
Come Euclid ci aiuterà a scoprire la storia dell'Universo

Vincenzo F. Cardone

Istituto Nazionale di Astrofisica, Osservatorio Astronomico di Roma

A metà del secolo scorso Allan Sandage, uno dei maggiori astronomi del tempo, era solito dire che la cosmologia si riduceva alla ricerca di due numeri: la costante di Hubble e il parametro di decelerazione. La prima ci dice quanto velocemente l'universo si sta espandendo, mentre il secondo permette di rispondere alla domanda se questa espansione stia accelerando o rallentando. Settanta anni dopo, quella frase ha lo stesso valore di un reperto archeologico. Ci mostra quale fosse il pensiero dominante di un'epoca e ci fa capire quanto cammino abbiamo fatto da allora. Quei due numeri oggi li conosciamo e, soprattutto, sappiamo che cosa li determina. Conosciamo, quindi, dove dobbiamo guardare per rispondere alla domanda di Sandage su quale sia il valore dell'accelerazione dell'espansione dell'universo.

Un successo? Sì, ma anche no. Perché, spesso, in cosmologia, ogni risposta si paga con nuove domande. Oggi sappiamo, infatti, che l'universo si espande in maniera accelerata e che la sua geometria è quella di uno spazio con curvatura nulla.

A dircelo sono i dati osservativi che in questi anni si sono accumulati in uno spettacolare crescendo di scoperte. Si stava per chiudere il millennio quando due *team* indipendenti pubblicavano i primi diagrammi di Hubble delle Supernovae di Tipo Ia (SNeIa) [1, 2]. Di questi oggetti stellari è possibile determinare, con una certa sicurezza, la luminosità assoluta per cui, misurando quella apparente, è possibile stimare la distanza. Il diagramma di Hubble è semplicemente un grafico della distanza in funzione del *redshift* e dipende a sua volta da come l'universo si sta espandendo (si vedano i due riquadri). Ebbene, le SNeIa in quel diagramma si trovano a distanze maggiori di dove ci si aspettava. Motivo? L'universo si sta espandendo in maniera accelerata. La cinematica dell'universo era così nota: l'espansione è un'auto che corre accelerando. Ma la pista come è fatta? Che geometria ha? Serviva tornare ancora più indietro nel tempo ed osservare di nuovo quella radiazione cosmica di fondo a microonde (CMBR secondo l'acronimo inglese) che per prima aveva fatto scoprire ai cosmologi che l'universo aveva avuto un inizio. Questo relitto dei primi minuti di vita del cosmo non è perfettamente isotropo. La temperatura della CMBR ha delle piccolissime differenze (dell'ordine di una parte su centomila), ma è proprio il modo in cui queste sono distribuite a

Espansione dell'universo e costante di Hubble

Immaginate due punti disegnati su un palloncino sgonfio. Se gonfiate il palloncino, i due punti continueranno a restare immobili al loro posto, eppure la loro distanza aumenterà. L'universo non è un palloncino che si gonfia perché non c'è nulla intorno a lui in cui allargarsi, ma l'analogia è comunque utile a capire che cosa intendono i cosmologi come espansione dell'universo. In un certo senso, è come se voi continuaste a misurare la distanza tra due punti e questo numero aumenta perché sono le tacche sul righello ad allontanarsi. Questo righello è quello che in cosmologia è chiamato fattore di scala. Quando si inserisce la metrica di un sistema omogeneo ed isotropo nelle equazioni della relatività generale di Einstein, si ottengono le equazioni di Friedman che permettono, tra le altre cose, di stimare come varia con il tempo questo fattore di scala in base al contenuto di energia e materia e alle proprietà di queste ultime. La derivata prima del fattore di scala rispetto al tempo è diversa da zero il che vi dice che l'universo non è statico, ma in evoluzione. Quanto veloce è questa evoluzione al giorno d'oggi è quantificato dalla costante di Hubble ossia il rapporto tra la derivata prima, rispetto al tempo del fattore di scala (\dot{a}) e il fattore di scala stesso

$$H = \frac{\dot{a}}{a} . \quad (1)$$

È questo il primo dei due numeri a cui faceva riferimento Sandage.

Il secondo è invece legato al segno della derivata seconda (\ddot{a}), sempre rispetto al tempo. Per rendere adimensionale questo parametro lo si divide per $H^2 a$. Pertanto il parametro di decelerazione è dato dall'espressione

$$q = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2} , \quad (2)$$

dove il segno negativo venne introdotto perché ai cosmologi piaceva avere a che fare con numeri positivi e la convinzione ai tempi era che l'espansione rallentasse cioè derivata seconda negativa. Con questa definizione il parametro di decelerazione sarebbe stato positivo. Ma i dati oggi ci dicono il contrario per cui i cosmologi di allora devono rassegnarsi ad avere un valore negativo.

dirci quale è la geometria dell'universo. Bisogna però misurare con precisione quello che si chiama spettro di anisotropia ossia il modo in cui queste differenze sono spazialmente correlate. Lo spettro avrà diversi picchi e sono la posizione e l'altezza relativa di questi a dirci qual è la geometria dell'universo e quanta materia c'è in esso. Un satellite americano prima (WMAP [3]) e uno europeo poi (Planck [4]) hanno dato la risposta che aspettavamo. L'universo è piatto, ossia ha una geometria sorprendentemente euclidea. Certo, qualche residua possibilità che la curvatura sia non nulla esiste ancora, ma le probabilità sono talmente basse da poter concludere che quanto detto sopra è corretto. Viviamo in un cosmo che ha una geometria piatta ed è in espansione accelerata.

Sappiamo anche il perché. Il contenuto ener-

getico dell'universo è dominato da quella che chiamiamo "energia oscura" che determina l'espansione accelerata, mentre a tenere insieme il tutto fornendo la gravità necessaria a formare le strutture che osserviamo è la "materia oscura". Due componenti accomunate nel nome dall'aggettivo "oscuro", ma nettamente diverse nelle proprietà fisiche. Soprattutto perché la prima ha una pressione negativa, mentre la seconda contribuisce ad aumentare la gravità che tiene legate le stelle all'interno delle galassie e le galassie negli ammassi. Due forze opposte che si contendono il dominio del contenuto energetico dell'universo con la prima a vincere oggi fornendo quella spinta necessaria ad accelerare l'espansione motivando così la cinematica osservata. Ah, giusto per dire, quella energia oscura è consistente con quella costante cosmologica che lo stesso Einstein

Redshift

Gli astronomi guardano il cielo e il cielo è una splendida tela punteggiata di stelle e galassie, ma anche un problema pratico: ha solo due dimensioni. Come misurare la terza? Ossia, come quantificare le distanze relative tra gli oggetti che vediamo proiettati su quella tela? Ci viene in soccorso un fenomeno noto anche nella vita di tutti i giorni. Pensate ad un'ambulanza che si avvicina. Il suono della sirena sembrerà più acuto di quando invece si allontana. Questo perché le onde sonore in avvicinamento hanno una lunghezza d'onda minore rispetto a quelle emesse dall'ambulanza che si allontana. Lo stesso avviene per la luce emessa dalle sorgenti astrofisiche. Più sono lontane da noi, più la lunghezza d'onda della radiazione emessa è maggiore ossia è spostata verso la zona dello spettro che definiamo rossa (perché questo sarebbe il colore che vedremmo se restiamo nella banda visibile). Quindi, maggiore distanza, maggiore spostamento verso il rosso, in inglese *redshift*. Ecco la terza dimensione che gli astronomi usano per trasformare la visione bidimensionale del cielo in una mappa 3D. Ma c'è di più. Poiché la luce impiega un certo tempo finito a percorrere la strada dalla sorgente a noi, maggiore è il *redshift*, maggiore sarà il tempo impiegato a raggiungerci ossia tanto più tempo fa la luce è partita. Per questo motivo guardare sorgenti ad alto *redshift* significa guardare l'universo come era tanto tempo fa. Insomma, il *redshift* di un oggetto ci dice non solo quanto è distante da noi la sorgente luminosa (il dove), ma anche quale era l'età dell'universo al momento in cui la luce è partita (il quando). Un solo numero per passare dalla tela del cielo al dove e quando del cosmo.

aveva introdotto nella sua teoria per poi pentirsi e ritrattare troppo presto. E che ci debba essere nel conto non è più il frutto di una intuizione geniale dettata da un motivo puramente opportunistico. C'è quella costante cosmologica perché il vuoto stesso ha una sua energia e non perché, come ad Einstein sarebbe piaciuto, l'universo possa restare uguale a sé stesso in eterno senza mai espandersi. Costante cosmologica e materia oscura sono i due pilastri che reggono il modello Λ CDM. *Nomen omen*, Λ CDM = Λ + CDM a ricordare i due protagonisti di questa storia: la costante cosmologica Λ e la Cold Dark Matter. Una accoppiata così vincente da essere in accordo talmente buono con le osservazioni a disposizione da essere definita come **Concordance Model** perché, appunto, mette d'accordo tutti.

Tutti contenti, quindi? Sì, ma anche no. E quell'anche no è racchiuso nell'aggettivo che abbiamo usato per battezzare i due costituenti principali del modello: oscuro. Più del 95% dell'universo è composto da energia e materia oscura ossia da due componenti di cui non conosciamo né la natura né le proprietà. E, quando non si sa qualcosa, l'unica via che i cosmologi possono percorrere è affidarsi a tanta buona volontà, alla

metaforica carta e penna e alla fantasia mediata dal rigore delle equazioni. Il risultato è una messe di teorie che predicono come l'universo si espande e come quelle minuscole disomogeneità che appaiono come puntini sulla mappa della temperatura della radiazione cosmica di fondo sono cresciute per diventare le spettacolari galassie che ci affascinano nelle immagini ottenute con i grandi telescopi a terra e con quei nostri occhi nello spazio che sono i satelliti come Hubble e JWST. Risposte tanto diverse che si fa fatica a credere che possano spiegare le stesse osservazioni.

Ad esempio, che cos'è l'energia oscura? La costante cosmologica, ovvio. No, invece, perché l'energia del vuoto la puoi calcolare e il risultato è in disaccordo con la misura per ben 133 ordini di grandezza. E allora forse non è costante per niente, ma la sua equazione di stato (che regola la relazione tra pressione e densità) cambia col tempo. Ma questo sposta solo il problema da "che cos'è l'energia oscura?" a "quale è la sua equazione di stato?" e scoprire questo arcano è impresa più ardua di quella precedente. Perché di formule per quella quantità e di motivi per cui debba avere questa o quella forma ne sono state proposte a iosa e tutte fanno il loro dovere: sono

in accordo con i dati osservativi.

Contenti? Ancora no, ovviamente. Perché avere tante teorie che spiegano i dati è lo stesso che non averne nessuna. Avere mille risposte ugualmente valide alla stessa domanda significa ritrovarsi al via dopo essersi sforzati di partire a tutta velocità. Ma se le risposte sono così tante è perché la domanda era troppo vaga. Detto in termini più pratici, i dati che abbiamo al momento non sono in grado di dirci quale teoria è quella giusta perché non sono sufficientemente precisi o non ci danno informazioni su quelle quantità che potrebbero discriminare tra teorie diverse. Diverse in cosa? Nelle previsioni che fanno sul modo in cui l'universo si espande? Di nuovo: sì, ma anche no. Perché teorie pure radicalmente differenti possono prevedere la stessa espansione accelerata. Ma non la stessa crescita delle strutture. Ci serve, quindi, qualche osservabile che ci dia informazioni su entrambi gli aspetti: evoluzione e crescita.

La natura sarà anche maligna come ha imparato a sue spese l'immaginario viaggiatore islandese di Leopardi, ma non lo è tanto da non offrirci gli strumenti adatti per imparare a conoscere il cosmo. Per capirlo, dobbiamo fare un passo indietro nel tempo. Tornare a quel 1915 in cui Einstein (sempre lui) formulò la sua teoria della relatività generale che ci insegna che la gravità deforma lo spazio-tempo. Conseguenza ne è che la traiettoria più breve tra due punti sarà diversa a seconda che nel mezzo ci sia o no una distribuzione di materia. Se i due punti sono una sorgente luminosa distante, che sia una stella o una galassia, e un osservatore dall'altro lato di un telescopio, quello che accadrà è che l'immagine dell'oggetto apparirà diversa da quella che realmente è. Questo effetto è ciò che chiamiamo **lensing gravitazionale** dall'analogia con il ben noto fenomeno delle lenti in ottica geometrica. Se le distanze coinvolte sono su scala cosmologica, il raggio di luce nel suo percorso incontrerà la distribuzione della materia dell'universo stesso e viaggerà mentre l'espansione sta avendo luogo. La distorsione dell'immagine è, quindi, una misura indiretta dell'espansione e della crescita. È, cioè, quello che stavamo cercando. Solo che tra il dire e il fare c'è di mezzo... la natura maligna che ci complica le misure. Dal momento che l'universo è in media omogeneo e isotropo,

la distorsione dovuta al lensing gravitazionale è talmente piccola che non si può misurare direttamente. Fine dei giochi? No, perché c'è un altro effetto che possiamo sfruttare. Nell'ipotesi ragionevole che le galassie siano orientate in maniera casuale, la media su un numero molto grande di galassie darebbe una ellitticità media nulla¹. Se non ci fosse, appunto, il *lensing* gravitazionale! La media non farà zero, ma sarà uguale proprio a quella distorsione minuscola che pensavamo di non poter misurare. Di più. Se riuscissimo a fare questa misura in diversi punti del cielo, potremmo studiare come queste distorsioni sono correlate ossia, semplificando grossolanamente, quale è la probabilità che, avendo osservato una certa distorsione qui ed ora, si trovi lo stesso valore lì e allora, dove lì e allora sono misurati dalla distanza angolare sul cielo e dal *redshift*. E questa misura sappiamo come prevederla per cui il gioco è ora trovare nel pagliaio di teorie l'ago che ci pungerà proprio nel modo giusto. Ossia, fuor di metafora, il valore dei parametri della teoria che prevedono una correlazione a due punti dello *shear* in accordo con quella misurata.

Detto, fatto? Eh, magari. Già il primo passo di questa avventura rischia di incastrarsi in una buca o di schiacciare una mina. Perché le distorsioni di cui sopra sono comunque piccole per cui bisogna essere sicuri di aver misurato correttamente la forma delle galassie rimuovendo tutti quegli effetti che possono mimare quello del *lensing* gravitazionale. Per esempio, bisogna rimuovere l'effetto dell'atmosfera terrestre, il che si può fare nel modo migliore andando nello spazio. Poi sottrarre le distorsioni dovute agli strumenti il che richiede di caratterizzare accuratissimamente i parametri che caratterizzano le ottiche del telescopio e della camera ed essere sicuri che i loro valori siano stabili nel tempo. Bisogna che l'immagine sia nitida e non sommersa nel rumore il che richiede lunghi tempi di esposizione o un filtro ampio o un telescopio con

¹L'ellitticità di una galassia è un vettore che permette di quantificare la sua forma. Se approssimiamo la galassia come un'ellisse con asse maggiore a e asse minore b , la sua ellitticità è un vettore le cui due componenti sono $(e_1, e_2) = (e \cos \alpha, e \sin \alpha)$ dove il modulo è $e = \sqrt{(a^2 - b^2)/(a^2 + b^2)}$, e l'orientazione è data da $\alpha = \arctan(b/a)$. Poiché, in assenza di *lensing* gravitazionale, l'orientazione è casuale, la media di (e_1, e_2) è nulla.

grande specchio primario. Ed ancora non basta. Perché se vogliamo studiare le correlazioni nello spazio e nel tempo dobbiamo mappare un'area molto grande ed arrivare a *redshift* alti. Insomma, l'ideale è una *survey* fotometrica a grande area e profonda eseguita da un telescopio con ottiche stabili e una camera a grande campo e grande risoluzione in orbita nello spazio. C'è? Sì, Euclid!

Euclid eseguirà quella che viene definita una *survey* di *lensing* gravitazionale di quarta generazione. Unirà precisione, profondità, area, risoluzione e stabilità per permettere una misura tomografica (ossia a diversi *redshift*) dello spettro di potenza (che altro non è che un modo diverso di quantificare le correlazioni di cui dicevamo prima) dello *shear* cosmico ossia l'effetto di *lensing* gravitazionale della struttura su larga scala. Ma Euclid potrà fare ancora di più. Perché, infatti, limitarsi ad una correlazione a due punti se hai galassie in abbondanza per misurare correlazioni a più punti? E perché accontentarsi di queste correlazioni se puoi costruire una mappa sul cielo della distribuzione di materia proiettata e dalle proprietà topologiche di questa ricavare informazioni ulteriori? Parlando in un linguaggio più tecnico, la quantità e qualità delle misure di *shear* fornite da Euclid permetterà di studiare il campo di distorsione usando statistiche di ordine superiore con una accuratezza finora impensabile. Tutte queste misure permetteranno di testare sia come l'universo si è espanso negli ultimi dieci miliardi di anni, sia come le perturbazioni di densità sono cresciute. Espansione e crescita: il binomio di cui avevamo bisogno per rendere più fitte le maglie del setaccio attraverso cui far passare la messe di teorie di cui parlavamo.

Un grande passo in avanti, ma perché accontentarsi e non provare a fare proprio un grande balzo? Si fa molta più strada saltando. Per capire come mettere le molle sotto le nostre suole, dobbiamo notare che il *lensing* gravitazionale è sensibile al prodotto di evoluzione e crescita, ma non i due singoli aspetti separatamente. È un po' come sapere che il risultato di una moltiplicazione di due numeri interi A e B è 36. Potete escludere tanti numeri, ma potete ottenere 36 se $(A, B) = (2, 18)$ o $(3, 12)$ o $(4, 9)$ o $(6, 6)$. Quale sarà la combinazione giusta? Per scoprirlo ser-

ve qualcosa che misuri A o B individualmente. Ossia, venendo al caso nostro, qualcosa che misuri o la sola espansione o la sola crescita delle strutture.

Ancora una volta questo qualcosa c'è ed è il *galaxy clustering*. Torniamo a guardare il cielo, ma immaginiamo di poter misurare di ogni galassia non solo la sua posizione sulla volta celeste, ma anche la sua distanza. Potremmo costruire in questo modo una mappa tridimensionale dell'universo osservabile e andare anche a determinare se le strutture sono più o meno addensate tra di loro. Potremmo, cioè, determinare quale è la probabilità di trovare una galassia in una certa posizione di questa mappa 3D se so di averne già trovata una in una data posizione. L'oggetto matematico che quantifica questa proprietà è la funzione di correlazione che, nello spazio di Fourier (una sorta di artificio ideale che i cosmologi usano per semplificare alcuni conti) diventa lo spettro di potenza. Ed è qui che arriva il bello. A determinare quanto fitta è la rete che le galassie disegnano nello spazio-tempo è la gravità e come essa guida il processo di crescita delle strutture. Ossia, il *galaxy clustering* misura la crescita delle strutture. Proprio quello che cercavamo: una misura di A o di B e non di $A \times B$.

Ma come si fa una mappa 3D? Serve un telescopio che misuri non solo la posizione in cielo, ma anche il *redshift* con una accuratezza dell'ordine di una parte su mille. E lo deve fare, di nuovo, su un'area grande e in un intervallo di *redshift* ampio e ricco di informazioni. Servirebbe quella che viene definita una *survey* spettroscopica di quarta generazione. Ce l'abbiamo? Copia e incolla la risposta di prima: sì, è Euclid! La missione ESA misurerà la posizione e il *redshift* di oltre dieci milioni di galassie costruendo una mappa 3D dell'universo nel range di *redshift* compreso tra 0.9 e 1.8, ossia proprio quello che non era stato possibile testare con gli strumenti da terra nelle *survey* precedenti.

Manco a dirlo, c'è un problema anche qui. Anzi, più di uno, almeno tre. I nostri modelli teorici sono in grado di prevedere le proprietà di *clustering* degli aloni di materia oscura, ma quello che misuriamo è il *clustering* delle galassie. C'è una corrispondenza 1 a 1 tra le due cose? Purtroppo, no perché ogni alone può ospitare più di una galassia. Si dice, quindi, che lo spettro di potenza

delle galassie è una versione distorta di quello degli aloni e proprio questo *bias* è una ulteriore incognita che si aggiunge a quelle del modello cosmologico. Un problema che è anche un'opportunità. Misurare il *bias* ci permette, infatti, di discriminare tra diversi modelli di formazione delle galassie aggiungendo un tassello ulteriore alla nostra comprensione di come la luce delle galassie si accenda all'interno dell'oscurità degli aloni. Problema numero due: noi misuriamo il *redshift*, ma il *redshift* non è la distanza. Ci direbbe quale è la distanza della galassia se conoscessimo il modello cosmologico che è proprio quello che stiamo cercando di scoprire. Dobbiamo, quindi, introdurre una correzione che tenga conto dell'eventuale differenza tra il modello che abbiamo ipotizzato a priori essere quello giusto e quello che invece i dati ci dicono essere il più adatto a spiegarli. Infine, il moto relativo delle galassie l'una rispetto all'altra dipende da come evolve il potenziale gravitazionale della struttura su larga scala ossia da come le strutture cosmiche si assemblano. Ed anche la differenza tra le nostre ipotesi e i dati è una funzione di quei parametri cosmologici che vogliamo misurare.

Tre problemi che quindi, ci danno informazioni in più una volta che abbiamo capito come quantificarli e una volta che la nostra *survey* abbia sufficiente risoluzione in *redshift* e ampiezza in area di cielo per garantirne una misura. E, arrivati a questo punto l'avrete capito: Euclid ha entrambe le caratteristiche richieste.

Lensing gravitazionale più *galaxy clustering* su un'area di 15000 gradi quadrati (circa un terzo del cielo) e su un *range* che copre gli ultimi dieci miliardi di anni di storia dell'universo. Uno sguardo unico su come il cosmo si è espanso e su come le strutture sono cresciute. Il tutto in un'unica missione capace di fare ciò che le *survey* di galassie finora non sono riuscite a fare nonostante l'impiego delle migliori risorse osservative. Questo è Euclid: la luce che viene nelle tenebre per illuminare l'oscuro. Non vediamo l'ora di farci abbagliare!



[1] A. G. Riess et al.: *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, *Astronomical Journal*, 116 (1998) 1009.

- [2] S. Perlmutter et al.: *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae*, *Astrophysical Journal*, 517 (1999) 565.
- [3] D. N. Spergel et al.: *First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters*, *Astrophysical Journal Supplement Serie*, 148 (2003) 175.
- [4] P. A. R. Ade et al.: *Planck early results. XVIII. The power spectrum of cosmic infrared background anisotropies*, *Astronomy and Astrophysics*, 536 (2011) 1.



Vincenzo F. Cardone: è ricercatore presso l'Osservatorio Astronomico di Roma. Si occupa di *lensing* gravitazionale e modelli cosmologici ed è membro della collaborazione Euclid da più di dieci anni. In Euclid è *leader* del gruppo responsabile dell'estrazione dei parametri cosmologici dalle misure di *weak lensing* e *galaxy clustering*.