

La natura del cosmo, oltre lo spazio e il tempo



Daniele Oriti



Max Planck Institute for Gravitational Physics
(Albert Einstein Institute) - Potsdam, Germania, EU



Gravita' quantistica:
il lavoro, le idee, le passioni di una comunita' di persone

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

entusiasmi e passioni, competenze e talenti personali, errori e idee sbagliate, ambizioni personali e piccolezze umane, questioni di soldi e di carriere, aspetti politici e culturali,

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

entusiasmi e passioni, competenze e talenti personali, errori e idee sbagliate, ambizioni personali e piccole umane, questioni di soldi e di carriere, aspetti politici e culturali,



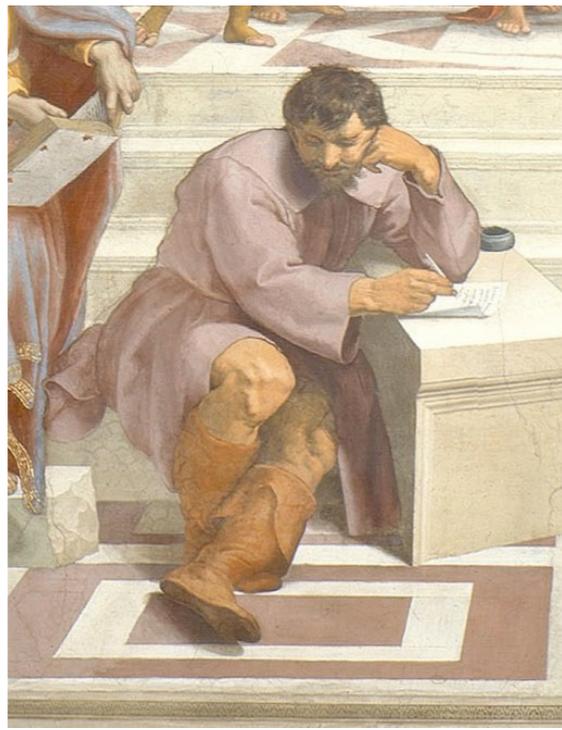
Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

... un settore in cui lavorano centinaia di persone da decenni, con metodi, idee, obiettivi, interessi e competenze diverse:

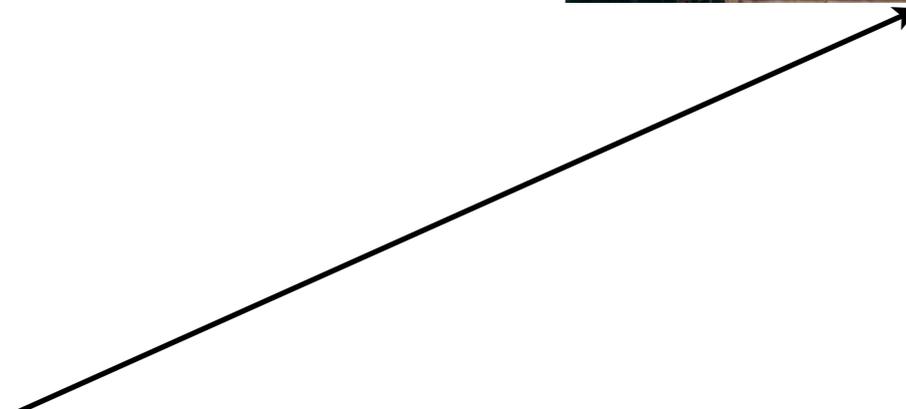


Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

... un settore in cui lavorano centinaia di persone da decenni, con metodi, idee, obiettivi, interessi e competenze diverse:



assorti in
riflessioni solitarie



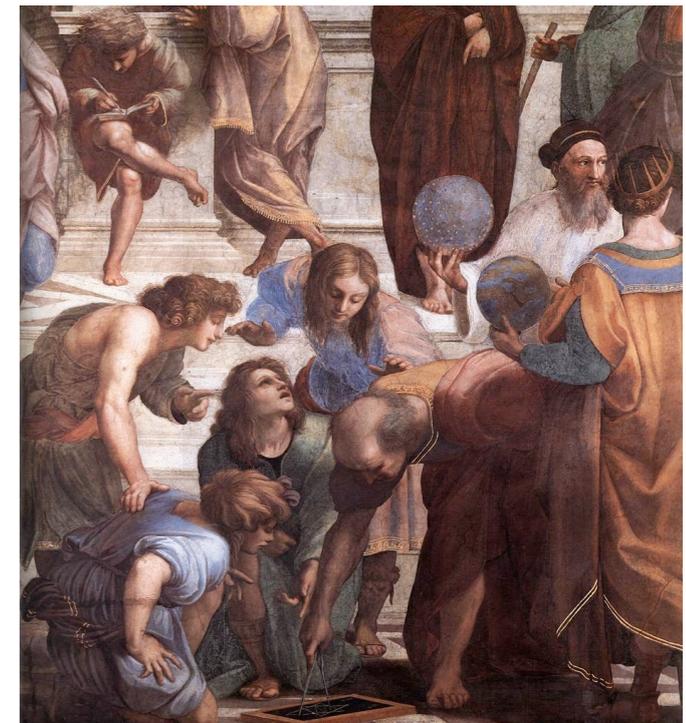
Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

... un settore in cui lavorano centinaia di persone da decenni, con metodi, idee, obiettivi, interessi e competenze diverse:



assorti in
riflessioni solitarie

o in animate discussioni con
gruppi di colleghi



Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

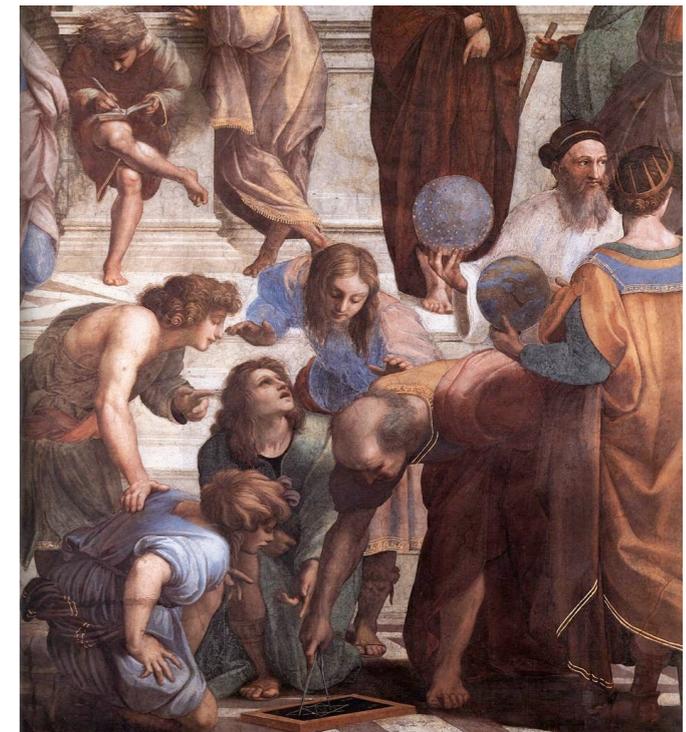
... un settore in cui lavorano centinaia di persone da decenni, con metodi, idee, obiettivi, interessi e competenze diverse:

spesso con grandi difficoltà a trovare lavoro o salari decenti



assorti in riflessioni solitarie

o in animate discussioni con gruppi di colleghi



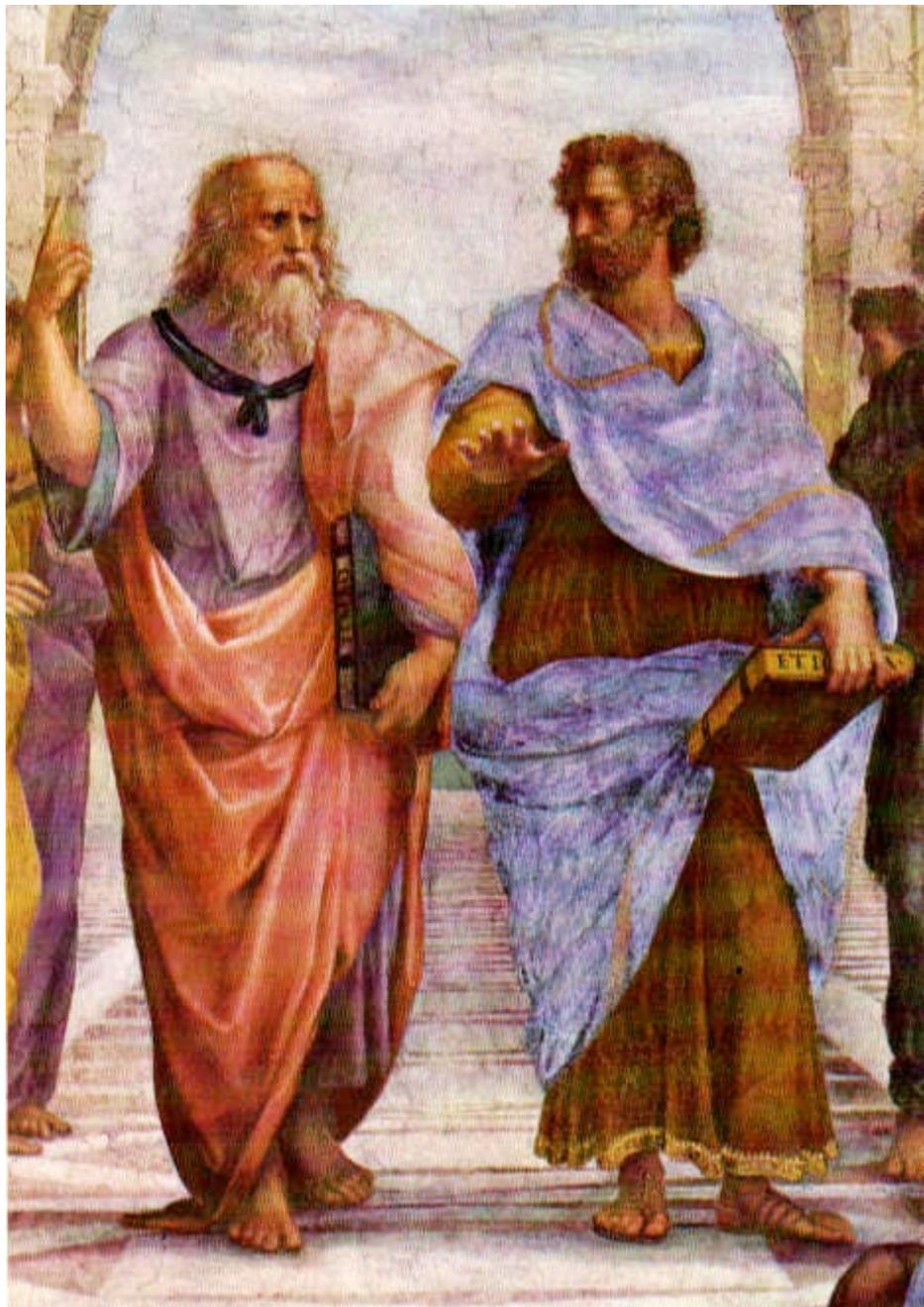
Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

... un settore in cui lavorano centinaia di persone da decenni, con metodi, idee, obiettivi, interessi e competenze diverse:



Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

... un settore in cui lavorano centinaia di persone da decenni, con metodi, idee, obiettivi, interessi e competenze diverse:



in un costante dialogo tra astrazione matematica
e realta' fisica

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)

AEI-2013-050

Disappearance and emergence of space and time in quantum gravity

Daniele Oriti*

Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute)
Am Mühlenberg 1, D-14476 Golm, Germany, EU

We discuss the hints for the disappearance of continuum space and time at microscopic scale. These include arguments for a discrete nature of them or for a fundamental non-locality, in a quantum theory of gravity. We discuss how these ideas are realized in specific quantum gravity approaches. Turning then the problem around, we consider the emergence of continuum space and time from the collective behaviour of discrete, pre-geometric atoms of quantum space, and for understanding spacetime as a kind of "condensate", and we present the case for this emergence process being the result of a phase transition, dubbed "geometrogenesis". We discuss some conceptual issues of this scenario and of the idea of emergent spacetime in general. As a concrete example, we outline the GFT framework for quantum gravity, and illustrate a tentative procedure for the emergence of spacetime in this framework. Last, we re-examine the conceptual issues raised by the emergent spacetime scenario in light of this concrete example.

PACS numbers:

I. INTRODUCTION: PHILOSOPHY OF QUANTUM GRAVITY "IN THE MAKING"

Quantum Gravity is a hard problem. Beside the technical difficulties of developing and applying the right mathematics, adapted to a background independent context, the main difficulties are conceptual. One is to imagine first, and then identify in mathematical terms, the fundamental degrees of freedom of the theory. The next one is to show how the quantum dynamics of such fundamental degrees of freedom leads to an effective classical behaviour described, at least in some approximation, by General Relativity. If the fundamental degrees of freedom are not spatio-temporal in the usual sense, that is, they are not associated to a smooth spacetime manifold (as the basic variable of GR, the spacetime metric), then one faces an additional challenge: to show that the spacetime continuum itself, and the relative geometric variables¹ arise at least as a useful approximation to the more fundamental structures the theory is based on.

There has been an enormous progress in several approaches to quantum gravity, in recent years, and in particular in the ones we will be focusing on, group field theories, spin foam models and loop quantum gravity. This has led to concrete suggestions for the fundamental degrees of freedom, to interesting proposals for the fundamental quantum dynamics, and even physical applications in simplified context (e.g symmetry reduced models in cosmology). The "problem of the continuum" or "the issue of the emergence of spacetime and geometry" remains open. This is, in our opinion, the most pressing issue that quantum gravity approaches have to tackle. Indeed, it is the real challenge even assuming that the true fundamental degrees of freedom of quantum gravity have been found. Such degrees of freedom would be of a different nature than anything else we have learned to deal with up to now, in usual spacetime-based physics, and many of the tools that we have developed to describe similar micro-to-macro and few-to-many transitions in ordinary physical systems, e.g. in condensed matter theory, would have to be at the very least adapted to this new background independent context and reinterpreted accordingly. Beyond the technical difficulties, this is necessarily going to be a conceptual tour-de-force.

* daniele.oriti@aei.mpg.de

¹ In this paper, we focus on pure gravity and geometry, leaving aside the coupling (or the emergence) of matter and gauge fields. While this is of course an important issue, we do not feel that the problem of emergence of spacetime, as phrased here will be much affected by adding other degrees of freedom in the picture.

The expansion of the r.h.s. of the Wetterich equation (10) involves two quantities

$$\begin{aligned} P_N(\{p_i\}; \{p'_i\}) &= R_N(\{p_i\}; \{p'_i\}) + (Z_N)^{\frac{1}{3}} \sum_i |p_i| + m_N \delta_{p_i, p'_i}, \\ F_N(\{p_i\}; \{p'_i\}) &= \Gamma_N^{(2)}(\{p_i\}; \{p'_i\}) - (Z_N)^{\frac{1}{3}} \sum_i |p_i| + m_N \delta_{p_i, p'_i}. \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

and these enter in that expansion as

$$\partial_t \Gamma_n = \frac{1}{2} \left[\overline{\text{Tr}} \left(\partial_t R_N \cdot P_N^{-1} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \overline{\text{Tr}} \left(\partial_t R_N \cdot P_N^{-1} \cdot [F_N(P_N)^{-1}]^n \right) \right]. \quad (\text{A.3})$$

Consider a truncation in the expansion in n . The first term $\partial_t R_N \cdot P_N^{-1}$ collects, as in the ordinary case, vacuum configurations and thus can be forgotten. Then, since each term in $F_N(P_N)^{-1}$ has exactly two fields, $[F_N(P_N)^{-1}]^n$ contains $2n$ fields. For the flow of Z_N and of the mass m_N , we need to focus on the term of order $n = 1$ in (A.3). These correspond to non-perturbative contributions with two external legs of the form φ^2 . Meanwhile, for the running of λ_N , we must expand at order $n = 2$ and these correspond to terms with 4 legs, i.e. φ^4 . The other terms do not contribute to the flow, in the chosen truncation.

First order or φ^2 -terms. We introduce the following formal constants:

$$c = -\frac{1}{2}, \quad \alpha = -c \frac{\partial_t Z_N}{(Z_N N + m_N)^2}, \quad \beta = c \frac{N(\partial_t Z_N + Z_N)}{(Z_N N + m_N)^2}. \quad (\text{A.4})$$

The aim is to calculate $c \overline{\text{Tr}} \left(\partial_t R_N \cdot (P_N)^{-1} \cdot [F_N(P_N)^{-1}] \right) = \alpha A + \beta B$. Other useful notations must be introduced as this stage:

$$\begin{aligned} \text{for } i = 1, 2, 3, \quad \text{Tr}(\varphi \cdot |p_i| \cdot \varphi) &= \sum_{p_j} |p_i| (\varphi_{p_j})^2 = |p_i| \frac{1}{3} \equiv \frac{1}{3}, \\ \text{then } \text{Tr}(\varphi \cdot K \cdot \varphi) &= \sum_i |p_i| \frac{1}{3} \equiv \frac{1}{3} = K \frac{1}{3} \equiv \frac{1}{3}, \quad \text{Tr}(\varphi^2) = \frac{1}{3} \equiv \frac{1}{3}. \end{aligned}$$

We are now in position to evaluate the first order:

$$\begin{aligned} \alpha A + \beta B &= \sum_{p_i} \left[\alpha \left(\frac{1}{3} \sum_i |p_i| \right) + \beta \right] \Theta \left(N - \frac{1}{3} \sum_i |p_i| \right) F_N(\{p_i\}; \{p_i\}) \\ &= \sum_{p_i} \left[\alpha \left(\frac{1}{3} \sum_i |p_i| \right) + \beta \right] \Theta \left(N - \frac{1}{3} \sum_i |p_i| \right) \left(\frac{1}{3} \equiv \frac{1}{3} + \frac{1}{3} \equiv \frac{1}{3} + \frac{1}{3} \equiv \frac{1}{3} + \text{Sym}(1 \rightarrow 2 \rightarrow 3) \right) \\ &= 3(\alpha K + \beta) \frac{1}{3} \equiv \frac{1}{3} \\ &+ \left\{ \frac{1}{3} \equiv \frac{1}{3} \left[\sum_{p_2, p_3} + \sum_{p_1} \right] \left[\alpha \left(\frac{1}{3} \sum_i |p_i| \right) + \beta \right] \Theta \left(N - \frac{1}{3} \sum_i |p_i| \right) + \text{Sym}(1 \rightarrow 2 \rightarrow 3) \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

The spectral sums can be performed, discarding all terms involving momenta with power higher than 1, to give

$$\begin{aligned} S_{1;p} &= \sum_{p_2, p_3 \in \mathbb{Z}} \left[\alpha \left(\frac{1}{3} \sum_i |p_i| \right) + \beta \right] \Theta \left(N - \frac{1}{3} \sum_i |p_i| \right) \\ &\simeq 4 \sum_{p_2=1}^{3N-|p_1|} \sum_{p_3=1}^{3N-|p_1|-p_2} \left[\frac{1}{3} \alpha \sum_i |p_i| + \beta \right] + 4 \sum_{p_2=1}^{3N-|p_1|} \sum_{p_3=1}^{3N-|p_1|-p_2} \left[\frac{1}{3} \alpha (p_2 + |p_1|) + \beta \right] + \frac{1}{3} \alpha |p_1| + \beta \\ &\simeq \frac{1}{9} \alpha (6N(3N+1)(6N+1) + (1-18N-54N^2)|p_1|) + \beta (1+6N(1+3N)-2|p_1|(1+6N)); \\ S_{23;p} &= \sum_{p_1 \in \mathbb{Z}} \left[\alpha \left(\frac{1}{3} \sum_i |p_i| \right) + \beta \right] \Theta \left(N - \frac{1}{3} \sum_i |p_i| \right) \simeq \alpha N(3N+1) + \beta(1+6N-2(|p_2|+|p_3|)). \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Inserting these results in (A.6), one infers

$$\alpha A + \beta B = 3(\alpha K + \beta) \frac{1}{3} \equiv \frac{1}{3}$$

Functional Renormalisation Group Approach for Tensorial Group Field Theory: a Rank-3 Model

Dario Benedetti,^{1,*} Joseph Ben Geloun,^{1,2,†} and Daniele Oriti^{1,‡}

¹Max Planck Institute for Gravitational Physics, Albert Einstein Institute
Am Mühlenberg 1, 14476, Potsdam, Germany

²International Chair in Mathematical Physics and Applications,
ICMPA-UNESCO Chair, 072BP50, Cotonou, Rep. of Benin

(Dated: November 12, 2014)

We set up the Functional Renormalisation Group formalism for Tensorial Group Field Theory in full generality. We then apply it to a rank-3 model over $U(1)^3$, endowed with a linear kinetic term and nonlocal interactions. The system of FRG equations turns out to be non-autonomous in the RG flow parameter. This feature is explained by the existence of a hidden scale, the radius of the group manifold. We investigate in detail the opposite regimes of large cut-off (UV) and small cut-off (IR) of the FRG equations, where the system becomes autonomous, and we find, in both case, Gaussian and non-Gaussian fixed points. We derive and interpret the critical exponents and flow diagrams associated with these fixed points, and discuss how the UV and IR regimes are matched at finite N . Finally, we discuss the evidence for a phase transition from a symmetric phase to a broken or condensed phase, from an RG perspective, finding that this seems to exist only in the approximate regime of very large radius of the group manifold, as to be expected for systems on compact manifolds.

Pacs numbers: 11.10.Gh, 04.60.-m, 02.10.Ox

Key words: Quantum Gravity, Functional Renormalisation Group, Group Field Theory, Tensor Models.

Report numbers: AEI-2014-058; ICMPA/MPA/2014/23

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

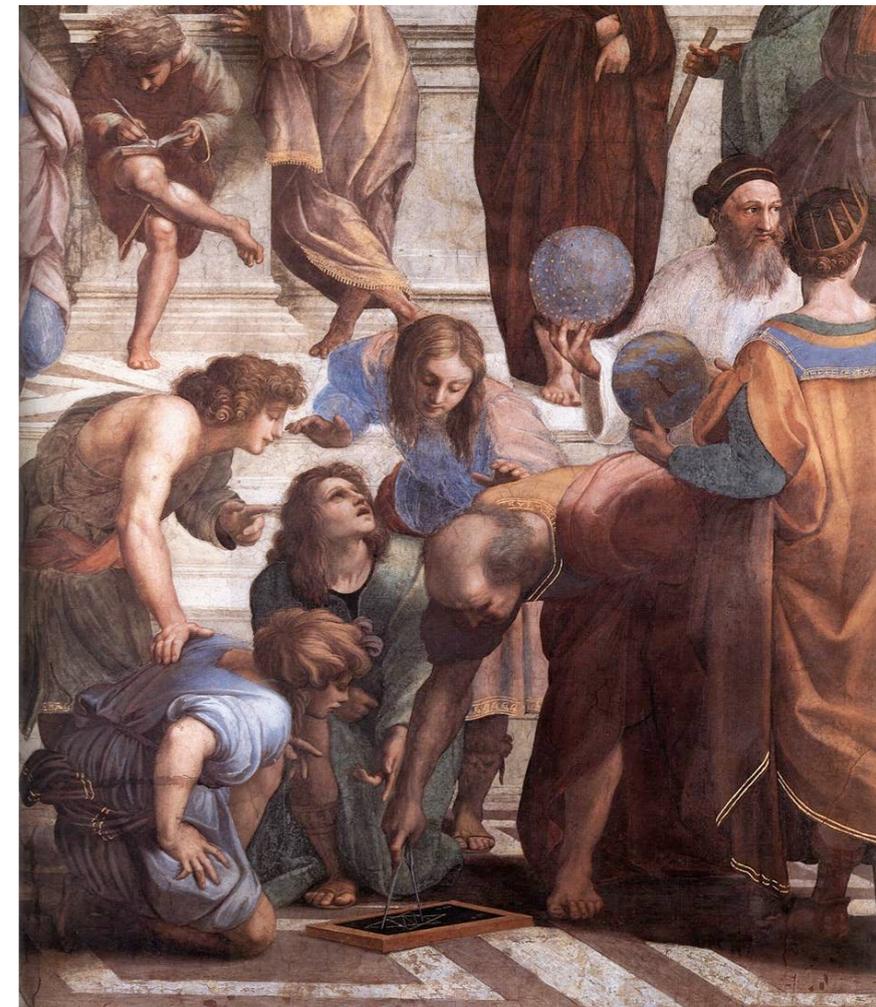
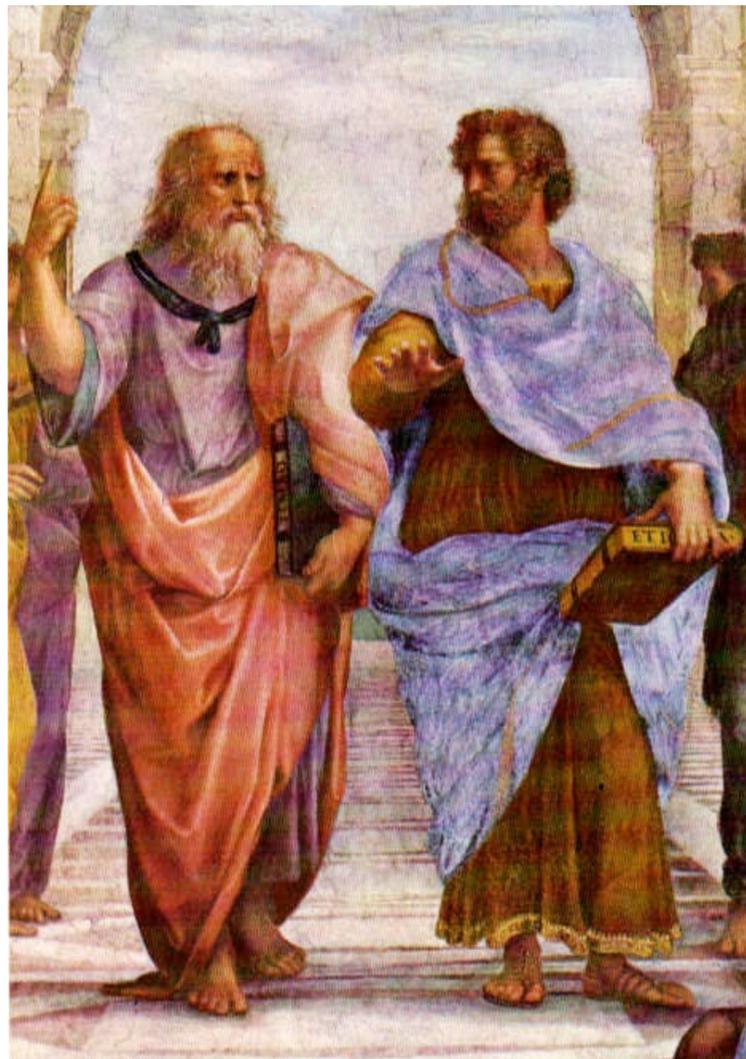
un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)
- discutere coi colleghi

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)
- discutere coi colleghi



Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)
- discutere coi colleghi

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)
- discutere coi colleghi



Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)
- discutere coi colleghi

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)
- discutere coi colleghi
- leggere e riflettere

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)
- discutere coi colleghi
- leggere e riflettere



Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

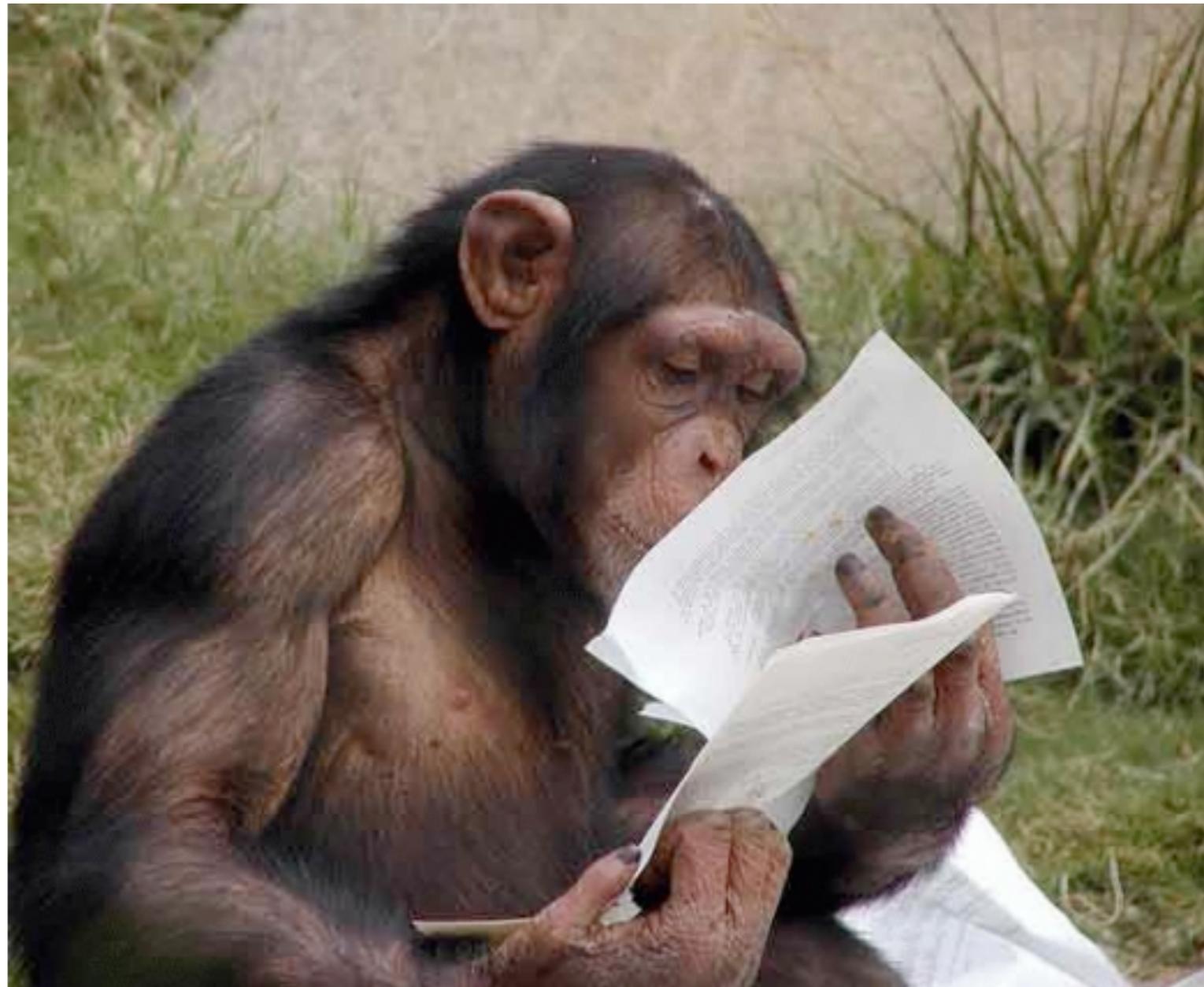
un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)
- discutere coi colleghi
- leggere e riflettere

Gravita' Quantistica: il lavoro di una comunita'

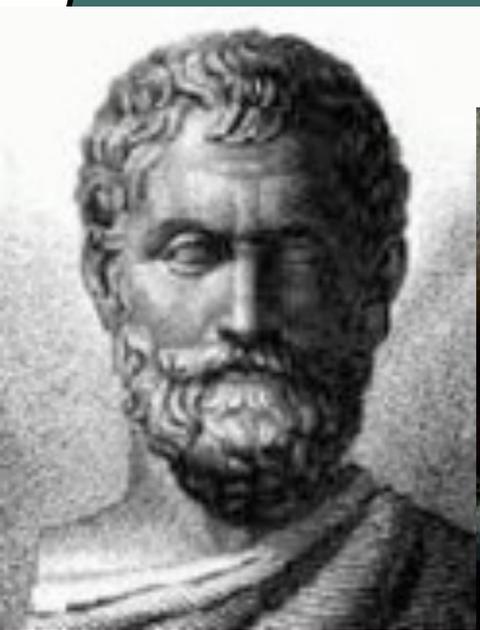
un lavoro giornaliero e individuale che comporta:

- fare conti, costruire modelli matematici, fare simulazioni o osservazioni sperimentali, dimostrare teoremi, etc
.... e alla fine, pubblicare articoli (dire agli altri cio' che hai capito)
- discutere coi colleghi
- leggere e riflettere

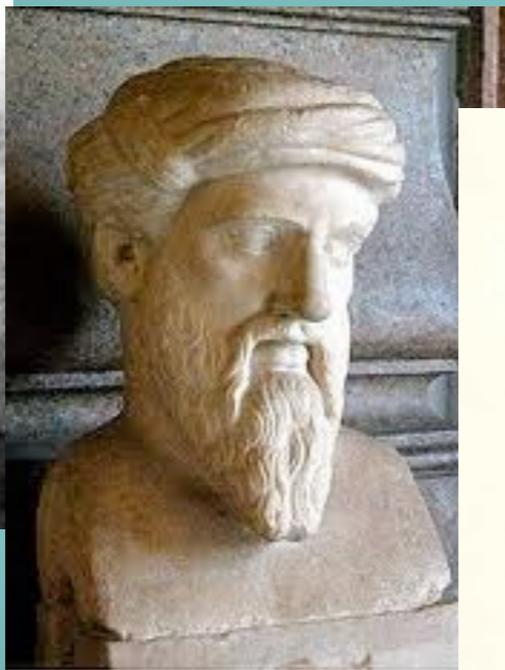


Gravita' quantistica:
il proseguimento di una tradizione di "filosofia naturale"

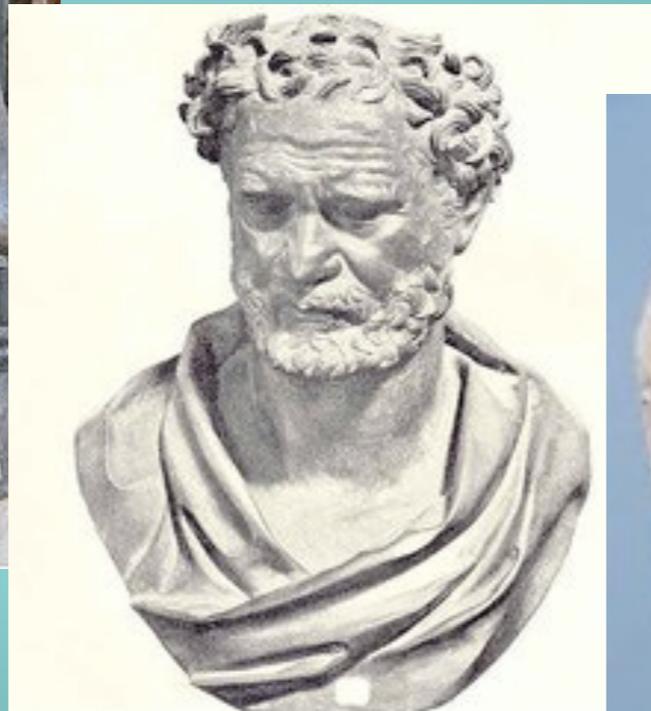
il proseguimento di una tradizione di “filosofia naturale”



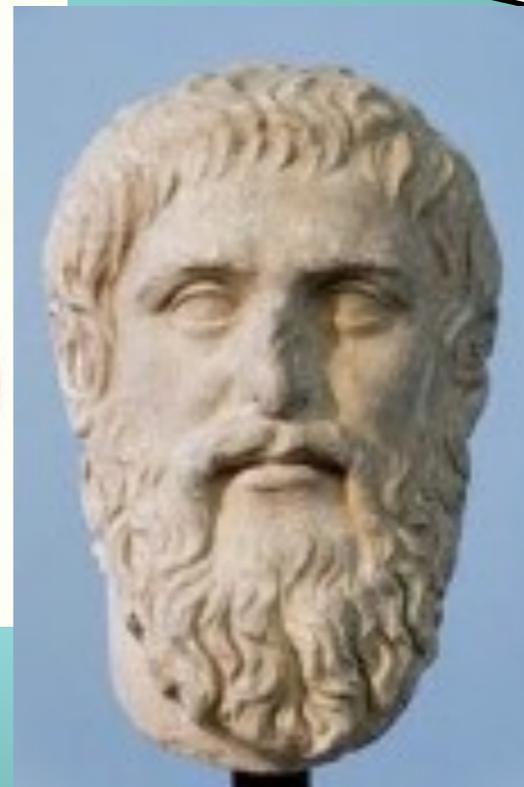
Anaximander



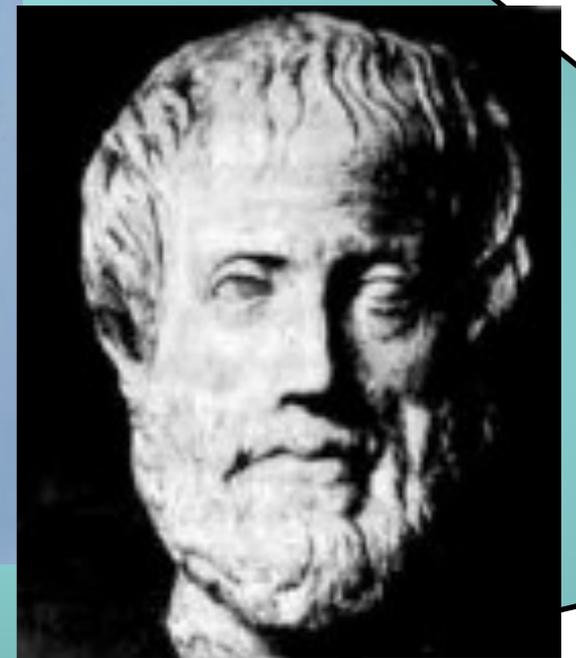
Pythagoras



Democritus



Plato



Aristotle

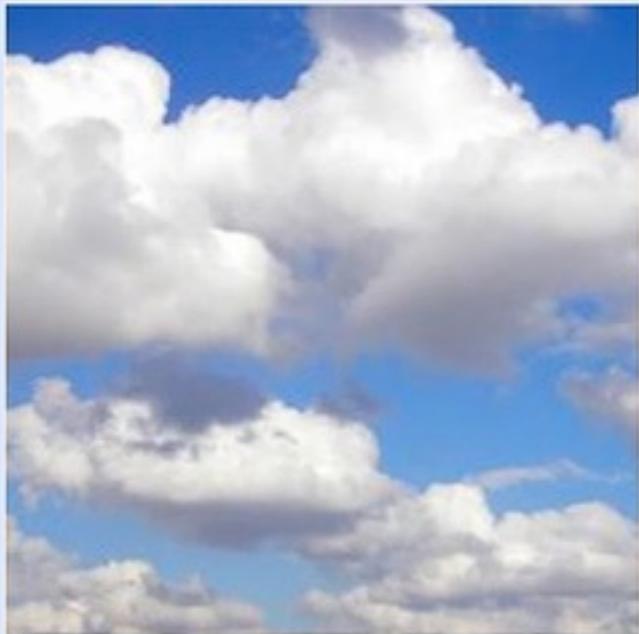
il proseguimento di una tradizione di “filosofia naturale”

cercando di capire:

- di cosa e' fatto il mondo (quali sono i costituenti elementari?)

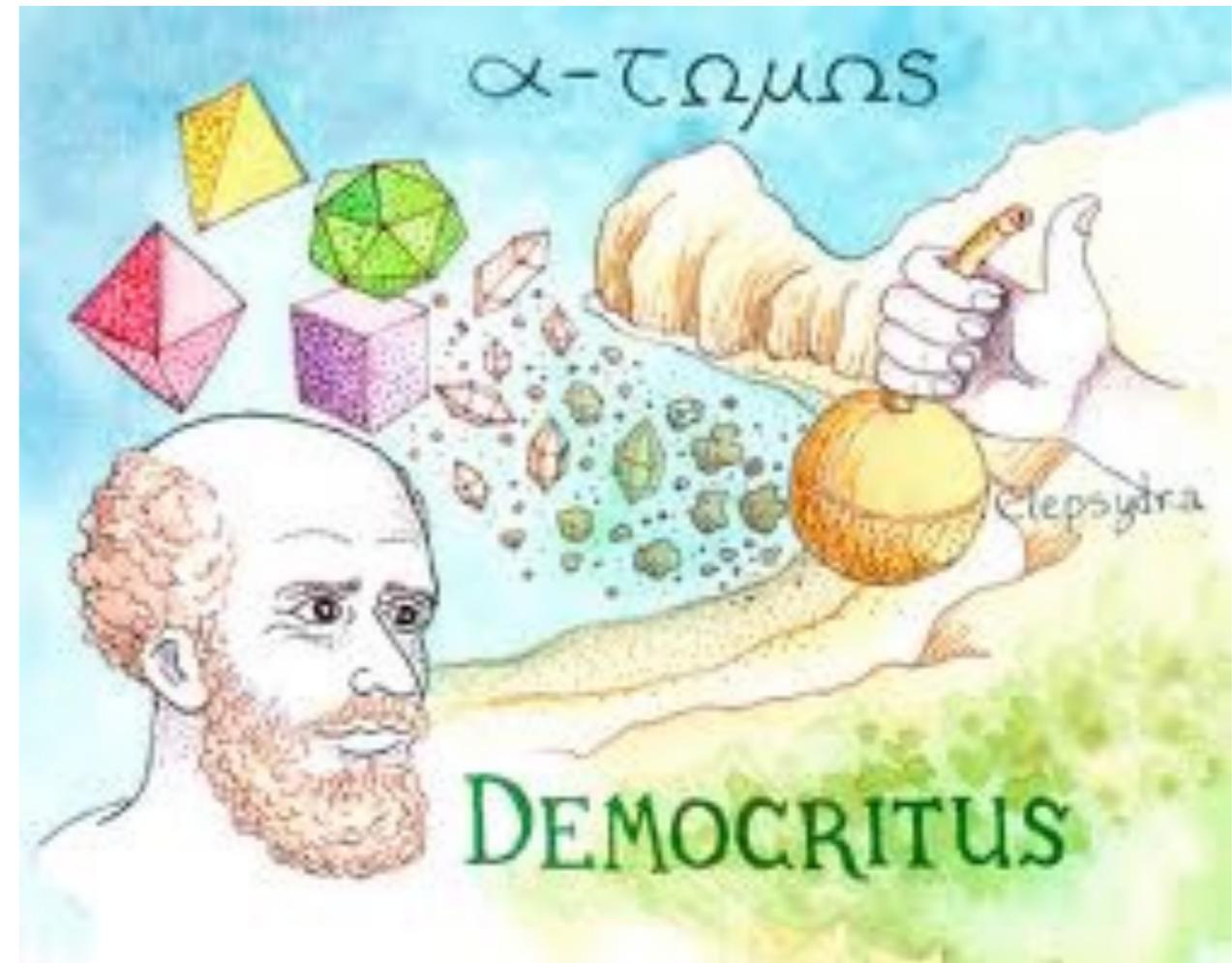
costituenti elementari

le sostanze base
(Empedocle,,Aristotele,....)



o

gli atomi (Democrito, ...)



il proseguimento di una tradizione di “filosofia naturale”

cercando di capire:

- di cosa e' fatto il mondo (quali sono i costituenti elementari?)
- la natura dello spazio (cosa e', veramente, lo spazio? e il tempo?)

natura dello spazio

vuoto e inerte

(in cui i corpi si propagano interagendo a distanza)
(Democrito,, Newton,...)

oppure

riempito da (o identificato esso stesso con)
una sostanza onnipresente, dinamica e interagente
(.....Descartes....)

il proseguimento di una tradizione di “filosofia naturale”

cercando di capire:

- di cosa e' fatto il mondo (quali sono i costituenti elementari?)
- la natura dello spazio (cosa e', veramente, lo spazio? e il tempo?)
- l'origine del mondo fisico

L'origine

da cosa e' nato l'universo delle cose che osserviamo?

esiste una "sostanza primordiale"?

come si sono originati i costituenti elementari del cosmo?



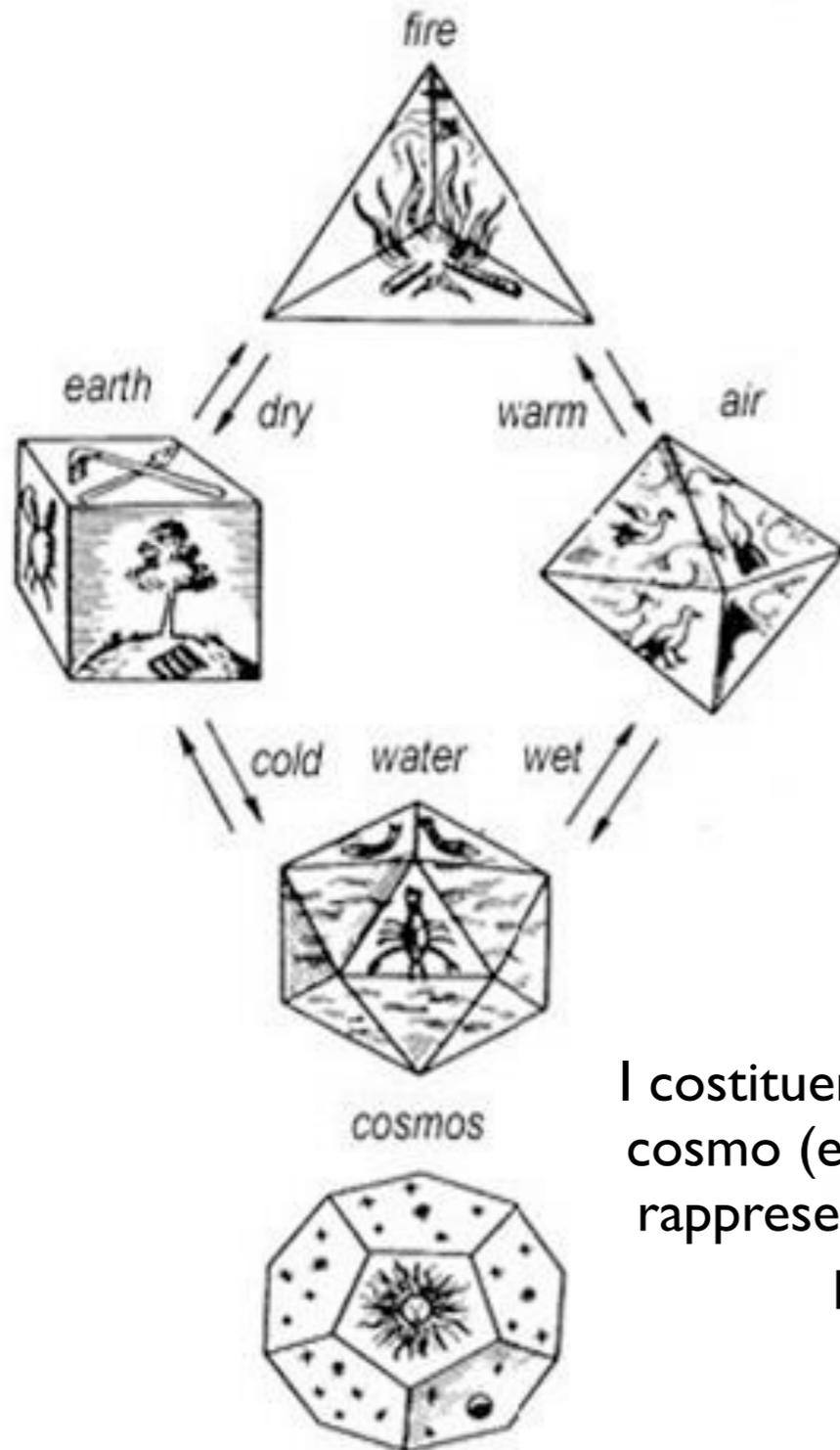
il proseguimento di una tradizione di “filosofia naturale”

cercando di capire:

- di cosa e' fatto il mondo (quali sono i costituenti elementari?)
- la natura dello spazio (cosa e', veramente, lo spazio? e il tempo?)
- l'origine del mondo fisico
- nel linguaggio della matematica

“La filosofia naturale è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi, io dico l’universo, ma non si può intendere se prima non s’impara a intender la lingua e conoscer i caratteri nei quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto.”

G. Galilei



I costituenti elementari del cosmo (e il cosmo stesso) rappresentati come solidi platonici



La ragione geometrica per la struttura del sistema solare
J. Kepler, *Mysterium Cosmographicum*

che tipo di risposte cerchiamo:

◆ naturali (non “sovrannaturali”)

che tipo di risposte cerchiamo:

◆ naturali (non “sovrannaturali”)



che tipo di risposte cerchiamo:

◆ naturali (non “sovrannaturali”)



che tipo di risposte cerchiamo:

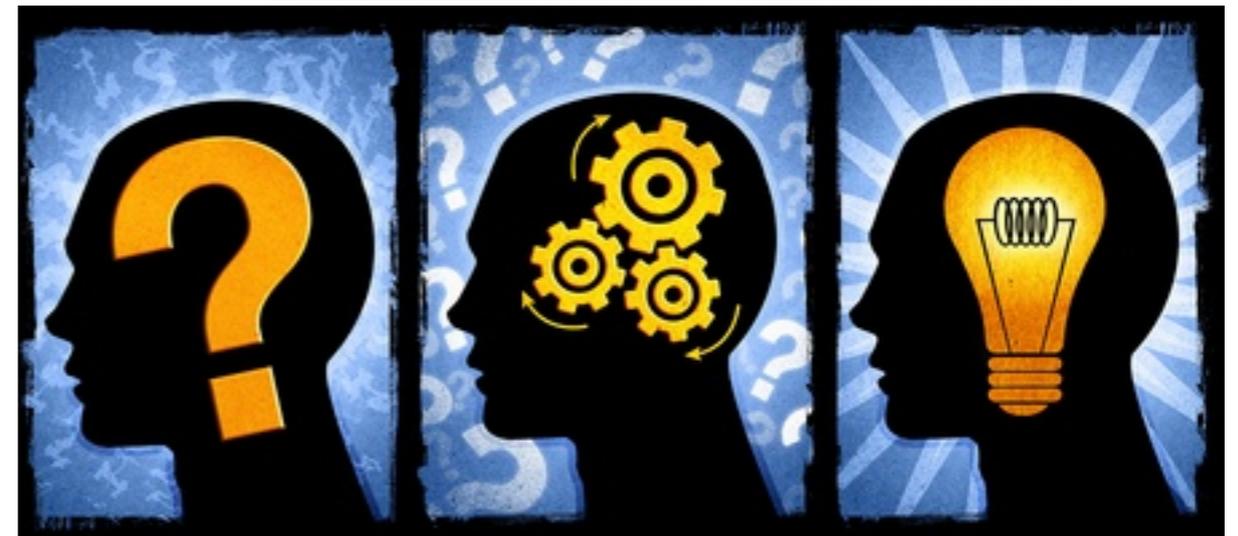
◆ naturali (non “sovrannaturali”)



che tipo di risposte cerchiamo:

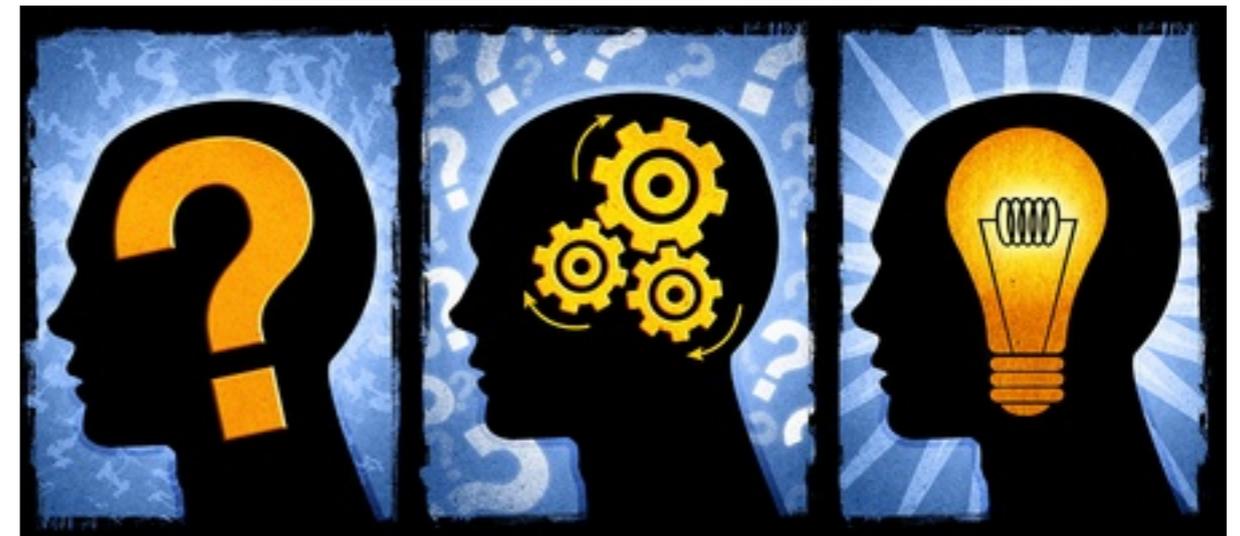
◆ naturali (non “sovrannaturali”)

◆ razionali



che tipo di risposte cerchiamo:

- ◆ naturali (non “sovrannaturali”)
- ◆ razionali
- ◆ osservabili e testabili



che tipo di risposte cerchiamo:

◆ naturali (non “sovrannaturali”)

◆ razionali

◆ osservabili e testabili

che tipo di risposte cerchiamo:

◆ naturali (non “sovrannaturali”)

◆ razionali

◆ osservabili e testabili

◆ solide



che tipo di risposte cerchiamo:

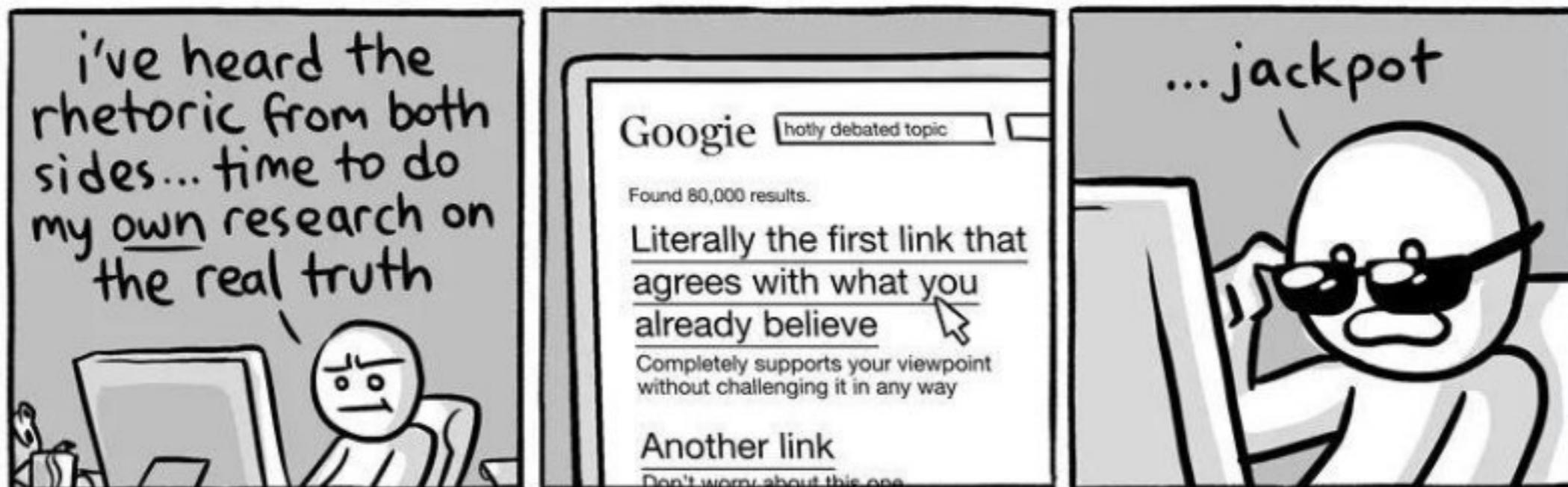
◆ naturali (non “sovrannaturali”)

◆ razionali

◆ osservabili e testabili

◆ solide

◆ quindi piu’ forti dei nostri bias cognitivi



che tipo di risposte cerchiamo:

◆ naturali (non “sovrannaturali”)

◆ razionali

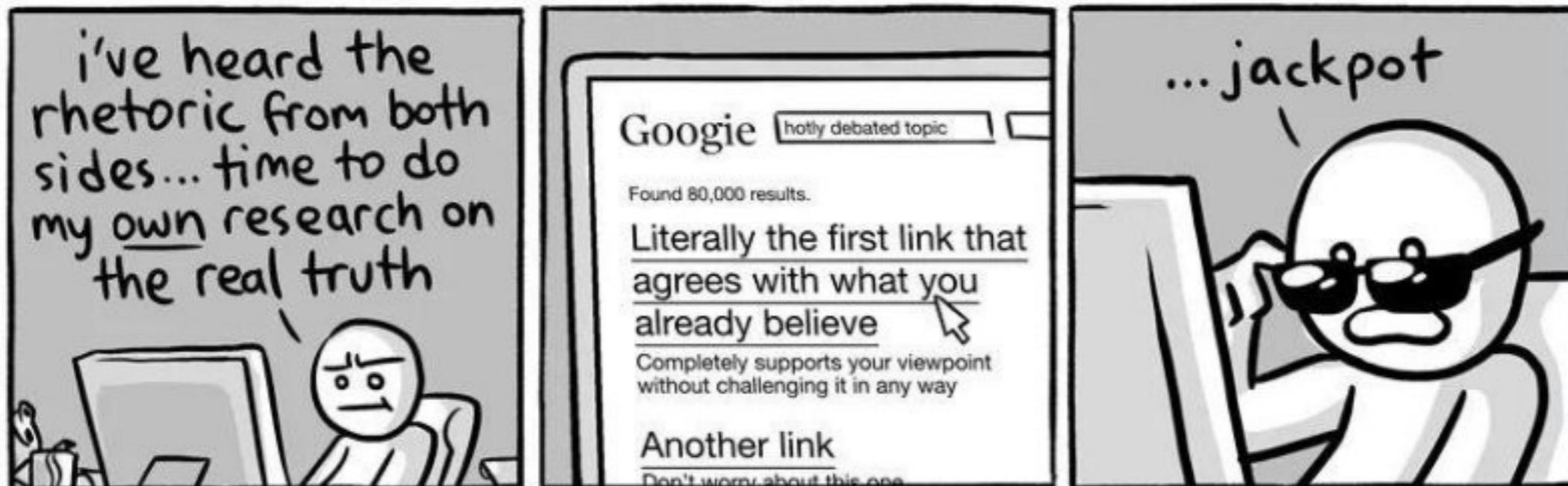
◆ osservabili e testabili

“il metodo scientifico e’ un insieme di strumenti che ci aiutano a credere a meno stupidaggini”

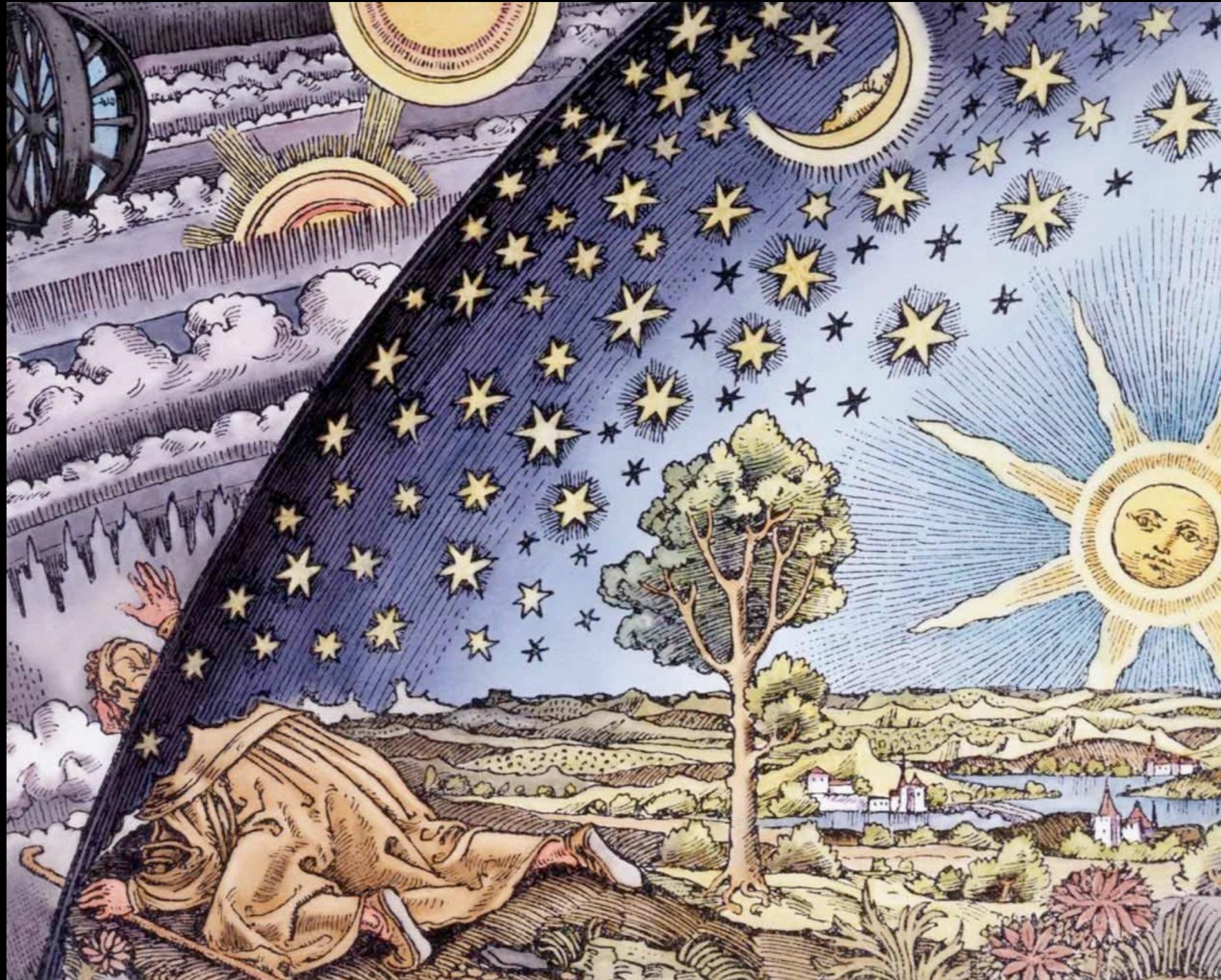
autore anonimo che conosco personalmente

◆ solide

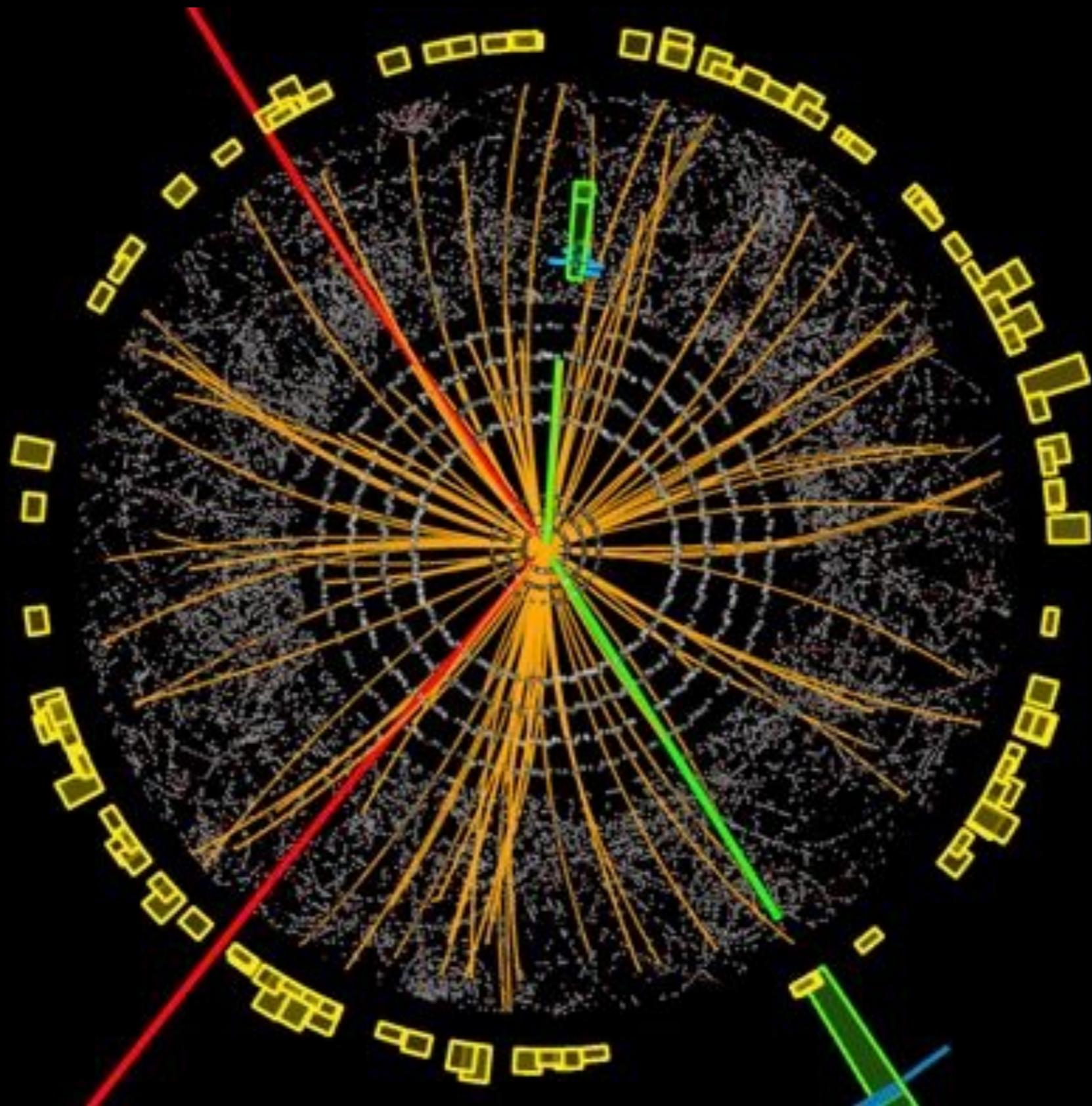
◆ quindi piu’ forti dei nostri bias cognitivi



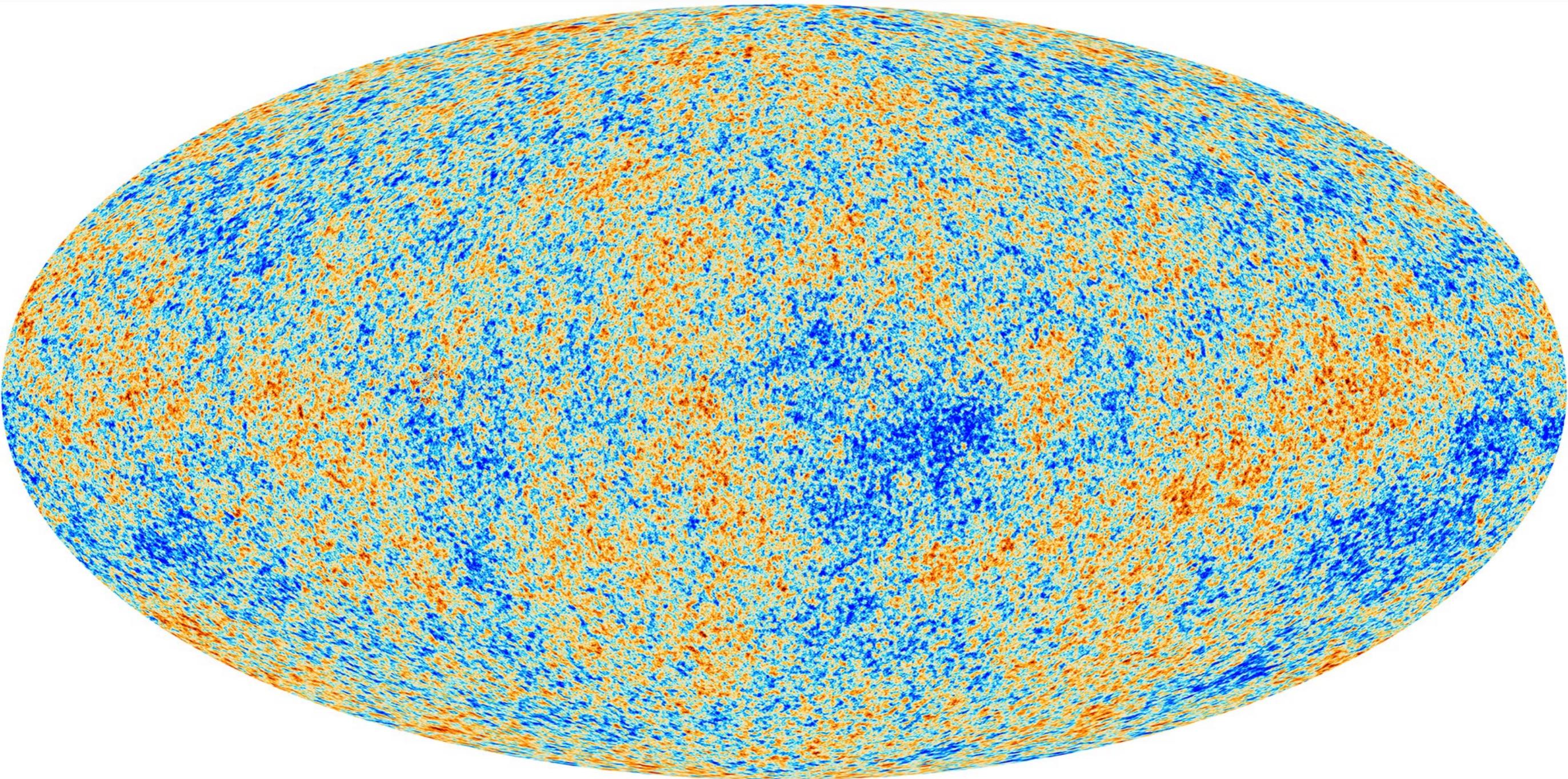
muovendoci alla scoperta di un livello sempre nuovo della realta' fisica



..... guardando alle piu' piccole distanze



... e alle piu' grandi distanze, nel tempo e nello spazio



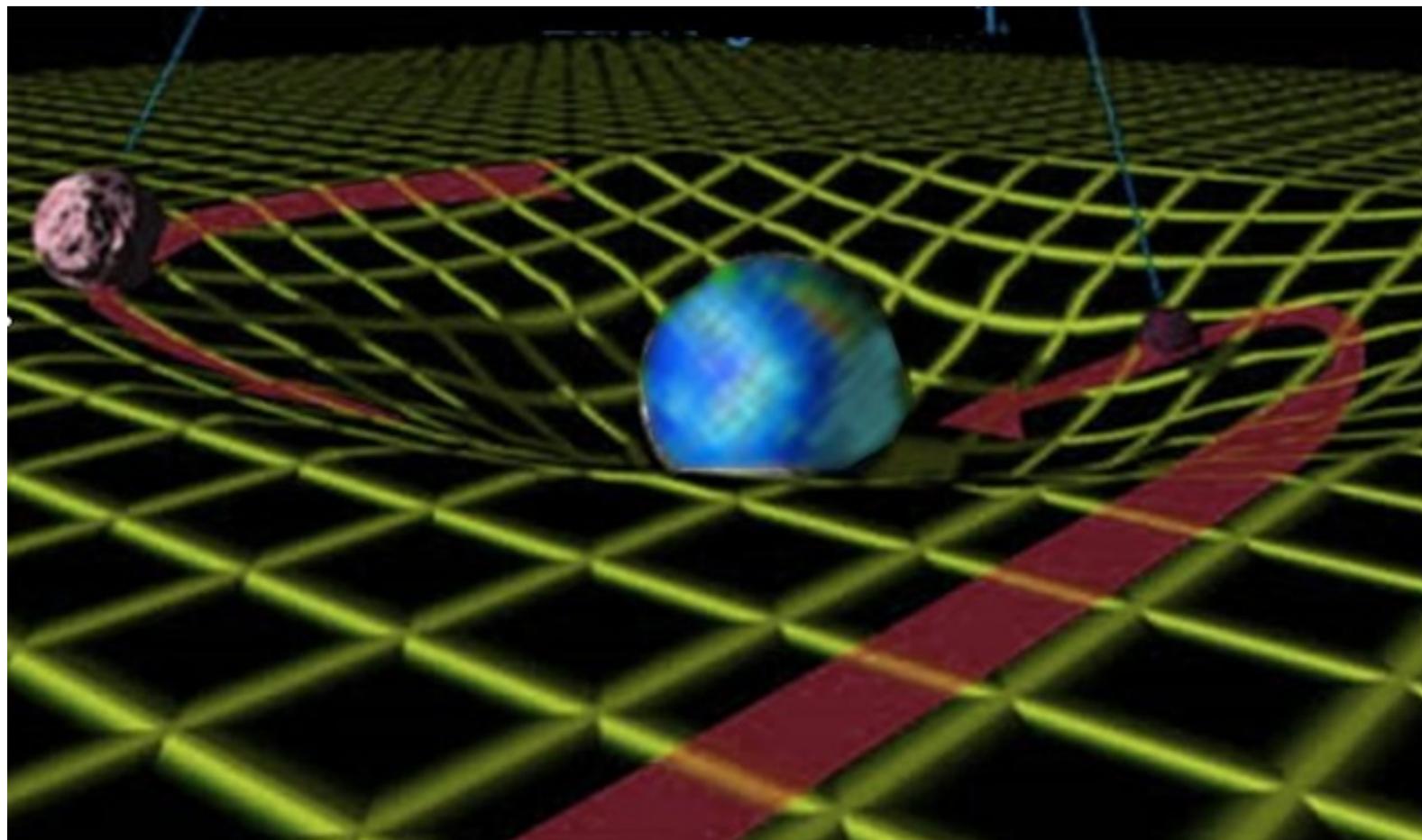
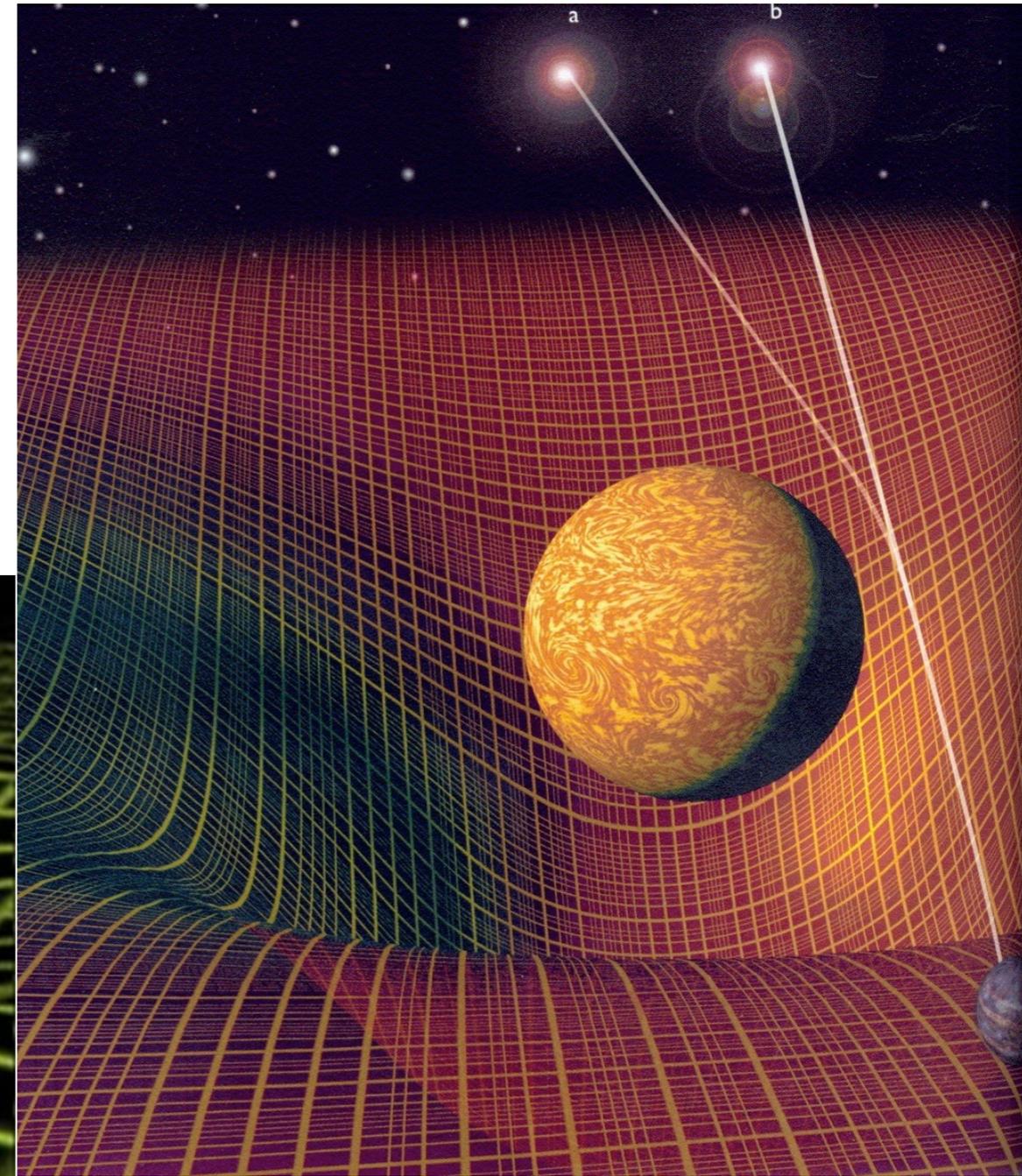
Cosa sappiamo del mondo

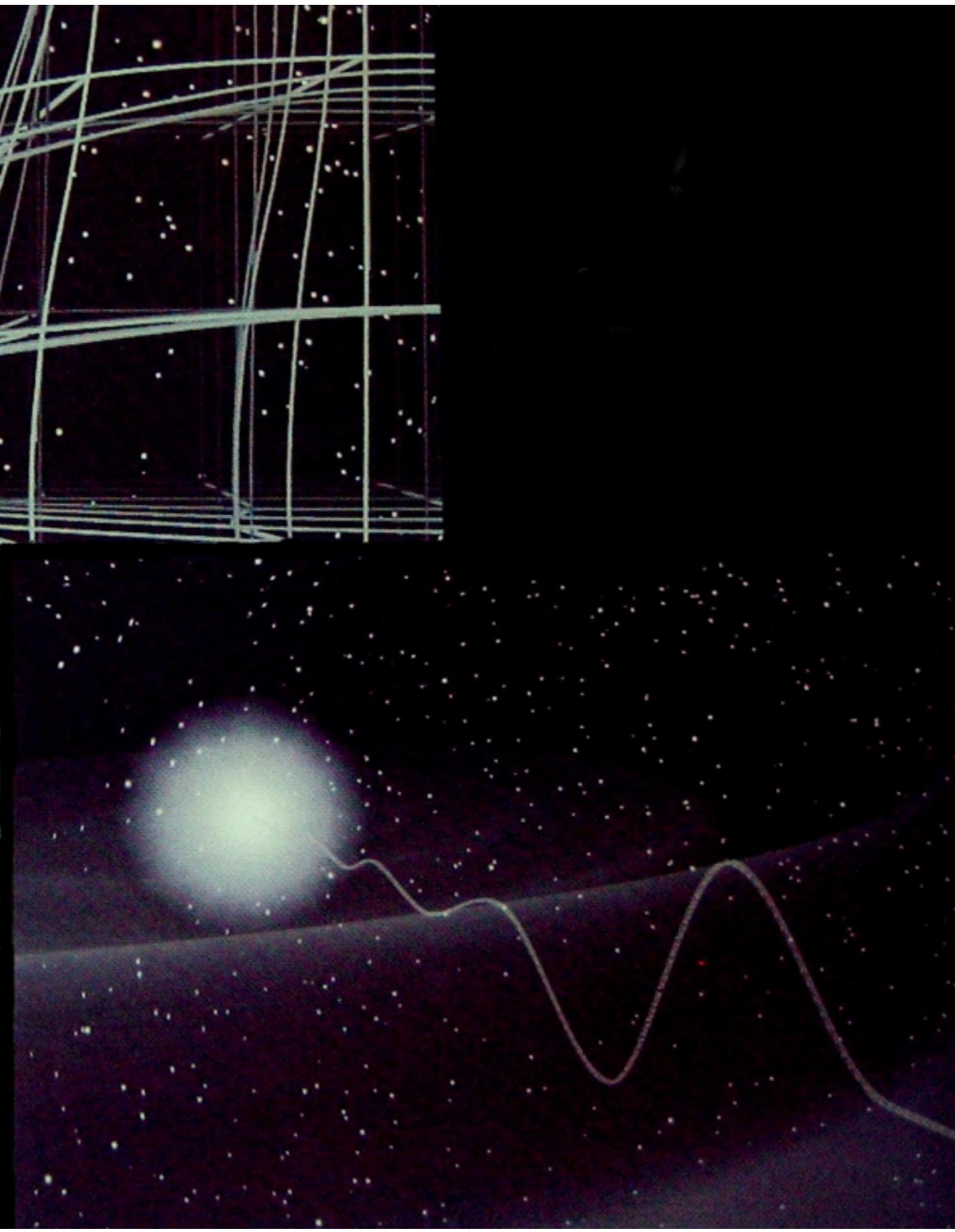
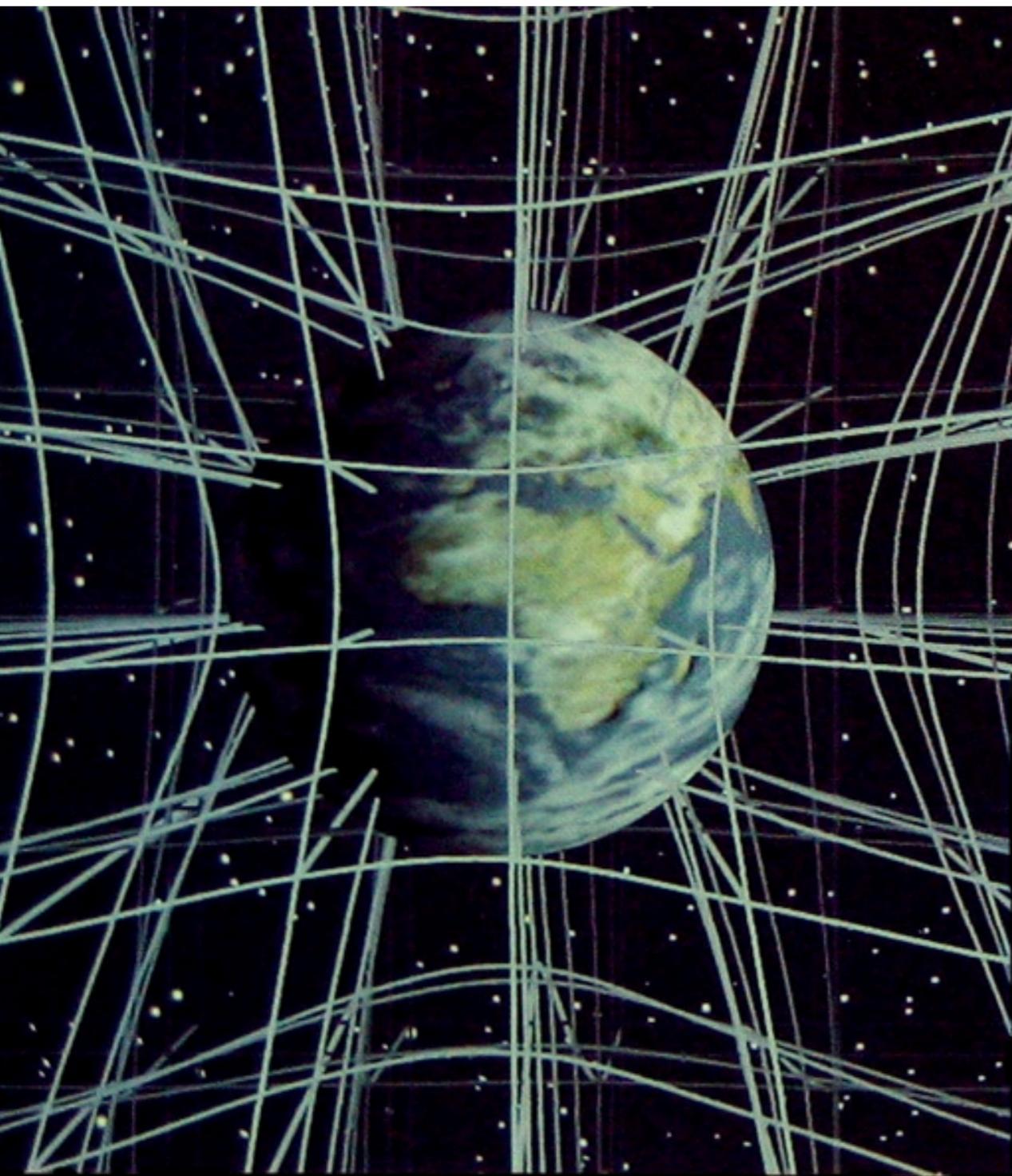
(per cio' che riguarda direttamente la Gravita' Quantistica)

dalla Relativita' Generale

la teoria attuale per descrivere i fenomeni gravitazionali

- gravita' = geometria dello spaziotempo (distanze spaziali tra punti/oggetti + intervalli temporali tra eventi, curvatura)
- la massa-energia dei corpi materiali "deforma" lo spazio(tempo) attorno a loro, e questa deformazione influenza il movimento degli altri corpi
- questa deformazione e' cio' che chiamiamo gravita'

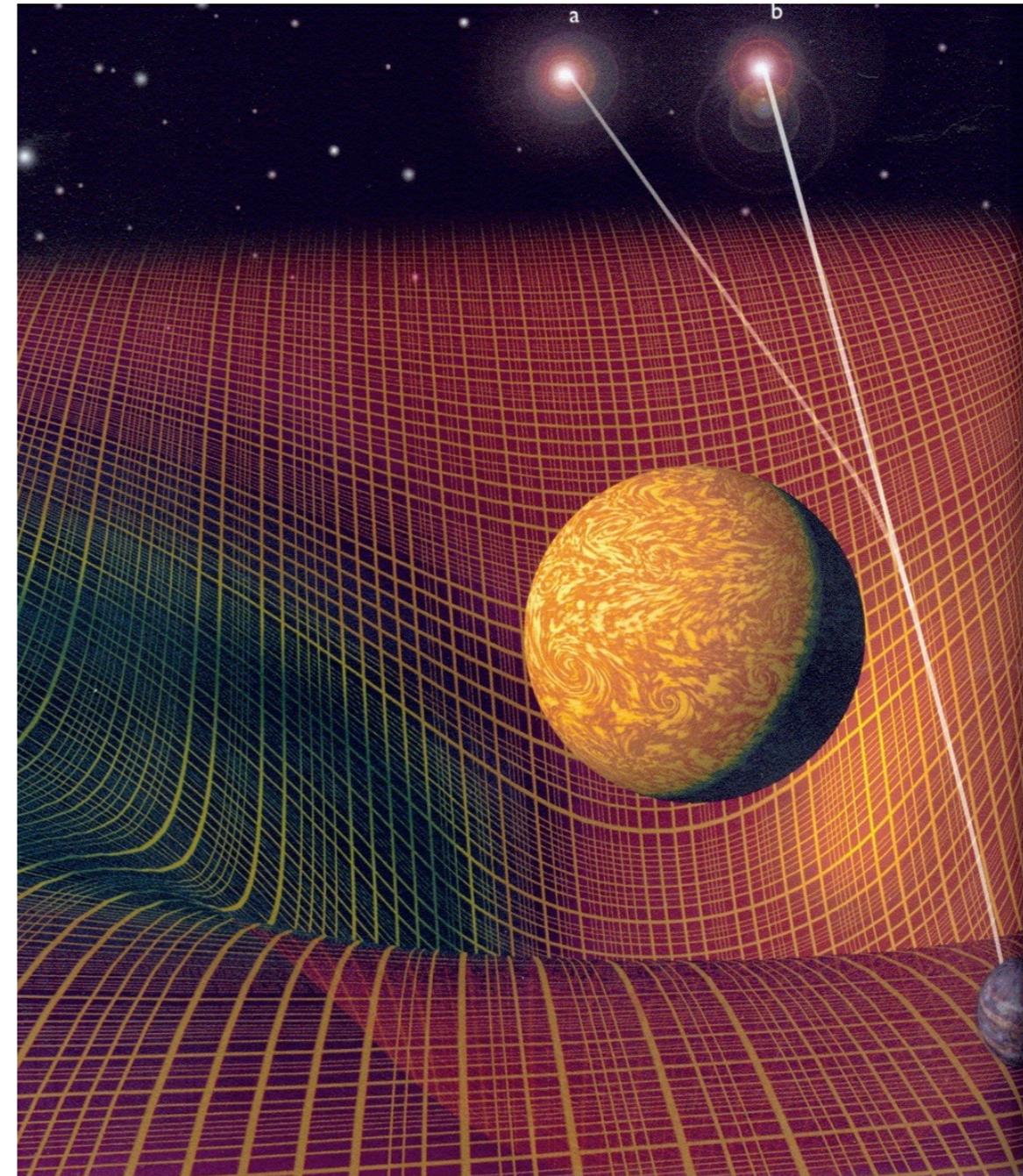




dalla Relativita' Generale

la teoria attuale per descrivere i fenomeni gravitazionali

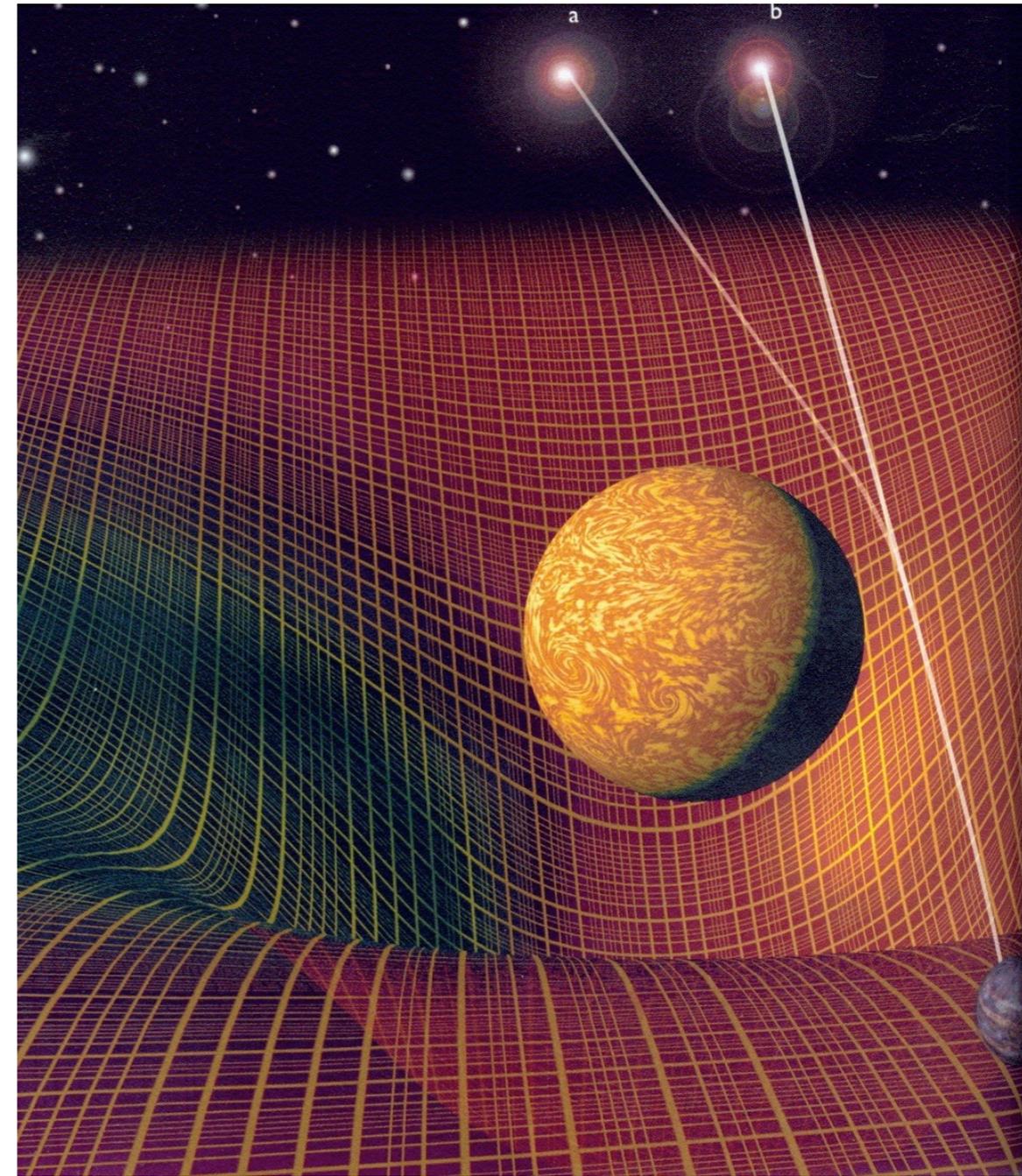
- gravita' = geometria dello spaziotempo
(distanze spaziali tra punti/oggetti + intervalli temporali tra eventi)
- lo spaziotempo in se' e' un ente fisico, dinamico, interagente
- non esiste nessun background spaziotemporale fisso su cui gli enti fisici interagiscono



dalla Relativita' Generale

la teoria attuale per descrivere i fenomeni gravitazionali

- gravita' = geometria dello spaziotempo
(distanze spaziali tra punti/oggetti + intervalli temporali tra eventi)
- lo spaziotempo in se' e' un ente fisico, dinamico, interagente
- non esiste nessun background spaziotemporale fisso su cui gli enti fisici interagiscono

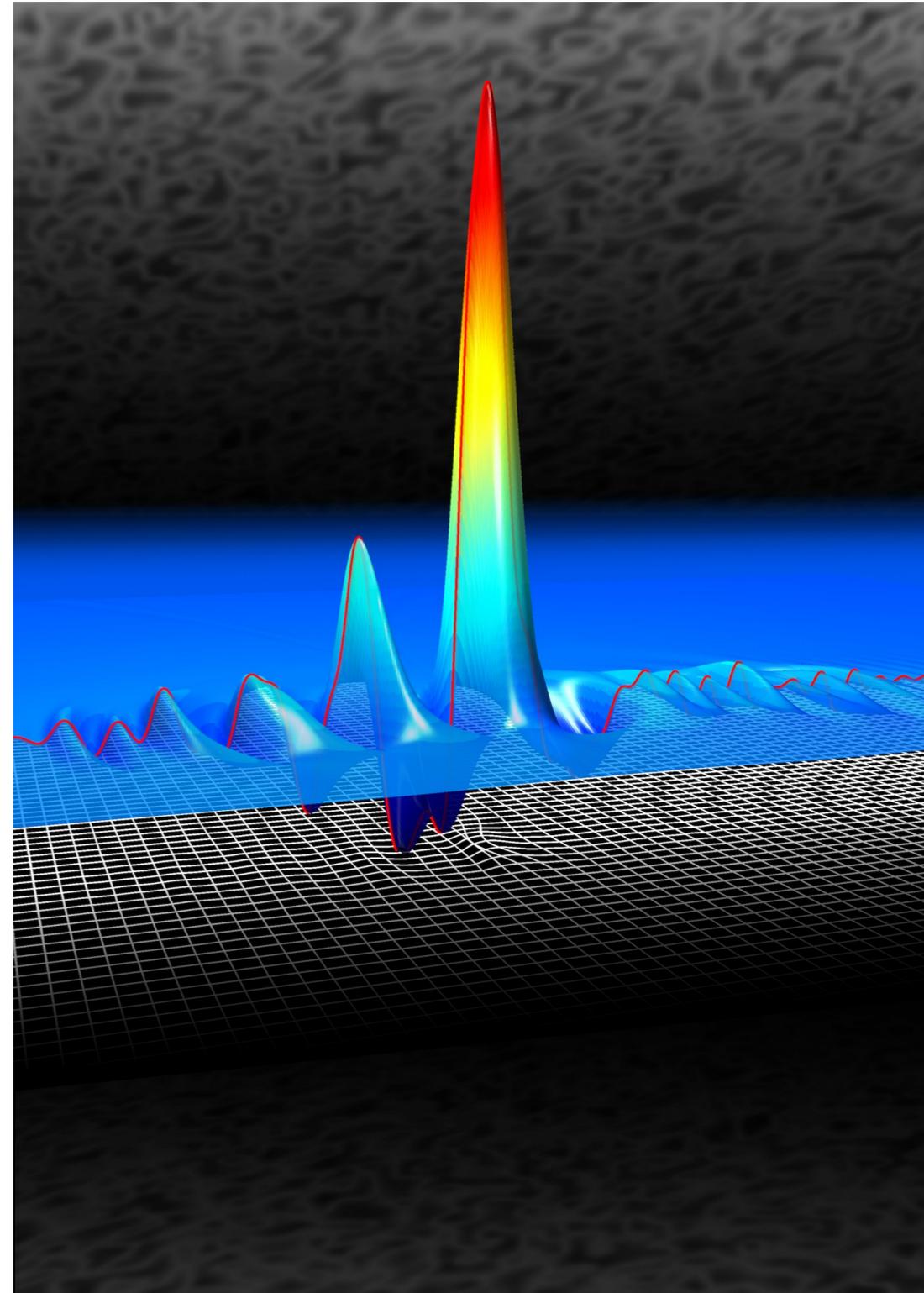
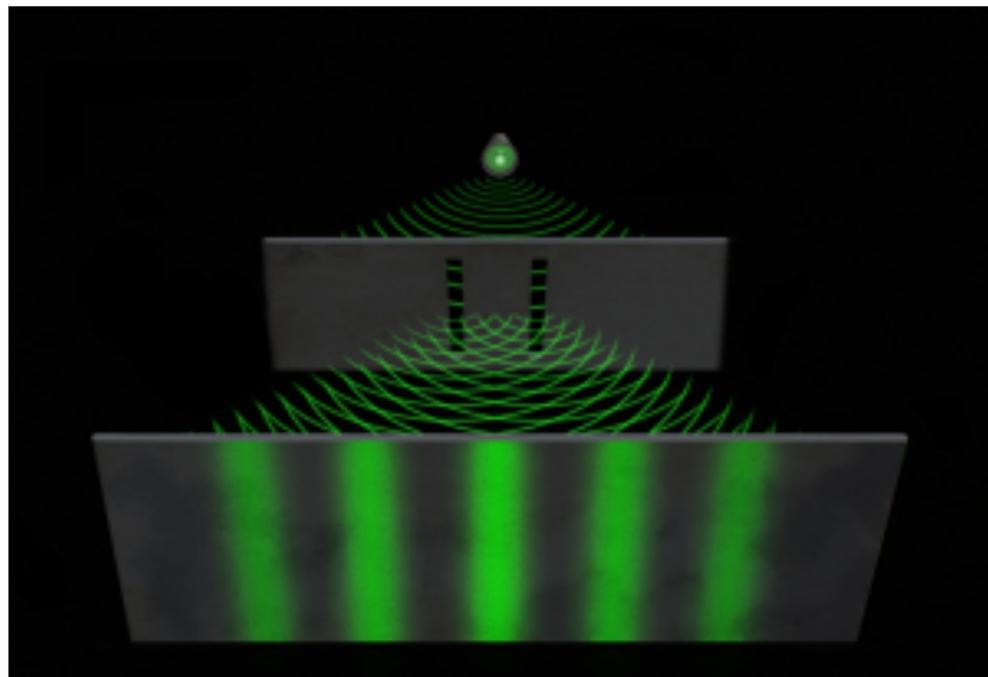


una piu' profonda comprensione della gravita' equivale ad una piu' profonda comprensione dello spazio e del tempo

dalla Meccanica Quantistica

la teoria attuale per descrivere tutte le altre interazioni fisiche e tutti i tipi di materia

- tutti i campi sono costituiti da “quanti”, costituenti discreti
- molte quantità fisiche (e.g. energia) sono quantizzate
- la determinazione di ogni quantità fisica (e.g. localizzazione) è intrinsecamente incerta, e certe coppie di proprietà fisiche non possono essere determinate simultaneamente
- sia la determinazione delle proprietà fisiche del mondo sia la loro evoluzione sono di natura probabilistica
- tutti i sistemi fisici, generalmente e inevitabilmente se interagiscono, sono “entangled”: non possono essere descritti separatamente come fossero indipendenti



Tutte le cose che sappiamo spiegare/descrivere/controlare

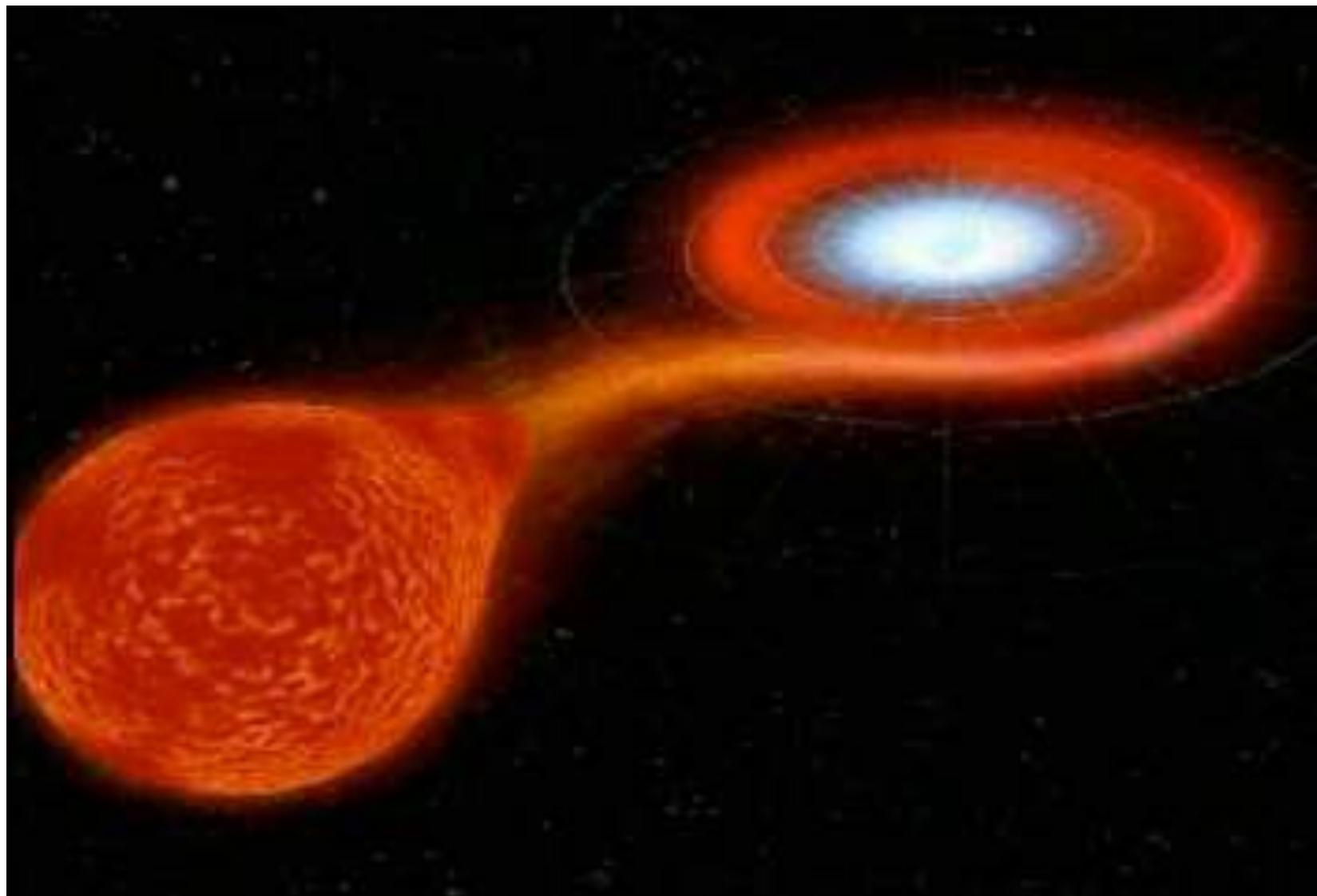
Relativita' Generale: base della astronomia, della astrofisica e della cosmologia moderne

Meccanica Quantistica: base della fisica delle particelle, della fisica nucleare e atomica, della fisica della materia condensata e della struttura della materia,

Tutte le cose che sappiamo spiegare/descrivere/controllare

Relativita' Generale: base della astronomia, della astrofisica e della cosmologia moderne

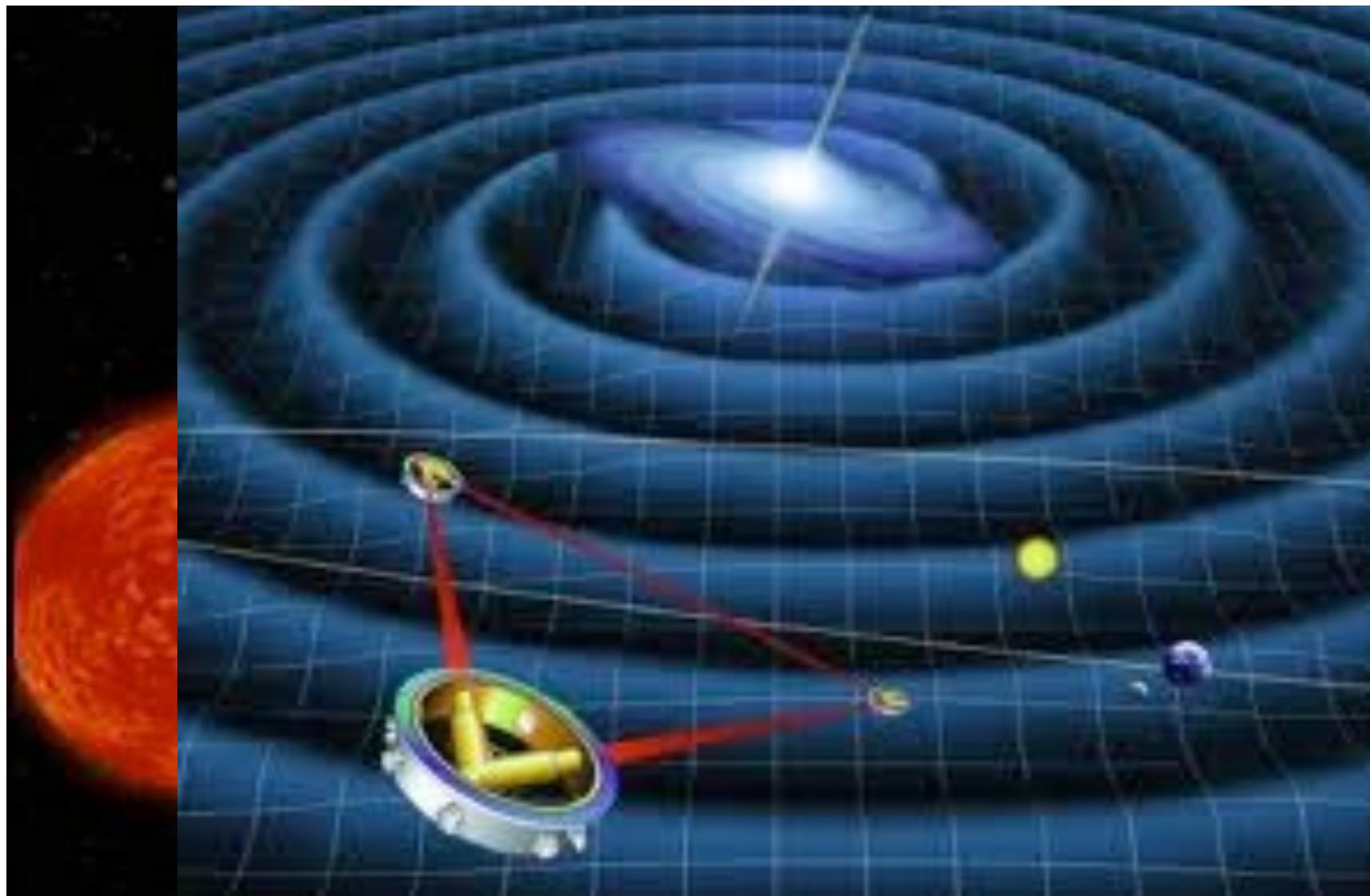
Meccanica Quantistica: base della fisica delle particelle, della fisica nucleare e atomica, della fisica della materia condensata e della struttura della materia,



Tutte le cose che sappiamo spiegare/descrivere/controllare

Relativita' Generale: base della astronomia, della astrofisica e della cosmologia moderne

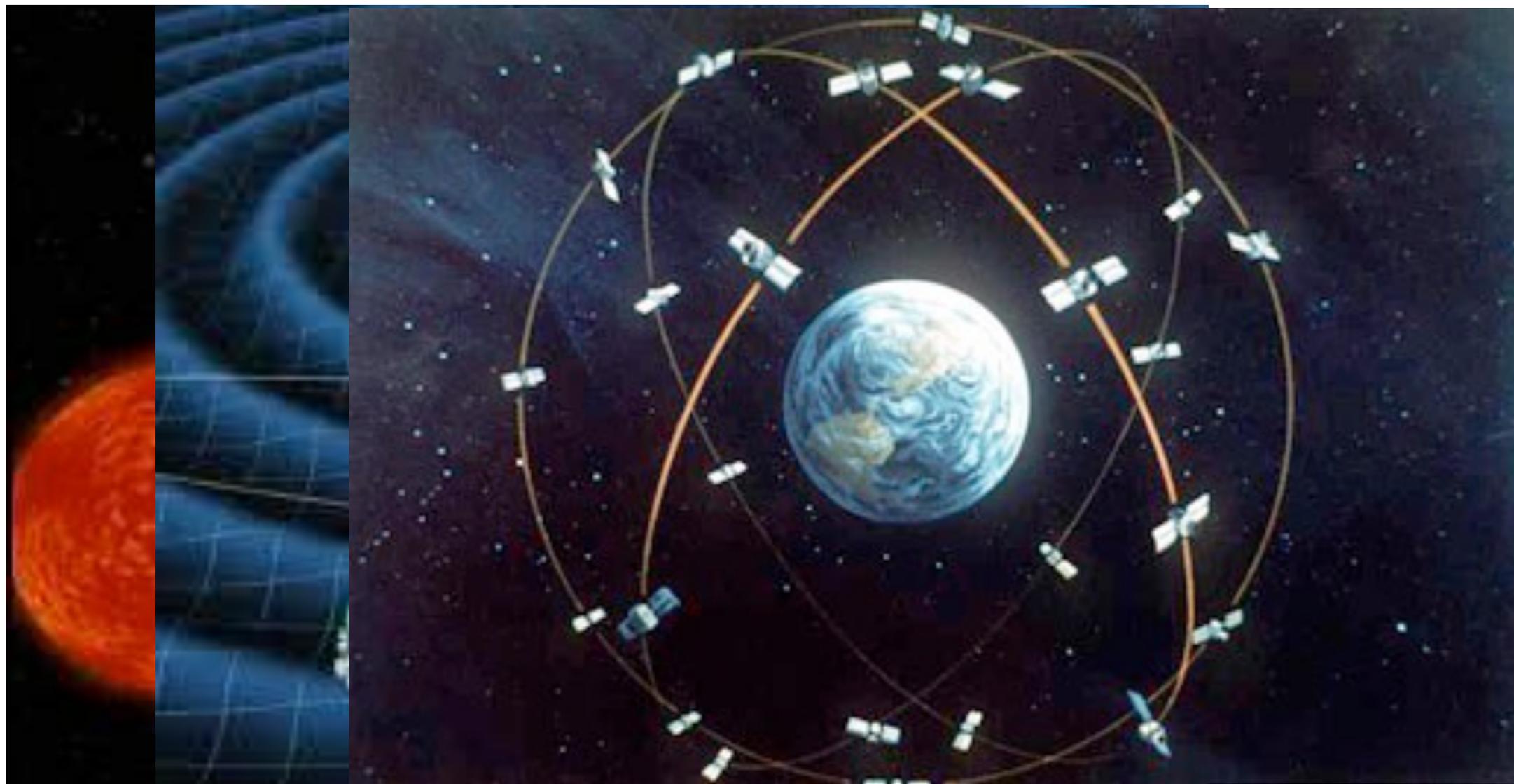
Meccanica Quantistica: base della fisica delle particelle, della fisica nucleare e atomica, della fisica della materia condensata e della struttura della materia,



Tutte le cose che sappiamo spiegare/descrivere/controllare

Relativita' Generale: base della astronomia, della astrofisica e della cosmologia moderne

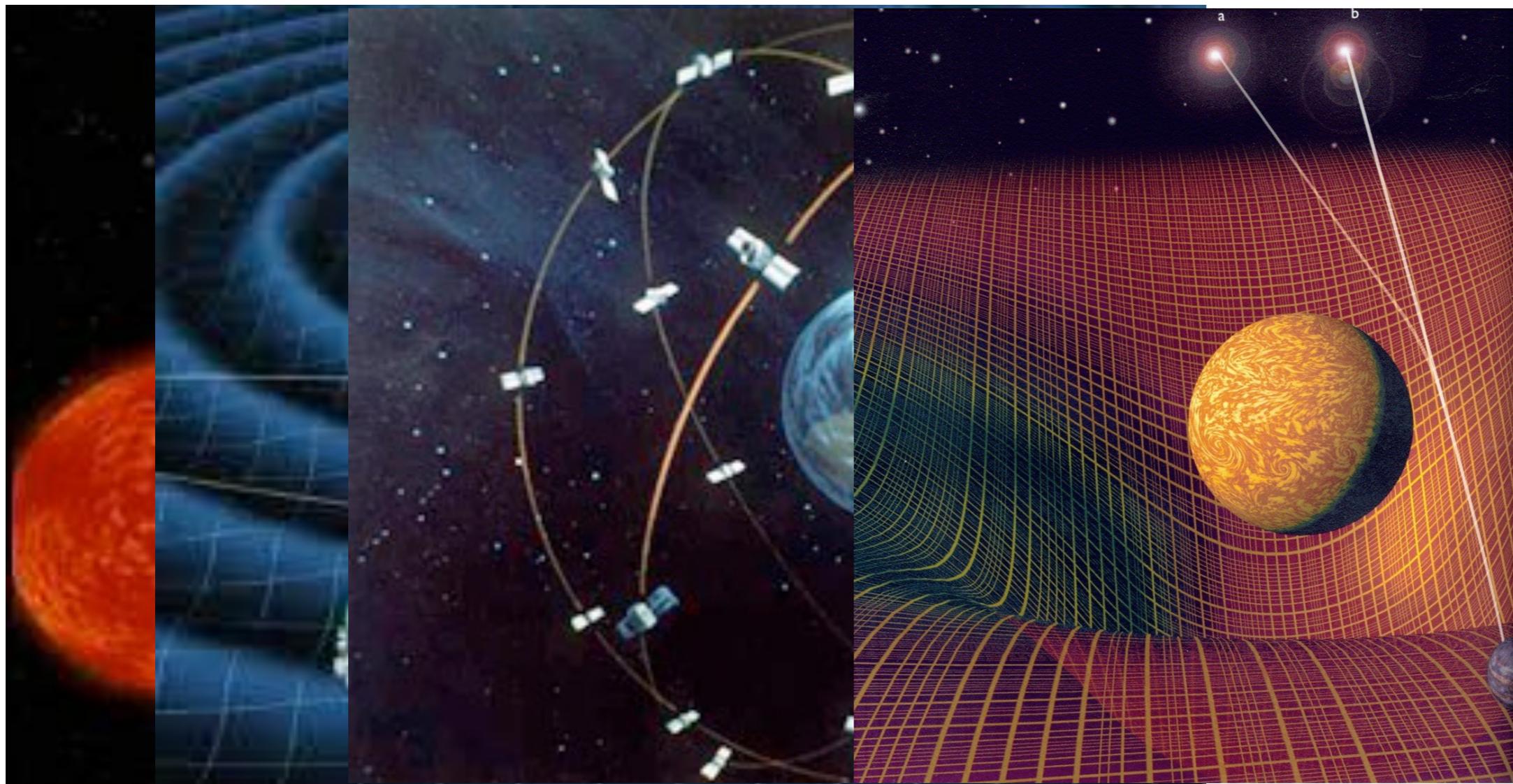
Meccanica Quantistica: base della fisica delle particelle, della fisica nucleare e atomica, della fisica della materia condensata e della struttura della materia,



Tutte le cose che sappiamo spiegare/descrivere/controllare

Relativita' Generale: base della astronomia, della astrofisica e della cosmologia moderne

Meccanica Quantistica: base della fisica delle particelle, della fisica nucleare e atomica, della fisica della materia condensata e della struttura della materia,



Tutte le cose che sappiamo spiegare/descrivere/controllare

Relativita' Generale: base della astronomia, della astrofisica e della cosmologia moderne

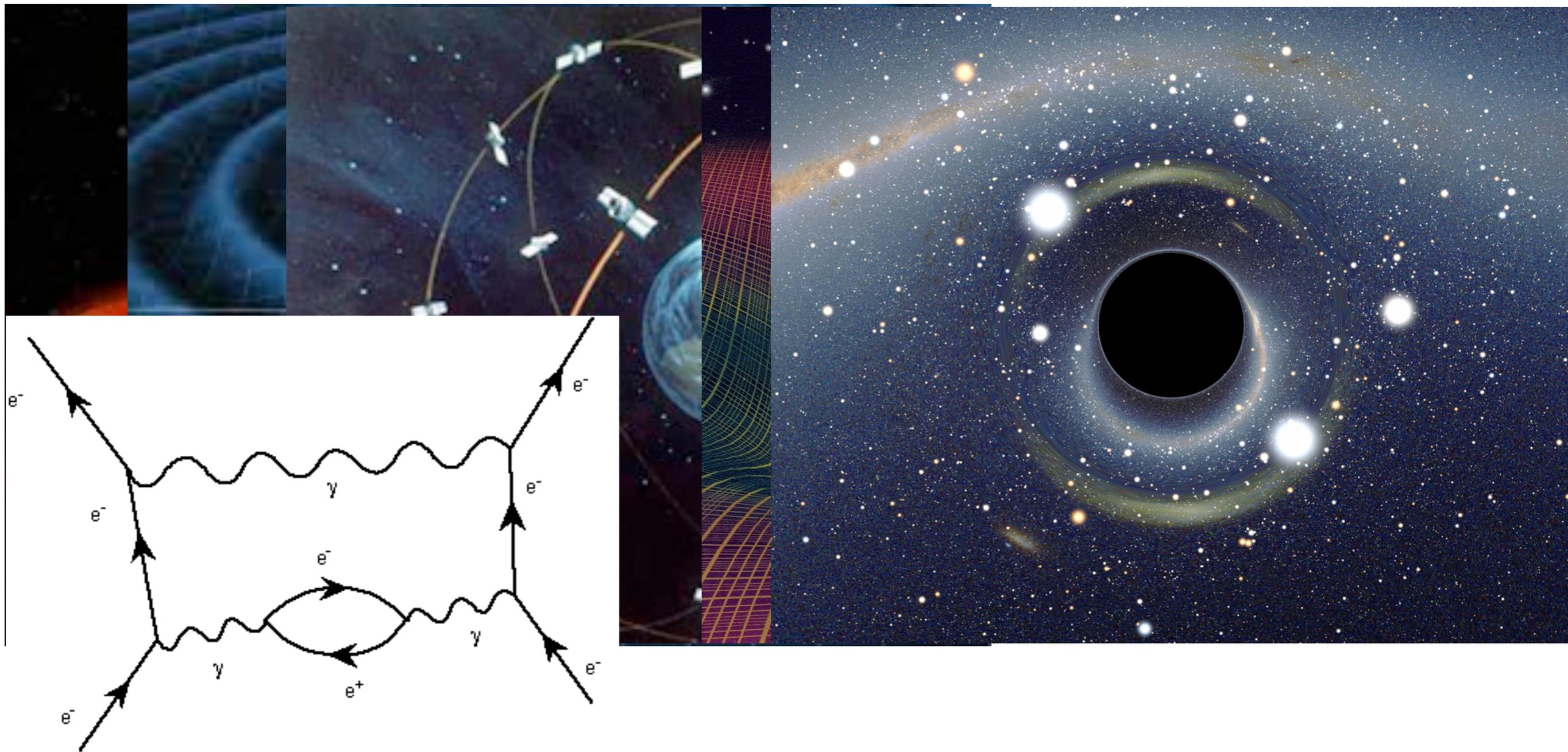
Meccanica Quantistica: base della fisica delle particelle, della fisica nucleare e atomica, della fisica della materia condensata e della struttura della materia,



Tutte le cose che sappiamo spiegare/descrivere/controllare

Relatività Generale: base della astronomia, della astrofisica e della cosmologia moderne

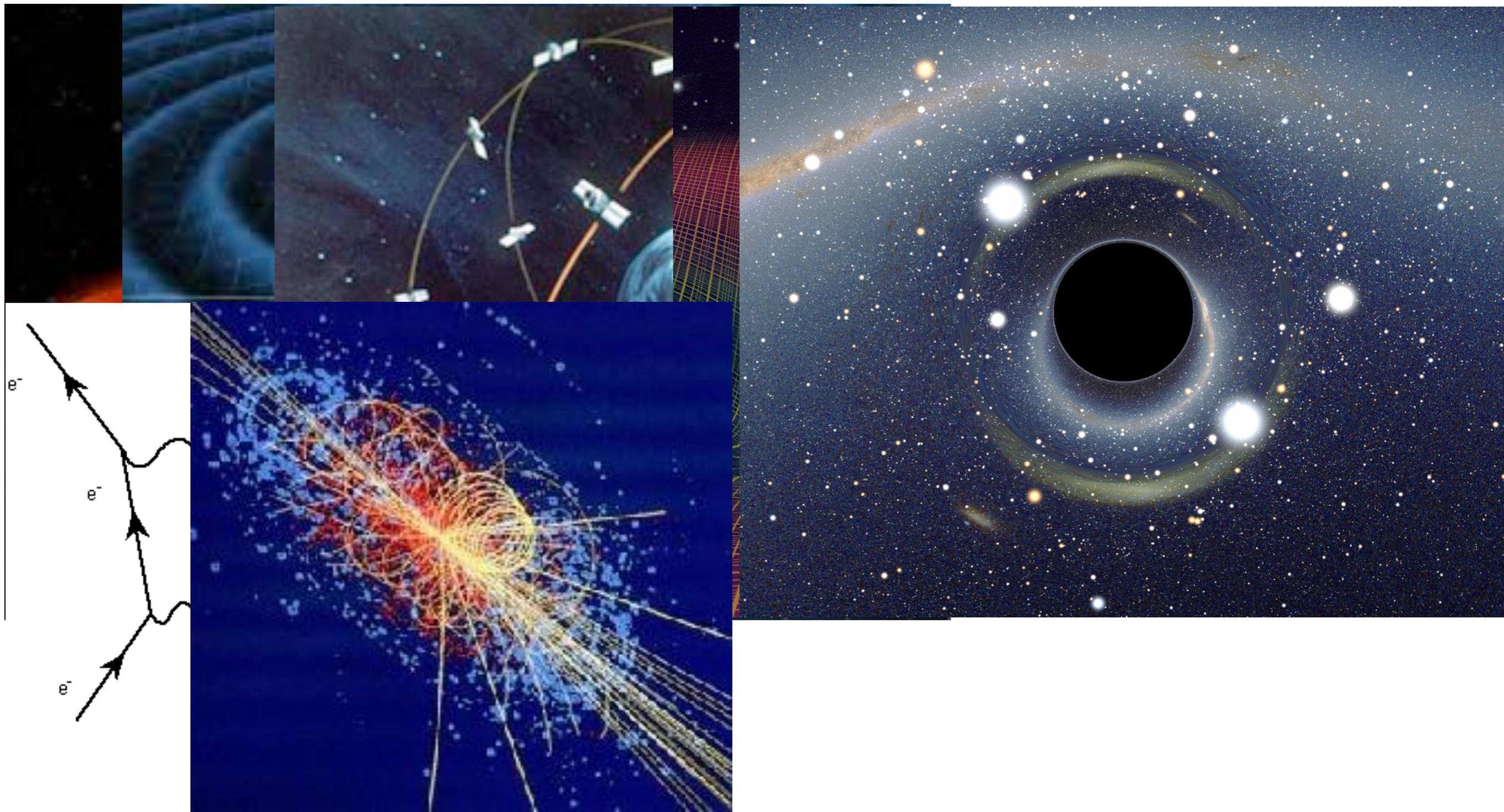
Meccanica Quantistica: base della fisica delle particelle, della fisica nucleare e atomica, della fisica della materia condensata e della struttura della materia,



Tutte le cose che sappiamo spiegare/descrivere/controllare

Relativita' Generale: base della astronomia, della astrofisica e della cosmologia moderne

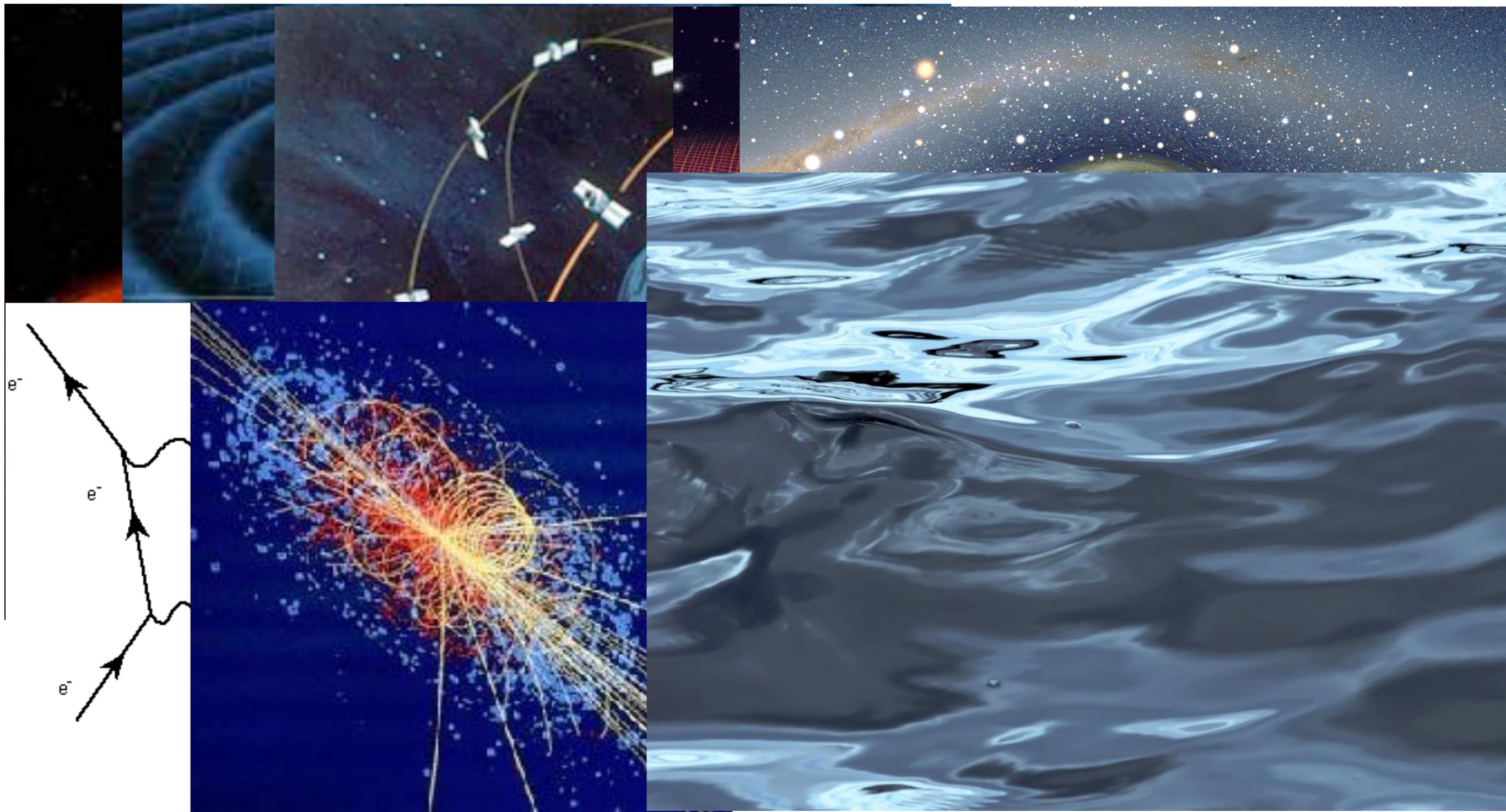
Meccanica Quantistica: base della fisica delle particelle, della fisica nucleare e atomica, della fisica della materia condensata e della struttura della materia,



Tutte le cose che sappiamo spiegare/descrivere/controllare

Relativita' Generale: base della astronomia, della astrofisica e della cosmologia moderne

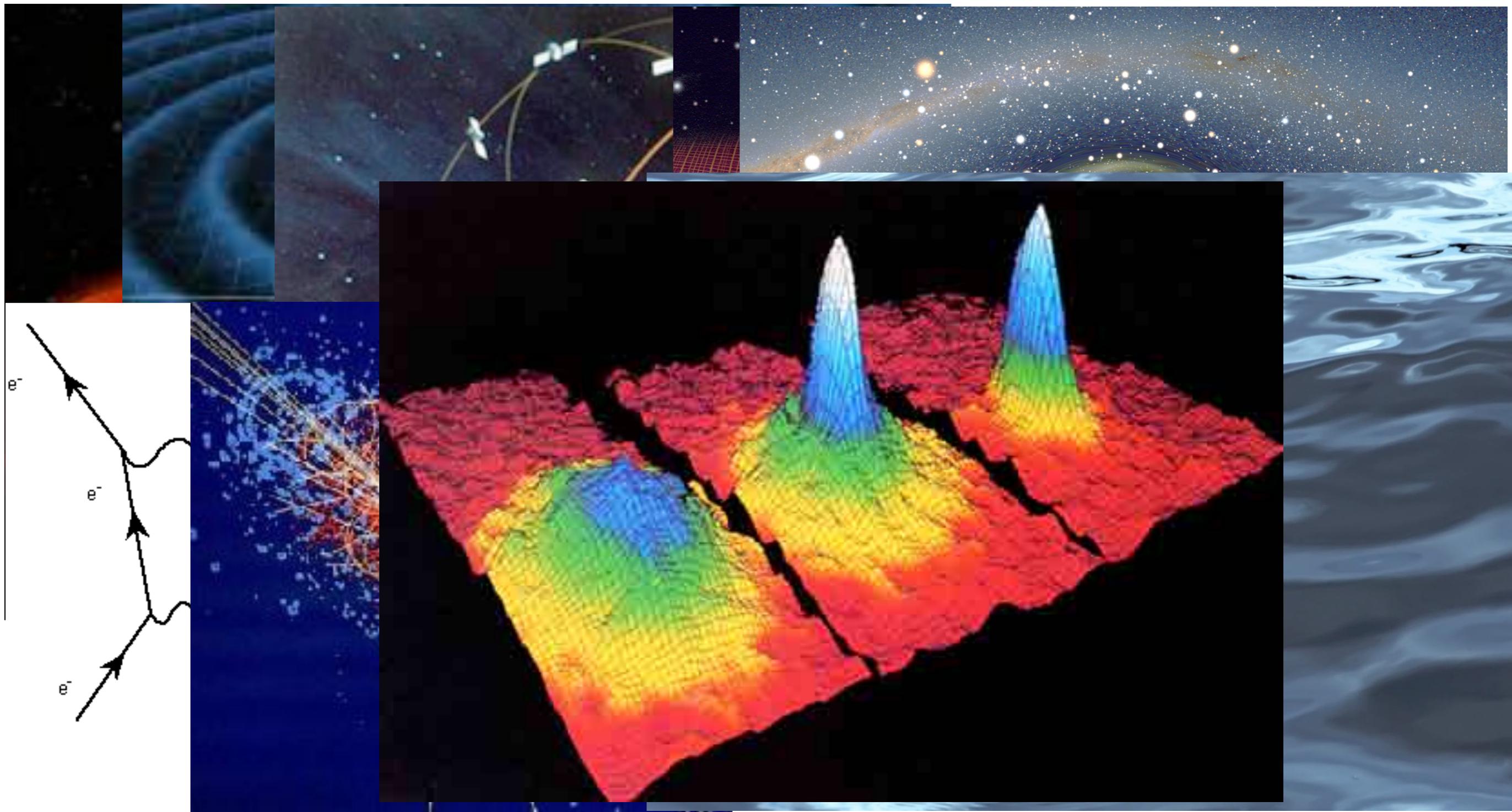
Meccanica Quantistica: base della fisica delle particelle, della fisica nucleare e atomica, della fisica della materia condensata e della struttura della materia,



Tutte le cose che sappiamo spiegare/descrivere/controllare

Relativita' Generale: base della astronomia, della astrofisica e della cosmologia moderne

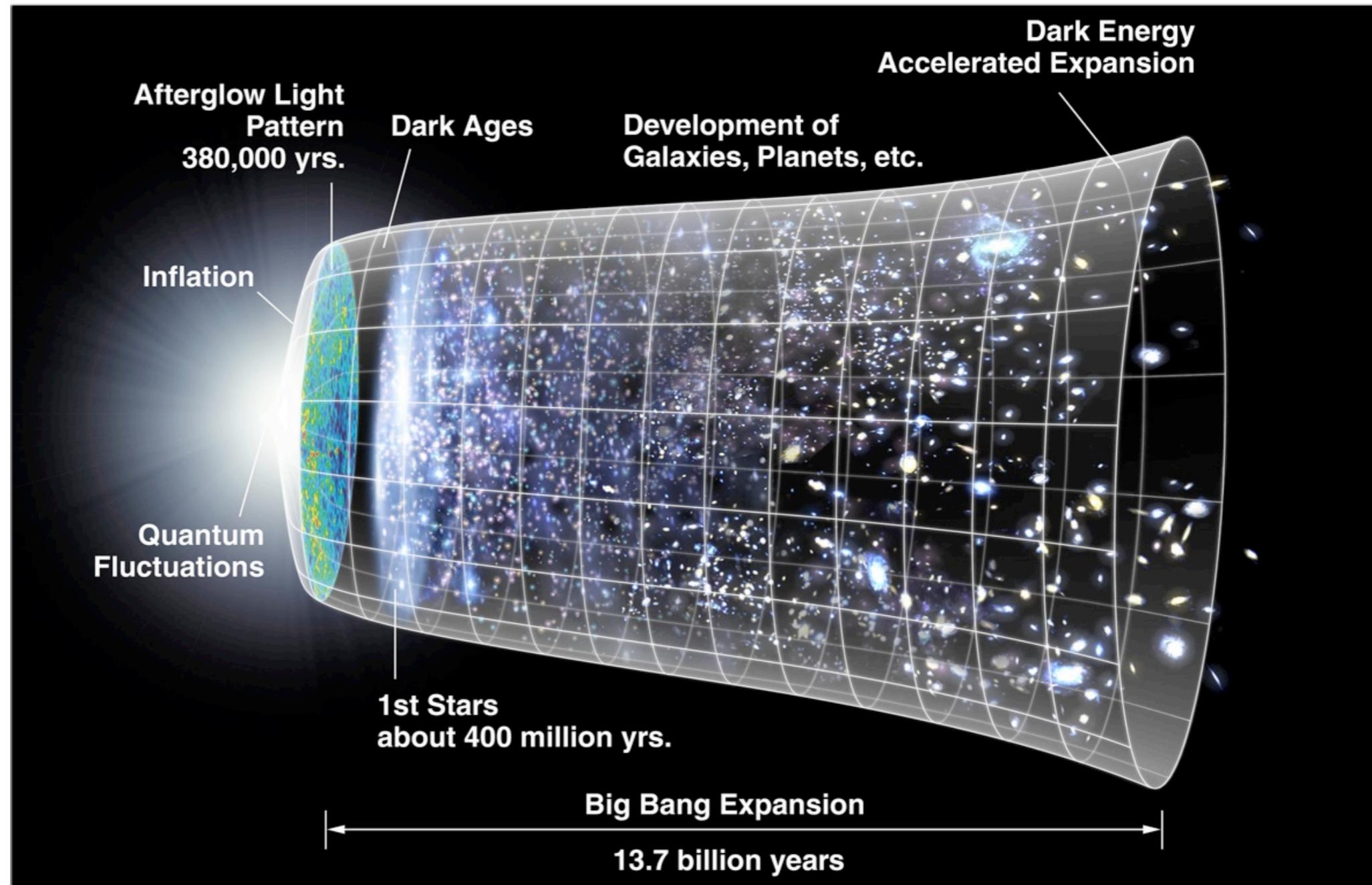
Meccanica Quantistica: base della fisica delle particelle, della fisica nucleare e atomica, della fisica della materia condensata e della struttura della materia,



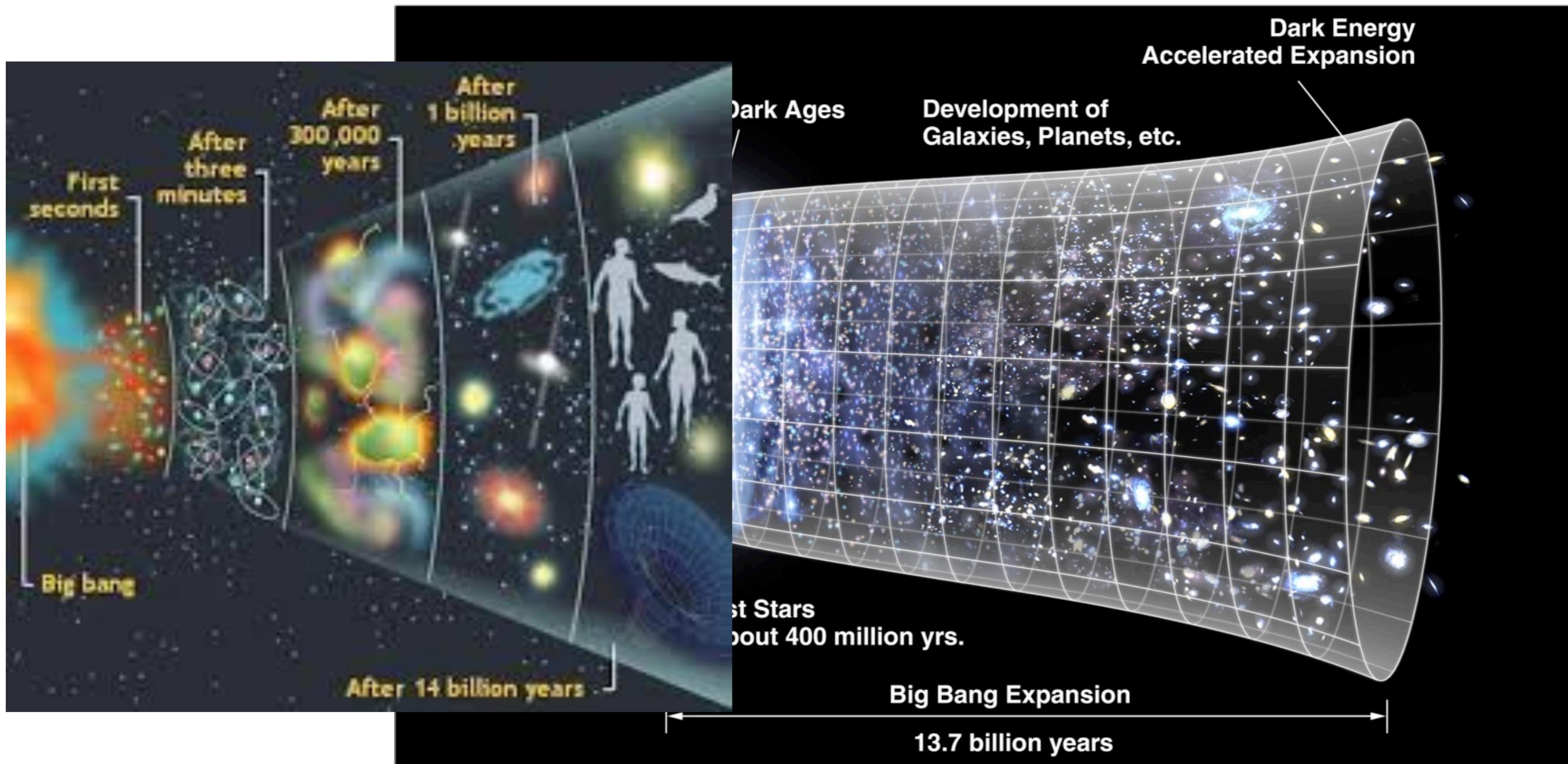
(pausa di apprezzamento orgoglioso)

l'evoluzione dell'universo (e di ciò che contiene, compresa l'origine delle strutture cosmiche)

l'evoluzione dell'universo (e di cio' che contiene, compresa l'origine delle strutture cosmiche)



l'evoluzione dell'universo (e di cio' che contiene, compresa l'origine delle strutture cosmiche)



(pausa di meraviglia incredula)

Cosa non sappiamo del mondo

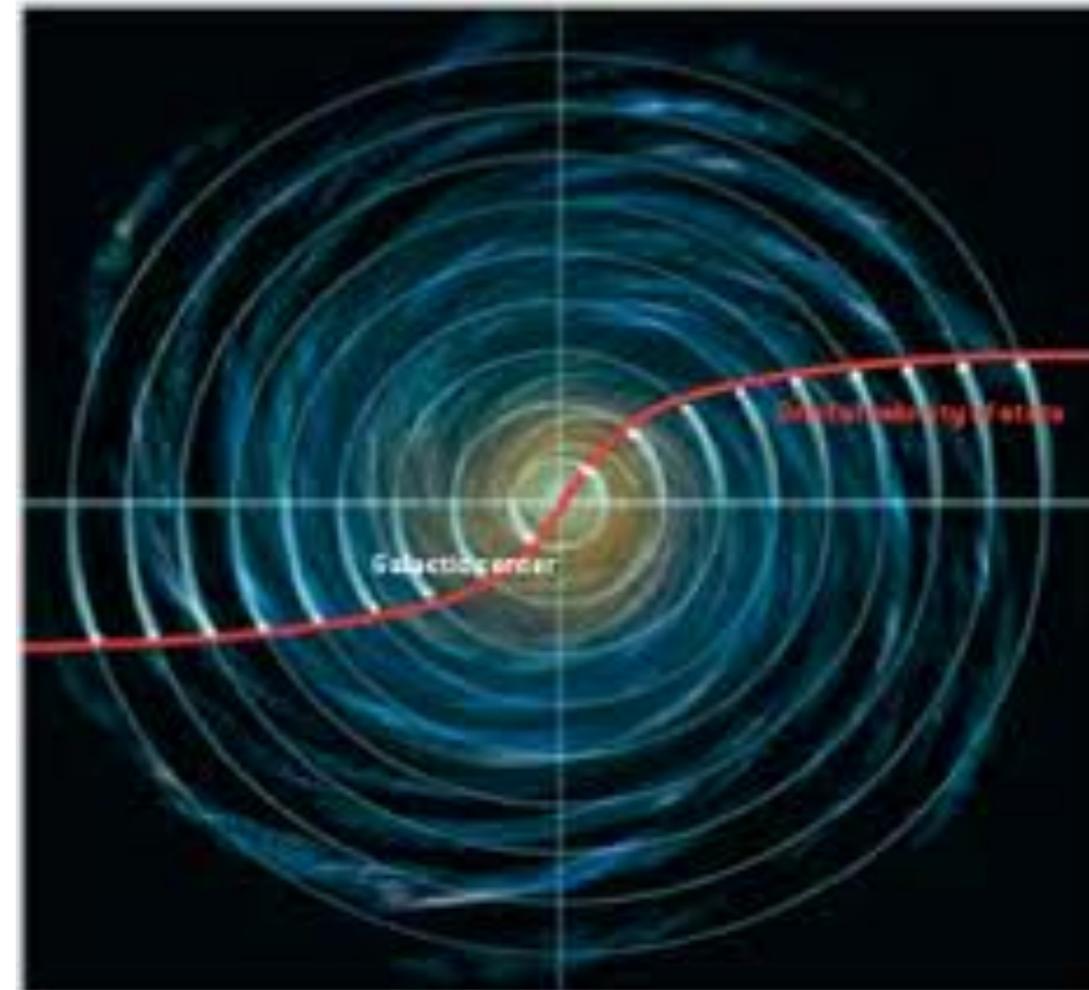
(per cio' che riguarda la Gravita' Quantistica)

Cosa non sappiamo

..... moltissime cose

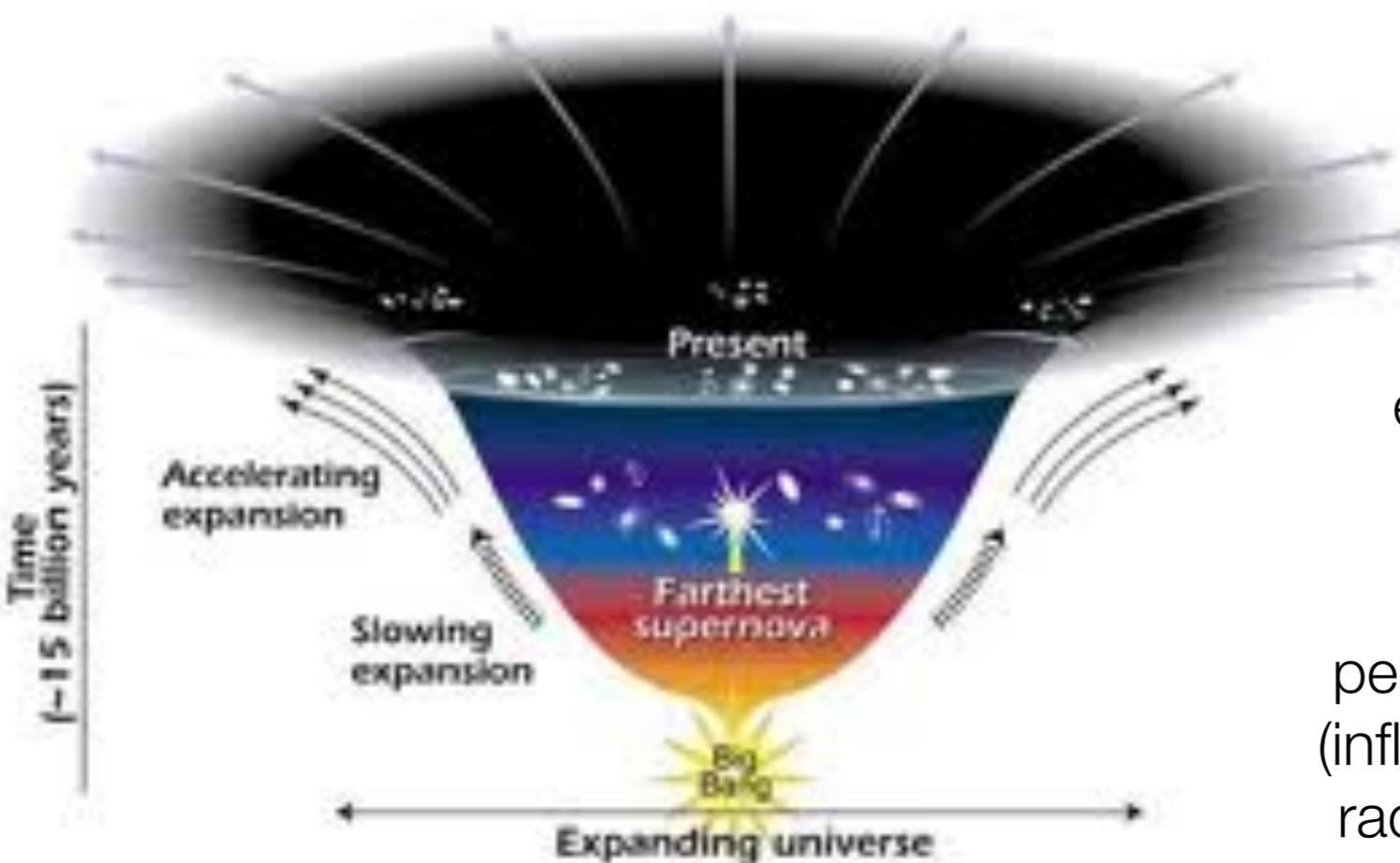
alcune direttamente "visibili"

materia oscura? modifiche della gravita' su scala galattica?



energia oscura? perche' l'universo accelera la sua espansione? cosa e' la costante cosmologica?

perche' l'espansione accelerata originaria (inflazione)? oppure, come altro spiegare la radiazione di fondo cosmica primordiale?



Cosa non sappiamo

..... molte cose

alcune direttamente “visibili”

..... molte altre non direttamente osservabili (non ancora, almeno), ma non meno reali o pressanti

ad esempio, cosa succede al Big Bang, o dentro i buchi neri

(pausa di delusione)

(NO! pausa di eccitazione ottimista!)

Cosa non sappiamo

..... molte cose

alcune direttamente “visibili”

..... molte altre non direttamente osservabili (non ancora, almeno), ma non meno reali o pressanti

ad esempio, cosa succede al Big Bang, o dentro i buchi neri

queste sono le ragioni della ricerca di una

Teoria quantistica della gravitazione e dello spaziotempo

La Gravita' Quantistica

Il problema della Gravita' Quantistica: concettuale

una immagine del mondo schizofrenica, due quadri concettuali in contraddizione

riguardo lo spazio e il tempo, riguardo la geometria, e riguardo la natura della materia

RG

lo spaziotempo e' un sistema fisico e dinamico in se'

non esiste nessuna direzione spaziale o temporale privilegiata

i sistemi fisici sono localizzati e interagiscono localmente

tutto (pure lo spaziotempo) evolve in modo deterministico

i campi (e lo spaziotempo) sono sistemi continui

ogni proprieta' fisica dei sistemi fisici (compreso lo spaziotempo) e delle loro interazioni puo' essere determinato esattamente, in linea di principio

MQ

lo spaziotempo e' un sostrato fisso e assoluto

l'evoluzione dei campi e' unitaria (le probabilita' si conservano) in una data direzione temporale

niente puo' essere localizzato esattamente

tutto evolve in maniera probabilistica

i campi di interazione e di materia sono fatti di costituenti elementari (quanti) discreti

ogni quantita' fisica e' intrinsecamente indeterminata nelle sue proprieta' fisiche, in generale

cos'e', quindi, lo spazio? cos'e' il tempo? cosa e', veramente, la gravita'? cosa e' la materia?

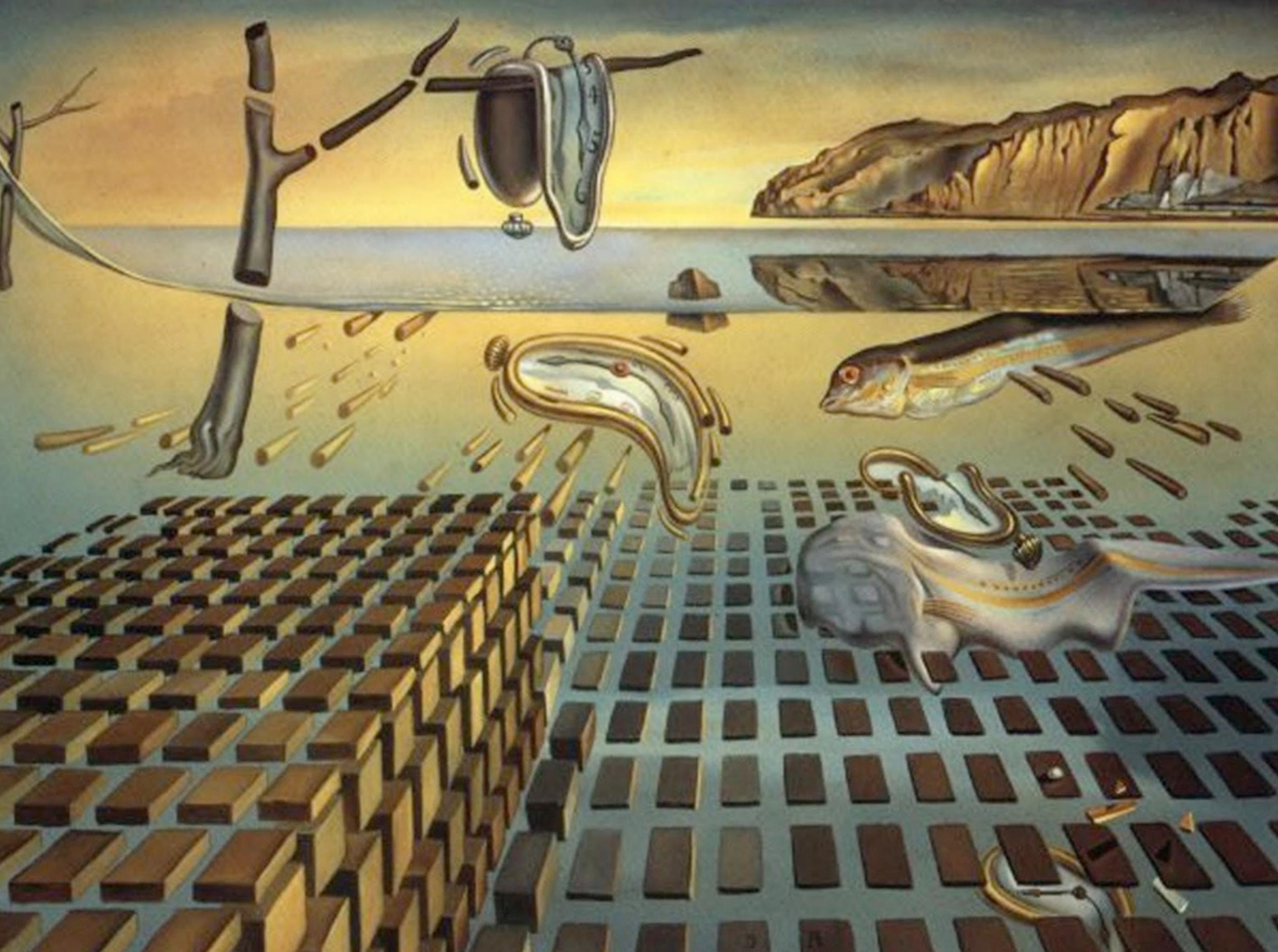
Gravita' Quantistica:

una comprensione piu' profonda della natura
dello spazio e del tempo

Gravita' Quantistica:

una comprensione piu' profonda della natura
dello spazio e del tempo

dobbiamo imparare a "pensare" piu' in profondita' alla natura
di spazio e tempo, quindi dobbiamo imparare a
pensare il mondo senza (assumere) lo spazio e il tempo



Il problema della Gravita' Quantistica: fisica

un numero di problemi fisici aperti, subito oltre i limiti di GR e QFT, o dove entrambe sono rilevanti

- singolarita' spaziotemporali in GR, per densita' e curvature elevate; cosa succede (e' successo) veramente al big bang? cosa c'e' dentro i buchi neri?
- vicino al big bang, a grande curvatura ed energie, come viene modificata la QFT? su cosa si basa (o cosa rimpiazza) l'inflazione?
- cosa origina la costante cosmologica, causando l'espansione accelerata che osserviamo?
- divergenze nella dinamica quantistica dei campi; cosa succede veramente ad alte energie?
- termodinamica dei buchi neri; entropia, quindi microstruttura, dello spazio stesso?
- le fluttuazioni dei campi di materia/interazione inducono fluttuazioni della geometria; come descriverle? portano anche a fluttuazioni della topologia?

Gravita' Quantistica: dove aspettarsela?

a che scala di lunghezza/energia la Gravita' Quantistica e' rilevante/necessaria? "scala di Planck"

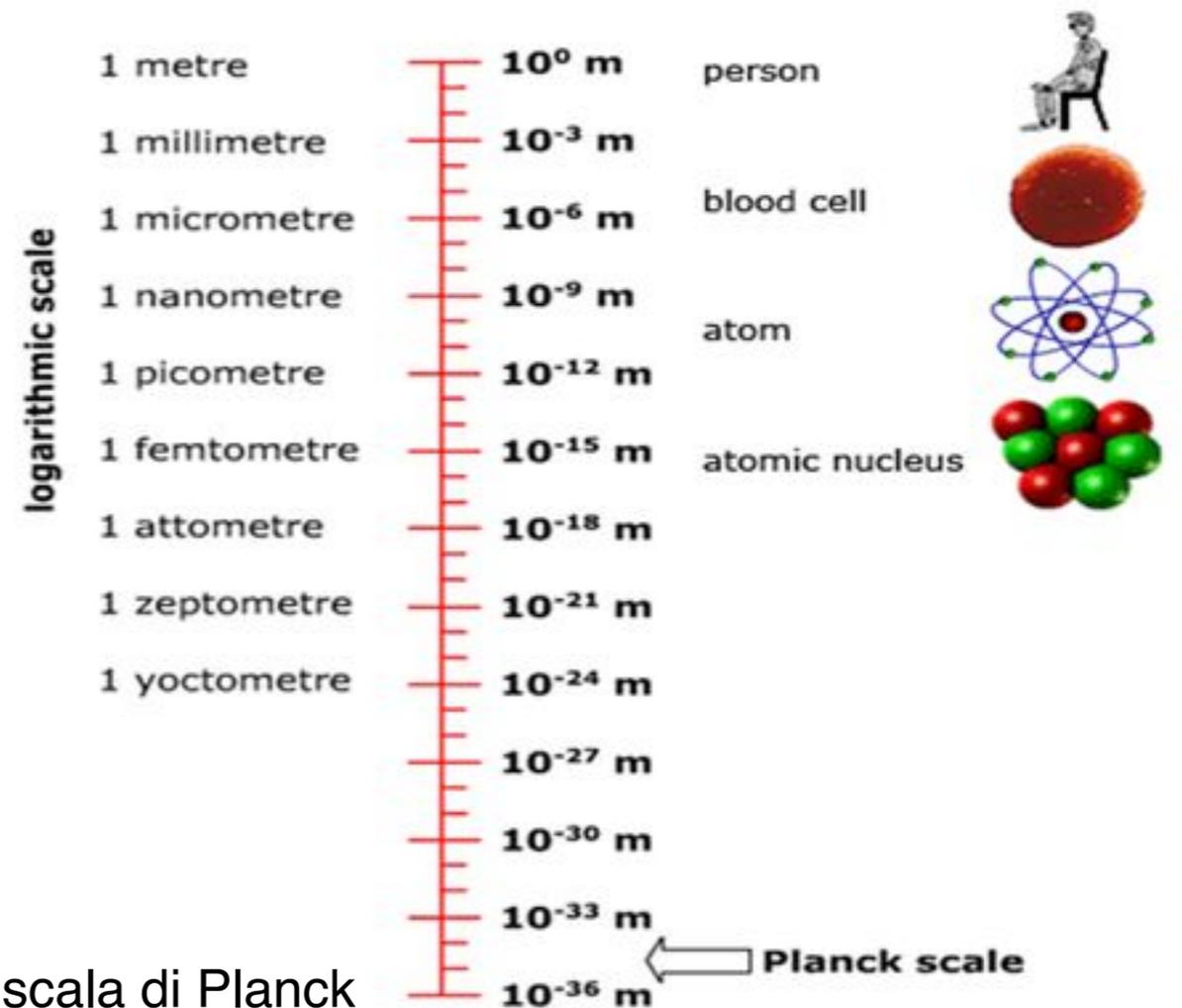
~ dove sono rilevanti sia la MQ che la RG

$$l = \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} = 3.99 \times 10^{-33} \text{ cm} = 3.99 \times 10^{-35} \text{ m},$$

$$m = \sqrt{\frac{ch}{G}} = 5.37 \times 10^{-5} \text{ g} = 5.37 \times 10^{-8} \text{ kg},$$

$$t = \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} = 1.33 \times 10^{-43} \text{ sec},$$

$$T = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{c^5 h}{G}} = 3.60 \times 10^{32} \text{ deg K}.$$



www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight

Gravita' Quantistica "copre" dalle scale cosmologiche alla scala di Planck e oltre (molto oltre cio' che e' osservato, e forse osservabile direttamente)

anche questo va preso con cautela - stima basata sulla fisica attuale

poi ci sono le questioni tecniche/matematiche

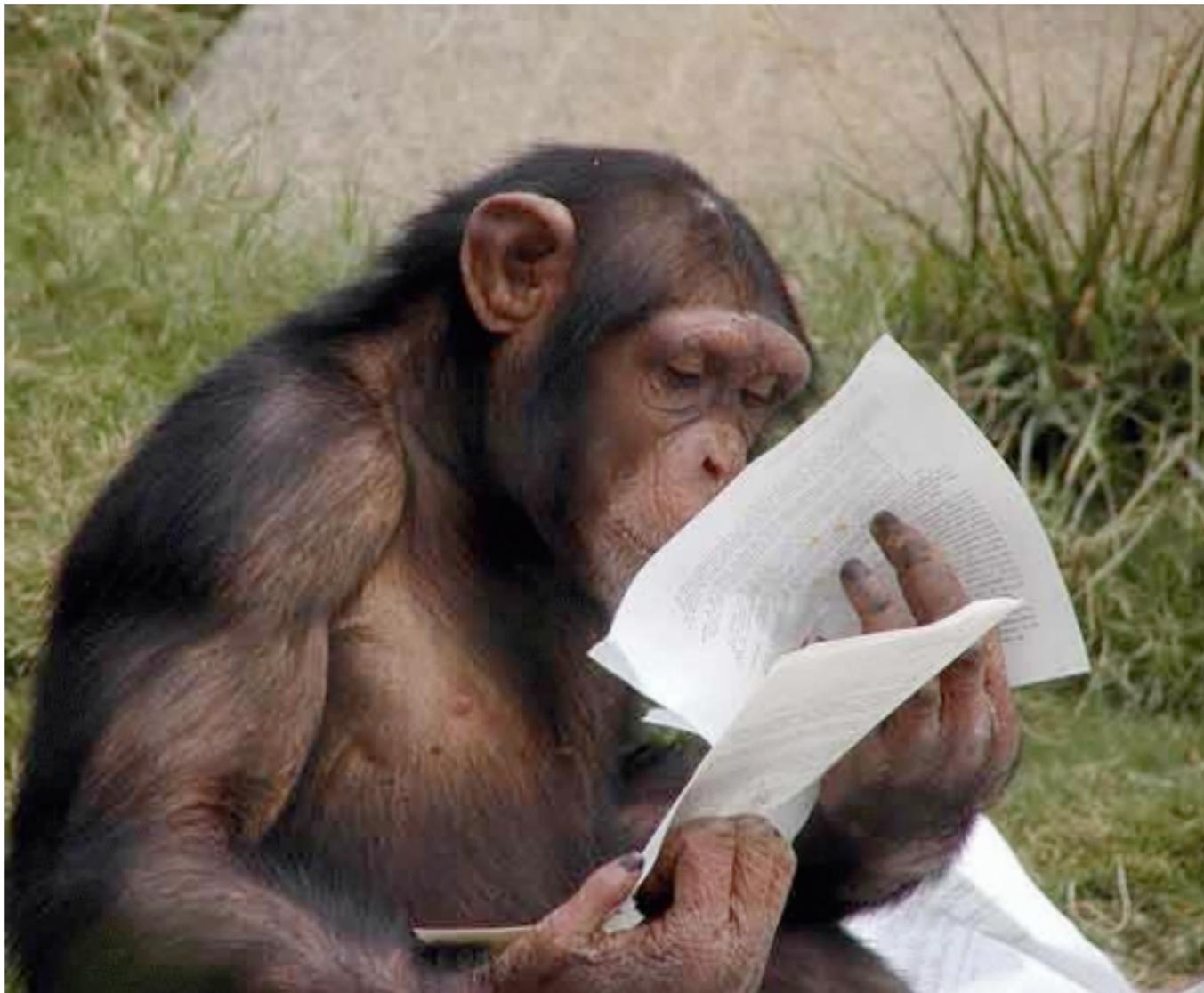
poi ci sono le questioni tecniche/matematiche

mettere assieme Relativita' Generale e Meccanica Quantistica
in un'unica teoriadal punto di vista tecnico-matematico

poi ci sono le questioni tecniche/matematiche

mettere assieme Relativita' Generale e Meccanica Quantistica
in un'unica teoriadal punto di vista tecnico-matematico

e' dannatamente complicato!



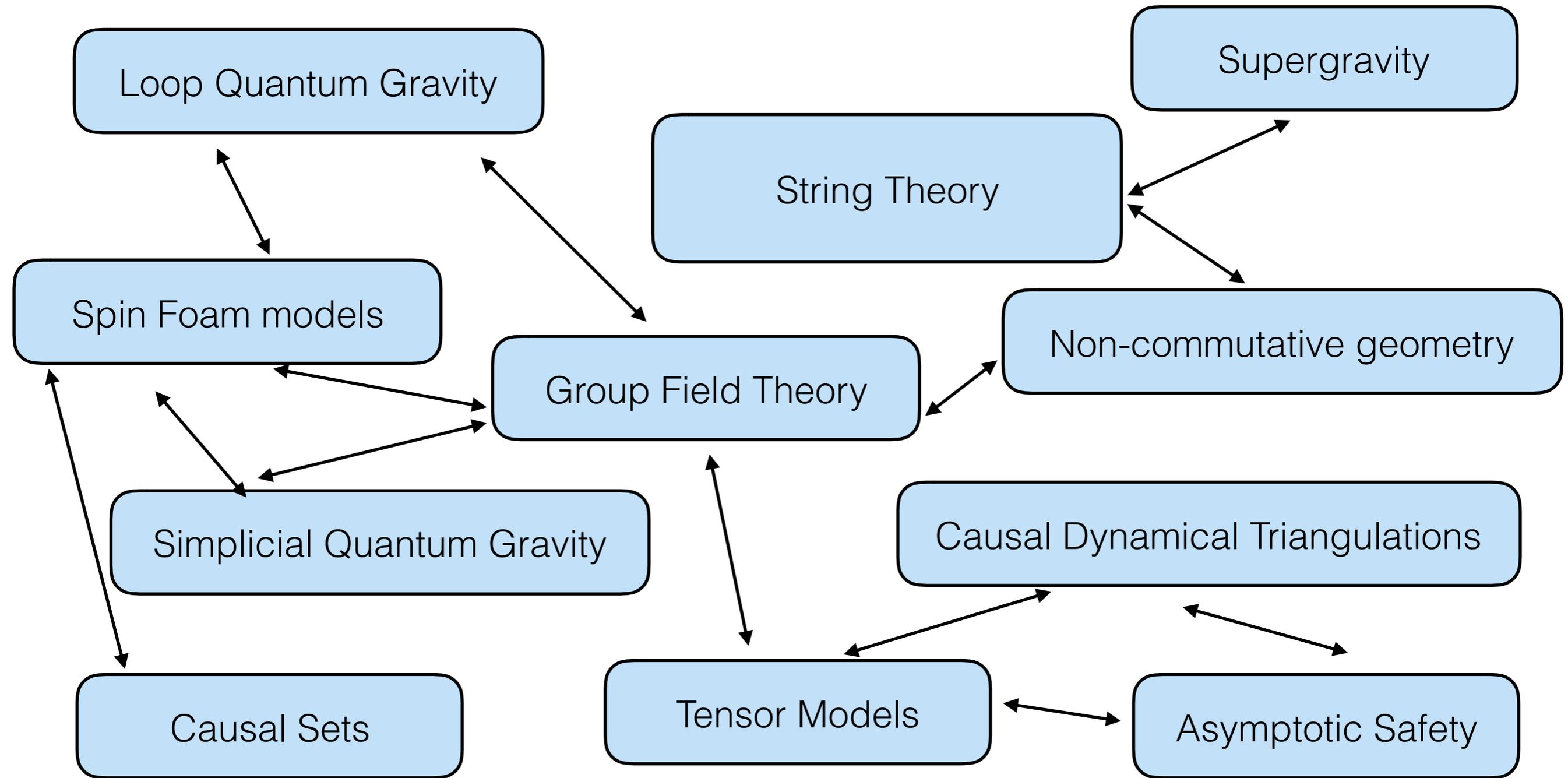
La Gravita' Quantistica:

molti approcci/formalismi diversi

e quindi immagini diverse del mondo, e suggerimenti
diversi sulla nuova fisica da scoprire.....

Gravita' Quantistica: approcci contemporanei

e una rete di relazioni e corrispondenze



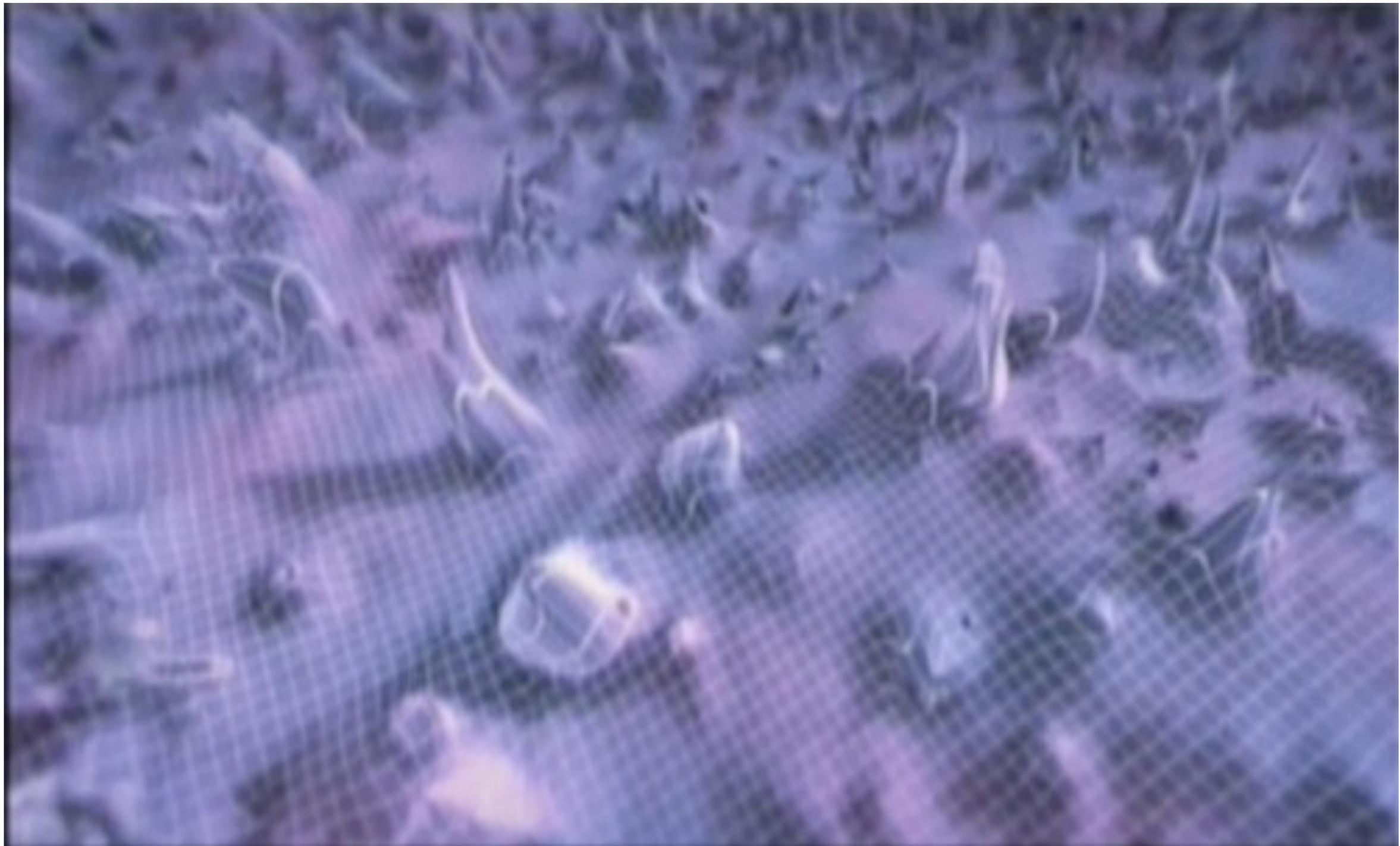
la diversita' e' ricchezza e potenzialita'!

La Gravita' Quantistica:

cosa ci aspettiamo succeda comunque, alla fine

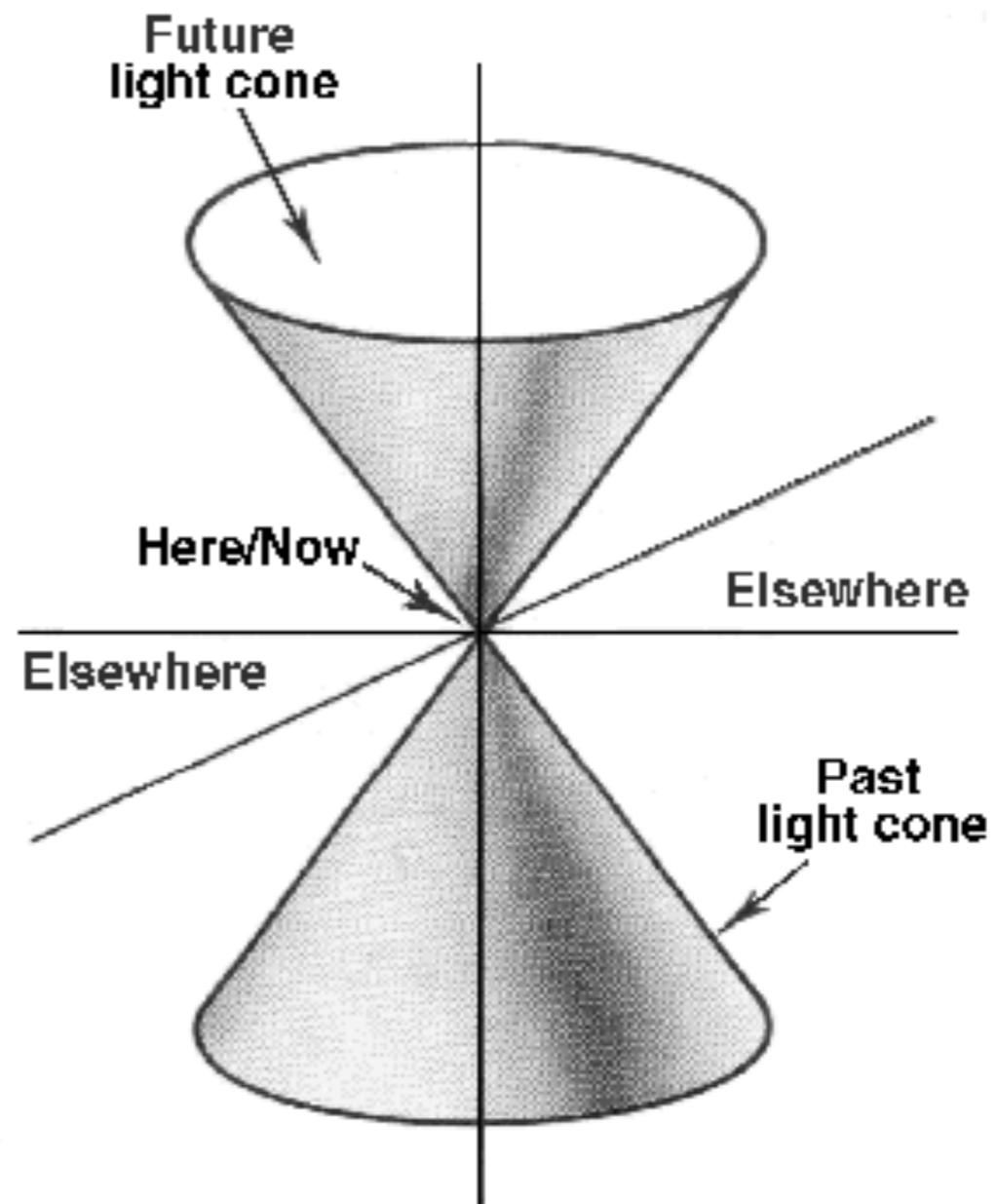
spazio, tempo e geometria “fluttuano” ed evolvono probabilisticamente

(quantita' geometriche (lunghezze, intervalli temporali, volumi,...) quantisticamente incerti)



spazio, tempo e geometria “fluttuano” ed evolvono probabilisticamente

la causalita' stessa fluttua



spazio, tempo e geometria “fluttuano” ed evolvono probabilisticamente

la causalita' stessa fluttua

quantita' geometriche (lunghezze, intervalli temporali, volumi,...) discrete

distanza minima? energia massima?



La Gravita' Quantistica:

alcune idee e risultati parziali

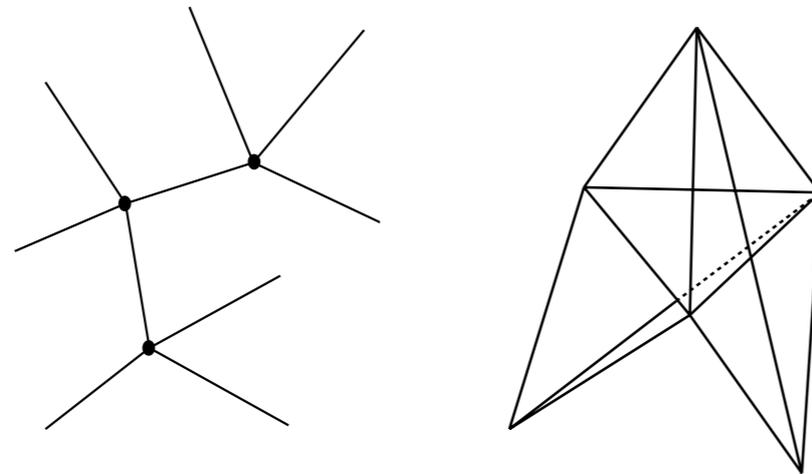
Spaziotempo come “sostanza” fatta di “costituenti” non-spaziotemporalì? atomi di spazio?



Spaziotempo come “sostanza” fatta di “costituenti” non-spaziotemporali? atomi di spazio?

esempio: in Loop Quantum Gravity e in Group Field Theory

lo spazio e' come una “sostanza” composta di costituenti elementari discreti e quantistici non descritti in termini geometrici (“**atomi di spazio**”)
rappresentabili graficamente come poliedri or come “reti”

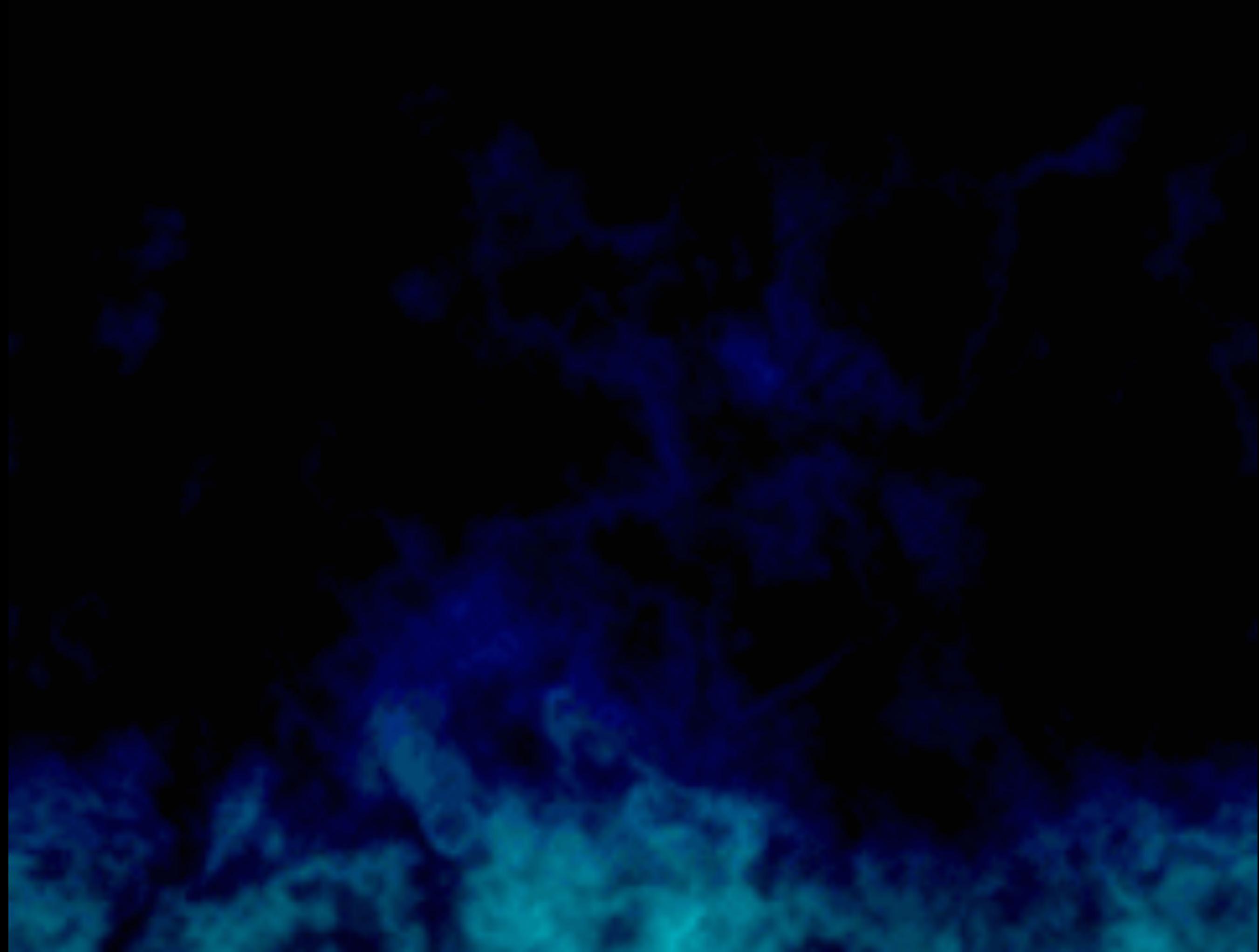


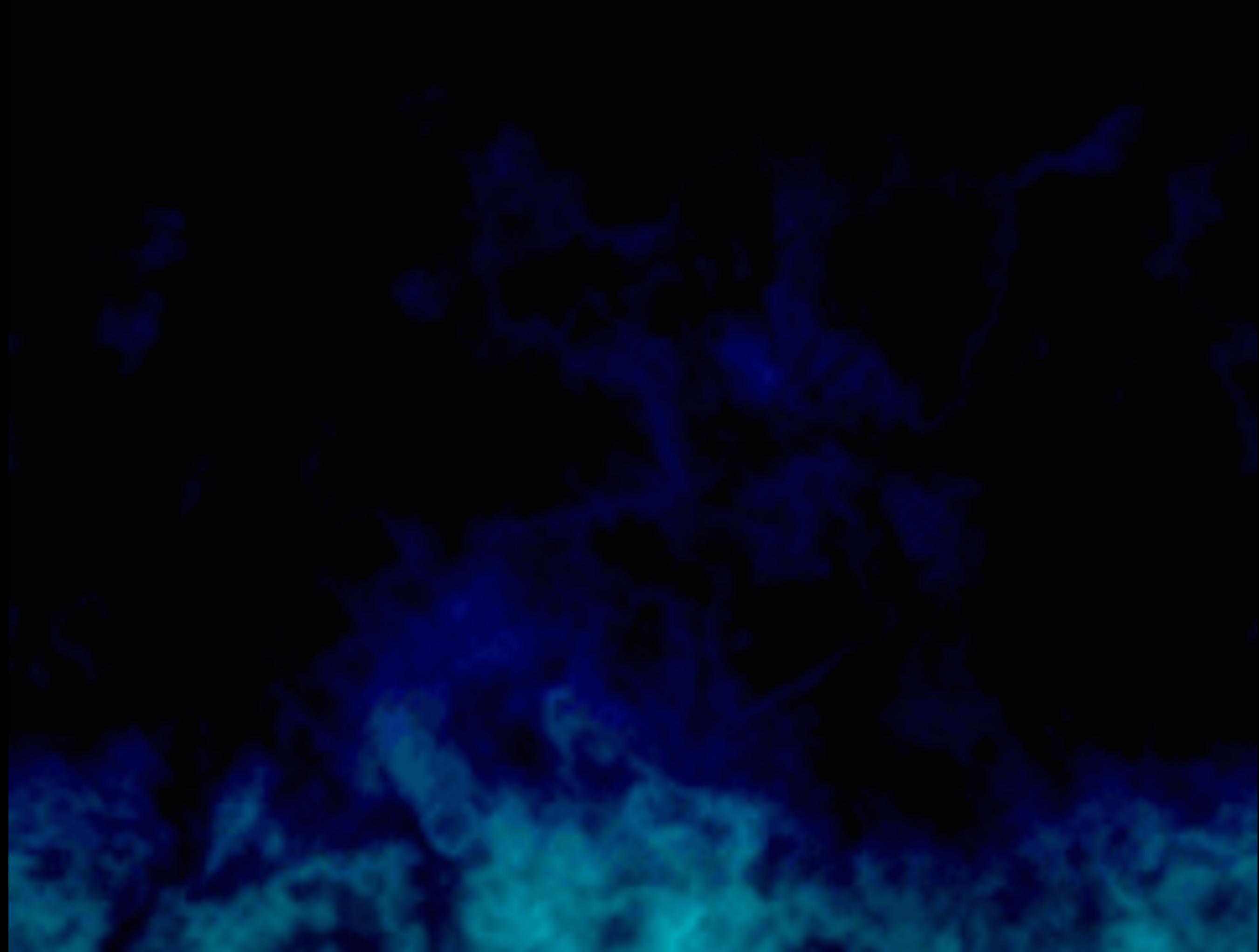
queste strutture fisiche “compongono lo spazio”, quindi non “si trovano” in nessuno spazio pre-esistente, non sono caratterizzati in termini spaziotemporali

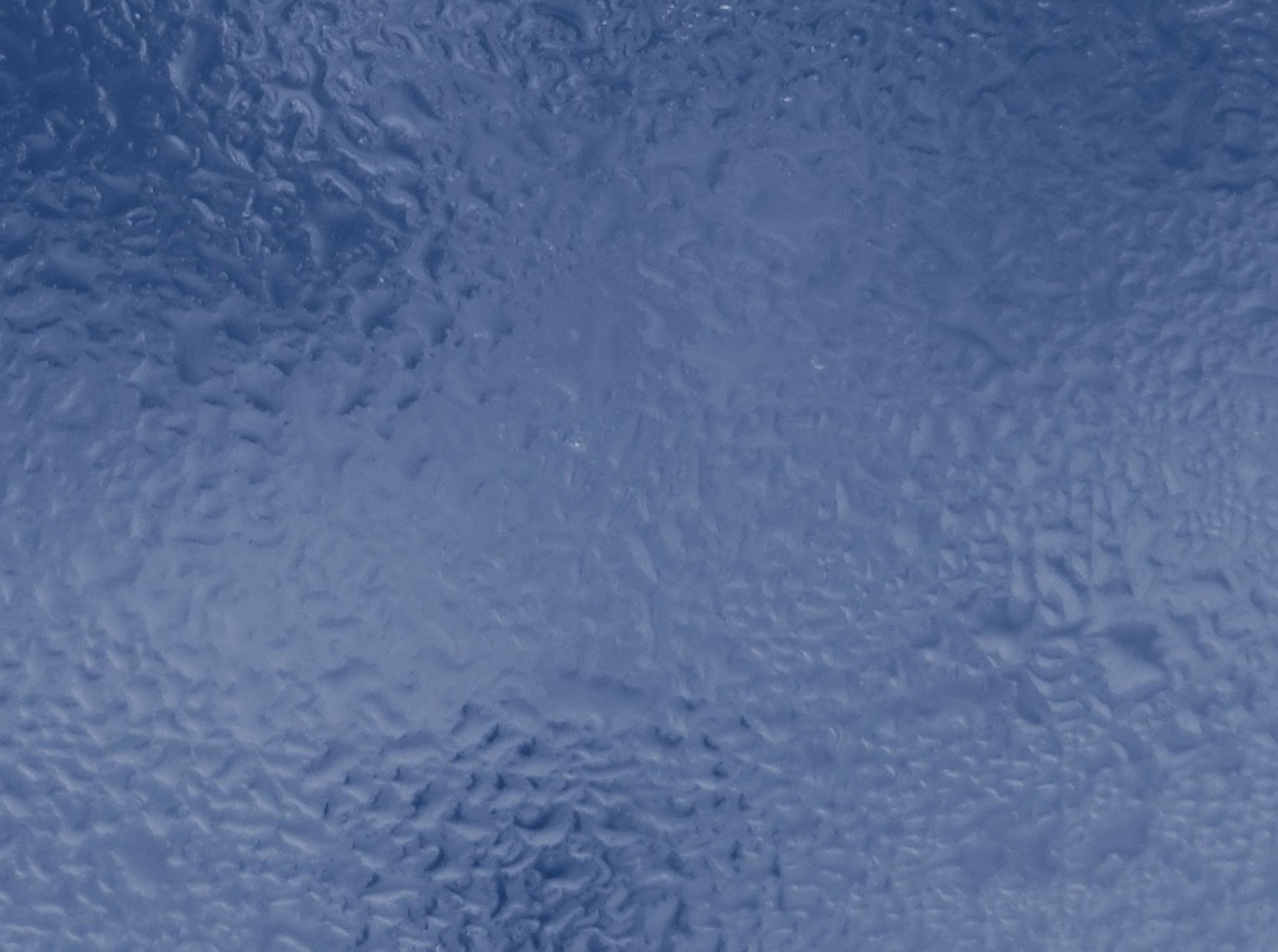
ma quindi come “emerge” lo spazio, a partire da questi costituenti elementari?

universo come un condensato di “atomi di spazio”

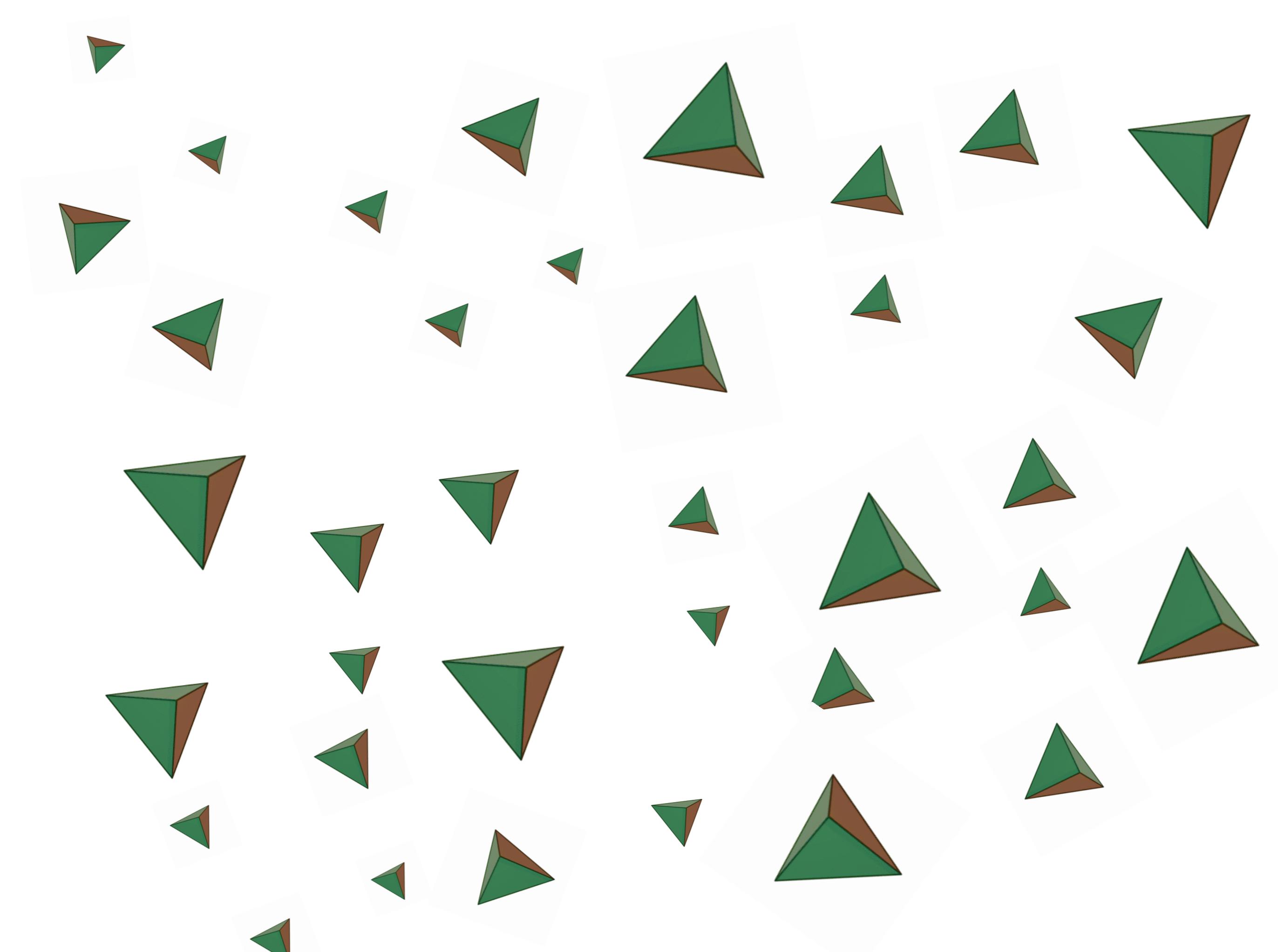
(in Loop Quantum Gravity e Group Field Theory)

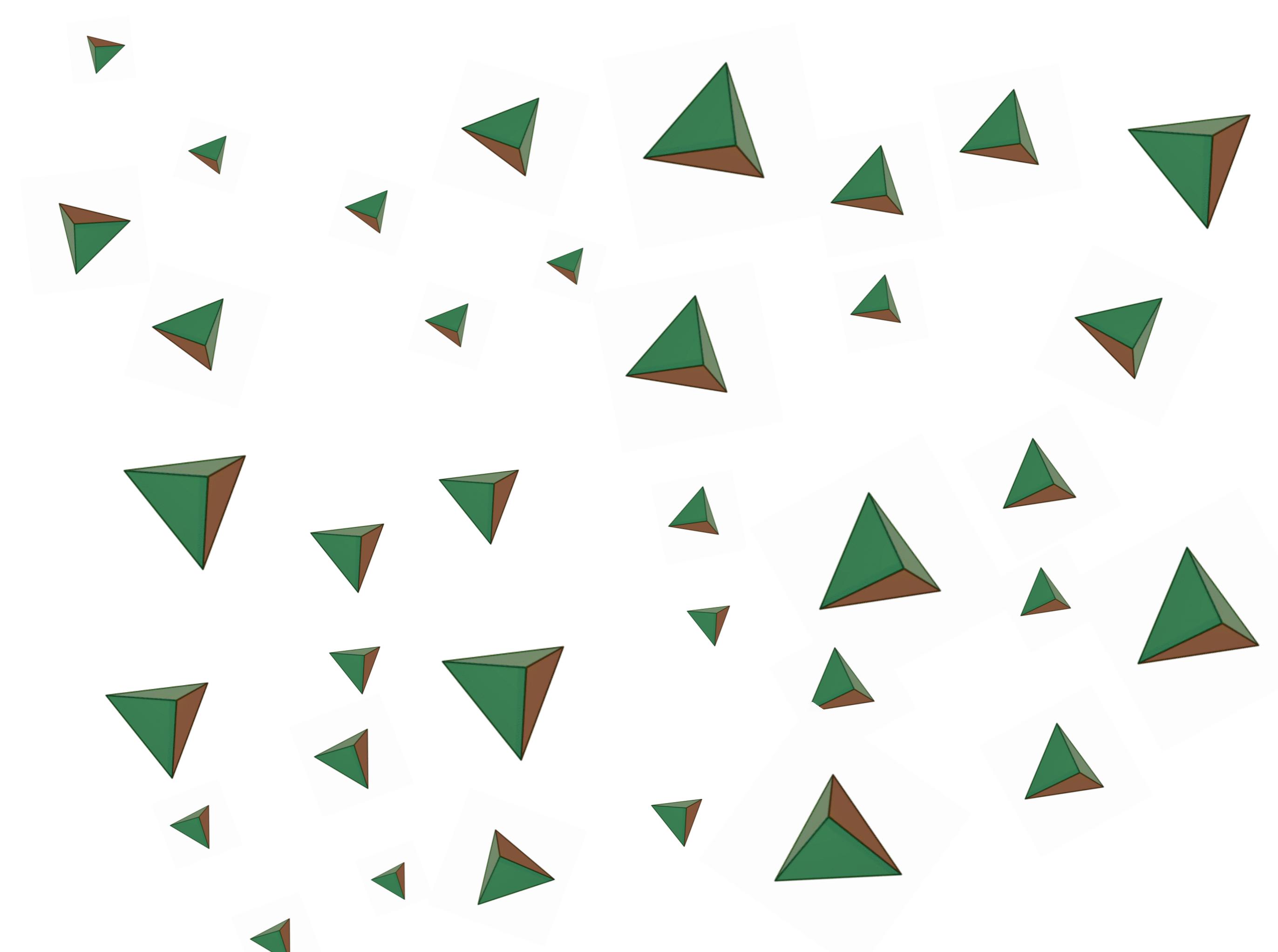


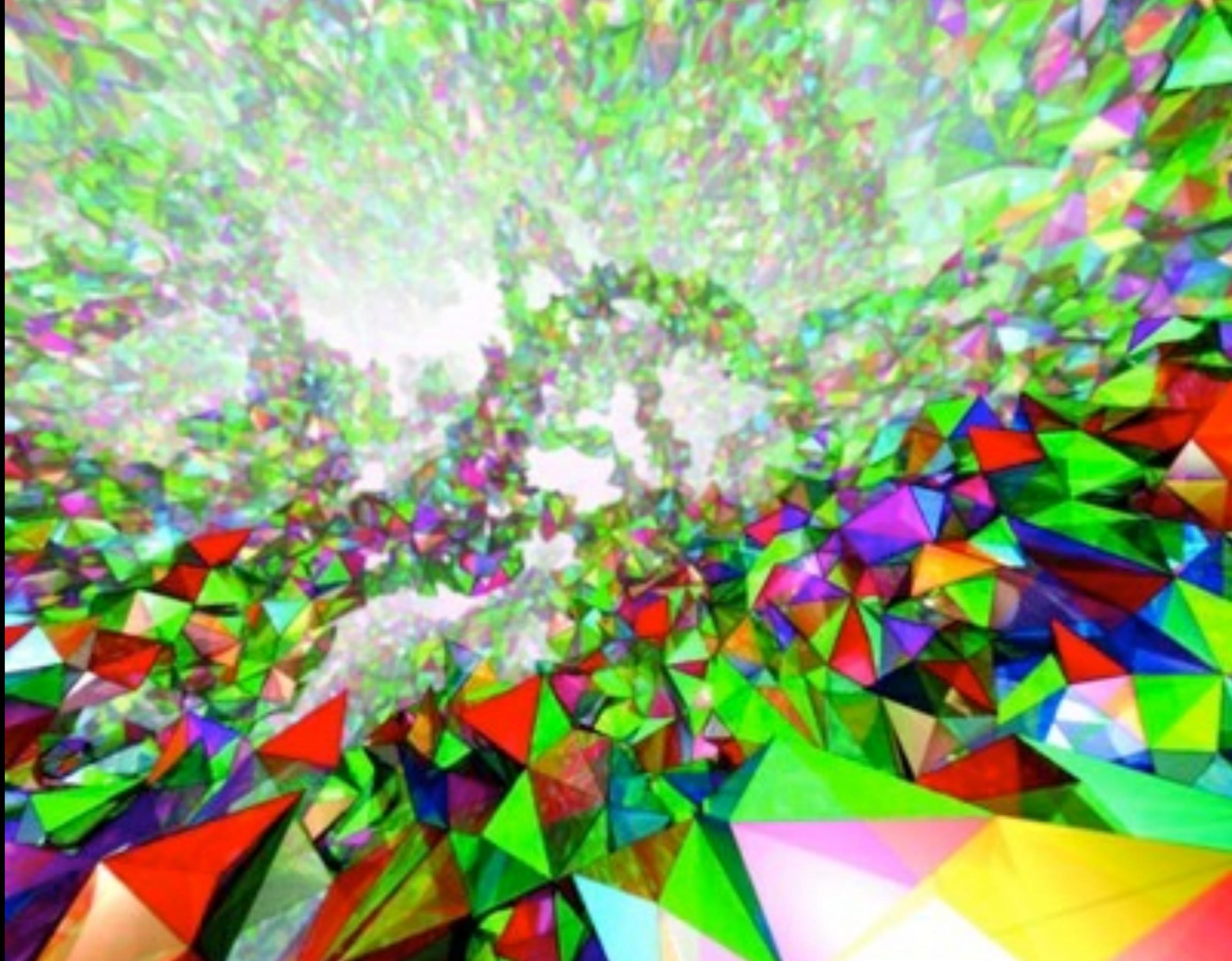


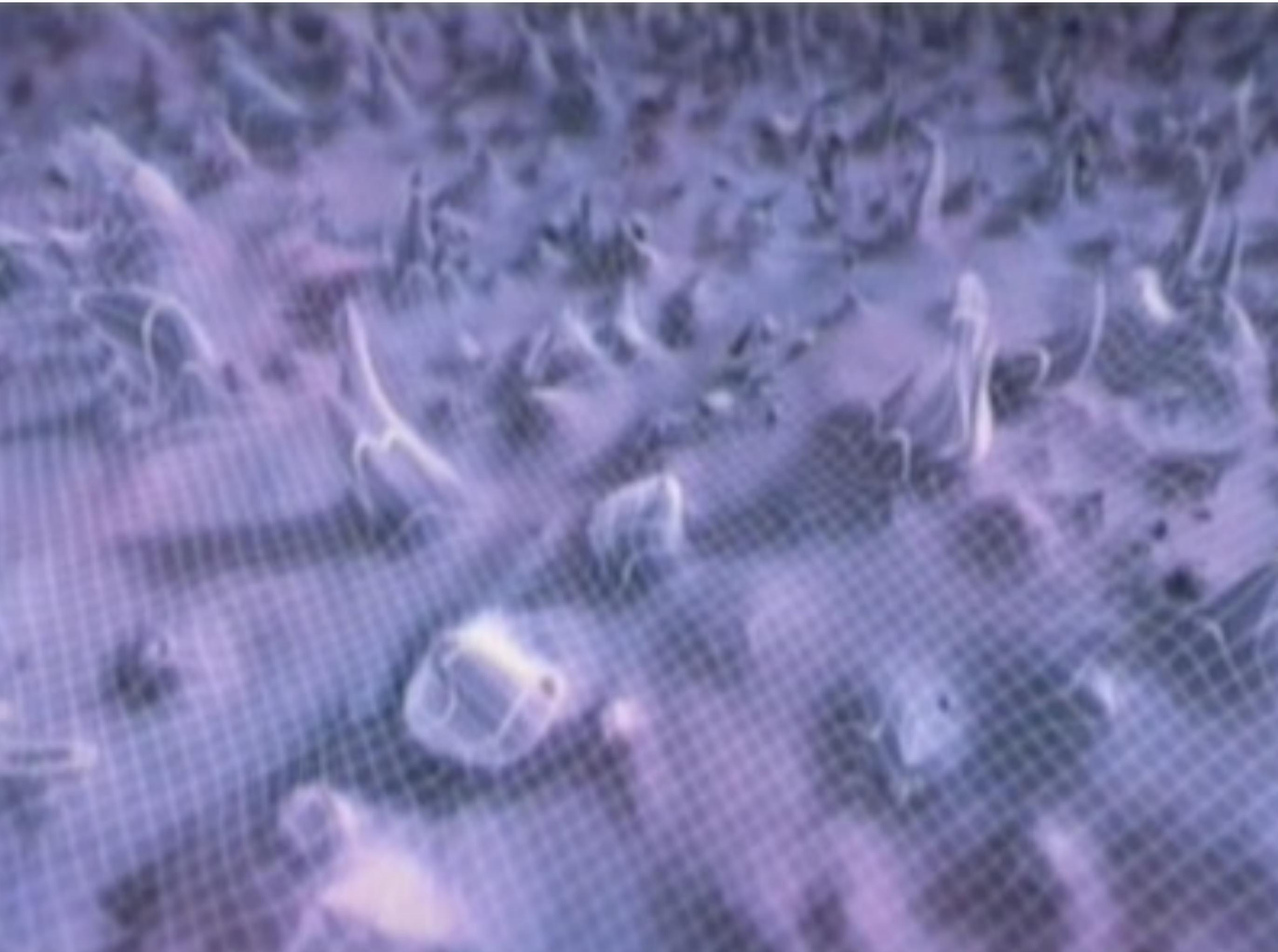


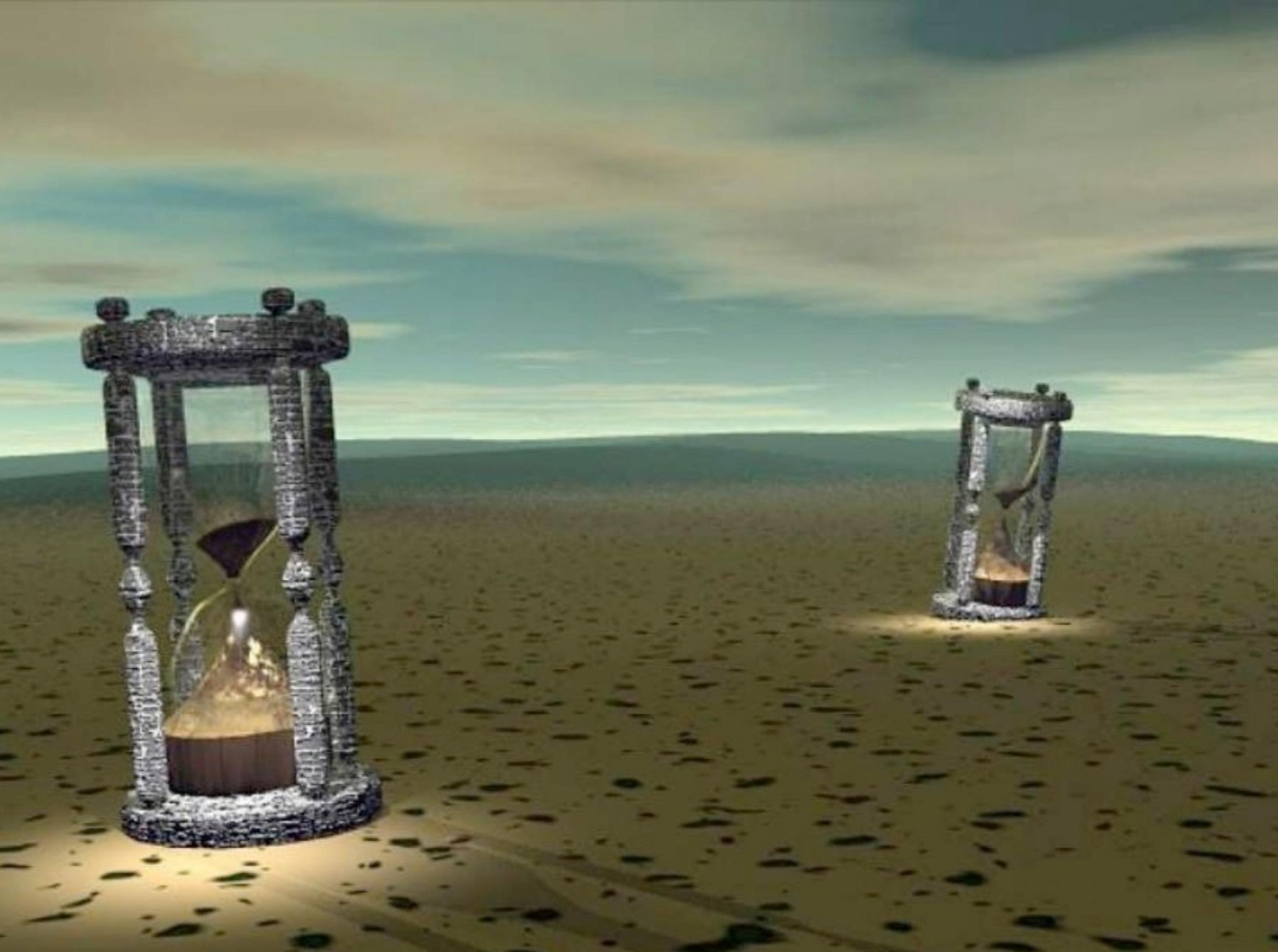












La Gravita' Quantistica:

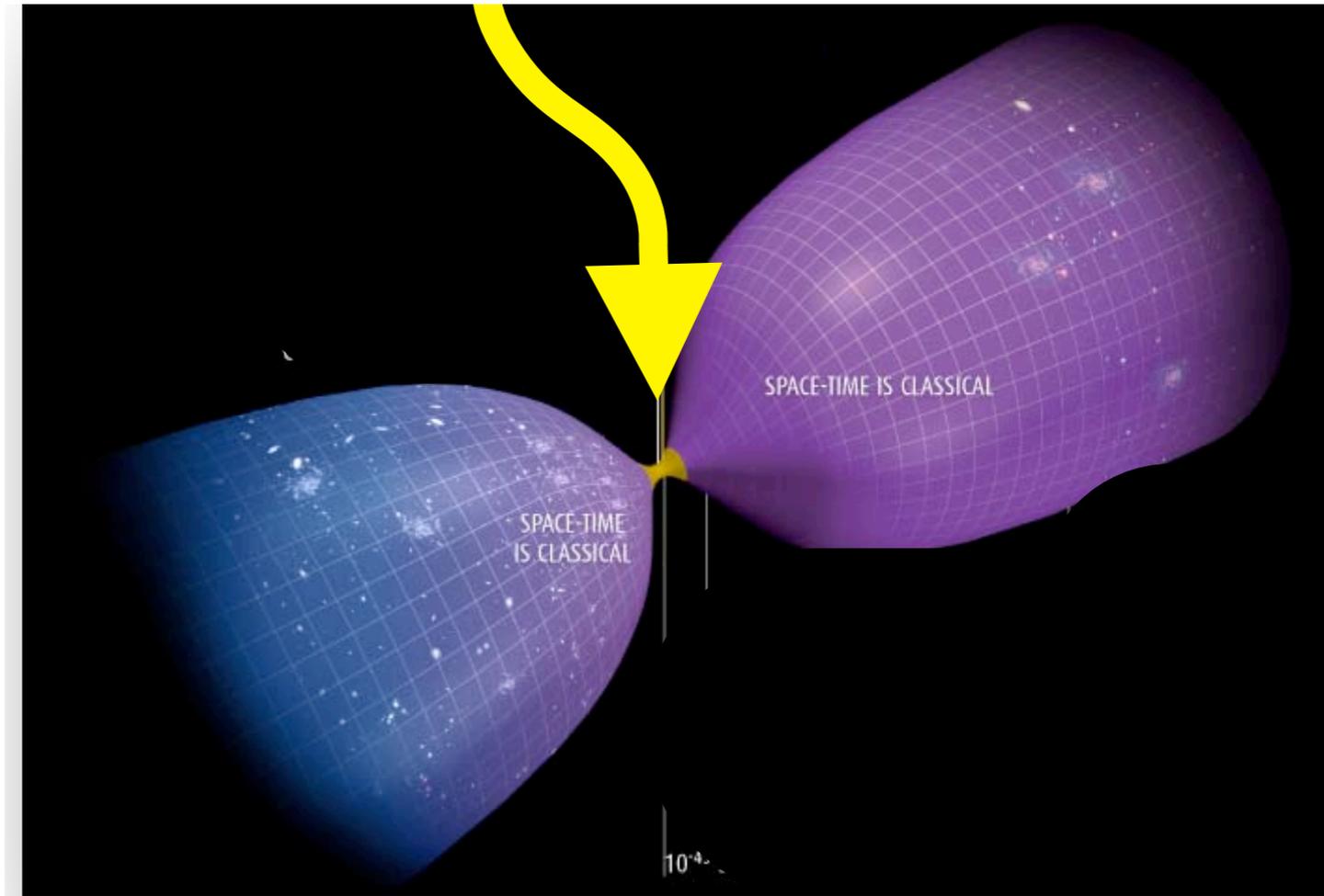
scenari cosmologici

cosa e' successo, davvero, al Big Bang?

cosa e' successo, davvero, al Big Bang?

Big Bounce al posto del Big Bang?

Loop Quantum Cosmology, String Cosmology,
Ekpyrotic Scenario,...



cosa e' successo, davvero, al Big Bang?

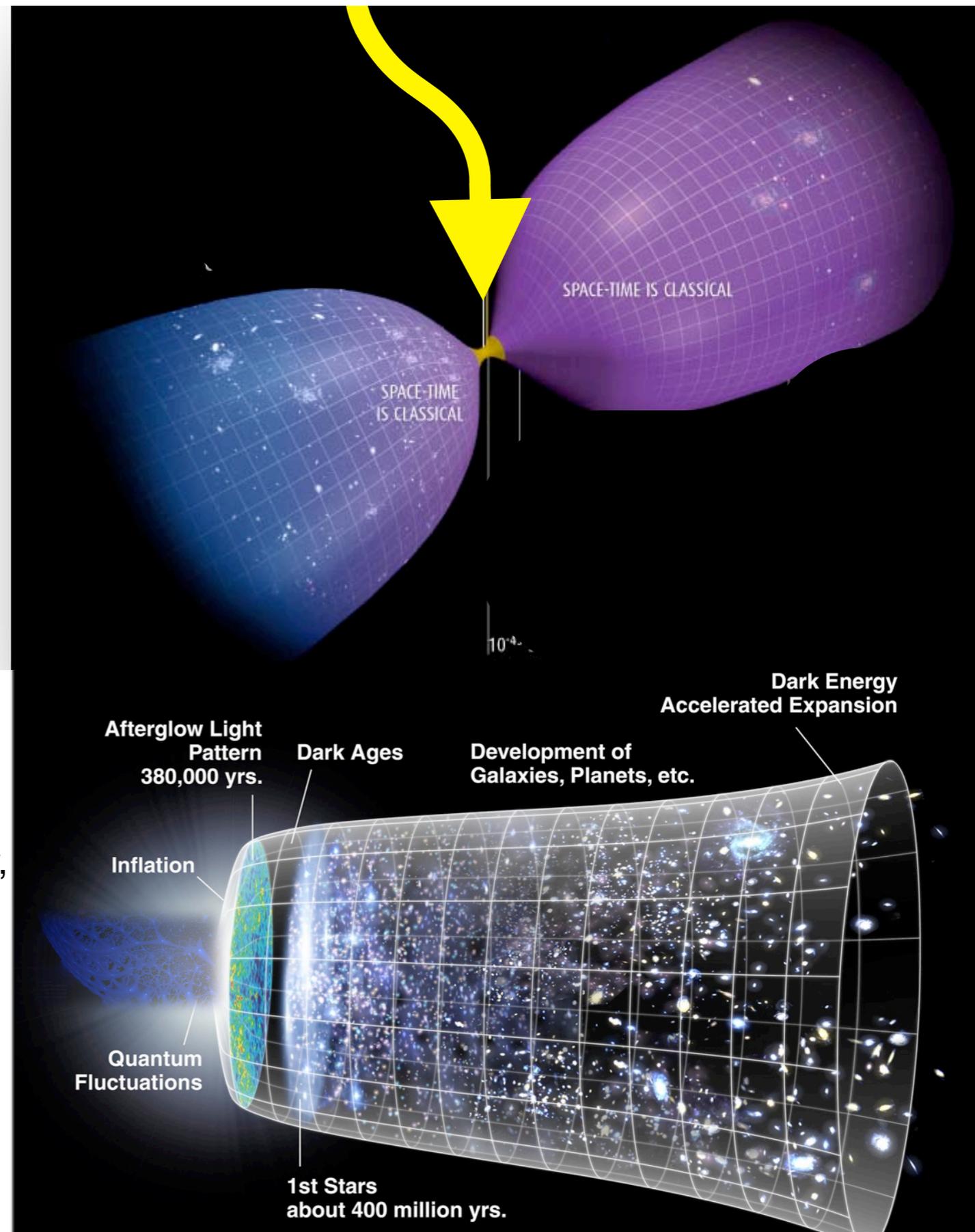
Big Bounce al posto del Big Bang?

Loop Quantum Cosmology, String Cosmology, Ekpyrotic Scenario,...

Transizione di fase cosmologica (condensazione)?

da fase pre-geometrica a fase geometrica
("geometrogenesis")

GFT Condensate Cosmology, String Gas Cosmology, Emergent Universe Scenario,



cosa e' successo, davvero, al Big Bang?

Big Bounce al posto del Big Bang?

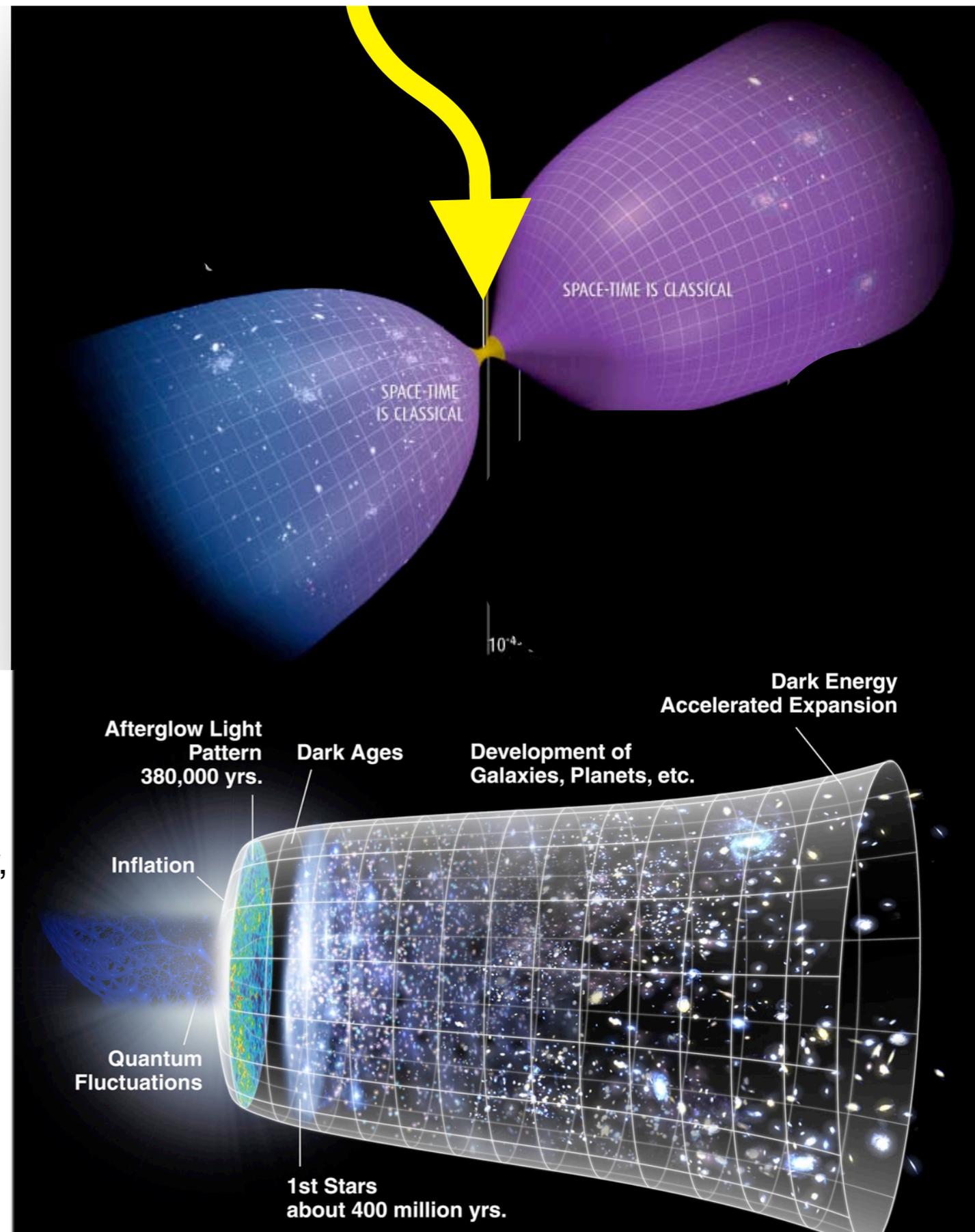
Loop Quantum Cosmology, String Cosmology, Ekpyrotic Scenario,...

Transizione di fase cosmologica (condensazione)?

da fase pre-geometrica a fase geometrica
("geometrogenesis")

GFT Condensate Cosmology, String Gas Cosmology, Emergent Universe Scenario,

oppure?



La Gravita' Quantistica:

ma si puo' osservare?

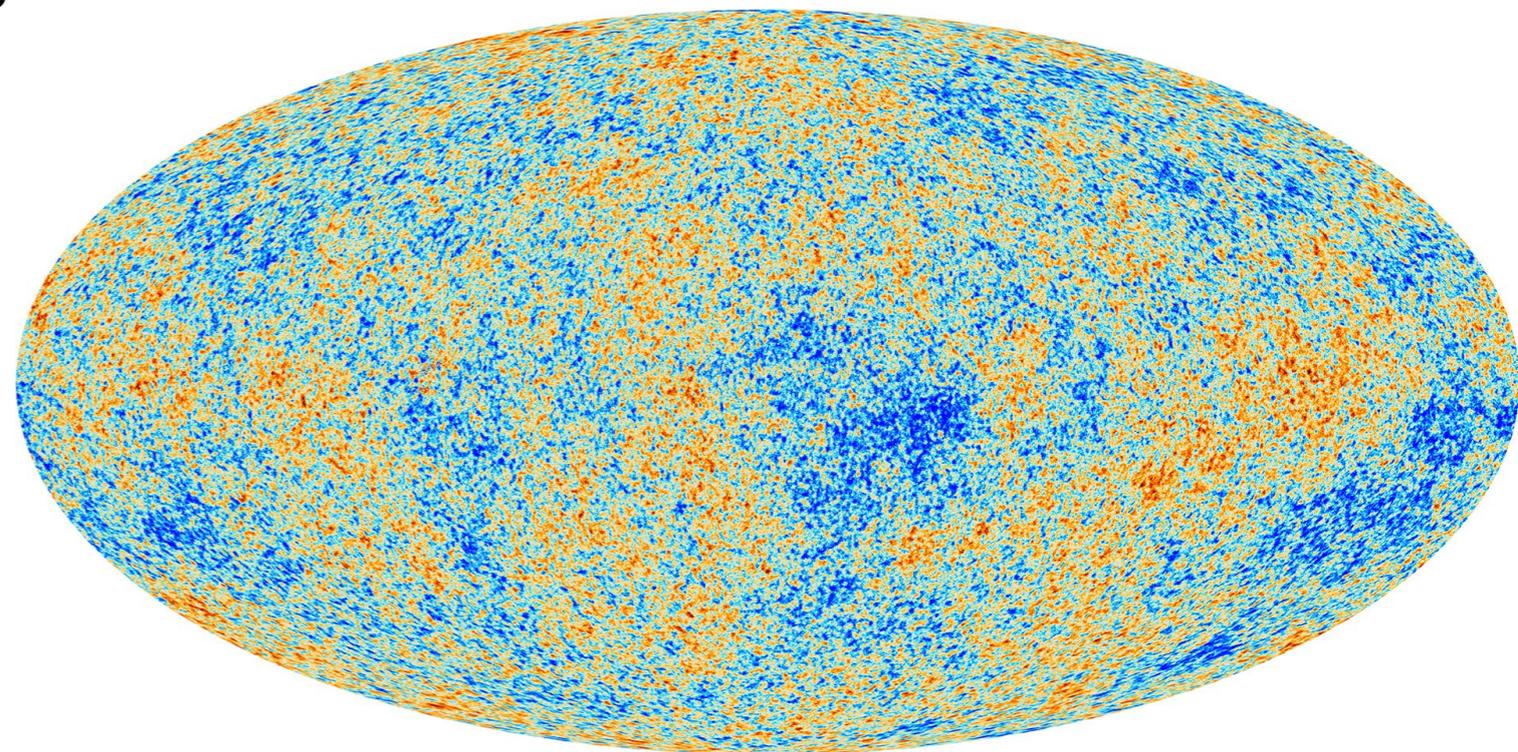
Prospettive osservative

Gli effetti direttamente dovuti alla Gravita' Quantistica sono probabilmente molto piccoli. Sono per questo necessariamente e inesorabilmente lontani da qualunque osservazione sperimentale?

Moltissimi studi recenti suggeriscono di no, e alcuni modelli ispirati direttamente da teorie di Gravita' Quantistica sono gia' testabili.

Possibili modifiche osservabili della fisica relativistica dovute alla Gravita' Quantistica: relazioni di dispersione modificate, modifiche al principio di indeterminazione, time of arrival, scattering thresholds,

In piu', possibili tracce di effetti di Gravita' Quantistica vicino al Big Bang che si manifestino in osservazioni cosmologiche (e.g. CMB)



Uno sguardo sulla scienza
(dalla frontiera)

mettere in discussione le fondamenta stesse del nostro pensare il mondo



non basta immaginare, bisogna costruire strutture concettuali solide



la verita' scientifica:

ambiziosa ma umile, solida ma parziale e temporanea, orgogliosa ma piena di dubbi



la comunità scientifica come comunità etica

piu' che un "metodo scientifico" (una serie di "pratiche" che funzionano nell'ottenere descrizioni del mondo solide), cio' che caratterizza la scienza e' l'accettazione di alcuni principi etici:

- 1) esporre sinceramente e in maniera trasparente argomentazioni, dati, osservazioni e ipotesi
- 2) identificare la spiegazione piu' solida usando argomenti razionali e evidenze osservative pubbliche
- 3) quando l'evidenza osservativa e l'argomentazione razionale non e' sufficiente per stabilire quale spiegazione e' piu' convincente, incoraggiare la diversificazione e la competizione dei punti di vista



a cosa serve la scienza:

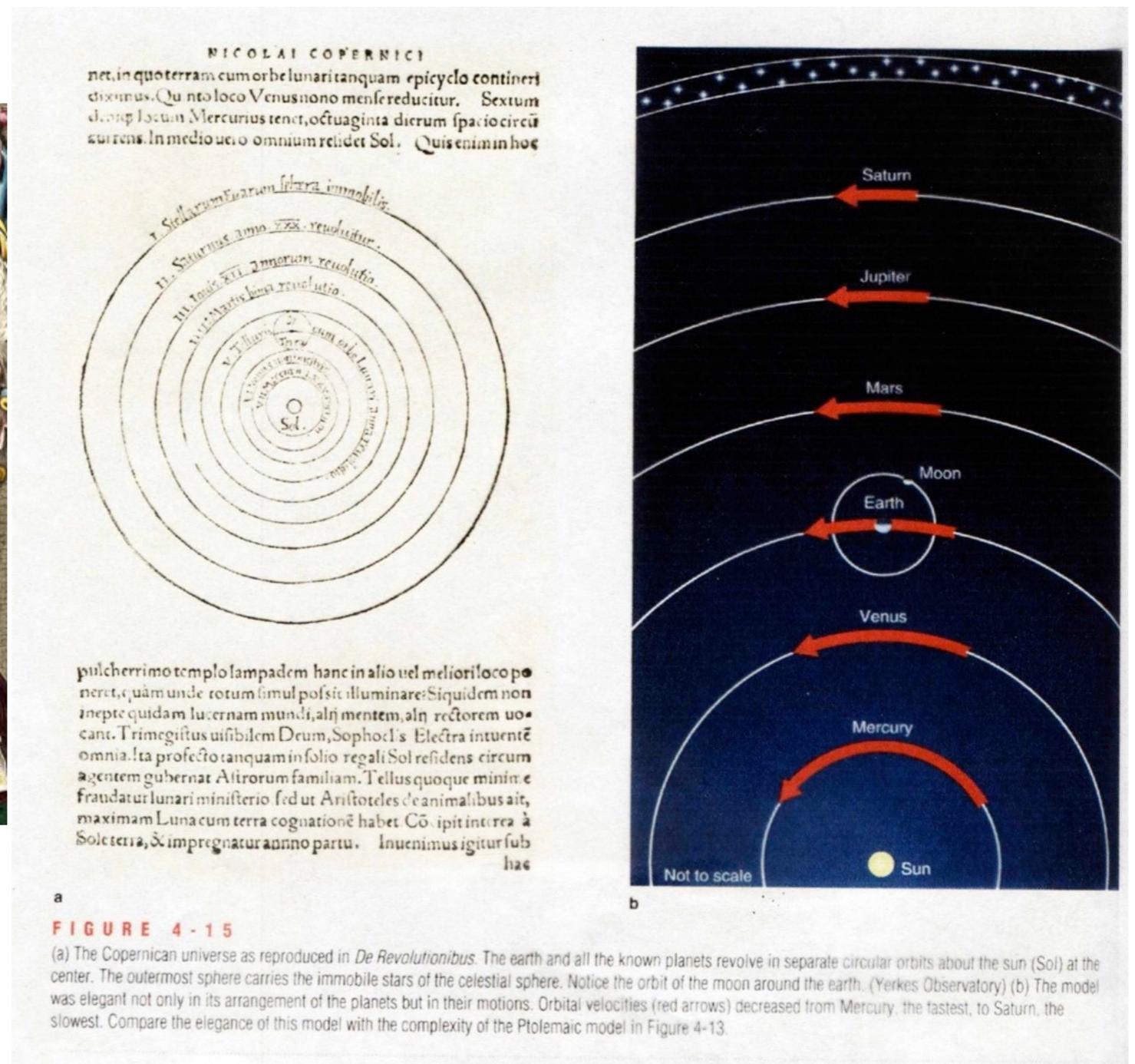
conoscenza

cultura

a cosa serve la scienza:

conoscenza

cultura

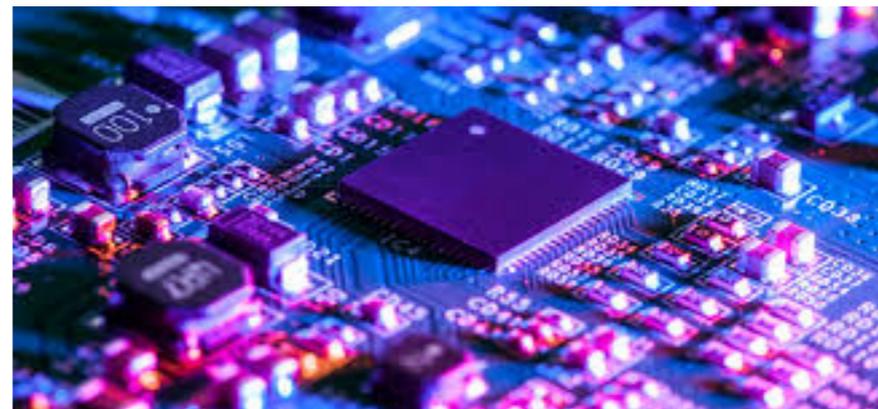


a cosa serve la scienza:

conoscenza

cultura

tecnologia



a cosa serve la scienza:

conoscenza

cultura

tecnologia

etica pubblica, quindi democrazia



Grazie per l'attenzione!