

# Simmetrie e invarianze nel mondo dei costituenti elementari



Alessandro De Angelis

Univ. di Udine, INFN Trieste e IST Lisboa

1000 anni di scienza e tecnica in Italia

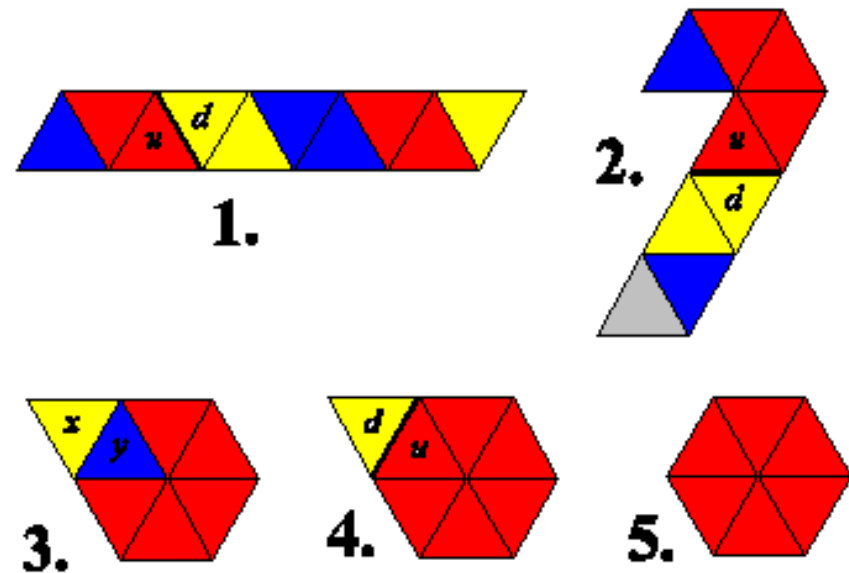
Pordenone, marzo 2001

# E' possibile capire l'universo ?

- Capire (dal latino *capio*, contenere)

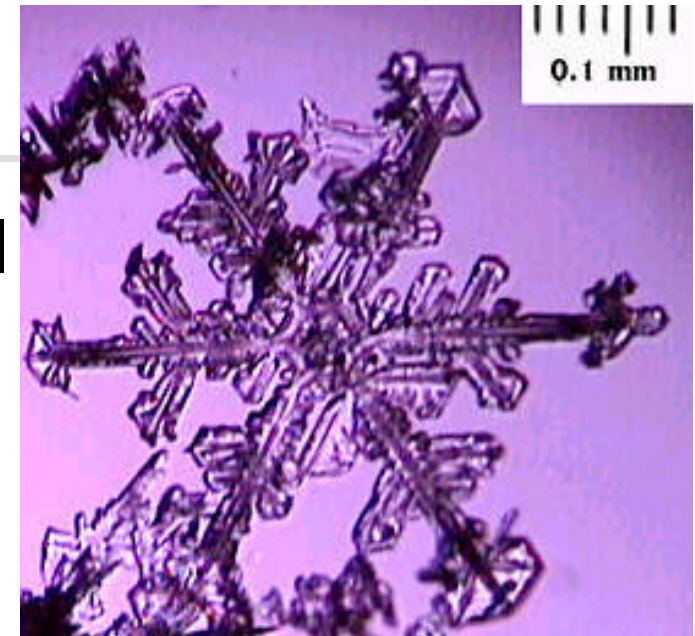
Non possiamo capire l'universo, in quanto ne siamo una -piccola- parte...

- Ma forse c'è un modo di andare oltre noi stessi: se riusciamo a dividere l'universo in unità più semplici, a ripiegarlo su se stesso...



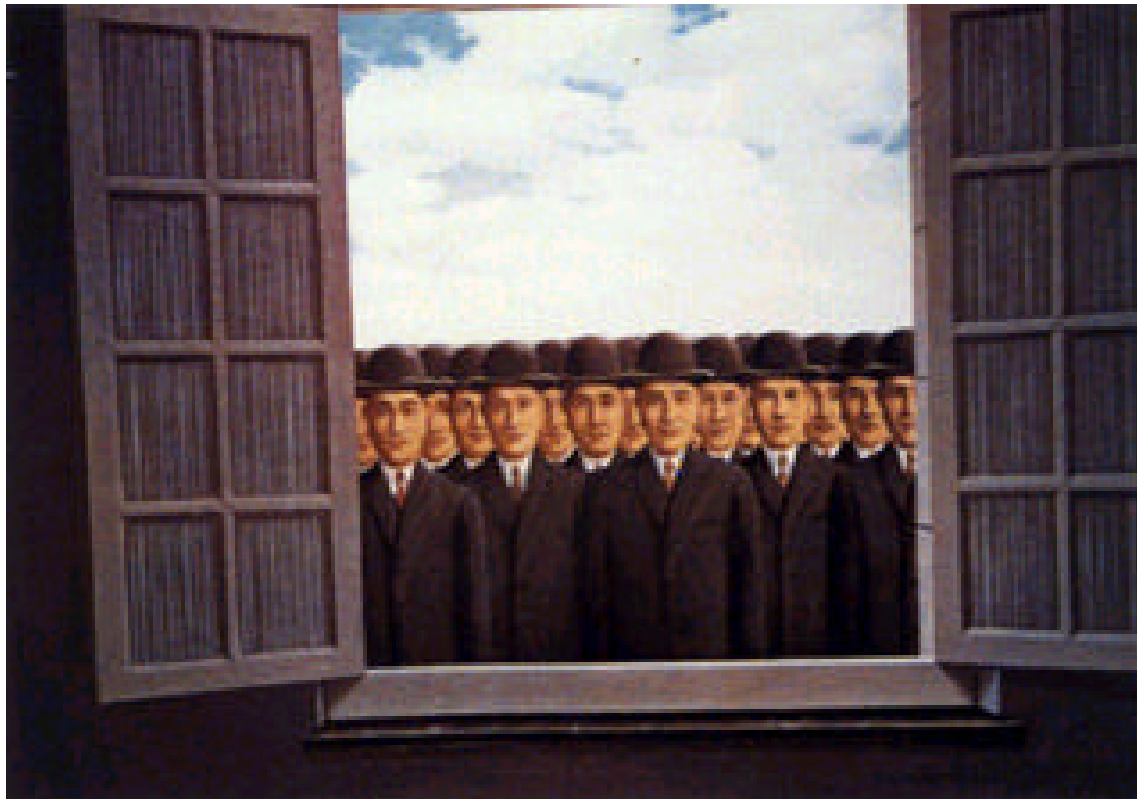
# La simmetria

- Il concetto di simmetria è legato al concetto d'invarianza rispetto a un insieme di trasformazioni (un gruppo di simmetria)
  - Un oggetto che non cambia venendo osservato da punti di vista diversi
- Nasce da un'esigenza umana profonda e antica, ed è associato all'idea di bellezza e all'ideale di perfezione
  - Architettura antica, luoghi religiosi... in cui Dio avrebbe voluto vivere
    - Bello e vero



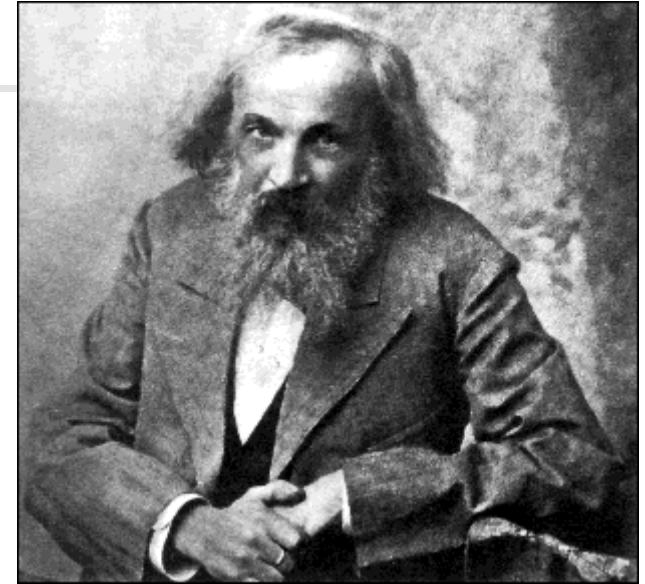
# Simmetria e semplificazione della realtà

- La simmetria ci consente di semplificare la realtà, estrapolando al tutto la comprensione di una parte



# La simmetria e la chimica

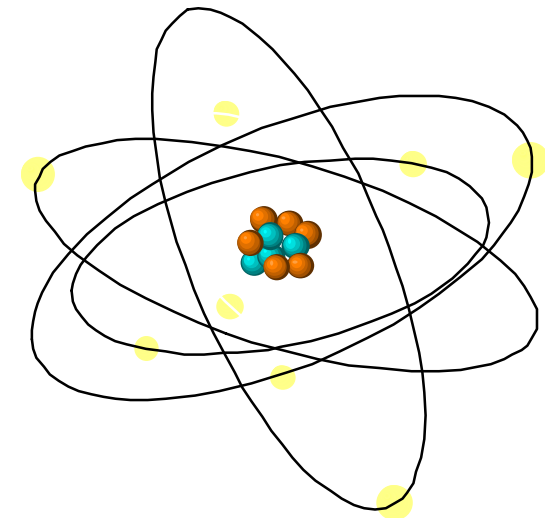
- Una proprietà di simmetria (la tavola periodica) ha consentito di capire la struttura atomica molti anni prima delle osservazioni sperimentali...



group	1*	2											13	14	15	16	17	18	
period	Ia	IIa	IIIa**	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa	IXa	Xa	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb		
1	H																He		
2	Li	Be																	
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar											
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	
			6	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
			7	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
				Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

\* Numbering system recommended by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)  
 \*\* Previous IUPAC numbering system  
 \*\*\* Numbering system recommended by the Chemical Abstracts Service  
 \*\*\*\* For the names of elements 104–112, see Table 27.

©1997 Encyclopaedia Britannica, Inc.



# Il teorema di Nöther



- Stabilisce un'equivalenza tra invarianza (simmetria) dell'hamiltoniano ed esistenza di una legge di conservazione

$$\partial H / \partial q = 0 \Leftrightarrow p = \text{costante}$$

- Un bel teorema con molte sfaccettature...

Se  $q = \mathbf{x}$  ,  $\mathbf{p}$  è il momento (che quantisticamente -a meno di fattori- e' rappresentato dal gruppo delle traslazioni)

- Nota: per un sistema descritto dall'eq. di Schrödinger

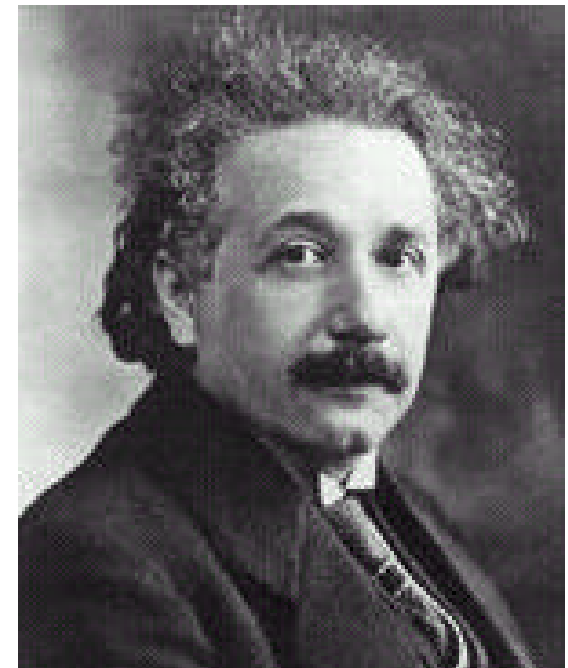
$$\frac{d \langle \mathbf{A} \rangle}{dt} = \frac{i}{\hbar} \langle [\tilde{H}, \tilde{\mathbf{A}}] \rangle \quad \text{e la conservazione diviene banale}$$

# Simmetrie e invarianze

- Teorema di Nöther: relazione tra proprietà intrinseche di simmetria dello spaziotempo e leggi di conservazione

Formulazione covariante in  
relatività speciale einsteiniana  
(gruppo di Lorentz-Poincaré)

- Simmetria per traslazione nel tempo (riproducibilità)  
⇔ conservazione dell'energia
- Omogeneità dello spazio (G delle traslazioni spaziali)  
⇔ conservazione del momento
- Isotropia dello spazio (G delle rotazioni)  
⇔ conservazione del momento angolare



# Simmetrie locali di gauge in meccanica quantistica

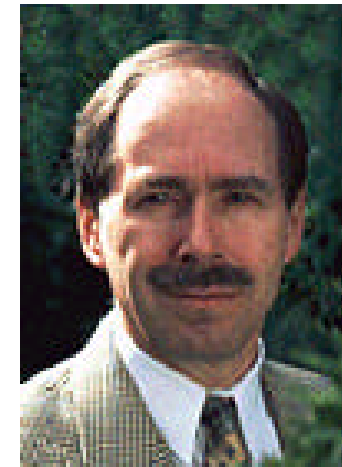
- In teoria dei campi, alle simmetrie locali corrispondono "cariche" conservate

- La fisica non cambia se la funzione d'onda del campo elettromagnetico viene moltiplicata per una fase arbitraria

$$\mathbf{y}(\vec{r}, t) \rightarrow \mathbf{y}(\vec{r}, t) \times e^{iq(\vec{r}, t)} \Rightarrow |\mathbf{y}|^2 \text{ non cambia}$$

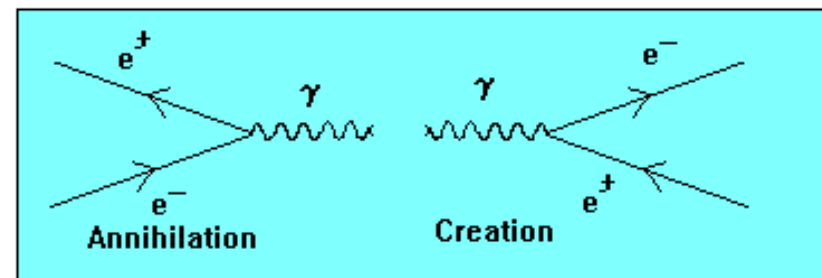
- La quantità conservata corrispondente è la **carica elettrica**

- Tutte le forze (con un caveat per la gravità) vengono spiegate da simmetrie di gauge



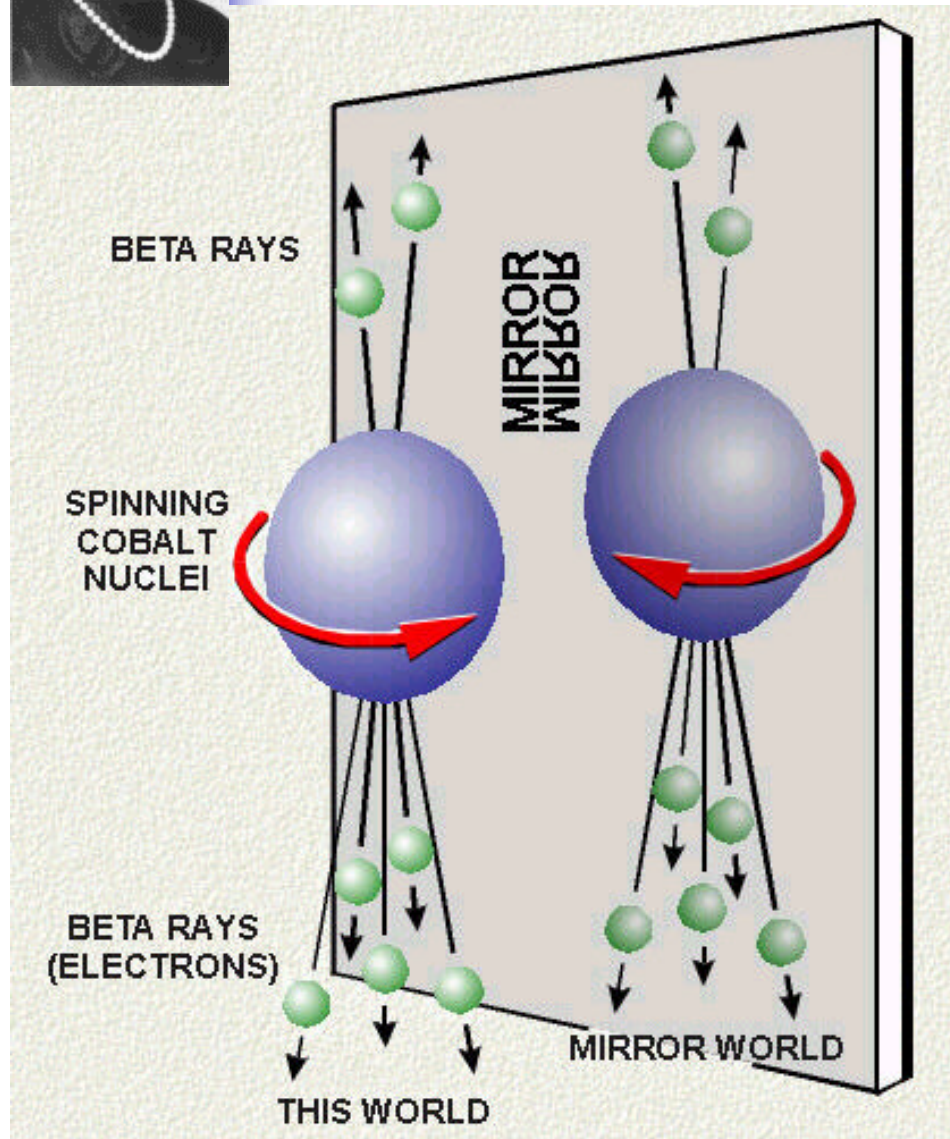
# Simmetrie discrete

- Altre proprietà intrinseche dello spaziotempo che ci attendiamo sono rappresentate da gruppi discreti
  - Simmetria **P** per riflessione (parità)
  - Simmetria **C** per coniugazione di carica (materia-antimateria)
  - Simmetria **T** per inversione del tempo





# La parità violata



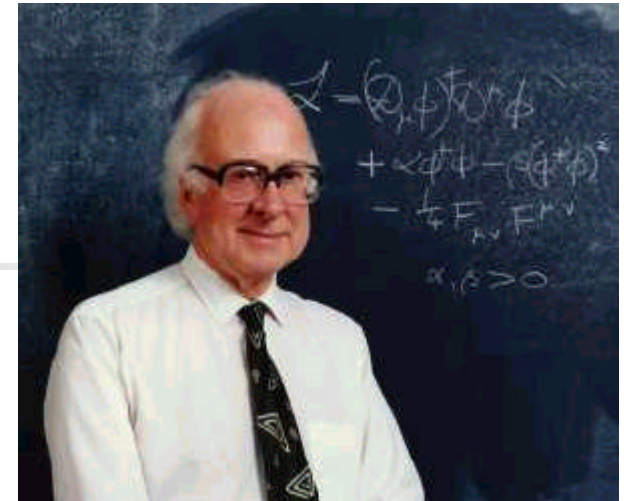
- Nel 1956 un grande shock: la simmetria di parità è violata
- Lo spaziotempo non è come si immaginava...

# Materia e antimateria

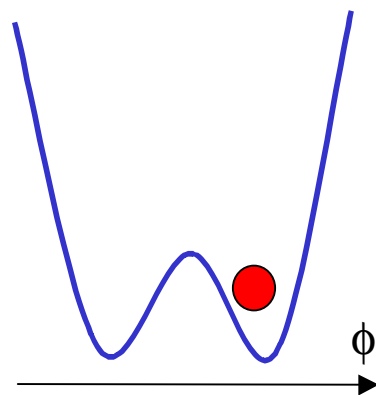
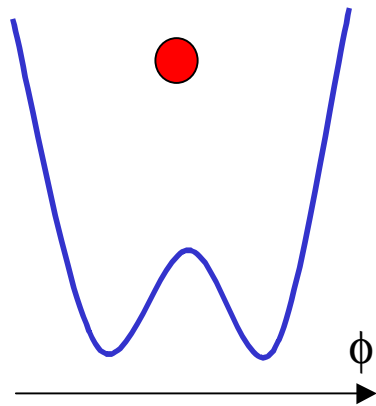
- Anche la simmetria rispetto alla coniugazione di carica è violata: la materia sembra dominare l'universo



# Rottura spontanea della simmetria



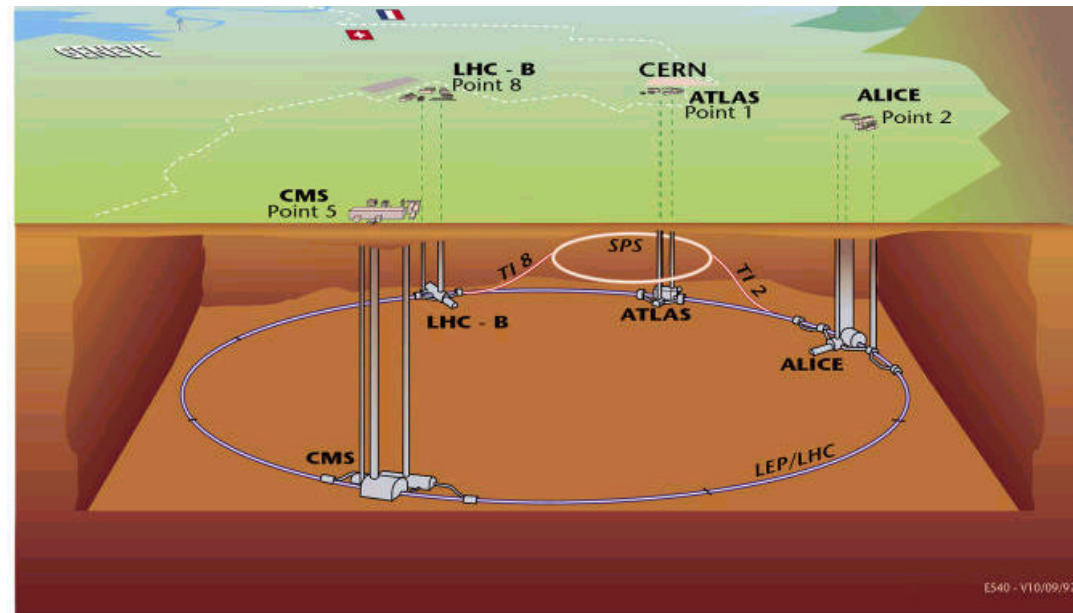
- Il meccanismo di Higgs invoca l'immagine di un mondo ideale



- Un potenziale di forma  $A\phi^4 - B\phi^2$  ( $A$  e  $B > 0$ ) è simmetrico per riflessione; finché l'energia cinetica è alta il mondo è simmetrico
- Quando l'universo si raffredda la simmetria si perde accidentalmente

# Ritrovare la simmetria perduta

- Insomma viviamo in un mondo memore della simmetria ma con qualche difetto; possiamo restaurare la perfezione riavvicinandoci alle energie del big bang



- Nella vera bellezza la simmetria ha sempre qualche imperfezione...

# Il successo delle simmetrie discrete (parzialmente violate)

- Il concetto di simmetria inesatta consente una grande semplificazione del mondo dei costituenti elementari

CONSTITUENTS OF MATTER				CHARGE		
QUARKS	UP	DOWN	STRANGE	TOP	BOTTOM	$+2/3$
	0.3	0.3	0.5	175	4.5	$-1/3$
	MASS (GeV)					
	ELECTRON	MUON	TAU			$-1$
	0.0005	0.106	1.7			
	MASS (GeV)					
ELECTRON NEUTRINO	MUON NEUTRINO	TAU NEUTRINO			0	
0?	0?	0?				
MASS (GeV)						

TRANSMITTERS OF FORCE					
	VECTOR BOSONS			PHOTON	GLUON
	$W^+$	$W^-$	$Z^0$	$\gamma$	$g$
MASS (GeV)	80	80	91	0	0
CHARGE	+1	-1	0	0	0
FORCE	WEAK	WEAK	WEAK	ELECTRO-MAGNETIC	STRONG



# Il Modello Standard



Tutte le interazioni (esclusa la gravità) sono spiegate da una simmetria di gauge

$$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$$

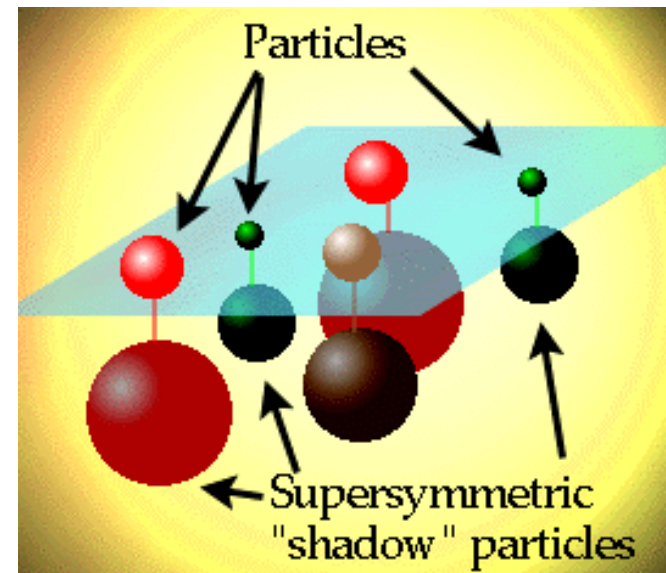
- Impressionanti verifiche sperimentali  
(massa della particella Z : OK con una precisione di 20 ppm)

Due premi Nobel per la Fisica  
al Friuli-Venezia Giulia !



# La supersimmetria

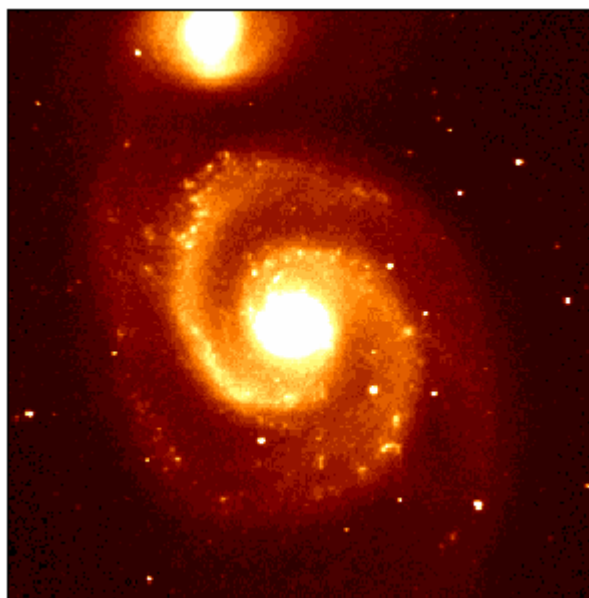
- Che cosa resta per completare il quadro?  
Una simmetria fermioni-bosoni...
- Questa è la supersimmetria (una teoria che spiega molti fenomeni in modo elegante, ma che per il momento non si è mostrata predittiva)



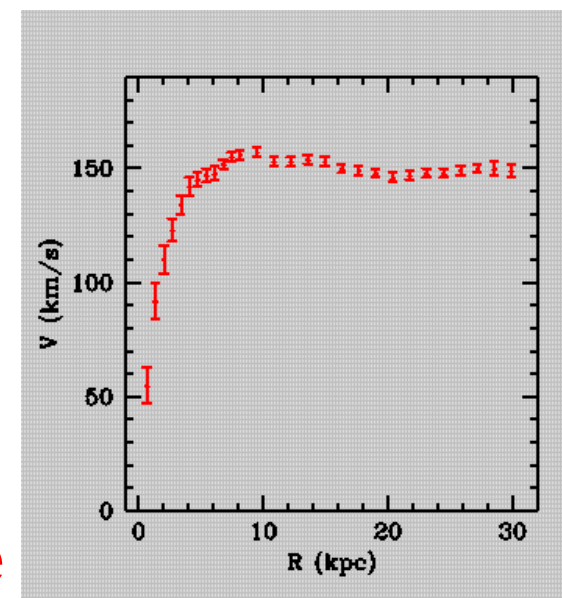
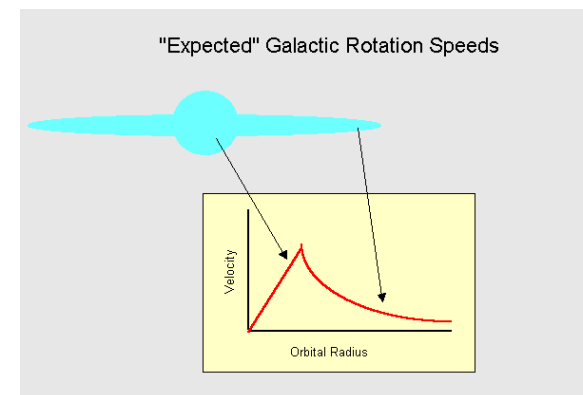
# Ci sono oggetti invisibili (e dominano la materia dell'universo)

17

- La materia oscura (probabilmente il 90% della materia) non emette nelle frequenze da noi visibili

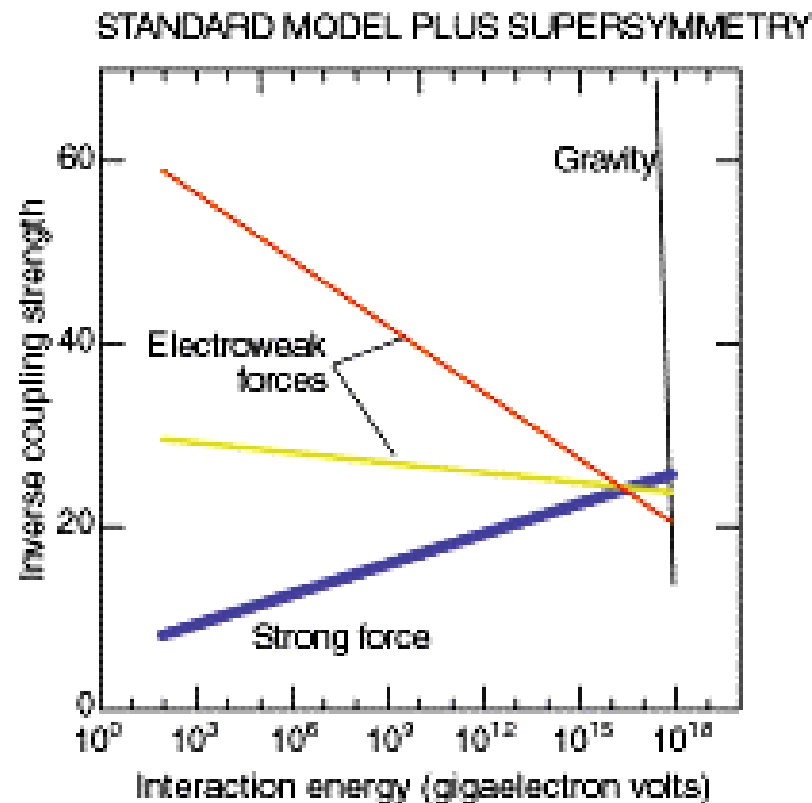
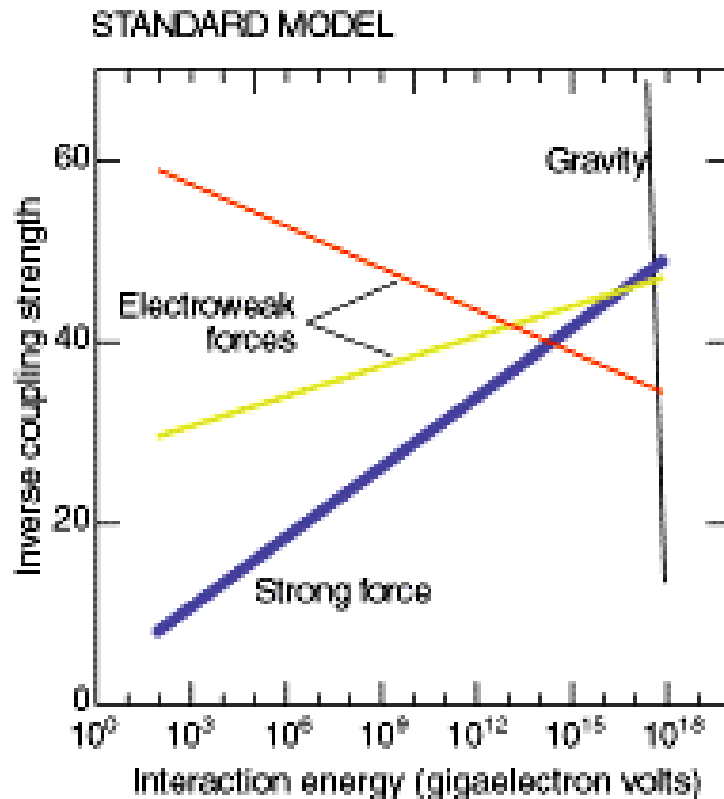


- Sono i compagni supersimmetrici delle nostre particelle ?



# Supersimmetria e unificazione delle forze

- Per realizzare l'unificazione delle forze occorre un nuovo ingrediente; la supersimmetria funzionerebbe...



6) COMPARISON OF GRAND UNIFIED THEORIES WITH ELECTROWEAK AND STRONG COUPLING CONSTANTS MEASURED AT LEP

U. Amaldi (CERN), W. de Boer, H. Furstenuau (Karlsruhe U., IEKP)  
*Phys. Lett. B260 (1991) 447-455.*

400 citations between Jan 1, 93 and Dec 31, 95.

# La materia oscura e il nostro destino ultimo

- Misurare quanta materia c'è nell'universo ci può chiarire il problema fondamentale : l'universo tornerà indietro o continuerà ad espandersi indefinitamente ?
- La risposta è data da un criterio estetico come la simmetria ?





## Conclusioni (e una domanda)

---

- L'interplay tra fisica e matematica trova un campo di applicazione bellissimo (e fruttifero) nello studio delle simmetrie
- Le leggi di conservazione sono riconducibili a proprietà intrinseche dello spaziotempo
- Ma la natura ha davvero (asintoticamente per  $t \rightarrow 0$ ) un elegante pattern di simmetria o è tutto un gioco di specchi senza fine, una costruzione all'infinito che creiamo nell'illusione di trovare un ordine nelle cose?