

Scienza

L'alba di un nuovo cosmo

Daniel Cossins, New Scientist, Regno Unito

Un vasto progetto di osservazione dell'energia oscura suggerisce che la teoria prevalente sull'universo potrebbe essere superata. È il momento di elaborare un modello alternativo

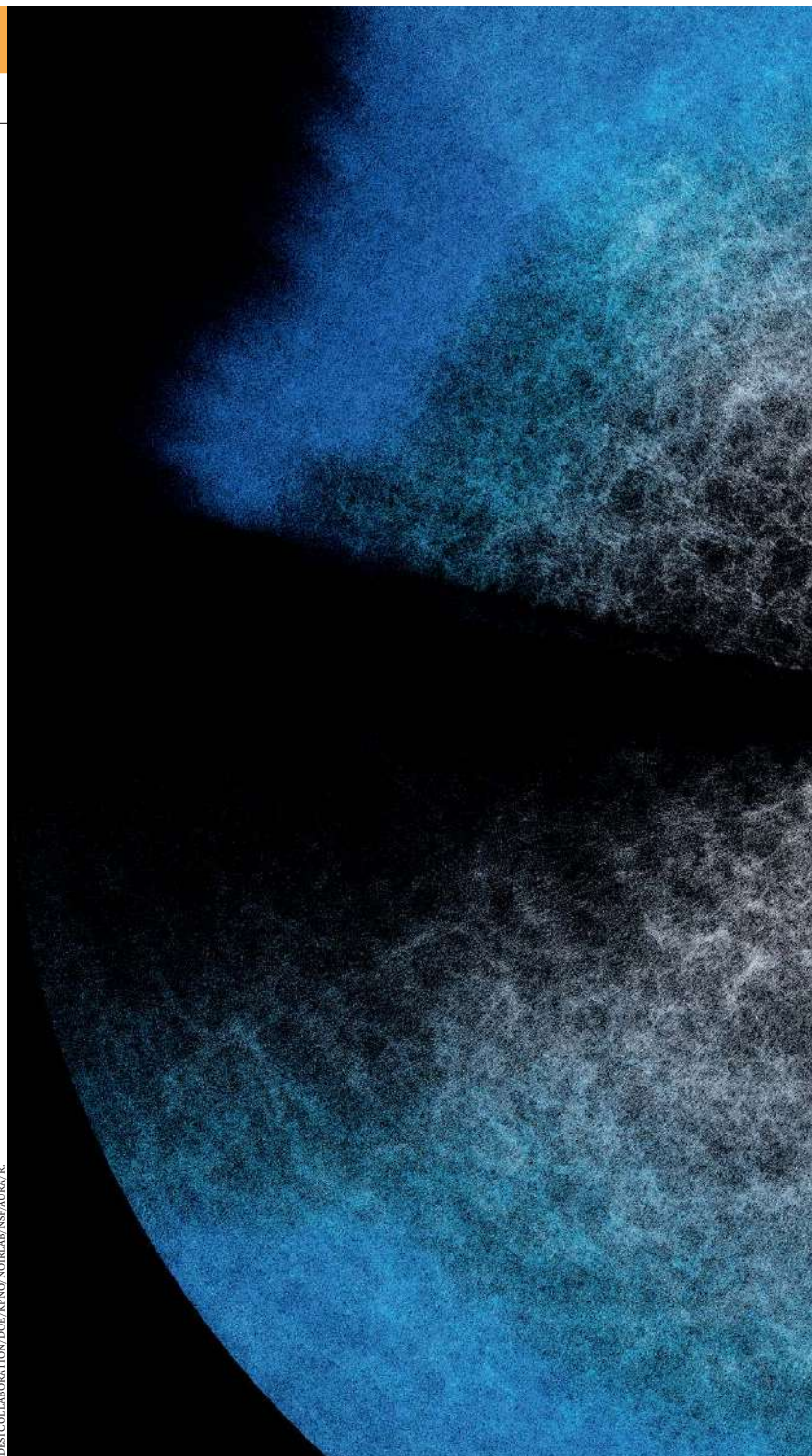
Se immaginate la storia dell'universo come un film in perenne post-produzione, i cosmologi sarebbero i suoi montatori ossessivi, sempre intenti a ritoccare la trama. La versione su cui stanno lavorando attualmente è una stupefacente impresa cinematografica: comincia con un botto, lo spaziotempo che emerge dal nulla e poi si dispiega maestoso con la formazione di stelle e galassie, scolpite dall'attrazione gravitazionale della materia visibile e della misteriosa materia oscura, mentre il cosmo continua placidamente a espandersi grazie a una forza imperscrutabile chiamata energia oscura.

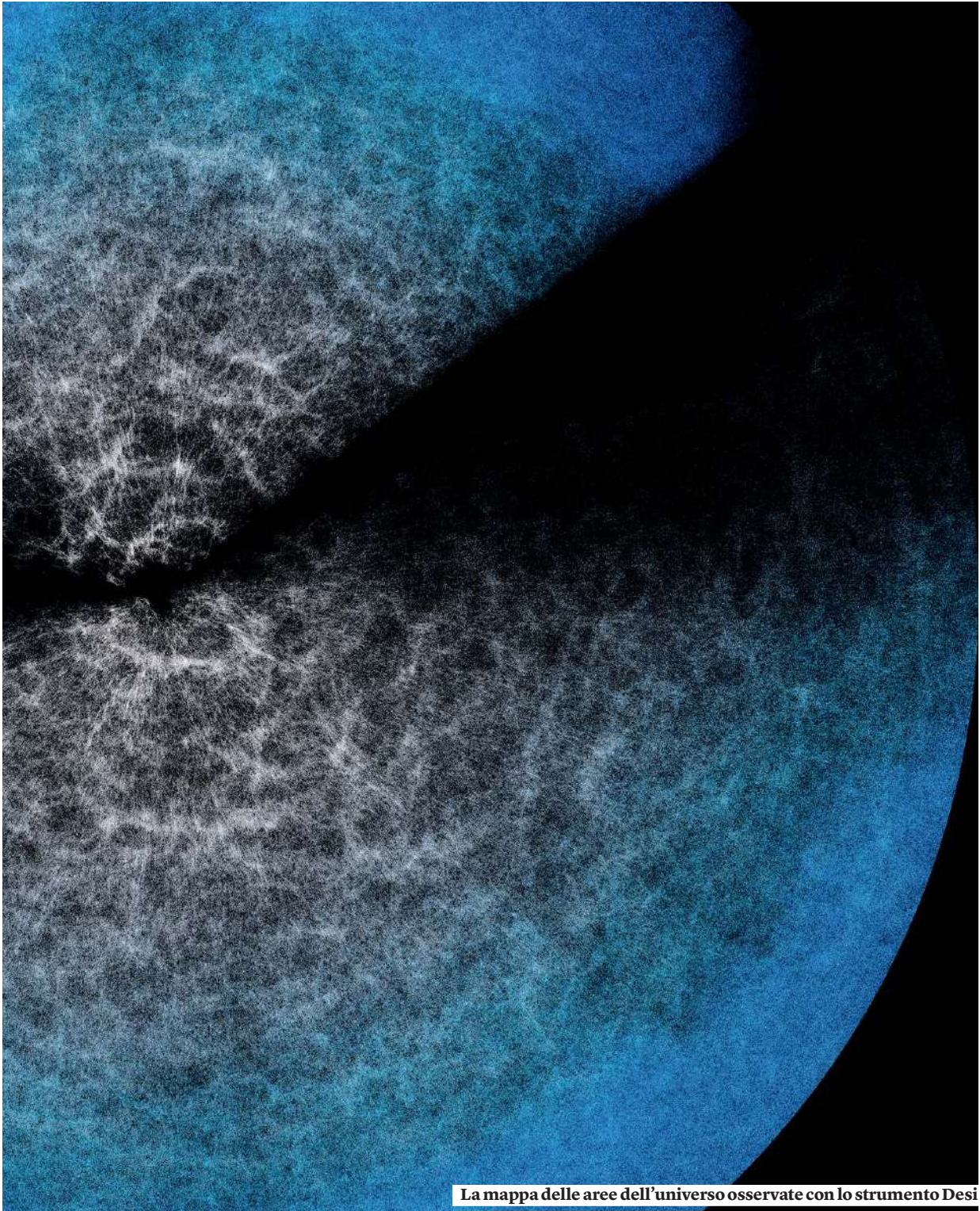
Ma non può essere la versione definitiva. Più osserviamo lo spazio, più la storia sembra incompleta: ci sono piccole incongruenze e alcuni protagonisti continuano a sfuggirci. Da decenni i cosmologi hanno difficoltà a perfezionare il copione.

Ora finalmente il cosmo gli offre una nuova ispirazione. Un potente telescopio ha mappato milioni di galassie lontane, ricostruendo la storia dell'espansione dell'universo con una precisione mai rag-

giunta prima. Ne emerge che l'energia oscura si comporta in modo talmente imprevedibile che non può essere quello che pensavamo. Se confermato, sarebbe un clamoroso colpo di scena. I teorici stanno pensando di rivedere completamente il

concetto di energia oscura. Come andrà a finire è tutt'altro che chiaro. Molti però cominciano a credere che stiamo per scrivere una storia del cosmo molto più ricca e dettagliata, che potrebbe essere completamente diversa dalla versione





La mappa delle aree dell'universo osservate con lo strumento Desi

attuale. “Siamo in un momento interessante”, dice Adam Riess, un astrofisico della Johns Hopkins university che ha condiviso il premio Nobel per la fisica nel 2011 per aver contribuito alla scoperta dell'energia oscura. “Vi consiglio di non

andare in bagno adesso”.

La nostra migliore rappresentazione delle origini e dell'evoluzione dell'universo è stata messa insieme nell'arco di un secolo. Tutto è cominciato nel 1915 con la teoria della relatività generale di Albert

Einstein, che descrive la gravità come l'effetto della curvatura dello spaziotempo provocata da corpi ad alta massa.

All'epoca si pensava che l'universo fosse statico, perciò Einstein aggiunse alle sue equazioni un termine stabilizzante, la

Scienza

“costante cosmologica”. Ma nel 1929 l'astronomo Edwin Hubble osservò che le galassie lontane si stavano allontanando rapidamente l'una dall'altra, segno che l'universo si stava espandendo. Questa scoperta spinse Einstein ad abbandonare la sua costante.

Poi arrivò la teoria del big bang. Anche se oggi la teoria è considerata quasi un dogma, l'ipotesi alternativa dello stato stazionario fu definitivamente superata solo negli anni sessanta, quando gli astronomi scoprirono un'impronta termica residua del big bang, la radiazione cosmica di fondo (Cmb), le cui caratteristiche coincidevano con le previsioni.

Con il progressivo miglioramento della nostra capacità di osservare lo spazio, la teoria del big bang ha cominciato a non bastare più. Negli anni ottanta gli astronomi scoprirono che la gravità della materia visibile non era sufficiente a tenere insieme le galassie né a spiegare la formazione degli ammassi di galassie. La soluzione fu ipotizzare l'esistenza di una materia oscura invisibile. Un decennio più tardi, l'osservazione di supernove lontane fatta da Riess e i suoi colleghi rivelò, contro ogni aspettativa, che l'espansione dell'universo stava accelerando. La costante cosmologica fu reintegrata, anche se con un nuovo nome: energia oscura.

Toppe e crepe

È questo, in sostanza, è l'attuale modello standard della cosmologia, noto come Λ cdm. La lettera greca lambda indica la costante cosmologica, mentre cdm sta per cold dark matter, la materia oscura fredda, che si pensa sia composta da particelle pesanti e lente. Integrato con la relatività generale e con alcune ipotesi fondamentali (soprattutto quella secondo cui su larga scala l'universo appare uguale in ogni direzione) questo modello fornisce un quadro convincente di come le strutture cosmiche si sono formate a partire dalle fluttuazioni quantistiche dell'universo primordiale, in seguito a una breve ma rapidissima espansione esponenziale nei primi istanti dell'universo.

Il modello Λ cdm è considerato uno dei più grandi trionfi della scienza. Unisce eleganza e una straordinaria capacità descrittiva: con soli sei parametri riesce a raccontare l'intera storia del cosmo, formulando una serie di previsioni precise che sono state confermate da osservazioni sempre più accurate. “È stato straordinariamente efficace”, dice Mike Turner, cosmologo teorico dell'università di Chi-

cago. “Se penso a quello che avevamo quando ho cominciato, intorno al 1980, è più di quanto avremmo potuto immaginare”. Eppure, osserva Turner, oggi “è molto meno di quello che possiamo accettare”. In parte semplicemente perché la scienza non sta mai ferma: anche le teorie più riuscite sono approssimazioni di una comprensione più profonda, e quando sono sottoposte a osservazioni più rigorose emergono punti irrisolti e crepe.

Nel caso del modello Λ cdm, i punti irrisolti sono evidenti. La materia oscura e l'energia oscura sono sempre state dei segnaposto: erano usate per giustificare i fenomeni osservati, ma senza una spiegazione fisica. Nonostante decenni di ricerche, i fisici non hanno ancora rilevato direttamente le particelle di materia oscura. E anche se l'energia oscura è spiegata come energia del vuoto, risultante dalle fluttuazioni quantistiche dello spazio, resta problematica a livello teorico. La teoria quantistica prevede infatti che abbia un valore circa 10^{120} volte più grande di quello necessario per spiegare l'espansione dell'universo osservata.

“L'energia oscura e la materia oscura sono solo toppe”, sostiene Turner. Entrambe svolgono un ruolo preciso nel modello e ci sono solide prove empiriche della loro esistenza. “Ma sono semplici descrizioni fenomenologiche, e dietro deve esserci qualcosa di più fondamentale”.

Nel modello hanno cominciato ad apparire delle crepe. La più nota è la cosiddetta tensione di Hubble. Si chiama così perché due diversi metodi per misurare la velocità di espansione dell'universo, chiamata costante di Hubble, forniscono valori incompatibili. Quando i cosmologi proiettano in avanti i dati della radiazione cosmica di fondo (Cmb) usando il modello attuale, ottengono circa 67 chilometri al secondo per megaparsec. Quando invece gli astronomi misurano direttamente l'universo locale, usando supernove e stelle

variabili, il valore è intorno a 73. Secondo Riess il fatto che i dati non coincidono è un forte indizio che nel modello Λ cdm qualcosa non funziona.

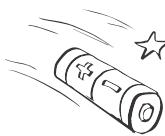
Eppure la maggior parte dei cosmologi non è ancora pronta ad abbandonarlo. Tutte le proposte avanzate per risolvere la tensione di Hubble mettono in crisi la coerenza quasi perfetta del modello attuale con la Cmb e la struttura su larga scala dell'universo osservabile. È anche possibile che le misure alla base della tensione contengano sottili errori. In particolare, il modo in cui misuriamo l'espansione dell'universo recente si basa su una complessa catena di inferenze, in cui ogni passaggio dipende da meticolose calibrature e ipotesi su stelle e galassie. Il sospetto è che con più dati la tensione sparirà. “Ci sono troppe variabili per affermare qualcosa di definitivo”, osserva Pedro Ferreira, cosmologo e astrofisico dell'università di Oxford.

Riess non è convinto. Le sue misurazioni dell'espansione dell'universo recente sono state verificate più e più volte, sottolinea, e nessuno ha trovato errori. “Sono passati dieci anni da quando abbiamo scoperto la tensione di Hubble e non è scomparsa”, dice. “Anzi, è diventata ancora più evidente”. Secondo lui il vero motivo per cui la comunità scientifica non è disposta ad abbandonare il modello Λ cdm è che gli scienziati fanno fatica a rinunciare a una teoria così riuscita finché non ne hanno un'altra migliore: “A nessuno piace vagare nel deserto”.

In quest'ottica servirebbero osservazioni in grado di indicare più chiaramente quale potrebbe essere la strada giusta. Fortunatamente una nuova generazione di strumenti ha cominciato a dare risultati eccezionali. Uno di questi è il Dark energy spectroscopic instrument (Desi).

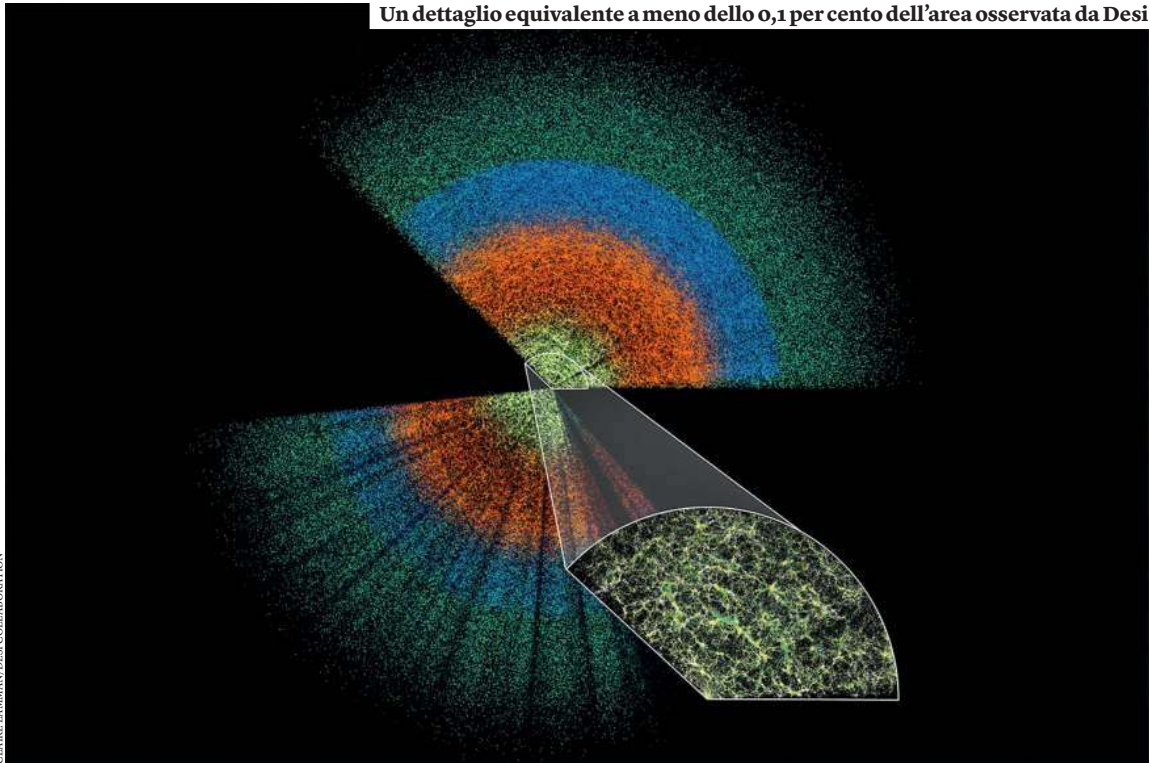
La soglia fantasma

Installato su un telescopio in Arizona, Desi è dotato di un enorme specchio e di cinquemila fibre ottiche controllate roboticamente che si allineano in automatico alle galassie più lontane, una dopo l'altra, molto più velocemente rispetto alle precedenti osservazioni sull'energia oscura. Dal 2021 Desi osserva milioni di galassie per misurarne il *redshift* (spostamento verso il rosso), cioè quanto la lunghezza d'onda della luce che emettono è aumentata a causa dell'espansione cosmica, un indicatore della loro distanza dalla Terra. E poiché le galassie hanno *redshift* diversi, pos-



Secondo Riess il fatto che i dati non coincidono è un forte indizio che nel modello Λ cdm qualcosa non funziona

Un dettaglio equivalente a meno dello 0,1 per cento dell'area osservata da Desi



CLAIRE LAMMAN/DESI COLLABORATION

siamo confrontare le distanze ricorrenti nella loro distribuzione per ricostruire come il tasso di espansione dell'universo è cambiato nel tempo.

Per calibrare queste distanze, Desi sta misurando anche delle sottili impronte lasciate dall'universo primordiale, note come oscillazioni acustiche barioniche (Bao). Come increspature su uno stagno rimaste congelate nel ghiaccio, le Bao evidenziano uno schema caratteristico nella separazione tra galassie che fornisce ai cosmologi un "righello standard" per misurare l'espansione cosmica. L'idea è arrivare alla ricostruzione tridimensionale dell'espansione dell'universo più accurata e precisa mai realizzata. L'ultima versione, resa nota nel marzo 2025 e basata su tre anni di dati (pari a 15 milioni di galassie) conteneva una bomba che ha fatto tremare dalle fondamenta la cosmologia.

I ricercatori hanno confrontato i risultati delle osservazioni di Desi con gli ultimi dati sulle supernove, che limitano fortemente l'espansione dell'universo vicino, e con quelli della radiazione cosmica di fondo. Dopo averne verificato la compatibilità con il Λ cdm, hanno scoperto che il modello attuale non regge del tutto, poiché non contempla la possibilità che la

forza dell'energia oscura cambi nel tempo. La conclusione è stata netta: l'energia oscura si sta indebolendo, e non sembra essere una costante cosmologica.

"È stato davvero sconvolgente", dice Will Percival, astrofisico dell'università di Waterloo, in Canada, che collabora con Desi. Naturalmente il risultato è stato sottoposto a verifiche molto rigorose. "Ma per molti versi è proprio quello che tutti stavamo aspettando".

Come se non bastasse, i risultati di Desi indicano anche che nell'universo primordiale l'energia oscura potrebbe essere scesa al di sotto del cosiddetto *phantom divide* - la soglia oltre la quale la sua forza repulsiva sarebbe stata molto più intensa di quanto permette la costante cosmologica - per poi risalire successivamente.

"I risultati di Desi sono meravigliosamente bizzari", dice Eric Linder, fisico e cosmologo dell'università di Berkeley, in California. "Si discostano dalla costante cosmologica in un modo che nessuno aveva mai preso in considerazione". Allo stato attuale i risultati non sono abbastanza solidi perché si possa parlare di una scoperta vera e propria. L'analisi suggerisce l'ipotesi di un'energia oscura in evoluzione con una significatività statistica massi-

ma di 4,2 sigma, ancora lontana dalla soglia dei 5 sigma considerata lo standard di riferimento, quindi potrebbe essere smentita da nuovi dati. L'indicazione del superamento del *phantom divide* è ancora meno sicura. "Sono indeciso", osserva Ferreira. "Ci siamo già passati fin troppe volte".

Idee confuse

Eppure ci sono motivi per pensare che i risultati di Desi siano diversi. Secondo Catherine Heymans, astronoma dell'università di Edimburgo, "il metodo che hanno seguito per misurare l'espansione cosmica è uno dei più puliti. È molto più difficile trovare argomenti contro questo risultato rispetto alla tensione di Hubble".

Qualcuno ci ha provato comunque. Nel maggio 2025 George Efstathiou, astrofisico dell'università di Cambridge, ha pubblicato un articolo in cui sostiene che le prove a favore di un'energia oscura in evoluzione sono fragili, per due motivi. Il primo è che la discrepanza rispetto al modello Λ cdm emerge solo quando si includono i dati delle supernove. Il secondo è che l'analisi statistica si basa su ipotesi preliminari riguardo alla plausibilità dei diversi scenari cosmologici, che secondo

Efstathiou favoriscono ingiustamente i modelli con energia oscura variabile.

Ma tutti sono d'accordo che, se i risultati di Desi fossero confermati da nuovi dati, sarebbe un duro colpo per il modello Λ cdm. "Dovremmo rimettere tutto in discussione", osserva Ferreira.

In un articolo pubblicato nell'agosto 2025, Riess e la cosmologa osservativa Alexie Leauthaud dell'università di Santa Cruz, in California, scrivono che stiamo assistendo al tramonto del modello Λ cdm e che dobbiamo prepararci ad andare oltre. Per la prima volta in 25 anni abbiamo un indizio concreto su che aspetto potrebbe avere un modello migliore.

Questo non significa che sarà semplice venirne a capo. Sebbene i risultati di Desi ci offrano un'indicazione chiara sulle proprietà fisiche dell'energia oscura, il quadro dell'espansione cosmica che ne risulta rende molto difficile trovare la formula esatta. La soluzione più semplice è dire che l'energia oscura non proviene dal vuoto ma è una specie di campo, simile a quelli che descrivono la luce o le forze nucleari. Ma questi modelli devono essere calibrati con una precisione sospetta per fare in modo che l'energia oscura aumenti proprio negli ultimi miliardi di anni, invece che in un'altra epoca cosmica. E soprattutto, da soli non riescono a riprodurre il *phantom crossing*.

Molti teorici preferiscono concentrarsi su modelli in cui l'energia oscura interagisce con la gravità invece di evolvere in modo indipendente. L'idea è che, a un certo punto, la gravità comincia a comportarsi diversamente perché c'è un trasferimento di energia tra la materia ordinaria e l'energia oscura. "In questo modo si capisce che la densità dell'energia oscura può aumentare e poi diminuire", spiega Alessandra Silvestri, teorica dell'università di Leida, nei Paesi Bassi, che ha mostrato come un modello di questo tipo si adatti ai dati di Desi meglio del Λ cdm. "È davvero l'unico modello che sembra funzionare".

Ci sono anche modelli che prevedono uno scambio energetico tra materia oscura ed energia oscura, con una lenta conversione della prima nella seconda durante l'espansione cosmica. Questa idea è particolarmente attraente dal punto di vista teorico, perché collega le due più grandi incognite della cosmologia.

Il problema di tutti questi modelli integranti è che, se fossero corretti, dovremmo averne già vista qualche traccia nelle osservazioni – per esempio, nelle orbite planetarie – e così non è. Inoltre, anche

ammettendo che le interazioni siano così piccole da sfuggire alle osservazioni, potrebbero violare la legge di conservazione dell'energia e della quantità di moto. Insomma, c'è un'abbondanza di idee, ma nessuna risolve davvero il problema.

Per Ferreira – e anche per Riess – non bisogna limitarsi a mettere delle toppe al concetto di energia oscura per adattarlo meglio ai dati. Piuttosto, bisogna chiedersi quali insegnamenti trarre se i risultati di Desi fossero davvero il colpo di grazia per il modello Λ cdm. "Dobbiamo fermarci un momento e riflettere", dice Riess: se siamo all'alba di un nuovo grande salto nella comprensione dell'universo, i cosmologi devono pensare bene a che direzione prendere, non solo rispetto alle ipotesi consolidate su come dovrebbe funzionare una teoria migliore, ma anche su come trovarla.

Forse elaboreremo un'altra teoria semplice ed elegante. O forse scopriremo che la spiegazione è più complessa: un guazzabuglio di campi multipli di energia oscura, diversi tipi di materia oscura, interazioni tra le due e/o una nuova interpretazione della gravità su scale cosmologiche. "L'attenzione all'eleganza e alla semplicità viene dalla fisica delle particelle", osserva Riess. "Ma chi può dire che funzioni anche su scala cosmica? L'universo è piuttosto complicato, quindi è meglio tenere la mente aperta".

La spada nella roccia

Come sempre saranno le osservazioni a guidarci. Desi sta continuando a raccogliere dati e una nuova pubblicazione è prevista per il 2027. I cosmologi si aspettano molto anche dal telescopio spaziale Euclid dell'Agenzia spaziale europea e dall'osservatorio Vera Rubin in Cile. Queste nuove misurazioni dovrebbero darci maggiore fiducia nel quadro dell'espansione che sta emergendo. O forse no. Ma, in ogni caso, ci permetteranno di studiar-

Possiamo dire con certezza che dopo un lungo periodo di armonia, la cosmologia sta entrando in un'era più interessante

la attraverso *redshift* finora inesplorati. Ferreira è meno ottimista. Dato che siamo in grado di esplorare solo un intervallo limitato della storia dell'espansione dell'universo, ha scritto in un articolo del 2025, molti modelli teorici diversi possono produrre comportamenti quasi identici in quell'intervallo. Di conseguenza, anche con tutti i nuovi dati "ci ritroveremo con un'ampia famiglia di modelli che sono sostanzialmente indistinguibili sul piano dell'osservazione".

Il rischio è di trovarci nella stessa situazione della tensione di Hubble: un'impasse in cui molti cosmologi non sono disposti ad abbandonare il modello Λ cdm senza una teoria migliore pronta a sostituirlo. E non sembra che questa teoria sarà trovata a breve. Riess teme che questo possa portare all'inerzia. "Cercare di estrarre la spada dalla roccia è un lavoro duro e ingrato. Ma non dimentichiamo che la spada è ancora conficcata in quella roccia".

Detto questo, secondo Riess il problema è che la comunità scientifica dà troppo peso a un modello sviluppato prima che fossero disponibili nuovi dati, e non abbastanza ai dati in sé. Ogni volta che emerge una tensione nel modello Λ cdm, osserva, l'incapacità di risolverla è usata come argomento contro le nuove osservazioni, il che spiega perché ci si fissa su errori ignoti e perché ulteriori osservazioni finiscono solo per alimentare nuovi dubbi. "Molta gente ha costruito la sua carriera su questo modello", dice Riess. "L'idea che possa non spiegare tutto è destabilizzante".

Forse è semplicemente la natura dei cambi di paradigma. Il cambiamento porta sempre dei conflitti, e il modello Λ cdm non se ne andrà senza lottare. Ma questo non è necessariamente un problema. "È giusto che i difensori del modello cerchino ogni dettaglio sospetto nei dati. Ed è altrettanto giusto che ci siano i rivoluzionari, quelli che sono disposti a guardare oltre", osserva Linder. "Può sembrare conflittuale, ma in realtà è un bene".

Il fatto che i cosmologi si stiano preparando allo scontro potrebbe indicare che siamo davvero sull'orlo di un'altra rivoluzione. L'unica cosa che possiamo dire con certezza è che, dopo un lungo periodo di armonia, la cosmologia sta entrando in un'era molto più interessante. "Stiamo aspettando con impazienza questi nuovi dati che secondo me ci lasceranno a bocca aperta", dice Linder. "È un momento incredibilmente emozionante". ♦ *fas*

