

La candela

Sono passati quattro anni, ed era la 15-ma puntata di questa rubrica, quando vi ho raccontato di un mio viaggio in Calabria e degli incontri con studenti e insegnanti. Il lupo perde il pelo . . . con quel che segue, e circa un mese fa sono stato all'altro capo d'Italia, a Pordenone, a fare più o meno la stessa cosa.

Questa volta voglio intrattenervi solo sul mio incontro con gli studenti; in primo luogo riassumendo quello che ho detto, e poi aggiungendo qualche commento.

Il titolo che avevo scelto era: “Ma insomma, lo spazio è piatto o no?” La mia idea era stata d'ispirarmi a un evento scientifico che aveva avuta notevole risonanza nei media, e che quindi supponevo fosse noto, almeno per nome, agli studenti: mi riferisco all'esperimento “Boomerang.” I risultati preliminari di quell'esperimento erano stati presentati da stampa e TV appunto come prova che “lo spazio è piatto,” contro le convinzioni precedenti degli scienziati; e mi pareva che la cosa dovesse avere attirato un certo interesse. Volevo sfruttare l'occasione per mostrare su un esempio concreto e recente che cosa può significare la ricerca cosmologica: i suoi obiettivi, i metodi, i risultati.

Come vedremo poi, sull'interesse non mi sbagliavo, ma sull'informazione invece ero stato grandemente ottimista: da un sondaggio alla buona (“alzi la mano chi aveva già sentito parlare di Boomerang”) fatto alla fine, è risultato infatti che su oltre 200 ragazzi presenti meno di una decina ne avevano avuto notizia. E già questo potrebbe insegnarci qualcosa...

Avete letto bene: erano almeno 200, e non vi nascondo che ero un po' preoccupato, tanto che mi ero lamentato con gli organizzatori. Come si fa a parlare a 200 ragazzi per un'ora, e sperare che stiano zitti e attenti? La risposta era stata che non si erano sentiti di escludere nessuno, e così tutti gli allievi delle ultime classi dei licei di Pordenone (due scientifici e un classico) erano presenti, e riempivano un vasto auditorium. Non che mi faccia paura parlare a un pubblico così ampio (mi è capitato anche di peggio . . .). Ma so per esperienza che l'efficacia del discorso decresce sensibilmente col numero di presenti; e soprattutto che l'interazione è meno diretta: non si vedono le facce, non si possono cogliere quei segni sottili che aiutano a sintonizzarsi col pubblico.

Ma basta con le premesse: ora vi riassumo la linea del mio ragionamento. Voglio farlo perché mi sembra utile per mostrare, su un esempio dal vivo, che cosa può essere, secondo me, l'approccio a un tema come quello di cui vi ho dato il titolo. Anche se il tempo limitato mi ha obbligato a dare solo cenni sommari, ho accuratamente evitato (o almeno spero) d'indulgere a semplificazioni eccessive o a sostanziali mistificazioni, come sono purtroppo comuni nella gran parte della cosiddetta divulgazione.

Ho iniziato con una velocissima storia delle conoscenze cosmologiche. Mi è sembrato importante farlo, perché credo che i ragazzi anche quando hanno delle conoscenze su questo o quel fatto scientifico raramente sappiano inquadrarle storicamente, o almeno cronologicamente: primo passo, necessario anche se insufficiente, per una comprensione storica.

Partiamo dunque da 100 anni fa: che cosa si sapeva sull'Universo? Si conoscevano le distanze di numerose stelle (la prima misura del genere, dovuta a Bessel, è del 1838). Però intendiamoci: quando dico “numerose,” sono sempre pochissime rispetto alle centinaia di miliardi che compongono la Galassia.

Si conoscevano “oggetti non stellari” di vari tipi: già alla fine del '700 Messier aveva messo insieme il primo catalogo. Fra gli oggetti non stellari si contavano però formazioni che oggi sappiamo essere di natura e origine assai diversa: ammassi aperti e globulari, nebulose planetarie, nebulose gassose (irregolari), nebulose ellittiche e spirali. Si riteneva che tutti fossero oggetti galattici, ossia appartenenti alla Galassia, più o meno identificata con l'Universo. Sopravviveva un punto di vista antropocentrico, nel senso che si riteneva ancora che il sistema solare fosse al centro della Galassia.

A questo punto mi sono servito di un piccolo show di diapositive per mostrare i diversi oggetti, facendo notare che da una fotografia, se non si hanno dati addizionali, che vengono forniti assai raramente, non è possibile capire quanto grande o lontano sia l'oggetto in questione. In realtà alcuni degli oggetti mostrati (ad es. la nebulosa di Orione: M 42, ossia il n. 42 del catalogo di Messier) sono visibili a occhio nudo; altri richiedono strumenti potenti.

Passano 20 anni, e si sono prodotti due fatti importanti per il nostro discorso:

- è nata la Relatività Generale (1915) e in conseguenza i primi modelli cosmologici
- si è acceso quello che verrà chiamato “il grande dibattito”: le nebulose ellittiche e spirali sono oggetti *galattici* o *extragalattici*?

Ancora 10 anni (siamo al 1930) e il dibattito è ormai concluso a favore della tesi extragalattica. Determinante è stato il fatto che si è trovato il modo di avere dati affidabili sulle distanze. Intanto Hubble ha scoperto la “recessione delle galassie,” che i modelli cosmologici interpretano come “espansione dell'Universo.” Saltiamo altri 35 anni: nel 1965 viene scoperta (casualmente) la *radiazione cosmica di fondo* che i cosmologi teorici avevano prevista nel 1948. Per ora basti questa notizia, perché la radiazione di fondo è in realtà la protagonista della nostra storia, per cui ne ripareremo più avanti.

A questo punto ho fornito alcuni dati sulle dimensioni astronomiche e cosmologiche, non mancando di far notare che sono dati di cui è ben difficile farsi un'immagine intuitiva. Anch'io, che pure sono del mestiere, posso solo padroneggiarli attraverso l'abitudine al calcolo; ma non posso dire che so intuire

una distanza di un miliardo di anni-luce... Scostandomi dall'uso astronomico corrente, ho scelto di dare le distanze in tempo-luce, perché darle in metri o chilometri avrebbe comportato numeri enormi e ancor meno afferrabili, mentre l'unità usuale (il parsec) non potevo supporre che fosse familiare agli ascoltatori.

- Sistema solare: dalla Terra al Sole ci sono 8 minuti-luce, dal Sole a Plutone 6 ore-luce.
- Galassia: dal Sole al centro circa 30000 anni-luce
- M 31 (galassia di Andromeda) dista 2 milioni di a-l.
- le galassie più lontane visibili stanno a miliardi di a-l.

Infine vediamo la costante di Hubble, che misura la velocità di recessione: vale all'incirca 20 km/s alla distanza di un milione di a-l. Poiché la velocità di recessione cresce proporzionalmente alla distanza (legge di Hubble) se ne può ricavare quella velocità per una galassia posta a distanza qualsiasi. Occorre però ricordare che la legge di Hubble in realtà vale solo per distanze relativamente "piccole," diciamo non oltre il miliardo di a-l.

Un'osservazione terminologica: a me piace distinguere fra "Via Lattea," "Galassia" con la maiuscola e "galassia" con la minuscola. La Via Lattea per me è quella striscia, appunto lattescente, che si vede a occhio nudo guardando il cielo, e che Galileo per primo scoprì essere in realtà composta di una "congerie d'innomerevoli stelle." Chiamo Galassia la struttura come la conosciamo oggi (disco, bracci a spirale, nucleo, alone, col Sole piuttosto in periferia) e di cui la Via Lattea è la vista dall'interno, per così dire. Infine galassia come nome comune spetta a tutte le (di nuovo innumerevoli) altre formazioni analoghe che sappiamo sparse per tutto l'Universo visibile. Debbo però avvertire che su questa distinzione non c'è accordo unanime: per altri Galassia e Via Lattea sono sinonimi.

* * *

Comincia ora una seconda parte del discorso, mirata a rispondere alla domanda: che cos'è uno spazio curvo? Per costruire la risposta, stavolta bisogna andare indietro di 200 anni: ai tempi di Kant e di Gauss (il secondo di oltre 50 anni più giovane del primo, ma tuttavia contemporanei, in quanto Gauss aveva 27 anni alla morte di Kant, 1804). Kant dà forma di sistema filosofico a una visione del rapporto tra matematica e fisica che si era andata costruendo nel tempo, ed era comune agli scienziati della sua epoca: lo spazio (e la geometria euclidea, con la quale la matematica ne precisa le proprietà) è la forma necessaria con cui interpretiamo il mondo esterno. Non c'è quindi distinzione fra spazio della matematica e spazio della fisica; non c'è questione sulla "verità" della geometria euclidea.

È giusto alla fine del '700 che si comincia a capire che sono logicamente possibili altre geometrie, e nasce la divisione tra la matematica come costruzione

astratta e il suo impiego per studiare il mondo reale. Ci si può quindi chiedere: quale geometria corrisponde allo spazio fisico? Non a caso Gauss, oltre a essere uno dei fondatori delle geometrie non euclidee, si pone il problema di una ricerca sperimentale, volta a decidere appunto se lo spazio fisico sia euclideo oppure no. Ha poca importanza che le sue misure concludessero a favore della geometria euclidea, mentre oggi noi sappiamo che a stretto rigore questo non è vero, anche se le deviazioni in prossimità della Terra sono largamente inosservabili pur con strumenti moderni; ciò che conta è appunto che si sia posto il problema, sancendo così una separazione fra matematica e fisica, che sarebbe rimasta ferma nei due secoli seguenti.

Da un punto di vista moderno infatti c'è piena libertà d'inventare qualsiasi struttura matematica, e spetta al fisico trovare quelle che meglio si adattano a descrivere la realtà. La distinzione in linea di principio è dunque chiara per tutto l'800, e i matematici (Riemann e altri) studiano a fondo le caratteristiche degli spazi "curvi" più generali; tuttavia fino ad Einstein nessuno mette in dubbio che lo spazio fisico sia euclideo.

Una piccola nota è opportuna a questo punto in relazione al titolo, dove ho usato il termine "piatto." È necessario non equivocare: nel gergo di fisici e matematici, "piatto" è semplicemente sinonimo di "non curvo," ossia "euclideo." Non vuol dire che lo spazio venga "schiacciato" in un superficie bidimensionale: le dimensioni dello spazio restano sempre tre.

Ma come si riconoscerebbe sperimentalmente uno spazio curvo? Che cosa tentò di misurare Gauss? Alla prima domanda ci sono molte risposte possibili. Un esempio che rimane legato alle tre dimensioni dello spazio è quella figura che prende il nome di parallelepipedo rettangolo: una figura con 6 facce e 12 spigoli, dove le facce sono rettangoli e gli spigoli concorrenti in un vertice stanno ad angolo retto, mentre quelli tra loro paralleli sono di uguale lunghezza. Insomma, una normale stanza di appartamento. Bene: in uno spazio curvo una cosa del genere non esiste. Non si riesce a costruire un solido in cui siano rispettate insieme tutte queste proprietà: angoli retti, spigoli paralleli, uguali lunghezze. A qualcuna bisogna rinunciare.

Molto più semplicemente, in uno spazio curvo non esistono i quadrati: quadrilateri con i lati uguali e gli angoli retti. A seconda dello spazio in cui si lavora, o la somma degli angoli è maggiore di 360° (spazio a *curvatura positiva*) o è minore (*curvatura negativa*).

Ma si possono usare molte altre proprietà:

- la somma degli angoli interni di un triangolo non è 180° , e ne differisce tanto più quanto più grande è il triangolo (è questo che tentò di verificare Gauss, misurando gli angoli fra le cime di tre montagne)
- non esistono figure simili
- la lunghezza di una circonferenza non è $2\pi r$

- non esistono parallele (intese nel senso di rette che mantengono distanza costante)
- ...

* * *

Ora comincia la parte più difficile, dove (in tutta onestà debbo dirlo) non ho potuto far altro che affermazioni senza né giustificazione né spiegazione. Il punto centrale è che finora abbiamo parlato di spazio, ma ciò che caratterizza la relatività è l'unificazione di spazio e tempo in un'unica entità, denominata "spazio-tempo." A differenza della fisica newtoniana, dove spazio e tempo sono entità ben distinte (le "forme a priori dell'intuizione" di Kant) secondo la relatività non esistono spazio e tempo separati: insieme formano una struttura a 4 dimensioni, mentre la distinzione fra spazio e tempo non è assoluta, e viene fatta in modo diverso a seconda del sistema di riferimento.

Questo nella relatività ristretta, dove lo spazio-tempo è piatto (v. dopo) e il carattere relativo della distinzione deriva solo da quello della simultaneità. Quando si passa alla RG, dove lo spazio-tempo è curvo, la distinzione è ancora meno definita, e ha in larga misura carattere arbitrario: si può dire che lo spazio è solo una "sezione" dello spazio-tempo. In altre parole, lo spazio-tempo può essere "affettato" con una serie di sezioni spaziali, ma ciò può avvenire in infiniti modi.

Sto insistendo su questa arbitrarietà perché occorrerà tenerla presente quando torneremo a parlare di "spazio piatto": dovremo ricordarci che questo spazio è appunto una particolare scelta circa il modo di affettare lo spazio-tempo.

Dicevo sopra che lo spazio-tempo è generalmente curvo, e spero di potermi ora appoggiare su un'idea intuitiva, anche se vaga, di che cosa questo significhi: a parte la dimensione in più, non è diverso dallo spazio curvo di cui si era discorso prima. Nello spazio-tempo la curvatura ha però un ruolo essenziale, che è stata una delle grandi scoperte di Einstein: tale curvatura è strettamente connessa con la gravità. O meglio: ciò che noi siamo abituati a descrivere come effetto della gravità non è, secondo Einstein, che una manifestazione della curvatura dello spazio-tempo. È a causa della curvatura che i corpi non possono muoversi di moto rettilineo uniforme, ma debbono "cadere," mentre noi siamo stati abituati da Newton ad attribuire questa caduta a una forza, appunto la gravità.

In realtà quanto ho appena scritto non è proprio esatto, ma è quello che ho detto a Pordenone. Non c'era proprio tempo di spiegarsi meglio. . . Ripensandoci ora, mentre riassumo per voi, mi viene in mente che sono passati ben cinque anni da quando scrivevo delle maree, e facevo riferimento alla RG. Uno dei tanti fili sospesi da riannodare. . . Infatti non è proprio la forza di gravità che è connessa con la curvatura dello spazio-tempo, bensì il suo effetto differenziale, ossia la forza di marea. Ma chiudiamo la parentesi e riprendiamo il riassunto.

Così come la forza di gravità newtoniana è dovuta alla presenza di materia, lo stesso accade con Einstein per la curvatura dello spazio-tempo. Per dirla con

Wheeler: la materia dice allo spazio-tempo come incurvarsi, lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi.

Per prepararci a capire la questione dello spazio piatto abbiamo ancora bisogno di un'osservazione: in uno spazio-tempo curvo possono esistere sezioni spaziali piatte (e viceversa: uno spazio-tempo piatto potrebbe avere sezioni curve, ma questo non c'interessa). Non credo che sia semplice immaginare come ciò possa accadere, prima di tutto perché non è semplice immaginare lo spazio-tempo, e tanto meno uno spazio-tempo curvo; ma dato che il tempo (della mia conversazione) era quello che era, e anche lo spazio che posso permettermi in questa puntata ha i suoi limiti, si può capire che non possa fare di meglio che proporre alcune asserzioni senza poterle spiegare. A Pordenone mi sono aiutato con alcune figure, e con molte più parole di quelle che sto scrivendo qui (è incredibile quante parole si possono pronunciare in un'ora ...).

* * *

E siamo arrivati alla cosmologia, ossia ai modelli cosmologici. È merito non piccolo della RG di aver reso possibile una cosmologia scientifica, ma su questo non mi posso soffermare. Debbo dire invece qualcosa sui *modelli cosmologici*: si chiamano così delle forme di spazio-tempo che si ritengono adeguate a descrivere la struttura e l'evoluzione dell'Universo. Occorre il plurale, perché l'incertezza dei dati non permette di scegliere in modo certo un determinato modello; l'esperimento Boomerang è uno dei contributi recenti verso la soluzione di questo problema.

Tutti i modelli cosmologici in uso si basano sul *principio cosmologico*: le proprietà fisiche dell'Universo sono le stesse in tutto lo spazio (omogeneità) e in tutte le direzioni (isotropia). Purtroppo non posso permettermi di discutere il fondamento di tale principio, che a prima vista appare del tutto arbitrario, se non falso. Diciamo che ci sono buone ragioni per ammetterlo valido su grande scala, e che ha il grande vantaggio della semplicità (che, come sapete, esercita sempre grande attrattiva sui fisici ...).

Debbo invece ricordare che il principio cosmologico ha un'implicazione immediata: lo spazio è a curvatura costante. La cosa è quasi ovvia: la curvatura è una proprietà geometrica fondamentale dello spazio, e se tutte le proprietà debbono essere le stesse ovunque, dev'esserlo in particolare la curvatura. Notiamo solo che dicendo "costante" intendiamo che lo sia nello spazio a un dato tempo: niente vieta che la curvatura possa cambiare nel tempo, e anzi questo accadrà quasi certamente in un universo in espansione.

Ciò posto, la matematica c'insegna che per questa curvatura esistono tre sole possibilità:

- curvatura positiva (spazio *sferico*)
- c. nulla (spazio *piatto*)
- c. negativa (spazio *iperbolico*).

Nel primo caso lo spazio è *finito*, in due sensi: come volume, e nel senso che partendo da un punto tutti gli altri sono a distanza finita; negli altri due casi è *infinito*.

Ed ecco le questioni aperte al momento presente:

- che segno ha la curvatura?
- come varia nel tempo? (accelerata? rallentata?).

La risposta può venire solo da un confronto più o meno indiretto fra la teoria (equazioni di Einstein) e le osservazioni. Per trattare questa parte occorre però spazio adeguato, per cui la rimandiamo alla prossima puntata, insieme con i commenti.