Giovanni Garberoglio

ZIO, E L'UNIVERSO QUANTO È GRANDE?

Abstract - Garberoglio G., 2013 - Uncle, how big is the Universe?

Atti Acc. Rov. Agiati, a. 263, 2013, ser. IX, vol. III, B: 5-23.

What lies beyond the stars? Just before the traditional Italian Christmas Family Luncheon, an inquisitive teenager asks her «scientist uncle» about galaxies and the size of the Universe. The ensuing dialogue covers the history of modern astrophysics, from the Great Debate of the 1920s until the recent discovery of the accelerated expansion of the Universe.

Key words - Galaxies, Cosmology, Hubble's Law, Dark Matter, Dark Energy.

Riassunto - Garberoglio G., 2013 - Zio, e l'Universo quanto è grande?

Che cosa c'è oltre le stelle? Appena prima del tradizionale Pranzo di Natale, una ragazzina pone allo «zio scienziato» alcune domande sulla nostra galassia e sulle dimensioni dell'Universo. Il dialogo che ne segue ripercorre la storia dell'astrofisica moderna, dal «Grande Dibattito» del 1920 fino alla recente scoperta dell'espansione accelerata dell'Universo.

Parole chiave - Galassie, Cosmologia, Legge di Hubble, Materia Oscura, Energia Oscura.

– Zio, ti ricordi che mi hai parlato delle stelle?

*E rieccoci qua! Sono di nuovo a casa, a trovare la mia famiglia per il tradizionale pranzo di Natale. ***, che ormai è «grande» e dotata di motorino, è arrivata un po' prima. Mia madre sta ancora approntando gli ultimi «preparativi» e siamo tutti confinati in salotto fino a nuovo ordine.*

Inizio a temere che il suo anticipo non sia stato proprio casuale.

Quasi beffarda, la musica natalizia che mia madre ritiene essere irrinunciabile in questa occasione ci accompagna con un «Tu scendi dalle stelle»...

– Certo, me lo ricordo. Era la scorsa estate al mare, vero?
– Sì, bravo! Sai, poi ho ripensato a quello che mi hai detto. La settimana dopo sono stata col papà in montagna, e quando uscivamo la sera non riuscivo proprio a non mettere il naso per aria. Lui mi prendeva in giro come la servetta trace di Talete, però io ho notato delle cose...
– Bene! Osservare con mente aperta è sempre una buona cosa. E cosa stavi notando?
– Beh, guardavo le stelle nel cielo. Era una bella notte limpida, e si vedeva una bella striscia di stelle nel cielo. In città non l'ho mai notata. Papà mi ha detto che si chiama Via Lattea. Dice che è la nostra galassia vista da dentro.
– In effetti, è così.
– Ma quindi le stelle non sono messe a caso?
– No, decisamente no. Sono raggruppate in galassie.
– Sì, questo l'avevo capito. Sono anche andata su internet e ho visto delle foto. Belle! Però non ho capito una cosa...

Ah ah! Ecco... qui capisco che iniziano i giochi. Allungo la mano e bevo un sorso del provvidenziale aperitivo che mi ero preparato... iniziamo!

Fig. 1 - La galassia M101, ripresa dal telescopio spaziale Hubble. NASA, ESA, K. Kuntz (JHU), F. Bresolin (University of Hawaii), J. Trauger (Jet Propulsion Lab), J. Mould (NOAO), Y.-H. Chu (University of Illinois, Urbana), and STScI [http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2006/10/image/a].

– Dimmi.
– ... ma perché tutte le galassie che ho visto sono a forma di frittella? Io mi aspettavo delle sfere o cose del genere.
– In realtà non è vero che tutte le galassie sono a forma di frittella. Quelle che hai in mente tu, si chiamano galassie a *spirale*, e sono effettivamente molto fotogeniche. Forse è per questo che se ne vedo-

no tante in giro. In realtà se uno guarda bene il cielo, scopre anche galassie «tonde». In gergo tecnico queste si chiamano galassie *ellittiche*. Quando le fotografi vedi solo un grande ammasso di stelle, tendenzialmente così compatto da apparire come un grande globo luminoso. Sono meno fotogeniche, ma non per questo meno importanti.

Fig. 2 - L'oggetto ARP 116, formato da una galassia ellittica (M60, in primo piano) e una galassia a spirale (NGC 4647, in secondo piano). NASA, ESA, and the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration. [http://hubblesit-e.org/newscenter/archive/releases/galaxy/elliptical/2012/38/].

– E perché queste forme diverse?
– Ah! Qui metti il dito nella piaga. Lo studio della formazione delle galassie è una disciplina ancora alla sua infanzia. Ci sono molte osservazioni e un sacco di teorie, ma credo che non ci sia ancora una risposta definitiva a queste domande. Il tutto è legato anche a problemi cosmologici sull'origine l'evoluzione dell'Universo.
– Wow! Sembra un argomento veramente complicato!
– In effetti la cosmologia non è una scienza facile. Anzi, si potrebbe pure argomentare che non sia una scienza nel senso classico del termine, dove lo sviluppo di ipotesi sul funzionamento del mondo viene accompagnata dall'ideazione di esperimenti volti a verificare o smentire le ipotesi di lavoro. L'Universo è uno solo, e non possiamo certo crearne altri per vedere cosa succede...
– E allora come si fa?
– Si osserva, si prende spunto da quello che si sa di altre discipline – principalmente la fisica –, si fanno ipotesi su «cosa possa essere successo», e si organizzano campagne di osservazione sempre più approfondite per vedere se le ipotesi reggono...

– Ma... non avevi già osservato prima? Prima di fare le ipotesi, intendo. Cosa puoi imparare guardando di nuovo le stesse cose?
– Hmmm... non intendevo guardare di nuovo. Intendevo guardare meglio. Lo sviluppo della cosmologia, e dell'astronomia, è strettamente legato allo sviluppo di strumenti osservativi sempre più precisi. E questa è come un'arma a doppio taglio: vedendo meglio, trovi anche un sacco di cose che non sai spiegare.
– Davvero? Sembra frustrante... anzi, se ho capito come «ragionate» voi scienziati immagino che lo riteniate «entusiasmante»...
– *Touché*. Però in effetti la storia della cosmologia è abbastanza interessante. Un po' come un bel romanzo giallo... solo che anche se arrivi all'ultima pagina non conosci ancora il colpevole! Pensa alle galassie stesse...
– Perché, che colpa ne hanno le galassie?
– No, nessuna colpa, intendevo la scoperta delle galassie.
– E cosa c'è da scoprire? Basta puntare i telescopi al cielo e guardare, no?
– Eh, sì, in effetti basta questo... il problema è quello di capire cosa sia quello che si sta vedendo.
– In che senso? Vedi una galassia, no?
– Lo vedi adesso che lo sai. Nel 1920, meno di 100 anni fa, la cosa era ancora dibattuta. Anzi, questo era «Il Grande Dibattito» in corso tra gli astronomi dell'epoca.
– E cosa avevano da dibattere, scusa?

Fig. 3 - NGC 2818, una nebulosa planetaria, residuo di una esplosione di supernova. NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA). [http://hubblesi-te.org/newscenter/archive/releases/nebula/2009/05/].

– Un sacco di cose. Tutti vedevano quelle che allora chiamavano «nebulose». In alcuni casi erano quelle che anche oggi noi chiamiamo «nebulose», cioè agglomerati di gas nello spazio tra le stelle della nostra galassia, oppure residui di esplosioni di stelle, ma sempre all'interno della nostra galassia. Però altre nebulose – del 1920 – erano quelle che oggi sappiamo essere galassie, quindi molto lontane. Al-

l'epoca sembravano «oggetti diffusi» tanto le une quanto le altre, anche se alcune – per la loro peculiare forma – venivano chiamate «nebulose a spirale».

– Ah, ora inizio a capire il problema. Ma scusa, non bastava misurare la distanza?
– Ma infatti era proprio quello il problema.
– E il metodo della parallasse che mi hai descritto l'altra volta? Non funziona?
– Sì, il metodo funziona, ma ha i suoi limiti. Per misurare le parallassi bisogna essere in grado di misurare bene gli angoli, e anche coi migliori telescopi non si riesce a fare con precisione infinita. Non so quanto fossero precisi nel 1920, ma non credo andassero molto oltre i 100 anni luce. Giusto per darti un'idea, oggi sappiamo che la nostra galassia ha un diametro di circa 100 000 anni luce. E la galassia più vicina, la galassia di Andromeda, è distante circa 2.5 milioni di anni luce...
– Ma... se non possiamo usare la parallasse come facciamo?
– Eh, questo è il grande problema dell'astronomia e della cosmologia. La misura delle distanze. Uno dei metodi più usati è quello di introdurre le cosiddette «candele standard», ovvero fenomeni astrofisici di cui si riesce a stabilire con una buona approssimazione la luminosità intrinseca L, che sarebbe sostanzialmente la quantità di energia che emettono. La distanza R viene calcolata poi in base alla luminosità apparente cioè alla quantità di energia che osserviamo per unità di superficie dei nostri rivelatori, l, secondo la relazione $l = L / (4\pi R^2)$.
– Ah! Una formula!
– Si, ma dai, questa è facile. Vuol dire che di tutta l'energia che emette l'oggetto, noi misuriamo solo quella parte che ci arriva, spalmata su tutta la superficie S della sfera di raggio R, che è proprio data da $S = 4\pi R^2$.
– Ah. Ok. Però, scusa, come fai a stabilire la luminosità intrinseca se non sai la distanza?
– Beh, devi tarare le tue misure di luminosità su oggetti di cui sai la distanza. Questo è quanto ha fatto Hubble per dirimere la questione delle nebulose.
– E come ha fatto?
– Ha usato delle stelle particolari, che si chiamano *variabili cefeidi*.
– Cefe... che?
– Cefeidi. Dal nome della prima stella di questo tipo mai osservata: δ-Cephei, la quarta stella come luminosità (apparente) nella costellazione del Cefeo. Questo tipo di stelle, oltre ad essere generalmente

Fig. 4 - La variabile cefeide RS Puppis ripresa dal telescopio spaziale Hubble. Hubble Legacy Archive, NASA, ESA. Image processing by Stephen Byrne. [www.flickr.com/photos/stephen63/9642978248/].

molto luminose e quindi visibili «da lontano», hanno una caratteristica peculiare e molto utile: pulsano. La loro luminosità oscilla, con un periodo che è strettamente legato alla loro luminosità intrinseca. Basta quindi scattare delle foto abbastanza regolarmente, vedere quanto è chiaro il puntino che rappresenta la stella, e misurare il periodo delle oscillazioni. Da questo possiamo ottenere *L* e quindi, visto che *l* lo abbiamo appena misurato, possiamo anche ricavare la distanza.

Hubble ha notato che dentro la «nebulosa» di Andromeda c'erano delle variabili cefeidi, e ne ha quindi ricavato la distanza, mostrando quanto fosse grande. Molto più grande della distanza delle cefeidi osservate nella nostra galassia.

– Tutto qua? E non se ne erano accorti prima?
– Detto così sembra semplice. Però ricordati cosa ti ho detto prima: lo sviluppo dell'astronomia non è solo legato a quello che vedi, ma anche al fatto che lo vedi sempre meglio. Per le sue misure Hubble aveva a disposizione il migliore telescopio dell'epoca, e quindi riusciva a risolvere le singole stelle, laddove gli altri astronomi vedevano solo una nebbiolina indistinta. Ovviamente questo è stato solo l'inizio dei problemi...
– Come «problemi»? Ma il signor Hubble non aveva il telescopio più potente dell'epoca?
– Sì, certo che ce lo aveva. Ma come ti dicevo prima, quando vedi meglio scopri anche cose che non ti aspettavi. E guardando le galassie di cose «strane» se ne sono trovate tante.

– Per esempio?
– Beh, non appena ci si è accorti che l'Universo era molto più grande di quanto si pensasse, gli astronomi hanno iniziato ad osservare le galassie e misurare i loro movimenti. Da qui si è scoperto che il nostro Universo si sta espandendo. Anzi, è stato proprio il signor Hubble a rendersi conto che le galassie si stanno allontanando reciprocamente.
– Ah sì! Il famoso *Big Bang*. Una grande esplosione che ha scagliato le galassie verso l'infinito!
– Ehm... in realtà non si è trattato di una vera «esplosione»...
– Come no?
– Non esattamente. Il fatto è che è proprio la geometria dello spazio che si modifica, e quindi in un certo senso è lo spazio che si crea...
– Eh?
– Sì dai, un po' come quando soffi in un palloncino. La superficie del palloncino aumenta, e se tu hai segnato col pennarello due punti sul palloncino – due galassie, se vogliamo – allora questi due punti si allontanano.
– Sì, ok, ma questo cosa c'entra col *Big Bang*?
– C'entra se cogli l'analogia. La superficie del palloncino è come lo spazio: cresce al variare del tempo. Ma non solo, non esiste nessun «centro della superficie» da cui i punti si allontanano, ma qualsiasi punto del palloncino vede allontanarsi tutti gli altri. Nell'Universo succede una cosa simile, solo con una dimensione in più. Non è che noi siamo al centro dell'Universo e vediamo tutto espandersi. Chiunque sia in qualsiasi altra galassia vede la stessa cosa, come se fosse al centro di uno spazio in espansione.
– Ah... Ma allora... senti Zio, però io se voglio gonfiare il palloncino devo soffiare con forza, no?
– Sì, certo... ma mi pare che tu abbia qualcosa in mente...
– Sì, mi è venuta una curiosità in effetti, ma non so se sia ridicola.
– Non ti preoccupare: di solito le domande all'apparenza più ingenue sono quelle più interessanti.
– Ok, dunque... Stavo pensando che però se io voglio gonfiare un palloncino devo soffiare con forza, perché il palloncino è elastico. Mi chiedevo se anche questa parte dinamica dell'analogia si applichi all'Universo o meno.
– Hmmm, spiegati meglio.
– Quello che vorrei sapere è questo: quando uno smette di soffiare il palloncino vuole sgonfiarsi perché è elastico, e quindi esercita una pressione. Non è che lo spazio agisce in maniera simile... come dire?

che contrasta l'espansione del Big Bang, e quindi ad un certo punto l'Universo smetterà di allargarsi e si rimpicciolirà di nuovo?
– Bene! Gran bella domanda!
– Ah, davvero?
– Sì, sì. In effetti questo è proprio il genere di domande a cui la cosmologia tenta di rispondere.
– Ma c'è una risposta? Allora, si rimpicciolirà tutto?
– Probabilmente una risposta c'è, ma non credo che la questione sia già stata risolta definitivamente. Però sono stati raccolti un sacco di indizi interessanti...
– Interessanti?
– Molto interessanti!
– Sicuro?
– Sicurissimo.
– Comprensibili?
– Forse.
– Come «forse»? Ora mi hai solleticato la curiosità e mi piacerebbe capirci un po' di più, ma non mi dire che per farlo devo studiare libri e libri pieni di formule astruse!
– Beh, se vuoi veramente andare fino in fondo, un po' di lavoro lo devi fare. Ma se ti accontenti di un'idea generale, possiamo provare ad affrontare l'argomento in maniera euristica.
– Euristica?
– È un modo raffinato per dire «in maniera un po' grossolana ed approssimata, ma che ti porta nella direzione giusta».
– Con la matematica?
– Eh sì...
– Non sono sicura di volerlo fare.
– Come no? Ti prometto che non si tira fuori niente di esoterico. Solo le buone, care, vecchie quattro operazioni e un po' di geometria.
– «Euristico», «esoterico»... ma non ci riesci proprio a parlare normale?
– Ah ah ah! Ok, allora adesso parlerò normalmente. Iniziando a prendere sul serio l'analogia del palloncino.
– Vediamo...
– Dunque, immagina di essere in un punto qualsiasi del palloncino, chiamiamolo O e di considerare due punti vicini, chiamiamoli P e Q, tali che la distanza di P da O ad un certo istante sia d, mentre quella tra Q ed O allo stesso istante sia $2d$.
– Ok.
– E ora considera cosa succede un istante Δt più tardi, quando il palloncino si è gonfiato. Il punto P è andato ad una distanza $d+\Delta d$,

mentre il secondo punto, che è a distanza doppia, è finito ad una distanza $2(d+\Delta d)$. Ti torna?

– Beh, sì, se il palloncino si espande in maniera omogenea, se un punto è a distanza doppia da un altro in un certo istante, sarà a distanza doppia in ogni istante...
– Esatto! Ora vediamo di chiederci quale sia la velocità relativa dei due punti P e Q rispetto al punto O.
– Ah, questa la so! La velocità è la distanza percorsa divisa per il tempo impiegato a percorrerla!
– Bene, vedo che non hai già dimenticato le tue lezioni di Fisica!
– Più che altro qualcuno qui ha continuato ad insistere...
– *Repetita juvant!* Comunque vediamo se le mie insistenze sono servite: quanto valgono le due velocità?
– Dunque: il primo punto si sposta di una distanza Δd in un tempo Δt, quindi la sua velocità è $v_P = \Delta d/\Delta t$. Giusto?
– Fin qui tutto bene...
– Mentre il secondo, allora... all'istante iniziale era ad una distanza $2d$, poi si è ritrovato ad una distanza $2d+2\Delta d$, quindi si è spostato di $2\Delta d$. L'intervallo di tempo passato è stato lo stesso di prima, quindi la sua velocità è $v_Q = 2\Delta d/\Delta t$... il doppio di quella precedente!
– Esatto! Questo succede anche con le galassie. Più sono lontane da noi, più si allontanano velocemente. Questa è stata una delle prime scoperte «inaspettate» che si sono fatte dopo essersi resi conto che le «nebulose a spirale» erano effettivamente strutture lontanissime. Tra l'altro è stato lo stesso Hubble a rendersi conto di questa relazione di proporzionalità, che da allora è nota come *legge di Hubble*. In formule $v = H\,d$, dove H è appunto nota come costante di Hubble.
– Certo che è in effetti un po' strano questo fenomeno. Più un oggetto è lontano, più si allontana velocemente...
– Strano se pensi che appunto si allontanino nello spazio vuoto, come degli oggetti scagliati via da un'esplosione. Se invece la vedi dal punto di vista del «palloncino», è lo spazio che si crea per così dire «in mezzo». Tra l'altro questo punto di vista è il punto di vista «naturale» della Relatività Generale: la geometria dello spazio non è fissata una volta per tutte, ma è qualcosa di dinamico, che evolve.
– Ci mancava solo la Relatività Generale... non so cosa sia questa roba, ma solo il nome mi fa venire il mal di testa.
– No, non ti preoccupare. Era solo per dirti che quando Hubble ha scoperto che le galassie si stavano allontanando, l'interpretazione di questo fatto che – come tu dici – è un po' «strano» da figurarsi era già bella e pronta.

– Sì, però qui ancora la tua euristica non la vedo...
– Perché ancora non l'ho tirata fuori... questo era un esercizio di riscaldamento!
– Ahia!
– Il vero divertimento viene adesso.
– Divertimento?
– Sì, dai, in fondo è un divertimento. Dunque, prendiamo sul serio quello che hai detto prima.
– Cosa, in particolare?
– Che c'è qualcosa che contrasta l'espansione del Big Bang.
– Ah sì, lo spazio. E io che ne so di come si comporta lo spazio?
– Niente. Per sapere come si comporta lo spazio bisogna rivolgersi alla Relatività Generale a cui accennavo poc'anzi. La Relatività Generale descrive appunto lo spazio come un'entità dinamica, la cui geometria viene modificata dalla presenza delle masse, e che a sua volta determina come queste masse si muoveranno...
– Un po' come fa la gravità?
– Esattamente. Diciamo che è una estensione della teoria della gravità classica.
– Quella di Newton! Sì, questa me la ricordo: la forza fra due masse è sempre attrattiva. La sua intensità è inversamente proporzionale al quadrato della distanza, e proporzionale al prodotto delle due masse.
– Bene! Quindi che effetto ha secondo te sull'espansione dell'Universo?
– Beh, se le galassie si stanno allontanando fra di loro, direi che la gravità dovrebbe rallentarle!
– Ottima deduzione! Vedi come funziona l'euristica?
– E come funziona?
– Prendendo sul serio queste intuizioni. Ora, se volessimo fare le cose per bene dovremmo usare la Relatività Generale per capire cosa succede all'Universo in espansione, ma in pratica qualcosa lo possiamo dedurre considerando l'effetto della gravità secondo la teoria di Newton. Poi se un giorno ci venisse proprio la curiosità possiamo andare a studiare cosa ha dedotto Friedmann applicando la Relatività Generale all'Universo nella sua interezza...
– Non ci voglio nemmeno pensare! Per me la Legge di Gravitazione di Newton è più che sufficiente. Ma scusa, però non è che se uno la prende seriamente poi sbaglia?
– Sì, infatti ora sappiamo che è sbagliata. Ma il bello è che non è troppo sbagliata, al limite un po' incompleta... ma se ragioniamo con criterio riusciamo comunque a capire qualcosa anche usando una teoria che sappiamo essere incompleta.

– E cioè? Che vuoi dire?
– Beh, prendiamo sul serio questa espansione dell'Universo. Se ti ricordi l'esempio del palloncino, avevamo visto che lo spazio si «dilata». Quindi le distanze tra gli oggetti sono nella forma $d(t) = a(t)\, D$, dove D è la distanza diciamo oggi, e $a(t)$ è una funzione che descrive come avviene la dilatazione dello spazio, ad esempio al giorno d'oggi...
– ... ma... zio?
– Dimmi.
– Stai mica usando di nuovo la matematica?
– Ehm... sì?
– Non se ne può fare a meno?
– No. Ma vedrai che è facile.
– Sarà...
– Sì, sì, basta pensarci un attimo. Hai capito a cosa serve la funzione $a(t)$?
– Sì, descrive come si dilata lo spazio.
– Infatti. Per la cronaca riceve anche il nome pomposo di «fattore di scala dell'Universo». E cosa mi sai dire di questa funzione?
– Dunque... se $d(t)$ sono le distanze al tempo t, e D è la distanza oggi, cioè diciamo quando $t=0$, allora direi che $a(t=0)=1$. Giusto?
– Ottimo! E dalla legge di Hubble cosa deduci?
– Dunque, fammi pensare... beh, direi che $a(t)$ non può essere sempre uguale a 1. Perché se lo fosse le distanze non cambierebbero nel tempo e non ci sarebbe espansione dell'Universo.
– Bene! Ma ancora non abbiamo dedotto niente dalla legge di Hubble. La velocità con cui le galassie si allontanano è proporzionale alla loro distanza D.
– Ah! Dunque vediamo. La velocità con cui si allontanano è lo spazio percorso diviso per il tempo impiegato. Quindi, se passa un intervallo di tempo Δt lo spazio percorso dalla galassia è $d(\Delta t)\text{-}D$ e pertanto posso dedurre che la velocità è $v = (d(\Delta t)\text{-}D) / \Delta t$.
– Ottimo...
– Ah, ma ora posso scrivere $d(\Delta t) = a(\Delta t)\, D$, e quindi sostituisco e ottengo $v = (a(\Delta t)\text{-}1)\, D / \Delta t$... Ehi! Ma questa è la legge di Hubble! La velocità di allontanamento è proporzionale alla distanza. Quindi, com'è che avevamo detto prima?... Ah ecco, la costante di Hubble è legata ad $a(t)$ da $H = (a(\Delta t)\text{-}1) / \Delta t$. Quindi la costante di Hubble mi dice come sarà la funzione $a(t)$ dopo un certo tempo.
– Benissimo. Vedi come funziona l'euristica? Abbiamo un'osservazione – la legge di Hubble – e siamo arrivati ad una «spiegazione». Il fatto che le galassie si allontanano è descrivibile in maniera naturale assu-

mendo che lo spazio in mezzo si «dilati» nel tempo, e questa dilatazione sia descritta dalla funzione *a(t)*.
– Ah ecco... interessante. Però scusa, posso chiederti una cosa?
– Sì, certo.
– Ma la costante di Hubble, è una specie di variazione del... com'è che chiamavi *a(t)*, fattore dell'Universo?
– Fattore di scala dell'Universo.
– Ecco, quello... comunque volevo dire questo: mi pare che la costante di Hubble sia legata ad *a(t)* così come la velocità di un corpo è legata alla variazione della posizione.
– Sì, in effetti è così. Il termine matematico per indicare questa relazione è derivata. Vedrai che ora che vai in quinta superiore ne troverai di ogni tipo.
– Wow! Non vedo l'ora!
– ???
– ...ah ah ah, ci sei cascato! Comunque, se la costante di Hubble è per il fattore di scala la stessa cosa che la velocità è per lo spostamento di un corpo, c'è qualcosa che è analogo l'accelerazione?
– Vedo che questa euristica ti piace?
– Ah. Sto facendo euristica?
– Sì, direi di sì. Stai tentando di capire qualcosa che non sai per analogia con qualcosa che sai.
– E funziona?
– Nel tuo caso, direi di sì. Stai arrivando dritta al punto come un segugio.
– Davvero?
– Eh sì, perché una cosa che ci si può chiedere è proprio questa: da cosa è determinata l'evoluzione di *a(t)*?
– E che ne so io?
– Per ora ancora niente, ma lascia lavorare l'euristica...
– E come? Devo calcolare l'accelerazione dell'Universo?
– In un certo senso...
– E come faccio?
– Basta che ripensi un attimo a quello che avevi detto prima: immagina tutte queste galassie, con lo spazio in mezzo che si dilata. C'è qualcosa che possa contrastare questa espansione?
– La Legge di Gravitazione Universale! Giusto? Da una parte le galassie si stanno allontanando, ma d'altra parte direi che la forza di gravità dovrebbe in qualche modo rallentare questa espansione.
– Benissimo! Sei sempre più euristica!
– Facciamo finta che sia un complimento...
– ...in effetti voleva esserlo, anche se un po' *sui generis*.

– Decisamente... non dirlo troppo in giro, ok?
– Ah, ah! Ok. Comunque dai, che ci siamo quasi.
– A fare che?
– A calcolare l'accelerazione dell'Universo!
– Ah già, ci rimane solo questo piccolo dettaglio da mettere a posto... mi sembrava però di essermelo già guadagnato il pranzo!
– Vedrai che non è difficile. Basta continuare a prendersi sul serio. Ovviamente ti ricordi dov'è che compare l'accelerazione nei tuoi studi.
– Me lo ricordo bene: la seconda legge di Newton! Ma la possiamo usare anche per descrivere tutto l'Universo?
– Hai qualcosa di meglio da proporre?
– Ehm... no, per ora no.
– E allora vediamo cosa succede. Ti ricordi che stavamo cavalcando l'onda euristica?
– Sì, sì, quindi... dunque, bisognerebbe calcolare la forza gravitazione sulle galassie che si allontanano. Mi sembra un'impresa titanica! Bisognerebbe sapere dove sono masse e sommare tutte le forze che ogni galassia esercita su tutte le altre. Non ci voglio nemmeno pensare!
– Sì, su questo hai ragione. Però possiamo «semplificare».
– In che senso, «semplificare»?
– Beh, immagina di guardare l'Universo «da fuori e da molto lontano»: come pensi siano disposte le galassie?
– Boh, più o meno a caso?
– Ecco, quindi come prima approssimazione possiamo supporre che la loro distribuzione sia omogenea. Hai qualcosa in contrario?
– No, no, niente... anzi, mi ricordo che il prof. di Fisica ci ha detto che una distribuzione omogenea e sferica di massa genera un campo gravitazionale che è uguale fuori dalla sfera a quello che genera un punto di massa pari alla massa totale posto al centro della distribuzione... serve a qualcosa?
– Assolutamente sì... anzi, a questo punto abbiamo proprio tutti gli ingredienti. Dobbiamo solo cucinarli...
– Come il pranzo di Natale? Sento un profumino...
– Esatto. Ognuno cucina quello che sa. E la nostra ricetta inizia proprio dalla seconda legge di Newton: $F = mA$.
– Dove stavolta $F = -G\,M\,m\,/\,d^2$, che è l'espressione della legge di Gravitazione, sempre del solito Newton. Giusto?
– Giusto! Ma cosa indicano le quantità che abbiamo scritto?
– Dunque, direi che si parla di una galassia a distanza d da noi, la sua massa sarà questa m, visto che vogliamo capire come lei stia accelerando... giusto?
– Ottimo.

– E allora M dev'essere tutta la massa contenuta nella sfera di raggio d. Guarda, mi ricordo pure la formula del volume della sfera: «Il volume della sfera qual'è? Quattro terzi pi greco erre tre!». Quindi ti dico anche che $M = \rho\, 4\, \pi\, d^3 / 3$, dove ρ è la densità media dell'Universo di cui abbiamo discusso prima.
– Complimenti! Adesso si tratta di riscrivere tutto in funzione del fattore di scala $a(t)$.
– Beh, una cosa è semplice: avevamo detto che $d = a(t)\, D$. Però non so cosa succede all'accelerazione A.
– Beh, anche questa sarà proporzionale alla distanza D che misuriamo oggi, e la costante di proporzionalità dipende dal fattore di scala. In termini matematici è la «derivata seconda» del fattore di scala, che si indica con due punti sopra la funzione. Quindi possiamo scrivere $A(t) = \ddot{a}(t)\, D$, ed otteniamo

$$\ddot{a}(t) = -\, (4\, \pi\, G/3)\, \rho(t)\, a(t) = -\, (4\, \pi\, G/3)\, \rho_0 / a^2(t).$$

– Non ho capito l'ultima cosa che hai scritto...
– Beh, ho messo dentro il fatto che anche la densità dipende dal fattore di scala. Visto che la materia dentro il volume che consideriamo non si può ne creare ne distruggere, ma il volume cambia per via dell'espansione, allora la densità deve decrescere nel tempo, e quindi $\rho(t) = \rho_0 / a^3(t)$.
– Ah, giusto. Però non ho capito cosa ci dice l'equazione che hai scritto. Quanto vale alla fine $a(t)$?
– Beh, quella che ho scritto si chiama tecnicamente «equazione differenziale». L'incognita, come hai detto tu, è una funzione, la funzione $a(t)$, di cui sappiamo che $a(0) = 1$, per come l'abbiamo definita, e sappiamo anche che la sua derivata temporale, che si indica con un puntino sopra il nome della funzione $\dot{a}(t)$, ad oggi vale H. Matematicamente parlando, questo basta per determinare tutta la funzione.
– Sì, ma come si risolve?
– Ah, questo lo vedrai l'anno prossimo.
– Posso aspettare! Però non capisco una cosa. Se la gravità è sempre attrattiva, riuscirà a fermare l'espansione? C'è scritto questo nella tua equazione?
– Sì, certo che c'è scritto.
– E quindi?
– Dipende. Per chi lo sa leggere, in quell'equazione c'è scritto che la gravità riuscirà a fermare l'espansione se ρ_0 è sufficientemente grande. In particolare deve essere maggiore di una densità critica che vale $\rho_{cr} = 3\, H^2 / (8\pi G)$.

– Beh, allora basta, come dire, contare le stelle e le galassie e vedere se sono abbastanza.
– Sì, in effetti hai ragione. È proprio quello che gli astronomi si sono proposti di fare.
– E lo hanno fatto?
– Certo! Si sono messi diligentemente a contare le stelle e le galassie che vedevano per vedere si stabilire il valore della densità media dell'Universo.
– E quanto è?
– Se sommi le masse di tutto quello che vedi coi telescopi ottieni circa il 4% della densità critica.
– Così poco?
– Così poco. Ma in questo contare gli astronomi hanno scoperto un sacco di cose ancora misteriose.
– E cioè?
– Ad esempio, hanno scoperto che c'è molta più massa dell'Universo di quanto non se ne veda. Come ti dicevo, quella che si «vede» coi telescopi, i satelliti e tutto il resto è circa il 4% di cui parlavo prima. Quella che non si vede è circa sei volte tanto, e corrisponde a circa il 26% della densità critica. Quindi la densità media dell'Universo alla fine è circa il 30% di quello che servirebbe a farlo fermare.
– Eh? Ma scusa, come fanno gli astronomi a dire che c'è così tanta massa se non la vedono?
– Beh, non occorre vederla direttamente, basta vederne gli effetti su quella parte di massa che riesci a vedere: stelle, galassie e così via. Questa massa «oscura» è pur sempre della massa, e pertanto genera forze gravitazionali. Per capire che esiste basta fare un «semplice» conto: da un lato misuri le accelerazioni degli oggetti che vedi. In base alla seconda legge di Newton queste accelerazioni sono dovute alla forza di gravità. Ma la forza di gravità dipende a sua volta dalle masse, e la puoi calcolare appunto contando quanta massa vedi in giro. Quando provi a far combaciare le due cose, ti accorgi che non combaciano. Le accelerazioni sono più grandi di quello che ci si aspetterebbe come effetto gravitazionale della massa visibile. Quindi vuol dire che c'è in giro un sacco di massa che non vediamo direttamente, ma di cui vediamo gli effetti gravitazionali. Gli astronomi, a cui piace battezzare tutto quello che incontrano, la chiamano materia oscura.
– E di cosa è fatta questa materia oscura?
– Non si sa.
– Come non si sa?
– Non si sa. L'unica cosa che si sa è che non è fatta di particelle cari-

che, perché altrimenti emetterebbero luce, o interagirebbero con la luce delle stelle e delle galassie e quindi ci accorgeremmo della sua esistenza. Ci sono forti indizi sul fatto che sia formata di particelle pesanti (più pesanti dei protoni e neutroni che stanno nei nuclei atomici), ma per il resto non ne sappiamo proprio niente.

– Ma guarda te! È proprio misteriosa!
– E questo non è niente.
– Come, niente?
– C'è di peggio.
– Cosa vuoi dire?
– Hai presente l'equazione che abbiamo dedotto prima, quella che descrive il fattore di scala dell'Universo?
– Sì.
– Come ti ricorderai, avevi notato che dice che l'effetto della forza di gravità dev'essere quello di rallentare l'espansione dell'Universo.
– Sì, me lo ricordo.
– Beh, se la cosa ti può consolare, l'approccio euristico è confermato dalla Relatività Generale. Si ottengono equazioni molto simili, e anch'esse dicono la stessa cosa. Se l'Universo si sta espandendo, l'effetto della gravità deve essere quello di farlo rallentare.
– Bene, allora l'euristica funziona.
– Sì, certo, l'euristica funziona. È il mondo che si ostina a non comportarsi secondo le nostre equazioni.
– Cosa vuoi dire?
– Voglio dire che gli scienziati sono curiosi. E allora si sono messi in testa di misurare il rallentamento dell'espansione.
– Oh mamma! E come si fa?
– Beh, devi ricostruire la funzione $a(t)$ nei tempi passati e vedere quanto si discosta da una retta. Per fare questo devi essere in grado di capire cosa è successo tanto tempo fa.
– Un po' come gli archeologi?
– In un certo senso sì. Solo che gli astronomi sono forse un po' più fortunati. Dal momento che la luce si propaga con una velocità finita, allora guardare lontano nello spazio equivale a vedere com'erano le cose tanto tanto tempo fa, quando la luce che ci raggiunge oggi è stata emessa.
– Ah! È vero. Peccato che non si riesca a fare con l'archeologia. Mi sono sempre chiesta come facevano a vivere i romani senza pomodori, pop-corn, e soprattutto senza cioccolata!
– ... Vabbè ... Comunque alcuni scienziati si sono messi in testa di andare a vedere come era $a(t)$ parecchio tempo fa. Anzi, visto che gli

scienziati sono competitivi e non si fidano gli uni degli altri, ci sono stati due gruppi di persone che hanno investigato questo problema in maniera totalmente indipendente.

– Ma non bastava uno?
– Beh, di solito no. Sai, quando qualcuno annuncia una scoperta questo non significa niente.
– Come no? E tutto il lavoro che hanno impiegato? O stai dicendo che sono dei truffatori?
– No, non voglio insinuare niente. È solo che è sempre meglio controllare. La storia della scienza è piena di situazioni dove qualcosa sembrava andare in un certo modo, ma poi ad un controllo più approfondito si è scoperto che andava in un altro. In fondo gli scienziati sono esseri umani, e talvolta sbagliano anche in perfetta buona fede. Un po' di sano e costruttivo scetticismo è il sale della scienza. Non bisognerebbe mai dimenticarlo.
– Ho capito, quindi questi due gruppi sono partiti a osservare le galassie lontane in maniera indipendente.

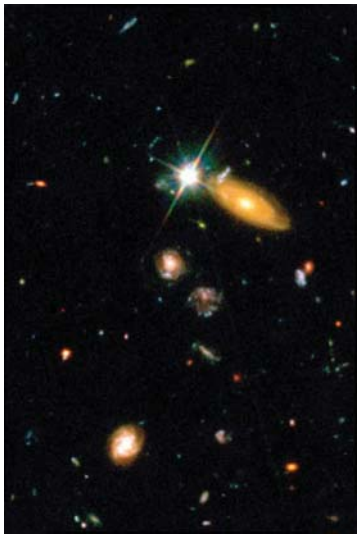

Fig. 5 - La supernova SN2002dd ripresa dal telescopio spaziale Hubble. NASA and J. Blakeslee (JHU) [http://hubblesite.org/gallery/album/star/supernova/pr2003012b/].

– Sì. Tutti e due usavano delle supernove come «candele standard». Le supernove sono delle esplosioni stellari particolari che liberano una quantità di energia enorme, e per questo si vedono fino a grandissime distanze.
– Che botto!
– Un super-botto! Pensa che quando una supernova esplode, emette

per poco tempo più luce di quanta ne emettano tutte le altre stelle della galassia in cui si trova.
– Ci credo che si vede da lontano, allora!
– Eh si. Comunque questi due gruppi «rivali» iniziano a raccogliere i dati e ad analizzarli. Ad un certo punto si accorgono che c'è qualcosa che non quadra.
– E cioè?
– L'analisi mostra che l'espansione dell'Universo invece di rallentare, sta accelerando!
– Ma come è possibile?
– Credo che questa stessa domanda abbia procurato loro parecchie notti insonni.
– E a questo punto cos'hanno fatto?
– Beh, hanno controllato e ricontrollato i loro dati sotto ogni possibile punto di vista. Ognuno sapeva che c'era un altro gruppo al lavoro, ma non sapevano cosa gli altri stessero ottenendo.
– E alla fine?
– Alla fine hanno confrontato i loro dati, scoprendo che tutti e due stavano ottenendo lo stesso risultato! Quando hanno pubblicato le loro scoperte è stata una bella sorpresa per tutti. Gli altri scienziati hanno controllato, ma entrambi i gruppi avevano fatto i loro «compiti» con diligenza ed il loro risultato è stato confermato. Alla fine tutti e due i gruppi hanno persino vinto il premio Nobel.
– Wow!
– E hanno aggiunto un altro bel mistero alla storia dell'astronomia. L'espansione dell'Universo sta accelerando, e nessuno sa quale ne sia la ragione.
– Ma questa sarebbe una specie di antigravità?
– Come ho detto, nessuno sa come trattare questa scoperta. L'unico posto dove poter inserire qualcosa che provochi un'accelerazione dell'espansione senza scompaginare tutte le teorie esistenti, è riesumare la costante cosmologica di Einstein.
– Einstein?
– Sì, una volta Einstein, prima che Hubble scoprisse l'espansione dell'Universo, si era reso conto che le sue equazioni la prevedevano. Però lui stesso non ci credeva, e allora le ha estese con un termine che permettesse di raggiungere un equilibrio stazionario. Si è poi pentito amaramente di averlo fatto quando Hubble ha pubblicato i suoi risultati: avrebbe potuto prevedere l'espansione dell'Universo 5 anni prima della sua scoperta! Però quel termine è l'unico possibile che renda conto di questa accelerazione senza dover cambiare tut-

to il resto della teoria, che peraltro è brillantemente confermata da una innumerevole serie di osservazioni. Giusto per dargli un nome lo si chiama densità di energia oscura.

– Materia oscura, energia oscura... che nomi inquietanti.
– Beh, in realtà sono nomi che denotano la nostra ignoranza attuale. L'unica cosa che possiamo fare è sperare che qualche giovane sia abbastanza curioso ed intraprendente da accettare la sfida e...

RAGAZZIII! È PRONTOOO!!!
Mia madre ci chiama dalla sala da pranzo. Bastano poche parole per tornare a terra dagli spazi siderali. In effetti il profumino che già da un po' pervade l'aria costituisce un'ottimo filo d'Arianna, e ci conduce dritti alla meta.
In men che non si dica siamo seduti e pronti.

BIBLIOGRAFIA

GARBEROGLIO G., 2012 - Zio, ma quanto è grande il Sole?, *Atti Acc. Rov. Agiati*, a. 262, ser. IX, vol. II, B: 43-61.

PANEK R., 2012 - *Il 4% dell'Universo. La storia della scoperta della materia e dell'energia oscura*. Codice Edizioni, 2012. Ristampato come L'Universo Oscuro. Biblioteca de «Le Scienze», Agosto 2011.

SCHNEIDER P., 2006 - *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin.

PERLMUTTER S., 2012 - Nobel Lecture: Measuring the acceleration of the cosmic expansion using supernovae. *Rev. Mod. Phys*. 84, 1127 [http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.84.1127].

SCHMIDT B.P., 2012 - Nobel Lecture: Accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae. *Rev. Mod. Phys*. 84, 1151 [http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.84.1151].

RIESS A.G., 2012 - Nobel Lecture: My path to the accelerating Universe. *Rev. Mod. Phys*. 84, 1165 [http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.84.1165].

Giovanni Garberoglio - Laboratorio Interdisciplinare di Scienza Computazionale (LISC) Fondazione Bruno Kessler e Università degli Studi di Trento.