

Il prodotto multimediale: contenuti testuali

Qualche breve nota storica su Einstein e sulla Teoria della Relatività Speciale.....	2
Che cosa è una “supernova”?	2
Che cosa è un anno luce?.....	3
Cosa significa esattamente che “nessun segnale può viaggiare più veloce della luce? E perché questo ha a che fare con la possibilità di viaggiare indietro nel tempo?	3
La nuova teoria di Einstein si riflette anche sulla possibilità di viaggiare nello spazio oppure questa è solo Fantascienza?.....	4
Si parla continuamente di particelle elementari: cosa sono? E che cosa significa che esse hanno un “tempo di decadenza”? Che cos’è un acceleratore di particelle?.....	5
In che cosa consiste esattamente la nozione di “Relatività” in questa nuova teoria di Einstein? Perché la massa è variabile con la velocità...? Come si riflette tutto ciò sull’equivalenza tra massa ed energia?.....	8
Che cos’è l’antimateria? Essa esiste veramente? Essa può essere rivelata negli acceleratori di particelle o altrove?	10
In che cosa consiste il “Principio di Relatività”?	10
Per quali motivi questa “Teoria della Relatività Speciale” non è del tutto soddisfacente? E perché Einstein dovette per forza ritornarci sopra per oltre dieci anni? Che cos’è la forza di gravità?	11
Che cos’è un interferometro? In che cosa consiste l’utilizzo degli interferometri per la rivelazione di onde gravitazionali? Chi sono LISA e VIRGO?	12

Qualche breve nota storica su Einstein e sulla Teoria della Relatività Speciale

Albert Einstein nacque ad **Ulm** (Germania) nel 1879, lo stesso anno in cui il fisico inglese James Clerk **Maxwell** pubblicava le sue famose equazioni sull'elettromagnetismo. Negli anni 1894-1895, seguendo il padre, studiò in Italia (a **Milano** e a **Pavia**) e ivi venne a conoscenza dei lavori fondamentali di **Lorentz**, relativi alla **dilatazione dei tempi** ed alla **contrazione delle lunghezze** (teorizzati in un contesto fisico differente, una coerente teoria dell'etere). Studiò poi ad **Aarau** e Zurigo, dove (nel 1900) si laureò presso il locale **Politecnico di Zurigo**. Dopo alcune difficoltà iniziali a trovar lavoro, fu assunto nel 1902 all'**Ufficio Brevetti di Berna**. Ivi poté proseguire con tranquillità i suoi profondi studi, che lo portarono nel 1905 a formulare la **Teoria della Relatività Speciale**. Il lavoro destò un grande interesse, oltre che ovvie e intuibili incomprensioni tra i fisici dell'epoca. Iniziò comunque una carriera universitaria, tra il 1909 ed il 1912 sempre a Zurigo, con una parentesi nel 1911 presso l'Università Tedesca di **Praga**. Nel 1912 ottenne finalmente a Zurigo una cattedra degna della sua fama, ormai internazionalmente riconosciuta. Nel 1916 giunse a formulare la **Teoria della Relatività Generale**. Le persecuzioni antisemite nate in Germania negli anni successivi lo costrinsero ad emigrare negli **Stati Uniti**, dove nel 1930 Einstein si trasferì definitivamente, dapprima in California e poi a **Princeton**, dove Einstein prese cittadinanza nel 1941 e visse fino alla sua morte, avvenuta nel 1955.

La grande fama di Einstein è legata all'intera Fisica del XX Secolo, dalla rivoluzionaria Teoria della Relatività (sia Speciale sia Generale) alla **Meccanica Quantistica**, disciplina parimenti rivoluzionaria che egli - sebbene in anni successivi ebbe molti ripensamenti - di fatto contribuì in modo fondamentale a fondare. Nel 1921 egli venne insignito del **Premio Nobel per la Fisica**, ma l'ottenne non per la Relatività - che è di fatto il suo più grande ed importante contributo alla Fisica - bensì per i suoi studi sull'effetto fotoelettrico.

Einstein, negli ultimi anni della sua vita, fu fortemente impegnato socialmente nelle campagne per l'**uso pacifico** e non bellico della Fisica, e, in particolare, **dell'energia atomica**.

Che cosa è una "supernova"?

Una **supernova** è una stella che esplose violentemente; il termine, in realtà, indica lo **stato finale della vita di alcune particolari stelle**.

Quando una stella finisce di bruciare il combustibile che la fa splendere, le **reazioni nucleari** che avvengono nel suo nucleo tendono ad interrompersi e la **forza di gravità**, che tende a fare collassare il materiale verso il centro della stella, non è più bilanciata dalla **pressione delle radiazioni** che vengono prodotte dalle reazioni nucleari che, durante la sua vita, avvengono nel suo nucleo. La stella, allora, collassa bruscamente, ovvero si comprime in spazi sempre più piccoli, aumentando di conseguenza la pressione dei gas che la compongono.

In tali condizioni estreme si può innescare nuovamente una reazione nucleare, sostenuta questa volta dal combustibile ancora contenuto nel **mantello**. L'enorme quantità di radiazioni prodotta da questa nuova reazione soffia via la materia che costituisce il mantello stesso. Ciò avviene con grande emissione di energia e sembra configurarsi come una vera e propria esplosione della stella. Per un breve periodo la stella diventa quindi uno degli oggetti più luminosi dell'Universo, lasciando come residuo una stella assai più piccola e poco luminosa.

Alcune supernovae di tipo particolare vengono scelte dagli astrofisici per misurare la distanza delle galassie. La loro **luminosità assoluta** è, infatti, quasi sempre la stessa e quindi, dalla luminosità apparente con cui esse ci appaiono, possiamo calcolare la loro distanza dal Sistema Solare.

È importante segnalare che non tutte le stelle che collassano hanno come stato finale una supernova. In condizioni particolari - infatti - non v'è combustibile sufficiente ad innescare l'esplosione della stella. In ogni caso il collasso può proseguire senza fenomeni di natura esplosiva, riducendo la stella ad un oggetto costituito da materia molto densa e compressa in uno spazio relativamente piccolo. In tal caso lo stato finale del collasso può essere quello che in Astrofisica viene chiamata una **stella di neutroni** o, addirittura, un **buco nero** (una stella, cioè, che non è più in grado di emettere radiazione elettromagnetica verso l'esterno, rendendosi di fatto invisibile).

Che cosa è un anno luce?

La **luce** è un fenomeno elettromagnetico, la cui velocità di propagazione è sperimentalmente nota essere finita. Tale velocità viene di regola indicata con la lettera *c*. La teoria della Relatività Speciale prevede, inoltre, che questa velocità sia costante nel vuoto, indipendentemente dall'osservatore e dalla sorgente che l'ha emessa. In buona approssimazione questa velocità nel vuoto è prossima ai **300.000 chilometri per secondo**. In assenza di materia e di ulteriori campi elettromagnetici di intensità variabile, inoltre, un segnale luminoso - interpretato come **particella elementare** ed in tal caso detto **fotone** - percorre una traiettoria rettilinea (nel vuoto).

L'anno luce è una misura di distanza. Esso indica lo spazio che - nel vuoto - viene percorso da un segnale luminoso in un anno di tempo. Siccome in un anno - convenzionalmente fissato in 365 giorni - vi sono esattamente 31.536.000 secondi, un anno luce uguaglia quasi 10^{13} chilometri (1 seguito da tredici zeri). Analogamente si può definire il "secondo luce" - lo spazio percorso dalla luce in un secondo di tempo - che misura quindi circa 300.000 chilometri.

Per farsi un'idea, osserviamo che la Luna dista dalla Terra circa 1 secondo luce, mentre la stella più vicina al Sole dista circa 4 anni luce.

Cosa significa esattamente che "nessun segnale può viaggiare più veloce della luce? E perché questo ha a che fare con la possibilità di viaggiare indietro nel tempo?"

Una spiegazione tecnica richiede una certa quantità di Matematica sofisticata, ma il principio fisico è abbastanza semplice da esprimere. Se un segnale fisico o un piccolo oggetto potessero viaggiare a velocità superiori a quella della luce - ciò sia nel vuoto sia in un mezzo continuo - verrebbe violato quello che in Fisica viene chiamato "**Principio di Causalità**".

Questo fondamentale principio prevede che ogniquale volta un **effetto** è dovuto ad una **causa**, indipendentemente dall'osservatore che in tempi diversi misura l'istante in cui la causa si è prodotta e l'istante in cui si è prodotto l'effetto, l'effetto debba necessariamente prodursi in un tempo successivo a quello della causa.

Nella fisica classica di Galileo e di Newton il tempo scorre assolutamente e vi è quindi una nozione universale di **contemporaneità**: in tal caso il principio di causalità si esprime semplicemente dichiarando che ogni effetto deve avvenire in un istante di tempo assoluto successivo a quello della causa che l'ha prodotto. Giacché in Relatività Speciale la nozione di contemporaneità assoluta perde invece di significato e viene a dipendere dall'osservatore, la formulazione del principio si fa lievemente più complicata e richiede che l'effetto segua la causa in qualunque tempo relativo misurato da qualunque osservatore fisicamente ammissibile.

In termini lievemente più precisi, supponiamo che un oggetto in movimento (per esempio una

piccola particella di materia) occupi nel corso della sua esistenza due posizioni spaziali distinte, A e B. Supponiamo anche che un osservatore veda la particella muoversi da A verso B. Per la particolare struttura matematica delle **Trasformazioni di Lorentz** (quelle che esprimono come spazio e tempo si trasformano in Relatività Speciale, tenendo conto dell'assolutezza della velocità della luce nel vuoto) - chiunque osservi questo oggetto lo vedrà ancora partire dal punto A ed arrivare nel punto B, purché la particella si muova con una velocità inferiore a quella della luce. Questa "sequenza temporale", pertanto, non dipende dall'osservatore ed è quindi un'affermazione assoluta sulla realtà. Al contrario, se l'oggetto si muovesse più velocemente della luce, alcuni osservatori lo vedrebbero partire dal punto A e arrivare al punto B mentre altri lo vedrebbero partire da B e arrivare in A. Questo sarebbe teoricamente possibile perché in Relatività Speciale l'istante di tempo non ha carattere assoluto; di conseguenza, l'ordine cronologico dei due eventi "partenza" e "arrivo" non ha carattere assoluto se l'oggetto si muove più velocemente della luce, mentre continua invece ad averlo se l'oggetto si muove più lentamente della luce.

Come si è già detto, la ragione di questa differenza è codificata matematicamente nelle trasformazioni di Lorentz, che rappresentano quindi lo strumento usato in Relatività Speciale per esprimere previsioni quantitative, successivamente confermate da numerosi **esperimenti sulle particelle elementari**.

La nuova teoria di Einstein si riflette anche sulla possibilità di viaggiare nello spazio oppure questa è solo Fantascienza?

Proprio poiché nulla può viaggiare più veloce della luce, i viaggi interstellari appaiono a prima vista scientificamente impossibili. Per raggiungere la stella più vicina viaggiando alla pur fantastica velocità di un milione di chilometri all'ora occorrerebbero comunque circa 4000 anni! Ma come spesso capita, la teoria è non troppo lontana dalla pratica e talvolta questo può essere usato a nostro vantaggio. Ogni affermazione scientifica è infatti valida all'interno di una teoria che descrive la realtà sotto certe ipotesi che, a seconda delle circostanze, possono essere verificate o meno.

Ad esempio, il calcolo del tempo necessario a raggiungere la stella più vicina al Sole si basa sulla Relatività Speciale, che a sua volta è valida solamente in assenza di forti campi gravitazionali. Diversa è la situazione se la gravità è presente e viene sfruttata. Ben lo sanno tutti gli scrittori di fantascienza che immaginano motori di astronavi capaci in qualche modo di superare questo limite. Ogni proposta, dai motori a curvatura di Star-Trek alla macchina di Contact o all'iperguida di StarWars, si fonda implicitamente sui campi gravitazionali, che si manifestano in **Relatività Generale** con una forte curvatura dello spazio-tempo (vedi oltre, nelle note relative alla "gravità") o con la creazione di "tunnel spazio-temporali" brevi, che connettono regioni altrimenti distanti.

In ogni caso, queste realizzazioni immaginarie degli scrittori di fantascienza (che hanno, comunque, una seria controparte scientifica) prescindono dalla Relatività Speciale e una discussione sulla loro verosimiglianza richiede (almeno e come già menzionato) la più vasta teoria della Relatività Generale. In un certo senso, anche nella fantascienza "nulla va più veloce della luce", tranne forse che per Superman (che in questo risente della sua età); semplicemente si immagina un modo per "barare" o su come si misura la distanza da percorrere oppure su quale sia in cammino più corto che unisce due punti.

A questo proposito, Enrico Fermi ha proposto un argomento simpatico: *"Supposto che nell'Universo ci siano altre civiltà, di cui alcune molto progredite. Se qualcuna di queste civiltà fosse in grado di colonizzare i sistemi stellari vicini, potrebbe, diciamo, colonizzare nuovi sistemi ogni centomila anni. In ogni caso, il numero di sistemi colonizzati crescerebbe esponenzialmente nel tempo e nel giro di pochi milioni di anni praticamente tutta la Galassia*

sarebbe stata colonizzata. Il fatto che il nostro e i sistemi prossimi al nostro non appaiono essere abitati sembrerebbe indicare che non ci sono civiltà capaci di compiere viaggi interstellari.”

Ovviamente, questo ragionamento si basa sull'assunto che ci siano civiltà extraterrestri, che siano evolute e che i sistemi stellari prossimi a noi siano disabitati (oltre ad una certa sovrastima del tasso di colonizzazione di nuovi mondi), tutte cose di cui - però - non siamo assolutamente certi.

Si parla continuamente di particelle elementari: cosa sono? E che cosa significa che esse hanno un “tempo di decadenza”? Che cos'è un acceleratore di particelle?

Le **particelle elementari** sono (o meglio, dovrebbero essere) i costituenti più piccoli ed elementari della materia che riempie l'Universo. Premettiamo subito che le più moderne accezioni della Fisica Teorica ci costringono a dire “dovrebbero essere” piuttosto che “sono”, proprio perché secondo il modello più comunemente accettato (il cosiddetto “**modello standard**” della fisica particellare) le particelle elementari sono a loro volta oggetti composti, i cui elementi ultimi (detti “**quarks**”) intervengono tramite complicate **leggi di simmetria** a formare le particelle stesse. Ciò che comunque si osserva ormai comunemente nei laboratori di Fisica sono le particelle (atomiche e sub-atomiche), a loro volta interpretabili matematicamente come stati fondamentali dei campi fisici che ne descrivono le interazioni reciproche e con gli altri costituenti.

La materia di cui siamo composti noi e tutto ciò che vediamo nell'Universo è innanzitutto costituita da **protoni, neutroni ed elettroni**. Questi - come è noto - sono i costituenti fondamentali degli **atomi**, che (secondo un modello ormai in parte superato ma comunque ancora ben adatto a descrivere la struttura fondamentale della materia) ha un **nucleo** formato da protoni e neutroni, che ne caratterizzano il **numero atomico** e la **massa totale**, circondato da una famiglia (più propriamente, una “**nuvola**”) di elettroni. Ognuna di queste particelle ha caratteristiche fisiche che la caratterizzano univocamente. L'**elettrone** ha una **carica elettrica** negativa caratteristica, indicata con e ; il **protone** ha carica elettrica positiva, esattamente uguale e contraria a quella dell'elettrone; mentre il **neutrone** è elettricamente neutro. Un elettrone ha una massa caratteristica m_e , mentre protone e neutrone “pesano” quasi 2.000 volte di più.

È importante capire che queste particelle sono diverse da tutto ciò a cui siamo abituati nella nostra esperienza quotidiana. Ad esempio, noi sappiamo che un cane di taglia media pesa circa 10 chilogrammi, ma se pesiamo due cani con bilance abbastanza precise possiamo facilmente dimostrare che due cani diversi, ma della stessa razza e della stessa taglia, hanno due masse diverse; magari di poco, ma comunque differenti. Al contrario, questo non si verifica per le particelle. Due elettroni hanno sempre esattamente la stessa carica elettrica e la stessa massa. Questo rende molto facile identificare le particelle anche se sono molto più piccole di un cane!

Oltre a protoni, neutroni e elettroni (particelle che chiameremo “ordinarie”, già note agli inizi del XX secolo) esistono moltissime **altre particelle**. Anche queste hanno una carica elettrica e una massa caratteristica (oltre ad altre qualità fondamentali) che le rendono “facili” da riconoscere. Ma, al contrario di protoni, neutroni e elettroni, queste altre particelle sono generalmente **instabili** e decadono in particelle più leggere, che a loro volta possono essere instabili e decadere ulteriormente, fino a produrre protoni, neutroni, elettroni e altre particelle stabili, come ad esempio i cosiddetti **neutrini**. [Per essere più precisi, va osservato che anche il neutrone non è una particella veramente “stabile”, perché anch'esso, allo stato libero, decade in un protone, un elettrone e un (**anti**)**neutrino**. Tuttavia, i neutroni nei nuclei atomici

sono stabili in quanto la loro instabilità è, per così dire, “stemperata” dai protoni e neutroni ad essi vicini. Per questa ragione i nuclei atomici sono una miniera inesauribile di neutroni, così come lo è una gran parte della materia stellare; proprio su questo si fonda l’uso dell’**energia nucleare**. Per questa ragione, inoltre, non è necessario creare neutroni, anche se non sarebbe difficile farlo facendo opportunamente scontrare elettroni e protoni tra di loro. A proposito di “antineutrini”, dobbiamo anche osservare che la corrente teoria della struttura della materia prevede che esista anche l’**antimateria**; cioè, che praticamente ogni particella elementare sia accompagnata da una “compagna” per così dire “duale”, detta correntemente una **anti-particella**. Queste “antiparticelle” sono abbastanza rare in natura, almeno nella parte di Universo a noi nota, perché esse tendono ad annichilarsi con le loro compagne per dare origine ad altre particelle, con elevato scambio di energia. Per esempio, l’elettrone ha come antiparticella una particella (già teorizzata negli anni '20 da Dirac) detta **positrone**, di massa piccola come l’elettrone ma di carica uguale a quella del protone.]

Proprio a causa della loro instabilità, queste particelle sono praticamente assenti nel nostro Universo e quindi devono essere prodotte. Questo è relativamente facile da ottenere; basta prendere particelle ordinarie, accelerarle in apposite macchine dette **acceleratori di particelle** e lasciarle scontrare le une con le altre. Durante la collisione l’energia cinetica delle particelle che si scontrano viene convertita in materia-energia (si ricordi la famosa **equivalenza tra massa ed energia**, espressa dalla celeberrima formula di Einstein $E=mc^2$), di modo che possono essere prodotte un gran numero di particelle. Tra queste, alcune saranno “ordinarie”, ma ci saranno anche molte particelle instabili (ad esempio, i **mesoni**). Al mondo ci sono una decina di laboratori (per esempio, **CERN**, Fermilab) specializzati in questo processo, in cui si studiano le particelle prodotte da questi urti e se ne determinano le proprietà fisiche più salienti.

Come per le masse e le cariche elettriche il mondo delle particelle elementari è abbastanza monotono. Esistono infatti tante **specie di particelle** (secondo il già citato “modello standard”), ma - una volta identificata la specie - poi ogni particella appartenente a tale specie è assolutamente identica alle altre. Per questa ragione non c’è modo di distinguere tra due particelle dello stesso tipo. In particolare, tutte le particelle di uno stesso tipo si comportano nello stesso modo, ma ancora una volta in un modo sotto certi aspetti inaspettato.

Uno si potrebbe aspettare che, ad esempio, ogni “**mesone τ** ” (tau), essendo instabile, decada esattamente dopo un tempo caratteristico T_τ . Ma questo non è ciò che si osserva. In realtà, ogni “mesone τ ” viene creato, vive la sua vita e decade dopo un po’ di tempo. Due “mesoni τ ” possono vivere due vite di differente lunghezza. Ma se noi prendiamo un numero elevato (qualche migliaio) di “mesoni τ ” e misuriamo la vita di ognuno di essi otteniamo, in media, un numero ben preciso, che è caratteristico dei “mesoni τ ”. Questo tempo si chiama **vita media**. Nella grande famiglia dei “mesoni” un ruolo storicamente importante spetta ai cosiddetti “**mesoni μ** ” (mu), che furono tra i primi ad essere osservati nel contesto sperimentale della Relatività Speciale, riconoscendo per essi la validità della “contrazione di Lorentz”: la vita media che si allunga (vedi sotto).

È importante capire la differenza del concetto di “vita media” tra i “mesoni τ ” e gli esseri viventi (ad esempio, le persone). Anche le persone hanno una vita media (di circa 75-80 anni, tra l’altro differente in base al sesso); e anche tra le persone c’è, ovviamente, chi vive di più e chi vive di meno. Mentre altri animali hanno una vita media diversa (ad esempio, i cani l’hanno di circa 10-12 anni). Allora, qual’è la differenza tra le persone e le particelle? La differenza è che per le persone la vita media dipende da molti fattori (l’alimentazione, il progresso della medicina, la diffusione nella società di abitudini dannose per la salute, eccetera); mentre per le particelle la vita media non dipende da nessun fattore esterno. Un “mesone τ ” osservato “a riposo”, ovvero in quiete, vive in media il suo tempo caratteristico T_τ , indipendentemente da ogni condizione esterna, indipendentemente dal processo che l’ha prodotto, e così via.... Tra l’altro questo permette alla vita media delle persone di cambiare

nel tempo (al tempo degli antichi romani, un quarantenne era considerato decisamente vecchio), mentre la vita media delle particelle dipende solo dal tipo di particella ed è, per quanto ne sappiamo, assolutamente costante nel tempo. Inoltre questa vita media può essere calcolata con l'ausilio della **Meccanica Quantistica**, in alcuni casi con grande precisione. Ora, i neutroni liberi hanno una vita media lunghissima rispetto alle altre particelle (dell'ordine della decina di minuti), mentre altri tipi di particelle vivono per una frazione infinitesima di secondo (alcune anche per meno di un milionesimo di secondo). Tutte queste vite medie sono misurate in laboratorio con grande precisione e trovate in accordo con le previsioni della meccanica quantistica. Possiamo ben dire di essere soddisfatti e di aver ben descritto il fenomeno.

Tuttavia... c'è sempre qualcos'altro, ed è proprio la Relatività Speciale (della anche "Relatività Ristretta") a "fare la differenza"... La Relatività prevede infatti che particelle veloci, con velocità prossime a quelle della luce nel vuoto, vedano scorrere un tempo rallentato, tanto più rallentato quanto più è alta la velocità ("**dilatazione dei tempi**", dovuta alle "formule di Lorentz"). Essa prevede, cioè, che il tempo rallenti nei sistemi in moto a velocità prossime a quelle della luce (c , circa un miliardo di km/h). Questo significa, per esempio, che un "mesone τ " dovrebbe avere una vita media assai più lunga rispetto ad un compagno "a riposo" quando esso è in moto a velocità prossime a quelle della luce. In un certo senso, potremmo dire che la vita media resta costante come previsto dalla Meccanica Quantistica, mentre è il tempo che scorre più lentamente, creando l'illusione di una vita più lunga.

Ora, siccome le particelle instabili che vengono prodotte negli acceleratori sono di regola animate da altissime velocità, molto prossime a quelle della luce, possiamo misurare la loro "vita media relativistica" con grande precisione, facendo la media su un gran numero di particelle dello stesso tipo che si muovono approssimativamente alla stessa velocità. In questo caso, l'esperimento è in perfetto accordo con le previsioni della Teoria della Relatività (osservazione che, di fatto, ha costituito già negli anni '30 una delle più eclatanti verifiche sperimentali della teoria stessa). La vita media T' di una particella in moto con velocità v è più lunga di quella T della stessa particella ferma, e precisamente vale una trasformazione di Lorentz, espressa matematicamente da una legge di proporzionalità in cui il fattore di moltiplicazione è l'inversa della radice quadrata di $(1 - \beta^2)$, essendo β il rapporto v/c .

Un **acceleratore di particelle** è un dispositivo atto - come dice il nome stesso - ad accelerare particelle subatomiche a velocità prossime a quelle della luce, per poi farle scontrare tra di loro e analizzare i risultati dello scontro stesso. La Meccanica Quantistica è in grado di fornire previsioni quantitative sui prodotti di questi scontri; quindi, negli acceleratori di particelle non si fa altro, in primis, che sottoporre la Meccanica Quantistica ad accurate prove sperimentali, per acquisire inoltre informazioni sulla struttura dei componenti subatomici della materia.

Un acceleratore è costituito da un lungo **tubo a vuoto**, normalmente di forma circolare (ma talora rettilineo), circondato da potenti **magneti**. Una particella subatomica è lanciata lungo il tubo (in realtà ciò avviene con fasci di molte particelle dello stesso tipo), accelerata e mantenuta nell'orbita (circolare) dal campo elettromagnetico generato dai magneti stessi.

A Ginevra (o meglio, sottoterra nei dintorni di Ginevra), si trova il più grande acceleratore di particelle del mondo, che misura 27 chilometri. Il sito scientifico che ospita questo acceleratore si chiama **CERN** (<http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html>).

Questo fantastico acceleratore prende il nome di **LHC (Large Hadron Collider)**; esso è situato in un tunnel alla profondità di circa 100 metri sottoterra. Dovrebbe essere già operativo nel 2007, e si prevede che in esso i protoni si scontreranno all'elevatissima energia di 14 TeV. Inoltre esso farà collidere fasci di nuclei di piombo alla fantastica energia di 1150 TeV. [Il **TeV** = TeraElettronVolt è un'unità fondamentale di energia utilizzata correntemente nella Fisica delle Particelle: 1 TeV è approssimativamente l'energia cinetica prodotta da una

zanzara in volo. Ma in un acceleratore di particelle questa energia è concentrata in uno spazio circa un milionesimo di volte più piccolo dello spazio occupato da una zanzara...! Un TeV rappresenta mille miliardi di eV = ElettronVolt, l'energia di un singolo elettrone; 1 TeV è quindi l'energia equivalente di mille miliardi di elettroni.....!]

Acceleratori come LHC costituiscono il culmine di ricerche iniziate oltre un secolo fa, sulla scia degli studi relativi alle misteriose radiazioni della materia (raggi X, raggi catodici, raggi alfa e beta). Queste domande sono oggi tutte ben comprese e le risposte ad esse date hanno cambiato anche la vita quotidiana: per citare alcune delle ricadute, la televisione, i transistor, i calcolatori elettronici, gli strumenti di indagine medica non invasiva. Alle soglie del XXI Secolo gli acceleratori di particelle si pongono la sfida di investigare ancor più profondamente l'intima struttura della materia, con ricadute tecnologiche ancora non note ma certamente immaginabili...

Il primo acceleratore di particelle fu costruito negli USA intorno al 1930. Si tratta del famoso **ciclotrone**, ideato da Ernest Lawrence. La ricerca tramite gli acceleratori fu all'inizio dominio statunitense. Nel 1954 venne fondato il primo laboratorio europeo, il **CERN** (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire). I primi acceleratori erano caratterizzati da sistemi acceleranti ad un solo magnete: **ciclotroni** e **betatroni**, costruiti per accelerare, rispettivamente, protoni ed elettroni ad energie di alcuni MeV (MegaElettronVolt = 1.000 eV = un milionesimo di TeV). Un nuovo tipo, a forma di ciambella, detto **sincrotrone**, fu successivamente evoluto e raggiungeva energie dell'ordine dei GeV (GigaElettronVolt = 1.000 MeV = un milione di eV = un millesimo di TeV); il sincrotrone poteva accelerare sia protoni sia elettroni. Già negli anni '50 si potevano accelerare particelle all'energia di circa 30 GeV; impetuosi successi furono poi visti negli anni '70, con la scoperta di molte nuove famiglie di particelle e sub-particelle, grazie a nuove generazioni di acceleratori particellari, come, ad esempio, il **PS** ("28 GeV Proton Synchrotron" del CERN) ed il **AGS** ("33 GeV Alternating Gradient Synchrotron" di Brookhaven); la rivelazione di nuove particelle è oggi permessa da nuovi più potenti apparati di rivelazione, detti **camere a bolle**.

In che cosa consiste esattamente la nozione di "Relatività" in questa nuova teoria di Einstein? Perché la massa è variabile con la velocità...? Come si riflette tutto ciò sull'equivalenza tra massa ed energia?

Come già detto per la "vita media" di una particella, anche la **massa** di una particella è destinata ad essere variabile con la velocità, cambiando in accordo a precise leggi matematiche della Relatività Speciale. Come nel caso della vita media, quella che è caratteristica del tipo di particella non è la massa misurata m (misurata quando la particella è, necessariamente, in movimento, perché è sostanzialmente impossibile osservare particelle elementari "a riposo" - e che, come detto, dipende dalla velocità della particella stessa), ma piuttosto la cosiddetta **massa a riposo**, che indicheremo con m_0 , cioè la massa che misurerebbe un osservatore "solidale" alla particella. Se la particella si muove con una velocità v la massa effettivamente misurata, ancora in perfetto accordo con la Relatività Speciale, è proporzionale alla massa a riposo ed è espressa da una relazione diretta in cui il fattore di moltiplicazione è - come usuale nelle trasformazioni di Lorentz - l'inversa della radice quadrata di $(1 - \beta^2)$, essendo β il rapporto v/c .

Come nel caso della vita media, la massa "osservata" m può essere considerata, in una certa misura, come un'illusione creata dal moto, in quanto - se la particella stessa potesse misurare la sua propria massa - essa misurerebbe sempre la sua massa a riposo, indipendentemente dal suo stato di moto. A riprova di questa affermazione, si può menzionare il fatto che - se la particella fosse ferma e l'apparato di misura fosse in moto rispetto ad essa - la massa misurata

della particella sarebbe cresciuta ugualmente in ragione della velocità dell'apparato di misura! In altri termini (come già, del resto, avviene, ma con significato differente, nella fisica di Newton e di Galileo) il **moto ha un carattere relativo**, perché non ha senso specificare in senso assoluto cosa sia lo stato di quiete. Ma - mentre nella fisica classica di Galileo e di Newton - esiste un sistema di riferimento assoluto rispetto al quale osservare, da un sistema "relativo", il moto degli oggetti - nella nuova teoria di Einstein **nessun sistema di riferimento può essere, né a priori né a posteriori, privilegiato**. Analogamente molte delle grandezze fisiche (massa, vita media, etc.) sono affette dallo stesso tipo di "relatività", cioè di imprescindibile dipendenza dalla scelta del sistema di riferimento in cui esse vengono misurate, nessun sistema essendo "migliore" di altri. Da qui il nome stesso della teoria.

Va però chiarito che la Relatività Speciale non afferma affatto che - come spesso viene equivocamente preteso - "tutto è relativo". Sono relative solo tutte quelle grandezze fisiche la cui definizione o misura non risulta essere indipendente dal sistema di riferimento in cui vengono definite od osservate: ad esempio, grandezze di questo tipo "relativo" sono la massa, la vita media, eccetera. L'equivoco di fondo nasce soprattutto sulla terminologia e sull'effettiva interpretazione fisica di queste grandezze, perché molti di questi concetti sono preesistenti alla nuova teoria della Relatività Speciale; essi - in buona sostanza - sono stati e vengono ancor oggi spesso definiti con una mentalità cresciuta nel mondo di Newton-Descartes, in cui - come già detto - tutto è supposto vivere in uno "spazio assoluto", in cui anche il concetto di quiete ha, in una certa misura, un senso assoluto. Al contrario, anche in Relatività Speciale esistono "grandezze fisiche assolute"; esistono, cioè, altre misure che in realtà non necessitano né della definizione di "quiete assoluta" né tantomeno della scelta di un particolare sistema di riferimento, ovvero sono indipendenti dallo stato di moto e in questo senso coerentemente definibili come "assolute". Ad esempio, la massa a riposo, il tempo proprio, eccetera. Quindi non è "tutto relativo", ma sono "relative" solo alcune grandezze, a causa della loro natura. In un certo senso, non sono le risposte alle nostre domande (cioè le grandezze fisiche) ad essere relative, ma sono quelle specifiche domande ad essere, in realtà, fisicamente inammissibili o almeno malposte nel contesto della nuova teoria.

A dispetto del suo nome, **la Relatività Speciale è quindi una teoria sull'assoluto in Fisica**. Solo che il concetto di "assoluto" è in essa differente da quello classico del mondo di Galileo e Newton, che è - purtroppo - il mondo che ci sembra di osservare in prima approssimazione e che, certamente, ben si presta alla descrizione di molti fenomeni (tutti quelli che non fanno intervenire esplicitamente le leggi dell'elettromagnetismo e le velocità prossime a quella della luce). La Relatività Speciale dice esattamente che la descrizione della realtà può (e dovrebbe) essere fatta prescindendo dalle grandezze relative, usando solo la loro controparte assoluta. Sono quindi la nostra "pigrizia mentale" e l'abitudine ad usare ancor oggi concetti Newtoniani (che sappiamo o dovremmo sapere essere "mal definiti") a produrre in realtà l'illusione - ancora dura a morire - della pretesa coerenza di una fisica che, sostanzialmente, è dipendente dall'osservatore.

Una stupefacente - ed in certo senso sconvolgente - predizione della Relatività Speciale conduce a comprendere che vi è una sostanziale "equivalenza" tra massa ed energia, il che - tra l'altro - costituisce una delle basi concettuali per la possibilità di estrarre, per via "nucleare", un'elevata quantità di energia da porzioni sostanzialmente "piccole" di materia. Se, infatti, si utilizzano le trasformazioni di Lorentz - ed in particolare la formula sopra citata che esprime la massa in moto di una particella - si scopre che ogni particella di massa a riposo m_0 , è dotata di un'energia equivalente uguale al prodotto della massa a riposo per il quadrato della velocità della luce nel vuoto. La famosa formula che - omettendo come d'abitudine il suffisso "zero" che indica la massa a riposo - si esprime con la celeberrima formula $E = mc^2$.

Che cos'è l'antimateria? Essa esiste veramente? Essa può essere rivelata negli acceleratori di particelle o altrove?

L'antimateria è una **forma duale di materia**, prevista dagli attuali modelli particellari della Fisica Teorica. In sostanza ogni particella elementare è obbligata ad avere una controparte in un certo senso "duale", che ne condivide tutte le caratteristiche fisiche fondamentali, ad eccezione di una, che è uguale in valore ma contraria in segno a quella della sua "compagna ordinaria". Per esempio, l'elettrone (che ha carica negativa) ha come compagna una particella teorizzata da P.A.M. Dirac nel 1928 (per rendere coerente la Meccanica Quantistica da poco formulata), particella detta **positrone**, ed oggi ben osservata sperimentalmente ed anche utilizzata esplicitamente a livello tecnologico. I positroni, ad esempio, sono impiegati in medicina nella cosiddetta PET (Positron-Emission Tomography = PET).

L'antimateria è correntemente osservata e studiata nei grandi acceleratori di particelle; essa è certamente presente a livello cosmologico, anche se è difficilissimo osservarla. Essa - infatti - in presenza di materia ordinaria tende ad annichilarsi, con grande emissione di energia, con la propria duale "ordinaria". Apparentemente, il nostro Universo - o, almeno, la parte di esso a noi visibile - sembra essere composto soprattutto da "materia ordinaria", sebbene nulla vieti che esistano altri Universi o altre porzioni del nostro stesso Universo in cui sia, invece, l'antimateria a preponderare.

Si può "confinare" l'antimateria, per osservarla..? Sì, ma con grande difficoltà, per la sua già citata tendenza ad annichilarsi con la materia ordinaria. I casi sono sostanzialmente due: (i) se la particella è neutra, ciò è sostanzialmente impossibile con l'attuale tecnologia; ma nel caso (ii) - quello della materia elettricamente carica - si possono usare "bottiglie elettromagnetiche", che comunque possono contenerne solo piccole quantità perché cariche identiche tendono a respingersi. Al CERN, per esempio, l'esperimento PS210 condotto con l'acceleratore circolare chiamato LEAR (Low Energy Antiproton Ring) già nel 1996 ha permesso la produzione di alcuni antiprotoni; nel 2002 gli esperimenti, migliorati, ne hanno prodotte alcune decine di migliaia, un numero in realtà ancora assai piccolo ma già sufficiente a studiare questa antimateria nella sua forma gassosa.

È vero che **una bomba da mezzo grammo di antimateria racchiuderebbe in sé l'energia di una bomba nucleare da 20 chilotoni** (si ricordi che la bomba atomica che fu sganciata su Hiroshima era da 20 chilotoni)...? Un **chilotone** è l'equivalente di mille tonnellate di tritolo. Un chilotone corrisponde a 4.2×10^{12} joules, ovvero 4.2 Terajoules. Giacché un grammo è 0.001 kg e la velocità della luce è circa di 300'000 km/s (ovvero 300'000'000 metri/s) dalla relazione $E=mc^2$ segue che per un grammo di materia si ha un'energia equivalente di $E = 0.001 \times 300'000'000 \times 300'000'000 \text{ kgm}^2/\text{s}^2 = 90'000'000'000'000 \text{ joules} = 90 \text{ Terajoules}$. Giacché 4.2 Terajoules corrispondono ad un chilotone, 90 Terajoules sono circa 21.4 chilotoni. Ciò premesso, se osserviamo che in una "bomba di antimateria" bisogna far interagire quantità equivalenti di materia ed antimateria, si vede che a mezzo grammo di antimateria verrebbero a corrispondere oltre 42 chilotoni....

In che cosa consiste il "Principio di Relatività"?

In Fisica il **principio di relatività** è stato per la prima volta introdotto da Galileo Galilei. Originariamente, tale principio diceva che uno stato di moto rettilineo uniforme non può essere distinto (tramite esperimenti locali) da uno stato di quiete. La Relatività Speciale è un'ideale applicazione di questo vecchio principio, con alcune modifiche per inglobare anche nuovi esperimenti, ad esempio tutti quelli relativi ai fenomeni elettromagnetici, scoperti nel frattempo, che inizialmente sembravano violare questo principio nella sua forma "classica".

In realtà, ciò che è stato dimostrato essere errato non fu il vecchio “principio di relatività galileiano”, bensì la sua traduzione in termini matematici di cosa significasse trasformare le misure di un osservatore in quelle di uno in moto rettilineo uniforme rispetto ad esso. Anzi per meglio dire, la Relatività nasce proprio dall'unione di una forma opportunamente riveduta del “principio di relatività” con il principio - base dell'elettromagnetismo - della costanza della velocità della luce rispetto a qualunque osservatore e qualunque sorgente.

Per quali motivi questa “Teoria della Relatività Speciale” non è del tutto soddisfacente? E perché Einstein dovette per forza ritornarci sopra per oltre dieci anni? Che cos'è la forza di gravità?

Il **principio di relatività** - anche nella sua forma relativistica - è, per così dire, molto selettivo in materia di interazioni ammesse. Si scopre facilmente che in Relatività Speciale quasi ogni forma di interazione finisce per violare il principio di relatività stesso. L'interazione elettromagnetica è, praticamente, l'unica vera eccezione.

Si pose quindi ad Einstein il problema della **gravitazione**. L'interazione gravitazionale è formalmente molto simile all'interazione elettrica (nell'accezione classica la forza di Newton e quella di Coulomb hanno la stessa struttura matematica, essendo entrambe proporzionali all'inverso del quadrato della distanza tra le particelle interagenti) ma non è mai stato rilevato l'analogo gravitazionale dell'interazione magnetica. D'altro canto, l'elettromagnetismo non viola il principio di relatività, proprio in virtù dell'esistenza del campo magnetico.

Quindi Einstein riconobbe immediatamente il problema di produrre una teoria della gravitazione che non violasse il principio di relatività. Occorsero ad Einstein più di dieci anni per arrivare nel 1916 a formulare la “**Teoria della Relatività Generale**” che descrive l'interazione gravitazionale nel contesto di un ben più generale principio di relatività. In essa, non solo non è possibile rivelare uno stato di moto in modo assoluto, ma secondo questo “**principio di relatività generale**” non è neanche possibile rivelare un qualunque moto arbitrario.

Se la Relatività Speciale ha di fatto cancellato la nozione di spazio e tempo assoluti, rimpiazzandole con una classe privilegiata di osservatori (gli **osservatori inerziali**, tutti equivalenti tra di loro), la Relatività Generale rimuove addirittura ogni distinzione tra osservatori qualunque. La Fisica può (e dovrebbe) essere descritta nello stesso modo da ogni osservatore. Ancora una volta, una definizione precisa e rigorosa di cosa debba intendersi per “assoluto” in Fisica....!

La **gravità** è l'interazione fondamentale responsabile della forza che attrae due qualunque masse dell'Universo. Essa è la forza che ci tiene ancorati al nostro pianeta, che tiene la Luna legata alla Terra, la Terra legata al Sole e le Stelle che formano le Galassie legate le une alle altre. Gli oggetti “pesano” in virtù della forza gravitazionale che li attrae verso la superficie del terreno (in realtà, verso il centro della Terra).

Forza studiata sin dai tempi più antichi, una sua teoria ben fondata e rigorosa fu elaborata nel XVII Secolo dal fisico inglese Isaac Newton; egli fu il primo dare corpo all'idea che la forza che tiene noi ancorati a Terra è la stessa che tiene la Luna legata alla Terra e che mantiene unito il Sistema Solare. Per questo la teoria di Newton fu detta **Legge di Gravitazione Universale** e restò incontrastata sino agli albori del XX Secolo. Ancor oggi essa viene convenientemente utilizzata in ipotesi di “campo debole”, ovvero in tutte quelle situazioni in cui non è ancora necessario ricorrere alla più moderna **Teoria della Relatività Generale** (che fu elaborata da Einstein agli inizi del XX Secolo). Secondo la teoria newtoniana, due particelle dotate di massa sono attratte da una forza reciproca proporzionale all'inverso del quadrato della distanza che le separa.

La Relatività Ristretta (o Speciale) - teoria la cui validità sperimentale è oggi certa - descrive

tuttavia un mondo in assenza di gravità e comunque privo di materia solida; essa, in sostanza, ben descrive i fenomeni elettromagnetici e permette di introdurre in modo rigoroso solamente il concetto di “particella test” (ovvero una particella priva di dimensioni solide reali). Forzando un po', si può dire che la Relatività Speciale mantiene ancora la sua validità soltanto se e dove l'interazione gravitazionale è sufficientemente trascurabile. Proprio per questo nei dieci anni che intercorsero tra il 1905 (anno in cui fu formulata definitivamente la Relatività Speciale) e il 1915 (anno in cui fu formulata la prima teoria “generale”, in realtà ancora inesatta e resa finalmente completa nel 1916) il fisico tedesco Einstein si occupò della necessaria estensione ad una teoria che, mantenendo saldi i principii della Relatività Speciale - ed in particolare l'indipendenza della velocità della luce dalla scelta di un sistema di riferimento e della sorgente - permettesse anche una coerente descrizione dei fenomeni gravitazionali. Per descrivere la gravitazione in un contesto relativistico occorre quindi una teoria “migliore”.

La **Relatività Generale** fornisce quella teoria che - sebbene non unica ed ancora suscettibile di ulteriori generalizzazioni - meglio si presta a descrivere al contempo i fenomeni gravitazionali, sia a livello solare sia galattico sia extra-galattico, mantenendo la validità della Relatività Speciale in sostanziale assenza di gravità (quando, cioè, si finge che la forza gravitazionale possa essere “spenta”). In essa si ipotizza che le forze gravitazionali si traducano in una curvatura della struttura stessa dello spazio-tempo, che viene così a discostarsi dall'essere “piatto” (come accade invece nella Relatività Speciale) quanto più è forte la forza gravitazionale (ovvero, quanta più materia vi è in esso presente).

Che cos'è un interferometro? In che cosa consiste l'utilizzo degli interferometri per la rivelazione di onde gravitazionali? Chi sono LISA e VIRGO?

Un **interferometro** è un dispositivo sperimentale, costituito essenzialmente da due lunghi tubi rettilinei (in genere disposti a formare un angolo retto). Nei due tubi viene puntato un raggio elettromagnetico (un raggio luminoso o, nei modelli più moderni, un **raggio laser**), che viaggia lungo il tubo, viene riflesso da due specchi all'estremo dei tubi e viaggia indietro verso il punto di emissione. I due raggi che tornano indietro nello stesso punto dove erano stati emessi vengono quindi “fatti interferire”.

Il **processo di interferenza** è un processo legato alla natura ondulatoria della luce (più in generale, dell'interazione elettromagnetica). Si deve qui immaginare la luce come un'onda; quando due onde arrivano in un punto, esse possono sommarsi o cancellarsi a vicenda, a seconda della loro **fase**.

Quando due onde interferiscono su uno schermo, esse formano zone d'ombra e zone molto luminose, disposte secondo un disegno caratteristico nel complesso chiamato **frange d'interferenza**. Fortunatamente, il disegno generato da un interferometro è sensibilissimo alla lunghezza dei tubi e pertanto con un interferometro un fisico può rilevare variazioni di lunghezza dell'ordine di una frazione della lunghezza d'onda del laser usato nell'esperimento stesso. Gli interferometri, in altri termini, sono l'equivalente di righelli estremamente precisi che misurano continuamente la lunghezza dei tubi.

Gli interferometri sono intrecciati fortemente con la storia della Relatività. Prima che Einstein formulasse la Relatività Speciale si credeva che la luce si propagasse in un mezzo materiale, detto **etere** (terminologia che ancora sopravvive, ma solo in alcuni modi di dire legati alle trasmissioni radiotelevisive). Due scienziati sperimentali (**Michelson** e **Morley**) progettaronò un esperimento per rivelare il moto della Terra in questo mezzo. Costruirono quindi un interferometro e lo calibrarono in modo che i due fasci di luce impiegassero lo stesso tempo a percorrere i due tubi. A distanza di sei mesi il moto della Terra rispetto

all'etere doveva essere pressoché invertito rispetto al primo esperimento. Poiché il moto della luce era già e comunque ritenuto avvenire a velocità costante "rispetto all'etere", uno dei raggi avrebbe dovuto impiegare un tempo differente a percorrere il suo tubo, esattamente come lo stesso nuotatore ha due velocità diverse quando risale o scende lungo la corrente di un fiume, che oppone una certa resistenza al moto (così come si riteneva dovesse fare l'etere sul raggio luminoso). Quindi lo strumento di Michelson e Morley avrebbe dovuto rivelare delle frange d'interferenza; che però non furono rivelate, né nell'esperimento originale né nelle sue innumerevoli ripetizioni dovute al successivo progresso dovuto alle idee di Einstein. Per qualche anno si cercò addirittura di fornire modelli alternativi in cui l'etere veniva trascinato localmente dalla Terra lungo la sua orbita. Ma fu presto chiaro che tutti tali modelli erano incompatibili sia con la stabilità rivelata del Sistema Solare (il trascinamento avrebbe dissipato energia, facendo rallentare troppo velocemente i pianeti nelle loro orbite, facendoli alla fine cadere sul Sole) sia con misure astronomiche legate alla cosiddetta **aberrazione stellare**.

Einstein (che, secondo ricerche storiche recenti ed assai approfondite, a quanto pare era all'oscuro dell'esperimento di Michelson e Morley fino a tempi decisamente posteriori alla formulazione della Relatività Speciale) fornì, di fatto, una spiegazione alternativa al fenomeno attraverso la sua nuova teoria della Relatività. Essa, infatti, prescinde dall'esistenza dell'etere; in essa, in sostanza, l'etere non esiste e la velocità della luce è rigorosamente costante: non dipende né dall'osservatore né da altre circostanze. Secondo la Relatività Speciale, quindi, in un esperimento di interferenza del tipo di quello ideato da Michelson e Morley non si dovrebbero formare frange d'interferenza:e infatti non si formano, il che rese in breve (ma non brevissimo) tempo credibile la rivoluzionaria idea di Einstein.

In tempi più recenti gli interferometri sono stati di nuovo utilizzati in campo relativistico; per esempio, essi sono largamente utilizzati con lo scopo prossimo futuro di poter rivelare sperimentalmente le **onde gravitazionali**, un effetto previsto dalla Relatività Generale. Quando avviene un'intensa perturbazione gravitazionale (per esempio, il fenomeno di esplosione di una supernova o la caduta di materia in un buco nero) lo spazio-tempo stesso viene attraversato da un'onda. Quest'onda si propaga - proprio come farebbe un'onda provocata dalla caduta di un sasso in uno stagno - e, con un pizzico di fortuna, possiamo sperare che essa, attraversando lo spazio-tempo, finisca per attraversare il nostro interferometro, provocando in esso un'infinitesimale variazione della lunghezza dei tubi. Questa a sua volta si deve manifestare con la formazione di frange di interferenza transitorie, che trasportano informazioni precise sull'onda che le ha generate e che verrebbero, quindi, a costituire una inconfutabile prova dell'esistenza di onde gravitazionali nell'Universo (un test cruciale per la Relatività Generale).

Esistono nel mondo alcuni grandi **interferometri gravitazionali**. I due più grandi interferometri sono **LISA** e **VIRGO**; essi sono (o meglio, saranno presto) in attesa che un'onda gravitazionale passi dalle loro parti per poter estrarre le informazioni dell'evento che le ha generate, informazioni che l'onda porta con sé. Questo fornirebbe un'ulteriore conferma della **Relatività Generale**, inaugurerebbe una nuova tecnica osservativa di eventi catastrofici galattici e fornirebbe informazioni preziose sulla struttura stessa del cosmo.

La collaborazione **VIRGO** è l'avventura scientifica congiunta di due gruppi di ricerca europei, uno italiano ed uno francese. Essa è situata a Cascina (nei pressi di Pisa) nel contesto di **EGO** (European Gravitational Observatory) e consiste in un **interferometro laser** del tipo di Michelson e Morley, con due bracci perpendicolari lunghi ciascuno 3 chilometri; in ciascuno di essi è mantenuto un vuoto ultra-spinto. Le riflessioni multiple dei raggi laser di altissima precisione (una quarantina) estendono la lunghezza effettiva del braccio ad oltre 120 chilometri. **VIRGO** è in grado di rivelare onde di frequenza tra i 10 ed i 6.000 Hertz, permettendo così l'osservazione di onde gravitazionali emesse sia dalle supernove sia dalla coalescenza di sistemi binari in Galassie esterne (come, ad esempio, la stessa Galassia che

contiene l'**ammasso di Virgo**). Per raggiungere la necessaria sensibilità e garantire l'isolamento da perturbazioni esterne, questo interferometro utilizza tecniche di ottica di altissima precisione, unitamente a tecnologie criogeniche e di meccanica di alta precisione per l'eliminazione di ogni possibile rumore.

Informazioni più dettagliate su VIRGO possono essere reperite al seguente sito web:

<http://wwwcascina.virgo.infn.it/>

LISA è invece un'osservatorio gravitazionale basato nello spazio. Esso prevede di osservare le onde gravitazionali emesse da stelle binarie nella nostra Galassia (la **Via Lattea**) oltre che eventi catastrofici generati da **buchi neri** in Galassie lontane. Anche LISA utilizza - questa volta nello spazio - tecniche di interferometria laser di altissima precisione. Si tratta di tre navicelle spaziali che gravitano liberamente a cinque milioni di chilometri di reciproca distanza, formando un triangolo equilatero nello spazio. I raggi laser corrono sui lati del triangolo ed interferiscono all'interno della navicella che ospita gli apparati sensori. L'utilizzo dello spazio interplanetario permetterà probabilmente di osservare frequenze non accessibili agli esperimenti terrestri, costituendo così un ottimo complemento agli esperimenti basati a Terra, che permettono invece una maggior flessibilità operativa. Le ovvie e grandi difficoltà tecniche della sua localizzazione nello spazio sono compensate dalla mancanza di perturbazioni esterne, che invece a terra debbono essere filtrate per riconoscere un segnale veramente gravitazionale. L'esperimento LISA vede la partecipazione dell'Agenzia Spaziale Europea (**ESA**) e di quella statunitense, la **NASA**.

Informazioni più dettagliate su LISA possono essere reperite al seguente sito web:

<http://lisa.jpl.nasa.gov/>