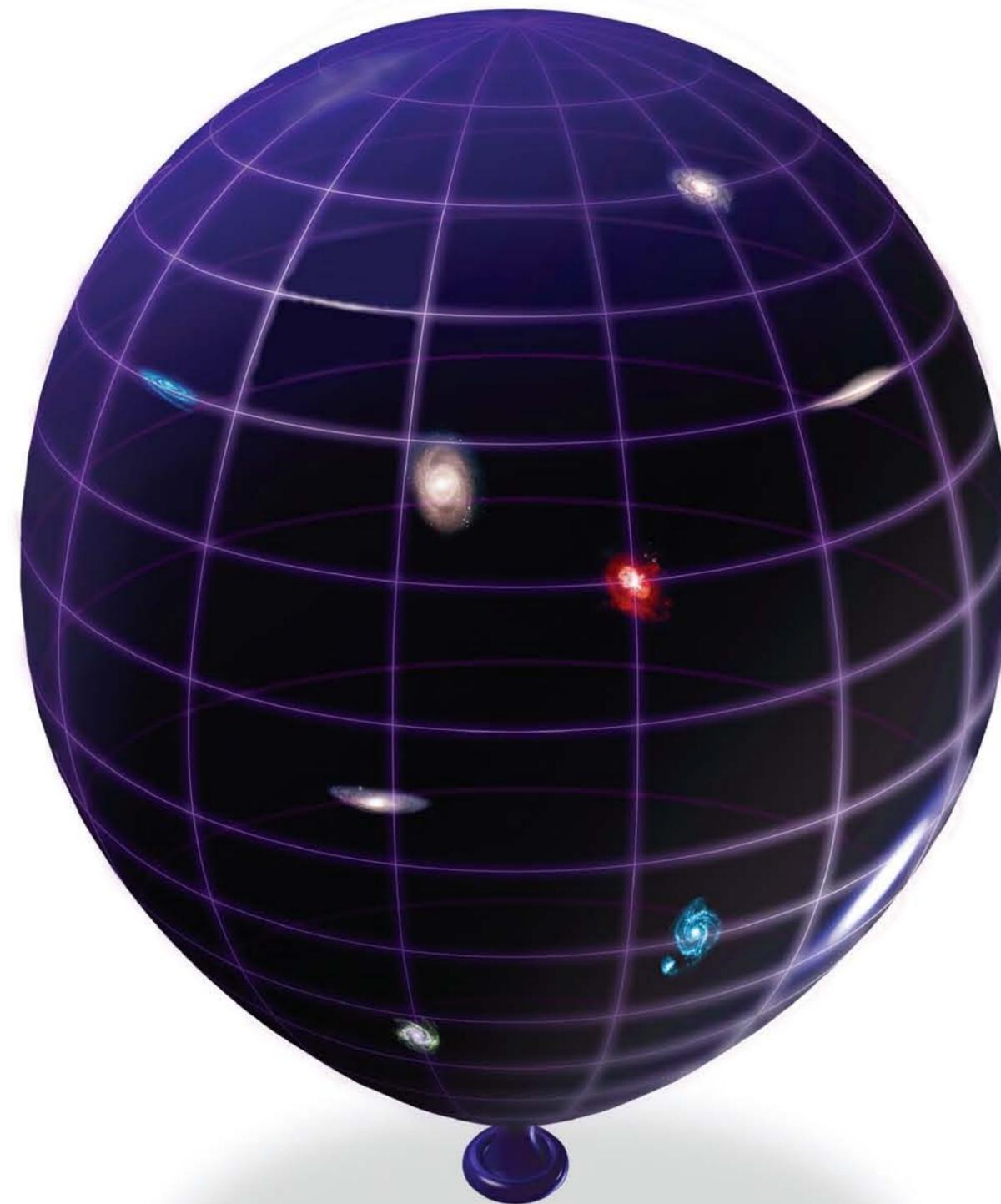
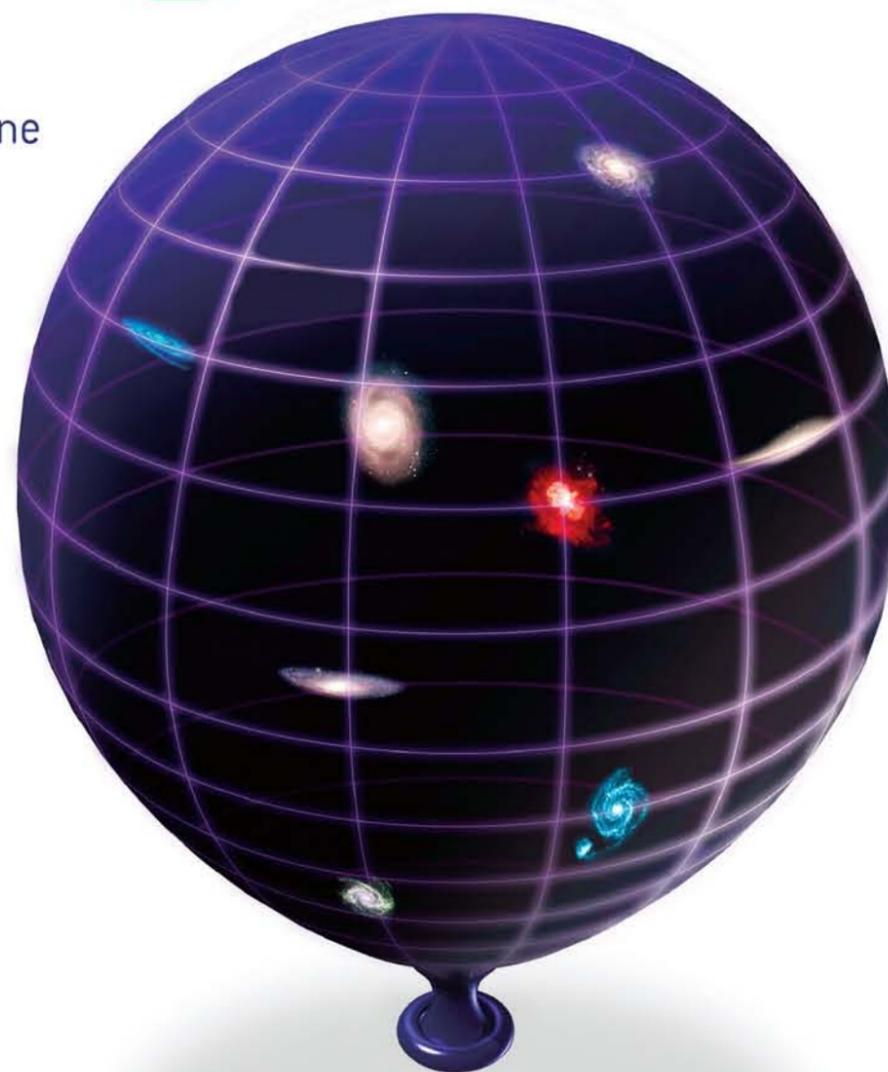


# Piccoli equivoci sul big bang

Perplessi a proposito dell'espansione dell'universo? Non siete i soli. Anche gli astronomi, a volte, fanno un po' di confusione

di **Charles H. Lineweaver**  
e **Tamara M. Davis**



UN PALLONCINO CHE SI GONFIA è un'analogia vecchia ma efficace per capire l'espansione dell'universo. Le galassie sulla superficie del palloncino sono in quiete, eppure con l'espandersi dell'universo la distanza di una galassia dall'altra aumenta. Le galassie stesse non aumentano di dimensione.

**L'**espansione dell'universo è probabilmente il fatto più importante che abbiamo scoperto a proposito delle nostre origini. Non stareste leggendo questo giornale se l'universo non si fosse espanso. Gli esseri umani non esisterebbero. Gli oggetti freddi fatti di molecole, come le forme di vita e i pianeti di tipo terrestre, non sarebbero mai comparsi se l'universo, a partire da un big bang ad altissima temperatura, non si fosse espanso e raffreddato. La formazione di tutte le strutture del cosmo, dalle galassie alle stelle, dai pianeti agli articoli di «Le Scienze», è dovuta all'espansione. A luglio saranno passati quarant'anni da quando fu annunciata la scoperta di prove definitive dell'espansione dell'universo a partire da uno stato primordiale più caldo e più denso. Erano stati scoperti gli ultimi freddi bagliori del big bang: la radiazione cosmica di fondo a microonde. Da allora, l'espansione e il raffreddamento dell'universo sono stati il tema unificante della cosmologia, proprio come l'evoluzione darwiniana è il tema unificante della biologia. Analogamente all'evoluzione darwiniana, l'espansione cosmica è il contesto all'interno del quale prendono forma strutture semplici che si sviluppano nel corso del tempo in strutture complesse. Senza l'evoluzione e l'espansione, la biologia e la cosmologia moderne avrebbero poco senso.

L'espansione dell'universo è come l'evoluzione darwiniana anche in un altro senso: la maggior parte degli scienziati pensa di averla capita, ma pochi sono d'accordo sul suo vero significato. Un secolo e mezzo dopo *L'origine delle specie*, i biologi discutono ancora sulle modalità e le implicazioni (ma non sulla realtà) del darwinismo, mentre buona parte del pubblico ancora vaga in un'ignoranza predarwiniana. Allo stesso modo, a 75 anni dalla sua scoperta, l'espansione dell'universo è ancora largamente fraintesa. Un autorevole cosmologo che si occupa dell'interpretazione della radiazione cosmica di fondo a microonde, James Peebles della Princeton University, scrisse nel 1993: «La piena ampiezza e ricchezza del modello del big bang caldo dell'universo in espansione non è compresa come meriterebbe, persino tra coloro che forniscono alcuni dei più stimolanti contributi alla ricerca cosmologica.»

Scienziati famosi, autori di libri di testo di astronomia e noti divulgatori hanno fatto affermazioni scorrette, fuorvianti o facilmente equivocabili sull'espansione dell'universo. Dato che l'espansione è la base del modello del big bang, questi equivoci sono di grande importanza. L'espansione è un'idea affascinante per la sua semplicità, ma che cosa significa esattamente che l'universo si sta espandendo? Dove si espande? Anche la terra si espande? Ad aumentare la confusione, adesso sembra che l'espansione stia accelerando, un processo le cui conseguenze possono veramente cambiare le nostre concezioni.

### Ma che cos'è l'espansione?

Quando si espande un oggetto familiare, come una cavaglia slogata o l'impero romano o ancora una bomba, esso diventa più grande, allargandosi nello spazio attorno a sé. Le cavaglie, gli imperi e le bombe hanno centri e confini. Fuori dai loro confi-

ni c'è spazio in cui espandersi. L'universo non sembra avere un confine o un centro o un esterno, perciò come può espandersi?

Una buona analogia è questa: immaginiamo di essere una formica che vive sulla superficie di un palloncino che si sta gonfiando. Improvvisamente il nostro mondo è diventato bidimensionale; le sole direzioni che conosciamo sono destra, sinistra, avanti e indietro. Non abbiamo idea di che cosa significhino «su» e «giù». Un bel giorno ci rendiamo conto che la nostra camminata per andare in cerca di afidi è più lunga di un tempo: cinque minuti oggi, sei minuti domani, sette dopodomani. Anche il tempo necessario per raggiungere altri luoghi familiari sta aumentando. Eppure siamo sicuri che non stiamo camminando più

lentamente e che gli afidi si aggirano casualmente in gruppo e non si allontanano da noi.

Questo è il fatto importante: le distanze tra noi e gli afidi stanno aumentando anche se gli afidi non si stanno spostando. Stanno lì, immobili rispetto alla gomma del palloncino, eppure la nostra distanza da loro e quella tra ognuno di essi sta aumentando perché il palloncino si sta espandendo. Osservando questi fatti, ne concludiamo che si sta espandendo il terreno sotto i nostri piedi. Strano, perché abbiamo camminato in giro per il nostro mondo senza trovare limiti o un «esterno» in cui possa espandersi.

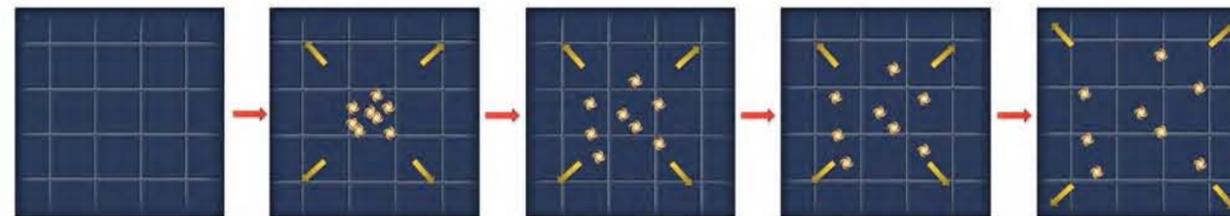
## In sintesi/Confusione cosmica

- L'espansione dell'universo è uno dei concetti fondamentali della scienza moderna, ma anche uno di quelli più comunemente fraintesi.
- La chiave per evitare confusioni è di non prendere il termine «big bang» [grande esplosione] troppo letteralmente. Il big bang non fu una bomba che esplose al centro dell'universo e scagliò materia verso l'esterno in un vuoto preesistente. Fu piuttosto un'esplosione dello spazio stesso che avvenne ovunque, analogamente a come l'espansione della superficie di un palloncino avviene ovunque sulla superficie.
- Questa differenza tra espansione *dello* spazio ed espansione *nello* spazio può sembrare sottile, ma ha conseguenze importanti per le dimensioni dell'universo, la velocità a cui le galassie si allontanano le une dalle altre, le osservazioni che possiamo fare e il tipo di accelerazione a cui sembra che l'universo sia sottoposto.
- A rigor di termini, il modello del big bang ha da dire molto poco sul big bang stesso. Descrive ciò che avvenne dopo.

## CHE ESPLOSIONE FU IL BIG BANG?

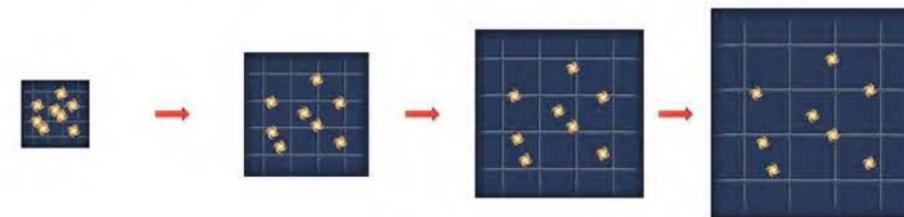
**SBAGLIATO:** Il big bang fu come una bomba che esplose *nello* spazio, precedentemente vuoto.

Da questo punto di vista, l'universo prese a esistere quando la materia esplose a partire da un punto particolare. La pressione era massima al centro e più bassa nel vuoto circostante, e questa differenza di pressione spinse il materiale verso l'esterno.



**GIUSTO:** Fu un'esplosione *dello* spazio, che portò con sé la materia.

Lo spazio e il tempo in cui risiediamo apparvero col big bang e iniziarono a espandersi. Nessun luogo specifico ne fu il centro. La pressione era identica dappertutto: non c'era alcuna differenza in questo parametro che potesse dar luogo a un'esplosione convenzionale.



Alfred T. Kamajian

L'espansione del nostro universo è molto simile a quella del palloncino. Le distanze tra noi e le galassie lontane stanno aumentando. Gli astronomi dicono, semplificando, che le galassie distanti «recedono», ma di fatto le galassie non stanno viaggiando nello spazio allontanandosi da noi. Non sono schegge di un'enorme bomba. In realtà è lo spazio tra noi e le galassie che si sta espandendo. Le singole galassie si muovono a caso all'interno degli ammassi, ma gli ammassi di galassie sono essenzialmente in quiete. Il termine «in quiete» può essere definito rigorosamente. La radiazione di fondo a microonde riempie l'universo e definisce un sistema di riferimento universale, analogo alla gomma del palloncino, rispetto al quale si può misurare il moto di una galassia.

Questa analogia con il palloncino non deve essere portata troppo oltre. Dal nostro punto di vista esterno al palloncino l'espansione della gomma curva bidimensionale è possibile solo perché la gomma è immersa nello spazio tridimensionale. Nel contesto delle tre dimensioni il palloncino ha un centro, e la sua superficie si espande nell'aria circostante via via che viene gonfiato. Se ne potrebbe concludere che l'espansione del nostro spazio tridimensionale richiede la presenza di una quarta dimensione. Ma nella teoria della relatività generale di Einstein, il fondamento della cosmologia moderna, lo spazio è dinamico. Può espandersi, contrarsi e curvarsi senza essere immerso in uno spazio di dimensione maggiore.

Da questo punto di vista, l'universo è autocontenuto. Non ha bisogno né di un centro da cui espandersi né di un esterno (dovunque esso si trovi) con uno spazio vuoto in cui espandersi.

Quando si espande, non si appropria di uno spazio circostante precedentemente non occupato. Alcune teorie cosmologiche, come la teoria delle stringhe, postulano l'esistenza di dimensioni ulteriori, ma l'espansione del nostro universo tridimensionale non ha bisogno di questa ipotesi.

### L'inevitabile ingorgo

Nel nostro universo, come sulla superficie del palloncino, ogni cosa si allontana da ogni altra. Quindi il big bang non fu un'espansione *nello* spazio; fu piuttosto un'esplosione *dello* spazio. Non avvenne in un luogo particolare per poi estendersi di lì in un immaginario spazio vuoto preesistente. Si verificò dappertutto simultaneamente.

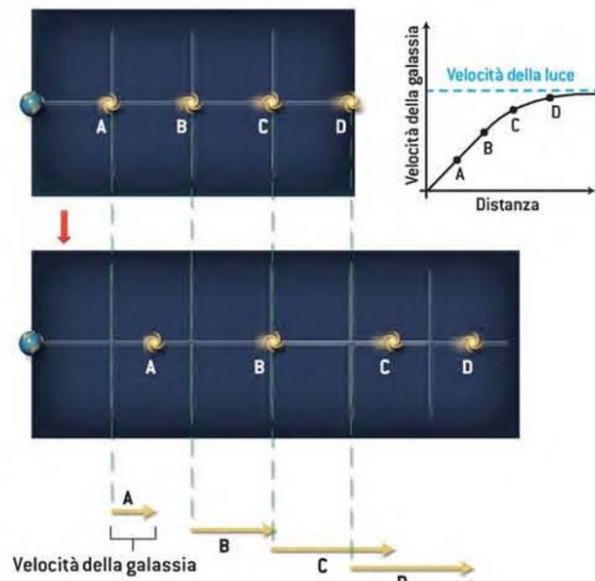
Se si immagina di far tornare indietro nel tempo l'orologio, ogni regione dello spazio nell'universo si contrae, e tutte le galassie che vi sono contenute si avvicinano sempre di più, fino a scontrarsi in una sorta di ingorgo cosmico: il big bang. Questa analogia con un ingorgo stradale fa pensare a un intasamento che si potrebbe evitare, se solo si ascoltassero alla radio le notizie sul traffico. Ma il big bang fu un ingorgo inevitabile. Fu come se la superficie della terra e tutte le sue strade si contraessero lasciando invece restare le automobili delle loro dimensioni. Prima o poi, in ogni strada le macchine sarebbero stipate, paraurti contro paraurti. Nessun notiziario radiofonico potrebbe evitare un simile ingorgo. L'intasamento sarebbe ovunque.

Analogamente, il big bang avvenne dappertutto: nella stanza in cui state leggendo questo articolo, in un punto appena al-

## LE GALASSIE POSSONO RECEDERE A VELOCITÀ MAGGIORE DELLA LUCE?

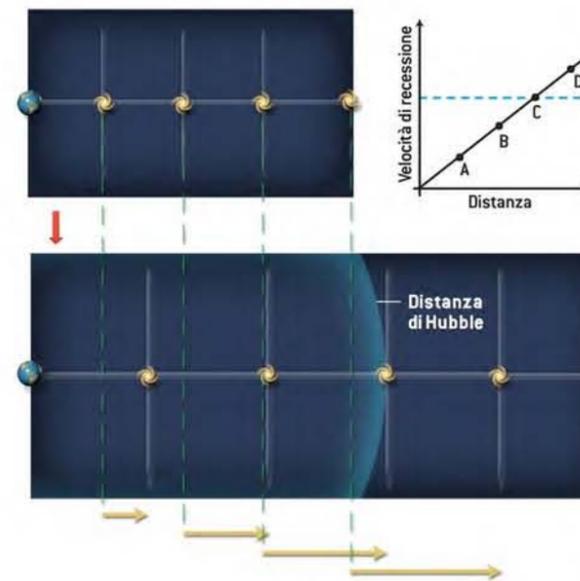
**SBAGLIATO:** Certo che no. La teoria della relatività ristretta di Einstein lo vieta.

Consideriamo una regione di spazio che contiene alcune galassie. Via via che si espande, le galassie si allontanano. Più è lontana una galassia, maggiore è la sua velocità di recessione (freccie in giallo). Se la velocità della luce è il limite, la velocità di recessione, a un certo punto, non può più aumentare.



**GIUSTO:** Certo che possono. La relatività ristretta non si applica alla velocità di recessione.

La velocità di recessione aumenta senza limiti con la distanza. Oltre una certa distanza, nota come distanza di Hubble, supera la velocità della luce. Questa non è una violazione della relatività, perché la velocità di recessione non è causata da un moto nello spazio, ma dall'espansione dello spazio.



Alfred T. Kamajian

la sinistra di Alpha Centauri. Ovunque. Non fu una bomba che esplose in un punto specifico che possiamo identificare come centro dell'esplosione. Così, nell'analogia con il palloncino, non c'è un punto speciale sulla superficie del palloncino che sia il centro dell'espansione.

Questa ubiquità del big bang è valida indipendentemente da quanto grande sia l'universo o addirittura dal suo essere di grandezza finita o infinita. La relatività generale descrive come si dilata ogni regione dello spazio, ma non dice nulla sulle dimensioni o sulla forma complessiva dello spazio. I cosmologi dicono qualche volta che l'universo è stato delle dimensioni di un pompelmo, ma intendono che la parte di universo che possiamo vedere attualmente, l'universo osservabile, è stato delle dimensioni di un pompelmo.

Osservatori che vivessero nella galassia di Andromeda e oltre avrebbero i loro universi osservabili, distinti dal nostro ma che vi si sovrappongono. Gli abitanti di Andromeda possono vedere galassie che noi non possiamo vedere, solo per il fatto di essere un po' più vicini a esse, e viceversa. Anche il loro universo osservabile è stato delle dimensioni di un pompelmo. Quindi possiamo concepire l'universo delle origini come un mucchio di pompelmi che si estende all'infinito in tutte le direzioni. Perciò l'idea che il big bang fosse «piccolo» è fuorviante. È possibile che la totalità dello spazio sia infinita. Per quanto uno spazio infinito si contragga, rimane infinito.

### Più veloce della luce

Altri equivoci riguardano la descrizione quantitativa dell'espansione. La velocità a cui aumenta la distanza tra le galassie segue una legge scoperta dall'astronomo statunitense Edwin Hubble nel 1929: la velocità con cui una galassia recede da noi ( $v$ ) è direttamente proporzionale alla sua distanza ( $d$ ), cioè  $v = Hd$ . La costante di proporzionalità  $H$ , la «costante di Hubble», quantifica la rapidità con cui lo spazio si sta dilatando, non soltanto attorno a noi ma attorno a qualsiasi osservatore nell'universo.

Alcuni sono perplessi per il fatto che alcune galassie non obbediscono alla legge di Hubble. Andromeda, la grande galassia più vicina a noi, si sta effettivamente muovendo verso di noi. Queste eccezioni si verificano perché la legge di Hubble descrive solo il comportamento medio delle galassie. Le galassie possono avere anche modesti moti locali nel loro girovagare, e attrarsi gravitazionalmente, come stanno facendo la Via Lattea e Andromeda. Anche le galassie lontane hanno piccole velocità locali, ma dal nostro punto di vista (per valori elevati di  $d$ ) queste velocità casuali sono sovrastate dalla grande velocità di recessione ( $v$ ). Quindi per quelle galassie la legge di Hubble vale con buona approssimazione.

Secondo la legge di Hubble, l'universo non si espande a una singola velocità. Alcune galassie recedono da noi a 1000 chilometri al secondo, altre (quelle distanti il doppio) a 2000, e così

via. In effetti, la legge di Hubble dice che le galassie oltre una certa distanza, nota come distanza di Hubble, recedono a velocità maggiore di quella della luce. Per i valori misurati della costante di Hubble, questa distanza è pari a circa 14 miliardi di anni luce.

Il fatto di affermare che le galassie possono essere più veloci della luce significa che la legge di Hubble è sbagliata? La teoria della relatività ristretta di Einstein non dice forse che nulla può avere una velocità superiore a quella della luce? Questo problema ha lasciato perplesse intere generazioni di studenti. La soluzione è che la relatività ristretta si applica solo a velocità «normali», al movimento nello spazio. La velocità nella legge di Hubble è una velocità di recessione causata dall'espansione dello spazio, non un movimento attraverso lo spazio. È un effetto che riguarda la relatività generale, e non è vincolato dal limite di velocità della relatività ristretta. Avere una velocità di recessione maggiore della velocità della luce non viola la relatività ristretta. È ancora vero che nulla batterà mai in velocità un raggio di luce.

### Verso il rosso!

La prima constatazione che l'universo si sta espandendo emerse tra il 1910 e il 1930. Gli atomi emettono e assorbono luce di specifiche lunghezze d'onda, come si può misurare in esperimenti in laboratorio. Le stesse configurazioni appaiono nella luce proveniente dalle galassie lontane, con la differenza che sono spostate verso lunghezze d'onda maggiori. Come dicono gli astronomi, la luce galattica ha subito uno spostamento verso il rosso (*redshift*, in inglese, con un termine che è entrato nel linguaggio astronomico internazionale). La spiegazione è molto semplice: via via che lo spazio si espande, le onde luminose si allungano, e perciò si indeboliscono. Se le dimensioni dell'universo raddoppiano durante il tragitto delle onde, la loro lunghezza d'onda raddoppia e la loro energia si dimezza.

Questo fenomeno può essere descritto in termini di temperatura. I fotoni emessi da un corpo hanno, collettivamente, una certa temperatura: una certa distribuzione di energia che descrive quanto è caldo il corpo. Viaggiando nello spazio in espansione, i fotoni perdono energia e la loro temperatura decresce. In questo modo l'universo si raffredda espandendosi, proprio come l'aria compressa in una bombola da sub si raffredda quando viene fatta uscire permettendole di espandersi. Per esempio, oggi la radiazione di fondo a microonde ha una temperatura di circa tre kelvin, ma il fenomeno che la produsse avvenne a circa 3000 Kelvin. Dal momento dell'emissione di questa radiazione l'universo si è ingrandito di un fattore 1000, perciò la temperatura dei fotoni è diminuita dello stesso fattore. Osservando il gas nelle galassie lontane gli astronomi hanno misurato direttamente la temperatura della radiazione nel lontano passato. Queste misurazioni confermano che l'universo si va raffreddando nel corso del tempo.

C'è un'enorme confusione a proposito della relazione tra spostamento verso il rosso e velocità. Il redshift causato dall'espansione è spesso confuso con il più familiare spostamento verso il rosso generato dall'effetto Doppler. Il comune effetto Doppler fa sì che le onde sonore si allungano se la sorgente del suono si sta allontanando, come succede con la sirena di un'ambulanza. Lo stesso principio descrive anche come le onde luminose si allungano se la sorgente della luce si allontana da noi nello spazio.

## Un'ipotesi stancante

Puntuali come un orologio, ogni volta che pubblichiamo un articolo di cosmologia, ci sono lettori che scrivono per sostenere che le galassie non si stanno veramente allontanando da noi e che l'espansione dello spazio è un'illusione. Propongono che gli spostamenti galattici verso il rosso siano causati, in realtà, dal fatto che la luce si «stancherebbe» durante il suo lungo viaggio. Qualche fenomeno ignoto fa sì che la luce perda spontaneamente energia, e così si sposti verso il rosso, mentre si propaga nello spazio.

Questa ipotesi è vecchia di almeno mezzo secolo, e a prima vista sembra plausibile. Il problema è che non concorda con i dati osservati. Per esempio, quando una stella esplose come supernova, diventa splendente e poi si affievolisce; è un processo che dura circa due settimane per il tipo di supernova che gli astronomi usano per studiare lo spazio. Durante queste due settimane, la supernova emette un flusso di fotoni. L'ipotesi della luce stanca prevede che questi fotoni perdano energia mentre si propagano, ma che l'osservatore veda sempre un flusso che dura due settimane.

Nello spazio in espansione, invece, non solo i singoli fotoni si allungano (perdendo così energia) ma anche l'intero flusso di fotoni si allunga. Così ci vogliono più di due settimane perché tutti i fotoni arrivino sulla Terra. Recenti osservazioni confermano questo effetto. Una supernova in una galassia che ha un redshift pari a 0,5 dura apparentemente tre settimane; una supernova in una galassia con redshift pari a 1 dura quattro settimane.

L'ipotesi della luce stanca è in conflitto anche con le osservazioni dello spettro della radiazione cosmica di fondo a microonde e della luminosità superficiale delle galassie distanti. È ora di mettere a letto la luce stanca.



LE SUPERNOVE, come questa nell'ammasso di galassie della Vergine, sono una traccia dell'espansione cosmica. Le loro proprietà osservate escludono teorie cosmologiche alternative in cui lo spazio non si espande.

P. Challinor/Center for Astrophysics/STScI/NASA

## POSSIAMO VEDERE GALASSIE PIÙ VELOCI DELLA LUCE?

**SBAGLIATO:** Naturalmente no. La luce di queste galassie viene trascinata via.

Consideriamo una galassia che si trova al di là della distanza di Hubble (*sfera*), il che significa che recede a velocità maggiore della luce. La galassia emette un fotone (*in giallo*). Mentre il fotone viaggia nello spazio, lo spazio si espande. La distanza dalla Terra aumenta più velocemente di quanto si muova il fotone. Esso non ci raggiungerà mai.



**GIUSTO:** Certo che possiamo, perché la velocità di espansione cambia nel tempo.

Il fotone viene inizialmente trascinato via, come sopra. La differenza è che la distanza di Hubble non è costante, aumenta. La distanza di Hubble può aumentare fino a includere il fotone. Quando ciò avviene, il fotone si muove più velocemente di quanto aumenti la distanza dalla Terra, e così ci può raggiungere.



### GLI AUTORI

CHARLES H. LINEWEAVER e TAMARA M. DAVIS sono astronomi all'osservatorio di Mount Stromlo, vicino a Canberra. I loro argomenti di ricerca vanno dalla cosmologia alla vita nell'universo. Quando era all'Università della California a Berkeley, nei primi anni novanta, Lineweaver fece parte della squadra di COBE. Tamara Davis lavora alla Supernova/Acceleration Probe, un osservatorio spaziale in fase di progettazione.

### Correre per rimanere immobili

L'idea di vedere galassie più veloci della luce può suonare mistica, ma è resa possibile dalle variazioni della velocità di espansione. Immaginiamo un raggio di luce più lontano della distanza di Hubble, 14 miliardi di anni luce, che cerchi di viaggiare nella nostra direzione. Viene verso di noi alla velocità della luce rispetto al suo spazio locale, ma il suo spazio locale si allontana a una velocità maggiore di quella della luce. Sebbene la luce stia viaggiando verso di noi alla massima velocità possibile, non può tenere testa alla dilatazione dello spazio. È un po' come un bambino che cerchi di correre contromano su un tapis roulant. I fotoni alla distanza di Hubble sono come la Regina Rossa e Alice: corrono più veloci che possono solo per rimanere nello stesso posto.

Se ne potrebbe concludere che la luce al di là della distanza di Hubble non ci raggiungerà mai, e che la sua sorgente sarà invisibile per sempre. Ma la distanza di Hubble non è fissa, perché la costante di Hubble, da cui dipende, cambia con il tempo. In particolare, la costante è proporzionale alla velocità a cui aumenta la distanza tra due galassie, divisa per tale distanza. Nei modelli dell'universo in accordo con i dati osservativi, il denominatore cresce più velocemente del numeratore, e così la co-

Alfred T. Kamajian

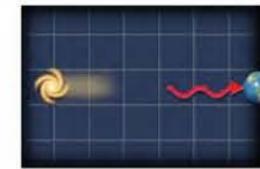
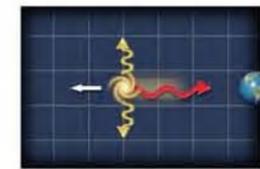
Questo fenomeno è simile, ma non identico, a quello che accade alla luce proveniente dalle galassie lontane. Lo spostamento verso il rosso cosmologico non è un normale effetto Doppler. Spesso i docenti lo descrivono in questo modo, rendendo un pessimo servizio ai loro studenti. Lo spostamento verso il rosso dell'effetto Doppler e il redshift cosmologico sono descritti da due formule diverse. Il primo deriva dalla relatività ristretta, che non tiene conto dell'espansione dello spazio; il secondo viene dalla relatività generale, che ne tiene conto. Le due formule sono quasi uguali per galassie vicine ma divergono per galassie distanti.

Secondo la formula dell'effetto Doppler, gli oggetti la cui velocità nello spazio si avvicina a quella della luce hanno spostamenti verso il rosso che tendono all'infinito. La lunghezza d'onda della luce che emettono diventa troppo lunga per poter essere osservata. Se ciò fosse vero per le galassie, i più lontani oggetti celesti visibili si allontanerebbero a velocità appena inferiore alla velocità della luce. Ma la formula per il redshift cosmologico porta a una conclusione diversa. Nel modello standard attuale della cosmologia, le galassie con uno spostamento verso il rosso di circa 1,5, cioè la cui luce ha una lunghezza d'onda più lunga del 50 per cento del valore di riferimento misurabile in laboratorio, recedono alla velocità della luce. Gli astronomi hanno osservato circa 1000 galassie con redshift maggiore di 1,5. Hanno cioè osservato circa 1000 oggetti che si allontanano da noi a una velocità maggiore di quella della luce. Un modo equivalente per dirlo è che noi ci stiamo allontanando da loro a una velocità maggiore di quella della luce. La radiazione cosmica di fondo a microonde è arrivata ben più lontano, e ha uno spostamento verso il rosso pari a circa 1000. Quando il plasma caldo dell'universo delle origini emise la radiazione che vediamo oggi, stava recedendo dalla nostra posizione circa 50 volte più veloce della luce.

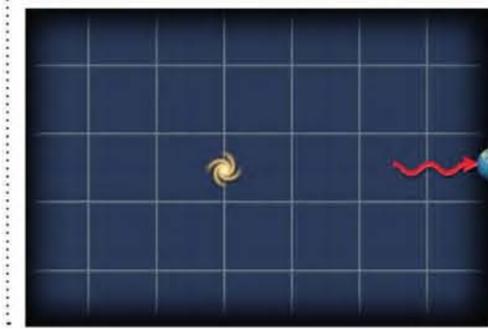
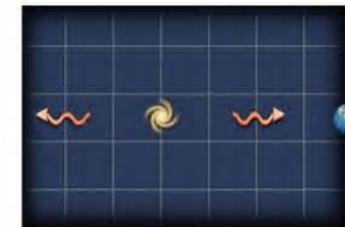
## PERCHÉ C'È UN REDSHIFT COSMICO?

**SBAGLIATO:** Perché le galassie in allontanamento sono soggette a effetto Doppler.

Nell'effetto Doppler le onde luminose si allungano quando la sorgente si allontana dall'osservatore, e quindi diventano più rosse (*in alto*). Poi, la lunghezza d'onda della luce rimane costante durante il suo viaggio attraverso lo spazio (*al centro*). L'osservatore rileva la luce, ne misura lo spostamento verso il rosso e calcola la velocità della galassia (*in basso*).



**GIUSTO:** Perché lo spazio allunga tutte le onde luminose mentre si propagano.



Una galassia è quasi immobile nello spazio, e quindi emette luce con la stessa lunghezza d'onda in tutte le direzioni (*in alto*). La lunghezza d'onda aumenta durante il viaggio perché lo spazio si espande. Perciò la luce diventa gradualmente più rossa (*al centro e in basso*). Il redshift cosmico è diverso a livello quantitativo dall'effetto Doppler.

Alfred T. Kamajian

stante di Hubble decresce. In questo modo la distanza di Hubble aumenta. Al suo aumentare, la luce che inizialmente era appena fuori dalla distanza di Hubble, così da allontanarsi da noi, entra all'interno della distanza di Hubble. E i fotoni si ritrovano in una regione dello spazio che sta recedendo più lentamente della velocità della luce. Di lì ci potranno raggiungere. Può però accadere che la galassia da cui provenivano continui ad allontanarsi a velocità maggiore della luce. Quindi possiamo osservare la luce di galassie che si sono sempre allontanate più velocemente della luce e sempre lo faranno. In altre parole, la distanza di Hubble non è fissa, e non segna i confini dell'universo osservabile.

Che cos'è che segna i confini dell'universo osservabile? Anche qui c'è stata una certa confusione. Se lo spazio non si stesse espandendo, l'oggetto più distante che potremmo vedere sarebbe, adesso, a circa 14 miliardi di anni luce da noi, la massima distanza che la luce può aver percorso nei 14 miliardi di anni trascorsi dal big bang. Ma dato che l'universo si sta espandendo lo spazio percorso da un fotone si espande dietro di esso durante il viaggio. Di conseguenza l'attuale distanza dall'oggetto più distante che possiamo vedere è all'incirca tre volte maggiore: più o meno, 46 miliardi di anni luce.

La recente scoperta che la velocità di espansione sta aumen-

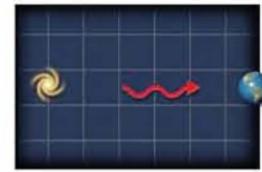
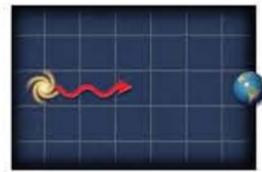
tando rende le cose ancora più interessanti. In precedenza i cosmologi pensavano che vivessimo in un universo in decelerazione, e che sarebbe diventato visibile un numero sempre maggiore di galassie. In un universo in accelerazione, invece, siamo circondati da una frontiera oltre la quale si svolgono eventi che non vedremo mai: un orizzonte degli eventi cosmico. Perché ci raggiunga la luce delle galassie che recedono più velocemente della luce, la distanza di Hubble deve aumentare, ma in un universo in accelerazione smette di aumentare. Eventi distanti possono emettere luce nella nostra direzione, ma questa resta intrappolata al di là della distanza di Hubble per l'accelerazione dell'espansione.

Un universo in accelerazione, quindi, assomiglia a un buco nero nel senso che ha un orizzonte degli eventi, un bordo oltre il quale non si può vedere. La distanza attuale dal nostro orizzonte degli eventi cosmico è di 16 miliardi di anni luce, ben all'interno del raggio di ciò che è osservabile. La luce emessa dalle galassie che oggi si trovano oltre l'orizzonte degli eventi cosmico non potrà mai raggiungerci; la distanza che attualmente corrisponde a 16 miliardi di anni luce si espanderà troppo rapidamente. Saremo ancora in grado di vedere gli eventi che ebbero luogo in certe galassie prima che attraversassero l'orizzonte, ma gli eventi successivi saranno per sempre invisibili.

## QUANTO È GRANDE L'UNIVERSO OSSERVABILE?

**SBAGLIATO:** L'universo ha 14 miliardi di anni, perciò la parte osservabile deve avere un raggio di 14 miliardi di anni luce.

Consideriamo la galassia osservabile più distante, i cui fotoni, emessi poco dopo il big bang, ci stanno raggiungendo solo ora. Un anno luce è la distanza che un fotone percorre in un anno. Quindi un fotone percorre 14 miliardi di anni luce.



**GIUSTO:** Dato che lo spazio si sta espandendo, la parte osservabile del nostro universo ha un raggio maggiore di 14 miliardi di anni luce.



Mentre un fotone viaggia, lo spazio che attraversa si espande. Nel momento in cui ci raggiunge, la distanza complessiva dalla galassia d'origine è maggiore di quella che si otterrebbe con un semplice calcolo basato sulla durata del viaggio: è circa tre volte maggiore.

Alfred T. Kamajian

## Brooklyn si sta dilatando?

In *Io e Annie*, il personaggio del giovane Woody Allen spiega al suo medico e a sua madre perché non può fare i compiti: «L'universo si sta dilatando... L'universo è tutto, e si sta dilatando. Questo significa che un bel giorno scoppierà e allora quel giorno sarà la fine di tutto!» Ma sua madre la sa più lunga di lui: «Tu sei qui, a Brooklyn. E Brooklyn non si sta dilatando!»

Ebbene, ha ragione sua madre. Brooklyn non si sta dilatando. Spesso si pensa che, visto che lo spazio si espande, anche tutto ciò che è in esso si espanda. Ma non è vero. L'espansione di per sé non produce forze. La lunghezza d'onda dei fotoni si espande insieme all'universo perché, a differenza degli atomi e delle città, i fotoni non sono oggetti coerenti le cui dimensioni sono fissate da un compromesso tra varie forze. Un mutamento della velocità di espansione aggiunge una nuova forza a quelle già presenti, ma nemmeno essa fa espandere o contrarre gli oggetti.

Per esempio, se la gravità diventasse più forte, la nostra spina dorsale si comprimerebbe fino al momento in cui gli elettroni nelle vertebre trovano un nuovo equilibrio lievemente più vicini tra loro. Saremmo più bassi, ma non continueremmo a restrin-

gerci. Allo stesso modo, se vivessimo in un universo dominato dalla forza di attrazione gravitazionale, come riteneva la maggior parte dei cosmologi fino a qualche anno fa, l'espansione decelererebbe, esercitando una lieve stretta sui corpi in tutto l'universo e facendo sì che raggiungano un equilibrio in cui sono un po' più piccoli. Ma poi non continuerebbero a restringersi.

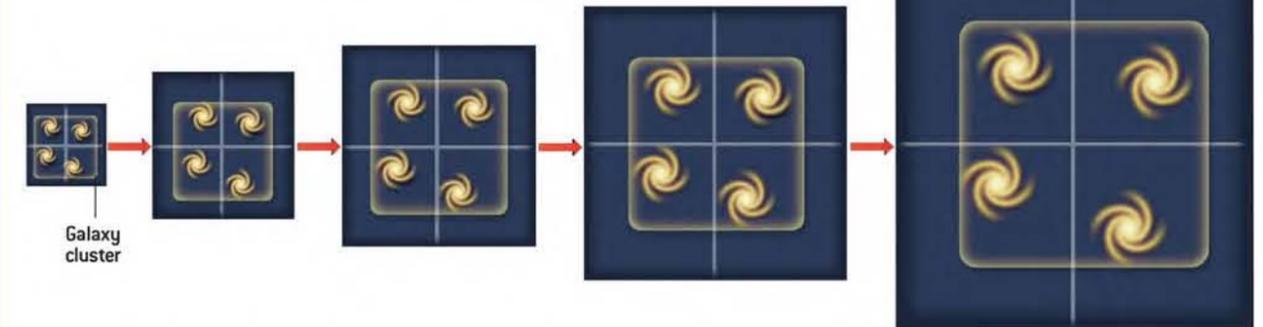
In realtà, l'espansione sta accelerando, e ciò esercita una lieve forza che fa espandere i corpi. Perciò gli oggetti sono lievemente più grandi di quanto lo sarebbero in un universo non in accelerazione, perché l'equilibrio tra le forze si raggiunge per dimensioni lievemente maggiori. Alla superficie della Terra l'accelerazione nella direzione che si allontana dal centro del pianeta è pari a una minuscola frazione ( $10^{-30}$ ) della normale accelerazione gravitazionale. Se questa accelerazione è costante, non fa espandere la Terra; il pianeta si limita a raggiungere un equilibrio stabile con dimensioni appena maggiori di quelle che avrebbe altrimenti.

Il ragionamento cambia se l'accelerazione non è costante, come è stato ipotizzato. Se l'accelerazione aumentasse, a un certo punto potrebbe diventare abbastanza forte da svellere tutte le strutture, portando a un *big rip*, un grande strappo. Ma questo strappo non avverrebbe a causa dell'espansione o dell'accelera-

## ANCHE GLI OGGETTI CHE STANNO NELL'UNIVERSO SI ESPANDONO?

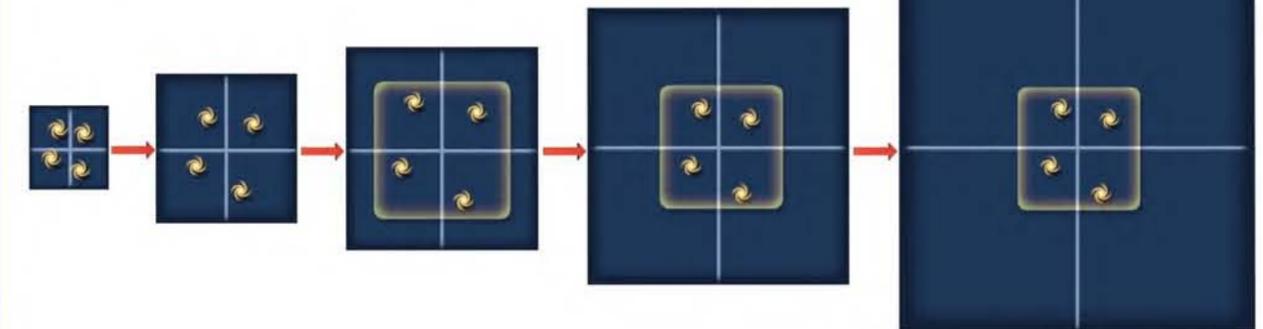
**SBAGLIATO:** Sì. L'espansione fa sì che l'universo e tutto ciò che esso contiene si espandano.

Consideriamo un ammasso di galassie. Via via che l'universo diventa più grande, lo diventa anche l'ammasso. Il bordo dell'ammasso (*linea gialla*) si sposta verso l'esterno.



**GIUSTO:** No. L'universo cresce, ma gli oggetti coerenti al suo interno non crescono.

All'inizio, galassie vicine si allontanano, ma prima o poi la reciproca attrazione gravitazionale supera l'espansione. Si forma un ammasso, e si stabilizza in una dimensione di equilibrio.



Alfred T. Kamajian

zione di per sé, bensì a causa di un'accelerazione che accelera.

Il modello del big bang è basato su osservazioni dell'espansione: la radiazione cosmica di fondo a microonde, la composizione chimica dell'universo e il modo in cui è ammassata la materia. Come tutte le idee scientifiche, un giorno potrebbe essere superato. Ma per ora spiega i dati meglio di qualunque altra teoria. Via via che nuove misurazioni permettono di capire meglio l'espansione e l'accelerazione, ci possiamo porre domande anche più fondamentali a proposito dei primissimi momenti dell'universo. Che cosa causò l'espansione? Molti cosmologi la attribuiscono all'inflazione, un processo di espansione in accelerazione. Ma questa può essere solo una risposta parziale, perché sembra che per cominciare l'inflazione l'universo dovesse essere già in espansione. E che dire dei fenomeni che si verificano su grandissima scala, al di là di ciò che possiamo vedere? È possibile che regioni diverse dell'universo si espandono a velocità differenti, e che il nostro universo sia una singola bolla inflazionaria di un «multiverso» molto più grande? Nessuno lo sa. Anche se molte questioni restano aperte, osservazioni sempre più precise fanno pensare che l'universo si espanderà per sempre. Speriamo almeno che col tempo si contragga la confusione a proposito dell'espansione. ■

### PER APPROFONDIRE

HARRISON E.R., *Cosmology: The Science of Universe*, Cambridge University Press, 2000.

MOLARO P., LEVSHAKOV S.A., DESSAUGES-ZAVADSKY M. e D'ODORICO S., *The Cosmic Microwave Background Radiation Temperature at  $z = 3.025$  toward QSO 0347-3819*, in «Astronomy and Astrophysics», vol. 381, n. 3, pp. L64-L67, gennaio 2002. Disponibile in rete all'indirizzo: [arxiv.org/abs/astro-ph/0111589](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0111589).

DAVIS T.M., LINEWEAVER C.H. e WEBB J.K., *Solutions to the Tethered Galaxy Problem in an Expanding Universe and the Observation of Receding Blue Shifted Objects*, in «American Journal of Physics», vol. 71, n. 4, pp. 358-364, aprile 2003. Disponibile in rete all'indirizzo: [astro-ph/0104349](http://astro-ph/0104349).

DAVIS T.M. e LINEWEAVER C.H., *Expanding Confusion: Common Misconceptions of Cosmological Horizons and the Superluminal Expansion of the Universe*, in «Publications of the Astronomical Society of Australia», vol. 21, n. 1, pp. 97-109, febbraio 2004. Disponibile in rete all'indirizzo: [astro-ph/0310808](http://astro-ph/0310808).

Un'altra eccellente risorsa per evitare confusioni in campo cosmologico è la guida alla cosmologia compilata da Ned Wright, reperibile all'indirizzo web: [www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm).