

**MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA
DIPARTIMENTO PER LA PROGRAMMAZIONE IL COORDINAMENTO E GLI AFFARI
ECONOMICI - SAUS
PROGRAMMI DI RICERCA SCIENTIFICA DI RILEVANTE INTERESSE NAZIONALE
RICHIESTA DI COFINANZIAMENTO
(DM n. 20 del 19 febbraio 2002)
PROGETTO DI UNA UNITÀ DI RICERCA - MODELLO B
Anno 2002 - prot. 2002015553_003**

Parte: I

1.1 Programma di Ricerca di tipo: *interuniversitario*Area Scientifico Disciplinare: *Scienze Matematiche***1.2 Durata del Programma di Ricerca:** *24 mesi***1.3 Coordinatore Scientifico del Programma di Ricerca****CERCIGNANI**

(cognome)

Politecnico di MILANO

(università)

MAT/07

(settore scient.discipl.)

CARLO

(nome)

**Facoltà di
INGEGNERIA II**

(facoltà)

**Dipartimento di
MATEMATICA**

(Dipartimento/Istituto)

carcer@mate.polimi.it

(E-mail)

1.4 Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca**FROSALI**

(cognome)

GIOVANNI

(nome)

Professore ordinario

(qualifica)

29/11/1947

(data di nascita)

FRSGNN47S29I728W(codice di identificazione
personale)**Università degli Studi di
FIRENZE**

(università)

MAT/07

(settore scient.discipl.)

Facoltà di INGEGNERIA

(facoltà)

**Dipartimento di MATEMATICA APPLICATA "G.
SANSONE"**

(Dipartimento/Istituto)

055/4796307

(prefisso e telefono)

055/471787

(numero fax)

FROSALI@DMA.UNIFI.IT

(E-mail)

1.5 Curriculum scientifico del Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca**Testo italiano**

G.Frosali ha svolto i suoi studi presso l'Università di Firenze, dove è stato assistente dal 1973 al 1983 e professore associato di Meccanica Razionale presso la Facoltà di Ingegneria di Firenze dal 1983. Vincitore di concorso nel 1986, è stato professore ordinario di Meccanica Razionale dal 1987 al 1997, presso l'Università di Ancona dove è stato Direttore del Dipartimento di Matematica per due trienni. Attualmente è professore di Meccanica Razionale presso la Facoltà di Ingegneria di Firenze. Ha svolto ricerche nell'ambito della teoria del trasporto di particelle, con particolare riguardo a problemi stazionari e di criticità, a problemi di esistenza ed unicità con metodi di semigruppì, a problemi di runaway, a scattering theory e ad analisi asintotica per equazioni cinetiche. Attualmente la sua attività di ricerca è rivolta allo studio di modelli semiclassici e quantistici per semiconduttori. È autore di più di 70 articoli pubblicati su riviste nazionali ed internazionali, su atti di congressi, e rapporti interni. È stato membro della Commissione Scientifica dell'UMI, e' socio di numerose società di matematica pura ed applicata.

Testo inglese

Dr. Frosali completed his studies at the University of Florence, where he was assistant professor from 1973 to 1983 and associate professor of Analytical Mechanics at the Faculty of Engineering from 1983. In 1986, he was promoted professor of Analytical Mechanics from 1987 to 1997 at the University of Ancona, where he was the chairman of the Mathematical Department for six years. Since 1997 he is professor of Analytical Mechanics at the Faculty of Engineering of the University of Florence. He has been interested in transport theory and in mathematical methods in applied sciences, participating at numerous national and international scientific meetings, congresses, and conferences. His research activity is strongly related with the research of numerous groups working in these fields. Recently his main interest is devoted to the study of semi-classical and quantum models for semiconductors. He authored more than 70 journal articles published in prestigious national and international journals, conference papers, and internal reports. He was member of the Scientific Committee of UMI and he is member of others societies of pure and applied mathematics.

1.6 Pubblicazioni scientifiche più significative del Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca

1. **FROSALI G. (1998). *Asymptotic analysis for a particle transport problem in a moving medium*. IMA JOURNAL OF APPLIED MATHEMATICS. vol. 60, pp. 1-19.**
2. **DEMEIO L., FROSALI G. (2000). *Diffusion limits of the linear Boltzmann equation in extended kinetic theory: weak and strong inelastic collisions*. RENDICONTI SEMINARIO UNIVERSITA' DI MILANO. vol. LXIX, pp. 51-81.**
3. **BANASIAK J., FROSALI G., SPIGA G. (2000). *Inelastic scattering models in transport theory and their small mean free path analysis*. MATHEMATICAL METHODS IN THE APPLIED SCIENCES. vol. 23, pp. 121-145.**
4. **BANASIAK J., FROSALI G., SPIGA G. (2002). *Interplay of elastic and inelastic scattering operators in extended kinetic models and their hydrodynamic limits - reference manual*. TRANSPORT THEORY & STATISTICAL PHYSICS. vol. 31(2).**

5. **BORGIOLI G., FROSALI G., ZWEIFEL P.F. (2001). Wigner approach to the two-band Kane model for a tunneling diode. XVII International Conference on Transport Theory ICTT 2001 - LONDON. 8-14 July 2001. submitted on TRANSPORT THEORY STATIST. PHYSICS.**

1.7 Risorse umane impegnabili nel Programma dell'Unità di Ricerca

1.7.1 Personale universitario dell'Università sede dell'Unità di Ricerca

N°	Cognome	Nome	Dipart./Istituto	Qualifica	Settore scient.	Mesi uomo	
						2002	2003
Personale docente:							
1	FROSALI	GIOVANNI	MATEMATICA APPLICATA "G. SANSONE"	Prof. ordinario	MAT/07	11 (ore: 1507)	7 (ore: 959)
2	BARLETTI	LUIGI	MATEMATICA "ULISSE DINI"	Ricercatore	MAT/07	11 (ore: 1507)	6 (ore: 825)
3	BORGIOLI	GIOVANNI	ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI	Prof. associato	MAT/07	11 (ore: 1507)	6 (ore: 825)
4	BUSONI	GIORGIO	MATEMATICA "ULISSE DINI"	Prof. ordinario	MAT/07	11 (ore: 1507)	6 (ore: 825)
Altro personale:							

1.7.2 Personale universitario di altre Università

N°	Cognome	Nome	Università	Dipart./Istituto	Qualifica	Settore scient.	Mesi uomo	
							2002	2003
Personale docente:								
1	DEMEIO	LUCIO	ANCONA	MATEMATICA "Vito Volterra"	Ricercatore	MAT/07	11 (ore: 1507)	7 (ore: 959)
2	TOTARO	SILVIA	SIENA	MATEMATICA "Roberto Magari"	Prof. ordinario	MAT/07	11 (ore: 1507)	7 (ore: 959)
Altro personale:								

1.7.3 Titolari di assegni di ricerca

N°	Cognome	Nome	Dipart./Istituto	Anno del titolo	Mesi uomo	
					2002	2003
1	MUGELLI	FRANCESCO	Dip. MATEMATICA APPLICATA "G. SANSONE"	2002	10 (ore: 1375)	8 (ore: 1100)

1.7.4 Titolari di borse per Dottorati di Ricerca e ex L. 398/89 art.4 (post-dottorato e specializzazione)

N°	Cognome	Nome	Dipart./Istituto	Anno del titolo	Mesi uomo
1.	<i>BIONDINI</i>	<i>STEFANO</i>	<i>ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI</i>	2004	<i>16</i> (ore: 2200)
2.	<i>CAMPRINI</i>	<i>MATTEO</i>	<i>ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI</i>	2003	<i>10</i> (ore: 1375)
3.	<i>LISI</i>	<i>MERI</i>	<i>MATEMATICA "ULISSE DINI"</i>	2004	<i>18</i> (ore: 2475)
4.	<i>MANZINI</i>	<i>CHIARA</i>	<i>MATEMATICA "ULISSE DINI"</i>	2004	<i>15</i> (ore: 2055)

1.7.5 Personale a contratto da destinare a questo specifico programma

N°	Qualifica	Costo previsto	Mesi uomo
1.	<i>LAUREATO</i>	7000	<i>11</i> (ore: 1507)

1.7.6 Personale extrauniversitario dipendente da altri Enti

N°	Cognome	Nome	Dipart./Istituto	Qualifica	Mesi uomo
----	---------	------	------------------	-----------	-----------

Parte: II

2.1 Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca

Testo italiano

Modelli matematici per dispositivi a semiconduttore, metodi matematici in teorie cinetiche ed applicazioni

Testo inglese

Mathematical modeling of semiconductor devices, mathematical methods in kinetic theories and applications

2.2 Settori scientifico-disciplinari interessati dal Programma di Ricerca

- *MAT/07 - FISICA MATEMATICA*

2.3 Parole chiave

Testo italiano

EQUAZIONE DI BOLTZMANN QUANTISTICA ; FUNZIONE DI WIGNER ; SISTEMA DI VLASOV-WIGNER ; SEMICONDUTTORI ; MODELLI IDRODINAMICI ; RESONANT TUNNELING DIODE ; TRASPORTO RADIATIVO ; TEORIA DEL TRASPORTO ; METODI FUNZIONALI

Testo inglese

QUANTUM BOLTZMANN EQUATION ; WIGNER FUNCTION ; VLASOV-WIGNER SYSTEM ; SEMICONDUCTORS ; HYDRODYNAMIC MODELS ; RESONANT TUNNELING DIODE ; RADIATIVE TRANSPORT ; TRANSPORT THEORY ; FUNCTIONAL METHODS

2.4 Base di partenza scientifica nazionale o internazionale**Testo italiano**

1. Modelli matematici e numerici di dispositivi a semiconduttore.

Nella modellizzazione dei dispositivi a semiconduttore di nuova generazione è necessario tenere conto degli effetti quantistici [1.25]. Gli effetti dell'interferenza quantistica e delle dimensioni finite dominano il comportamento di queste nanostrutture e controllano il flusso di corrente. La funzione di Wigner gioca un ruolo simile a quello della distribuzione classica, ed i momenti danno le quantità macroscopiche che caratterizzano il sistema [1.3,1.14]. Essa è definita per i sistemi quantistici per mezzo di una trasformazione appropriata della funzione d'onda, detta trasformazione di Wigner [1.15].

Uno dei prototipi fra i semiconduttori di scala nanometrica è il Resonant Tunneling Diode (RTD) le cui proprietà sono state già studiate numericamente facendo uso del formalismo di Wigner [1.22]. Un altro dispositivo di grande interesse è il Resonant Interband Tunneling Diode (RITD), che si differenzia dall'RTD per il fatto che i portatori della banda di valenza giocano un ruolo determinante nella corrente e per l'esistenza di regioni con resistività negativa [1.27]. Per la descrizione cinetica dell'RITD mediante la funzione di Wigner, è necessaria la formulazione di un modello di trasporto multibanda, finora assente in letteratura.

E' noto che lo spettro dell'Hamiltoniana di una particella quantistica in un potenziale periodico (come nel reticolo di un semiconduttore) è uno spettro continuo scomponibile in bande di energia. In presenza di potenziali esterni applicati (o Coulombiani) le proiezioni della funzione d'onda sugli autospazi relativi alle bande (sottospazi di Floquet) risultano accoppiate dall'equazione di Schroedinger, producendo transizioni interbanda ed effetti non secondari sul funzionamento dei dispositivi RITD.

Il nostro gruppo di ricerca ha già elaborato modelli che tengano conto di un tale "trasporto interbanda" [1.4,1.12,1.13]. Abbiamo definito la funzione di Wigner per un insieme statistico di elettroni comprendente le popolazioni di tutte le bande di energia e si è scritta l'equazione di evoluzione esatta in assenza di campo esterno. Le equazioni ottenute sono una generalizzazione di un risultato dovuto a Markowich per una sola banda [1.24]. Il modello è stato poi esteso al caso in cui l'evoluzione della funzione di Wigner sia determinata anche da un potenziale esterno. Dalle equazioni generali, si è quindi ricavato un modello multibanda semplificato, applicando l'approssimazione di massa efficace a ciascuna banda [1.12,1.13].

Un altro tema cui siamo interessati riguarda i modelli idrodinamici per sistemi quantistici a due bande. I modelli idrodinamici hanno avuto sempre largo impiego nello studio dei semiconduttori [1.25]. Nei più recenti dispositivi quali gli RTD e RITD occorre però sviluppare ed utilizzare modelli pienamente quantistici perché tali sono i loro meccanismi di funzionamento. Una buona descrizione del tunneling interbanda è fornito dal modello di Kane a due bande [1.19, 1.20], che, partendo dall'equazione di Schrodinger ed approssimando l'Hamiltoniana con il metodo kP [1.29], fornisce un sistema di due equazioni accoppiate di tipo Schrodinger per le funzioni "envelope" [1.10] di elettroni e lacune.

Il modello di Kane è stato oggetto di studio da parte della nostra unità. Di tale modello è stata presentata una riformulazione in termini di funzioni di Wigner [1.8], come un sistema di quattro equazioni integro-differenziali di tipo "cinetico".

Nella letteratura recente è presente una modellistica idrodinamica ottenuta con un

approccio non euristico, che deriva le equazioni dall'equazione di Wigner-Boltzmann con il metodo dei momenti e con sviluppi alla Chapman-Enskog [1.16,1.17,1.6]. Questa formulazione risulta interessante perché tratta grandezze fisiche macroscopiche e, soprattutto, permette di maneggiare una versione "smussata" dell'energia potenziale di banda, che ha in genere brusche discontinuità. I termini quantistici si presentano nelle equazioni come perturbazione in modo che l'analisi del modello ottenuto risulta agevole nel limite semiclassico ed il trattamento numerico è relativamente semplice e in accordo con i dati sperimentali [1.18].

Per quanto riguarda il sistema di Wigner-Poisson, siamo interessati allo studio di soluzioni stazionarie (modi BGK quantistici).

I modi BGK (classici) sono soluzioni stazionarie del sistema di Vlasov-Poisson [1.28] monodimensionale, che governa l'andamento temporale e (stazionario) degli elettroni e del campo elettrico autoconsistente di un plasma non magnetizzato ed acollisionale, con ioni fissi. Queste soluzioni stazionarie possono poi essere trasformate in onde viaggianti non smorzate, grazie all'invarianza per trasformazioni Galileiane [1.7]. La tecnica più usata e diretta per costruire analiticamente e numericamente le soluzioni è quella di considerare funzioni di distribuzione elettroniche che dipendano dalle variabili canoniche dello spazio delle fasi soltanto tramite l'energia totale della particella. L'equazione di Poisson, quindi, diventa un'equazione differenziale per il potenziale elettrico autoconsistente [1.11],[1.9].

L'analogo quantistico del sistema di Vlasov-Poisson è il sistema di Wigner-Poisson [1.1],[1.30]. La funzione di Wigner obbedisce ad un'equazione di evoluzione (o stazionaria) in cui al termine differenziale di accelerazione dell'equazione di Boltzmann classica si sostituisce un operatore pseudodifferenziale, che rende inusabili le tecniche basate sul metodo delle caratteristiche, applicabili invece al caso classico. L'esistenza di soluzioni stazionarie del sistema di Wigner-Poisson è stata dimostrata in [1.22]; queste soluzioni stazionarie sono l'analogo quantistico dei modi BGK classici e perciò sono state chiamate "modi BGK quantistici (QBGK)".

2. Modelli cinetici con applicazioni alla fisica del mezzo interstellare.

Il mezzo interstellare è una sorta di "laboratorio chimico" responsabile della nascita di stelle e galassie. La materia interstellare è costituita principalmente da gas molecolari (in gran parte idrogeno) da molecole più complesse e da grani di "polveri" di silicati e carbonati. Essa è concentrata in grandi nubi le cui dimensioni sono dell'ordine delle decine di anni-luce e la cui densità varia da circa 10^3 a circa 10^6 particelle per cm cubo [2.12]. Ci sono vari aspetti della fisica delle nubi interstellari che portano a modelli matematici di tipo cinetico. Il più classico è senz'altro quello del trasporto radiativo [2.10], da una parte perché il campo di radiazione all'interno della nube induce reazioni che influiscono sulla sua evoluzione chimica, sia in quanto l'osservazione da terra delle righe spettrali fornisce informazioni sulla composizione della nube.

In quest'ambito la nostra ricerca si è in un primo tempo indirizzata allo studio del trasporto radiativo attraverso una nube con ammassi più densi, detti "clumps", distribuiti in modo casuale al suo interno, [2.3], [2.8]. In un secondo tempo si è aggiunto lo studio di problemi quasi-statici [2.4] e di problemi inversi, su cui esiste una vasta letteratura [2.1], [2.11].

Un altro aspetto della fisica delle nubi molecolari dove i modelli di tipo cinetico risultano appropriati è quello della dinamica delle polveri e dei gas che costituiscono la nube. In particolare, sono di grande interesse i fenomeni di coagulazione fra grani di polvere, [2.9] e/o di scambio di cariche fra polveri e ioni [2.13].

In quest'ambito la ricerca si è indirizzata all'elaborazione e allo studio di modelli cinetici non-lineari atti a descrivere tali fenomeni, [2.2], [2.4], [2.6], [2.7]. In [2.7], in particolare, il modello cinetico adottato ha permesso di ricavare stime del tempo di estinzione di una popolazione di particelle piccole, per coagulazione con particelle di maggiori dimensioni, che si è dimostrato in buon accordo con i valori osservati.

Testo inglese

1. Mathematical and numerical modeling of semiconductor devices.

Quantum effects play a very important role in new-generation semiconductor devices and must be taken into account in their modeling [1.25]. Quantum interference and finite-size effects dominate the behaviour of these nanostructures and control the flow of current. The most important quantity in the theory of quantum transport is the Wigner function, which plays a role similar to that of the classical distribution function, and whose moments give the macroscopic quantities which characterize the behaviour of the system [1.3,1.14]. The Wigner function is defined for quantum statistical systems by a suitable transformation of the density matrix, called Wigner transformation [1.15].

One of the prototypes among the nanoscale semiconductor devices is the Resonant Tunneling Diode (RTD), whose properties have already been studied by means of the Wigner-function formalism (see [1.22], where the kinetic equations that govern the time evolution of the Wigner function were solved numerically).

Another device which has attracted attention is the Resonant Interband Tunneling Diode (RITD), which is different from the RTD in that the carriers of the valence band play a significant role in controlling the flow of current. The experimental results show the existence of multiple regions with negative differential resistivity [1.27]. For the description of the RITD, a multiband transport model, so far not present in the literature, is needed. Along this line of research, a Wigner function for a statistical ensemble of electrons, which includes the populations of all energy bands, was defined and the evolution equation in absence of an external field was written [1.4,1.12,1.13]. This is a generalization of an earlier result for a single band, due to Markowich [1.24]. Subsequently, the model has been extended to the case in which the time evolution of the Wigner function is determined by an external field, besides the periodic field of the crystal lattice. From the general equations, a simplified multiband model was derived, by adopting the effective mass approximation to each band [1.12,1.13].

Hydrodynamic models have often been used in studying the dynamics of electrons and holes in semiconductors [1.25]. In the modeling of the most recent devices, such as the resonant tunneling diodes described earlier (RTD and RITD), in which quantum effects are important, fully quantum mechanical models need to be formulated. A simple model for the description of the RITD is the two-band Kane model [1.19, 1.20], which is based on the Schroedinger equation for the one-particle wave function and uses the so called kP approximation to the true Hamiltonian. The resulting equations form a system of two coupled equations for the envelope functions of electrons and holes. The Kane model has been studied by the Firenze research group, which has re-formulated the system using Wigner functions, thus obtaining a system of four linear kinetic integro-differential equations.

Much of the recent literature has been devoted to a rigorous hydrodynamic approach, in which the basic equations are derived from the Wigner-Boltzmann equation by moment methods and Chapman-Enskog type expansions [1.16,1.17,1.6]. This formulation is interesting since it deals with macroscopic physical quantities which can be readily interpreted and also because it allows a smoothing of the band profiles, which exhibits sharp discontinuities at the interfaces between different materials. The quantum terms are present in the equations as perturbations, so that the analysis of the model becomes easier in the semiclassical limit. The numerical approach becomes also simple and gives good agreement with experimental results [1.18].

Another topic of our research is the study of steady-state solutions of the Wigner-Poisson system (Quantum BGK modes).

Classical BGK modes are steady-state solutions of the one-dimensional Vlasov-Poisson system [1.28], which governs the time evolution (and the steady-state behaviour) of the electron distribution and of the self-consistent electric field of an unmagnetized, non-collisional plasma with immobile ions. These steady-state solutions can be transformed into undamped travelling waves, thank to the invariance of the equations under Galilean transformations [1.7]. The simplest and most widely used technique to construct steady-state solutions (analytically and numerically) is that of considering distribution functions which depend upon the canonical phase-space variables through the single-particle energy only. Poisson's equation then becomes a differential equation

for the self-consistent electrostatic potential [1.11,1.9].

The quantum analogue of the Vlasov-Poisson system is the Wigner-Poisson system [1.1,1.30], in which the Wigner function takes the place of the classical distribution function. The Wigner function obeys an evolution (or stationary) equation in which the differential acceleration term of the classical Boltzmann equation is replaced by a pseudodifferential operator, which makes useless the techniques based on the method of characteristics, which are applicable to the classical system. The existence of steady-state solutions of the Wigner-Poisson system has been proved in [1.22]; these steady-state solutions are the quantum analogue of the classical BGK modes, and have therefore been named "Quantum BGK modes (QBGK)".

2. Kinetic models with applications to the interstellar physics.

The interstellar (and intergalactic) medium, far from being a vacuum, can be regarded as a "chemical laboratory" responsible of the birth of stars and galaxies. The interstellar medium is mainly constituted by molecular gases (mostly hydrogen), by more complex molecules and by grains of "dust" of silicon and carbonates. It is concentrated in large clouds, whose dimensions are of the order of tens of light years and whose density ranges from about 10^3 to 10^6 particles per cubic centimeter [2.12]. There are many aspects concerning the physics of interstellar clouds which lead to mathematical models of the kinetic type. The most classical among these is certainly radiative transport [2.10], both because the radiation field (especially ultraviolet) within the clouds induces reactions which affect their chemical evolution, and because earth-based observations of the spectral lines yields information on the chemical composition of the cloud itself. In this topic, our research has first been devoted to the study of radiative transport through a cloud with denser parts, or "clumps", randomly distributed inside the cloud [2.3, 2.8]. Then, we have investigated quasi-static [2.4] and inverse problems, about which there exists a large literature [2.1, 2.11].

Another aspect of the physics of molecular clouds, where kinetic models are appropriate, is the dynamics of the dusts and gases that form the cloud. Particularly interesting are the phenomena of coagulation of dust grains [2.9] and of charge-exchange between dusts and ions [2.13]. In this topic, our research has been devoted to the formulation of nonlinear kinetic models for these phenomena [2.2], [2.4], [2.6], [2.7]. In [2.7], in particular, the adopted kinetic model has allowed to estimate the "extinction time" of a population of small particles by coagulation with bigger particles. This estimate is in good agreement with the observed values.

2.4.a Riferimenti bibliografici

1. Modelli di trasporto quantistico multibanda.

[1.1] A. Arnold, P. Markowich, The periodic quantum Liouville-Poisson problem, *Bollettino U.M.I.* (7) 4-B, 449-484 (1990).

[1.2] J.Banasiak, L.Barletti, On the existence of propagators in stationary Wigner equation without velocity cut-off, *Transport Theory Stat. Phys.* 30(7), 2001.

[1.3] L.Barletti, A mathematical introduction to the Wigner formulation of quantum mechanics, *Quaderni del Dipartimento di Matematica "Ulisse Dini" 15/2001*, *Boll. Unione Mat. Ital. B.* (submitted).

[1.4] L.Barletti, Wigner envelope functions for electron transport in semiconductor devices. Preprint (2001), *Transport Theory Stat. Phys.* (submitted).

[1.5] L.Barletti, P.F. Zweifel, Parity-decomposition method for the stationary Wigner equation with inflow boundary conditions, *Transport Theory Stat. Phys.* 30(4-6), 507-520, 2001.

[1.6] N.Ben Abdallah, On a multidimensional Schroedinger-Poisson scattering model for semiconductors, *J. Math. Phys.* 41(7), 4241-4261, 1999.

[1.7] I. B. Bernstein, J. M. Greene, M. D. Kruskal, Exact Nonlinear Plasma Oscillations. *Physical Review* 108, 546-550 (1957).

- [1.8] G.Borgioli, G. Frosali, P.F. Zweiefel, *Wigner approach to the two-band Kane model for a tunneling diode (submitted to Transport Theory Stat. Phys.)*.
- [1.9] M. Buchanan, J. J. Dornig, *Nonlinear Electrostatic Waves in Collisionless Plasmas, Physical Review E* 52, 3015-3033 (1995).
- [1.10] M.G. Burt, *The justification for applying the effective-mass approximation to microstructure, J.Phys: Condens.Matter* 4, 6651-6690 (1992).
- [1.11] L. Demeio, *A numerical study of linear and nonlinear superpositions of BGK modes, Transport Theory and Statistical Physics* 30, 457-470 (2001).
- [1.12] L. Demeio, L. Barletti, P. Bordone and C. Jacoboni, *Wigner function for multiband transport in semiconductors, Transport Theory and Statistical Physics, Settembre 2001 (to appear)*.
- [1.13] L. Demeio, L. Barletti, A. Bertoni, P. Bordone and C. Jacoboni, *Wigner-function approach to multiband transport in semiconductors, Physica B (to appear)*.
- [1.14] W.R. Frensley, *Wigner-Function Model of a Resonant-Tunneling Semiconductor Device, Phys. Rev B*, 36(3), 1570-1580, 1987.
- [1.15] W.R. Frensley, *Boundary Conditions for Open Quantum Systems Driven far from Equilibrium, Rev. Modern Phys.*, 62(3), 745-791, 1990.
- [1.16] C.L.Gardner, *The quantum hydrodynamic model for semiconductor devices, SIAM Journal on Appl.Math.* 54, 409-427 (1994)
- [1.17] C.L.Gardner, C.Ringhofer, *The Chapman-Enskog expansion and the quantum hydrodynamic model for semiconductor devices, VLSI Design* 10, 415-435 (2000).
- [1.18] C.L.Gardner, C.Ringhofer, *Numerical simulation of the smooth quantum hydrodynamic model for semiconductor devices, Comp. Methods in Applied Mechanics and Engineering* 181, 393-401 (2000).
- [1.19] E. C. Kane, *Energy Band Structure in p-Type Germanium and Silicon, J. Phys. Chem. Solids*, 1, 82-89 (1956).
- [1.20] E. C. Kane, *Zener Tunneling in Semiconductors, J. Phys. Chem. Solids*, 12, 181-188 (1959).
- [1.21] N. C. Kluksdahl, A. M. Krivan, D. K. Ferry and C. Ringhofer, *Self-Consistent Study of the Resonant-Tunneling Diode, Phys. Rev B*, 39(11),7720-7735, 1989.
- [1.22] H. Lange, B. Toomire, P.F. Zweifel, *Quantum BGK modes for the Wigner-Poisson system, Transport Theory and Statistical Physics* 25, 713-722 (1996).
- [1.23] C.Manzini, *Due problemi per l'equazione di Wigner in domini limitati. Preprint*.
- [1.24] P. A. Markowich, N. J. Mauser and F. Poupaud, *A Wigner-function approach to (semi)classical limits: Electrons in a periodic potential, J. Math. Phys.* 35(3), 1066-1094 (1994).
- [1.25] P.Markowich, Ch.A.Ringhofer, Ch.Schmeiser, *Semiconductor equations, Springer Verlag, Wien, 1990*
- [1.26] H. Neunzert, *the "Nuclear" Vlasov equation. Methods and results that can(not) be taken over from the "Classical" case, Il Nuovo Cimento* 87A(2), 151-161 (1985).
- [1.27] M. Sweeney and J.M. Xu, *Resonant Interband Tunnel Diodes, Appl. Phys. Lett.* 54(6), 546-548 (1989).
- [1.28] A. Vlasov, *On the Kinetic Theory of an Assembly of Particles with Collective Interaction. Journal of Physics* 9, 25-40 (1945).
- [1.29] W.T.Wenckebach, *Essential of Semiconductor Physics, J.Wiley & Sons, Chichester, 1999.*
- [1.30] P.F. Zweifel, *The Wigner transform and the Wigner-Poisson system, Transport Theory and Statistical Physics* 22, 459 (1993).
2. *Modelli cinetici con applicazioni alla fisica del mezzo interstellare.*
- [2.1] Bal G., *Inverse problems for homogeneous transport equations: the multidimensional case, Inverse Problems* 16 (2000), 1013-1028.
- [2.2] A. Belleni-Morante, L. Barletti, C. Cecchi-Pestellini, S. Aiello. *A Boltzmann-like model for interstellar dust coagulation. Confer. Sem. Mat. Univ. Bari* 278, 2000.
- [2.3] A. Belleni Morante, A. Moro, S. Aiello, C. Cecchi Pestellini, *Photon transport in an interstellar cloud with stochastic clumps: the three-dimensional case, Confer. Sem. Mat. Univ. Bari* 25, 1994.
- [2.4] A. Belleni Morante, S. Totaro, *Photon transport in a time dependent region: a*

quasi-static approximation, Confer. Sem. Mat. Univ. Bari 276, 1999.

[2.5] G. Busoni, L. Barletti, *A kinetic model of a dusty plasma with discrete charges. Submitted.*

[2.6] G. Busoni, L. Barletti, *Evolution of dusty plasmas: global existence of a strict solution. In preparation.*

[2.7] C. Cecchi-Pestellini, L. Barletti, S. Aiello, A. Belleni Morante, *A kinetic model for dust coagulation, J. Quant. Spettrosc. Radiat. Transfer 70(1), 1-9, 2001.*

[2.8] C. Cecchi-Pestellini, L. Barletti, A. Belleni Morante, S. Aiello, *Mathematical methods for photon transport in random media, J. Quant. Spettrosc. Radiat. Transfer 65(6), 835-851, 2000.*

[2.9] A. Chokshi, A.G. Tielens, D. Hollenbach, *Dust coagulation, The Astrophysical Journal 407, 806-819, 1993*

[2.10] G.C. Pomraning. *The equation of radiation hydrodynamics. Pergamon Press, Oxford, 1973.*

[2.11] Roach G.F., *An inverse problem for the wave equation with time dependent potentials, Chapman & Hall Research Notes in Mathematics, Vol. 417 (2000), 255-266.*

[2.12] L. Spitzer. *Physical processes in the interstellar medium. John Wiley & Sons, Toronto, 1978.*

[2.13] V.N. Tsytovich and U. De Angelis. *Kinetic theory of dusty plasmas. I-General approach, Physics of Plasmas 6(4), 1093-1106, 1999.*

2.5 Descrizione del programma e dei compiti dell'Unità di Ricerca

Testo italiano

1. Modelli matematici e numerici di dispositivi a semiconduttore.

1.1 Modelli per il trasporto quantistico multibanda.

1.2 Modelli idrodinamici per sistemi quantistici a due bande.

1.3 Problemi al contorno per l'equazione di Wigner.

1.4 Soluzioni stazionarie del sistema di Wigner-Poisson (modi BGK quantistici)

1.5 Limiti semiclassici.

2. Modelli cinetici con applicazioni alla fisica del mezzo interstellare.

2.1 Problemi diretti e inversi di trasporto radiativo.

2.2 Modelli non-lineari di "plasmi polverosi".

1. Modelli matematici e numerici di dispositivi a semiconduttore.

1.1 Modelli per il trasporto quantistico multibanda.

Si propone un modello di trasporto che descriva i dispositivi a semiconduttore dove sia i portatori della banda di valenza che quelli della banda di conduzione siano importanti nella determinazione del flusso di corrente. Si deve necessariamente utilizzare una funzione di Wigner che tenga conto, in generale, delle popolazioni di tutte le bande coinvolte. Inoltre, l'equazione cinetica che governa l'evoluzione temporale di tale funzione di Wigner multibanda deve tenere conto dei profili delle bande, che possono essere qualsiasi.

Il modello cinetico sviluppato di recente in [1.12] e [1.13] è, da questo punto di vista, completo, in quanto tiene conto sia degli effetti di non parabolicità delle bande sia di una popolazione dei portatori distribuita su più bande. Le equazioni generali, tuttavia, sono complesse e difficili da risolvere, sia perché richiedono la conoscenza delle funzioni di Bloch per il semiconduttore che si vuole studiare sia per la presenza di integrali di funzioni fortemente oscillanti nella variabile spaziale. Un primo passo sarà quello di semplificare il modello generale per studiare transizioni interbanda di una popolazione spazialmente uniforme in un mezzo omogeneo infinito sotto l'azione di un campo esterno costante. Si passerà quindi ad esaminare il comportamento di un pacchetto d'onde nelle medesime condizioni; a tale scopo, si dovranno superare le difficoltà imposte dalla presenza di integrali di funzioni fortemente oscillanti. In questi primi esempi di base, si farà uso dell'approssimazione di banda parabolica per

esprimere le funzioni di Bloch nella forma semplice di onde piane ripiegate. In seguito, si intende proseguire lungo due linee di ricerca: studiare le conseguenze di una definizione diversa della funzione di Wigner, basata sulla trasformata di Fourier discreta (sommando solo sui siti del cristallo e non su tutto lo spazio) della matrice densità, ed applicare il modello generale a semiconduttori particolari.

1.2 Modelli idrodinamici per sistemi quantistici a due bande

Ci proponiamo di sviluppare un modello idrodinamico per il tunneling interbanda a partire dalla formulazione del modello di Kane sotto forma di equazione di Wigner-Boltzmann [1.8] con il metodo dei momenti. La chiusura della gerarchia delle equazioni dei momenti sarà ottenuta effettuando un'opportuno sviluppo alla Chapman-Enskog delle equazioni di Wigner-Boltzmann.

Il sistema di equazioni ottenute sarà utilizzato per applicazioni numeriche da confrontare con i dati sperimentali noti in letteratura per i diodi risonanti a tunnel interbanda (RITD), sia considerando come nota e assegnata l'energia potenziale che, invece, considerando l'accoppiamento delle equazioni idrodinamiche all'equazione di Poisson che assegna l'energia potenziale tramite la densità di carica.

1.3 Problemi al contorno per l'equazione di Wigner e Problemi di scattering.

Lo studio di problemi al contorno per l'equazioni di Wigner e per il sistema di Wigner-Poisson (non lineare) ha un comprensibile interesse modellistico per quanto riguarda l'accoppiamento dell'area funzionale del dispositivo con contatti metallici. L'analogia della teoria Wigneriana con le teorie cinetiche classiche permette la formulazione di condizioni al contorno di tipo "inflow", tipiche dei problemi di trasporto. L'analisi matematica di problemi di questo tipo e la possibilità di utilizzare condizioni di tipo diverso sono oggetto del nostro programma di ricerca. I risultati finora ottenuti sono pubblicati (o in via di pubblicazione) in [1.2,1.5,1.23].

Inoltre ci proponiamo lo studio dello scattering per le equazioni relative ai problemi sopra descritti. In particolare, è previsto lo studio dello scattering interbanda e dello scattering fononico. Siamo inoltre interessati alle relazioni tra scattering e condizioni di tipo inflow, [1.6].

1.4 Soluzioni stazionarie del sistema di Wigner-Poisson (modi BGK quantistici)

In questa parte del progetto di ricerca, ci proponiamo di affrontare la ricerca delle soluzioni stazionarie del sistema di Wigner-Poisson, cioè dei modi BGK quantistici. Inizialmente, intendiamo usare metodi perturbativi che portino alla determinazione delle correzioni quantistiche di ordine più basso quando il sistema è vicino a quello classico (limite semiclassico) [1.26]. Al primo ordine nel parametro della perturbazione, l'operatore pseudodifferenziale si riduce all'operatore differenziale iperbolico del caso classico con una correzione data da un operatore differenziale del terz'ordine. La soluzione classica offre il termine di ordine zero nel parametro che caratterizza la perturbazione. Si anticipa che uno sviluppo perturbativo diretto non sarà sufficiente, in quanto ci si aspetta l'insorgere di comportamenti secolari da trattare, ad esempio, con il metodo delle scale multiple. Successivamente, affronteremo il problema generale con l'operatore pseudodifferenziale.

1.5 Limiti semiclassici.

Ci proponiamo lo studio di limiti semiclassici delle equazioni relative ad alcuni dei problemi sopra descritti. In particolare, siamo interessati al limite semiclassico (rispetto a "parametri piccoli" derivanti da opportune riscalature delle variabili e delle costanti) delle equazioni di Wigner con condizioni di inflow, con potenziali di eterostruttura [1.4] e con campo fononico. Si prevede il confronto con modelli euristici e/o di tipo fluidodinamico.

2 - Modelli cinetici con applicazioni alla fisica del mezzo interstellare

2.1 Problemi diretti e inversi di trasporto radiativo.

Ci proponiamo lo studio problemi diretti e inversi di trasporto radiativo derivanti dalle problematiche di fisica del mezzo interstellare sopra descritte. Nel caso di problemi diretti si vuole valutare la densità dei fotoni nella nube, note (eventualmente solo in senso statistico) le caratteristiche delle sorgenti e degli assorbitori/diffusori presenti. Si prevede lo studio di soluzioni approssimate e di limiti diffusivi.

Nel caso dei problemi inversi, si tratta in generale di ricavare proprietà (chimiche,

fisiche, geometriche) della nube a partire dal flusso di radiazione ricevuto dall'osservatore. In particolare, partendo da misure terrestri dell'intensità di radiazione, si vogliono determinare le dimensioni medie della nube e/o il coefficiente di interazione totale della radiazione con le particelle che compongono la nube.

Studieremo inoltre la possibilità di determinare le abbondanze relative di diverse specie di polveri e gas in base ai dati della misura di un certo numero di righe spettrali. Sia i problemi diretti che quelli inversi saranno affrontati usando tecniche analitiche e numeriche. Si prevede il confronto con modelli e tecniche matematiche già esistenti.

2.2 Modelli non-lineari di "plasmi polverosi".

Ci proponiamo lo studio di modelli cinetici non-lineari con termini di coagulazione e/o scambio di cariche. Oltre allo sviluppo e all'analisi numerica del modello introdotto in [2.2, 2.7] (dove la polvere è considerata elettricamente neutra) sono attualmente allo studio modelli cinetici per plasmi di ioni, elettroni e polveri.

In tali modelli si considerano sistemi formati da elettroni e ioni che si coagulano con grani di polvere i quali, di conseguenza, si caricano per quantità discrete. Tutto il sistema è inoltre sotto l'azione di un campo elettrostatico esterno. Ne deriva un sistema di un numero finito o di un'infinita numerabile di equazioni non-lineari integro-differenziali alle derivate parziali del quale si possono studiare proprietà quali la buona posizione, la positività le proprietà di conservazione/dissipazione e comportamento asintotico. Alcuni risultati, [2.5, 2.6], sono in corso di pubblicazione.

Testo inglese

1. *Mathematical and numerical modeling of semiconductor devices.*

1.1 *Multiband quantum transport models.*

1.2 *Quantum hydrodynamic models for two-band systems.*

1.3 *Boundary and scattering problems for the Wigner equation.*

1.4 *Steady-state solutions of the Wigner-Poisson system (Quantum BGK modes).*

1.5 *Semiclassical limits.*

2. *Kinetic models with applications to the physics of interstellar medium.*

2.1 *Direct and inverse problems of radiative transfer.*

2.2 *Non-linear models of "dusty plasmas".*

1. *Mathematical and numerical modeling of semiconductor devices.*

1.1 *Multiband quantum transport models.*

A transport model which describes semiconductor devices in which both conduction band carriers and valence band carriers are important in determining the flow of current must use a Wigner function which takes into account the populations of all bands involved in the process. In addition, the kinetic equation which governs the time evolution of this multiband Wigner function must take into account the shape of the bands, which can be arbitrary. From this point of view, the kinetic model developed recently in [1.6] and [1.7] is complete, since it takes into account the non parabolicity of the bands and a carrier population partitioned in many bands. The general model equations, however, are complicated and difficult to solve, because they require the knowledge of the Bloch functions of the semiconductor under study and because of the presence of integrals of highly oscillatory functions in the space variable. A first step will be that of simplifying the general model in order to study interband transitions of a space uniform electron population under the action of a constant electric field in a homogeneous infinite medium. The behaviour of a wave packet, under the same conditions, will then be examined; the difficulties due to the presence of integrals of highly oscillatory functions will have to be overcome. In these first basic examples, we will use the parabolic band approximation in order to express the Bloch functions in the simple form of lattice-periodic plane waves.

Afterwards, two lines of research will be followed: the introduction of a different definition of the Wigner function, based on a discrete Fourier transform (summing only on the sites of the crystal instead of the whole space), and further applications of the multiband model to specific real semiconductors.

1.2 *Quantum hydrodynamic models for two-band systems.*

We propose an hydrodynamic model derived by means of moments method starting from the Kane model formulated as a Wigner-Boltzmann system [1.8]. The hierarchy of moments equations will be closed through a suitable Chapman-Enskog expansion. The hydrodynamic equations system will be used for numerical applications which will be compared to laboratory data for resonant and interband tunneling diodes (RITD). We shall study both the case when the potential energy is considered as known and the case when the potential energy is assigned in terms of the charge density through the Poisson equation.

1.3 Boundary and scattering problems for the Wigner equation.

Modeling the behaviour of carriers in the device region close to metallic contacts is a really interesting task and can be faced as a boundary value problem for the Wigner equation and for the nonlinear Wigner-Poisson system. The analogy of Wigner function approach with the classical kinetic equations permits to choose the classical "inflow" boundary conditions like in transport problems. We propose to face the mathematical quest of such problems and the possibility of assigning boundary conditions of different type. Already obtained results are published or under publication in [1.2],[1.5],[1.23].

Moreover we mean to study scattering problems for the equations related to the above described problems. In particular we plan to study interband and phonon scattering. We are also interested to relations between scattering and inflow boundary conditions [1.6].

1.4 Steady-state solutions of the Wigner-Poisson system (Quantum BGK modes).

In this part of the research project, we intend to construct steady-state solutions of the Wigner-Poisson system, that is of Quantum BGK Modes. Initially, we intend to use perturbative methods that allow the calculation of the quantum corrections to the lowest significant order when the behaviour of the system is close to classical (semiclassical limit) [2.8]. To first order in the perturbation parameter, the pseudodifferential operator reduces to the standard differential, hyperbolic operator of the classical case with a correction represented by a third-order differential operator. The classical solution gives the zero-order term. We anticipate that a direct perturbative expansion will not be sufficient, since we expect the onset of secular terms which will have to be treated, for example, by the technique of multiple scales. Subsequently, we shall address the general problem, with the full pseudodifferential operator.

1.5 Semiclassical limits.

We plan to study the semiclassical limits of some of the models described above. In particular, we are interested to the semiclassical limit (with respect to suitable small parameters) of Wigner equations with inflow boundary conditions, with heterostructure potentials [1.4] and with phonon scattering terms. We intend to perform a comparison with semiclassical models appeared in literature and in particular with hydrodynamic models.

2 - Kinetic models with applications to the physics of interstellar medium.

2.1 Direct and inverse problems of radiative transfer

We intend to study direct and inverse problems of radiative transfer, related to the above described topics in the physics of interstellar medium. The aim of direct problems is to evaluate the radiation intensity within the cloud, by assuming that the characteristics of sources, absorbers and scatterers are known (may be only in a statistical sense). We plan to study approximate solution and diffusive limits. The aim of inverse problems, generally speaking, is to infer physical, chemical and geometrical properties of the interstellar cloud from Terrestrial measures of the radiation coming from the cloud. In particular, we shall investigate the possibility of inferring the mean size and/or the total interaction coefficient of the cloud by measuring the radiation intensity (knowing the characteristics of sources, e.g. embedded stars). Moreover we shall investigate the possibility of determining the relative densities of different species of dust particles, by measuring several spectral lines. Both direct and inverse problems will be studied by means of analytical and numerical techniques. A comparison with the already existing mathematical models and methods will be also performed.

2.2 Non-linear models of "dusty plasmas"

We intend to study non-linear kinetic models of coagulation and/or charge exchange. Besides the development and the numerical analysis of the model introduced in [2.2, 2.7]

(where the dust grains are assumed to be electrically neutral), we are also studying kinetic models of plasmas composed by dust grains, electrons and ions. In such models we consider a plasma where electrons and ions coalesce with dust grains which, consequently, are charged by discrete quantities. The whole system is under the action of an external electrostatic field. This yields a non-linear system of finitely or infinitely many integro-differential, partial derivative equations, whose mathematical properties (such as well-posedness, conservation/dissipation, asymptotic behaviour) are currently under investigation. Some results, [2.5, 2.6], are going to be published.

2.6 Descrizione delle attrezzature già disponibili ed utilizzabili per la ricerca proposta

N°	Anno di acquisizione	Descrizione	
		Testo italiano	Testo inglese

2.7 Descrizione della richiesta di Grandi attrezzature (GA)

Attrezzatura I Descrizione

valore presunto (Euro) percentuale di utilizzo per il programma

Attrezzatura II Descrizione

valore presunto (Euro) percentuale di utilizzo per il programma

2.8 Mesi uomo complessivi dedicati al programma

	numero	mesi uomo
Personale universitario dell'Università sede dell'Unità di Ricerca (docenti)	4	69 (ore: 9453)
Personale universitario dell'Università sede dell'Unità di Ricerca (altri)	0	0
Personale universitario di altre Università (docenti)	2	36 (ore: 4950)
Personale universitario di altre Università (altri)	0	0
Titolari di assegni di ricerca	1	18 (ore: 2475)
Titolari di borse dottorato e post-dottorato	4	59 (ore: 8083)
Personale a contratto	1	11 (ore: 1507)
Personale extrauniversitario	0	0
Totale	12	193 (ore: 26468)

Parte: III

3.1 Costo complessivo del Programma dell'Unità di Ricerca

Voce di spesa	Spesa, Euro	Descrizione	
		Testo italiano	Testo inglese
Materiale inventariabile	6.000	<i>Libri, software e hardware, ecc.</i>	<i>Books, software and hardware</i>
Grandi Attrezzature			
Materiale di consumo e funzionamento	3.000	<i>Quota spese Dipartimento, carta, cancelleria, cartucce, ecc.</i>	<i>Department reimbursement, paper, stationery, refills, etc.</i>
Spese per calcolo ed elaborazione dati	1.000	<i>Rimborso spese di calcolo</i>	<i>computing center reimbursement</i>
Personale a contratto	7.000	<i>Contributo per un assegno di studio per laureato</i>	<i>person under contract</i>
Servizi esterni	2.000	<i>Dattiloscrittura, reprints, assistenza webpage, segreteria</i>	<i>typing, reprints, webpage, etc.</i>
Missioni	18.000	<i>Missioni dei collaboratori, compreso i contatti con i collaboratori stranieri</i>	<i>inclusive contacts with foreign coworkers</i>
Pubblicazioni			
Partecipazione / Organizzazione convegni	1.000	<i>Quote di iscrizione, organizzazione di convegni</i>	<i>participation fee, organization of meeting</i>
Altro	3.000	<i>Collaboratori stranieri, assegno di ricerca, ecc.</i>	<i>inclusive contacts with foreign coworkers</i>

Il progetto e' gia' stato cofinanziato da altre amministrazioni pubbliche o private (art. 4 bando 2002)? NO

Amministrazioni cofinanziatrici:

	Euro
Costo complessivo del Programma dell'Unità di Ricerca	41.000
Costo minimo per garantire la possibilità di verifica dei risultati	35.000
Fondi disponibili (RD)	6.900

Fondi acquisibili (RA)	5.500
Cofinanziamento di altre amministrazioni pubbliche o private (art. 4 bando 2002)	0
Cofinanziamento richiesto al MIUR	28.600

Parte: IV

4.1 Risorse finanziarie già disponibili all'atto della domanda e utilizzabili a sostegno del Programma

QUADRO RD

Provenienza	Anno	Importo disponibile, Euro	Note
Università	2001	5.000	Fondi Ex60% -Prof. Busoni
Dipartimento			
CNR	2000	1.900	Progetto Strategico ST/74
Unione Europea			
Altro			
TOTAL		6.900	

4.1.1 Altro

4.2 Risorse finanziarie acquisibili in data successiva a quella della domanda e utilizzabili a sostegno del programma nell'ambito della durata prevista

QUADRO RA

Provenienza	Anno della domanda o stipula del contratto	Stato di approvazione	Quota disponibile per il programma, Euro	Note

Università	2002	<i>disponibile in caso di accettazione della domanda</i>	5.500	<i>Quota garantita dall'Ateneo, pari al 45% della somma da certificare</i>
Dipartimento				
CNR				
Unione Europea				
Altro				
TOTAL			5.500	

4.2.1 Altro

4.3 Certifico la dichiarata disponibilità e l'utilizzabilità dei fondi di cui ai punti 4.1 e 4.2: *SI*

Firma _____

(per la copia da depositare presso l'Ateneo e per l'assenso alla diffusione via Internet delle informazioni riguardanti i programmi finanziati; legge del 31.12.96 n° 675 sulla "Tutela dei dati personali")

Firma _____

13/04/2002 11:38:29