

## La candela

Riprendiamo il discorso lasciato a metà nella penultima puntata: il commento all'articolo di Stefania Consigliere. La prima parte del commento si era limitata alla termodinamica, e ora è il momento di affrontare quello che è (dal mio punto di vista) il tema centrale: la fisica del '900.

Una breve parentesi di scuse: avevo promesso, alla fine della scorsa puntata, che in questa avrei tolto dal centro dei miei discorsi le questioni di fisica. E invece ci risiamo. . . La sola giustificazione che posso addurre è che non è colpa mia se la “fisica moderna” viene tirata in ballo da altri, in relazione ad altri argomenti, e se mi trovo a non poter condividere (e quindi mi sento in obbligo di correggere) l'immagine che ne viene data. Come vedremo, non c'è infatti solo l'articolo di Consigliere, e l'influenza che la fisica del 20-mo secolo (o piuttosto una sua immagine deformata) sembra aver avuto in tanti settori della cultura moderna mi permette di difendermi così: è vero che parlerò ancora di fisica, ma solo in quanto pare che questa fisica motivi o giustifichi un certo modo di pensare ad altre scienze e non solo. In altre parole, qui parleremo di fisica perché un certo modo corrente di (rap)presentarla sembra influire ben al di là del suo campo specialistico.

Cominciamo con un'altra citazione di Consigliere (pag. 25, prima colonna):  
*Se le leggi di Newton non facevano alcun riferimento alla realtà fisica dell'osservatore (il demone di Laplace è infatti una mera intelligenza astratta), la fisica contemporanea ha ritrovato, al termine delle sue esplorazioni più avanzate, la questione dell'osservatore e della sua realtà.*

Il brano prosegue con una rapida analisi del ruolo delle costanti universali, e debbo riportarlo per rendere chiara la mia critica:

*Si comincia con la scoperta delle costanti universali, valori-soglia che non possono essere superati e ai quali devono soggiacere tutte le osservazioni. Niente del genere esiste nella fisica newtoniana, che si applica universalmente indipendentemente dalla scala degli oggetti e dalla loro velocità. I valori-soglia pongono un limite all'uniformità dell'universo: il comportamento degli oggetti fisici si differenzia a seconda della loro velocità.*

Qui è palese, a chi sappia un po' di fisica, la confusione tra il concetto generale di “costante universale” e quelli che Consigliere chiama “valori-soglia.” È senz'altro giusta l'osservazione che la fisica classica ignorava (quasi) le costanti universali, e quindi aveva un'*invarianza di scala* che la fisica moderna non riconosce più: gli atomi hanno delle dimensioni fissate, e perfino le stelle, su una scala enormemente maggiore, non possono avere masse qualsiasi; del limite di

Chandrasekhar per le nane bianche ne abbiamo parlato quasi un anno fa. Ma i valori-soglia sono tutt'altra cosa...

Oltre alla velocità della luce, che Consigliere ha in mente in questo brano, ci sono molte altre costanti universali: la costante di Planck  $h$ , quella di Boltzmann  $k$ , la costante di gravitazione  $G$ , la carica elementare  $e$ ... Per alcune di queste non avrebbe alcun senso parlare di valore-soglia, per es. per  $G$ . Per altre si potrebbe trovare un'interpretazione del genere forzandone un po' il significato: penso soprattutto a  $h$  e a  $k$ . La carica elementare sarebbe un valore-soglia nel senso che non esistono cariche più piccole, se non fosse che ci sono i quarks, che hanno valori pari a  $1/3$  o  $2/3$  di  $e$ . Ci si può arrampicare sugli specchi, e dire che il valore-soglia non è  $e$ , ma  $e/3$ ; ma comunque non si tratta di una soglia, termine che riserverei a una grandezza che possa variare con continuità ma non possa superare (da sotto o da sopra) un certo limite. È questo il caso della velocità, ma non della carica, che si presenta invece in *grani* discreti.

Nella (cattiva) divulgazione si può incontrare un altro tipo di soglia, sotto il nome di "lunghezza di Planck." Di che si tratta? In primo luogo, si sa da tempo che con tre delle suddette costanti universali si può costruire una grandezza che ha la dimensione di una lunghezza:

$$L_P = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3}} \simeq 1.6 \cdot 10^{-35} \text{ m.}$$

L'interpretazione fisica di  $L_P$  è questa: la RG è una teoria *classica* (non quantistica) della gravitazione, e perciò ci si deve attendere che perda di validità quando gli effetti quantistici diventano importanti. Ciò accade appunto su scale di lunghezze dell'ordine di  $L_P$  o minori. Dato che per ora non si sa fare una teoria quantistica della gravitazione, non possiamo attribuire un significato più preciso a  $L_P$ . Viceversa i cattivi divulgatori, che amano stupire il lettore e non si trattengono da affermazioni azzardate purché d'effetto, dicono senz'altro che  $L_P$  è il limite sotto il quale non si può parlare di lunghezza; oppure asseriscono che lo spazio a quella scala è quantizzato...

\* \* \*

Debbo tornare sull'ultima citazione da un altro punto di vista, in quanto evidenzia un fraintendimento di non poco conto. Due volte si parla di "velocità degli oggetti," dimenticando che questa velocità ha senso solo rispetto a un dato riferimento, e non è certo una proprietà intrinseca degli oggetti: quindi non ha alcun senso attribuire alla velocità un effetto sul loro "comportamento" (?)

A questo punto l'analisi di Consigliere vira decisamente sul filosofico:

*Ciò comporta anche una nuova concezione dell'oggettività: se nessun essere sottomesso alle leggi fisiche può trasmettere segnali a una velocità superiore a quella della luce, allora non si può più parlare di simultaneità assoluta di due eventi distanti.*

A parte che non riesco ancora a vedere che cosa c'entri l'oggettività, l'affermazione è decisamente errata. È perfettamente possibile definire la simultaneità di due eventi distanti, proprio (guarda caso!) per mezzo di segnali luminosi. La preferenza che Einstein dà a quel tipo di segnali non è dovuta all'essere  $c$  una velocità limite, ma all'essere *invariante*. Non dico di più perché di relatività ho parlato a lungo, da tre anni a questa parte, e ora il tema è diverso.

Chi vuole cimentarsi con questi argomenti dovrebbe aver chiaro che il problema della sincronizzazione è un altro: sta nel fatto che la simultaneità, definita appunto attraverso i segnali luminosi, riesce *relativa al riferimento*. Il che obbliga, insieme ad altri fatti, a rinunciare al carattere assoluto del tempo. Sottolineo: la rinuncia è all'*assoluto*, non all'*oggettivo*.

Ma la spiegazione riguardo all'"oggettivo" arriva subito:

*La simultaneità è infatti definibile solo in relazione a un osservatore e nessun osservatore è esterno al sistema (nessuno può guardarlo con gli occhi del Dio geometra di Newton). Uno dei nodi teorici densi della teoria della relatività è dunque l'assunzione di una conoscenza situata, in cui contano le dimensioni fisiche del conoscente, la sua posizione nello spazio, la strumentazione di cui dispone. La scienza, la conoscenza dell'universale, si connette per queste vie all'esistentia, al 'qui e ora' del conoscente e del processo conoscitivo: perché i dati abbiano un senso occorre conoscere la posizione nello spazio e nel tempo (ovvero, una parte tutt'altro che irrilevante del 'qui e ora' del particolare individuo — sia esso umano o tecnico — che li sta misurando.*

Piuttosto complicato esaminare per bene questa citazione... Per fortuna posso risparmiarmi almeno in parte il lavoro, perché l'avevo già fatto in anticipo. Questo mi è stato possibile per la ragione che dicevo all'inizio: non si tratta di discorsi nuovi. Al contrario, mi erano già familiari per averli incontrati in più occasioni, per cui ho già avuto modo di scrivere qualcosa in proposito. Posso quindi autocitarmi: quella che segue è una pagina di un volumetto apparso nel 2005 [1].

\* \* \*

### **Mandiamo in pensione gli "osservatori"**

*Gli esempi servono poi a sottolineare che un rif. è un oggetto reale: una stanza, un'automobile, un treno, una stazione spaziale. Non è una cosa soggettiva, una cosa sognata, pensata, immaginata. Per ragioni analoghe, in relazione con i rif. è bene non usare mai il termine "osservatore." So che è comunissimo usarlo; è così comune che anche se dico che non si deve usare mai, qualche volta mi scapperà. Però se mi scappa voi dovrete dire: "paga pegno."*

*Perché dico che non è bene usare il termine "osservatore"? Perché c'è poco da fare: quando diciamo "osservatore" siamo portati a pensare a una persona, e quindi introduciamo una connotazione soggettiva: suggeriamo che ciò che si vede dipenda da qualcuno che sta guardando. Mentre invece la cosa importante*

*è ricordare che le misure di un rif. sono dovute a strumenti. Ecco perché ho sottolineato prima che un rif. è un laboratorio dotato di strumenti: gli strumenti, in quanto tali, sono oggettivi, funzionano per i fatti loro; fanno misure, interagiscono con l'apparato che devo indagare e danno dei risultati, delle risposte, che non dipendono da me o da chiunque li stia usando o guardando.*

*Sempre sul piano filosofico, è facile equivocare tra la coppia soggetto/oggettivo e la coppia assoluto/relativo. Quello che voglio sottolineare ora è che le misure (per es. il moto, la velocità) dipendono dal rif., quindi sono relative: non si può parlare in assoluto di velocità, ma solo rispetto ad un certo rif. Ma questo non ha niente a che fare col fatto che siano soggettive, cioè che c'entri qualcuno che percepisce, qualcuno che osserva: sono relative ma sono oggettive. Non bisogna confondere una coppia con l'altra. Questa è filosofia; ma purtroppo è proprio dai filosofi che talvolta arrivano delle confusioni su questo punto. Quindi è bene essere preparati.*

*Per rafforzare il concetto, faccio notare che a volte un rif., come nel caso di una sonda spaziale, porta strumenti telecomandati. Ci sono esempi recenti: pensate alla sonda Giotto, che è passata vicino alla cometa di Halley. La sonda viaggiava per i fatti suoi, aveva dentro strumenti di vario tipo: elettrometri, magnetometri, tutto quello che poteva servire. Da terra riceveva i comandi di cosa fare e rimandava indietro le misure. Non c'era nessuno a bordo, ovviamente. Abbiamo quindi un laboratorio con degli strumenti, un rif., in cui si facevano delle misure. Se volete chiamare osservatori i fisici che leggevano queste misure, essi stavano però in tutt'altro posto, che non aveva niente a che vedere con la posizione e il moto della sonda.*

*Quindi l'accoppiamento tra un rif. e qualcuno che ci vive dentro non è necessario: può capitare, ma può darsi anche di no. In ogni caso le misure sono lì, e sono oggettive. Potranno anche essere sbagliate, ad es. se qualcosa ha fatto funzionare male gli strumenti; ma essere sbagliate è diverso da essere soggettive. Sono oggettive nel senso che qualunque fisico, sulla Terra o — per quello che ne sappiamo — su Marte o su un altro pianeta della Galassia, può leggerle e ragionarci su in modo del tutto indipendente da dove sta e da chi è.*

*Queste sono cose che è bene mettere in chiaro: più presto lo si fa e meglio è. Naturalmente, trattandosi di argomenti che richiedono una certa sottigliezza di ragionamento, quindi una certa maturità intellettuale, non possono essere liquidati una volta per tutte all'inizio di un corso di fisica. Sono argomenti che vanno ripresi, approfonditi, richiamati ogni volta che capita l'occasione.*

*Ma voglio dire, soprattutto, che questi discorsi vanno fatti prima di mettere in ballo la relatività; altrimenti avremo la solita storia, che finché si fa la fisica classica sembra non ci siano problemi d'interpretazione; poi, con la relatività, non si sa più chi è che vede, chi è che misura, che cosa è vero, che cosa è assoluto, che cosa è relativo. . . E così la relatività appare una cosa strana, piena di paradossi in cui non si capisce niente.*

*No: questi problemi non sono specifici della relatività. Quello che capita con la relatività è che certe cose, che si dava per scontato fossero assolute, come il tempo, si scopre invece che non lo sono. Ma in linea di principio il problema di come interpretare il risultato delle misure, di riconoscere che uno stesso fenomeno può essere visto da diversi rif.; tutti questi problemi sono inerenti alla fisica in sé: non sono una particolarità della relatività.*

\* \* \*

Con questo ho forse sbrigato la questione dell'oggettivo e dell'osservatore, ma c'è ben altro in pentola: "nessun osservatore è esterno al sistema." Lasciando per un momento in servizio attivo il nostro osservatore, c'è da chiedersi perché non possa essere esterno al sistema: forse quando facciamo misure sulla galassia di Andromeda dobbiamo portarci al suo interno? Ma penso di capire che cosa Consigliere intende: il "sistema" qui non è né più né meno che l'Universo, e senza dubbio (per definizione) noi o qualunque pensabile osservatore siamo ad esso interni.

C'è piuttosto da chiedersi che cosa c'entri la relatività: forse quando Halley nel 1717 diede la prima notizia che le "stelle fisse" non erano affatto fisse, non si stava appunto interessando all'universo allora conosciuto (il cielo stellato)? Non sapeva di far parte di quel cosmo? Allora come oggi fisici, astronomi, cosmologi si basano sui dati raccolti da un punto di vista particolare (ieri soltanto la Terra, oggi i telescopi in orbita e le sonde spaziali) proprio per costruire quel modello dell'Universo che nelle parole di Consigliere appartiene al Dio geometra.

La relatività non ci ha tolto qualcosa in proposito, anzi: ci ha obbligati a pensare allo *spazio-tempo*, dotato di proprietà geometriche ben definite. La RG ci ha permesso *per la prima volta*, quasi un secolo fa, di costruire una cosmologia scientifica, "liberandola da sterili dispute" (Galileo, *Sidereus Nuncius*).

Continuando a pescare nella metaforica pentola, troviamo la "conoscenza situata," con quel che segue: il "qui e ora," ecc. Ora a me sembra che in questo non ci sia niente di vero; che non si tratti affatto di un "nodo teorico denso" della relatività, ma di un sostanziale stravolgimento, dovuto probabilmente a qualche divulgatore di quelli che con un po' di benevolenza poco sopra ho chiamato "alti"... Purtroppo non mi è dato di risalire alla fonte. Tra l'altro, nell'esposizione che Consigliere fa del "nodo teorico" manca proprio quello che è il tratto caratteristico della relatività (e che solo ne giustifica il nome): il fatto che certe grandezze in precedenza ritenute assolute (*ab-solutæ*, sciolte, libere, indipendenti), in primo luogo il tempo, sono invece dipendenti, *relative*; non già all'osservatore ma più esattamente al *sistema di riferimento*. Ciò che conta non è la determinazione spazio-temporale (il "qui e ora"), né le dimensioni fisiche: conta invece il *moto relativo*. Nel senso che rispetto a due rif. in moto relativo gli intervalli di tempo e le simultaneità riusciranno diversi: le loro misure saranno diverse.

Una piccola parentesi storica: visto che ho richiamato il nome “relatività” e la sua giustificazione, è bene ricordare che questo nome per la sua teoria non è dovuto ad Einstein, che lo usa solo per il famoso principio, ma a Planck. E non pochi in seguito hanno giudicato infelice la scelta del nome, proprio perché metteva l’accento su un aspetto foriero di fraintendimenti (niente di più vero . . .) e lasciava in ombra il tratto forse più caratteristico della teoria: la scoperta di nuovi *invarianti*: il tempo proprio, la massa, ecc.

Tornando al “qui e ora,” è vero l’opposto. Nella RR non c’è alcuna limitazione all’estensione spazio-temporale di un riferimento. Se la costruzione concreta di partenza è necessariamente un corpo limitato (un pianeta, un’astronave . . .) è comunque inteso e definito in modo preciso dal punto di vista operativo come un rif. possa essere esteso a piacere nello spazio e nel tempo, grazie allo scambio di segnali luminosi. Detto in termini tecnici, lo spazio-tempo di Minkowski è infinitamente esteso in tutte le sue quattro dimensioni.

Le cose sono un po’ più complicate nella RG, a causa della curvatura. L’estrapolazione di un rif. non può essere fatta in modo semplice, il che corrisponde al fatto matematico che di regola non è possibile usare un unico sistema di coordinate per tutto lo spazio-tempo; ma lo spazio-tempo resta comunque *uno*, oggettivamente definito.

Del resto la difficoltà a estrapolare non tanto lo spazio-tempo, e neppure lo spazio tridimensionale, ma una semplice superficie, è ben nota già per il nostro ambiente domestico: nessuno può vedere in un colpo solo tutta la superficie della Terra, neppure da un satellite. La determinazione della forma della Terra e delle sue dimensioni è stata anch’essa il risultato di un *mosaico* di osservazioni, via via di precisione crescente, ma sempre relative a porzioni limitate della superficie terrestre. E questo fin dai tempi di Newton, quando si discuteva se la Terra fosse allungata o schiacciata.

Dunque già più di tre secoli fa esisteva la visione di uno spazio tridimensionale astratto (nel senso di non direttamente accessibile all’esperienza) come sintesi di un insieme di osservazioni parziali, locali. *Nihil sub sole novi*, in questo senso. . .

\* \* \*

Un ultimo commento riguarda una questione apparentemente di dettaglio: l’inciso di Consigliere sul “particolare individuo — sia esso umano o tecnico — che li sta misurando [i dati].” Può sembrare che con ciò venga evitata la mia critica (e il conseguente pensionamento) agli “osservatori”: anche gli strumenti di misura, che secondo il mio punto di vista sono ciò che deve sostituire eventuali osservatori coscienti e pensanti, nell’accezione di Consigliere sono “particolari individui,” quindi ancora soggetti al vincolo del “qui e ora.” Lo scienziato che legge quegli strumenti, magari in viaggio ai limiti del sistema solare, non può fare a meno, per interpretare i loro dati, di tener conto di dove gli strumenti si

trovavano quando quei dati sono stati rilevati, di quando ciò è accaduto, di come gli strumenti si muovevano. . .

Verissimo, ma direi anche piuttosto ovvio, e non da oggi. Direi di più: gli astronomi che studiano stelle e addirittura galassie lontane, sanno benissimo che quella che *oggi* vedono i loro telescopi è luce che è stata emessa migliaia, milioni, perfino miliardi di anni prima. Che quindi l'immagine del cosmo che ne risulta va ricostruita con un'operazione complessa (che per inciso, in ambito cosmologico richiede di appoggiarsi su un preciso *modello cosmologico*). Perfino la frase apparentemente innocente che ho appena usata: "luce che è stata emessa migliaia, milioni, perfino miliardi di anni prima" non ha senso se non si stabilisce che cosa deve intendersi con quel "prima," nel momento in cui sappiamo di non poter contare su un tempo assoluto.

So anche bene, per esperienza personale, che questo è uno dei nodi didattici chiave nell'insegnamento della cosmologia: riesce difficile a uno studente al primo incontro con questi temi di liberarsi dal tempo assoluto, e insieme non perdersi in una confusione in cui niente è più certo e definito, di nulla si può parlare perché il linguaggio comune, infarcito di avverbi e metafore temporali, cade in difetto. . . Lo so e ho sempre curato questo problema (ripeto, come problema didattico). Ma non mi è mai capitato di doverlo presentare come "una nuova concezione dell'oggettività." Forse perché "dal di dentro," per così dire, non coglievo la portata del cambiamento filosofico? Oppure perché la mia filosofia (e direi quella implicita della stragrande maggioranza dei fisici) rifiuta di considerarlo un problema?

\* \* \*

La citazione dall'articolo di Consigliere termina così:

*Nonostante le modifiche che essa impone all'antico concetto di oggettività, la relatività conserva tuttavia l'ambizione, propria della fisica classica, di una conoscenza completa dell'universo: non più, come nel caso del demone di Laplace, per conoscenza istantanea ed esterna al sistema, ma come somma di tutti i possibili punti di vista interni sul mondo. La fisica quantistica è la prima teoria scientifica a superare risolutamente questa aspirazione a una conoscenza divina.*

Abbiamo già ampiamente analizzato la tesi espressa nella prima parte di questo brano: abbiamo visto che in realtà la differenza (almeno per quello che mi riesce di capire "dall'interno" del lavoro scientifico) non esiste. Da un lato, già la fisica prima di Einstein ha costruito il proprio sistema di conoscenza come "somma" (sopra ho scritto "mosaico") di conoscenze parziali; dall'altro, non mi pare che la relatività abbia cambiato nulla in questo senso. Quello che è cambiato è il riconoscimento che alcuni assoluti non sono tali; che la connessione tra i risultati di esperimenti e osservazioni condotte in diversi *sistemi di riferimento* (che sono cosa ben diversa dai "punti di vista") va fatta secondo *leggi di tra-*

*sformazione* diverse da quelle ritenute valide in precedenza. L'invarianza della velocità della luce è solo un esempio fra molti.

\* \* \*

È forse il caso di sviluppare un po' il tema per quanto riguarda la RG. Ho già scritto che questa creazione di Einstein, per la quale non mi sembra esagerato l'aggettivo "monumentale," ha consentito per la prima volta nella storia del pensiero umano la costruzione di una cosmologia scientifica. Si tratta però di vedere *come* Einstein sia arrivato a formulare una teoria che ha dato adito — da parte sua per cominciare, e poi da parte di tutti coloro che lo hanno seguito, fino al tempo presente — a questa costruzione. E che carattere abbia la teoria dal punto di vista che qui stiamo esaminando.

Dovrò ora ripetere, con accentuazione diversa, cose di cui ho già parlato circa tre anni fa. Su quali basi osservative, sperimentali, si appoggia Einstein nel costruire la RG? È presto detto: *una sola*, la scoperta di Galileo "tutti i gravi cadono con la stessa accelerazione." Da lì, in alcuni anni di lavoro, erige quel monumento, che a differenza di Orazio non avrebbe mai definito *ære perennius*, in quanto era ben consapevole di come la scienza sia capace di conquiste durature ma anche di profonde revisioni. Non ci sono altri fatti sperimentali su cui possa basarsi: al contrario nel corso del lavoro formula previsioni di effetti ancora sconosciuti e che sarebbero stati scoperti e verificati nel corso degli anni; alcuni anche parecchi anni dopo. Con un'unica eccezione, di cui pure abbiamo già trattato due anni fa: la precessione del perielio di Mercurio, che era conosciuta da tempo come problema insoluto, ma che in partenza Einstein non collegava alla teoria che stava costruendo. Come sapete, fu solo alla fine del 1915, a lavoro quasi concluso, che riuscì a dimostrare che la RG spiegava perfettamente quel fenomeno. E voglio ripetere qui che cosa scrisse a Ehrenfest: "Per alcuni giorni sono rimasto fuori di me per l'eccitazione e la gioia. La natura mi aveva parlato!" Dunque una conferma inattesa, non una guida alla scoperta.

Quanto alla nascita della cosmologia scientifica, ricordiamo che a quel tempo le conoscenze astronomiche erano assai arretrate rispetto a ciò che oggi sa qualunque ragazzo appena un po' interessato. Si conosceva la Galassia, come aggregato di stelle, ma non se ne conosceva la forma, e non ne era ancora stata scoperta la rotazione. Con un residuo antropocentrico, si riteneva che il Sole ne occupasse il centro. Si sapeva dell'esistenza di "nebulose," la cui struttura e dimensioni non erano affatto chiare: il "grande dibattito," che si concluse con la vittoria della tesi "extragalattica" per quelle che oggi chiamiamo "galassie," sarebbe arrivato poco dopo, negli anni '20. L'altra grande scoperta, che oggi tutti conoscono, ossia *l'espansione dell'Universo*, è ancora successiva: siamo ormai al 1929.

Perciò neanche su questo argomento, che è poco definire "grande," Einstein poteva appoggiarsi su conoscenze osservative. Poteva solo provare a fare qualche ipotesi di massima: il *principio cosmologico*, ossia l'omogeneità e isotropia



dell'Universo, e poi la condizione, per lui naturale forse su basi più filosofiche che fisiche, che l'Universo fosse *statico*. Qui ebbe una spiacevole sorpresa: le sue equazioni non erano compatibili con un universo statico. Per questo motivo introdusse (a malincuore) una correzione: il famoso “termine cosmologico.”

Quando Einstein venne a conoscenza dei risultati di Hubble e Humason sulla legge di allontanamento delle galassie, che provava come l'Universo non fosse statico, si pentì di aver introdotto il termine cosmologico; come ci racconta Gamow, anni dopo l'avrebbe definito “la più grande cantonata della mia vita.” E poco importa che in tempi molto più vicini il termine cosmologico sia tornato in auge, col nome di “energia oscura”...

Insomma, anche qui non solo è vero che si mantiene “l'ambizione di una conoscenza completa dell'universo,” ma per di più questa conoscenza si basa su una teoria costruita con un unico atto creativo, in cui non entrano “possibili punti di vista.” Quanto alle informazioni necessarie per convalidare la teoria e per determinare il modello cosmologico, queste vengono raccolte com'è sempre stato: grazie a strumenti (seppure ben più sofisticati man mano che il tempo passa) costruiti dall'uomo e piazzati in tutti i punti accessibili.

\* \* \*

Se passiamo alla frase finale della citazione si apre un nuovo campo di lavoro, che non poteva certo mancare: la fisica quantistica. Si tratta di un campo anche più vasto e complesso di quello che ci ha occupati in questa puntata, e perciò debbo rinviarlo alla prossima.

[1] E. Fabri: “Insegnare relatività nel XXI secolo”; *Quaderno 16, La Fisica nella Scuola* **38**, suppl. al n. 1 (2005), pag. 41–42. Disponibile anche in <http://www.df.unipi.it/~fabri/sagredo/Q16/lez03.pdf>