

## PIERO GALEOTTI

### **CURRICULUM DELL'ATTIVITA' DIDATTICA, SCIENTIFICA E ORGANIZZATIVA**

(Aggiornato all'anno 2000)

1942, 6 Marzo	nato a Torino
1965, 20 Dicembre	laureato in Fisica all'Università di Torino
1966, 15 Ottobre	borsista CNR
1967, 1 Febbraio	<b>ricercatore CNR</b>
1968, 7 Maggio	abilitato all'insegnamento di Fisica nelle Scuole Medie Superiori
1968, 10 Dicembre	conseguita l'idoneità di aiuto astronomo negli Osservatori Astronomici
dal 1972 al 1975	<b>professore incaricato</b> all'Università di Torino
dal 1975 al 1985	professore incaricato <b>stabilizzato</b> all'Università di Torino
1972, 1 Febbraio	ricercatore qualificato CNR
dal 1972 al 1987	membro del Consiglio Scientifico dell'Istituto di Cosmo-geofisica del CNR di Torino
1975, 1 Febbraio	ricercatore capo CNR
dal 1975 al 1985	docente alla Scuola di Specializzazione in Fisica Cosmica dell'Università di Torino
dal 1976	membro dell'International Astronomical Union (IAU)
dal 1982 al 1986	<b>collaboratore coordinatore CNR</b>
dal 1983	membro del Consiglio Scientifico del Gruppo Italiano di Fisica Cosmica del CNR (GIFCO)
dal 1983	associato CERN (divisione PPE)
dal 1983	associato INFN (Sezione di Torino)
dal 1986	<b>professore associato di Fisica Generale</b> all'Università di Torino
dal 1985	co-direttore dell'International School of Particle Astrophysics del Centro E.Majorana di Erice
dal 1986	docente al Corso di Perfezionamento in Fisica e Astrofisica Nucleare e Subnucleare dell'Università di Torino
dal 1988	co-responsabile nazionale dell'esperimento LVD del Gran Sasso
dal 1989 al 1996	docente alla Scuola di Applicazione di Torino
dal 1991	membro del Consiglio Scientifico dell'Istituto di Fisica Cosmica e Applicazioni Informatiche del CNR di Palermo (IFCAI)
dal 1996 al 1998	Membro della Giunta del Dipartimento di Fisica Generale dell'Università di Torino
dal 1998 al 1999	docente (secondo insegnamento gratuito) al corso di Diploma Universitario in metodologie fisiche dell'Università di Torino
dal 1999	docente alla Scuola di Specializzazione in Fisica Medica dell'Università di Torino
dal 2001	Vice Direttore del Dipartimento di Fisica Generale dell'Università di Torino

## ATTIVITA' DIDATTICA

Dal 1970 ho svolto con continuità la mia attività didattica presso la Facoltà di Scienze dell'Università di Torino. Negli a.a. 1970/71 e 1971/72 sono stato titolare di corsi serali e di cicli di esercitazioni; nel 1972, avendo vinto il relativo concorso, sono stato nominato professore incaricato e sono divenuto incaricato stabilizzato nell'a.a. 1975/76, qualifica che ho ricoperto fino all'a.a. 1984/85. In seguito al superamento del relativo giudizio di idoneità, sono divenuto professore associato, con presa di servizio nell'a.a. 1985/86. Questa è la mia qualifica attuale.

Dall'a.a. 1975/76 all'a.a. 1984/85 ho svolto attività didattica presso la Scuola di Specializzazione in Fisica Cosmica e dall'a.a. 1985/86 sono docente al Dottorato di Ricerca in Fisica e al Corso di Perfezionamento in Fisica e Astrofisica Subnucleare e Nucleare. Dall'a.a. 1989/90 all'a.a. 1995/96 sono anche stato incaricato di tenere un corso alla Scuola di Applicazione di Torino. Nell'a.a. 1998/99 sono stato titolare di un secondo incarico di insegnamento per il corso di diploma in metodologie fisiche. Dall'a.a. 1999/2000 sono docente alla Scuola di Specializzazione in Fisica Medica. In particolare, nei diversi anni accademici, ho tenuto i seguenti corsi:

a.a.1970/71 e 1971/72:	Esercitazioni di Fisica Generale I
a.a.1971/72:	Corso serale di Fisica Generale II
	Esercitazioni di Astrofisica
a.a.1972/73 al 1974/75:	<b>Incaricato</b> di Calcolo delle probabilità e statistica al Corso di laurea in Scienze dell'Informazione
a.a.1975/76 al 1981/82:	<b>Incaricato stabilizzato</b> di Calcolo delle probabilità e statistica
a.a.1982/83 al 1984/85:	Incaricato stabilizzato di Esperimentazioni di Fisica II al Corso di laurea in Fisica
a.a.1975/76 al 1980/81:	Docente di Fisica del mezzo interplanetario alla Scuola di Specializzazione in Fisica Cosmica
a.a.1981/82 al 1985/86:	Docente di Complementi di Astrofisica alla Scuola di Specializzazione in Fisica Cosmica
a.a.1985/86 al 1988/89:	<b>Professore Associato di Fisica Generale</b> , con compito didattico di Esperimentazioni di Fisica II (per fisici)
a.a.1986/87 al 1988/89:	Docente di Fisica dello Spazio (II insegnamento gratuito)
a.a. 1989/90 a oggi:	<b>Professore Associato di Fisica dello Spazio</b>
a.a.1987/88 a oggi:	Docente di Astrofisica Neutrinica ai Corsi di Dottorato e alla Scuola di Perfezionamento in Fisica e Astrofisica Nucleare e Subnucleare dell'Università di Torino
a.a.1989/90 al 1991/92:	Docente di Tecniche Numeriche e Analogiche alla Scuola di Applicazione
a.a. 1992/93 al 1995/96:	Docente di Calcolo delle Probabilità e Statistica alla Scuola di Applicazione
a.a. 1998/99	Professore di Calcolo delle Probabilità e Statistica al corso di Diploma in Metodologie Fisiche
a.a. 1999/2000 a oggi	Docente di Calcolo delle Probabilità e Statistica I e II alla Scuola di Specializzazione in Fisica Medica

Sono stato relatore, in media, di 2 tesi di laurea per ogni anno accademico. Ho svolto e svolgo tuttora attività didattica di aggiornamento e di divulgazione scientifica in Fisica per insegnanti di scuole medie superiori, organizzando o partecipando ai corsi del Seminario Fisico di Aggiornamento e Didassi dell'Università di Torino, di cui sono stato segretario scientifico. Sono stato docente di Fisica al I Corso abilitante per insegnanti di scuole medie superiori. Svolgo attività di divulgazione scientifica da molti anni, avendo iniziato nel 1979 con T. Regge ad organizzare e partecipare ai corsi di Torino Enciclopedia. Ho scritto articoli di divulgazione scientifica su riviste specialistiche e su quotidiani.

## **ATTIVITA' DI COORDINAMENTO**

Sono **co-responsabile dell'esperimento LVD** (con A. Zichichi) dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso. L'esperimento LVD, la cui costruzione è stata ultimata all'inizio del 2000, costituisce attualmente il più sensibile esperimento sotterraneo a scintillatore liquido in funzione al mondo. L'esperimento è stato realizzato nell'ambito di una collaborazione scientifica internazionale (a cui partecipano circa 80 fisici di diverse nazioni: Italia, Russia, USA, Brasile e Giappone) di cui sono **co-spokesman**. In particolare, ho la responsabilità scientifica per la componente a scintillatore liquido dell'esperimento. In questa veste presento regolarmente alla Commissione Scientifica II dell'INFN i risultati ottenuti e discuto gli obiettivi da conseguire e i finanziamenti delle Sezioni INFN italiane interessate. L'esperimento LVD consiste di 1.000 tonnellate attive di scintillatore liquido suddivise in 912 moduli con 3 fotomoltiplicatori, 2 canali ADC e 1 canale TDC per modulo oltre ai canali di alimentazione di alta e bassa tensione e il sistema di DAQ, tutto progettato e realizzato sotto la mia personale responsabilità. L'inizio della presa dati, con parte dell'esperimento attivo (1/3 della configurazione finale), è avvenuto nel 1992; in quell'occasione sono stato invitato a presentare i risultati ottenuti al congresso internazionale *Neutrino 92* a Granada (Spagna).

Sono **responsabile locale (Torino) del progetto Airwatch-Euso** il cui scopo è lo studio dallo spazio di raggi cosmici e neutrini di altissima energia ( $E \geq 10^{19}$  eV). Il progetto Airwatch prevede l'invio in orbita di un satellite dedicato all'osservazione delle interazioni di raggi cosmici e neutrini in atmosfera (massa bersaglio  $10^{12}$  ton) mentre EUSO (Extreme Universe Space Observatory) è un modulo che sarà installato nella Stazione Spaziale ISS al termine delle fasi di studio e costruzione (attualmente è stata approvata la fase A). Il finanziamento dell'impresa è ESA (European Space Agency), con forte partecipazione ASI e INFN, ma anche di altri gruppi europei, americani e giapponesi.

Sono stato **membro di Giunta del Dipartimento di Fisica Generale** dell'Università di Torino e, attualmente sono **Vice-Direttore del Dipartimento**.

Sono **membro del consiglio scientifico del GIFCO** (Gruppo Italiano di Fisica Cosmica del CNR) in qualità di esperto. Mi occupo della politica scientifica del gruppo, dei finanziamenti alla ricerca universitaria e dell'organizzazione nazionale in fisica cosmica. Ho fatto parte dei comitati scientifici dei congressi organizzati ogni due anni dal gruppo.

Sono stato per 15 anni **membro del Consiglio Scientifico dell'Istituto di Cosmo-geofisica** del CNR e **responsabile del reparto "Fisica e Astrofisica delle particelle"** di questo Istituto. In particolare ho curato lo sviluppo dell'Istituto in questo campo nel periodo in cui si stava sviluppando il laboratorio del Monte Bianco e, successivamente, si stava progettando e realizzando il laboratorio del Gran Sasso e degli esperimenti connessi, sia

sotterranei che ad alta quota montana. Per un certo periodo sono stato anche segretario del Comitato tecnico del Progetto Gran Sasso ed ho seguito le realizzazioni ingegneristiche per conto dei gruppi fisici responsabili dei vari progetti di esperimento.

Sono **membro del consiglio scientifico dell'IFCAI** (Istituto di Fisica Cosmica ed Applicazioni Informatiche) del CNR di Palermo.

Sono stato **responsabile dell'accordo di collaborazione scientifica** tra il CNR e l'Accademia delle Scienze dell'URSS nel campo dell'astrofisica neutrinica ed ho contribuito alla nascita dell'esperimento LSD (collaborazione Torino-Mosca) nel laboratorio del Monte Bianco che e' stato il pioniere nella ricerca di neutrini da collassi gravitazionali stellari.

Sono **responsabile dell'accordo di collaborazione scientifica** tra INFN e Università di Campinas (Brasile) per lo sviluppo delle ricerche congiunte nel campo della fisica cosmica.

Nel 1989 sono stato nominato **Presidente della Sezione Fisica Cosmica e Astrofisica** della Società Italiana di Fisica e ho organizzato le relazioni su invito e le comunicazioni della sezione per il 75° Congresso SIF (Cagliari).

Sono **co-direttore dell'International School of Particle Astrophysics** (insieme a D. N. Schramm dell'Università di Chicago, recentemente deceduto) del Centro E. Majorana di Erice. In questa veste ho organizzato i corsi:

1. *Gauge Theory and the Early Universe,*
2. *Dark Matter in the Universe,*
3. *Generation of Cosmological Large-scale Structure,*
4. *Astrophysical Sources of High Energy Particles and Radiation*

quest'ultimo, nell'anno 2000, insieme all'International School of Cosmic Ray Astrophysics diretta da M.M. Shapiro. Sono **co-editor** dei Proceedings di questi corsi.

## **RELAZIONI SU INVITO**

Numerose volte sono stato invitato a tenere relazioni su invito a conferenze nazionali o internazionali. Tra esse ricordo le principali:

1. *Relazione Generale della Sez. 4 al 68° Congresso SIF* Perugia, sul tema Neutrini di bassa energia: sorgenti astrofisiche e loro rivelazione
2. *4<sup>th</sup> Moriond Astrophysics Meeting*, La Plagne, sul tema: Particle Astrophysics in Underground Laboratories
3. *1<sup>st</sup> International Symposium on Underground Physics*, S. Vincent, sul tema: The Large Volume detector at Gran Sasso
4. *10<sup>th</sup> European Cosmic Ray Symposium*, Bordeaux, sul tema: The Gran Sasso Programm
5. *2<sup>nd</sup> International Symposium on Underground Physics*, Baksan (Russia), sul tema: Present status of the Gran Sasso Laboratory
6. *4<sup>th</sup> Marcel Grossman Meeting*, Roma, sul tema: Underground Neutrino Observatories in Italy
7. *Theoretical Aspects of underground Physics TAUP 91*, Toledo (Spagna) sul tema: First results of the Large Volume Detector at Gran Sasso

8. *Giornate di studio ai LNGS su Fisica delle particelle, Astrofisica e Cosmologia*, organizzate da INFN, CNR, ASI, INAF (ottobre 2000) sul tema: Neutrini da Supernovae in presenza di oscillazioni

In particolare la mia relazione su invito n. 3, sopra citata, e' stata svolta nel corso di una giornata dedicata alla presentazione degli esperimenti proposti per il laboratorio del Gran Sasso. Oltre alla mia relazione su LVD, ci sono state le relazioni di Iarocci su MACRO, di Rubbia su Icarus, di Kirsten su Gallex oltre a quelle su esperimenti minori.

Ho avuto la **responsabilita' di presentare e discutere ai congressi internazionali** le osservazioni di neutrini dalla supernova 1987A ottenute con l'esperimento del Monte Bianco Dopo un'accuratissima analisi dei dati e delle correlazioni con altri esperimenti di neutrini (in Giappone e negli Stati Uniti) e con i rivelatori di onde gravitazionali del gruppo di E. Amaldi e G. Pizzella a Roma e di J. Weber nel Maryland, sono stato invitato a discutere i nostri dati a molte conferenze internazionali, spesso in contraddittorio con ricercatori che cercavano di sminuire l'importanza e la stessa validita' dell'evento del Monte Bianco. Tra le principali conferenze, workshop o meeting a cui sono stato invitato per discutere questi risultati ricordo:

1. *1<sup>st</sup> Rencontres de Physique de la Vallee d'Aoste*, La Thuille (Italia)
2. *ESO Workshop on Supernova 1987A*, Garching bei Munchen (Germania)
3. *Meeting delle Societa' svizzera, tedesca e austriaca di Fisica*, Zurigo (Svizzera)
4. *4<sup>th</sup> George Mason Astrophysics Conference*, Fairfax (USA)
5. *Theoretical Physics Conference on cosmic neutrinos*, Minneapolis (USA)
6. *2<sup>nd</sup> Rencontres de Physique de la Vallee d'Aoste*, La Thuille (Italia)
7. *Berkeley Particle Physics workshop*, Berkeley (USA)
8. *International School of Cosmic Ray Astrophysics*, Erice (Italia)
9. *UCLA Workshop on Extra Solar Neutrino Astronomy*, Los Angeles (USA)
10. *Workshop on Mass Outflow from Stars*, Torino (Italia)
11. *Physical processes in hot cosmic plasmas*, Vulcano (Italia)
12. *Int. School of Cosmic Ray Astrophysics*, Erice (Italia)
13. *Int. School of Data Analysis in Astronomy*, Erice (Italia)

Sono stato invitato a tenere seminari da numerose Universita' o Istituti di ricerca italiani e stranieri. Tra essi ricordo: *University of Chicago* (USA), *Fermi Lab.* (USA), *CEN Saclay* (Francia), *University of Okayama* (Giappone), *University of Saitama* (Giappone), *University of Houston* (USA), *Institute of Nuclear Research* (Mosca, Russia), *Ioffe Physical Technical Institute* (Leningrado, Russia), *Aspen Center* (USA), *ICTP* (Trieste).

Sono stato nominato **membro dei comitati scientifici** di congressi internazionali, tra cui ricordo i seguenti:

1. *2<sup>nd</sup> Symposium on Undergropund Physics* (UP 87), Baksan (Russia) 1987
2. *2<sup>nd</sup> Rencontres de Physique de la Vallee d'Aoste*, La Thuille (Italia), 1988, nel cui ambito ho organizzato il *Workshop Supernova 1987A*, one year later
3. *14<sup>th</sup> Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, Dallas (USA), 1988
4. *Taup 89*, L'Aquila (Italia), 1989

## **ATTIVITA` SCIENTIFICA**

Nato a Torino il 6/3/1942, mi sono laureato in fisica all'Università di Torino il 20/12/1965. Dalla laurea al 31/12/1969 ho lavorato, prima come borsista e poi come ricercatore, all'Osservatorio di Milano-Merate. Dal 1/1/1970 sono stato trasferito, in seguito a mia domanda, all'Istituto di Cosmogeofisica del CNR di Torino dove sono rimasto fino alla presa di servizio come professore associato all'Università di Torino, dove insegno dal 1/11/1972 prima come professore incaricato (stabilizzato dal 1/11/1975) e poi, dal 1/9/1986, come professore associato.

La mia attività scientifica è sempre stata di tipo sperimentale ed ha riguardato la costruzione e la gestione di esperimenti, l'analisi e l'interpretazione dei dati di questi esperimenti. Durante la permanenza all'Osservatorio di Merate e nei primi anni all'Istituto di Cosmogeofisica ho lavorato in astrofisica sperimentale nel campo della spettroscopia stellare di stelle binarie e della nucleosintesi stellare. Dal 1972 mi sono dedicato a tempo pieno alla costruzione degli esperimenti del Laboratorio del Monte Bianco, attività che ha comportato un'enorme mole di lavoro sperimentale (dalla progettazione e costruzione della meccanica e dell'elettronica, dalla taratura dei fototubi e calibrazione dell'elettronica, fino alla messa in misura degli apparati). Dal 1984 mi occupo anche di due esperimenti del Gran Sasso: EAS-TOP (terminato nel 2000) e LVD, di cui sono responsabile per la componente a scintillatore liquido. Con la chiusura di EAS-TOP ho potuto dedicarmi alla realizzazione di Airwatch-EUSO.

I miei interessi scientifici hanno quindi riguardano lo studio sperimentale e fenomenologico di quei problemi noti come particle astrophysics principalmente in laboratori sotterranei. Tra essi, in particolare: fisica della radiazione cosmica, fisica e astrofisica del neutrino, materia oscura, astrofisica e cosmologia sperimentali. Nella mia trentennale attività scientifica, mi sono dedicato agli argomenti illustrati nel seguito in ordine quasi cronologico.

### **1 - RICERCHE DI ASTROFISICA E COSMOLOGIA**

#### **1.a - Binarie spettroscopiche**

Ho iniziato la mia attività scientifica all'Osservatorio di Milano-Merate con una ricerca sulle caratteristiche e proprietà dinamiche di alcuni sistemi binari spettrofotometrici:  $\beta$  Aurigae, per misurare i valori di massa di entrambe le componenti;  $\lambda$  Tauri e VV Orionis, per verificare l'ipotesi di esistenza di un terzo corpo nel sistema che spiegasse le anomalie nel moto orbitale; R Canis Majoris, per determinare in modo preciso le masse delle due componenti, in quanto i valori riportati nella letteratura non soddisfano alla relazione massa-luminosità.

#### **1.b - Stelle a spettro peculiare**

Ho studiato l'evoluzione temporale dello spettro della stella o Andromedae, per un periodo di tempo di alcuni anni, per analizzare il meccanismo di comparsa e scomparsa della shell, in particolare per stabilire se questa sia attribuibile ad una natura binaria della stella oppure a variazioni nelle condizioni di ionizzazione e di eccitazione del gas stellare.

Ho compiuto uno studio spettroscopico sistematico della stella Nova Delphini dal momento della sua esplosione, nel 1967, fino a quando la sua luminosità ne consentiva l'osservazione con la strumentazione dell'Osservatorio di Merate, con lo scopo di interpretare

i meccanismi fisici (eccitazione e ionizzazione del gas stellare) responsabili della comparsa di diverse shell durante l'evoluzione del fenomeno di espansione dell'involucro. In particolare ho ottenuto, come risultato, l'evidenza di un comportamento delle righe dei metalli diverso rispetto a quello dell'idrogeno che non era noto precedentemente.

### **1.c - Evoluzione chimica di galassie**

Per verificare se lo stadio evolutivo delle galassie spirali può dipendere da altre caratteristiche morfologiche, ho esaminato la correlazione tra gli indici di metallicità ed i parametri integrali e dinamici di un campione di galassie, con il metodo dell'analisi fattoriale delle componenti principali. Ho così potuto evidenziare una correlazione statisticamente significativa tra l'abbondanza di metalli ed altre grandezze integrali di queste galassie.

### **1.d - Esplosioni supernove**

Sulla base delle osservazioni della supernova 1987A ho valutato la frequenza di collassi gravitazionali stellari nella nostra Galassia e nelle Nubi di Magellano. A questo scopo ho sviluppato un modello di galassia spirale (nel passato questa veniva approssimata con un disco sottile), da cui ho dedotto il rate di un collasso ogni 15 anni circa, visibile in neutrini anche se privo di controparte ottica.

Ho anche valutato la possibilità di rivelare il fondo di neutrini cosmici dovuto a esplosioni supernovae avvenute nel passato dell'evoluzione dell'universo. Questo fondo, spostato verso le basse energie per effetto del *red-shift* cosmologico rispetto alla distribuzione emessa dalla sorgente, è al limite delle possibilità sperimentali dell'esperimento LVD del Gran Sasso nella finestra 3 - 30 MeV.

### **1.e - Simulazioni sulla materia oscura**

Ho collaborato alla simulazione della struttura a grande scala dell'universo allo scopo di ottenere una modellistica sulla distribuzione degli ammassi di galassie in grado di interpretare i dati osservativi ottenuti con i cataloghi. Utilizzando la tecnica dei frattali si è cercato di spiegare le disomogeneità a piccola scala e le omogeneità a più grande scala nell'universo, introducendo fluttuazioni di densità di materia per la formazione degli ammassi. Questa ricerca è connessa al problema più generale della materia oscura nell'universo (dovuta alla presenza di particelle massive non barioniche, in particolare neutrini massivi), su cui ho lavorato allo scopo di valutarne le possibilità di osservazione sperimentale con LVD.

### **1.f - Processi di cattura neutronica**

È noto che la formazione di elementi chimici pesanti è dovuta a processi di cattura neutronica lenta (processi s) o rapida (processi r) nell'interno delle stelle. Particolarmente adatte alla ricerca di elementi r sono le stelle magnetiche, in cui si ritiene abbiano luogo processi di diffusione selettiva degli elementi dall'interno alla superficie stellare, che ne facilitano l'osservazione con metodi spettroscopici.

Per questa ricerca ho analizzato gli spettri (da me ottenuti all'Osservatorio di Merate) di un campione di alcune stelle magnetiche spettrovariabili, tra le quali è risultata particolarmente interessante  $\kappa$  Piscium. Ho quindi analizzato spettri ad alta dispersione di questa stella, ottenuti dall'Osservatorio di Monte Palomar, e ho potuto osservare righe di elementi r e correlazioni temporali tra variazioni magnetiche, spettrali e luminose.

### 1.g - Processi di interazione debole in ammassi stellari

Ho compiuto uno studio sistematico dell'ammasso galattico  $\eta$  e  $\chi$  Persei per verificare l'importanza dell'accoppiamento diretto elettrone-neutrino nelle fasi finali dell'evoluzione stellare. Si noti che la scoperta delle interazioni a correnti neutre è avvenuta successivamente a questo lavoro, il cui scopo era di verificarne l'efficacia in processi astrofisici.

Sono stati costruiti modelli di equilibrio di stelle supergiganti blu e rosse e valutati i tempi evolutivi di permanenza in queste regioni del diagramma H-R. Il confronto con il numero di supergiganti blu e rosse osservato in diversi ammassi galattici (in particolare  $\eta$  e  $\chi$  Persei per la sua ricca statistica di supergiganti) ha consentito di stimare l'efficacia del processo e-v e di separare popolazioni stellari di diversa età nello stesso ammasso.

## 2 - RICERCHE IN FISICA E ASTROFISICA NEUTRINICA

Nel 1972 ho iniziato a lavorare agli esperimenti sotterranei del Laboratorio del Monte Bianco, posto alla profondità di 5000 hg/cm<sup>2</sup> di roccia standard, e dal 1984 all'esperimento LVD del Laboratorio del Gran Sasso, alla profondità di 3500 hg/cm<sup>2</sup>. Pur essendo esperimenti a molti scopi, la rivelazione dei neutrini emessi durante il collasso gravitazionale di un core stellare ne costituisce la ricerca principale. La rivelazione dei neutrini avviene mediante diverse reazioni, la principale delle quali è la cattura degli  $\bar{\nu}_e$  da parte di protoni liberi:



Data la piccola sezione d'urto della reazione (1), la ricerca di burst neutrinici da collassi stellari, anche se questi avvengono entro la nostra Galassia, richiede rivelatori di grande massa per ottenere un buon riconoscimento dell'evento. Per questo scopo, mi sono dedicato alla realizzazione dei seguenti esperimenti:

### 2.a - Esperimento in luce Cerenkov

Dal 1972 al 1979 è stato in funzione nel Laboratorio del Monte Bianco un esperimento Cerenkov di 20 tonnellate di acqua deionizzata. L'esperimento era stato progettato in modo da osservare treni di impulsi di positroni su tempi dell'ordine di un decimo di secondo, quanto allora previsto dai modelli di emissione neutrinica durante i processi di neutronizzazione del core stellare, che avvengono su tempi scala di poco superiori a quelli di caduta libera durante l'implosione.

In quegli anni non era ancora previsto l'intrappolamento dei neutrini nel core stellare (dovuto all'effetto delle interazioni a correnti neutre) e la formazione di una neutrino-sfera, attraverso la quale i neutrini diffondono verso la superficie, da cui vengono poi emessi con tempi scala molto più lunghi (alcuni secondi). Sia per disporre di un esperimento in grado di funzionare in modo indipendente dai modelli di emissione che per ridurre la soglia di rivelazione, l'esperimento è stato soppresso per essere sostituito con un rivelatore più sensibile a scintillatore liquido.

Nel complesso il rivelatore Cerenkov è stato in misura per circa 3 anni, in coincidenza temporale entro 10<sup>-3</sup> sec con un analogo rivelatore a Homestake (USA), senza che eventi attribuibili a bursts di neutrini fossero stati osservati. Tuttavia, durante questo tempo di

misura, sono stati ottenuti e pubblicati risultati relativi alla radiazione cosmica penetrante, che verranno discussi in seguito.

## 2.b - Esperimento LSD (Liquid Scintillation Detector)

Dopo aver installato e testato per 2 anni un prototipo di 5 tonnellate, nel 1979 è iniziata la costruzione di un esperimento a scintillatore liquido, in collaborazione tra l'Istituto di Cosmogeofisica e l'Istituto di Ricerche Nucleari dell'Accademia delle Scienze dell'URSS, entrato in misura nella configurazione finale nel 1984.

Il rivelatore consiste di 90 tonnellate di scintillatore liquido in 72 contatori di  $1,5 \text{ m}^3$  ciascuno con 3 fotomoltiplicatori per contatore; in questo esperimento la soglia energetica di rivelazione è praticamente limitata solo dal background ambientale. In seguito a misure di conteggi di fondo fatte a varie energie, i singoli moduli di rivelazione e l'intero esperimento sono stati schermati con lastre di ferro (circa 400 tonnellate) e paraffina borata. Ciò ha consentito di ridurre il fondo di neutroni e gamma di bassa energia, rendendo possibile l'osservazione di entrambi i prodotti delle interazioni degli antineutrini nello scintillatore: positroni e neutroni. Questi ultimi sono rivelati tramite i  $\gamma$  di cattura:



di energia 2.2 MeV, ritardati di un tempo medio da noi misurato  $\tau \sim 170 \text{ ms}$  rispetto alla reazione (1). L'efficienza di rivelazione dei  $\gamma$  di cattura (n,p) è  $\sim 60\%$  in media, ed è stata misurata utilizzando, come sorgente di calibrazione, i neutroni emessi nella fissione spontanea di una sorgente di  $^{252}\text{Cf}$  a bassa attività.

Il riconoscimento di ogni interazione neutrinica è perciò dato dalla coincidenza ritardata tra la (1) e la (2), con soglie di energia a circa 5 MeV e 0.8 MeV rispettivamente, con un trigger rate totale di 0.012 Hz. In questo modo si ha un'ottima segnatura dell'evento e l'esperimento funziona in modo indipendente dai modelli teorici di emissione neutrinica dalla stella collassante, in quanto è in grado di rivelare ogni singola interazione senza tempi morti (gli ADC dei due canali in energia sono bufferizzati a 16 parole) qualunque sia la distribuzione temporale del burst di neutrini.

Nel corso del 1987, dopo l'esplosione della supernova 1987A, si è provveduto a ridurre ulteriormente le condizioni del fondo radioattivo di bassa energia, con una schermatura aggiuntiva di ferro e paraffina borata intorno all'esperimento. Ciò ha ridotto di circa un fattore 10 il trigger rate che, a parità di soglia energetica, è di 0.0013 Hz sull'intero apparato. Il grande spessore della copertura di roccia del Monte Bianco e la schermatura passiva in ferro e paraffina borata comportano un elevato rapporto segnale/rumore, in grado di osservare collassi gravitazionali stellari entro l'intera nostra Galassia. L'esperimento LSD è stato spento nella primavera 1999, dopo l'incendio nel traforo autostradale.

## 2.c - Esperimento LVD (Large Volume Detector)

Fin dall'inizio del progetto del Laboratorio INFN del Gran Sasso, nel 1984, mi sono occupato della proposta dell'esperimento LVD, alla cui costruzione mi sono poi dedicato con responsabilità dirigenziali. LVD si basa in parte sui risultati ottenuti con il prototipo funzionante al Monte Bianco, in quanto utilizza gli stessi moduli di scintillatore liquido (anche se in numero molto maggiore) per un totale di circa 1000 tonnellate di rivelatore e con

un'elettronica di segnale più avanzata. Tuttavia, a differenza di LSD, l'esperimento LVD è dotato anche di un sistema di tracciamento, costituito di tubi a streamer limitato tutt'intorno ai moduli di scintillatore liquido. Ciò consente di utilizzare l'esperimento in modo calorimetrico e di seguire le tracce e le perdite di energia delle particelle su tutto il volume. LVD è un esperimento modulare suddiviso in 3 torri, la prima delle quali è in funzione dal giugno 1992 e il completamento è avvenuto nel settembre 2000.

Con l'esperimento LVD, non solo è possibile rivelare i burst di neutrini da collassi stellari che avvengono entro la distanza delle Nubi di Magellano, ma è anche possibile compiere una "spettroscopia neutrinica" durante le varie fasi di collasso del core e distinguere le emissioni di neutrini dovute a diversi processi. A questo riguardo, ho studiato la possibilità di rivelare neutrini di diverso flavour, in particolare  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$  per interazioni a correnti neutre o a correnti cariche con nuclei di carbonio dello scintillatore, allo scopo di evidenziare processi di oscillazione.

Inoltre, essendo LVD un esperimento a molti scopi, è possibile compiere anche altri tipi di ricerca (che verranno discussi più in dettaglio nel seguito), in particolare tutta la fisica dei raggi cosmici penetranti (studiati sia in LVD da solo che in correlazione con l'esperimento di superficie EAS-TOP), la rivelazione di neutrini atmosferici e la ricerca di fenomeni rari, quali neutrini associati a  $\gamma$ -ray burst. Infine, LVD è posto in coincidenza con gli altri rivelatori di burst neutrinici (Macro, Superkamiokande, SNO e in futuro Borexino).

## **2.d - Neutrini dalla supernova 1987A**

Il 23 febbraio 1987, alle ore 2<sup>h</sup> 52<sup>m</sup> 36.79<sup>s</sup> di tempo universale, il calcolatore dell'esperimento LSD del Monte Bianco ha segnalato in tempo reale la registrazione di un pacchetto di 5 interazioni in 7 sec. Dai programmi di monitoraggio on-line e dalla successiva analisi off-line abbiamo verificato che l'esperimento funzionava regolarmente, con il consueto trigger rate di 0.012 Hz. Pochi giorni dopo, il 28 febbraio, è stato possibile distribuire una circolare dell'International Astronomical Union (n.4323) ed un preprint in cui venivano discusse le caratteristiche di questo evento, attribuito alla registrazione dei neutrini emessi dalla supernova 1987A esplosa nelle Grandi Nubi di Magellano.

Successivamente, anche gruppi americani e giapponesi hanno annunciato l'osservazione di neutrini da questa supernova, ad un tempo di 4.7 ore successivo a quello del Monte Bianco. Poiché i modelli teorici non prevedevano l'emissione di un doppio burst, l'insieme di queste osservazioni, che non sono tra loro inconsistenti dal punto di vista sperimentale, hanno fornito per la prima volta i dati con cui confrontare le teorie sui collassi gravitazionali stellari. Analisi di correlazione sono state effettuate su tutti i dati sperimentali disponibili, osservando un significativo eccesso di coincidenze da parte di tutti questi esperimenti indipendenti, circostanza che comporta una dinamica ed un'energetica del collasso molto diverse rispetto a quanto previsto dai modelli teorici precedenti.

In seguito a questi risultati inattesi (anche se non unanimemente accettati in quanto in contrasto con molte previsioni teoriche) e sperimentalmente consistenti, ho compiuto un riesame dei modelli di emissione, precedentemente basati su collassi a simmetria sferica, senza rotazione né campi magnetici, che molto raramente sono in grado di giustificare l'esplosione supernova della stella in seguito al collasso delle sue parti interne. Per poter interpretare i dati sperimentali dei vari rivelatori, ho elaborato un modello originale di collasso a due stadi (prima in stella di neutroni e poi in buco nero), basato sulla frammentazione del core degenerare per effetto della sua elevata velocità di rotazione.

## 2.e – Correlazioni tra rivelatori di onde gravitazionali e di neutrini

Fin dal 1978 avevo proposto in un lavoro scientifico l'opportunità di effettuare correlazioni in tempo tra rivelatori di neutrini da collasso gravitazionale stellare e di onde gravitazionali. Questa possibilità è stata discussa, accettata ed effettuata tra gli esperimenti LSD e LVD e le antenne gravitazionali del gruppo di Roma di E.Amaldi e collaboratori già prima dell'esplosione della supernova 1987A.

Con l'osservazione dell'evento neutrino del Monte Bianco associato a questa supernova l'analisi di correlazione è stata effettuata su un lungo periodo di dati di neutrini e di onde gravitazionali, inclusi quelli dell'antenna del Maryland di J.Weber, ottenendo risultati statisticamente significativi di un eccesso di coincidenze per periodi di tempo superiori a quelli previsti dai modelli teorici. Anche per interpretare questi dati ho formulato un modello originale di collasso gravitazionale con core stellare degenere e in rotazione, con successiva frammentazione, la cui naturale conseguenza è un'emissione prolungata nel tempo di onde gravitazionali e neutrini.

## 2.f - Neutrini di alta energia

L'emissione di neutrini di alta energia è prevista per molti oggetti cosmici, in particolare da stelle binarie, attraverso il decadimento di  $\pi$  carichi prodotti nell'urto dei protoni emessi ad alta energia da una stella compatta contro i protoni a riposo del suo involucro o di un'eventuale stella compagna. Ho studiato questi processi e la possibilità di rivelare i neutrini ad essi associati, mediante la rivelazione dei muoni prodotti nella roccia circostante l'apparato sperimentale, ad opera della reazione:



Per questa ricerca ho calcolato il flusso previsto di neutrini a Terra da oggetti singoli (per es. shell di supernovae giovani) o da sorgenti binarie (tipo Cygnus X-3), ed ho valutato la possibilità di rivelare sorgenti cosmiche di neutrini di alta energia in esperimenti sotterranei attraverso il corrispondente flusso di muoni secondari.

## 2.g - Neutrini atmosferici e oscillazioni

Il flusso di neutrini secondari a Terra, prodotti da interazioni di raggi cosmici primari al top dell'atmosfera, non era ben noto a basse energie (inferiori a circa 20 MeV) prima che l'esperimento LSD del Monte Bianco ne misurasse il flusso. Ciò è stato fatto per diversi flavour neutrini, ottenendo risultati comparabili con quelli di esperimenti Cerenkov ad acqua di dimensioni molto maggiori, ma meno sensibili alle basse energie. Questo risultato, insieme a quello di Nusex ad energie più elevate ci ha permesso di misurare l'intensità dei neutrini atmosferici a Terra su un vasto range energetico. Esperimenti più recenti e di maggiori dimensioni (per es. Macro e Superkamiokande) hanno migliorato queste misure ed evidenziato il processo di oscillazione con l'osservazione di un deficit dei  $\nu_{\mu}$  prodotti dalla reazione (3).

Lo studio dei neutrini atmosferici consente di ottenere informazioni sulla natura dei primari e sui meccanismi delle loro interazioni ad alta energia al top dell'atmosfera. In LVD (dotato di grande accettazione anche per eventi orizzontali) abbiamo analizzato eventi a diverso

angolo zenitale, usando questo esperimento in modo calorimetrico. Il risultato è stato una misura del flusso di muoni orizzontali da neutrini ed una correlazione tra perdite di energia  $dE_\mu/dx$  ed energia  $E_\mu$  dei muoni.

### **3 - RICERCHE IN FISICA DEI RAGGI COSMICI**

Da oltre 30 anni mi occupo dello studio sperimentale dei raggi cosmici, sia in laboratori sotterranei a piccole profondità (laboratorio del Monte dei Cappuccini, 40 hg/cm<sup>2</sup>) o a grandi profondità (laboratori del Monte Bianco, 5000 hg/cm<sup>2</sup>, e del Gran Sasso, 3500 hg/cm<sup>2</sup>) che in alta montagna (laboratorio di Campo Imperatore del Gran Sasso, 2000 m s.l.m.) e, recentemente, dallo spazio con il progetto Airwatch Euso. Risultati significativi sono stati ottenuti nello studio dei primari (composizione chimica, ricerca di sorgenti astrofisiche e fondo diffuso di neutrini) e dei secondari (anisotropie sideree e temporali, intensità a diverse profondità, muoni pronti o a fine range).

#### **3.a - L'esperimento NUSEX del Monte Bianco**

Oltre che con gli esperimenti già descritti in relazione alle ricerche di fisica e astrofisica neutrinica, ho lavorato allo studio sperimentale dei raggi cosmici sotto grandi spessori di roccia anche con l'esperimento NUSEX, il cui scopo principale era studiare la stabilità della materia. NUSEX, in misura dal 1982 al 1991 nel laboratorio del Monte Bianco, era un calorimetro a grana fine di lato 3,5 m e massa 150 ton, composto di 134 strati di tubi a streamer limitato (sezione 1 cm<sup>2</sup> per avere alta risoluzione spaziale) intervallati con lastre di ferro di spessore 1 cm.

L'ottima risoluzione spaziale dell'esperimento (necessaria per una corretta identificazione dei candidati di decadimento del nucleone) rendevano NUSEX anche un eccellente esperimento per lo studio della componente penetrante della radiazione cosmica. Nei suoi primi anni di funzionamento questo apparato è stato, in effetti, l'unico esperimento sotterraneo che utilizzasse tecniche visualizzanti per lo studio dei muoni o di altri fenomeni (per es. monopoli magnetici) tipici della fisica in laboratori sotterranei; solo in anni più recenti ad esso si sono aggiunti altri esperimenti traccianti, quali Frejus, Macro e LVD di dimensioni molto maggiori che hanno reso meno interessante il prosieguo della presa dati.

#### **3.b - L'apparato EAS-TOP del Gran Sasso**

Fin dalle prime fasi di realizzazione del Laboratorio del Gran Sasso, nel 1984, ho collaborato alla costruzione di un laboratorio ad alta quota (Campo Imperatore) per lo studio degli sciami estesi atmosferici composto di:

1. un calorimetro (muon-hadron detector) di area 12x12 m<sup>2</sup> per lo studio dei muoni e delle interazioni adroniche o elettromagnetiche dei raggi cosmici.
2. un rivelatore elettromagnetico (electro-magnetic detector) composto di 28 moduli di scintillatore, di area 10 m<sup>2</sup> ciascuno e sparsi su un'area totale di circa 10<sup>5</sup> m<sup>2</sup> per lo studio degli EAS indotti in atmosfera dai raggi cosmici primari.
3. un rivelatore di luce Cerenkov composto di un sistema di 8 moduli con 4 specchi di diametro 0.9 m ciascuno, uno dei quali accoppiato ad un fotomoltiplicatore a molti pixel per la ricostruzione dell'immagine.

L'esperimento EAS-TOP è stato progettato con il duplice scopo di compiere ricerche autonome sui raggi cosmici ad alta quota e di effettuare correlazioni con i  $\mu$  secondari rivelati negli esperimenti del laboratorio sotterraneo. Poiché EAS-TOP era uno dei più grandi apparati sciami al mondo, esso ha ottenuto risultati fisici significativi sia nel suo modo di operare autonomo, sia in correlazione con gli esperimenti sotterranei del Gran Sasso.

### **3.c - Studio della componente muonica della radiazione cosmica**

Con gli esperimenti Nusex e LVD sono stati osservati  $\mu$  sotto grandi spessori di roccia per molti anni di presa dati; la grande statistica ottenuta sui muoni singoli e multipli ha consentito di determinare la relazione intensità-profondità dei  $\mu$  con grande precisione in un grande intervallo di profondità (da 3.000 a 16.000 hg/cm<sup>2</sup>). Da questa relazione si è ricavato lo spettro dei primari in un intervallo di energie ( $10^{13}$  -  $10^{16}$  eV) mai coperto in precedenza con un solo esperimento.

Lo studio dei gruppi di muoni e dei muoni a fine percorso ha permesso di ricavare informazioni alle corrispondenti energie e sui meccanismi di produzione dei secondari al top dell'atmosfera. In Nusex sono anche stati osservati gruppi di  $\mu$  coplanari, prodotti in una singola interazione di primari, la cui natura è legata a particolari valori del momento trasverso.

Per un esperimento sotterraneo, è particolarmente importante lo studio dei  $\mu$  a grande profondità di roccia e di quelli orizzontali, in quanto essi hanno energie molto più elevate di quelli verticali o sono prodotti da interazioni di  $\nu_{\mu}$ . Nel primo caso il meccanismo di produzione non è dominato dal decadimento dei  $\pi$  o dei  $k$  ma da quello dei  $D$  e dei  $\lambda$  ( $\mu$ -prompt). Nell'esperimento LVD (che per la sua geometria è particolarmente adatto a rivelare particelle di provenienza orizzontale) è stato misurato il flusso di muoni da neutrini ed è stato ottenuto un limite superiore alla componente di  $\mu$ -prompt. Per l'interpretazione di questi risultati, ho calcolato il contributo di muoni pronti al flusso atmosferico dei muoni, utilizzando i dati di esperimenti con gli acceleratori ed i risultati sulla produzione di particelle charmate in interazioni nucleoni-nuclei atmosferici. I risultati ottenuti si sono dimostrati in accordo con i dati forniti dagli esperimenti sotterranei.

Tra i vari modelli proposti sulla composizione chimica dei primari di alta energia, alcuni prevedono un arricchimento di elementi pesanti rispetto ai valori misurati direttamente alle basse energie. L'effetto potrebbe essere dovuto ad immissione, da parte delle pulsar, di materiale pesante accelerato ad alta energia. La distribuzione dei gruppi di  $\mu$  in funzione della loro molteplicità, osservata con Nusex, non favorisce tale ipotesi, in quanto non si discosta significativamente dalle previsioni ottenute dai modelli di composizione chimica dei primari estrapolati dalle basse energie. Con l'esperimento EAS-TOP (sia in modo indipendente, che in correlazione con gli esperimenti sotterranei LVD e Macro) sono stati compiuti importanti studi sulla composizione chimica primaria alle energie del ginocchio ottenendo evidenza di una composizione mista.

### **3.d - Ricerca di sorgenti di alta energia**

La ricerca di sorgenti cosmiche costituisce uno dei principali filoni di lavoro della fisica dei raggi cosmici. Infatti, tutti gli esperimenti dotati di buona misura di direzionalità ed accettazione sufficientemente grande compiono ricerche su sorgenti di raggi cosmici. In questo campo due risultati particolarmente significativi sono stati ottenuti con gli esperimenti di cui

mi sono occupato: l'osservazione di un eccesso  $\mu$  di in direzione di Cygnus X-3 con Nusex e l'osservazione di un burst  $\gamma$  dalla Crab Nebula con EAS-TOP.

Nel primo caso, le direzioni d'arrivo dei  $\mu$  singoli o multipli osservati in Nusex sono state collocate in una mappa del cielo, con risoluzione angolare dell'ordine del grado, per ricercare possibili sorgenti localizzate di primari. E' stato osservato un eccesso di  $\mu$  in direzione della sorgente binaria Cyg X-3, alla fase 0.7 dopo il minimo X, con alta significatività statistica negli anni 1983-84. L'interpretazione di questo risultato è tuttora mancante, in quanto l'eccesso osservato (che potrebbe essere dovuto a particelle primarie neutre, per conservare la direzione di propagazione nel campo magnetico della Galassia) non sembra essere dovuto nè a gamma, nè a neutroni nè a neutrini primari. Dal punto di vista fenomenologico ho esaminato in dettaglio la possibilità di rivelare neutrini di alta energia negli esperimenti attuali, ottenendo risultati negativi confermati da valutazioni successive di altri autori.

Per quanto riguarda il secondo caso, si è osservato un eccesso di sciami estesi atmosferici provenienti dalla direzione della Crab Nebula per un periodo di alcune ore, in successione temporale con analoghe osservazioni effettuate da altri apparati sciami nei laboratori KGF (India) e Baksan (Caucaso). Questa osservazione costituisce uno dei pochi casi di evento transiente direttamente osservato nei raggi cosmici.

Oltre a queste osservazioni positive, sono state ricercate (con esito negativo) altre sorgenti, quali il centro galattico o stelle binarie X. Anche l'analisi delle correlazioni tra eventi osservati nei nostri esperimenti ed altri tipi di fenomeni cosmici ha dato esito negativo; in particolare, coincidenze con  $\gamma$ -burst e flares solari di grande intensità hanno permesso di ottenere solo limiti superiori al flusso di neutrini associati a questi fenomeni.

### **3.e - Misure congiunte sottoterra-superficie al Gran Sasso**

I dati sugli sciami estesi osservati con l'esperimento EAS-TOP sono stati correlati con le osservazioni degli esperimenti sotterranei Macro e LVD al fine di studiare la componente di energia ultra-alta (UHE) dei raggi cosmici. Uno studio dettagliato delle molti componenti degli EAS è essenziale per comprendere la fisica dei raggi cosmici ad altissime energie; ciò può essere fatto solo con un "telescopio congiunto" costituito di una parte in superficie e di una parte a grande profondità sottoroccia.

Con questi studi di correlazione dei dati di superficie con quelli sotterranei, si sono ottenute informazioni dirette sullo spettro e composizione chimica dei primari, sulle interazioni adroniche (di protoni e nuclei) a energie maggiori di 1000 TeV e su eventuali sorgenti astrofisiche. La parte in superficie di questo telescopio misura le componenti elettromagnetica, muonica e adronica, quella sotterranea misura muoni di alta energia, le loro interazioni e la componente neutra penetrante. Per esempio, in coincidenza con tutti i moduli di EAS-TOP, è stato osservato un muon-bundle in LVD di molteplicità 32; l'analisi congiunta di queste osservazioni ha permesso di stimare in circa  $10^{17}$  eV l'energia del primario responsabile dell'evento.

### **3.f - Misure di raggi cosmici dallo spazio: il progetto Airwatch/Euso**

Dato il flusso a terra molto piccolo dei raggi cosmici di altissima energia ( $E \geq 10^{19}$  eV), per la loro rivelazione sono necessari apparati sperimentali di accettazione molto grande. Tuttavia, non è pensabile di costruire rivelatori con area superiore a quelli attualmente in misura o in progetto (per es. Auger) per cui, in vista della fine di EAS-TOP, mi sono dedicato

al progetto Airwatch che prevede l'osservazione dei raggi cosmici con  $E \geq 10^{19}$  eV dallo spazio, con un'area di atmosfera osservata pari a circa  $10^3 - 10^6$  km<sup>2</sup>, ed una massa coinvolta di circa  $10^{12}$  tonnellate. Un primo passo del progetto è la costruzione sulla stazione spaziale dell'esperimento EUSO (Extreme Universe Space Observatory), a cui dovrebbe seguire un esperimento su satellite dedicato. La decisione finale sulla costruzione di EUSO sarà presa dall'ESA nella primavera del 2001 e, se sarà positiva, si potrà osservare un gran numero di raggi cosmici e neutrini di energia superiore al taglio GZK per verificarne i meccanismi di origine (cosmologico o no), interazione e propagazione nel mezzo intergalattico.

#### **4 - RICERCA DI PARTICELLE E PROCESSI GUT**

È noto che le teorie di grande unificazione (GUTs) tra interazioni forti ed elettrodeboli, secondo le quali quark e leptoni possono occupare gli stessi multipletti, hanno come conseguenza l'esistenza di processi di violazione del numero barionico, osservabili sia attraverso il decadimento del protone (dove  $\Delta B = 1$ ), che come oscillazioni neutrone-antineutrone (dove  $\Delta B = 2$ ). Inoltre, queste teorie comportano anche l'esistenza di difetti topologici di origine cosmologica quali i monopoli magnetici. Processi di questo tipo dovevano essere comuni al tempo  $t \sim 10^{-33}$  s dal Big Bang, quando la temperatura dell'universo era  $T \sim 10^{14}$  GeV, alla fine della transizione di fase conseguente alla rottura spontanea della simmetria di grande unificazione.

##### **4.a – Studio sperimentale del decadimento del protone**

L'esperimento NUSEX del Laboratorio del Monte Bianco era stato costruito, a fine anni 70, con lo scopo principale di studiare il decadimento del protone e i monopoli magnetici. Anche l'esperimento LVD del Gran Sasso, pur non costituendo queste ricerche il suo scopo principale, consente di esaminare questi processi con buona sensibilità nei canali che generano  $\mu$ , in particolare nel canale  $p \rightarrow K^+ \tilde{\nu}_e$ , dominante nelle teorie SUSY, attraverso la catena di decadimento del K, che comporta l'uso di un'elettronica molto veloce per poter discriminare il K dal  $\mu$  del suo decadimento.

Tuttavia, i risultati sperimentali hanno mostrato che tutti gli eventi confinati osservati sono interpretabili come dovuti ad interazioni di neutrini atmosferici, senza evidenza di decadimento del protone. Per i diversi canali sono stati ricavati i limiti inferiori alla vita media del protone. Sia perché nuovi esperimenti di grande massa sono entrati in funzione, sia perché le teorie più recenti hanno aumentato di molti ordini di grandezza la vita media del protone, questo tipo di ricerca è stato abbandonato.

Con l'esperimento Nusex del Monte Bianco sono anche stati ricercati eventi che, per le loro caratteristiche energetiche e cinematiche, potessero essere attribuibili a processi di oscillazione neutrone-antineutrone. Non essendo stati rivelati candidati nei molti anni in cui l'esperimento è stato in misura, si è ottenuto un limite inferiore al tempo di decadimento nel ferro di circa  $10^{31}$  anni, corrispondente ad un tempo di oscillazione del neutrone libero di  $4 \cdot 10^7$  sec.

##### **4.b - Monopoli magnetici**

Poiché i modelli cosmologici standard prevedono l'esistenza di un gran numero di monopoli magnetici GUT, mentre quelli inflazionari ne escludono praticamente l'esistenza, la

loro eventuale osservazione è importante non solo per la fisica delle particelle elementari, ma anche per discriminare in modo sperimentale i diversi modelli di universo. Inoltre, le ricerche congiunte di monopoli magnetici e decadimento del protone costituiscono l'unica possibilità di studiare sperimentalmente epoche prossime al Big Bang.

Ho lavorato alla ricerca di monopoli magnetici di grande unificazione con gli esperimenti Nusex e LSD del Monte Bianco, con cui è stato ottenuto un flusso limite a Terra dell'ordine di  $10^{-14}$  poli  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$  per monopoli con velocità  $\beta > 10^{-4}$  e perdite di energia  $\sim 10^{-2}$  volte una particella al minimo di ionizzazione. Altri esperimenti di maggior accettazione, tra cui MACRO al Gran Sasso, hanno ormai raggiunto il limite di Parker, basato sulla sopravvivenza dei campi magnetici galattici, per cui ho abbandonato queste ricerche.