

Emilio Gatti

Giulio Natta nel Politecnico di Milano

Giulio Natta in the Politecnico di Milano

Giulio Natta was a charismatic person who, in my opinion, represents the ideal model of the professor scientist in a polytechnic University.

He was a theoretical and experimental academic of basic science, knew and used the most updated experimental means of analysis of the molecular structure of the matter (at the time, X ray and electron diffraction), and knew the synthetic macromolecules obtained by means of new processes of stereospecific catalysis he conceived.

He was deeply an engineer in knowing the features of the materials appropriate to applications in every field of chemical, mechanical, structural and electrical engineering. He did not limit himself to laboratory synthesis or to the chemical and physical characterization of the macromolecular materials he obtained, but he designed pilot plants and assessed also the patent, legal and economic issues of industrial plants, with the involvement of enlightened industrialists who gave the Politecnico the resources to erect buildings and laboratories provided with the most sophisticated experimental equipment and to have appropriate human resources: professors, researchers, students following doctorate courses ahead of their time. Thus Natta created a permanent cultural environment of scientists that attracted researchers from the world over and produced applied chemical engineers for the Italian and world polymer industry. Results and plants connected to his patents were fundamental for the development of the production and use of new plastic materials provided with previously unimaginable properties.

Giulio Natta è stato una figura carismatica che secondo me rappresenta il modello ideale dello scienziato professore in un'università politecnica. È stato uno studioso teorico e sperimentale delle scienze di base, conoscitore e utilizzatore dei più recenti mezzi sperimentali di analisi della struttura molecolare della materia (al tempo diffrazione di raggi X e di elettroni), conoscitore delle macromolecole sintetiche ottenute con nuovi processi di catalisi stereospecifica da lui ideati.

È stato profondamente ingegnere nel conoscere le caratteristiche dei materiali adatti alle applicazioni in ogni campo dell'ingegneria chimica, meccanica, strutturale, elettrica. Non si è limitato alle sintesi in laboratorio e alla caratterizzazione chimica e fisica dei materiali macromolecolari ottenuti, ma ha progettato impianti pilota e ha valutato per gli impianti industriali e anche gli aspetti brevettuali, legali ed economici coinvolgendo illuminati industriali che hanno dato le risorse al Politecnico per costruire edifici e laboratori muniti delle più moderne attrezzature sperimentali e di disporre di adeguate risorse umane: professori, ricercatori, dottorandi ante litteram.

Natta ha così creato un permanente ambiente culturale di Scienziati che ha attratto ricercatori da tutto il mondo e ha prodotto ingegneri chimici applicati per l'industria dei polimeri italiana e mondiale. I risultati e gli impianti legati ai suoi brevetti sono stati determinanti per lo sviluppo della produzione e dell'impiego di nuovi materiali plastici dotati di proprietà prima impensabili.

Io, elettronico, strumentista per le esperienze di fisica nucleare, non ho avuto l'occasione di lavorare con il grande Maestro Giulio Natta, ma l'ho conosciuto al Politecnico e in vacanza nella sua villa di Champoluc, apparentemente timido ma sempre disponibile al colloquio scientifico, umile nella sua grandezza.

Il collega prof. Allegra mi ha pregato di scrivere queste righe, pensando che, come professore ex decano del Politecnico, potessi scrivere di quanto Natta ha dato al Politecnico.

Io posso solo dire: un irraggiungibile esempio, le sue scoperte e la sua Scuola.

Non oso dire di più perché Natta stesso ha detto tutto, con estrema chiarezza, nella prolusione che ha pronunciato in occasione dell'apertura dell'anno accademico 1957-1958 cdi seguito riportata.

1.
Immagine di Giulio Natta,
prese nel 1963, alla vigilia
del premio Nobel
Photo of Giulio Natta,
taken in 1963, on the eve
of the Nobel Prize



As an electronics engineer and instrumentation expert in nuclear physics, I did not have the chance to work with great Master Giulio Natta, but I knew him at the Politecnico and on holiday in his Champoluc house, apparently timid but always ready for scientific talks, humble in his greatness. My colleague, professor Allegra, asked me to write these lines, considering that, in my capacity of former senior professor at Politecnico, I would write about how much Natta gave to the Politecnico. Natta represented an unreachable example, for his discoveries and his School.

I do not dare say more, because Natta himself said everything, with utter clarity, in the inaugural lecture he made on the occasion of the opening of the 1957-1958 academic year, which follows below.

**La sintesi di macromolecole organiche
a struttura ordinata fonte
di nuovi materiali da costruzione
Prolusione del Professor Giulio Natta
A.A. 1957.1958**

Ho aderito con una certa perplessità al gentile invito del nostro Rettore Professor Gino Cassinis, di riassumere in questa occasione quanto si è fatto in questo Politecnico nel campo della chimica macromolecolare, perché avrei preferito rimandarlo ad uno dei prossimi anni. E ne dico subito la ragione: un auditorio prevalentemente costituito da ingegneri e da prossimi ingegneri è, per la massima parte, formato da persone molto realistiche, portate a trattare di cose concrete, corrispondenti a delle realtà fisiche, e per le quali la realtà fisica è racchiusa in regole matematiche. È un pubblico quindi che non ama le esstrapolazioni.

Avrei perciò preferito parlarvi delle nuove scoperte, sbocciate nei laboratori scientifici di questa Scuola, soltanto quando i risultati avessero superato non solo la fase delle ricerche di laboratorio, e la fase attualmente in corso, di realizzazione negli impianti pilota e nei primi impianti industriali, ma i nuovi ritrovati si fossero praticamente, materialmente imposti, con il peso di decine di migliaia di tonnellate di prodotti diffusi nei principali mercati di tutto il mondo. Ossia quando i nuovi prodotti creati dal chimico fossero diventati in larga scala disponibili per le opere degli ingegneri e degli architetti quali nuovi materiali da costruzione.

Tale fase non sarà raggiunta dal complesso delle produzioni europee, americane e giapponesi (che applicheranno i nostri principi), che fra uno o due anni.

Ma il nostro Rettore Professor Cassinis, ed il Preside della nostra Facoltà di Ingegneria, Professor De

Marchi, hanno desiderato che venisse reso noto, già sin d'ora, un caso che può essere considerato tipico, in relazione ad una delle più importanti funzioni espletate dall'Università, quella di pioniere nel campo della scienza. Il progresso scientifico, soprattutto nel campo chimico è stato, si può dire, sempre il presupposto necessario ad ogni grande nuova realizzazione.

In un periodo in cui anche persone autorevoli si sono espresse in modo pessimistico sulla rispondenza e funzionalità delle Università Italiane, noi sentiamo il dovere di affermare che Istituti del Politecnico di Milano, sia da un punto di vista didattico, ma ancor più dal punto di vista della ricerca scientifica, assolvono in pieno il loro compito.

Chi vi parla non crede di peccare di immodestia dicendo che il lavoro effettuato in un Istituto di Chimica del nostro Politecnico ha avuto l'onore di essere particolarmente apprezzato e riconosciuto in tutto il mondo chimico. Lo provano le citazioni su pubblicazioni straniere, le visite di Capi dei più importanti laboratori di ricerca chimica di industrie europee ed americane, l'invito a fare delle nostre ricerche il tema del discorso inaugurale del 16° Congresso Internazionale di Chimica tenutosi a Parigi il luglio scorso, gli inviti a tenere cicli di conferenze presso Università ed i più grandi Istituti di ricerche industriali degli Stati Uniti d'America. Ciò mi incoraggia ad accennarvi al lavoro finora effettuato nel mio Istituto, perché si sappia quanto i Laboratori scientifici della Facoltà di Ingegneria del nostro Politecnico fanno e faranno per il progresso

della scienza, della nostra industria e della nostra economia.

In un paese povero di materie prime, come l'Italia, l'unica materia prima di cui si dispone a condizioni più favorevoli, sono la mente e le mani degli uomini. Non dico solo la mente, perché nel campo chimico non basta abbandonarsi alla speculazione teorica, ma occorre realizzare concretamente, e spesso a spese di lunghe, faticose, incerte ricerche pratiche, per le quali anche la manualità sperimentale assume un'importanza non lieve. Inoltre occorre, per affrontare campi completamente nuovi, anche una certa dose di immaginazione, qualità sovente considerata antitetica con le funzioni dell'ingegnere.

Vi parlerò oggi sulla costruzione di molecole giganti, cioè di macromolecole che si possono paragonare ad edifici architettonici costruiti dal concatenamento di migliaia o di centinaia di migliaia od anche di milioni di elementi costruttivi. Le piccole molecole di partenza, chiamate unità monomeriche, sono paragonabili ai mattoni di un edificio e ciascuna di esse ha dimensioni di frazioni di un milionesimo di millimetro.

È necessaria qui una premessa intesa a precisare quanto era noto nel campo delle grandi molecole prima che, in questo Politecnico, venissero scoperti i processi di catalisi stereospecifica. Era noto che piccole molecole asimmetriche di partenza si potevano unire per lo più soltanto in modo casuale e disordinato in macromolecole. Sino a pochi anni fa, esclusi certi casi particolari (ad es. esempio la produzione del polietene e del nylon) in cui le unità

**The synthesis of organic macromolecules
with ordered structure, source of new
building materials
Inaugural lecture by Professor Giulio Natta
A.A. 1957.1958**

I had some doubts when accepting the kind invitation of our Rector, Prof. Gino Cassinis, to summarize on this occasion what has been done in this Politecnico in the field of macromolecular chemistry, because I would have rather postponed it to one of future years.

And I will immediately say the reason: an audience mainly including engineers and future engineers is, for the most, comprised of highly realistic people, geared to dealing with concrete things, corresponding to physical realities, and for which physical reality is explained by mathematic rules. This is therefore an audience that does not love extrapolations.

So, in talking about new discoveries emerging from the scientific laboratories of this School, I would rather do so only when results would be beyond the stage of laboratory research, after the stage currently underway, of the making of pilot plants and the first industrial plants. I would prefer to talk when the new inventions had practically, materially imposed themselves, with the weight of dozens of thousands of tons of products present in the main markets of the whole world. That is, when new products created by the chemist would become largely available for the works of engineers and architects as new building materials.

This stage will only be reached by the whole of European, American and Japanese productions (which will apply our principles) in one or two years.

Yet our Rector Prof. CASSINIS, and the Dean of our Faculty of Engineering, Prof. DE MARCHI,

wanted to make public, as of now, a case that can be considered as typical, with respect to one of the most important functions carried out by the University, that is of pioneer in the field of science.

Scientific progress, especially in chemistry, has always been, one may say, the necessary premise to any great new project. At a time when even authoritative people give a pessimistic view on the appropriateness and functionality of Italian Universities, we feel obliged to state that Institutes of the Politecnico di Milano, both in terms of teaching, but even more in terms of scientific research, fully carry out their task.

I do not feel conceited in saying that the work carried out at an Institute of Chemistry of our Politecnico has had the honour of being particularly appreciated and acknowledged in the whole world of chemistry. This is proved by references in foreign journals, visits of the Heads of the most important laboratories of chemical research of European and American industries, the invitation to make our research the theme of the opening speech at the 16th International Congress of Chemistry held in Paris last July, the invitations to hold a series of conferences at Universities and the biggest Institutes of industrial research in the United States of America.

This encourages me to tell you about the work that has been made so far at my Institute, so that you know how much the scientific Laboratories of the Faculty of Engineering of our Politecnico

achieve and will be achieving for the progress of science, our industry and our economy.

In a country poor in raw materials, such as Italy, the only raw material available at more favourable terms is human minds and hands. But not only minds because in chemistry, limiting yourself to theoretical speculation is not enough, but actual implementation is also necessary, and often after long, tiring, uncertain practical research, for which also experimental manual dexterity is of not minor significance. Besides, to tackle totally new fields, also a certain amount of imagination is necessary, a quality which is often seen as the opposite of the engineer's functions.

Today I will talk about the construction of giant molecules, i.e. macromolecules that can be compared to architectural buildings erected by linking thousands or hundreds of thousand or even millions of building parts. The small starting molecules, called monomer units, can be compared with the bricks of a building and each of them is the size of fractions of a millionth millimetre.

Here a premise is necessary to point out what was known in the field of large molecules before stereospecific catalysis processes were discovered here, in this Politecnico. It was known that the combining of small asymmetric starting molecules with macromolecules was mostly random and disordered. Until a few years ago, with the exception of few specific cases (e.g. the production of polythene and nylon) where monomer

monomeriche presentano di per sé una elevata simmetria, oppure una particolare struttura polifunzionale, si ottenevano generalmente, per polimerizzazione, dei prodotti a struttura disordinata che era la causa delle deficienti caratteristiche termiche e meccaniche e li rendeva di limitato interesse pratico.

Il chimico, sino a pochi anni fa, non era capace di ottenere da tali elementi costruttivi che delle macromolecole bidimensionali o tridimensionali, a struttura irregolare, o tutt'al più sapeva dare alla costruzione una forma prevalentemente lineare ma irregolare e ramificata. Molecole giganti a strutture corrispondenti a modelli ben precisi ci vengono invece largamente fornite dalla natura nelle molecole aventi funzioni fondamentali negli organismi viventi.

L'uomo senza saperlo ha utilizzato, già dalla preistoria, delle macromolecole come alimento, come vestiario, come materiale da costruzione. Esse furono però le ultime ad essere ben conosciute dal chimico. Solo in questi ultimi decenni si è cominciato a conoscerne la intima natura e soprattutto l'architettura interna. La prima sostanza organica a basso peso molecolare ottenuta per sintesi fu preparata da Wohler 130 anni fa (1828). Per oltre un secolo migliaia di chimici hanno demolito e sintetizzato molecole organiche, hanno creato centinaia di migliaia di sostanze organiche diverse, per lo più a basso peso molecolare, sostanze che il chimico per estrazione, cristallizzazione, distillazione, si sforzava di ottenere purissime. La teoria della quadrivalenza del carbonio ne spiegava la natura e lasciava prevedere la sintesi, il chimico le utilizzò per ottenere migliaia di prodotti sintetici più o meno semplici, alcuni di interesse pratico: coloranti, solventi, profumi, medicamenti.

Passando dalle molecole relativamente piccole alle molecole giganti naturali, il chimico si trovava di fronte ad un problema troppo complicato. Tali molecole non si lasciavano trattare con i metodi classici della chimica organica, non fonde-

vano, non cristallizzavano, non si discioglievano indecomposte. Il chimico non sapeva quindi da che parte aggredirle per individuarne la intima struttura molecolare e le caratteristiche. I mezzi di cui il chimico disponeva erano troppo grossolani per poter isolare ad uno ad uno gli elementi costruttivi le cui dimensioni sono, come ordine di grandezza, molto più piccole, del limite di visibilità microscopica, e per disporli con un ordine prestabilito. Si pensi che una sola goccia di un monomero contiene un ordine di grandezza di 10^{20} molecole semplici.

Alcune macromolecole, come la cellulosa, potevano venire modificate nelle loro proprietà con trattamenti chimici, e ciò diede vita a rami importanti della chimica, quali ad es. ad una classe importante di esplosivi e di materie plastiche, all'industria delle fibre tessili artificiali, ai rayon alla viscosa e all'acetato di cellulosa.

Si sapeva anche che alcune molecole giganti naturali erano costituite da un concatenamento regolare di elementi costitutivi relativamente semplici, per lo più uguali tra loro (glucosio nel caso della cellulosa; aminoacidi nel caso della lana, della seta e di altre sostanze proteiche; isoprene nel caso della gomma naturale) ma l'uomo era incapace di riprodurle.

Questo il grado di conoscenza cui era pervenuto il chimico nel campo della sintesi delle macromolecole fino a quattro anni or sono.

La scoperta realizzata nell'Istituto di Chimica Industriale di questo Politecnico nei primi mesi del 1954, che ha profondamente rivoluzionato la chimica macromolecolare, schiudendo enormi possibilità di realizzazioni pratiche, consiste concettualmente, in questo: è, stato trovato un processo per il quale, partendo da composti chimici semplici non saturi, operando in presenza di particolari catalizzatori, si possono ottenere grandi molecole caratterizzate da strutture spaziali ordinate e prestabilite. Abbiamo denominato stereospecifici i catalizzatori e polimerizzazione stereospecifica il pro-

cesso che consente di ottenere le grandi molecole a struttura ordinata e prestabilite.

Da questo momento il chimico, è stato messo in grado di costruire delle macromolecole secondo schemi architettonici preordinati con le proprietà desiderate.

I primi elementi costruttivi da noi usati sono stati i più semplici idrocarburi non saturi.

È stato trovato che certi cristalli a strati di ioni aventi una particolare struttura reticolare, assorbono composti metallorganici, formando in superficie dei complessi catalitici asimmetrici aventi una particolare struttura ed un particolare tipo di coordinazione, con legami cosiddetti a ponte, elettrone-deficienti.

Tali complessi agiscono da catalizzatori in un particolare e nuovo tipo di polimerizzazione, quella anionica coordinata, per cui le unità monomeriche reagiscono soltanto se si dispongono orientate in un modo particolare, tale da differenziare molecole eguali ma enantiomorfe (l'una immagine speculare ma non sovrapponibile dell'altra). In tal modo si sono ottenute strutture nuove e diverse a seconda del tipo e dell'ordine di tale concatenamento. Unità monomeriche, molto asimmetriche, possono collegarsi in strutture simmetriche che assumono spesso una forma di eliche.

Le molecole giganti così ottenute, costituite da centinaia di migliaia di piccole molecole che si sono fuse in una più grande, posseggono proprietà eccezionali dipendenti dalla loro architettura interna e dal grado di ordine che può venire modificato a piacere entro larghi limiti.

Da idrocarburi semplici, ad esempio dalle olefine che costituiscono i componenti principali del gas di cracking del petrolio, (una volta inutilizzabili se non come combustibile povero) si possono così ottenere a piacere delle macromolecole lineari, lunghe da 1.000 a 100.000 volte il loro diametro, aventi una forma di elica a simmetria ternaria ed a passo regolare, che possono cristallizzare e fornire fibre aventi la resistenza del nylon.

La struttura cristallina determina

units show a high degree of symmetry per se, or a particular multifunctional structure, products with a disordered structure were generally obtained by means of polymerisation, which was the cause of their poor thermal and mechanical properties and made them of limited practical interest. Up to a few years ago, the chemist could only obtain bi-dimensional or three-dimensional macromolecules from such building elements, with irregular structures, or at the most could give the construction a mainly linear form, yet irregular and branched.

Giant molecules with structures corresponding to well defined models are instead largely provided by nature in molecules having fundamental functions in living beings.

Without knowing it, Man was already using macromolecules as food, clothing, building materials in prehistory. And yet, to the chemist, macromolecules were the last to become well known. Only in the last decades have we begun to know their intimate nature and, particularly, their inner architecture.

The first organic substance with low molecular weight obtained by means of synthesis was prepared by Wohler 130 years ago (1828). For over a century, thousands of chemists have demolished and synthesised organic molecules, have created hundreds of thousands of different organic substances, for the most with low molecular weight, substances that the chemist, by means of extraction, crystallisation, distillations, tried to obtain as pure as possible. The theory of tetravalence of carbon explained its nature and made its synthesis foreseeable, and the chemist used it to obtain thousands of more or less simple synthetic products, some of them with practical interest: dyes, solvents, perfumes, drugs.

Going from relatively small to giant natural molecules, the chemist was faced with a too complicated problem. These molecules could not be treated by means of the classi-

cal methods of organic chemistry, they did not melt, they did not crystallise, they did not dissolve without decomposing. The chemist therefore did not know from which side to tackle them to find their intimate molecular structure and features. The means available to the chemist were too crude to isolate every single building element, whose sizes are, in terms of magnitude, much smaller than the limit of microscopic visibility, and to arrange them according to a set order. It only need be considered that one single drop of a monomer contains a magnitude of 10^{20} simple molecules.

Some macromolecules, such as cellulose, could be modified in their properties by means of chemical treatments, and this gave life to significant branches of chemistry, such as for example a significant class of explosives and plastics, to the industry of man-made textile fibres, rayon, viscose and cellulose acetate.

It was known that some natural giant molecules were made of a regular linking of relatively simple building elements, largely equal among themselves (glucose in the case of cellulose; amino acids in the case of wool, silk and other protein substances; isoprene in the case of natural rubber) but man was not able to reproduce them. This was the degree of knowledge of the chemist in the field of the synthesis of macromolecules until four years ago.

The discovery made in the Institute of Industrial Chemistry of the Politecnico in early 1954, which deeply revolutionized macromolecular chemistry, opening enormous opportunities of practical achievements, is conceptually the following: a process has been devised by means of which, starting from simple non saturated chemical compounds, working in the presence of specific catalysts, large molecules can be obtained characterised by ordered and predefined space structures. We called the catalysts stereospecific, and stereospecific polymerisation the process

which makes it possible to obtain large molecules with an ordered and predefined structure.

From this moment the chemist has been enabled to build macromolecules according to pre-established architectural patterns and with the desired properties.

The first building elements we have used have been the simplest non saturated hydrocarbons.

It has been found that some crystals with ion layers having a specific reticular structure, absorb metallorganic compounds and form on the surface asymmetrical catalyst complexes, having a specific structure and a particular type of coordination, with so called bridge bonds, electron-deficient.

Such complexes act as catalysts in a particular and new type of polymerisation, coordinated anionic polymerisation, for which monomer units only react when they are oriented in a particular way, such as to differentiate equal but enantiomorphous molecules (one is the specular but not overlapping image of the other). In this way, new and different structures have been obtained, according to the type and order of such linking.

Monomer, highly asymmetrical units, can connect in symmetrical structures which often take the shape of spirals. Giant molecules obtained his way, made up of hundreds of thousands of small molecules that have combined into a larger one, possess exceptional properties depending on their inner architecture and the degree of order which can be changed as required within large limits.

From simple hydrocarbons, e.g. from olefins which are the main components of oil cracking gas, (once impossible to use unless as lean fuel) linear molecules can thus be obtained of length from 1,000 to 100,000 times their diameter, having the shape of spiral with ternary symmetry and regular pitch, which can crystallise and produce fibres, having the strength of nylon.

Crystalline structure determines a certain analogy between the beha-

una certa analogia tra il comportamento dei materiali metallici e le macromolecole di un polimero a struttura ordinata, così ad es. tondini e lamine ottenuti per estrusione ed orientate per stiro dopo l'estruzione, aumentano la loro resistenza a trazione fino a raggiungere carichi di rottura di 40/60 Kg/mm², (equivalenti a quelli di un acciaio) ma presentano un peso specifico otto volte minore avendo un peso specifico di 0,90 (minore di quello del ghiaccio).

Le più alte resistenze a trazione si hanno estrudendo fili del diametro delle fibre tessili, mentre lamine trasparenti, ad orientamento planare di cristalli, presentano una resistenza a trazione uguale nelle varie direzioni (10-15 Kg/mm²) che è circa 1/4 di quella che si osserva nel senso di orientamento delle lamine, quando le lamine vengono orientate per stiro in una sola direzione.

Una caratteristica tipica che giustifica le eccezionali proprietà meccaniche delle macromolecole lineari cristalline, in confronto agli altri materiali da costruzione, è data dal fatto che essi possono cristallizzare in forme sferulitiche, ben diverse da quelle dei minerali e dei metalli cristallini.

Mentre nei metalli, ed in genere in tutte le sostanze a basso peso molecolare, ogni cristallo è costituito dalle ripetizioni di piccolissime celle elementari, contenenti un numero intero di molecole, i nuovi polimeri lineari formano dei microcristalli, ciascuno dei quali è più piccolo della lunghezza di ogni macromolecola. Ogni macromolecola perciò fa parte di più cristalli diversi, e li collega l'uno con l'altro. Nei materiali orientati (ad esempio per stiro), i cristalli sono disposti in gran parte parallelamente tra di loro e pure le macromolecole lineari sono orientate, (ad esempio nel senso dello stiro), e ciò conferisce alta resistenza a trazione ed allo scorrimento viscoso, perché le molecole molto lunghe, associate parallelamente in cristalli, difficilmente possono scorrere l'una rispetto all'altra.

Se fosse possibile risolvere pratica-

mente il problema di ottenere una fibra con un cristallo unico orientato costituito da macromolecole lineari, si arriverebbe a resistenze a trazione oltre dieci volte superiori a quelle dell'acciaio.

Queste caratteristiche meccaniche eccezionali si osservano nel caso di macromolecole a struttura regolare lineare, ma la stessa materia prima, ad esempio il propilene, può fornire prodotti aventi proprietà completamente diverse, quando si consente alle unità monomeriche di unirsi in modo non stericamente regolare, ossia quando si consente che due unità assumano, a caso, nella stessa macromolecola, forme diverse, corrispondenti ad esempio. l'una all'immagine speculare dell'altra (come quella della mano sinistra rispetto alla destra). Questa semplice modifica dell'orientamento relativo delle unità monomeriche trasforma un polimero cristallino, alto fondente, rigido, che noi abbiamo battezzato isotattico, in una gomma elastica amorfa.

I più sensazionali risultati nelle catalisi stereospecifiche sono stati però ottenuti nel campo delle gomme elastiche cristallizzabili. Da oltre 50 anni i chimici si erano sforzati di ottenere dei prodotti sintetici, aventi le proprietà della gomma naturale, che secerne l'albero di Hevea Brasiliensis, e che è ancor oggi, si può dire, produzione quasi esclusiva della Malesia.

Già da oltre 70 anni i chimici avevano scoperto che la gomma naturale è costituita da un polimero dell'isoprene, idrocarburo diolefinico assai semplice (C₅H₈). Tutti i tentativi di riprodurre la gomma elastica erano però falliti. Il chimico si trova di fronte a molecole molto reattive (come le diolefine) le quali possono concatenarsi in modi diversi e per uno stesso concatenamento possono orientarsi in differenti modi, formando un'infinità di prodotti diversi. Una macromolecola del peso molecolare di 500.000, quale è all'incirca il peso molecolare della gomma naturale, contiene circa 8.000 unità monomeriche. Se tali unità fossero tutte disposte a caso nelle diverse forme di concatena-

menti possibili, si potrebbero prevedere un numero di strutture isomere e stereoisomere diverse uguali a 4 elevato a 8.000 (essendo 4 i modi con cui ciascuna molecola di monomero può presentarsi nel polimero, supposto che si concateni solo secondo i modi 1-4 e 3-4).

Oggi la catalisi stereospecifica ci ha consentito di ottenere polimeri in cui la massima parte delle unità monomeriche si presentano nello stesso modo e con la stessa struttura. Se prendiamo il butadiene, idrocarburo caratterizzato, come è noto, dalla presenza di 4 atomi di carbonio, di cui gli atomi di carbonio 1-2 e 3-4 sono uniti da un doppio legame, e facciamo reagire tra di loro le molecole del butadiene in modo che il primo atomo di una molecola reagisca con il quarto della successiva, le molecole possono presentarsi in due modi diversi, in forme denominate cis oppure trans, a seconda della posizione relativa degli atomi di idrogeno e di carbonio adiacenti ad un doppio legame nella catena. Se si presentano in forma cosiddetta cis, risulta una struttura regolare meandriforme; e si hanno polimeri che sono delle gomme elastiche con proprietà di resilienza ottime, come la gomma naturale (che è pure un polimero 1-4 cis). Se si presentano in forma trans più distesa, si ha un polimero rigido a più alta temperatura di fusione, una materia plastica del tipo della guttaperca naturale. Se le molecole del monomero reagiscono concatenandosi mediante gli atomi 1-2, si hanno altri polimeri, di diverso tipo, ed a seconda della configurazione sterica, si ottengono dei plastici oppure delle gomme ma con valori della resilienza inferiori.

Tutti i polimeri regolari possono cristallizzare, le gomme elastiche a struttura regolare solo sotto stiro (come la gomma naturale) e solo le gomme cristallizzabili sotto stiro, aventi bassa entropia di fusione, possono presentare le proprietà paradossali della gomma naturale, che presenta allungamenti elastici reversibili dell'800-900%, che si raffredda, se si rilassa dopo essere

viour of metallic materials and macromolecules of a polymer with ordered structure, so that for example rods and foils obtained by extrusion and oriented by stretching after extrusion, increase their resistance to tensile stress up to tensile stresses of 40/60 Kg/mm², (equivalent to those of steel) but have specific weight eight times lower at 0.90 (lower than that of ice). The highest resistances to tensile stress are obtained by extruding yarns of diameter of textile fibres, while transparent foils, with planar crystal orientation, show a resistance to tensile stress equal in the various directions (10-15 Kg/mm²) which is around 1/4 of that observed in the sense of direction of foils, when foils are oriented by stretching in one single direction. A typical feature which justifies the exceptional mechanical properties of linear crystalline macromolecules, compared to other building materials, is given by the fact that they can crystallise, in spherulitic forms, very different from those of minerals and crystalline metals. While in metals, and generally in all substances with low molecular weight, every crystal is made of the repetitions of very small elementary cells, containing a whole number of molecules, new linear polymers form microcrystals, each of which is smaller than the length of any macromolecule. Every macromolecule therefore is part of many different crystals, and links them with each other. In oriented materials (e.g. by stretching), crystals are largely arranged in parallel among themselves and also linear macromolecules are oriented, (e.g. in the sense of stretching), and this gives high resistance to tensile stress and to creep, because very long molecules, associated in parallel in crystals, are very unlikely to creep among themselves. If it were possible to practically solve the problem of obtaining a fibre with a single oriented crystal made of linear macromolecules, we would achieve resistances to tensile stress more than ten times higher than those of steel.

These exceptional mechanical properties are observed in the case of macromolecules with linear regular structures, but the same raw materials, for example polypropylene, can produce products having completely different properties, when monomer units are allowed to combine in a non sterically regular way, i.e. when two units are allowed to take, at random, in the same macromolecule, different shapes, corresponding for example one at the specular image of the other (such as that of the left hand compared to the right). This simple change to the relative orientation of monomer units transforms a crystalline polymer, highly melting, rigid, that we named isotactic, into an amorphous elastic rubber. The most sensational results in stereospecific catalyses have however been obtained in the field of crystallisable elastic rubbers. For over 50 years chemists had tried to obtain synthetic products having the properties of natural rubber, which is secreted by the tree of Hevea Brasiliensis, and which is still today, it can be said, the almost exclusive production of Malaysia.

Already over 70 years ago, chemists had discovered that natural rubber is made of a polymer of isoprene, a very simple diolefinic hydrocarbon (C₅H₈). All the attempts to reproduce elastic rubber had however failed. The chemist is faced with highly reactive molecules (such as diolefins) which can link in various ways and for the same linkage they can orient in different ways, forming an endless number of different products. A macromolecule with molecular weight of 500,000, which is more or less the molecular weight of natural rubber, contains around 8,000 monomer units. If these units were all arranged randomly in the various forms of possible linkages, we could forecast a number of different isomer and stereoisomer structures equal to 4 raised to 8,000 (since there are 4 modes in which each monomer molecule can come in the polymer, provided that

it only links according to the 1-4 and 3-4 modes).

Today, stereospecific catalysis has enabled us to obtain polymers where most monomer units come in the same way and with the same structures. If we take butadiene, a hydrocarbon characterised, as is known, by the presence of 4 carbon atoms, of which carbon atoms 1-2 and 3-4 are combined by a double bond, and we have molecules react among themselves in such a way that the first atom of a molecule reacts with the 4th of the following one, molecules can come in two different ways in forms named cis or trans, according to the relative position of hydrogen and carbon atoms adjacent to a double bond in the chain. If they come in the so called cis form, the result is a regular meander shaped structure; and there are obtained polymers which are elastic rubbers with excellent impact resistance properties, like natural rubber (which is also a 1-4 cis polymer). If they come in a more elongated trans form, the result is a rigid polymer with a higher melting temperature, a plastic material of the kind of natural gutta.

If the molecules of the monomer react through linking by means of 1-2 atoms, there come other polymers, of different kind, and according to the steric configuration, plastics or rubbers are obtained, but with lower impact strength values.

All regular polymers can crystallise, elastic rubbers with regular structure only under stretch (such as natural rubber) and only crystallisable rubbers under stretch, with low melting entropy, can show the paradoxical properties of natural rubber, which shows reversible elastic elongation of 800-900%, which cools, if it is relaxed after being stretched, and which shows an elastic module which grows enormously and reversibly under different stresses.

In our Politecnico we obtained all the four polymers with regular structure that can be expected in butadiene and the first elastic rub-

stata stirata, e che presenta un modulo elastico che cresce in modo notevolissimo e reversibilmente con il variare degli sforzi.

Nel nostro Politecnico si sono ottenuti tutti i quattro polimeri a struttura regolare prevedibili del butadiene e la prima gomma elastica che presenta le proprietà eccezionali della gomma naturale.

Ritengo però che i più promettenti prodotti intermedi per la produzione di gomme elastiche sintetiche siano i copolimeri lineari saturi di olefine, pure ideati qui. Questi infatti forniscono gomme caratterizzate da una resilienza superiore alle gomme sintetiche prodotte in passato, solo di poco inferiore a quella della gomma naturale, ma sono molto più resistenti all'invecchiamento. E le materie prime di partenza sono molto meno costose. Io vorrei che questa breve esposizione potesse dare una chiara sensazione della profonda rivoluzione in atto nel campo della chimica macromolecolare, rivoluzione che ha avuto il suo inizio in questo Politecnico, che ha schiuso nuovi vasti orizzonti anche nel campo delle ricerche. Nel campo da noi discusso lavorano oggi diverse migliaia di chimici, in centinaia di laboratori di ricerca sparsi in tutto il mondo. Proprio in questi giorni m'è giunta notizia di un grande laboratorio deciso dalla Accademia delle Scienze di Mosca, sui polimeri isotattici (la parola isotattico è stata conosciuta da noi ed è ormai accettata da tutti).

Come ho detto, sono trascorsi appena quattro anni dalla prima sintesi stereospecifica realizzata in questo Politecnico. Già sono sorte decine di impianti pilota, e 3 impianti industriali per la produzione del primo polimero isotattico: i primi due rispettivamente in Italia ed in Germania, utilizzando in quest'ultimo paese, l'estensione di brevetti italiani. Un terzo è in costruzione negli Stati Uniti.

Il Ricercatore generalmente è restio dal fare previsioni, ed anche quando i risultati delle sue ricerche riguardano temi interessanti le applicazioni industriali, prevale in

lui l'ansia del conoscere, la soddisfazione di avere individuato quelle leggi che natura custodisce tanto tenacemente, ed è più portato ad allargare i nuovi campi di ricerca, piuttosto che a fermarsi per seguire gli sviluppi pratici ed i risultati precedentemente conseguiti. Ma se mi soffermo per un solo istante a meditare sugli sviluppi che questi potranno avere in futuro, posso affermare con certezza che eserciteranno un ruolo fondamentale, nell'evoluzione tecnica ed economica nel campo della chimica macromolecolare. Infatti i risultati positivi ottenuti nella produzione su scala industriale dei nuovi polimeri a struttura regolare, consentono di prevedere che in due-tre anni la produzione in Europa e in America raggiungerà molte decine di migliaia di tonnellate/anno, per salire, pochi anni dopo, fino a diverse centinaia di migliaia di tonnellate/anno.

Tale aumento sarà favorito da contingenze di carattere economico. Infatti l'inevitabile discesa dei costi, che accompagna normalmente i forti aumenti di produzione, quando il basso prezzo delle materie prime lo consentirà, determinerà prezzi di vendita molto inferiori a quelli delle materie plastiche cristalline sinora note ed a quelli dei metalli più comuni (a parità di volume od a parità di resistenza).

La facile lavorabilità dei materiali cristallini macromolecolari, le loro migliorate proprietà meccaniche, la loro maggiore resistenza allo scorrimento viscoso, la loro facile lavorabilità, la trasparenza di alcuni prodotti, la impermeabilità perfetta, la loro leggerezza (pesi specifici minori di 1 allo stato compatto, ma compresi tra 0,1-0,01 allo stato poroso) lasciano prevedere una evoluzione dalla applicazione in atto, come materiali ornamentali, di vestiario ed imballaggi, verso nuovi impieghi, quali tubazioni, anche per medie pressioni, quali coperture di edifici, elementi costruttivi isolanti, ecc.

Nelle costruzioni potranno essere applicati anche per strutture resistenti a sforzi notevoli di trazione e

di flessione, per costruzioni navali ed automobilistiche o per la costruzione di ponti, per i quali è già prevedibile la realizzazione di maggiori luci con minori pesi rispetto a quelli ottenibili con l'impiego di strutture e di funi metalliche.

Sono il petrolio e gli idrocarburi superiori al metano dei gas naturali, le nostre materie prime per le sintesi organiche macromolecolari. Essi attraverso trasformazioni chimiche possono fornire, in quantità che possono ora apparire come illimitate, prodotti più nobili, che non hanno più nessuna proprietà in comune, esclusa la leggerezza, col materiale di origine. Essi potranno consentire in un futuro, quando l'aumento di popolazione del mondo lo rendesse necessario, di destinare alla produzione di prodotti alimentari più larghe porzioni di superfici agricole, che dovrebbero altrimenti venir destinate alla produzione di cellulosa, di fibre tessili, di lana e di gomma.

Debbo dire però, che il nostro lavoro è stato reso possibile dall'appoggio finanziario che l'industria, in particolare la Soc. Montecatini, ci ha dato. È stato per noi di vero conforto constatare che l'industria italiana dispone di uomini di grande coraggio e di larghezza di idee disposti, a differenza di quanto hanno fatto le industrie statizzate, ad aiutare ricerche di carattere fondamentale, anche quando esse erano ancora solo delle idee, con incerte probabilità di successo nel campo delle realizzazioni industriali.

Questi uomini hanno stanziato somme dell'ordine delle centinaia di milioni l'anno per contribuire all'attrezzamento, alle spese di funzionamento di laboratori universitari, organizzati sulla scala dei grandi laboratori di ricerca di oltreoceano. È in questa fase iniziale che si può giudicare la sensibilità, l'intuizione e lo slancio per una iniziativa. Poi, quando i risultati ottenuti sono positivi, tutti, anche oltreoceano, si dichiarano disposti ad elargire grandi aiuti pure di poter disporre anche solo di una parte dei risultati riguardanti le ricerche effettuate. Esprimo qui la nostra gratitudine a

ber which shows the exceptional properties of natural rubber. However, I believe that the most promising intermediate products for the production of synthetic elastic rubbers are the saturated linear copolymers of olefins, also conceived here. These provide rubbers characterised by higher impact strength than synthetic rubbers produced in the past, only slightly lower than that of natural rubber, but which are much more resistant to ageing. And starting raw materials are a lot less expensive.

I would like this short presentation to give the clear sensation of the profound revolution under way in the field of macromolecular chemistry, a revolution which was started in this Politecnico, which has opened new wide horizons also in the field of research. Several thousand chemists are now working in the field we have opened, in hundreds of research laboratories scattered all over the world. Just in the last few days I have heard of a large laboratory that the Academy of Sciences in Moscow has decided to open on isotactic polymers (we invented the word isotactic and it is now accepted by everybody).

As I have said, only 4 years have gone from the first stereospecific synthesis made in this Politecnico. Dozens of pilot plants have been built already, and 3 industrial plants for the production of the first isotactic polymer: the first two in Italy and Germany, respectively, using in the latter country the extension of Italian patents. A third plant is under construction in the United States.

Generally speaking, a Researcher is reluctant to make forecasts, and even when the results of his research concern issues involving industrial application, there prevails in him the anxiety of knowing, the satisfaction of finding those laws that nature so tenaciously preserves, and is more prone to enlarge new research fields than to stop to follow the practical development and the previously achieved results. But if I dwell for one single moment to think about the deve-

lopments that these can have in the future, I can definitely maintain that they will play a fundamental role in the technical and economic development, in the field of macromolecular chemistry. Positive results obtained in the industrial production of new polymers with regular structure make it possible to estimate that in two-three years the production in Europe and America will reach many dozens of thousand tons/year, to grow, a few years later, to various hundreds of thousands of tons/year.

Such an increase will be fostered by economic contingencies. The inevitable decrease in costs, which normally accompanies strong production increases, when the low cost of raw materials will allow it, will determine selling prices much lower than those of the crystalline plastic materials known so far and than those of the most common metals (with equal volumes or with equal resistance).

Easy workability of macromolecular crystalline materials, their improved mechanical properties, their greater resistance to creep, their easy workability, the transparency of some products, the perfect impermeableness, their lightness (specific weights lower than 1 in the compact state, but between 0.1-0.01 in the porous state) will make an evolution of the current application imaginable, such as ornamental materials, clothing and packages, towards new uses, such as tubes, also for medium pressures, such as building covers, isolating building elements, etc.

In buildings they can be applied also for structures resistant to high tensile and bending stresses, for ships and cars or for the construction of bridges, for which we can already foresee the creation of greater spans with lower weights compared to those that can be obtained by using metal structures and cables.

Oil and hydrocarbons higher than methane of natural gases are our raw materials for macromolecular organic syntheses. By means of chemical transformation they can

provide, in quantities that can now appear as unlimited, more noble products, which have no property in common, apart from lightness, with the original material. They can allow in the future, when the increase of world population makes it necessary, to devote larger portions of agricultural surfaces to the production of food products, which should however be destined to the production of cellulose, textile fibres, wool and rubber. I must say however that our work was made possible by the financial support that industry, and specifically the company Montecatini, has given us. It was really comforting for us to see that Italian industry features people that are courageous and with a broader view who were ready, unlike government owned companies, to help fundamental research, even when these projects were only ideas, with uncertain success probabilities in the field of industrial implementations.

These men have allocated sums of hundreds of millions per year to contribute to the equipment, to functioning costs of university laboratories, organised on the scale of large research laboratories overseas.

At this initial stage it is possible to judge the sensitivity, the intuition and the flair for a project. Later, when positive results are obtained, everybody, even overseas declares to be ready to provide great help in order to be given even just a part of the results regarding research carried out. Here I would like to express my gratitude to all those who helped us. As to us, I will simply say that in these four years nothing else existed but our work.

I would like to conclude this short presentation by highlighting a result which in my opinion is no less important than the success of our research, I mean the influence that our work has had on the education of young chemists. Alongside the main research theme, a large number of issues has emerged, which have become

quanti ci hanno aiutato. Da parte nostra dirò semplicemente che in questi quattro anni non è esistito altro che il nostro lavoro. Desidero chiudere questa breve esposizione ponendo in rilievo un risultato per me non meno importante della affermazione delle nostre ricerche, voglio dire l'influenza che i nostri lavori hanno avuto sulla formazione dei giovani chimici. Infatti accanto al tema fondamentale di ricerca è scaturito un largo numero di temi che hanno costituito argomento di tesi di laurea per gli studenti e di ricerca a carattere scientifico per i giovani laureati. I risultati sono stati tangibili e si rilevano soprattutto dal livello raggiunto dai giovani ingegneri chimici che il Politecnico di Milano pone a disposizione dell'industria italiana, e dalle numerose richieste di laureati e docenti stranieri anche nord-americani, di essere accolti per un periodo di specializzazione nel nostro Istituto. La ricerca in un campo tanto vasto e tanto fertile ha consentito di raggiungere accanto alle realizzazioni nel campo della chimica macromolecolare un'altra realizzazione di estrema importanza: la formazione di chimici particolarmente addestrati per la ricerca sperimentale che costituiranno in avvenire le forze operanti del progresso chimico. Medito sovente sui compiti che il chimico dovrà assolvere negli anni futuri e soprattutto sulla nostra funzione nel formare uomini. Scomparsa la possibilità di condurre la ricerca come negli anni passa-

ti, in cui il chimico si dedicava isolatamente o con l'aiuto di un ristretto numero di collaboratori allo studio di problemi che potevano venire affrontati anche con mezzi relativamente modesti, la ricerca chimica oggi, nel suo progredire, richiede mezzi imponenti ed un larghissimo numero di collaboratori. La ricerca deve ora essere compiuta su una scala che si va facendo sempre più vasta, una nuova reazione realizzata dai chimici deve essere studiata in tutti i suoi aspetti da ricercatori la cui competenza è nettamente diversa dalla competenza di coloro che hanno realizzato la prima reazione chimica in Laboratorio. Sorge così ad esempio la necessità che accanto al chimico organico si disponga di chimici specializzati rispettivamente nei vari campi dell'indagine chimico-fisica, nelle determinazioni strutturali e nella determinazione di tutte quelle proprietà che consentiranno di caratterizzare il composto di nuova realizzazione e di stabilirne il campo di applicazione. Occorre inoltre determinare tutti i dati termodinamici, cinetici, tecnologici che occorrono all'ingegnere perché il seme germinato nel laboratorio di ricerche si sviluppi in grande albero capace di dare ricchi frutti. Per questo nel condurre i nostri lavori è stato necessario formare una larga schiera di chimici ed ingegneri specializzati che hanno collaborato con passione, competenza e dedizione alle nostre ricerche. Il primo nucleo di Ricercatori presso il nostro Istituto ha catalizzato una reazione a catena, che ha por-

tato alla formazione di un aggregato «macromolecolare» costituito da numerose «unità monomeriche» ordinate di ricercatori chimici. E per un processo di trasferimento di catena altri nuclei di «Ricercatori chimici» si stanno formando in Italia, e noi ci auguriamo che raggiungano «gradi di polimerizzazione,» molto elevati. Sarà questo il giorno in cui ci potremo concedere un po' di tregua poiché vedremo dietro di noi formata una schiera di chimici che raccoglieranno la nostra eredità e sui quali la Scuola e l'Industria Italiana potranno poggiare, sicure di potersi avvalere di un'opera che consentirà loro di occupare quel posto che per l'operosità dei suoi uomini e per il livello scientifico raggiunto meritano di occupare nel mondo.

the topic for dissertations for students and for scientific research for young graduates. Results are tangible and can be especially seen in the level reached by young chemical engineers that the Politecnico di Milano makes available to Italian industry, and in the many applications from foreign graduates and teachers, even from North America, to be accepted for a term of specialisation in our Institute. Alongside results in the field of macromolecular chemistry, research in such a wide and fertile field has allowed us to reach another extremely important result: the education of particularly well-trained chemists for experimental research who will become the future's forces of chemical progress. I often think about the tasks that a chemist will have to carry out in future years and especially about our function in training people. Since the possibility to conduct research as in past years has disappeared, when the chemist worked in isolation or with the help of a small number of collaborators on the study of problems that could be tackled even with relatively modest means, chemical research today, in its progress, requires large means and a very high number of collaborators. Research must now be carried out on a scale that is becoming bigger and bigger, a new reaction made by chemists must be studied in all its facets by researchers whose knowledge is clearly different from the knowledge of those who made

the first chemical reaction in the Lab. It thus becomes necessary for example that together with the organic chemist there are available chemists specialised in the various fields of chemical-physical investigation, in structural determinations and in the determination of all those properties that will make it possible to characterise the newly realised compound and to establish its field of application. Besides, it is necessary to determine all thermodynamic, kinetic, technological data which are needed by the engineer so that the seed born in the research laboratory becomes a large tree capable of giving abundant fruit. That is why, in conducting our work, it was necessary to train a large team of specialised chemists and engineers who worked with passion, knowledge and dedication to our research. The first group of Researchers at our Institute catalysed a chain reaction which has led to the creation of a «macromolecular» aggregate made of many «monomer units» ordered by chemical researchers. And with a process of chain transfer, other groups of «Chemical Researchers» are being formed in Italy, and we hope they reach very high «degrees of polymerisation». This will be the day when we can allow ourselves some rest because we will see behind us a group of chemists that will receive our legacy and on whom Italian School and Industry can base themselves, certain to avail themselves of an

activity that will allow them to take the place that, because of the work of its people and the scientific level achieved, they deserve to take in the world.