

# *Athenaeum*

Associazione N.A.E.

in collaborazione con

**LUISS Guido Carli**

Giovedì 10 gennaio 2019, ore 11:00  
LUISS Guido Carli – Aula Magna Mario Arcelli  
Viale Pola, 12 – Roma

Progetto

*“Quale Europa per i giovani?”*

## *Per un approccio etico al mondo del lavoro Materia, Spazio, Tempo – Le ultime frontiere della fisica e le possibili ricadute*

### **Stefano Attili**

*Orientamento ed Entrepreneurship, LUISS Guido Carli*

Benvenuti a tutti. Per me è sempre un piacere poter rivolgere un breve indirizzo di saluto in occasione di questi incontri. Ci sentiamo vicini ai progetti di Athenaeum, in particolare al progetto in cui siete coinvolti voi, che ci permette di guardare al nostro futuro, quel futuro che voi rappresentate.

Il filo conduttore degli interventi di stamani è “Materia spazio tempo: le ultime frontiere della fisica e le possibili ricadute”. In quanto Ateneo di Scienze Sociali il nostro insegnamento accademico è ovviamente distante da queste tematiche ma, uscendo da una visione parziale, allargando lo sguardo alla dimensione della eterogeneità, della contaminazione di saperi diversi, vogliamo mostrarvi e darvi la possibilità di capire, grazie a chi interverrà oggi, aspetti che magari in questo momento sono lontani dalla vostra realtà, che sinora hanno fatto parte solo del vostro immaginario, a volte inverosimile. Credo che questa sia quindi una grandissima opportunità – e sono felice di vedervi sempre così numerosi in queste iniziative – per aprire gli occhi, per aprire la mente. Senza dimenticare che tutto questo nasce da una dimensione che è sì collettiva, ma anche individuale, che dipende da come ci interroghiamo e da come ci poniamo nei riguardi della nostra vita, all’interno di un contesto sociale, in un’Europa, terreno di grandi tensioni e grandi complessità, e che voi, per primi dopo di noi, siete chiamati a costruire in maniera differente.

Allora vedere, aprire la propria mente, allargare lo sguardo, scoprire ciò che vi può attrarre e in che modo, come individui, come futuri professionisti, come futuri uomini e donne di questa società potrete dare il vostro contributo, questo credo sia lo spirito più bello. Grazie e buon lavoro.

### **Maria Camilla Pallavicini**

*Presidente Athenaeum N.A.E.*

Buongiorno a tutti e ben ritrovati. Vorrei dirvi solo due parole per non portare via tempo a un convegno le cui tematiche sono talmente interessanti e complesse da richiedere la massima concentrazione. Innanzitutto, un grazie veramente di cuore alla LUISS che ci ospita come sempre con tanta generosità, e poi agli illustri relatori che hanno accolto il nostro invito per parlarvi di argomenti affascinanti come le onde gravitazionali, lo Spazio, il Tempo e la

Materia, secondo le ultime ricerche della fisica moderna. State bene attenti, perché dopo i loro interventi, avrete modo di porre loro delle domande su ciò che vi interessa maggiormente o sulle cose che non avrete capito. Vorrei solo brevemente presentarveli.

Fulvio Ricci è un astrofisico con una carriera accademica eccezionale, uno dei massimi esperti di Gravitazione Sperimentale, di sistemi di rivelazione delle onde gravitazionali, (peraltro già previste da Einstein un secolo fa), e di buchi neri. La prima scoperta di un'onda gravitazionale è stata una pietra miliare della fisica e, fra l'altro, ha permesso di studiare i buchi neri che sono corpi così densi che né la luce né la materia riescono a sfuggirvi. Fulvio Ricci, nel parlare di astronomia gravitazionale, ama ripetere una frase profonda, quella di essersi messo in ascolto dei sussulti cosmici delle onde gravitazionali per "studiare l'invisibile".

Donatella Lucchesi, anche lei, ha un curriculum così denso che non provo neppure a riassumerlo. Lavora al Dipartimento di Fisica e di Astronomia all'Università di Padova, è ricercatrice dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e collabora con molte altre Istituzioni all'estero. In particolare, lavorando al CERN, ha scoperto la particella XI che può aiutare a studiare la "colla" che tiene unita la materia, e quindi capire una delle quattro forze fondamentali dell'universo, ossia la forza forte. La particella XI è una chiave senza precedenti per scoprire i segreti della "colla" della materia, ossia, il comportamento delle forze che agiscono nel mondo infinitamente piccolo.

Infine, Marco Donetti, è ricercatore presso il Centro di adroterapia della Fondazione CNAO di Pavia, la Fondazione TERA di Novara, e l'Università agli studi di Torino. La sua ricerca mira a combattere i tumori che colpiscono in particolare gli organi in movimento come i polmoni, il fegato e il pancreas, rendendo più preciso il fascio di ioni utilizzato per la loro cura. L'adroterapia, infatti, è una forma di radioterapia più avanzata che utilizza fasci di protoni e ioni carbonio per combattere i tumori non operabili e che consente di ridurre in maniera sostanziale gli effetti collaterali ai tessuti sani.

Francamente, non avendo alcuna competenza in merito, preferisco lasciare loro la parola perché siano loro stessi a spiegarvi il frutto delle loro ricerche, le motivazioni che li hanno portati a scegliere questa strada, e soprattutto le aspettative che ipotizzano nei loro esperimenti.

Vi rubo ancora un minuto per ribadirvi una cosa che non vorrei fosse fraintesa, in particolare, da tutti coloro che si sono iscritti al Corso triennale di Alternanza Scuola - Lavoro.

Il nostro Corso è trasversale e si intitola *Per un approccio etico al mondo del lavoro* e si sviluppa su tre aree generali – la Ricerca scientifica e l'Innovazione tecnologica; le Scienze umane; e l'Economia e la Finanza – che verranno esplorate da un punto di vista etico nelle loro implicazioni pratiche a livello professionale. Questo perché gli studenti possano riflettere sulle loro future responsabilità individuali e sulle regole che dovranno rispettare nell'ambito del loro lavoro. Quello che desidero precisarvi è che questo Corso non ha il fine di insegnarvi una professione o di darvi delle opportunità pratiche di lavoro. Qualcuno ha detto che bisognerebbe offrire delle esperienze pratiche nei diversi ambiti lavorativi. Capirete bene, rileggendo il titolo del nostro Progetto, che non è certo questo il nostro obiettivo, che è un obiettivo a monte delle vostre scelte future e cioè di farvi riflettere sugli aspetti etici che comporteranno le vostre scelte professionali, sia nei confronti degli altri che di voi stessi; vorremmo che imparaste a leggere dentro di voi per conoscervi meglio e valutare le vostre debolezze e le vostre reazioni di fronte agli eventi che vi verranno incontro e che dovrete affrontare, capaci di verificare con buon senso il contesto in cui dovrete operare e la bontà o meno dei vostri comportamenti verso gli altri e la società, capaci di leggere con sincerità i vostri conflitti interiori e di valutare se siete in grado di mettervi al posto degli altri e di volere il loro bene e quello della società, infine, di motivarvi, ascoltando le esperienze e le scelte di personalità importanti che sono riuscite nella vita, al fine di costruire dei progetti e portare avanti i vostri sogni.

Suggerisco, poi, alle Scuole che ne fossero interessate, (a questo proposito abbiamo già preso contatto con alcuni imprenditori che hanno creato delle onlus di grande utilità, interesse e innovazione) di finalizzare i vostri viaggi di istruzione come parte del vostro Progetto di Alternanza Scuola – Lavoro allo scopo di visitarle, vedere come sono organizzate e prendere atto delle loro attività innovative, anche in termini di approccio etico e di sostenibilità. Conoscerle, potrebbe suggerirvi molte cose alle quali ispirarvi. Inoltre, per unire l'utile al dilettevole, potreste anche approfittare per visitare il territorio circostante, seguire itinerari insoliti e farvi invadere dalla grande Bellezza del nostro Paese. Ecco, questo è quello che volevo dirvi e lascio subito la parola a Filippo Gaudenzi, nostro grande e vero amico, che coordinerà l'incontro e il dibattito fra i nostri illustri ospiti che non vedo l'ora di ascoltare. Grazie.

## **Filippo Gaudenzi**

*Vice-direttore Tg1*

Grazie, ben trovati. Confesso subito: mi dichiaro prigioniero dei nostri relatori. Andavo malissimo in Fisica a scuola, ho sempre considerato extraterrestri le persone che si occupavano di questi argomenti. Sono sempre stato affascinato, però dall'idea che la materia così come noi la vediamo, possa invece essere scomposta, si possa vedere come si è formata, quale sia la sua origine. Noi consumiamo lo spazio, lo occupiamo, lo vediamo, ma anche lo spazio nasconde

dimensioni inaspettate. E subiamo il tempo, il tempo che è una variabile dipendente persino dal nostro umore, al punto che ne abbiamo una concezione ogni giorno diversa. Ci capita di dire, a volte: “Questa giornata è passata velocissima”, invece in un’altra occasione diciamo: “Il tempo non passa mai”. Siamo consapevoli che è il nostro stato a farci esprimere in un modo anziché in un altro.

Proprio con questo approccio, vorrei chiedere a Donatella Lucchesi: come le è venuto in mente, da ragazza, di cominciare ad occuparsi della materia?

### **Donatella Lucchesi**

*Professoressa dipartimento di Fisica e Astronomia - Università di Padova, Progetto LHCb al CERN*

Buongiorno, è un piacere vedervi così numerosi. Stavo dicendo prima a un mio collega: «Spero di rivedere così tanti giovani nell’auditorium del CERN tra qualche anno». Rivedere qualcuno di voi mi farebbe davvero piacere.

Come sono arrivata a occuparmi della materia? Penso di essere una persona comune, sono una persona come tante, e ci sono arrivata quasi per caso. Perché, a dirla proprio tutta, nemmeno io andavo bene in matematica. Addirittura, al primo anno di liceo, la mia insegnante di matematica suggerì ai miei genitori di farmi cambiare scuola, perché non sembravo portata. In realtà, ho sempre avuto una grande curiosità. Sono sempre stata curiosa di capire come è fatta veramente la materia, ma anche i concetti di cui si parlava prima: spazio e tempo, che cosa sono? Un’idea di quello che è la materia, adesso ce l’abbiamo, ma cosa siano lo spazio e il tempo non lo sappiamo ancora. Ci sono sempre stati lo spazio e il tempo? O sono comparsi quando si è formato l’universo? Questa è una bella domanda. Il tempo scorre per tutti uguale, o per ciascuno è diverso? Erano questioni che mi incuriosivano, e ho capito che per approfondirle bisognava studiare la matematica. E così l’ho fatto, perché era l’unico modo.

La matematica non è altro che un linguaggio, con il quale noi riusciamo a dialogare su concetti complicati. È una lingua. Come quando si va in un altro Paese è necessario imparare l’inglese, il francese o il tedesco, così per parlare di cose che hanno a che fare in maniera precisa con la scienza, bisogna usare la matematica. Quindi me la sono fatta piacere, l’ho studiata e sono arrivata qua, passo dopo passo. Ma vi assicuro che è dura, non è vero che sia facile. Non so se esistano dei geni, ma per tutti quelli che conosco io, la strada è, come per tutte le altre cose, in salita, molto in salita. In particolare, lasciatemelo dire, per le donne è un po’ più in salita che per gli altri, in certi settori.

### **Filippo Gaudenzi**

Però Donatella, adesso che abbiamo capito come ci è arrivata, sempre per proseguire con le domande da centomila dollari, le chiedo: dove è arrivata? Ha capito tutto?

### **Donatella Lucchesi**

No, assolutamente. Come vi mostrerò, quello che sappiamo è pochissimo. Fra l’altro, noi stiamo pensando di progettare una macchina completamente diversa da quelle che ci sono al CERN, ancora più grande e fatta in maniera diversa, perché le cose che ancora non sappiamo sono tantissime, e in moltissimi settori non solo nella Fisica, ma nella Fisica di cui mi occupo sono proprio questioni fondamentali.

E in questo è la bellezza. Infatti, quello che mi guida, che mi aiuta, è proprio la bellezza di ciò che faccio. Nella ricerca, la bellezza è la stessa che si trova in un bel quadro, in una bella poesia, in un bel romanzo, in una discussione di filosofia.

Per me la ricerca è qualcosa che sta sopra a tutto. Ma da capire, da studiare c’è tantissimo. Con la conferma del Bosone di Higgs, abbiamo aperto la porta su un nuovo mondo, su una nuova comprensione, ma siamo appena sulla soglia. Dobbiamo ancora fare il passo per entrare e andare a vedere che cosa c’è e da dove veniamo. Se riusciamo a capire da dove veniamo, capiremo anche dove ci porterà il nostro cammino.

### **Filippo Gaudenzi**

Sono domande che presuppongono una risposta. Lei ce l’ha, una risposta, professore?

### **Fulvio Ricci**

*Ordinario di Fisica generale – Università Sapienza di Roma*

Le domande sono tante e le risposte che abbiamo in mano sono poche. Però questo è il nostro compito, anzi, è il vostro compito. Il compito di coloro che hanno coraggio, perché primo passaggio logico è prendere coscienza che

sappiamo pochissimo. Quindi ci vuole coraggio nell'affrontare il problema, per capire come funziona la natura. Questa è la sfida che abbiamo di fronte.

Poi, ovviamente, accanto al coraggio ci vuole la costanza, che è un elemento fondamentale. Bisogna costruirselo, rafforzare il carattere e tenere duro, perché capire significa, a volte, superare dei limiti che sembrano invalicabili. Però, piano piano, si va avanti, con il contributo di tutti – perché la crescita della nostra conoscenza, badate bene, è frutto di tanti piccoli contributi, sui quali poi svetta il contributo di qualcuno che è più rapido o più bravo degli altri, ma che si avvale del contributo di tutti.

Io mi sono occupato e mi occupo di relatività generale. La relatività generale è la teoria principe sviluppata da Albert Einstein. Albert Einstein è deificato, è considerato il genio per eccellenza. Girano le immagini di quest'uomo, con i capelli disordinati, in bicicletta e che fa le boccacce, insomma è considerato un essere al di fuori della normalità, un extraterrestre.

Qui di extraterrestri non ce ne sono. Guardate, queste tre persone che siedono di fronte a voi sono normalissime, però hanno avuto la capacità di tenere duro. È questo che vi chiedo e vi sfido a fare per il prossimo futuro. Capire la natura è un'impresa difficile, ci vuole coraggio e ci vuole costanza e poi, ovviamente, ci vuole la competenza. Bisogna studiare, ma studiare è fatica. La prima cosa che bisogna mettersi in testa è che studiare è fatica, non è semplice. Però, poi, quando si è capito come risolvere un problema, anche un piccolo, la soddisfazione è enorme, è veramente una soddisfazione interiore. È quello che ci spinge. Il nostro è un mestiere che dà veramente delle soddisfazioni straordinarie.

### **Filippo Gaudenzi**

Adesso ci faremo prendere per mano e ci faremo condurre nella materia, nello spazio e nel tempo. Ovviamente qui parliamo di ricerca, quindi di teorie, e la soddisfazione è quella del fare un piccolo passo. Come disse l'astronauta Armstrong, quando mise un piede sulla luna: «È un piccolo passo per un uomo, ma un grande passo per l'umanità». Ogni volta che c'è un piccolissimo passo in avanti, anche se pare insignificante, si tratta di un progresso, di una conferma di una teoria, significa andare avanti.

A Marco Donetti vorrei chiedere della soddisfazione che si prova quando questo progresso, questa teoria, poi si applica al nostro corpo, ci fa bene e ci aiuta.

### **Marco Donetti**

*Ricercatore – Centro Nazionale Adroterapia Oncologica – Pavia*

Io non scrivo libri, non ho la capacità di scrivere libri, non troverete mai il mio nome sul vostro libro di Fisica, perché mi occupo di applicazioni, non della ricerca di base. Vedrete poi, nella presentazione, che uso cose complicate: la nostra Fondazione, per curare i pazienti usa i nuclei della materia e bisogna capire che cosa siano i nuclei e come si comportano.

Io più che un fisico, mi sento – anche se lo sono, avendo studiato Fisica – un tecnologo. Il nostro è un lavoro basato sull'elettronica, sull'informatica, sulla costruzione di oggetti, sulla costruzione di rivelatori e, come il professore diceva prima, fare *clic* su un programma e vedere che tutto funziona, vi assicuro che è molto emozionante.

Anch'io con la matematica... insomma. Anche se mi ritenevo bravo.

Ricordo la professoressa della prima superiore, era veramente arcigna. Arrivava in classe con il camice marrone, perché aveva paura di sporcarsi con il gesso, e incuteva autentico terrore. Credevo di essere abbastanza bravo, alle medie andavo bene e anche lei aveva visto qualcosa in me, tutto sommato. Mi aveva regalato mezzo punto il primo quadrimestre della mia prima superiore, così invece del cinque e mezzo avevo ottenuto il sei. Ero soddisfatto e pensavo: "Ragazzi, sono forte". Poi mi ha chiamato per la prima interrogazione nel secondo quadrimestre e non avevo studiato, avevo la sufficienza e mi ero detto: "Figuriamoci se mi interroga". Mi ha fatto una terribile scenata, mi ha mandato via gridando. Tornato al mio posto, mi sono detto: "Forse non ho capito qualcosa". Quello che non avevo capito è che, come dicevamo prima, bisogna fare fatica. Quello che si pensa di sapere non basta, c'è sempre una porta da aprire. E, dietro ogni porta che apriamo, ce n'è sempre un'altra.

Poi mi sono fermato negli studi, non mi occupo di fisica teorica, non mi occupo della struttura della materia. Sono un utilizzatore, un costruttore e credo che ci siano due punti importanti. Il primo, come diceva Donatella, è la curiosità. Da bambino prendevo una macchinina, smontavo il motorino elettrico per vedere come era fatto, sperando poi di riuscire a ricostruirlo. Non ci sono riuscito ma ho capito, anzi ho cercato di capire, a quel tempo, come potesse funzionare un motore elettrico. E ho continuato, con il passare degli anni a cercare di capire come funzionasse l'informatica, capire come funzionassero i programmi che usiamo, capire come funzionasse l'elettronica, capire, per quanto riguarda la fisica, il funzionamento degli elementi che studiamo.

## Filippo Gaudenzi

Allora, Donatella, vogliamo entrare nella materia?

## Donatella Lucchesi

Ho preparato qualche slide. Se non capite, mani alzate e domandate. Cos'è e come è fatta la materia? Io ho cercato di mettere insieme delle cose che dovrete già sapere, quindi non ve la prendete con me se i vostri insegnanti si accorgono che non avete studiato.

Ci sono cose che sappiamo tutti. La materia è fatta di atomi e ciascun atomo è costituito, al proprio interno, da un nucleo centrale e poi dagli elettroni. Andiamo a vedere come è fatto il nucleo. Il nucleo è costituito a sua volta da neutroni e da protoni. Ma non è finita qui: anche i neutroni e i protoni sono costituiti da altre particelle che si chiamano quark.

La domanda a questo punto è: questo gioco di scatole cinesi finisce oppure non finisce mai e ogni volta c'è qualcosa di più piccolo? Esiste un mattone fondamentale, un pezzetto fondamentale a partire dal quale si riesce a costruire la natura, anche organismi complicatissimi come l'essere umano?

Questo si è fatto nel corso degli ultimi cinquanta, sessanta anni. Come ci siamo arrivati? Andando a guardare. Su che dimensioni, su che lunghezze stiamo ragionando? Per l'atomo parliamo di *dieci alla meno dieci metri*. Poi abbiamo il nucleo, che è *dieci alla meno quattordici metri*. Pensate a quanto siano piccole queste dimensioni. Dopodiché abbiamo il protone, arriviamo al quark, e all'elettrone, che è molto piccolo. Questi sono, diciamo, "*inferiori*" a *dieci alla meno diciotto*. Perché non riusciamo a misurarli, non sappiamo quanto grandi siano. Come si fa a fare queste misurazioni? Abbiamo inventato i microscopi, ma con il microscopio più potente che abbiamo oggi, si arriva a vedere oggetti che sono al massimo *dieci alla meno dieci metri*. Con gli ingrandimenti che abbiamo oggi, riusciamo a vedere gli atomi. Allora come si fa a verificare se davvero esistono i quark? Se non li vedo, come faccio a dimostrare che esistono? È il metodo scientifico. Devo fare un esperimento, ottenere qualcosa da poter mostrare anche agli altri, perché altrimenti, non funziona, non è dimostrabile.

Quindi come faccio a inventare qualcosa che vada a vedere questi soggetti così piccoli? Vediamo come funziona il microscopio. Mandiamo della luce sull'oggetto che vogliamo vedere e poi, con un sistema di lenti più o meno complicate, vediamo la luce che quell'oggetto diffonde. Non vediamo l'oggetto vero e proprio, ma quello che esso ci rimanda.

Abbiamo dunque pensato – noi fisici, a partire da Fermi in poi – di inventare un altro microscopio che funzionasse in maniera simile. Cioè prendendo le particelle più piccole possibili, per esempio i protoni o gli elettroni, e infilandole negli anelli che chiamiamo acceleratori di particelle. La figura che vedete [slide], è lo schema dell'acceleratore del CERN. Lì dentro facciamo girare, a una velocità prossima a quella della luce, i protoni, che collidono e, dalla collisione, viene fuori quello che noi chiamiamo *evento* (appare proprio come una immagine) e che andiamo a fotografare con dei rivelatori. Sull'anello del CERN ci sono quattro rivelatori. Dal rivelatore otteniamo dei dati, che inseriamo nel computer per visualizzare la fotografia. L'immagine che vedete è una delle migliori fotografie del Bosone di Higgs. Quei segni verdi che vedete sono, diciamo, le scie che sono state rilasciate nel rivelatore dal Bosone di Higgs. Abbiamo milioni di queste fotografie. Quindi, facendole vedere agli altri fisici, siamo in grado di affermare che quella cosa, che a occhio nudo non vediamo, esiste. Abbiamo inventato un altro tipo di microscopio.

Adesso vi mostro un breve filmato che mostra esattamente come funziona l'acceleratore al CERN. Gli oggetti che vedete girare sono dei pacchetti di protoni che vengono accelerati, prima in un anello più piccolo – pensate a una gara di Formula Uno: si inizia, si esce dal box, si entra in pista e si inizia a correre sempre più forte. Quella che vedete è un'immagine vera di LHC ripresa da un drone. Vedete il protone che entra nell'anello, poi arriva nella zona dove noi abbiamo l'enorme macchina fotografica. Guardate che succede. Si scontrano, producono tutto quello che si può produrre, tutto quello che è possibile, e noi lo catturiamo, lo fotografiamo con il rivelatore, che è la nostra macchina fotografica. Questi dati, questi oggetti, li prendiamo, li trasferiamo sui nostri computer, e ci lavoriamo per capire che cosa si è prodotto.

## Filippo Gaudenzi

Non bisogna vergognarsi di fare domande e io faccio una domanda da ignorante. Noi prendiamo dei protoni, ma il protone dove si compra? Si va da qualcuno a chiedere "Mi dà un protone?"

## **Donatella Lucchesi**

Il protone è quanto vi sia di più comune, sono dappertutto. Noi li prendiamo dall'elemento da cui è più facile trarli: l'acqua. Dal nucleo dell'acqua prendiamo i nuclei più facili da spaccare e li spacchiamo. Lo racconto così, in maniera semplice, però ci sono voluti anni di prove per riuscirci... Quando Marco Donetti diceva: «Fai clic e funziona», questo succede alla fine, ma prima ci sono stati tutti i clic in cui non funzionava...

Perciò, estraiamo i protoni, li impacchettiamo con qualcosa che forse alcuni di voi conoscono: campi elettrici e campi magnetici. Poiché sono particelle cariche, quando le infiliamo nei campi elettrici e magnetici riusciamo ad accelerarle. Li acceleriamo dando delle botte con questi campi elettrici e magnetici. Che cosa siamo arrivati a capire con questo sistema?

Riassumo tutto quello che sappiamo. Siamo formati – tutto è formato – da quark, e i quark, i mattoni fondamentali, sono pochi. La natura, come si suol dire, è semplice. Non è facile da studiare, ma è semplice. I quark sono sei: l'*up*, il *down*, lo *charm*, lo *strange*, il *top* e il *beauty*. È ciò di cui siamo fatti. Poi ci sono i leptoni, ossia gli elettroni – che conosciamo benissimo tutti quanti – i famosi neutrini – le particelle molto elusive che non si riescono ad acchiappare – i muoni, i tau o tauoni. Questo è quasi tutto, c'è qualche altro pezzettino di cui vi parlerò man mano che andiamo avanti.

Abbiamo questi mattoni, li dobbiamo però anche mettere insieme. Come farli stare insieme? C'è una cosa che si chiama forza. Cos'è la forza? Se ne parla tantissimo, ma se si chiede a qualcuno “Secondo te, cos'è la forza?”, gli è difficile rispondere.

Che succede se qualcuno vi dà una spinta o vi tira una pallina e siete sul ghiaccio? Si rincula, anche senza essere toccati. Se siete sul ghiaccio e qualcuno vi tira una palla, anche senza essere toccati, voi cadete, per terra, se la palla è grossa.

Queste sono le forze. È il modo in cui le particelle che vi ho mostrato prima parlano tra loro. Le particelle dialogano scambiandosi altre particelle. Dunque, ci sono i quark, gli elettroni, e poi i gluoni, ossia delle colle che tengono insieme la materia. Ci sono anche i fotoni, li conoscete vero? Dove sono i fotoni? Si trovano nella luce, ma ve ne sono anche di quelli che trasportano un certo tipo di interazione. Poi abbiamo i  $W^+$ ,  $W^-$  e gli  $Z^0$  con cui il nostro Carlo Rubbia ha vinto il Nobel al CERN qualche anno fa. Di un'altra particella vi parlerà il professor Ricci, il gravitone. Non è detto che ci sia, c'è un bel punto interrogativo su questa particella, perché questo ha a che fare con le onde gravitazionali. Noi negli acceleratori non l'abbiamo vista e penso che il professor Ricci vi dirà qualcosa in proposito. Infine abbiamo l'ultimo, il nostro grande favorito, il Bosone di Higgs.

A cosa serve il Bosone di Higgs? Nella teoria che noi abbiamo costruito, una teoria matematica, le particelle sono senza massa e per molti anni ci siamo detti: “Non stiamo capendo nulla. Come è possibile che noi vediamo la materia – la massa ce l'abbiamo tutti ma che, nella nostra teoria, le particelle siano senza massa?” Allora tre fisici, Brout, Englert e Higgs hanno ipotizzato l'esistenza un'altra particella, che hanno chiamato Bosone di Higgs. L'hanno proprio inventato, perché nella teoria è stato quasi messo a forza. Secondo la teoria, tutte le particelle, quando nascono, sono senza massa, poi passano attraverso il campo di Higgs, interagiscono con questo Bosone di Higgs e acquisiscono massa. Questo è quello che per adesso abbiamo capito con le nostre particelle. Non finisce qua, ma forse adesso volete sentire parlare del gravitone.

## **Filippo Gaudenzi**

Sì, darei la parola al professor Ricci su questo argomento.

## **Fulvio Ricci**

Mi spiace deludervi ma noi non abbiamo visto il gravitone. Se il gravitone esiste siamo nella situazione esattamente opposta: ne abbiamo visti una quantità stratosferica.

La situazione è analoga al caso dei fotoni. Il fotone è la rappresentazione corpuscolare della luce che si propaga. La luce, in realtà, è un fenomeno elettromagnetico. La luce è quella che sta illuminando il mio volto e che proviene da quella lampadina. Se, però, faccio un'analisi in termini di numero di fotoni, il numero di fotoni che stanno illuminando il mio volto è enorme. Se devo rappresentare il fenomeno elettromagnetico, che è la propagazione della luce dalla lampadina verso di me, non c'è bisogno di utilizzare il concetto corpuscolare di fotoni: abbiamo uno strumento molto più potente, ossia le equazioni di Maxwell, una rappresentazione classica in termini di onde. La luce è un'onda, come quelle del mare. Questo è uno strumento concettuale che utilizziamo per studiare il fenomeno della luce che si propaga. La situazione, per quello che concerne i gravitoni, è assolutamente analoga. Noi siamo in una fase molto più arretrata dal punto di vista dello studio della gravità rispetto allo studio dell'interazione elettromagnetica. Questo è un paradosso, perché la forza gravitazionale è la forza nota da più tempo. La prima teoria compiuta di fisica, relativa alla gravitazione, è dell'epoca di Newton. Lo studio dell'elettromagnetismo e l'interpretazione dettagliata dei

fenomeni luminosi viene molto più tardi. Nonostante questo, la gravità è rimasta per lungo tempo un fenomeno che nascondeva al suo interno tante cose non capite. Dobbiamo aspettare l'inizio del Novecento, esattamente il 1915, quando Albert Einstein fa una sintesi fondamentale, che è quella di riproporre una teoria della gravità, nota come teoria della relatività generale, che ne sconvolge la nostra visione. All'interno di questa teoria, si concepisce l'esistenza di un fenomeno analogo a quello della propagazione della luce, ossia la propagazione della forza gravitazionale, che si chiama onda gravitazionale. Per spiegare cosa è l'onda gravitazionale in dettaglio sarebbe necessario molto tempo, cercherò allora di fare una sintesi, perché il problema è relativamente complesso e coinvolge la nostra concezione di spazio. L'onda gravitazionale, in realtà, è una perturbazione delle proprietà dello spazio. Ho detto una serie di parolacce, su ciascuna delle quali dovrete riflettere un attimo. È una perturbazione del nostro concetto di spazio. La prima cosa da capire è cosa sia lo spazio per noi. Io credo che l'evoluzione fondamentale nella concezione dello spazio, la stiamo verificando tecnologicamente solo oggi. Mio padre era ingegnere edile e progettava case, quindi si occupava di spazio e, per la progettazione, usava uno strumento fondamentale che era la fettuccia, un metro analogo a quello del sarto, che misurava la distanza tra due punti. Oggi, se andate in cantiere, vedrete che il capomastro non usa più la fettuccia ma il laser, un oggettino che misura la distanza tra due punti lanciando il raggio di luce e poi misurando il tempo che il raggio impiega per arrivare all'obiettivo, rimbalzare e tornare indietro. Quindi la misura dello spazio è determinata sostanzialmente dalla propagazione della radiazione luminosa. Un oggetto di questo tipo si trova dal ferramenta, al costo di circa 40 euro o ancora meno. Dietro questa semplice osservazione si nasconde un cambiamento concettuale fondamentale: lo spazio è relativo così come è relativo il tempo. Tempo e spazio sono concetti relativi, non assoluti. La fettuccia che usava mio padre per misurare lo spazio, cambia di dimensioni a seconda dello stato di movimento dell'osservatore. Questo è il problema principale della fettuccia. Al contrario, la velocità della luce non cambia a seconda dello stato di moto dell'osservatore ed è attraverso di essa che ci possiamo rendere conto che lo spazio è cambiato.

Un'onda gravitazionale è un processo che determina una perturbazione dello spazio. Cosa significa? Significa che sta cambiando la distanza tra i punti dello spazio: se io provassi a misurare la distanza con la mia fettuccia non potrei capire quando arriva l'onda gravitazionale perché quello che succede è che anche la fettuccia cambia di dimensioni, cambia di lunghezza. Ma se ho due specchi distanti tra loro, all'arrivo dell'onda gravitazionale la distanza tra questi due specchi cambia, cioè al cambio delle proprietà dello spazio: si avvicinano e si allontanano perché stanno cambiando le proprietà dello spazio. Per accorgersene, bisogna far rimbalzare la luce tra questi due specchi: sfruttando la proprietà della velocità della luce, che è invariante – cioè la sua velocità non cambia – osservando il cambiamento del tempo che impiega la luce a rimbalzare tra questi due specchi, posso rendermi conto che lo spazio sta cambiando. Ho cercato di spiegarvi cosa sia l'onda gravitazionale, ovvero il cambiamento delle proprietà dello spazio, ma anche il modo con cui la misuro, utilizzando la luce che mi consente di rendermi conto che lo spazio sta cambiando. Usando questi due concetti fondamentali, sono in grado di capire che è questo processo, questo cambiamento dello stato dello spazio, che è stato generato da qualche lontano evento dell'universo.

Fino ad ora tutti i fenomeni astrofisici sono stati studiati utilizzando le radiazioni elettromagnetiche, in primis la luce. I primi studi sono stati fatti da Galileo puntando il cannocchiale e osservando la luce riflessa dalla Luna o da Giove. È la luce che ci ha chiarito che sulla Luna ci sono i crateri. Poi, oltre a usare la luce, ossia la radiazione elettromagnetica alle frequenze ottiche, abbiamo iniziato a osservare l'Universo alle frequenze infrarosse, le frequenze gamma, ai raggi x. Quando usiamo i raggi x, raggi gamma, luce, onde radio, stiamo sempre sfruttando il messaggero fondamentale che è la radiazione elettromagnetica. Con le onde gravitazionali abbiamo un altro messaggero, l'onda dello spazio che si sta deformando. Questo è un modo per studiare ciò che la luce non rivela, ovvero processi che non emettono luce. Quindi è un altro modo per osservare l'universo, è un altro modo per costruire una nuova mappa di quello che ci circonda. Il primo evento, la rottura di questo nostro stato di ignoranza o di conoscenza limitata, legata al fatto che usavamo solo e principalmente il messaggero legato alla radiazione elettromagnetica, è recentissimo: il 14 settembre 2015 abbiamo visto il primo segnale gravitazionale che abbiamo rilevato dall'emissione causata dal processo di collisione di due buchi neri, due oggetti che non emettono radiazione elettromagnetica, non emettono luce. L'unico modo per poter osservare fenomeni di questo genere era legato alla nostra capacità di rivelare le onde gravitazionali. Va detto però che le onde gravitazionali vengono emesse anche in processi nei quali avviene emissione elettromagnetica. Ad esempio, se invece di aver a che fare con collisioni di buchi neri, abbiamo collisioni di stelle – ancorché compatte, come quelle costituite di neutroni – che quando collidono emettono in onde radio, emettono in gamma, in questo caso avremo contemporaneamente l'emissione del messaggero elettromagnetico e l'emissione del messaggero gravitazionale. Questo diventa uno strumento potentissimo, perché avremo due canali diversi per studiare un processo straordinario come la collisione di due stelle di neutroni.

Questi che vedete nel filmato che vi sto mostrando, sono le due stelle che stanno spiraleggiando, emettono onde gravitazionali poi, al momento dell'impatto, emettono anche un violento getto di raggi gamma, ossia la radiazione elettromagnetica che ci dice, tra l'altro, cosa sta succedendo attorno al cuore dell'evento che è la collisione di questi

due oggetti. Nello studiare questo fenomeno – noi abbiamo ricevuto questa informazione nel 2017, ormai due anni fa – quando abbiamo visto il segnale gravitazionale, abbiamo comunicato rapidamente l'informazione ad una settantina di gruppi che avevano telescopi e, da tutto il mondo, hanno provato a puntare dove gli dicevamo noi e hanno osservato il messaggero elettromagnetico. Abbiamo ricostruito così tutto il fenomeno. Tra l'altro, abbiamo visto una cosa bellissima: attorno al cuore questi due oggetti collassati, in quella grossa immagine che avete visto, in tutta la luce che si creava, c'era anche l'informazione che si stavano formando l'oro, il platino, gli elementi pesanti che poi sono quelli che noi usiamo tutti i giorni, gli elementi che ritroviamo ad esempio nelle batterie del computer. Non era chiaro, fino al momento di questa osservazione, come e quando questi elementi più pesanti del ferro si fossero formati nell'universo, oggi ne abbiamo una chiara evidenza.

Ci sono voluti cento anni per vedere le onde gravitazionali: Einstein ne predice l'esistenza e presenta il suo studio a riguardo nel 1916. Più precisamente lo presenta nel 1915 e lo pubblica nel 1916. Poi, però, c'è voluto lo sforzo di una enormità di persone per riuscire a concretizzare, vedendo questo nuovo messaggero che ci fa osservare l'invisibile.

### **Filippo Gaudenzi**

Dunque, noi abbiamo osservato adesso quello che è accaduto un milione e duecento mila anni fa?

### **Fulvio Ricci**

Questi sono eventi che avvengono lontano da noi. Molto lontano da noi. La luce si propaga con una velocità finita. Sono trecentomila chilometri al secondo. In questo caso il segnale ha dovuto camminare per lungo tempo per arrivare fino a noi. Quindi il fenomeno dello scontro è avvenuto più di un milione di anni fa e oggi noi vediamo quello che è accaduto nel passato. Vogliamo capire se sia possibile vedere prima? Questo ve lo dico dopo.

### **Filippo Gaudenzi**

Dunque, quello che sta accadendo adesso non lo vedremo mai?

### **Fulvio Ricci**

Noi no, loro forse! Gli auguro lunga vita

### **Filippo Gaudenzi**

Ma se ci vuole un milione di anni?

### **Fulvio Ricci**

Ancora di più, guardi, perché lei si è fermato su questa slide Il collasso dei due buchi neri di cui parlavo è avvenuto un miliardo di anni fa.

### **Filippo Gaudenzi**

Quindi il concetto dello spazio e del tempo è infinito. Cioè non riusciamo neanche a misurarlo?

### **Fulvio Ricci**

Il concetto di infinito ci fa venire un po' di mal di pancia. Perché che cosa significa infinito sarebbe una lunga discussione. Come è disposto l'universo? L'universo è una sfera? E' una sfera che si sta allargando? E' come un palloncino che si sta gonfiando?

### **Donatella Lucchesi**

Se volete ho un breve filmato sull'universo.

[*proiezione video – voce fuori campo*]:



«Oggi, alla mia età di quattordici miliardi di anni, può sembrare strano che io riesca a raccontarvi la mia infanzia. Le scoperte dei fisici però mi aiutano a ricostruire il tempo remoto in cui venni al mondo. Anche se, a dire il vero, il mondo, l'universo, cioè me stesso, non esisteva ancora. Così come il tempo, lo spazio, la luce e la materia. Non c'era in effetti proprio niente. Il nulla. Io, infatti, di quei primissimi istanti, non ricordo granché, ma mi dicono che appena nato ero piccolo, ma davvero piccolo, densissimo e caldo. Ero grande come un pallone da calcio, ma già contenevo tutta la materia dell'universo che voi conoscete. Solo i meccanici quantistici sanno descrivermi e raccontarmi oggi quello che succedeva allora, nell'era di Planck. Un'era che durò del resto meno di un battito di ciglia, dopo di che accadde qualcosa di straordinario. Cominciai a gonfiarmi sempre più velocemente, mentre le mie parti si allontanavano a una velocità più grande di quella della luce. Mi sentii stirato e appiattito. Ma pieno di energia. In pochi ziliardesimi di secondo ero cresciuto miliardi di volte e alla fine esplosi in un lampo abbagliante. È quello che voi chiamate Big Bang. Poi ci furono tre minuti di inferno. Nacquero i costituenti fondamentali della materia: i quark. E subito si nascosero nei protoni e nei neutroni, che a loro volta cominciarono a urtarsi in un mare di altre particelle e radiazioni: i fotoni e i neutrini. La materia oscura, invece, immensa e fredda, stava a guardare e faceva sentire il suo peso. Passati i tre minuti ebbi un po' di tranquillità. Continuavo ad espandermi ma molto più lentamente. I nuclei primordiali, la luce, gli elettroni, formavano dentro di me una grande zuppa, mischiandosi e scontrandosi, senza però raggiungere un vero equilibrio e andai avanti così per altri trecento mila anni. Poi finalmente il mio corpo, cioè l'intero universo, apparve in tutto il suo splendore. Generai un enorme bagliore, si formarono gli atomi e si liberarono i fotoni, che si diffusero ovunque. Quella è la mia fotografia più bella e ancora ne conservo, anche se dispersi in tutto lo spazio, i suoi frammenti. Solo nei miliardi di anni a seguire si sarebbero generate le galassie e le stelle e in esse i nuclei necessari alla vita e tutto ciò che oggi voi uomini chiamate universo».

Questo è uno dei filmati dell'INFN. In questa slide vedete quello che si è detto prima. Il Big Bang viene associato a un'esplosione. Non è detto, in realtà, che sia stata un'esplosione: è, diciamo noi, una discontinuità. Succede qualcosa, si crea una discontinuità e, in questo momento, si forma la materia, prima si ha un equilibrio tra tutto quello che c'era, particelle e antiparticelle – di cui non abbiamo ancora parlato. È allora che si formano, almeno stando alle teorie più attuali – perché, non avendolo misurazioni, utilizziamo per il momento la teoria – anche lo spazio e il tempo. Come diceva prima il professor Ricci, se l'universo sia sferico o non lo sia, se continuerà a espandersi o si contrarrà, questo non possiamo determinarlo con certezza. Comunque, non c'è da preoccuparsi. Ricordo che quando Hawking andò in Giappone gli fu chiesto di non menzionare l'universo pulsante, perché avrebbe potuto influenzare il mercato, e lui rispose di stare tranquilli che per qualche miliardo di anni non ci sarebbe stato problema.

### **Filippo Gaudenzi**

Vorrei farvi la domanda più difficile del mondo, visto che voi esplorate cose che non si vedono e di cui ancora capiamo poco. Vi domando: scienziati, è tutto casuale? Questo universo che ci sembra così perfetto, con il sole che sorge, poi sale, la terra che gira, le stagioni, il movimento, la nascita, la crescita, il deperimento, la morte. Tra poco sarà primavera, rivedremo gli alberi sui quali spunteranno le gemme, poi ci saranno i fiori e i fiori daranno i frutti, che matureranno, li coglieremo, li mangeremo. Questa perfezione, questa armonia, è tutta casuale? C'è un principio ordinatore, secondo voi?

### **Donatella Lucchesi**

Noi sappiamo descrivere quello che scopriamo, compresi i corpi, le cose più complesse, attraverso delle regole, con quella matematica di cui parlavamo prima. Possiamo aver bisogno di equazioni molto difficili per descrivere corpi, come fa la Fisica statistica. Abbiamo processi che coinvolgono tantissimi corpi, difficili da descrivere, però le regole fondamentali sono piuttosto semplici. Una volta comprese, ci paiono semplici, ma prima di averle capite sono molto difficili. Se ci si chiede il perché di tutto ciò, questo è un altro lavoro, però il modo in cui queste cose avvengono lo conosciamo.

### **Filippo Gaudenzi**

A me interessava proprio capire qual è il punto di crisi dello scienziato.

### **Fulvio Ricci**

Allora, noi siamo persone, abbiamo dei chiarissimi limiti. Il fisico, mediamente, si chiede il perché di certi processi e cerca di spiegare come avvengono le cose e di fare delle previsioni su come avvengono. Ma la questione teologica non è il nostro mestiere, non è il nostro compito. Detto questo, noi siamo al confine con la filosofia. Tra l'altro, uno dei motivi per cui, invece di iscrivermi a ingegneria seguendo l'influenza paterna, sono andato a fare il fisico fu perché avevo studiato un pochino di filosofia e quindi cercavo di spingermi a capire il perché delle cose. Poi ho capito meglio quale sia il mestiere del fisico. Il mestiere del fisico è di capire quali sono le regole fondamentali del gioco e poi fare delle previsioni. Per capire quali sono le regole bisogna sviluppare delle teorie che poi si confrontano con le misure, si confrontano con quello che si osserva in natura. Non siamo le persone che possono dare delle risposte più profonde sul perché l'universo sia stato creato. Nello specifico della domanda, in realtà è vero e non è vero che siamo tutti legati a questa grande armonia. Ci sono delle regole fondamentali del gioco che stiamo cercando di capire fino in fondo, però queste regole, ci confondono un po' le idee, perché al loro interno c'è del casuale. Se io guardo, ad esempio, la distribuzione della radiazione cosmica di fondo, del fondo dell'universo, come nell'immagine che vi mostro, vedo un'immagine che è simile allo schermo di un televisore acceso al quale è stata staccata l'antenna: c'è casualità dentro.

Ci sono dunque delle regole che ci consentono di seguire l'evoluzione di processi ben determinati, però c'è anche il caso. Einstein diceva: "Dio non gioca a dadi", una famosa frase contro la meccanica quantistica. In realtà un pochino Dio gioca a dadi. La verità è che il ponte tra la descrizione deterministica e quindi l'imposizione di regole rigide nel processo di sviluppo dell'universo, e la casualità è un punto aperto delle discussioni dei fisici che cercano di capire come coniugare queste due visioni fino in fondo, di trovare il ponte tra le regole deterministiche tipiche ad esempio della relatività generale e le regole dominate dal caso, che sono le regole della meccanica quantistica.

### **Filippo Gaudenzi**

Ho fatto questa domanda perché, nel vedere quel filmato, un po' di sgomento l'ho avuto. Aver ricostruito come l'universo si è formato, in tre minuti, da una palla da calcio... tutto contenuto là dentro e tutto si è espanso da là. Posso avere delle convinzioni, avere la fede, che di per sé è una cosa indimostrabile, però certo tutto questo mi colpisce. Dio non gioca a dadi, però sembra abbia giocato a palla, perché questa palla *qualcuno* ce l'avrà messa. La mia domanda era rivolta più all'uomo e alla donna che agli scienziati. Perché, se è vero che la filosofia coincide con il porsi domande, quando si tocca con mano, quando si vede al microscopio qualcosa che è infinitamente piccolo e che avrà anche le sue regole ma anche la sua dose di casualità, io mi domando, l'uomo – non lo scienziato – si chiede: ma che succede qua?

### **Donatella Lucchesi**

Visto che abbiamo generato un po' di sgomento con questa palla iniziale, posso aggiungerne dell'altro costituito dalle antiparticelle, dall'antimateria? Perché c'è anche quella. Le antiparticelle, e quindi l'antimateria, vengono scoperte, anzi postulate, quasi per caso, da Dirac, un fisico che stava cercando di descrivere matematicamente gli elettroni che vanno alla velocità della luce, ricorrendo alla meccanica quantistica. È arrivato così a un'equazione, che conoscete bene:  $x^2 = 4$ . Le soluzioni di  $x^2 = 4$  sono due. Una, quella positiva,  $x = 2$ , erano gli elettroni, ma quella negativa? Gli dicevano che doveva aver sbagliato qualcosa. Ma Dirac era sicuro di non aver sbagliato niente. Allora postulò che quella negativa,  $x = -2$ , fosse l'antiparticella, dunque l'antimateria, che lui chiamò positrone.

Però, come sempre, noi fisici vogliamo vedere, quindi ci siamo messi alla ricerca di queste antiparticelle. In effetti il mondo è pieno di antiparticelle: all'inizio, nell'universo, quella famosa palla che tanto vi ha turbato, era un equilibrio tra materia e antimateria, perché tutte le particelle hanno la loro antiparticella. I quark hanno gli anti-quark, i leptoni hanno gli anti-leptoni. Anche le particelle composte hanno la loro antiparticella: il protone, che è fatto da tre quark, ha la sua antiparticella, che si chiama anti-protone. Siamo riusciti a ottenere in laboratorio l'anti-elio; quindi l'atomo di elio, una struttura complicata, ha il suo anti. Quindi l'antimateria esiste. Perché non la vediamo allora? Guardate cosa succede: quando materia e antimateria si incontrano, si annichilano e scaturisce solo energia. Come siamo finiti in un universo fatto di materia? Se abbiamo tempo ne parliamo tra un po'.

### **Filippo Gaudenzi**

Vuol dire che c'è un altro universo?

### **Donatella Lucchesi**

Non si sa... Vi lascio con questo dubbio. Ho parlato dell'antimateria non solo per dimostrarvi che in effetti esiste, esiste eccome. Spesso, all'inizio, non sappiamo che applicazione pratica possa avere quello di cui ci occupiamo. Quando abbiamo scoperto le antiparticelle, non sapevamo cosa farcene. Guardate poi a che cosa sono serviti i positroni: vengono utilizzati per fare la PET, un esame che, purtroppo, quasi tutti prima o poi fanno. Di applicazioni di questo tipo ce ne sono tantissime. È il lavoro che Marco Donetti fa giornalmente, forse anche la notte ogni tanto.

### **Marco Donetti**

Non so se sapete come funziona la PET. Esistono degli elementi radioattivi che, per loro natura, hanno la capacità di creare positroni. Sono nuclei radioattivi che, a un certo punto, per raggiungere una stabilità emettono un positrone. Un positrone nel nostro mondo ha vita molto breve. Positrone vuol dire antimateria e, in un mondo fatto di materia, il positrone ha veramente pochissima speranza di sopravvivere.

Quello che accade è che il positrone incontra un elettrone. Il primo è antimateria, il secondo materia e, appena si scontrano, si annichilano, cioè spariscono, e vengono sparati due fotoni. I due fotoni, per poter mantenere un centro di gravità del sistema, devono andare in direzione opposta l'uno dall'altro.

Noi introduciamo nel corpo di un paziente le sostanze radioattive capaci di emettere positroni che scontrandosi con gli elettroni, emettono due fotoni. Se posizioniamo attorno al paziente dei rilevatori – che vedono i due fotoni e, dunque, ci segnalano che è avvenuta un'annichilazione – possiamo misurare il tempo impiegato da ognuno dei due fotoni ad arrivare al rispettivo rilevatore, ottenendo due misure differenti che ci permettono di calcolare la differenza di tempo, e di sapere dunque dove quell'annichilazione è avvenuta nel paziente.

Per studiare le patologie, si usa una particolare sostanza chimica che va a raggiungere la cellula tumorale – tipicamente il glucosio perché i tumori ne consumano tantissimo. In questa sostanza viene inserito l'elemento radioattivo che emette il positrone, che ci permette di vedere dove questa è arrivata. L'immagine mostra ciò che succede quando viene eseguita una PET a un paziente: la sostanza, iniettata nel sangue, viene catturata dal tumore che ne ha bisogno, emette i due fotoni e noi vediamo dove questo è avvenuto.

C'è anche un altro esempio che usiamo quasi quotidianamente, riguardo a questa emissione di positroni. Quando bombardiamo i tumori con gli ioni carbonio, i nuclei, composti da sei protoni e sei neutroni, interagiscono con la materia e possono avere delle reazioni nucleari, diventando a loro volta degli elementi che emettono positroni. Dove gli ioni immessi nel paziente si fermano, dove sono passati, lasciano una leggera traccia di positroni.

Questi positroni vengono annichilati dagli elettroni che sono nelle vicinanze, emettendo i fotoni che i rilevatori permettono di vedere e possiamo sapere dove si fermano le particelle che noi mandiamo.

### **Filippo Gaudenzi**

Questo, diciamo, è per la rilevazione. Invece poi c'è anche una fase in cui si va a colpire il tumore.

### **Marco Donetti**

Sì. I centri dove vengono curati i tumori con gli ioni carbonio sono pochissimi, stiamo parlando di una decina circa in tutto il mondo. Il punto critico è accertarsi che le particelle vadano effettivamente nel volume tumorale, poiché, ovviamente, durante l'irraggiamento, si osserva il paziente solo dall'esterno e non si sa ancora dove sia il tumore. L'utilizzo di sistemi che permettono di capire dove effettivamente le particelle si fermano è dunque molto importante. Si usano sia nella diagnostica medica sia per verificare la correttezza di cosa si sta facendo, ossia che le particelle stiano effettivamente raggiungendo l'interno del tumore.

### **Filippo Gaudenzi**

Quindi, se si accende quella particella, se vengono generati i due fotoni, vuol dire che, al cento per cento, lì c'è il tumore...

### **Marco Donetti**

Inizio a mostrarvi la mia presentazione in modo da spiegarmi meglio. Lavoro per il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica, che è sostanzialmente un ospedale, un centro di cura a Pavia. Viene considerato, nell'ambito dell'offerta del Servizio sanitario nazionale, veramente un'arma di eccellenza per la cura dei tumori.

Questa Fondazione è nata nel 2001 ed è stata creata dal ministero della Salute. Il suo scopo è trattare i pazienti mediante l'adroterapia e svolgere la ricerca nell'ambito clinico e radiologico. Abbiamo iniziato a lavorare nel 2001 e dieci anni dopo abbiamo trattato il nostro primo paziente. A proposito del "Fare *clit* e vedere che tutto funziona, è un'emozione pazzesca", non dimenticherò mai il giorno in cui abbiamo trattato il nostro primo paziente. Una giornata stressante ma di enorme soddisfazione per tutti, giacché l'acceleratore del CNAO l'abbiamo costruito noi, in collaborazione con delle ditte e con l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, senza il quale non vi saremmo mai riusciti. Ma, la realizzazione concreta, "stringere le viti", è stata frutto del lavoro delle persone del Centro. Sebbene, per questo, non voglia definirmi uno scienziato, quando si lavora in progetti di punta simili, oltre a quello che io chiamo "portare la carretta", oltre al lavoro di manutenzione e costruzione, o alla saldatura elettronica, in realtà ciò che si fa è propriamente scienza.

Anche se insieme alla scienza, in queste cose, c'è tantissima tecnologia. Quindi non bisogna pensare che l'aver seguito studi superiori di tipo tecnologico ci escluda da questo mondo. C'è bisogno degli scienziati, dei teorici ma anche di persone che abbiano senso pratico, che sappiano e abbiano il coraggio di mettere mano agli oggetti, di capire come funzionano e di avere la forza di farli funzionare.

Il nostro primo paziente è stato veramente molto importante per noi. È tuttora vivo, ma è arrivato con un'aspettativa di sei mesi di vita. Adesso è sposato, ha un bambino. Non so che cosa capiterà in futuro, però so che il nostro lavoro ha fatto sì che questo ragazzo oggi sia vivo. Non sono un eroe, ma vi dico che nel mondo della ricerca, delle applicazioni medicali, ci sono tantissime soddisfazioni.

Dal primo paziente alla fine del 2018, abbiamo trattato 2100 pazienti.

Stiamo parlando di radioterapia. La radioterapia si può utilizzare quando il tipo di patologia tumorale ha una massa definita. Se ci sono metastasi bisogna affrontare il problema da un punto di vista sistemico, mandando gli elementi curativi nel sangue, e non è di nostra competenza. Ci sono tantissime strutture in Italia che eseguono la radioterapia. Funzionano benissimo, ma non su tutti i tumori: ci sono tumori molto vicini agli organi critici, oppure quelli che vengono chiamati radioresistenti, che possono essere curati con la terapia basata sulle particelle. In questa immagine [mostra slide] vediamo il numero di pazienti che abbiamo trattato nel corso degli anni. Purtroppo questa linea non continuerà a salire così, perché a un certo punto si arriverà alla saturazione ma, adesso, riusciamo a trattare 600 pazienti all'anno.

Abbiamo parlato della struttura atomica. L'atomo è composto da protoni e neutroni; le forze che uniscono i quark all'interno dei protoni e neutroni si chiamano forze forti. Di conseguenza, queste particelle si chiamano adroni e, a partire dal loro nome, è nato il nome adroterapia, ossia la terapia basata su particelle che vengono governate dalla radiazione forte. Come dicevo, la radioterapia viene effettuata con l'utilizzo delle radiazioni ionizzanti. È una terapia che nel nostro gergo definiamo convenzionale – anche se tanto convenzionale non è – basata su elettroni e su fotoni: si possono mandare nel paziente gli elettroni o si possono mandare i fotoni che vengono generati da un acceleratore di particelle, che in realtà accelera elettroni, oppure si possono usare protoni e ioni carbonio.

Che cosa sono i protoni? I protoni costituiscono anche il nucleo dell'atomo di idrogeno. Noi non lo otteniamo dall'acqua ma dalle bombole di idrogeno, che come sapete è una molecola composta da due atomi, ognuno formato da un protone e un elettrone che gli gira intorno. Mettiamo l'idrogeno in un sistema che si chiama sorgente, in cui scaldiamo talmente tanto il gas da farlo diventare un plasma. Il plasma è uno stato della materia – l'unico presente all'inizio della creazione dell'universo – in cui non c'è più il nucleo con l'elettrone che gli gira attorno, ma una sorta di grande "marmellata", cioè protoni ed elettroni che si muovono liberamente.

Questo è il plasma. Le particelle sono cariche: i protoni sono positivi, gli elettroni sono negativi. Creando un campo elettrico, applicando una forza di tipo elettrico, si riesce a spostare le particelle da una parte all'altra. Quindi si mandano verso un forellino i protoni che, una volta usciti, vengono raccolti da un campo magnetico e iniettati dentro l'acceleratore.

Per quello che riguarda gli ioni carbonio, partiamo da una bombola di anidride carbonica. Anche in questo caso si riscalda tutto, creando un miscuglio di atomi di carbonio, di ossigeno, intorno ai quali girano i loro elettroni, e da cui si riesce a estrarre le particelle che sono ioni carbonio.

La terapia avviene attraverso la rottura, causata dalla radiazione, della doppia elica del DNA. In questo caso si ottiene una particella che viaggia dentro il corpo del paziente e che è detta ionizzante, ha carica positiva mentre il corpo è neutro, perché ha protoni ed elettroni. Gli elettroni sono duemila volte più leggeri rispetto ai protoni dunque questa particella, un protone bello forte ed energetico trova gli elettroni sulla sua strada e inizia a spiarli via. Non li colpisce meccanicamente ma attraverso la forza elettromagnetica. Poiché i legami chimici all'interno della materia sono retti dagli elettroni, che vengono condivisi da diversi atomi, togliendo l'elettrone si rompe un legame chimico e, se questo legame chimico fa parte del DNA, si rompe il DNA. Se vogliamo uccidere una cellula tumorale, le possiamo dunque distruggere il DNA. Quando il DNA si rompe, la cellula continua a vivere per un po' ma non è più capace di replicarsi, perché non è più capace di costruire il meccanismo per potersi duplicare e, di conseguenza, muore.

Questo è il principio della terapia con le radiazioni ionizzanti. Però, ogni particella si comporta in un modo diverso, ed è per questo che è nata l'idea dell'adroterapia, della terapia con le particelle. Osservate il grafico che vi sto mostrando. Immaginate che questa linea verticale sia l'ingresso, ossia la pelle del paziente, e immaginate che a circa 25 centimetri ci sia una massa tumorale. In questo caso stiamo parlando di una profondità di un centimetro e mezzo, due centimetri, quindi è un tumore piccolo. Come si fa, con la radiazione, ad arrivare a distruggere il DNA di queste cellule tumorali? Si entra dalla pelle. Nel caso di una terapia di tipo convenzionale, ossia i raggi gamma, quindi fotoni, dobbiamo tenere presente che il comportamento dei fotoni all'interno della materia – che è composta di elettroni e di nuclei – segue un andamento di tipo esponenziale: abbiamo una grande interazione all'inizio, poi, poco per volta, la capacità di distruggere il DNA, diminuisce.

Quindi, per trattare un tumore che è in una posizione interna, si finisce per distruggere sia il DNA buono sia quello cattivo, di conseguenza ho un effetto di danno alle cellule, più grande vicino alla pelle rispetto alla posizione in cui io ho il tumore. Questo perché i fotoni, all'interno del paziente, si comportano così: poco per volta la loro intensità diminuisce.

Mentre, con le particelle, la cosa è completamente diversa, perché è come se si usasse una specie di palla da biliardo, ossia il nucleo di un atomo di carbonio ottenuto con l'acceleratore. Questa palla, essendo un nucleo, è positiva e, entrando nel corpo del paziente, fatto di tantissime particelle elettricamente cariche, tutte le volte che colpisce un elettrone perde energia. Quindi entra, è veloce perché ha una certa energia e, poco per volta, la sua energia diminuisce. Man mano che rallenta, acquisisce una capacità maggiore di interagire con gli altri elettroni. Immaginate una persona che corre in mezzo a una folla: quando corre veloce non vede nessuno, quindi rallenta e, man mano che rallenta vede sempre più gente. E quindi che cosa succede? Rallenta ancora di più.

Questo fa sì che le particelle che usiamo non passino il paziente da parte a parte, come fanno i fotoni, ma entrino nel paziente, finché, a un certo punto, si fermano, perché hanno una determinata energia. Se si cambia l'energia con la quale si mandano le particelle nel paziente, queste andranno a una profondità diversa. L'effetto, dal punto di vista della distruzione del DNA è quello che vedete in questa curva: abbiamo poco effetto all'inizio, poi continuiamo a rallentare, finché abbiamo un grandissimo effetto, subito prima di fermarci. Questo è il picco di Bragg e rende possibile mandare il fascio e farlo fermare esattamente all'interno del volume tumorale. Vi mostro l'immagine della TAC di un paziente: la parte rossa è il tumore da trattare, quindi bisogna dare energia all'interno di questo volume. Se si usano fotoni, all'ingresso l'effetto è maggiore rispetto a quello che si vorrebbe, poi l'effetto continua anche oltre il tumore. Mentre, nel nostro caso, vediamo che la dose effettivamente rilasciata all'esterno del tumore è minore. Inoltre, le particelle si fermano e non vanno oltre, quindi c'è una zona che non viene irraggiata. Questo è il motivo per cui con questa tecnica si possono trattare tumori che sono vicini agli organi critici, evitando di danneggiare con le radiazioni l'organo vicino e un conseguente danno al paziente, risultato non raggiungibile con la terapia convenzionale. Questo è il grande vantaggio degli adroni.

Abbiamo però anche un altro effetto: mentre i fotoni non cambiano il loro comportamento man mano che procedono nel paziente, e quindi il loro impatto in funzione della profondità è sempre lo stesso, nel caso degli ioni carbonio le particelle hanno un'interazione sempre più forte man mano che rallentano. Cosa vuol dire interazione più forte dal punto di vista dell'interazione della radiazione con la materia? Avere danni più vicini.

Questo [mostra slide] è un trattamento con i raggi X. Vedete l'elica del DNA, questo è un fotone che passa e qui c'è un'interazione. L'interazione non fa quasi niente al DNA. Rompe il DNA in quello che chiamiamo "modo semplice". Mentre, per quanto riguarda gli ioni carbonio, succede che all'inizio, quando vanno veloci, hanno poca capacità di distruggere il tumore ma quando si stanno per fermare, il numero di interazioni aumenta tantissimo, facendo sì che il danno sul DNA sia molto molto più forte.

Il DNA è una macchina eccezionale, si rompe in continuazione. Quando una cellula si divide, il DNA si rompe e poi si sa ricostruire. Con dei danni semplici, cioè danni che avvengono su una sua sola catena, il DNA riesce a ripararsi, perché c'è l'altra elica di fianco che permette la riparazione cellulare. Nel caso del trattamento con gli ioni, soprattutto con gli ioni carbonio, dato che la densità di ionizzazione è molto concentrata, si rompono le due eliche. A quel punto i due pezzi di DNA, separati tra di loro, non sono più capaci di agganciarsi. Questo fa sì che, dal punto di vista puramente fisico, diciamo balistico, di traiettoria, con le particelle si riesce a trattare bene il volume tumorale e inoltre si ottiene un danno di un'efficacia che con i fotoni non è raggiungibile. È la ragione per cui diciamo che con radiazioni di questo genere possiamo trattare tumori radioresistenti cioè quei tumori che, per le loro caratteristiche, una volta irraggiati riescono a ricostruire il proprio DNA.

## Filippo Gaudenzi

Grazie, perché questa è una frontiera veramente fondamentale per tutti noi. Siamo quasi arrivati alla conclusione e vorrei fare un'ultima domanda: qual è il vostro obiettivo adesso?

### **Donatella Lucchesi**

Al CERN stiamo lavorando al miglioramento della macchina, acceleratore LHC, stiamo cercando di costruire dei rivelatori, macchine fotografiche, ancora più potenti, per chiarire alcuni punti.

Il primo è: perché c'è questa differenza tra materia e antimateria? Perché siamo finiti in un mondo di materia? Come ho già detto, ci siamo finiti perché la materia era un pochino di più, ma proprio poco di più. In realtà, quindi, la cosa pesante di cui abbiamo parlato si è tutta annichilita. È una differenza che vogliamo capire e speriamo riuscirci.

Il secondo punto è: esiste veramente e si può andare oltre il Bosone di Higgs? È possibile che le forze che abbiamo visto – la forza forte, quella elettromagnetica, quelle deboli – siano in realtà, arrivate proprio all'inizio, come un'unica forza che poi si attua nel mondo così, in tre modi diversi. Speriamo dunque di fare un passo avanti, studiando, andando indietro – dico indietro perché, con le onde gravitazionali, guardare lontano vuole dire anche guardare indietro nel tempo quindi andando oltre il Bosone di Higgs.

### **Fulvio Ricci**

Noi andiamo a caccia di nuovi segnali. Abbiamo visto le collisioni dei buchi neri, abbiamo visto le collisioni di stelle di neutroni ma c'è una pletera di altri tipi di segnali che si possono cercare di individuare con i rilevatori, che abbiamo rinnovato. Abbiamo introdotto nuova tecnologia. Come si diceva, la tecnologia è cruciale in questi esperimenti. Ora le mie grandi aspirazioni, i sogni di un fisico, sono due.

Se, con le onde gravitazionali, riuscissimo a vedere la radiazione cosmica di fondo gravitazionale, potremmo andare a studiare cosa è successo in un tempo estremamente vicino alla grande esplosione. Il grande vantaggio dell'onda gravitazionale, che è anche il suo grande vizio, è che interagisce pochissimo con la materia. Questo significa che quando c'è stata la grande esplosione iniziale, le onde gravitazionali quasi subito si sono disaccoppiate dalla materia pressoché imperturbate. Se riuscissimo a captare questo tipo di onde, potremmo capire cosa sia successo a frazioni di secondo dal momento della prima esplosione. Questa è però un'impresa molto difficile, ed è quello che lascio, anzi che lasciamo - perché siamo un migliaio di persone a lavorare su questo – in eredità a voi giovani.

Il secondo sogno è ancora più fantascientifico. Vi mostro una slide. Einstein, negli anni Trenta, insieme con un suo discepolo, Rosen, anche egli un grande teorico, trova una soluzione particolare di queste equazioni che prevede l'esistenza di strani oggetti: *i wormhole*. Cos'è un *wormhole*? Un passaggio da un punto all'altro dello stesso universo, o da un universo a un altro universo. Tuttavia, allo stato attuale delle nostre conoscenze, i *wormhole* sono per ora una soluzione matematica di complesse equazioni di campo della relatività di Einstein. Ma noi siamo fisici, non siamo matematici. La prima cosa che dobbiamo fare è capire se, a fronte di queste soluzioni matematiche, questi oggetti esistono o non esistono davvero, quindi dobbiamo cercare un'evidenza. L'unico modo per ottenerla, è osservare la caratteristica emissione di onde gravitazionali quando qualcosa cade dentro il *wormhole*. Quindi il sogno è di andare a caccia di *wormhole* e, se esistono, vedere se grazie ad essi, riusciamo a viaggiare nel tempo.

### **Filippo Gaudenzi**

Grazie al professor Fulvio Ricci, alla professoressa Donatella Lucchesi, a Marco Donetti. Devo dire, abbiamo parlato di materia, spazio, tempo e il tempo oggi ce lo avete fatto volare. Grazie, e grazie a voi.