

G. SETTI (*)

La Radioastronomia (**)

1. Introduzione

Sono stato estremamente lieto, e grato nello stesso tempo, dell'invito di presentare un discorso sulla radioastronomia nell'ambito delle celebrazioni per il 50° anniversario della morte di Guglielmo Marconi. Mi è parsa un'idea estremamente felice ed opportuna poiché la nascita di questa disciplina, anche storicamente, è strettamente legata alla grande invenzione del Nostro.

Agli inizi degli anni '30, Karl Jansky, un ricercatore presso i Laboratori della Bell Telephone, stava sperimentando con un'antenna rotante da lui stesso costruita per indagare interferenze radio a lunghezze d'onda relativamente corte (Fig. 1). Egli aveva notato che mentre gran parte dei disturbi nella banda osservata potevano essere correlati alla presenza di temporali più o meno distanti, c'era tuttavia un'interferenza persistente e debole quasi certamente di origine celeste dal momento che la direzione di provenienza appariva ruotare di circa 360° in un giorno. Mentre in un primo tempo Jansky pensava che l'interferenza fosse in qualche modo legata causalmente al Sole, dopo un anno di intense osservazioni egli fu in grado di stabilire che la direzione del « disturbo » radio era fissa nel sistema di coordinate celesti e molto prossima alla posizione del centro della nostra Galassia. Era l'anno 1933.

Naturalmente, come sempre succede nel caso di nuove scoperte che in qualche modo rivoluzionano schemi già stabiliti, l'ipotesi che questa sorgente di onde radio potesse avere un'origine al di fuori del sistema solare, addirittura localizzata in prossimità del centro galattico, fu sottoposta ad un vaglio severo e vennero anche avanzati modelli alternativi che legavano il fenomeno all'interazione di particelle prodotte da una sorgente di raggi cosmici, casualmente posta sulla direttrice con il centro galattico, con l'atmosfera terrestre. Nel giro di due anni

(*) Dipartimento di Fisica, Università di Bologna e European Southern Observatory, Garching, Germany.

(**) Relazione presentata in occasione della commemorazione del cinquantesimo anniversario della morte di Guglielmo Marconi a Villa Griffone, Pontecchio Marconi, il 20 luglio 1987.

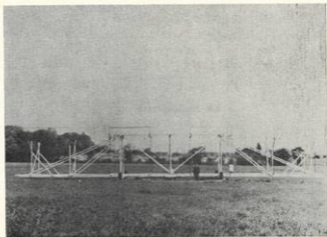


Fig. 1. Karl Jansky e l'antenna con la quale ha realizzato la sua famosa scoperta.

Jansky fu in grado di dimostrare che segnali radio deboli potevano essere ricevuti in tutte le direzioni dalla Via Lattea con un massimo in direzione del centro galattico ed un minimo in quella dell'anti-centro. L'origine galattica dei segnali radio risultava così definitivamente stabilita, anche se rimaneva oscura la natura dell'emissione, e venivano così gettate le basi della disciplina radioastronomica.

Tuttavia, occorrerà attendere fino agli anni '50 per assistere all'affermarsi della radioastronomia come branca estremamente importante della ricerca astronomica ed astrofisica, quando l'evolversi delle tecnologie radio ha consentito la costruzione di antenne sufficientemente grandi e di sistemi di amplificazione dei segnali sufficientemente perfezionati tali da poter rivelare flussi di onde radio estremamente deboli, nonché la direzione di provenienza degli stessi. Naturalmente la precisione con la quale si è riusciti a determinare la posizione delle sorgenti radio sulla sfera celeste è stata fondamentale per lo sviluppo delle ricerche radioastronomiche in quanto ha consentito di identificare le eventuali controparti ottiche, e quindi ha consentito di saldare il ponte con le conoscenze acquisite attraverso i secoli dalla ricerca astronomica nella banda del visibile.

Un esempio importante, ed a noi vicino, di questi grandi strumenti per l'esplorazione sistematica del cielo radio è fornito dal radiotelescopio « Croce del Nord » dell'Università di Bologna (Fig. 2). Con questo strumento è stata esplorata un'ampia fascia dell'emisfero nord e sono state catalogate alcune decine



Fig. 2. La Stazione Radioastronomica di Medicina (Bologna) dell'Istituto di Radioastronomia C.N.R. con il radiotelescopio «Croce del Nord». Il braccio Est-Ovest è costituito da un riflettore cilindrico-parabolico posizionabile in declinazione lungo 600 m e con apertura di 35 m, mentre il braccio Nord-Sud è formato da 64 antenne cilindro-paraboliche disposte su una lunghezza complessiva di 640 m. In basso a destra nella figura il nuovo radiotelescopio del progetto VLBI.

di migliaia di sorgenti radio: i cataloghi, universalmente noti con la lettera B (per Bologna) seguita da un numero progressivo, danno la posizione delle sorgenti con una precisione di 10 secondi d'arco in direzione Est-Ovest e di 10-30 secondi d'arco in Nord-Sud, nonché il flusso di radiazione osservato alla frequenza di 408 MHz fino ad un flusso limite di 2×10^{-27} watt m^{-2} Hz^{-1} . Questi cataloghi sono stati alla base di un'innumerabile serie di ricerche d'importanza per la cosmologia e l'astrofisica.

2. Le Scoperte della Radioastronomia

Per illustrare l'impatto enorme della ricerca radioastronomica sull'evoluzione degli studi dell'Universo sarà sufficiente richiamare le scoperte più importanti in ordine cronologico:

1951 - Rivelazione della riga a 1420MHz (21 cm) emessa dall'idrogeno neutro del gas interstellare, che comprende il 5-10% della massa totale della Via Lattea. Le osservazioni della riga a 21 cm sia in emissione che in assorti-

mento hanno permesso di scandagliare in profondità la nostra Galassia particolarmente verso il centro galattico dove le osservazioni nella banda del visibile sono bloccate dalla presenza dei grani di « polvere » interstellare. Così gli studi condotti nella riga hanno fornito uno strumento indispensabile per lo studio delle strutture, dinamica ed evoluzione dei sistemi galattici che come il nostro sono ricchi di gas.

1954 - Scoperta delle radio galassie. Identificazione della radio sorgente forte Cygnus A con una galassia relativamente debole in quanto a grande distanza (circa 750 milioni di anni luce). L'energia emessa nel continuo radio è dominante rispetto a quella emessa nel visibile. Tipicamente la struttura della radio sorgente presenta una simmetria doppia (Fig. 3) e dimensioni di gran lunga superiori a quelle della galassia madre. La natura dell'emissione nel continuo radio, sovente caratterizzata da alte percentuali di polarizzazione lineare che aumentano al crescere della frequenza d'osservazione, è di tipo non termico ed è dovuta all'irraggiamento di elettroni ultrarelativistici che spiraleggiano in campi magnetici relativamente intensi (emissione sincrotrone). I meccanismi per i quali enormi quantità di energia vengono in ultima analisi trasferite con alta efficienza in particelle relativistiche (e campi magnetici) sono ancora l'oggetto di un appassionato dibattito scientifico. Ritorneremo su questa problematica nel seguito.

1963 - Scoperta delle quasars (abbreviazione dall'inglese per quasi-stellar radio sources). Posizioni estremamente accurate di alcune radio sorgenti avevano consentito la loro identificazione certa con controparti ottiche dall'apparenza stellare i cui spettri, tuttavia, apparivano caratterizzati da intense righe d'emissione difficilmente interpretabili. L'astronomo di origine olandese Marteen Schmidt dimostrò che questi spettri anomali potevano essere facilmente interpretati secondo i canoni classici della spettroscopia qualora si assumesse che le righe erano spostate verso il rosso di una quantità proporzionale alla lunghezza d'onda di ciascuna riga così come misurata in laboratorio, la costante di proporzionalità essendo caratteristica per ogni oggetto. Un'analisi dettagliata ha poi dimostrato che l'interpretazione più plausibile dello spostamento verso il rosso degli spettri ottici è quella dell'effetto Doppler associato all'espansione dell'Universo tale per cui la velocità di allontanamento aumenta all'aumentare della distanza (legge di Hubble). Ponendo le quasars alle distanze cosmologiche indicate dagli « spostamenti verso il rosso », si trova che mentre la loro potenza nel continuo radio è simile a quella delle radio galassie forti, ivi inclusa la presenza di strutture radio a simmetria doppia, la potenza emessa nella banda visibile è enorme, da 100 a 10000 volte quelle emesse dalle galassie brillanti. Successivamente si è trovato che solo il 10% circa delle quasars sono anche potenti sorgenti di onde radio, mentre per la stragrande maggioranza, pur caratterizzata dalle stesse proprietà ottiche, l'emissione di onde radio appare fortemente soppressa. Le quasars sono di gran lunga gli oggetti più luminosi presenti nell'Universo e si ritiene ch'esse rappresentino fasi estreme dell'attività dei nuclei galattici.

1963 - Scoperta della molecola OH nel gas interstellare. Anche se alcune

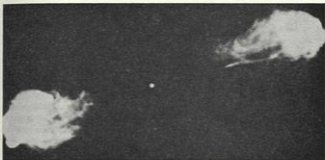
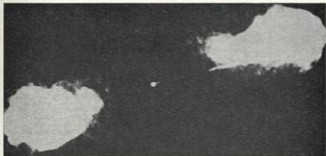


Fig. 3. Rappresentazione fotografica della struttura della radio galassia Cygnus A alla lunghezza d'onda di 6 cm. La Fig. 3b) ha una profondità 4 volte superiore a quella della Fig. 3a). La penetrazione del getto nel lobo destro di radio emissione è ben visibile nella Fig. 3a) mentre rimane saturata nella Fig. 3b), la quale di converso mostra più chiaramente la connessione del getto con il nucleo. Il nucleo centrale coincide con la posizione ottica della galassia la cui immagine, non riprodotta nella figura, è molto più piccola di quella della struttura radio. I due estremi dei lobi di radio emissione hanno una separazione angolare di $2'07''$ che alla distanza di Cygnus A corrisponde ad una dimensione di circa 400,000 mila anni luce. (Ap. J., 285, 135).



molecole del gas interstellare erano già note da osservazioni spettroscopiche nel dominio ottico, l'osservazione dell'idrossido nel dominio delle radio onde (18 cm) ha costituito una tappa fondamentale nello studio della complessità chimico-fisica del mezzo interstellare. Le osservazioni condotte con i radiotelescopi in questo ultimo quarto di secolo nella banda delle microonde hanno rivelato una miriade di molecole, incluse molecole organiche estremamente complesse. In generale le molecole si trovano in abbondanza in regioni dense e relativamente fredde spesso associate con dense nubi del mezzo interstellare in cui esistono le condizioni per la formazione di nuove stelle. Quindi lo studio delle molecole interstellari ha grandemente contribuito a far progredire le nostre conoscenze sul problema fondamentale della formazione delle stelle.

1965 - Scoperta della radiazione universale per la quale gli americani A. Penzias e R. Wilson hanno ottenuto il premio Nobel per la fisica. Lo spettro della radiazione è rappresentato nella Fig. 4. Esso è consistente con lo spettro di emissione di un corpo nero alla temperatura di 2.7°K. I dati ottenuti dai radiometri coprono la porzione di Rayleigh-Jeans dello spettro di corpo nero

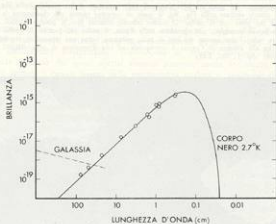


Fig. 4. Intensità della radiazione universale come risulta da misure nel dominio delle microonde fino ad una lunghezza d'onda minima di 3 mm (o). Alle lunghezze d'onda più grandi il fondo cosmico è inquinato dalla emissione radio della nostra Galassia, I dati sono rappresentati al meglio da uno spettro di corpo nero con una temperatura di 2.7 gradi assoluti (linea continua).

fino ad una lunghezza d'onda di circa 3 mm, così che la radiazione osservata è nota come « fondo cosmico alla microonde ». Le osservazioni ottenute con palloni di alta quota (40.000 m) e con razzi hanno consentito di esplorare la parte restante dello spettro alle lunghezze d'onda più piccole assorbite dall'atmosfera terrestre in particolare per la presenza del vapor d'acqua. I risultati fino ad ora ottenuti sono consistenti con uno spettro di corpo nero di circa 3°K con un massimo intorno ad una lunghezza d'onda di 1 mm ed una caduta esponenziale alle lunghezze d'onda più corte. E' probabile che bisognerà attendere il lancio del satellite COBE della NASA per avere dati più accurati.

In ogni caso la forma dello spettro e l'intensità della radiazione, nonché il suo alto grado di isotropia spaziale, sono tali da poter escludere una spiegazione in termini della somma di tanti contributi da classi di sorgenti extragalattiche note. A meno, quindi, d'introdurre l'ipotesi completamente ad hoc dell'esistenza di una nuova classe di oggetti a distanze cosmologiche e con proprietà di emissione adeguate, l'unica interpretazione plausibile dell'eccesso di radiazione osservato alle microonde è quella della radiazione universale generata in un'origine esplosiva e calda dell'Universo, nota come modello del « big bang caldo ».

1968 - Scoperta delle pulsars (abbreviazione dall'inglese per radio sorgenti pulsate). - Con la scoperta della pulsar nella Nebulosa del Granchio (un resto di supernova esplosa nel 1054), i cui impulsi radio si susseguono ad intervalli estremamente regolari di soli 33 millisecondi, si è avuta una conferma definitiva della congettura iniziale che le pulsars sono la manifestazione di stelle di neutroni in rapidissima rotazione e dotate di campi magnetici intensissimi (tipicamente 10^{12} Gauss) orientati obliquamente rispetto agli assi di rotazione, da cui l'asimmetria necessaria al fenomeno di pulsazione (modello « faro »).

Le pulsars hanno rappresentato la prima verifica osservativa dell'esistenza di questi oggetti straordinari che si formano nelle fasi finali dell'evoluzione di stelle massicce quando, esauritasi la produzione d'energia per reazioni nucleari, esse collassano sotto l'azione della propria gravità. Il collasso del nucleo stellare s'arresta bruscamente quando la densità della materia raggiunge la densità dei nuclei atomici (circa 10^{14} g/cm³) ed una massa dell'ordine di quella del Sole viene schiacciata entro una sfera di raggio pari a circa 10 km, in rapidissima rotazione per la conservazione del momento angolare, mentre l'onda d'urto che ne consegue espelle il resto dell'involuppo stellare in una grande esplosione che dà luogo al fenomeno spettacolare noto come « supernova ». Data la grande conducibilità elettrica del gas stellare anche i campi magnetici vengono trascinati e compressi nel corso del collasso gravitazionale, rimanendo poi saldamente ancorati alla stella di neutroni con la quale corrotano.

In un certo senso le pulsars sono grandi antenne cosmiche alimentate dall'energia di rotazione delle stelle di neutroni. Gli intensi campi elettrici indotti sono in grado di accelerare particelle cariche con grandissima efficienza. Un esempio classico è ancora una volta fornito dalla Nebulosa del Granchio nella quale l'energia rotazionale ceduta dalla pulsar ad essa associata, così come misurata dall'aumento sistematico del periodo degli impulsi, bilancia perfettamente le perdite di energia

degli elettroni ultrarelativistici responsabili dell'irraggiamento di natura non-termica (radiazione sincrotrone) della Nebula dalle onde radio fino ai raggi gamma.

Le pulsars, viste come orologi di grande precisione, risentono dei cambiamenti strutturali che possono aver luogo nelle stelle di neutroni in rapida rotazione e quindi forniscono un mezzo unico per lo studio della fisica della materia alle altissime densità nucleari non raggiungibili in laboratorio. La ricerca sistematica di pulsars ha poi portato alla scoperta di una pulsars in un sistema binario eccezionale in cui il compagno è pure una stella di neutroni. Si tratta di un sistema binario estremamente stretto (dimensioni dell'ordine del diametro solare), nel quale si realizzano pertanto condizioni ottimali per la verifica delle teorie gravitazionali. Secondo la teoria della Relatività Generale di Einstein il sistema binario emette un flusso continuo di onde gravitazionali a spese dell'energia rotazionale, e come conseguenza i due corpi debbono spiraleggiare l'uno verso l'altro per effetto dell'attrazione gravitazionale dominante, e quindi il periodo orbitale deve diminuire. Questo è in effetti quanto si è trovato grazie alla precisione dell'« orologio » pulsar in perfetto accordo quantitativo con le previsioni della Relatività Generale, e quindi questa si può considerare anche come la prima prova sperimentale dell'esistenza delle onde gravitazionali.

All'altro estremo l'analisi degli impulsi delle pulsars a varie frequenze consente di effettuare una diagnostica del gas interstellare che s'interpone fra noi e le pulsars stesse.

Questi brevi cenni dovrebbero essere sufficienti ad illustrare l'enorme portata scientifica della scoperta delle pulsars il cui studio copre un ampio spettro di tematiche di alto interesse per la fisica e l'astrofisica.

1971 - Scoperta delle sorgenti radio superluminali. - Questa scoperta è legata allo studio della struttura dettagliata delle radio sorgenti compatte associate alle quasars mediante l'introduzione di una nuova tecnica di osservazione che ha consentito il raggiungimento di altissime risoluzioni angolari. In tal modo è stato possibile seguire l'evoluzione di strutture radio (vere sacche d'energia prodotte dall'attività delle quasars) che appaiono muoversi con una velocità superiore a quella della luce nel vuoto, in apparente violazione di uno degli assunti fondamentali della fisica.

Ritourneremo su questa scoperta sorprendente e sulle sue implicazioni in maggior dettaglio nel seguito.

Questo breve escurso sulle maggiori scoperte della radioastronomia dimostra la ricchezza e l'importanza dei fenomeni che vengono evidenziati quando si osserva l'Universo alle radio-onde. Nel contempo è anche chiaro tuttavia che è impossibile nel breve corso di una relazione approfondire tutti gli argomenti che sono stati ora sfiorati. Pertanto ho ritenuto opportuno dedicare la parte restante del mio intervento all'approfondimento di due soli temi che riguardano l'impatto della radioastronomia sulla cosmologia e sullo studio delle attività energetiche nel corso dell'evoluzione dei nuclei galattici.

3. La Radioastronomia e la Cosmologia

Le grandi potenze associate alle radio galassie ed alle quassars fanno sì che questi oggetti possano essere rivelati anche a grandissime distanze e, pertanto, essi forniscono uno strumento ideale per l'indagine cosmologica. Un esperimento concettualmente molto semplice è quello di contare il numero delle sorgenti rivelate in una prefissata area del cielo mano a mano che il flusso limite di ricezione ad una certa frequenza viene abbassato, e di confrontare i risultati così ottenuti con quanto predetto dai modelli cosmologici. Consideriamo il caso semplice ed ipotetico di un Universo statico di tipo euclideo nel quale sorgenti della stessa potenza P_0 sono distribuite uniformemente. Se il flusso limite d'osservazione è $S_{0, \text{lim}}$ per la legge dell'inverso del quadrato della distanza il volume esplorato è una sfera di raggio $R_0 = P_0/4\pi S_{0, \text{lim}}$ entro il quale saranno contate N_0 sorgenti. Se ora il flusso limite d'osservazione viene abbassato di un fattore 4, la distanza massima entro la quale le sorgenti possono essere rivelate aumenta di un fattore due ($2 R_0$), e quindi il volume di spazio esplorato aumenta il numero di sorgenti rivelate ubbidisce una legge del tipo $N \propto S_{\text{lim}}^{-3/2}$, o se si vuole in un diagramma bidimensionale in cui si mappano i logaritmi di queste di un fattore 8 così come il numero totale di sorgenti rivelate ($8 N_0$). E pertanto due quantità i conteggi sono rappresentati da una retta con pendenza -1.5 . Questo risultato ha una validità generale e si applica anche quando si mescolano sorgenti di diversa potenza purché distribuite uniformemente nello spazio.

Ciò che si trova è che i conteggi delle radio sorgenti extragalattiche sono largamente in eccesso rispetto a quanto previsto dal modello euclideo (Fig. 5). Ciò è tanto più significativo in quanto le correzioni introdotte per il fatto che l'Universo reale è in espansione (effetto Doppler) e che le onde elettromagneti-

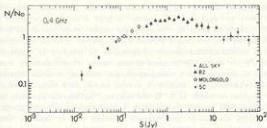


Fig. 5. Conteggi integrali delle radio sorgenti extragalattiche alla frequenza di 408 MHz normalizzati rispetto a quelli previsti in un universo statico euclideo con distribuzione uniforme delle sorgenti (N_0). La densità di flusso sono misurate in Jansky ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ watt m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). I dati della survey del cielo con il radiotelescopio «Croce del Nord» (B2) corrispondono alla deviazione massima rispetto al modello euclideo.

che si propagano secondo le leggi della Relatività Generale portano ad una predizione di conteggi ben al di sotto di quelli del modello euclideo sopra descritto. L'interpretazione più convincente di queste osservazioni è che le radio sorgenti (radio galassie e quasars) erano molto più numerose (circa un fattore 1000) e/o più potenti in epoche precedenti quando l'età dell'Universo era circa il 20% dell'età presente. Da qui l'inferenza importante che l'Universo è di tipo evolutivo in contrasto con teorie cosmologiche, come quella dello « stato stazionario », per le quali le proprietà dell'Universo, e quindi quelle dei suoi componenti, sono immutabili nel tempo.

Il concetto di un Universo in evoluzione è naturalmente connesso alla teoria del « big-bang » per la quale, come abbiamo visto, la radioastronomia ha fornito una delle prove osservative fondamentali con la scoperta della radiazione universale. Nelle sue fasi principali il modello classico del « big-bang caldo » si sviluppa come segue:

Inizialmente le densità della materia e della radiazione sono estremamente elevate, così come altissima è la loro temperatura, di modo che tutta una serie di processi elementari garantiscono uno stretto accoppiamento fra radiazione e materia per cui si realizzano le condizioni di « corpo nero » caratteristico della radiazione universale ora osservata. Dopo circa 100 secondi dal « big-bang », quando a causa della violenta espansione la temperatura è scesa intorno a 1 miliardo di gradi e la densità della materia è dell'ordine di quella dell'acqua, s'innesca la fase molto importante della nucleosintesi che porta alla formazione degli elementi leggeri, quali l'elio ed il deuterio, nelle abbondanze universali osservate. Dopo circa otto minuti la temperatura e la densità della materia scendono al di sotto di certi valori critici per effetto dell'espansione e di fatto le reazioni nucleari cessano. Segue un lungo periodo in cui l'Universo si espande senza che accada nulla di traumatico: a causa della temperatura ancora elevata la materia è sotto forma di un gas completamente ionizzato ed uniforme composto prevalentemente d'idrogeno (protoni), ma con i prodotti della nucleosintesi primordiale presenti, il tutto immerso nel bagno della radiazione universale (circa 100 milioni di fotoni per ogni atomo d'idrogeno) la quale è ancora strettamente accoppiata alla materia ed agisce da vero e proprio mezzo viscoso impedendo la formazione di strutture. Dopo circa 1 milione d'anni, invece, si ha un fenomeno traumatico: il raffreddamento dovuto all'espansione fa scendere la temperatura a circa 4000°K, la materia da ionizzata diventa neutra (ricombinazione), materia e radiazione si disaccoppiano e successivamente evolvono in modo separato. La radiazione preserva il suo carattere di « corpo nero », ma a causa dell'espansione la sua temperatura scende ai 2.7°K ora osservati. La materia allo stato gessoso sotto l'azione della propria gravità tende a frantumarsi in grandi aggregati che per successiva contrazione gravitazionale formano poi le strutture osservate (galassie, ammassi di galassie, etc.).

Quindi, nell'ambito del modello del « big-bang caldo » le misure relative all'intensità della radiazione universale nelle varie direzioni ci informano sulla distribuzione della materia al momento del disaccoppiamento. Quello che si trova è che l'intensità della radiazione universale alle micro-onde non cambia con la

direzione d'osservazione a meglio di un fattore 1/1000, il che implica che anche la distribuzione di materia è altamente isotropa. Ciò pone un problema, noto tecnicamente come « problema degli orizzonti », poichè due ipotetici osservatori posti da parti opposte dell'Universo al momento del disaccoppiamento fra radiazione e materia non avrebbero avuto modo di comunicare fra di loro nemmeno con segnali luminosi: dopo circa un milione d'anni dall'esplosione iniziale gli « orizzonti » dei due ipotetici osservatori sono ancora separati. Appare quindi molto strano, e di fatto incredibile, che regioni di spazio che non hanno avuto modo di interagire fisicamente presentino caratteristiche così identiche. Il problema, naturalmente, è intrinseco al modello del « big-bang » che nella sua formulazione classica contempla un'esplosione iniziale in cui le varie parti si allontanano le une dalle altre a velocità maggiori di quella della luce. Una soluzione elegante a questo enigma cosmologico, che lascia immutati i pregi osservativi del modello di « big-bang caldo » nelle fasi precedentemente descritte, è stata proposta all'inizio di questa decade ed è nota nella terminologia tecnica inglese come « inflationary model » dell'Universo (una traduzione italiana appropriata potrebbe essere quella di « modello di iperespansione »). Una discussione di questo modello è al di fuori del tema qui trattato. Basti dire, tuttavia, ch'esso si riferisce alla fisica dei primissimi istanti successivi all'esplosione iniziale (10^{-35} secondi) quando si verificano le condizioni per l'applicazione delle moderne Teorie Grandi Unificate della fisica fondamentale. In tal modo la radioastronomia ha grandemente contribuito alla creazione di uno stretto legame fra lo studio del macro- e del micro-cosmo di enorme portata culturale.

4. La Radioastronomia ed i Nuclei Galattici Attivi

Con la scoperta delle radio galassie la radioastronomia ha aperto un capitolo nuovo dell'astrofisica, quello dell'attività dei nuclei galattici che in certe condizioni sono in grado di liberare enormi quantità d'energia. Esiste un'evidenza osservativa incontrovertibile che l'origine dell'energia che alimenta le strutture radio, e quindi gli elettroni ultra-relativistici responsabili dell'emissione sincrotrone osservata, si deve ricondurre a processi altamente energetici che avvengono nei nuclei delle galassie associate alle radio sorgenti. Ciò è chiaramente visualizzato in Fig. 3b) che riproduce una mappa radio della radio galassia Cygnus A analoga a quella di Fig. 3a) ma più profonda. Le dimensioni di Cygnus A proiettate sulla sfera celeste da un estremo all'altro della struttura radio corrispondono a circa 400.000 mila anni luce (4 volte la dimensione della nostra Galassia), ma possono essere molto maggiori in dipendenza dell'inclinazione non nota della struttura rispetto alla linea di vista. Il contenuto minimo di energia delle strutture radio di Cygnus A in particelle ultra-relativistiche e campi magnetici è di 10^{58} ergs, equivalente alla conversione totale in energia di una massa pari a un milione di masse solari. Se si assume un fattore minimo di efficienza per la conversione dell'energia pari al 10%, e siccome in ultima analisi l'energia disponibile è quella gravitazionale, si trova che il bilancio energetico di Cygnus A implica il collasso gravitazionale di una massa almeno pari a 10 milioni di masse solari.

Quindi le conclusioni che si possono trarre dalle morfologie osservate sono le seguenti:

(a) I nuclei delle radio galassie contengono uno, o forse alcuni oggetti di grande massa in fase di collasso gravitazionale (buchi neri?).

(b) L'energia gravitazionale liberata viene convertita con alta efficienza e può essere convogliata lungo una direzione (getti). I meccanismi fisici per la conversione d'energia non sono noti, ma estrapolando la conoscenza acquisita con lo studio delle pulsars è possibile che la rotazione giochi un ruolo importante.

(c) I «getti» possono raggiungere grandi distanze finché non sono frenati dal gas circostante e costretti a depositare l'energia trasportata dando luogo alla formazione delle strutture radio.

Il desiderio di indagare ciò che avviene nei nuclei galattici ha stimolato la fantasia dei radioastronomi portando allo sviluppo di una nuova tecnica d'osservazione nota come VLBI dalle iniziali di «Very Long Baseline Interferometry». Come è implicito nel nome stesso, essa consente l'utilizzo delle osservazioni contemporanee di una stessa sorgente fatte con una rete di radiotelescopi disposti su distanze continentali ed intercontinentali. I segnali ricevuti da ciascun radiotelescopio vengono registrati su nastro magnetico con un'apposita apparecchiatura e con marche di tempo ottenute da «orologi» di altissima precisione (generalmente «masers d'idrogeno»). I nastri magnetici vengono poi decodificati contemporaneamente in un apposito «processore» in grado di correlare i segnali ricevuti. In tal modo si ottengono mappe delle strutture radio, in particolare delle sorgenti compatte associate ai nuclei, con risoluzioni angolari un tempo impensabili alle lunghezze d'onda radio (10^{-3} - 10^{-4} secondi d'arco), ed ordini di grandezza migliori di quelle fino ad ora ottenibili con i telescopi ottici.

In Fig. 6 sono riportate le mappe della radio galassia 3C 236, la più grande fino ad ora scoperta, ottenute con radiotelescopi a varie risoluzioni angolari. Le dimensioni proiettate fra i due estremi della struttura radio corrispondono a circa 10 milioni di anni luce, mentre la mappa VLBI della regione nucleare ha consentito di evidenziare strutture di circa 10 anni luce. Il punto importante da notare è il parallelismo fra le strutture evidenziate alle diverse scale angolari, il che dimostra come l'energia prodotta nel nucleo venga espulsa secondo direzioni ben precise e possa venire trasportata ad enormi distanze con getti che rimangono perfettamente collimati. Siccome in questo caso il tempo necessario a raggiungere gli estremi della configurazione radio prima che l'energia venga depositata è di almeno alcuni milioni di anni (propagazione alla velocità della luce) ciò implica che la direzione iniziale dei getti rimane costante per tempi molto lunghi, probabilmente controllata da fattori dinamici nel nucleo (rotazione?) o dalla distribuzione della materia circumnucleare.

Esiste un ampio corpo di evidenza osservativa a sostegno dell'idea che le quasars sono nuclei di galassie in cui l'attività energetica raggiunge valori estremi. La loro luminosità ottica è tale da «oscurare» per contrasto la galassia circostante. Come si è già accennato mentre una parte delle quasars che sono anche

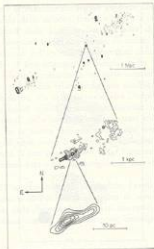


Fig. 6. La struttura della radio galassia gigante IC 236 come risulta dall'impiego di strumenti con potere risolutore sempre più spinto. La mappa superiore è stata ottenuta dal radiotelescopio WRST a 1412 MHz, quella mediana con l'impiego del MERLIN e VLBI alla frequenza di 1.6 GHz e quella inferiore con il VLBI alla frequenza di 5 GHz. In corrispondenza alle varie mappe è riportata la scala appropriata di dimensioni lineari calcolata sulla sorgente ad una distanza di 395 Mpc (1 pc = 3,26 anni luce). (*Astron. Astrophys.* 148, L17).

forti sorgenti di onde radio mostra morfologie radio simili a quelle delle radio galassie (struttura doppia estesa), le altre sono caratterizzate da sorgenti compatte e forti, coincidenti entro gli errori con l'oggetto ottico, le cui potenze emesse spesso variano rapidamente su intervalli di tempo dell'ordine di un anno, o meno. Una prima semplice analisi di questo fenomeno di rapida variabilità portava a pensare che anche le dimensioni delle sorgenti fossero inferiori all'anno luce, e che quindi enormi quantità di energia sotto forma di particelle relativistiche e campi magnetici si trovassero racchiuse in volumi estremamente piccoli, e ciò comportava grandi difficoltà per i modelli classici di emissione sincrotrone. Le difficoltà teoriche erano talmente rilevanti da indurre alcuni astrofisici a proporre che questi oggetti fossero in realtà più facilmente interpretabili come sede ed attività di civiltà extraterrestri estremamente avanzate.

Dato che le quasars radio compatte sono sorgenti forti esse hanno fornito un terreno ideale per gli esperimenti VLBI. Quello che si è trovato è che la



Fig. 7. Isofote della struttura radio della quasar 3C 263 ottenute con tecniche VLBI in epoche successive partendo dall'alto della figura. Si noti l'apparire di una componente la cui intensità aumenta mentre si allontana dalla componente nucleare, il cui flusso pure è in aumento. Le due componenti si separano con una velocità angolare di 0.06 millesimi di secondo d'arco/anno, cui corrisponde una velocità trasversale pari a circa 3 volte la velocità della luce (assumendo naturalmente che 3C 263 sia alla distanza cosmologica indicata dal suo spettro ottico). Il cerchio quadrato in basso a destra nella figura indica la risposta angolare delle misure VLBI in questo esperimento.

struttura delle sorgenti compatte è caratterizzata da un nucleo e da un getto di radio emissione ad esso collegato, il quale tuttavia appare strutturato in una o più componenti. In generale la rapida variabilità è collegata al formarsi ed evolversi di una nuova componente che si separa seguendo la direzione del getto con velocità apparenti superiori a quelle della luce anche di fattori 10-20. Un esempio di questa morfologia è rappresentato nella Fig. 7. Naturalmente le velocità apparenti misurate sono quelle trasversali alla linea di vista, cioè proiettate sulla sfera celeste. Qual'è l'interpretazione di questo risultato straordinario che apparentemente viola il limite di velocità per la propagazione di entità fisiche? La spiegazione che trova maggior credito è quella di un modello relativistico in cui le componenti « superluminali » si stanno in realtà muovendo verso di noi a velocità prossime alla velocità della luce lungo direzioni molto vicine alla linea di vista. Siccome le velocità sono prossime a quelle della luce gli intervalli di

tempo fra l'emissione e la ricezione dei segnali risultano compressi, ed è a causa di questo che il calcolo delle velocità trasverse porta a valori apparentemente in eccesso della velocità della luce. Inoltre, a causa dell'effetto Doppler il flusso di radiazione osservato viene amplificato di ordini di grandezza rispetto a quanto realmente emesso nel sistema di riferimento delle componenti relativistiche, e quindi anche il loro contenuto d'energia risulta proporzionalmente ridotto. Viceversa, la eventuale presenza di un getto simmetrico ma in allontanamento rispetto a noi con velocità relativistiche non sarebbe in generale rivelabile in quanto troppo debole per via dello stesso effetto Doppler.

Quindi, la presenza di questi fenomeni relativistici sembra poter spiegare gran parte delle proprietà radio osservate nelle quasars e nei nuclei delle radio galassie. Qualunque sia la natura dell'oggetto centrale responsabile per la produzione d'energia, qualunque siano i meccanismi dettagliati mediante i quali la stessa viene trasformata, il suo trasferimento verso l'esterno avviene tramite getti di materia eventualmente strutturati in componenti che si muovono a velocità relativistiche.

La tecnica VLBI ha consentito di scandagliare l'attività dei nuclei galattici su dimensioni tipicamente dell'ordine della decina di anni luce (naturalmente il valore preciso dipende dalla distanza degli oggetti osservati). E' necessario aumentare ancora la risoluzione angolari al fine di poter investigare regioni ancora più



Fig. 8. Il radiotelescopio con riflettore parabolico di 32 m d'apertura della stazione VLBI di Medicina dell'Istituto di Radioastronomia del C.N.R.

prossime al cuore dei nuclei, là dove l'energia viene prodotta. Ciò richiede un aumento delle dimensioni della rete interferometrica che è solo possibile immettendo delle antenne in orbite spaziali. A tale proposito esistono varie proposte di missioni VLBI ora all'esame delle agenzie spaziali in Europa, Stati Uniti, Unione Sovietica e Giappone.

Conclusioni

La storia della disciplina radioastronomica per quanto recente può già vantare un medagliere pieno di scoperte sensazionali. L'Universo esplorato attraverso le onde radio si è rivelato ricco di fenomeni inaspettati che hanno inciso profondamente sullo sviluppo dell'astrofisica e della cosmologia, nonché sulla conoscenza di fenomeni fisici non riproducibili in laboratorio.

Desidero terminare con brevi parole sul progetto italiano per il VLBI. Esso è gestito dall'Istituto di Radioastronomia C.N.R. di Bologna ed è in fase avanzata di attuazione. La prima antenna di 32 metri di diametro, capace di lavorare fino a frequenze di 23 GHz, è stata inaugurata nel 1983 (Fig. 8). La sua gemella è in fase di costruzione nelle vicinanze di Noto (Sicilia) ed entrerà in funzione verso la fine del 1988. L'Istituto è membro del consorzio Europeo per il VLBI ed è pure associato al corrispondente Consorzio che gestisce la rete VLBI americana. Occorre menzionare che il progetto italiano per il VLBI è stato concepito non solo per la ricerca radioastronomica, ma considerando anche un ampio coinvolgimento nei programmi di geodinamica per il rilevamento dei moti costali della Terra.



Fig. 8. Antenna di 32 metri di diametro, capace di lavorare fino a frequenze di 23 GHz, inaugurata nel 1983.