



Università
degli Studi
di Catania

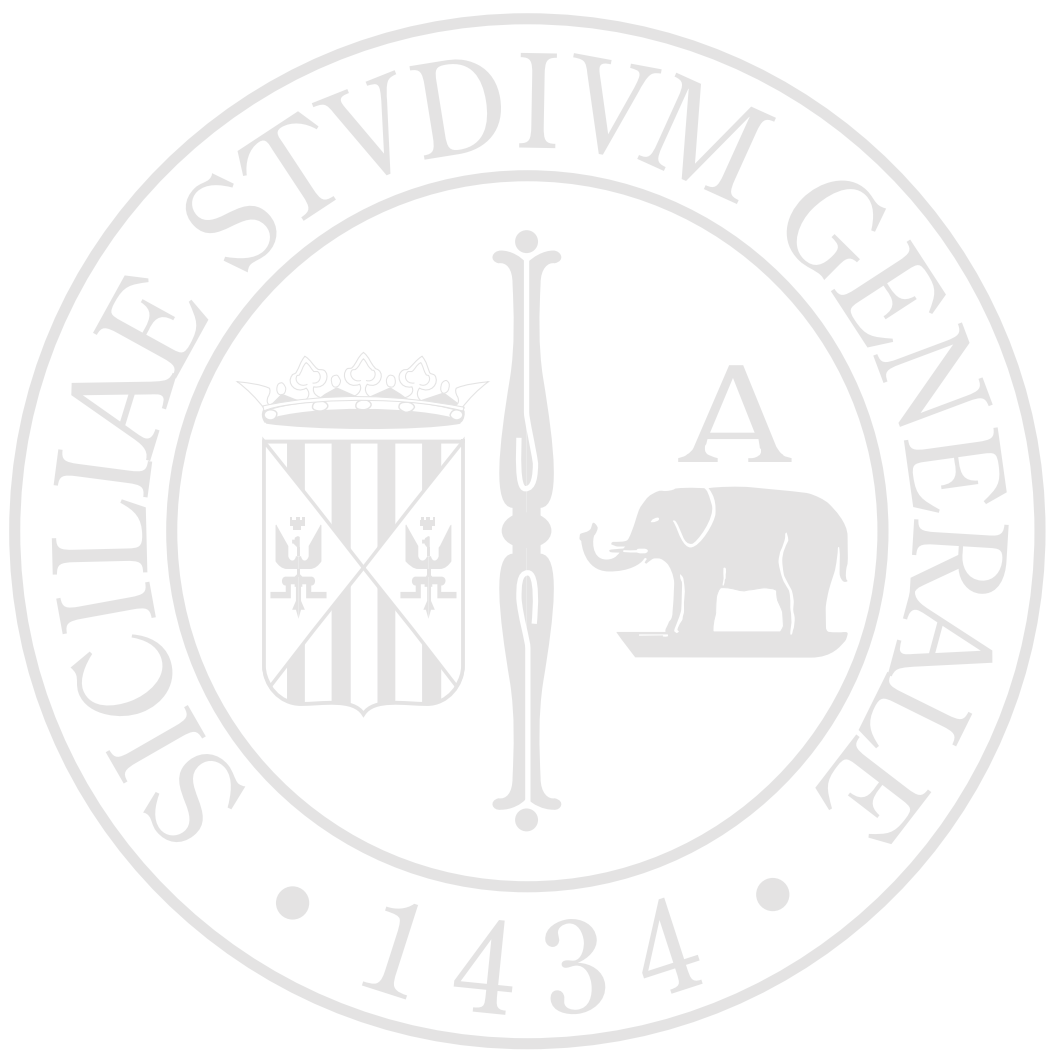
Cerimonia di conferimento della
Laurea magistrale Honoris Causa
in
Fisica
a

Francesco Iachello



Aula Magna Palazzo Centrale
Piazza Università, 2 – Catania

14 settembre 2018, ore 16.30





Università
degli Studi
di Catania

Cerimonia di conferimento della
Laurea magistrale Honoris Causa
in
Fisica
a

Francesco Iachello

*J.W. Gibbs Emeritus Professor and Research
Professor of Physics and Chemistry Yale University USA*

Aula Magna Palazzo Centrale
Piazza Università, 2 – Catania

17 settembre 2018, ore 16.30

PROGRAMMA

Saluto del Magnifico Rettore

Francesco Basile

Lettura della motivazione

Valerio Pirronello

Direttore del Dipartimento di Fisica e Astronomia

Laudatio

Francesco Cappuzzello

Professore di Fisica Nucleare e Subnucleare

Conferimento della

Laurea magistrale Honoris Causa

Lectio doctoralis

Francesco Iachello

Lettura della motivazione

Valerio Pirronello

Direttore del Dipartimento di Fisica e Astronomia

Magnifico Rettore
Amplissimi Direttori
Chiarissimi Professori
Autorità
Signore e Signori

Francesco Iachello è un eminentissimo scienziato, nato in Sicilia e divenuto famoso già negli anni settanta del secolo scorso. Per i suoi contributi di importanza fondamentale nella fisica dei sistemi microscopici è stato candidato numerose volte al Premio Nobel.

Si può certamente affermare che nel suo lavoro egli abbia focalizzato l'attenzione sulla ricerca di importantissime simmetrie nei sistemi microscopici nucleari, atomici e molecolari.

È ben noto che le simmetrie geometriche, sin dagli albori della civiltà, hanno affascinato l'uomo soddisfacendo il suo senso estetico, infatti, i greci scrivevano: $\Sigma\upsilon\mu\mu\epsilon\tau\rho\omicron\varsigma\ \kappa\alpha\lambda\omicron\varsigma\ \epsilon\sigma\tau\iota\nu$. In fisica le simmetrie, che si riescono a riscontrare in Natura, trascendono il puro fatto estetico ed assumono una valenza importantissima, consentendo una comprensione più approfondita della Natura stessa. È, ad esempio, il caso delle simmetrie per traslazione nel tempo o per traslazione e rotazione nello spazio che sono strettamente legate alle leggi di conservazione dell'energia, della quantità di moto e del momento angolare.

In generale si può dire che l'individuazione delle simmetrie in Fisica, mettendo ordine nella interpretazione della enorme varietà dei fenomeni che si presentano in Natura, consente una comprensione del mondo in cui viviamo e Francesco Iachello ha proprio individuato delle ulteriori importantissime simmetrie, non ancora note, in sistemi microscopici.

Ancora molto giovane ha proposto, insieme al collega giapponese Akito Arima, un modello dei nuclei atomici pesanti, detto a "Bosoni Interagenti", nel quale protoni e neutroni (caratterizzati dall'avere momento angolare di spin semintero, che seguono la statistica quantistica di Fermi-Dirac e, pertanto, sono detti fermioni) si accoppiano comportandosi come bosoni, particelle caratterizzate da spin intero che mostrano un comportamento descritto dalla statistica quantistica di Bose-Einstein. In seguito, ha ulte-

riormente affinato il modello ricercando le proprietà di simmetria prodotte dallo scambio di singoli nucleoni con coppie della medesima specie nella cosiddetta “Supersimmetria dinamica”.

La reale esistenza delle simmetrie, intuite da Francesco Iachello, è stata puntualmente confermata dagli esperimenti e la capacità predittiva dei modelli da lui introdotti ha consentito una comprensione enormemente più approfondita di tali sistemi microscopici.

La sua straordinaria creatività e l'intensissima attività di ricerca, che continua tuttora e che è caratterizzata da una non comune tenacia e passione per la Fisica, gli ha consentito di fornire contributi fondamentali all'avanzamento della conoscenza.

Per tutti i motivi suddetti il Dipartimento di Fisica e Astronomia ha proposto all'unanimità al Senato Accademico dell'Università di Catania il conferimento della Laurea H.C. al Professor Francesco Iachello con la seguente motivazione: “Per il suo contributo fondamentale alla ancestrale ricerca di ordine in Natura attraverso l'introduzione di modelli innovativi, basati sulle simmetrie dinamiche, e per le loro applicazioni a sistemi fisici nucleari, atomici e molecolari, che tracciano un eccezionale percorso di scoperta e di guida per le nuove generazioni di scienziati”.

Authorities

Ladies and Gentlemen

Francesco Iachello is a very eminent scientist, born in Sicily and famous already in the second half of the last Century. Due to his fundamental contributions to the physics of microscopic systems, he has been nominated several times to the Nobel Prize.

In his work, he has been focusing his attention on the continuous search for symmetries in nuclear, atomic and molecular systems.

It is well known that symmetries, since the dawn of civilization, fascinated humans by satisfying their sense of esthetics and Greeks used to say Σύμμετρος καλός ἐστιν. In Physics, symmetries that can be observed in Nature transcend pure esthetics and assume a very important significance by allowing a very deep understanding of Nature itself. This is the case, for instance, of the symmetries under translation in time and translation and rotation in space that are strictly connected with the conservation laws of energy, linear momentum and angular momentum respectively.

Quite generally it is possible to affirm that the identification of symmetries in Physics, allows a better understanding of our world by sorting the enormous variety of natural phenomena and Francesco Iachello truly identified some very important yet unknown symmetries of microscopic quantum systems.

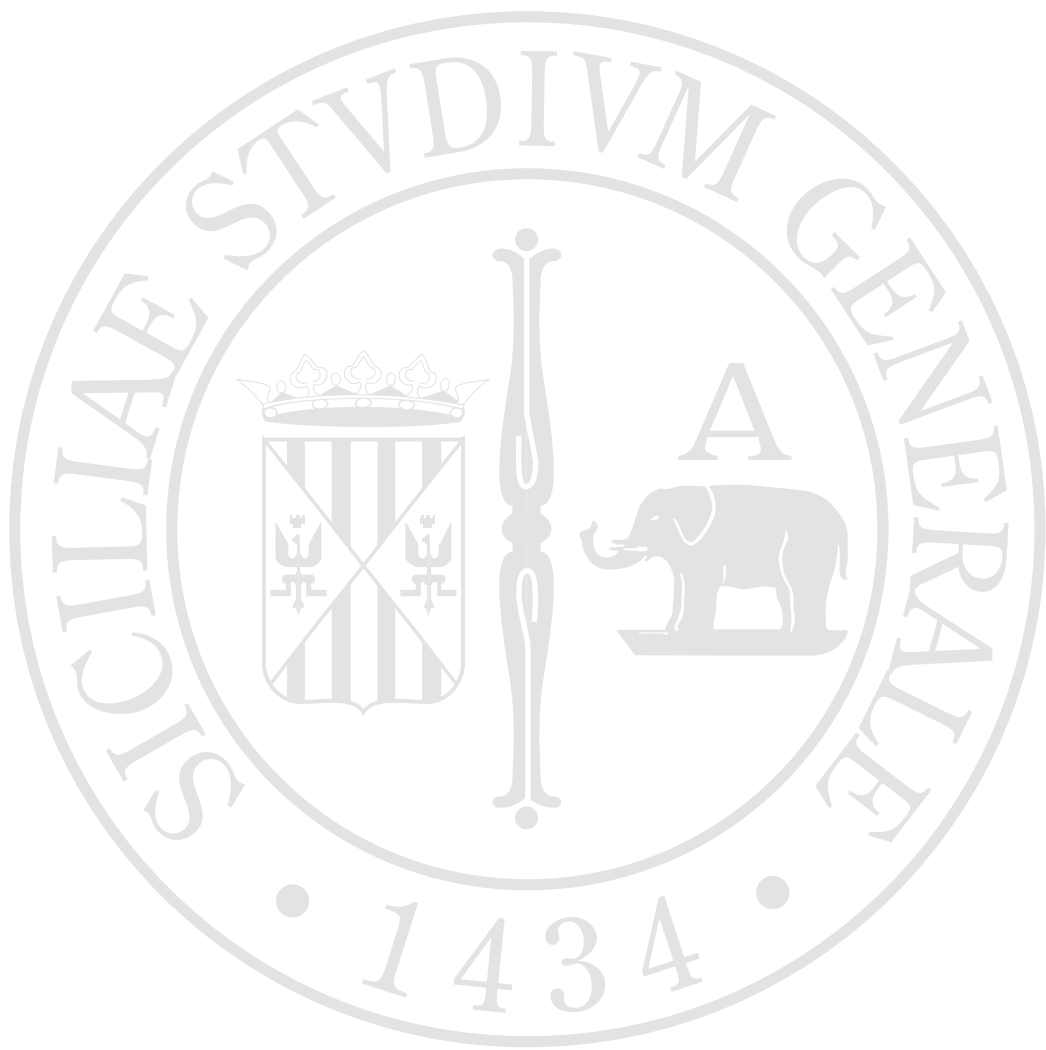
Still very young, together with his Japanese colleague Akito Arima, he proposed for heavy nuclei the so called Interacting Boson Model, in which protons and neutrons (possessing an half integer spin, following the Fermi-Dirac quantum statistics, and therefore called fermions) pair together to form bosons, particles possessing integer spin and behaving according to the quantum statistics of Bose-Einstein. Subsequently, he refined further his model searching for the symmetry properties generated by exchanging single nucleons with pairs of the same type in the so-called “Dynamical Supersymmetry”.

The real existence of the symmetries foreseen by Francesco Iachello has been confirmed by experiments and the predictive capability of the mod-

els, introduced by him, allowed an enormously deeper comprehension of such microscopic systems.

His extraordinary creativity and his extremely intense research activity, that is still going on and that is characterized by an uncommon perseverance and passion for Physics, allowed him to generate fundamental contributions to the advancement of Knowledge.

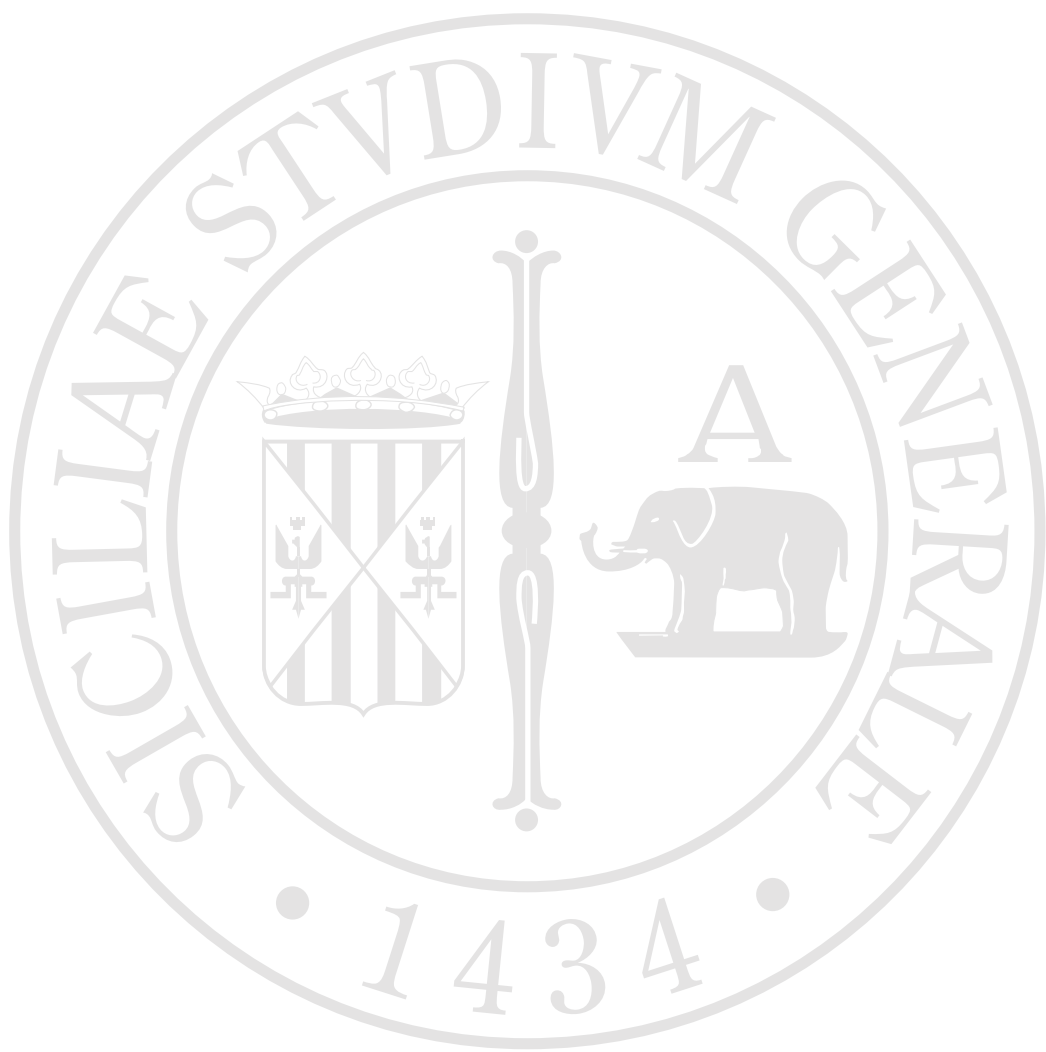
For all the mentioned reasons the Physics and Astronomy Department proposed unanimously to the Academic Senate of the University of Catania the bestowal of the Laurea Honoris Causa to Professor Francesco Iachello with the following motivation: “For his fundamental contributions to the ancestral search of order in Nature through the introduction of innovative models, based on dynamical symmetries, and for their implementations to nuclear, atomic and molecular systems, that mark an exceptional path of discoveries and mentoring to new generations of scientists”.



Laudatio

Francesco Cappuzzello

Professore di Fisica Nucleare e Subnucleare



Magnifico Rettore, caro Direttore e cari colleghi, Signore e Signori, Autorità, Professore Iachello,

è per me un grande onore poter qui pronunciare la Laudatio per il qui presente Professore Francesco Iachello, un amico ed un maestro che tanto ammiro, a cui oggi il nostro Ateneo conferisce la Laurea Honoris Causa.

Per presentare l'illustre scienziato, delineerò prima alcuni tratti salienti della sua formazione e della sua eccezionale attività scientifica, concentrandomi poi sugli aspetti che lo rendono particolarmente rilevante per la nostra comunità.

Francesco Iachello nasce l'11 gennaio 1942 nel vicino comune di Francofonte. Dopo una rigorosa formazione classica, acquisita presso il collegio Pennisi di Acireale, consegue nel 1964 la Laurea in Ingegneria Nucleare presso il Politecnico di Torino, dove rimane fino al 1966 come Assistente Professore. Nel 1966 si sposta al Massachusetts Institute of Technology dove perfeziona la sua formazione ottenendo nel 1969 il Dottorato di Ricerca in Fisica Teorica, contestualmente operando nel ruolo di Teaching Assistant. In quegli anni collabora anche con il prestigioso Niels Bohr Institute for Theoretical Physics di Copenhagen. Fra il 1971 ed il 1974 rientra al Politecnico di Torino con il ruolo di Professore Associato. Successivamente ottiene la cattedra presso l'Università di Groningen, che tiene fino al 1982. Nel frattempo, nel 1978, ottiene la cattedra all'Università di Yale, che viene promossa, sempre a Yale, alla prestigiosa cattedra Josiah Willard Gibbs Professor in Physics nel 1990. Successivamente ottiene anche la cattedra Gibbs Professor in Chemistry. Tali posizioni vengono poi estese in qualità di Emeritus in occasione del suo recentissimo ritiro.

Vorrei introdurre l'attività scientifica del nostro Laureato, con una citazione che ritengo utile per un corretto inquadramento storico. Scrive

Galileo Galilei nel Saggiatore: “La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto davanti agli occhi (io dico l’universo), ma non si può intendere se prima non s’impara a intender la lingua, e conoscere i caratteri nei quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica e i caratteri son triangoli, cerchi, e altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile intenderne umanamente parola: senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto.”

Le illuminanti riflessioni di Galilei indicano la missione della scienza, che è quella di intender lingua e conoscere i caratteri nei quali è scritto l’universo. In tale contesto il lavoro di Francesco Iachello ha permesso di svelare aspetti rilevanti di tale linguaggio naturale, attraverso l’introduzione di modelli basati sulla simmetria e la loro applicazione ai sistemi fisici microscopici. Aggiungo che i sistemi a cui egli si è rivolto, ed in particolare i nuclei atomici, rappresentano fra gli oggetti più complessi che la Natura ci offre, e per i quali è quanto mai arduo individuare eventuali segni di un ordine elementare.

È stato il suo un lavoro profondamente innovativo, rigoroso e multidisciplinare ed ha avuto, sin dall’inizio, un impatto decisivo per il successivo sviluppo della Fisica Nucleare e più in generale della Fisica dei sistemi microscopici. Tale attività si è riverberata con una incredibile costanza e capacità innovativa per circa mezzo secolo, e mi sento di dire che è tuttora in pieno sviluppo.

Il Professore Iachello ha formato una scuola di brillanti scienziati che oggi occupano posizioni importanti nei maggiori centri di ricerca e università in tutto il mondo. È sovente chiamato come consulente per molte prestigiose istituzioni di ricerca, senza mai abdicare ad un paziente lavoro formativo nei confronti di tanti giovani studenti e ricercatori che ha sempre affascinato ed affascina tuttora. I presenti non troveranno difficile giungere alle medesime conclusioni consultando le centinaia di articoli di ricerca, di saggi, di libri, etc. pubblicati e di quelli pubblicati recentemente nelle più prestigiose riviste.

Ma andiamo con ordine.

Nel 1974, Iachello introduce il modello a “bosoni interagenti” del nucleo, più propriamente detto Interacting Boson Model, spesso citato con l’acronimo IBM nella letteratura specialistica. Questo modello, sviluppato

in una serie di articoli fondamentali tra il 1975 e il 1979 con Akito Arima, ha portato ordine nella classificazione dei nuclei pesanti e nella comprensione delle loro proprietà. L'idea è quella di raggruppare separatamente i protoni e neutroni costituenti il nucleo in coppie, chiamate bosoni (particelle con spin intero) caratterizzate da momento angolare 0 o 2. I sei bosoni ammessi dal modello, uno con momento angolare nullo e cinque con momento angolare 2, possono essere scambiati senza che cambi l'energia del nucleo. Per i nuclei caratterizzati da un numero pari di protoni e di neutroni ogni stato quantistico è costruito come combinazione lineare di tali bosoni, che rappresentano pertanto i mattoni elementari della struttura. Lo scambio dei bosoni elementari evidenzia pertanto una precisa simmetria per tali nuclei, che nel linguaggio matematico della teoria dei gruppi si indica con $U(6)$, perché rappresentabile da matrici unitarie a 6 dimensioni. Ciò che ha reso tale idea un'intuizione straordinaria, e non solo un modo ingegnoso, magari elegante, di rappresentare gli stati nucleari, sta nel fatto che nei nuclei reali tale simmetria si osserva in dettaglio con piccolissime deviazioni, dovute ad interazioni residue non contemplate nel modello, ma che al più modificano di poco l'energia degli stati, senza cambiarne di fatto la struttura quantistica. Si parla di rotture spontanee della simmetria o di simmetrie dinamiche. Il modello di Iachello ed Arima prevede che le proprietà osservate negli esperimenti di spettroscopia nucleare e nello studio delle transizioni elettromagnetiche possono essere classificate secondo tre ben precisi schemi di "rottura" spontanea di tale simmetria $U(6)$ verso simmetrie più elementari, dette $SU(3)$, $U(5)$, $SO(6)$ e da lì verso simmetrie ancora più elementari, secondo tre schemi di ordine che la Natura predilige nell'apparente inestricabile complessità.

Il modello IBM dimostrò subito di possedere una potente capacità predittiva, una semplice realizzazione algebrica ed una illuminante interpretazione geometrica, tre aspetti che lo rendono ancora oggi uno degli strumenti più potenti dell'indagine nucleare. Per dirla con Galilei, si era compreso un pezzo importante del linguaggio dell'Universo.

Quanto detto finora vale per nuclei caratterizzati da un numero pari di protoni e neutroni. Ma noi osserviamo anche nuclei con numeri dispari di tali costituenti. Nel tentativo, peraltro riuscito, di comprendere la struttura di tali nuclei nel 1980, Iachello, insieme ai suoi collaboratori Itzhak Bars e Baha Balantekin, introduce un'ulteriore idea di ordine nella classificazione

degli spettri dei nuclei. L'idea è quella di ricercare le proprietà di simmetria che emergono dallo scambio di protoni o neutroni singoli (che essendo dotati di spin semi-intero si comportano come Fermioni), con coppie della medesima specie, che per quanto detto prima si comportano come Bosoni. In un primo tempo protoni e neutroni vengono trattati separatamente, all'interno del modello Interacting Boson-Fermion Model, (IBFM). In seguito, grazie anche alla collaborazione di Piet Van Isacker, le operazioni di scambio di protoni e neutroni, singoli e a coppie, vengono raggruppate all'interno di una costruzione teorica della struttura dei nuclei nota come supersimmetria dinamica. Ancora una volta è il dato sperimentale che dà conferma alle previsioni di tale teoria. In un bellissimo esperimento condotto a Monaco di Baviera nel 1998 si dimostra che le proprietà dei complicatissimi spettri di alcuni isotopi del Platino e dell'Oro manifestano inequivocabilmente la presenza di tale supersimmetria. Senza retorica si parlò di un trionfo della Fisica Teorica e di un sostanziale progresso nella ricerca dell'ordine in Natura.

Uno degli aspetti di grande interesse negli approcci proposti, detti anche algebrici, è la diretta estensibilità ad altri ambiti della Fisica. Un lavoro che Francesco Iachello ha spesso sviluppato personalmente, mostrando un'apertura culturale ampia quanto rara nel panorama moderno. Un esempio è il modello a Vibroni delle molecole, basato sulle simmetrie del gruppo $U(4)$, elaborato con Raphael Levine nel 1982-83, che ha fornito un efficace quadro per la classificazione delle molecole. Nel 1991-96, il modello a Vibroni è stato esteso allo studio delle molecole poliatomiche, in collaborazione con Stefano Oss.

Oltre a questi importanti risultati, egli ha esplorato ulteriormente il ruolo delle simmetrie nello studio delle collisioni tra le particelle negli anni 1983-86 (teoria algebrica della diffusione), nello studio degli spettri elettronici delle molecole (modello a Elettroni-Vibroni) nel 1986-87, e nello studio degli spettri di adroni (modello algebrico di Barioni e Mesoni) nel 1994-1996.

Nel 2000-01, Iachello ritorna allo studio delle simmetrie nei nuclei ed introduce il concetto di simmetrie dinamiche nel punto critico delle transizioni di fase. Negli ultimi anni esplora il ruolo delle simmetrie nelle transizioni di fase quantistica e introduce nel 2008 il concetto di transizione di fase quantistica verso gli stati eccitati. Inoltre, a partire dal 2014, inizia

lo studio del ruolo delle simmetrie discrete nella struttura a grappoli (detti cluster) dei nuclei leggeri, e dal 2013 sviluppa un modello algebrico di vibrazioni dei cristalli.

Fra le attività recenti del nostro Laureato, sento però l'esigenza di soffermarmi su una in particolare. Mi riferisco allo studio, a partire dal 2009 del doppio decadimento beta senza neutrini; un processo oggi considerato cruciale per la comprensione della natura dei neutrini e fondamentale per la determinazione della massa di tali particelle. Tale processo non è mai stato osservato in laboratorio, ma è considerato l'*experimentum crucis* per stabilire se il neutrino, come tutti i Fermioni noti, è distinguibile dalla sua antiparticella (antineutrino), oppure è identico ad essa. Quest'ultima possibilità fu proposta dal nostro Ettore Majorana, nel suo memorabile articolo dal titolo "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone", pubblicato su Nuovo Cimento nel 1937. Va detto che, se confermata, l'idea di Majorana sui neutrini avrebbe un impatto molto profondo sulla Fisica fondamentale, sulla Fisica delle particelle elementari, sulla Cosmologia, al punto di essere considerata oggi uno dei casi di Fisica più importanti.

Anche in tale contesto il Professore Iachello ha dato, e continua ferventemente a dare, un contributo molto importante. Egli ha sensibilmente migliorato la descrizione della dinamica del processo di doppio decadimento beta ed ha introdotto il modello IBM per il calcolo delle probabilità di transizione nucleare. Di recente ha messo in evidenza ed affrontato il fondamentale problema del comportamento delle costanti di accoppiamento dell'interazione debole all'interno dei nuclei pesanti interessati da tale decadimento radioattivo.

Ricordiamo in molti l'illuminante presentazione che egli ha dato lo scorso 18 Ottobre 2017, proprio in questa Aula Magna, dal titolo "Majorana e la ricerca di ordine in Natura" in cui, Francesco Iachello ci ha fatto ben comprendere la portata del lavoro di Majorana ed il suo legame con le simmetrie.

Con il suo operato Francesco Iachello ha contribuito ad avvicinare molti ricercatori nucleari a tali stimolanti tematiche di ricerca. È questo il caso dei progetti di ricerca che sono stati avviati all'interno del Dipartimento di Fisica e Astronomia del nostro Ateneo e dei Laboratori Nazionali del Sud dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, che personalmente mi vede

impegnato insieme ad un centinaio di colleghi di 15 paesi del mondo e che vedono le istituzioni catanesi portabandiera a livello internazionale. Anche lì il ruolo di sagace consulente ed arbitro che il nostro Laureato svolge risulta essenziale.

Per il suo lavoro sulle simmetrie in Fisica, Iachello ha ricevuto alcuni fra i più prestigiosi riconoscimenti internazionali: la medaglia Eugene Wigner nel 1990 della Group Theory and Fundamental Physics Foundation, il premio Tom Bonner nel 1993 della American Physical Society (condiviso con Arima), la medaglia Lise Meitner nel 2002 della European Physical Society (condivisa con J. Philip Elliott) ed il Premio Enrico Fermi nel 2010 della Società Italiana di Fisica.

Oltre a questi premi, egli ha anche ricevuto il premio AKZO della Netherlands Society of Sciences, il Premio Taormina of Arts and Sciences, il Centennial Prize of Italian Physical Society, la Medaglia Nazionale della Scienza in Italia, il Majorana Prize, il premio Eminent Scientist Award in Giappone, la Commemorative Medal della Charles University di Praga ed il Somani Volta Prize.

Ha ricevuto Lauree e Dottorati Honoris Causa da molte istituzioni tra cui l'Università di Ferrara, l'Università di Siviglia, la Chung Yuan University in Cina, l'Università di Bucarest, l'Università Ebraica di Gerusalemme e la Technical University di Darmstadt in Germania. È stato insignito di diverse cattedre onorarie, fra le quali ricordiamo la Honorary Professorship dall'Università di Nanchino, Cina; la Zernike Professorship presso l'Università di Groningen, Paesi Bassi; e la Honorary Professorship dalla Liaoning Normal University, Cina.

È membro dell'Accademia delle Arti e delle Scienze dei Paesi Bassi, dell'Accademia delle Scienze e delle Arti della Croazia, dell'Accademia delle Scienze in Messico, dell'Accademia Galileana, dell'Accademia Zanatta e dell'Accademia Europaea di Londra. È membro dell'American Physical Society, dell'American Association for the Advancement of Science ed è membro onorario della Eotvos Physical Society in Ungheria, della Hellenic Nuclear Physics Society in Grecia e della Società Italiana di Fisica.

Francesco Iachello ha anche scritto diversi articoli sulle simmetrie nelle arti ed il loro collegamento con le simmetrie nelle scienze. Sebbene sia un fisico teorico, i suoi interessi si estendono a molti altri argomenti, tra cui

la musica, specialmente la musica del Rinascimento e del Barocco, e la letteratura, in particolare la poesia italiana, spagnola e russa del XX secolo.

Fin qui lo scienziato. Per l'uomo mi permetto di dire soltanto che egli rappresenta una figura esemplare di stile ed eleganza, uniti ad un saldo ancoraggio a valori etici importanti che lo rendono un vero ambasciatore della sicilianità in un mondo sempre più piccolo ed interconnesso.

Grazie Francesco

Rector Magnificus, dear Director and dear colleagues, Ladies and Gentlemen, Professor Iachello,

it is a great honor for me to be called here to deliver the Laudatio for the present Professor Francesco Iachello, a friend and a mentor I admire so much, to whom today our University grants the Laurea Honoris Causa.

In order to present the eminent scientist, I will first outline some salient features of his formation and of his exceptional scientific activity, concentrating on the aspects that make it particularly relevant for our community.

Francesco Iachello was born on 11 January 1942 in the nearby municipality of Francofonte. After a rigorous classical training, acquired at the Pennisi College of Acireale, in 1964 he obtained a Degree in Nuclear Engineering at the Polytechnic of Turin, where he remained until 1966 as Assistant Professor. In 1966 he moved to the Massachusetts Institute of Technology where he completed his training obtaining in 1969 the Ph.D. in Theoretical Physics, simultaneously working in the role of Teaching Assistant. In those years he also collaborated with the prestigious Niels Bohr Institute for Theoretical Physics in Copenhagen. Between 1971 and 1974 he returned to the Polytechnic of Turin with the role of Associate Professor. Later he obtained the Chair at the University of Groningen, which he held until 1982. Meanwhile, in 1978, he obtained the Chair at the University of Yale, which was promoted, at Yale, to the prestigious Josiah Willard Gibbs Professor Chair in Physics in 1990. At a later time, he also obtained the Gibbs Professor Chair in Chemistry. These positions have been extended as Emeritus on the occasion of his recent retirement.

I would like to introduce the scientific activity of our graduate, with a quote that I consider useful for a correct historical setting. Galileo Galilei writes in the “*Il Saggiatore*”: “Philosophy is written in this great book that is constantly open before our eyes (I say the universe), but we cannot understand it if we do not learn to understand the language first, and know the characters in which it is written. It is written in the mathematical language and the characters are triangles, circles, and other geometric figures, without which means it is impossible to understand humanly the word: without these it is a vain wandering through an obscure labyrinth.”

The illuminating reflections of Galileo indicate the mission of science, which is to understand the language and to know the characters in which

the universe is written. In this context the work of Francesco Iachello has allowed to reveal important aspects of this natural language, through the introduction of models based on symmetry and their application to physical microscopic systems. I would add that the systems to which he addressed himself, and in particular the atomic nuclei, are among the most complex objects that Nature offers us, and for which it is extremely difficult to identify any emerging signs of an elementary order.

His work has always been deeply innovative, rigorous and multidisciplinary and had, from the beginning, a decisive impact on the subsequent development of Nuclear Physics and, more in general, of the Physics of microscopic systems. This activity has reverberated with incredible perseverance and creative energy for about half a century, and I can say that it is still in full development.

Professor Iachello has formed a school of brilliant scientists, who today occupy important positions in major research centers and universities all over the world. He is often called as a consultant for many prestigious research institutions, without ever abdicating a patient formative work towards many young students and researchers who has always fascinated and still fascinates. Those present will not find it difficult to reach the same conclusions by consulting the hundreds of research articles, essays, books, etc. published even recently in the most prestigious magazines.

But let us go in order.

In 1974, Iachello introduced the “interacting boson” model of the nucleus, more properly called the Interacting Boson Model, often referred to by the acronym IBM in the specialized literature. This model, developed in a series of fundamental articles between 1975 and 1979 with Akito Arima, brought order in the classification of heavy nuclei and in the understanding of their properties. The idea is to group separately the protons and neutrons constituting the nucleus in pairs, called bosons (particles with whole spin) characterized by angular momentum 0 or 2. The six bosons allowed by the model, one with no angular momentum and five with moment angular 2, can be exchanged without changing the energy of the nucleus. For nuclei characterized by an even number of protons and neutrons, each quantum state is constructed as a linear combination of such bosons, which therefore represent the elementary building blocks. The ex-

change of the elementary bosons therefore highlights a precise symmetry for these nuclei, which in the mathematical language of group theory is indicated as $U(6)$, because it can be represented by unitary matrices with six dimensions. What has made this idea an extraordinary intuition, and not just an ingenious, perhaps elegant way of representing nuclear states, lies in the fact that in the real nuclei this symmetry is observed in detail. Residual interactions, not contemplated in the model, produce very small modifications of the energy of the states, without actually changing their quantum structure. We speak of spontaneous symmetry breaking or dynamic symmetries. The Iachello and Arima model predicts that the properties observed in the experiments of nuclear spectroscopy and in the study of electromagnetic transitions can be classified according to three well-defined schemes of spontaneous “breaking” of this symmetry. In particular the $U(6)$ breaks towards more elementary symmetries, called $SU(3)$, $U(5)$, $SO(6)$ and from there to even more elementary symmetries, according to three order patterns that Nature prefers in the apparent inextricable complexity.

The IBM model immediately demonstrated to possess a strong predictive power, a simple algebraic formulation and an illuminating geometric interpretation, three aspects that make it one of the most powerful tools of nuclear investigation. To put it with Galilei, an important piece of the language of the Universe was understood.

What has been said so far applies to nuclei characterized by an even number of protons and neutrons. But we also observe nuclei with odd numbers of such constituents. In the attempt, however successful, to understand the structure of these nuclei in 1980, Iachello, together with his collaborators Itzhak Bars and Baha Balantekin, introduced a further idea of order in the classification of the spectra of the nuclei. The idea is to search for the symmetry properties that emerge from the exchange of protons or single neutrons (which are equipped with half-integer spin behave like fermions), with pairs of the same species, which as remarked before behave like bosons. Initially, protons and neutrons are treated separately, within the Interacting Boson-Fermion Model (IBFM) model. Subsequently, thanks to the collaboration of Piet Van Isacker, the operations of proton and neutron exchange, single and in pairs, are grouped within a theoretical construction of the nuclear structure, known as dynamic su-

persymmetry. Once again the experimental data confirm the predictions of this theory. In a challenging experiment conducted in Munich in 1998, it was found that the properties of the complicated spectra of some Platinum and Gold isotopes, unequivocally manifest the presence of such supersymmetry. Without rhetoric it was a triumph of Theoretical Physics and of a substantial progress in the search for order in Nature.

One of the aspects of great interest in the proposed approaches, also called algebraic, is the direct extensibility to other areas of Physics. A work that Francesco Iachello has often developed personally, showing a wide and rare cultural opening in the modern panorama. An example is the Vibron model of the molecules, based on the symmetries of the $U(4)$ group, elaborated with Raphael Levine in 1982-83, which provided an effective framework for the classification of molecules. In 1991-96, the Vibron model was extended to the study of polyatomic molecules, in collaboration with Stefano Oss.

In addition to these important results, he further explored the role of symmetries in the study of particle collisions in the years 1983-86 (algebraic scattering theory), in the study of the electron spectra of molecules (Electron-Vibron model) in 1986- 87, and in the study of the hadrons spectra (algebraic model of Baryons and Mesons) in 1994-1996.

In 2000-01, Iachello returned to the study of symmetries in nuclei and introduced the concept of dynamic symmetries at the critical point of phase transitions. In recent years, he has explored the role of symmetries in quantum-phase transitions and in 2008 introduced the concept of quantum-phase transition to excited states. Moreover, starting from 2014, he started the study of the role of discrete symmetries in the cluster structure of light nuclei, and from 2013 developed an algebraic model of crystal vibrations.

Among the recent activities of our graduate, however, I feel the need to dwell on one in particular. I refer to the study of neutrinoless double beta decay, started in 2009. This process is now considered crucial for understanding the nature of neutrinos and fundamental for determining the mass of these particles. This process has never been observed in the laboratory, but is considered the experimentum crucis to determine whether the neutrino, like all known fermions, is distinguishable from its antiparticle (an-

tineutrino), or it is identical. This last possibility was proposed by Ettore Majorana, in his memorable article titled “Symmetric theory of electron and positron”, published in *Nuovo Cimento* in 1937. It should be said that, if confirmed, the idea of Majorana about neutrinos would have a very deep impact on fundamental physics, on physics of elementary particles, on cosmology, to the point of being considered today one of the most important physics cases to investigate.

Also in this context Professor Iachello has given, and continues fervently to give, a very important contribution. He significantly improved the description of the dynamics of the double beta decay process and introduced the IBM model for calculating nuclear transition probabilities. He recently highlighted and addressed the fundamental problem of the possible quenching of coupling constants of the weak interaction within the decaying heavy nuclei.

Many of us remember the enlightening presentation that he gave last 18 October 2017, in this Auditorium, entitled “Majorana and the search for order in nature”, in which Francesco Iachello made us well understand the extent of the work of Majorana and its link with symmetries. With his work, Francesco Iachello has stimulated the interest of many nuclear researchers toward these research items. This is the case of a challenging research project, named NUMEN, that have been initiated within the Department of Physics and Astronomy of our University and the Laboratori Nazionali del Sud of the National Institute of Nuclear Physics. About a hundred colleagues from 15 countries in the world has joined this project so far, with a leading position for the Catania-based institutions at international level. There the role of sagacious advisor and referee that our graduate performs is essential.

For his work on symmetries in Physics, Iachello has received some of the most prestigious international awards: the Eugene Wigner Medal in 1990 of the Group Theory and Fundamental Physics Foundation, the Tom Bonner award in 1993 of the American Physical Society (shared with A. Arima), the Lise Meitner medal in 2002 of the European Physical Society (shared with J. Philip Elliott) and the Enrico Fermi Prize in 2010 of the Italian Physical Society.

In addition to these awards, he has also received the AKZO award

from the Netherlands Society of Sciences, the Taormina Arts and Sciences Award, the Centennial Prize of the Italian Physical Society, the National Medal of Science in Italy, the Majorana Prize, the Eminent Scientist Award in Japan, the Commemorative Medal of the Charles University of Prague and the Somani Volta Prize.

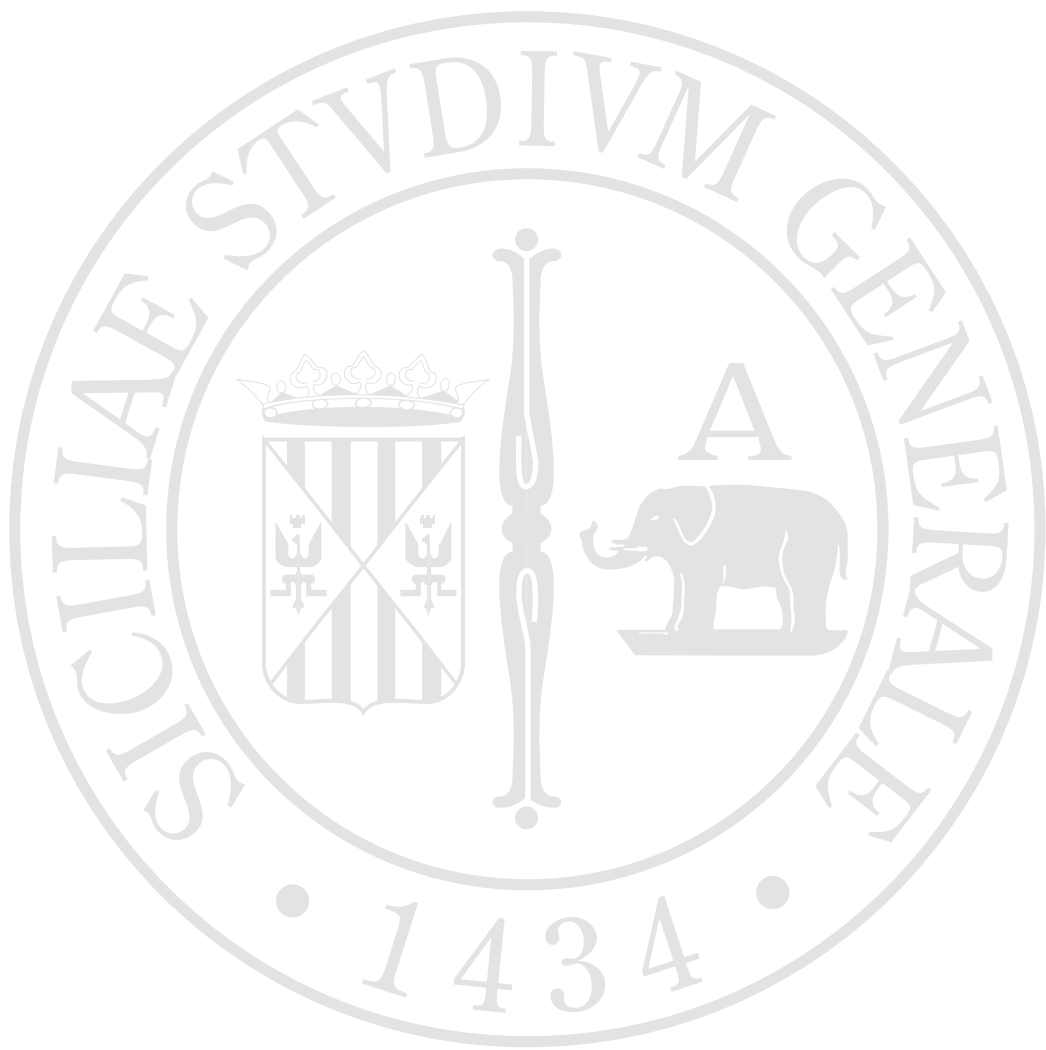
He has received Honorary Doctorates from many institutions including the University of Ferrara, the University of Seville, the Chung Yuan University in China, the University of Bucharest, the Hebrew University of Jerusalem and the Technical University of Darmstadt in Germany. He was awarded several honorary professorships, including the Honorary Professorship from the University of Nanjing, China; the Zernike Professorship at the University of Groningen, Netherlands; and the Honorary Professorship from Liaoning Normal University, China.

He is a member of the Academy of Arts and Sciences of the Netherlands, of the Academy of Sciences and Arts of Croatia, of the Academy of Sciences in Mexico, of the Galilean Academy, of the Zelantea Academy and of the Academia Europaea in London. He is a Fellow of the American Physical Society, an honorary member of the Eotvos Physical Society in Hungary, the Hellenic Nuclear Physics Society in Greece and the Italian Physical Society.

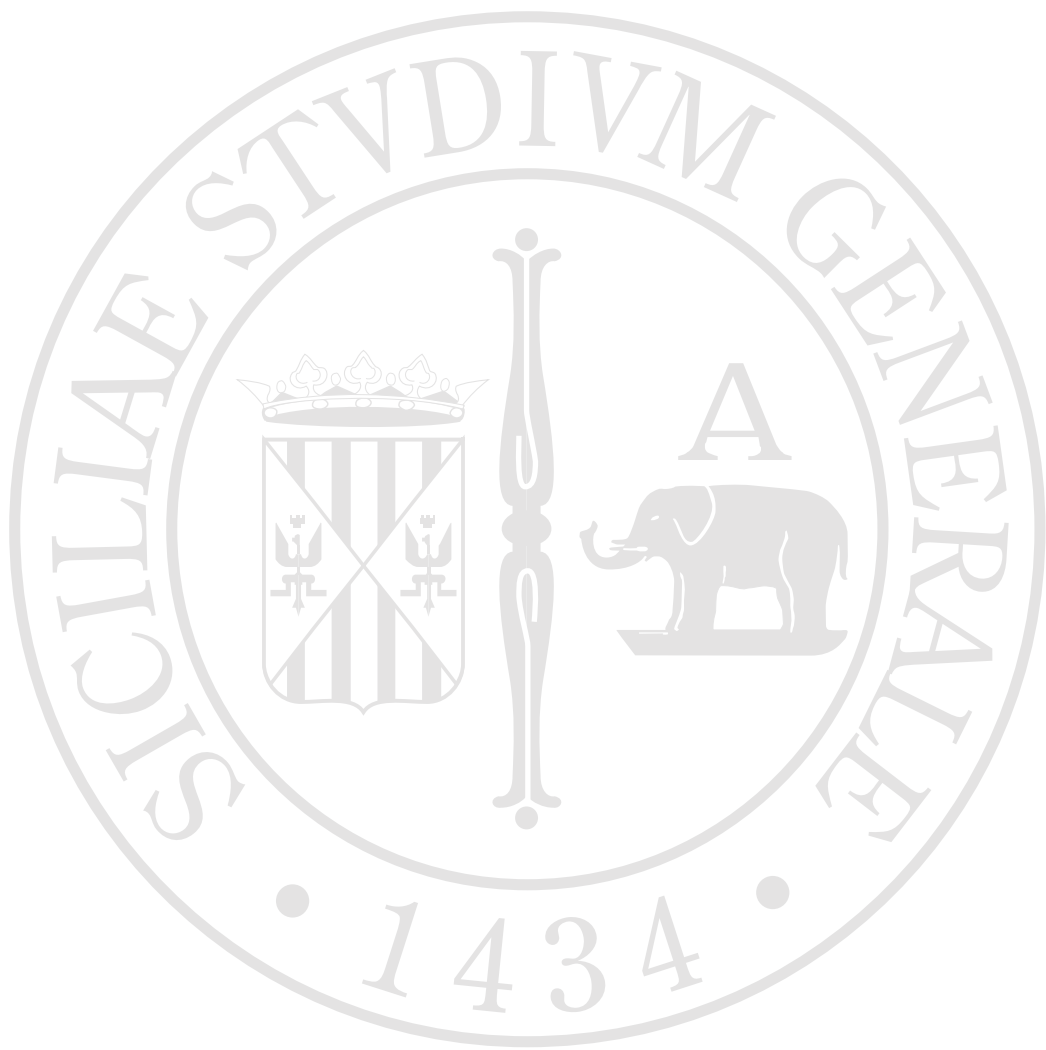
Francesco Iachello has also written several articles on symmetries in arts and their connection with symmetries in the sciences. Although he is a theoretical physicist, his interests extend to many other topics, including music, especially the music of the Renaissance and the Baroque, and literature, especially Italian, Spanish and Russian poetry of the twentieth century.

So far the scientist. For the man I would only say that he represents an exemplary figure of style and elegance, united with a strong anchorage to important ethical values that make him a true ambassador of Sicily in an increasingly small and interconnected world.

Thank you very much Francesco!



Lectio doctoralis



Simmetria: la ricerca di ordine in natura

Una delle aspirazioni maggiori dell'uomo è stata sempre quella di trovare un ordine nell'Universo. In questa *lectio doctoralis*, illustrerò brevemente il concetto di simmetria (sinonimo di ordine) nell'arte e nelle scienze, e menzionerò il mio contributo al suo sviluppo con la scoperta delle simmetrie dinamiche nei nuclei e nelle molecole (1974-1980) e di un ancora più complesso tipo di simmetria, chiamata supersimmetria dinamica, che io scopersi nel 1980 e che è stata confermata nel 1999-2000.

Simmetria in natura e nell'arte

L'idea dell'ordine deve essere venuta, almeno in parte, dalla osservazione che molte forme della Natura anche le più complesse sono spesso ordinate. Un esempio è mostrato nella figura 1.

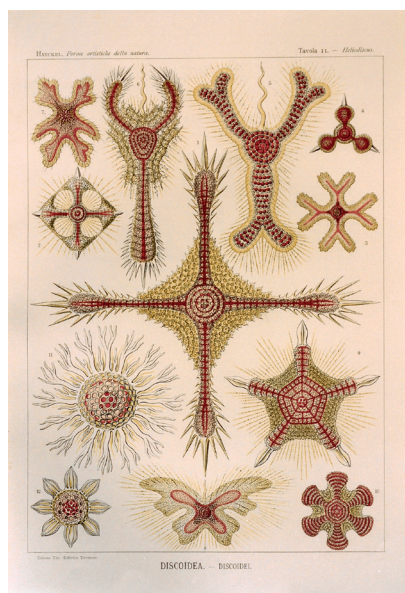


Figura 1. Molluschi della famiglia delle discoidee. (Da E. Haeckel, *Kunstformen der Natur*, Leipzig, 1899. Versione italiana *Forme artistiche della natura*, Torino, 1900).

Come detto sopra, ordine è sinonimo di simmetria. Il concetto di simmetria, dal Greco *συμμετρος*, ordinato, organizzato (letteralmente “con

misura”) fu originariamente introdotto per descrivere certe proprietà di artifatti [Policleto, Περὶ βελτοποικων, IV, 2]. Tutte le civiltà antiche usarono questo concetto cercando di imitare le forme della natura nell’arte. Due esempi sono mostrati nella figura 2.



Figura 2. (a) Decorazione Sumera, circa 2000 a.C.: simmetria di traslazione.
(b) Tavoletta trovata al Megaron di Tirinto, Periodo tardo Elladico, circa 1200 a.C.: simmetria di riflessione.

L’uso della simmetria nell’arte e nell’architettura fu portato alla perfezione dai greci e dai romani. Lo scultore Policleto nel suo libro sopra citato sull’arte della costruzione discusse il suo significato e l’architetto romano Vitruvio disse che la “simmetria è il risultato di proporzioni tra le differenti parti”. La simmetria divenne parte essenziale di ogni artifatto e il suo uso raggiunse il picco nel tempio greco, come si può vedere in Sicilia ad Agrigento, Selinunte e Segesta.

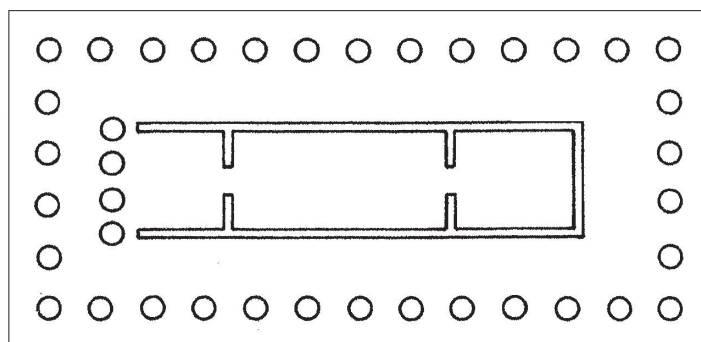


Figura 3. Pianta del tempio D a Selinunte, circa 500 a. C.

La struttura del tempio Greco, figura 3, ha simmetria di riflessione lungo il pronao e la cella. Inoltre, ciascuna parte del tempio, come le colonne, ha altre simmetrie, specialmente simmetrie di rotazione e di traslazione. I greci svilupparono anche un canone, cioè un insieme di relazioni matemati-

che che permetteva di determinare la struttura dell'artefatto. Nel caso dei templi, il canone legava tra l'altro il numero di colonne del lato lungo a quello del lato corto con la formula matematica $n_{\text{lungo}} = 2n_{\text{corto}} + 1$. Il tempio sopra mostrato è esastilo ($n_{\text{corto}} = 6$, $n_{\text{lungo}} = 13$). Questa formula era usata per produrre una struttura che, vista da lontano, fosse proporzionata, o "simmetrica".

Il linguaggio necessario per descrivere le simmetrie è la matematica. I greci svilupparono la matematica (geometria) nel V secolo a.C. introducendo i cinque corpi regolari (poliedri), cioè il tetraedro, l'ottaedro, il cubo, l'icosaedro e il dodecaedro. I poliedri regolari furono associati con i costituenti dell'Universo: fuoco (tetra-), aria (octa) terra (cubo), acqua (icosa-), e lo stesso Universo (pentadodeca-edro) (Platone, *Timeo*, 55C). Lo studio dei poliedri e della struttura matematica ad essi associata fu ulteriormente sviluppato in Sicilia da Archimede, III a.C., che introdusse 13 nuovi poliedri, cosiddetti semi-regolari o di Archimede, in aggiunta ai 5 poliedri regolari di Platone.

I greci pensarono anche che la simmetria è associata con la bellezza, $\Sigma\upsilon\mu\mu\epsilon\tau\rho\omicron\varsigma \kappa\alpha\lambda\omicron\varsigma \epsilon\sigma\tau\iota\nu$, connettendola così con l'estetica. Un esempio è mostrato in figura 4.



Figura 4. Efebo, IV Secolo a.C.

(Da H. Weyl, *Symmetry*, Princeton University Press, 1952). Simmetria bilaterale.

Lo studio della simmetria fece un altro passo avanti durante il Rinascimento Italiano. Ai poliedri regolari si aggiunsero altre strutture più complesse, i poliedri di Archimede sopra menzionati, figura 5.

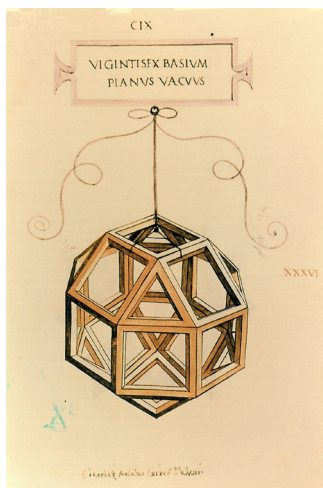


Figura 5. Poliedro di Archimede a ventisei basi.
(Da Luca Pacioli, *Divina Proportione*, Venezia, 1509).

Le simmetrie dei corpi regolari vennero descritte in dettaglio (Piero della Francesca, *De quinque corporibus regularis*, 1482). Una descrizione matematica venne introdotta, che, nel linguaggio della matematica moderna, è la teoria dei gruppi di trasformazioni, o semplicemente *teoria dei gruppi*. Si pensò che la simmetria fosse la legge fondamentale della *natura* e perciò *divina*.



Figura 6. Luca Pacioli istruisce Guidobaldo da Montefeltro nella matematica.
(Dipinto ad olio di Jacopo de' Barbari, 1494, Museo e Gallerie Nazionali di Capodimonte).

Luca Pacioli, basandosi sugli studi di Piero della Francesca, scrisse un libro che intitolò appunto *Divina Proportione*. Nella figura 6 si vede Luca Pacioli mentre istruisce il giovane Guidobaldo da Montefeltro nella matematica. In alto a sinistra si vede un poliedro di Archimede e sulla tavoletta una figura geometrica presa dal trattato di Euclide.

Il concetto di simmetria e la sua descrizione matematica, sviluppata in Italia alla fine del quattrocento, si propagò nel cinquecento in altri paesi, specialmente in Germania, dove Albrecht Dürer scrisse nel 1522 un libro sulle proporzioni.

Le simmetrie studiate dai greci (e poi nel Rinascimento) erano simmetrie geometriche: traslazioni (figura 7), riflessioni e rotazioni. Queste apparivano nell'Arte e in Natura.

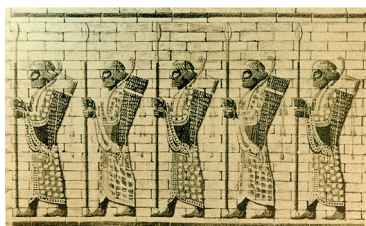


Figura 7. Portatori di lancia, dal Palazzo di Dario a Susa, VI Secolo a.C.

Alla fine del quattrocento e l'inizio del cinquecento, a seguito dello studio dei classici greci, specialmente il dialogo *Timeo* di Platone, si ricominciò a pensare che anche l'Universo ha una sua simmetria. Questa linea di pensiero culminò nell'affermazione di Keplero che il sistema planetario (conosciuto allora), Saturno, Giove, Marte, Terra, Venere e Mercurio può essere ridotto al moto di corpi regolari, figura 8 (Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 1595). Keplero concluse il suo libro con la famosa frase: *Credo spatioso numen in orbe*, Credo in un ordine geometrico dell'Universo.

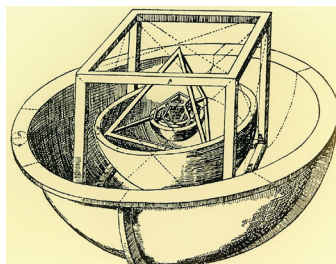


Figura 8. L'Universo secondo Keplero, da *Mysterium Cosmographicum*, Tübingen, 1595.

Simmetria in fisica

L'idea che la simmetria ha un ruolo fondamentale anche in Fisica divenne apparente mano a mano che la Fisica passò dalla descrizione dei fenomeni macroscopici a quelli microscopici. Molti aspetti della fisica sono ordinati. I migliori esempi sono le molecole e i cristalli, simmetria geometrica, figura 9.

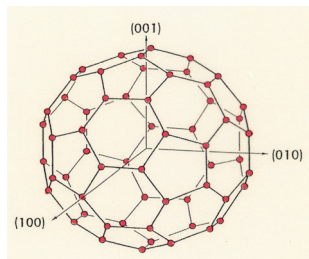


Figura 9. La molecola C_{60} con simmetria icosaedrica, I_h .

Questo tipo di simmetria è l'estensione naturale delle simmetrie studiate dai greci (e nel Rinascimento). Col passare del tempo, divenne però chiaro che altri tipi di simmetria sono presenti in Natura, non più collegate alla sistemazione geometrica di atomi in una molecola o in un cristallo, ma piuttosto alle leggi della Natura. Le simmetrie sono usate oggi in diversi modi:

Simmetrie geometriche. Queste sono simili a quelle discusse precedentemente.

Simmetrie dello spazio-tempo. Queste simmetrie sono legate alla invarianza delle leggi della fisica per trasformazioni di Lorentz.

Simmetrie di gauge. Queste sono legate alla invarianza delle leggi della fisica per certe trasformazioni, dette di „gauge“.

Simmetrie di permutazione. Queste sono legate alla invarianza per rispetto alla permutazione di due o più oggetti.

Simmetrie dinamiche. Queste sono legate alle simmetrie delle interazioni tra due o più corpi.

Le simmetrie dello spazio-tempo sono molto difficili da comprendere,

perchè implicano che lo spazio e il tempo sono la stessa entità (contrariamente alla intuizione). Per esempio, una navicella spaziale che viaggia a velocità paragonabile a quella della luce è spazialmente contratta e temporalmente dilatata. Per un osservatore fisso nel sistema inerziale, l'orologio va più lentamente che non per l'osservatore nella navicella (relatività), secondo la formula di Einstein,

$$dt = \frac{d\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Le simmetrie spazio-tempo furono introdotte nel 1905 da Lorentz e usate da Einstein negli anni seguenti per costruire la teoria della relatività ristretta.

Le simmetrie di “gauge” sono anche esse difficili da comprendere. Esse implicano che le leggi della Fisica sono invarianti per rispetto a trasformazioni di gauge. Per esempio, le leggi dell'elettromagnetismo sono invarianti per rispetto a trasformazioni del potenziale elettrico e magnetico

$$\begin{aligned} \varphi &\rightarrow \varphi' = \varphi - \frac{\partial \Lambda}{\partial t} \\ \vec{A} &\rightarrow \vec{A}' = \vec{A} + \nabla \Lambda \end{aligned}$$

dove Λ è detto “gauge”. Le simmetrie di gauge furono introdotte in elettrodinamica nella seconda parte del 19esimo secolo. Esse hanno acquistato grandissima importanza nella seconda parte del 20esimo secolo dopo la scoperta che la maggior parte (se non tutte) le leggi della fisica posseggono questo tipo di simmetria.

Un altro tipo di simmetria è la simmetria di permutazione. Questa è rilevante per un insieme di oggetti identici. Per esempio, le proprietà fisiche di un insieme di due oggetti, 1 e 2, rimangono le stesse se i due oggetti vengono scambiati $1 \leftrightarrow 2$. Questo tipo di simmetria divenne importante quando si sviluppò la meccanica quantistica (1920). Le proprietà dei sistemi fisici sono descritti in meccanica quantistica dalla funzione d'onda, ψ . Nei sistemi a molti corpi, come molecole, atomi, nuclei, ... la funzione d'onda dipende dalle coordinate dei corpi costituenti, per due particelle, $\psi(1,2)$. Si è trovato che nello scambio dei costituenti 1 e 2, ci possono essere due tipi di simmetria

$$\psi(1, 2) = \psi(1, 2)$$

$$\psi(1, 2) = -\psi(1, 2)$$

e quindi due tipi di costituenti, detti rispettivamente bosoni, dal nome del fisico indiano Bose, e fermioni, dal nome di Enrico Fermi. La simmetria di permutazione può essere facilmente illustrata, figura 10. La figura è invariante per permutazione dei cavalieri bianchi e neri (double group).

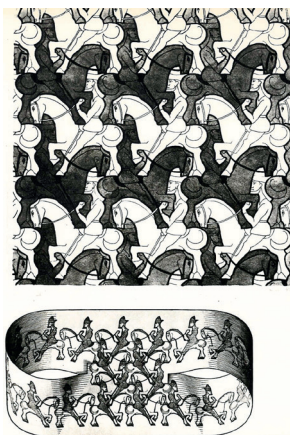


Figura 10. Studio della divisione regolare del piano con cavalieri.
Studio della tassellazione di una striscia di Möbius con cavalieri. (da M.V. Escher, 1946)

Simmetria dinamica

Una simmetria particolarmente importante nella fisica moderna è la simmetria dinamica. Negli ultimi 80 anni, simmetrie dinamiche sono state scoperte a tutti i livelli del mondo microscopico: molecole, atomi, nuclei, adroni. La simmetria dinamica si manifesta nella regolarità dello spettro di un sistema quantico. In meccanica quantistica, l'energia del sistema non è continua, ma assume valori discreti, detti livelli quantici. L'insieme dei livelli quantici è detto spettro.

Nel 1926, Wolfgang Pauli (Premio Nobel) notò che la regolarità dello spettro dell'atomo di idrogeno, figura 11, è dovuta ad una simmetria dinamica, $SO(4)$. (W. Pauli, *Über der Wasserstoffspektrum von Standpunkt der Neuen Quantenmechanik*, Z. Physik 36, 336 (1926)).

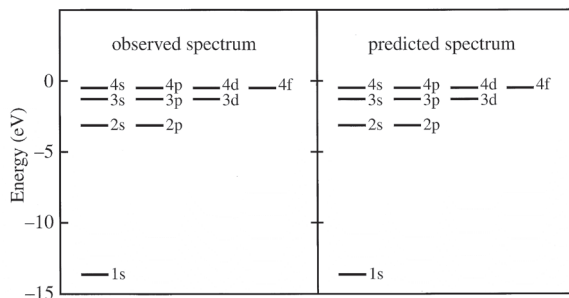


Figura 11. Lo spettro dell'atomo di idrogeno.

Nel 1961, Murray Gell-Mann (Premio Nobel) (M. Gell-Mann, *Symmetry of Baryons and Mesons*, Phys. Rev. 125, 1067 (1962)) e Yuval Nèeman (Premio Wigner) (Y. Nèeman, *Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance*, Nucl. Phys. 26, 222 (1961)) notarono che lo spettro degli adroni è molto regolare e scoprirono che può essere descritto da una simmetria dinamica, detta simmetria di sapore, $SU(3)$, come mostrato in figura 12. La scoperta della simmetria di sapore e della susseguente simmetria di colore, portò alla teoria delle particelle elementari detta cromodinamica quantistica (QCD).

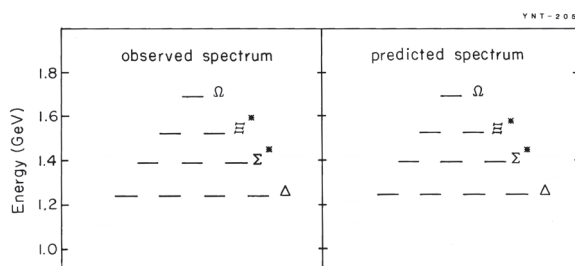


Figura 12. Lo spettro del decupletto di barioni.

Nel 1974, Akito Arima e io (Premio Wigner) notammo che gli spettri di molti nuclei sono regolari e scoprimmo che potevano essere descritti da una simmetria dinamica detta $U(6)$. (A. Arima and F. Iachello, *Collective Nuclear States as Representations of a $SU(6)$ Group*, Phys. Rev. Lett. 35, 1069 (1975)). La scoperta della simmetria dinamica $U(6)$ portò allo sviluppo di un modello del nucleo atomico, detto modello a bosoni interagenti.

La simmetria dinamica $U(6)$ è particolarmente interessante, poichè contiene al suo interno più sottosimmetrie, corrispondenti alla rottura dinamica di $U(6)$ nei suoi sottogruppi

$$(III) : U(6) \supset SO(6).$$

The figure displays two energy level diagrams side-by-side, comparing experimental data (Exp.) with theoretical predictions (Th.) for the nucleus $^{156}\text{Gd}_{92}$ (left) and $^{156}\text{Th}_{90}$ (right). The vertical axis represents energy in MeV, ranging from 0 to 3. The horizontal axis represents the SU(3) symmetry labels, which are (24,0), (20,2), (16,4), and (18,0). The diagrams show the relative energies of various states, with the ground state at 0 MeV. The theoretical predictions are shown as lines connecting the experimental data points, indicating the SU(3) symmetry breaking pattern.

Nel 1981, io notai che gli spettri di molte molecole sono regolari e scoprii che possono essere descritti da una simmetria dinamica, $U(4)$. (F. Iachello, *Algebraic Methods for Molecular Vibration-Rotation Spectra*, Chem. Phys. Lett. 78, 581 (1981)). La scoperta della simmetria $U(4)$ portò allo sviluppo di un modello delle molecole detto modello a vibroni. Anche in questo modello ci sono delle sottosimmetrie, corrispondenti alla rottura di $U(4)$ nei suoi sottogruppi

$$(II) : U(4) \supset SO(4)$$

Figure 1 consists of two side-by-side energy level diagrams. The left diagram is for H_2 and the right diagram is for Th . Both diagrams plot energy E in cm^{-1} on the y-axis, ranging from -40,000 to 10,000. The H_2 diagram shows a series of energy levels, with the lowest level labeled (1) and the highest labeled (14). The Th diagram shows a similar series of energy levels, also labeled (1) through (14). The levels are represented by horizontal lines, and the labels are placed to the right of the lines.

38

Le simmetrie dinamiche non vivono nello spazio-tempo ordinario, ma in spazi astratti a molte dimensioni. È quindi difficile visualizzarle, se non nel modo indiretto descritto qui sopra (livelli di energia). Lo studio di questi spazi astratti è uno degli aspetti più importanti della fisica contemporanea. Ad essi sono stati dati vari nomi: spin isotopico, sapore, colore, F-spin, ecc. Particolarmente importante è lo spazio di colore che determina la struttura del protone e neutrone, ingredienti fondamentali della materia. Lo spazio di colore è tri-dimensionale, la qual cosa ha indotto alcuni a pensare ad una connessione ontologica, Dante, Paradiso, XXXIII, 115:

*Nella profonda e chiara sussistenza
dell'alto lume parvemi tre giri
di tre colori e d'una contenenza.*

Una ulteriore ricerca di ordine: supersimmetria

Recentemente (1974) il concetto di simmetria è stato ulteriormente allargato a quello di “supersimmetria”. Come accennato precedentemente, esistono in Natura due tipi di particelle dette rispettivamente bosoni e fermioni. La supersimmetria è invarianza per rispetto a trasformazioni che cambiano bosoni in fermioni e viceversa. Essa è una simmetria del tutto sorprendente perchè i bosoni e i fermioni sono particelle completamente diverse. Questo tipo di simmetria è stato introdotto da Julius Wess (Premio Wigner) e Bruno Zumino (Premio Wigner) per applicazioni alla fisica delle particelle elementari. (J. Wess and B. Zumino, *Supergauge transformations in four dimensions*, Nucl. Phys. B70, 39 (1974)). Come nel caso delle simmetrie, ci sono vari tipi di supersimmetrie:

Supersimmetrie geometriche

Supersimmetrie dello spazio-tempo

Supersimmetrie di gauge

Supersimmetrie di permutazione

Supersimmetrie dinamiche

Qui descriverò brevemente le supersimmetrie dinamiche. Contrariamente al caso delle simmetrie dinamiche che sono state osservate a tutti i livelli

del mondo microscopico come sopra menzionato, supersimmetrie dinamiche sono state osservate al momento solo nei nuclei atomici.

Nel 1980, io (Premio Meitner, Premio Fermi) notai che gli spettri di certi nuclei, in parte con un numero pari di protoni e neutroni (nuclei bosonici) e in parte con un numero dispari di protoni e neutroni (nuclei fermionici) sono regolari e possono essere descritti da una supersimmetria dinamica $U(6/4)$. (F. Iachello, *Dynamical Supersymmetry in nuclei*, Phys. Rev. Lett. 44, 772 (1980)). Un esempio è mostrato nella figura 15.

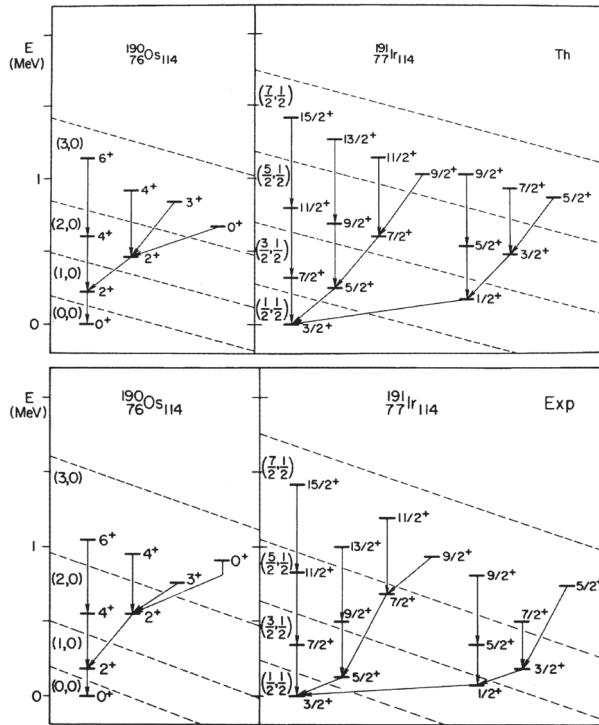


Figura 15. Lo spettro della coppia di nuclei ^{190}Os and ^{191}Ir .

Negli ultimi anni, in seguito a esperimenti in Germania, Svizzera e negli USA, regolarità sono state osservate in spettri di sistemi ancora più complessi, figura 16. La scoperta di queste regolarità (A. Metz, J. Jolie, G. Graw *et al.*, Phys. Rev. Lett. 83, 1542 (1999)) ha confermato la presenza di supersimmetrie nei nuclei atomici in accordo con la teoria da me proposta nel 1980. Al momento, questi sono gli unici esempi di supersimmetria osservati sperimentalmente in Natura.

Le simmetrie dinamiche producono strutture quantistiche ordinate. Queste strutture sono a volte molto complicate e difficili da riconoscere, figura 17. Più complicata è la struttura, più utile è il concetto di simmetria. Da questa osservazione è nato il programma semplicità nella complessità da me introdotto negli anni novanta.

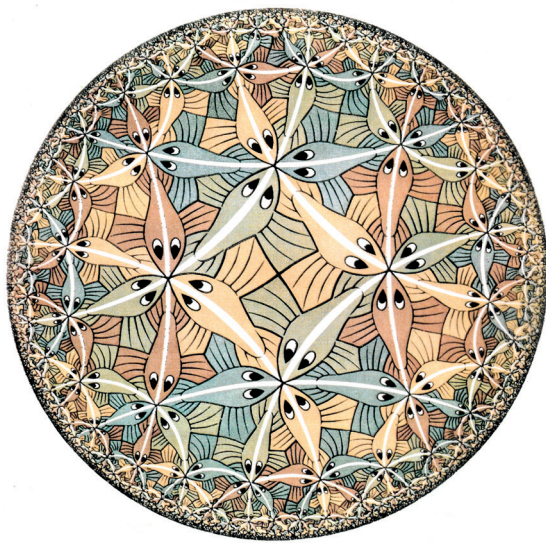


Figura 17. Tassellazione del piano iperbolico. (Da M.C. Escher, *Circle Limit III*, 1959).

Più penetriamo nei misteri della Natura, più incontriamo la Simmetria.

Ringrazio il Senato Accademico dell'Ateneo di Catania per avermi conferito la Laurea Honoris Causa per lo studio delle simmetrie e supersimmetrie dinamiche nei nuclei e nelle molecole.

Symmetry: the search for order in nature

One of the major aspirations of mankind has always been that of finding an order in the Universe. In this *lectio doctoralis*, I will illustrate briefly the concept of symmetry (synonym of order) in art and science, and mention my contributions to development of this concept with the discovery of dynamical symmetries in nuclei and in molecules (1974-1980), and of an even more complex type of symmetry, called dynamical supersymmetry, which I discovered in 1980 and that has been confirmed in 1999-2000.

Symmetry in nature and art

The idea of order in the Universe, must have come, at least in part, from the observation that several forms of Nature, even the most complex, are often ordered. An example is shown in Fig.1.

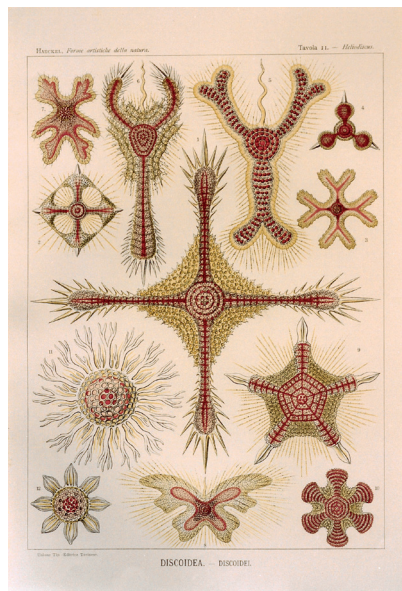


Fig. 1. Living creatures of the family *discoidea*. (From E. Haeckel, *Kunstformen der Natur*, Leipzig, 1899).

As mentioned above, order is synonym of symmetry. The concept of symmetry, from the Greek *συμμετρος*, well-ordered, well-proportioned,

literally “with measure”, was originally introduced to describe certain properties of artifacts [Polykleitos, *Περὶ βελοποικων*, IV, 2]. All ancient civilizations used this concept in an attempt to imitate forms of Nature. Two examples are shown in Fig.2.



Fig.2. (a) Decorative motif (Sumerian, circa 2000 B.C.): translation symmetry.
(b) Tile found at the Megaron in Tyrins (Late Helladic, circa 1200B.C.): reflection symmetry.

The use of symmetry in art and architecture was perfected by the Greeks and the Romans. The sculptor Polykleitos in his book cited above on the art of construction discussed its meaning and the architect Vitruvius wrote that “symmetry is the result of proportions between different parts”. Symmetry became an essential part of any artifact and its use reached its peak in the Greek temple, as one can see here in Sicily in the temples at Agrigento, Selinunte and Segesta.

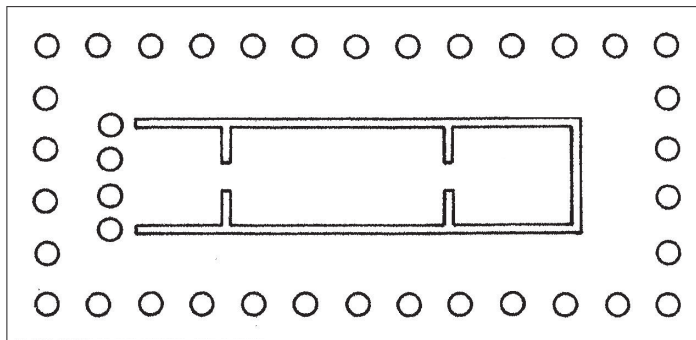


Fig. 3. Plan of Temple D at Selinunte, Sicily (Circa 500 B. C.)

The structure of the Greek temple has reflection symmetry along its inner part, Fig.3. Also, each part of the temple, as for example the columns, has additional symmetries, especially rotation and translation symmetry. The Greeks developed a canon, i.e. a set of mathematical relations determi-

ning the structure of the artifact. In the case of the temple, the canon gave a relationship between the number of columns in the long side and that in the short side, according to the formula $n_{\text{long}} = 2n_{\text{short}} + 1$. In Fig.3, $n_{\text{short}} = 6$, $n_{\text{long}} = 13$. This formula was used to give rise to a structure that seen from the distance was proportionate, or “symmetric”.

The language of symmetries is mathematics. The Greeks developed mathematics (geometry) in the V Century B.C., introduced the five regular polyhedra, tetrahedron, octahedron, cube, icosahedron and dodecahedron, and associated them with the constituents of the Universe: fire (tetra-), air (octa-), earth (cube), water (icosa-) and the Universe itself (penta-dodecahedron) (Plato, *Timaeus*, 55C). The study of polyhedra and the mathematical structure associated with them was further developed in Sicily by Archimedes, III century B.C., who introduced 13 new polyhedra, the so-called semi-regular polyhedra or Archimedean polyhedra, in addition to the 5 regular polyhedra.

The Greeks also thought that symmetry is associated with beauty, Σύμμετρος καλός ἐστιν, thus connecting symmetry with aesthetic. An example is shown in Fig.4.



Fig. 4. Ephebus, IV Secolo B.C.
(From H. Weyl, *Symmetry*, Princeton University Press, 1952).

The study of symmetry took another step forward during the Italian Renaissance. Regular polyhedra were complemented by more complex structures, the Archimedean polyhedra mentioned above, Fig. 5.

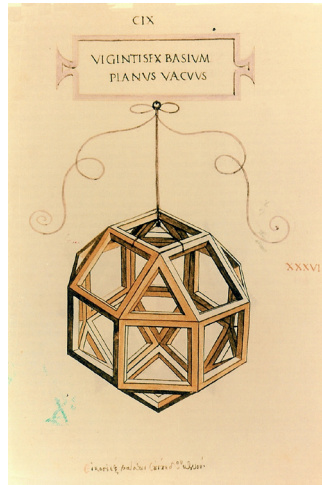


Fig.5. An Archimedean polyhedron with 26 bases (after Leonardo da Vinci). (From Luca Pacioli, *Divina Proportione*, Venezia, 1509).

The symmetries of the regular bodies were described in detail (Piero della Francesca, *De quinque corporibus regularis*, 1482). A mathematical description was introduced (projective transformation), which, when translated into modern mathematical language, is the theory of group transformation, or simply *group theory*. Symmetry was assumed to be the fundamental law of Nature and therefore above all (*divina*).



Fig. 6. Luca Pacioli instructing Guidobaldo da Montefeltro in mathematics (geometry). (Oil painting by Jacopo de' Barbari, 1494, *Museo e Gallerie Nazionali di Capodimonte*).

Luca Pacioli, following previous studies of Piero della Francesca, wrote a book entitled *Divina Proportione*. In Fig. 6, one can see Luca Pacioli instructing the young Guidobaldo da Montefeltro in mathematics. On the top left one can see an Archimedean polyhedron, and on the tablet a geometric figure from the *Elements* of Euclid.

The concept of symmetry and its mathematical description, developed in Italy at the end of the 15th Century, spread to other Countries, especially Germany, at the beginning of the 16th Century, when Albrecht Dürer wrote a book on proportions.

The symmetries studied by the Greeks (and then in the Renaissance) were geometric symmetries, translations (Fig. 7), reflections and rotations. They appear in Art and Nature.

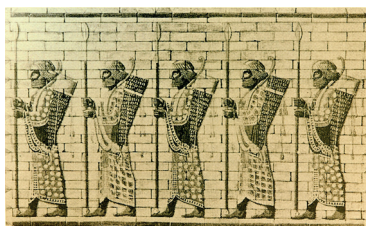


Fig . 7. Warriors (From a frieze in the Palace of Darius at Susa, VI Century B.C.)

At the end of the 15th Century, following a renewed interest in the study of the Classics, especially of Plato's dialogue *Timaeus*, the idea that the Universe is symmetric came back. This line of thought culminated in the assertion by Kepler that the planetary system (known at the time), Saturn, Jupiter, Mars, Earth, Venus and Mercury can be reduced to the motion of regular bodies, Fig. 8. (Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 1595). Kepler concluded his book with the sentence: *Credo spatioso numen in orbe*, I believe in a geometric order of the Universe.

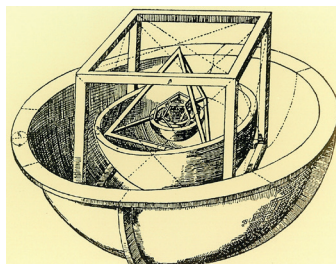


Fig. 8. The Universe according to Kepler (From *Mysterium Cosmographicum*, Tübingen, 1595).

Symmetry in physics

The idea that symmetry plays a fundamental role also in Physics became apparent as soon as Physics moved from a description of macroscopic phenomena to that of microscopic phenomena. Several aspects of physics are ordered. The best examples are molecules and crystals, geometric symmetry, Fig. 9.

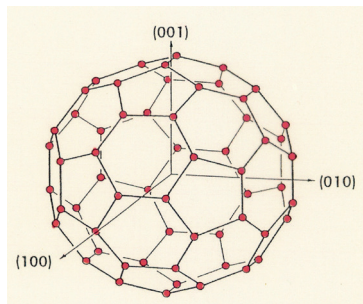


Fig. 9. The molecule C_{60} with icosahedral symmetry, I_h .

This type of symmetry is a natural extension of the symmetries studied by the Greeks. As time went on, it became clear that other types of symmetry are present in Nature, not related to the geometric arrangements of atoms in a molecule or a crystal, but rather to the laws of Nature. Symmetries are used today in a variety of ways:

Geometric symmetries. These are similar to those described above.

Space-time symmetries. These symmetries are related to the invariance of the laws of Physics under Lorentz transformations.

Gauge symmetries. These are related to invariance under a set of transformation, called “gauge” transformations.

Permutation symmetries. These are related to invariance under permutation of two or more bodies.

Dynamic symmetries. These are related to symmetries of the interactions between two or more bodies.

Space-time symmetries are difficult to understand, since they imply that

space and time are the same entity (contrary to intuition). For example, a spacecraft traveling at speeds comparable to the speed of light is contracted in space and dilated in time. For an observer in the inertial system, clocks go slower than for an observer in the spacecraft (relativity), according to Einstein formula

$$dt = \frac{d\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Space-time symmetries were introduced by Lorentz in 1905 and used by Einstein in the following years to construct the theory of relativity.

Gauge symmetries are also difficult to understand. They imply that the laws of Physics are invariant under a set of transformations called gauge transformations. For example, the laws of electromagnetism are invariant with respect to transformations of the electric and magnetic potentials

$$\begin{aligned} \varphi &\rightarrow \varphi' = \varphi - \frac{\partial \Lambda}{\partial t} \\ \vec{A} &\rightarrow \vec{A}' = \vec{A} + \nabla \Lambda \end{aligned}$$

where Λ is called gauge. Gauge symmetries were introduced in electrodynamics in the second part of the 19th century. They have become very important in the second part of the 20th Century, when it was discovered that the major part (if not all) of the laws of physics have this type of symmetry.

Another type of symmetry is permutation symmetry. This symmetry is relevant to a system of identical objects. For example, physical properties of a system of two objects 1 and 2, remain the same if the two objects are interchanged, $1 \leftrightarrow 2$. This type of symmetry became important when quantum mechanics was introduced (1920). Properties of physical systems are described in quantum mechanics by the wave function ψ . In many-body systems, molecules, atoms, nuclei,..., the wave function depends on the coordinates of the two objects, for two particles $\psi(1,2)$. It has been found that in the interchange of the two constituents 1 and 2, there are two types of symmetry

$$\psi(1, 2) = \psi(2, 1)$$

$$\psi(1, 2) = -\psi(2, 1)$$

and therefore two types of constituents, called respectively bosons, from the name of the Indian physicist Bose, and fermions from the name of Enrico Fermi. Permutation symmetry can be easily displayed, Fig. 10. This figure is invariant under permutation of the horseman, white and black (double group).

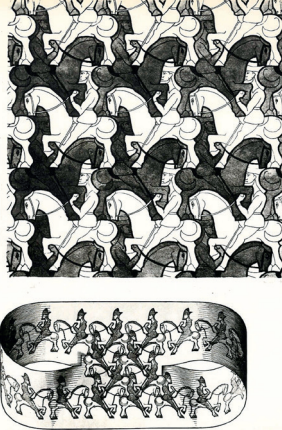


Fig. 10. Study of the regular division of the plane with horsemen. Study of the tessellation of a Möbius strip with horsemen. (From M.V. Escher, 1946)

Dynamic symmetry

A type of symmetry particularly important in modern physics has been dynamic symmetry. In the last 80 years dynamic symmetries have been discovered at all levels of the microscopic world: molecules, atoms, nuclei, hadrons. The manifestation of dynamic symmetry is the regularity of the spectrum of a quantum system. In quantum mechanics, the energy of the system is not continuous, but takes discrete values, called quantum levels. The ensemble of quantum levels is called spectrum.

In 1926, Wolfgang Pauli (Nobel Prize) noted that the regularity of the spectrum of the hydrogen atom is due to the occurrence of a dynamic symmetry, $SO(4)$, Fig.11. (W. Pauli, *Über der Wasserstoffspektrum von Standpunkt der Neuen Quantenmechanik*, Z. Physik 36, 336 (1926)).

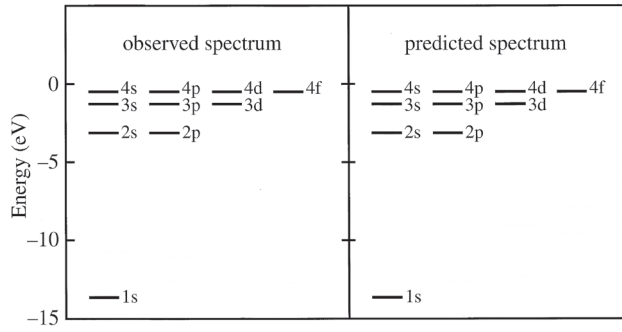


Fig. 11. The spectrum of the hydrogen atom is shown as an example of $SO(4)$ symmetry.

In 1961, Murray Gell-Mann (Nobel Prize) (M. Gell-Mann, *Symmetry of Baryons and Mesons*, Phys. Rev. 125, 1067 (1962)) e Yuval Ne’eman (Wigner Prize) (Y. Ne’eman, *Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance*, Nucl. Phys. 26, 222 (1961)) noted that the spectra of elementary particles known as hadrons are very regular and can be described by a dynamic symmetry, called flavor symmetry, $SU(3)$, as shown in Fig. 12. The discovery of flavor symmetry and the subsequent color symmetry, led to the theory of elementary particle physics called quantum chromodynamics (QCD).

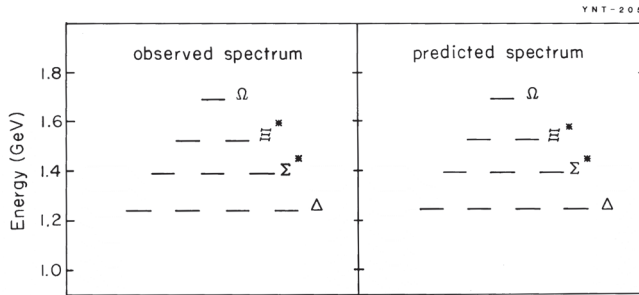


Fig. 12. The spectrum of the baryon decuplet is shown as evidence of a $SU(3)$ symmetry.

In 1974, Akito Arima e I (Wigner Prize) noted that the spectra of many nuclei are regular and can be described by a dynamic symmetry called $U(6)$. (A. Arima and F. Iachello, *Collective Nuclear States as Representations of a $SU(6)$ Group*, Phys. Rev. Lett. 35, 1069 (1975)). The discovery of the dynamic symmetry $U(6)$ led to the development of a model of nuclei, called Interacting Boson Model. The dynamic symmetry $U(6)$ is particularly interesting, since it contains several sub-symmetries, corresponding to the breaking of $U(6)$ into its subgroups

$$(I) : U(6) \supset U(5)$$

$$(II) : U(6) \supset SU(3)$$

$$(III) : U(6) \supset SO(6).$$

An example of $SU(3)$ symmetry is shown in Fig.13.

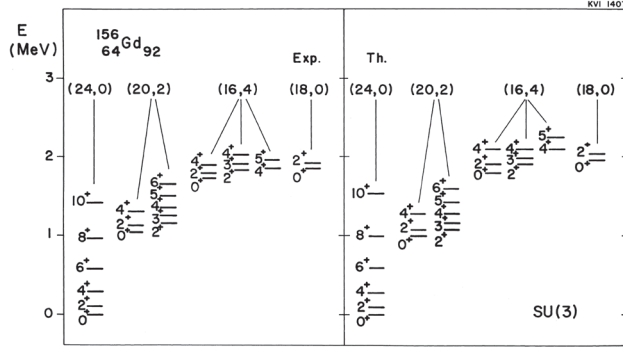


Fig. 13. The spectrum of the nucleus ^{156}Gd is shown as an example of $SU(3)$ symmetry.

In 1981, I noted that the spectra of several molecules are regular and can be described by a dynamic symmetry $U(4)$. (F. Iachello, *Algebraic Methods for Molecular Vibration-Rotation Spectra*, Chem. Phys. Lett. 78, 581 (1981)). The discovery of the $U(4)$ symmetry led to the development of a model of molecules called vibron model. Also in this model there are sub-symmetries, corresponding to the breaking of $U(4)$ into its subgroups

$$(I) : U(4) \supset U(3)$$

$$(II) : U(4) \supset SO(4)$$

An example of $SO(4)$ symmetry in molecules is shown in Fig.14.

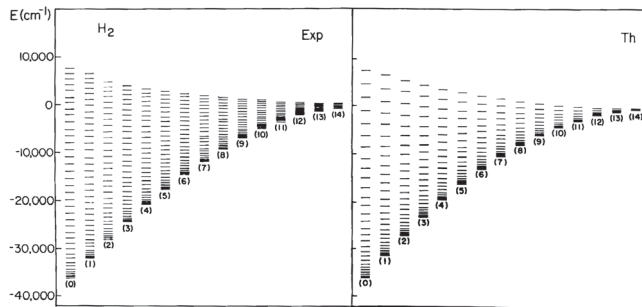


Fig. 14. The spectrum of the H_2 molecule is shown as an example of $SO(4)$ symmetry.

Dynamic symmetries do not “live” in ordinary phase-space, but in some abstract multidimensional space. It is therefore difficult to display them, except in the indirect fashion described above (energy levels). The study of these abstract spaces is one of the most important aspects of modern physics. Different names have been given to these spaces: isotopic spin, flavor, color, F-spin, etc. Particularly important is color that determines the structure of protons and neutrons. Color is a three dimensional space. This has led some people to speculate that it is connected with the Trinity (ontological connection).

Further search for order: supersymmetry

Recently (1974) the concept of symmetry has been further enlarged to “supersymmetry”. As mentioned above, there exist in Nature two types of particles, called bosons and fermions. Supersymmetry is invariance under transformations that interchange bosons with fermions and vice versa. This is a very surprising type of symmetry, since bosons and fermions are totally different particles. This type of symmetry was introduced by Julius Wess (Wigner Prize) and Bruno Zumino (Wigner Prize) for applications to elementary particle physics. (J. Wess and B. Zumino, *Supergauge transformations in four dimensions*, Nucl. Phys. B70, 39 (1974)). As in the case of symmetries, there are various types of supersymmetries:

- Geometric supersymmetries

- Space-time supersymmetries

- Gauge supersymmetries

- Permutation supersymmetries

- Dynamic supersymmetries

Here I will briefly describe dynamic supersymmetries. Contrary to the case of dynamic symmetries observed at all levels of the microscopic world, dynamic supersymmetries have been observed at the moment only in atomic nuclei.

In 1980, I (Meitner Prize, Fermi Prize) noted that the spectra of certain nuclei, in part with an even number (bosonic nuclei) and in part with an

odd number (fermionic nuclei) of protons and neutrons are regular and can be described by a dynamic supersymmetry $U(6/4)$. (F. Iachello, *Dynamic Supersymmetry in nuclei*, Phys. Rev. Lett. 44, 772 (1980)). An example is shown in Fig.15.

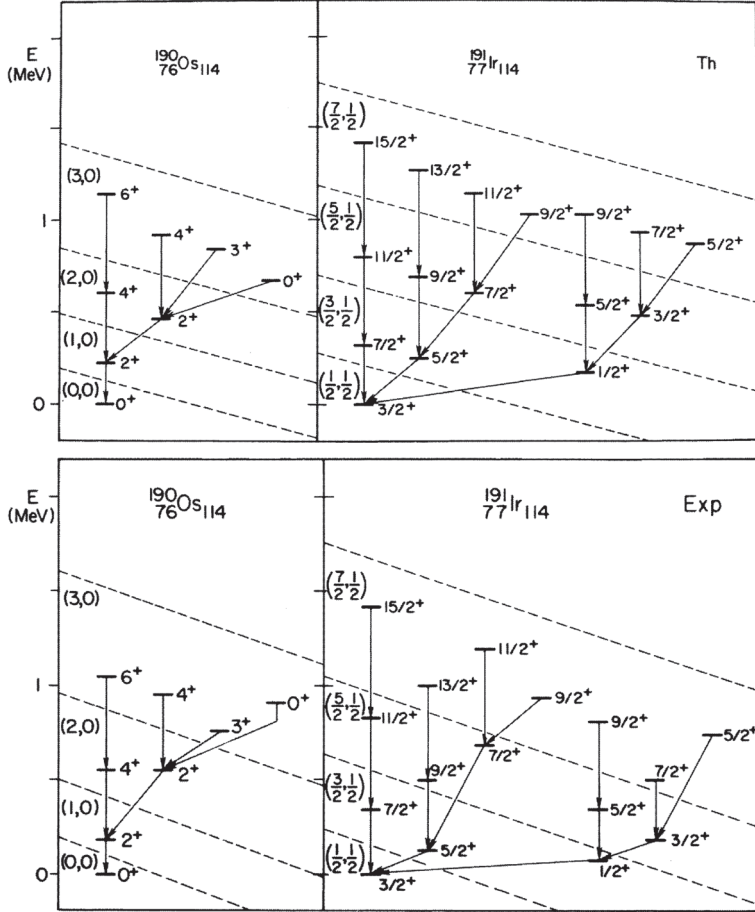


Fig. 15. The spectra of ^{190}Os and ^{191}Ir are shown as an example of $U(6/4)$ symmetry.

In recent years, as a result of experiments in Germany, Switzerland and USA, regularities in the spectra of even more complex nuclei have been observed, Fig.16. The discovery of these regularities (A. Metz, J. Jolie, G. Graw *et al.*, Phys. Rev. Lett. 83, 1542 (1999)) has confirmed the occurrence of supersymmetry in atomic nuclei, in agreement with the theory that I proposed in 1980. At the moment, these are the only examples of supersymmetry in Nature.

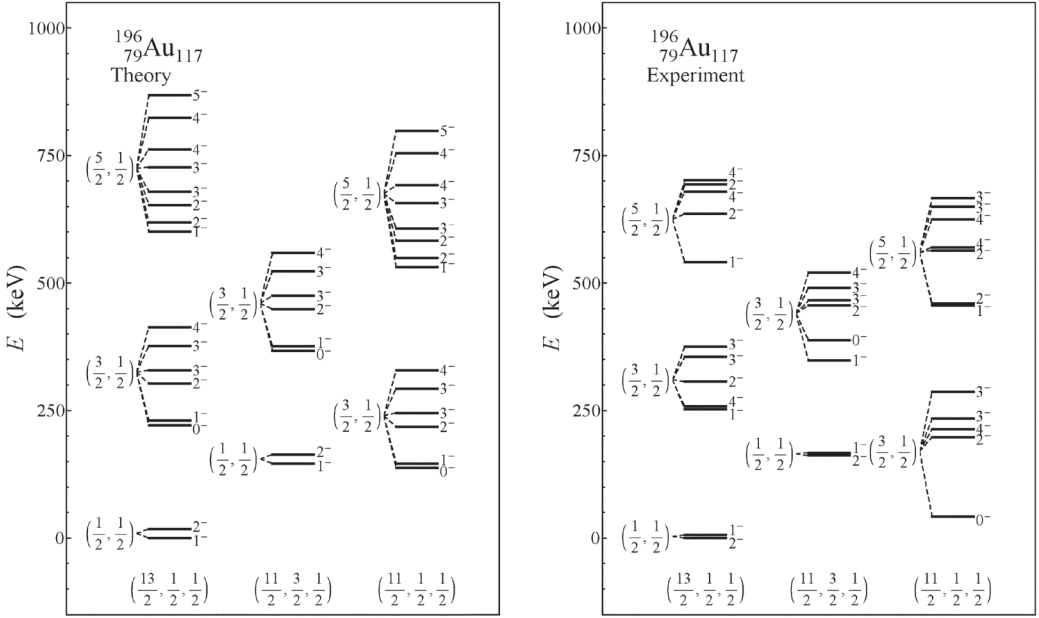


Fig. 16. The spectrum of ^{196}Au is shown as an example of supersymmetry in complex systems.

Wess and Zumino also suggested in 1974 that the laws of Nature are invariant with respect to supersymmetric transformations of elementary particles, in part fermionic (quarks) and in part bosonic (squarks) or in part bosonic (gluons) and in part fermionic (gluinos). Quarks and gluons are known. The search for supersymmetric partners squarks and gluinos is at the moment one of the most important aspects of elementary particle physics and a large accelerator has been built in Geneva, Switzerland, called Large Hadron Collider (LHC) to search for these particles. LHC has entered the running phase in 2010, but no supersymmetric particle has been discovered yet. Further experiments are being carried out and we will find out soon if supersymmetric partners of quarks and gluons exist in Nature and therefore if supersymmetry is a fundamental law of Nature, or simply a symmetry of effective interactions in nuclei.

In conclusion, Nature displays at all levels of the microscopic world an ordered structure. As the German mathematician Hermann Weyl wrote: *Nature loves symmetry.*

Dynamic symmetries give rise to ordered quantum structures. These structures are often very complex and difficult to recognize as in the Fig.17. However, the more complex is the structure, the more useful is the concept of symmetry. From this observation arose the program *Simplicity in complexity* that I introduced in the 1990's.

The more we enter into the mysteries of Nature, the more we find Symmetry.

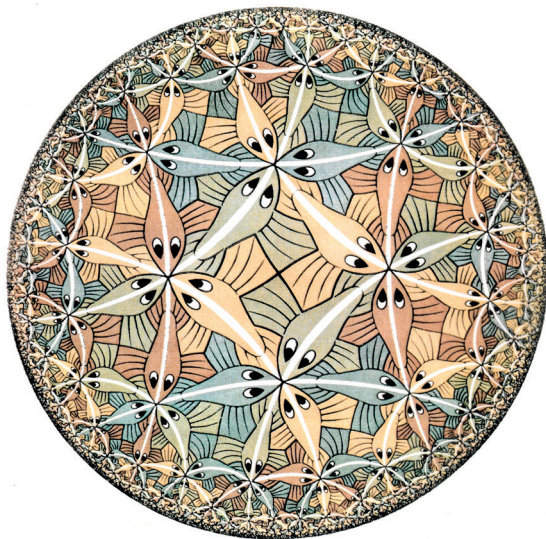


Fig. 17. Tessellation of the hyperbolic plane (From M.C. Escher, *Circle Limit III*, 1959).

I wish to thank the Academic Senate of the University of Catania for bestowing upon me an Honorary Degree for the study of dynamic symmetries and supersymmetries in nuclei and molecules.

