

Una Nuova Immagine dell'Universo? I Misteri della Supersimmetria

Stefano Spagocci

GACB

(stefanspag@gmail.com)



La Radioattività

- Gli atomi in chimica o meccanica dei gas erano concepiti quali mattoncini fondamentali, non composti da particelle più piccole.
- La scoperta della radioattività suggerì che gli atomi potessero emettere particelle più piccole, quindi contenerle.



Rutherford, Crookes, Chadwick

- Rutherford, agli inizi del XX sec., bombardando atomi con particelle α (nuclei di elio) dimostrò che negli atomi c'è un nucleo con carica positiva, circondato da particelle negative.
- In effetti, per emissione da tubo catodico erano già state scoperte (Crookes) particelle negative (gli elettroni) e positive (i protoni).
- In seguito furono anche scoperte (Chadwick) particelle neutre (i neutroni).



Altre Particelle

- Era ormai chiaro che gli atomi sono composti da particelle elementari.
- Nei primi decenni del '900, nei raggi cosmici si scoprirono i muoni e i pioni.
- Nella stessa epoca si realizzarono i primi acceleratori che permisero, assieme ai raggi cosmici, di scoprire centinaia di nuove particelle.

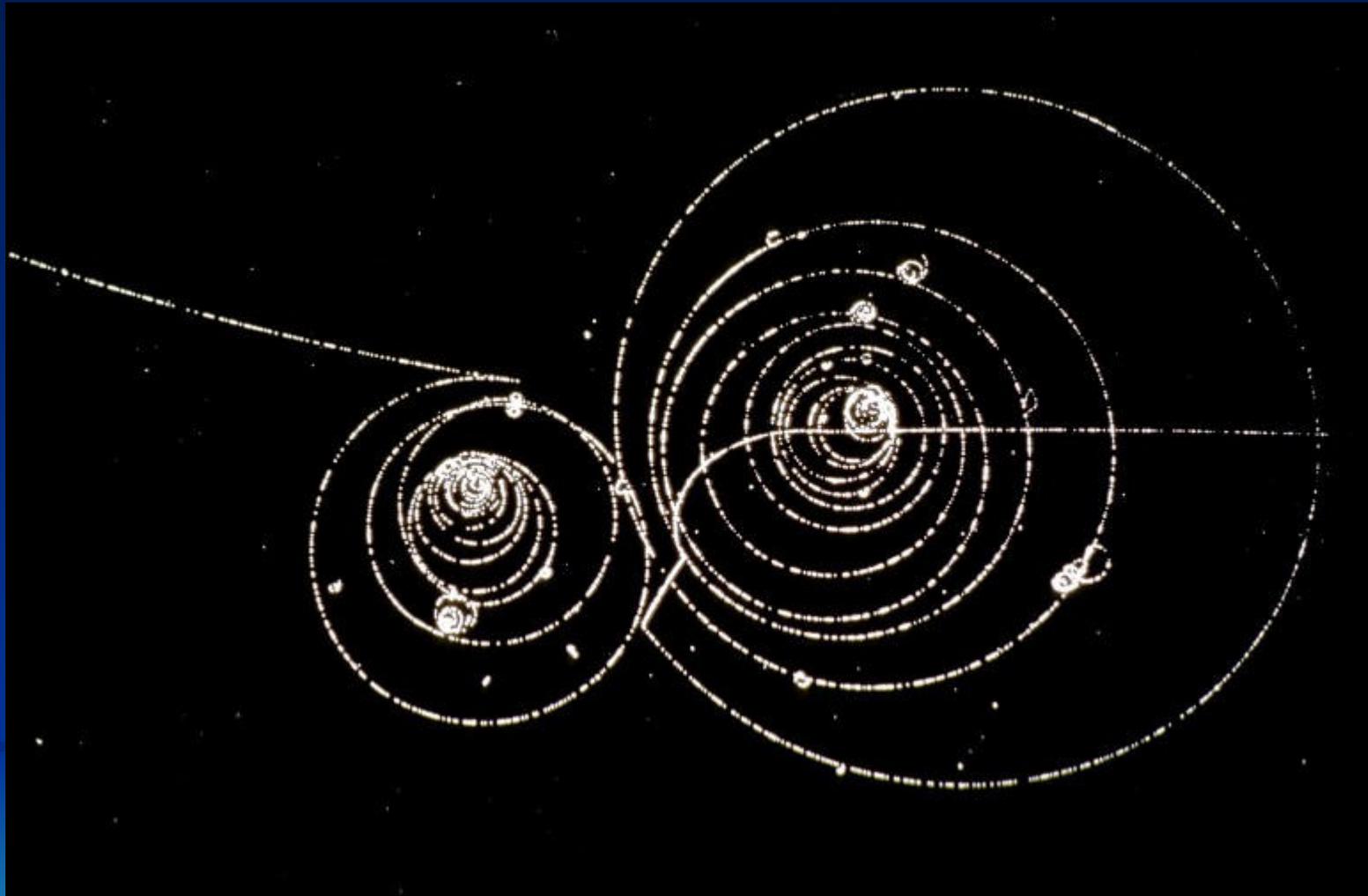




L'Antimateria

- Sempre nei primi decenni del secolo scorso, si scoprirono particelle che erano identiche ad altre particelle, tranne per l'averne carica opposta.
- Si scoprì così l'antimateria (Anderson).
- Ogni particella, in natura, possiede un'antiparticella identica ma di carica e spin opposti.

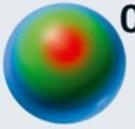
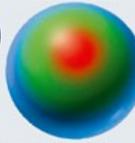




PARTICELLE DI MATERIA

QUARK

Queste particelle formano i protoni, i neutroni e un vero e proprio zoo di altre particelle meno note. Non sono mai stati osservati isolatamente.

<p>UP  u</p> <p>Carica elettrica: +2/3 Massa: 2 MeV Costituente della materia ordinaria; un protone è composto da due quark up e uno down.</p>	<p>CHARM  c</p> <p>Carica elettrica: +2/3 Massa: 1,25 GeV Cugino instabile e più pesante del quark up, scoperto come costituente della particella J/Ψ.</p>	<p>TOP  t</p> <p>Carica elettrica: +2/3 Massa: 171 GeV È la particella più pesante, ha massa paragonabile a un atomo di osmio e una vita media molto breve.</p>
<p>DOWN  d</p> <p>Carica elettrica: -1/3 Massa: 5 MeV Costituente della materia ordinaria; un neutrone è composto da due quark down e uno up.</p>	<p>STRANGE  s</p> <p>Carica elettrica: -1/3 Massa: 95 MeV Cugino instabile e più pesante del quark down, è il costituente del più studiato kaone, altra particella.</p>	<p>BOTTOM  b</p> <p>Carica elettrica: -1/3 Massa: 4,2 GeV Altra copia instabile e ancora più pesante del quark down, è un costituente del mesone B.</p>

LEPTONI

Queste particelle sono immuni all'interazione forte e si osservano isolatamente. Ogni neutrino mostrato qui in realtà è una combinazione di neutrini diversi, ciascuno con massa non più grande di pochi eV.

<p>NEUTRINO ELETTRONICO  ν_e</p> <p>Carica elettrica: 0 Immune sia all'elettromagnetismo che all'interazione forte, non prende parte a quasi nessuna interazione, ma è essenziale nei decadimenti radioattivi.</p>	<p>NEUTRINO MU  ν_μ</p> <p>Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i muoni.</p>	<p>NEUTRINO TAU  ν_τ</p> <p>Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i leptoni tau.</p>
<p>ELETTRONE  e</p> <p>Carica elettrica: -1 Massa: 0,511 MeV La particella più leggera dotata di carica. Trasporta la corrente elettrica e orbita intorno ai nuclei atomici.</p>	<p>MUONE  μ</p> <p>Carica elettrica: -1 Massa: 106 MeV Versione più pesante dell'elettrone, vita media di 2,2 microsecondi, scoperto come componente dei raggi X cosmici.</p>	<p>TAU  τ</p> <p>Carica elettrica: -1 Massa: 1,78 GeV Un'altra versione instabile e ancora più pesante dell'elettrone con una vita media di 0,3 picosecondi.</p>

PARTICELLE DI FORZA

BOSONI

A livello quantistico, ognuna delle forze fondamentali è mediata da una specifica particella o insieme di particelle.

<p>FOTONE  γ</p> <p>Carica elettrica: 0 Massa: 0 Mediatore dell'elettromagnetismo, il quanto di luce agisce sulle particelle cariche elettricamente. Il suo raggio d'azione è illimitato.</p>
<p>BOSONE Z  Z</p> <p>Carica elettrica: 0 Massa: 91 GeV Il mediatore delle reazioni deboli che non modificano l'identità delle particelle. Il suo raggio d'azione è di appena 10⁻¹⁸ metri circa.</p>
<p>BOSONI W⁺/W⁻  W</p> <p>Carica elettrica: +1 o -1 Massa: 80,4 GeV Sono i mediatori dell'interazione debole, che modifica il sapore e la carica delle particelle. Il raggio d'azione di queste interazioni è di appena 10⁻¹⁸ metri circa.</p>
<p>GLUONI  g</p> <p>Carica elettrica: 0 Massa: 0 Otto specie di gluoni mediano l'interazione forte, interagendo con i quark e con altri gluoni. Queste particelle non risentono delle interazioni elettromagnetiche e delle interazioni deboli.</p>
<p>HIGGS  H</p> <p>(ancora non osservato) Carica elettrica: 0 Massa: presumibilmente inferiore a 1 TeV, probabilmente tra 114 e 192 GeV Si ritiene che il bosone di Higgs conferisca la proprietà della massa ai quark, ai leptoni e ai bosoni W e Z.</p>

Il Modello Standard

- Abbandoniamo ora il criterio cronologico e descriviamo il Modello Standard delle particelle elementari, che pone ordine tra di esse.
- Elaborato da Glashow, Salam e Weinberg sul finire degli anni '60 del secolo scorso.



Mesoni (Quark + Antiquark)

- π^+ = pione positivo = $u\bar{d}$, carica = 1.
- π^- = $\bar{u}d$, pione negativo, carica = -1 (antiparticella).
- Decadono in un muone.
- π^0 = pione neutro = $u\bar{u} + d\bar{d}$, carica = 0.
- Decade in due fotoni.
- ...

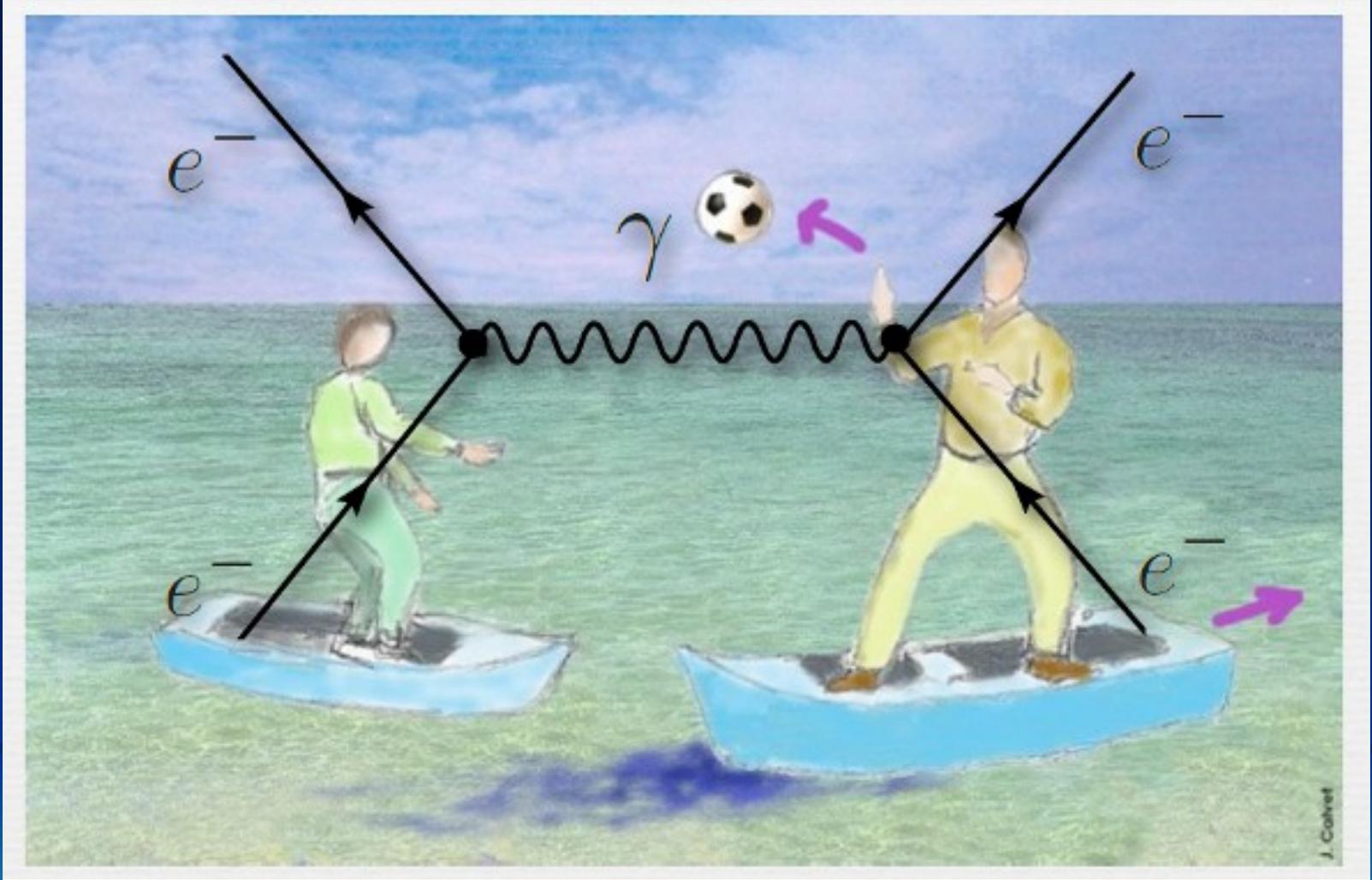


Barioni (3 Quark)

- p = protone = uud , carica = 1.
- n = neutrone = udd , carica = 0.
- \bar{p} = antiprotone = $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$, carica = -1.
- \bar{n} = antineutrone = $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$, carica = 0.

• ...





J. Cochet

Le Forze

- Tutte le particelle cariche sentono la forza elettromagnetica.
- Leptoni e quark (e particelle composte da quark) sentono la forza debole.
- Solo i quark (e particelle composte da quark) sentono la forza forte.

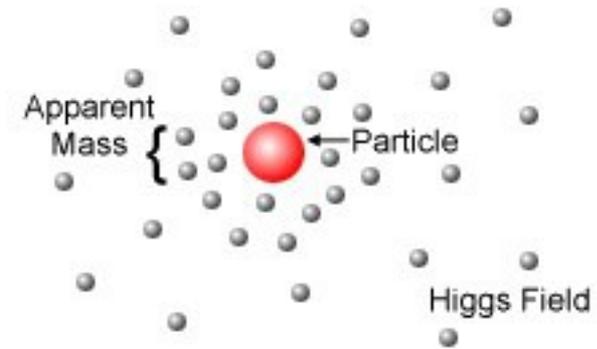


Forza Elettrodebole

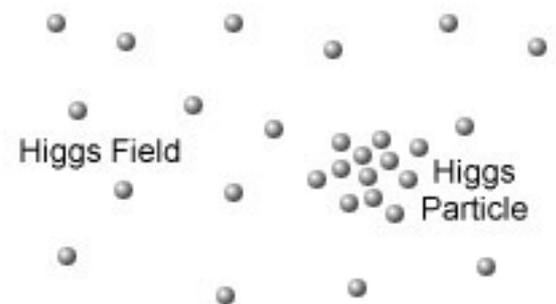
- Nel Modello Standard si assume l'esistenza di una particella neutra, il bosone di Higgs (scoperto al CERN/LHC nel 2012).
- Ad alte energie la forza elettromagnetica e quella debole hanno lo stesso mediatore, dunque coincidono.
- A basse energie il fotone, le W e le Z interagiscono con il campo di Higgs in maniera differente e dunque si differenziano in massa.



Higgs Mechanism

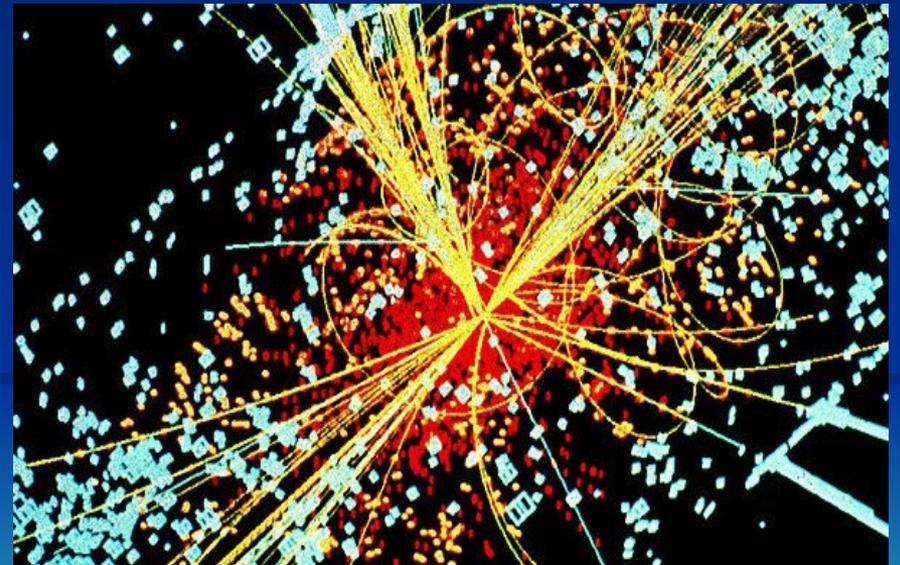
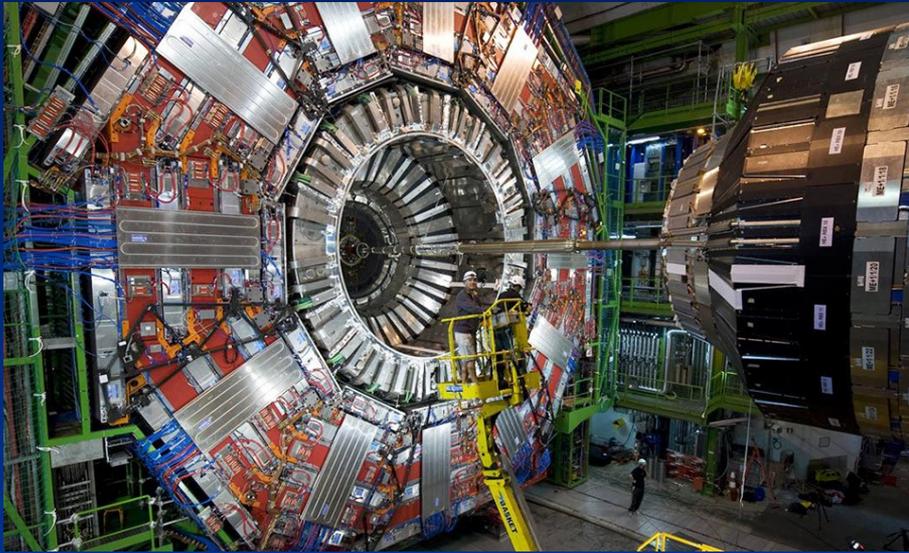


Higgs Particles

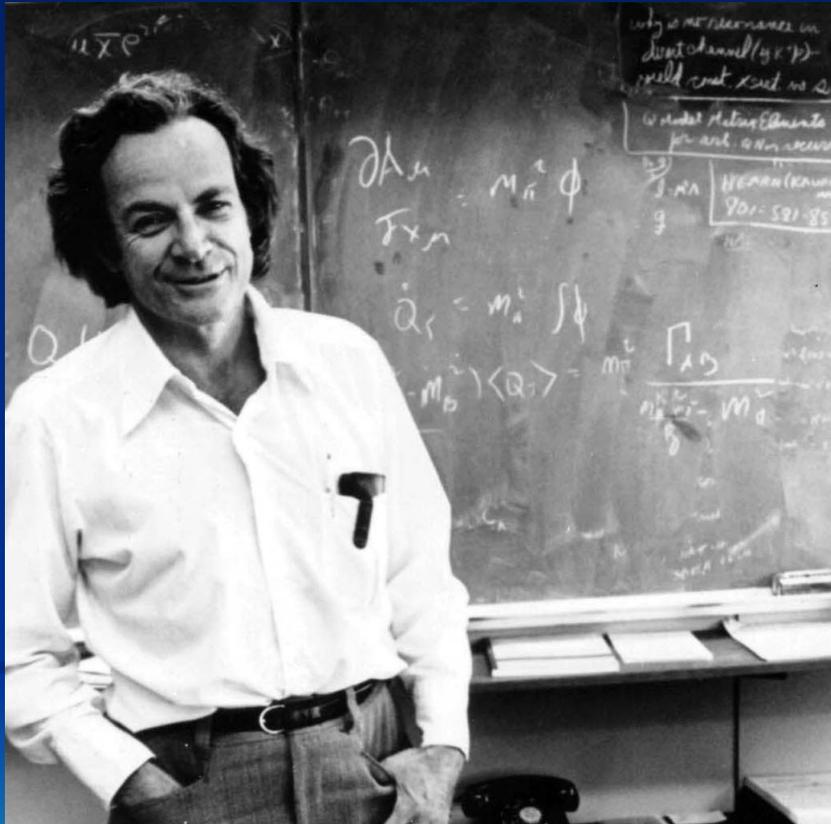


$\mathcal{L} = (D_\mu \phi)^\dagger D^\mu \phi - U(\phi) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$
 $D_\mu \phi = \partial_\mu \phi - ie A_\mu \phi$
 $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$
 $U(\phi) = \alpha \phi^\dagger \phi + \beta (\phi^\dagger \phi)^2$
 $\alpha < 0, \beta > 0$
Peter Higgs

La Scoperta dell'Higgs

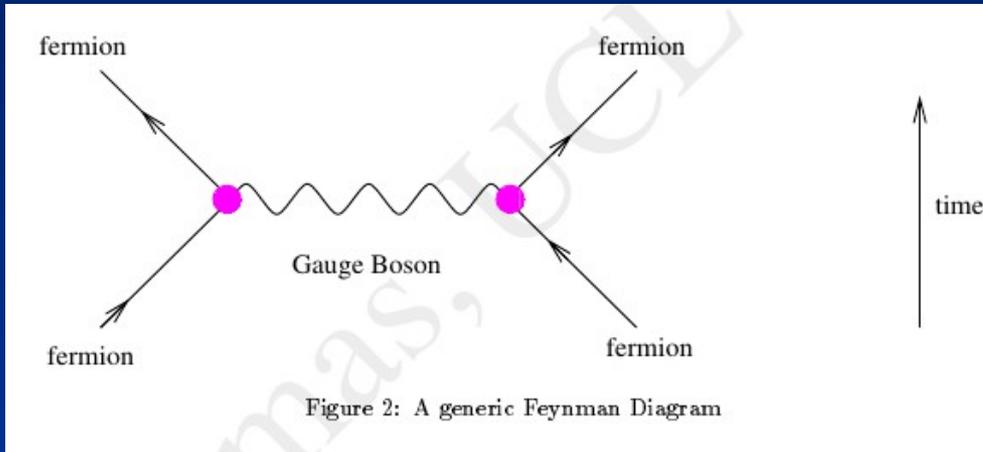


Lagrangiana e Diagrammi di Feynman

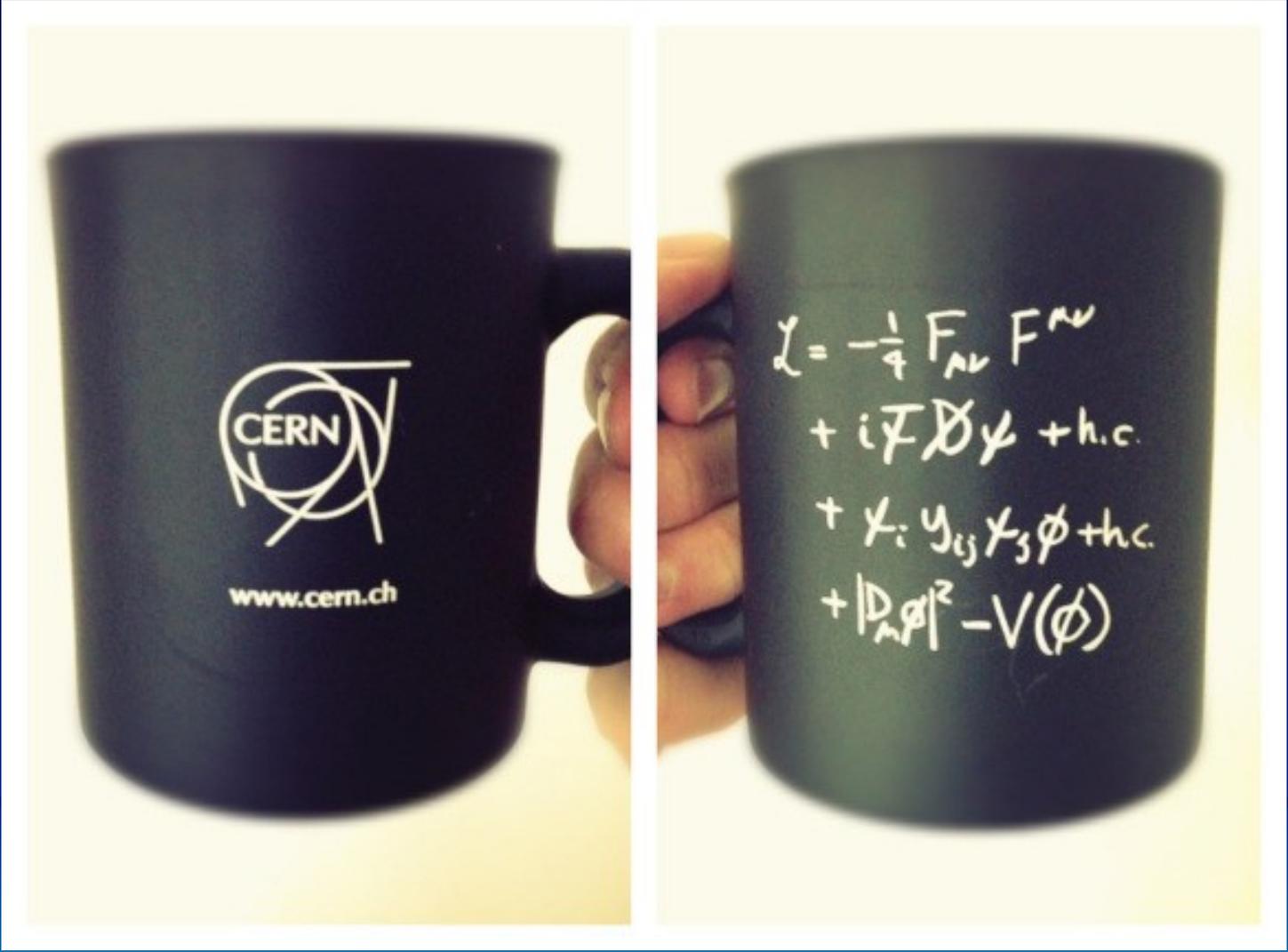


- La lagrangiana del Modello Standard è sostanzialmente l'energia (per unità di volume) contenuta in una certa zona di spazio-tempo, in funzione dell'intensità dei vari campi (quali quello elettromagnetico). Ogni particella o forza ha un campo associato.

Lagrangiana e Diagrammi di Feynman



- Dall'espressione per la lagrangiana è immediato ricavare le regole per la costruzione dei diagrammi di Feynman.
- I diagrammi di Feynman, al livello più basso, sono rappresentazioni pittoriche e intuitive dei processi di interazione tra particelle.
- A un livello più alto, dai diagrammi di Feynman per un processo si ricavano subito le regole per calcolare la probabilità del processo stesso (tali diagrammi si possono quindi considerare una sorta di stenografia).



WHAT PART OF

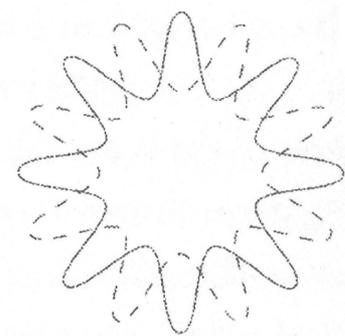
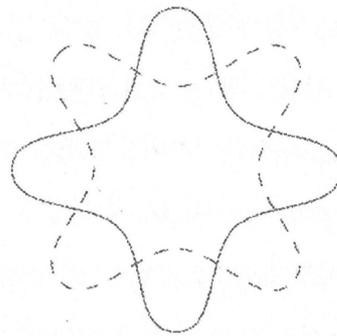
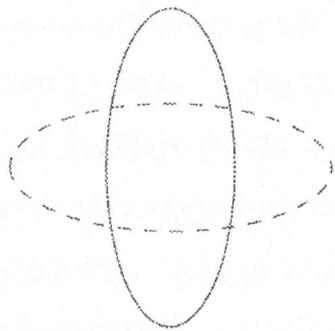
$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^\alpha \partial_\nu g_\mu^\alpha - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^b g_\mu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}i g_s^2 (\bar{q}^c \gamma^\mu q^c) g_\mu \\
 & \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \\
 & \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2} m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M}{g^2} \alpha_h - i g_{c_w} [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - i g_{s_w} \partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
 & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - \\
 & A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^- W_\mu^-) - 2 A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- - g \alpha [H^3 + \\
 & H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2} g^2 \alpha_h H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + \\
 & 2(\phi^0)^2 H^2] - g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2} i g [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2} g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} [Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \phi^0 \partial_\mu H) - i g \frac{s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + i g s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \\
 & \phi^- \partial_\mu \phi^+) + i g s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{2} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \\
 & \frac{1}{2} i g^2 \frac{s_w}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} i g^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- \\
 & W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w^2}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma^\partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \\
 & \bar{\nu}^\lambda \gamma^\partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + i g_{s_w} A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \\
 & \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \frac{4i g}{3c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) - (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3} s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3} s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{4i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) - (u_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) C_{\lambda k} d_j^\lambda)] + \frac{4i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{4i g}{2\sqrt{2}} M^2 [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \\
 & \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{4i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_h^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 - \\
 & \gamma^5) d_j^\lambda) + m_h^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{4i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_h^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^1 (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_h^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^1 (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (u_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (d_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{4i g}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{4i g}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\
 & X^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + X^- (\partial^2 - M^2) X^- + X^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + Y \partial^2 Y + i g_{c_w} W_\mu^+ (\partial_\mu X^0 X^- - \\
 & \partial_\mu X^+ X^0) + i g_{s_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu X^+ \bar{Y}) + i g_{c_w} W_\mu^- (\partial_\mu X^- X^0 - \partial_\mu X^0 X^+) + \\
 & i g_{s_w} W_\mu^- (\partial_\mu X^- Y - \partial_\mu Y X^+) + i g_{c_w} Z_\mu^0 (\partial_\mu X^+ X^+ - \partial_\mu X^- X^-) + i g_{s_w} A_\mu (\partial_\mu X^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu X^- X^-) - \frac{1}{2} g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} i g M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\
 & X^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} i g M [X^0 X^- \phi^+ - X^0 X^+ \phi^-] + i g M s_w [X^0 X^- \phi^+ - X^0 X^+ \phi^-] + \\
 & \frac{1}{2} i g M \bar{X}^+ X^+ \phi^0 - X^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

**DO YOU NOT
UNDERSTAND?**

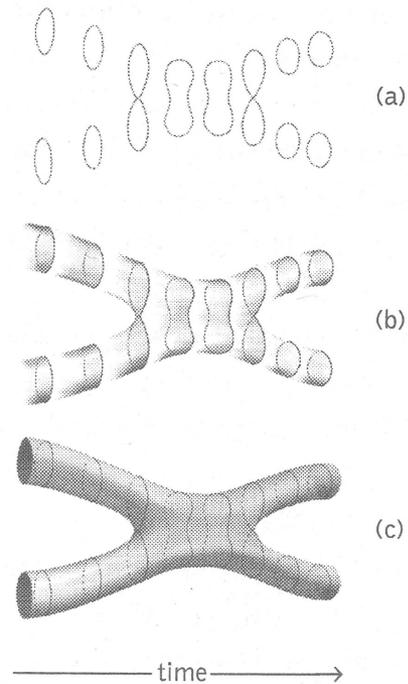
Teoria delle Stringhe

- Secondo la teoria delle stringhe, le particelle elementari, compresi i quanti di campo, sarebbero in realtà delle piccolissime corde vibranti (impropriamente dette “stringhe” in italiano).
- Come una corda di violino può vibrare a diverse frequenze, le stringhe possono vibrare a diverse frequenze e ogni frequenza corrisponde a un diverso tipo di particella elementare.

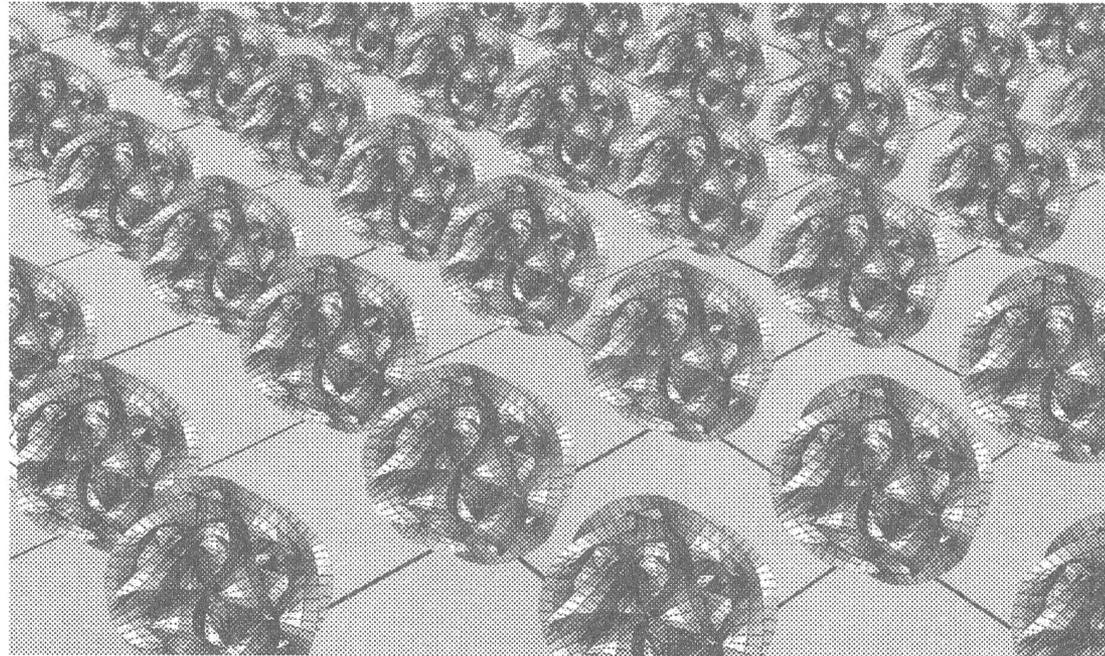




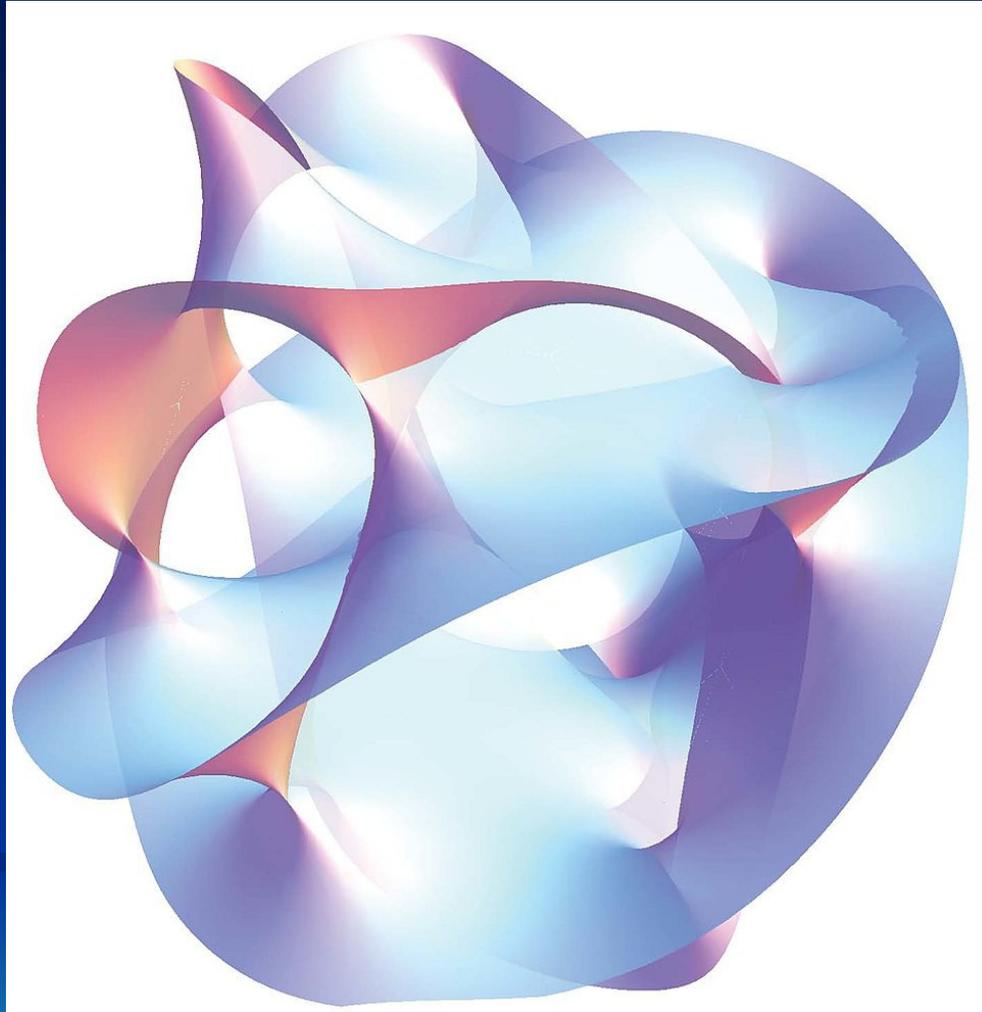
The loops in string theory can vibrate in resonance patterns similar to those of violin strings—in which a whole number of peaks and troughs fit along their spatial extent.



(a) Two strings on a collision course can merge into a third string, which subsequently can split apart into two strings travelling along deflected trajectories. (b) The same process as shown in (a), emphasizing string motion. (c) A “time-lapse photograph” of two interacting strings sweeping out a “world-sheet.”



According to string theory, the universe has extra dimensions curled up into a Calabi-Yau shape.



Bosoni e Fermioni

- Le particelle elementari, come accennato in precedenza, si dividono in bosoni e fermioni.
- I bosoni (es. fotoni, W, Z, gluoni) sono particelle “cui piace stare in compagnia”, ovvero tendono ad aggregarsi nello stesso stato (un esempio è il laser).
- I fermioni (es. leptoni e quark) sono particelle “cui piace stare da sole”, ovvero in un certo stato può esistere una sola particella (esempi sono gli elettroni che circondano il nucleo di un atomo).



Supersimmetria

- La supersimmetria è nata negli anni '70 del secolo scorso da un “modello giocattolo” (toy model) nel campo della fisica delle particelle elementari.
- I toy models sono modelli matematici (cioè insiemi di equazioni) che si sanno non essere realistici ma che, per la loro relativa semplicità, possono essere studiati in dettaglio e spesso fornire preziose informazioni su come affrontare i più complicati modelli realistici.



Supersimmetria

- E' una teoria delle particelle elementari, per la quale ad ogni tipo di bosone corrisponde un superpartner fermione e ad ogni tipo di fermione esiste un superpartner bosone.
- Ogni particella, infatti, tra le caratteristiche che la definiscono ha quella di possedere uno spin. Lo spin di una particella può essere visto come una misura della velocità con cui la particella ruota su se stessa (più esattamente il suo momento angolare).



Supersimmetria

- Esprimendo lo spin in opportune unità di misura (per gli esperti, in unità di \hbar tagliato), si trova che i bosoni hanno spin intero (0, 1, 2...) mentre i fermioni hanno spin semintero ($1/2$, $3/2$, $5/2$...).
- I leptoni hanno spin $1/2$, i bosoni vettori (i quanti delle diverse forze) hanno spin 1 (tranne il gravitone che ha spin 2), il bosone di Higgs ha spin 0.



Superpartner

- I superpartner dei leptoni (spin $1/2$) prendono il nome di sleptoni (spin 0) e si hanno dunque selettroni, smuoni, stauoni, sneutrini dei tre tipi, più le relative antiparticelle.
- I superpartner dei bosoni vettori (spin 1 , tranne il gravitone, spin 2 e l'Higgs, spin 0) prendono il nome in -ini (spin $1/2$, tranne il gravitino, spin $3/2$) e si hanno dunque fotini, wini, zini, gluini, higgsini (carichi e neutri), più le eventuali antiparticelle.



Superpartner

- Se la supersimmetria fosse una simmetria esatta, le masse di una particella elementare e del suo superpartner dovrebbero essere uguali.
- Poichè invece la supersimmetria non è esatta (si dice che “la simmetria è rotta”), la massa di una particella elementare è più piccola di quella del suo superpartner.



Verifica Sperimentale

- Applicando le equazioni della supersimmetria si possono fare previsioni sulla probabilità che varie reazioni tra particelle elementari avvengano, in funzione, tra l'altro, della massa dei vari superpartner.
- Tali masse devono quindi essere misurate. Quando lo saranno, si potranno calcolare le probabilità dei vari processi e confrontarle con le probabilità misurate negli esperimenti.



Verifica Sperimentale

- Il primo passo sarebbe dunque scoprire i vari superpartner e, di conseguenza, misurarne le masse (previste essere dell'ordine di 1 Tev, mille miliardi di elettronvolt).
- La ricerca di superpartner cominciò negli anni '90 del secolo scorso e ancora oggi continua. Ha coinvolto il Tevatron (Fermilab, Chicago - USA) e il LEP (CERN, Ginevra - CH); oggi coinvolge il più grande acceleratore del mondo, l'LHC del CERN.



Verifica Sperimentale

- Se un acceleratore raggiunge un'energia E , potrà produrre particelle di massa/energia pari al massimo ad E .
- Poichè l'LHC può mettere a disposizione un'energia dell'ordine dei 10 Tev, si prevedeva di scoprire, quantomeno all'LHC, almeno alcuni superpartner.

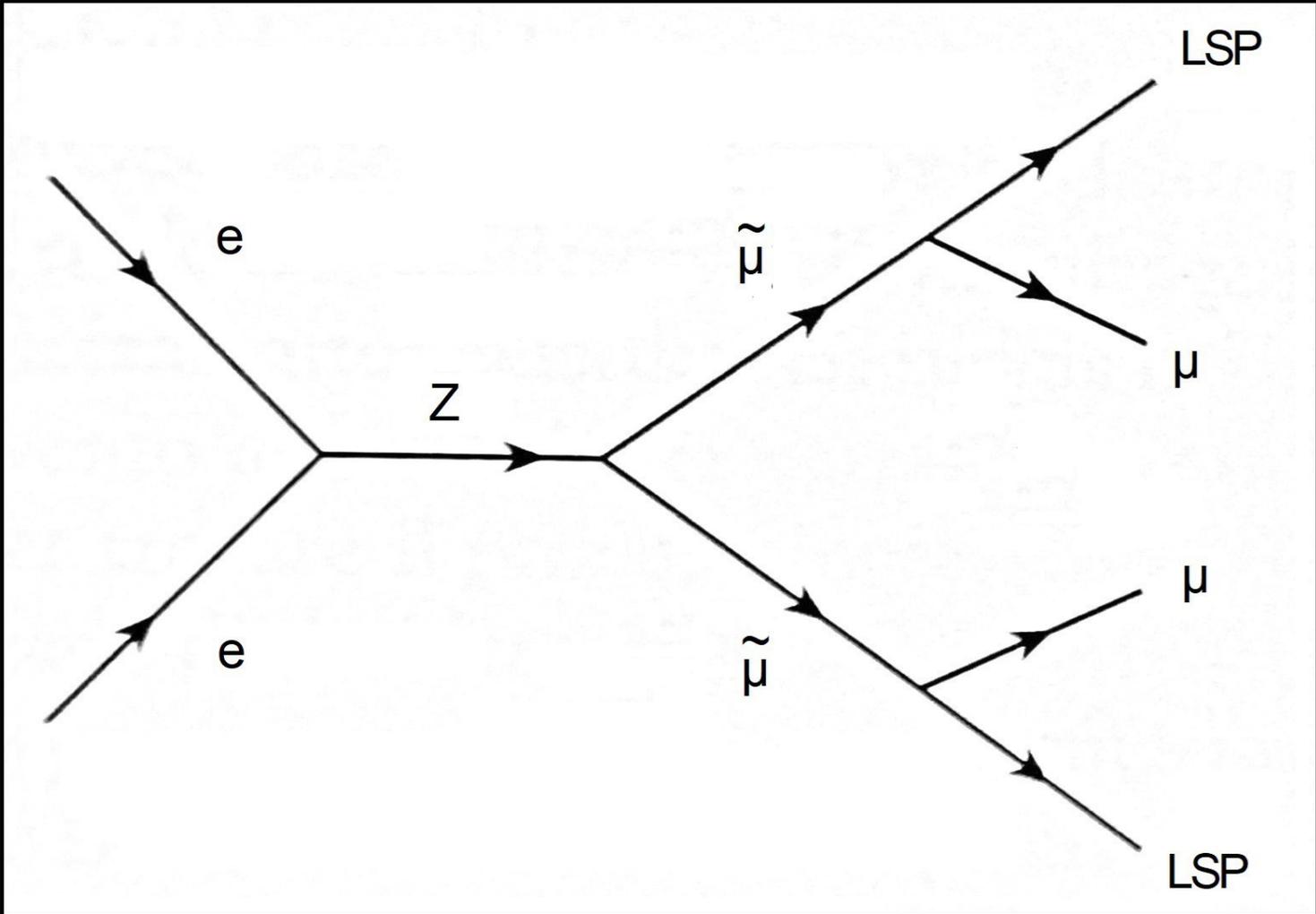


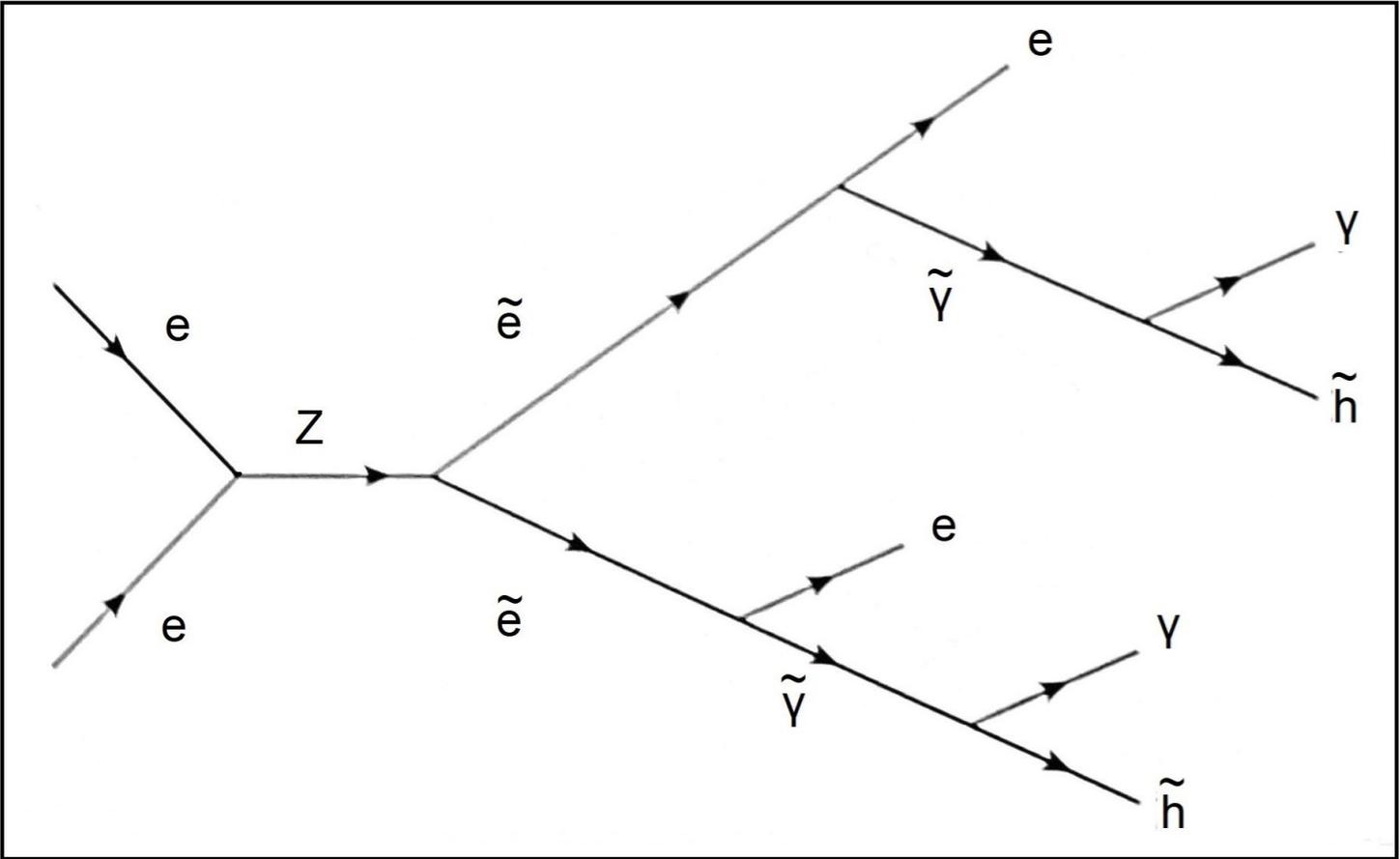
- Nelle prossime slide mostriamo i diagrammi di Feynman dei processi mediante i quali si pensava di scoprire almeno il superpartner più leggero (LSP), probabilmente un neutralino (una miscela di fotini, zini e higgsini neutri).
- Ogni superparticella, si predice, prima o poi decade in un insieme di particelle ordinarie ed uno o più LSP.

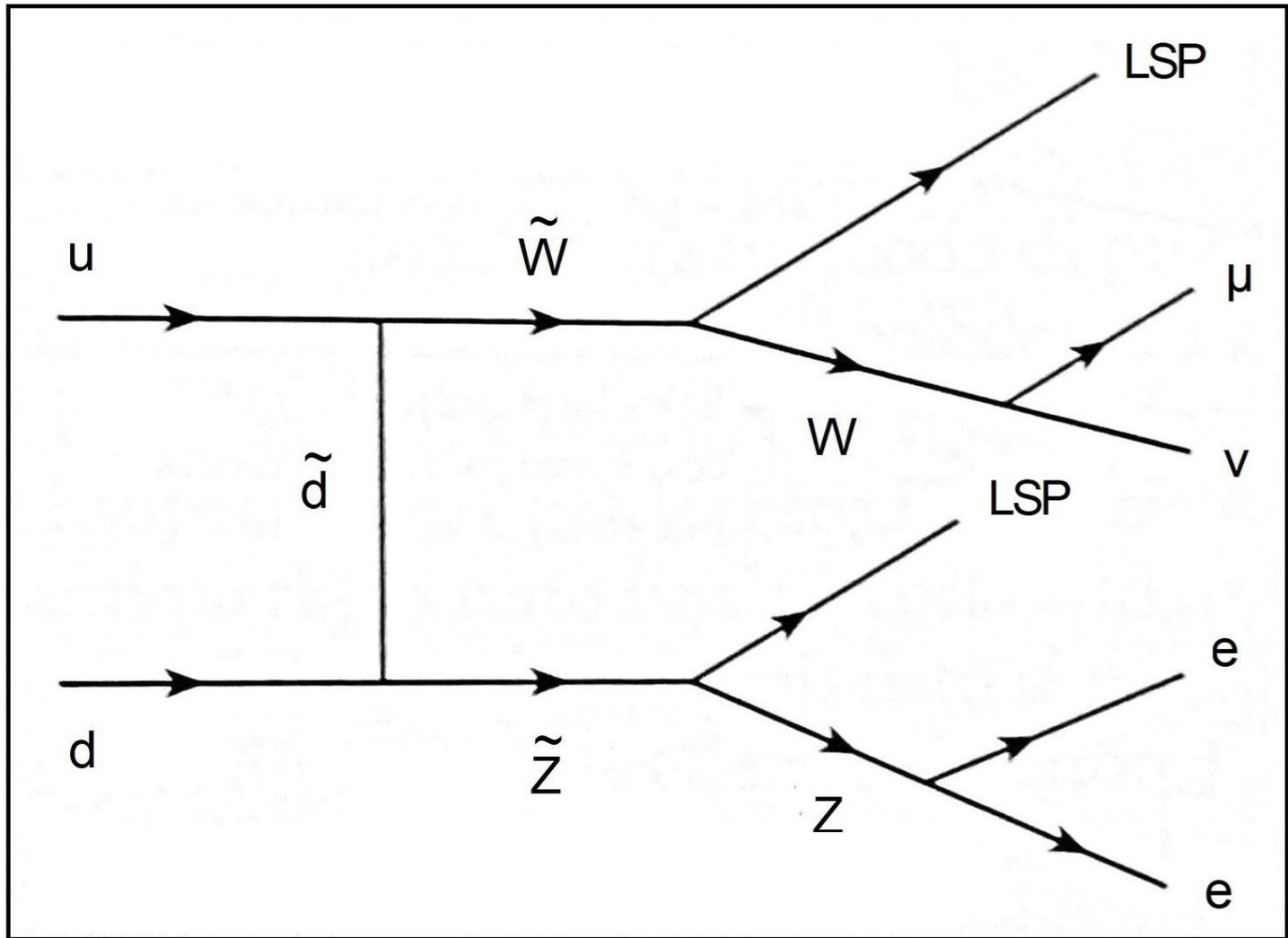


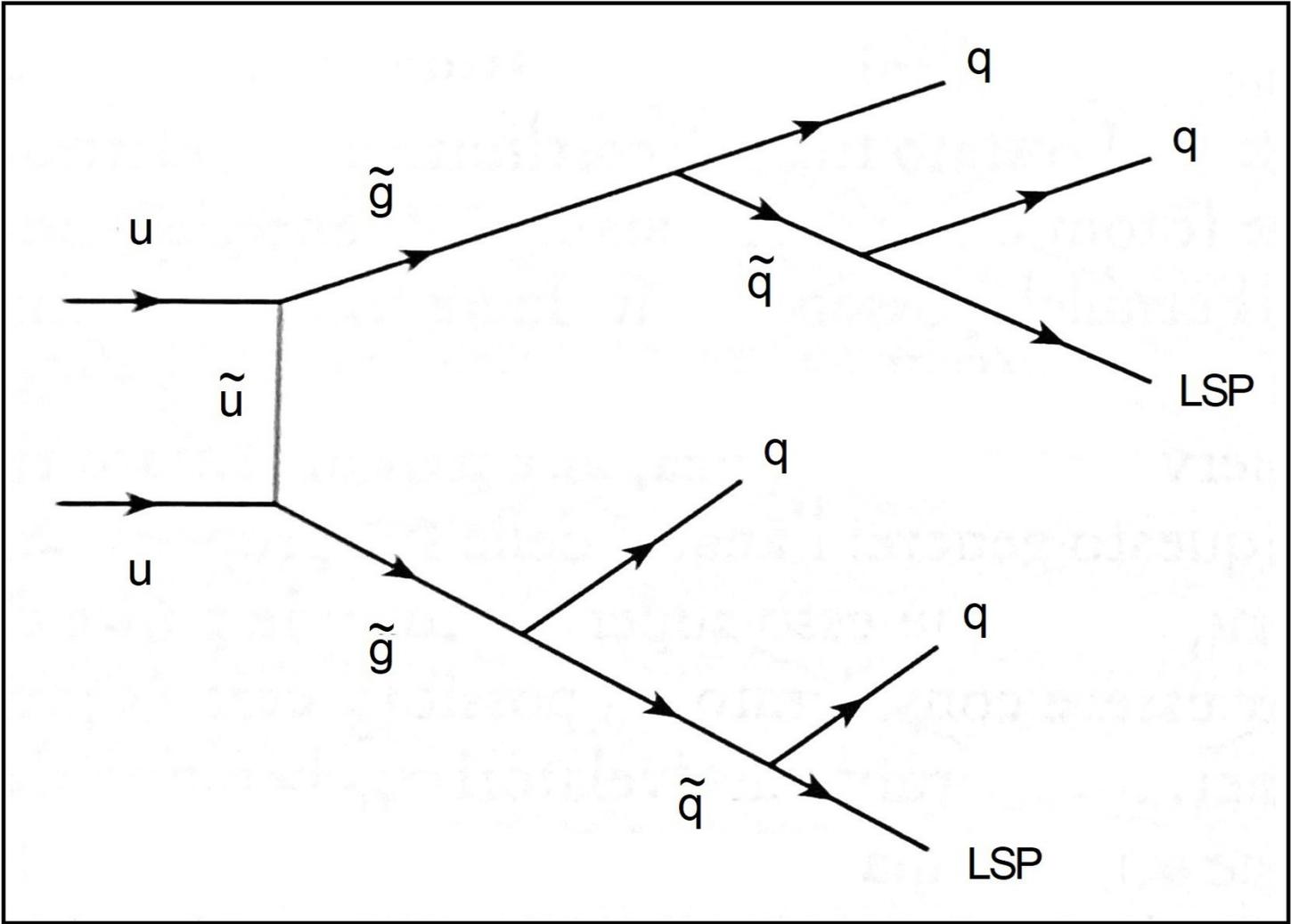
- Gli LSP sono invece stabili, cioè non decadono. Interagiscono molto debolmente con la materia circostante e dunque non sono registrati dai rivelatori dell'acceleratore.
- Appaiono dunque come energia mancante, quando si fa un bilancio tra l'energia delle particelle che si sono scontrate e quella delle particelle prodotte nello scontro.











Risultati Sperimentali

- Finora non è stato scoperto alcun LSP, quindi nessun superpartner.
- Ci sono due possibilità: può darsi che la supersimmetria non sussista o che la massa dei superpartner, quindi anche degli LSP, sia molto maggiore di 1 Tev.



- La supersimmetria, ammesso che veramente sussista, risolverebbe o allevierebbe alcuni importantissimi problemi aperti della fisica delle particelle elementari e della cosmologia.



Unificazione delle Forze

- La forza forte, nel Modello Standard, non è unificata con la elettrodebole. Tuttavia teorie più avanzate (GUT o Teorie di Grande Unificazione), non ancora verificate sperimentalmente, includono anche la forza forte.
- Altre teorie (stringhe e gravità a loop), difficilmente verificabili sperimentalmente, includono anche la gravità.
- Come mostra il grafico seguente, secondo il Modello Standard non si arriverebbe mai ad una vera unificazione; con la supersimmetria sì.



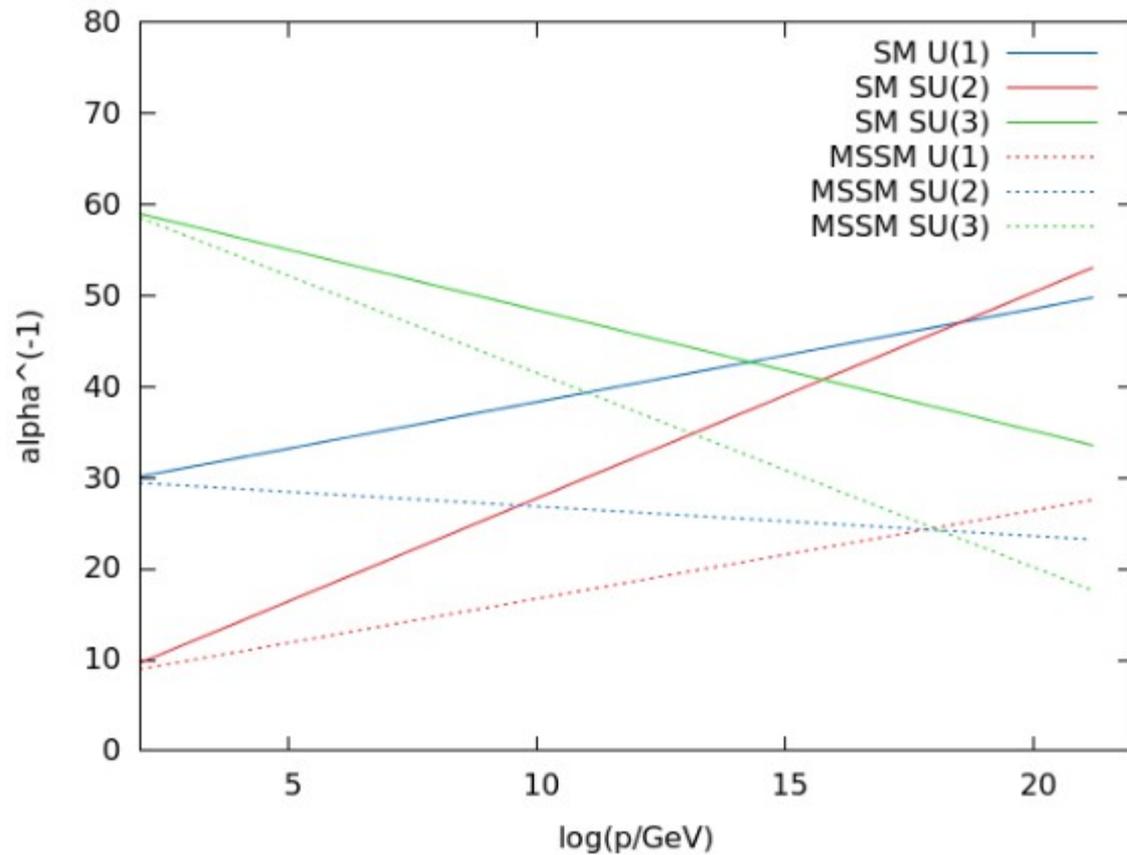


Figure 1: One Loop Running Couplings in the SM and MSSM

Massa delle Particelle

- Ogni particella elementare è circondata da una nube di altre particelle elementari che appaiono “dal nulla” e rapidamente scompaiono (principio di indeterminazione di Heisenberg).
- Tenuto conto di tale nube, ogni particella dovrebbe avere massa zero o “quasi infinita” (maggiore della massa di Planck).
- Se la natura fosse supersimmetrica, il contributo alla massa di una particella sarebbe annullato da quello del suo superpartner e il problema svanirebbe.



Meccanismo di Higgs

- Secondo il Modello Standard, la massa dei bosoni di Goldstone (precursori del bosone di Higgs) dovrebbe essere espressa da un numero immaginario (radice quadrata di un numero negativo).
- Se la natura fosse supersimmetrica, la massa dei bosoni di Goldstone sarebbe espressa da un numero reale per esperimenti ad energie “quasi infinite” (massa/energia maggiore di quella di Planck); per esperimenti alle energie ottenibili dagli acceleratori tale massa diverrebbe immaginaria e avremmo in tal modo spiegato il meccanismo di Higgs.



Teoria delle Stringhe

- La teoria delle stringhe, per fornire risultati sensati, ha bisogno della supersimmetria.
- Se la natura fosse supersimmetrica e lo confermassimo sperimentalmente, avremmo una “verifica” (molto indiretta) della validità della teoria delle stringhe.
- Se la natura si dimostrasse non supersimmetrica, la teoria delle stringhe non varrebbe e dovremmo quindi escogitare un'altra teoria del tutto.



Decadimento del Protone

- Le GUT, unite alla supersimmetria, prevedono che ogni protone decada in tempi lunghissimi, trasformandosi in altre particelle.
- Numerosi esperimenti in laboratori sotterranei (tra cui quello del Gran Sasso) sono stati effettuati per rivelare il decadimento del protone ma finora non hanno dato risultati.
- Il protone allora non decade o decade con una vita media tanto lunga (maggiore di 10^{33} anni) da non poter essere misurata.



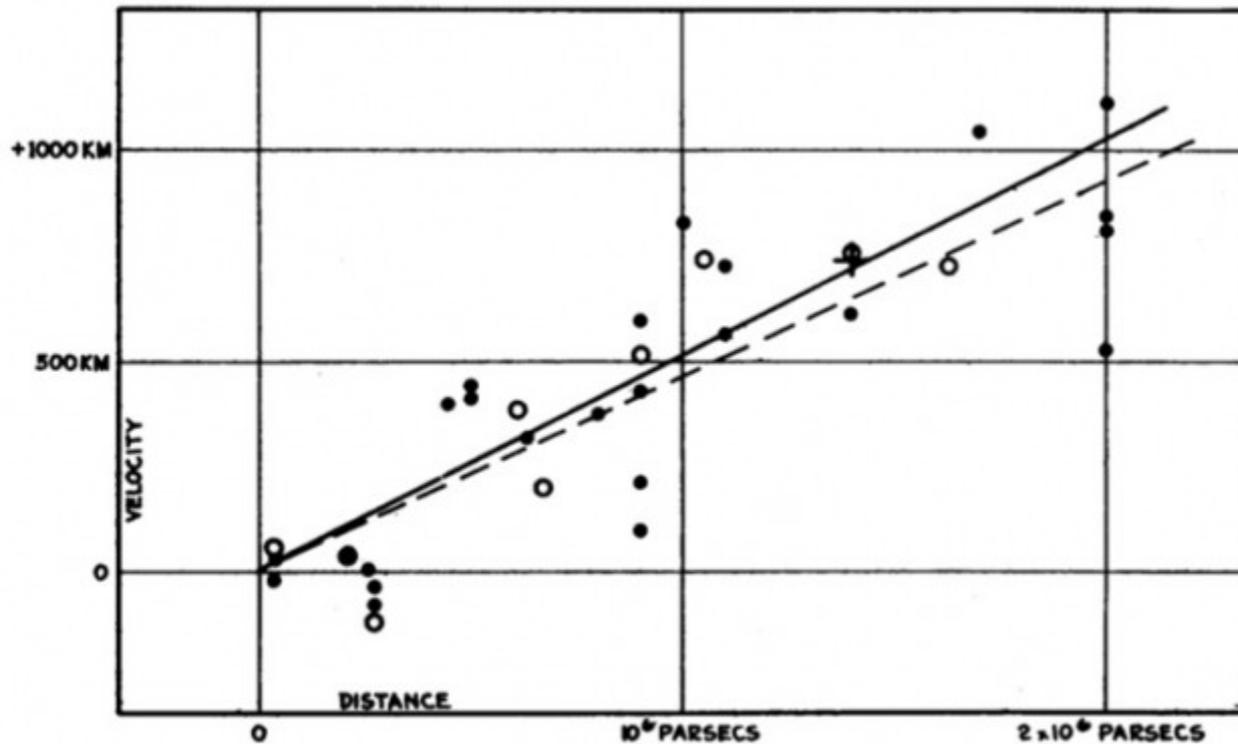


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Asimmetria Materia/Antimateria

- L'universo è composto quasi interamente di materia ordinaria; il Big Bang, però, produsse uguali quantità di materia e antimateria che, entro un secondo circa, si sarebbero dovute reciprocamente annichilire, trasformandosi in fotoni.
- Nell'universo, quindi, non si sarebbero potute formare le stelle, dunque nemmeno i pianeti e la vita.
- Ci devono quindi essere stati dei tipi di particelle che, decadendo, produssero più materia che antimateria: a differenza del Modello Standard, la supersimmetria prevede l'esistenza di tali particelle.



Materia Oscura

- Dagli anni '70 del secolo scorso, sappiamo (dallo studio del moto delle stelle nelle galassie e delle galassie negli ammassi di galassie) che una parte consistente dell'universo (27%) consiste di materia oscura, materia che non emette radiazione elettromagnetica ma i cui effetti gravitazionali sono ben evidenti.
- Gli unici candidati al ruolo di materia oscura (ammesso che esistano) sono i neutralini e gli assioni, che però non abbiamo ancora scoperto



Energia Oscura

- Dalla fine degli anni '90 del secolo scorso sappiamo che l'universo non solo si espande ma lo fa in maniera accelerata, cioè la sua velocità di espansione da circa 5 miliardi di anni cresce col tempo.
- Tale espansione è provocata da un'energia oscura che permea l'universo, dovuta ai vari campi che lo permeano.
- Secondo il Modello Standard, il valore di tale energia oscura risulta enormemente più grande (10^{120} volte) di quello osservato sperimentalmente.
- Se la natura fosse supersimmetrica, il problema si allevierebbe ma solo parzialmente (10^{60} e non 10^{120}).



Inflazione

- Spiegare certi fatti sperimentali della cosmologia implica il supporre che l'universo, negli istanti immediatamente successivi al Big Bang, abbia subito una rapidissima ed enorme dilatazione, dovuta ad un campo, detto “inflatone”.
- Il Modello Standard non prevede l'esistenza di un campo di tale tipo e con le giuste caratteristiche; la supersimmetria implica invece l'esistenza di un tale campo.



- La supersimmetria, se confermata sperimentalmente, costituirebbe una nuova e potente visione dell'universo, in grado di risolvere molti dei problemi posti dalla teoria delle particelle elementari e dalla cosmologia.
- Il problema è che si pensava di confermarla sperimentalmente, quantomeno con gli esperimenti all'LHC, il che non è ancora avvenuto.



- Il problema è rimandato al futuro e potenziato LHC e/o a più potenti acceleratori futuri e/o agli esperimenti di ricerca della materia oscura.
- Se la natura si dovesse rivelare non supersimmetrica, dovremmo rimetterci al lavoro ed escogitare una nuova teoria del tutto, in quanto la teoria delle stringhe ha bisogno della supersimmetria.

