

LES HOUCHES

SESSION XXVI

1 Juillet — 23 Août 1974

PHYSIQUE ATOMIQUE ET MOLÉCULAIRE
ET MATIÈRE INTERSTELLAIRE

ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS
AND THE INTERSTELLAR MATTER

ROGER BALIAN

PIERRE ENCRENAZ et JAMES LEQUEUX

LES HOUCHES

SESSION XXVI

1 Juillet — 23 Août 1975

**PHYSIQUE ATOMIQUE ET MOLÉCULAIRE
ET MATIÈRE INTERSTELLAIRE**

**ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS
AND THE INTERSTELLAR MATTER**

Édité par

ROGER BALIAN

Directeur de l'École

PIERRE ENCRENAZ et JAMES LEQUEUX

Observatoire de Meudon

1975

NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY — AMSTERDAM • OXFORD
AMERICAN ELSEVIER PUBLISHING COMPANY, INC. — NEW YORK

© NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY - 1975

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the copyright owner.

Library of Congress Catalog Card Number 75-23253

ISBN North-Holland 0 7204 0328 6

ISBN American Elsevier 0 444 10856 4

Publishers:

NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY - AMSTERDAM

NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY, Ltd. - OXFORD

Sole distributors for the U.S.A. and Canada:

AMERICAN ELSEVIER PUBLISHING COMPANY, INC.

52 Vanderbilt Avenue

New York, N.Y. 10017

Library of Congress Cataloging in Publication Data

Main entry under title:

Physique atomique et moléculaire et matière inter-
stellaire = Atomic and molecular physics and the
interstellar matter.

Lectures, in English, delivered at Les Houches, École
d'été de physique théorique.

Includes bibliographies.

I. Interstellar matter--Addresses, essays, lectures.

I. Balian, Roger. II. Encrenaz, Pierre. III. Le-
queux, James. IV. Grenoble. Université. École d'été
de physique théorique, Les Houches. V.. Title: Atomic
and molecular physics and the interstellar matter.

QB790.P48 1975

523.1'135

75-23253

ISBN 0-444-10856-4 (American Elsevier)

PRINTED IN THE NETHERLANDS

LES HOUCHES

Session XXVI

1974

PHYSIQUE ATOMIQUE ET MOLÉCULAIRE

ET MATIÈRE INTERSTELLAIRE

ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS

AND THE INTERSTELLAR MATTER

LES HOUCHES, ÉCOLE D'ÉTÉ DE PHYSIQUE THÉORIQUE

Session

I	1951	Mécanique quantique. Théorie quantique des champs (Polycopié). Out of print
II	1952	Quantum mechanics. Mécanique statistique. Chapitres de physique nucléaire (Polycopié). Out of print
III	1953	Quantum mechanics. Etat solide. Mécanique statistique. Elementary particles (Polycopié). Out of print
IV	1954	Mécanique quantique. Théorie des collisions; two-nucleon interaction. Electrodynamique quantique (Polycopié). Out of print
V	1955	Quantum mechanics. Non-equilibrium phenomena. Réactions nucléaires. Interaction of a nucleus with atomic and molecular fields (Polycopié). Out of print
VI	1956	Quantum perturbation theory. Low temperature physics. Quantum theory of solids; dislocations and plastic properties. Magnetism; ferromagnetism (Polycopié). Out of print
VII	1957	Théorie de la diffusion; recent developments in field theory. Interaction nucléaire; interactions fortes. Electrons de haute énergie. Experiments in high energy nuclear physics (Polycopié). Out of print
VIII	1958	Le problème à N corps (Dunod, Wiley, Methuen)
IX	1959	La théorie des gaz neutres et ionisés (Hermann, Wiley)
X	1960	Relations de dispersion et particules élémentaires (Hermann, Wiley)
XI	1961	La physique des basses températures. Low temperature physics (Gordon and Breach, Presses Universitaires)
XII	1962	Géophysique extérieure. Geophysics: the earth's environment (Gordon and Breach)
XIII	1963	Relativité, groupes et topologie. Relativity, groups and topology (Gordon and Breach)
XIV	1964	Optique et électronique quantiques. Quantum optics and electronics (Gordon and Breach)
XV	1965	Physique des hautes énergies. High energy physics (Gordon and Breach)
XVI	1966	Hautes énergies en astrophysique. High energy astrophysics (Gordon and Breach)
XVII	1967	Problème à N corps. Many-body physics (Gordon and Breach)
XVIII	1968	Physique nucléaire. Nuclear physics (Gordon and Breach)
XIX	1969	Aspects physiques de quelques problèmes biologiques. Physical problems in biology (Gordon and Breach)
XX	1970	Mécanique statistique et théorie quantique des champs. Statistical mechanics and quantum field theory (Gordon and Breach)
XXI	1971	Physique des particules. Particle physics (Gordon and Breach)
XXII	1972	Physique des plasmas. Plasma physics (Gordon and Breach)
XXIII	1972	Les astres occlus. Black holes (Gordon and Breach)
XXIV	1973	Dynamique des fluides. Fluid dynamics (Gordon and Breach)
XXV	1973	Fluides moléculaires. Molecular fluids (Gordon and Breach)
XXVI	1974	Physique atomique et moléculaire et matière interstellaire. Atomic and molecular physics and the interstellar matter (North-Holland)

Forthcoming sessions:

XXVII	1975	Application des lasers à la physique atomique et moléculaire. Application of lasers to atomic and molecular physics (North-Holland). To be published
XXVIII	1975	Méthodes en théorie des champs. Methods in field theory (North-Holland). To be published

LES HOUCHES, ÉCOLE D'ÉTÉ DE PHYSIQUE THÉORIQUE

SESSION XXVI

ORGANISME D'INTÉRÊT COMMUN DE L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE
ET MÉDICALE DE GRENOBLE ET DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

INSTITUT D'ÉTUDES AVANCÉES DE LA DIVISION
DES AFFAIRES SCIENTIFIQUES DE L'OTAN

AIDÉ PAR LE COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Membres du conseil: M. Soutif, président, L. Néel, vice-président, P. Averbuch, M.-Y. Bernard, J.-F. Detoeuf, C. De Witt, J.-M. Dolique, B. Dreyfus, J. Gregory, S. Haroche, M. Jacob, Y. Rocard, D. Thoulouze, J. Yoccoz, J. Yvon.

Directeur: Roger Balian, Service de Physique Théorique, Centre de Saclay, BP No. 2, 91190 Gif s/Yvette.

Directeurs scientifiques de la session: Pierre Encrenaz, James Lequeux, Département de radio-astronomie, Observatoire de Paris-Meudon, 92190 Meudon.

COURS DONNÉS À LA SESSION

Atomic Physics, by Harry Nussbaumer

Molecular Spectroscopy and Collisional Excitation, by Sheldon Green

Atomic Collision Theory, by David Flower

*Atom-Atom Collision Processes in the Interstellar Medium,
by Ronald McCarroll*

*Physical Processes for the Formation and Destruction
of Interstellar Molecules, by William D. Watson*

Physics of Fully Ionised Regions, by David Flower

Observations and Physics of Dense Neutral Clouds, by Arno A. Penzias

Interstellar Masers, by Peter Goldreich

Interstellar Grains, by E.M. Greenberg

*Heating and Ionization of the Interstellar Medium; Star Formation,
by George B. Field*

Dynamics of Interstellar Matter, by Franz Kahn

Atoms as Monitors of Galactic Evolution, by Hubert Reeves

PARTICIPANTS

- Ames, Susan*, Institute for Advanced Study, Princeton University, Princeton New Jersey 08540, U.S.A.
- Bibring, Jean-Pierre*, Laboratoire René Bernas, Faculté des Sciences, 91-Orsay, France.
- Constantinescu, Dan Horia*, Institut für theoretische Physik, Universität Heidelberg, Heidelberg 69, Germany F.R.
- Cowie, Lennox*, Physics Dept., Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138, U.S.A.
- Delannoy, Jean*, Observatoire de Bordeaux, 33270 Floirac, France.
- Demoulin-Ulrich, Marie-Hélène*, Observatoire de Meudon, 92190-Meudon, France.
- Dickey, John*, Center for Radiophysics and Space Research, Cornell University, Ithaca, New York 14850, U.S.A.
- Elmergreen, Bruce*, Princeton University Observatory, Peyton Hall, Princeton, New Jersey 08540, U.S.A.
- Guélin, Michel*, Département de Radioastronomie, Observatoire de Meudon, 92190-Meudon, France.
- Gee, Clive*, Dept. of Theoretical Physics, University of Stirling, Stirling, Scotland, U.K.
- Galliford, Peter*, Dept. of Astronomy, University of Manchester, Oxford Rd., Manchester 1, U.K.
- Joly, François*, Laboratoire d'Astrophysique (Université de Bordeaux I), 40 rue Lamartine, 33400-Tajence, France.
- Lazareff, Bernard*, Département de Radioastronomie, Observatoire de Meudon, 92190-Meudon, France.
- Lépine, Jacques*, Département de Radioastronomie, Observatoire de Meudon, 92190-Meudon, France.
- Loren, Robert B.*, Dept. of Astronomy, University of Texas, Austin, Texas 78712, U.S.A.
- Lucas, Robert*, Département de Radioastronomie, Observatoire de Meudon, 92190-Meudon, France.
- Manfroid, Jean*, Institut d'Astrophysique, B-4200 Cointe Ougrée, Belgium.
- Mestdagh, Jean Michel*, Observatoire de Bordeaux, 33270-Floirac, France.

- Morris, Mark*, Dept. of Astronomy and Astrophysics, University of Chicago, 1100-14E. 58th St., Chicago, Illinois 60637, U.S.A.
- Nachman, Paul*, Dept. of Astronomy and Astrophysics, Ryerson 162, University of Chicago, Chicago, Illinois 60637, U.S.A.
- Omont, Alain*, Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne, Université de Paris VII, Place Jussieu, 75230-Paris Cedex 05, France.
- Richard, Lee J.*, Department of Astronomy and Astrophysics, University of Chicago, 1100-14E. 58th St., Chicago, Illinois 60637, U.S.A.
- Salinari, Pierre*, Laboratorio Plasma Spaziale CNR, V. Galilei, cas. Post. No. 27, Frascati (Roma) 06044, Italia.
- Tarafdar, Sankar Prosad*, Theoretical Astrophysics Group, Tata Inst. of Fundamental Research, Homi Bhabha Road, Bombay 400003, India.
- Valiron, Pierre*, Laboratoire d'Astrophysique (Université de Bordeaux I), 40 rue Lamartine, 33400 Talence, France
- Vandelpianque, Jean*, Service de Physique Atomique, C.E.N. Saclay, BP No. 2, 91190-Gif-sur-Yvette, France.
- Vidal, Jean-Louis*, Observatoire du Pic du Midi, 63200-Bagnères de Bigorre, France.
- Weliachew, Leonid*, Département de Radioastronomie, Observatoire de Meudon, 92190-Meudon, France.

PRÉFACE

La session de 1974 de l'Ecole d'Été de Physique Théorique des Houches a été consacrée à la physique de la matière interstellaire avec un intérêt particulier pour les processus atomiques et moléculaires. La découverte dans les dernières années de nombreuses molécules interstellaires ainsi que les observations récentes, par le satellite Copernic, de nombreux éléments atomiques, moléculaires ou ionisés, ont soulevé bon nombre de problèmes: quels sont les mécanismes d'ionisation, d'excitation et de chauffage du gaz interstellaire? Comment ces molécules peuvent-elles se former et être excitées? Que pouvons nous déduire sur la structure et les propriétés physico-chimiques du milieu interstellaire, à partir de l'observation des raies atomiques et moléculaires? Comment la matière interstellaire évolue-t-elle durant l'histoire de la Galaxie? Comment les étoiles se forment-elles au sein des nuages interstellaires? Ce vaste sujet a de nombreux rapports avec la physique atomique et moléculaire, en particulier parce que le milieu interstellaire est un laboratoire naturel dont les conditions physiques sont très variées et différentes de celles de nos laboratoires terrestres: en particulier, de nombreuses molécules instables, des raies interdites, et même des processus d'émission maser peuvent y être observés.

Les cours ont fourni une description détaillée des processus physiques de base apparaissant dans le gaz et les poussières interstellaires, et ils ont essayé d'apporter une réponse partielle aux questions ci-dessus, sur la base des observations et de notre connaissance théorique de ce milieu.

La première moitié de l'école a comporté des cours de haut niveau donnant les bases physiques et physicochimiques nécessaires pour la compréhension de la matière interstellaire. H. Nussbaumer et S. Green, faisant leurs cours parallèlement, ont couvert respectivement les aspects les plus utiles de la physique atomique et moléculaire; S. Green a aussi donné plusieurs cours sur les surfaces de potentiel moléculaires et la théorie de l'excitation collisionnelle des molécules, tandis que D. Flower et R. Mc Carroll ont couvert l'excitation collisionnelle atomique. La physico-chimie des molécules interstellaires (formation et destruction) a été décrite de manière extensive par W. Watson qui a donné la revue la plus complète et la plus à jour de ce sujet difficile. Les cours suivants ont été plus directement centrés sur l'astrophysique. D. Flower a présenté la théorie de l'ionisation et l'excitation des nébuleuses gazeuses, tandis que A. Penzias

PRÉFACE

décrivait la physique des nuages moléculaires denses, dérivée de l'étude de leurs raies moléculaires. P. Goldreich présenta de manière détaillée la théorie des masers moléculaires interstellaires. Cette partie astrophysique de la session a été centrée sur la série de cours de G. Field, qui a présenté pendant trois semaines une revue complète et claire de la physique de la matière interstellaire peu dense en insistant sur les mécanismes physiques gouvernant sa température, son ionisation et son évolution. La formation des étoiles a aussi été étudiée à cette session, et F. Kahn a donné les bases nécessaires en hydrodynamique et en magnétohydrodynamique et appliqué ces notions à la propagation des rayons cosmiques et aux problèmes qui s'y rattachent. Enfin H. Reeves a discuté les rayons cosmiques et l'abondance des éléments pour comprendre l'évolution de la matière interstellaire.

Cette série de cours a ainsi permis de couvrir pratiquement tous les aspects de la matière interstellaire. La durée de 8 semaines de l'école a permis de traiter en détail un programme étendu. En dépit de certaines craintes des organisateurs et des participants au début de la session, la longue durée de celle-ci a été reconnue par tous comme très profitable, étant donné le large éventail des sujets abordés. Un certain nombre de programmes de recherches a démarré aux Houches, et les nombreux séminaires, dont nous donnons en fin de volume la liste et quelques résumés, montrent combien vivante a été l'école. Notre espoir est que la consultation de ce livre sera aussi utile aux lecteurs que les conférences l'ont été aux participants. Mais il est une chose que le livre ne peut rendre, c'est le cadre magnifique où nous avons tous vécu pendant ces deux mois.

Pierre Encrenaz
James Lequeux

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette session de l'Ecole des Houches et de ce volume de notes de cours n'a été possible que grâce à de nombreuses contributions:

- le soutien financier de l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble, et les subventions de la Division des Affaires Scientifiques de l'OTAN, qui a inclus la session dans son programme d'Instituts d'Etudes Avancées, et du Commissariat à l'Energie Atomique;
- l'orientation et le soutien effectif du Conseil de l'Ecole;
- le soin apporté par Jeannette Caro et Chantal Le Gall dans la préparation des manuscrits;

– la coopération de tous les participants, qui ont pris une part active dans l'élaboration des notes de cours;

– l'aide d'Henri et Nicole Coiffier et de toute leur équipe pour résoudre les problèmes matériels et administratifs.

Nous tenons cependant à remercier tout particulièrement les conférenciers, pour les nombreuses heures passées à préparer leurs cours, qui ont assuré le succès de la session, et qui nous l'espérons feront de ce volume un outil utile à la communauté scientifique.

Roger Balian
Pierre Encrenaz
James Lequeux

PREFACE

The 1974 session of the les Houches Summer School in Theoretical Physics has been devoted to the physics of interstellar matter, with special emphasis on atomic and molecular processes.

The discovery in the last few years of many interstellar molecules by radio-astronomers, as well as the recent observations of numerous atomic, ionic and molecular species in the interstellar matter by the astronomical satellite Copernicus, raise a large number of exciting problems: what are the mechanisms of ionization, heating and cooling of the interstellar gas? How are interstellar molecules formed, and are excited? What can we derive through observations of atomic and molecular lines about the structure and physico-chemical properties of interstellar matter? How does interstellar matter evolve during the life of the Galaxy? How do stars form in the interstellar clouds? This very wide subject has numerous inferences with atomic and molecular physics, because the interstellar medium is a natural laboratory where the physical conditions exhibit a large variety and are quite different from the conditions in our terrestrial laboratories: in particular, many unstable molecules, forbidden-line and even maser emissions can be readily observed in the interstellar gas.

The lectures provide a detailed description of the basic physical and chemical processes occurring in the interstellar gas and dust, and give a thorough and up-to-date account of the present status of our observational and theoretical knowledge of this medium.

The first half of the school includes advanced courses giving the physical and chemical background necessary for a deep understanding of the interstellar matter. H. Nussbaumer and S. Green cover the most useful aspects of atomic and molecular physics, respectively. S. Green also gives several lectures on molecular potential surfaces and the theory of molecular excitation, while D. Flower and R. Mc Carrol discuss various aspects of atomic collisions. Physico-chemistry of interstellar molecules (formation and destruction) is extensively described by W. Watson, who gives the most complete available review of this complex subject. The following courses are more directly centered on astrophysics. D. Flower describes the theory of ionization and excitation of gaseous nebulae, while A. Penzias covers the physics of the dense interstellar clouds as derived from a study of their molecular lines. P. Goldreich gives a detailed account of the theory of interstellar masers, and M. Greenberg discusses interstellar grains.

This astrophysical part is centered on the extensive series of lectures by G. Field, which provide a rather complete and comprehensive review of the physics of not-too-dense interstellar matter, with emphasis on the physical mechanisms governing its temperature, ionization and evolution. Some aspects of stellar formation are also studied in this course, and F. Kahn gives the necessary background in hydrodynamics and magnetohydrodynamics, with applications also to the propagation of cosmic rays and related problems. Finally, H. Reeves discusses cosmic rays and element abundances as tools for studying the evolution of interstellar matter.

This series of lectures thus provide a detailed and complete analysis of the many aspects of the physics of interstellar matter. The eight-week duration of the school has made possible to treat thoroughly such an extensive program. In spite of some fears of the organizers and participants at the beginning of the school, its long duration has been unanimously acknowledged as very fruitful, given the broad scope of subject. A number of research programs have been started at les Houches, and the many seminars, of which a list and some summaries are given at the end of the book, show how lively the school has been. Our hope is that reading the present book will be as useful for the reader as have been the lectures for the participants at the school. The thing that this book cannot provide is the magnificent setting in which we all have lived for these two months.

Pierre Encrenaz
James Lequeux

ACKNOWLEDGEMENTS

This session of the Les Houches Summer School and this volume of lecture notes have been made possible only through many contributions:

- the financial support to the School, coming from the Université Scientifique et Médicale de Grenoble, the NATO Scientific Affairs Division (who included this session in its Advanced Study Institutes Programme), and the Commissariat à l'Energie Atomique;
- the guidance of the School board;
- the care of Jeannette Caro and Chantal Le Gall in the typing and preparation of manuscripts;
- the cooperation of all participants, who took an active part in the elaboration of the lecture notes;

— the help of Henri and Nicole Coiffier and all their team for dealing with material and administrative problems.

But we wish to thank quite particularly the lecturers, for the many hours of preparation of their conferences, which have made the session successful, and we hope will make the present volume a useful contribution to the scientific community.

Roger Balian
Piere Encrenaz
James Lequeux

CONTENTS

<i>Contributors</i>	v
<i>Participants</i>	vii
<i>Preface (in French and English)</i>	ix

LECTURES

<i>Course 1. Atomic Physics, by Harry Nussbaumer</i>	1
1. Short historical introduction	3
2. State functions	7
3. The hydrogenic atom	10
4. The non-Coulomb central potential	19
5. The helium atom	29
6. The electron spin	39
7. Antisymmetric eigenfunctions of angular momentum	46
8. The general eigenfunction for a complex atom (configuration interaction)	53
9. Transition probabilities	59
10. Selection rules	67
11. Electric dipole transitions in intermediate coupling (intercombination lines)	72
12. Trends along isoelectronic sequences	76
References	81

<i>Course 2. Molecular Spectroscopy and Collisional Excitation, by Sheldon Green</i>	83
1. Introduction	85
2. Molecular energy levels	88
2.1. Born–Oppenheimer approximation	89
2.2. Electronic	91
2.3. Vibration	100
2.4. Rotation	103
3. Spectroscopy	110
3.1. Rigid rotation	112
3.2. Diatomic molecules with electronic angular momenta	112
3.3. Vibrational transitions	113
3.4. Electronic transitions	114
4. Collisional excitation	116
4.1. Experimental determination of cross sections	117
4.2. Theoretical determination	119
References	132
 <i>Course 3. Atomic Collision Theory, by David Flower</i>	 135
1. Introduction	137
2. Classical theory	138
3. Quantum theory	140
4. Quantum-mechanical treatment of the scattering of electrons by hydrogenic ions	143
4.1. Assuming the electrons to be distinguishable and neglecting spin	143
4.2. Allowing for the indistinguishability of the electrons and for their spin	147
5. Variational principle	149
5.1. Distorted wave approximation	151
5.2. Coulomb–Born approximation	152
References	152
 <i>Course 4. Atom–Atom Collision Processes in the Interstellar Medium, by Ronald McCarroll</i>	 155
1. Introduction	157

2. Low-energy collisions	157
2.1. Introduction	157
2.2. Theory	158
2.3. Correlation diagram	162
2.4. Applications	163
2.5. Validity of model	167
2.6. Auto-ionization in the molecular model	168
3. High-energy collisions, $E \gtrsim 100$ keV	171
3.1. Ionization and charge exchange	171
3.2. Inner shell excitation and ionization. Fluorescence yield	172
References	173
 <i>Course 5. Physical Processes for the Formation and Destruction of Interstellar Molecules, by William D. Watson</i>	 177
1. Introduction	181
1.1. Diffuse interstellar clouds	181
2. Factors that influence the rate of formation of molecules on interstellar grains	186
3. Temperatures of interstellar grains	189
4. The electric potential of interstellar grains	195
5. Nature of grain surfaces and binding energies of particles to grains	198
6. Sticking of neutral atoms and molecules onto grain surfaces	204
7. Mobility of atoms on grain surfaces	210
7.1. Thermal hopping	211
7.2. Quantum mechanical tunneling	211
8. Processes for ejecting gas atoms and molecules from grains	214
8.1. Thermal evaporation	214
8.2. Non-thermal ejection processes	214
9. Summary and conclusions for molecule formation on grains	223
9.1. Formation of molecular hydrogen on grains	224
9.2. Formation of molecules other than H_2 on grains	228
10. Basic chemical energies	230
11. Photo-dissociation of interstellar molecules	233
12. Rates for molecular reactions	239
13. Molecule formation by radiative association	242