



Prolusione del prof. Fulvio Parmigiani, ordinario di Fisica della Materia

Luce e Materia

Magnifico Rettore, signor Presidente della Conferenza dei Rettori,
Autorità, chiarissimi colleghi, carissimi studenti, signore e signori,

innanzitutto mi corre l'obbligo di ringraziare il Rettore per l'invito
che mi ha rivolto a tenere la prolusione per l'apertura di questo anno

accademico. Voglio altresì ringraziare i colleghi del Dipartimento di Fisica per la fiducia e l'incoraggiamento che hanno manifestato.

Il titolo della mia prolusione è "Luce e materia". È un titolo impegnativo. Lo scopo è quello di illustrarvi, nel modo più semplice che mi sarà possibile, la natura della luce e l'interazione della luce con la materia. Nel contempo, vi illustrerò è anche quella che ritengo l'impresa scientifica più importante che si è sviluppata in Italia nell'ultimo decennio. Ovvero, la realizzazione di una sorgente di laser a elettroni liberi, costruita accanto all'anello di accumulazione Elettra a Basovizza. Sorgente che, con grande orgoglio, posso dire unica al mondo. A Trieste è stato costruito il primo laser a raggi X.

La luce e la materia stanno all'origine del nostro Universo, ma per osservare luce e materia servono dei rivelatori. Il nostro occhio è un esempio di rivelatore, seppure esso sia sensibile solo a una frazione molto piccola della radiazione dell'Universo.

Lo studio della interazione tra la luce e la materia e quindi la fisica che descrivere la luce, la materia e la loro influenza reciproca, ci permette di conoscere la natura della luce e della materia e quindi trarre, da questa descrizione, conoscenze che diventano tecnologia e manipolazione della luce e della materia.

Per fare questo, la nostra specie ha dovuto sviluppare delle forme intellettive avanzate che si possono ricondurre alla capacità di astrazione e quindi alla creatività. L'Uomo ha dovuto immaginare

cos'è la luce e quindi realizzare esperimenti in grado di confermare quello che un modello astratto, fondato su un linguaggio matematico, è in grado di descrivere e prevedere. Da questo processo nasce la conoscenza della fisica e nel nostro caso la natura dell'interazione tra luce e materia.

In termini artistici questo pensiero è ben sintetizzato dalle sequenze iniziali del film di Stanley Kubrick *2001 Odissea nello spazio*.

Le prime luci che ha visto l'Uomo sono state quella del Sole e, probabilmente, quella dei lampi durante un temporale. A noi piace pensare che furono i lampi a stimolare nell'Uomo l'idea del fuoco e con questo, oltre all'idea di calore, anche quella di luce artificiale e direttamente manipolabile.

Da questo semplice inizio, che tuttavia ha richiesto decine di migliaia di anni, la nostra specie è arrivata alle conoscenze di oggi sulla natura della luce, della materia e della loro interazione. Una



conoscenza che non si limita alla scienza e alla tecnologia, ma che nel corso degli ultimi millenni ha prodotto, per esempio con la pittura, sublimi opere d'arte. Così l'Uomo ha imparato che il colore, rilevato dal nostro occhio ed elaborato dal nostro cervello, risulta dall'interazione tra la luce e la materia.

Tuttavia, la luce è molto di più di quella visibile. La luce può essere anche una radiazione X o un'onda radio. La prima ci permette di analizzare, per esempio, la struttura della materia, biologica, organica o inorganica. Sfruttando il principio del contrasto di assorbimento è possibile osservare la struttura scheletrica o gli organi interni degli esseri viventi fino a raggiungere, con le moderne sorgenti di luce di sincrotrone, la possibilità di osservare la struttura interna di una cellula con risoluzioni pari a qualche milionesimo di metro, unità questa, nota come nonometro. D'altra parte la stessa radiazione X ci permette di analizzare e studiare la struttura elettronica di materiali molto complessi e quindi di governarne le proprietà.

La descrizione analitico-matematica della luce nasce da una teoria che fonda le sue radici tra la fine del '700 e gli inizi dell'800, e si sviluppa durante tutto il secolo XIX con Faraday, Volta, Ampère e Coulomb, per citare i nomi più famigliari.

Tuttavia, è solo con Maxwell, un fisico inglese dell'800, che la forza magnetica e la forza elettrica sono unificate e descritte come effetti di una stessa causa e quindi la natura elettromagnetica delle

onde luminose viene svelata. Da questa teoria, nota come teoria elettromagnetica classica, nasce la tecnologia che oggi invade tutta la nostra vita, a cominciare dagli strumenti medicali, che trovate in un ospedale moderno, a quelli che ci permettono di comunicare a distanza o di compiere calcoli altrimenti impossibili, fino alla possibilità di registrare e leggere dati con velocità e volumi non immaginabili fino a qualche decennio fa.

A questo punto mi corre l'obbligo di ricordare che, all'inizio del XX secolo, la teoria elettromagnetica classica rappresentava uno degli argomenti più avanzati della fisica e, come tale, era insegnata ed era molto popolare nelle università, in particolare in quelle americane, dove ci fu una importante partecipazione anche di giovani donne alla conoscenza dell'elettromagnetismo.

Nella formulazione moderna l'elettromagnetismo si può riassumere in un insieme di equazioni relativamente semplici: le equazioni di Maxwell. Queste equazioni governano il comportamento delle cariche elettriche, delle correnti elettriche e dei campi magnetici e da esse si deduce che la luce è un'onda elettromagnetica (ovvero un campo elettrico e un campo magnetico che sono ortogonali tra loro e che oscillano a frequenze molto elevate e si propagano ad una velocità costante (nel vuoto tale velocità è indicata con la lettera "c" e vale $\sim 299\,792,458$ km/s) in una direzione perpendicolare a quella individuata dal piano che contiene i campi elettrico e magnetico.

Inoltre, le equazioni di Maxwell rendono conto del fatto che una carica elettrica, soggetta a un moto accelerato, genera la luce. Per esempio, se una carica elettrica che si trova sulla superficie del Sole o di una stella, si trova soggetta a una forza e quindi accelera, sulla Terra si potrà osservare l'onda elettromagnetica prodotta. Ovvero, il moto accelerato delle cariche elettriche genera un'onda elettromagnetica che si propaga alla velocità c , fino a un eventuale rivelatore, per esempio l'occhio umano, che la rende manifesta.

Naturalmente, la teoria elettromagnetica ci permette anche di calcolare l'energia che è trasportata dalla luce e in particolare, se controlliamo il moto delle cariche, essa ci permette anche di governare la radiazione generata. In parole semplici, per esempio i colori, sono generati da cariche che oscillano a diverse frequenze. Invece, una comune lampadina produce una luce che alla nostra vista non ha, in genere, un colore specifico. L'effetto "colore" è dovuto al



nostro sistema visivo-neuronale, che traduce la frequenza della radiazione elettromagnetica in un impulso nervoso percepito come colore. La luce comune è tipicamente costituita da una sequenza continua di frequenze e quindi non ha alcun colore specifico. Al contrario, un laser genera una luce con un colore ben definito. Per questo un laser è sostanzialmente una sorgente monocromatica, in altre parole è una sorgente di luce a frequenza quasi unica e quindi coerente. Una radiazione elettromagnetica, per essere monocromatica, deve oscillare alla stessa frequenza senza discontinuità di fase. Se ci fossero delle discontinuità della frequenza o della fase, la radiazione non sarebbe più monocromatica e quindi coerente. Da questo deduciamo che monocromaticità e coerenza di una radiazione sono due parametri che coincidono. Tuttavia, la perfetta monocromaticità richiede che un'onda abbia una frequenza e una fase definite e di durata infinita. In Natura, un'onda infinita non esiste, mentre esistono impulsi di luce. Da ciò si deduce che non esistono radiazioni perfettamente monocromatiche.

Ora esploriamo l'intero spettro delle radiazioni elettromagnetiche. Come potete osservare in Figura 1 queste possono andare da radiazioni di lunghezza d'onda molto grande, chilometri, ovvero onde radio, fino alle radiazioni gamma la cui lunghezza d'onda è dell'ordine di un millesimo di un miliardesimo di metro.

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

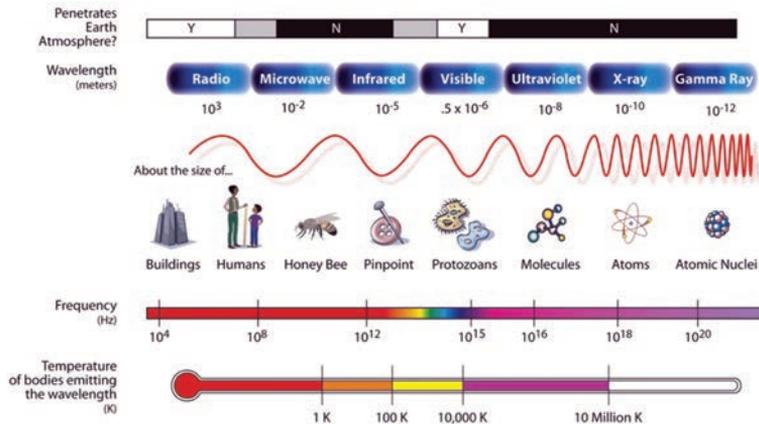


Figura 1- Spettro delle radiazioni elettromagnetiche.

L'elettromagnetismo ha fornito il supporto teorico alla evoluzione delle sorgenti di luce, dalla lampada ad olio fino alla lampada elettrica. Per compiere questo passo ci sono voluti migliaia di anni. Quindi qualche decina di anni per realizzare sorgenti di luce, quali le lampade a scarica di gas, che sono in grado di emettere luce con un certo grado di monocromaticità e che furono utilizzate in passato per lo studio spettroscopico della materia. Oltre a queste sorgenti, alla fine dell'800, furono scoperti i raggi X. Röntgen fu il primo a costruire una sorgente a raggi X. Da questa scoperta derivano le moderne apparecchiature per la radiografia X e quindi per la tomografia assiale computerizzata. Questi strumenti ci hanno permesso

di analizzare, mediante la tecnica del contrasto ottico di assorbimento, la struttura interna della materia vivente o della materia organica o inorganica.

Le sorgenti convenzionali di raggi X producono una radiazione che si estende su un dominio ampio di lunghezze d'onda e quindi sono tutt'altro che monocromatiche. Tuttavia, esse rispondono bene agli scopi della radiologia. Inoltre, possono essere anche applicate, sfruttando la diffrazione, allo studio della struttura di un cristallo, sia esso inorganico, organico o biologico. La diffrazione è un fenomeno che è conseguenza diretta dalla natura ondulatoria della luce e che ci permette di osservare direttamente nello spazio reciproco la disposizione che hanno gli atomi di un cristallo nello spazio reale. Questa tecnica portò alla fine degli anni '40 alla scoperta della struttura del DNA. La figura 2 mostra la prima immagine della diffrazione del DNA ottenuta da Rosalind Franklin.





Figura 2- La prima immagine della diffrazione X del DNA, dovuta a Rosalind Franklin.

Rosalind Franklin morì qualche anno dopo questa grande scoperta, mentre il Nobel fu assegnato a Crick e Watson, lasciando un vulnus nella storia di questo premio prestigioso, che rimane tuttora non risolto. Solo di recente è stato possibile ottenere, a conferma di quanto dedotto decenni prima con la diffrazione X, un'immagine del DNA nello spazio reale.

Parliamo ora dei rivelatori di luce. Quello più naturale e comune è l'occhio. In pratica una grande parte degli esseri viventi è dotato di questo organo per la visione. L'occhio è un organo di estrema complessità, in grado di trasformare segnali luminosi in segnali nervosi

che il cervello, in altre parole una rete neuronale, elabora, generando l'effetto che noi identifichiamo con la visione. Questa dipende dalla interazione tra la luce e la materia, ma è elaborata da una rete neuronale, e quindi risulterà diversa a seconda del sistema che elabora gli impulsi nervosi prodotti dal rivelatore "occhio". Da questo si deduce che le immagini che appaiono nello spazio reale, saranno dipendenti dal sistema neuronale che le rivela.

Tuttavia, l'occhio può rilevare solo lunghezze d'onda in una parte molto limitata dello spettro elettromagnetico, detta appunto "visibile". Al fine di osservare radiazioni elettromagnetiche a lunghezze d'onda differenti da quelle visibili è stato necessario costruire dei rivelatori appositi e sensibili alle radiazioni infrarosse, ultraviolette, X e gamma. Oggi esiste una tecnologia molto avanzata, in grado di produrre rivelatori di dimensioni nano-metriche e in grado di operare con un'elevata efficienza. Possiamo allora concludere che per la fisica classica la luce è un'onda elettromagnetica che si propaga senza alcun mezzo di supporto e quindi anche nel vuoto e con una velocità che la teoria della relatività speciale postula come il limite massimo con cui può propagarsi l'energia o la materia nel nostro Universo.

All'inizio del '900, la meccanica quantistica ipotizzò che la natura della luce non fosse semplicemente ondulatoria, ma duale, ossia che la luce potesse anche essere descritta come un insieme di particelle, i fotoni, prive di massa. Quando un impulso di luce è costitui-

to da un numero elevato di fotoni, le interazioni della luce con la materia possono essere descritte, sia tramite le onde elettromagnetiche classiche, sia mediante i fotoni. Tuttavia, la descrizione quantistica della luce diventa necessaria per descrivere gli stessi fenomeni quando si tratta di una energia pari a quella di pochi fotoni. Naturalmente, le teorie non cambiano la natura della luce, mentre cambia il modo col quale noi descriviamo la luce.

Tra i primi a introdurre l'idea di fotone fu Einstein, che utilizzò questo concetto per semplificare i modelli per descrivere l'interazione tra luce e materia, come nel caso della teoria del processo fotoelettrico o quella che descrive i processi di assorbimento, emissione stimolata ed emissione spontanea. Tuttavia all'epoca in cui questi modelli furono formulati pochi fisici davano credito all'idea che la luce fosse costituita da fotoni. Einstein non abbandonò mai questa convinzione e solo più tardi un altro grande fisico del '900, Dirac, postulò l'idea che le onde elettromagnetiche monocromatiche si potessero anche rappresentare come delle vibrazioni dei campi elettrico e magnetico e alle quali si poteva assegnare una quantità definita di energia, ossia un quanto di energia identificabile come il fotone. Questo concetto si traduce formalmente con la quantizzazione del campo elettromagnetico. Il modello quantistico della luce non contraddice, ovviamente, la teoria dell'elettromagnetismo classico, ma la amplia ulteriormente, permettendo di interpretare quei feno-

meni che la teoria classica non è in grado di interpretare, come l'interferenza con un singolo fotone oppure l'emissione spontanea della luce.

La teoria elettromagnetica, sia nella sua formulazione classica che quantistica permette, tramite modelli che descrivono l'interazione tra la luce e la materia, di comprendere e anche visualizzare la struttura della materia, fino al livello atomico e sub-atomico.

Naturalmente, tale descrizione è tanto più estesa e completa, quanto più ampio è lo spettro delle radiazioni luminose disponibili e quanto più si riesce a controllare le proprietà della luce in termini di polarizzazione, coerenza e brillantezza.

Fino ad alcuni decenni fa, generare la luce in uno spettro molto ampio, dall'infrarosso fino ai raggi X duri, e di grande intensità e coerenti, era un problema insormontabile. Un grande progresso fu ottenuto con la realizzazione delle prime sorgenti da radiazione, basate su macchine acceleratrici di particelle (elettroni) come gli anelli di accumulazione, noti anche col nome di sincrotroni. In un sincrotrone un pacchetto di elettroni viaggia a una velocità relativistica costante, in un'orbita circolare imposta dalla forza di Lorentz e generata da appositi magneti curvanti. Un moto circolare è un moto accelerato e quindi le cariche elettriche emettono una radiazione la cui intensità massima risulta perpendicolare alla accelerazione, che essendo centripeta, produce una emissione di luce tangenziale

rispetto all'orbita percorsa dagli elettroni. La radiazione così prodotta può essere utilizzata per diversi esperimenti, che vanno dalla microscopia a raggi X allo studio della struttura cristallina o elettronica della materia, o per realizzare dei dispositivi nanometrici mediante tecniche di foto-litografia.

L'intensità, o meglio la brillantezza, della radiazione X prodotta mediante un tubo a raggi X convenzionale risulta circa dai dieci ai venti ordini di grandezza meno intensa della luce di sincrotrone. Questa già sorprendente differenza tra la radiazione X prodotta da un tubo e quella dei sincrotroni di ultima generazione è anche più eclatante se si considera la brillantezza della radiazione prodotta da un laser X a elettroni liberi (X-FEL). I FEL X generano degli impulsi di luce la cui brillantezza di picco supera di parecchi ordini di grandezza quella generata dai sincrotroni.

Un'altra e non secondaria differenza tra la radiazione prodotta da un sincrotrone e quella di un laser a elettroni liberi sta nella lunghezza degli impulsi delle radiazioni generate. Questi sono circa milionesimi di miliardesimi di secondo (10^{-15} s), mentre quelli sono millesimi di miliardesimi di secondo (10^{-12} s). Per questo motivo, a parità di energia, la brillantezza di picco di una radiazione X-FEL è molto più intensa.

L'obiettivo di queste ricerche è quello di raggiungere nelle radiografie X risoluzioni paragonabili alle dimensioni atomiche.

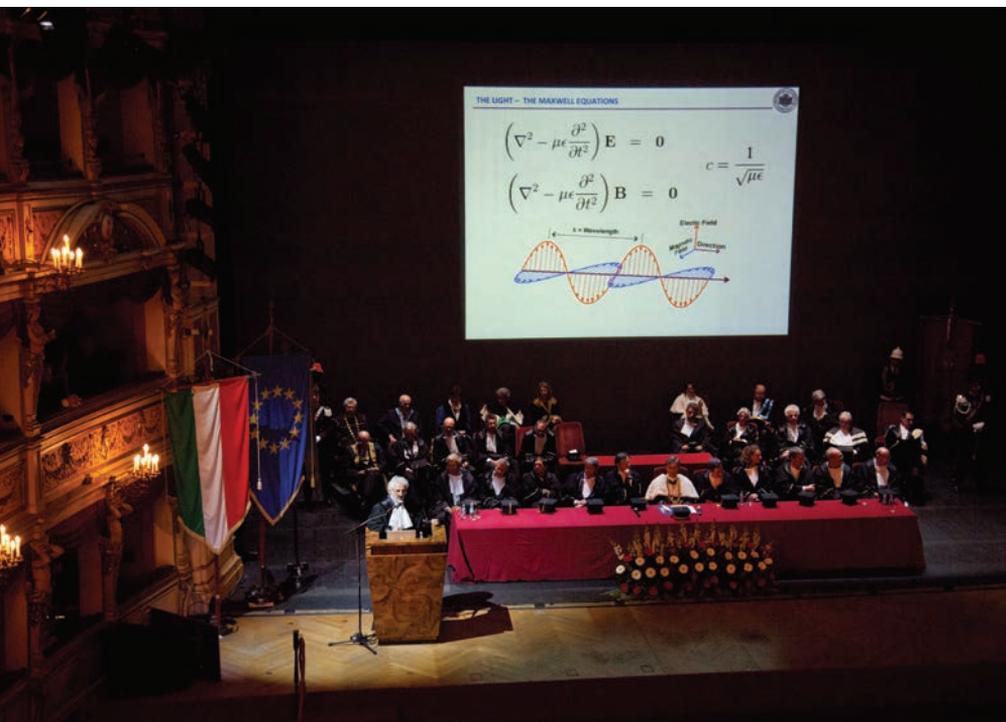
Per ottenere questo scopo è necessario realizzare un laser a raggi X. Questo significa una sorgente di raggi X completamente coerente. Tuttavia, se realizzata in modo convenzionale, una sorgente a raggi X richiederebbe due specchi necessari per realizzare la cavità ottica risonante che sostiene l'onda stazionaria che stimola l'emissione della radiazione coerente. È proprio questo uno dei maggiori ostacoli da superare per realizzare un laser a raggi X convenzionale. Infatti, non esistono ancora materiali o tecnologie che ci permettano di costruire tali specchi. È quindi necessario ricorrere a principi fisici differenti per realizzare un laser a raggi X.

Questa fisica diversa si è sviluppata a partire dagli anni '70 dello scorso secolo e oggi si basa su modelli e esperimenti molto solidi che hanno portato, prima alla formulazione dei modelli elettrodinamici e quindi alla realizzazione dei primi laser a elettroni liberi. I primi FEL furono costruiti per generare radiazione infrarossa (IR) e



quindi quella visibile e ultravioletta. Oggi sono operativi FEL che producono raggi X duri, anche se non completamente coerenti.

Questa non è la sede adatta per approfondire gli aspetti teorici e sperimentali dei FEL, ma qui basti dire che il principio si basa sulla mutua interazione reciproca tra un pacchetto di elettroni che si muove a energie relativistiche, un campo magnetico periodico e la radiazione emessa dallo stesso pacchetto di elettroni fatti oscillare dal campo magnetico periodico. Quando questa interazione si prolunga per un tempo (spazio) sufficientemente lungo, dell'ordine delle frazioni di milionesimi di secondo, gli elettroni formano dei micro-pacchetti che oscillano in fase e quindi emettono radiazione coerente. Dato che i pacchetti di elettroni sono molto corti, dai picosecondi ai sub-picosecondi, risulta che l'impulso della luce FEL è



anch'esso molto corto e parzialmente coerente. Tuttavia, questo processo, detto anche SASE (self-amplified stimulated emission) limita il grado di coerenza della radiazione FEL, dato che esso è innescato dal rumore di fondo della radiazione spontanea del pacchetto di elettroni. Questo limite è stato superato solo ultimamente, quando si sono realizzate le condizioni sperimentali per innescare il processo FEL partendo da un impulso di luce coerente, come quello generato da una sorgente laser impulsata. Questa nuova idea ha richiesto la formulazione di modelli ad hoc per simulare il processo FEL e la realizzazione di una serie impressionante di nuovi ed avanzati sviluppi sperimentali, in gran parte realizzati dal laboratorio Elettra-Sincrotrone Trieste e che nel 2010 hanno permesso di generare qui a Trieste la prima luce FEL completamente coerente.

Il FEL realizzato a Trieste sta riscuotendo l'ammirazione e il consenso unanime dell'intera comunità scientifica internazionale. Nella figura 3 vi mostro la fotografia del laboratorio, dove è chiaramente visibile accanto all'anello di accumulazione la struttura lunga circa 400 m della nuova sorgente FEL, oggi operativa e aperta ad esperimenti che vengono proposti da gruppi provenienti da ogni continente e battezzata FERMI, in onore del grande scienziato italiano. Essa è costituita da un acceleratore lineare, quindi da una serie di magneti che fanno oscillare gli elettroni a cui è stato sovrapposto un impulso laser e quindi dalla sala sperimentale.



Figura 3. Una vista aerea del laboratorio Elettra-Sincrotrone Trieste. Sono visibili il sincrotrone e il FEL-FERMI

Il progetto è costato circa 160 milioni di euro; è stato costruito senza costi aggiuntivi e nei tempi previsti. I test hanno confermato che le specifiche previste dai modelli sono state ampiamente raggiunte. Come vi ho detto, FERMI è in assoluto la prima sorgente di luce ad aver prodotto radiazione coerente nell'estremo ultravioletto e nei raggi X molli. La sorgente FERMI si affianca così ad altre sorgenti FEL, ma con la caratteristica, per ora unica, di produrre radiazione EUV e X completamente coerente e con la polarizzazione variabile.

La differenza tra una radiazione coerente e una parzialmente coerente si nota osservando le strutture spettrali della radiazione

emessa. Quella prodotta dal FEL-SASE, come quello di Amburgo (FLASH) o quello giapponese (SAGA) o quello di SLAC a Stanford (LCLS), mostra nello spettro una molteplicità di strutture a frequenze differenti, mentre FERMI mostra una sola riga di emissione centrata ad un'unica frequenza. Solo ultimamente LCLS ha dimostrato di poter produrre una radiazione più coerente di quella SASE, con una tecnica, detta di auto-inseminazione (self-seeding), ma anche in questo caso il grado di coerenza mediato nel tempo non raggiunge quello di FERMI.

Nel 2011 FERMI è entrato in una seconda fase di costruzione per la realizzazione di un secondo FEL, in grado di produrre radiazione X a lunghezze d'onda più corte. Anche questa seconda fase è stata conclusa con successo e il secondo FEL verrà aperto agli esperimenti nel 2014.

Gli esperimenti che ci proponiamo di condurre riguardano lo studio, su scala nanometrica, di sistemi magnetici, biologici e organici, nel tentativo di realizzare spettroscopie e microscopie in grado di studiare la materia sulla scala temporale dei femtosecondi e con risoluzione spaziale dell'ordine dei nanometri e una risoluzione in energia dell'ordine dei millesimi di elettronvolt. Questo è un obiettivo formidabile, ma se raggiunto la tecnologia farà un passo enorme, così come le nostre conoscenze sulla struttura della materia.

Gli esperimenti, condotti da gruppi di ricerca provenienti da tutto il mondo, sono iniziati lo scorso dicembre e si sono conclusi in questi giorni. Vi posso anticipare che questi primi studi hanno segnato un grande successo per FERMI.

Concluderò qui la mia lezione, mostrandovi uno spezzone del film “2001 Odissea nello Spazio” di Kubrick, per chiosare che, con FERMI, anche noi abbiamo iniziato una nuova avventura, le cui frontiere non sono per ora prevedibili.

Naturalmente, sono molte le persone che devo ringraziare, a cominciare dagli artefici di questa grande impresa scientifica tutta italiana che, in questo momento particolare per il nostro Paese, è motivo di grande orgoglio e di speranza. Voglio altresì ringraziare le Istituzioni, le Università, i colleghi che ci hanno aiutato, ma voglio anche ringraziare il mio Paese, che non sempre è quello che vorrei, ma che ciò nonostante amo profondamente. Ringrazio ovviamente la mia famiglia, il Dipartimento di Fisica dell’Università di Trieste che – lasciatemi dire – è un grande dipartimento di fisica; quindi ringrazio i miei collaboratori e i miei studenti.

Infine vorrei rivolgere un ultimo appello alle autorità. Se il nostro Paese non riuscirà a fare una politica seria per promuovere l’istruzione, la conoscenza e la ricerca, non ci sarà futuro per noi. In questi anni, ma sono ormai tanti, abbiamo cercato di lavorare sodo, con passione, impegno e professionalità. Abbiamo fatto il possibile per

sostenere il sistema universitario e della ricerca, sia in ambito nazionale, sia in quello internazionale. FERMI ne è un chiaro esempio, che sta attirando l'attenzione delle comunità scientifiche di tutto il mondo. Ora spetta alla società civile e alla politica dare speranza ai giovani, così come spero che questa nostra impresa scientifica e di avanzata tecnologia sia di stimolo e di esempio per i nostri giovani. Grazie.

