοντας στο κέντρο του Γαλαξία μας για να παρατηρήσουμε αστέρες από το European Southern Observatory's Very Large Telescope (τελευταία παρατήρηση το 2019). Στο κέντρο της εστίασης φανερώνονται αστέρες γύρω από Μελανή Οπή, χρησιμοποιώντας το όργανο GRAVITY του ESO's Very Large Telescope Interferometry (2021)







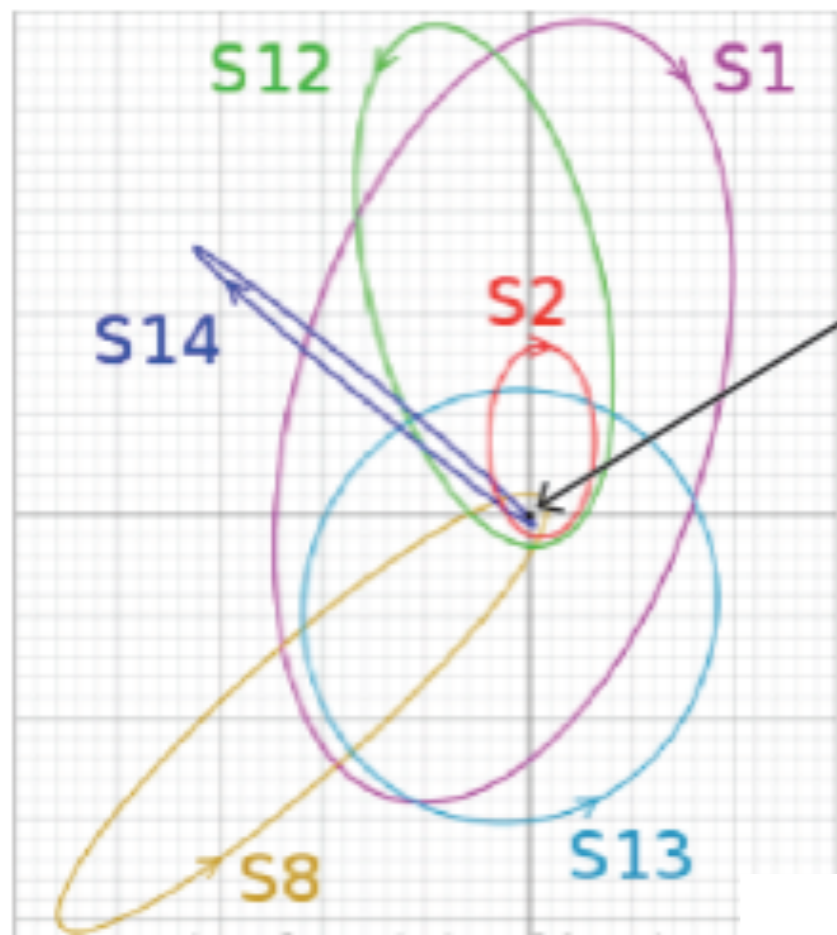
02 | MAR | 21

Γιάννης Νταλιάνης, 2022

Υπολογίστε!

3ος Νόμος Κέπλερ:

Το τετράγωνο της περιόδου περιφοράς του κάθε πλανήτη είναι ανάλογο με τον κύβο του μήκους του μεγάλου ημιάξονα της έλλειψης που διαγράφει.



Supermassive black hole, Sgr A*

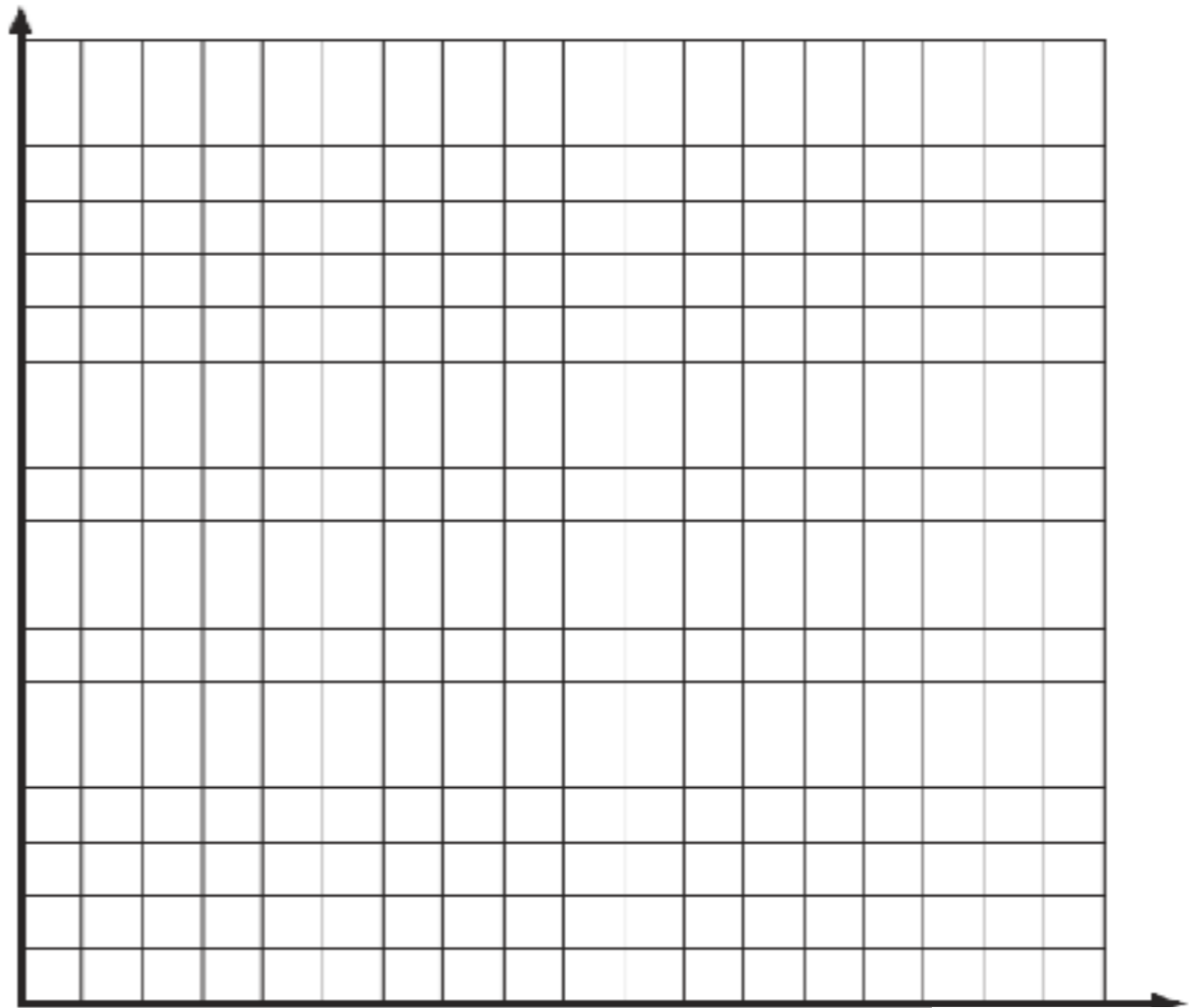
Table 1 Orbital Data of Six Stars Orbiting Sgr A*

| Star | a (AU) | T (years) | a^3 ($\times 10^9 \text{ AU}^3$) | T^2 ($\times 10^3 \text{ years}^2$) |
|------|-------------|----------------|---|--|
| S1 | 3300 | 94.1 | 35.9 | 8.9 |
| S2 | 980 | 15.2 | | |
| S8 | 2630 | 67.2 | | |
| S12 | 2290 | 54.4 | | |
| S13 | 1750 | 36 | | |
| S14 | 1800 | 38 | | |
| | | | | |
| S102 | | | | |

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

Το διάγραμμα:

a^3 ($\times 10^9$ AU³)



T^2 ($\times 10^3$ years²)

Υπολογίστε την κλίση

3ος Νόμος Κέπλερ:

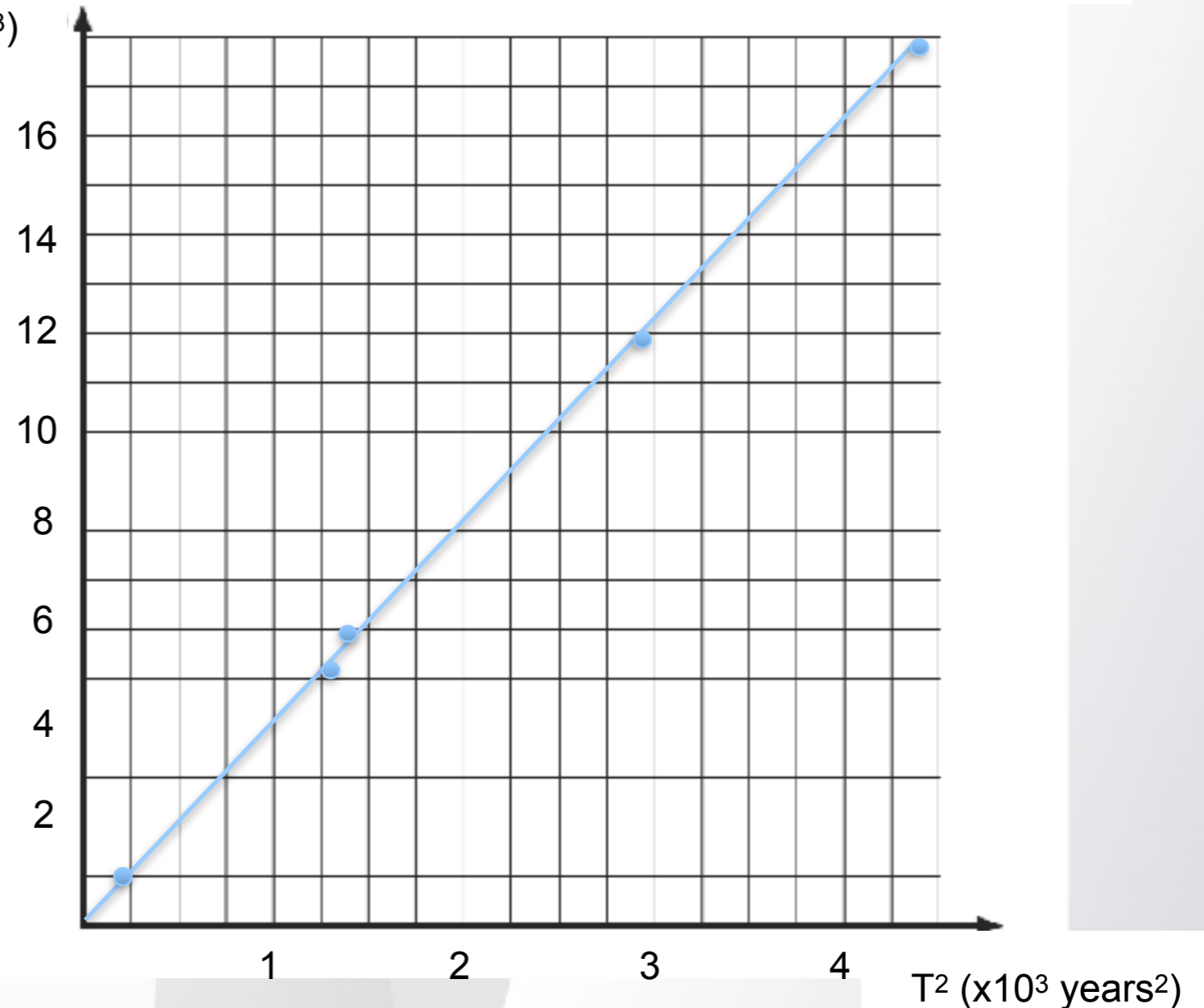
Το τετράγωνο της περιόδου περιφοράς του κάθε πλανήτη είναι ανάλογο με τον κύβο του μήκους του μεγάλου ημιάξονα της έλλειψης που διαγράφει.

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

$$M = \frac{\Delta a^3}{\Delta T^2}$$

$$M = 4.0 \times 10^6 \text{ solar masses}$$

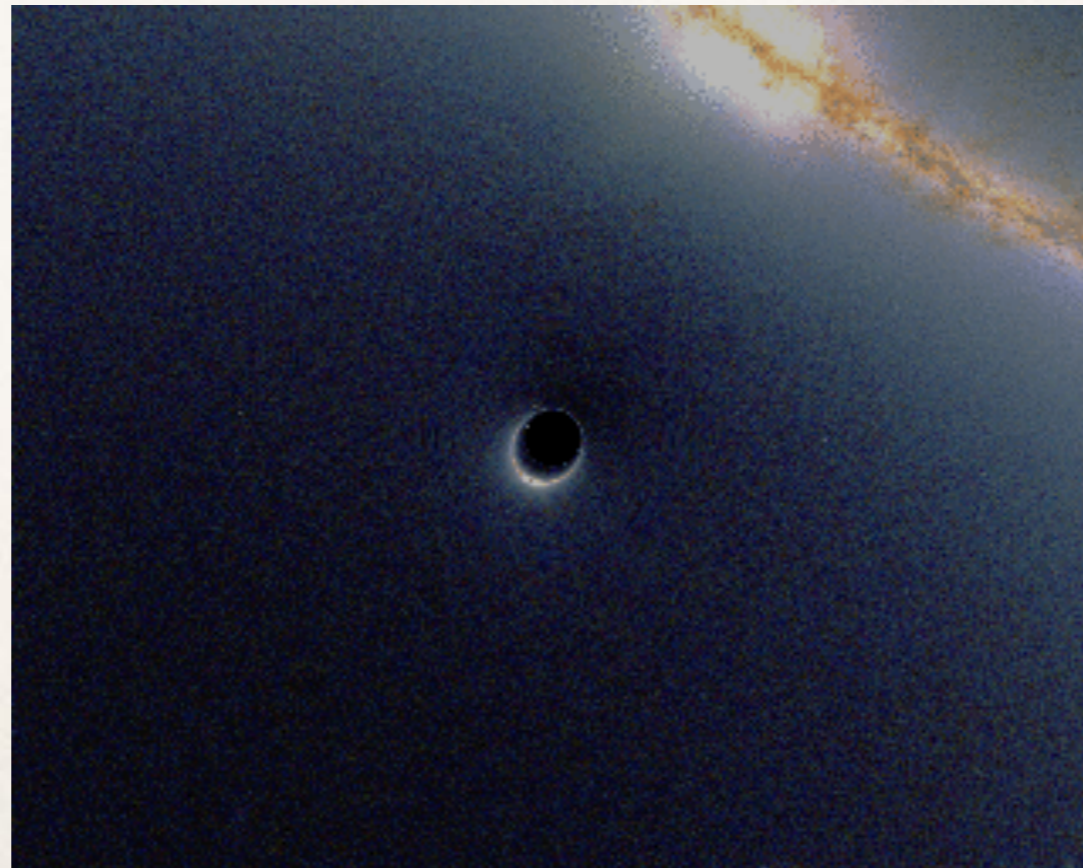
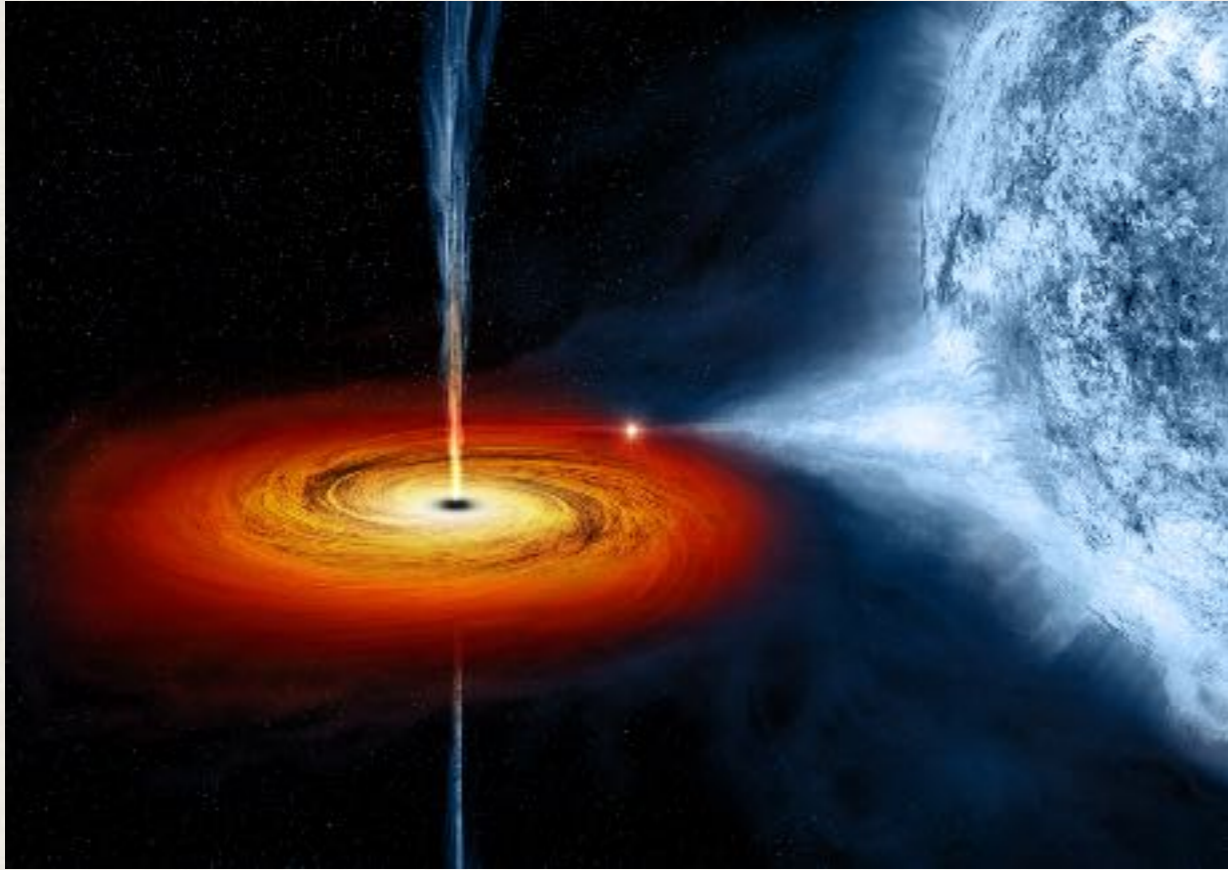
a^3 ($\times 10^9 \text{ AU}^3$)



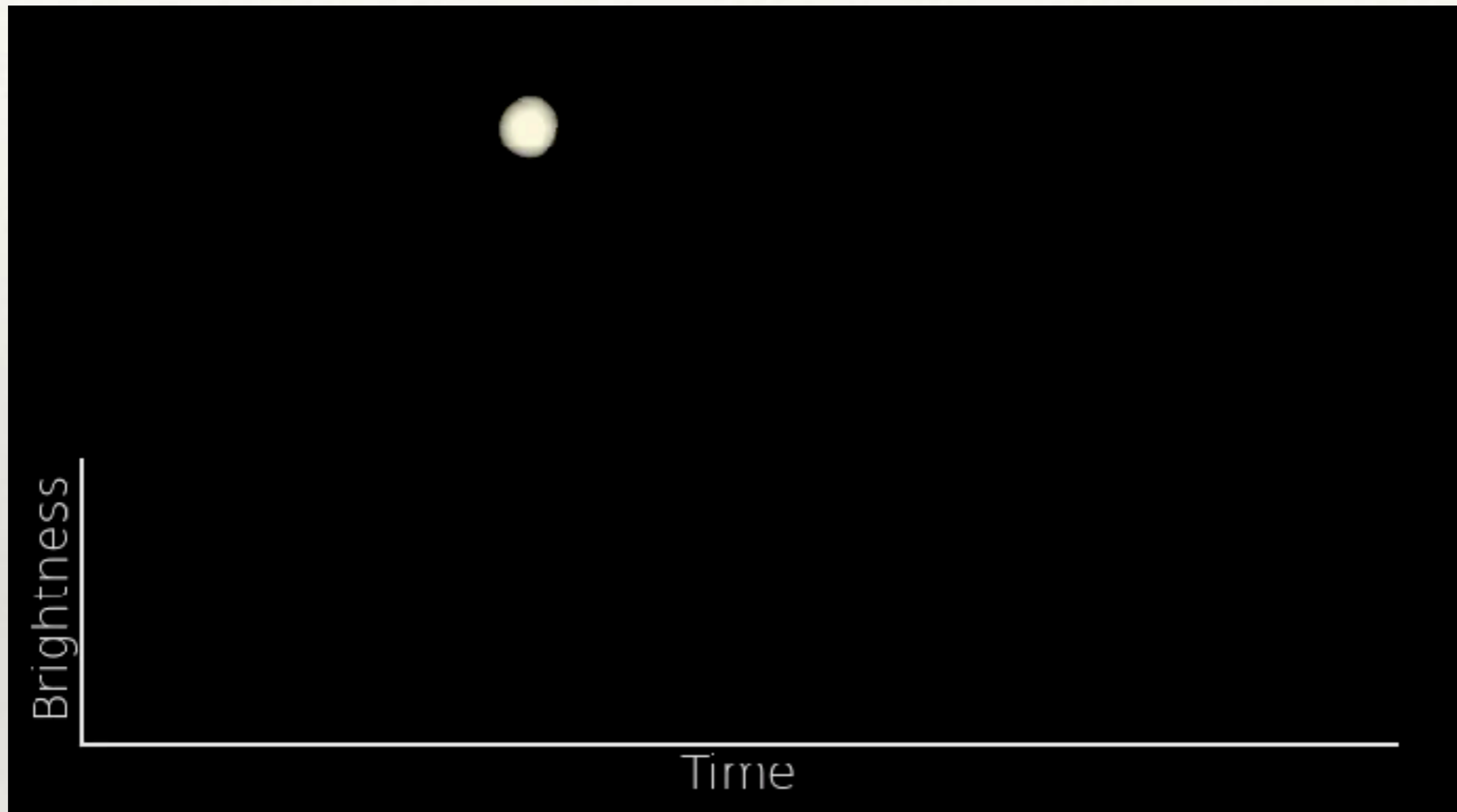
SIZE COMPARISON:
THE M87 BLACK HOLE
AND
OUR SOLAR SYSTEM

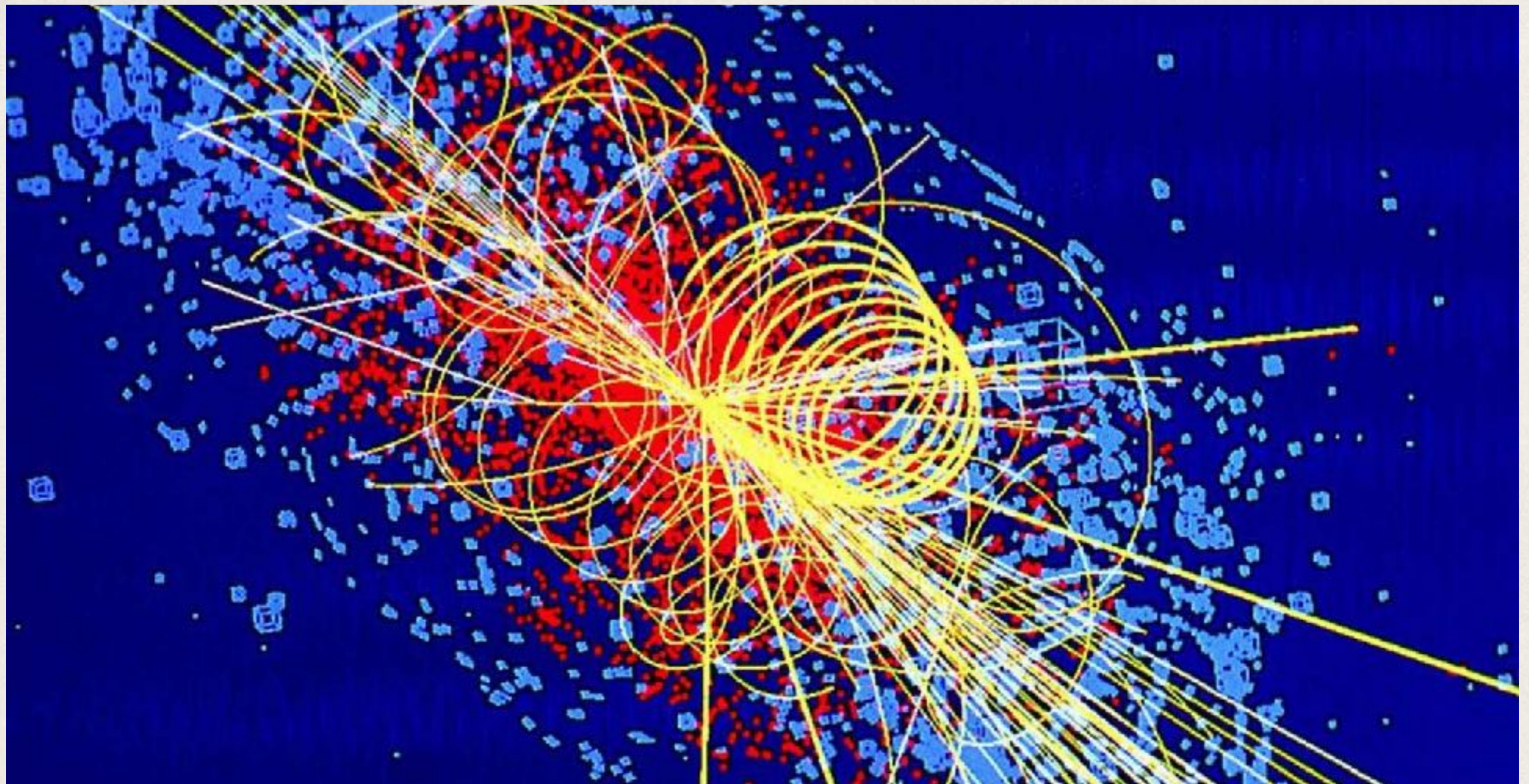
EHT BLACK HOLE IMAGE
SOURCE: NSF





Παρατήρηση



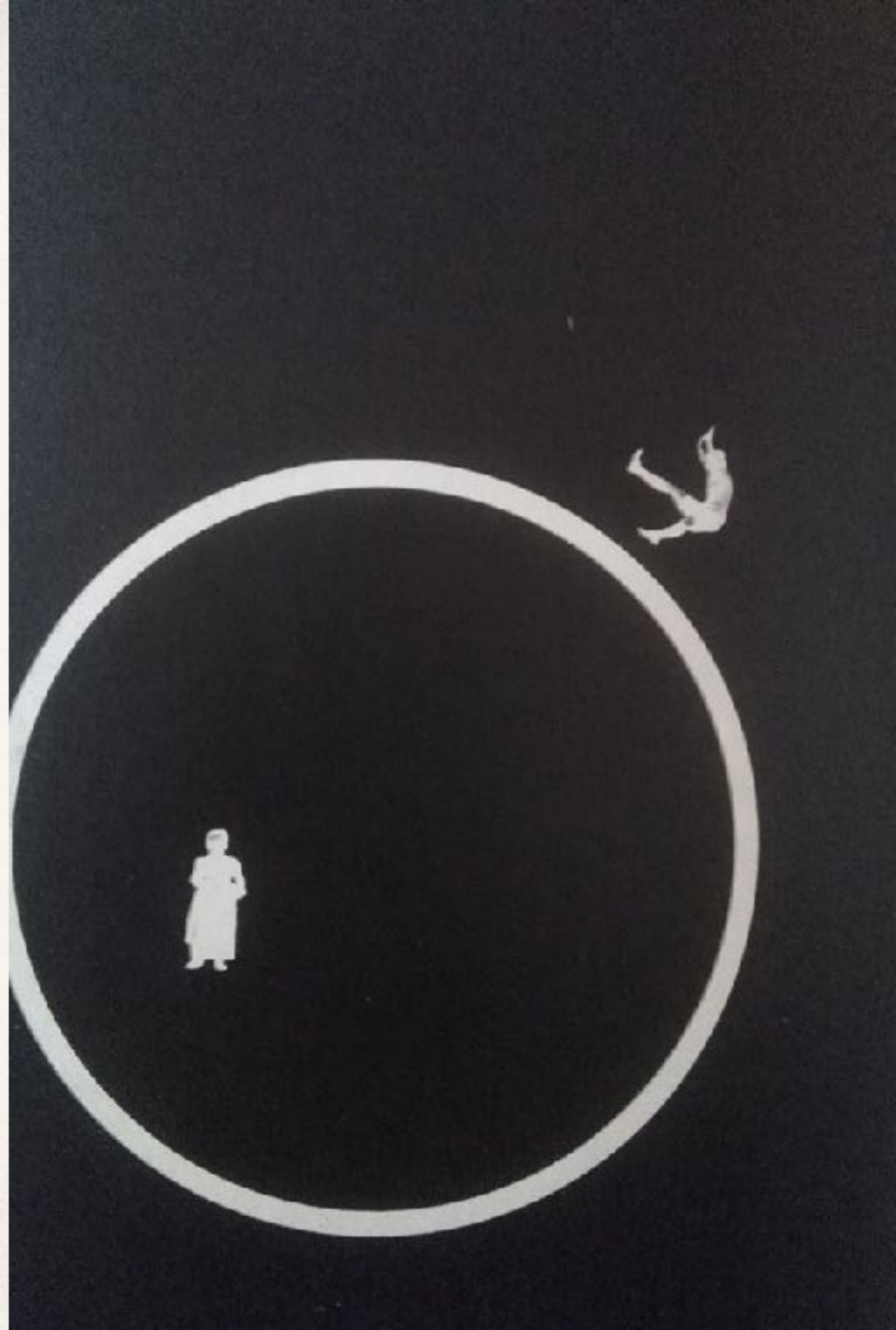


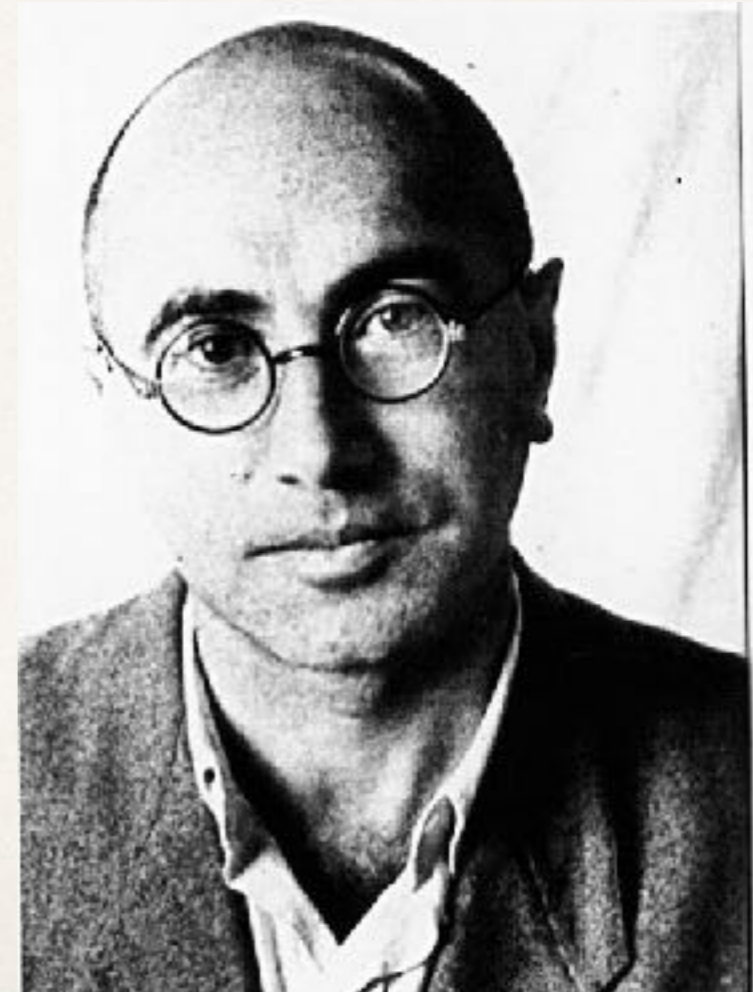
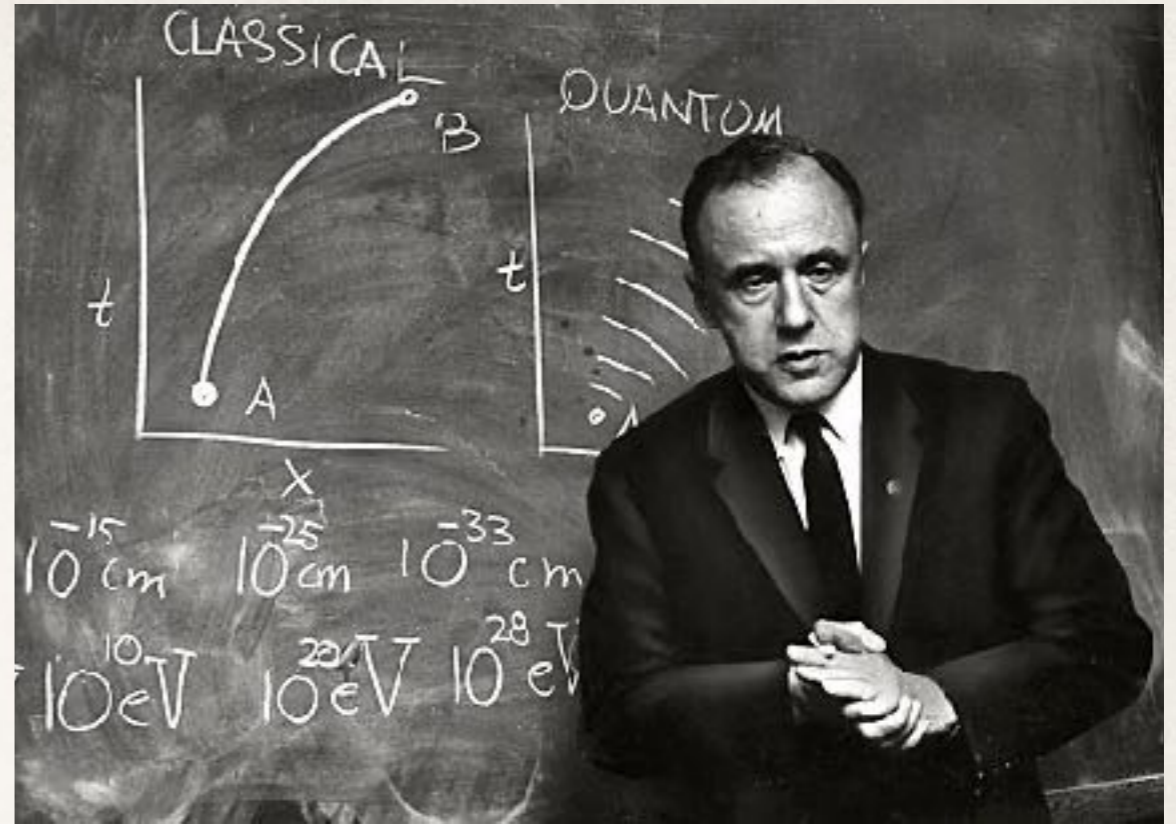
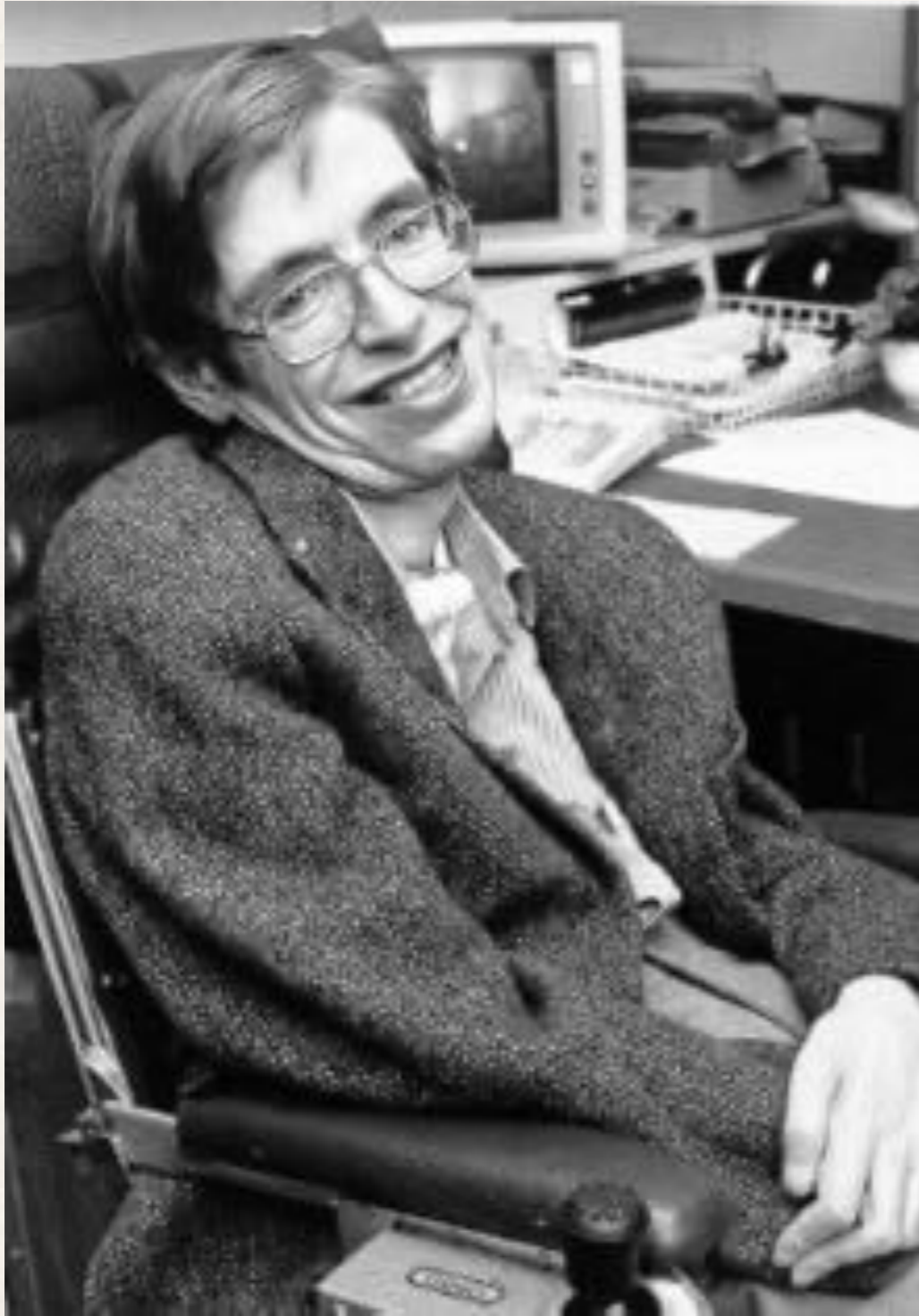
Πέρα από τη βαρύτητα

Γιάννης Νταλιάνης, 2022

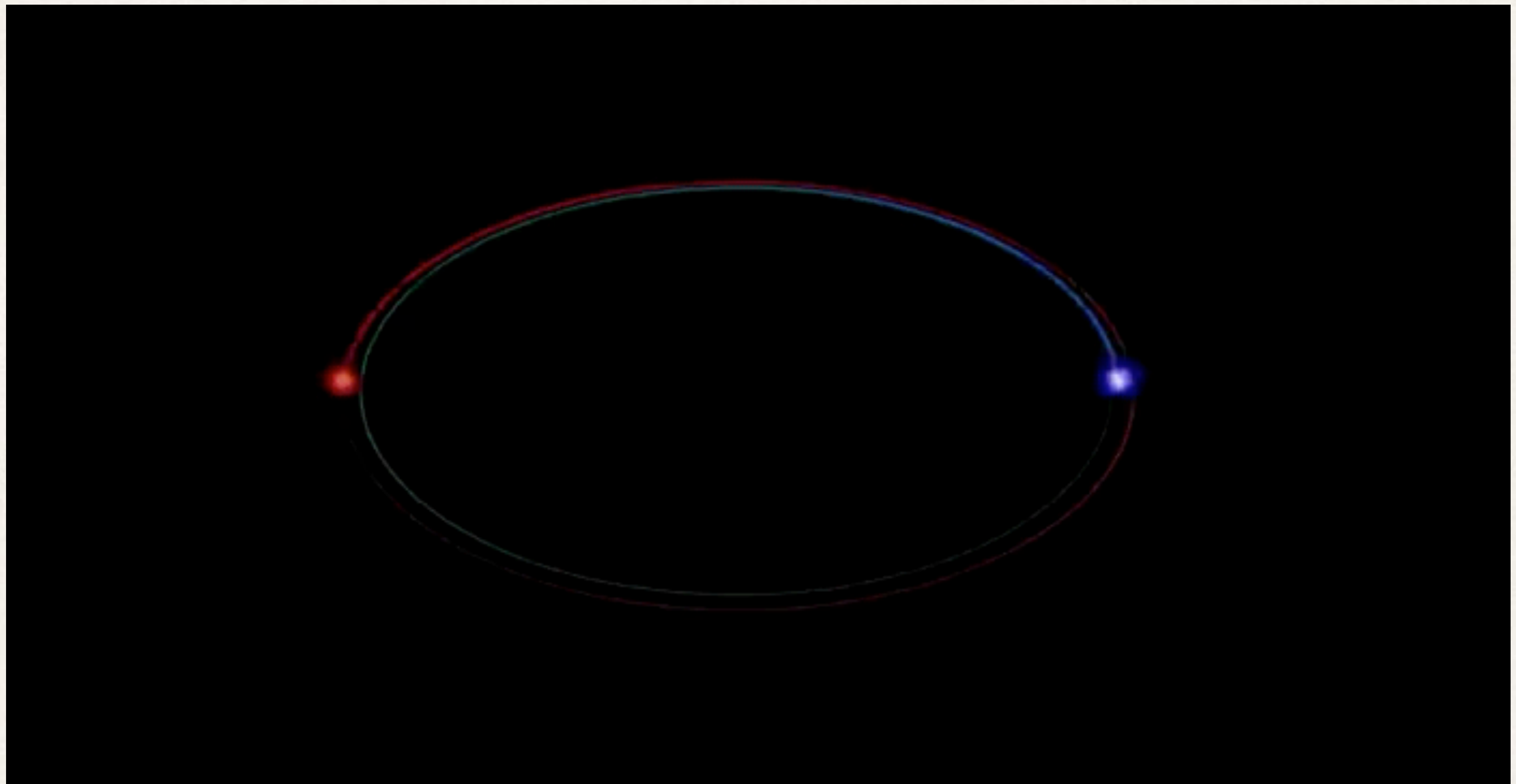
Οι μελανές οπές χωρίζουν τον χωροχρονο

Η βαρυντική κατάρρευση δημιουργεί τον
λεγόμενο ορίζοντα γεγονότων





Γιάννης Νταλιάνης, 2022



Πέρα από τη βαρύτητα

Γιάννης Νταλιάνης, 2022

Ακτινοβολία Hawking

- Το 1974 ο Hawking έδωσε στην μελανή οπή μία εντελώς νέα εμφάνιση
- Εφαρμόζοντας τους νόμους της κβαντομηχανικής σε μία μελανή οπή συμπέρανε ότι η κβαντομηχανική οδηγεί τις μελανές οπές να δημιουργούν και να εκπέμπουν σωματίδια σαν να ήταν θερμά σώματα
- Αυτή η θερμική εκπομπή οδηγεί σε μία αργή μείωση της μάζας της μελανής οπής και στην τελική της εξαφάνιση
- Μία μελανή οπή με μάζα άστρου εξατμίζεται σε 10^{67} έτη
- Μία μελανή οπή με μέγεθος ατόμου θα εξατμιστεί σε μερικά δισεκατομμύρια χρόνια (όση η ηλικία του σύμπαντος)

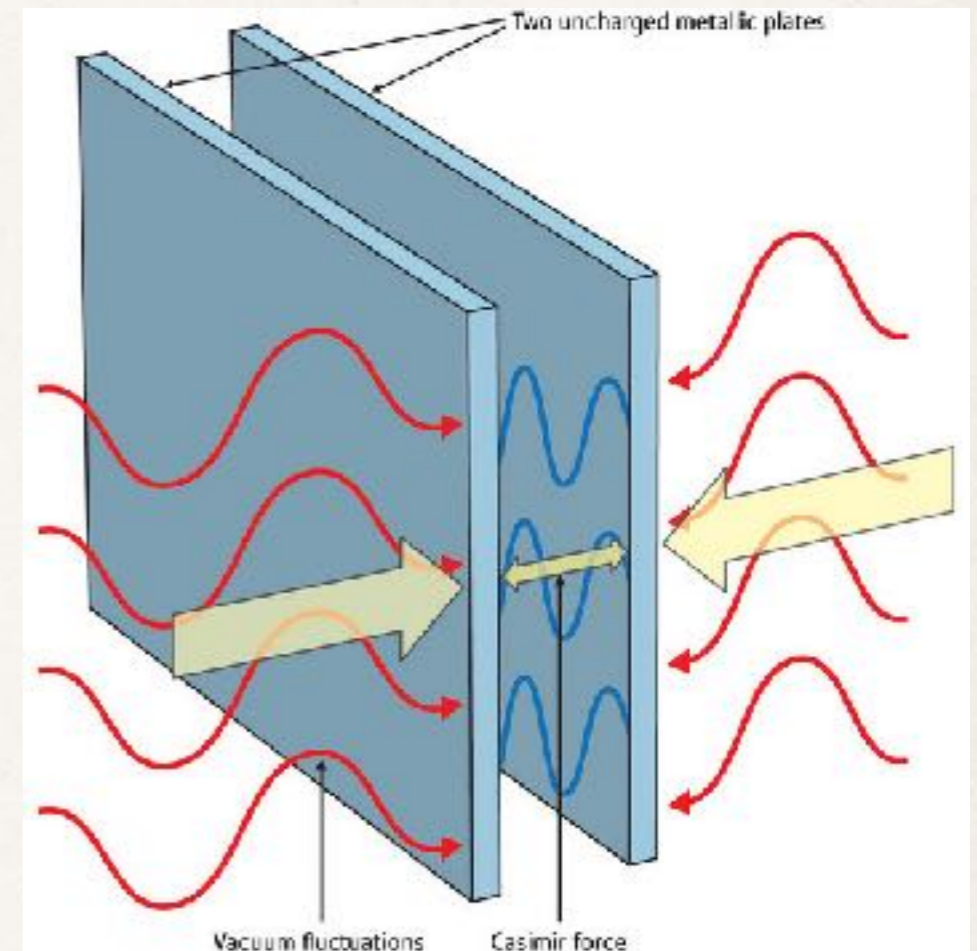
Υπάρχει άραγε η ακτινοβολία Hawking;

Το φαινόμενο Casimir

- Η ενέργεια του κενού εντός μια περιοχής αλλάζει αν της βάλουμε αγωγίμα σύνορα
- Το 1948 ο Casimir έδειξε ότι δυο παράλληλες αγωγίμες σφαίρες έλκονται με δύναμη

$$F = -\frac{\pi^2 \hbar c}{240a^4}$$

όπου a η απόσταση μεταξύ των πλακών



“Φαινόμενο” Unruh

- Το 1976 ο Unruh μελέτησε την επίδραση του κβαντικού κενού σε επιταχυνόμενους παρατηρητές (σταθερές ταχύτητες αντιστοιχούν σε αδρανειακούς παρατηρητές)
- Ο παρατηρητής δέχεται θερμική ακτινοβολία θερμοκρασίας

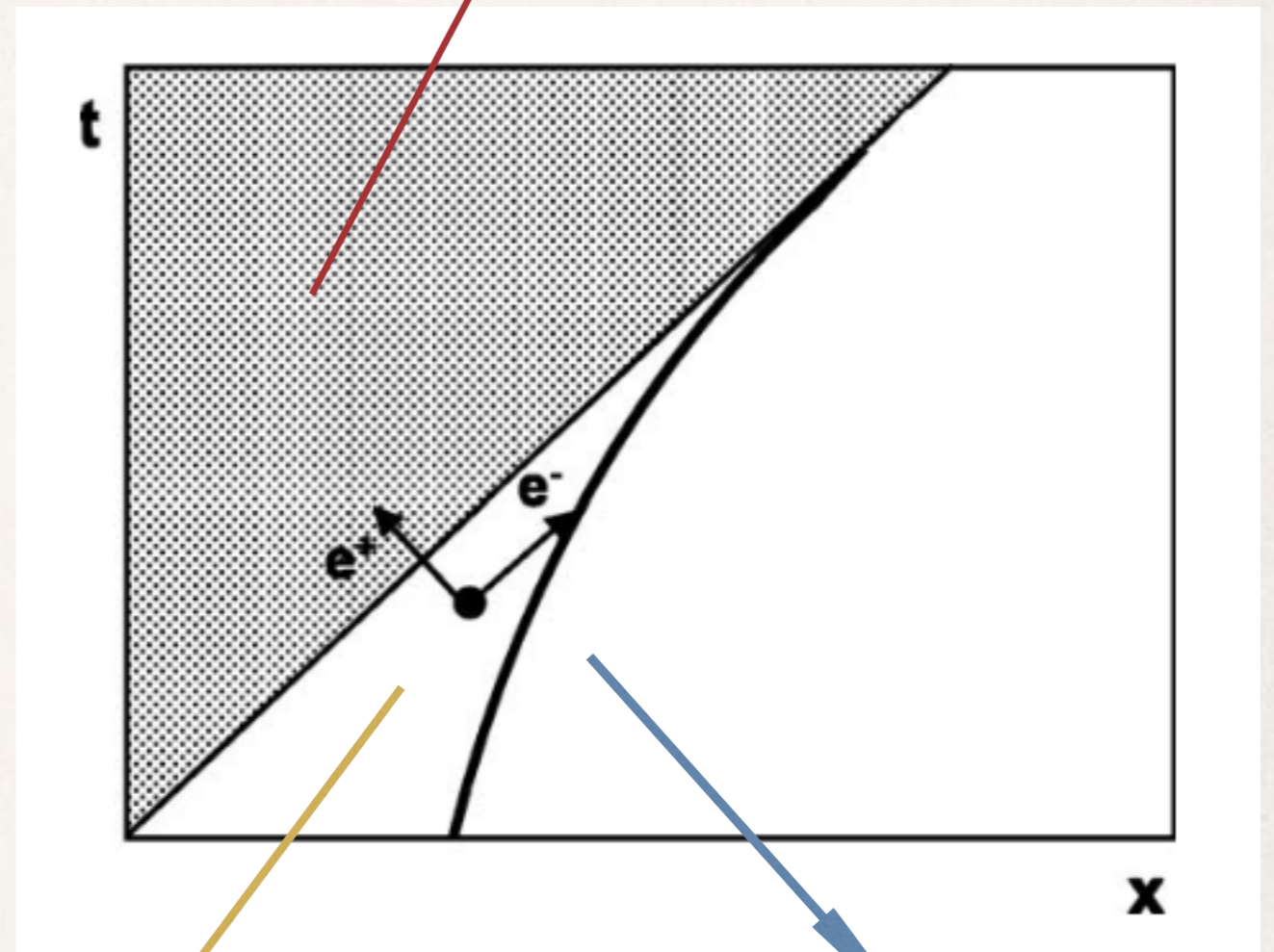
$$kT = \frac{\hbar g}{2\pi c}$$

όπου g η επιτάχυνση του παρατηρητή

- Για $g \sim 9.8m/s^2$ η θερμοκρασία λόγω κβαντικού κενού είναι $\sim 4 \times 10^{-20}K$

Δίδυμος γένεση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου από το κβαντικό κενό δημιουργεί τη θερμική ακτινοβολία

Ο επιταχυνόμενος παρατηρητής δεν μπορεί να λάβει σήματα από την σκιασμένη περιοχή.



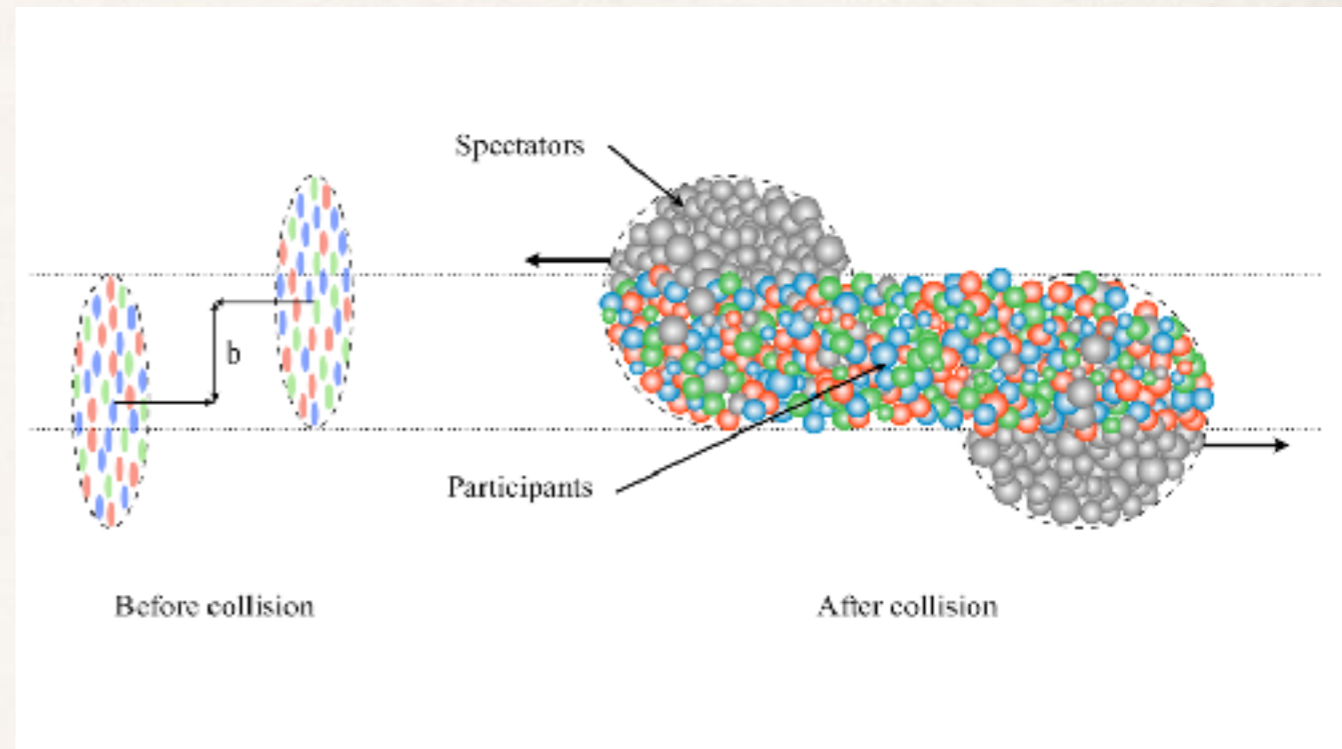
Κοσμική γραμμή υπερβολικού σχήματος

Το κβαντικό κενό σε ισχυρά πεδία: διαχωρισμός ενδιάμεσων σωματιδίων από δίδυμο γένεση

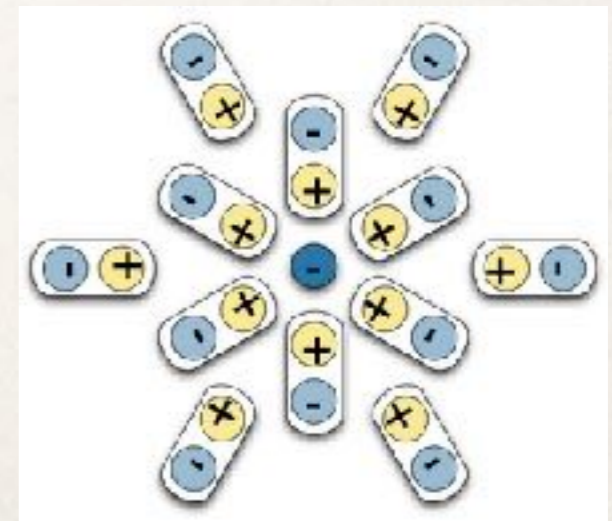
- Το πεδίο Coulomb ενός εξαιρετικά βαρέος πυρήνα μπορεί να προκαλέσει διάσπαση του κενού
- Η χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη σε ένα άτομο (προσέγγιση H) είναι

$$E_{1s_{1/2}} = m_0 c^2 \sqrt{1 - Z^2 \alpha^2}$$

- Λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα για την υποθετική περίπτωση που $Z > Z_{cr} \sim 173$ η ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου στην 1s κατάσταση ξεπερνάει την τιμή $2m_e c^2$.
- Σε γυμνό πυρήνα (ιόν) η κατάσταση 1s θα πληρωθεί με ένα ηλεκτρόνιο συνοδευόμενη από την εκπομπή ενός ποζιτρονίου (υπό πειραμτικό έλεγχο)

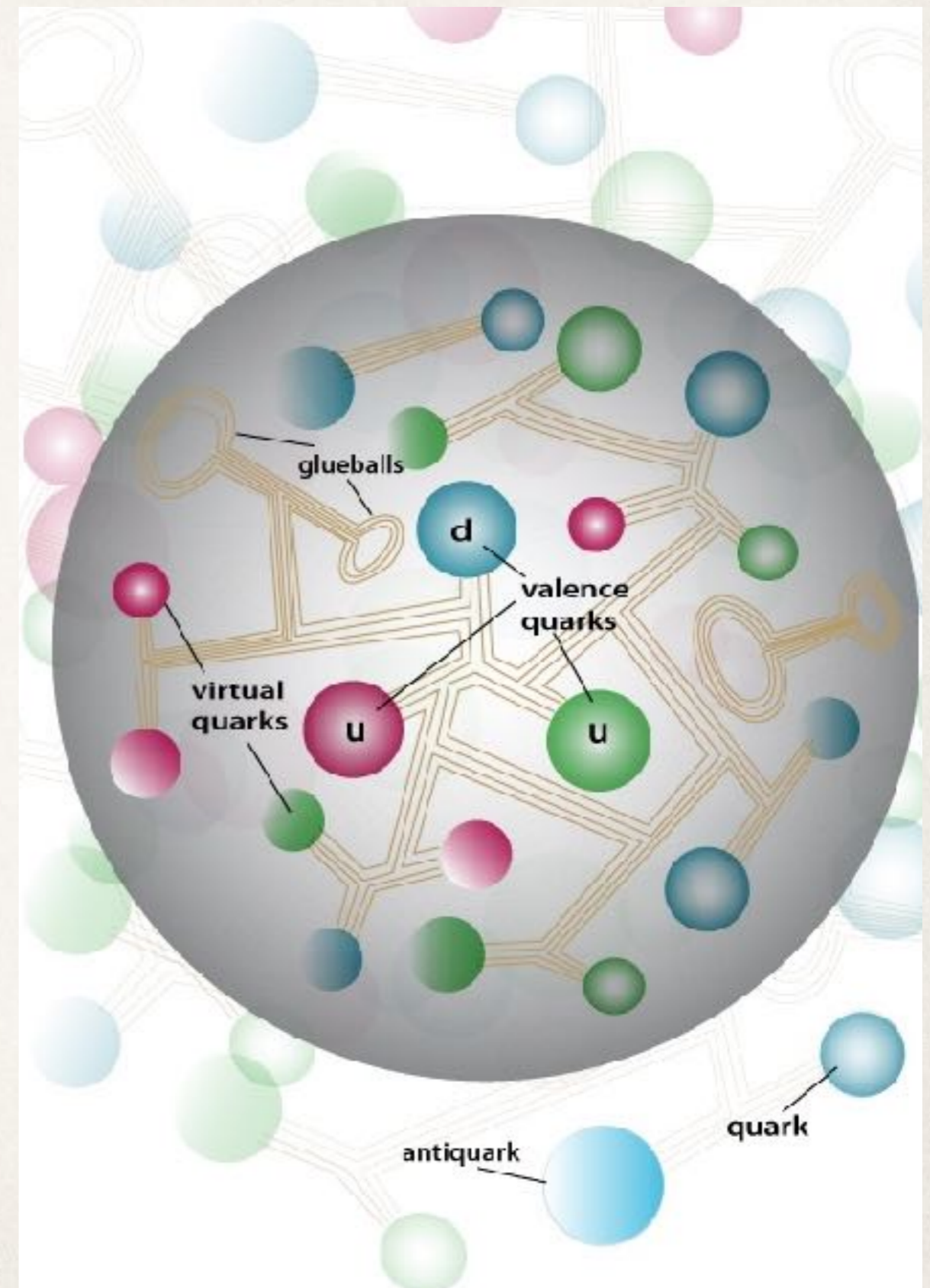


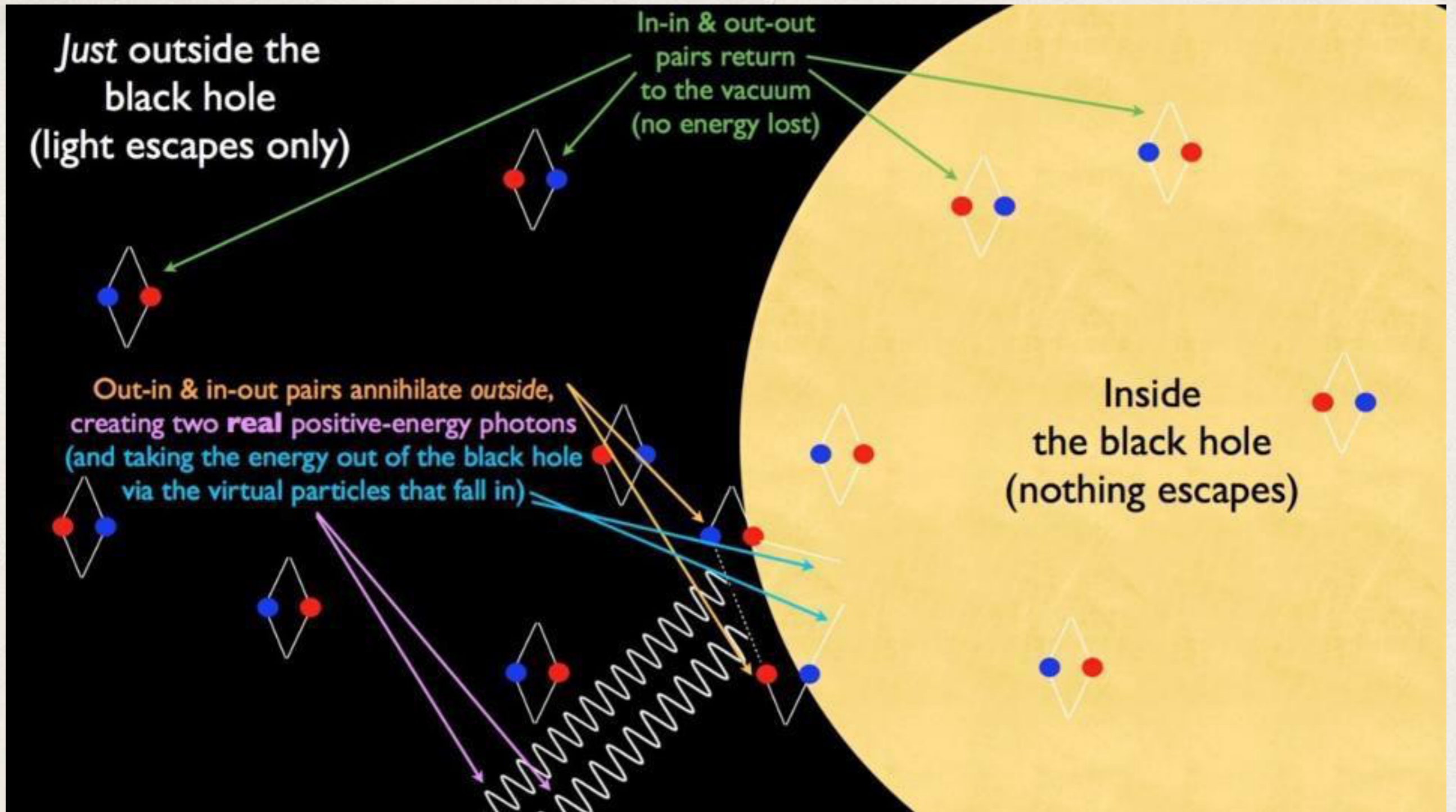
$$E_n = -hcR_\infty \frac{Z^2}{n^2}$$



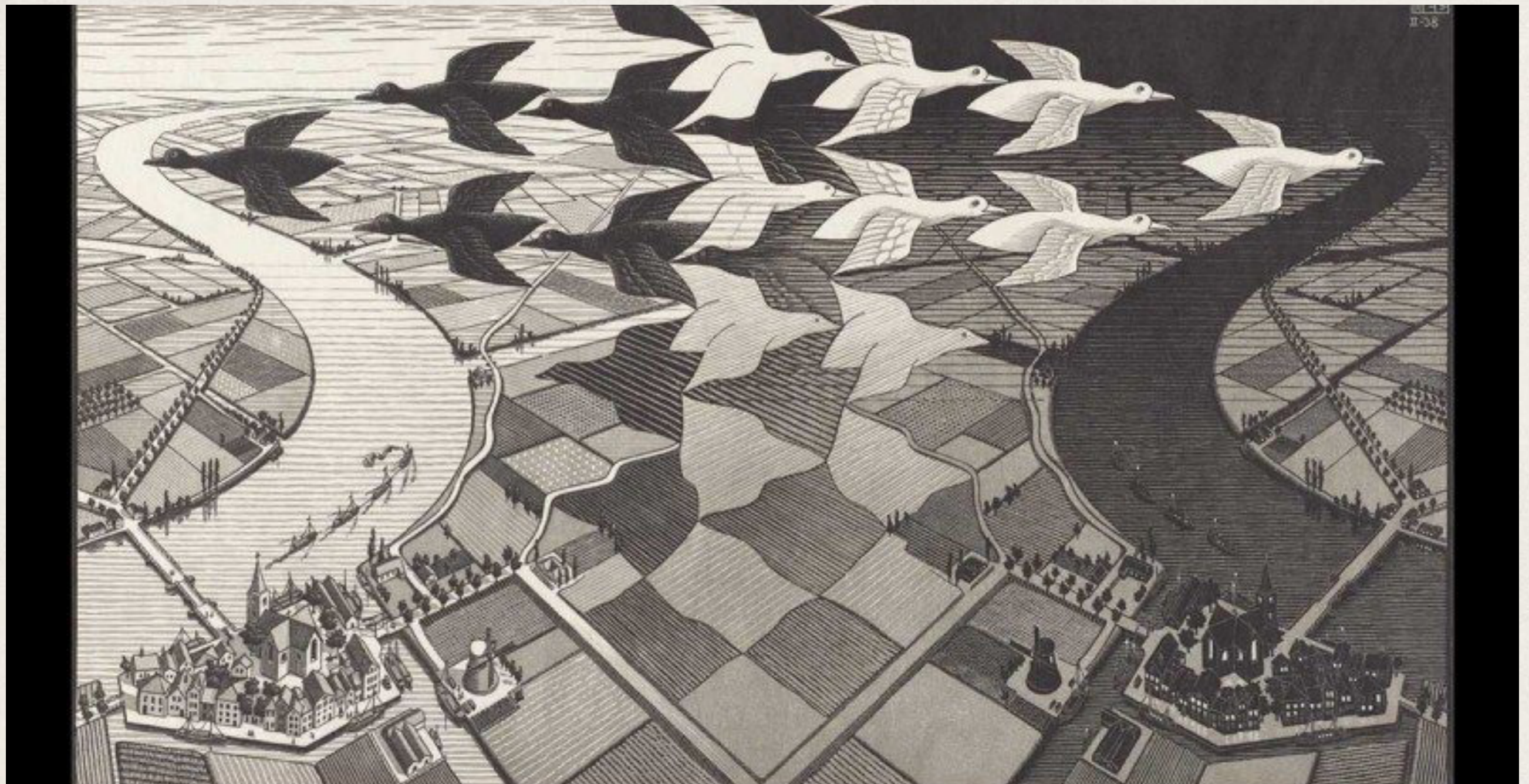
Η θάλασσα κουάρκ-αντικουάρκ-γλοιονίων

- Η μάζα του πρωτονίου είναι 938 MeV
- Πέρα από δύο up και ένα down κουάρκ (έκαστο με μάζα μερικών MeV) πρέπει να κρύβει κάτι πολύ μεγαλύτερο
- Εν μέρει είναι η κινητική ενέργεια των κουάρκ
- Η σημαντικότερη συνεισφορά έρχεται από τα γλοιόνια (τους φορείς των ισχυρών αλληλεπιδράσεων) που δημιουργεί συνεχώς ζεύγη κουάρκ-αντικουάρκ, η λεγόμενη θάλασσα





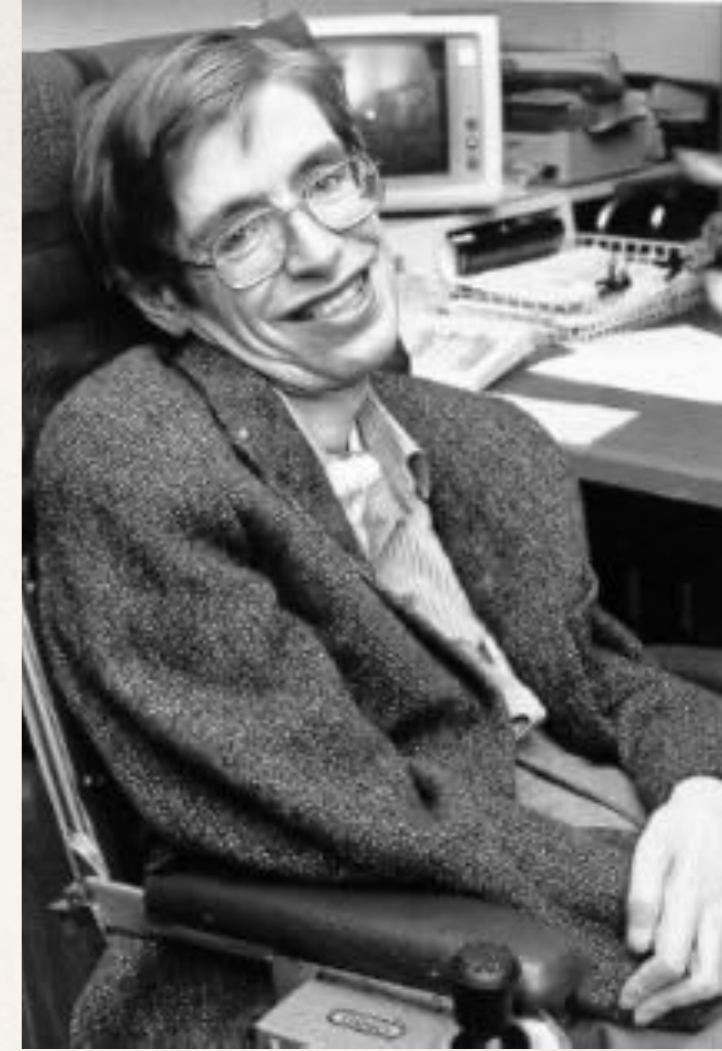
Ακτινοβολία Hawking



...Ακτινοβολία Hawking ;

Stephen Hawking

(8 Ιανουαρίου 1942 -14 Μαρτίου 2018)



Επιλεγμένα ακαδημαϊκά έργα

- *Hawking, S.W.; Penrose, R. (1970). "The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology". Proceedings of the Royal Society Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 314 (1519): 529–548.*
- *Hawking, S. (1971). "Gravitational Radiation from Colliding Black Holes". Physical Review Letters. 26 (21): 1344–1346.*
- *Hawking, S.W. (1972). "Black holes in general relativity". Communications in Mathematical Physics. 25 (2): 152–166.*
- *Hawking, S.W. (1974). "Black hole explosions?". Nature. 248 (5443): 30–31.*
- *Hawking, S.W. (1975). "Particle Creation by Black Holes". Commun.Math.Phys. 43 (1975) 199-220, Erratum: Commun.Math.Phys. 46 (1976) 206*
- *Hawking, S.W. (1982). "The development of irregularities in a single bubble inflationary universe". Physics Letters B. 115 (4): 295–297.*
- *Hartle, J.; Hawking, S. (1983). "Wave function of the Universe". Physical Review D. 28 (12): 2960–2975.*
- *Hawking, S.W. (1996). "The Gravitational Hamiltonian in the Presence of Non-Orthogonal Boundaries". Classical and Quantum Gravity. 13 (10): 2735–2752.*
- *Hawking, S. (2005). "Information loss in black holes". Physical Review D. 72 (8): 084013.*
- *Hawking, S.; Hertog, T. (2018). "A smooth exit from eternal inflation?". Journal of High Energy Physics. 147 (4).*

*Αλλά η ακτινοβολία Hawking δεν έχει ανιχνευθεί ούτε στο διάστημα
ούτε στα εργαστήρια*

Μελανές Οπές: θερμοκρασία και χρόνος ζωής

Μελανή οπή συμπεριφέρεται ως ένα μέλαν σώμα με θερμοκρασία

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k} \approx 10^{-7} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1} \text{ K}$$

Και έχει ένα χρόνο ζωής

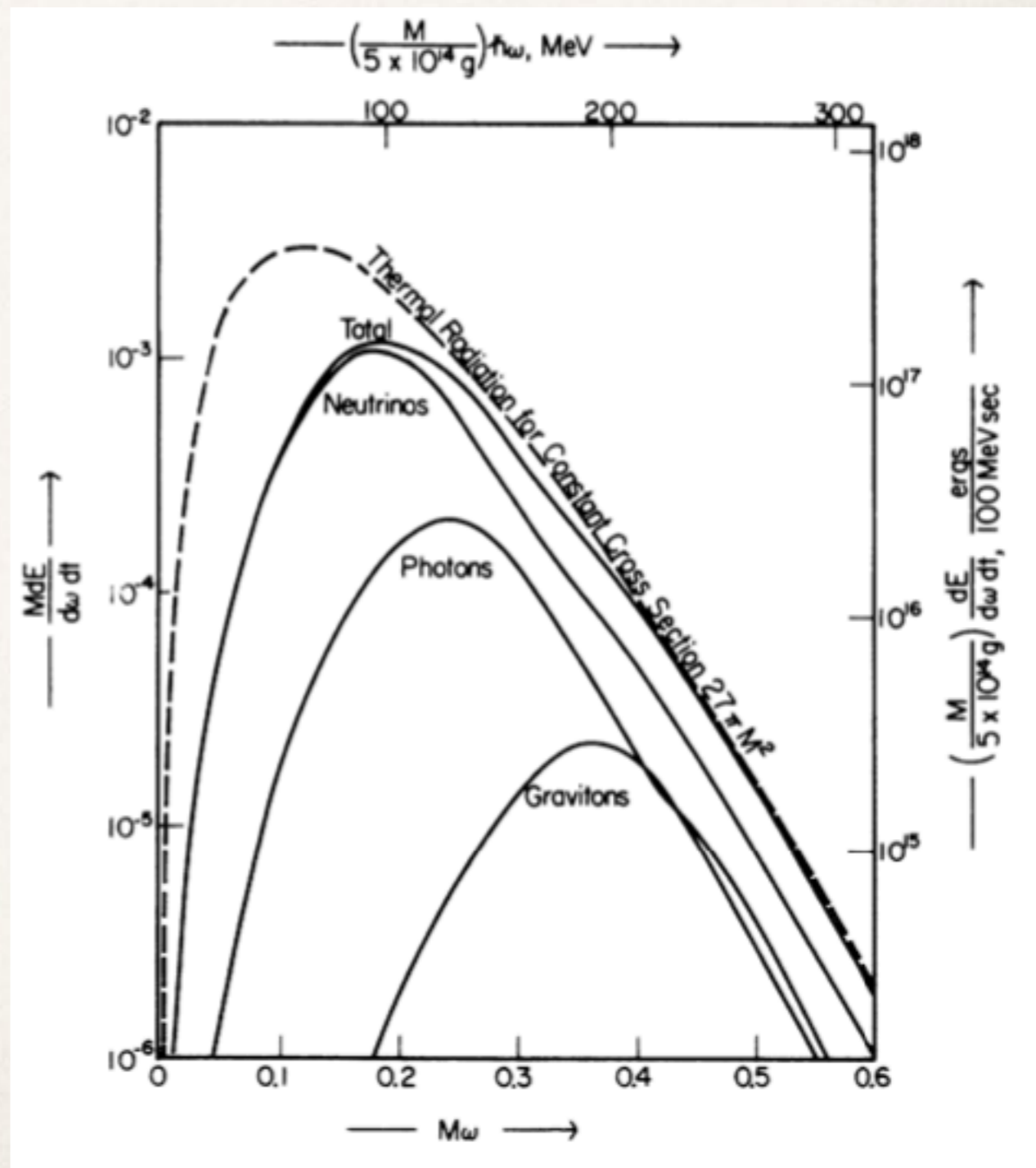
$$\tau(M) \approx \frac{\hbar c^4}{G^2 M^3} \approx 10^{64} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^3 \text{ y}$$

Particle emission rates from a black hole: Massless particles from an uncharged, nonrotating hole*

Don N. Page

California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

(Received 18 August 1973)



Μελανές Οπές στον LHC ?

Black Holes at the Large Hadron Collider

Savas Dimopoulos¹ and Greg Landsberg²

¹Physics Department, Stanford University, Stanford, California 94305-4060

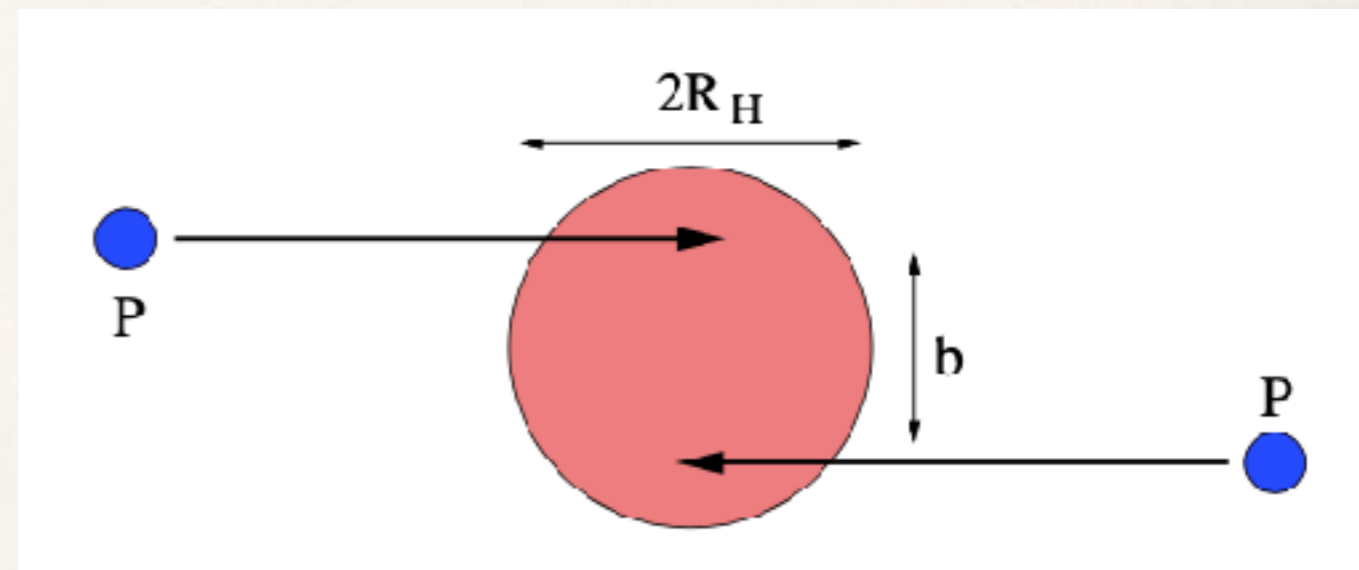
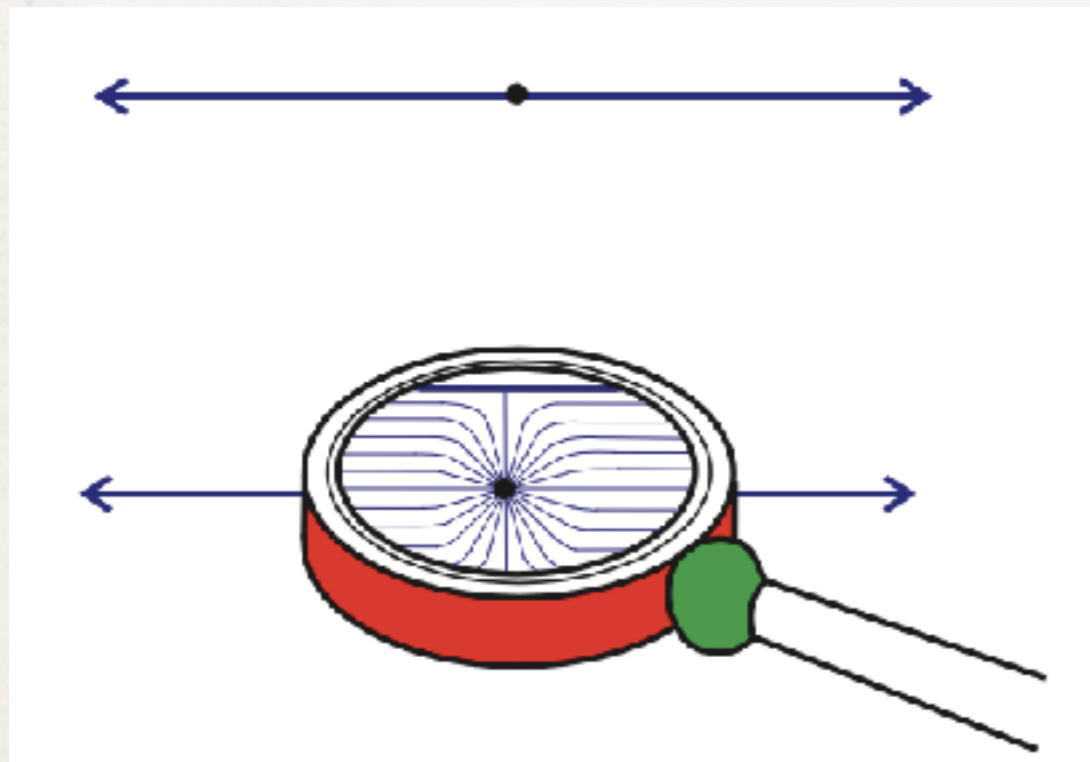
²Department of Physics, Brown University, Providence, Rhode Island 02912

(Received 28 June 2001; published 27 September 2001)

If the scale of quantum gravity is near TeV, the CERN Large Hadron Collider will be producing one black hole (BH) about every second. The decays of the BHs into the final states with prompt, hard photons, electrons, or muons provide a clean signature with low background. The correlation between the BH mass and its temperature, deduced from the energy spectrum of the decay products, can test Hawking's evaporation law and determine the number of large new dimensions and the scale of quantum gravity.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.161602

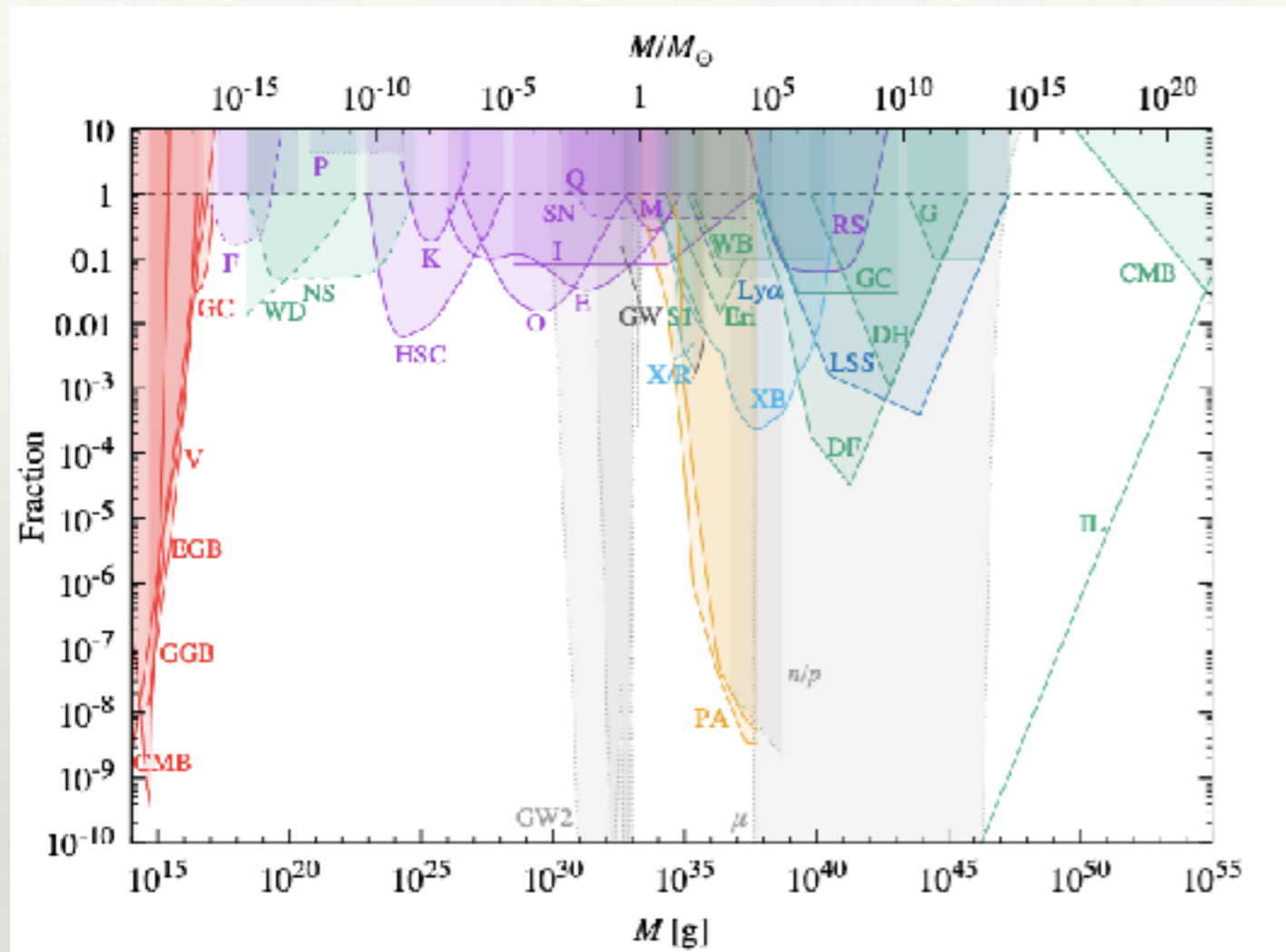
PACS numbers: 11.10.Kk, 04.70.Dy, 13.85.Qe, 14.80.-j



Η ροή δυναμικών γραμμών από σημειακή μάζα σε μία διασταση στον συνηθισμένο χώρο (πάνω) και η διάχυση σε χώρο με επιπλέον διαστάσεις

Σε υψηλές ενέργειες τα πρωτόνια έρχονται πολύ κοντά το ένα με το άλλο και αν βρεθούν εντός της ακτίνας Schwarzschild, R_H , που αντιστοιχεί στην ενέργεια τους θα δημιουργήσει μία μελανή οπή

Carr, Kohri, Sendouda, Yokohama, (2020),



Constraints on $\Omega_{\text{PBH}}/\Omega_{\text{DM}}$ from

1) εξατμηση, 2) φακοί, 3) δυναμική επίδραση, 4) συγκέντρωση ύλης,

5) CMB διαταράξεις, 6) δομές μεγάλης κλίμακας

and 7) φαινόμενα υποβάθρου

EGB: extragalactic gamma-ray background,

GGB: Galactic gamma-ray background, V: Voyager e^\pm limits

F : femtolensing , P : picolensing (P) of gamma-ray bursts,

HSC : microlensing of stars in M31 by Subaru

M: in the Magellanic Clouds by MACHO (M)

E: and EROS (E), in the local neighbourhood by Kepler

K: in the local neighbourhood by Kepler

O: in the Galactic bulge by OGLE (O)

I: by Icarus in a cluster of galaxies ,

SN: microlensing of supernova

Q: Quasars, RS: compact radio sources.

WB: disruption of wide binaries, GC: globular clusters,

DH: heating of stars in the Galactic disk, survival of star

Eri: clusters in Eridanus II and S1: Segue

DF: infalling of halo objects due to dynamical friction

G: tidal disruption of galaxies, and CMB: the CMB dipole

X/R: X-ray and radio observations,

PA: CMB anisotropies measured by Planck,

GW: gravitational waves from binary coalescences

μ : Constraints come from CMB spectral distortion

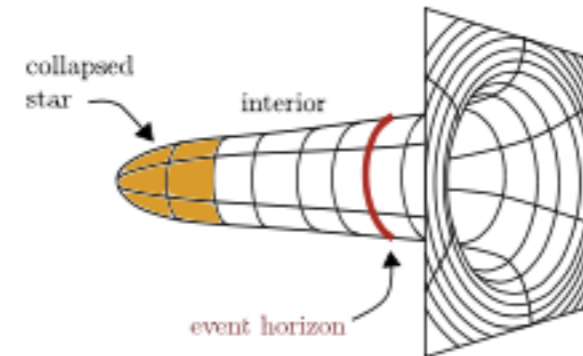
GW2: 2nd order gravitational waves (GW2)

n/p: the neutron-to-proton ratio (n/p). The incredulity limit IL: one hole per Hubble volume.

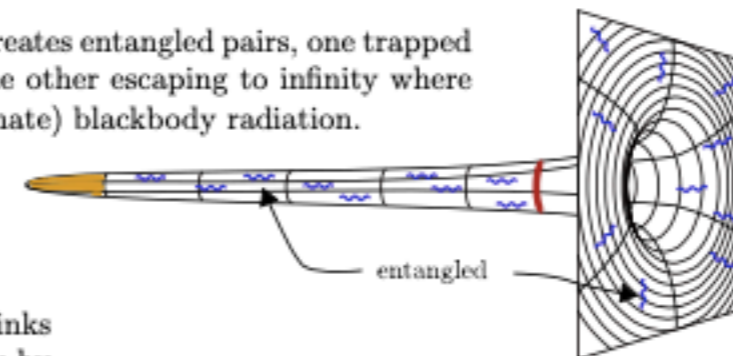
Μελανές Οπές και πληροφορία

Stages of Black Hole Evaporation

(a) After stellar collapse, the outside of the black hole is nearly stationary, but on the inside, the geometry continues to elongate in one direction while pinching toward zero size in the angular directions.

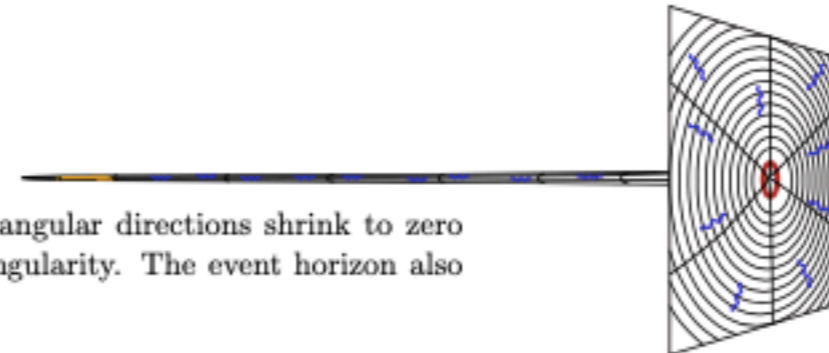


(b) The Hawking process creates entangled pairs, one trapped behind the horizon and the other escaping to infinity where it is observed as (approximate) blackbody radiation.

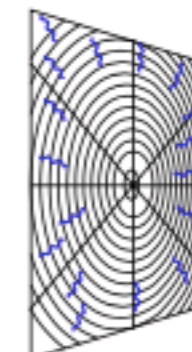


The black hole slowly shrinks as its mass is carried away by the radiation.

(c) Eventually the angular directions shrink to zero size. This is the singularity. The event horizon also shrinks to zero.

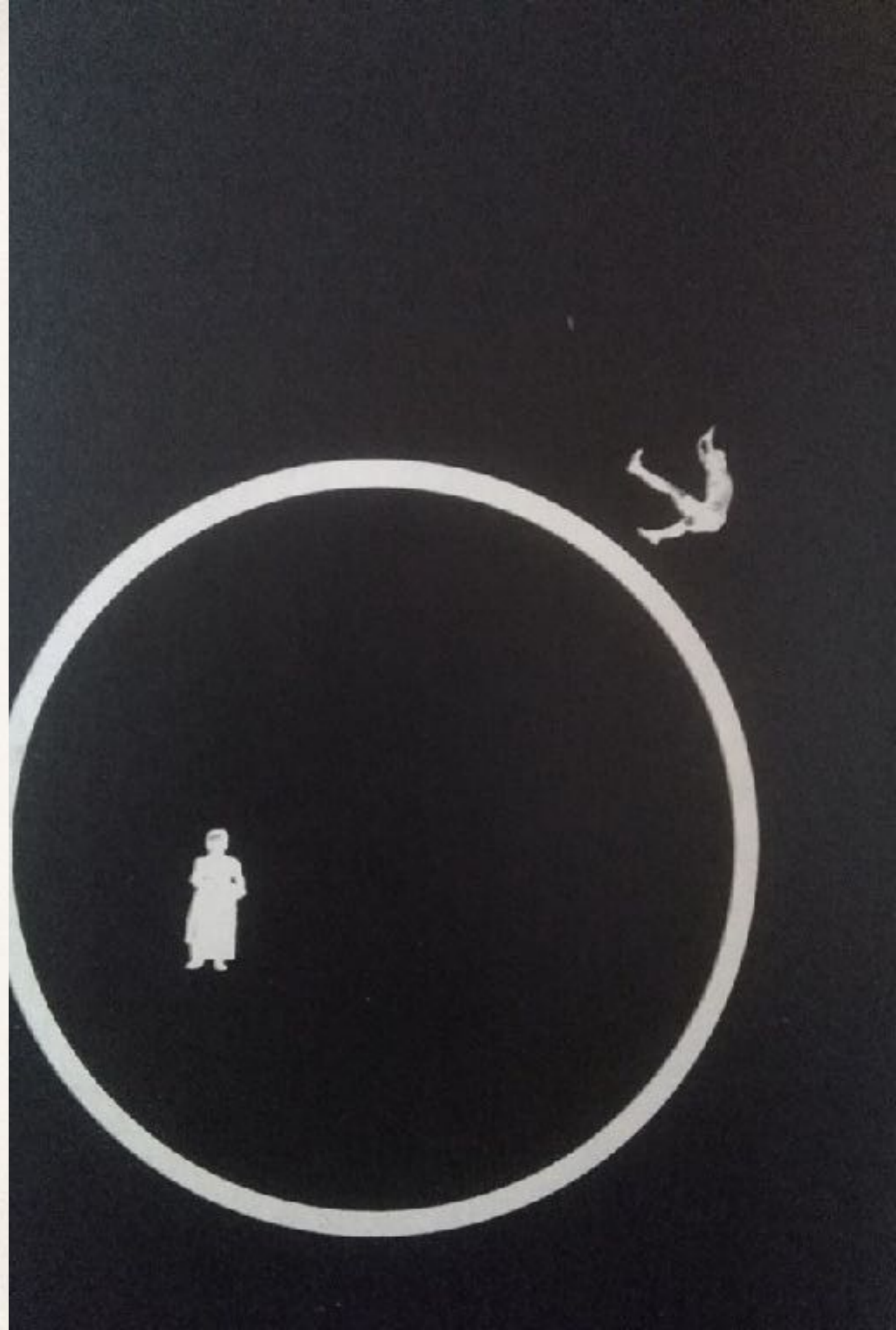


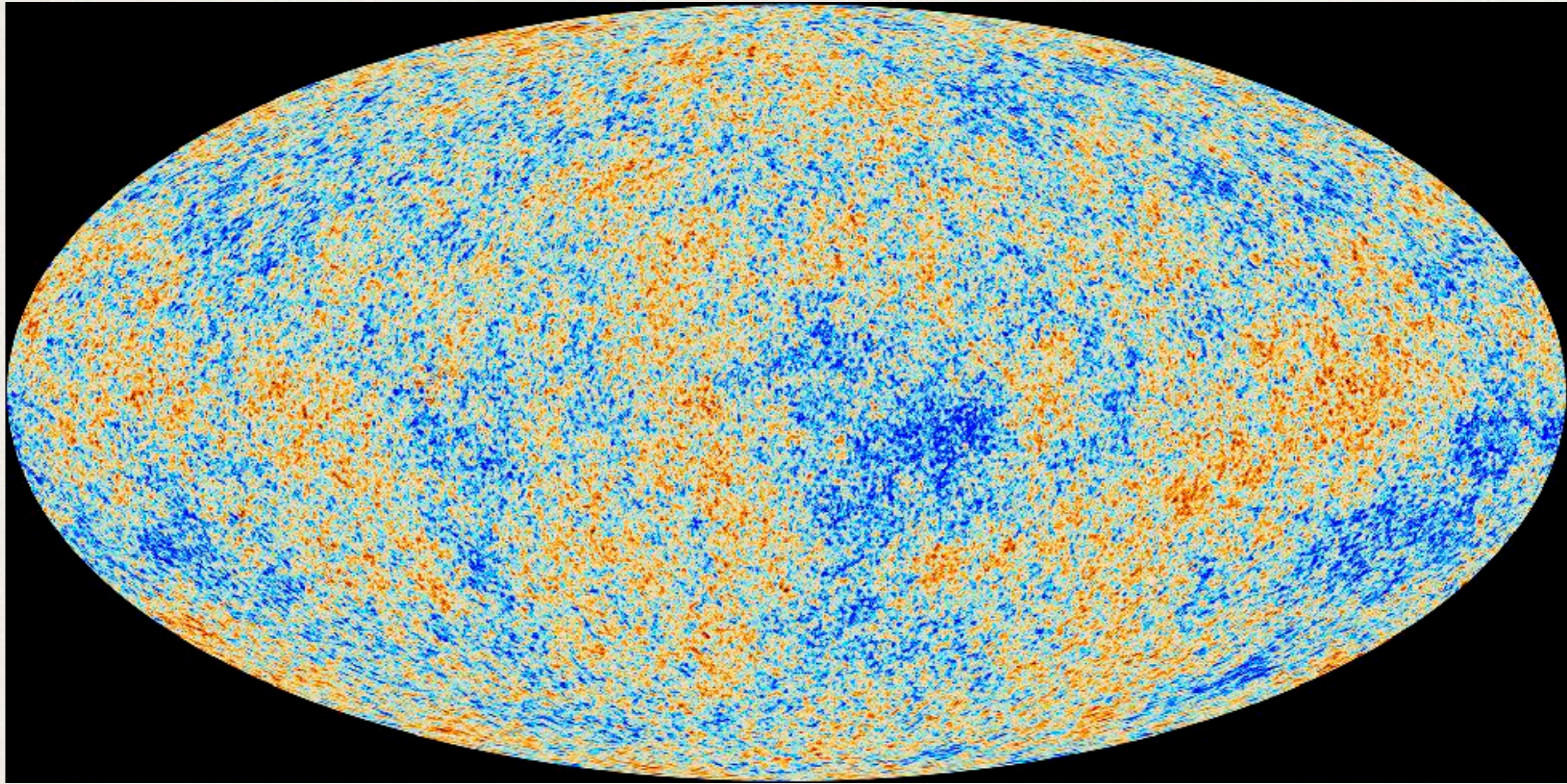
(d) At the end there is a smooth spacetime containing thermal Hawking radiation but no black hole.



Πιστεύουμε πως ορίζοντας
γεγονότων υπήρξε στην αρχή του
Σύμπαντος, στη Μεγάλη Έκρηξη

Και η μεγάλη έκρηξη
δημιούργησε το Σύμπαν που
κατοικούμε. Και η ακτινιβολία
του ορίζοντα γεγονότων θα
πρέπει να υπάρχει παντού
γύρω μας





Οι ανισοτροπίες στην κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου

Δορυφόρος Planck 2015



Γιάννης Νταλιάνης, 2022

Βαρυτικά Κύματα

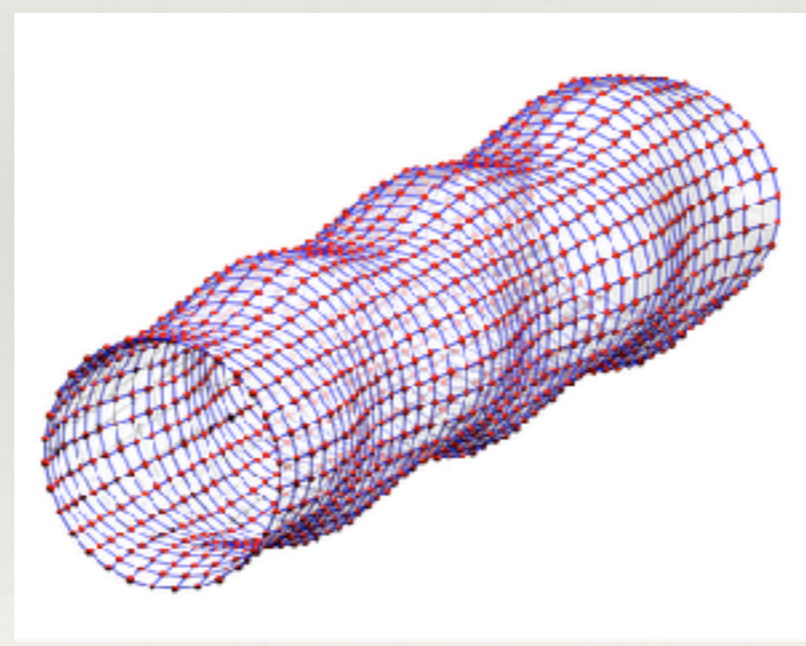


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

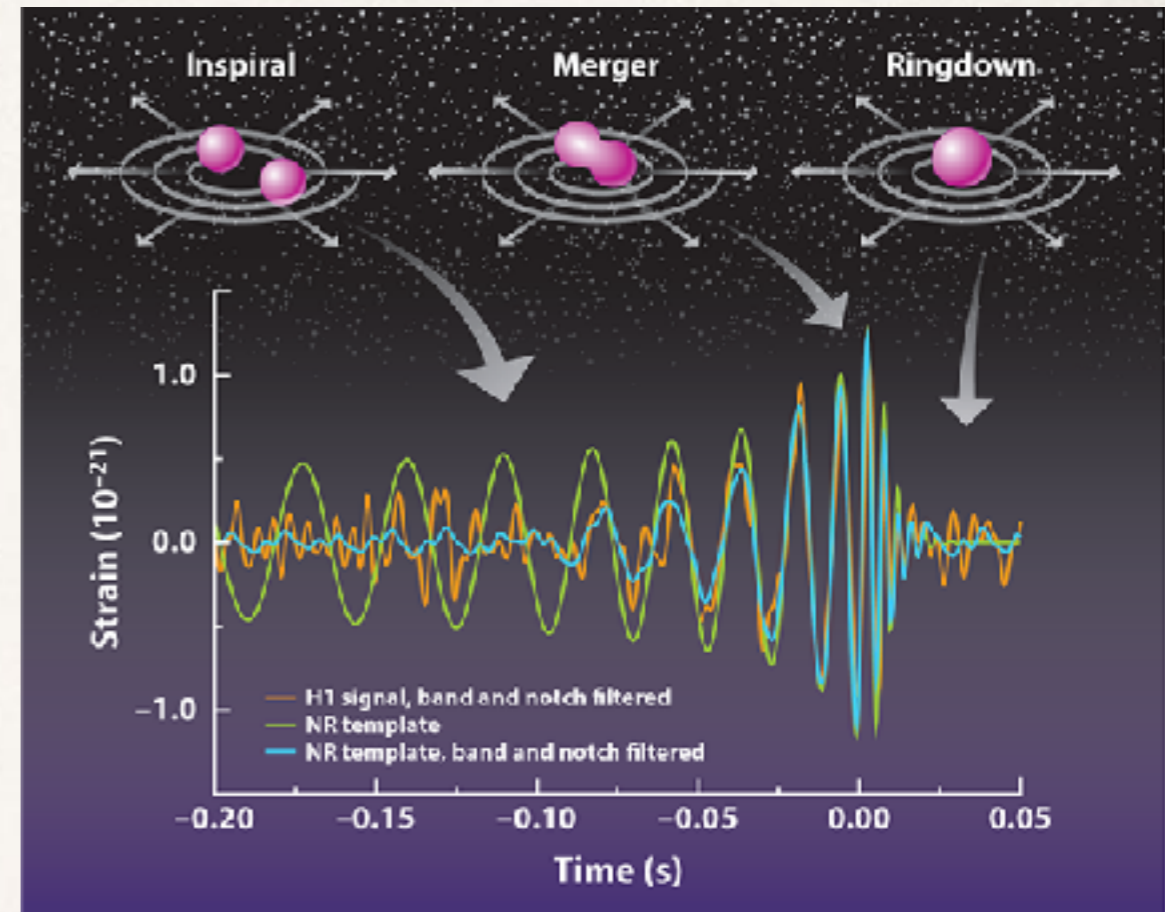
Βαρυτικά κύματα

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$$
$$g_{\mu\nu} = \text{επιπεδο} + h_{\mu\nu}$$

$$\nabla^2 h_{\mu\nu} = 0$$



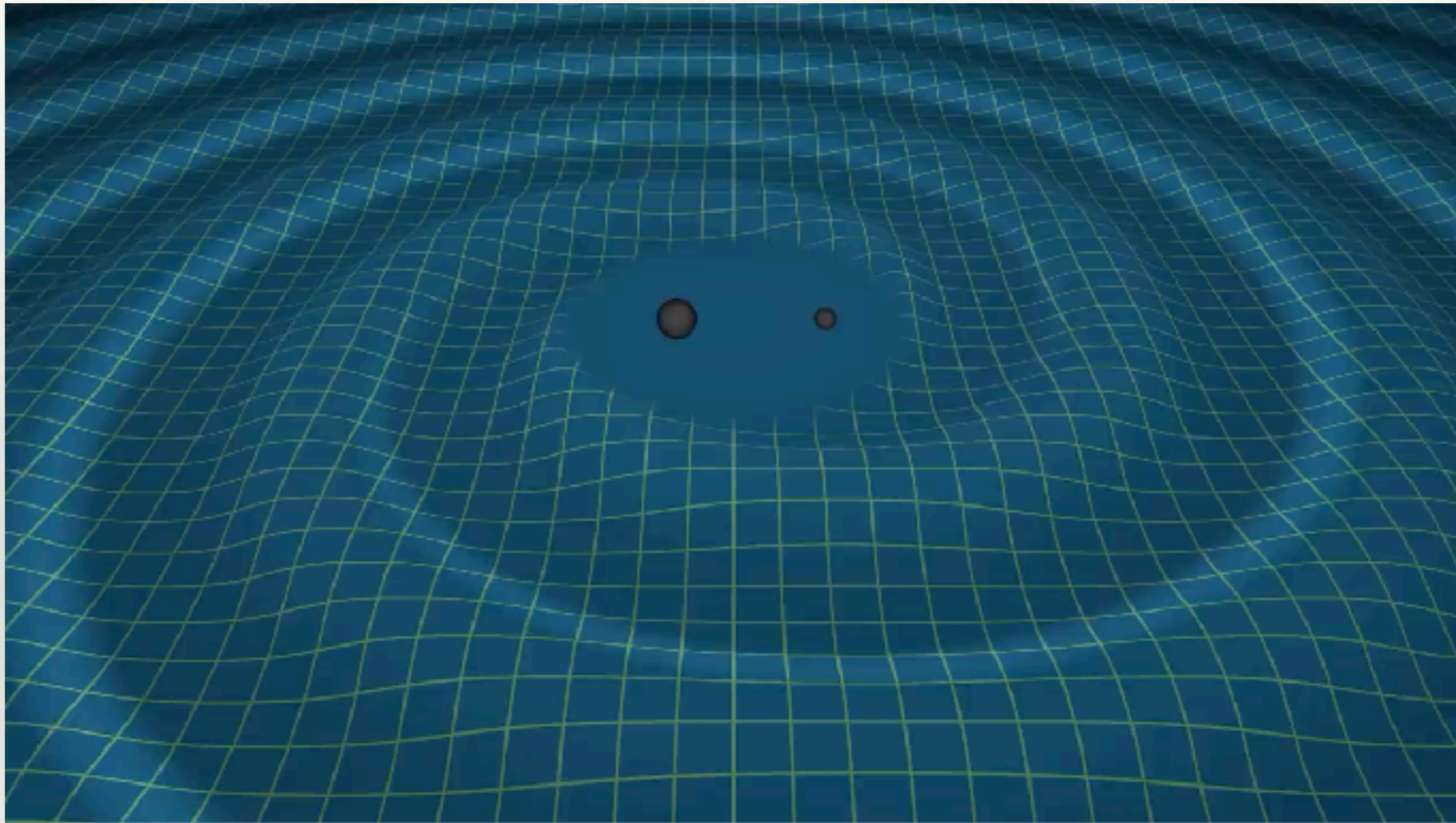
$$h_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_x & 0 \\ 0 & h_x & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} e^{2\pi i f t - i k z}$$

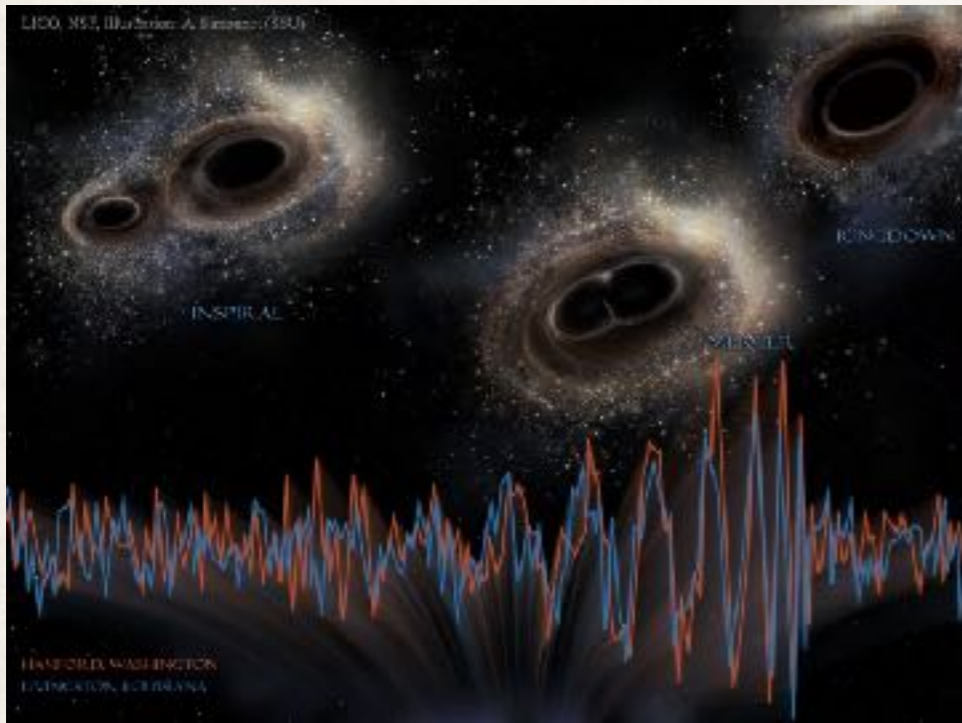


Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων

LIGO 2016

*14 Σεπτεμβρίου 2015 μείον ...1.3 δισεκατομμύρια χρόνια
Δυο μαύρες τρύπες μάζας 36 και 29 ηλιακών μαζών συγχωνεύθηκαν...*





Η ενέργεια που εκκλύεται είναι ένα κλάσμα της βασικής ποσότητας:

$$L_0 = \frac{c^5}{G} = 3.6 \times 10^{52} W$$

Το πλάτος το βαρυτικού κύματος για διπλό σύστημα που συγχωνεύεται

$$h \sim 10^{-21} \left(\frac{M}{20M_\odot} \right) \left(\frac{r}{200Mpc} \right)$$

Κάποια μεγέθη σύγκρισης

$$L_{\text{Ηλιος}} = 3.8 \times 10^{26} W$$

$$L_{\text{γαλ}} \approx 10^{37} W$$

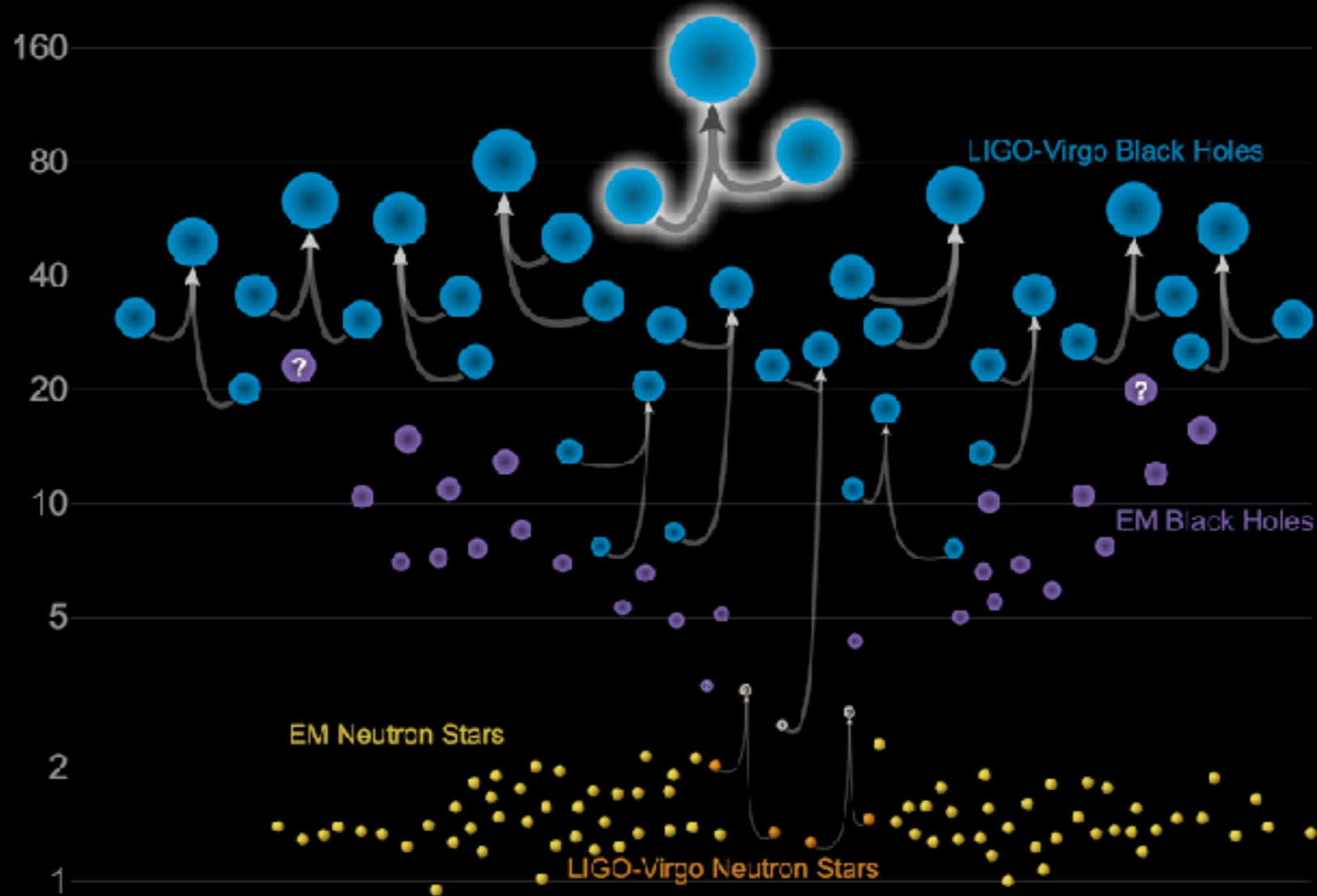
$$L_{\text{ολοι-γαλ}} \approx 10^{49} W$$



Αϊνστάιν: Αν ένα σώμα εκπέμπει ενέργεια E με την μορφή ακτινοβολίας, η μάζα του μειώνεται κατά E/c^2

Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses



Updated 2020-09-02

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

Σήμερα, οι μαύρες τρύπες που έχουμε ανιχνεύσει άμεσα

Η ακτινοβολία των μελανών οπών
ίσως είναι κάπου εκεί έξω

