

Redshift non cosmologici

JAYANT V. NARLIKAR

Un certo numero di osservazioni mette in discussione la validità della legge di Hubble per i quasar: lo spostamento verso il rosso nei loro spettri è davvero di natura cosmologica? E se non lo fosse, quali sono le possibili alternative?

Nel 1929 Edwin Hubble propose la sua famosa relazione tra *redshift* (cioè lo spostamento verso il rosso delle righe spettrali) e distanza per le nebulose extragalattiche. Quella che è ormai conosciuta come *legge di Hubble* entra così nel suo sessantesimo anno di vita e può a ragione essere indicata come il fondamento di tutta la moderna cosmologia. Rispetto ai tempi di Hubble, oggi gli astronomi possono disporre di strumenti di osservazione enormemente più sofisticati, capaci di rivelare oggetti molto più deboli di quanto non fosse possibile negli anni '20: ciò ha consentito di verificare questa legge fino a distanze cento volte maggiori di quanto non abbia potuto fare lo stesso Hubble.

Tuttavia, questi progressi osservativi hanno anche incominciato ad evidenziare dei casi in apparente disaccordo con la visione cosmologica complessiva che si basa sulla legge di Hubble. Inizialmente si pensò che questi casi anomali si dovessero interpretare come artefatti strumentali oppure che potessero essere spiegati come effetti di selezione osservativa: in ogni caso si tendeva a considerarli come episodi di scarso significato. Invece si continua a scoprire un numero crescente di tali situazioni anomale.

Per capire meglio la natura di queste eccezioni è necessario anzitutto comprendere cosa sia un *redshift* e in che modo questo si leghi alla distanza tramite la legge di Hubble.

In astronomia si ha a che fare con *redshift* dovuti a cause diverse. La fisica ci indica tre possibili spiegazioni convenzionali di questo fenomeno e la legge di Hubble, in linea di principio, potrebbe avere a che fare con ciascuna di queste.

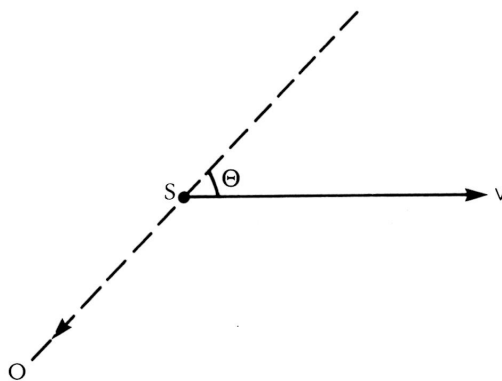
Supponiamo che λ denoti la lunghezza d'onda osservata di una riga presente nello spettro di un oggetto astronomico e che λ_0 sia la lunghezza d'onda che quella stessa riga avrebbe in uno spettro prodotto in

un laboratorio terrestre. Allora il *redshift* z della riga osservata si definisce come:

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

Se z è positivo, come di norma succede per le galassie, la riga spettrale è spostata rispetto a quella di laboratorio verso le lunghezze d'onda maggiori che, nella regione ottica, corrispondono al rosso (in inglese, *red*). Nel seguito denoteremo invece con il termine *blueshift* uno z negativo.

La causa del *redshift* meglio conosciuta è l'*effetto Doppler*, che si produce quando la sorgente si muove rispetto all'osservatore. Il *redshift* Doppler è descritto in figura 1. Seguendo le notazioni riportate nel disegno,



(fig. 1) La sorgente S si muove con velocità v in una direzione che sottende un angolo Θ con la linea visuale di S rispetto all'osservatore O . A seconda del valore di v e di Θ le righe spettrali di S appariranno all'osservatore in O spostate verso il rosso o verso il blu. È questo il *redshift* per effetto Doppler.

il *redshift* misurato dall'osservatore O nello spettro della sorgente S è dato da questa relazione (che ingloba gli effetti relativistici):

$$z = \frac{1 + \frac{v}{c} \cos \Theta}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1$$

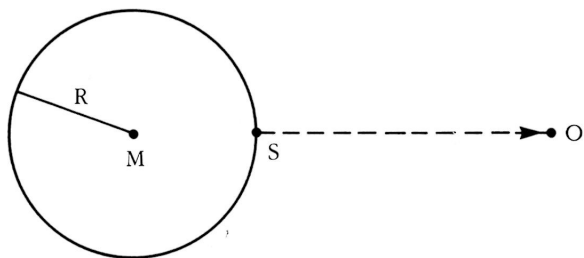
dove con c si è indicata la velocità della luce, con Θ

La galassia NGC 7603 con filamenti che la congiungono ad una compagna più piccola di *redshift* maggiore. (foto Halton Arp)

l'angolo tra la linea visuale e la direzione della velocità della sorgente e con v la velocità relativa sorgente-osservatore. Si noti, per inciso, che l'effetto Doppler produce un *blueshift* quando:

$$\frac{v}{c} \cos \Theta < \sqrt{1 - v^2/c^2} - 1$$

La figura 2 descrive invece il fenomeno del *redshift*



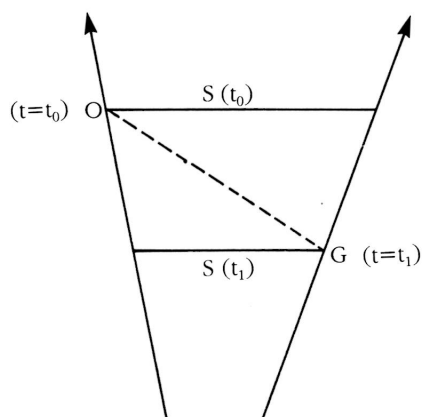
8 (fig. 2) La radiazione che viene emessa radialmente da S, un punto sulla superficie del corpo di massa M e raggio R, appare spostata verso il rosso all'osservatore in O. Questo è il *redshift* gravitazionale.

gravitazionale che fu predetto dalla teoria della relatività di Einstein. Esso si verifica quando un fascio luminoso parte dalla sorgente S, immersa nel campo gravitazionale particolarmente intenso di una massa M, e raggiunge un osservatore O posto a grande distanza, dove il campo gravitazionale è debole. Se consideriamo una massa sferica di raggio R, il *redshift* alla superficie è dato da:

$$z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}} - 1$$

dove G è la costante di gravitazione universale.

I *redshift* scoperti da Hubble e Humason negli anni '20, e prima di loro da Slipher, sono tuttavia di un tipo ancora diverso. Le sorgenti, in questo caso le galassie distanti, si pensa prendano parte all'espansione dell'Universo. La figura 3 mostra una galassia che emette



(fig. 3) La luce emessa dalla galassia G all'epoca t_1 viene ricevuta dall'osservatore O all'epoca presente t_0 . Nel frattempo la scala dell'Universo in espansione è cresciuta da $S(t_1)$ a $S(t_0)$. Questo dà origine al *redshift* cosmologico.

la sua luce all'epoca t_1 ; questa arriva all'osservatore (nella nostra Galassia) nell'epoca presente t_0 . Indicando con $S(t)$ il fattore di scala dell'Universo in espansione (un parametro variabile nel tempo, proporzionale alla distanza relativa tra due punti in una data epoca), si avrà che $S(t_1)$ è minore di $S(t_0)$ e il *redshift* è allora dato da:

$$z = S(t_0)/S(t_1) - 1$$

È questo il cosiddetto *redshift* cosmologico.

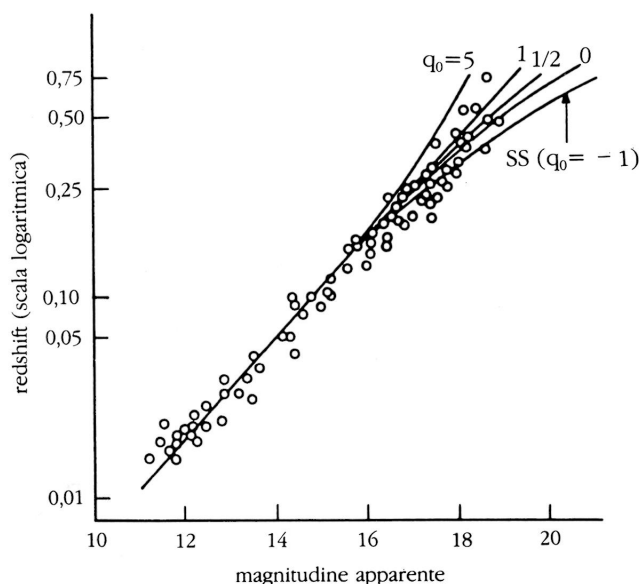
Grandi spostamenti Doppler si misurano normalmente nelle particelle di alta energia dentro gli acceleratori che viaggiano praticamente alla velocità della luce. Invece gli astronomi non sono avvezzi a registrare spostamenti verso il rosso molto spinti negli spettri degli oggetti celesti vicini. Ad esempio, le stelle della nostra Galassia si muovono abbastanza lentamente: le loro velocità sono tipicamente minori di un millesimo della velocità della luce, e dunque mostrano *redshift* minori di 0,001. Analogamente, nei casi di *redshift* gravitazionale, che si osservano in talune nane bianche, non si trovano mai valori maggiori di 0,001. Invece l'astronomia extragalattica dell'era successiva ad Hubble è ricca di galassie con z maggiore di 0,1 e ai nostri giorni si osservano frequentemente sistemi con z dell'ordine dell'unità o maggiori.

Nel 1963 furono scoperti due oggetti di apparenza stellare ma identificati con le radiosorgenti 3C 273 e 3C 48 che mostravano un *redshift* rispettivamente pari a $z=0,158$ e $z=0,37$. Oggi chiamati *oggetti quasi-stellari* (QSO) o quasar, queste sorgenti risultarono costituire una nuova classe di corpi astronomici; attualmente se ne conoscono circa tremila. L'apparenza stellare e l'alto *redshift* (con z fino a 4,4) sono il marchio caratteristico dei quasar, con solo una piccola frazione (meno del 10%) emittente anche nelle onde radio.

In teoria il *redshift* dei quasar potrebbe essere dovuto a ciascuna delle tre cause sopracitate, ma poiché nel 1963 solo tra i *redshift* cosmologici si registravano casi con z piuttosto elevati, ciò comportò che anche lo spostamento verso il rosso dei quasar fu considerato di natura cosmologica. Di conseguenza i quasar devono essere necessariamente oggetti molto distanti, poiché nella cosmologia del Big Bang si può esprimere la distanza D di una lontana sorgente come funzione del *redshift* secondo la *legge di Hubble*: $D = f(z) \times c/H_0$. Qui H_0 è il valore attuale della costante di Hubble e, per piccoli valori di z , $f(z)$ risulta essere circa uguale a z stessa. Tanto per fare un esempio, se assumiamo $H_0 = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, 3C 273 si trova alla distanza di circa 1600 milioni di anni luce da noi. Se l'ipotesi cosmologica è valida, i quasar sarebbero gli oggetti più lontani che si conoscono (visto che sono quelli con il *redshift* più elevato) e quindi anche i testimoni del più remoto passato dell'Universo. Proprio per questa loro natura, e per l'opportunità che ci offrono di indagare come è evoluto l'Universo negli ultimi dieci miliardi di anni, è necessario sottoporre l'ipotesi cosmologica ad un esame critico. Se dovesse emergere che quest'ipotesi non è adeguata a render conto delle caratteristiche osservate nei *redshift* dei quasar potrebbe render-

si necessario esaminare ipotesi alternative. Ci riferiremo all'insieme di queste alternative, inclusi l'effetto Doppler e il *redshift* gravitazionale, come *redshift non cosmologici*.

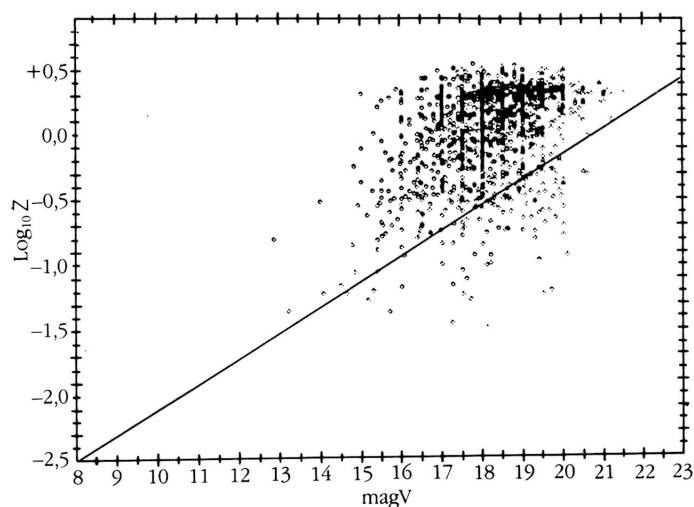
La maggioranza dei cosmologi ritiene che la legge di Hubble funzioni bene per le galassie: cioè il *redshift* è proporzionale alla distanza. La figura 4 mostra un gra-



(fig. 4) Diagramma redshift-magnitudine per le galassie più brillanti degli ammassi ottenuto da Kristian, Sandage e Westphal (1978). Le curve continue tracciate attraverso i punti rappresentano le diverse previsioni (al variare della densità media universale) del modello standard del Big Bang; quella indicata con SS si riferisce alle previsioni del modello a Stato Stazionario.

fico in cui il logaritmo del *redshift* è confrontato con la magnitudine apparente di un campione di galassie ellittiche (la magnitudine apparente può essere considerata come una misura della distanza, in scala logaritmica). Benché ci sia qualche scarto, è ben evidente un andamento lineare tra le due grandezze, del tutto conforme alla suddetta legge. Gli scarti aumentano, invece, se noi consideriamo non solo le ellittiche, ma le galassie di tutti i tipi. Cionondimeno si può verificare che esiste ancora un andamento ben definito dove la magnitudine cresce con il *redshift*.

Naturalmente, se avessimo un risultato simile nel caso dei quasar potremmo considerare confermata l'ipotesi che anche lo *z* di questi oggetti sia di natura cosmologica, ma gli sforzi condotti finora per cercare di stabilire la relazione di Hubble per i quasar non hanno dato esiti conclusivi. Il grafico *redshift*-magnitudine che si ottiene in questo caso è un diagramma ben poco regolare, come si vede in figura 5. Questo potrebbe significare due cose: o che il mancato andamento rettilineo sia dovuto ad un'ampia dispersione dei valori delle luminosità intrinseche dei quasar oppure che il



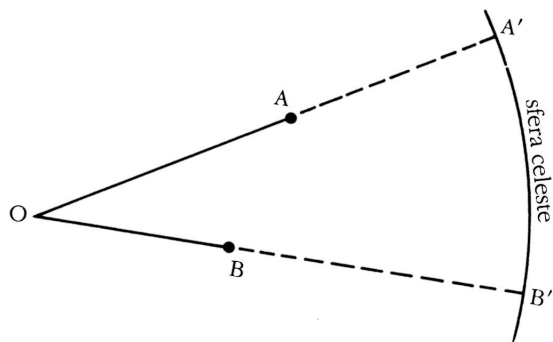
(fig. 5) Questo diagramma redshift-magnitudine di G. Burbidge e A. Hewitt, basato su circa tremila quasar del loro catalogo, non mostra alcuna relazione lineare del tipo della legge di Hubble per le galassie (fig. 4).

redshift e la distanza dei QSO sono grandezze totalmente scorrelate. Alcuni sostenitori dell'ipotesi cosmologica si sono sforzati di mostrare che un campione convenientemente selezionato di quasar effettivamente disegna una linea retta, ma questi tentativi non possono dirsi del tutto convincenti.

La seconda alternativa implica che i *redshift* dei quasar siano di natura non cosmologica, o perlomeno che lo siano in parte, diciamo per una frazione sostanziale. Tuttavia, prima di giungere a questa conclusione noi dovremmo esaminare anche altre prove. Dobbiamo subito ricordare che in effetti esistono delle prove osservative che sono in sintonia con l'ipotesi cosmologica; ma questa interpretazione non può essere considerata né unica né obbligata, probabilmente con una sola eccezione, che riguarda il lavoro di Stockton. In una attenta esplorazione di piccole regioni celesti, Stockton ha evidenziato la presenza di quasar in stretta prossimità di galassie che hanno praticamente lo stesso *redshift*. Poiché, come si è detto, il *redshift* delle galassie è cosmologico, altrettanto deve esserlo quello dei quasar associati. Comunque, la discussione su questo punto non può ritenersi conclusa; più tardi vi ritorneremo.

Abbiamo sollevato precedentemente alcuni dubbi riguardo all'interpretazione in chiave cosmologica del *redshift*. Si noti che, in linea di principio, basterebbe un controesempio appropriato per invalidare la portata universale di questa ipotesi.

Gli astronomi non sono in grado di misurare direttamente le distanze degli oggetti extragalattici. Quello che possono misurare con precisione sono le posizioni in cielo. Così, due oggetti A e B (si veda la figura 6) sono visti dall'osservatore O proiettati sulla sfera celeste nelle posizioni A' e B'. Se egli osserva A' e B' molto vicini fra loro, può legittimamente concludere che anche A e B sono fra loro vicini?

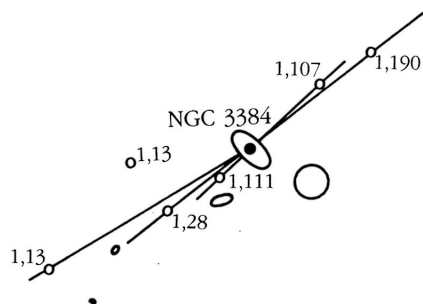


(fig. 6) Gli oggetti localizzati in A e B vengono osservati da O nelle loro posizioni A' e B' proiettate sulla sfera celeste.

Si noti che l'argomento di Stockton in favore del *redshift* cosmologico implica che la risposta a questa domanda sia positiva. Benché gli astronomi non abbiano prove solidissime a sostegno di questa conclusione, diciamo che la risposta è resa quantomeno plausibile da argomenti di tipo statistico. Se, come è il caso, la popolazione dei quasar si trova sparsa casualmente in cielo, la probabilità di trovare la proiezione A' del quasar A abbastanza vicina alla proiezione B' della galassia B è molto piccola, a meno che A e B non siano davvero fisicamente vicini l'un l'altro. Questo è il ragionamento che sta alla base dell'affermazione di Stockton.

Comunque, l'argomento si è dimostrato una spada a doppio taglio. Supponiamo infatti di trovare un quasar A proiettato abbastanza vicino alla proiezione della galassia B, ma di scoprire che i *redshift* dei due oggetti (z_A, z_B) siano sostanzialmente diversi. In questo modo è chiaro che la legge di Hubble non funziona o per gli uni o per gli altri, se non per entrambi. Poiché i *redshift* delle galassie si ritengono di natura cosmologica dobbiamo concludere che non lo sia z_A o quantomeno una sua parte. Prove di associazioni QSO-galassie con z diversi sono state presentate da vari astronomi, ma certamente il più fervente sostenitore dei *redshift* non cosmologici è Chip Arp. Arp ha mostrato, solo o in collaborazione con altri, diversi esempi di questo tipo:

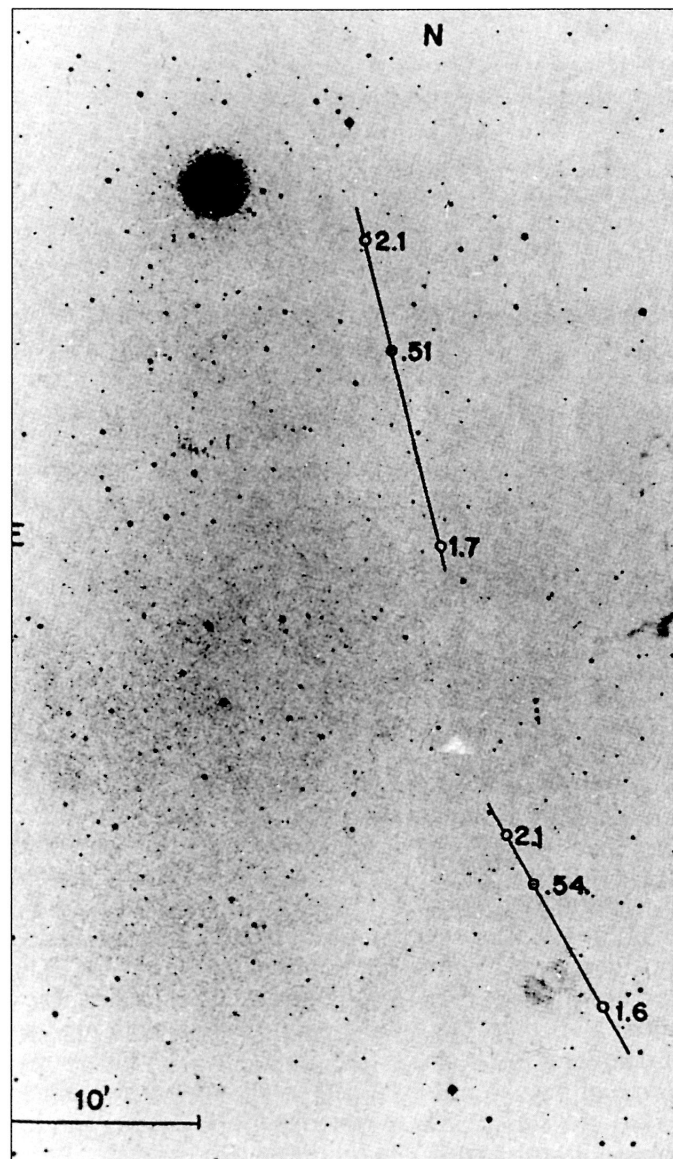
1 - nella figura 7 vediamo una concentrazione anoma-



(fig. 7) Questi quasar (il numero rappresenta il relativo *redshift*) furono scoperti da Arp nei dintorni della galassia NGC 3384 di basso *redshift*. È puramente casuale questo addensamento e allineamento?

la di quasar di alto *redshift* nei pressi di una galassia di basso *redshift*. Si notano anche allineamenti di quasar lungo direzioni radiali. Allora: questi quasar sono legati alla galassia, e addirittura sono stati generati da questa con qualche strano meccanismo di espulsione, oppure si proiettano semplicemente per caso attorno alla galassia come la legge di Hubble, se la riteniamo valida, ci suggerisce?

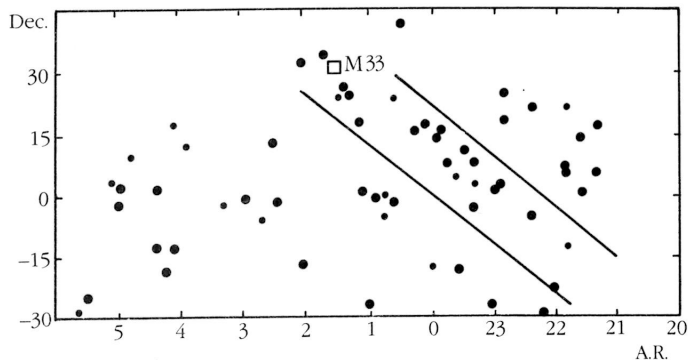
2 - Nella figura 8 troviamo due triplette di quasar di



(fig. 8) Due triplette di quasar allineati con differenti *redshift* scoperte da Arp e Hazard. Se la legge di Hubble è nel giusto allora questa configurazione deve essersi generata in modo del tutto casuale.

differenti *redshift* perfettamente allineati. È solo una pura coincidenza?

3 - Nella figura 9 ci sono quasar di alto *redshift* distribuiti in modo apparentemente non casuale che suggeriscono la presenza di una struttura a getto, forse emanante da una galassia di basso *redshift*.

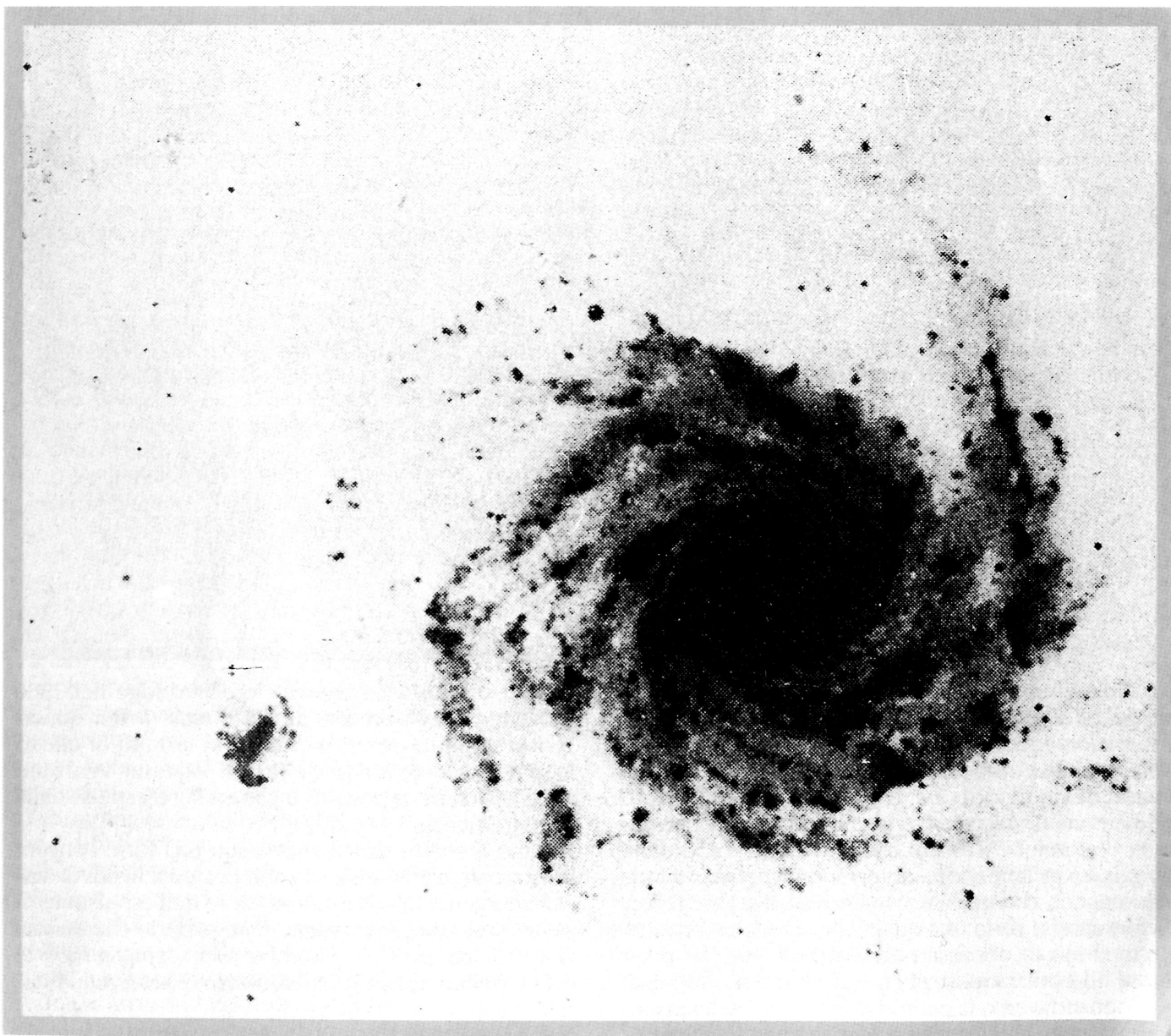


(fig. 9) Il grafico della posizione dei quasar radioemittenti ottenuto dai cataloghi di Parkes e di Cambridge (3C) mostra una distribuzione non casuale. In ascisse è riportata l'ascensione retta, in ordinate la declinazione. I quasar con redshift compreso tra 1,4 e 2,8 e con magnitudine minore di 20 evidenziano una concentrazione a forma di getto (son quelli contenuti tra le due linee parallele) che pare provenire dalla direzione della vicina galassia M33.

4 - La figura 10 e quella di pag. 6 mostrano galassie di basso *redshift* connesse da filamenti di materia con galassie compagne di *redshift* molto più alto. Quest'ultimo tipo di prova va a cozzare contro la base stessa della legge di Hubble poiché ne mette in questione la validità addirittura nel caso di galassie.

Quando si sottopongono queste situazioni all'esame dei sostenitori del *redshift* cosmologico, questi cercano sempre una spiegazione di tipo statistico. In genere mettono in discussione i criteri di selezione di Arp e sostengono che quelli che lui chiama raggruppamenti o associazioni sono semplici effetti di proiezione casuale. In altre parole, nei termini della figura 6, benché A' e B' siano vicini, A e B non lo sono. Quanto a lungo questa difesa possa essere sostenuta dipende dai pregiudizi individuali, ma io personalmente sono convinto che l'ipotesi della proiezione casuale stia diventando difficile da sostenere contro le molte prove fornite da Chip Arp.

11



(fig. 10) Anche la NGC 1232 è connessa da filamenti di materia con una piccola galassia di alto redshift. (H. Arp)

I concetti espressi in questo lavoro di J.V. Narlikar non sono tra i più semplici. D'altra parte, spiegarli nel corpo dell'articolo avrebbe spezzettato la trattazione. Il lettore troverà qui di seguito una discussione più articolata di alcune leggi o grandezze.

Partiamo dalla legge di Hubble. Enunciata verso la metà degli anni Venti essa afferma che sussiste una relazione lineare tra il logaritmo del *redshift* osservato nelle righe spettrali delle galassie e la magnitudine apparente delle stesse. Se si seleziona un campione opportuno di galassie in modo da poter ipotizzare che abbiano la stessa luminosità intrinseca, allora le rispettive magnitudini apparenti (cioè quanto ci appaiono brillanti) risultano essere una misura, in scala logaritmica, delle loro distanze. La legge si può dunque enunciare anche in una forma più semplice, e cioè: il *redshift* è direttamente proporzionale alla distanza: $z = (H_0/c) \times d$

dove la distanza d si esprime in Megaparsec (1Mpc = 3,26 milioni di anni luce), c è la velocità della luce e H_0 è la costante di Hubble il cui valore è assai controverso e oscilla tra i valori 50 e 100 km s⁻¹Mpc⁻¹. Ricordiamo che questa legge è verificata dalle osservazioni di galassie fino a valori di z relativamente piccoli (diciamo dell'ordine di 0,1 tanto per fissare le idee). Per valori più elevati la relazione si complica: a z si deve sostituire un'opportuna espressione

funzione di z e che l'autore indica con $f(z)$.

Nell'articolo si sottolinea che l'origine del *redshift* nelle galassie in linea di principio potrebbe essere attribuita ad una qualunque delle tre cause fisicamente possibili (o, meglio, oggi conosciute) dello spostamento spettrale: effetto Doppler, gravitazionale, cosmologico. Ciò è tanto più corretto in quanto si è affermato l'uso, in cosmologia, di considerare in modo pressoché equivalente il *redshift* z e la corrispondente velocità ($v = z \times c$, dove c è velocità della luce) a cui quello z corrisponderebbe se il *redshift* si generasse per effetto Doppler (non relativistico). Per capirci, di una galassia che presenta uno $z = 0,01$ si dice che si allontana da noi alla velocità di 3000 km: questo è vero e rigoroso solo se consideriamo come causa dello z un moto relativo della galassia rispetto all'osservatore terrestre. Ma naturalmente l'affermazione perde significato se lo z fosse d'origine gravitazionale e ne acquisterebbe uno diverso se la sua natura fosse cosmologica.

Nella formula relativa all'effetto Doppler, è inglobata la trattazione relativistica. Quando la velocità relativa v è molto minore della velocità della luce, il termine v^2/c^2 può essere trascurato: se poi la sorgente si allontana dall'osservatore $\Theta = 0$ e si ottiene il risultato più sopra citato $v = z \times c$.

Il fattore di scala dell'Universo $S(t)$

è una grandezza variabile nel tempo, che tiene conto di come variano nel tempo tutte le distanze nell'Universo in espansione. La formula riportata nell'articolo esprime il fatto che anche la lunghezza d'onda di una radiazione si "allunga" con il passare del tempo nella stessa misura di $S(t)$. Esempio: se tra l'epoca dell'emissione e quella dell'osservazione l'Universo ha raddoppiato le sue dimensioni anche λ avrà raddoppiato la sua lunghezza. Il suo *redshift* varrà 1 ($z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = (2\lambda_0 - \lambda_0)/\lambda_0 = 1$) come si deduce anche dalla formula usata dall'autore. Inversamente potremmo affermare che uno spettro con $z = 4$ è stato emesso quando l'Universo era 5 volte più piccolo dell'epoca presente.

In più punti nell'articolo si parla di una possibile componente non cosmologica del *redshift*. In effetti è possibile che effetti diversi si sovrappongano a determinare un *redshift* complessivo: ad esempio, una galassia appartenente ad un ammasso mostrerà un *redshift* che è la combinazione del *redshift* cosmologico proprio dell'ammasso, determinato dalla sua distanza secondo la legge di Hubble, e del *redshift* Doppler dovuto al suo moto intorno al centro di massa del sistema. Per le galassie vicine può capitare che il *redshift* Doppler sia più importante di quello cosmologico: è per questo motivo che in certe galassie del nostro Gruppo Locale si osserva addirittura un *blueshift*. (n.d.r.)

In un'intervista del 1983 Martin Rees assimilava chi dubita del *redshift* cosmologico a chi dubita della relatività speciale. Non mi pare che il paragone regga. La relatività speciale è stata ampiamente confermata da esperimenti di laboratorio e attualmente non conosciamo effetti anomali osservativi o sperimentali che la mettano in discussione. I pochi che ancora dubitano della sua validità lo fanno più sul terreno filosofico-concettuale-estetico che non su quello propriamente fisico. Al contrario, ci sono una quantità di prove osservative che mettono in discussione la legge di Hubble per i quasar e le situazioni scomode non sono state spiegate se non attraverso la contorta scappatoia della proiezione casuale. Vediamo invece quali sono le alternative non cosmologiche alla luce di queste osservazioni.

Sia Terrell nel 1964 che Hoyle e Burbidge nel 1966 proposero degli scenari in cui il *redshift* dei quasar veniva spiegato prevalentemente in termini di effetto Doppler. Nel modello di Terrell i quasar venivano proposti come oggetti di taglia stellare espulsi dalla nostra Galassia.

Benché il centro galattico presenti una forte concentrazione di materia, tuttavia non presenta livelli di attività energetica tali da rendere conto dell'espulsione di stelle a velocità relativistiche. Pare proprio che un'attività così intensa non potrebbe non scompaginare le orbite stellari nella Via Lattea: niente di ciò è stato finora osservato.

Nell'ipotesi di Hoyle e Burbidge l'espulsione dei quasar veniva associata ai nuclei galattici attivi. In tal modo

venivano aggirate le obiezioni che si muovevano all'ipotesi di Terrell, ma si andava incontro ad un'altra difficoltà che chiamerò la "catastrofe del *blueshift*". Come mostrò Streetmatter, nel 1967, ci si doveva aspettare che il numero dei quasar con righe spostate verso il blu, cioè con velocità diretta verso di noi, fosse decisamente maggiore di quelli con righe spostate verso il rosso, qualunque fosse il campione di quasar selezionato. Poiché finora non si è osservato alcun quasar con z negativo questa ipotesi non si è guadagnata credibilità.

Era stato intuito da Streetmatter, e sottolineato più recentemente nel 1980 da Hoyle, che si può evitare la catastrofe del *blueshift* se si suppone che i quasar emettano selettivamente tutta la loro radiazione all'indietro. Come mostrò Hoyle, se un quasar che si muove con velocità v relativa al substrato cosmologico emettesse tutta la sua radiazione all'indietro entro un cono di semiapertura tanto minore quanto maggiore è la velocità, nessun osservatore che sia solidale con il substrato cosmologico vedrebbe tale radiazione spostata verso il blu.

Ma perché un quasar lanciato a grande velocità dovrebbe emettere selettivamente la sua radiazione in un cono diretto all'indietro? Né Streetmatter né Hoyle hanno mai prodotto una spiegazione astrofisica convincente di questo fatto. Questo problema fu discusso da Subramanian e da me nel 1983: noi trovammo una possibile spiegazione adattando il modello elaborato da Blandford e Rees ai quasar di alta velocità. In questo modello, una sorgente di plasma caldo è avvolta da una nube di gas, trattenuta dal campo gravitazionale di un ammasso stellare o di un buco nero molto massiccio; la sorgente emette dei getti di plasma altamente collimati che fuoriescono in versi opposti lungo le linee di minor resistenza: nel modello di Blandford e Rees coincidono con l'asse di rotazione. Nel nostro modello una struttura di questo tipo che si muova attraverso il mezzo intergalattico sviluppa un singolo getto perché, a causa della pressione del mezzo che deve attraversare, incontra una notevole resistenza nella direzione del moto mentre non ne incontra nel senso opposto. È così che si produce preferenzialmente un solo getto e all'indietro.

Il modello del *redshift* per effetto Doppler affascina per via delle previsioni che riesce a produrre. La prima è ovvia ed è che i quasar dovrebbero mostrare un singolo getto, previsione che finora sembra confermata dalle osservazioni radio. Misure fatte con tecniche interferometriche VLBI in un prossimo futuro potrebbero essere in grado di dirci se effettivamente i quasar possiedono dei moti propri nei confronti del substrato cosmologico e, ammesso che sia così, se i loro getti sono diretti in senso opposto al moto. Questo modello è anche in grado di spiegare perché ci sono in proporzione così pochi quasar radioemittenti e perché è più probabile che siano i quasar di basso *redshift* a mostrare tenui nebulosità che li circondano. E naturalmente anche le associazioni tra quasar e galassie scoperte da Arp sono facili da spiegare.

Benché la natura compatta dei quasar suggerisse l'ipo-

tesi che il *redshift* fosse d'origine gravitazionale, furono avanzate subito due obiezioni che non fecero guadagnare troppi consensi all'idea. La prima riguarda un risultato notevole in campo teorico ottenuto da Bondi nel 1964 che dimostrava che nessun oggetto in condizioni di equilibrio può mostrare un *redshift* gravitazionale superiore a 0,62. La seconda obiezione si basava sulle analisi spettroscopiche di Greenstein e Schmidt, sempre nel 1964, sulle righe d'emissione dei primi due quasar scoperti, il 3C 48 e 3C 273; essi mostrarono che gli oggetti avrebbero dovuto essere massicci come galassie e posti a distanze relativamente vicine, così da farli appartenere al Gruppo Locale. Il che sembrava altamente improbabile.

Per aggirare questi problemi, nel 1967 Hoyle e Fowler suggerirono che le righe d'emissione dei quasar non provenivano dalla superficie esterna del sistema massiccio, ma da gas caldo intrappolato nelle sue regioni centrali. Una nube esterna di stelle di neutroni, per esempio, avrebbe potuto risolvere la questione: queste stelle, essendo di piccole dimensioni, non intercetterebbero se non in misura minima la luce uscente dal centro ed essendo massicce creerebbero il forte campo gravitazionale necessario per produrre il *redshift*. Verso la metà degli anni '70 Das e chi scrive approfondirono questa possibilità. Pur restando all'interno dei vincoli dettati dalle misure spettroscopiche di cui si è già detto e imponendo le dovute restrizioni per garantire la stabilità del sistema, è possibile ipotizzare oggetti di massa galattica con *redshift* gravitazionali dell'ordine di 2-2,5 e a distanze intorno a 300 milioni di anni luce.

Dei tre tipi di *redshift* previsti dalla fisica, fu in astronomia che si trovarono i primi esempi concreti. Di questi, il *redshift* gravitazionale deriva da una modificazione della geometria spazio-temporale su scala locale, mentre il *redshift* cosmologico richiede un cambiamento globale.

Hoyle e chi scrive mostrarono nel 1972 che il *redshift* cosmologico in un modello a Big Bang avrebbe potuto essere interpretato anche come generato dalla variazione della massa delle particelle elementari. In tal modo il valore osservato λ di una riga spettrale presente nella radiazione che ci giunge da una galassia distante è maggiore di quello (λ_0) che si misura in laboratorio poiché si origina in un'epoca precedente e quindi in un sistema di massa minore. Allora la nozione dell'Universo in espansione viene ad essere rimpiazzata dalla nozione di un incremento tendenziale della massa delle particelle in un Universo statico.

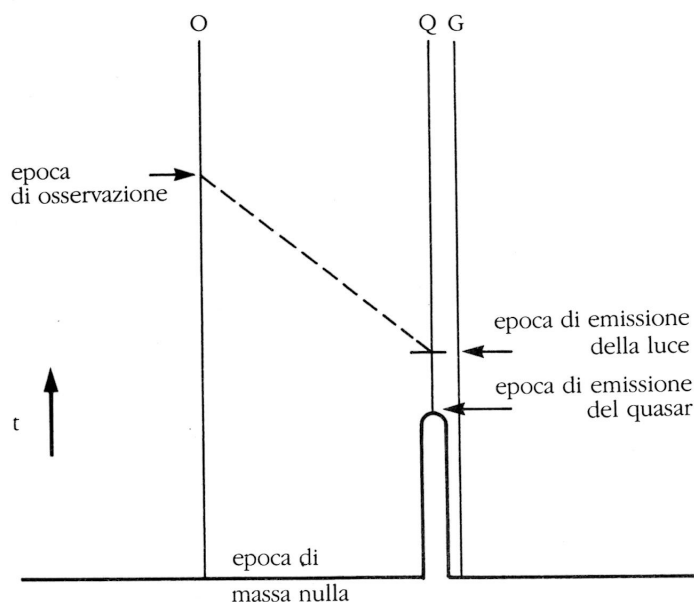
C'è da dire che i due approcci sono equivalenti dal punto di vista matematico, benché il secondo trovi una pronta spiegazione nella teoria gravitazionale sviluppata nel 1964 da Hoyle e dall'autore, il quale successivamente ha pure introdotto delle correzioni in questo quadro generale per rendere conto dei *redshift* anomali scoperti da Arp. In termini qualitativi l'idea è la seguente.

Se tutta la materia fosse stata creata all'epoca $t = 0$

come vuole l'ipotesi cosmologica del Big Bang, in quell'istante tutte le masse avrebbero avuto valore nullo. Incominciarono poi a crescere in modo tale che tutte le galassie che noi osserviamo alla stessa epoca ci mostrerebbero lo stesso *redshift*. (Questo è semplicemente il riaffermare la legge di Hubble, secondo la quale galassie alla stessa distanza mostrano lo stesso spostamento verso il rosso).

Immaginiamo ora un quasar che sia espulso da una galassia in una qualche epoca t . Secondo la nuova ipotesi dell'autore, le particelle del quasar avrebbero masse nulle all'epoca t della loro creazione e solo da lì in poi le masse comincerebbero a crescere. In questo modo le particelle di un quasar avrebbero sempre masse minori di quelle delle particelle della galassia genitrice semplicemente perché sono più giovani. È questo il motivo che porta ad un eccesso di spostamento verso il rosso nei quasar e questo eccesso è tanto minore quanto più lontana nel passato è l'epoca della creazione del quasar. L'idea è rappresentata nella figura 11.

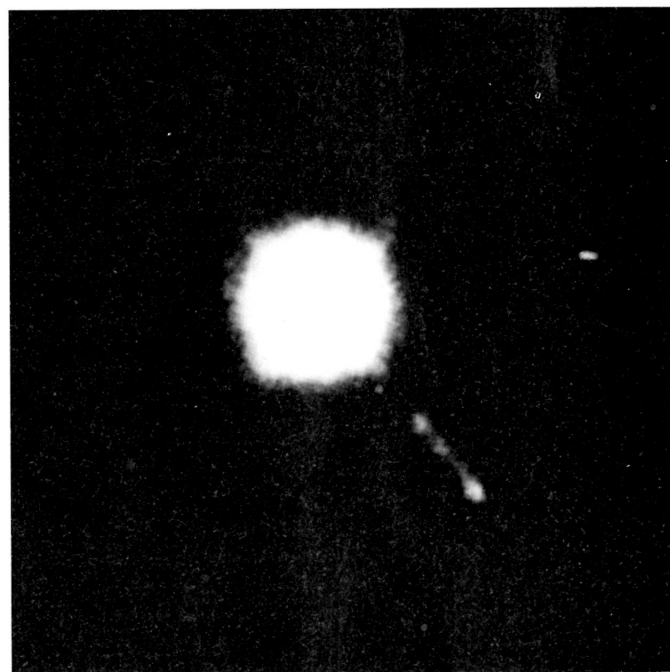
È possibile che le galassie compagne osservate da Arp



(fig. 11) Nella cosmologia di Hoyle-Narlikar, l'epoca del Big Bang è rimpiazzata dall'epoca di massa nulla (riga più spessa). Il picco a tratto marcato denota una "creazione" successiva. Il quasar Q fu creato successivamente alla galassia vicina G, per emissione dal suo nucleo. Le particelle di Q avranno sistematicamente una massa minore di quelle di G in ogni epoca successiva. Un osservatore O vedrà perciò Q caratterizzato da un *redshift* maggiore di G.

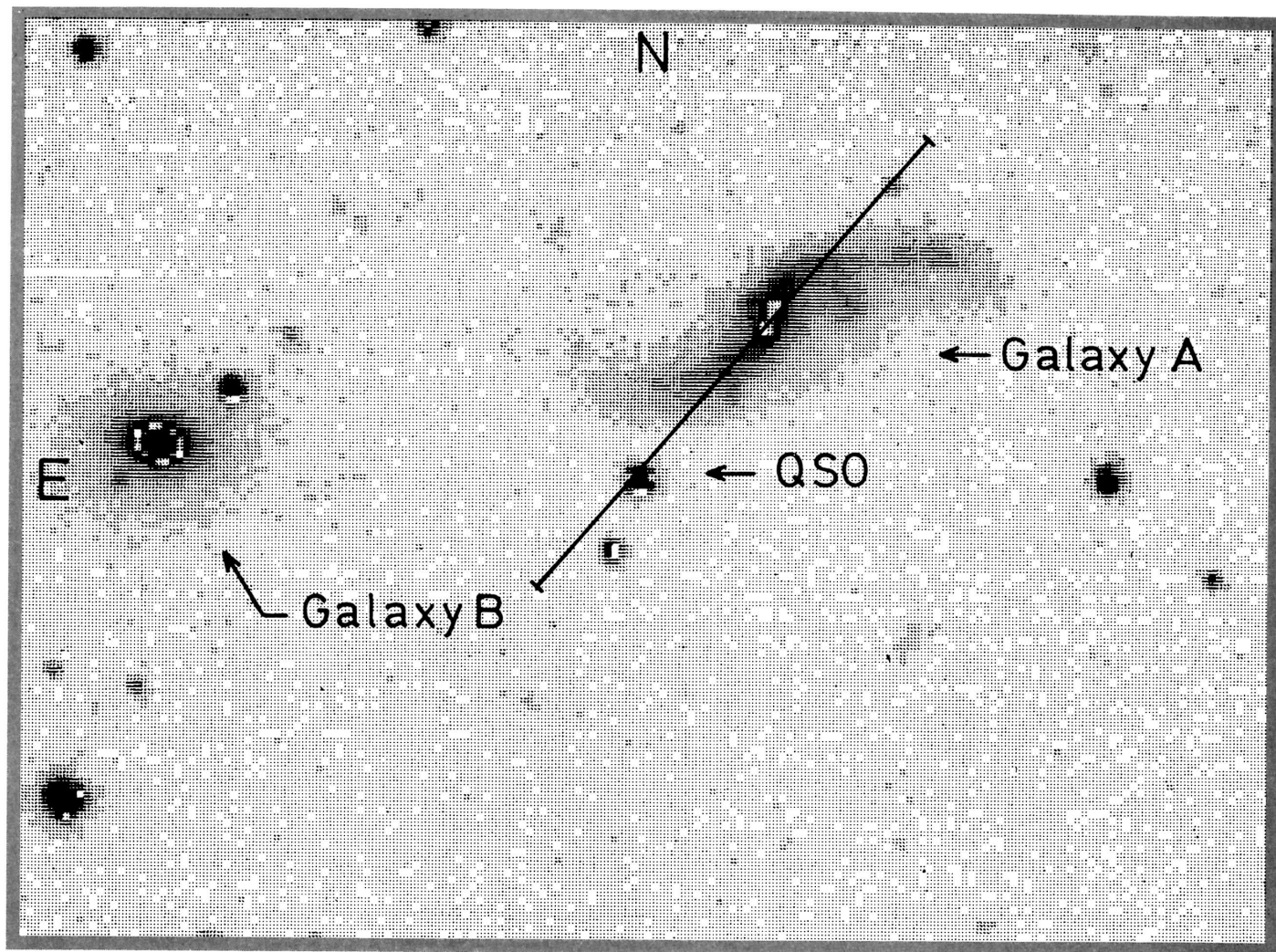
siano sistemi in cui la secondaria è generata dalla galassia principale: se l'espulsione fosse avvenuta in un lontano passato l'eccesso del loro *redshift* sarebbe stato molto basso. Inoltre noi potremmo pensare che i quasar siano oggetti molto più recenti, che potrebbero non aver ancor avuto il tempo di evolvere fino a

diventare galassie. Ma dal momento in cui essi lo diventano l'eccesso osservato si ridurrebbe fortemente. Nel 1980, Das e chi scrive investigarono la dinamica dell'espulsione deducendo alcune conseguenze osservabili. Per esempio noi ci aspettiamo che se il quasar viene espulso con un'energia abbastanza bassa da restare gravitazionalmente legato alla galassia genitrice, esso si dispone su un'orbita fortemente eccentrica che subito tende a restringersi. Questa previsione e altre ancora sembrerebbero confermate dall'esame che Arp ha condotto sui suoi dati. Un raggruppamento di quasar con identico *redshift* vicino a una galassia suggerisce, nel nostro modello, che essi furono espulsi tutti alla stessa epoca. Anche l'allineamento di quasar sembra spiegabile in modo abbastanza naturale. Con questo modello potrebbe anche comprendersi (benché finora non sul piano quantitativo) un altro curioso fenomeno che riguarda gli spostamenti spettrali. Scoperto dapprima da Tifft negli anni '70, confermato poi con studi più accurati dallo stesso Tifft, da Arp e da Sulentic ed esaminato criticamente da altri, il fenomeno in questione riguarda l'apparente distribu-



(fig. 12) Il quasar 3C 273 fu uno dei primi oggetti di questo tipo scoperti nel 1963, assieme a 3C 48; il suo *redshift* è pari a 0,158 e, nell'ipotesi che sia di origine cosmologica e assumendo per la costante di Hubble il valore di $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, lo collocherebbe ad una distanza di circa 1600 milioni di anni luce da noi (naturalmente se $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ la distanza sarebbe doppia). In questa foto ottenuta al Kitt Peak è ben visibile il getto singolo emesso da questo quasar.

zione discreta delle differenze di *redshift* nelle galassie binarie e degli ammassi. Tali differenze (quando vengono moltiplicate per la velocità della luce) sembrano addensarsi molto fortemente intorno a 72 km/s e ai suoi multipli interi! La presenza di questo effetto "di quantizzazione" non trova spiegazione all'interno



(fig. 13) Questa immagine è tratta da un recente lavoro (P. Boissé et al. *Astronomy and Astrophysics* 191, 193) che analizza nei dettagli i possibili legami tra quasar (in questo caso PKS 2020-370) e galassie apparentemente vicine. Il segmento indica la direzione lungo cui gli autori hanno effettuato una accurata analisi spettrale dell'emissione dei due oggetti alla ricerca di informazioni che potessero evidenziare un legame fisico fra di essi. È dallo sviluppo di queste osservazioni che potrà arrivare una risposta al problema dei redshift anomali.

della visione convenzionale della legge di Hubble. Potrebbe essere in qualche modo legato ad una quantizzazione della massa delle particelle?

È prassi normale in campo scientifico sottoporre le teorie più unanimemente accettate ai test più stringenti. Come si è cercato di spiegare in questo articolo questi test lasciano spazio a sufficienza per dubitare della validità della legge di Hubble per i quasar. Su questa base si è cercato di mostrare delle possibili alternative.

Poiché non è mai stata riservata loro l'attenzione che pure si meritano, le ipotesi del *redshift* Doppler o gravitazionale non sono progredite al livello di dettaglio che invece ha l'ipotesi ispirata dal modello cosmologico standard. In sé questo fatto non può certo essere considerato come una prova dei loro limiti o della loro inadeguatezza. Solo dopo che queste idee saranno sviluppate in profondità si potranno approntare dei test altrettanto stringenti per verificare la loro validità. Il criterio del *rasoio di Occam* (cioè di non abbandonare le spiegazioni più semplici per introdurre con-

cetti astrusi e superflui, n.d.r) ci consiglia di considerare nuovi tipi di *redshift* solo se i tre tipi standard dovessero dimostrare di fallire nella spiegazione dei fenomeni osservati. In questo senso può essere considerato prematuro approfondire ad un dettaglio maggiore l'ipotesi della massa variabile. È per questa ragione che chi scrive attende con grandissimo interesse gli sviluppi osservativi che si delineano all'orizzonte nel campo dei *redshift* anomali.

Traduzione di Giusi Galli

JAYANT V. NARLIKAR. È nato nel 1938 a Kolhapur (India). Figlio di un professore di matematica ha conseguito la laurea nel 1960 a Cambridge dove fu prima allievo e poi collega di Sir Fred Hoyle all'Istituto di Astronomia Teorica dell'Università. I suoi lavori più famosi riguardano la cosmologia: studi sulla teoria dello Stato Stazionario, nuove teorie della gravità, studi sui *redshift* anomali dei quasar, comportamento dei tachioni in forti campi gravitazionali, fenomenologia dei buchi neri. Autore di numerosi lavori divulgativi, tradotti anche in italiano, ha pubblicato di recente *The primeval Universe* (1988) per la Oxford University Press. Sposato, ha tre figlie: Geeta, Girija, Leelavati.