

Università degli Studi di Roma “La Sapienza”
Anno Accademico 2003-2004

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI
CORSO DI LAUREA IN MATEMATICA

Alcuni appunti per il corso di
METODI PROBABILISTICI
PER L'ECONOMIA E LA FINANZA

Giovanna Nappo
A.A. 2003/04

Indice

Introduzione	iii
1 Richiami su spazi di probabilità	1
1.1 Esempi di spazi di probabilità	1
1.2 Variabili aleatorie	4
1.3 Valori attesi	7
2 Valori attesi e probabilità condizionali	9
2.1 Definizioni	9
2.2 Esempi	11
2.3 Proprietà del valore atteso condizionale	20
2.4 Equivalenza tra le definizioni di valore atteso condizionale per variabili aleatorie di quadrato sommabile	23
2.5 Dimostrazioni delle proprietà del valore atteso condizionale	24
2.6 Probabilità condizionali regolari	28
2.7 Esempi	30
3 Martingale	34
3.1 Esempi di martingale e di submartingale	35
3.2 Decomposizione di Doob	41
3.3 Martingale, submartingale e tempi d'arresto	44
3.4 Alcune proprietà dei tempi d'arresto	46
3.5 Caso a tempo discreto	48
3.6 Applicazione: la rovina del giocatore con le martingale	49
3.7 Disuguaglianza di Kolmogorov per submartingale non negative	51
3.8 Convergenza di martingale	52
3.9 Disuguaglianza di Doob	53
4 Mercato (B, S): investimenti, proprietà e caratteristiche	55
4.1 Struttura del mercato (B, S)	55
4.1.1 Strategia di investimento di un portfolio	56
4.1.2 Mercato scontato (\tilde{B}, \tilde{S})	60
4.2 Nozione di copertura. Prezzo superiore e inferiore.	61
4.2.1 Mercato completo e incompleto	65
4.3 Mercato senza opportunità di arbitraggio	67
4.4 Primo e Secondo Teorema Fondamentale	68
4.4.1 Sufficienza del Teorema APT1	72
4.4.2 Necessità del Teorema APT1: trasformazione condizionale di Esscher	74

5	Il modello di Cox Ross Rubinstein (<i>CRR-model</i>)	83
5.1	Caratteristiche del modello	83
5.1.1	CRR è arbitrage-free e completo	84
5.1.2	S -rappresentabilità	87
5.2	Prezzi di copertura per opzioni Europee	88
5.2.1	Calcolo del prezzo di copertura per l'opzione call	90
6	Processi aleatorie a tempo continuo	94
6.1	Processi aleatori, definizioni ed esempi	94
6.2	Osservazione sulla definizione di un processo solo attraverso le sue distribuzioni finito dimensionali	100
6.3	Esistenza di una versione continua: criterio di Chensov-Kolmogorov.	101
6.4	Le traiettorie del processo di Wiener non sono a variazione limitata	102
6.5	Processi ad incrementi indipendenti ed omogenei	104
6.6	Esempi di martingale a tempo continuo	107
6.7	Processi di Markov regolari	110
6.7.1	Processo di Orstein-Ulhenbeck	114
6.7.2	Moto browniano geometrico e modello di Black-Scholes	117
6.8	Appendice: variabili Gaussiane	121
7	Proprietà del moto browniano	124
7.1	Trasformazioni del moto browniano	124
7.2	Proprietà di Markov forte per il processo di Wiener	124
7.3	Principio di riflessione	126
7.4	Tempi di uscita da una striscia	129
	Bibliografia	132

Introduzione

Questi appunti sono una raccolta di vari appunti, scritti durante vari anni di insegnamento di corsi universitari sui processi aleatori. E questo spiega la ancora non completa coerenza della presentazione degli argomenti. Nella preparazione delle lezioni ho utilizzato diversi testi e i principali sono il testo di Baldi [?] e quello di Shiryaev [8]. Ma andrebbero citati anche altri testi, come ad esempio il testo di Ross, *Introduction to stochastic processes*. Inoltre, per le parti dedicate agli esempi in finanza, ho utilizzato, rimaneggiandole, anche alcune parti delle tesi di laurea di due studentesse Valeria Belleudi e Stefania Latella, che ringrazio per il lavoro svolto. Questo spiega la grande discontinuità di stile delle varie parti di questi appunti.

Quest'anno il corso di Metodi Probabilistici per l'Economia e la Finanza è divenuto un corso complementare della laurea triennale in Matematica, di conseguenza si è posto il problema di riuscire a presentare argomenti come il valore atteso condizionato e le martingale in modo che uno studente con un minimo di bagaglio di conoscenze in probabilità possa ugualmente capire l'utilità di questi concetti e le sue applicazioni in finanza.

Lo sforzo principale fatto consiste appunto in questo tentativo, ma per ora si tratta solo di un tentativo preliminare.

Nonostante ciò rimangono nel testo alcune note che erano state scritte per studenti con un bagaglio di di conoscenze più elevato, quelle parti però non sono state ancora riguardate.

Capitolo 1

Richiami su spazi di probabilità

1.1 Esempi di spazi di probabilità

Come dovrebbe essere noto uno spazio di probabilità è una terna $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, dove

\mathcal{F} è una σ -*algebra*, ovvero \mathcal{F} è una famiglia di sottoinsiemi di Ω , cioè \mathcal{F} è un sottoinsieme di $\mathcal{P}(\Omega)$, tale che

$$\Omega \in \mathcal{F}; \tag{1.1}$$

$$\text{se } A \in \mathcal{F}, \text{ allora } A^c \in \mathcal{F}; \tag{1.2}$$

$$\text{se } A_n \in \mathcal{F}, n \in \mathbb{N}, \text{ allora } \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{F}; \tag{1.3}$$

\mathbb{P} è una *misura di probabilità*, ovvero

$$\mathbb{P} : \mathcal{F} \mapsto [0, 1]; \quad A \mapsto \mathbb{P}(A)$$

con le proprietà che

$$\mathbb{P}(\Omega) = 1; \tag{1.4}$$

$$\text{se } A_n \in \mathcal{F}, n \in \mathbb{N}, \text{ con } A_n \cap A_m = \emptyset \text{ per } n \neq m, \tag{1.5}$$

$$\text{allora } \mathbb{P}\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \mathbb{P}(A_n).$$

La σ -algebra \mathcal{F} rappresenta l'informazione disponibile, ovvero gli unici eventi di cui abbiamo la possibilità di verificare se si sono verificati oppure no sono gli eventi appartenenti a \mathcal{F} .

Vediamo ora alcuni esempi elementari di spazi di probabilità:

Esempio 1.1. Qualunque sia Ω , la σ -algebra banale $\mathcal{F} = \{\emptyset, \Omega\}$ è una σ -algebra, e necessariamente $\mathbb{P}(\Omega) = 1$ e $\mathbb{P}(\emptyset) = 0$.

Esempio 1.2. Qualunque sia Ω , preso un sottoinsieme proprio A di Ω la σ -algebra $\mathcal{F} = \{\emptyset, A, A^c, \Omega\}$ è una σ -algebra, e necessariamente $\mathbb{P}(\Omega) = 1$, $\mathbb{P}(\emptyset) = 0$, $\mathbb{P}(A) = p$, $\mathbb{P}(A^c) = 1 - p$, per un $p \in [0, 1]$.

Esempio 1.3. Qualunque sia Ω , sia $\{H_m, m = 1, 2, \dots, N\}$ una **partizione finita** di Ω , cioè se

$$H_n \cap H_m = \emptyset \text{ per } n \neq m, n, m \in \{1, 2, \dots, N\}$$

$$\bigcup_{m=1}^N H_m = \Omega,$$

allora la famiglia $\mathcal{M} = \{A = \bigcup_{m \in I} H_m, \text{ al variare di } I \subset \{1, 2, \dots, N\}\}$, (con la convenzione che $\bigcup_{m \in \emptyset} H_m = \emptyset$) è una σ -algebra. Inoltre se p_1, p_2, \dots, p_N sono numeri non negativi, a somma 1, ovvero

$$p_m \geq 0, m = 1, 2, \dots, N, \quad \sum_{m=1}^N p_m = 1,$$

allora $\mathbb{P} : \mathcal{M} \mapsto [0, 1]; A \mapsto \mathbb{P}(A)$, con

$$\mathbb{P}(A) = \sum_{m \in I} p_m, \quad \text{per } A = \bigcup_{m \in I} H_m, \quad (1.6)$$

definisce una probabilità su (Ω, \mathcal{M}) .

Esempio 1.4. Le proprietà dell'esempio precedente valgono anche nel caso di una **partizione numerabile** $\{H_m, m \in \mathbb{N}\}$ con i dovuti cambiamenti: cioè, se

$$H_n \cap H_m = \emptyset \text{ per } n \neq m, n, m \in \mathbb{N},$$

$$\bigcup_{m \in \mathbb{N}} H_m = \Omega,$$

allora la famiglia

$$\mathcal{M} = \{A = \bigcup_{m \in I} H_m, \text{ al variare di } I \subset \mathbb{N}\},$$

(con la convenzione che $\bigcup_{m \in \emptyset} H_m = \emptyset$), è una σ -algebra¹.

¹La verifica è banale:

$$\Omega = \bigcup_{m \in \mathbb{N}} H_m, \text{ ovvero } I = \mathbb{N}$$

$$\text{se } A = \bigcup_{m \in I} H_m, \text{ allora } A^c = \bigcup_{m \in I^c} H_m$$

$$\text{se } A_n = \bigcup_{m \in I_n} H_m, n \geq 1, \text{ allora } \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n = \bigcup_{m \in I} H_m, \text{ per } I = \bigcup_{n=1}^{\infty} I_n.$$

Inoltre se $p_1, p_2, \dots, p_m, \dots$ sono numeri non negativi, somma 1, ovvero

$$p_m \geq 0, m \in \mathbb{N}, \quad \sum_{m \in \mathbb{N}} p_m = 1,$$

allora $\mathbb{P} : \mathcal{M} \mapsto [0, 1]; A \mapsto \mathbb{P}(A)$, con

$$\mathbb{P}(A) = \sum_{m \in I} p_m, \quad \text{per } A = \bigcup_{m \in I} H_m, \quad (1.7)$$

definisce una probabilità su $(\Omega, \mathcal{F})^2$.

Elenchiamo adesso alcune **proprietà e notazioni relative alle σ -algebre**:

1 l'intersezione di σ -algebre è una σ -algebra

Sia $\{\mathcal{G}_\alpha, \alpha \in \Lambda\}$ una famiglia di σ -algebre, allora $\mathcal{F} := \bigcap_{\alpha \in \Lambda} \mathcal{G}_\alpha$ è una σ -algebra³.

2 l'unione di σ -algebre non è (in generale) una σ -algebra

Basta mostrare con un controesempio che l'unione di due σ -algebre non è una σ -algebra: ad esempio se $\mathcal{G}_i = \{\emptyset, A_i, A_i^c, \Omega\}$, con $A_1 \cap A_2 \neq \emptyset, A_1, A_2$, allora $\mathcal{G}_1 \cup \mathcal{G}_2 = \{\emptyset, A_1, A_2, A_1^c, A_2^c, \Omega\}$ non è una σ -algebra.

3 la σ -algebra generata da una collezione di eventi

Sia \mathcal{K} un sottoinsieme di $\mathcal{P}(\Omega)$, l'insieme delle parti di Ω , allora

$$\sigma(\mathcal{K}) := \bigcap_{\mathcal{G} : \mathcal{K} \subseteq \mathcal{G}}$$

²La funzione $\mathbb{P} : \mathcal{M} \mapsto [0, 1]$ definita in (1.7) è una probabilità, infatti

$$\mathbb{P}(\Omega) = \sum_{m \in \mathbb{N}} p_m = 1,$$

$$\text{se } A_n = \bigcup_{m \in I_n} H_m \in \mathcal{M}, n \in \mathbb{N}, \text{ con } A_n \cap A_{n'} = \emptyset \text{ per } n \neq n',$$

$$\text{allora } \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n = \bigcup_{m \in I} H_m \text{ con } I = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_n, \text{ e con } I_n \cap I_{n'} = \emptyset \text{ per } n \neq n',$$

$$\text{e quindi } \mathbb{P}\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \mathbb{P}(A) = \sum_{\ell \in I} p_\ell = \sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{m \in I_n} p_m = \sum_{n \in \mathbb{N}} \mathbb{P}(A_n),$$

³La verifica è banale:

$\Omega \in \mathcal{F}$, in quanto $\Omega \in \mathcal{G}_\alpha$, per ogni $\alpha \in \Lambda$;

se $A \in \mathcal{F}$, cioè se $A \in \mathcal{G}_\alpha$, per ogni $\alpha \in \Lambda$, allora $A^c \in \mathcal{G}_\alpha$, per ogni $\alpha \in \Lambda$, e quindi $A^c \in \mathcal{F}$;

se $A_n \in \mathcal{F}, n \in \mathbb{N}$ cioè se $A_n \in \mathcal{G}_\alpha$, per ogni $\alpha \in \Lambda, n \in \mathbb{N}$ allora $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{G}_\alpha$, per ogni $\alpha \in \Lambda$, e quindi $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{F}$;

è la σ -algebra⁴ generata da \mathcal{K} .

In particolare quindi la σ -algebra \mathcal{M} , generata dalla partizione $\{H_m; m \in \mathbb{N}\}$ come nell'Esempio 1.4, coincide con $\sigma(\{H_m; m \in \mathbb{N}\})$, in quanto, come già visto \mathcal{M} è una σ -algebra, e inoltre ogni σ -algebra che contenga $\{H_m; m \in \mathbb{N}\}$, deve necessariamente contenere tutte le unioni del tipo $\cup_{m \in I} H_m$.

4 la σ -algebra generata da una collezione di σ -algebre

Nel caso in cui $\mathcal{K} = \bigcup_{\alpha \in \Lambda} \mathcal{G}_\alpha$, dove \mathcal{G}_α sono σ -algebre, allora si pone

$$\bigvee_{\alpha \in \Lambda} \mathcal{G}_\alpha := \sigma\left(\bigcup_{\alpha \in \Lambda} \mathcal{G}_\alpha\right).$$

In particolare se $\mathcal{M} = \sigma(\{H_m; m \in \mathbb{N}\})$ e $\mathcal{N} = \sigma(\{K_\ell; \ell \in \mathbb{N}\})$, allora

$$\mathcal{M} \vee \mathcal{N} = \sigma(\{H_m \cap K_\ell; m \in \mathbb{N}, \ell \in \mathbb{N}\}) = \left\{E = \bigcup_{(m,\ell) \in J} H_m \cap K_\ell; \text{ con } J \subseteq \mathbb{N} \times \mathbb{N}\right\}.$$

5 la σ -algebra dei Boreliani

Nel caso in cui $\mathcal{K} = \mathcal{A}$, la famiglia degli aperti di \mathbb{R}^k , allora

$$\mathcal{B}(\mathbb{R}^k) := \sigma(\mathcal{A})$$

è detta σ -algebra dei boreliani, o σ -algebra di Borel, ed ogni elemento di \mathcal{I} di $\mathcal{B}(\mathbb{R}^k)$ è detto **boreliano**.

1.2 Variabili aleatorie

Definizione 1.1. Dato uno spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ ⁵, una **variabile aleatoria reale** X è una funzione \mathcal{F} -misurabile, ovvero una funzione

$$X : \Omega \mapsto \mathbb{R}; \quad \omega \mapsto X(\omega),$$

tale che la controimmagine di ogni aperto $\mathcal{O} \in \mathcal{A}$ sia un elemento di \mathcal{F} ⁶, cioè tale che $X^{-1}(\mathcal{O} := \{\omega \text{ tali che } X(\omega) \in \mathcal{O}\}) \in \mathcal{F}$, per ogni aperto $\mathcal{O} \in \mathcal{A}$.

Si dice anche che X è una **variabile aleatoria \mathcal{F} -misurabile**.

Una definizione analoga vale nel caso di variabili aleatorie multidimensionali

$$\mathbf{X} : \Omega \mapsto \mathbb{R}^k; \quad \omega \mapsto \mathbf{X}(\omega) = (X_1(\omega), \dots, X_k(\omega)),$$

basta infatti sostituire \mathbb{R} con \mathbb{R}^k .

⁴Il fatto che $\bigcap_{\mathcal{G} : \mathcal{K} \subseteq \mathcal{G}}$ sia una σ -algebra, deriva dalla proprietà che l'intersezione di σ -algebre è una σ -algebra.

⁵In realtà basta che ci sia uno spazio **probabilizzabile**, ovvero basta solo la coppia (Ω, \mathcal{F}) , mentre non è necessario specificare la misura di probabilità \mathbb{P} .

⁶Si noti l'analogia con la definizione di funzione continua $f : \mathbb{R}^k \mapsto \mathbb{R}^d$, come una funzione tale che le controimmagini di aperti sono aperti.

Vediamo alcuni esempi di variabili aleatorie \mathcal{F} -misurabili, al variare della σ -algebra \mathcal{F} .

Esempio 1.5. Se $\mathcal{F} = \{\emptyset, \Omega\}$, allora le uniche variabili aleatorie reali X \mathcal{F} -misurabili sono le costanti:

Se $X : \Omega \mapsto \mathbb{R}; \omega \mapsto X(\omega) = c$, allora $X^{-1}(\mathcal{O})$ è l'evento impossibile (=insieme vuoto \emptyset), se $c \notin \mathcal{O}$, oppure è l'insieme certo (= Ω), se $c \in \mathcal{O}$.

Viceversa se $X : \Omega \mapsto \mathbb{R}; \omega \mapsto X(\omega)$ non è costante allora X assume almeno due valori c_1 e c_2 distinti (cioè esistono ω_i tale che $X(\omega_i) = c_i$, per $i = 1, 2$, con $c_1 \neq c_2$). Quindi se $c_1 \in \mathcal{O}$, ma $c_2 \notin \mathcal{O}$, allora $\omega_1 \in X^{-1}(\mathcal{O})$, mentre $\omega_2 \notin X^{-1}(\mathcal{O})$, ovvero $\emptyset \subset X^{-1}(\mathcal{O}) \subset \Omega$ (dove le inclusioni sono in senso stretto), e quindi X non è \mathcal{F} -misurabile.

Si noti che l'esempio precedente mostra anche che tutte le variabili aleatorie costanti sono misurabili rispetto a qualunque σ -algebra ($\{\emptyset, \Omega\} \subset \mathcal{F}$, per ogni σ -algebra \mathcal{F}).

Esempio 1.6. Sia $\{H_m, m \in \mathbb{N}\}$ una partizione numerabile, e sia \mathcal{M} come nell'esempio 1.4. Allora $X : \Omega \mapsto \mathbb{R}; \omega \mapsto X(\omega)$ è \mathcal{M} -misurabile, se e solo se esiste una successione di costanti $\{c_m, m \in \mathbb{N}\}$ ⁷, tale che

$$X(\omega) = \sum_{m \in \mathbb{N}} c_m \mathbb{I}_{H_m}(\omega). \quad (1.8)$$

Se X è definita come in (1.8) allora X è \mathcal{M} -misurabile, infatti per ogni aperto \mathcal{O} ,

$$X^{-1}(\mathcal{O}) = \bigcup_{m: c_m \in \mathcal{O}} H_m,$$

ovvero $X^{-1}(\mathcal{O}) = \bigcup_{m \in I} H_m \in \mathcal{M}$, per $I = \{m : c_m \in \mathcal{O}\}$.

Viceversa se X è \mathcal{M} -misurabile, cioè, per ogni aperto \mathcal{O} , esiste un $I \subseteq \mathbb{N}$ tale che

$$X^{-1}(\mathcal{O}) = \bigcup_{m \in I} H_m,$$

allora qualunque sia $c \in \mathbb{R}$, preso \mathcal{O}^n l'intervallo aperto $(c - 1/n, c + 1/n)$ si ha che

$$X^{-1}(\{c\}) = X^{-1}\left(\bigcap_n \mathcal{O}^n\right) = \bigcap_n X^{-1}(\mathcal{O}^n) = \bigcap_n \bigcup_{m \in I^n} H_m = \bigcup_{m \in \bigcap_n I^n} H_m \in \mathcal{M},$$

Esempio 1.7. Sia $X : \Omega \mapsto \mathbb{R}; \omega \mapsto X(\omega)$, una funzione discreta, ovvero tale che l'immagine $X(\Omega) = \{x \in \mathbb{R}, \text{ tali che esiste un } \omega \text{ con } X(\omega) = x\}$ di X sia un insieme numerabile (finito o infinito), cioè $X(\Omega) = \{x_m, m \in \mathbb{N}\}$, con $x_m \neq x_n$ per $m \neq n$. Allora

$$X(\omega) = \sum_{m \in \mathbb{N}} x_m \mathbb{I}_{H_m}(\omega). \quad (1.9)$$

⁷Si noti che non si assume che i valori di $\{c_m\}$ siano tutti distinti, ad esempio nel caso della successione costante, cioè $c_m = c$ per ogni $m \in \mathbb{N}$, si trova una variabile aleatoria costante.

dove

$$H_m = X^{-1}(\{x_m\}).$$

Si noti che $\{H_m, m \in \mathbb{N}\}$ forma una partizione numerabile.

La funzione X è una variabile aleatoria **semplice o elementare**, **\mathcal{F} -misurabile**, se e solo se

$$H_m = X^{-1}(\{x_m\}) \in \mathcal{F}, \text{ per ogni } m \in \mathbb{N},$$

come è immediato da (1.9), osservando che, come nel caso precedente,

$$X^{-1}(\mathcal{O}) = \bigcup_{m: x_m \in \mathcal{O}} H_m.$$

Si può dimostrare che

- 1 se X è una variabile aleatoria \mathcal{F} -misurabile, allora la controimmagine $X^{-1}(\mathcal{I}) \in \mathcal{F}$, per ogni boreliano $\mathcal{I} \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$,
- 2 la variabile aleatoria \mathbf{X} è \mathcal{F} -misurabile, se e solo se ciascuna componente X_i è \mathcal{F} -misurabile⁸, per ogni $i = 1, \dots, k$. In particolare $X^{-1}(\{x\}) \in \mathcal{F}$, per ogni $x \in \mathbb{R}$, in quanto $\{x\} = \bigcap_n (x - 1/n, x + 1/n)$.

Connessa con la precedente Definizione 1.1 è la seguente definizione:

Definizione 1.2. Sia data una funzione $\mathbf{X} : \Omega \mapsto \mathbb{R}^k$; $\omega \mapsto \mathbf{X}(\omega) = (X_1(\omega), \dots, X_k(\omega))$. Si dice **σ -algebra generata da \mathbf{X}** , la σ -algebra

$$\sigma(\mathbf{X}) = \bigcap_{\mathcal{G} \in \mathcal{R}^{\mathbf{X}}} \mathcal{G}$$

dove $\mathcal{R}^{\mathbf{X}}$ è la famiglia delle σ -algre, per le quali \mathbf{X} è \mathcal{G} -misurabile⁹.

Si dimostra che

- 3 La σ -algebra generata da \mathbf{X} , si può caratterizzare come:

$$\sigma(\mathbf{X}) = \{A = \mathbf{X}^{-1}(\mathcal{I}), \text{ per } \mathcal{I} \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^k)\},$$

- 4 la funzione \mathbf{X} è \mathcal{F} -misurabile, se e solo se $\sigma(\mathbf{X}) \subseteq \mathcal{F}$,
- 5 le variabili aleatorie $\sigma(\mathbf{X})$ -misurabili a valori in \mathbb{R}^d sono tutte e sole le variabili aleatorie \mathbf{Z} per le quali esiste una funzione g boreliana¹⁰ tale che

$$\mathbf{Z} = g(\mathbf{X}).$$

⁸Dimostriamo solo la necessità, che è immediata: basta prendere $\mathcal{O} = \underbrace{\mathbb{R} \times \dots \times \mathbb{R}}_{i-1 \text{ volte}} \times \mathcal{O}_i \times \underbrace{\mathbb{R} \times \dots \times \mathbb{R}}_{k-i \text{ volte}}$.

⁹La famiglia $\mathcal{R}^{\mathbf{X}}$ non è vuota, in quanto contiene almeno $\mathcal{G} = \mathcal{P}(\Omega)$, l'insieme delle parti di Ω .

¹⁰Una funzione $g : \mathbb{R}^k \mapsto \mathbb{R}^d$, si dice boreliana se è una funzione tale che le controimmagini di aperti sono boreliani.

Ovviamente le funzioni continue sono boreliane. Sono boreliane anche le funzioni continue a tratti, o meglio ancora costanti a tratti.

Per chi non avesse familiarità con i concetti di misurabilità può pensare a queste funzioni, o a funzioni che siano limite puntuale di funzioni di uno dei due tipi precedenti.

Esempio 1.8. Sia X una funzione semplice, come in Esempio 1.7, allora

$$\sigma(X) = \sigma(\{H_m, m \in \mathbb{N}\}) = \{A = \bigcup_{m \in I} H_m; I \subseteq \mathbb{N}\},$$

dove $H_m = X^{-1}(\{x_m\})$.

Inoltre tutte e sole le variabili aleatorie $\sigma(X)$ -misurabili sono le funzioni

$$Z : \Omega \mapsto \mathbb{R}; \omega \mapsto Z(\omega) := \sum_m c_m \mathbb{I}_{H_m},$$

come discende immediatamente dall'Esempio 1.6. Di conseguenza se $g : \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$ tale che $g(x_m) = c_m$, per ogni $m \in \mathbb{N}$, allora

$$Z(\omega) := \sum_m c_m \mathbb{I}_{H_m} = Z(\omega) = \sum_m g(x_m) \mathbb{I}_{X^{-1}(\{x_m\})}(\omega) = \sum_m g(x_m) \mathbb{I}_{\{x_m\}}(X(\omega)) = g(X(\omega)).$$

Terminiamo questa sezione, ricordando che le operazioni di massimo, minimo, somma, prodotto, di due funzioni misurabili, danno luogo a funzioni misurabili: quindi se X ed Y sono variabili aleatorie \mathcal{F} -misurabili, lo sono anche $X \vee Y = \max(X, Y)$, $X \wedge Y = \min(X, Y)$, $X + Y$, XY . In particolare sono variabili aleatorie $X^+ := X \vee 0$ e $X^- := (-X) \vee 0$.

1.3 Valori attesi

Definizione 1.3 (Valore atteso per variabili semplici). Sia X una variabile aleatoria in $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, non negativa e semplice, cioè come in Esempio 1.7,

$$X(\omega) = \sum_{m \in \mathbb{N}} x_m \mathbb{I}_{H_m}(\omega), \quad \text{con } H_m \in \mathcal{F} \text{ per ogni } m \in \mathbb{N},$$

allora si definisce

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{m \in \mathbb{N}} x_m \mathbb{P}(H_m).$$

Osservazione 1.1. Ogni variabile aleatoria X in $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, non negativa, ammette una successione di variabili aleatorie X_n , semplici e non negative, tali che

$$0 \leq X_n(\omega) \leq X_{n+1}(\omega), \quad \text{e tali che } \lim_{n \rightarrow \infty} X_n(\omega) = X(\omega).$$

Infatti¹¹ basta prendere

$$X_n(\omega) = \sum_{m=0}^{n2^n-1} \frac{m}{2^n} \mathbb{I}_{H_m}(\omega) + n \mathbb{I}_{H_{n2^n}} = \sum_{m=0}^{n2^n-1} \frac{m}{2^n} \mathbb{I}_{[\frac{m}{2^n}, \frac{m+1}{2^n})}(X(\omega)) + n \mathbb{I}_{[n, \infty)}(X(\omega)), \quad (1.10)$$

¹¹La monotonia della successione delle variabili aleatorie X_n è evidente: se $X_n(\omega) = m/2^n$, con $m < n2^n$, allora i soli casi possibili sono $X_{n+1}(\omega) = (2m)/2^{n+1} = m/2^n = X_n(\omega)$, oppure $X_{n+1}(\omega) = (2m+1)/2^{n+1} = m/2^n + 1/2^{n+1} > X_n(\omega)$; se $X_n(\omega) = n$ allora $X_{n+1}(\omega)$ può assumere un valore compreso tra n ed $n+1$.

Per la convergenza basta osservare che, qualunque sia ω , pur di prendere n sufficientemente grande e in modo che $X(\omega) < n$, si ha che $0 \leq X(\omega) - X_n(\omega) \leq 1/2^n$.

ovvero con

$$H_m = X^{-1} \left(\left[\frac{m}{2^n}, \frac{m+1}{2^n} \right) \right) \in \mathcal{F} \text{ per } 0 \leq m \leq n2^n - 1, \quad H_{n2^n} = X^{-1}([n, \infty)).$$

È infine interessante notare che, posto $[x]$ la parte intera inferiore¹² di x , si può riscrivere nel seguente modo

$$X_n(\omega) = \frac{[2^n X(\omega)]}{2^n} \wedge n.$$

Definizione 1.4 (Valore atteso per variabili nonnegative). Sia X una variabile aleatoria in $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, non negativa, si definisce

$$\mathbb{E}[X] = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[X_n],$$

dove $\{X_n; n \in \mathbb{N}\}$ è la successione monotona definita come in (1.10) dell'Osservazione precedente. Il limite esiste ed è monotono, per la proprietà di monotonia del valore atteso, sulle variabili aleatorie semplici. Si noti bene che tale limite può valere anche $+\infty$, nel qual caso si dice che la variabile X ha valore atteso infinito.

Arriviamo ora alla definizione generale del valore atteso:

Definizione 1.5 (Valore atteso per variabili generali). Sia X una variabile aleatoria in $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, Siano X^+ ed X^- , le variabili aleatorie non negative, definite alla fine della sezione precedente. Si noti che $X = X^+ - X^-$ e che invece $|X| = X^+ + X^-$. Si definisce allora, se ha senso¹³

$$\mathbb{E}[X] = \mathbb{E}[X^+] - \mathbb{E}[X^-].$$

¹²La parte intera inferiore $[x]$ di x è quel numero intero k tale che $k \leq x < k + 1$.

¹³Si considera che la somma $\mathbb{E}[X^+] - \mathbb{E}[X^-]$ ha senso

- 1 se $\mathbb{E}[X^+] < \infty$, $\mathbb{E}[X^-] < \infty$, nel qual caso $\mathbb{E}[X] \in \mathbb{R}$ e inoltre si ha anche $\mathbb{E}[|X|] = \mathbb{E}[X^+] + \mathbb{E}[X^-] < \infty$;
- 2 se $\mathbb{E}[X^+] < \infty$, $\mathbb{E}[X^-] = \infty$, nel qual caso $\mathbb{E}[X] = -\infty$;
- 3 se $\mathbb{E}[X^+] = \infty$, $\mathbb{E}[X^-] < \infty$, nel qual caso $\mathbb{E}[X] = +\infty$;

Il caso che rimane escluso è quindi il caso in cui $\mathbb{E}[X^+] = \infty$, $\mathbb{E}[X^-] = \infty$, del resto si avrebbe la forma indeterminata $\infty - \infty$.

Capitolo 2

Valori attesi e probabilità condizionali

2.1 Definizioni

Sia $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ uno spazio di probabilità e sia X una variabile aleatoria. Si supponga di avere una sotto σ -algebra $\mathcal{G} \subseteq \mathcal{F}$. Cerchiamo una variabile aleatoria \tilde{X} che sia \mathcal{G} -misurabile e che “in qualche senso” abbia un comportamento simile a X . Vale la pena di ricordare che una σ -algebra può essere interpretata come “informazione” disponibile, e quindi cercare una variabile \tilde{X} che sia \mathcal{G} -misurabile con un comportamento simile ad X , significa cercare una variabile aleatoria che, sulla base dell’informazione disponibile \mathcal{G} , sia simile. Un’altro modo di definire questa variabile \tilde{X} consiste, più banalmente, nel richiedere che sia una variabile aleatoria \mathcal{G} -misurabile “vicina” ad X . Naturalmente è necessario definire il senso di vicinanza, cioè quale metrica mettere sullo spazio delle variabili aleatorie.

Diamo ora due pre-definizioni, in cui però mancano le ipotesi da fare su X e delle precisazioni, affinché risultino definizioni ben poste.

pre-Definizione 1. *Si cerca una variabile aleatoria \tilde{X} , \mathcal{G} -misurabile, per la quale valga*

$$\mathbb{E}[X|A] = \mathbb{E}[\tilde{X}|A], \quad \forall A \in \mathcal{G}, \text{ con } \mathbb{P}(A) > 0. \quad (2.1)$$

dove

$$\mathbb{E}[X|A] = \frac{\mathbb{E}[XI_A]}{\mathbb{P}(A)}.$$

Si noti che (2.1) equivale a

$$\mathbb{E}[XI_A] = \mathbb{E}[\tilde{X}I_A], \quad \forall A \in \mathcal{G}, \text{ con } \mathbb{P}(A) > 0. \quad (2.2)$$

e che quindi la richiesta che $\mathbb{P}(A) > 0$ si può omettere.

Si noti inoltre che la precedente (2.2) per $A = \Omega$, implica che, se una tale variabile aleatoria \tilde{X} esiste, allora $\mathbb{E}[\tilde{X}] = \mathbb{E}[X]$.

pre-Definizione 2. *Si cerca una variabile aleatoria \tilde{X} , \mathcal{G} -misurabile, per la quale valga*

$$\mathbb{E}[(X - Z)^2] \geq \mathbb{E}[(X - \tilde{X})^2], \quad \forall Z \mathcal{G} - \text{misurabile.} \quad (2.3)$$

Prima di tutto, dobbiamo trovare sotto quali condizioni le pre-definizioni siano ben poste, cioè, in questo caso, che esista una variabile \tilde{X} per cui valga la (2.1) (o equivalentemente la (2.2)) oppure valga la (2.3), ed in che senso ne viene individuata una sola. Notiamo che intanto ci sono delle condizioni necessarie da rispettare: chiaramente, per la pre-definizione 1, è necessario che X sia una variabile aleatoria integrabile¹, cioè $\mathbb{E}[|X|] < \infty$, mentre, per la pre-definizione 2, è necessario richiedere che X sia di quadrato integrabile², cioè $\mathbb{E}[|X|^2] < \infty$, ed inoltre anche la (2.3) va modificata, nel senso che è necessario richiedere che anche Z sia di quadrato integrabile, oltre che \mathcal{G} -misurabile³. Inoltre è chiaro che se \tilde{X}' è una variabile aleatoria \mathcal{G} -misurabile, che differisce da \tilde{X} a meno di un insieme di misura nulla, anche \tilde{X}' gode della proprietà (2.2) o (2.3) rispettivamente e quindi non si individua una sola variabile aleatoria, ma una classe di variabili aleatorie. Queste modifiche in realtà sono sufficienti a garantire che le due pre-definizioni diventino due definizioni.

Definizione 2.1 (valore atteso condizionale 1). *Sia X una variabile aleatoria integrabile, cioè $X \in L^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$. Sia data una variabile aleatoria (integrabile) \tilde{X} , \mathcal{G} -misurabile, per la quale valga*

$$\mathbb{E}[XI_A] = \mathbb{E}[\tilde{X}I_A], \quad \forall A \in \mathcal{G}. \quad (2.4)$$

*In questo modo si individua univocamente una classe di funzioni che si indica con $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$ e che si chiama anche **media condizionale** (o **condizionata**) di X data \mathcal{G} . Si dice inoltre che \tilde{X} è una versione di $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$.*

¹L'insieme delle variabili aleatorie X , che sono \mathcal{F} -misurabili ed integrabili, cioè per le quali $\mathbb{E}[|X|] < \infty$, forma uno spazio vettoriale reale: se $\mathbb{E}[|X_i|] < \infty$, per $i = 1, 2$, con X_i \mathcal{F} -misurabili, allora la variabile aleatoria $a_1X_1 + a_2X_2$ è ancora \mathcal{F} -misurabile e inoltre

$$\mathbb{E}[|a_1X_1 + a_2X_2|] \leq \mathbb{E}[|a_1||X_1| + |a_2||X_2|] \leq |a_1|\mathbb{E}[|X_1|] + |a_2|\mathbb{E}[|X_2|] < \infty.$$

L'insieme di tali variabili aleatorie è indicato con $L^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ che è uno spazio metrico completo e separabile rispetto alla distanza $d(X, Y) = \mathbb{E}[|X - Y|]$ (modulo passare a classi di equivalenza $X \sim Y$ se e solo se $\mathbb{E}[|X - Y|] = 0$, perché altrimenti $d(X, Y)$ non gode della proprietà delle metriche che $d(X, Y) = 0$ se e **solo se** $X = Y$).

²Anche in questo caso l'insieme delle variabili aleatorie X , che sono \mathcal{F} -misurabili e quadrato integrabili, cioè per le quali $\mathbb{E}[|X|^2] < \infty$, forma uno spazio vettoriale reale che si indica con $L^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, che inoltre è uno spazio metrico completo e separabile rispetto alla distanza $d_{L^2}^2(X, Y) = \mathbb{E}[|X - Y|^2]$ (modulo passare a classi di equivalenza $X \sim Y$ se e solo se $\mathbb{E}[|X - Y|^2] = 0$). Inoltre $L^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ è uno spazio di Hilbert. Questo significa che è possibile introdurre un prodotto scalare

$$\langle X_1, X_2 \rangle := \mathbb{E}[X_1X_2],$$

e definire $d_{L^2}^2(X, Y) = \langle X - Y, X - Y \rangle = \mathbb{E}[|X - Y|^2]$. Si noti che, per la disuguaglianza di Cauchy,

$$|\mathbb{E}(X_1X_2)| \leq \mathbb{E}(|X_1X_2|) \leq \mathbb{E}^{1/2}(|X_1|^2)\mathbb{E}^{1/2}(|X_2|^2),$$

e quindi $\langle X_1, X_2 \rangle$ è finito se $\mathbb{E}[|X_i|^2] < \infty$, per $i = 1, 2$.

³Si noti che quindi deve essere $Z \in L^2(\Omega, \mathcal{G}, \widehat{\mathbb{P}})$ dove $\widehat{\mathbb{P}} = \mathbb{P}|_{\mathcal{G}}$, cioè la restrizione di \mathbb{P} a \mathcal{G}

Definizione 2.2 (valore atteso condizionale 2). Sia X una variabile aleatoria di quadrato integrabile, cioè $X \in L^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$. Sia data una variabile aleatoria (di quadrato integrabile) \tilde{X} , \mathcal{G} – misurabile, per la quale valga⁴

$$\mathbb{E}[(X - Z)^2] \geq \mathbb{E}[(X - \tilde{X})^2], \forall Z \text{ } \mathcal{G} \text{ – misurabile, con } \mathbb{E}[Z^2] < \infty. \quad (2.7)$$

In questo modo si individua univocamente una classe di funzioni che si indica con $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$ e che si chiama anche **media condizionale** (o **condizionata**) di X data \mathcal{G} . Si dice inoltre che \tilde{X} è una versione di $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$.

Rimandiamo la verifica che effettivamente la Definizione 2.1 e la Definizione 2.2 sono ben poste a dopo aver trattato alcuni esempi, e anticipiamo che, se X è di quadrato integrabile⁵, allora le Definizioni 2.1 e 2.2 sono equivalenti, e quindi non c'è ambiguità nello scegliere una definizione o l'altra e che in seguito, riferendoci a $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$, intenderemo riferirci alla Definizione 2.1, che valendo per variabili aleatorie integrabili, è più generale. Non c'è quindi ambiguità nella seguente definizione che viene data in analogia con $\mathbb{P}(A) = \mathbb{E}[I_A]$.

Definizione 2.3 (probabilità condizionale di un evento). Sia $A \in \mathcal{F}$ un evento e \mathcal{G} una sotto σ –algebra di \mathcal{F} , allora

$$\mathbb{P}(A | \mathcal{G}) := \mathbb{E}[I_A | \mathcal{G}]$$

è detta **probabilità condizionale** di A data \mathcal{G} .

Va inoltre sottolineato **un abuso di notazione** per cui si identifica la classe di equivalenza $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$ e la variabile aleatoria \tilde{X} che ne è un rappresentante.

2.2 Esempi

Esempio 2.1. Caso in cui $\mathcal{G} = \{\Omega, \emptyset\}$.

⁴La proprietà (2.7) è equivalente alla proprietà

$$\mathbb{E}[(X - \tilde{X})^2] = \min_{Z \in L^2(\Omega, \mathcal{G}, \mathbb{P})} (\mathbb{E}[(X - Z)^2]), \quad (2.5)$$

ovvero

$$d_{L^2}^2(X, \tilde{X}) = \min_{Z \in L^2(\Omega, \mathcal{G}, \mathbb{P})} d_{L^2}^2(X, Z). \quad (2.6)$$

(vedere le note precedenti per la definizione di $L^2(\Omega, \mathcal{G}, \hat{\mathbb{P}})$ e di $d_{L^2}^2$)

⁵Si ricordi che se X è di quadrato integrabile allora se X è integrabile:

$$\mathbb{E}[X^2] < \infty \Rightarrow \mathbb{E}[|X|] < \infty,$$

come si vede immediatamente, ad esempio, con la disuguaglianza di Cauchy:

$$\mathbb{E}[|X|] = \mathbb{E}[1|X|] \leq (\mathbb{E}[1^2])^{1/2} (\mathbb{E}[X^2])^{1/2} = (\mathbb{E}[X^2])^{1/2},$$

oppure direttamente considerando che $|x| \leq 1 + x^2$, e per la proprietà di monotonia del valore atteso

$$\mathbb{E}[|X|] \leq 1 + \mathbb{E}[X^2].$$

In questo caso $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$ si riduce al valore medio usuale, cioè

$$\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] = \mathbb{E}[X],$$

in quanto ovviamente $\mathbb{E}[XI_\Omega] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[X]I_\Omega] = \mathbb{E}[X] \cdot 1$, mentre banalmente $\mathbb{E}[XI_\emptyset] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[X]I_\emptyset] = \mathbb{E}[X] \cdot 0$.

Esempio 2.2. Caso in cui $\mathcal{G} = \mathcal{M} = \sigma\{H_m, m \in \mathbb{N}\}$ ed $\{H_m, m \in \mathbb{N}\}$ è una partizione.

Intanto ricordiamo che in questo caso le variabili aleatorie \mathcal{G} -misurabili sono le funzioni del tipo

$$Z(\omega) = \sum_{m=1}^{\infty} c_m \mathbb{I}_{H_m}(\omega),$$

dove c_m sono costanti reali, e gli insiemi \mathcal{G} -misurabili sono le unioni di sottofamiglie numerabili di elementi della partizione. Basta quindi calcolare i valori \tilde{c}_m che caratterizzano \tilde{X} , imponendo la condizione⁶ che

$$\mathbb{E}[XI_{H_n}] = \mathbb{E}[\tilde{X}\mathbb{I}_{H_n}] = \mathbb{E}\left[\sum_{m=1}^{\infty} \tilde{c}_m \mathbb{I}_{H_m} \mathbb{I}_{H_n}\right] = \mathbb{E}[\tilde{c}_n \mathbb{I}_{H_n}] = \tilde{c}_n \mathbb{P}[H_n] \quad (2.8)$$

Quindi

$$\tilde{c}_m = \frac{\mathbb{E}[XI_{H_m}]}{\mathbb{P}(H_m)} \quad \text{se } \mathbb{P}(H_m) > 0 \quad \text{e} \quad \tilde{X} = \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] = \sum_{n \geq 1}^* \frac{\mathbb{E}[XI_{H_n}]}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n},$$

dove $\sum_{n \geq 1}^*$ è la somma estesa agli indici n per cui $\mathbb{P}(H_n) > 0$.

Si noti l'abuso di notazione: in realtà

$$\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] = \{\xi \text{ v.a. } \mathcal{G} - \text{misurabili, t.c. } \xi = \sum_{n \geq 1}^* \frac{\mathbb{E}[XI_{H_n}]}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n} + \sum_{m \geq 1}^{**} c_m \mathbb{I}_{H_m}, \text{ per } c_m \in \mathbb{R}\}$$

dove $\sum_{m \geq 1}^{**}$ è la somma estesa agli indici m per cui $\mathbb{P}(H_m) = 0$.

In particolare se $X = \mathbb{I}_B$, con $B \in \mathcal{F}$, e ponendo (come è usuale)

$$\mathbb{P}(B | \mathcal{G})(\omega) = \mathbb{E}[\mathbb{I}_B | \mathcal{G}](\omega),$$

⁶E' chiaro che la condizione che $\mathbb{E}[XI_A] = \mathbb{E}[\tilde{X}\mathbb{I}_A]$ per ogni $A = \bigcup_{n \in I} H_n$, implica la condizione (2.8): basta prendere $A = H_n$.

Tuttavia vale anche il viceversa, in quanto

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[XI_A] &= \mathbb{E}\left[X \sum_{n \in I} \mathbb{I}_{H_n}\right] = \sum_{n \in I} \mathbb{E}[XI_{H_n}] \\ &= \sum_{n \in I} \mathbb{E}[\tilde{X}\mathbb{I}_{H_n}] = \mathbb{E}\left[\tilde{X} \sum_{n \in I} \mathbb{I}_{H_n}\right] = \mathbb{E}[\tilde{X}\mathbb{I}_A]. \end{aligned}$$

otteniamo che una versione⁷ di $\mathbb{P}(B \mid \mathcal{G})(\omega)$ è data da

$$\mathbb{P}(B \mid \mathcal{G}) = \sum_{n \geq 1}^* \frac{\mathbb{E}[\mathbb{I}_B \mathbb{I}_{H_n}]}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n} = \sum_{n \geq 1}^* \frac{\mathbb{P}(B \cap H_n)}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n} = \sum_{n \geq 1}^* \mathbb{P}(B \mid H_n) \mathbb{I}_{H_n}. \quad (2.9)$$

Ritroviamo quindi forse più chiaramente l'idea che se si verifica H_n cambiamo la probabilità prendendo $\mathbb{P}(B \mid H_n)$ al posto di $\mathbb{P}(B)$, che consideriamo se non abbiamo alcuna informazione (corrisponde al caso in cui la σ -algebra a nostra disposizione è quella banale).

Vale la pena di considerare il caso in cui B sia un evento della σ -algebra \mathcal{G} a nostra disposizione: $B \in \mathcal{G}$, o equivalentemente $B = \cup_{n \in I} H_n$, per un insieme di indici I . A parole si tratta del caso in cui B è un evento completamente osservabile, ovverosia il caso in cui B sia un evento che possiamo conoscere perfettamente. In tale caso una versione di $\mathbb{P}(B \mid \mathcal{G})(\omega)$ è proprio la funzione indicatrice di B , ovvero $\mathbb{I}_B(\omega)$. Infatti $\mathbb{P}(B \mid H_n) = 1$ per $n \in I$ e $\mathbb{P}(H_n) > 0$, mentre $\mathbb{P}(B \mid H_n) = 0$ per $n \notin I$ e $\mathbb{P}(H_n) > 0$.

È interessante osservare che, se \mathcal{F} è a sua volta generato da una partizione $\{K_\ell, \ell \in \mathbb{N}\}$, più fine⁸ di $\{H_m, m \in \mathbb{N}\}$, e nel caso in cui $\mathbb{P}(H_n) > 0$ per ogni $n \in \mathbb{N}$, allora (2.9) definisce una probabilità su \mathcal{F} :

per iniziare

$$\mathbb{P}(\Omega \mid \mathcal{G})(\omega) = \sum_{n \geq 1}^* \frac{\mathbb{E}[\mathbb{I}_\Omega \mathbb{I}_{H_n}(\omega)]}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n} = \sum_{n \geq 1} \frac{\mathbb{E}[\mathbb{I}_\Omega \mathbb{I}_{H_n}(\omega)]}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n} = \sum_{n \geq 1} \mathbb{I}_{H_n} = 1,$$

inoltre, se $B = \bigcup_{\ell \in I_B} K_\ell$, allora

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(B \mid \mathcal{G})(\omega) &= \sum_{n \geq 1}^* \frac{\mathbb{E}[\mathbb{I}_B \mathbb{I}_{H_n}(\omega)]}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n} = \sum_{n \geq 1} \frac{\mathbb{E}[\mathbb{I}_B \mathbb{I}_{H_n}(\omega)]}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n} = \sum_{n \geq 1} \frac{\mathbb{P}(B \cap H_n)}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n}(\omega) \\ &= \sum_{n \geq 1} \sum_{\ell \in I_B} \frac{\mathbb{P}(K_\ell \cap H_n)}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n}(\omega) = \sum_{\ell \in I_B} \sum_{n \geq 1} \frac{\mathbb{P}(K_\ell \cap H_n)}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n}(\omega) = \sum_{\ell \in I_B} \mathbb{P}(K_\ell \mid \mathcal{G})(\omega), \end{aligned}$$

e da questa relazione immediatamente si ricava che, qualunque sia ω , l'applicazione $B \mapsto \mathbb{P}(B \mid \mathcal{G})(\omega)$ definisce una probabilità. Anche nel caso in cui **non** si faccia l'ipotesi che $\mathbb{P}(H_n) > 0$ per ogni $n \in \mathbb{N}$, si può trovare una versione di $\mathbb{P}(B \mid \mathcal{G})(\omega)$ in modo che per ogni ω la funzione

$$\mathbb{P}(\cdot \mid \mathcal{G})(\omega) : \mathcal{F} \mapsto [0, 1]; B \mapsto \mathbb{P}(B \mid \mathcal{G})(\omega)$$

sia una probabilità:

⁷La versione di $\mathbb{P}(B \mid \mathcal{G})(\omega)$ data in (2.9) non è in generale una probabilità per ogni ω : ad esempio se $\omega \in H_m$ e $\mathbb{P}(H_m) = 0$, allora $\mathbb{P}(\Omega \mid \mathcal{G})(\omega) = 0$ invece di 1.

⁸La partizione $\{K_\ell, \ell \in \mathbb{N}\}$ è più fine della partizione $\{H_m, m \in \mathbb{N}\}$ se e solo se per ogni $m \in \mathbb{N}$ esiste un $I_m \subset \mathbb{N}$ tale che

$$H_m = \bigcup_{\ell \in I_m} K_\ell.$$

fissata a piacere una probabilità \mathbb{P}^0 su \mathcal{F}^9 , si definisce

$$\mathbb{P}(K_\ell | \mathcal{G})(\omega) = \sum_{n \geq 1}^* \frac{\mathbb{P}(K_\ell \cap H_n)}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n}(\omega) + \sum_{n \geq 1}^{**} \mathbb{P}^0(K_\ell) \mathbb{I}_{H_n}(\omega) = \quad (2.10)$$

$$= \sum_{n \geq 1}^* \frac{\mathbb{P}(K_\ell \cap H_n)}{\mathbb{P}(H_n)} \mathbb{I}_{H_n}(\omega) + \mathbb{P}^0(K_\ell) \mathbb{I}_{\{\cup_{n \geq 1}^* H_n\}}(\omega). \quad (2.11)$$

e

$$\mathbb{P}(B | \mathcal{G})(\omega) := \sum_{\ell \in I_B} \mathbb{P}(K_\ell | \mathcal{G})(\omega). \quad (2.12)$$

Si vede immediatamente che la parte a destra di (2.12) è effettivamente una versione di $\mathbb{P}(B | \mathcal{G})$, e si vede facilmente che in questo modo, qualunque sia ω , $\mathbb{P}(\cdot | \mathcal{G})(\omega)$ definisce una probabilità¹⁰.

Inoltre questa probabilità gode della proprietà che se X è \mathcal{F} -misurabile, cioè se

$$X = \sum_{\ell \in \mathbb{N}} c_\ell \mathbb{I}_{K_\ell},$$

allora

$$\mathbb{E}[X | \mathcal{G}](\omega) = \sum_{\ell \in \mathbb{N}} c_\ell \mathbb{P}(K_\ell | \mathcal{G})(\omega) = \int_{\Omega} X(\omega') d\mathbb{P}(d\omega' | \mathcal{G})(\omega).$$

Per σ -algebre \mathcal{F} più generali del caso di σ -algebre generate da una partizione, non è detto che queste proprietà valgano (per approfondimenti vedere la Sezione 4).

Esempio 2.3. Ritorniamo nel caso dell'Esempio precedente, quando $\mathcal{G} = \sigma(Y)$, e Y è una variabile aleatoria discreta, a valori in $\{y_m; m \in \mathbb{N}\}$. Infatti allora

$$\mathcal{G} = \sigma(\{H_m := Y^{-1}(\{y_m\}); m \in \mathbb{N}\}),$$

e di conseguenza, se $\mathbb{P}(Y = y_m) > 0$ per ogni $m \in \mathbb{N}$, si ha

$$\mathbb{E}[X | \sigma(Y)](\omega) = \sum_{m \in \mathbb{N}} \mathbb{E}[X | \{Y = y_m\}] \mathbb{I}_{\{Y = y_m\}}(\omega) = \sum_{m \in \mathbb{N}} \mathbb{E}[X | \{Y = y_m\}] \mathbb{I}_{\{y_m\}}(Y(\omega)),$$

⁹Ad esempio fissando una successione $\{p_\ell; \ell \in \mathbb{N}\}$, con $p_\ell \geq 0$, per ogni $\ell \in \mathbb{N}$ e $\sum_{\ell \in \mathbb{N}} p_\ell = 1$, in modo che $\mathbb{P}^0(K_\ell) = p_\ell$.

¹⁰Infatti in questo caso è come se avessimo definito una successione $\{p_\ell(\omega); \ell \in \mathbb{N}\}$, con $\sum_{\ell \in \mathbb{N}} p_\ell(\omega) = 1$ per ogni ω

$$\begin{cases} p_\ell(\omega) = \mathbb{P}(K_\ell | H_m) & \text{se } \omega \in H_m, \text{ con } \mathbb{P}(H_m) > 0, \\ p_\ell(\omega) = \mathbb{P}^0(K_\ell) & \text{se } \omega \in H_m, \text{ con } \mathbb{P}(H_m) = 0, \end{cases}$$

e poi avessimo definito, per $B = \cup_{\ell \in I}$,

$$\mathbb{P}(B | \mathcal{G})(\omega) = \sum_{\ell \in I} p_\ell(\omega).$$

Così, ad esempio,

$$\mathbb{P}(\Omega | \mathcal{G})(\omega) := \sum_{\ell \in \mathbb{N}} \mathbb{P}(K_\ell | \mathcal{G})(\omega) = \begin{cases} \mathbb{P}(\Omega | H_m) = 1 & \text{se } \omega \in H_m, \text{ con } \mathbb{P}(H_m) > 0, \\ \mathbb{P}^0(\Omega) = 1 & \text{se } \omega \in H_m, \text{ con } \mathbb{P}(H_m) = 0. \end{cases}$$

con il solito abuso di notazione (il secondo membro è un rappresentante della classe di equivalenza $\mathbb{E}[X | \sigma(Y)]$).

Quindi posto

$$\psi(y) = \sum_{m \in \mathbb{N}} \mathbb{E}[X | \{Y = y_m\}] \mathbb{I}_{\{y_m\}}(y),$$

e indicato con

$$\mathbb{E}[X | \{Y = y\}] = \psi(y),$$

cioè la funzione, che vale $\mathbb{E}[X | \{Y = y\}]$, se $y \in \{y_m; m \in \mathbb{N}\}$, e zero altrimenti, si ha:

$$\mathbb{E}[X | \sigma(Y)](\omega) = \mathbb{E}[X | \{Y = y\}] \Big|_{y=Y(\omega)} = \psi(Y(\omega)).$$

Ciò giustifica il fatto che si usa scrivere

$$\mathbb{E}[X | \sigma(Y)] = \mathbb{E}[X | Y],$$

e ci fa ritrovare il concetto elementare di valore atteso condizionato di una variabile aleatoria discreta X rispetto a una variabile aleatoria discreta Y .

Analogamente a quanto fatto nell'esempio precedente si ottiene che in tale caso, cioè se anche X è una variabile aleatoria discreta a valori in $\{x_n; n \in \mathbb{N}\}$, allora

$$\mathbb{E}[X | Y](\omega) = \sum_{n \in \mathbb{N}} x_n \mathbb{P}(X = x_n | \{Y = y\}) \Big|_{y=Y(\omega)}$$

Infine notiamo che è facile ripetere quanto sopra nel caso in cui al posto di X ci sia una variabile aleatoria $Z = h(X)$, integrabile, e ottenere che

$$\mathbb{E}[h(X) | Y](\omega) = \sum_{n \in \mathbb{N}} h(x_n) \mathbb{P}(X = x_n | \{Y = y\}) \Big|_{y=Y(\omega)}$$

Nel caso in cui **non** si abbia che $\mathbb{P}(Y = y_m) > 0$ per ogni $m \in \mathbb{N}$, si ottiene, fissata una probabilità \mathbb{P}^0 , come nell'esempio precedente,

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X | \sigma(Y)](\omega) &= \sum_{m \in \mathbb{N}}^* \mathbb{E}[X | \{Y = y_m\}] \mathbb{I}_{\{Y=y_m\}}(\omega) + \sum_{m \in \mathbb{N}}^{**} \mathbb{E}^0[X] \mathbb{I}_{\{Y=y_m\}}(\omega) \\ &= \sum_{m \in \mathbb{N}}^* \mathbb{E}[X | \{Y = y_m\}] \mathbb{I}_{\{y_m\}}(Y(\omega)) + \sum_{m \in \mathbb{N}}^{**} \mathbb{E}^0[X] \mathbb{I}_{\{y_m\}}(Y(\omega)), \end{aligned}$$

con il solito abuso di notazione (il secondo membro è un rappresentante della classe di equivalenza $\mathbb{E}[X | \sigma(Y)]$).

Quindi posto

$$\psi(y) = \sum_{m \in \mathbb{N}}^* \mathbb{E}[X | \{Y = y_m\}] \mathbb{I}_{\{y_m\}}(y) + \sum_{m \in \mathbb{N}}^{**} \mathbb{E}^0[X] \mathbb{I}_{\{y_m\}}(y),$$

e indicato con

$$\mathbb{E}[X | \{Y = y\}] = \psi(y),$$

cioè la funzione, che vale $\mathbb{E}[X | \{Y = y\}]$, se $y \in \{y_m; m \in \mathbb{N}\}$ e se $\mathbb{P}(\{Y = y\}) > 0$, e vale $\mathbb{E}^0[X]$ altrimenti, si ha:

$$\mathbb{E}[X | Y](\omega) = \mathbb{E}[X | \{Y = y\}] \Big|_{y=Y(\omega)} = \psi(Y(\omega)).$$

Più in generale si ha anche che posto

$$\psi_h(y) = \sum_{m \in \mathbb{N}}^* \mathbb{E}[h(X) | \{Y = y_m\}] \mathbb{I}_{\{y_m\}}(y) + \sum_{m \in \mathbb{N}}^{**} \mathbb{E}^0[h(X)] \mathbb{I}_{\{y_m\}}(y),$$

si ottiene che

$$\mathbb{E}[h(X) | Y](\omega) = \psi_h(Y(\omega)).$$

Esempio 2.4. Caso in cui $\mathcal{G} = \sigma(Y)$, con Y una variabile aleatoria a valori in \mathbb{R}^d , e (X, Y) ammette densità di probabilità congiunta $f_{X,Y}(x, y)$. Allora, posto

$$f_{X|Y}(x|y) = I_{\{z: f_Y(z) > 0\}}(y) \frac{f_{X,Y}(x, y)}{f_Y(y)} + I_{\{z: f_Y(z) = 0\}}(y) f_0(x)$$

dove $f_0(x)$ è una densità di probabilità prefissata, si ha

$$\tilde{X}(\omega) = \mathbb{E}[X | Y](\omega) = \int_{\mathbb{R}} x f_{X|Y}(x|y) \Big|_{y=Y(\omega)} dx$$

ossia

$$\tilde{X}(\omega) = \int_{\mathbb{R}} x \left(I_{\{z: f_Y(z) > 0\}}(y) \frac{f_{X,Y}(x, y)}{f_Y(y)} \right) \Big|_{y=Y(\omega)} dx + \int_{\mathbb{R}} x I_{\{z: f_Y(z) = 0\}}(y) \Big|_{y=Y(\omega)} dx,$$

dove $\mathbb{E}[X | Y]$ è una abbreviazione per $\mathbb{E}[X | \sigma(Y)]$.

Per la verifica è intanto importante notare che $\sigma(Y) = \{A = Y^{-1}(B), \text{ per } B \in \mathcal{B}(\mathbb{R})\}$, quindi $I_A(\omega) = I_B(Y(\omega))$ e

$$\mathbb{E}[X I_A] = \mathbb{E}[X I_B(Y)] = \int_{\mathbb{R} \times \mathbb{R}^d} x I_B(y) f_{X,Y}(x, y) dx dy.$$

Cominciamo con il caso in cui $f_{X,Y}(x, y) > 0$ per ogni $(x, y) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^d$, così anche $f_Y(y) > 0$ per ogni $y \in \mathbb{R}^d$, e quindi

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\tilde{X}(\omega) I_A] &= \mathbb{E}[\tilde{X}(\omega) I_B(Y)] \\ &= \int_{\mathbb{R}^d} \left(\int_{\mathbb{R}} x \frac{f_{X,Y}(x, y)}{f_Y(y)} dx \right) I_B(y) f_Y(y) dy \end{aligned}$$

ovvero, per il Teorema di Fubini¹¹,

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[\tilde{X}(\omega)I_A] &= \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^d} x I_B(y) \frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_Y(y)} f_Y(y) dx dy \\ &= \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^d} x I_B(y) f_{X,Y}(x,y) dx dy.\end{aligned}$$

D'altra parte, nel caso generale

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[\tilde{X}(\omega)I_A] &= \\ &= \mathbb{E}[\tilde{X}(\omega)I_B(Y)] \\ &= \int_{\mathbb{R}^d} \left(\int_{\mathbb{R}} x I_{\{z:f_Y(z)>0\}}(y) \frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_Y(y)} dx \right) I_B(y) f_Y(y) dy \\ &\quad + \int_{\mathbb{R}^d} \left(\int_{\mathbb{R}} x I_{\{z:f_Y(z)=0\}}(y) f_0(x) dx \right) I_B(y) f_Y(y) dy\end{aligned}$$

ovvero, per il Teorema di Fubini,

$$\begin{aligned}&= \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^d} x I_B(y) I_{\{z:f_Y(z)>0\}}(y) \frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_Y(y)} f_Y(y) dx dy \\ &\quad + \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^d} x I_B(y) I_{\{z:f_Y(z)=0\}}(y) f_0(x) f_Y(y) dx dy \\ &= \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^d} x I_B(y) I_{\{z:f_Y(z)>0\}}(y) \frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_Y(y)} f_Y(y) dx dy \\ &= \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^d} x I_B(y) I_{\{z:f_Y(z)>0\}}(y) f_{X,Y}(x,y) dx dy\end{aligned}$$

Si tratta quindi solo di controllare che, qualunque sia $B \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$

$$\int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^d} x I_B(y) I_{\{z:f_Y(z)>0\}}(y) f_{X,Y}(x,y) dx dy = \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^d} x I_B(y) f_{X,Y}(x,y) dx dy.$$

La verifica è immediata in quanto

$$\int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}^d} x I_B(y) I_{\{z:f_Y(z)=0\}}(y) f_{X,Y}(x,y) dx dy = 0,$$

¹¹Una versione del Teorema di Fubini è la seguente: se $\psi : \mathbb{R}^{n_1} \times \mathbb{R}^{n_2} \mapsto \mathbb{R}$; $(x,y) \in \mathbb{R}^{n_1} \times \mathbb{R}^{n_2} \mapsto \psi(x,y) \in \mathbb{R}$ è una funzione boreliana, allora le seguenti condizioni sono equivalenti

$$\begin{aligned}\int_{\mathbb{R}^{n_1}} \left(\int_{\mathbb{R}^{n_2}} |\psi(x,y)| dy \right) dx &< \infty, \\ \int_{\mathbb{R}^{n_2}} \left(\int_{\mathbb{R}^{n_1}} |\psi(x,y)| dx \right) dy &< \infty \\ \int_{\mathbb{R}^{n_1} \times \mathbb{R}^{n_2}} |\psi(x,y)| dx dy &< \infty.\end{aligned}$$

Inoltre se vale una delle precedenti condizioni vale, allora tutti i valori dei precedenti integrali coincidono. Il Teorema di Fubini è quindi usato per scambiare l'ordine degli integrali.

infatti, se $I_{\{z:f_Y(z)=0\}}(y) = 1$, ovvero se $f_Y(y) = 0 (= \int_{\mathbb{R}} f_{X,Y}(x,y) dx)$, allora l'insieme $\{x : f_{X,Y}(x,y) > 0\}$ ha misura di Lebesgue nulla, e quindi, per tali y

$$\int_{\mathbb{R}^d} x I_B(y) f_{X,Y}(x,y) dx = 0.$$

Si osservi che anche in questo caso, se $f_{X,Y}(x,y) > 0$ per ogni (x,y) , allora $\frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_Y(y)}$ è una densità di probabilità in x , qualunque sia y , e che

$$\mathbb{P}(X \in C | Y) = \mathbb{E}[\mathbb{I}_C(X) | \sigma(Y)] = \int_C \frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_Y(y)} dx$$

definisce una probabilità sui boreliani di \mathbb{R} .

Esempio 2.5. *Caso in cui $\mathcal{G} = \sigma(Y)$ e (X,Y) è una variabile (congiuntamente) gaussiana bidimensionale, di media nulla. Come caso particolare dell'esempio precedente si ottiene*

$$\mathbb{E}[X | Y] = \frac{\sigma_{X,Y}}{\sigma_Y^2} Y.$$

A sua volta questo risultato si ottiene dal caso più in generale: (X_1, \dots, X_n) è un vettore aleatorio gaussiano di media nulla e densità congiunta

$$f(x_1, \dots, x_n) = c \exp\left\{-\sum_{i,j}^{1,n} \alpha_{i,j} x_i x_j\right\} = c \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{i,j} x_i x_j\right\} \quad \text{con } \alpha_{i,j} = \alpha_{j,i}, \alpha_{n,n} > 0$$

e

$$\mathbb{E}[X_n | X_1, \dots, X_{n-1}] = -\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\alpha_{i,n}}{\alpha_{n,n}} X_i. \quad (2.13)$$

(Pur essendo possibile utilizzare la tecnica dell'esempio precedente si consiglia lo svolgimento dei calcoli dopo l'introduzione delle distribuzioni condizionali) Svolgimento: Si tratta del caso $d = n - 1$ con $X = X_n$ e $Y = (X_1, \dots, X_{n-1})$ e con $f_{X,Y}(x,y) > 0$. Per calcolare $\mathbb{E}[X_n | X_1, \dots, X_{n-1}]$ dobbiamo innanzitutto

$$\frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_Y(y)} = \frac{f_{Y,X}(y,x)}{f_Y(y)} = \frac{f_{X_1, \dots, X_{n-1}, X_n}(y,x)}{f_{X_1, \dots, X_{n-1}}(y)}, \quad \text{con } y = (x_1, \dots, x_{n-1}).$$

Abbiamo quindi

$$f(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) = c \exp\left\{-\sum_{i,j}^{1,n-1} \alpha_{i,j} x_i x_j - x_n \left(\sum_{j=1}^{n-1} \alpha_{n,j} x_j\right) - \left(\sum_{i=1}^{n-1} \alpha_{i,n} x_i\right) x_n - \alpha_{n,n} x_n^2\right\}$$

Tenendo presente che $\alpha_{i,j} = \alpha_{j,i}$, e che $\alpha_{n,n} > 0$ si ha che

$$m(y) = m(x_1, \dots, x_{n-1}) := \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\alpha_{n,j}}{\alpha_{n,n}} x_j = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\alpha_{i,n}}{\alpha_{n,n}} x_i,$$

e quindi che

$$\begin{aligned} f(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) &= f(y, x_n) = c \exp \left\{ -\alpha_{n,n} \left[\sum_{i,j}^{1,n-1} \frac{\alpha_{i,j}}{\alpha_{n,n}} x_i x_j + 2x_n m(x_1, \dots, x_{n-1}) + x_n^2 \right] \right\} \\ &= c \exp \left\{ -\alpha_{n,n} \left[\sum_{i,j}^{1,n-1} \frac{\alpha_{i,j}}{\alpha_{n,n}} x_i x_j + m^2(y) + 2x_n m(y) + x_n^2 - m^2(y) \right] \right\} \\ &= c(y) \exp \left\{ -\alpha_{n,n} [m^2(y) + 2x_n m(y) + x_n^2] \right\} = c(y) \exp \left\{ -\alpha_{n,n} [x_n + m(y)]^2 \right\} \end{aligned}$$

Di conseguenza

$$\frac{f_{X,Y}(x, y)}{f_Y(y)} = \frac{c(y)}{f_Y(y)} \exp \left\{ -\alpha_{n,n} [x_n - (-m(y))]^2 \right\} = K(y) \exp \left\{ -\frac{[x_n - (-m(y))]^2}{2\frac{1}{2\alpha_{n,n}}} \right\}.$$

Come osservato nel caso generale dell'esempio precedente, qualunque sia y , $\frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_Y(y)}$ deve essere una densità di probabilità: è quindi chiaro che deve coincidere con la densità di una variabile aleatoria gaussiana¹² $N(-m(y), \frac{1}{2\alpha_{n,n}})$, di media $-m(y)$ e di varianza $\frac{1}{2\alpha_{n,n}}$. Il valore atteso si calcola quindi come

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X_n | X_1, \dots, X_{n-1}] &= \int_{\mathbb{R}} x K(y) \exp \left\{ -\frac{[x_n - (-m(y))]^2}{2\frac{1}{2\alpha_{n,n}}} \right\} dx \Big|_{y=(X_1, \dots, X_{n-1})} \\ &= -m(y) \Big|_{y=(X_1, \dots, X_{n-1})}, \end{aligned}$$

da cui si ottiene (2.13).

È infine interessante notare che essendo l'espressione del valore condizionato $\mathbb{E}[X_n | X_1, \dots, X_{n-1}]$, una funzione lineare di X_1, \dots, X_{n-1} , si ottiene che coincide con la retta di regressione¹³ di X_n rispetto a X_1, \dots, X_{n-1} .

¹²La funzione $K(y)$ di y deve inoltre necessariamente valere:

$$K(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \frac{1}{2\alpha_{n,n}}}} = \sqrt{\frac{\alpha_{n,n}}{\pi}}.$$

¹³Ricordiamo che il problema di trovare la retta di regressione lineare di X rispetto ad Y corrisponde al problema di trovare il punto di minimo, tra tutte le funzioni affini $\mathbf{a} \cdot \mathbf{y} + b$ del valore atteso del quadrato della differenza tra X , ovvero trovare $\tilde{\mathbf{a}}$ e \tilde{b} tali che

$$\mathbb{E}[(X - (\tilde{\mathbf{a}} \cdot \mathbf{Y} + \tilde{b}))^2] = \min_{\mathbf{a}, b} \mathbb{E}[(X - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{Y} + b))^2].$$

Tenendo presente che le variabili aleatorie $\sigma(Y)$ -misurabili sono le variabili aleatorie $Z = g(Y)$, con g boreliana, allora il valore atteso condizionato, secondo la Definizione 2.2, è quella variabile aleatoria $\mathbb{E}[X|Y] = \tilde{X} = \tilde{g}(Y)$ tale che

$$\mathbb{E}[(X - \tilde{g}(Y))^2] = \min_{g \text{ boreliane}} \mathbb{E}[(X - g(Y))^2],$$

di conseguenza si ha che se $\mathbb{E}[X|Y] = \tilde{X} = \tilde{\mathbf{a}} \cdot \mathbf{Y} + \tilde{b}$ è una funzione affine, allora coincide anche con la retta di regressione.

Esempio 2.6. L'Esempio 2.4 si generalizza facilmente al caso in cui X è una variabile aleatoria a valori in \mathbb{R}^k , e si vuole calcolare il valore atteso condizionale $\mathbb{E}[h(X) | Y]$, dove $h(\cdot)$ è una funzione misurabile, a valori reali, ripetendo tutti i passaggi con i dovuti cambiamenti:

$$\widetilde{h(X)}(\omega) = \mathbb{E}[h(X) | Y](\omega) = \int_{\mathbb{R}^k} h(x) f_{X|Y}(x|y)|_{y=Y(\omega)} dx$$

2.3 Proprietà del valore atteso condizionale

Enunciamo ora (senza dimostrarle, per il momento), le proprietà fondamentali della media condizionale (secondo la Definizione 2.1).

Siano X e Y variabili aleatorie integrabili in $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ e siano \mathcal{G} e \mathcal{H} sotto σ -algebre di \mathcal{F} , allora valgono le seguenti proprietà:

1. Linearità

$$\mathbb{E}[aX + bY | \mathcal{G}] = a\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] + b\mathbb{E}[Y | \mathcal{G}]$$

2. Monotonia

$$\mathbb{P}(X \leq Y) = 1 \text{ implica } \mathbb{P}(\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] \leq \mathbb{E}[Y | \mathcal{G}]) = 1$$

3. Formula dei condizionamenti successivi (caso particolare $\mathcal{G} = \{\Omega, \emptyset\}$)

$$\text{se } \mathcal{G} \subseteq \mathcal{H}, \text{ allora } \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[X | \mathcal{H}] | \mathcal{G}]$$

quindi, in particolare,

$$\text{se } \mathcal{G} = \{\Omega, \emptyset\}, \text{ allora } \mathbb{E}[X] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[X | \mathcal{H}]]$$

4. Fattorizzazione

Se Z è \mathcal{G} -misurabile e ZX è integrabile allora

$$\mathbb{E}[ZX | \mathcal{G}] = Z\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$$

5. Condizionamento rispetto a σ -algebre indipendenti

Se X e \mathcal{G} sono indipendenti allora

$$\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] = \mathbb{E}[X]$$

6. Condizionamento ridondante, cioè rispetto ad allargamenti indipendenti di σ -algebre

Se X e \mathcal{G} sono indipendenti da \mathcal{H} , allora

$$\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G} \vee \mathcal{H}] = \mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}]$$

7. Disuguaglianza di Jensen per funzioni convesse (caso particolare $\phi(x) = x^2$)

Se ϕ è una funzione convessa, e $\phi(X)$ è integrabile, allora

$$\phi(\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}]) \leq \mathbb{E}[\phi(X) \mid \mathcal{G}]$$

Osservazione In particolare per $\phi(x) = x^2$ ed X in $L^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, si ottiene che

$$(\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}])^2 \leq \mathbb{E}[X^2 \mid \mathcal{G}],$$

e quindi, passando al valore atteso, che

$$\mathbb{E}[(\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}])^2] \leq \mathbb{E}[\mathbb{E}[X^2 \mid \mathcal{G}]] = \mathbb{E}[X^2].$$

8. Convergenza sotto il segno di media condizionale, monotona e dominata

Se $\{X_n\}_{n \geq 1}$ è una successione di variabili aleatorie non negative ed integrabili, convergente con probabilità 1 ad X , monotonamente, cioè $0 \leq X_n \leq X_{n+1}$, allora

$$\mathbb{E}[X_n \mid \mathcal{G}] \uparrow \mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}], \text{ con probabilità } 1,$$

Se invece la successione converge ad X dominatamente, cioè $|X_n| \leq Y$, allora

$$\mathbb{E}[X_n \mid \mathcal{G}] \rightarrow \mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}], \text{ in } L^1.$$

La Definizione 2.1 è ben posta, in quanto esiste almeno una variabile aleatoria che verifica la (2.4).

Si definisca infatti la misura $\nu(\cdot)$ su \mathcal{G} come $\nu(A) := \mathbb{E}[XI_A]$, per $A \in \mathcal{G}$. La misura $\nu(\cdot)$ risulta assolutamente continua¹⁴ rispetto a $\widehat{\mathbb{P}} = \mathbb{P}|_{\mathcal{G}}$, in quanto se $\widehat{\mathbb{P}}(A) = \mathbb{P}(A) = 0$, allora $\nu(A) = 0$. Esiste quindi la derivata di Radon-Nikodym di ν rispetto a $\widehat{\mathbb{P}}$, cioè una funzione $f(\omega) = \frac{d\nu}{d\widehat{\mathbb{P}}}(\omega)$, \mathcal{G} -misurabile, per la quale valga, qualunque sia $A \in \mathcal{G}$

¹⁴Date due misure ν e μ su una σ -algebra \mathcal{G} , si dice che ν è assolutamente rispetto a μ se e solo se per ogni $A \in \mathcal{G}$ con $\mu(A) = 0$ risulta $\nu(A) = 0$. Questa proprietà si può anche esprimere dicendo che la famiglia $\mathcal{N}^\nu = \{A : \nu(A) = 0\}$ degli insiemi di ν -misura nulla contiene la famiglia $\mathcal{N}^\mu = \{A : \mu(A) = 0\}$ degli insiemi di μ -misura nulla. La derivata di Radon-Nikodym $\frac{d\nu}{d\mu}$ è una funzione h , che sia \mathcal{G} -misurabile, e per la quale valga

$$\nu(A) = \int_A h(\omega) \mu(d\omega) = \int_{\Omega} \mathbb{I}_A h(\omega) \mu(d\omega), \quad \text{per ogni } A \in \mathcal{G}.$$

$$\nu(A) = \int_A f(\omega) d\widehat{\mathbb{P}}(\omega) = \int_A f(\omega) d\mathbb{P}(\omega)$$

ovvero

$$\mathbb{E}[XI_A] = \mathbb{E}[fI_A].$$

La derivata di Radon-Nikodym è definita a meno di insiemi di $\widehat{\mathbb{P}}$ -misura nulla. Infatti se $g(\omega)$ è un'altra funzione \mathcal{G} -misurabile per la quale valga $\mathbb{E}[XI_A] = \mathbb{E}[gI_A]$ per ogni $A \in \mathcal{G}$, allora $\mathbb{E}[fI_A] = \mathbb{E}[gI_A]$ per ogni $A \in \mathcal{G}$, ed in particolare per $A = \{\omega : f(\omega) \geq g(\omega)\}$ e per $A = \{\omega : f(\omega) < g(\omega)\}$, per cui $\mathbb{E}[|f - g|] = 0$. Basta quindi prendere come \widetilde{X} la derivata di Radon-Nikodym f o qualunque altra variabile aleatoria che differisca da \widetilde{X} al più in un insieme (\mathcal{G} -misurabile) di probabilità nulla.

Anche la Definizione 2.2 è ben posta, per convincersene basta considerare che lo spazio $L^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, pensato come classi di equivalenza, è uno spazio di Hilbert con la norma $\|X\|^2 = \mathbb{E}[|X|^2]$ ed $L^2(\Omega, \mathcal{G}, \widehat{\mathbb{P}})$ è un suo sottospazio chiuso. Quindi la classe di equivalenza $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$ della Definizione 2.2 è la proiezione di X su $L^2(\Omega, \mathcal{G}, \widehat{\mathbb{P}})$.

Si noti la (2.4) potrebbe essere modificata come

$$\mathbb{E}[XW] = \mathbb{E}[\widetilde{X}W], \quad \forall \text{ v.a. } W \text{ } \mathcal{G} \text{ - misurabile e per cui } XW \text{ è integrabile.} \quad (2.14)$$

Dimostrazione. [**Attenzione:** la dimostrazione si basa sulle proprietà di linearità e di monotonia dei valori attesi condizionali, che dimostreremo più in là, basandoci solo sulla Definizione 2.1 e quindi sulla (2.4)]

Ovviamente (2.14) implica (2.4). Per mostrare il viceversa, basta considerare il caso in cui $W \geq 0$. In tale caso esiste una successione $W_n \uparrow W$, con W_n funzioni elementari, cioè combinazioni lineari di funzioni indicatrici. D'altra parte è facile vedere (confronta le proprietà di linearità e di monotonia, dimostrate nella sezione successiva) che, posto

$$X = X^+ - X^-, \quad \text{con } X^+ = X \vee 0, \text{ e con } X^- = (-X) \vee 0,$$

si ha $\widetilde{X} = \widetilde{X}^+ - \widetilde{X}^-$, per la proprietà di linearità, con $\widetilde{X}^+ \geq 0$ e $\widetilde{X}^- \geq 0$, per la proprietà di monotonia. Inoltre si ha che

$$\mathbb{E}[XW_n] = \mathbb{E}[X^+W_n] - \mathbb{E}[X^-W_n] = \mathbb{E}[\widetilde{X}^+W_n] - \mathbb{E}[\widetilde{X}^-W_n].$$

Per la proprietà di convergenza monotona dei valori attesi, (se $Z \geq 0$ allora $0 \leq ZW_n \leq ZW_{n+1} \uparrow ZW$), si ha

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X^+W_n] \uparrow \mathbb{E}[X^+W], & \quad \mathbb{E}[X^-W_n] \uparrow \mathbb{E}[X^-W], \\ \mathbb{E}[\widetilde{X}^+W_n] \uparrow \mathbb{E}[\widetilde{X}^+W], & \quad \mathbb{E}[\widetilde{X}^-W_n] \uparrow \mathbb{E}[\widetilde{X}^-W], \end{aligned}$$

quindi $\mathbb{E}[XW] = \mathbb{E}[\widetilde{X}W]$, in quanto

$$\mathbb{E}[XW] \leftarrow \mathbb{E}[XW_n] = \mathbb{E}[\widetilde{X}W_n] \rightarrow \mathbb{E}[\widetilde{X}^+W] - \mathbb{E}[\widetilde{X}^-W] = \mathbb{E}[\widetilde{X}W]$$

2.4 Equivalenza tra le definizioni di valore atteso condizionale per variabili aleatorie di quadrato sommabile

Mostreremo ora che, se X è di quadrato sommabile, allora ogni variabile aleatoria \tilde{X}_2 che soddisfa la Definizione 2.2, soddisfa anche la Definizione 2.1. Per l'implicazione inversa, sempre nel caso in cui X sia di quadrato integrabile, abbiamo bisogno di alcune delle proprietà della media condizionale secondo la Definizione 2.1, enunciate precedentemente e che dimostreremo in seguito.

1) Se \tilde{X}_2 è la (o meglio un rappresentante della) media condizionale di X secondo la Definizione 2.2, allora lo è anche secondo la Definizione 2.1.

Se infatti \tilde{X}_2 soddisfa la condizione (2.7) allora, qualunque sia $Z \in L^2(\Omega, \mathcal{G}, \hat{\mathbb{P}})$ la funzione

$$\phi_2(t) := \mathbb{E}[(X - \{(1-t)\tilde{X}_2 + tZ\})^2] = \mathbb{E}[(X - \tilde{X}_2)^2 - 2t(X - \tilde{X}_2)(Z - \tilde{X}_2) + t^2(Z - \tilde{X}_2)^2]$$

ammette un minimo in $t = 0$, e quindi

$$\phi'_2(t)|_{t=0} = \frac{d}{dt} \mathbb{E}[(X - \{(1-t)\tilde{X}_2 + tZ\})^2] \Big|_{t=0} = -2\mathbb{E}[(X - \tilde{X}_2)(Z - \tilde{X}_2)] = 0$$

Quindi posto $W = Z - \tilde{X}_2$ deve valere, qualunque sia $W \in L^2(\Omega, \mathcal{G}, \hat{\mathbb{P}})$

$$\mathbb{E}[XW] = \mathbb{E}[\tilde{X}_2W].$$

Considerando che tutte le funzioni indicatrici del tipo I_A , con $A \in \mathcal{G}$, sono in $L^2(\Omega, \mathcal{G}, \hat{\mathbb{P}})$, otteniamo che se vale la (2.7) allora vale la (2.4).

2) Se \tilde{X} è la media condizionale di X secondo la Definizione 2.1 (o meglio ne è un rappresentante), allora lo è anche secondo la Definizione 2.2.

Infatti, allora \tilde{X} è di quadrato sommabile (confrontare l'osservazione alla disuguaglianza di Jensen, proprietà 7.) e quindi la seguente funzione è finita per ogni Z di quadrato sommabile

$$\phi(t) := \mathbb{E}[(X - \{(1-t)\tilde{X} + tZ\})^2] = \mathbb{E}[(X - \tilde{X})^2 - 2t(X - \tilde{X})(Z - \tilde{X}) + t^2(Z - \tilde{X})^2]$$

Poiché si tratta di una parabola essa ammette un minimo nel punto \bar{t} , in cui la derivata si annulla:

$$\phi'(\bar{t}) = -2\mathbb{E}[(X - \tilde{X})(Z - \tilde{X})] + 2\bar{t} \mathbb{E}[(Z - \tilde{X})^2] = 0$$

Posto $W = Z - \tilde{X}$ e tenendo conto della (2.14), si ottiene $\phi'(\bar{t}) = 2\bar{t} \mathbb{E}[(Z - \tilde{X})^2] = 0$, da cui, per l'arbitrarietà di Z , segue che $\bar{t} = 0$. Quindi \tilde{X} gode della proprietà che per ogni Z di quadrato sommabile $\phi(1) \geq \phi(0)$, ovvero la (2.7).

Osservazione 2.1. Si noti l'analogia¹⁵ con il problema classico di geometria euclidea del trovare la proiezione di un vettore $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ su un sottospazio vettoriale $V \subset \mathbb{R}^n$ come quel vettore $\tilde{\mathbf{x}} \in V$ che gode della proprietà di minimizzare la distanza da V , ovvero

$$\|\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}\|^2 = \min_{z \in V} \|\mathbf{x} - z\|^2,$$

che è notoriamente equivalente alla condizione di ortogonalità

$$\langle \mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{z} \rangle = 0 \text{ per ogni } \mathbf{z} \in V \quad \Leftrightarrow \quad \langle \mathbf{x}, \mathbf{z} \rangle = \langle \tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{z} \rangle \text{ per ogni } \mathbf{z} \in V.$$

2.5 Dimostrazioni delle proprietà del valore atteso condizionale

Daremo ora le dimostrazioni delle proprietà enunciate nella sezione precedente utilizzando solo la Definizione 2.1.

Si noti che ciò permette di concludere che la dimostrazione dell'equivalenza delle Definizioni 2.1 e 2.2 è autocontenuta: in realtà andrebbero prima dimostrate le proprietà 1,2, e 7; successivamente la (2.14) e infine l'equivalenza delle Definizioni 2.1 e 2.2.

1. Linearità: $\mathbb{E}[aX + bY \mid \mathcal{G}] = a\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}] + b\mathbb{E}[Y \mid \mathcal{G}]$

La dimostrazione è ovvia infatti se $\mathbb{E}[XI_A] = \mathbb{E}[\tilde{X}I_A]$ e $\mathbb{E}[YI_A] = \mathbb{E}[\tilde{Y}I_A]$ per ogni $A \in \mathcal{G}$ allora

$$\mathbb{E}[(aX + bY)I_A] = a\mathbb{E}[XI_A] + b\mathbb{E}[YI_A] = a\mathbb{E}[\tilde{X}I_A] + b\mathbb{E}[\tilde{Y}I_A] = \mathbb{E}[(a\tilde{X} + b\tilde{Y})I_A]$$

2. Monotonia: $\mathbb{P}(X \leq Y) = 1$ implica $\mathbb{P}(\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}] \leq \mathbb{E}[Y \mid \mathcal{G}]) = 1$

Se $\mathbb{P}(X \leq Y) = 1$, allora $\mathbb{E}[(Y - X)I_A] = \mathbb{E}[(\tilde{Y} - \tilde{X})I_A] \geq 0$ per ogni $A \in \mathcal{G}$ e quindi in particolare per $A = \{\tilde{X} < \tilde{Y}\}$, si ottiene che $\mathbb{P}(\tilde{X} \leq \tilde{Y}) = 1$, ovvero $\mathbb{P}(\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}] \leq \mathbb{E}[Y \mid \mathcal{G}]) = 1$.

3. Formula dei condizionamenti successivi: se $\mathcal{G} \subseteq \mathcal{H}$, allora $\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[X \mid \mathcal{H}] \mid \mathcal{G}]$

Sia $\mathcal{G} \subseteq \mathcal{H}$ e siano \tilde{X} e \hat{X} tali che $\mathbb{E}[XI_A] = \mathbb{E}[\tilde{X}I_A]$ per ogni $A \in \mathcal{G} \subseteq \mathcal{H}$ e $\mathbb{E}[XI_B] = \mathbb{E}[\hat{X}I_B]$ per ogni $B \in \mathcal{H}$, ed in particolare per ogni $A \in \mathcal{G}$. Allora

$$\mathbb{E}[\hat{X}I_A] = \mathbb{E}[\tilde{X}I_A] (= \mathbb{E}[XI_A]), \quad \text{per ogni } A \in \mathcal{G}$$

e quindi $\tilde{X} = \mathbb{E}[\hat{X} \mid \mathcal{G}]$. La seconda parte deriva dal fatto che per la σ -algebra banale la media e la media condizionale coincidono.

¹⁵L'analogia si vede meglio se si sostituisce $\|\mathbf{x} - \mathbf{z}\|^2$ con $d_{L^2}(X, Z) = \mathbb{E}[|X - Z|^2]$ e $\langle \mathbf{x}, \mathbf{z} \rangle$ con $\mathbb{E}[XZ]$.

4. Fattorizzazione: se Z è \mathcal{G} -misurabile e ZX è integrabile allora $\mathbb{E}[ZX \mid \mathcal{G}] = Z\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}]$.

Infatti allora $\mathbb{E}[XZI_A] = \mathbb{E}[\tilde{X}ZI_A]$, per ogni $A \in \mathcal{G}$ e la funzione $Z\tilde{X}$ è ovviamente \mathcal{G} -misurabile.

5. Condizionamento rispetto a σ -algebre indipendenti: se X e \mathcal{G} sono indipendenti allora $\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}] = \mathbb{E}[X]$.

Infatti allora, per ogni $A \in \mathcal{G}$

$$\mathbb{E}[XZI_A] = \mathbb{E}[X]\mathbb{E}[ZI_A] = \mathbb{E}[Z\mathbb{E}[X]I_A]$$

e la funzione $Z\mathbb{E}[X]$ è ovviamente \mathcal{G} -misurabile.

6. Condizionamento ridondante: se X e \mathcal{G} sono indipendenti da \mathcal{H} allora, per il Lemma di Dynkin¹⁶ $\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G} \vee \mathcal{H}] = \mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}]$.

La dimostrazione si basa sul fatto che gli eventi del tipo $A \cap B$, con $A \in \mathcal{G}$ e $B \in \mathcal{H}$, formano un sistema chiuso rispetto all'intersezione e generano $\mathcal{G} \vee \mathcal{H}$, per il lemma precedente basterà quindi verificare che

$$\mathbb{E}[XI_{A \cap B}] = \mathbb{E}[XI_A I_B] = \mathbb{E}[XI_A]\mathbb{E}[I_B] = \mathbb{E}[\tilde{X}I_A]\mathbb{E}[I_B] = \mathbb{E}[\tilde{X}I_A I_B] = \mathbb{E}[\tilde{X}I_{A \cap B}].$$

(Alternativamente¹⁷, senza bisogno del Lemma di Dynkin: le unioni finite di eventi di questo tipo formano un'algebra che genera $\mathcal{G} \vee \mathcal{H}$, le due misure $\mathbb{E}[XI_{A \cap B}]$ e $\mathbb{E}[\tilde{X}I_{A \cap B}]$ coincidono sull'algebra e sono σ -additive, quindi coincidono su tutta la σ -algebra $\mathcal{G} \vee \mathcal{H}$.)

7. Disuguaglianza di Jensen¹⁸: se ϕ è una funzione convessa, e $\phi(X)$ è integrabile, allora $\phi(\mathbb{E}[X \mid \mathcal{G}]) \leq \mathbb{E}[\phi(X) \mid \mathcal{G}]$.

¹⁶Ricordiamo l'enunciato del Lemma di Dynkin, che tra l'altro è la base per molti risultati di unicità.

Lemma 2.1 (Lemma di Dynkin, Billingsley 1984). *Sia \mathcal{A} una famiglia di eventi che genera la σ -algebra \mathcal{G} e che è chiusa rispetto alla intersezione finita. Se due misure finite ν e μ coincidono su \mathcal{A} , allora le due misure coincidono su \mathcal{G} .*

¹⁷Va tuttavia osservato che comunque, la dimostrazione del risultato sull'unicità dell'estensione da un'algebra \mathcal{A} alla σ -algebra generata da \mathcal{A} , si basa a sua volta sul Lemma di Dynkin.

¹⁸Si noti che nel caso particolare in cui \mathcal{G} è la σ -algebra banale la disuguaglianza di Jensen per i valori attesi condizionali diviene l'usuale disuguaglianza di Jensen

$$\phi(\mathbb{E}[X]) \leq \mathbb{E}[\phi(X)].$$

Infine va notato che la precedente disuguaglianza di Jensen, nel caso particolare di una variabile aleatoria X semplice, a valori in $\{x_1, \dots, x_n\}$, con $\mathbb{P}(\{X = x_i\}) = \lambda_i$ si scrive come

$$\phi(\mathbb{E}[X]) = \phi\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i\right) \leq \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi(x_i) = \mathbb{E}[\phi(X)], \quad \text{con } \lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Per risultati classici di analisi ϕ è l'involuppo delle sue tangenti (o sotto tangenti) ovvero esistono una successione di rette $\phi_n(x) = \alpha_n x + \beta_n$ per cui $\phi(x) = \sup_n \{\phi_n(x)\}$, per ogni x in \mathbb{R} . Per le proprietà **1.** di linearità e **2.** di monotonia si ha allora che

$$\phi_n(\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]) = \alpha_n \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] + \beta_n = \mathbb{E}[\phi_n(X) | \mathcal{G}] \leq \mathbb{E}[\phi(X) | \mathcal{G}];$$

passando all'estremo superiore su n si ottiene

$$\sup_n \{\phi_n(\mathbb{E}[X | \mathcal{G}])\} = \phi(\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]) \leq \mathbb{E}[\phi(X) | \mathcal{G}].$$

Si noti che nella dimostrazione vengono utilizzate solo le proprietà di linearità e di monotonia del valore atteso condizionato.

8. Convergenza sotto il segno di media condizionale, monotona e dominata

8i) Se $\{X_n\}_{n \geq 1}$ è una successione di variabili aleatorie non negative ed integrabili, convergente con probabilità 1 ad X , **monotonamente**, cioè $0 \leq X_n \leq X_{n+1}$, allora $\mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}] \nearrow \mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$, con probabilità 1.

Dalla proprietà di monotonia si ottiene che se $\{X_n\}_{n \geq 1}$ è una successione monotona allora anche la successione delle medie condizionate $\tilde{X}_n = \mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}]$ è una successione monotona, ed è quindi convergente ad una variabile aleatoria \tilde{Z} , \mathcal{G} -misurabile. (È importante notare che per ogni n esiste un insieme $A_n \in \mathcal{G}$ di probabilità nulla nel cui complementare vale $\tilde{X}_n \leq \tilde{X}_{n+1}$, che queste disuguaglianze valgono contemporaneamente nel complementare di $A = \bigcup_{n \geq 1} A_n$, ed infine che A ha ancora misura nulla).

Per mostrare che la successione converge ad un rappresentante di $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$, basta notare che $\mathbb{E}[\tilde{X}_n I_A] = \mathbb{E}[X_n I_A] \uparrow \mathbb{E}[X I_A]$, per la convergenza monotona di $\{X_n\}$ a X (e quindi di $\{X_n I_A\}$ a $X I_A$), e che $\mathbb{E}[\tilde{X}_n I_A] \uparrow \mathbb{E}[\tilde{Z} I_A]$, per la convergenza monotona di $\{\tilde{X}_n\}$ a \tilde{Z} (e quindi di $\{\tilde{X}_n I_A\}$ a $\tilde{Z} I_A$). Di conseguenza $\mathbb{E}[X I_A] = \mathbb{E}[\tilde{Z} I_A], \forall A \in \mathcal{G}$.

8ii) Se $\{X_n\}_{n \geq 1}$ è una successione di variabili aleatorie integrabili, convergente con probabilità 1 ad X , **dominatamente**, cioè $|X_n| \leq Y$, per una variabile aleatoria Y integrabile, allora $\mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}] \rightarrow \mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$, in L^1 .

La disuguaglianza interna è equivalente alla definizione di funzione convessa. Lo è esattamente nel caso $n = 2$

$$\phi(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda \phi(x_1) + (1 - \lambda)\phi(x_2)$$

Il caso generale si ottiene per induzione su n : Se

$$\phi\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i\right) \leq \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi(x_i), \text{ per ogni } \lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \text{ e per ogni } x_i$$

allora

$$\phi\left(\sum_{i=1}^{n+1} \mu_i x_i\right) \leq \sum_{i=1}^{n+1} \mu_i \phi(x_i), \text{ per ogni } \mu_i \geq 0, \sum_{i=1}^{n+1} \mu_i = 1, \text{ e per ogni } y_i$$

La dimostrazione relativa alla convergenza dominata si basa sulla seguente osservazione: se $X_n \rightarrow X$ q.c. e $|X_n| \leq Y$ allora $X_n \rightarrow X$ in L^1 (infatti allora $|X_n - X| \leq |Y| + |X|$ e quindi $|X_n - X| \rightarrow 0$ dominatamente e perciò $\mathbb{E}[|X_n - X|] \rightarrow 0$). Di conseguenza per le proprietà di linearità e per la disuguaglianza di Jensen applicata alla funzione $\phi(x) = |x|$ e alla variabile aleatoria $X_n - X$,

$$|\mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}] - \mathbb{E}[X | \mathcal{G}]| = |\mathbb{E}[X_n - X | \mathcal{G}]| \leq \mathbb{E}[|X_n - X| | \mathcal{G}].$$

Passando ai valori medi

$$\mathbb{E}[|\mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}] - \mathbb{E}[X | \mathcal{G}]|] = \mathbb{E}[|\mathbb{E}[X_n - X | \mathcal{G}]|] \leq \mathbb{E}[\mathbb{E}[|X_n - X| | \mathcal{G}]] = \mathbb{E}[|X_n - X|] \rightarrow 0.$$

Osservazione. Dalla dimostrazione è chiaro che basta la convergenza $X_n \rightarrow X$ in L^1 , per ottenere la convergenza delle rispettive medie condizionali in L^1 . In realtà, nel caso di convergenza dominata, c'è anche la convergenza puntuale delle medie condizionali. La dimostrazione di questo fatto è rimandata a dopo aver mostrato l'esistenza di distribuzioni condizionali regolari.

2.6 Probabilità condizionali regolari

Il problema è il seguente:

È possibile trovare una versione di $\mathbb{P}(A \mid \mathcal{G})$ in modo che l'applicazione

$$\mathbb{P}(\cdot \mid \mathcal{G})(\omega) : \mathcal{F} \rightarrow [0, 1]; A \rightarrow \mathbb{P}(A \mid \mathcal{G})(\omega)$$

sia una probabilità per ogni ω ?

Ad un primo sguardo superficiale sembrerebbe di sì:

Ovviamente $\mathbb{P}(\Omega \mid \mathcal{G})(\omega)=1$. Dalla proprietà di monotonia si ha che $\mathbb{P}(C \mid \mathcal{G}) \in [0, 1]$, per ogni evento $C \in \mathcal{F}$. Dalla proprietà di convergenza monotona, applicata alla successione $X_n = \sum_{k=1}^n I_{A_k}$, dove $\{A_n\}$ è una successione di eventi di \mathcal{F} , oppure di una σ -algebra $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{F}$, si ottiene che, comunque scelta una successione di eventi di \mathcal{A} , disgiunti a due a due, vale

$$\mathbb{P}\left(\bigcup_{n \geq 1} A_n \mid \mathcal{G}\right) = \sum_{n \geq 1} \mathbb{P}(A_n \mid \mathcal{G})$$

nel senso che al più differiscono per un insieme di misura nulla N .

Sembrerebbe quindi tutto funzionare. Il problema sta nel fatto che l'insieme N può dipendere però, in generale, dalla particolare successione $\{A_n, n \geq 1\}$ scelta e l'unione su tutte le successioni possibili è un'unione non numerabile, quindi non è detto che sia un evento e, anche se lo fosse, non è detto che sia di probabilità nulla. È proprio questo che in generale impedisce di affermare che $A \mapsto \mathbb{P}(A \mid \mathcal{G})(\omega)$ è una probabilità.

Lo stesso tipo di problema si pone nel caso in cui invece si cerchi una versione di $\mathbb{P}(A \mid \mathcal{G})(\omega)$ per $A \in \mathcal{A} \subseteq \mathcal{F}$, mentre non c'è nessun problema del tipo precedente se \mathcal{A} è un'algebra finita (e quindi una σ -algebra).

Comunque, nel caso in cui sia possibile trovare un **nucleo di misure di probabilità**, cioè una famiglia

$$\mathbb{Q}(\cdot, \cdot) : \mathcal{A} \times \Omega \rightarrow [0, 1]; (A, \omega) \mapsto \mathbb{Q}(A, \omega)$$

- 1) per ogni $\omega \in \Omega$, $\mathbb{Q}(\cdot, \omega)$ è una misura di probabilità su (Ω, \mathcal{A})
- 2) per ogni $C \in \mathcal{A}$, $\mathbb{Q}(C, \cdot)$ è \mathcal{G} -misurabile ed è una versione di $\mathbb{P}(C \mid \mathcal{G})(\omega)$,

allora si dice che $\mathbb{Q}(\cdot, \omega)$ è una **versione regolare** di $\mathbb{P}(\cdot \mid \mathcal{G})(\omega)$, cioè **delle probabilità condizionali**.

L'interesse di tali versioni deriva dal fatto che allora, per ogni v.a. Z , \mathcal{A} -misurabile e integrabile, vale

$$\mathbb{E}(Z \mid \mathcal{G})(\omega) = \int_{\Omega} Z(\omega') \mathbb{Q}(d\omega', \omega).$$

Per convincersene basta capire che ciò è vero per $Z = I_C$, e quindi per ogni funzione elementare, cioè combinazione lineare di funzioni indicatrici. Quindi (3) vale per ogni v.a. non negativa integrabile, in quanto limite monotono di funzioni elementari, e quindi per ogni v.a. integrabile in quanto differenza di due v.a. non negative ed integrabili.

L'interesse per l'esistenza di una versione regolare delle probabilità condizionali sta anche nel fatto che tutte le dimostrazioni delle proprietà delle medie condizionali sarebbero immediate (in particolare la disuguaglianza di Jensen e la convergenza monotona e dominata, anche nella versione dell'osservazione relativa, con la convergenza puntuale).

Non sempre, purtroppo, si hanno versioni regolari delle probabilità condizionali. In generale dipende dalla σ -algebra \mathcal{A} , qui di seguito viene dimostrato che ciò è vero se $\mathcal{A} = \sigma(X)$, dove X è una variabile aleatoria a valori in \mathbb{R} , cioè se $C = \{X \in H\}$, $H \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$. In realtà si potrebbe vedere che ciò è vero anche se X è una variabile aleatoria d dimensionale, oppure se X è una variabile aleatoria a valori in uno spazio metrico S , completo e separabile (ovvero uno spazio polacco). In questi casi si ottiene anche una probabilità sullo spazio S degli stati di X e si parla di distribuzione condizionale invece che di probabilità condizionale, che invece è una misura di probabilità su Ω .

L'idea è molto semplice: si considera $F(t | \mathcal{G})(\omega) := \mathbb{P}(X \leq t | \mathcal{G})(\omega)$ per t razionale. Per la proprietà della monotonia, possiamo prendere una versione per cui, per ogni $t_1 \leq t_2$ razionali, $F(t_1 | \mathcal{G})(\omega) \leq F(t_2 | \mathcal{G})(\omega)$, in un evento Ω_0 di probabilità 1: in questo caso l'evento in cui ciò non si verifica è un'unione numerabile di eventi di probabilità nulla. Per $\omega \in \Omega_0^c$ si definisce $F(t | \mathcal{G})(\omega) = F_0(t)$, con F_0 una fissata funzione di distribuzione, ad esempio (sempre sui razionali). Su tale evento Ω_0 esiste, per monotonia, il limite di $F(t | \mathcal{G})(\omega)$ sia per $t \rightarrow +\infty$ che per $t \rightarrow -\infty$, sempre per t razionale. Tali limiti sono rispettivamente uguali ai limiti di $F(n | \mathcal{G})(\omega)$ e di $F(-n | \mathcal{G})(\omega)$, e, di nuovo a parte un insieme di probabilità nulla, coincidono rispettivamente con $1 = \mathbb{P}(X < +\infty | \mathcal{G})$ e $0 = \mathbb{P}(X < -\infty | \mathcal{G})$. (Di nuovo su tale insieme si definisca $F(t | \mathcal{G})(\omega) = F_0(t)$)

Per ogni valore s reale, ma non razionale, si definisce una successione $t_n \downarrow s$. Per la proprietà della convergenza monotona (applicato a $1 - I_{\{X \leq t_n\}}$) si ottiene che il limite di $F(t_n | \mathcal{G})(\omega)$ esiste ed è una versione di $\mathbb{P}(X \leq s | \mathcal{G})(\omega)$. In questo modo si è ottenuta, per ogni ω una funzione $F(s | \mathcal{G})(\omega)$, definita su tutti i reali, e che soddisfa tutte le proprietà di una funzione di ripartizione, come si può vedere facilmente. Ad ogni ω è quindi associata una misura $\mu_X(\cdot | \mathcal{G})(\omega)$ di probabilità, che definisce appunto la distribuzione condizionale di X data \mathcal{G} .

Si faccia attenzione: $\mu_X(\cdot | \mathcal{G})(\omega)$ è una probabilità su $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$, mentre $\mathbb{Q}(\cdot | \mathcal{G})(\omega)$ è una misura su $(\Omega, \sigma(X))$. Comunque accade che $\mathbb{P}(\{X \in H\} | \mathcal{G})(\omega) = \mu_X(H | \mathcal{G})(\omega)$. Inoltre poiché le v.a. $\sigma(X)$ -misurabili sono le variabili aleatorie del tipo $Z = f(X)$, con f boreliana, si ha che

$$\mathbb{E}(f(X) | \mathcal{G})(\omega) = \mu_X(f | \mathcal{G})(\omega),$$

dove, in generale,

$$\mu(f) := \int f(x)d\mu(x).$$

Per la verità esiste una generalizzazione a tutti gli **spazi di Borel** (S, \mathcal{S}) , cioè quegli spazi misurabili (S, \mathcal{S}) per cui esiste un insieme $E \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$ e una funzione biunivoca $\phi : S \rightarrow E$ che sia $(S, \mathcal{S}) - (E, \mathcal{B}(\mathbb{R})|_E)$ misurabile, e la cui inversa sia $(E, \mathcal{B}(\mathbb{R})|_E) - (S, \mathcal{S})$ misurabile.

In particolare quindi il risultato di esistenza della versione regolare è valido per $(S, \mathcal{S}) = (\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d))$ o $(S, \mathcal{S}) = (\mathbb{R}^{\mathbb{N}}, \mathcal{R}^{\mathbb{N}})$, che sono spazi di Borel (vedere ad esempio P. Billingsley [2] “Convergence of Probability measures“ pag. 218 e seguenti).

Prima della dimostrazione va notato che questo fatto permette di applicare il risultato anche al caso in cui siano coinvolte le variabili aleatorie $X_n, n \geq 1$, ed X (confrontare di nuovo l’osservazione alla proprietà della convergenza dominata per i valori attesi condizionali).

La dimostrazione è basata sull’osservazione che se Y è una variabile aleatoria a valori in S , allora $X := \phi(Y)$ è una variabile aleatoria reale, e quindi esiste una distribuzione condizionale $\mu_X(\cdot | \mathcal{G})$. La distribuzione condizionale di Y su (S, \mathcal{S}) si ottiene, per $J \in \mathcal{S}$, come

$$\nu_Y(J | \mathcal{G})(\omega) = \mu_X(\phi(J) | \mathcal{G})(\omega)$$

in quanto la seconda è una versione di

$$\mathbb{P}(\{X \in \phi(J)\} | \mathcal{G})(\omega) \equiv \mathbb{P}(\{\phi^{-1}(X) \in J\} | \mathcal{G})(\omega) \equiv \mathbb{P}(\{Y \in J\} | \mathcal{G})(\omega).$$

Abbiamo già usato il fatto che ogni funzione $\sigma(X)$ -misurabile si può esprimere come $f(X)$. Supponiamo ora che $\mathcal{G} = \sigma(Y)$ allora, necessariamente deve accadere che $\mu_X(H)(\omega)$ sia una funzione di $Y(\omega)$, ovvero che, per ogni boreliano H , esista una funzione $f(H, y)$, misurabile in y , per cui

1) $f(H, Y(\omega)) = \mu_X(H)(\omega)$

2) $f(\cdot, y)$ sia una misura di probabilità per ogni y

(questo è sicuramente vero se $y \in Y(\Omega)$, mentre se $y \notin Y(\Omega)$ basta definire $f(H, y) = \nu(H)$ per una fissata misura di probabilità ν).

Indicheremo $f(H, y)$ con la notazione più evocativa di $\mu_X(H | Y = y)$ o anche $\mu_{X|Y}(H | y)$. Analogamente indicheremo con $F_X(t | Y = y)$ o con $F_{X|Y}(t | y)$ la funzione di distribuzione condizionale di X data Y , “valutata in $Y = y$ ”. Ovviamente tale espressione non va confusa con $\mathbb{P}(X \leq t | \{Y = y\})$, che tra l’altro potrebbe non avere senso nel caso in cui $\mathbb{P}(\{Y = y\}) = 0$.

2.7 Esempi

Esempio 2.7 (caso dominato). *Si tratta della generalizzazione dell’Esempio 2.4. Siano X ed Y due variabili aleatorie con legge congiunta assolutamente continua rispetto ad una misura prodotto $\nu_1(dx) \times \nu_2(dy)$ cioè con legge congiunta data da*

$$\mu_{X,Y}(dx, dy) = f(x, y)\nu_1(dx) \times \nu_2(dy).$$

È facile vedere che la legge di X è assolutamente continua rispetto a $\nu_1(dx)$ e la legge di Y lo è rispetto a $\nu_2(dy)$, o meglio

$$\mu_X(dx) = \left[\int f(x, y)\nu_2(dy) \right] \nu_1(dx) = f_X(x)\nu_1(dx),$$

$$\mu_Y(dy) = \left[\int f(x, y)\nu_1(dx) \right] \nu_2(dy) = f_Y(y)\nu_2(dy).$$

In questo caso anche la legge condizionale di X data Y è assolutamente continua rispetto a $\nu_1(dx)$ e risulta

$$\mu_{X|Y}(dx|y) = \frac{f(x, y)}{f_Y(y)}\nu_1(dx),$$

per μ_Y -quasi ogni y .

Infatti è facile verificare che, per ogni funzione $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, misurabile,

$$\mathbb{E}[g(X)h(Y)] = \mathbb{E}[\phi(Y)h(Y)], \quad \text{per ogni funzione } h \text{ misurabile} \quad (*)$$

dove

$$\phi(y) = \int g(x)\mu_{X|Y}(dx|y) = \int g(x)\frac{f(x, y)}{f_Y(y)}\nu_1(dx);$$

(ovviamente g ed h devono soddisfare ipotesi che garantiscano l'integrabilità delle v.a. $g(X)$ ed $h(Y)$)

Tutte le v.a. W che siano $\sigma(Y)$ -misurabili sono del tipo $W = h(Y)$ per h boreliana, di conseguenza

$$\mathbb{E}[g(X) | Y] = \phi(Y) = \int g(x) \mu_{X|Y}(dx|y)\Big|_{y=Y(\omega)} = \int g(x) \frac{f(x, y)}{f_Y(y)}\nu_1(dx)\Big|_{y=Y(\omega)}$$

Un risultato analogo vale ovviamente anche per la legge di Y data X .

Casi particolari sono i casi in cui $\nu_1(dx) = dx$, e $\nu_2(dy) = dy$, cioè torniamo al caso della misura di Lebesgue esaminato nell'Esempio 2.4, oppure $\nu_1(dx) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta_{x_n}(dx)$, e $\nu_2(dy) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta_{y_n}(dy)$ e si trova allora che

$$\mathbb{E}[g(X) | Y] = \sum_n g(x_n) \mu_{X|Y}(\{x_n\}|y)\Big|_{y=Y(\omega)} = \sum_n g(x_n) \mathbb{P}(X = x_n | Y = y)\Big|_{y=Y(\omega)}.$$

Esempio 2.8 (caso non dominato). Siano X ed Y due variabili aleatorie con legge congiunta data da

$$\mu_{X,Y}(dx, dy) = p f_1(x) dx \delta_{\alpha(x)}(dy) + q f_2(x, y) dx dy,$$

dove

$\delta_z(dx)$ è la misura concentrata in z (ovvero $\delta_z(A) = 1$ se $z \in A$, mentre $\delta_z(A) = 0$ se $z \notin A$),

$p + q = 1$,

$f_1(x)$ è una densità di probabilità su \mathbb{R}

$f_2(x, y)$ è una densità di probabilità su \mathbb{R}^2 ,

α è una funzione invertibile, C^1 e con $|\alpha'(x)|$ strettamente positiva.

Le distribuzioni marginali sono equivalenti alla misura di Lebesgue, essendo

$$\mu_X(dx) = \left[pf_1(x) + q \int f_2(x, y)dy \right] dx,$$

$$\mu_Y(dy) = \left[pf_1(\alpha^{-1}(y)) \frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|} + q \int f_2(x, y)dx \right] dy.$$

L'ultima uguaglianza deriva da

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[h(Y)] &= p \int h(\alpha(x))f_1(x)dx + q \int h(y)dy \int f_2(x, y)dx = \\ &= p \int h(y)f_1(\alpha^{-1}(y)) \frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|} dy + q \int h(y)dy \int f_2(x, y)dx = \int h(y)\mu_Y(dy) \end{aligned}$$

Come si procede per calcolare la media condizionata di $g(X)$ data Y ?

Come nell'esempio precedente si deve trovare una v.a. $\sigma(Y)$ -misurabile, cioè una funzione $\phi(Y)$ per cui valga

$$\mathbb{E}[g(X)h(Y)] = \mathbb{E}[\phi(Y)h(Y)], \quad \text{per ogni funzione } h \text{ misurabile} \quad (*)$$

Se poi troviamo che

$$\phi(y) = \int g(x)\nu(dx; y)$$

per una misura di probabilità $\nu(\cdot; y)$, allora potremo affermare che $\nu(\cdot; y)$ è una versione regolare della distribuzione condizionale di X data $Y = y$.

Ora, qualunque sia la funzione h

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[g(X)h(Y)] &= p \iint g(x)h(y)f_1(x)dx\delta_{\alpha(x)}(dy) + q \iint g(x)h(y)f_2(x, y)dx dy \\ &= p \int g(x)h(\alpha(x))f_1(x)dx + q \int \left(\int g(x)f_2(x, y)dx \right) h(y)dy \\ &= p \int g(\alpha^{-1}(y))f_1(\alpha^{-1}(y)) \frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|} h(y)dy + q \int \left(\int g(x)f_2(x, y)dx \right) h(y)dy \\ &= \int \left[pg(\alpha^{-1}(y))f_1(\alpha^{-1}(y)) \frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|} + q \left(\int g(x)f_2(x, y)dx \right) \right] h(y)dy, \end{aligned}$$

mentre invece

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[\phi(Y)h(Y)] &= p \int \phi(y)h(y)f_1(\alpha^{-1}(y))\frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|}dy + q \int \phi(y)h(y)dy \int f_2(x, y)dx \\ &= \int \phi(y) \left[pf_1(\alpha^{-1}(y))\frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|} + q \left(\int f_2(x, y)dx \right) \right] h(y)dy.\end{aligned}$$

Quindi affinché valga l'uguaglianza (*), qualunque sia h , è necessario e sufficiente che

$$\begin{aligned}\left[pg(\alpha^{-1}(y))f_1(\alpha^{-1}(y))\frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|} + q \left(\int g(x)f_2(x, y)dx \right) \right] = \\ = \phi(y) \left[pf_1(\alpha^{-1}(y))\frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|} + q \left(\int f_2(x, y)dx \right) \right]\end{aligned}$$

ovvero che

$$\phi(y) = \frac{pg(\alpha^{-1}(y))f_1(\alpha^{-1}(y))\frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|} + q \left(\int g(x)f_2(x, y)dx \right)}{pf_1(\alpha^{-1}(y))\frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|} + q \left(\int f_2(x, y)dx \right)}.$$

Si noti ancora che

$$g(\alpha^{-1}(y)) = \int g(x)\delta_{\alpha^{-1}(y)}(dx).$$

Per questo motivo, qualunque sia g , si può riscrivere il numeratore come

$$pf_1(\alpha^{-1}(y))\frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|} \int g(x)\delta_{\alpha^{-1}(y)}(dx) + q \left(\int g(x)f_2(x, y)dx \right)$$

e quindi la legge $\mu_{X|Y}(dx|y)$ di X , condizionata ad $Y = y$, è proporzionale a

$$pf_1(\alpha^{-1}(y))\frac{1}{|\alpha'(\alpha^{-1}(y))|}\delta_{\alpha^{-1}(y)}(dx) + qf_2(x, y)dx.$$

Si noti che quindi la legge di X condizionata a $Y = y$ non è assolutamente continua rispetto alla distribuzione iniziale di X , che ha invece una densità rispetto alla misura di Lebesgue.

Capitolo 3

Martingale

Per definire una martingala abbiamo bisogno di dare prima la seguente

Definizione 3.1 (Filtrazione). *In uno spazio (Ω, \mathcal{F}) , la famiglia $\{\mathcal{F}_t, t \geq 0\}$ si dice una **filtrazione** se è una famiglia crescente di σ -algebre di \mathcal{F} , cioè $\mathcal{F}_s \subseteq \mathcal{F}_t \subseteq \mathcal{F}$, per $0 \leq s \leq t$. (La definizione ha senso anche nel caso in cui $t = n \in \mathbb{N}$, e nel caso in cui $t \in I \subseteq \mathbb{R}$, ad esempio $t \in [0, T]$).*

La σ -algebra \mathcal{F}_t rappresenta l'informazione disponibile fino al tempo t , e più in generale la filtrazione $\{\mathcal{F}_t\}$ viene detta anche **flusso di σ -algebre**, in quanto rappresenta il flusso di informazioni disponibili, al variare del tempo.

Definizione 3.2 (Martingala). *Un processo aleatorio X_t , definito in uno spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, si dice una **martingala** rispetto ad una filtrazione $\{\mathcal{F}_t\}$, con $\mathcal{F}_t \subset \mathcal{F}$, se*

- 0) X_t è \mathcal{F}_t -misurabile per ogni $t \geq 0$. (o più rapidamente il processo X_t è **adattato** ad \mathcal{F}_t)
- 1) X_t è integrabile per ogni $t \geq 0$, cioè $\mathbb{E}[|X_t|] < +\infty$ per ogni $t \geq 0$.
- 2) $\mathbb{E}[X_{t+s} | \mathcal{F}_t] = X_t$, per ogni $t, s \geq 0$

Nel caso in cui $t = n \in \mathbb{N}$ la 2) può essere sostituita con la richiesta che

$$\mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] = X_n, \text{ per ogni } n \in \mathbb{N}.$$

Si noti che la proprietà 0) è sovrabbondante in quanto la 2) implica che X_t sia \mathcal{F}_t -misurabile. Ciò non è vero nella seguente definizione:

Definizione 3.3 (Submartingala (Supermartingala)). *Un processo aleatorio X_t si dice una **submartingala** (**supermartingala**) rispetto ad una filtrazione $\{\mathcal{F}_t\}$ se*

- 0) X_t è \mathcal{F}_t -misurabile per ogni $t \geq 0$. (o più rapidamente il processo X_t è adattato ad \mathcal{F}_t)
- 1) X_t è integrabile per ogni $t \geq 0$, cioè $\mathbb{E}[|X_t|] < +\infty$ per ogni $t \geq 0$.
- 2) $\mathbb{E}[X_{t+s} | \mathcal{F}_t] \geq X_t$ ($\mathbb{E}[X_{t+s} | \mathcal{F}_t] \leq X_t$), per ogni $t, s \geq 0$,

Di nuovo, nel caso in cui $t = n \in \mathbb{N}$ la **2)** può essere sostituita con la richiesta che

$$\mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] \geq X_n (\mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] \leq X_n), \text{ per ogni } n \in \mathbb{N}.$$

Osservazione 3.1. Se X_t è una martingala (o submartingala) rispetto a una filtrazione $\{\mathcal{F}_t\}$ e se $\{\mathcal{G}_t\}$ è una filtrazione per cui $\sigma(X_t) \subseteq \mathcal{G}_t \subseteq \mathcal{F}_t$, per ogni $t \geq 0$, allora X_t lo è anche rispetto alla nuova filtrazione:

$$\mathbb{E}[X_{t+s} | \mathcal{G}_t] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[X_{t+s} | \mathcal{F}_t] | \mathcal{G}_t] = \mathbb{E}[X_t | \mathcal{G}_t] = X_t.$$

In particolare per ogni martingala (o submartingala) si può prendere sempre la filtrazione minimale $\mathcal{F}_t^X = \sigma(\{X_u, u \leq t\}) = \sigma(\bigcup_{0 \leq u \leq t} \sigma(X_u))$, che per la proprietà **0)** è sempre contenuta in \mathcal{F}_t . Quindi, in genere ¹, se la filtrazione non è specificata, si deve intendere che si tratti della filtrazione naturale.

Se invece $\{\mathcal{H}_t\}$ è una filtrazione per cui \mathcal{H}_t è indipendente da \mathcal{F}_t (e quindi da X_t), allora X_t è una martingala (o submartingala) anche rispetto alla filtrazione $\mathcal{G}_t := \mathcal{F}_t \vee \mathcal{H}_t$ (confrontare la proprietà **6.** delle medie condizionali: il condizionamento ridondante).

Osservazione 3.2. Ogni martingala ha media costante e ogni submartingala ha media crescente (in senso lato): basta passare al valore medio nella proprietà **3.** delle medie condizionali (condizionamenti successivi) e tenere presente che il valore medio di Y coincide con il valore medio di $\mathbb{E}[Y | \mathcal{G}]$.

Osservazione 3.3. Data una submartingala X_t si ottiene una supermartingala considerando $-X_t$, e viceversa.

3.1 Esempi di martingale e di submartingale

Esempio 3.1. Sia data una variabile aleatoria Y integrabile ed una filtrazione $\{\mathcal{F}_t\}$. Si definisca $X_t := \mathbb{E}[Y | \mathcal{F}_t]$. Si dimostra facilmente che X_t è una martingala:

$$\mathbb{E}[X_{t+s} | \mathcal{F}_t] = \underset{\text{(per def.)}}{\mathbb{E}[\mathbb{E}[Y | \mathcal{F}_{t+s}] | \mathcal{F}_t]} = \underset{\text{(condiz. successivi)}}{\mathbb{E}[Y | \mathcal{F}_t]}$$

L'esempio precedente aiuta a capire il nome di submartingala: sia ora X_t una submartingala, allora, fissato $v = t + s$, il processo

$$Z_t := \mathbb{E}[X_{t+s} | \mathcal{F}_t] \equiv \mathbb{E}[X_v | \mathcal{F}_t],$$

è una martingala per $t \in [0, v]$, quindi la proprietà **2)** per le submartingale diviene

$$Z_t := \mathbb{E}[X_v | \mathcal{F}_t] \geq X_t, \quad \text{per } t \in [0, v],$$

ovvero che X_t sia sotto la martingala $Z_t := \mathbb{E}[X_v | \mathcal{F}_t]$, per $t \in [0, v]$.

¹Attenzione: ovviamente la filtrazione potrebbe essere specificata anche all'inizio di una sezione, o di un capitolo

Esempio 3.2. Sia data una successione di variabili aleatorie Y_n indipendenti, identicamente distribuite², integrabili e a media nulla. Si definisca

$$S_0 = 0, \quad S_n = \sum_{k=1}^n Y_k, \quad n \geq 1,$$

o equivalentemente

$$S_n = \sum_{k=1}^n Y_k, \quad n \geq 0,$$

(con la convenzione che $\sum_{k=1}^0 a_k = \sum_{1 \leq k \leq 0} a_k = \sum_{k \in \emptyset} a_k = 0$).

Si ottiene facilmente che S_n è una martingala, rispetto³ a $\mathcal{F}_n^S = \begin{cases} \{\emptyset, \Omega\} & \text{se } n = 0, \\ \sigma(\{Y_1, \dots, Y_n\}) & \text{se } n > 0, \end{cases}$

$$\mathbb{E}[S_{n+1} | \mathcal{F}_n] = \mathbb{E}[S_n + Y_{n+1} | \mathcal{F}_n] = S_n + \mathbb{E}[Y_{n+1} | \mathcal{F}_n] = S_n + \mathbb{E}[Y_{n+1}] = S_n.$$

Se le variabili aleatorie Y_k non sono a media nulla, basta sostituire $Y_k - \mu$, se $\mu = \mathbb{E}[Y_1]$, ed ottenere che

$$\tilde{S}_n = \sum_{k=1}^n (Y_k - \mu) = \sum_{k=1}^n Y_k - n\mu = S_n - n\mu$$

è una martingala⁴.

Infine si osservi che, nel caso in cui $\mu > 0$, si ottiene che S_n è una submartingala, mentre, nel caso in cui $\mu < 0$, si ottiene che S_n è una supermartingala.

Esempio 3.3. Se siamo nelle stesse ipotesi del precedente Esempio 3.2 ed inoltre le variabili aleatorie Y_k ammettono momento secondo finito, e quindi varianza σ^2 , allora $M_n := S_n^2 - n\sigma^2$ è una martingala:

$$M_{n+1} - M_n = S_{n+1}^2 - (n+1)\sigma^2 - (S_n^2 - n\sigma^2) = (S_n^2 + 2Y_{n+1}S_n + Y_{n+1}^2) - S_n^2 - \sigma^2 = 2Y_{n+1}S_n + Y_{n+1}^2 - \sigma^2$$

Passando alle medie condizionali si ottiene che

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[M_{n+1} - M_n | \mathcal{F}_n] &= \mathbb{E}[2Y_{n+1}S_n + Y_{n+1}^2 - \sigma^2 | \mathcal{F}_n] \\ &= 2S_n \mathbb{E}[Y_{n+1} | \mathcal{F}_n] + \mathbb{E}[Y_{n+1}^2 | \mathcal{F}_n] - \sigma^2 = 2S_n \cdot 0 + \sigma^2 - \sigma^2 = 0 \end{aligned}$$

²Non è necessario che le variabili aleatorie Y_n abbiano la stessa distribuzione, basta che siano integrabili e abbiano valore atteso nullo.

³La successione $\{Y_k\}$ si ottiene immediatamente dalla successione $\{S_k\}$:

$$Y_n = S_n - S_{n-1}, \quad \text{per } n \geq 1,$$

di conseguenza $\mathcal{F}_n^S = \mathcal{F}_n^Y$, per $n \geq 1$.

⁴Sempre nel caso in cui le variabili aleatorie Y_k non abbiano la stessa legge si dovrà sostituire $Y_k - \mu_k$, dove $\mu_k = \mathbb{E}[Y_k]$. In questo caso

$$\tilde{S}_n = \sum_{k=1}^n (Y_k - \mu_k) = \sum_{k=1}^n Y_k - \sum_{k=1}^n \mu_k$$

in quanto Y_{n+1} è indipendente da \mathcal{F}_n e quindi i valori medi condizionali $\mathbb{E}[Y_{n+1} \mid \mathcal{F}_n]$ ed $\mathbb{E}[Y_{n+1}^2 \mid \mathcal{F}_n]$ coincidono con i rispettivi valori medi.

Se le variabili aleatorie Y_k non sono a media nulla, allora

$$M_n := (S_n - n\mu)^2 - n\sigma^2$$

è una martingala⁵.

Il seguente esempio permette di generare submartingale a partire da martingale e da submartingale.

Esempio 3.4. Sia X_t una martingala con $\mathbb{E}[|X_t|^\alpha] < +\infty$, per un $\alpha \geq 1$. Allora il processo $|X_t|^\alpha$ è una submartingala: basta applicare la disuguaglianza di Jensen alla funzione $|x|^\alpha$, che è convessa per $\alpha \geq 1$

$$|X_t|^\alpha =_{(X_t \text{ è una MG})} \mathbb{E}[|X_{t+s}|^\alpha \mid \mathcal{F}_t] \leq_{(\text{dis. Jensen per } |x|^\alpha)} \mathbb{E}[|X_{t+s}|^\alpha \mid \mathcal{F}_t].$$

Questo esempio si generalizza immediatamente al caso di ogni funzione convessa ϕ , purché, ovviamente, $\mathbb{E}[\phi(X_t)] < +\infty$.

$$\phi(X_t) =_{(X_t \text{ è una MG})} \phi(\mathbb{E}[X_{t+s} \mid \mathcal{F}_t]) \leq_{(\text{dis. Jensen per } \phi)} \mathbb{E}[\phi(X_{t+s}) \mid \mathcal{F}_t].$$

Per ottenere un risultato analogo nel caso in cui X_t sia una submartingala bisogna aggiungere l'ipotesi che ϕ sia una funzione crescente, in modo che, essendo

$$\begin{aligned} X_t &\leq_{(X_t \text{ è una subMG})} \mathbb{E}[X_{t+s} \mid \mathcal{F}_t], \\ &\Downarrow \\ \phi(X_t) &\leq_{(\phi \text{ è crescente})} \phi(\mathbb{E}[X_{t+s} \mid \mathcal{F}_t]) \leq_{(\text{dis. Jensen per } \phi)} \mathbb{E}[\phi(X_{t+s}) \mid \mathcal{F}_t]. \end{aligned}$$

Esempio 3.5. Se le variabili aleatorie W_k sono indipendenti identicamente distribuite⁶, con $\mathbb{E}[W_1] = 1$, allora la successione di variabili aleatorie

$$Z_0 = 1, \quad Z_n := \prod_{k=1}^n W_k, \quad n \geq 1,$$

o equivalentemente

$$Z_n := \prod_{k=1}^n W_k, \quad n \geq 0,$$

⁵Di nuovo la stessa dimostrazione funziona anche nel caso in cui le variabili aleatorie Y_k non hanno la stessa legge, purché abbiano momento secondo finito e siano indipendenti. In tale caso

$$M_n := (S_n - \sum_{k=1}^n \mu_k)^2 - \sum_{k=1}^n \sigma_k^2$$

è una martingala.

⁶L'ipotesi che abbiano la stessa legge è superflua, basta che le variabili aleatorie W_k abbiano valore atteso 1 e siano indipendenti.

(con la convenzione che $\prod_{k=1}^0 a_k = 1$) definisce una martingala, rispetto ⁷ a

$$\mathcal{F}_n = \begin{cases} \{\emptyset, \Omega\} & \text{se } n = 0, \\ \sigma(\{W_1, \dots, W_n\}) & \text{se } n > 0, \end{cases}$$

ovvero, dato che la condizione di misurabilità è ovvia, quella di integrabilità deriva dall'integrabilità di ciascuna delle W_k e dalla loro indipendenza, e infine

$$\mathbb{E}[Z_{n+1} | \mathcal{F}_n] = \mathbb{E}[Z_n W_{n+1} | \mathcal{F}_n] = Z_n \mathbb{E}[W_{n+1} | \mathcal{F}_n] = Z_n \mathbb{E}[W_{n+1}] = Z_n.$$

Come caso particolare si consideri la situazione dell'Esempio 3.2 con l'ulteriore ipotesi che per un $\theta \in \mathbb{R}$ valga

$$\mathbb{E}[\exp\{\theta Y_1\}] = \exp\{\psi(\theta)\} < +\infty$$

(si noti che **non è necessario** supporre $\mathbb{E}[Y_1] = 0$). Allora ovviamente

$$\mathbb{E}[\exp\{\theta Y_1\} \exp\{-\psi(\theta)\}] = \mathbb{E}[\exp\{\theta Y_1 - \psi(\theta)\}] = 1.$$

Come conseguenza, posto $W_k = \exp\{\theta Y_k - \psi(\theta)\}$, si ha che

$$Z_n = \exp\{\theta S_n - n\psi(\theta)\}$$

è una martingala strettamente positiva di media 1.

Esempio 3.6. Sia \tilde{S}_n una martingala rispetto a \mathcal{F}_n , nello spazio $(\Omega, \mathcal{F}, \tilde{\mathbb{P}})$, e sia γ_n **predicibile** rispetto a \mathcal{F}_n , ovvero sia γ_n misurabile rispetto a \mathcal{F}_{n-1} per ogni $n \geq 1$. Allora l'**integrale stocastico discreto**

$$(\gamma \cdot \tilde{S})_n = I_n(\gamma) := \sum_{k=1}^n \gamma_k (\tilde{S}_k - \tilde{S}_{k-1}) \tag{3.1}$$

definisce una \mathcal{F}_n -martingala, sotto una delle due seguenti condizioni:

- a) per ogni k esiste una costante c_k tale che $\tilde{\mathbb{P}}(\{\omega \text{ tali che } \gamma_k(\omega) \leq c_k\}) = 1$
- b) La martingala \tilde{S}_k e il processo γ_k sono di quadrato integrabile, ovvero

$$\tilde{\mathbb{E}}[|\tilde{S}_k|^2] < \infty, \text{ per ogni } k \geq 0 \quad \tilde{\mathbb{E}}[|\gamma_k|^2] < \infty, \text{ per ogni } k \geq 1$$

Verifica: Per la misurabilità basta osservare che se $k \leq n$ allora γ_k e \tilde{S}_{k-1} sono \mathcal{F}_{k-1} -misurabile e quindi anche \mathcal{F}_n -misurabile, analogamente \tilde{S}_k è \mathcal{F}_k -misurabile e quindi anche \mathcal{F}_n -misurabile, di conseguenza

$$I_n(\gamma) = \sum_{k=1}^n \gamma_k (\tilde{S}_k - \tilde{S}_{k-1})$$

⁷In questo caso \mathcal{F}_n^Z può essere strettamente contenuta in $\mathcal{F}_n = \mathcal{F}_n^W$, infatti mentre $Z_n = g_n(W_1, \dots, W_n)$, e quindi ogni funzione misurabile rispetto a Z_1, \dots, Z_n è funzione misurabile di W_1, \dots, W_n , il viceversa in genere non è vero: se Z_1, \dots, Z_n sono tutti positivi, allora $W_k = Z_k/Z_{k-1}$, ma se $Z_n = 0$ allora $Z_{n+m} = 0$ per ogni $m \geq 0$ e quindi è impossibile ricavare i valori di W_{n+m} per $m > 0$. Se tuttavia le variabili aleatorie $W_k(\omega)$, assumono valori strettamente positivi per ogni k e per ogni ω , allora la corrispondenza tra $\{Z_k\}$ e $\{W_k\}$ è biunivoca e $\mathcal{F}_n^Z = \mathcal{F}_n^W$, per ogni $n \geq 1$.

è \mathcal{F}_n -misurabile. Per l'integrabilità si osservi che

$$|I_n(\gamma)| \leq \sum_{k=1}^n |\gamma_k| (|\tilde{S}_k| + |\tilde{S}_{k-1}|)$$

e che, se vale la condizione **a)**, allora

$$\tilde{\mathbb{E}}[|\gamma_k||\tilde{S}_k|] \leq c_k \tilde{\mathbb{E}}[|\tilde{S}_k|] < \infty \quad \tilde{\mathbb{E}}[|\gamma_k||\tilde{S}_{k-1}|] \leq c_k \tilde{\mathbb{E}}[|\tilde{S}_{k-1}|] < \infty,$$

mentre se vale la condizione **b)**, allora per la disuguaglianza di Cauchy

$$\tilde{\mathbb{E}}[|\gamma_k||\tilde{S}_k|] \leq \tilde{\mathbb{E}}^{1/2}[|\gamma_k|^2] \tilde{\mathbb{E}}^{1/2}[|\tilde{S}_k|^2] < \infty \quad \tilde{\mathbb{E}}[|\gamma_k||\tilde{S}_{k-1}|] \leq \tilde{\mathbb{E}}^{1/2}[|\gamma_k|^2] \tilde{\mathbb{E}}^{1/2}[|\tilde{S}_{k-1}|^2] < \infty.$$

Infine basta osservare che

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbb{E}}[I_{n+1}(\gamma) - I_n(\gamma) \mid \mathcal{F}_n] &= \tilde{\mathbb{E}}[\gamma_{n+1}(\tilde{S}_{n+1} - \tilde{S}_n) \mid \mathcal{F}_n] \\ &\stackrel{(\gamma_{n+1} \text{ è } \mathcal{F}_n\text{-mis.})}{=} \gamma_{n+1} \tilde{\mathbb{E}}[(\tilde{S}_{n+1} - \tilde{S}_n) \mid \mathcal{F}_n] \\ &\stackrel{(\tilde{S}_n \text{ è una } \mathcal{F}_n\text{-MG})}{=} \gamma_{n+1} 0 = 0 \end{aligned}$$

Esempio 3.7. Dato uno spazio (Ω, \mathcal{F}) e su di esso una filtrazione \mathcal{F}_t e due misure di probabilità \mathbb{P} e \mathbb{Q} , con \mathbb{P} assolutamente continua rispetto a \mathbb{Q} (di conseguenza lo sono anche rispetto ad \mathcal{F}_t per ogni t). Si definisca la derivata di Radon Nikodym di \mathbb{P} rispetto a \mathbb{Q} , entrambe ristrette a \mathcal{F}_t , cioè

$$L_t := \left. \frac{d\mathbb{P}}{d\mathbb{Q}} \right|_{\mathcal{F}_t}.$$

Il processo L_t è una \mathcal{F}_t -martingala nello spazio $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{Q})$, anzi più in generale risulta che se X_t è un processo adattato ad \mathcal{F}_t , allora X_t è una \mathcal{F}_t -martingala nello spazio $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ se e solo se $X_t L_t$ è una \mathcal{F}_t -martingala nello spazio $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{Q})$ (quindi il caso precedente deriva prendendo banalmente $X_t \equiv 1$).

Infatti X_t è una martingala in $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, se e solo è integrabile rispetto a \mathbb{P} e se per $0 \leq s \leq t$ e $A \in \mathcal{F}_s$

$$\mathbb{E}^{\mathbb{P}}[I_A X_t] = \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[I_A X_s],$$

mentre $X_t L_t$ lo è in $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{Q})$ se e solo se è integrabile rispetto a \mathbb{Q} e se per $0 \leq s \leq t$ e $A \in \mathcal{F}_s$

$$\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[I_A X_t L_t] = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[I_A X_s L_s].$$

Ovviamente, essendo $I_A X_s$ una v.a. \mathcal{F}_s -misurabile, si ha $\mathbb{E}^{\mathbb{P}}[I_A X_s] = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[I_A X_s L_s]$ e, essendo $I_A X_t$ una v.a. \mathcal{F}_t -misurabile, in quanto $A \in \mathcal{F}_s \subseteq \mathcal{F}_t$, si ha $\mathbb{E}^{\mathbb{P}}[I_A X_t] = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[I_A X_t L_t]$. La verifica dell'integrabilità è banale.

Esempio 3.8. Sia X_n una catena di Markov con spazio degli stati finito e con probabilità di transizione $p_{i,j}$. Sia inoltre h una **funzione armonica** rispetto alla matrice delle probabilità di transizione $P = (p_{i,j})_{i,j}$, cioè

$$h(i) = (Ph)(i) := \sum_j p_{i,j}h(j), \quad \text{per ogni } i$$

(si noti che ciò corrisponde a chiedere che h sia la soluzione di $(P - I)h = 0$).

Il processo

$$M_n^h := h(X_n)$$

è una martingala (rispetto a $\mathcal{F}_n^X = \sigma\{X_k, k = 0, \dots, n\}$).

Questo risultato deriva da un caso più generale: qualunque sia f

$$M_n^f := f(X_n) - \sum_{k=0}^{n-1} (P - I)f(X_k)$$

è una martingala rispetto a \mathcal{F}_n^X .

Cominciamo con il caso h armonica. Basta controllare che

$$\mathbb{E}[M_{n+1}^h \mid \mathcal{F}_n^X] = \mathbb{E}[M_{n+1}^h \mid X_n, X_{n-1}, \dots, X_0] = M_n^h,$$

ovvero che

$$\mathbb{E}[h(X_{n+1}) \mid X_n, X_{n-1}, \dots, X_0] = h(X_n).$$

Essendo $(X_n, n \geq 0)$ una catena di Markov si ha⁸

$$\mathbb{E}[f(X_{n+1}) \mid X_n, X_{n-1}, \dots, X_0] = (Pf)(X_n)$$

ed il caso $f = h$ armonica è immediato. Il caso generale deriva dall'osservare che

$$M_{n+1}^f - M_n^f = f(X_{n+1}) - \sum_{k=0}^n (P - I)f(X_k) - f(X_n) + \sum_{k=0}^{n-1} (P - I)f(X_k)$$

$$M_{n+1}^f - M_n^f = f(X_{n+1}) - (P - I)f(X_n) - f(X_n) = f(X_{n+1}) - (Pf)(X_n),$$

e quindi

$$\mathbb{E}[M_{n+1}^f - M_n^f \mid \mathcal{F}_n^X] = \mathbb{E}[f(X_{n+1}) - (Pf)(X_n) \mid \mathcal{F}_n^X] = \mathbb{E}[f(X_{n+1}) \mid \mathcal{F}_n^X] - (Pf)(X_n) = 0.$$

⁸Nel caso di variabili aleatorie discrete possiamo applicare i risultati sulle densità condizionali: posto $\mathbf{X} = (X_n, X_{n-1}, \dots, X_0)$, sappiamo che

$$\mathbb{E}[f(X_{n+1}) \mid \mathbf{X}](\omega) = \sum_j f(j) \mathbb{P}(X_{n+1} = j \mid \{\mathbf{X} = \mathbf{x}\})|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}(\omega)}$$

Per la proprietà di Markov $\mathbb{P}(X_{n+1} = j \mid \mathbf{X} = \mathbf{x}) = \mathbb{P}(X_{n+1} = j \mid X_n = x_n) = p_{x_n, j}$, quindi $\mathbb{P}(X_{n+1} = j \mid \mathbf{X}) = \mathbb{P}(X_{n+1} = j \mid X_n) = p_{X_n, j}$ e $\sum_j f(j)\mathbb{P}(X_{n+1} = j \mid \mathbf{X} = \mathbf{x}) = (Pf)(x_n)$ e perciò $\mathbb{E}[f(X_{n+1}) \mid X_n, X_{n-1}, \dots, X_0] = (Pf)(X_n)$

3.2 Decomposizione di Doob

Tenendo conto dell'Esempio 3.4, possiamo affermare che, se sono soddisfatte delle condizioni di integrabilità, il quadrato della martingala S_n dell'Esempio 3.2 è una submartingala. Nell'Esempio 3.3, si ottiene che $S_n^2 - n\mu$ è una martingala, quindi si può scrivere come la somma di due processi

$$S_n^2 = (S_n^2 - n\sigma^2) + n\mu = M_n + A_n$$

dove M_n è una martingala, ed $A_n = n\sigma^2$ è un processo deterministico crescente.

Il seguente teorema generalizza tale esempio a tutte le submartingale.

Teorema 3.1 (Decomposizione di Doob). : *Sia $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ uno spazio di probabilità, e sia $(\mathcal{F}_n)_n \in \mathbb{N}$ una filtrazione con $\mathcal{F}_n \subset \mathcal{F}$. Data una \mathcal{F}_n -submartingala X_n a tempo discreto, essa si può sempre scrivere in modo unico (a meno di insiemi di misura nulla) come*

$$X_n = X_0 + M_n + A_n,$$

dove M_n è una martingala ed A_n è un processo predicibile (cioè, per ogni $n \in \mathbb{N}$, A_n è \mathcal{F}_{n-1} -misurabile) crescente in senso lato, con $A_0 = 0$.

Dimostrazione. Se una tale decomposizione esiste necessariamente deve accadere che $M_0 = 0$, ed inoltre, essendo $A_n = X_n - X_0 - M_n$, deve accadere che

$$A_{n+1} - A_n = X_{n+1} - X_0 - M_{n+1} - (X_n - X_0 - M_n) = X_{n+1} - X_n - (M_{n+1} - M_n).$$

Essendo $A_{n+1} - A_n$ una v.a. \mathcal{F}_n -misurabile, passando alla media condizionale rispetto ad \mathcal{F}_n , essa non cambia, per cui deve necessariamente accadere che

$$\begin{aligned} A_{n+1} - A_n &= \mathbb{E}[X_{n+1} - X_n - (M_{n+1} - M_n) \mid \mathcal{F}_n] \\ &= \mathbb{E}[X_{n+1} - X_n \mid \mathcal{F}_n] - \mathbb{E}[M_{n+1} - M_n \mid \mathcal{F}_n] = \quad (M_n \text{ è una } \mathcal{F}_n\text{-martingala}) \\ &= \mathbb{E}[X_{n+1} - X_n \mid \mathcal{F}_n] = \mathbb{E}[X_{n+1} \mid \mathcal{F}_n] - X_n. \end{aligned}$$

Quindi l'unico modo per definire⁹ A_{n+1} , con $A_0 = 0$, è il seguente

$$A_{n+1} := A_{n+1} - A_0 = \sum_{k=0}^n (A_{k+1} - A_k) = \sum_{k=0}^n (\mathbb{E}[X_{k+1} \mid \mathcal{F}_k] - X_k). \quad (3.2)$$

È immediato verificare¹⁰ che con questa definizione il processo $A_n := \sum_{\ell=1}^n (\mathbb{E}[X_\ell \mid \mathcal{F}_{\ell-1}] - X_{\ell-1})$ è integrabile, predicibile e crescente, con $A_0 = 0$.

⁹Da cui segue l'unicità della decomposizione, in quanto A_n deve essere definito come in (3.2) e poi si dovrà definire necessariamente $M_n := X_n - X_0 - A_n$.

¹⁰Per l'integrabilità basta osservare che

$$|A_n| \leq \sum_{\ell=1}^{n-1} (|\mathbb{E}[X_\ell \mid \mathcal{F}_\ell]| + |X_{\ell-1}|) \underset{\text{(per dis. Jensen)}}{\leq} \sum_{\ell=1}^n (\mathbb{E}[|X_\ell| \mid \mathcal{F}_{\ell-1}] + |X_{\ell-1}|),$$

ed utilizzare il fatto che X_n sono tutte integrabili.

Per la predicibilità, basta osservare che, per ogni $\ell \leq n$, $\mathbb{E}[X_\ell \mid \mathcal{F}_\ell]$ ed $X_{\ell-1}$ sono $\mathcal{F}_{\ell-1}$ -misurabili e quindi \mathcal{F}_{n-1} -misurabili.

Si tratta ora solo di verificare che con questa definizione di $\{A_n\}_{n \geq 0}$ il processo $M_n := X_n - X_0 - A_n$ è una martingala, con $M_0 = 0$. Ma ovviamente

$$M_{n+1} - M_n = X_{n+1} - X_0 - A_{n+1} - (X_n - X_0 - A_n) = X_{n+1} - X_n - (A_{n+1} - A_n),$$

per cui, tenendo conto che per definizione $A_{n+1} - A_n = \mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] - X_n$, e passando alla media condizionale, si ottiene la tesi.

Osservazione 3.4. *Si noti che nella dimostrazione del teorema di decomposizione di Doob, il fatto che X_n sia una submartingala è servito solo nei seguenti punti:*

- (i) *ha senso calcolare la media condizionata di $\mathbb{E}[X_{n+1} - X_n | \mathcal{F}_n]$, in quanto X_k è integrabile per ogni k ,*
- (ii) *il valore atteso condizionato $\mathbb{E}[X_{n+1} - X_n | \mathcal{F}_n]$ coincide con $\mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] - X_n$ in quanto X_n è adattato alla filtrazione $\{\mathcal{F}_n\}$,*
- (iii) *il processo A_n risulta crescente (in senso lato), in quanto $\mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] - X_n \geq 0$.*

Si vede quindi che il procedimento si applica a qualunque processo che sia integrabile ed \mathcal{F}_n -adattato, si ottiene però una decomposizione nella somma di una martingala e di un processo predicibile (che, in generale, non è crescente).

Sarebbe interessante rivedere l'Esempio 3.8, sotto questa luce, in fondo applicando il procedimento della decomposizione di Doob al processo \mathcal{F}_n^X -adattato e integrabile $f(X_n)$, si ottiene che

$$\begin{aligned} f(X_n) &= f(X_n) - \sum_{k=0}^{n-1} (\mathbb{E}[f(X_{k+1}) | \mathcal{F}_k] - f(X_k)) + \sum_{k=0}^{n-1} (\mathbb{E}[f(X_{k+1}) | \mathcal{F}_k] - f(X_k)) \\ &= f(X_n) - \sum_{k=0}^{n-1} (Pf(X_k) - f(X_k)) + \sum_{k=0}^{n-1} (Pf(X_k) - f(X_k)) \\ &= f(X_n) - \sum_{k=0}^{n-1} (P - I)f(X_k) + \sum_{k=0}^{n-1} (P - I)f(X_k) = M_n^f + \sum_{k=0}^{n-1} (P - I)f(X_k) \\ &= f(X_0) + [M_n^f - f(X_0)] + \sum_{k=0}^{n-1} (P - I)f(X_k). \end{aligned}$$

In effetti il processo

$$A_n^f := \sum_{k=0}^{n-1} (P - I)f(X_k)$$

è un processo \mathcal{F}_n^X -predicibile, in quanto chiaramente A_n^f è \mathcal{F}_{n-1}^X -misurabile.

Per la crescita basta osservare che, per definizione

$$A_{n+1} - A_n = \mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] - X_n \geq 0,$$

dove la disuguaglianza vale in quanto X_n è una submartingala. Infine il fatto che $A_0 = 0$, è vero per definizione.

???? QUI SI POTREBBE METTERE ANCHE IL PROCESSO DI VARIAZIONE QUADRATICA
E INOLTRE L'OSSERVAZIONE CHE OGNI PROCESSO CRESCENTE ED ADATTATO E' UNA SUBMARTINGALA, O PIU' IN GENERALE CHE OGNI PROCESSO CRESCENTE ADATTATO SOMMATO AD UNA MARTINGALA E' UNA SUBMARTINGALA E SI PUO' RISCRIVERE ANCORA COME UN'ALTRA MARTINGALA PIU' UN PROCESSO CRESCENTE PREDICIBILE.

3.3 Martingale, submartingale e tempi d'arresto

Definizione 3.4. . Sia $\{\mathcal{F}_t\}$ una filtrazione e sia $\tau : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{\infty\}$, una variabile aleatoria (la v.a. τ deve prendere valori negli indici del tempo preso in considerazione e quindi, ad esempio, in \mathbb{N} se si tratta tempo discreto, ma può anche prendere il valore infinito). La v.a. τ si dice **tempo d'arresto** (o **stopping time**) rispetto ad $\{\mathcal{F}_t\}$, se per ogni t

$$\{\tau \leq t\} \in \mathcal{F}_t$$

Si dice inoltre che τ è un **tempo d'arresto finito** se

$$\mathbb{P}(\tau < +\infty) = 1$$

e che τ è un **tempo d'arresto limitato** se esiste un numero $L < +\infty$ per cui

$$\mathbb{P}(\tau < L) = 1$$

(Si noti che a volte la filtrazione in considerazione è ovvia, e quindi non viene specificata.)

Nel caso in cui l'insieme dei tempi sia \mathbb{N} è equivalente chiedere che $\{\tau = n\} \in \mathcal{F}_n$ per ogni n in quanto ovviamente

$$\{\tau = n\} = \{\tau \leq n\} \setminus \{\tau \leq n-1\}$$

e quindi se $\{\tau \leq n\} \in \mathcal{F}_n$ e $\{\tau \leq n-1\} \in \mathcal{F}_{n-1} \subseteq \mathcal{F}_n$ allora $\{\tau = n\} \in \mathcal{F}_n$ per ogni n , mentre

$$\{\tau \leq n\} = \cup_{k=0}^n \{\tau = k\}$$

e quindi se $\{\tau = k\} \in \mathcal{F}_k$ per ogni k , essendo $\mathcal{F}_k \subseteq \mathcal{F}_n$ per $k \leq n$, si ha che $\{\tau \leq n\} \in \mathcal{F}_n$ per ogni n .

Esempio 3.9. Con le stesse notazioni dell'Esempio 3.3, e per ogni $a \in \mathbb{R}$,

$$\tau(\omega) = \inf\{n : S_n \geq a\}, \quad (\text{con la convenzione che } \inf\{\emptyset\} = +\infty)$$

è un tempo d'arresto rispetto ad \mathcal{F}_n^S , in quanto per decidere se l'evento $\{\tau \leq k\}$ si è verificato, basta esaminare le prime k v.a. S_1, \dots, S_k .

Invece $\sigma(\omega) = \sup\{n \leq 10 : S_n \geq a\}$, se un tale n esiste e 10 altrimenti, non è un tempo d'arresto, in quanto, ad esempio, per decidere se l'evento $\{\sigma \leq 3\}$ si è verificato, bisogna esaminare tutte le v.a. S_1, \dots, S_{10} e non solo S_1, S_2, S_3 , perciò $\{\sigma \leq 3\}$ non è misurabile rispetto a \mathcal{F}_3^S .

Definizione 3.5. . Dato un tempo d'arresto τ , si definisce la **σ -algebra degli eventi fino al tempo τ** come

$$\mathcal{F}_\tau = \{A \in \mathcal{F}_\infty, \text{ per cui } A \cap \{\tau \leq t\} \in \mathcal{F}_t \text{ per ogni } t\}$$

dove $\mathcal{F}_\infty = \bigvee_t \mathcal{F}_t$.

Si tratta cioè degli eventi, per i quali stabilire il loro verificarsi insieme al verificarsi di $\{\tau \leq t\}$ dipende solo dall'informazione disponibile fino al tempo t .

Esercizio 3.1. *Controllare che \mathcal{F}_τ è una σ -algebra.*

(suggerimento: se $A \in \mathcal{F}_\tau$ allora l'evento $A^c \cap \{\tau \leq t\} = \{\tau \leq t\} \setminus \{A \cap \{\tau \leq t\}\} \in \mathcal{F}_t$)

Esempio 3.10. *Se $\mathcal{F}_n = \sigma\{X_1, \dots, X_n\}$ e $\tau = \inf\{n \text{ t.c. } X_n \in I\}$, con $I \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$, allora τ è un \mathcal{F}_n tempo d'arresto, infatti l'evento $\{\tau \leq n\} = \{\exists k \leq n \text{ t.c. } X_k \in I\} \in \mathcal{F}_n$.*

Nel caso tempo continuo non è così semplice, però qualcosa si può dire.

Definizione 3.6. *Sia*

$$\tau_A = \inf\{t > 0 \text{ t.c. } X_t \notin A\},$$

con la convenzione che l'estremo inferiore dell'insieme vuoto è uguale a $+\infty$.

La v. a. τ_A è detta **tempo di prima uscita da A** .

Lemma 3.2. *Se X_t è un processo a traiettorie continue e A è aperto, allora τ_A è un tempo d'arresto.*

Dimostrazione Si tratta di notare che, essendo A^c chiuso la funzione $x \mapsto \text{dist}(x, A^c)$ è continua, e di conseguenza, essendo X_t a traiettorie continue, si ha che la funzione $s \mapsto \text{dist}(X_s, A^c)$ è continua. Perciò

$$\inf_{0 \leq s \leq t} \text{dist}(X_s, A^c) = \min_{0 \leq s \leq t} \text{dist}(X_s, A^c)$$

e quindi

$$\begin{aligned} \{\tau_A > t\} &= \left\{ \inf_{0 \leq s \leq t} \text{dist}(X_s, A^c) > 0 \right\} = \bigcup_n \left\{ \inf_{0 \leq s \leq t} \text{dist}(X_s, A^c) > \frac{1}{n} \right\} = \\ &= \bigcup_n \left\{ \inf_{\substack{0 \leq s \leq t \\ s \in \mathbb{Q}}} \text{dist}(X_s, A^c) \geq \frac{1}{n} \right\} = \bigcup_n \bigcap_{\substack{0 \leq s \leq t \\ s \in \mathbb{Q}}} \left\{ \text{dist}(X_s, A^c) \geq \frac{1}{n} \right\} \in \mathcal{F}_t \end{aligned}$$

Si noti che se il $\inf_{0 \leq s \leq t} \text{dist}(X_s, A^c)$ non fosse un minimo, allora potrebbero verificarsi contemporaneamente gli eventi

$$\{\tau_A > t\} \text{ e } \left\{ \inf_{0 \leq s \leq t} \text{dist}(X_s, A^c) = 0 \right\},$$

e la prima delle precedenti uguaglianze non sarebbe valida.

Nel caso in cui l'insieme A non sia aperto non è detto che τ_A sia un tempo d'arresto. Se A è un **insieme chiuso** allora τ_A è un **tempo d'arresto in senso debole**, ovvero

$$\{\tau_A < t\} \in \mathcal{F}_t \text{ per ogni } t \geq 0.$$

Osservazione 3.5. *Affermare che τ è un tempo d'arresto debole è equivalente ad affermare che è un tempo di arresto rispetto alla filtrazione*

$$\mathcal{F}_{t+} := \bigcap_{s>t} \mathcal{F}_s.$$

Infatti in generale, se $\{\tau < t\} \in \mathcal{F}_t$ per ogni $t \geq 0$, allora, qualunque sia $m \geq 1$

$$\{\tau \leq t\} = \bigcap_{n \geq m} \left\{ \tau < t + \frac{1}{n} \right\} \in \mathcal{F}_{t+\frac{1}{m}},$$

e quindi $\{\tau \leq t\} \in \mathcal{F}_s$ per ogni $s > t$, ovvero ¹¹ $\{\tau \leq t\} \in \mathcal{F}_{t+}$ per ogni t .

Lemma 3.3. *Se X_t è un processo con traiettorie continue a destra con limiti a sinistra (cadlag acronimo dal francese continue a droite limite a gauche), la filtrazione è continua a destra (cioè $\mathcal{F}_t = \mathcal{F}_{t+} := \bigcap_{s>t} \mathcal{F}_s$) ed F è un chiuso allora τ_F è un tempo d'arresto.*

Dimostrazione. Basta dimostrare che τ_F è un tempo d'arresto in senso debole, e difatti

$$\{\tau_F \geq t\} = \bigcap_{0 \leq s < t} \{X_s \in F\},$$

ed essendo il processo X_t a traiettorie *cadlag* ed F chiuso si ha

$$\bigcap_{0 \leq s < t} \{X_s \in F\} = \bigcap_{\substack{0 \leq s < t \\ s \in \mathbb{Q}}} \{X_s \in F\} \in \mathcal{F}_t.$$

(infatti se $X_s \in F$ per ogni $s \in \mathbb{Q} \cap [0, t)$, allora $\forall r < t$ $X_r = \lim_{\substack{s \rightarrow r \\ s \in \mathbb{Q} \cap (r, t)}} X_s \in F$)

3.4 Alcune proprietà dei tempi d'arresto

1) Se τ e σ sono tempi d'arresto allora $\tau \wedge \sigma$ e $\tau \vee \sigma$ sono tempi d'arresto.

Infatti, per ogni t ,

$$\{\tau \vee \sigma \leq t\} = \{\tau \leq t\} \cap \{\sigma \leq t\} \in \mathcal{F}_t \text{ e } \{\tau \wedge \sigma \leq t\} = \{\tau \leq t\} \cup \{\sigma \leq t\} \in \mathcal{F}_t$$

2) Se τ è un tempo d'arresto allora la successione $\tau_n = \frac{\lceil \tau n \rceil}{n}$ è una successione di tempi d'arresto per cui $\tau_n \rightarrow \tau$, con $\tau_n \geq \tau$ per ogni n . (qui $\lceil x \rceil$ denota la parte intera superiore)

Infatti, $\forall t$, posto $t_n = \frac{\lfloor nt \rfloor}{n}$, risulta

$$\{\tau_n \leq t\} = \{\lceil \tau n \rceil \leq nt\} = \left\{ \tau \leq \frac{\lfloor nt \rfloor}{n} \right\} \in \mathcal{F}_{t_n} \subseteq \mathcal{F}_t,$$

¹¹Alternativamente: per ogni $s > t$ si ha $\{\tau \leq t\} = \bigcap_{n \geq 1} \left\{ \tau < t + \frac{s-t}{n} \right\} \in \mathcal{F}_{t+(s-t)} = \mathcal{F}_s$

in quanto, posto $k = \lceil \tau n \rceil$, cioè $k - 1 < \tau n \leq k$, e $k \leq nt$, allora $\lfloor nt \rfloor \geq k \geq \tau n$, ovvero $\tau \leq \frac{\lfloor nt \rfloor}{n}$, ed ovviamente risulta $t_n \leq t$.

Per la convergenza di τ_n a τ , basta osservare che qualunque sia $x \in \mathbb{R}$ si ha

$$\frac{\lfloor nx \rfloor}{n} - \frac{1}{n} = \frac{\lfloor nx \rfloor - 1}{n} < x \leq \frac{\lfloor nx \rfloor}{n}$$

Si osservi che, se si prende $\tilde{\tau}_n = \tau_{2^n}$, allora $\tilde{\tau}_n \searrow \tau$, cioè $\tilde{\tau}_n$ è anche una successione monotona non crescente, e che inoltre $\{\tilde{\tau}_n\} \subseteq D$, dove D è l'insieme dei diadici. Infine va notato che tale risultato è interessante solo nel caso di tempi d'arresto che assumono valori in un insieme non discreto.

3) La v.a. τ è \mathcal{F}_τ -misurabile.

Infatti, per ogni s , $\{\tau \leq s\} \in \mathcal{F}_\tau$ in quanto, qualunque sia t ,

$$\{\tau \leq s\} \cap \{\tau \leq t\} = \{\tau \leq s \wedge t\} \in \mathcal{F}_{s \wedge t} \subseteq \mathcal{F}_t$$

4) Se τ e σ sono tempi d'arresto e $\mathbb{P}\{\sigma \leq \tau\} = 1$, ed \mathcal{F}_0 contiene tutti gli eventi trascurabili (cioè gli insiemi contenuti in insiemi di probabilità nulla), allora $\mathcal{F}_\sigma \subseteq \mathcal{F}_\tau$.

Infatti se $A \in \mathcal{F}_\infty$ e $A \cap \{\sigma \leq t\} \in \mathcal{F}_t$ per ogni t , allora

$$A \cap \{\tau \leq t\} = (A \cap \{\tau \leq t\} \cap \{\sigma \leq t\}) \cup (A \cap \{\tau \leq t\} \cap \{\sigma > t\}) =$$

$$= ((A \cap \{\sigma \leq t\}) \cap \{\tau \leq t\}) \cup C \in \mathcal{F}_t$$

in quanto $C := (A \cap \{\tau \leq t\} \cap \{\sigma > t\}) \in \mathcal{F}_0 \subseteq \mathcal{F}_t$, essendo un evento trascurabile, e $\{\tau \leq t\}$ e $A \cap \{\sigma \leq t\}$ sono in \mathcal{F}_t per ipotesi.

Si osservi che se invece $\sigma \leq \tau$ certamente, allora la condizione che \mathcal{F}_0 contenga tutti gli eventi trascurabili non è necessaria.

Convieni qui osservare che se una filtrazione soddisfa le **condizioni "abituali"**, cioè

i) \mathcal{F}_0 contiene tutti gli eventi trascurabili non è necessaria.

ii) la filtrazione è continua a destra (cioè $\mathcal{F}_t = \mathcal{F}_{t+} := \bigcap_{s>t} \mathcal{F}_s$)

si possono applicare sia il Lemma 2 (e ottenere dalla ii) che i tempi di uscita da un chiuso sono tempi d'arresto) sia la proprietà 4 (e ottenere dalla i) che $\mathcal{F}_\sigma \subseteq \mathcal{F}_\tau$).

3.5 Caso a tempo discreto

Proposizione 3.4 (Martingale arrestate). *Data una \mathcal{F}_n -martingala (o submartingala) X_n ed un tempo d'arresto τ , il processo*

$$Y_n := X_{n \wedge \tau}$$

è una \mathcal{F}_n -martingala (o submartingala).

Dimostrazione. Cominciamo con il dimostrare che Y_n è \mathcal{F}_n -misurabile e che è integrabile. Si noti che

$$Y_n = X_\tau I_{\{\tau \leq n\}} + X_n I_{\{\tau > n\}},$$

e quindi

$$Y_n = X_0 I_{\{\tau=0\}} + X_1 I_{\{\tau=1\}} + X_2 I_{\{\tau=2\}} + \cdots + X_n I_{\{\tau=n\}} + X_n I_{\{\tau>n\}}, \quad (3.3)$$

$$Y_n = X_0 I_{\{\tau=0\}} + X_1 I_{\{\tau=1\}} + X_2 I_{\{\tau=2\}} + \cdots + X_n I_{\{\tau \geq n\}} \quad (3.4)$$

e che $\{\tau = k\} \in \mathcal{F}_k \subseteq \mathcal{F}_n$, $\{\tau > n\} \in \mathcal{F}_n$ e che X_k sono \mathcal{F}_n -misurabili per $k \leq n$, da cui la \mathcal{F}_n -misurabilità di Y_n . Per ottenere l'integrabilità basta notare che dalla (3.4)

$$|Y_n| \leq |X_0| + |X_1| + |X_2| + \cdots + |X_n|$$

e sfruttare l'integrabilità delle X_k .

Per ottenere il resto dobbiamo notare che dalla (3.4), con $n + 1$ al posto di n , si ha

$$Y_{n+1} = X_0 I_{\{\tau=0\}} + X_1 I_{\{\tau=1\}} + X_2 I_{\{\tau=2\}} + \cdots + X_n I_{\{\tau=n\}} + X_{n+1} I_{\{\tau>n\}}, \quad (3.5)$$

e quindi, confrontando (3.3) e (3.5)

$$Y_{n+1} - Y_n = (X_{n+1} - X_n) I_{\{\tau>n\}}$$

Di conseguenza, essendo $I_{\{\tau>n\}}$ una v.a. \mathcal{F}_n -misurabile, ed X_n una martingala,

$$\mathbb{E}[Y_{n+1} - Y_n \mid \mathcal{F}_n] = \mathbb{E}[X_{n+1} - X_n \mid \mathcal{F}_n] I_{\{\tau>n\}} = 0.$$

Nel caso in cui X_n sia una submartingala risulta ovviamente $\mathbb{E}[Y_{n+1} - Y_n \mid \mathcal{F}_n] \geq 0$.

Proposizione 3.5. *Data una \mathcal{F}_n -submartingala (o martingala) X_n ed un tempo d'arresto τ , limitato quasi certamente, ovvero per cui*

$$\mathbb{P}(1 \leq \tau \leq n) = 1$$

allora

$$\mathbb{E}[X_1] \leq \mathbb{E}[X_\tau] \leq \mathbb{E}[X_n].$$

(Nel caso di martingale $\mathbb{E}[X_1] = \mathbb{E}[X_\tau] = \mathbb{E}[X_n]$.)

Dimostrazione. Per la proposizione precedente si ha che $\{X_{\tau \wedge k}\}_k$ è una submartingala, e quindi in particolare il valore medio è crescente (in senso lato). Poiché $X_{\tau \wedge 1} = X_1$, la prima disuguaglianza segue immediatamente.

Per la seconda disuguaglianza basta mostrare che $\mathbb{E}[X_n - X_\tau] \geq 0$ e infatti

$$X_n - X_\tau = \sum_{i=1}^n (X_n - X_\tau) I_{\{\tau=i\}} = \sum_{i=1}^n (X_n - X_i) I_{\{\tau=i\}}$$

e quindi

$$\mathbb{E}[X_n - X_\tau] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E}[(X_n - X_i) I_{\{\tau=i\}}] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E}[\mathbb{E}[(X_n - X_i) I_{\{\tau=i\}} \mid \mathcal{F}_i]]$$

La tesi segue in quanto

$$\mathbb{E}[(X_n - X_i) I_{\{\tau=i\}} \mid \mathcal{F}_i] = I_{\{\tau=i\}} \mathbb{E}[(X_n - X_i) \mid \mathcal{F}_i] \geq 0,$$

nel caso delle submartingale (= 0 nel caso delle martingale).

3.6 Applicazione: la rovina del giocatore con le martingale

1) caso simmetrico

Sia Y_k una successione di v.a. indipendenti, con

$$\mathbb{P}(Y_k = 1) = \mathbb{P}(Y_k = -1) = \frac{1}{2},$$

e sia

$$S_n = \sum_{k=1}^n Y_k.$$

Sappiamo (vedi Esempio 3.2 che S_n è una martingala. Siano a e b numeri naturali non nulli e sia

$$\tau = \tau(a, b) := \inf\{n \text{ t.c. } S_n \notin (-a, b)\} = \inf\{n \text{ t.c. } S_n = -a \text{ o } S_n = b\}.$$

La variabile aleatoria τ è finita ¹² con probabilità 1, cioè $\mathbb{P}(\tau < +\infty) = 1$.

¹²Si può dimostrare direttamente, anche nel caso generale, con $\mathbb{P}(Y_h = 1) = p$, che

$$\mathbb{P}(\tau = +\infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}(\tau > n(a+b)) = 0.$$

Infatti, si ha $\{\tau = +\infty\} = \bigcap_{n \geq 1} \{\tau > n(a+b)\}$ e $\mathbb{P}(\tau > n(a+b)) \leq \alpha^n$ per un $\alpha < 1$. La prima uguaglianza è ovvia, mentre la seconda si può vedere facilmente osservando che

$$\{\omega \text{ tali che esiste } k < n \text{ per cui } Y_{k(a+b)+1} = Y_{k(a+b)+2} = \dots = Y_{k(a+b)+a+b} = 1\} \subset \{\tau \leq n(a+b)\},$$

e che quindi

$$\mathbb{P}\left(\bigcup_{k < n} \{Y_{k(a+b)+1} = Y_{k(a+b)+2} = \dots = Y_{k(a+b)+a+b} = 1\}\right) \leq \mathbb{P}(\tau \leq n(a+b))$$

Per uno dei risultati precedenti sappiamo che $S_{n \wedge \tau}$ è una martingala e che quindi

$$\mathbb{E}[S_{n \wedge \tau}] = \mathbb{E}[S_{1 \wedge \tau}] = \mathbb{E}[S_1] = 0$$

Inoltre $S_{n \wedge \tau} \rightarrow S_\tau$ per $n \rightarrow +\infty$, e $|S_{n \wedge \tau}| \leq \max(a, b)$ e quindi per il teorema della convergenza dominata

$$\mathbb{E}[S_{n \wedge \tau}] \rightarrow \mathbb{E}[S_\tau].$$

Di conseguenza

$$\mathbb{E}[S_\tau] = -a\mathbb{P}(S_\tau = -a) + b(1 - \mathbb{P}(S_\tau = -a)) = 0,$$

da cui immediatamente

$$\mathbb{P}(S_\tau = -a) = \frac{b}{a+b}.$$

2) caso generale

Come nell'applicazione 1) ma con $\mathbb{P}(Y_k = 1) = p$ e $\mathbb{P}(Y_k = -1) = q = 1 - p$. Si procede in modo analogo al caso precedente, ma questa volta si prende come martingala

$$Z_n = \exp\{\theta S_n - n\psi(\theta)\}$$

dove

$$\exp\{\psi(\theta)\} = \mathbb{E}[\exp\{\theta Y_1\}] = \exp\{\theta\}p + \exp\{-\theta\}q.$$

Si cerca, se esiste θ in modo che $\psi(\theta) = 0$ ovvero, posto $\exp\{\theta\} = \alpha$, si cerca $\alpha p + \alpha^{-1}q = 1$, ovvero $\alpha^2 p - \alpha + q = 0$. Ciò è possibile solo per

$$\alpha = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4pq}}{2p} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4p + 4p^2}}{2p} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4p + 4p^2}}{2p} = \frac{1 \pm |1 - 2p|}{2p} = \frac{1 \pm (1 - 2p)}{2p}$$

ovvero per $\alpha = 1$ o $\alpha = \frac{q}{p}$ (come del resto si può vedere anche subito). Il caso $\alpha = 1$ corrisponderebbe a $Z_n \equiv 1$ e non porterebbe ad alcun risultato, mentre $\exp\{\theta\} = \alpha = \frac{q}{p}$ corrisponde a $Z_n = \left(\frac{q}{p}\right)^{S_n}$. Di nuovo, sempre per convergenza dominata,

$$1 \equiv \mathbb{E}[Z_{n \wedge \tau}] \rightarrow \mathbb{E}[Z_\tau] = \left(\frac{q}{p}\right)^{-a} \mathbb{P}(S_\tau = -a) + \left(\frac{q}{p}\right)^b [1 - \mathbb{P}(S_\tau = -a)] = 1,$$

ovvero, passando ai complementari, e utilizzando l'indipendenza delle v.a. Y_h ,

$$\begin{aligned} & \mathbb{P}\left(\bigcap_{k < n} \{Y_{k(a+b)+1} = Y_{k(a+b)+2} = \dots = Y_{k(a+b)+a+b} = 1\}^c\right) \\ &= \prod_{k < n} \mathbb{P}(\{Y_{k(a+b)+1} = Y_{k(a+b)+2} = \dots = Y_{k(a+b)+a+b} = 1\}^c) \\ &= \prod_{k < n} (1 - p^{a+b}) = (1 - p^{a+b})^n = \alpha^n \geq \mathbb{P}(\tau > n(a+b)). \end{aligned}$$

Si noti che in fondo si è dimostrato che $\tau \leq T(a+b)$, dove T è una variabile aleatoria geometrica di parametro $\beta = p^{a+b} = 1 - \alpha$.

Da cui di nuovo si può ricavare, posto $\rho = \frac{q}{p}$

$$\mathbb{P}(S_\tau = -a) = \frac{1 - \rho^b}{\rho^{-a} - \rho^b} = \frac{\rho^a - \rho^{b+a}}{1 - \rho^{b+a}} = \frac{\rho^{b+a} - \rho^a}{\rho^{b+a} - 1}.$$

Si noti che

$$\mathbb{P}(S_\tau = -a) \rightarrow \frac{b}{a+b}$$

per $\rho \rightarrow 1$, cioè per $p \rightarrow \frac{1}{2}$.

3.7 Disuguaglianza di Kolmogorov per submartingale non negative

Proposizione 3.6 (Disuguaglianza di Kolmogorov). *Sia X_n una submartingala non negativa allora*

$$(i) \quad \mathbb{P}(\max(X_1, X_2, \dots, X_n) > \gamma) \leq \frac{\mathbb{E}[X_n]}{\gamma}$$

Sia X_n una martingala con $\mathbb{E}[|X_n|^\alpha] < +\infty, \alpha \geq 1$, allora

$$(ii) \quad \mathbb{P}(\max(|X_1|, |X_2|, \dots, |X_n|) > \gamma) \leq \frac{\mathbb{E}[|X_n|^\alpha]}{\gamma^\alpha}$$

Dimostrazione. Cominciamo con il primo caso. Si definisca

$$\begin{cases} \tau := \inf\{k \text{ tali che } 1 \leq k \leq n, X_k > \gamma\}, & \text{se un tale } k \text{ esiste} \\ \tau := n, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

Ovviamente τ è un tempo d'arresto e $\{X_\tau > \gamma\} = \{\max(X_1, \dots, X_n) > \gamma\}$ e quindi per la disuguaglianza di Markov

$$\mathbb{P}(\max(X_1, X_2, \dots, X_n) > \gamma) = \mathbb{P}(X_\tau > \gamma) \leq \frac{\mathbb{E}[|X_\tau|]}{\gamma} = \frac{\mathbb{E}[X_\tau]}{\gamma}$$

Basta quindi mostrare che $\mathbb{E}[X_\tau] \leq \mathbb{E}[X_n]$, ma ciò discende immediatamente dalla proposizione precedente in quanto τ è a valori in $1, 2, \dots, n$.

Per il caso di martingale, la tesi segue osservando che

$$\mathbb{P}(\max(|X_1|, |X_2|, \dots, |X_n|) > \gamma) = \mathbb{P}(\max(|X_1|^\alpha, |X_2|^\alpha, \dots, |X_n|^\alpha) > \gamma^\alpha),$$

la funzione $|x|^\alpha$, per $\alpha \geq 1$ è convessa e quindi $|X_n|^\alpha$ è una submartingala non negativa (confrontare proprietà 4) e infine applicando la disuguaglianza precedente.

3.8 Convergenza di martingale

Proposizione 3.7. *Sia X_n una martingala uniformemente limitata in L^1 , cioè tale che*

$$\sup_n \mathbb{E}[|X_n|] \leq M < +\infty.$$

Allora

$$\mathbb{P}(\{\omega \text{ t.c. } \exists \text{ finito } \lim_{n \rightarrow \infty} X_n(\omega)\}) = 1$$

Dimostrazione. Daremo la dimostrazione solo nel caso in cui valga una ipotesi più forte:

$$\sup_n \mathbb{E}[|X_n|^2] \leq M < +\infty.$$

(si noti infatti che in tale caso $\mathbb{E}[|X_n|] \leq (\mathbb{E}[|X_n|^2])^{1/2} \leq M$)

Basta mostrare che la successione X_n è una successione di Cauchy con probabilità 1. Ciò significa che

$$\{\omega \text{ t.c. } \forall \epsilon > 0 \exists m \geq 1 \text{ t.c. } \forall k \geq 1 |X_{m+k}(\omega) - X_m(\omega)| \leq \epsilon\}$$

ovvero

$$\bigcap_{\epsilon > 0} \bigcup_{m \geq 1} \bigcap_{k \geq 1} \{|X_{m+k} - X_m| \leq \epsilon\}$$

è un insieme misurabile di probabilità 1. La misurabilità segue osservando che è equivalente prendere ϵ razionale positivo. Per calcolare la probabilità, ricordiamo che in generale se B_h sono eventi $\mathbb{P}(\bigcap_{h \geq 1} B_h) = 1$ se e solo se $\mathbb{P}(B_h) = 1 \forall h \geq 1$.

Infatti se $\mathbb{P}(\bigcap_{h \geq 1} B_h) = 1$ allora, poiché $\bigcap_{h \geq 1} B_h \subseteq B_{\bar{h}}$, ne segue che $\mathbb{P}(B_{\bar{h}}) = 1$, comunque fissato $\bar{h} \geq 1$. Se viceversa $\mathbb{P}(B_h) = 1 \forall h \geq 1$, allora

$$\mathbb{P}(\bigcap_{h \geq 1} B_h) = 1 - \mathbb{P}(\bigcup_{h \geq 1} B_h^c), \text{ e } \mathbb{P}(\bigcup_{h \geq 1} B_h^c) \leq \sum_{h \geq 1} \mathbb{P}(B_h^c) = 0.$$

Di conseguenza la tesi equivale a mostrare che, per ogni $\epsilon > 0$,

$$\mathbb{P}(\bigcup_{m \geq 1} \bigcap_{k \geq 1} \{|X_{m+k} - X_m| \leq \epsilon\}) = 1,$$

ovvero che, per ogni $\epsilon > 0$,

$$\mathbb{P}(\bigcap_{m \geq 1} \bigcup_{k \geq 1} \{|X_{m+k} - X_m| > \epsilon\}) = 0.$$

Si osservi che, $\forall \bar{m} \geq 1$,

$$\bigcap_{m \geq 1} \bigcup_{k \geq 1} \{|X_{m+k} - X_m| > \epsilon\} \subseteq \bigcup_{k \geq 1} \{|X_{\bar{m}+k} - X_{\bar{m}}| > \epsilon\}$$

e che

$$\mathbb{P}(\bigcup_{k \geq 1} \{|X_{\bar{m}+k} - X_{\bar{m}}| > \epsilon\}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}(\bigcup_{k=1}^n \{|X_{\bar{m}+k} - X_{\bar{m}}| > \epsilon\}).$$

Di conseguenza

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{m \geq 1} \bigcup_{k \geq 1} \{|X_{m+k} - X_m| > \epsilon\}\right) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}\left(\bigcup_{k=1}^n \{|X_{\bar{m}+k} - X_{\bar{m}}| > \epsilon\}\right),$$

e quindi

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{m \geq 1} \bigcup_{k \geq 1} \{|X_{m+k} - X_m| > \epsilon\}\right) \leq \lim_{\bar{m} \rightarrow \infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}\left(\bigcup_{k=1}^n \{|X_{\bar{m}+k} - X_{\bar{m}}| > \epsilon\}\right).$$

Non rimane che dimostrare che

$$\lim_{\bar{m} \rightarrow \infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}\left(\bigcup_{k=1}^n \{|X_{\bar{m}+k} - X_{\bar{m}}| > \epsilon\}\right) = 0.$$

Si osservi ora che $\bar{X}_k := X_{\bar{m}+k} - X_{\bar{m}}$, è una martingala rispetto alla filtrazione $\mathcal{G}_k := \mathcal{F}_{\bar{m}+k}$ e che

$$\bigcup_{k=1}^n \{|X_{\bar{m}+k} - X_{\bar{m}}| > \epsilon\} = \{\max(|\bar{X}_1|, |\bar{X}_2|, \dots, |\bar{X}_n|) > \epsilon\}.$$

Basta quindi applicare la disuguaglianza di Kolmogorov per $\alpha = 2$ per ottenere che

$$\mathbb{P}\left(\bigcup_{k=1}^n \{|X_{\bar{m}+k} - X_{\bar{m}}| > \epsilon\}\right) \leq \frac{\mathbb{E}[|X_{\bar{m}+n} - X_{\bar{m}}|^2]}{\epsilon^2} = \frac{\mathbb{E}[X_{\bar{m}+n}^2] - \mathbb{E}[X_{\bar{m}}^2]}{\epsilon^2}.$$

Infatti

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[|X_{\bar{m}+n} - X_{\bar{m}}|^2] &= \mathbb{E}[X_{\bar{m}+n}^2] + \mathbb{E}[X_{\bar{m}}^2] - 2\mathbb{E}[X_{\bar{m}+n}X_{\bar{m}}] = \\ &= \mathbb{E}[X_{\bar{m}+n}^2] + \mathbb{E}[X_{\bar{m}}^2] - 2\mathbb{E}[\mathbb{E}[X_{\bar{m}+n}X_{\bar{m}} | \mathcal{F}_{\bar{m}}]] = \\ &= \mathbb{E}[X_{\bar{m}+n}^2] + \mathbb{E}[X_{\bar{m}}^2] - 2\mathbb{E}[X_{\bar{m}}\mathbb{E}[X_{\bar{m}+n} | \mathcal{F}_{\bar{m}}]] = \mathbb{E}[X_{\bar{m}+n}^2] + \mathbb{E}[X_{\bar{m}}^2] - 2\mathbb{E}[X_{\bar{m}}^2] \end{aligned}$$

A questo punto si noti che $\mathbb{E}[X_{\bar{m}}^2]$ è una successione convergente ad un numero $\mu \leq M$, in quanto è una successione limitata per ipotesi, e monotona non decrescente ($X_{\bar{m}}^2$ è una submartingala). Quindi

$$\lim_{\bar{m} \rightarrow \infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}\left(\bigcup_{k=1}^n \{|X_{\bar{m}+k} - X_{\bar{m}}| > \epsilon\}\right) \leq \lim_{\bar{m} \rightarrow \infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}[X_{\bar{m}+n}^2] - \mathbb{E}[X_{\bar{m}}^2]}{\epsilon^2} = \lim_{\bar{m} \rightarrow \infty} \frac{\mu - \mathbb{E}[X_{\bar{m}}^2]}{\epsilon^2} = 0.$$

3.9 Disuguaglianza di Doob

Proposizione 3.8 (Disuguaglianza di Doob). *Sia data una submartingala non negativa X_n , con $\mathbb{E}[(X_n)^p] < +\infty$, per un $p > 1$. Posto $X_n^* = \max_{k \leq n} (X_k)$ vale la seguente disuguaglianza:*

$$\mathbb{E}[(X_n^*)^p] \leq \left(\frac{p}{p-1}\right)^p \mathbb{E}[(X_n)^p].$$

Nel caso di una martingala X_n , con $\mathbb{E}[|X_n|^p] < +\infty$, e posto $X_n^ = \max_{k \leq n} (|X_k|)$ vale la seguente disuguaglianza:*

$$\mathbb{E}[|X_n^*|^p] \leq \left(\frac{p}{p-1}\right)^p \mathbb{E}[|X_n|^p]$$

Dimostrazione. Si definisca

$$\tau_\gamma := \inf\{k \text{ tali che } 1 \leq k \leq n, X_k > \gamma\}, \quad \text{se un tale } k \text{ esiste}$$

$$\tau_\gamma := n + 1 \quad \text{altrimenti.}$$

Ovviamente τ_γ è un tempo d'arresto e $\{X_n^* > \gamma\}$ coincide con $\bigcup_{k=1}^n \{\tau_\gamma = k\}$ e quindi per ogni β

$$(X_n^*)^\beta = \int_0^{X_n^*} \beta \gamma^{\beta-1} d\gamma = \int_0^\infty \beta \gamma^{\beta-1} I_{\{X_n^* > \gamma\}} d\gamma = \int_0^\infty \beta \gamma^{\beta-1} \sum_{k=1}^n I_{\{\tau_\gamma = k\}} d\gamma$$

Passando al valore medio, per $\beta > 0$,

$$\mathbb{E}[(X_n^*)^\beta] = \sum_{k=1}^n \int_0^\infty \beta \gamma^{\beta-2} \mathbb{E}[\gamma I_{\{\tau_\gamma = k\}}] d\gamma \leq \sum_{k=1}^n \int_0^\infty \beta \gamma^{\beta-2} \mathbb{E}[X_k I_{\{\tau_\gamma = k\}}] d\gamma$$

in quanto $\gamma I_{\{\tau_\gamma = k\}} \leq X_k I_{\{\tau_\gamma = k\}}$. Inoltre, essendo X_n una submartingala $X_k \leq \mathbb{E}[X_n | \mathcal{F}_k]$, non negativa, ed essendo $\{\tau_\gamma = k\} \in \mathcal{F}_k$ si ha

$$\mathbb{E}[X_k I_{\{\tau_\gamma = k\}}] \leq \mathbb{E}[\mathbb{E}[X_n | \mathcal{F}_k] I_{\{\tau_\gamma = k\}}] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[X_n I_{\{\tau_\gamma = k\}} | \mathcal{F}_k]] = \mathbb{E}[X_n I_{\{\tau_\gamma = k\}}]$$

e quindi

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[(X_n^*)^\beta] &\leq \sum_{k=1}^n \int_0^\infty \beta \gamma^{\beta-2} \mathbb{E}[X_n I_{\{\tau_\gamma = k\}}] d\gamma = \int_0^\infty \beta \gamma^{\beta-2} \mathbb{E}[X_n \sum_{k=1}^n I_{\{\tau_\gamma = k\}}] d\gamma \\ &= \mathbb{E}\left[\int_0^\infty \beta \gamma^{\beta-2} X_n I_{\{X_n^* > \gamma\}} d\gamma\right] \end{aligned}$$

ovvero

$$\mathbb{E}[(X_n^*)^\beta] \leq \beta \mathbb{E}\left[X_n \int_0^\infty \gamma^{\beta-2} I_{\{X_n^* > \gamma\}} d\gamma\right] = \frac{\beta}{\beta-1} \mathbb{E}[X_n (X_n^*)^{\beta-1}].$$

Questa disuguaglianza non è banale (ovvero non è del tipo $+\infty \leq +\infty$) prendendo $\beta=p$, in quanto si ha che $\mathbb{E}[(X_n^*)^p] \leq \mathbb{E}[\sum_{k=1}^n (X_k)^p] < +\infty$. Inoltre, usando la disuguaglianza di Hölder si ottiene la tesi osservando che

$$\mathbb{E}[(X_n^*)^p] \leq \frac{p}{p-1} \mathbb{E}[(X_n)^p]^{1/p} \mathbb{E}\left[\left((X_n^*)^{p-1}\right)^{p/(p-1)}\right]^{(p-1)/p} = \frac{p}{p-1} \mathbb{E}[(X_n)^p]^{1/p} \mathbb{E}[(X_n^*)^p]^{(p-1)/p}$$

Capitolo 4

Mercato (B, S) : investimenti, proprietà e caratteristiche

4.1 Struttura del mercato (B, S)

Si considera un mercato che opera sotto condizioni di incertezza, rappresentabili in termini probabilistici da uno spazio di probabilità dotato di filtrazione

$$(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}, \mathbb{P}).$$

Come al solito il flusso $\mathcal{F} = (\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ di σ -algebre può essere interpretato come il flusso di informazioni \mathcal{F}_n accessibile fino all'istante n , con $n \geq 0$.

Si definisce *mercato*- (B, S) la coppia di elementi formata da $d + 1$ operazioni finanziarie:

un	conto bancario o bond	B	<i>titolo non rischioso</i>
d	azioni o stocks	$S = (S^1, \dots, S^d)$	<i>titoli rischiosi</i>

in cui si assume che l'evoluzione del conto bancario sia descrivibile tramite una successione stocastica (strettamente) positiva

$$B = (B_n)_{n \geq 0}, \quad \text{con } B_n > 0 \text{ per ogni } n,$$

dove le variabili B_n sono \mathcal{F}_{n-1} -misurabili per ogni $n \geq 1$, e B_0 è $\mathcal{F}_{-1} = \mathcal{F}_0$ -misurabile, ovvero il processo $B = (B_n)_{n \geq 0}$ è **predicibile**¹ rispetto alla filtrazione (\mathcal{F}_n) .

Anche la dinamica dei valori dell' i -esimo titolo S^i può essere descritta da una successione stocastica

$$S^i = (S_n^i)_{n \geq 0}$$

dove però le S_n^i sono variabili \mathcal{F}_n -misurabili per ogni $n \geq 0$, ovvero i processi $S^i = (S_n^i)_{n \geq 0}$ sono **adattati**² rispetto alla filtrazione (\mathcal{F}_n) .

Dalle definizioni date si vede che esiste una differenza sostanziale tra un conto bancario e

¹Come al solito il lettore può pensare all'esempio in cui $\mathcal{F}_n = \sigma\{\xi_k, k \leq n\}$, e allora ciò significa che $B_n = b_n(\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{n-1})$.

²Come al solito il lettore può pensare all'esempio in cui $\mathcal{F}_n = \sigma\{\xi_k, k \leq n\}$, e allora ciò significa che $S_n^i = s_n^i(\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_n)$.

un'azione; ovvero, la \mathcal{F}_{n-1} -misurabilità di B_n indica che lo stato del conto bancario al tempo n risulta già conosciuto (si hanno tutte le informazioni) al tempo $n - 1$: la successione di variabili aleatorie (B_n) è detta predicibile appunto per questa sua caratteristica. La situazione per i prezzi delle azioni è differente: le variabili S_n^i sono \mathcal{F}_n -misurabili, ciò significa che i loro valori attuali si possono determinare solo dopo che risultano disponibili tutte le informazioni \mathcal{F}_n arrivate fino al tempo n .

Tali considerazioni permettono di capire perché si dice che un conto bancario è un'operazione non rischiosa mentre le azioni sono dei titoli rischiosi.

Ponendo

$$r_n := \frac{B_n - B_{n-1}}{B_{n-1}} = \frac{\Delta B_n}{B_{n-1}} \quad \text{tasso di interesse}$$

$$\rho_n^i := \frac{S_n^i - S_{n-1}^i}{S_{n-1}^i} = \frac{\Delta S_n^i}{S_{n-1}^i} \quad \text{rendimento dell'azione } i, \text{ per } i = 1, 2, \dots, d,$$

si può scrivere

$$\Delta B_n = r_n B_{n-1}, \quad (4.1)$$

$$\Delta S_n^i = \rho_n^i S_{n-1}^i, \text{ per } i = 1, 2, \dots, d, \quad (4.2)$$

dove le r_n sono \mathcal{F}_{n-1} -misurabili (ovvero predicibili) e le ρ_n^i sono \mathcal{F}_n -misurabili (ovvero adattati). Allora per $n \geq 1$ si ha

$$B_n = B_0 \prod_{k=1}^n (1 + r_k) \quad (4.3)$$

$$S_n^i = S_0^i \prod_{k=1}^n (1 + \rho_k^i). \quad (4.4)$$

Si noti che l'ipotesi (ragionevole) che B_n sia strettamente positivo si traduce nell'ipotesi che $r_k > -1$ per ogni k . Inoltre spesso per comodità si assume che $B_0 = 1$.

4.1.1 Strategia di investimento di un portfolio

Si consideri un investitore sul mercato (B, S) che può:

- 1 depositare o prendere soldi dal conto bancario
- 2 vendere e comprare azioni.

Si assume che un trasferimento di denaro da un'operazione ad un'altra non richieda costi di transazione e che le operazioni risultino infinitamente divisibili, cioè che l'investitore possa comprare, o vendere, qualunque porzione di azione e prelevare, o depositare, qualsiasi ammontare dal conto bancario.

Si vogliono ora introdurre alcune definizioni in merito alle operazioni, alle posizioni e alle strategie finanziarie possibili in tale mercato.

Definizione 4.1 (Portfolio o Strategia d'investimento). *Una successione stocastica predicibile*

$$\pi = (\beta, \gamma)$$

dove $\beta = (\beta_n(\omega))_{n \geq 0}$ e $\gamma = (\gamma_n^1(\omega), \dots, \gamma_n^d(\omega))_{n \geq 0}$ sono predicibili, ovvero tali che $\beta_n(\omega)$ e $\gamma_n^i(\omega)$ risultano \mathcal{F}_{n-1} -misurabili per ogni $n \geq 0$ e $i = 1, \dots, d$ è detta **investimento di un portfolio** (o più semplicemente **portfolio**) sul mercato (B, S) .

Per enfatizzare il dinamismo al quale risulta sottoposto l'investimento di un portfolio viene spesso usato il termine **strategia di investimento**. (o più semplicemente **strategia**)

Si osservi che le variabili $\beta_n(\omega)$ e $\gamma_n^i(\omega)$ possono essere positive, nulle e anche negative; quest'ultimo caso indica che l'investitore può prendere un prestito dalla banca e vendere azioni che non possiede (**vendita a corto**, o **vendita allo scoperto**, o **short sale**).

Un altro punto importante da sottolineare è che la \mathcal{F}_{n-1} -misurabilità indica che le variabili $\beta_n(\omega)$ e $\gamma_n^i(\omega)$, che descrivono la posizione finanziaria dell'investitore al tempo n (ovvero l'ammontare presente sul conto bancario e le azioni in suo possesso), sono determinabili tramite le informazioni ottenibili fino al tempo $n - 1$ mentre **non** dipendono da quelle relative al tempo n : (la posizione di domani è completamente definita dalla situazione presente oggi).

Il tempo $n = 0$ gioca un ruolo importante; infatti la predicibilità in tale istante, formalmente equivalente alla \mathcal{F}_{-1} -misurabilità, corrisponde alla \mathcal{F}_0 -misurabilità, si assume cioè $\mathcal{F}_{-1} = \mathcal{F}_0$.

Si è già assunto $n \geq 0$ verrà fatta anche l'ipotesi aggiuntiva di tempo limitato (**orizzonte finito**), ovvero $n \leq N$ da cui segue che si considereranno solo gli istanti di tempo $0 \leq n \leq N$. Nell'indicare una generica successione $(a_n)_{n=0}^N$ si useranno, equivalentemente, le espressioni: $(a_n)_{n \geq 0}$, $(a_n)_{0 \leq n \leq N}$ o addirittura (a_n) .

Definizione 4.2 (Valore di un portfolio). *Il processo aleatorio valore associato a una strategia di investimento π è la successione stocastica:*

$$X^\pi = (X_n^\pi)_{n \geq 0}$$

dove, all'istante n

$$X_n^\pi = \beta_n B_n + \sum_{i=1}^d \gamma_n^i S_n^i. \quad (4.5)$$

La definizione (4.5) significa solo che se al tempo n possediamo β_n titoli bancari (o bond), il cui valore unitario³ è B_n e γ_n^i azioni del titolo i , che al tempo n vale⁴ S_n^i , allora il valore totale del portfolio è la somma dei valori investiti nei singoli titoli.

Per evitare di appesantire le notazioni si indicherà con $\gamma_n S_n$ il prodotto scalare dei vettori $\gamma_n = (\gamma_n^1, \dots, \gamma_n^d)$ e $S_n = (S_n^1, \dots, S_n^d)$ per cui la (4.5) diviene

$$X_n^\pi = \beta_n B_n + \gamma_n S_n. \quad (4.6)$$

³Allora il valore globale investito in banca (o nel bond) è $\beta_n B_n$

⁴Allora il valore globale investito nel titolo i è $\gamma_n^i S_n^i$.

Si assume inoltre che le uniche strategie ammissibili siano le strategie autofinanzianti, ovvero se non ci sono consumi o costi di transazione, e neppure ulteriori investimenti esterni, ma ad ogni istante tutto (e solo) il valore viene semplicemente reinvestito nel mercato⁵.

Definizione 4.3 (Strategia autofinanziante). Una strategia $\pi = (\beta, \gamma)$ si dice **autofinanziante** (o **self-financing**), se per ogni n

$$\beta_{n-1}B_{n-1} + \gamma_{n-1}S_{n-1} = \beta_n B_{n-1} + \gamma_n S_{n-1}, \quad (4.7)$$

o equivalentemente

$$(\beta_n - \beta_{n-1})B_{n-1} + (\gamma_n - \gamma_{n-1})S_{n-1} = 0. \quad (4.8)$$

Da questa definizione si ottiene immediatamente che

$$\begin{aligned} X_n^\pi - X_{n-1}^\pi &= \beta_n B_n + \gamma_n S_n - (\beta_{n-1}B_{n-1} + \gamma_{n-1}S_{n-1}) \\ &= \beta_n B_n + \gamma_n S_n - (\beta_n B_{n-1} + \gamma_n S_{n-1}) \\ &= \beta_n (B_n - B_{n-1}) + \gamma_n (S_n - S_{n-1}) \\ &= \beta_n \Delta B_n + \gamma_n \Delta S_n. \end{aligned}$$

Dalla precedente relazione si ottiene quindi che

$$\begin{aligned} X_n^\pi - X_0^\pi &= \sum_{k=1}^n (X_k^\pi - X_{k-1}^\pi) = \\ &= \sum_{k=1}^n (\beta_k \Delta B_k + \gamma_k \Delta S_k) \\ &= \sum_{k=1}^n \beta_k \Delta B_k + \sum_{k=1}^n \gamma_k \Delta S_k. \end{aligned}$$

Da quanto osservato si può concludere che il capitale guadagnato (o *capital gains*) $X_n^\pi - X_0^\pi$, tramite l'investimento di un portfolio π autofinanziante, può essere descritto da una successione $G^\pi = (G_n^\pi)_{n \geq 0}$, dove

$$G_0^\pi = 0 \quad \text{e} \quad G_n^\pi = \sum_{k=1}^n (\beta_k \Delta B_k + \gamma_k \Delta S_k), \quad (4.9)$$

⁵Per capire il significato della (4.7) si può ragionare così : nell'istante $n - 1$ si ha che il valore del portfolio è

$$X_{n-1}^\pi = \beta_{n-1}B_{n-1} + \gamma_{n-1}S_{n-1},$$

durante l'intervallo $(n - 1, n)$ si cambia strategia e ci si ritrova con β_n titoli bancari, che però valgono ancora B_{n-1} , e con γ_n^i titoli i , che però valgono ancora S_{n-1}^i . Il fatto che la strategia sia autofinanziante si riflette nel fatto che per fare questa operazione non ho bisogno di prendere altro denaro da fuori l'investimento (ad esempio comprando azioni con il ricavato di un lavoro) e neppure di effettuare consumi (ad esempio per comprare beni, come case, automobili, etc.) o di pagare dei costi (si ipotizza che non ci siano costi di transazione), ma tutto il denaro necessario per avere il nuovo portfolio, ovvero

$$\beta_n B_{n-1} + \gamma_n S_{n-1}$$

è esattamente il valore X_{n-1}^π del portfolio all'istante $n - 1$.

quindi il valore del portfolio al tempo n è dato dall'espressione

$$X_n^\pi = X_0^\pi + G_n^\pi, \quad (4.10)$$

si arriva così alla seguente definizione alternativa ed equivalente⁶:

Definizione 4.4 (Strategia autofinanziante bis). *Un portfolio π è autofinanziante se il suo valore $X^\pi = (X_n^\pi)_{n \geq 0}$ può essere rappresentato dalla somma:*

$$X_n^\pi = X_0^\pi + \sum_{k=1}^n (\beta_k \Delta B_k + \gamma_k \Delta S_k) \quad n \geq 1. \quad (4.13)$$

La classe delle strategie π autofinanzianti verrà indicata con SF (da **self-financing**).

Osservazione 4.1. *Le ipotesi fondamentali che caratterizzano il mercato finanziario considerato, ovvero:*

- ▷ **assenza di costi di transazione;**
- ▷ **titoli infinitamente divisibili:** *non ci sono limiti sulle quantità minime dei titoli trattati;*
- ▷ **possibilità di vendite allo scoperto (short sale):** *è possibile vendere titoli che non si possiedono, ciò equivale a ipotizzare che è sempre consentito assumere la posizione di debitore;*

⁶Si osservi inoltre che prese due successioni arbitrarie $a = (a_n)_{n \geq 0}$ e $b = (b_n)_{n \geq 0}$ sussiste la regola di differenziazione discreta:

$$\Delta(a_n b_n) = a_n \Delta b_n + b_{n-1} \Delta a_n, \quad (4.11)$$

dove si è posto $\Delta a_n = a_n - a_{n-1}$. Applicando questo risultato alla parte destra della (4.6) si ottiene l'espressione:

$$\begin{aligned} \Delta X_n^\pi &= \Delta(\beta_n B_n) + \Delta(\gamma_n S_n) \\ &= [\beta_n \Delta B_n + \gamma_n \Delta S_n] + [B_{n-1} \Delta \beta_n + S_{n-1} \Delta \gamma_n]. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Ciò mostra che il cambiamento del valore del portfolio ($\Delta X_n^\pi = X_n^\pi - X_{n-1}^\pi$) dipende, in generale, da due fattori:

- 1 dalla *variazione* dovuta al *conto bancario* e ai *prezzi delle azioni*

$$\beta_n \Delta B_n + \gamma_n \Delta S_n;$$

- 2 dalla *variazione* della composizione del *portfolio* (*cambio di strategia*)

$$B_{n-1} \Delta \beta_n + S_{n-1} \Delta \gamma_n.$$

Risulta, dunque, che in caso di autofinanziamento (una sorta di autarchia) il reale cambio di valore di X_n^π sia sempre dovuto alle variazioni ΔB_n e ΔS_n e non $\Delta \beta_n$ e $\Delta \gamma_n$ (si assume, cioè, che le posizioni finanziarie prese dall'investitore non siano soggette a cambiamenti). Si vede immediatamente che assumere π autofinanziante equivale al verificarsi della seguente condizione

$$B_{n-1} \Delta \beta_n + S_{n-1} \Delta \gamma_n = 0 \quad n \geq 1.$$

▷ **assenza di rischio di insolvenza (default risk):** si assume che i contratti di compravendita stipulati vengano sicuramente onorati;

possono essere sintetizzate dicendo che il mercato è privo di frizionalità (per maggiori dettagli si consulti, ad esempio, il testo di Moriconi [4]).

4.1.2 Mercato scontato (\tilde{B}, \tilde{S})

Si consideri un mercato (B, S) come descritto precedentemente. È interessante notare che partendo da questo è sempre possibile⁷ costruire un nuovo mercato (\tilde{B}, \tilde{S}) detto **mercato scontato** o **attualizzato** tale che

$$\tilde{B} = (\tilde{B}_n)_{n \geq 0}, \quad \text{con} \quad \tilde{B}_n \equiv 1$$

e

$$\tilde{S} = (\tilde{S}_n)_{n \geq 0}, \quad \text{con} \quad \tilde{S}_n = \frac{S_n}{B_n}.$$

Allora preso un portfolio $\pi = (\beta, \gamma)$ il suo **valore scontato**

$$\tilde{X}_n^\pi = (\tilde{X}_n^\pi)_{n \geq 0}, \quad \text{con} \quad \tilde{X}_n^\pi = \frac{X_n^\pi}{B_n}$$

risulta dato dall'espressione

$$\tilde{X}_n^\pi = \beta_n \tilde{B}_n + \gamma_n \tilde{S}_n = \beta_n + \gamma_n \tilde{S}_n \quad (4.14)$$

in quanto

$$\tilde{X}_n^\pi = \frac{X_n^\pi}{B_n} = \frac{1}{B_n} (\beta_n B_n + \gamma_n S_n),$$

e nel caso in cui π è autofinanziante nel mercato (B, S) si ha che questa proprietà si trasmette al mercato (\tilde{B}, \tilde{S}) , infatti la condizione (4.8) che caratterizza le strategie autofinanzianti è equivalente⁸ a

$$(\beta_n - \beta_{n-1})\tilde{B}_{n-1} + (\gamma_n - \gamma_{n-1})\tilde{S}_{n-1} = 0 \quad (4.15)$$

In altre parole una strategia è autofinanziante nel mercato (B, S) se e solo se è autofinanziante nel mercato attualizzato (\tilde{B}, \tilde{S}) .

Pertanto vale la (4.13) attualizzata dove, cioè, al posto di X, B, S si considera $\tilde{X}, \tilde{B}, \tilde{S}$ ed essendo $\Delta \tilde{B}_k \equiv 0$ segue, inoltre, che per $\pi \in SF$

$$\tilde{X}_n^\pi = \tilde{X}_0^\pi + \sum_{k=1}^n \gamma_k \Delta \tilde{S}_k, \quad (4.16)$$

⁷Si ricordi che per ipotesi $B_n > 0$ per ogni n .

⁸Chiaramente la condizione (4.8), ovvero $(\beta_n - \beta_{n-1})B_{n-1} + (\gamma_n - \gamma_{n-1})S_{n-1} = 0$, rimane invariata se si divide per B_{n-1} , ovvero

$$(\beta_n - \beta_{n-1})\tilde{B}_{n-1} + (\gamma_n - \gamma_{n-1})\tilde{S}_{n-1} = \frac{1}{B_{n-1}} [(\beta_n - \beta_{n-1})B_{n-1} + (\gamma_n - \gamma_{n-1})S_{n-1}] = 0.$$

quindi l'espressione esplicita del valore del portfolio è

$$\tilde{X}_n^\pi = \tilde{X}_0^\pi + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^d \gamma_k^i \Delta \tilde{S}_k^i, \quad \tilde{S}_k^i = \frac{S_k^i}{B_k}. \quad (4.17)$$

Allora si conclude considerando la (4.14) e la (4.15) che il valore scontato $\tilde{X}^\pi = \left(\tilde{X}_n^\pi \right)_{n \geq 0} = \left(\frac{X_n^\pi}{B_n} \right)_{n \geq 0}$ con $\pi \in SF$ soddisfa la relazione

$$\Delta \left(\tilde{X}_n^\pi \right) = \gamma_n \Delta \left(\tilde{S}_n \right), \quad \text{ovvero} \quad \Delta \left(\frac{X_n^\pi}{B_n} \right) = \gamma_n \Delta \left(\frac{S_n}{B_n} \right). \quad (4.18)$$

Da quanto illustrato risulta chiaro che nel caso si sappia a priori che $B_n > 0$ con $n \geq 1$ si può semplificare la struttura del portfolio π assumendo $B_n \equiv 1$.

Dopo aver dato le nozioni base di mercato (B, S) un punto fondamentale che si vuole sottolineare è che si considererà *sempre e soltanto* un mercato che non prevede opportunità di arbitraggio (non esistono *free-lunch*, cioè pasti gratis), ovvero:

Definizione 4.5. *Un mercato è detto privo di opportunità di arbitraggio (o arbitrage-free), o anche razionale (o fair), se non permette di ottenere guadagni sicuri, cioè se non si possono ottenere dei profitti senza sottoporsi a dei rischi*

N.B. La relazione illustrata nella (4.18), nella sua semplicità, risulterà assumere un ruolo chiave in molti calcoli relativi al concetto di arbitrage-free, ciò spiega il perché dell'introduzione del mercato scontato.

4.2 Nozione di copertura. Prezzo superiore e inferiore.

Sia $f_N = f_N(\omega)$ una funzione non negativa \mathcal{F}_N -misurabile detta **obbligazione** o **pay-off (prezzo di pagamento) terminale**⁹, in questo paragrafo vengono illustrati alcuni concetti di **copertura** (o **hedge**) per il pay-off terminale.

Definizione 4.6 (Copertura superiore, inferiore e perfetta). *Un portfolio $\pi = (\beta, \gamma)$ con $\beta = (\beta_n)$, $\gamma = (\gamma_n)$, per $n = 0, 1, \dots, N$ è detto **copertura superiore** per (x, f_N) , con $x \geq 0$, se il valore iniziale del portfolio è x e se $X_N^\pi \geq f_N$, \mathbb{P} q.c., ovvero se*

$$X_0^\pi = x \quad e \quad \mathbb{P}(X_N^\pi \geq f_N) = 1.$$

*Un portfolio $\pi = (\beta, \gamma)$ è invece detto **copertura inferiore** per (x, f_N) , con $x \geq 0$, se il valore iniziale del portfolio è x e se $X_N^\pi \leq f_N$, \mathbb{P} q.c., ovvero*

$$X_0^\pi = x \quad e \quad \mathbb{P}(X_N^\pi \leq f_N) = 1.$$

⁹Esempio tipico, nel caso $d = 1$, è il caso della opzione call con prezzo di esercizio K , per cui $f_N = (S_N - K)^+$. Altri esempi sono dati dal prezzo massimo dell'azione $f_N = \max\{S_n; n = 1, \dots, N\}$, o ancora dal suo prezzo medio $f_N = (S_1 + \dots + S_N)/N$.

Infine un portfolio $\pi = (\beta, \gamma)$ è invece detto **copertura perfetta** per (x, f_N) , con $x \geq 0$, se è sia una copertura inferiore che una copertura superiore, una copertura, cioè se il valore iniziale del portfolio è x e se $X_N^\pi = f_N$, \mathbb{P} q.c., ovvero

$$X_0^\pi = x \quad e \quad \mathbb{P}(X_N^\pi = f_N) = 1.$$

Il concetto di **copertura** gioca un ruolo di fondamentale importanza in ambito finanziario in quanto rappresenta uno strumento di protezione che permette di ottenere un livello di garanzia relativamente a un certo investimento.

Tramite le successive definizioni si potranno formalizzare le azioni che si devono compiere per assicurarsi un livello di garanzia. Si indichi con

$$\begin{aligned} H^*(x, f_N; \mathbb{P}) &= \{\pi \text{ ammissibili} : X_0^\pi = x, \quad X_N^\pi \geq f_N, \quad \mathbb{P} \text{ q.c.}\} \\ &= \{\pi \text{ ammissibili} : X_0^\pi = x, \quad \mathbb{P}(X_N^\pi \geq f_N) = 1\} \end{aligned}$$

la **classe delle coperture superiori per (x, f_N)** e con

$$\begin{aligned} H_*(x, f_N; \mathbb{P}) &= \{\pi \text{ ammissibili} : X_0^\pi = x, \quad X_N^\pi \leq f_N, \quad \mathbb{P} \text{ q.c.}\} \\ &= \{\pi \text{ ammissibili} : X_0^\pi = x, \quad \mathbb{P}(X_N^\pi \leq f_N) = 1\} \end{aligned}$$

la **classe delle coperture inferiori per (x, f_N)** .

Definizione 4.7 (Prezzo superiore e prezzo inferiore). Sia f_N una funzione di pay-off, allora la quantità

$$\begin{aligned} C^* &= C^*(f_N; \mathbb{P}) = \inf\{x \geq 0 : H^*(x, f_N; \mathbb{P}) \neq \emptyset\} \\ &= \inf\{x \geq 0 : \exists \pi \text{ ammissibile} : X_0^\pi = x, \quad \mathbb{P}(X_N^\pi \geq f_N) = 1\} \end{aligned}$$

è detta **prezzo superiore** (di copertura per f_N) e

$$\begin{aligned} C_* &= C_*(f_N; \mathbb{P}) = \sup\{x \geq 0 : H_*(x, f_N; \mathbb{P}) \neq \emptyset\} \\ &= \sup\{x \geq 0 : \exists \pi \text{ ammissibile} : X_0^\pi = x, \quad \mathbb{P}(X_N^\pi \leq f_N) = 1\} \end{aligned}$$

è detta **prezzo inferiore** (di copertura per f_N).

N.B. Per convenzione si pone $C^*(f_N; \mathbb{P}) = \infty$ se $H^*(x, f_N; \mathbb{P}) = \emptyset$ per tutti gli $x \geq 0$ e $C_*(f_N; \mathbb{P}) = \infty$ se $H_*(x, f_N; \mathbb{P}) \neq \emptyset$ per tutti gli $x \geq 0$.

Osservazione 4.2. Le definizioni date precedentemente assumono, implicitamente, che le strategie π considerate seguono le costrizioni imposte sulla dinamica del valore del portfolio; ad esempio se, come si fa in questo capitolo, ci si limita alle strategie autofinanzianti, allora più esplicitamente

$$\begin{aligned} H^*(x, f_N; \mathbb{P}) &= \{\pi \in SF : X_0^\pi = x, \quad X_N^\pi \geq f_N \quad (\mathbb{P} \text{ q.c.})\}, \\ H_*(x, f_N; \mathbb{P}) &= \{\pi \in SF : X_0^\pi = x, \quad X_N^\pi \leq f_N \quad (\mathbb{P} \text{ q.c.})\}. \end{aligned}$$

Inoltre va osservato che nel mercato attualizzato (\tilde{B}, \tilde{S}) , si ha

$$H^*(x, f_N; \mathbb{P}) = \tilde{H}^*(\tilde{x}, \tilde{f}_N; \mathbb{P}), \quad e \quad H_*(x, f_N; \mathbb{P}) = \tilde{H}_*(\tilde{x}, \tilde{f}_N; \mathbb{P}),$$

dove, $\tilde{x} = x/B_0$ e

$$\begin{aligned} \tilde{H}^*(\tilde{x}, \tilde{f}_N; \mathbb{P}) &:= \{\pi \in SF : \tilde{X}_0^\pi = \tilde{x}, \quad \tilde{X}_N^\pi \geq \tilde{f}_N \quad (\mathbb{P} \text{ q.c.})\}, \\ \tilde{H}_*(\tilde{x}, \tilde{f}_N; \mathbb{P}) &:= \{\pi \in SF : \tilde{X}_0^\pi = \tilde{x}, \quad \tilde{X}_N^\pi \leq \tilde{f}_N \quad (\mathbb{P} \text{ q.c.})\}. \end{aligned}$$

Dopo aver visto formalmente i concetti di copertura, risulta interessante darne una visione pratica, cioè spiegare il loro utilizzo in ambito finanziario e il loro legame con la condizione di assenza di opportunità di arbitraggio.

Va osservato che nel seguito si dovrebbe considerare un mercato scontato (\tilde{B}, \tilde{S}) e il valore scontato \tilde{X}^π relativo ad una strategia π . Tuttavia, per semplicità di notazione tale mercato viene denotato come (B, S) e il valore con X^π , che è come dire che si suppone direttamente che sia $B_n = 1$, ciò permette di considerare i guadagni ad esse relativi nell'istante iniziale senza dover attualizzare i valori.

Si immagini di vendere a un prezzo x un generico contratto al quale corrisponde, all'istante N , il pagamento di un pay-off f_N . Naturalmente lo scopo è venderlo a un prezzo elevato, però si deve tener conto che il compratore lo vuole acquistare a un prezzo basso, ma vuole anche essere certo che il venditore sia in grado di fornire al tempo N l'obbligazione promessa f_N , cioè che non ci sia rischio di insolvenza (o default risk). Considerando queste posizioni opposte si pone il problema di determinare il **più piccolo prezzo accettabile**, ovvero quel prezzo che permette al venditore di rispettare i termini del contratto (cioè di pagare l'ammontare f_N al tempo N) senza però dare al venditore un'opportunità di ottenere un arbitraggio altrimenti il compratore non avrebbe ragione di accettare la vendita.

D'altra parte acquistando un contratto lo si vuole comprare a buon mercato, ma non si può pretendere di ottenere un guadagno sicuro, senza rischi (ovvero un'opportunità di arbitraggio per il compratore), altrimenti il venditore non avrebbe interesse a cederlo.

Da quanto richiesto si ottiene, come si spiegherà tra poco, che i prezzi superiore e inferiore, $C^* = C^*(f_N; \mathbb{P})$ e $C_* = C_*(f_N; \mathbb{P})$, definiti precedentemente, soddisfano la seguente proprietà:

Gli intervalli $[0, C_*)$ e (C^*, ∞) sono insiemi dei valori dei prezzi che danno, rispettivamente, al compratore e al venditore opportunità di arbitraggio.

Verifica della proprietà (C^, ∞) è un intervallo dei prezzi con opportunità di arbitraggio per il venditore:*

Si assuma che il contratto venga pagato un prezzo x maggiore di C^* allora il venditore può ottenere un free-lunch agendo in questo modo: egli preleva dalla somma totale x una quota y in modo tale che

$$C^* < y < x \text{ e } H^*(y, f_N; \mathbb{P}) \neq \emptyset$$

(un tale y esiste per la definizione di estremo inferiore) e la usa per costruire un portfolio $\pi^*(y)$ che assume i seguenti valori

$$X_0^{\pi^*(y)} = y \text{ e } \mathbb{P}(X_N^{\pi^*(y)} \geq f_N) = 1$$

(un tale portfolio esiste perché $H^*(y, f_N; \mathbb{P}) \neq \emptyset$).

Si può descrivere la stessa azione dicendo che il venditore *investe* la quota y nel mercato (B, S) in accordo con la strategia $\pi^*(y) = (\beta_n^*(y), \gamma_n^*(y))_{0 \leq n \leq N}$.

Il valore¹⁰ di $\pi^*(y)$ al tempo N è $X_N^{\pi^*(y)}$, il guadagno totale delle due transazioni (vendere il contratto e comprare il portfolio $\pi^*(y)$) risulta¹¹ quindi

$$(x - f_N) + (X_N^{\pi^*(y)} - y) = (x - y) + (X_N^{\pi^*(y)} - f_N) \geq x - y > 0.$$

Allora, c'è un *guadagno netto senza rischio* (arbitraggio) del venditore di almeno $x - y > 0$.

Verifica della proprietà $[0, C_)$ è un intervallo dei prezzi con opportunità di arbitraggio per il compratore:*

Si consideri ora l'opportunità di arbitraggio per il compratore. Se il compratore acquista, per un prezzo $x < C_*$, un contratto che preveda all'istante N il pagamento di un ammontare f_N , allora egli può ottenere un free-lunch, come segue: prima di tutto il compratore sceglie y tale che

$$x < y < C_* \text{ e } H_*(y, f_N; \mathbb{P}) \neq \emptyset$$

(un tale y esiste per definizione di estremo superiore). Sia ora $\pi_*(y)$ un portfolio che appartiene a $H_*(y, f_N; \mathbb{P})$, ovvero il cui valore iniziale è y e il cui valore al tempo N risulti $X_N^{\pi_*(y)} \leq f_N$, in formule

$$X_0^{\pi_*(y)} = y \text{ e } \mathbb{P}(X_N^{\pi_*(y)} \leq f_N) = 1.$$

Il compratore agisce come segue: al tempo $n = 0$ investe la quota $-y$ in accordo con la strategia $\bar{\pi}(-y) = -\pi_*(y)$, dove

$$\pi_*(y) = (\beta_{*n}(y), \gamma_{*n}(y))_{0 \leq n \leq N}.$$

Allora

$$\bar{\pi}(-y) = (-\beta_{*n}(y), -\gamma_{*n}(y))_{0 \leq n \leq N},$$

in modo tale che

$$-y = -\beta_{*0}(y)B_0 - \gamma_{*0}(y)S_0$$

e il valore di $\bar{\pi}(-y)$ sia

$$X_N^{\bar{\pi}(-y)} = X_N^{-\pi_*(y)} = -X_N^{\pi_*(y)},$$

¹⁰Si ricordi che abbiamo assunto per semplicità che $B_n = 1$ per ogni $n = 0, \dots, N$: altrimenti si dovrebbero cambiare le quantità $X_N^{\pi^*(y)}$ con $\tilde{X}_N^{\pi^*(y)} = X_N^{\pi^*(y)}/B_N$, ed f_N con $\tilde{f}_N = f_N/B_N$.

¹¹Al tempo 0 il venditore riceve x dal compratore e al tempo N gli deve restituire f_N , inoltre tiene per sé il guadagno $X_N^{\pi^*(y)} - y$, ottenuto investendo y con la strategia $\pi^*(y)$.

si ottiene, quindi, che il guadagno totale dato dalle due transazioni (ossia comprare il contratto e investire $-y$, con la strategia $\bar{\pi}(-y)$)¹² è

$$(f_N - x) + (X_N^{\bar{\pi}(-y)} - (-y)) = (f_N - X_N^{\pi_*(y)}) + (y - x) \geq y - x > 0.$$

Si vede, infine, che essendo questo il guadagno netto strettamente positivo del compratore relativo all'acquisto di un contratto di prezzo $x < C^*$ implica un arbitraggio.

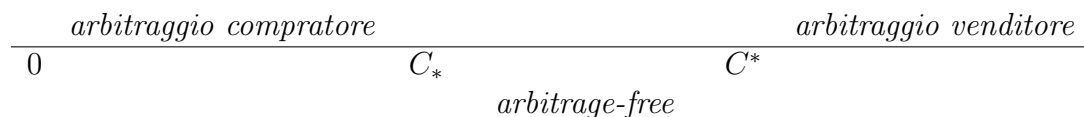
Osservazione 4.3. *Nella discussione precedente è stato considerato un investimento con un ammontare negativo $-y$, praticamente ciò significa che esiste la possibilità di trovare uno speculatore che mette a disposizione la quota y al tempo $n = 0$ al patto di ricevere $X_N^{\pi_*(y)}$ al tempo $n = N$; si noti che quest'ultimo valore può essere superiore o inferiore a y data l'aleatorietà dei prezzi.*

Dalla serie di considerazioni fatte si evince che l'unica possibilità per non avere opportunità di arbitraggio è porsi nell'ipotesi che $C_* \leq C^*$ e prendere come prezzo del contratto un valore $x \in [C_*, C^*]$; per questo motivo si dà a $[C_*, C^*]$ il nome di **intervallo dei prezzi accettabili (o razionali)**.

In altre parole: se non ci sono opportunità di arbitraggio (ne' per il compratore, ne' per il venditore) deve necessariamente valere

$$C_* = C_*(f_N, \mathbb{P}) \leq C^*(f_N, \mathbb{P}) = C^* \quad (4.19)$$

La trattazione precedente dei prezzi razionali può essere schematizzata come segue



Si osservi, infine, che operare con prezzi appartenenti al range di quelli accettabili esclude soltanto il caso di profitti sicuri, ma non la possibilità di profitti, e che un profitto sicuro è una situazione logicamente e economicamente assurda anche perché un guadagno può essere visto come una *compensazione per il rischio*.

4.2.1 Mercato completo e incompleto

Si consideri ora il caso particolare in cui esista, per un fissato valore x e una funzione di pay-off f_N , una copertura perfetta π per (x, f_N) , cioè una strategia tale che

$$X_0^\pi = x \text{ e } \mathbb{P}(X_N^\pi = f_N) = 1.$$

¹²Per il contratto, al tempo zero deve pagare x e al tempo N riceve f_N , mentre per l'investimento al tempo 0 deve pagare $(-y)$ e al tempo N riceve $X_N^{\bar{\pi}(-y)} = -X_N^{\pi_*(y)}$.

Assumere che $X_N^\pi = f_N$, \mathbb{P} q.c., significa prendere una copertura π in grado di **replicare** la f_N richiesta.

Per molte ragioni risulta auspicabile che ogni obbligazione si possa replicare per qualche valore di $x = \bar{x}$; il motivo principale è che se questo accade l'intersezione tra le classi $H^*(x, f_N; \mathbb{P})$ e $H_*(x, f_N; \mathbb{P})$ è diversa dall'insieme vuoto in quanto contiene la strategia π che dà la replicabilità. Dalla definizione dei prezzi di copertura segue allora

$$C^*(f_N; \mathbb{P}) \leq \bar{x} \leq C_*(f_N; \mathbb{P})$$

ovvero, in questo caso, se inoltre non ci sono opportunità di arbitraggio e quindi deve valere (4.19), allora l'intervallo dei prezzi accettabili si riduce a un **unico prezzo**

$$C(f_N; \mathbb{P}) = C^*(f_N; \mathbb{P}) = C_*(f_N; \mathbb{P}) = \bar{x},$$

detto **prezzo razionale** (o **fair price**) per la richiesta f_N (è il prezzo che risulta accettabile sia per il venditore che per il compratore: ogni deviazione da questo comporterebbe la possibilità di ottenere guadagni senza rischi).

Il caso trattato, vista la sua importanza, presenta una terminologia specifica.

Definizione 4.8 (Replicabilità). *Una obbligazione f_N si dice replicabile, se esiste un x , per il quale esiste una copertura perfetta π di (x, f_N) , ovvero esiste un portfolio π tale che*

$$X_0^\pi = x, \quad e \quad \mathbb{P}(X_N^\pi = f_N) = 1.$$

Definizione 4.9 (Mercato N -perfetto). *Un mercato (B, S) è detto N -perfetto o perfetto rispetto al tempo N , se ogni funzione f_N \mathcal{F}_N -misurabile può essere replicata, cioè, per un qualche x esiste una copertura perfetta π di (x, f_N) , altrimenti il mercato viene detto N -imperfetto.*

La condizione che un mercato (B, S) sia perfetto è molto forte e impone delle costrizioni severe sulla struttura del mercato. Fortunatamente, non è necessario, in molti casi, che la copertura perfetta esista per tutte le funzioni f_N \mathcal{F}_N -misurabili a volte è sufficiente considerare solo funzioni limitate oppure funzioni con opportune condizioni di integrabilità o di misurabilità: è questo il caso di un mercato completo.

Definizione 4.10 (Mercato N -completo). *Un mercato (B, S) si dice N -completo o completo rispetto al tempo N , se ogni funzione f_N di pay-off limitata e \mathcal{F}_N -misurabile è replicabile.*

Osservazione 4.4. *Si noti che nel caso in cui \mathcal{F}_N è una σ -algebra finita, allora tutte le variabili aleatorie \mathcal{F}_N -misurabili sono variabili aleatorie discrete e che assumono un numero finito di valori, e quindi tutte le variabili aleatorie \mathcal{F}_N -misurabili sono anche limitate. In questo caso non c'è differenza tra le due condizioni di mercato N -perfetto e mercato N -completo. Inoltre conviene osservare in questo caso, tutte le variabili aleatorie \mathcal{F}_N -misurabili sono anche ovviamente integrabili, essendo limitate. Quest'ultima proprietà sarà utile nel seguito per semplificare alcune dimostrazioni.*

Determinare se e quando un mercato è perfetto o completo è uno dei punti di maggiore interesse per la matematica finanziaria rispondere a queste domande risulta estremamente difficile nel caso generale, ma, considerando delle ipotesi aggiuntive sulla struttura del mercato,

si può arrivare a una soluzione esaustiva del problema. È questo il caso di un mercato arbitrage-free dove la completezza risulta strettamente connessa all'esistenza e all'unicità di una misura di probabilità: **la misura martingala equivalente**, che viene trattata nelle sezioni successive e che è l'oggetto principale dei così detti teoremi dell'Asset Pricing *APT1* e *APT2* (vedere le sezioni successive).

4.3 Mercato senza opportunità di arbitraggio

In poche parole, come preannunciato, dire che un mercato è **senza opportunità di arbitraggio** (o **arbitrage-free**) significa che il mercato è razionale: non si ottengono profitti senza rischiare. La Definizione 4.5 di arbitrage-free è piuttosto intuitiva la si vuole formalizzare illustrandone i legami con gli elementi finanziari introdotti.

Si fissi un $N \geq 1$ si è interessati al valore X_N^π di una strategia $\pi \in SF$ all'istante terminale.

Definizione 4.11 (Opportunità di arbitraggio). *Si dice che una strategia autofinanziante π permette un'opportunità di arbitraggio (al tempo N) se, per un capitale iniziale*

$$X_0^\pi = 0$$

si ha

$$\mathbb{P}(X_N^\pi \geq 0) = 1$$

e $X_N^\pi > 0$ con probabilità \mathbb{P} positiva, cioè

$$\mathbb{P}(X_N^\pi > 0) > 0$$

o, equivalentemente¹³

$$E(X_N^\pi) > 0.$$

Si indichi con SF_{arb} la classe delle strategie autofinanzianti con opportunità di arbitraggio. Se $\pi \in SF_{arb}$ e $X_0^\pi = 0$, allora

$$\mathbb{P}(X_N^\pi \geq 0) = 1 \implies \mathbb{P}(X_N^\pi > 0) > 0.$$

Definizione 4.12 (Assenza di opportunità di arbitraggio). *Si dice che non esiste opportunità di arbitraggio su un mercato (B, S) o che il mercato è arbitrage-free se $SF_{arb} = \emptyset$. In altre parole, se il capitale iniziale X_0^π di una strategia π è zero e al tempo N il guadagno è non negativo \mathbb{P} q.c., allora il guadagno è nullo \mathbb{P} q.c., ovvero in formule, per ogni strategia autofinanziante*

$$X_0^\pi = 0 \text{ e } \mathbb{P}(X_N^\pi \geq 0) = 1 \implies \mathbb{P}(X_N^\pi = 0) = 1.$$

Si noti che nelle definizioni date sopra si considerano eventi del tipo $\{X_N^\pi > 0\}$, $\{X_N^\pi \geq 0\}$, o $\{X_N^\pi = 0\}$, che sono, rispettivamente, gli stessi¹⁴ di $\{\tilde{X}_N^\pi > 0\}$, $\{\tilde{X}_N^\pi \geq 0\}$, o $\{\tilde{X}_N^\pi = 0\}$ dove

¹³In generale una variabile aleatoria Z con $\mathbb{P}(Z \geq 0) = 1$ si ha:

se $\mathbb{P}(Z > 0) > 0$ allora $E[Z] > 0$;

se $E[Z] > 0$ allora necessariamente deve essere $\mathbb{P}(Z > 0) > 0$ (se fosse $\mathbb{P}(Z > 0) = 0$ allora sarebbe $\mathbb{P}(Z = 0) = 1$ e $E[Z] = 0$)

¹⁴Si ricordi che si ipotizza che $B_N > 0$, e quindi $\{\omega \in \Omega : X_N^\pi(\omega) > 0\} = \{\omega \in \Omega : \frac{X_N^\pi(\omega)}{B_N(\omega)} > 0\}$

$\tilde{X}_N^\pi = \frac{X_N^\pi}{B_N}$. Una considerazione analoga vale per gli eventi del tipo $\{X_N^\pi \geq f_N\}$, $\{X_N^\pi \leq f_N\}$ e $\{X_N^\pi = f_N\}$, che sono uguali agli eventi $\{\tilde{X}_N^\pi \geq \tilde{f}_N\}$, $\{\tilde{X}_N^\pi \leq \tilde{f}_N\}$ e $\{\tilde{X}_N^\pi = \tilde{f}_N\}$, come già osservato in precedenza. Ciò spiega perché la discussione relativa all'assenza o, alla presenza, di arbitraggio su un mercato (B, S) , può essere ristretta al mercato (\tilde{B}, \tilde{S}) con $\tilde{B}_n \equiv 1$ e $\tilde{S}_n = \frac{S_n}{B_n}$. Nel seguito quindi si deve intendere che le ipotesi sono riferite al mercato scontato. Tuttavia, per semplificare le notazioni (sempre nell'ipotesi che valga $B_n > 0$ per ogni $n = 0, \dots, N$) le ipotesi saranno scritte per il mercato (B, S) ¹⁵.

4.4 Primo e Secondo Teorema Fondamentale

In questo paragrafo si vogliono illustrare i legami esistenti tra le proprietà di assenza di arbitraggio e di completezza in un mercato finanziario e la nozione di misura martingala¹⁶ equivalente. Si consideri ora un mercato (B, S) strutturato come descritto nel primo paragrafo, in quest'ambito viene data la seguente definizione

Definizione 4.13. *Una misura di probabilità $\tilde{\mathbb{P}}$ è una **misura martingala equivalente** alla misura \mathbb{P} se la successione d -dimensionale scontata*

$$\tilde{S} = \left(\tilde{S}_n := \frac{S_n}{B_n} \right)_{n \geq 0}$$

è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala, cioè, esplicitamente, presa $\tilde{\mathbb{E}}$ come la media rispetto alla $\tilde{\mathbb{P}}$ si ha che per ogni $i = 1, \dots, d$

$$\tilde{\mathbb{E}} \left| \tilde{S}_n^i \right| = \tilde{\mathbb{E}} \left| \frac{S_n^i}{B_n} \right| < \infty \quad (4.20)$$

con $n = 0, 1, \dots, N$ e

$$\tilde{\mathbb{E}} \left(\tilde{S}_n^i \middle| \mathcal{F}_{n-1} \right) = \tilde{S}_{n-1}^i \quad \text{ovvero} \quad \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{S_n^i}{B_n} \middle| \mathcal{F}_{n-1} \right) = \frac{S_{n-1}^i}{B_{n-1}} \quad (\tilde{\mathbb{P}} \text{ q.c.}) \quad (4.21)$$

per $n = 1, \dots, N$.

Introdotti questi elementi si può enunciare il seguente teorema che data la sua importanza è chiamato **Primo Teorema fondamentale del'Asset Pricing** (o **First Fundamental Asset Pricing Theorem**), e verrà richiamato nel seguito come **APT1**.

¹⁵Scrivere le assunzioni per il mercato (B, S) , invece che per il mercato (\tilde{B}, \tilde{S}) , si può esprimere anche dicendo che si può assumere senza ledere la generalità che $B_n \equiv 1$, per ogni $n = 0, \dots, N$.

¹⁶Ricordiamo la definizione di martingala a tempo discreto per comodità del lettore. Un processo $X = (X_n)_{n \geq 0}$ definito su uno spazio di probabilità filtrato $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_n), \mathbb{P})$ è una *martingala* rispetto (\mathcal{F}_n) sotto \mathbb{P} , $(\mathbb{P}, \mathcal{F}_n)$ -martingala, se:

- 0) X_n è \mathcal{F}_n -misurabile $\forall n$ (X_n è \mathcal{F}_n -adattato);
- 1) X_n è integrabile ($\mathbb{E}|X_n| < \infty \quad \forall n$);
- 2) $\mathbb{E}(X_n | \mathcal{F}_{n-1}) = X_{n-1}$ (condizione martingala).

Teorema 4.1 (APT1). *Un mercato finanziario (B, S) con $N < \infty$ e $d < \infty$ definito su uno spazio di probabilità filtrato in cui $\mathcal{F}_0 = \{\emptyset, \Omega\}$ e $\mathcal{F}_N = \mathcal{F}$ è arbitrage-free se e solo se esiste almeno una misura martingala $\tilde{\mathbb{P}}$ equivalente a \mathbb{P} .*

Si è già detto che l'assunzione di assenza di arbitraggio ha un chiaro significato economico: questa proprietà rende il mercato razionale; è interessante osservare come tale caratteristica puramente finanziaria sia in realtà strettamente connessa a modelli probabilistici quali risultano essere le martingale, considerando ciò appare chiara l'importanza del teorema e il perché dell'attributo fondamentale!

Pur avendo elogiato il valore del teorema **APT1** bisogna sottolineare che le ipotesi su cui poggia risultano abbastanza restrittive, infatti si sta immaginando di operare su un mercato con orizzonte finito ($N < \infty$) e numero di azioni limitato ($d < \infty$). Queste assunzioni pur limitando notevolmente l'applicazione del teorema risultano, purtroppo, indispensabili: si possono, infatti, fornire dei **controesempi** che mostrano la non validità del teorema nel caso di $d = \infty$ o $N = \infty$.

Esempio 4.1. *Questo esempio, dovuto a W. Schachermayer [7], mostra che se $d = \infty$ (e $N = 1$) allora esiste un mercato arbitrage-free senza misura martingala equivalente, così che la parte necessaria del teorema risulta non verificata per un numero infinito di azioni.*

Sia $\Omega = \{1, 2, \dots\}$, sia $\mathcal{F}_0 = \{\emptyset, \Omega\}$, sia $\mathcal{F} = \mathcal{F}_1$ la σ -algebra generata dall'insieme delle parti di Ω e sia $\mathbb{P} = \sum_{k=1}^{\infty} 2^{-k} \delta_k$, cioè, $\mathbb{P}\{k\} = 2^{-k}$.

Si definisca la successione dei prezzi $S = (S_n^i)$ per $i = 1, 2, \dots$ e $n = 0, 1$ come segue:

$$\Delta S_1^i(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega = i \\ -1, & \omega = i + 1 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad e \quad S_0^i = 1 \quad \forall i$$

e si consideri il mercato (B, S) corrispondente alla successione $S = (S_n^i)$, per $n = 0, 1$, e con $B_0 = B_1 = 1$.

*Si inizi con il vedere che è **arbitrage-free**.*

Il valore al tempo 0 è

$$X_0^\pi = c_0 + \sum_{i=1}^{\infty} c_i;$$

ovvero $c_0 (= \beta_0)$ rappresenta la quantità di denaro investita nel conto in banca (o nel bond) e le $c_i (= \gamma_0^i)$ con $i = 1, 2, \dots$ sono le quantità iniziali delle azioni (si assume che $\sum |c_i| < \infty$), che inizialmente valgono $S_0^i = 1$.

Il valore $X_1^\pi(\omega)$ del generico portfolio π può essere allora rappresentato con la somma

$$X_1^\pi = c_0 + \sum_{i=1}^{\infty} c_i S_1^i == X_0^\pi + c_0 + \sum_{i=1}^{\infty} c_i S_1^i - X_0^\pi = X_0^\pi + \sum_{i=1}^{\infty} c_i \Delta S_1^i.$$

Se $X_0^\pi = 0$ (cioè $c_0 + \sum_{i=1}^\infty c_i = 0$) allora dalla condizione $\mathbb{P}(X_1^\pi \geq 0) = 1$ si ottiene¹⁷

$$X_1^\pi(1) = c_1 \geq 0; X_1^\pi(2) = c_2 - c_1 \geq 0; \dots; X_1^\pi(k) = c_k - c_{k-1} \geq 0; \dots$$

ovvero si ottiene che la $\{c_i\}$ è una successione crescente in senso lato. D'altra parte la successione $\{c_i\}$ è assolutamente convergente, e quindi si devono avere tutte le c_i uguali a zero. Da ciò segue che $X_1^\pi = 0$ (\mathbb{P} q.c.) e, quindi, ricordando la Definizione 4.12 si ottiene l'assenza di opportunità di arbitraggio.

Tuttavia non esiste nessuna misura martingala equivalente: se esistesse una misura $\tilde{\mathbb{P}} \sim \mathbb{P}$ tale che S è una martingala rispetto a $\tilde{\mathbb{P}}$ si dovrebbe avere (si veda la (4.21)) che per ogni $i = 1, 2, \dots$

$$\tilde{\mathbb{E}}[\Delta S_1^i | \mathcal{F}_0] = \tilde{\mathbb{E}}[\Delta S_1^i] = 0.$$

Esplicitando tale condizione si ottiene

$$\begin{aligned} \sum_{\omega \in \Omega} \Delta S_1^i(\omega) \tilde{\mathbb{P}}(\omega) &= \sum_{\omega=1}^\infty \Delta S_1^i(\omega) \tilde{\mathbb{P}}(\omega) \\ &= \Delta S_1^i(i) \tilde{\mathbb{P}}(i) + \Delta S_1^i(i+1) \tilde{\mathbb{P}}(i+1) = \tilde{\mathbb{P}}(i) - \tilde{\mathbb{P}}(i+1) = 0, \end{aligned}$$

cioè $\tilde{\mathbb{P}}(i) = \tilde{\mathbb{P}}(i+1)$, per $i = 1, 2, \dots$; ciò è chiaramente impossibile per una misura di probabilità σ -additiva (si avrebbe, infatti, $\sum_{\omega=1}^\infty \tilde{\mathbb{P}}(\omega) = \infty$ oppure $= 0$).

Esempio 4.2. Questo controesempio, che è il classico **Paradosso di S. Pietroburgo**, mostra che nel caso $N = \infty$ l'esistenza di una misura martingala non assicura l'assenza di opportunità di arbitraggio, ovvero la parte sufficiente del teorema risulta non verificata nel caso di orizzonte infinito.

Sia $\xi = (\xi_n)_{n \geq 0}$ una successione di variabili aleatorie i.i.d. su uno spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ tali che $\mathbb{P}(\xi_n = 1) = \mathbb{P}(\xi_n = -1) = \frac{1}{2}$. Se si considera il mercato (B, S) tale che $S_0 = 0$, $S_n = \xi_1 + \dots + \xi_n$ e $B_n \equiv 1$, si vede subito che \mathbb{P} è essa stessa una **misura martingala equivalente** in quanto $\tilde{S}_n = S_n$ è una martingala (confrontare l'Esempio 3.2) Tuttavia se si considera la strategia π autofinanziante, con

$$\gamma_k = \begin{cases} 2^{k-1} & \text{se } \xi_1 = \dots = \xi_{k-1} = -1, \\ 0 & \text{altrimenti,} \end{cases}$$

e con capitale iniziale X_0^π nullo, si ottiene che il guadagno è

$$X_n^\pi = \sum_{1 \leq k \leq n} \gamma_k \Delta S_k = \sum_{1 \leq k \leq n} \gamma_k \xi_k.$$

Questa strategia permette arbitraggio, anzi per la precisione, questa strategia assicura una vincita sicura di 1. Prima di dimostrare questa proprietà, che permette di affermare che il **Paradosso di S. Pietroburgo** fornisce un controesempio al Teorema **APT1**, risulta interessante

¹⁷Se $\omega = 1$ allora $\Delta S_1^1(\omega) \Delta S_1^1(1) = 1$, mentre $\Delta S_1^i(1) = 0$ per ogni altro valore di $i > 1$, da cui $X_1^\pi(1) = c_1$. Se $\omega = k \geq 2$, allora $\Delta S_k^1(\omega) = \Delta S_k^1(k) = 1$ e $\Delta S_{k-1}^1(\omega) = \Delta S_{k-1}^1(k) = -1$, mentre $\Delta S_1^i(\omega) = \Delta S_1^i(k) = 0$ per ogni altro valore di i , da cui $X_1^\pi(k) = c_k - c_{k-1}$.

osservare che X_n^π può essere visto come il guadagno associato a un giocatore d'azzardo che sta giocando contro un avversario di pari livello (da qui la simmetria), che l'esito del gioco è descritto dalle variabili aleatorie ξ_k (egli vince se $\xi_k = 1$ e perde se $\xi_k = -1$) e infine che la strategia del giocatore consiste nel raddoppiare la puntata dopo una perdita e smettere di giocare dopo la prima vincita.

Chiaramente se $\xi_1 = \dots = \xi_k = -1$ il giocatore è in netta perdita e il guadagno in questo caso assume il valore

$$X_k^\pi = - \sum_{i=1}^k 2^{i-1} = -(2^k - 1),$$

tuttavia se all'istante successivo $k + 1$ si ha una vincita, cioè se $\xi_{k+1} = 1$, il guadagno diventa

$$X_{k+1}^\pi = X_k^\pi + 2^k = -(2^k - 1) + 2^k = 1;$$

quindi la strategia scelta ammette un tempo di arresto (aleatorio) τ , cui è associato un guadagno positivo.

Si può definire τ come

$$\tau = \inf\{k : X_k^\pi = 1\}$$

e poiché $\mathbb{P}(\tau = k) = (\frac{1}{2})^k$, risulta $\mathbb{P}(\tau < \infty) = 1$, e quindi essendo $\mathbb{P}(X_\tau^\pi = 1) = 1$ si ha

$$X_N^\pi = X_\infty^\pi = \sum_{k \geq 1} \gamma_k \xi_k = \sum_{1 \leq k \leq \tau} \gamma_k \xi_k = X_\tau^\pi = 1$$

(e quindi anche $\mathbb{E}X_\tau^\pi = 1$) sebbene il capitale iniziale X_0^π sia nullo.

Allora nel mercato (B, S) considerato esiste un'opportunità di arbitraggio: esiste un portfolio π tale che $X_0^\pi = 0$ e $\mathbb{E}X_\tau^\pi = 1 > 0$ per un qualche istante τ .

N.B. Ipotizzare una strategia che raddoppi la posta dopo ogni perdita significa considerare, implicitamente, che egli possa prendere dei prestiti senza alcun limite (oppure che il giocatore sia immensamente ricco); la possibilità di prendere in prestito una cifra di qualunque entità (così come l'eventualità che il giocatore sia immensamente ricco) risulta altamente improbabile, nel mondo reale. Per questo motivo si capisce che tra le considerazioni da fare, in relazione a un mercato, vi è anche quella di considerare, fra le strategie ammissibili, solo quelle economicamente ragionevoli.

Tornando al caso generale si denoti con $\mathcal{P}(\mathbb{P})$ l'insieme di tutte le misure martingala $\tilde{\mathbb{P}}$ equivalenti¹⁸ a \mathbb{P}

$$\mathcal{P}(\mathbb{P}) = \{\tilde{\mathbb{P}} \sim \mathbb{P} : \tilde{S} \text{ è una } (\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n) - \text{martingala}\},$$

¹⁸Una misura $\tilde{\mathbb{P}}$ è equivalente ad un'altra misura \mathbb{P} su (Ω, \mathcal{F}) se e solo se

$$\{A \in \mathcal{F} : \mathbb{P}(A) = 0\} = \{A \in \mathcal{F} : \tilde{\mathbb{P}}(A) = 0\}.$$

Trattandosi di misure di probabilità la precedente condizione equivale a

$$\{B \in \mathcal{F} : \mathbb{P}(B) = 1\} = \{B \in \mathcal{F} : \tilde{\mathbb{P}}(B) = 1\},$$

come si vede subito passando ai complementari.

ovvero la successione dei prezzi scontati $\tilde{S} = \left(\tilde{S}_n = \frac{S_n}{B_n} \right)_{n \geq 0}$ è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala, per ogni $\tilde{\mathbb{P}} \in \mathcal{P}(\mathbb{P})$.

Definito questo insieme si può introdurre il seguente risultato che per la sua importanza viene detto **Secondo teorema fondamentale dell'Asset Pricing** (o **Second Fundamental Asset Pricing Theorem**) e denotato in seguito con **APT2**.

Teorema 4.2 (APT2). *Un mercato finanziario (B, S) arbitrage-free con $N < \infty$ e $d < \infty$ definito su uno spazio di probabilità filtrato in cui $\mathcal{F}_0 = \{\emptyset, \Omega\}$ e $\mathcal{F}_N = \mathcal{F}$ è completo se e solo se l'insieme $\mathcal{P}(\mathbb{P})$ delle misure martingala equivalenti contiene un singolo elemento.*

Allora si può osservare che mentre l'assenza di opportunità di arbitraggio implica

$$\mathcal{P}(\mathbb{P}) \neq \emptyset$$

la completezza di un mercato arbitrage-free può essere scritta come

$$|\mathcal{P}(\mathbb{P})| = 1.$$

4.4.1 Sufficienza del Teorema APT1

L'esistenza di una misura di probabilità $\tilde{\mathbb{P}}$ equivalente a \mathbb{P} tale che il valore

$$\tilde{S} = \left(\tilde{S}_n = \frac{S_n}{B_n} \right)_{0 \leq n \leq N}$$

sia una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala implica l'assenza di opportunità di arbitraggio per il mercato (B, S) . Si ricorda che siamo nell'ipotesi $B_n > 0$ per $n \geq 0$ per cui si può assumere $B_n \equiv 1$ quindi usando la formula (4.18) relativa al mercato scontato si ha

$$X_n^\pi = X_0^\pi + G_n^\pi \quad e \quad G_n^\pi = \sum_{k=1}^n \gamma_k \Delta S_k \quad (4.22)$$

dove $S = (S_n)$ è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala.

Per provare quanto richiesto si deve mostrare che presa una qualunque strategia autofinanziante $\pi \in SF$ tale che $X_0^\pi = 0$ e $\mathbb{P}(X_N^\pi \geq 0) = 1$, cioè

$$X_N^\pi = G_N^\pi = \sum_{k=1}^N \gamma_k \Delta S_k \geq 0 \quad (4.23)$$

\mathbb{P} q.c. o, equivalentemente, $\tilde{\mathbb{P}}$ q.c., si ha $X_N^\pi = G_N^\pi = 0$ \mathbb{P} q.c. o, equivalentemente, $\tilde{\mathbb{P}}(X_N^\pi \geq 0)$ q.c.. Daremo qui la dimostrazione nel caso in cui $\mathcal{F}_N = \mathcal{F}$ sia una famiglia finita, ciò evita tutti i problemi di integrabilità, in quanto in uno spazio di probabilità con un numero finito di eventi, tutte le variabili aleatorie sono limitate e quindi integrabili (ovvero ammettono valore atteso finito).

Dimostrazione della sufficienza del teorema *APT1*.

Dall'espressione del guadagno $(G_n^\pi)_{n=0}^N$ risulta chiaro che questa successione è un integrale stocastico a tempo discreto¹⁹ e quindi (vedere l'Esempio 3.6) è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala, purché siano soddisfatte le condizioni di integrabilità²⁰. Inoltre, poiché si assume $G_0^\pi = 0$ e $\mathbb{P}(G_N^\pi \geq 0) = 1$, ricordando che dalla condizione di martingala discende che la successione considerata ha media costante, si ottiene la seguente serie di implicazioni

$$X_0^\pi = 0 \implies \tilde{\mathbb{E}}[X_0^\pi] = 0 \implies \tilde{\mathbb{E}}[X_N^\pi] = 0$$

ed avendo assunto per ipotesi $\mathbb{P}(X_N^\pi \geq 0) = 1$ ovvero $\tilde{\mathbb{P}}(X_N^\pi \geq 0) = 1$ si deve avere $G_N^\pi = 0 = X_N^\pi$ $\tilde{\mathbb{P}}$ q.c. e quindi anche \mathbb{P} q.c., ovvero la tesi.

Nel seguito viene accennato a come si può ottenere la dimostrazione anche nel caso generale, ovvero senza l'ipotesi che \mathcal{F} sia una famiglia finita.

Per poter arrivare a dimostrare che, sotto le ipotesi fatte, $G_N^\pi = 0$, occorre introdurre delle definizioni e dei teoremi su nuovi elementi probabilistici: le martingale locali.

Definizione 4.14. Una successione stocastica $X = (X_n)$ è una $(\mathbb{P}, \mathcal{F}_n)$ -martingala locale se esiste una successione di tempi di Markov $(\tau_k)_{k \geq 1}$ (cioè, di variabili aleatorie che soddisfano la condizione $\{\omega : \tau_k \leq n\} \in \mathcal{F}_n$, $n \geq 1$) tali che $\tau_k \leq \tau_{k+1}$ (\mathbb{P} q.c.), $\tau_k \uparrow \infty$ (\mathbb{P} q.c.) per $k \rightarrow \infty$ e per ogni k il processo arrestato al tempo τ_k

$$X^{\tau_k} = (X_{\tau_k \wedge n})_{n \geq 0}$$

è una $(\mathbb{P}, \mathcal{F}_n)$ -martingala.

Teorema 4.3. Sia il processo $(M_n)_{n \geq 0}$ una $(\mathbb{P}, \mathcal{F}_n)$ -martingala e Y_n un processo predicibile, allora la trasformazione di martingala $X = Y \cdot M$, cioè la successione stocastica definita come integrale stocastico a tempo discreto

$$X_n = Y_0 M_0 + \sum_{k=1}^n Y_k (M_k - M_{k-1}) \tag{4.24}$$

è una martingala locale.

N.B. Per approfondimenti del concetto di integrale stocastico e dei legami tra questo e le martingale si rimanda alla lettura del Baldi [1].

Lemma 4.4. 1) Se il processo $(X_n)_{n \geq 0}$ è una $(\mathbb{P}, \mathcal{F}_n)$ -martingala locale tale che $\mathbb{E}X_0 < \infty$ e risulta verificata una fra le due condizioni seguenti

$$\mathbb{E}X_n^- < \infty, \quad n \geq 0$$

$$\mathbb{E}X_n^+ < \infty, \quad n \geq 0$$

¹⁹In alcuni testi viene denotato come una trasformazione di martingala rispetto a $\tilde{\mathbb{P}}$

²⁰Come si è già chiarito si sono fatte le ipotesi che garantiscano l'integrabilità di qualsiasi variabile aleatoria

allora $X = (X_n)_{n \geq 0}$ è una $(\mathbb{P}, \mathcal{F}_n)$ -martingala.

2) Sia $X = (X_n)_{0 \leq n \leq N}$ una $(\mathbb{P}, \mathcal{F}_n)$ -martingala locale e si assuma che $N < \infty$, $\mathbb{E}X_0 < \infty$ e sia $\mathbb{E}X_N^- < \infty$ oppure $\mathbb{E}X_N^+ < \infty$. Allora le ipotesi del punto 1) sono verificate per ogni $n \leq N$ e $X = (X_n)_{0 \leq n \leq N}$ è una $(\mathbb{P}, \mathcal{F}_n)$ -martingala.

Introdotte queste nozioni si può procedere nella dimostrazione della sufficienza del teorema APT1.

Dall'espressione del guadagno $(G_n^\pi)_{n=0}^N$ risulta chiaro che questa successione è una trasformazione di martingala rispetto a \mathbb{P} e quindi per Teorema 4.3 è una martingala locale. Inoltre, poiché si assume $G_0^\pi = 0$ e $\mathbb{P}(G_N^\pi \geq 0) = 1$, risultano verificate le ipotesi di integrabilità della parte 2) del Lemma 4.4 da cui (G_n^π) è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala. Infine ricordando che dalla condizione di martingala discende che la successione considerata ha media costante si ottiene la seguente serie di implicazioni

$$G_0^\pi = 0 \implies \tilde{\mathbb{E}}G_0^\pi = 0 \implies \tilde{\mathbb{E}}G_N^\pi = 0$$

ed avendo assunto per ipotesi $\mathbb{P}(G_N^\pi \geq 0) = 1$ si deve avere $G_N^\pi = 0 = X_N^\pi$ (\mathbb{P} q.c. e $\tilde{\mathbb{P}}$ q.c.) ovvero quanto desiderato.

Osservazione 4.5. *Come illustrato, la sufficienza del teorema APT1 risulta banalmente dimostrata se G_n^π è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala. Tale proprietà è strettamente connessa all'integrabilità della successione $(\gamma_n S_n)$; infatti, dall'ipotesi che (S_n) è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala e data la \mathcal{F}_{n-1} -misurabilità delle (γ_n) , si ottiene la condizione di martingala (si veda il punto 3 della Definizione ??) per il guadagno, risulta cioè:*

$$\tilde{\mathbb{E}}(G_n^\pi - G_{n-1}^\pi | \mathcal{F}_{n-1}) = \tilde{\mathbb{E}}(\gamma_n(S_n - S_{n-1}) | \mathcal{F}_{n-1}) = \gamma_n \tilde{\mathbb{E}}(S_n - S_{n-1} | \mathcal{F}_{n-1}) = 0.$$

Quindi per avere verificate tutte le condizioni di martingala serve l'integrabilità della successione $(\gamma_n S_n)$ rispetto a $\tilde{\mathbb{P}}$, questo è, ad esempio, il caso in cui le (γ_n) sono uniformemente limitate. Assumere la successione $(\gamma_n S_n)$ integrabile, pur semplificando notevolmente la dimostrazione del teorema, lederebbe la sua generalità, è per tale motivo che si preferisce ricorrere al concetto di martingala locale che permette di apprezzare l'efficacia dell'APT1.

4.4.2 Necessità del Teorema APT1: trasformazione condizionale di Esscher

Si deve dimostrare che l'assenza di opportunità di arbitraggio significa l'esistenza di una misura di probabilità $\tilde{\mathbb{P}} \sim \mathbb{P}$ in (Ω, \mathcal{F}) tale che la successione scontata $S = (S_n)_{0 \leq n \leq N}$ è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala.

Esistono diverse dimostrazioni rigorose di questo risultato le quali sfruttano, in un modo o in un altro, dei risultati relativi all'analisi funzionale. Nessuna di queste suggerisce, però, la costruzione esplicita delle misure martingala equivalenti: non compare mai l'esplicita descrizione di tutte le misure martingala $\tilde{\mathbb{P}}$ equivalenti all'originale misura \mathbb{P} .

Per questo motivo si è cercata una dimostrazione alternativa che potesse portare a una costruzione della misura martingala equivalente: l'idea da utilizzare, come ha illustrato per primo L.C.G. Rogers nel 1994 [5], è quella di sfruttare la *trasformazione condizionale di Esscher*, si veda il Lemma 4.6, tale trasformazione è una generalizzazione della (4.35).

Per spiegare l'idea base si considera inizialmente un modello a un singolo passo ($N = 1$) dove, per semplicità, si assume: $d = 1$, $B_0 = B_1 = 1$ e $\mathcal{F}_0 = \{\emptyset, \Omega\}$. Si ipotizza inoltre che $\mathbb{P}(S_1 \neq S_0) > 0$ altrimenti si avrebbe un mercato banale in cui si può prendere come misura martingala equivalente la misura originale \mathbb{P} .

Considerato che ogni portfolio π è una coppia di numeri (β, γ) , se $X_0^\pi = 0$ allora le sole coppie ammissibili sono quelle per cui si ha $\beta + \gamma S_0 = 0$.

Assumere che il mercato sia arbitrage-free significa dire che devono verificarsi (sotto l'ipotesi di mercato non banale) le condizioni :

$$\mathbb{P}(\Delta S_1 > 0) > 0 \quad e \quad \mathbb{P}(\Delta S_1 < 0) > 0. \quad (4.25)$$

Si vuole dedurre dalla (4.25) che esiste una misura $\tilde{\mathbb{P}} \sim \mathbb{P}$ tale che

- 1) $\tilde{\mathbb{E}}|\Delta S_1| < \infty$;
- 2) $\tilde{\mathbb{E}}\Delta S_1 = 0$;

per poter giungere a questa conclusione si applicano i risultati ottenuti dal seguente lemma.

Lemma 4.5. *Sia X una variabile aleatoria reale con distribuzione di probabilità su $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ tale che*

$$\mathbb{P}(X > 0) > 0 \quad e \quad \mathbb{P}(X < 0) > 0. \quad (4.26)$$

Allora esiste una misura $\tilde{\mathbb{P}} \sim \mathbb{P}$ tale che

$$\tilde{\mathbb{E}}e^{aX} < \infty \quad (4.27)$$

per ogni $a \in \mathbb{R}$; in particolare,

$$\tilde{\mathbb{E}}|X| < \infty. \quad (4.28)$$

Inoltre, $\tilde{\mathbb{P}}$ ha la seguente proprietà:

$$\tilde{\mathbb{E}}X = 0. \quad (4.29)$$

Dimostrazione. Data la misura \mathbb{P} , si costruisce a partire da questa la misura di probabilità equivalente

$$\mathbb{Q}(dx) = ce^{-x^2}\mathbb{P}(dx), \quad x \in \mathbb{R},$$

dove c è la costante di normalizzazione, cioè

$$c^{-1} = \mathbb{E}e^{-X^2}.$$

Considerando la funzione

$$\varphi(a) = \mathbb{E}_{\mathbb{Q}}e^{aX} = \frac{\mathbb{E}(e^{aX}e^{-X^2})}{\mathbb{E}(e^{-X^2})}, \quad a \in \mathbb{R}, \quad (4.30)$$

dalla costruzione di \mathbb{Q} segue che $0 < \varphi(a) < \infty$ per ogni $a \in \mathbb{R}$ (si verificherà ciò nelle Osservazione 4.6); quindi ponendo

$$Z_a(x) = \frac{e^{ax}}{\varphi(a)}, \quad (4.31)$$

si ha $Z_a(x) > 0$ e $\mathbb{E}_{\mathbb{Q}} Z_a(X) = 1$. Risulta possibile, dunque, definire per ogni $a \in \mathbb{R}$ la misura di probabilità

$$\tilde{\mathbb{P}}_a(dx) = Z_a(x)\mathbb{Q}(dx) \quad (4.32)$$

tale che $\tilde{\mathbb{P}}_a \sim \mathbb{Q} \sim \mathbb{P}$.

Dalla definizione di $\tilde{\mathbb{P}}_a$ segue che, per ogni scelta di a , assumendo $\tilde{\mathbb{P}} = \tilde{\mathbb{P}}_a$ vale la (4.27), infatti

$$\mathbb{E}_{\tilde{\mathbb{P}}_a} e^{aX} = \mathbb{E}_{\mathbb{Q}} \left(\frac{e^{2aX}}{\varphi(a)} \right) = \frac{\varphi(2a)}{\varphi(a)} < \infty. \quad (4.33)$$

Si può notare, inoltre, che la funzione $\varphi = \varphi(a)$ definita $\forall a \in \mathbb{R}$ è strettamente convessa poiché

$$\varphi''(a) = \frac{\mathbb{E}(X^2 e^{aX} e^{-X^2})}{\mathbb{E}(e^{-X^2})} > 0;$$

per cui se si pone

$$\varphi_* = \inf\{\varphi(a) : a \in \mathbb{R}\}$$

vi sono solo due casi possibili

- 1) esiste a_* tale che $\varphi(a_*) = \varphi_*$;
- 2) non esiste a_* tale che $\varphi(a_*) = \varphi_*$.

Nel primo caso risulta, come ovvio, $\varphi'(a_*) = 0$ da cui

$$\mathbb{E}_{\tilde{\mathbb{P}}_{a_*}} X = \mathbb{E}_{\mathbb{Q}} \left(\frac{X e^{a_* X}}{\varphi(a_*)} \right) = \frac{\varphi'(a_*)}{\varphi(a_*)} = 0; \quad (4.34)$$

allora in virtù della (4.33) e della (4.34) si ha che prendendo $\tilde{\mathbb{P}} = \tilde{\mathbb{P}}_{a_*}$ il lemma è dimostrato. Il secondo caso è irrealizzabile data l'ipotesi (4.26). Infatti, se un tale a_* non esiste, si può prendere una successione $\{a_n\}$ per cui valgono le relazioni

$$\varphi_* < \varphi(a_n) \quad \text{e} \quad \varphi(a_n) \searrow \varphi_*,$$

inoltre la successione $\{a_n\}$ deve tendere a $+\infty$ o a $-\infty$ poiché, altrimenti, si potrebbe scegliere una sottosuccessione convergente in modo tale che il valore di minimo venga assunto in un punto finito e ciò contraddice l'assunzione **2**).

Sia $u_n = \frac{a_n}{|a_n|}$ e sia $u = \lim u_n$, ne segue $u = \pm 1$. Allora considerando l'ipotesi (4.26) e l'equivalenza tra le misure \mathbb{P} e \mathbb{Q} si ha

$$\mathbb{Q}(uX > 0) > 0,$$

per cui esiste $\delta > 0$ tale che

$$\mathbb{Q}(uX > \delta) > 0;$$

definendo $\varepsilon := \mathbb{Q}(uX > \delta)$ e scegliendo δ in modo tale che risulti un punto di continuità per \mathbb{Q} , cioè

$$\mathbb{Q}(uX = \delta) = 0$$

si ottiene

$$\mathbb{Q}(a_n X > |a_n| \delta) = \mathbb{Q}(u_n X > \delta) \rightarrow \varepsilon \quad \text{per} \quad n \rightarrow \infty.$$

Quindi per n sufficientemente grande

$$\begin{aligned} \varphi(a_n) &= \mathbb{E}_{\mathbb{Q}}(e^{a_n X}) \geq \mathbb{E}_{\mathbb{Q}}(e^{a_n X} \mathbb{I}_{(a_n X > \delta | a_n|)}) \\ &\geq e^{\delta |a_n|} \mathbb{E}_{\mathbb{Q}}(\mathbb{I}_{(a_n X > \delta | a_n|)}) = e^{\delta |a_n|} \mathbb{Q}(u_n X > \delta) \end{aligned}$$

da cui definitivamente

$$\varphi(a_n) \geq \frac{1}{2} \varepsilon e^{\delta |a_n|} \longrightarrow \infty.$$

Si è giunti a un assurdo poichè, come visto, $\varphi(a_n) \searrow \varphi_*$ e $\varphi_* < \infty$. □

Si osservi che la dimostrazione di tale lemma porta a una costruzione della misura $\tilde{\mathbb{P}}_a$ basata sulla trasformazione

$$x \mapsto \frac{e^{ax}}{\varphi(a)} \tag{4.35}$$

detta *trasformazione di Esscher*.

Osservazione 4.6. Nella precedente dimostrazione si è tralasciato di verificare l'asserzione $0 < \varphi(a) < \infty$ per ogni $a \in \mathbb{R}$; la prima disuguaglianza è ovvia, la seconda è diretta conseguenza della semplice relazione algebrica:

$$e^{-x^2} e^{ax} = e^{-(x-\frac{a}{2})^2} e^{\frac{a^2}{4}},$$

infatti applicandola alla definizione di $\varphi(a)$ si ottiene

$$\varphi(a) = \frac{\mathbb{E}(e^{-X^2} e^{aX})}{\mathbb{E}(e^{-X^2})} = e^{\frac{a^2}{4}} \frac{\mathbb{E}e^{-(X-\frac{a}{2})^2}}{\mathbb{E}(e^{-X^2})} \leq \frac{e^{\frac{a^2}{4}}}{\mathbb{E}(e^{-X^2})} < +\infty.$$

Dalla limitatezza delle $\varphi(a) = \mathbb{E}_{\mathbb{Q}}(e^{aX})$ seguono alcune considerazioni che sono state adoperate nel corso della dimostrazione:

- $\varphi_* < \infty$ (φ_* è l'estremo inferiore di funzioni limitate)
- $\mathbb{E}_{\mathbb{Q}}(X e^{aX}) = \mathbb{E}_{\mathbb{Q}}\left(\frac{d}{da}(e^{aX})\right) = \frac{d}{da} \mathbb{E}_{\mathbb{Q}}(e^{aX}) = \frac{d}{da} \varphi(a)$.

Dimostrato il lemma è facile vederne la generalizzazione al caso vettoriale quando, cioè, si considera al posto di X una successione di variabili aleatorie (X_0, X_1, \dots, X_N) tali che X_n è \mathcal{F}_n -misurabile per $0 \leq n \leq N$ con $\mathcal{F}_0 = \{\emptyset, \Omega\}$ e $\mathcal{F}_N = \mathcal{F}$.

Per procedere nella trattazione del caso generale si deve tener presente il concetto di differenza di martingala.

Definizione 4.15. Un processo $X = (X_n)_{n \geq 1}$ con $\mathbb{E}|X_n| < \infty$ è una $(\mathbb{P}, \mathcal{F}_n)$ -differenza di martingala se

$$\mathbb{E}(X_n | \mathcal{F}_{n-1}) = 0 \quad (\mathbb{P} \text{ q.c.}), \quad n \geq 1.$$

Lemma 4.6. *Si ipotizzi che*

$$\mathbb{P}(X_n > 0 | \mathcal{F}_{n-1}) > 0 \quad e \quad \mathbb{P}(X_n < 0 | \mathcal{F}_{n-1}) > 0 \quad (4.36)$$

per $1 \leq n \leq N$. Allora esiste una misura di probabilità $\tilde{\mathbb{P}} \sim \mathbb{P}$ nello spazio (Ω, \mathcal{F}) tale che la successione (X_0, X_1, \dots, X_N) è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -differenza di martingala.

Dimostrazione. La dimostrazione di questo lemma ripercorre pari passo quella del precedente. Data \mathbb{P} si considera la misura di probabilità \mathbb{Q} tale che

$$\mathbb{Q}(d\omega) = c \exp \left\{ - \sum_{i=0}^N X_i^2(\omega) \right\} \mathbb{P}(d\omega) \quad (4.37)$$

e $\mathbb{E}_{\mathbb{Q}} \exp \left\{ - \sum_{i=0}^N a_i X_i \right\}$ è finito. Per costruire la misura $\tilde{\mathbb{P}}$ richiesta si considerano le funzioni

$$\varphi_n(a; \omega) = \mathbb{E}_{\mathbb{Q}}(e^{aX_n} | \mathcal{F}_{n-1})(\omega)$$

che fissato ω risultano strettamente convesse in a . Si può mostrare procedendo come fatto per il Lemma 4.5 che esiste un unico punto (finito) $a_n^*(\omega)$ tale che il più piccolo valore $\inf_a \varphi_n(a; \omega)$ viene assunto in questo punto, ovvero:

$$\inf_a \varphi_n(a; \omega) = \varphi_n(a_n^*(\omega); \omega).$$

La funzione $\inf_a \varphi_n(a; \omega)$ è \mathcal{F}_{n-1} -misurabile da ciò segue che anche $a_n^*(\omega)$ è \mathcal{F}_{n-1} -misurabile. Ora si definisce ricorsivamente una successione $Z_0, Z_1(\omega), \dots, Z_N(\omega)$ ponendo

$$Z_0 = 1 \quad e \quad Z_n(\omega) = Z_{n-1}(\omega) \frac{\exp\{a_n^*(\omega)X_n(\omega)\}}{\mathbb{E}_{\mathbb{Q}}(\exp\{a_n^* X_n\} | \mathcal{F}_{n-1})(\omega)}$$

per $n \geq 1$. Chiaramente, le variabili $Z_n(\omega)$ sono \mathcal{F}_n -misurabili e formano una $(\mathbb{Q}, \mathcal{F}_n)$ -martingala

$$\mathbb{E}_{\mathbb{Q}}(Z_n | \mathcal{F}_{n-1}) = Z_{n-1} \quad (\mathbb{Q} \text{ q.c. e } \mathbb{P} \text{ q.c.}).$$

Quanto mostrato permette di definire la $\tilde{\mathbb{P}}$ richiesta come:

$$\tilde{\mathbb{P}}(d\omega) = Z_N(\omega) \mathbb{P}(d\omega),$$

ricordando la dimostrazione del Lemma 4.5 si vede che $\tilde{\mathbb{E}}|X_n| < \infty$, $0 \leq n \leq N$,

$$\tilde{\mathbb{E}}(X_n | \mathcal{F}_{n-1}) = 0 \quad 1 \leq n \leq N$$

e inoltre $\tilde{\mathbb{E}}X_0 = 0$. Quindi la successione (X_0, X_1, \dots, X_N) è una differenza di martingala rispetto la $\tilde{\mathbb{P}}$ ciò prova il lemma. \square

Si evince immediatamente che nel caso $d = 1$, la *necessità* dell'esistenza di una misura martingala $\tilde{\mathbb{P}} \sim \mathbb{P}$ (in un mercato arbitrage-free) è conseguenza del Lemma 4.6: basta prendere come successione di variabili aleatorie $X_0 = S_0, X_1 = \Delta S_1, \dots, X_N = \Delta S_N$.

Considerando un mercato privo di opportunità di arbitraggio si può assumere senza ledere la generalità che

$$\mathbb{P}(\Delta S_n > 0 | \mathcal{F}_{n-1}) > 0 \quad \text{e} \quad \mathbb{P}(\Delta S_n < 0 | \mathcal{F}_{n-1}) > 0 \quad (4.38)$$

per ogni $n = 1, \dots, N$; infatti se esiste un istante n per cui $\mathbb{P}(\Delta S_n = 0) = 1$ questo può essere trascurato in quanto, preso un generico portfolio π autofinanziante, l'istante n non apporta contributi al valore X_N^π . Allora la (4.38) risulta vera per tutti gli $n \leq N$ da cui si conclude, come annunciato, che applicando il Lemma 4.6 a $X_0 = S_0$ e $X_n = \Delta S_n$ per $1 \leq n \leq N$ esiste una misura martingala equivalente (si veda la Definizione 4.13).

Per il caso generale, $d \geq 1$, la dimostrazione della necessità è concettualmente la stessa del caso $d = 1$, si deve però tener conto della generalizzazione del Lemma 4.6 al caso di valori vettoriali.

Lemma 4.7. *Sia (X_0, X_1, \dots, X_N) una successione di d -vettori \mathcal{F}_n -misurabili*

$$X_n = \begin{pmatrix} X_n^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n^d \end{pmatrix}, \quad 0 \leq n \leq N$$

definita su uno spazio di probabilità filtrato $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_n)_{0 \leq n \leq N}, \mathbb{P})$ con $\mathcal{F}_0 = \{\emptyset, \Omega\}$ e $\mathcal{F}_N = \mathcal{F}$. Si assuma inoltre che

$$\gamma_n = \begin{pmatrix} \gamma_n^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma_n^d \end{pmatrix}$$

è un vettore di variabili vettoriali, diverse da zero, \mathcal{F}_{n-1} -misurabili avente componenti limitate ($|\gamma_n^i(\omega)| \leq c < \infty$, $\omega \in \Omega$) tale che

$$\mathbb{P}((\gamma_n, X_n) > 0 | \mathcal{F}_{n-1}) > 0 \quad \text{e} \quad \mathbb{P}((\gamma_n, X_n) < 0 | \mathcal{F}_{n-1}) > 0 \quad (\mathbb{P} \text{ q.c.})$$

dove (γ_n, X_n) è il prodotto scalare.

Allora esiste una misura di probabilità $\tilde{\mathbb{P}}$ equivalente a \mathbb{P} su (Ω, \mathcal{F}) tale che la successione (X_0, X_1, \dots, X_N) è una differenza di martingala d -dimensionale rispetto a $\tilde{\mathbb{P}}$, cioè: $\tilde{\mathbb{E}}|X_n| < \infty$, $\tilde{\mathbb{E}}X_0 = 0$ e $\tilde{\mathbb{E}}(X_n | \mathcal{F}_{n-1}) = 0$ $1 \leq n \leq N$.

Risulta interessante notare che la costruzione della misura martingala basata sulla trasformazione condizionale di Esscher dà solo *una* misura particolare, sebbene la classe di misure martingala equivalente all'originale possa contenerne altre. A titolo informativo si osservi che esiste un procedimento rigoroso basato sulle *trasformazioni di Girsanov* che può essere usato nella costruzione di una famiglia di misure $\tilde{\mathbb{P}}$ (per un maggior approfondimento di questo argomento si veda il capitolo V dello Shiryaev [8]).

4.5 Completezza e S -rappresentabilità

In questo paragrafo si vuole illustrare l'equivalenza tra la completezza e la proprietà di S -rappresentabilità di martingale locali.

Definizione 4.16. *Sia $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_n), \mathbb{Q})$ uno spazio di probabilità filtrato con*

$$\text{una } (\mathbb{Q}, \mathcal{F}_n)\text{-martingala } d \text{ dimensionale } S = (S_n)$$

e

$$\text{una } (\mathbb{Q}, \mathcal{F}_n)\text{-martingala locale unidimensionale } X = (X_n).$$

Allora diciamo che la $(\mathbb{Q}, \mathcal{F}_n)$ -martingala locale X ammette una **S -rappresentazione** rispetto a \mathbb{Q} , o una **rappresentazione in termini della $(\mathbb{Q}, \mathcal{F}_n)$ -martingala S** , se esiste una successione predicibile $\gamma = (\gamma_n)$, dove $\gamma_n = (\gamma_n^1, \dots, \gamma_n^d)$, tale che

$$X_n = X_0 + \sum_{k=1}^n \gamma_k \Delta S_k = X_0 + \sum_{k=1}^n \left(\sum_{j=1}^d \gamma_k^j \Delta S_k^j \right) \quad (\mathbb{Q} \text{ q.c.}) \quad (4.39)$$

per ogni $n \geq 1$, cioè X è l'integrale stocastico di una successione predicibile γ_n , ovvero X è una trasformazione di martingala ottenuta dalla $(\mathbb{Q}, \mathcal{F}_n)$ -martingala S attraverso l'integrazione di una successione predicibile γ_n .

Lemma 4.8. *Sia (B, S) un mercato arbitrage-free con orizzonte finito N e $B_n \equiv 1$ per $n \leq N$. Allora questo mercato è completo se e solo se esiste una misura $\tilde{\mathbb{P}} \in \mathcal{P}(\mathbb{P})$ tale che ogni $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala limitata $X = (X_n)$ (con $|X_n(\omega)| \leq C$ $n \leq N$ $\omega \in \Omega$) ammette una S -rappresentazione rispetto a $\tilde{\mathbb{P}}$.*

Dimostrazione. (\implies) Si assuma che il mercato (arbitrage-free) sia completo. Presa una misura arbitraria $\tilde{\mathbb{P}}$ appartenente a $\mathcal{P}(\mathbb{P})$ si consideri una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala $M = (M_n)$ con $|M_n(\omega)| \leq C$ per $n \leq N$ e $\omega \in \Omega$. Si può scegliere come funzione di pay-off $f_N = M_N$, dall'ipotesi di completezza segue l'esistenza di un portfolio π autofinanziante e di un capitale iniziale x tale che

$$X_n^\pi = x + \sum_{k=1}^n \gamma_k \Delta S_k$$

e $X_N^\pi = f_N = M_N$ (\mathbb{P} q.c. e $\tilde{\mathbb{P}}$ q.c.). Dalla limitatezza dell'obbligazione $|f_N| \leq C$ segue che $\mathbb{E}X_N^\pi < \infty$ ed essendo $X_0^\pi = x$ risultano verificate le ipotesi del Lemma 4.4²¹, quindi si ottiene che $X^\pi = (X_n^\pi)_{n \leq N}$ è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala. Le martingale X^π ed M presentano la stessa funzione terminale, il pay-off f_N , e quindi la condizione di martingala porta alle seguenti uguaglianze

$$X_n^\pi = \tilde{\mathbb{E}}(X_N^\pi | \mathcal{F}_n) = \tilde{\mathbb{E}}(M_N | \mathcal{F}_n) = M_n \quad \tilde{\mathbb{P}} \text{ q.c.}$$

e da ciò si può concludere che $X_n^\pi = M_n$ per ogni $0 \leq n \leq N$ (le martingale coincidono in ogni istante $\tilde{\mathbb{P}}$ q.c. e quindi anche \mathbb{P} q.c.) la martingala M ammette, quindi, una S -rappresentazione. (\impliedby) Si ipotizzi che esista una misura $\tilde{\mathbb{P}} \in \mathcal{P}(\mathbb{P})$, tale che ogni $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala limitata ammette un S -rappresentazione e sia $f_N = f_N(\omega)$ una funzione limitata \mathcal{F}_N -misurabile

²¹Nel caso in cui \mathcal{F} sia una famiglia finita, non ci sono problemi di integrabilità.

($|f_N| \leq C < \infty$ \mathbb{P} q.c.) si vuole ottenere che esiste una strategia π autofinanziante e un capitale iniziale x tale che $X_N^\pi = f_N$ (\mathbb{P} q.c.).

Si consideri la $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala

$$M = (M_n)_{n \leq N}, \quad \text{dove} \quad M_n = \tilde{\mathbb{E}}(f_N | \mathcal{F}_n),$$

essendo $|f_N| \leq C$ si ha che M è una martingala limitata e per ipotesi ammette una S -rappresentazione (4.39). Esiste dunque una successione di variabili aleatorie predicibili γ_k^j , $j = 1, \dots, d$, $k \leq N$ tale che $M_n = M_0 + \sum_{k=1}^n \gamma_k \Delta S_k$, attraverso queste variabili si costruisce un portfolio $\pi^* = (\beta^*, \gamma^*)$ dove

$$\gamma_n^* = \gamma_n$$

e

$$\beta_0^* = M_0 - \sum_{j=1}^d \gamma_0^j S_0^j, \quad \beta_n^* = \beta_{n-1}^* - (\gamma_n - \gamma_{n-1}) S_{n-1},$$

in quanto si cerca una strategia autofinanziante, e basta allora ricordare la condizione (4.8).

Si osserva che le β_n^* risultano predicibili data la \mathcal{F}_{n-1} -misurabilità delle γ_n . Inoltre π^* è un portfolio autofinanziante di valore ²²

$$X_n^{\pi^*} = \beta_n^* + \sum_{j=1}^d \gamma_n^j S_n^j = M_n.$$

In particolare si vede che per l'istante terminale N si ha $X_N^{\pi^*} = M_N = f_N$ ($\tilde{\mathbb{P}}$ e \mathbb{P} q.c.) da cui segue la completezza del mercato (B, S) . \square

N.B. Se non si assume che $B_n \equiv 1, n \leq N$, allora tutti i risultati ottenuti risultano, comunque, validi se si considera al posto della $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala $S = (S_n)_{n \leq N}$ la $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala $\tilde{S} = \left(\tilde{S}_n = \frac{S_n}{B_n} \right)_{n \leq N}$, e al posto di f_N si considera il valore attualizzato $\tilde{f}_N = \frac{f_N}{B_N}$.

In particolare si noti che allora serve la \tilde{S} -rappresentabilità, e che allora

$$M_0 = \tilde{\mathbb{E}}(\tilde{f}_N | \mathcal{F}_0) = \tilde{\mathbb{E}}\left(\frac{f_N}{B_N}\right),$$

essendo \mathcal{F}_0 la σ -algebra banale.

²²L'ultima uguaglianza si vede subito considerando che, per la definizione di β_n^* si ha

$$\begin{aligned} M_n - M_{n-1} &= \gamma_n(S_n - S_{n-1}) = \gamma_n S_n - \gamma_n S_{n-1} + \gamma_{n-1} S_{n-1} - \gamma_{n-1} S_{n-1} + (\beta_n^* - \beta_{n-1}^*) - (\beta_n^* - \beta_{n-1}^*) \\ &= \gamma_n S_n - \gamma_{n-1} S_{n-1} + (\beta_n^* - \beta_{n-1}^*), \end{aligned}$$

da cui

$$\begin{aligned} M_n - M_0 &= \gamma_n S_n - \gamma_0 S_0 + (\beta_n^* - \beta_0^*) \\ &= \gamma_n S_n + \beta_n^* - (\gamma_0 S_0 - \beta_0^*) = \gamma_n S_n + \beta_n^* - M_0. \end{aligned}$$

Allora $M_0 = \frac{x_0}{B_0}$, dove x_0 si può interpretare come il capitale iniziale che permette, attraverso la strategia π^* , descritta nella dimostrazione della parte sufficiente del lemma, di ottenere una copertura perfetta per f_N .

Per ottenere quindi il prezzo si può procedere nel seguente modo:

- 1** si mostra l'esistenza di una misura martingala equivalente $\tilde{\mathbb{P}}$; da cui per la necessità dell'APT1 si ottiene che non ci sono opportunità di arbitraggio e quindi si ha

$$C_* \leq C^*;$$

- 2** si mostra che vale la \tilde{S} -rappresentabilità, e quindi che il mercato $(\tilde{B}_n, \tilde{S}_n)$ è completo, da cui deve valere che, se x_0 è il capitale iniziale che permette una copertura perfetta per f_N , allora

$$C^* \leq x_0 \leq C_*;$$

- 3** dai punti precedenti si ottiene che allora l'unico prezzo che non permette arbitraggi è proprio x_0

- 4** dalla dimostrazione del lemma si ha inoltre che

$$x_0 = B_0 M_0 = B_0 \tilde{\mathbb{E}}\left[\frac{f_N}{B_N}\right]$$

e la strategia di copertura si ottiene prendendo

$$\gamma_k^* = \gamma_k$$

della rappresentazione della martingala $\tilde{\mathbb{E}}[f_N | \mathcal{F}_n]$ e che

$$\beta_0^* = M_0 - \gamma_0 S_0, \quad \beta_n^* = \beta_{n-1}^* - (\gamma_n - \gamma_{n-1}) S_{n-1},$$

Il precedente programma verrà realizzato nel seguente capitolo in cui si tratta il modello binomiale multiperiodale.

Si noti comunque che procedendo come nella dimostrazione del lemma (parte: la completezza implica la \tilde{S} -rappresentabilità) si può ottenere la dimostrazione che la completezza implica l'unicità della misura martingala equivalente, se si è in presenza di un mercato senza opportunità di arbitraggio. Dimostrazione della sufficienza dell'APT2: se il mercato è completo, allora, qualunque sia $A \in \mathcal{F}_N = \mathcal{F}$, per $f_N = \mathbb{I}_A$ si può trovare un capitale iniziale \tilde{x}_A e una strategia π_A^* , che permettono una copertura perfetta di f_N . Allora necessariamente deve essere

$$\tilde{x}_A = \tilde{\mathbb{E}}(\mathbb{I}_A) = \tilde{\mathbb{P}}(A).$$

Ragionando come nei punti **1**, **2** e **3**, si ottiene che $\tilde{x}_A = C_*(\mathbb{I}_A, \mathbb{P}) = C^*(\mathbb{I}_A, \mathbb{P})$, da cui l'unicità della misura martingala equivalente²³

²³Se esistesse una seconda misura martingala equivalente $\tilde{\mathbb{P}}'$ allora si avrebbe che

$$\tilde{x}'_A = \tilde{\mathbb{E}}'(\mathbb{I}_A) = \tilde{\mathbb{P}}'(A),$$

e contemporaneamente $\tilde{x}'_A = C_*(\mathbb{I}_A, \mathbb{P}) = C^*(\mathbb{I}_A, \mathbb{P}) = \tilde{x}_A$, da cui

$$\tilde{\mathbb{P}}'(A) = \tilde{\mathbb{P}}(A),$$

ovvero l'unicità.

Capitolo 5

Il modello di Cox Ross Rubinstein (*CRR-model*)

In questo capitolo si vuole illustrare l'applicazione di alcuni risultati teorici trattati, ovvero considerando un modello del quale si conoscono le caratteristiche peculiari si vogliono trarre delle conclusioni in merito al mercato su cui esso opera (arbitrage-free, completo, incompleto) e ai prezzi di copertura per opzioni Europee.

5.1 Caratteristiche del modello

Il modello che si andrà a considerare è il *Cox Ross Rubinstein* (*CRR-model*) detto anche *modello binomiale multiperiodale*: si prende un mercato (B,S) che risulta formato da due operazioni finanziarie:

1 un conto bancario $B = (B_n)$

2 un'azione $S = (S_n)$

per le quali si ha (ricordando le formule (4.1) e (4.2))

$$\Delta B_n = r_n B_{n-1};$$

$$\Delta S_n = \rho_n S_{n-1}.$$

Si ipotizza che il tasso di interesse¹ sia costante $r_n = r$ e che la successione di variabili aleatorie indipendenti $\rho = (\rho_n)$ possa prendere solo due valori² a e b tali che

$$-1 < a < r < b. \quad (5.1)$$

Inoltre si assume che la successione $\rho = (\rho_n)$ definita sullo spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}, \mathbb{P})$ sia \mathcal{F}_n -misurabile per ogni n e abbia la proprietà:

$$\mathbb{P}(\rho_n = b) = p \quad \text{e} \quad \mathbb{P}(\rho_n = a) = q \quad (5.2)$$

¹Nei testi di S. Ross [6] e di T. Björk [3] si pone $R = 1 + r$, o equivalentemente si ha qui $r = R - 1$.

²Nei testi di S. Ross [6] e di T. Björk [6] si pone $u = 1 + b$ e $d = 1 + a$, o equivalentemente si ha qui $b = u - 1$ e $a = d - 1$.

con $p + q = 1$ e $0 < p < 1$.

Si può osservare che tutta l'aleatorietà del modello risulta data dalle variabili ρ_n , quindi si può assumere come spazio dei risultati elementari lo spazio $\Omega = \Omega_n = \{a, b\}^N$ di successioni finite $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ tali che $x_n = a$ o $x_n = b$ con $n \leq N$. Allora $\rho_n(x) = x_n$ e la misura di probabilità \mathbb{P}_N sui corrispondenti insiemi di Borel risulta completamente definita dalle distribuzioni finito dimensionali \mathbb{P}_n dove $n \leq N$: se $\nu_b(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \mathbb{I}_b(x_i)$ è il numero di componenti $x_i = b$ per $i \leq n$ allora

$$\mathbb{P}_n(x_1, \dots, x_n) = p^{\nu_b(x_1, \dots, x_n)} q^{n - \nu_b(x_1, \dots, x_n)}. \quad (5.3)$$

Da tale considerazione segue che \mathbb{P}_n è uguale³ a un prodotto diretto di n misure di tipo Q dove con Q si indica la misura caratterizzata da $Q(\{b\}) = p$ e $Q(\{a\}) = q$.

Nei prossimi paragrafi si mostrerà che il modello CRR è arbitrage-free e completo. Per i Teoremi *APT1* e *APT2* (si vedano i Teoremi 4.1 e 4.2) ciò significa, rispettivamente, che per ogni $n \geq 1$ esiste ed è unica la misura martingala $\tilde{\mathbb{P}}_n$ equivalente a \mathbb{P}_n , si otterrà che $\tilde{\mathbb{P}}_n$ presenta la seguente struttura:

$$\tilde{\mathbb{P}}_n(x_1, \dots, x_n) = \tilde{p}^{\nu_b(x_1, \dots, x_n)} \tilde{q}^{n - \nu_b(x_1, \dots, x_n)} \quad (5.4)$$

dove

$$\tilde{p} = \frac{r - a}{b - a} \quad \text{e} \quad \tilde{q} = \frac{b - r}{b - a}. \quad (5.5)$$

Si può osservare che dalla (5.4) segue che anche $\tilde{\mathbb{P}}_n$, così come \mathbb{P}_n , presenta la struttura di un prodotto diretto di misure \tilde{Q} dove $\tilde{Q}(\{b\}) = \tilde{p}$ e $\tilde{Q}(\{a\}) = \tilde{q}$.

5.1.1 CRR è arbitrage-free e completo

Definita la struttura del modello si vuole dimostrare che il mercato su cui opera è senza opportunità di arbitraggio. Per realizzare tale scopo, come ricordato sopra, basta dimostrare l'esistenza di una misura di probabilità equivalente alla misura di probabilità definita dalla (5.3) rispetto alla quale la successione $\tilde{S}_n = \frac{S_n}{B_n}$ è una martingala.

Si ricorda che \tilde{S}_n è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala se risulta integrabile e gode della proprietà $\tilde{\mathbb{E}}(\tilde{S}_n | \mathcal{F}_{n-1}) = \tilde{S}_{n-1}$.

L'integrabilità in questo caso non comporta alcun problema poiché $\tilde{S}_n = \frac{S_n}{B_n}$ assume un numero finito di valori e in particolare risulta uniformemente limitata⁴. Inoltre essendo in generale:

$$\frac{S_n}{B_n} = \frac{S_{n-1}}{B_{n-1}} \frac{1 + \rho_n}{1 + r_n} \quad (5.6)$$

³Il punto importante qui è che $\mathbb{P}_n(x_1, \dots, x_n) > 0$ per ogni (x_1, \dots, x_n)

⁴In questo caso possiamo anche trovare una maggiorazione superiore: infatti

$$\frac{S_n}{B_n} = \frac{S_0}{B_0} \prod_{k=1}^n \frac{1 + \rho_k}{1 + r_k} \leq \frac{S_0}{B_0} \left(\frac{1 + b}{1 + r} \right)^n.$$

e considerata la \mathcal{F}_{n-1} -misurabilità di \tilde{S}_{n-1} e di $1+r_n$ risulta chiaro⁵ che la proprietà di martingala diviene

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbb{E}}\left(\frac{S_n}{B_n}\middle|\mathcal{F}_{n-1}\right) = \frac{S_{n-1}}{B_{n-1}} &\Leftrightarrow \tilde{\mathbb{E}}\left(\frac{1+\rho_n}{1+r_n}\middle|\mathcal{F}_{n-1}\right) = 1 \\ &\Leftrightarrow \tilde{\mathbb{E}}(\rho_n|\mathcal{F}_{n-1}) = r_n \\ &\Rightarrow \tilde{\mathbb{E}}(\rho_n) = \tilde{\mathbb{E}}(r_n). \end{aligned}$$

Quindi nel caso considerato in cui r_n è costantemente uguale a r si ottengono le seguenti identità

$$\tilde{\mathbb{E}}(\rho_n|\mathcal{F}_{n-1}) = r \tag{5.7}$$

$$\tilde{\mathbb{E}}(\rho_n) = r, \tag{5.8}$$

ovvero, tenendo conto del fatto che ρ può assumere solo i due valori a e b

$$b\tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = b|\mathcal{F}_{n-1}) + a\tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = a|\mathcal{F}_{n-1}) = b\tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = b|\mathcal{F}_{n-1}) + a\left(1 - \tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = b|\mathcal{F}_{n-1})\right) = r \tag{5.9}$$

$$b\tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = b) + a\tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = a) = b\tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = b) + a\left(1 - \tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = b)\right) = r, \tag{5.10}$$

Si osservi che la (5.9) e la (5.10) implicano

$$\tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = b|\mathcal{F}_{n-1}) = \tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = b) = \tilde{p} = \frac{r-a}{b-a} \tag{5.11}$$

$$\tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = a|\mathcal{F}_{n-1}) = \tilde{\mathbb{P}}(\rho_n = a) = \tilde{q} = \frac{b-r}{b-a}. \tag{5.12}$$

Da questa osservazione, e dal fatto che $\mathcal{F}_{n-1} = \sigma\{\rho_1, \dots, \rho_{n-1}\}$ si ottiene facilmente che le variabili aleatorie ρ_1, \dots, ρ_N sono, rispetto a $\tilde{\mathbb{P}}$, indipendenti ed identicamente distribuite⁶.

⁵Si osservi che

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbb{E}}\left[\frac{S_n}{B_n} - \frac{S_{n-1}}{B_{n-1}}\middle|\mathcal{F}_{n-1}\right] &= \tilde{\mathbb{E}}\left[\frac{S_{n-1}}{B_{n-1}}\left(\frac{1+\rho_n}{1+r_n} - 1\right)\middle|\mathcal{F}_{n-1}\right] \\ &= \frac{S_{n-1}}{B_{n-1}}\tilde{\mathbb{E}}\left[\left(\frac{1+\rho_n - (1+r_n)}{1+r_n}\right)\middle|\mathcal{F}_{n-1}\right] \\ &= \frac{S_{n-1}}{B_{n-1}}\frac{1}{1+r_n}\tilde{\mathbb{E}}[\rho_n - r_n|\mathcal{F}_{n-1}] \end{aligned}$$

⁶Un modo più elegante per pervenire a questo stesso risultato e verificare l'indipendenza delle ρ_n si ottiene illustrando la costruzione di $\tilde{\mathbb{P}}$.

Dalle premesse fatte si evince che si può costruire la misura $\tilde{\mathbb{P}} \sim \mathbb{P}$ attraverso dei passi ben precisi: si prende $\mathbb{P}_n = \mathbb{P}_N|\mathcal{F}_n$, dove $\mathcal{F}_n = \sigma(\rho_1, \dots, \rho_n)$, si considera una $(\mathbb{P}, \mathcal{F}_n)$ -martingala Z_n di media 1 e si definiscono $\tilde{\mathbb{P}}_1, \tilde{\mathbb{P}}_2, \dots, \tilde{\mathbb{P}}_N$ tramite la formula

$$\tilde{\mathbb{P}}_n(x_1, \dots, x_n) = Z_n(x_1, \dots, x_n)\mathbb{P}_n(x_1, \dots, x_n),$$

quindi, dalla formula di Bayes segue che la condizione (5.7) può essere espressa come

$$\mathbb{E}_n\left(\rho_n \frac{Z_n}{Z_{n-1}}\middle|\mathcal{F}_{n-1}\right) = r. \tag{5.13}$$

Per $n = 1$, tenendo conto che $\mathcal{F}_0 = \{\emptyset, \Omega\}$, che $Z_0 = 1$ e considerando la relazione (5.13) risulta

$$pbZ_1(b) + qaZ_1(a) = r, \tag{5.14}$$

Segue che *il modello CRR è un mercato privo di opportunità di arbitraggio*; analizzando i passi che conducono alla costruzione di $\tilde{\mathbb{P}}$ si evince che quest'ultima è l'*unica* misura martingala equivalente da ciò discende la *completezza*.

tale equazione unita alla condizione di normalizzazione

$$pZ_1(b) + qZ_1(a) = 1, \quad (5.15)$$

permette di ottenere

$$Z_1(b) = \frac{r-a}{b-a} \frac{1}{p} \quad \text{e} \quad Z_1(a) = \frac{b-r}{b-a} \frac{1}{q}.$$

Ponendo

$$\tilde{p} = \frac{r-a}{b-a} \quad \text{e} \quad \tilde{q} = \frac{b-r}{b-a}$$

si arriva all'identità

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbb{P}}_1(b) &= Z_1(b)\mathbb{P}_1(b) = \tilde{p} \\ \tilde{\mathbb{P}}_1(a) &= Z_1(a)\mathbb{P}_1(a) = \tilde{q}. \end{aligned}$$

Si osservi che $\tilde{p} + \tilde{q} = 1$ e che, per la (5.1), $\tilde{p}, \tilde{q} > 0$ da cui segue $\tilde{\mathbb{P}}_1$ è una probabilità equivalente a \mathbb{P}_1 . Per determinare $\tilde{\mathbb{P}}_2$ si usa nuovamente la (5.13) e l'indipendenza tra ρ_1 e ρ_2 rispetto a \mathbb{P}_2 arrivando al seguente risultato

$$pb \frac{Z_2(b,b)}{Z_1(b)} + qa \frac{Z_2(b,a)}{Z_1(b)} = r, \quad (5.16)$$

una condizione ulteriore sui valori di $Z_2(b,b)$ e $Z_2(b,a)$ è dovuta alla proprietà di martingala di Z_n

$$\mathbb{E}_2(Z_2(\rho_1, \rho_2) | \rho_1 = b) = Z_1(b),$$

che conduce all'uguaglianza

$$b \frac{Z_2(b,b)}{Z_1(b)} + q \frac{Z_2(b,a)}{Z_1(b)} = 1, \quad (5.17)$$

confrontando la (5.16) e la (5.17) rispettivamente con la (5.14) e la (5.15) si vede che

$$\frac{Z_2(b,b)}{Z_1(b)} = \frac{r-a}{b-a} \frac{1}{p} = \frac{\tilde{p}}{p} \quad \text{e} \quad \frac{Z_2(b,a)}{Z_1(b)} = \frac{b-r}{b-a} \frac{1}{q} = \frac{\tilde{q}}{q}.$$

In modo del tutto simile si può ottenere

$$\frac{Z_2(a,b)}{Z_1(a)} = \frac{\tilde{p}}{p} \quad \text{e} \quad \frac{Z_2(a,a)}{Z_1(a)} = \frac{\tilde{q}}{q};$$

quindi

$$\tilde{\mathbb{P}}_2(a,a) = Z_2(a,a)q^2 = Z_1(a) \frac{\tilde{q}}{q} q^2 = \tilde{q}^2$$

e analogamente

$$\tilde{\mathbb{P}}_2(a,b) = \tilde{q}\tilde{p}, \quad \tilde{\mathbb{P}}_2(b,a) = \tilde{p}\tilde{q}, \quad \tilde{\mathbb{P}}_2(b,b) = \tilde{p}^2.$$

Le variabili aleatorie ρ_1, ρ_2 risultano, dunque, i.i.d. rispetto la misura $\tilde{\mathbb{P}}_2$; inoltre $\tilde{\mathbb{P}}_2(\rho_i = b) = \tilde{p}$ e $\tilde{\mathbb{P}}_2(\rho_i = a) = \tilde{q}$ per $i = 1, 2$.

L'ultimo passo per costruire una misura martingala $\tilde{\mathbb{P}} \sim \mathbb{P}$ consiste nell'iterare il procedimento descritto per le misure $\tilde{\mathbb{P}}_3, \dots, \tilde{\mathbb{P}}_N$ ottenendo così le $\tilde{\mathbb{P}}_n$ definite dalla formula (5.4) e infine ponendo $\tilde{\mathbb{P}} = \tilde{\mathbb{P}}_N$.

5.1.2 S -rappresentabilità

Nel Lemma 4.8 viene stabilita l'equivalenza tra la proprietà di completezza e la S -rappresentabilità, è interessante osservare che in questo caso è proprio l'unicità della misura martingala a permettere la S -rappresentazione delle martingale limitate e quindi la completezza. N.B. Si giunge così, per il modello in questione, a una dimostrazione diretta della necessità del teorema *APT2*.

Sia $X = (X_n)_{n \geq 0}$ una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala e siano le $g_n = g_n(x_1, \dots, x_n)$ funzioni tali che

$$X_n(\omega) = g_n(\rho_1(\omega), \dots, \rho_n(\omega)),$$

ovvero

$$\Delta X_n(\omega) = g_n(\rho_1(\omega), \dots, \rho_n(\omega)) - g_{n-1}(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega)).$$

Poichè $\tilde{\mathbb{E}}(\Delta X_n | \mathcal{F}_{n-1}) = 0$ e le ρ_n sono i.i.d. segue che

$$\begin{aligned} \tilde{p} g_n(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega), b) + \tilde{q} g_n(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega), a) \\ = g_{n-1}(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega)) \end{aligned}$$

o equivalentemente

$$\begin{aligned} \frac{g_n(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega), b) - g_{n-1}(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega))}{\tilde{q}} \\ = \frac{g_{n-1}(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega)) - g_n(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega), a)}{\tilde{p}}. \end{aligned}$$

In virtù della (5.5) si definisce

$$\begin{aligned} \gamma'_n(\omega) &:= \frac{g_n(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega), b) - g_{n-1}(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega))}{b - r} \\ &= \frac{g_{n-1}(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega)) - g_n(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega), a)}{r - a} \end{aligned}$$

da cui segue

$$\begin{aligned} \Delta X_n(\omega) &= \mathbb{I}_{\rho_n(\omega)=b} [g_n(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega), b) - g_{n-1}(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega))] + \\ &+ \mathbb{I}_{\rho_n(\omega)=a} [g_n(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega), a) - g_{n-1}(\rho_1(\omega), \dots, \rho_{n-1}(\omega))] \\ &= \mathbb{I}_{\rho_n(\omega)=b} (b - r) \gamma'_n(\omega) + \mathbb{I}_{\rho_n(\omega)=a} (a - r) \gamma'_n(\omega) \\ &= \sum_{x=\{a,b\}} \mathbb{I}_{\rho_n(\omega)=x} (x - r) \gamma'_n(\omega) \\ &= (\rho_n(\omega) - r) \gamma'_n(\omega). \end{aligned}$$

La $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala $X = (X_n)_{n \geq 0}$ ammette, dunque, la rappresentazione

$$X_n(\omega) = X_0(\omega) + \sum_{k=1}^n (\rho_k(\omega) - r) \gamma'_k(\omega);$$

infine considerando la (5.6) si ha l'uguaglianza

$$\rho_n(\omega) - r = (1 + r) \frac{B_{n-1}}{S_{n-1}} \Delta \left(\frac{S_n}{B_n} \right)$$

da cui deriva la $\frac{S}{B}$ -rappresentabilità della martingala considerata, cioè

$$X_n(\omega) = X_0(\omega) + \sum_{k=1}^n \tilde{\gamma}_k(\omega) \Delta \left(\frac{S_n}{B_n} \right),$$

dove si è assunto

$$\tilde{\gamma}_n(\omega) = \gamma'_n(\omega)(1 + r) \frac{B_{n-1}}{S_{n-1}}. \quad (5.18)$$

Si osservi che poiché le $\gamma'_n(\omega)$ risultano \mathcal{F}_{n-1} -misurabili (questa proprietà è diretta conseguenza della loro definizione) la successione $\tilde{\gamma}_n(\omega)$ è predicibile .

5.2 Prezzi di copertura per opzioni Europee

Si considerino le opzioni Europee di maturità $N < \infty$ con pay-off f_N dipendenti in generale da tutte le variabili S_0, S_1, \dots, S_N o equivalentemente da S_0 e ρ_1, \dots, ρ_N . Come visto nel capitolo II se il mercato considerato è senza opportunità di arbitraggio e completo (come risulta essere il mercato binomiale (B,S) del modello CRR) il *prezzo di copertura* (o premio) per l'acquisto dell'opzione, cioè

$$C(f_N, \mathbb{P}) = \inf \{x \geq 0 : \exists \pi \text{ t.c. } X_0^\pi = x \text{ e } X_N^\pi = f_N \text{ } \mathbb{P}q.c.\} \quad (5.19)$$

dove con $X^\pi = (X_n^\pi)_{0 \leq n \leq N}$ si indica il valore della strategia autofinanziante $\pi = (\beta, \gamma)$, può essere determinato dalla identità:

$$C(f_N, \mathbb{P}) = B_0 \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{f_N}{B_N} \right). \quad (5.20)$$

Per il modello in oggetto essendo $B_N = B_0(1 + r)^N$ si ottiene:

$$C(f_N, \mathbb{P}) = \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{f_N}{(1 + r)^N} \right), \quad (5.21)$$

tale risultato permette di rispondere completamente al problema di determinare un prezzo razionale per il contratto di un'opzione con pay-off f_N . Si ricorda che il venditore prendendo il premio $C(f_N, \mathbb{P})$ dal compratore può dotarsi di un portfolio $\tilde{\pi} = (\tilde{\beta}, \tilde{\gamma})$ che replica il pay-off f_N all'istante N , cioè

$$X_N^{\tilde{\pi}} = f_N.$$

Come menzionato nella dimostrazione del Lemma 4.8 il modo standard per determinare il portfolio $\tilde{\pi}$ consiste nel considerare, inizialmente, la $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala $M = (M_n)_{n \leq N}$ definita da

$$M_n = \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{f_N}{B_N} \middle| \mathcal{F}_n \right).$$

Essendo M $\frac{S}{B}$ -rappresentabile esiste una successione predicibile $\tilde{\gamma} = (\tilde{\gamma}_n)_{n \leq N}$, si veda la (5.18), tale che la martingala risulta data da:

$$M_n = M_0 + \sum_{k=1}^n \tilde{\gamma}_k \Delta \left(\frac{S_k}{B_k} \right) \quad n \leq N. \quad (5.22)$$

Prendendo

$$\tilde{\beta}_n = M_n - \tilde{\gamma}_n \frac{S_n}{B_n}$$

si ottiene una copertura autofinanziante $\tilde{\pi} = (\tilde{\beta}, \tilde{\gamma})$ di valore

$$X_n^{\tilde{\pi}} = \tilde{\beta}_n B_n + \tilde{\gamma}_n S_n = B_n \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{f_N}{B_N} \middle| \mathcal{F}_n \right)$$

tale che inizialmente

$$X_0^{\tilde{\pi}} = C(f_N, \mathbb{P})$$

e all'istante N goda della proprietà di copertura perfetta.

Considerando inoltre la relazione

$$\Delta \left(\frac{S_n}{B_n} \right) = \frac{S_{n-1}(\rho_n - r)}{B_n}$$

e sostituendo questo risultato nella (5.22) si ottiene:

$$M_n = M_0 + \sum_{k=1}^n \tilde{\gamma}_k \frac{S_{k-1}}{B_k} (\rho_k - r) = M_0 + \sum_{k=1}^n \tilde{\alpha}_k (\rho_k - r) \quad (5.23)$$

avendo assunto $\tilde{\gamma}_k = \tilde{\alpha}_k \frac{B_k}{S_{k-1}}$.

Prendendo, infine, la successione $\delta = (\delta_n)$ delle variabili

$$\delta_n = \frac{\rho_n - a}{b - a}$$

risulta immediato che

$$\rho_n = \begin{cases} b \\ a \end{cases} \quad \iff \quad \delta_n = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

per cui $\mathcal{F}_n = \sigma(\rho_1, \dots, \rho_n) = \sigma(\delta_1, \dots, \delta_n)$.

Dalla relazione:

$$\delta_n - \tilde{p} = \frac{\rho_n - r}{b - a}$$

appare evidente che oltre alla (5.22) e alla (5.23) si ha anche una rappresentazione di M in funzione di δ , ovvero:

$$M_n = M_0 + \sum_{k=1}^n \tilde{\alpha}_k^{(\delta)} m_k^{(\delta)} \quad (5.24)$$

dove la successione $m^{(\delta)} = \left(m_n^{(\delta)}\right)_{n \leq N}$ di variabili $m_n^{(\delta)} = \sum_{k=1}^n (\delta_k - \tilde{p})$ è una $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala e $\tilde{\alpha}_n^{(\delta)} = (b - a)\tilde{\alpha}_n$.

Si osservi che la scelta di esprimere M in termini di δ risulterà utile nel calcolo esplicito del valore del premio.

Si può riassumere quanto detto in questa sezione enunciando il seguente teorema:

Teorema 5.1. *Dato il modello CRR*

- 1 per ogni N e per ogni pay-off f_N \mathcal{F}_N -misurabile il prezzo di esercizio può essere descritto dalla formula

$$C(f_N, \mathbb{P}) = B_0 \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{f_N}{B_N} \right) = \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{f_N}{(1+r)^N} \right). \quad (5.25)$$

- 2 esiste una copertura perfetta e autofinanziante $\tilde{\pi} = (\tilde{\beta}, \tilde{\gamma})$ dal valore $X^{\tilde{\pi}} = (X_n^{\tilde{\pi}})_{n \leq N}$ tale che

$$\begin{aligned} X_0^{\tilde{\pi}} &= C(f_N; \mathbb{P}) & X_N^{\tilde{\pi}} &= f_N \\ e \quad X_n^{\tilde{\pi}} &= B_n \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{f_N}{B_0(1+r)^N} \middle| \mathcal{F}_n \right). \end{aligned}$$

- 3 le componenti $\tilde{\beta} = (\tilde{\beta}_n)_{n \leq N}$ e $\tilde{\gamma} = (\tilde{\gamma}_n)_{n \leq N}$ della copertura $\tilde{\pi}$ soddisfano la relazione

$$\tilde{\beta}_n = M_n - \tilde{\gamma}_n \frac{S_n}{B_n}$$

dove $\tilde{\gamma}_n$ con $n \leq N$ può essere determinata attraverso la $\frac{S}{B}$ -rappresentazione (5.22) della $(\tilde{\mathbb{P}}, \mathcal{F}_n)$ -martingala $M = (M_n)_{n \leq N}$ definita come

$$M_n = \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{f_N}{B_N} \middle| \mathcal{F}_n \right).$$

5.2.1 Calcolo del prezzo di copertura per l'opzione call

Per un'opzione call standard (si veda la premessa del capitolo II) la funzione di pay-off f_N risulta pari a:

$$f_N = (S_N - K)^+ \quad (5.26)$$

dove N indica il tempo di maturità e K il prezzo di esercizio. Applicando i risultati generali (descritti nel paragrafo precedente) al caso considerato si ha che la (5.21) diviene:

$$C(f_N, \mathbb{P}) = \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{(S_N - K)^+}{(1+r)^N} \right). \quad (5.27)$$

Per sottolineare la dipendenza del prezzo di copertura dell'opzione call dal prezzo di strike viene introdotta la notazione $C_{call}(K, \mathbb{P}) = C(f_N, \mathbb{P})$.

Prendendo H pari al numero di volte in cui l'azione è aumentata del fattore $(1 + b)$ nel periodo di tempo che va da 1 a N , cioè, richiamando le notazioni del precedente paragrafo, $H = \sum_{k=1}^N \delta_k$ segue che la sua distribuzione è una binomiale di parametri N e \tilde{p} , ovvero:

$$H \sim B(N, \tilde{p}) \quad \text{sotto } \tilde{\mathbb{P}}.$$

Si può assumere, dunque, che all'istante N l'azione presenti il seguente valore

$$S_N = S_0(1+a)^{N-H}(1+b)^H \quad (5.28)$$

andandolo a sostituire nella (5.27) e esplicitando il valore della media per la distribuzione in esame segue che il prezzo di acquisto risulta

$$C_{call}(K, \mathbb{P}) = \frac{1}{(1+r)^N} \sum_{h=0}^N \binom{N}{h} \tilde{p}^h (1-\tilde{p})^{N-h} \cdot (S_0(1+a)^{N-h}(1+b)^h - K)^+, \quad (5.29)$$

se si prende h_0 come il più piccolo intero per cui è soddisfatta la disuguaglianza $S_0(1+a)^{N-h}(1+b)^h > K$ si può riscrivere la (5.29) in funzione di questo

$$C_{call}(K, \mathbb{P}) = S_0 \sum_{h=h_0}^N \binom{N}{h} \tilde{p}^h (1-\tilde{p})^{N-h} \left(\frac{1+a}{1+r}\right)^{N-h} \left(\frac{1+b}{1+r}\right)^h - \frac{K}{(1+r)^N} \sum_{h=h_0}^N \binom{N}{h} \tilde{p}^h (1-\tilde{p})^{N-h}. \quad (5.30)$$

Si osserva che presa la funzione di sopravvivenza di una binomiale calcolata nel punto j ovvero

$$B(j, N, p) = \sum_{h=j}^N \binom{N}{h} p^h (1-p)^{N-h} \quad (5.31)$$

si ottiene

$$C_{call}(K, \mathbb{P}) = S_0 B(h_0, N, p^*) - \frac{K}{(1+r)^N} B(h_0, N, \tilde{p}) \quad (5.32)$$

dove si è posto

$$p^* = \frac{1+b}{1+r} \tilde{p}. \quad (5.33)$$

Osservazione 5.1. *L' h_0 cercato deve soddisfare la condizione*

$$h_0 = \min\{j \in \mathbb{N} : S_0(1+a)^{N-j}(1+b)^j - K > 0\}$$

per cui risolvendo si arriva a

$$h_0 = 1 + \left\lceil \frac{\ln\left(\frac{K}{S_0(1+a)^N}\right)}{\ln\left(\frac{1+b}{1+a}\right)} \right\rceil. \quad (5.34)$$

I risultati ottenuti portano all'enunciazione del seguente teorema.

Teorema 5.2. *Il prezzo razionale per l'opzione Europea standard di tipo call con pay-off $f_N = (S_N - K)^+$ è pari a*

$$C_{call}(K, \mathbb{P}) = S_0 B(h_0, N, p^*) - \frac{K}{(1+r)^N} B(h_0, N, \tilde{p})$$

dove $B(h_0, N, p)$ è definito tramite la (5.31), p^* attraverso la (5.33) e si è assunto h_0 come nella (5.34).

Osservazione 5.2. *Si osservi che i risultati ottenuti nel caso delle opzioni call sono facilmente estendibili a quelle put (dove $f_N = (K - S_N)^+$), infatti dall'identità*

$$(K - S_N)^+ = (S_N - K)^+ - S_N + K$$

segue che il prezzo razionale di un'opzione put può essere definito dalla formula

$$\begin{aligned} C_{put}(K, \mathbb{P}) &= \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{(K - S_N)^+}{(1+r)^N} \right) \\ &= C_{call}(K, \mathbb{P}) - \tilde{\mathbb{E}} \frac{S_N}{(1+r)^N} + \frac{K}{(1+r)^N} \end{aligned}$$

ed essendo $\tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{S_N}{(1+r)^N} \right) = S_0$ si ottiene la seguente relazione

$$C_{put}(K, \mathbb{P}) = C_{call}(K, \mathbb{P}) - S_0 + \frac{K}{(1+r)^N}.$$

che viene detta formula di parità per le opzioni call-put.

Osservazione 5.3. *Sia $f = f(x)$, con $x \geq 0$, una funzione non negativa, sia $f_N = f(S_N)$ il pay-off e sia, come al solito, $C(f_N, \mathbb{P}) = B_0 \tilde{\mathbb{E}} \frac{f(S_N)}{B_N}$ il prezzo razionale corrispondente. È possibile determinare il valore del prezzo di un'opzione generica di questo tipo usando il prezzo razionale di un'opzione call.*

Si assuma f derivabile con derivata $f'(x) = f'(0) + \int_{(0,x]} \mu(dy)$, dove $\mu = \mu(dy)$ è una misura finita, non necessariamente positiva, su $(\mathbb{R}_+, \mathcal{B}(\mathbb{R}_+))$. Si noti che se f è derivabile due volte si ha $\mu(dy) = f''(y)dy$.

Allora è chiaro che

$$f(x) = f(0) + xf'(0) + \int_{(0,x]} (x-y)^+ \mu(dy) = f(0) + xf'(0) + \int_{(0,\infty)} (x-y)^+ \mu(dy),$$

quindi ponendo $x = S_N$ e cambiando notazione nell'integrale

$$f_N = f(S_N) = f(0) + S_N f'(0) + \int_{(0,\infty)} (S_N - y)^+ \mu(dy) \quad (\mathbb{P} \text{ q.c.}).$$

Se ora si attualizzano i valori

$$\tilde{f}_N = \frac{f(S_N)}{B_N} = \frac{f(0)}{B_N} + \frac{S_N}{B_N} f'(0) + \int_{(0,\infty)} \frac{(S_N - y)^+}{B_N} \mu(dy) \quad (\mathbb{P} \text{ q.c.}).$$

e si considera la media rispetto alla misura $\tilde{\mathbb{P}}$, essendo $\tilde{\mathbb{E}} \frac{S_N}{B_N} = \tilde{\mathbb{E}} \frac{S_0}{B_0} = \frac{S_0}{B_0}$, e tenendo conto che $B_N = B_0(1+r)^N$ è deterministico, si ottiene

$$\tilde{\mathbb{E}} \frac{f_N}{B_N} = \frac{f(0)}{B_N} + \frac{S_0}{B_0} f'(0) + \int_{(0,\infty)} \tilde{\mathbb{E}} \left(\frac{(S_N - y)^+}{B_N} \right) \mu(dy),$$

da cui segue, per la (5.27), che

$$C(f_N, \mathbb{P}) = \frac{f(0)}{(1+r)^N} + S_0 f'(0) + \int_{(0,\infty)} C_{call}(y, \mathbb{P}) \mu(dy). \quad (5.35)$$

Si osservi che se $f_N = f(S_N) = (S_N - K_*)^+$, $K_* > 0$, allora $\mu(dy)$ è concentrata nel punto K_* , cioè $\mu_*(dy) = \delta_{\{K_*\}}(dy)$, e ciò implica, come deve essere, $C(f_N, \mathbb{P}) = C_{call}(K_*, \mathbb{P})$.

Capitolo 6

Processi aleatorie a tempo continuo

6.1 Processi aleatori, definizioni ed esempi

Esistono diversi modi di definire un processo stocastico. Il primo consiste nel considerare semplicemente una famiglia di variabili aleatorie.

Definizione 6.1 (Processo stocastico come famiglia di v.a.). *Dato uno spazio $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ ed un insieme I di indici¹, allora una famiglia di variabili aleatorie $\{X_t : \Omega \mapsto \mathbb{R} \text{ (o } \mathbb{R}^d)\}$, per $t \in I$ è detta **processo stocastico**, e \mathbb{R} (o \mathbb{R}^d) è detto lo **spazio degli stati del processo**.*

In alcuni casi si vuole mettere in evidenza l'evoluzione rispetto al tempo e si preferisce dare una definizione di processo stocastico come funzione aleatoria.

Definizione 6.2 (Processo stocastico come funzione aleatoria). *Dato uno spazio $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ ed un insieme I di indici, si definisce **processo stocastico (come funzione aleatoria)** la funzione (misurabile)²*

$$X : \Omega \mapsto \mathbb{R}^I; \omega \mapsto (t \mapsto X(t, \omega)).$$

Una definizione analoga vale nel caso di processi con spazio degli stati \mathbb{R}^d .

Altre volte si è interessati anche ad alcune proprietà delle traiettorie $t \mapsto X(t, \omega)$, quali ad esempio la continuità. Viene allora naturale dare la definizione di processo a traiettorie continue.

Definizione 6.3 (Processo stocastico come funzione aleatoria continua). *Dato uno spazio $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ ed un insieme I di indici, si definisce **processo stocastico (come funzione***

¹Tipicamente l'insieme degli indici è $I = [0, \infty)$, o $I = [0, T]$, o ancora $I = \mathbb{N}$ (e in questo caso si parla più propriamente di successioni aleatorie), ma è possibile anche che l'insieme degli indici sia multidimensionale, ad esempio $I = \mathbb{R}^2$ (e in questo caso si parla più propriamente di campi aleatori).

²Per rendere la definizione completa andrebbe precisata la σ -algebra che si mette sullo spazio di tutte le funzioni \mathbb{R}^I . Di solito si tratta in realtà di richiedere almeno che tutte le funzioni

$$\Omega \mapsto \mathbb{R}; \omega \mapsto X(t, \omega)$$

siano variabili aleatorie \mathcal{F} -misurabili. La σ -algebra considerata è di solito quella del Teorema di Kolmogorov 6.1 e la nota corrispondente.

aleatoria continua) la funzione (misurabile)³

$$X : \Omega \mapsto C(I; \mathbb{R}); \omega \mapsto (t \mapsto X(t, \omega)),$$

dove $C(I; \mathbb{R})$ è lo spazio metrico delle traiettorie continue. Una definizione analoga vale nel caso di processi con spazio degli stati \mathbb{R}^d .

Dato un processo si definiscono le funzioni di distribuzione finito-dimensionali.

Definizione 6.4 (Famiglia delle funzioni di distribuzione finito-dimensionali). Dato un processo stocastico (secondo una delle precedenti definizioni) la famiglia delle funzioni di distribuzione F_{t_1, \dots, t_n} , definite per $n \geq 1$, e t_1, \dots, t_n , con $t_i \in I$, come le funzioni di distribuzione congiunte delle variabili $(X_{t_1}, \dots, X_{t_n})$, ovvero

$$F_{t_1, \dots, t_n}(x_1, \dots, x_n) = \mathbb{P}(X_{t_1} \leq x_1, \dots, X_{t_n} \leq x_n),$$

è detta famiglia delle funzioni di distribuzione finito-dimensionali del processo $X = (X_t)_{t \in I}$.

Va detto che, così come una variabile aleatoria viene spesso individuata attraverso la sua distribuzione, senza specificare quale sia lo spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ sul quale è definita, spesso anche un processo viene individuato attraverso le sue distribuzioni finito-dimensionali. Si pone quindi il problema di individuare quali sono le famiglie di distribuzioni che sono effettivamente famiglie di distribuzioni finito-dimensionali di un processo.

Si individuano facilmente delle condizioni necessarie, dette **condizioni di consistenza**:

(C1) Sia $k > 1$, sia π una permutazione di $\{1, \dots, k\}$, si ponga

$$\Phi_\pi : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^k, (x_1, \dots, x_k) \rightarrow \Phi_\pi(x_1, \dots, x_k) := (x_{\pi_1}, \dots, x_{\pi_k}).$$

Si richiede che per ogni $k > 1$, π , t_1, \dots, t_k e (x_1, \dots, x_k) valga

$$F_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k) = F_{t_{\pi_1}, \dots, t_{\pi_k}}(\Phi_\pi(x_1, \dots, x_k)) = F_{t_{\pi_1}, \dots, t_{\pi_k}}(x_{\pi_1}, \dots, x_{\pi_k}), \quad (6.1)$$

Infatti

$$\begin{aligned} F_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k) &= \mathbb{P}\{(X_{t_1} \leq x_1, \dots, X_{t_k} \leq x_k)\} \\ &= \mathbb{P}\{X_{t_{\pi_1}} \leq x_{\pi_1}, \dots, X_{t_{\pi_k}} \leq x_{\pi_k}\} = F_{t_{\pi_1}, \dots, t_{\pi_k}}(x_{\pi_1}, \dots, x_{\pi_k}) \end{aligned}$$

³Nel caso $I = [0, T]$ lo spazio $C(I; \mathbb{R})$ è uno spazio metrico con la metrica uniforme:

$$d(x(\cdot), y(\cdot)) := \sup_{t \in [0, T]} |x(t) - y(t)|,$$

e la σ -algebra su $C(I; \mathbb{R})$ è quella generata dagli aperti. Se invece $I = [0, \infty)$ si può, ad esempio, usare la metrica

$$d(x(\cdot), y(\cdot)) = \sum_{N=1}^{\infty} \frac{1}{2^N} \sup_{t \in [0, N]} |x(t) - y(t)| \wedge 1,$$

e di nuovo la σ -algebra su $C([0, \infty); \mathbb{R})$ è quella generata dagli aperti.

(C2) Si richiede che per ogni $k \geq 1$, t_1, \dots, t_k, t_{k+1} e (x_1, \dots, x_k) valga

$$\lim_{x_{k+1} \rightarrow \infty} F_{t_1, \dots, t_k, t_{k+1}}(x_1, \dots, x_k, x_{k+1}) = F_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k). \quad (6.2)$$

Infatti

$$\begin{aligned} \lim_{x_{k+1} \rightarrow \infty} F_{t_1, \dots, t_k, t_{k+1}}(x_1, \dots, x_k, x_{k+1}) &= \lim_{x_{k+1} \rightarrow \infty} \mathbb{P}(X_{t_1} \leq x_1, \dots, X_{t_k} \leq x_k, X_{t_{k+1}} \leq x_{k+1}) \\ &= \mathbb{P}(X_{t_1} \leq x_1, \dots, X_{t_k} \leq x_k) = F_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k). \end{aligned}$$

È interessante notare che la prima condizione potrebbe essere automaticamente soddisfatta dando le funzioni di distribuzione solo per $t_1 < t_2 < \dots < t_k$ (e definendole negli altri casi in modo che la condizione (C1) sia soddisfatta). Allora, però, la condizione (C2), va modificata:

(C2') Sia $k \geq 1$, siano $t_1 < t_2 < \dots < t_k < t_{k+1}$, allora

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} F_{t_1, \dots, t_k, t_{k+1}}(x_1, \dots, x_k, x) &= F_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k), \\ \lim_{x \rightarrow \infty} F_{t_1, \dots, t_{i-1}, t_i, t_{i+1}, \dots, t_{k+1}}(x_1, \dots, x_{i-1}, x, x_{i+1}, \dots, x_{k+1}) \\ &= F_{t_1, \dots, t_{i-1}, t_{i+1}, \dots, t_{k+1}}(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_{k+1}), \quad \text{per } i = 1, \dots, k. \end{aligned}$$

Il seguente teorema garantisce che le precedenti condizioni necessarie, sono anche sufficienti.

Teorema 6.1 (di Kolmogorov). *Sia data una famiglia F_{t_1, \dots, t_k} di funzioni di distribuzione finito-dimensionali consistente, cioè che verifica le condizioni di consistenza (C1) e (C2) (ovvero (6.1) e (6.2), rispettivamente), allora esiste uno spazio di probabilità ed un processo aleatorio che ammette F_{t_1, \dots, t_k} come funzioni di distribuzione finito-dimensionali.⁴*

Vediamo subito delle applicazioni del precedente teorema.

Esempio 6.1 (Processi a coordinate indipendenti). *Data una famiglia di funzioni di distribuzione $\{F_t, t \in I\}$ ad un tempo, si consideri la famiglia delle funzioni di distribuzione finito-dimensionali $F_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k) := F_{t_1}(x_1) \times \dots \times F_{t_k}(x_k)$. Tale famiglia è chiaramente una famiglia consistente e quindi esiste un processo con tali funzioni di distribuzione finito-dimensionali.*

Si noti che non si richiede che I sia numerabile, e che questo esempio, nel caso numerabile, garantisce l'esistenza di successioni di v.a. indipendenti⁵.

⁴Inoltre è sempre possibile prendere come spazio di probabilità lo spazio canonico \mathbb{R}^I , come σ -algebra la σ -algebra generata dai cilindri, ovvero dagli insiemi del tipo

$$\mathcal{C} = \{x(\cdot) \in \mathbb{R}^I \mid (x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_k)) \in H\}, \text{ dove } H \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$$

ed infine come processo il processo canonico $X_t(x(\cdot)) = x(t)$.

⁵L'esistenza di successioni indipendenti è di solito sottintesa nei teoremi fondamentali del *Calcolo delle Probabilità*, come ad esempio la Legge dei grandi numeri, o il Teorema centrale del limite.

Esempio 6.2 (Processi gaussiani). *Siano date una funzione $m : I \rightarrow \mathbb{R}$, $t \rightarrow m(t)$ e una funzione, detta **funzione di correlazione**, $K : I \times I \rightarrow \mathbb{R}$, $(t, s) \rightarrow K(t, s)$ **definita non negativa**, cioè tale che comunque scelti $n \geq 1$, $t_1, \dots, t_n \in I$, $\eta_1, \dots, \eta_n \in \mathbb{C}$ valga*

$$\sum_{h,k}^{1,n} \eta_h \bar{\eta}_k K(t_h, t_k) \geq 0.$$

Si noti che quindi necessariamente $K(t, s) = K(s, t)$ e $K(t, t) \geq 0$ e che la condizione che la funzione di correlazione sia definita non negativa corrisponde alla richiesta che la matrice $\Gamma = (\Gamma_{i,j} := K(t_i, t_j))_{i,j=1,\dots,n}$ sia definita positiva.

Sia F_{t_1, \dots, t_k} la funzione di distribuzione congiunta gaussiana di media $(m(t_1), \dots, m(t_k))$ e matrice di covarianza Γ definita da $\Gamma_{i,j} = K(t_i, t_j)$ per $i, j = 1, \dots, k$, e sia f_{t_1, \dots, t_k} la sua densità.

Per convincersi dell'esistenza di un processo con tali distribuzioni finito-dimensionali si consideri il caso in cui $K(t, s)$ sia strettamente definita positiva e si noti che se (Y_1, \dots, Y_k) è un vettore aleatorio con componenti indipendenti e ciascuna con distribuzione normale $N(0, 1)$, allora il vettore definito da $Z = (Z_1, \dots, Z_k) = A(Y_1, \dots, Y_k) + (m(t_1), \dots, m(t_k)) = AY + m$, dove $A = \Gamma^{1/2}$ (cioè $\Gamma = A^t A = AA^t$), è un vettore con la distribuzione cercata.

*Per la consistenza della famiglia F_{t_1, \dots, t_k} così definita, si noti che l'operatore Φ_π di (6.1) è una trasformazione lineare e che trasformazioni lineari di vettori gaussiani sono ancora gaussiani. Inoltre, indicando ancora con Φ_π la matrice associata all'operatore di (6.1), allora $\Phi_\pi Z = \Phi_\pi AY + \Phi_\pi m$, segue una legge gaussiana di media $\Phi_\pi m = (m(t_{\pi_1}), \dots, m(t_{\pi_k}))$ e con matrice di covarianza $(\Phi_\pi A)(\Phi_\pi A)^t = \Phi_\pi AA^t \Phi_\pi^t = \Phi_\pi \Gamma \Phi_\pi^t = (\Gamma_{\pi_i, \pi_j})_{i,j=1,\dots,k}$.
Da queste osservazioni si deduce immediatamente che per la densità vale*

$$f_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k) = f_{t_{\pi_1}, \dots, t_{\pi_k}}(\Phi_\pi(x_1, \dots, x_k)),$$

ovvero la (6.1). Per quanto riguarda la (6.2), basta ricordare che ogni sottovettore di un vettore gaussiano è ancora un vettore gaussiano.

In particolare possiamo ad esempio stabilire l'esistenza del processo di Wiener standard, detto anche Moto Browniano, cioè del processo gaussiano con $m(t) = 0$ e $K(t, s) = t \wedge s$.

Bisognerebbe ovviamente controllare che la funzione $K(\cdot, \cdot)$ sia definita non negativa. Ciò può essere fatto direttamente, ma con una certa fatica⁶.

⁶Dati $t_1 < t_2 < \dots < t_k$ la matrice $(t_i \wedge t_j)_{i,j}$ si può scrivere come

$$\begin{pmatrix} t_1 & t_1 & \cdots & t_1 & t_1 \\ t_1 & t_2 & \cdots & t_2 & t_2 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ t_1 & t_2 & \cdot & t_{k-1} & t_{k-1} \\ t_1 & t_2 & \cdot & t_{k-1} & t_k \end{pmatrix}$$

Un metodo decisamente più probabilistico⁷ è il seguente: consiste nell'osservare che la funzione di correlazione

$$K(t, s) := Cov(N_t, N_s)$$

di un processo N_t di Poisson standard (cioè con $\lambda = 1$) è proprio $t \wedge s$, ciò è sufficiente⁸ a garantire la sua non negatività. Infatti

$$\begin{aligned} Cov(N_t, N_s) &= Cov(N_{t \wedge s}, N_{t \vee s}) \\ &= \mathbb{E}[N_{t \wedge s}(N_{t \wedge s} + N_{t \vee s} - N_{t \wedge s})] - \mathbb{E}[N_{t \wedge s}]\mathbb{E}[N_{t \wedge s} + N_{t \vee s} - N_{t \wedge s}] \\ &= \mathbb{E}[N_{t \wedge s}N_{t \wedge s}] + \mathbb{E}[N_{t \wedge s}(N_{t \vee s} - N_{t \wedge s})] - \mathbb{E}[N_{t \wedge s}](\mathbb{E}[N_{t \wedge s}] + \mathbb{E}[N_{t \vee s} - N_{t \wedge s}]) \\ &= Var(N_{t \wedge s}) + \mathbb{E}[N_{t \wedge s}(N_{t \vee s} - N_{t \wedge s})] - \mathbb{E}[N_{t \wedge s}]\mathbb{E}[N_{t \vee s} - N_{t \wedge s}] = Var(N_{t \wedge s}) \\ &= t \wedge s \end{aligned}$$

Si noti che la proprietà del processo di Wiener di avere la stessa funzione di correlazione del processo di Poisson standard, implica che gli incrementi sono non correlati. Poiché gli

Si può dimostrare che il determinante di questa matrice è $t_1(t_2 - t_1)(t_3 - t_2) \cdots (t_k - t_{k-1}) > 0$, e ciò dimostra subito il fatto che $K(t, s) = t \wedge s$ è definita positiva. Il primo passo per dimostrare tale identità è osservare che

$$\det \begin{pmatrix} t_1 & t_1 & \cdots & t_1 & t_1 \\ t_1 & t_2 & \cdots & t_2 & t_2 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ t_1 & t_2 & \cdot & t_{k-1} & t_{k-1} \\ t_1 & t_2 & \cdot & t_{k-1} & t_k \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} t_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ t_1 & t_2 - t_1 & \cdots & t_2 - t_1 & t_2 - t_1 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ t_1 & t_2 - t_1 & \cdot & t_{k-1} - t_1 & t_{k-1} - t_1 \\ t_1 & t_2 - t_1 & \cdot & t_{k-1} - t_1 & t_k - t_1 \end{pmatrix}$$

da cui

$$\det \begin{pmatrix} t_1 & t_1 & \cdots & t_1 & t_1 \\ t_1 & t_2 & \cdots & t_2 & t_2 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ t_1 & t_2 & \cdot & t_{k-1} & t_{k-1} \\ t_1 & t_2 & \cdot & t_{k-1} & t_k \end{pmatrix} = t_1 \det \begin{pmatrix} t_2 - t_1 & \cdots & t_2 - t_1 & t_2 - t_1 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ t_2 - t_1 & \cdot & t_{k-1} - t_1 & t_{k-1} - t_1 \\ t_2 - t_1 & \cdot & t_{k-1} - t_1 & t_k - t_1 \end{pmatrix},$$

poi basta procedere per induzione, notando che $t_i - t_1 - (t_2 - t_1) = t_i - t_2$.

⁷Tuttavia questo metodo presuppone la conoscenza del processo di Poisson.

⁸La matrice di covarianza di un vettore aleatorio è sempre definita non negativa, e di conseguenza la funzione di correlazione $K(s, t) = Cov(X_s, X_t)$ di un processo X_t qualsiasi è sempre definita non negativa:

$$\begin{aligned} \sum_{h,k}^{1,n} \eta_h \bar{\eta}_k K(t_h, t_k) &= \sum_{h,k}^{1,n} \eta_h \bar{\eta}_k \mathbb{E} [(X_{t_h} - \mathbb{E}[X_{t_h}])(X_{t_k} - \mathbb{E}[X_{t_k}])] \\ &= \mathbb{E} \left[\sum_{h,k}^{1,n} \eta_h \bar{\eta}_k (X_{t_h} - \mathbb{E}[X_{t_h}])(X_{t_k} - \mathbb{E}[X_{t_k}]) \right] \\ &= \mathbb{E} \left[\sum_{h=1}^n \eta_h (X_{t_h} - \mathbb{E}[X_{t_h}]) \sum_{k=1}^n \bar{\eta}_k (X_{t_k} - \mathbb{E}[X_{t_k}]) \right] \\ &= \mathbb{E} \left[\left| \sum_{h=1}^n \eta_h (X_{t_h} - \mathbb{E}[X_{t_h}]) \right|^2 \right] \geq 0. \end{aligned}$$

incrementi del processo di Wiener $(W_t)_{t \geq 0}$ hanno distribuzione gaussiana, sono quindi anche indipendenti. Inoltre per ogni $s < t$, l'incremento $W_t - W_s$ deve essere una variabile aleatoria gaussiana (in quanto differenza di due v.a. congiuntamente gaussiane), deve avere media nulla e varianza⁹ uguale alla varianza di $N_t - N_s$, ovvero uguale a $t - s$. Infine deve essere $\mathbb{P}(W_0 = 0) = 1$, in quanto la media deve essere nulla e la varianza deve essere uguale a $K(0, 0) = 0$.

Questa proprietà di indipendenza degli incrementi fondamentale per ottenere la densità congiunta di $(W_{t_1}, \dots, W_{t_n})$. Infatti si può pensare che il vettore $(W_{t_1}, \dots, W_{t_n})$ si ottiene dal vettore degli incrementi

$$(\Delta W_{t_1}, \Delta W_{t_2}, \dots, \Delta W_{t_n}) = (W_{t_1} - W_0, W_{t_2} - W_{t_1}, \dots, W_{t_n} - W_{t_{n-1}})$$

con la seguente trasformazione lineare

$$W_{t_h} = W_{t_h} - W_0 = \sum_{i=1}^h (W_{t_i} - W_{t_{i-1}}) = \sum_{i=1}^h \Delta W_{t_i},$$

(dove si è posto $t_0 = 0$) che corrisponde ad una matrice B la cui inversa B^{-1} è la matrice la cui diagonale ha tutti gli elementi uguali ad 1, la cui sottodiagonale ha gli elementi tutti uguali a -1 e tutti i rimanenti elementi uguali a 0, in quanto banalmente

$$\Delta W_{t_h} = W_{t_h} - W_{t_{h-1}}.$$

Da questa osservazione, dalla formula di trasformazione della densità e dall'osservazione che gli incrementi sono indipendenti, ovvero che

$$f_{\Delta W_{t_1}, \dots, \Delta W_{t_n}}(y_1, \dots, y_n) = f_{\Delta W_{t_1}}(y_1) \cdots f_{\Delta W_{t_n}}(y_n) = \prod_{h=1}^n g_{t_h - t_{h-1}}(y_h),$$

dove

$$g_s(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s}} \exp\left\{-\frac{y^2}{2s}\right\}$$

si ottiene la densità congiunta di $(W_{t_1}, \dots, W_{t_n})$

$$f_{W_{t_1}, \dots, W_{t_n}}(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_{\Delta W_{t_1}, \dots, \Delta W_{t_n}}(x_1, x_2 - x_1, \dots, x_n - x_{n-1}) \quad (6.3)$$

$$= \prod_{h=1}^n g_{t_h - t_{h-1}}(x_h - x_{h-1}) \quad (6.4)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi t_1}} e^{-\frac{x_1^2}{2t_1}} \frac{1}{\sqrt{2\pi(t_2 - t_1)}} e^{-\frac{(x_2 - x_1)^2}{2(t_2 - t_1)}} \cdots \frac{1}{\sqrt{2\pi(t_n - t_{n-1})}} e^{-\frac{(x_n - x_{n-1})^2}{2(t_n - t_{n-1})}} \quad (6.5)$$

⁹Il lettore che non conosce il processo di Poisson, può procedere anche nel seguente semplicissimo modo

$$\begin{aligned} \text{Var}(W_t - W_s) &= \text{Cov}(W_t - W_s, W_t - W_s) = \text{Cov}(W_t, W_t) - \text{Cov}(W_t, W_s) - \text{Cov}(W_s, W_t) + \text{Cov}(W_s, W_s) \\ &= K(t, t) - 2K(s, t) + K(s, s) = t - 2s \wedge t + s = t - s. \end{aligned}$$

Si noti che il procedimento permette di calcolare la varianza degli incrementi per un qualunque processo, purché sia nota la funzione di covarianza $K(s, t)$.

6.2 Osservazione sulla definizione di un processo solo attraverso le sue distribuzioni finito dimensionali

La descrizione di un processo attraverso la famiglia delle distribuzioni finito dimensionali non è sufficiente a stabilire le proprietà delle sue traiettorie. In questa sezione e nella successiva ci si pone il problema di spiegare meglio questa affermazione, senza alcuna pretesa di essere esaurienti. Il primo concetto che ci serve l'equivalenza stocastica per due processi aleatori, che, come si vedrà immediatamente dopo la definizione, implica che i due processi hanno le stesse distribuzioni finito dimensionali.

Definizione 6.5 (Equivalenza stocastica). *Due processi aleatori $(X_t, t \in I)$ e $(Y_t, t \in I)$ sullo stesso spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ si dicono **stocasticamente equivalenti** se*

$$\mathbb{P}(X_t(\omega) = Y_t(\omega)) = 1 \text{ per ogni } t \in I.$$

(Si dice anche che $(Y_t, t \in I)$ è una versione di $(X_t, t \in I)$)

Lemma 6.2. *Due processi stocasticamente equivalenti hanno le stesse distribuzioni finito-dimensionali.*

Dimostrazione. Basta osservare che

$$\begin{aligned} & \mathbb{P}(\{(X_{t_1}, \dots, X_{t_k}) \in H\}) = \\ &= \mathbb{P}\left(\{(X_{t_1}, \dots, X_{t_k}) \in H\} \cap \bigcap_{i=1}^k \{X_{t_i} = Y_{t_i}\}\right) + \mathbb{P}\left(\{(X_{t_1}, \dots, X_{t_k}) \in H\} \cap \left(\bigcap_{i=1}^k \{X_{t_i} = Y_{t_i}\}\right)^c\right) = \\ &= \mathbb{P}\left(\{(Y_{t_1}, \dots, Y_{t_k}) \in H\} \cap \bigcap_{i=1}^k \{X_{t_i} = Y_{t_i}\}\right) = \mathbb{P}\left(\{(Y_{t_1}, \dots, Y_{t_k}) \in H\}\right) \end{aligned}$$

in quanto

$$\mathbb{P}\left(\left(\bigcap_{i=1}^k \{X_{t_i} = Y_{t_i}\}\right)^c\right) = \mathbb{P}\left(\bigcup_{i=1}^k \{X_{t_i} \neq Y_{t_i}\}\right) \leq \sum_{i=1}^k \mathbb{P}(\{X_{t_i} \neq Y_{t_i}\}) = 0.$$

□

Esempio 6.3. *Come primo esempio di processo si definisca, in uno spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$,*

$$N_t(\omega) := \mathbb{I}_{\{T \leq t\}}(\omega) = \mathbb{I}_{[T(\omega), \infty)}(t) \begin{cases} = 0 & \text{se } T(\omega) > t, \\ = 1 & \text{se } T(\omega) \leq t \end{cases}, \quad t \geq 0,$$

dove T è una variabile aleatoria a valori in $(0, \infty)$.

Si noti che, qualunque sia $\omega \in \Omega$ le traiettorie di questo processo, cioè le funzioni

$$t \mapsto \mathbb{I}_{\{T \leq t\}}(\omega)$$

sono funzioni crescenti (in senso lato) rispetto a t .

Se T ammette densità di probabilità, ad esempio se è una variabile aleatoria esponenziale, allora il processo definito da

$$M_t(\omega) := N_t(\omega) + f(t + T(\omega)),$$

dove

$$\begin{cases} f(s) = 1 & \text{per } s \in \mathbb{Q} \\ f(s) = 0 & \text{per } s \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}, \end{cases}$$

è stocasticamente equivalente ad N_t , e quindi ha le stesse distribuzioni finito-dimensionali di N_t , ma evidentemente non ha traiettorie crescenti (in senso lato).

Per controllare che $M_t(\omega)$ ed $N_t(\omega)$ sono stocasticamente equivalenti, si osservi che, $M_t(\omega) \neq N_t(\omega)$ se e solo se $f(t + T(\omega)) = 1$ ovvero se e solo se $t + T(\omega) \in \mathbb{Q}$ ed inoltre

$$\mathbb{P}(t + T(\omega) \in \mathbb{Q}) = \sum_{r \in \mathbb{Q}} \mathbb{P}(T(\omega) = r - t) = 0$$

per ogni t , in quanto T è una variabile aleatoria continua e si ha quindi che

$$\mathbb{P}(M_t(\omega) = N_t(\omega)) = 1 \text{ per ogni } t \geq 0.$$

6.3 Esistenza di una versione continua: criterio di Chensov-Kolmogorov.

Il seguente criterio sufficiente fornisce condizioni che assicurano l'esistenza di una versione hölderiana, non solo continua. Ricordiamo che una funzione $f(x)$ è **hölderiana** di esponente γ se per ogni x esistono un $\delta(x) > 0$ e un $L_\gamma(x)$ tali che, per ogni y per il quale $|y - x| \leq \delta(x)$, si abbia

$$|f(x) - f(y)| \leq L_\gamma(x)|x - y|^\gamma.$$

Nel caso in cui $\delta(x)$ e $L_\gamma(x)$ possano essere presi in modo indipendente da x , per $x \in I$, si dice che f è **uniformemente hölderiana** nell'insieme I .

Proposizione 6.3 (Criterio di Chensov-Kolmogorov). *Sia X_t un processo per cui esistono α , β e C strettamente positivi, per cui*

$$\mathbb{E}[|X_t - X_s|^\beta] \leq C|t - s|^{1+\alpha}.$$

Allora esiste una versione \tilde{X}_t di X_t , a traiettorie continue. Inoltre le traiettorie sono uniformemente hölderiane di esponente γ , per ogni $\gamma < \frac{\alpha}{\beta}$, in ogni intervallo limitato.

APPLICAZIONE

Il processo W_t di Wiener standard, o moto Browniano, ammette sempre una versione continua, anzi hölderiana per ogni $\gamma < \frac{1}{2}$. Infatti, per $s \leq t$,

$$\mathbb{E}[|W_t - W_s|^k] = \mathbb{E}[|W_{t-s}|^k] = C(k)|t - s|^{k/2}.$$

Il criterio di Chensov-Kolmogorov si può quindi applicare per $k \geq 3$ (così $\alpha = (k/2) - 1 > 0$) e ci garantisce che esiste una versione di W_t le cui traiettorie sono hölderiane di esponente γ per $\gamma < \frac{(k/2)-1}{k} = \frac{1}{2} - \frac{1}{k}$, e quindi per ogni $\gamma < \frac{1}{2}$. È possibile dimostrare che, a parte un eventuale insieme di misura nulla, le traiettorie non sono hölderiane di esponente $\frac{1}{2}$, e tantomeno di esponente maggiore di $\frac{1}{2}$.

6.4 Le traiettorie del processo di Wiener non sono a variazione limitata

In questa sezione si dimostra una proprietà che non permette di definire nel modo usuale (Lebesgue-Stieltjes) l'integrale rispetto al processo di Wiener. Nonostante si abbia che le traiettorie della versione continua del processo di Wiener siano hölderiane, tuttavia esse non possono essere molto regolari, in quanto ad esempio sono anche a variazione non limitata con probabilità 1 su ogni intervallo $[s, t]$. Infatti se esistesse un intervallo $[s, t]$ ed un insieme A con $\mathbb{P}(A) > 0$, su cui la variazione di W_u , cioè se

$$V(s, t, W; \omega) := \sup \left\{ \sum_{k=0}^n |W_{t_{k+1}} - W_{t_k}|, \text{ al variare delle partizioni } \pi : t_0 = s \leq t_1 \leq \dots \leq t_n = t \right\}$$

fosse finita per ogni $\omega \in A$, allora si avrebbe che

$$\begin{aligned} S_\pi &:= \sum_{k=0}^n |W_{t_{k+1}} - W_{t_k}|^2 \leq \sum_{k=0}^n (\sup_h |W_{t_{h+1}} - W_{t_h}|) |W_{t_{k+1}} - W_{t_k}| \\ &= (\sup_h |W_{t_{h+1}} - W_{t_h}|) \sum_{k=0}^n |W_{t_{k+1}} - W_{t_k}| \leq (\sup_h |W_{t_{h+1}} - W_{t_h}|) V(\omega) \rightarrow 0 \end{aligned}$$

per ogni versione continua di W_u . Questo fatto è in contraddizione con la seguente proprietà del moto browniano (valida anche per versioni non continue):

Lemma 6.4. *Si definisca*

$$S_\pi := \sum_{k=0}^n |W_{t_{k+1}} - W_{t_k}|^2,$$

allora $S_\pi \xrightarrow{L^2} (t - s)$, al tendere a zero di $|\pi| := \max_k |t_{k+1} - t_k|$.

Dimostrazione. Si tratta di mostrare che $\mathbb{E}[(S_\pi - (t - s))^2] \rightarrow 0$ al tendere a zero di $|\pi| := \max_k |t_{k+1} - t_k|$, e infatti

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[(S_\pi - (t-s))^2] &= \mathbb{E}[S_\pi^2 + (t-s)^2 - 2S_\pi(t-s)] \\
 &= \mathbb{E}\left[\left(\sum_{k=0}^{n-1} |W_{t_{k+1}} - W_{t_k}|^2\right)^2 + (t-s)^2 - 2\left(\sum_{k=0}^{n-1} |W_{t_{k+1}} - W_{t_k}|^2\right)(t-s)\right] \\
 &= \mathbb{E}\left[\sum_{k=0}^n |W_{t_{k+1}} - W_{t_k}|^2 \sum_{h=0}^{n-1} |W_{t_{h+1}} - W_{t_h}|^2 + (t-s)^2 - 2\left(\sum_{k=0}^{n-1} |W_{t_{k+1}} - W_{t_k}|^2\right)(t-s)\right] \\
 &= \sum_{k=0}^{n-1} \mathbb{E}[|W_{t_{k+1}} - W_{t_k}|^4] + \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq k}}^{n-1} \mathbb{E}[|W_{t_{k+1}} - W_{t_k}|^2 |W_{t_{h+1}} - W_{t_h}|^2] + \\
 &\quad + (t-s)^2 - 2(t-s) \sum_{k=0}^n \mathbb{E}[|W_{t_{k+1}} - W_{t_k}|^2] \\
 &= \sum_{k=0}^{n-1} 3|t_{k+1} - t_k|^2 + \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq k}}^{n-1} |t_{k+1} - t_k| |t_{h+1} - t_h| + (t-s)^2 - 2(t-s) \sum_{k=0}^{n-1} |t_{k+1} - t_k|
 \end{aligned}$$

Di conseguenza si ottiene che

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[(S_\pi - (t-s))^2] &= \sum_{k=0}^{n-1} 2|t_{k+1} - t_k|^2 + \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{h=0}^{n-1} |t_{k+1} - t_k| |t_{h+1} - t_h| + (t-s)^2 - 2(t-s)(t-s) \\
 &\leq 2 \sum_{k=0}^{n-1} |t_{k+1} - t_k| (\max_h |t_{h+1} - t_h|) + (t-s)^2 + (t-s)^2 - 2(t-s)(t-s) \\
 &= 2(\max_h |t_{h+1} - t_h|) \sum_{k=0}^{n-1} |t_{k+1} - t_k| = 2(\max_h |t_{h+1} - t_h|)(t-s) \rightarrow 0.
 \end{aligned}$$

La conseguenza di questo risultato è che le traiettorie di un processo di Wiener non sono a variazione limitata¹⁰, o meglio,

$$\mathbb{P} \left(V(s, t, W; \omega) := \sup_{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} |W_{t_{k+1}} - W_{t_k}| = \infty \right) = 1.$$

Questo fatto in particolare pone dei problemi nel tentare di definire $\int_0^t f(s, \omega) dW_s(\omega)$, in quanto non si può adottare la classica definizione di integrale di Lebesgue-Stieltjes, che avrebbe senso solo se W_s avesse traiettorie a variazione finita. La definizione che si dà è quindi diversa e si parlerà di integrale stocastico. Per ottenerla si ha però bisogno del concetto di martingala.

¹⁰In realtà il lemma dimostra anche che il processo di Wiener non ha traiettorie di Hölder con esponente $\gamma > 1/2$: se così fosse allora necessariamente si avrebbe

$$S_\pi(\omega) \leq \sum_{k=0}^{n-1} L^2(\omega) |t_{k+1} - t_k|^{2\gamma} \leq \sum_{k=0}^{n-1} L^2(\omega) |t_{k+1} - t_k| \delta^{2\gamma-1} = L^2(\omega) \delta^{2\gamma-1} (t-s) \rightarrow 0, \text{ q.c.}$$

6.5 Processi ad incrementi indipendenti ed omogenei

Il procedimento usato per ottenere le distribuzioni finito dimensionali del processo di Wiener, si può estendere ad una classe più generale:

Definizione 6.6 (Processi ad incrementi indipendenti ed omogenei). *Un processo $(X_t)_{t \geq 0}$ si dice ad incrementi indipendenti ed omogenei se*

- (0) $X_0 = 0$;
- (1) per $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n$ gli incrementi $\Delta X_{t_i} = X_{t_i} - X_{t_{i-1}}$ sono variabili aleatorie indipendenti;
- (2) gli incrementi $\Delta X_{t_i} = X_{t_i} - X_{t_{i-1}}$ sono variabili aleatorie la cui distribuzione dipende solo dall'ampiezza dell'intervallo $(t_i - t_{i-1})$;

Per fissare le idee e capire meglio la condizione **(2)**, si consideri la famiglia $(F_u)_{u \geq 0}$ di funzioni di distribuzione dipendente da un parametro, per cui $X_{t+u} - X_t \sim F_u$, qualunque siano t ed u in $[0, \infty)$.

La famiglia $(F_u)_{u \geq 0}$ non può essere presa a piacere, ma deve soddisfare la seguente condizione necessaria¹¹:

$$F_u * F_v = F_{u+v}, \quad \text{per ogni } u, v \geq 0, \quad (6.6)$$

dove $*$ corrisponde alla convoluzione.

Infatti ciò corrisponde alla condizione che

$$X_u = X_u - X_0 \sim F_u, \quad X_{u+v} - X_u \sim F_v, \quad X_{u+v} \sim F_{u+v},$$

e d'altra parte

$$X_{u+v} = (X_{u+v} - X_u) + (X_u - X_0) \sim F_v * F_u.$$

In realtà questa condizione risulta anche sufficiente, come si può verificare facilmente. Infatti le funzioni $F_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k)$ di distribuzione finito dimensionale risultano definite¹², per $0 < t_1 < \dots < t_k$, come, la funzione di distribuzione ottenuta da quella degli incrementi

$$F_{t_1}(z_1)F_{t_2-t_1}(z_2) \cdots F_{t_k-t_{k-1}}(z_k),$$

attraverso la trasformazione $x_1 = z_1, x_2 = z_1 + z_2, \dots, x_k = z_1 + \dots + z_k$. La condizione (6.6) implica immediatamente che la condizione di consistenza di Kolmogorov (**C2'**) sia soddisfatta.

¹¹Inoltre è necessario che $F_0(x) = 0$ per $x < 0$ ed $F_0(x) = 1$ per $x \geq 0$, ovvero che l'incremento $X_t - X_t$ sia concentrato nello 0.

¹²Nel caso $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_k$ si ottiene immediatamente che

$$F_{t_0, t_1, \dots, t_k}(x_0, x_1, \dots, x_k) = 0, \quad \text{per } x_0 < 0,$$

$$F_{t_0, t_1, \dots, t_k}(x_0, x_1, \dots, x_k) = F_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k), \quad \text{per } x_0 \geq 0.$$

Per rendere piú concreta la verifica, si consideri, ad esempio, il caso con densità, ovvero il caso in cui

$$F_u(x) = \int_{-\infty}^x q_u(y)dy.$$

Procedendo come per il processo di Wiener, si ottiene che, per $0 < t_1 < \dots < t_k$

$$F_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k) = \int_{-\infty}^{x_1} \dots \int_{-\infty}^{x_k} q_{t_1}(y_1) \dots q_{t_k-t_{k-1}}(y_k - y_{k-1}) dy_1 \dots dy_k.$$

Per controllare la condizione di consistenza **(C2')**, si prendano $k \geq 1$ e $t_1 < t_2 < \dots, < t_k < t_{k+1}$, allora

$$\begin{aligned} & \lim_{x \rightarrow \infty} F_{t_1, \dots, t_k, t_{k+1}}(x_1, \dots, x_k, x) \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{x_1} \dots \int_{-\infty}^{x_k} \int_{-\infty}^x q_{t_1}(y_1) \dots q_{t_k-t_{k-1}}(y_k - y_{k-1}) q_{t_{k+1}-t_k}(y - y_k) dy_1 \dots dy_k dy \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{x_1} q_{t_1}(y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_k} q_{t_k-t_{k-1}}(y_k - y_{k-1}) dy_k \int_{-\infty}^x \dots q_{t_{k+1}-t_k}(y - y_k) dy \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{x_1} q_{t_1}(y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_k} q_{t_k-t_{k-1}}(y_k - y_{k-1}) dy_k \int_{-\infty}^{x-y_k} \dots q_{t_{k+1}-t_k}(y') dy' \\ &= \int_{-\infty}^{x_1} q_{t_1}(y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_k} q_{t_k-t_{k-1}}(y_k - y_{k-1}) dy_k = F_{t_1, \dots, t_k}(x_1, \dots, x_k), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \lim_{x \rightarrow \infty} F_{t_1, \dots, t_{i-1}, t_i, t_{i+1}, \dots, t_{k+1}}(x_1, \dots, x_{i-1}, x, x_{i+1}, \dots, x_{k+1}) \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{x_1} \dots \int_{-\infty}^{x_{i-1}} \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^{x_{i+1}} \dots \int_{-\infty}^{x_{k+1}} q_{t_1}(y_1) \dots q_{t_{i-1}-t_{i-2}}(y_{i-1} - y_{i-2}) \\ & \quad q_{t_i-t_{i-1}}(y_i - y_{i-1}) q_{t_{i+1}-t_i}(y_{i+1} - y_i) \dots q_{t_{k+1}-t_k}(y_{k+1} - y_k) dy_1 \dots dy_{i-1} dy_i dy_{i+1} \dots dy_{k+1} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{x_1} q_{t_1}(y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_{i-1}} q_{t_{i-1}-t_{i-2}}(y_{i-1} - y_{i-2}) dy_{i-1} \\ & \quad \int_{-\infty}^{x_{i+1}} \left(\int_{-\infty}^x q_{t_i-t_{i-1}}(y_i - y_{i-1}) q_{t_{i+1}-t_i}(y_{i+1} - y_i) dy_i \right) dy_{i+1} \dots \\ & \quad \dots \int_{-\infty}^{x_{k+1}} q_{t_{k+1}-t_k}(y_{k+1} - y_k) dy_{k+1} \\ &= \int_{-\infty}^{x_1} q_{t_1}(y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_{i-1}} q_{t_{i-1}-t_{i-2}}(y_{i-1} - y_{i-2}) dy_{i-1} \\ & \quad \int_{-\infty}^{x_{i+1}} q_{t_{i+1}-t_i}(y_{i+1} - y_i) dy_{i+1} \dots \int_{-\infty}^{x_{k+1}} q_{t_{k+1}-t_k}(y_{k+1} - y_k) dy_{k+1} \\ &= F_{t_1, \dots, t_{i-1}, t_{i+1}, \dots, t_{k+1}}(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_{k+1}), \quad \text{per } i = 1, \dots, k. \end{aligned}$$

Nella penultima uguaglianza si è tenuto conto del fatto che la condizione $F_u * F_v = F_{u+v}$ implica

che, posto $y = y_i - y_{i-1}$, in modo che $y_{i+1} - y_i = (y_{i+1} - y_{i-1}) - y$, si abbia

$$\begin{aligned} & \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^x q_{t_i-t_{i-1}}(y_i - y_{i-1}) q_{t_{i+1}-t_i}(y_{i+1} - y_i) dy_i \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{x-y_{i-1}} q_{t_i-t_{i-1}}(y) q_{t_{i+1}-t_i}(y_{i+1} - y_i - y) dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} q_{t_i-t_{i-1}}(y) q_{t_{i+1}-t_i}(y_{i+1} - y_i - y) dy \\ &= q_{t_{i+1}-t_i} * q_{t_i-t_{i-1}}(y_{i+1} - y_{i-1}) = q_{t_{i+1}-t_{i-1}}(y_{i+1} - y_{i-1}). \end{aligned}$$

Nel caso in cui F_v sia discreta il discorso si ripete identico, mettendo le densità discrete al posto delle densità di probabilità e le somme al posto degli integrali.

Come esempi di famiglie ad un parametro di funzioni di distribuzione, oltre al caso della famiglia gaussiana $F_u \sim N(0, u)$, che dà luogo al processo di Wiener standard, si possono considerare

- 1 il processo di Wiener con drift (o deriva) μ e coefficiente di diffusione σ^2 , ovvero

$$F_u \sim N(\mu u, \sigma^2 u);$$

- 2 il processo di Cauchy, ovvero il caso in cui

$$F_u \sim Cauchy(u), \text{ ovvero } q_u(x) = \frac{u}{\pi} \frac{1}{u^2 + x^2};$$

- 3 il processo di Poisson di parametro λ , ovvero il caso in cui

$$F_u \sim Poisson(\lambda u), \text{ ovvero } p_u(k) = F_u(k) - F_u(k-1) = \frac{(\lambda u)^k}{k!} \exp(-\lambda u), \quad k \in \mathbb{N};$$

- 4 i processi di Poisson composti, ovvero i processi $(X_t)_{t \geq 0}$ ottenuti per mezzo di un processo di Poisson $(N_t)_{t \geq 0}$ ed una successione di variabili aleatorie indipendenti ed identicamente distribuite $\{\xi_n\}_{n \in \mathbb{N}}$, (tutte indipendenti dal processo di Poisson) tramite la seguente regola

$$X_t = 0, \text{ se } N_t = 0; \quad X_t = \sum_{k=1}^{N_t} \xi_k, \text{ se } N_t = n.$$

Terminiamo questa sezione ricordando anche la definizione di processi ad incrementi indipendenti rispetto ad una filtrazione $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$.

Definizione 6.7 (Processi ad incrementi indipendenti ed omogenei rispetto ad una filtrazione). *Un processo $(X_t)_{t \geq 0}$ si dice ad incrementi indipendenti ed omogenei rispetto alla filtrazione $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$, con $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0} \supseteq \mathcal{F}_t^X = \sigma\{X_u; u \in [0, t]\}$ se*

- (0) $X_0 = 0$;
- (1) per $s, t \geq 0$ gli incrementi $X_{t+s} - X_t$ sono variabili aleatorie indipendenti da \mathcal{F}_t ;
- (2) gli incrementi $X_{t+s} - X_t$ sono variabili aleatorie la cui distribuzione dipende solo da s .

Si vede facilmente che questa definizione implica l'altra considerando che $X_{t_n} - X_{t_{n-1}}$ è indipendente da $\mathcal{F}_{t_{n-1}} \supseteq \sigma\{X_{t_i} - X_{t_{i-1}}; i = 1, \dots, n-1\}$. Si può anche vedere che la prima definizione implica la seconda con $\mathcal{F}_t = \mathcal{F}_t^X = \sigma\{X_u; u \in [0, t]\} = \sigma\{X_u - X_v; u, v \in [0, t]\}$.

6.6 Esempi di martingale a tempo continuo

In modo molto simile a quanto fatto a tempo discreto per le somme di v.a. indipendenti, si può mostrare¹³ che se X_t è un processo ad incrementi indipendenti e omogenei, rispetto ad una filtrazione $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$, con $X_0 = 0$, e con media nulla allora X_t è una martingala, purché sia integrabile.

Inoltre è facile mostrare che se X_t è un processo ad incrementi indipendenti (e omogenei), integrabile e con $X_0 = 0$, allora $\mathbb{E}[X_t] = \mu t$ per t nei razionali:

$$\mathbb{E}[X_1] = \sum_{k=1}^n \mathbb{E}[X_{k/n} - X_{(k-1)/n}] = n\mathbb{E}[X_{1/n}]$$

da cui $\mathbb{E}[X_{1/n}] = \frac{1}{n}\mathbb{E}[X_1]$ e analogamente $\mathbb{E}[X_{m/n}] = \sum_{k=1}^m \mathbb{E}[X_{k/n} - X_{(k-1)/n}] = \frac{m}{n}\mathbb{E}[X_1]$. Per ottenere che ciò valga anche per ogni t reale, si deve notare che comunque $\mathbb{E}[X_{t+s}] = \mathbb{E}[X_t] + \mathbb{E}[X_s]$ e aggiungere una piccola ulteriore **ipotesi di regolarità**: la $\mathbb{E}[X_t]$ è una funzione continua in t (o continua a destra). Con questa ipotesi si ottiene immediatamente la tesi per continuità.

Il processo $X_t - \mathbb{E}[X_t] = X_t - \mu t$ è allora un processo ad incrementi indipendenti (ed omogenei), a media nulla e quindi è una martingala.

Se ancora X_t ammette momento secondo finito, allora, con una dimostrazione simile¹⁴ si ha che $Var(X_t) = \sigma^2 t$, purché si possa affermare a priori che $Var(X_t)$ è una funzione continua. Di nuovo similmente al caso a tempo discreto, accade che $(X_t - \mathbb{E}[X_t])^2 - Var(X_t) = (X_t - \mu t)^2 - \sigma^2 t$ è una martingala (a media nulla).

Infine è possibile mostrare¹⁵ che, sotto opportune ipotesi di regolarità (continuità in probabilità), se $\mathbb{E}[\exp\{\theta(X_t - \mu t)\}] < +\infty$, allora

¹³La condizione di misurabilità dipende dal fatto che $\mathcal{F}_t \supseteq \mathcal{F}_t^X$. La condizione di integrabilità è verificata per ipotesi. Infine

$$\mathbb{E}[X_{t+s} - X_t | \mathcal{F}_t] = \mathbb{E}[X_{t+s} - X_t] = \mathbb{E}[X_{t+s}] - \mathbb{E}[X_t] = 0 - 0 = 0,$$

dove nella prima uguaglianza si usa l'indipendenza di $X_{t+s} - X_t$ da \mathcal{F}_t , e nell'ultima si usa il fatto che la media di X_u è nulla. Si noti che l'omogeneità degli incrementi qui non è necessaria.

¹⁴Si tratta di osservare che la varianza della somma degli incrementi è la somma delle varianze degli incrementi e quindi si procede come nel caso del valore atteso, sostituendo Var a \mathbb{E} .

¹⁵In questo caso, posto $X'_t = X_t - \mu t$ si sfrutta il fatto che

$$\exp\{\theta X'_1\} = \prod_{k=1}^n \exp\{\theta (X_{k/n} - X_{(k-1)/n})\},$$

da cui, passando al valore atteso, per l'indipendenza degli incrementi e per l'omogeneità

$$\mathbb{E}[\exp\{\theta X'_1\}] = \prod_{k=1}^n \mathbb{E}[\exp\{\theta (X_{k/n} - X_{(k-1)/n})\}] = (\mathbb{E}[\exp\{\theta (X_{1/n} - X_0)\}])^n.$$

Posto $\exp\{K(\theta)\} := \mathbb{E}[\exp\{\theta X'_1\}]$ si ottiene dunque che

$$\mathbb{E}[\exp\{\theta (X_{k/n} - X_{(k-1)/n})\}] = \mathbb{E}[\exp\{\theta (X_{1/n})\}] = \exp\{K(\theta)(1/n)\},$$

da cui ancora la tesi per ogni t razionale.

$$\mathbb{E}[\exp\{\theta(X_t - \mu t)\}] = \exp\{K(\theta)t\}$$

e che quindi

$$Z_t := \exp\{\theta(X_t - \mu t) - K(\theta)t\}$$

è una martingala¹⁶ a media 1.

Il tutto vale anche per i processi $Y_t = Y_0 + X_t$, con dato iniziale Y_0 indipendente da $\{X_t\}$, tranne per i valori medi.

Bisogna però che Y_0 sia \mathcal{F}_0 -misurabile¹⁷, e soddisfi alcuni requisiti di integrabilità. Ad esempio

$$\tilde{Z}_t := \mathbb{E}[\exp\{\theta(Y_t - \mu t) - K(\theta)t\}]$$

è ancora una martingala a media costante uguale a $\mathbb{E}[\exp\{\theta Y_0\}]$, purché ovviamente tale valore medio sia finito.

Applicazione

Il processo di Wiener standard o moto Browniano W_t è una martingala, anche $M_t = W_t^2 - t$ e infine, per ogni θ reale

$$\tilde{Z}_t := \mathbb{E}[\exp\{\theta W_t - \frac{1}{2}\theta^2 t\}]$$

¹⁶Di nuovo misurabilità e integrabilità sono banali. Osservando che

$$\begin{aligned} Z_{t+s} &= \exp\{\theta(X_{t+s} - \mu(t+s)) - K(\theta)(t+s)\} \\ &= \exp\{\theta(X_t - \mu t) - K(\theta)t\} \exp\{\theta(X_{t+s} - X_t - \mu s) - K(\theta)s\} \\ &= Z_t \exp\{\theta(X_{t+s} - X_t - \mu s) - K(\theta)s\} \end{aligned}$$

si ottiene subito

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[Z_{t+s} - Z_t | \mathcal{F}_t] &= \mathbb{E}[Z_t (\exp\{\theta(X_{t+s} - X_t - \mu s) - K(\theta)s\} - 1) | \mathcal{F}_t] \\ &\quad \text{(per la misurabilità di } Z_t) \\ &= Z_t \mathbb{E}[(\exp\{\theta(X_{t+s} - X_t - \mu s) - K(\theta)s\} - 1) | \mathcal{F}_t] \\ &\quad \text{(per l'indipendenza degli incrementi da } \mathcal{F}_t) \\ &= Z_t \mathbb{E}[(\exp\{\theta(X_{t+s} - X_t - \mu s) - K(\theta)s\} - 1)] \\ &\quad \text{(per l'omogenità degli incrementi)} \\ &= Z_t \mathbb{E}[(\exp\{\theta(X_s - \mu s) - K(\theta)s\} - 1)] = Z_t (1 - 1) = 0 \end{aligned}$$

¹⁷In realtà la richiesta che Y_0 sia \mathcal{F}_0 -misurabile non è strettamente necessaria: nel caso in cui $\mathcal{F}_t = \mathcal{F}_t^X$ si potrebbe, in alternativa, cambiare la filtrazione e prendere la filtrazione definita da $\mathcal{F}_t \vee \sigma\{Y_0\}$. In questo caso infatti il processo $Y_0 + X_t$ viene automaticamente adattato alla nuova filtrazione. Inoltre $\{X_t\}$ è ancora una martingala rispetto alla nuova filtrazione, come si può vedere facilmente usando la proprietà dei condizionamenti ridondanti: infatti la σ -algebra $\mathcal{H} = \sigma\{Y_0\}$ è indipendente da $X = X_{t+s}$ e da $\mathcal{G} = \mathcal{F}_t$.

$$\mathbb{E}[X | \mathcal{G} \vee \mathcal{H}] = \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] \iff \mathbb{E}[X_{t+s} | \mathcal{F}_t \vee \sigma\{Y_0\}] = \mathbb{E}[X_{t+s} | \mathcal{F}_t] = X_t;$$

lo stesso discorso vale nel caso in cui si assuma Y_0 indipendente da $\mathcal{F}_t \supseteq \mathcal{F}_t^X$ per ogni t (e quindi anche dal processo $\{X_t\}$).

è una martingala¹⁸ a media 1, che viene detta ***martingala esponenziale***.

Si noti che W_t^2 è una submartingala (in quanto quadrato di una martingala) e che quindi $W_t^2 = M_t + t$. Anche il processo di Poisson N_t di parametro λ , essendo un processo crescente è una submartingala, e si può decomporre nella somma di una martingala $M_t := N_t - \lambda t$ e di un processo crescente $A_t = \lambda t$. Si tratta di casi particolari della decomposizione di Doob a tempo continuo. Altre applicazioni si potrebbero ottenere per i processi di Poisson composti.

Si ricordi che in generale data una v.a. Z non negativa e a media 1 in uno spazio $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, si può definire una nuova misura di probabilità \mathbb{Q} definita da

$$\mathbb{Q}(C) := \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[I_C Z], \quad C \in \mathcal{F}$$

Esercizio 6.1 (Un caso particolare del Teorema di Girsanov). Prese $Z = Z_T^\theta = \exp\{\theta W_T - \frac{1}{2}\theta^2 T\}$ e $\mathcal{F} = \mathcal{F}_T$ nell'espressione precedente, si trovi

1) la derivata di Radon-Nikodym

$$h_t = \left. \frac{d\mathbb{Q}}{d\mathbb{P}} \right|_{\mathcal{F}_t},$$

ovvero quella variabile aleatoria $h_t(\omega)$, \mathcal{F}_t -misurabile, tale che

$$\mathbb{Q}(A) = \int_A h_t(\omega) \mathbb{P}(d\omega), \quad \text{per ogni } A \in \mathcal{F}_t;$$

suggerimento: si veda l'esempio riguardante le martingale e le derivate di Radon-Nikodym.

soluzione: $\left. \frac{d\mathbb{Q}}{d\mathbb{P}} \right|_{\mathcal{F}_t} = \tilde{Z}_t$

2) la legge di W_t rispetto a \mathbb{Q} ,

suggerimento: basta capire che $\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[g(W_t)]$ si calcola equivalentemente come

$$\begin{aligned} \mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[g(W_t)] &= \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[g(W_t) \tilde{Z}_t] = \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[g(W_t) \exp\{\theta W_t - \frac{1}{2}\theta^2 t\}] \\ &= \int_{\mathbb{R}} g(w) \exp\{\theta w - \frac{1}{2}\theta^2 t\} \exp\{-\frac{1}{2t}w^2\} dw = \int_{\mathbb{R}} g(w) \exp\{-\frac{1}{2t}(w^2 - 2w\theta t + \theta^2 t^2)\} dw \\ &= \int_{\mathbb{R}} g(w) \exp\{-\frac{1}{2t}(w - \theta t)^2\} dw \end{aligned}$$

soluzione: la legge di W_t è $N(\theta t, t)$

3) le distribuzioni finito dimensionali di $(W_t, t \geq 0)$ rispetto a \mathbb{Q} .

suggerimento: si tratta di capire che $\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[g_1(W_{t_1})g_2(W_{t_2} - W_{t_1}) \cdots g_n(W_{t_n} - W_{t_{n-1}})]$ si

¹⁸Basta ricordare che $K(\theta)$ è definito dal fatto che $\exp\{K(\theta)\} = \mathbb{E}[\exp\{\theta(X_1 - \mu_1)\}]$. In questo caso quindi $\exp\{K(\theta)\} = \mathbb{E}[\exp\{\theta W_1\}] = \exp\{\frac{1}{2}\theta^2\}$, da cui $K(\theta) = \frac{1}{2}\theta^2$.

calcola come

$$\begin{aligned}
 & \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[g_1(W_{t_1})g_2(W_{t_2} - W_{t_1}) \cdots g_n(W_{t_n} - W_{t_{n-1}})Z_{t_n}] \\
 &= \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[g_1(W_{t_1})g_2(W_{t_2} - W_{t_1}) \cdots g_n(W_{t_n} - W_{t_{n-1}}) \prod_{k=1}^n \frac{Z_{t_k}}{Z_{t_{k-1}}}] \\
 &= \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[g_1(W_{t_1})g_2(W_{t_2} - W_{t_1}) \cdots g_n(W_{t_n} - W_{t_{n-1}}) \prod_{k=1}^n \exp\{(W_{t_k} - W_{t_{k-1}} - \frac{1}{2}\theta^2(t_k - t_{k-1}))\}] \\
 &= \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[\prod_{k=1}^n g_k(W_{t_k} - W_{t_{k-1}}) \exp\{(W_{t_k} - W_{t_{k-1}} - \frac{1}{2}\theta^2(t_k - t_{k-1}))\}] \\
 &= \prod_{i=1}^k \int_{\mathbb{R}} g(w_i - w_{i-1}) \exp\{-\frac{(w_i - w_{i-1} - \theta(t_i - t_{i-1}))^2}{2(t_i - t_{i-1})}\} dw_i.
 \end{aligned}$$

dove per convenzione si è posto $t_0 = 0$ e $w_0 = 0$.

soluzione: il processo $\{W_t\}$ diviene sotto \mathbb{Q} un processo di Wiener con drift θ .

6.7 Processi di Markov regolari

I processi di Markov regolari sono processi costruiti attraverso una **famiglia di probabilità di transizione regolari** $P(s, t, x, A)$, e attraverso una misura di probabilità μ_0 , detta (**misura delle**) **probabilità iniziali**.

Definizione 6.8 (Probabilità di transizione regolari). Una famiglia $P(s, t, x, A)$

$$P : (\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+)_+ \times \mathbb{R} \times \mathcal{B}(\mathbb{R}) \rightarrow [0, 1], (s, t, x, A) \rightarrow P(s, t, x, A),$$

dove

$$(\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+)_+ = \{(s, t) \in \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+, \text{ tali che } s \leq t\},$$

che soddisfa le seguenti proprietà:

(i) per ogni $0 \leq s \leq t$ ed $x \in \mathbb{R}$,

$$P(s, t, x, \cdot) : \mathcal{B}(\mathbb{R}) \rightarrow [0, 1], A \rightarrow P(s, t, x, A)$$

è una misura di probabilità,

(ii) per ogni $0 \leq s \leq t$ ed $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$,

$$P(s, t, \cdot, A) : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1], x \rightarrow P(s, t, x, A)$$

è una funzione misurabile,

(iii) la famiglia $P(\cdot, \cdot, \cdot, \cdot)$ soddisfa l'equazione di Chapman-Kolmogorov, cioè per ogni $0 \leq r \leq s \leq t$, per ogni $x \in \mathbb{R}$ e per ogni $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$ vale

$$P(r, t, x, A) = \int_{\mathbb{R}} P(r, s, x, dy) P(s, t, y, A),$$

viene detta **famiglia di probabilità di transizione regolari**.

Si noti che quindi necessariamente $P(t, t, x, A) = \delta_x(A)$, cioè vale 1 se $x \in A$ e vale 0 altrimenti e che le proprietà (i) e (ii) permettono di dare senso all'integrale in (iii).

Osservazione 6.1. E' interessante notare che l'equazione di Chapman-Kolmogorov, nel caso in cui $P(s, t, x, \cdot)$ ammette densità, ovvero

$$P(s, t, x, A) = \int_A p(s, t, x, y) dy,$$

diviene

$$\int_A p(r, t, x, z) dz = \int_{\mathbb{R}} p(r, s, x, y) dy \int_A p(s, t, y, z) dz = \int_A \left(\int_{\mathbb{R}} p(r, s, x, y) p(s, t, y, z) dy \right) dz,$$

ovvero

$$p(r, t, x, z) = \int_{\mathbb{R}} p(r, s, x, y) p(s, t, y, z) dy.$$

Attraverso le probabilità di transizioni regolari e la probabilità iniziale, si può definire una famiglia di funzioni di distribuzione finito dimensionale nel seguente modo: si definiscano, per $0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_k$, e per $(z_0, z_1, \dots, z_k) \in \mathbb{R}^{k+1}$,

$$F_{0, t_1, \dots, t_k}(z_0, z_1, \dots, z_k) := \int_{-\infty}^{z_0} \int_{-\infty}^{z_1} \dots \int_{-\infty}^{z_k} \mu_0(dx_0) P(0, t_1, x_0, dy_1) P(t_1, t_2, y_1, dy_2) \dots \dots P(t_{k-2}, t_{k-1}, y_{k-2}, dy_{k-1}) P(t_{k-1}, t_k, y_{k-1}, dy_k),$$

ed

$$F_{t_1, \dots, t_k}(z_1, \dots, z_k) := \lim_{z \rightarrow \infty} F_{0, t_1, \dots, t_k}(z, z_1, \dots, z_k),$$

Se invece non vale $0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_k$, si definiscono attraverso un'opportuna permutazione π per la quale $0 \leq t_{\pi_1} \leq \dots \leq t_{\pi_k}$ ed in modo che valga la condizione di consistenza **(C1)**.

La proprietà (iii), ovvero l'equazione di Chapman-Kolmogorov, permette di verificare immediatamente la condizione di consistenza **(C2')**¹⁹. La famiglia di distribuzioni finito-dimensionali così ottenute soddisfa quindi le proprietà di consistenza del teorema di Kolmogorov, e pertanto esiste un processo con queste distribuzioni finito-dimensionali. Un processo le cui distribuzioni finito-dimensionali si possono ottenere attraverso una famiglia di probabilità di transizione regolare e una probabilità iniziale come sopra, viene detto **processo di Markov regolare**.

¹⁹Nel caso con densità la verifica è simile a quella del caso dei processi ad incrementi indipendenti ed omogenei:

Esempio 6.4. *Il processo di Wiener ed il processo di Poisson sono processi Markoviani in questo senso con $\mu_0 = \delta_{\{0\}}$ per entrambi i processi e*

$$P(s, t, x, dy) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(t-s)}} \exp\left\{-\frac{(y-x)^2}{2(t-s)}\right\} dy$$

per il processo di Wiener,

$$P(s, t, n, \{m\}) = \frac{(\lambda(t-s))^{n-m}}{(n-m)!} \exp\{-\lambda(t-s)\}, \quad 0 \leq m \leq n$$

per il processo di Poisson.

si prendano $k \geq 1$ e $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < t_{k+1}$, allora

$$\begin{aligned} & \lim_{x \rightarrow \infty} F_{0, t_1, \dots, t_{i-1}, t_i, t_{i+1}, \dots, t_{k+1}}(x_0, x_1, \dots, x_{i-1}, x, x_{i+1}, \dots, x_{k+1}) \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{x_0} \int_{-\infty}^{x_1} \dots \int_{-\infty}^{x_{i-1}} \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^{x_{i+1}} \dots \int_{-\infty}^{x_{k+1}} \mu_0(dy_0) p(0, t_1, y_0, y_1) \dots p(t_{i-2}, t_{i-1}, y_{i-2}, y_{i-1}) \\ & \quad p(t_{i-1}, t_i, y_{i-1}, y_i) p(t_i, t_{i+1}, y_i, y_{i+1}) \dots p(t_k, t_{k+1}, y_k, y_{k+1}) dy_1 \dots dy_{i-1} dy_i dy_{i+1} \dots dy_{k+1} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{x_0} \mu_0(dy_0) \int_{-\infty}^{x_1} p(0, t_1, y_0, y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_{i-1}} p(t_{i-2}, t_{i-1}, y_{i-2}, y_{i-1}) dy_{i-1} \\ & \quad \int_{-\infty}^{x_{i+1}} \left(\int_{-\infty}^x p(t_{i-1}, t_i, y_{i-1}, y_i) p(t_i, t_{i+1}, y_i, y_{i+1}) dy_i \right) dy_{i+1} \dots \int_{-\infty}^{x_{k+1}} p(t_k, t_{k+1}, y_k, y_{k+1}) dy_{k+1} = \\ &= \int_{-\infty}^{x_0} \mu_0(dy_0) \int_{-\infty}^{x_1} p(0, t_1, y_0, y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_{i-1}} p(t_{i-2}, t_{i-1}, y_{i-2}, y_{i-1}) dy_{i-1} \\ & \quad \int_{-\infty}^{x_{i+1}} \left(\int_{-\infty}^x p(t_{i-1}, t_i, y_{i-1}, y_i) p(t_i, t_{i+1}, y_i, y_{i+1}) dy_i \right) dy_{i+1} \dots \int_{-\infty}^{x_{k+1}} p(t_k, t_{k+1}, y_k, y_{k+1}) dy_{k+1} \\ &= \int_{-\infty}^{x_0} \mu_0(dy_0) \int_{-\infty}^{x_1} p(0, t_1, y_0, y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_{i-1}} p(t_{i-2}, t_{i-1}, y_{i-2}, y_{i-1}) dy_{i-1} \\ & \quad \int_{-\infty}^{x_{i+1}} p(t_{i-1}, t_{i+1}, y_{i-1}, y_{i+1}) dy_{i+1} \dots \int_{-\infty}^{x_{k+1}} p(t_k, t_{k+1}, y_k, y_{k+1}) dy_{k+1} \\ &= F_{0, t_1, \dots, t_{i-1}, t_{i+1}, \dots, t_{k+1}}(x_0, x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_{k+1}), \quad \text{per } i = 1, \dots, k. \end{aligned}$$

Nella penultima uguaglianza si è tenuto conto dell'equazione di Chapman-Kolmogorov. Il caso $i = 0$ è verificato per definizione. Infine

$$\begin{aligned} & \lim_{x \rightarrow \infty} F_{0, t_1, \dots, t_k, t_{k+1}}(x_0, x_1, \dots, x_k, x) \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{x_0} \int_{-\infty}^{x_1} \dots \int_{-\infty}^{x_k} \int_{-\infty}^x \mu_0(dy_0) p(0, t_1, y_0, y_1) \dots p(t_{k-1}, t_k, y_{k-1}, y_k) p(t_k, t_{k+1}, y_k, y) dy_0 dy_1 \dots dy_k dy \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{x_0} \mu_0(dy_0) \int_{-\infty}^{x_1} p(0, t_1, y_0, y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_k} p(t_{k-1}, t_k, y_{k-1}, y_k) dy_k \int_{-\infty}^x \dots p(t_k, t_{k+1}, y_k, y) dy \\ &= \int_{-\infty}^{x_0} \mu_0(dy_0) \int_{-\infty}^{x_1} p(0, t_1, y_0, y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_k} p(t_{k-1}, t_k, y_{k-1}, y_k) dy_k \int_{-\infty}^{\infty} \dots p(t_k, t_{k+1}, y_k, y) dy \\ &= \int_{-\infty}^{x_0} \mu_0(dy_0) \int_{-\infty}^{x_1} p(0, t_1, y_0, y_1) dy_1 \dots \int_{-\infty}^{x_k} p(t_{k-1}, t_k, y_{k-1}, y_k) dy_k = F_{0, t_1, \dots, t_k}(x_0, x_1, \dots, x_k), \end{aligned}$$

Esempio 6.5. *In entrambi i casi dell'esempio precedente $P(s, t, x, A)$ dipende solo dalla differenza $t - s$. Più in generale ogni volta che $P(s, t, x, A) = P(s + h, t + h, x, A) = P(0, t - s, x, A)$ per ogni s, t, h, x, A , si parla di processo di Markov omogeneo (nel tempo). Inoltre se per ogni s, t, h, x, z, y ,*

$$P(s, t, x, (-\infty, z]) = P(s + h, t + h, x + y, (-\infty, z + y]), \quad (6.7)$$

allora in realtà si tratta di esempi di processi a incrementi indipendenti ed omogenei (con $X_0 = 0$, se μ_0 è la misura concentrata in 0) Nel caso generale la famiglia delle distribuzioni finito-dimensionali così ottenuta coincide con la famiglia delle distribuzioni finito-dimensionali di un processo $(X'_t)_{t \geq 0}$, con

$$X'_t = Y_0 + X_t,$$

dove $(X_t)_{t \geq 0}$ è un processo ad incrementi indipendenti ed omogenei con $X_0 = 0$, ed Y_0 è una variabile aleatoria con funzione di distribuzione $F_0(y) = \mu_0((-\infty, y])$, indipendente dal processo $(X_t)_{t \geq 0}$.

Per verificare le precedenti affermazioni si osservi che, prendendo $h = -s$ ed $y = -x$ nella formula (6.7) si ottiene

$$P(s, t, x, (-\infty, z]) = P(0, t - s, 0, (-\infty, z - x]),$$

allora basta porre

$$F_u(z) = P(0, u, 0, (-\infty, z]).$$

Sempre nel caso con densità, ovvero nel caso in cui $F_u(z) = \int_{-\infty}^z q_u(y) dy$, l'equazione di Chapman-Kolmogorov diviene

$$q_{t-r}(z - x) = \int_{\mathbb{R}} q_{s-r}(y - x) q_{t-s}(z - y) dy$$

ovvero, ponendo $s - r = u$, $t - s = v$, $\zeta = z - x$ ed $\eta = y - x$,

$$q_{u+v}(\zeta) = \int_{\mathbb{R}} q_u(\eta) q_v(\zeta - \eta) d\eta, \quad \text{ovvero} \quad q_{u+v} = q_u * q_v,$$

che è esattamente la condizione di compatibilità già incontrata per i processi ad incrementi indipendenti ed omogenei, e ciò dimostra che la famiglia markoviana di distribuzioni finito-dimensionali definita con $\mu_0 = \delta_0$, e quella definita per i processi ad incrementi indipendenti ed omogenei, sono le stesse, ovvero che $(X_t)_{t \geq 0}$ è un processo di quest'ultimo tipo.

Infine per mostrare che le distribuzioni finito-dimensionali del processo $(X'_t)_{t \geq 0}$ sono quelle

della famiglia markoviana, osserviamo che nel caso in cui $\mu_0(dy) = p_0(y)dy$, si ottiene

$$\begin{aligned}
 & \mathbb{P}(X'_0 \leq z_0, X'_{t_1} \leq z_1, \dots, X'_{t_k} \leq z_k) \\
 &= \mathbb{P}(Y_0 \leq z_0, Y_0 + X_{t_1} \leq z_1, \dots, Y_0 + X_{t_k} \leq z_k) \\
 &= \int_{-\infty}^{z_0} \mathbb{P}(Y_0 \in dx_0) \mathbb{P}(Y_0 + X_{t_1} \leq z_1, \dots, Y_0 + X_{t_k} \leq z_k | Y_0 = x_0) \\
 &= \int_{-\infty}^{z_0} \mathbb{P}(Y_0 \in dx_0) \mathbb{P}(X_{t_1} \leq z_1 - x_0, \dots, X_{t_k} \leq z_k - x_0 | Y_0 = x_0) \\
 &\quad \text{(per l'indipendenza di } (X_t)_{t \geq 0} \text{ ed } Y_0) \\
 &= \int_{-\infty}^{z_0} \mathbb{P}(Y_0 \in dx_0) \mathbb{P}(X_{t_1} \leq z_1 - x_0, \dots, X_{t_k} \leq z_k - x_0) \\
 &= \int_{-\infty}^{z_0} p_{Y_0}(x_0) dx_0 \int_{-\infty}^{z_1 - x_0} \dots \int_{-\infty}^{z_k - x_0} p_{X_{t_1}, \dots, X_{t_k}}(y'_1, \dots, y'_k) dy'_1 \dots, dy'_k \\
 &\quad \text{(posto } y_i = y'_i + x_0) \\
 &= \int_{-\infty}^{z_0} p_{Y_0}(x_0) dx_0 \int_{-\infty}^{z_1} \dots \int_{-\infty}^{z_k} p_{X_{t_1}, \dots, X_{t_k}}(y_1 - x_0, \dots, y_k - x_0) dy_1 \dots, dy_k \\
 &= \int_{-\infty}^{z_0} \int_{-\infty}^{z_1} \dots \int_{-\infty}^{z_k} p_0(x_0) dx_0 q_{t_1}(y_1 - x_0) dy_1 q_{t_2 - t_1}(y_2 - y_1) dy_2 \dots \\
 &\quad \dots q_{t_{k-1}, t_{k-2}}(y_{k-1} - y_{k-2}) dy_{k-1} q_{t_k - t_{k-1}}(y_k - y_{k-1}) dy_k, \\
 &=: F_{0, t_1, \dots, t_k}(z_0, z_1, \dots, z_k).
 \end{aligned}$$

6.7.1 Processo di Ornstein-Ulhenbeck

Si consideri la famiglia delle probabilità di transizione con densità, definita da

$$P(s, t, x, dy) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 \frac{1-e^{-2\lambda(t-s)}}{2\lambda}}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(y - e^{-\lambda(t-s)}x)^2}{\sigma^2 \frac{1-e^{-2\lambda(t-s)}}{2\lambda}}\right\} dy.$$

Si può dimostrare che $P(s, t, x, dy)$ definisce una famiglia di probabilità di transizione regolare (gaussiana). Inoltre si potrebbe dimostrare che, se Y_0 è una variabile aleatoria con distribuzione μ_0 , indipendente da un processo di Wiener standard $(W_t)_{t \geq 0}$, allora la famiglia di distribuzioni finito dimensionali ottenute tramite $P(s, t, x, dy)$ e la distribuzione iniziale μ_0 , ha le stesse distribuzioni finito dimensionali del processo

$$X_t := e^{-\lambda t} Y_0 + \sigma W_t - \int_0^t \sigma \lambda e^{-\lambda(t-s)} W_s ds.$$

Si noti che l'integrale ha senso purché si prenda la versione a traiettorie continue del processo di Wiener standard²⁰.

²⁰Vale la pena ricordare che di solito questo processo viene introdotto dopo aver parlato dell'integrale stocastico rispetto al processo di Wiener. Riscrivendo

$$\sigma W_t - \int_0^t \sigma \lambda e^{-\lambda(t-s)} W_s ds = \sigma e^{-\lambda t} \left(e^{\lambda t} W_t - \int_0^t \lambda e^{\lambda s} W_s ds \right),$$

È inoltre interessante notare che, se $Y_0 = x$, cioè se Y_0 è una variabile aleatoria degenera, allora $X_t := e^{-\lambda t}x + \sigma W_t - \int_0^t \sigma \lambda e^{-\lambda(t-s)} W_s ds$ è un processo gaussiano²¹, di valore atteso $m(t) = e^{-2\lambda t}x$ e funzione di covarianza

$$K(s, t) = \mathbb{E} \left[\left(\sigma W_t - \int_0^t \sigma \lambda e^{-\lambda(t-u)} W_u du \right) \left(\sigma W_s - \int_0^s \sigma \lambda e^{-\lambda(s-u)} W_u du \right) \right].$$

Con un po' di calcoli si può controllare che

$$K(s, t) = \frac{\sigma^2}{2\lambda} (e^{-\lambda|t-s|} - e^{-\lambda(t+s)}),$$

ed in particolare quindi

$$Var(X_t) = K(t, t) = \frac{\sigma^2}{2\lambda} (1 - e^{-2\lambda t})$$

Nel caso in cui $\lambda > 0$, quando t va all'infinito, allora chiaramente $\mathbb{E}[X_t] = m(t) = e^{-2\lambda t}x$ converge a zero e la varianza $Var(X_t) = K(t, t)$ converge a $\frac{\sigma^2}{2\lambda}$. Di conseguenza la legge unidimensionale del processo $(X_t)_{t \geq 0}$ converge in distribuzione ad una legge gaussiana $N(0, \frac{\sigma^2}{2\lambda})$.

Questa legge gode di una interessante proprietà: che se la legge iniziale μ_0 è appunto una legge gaussiana $N(0, \frac{\sigma^2}{2\lambda})$, cioè $\mu_0(dx) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \frac{\sigma^2}{2\lambda}}} \exp\{-\frac{x^2}{2 \frac{\sigma^2}{2\lambda}}\} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \sigma^2}} \exp\{-\frac{\lambda}{\sigma^2} x^2\}$, allora la legge

e interpretando la formula tra parentesi come un'integrazione per parti

$$e^{\lambda t} W_t - \int_0^t W_s d e^{\lambda s} =: \int_0^t e^{\lambda s} dW_s,$$

si può riscrivere

$$X_t := e^{-\lambda t} \left(Y_0 + \sigma \int_0^t e^{\lambda s} dW_s \right),$$

o in forma differenziale (stocastica)

$$dX_t = \lambda X_t dt + \sigma dW_t.$$

Per poter dare un senso più preciso a questa espressione, tuttavia andrebbe prima visto il significato dell'integrale stocastico.

²¹Il fatto che sia gaussiano dipende dal fatto che l'integrale $\int_0^t e^{-\lambda(t-s)} W_s ds = e^{-\lambda t} \int_0^t e^{\lambda s} W_s ds$ si può ottenere come limite delle somme di Riemann

$$e^{-\lambda t} \sum_{k=1}^n e^{\lambda s_k} W_{s_k} (s_k - s_{k-1}),$$

che sono variabili aleatorie gaussiane, e tenendo conto del fatto che il limite (in distribuzione) di variabili aleatorie gaussiane è ancora una variabile aleatoria gaussiana, purché valore atteso e varianza convergano.

di X_t è ancora una legge gaussiana $N(0, \frac{\sigma^2}{2\lambda})$, ovvero:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(X_t \in A) &= \int_{\mathbb{R}} \mu_0(dx) \int_A p(0, t, x, y) dy \\ &= \int_{\mathbb{R}} \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{\lambda}{\sigma^2}x^2\right\} dx \int_A \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2\frac{1-e^{-2\lambda t}}{2\lambda}}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(y-e^{-\lambda t}x)^2}{\sigma^2\frac{1-e^{-2\lambda t}}{2\lambda}}\right\} dy \\ &= \int_A \left(\int_{\mathbb{R}} \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{\lambda}{\sigma^2}x^2\right\} \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}} \exp\left\{-\frac{\lambda(y-e^{-\lambda t}x)^2}{\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}\right\} dx \right) dy \\ &= \int_A \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{\lambda}{\sigma^2}y^2\right\} dy, . \end{aligned}$$

per ogni A boreliano²².

Questo esempio porta a dare la definizione di distribuzione stazionaria.

Definizione 6.9 (Distribuzione stazionaria). *Sia μ una distribuzione tale che*

$$\int_{\mathbb{R}} \mu(dx) P(s, t, x, A) = \mu(A)$$

*allora μ viene detta **distribuzione stazionaria** o **invariante** del processo di Markov regolare determinato dalle probabilità di transizione $P(s, t, x, A)$.*

Si può dimostrare che se $\mu_0 = \mu$ è una distribuzione stazionaria, allora le distribuzioni finito-dimensionali godono della proprietà di stazionarietà

Definizione 6.10 (Processi stazionari). *Se per ogni $h > 0$, k , (t_1, \dots, t_k) e (z_1, \dots, z_k) la famiglia di distribuzioni finito-dimensionali $F_{t_1, \dots, t_k}(z_1, \dots, z_k)$ gode della proprietà che*

$$F_{t_1, \dots, t_k}(z_0, z_1, \dots, z_k) = F_{t_1+h, \dots, t_k+h}(z_0, z_1, \dots, z_k)$$

*allora F_{0, t_1, \dots, t_k} è detta una famiglia di distribuzioni finito-dimensionali stazionarie, e il processo con tale famiglia di distribuzioni finito-dimensionali è detto un **processo stazionario***

²²L'ultima uguaglianza deriva dal fatto che, la densità di X_t è data dall'espressione tra parentesi, ovvero da

$$\begin{aligned} &\sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2}} \int_{\mathbb{R}} \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\pi\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}} \exp\left\{-\left(\frac{\lambda(y-e^{-\lambda t}x)^2}{\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})} + \frac{\lambda x^2(1-e^{-2\lambda t})}{\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}\right)\right\} dx \\ &= \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2}} \int_{\mathbb{R}} \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\pi\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}} \exp\left\{-\frac{\lambda}{\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}((y-e^{-\lambda t}x)^2 + x^2(1-e^{-2\lambda t}))\right\} dx \\ &= \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2}} \int_{\mathbb{R}} \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\pi\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}} \exp\left\{-\frac{\lambda(y^2 - 2ye^{-\lambda t}x + e^{-2\lambda t}x^2 + x^2 - x^2e^{-2\lambda t})}{\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}\right\} dx \\ &= \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2}} \int_{\mathbb{R}} \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\pi\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}} \exp\left\{-\frac{\lambda(x^2 - 2xye^{-\lambda t} + y^2)}{\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}\right\} dx \\ &= \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2}} \int_{\mathbb{R}} \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\pi\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}} \exp\left\{-\frac{\lambda(x^2 - 2xye^{-\lambda t} + y^2e^{-2\lambda t})}{\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}\right\} \exp\left\{-\frac{\lambda(-y^2e^{-2\lambda t} + y^2)}{\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}\right\} dx \\ &= \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{\lambda}{\sigma^2}y^2\right\} \int_{\mathbb{R}} \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\pi\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}} \exp\left\{-\frac{\lambda(x-ye^{-\lambda t})^2}{\sigma^2(1-e^{-2\lambda t})}\right\} dx = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{\lambda}{\sigma^2}y^2\right\}. \end{aligned}$$

6.7.2 Moto browniano geometrico e modello di Black-Scholes

Il prossimo esempio è di fondamentale importanza nell'ambito dei modelli finanziari. Il **modello proposto da Black e Scholes** è un modello a tempo continuo con una azione rischiosa (una azione di prezzo S_t all'istante t) e una azione non rischiosa (di prezzo B_t all'istante t). Si suppone che l'evoluzione di B_t sia descritta dall'equazione differenziale seguente

$$dB_t = rB_t dt,$$

dove r è una costante positiva. Questo significa che il tasso di interesse è costante e uguale a r . Se $B_0 = 1$, allora ovviamente $B_t = e^{rt}$, per $t \geq 0$.

Si suppone che il prezzo dell'azione sia descritto²³ dal processo

$$S_t = S_0 \exp \left\{ \mu t - \frac{\sigma^2}{2} t + \sigma W_t \right\}.$$

dove μ e σ sono due costanti e $(W_t)_t$ è un moto browniano standard, ed S_0 è una variabile aleatoria indipendente da $(W_t)_t$.

Tale processo è detto **moto browniano geometrico**.

Il modello è studiato sull'intervallo $[0, T]$, dove T è la data di scadenza dell'opzione da studiare. In particolare, risulta che la legge di S_t è una legge log-normale, vale a dire che il suo logaritmo segue una legge normale.

Il processo $(S_t)_t$ è una trasformazione biunivoca di un processo di Markov, infatti

$$Y_t = \log(S_t) = \log(S_0) + \sigma W_t + \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)t$$

è un processo ad incrementi indipendenti ed omogenei, con

$$Y_0 = \log(S_0),$$

e con

$$X_t := \sigma W_t + \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)t$$

un processo di Wiener, non standard, con coefficiente di drift $\mu' = \mu - \frac{\sigma^2}{2}$ e coefficiente di diffusione σ^2 . Tenendo conto di questo fatto si può affermare immediatamente che il processo $(S_t)_t$ verifica le seguenti proprietà:

- continuità delle traiettorie;

²³Di solito si introduce il processo del prezzo S_t come la soluzione dell'equazione differenziale stocastica

$$dX_t = X_t(\mu dt + \sigma dW_t), \quad X_0 = S_0,$$

che si risolve esplicitamente:

$$X_t = S_0 \exp \left\{ \mu t - \frac{\sigma^2}{2} t + \sigma W_t \right\}.$$

Di nuovo per capire bene il senso dell'equazione differenziale stocastica precedente andrebbe prima chiarito il significato dell'integrale stocastico e del differenziale stocastico.

- se $u \leq t$, S_t/S_u è indipendente da $\mathcal{F}_u^S = \sigma(S_v, v \leq u)$;
- se $u \leq t$, la legge di $(S_t - S_u)/S_u$ è identica a quella di $(S_{t-u} - S_0)/S_0$.

La prima proprietà è banale. Per verificare le altre due proprietà basta osservare che

$$S_t/S_u = \exp\{Y_t - Y_u\} = \exp\{\sigma(W_t - W_u) + (\mu - \frac{\sigma^2}{2})(t - u)\},$$

che $\mathcal{F}_u = \mathcal{F}_u^S = \mathcal{F}_u^W \vee \sigma(S_0)$ e che $(W_t - W_u)$ è indipendente da \mathcal{F}_u^W e da $\sigma(S_0)$ ed ha la stessa legge di $(W_{t-u} - W_0) = W_{t-u}$.

Inoltre il processo $(S_t)_t$ risulta esso stesso un processo di Markov regolare: per $x_i > 0$, $i = 0, 1, \dots, k$

$$\begin{aligned} F_{S_0, S_1, \dots, S_k}(x_0, x_1, \dots, x_k) &= \mathbb{P}(S_0 \leq x_0, S_{t_1} \leq x_1, \dots, S_{t_k} \leq x_k) \\ &= \mathbb{P}(Y_0 \leq \log(x_0), Y_{t_1} \leq \log(x_1), \dots, Y_{t_k} \leq \log(x_k)) \\ &= \int_{-\infty}^{\log(x_0)} \int_{-\infty}^{\log(x_1)} \dots \int_{-\infty}^{\log(x_k)} p_{Y_0, Y_{t_1}, \dots, Y_{t_k}}(y_0, y_1, \dots, y_k) dy_0 dy_1 \dots dy_k \\ &= \int_{-\infty}^{\log(x_0)} \int_{-\infty}^{\log(x_1)} \dots \int_{-\infty}^{\log(x_k)} p_{Y_0}(y_0) \prod_{i=1}^k \frac{1}{\sqrt{2\pi((t_i - t_{i-1}))}} e^{-\frac{(y_i - y_{i-1} - \mu'(t_i - t_{i-1}))^2}{2(t_i - t_{i-1})}} dy_0 dy_1 \dots dy_k \end{aligned}$$

di conseguenza la densità congiunta di $(S_0, S_{t_1}, \dots, S_{t_k})$ si ottiene derivando rispetto a x_0, x_1, \dots, x_k la precedente espressione:

$$\begin{aligned} p_{S_0, S_{t_1}, \dots, S_{t_k}}(x_0, x_1, \dots, x_k) &= \frac{\partial^n}{\partial x_0 \partial x_1 \dots \partial x_k} F_{S_0, S_1, \dots, S_k}(x_0, x_1, \dots, x_k) \\ &= p_{Y_0, Y_{t_1}, \dots, Y_{t_k}}(\log(x_0), \log(x_1), \dots, \log(x_k)) \frac{1}{x_0} \frac{1}{x_1} \dots \frac{1}{x_k} \\ &= \frac{p_{Y_0}(\log(x_0))}{x_0} \prod_{i=1}^k \frac{1}{x_i \sqrt{2\pi(t_i - t_{i-1})}} e^{-\frac{(\log(x_i) - \log(x_{i-1}) - \mu'(t_i - t_{i-1}))^2}{2(t_i - t_{i-1})}}. \end{aligned}$$

La densità risulta evidentemente nulla se una delle x_i non è strettamente positiva.

Da ciò risulta evidente che le probabilità di transizione ammettono la seguente densità

$$p(s, t, x, y) = \frac{1}{y \sqrt{2\pi(t - s)}} \exp\left\{-\frac{(\log(y) - \log(x) - \mu'(t - s))^2}{2(t - s)}\right\}.$$

E infine facile vedere che queste densità di probabilità di transizione verificano l'equazione di Chapman-Kolmogorov in quanto ci si riporta immediatamente attraverso un cambio di variabile al caso delle densità di probabilità di transizione del processo Y_t .

La formula di Black-Scholes permette di calcolare in modo esplicito il prezzo di un'opzione call europea. Si indichi con $C_0(x)$ il prezzo dell'opzione emessa al tempo 0 con la condizione $S_0 = x$. Si ponga

$$Z_t^\theta = \exp\left\{-\frac{1}{2}\theta^2 t + \theta W_t\right\}$$

che è una martingala esponenziale con $\mathbb{E}[Z_t^\theta] = 1$.

Se si prende $\theta = \frac{r-\mu}{\sigma}$ per il Teorema di Girsanov (vedere l'Esercizio 6.1) il processo scontato dei prezzi $(\tilde{S}_t = \frac{S_t}{B_t} = e^{-rt}S_t)_t$ è una martingala²⁴ rispetto alla misura

$$\mathbb{Q}(A) = \mathbb{Q}^\theta(A) = \mathbb{E}^\mathbb{P}[\mathbb{I}_A Z_T^\theta], \quad A \in \mathcal{F}_T,$$

ovvero con $d\mathbb{Q} = Z_T^\theta d\mathbb{P}$. Estendendo la definizione data nel caso a tempo discreto, si ha quindi che la misura \mathbb{Q} è una **misura martingala equivalente** a \mathbb{P} .

Inoltre si ha che, per ogni t , la legge di $S_t = e^{rt}\tilde{S}_t$ rispetto a \mathbb{Q} la stessa²⁵ di $x \exp\{(r - \sigma^2/2)t + \sigma\sqrt{t}Z\}$, dove Z è una variabile aleatoria gaussiana standard $N(0, 1)$.

Quindi

$$\begin{aligned} C_0(x) &= e^{-rT} \mathbb{E}^\mathbb{Q} [(S_T - K)^+] \\ &= e^{-rT} \mathbb{E}^\mathbb{Q} \left[\left(x e^{(r - \frac{\sigma^2}{2})T + \sigma\sqrt{T}Z} - K \right)^+ \right]. \end{aligned}$$

²⁴Posto

$$\tilde{W}_t = \frac{\mu - r}{\sigma}t + W_t,$$

il processo

$$\tilde{S}_t = x \exp\left\{ \left(\mu - r - \frac{\sigma^2}{2} \right) t + \sigma W_t \right\}$$

si può riscrivere anche come

$$\tilde{S}_t = x \exp\left\{ -\frac{\sigma^2}{2}t + \sigma\tilde{W}_t \right\}$$

Rispetto alla misura di probabilità \mathbb{Q} il processo W_t risulta un processo di Wiener con coefficiente di drift θ , cioè equivalentemente

$$W_t = (W_t - \theta t) + \theta t = B_t + \theta t$$

con B_t un processo di Wiener standard rispetto a $\mathbb{Q} = \mathbb{Q}^\theta$. Di conseguenza

$$\tilde{W}_t = \frac{\mu - r}{\sigma}t + W_t = \frac{\mu - r}{\sigma}t + \theta t + B_t.$$

Prendendo quindi

$$\theta = -\frac{\mu - r}{\sigma} = \frac{r - \mu}{\sigma},$$

si ottiene che $\tilde{W}_t = B_t$ è un processo di Wiener standard rispetto a $\mathbb{Q} = \mathbb{Q}^\theta$. A questo punto si osserva che, proprio per questo motivo,

$$\tilde{S}_t = x \exp\left\{ -\frac{\sigma^2}{2}t + \sigma\tilde{W}_t \right\}$$

è rispetto alla misura \mathbb{Q} una martingala esponenziale ovvero

$$\tilde{S}_t = x \tilde{Z}_t^\sigma = x \exp\left\{ -\frac{\sigma^2}{2}t + \sigma\tilde{W}_t \right\}, \tag{6.8}$$

si tratta di applicare il risultato dell'Esercizio 6.1 con \mathbb{Q} al posto di \mathbb{P} , \tilde{W}_t al posto di W_t ed infine σ al posto di θ .

²⁵L'uguaglianza in legge si vede dall'espressione del prezzo scontato (6.8), e tenendo conto del fatto che la legge della variabile aleatoria \tilde{W}_t rispetto a \mathbb{Q} è $N(0, t)$ e che anche la legge di $\sqrt{t}Z$ ha legge $N(0, t)$, se Z ha legge $N(0, 1)$. È importante sottolineare che ovviamente ciò vale solo come variabili aleatorie e non vale come processi.

La speranza matematica a destra vale

$$e^{-rT} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(x e^{(r-\frac{\sigma^2}{2})T + \sigma\sqrt{T}z} - K \right)^+ e^{-z^2/2} dz.$$

L'integrando si annulla per $z \leq \zeta$, dove

$$\zeta = \frac{1}{\sigma\sqrt{T}} \left(\log \frac{K}{x} - \left(r - \frac{\sigma^2}{2} \right) T \right),$$

e quindi

$$C_0(x) = \frac{e^{-rT}}{\sqrt{2\pi}} \int_{\zeta}^{+\infty} \left(x e^{(r-\frac{\sigma^2}{2})T + \sigma\sqrt{T}z} - K \right) e^{-z^2/2} dz.$$

Se si indica con Φ la funzione di ripartizione della legge $\mathcal{N}(0, 1)$,

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-x}^{+\infty} e^{-z^2/2} dz,$$

allora

$$\begin{aligned} C_0(x) &= \frac{x}{\sqrt{2\pi}} \int_{\zeta}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}(z-\sigma\sqrt{T})^2} dz - K e^{-rT} \Phi(-\zeta) \\ &= \frac{x}{\sqrt{2\pi}} \int_{\zeta-\sigma\sqrt{T}}^{+\infty} e^{-z^2/2} dz - K e^{-rT} \Phi(-\zeta) \\ &= x \Phi \left(-\zeta + \sigma\sqrt{T} \right) - K e^{-rT} \Phi(-\zeta). \end{aligned}$$

In conclusione si ottiene la *formula di Black-Scholes*

$$C_0(x) = x \Phi \left(-\zeta + \sigma\sqrt{T} \right) - K e^{-rT} \Phi(-\zeta).$$

Per ulteriori approfondimenti consultare ([1]) e ([?]).

Mediante la formula di Black-Scholes, possiamo ricavare il prezzo equo di un'opzione call europea. Tuttavia, grazie alla formula di parità (??) del Teorema ??, si ricava immediatamente anche il prezzo equo di una put europea P_t , dato da

$$P_t = C_t - S_t + K e^{-r(T-t)}.$$

La formula di Black-Scholes ha il pregio di essere semplice e di dipendere da tre parametri: r , μ e σ . L'unico parametro difficile da stimare è la volatilità σ^2 . Questo parametro gioca un ruolo importante nelle applicazioni. Per questo motivo, negli ultimi anni, è stato molto studiato, in statistica, a partire dall'osservazione di una traiettoria, il coefficiente di diffusione.

6.8 Appendice: variabili Gaussiane

Cominciamo con il definire una variabile aleatoria gaussiana standard unidimensionale:

Definizione 6.11. *Si dice che una variabile aleatoria reale Z è **gaussiana** di valore atteso μ e varianza σ^2 , se ammette densità*

$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right)^2 \right\}.$$

In questo caso si usa la notazione $Z \sim N(\mu, \sigma^2)$. Se $\mu = 0$ e $\sigma^2 = 1$ allora si dice che Z segue una **legge normale o gaussiana standard**.

Caso n -dimensionale: iniziamo con il caso di un vettore (colonna) aleatorio

$$Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_k \\ \dots \\ Y_n \end{pmatrix}$$

a componenti indipendenti e tutte gaussiane standard, ovvero il caso in cui

$$\begin{aligned} f_Y(\mathbf{y}) &= \prod_{i=1}^n f_{Y_i}(y_i) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} y_i^2 \right\} \\ &= \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right\} = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \mathbf{y}' \mathbf{y} \right\}. \end{aligned}$$

dove l'apice indica l'operazione di trasposizione, ovvero \mathbf{y}' è il vettore riga (y_1, y_2, \dots, y_n) .

È immediato verificare che $\mathbb{E}(Y_i) = 0$, $Var(Y_i) = 1$ e che $Cov(Y_i, Y_j) = 0$, per $i \neq j$.

Sia ora A una matrice non singolare e sia \mathbf{m} un vettore (colonna). Definiamo ora $Z = AY + \mathbf{m}$ e cerchiamo la sua densità. Sappiamo dai risultati generali che se Y ammette densità e $Z = \varphi(Y)$ con φ invertibile e con derivate continue, allora anche Z ammette densità:

$$f_Z(z) = f_Y(\varphi^{-1}(z)) \left| \det \left(\frac{\partial \varphi^{-1}(z)}{\partial z} \right) \right| = f_Y(\varphi^{-1}(z)) \frac{1}{\left| \det \left(\frac{\partial \varphi(y)}{\partial y} \right) \right|_{y=\varphi^{-1}(z)}}$$

di conseguenza, poiché nel nostro caso $\varphi(y) = Ay + \mathbf{m}$ e $\varphi^{-1}(z) = A^{-1}(z - \mathbf{m})$

$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^n} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (A^{-1}(z - \mathbf{m}))' A^{-1}(z - \mathbf{m}) \right\} \frac{1}{|\det(A)|}.$$

Essendo

$$\begin{aligned} (A^{-1}(z - \mathbf{m}))' A^{-1}(z - \mathbf{m}) &= (z - \mathbf{m})' (A^{-1})' A^{-1}(z - \mathbf{m}) \\ &= (z - \mathbf{m})' (A')^{-1} A^{-1}(z - \mathbf{m}) = (z - \mathbf{m})' (AA')^{-1}(z - \mathbf{m}) \end{aligned}$$

si ottiene

$$f_Z(z) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \frac{1}{|\det(A)|} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (z - m)' (AA')^{-1} (z - m) \right\}.$$

La precedente espressione si basa sulle seguenti proprietà:

(i) $(A')^{-1} = (A^{-1})'$

in quanto

$$A'z = w \Leftrightarrow z = (A')^{-1}w$$

e inoltre

$$\begin{aligned} A'z = w &\Leftrightarrow (z'A)' = w \Leftrightarrow z'A = w' \Leftrightarrow z' = w'A^{-1} \\ &\Leftrightarrow z = (w'A^{-1})' \Leftrightarrow z = (A^{-1})'w. \end{aligned}$$

(ii) $(AA')^{-1} = (A')^{-1} A^{-1}$

in quanto

$$(AA')^{-1}z = w \Leftrightarrow z = AA'w \Leftrightarrow A^{-1}z = A'w \Leftrightarrow (A')^{-1}A^{-1}z = w.$$

È interessante notare che sia il vettore \mathbf{m} che la matrice $AA' = A'A$ hanno una interpretazione probabilistica:

$$\mathbb{E}(Z_i) = \mathbb{E}\left(\sum_{k=1}^n a_{k,i}Y_k\right) + m_i = \sum_{k=1}^n a_{k,i}\mathbb{E}(Y_k) + m_i = m_i$$

$$\text{Cov}(Z_i, Z_j) = \mathbb{E}[(Z_i - m_i)(Z_j - m_j)] = \mathbb{E}\left[\sum_{k=1}^n a_{i,k}Y_k \sum_{h=1}^n a_{j,h}Y_h\right] = \sum_{k=1}^n \sum_{h=1}^n a_{i,k}a_{j,h}\mathbb{E}[Y_kY_h]$$

e quindi

$$\text{Cov}(Z_i, Z_j) = \sum_{k=1}^n a_{i,k}a_{j,k}\mathbb{E}[Y_kY_k] + \sum_{k=1}^n \sum_{h \neq k}^{1,n} a_{i,k}a_{j,h}\mathbb{E}[Y_kY_h] = \sum_{k=1}^n a_{i,k}a_{j,k} = (AA')_{i,j}$$

Infine sia Z una variabile aleatoria $\mathcal{N}(0, 1)$, si ottiene che $\mathbb{E}[Z^{2k}] = (2k - 1)!! = (2k - 1)(2k - 3) \cdots 5 \cdot 3 \cdot 1$ mentre $\mathbb{E}[Z^{2k+1}] = 0$ e infine $\mathbb{E}[|Z|^{2k} + 1] = \sqrt{\frac{2}{\pi}}(2k)!! = \sqrt{\frac{2}{\pi}}(2k)(2k - 2) \cdots 4 \cdot 2 = \sqrt{\frac{2}{\pi}}2^k k!$. Le prime due uguaglianze dipendono dal fatto che

$$\mathbb{E}[e^{uZ}] = e^{\frac{u^2}{2}} = \sum_{h=0}^{\infty} \frac{1}{h!} u^{2h}$$

e d'altra parte, essendo ovviamente, per ragioni di simmetria, $\mathbb{E}[Z^{2k+1}] = 0$,

$$\mathbb{E}[e^{uZ}] = \mathbb{E}\left[\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} u^k Z^k\right] = \sum_{h=0}^{\infty} \frac{1}{(2h)!} u^{2h} \mathbb{E}[Z^{2h}]$$

si deve necessariamente avere che i coefficienti delle due serie devono coincidere:

$$\frac{1}{h!} = \frac{1}{(2h)!} \mathbb{E}[Z^{2h}],$$

ovvero

$$\mathbb{E}[Z^{2h}] = \frac{(2h)!}{h!} = \frac{2h(2h-1)(2h-2)(2h-3)\cdots 3\cdot 2\cdot 1}{h(h-1)\cdots 3\cdot 2\cdot 1} = \frac{(2h)!!(2h-1)!!}{h!} = 2^h \cdot (2h-1)!!$$

Capitolo 7

Proprietà del moto browniano

Abbiamo visto che il moto browniano è un particolare processo gaussiano a incrementi indipendenti e omogenei con media nulla e varianza t . Abbiamo anche visto che per la proprietà delle v.a. gaussiane per cui non correlazione ed indipendenza sono equivalenti, un modo alternativo di definire è attraverso la funzione di correlazione $Cov(W_t, W_s) = t \wedge s$. Inoltre sappiamo che W_t è una martingala rispetto alla filtrazione naturale \mathcal{F}_t^W .

7.1 Trasformazioni del moto browniano

1) Per ogni $s \geq 0$, $\widetilde{W}_t := W_{s+t} - W_s$ è un moto Browniano ed è una martingala rispetto alla filtrazione $\mathcal{G}_t := \mathcal{F}_{s+t}^W$.

2) Per ogni $c \in \mathbb{R}$, $W_t^{(c)} := cW_{c^2t}$ è un moto Browniano ed è una martingala rispetto alla filtrazione $\mathcal{G}_t^{(c)} := \mathcal{F}_{c^2t}^W$ (in particolare per $c = -1$ si ha che $-W_t$ è ancora un moto Browniano rispetto a \mathcal{F}_t^W).

3) Il processo definito da $\widehat{W}_t := tW_{1/t}$, per $t > 0$, e $Z_0 := 0$, è ancora un moto Browniano, rispetto alla sua filtrazione naturale.

4) Per ogni tempo d'arresto limitato τ il processo $\widetilde{W}_t^{(\tau)} := W_{\tau+t} - W_\tau$ è ancora un moto Browniano rispetto alla filtrazione $\mathcal{F}_{\tau+t}^W$.

Questa proprietà non è immediata, ed è una proprietà che, nei processi di Markov viene detta Proprietà di Markov Forte.

7.2 Proprietà di Markov forte per il processo di Wiener

Sia τ un tempo d'arresto finito con probabilità 1. Allora il processo $Y_t := W_{t+\tau} - W_\tau$ è un processo di Wiener standard ed è indipendente da \mathcal{F}_τ . (qui si suppone di prendere una versione continua dei W_t)

Quindi per ogni funzionale Φ , che sia $\mathcal{R}^{[0,\infty)}$ -misurabile delle traiettorie

$$\mathbb{E}[\Phi(W_s, s \geq \tau) \mid \mathcal{F}_\tau] = \mathbb{E}[\Phi(W_s, s \geq \tau) \mid W_\tau] = \mathbb{E}[\Phi(w + Y_u, u \geq 0)] \mid_{w=W_\tau} .$$

In questo senso è una generalizzazione della proprietà di Markov, che invece di valere solo per tempi deterministici t vale anche per tempi d'arresto τ .

Più precisamente la proprietà di Markov (rispetto ad una filtrazione $\mathcal{F}_t \supseteq \mathcal{F}_t^X$) per un generico processo X_t è la seguente:

$$\mathbb{P}(X_{t+s} \in A \mid \mathcal{F}_t) = \mathbb{P}(X_{t+s} \in A \mid X_t) \quad \text{per ogni } s, t \geq 0.$$

(nel caso dei processi di Markov regolari

$$\mathbb{P}(X_{t+s} \in A \mid X_t) = p(t, t + s, x, A) \mid_{x=X_t},$$

dove $p(u, v, x, \cdot)$ sono le probabilità di transizione)

La proprietà di Markov forte (che non è sempre verificata per un generico processo di Markov) è invece

$$\mathbb{P}(X_{\tau+s} \in A \mid \mathcal{F}_\tau) = \mathbb{P}(X_{\tau+s} \in A \mid X_\tau) \quad \text{per ogni tempo d'arresto finito } \tau \text{ ed } s \geq 0.$$

Si noti che è necessario che τ sia finito affinché abbia senso X_τ ed è necessario che X_τ sia una variabile aleatoria, e che sia \mathcal{F}_τ -misurabile.

Questa proprietà di misurabilità è sempre verificata per processi X_t *cadlag*, in realtà potrebbe bastare un poco meno e precisamente la progressiva misurabilità)

Dimostrazione. (della proprietà di Markov forte per il processo di Wiener standard)

La tesi equivale a richiedere che per ogni $k \geq 1, 0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_k, A_1, \dots, A_k$ boreliani di \mathbb{R} , e per ogni $C \in \mathcal{F}_\tau$

$$\mathbb{P}(Y_{t_1} \in A_1, \dots, Y_{t_k} \in A_k, C) = \mathbb{P}(W_{t_1} \in A_1, \dots, W_{t_k} \in A_k) \mathbb{P}(C)$$

I CASO: τ assume al più un'infinità di valori $\{s_h\}_{h \geq 1}$.

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(Y_{t_1} \in A_1, \dots, Y_{t_k} \in A_k, C) &= \sum_{h=1}^{\infty} \mathbb{P}(Y_{t_1} \in A_1, \dots, Y_{t_k} \in A_k, C, \tau = s_h) = \\ &= \sum_{h=1}^{\infty} \mathbb{P}(W_{t_1+s_h} - W_{s_h} \in A_1, \dots, W_{t_k+s_h} - W_{s_h} \in A_k, C, \tau = s_h) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (C \cap \{\tau = s_h\}) \in \mathcal{F}_{s_h}, \text{ poiché } C \in \mathcal{F}_\tau \text{ e } W_t \text{ ha incrementi indipendenti)} \\
 & = \sum_{h=1}^{\infty} \mathbb{P}(W_{t_1+s_h} - W_{s_h} \in A_1, \dots, W_{t_k+s_h} - W_{s_h} \in A_k) \mathbb{P}(C, \tau = s_h) = \\
 & \hspace{20em} (W \text{ ha incrementi omogenei}) \\
 & = \sum_{h=1}^{\infty} \mathbb{P}(W_{t_1} \in A_1, \dots, W_{t_k} \in A_k) \mathbb{P}(C, \tau = s_h) = \mathbb{P}(W_{t_1} \in A_1, \dots, W_{t_k} \in A_k) \mathbb{P}(C)
 \end{aligned}$$

II CASO: τ generico.

Per individuare la distribuzione congiunta in realtà basta verificare che per ogni $k \geq 1$, per ogni funzione continua e limitata $\Phi(y_1, \dots, y_k)$ e per ogni $C \in \mathcal{F}_\tau$

$$\mathbb{E}[\Phi(Y_{t_1}, \dots, Y_{t_k}) I_C] = \mathbb{E}[\Phi(W_{t_1}, \dots, W_{t_k})] \mathbb{P}(C)$$

in quanto le funzioni continue determinano univocamente la legge di una variabile aleatoria. Per il Caso I, presa $\{\tau_m\}$ una successione di tempi d'arresto, con $\tau_m \geq \tau$ e $\tau_m \rightarrow \tau$

$$\mathbb{E}[\Phi(W_{t_1+\tau_m} - W_{\tau_m}, \dots, W_{t_k+\tau_m} - W_{\tau_m}) I_C] = \mathbb{E}[\Phi(W_{t_1}, \dots, W_{t_k})] \mathbb{P}(C)$$

Essendo le traiettorie di W_t continue (ma basterebbe che fossero continue a destra), possiamo affermare che $(W_{t_h+\tau_m} - W_{\tau_m}) \rightarrow (W_{t_h+\tau} - W_\tau) = Y_{t_h}$ e quindi

$$\Phi(W_{t_1+\tau_m} - W_{\tau_m}, \dots, W_{t_k+\tau_m} - W_{\tau_m}) \rightarrow \Phi(Y_{t_1}, \dots, Y_{t_k}).$$

Essendo Φ limitata si può passare al limite sotto il segno di media.

Osservazione 7.1. *È evidente che questa dimostrazione (e quindi la proprietà di Markov forte) rimane valida se al posto del moto browniano si mette un qualsiasi processo ad incrementi indipendenti ed omogenei, con traiettorie cadlag.*

7.3 Principio di riflessione

Sotto questo nome vanno diverse proprietà ma la più nota è la seguente, per $a \geq 0$,

$$\mathbb{P}(\tau_a \leq t) = 2\mathbb{P}(W_t \geq a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi t}} \int_A^\infty \exp\left\{-\frac{x^2}{2t}\right\} dx = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{A/\sqrt{t}}^\infty \exp\{-y^2/2\} dy.$$

dove $\tau_a = \inf\{t > 0 \text{ t.c. } W_t \geq a\}$, cioè il primo tempo di uscita da $(-\infty, a)$, che è un tempo d'arresto se come al solito prendiamo la versione continua di W_t .

Per $a < 0$ si definisce $\tau_a = \inf\{t > 0 \text{ t.c. } W_t \leq a\}$.

Notando che $\tau_a = \inf\{t > 0 \text{ t.c. } -W_t \geq -a\}$ e che $-W_t$ è ancora un moto browniano si ottiene che per ogni $a \in \mathbb{R}$

$$\mathbb{P}(\tau_a \leq t) = 2\mathbb{P}(W_t \geq |a|) = \frac{2}{\sqrt{2\pi t}} \int_{|a|}^{\infty} \exp\left\{-\frac{x^2}{2t}\right\} dx = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{|a|/\sqrt{t}}^{\infty} \exp\{-y^2/2\} dy.$$

e quindi la sua densità è

$$g_{\tau_a}(t) = \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{|a|}{t^{3/2}} \exp\{-a^2/2t\}.$$

e il suo valore atteso è infinito:

$$\mathbb{E}[\tau_a] = \int_0^{\infty} t \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{|a|}{t^{3/2}} \exp\{-a^2/2t\} dt = \int_0^{\infty} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{|a|}{t^{1/2}} \exp\{-a^2/2t\} dt = \infty$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{|a|}{t^{1/2}} \exp\{-a^2/2t\} dt &\geq \int_1^{\infty} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{|a|}{t^{1/2}} \exp\{-a^2/2t\} dt \\ &\geq \int_1^{\infty} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{|a|}{t^{1/2}} \exp\{-a^2/2\} dt = \infty \end{aligned}$$

Inoltre questa proprietà permette di calcolare la distribuzione del massimo di un moto browniano (per $a \geq 0$):

$$\mathbb{P}(\sup_{s \leq t} W_s \geq a) = \mathbb{P}(\tau_a \leq t) = 2\mathbb{P}(W_t \geq a)$$

Dimostrazione intuitiva

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(W_t \geq a) &= \mathbb{P}(W_t \geq a \mid \tau_a \leq t)\mathbb{P}(\tau_a \leq t) + \mathbb{P}(W_t \geq a \mid \tau_a > t)\mathbb{P}(\tau_a > t) = \\ &= \mathbb{P}(W_t \geq a \mid \tau_a \leq t)\mathbb{P}(\tau_a \leq t) = \frac{1}{2}\mathbb{P}(\tau_a \leq t) \end{aligned}$$

in quanto ovviamente

$$\mathbb{P}(W_t \geq a \mid \tau_a > t) = 0 \text{ e } \mathbb{P}(W_t \geq a \mid \tau_a \leq t) = \mathbb{P}(W_t \leq a \mid \tau_a \leq t) = \frac{1}{2}.$$

Nell'ultima uguaglianza è implicito l'uso del fatto che l'informazione contenuta nell'evento $\{\tau_a \leq t\}$ è riassumibile nel fatto che $\{W_{\tau_a} = a\}$ e che $W_{\tau_a+s} - W_{\tau_a}$ è ancora un moto browniano. In realtà formalmente c'è qualche problema in quanto pur essendo $\{\tau_a \leq t\} \in \mathcal{F}_{\tau}$, e quindi

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(W_t \geq a \mid \tau_a \leq t) &= \mathbb{P}(W_t \geq W_{\tau_a} \mid \tau_a \leq t) = \mathbb{P}(W_t - W_{\tau_a} \geq 0 \mid \tau_a \leq t) = \\ &= \mathbb{P}(Y_{t-\tau_a} \geq 0 \mid \tau_a \leq t) = \mathbb{P}(Y_{t-\tau_a} \geq 0) \end{aligned}$$

essendoci di mezzo τ_a non è chiarissimo, anche se intuitivo che $\mathbb{P}(Y_{t-\tau_a} \geq 0) = \frac{1}{2}$.

Dimostrazione formale:

Faremo vedere che le trasformate di Laplace rispetto a t , di $\mathbb{P}(W_t \geq a)$ e di $\frac{1}{2}\mathbb{P}(\tau_a \leq t)$ sono uguali, utilizzando il fatto che $W_{\tau_a} = a$, per la continuità delle traiettorie di W_t , e che $W_{\tau+s} - W_\tau$ è indipendente da \mathcal{F}_τ , e quindi da τ : qualunque sia $\alpha \geq 0$,

$$\begin{aligned} \int_0^\infty e^{-\alpha t} \mathbb{P}(W_t \geq a) dt &= (\text{è necessario usare la congiunta misurabilità} \\ &\quad \text{in } (t, \omega) \text{ di } W_t, \text{ per scambiare gli integrali}) \\ &= \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-\alpha t} I_{[a, +\infty)}(W_t) dt \right] = \\ &\quad (W_t < a \text{ per } t < \tau_a) \\ &= \mathbb{E} \left[\int_{\tau_a}^\infty e^{-\alpha t} I_{[a, +\infty)}(W_t) dt \right] = \mathbb{E} \left[\int_{\tau_a}^\infty e^{-\alpha \tau_a} e^{-\alpha(t-\tau_a)} I_{[0, +\infty)}(W_t - W_{\tau_a}) dt \right] = \\ &\quad (W_t - W_{\tau_a} = Y_{t-\tau_a} \text{ e cambio di variabile}) \\ &= \mathbb{E} \left[e^{-\alpha \tau_a} \int_0^\infty e^{-\alpha s} I_{[0, +\infty)}(Y_s) ds \right] = \\ &\quad (\{Y_t, t \geq 0\} \text{ e } \tau_a \text{ sono indipendenti}) \\ &= \mathbb{E} \left[e^{-\alpha \tau_a} \right] \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-\alpha s} I_{[0, +\infty)}(Y_s) ds \right] = \mathbb{E} \left[e^{-\alpha \tau_a} \right] \int_0^\infty e^{-\alpha s} \mathbb{P}(Y_s \geq 0) ds = \\ &= \frac{1}{2\alpha} \mathbb{E} \left[e^{-\alpha \tau_a} \right]. \end{aligned}$$

In modo analogo

$$\int_0^\infty e^{-\alpha t} \mathbb{P}(\tau_a \leq t) dt = \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-\alpha t} I_{\{\tau_a \leq t\}} dt \right] = \mathbb{E} \left[\int_{\tau_a}^\infty e^{-\alpha t} dt \right] = \frac{1}{\alpha} \mathbb{E} \left[e^{-\alpha \tau_a} \right].$$

In alcuni testi viene dato come principio di riflessione la seguente proprietà (la cui dimostrazione è simile alla dimostrazione della proprietà di Markov forte):

Principio di riflessione: seconda formulazione

Per ogni tempo d'arresto τ finito, il processo "riflesso"

$$\begin{cases} Y_t = W_t & \text{per } t \leq \tau, \\ Y_t - Y_\tau = -(W_t - W_\tau) & \text{per } t > \tau, \end{cases}$$

è ancora un moto browniano.

7.4 Tempi di uscita da una striscia

Anche nel caso del moto Browniano si possono ottenere delle applicazioni simili a quelle della rovina del giocatore. Più in generale si può considerare il processo di Wiener con coefficiente di drift μ e coefficiente di diffusione σ , cioè

$$X_t := \sigma W_t + \mu t,$$

e il tempo τ di prima uscita da una striscia

$$\tau \equiv \tau(-a, b) := \inf\{t > 0 : X_t \notin (-a, b)\}, a, b > 0,$$

e cercare di calcolare la probabilità $p \equiv p(x, a, b) := \mathbb{P}_x(X_\tau = -a)$, e la trasformata di Laplace $\mathbb{E}_x[\exp\{-\alpha\tau\}]$, per $x \in (-a, b)$.

Sappiamo che, essendo $W_t = (X_t - \mu t)/\sigma$, il processo

$$Z_t := \exp\{\theta(X_t - \mu t)/\sigma - \theta^2 t/2\}$$

è una martingala con

$$\mathbb{E}_x[Z_t] = \exp\left\{\frac{\theta}{\sigma}x\right\}.$$

Anche $Z_{t \wedge \tau}$, è una martingala che inoltre converge a Z_τ . La convergenza è limitata:

$$Z_{t \wedge \tau} \leq \exp\{|\theta| \max(a, b)/\sigma\}, \text{ se } \frac{\theta\mu}{\sigma} + \frac{\theta^2}{2} \geq 0$$

e quindi anche

$$\mathbb{E}_x[\exp\left\{\frac{\theta}{\sigma}X_\tau\right\} \exp\left\{-\frac{\theta}{2}\left(2\frac{\mu}{\sigma} + \theta\right)\tau\right\}] = \exp\left\{\frac{\theta}{\sigma}x\right\}.$$

Scegliendo θ in modo che $2\frac{\mu}{\sigma} + \theta = 0$, ovvero $\theta = -2\frac{\mu}{\sigma}$, la precedente uguaglianza diviene

$$\mathbb{E}_x[\exp\left\{\frac{\theta}{\sigma}X_\tau\right\}] = \mathbb{P}_x[X_\tau = -a] \exp\left\{-\frac{\theta}{\sigma}a\right\} + \mathbb{P}_x[X_\tau = b] \exp\left\{\frac{\theta}{\sigma}b\right\} = \exp\left\{\frac{\theta}{\sigma}x\right\},$$

da cui subito, tenendo conto del valore di θ ,

$$p \exp\left\{2\frac{\mu}{\sigma^2}a\right\} + (1 - p) \exp\left\{-2\frac{\mu}{\sigma^2}b\right\} = \exp\left\{-2\frac{\mu}{\sigma^2}x\right\},$$

e quindi

$$p = \frac{\exp\left\{-2\frac{\mu}{\sigma^2}x\right\} - \exp\left\{-2\frac{\mu}{\sigma^2}b\right\}}{\exp\left\{2\frac{\mu}{\sigma^2}a\right\} - \exp\left\{-2\frac{\mu}{\sigma^2}b\right\}}.$$

Per ogni $\alpha > 0$, si pongano ora θ_α^+ e θ_α^- i due valori per cui $\alpha := \frac{\theta}{2}(2\frac{\mu}{\sigma} + \theta)$, cioè le due soluzioni di $\theta^2 + 2\frac{\mu}{\sigma}\theta - 2\alpha = 0$, ovvero

$$\theta_\alpha^+, \theta_\alpha^- := -\frac{\mu}{\sigma} \pm \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2 + 2\alpha}.$$

Come prima si ottiene che

$$\mathbb{E}_x[\exp\{\frac{\theta^+}{\sigma}X_\tau\} \exp\{-\alpha\tau\}] = \exp\{\frac{\theta^+}{\sigma}x\}, \quad \mathbb{E}_x[\exp\{\frac{\theta^-}{\sigma}X_\tau\} \exp\{-\alpha\tau\}] = \exp\{\frac{\theta^-}{\sigma}x\}.$$

Considerando che per $\theta = \theta_\alpha^+, \theta_\alpha^-$

$$\mathbb{E}_x[\exp\{\frac{\theta}{\sigma}X_\tau\} \exp\{-\alpha\tau\}] = \exp\{-\frac{\theta}{\sigma}a\}\mathbb{E}_x[I_{\{X_\tau=-a\}} \exp\{-\alpha\tau\}] + \exp\{\frac{\theta}{\sigma}b\}\mathbb{E}_x[I_{\{X_\tau=b\}} \exp\{-\alpha\tau\}]$$

si ottiene immediatamente il seguente sistema lineare nelle incognite

$$\begin{cases} y_{-a} & := \mathbb{E}_x[I_{\{X_\tau=-a\}} \exp\{-\alpha\tau\}] \\ y_b & := \mathbb{E}_x[I_{\{X_\tau=b\}} \exp\{-\alpha\tau\}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \exp\{-\frac{\theta_\alpha^+}{\sigma}a\}y_{-a} + \exp\{\frac{\theta_\alpha^+}{\sigma}b\}y_b & = \exp\{\frac{\theta_\alpha^+}{\sigma}x\} \\ \exp\{-\frac{\theta_\alpha^-}{\sigma}a\}y_{-a} + \exp\{\frac{\theta_\alpha^-}{\sigma}b\}y_b & = \exp\{\frac{\theta_\alpha^-}{\sigma}x\} \end{cases}$$

di cui si ricava la soluzione, ovvero

$$\begin{cases} y_{-a} & = \frac{\exp\{\nu_\alpha^+x\} \exp\{\nu_\alpha^-b\} - \exp\{\nu_\alpha^+b\} \exp\{\nu_\alpha^-x\}}{\exp\{-\nu_\alpha^+a\} \exp\{\nu_\alpha^-b\} - \exp\{\nu_\alpha^+b\} \exp\{-\nu_\alpha^-a\}} \\ y_b & = \frac{\exp\{-\nu_\alpha^+a\} \exp\{\nu_\alpha^-x\} - \exp\{\nu_\alpha^+x\} \exp\{-\nu_\alpha^-a\}}{\exp\{-\nu_\alpha^+a\} \exp\{\nu_\alpha^-b\} - \exp\{\nu_\alpha^+b\} \exp\{-\nu_\alpha^-a\}}, \end{cases}$$

avendo posto

$$\nu_\alpha^\pm := \frac{\theta_\alpha^\pm}{\sigma} = -\frac{\mu}{\sigma^2} \pm \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2}\right)^2 + 2\frac{\alpha}{\sigma^2}}.$$

Basta poi considerare la somma

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_x[\exp\{-\alpha\tau\}] &= y_{-a} + y_b = \\ &= \frac{\exp\{\nu_\alpha^+x\} \exp\{\nu_\alpha^-b\} - \exp\{\nu_\alpha^+b\} \exp\{\nu_\alpha^-x\} + \exp\{-\nu_\alpha^+a\} \exp\{\nu_\alpha^-x\} - \exp\{\nu_\alpha^+x\} \exp\{-\nu_\alpha^-a\}}{\exp\{-\nu_\alpha^+a\} \exp\{\nu_\alpha^-b\} - \exp\{\nu_\alpha^+b\} \exp\{-\nu_\alpha^-a\}}. \end{aligned}$$

Esercizio 7.1. Nel caso $x = 0$, $\mu > 0$ mandare a ad infinito in modo da ottenere la trasformata di Laplace di $\tau := \tau(-\infty, b)$

Soluzione:

Si noti che, essendo $\alpha, \mu > 0$, si ha $\nu_\alpha^+ > 0$ e $\nu_\alpha^- < 0$. Di conseguenza $\exp\{-\nu_\alpha^-a\} \rightarrow \infty$, mentre $\exp\{-\nu_\alpha^+a\} \rightarrow 0$, e dalla precedente espressione per $\mathbb{E}_0[\exp\{-\alpha\tau(-a, b)\}]$ si ricava, per $a \rightarrow \infty$

$$\mathbb{E}_0[\exp\{-\alpha\tau(-a, b)\}] \rightarrow \mathbb{E}_0[\exp\{-\alpha\tau(-\infty, b)\}] = \frac{1}{\exp\{\nu_\alpha^+b\}} = \exp\left[\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2}\right)^2 + 2\frac{\alpha}{\sigma^2}}\right)b\right].$$

Esercizio 7.2. Si consideri il caso del moto browniano o Wiener standard, cioè con $\mu=0$ e $\sigma=1$, e con $x = 0$ ed $a = b$.

Soluzione:

$$\mathbb{E}_0[\exp\{-\alpha\tau(-a, a)\}] = \frac{\exp\{\nu_\alpha^- a\} - \exp\{\nu_\alpha^+ a\} + \exp\{-\nu_\alpha^+ a\} - \exp\{-\nu_\alpha^- a\}}{\exp\{-\nu_\alpha^+ a\} \exp\{\nu_\alpha^- a\} - \exp\{\nu_\alpha^+ a\} \exp\{-\nu_\alpha^- a\}},$$

e quindi, poiché in questo caso $\nu_\alpha^- = -\nu_\alpha^+ = -\sqrt{2\alpha}$,

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_0[\exp\{-\alpha\tau(-a, a)\}] &= \frac{\exp\{-\sqrt{2\alpha}a\} - \exp\{\sqrt{2\alpha}a\} + \exp\{-\sqrt{2\alpha}a\} - \exp\{\sqrt{2\alpha}a\}}{\exp\{-\sqrt{2\alpha}a\} \exp\{-\sqrt{2\alpha}a\} - \exp\{\sqrt{2\alpha}a\} \exp\{\sqrt{2\alpha}a\}} \\ &= 2 \frac{\exp\{\sqrt{2\alpha}a\} - \exp\{-\sqrt{2\alpha}a\}}{\exp\{2\sqrt{2\alpha}a\} - \exp\{-2\sqrt{2\alpha}a\}} \\ &= 2 \frac{\sinh(\sqrt{2\alpha}a)}{\sinh(2\sqrt{2\alpha}a)} = 2 \frac{\sinh(\sqrt{2\alpha}a)}{2 \sinh(\sqrt{2\alpha}a) \cosh(\sqrt{2\alpha}a)} \\ &= \frac{1}{\cosh(\sqrt{2\alpha}a)} \end{aligned}$$

Bibliografia

- [1] BALDI, P. *Equazione differenziali stocastiche e applicazioni*. Quaderni dell'Unione Matematica Italiana, 28. Bologna: Pitagora Editrice. VIII, 309 p. (seconda edizione), 2000.
- [2] BILLINGSLEY, P. *Probability and measure*, third ed. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. John Wiley & Sons Inc., New York, 1995. A Wiley-Interscience Publication.
- [3] BJÖRK, T. *Arbitrage theory in continuous time*. Oxford University Press, Oxford, 1998.
- [4] MORICONI, F. *Matematica finanziaria*. Edizioni il Mulino, Bologna, 1995.
- [5] ROGERS, L. C. G. Equivalent martingale measures and no-arbitrage. *Stochastics Stochastics Rep.* 51, 1-2 (1994), 41–49.
- [6] ROSS, S. M. *An introduction to mathematical finance. Options and other topics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [7] SCHACHERMAYER, W. A Hilbert space proof of the fundamental theorem of asset pricing in finite discrete time. *Insurance Math. Econom.* 11, 4 (1992), 249–257.
- [8] SHIRYAEV, A. N. *Essentials of stochastic finance. Facts, models, theory*, vol. 3 of *Advanced Series on Statistical Science & Applied Probability*. World Scientific Publishing Co. Inc., River Edge, NJ, 1999. Translated from the Russian manuscript by N. Kruzhilin.