

# Ottimizzazione dei Sistemi Complessi

G. Liuzzi<sup>1</sup>

Venerdì 4 Maggio 2018

---

<sup>1</sup>Istituto di Analisi dei Sistemi ed Informatica IASI - CNR



# Introduzione

$$\begin{aligned} \min & f_1(x), \dots, f_k(x) \\ \text{s.t.} & x \in \mathcal{F}. \end{aligned}$$

$x \in \mathbb{R}^n$ ,  $k > 1$ ,  $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\mathcal{F} \subseteq \mathbb{R}^n$ .

- $\mathbb{R}^n$  è lo “spazio delle decisioni”
- $\mathbb{R}^k$  è lo “spazio degli obiettivi”
- $x \in \mathbb{R}^n$  è un “vettore di decisioni”
- $z \in \mathbb{R}^k$  è un “vettore di obiettivi”



# Introduzione

$$\begin{aligned} \min & f_1(x), \dots, f_k(x) \\ \text{s.t.} & x \in \mathcal{F}. \end{aligned}$$

$x \in \mathbb{R}^n$ ,  $k > 1$ ,  $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\mathcal{F} \subseteq \mathbb{R}^n$ .

- $\mathbb{R}^n$  è lo “spazio delle decisioni”
- $\mathbb{R}^k$  è lo “spazio degli obiettivi”
- $x \in \mathbb{R}^n$  è un “vettore di decisioni”
- $z \in \mathbb{R}^k$  è un “vettore di obiettivi”



# Introduzione

$$\begin{aligned} \min & f_1(x), \dots, f_k(x) \\ \text{s.t.} & x \in \mathcal{F}. \end{aligned}$$

$x \in \mathbb{R}^n$ ,  $k > 1$ ,  $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\mathcal{F} \subseteq \mathbb{R}^n$ .

- $\mathbb{R}^n$  è lo “spazio delle decisioni”
- $\mathbb{R}^k$  è lo “spazio degli obiettivi”
- $x \in \mathbb{R}^n$  è un “vettore di decisioni”
- $z \in \mathbb{R}^k$  è un “vettore di obiettivi”



# Introduzione

Definiamo

- $f(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x)) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$  **vettore delle f.obiettivo**
- $\mathcal{Z} = f(\mathcal{F})$  **regione ammissibile degli obiettivi:**

$$\mathcal{Z} = \{z \in \mathbb{R}^k : z = f(x), x \in \mathcal{F}\}.$$

- $z^{id}$  **vettore ideale** degli obiettivi:

$$z_i^{id} = \min_{x \in \mathcal{F}} f_i(x)$$

per ogni  $i = 1, \dots, k$ .

N.B. assumiamo che  $z^{id} \notin \mathcal{Z}$ , cioè che le funzioni obiettivo siano in contrasto fra di loro.



# Ordinamento nello spazio $k$ dimensionale

Possiamo definire nello spazio  $k$  dimensionale un ordinamento parziale non riflessivo.

Dovuto all'economista e sociologo italiano Vilfredo Pareto (1848-1923)



# Ordinamento nello spazio $k$ dimensionale

Dati due vettori  $z^1$  e  $z^2$  in  $\mathfrak{R}^k$  diciamo che:

$z^1$  *domina* (secondo Pareto)  $z^2$  ( $z^1 \leq_P z^2$ ) se

$$z_i^1 \leq z_i^2 \text{ per ogni } i = 1, \dots, k, \text{ e}$$

$$z_j^1 < z_j^2 \text{ per qualche } j \in \{1, \dots, k\}.$$

N.B. l'ordinamento è **solo parziale**, quindi esistono coppie di vettori  $z^1, z^2$  tali che **non risulta**

$$\text{ne } z^1 \leq_P z^2 \text{ ne } z^2 \leq_P z^1 \quad !!$$

In questo caso si dice che  $z^1$  e  $z^2$  sono vettori **non dominati** tra loro



# Ordinamento nello spazio $k$ dimensionale

Dati due vettori  $z^1$  e  $z^2$  in  $\mathfrak{R}^k$  diciamo che:

$z^1$  *domina* (secondo Pareto)  $z^2$  ( $z^1 \leq_P z^2$ ) se

$$z_i^1 \leq z_i^2 \text{ per ogni } i = 1, \dots, k, \text{ e}$$

$$z_j^1 < z_j^2 \text{ per qualche } j \in \{1, \dots, k\}.$$

N.B. l'ordinamento è **solo parziale**, quindi esistono coppie di vettori  $z^1, z^2$  tali che **non risulta**

$$\text{ne } z^1 \leq_P z^2 \text{ ne } z^2 \leq_P z^1 \quad !!$$

In questo caso si dice che  $z^1$  e  $z^2$  sono vettori **non dominati** tra loro





# Ordinamento debole

Dati due vettori  $z^1$  e  $z^2$  in  $\mathbb{R}^k$  diciamo che:

$z^1$  *domina debolmente* (secondo Pareto)  $z^2$  ( $z^1 < z^2$ ) se  
 $z_i^1 < z_i^2$  per **ogni**  $i = 1, \dots, k$ .

N.B. se  $z^1 < z^2$  allora  $z^1 \leq_P z^2$  ma, in generale, **non vale** il viceversa.



# Definizione di ottimalità secondo Pareto

Dato il problema multiobiettivo

$$\begin{aligned} \min & f_1(x), \dots, f_k(x) \\ \text{s.t.} & x \in \mathcal{F}. \end{aligned}$$

Un punto  $x^* \in \mathcal{F}$  è **ottimo** (secondo Pareto) se:  
non esiste alcun altro  $x \in \mathcal{F}$  tale che

$$f(x) \leq_P f(x^*)$$

Nello spazio degli obiettivi, l'insieme degli ottimi secondo Pareto  $\Omega_P$  è noto con il nome di:

- “frontiera efficiente”
- “frontiera di Pareto”



# Definizione di ottimalità secondo Pareto

Dato il problema multiobiettivo

$$\begin{aligned} \min & f_1(x), \dots, f_k(x) \\ \text{s.t.} & x \in \mathcal{F}. \end{aligned}$$

Un punto  $x^* \in \mathcal{F}$  è **ottimo** (secondo Pareto) se:

non esiste alcun altro  $x \in \mathcal{F}$  tale che

$$f(x) \leq_P f(x^*)$$

Nello spazio degli obiettivi, l'insieme degli ottimi secondo Pareto  $\Omega_P$  è noto con il nome di:

- “**frontiera efficiente**”
- “**frontiera di Pareto**”



# Definizione di ottimalità debole

Un punto  $x^* \in \mathcal{F}$  è **ottimo debole** (secondo Pareto) se:  
non esiste alcun altro  $x \in \mathcal{F}$  tale che

$$f(x) < f(x^*)$$

N.B. l'insieme degli ottimi di Pareto ( $\Omega_P$ ) è contenuto nell'insieme degli ottimi deboli di Pareto ( $\Omega_D$ )

$$\Omega_P \subseteq \Omega_D.$$



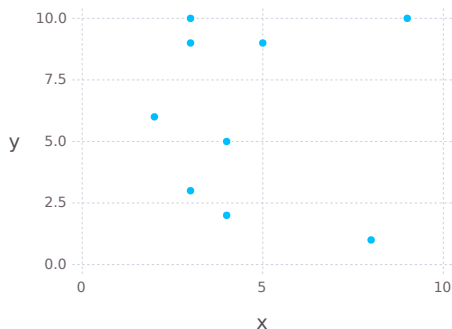
## Esempio (1)

Determinare l'insieme dei punti **non dominati** tra i seguenti

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
x	4	9	4	3	2	3	5	8	3	5
y	2	10	5	10	6	3	9	1	9	9



# Esempio (1)



	a	e	f	h
x	4	2	3	8
y	2	6	3	1



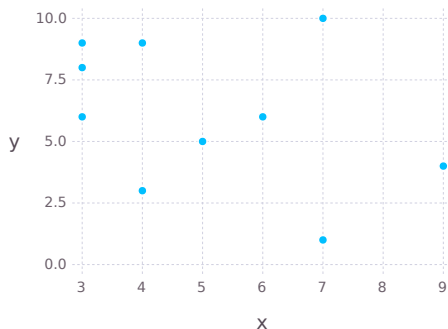
## Esempio (2)

Determinare l'insieme dei punti **non dominati** tra i seguenti

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
x	3	4	4	5	7	6	3	7	3	9
y	6	9	3	5	1	6	8	10	9	4



# Esempio (2)



	a	c	e
x	3	4	7
y	6	3	1





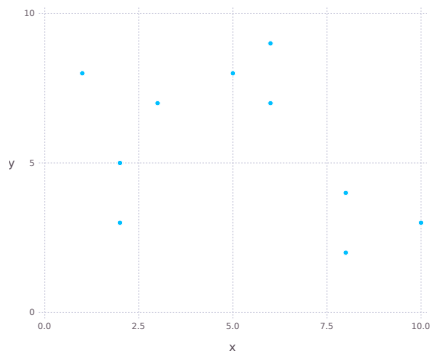
## Esempio (3)

Determinare l'insieme dei punti **non dominati** tra i seguenti

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
x	1	3	5	8	10	6	2	2	8	6
y	8	7	8	2	3	7	3	5	4	9



# Esempio (3)



	a	d	g
x	1	8	2
y	8	2	3



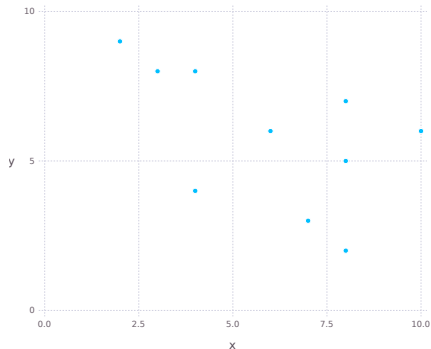
## Esempio (4)

Determinare l'insieme dei punti **non dominati** tra i seguenti

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
x	4	3	8	8	6	2	4	7	10	8
y	8	8	5	2	6	9	4	3	6	7



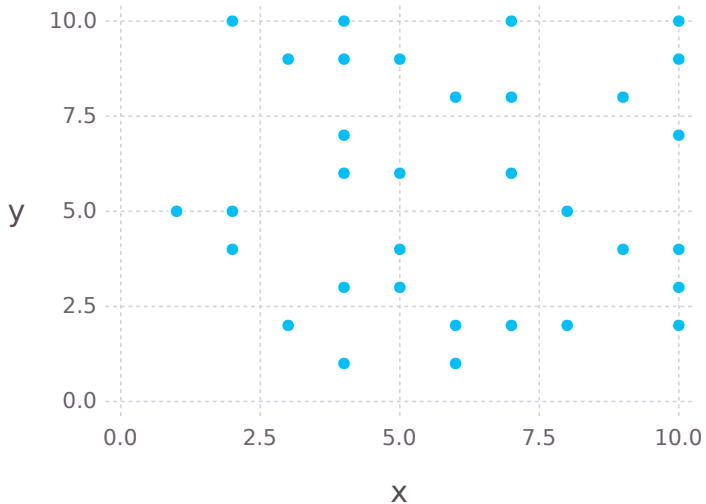
# Esempio (4)



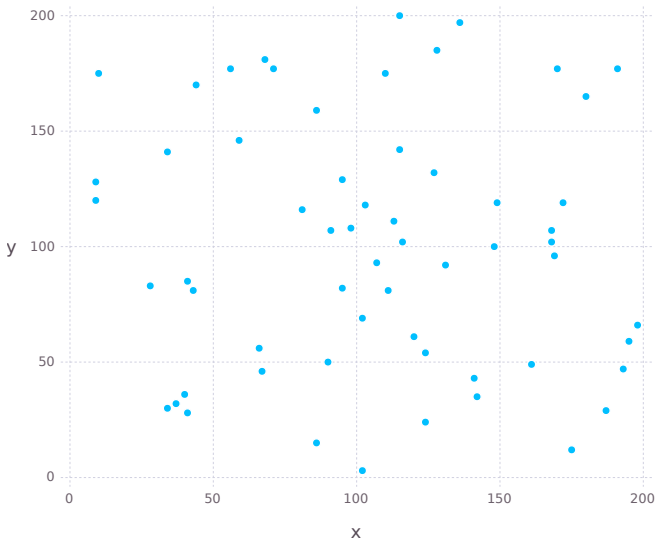
	b	d	f	g	h
x	3	8	2	4	7
y	8	2	9	4	3



# Esempio (5)



# Esempio (6)



# Caso convesso ed equivalenza

Dato il problema multiobiettivo

$$\begin{aligned} \min & f_1(x), \dots, f_k(x) \\ \text{s.t.} & x \in \mathcal{F}. \end{aligned}$$

siano  $f_i$  convesse su  $\mathcal{F}$  convesso. Sotto queste ipotesi il problema è **convesso**

## Proposizione

*Per un problema multiobiettivo convesso ogni ottimo locale di Pareto è anche ottimo globale*



# Caso convesso ed equivalenza

**Dim.** Sia  $x^*$  un ottimo locale di Pareto. Quindi esiste  $\epsilon > 0$  t.c.

$$\nexists x \in \mathcal{F} \cap \mathcal{B}(x^*, \epsilon) : f(x) \leq_P f(x^*)$$

Supponiamo ora (per assurdo) che  $x^*$  non sia ottimo globale di Pareto. Allora, deve esistere un  $x^\circ \in \mathcal{F}$ :

$$f(x^\circ) \leq_P f(x^*)$$

Dalla convessità di  $\mathcal{F}$  segue che il punto

$$x_\beta = \beta x^\circ + (1 - \beta)x^* \in \mathcal{F}$$

per ogni  $\beta \in [0, 1]$ .





# Caso convesso ed equivalenza

**Dim.** Sia  $x^*$  un ottimo locale di Pareto. Quindi esiste  $\epsilon > 0$  t.c.

$$\nexists x \in \mathcal{F} \cap \mathcal{B}(x^*, \epsilon) : f(x) \leq_P f(x^*)$$

Supponiamo ora (per assurdo) che  $x^*$  non sia ottimo globale di Pareto. Allora, deve esistere un  $x^\circ \in \mathcal{F}$ :

$$f(x^\circ) \leq_P f(x^*)$$

Dalla convessità di  $\mathcal{F}$  segue che il punto

$$x_\beta = \beta x^\circ + (1 - \beta)x^* \in \mathcal{F}$$

per ogni  $\beta \in [0, 1]$ .



# Caso convesso ed equivalenza

**Dim.** Sia  $x^*$  un ottimo locale di Pareto. Quindi esiste  $\epsilon > 0$  t.c.

$$\nexists x \in \mathcal{F} \cap \mathcal{B}(x^*, \epsilon) : f(x) \leq_P f(x^*)$$

Supponiamo ora (per assurdo) che  $x^*$  non sia ottimo globale di Pareto. Allora, deve esistere un  $x^\circ \in \mathcal{F}$ :

$$f(x^\circ) \leq_P f(x^*)$$

Dalla convessità di  $\mathcal{F}$  segue che il punto

$$x_\beta = \beta x^\circ + (1 - \beta)x^* \in \mathcal{F}$$

per ogni  $\beta \in [0, 1]$ .



# Caso convesso ed equivalenza

Inoltre, dalla convessità delle  $f_i$  segue che

$$f(x_\beta) \leq \beta f(x^\circ) + (1 - \beta)f(x^*)$$

È inoltre possibile determinare un valore  $\bar{\beta}$  tale che  $x_{\bar{\beta}} = \hat{x} \in \mathcal{F} \cap \mathcal{B}(x^*, \epsilon)$ .

$$f(\hat{x}) \leq \bar{\beta}f(x^\circ) + (1 - \bar{\beta})f(x^*) \leq f(x^*)$$

Quindi  $f(\hat{x}) = f(x^*)$  e possiamo scrivere

$$f(x^*) \leq \bar{\beta}f(x^\circ) + (1 - \bar{\beta})f(x^*), \text{ ovvero } f(x^*) \leq f(x^\circ).$$

Ma  $f(x^\circ) \leq_P f(x^*)$  il che è in contrasto con  $f(x^*) \leq f(x^\circ)$ .



# Caso convesso ed equivalenza

Inoltre, dalla convessità delle  $f_i$  segue che

$$f(x_\beta) \leq \beta f(x^\circ) + (1 - \beta)f(x^*)$$

È inoltre possibile determinare un valore  $\bar{\beta}$  tale che  $x_{\bar{\beta}} = \hat{x} \in \mathcal{F} \cap \mathcal{B}(x^*, \epsilon)$ .

$$f(\hat{x}) \leq \bar{\beta}f(x^\circ) + (1 - \bar{\beta})f(x^*) \leq f(x^*)$$

Quindi  $f(\hat{x}) = f(x^*)$  e possiamo scrivere

$$f(x^*) \leq \bar{\beta}f(x^\circ) + (1 - \bar{\beta})f(x^*), \text{ ovvero } f(x^*) \leq f(x^\circ).$$

Ma  $f(x^\circ) \leq_P f(x^*)$  il che è in contrasto con  $f(x^*) \leq f(x^\circ)$ .



# Caso convesso ed equivalenza

Inoltre, dalla convessità delle  $f_i$  segue che

$$f(x_\beta) \leq \beta f(x^\circ) + (1 - \beta)f(x^*)$$

È inoltre possibile determinare un valore  $\bar{\beta}$  tale che  $x_{\bar{\beta}} = \hat{x} \in \mathcal{F} \cap \mathcal{B}(x^*, \epsilon)$ .

$$f(\hat{x}) \leq \bar{\beta}f(x^\circ) + (1 - \bar{\beta})f(x^*) \leq f(x^*)$$

Quindi  $f(\hat{x}) = f(x^*)$  e possiamo scrivere

$$f(x^*) \leq \bar{\beta}f(x^\circ) + (1 - \bar{\beta})f(x^*), \text{ ovvero } f(x^*) \leq f(x^\circ).$$

Ma  $f(x^\circ) \leq_P f(x^*)$  il che è in contrasto con  $f(x^*) \leq f(x^\circ)$ .



# Caso convesso ed equivalenza

Inoltre, dalla convessità delle  $f_i$  segue che

$$f(x_\beta) \leq \beta f(x^\circ) + (1 - \beta)f(x^*)$$

È inoltre possibile determinare un valore  $\bar{\beta}$  tale che  $x_{\bar{\beta}} = \hat{x} \in \mathcal{F} \cap \mathcal{B}(x^*, \epsilon)$ .

$$f(\hat{x}) \leq \bar{\beta}f(x^\circ) + (1 - \bar{\beta})f(x^*) \leq f(x^*)$$

Quindi  $f(\hat{x}) = f(x^*)$  e possiamo scrivere

$$f(x^*) \leq \bar{\beta}f(x^\circ) + (1 - \bar{\beta})f(x^*), \text{ ovvero } f(x^*) \leq f(x^\circ).$$

Ma  $f(x^\circ) \leq_P f(x^*)$  il che è in contrasto con  $f(x^*) \leq f(x^\circ)$ .



# Caso convesso ed equivalenza

Inoltre, dalla convessità delle  $f_i$  segue che

$$f(x_\beta) \leq \beta f(x^\circ) + (1 - \beta)f(x^*)$$

È inoltre possibile determinare un valore  $\bar{\beta}$  tale che  $x_{\bar{\beta}} = \hat{x} \in \mathcal{F} \cap \mathcal{B}(x^*, \epsilon)$ .

$$f(\hat{x}) \leq \bar{\beta}f(x^\circ) + (1 - \bar{\beta})f(x^*) \leq f(x^*)$$

Quindi  $f(\hat{x}) = f(x^*)$  e possiamo scrivere

$$f(x^*) \leq \bar{\beta}f(x^\circ) + (1 - \bar{\beta})f(x^*), \text{ ovvero } f(x^*) \leq f(x^\circ).$$

Ma  $f(x^\circ) \leq_P f(x^*)$  il che è in contrasto con  $f(x^*) \leq f(x^\circ)$ .



# Ottimizzazione multiobiettivo del portafoglio

Il problema di portfolio selection formulato da Markowitz (modello mean-variance) è un caso particolare di problema di ottimizzazione a due obiettivi

$$\max (x^T R, -x^T Qx)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^n x_i = 1$$

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, n.$$





## Esempio numerico: EUROSTOXX50

- Consideriamo come possibili investimenti i **48 titoli** compresi nell'indice **EUROSTOXX**  
Total, Siemens, Basf, Sanofi-Aventis, BNP Paribas, Bayer, Allianz, Daimler, Unilever, FRANCE TELECOM, Danone, Nokia, Unicredit, Enel, Axa, L'Oreal, ....
- Determinare il **vettore ideale** degli obiettivi
- Come si possono determinare delle soluzioni di Pareto ?



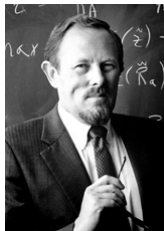
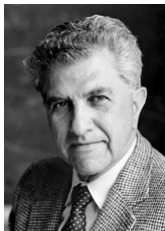
## Esempio numerico: EUROSTOXX50

- Consideriamo come possibili investimenti i **48 titoli** compresi nell'indice **EUROSTOXX**  
Total, Siemens, Basf, Sanofi-Aventis, BNP Paribas, Bayer, Allianz, Daimler, Unilever, FRANCE TELECOM, Danone, Nokia, Unicredit, Enel, Axa, L'Oreal, ...
- Determinare il **vettore ideale** degli obiettivi
- Come si possono determinare delle soluzioni di Pareto ?



# Introduction

Nel 1990 il premio in memoria di A. Nobel viene conferito congiuntamente a:

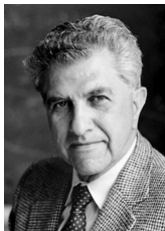


# Introduction

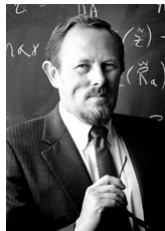
Nel 1990 il premio in memoria di A. Nobel viene conferito congiuntamente a:



Harry M. Markowitz



Merton H. Miller



William F. Sharpe



# Introduction



The Sveriges Riksbank Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel 1990  
Harry M. Markowitz, Merton H. Miller, William F. Sharpe



KUNGL.  
VETENSKAPSAKADEMIEN  
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

## Press Release

16 October 1990

THIS YEAR'S LAUREATES ARE PIONEERS IN THE THEORY OF FINANCIAL ECONOMICS  
AND CORPORATE FINANCE

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the 1990 Alfred Nobel  
Memorial Prize in Economic Sciences with one third each, to

Professor **Harry Markowitz**, City University of New York, USA,  
Professor **Merton Miller**, University of Chicago, USA,  
Professor **William Sharpe**, Stanford University, USA,

**for their pioneering work in the theory of financial economics.**

**Harry Markowitz** is awarded the Prize for having developed the theory of portfolio choice;  
**William Sharpe**, for his contributions to the theory of price formation for financial assets, the so-called, *Capital Asset Pricing Model* (CAPM); and  
**Merton Miller**, for his fundamental contributions to the theory of corporate finance.



# Portfolio selection

## PORTFOLIO SELECTION\*

HARRY MARKOWITZ  
*The Rand Corporation*

THE PROCESS OF SELECTING a portfolio may be divided into two stages. The first stage starts with observation and experience and ends with beliefs about the future performances of available securities. The second stage starts with the relevant beliefs about future performances and ends with the choice of portfolio. This paper is concerned with the second stage. We first consider the rule that the investor does (or should) maximize discounted expected, or anticipated, returns. This rule is rejected both as a hypothesis to explain, and as a maximum to guide investment behavior. We next consider the rule that the investor does (or should) consider expected return a desirable thing *and* variance of return an undesirable thing. This rule has many sound points, both as a maxim for, and hypothesis about, investment behavior. We illustrate geometrically relations between beliefs and choice of portfolio according to the “expected returns—variance of returns” rule.

H.M. Markowitz, “Portfolio selection”, *The Journal of Finance*, Vol. 7, No. 1. (Mar., 1952), pp. 77-91.



# Motivazione del premio

“Before the 1950s, there was hardly any theory whatsoever of financial markets. A first pioneering contribution in the field was made by **Harry Markowitz**, who **developed a theory of portfolio decisions of households and firms under conditions of uncertainty**. The theory shows how the multidimensional problem of investing under conditions of uncertainty in a large number of assets, each with different characteristics, may be reduced to the issue of a trade-off between only two dimensions, namely the expected return and the variance of the return of the portfolio.”



# Motivazione del premio

“Professors Markowitz, Miller and Sharpe,

You have by your research established the foundation for the field *Financial Economics and Corporate Finance*. The impressive development of this field of research in economics in recent years is largely based on your achievements. It is a pleasure to convey to you the warmest congratulations from the Royal Academy of Sciences and to ask you to receive from the hands of His Majesty the King the 1990 Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel.”





## Portfolio selection

Markowitz osservò che il comportamento tipico di un investitore finanziario è quello di *diversificare* il proprio portafoglio di titoli.

“The hypothesis that the investor does maximize discounted return must be rejected [...] the foregoing rule never implies that there is a diversified portfolio which is preferable to all non-diversified portfolios”

“There is a rule which implies both that the investor should diversify and that he should maximize expected return. [...] This rule is a special case of the expected returns-variance of returns rule”



# Portfolio selection

Consideriamo  $n$  titoli sul mercato finanziario e sia  $R_i$  la v.a. che rappresenta il rendimento dell'  $i$ -esimo titolo.

Sia  $\mu_i$  il rendimento atteso di  $R_i$  e  $\sigma_{ij}$  la covarianza tra  $R_i$  e  $R_j$  (quindi  $\sigma_{ii} = \sigma_i^2$  è la varianza di  $R_i$ ).

Indichiamo con  $x_i$  la frazione di capitale investita nel titolo  $i$ -esimo e supponiamo di voler investire tutto il capitale, per cui è

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

N.B. le  $x_i$  sono quantità scelte dall'investitore quindi **non sono v.a.**

Fissate le  $x_i$  il rendimento del portafoglio titoli è **una v.a.** combinazione delle  $R_i$  con coefficienti le  $x_i$ , cioè:

$$R = \sum_{i=1}^n x_i R_i$$



# Portfolio selection

Consideriamo  $n$  titoli sul mercato finanziario e sia  $R_i$  la v.a. che rappresenta il rendimento dell'  $i$ -esimo titolo.

Sia  $\mu_i$  il rendimento atteso di  $R_i$  e  $\sigma_{ij}$  la covarianza tra  $R_i$  e  $R_j$  (quindi  $\sigma_{ii} = \sigma_i^2$  è la varianza di  $R_i$ ).

Indichiamo con  $x_i$  la frazione di capitale investita nel titolo  $i$ -esimo e supponiamo di voler investire tutto il capitale, per cui è

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

N.B. le  $x_i$  sono quantità scelte dall'investitore quindi **non sono v.a.**

Fissate le  $x_i$  il rendimento del portafoglio titoli è **una v.a.** combinazione delle  $R_i$  con coefficienti le  $x_i$ , cioè:

$$R = \sum_{i=1}^n x_i R_i$$



# Portfolio selection

Consideriamo  $n$  titoli sul mercato finanziario e sia  $R_i$  la v.a. che rappresenta il rendimento dell'  $i$ -esimo titolo.

Sia  $\mu_i$  il rendimento atteso di  $R_i$  e  $\sigma_{ij}$  la covarianza tra  $R_i$  e  $R_j$  (quindi  $\sigma_{ii} = \sigma_i^2$  è la varianza di  $R_i$ ).

Indichiamo con  $x_i$  la frazione di capitale investita nel titolo  $i$ -esimo e supponiamo di voler investire tutto il capitale, per cui è

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

N.B. le  $x_i$  sono quantità scelte dall'investitore quindi **non sono v.a.**

Fissate le  $x_i$  il rendimento del portafoglio titoli è **una v.a.** combinazione delle  $R_i$  con coefficienti le  $x_i$ , cioè:

$$R = \sum_{i=1}^n x_i R_i$$



# Portfolio selection

Consideriamo  $n$  titoli sul mercato finanziario e sia  $R_i$  la v.a. che rappresenta il rendimento dell'  $i$ -esimo titolo.

Sia  $\mu_i$  il rendimento atteso di  $R_i$  e  $\sigma_{ij}$  la covarianza tra  $R_i$  e  $R_j$  (quindi  $\sigma_{ii} = \sigma_i^2$  è la varianza di  $R_i$ ).

Indichiamo con  $x_i$  la frazione di capitale investita nel titolo  $i$ -esimo e supponiamo di voler investire tutto il capitale, per cui è

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

N.B. le  $x_i$  sono quantità scelte dall'investitore quindi **non sono v.a.**

Fissate le  $x_i$  il rendimento del portafoglio titoli è **una v.a.** combinazione delle  $R_i$  con coefficienti le  $x_i$ , cioè:

$$R = \sum_{i=1}^n x_i R_i$$



# Portfolio selection

Quindi, come abbiamo visto in precedenza:

$$\mu_R(x) = \sum_{i=1}^n x_i \mu_{R_i},$$

$$\sigma_R^2(x) = x^T Q x,$$

dove,  $q_{ij} = \sigma_{ij}$ .



# Portfolio selection - formulazione multiobiettivo

Markowitz dimostrò che il comportamento osservato di un investitore poteva essere spiegato considerando il seguente problema *multiobiettivo*

$$\begin{aligned} \max \mu_R(x), \min \sigma_R^2(x) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n x_i = 1 \\ x_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

in cui si vuole *contemporaneamente* massimizzare il rendimento atteso e minimizzare la varianza. Per questo, il modello è anche noto con il nome di “*mean-variance*”

