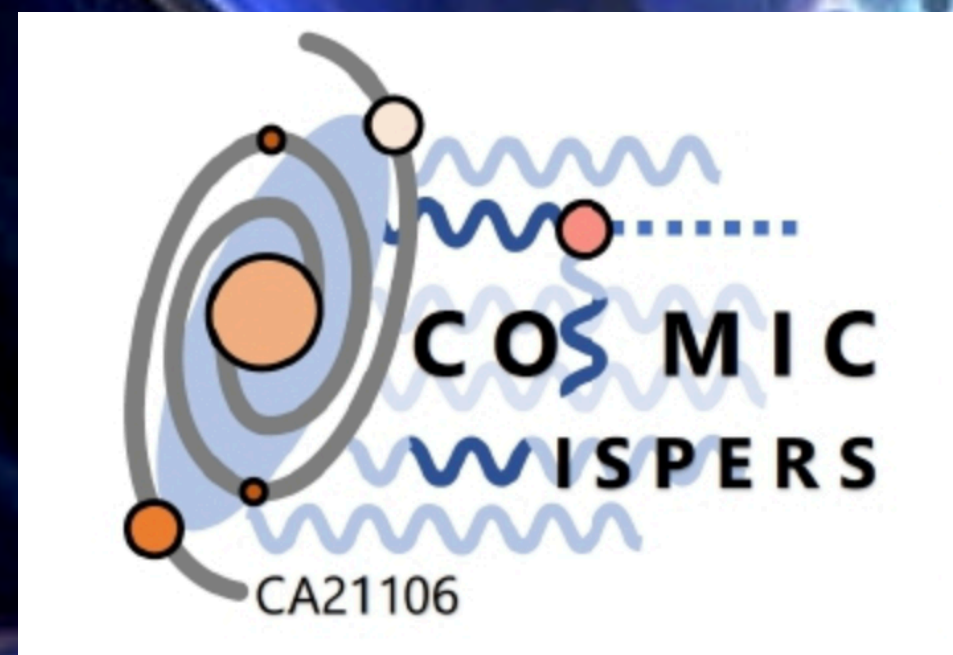


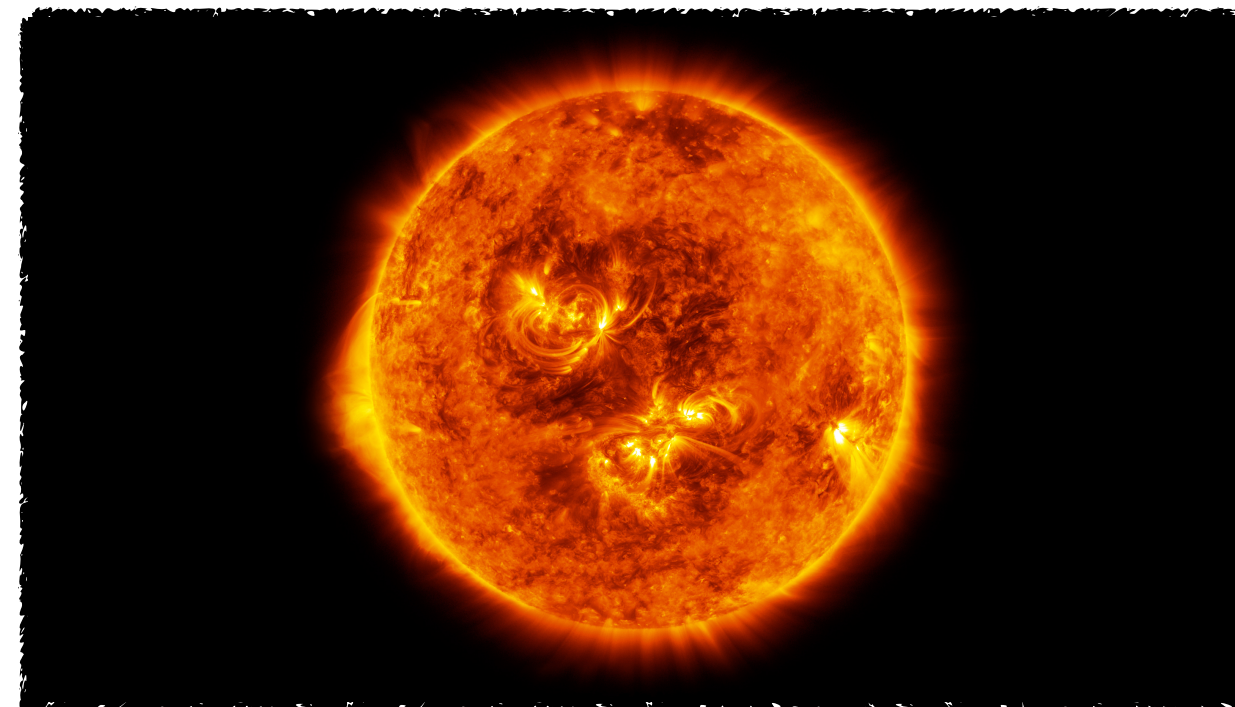
# Alla scoperta dell'universo invisibile: materia oscura, onde gravitazionali e buchi neri

**Andrea Caputo (CERN)**

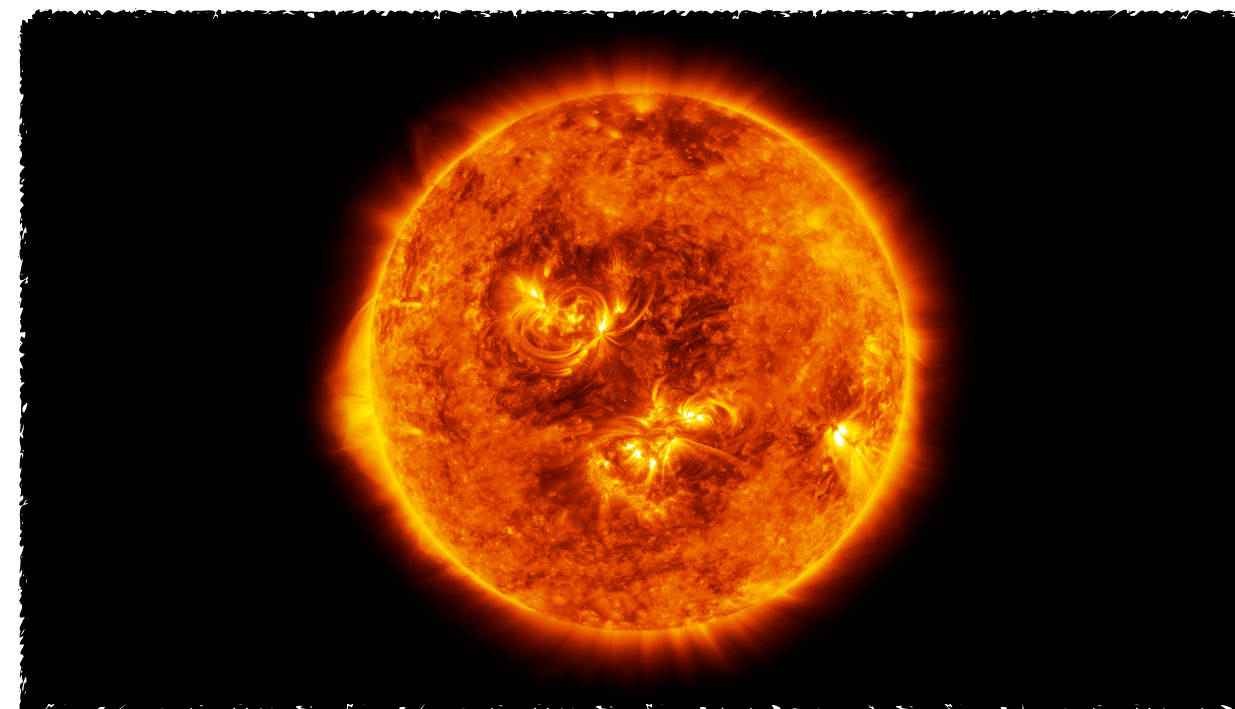
**Bari 07/09/2023**



# L'universo che conosciamo



# L'universo che conosciamo



## I mattoncini del nostro universo

Atomi: nuclei + elettroni

(Fatti di protoni e neutroni, a loro volta fatti di quarks)

Tabella Periodica degli Elementi

Gruppo	1	2											13	14	15	16	17	18
1	H	He															He	
2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne									Ne	
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar									Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	* Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	* Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

Dettagli per l'elemento Ferro (Fe):

- peso atomico standard: 55.845
- numero atomico: 26
- simbolo chimico: Fe
- nome: Ferro
- configurazione elettronica: [Ar] 3d<sup>6</sup> 4s<sup>2</sup>
- stati di ossidazione: +2, +3
- elettronegatività: 1.83
- prima energia di ionizzazione: 762.5 kJ/mol

Note:

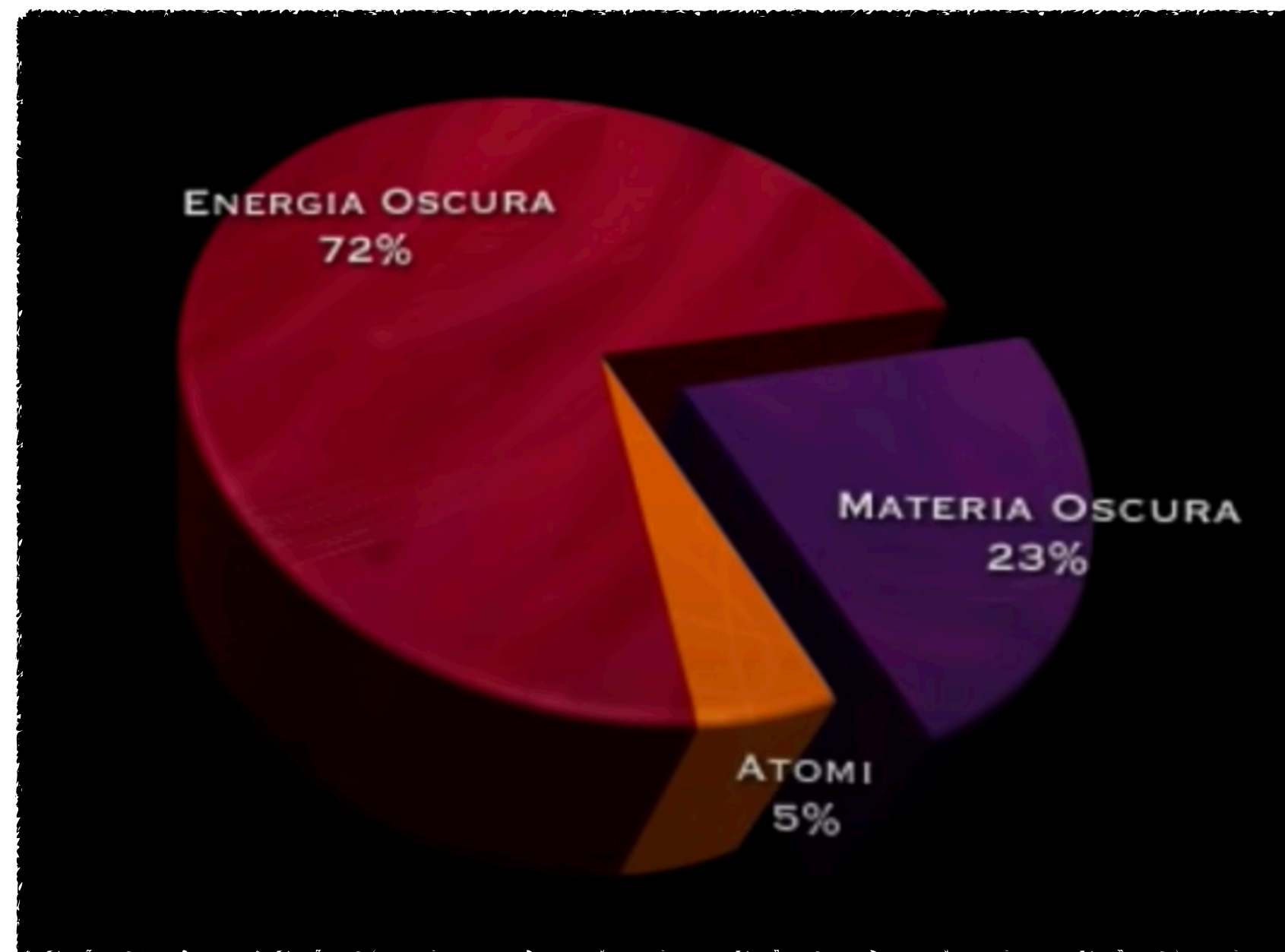
- \* I lantanidi e gli attinidi sono riportati a parte.
- \* I numeri atomici sono indicati tra parentesi.
- \* Le masse tra le parentesi sono le masse atomiche relative.

Legenda:

- metalli alcalini
- metalli alcalinoterrici
- lantanoidi
- metalli di transizione
- proprietà sconosciute
- metalli di post-transizione
- metalloidi
- non metalli reattivi
- gas nobili

**Ma di cosa e' fatto davvero  
l'Universo??**

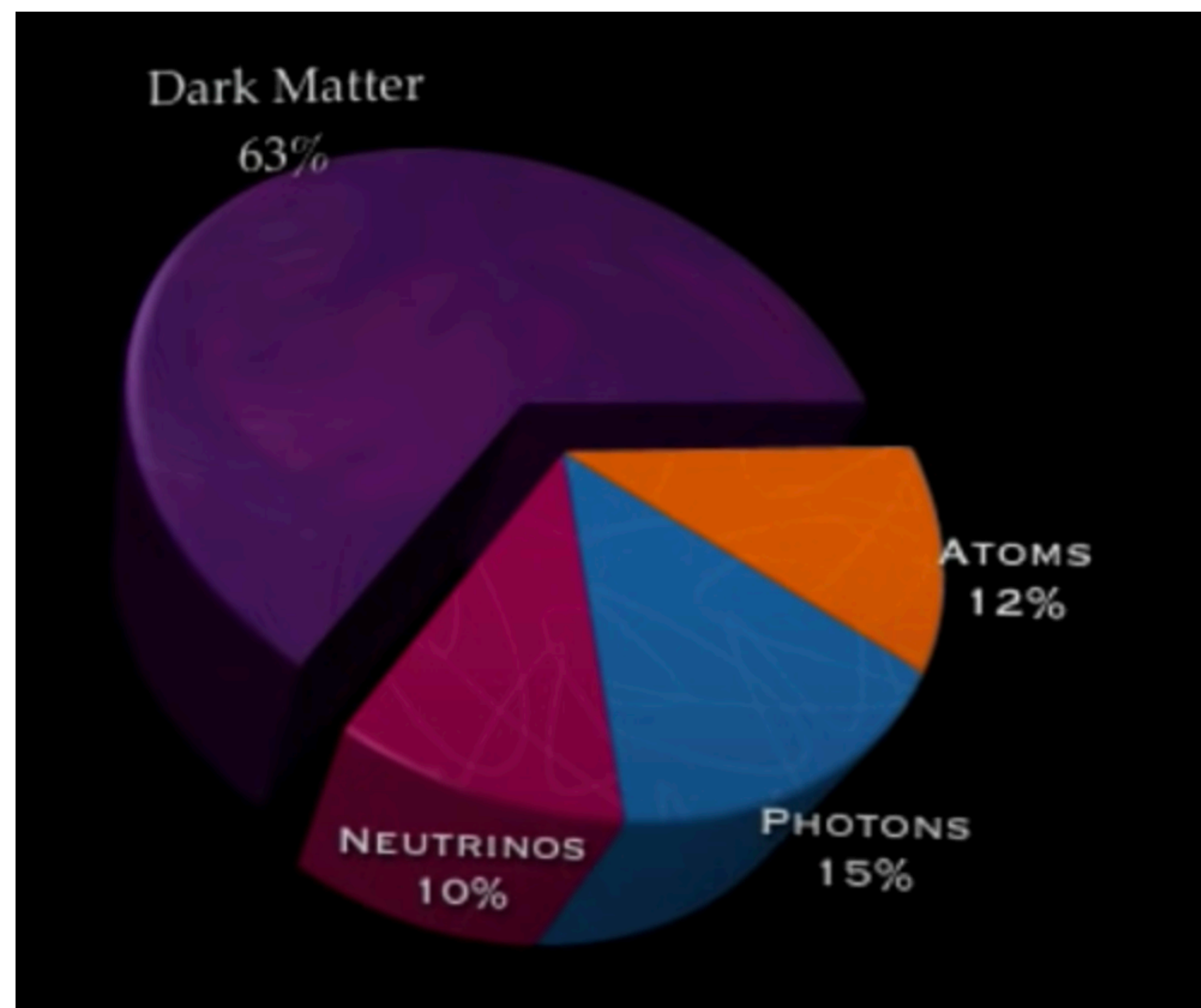
# Ma di cosa e' fatto davvero l'Universo??



Oggi

La maggior parte del nostro universo e' fatta  
di cose che NON conosciamo!

# Ma di cosa e' fatto davvero l'Universo??



La materia oscura e' un elemento cruciale per la formazione delle galassie. In altre parole, senza la materia oscura probabilmente oggi non saremmo qui a fare questo incontro!

Quando le galassie hanno iniziato a formarsi

**Ma se non la vediamo, come  
facciamo a sapere che esiste?**

# Ma se non la vediamo, come facciamo a sapere che esiste?



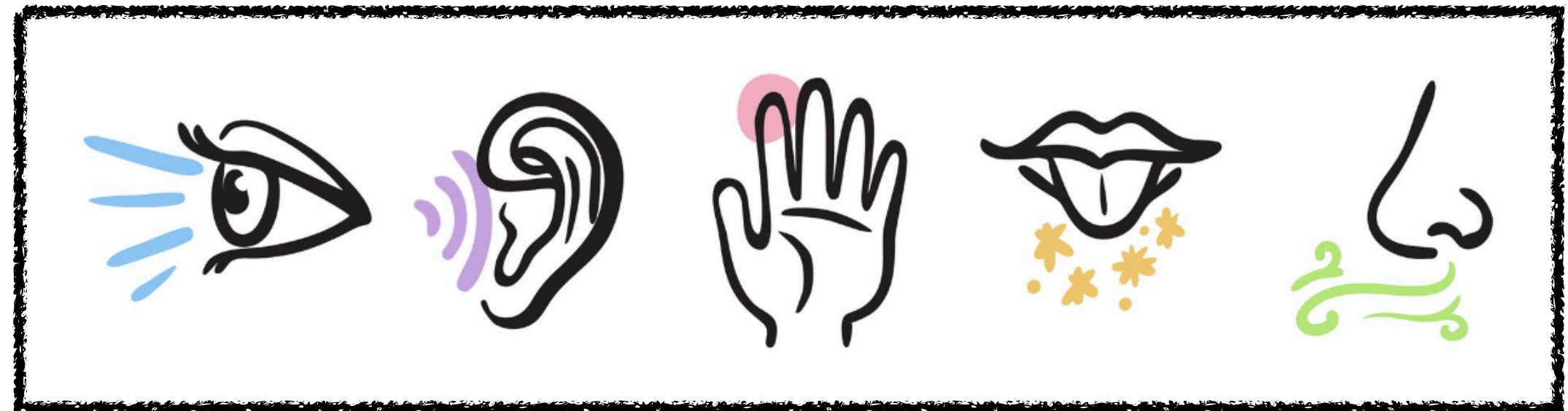
“Sa di polvere da sparo”  
Charlie Duke



# Ma se non la vediamo, come facciamo a sapere che esiste?



“Sa di polvere da sparo”  
Charlie Duke

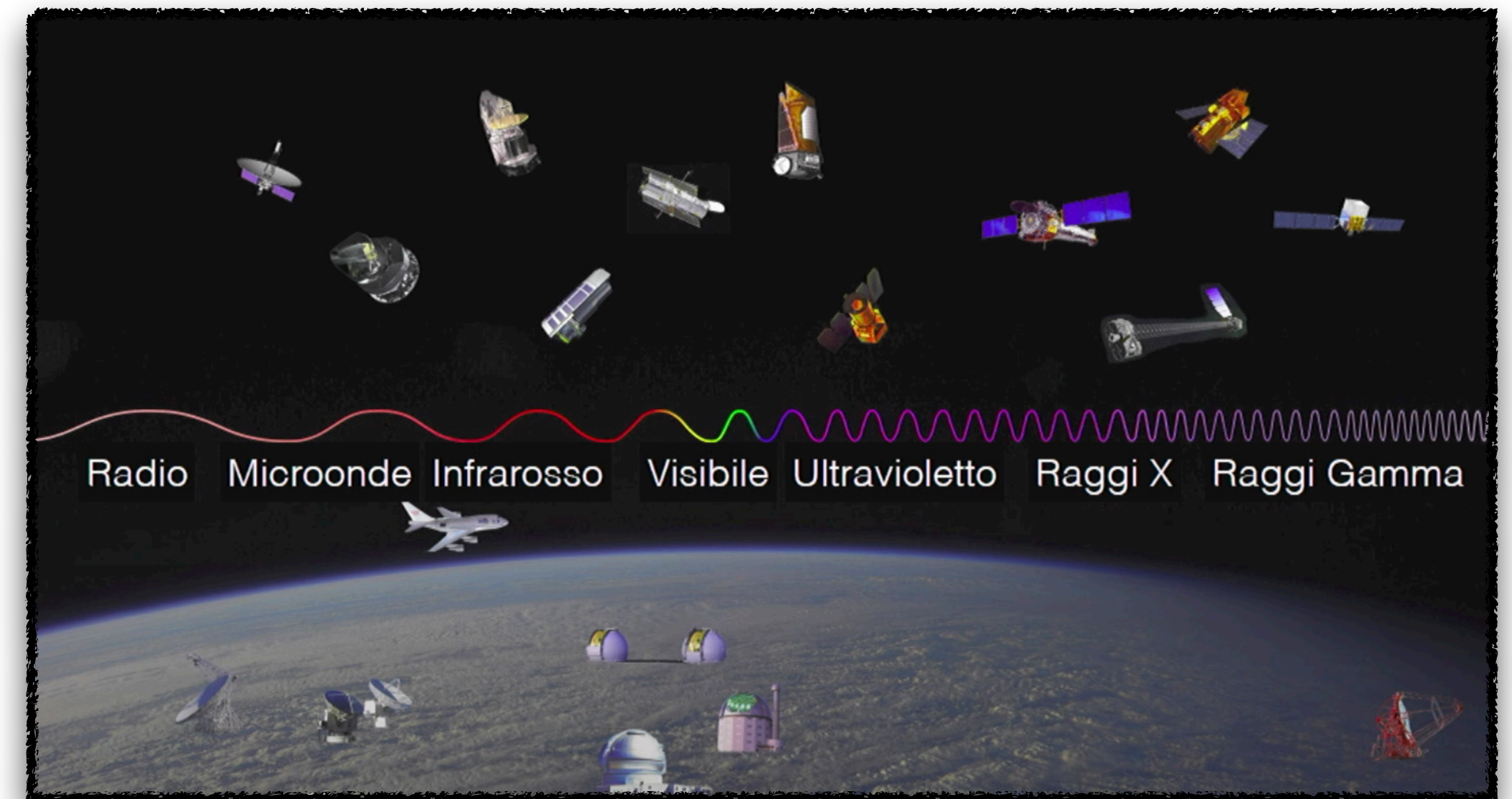
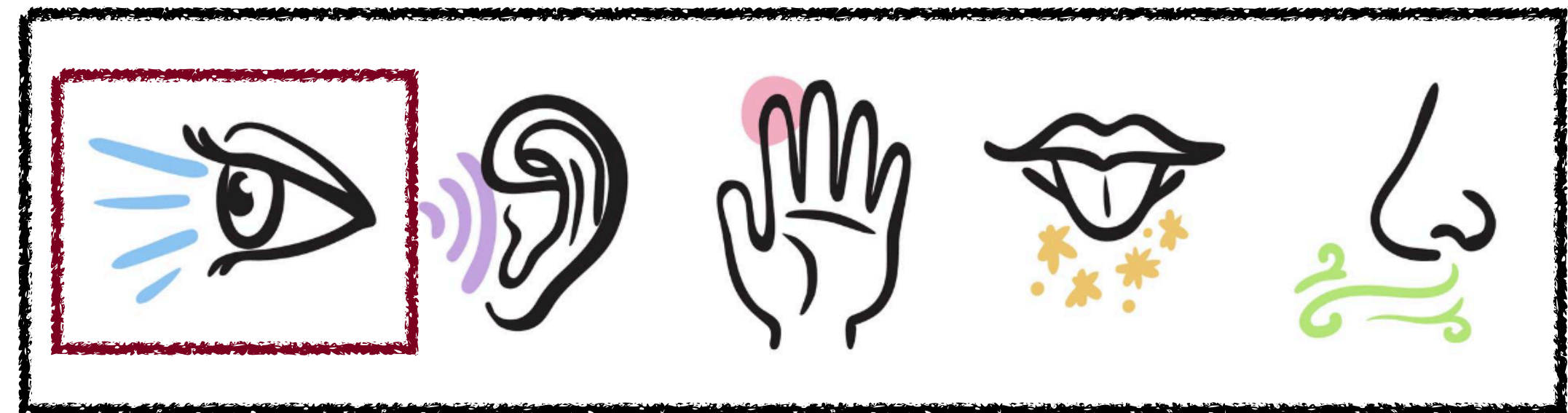


# Ma se non la vediamo, come facciamo a sapere che esiste?



“Sa di polvere da sparo”  
Charlie Duke

Tipicamente tutto quello che conosciamo sull’universo lo abbiamo scoperto “**guardandolo**”. Prima ad occhio nudo, poi con telescopi a varie lunghezze d’onda

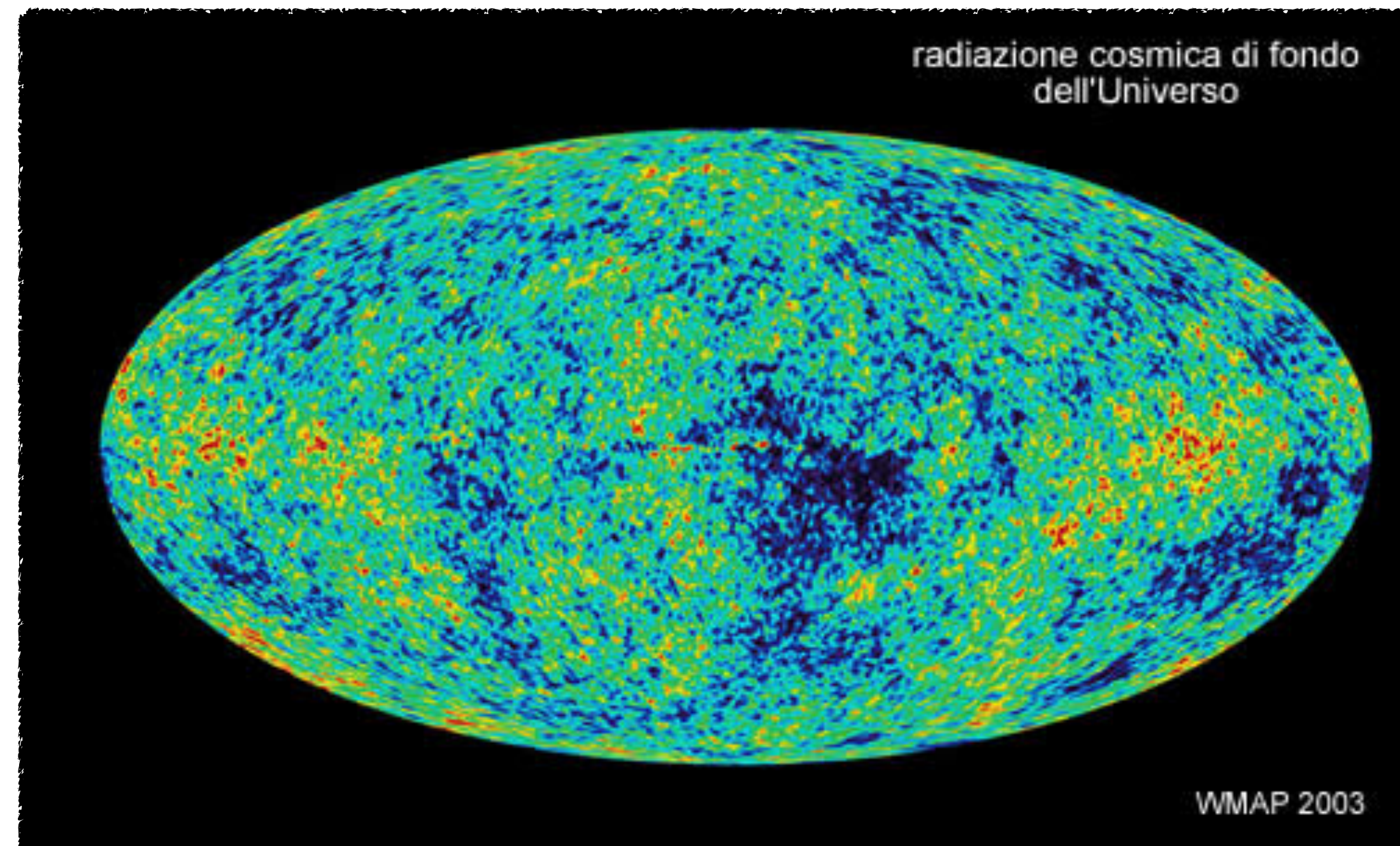


La peculiarita' della materia oscura  
e' che non sembra possa emettere,  
riflettere o assorbire luce!

# Indicazioni sperimentali per l'esistenza della materia oscura

# Indicazioni sperimentali per l'esistenza della materia oscura

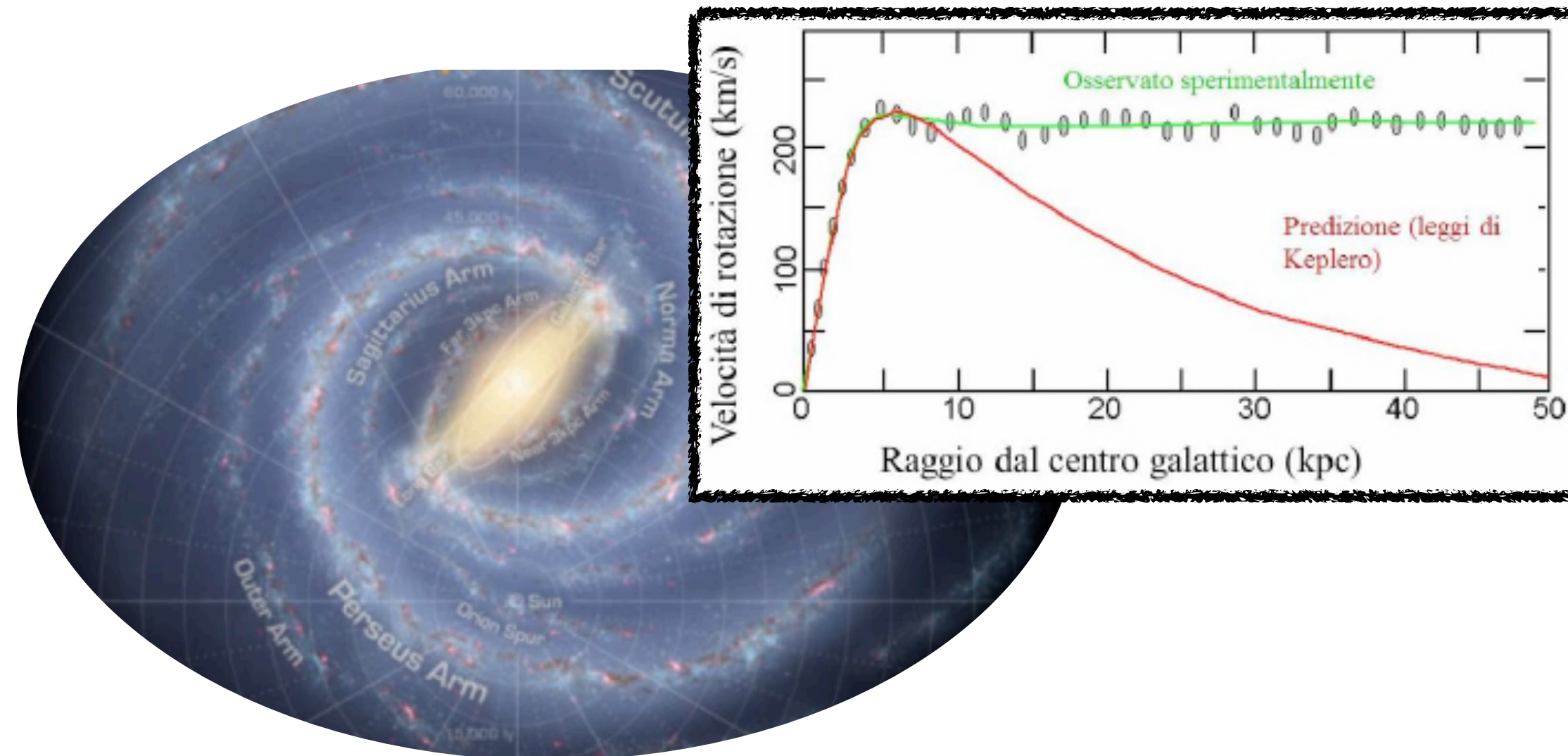
## 1) Radiazione cosmica di fondo (CMB)



# Indicazioni sperimentali per l'esistenza della materia oscura

1) Radiazione cosmica di fondo (CMB)

2) Curve di rotazione galassie

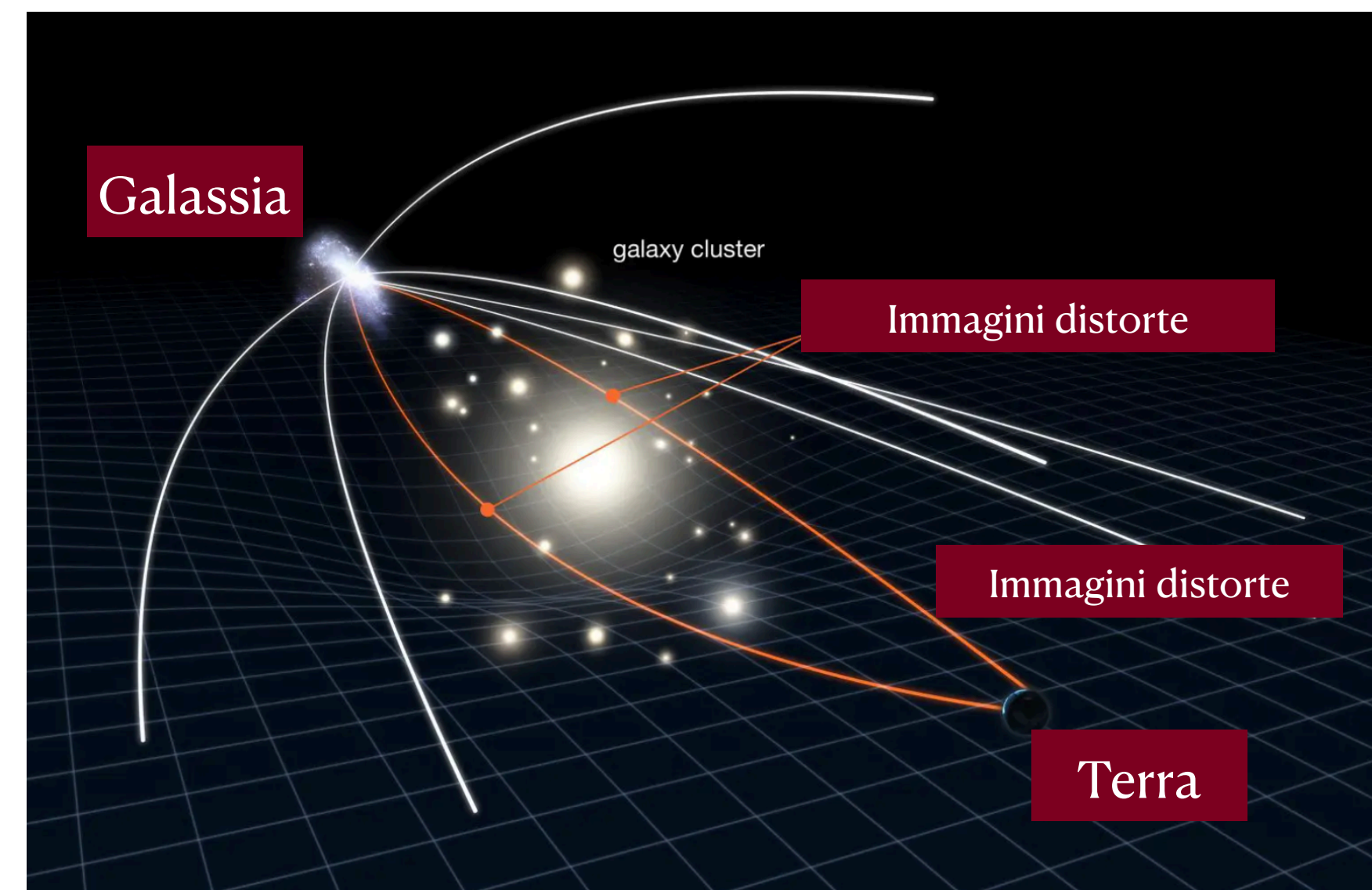


# Indicazioni sperimentali per l'esistenza della materia oscura

1) Radiazione cosmica di fondo (CMB)

2) Curve di rotazione galassie

3) Lenti gravitazionali



# Indicazioni sperimentali per l'esistenza della materia oscura

1)

fondo (CMB)

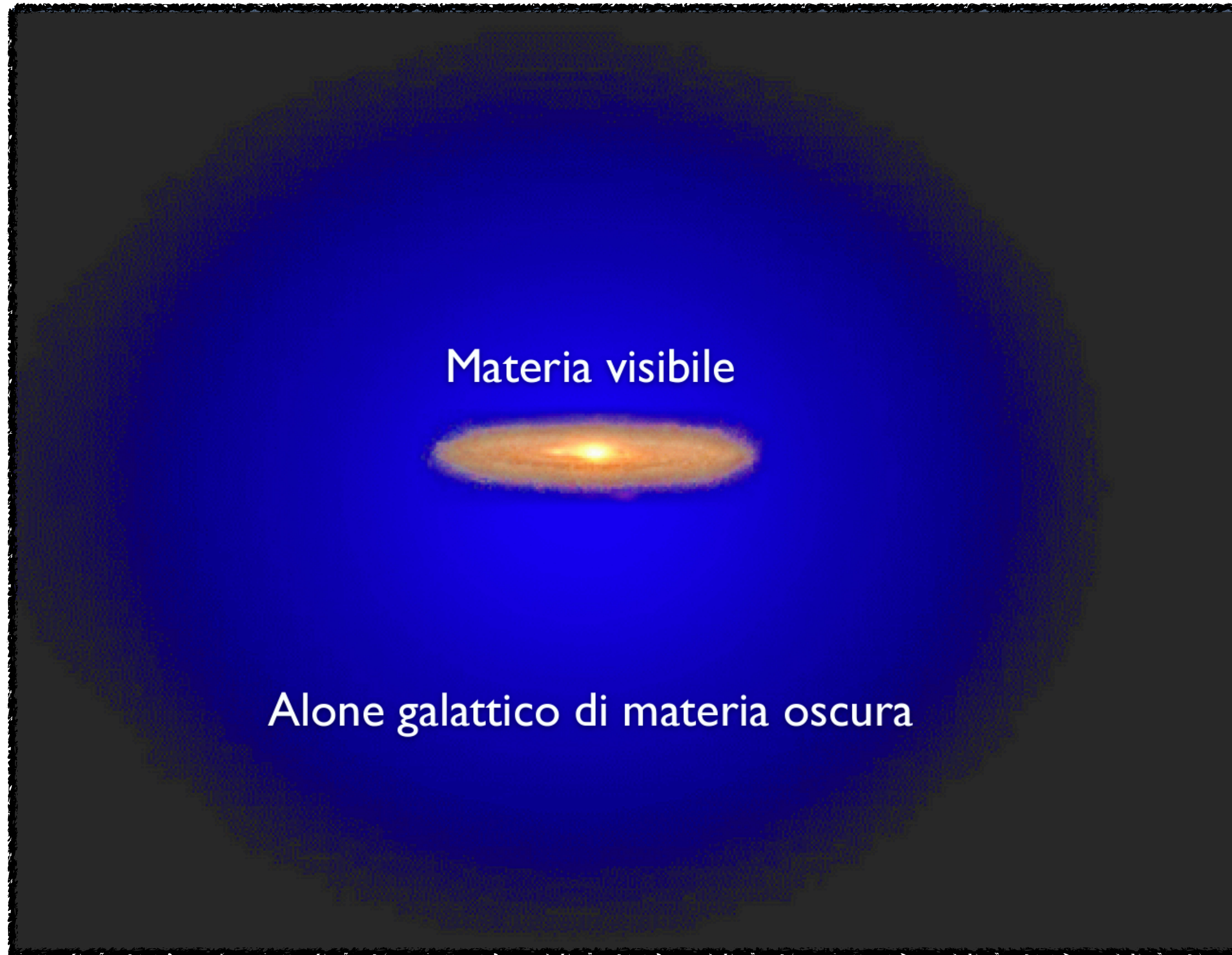
2)

Materia visibile

massie

3)

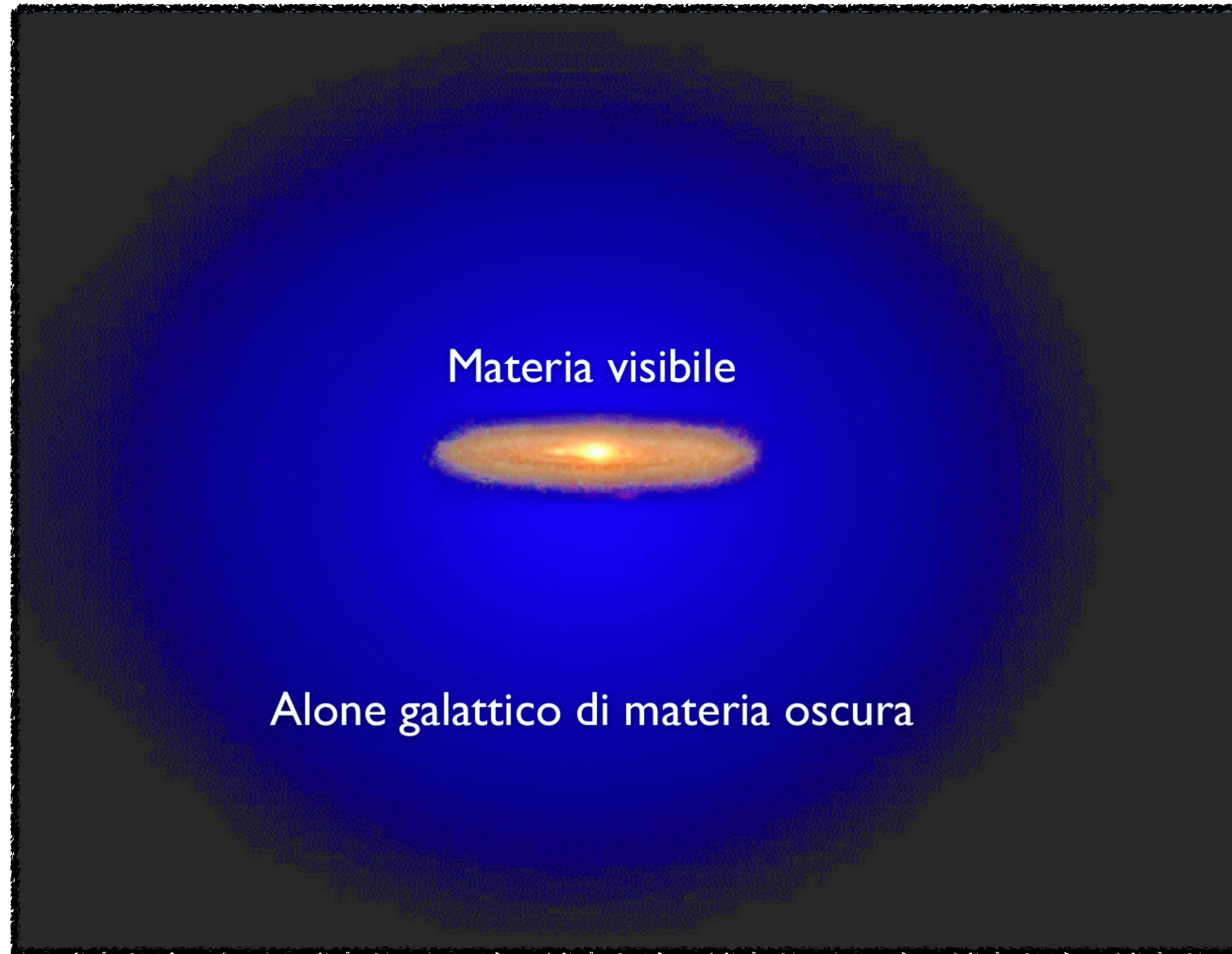
Alone galattico di materia oscura



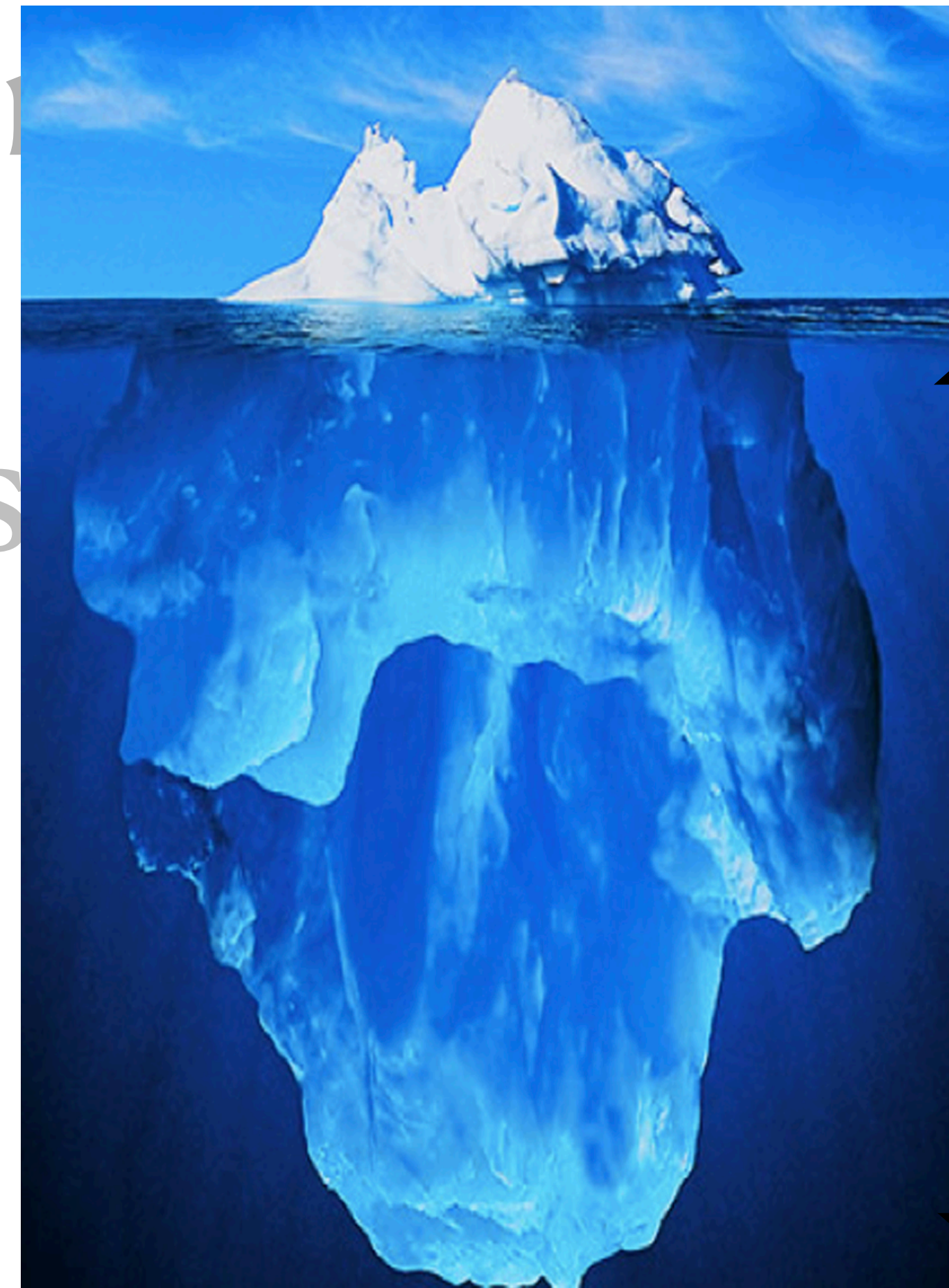


# Indicazioni sperimentali per l'esistenza della materia oscura

1)



2)



3)

# Caratteristiche della materia oscura

(Cosa deve e non deve essere)

- 1) Deve avere una determinata ``abbondanza” (la conosciamo in maniera precisa)
- 2) Deve essere fredda
- 3) Deve essere ``neutra” (o comunque molto poco ``carica”)
- 4) Poche interazioni con il modello standard
- 5) Praticamente non-collisionale

Una nuova particella

**Notate che non e' la prima volta che per anni si hanno ``indicazioni" per l'esistenza di una nuova particella, prima della sua scoperta.**

**Notate che non e' la prima volta che per anni si hanno ``indicazioni'' per l'esistenza di una nuova particella, prima della sua scoperta.**

Pauli teorizzo' l'esistenza del neutrino nel  
Dicembre del 1930

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich herzlichst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin  $1/2$  haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als  $0,01$  Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

# Notate che non e' la prima volta che per anni si hanno "indicazioni" per l'esistenza di una nuova particella, prima della sua scoperta.

Pauli teorizzo' l'esistenza del neutrino nel Dicembre del 1930

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Oloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich kuldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

20 July 1956, Volume 124, Number 3212

## SCIENCE

### Detection of the Free Neutrino: a Confirmation

C. L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, A. D. McGuire

A tentative identification of the free neutrino was made in an experiment performed at Hanford (1) in 1953. In that work the reaction

$$\nu + p \rightarrow \beta^+ + n^0 \quad (1)$$

was employed wherein the intense neutrino flux from fission-fragment decay in a large reactor was incident on a detector containing many target protons in a hydrogenous liquid scintillator. The reaction products were detected as a delayed pulse pair; the first pulse being due to the slowing down and annihilation of the positron and the second to capture of the moderated neutron in cadmium dissolved in the scintillator. To identify the observed signal as neutrino-induced, the energies of the two pulses, their time-

present work was done (3). This work confirms the results obtained at Hanford and so verifies the neutrino hypothesis suggested by Pauli (4) and incorporated in a quantitative theory of beta decay by Fermi (5).

In this experiment, a detailed check of each term of Eq. 1 was made using a detector consisting of a multiple-layer (club-sandwich) arrangement of scintillation counters and target tanks. This arrangement permits the observation of prompt spatial coincidences characteristic of positron annihilation radiation and of the multiple gamma ray burst due to neutron capture in cadmium as well as the delayed coincidences described in the first paragraph.

The three "bread" layers of the sand-

both triads. The detector was completely enclosed by a paraffin and lead shield and was located in an underground room of the reactor building which provides excellent shielding from both the reactor neutrons and gamma rays and from cosmic rays.

The signals from a bank of preamplifiers connected to the scintillation tanks were transmitted via coaxial lines to an electronic analyzing system in a trailer van parked outside the reactor building. Two independent sets of equipment were used to analyze and record the operation of the two triad detectors. Linear amplifiers fed the signals to pulse-height selection gates and coincidence circuits. When the required pulse amplitudes and coincidences (prompt and delayed) were satisfied, the sweeps of two triple-beam oscilloscopes were triggered, and the pulses from the complete event were recorded photographically. The three beams of both oscilloscopes recorded signals from their respective scintillation tanks independently. The oscilloscopes were thus operated in parallel but with different gains in order to cover the requisite pulse-amplitude range. All amplifier pulses were stored in long low-distortion delay lines awaiting electronic decision prior to this acceptance.

Manual analysis of the photographic record of an event then yielded the energy deposited in each tank of a triad by both the first and second pulses and

La conferma sperimentale e' arrivata solo 26 anni dopo!  
E per altri 40 anni poi si e' creduto che i neutrini non avessero massa (invece la hanno!)

# Notate che non e' la prima volta che per anni si hanno ``indicazioni'' per l'esistenza di una nuova particella, prima della sua scoperta.

Higgs teorizzo' l'esistenza della particelle che porta il suo nome nell'Ottobre nel 1964

VOLUME 13, NUMBER 16
PHYSICAL REVIEW LETTERS
19 OCTOBER 1964

---

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs  
Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland  
(Received 31 August 1964)

In a recent note<sup>1</sup> it was shown that the Goldstone theorem,<sup>2</sup> that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the

about the "vacuum" solution  $\varphi_1(x) = 0$ ,  $\varphi_2(x) = \varphi_0$ :

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass  $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$ ; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

# Notate che non e' la prima volta che per anni si hanno "indicazioni" per l'esistenza di una nuova particella, prima della sua scoperta.

Higgs teorizzo' l'esistenza della particelle che porta il suo nome nell'Ottobre nel 1964

## Fotografata al Cern l'impronta del bosone di Higgs

*Diffusi i risultati degli esperimenti Atlas e Cms condotti nell'acceleratore Lhc: i ricercatori credono di aver osservato un'impronta della "particella di Dio", l'ultimo elemento mancante per spiegare la struttura dell'universo. "Entro il 2012 la prova definitiva" dal nostro inviato ELENA DUSI*

VOLUME 13, NUMBER 16      PHYSICAL REVIEW LETTERS      19 OCTOBER 1964

---

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs  
Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland  
(Received 31 August 1964)

In a recent note<sup>1</sup> it was shown that the Goldstone theorem,<sup>2</sup> that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the

about the "vacuum" solution  $\varphi_1(x) = 0$ ,  $\varphi_2(x) = \varphi_0$ :

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$
$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$
$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass  $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$ ; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

La conferma sperimentale e' arrivata al CERN dopo quasi 50 anni!



# Vari candidati



# Vari candidati

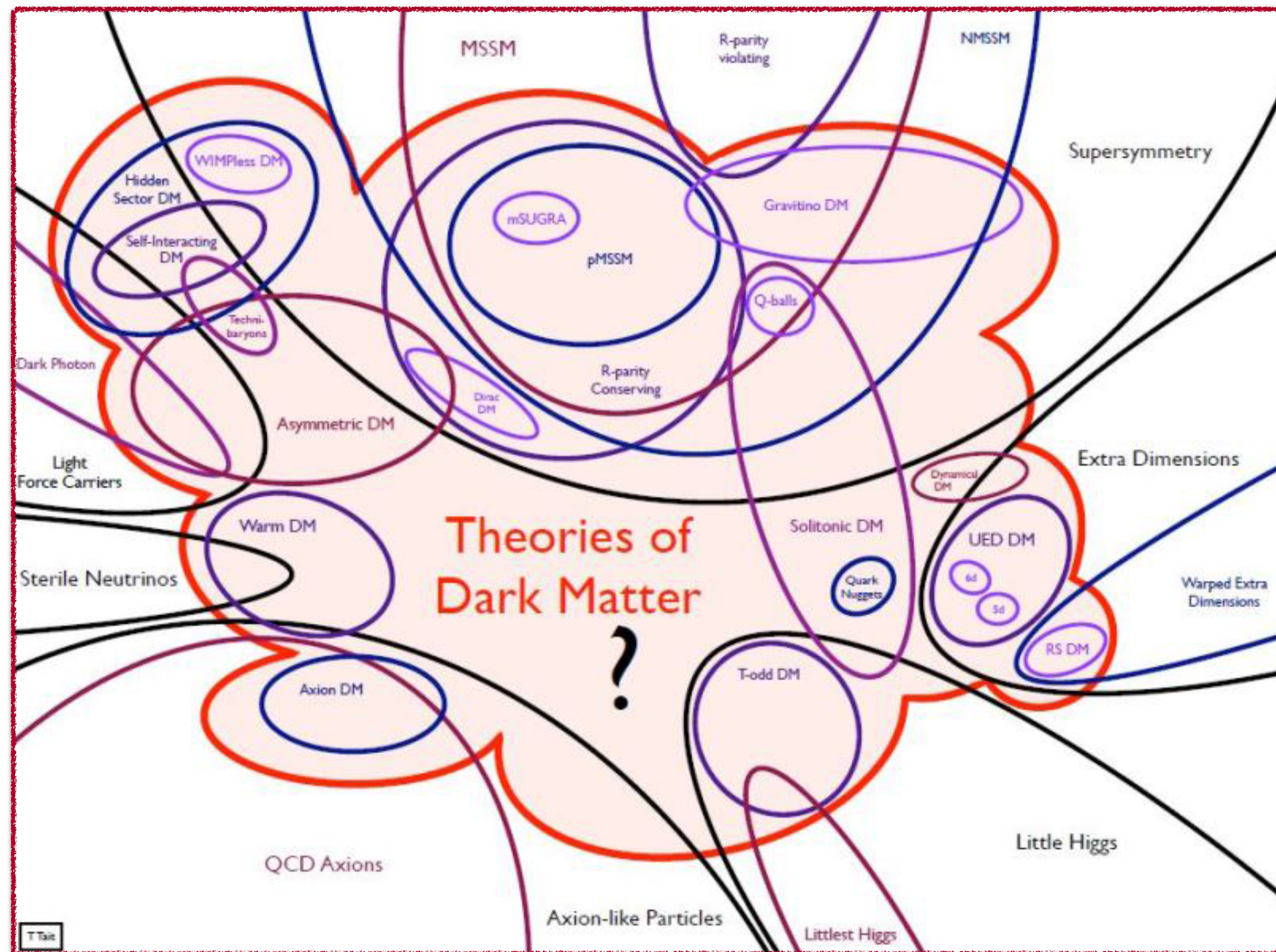
**Neutrini** come materia oscura? Non una cattiva idea! Ma sarebbero troppo “caldi” e le strutture cosmiche non esisterebbe come esistono

# Vari candidati

**Neutrini** come materia oscura? Non una cattiva idea! Ma sarebbero troppo “caldi” e le strutture cosmiche non esisterebbe come esistono

Davvero tante  
(troppe?) possibilita'

**Assioni e WIMPs** sono i  
candidati più motivati

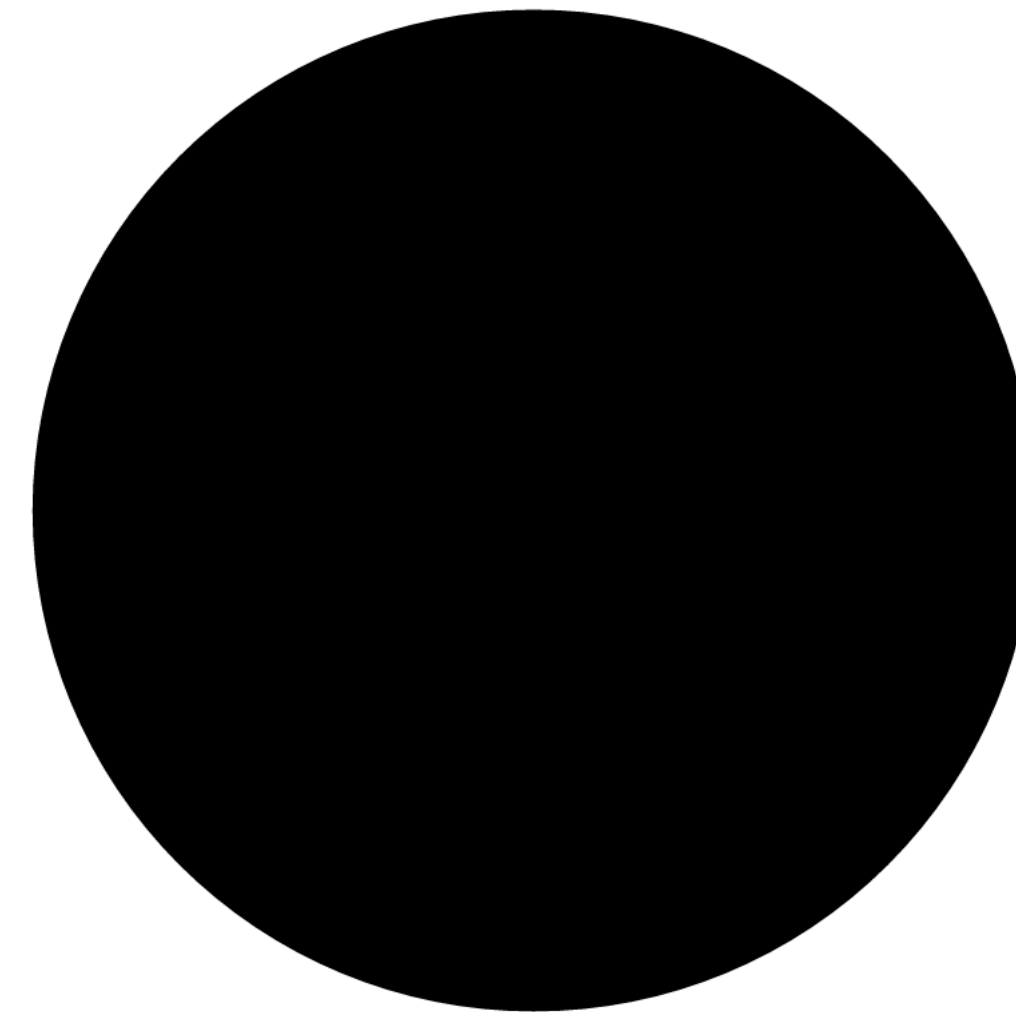


Ricapitolando: la materia oscura deve avere  
massa ed essere “invisibile”

# Ricapitolando: la materia oscura deve avere massa ed essere ``invisibile’’



La materia oscura puo' essere fatta di buchi neri???

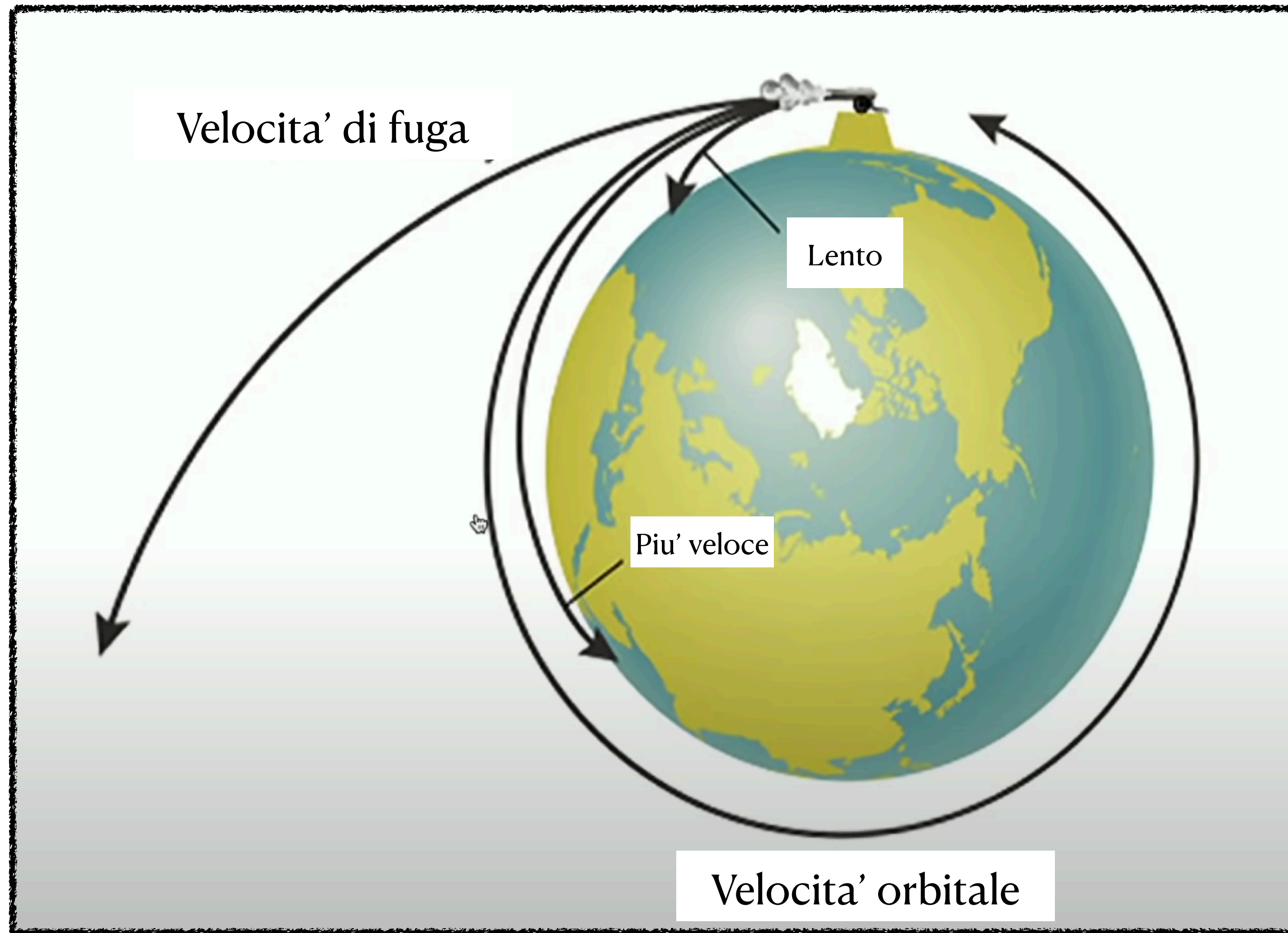


Buco nero con massa 5 volte quella della terra (**scala esatta!**)

# Spoiler

La materia oscura potrebbe, in principio, essere fatta di **piccoli buchi neri** formatisi durante i primi istanti di vita dell'Universo, in maniera differente dai buchi neri ``standard'' che si formano invece dal collasso gravitazionale alla fine della vita di una stella

Ma cos'è un buco nero?



Per la terra abbiamo

$$v_{\text{fuga}} = \sqrt{\frac{2Gm}{R}} = 11.2 \text{ km/s}$$

Raggio = 695.700 km



$v_0$  (Sole) = 617 km/s

Per il sole invece abbiamo



Raggio = 3 km



$v_0$  (Sole) = 300.000 km/s

Se la massa del sole fosse concentrata in 3 km, la velocità di fuga diventerebbe uguale a quella della luce.

Il sole non sarebbe più visibile!

Raggio = 3 km



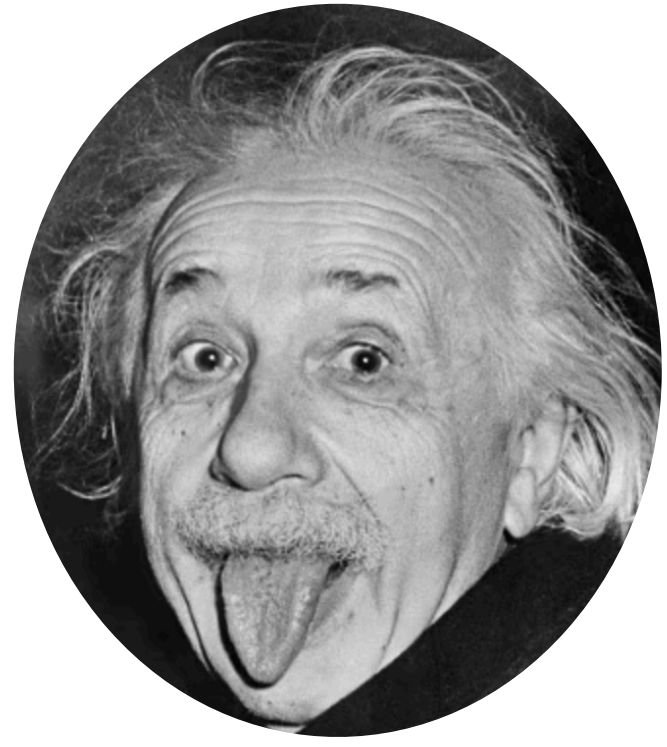
Se la massa del sole fosse concentrata in 3 km, la velocità di fuga diventerebbe uguale a quella della luce.

Il sole non sarebbe più visibile!

29. If there should really exist in nature any bodies, whose density is not less than that of the sun, and whose diameters are more than 500 times the diameter of the sun, since their light could not arrive at us; or if there should exist any other bodies of a somewhat smaller size, which are not naturally luminous; of the existence of bodies under either of these circumstances, we could have no information from sight; yet, if any other luminous bodies should happen to revolve about them we might still perhaps from the motions of these revolving bodies infer the existence of the central ones with some degree of probability, as this might afford a clue to some of the apparent irregularities of the revolving bodies, which would not be easily explicable on any other hypothesis; but as the consequences of such a supposition are very obvious, and the consideration of them somewhat beside my present purpose, I shall not prosecute them any farther.

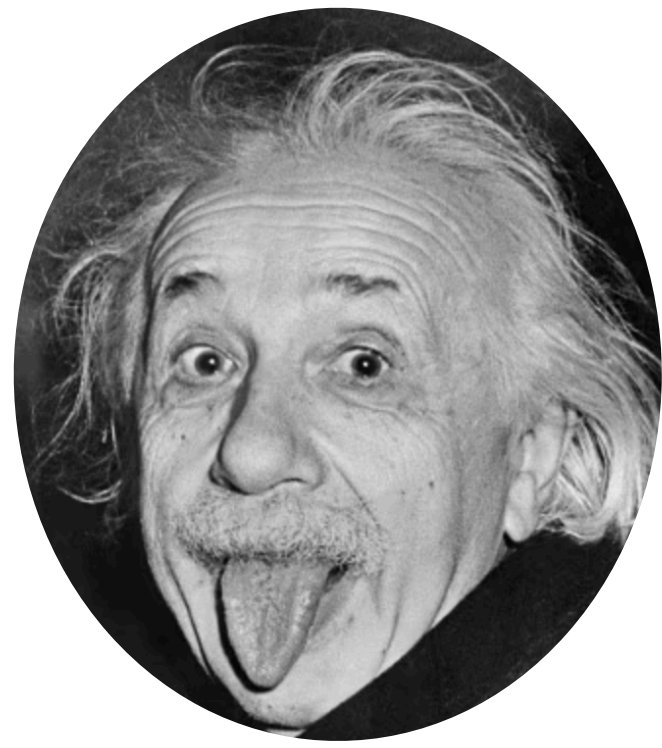


John Michell nel 1783  
ipotizzava la presenza di  
“stelle nere”



# Le equazioni di Einstein

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

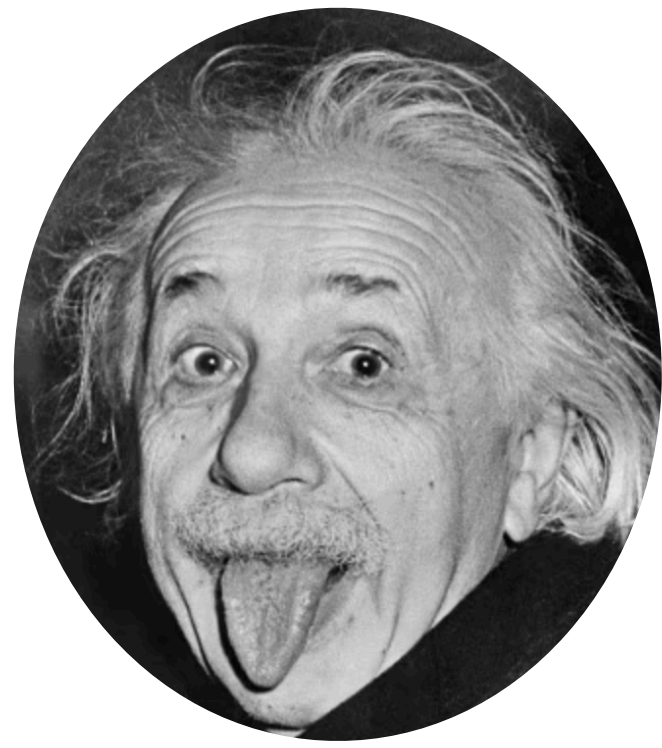


# Le equazioni di Einstein

Geometria dello spazio tempo

Materia

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



# Le equazioni di Einstein

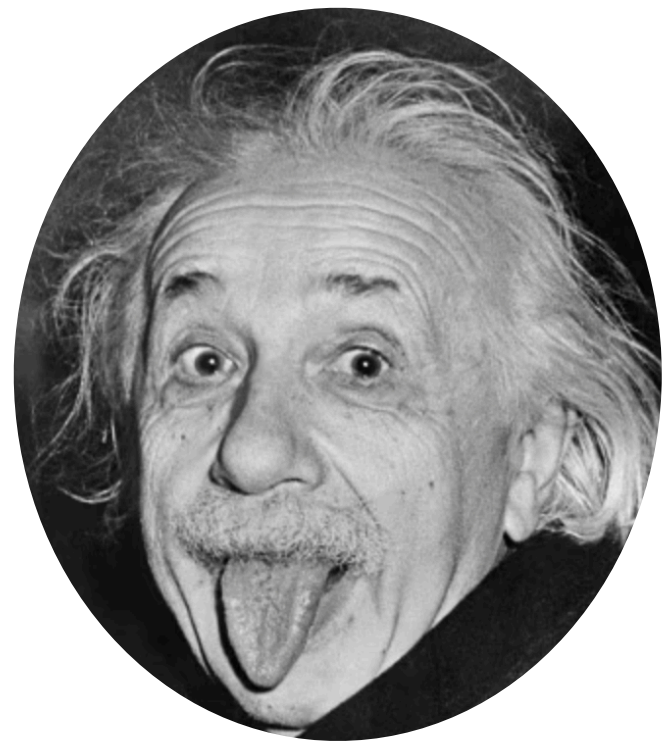
Geometria dello spazio tempo

Materia

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

La materia dice allo spazio come curvare





# Le equazioni di Einstein

Geometria dello spazio tempo

Materia

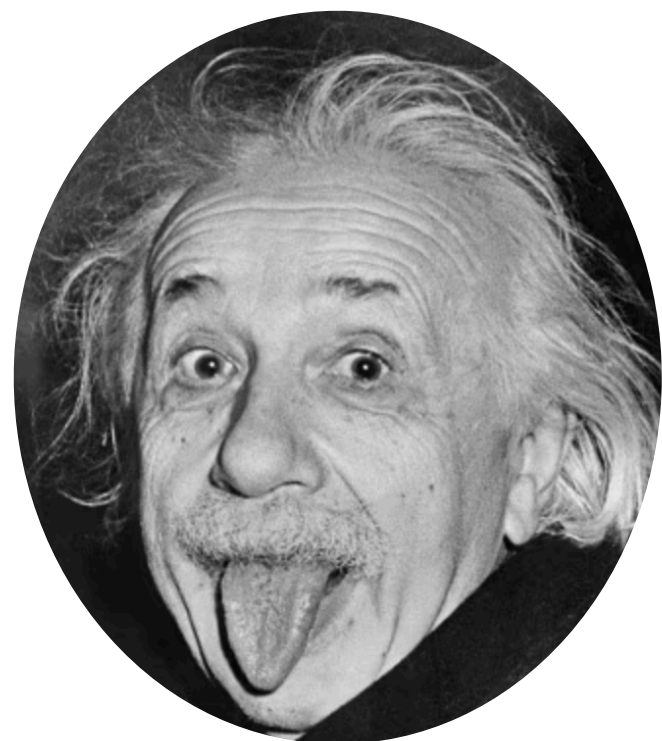
$$\boxed{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}} = \boxed{\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}}$$

La materia dice allo spazio come curvare



Lo spazio dice alla materia come muoversi





# Le equazioni di Einstein

Geometria dello spazio tempo

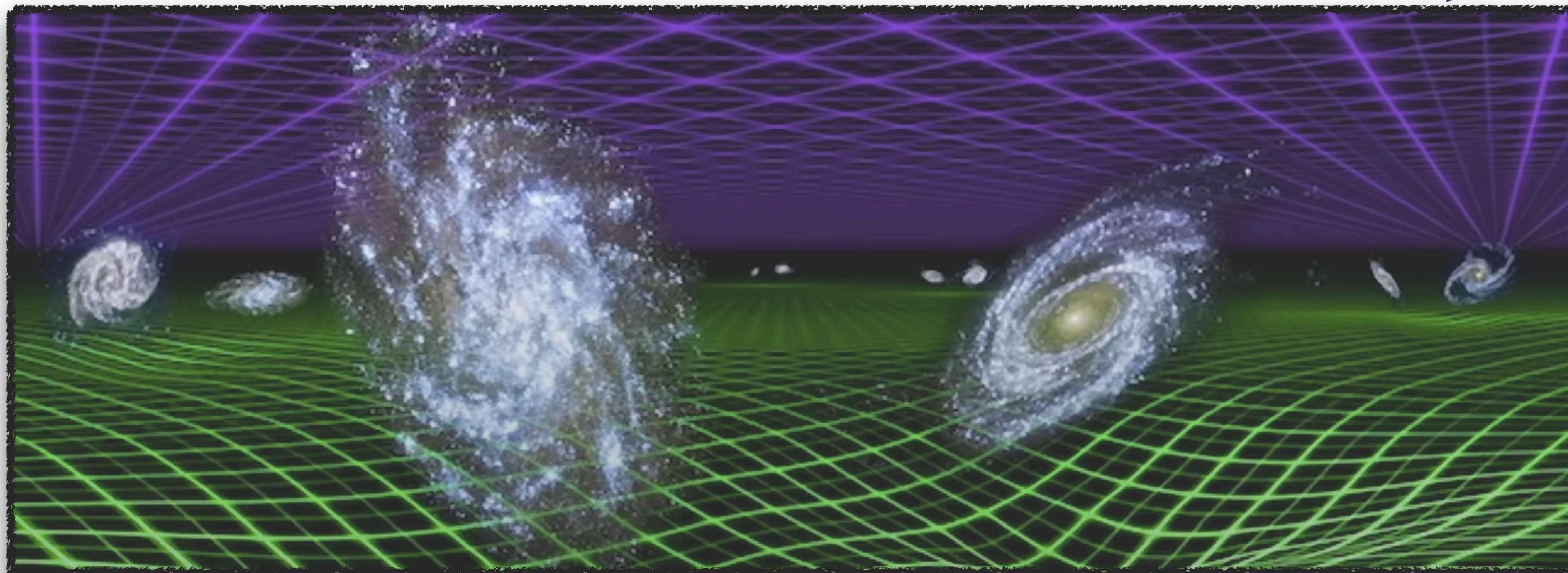
Materia

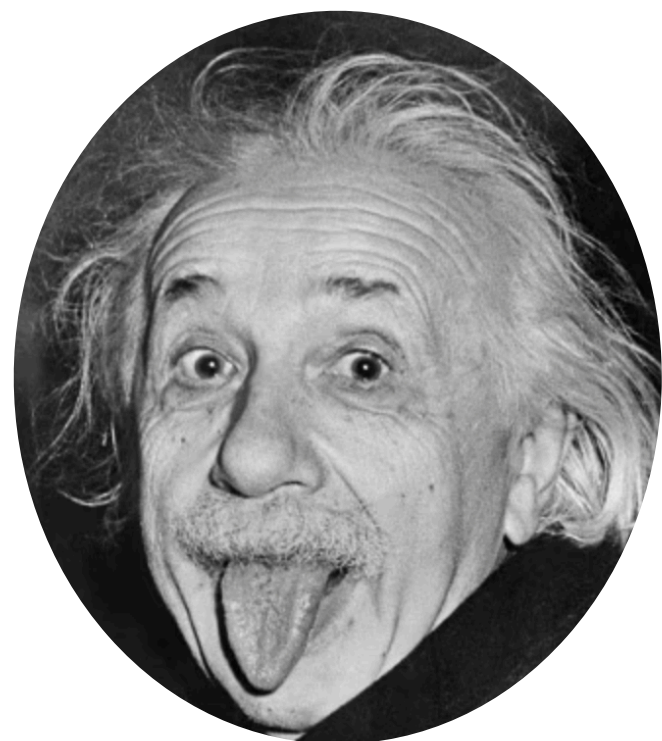
$$\boxed{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}} = \boxed{\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}}$$

La materia dice allo spazio come curvare



Lo spazio dice alla materia come muoversi





# Le equazioni di Einstein

Geometria dello spazio tempo

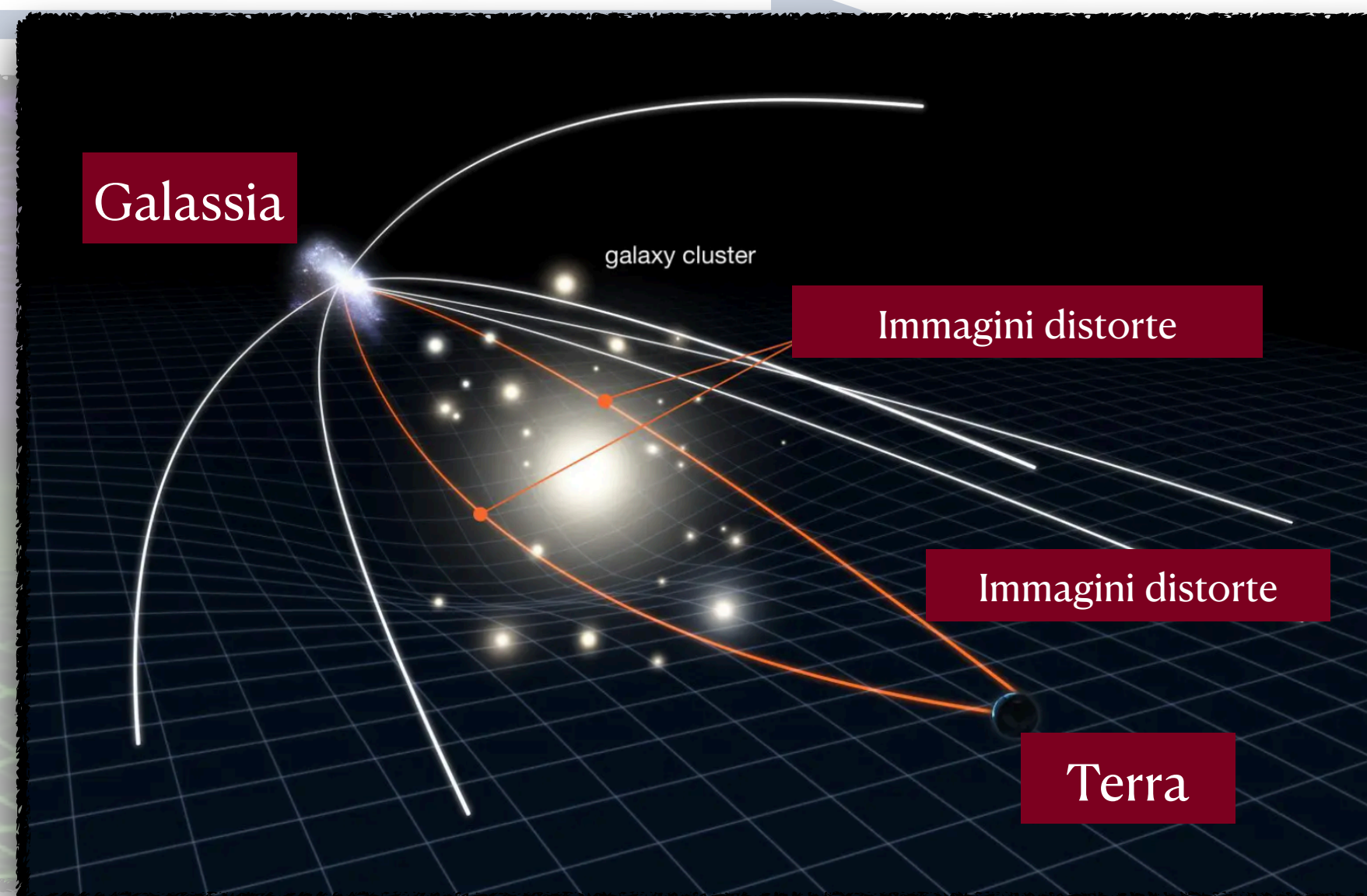
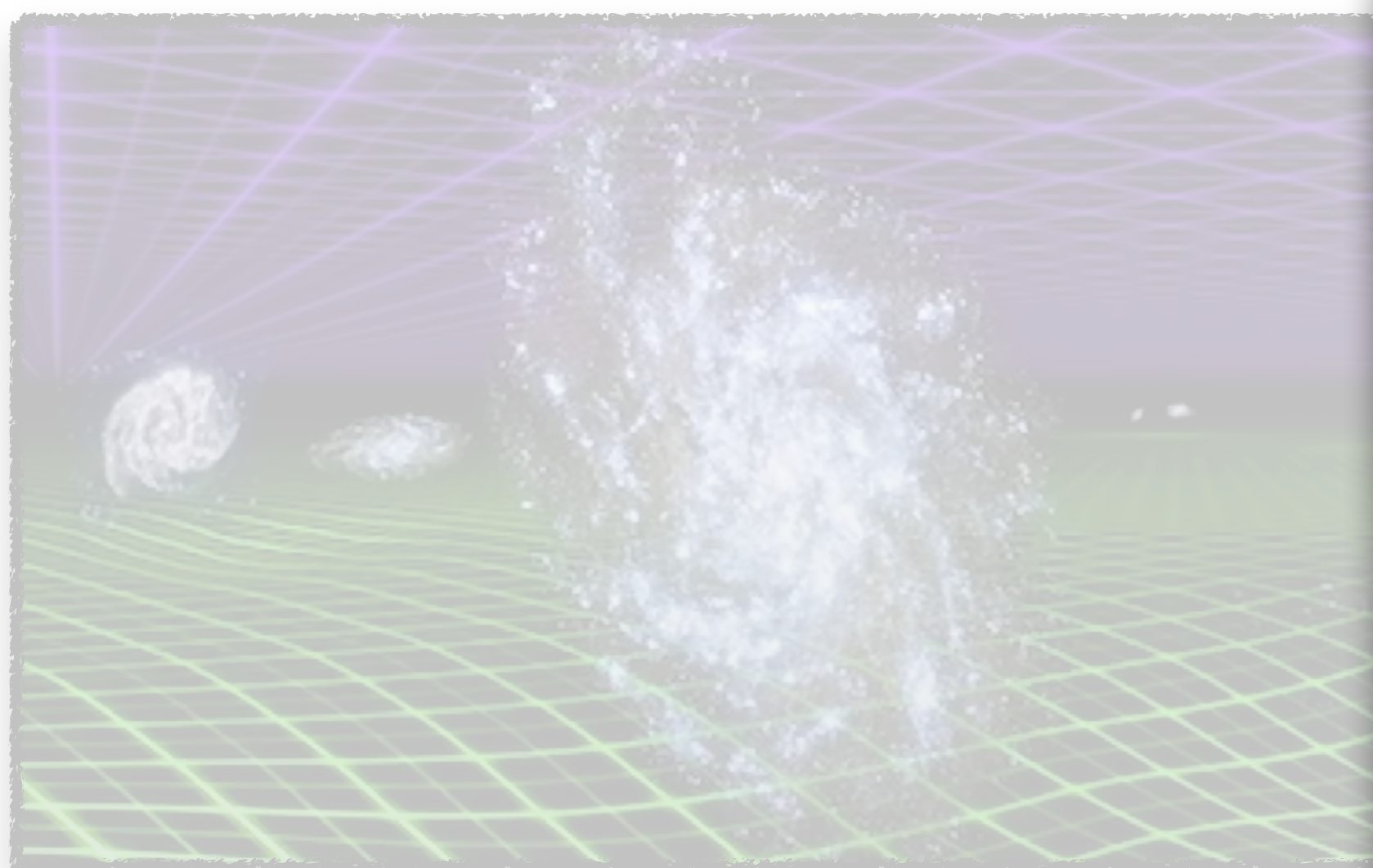
Materia

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

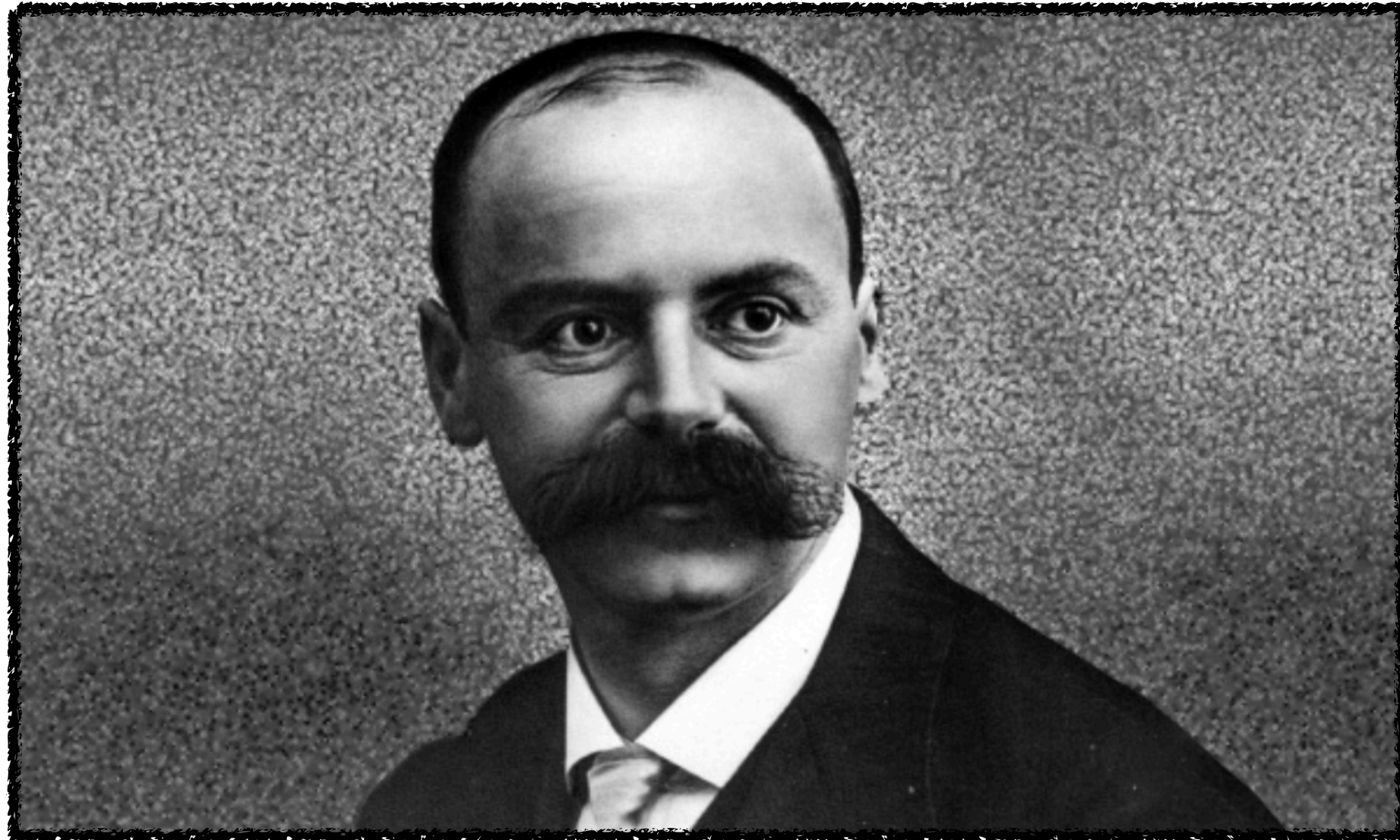
La materia dice allo spazio come curvare



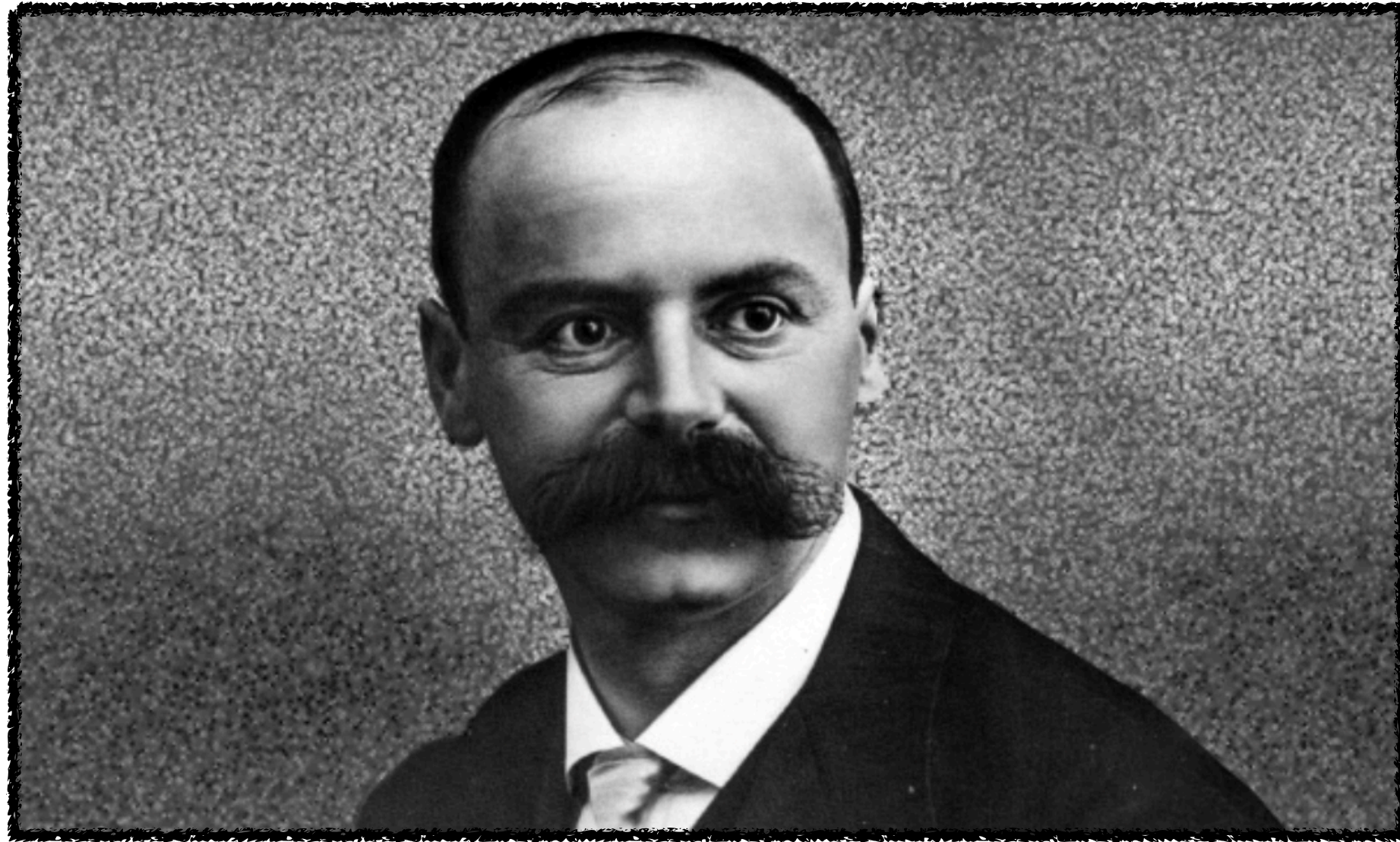
Lo spazio dice alla materia come muoversi



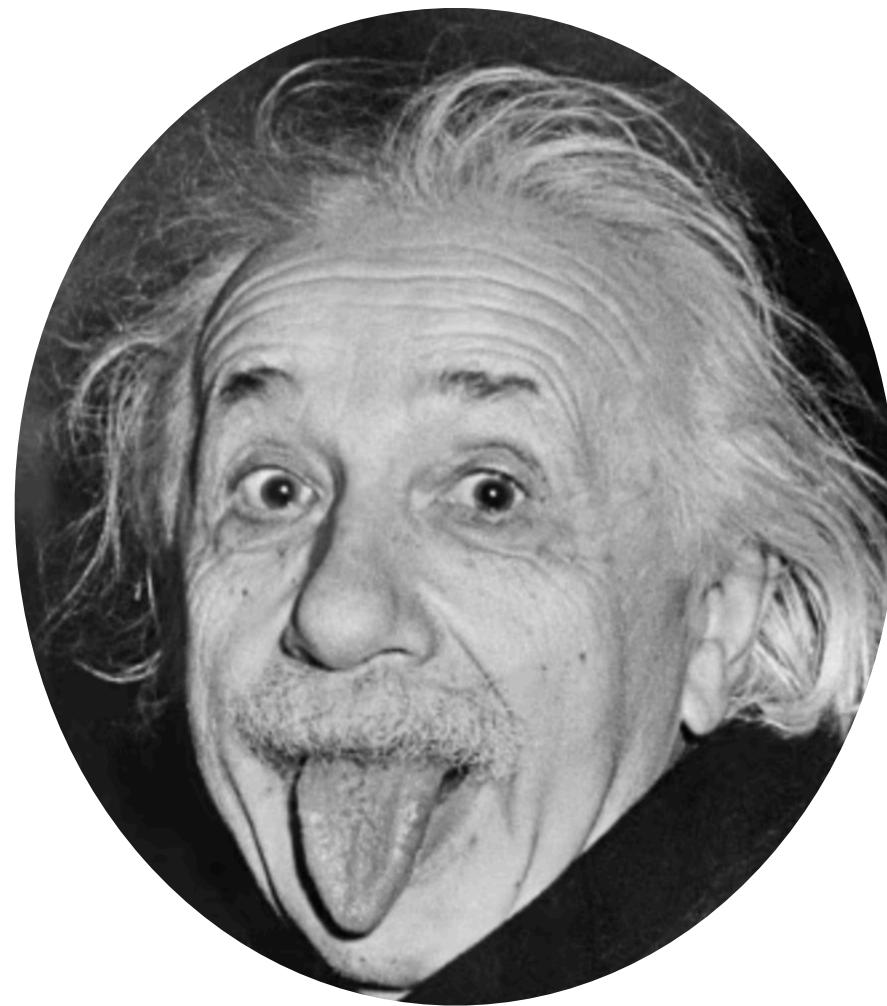




Nel 1916, mentre era in guerra, Karl Schwarzschild trova la soluzione alle equazioni di Einstein per un punto di dimensioni nulle ed infinitamente denso: un buco nero!



Nel 1916, mentre era in guerra, Karl Schwarzschild trova la soluzione alle equazioni di Einstein per un punto di dimensioni nulle ed infinitamente denso: un buco nero!



Einstein ne fu molto impressionato!

*I have read your paper with the utmost interest. I had not expected that one could formulate the exact solution of the problem in such a simple way. I liked very much your mathematical treatment of the subject. Next Thursday I shall present the work to the Academy with a few words of explanation.— Albert Einstein (Eisenstaedt, "The Early Interpretation of the Schwarzschild Solution," D. Howard, J. Stachel (eds), Einstein and the History of General Relativity: Einstein Studies, Vol. 1, pp. 213-234. Boston: Birkhauser, 1989]*

CILLIAN  
MURPHY

EMILY  
BLUNT

MATT  
DAMON

ROBERT  
DOWNEY JR.

FLORENCE  
PUGH

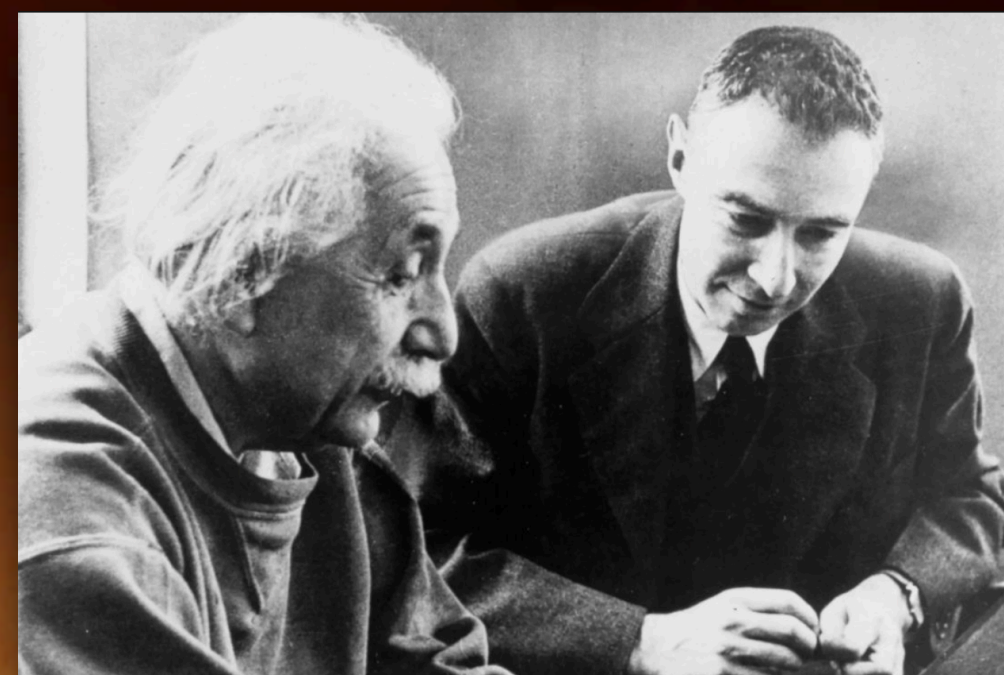
A FILM BY CHRISTOPHER NOLAN

# OPPENHEIMER

7

21

THE WORLD FOREVER CHANGES



Anche Oppenheimer era molto  
interessato al problema dei  
buchi neri e scrisse 3 paper sul  
collasso gravitazionale!



Featured in Physics

Free to Read

## On Continued Gravitational Contraction

J. R. Oppenheimer and H. Snyder  
Phys. Rev. **56**, 455 – Published 1 September 1939

Physics

Article

References

Citing Articles (1,151)

PDF

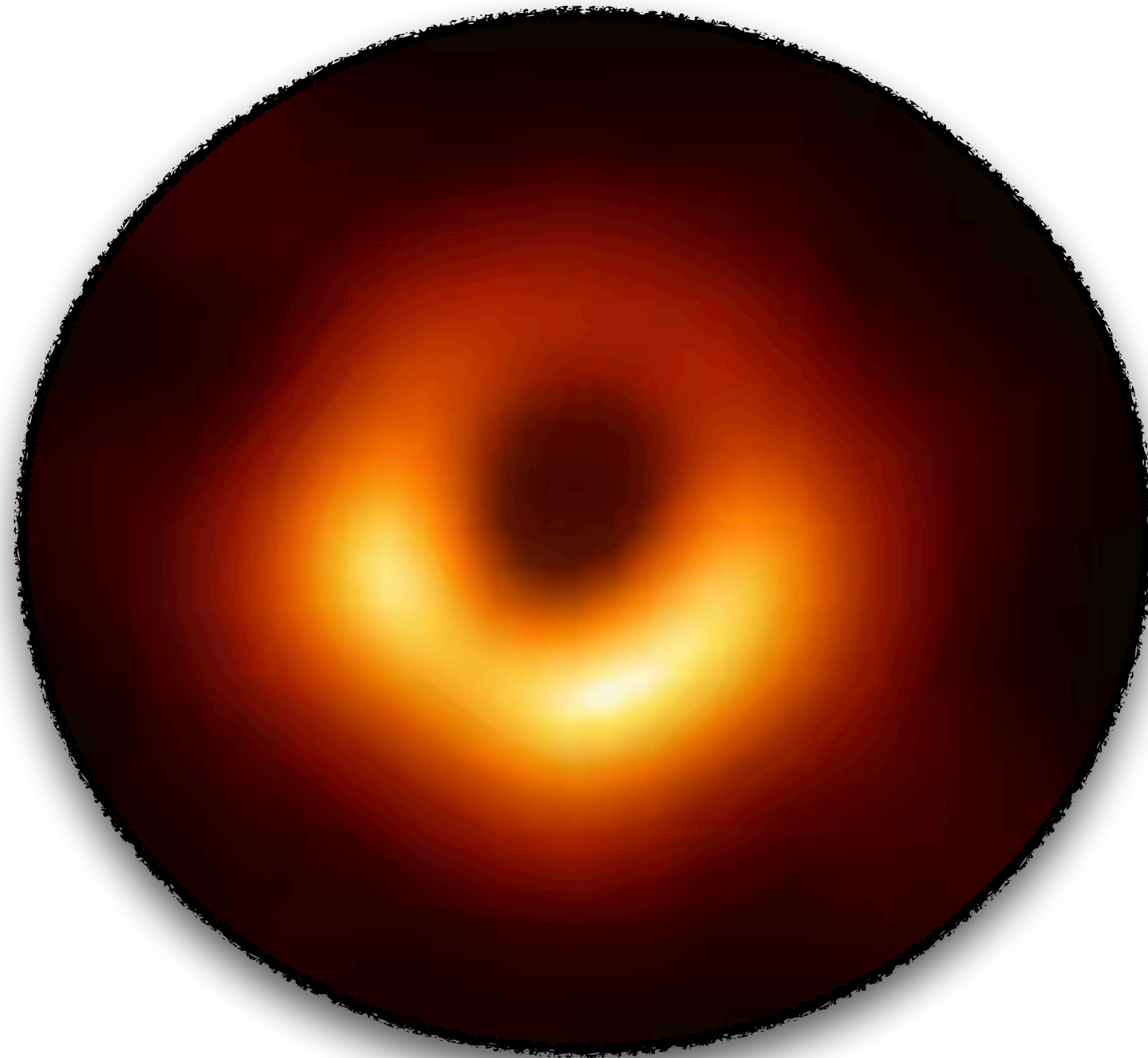
Export Citation



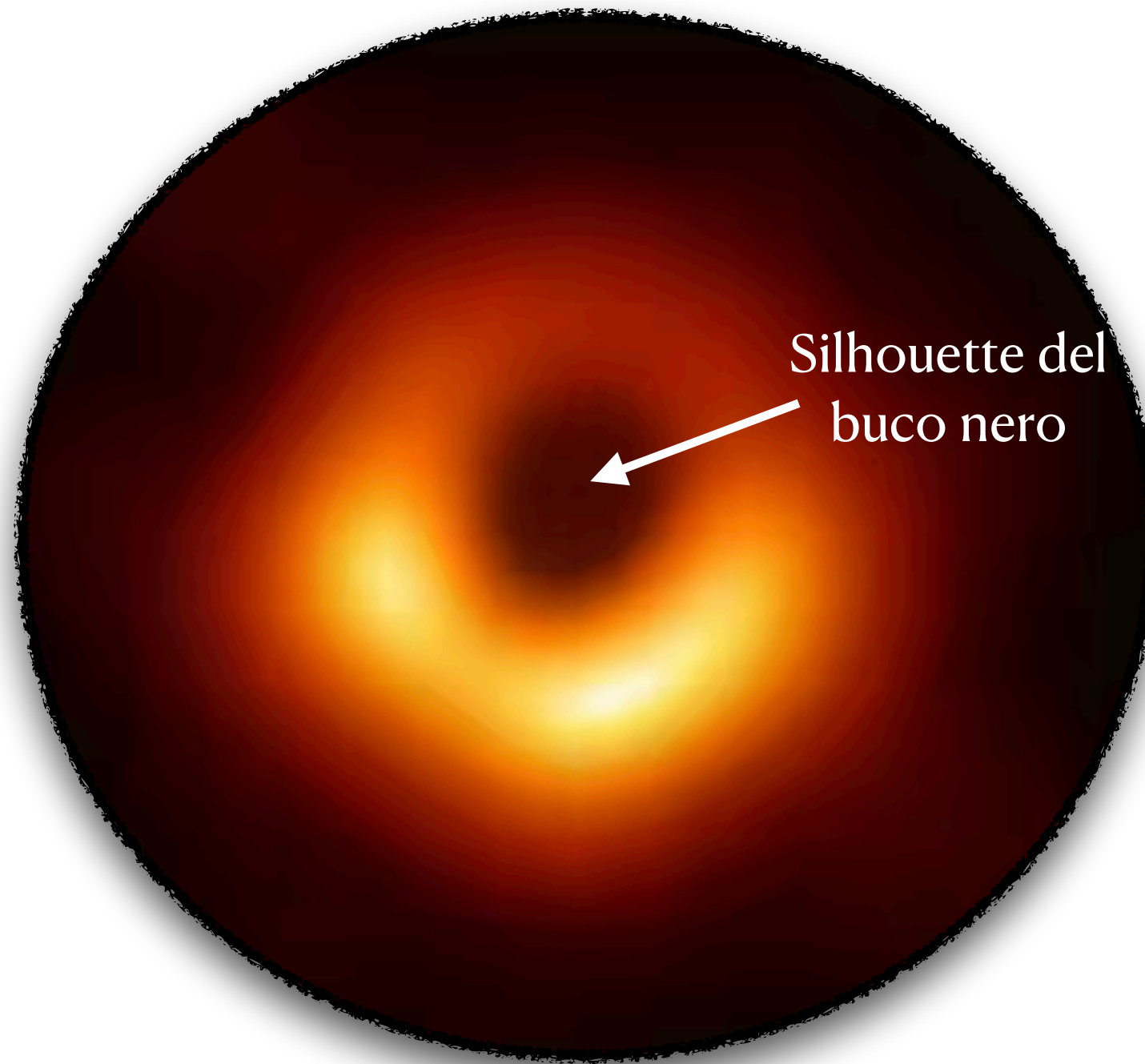
ABSTRACT

**I buchi neri esistono davvero,  
li abbiamo “visti”!!**

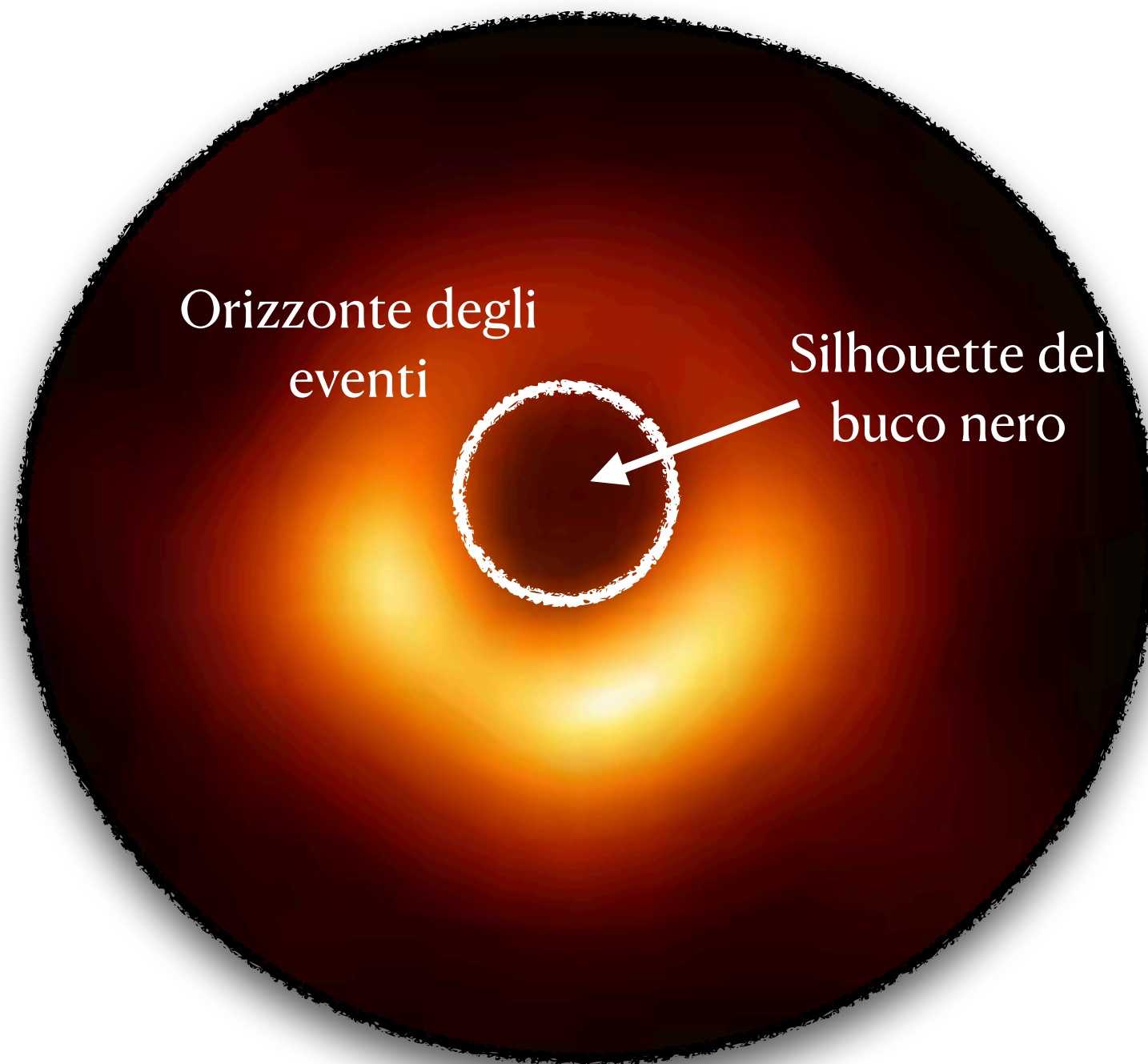
# Ecco la foto del secolo, è la prima di un buco nero



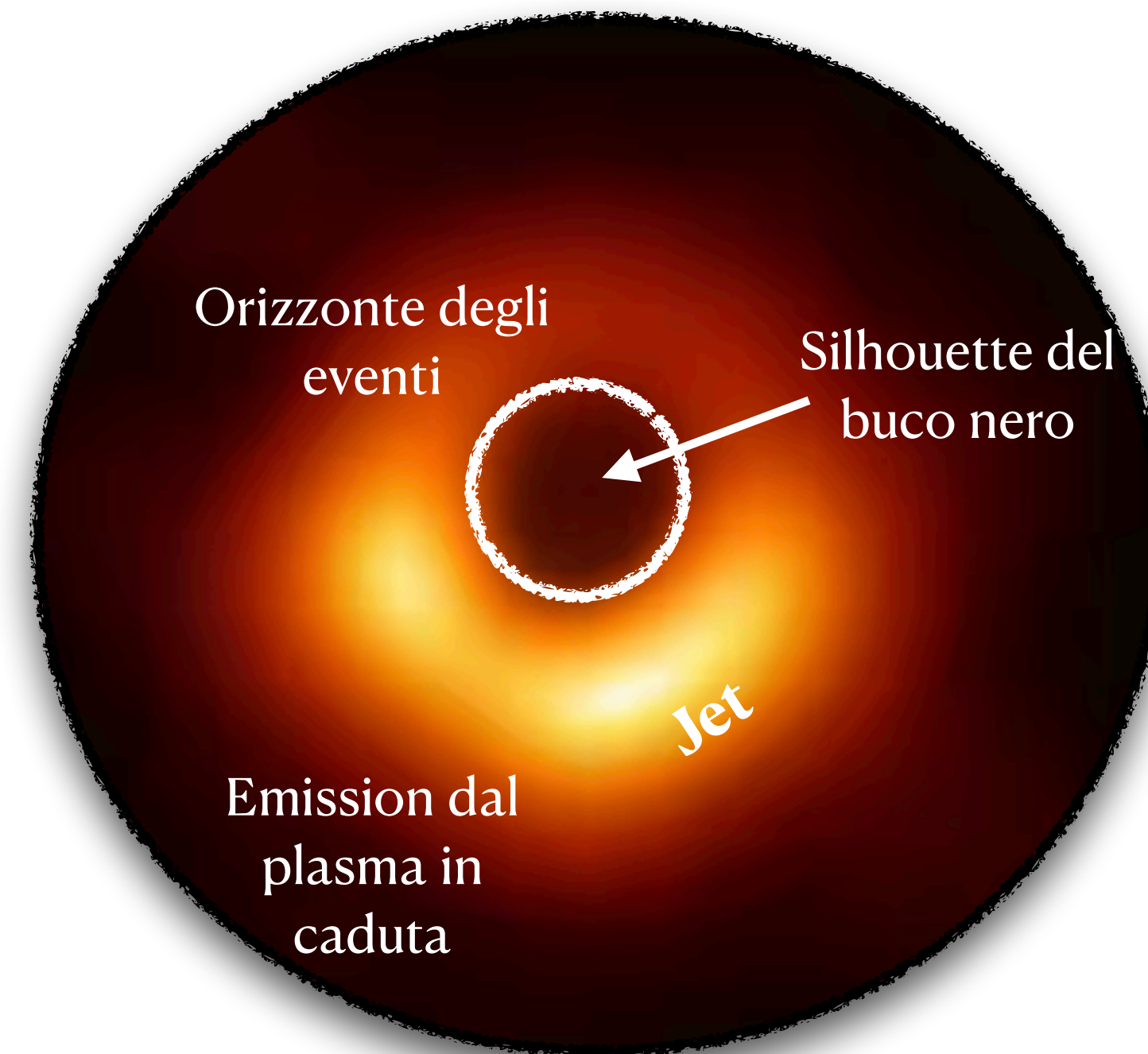
# Ecco la foto del secolo, è la prima di un buco nero



# Ecco la foto del secolo, è la prima di un buco nero



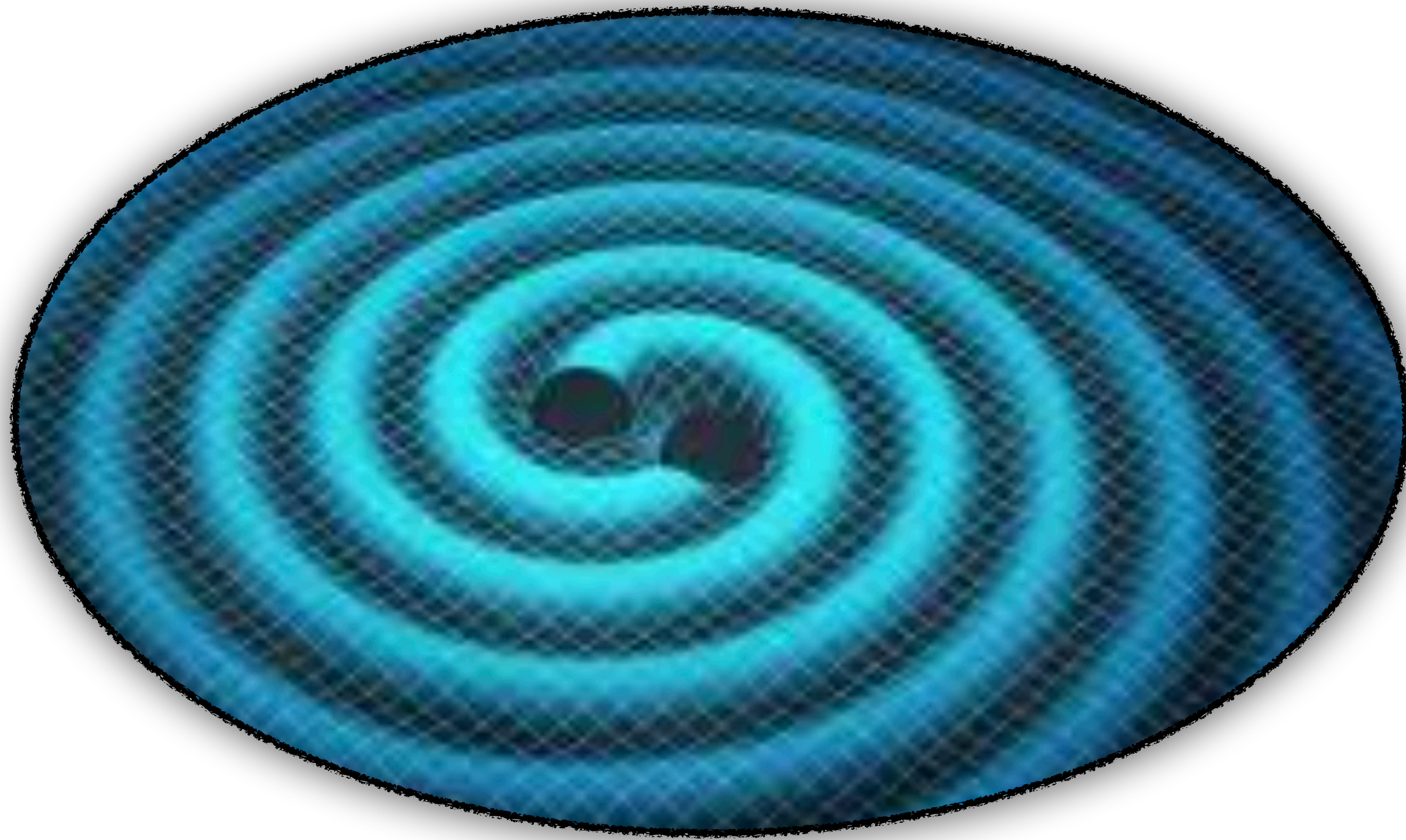
# Ecco la foto del secolo, è la prima di un buco nero





Esiste un altro modo per  
“vedere” un buco nero

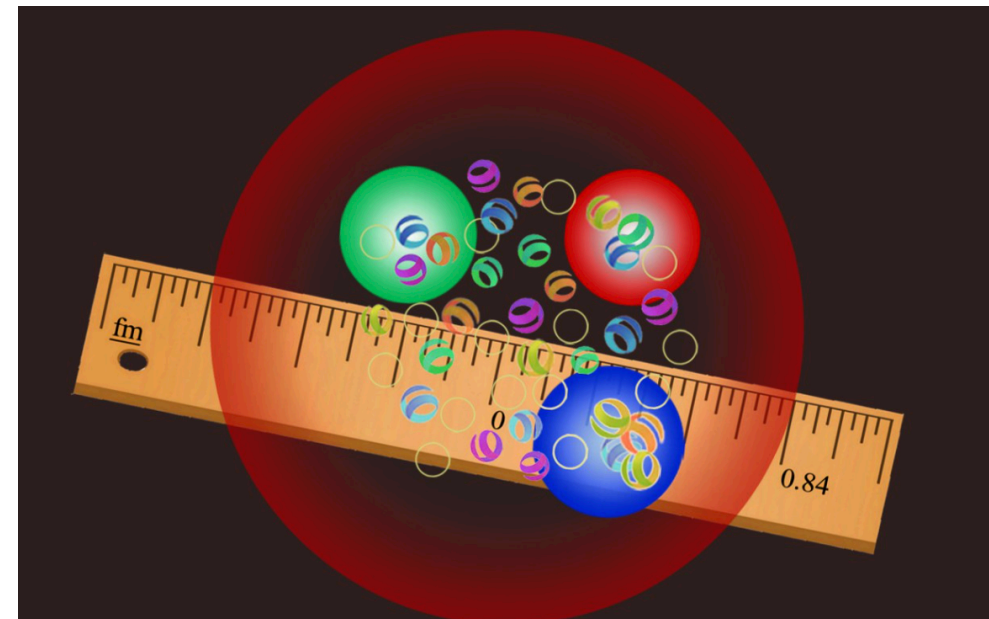
# Esiste un altro modo per “vedere” un buco nero



Onde gravitazionali!

# Si tratta di una fluttuazione infinitesimale dello spazio tempo

Molto piu' piccolo del raggio di un protone!

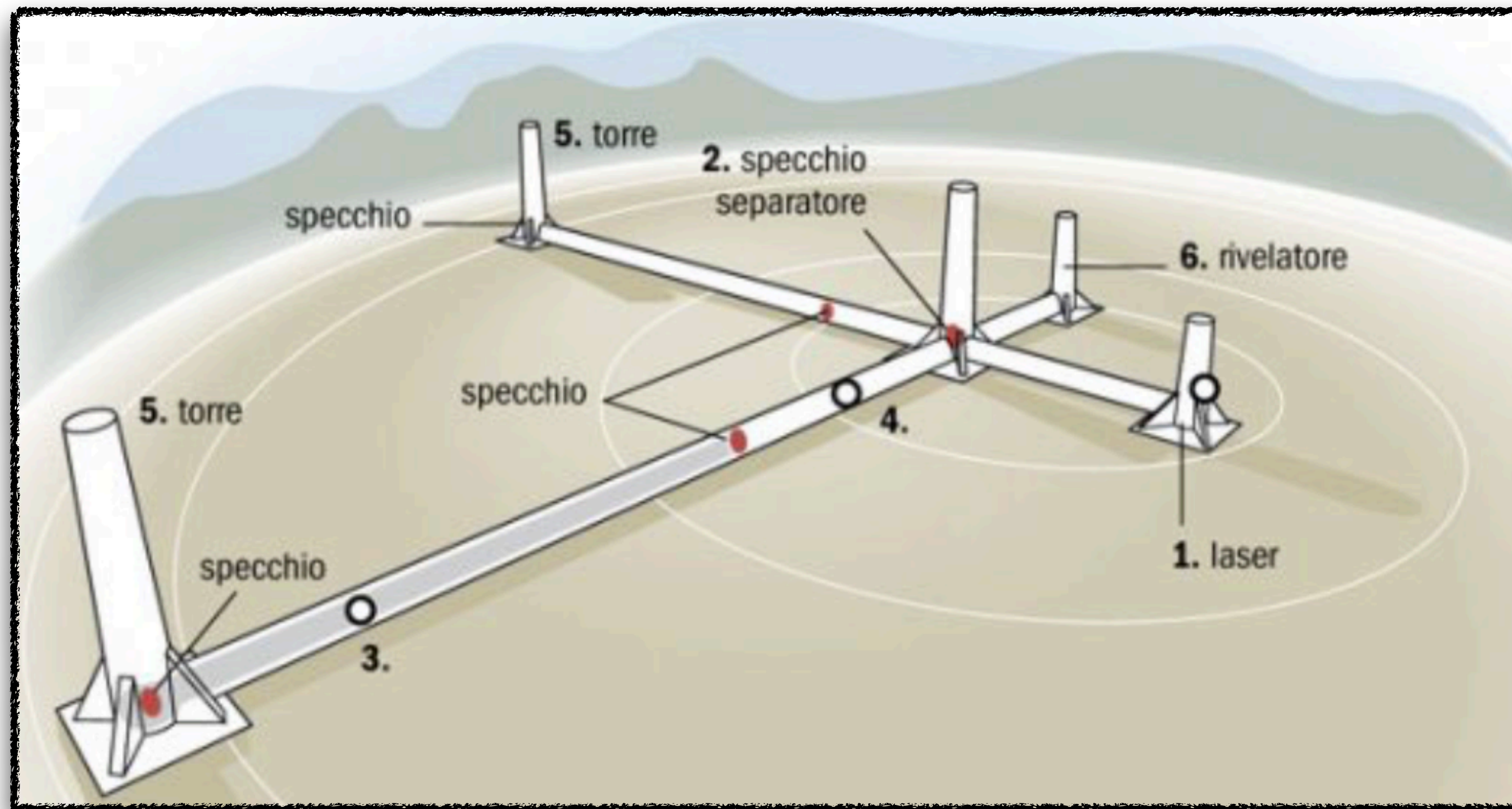


Se guardiamo alla stella più vicina a noi — Proxima Centauri — che dista **38000 miliardi di km**, un'onda gravitazionale come quelle che abbiamo scoperto creerebbe un **cambio della distanza pari al diametro di un capello.**

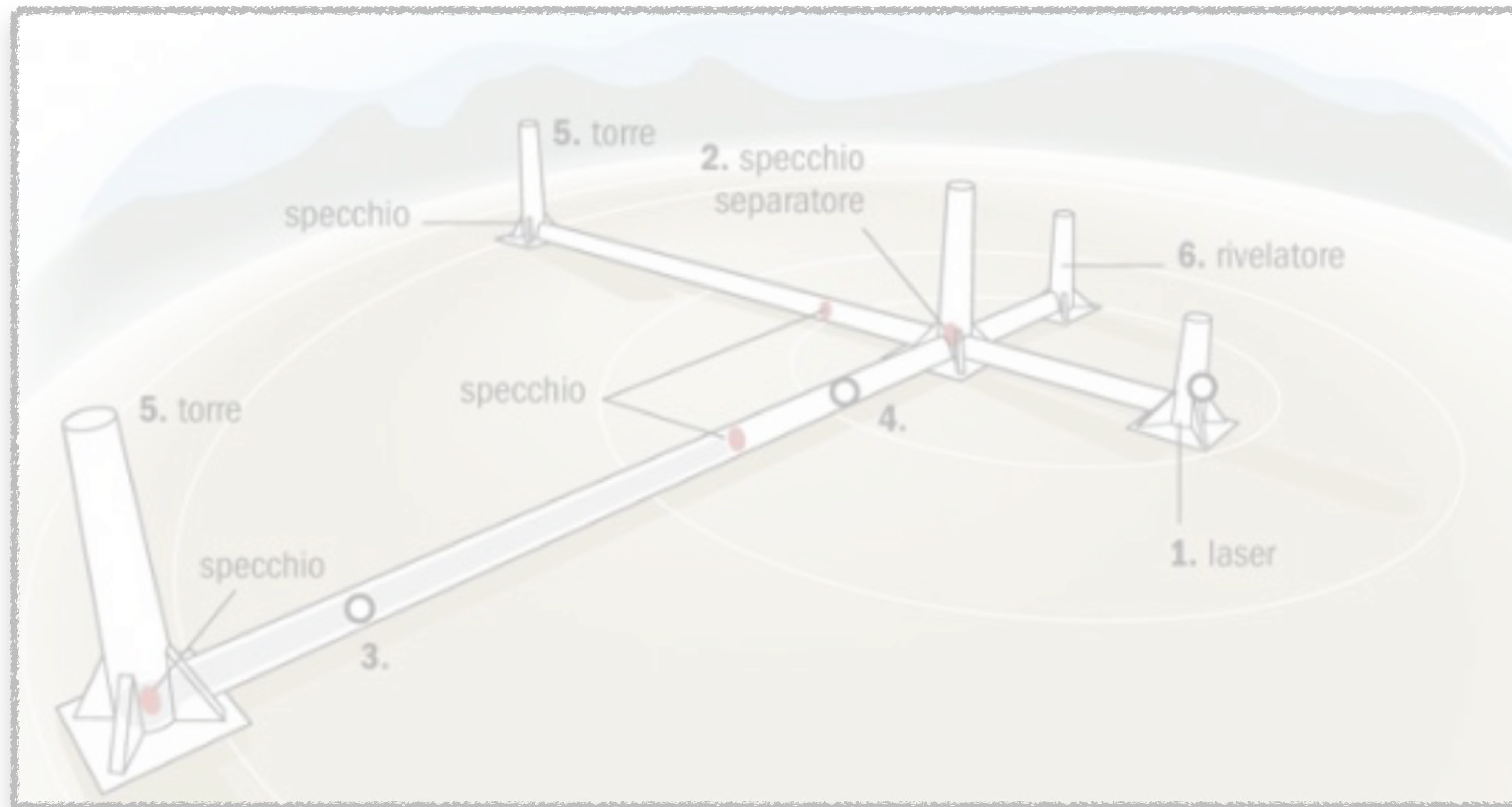


**Eppure siamo riusciti a inventare degli strumenti così precisi da rilevare questi cambi piccolissimi dello spazio tempo!**

Interferometri



**Eppure siamo riusciti a inventare degli strumenti così precisi da rilevare questi cambi piccolissimi dello spazio tempo!**



Interferometri



Ne abbiamo uno in Italia!  
VIRGO, a Cascina (Pisa)

# L'universo e' per lo piu' oscuro! Abbiamo ancora tanto da fare e da scoprire, i prossimi anni saranno entusiasmanti

