

# Curriculum dell'attività scientifica e didattica

Beatrice Meini

## Generalità

Nata a Pontedera (PI) il 5/12/1968.

Residente a Pontedera (PI), via Verdi 9.

Professore associato, SSD MAT/08, presso il Dipartimento di Matematica, Università di Pisa.

Pagina web: [www.dm.unipi.it/~meini](http://www.dm.unipi.it/~meini)

## Formazione

**1993** Laurea in matematica, presso l'Università degli Studi di Pisa, con la votazione di 110/110 e lode; tesi di analisi numerica dal titolo "Il problema della fila più corta: analisi di algoritmi di risoluzione", relatori Prof. Dario A. Bini e Prof. Luciano Lenzini.

**1998** Dottore di ricerca in Matematica, Dipartimento di Matematica, Università di Pisa, Consorzio delle Università di Pisa (Sede amministrativa), Bari, Ferrara, Lecce, Parma; tesi di analisi numerica dal titolo "Fast algorithms for the numerical solution of structured Markov chains", relatore Prof. Dario A. Bini.

## Borse di studio e posizioni accademiche

**1993** Vincitore di una borsa di studio bandita dal CNR, per laureati, non usufruita in quanto vincitore di un posto alla Scuola di dottorato di ricerca in matematica, Dipartimento di Matematica "L. Tonelli", Università di Pisa.

**1993 – 1997** Studente della Scuola di dottorato di ricerca in matematica, Dipartimento di Matematica "L. Tonelli", Università di Pisa, Consorzio delle Università di Pisa (Sede amministrativa), Bari, Ferrara, Lecce, Parma.

**Dicembre 1997** Incarico di collaborazione alla ricerca, presso Dipartimento di Matematica "L. Tonelli", Università di Pisa.

**Gennaio – Giugno 1998** Borsa di ricerca Senior, conferita dall'Istituto Nazionale di Alta Matematica Francesco Severi, usufruita presso il Dipartimento di Matematica "L. Tonelli", Università di Pisa.

**Luglio – Dicembre 1998** Borsa di studio conferita dal CNR, usufruita presso il Dipartimento di Matematica "L. Tonelli", Università di Pisa.

**Dicembre 1998 – Dicembre 2004** Ricercatore universitario presso il Dipartimento di Matematica "L. Tonelli", Università di Pisa, per il settore scientifico-disciplinare A04A.

**Gennaio 2005 – Ottobre 2016** Professore Associato presso il Dipartimento di Matematica, Università di Pisa, per il settore scientifico-disciplinare MAT/08.

**Novembre 2016 –** Professore Ordinario presso il Dipartimento di Matematica, Università di Pisa, per il settore scientifico-disciplinare MAT/08.

## Associazioni

SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics) e SIAM/LA (SIAM Activity Group in Linear Algebra), ILAS (International Linear Algebra Society).

## Attività editoriale

- Dal 1999, membro dell'*Editorial board* della rivista *Stochastic Models*.
- Dal 2009, membro dell'*Editorial board* della rivista *Linear Algebra and its Applications*.
- Dal 2009 al 2014 (due mandati di tre anni), membro dell'*Editorial board* della serie di monografie *SIAM Book Series Fundamentals of Algorithms*.

- Nel 2014, membro dell'*Editorial board* della rivista *Applied Mathematics and Computation*.
- Dal 2015, membro dell'*Editorial board* della rivista *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*.
- Dal 2016, membro dell'*Editorial board* della rivista *Linear and Multilinear Algebra*.
- *Guest editor* del numero speciale della rivista *Stochastic Models* sui *proceedings* del convegno “Fifth International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models”, Pisa, Giugno 2005.
- *Co-editor* dei Dagstuhl Seminar Proceedings *Numerical Methods for Structured Markov Chains*, number 07461, Dagstuhl, Germany, 2008. Internationales Begegnungs- und Forschungszentrum für Informatik (IBFI), Schloss Dagstuhl, Germany.
- *Special editor* del numero speciale della rivista *Linear Algebra and its Applications* sui *proceedings* del convegno “15-th ILAS Conference”, Cancun (Messico), 2008.
- *Guest editor* del numero speciale della rivista *Numerical linear algebra with applications*, dedicato ai *proceedings* del convegno Numerical Solution of Markov chains, 2010.
- *Guest editor* del numero speciale della rivista *Performance Evaluation*, dal titolo Advances in Matrix-Analytic Methodology - Modeling, Estimation and Numerical Analysis, 2012.
- *Guest editor* del numero speciale della rivista *Numerical linear algebra with applications*, dedicato ai *proceedings* del convegno “Matrix equations and tensor techniques”, Pisa, 2017.
- *Guest editor* del numero speciale della rivista *Stochastic Models* sui *proceedings* del convegno The Ninth International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models (MAM9), Budapest, 2016.

## Attività scientifica internazionale

- Ha tenuto un ciclo di lezioni e seminari e ha svolto attività di ricerca presso il Département d’Informatique, Université Libre de Bruxelles, Belgio, nella figura di “IBM International Chair in Computer Science: Numerical Methods for Markov Chains”, nel periodo 8 febbraio – 6 marzo 1999, su invito del Prof. G. Latouche (Université Libre de Bruxelles).
- Nell’ambito del “Computational science day”, Coimbra, 23 Luglio 2004, ha tenuto un ciclo di lezioni dal titolo “Numerical solution of Markov chains and queueing problems”
- Ha pubblicazioni e collaborazioni con numerosi ricercatori internazionali, tra i quali: S. Chakravarthy (Kettering University), C.-H. Guo (Calgary University), N. Higham (Manchester University), G. Latouche (Université Libre de Bruxelles), M.F. Neuts (Arizona University), V. Ramaswami (AT&T Labs), N. Rhee (Kansas City University), I.M. Spitkovsky (College of William and Mary), B. Van Houdt (Antwerp University).

## Servizi alla comunità scientifica internazionale

- Dal 2011 al 2013 (un mandato di un triennio) ha fatto parte dell'*advisory committee* dell'*ILAS (International Linear Algebra Society)*, su proposta dell'*ILAS board of directors*.
- Per il triennio 2015–2017, fa parte dell'*ILAS board of directors*, carica elettiva votata dai membri dell'ILAS.

## Organizzazione di convegni e sessioni speciali

- Sessione “Computational methods for queueing problems” al convegno internazionale INFORMS, Tel-Aviv University, Tel-Aviv (Israel), 1998.
- Convegno “Fifth International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models”, Pisa, 2005 (*Program co-chair*, insieme al Prof. Guy Latouche, ULB Bruxelles).
- Prima edizione del convegno “SMCTOOLS: Tools for solving Structured Markov Chains”, Pisa, 2006 (*Program co-chair* insieme al Prof. Benny van Houdt, Antwerp University).
- Dagstuhl Seminar “Numerical Methods for Structured Markov Chains”, Dagstuhl (Germania), Novembre 2007.
- Convegno “SMCTOOLS: Tools for solving structured Markov chains”, Pisa, 2009 (*Program co-chair* insieme al Dr. Andras Horvath).
- Convegno “When Probability Meets Computation, in honour of Guy Latouches retirement”, Varese, 2012.
- Minisymposium “Algebraic Riccati equations associated with M-matrices: numerical solution and applications” at the SIAM Conference on Applied Linear Algebra, Valencia (Spain), 2012.
- Convegno “SIAM Applied Linear Algebra conference”, Atlanta, 2015.

- Minisymposium su invito “Matrix equations” at the ILAS conference, Leuven (Belgium), 2016.
- Convegno “Matrix equations and tensor techniques”, Pisa, 2017.
- Membro del comitato scientifico dei seguenti convegni:
  - Second International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models, Winnipeg, Manitoba (Canada), 1998.
  - Third International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models, Leuven (Belgio), Luglio 2000.
  - Fourth International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models, Adelaide, Australia, Luglio 2002.
  - International conference on the numerical solution of Markov chains, Urbana-Champaign, Illinois (USA), Settembre 2003.
  - A.A. Markov Anniversary Meeting, Charleston, South Carolina (USA), Giugno 2006.
  - Second International Workshop on Tools for solving Structured Markov Chains, Nantes (Francia), Ottobre 2007.
  - Sixth International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models, Beijing (China), Giugno 2008.
  - 15-th International Linear Algebra Society (ILAS) Conference, Cancun (Messico), Giugno 2008.
  - Structured Linear Algebra Problems: Analysis, Algorithms, and Applications, Cortona, Settembre 2008.
  - Third International Workshop on Tools for solving Structured Markov Chains, Athens (Grecia), October 2008.
  - 6th International Workshop on the Numerical Solution of Markov Chains College of William and Mary, Computer Science Department, Williamsburg, USA, 2010.
  - Seventh International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models (MAM7), Columbia University, New York, NY, USA, 2011.
  - Eighth International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models (MAM8), Kerala, India, 2014.
  - Ninth International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models (MAM9), Budapest, 2016.
  - INdAM Meeting. Structured matrices in Numerical Linear Algebra: Analysis, Algorithms and Applications, Cortona, 2017.

## Partecipazione a conferenze internazionali

### Plenary talks su invito

- *Special lecturer (SIAM/LA speaker)* al convegno *11th ILAS conference*, Coimbra (Spain), 2004
- Plenary speaker al convegno *16th ILAS conference*, Pisa (Italy), 2010

### Altre presentazioni su invito

- *Toeplitz Matrices: Structure, Algorithms and Applications*, Cortona, 1996.
- *SPIE Conference*, Denver, Colorado (USA), 1999.
- *INFORMS Applied Probability Conference*, Ulm (Germania), 1999.
- *Second Conference on Numerical Analysis and Applications*, Rouse (Bulgaria), 2000.
- *Structured Matrices: Analysis, Algorithms and Applications*, Cortona, Settembre 2000.
- *Structured Numerical Linear Algebra Problems: Algorithms and Applications*, Cortona, Settembre 2004.
- *ICIAM Conference*, Zurigo (Svizzera), Luglio 2007.
- *Matrix Analysis and Applications*, CIRM Luminy (Francia), Ottobre 2007.
- *Web Information Retrieval and Linear Algebra Algorithms*, Dagstuhl (Germania), Febbraio 2007.
- *Numerical Methods for Structured Markov Chains*, Dagstuhl (Germania), Novembre 2007.
- *MIMS New Directions Workshop: Functions of Matrices*, Manchester (UK), Maggio 2008.

- *Advanced Workshop on Trends and Developments in Linear Algebra*, ICTP, Trieste (Italy), 2009.
- *Structured Numerical Linear and Multilinear Algebra Problems*, Leuven (Belgium), 2012.
- *Advances in Matrix Functions and Matrix Equations*, Manchester April 10-12, 2013.
- *Advanced School and Workshop on Matrix Geometries and Applications*, Trieste, July 1-12, 2013.
- *Nonlinear Evolution Equations and Linear Algebra*, Cagliari, Sardinia, Italy, September 2-5, 2013.
- *First Joint International Meeting RSME-SCM-SEMA-SIMAI-UMI*, Bilbao, 30 giugno–4 luglio, 2014.
- *6th Conference on Structured Numerical Linear and Multilinear Algebra: Analysis, Algorithms and Applications*, Kalamata, September 8th-12th 2014.
- *The Householder Symposium XIX on Numerical Linear Algebra*, June 8-13, Spa (Belgium), 2014.
- *SIAM Applied Linear Algebra conference*, Atlanta, October 2015.

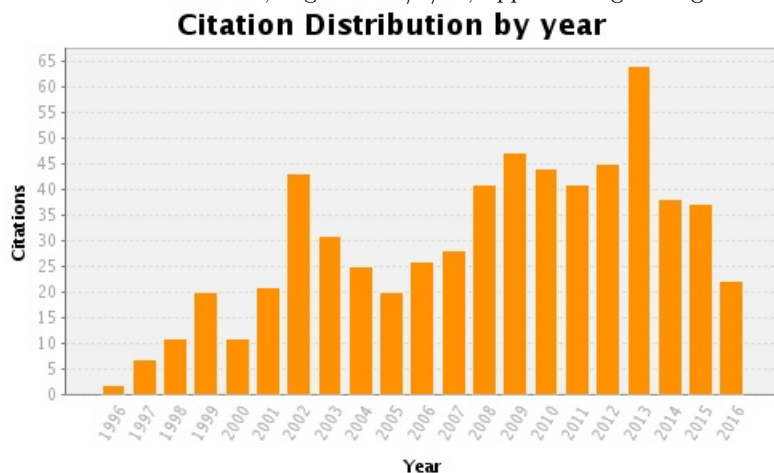
### Altre presentazioni (selezione)

- *Second International Workshop on the Numerical Solution of Markov Chains*, Raleigh (USA), 1995.
- *First International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models*, Flint, Michigan (USA), 1995.
- *International Workshop on Numerical Methods for Structured Matrices*, S. Barbara, California (USA), 1996.
- *INFORMS Conference*, Tel-Aviv University, Tel-Aviv (Israele), 1998.
- *Second International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models*, Winnipeg (Canada), 1998.
- *Third International Conference on the Numerical Solution of Markov Chains*, Saragoza (Spagna), 1999.
- *Third International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models*, Leuven (Belgio), 2000.
- *Ninth International Congress on Computational and Applied Mathematics*, Leuven (Belgio), 2000.
- *International conference on the numerical solution of Markov chains*, Urbana-Champaign (USA), 2003.
- *Fifth International Conference on Matrix Analytic Methods in Stochastic Models (MAM5)*, Pisa, Giugno 2005.
- *Workshop Matrix Equations*, Chemnitz (Germania), Giugno 2007.
- *15-th ILAS Conference*, Cancun (Mexico), 2008.
- *1-Day Workshop on Matrix Equations*, TU Braunschweig (Germany), 2009.
- *Matrix equations workshop*, Aachen (Germany), 2011.
- *Seventh International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models*, New York (USA), 2011.
- *Workshop on Matrix Equations and Tensor Techniques*, Lausanne, October, 2013.
- *Matrix equations and tensor techniques*, Bologna, 2015.
- *Ninth International Conference on Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models*, Budapest, 2016.
- *20-th ILAS conference*, Leuven, 2016.

### Citazioni e qualità della ricerca

- Ha pubblicato 45 articoli su riviste con *referee*, molti dei quali sulle riviste più prestigiose del suo settore di ricerca (SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, Mathematics of Computation, Numerische Mathematik, Linear Algebra and its Applications, Numerical Algorithms), e due libri di ricerca, uno pubblicato dalla Oxford University Press e uno pubblicato da SIAM.
- Gli articoli [27], [32] e [37] sono stati valutati 1 (Eccellente) nella VQR 2004-2010.

- Da “ISI Web of Science”, il giorno 22/8/16, appare il seguente grafico rappresentante le citazioni per anno:



Inoltre, le sue pubblicazioni ricevono in totale 624 citazioni, il numero medio di citazioni per articolo è 13.28.

Gli articoli più citati sono:

Articolo	[4]	[22]	[32]	[29]	[37]	[15]	[6]	[20]	[48]	[30]
Citazioni	79	50	45	43	41	40	39	38	34	24

Sempre secondo WoS il suo H-index è 14, mentre secondo Scopus è 17.

- L’articolo [31] è stato inserito, classificandolo settimo, nei “Top 25 Hottest Articles” della rivista *Linear Algebra and its Applications*, nel periodo gennaio/marzo 2006.

## Attività didattica

**Anni accademici 1996/97 – 1997/98** Contratti con l’Università di Pisa per prestazioni professionali di supporto alla didattica, con l’incarico di coadiuvare i docenti a supporto dell’attività didattica relativa al Corso di “Analisi Numerica - I Modulo”, Corso di Laurea in Matematica e al Corso di “Calcolo Numerico e Laboratorio di Programmazione e Calcolo”, Corso di Laurea in Chimica Industriale e Scienza dei Materiali.

**Anni accademici 1998/99 – 2000/01** Attività di esercitazione per i corsi: “Analisi Numerica”, Corso di Laurea in Matematica; “Laboratorio di Programmazione e Calcolo”, Corso di Laurea in Scienza dei Materiali; “Calcolo Numerico”, Corso di Laurea in Chimica Industriale; “Laboratorio di Programmazione e Calcolo”.

**Anni accademici 2001/02 – 2011/12** Tiene i seguenti insegnamenti al Corso di Laurea in Matematica: “Laboratorio didattico di matematica computazionale”, “Metodi numerici per equazioni differenziali ordinarie”, “Metodi numerici per catene di Markov”.

**Anni accademici 2012/13 – 2014/15** Tiene i seguenti insegnamenti al Corso di Laurea in Matematica: “Laboratorio didattico di matematica computazionale”, “Laboratorio computazionale”, “Analisi numerica” (esercitazioni), “Metodi numerici per catene di Markov”.

**Anno accademico 2015/16** Tiene i seguenti insegnamenti al Corso di Laurea in Matematica: “Istituzioni di analisi numerica”, “Analisi numerica” (esercitazioni), “Laboratorio computazionale”, “Metodi numerici per catene di Markov”.

Relatore di numerose tesi di Laurea in Matematica (vecchio ordinamento), Laurea Triennale e Laurea Magistrale.

*Supervisor* dello studente di perfezionamento Federico Poloni della Scuola Normale Superiore, che ha difeso la tesi dal titolo “Algorithms for quadratic matrix and vector equations”, 2010.

## Partecipazione a progetti di ricerca

- Ha partecipato a vari progetti di ricerca PRIN e COFIN, l’ultimo di questi è un progetto PRIN coordinato da Dario Bini, finanziato da marzo 2010 a settembre 2012.
- Membro di progetti finanziati dal GNCS dell’INDAM (Poloni, Equazioni e funzioni di matrici, 2013; Iannazzo, Approssimazione di soluzioni di problemi matriciali, 2014; Iannazzo, Metodi numerici per autovalori e funzioni di matrici con strutture, 2015).
- Membro del progetto PRA 2015 finanziato dall’Università di Pisa, coordinato da A. Frangioni “Mathematical models and numerical methods for complex networks”

# Coordinamento di progetti di ricerca

Coordinatore del progetto di ricerca GNCS 2016 dell'INdAM "Equazioni e funzioni di matrici con struttura: analisi e algoritmi".

## Attività di ricerca

La ricerca riguarda lo sviluppo e l'analisi di metodi di risoluzione efficienti per problemi di algebra lineare numerica con applicazioni. In particolare ha trattato i seguenti temi:

1. Risoluzione di equazioni matriciali non lineari e fattorizzazioni canoniche.
2. Funzioni di matrici.
3. Metodi per la risoluzione di catene di Markov.
4. Sistemi lineari con struttura e di grandi dimensioni.

Viene data una breve descrizione dei temi con un cenno ad alcuni dei risultati che hanno avuto maggior riscontro in letteratura.

1. *Risoluzione di equazioni matriciali non lineari e fattorizzazioni canoniche.* Equazioni matriciali si incontrano nella risoluzione di molti problemi delle applicazioni: dallo studio di problemi di controllo e stabilità (equazioni di Riccati algebriche a tempo continuo o discreto), allo studio di code fluide (equazioni di Riccati associate a M-matrici), a problemi di modelli di code in genere (equazioni unilaterali). Le idee principali introdotte, che hanno condotto a risultati più significativi, sono:
  - (a) *Linearizzazione del problema:* riscrivere il problema della risoluzione di equazioni matriciali non lineari in termini della risoluzione di particolari sistemi di equazioni lineari di dimensione infinita, ma dotati di forte struttura, in particolare struttura di Toeplitz.
  - (b) *Formulazione in termini di funzioni analitiche:* caratterizzare la soluzione di queste equazioni matriciali mediante la fattorizzazione canonica di Wiener-Hopf di opportuni polinomi di Laurent a coefficienti matriciali, e trattare il problema nell'ambito di funzioni analitiche di variabile complessa.
  - (c) *Utilizzo delle strutture:* utilizzare le proprietà e la tecnologia delle matrici di Toeplitz per fornire algoritmi di risoluzione; utilizzare le proprietà di funzioni analitiche e la teoria delle fattorizzazioni di Wiener-Hopf per dimostrare proprietà utili per l'analisi di convergenza.

Queste nuove interpretazioni hanno permesso da un lato di dimostrare interessanti proprietà teoriche, dall'altro di sviluppare nuovi algoritmi efficienti [22, 27, 29, 20, 25, 19, 30, 32, 72, 73].

In particolare, nell'articolo [4] si introduce un metodo per il calcolo della soluzione  $X \in M_n(\mathbb{R})$  di minimo raggio spettrale di una equazione matriciale unilaterale del tipo  $F(X) = X$  con  $F(z) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i z^i$ , con  $A_i \in M_n(\mathbb{R})$  e  $F(z)$  analitica in un dominio aperto del piano complesso contenente la circonferenza unitaria. Il metodo si ottiene costruendo in modo opportuno una successione di equazioni unilaterali in cui la soluzione minimale dell'equazione  $k$ -esima è data dalla potenza  $2^k$ -esima della soluzione dell'equazione originale. Si dimostra che l'errore di approssimazione converge a zero in modo *doppiamente esponenziale*. Si dimostra che la velocità di convergenza è determinata dall'ampiezza del dominio di analiticità della funzione  $(zI - F(z))^{-1}$ . Il metodo di risoluzione introdotto è diventato il metodo di scelta in tutte le applicazioni in cui la funzione  $\det F(z)$  ha  $n$  zeri dentro il cerchio unitario. L'articolo è citato 79 volte secondo WoS, 87 secondo Scopus, 154 secondo Google Scholar.

Nell'articolo [6] viene fornito un miglioramento algoritmico del metodo di [4] utilizzando la riformulazione dell'algoritmo data in termini di funzioni analitiche di variabile complessa e mediante l'uso della trasformata di Fourier. Nella nuova versione il metodo risulta molto più efficiente e permette di trattare in tempi brevi problemi applicativi per i quali un approccio standard incontrerebbe grosse difficoltà [5, 14, 69]. L'articolo [6] è citato 39 volte secondo WoS, 42 secondo Scopus, 72 secondo Google Scholar.

In [22] sono stati introdotti e analizzati dei metodi di risoluzione efficienti per le equazioni  $X \pm A^* X^{-1} A = Q$ , che si incontrano in numerose applicazioni. Si dimostra che queste equazioni sono ricondotte a equazioni quadratiche unilaterali e che sono valide le condizioni di applicabilità degli algoritmi dati in [4]. In questo modo si ottengono alti livelli di efficienza computazionale sia in termini di tempo di calcolo che di stabilità numerica. L'articolo è citato 50 volte secondo WoS, 61 secondo Scopus, 108 secondo Google Scholar.

In [32] viene analizzata la classe degli algoritmi doubling per risolvere equazioni algebriche di Riccati del tipo  $XBX + AX + XD - C = 0$  con  $A, B, C, D, X$  matrici di dimensioni compatibili, che si incontrano nell'analisi di code fluide e in altri contesti applicativi. Viene introdotta una metodologia per traslare parte dello spettro associato alla equazione di Riccati in modo da rimuovere alcune singolarità. Si dimostra che questo permette di costruire algoritmi di risoluzione dotati di alta efficienza anche nei casi in cui il problema fisico, modellato

dall'equazione di Riccati, presenta singolarità dove gli algoritmi tradizionali falliscono. L'articolo è citato 45 volte secondo WoS, 43 secondo Scopus, 70 secondo Google Scholar.

Vari aspetti teorici e computazionali di equazioni matriciali sono studiati in [16, 72, 73, 20, 21, 24, 68, 66, 31, 30]. Nella monografia di ricerca [2], pubblicata da SIAM, è riportato lo stato dell'arte per quanto riguarda gli aspetti teorici e computazionali delle equazioni algebriche di Riccati a tempo discreto e a tempo continuo.

Un argomento correlato alla risoluzione di equazioni matriciali riguarda il calcolo delle fattorizzazioni canoniche di Wiener-Hopf di matrix polynomials, la loro formulazione in termini di fattorizzazioni UL di matrici infinite di Toeplitz a blocchi, e in particolare la fattorizzazione spettrale di polinomi a coefficienti complessi. Questi temi sono trattati nei lavori [20, 18, 28, 23] dove vengono individuati metodi a convergenza quadratica per il calcolo di fattorizzazioni spettrali di polinomi e di serie di Laurent.

La ricerca in questo settore è svolta in collaborazione con C.H. Guo (Regina, Canada), N.J. Higham (Manchester, UK), G. Latouche (ULB, Bruxelles), V. Ramaswami (AT&T Bell Labs), I. Spitkovsky (Williamsburg, USA).

2. *Funzioni di matrici.* Molte funzioni di variabile complessa, estese al dominio delle matrici, trovano importanti applicazioni in problemi dell'ingegneria. L'interesse è rivolto al problema del calcolo di alcune funzioni di matrici, in particolare il calcolo della radice  $p$ -esima, dell'esponenziale, e della media geometrica di matrici definite positive. Quest'ultima si incontra in problemi di *radar detection*.

Nell'articolo [37] viene introdotta una nuova definizione di media geometrica di matrici definite positive basata sulle proprietà delle geodetiche nel cono delle matrici definite positive, dotato di una opportuna metrica Riemanniana. Si dimostra che questa media soddisfa a tutti i 10 assiomi di Ando, Li e Mathias, che caratterizzano le medie geometriche. Viene introdotto un metodo per il suo calcolo mediante una successione di matrici. Si dimostra che l'errore di approssimazione al passo  $k$  converge a zero in modo *doppiamente esponenziale* col passo  $k$  su base  $1/3$ . Questa media e questo metodo costituiscono un notevole avanzamento rispetto al metodo di Ando Li Mathias in cui l'errore converge in modo semplicemente esponenziale su base 2. Questa nuova definizione e questo metodo sono stati usati da numerosi altri studiosi esterni al gruppo di ricerca. Il lavoro, pubblicato nel 2010, è citato 41 volte secondo WoS, 43 secondo Scopus, 72 secondo Google Scholar.

In [27] viene data una nuova interpretazione funzionale della radice quadrata di una matrice, che ne permette il calcolo efficiente mediante un algoritmo basato su riduzione ciclica. I risultati sono poi estesi al caso della radice  $p$ -esima in [29]. Questo articolo riceve 43 citazioni secondo WoS, 44 secondo Scopus e 77 secondo Google Scholar.

Nel recente lavoro [47] viene affrontato il problema del calcolo dell'esponenziale di una matrice triangolare a blocchi di Toeplitz, che rappresenta i tassi di transizione di un processo stocastico che modella una cosa fluida. Utilizzando le proprietà delle matrici di Toeplitz e dell'esponenziale, vengono proposti vari metodi per il calcolo che permettono di trattare matrici di grandi dimensioni, intrattabili con i metodi standard.

3. *Metodi per la risoluzione di catene di Markov.* Per quanto riguarda questo punto, sono stati studiati problemi computazionali che scaturiscono dai principali modelli di code incontrati nelle applicazioni, tra cui problemi M/G/1, G/M/1, QBD, Non-Skip-Free, Tree-like. Lo scopo principale di queste ricerche è progettare e analizzare metodi efficienti per il calcolo del vettore di probabilità invariante per queste classi di problemi. In questo ambito, l'efficienza è valutata in termini di capacità di trattare con brevi tempi di calcolo problemi di dimensioni molto elevate, garantendo alta precisione numerica.

Sono state introdotte nuove metodologie numeriche di carattere avanzato basate sulla combinazione di strategie *divide et impera*, manipolazione di serie di potenze a coefficienti matriciali, uso della trasformata veloce di Fourier, e strumenti della teoria delle matrici di Toeplitz. I risultati ottenuti nella ricerca svolta hanno permesso di risolvere in tempo reale problemi applicativi nel campo delle reti di trasmissione che sarebbero stati intrattabili con gli algoritmi disponibili.

I primi lavori in questo ambito sono gli articoli [48, 4, 6], che forniscono e analizzano algoritmi numericamente stabili e a convergenza *doppiamente esponenziale* che continuano ad essere un attuale riferimento per i ricercatori nel settore. Il primo lavoro a riguardo è [48] che generalizza il metodo della riduzione ciclica introdotto da G. Golub negli anni 70. Il lavoro riceve 34 citazioni secondo WoS e 99 citazioni secondo Google Scholar.

Nel libro [1], della Oxford University Press, sono raccolti i principali risultati legati al trattamento numerico di catene di Markov con struttura mediante tecniche avanzate. Tutti gli algoritmi sono stati implementati in Fortran 90, mediante la realizzazione del pacchetto software "SMCSolver: A Fortran 90 software tool, with a user friendly GUI, for solving Structured Markov Chains" [70, 71, 75, 43] si è rivelato robusto, affidabile ed efficiente, ed è largamente usato nelle applicazioni.

La ricerca in questo settore è svolta in collaborazione con S. Chakravarthy (Kettering), C. He (Missouri-Kansas), G. Latouche (ULB Bruxelles), V. Ramaswami (AT&T Bell Labs), N.H. Rhee (Missouri-Kansas), K. Sohraby (Missouri-Kansas), B. Van Houdt (Antwerpen).

4. *Sistemi lineari con struttura e di grandi dimensioni.* Viene affrontato il problema della risoluzione di sistemi di grandi dimensioni dotati di struttura. Sono stati proposti un nuovi metodi efficienti, basati sull'uso del

concetto di rango di dislocamento e su strategie *divide et impera*, per la risoluzione di sistemi con matrice di Toeplitz a banda [15], oppure con struttura Toeplitz a due livelli, con applicazioni a problemi legati al recupero di immagini sfocate, con e senza rumore aggiunto [59, 64, 63, 50]

Nel lavoro [15] si fornisce un metodo di risoluzione di sistemi a banda di Toeplitz a basso costo computazionale. Il metodo si basa su una interpretazione a blocchi della matrice del sistema a cui viene applicato il metodo di riduzione ciclica. Si dimostra che tutte le matrici generate dal metodo hanno un *displacement rank* limitato superiormente da 4. Questo fatto, unito all'uso della FFT, permette di arrivare ad un algoritmo di risoluzione che ha costo lineare nelle dimensioni della matrice e lineare, a meno di un fattore logaritmico, nella dimensione della banda. Tale metodo è il metodo di riferimento negli articoli apparsi in letteratura su questo problema. Infatti il lavoro riceve 37 citazioni secondo WoS, 34 secondo Scopus e 64 secondo Google Scholar.

## Pubblicazioni

### Libri di ricerca

- [1] D. A. Bini, G. Latouche, and B. Meini. *Numerical methods for structured Markov chains*. Numerical Mathematics and Scientific Computation. Oxford University Press, New York, 2005. Oxford Science Publications.
- [2] D. A. Bini, B. Iannazzo, and B. Meini. *Numerical solution of algebraic Riccati equations*. Fundamentals of Algorithms, Vol. 9, 2012. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, PA.

### Articoli su rivista con *referee*

- [3] D. Bini and B. Meini. Solving certain queueing problems modelled by Toeplitz matrices. *Calcolo*, 30(4):395–420 (1995), 1993.
- [4] D. Bini and B. Meini. On the solution of a nonlinear matrix equation arising in queueing problems. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 17(4):906–926, 1996.
- [5] G. Anastasi, L. Lenzini, and B. Meini. Performance evaluation of a worst case model of the MetaRing MAC protocol with global fairness. *Perf. Eval.*, 29:127–151, 1997.
- [6] D. A. Bini and B. Meini. Improved cyclic reduction for solving queueing problems. *Numer. Algorithms*, 15(1):57–74, 1997.
- [7] B. Meini. An improved FFT-based version of Ramaswami's formula. *Comm. Statist. Stochastic Models*, 13(2):223–238, 1997.
- [8] B. Meini. New convergence results on functional iteration techniques for the numerical solution of  $M/G/1$  type Markov chains. *Numer. Math.*, 78(1):39–58, 1997.
- [9] B. Meini. Solving  $M/G/1$  type Markov chains: recent advances and applications. *Comm. Statist. Stochastic Models*, 14(1-2):479–496, 1998. Special issue in honor of Marcel F. Neuts.
- [10] B. Meini. Solving QBD problems: the cyclic reduction algorithm versus the invariant subspace method. *Adv. Perf. Anal.*, 1:215–225, 1998.
- [11] D. A. Bini and B. Meini. Inverting block Toeplitz matrices in block Hessenberg form by means of displacement operators: application to queueing problems. *Linear Algebra Appl.*, 272:1–16, 1998.
- [12] D. A. Bini and B. Meini. Exploiting the Toeplitz structure in certain queueing problems. *Calcolo*, 33(3-4):289–305 (1998). Toeplitz matrices: structures, algorithms and applications (Cortona, 1996).
- [13] P. Favati and B. Meini. Relaxed functional iteration techniques for the numerical solution of  $M/G/1$  type Markov chains. *BIT*, 38(3):510–526, 1998.
- [14] L. Lenzini, B. Meini, and E. Mingozzi. An efficient numerical method for performance analysis of contention MAC protocols: a case study (PRMA++). *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16:653–667, 1998.
- [15] D. A. Bini and B. Meini. Effective methods for solving banded Toeplitz systems. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 20(3):700–719 (electronic), 1999.
- [16] P. Favati and B. Meini. On functional iteration methods for solving nonlinear matrix equations arising in queueing problems. *IMA J. Numer. Anal.*, 19(1):39–49, 1999.
- [17] P. Favati and B. Meini. Solving certain queueing problems by means of regular splittings. *Appl. Math. Lett.*, 13(7):99–105, 2000.
- [18] D. A. Bini, L. Gemignani, and B. Meini. Factorization of analytic functions by means of Koenig's theorem and Toeplitz computations. *Numer. Math.*, 89(1):49–82, 2001.



- [19] C. He, B. Meini, and N. H. Rhee. A shifted cyclic reduction algorithm for quasi-birth-death problems. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 23(3):673–691 (electronic), 2001/02.
- [20] D. A. Bini, L. Gemignani, and B. Meini. Computations with infinite Toeplitz matrices and polynomials. *Linear Algebra Appl.*, 343/344:21–61, 2002. Special issue on structured and infinite systems of linear equations.
- [21] D. A. Bini, G. Latouche, and B. Meini. Solving matrix polynomial equations arising in queueing problems. *Linear Algebra Appl.*, 340:225–244, 2002.
- [22] B. Meini. Efficient computation of the extreme solutions of  $X + A^*X^{-1}A = Q$  and  $X - A^*X^{-1}A = Q$ . *Math. Comp.*, 71(239):1189–1204 (electronic), 2002.
- [23] D. A. Bini, G. Fiorentino, L. Gemignani, and B. Meini. Effective fast algorithms for polynomial spectral factorization. *Numer. Algorithms*, 34(2-4):217–227, 2003. International Conference on Numerical Algorithms, Vol. II (Marrakesh, 2001).
- [24] D. A. Bini, G. Latouche, and B. Meini. Solving nonlinear matrix equations arising in tree-like stochastic processes. *Linear Algebra Appl.*, 366:39–64, 2003. Special issue on structured matrices: analysis, algorithms and applications (Cortona, 2000).
- [25] D. A. Bini and B. Meini. Non-skip-free  $M/G/1$ -type Markov chains and Laurent matrix power series. *Linear Algebra Appl.*, 386:187–206, 2004.
- [26] C. He, B. Meini, N. H. Rhee, and K. Sohraby. A quadratically convergent Bernoulli-like algorithm for solving matrix polynomial equations in Markov chains. *Electron. Trans. Numer. Anal.*, 17:151–167 (electronic), 2004.
- [27] B. Meini. The matrix square root from a new functional perspective: theoretical results and computational issues. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 26(2):362–376 (electronic), 2004/05.
- [28] D. A. Bini, B. Meini, and I. M. Spitkovsky. Shift techniques and canonical factorizations in the solution of  $M/G/1$ -type Markov chains. *Stoch. Models*, 21(2-3):279–302, 2005.
- [29] D. A. Bini, N. J. Higham, and B. Meini. Algorithms for the matrix  $p$ th root. *Numer. Algorithms*, 39(4):349–378, 2005.
- [30] D. A. Bini, B. Iannazzo, G. Latouche, and B. Meini. On the solution of algebraic Riccati equations arising in fluid queues. *Linear Algebra Appl.*, 413(2-3):474–494, 2006.
- [31] B. Meini. Nonlinear matrix equations and structured linear algebra. *Linear Algebra Appl.*, 413(2-3):440–457, 2006.
- [32] C.-H. Guo, B. Iannazzo, and B. Meini. On the doubling algorithm for a (shifted) nonsymmetric algebraic Riccati equation. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 29(4):1083–1100, 2007.
- [33] D. A. Bini, B. Meini, and F. Poloni. Fast solution of a certain Riccati equation through Cauchy-like matrices. *Electronic Transactions on Numerical Analysis*, 33:84–104, 2008.
- [34] D. A. Bini, B. Meini, and V. Ramaswami. A probabilistic interpretation of cyclic reduction and its relationships with logarithmic reduction. *Calcolo*, 45(3):207–216, 2008.
- [35] D. A. Bini and B. Meini. The cyclic reduction algorithm: from Poisson equation to stochastic processes and beyond. *Numerical Algorithms*, 51:23–61, 2009.
- [36] D. A. Bini, B. Meini, and V. Ramaswami. A note on computing the tail decay of  $M/G/1$ -type Markov renewal processes. *Stochastic Models*, 25:569–579, 2009.
- [37] D.-A. Bini, B. Meini, and F. Poloni. An effective matrix geometric mean satisfying the Ando-Li-Mathias properties. *Mathematics of Computation*, 79:437–452, 2010.
- [38] D. A. Bini, B. Meini, and F. Poloni. Transforming algebraic Riccati equations into unilateral quadratic matrix equations. *Numerische Mathematik*, 116:553–578, 2010.
- [39] D. A. Bini, B. Meini, and F. Poloni. On the solution of a quadratic vector equation arising in Markovian Binary Trees. *Numerical Linear Algebra with Applications*, 18:981–991, 2011.
- [40] B. Iannazzo and B. Meini. Palindromic matrix polynomials, matrix functions and integral representations. *Linear Algebra and Its Applications*, 434:174–184, 2011.
- [41] B. Meini and F. Poloni. A Perron iteration for the solution of a quadratic vector equation arising in Markovian binary trees. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 32:248–261, 2011.
- [42] D. A. Bini, P. Favati, and B. Meini. A compressed cyclic reduction for QBDs with low rank upper and lower transitions. *ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review*, 39:33–33, 2012.
- [43] D. A. Bini, B. Meini, J. F. Pérez, S. Steffè, and B. Van Houdt. SMCSolver and Q-MAM: tools for matrix-analytic methods. *ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review*, 39:46–46, 2012.
- [44] B. Meini. A shift-and-deflate technique for quadratic matrix polynomials. *Linear Algebra and Its Applications*, 438:1946–1961, 2013.

- [45] B. Meini. On the numerical solution of a structured nonsymmetric algebraic riccati equation. *Performance Evaluation*, 70:682–690, 2013.
- [46] B. Iannazzo and B. Meini. The palindromic cyclic reduction and related algorithms. *Calcolo*, 52:25–43, 2015.
- [47] D. A. Bini, S. Dendievel, G. Latouche, and B. Meini. Computing the exponential of large block-triangular block-Toeplitz matrices encountered in fluid queues. *Linear Algebra and Its Applications*, 502:387–419, 2016.

## Capitoli in libri

- [48] D. A. Bini and B. Meini. On cyclic reduction applied to a class of Toeplitz-like matrices arising in queueing problems. In W. J. Stewart, editor, *Computations with Markov Chains*, pages 21–38. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [49] D. A. Bini and B. Meini. Fast algorithms with applications to Markov chains and queueing models. In *Fast reliable algorithms for matrices with structure*, pages 211–243. SIAM, Philadelphia, PA, 1999.
- [50] D. A. Bini and B. Meini. Solving block banded block Toeplitz systems with structured blocks: algorithms and applications. In D. A. Bini, E. Tyrtyshnikov, and P. Yalamov, editors, *Structured Matrices: Recent Developments in Theory and Computation*, pages 21–42. Science Publisher Inc., 2001.
- [51] D. A. Bini, B. Iannazzo, B. Meini, and F. Poloni. *Matrix Methods: Theory, Algorithms and Applications Dedicated to the Memory of Gene Golub*, Chapter “Nonsymmetric algebraic Riccati equations associated with an M-matrix: recent advances and algorithms”, pages 176–209. WORLD SCIENTIFIC, 2010.
- [52] D. A. Bini and B. Meini. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Chapter “Markov Chains of the M/G/1-Type”. 2011.
- [53] B. Meini. *Handbook of linear algebra*, Chapter “Matrix equations”, pages (19–1)–(19–14). CRC Press-Taylor & Francis Group, USA, 2013.
- [54] B. Meini. *Handbook of linear algebra*, Chapter “Markov chains”, pages (72–1)–(72–16). CRC Press-Taylor & Francis Group, 2013.
- [55] B. Meini. Markov chains. In N. J. Higham, M. R. Dennis, P. Glendinning, P. A. Martin, F. Santosa, and J. Tanner, editors, *The Princeton Companion to Applied Mathematics*, pages 116–117. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 2015.

## Articoli su proceedings di convegni

- [56] D. A. Bini and B. Meini. Using displacement structure for solving non-skip-free M/G/1 type Markov chains. In A. Alfa and S. Chakravathy, editors, *Advances in Matrix Analytic Methods for Stochastic Models - Proceedings of the 2nd international conference on matrix analytic methods*, pages 17–37. Notable Publications Inc, NJ, 1998.
- [57] P. Favati and B. Meini. On functional iteration methods for solving M/G/1 type Markov chains. In A. Alfa and S. Chakravathy, editors, *Advances in Matrix Analytic Methods for Stochastic Models - Proceedings of the 2nd international conference on matrix analytic methods*, pages 39–54. Notable Publications Inc, NJ, 1998.
- [58] D. A. Bini, S. Chakravathy, and B. Meini. A new algorithm for the design of finite capacity service units. In B. Plateau, W. J. Stewart, and M. Silva, editors, *Numerical Solution of Markov Chains, 3rd International Workshop, Saragoza (Spain), Sept. 1999*, pages 247–260. Prensas Unversitarias de Zaragoza, 1999.
- [59] D. A. Bini and B. Meini. Solving block banded block Toeplitz systems with banded Toeplitz blocks. In F. Luk, editor, *Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations IX*, pages 300–311. Proceedings of SPIE, 1999.
- [60] D. A. Bini and B. Meini. Solving block banded block Toeplitz systems with structured blocks: new algorithms and open problems. In *Large-scale scientific computations of engineering and environmental problems, II (Sozopol, 1999)*, volume 73 of *Notes Numer. Fluid Mech.*, pages 15–24. Vieweg, Braunschweig, 2000.
- [61] D. A. Bini, S. Chakravathy, and B. Meini. Control of the BMAP/PH/1/K queue with group services. In G. Latouche and P. Taylor, editors, *Advances in Algorithmic Methods for Stochastic Models*, pages 57–72. Notable Publications, New Jersey, USA, 2000. Proceedings of the Third Conference on Matrix Analytic Methods.
- [62] D. A. Bini, B. Meini, and V. Ramaswami. Analyzing M/G/1 paradigms through QBDs: the role of the block structure in computing the matrix  $G$ . In G. Latouche and P. Taylor, editors, *Advances in Algorithmic Methods for Stochastic Models*, pages 73–86. Notable Publications, New Jersey, USA, 2000. Proceedings of the Third Conference on Matrix Analytic Methods.
- [63] D. A. Bini, A. Farusi, G. Fiorentino, and B. Meini. On the regularized solution of block banded block Toeplitz systems. In F. Luk, editor, *Proceedings of SPIE*, volume 4116, pages 135–146, 2000.

- [64] D. A. Bini and B. Meini. Approximate displacement rank and applications. In *Structured matrices in mathematics, computer science, and engineering, II (Boulder, CO, 1999)*, volume 281 of *Contemp. Math.*, pages 215–232. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2001.
- [65] C. H. Foh, B. Meini, B. Wydrowski, and M. Zukerman. Modeling and performance evaluation of gprs. In *Proceedings, IEEE VTC 2001, Rhodes, Greece*, pages 2108–2112, 2001.
- [66] B. Meini. Matrix equations and structures: efficient solution of special discrete algebraic Riccati equations. In *Numerical analysis and its applications (Rousse, 2000)*, volume 1988 of *Lecture Notes in Comput. Sci.*, pages 578–585. Springer, Berlin, 2001.
- [67] M. Bladt, B. Meini, M. F. Neuts, and B. Sericola. Distributions of reward functions on continuous-time Markov chains. In *Matrix-analytic methods (Adelaide, 2002)*, pages 39–62. World Sci. Publ., River Edge, NJ, 2002.
- [68] D. A. Bini, L. Gemignani, and B. Meini. Solving certain matrix equations by means of Toeplitz computations: algorithms and applications. In *Fast algorithms for structured matrices: theory and applications (South Hadley, MA, 2001)*, volume 323 of *Contemp. Math.*, pages 151–167. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2003.
- [69] L. Lenzini, B. Meini, E. Mingozzi, and G. Stea. An M/G/1 queuing system with multiple vacations to assess the performance of a simplified deficit round robin model. In *Proc. Tools for Performance Evaluation, Urbana (USA)*, volume 1, pages 134–151, 2003.
- [70] D. Bini, B. Meini, S. Steffè, and B. V. Houdt. Structured Markov chains solver: algorithms. In *Proceedings of Valuetools, ACM, Pisa (Italy)*, 2006.
- [71] D. Bini, B. Meini, S. Steffè, and B. V. Houdt. Structured Markov chains solver: software tools. In *Proceedings of Valuetools, ACM, Pisa (Italy)*, 2006.
- [72] D. A. Bini, B. Iannazzo, B. Meini, and F. Poloni. Nonsymmetric algebraic Riccati equations associated with an M-matrix: recent advances and algorithms. In D. Bini, B. Meini, V. Ramaswami, M.-A. Rémiche, and P. Taylor, editors, *Numerical Methods for Structured Markov Chains*, number 07461 in Dagstuhl Seminar Proceedings, Dagstuhl, Germany, 2008.
- [73] D. A. Bini, B. Meini, and F. Poloni. From algebraic Riccati equations to unilateral quadratic matrix equations: old and new algorithms. In D. Bini, B. Meini, V. Ramaswami, M.-A. Rémiche, and P. Taylor, editors, *Numerical Methods for Structured Markov Chains*, number 07461 in Dagstuhl Seminar Proceedings, Dagstuhl, Germany, 2008.
- [74] D. A. Bini, B. Meini, and V. Ramaswami. On the tail decay of M/G/1-type Markov renewal processes. In D. Bini, B. Meini, V. Ramaswami, M.-A. Rémiche, and P. Taylor, editors, *Numerical Methods for Structured Markov Chains*, number 07461 in Dagstuhl Seminar Proceedings, Dagstuhl, Germany, 2008.
- [75] D. A. Bini, B. Meini, S. Steffè, and B. Van Houdt. Structured Markov chains solver: Tool extension. In *Proceedings CD of the Fourth International ICST Conference on Performance Evaluation Methods and Tools*, pages 1–7, New York, October 11–16, 2009. ACM Digital Library.
- [76] D. A. Bini, B. Meini, and F. Poloni. On the solution of a quadratic vector equation arising in Markovian binary trees. In *Proceedings of the 6th international workshop on the numerical solution of Markov chains (NSMC) 2010*, pages 10–12, 2010.
- [77] D. A. Bini, P. Favati, and B. Meini. A compressed cyclic reduction for QBD processes with low-rank upper and lower transitions. In *Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models*, pages 25–40. Springer New York, 2013.