

Incontri della Fisica 2012, LNF, Frascati, 10 ottobre 2012,

PROSPETTIVE DELLA FISICA (ASTRO)PARTICELLARE

Antonio Masiero

Universita' di Padova e

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

DOMANDE “FONDAMENTALI” SULLA MATERIA: ESISTE L’*ELEMENTARE*? ESISTE UN’UNITA’ DI FONDO?

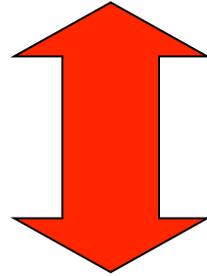
- Di che cosa e’ fatta la materia dell’ Universo ?
- Scomponendola in parti sempre piu’ piccole, e’ possibile arrivare ai “**mattoni fondamentali**” (*ELEMENTARE*) della materia (particelle di materia che non sono divisibili e che non hanno struttura)?
- Quali sono le forze (“interazioni”) che agiscono sulla materia?
- Esiste una **UNIFICAZIONE** delle forze per cui la varieta’ delle interazioni discende da un’ unica interazione fondamentale?

L' ATOMO DI DEMOCRITO

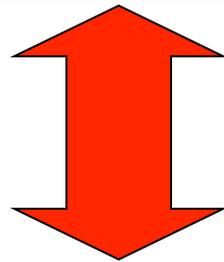


- **Democrito** di Abdera (Tracia) 25 secoli fa risponde così :
- Spezzettando la materia in frammenti sempre più piccoli si arriva ad una particella fondamentale, indistruttibile (**ATOMOS**: indivisibile in greco antico)
- Gli atomi sono eterni e immutabili, esistono in varie forme e sono animati da un continuo movimento nello **SPAZIO VUOTO**
- L' Universo di Democrito è costituito da DUE entità opposte: **ATOMI** e **VUOTO**

SIMMETRIA (geometria)



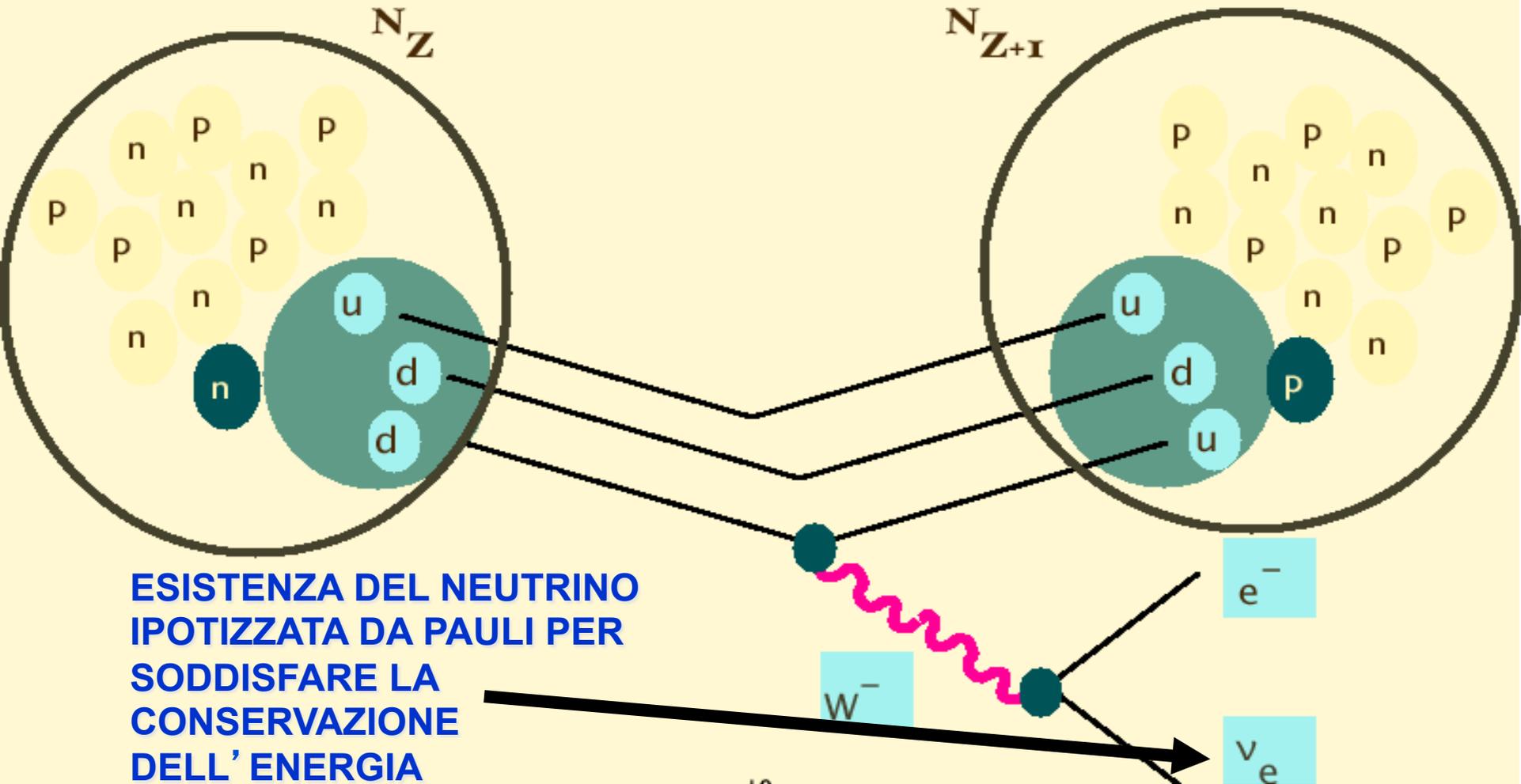
LEGGI DI CONSERVAZIONE



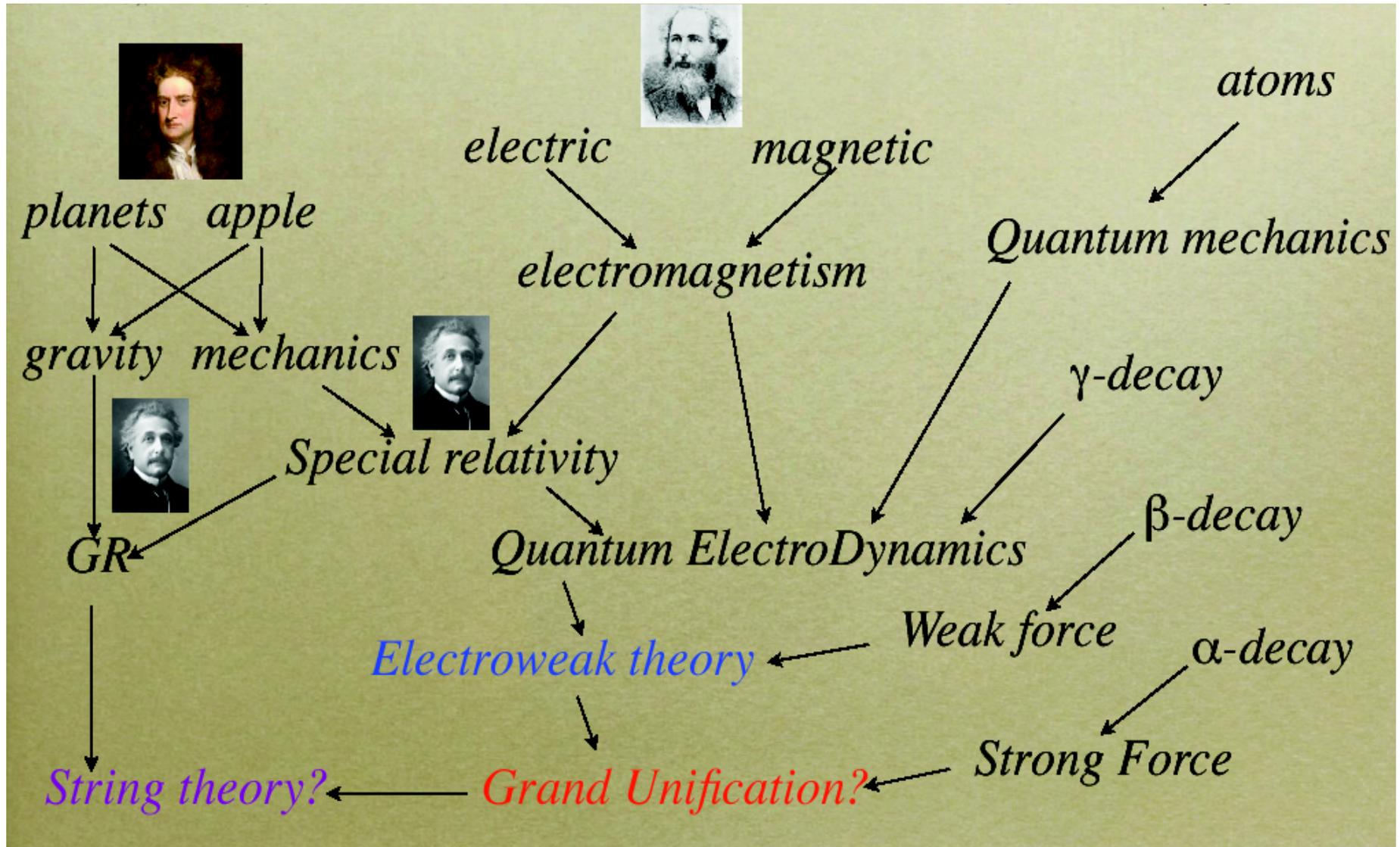
INTERAZIONI FONDAMENTALI
dei COSTITUENTI ELEMENTARI

LA POTENZA DI UNA LEGGE UNIVERSALE DI CONSERVAZIONE

$$N_Z \rightarrow N_{Z+1} e \nu$$



UNIFICAZIONE DELLE INTERAZIONI FONDAMENTALI



Big Bang

Quark-Gluon Plasma

Protoni e neutroni

Protoni e Nuclei leggeri

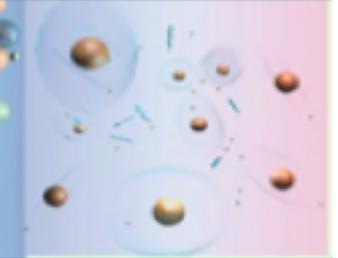
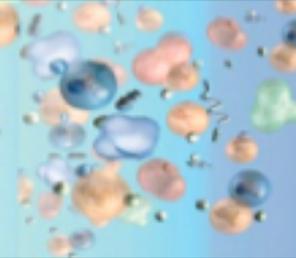
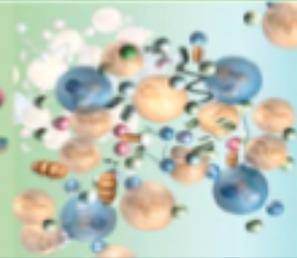
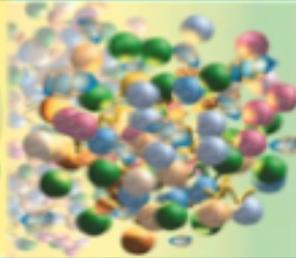
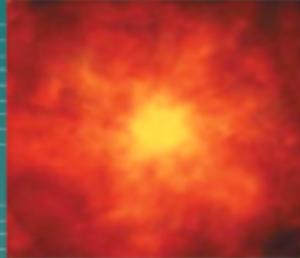
Atomi → Galassie

Gravità

Nucleare forte

Nucleare debole

→ Molecole → DNA



10^{-43} sec
 10^{-35} m
 10^{19} GeV

10^{-32} sec
 10^{-32} m
 10^{16} GeV

10^{-10} sec
 10^{-18} m
 10^2 GeV

10^{-4} sec
 10^{-16} m
1 GeV

100 sec
 10^{-15} m
1 MeV

300KY → 15GY
 10^{-10} m
10 eV

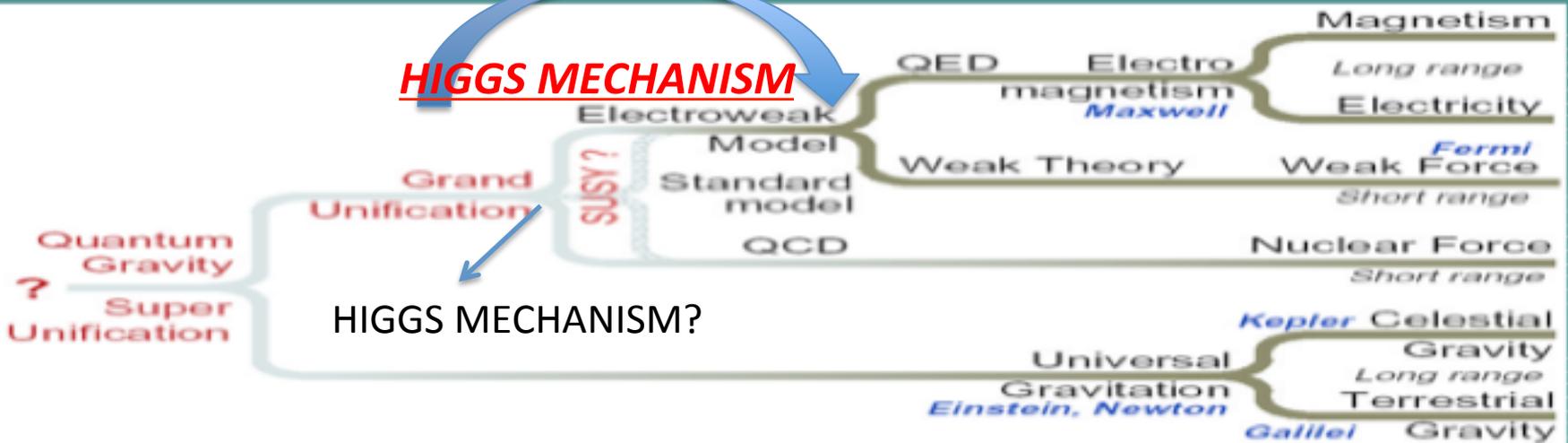
???

LHC

LEP

Astronomia →

HIGGS MECHANISM



HIGGS MECHANISM?

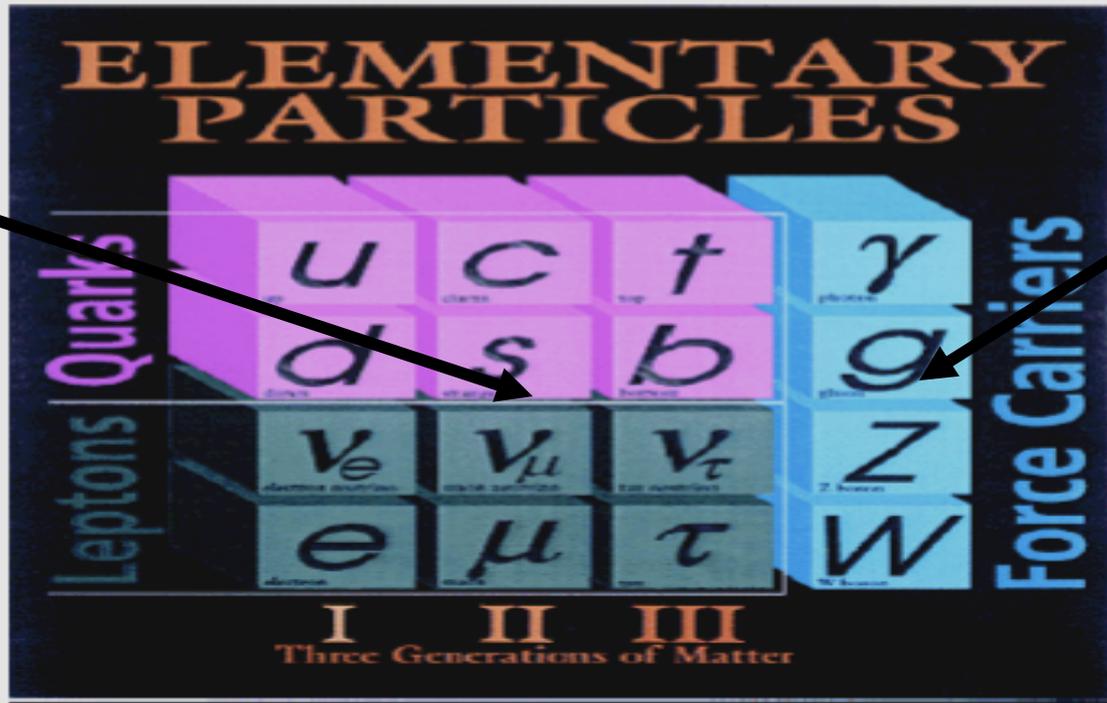
Theories:

STRINGS?

RELATIVISTIC/QUANTUM

CLASSICAL

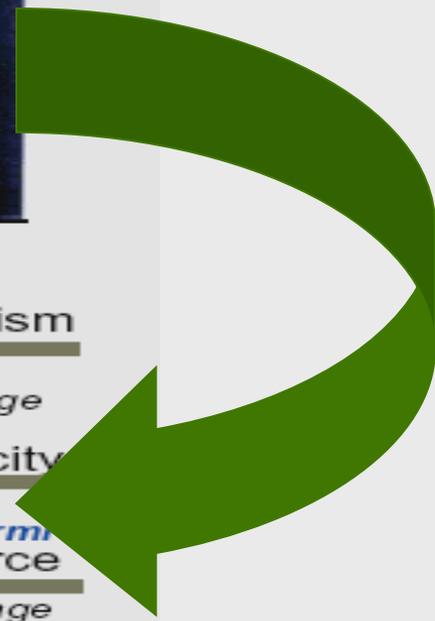
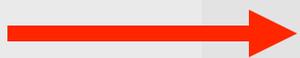
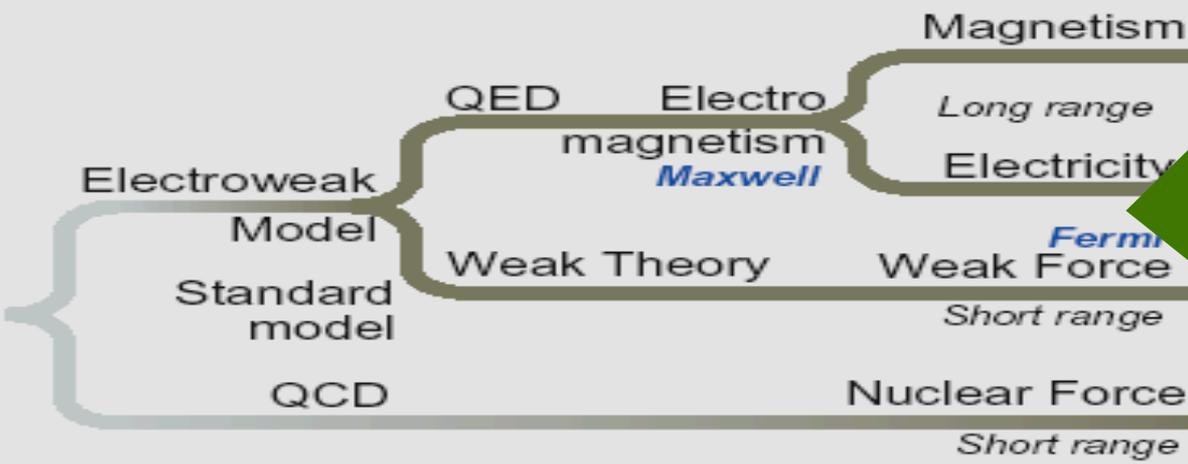
MODELLO STANDARD delle Interaz. Fondam.



RADIAZIONE

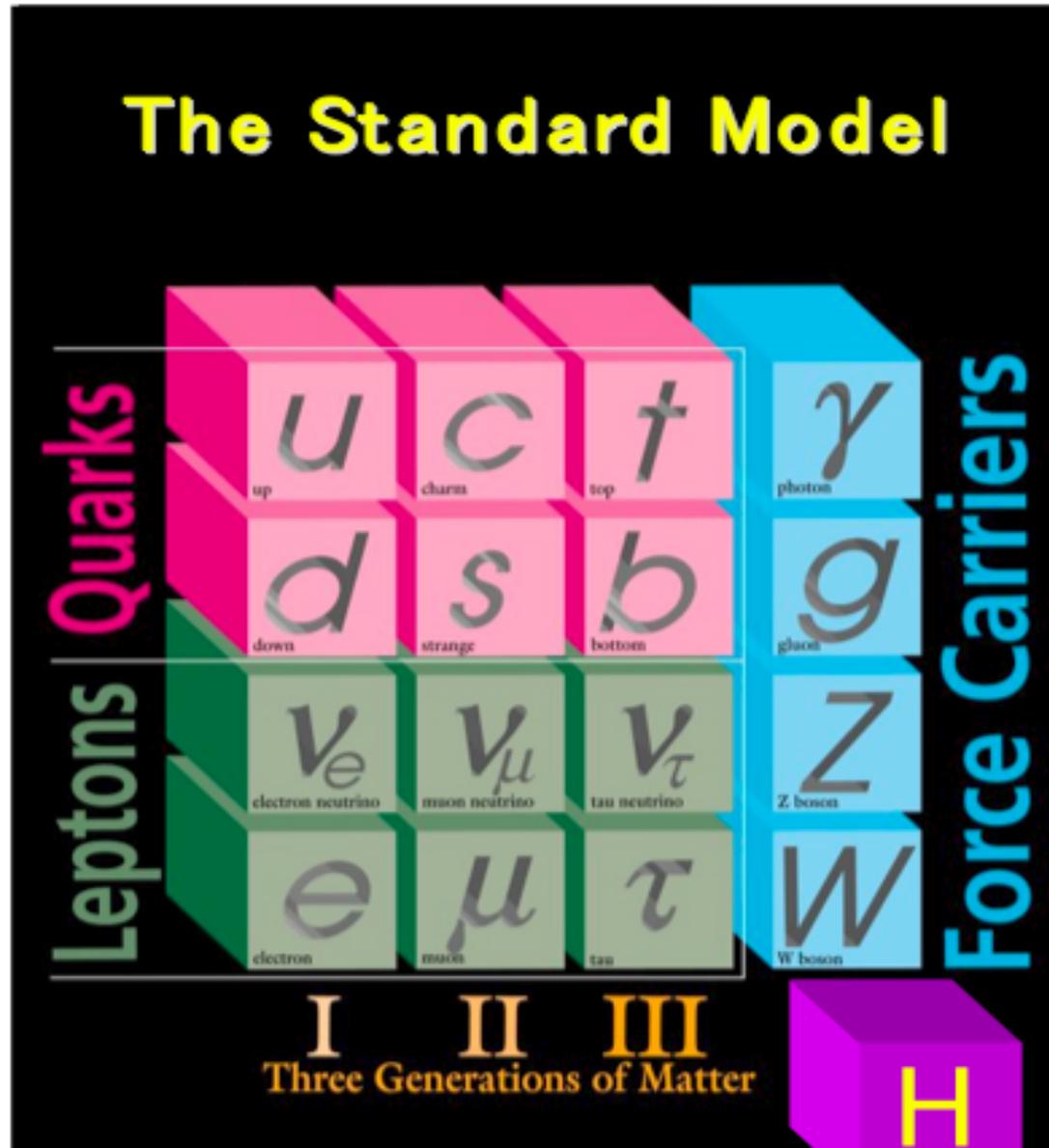
MATERIA

Grand Unified Theory
GUT



The Standard Model

Gravity
?



?

2014: the conquest of a new energy scale in physics

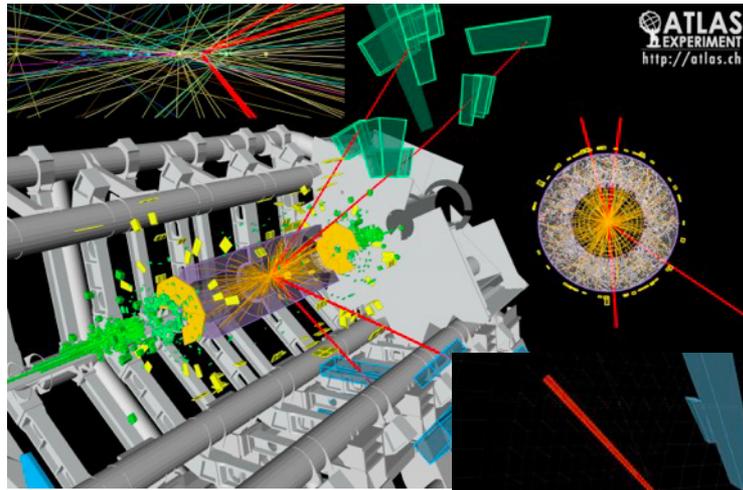
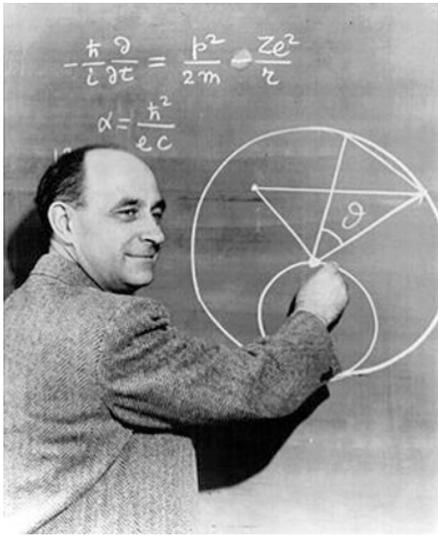
- ~1900 **ATOMIC SCALE** 10^{-8} cm. $1/(\alpha m_e)$
- ~1970 **STRONG SCALE** 10^{-13} cm. $M e^{-2\pi/\alpha_S b}$
- ~2010 **WEAK SCALE** 10^{-17} cm. TeV^{-1}

FUNDAMENTAL OR DERIVED SCALE?

EX. **EXTRA-DIMENSIONS**
or
TeV STRING THEORY

EX.: **TECHNICOLOR** or
SUSY with ELW RAD. BREAKING

NEW PARTICLES AT THE TEV SCALE?

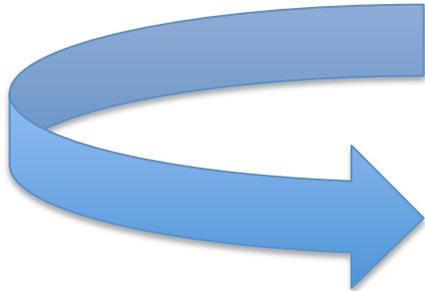


FERMI THEORY OF WEAK INTERACTIONS 1933

ELW. THEORY: 1964

CONCEPT: 1984

CONSTRUCTION : 2001



MICRO

PARTICLE PHYSICS

GWS STANDARD MODEL

MACRO

COSMOLOGY

HOT BIG BANG STANDARD MODEL



HAPPY MARRIAGE
Ex: NUCLEOSYNTHESIS

BUT ALSO



POINTS OF
FRICTION



-COSMIC MATTER-ANTIMATTER ASYMMETRY

-INFLATION

- DARK MATTER + DARK ENERGY

“OBSERVATIONAL” EVIDENCE FOR NEW PHYSICS BEYOND
THE (PARTICLE PHYSICS) STANDARD MODEL

WHY TO GO BEYOND THE SM

“OBSERVATIONAL” REASONS

•HIGH ENERGY PHYSICS

NO (but $A_{FB}^{Z \rightarrow bb}$, $A_{FB}^{\tau\bar{\tau}}$)

•FCNC, $CP \neq$

NO (but $b \rightarrow sq\bar{q}$ penguin ...)

•HIGH PRECISION LOW-EN.

NO (but $(g-2)_\mu$...)

•NEUTRINO PHYSICS

YES $m_\nu \neq 0$, $\theta_\nu \neq 0$

•COSMO - PARTICLE PHYSICS

YES (DM, ΔB_{cosm} , INFLAT., DE)

THEORETICAL REASONS

•INTRINSIC INCONSISTENCY OF SM AS QFT

NO (spont. broken gauge theory without anomalies)

•NO ANSWER TO QUESTIONS THAT “WE” CONSIDER “FUNDAMENTAL” QUESTIONS TO BE ANSWERED BY “FUNDAMENTAL” THEORY

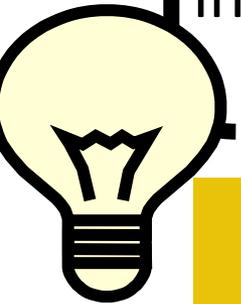
YES (hierarchy, unification, flavor)

The Energy Scale from the “Observational” New Physics

neutrino masses
dark matter
baryogenesis
inflation



NO NEED FOR THE
NP SCALE TO BE
CLOSE TO THE
ELW. SCALE



The Energy Scale from the “Theoretical” New Physics

★ ★ ★ Stabilization of the electroweak symmetry breaking
at M_W calls for an **ULTRAVIOLET COMPLETION** of the SM
already at the TeV scale +

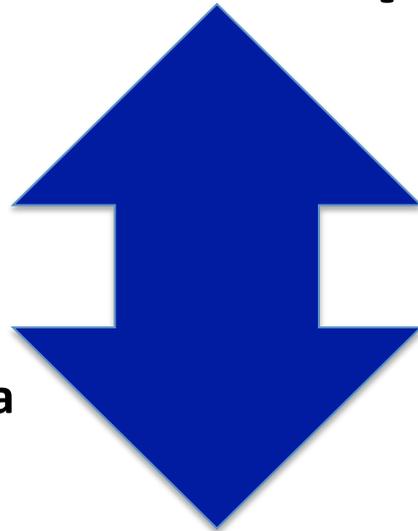
★ **CORRECT GRAND UNIFICATION “CALLS” FOR NEW PARTICLES
AT THE ELW. SCALE**

SYMMETRIES

(geometrical principle)

**LEP → HIGGS
MECHANISM**

(spontaneous breaking of a
local or gauge symmetry)

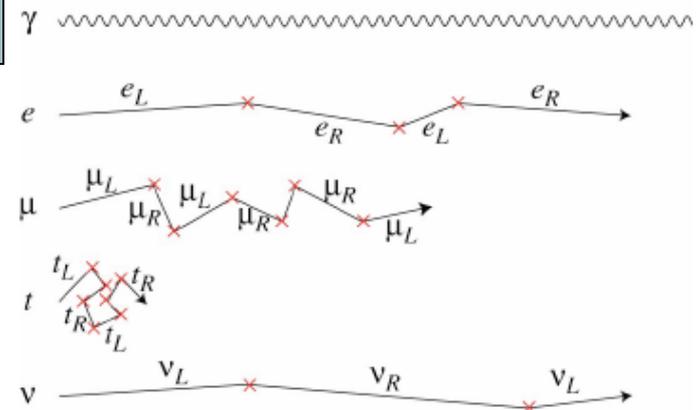
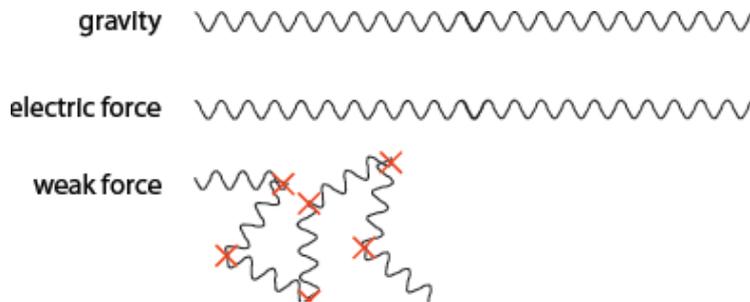


**LHC → HOW the
HIGGS MECHANISM
IS REALIZED**

***FUNDAMENTAL
INTERACTIONS***

IL CAMPO DI HIGGS:

c'è “qualcosa” che riempie l'intero Universo e che..



NON DISTURBA LA FORZA ELETTROMAGNETICA O QUELLA GRAVITAZIONALE, MA DISTURBA (“FA ATTRITO”) CON LA FORZA DEBOLE RENDENDOLA DI CORTA DISTANZA E DANDO MASSA AI SUOI MEDIATORI, I BOSONI W, Z

TUTTA LA MATERIA – QUARK E LEPTONI PRENDONO MASSA DALL'ATTRITO CON QUESTO “CAMPO DI HIGGS ATTRITO PIU' GRANDE

MASSA PIU' GRANDE

NUOVA FISICA A LHC?

- **SUPERSIMMETRIA:** OGNI PARTICELLA “ORDINARIA” E’ ACCOMPAGNATA DA UNA PARTICELLA PARTNER SUPERSIMMETRICA.
- **TEORIE CON NUOVE DIMENSIONI SPAZIALI:** OLTRE ALLE USUALI 3 DIMENSIONI SPAZIALI , NE ESISTONO ALTRE . IN QUESTO CASO OGNI PARTICELLA ORDINARIA E’ ACCOMPAGNATA DA UNA “TORRE” DI PARTICELLE PARTNER, STATI DI KALUZA-KLEIN, KK, CON LE STESSA CARATTERISTICHE TRANNE CHE AVERE MASSA PIU’ GRANDE.

IL PROBLEMA DELL'AGGIUSTAMENTO DEI PARAMETRI FONDAMENTALI (I)

- **LE MASSE DEI FERMIONI ELEMENTARI SONO MOLTO DIVERSE** (il quark top ha una massa che e' ~ 200.000 volte piu' grande di quella di un elettrone):
QUAL E' IL PRINCIPIO CHE FISSA IL VALORE DELL'INTERAZIONE, DELL'"ATTRITO" DEI FERMIONI COL CAMPO DI HIGGS ?
- **CHE COSA FISSA IL VALORE DELLA MASSA DEL BOSONE DI HIGGS**, **valore cruciale per tutte le masse presenti nell' Universo?**

IL PROBLEMA DELL'AGGIUSTAMENTO DEI PARAMETRI FONDAMENTALI (II)

- Anche ammettendo di **fissare a mano**, cioè, di scegliere i parametri per avere la massa “corretta” del bosone di Higgs, poi questa e' soggetta a **correzioni quantistiche** che tendono a portarla a valori molto piu' grandi → necessita' di un **insopportabile aggiustamento** (“fine-tuning”) **dei parametri** con una precisione di molte (troppe) cifre dopo la virgola... oppure

- $A \ 1000000000 + B \ 1000000000 = 1$

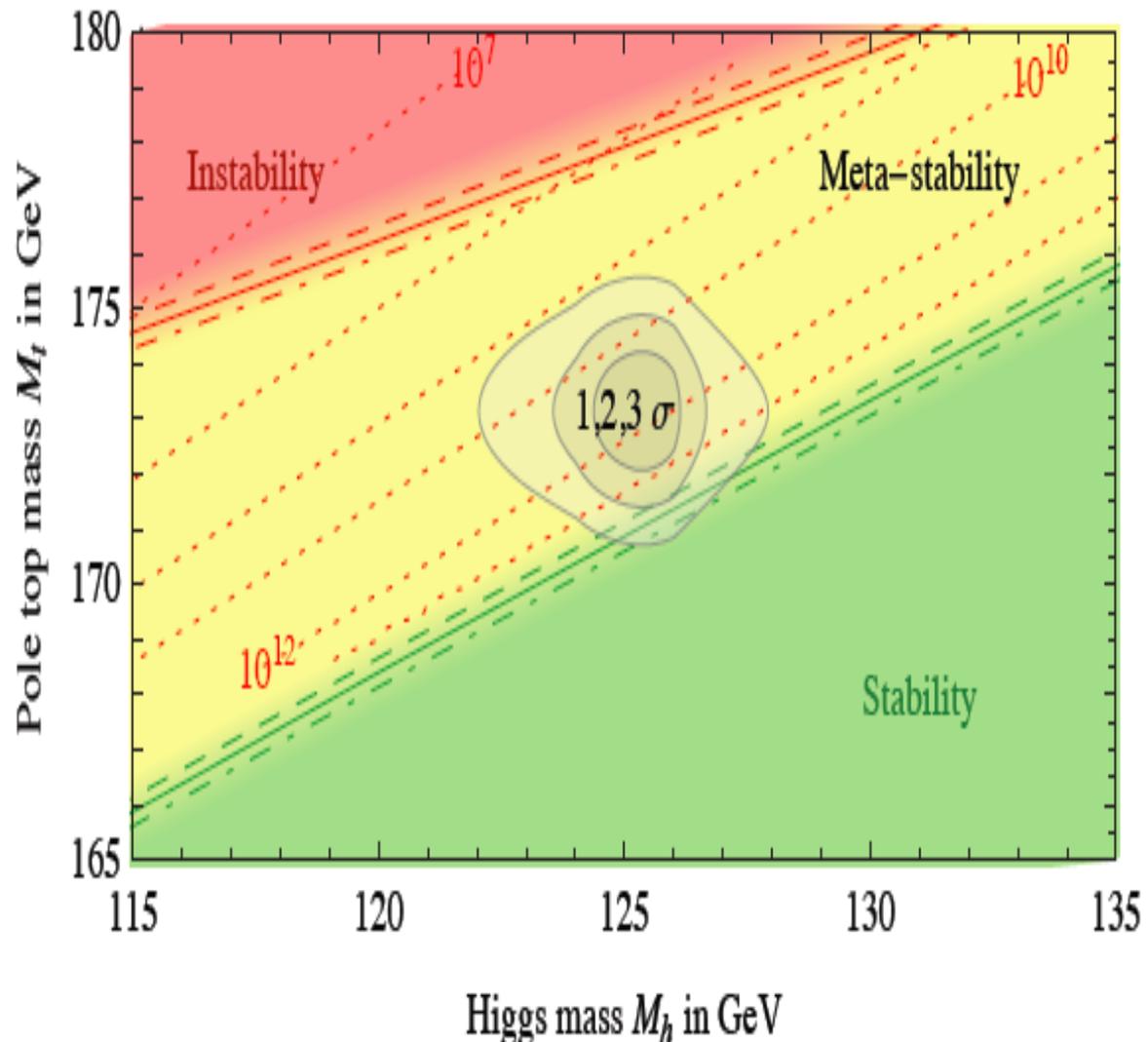
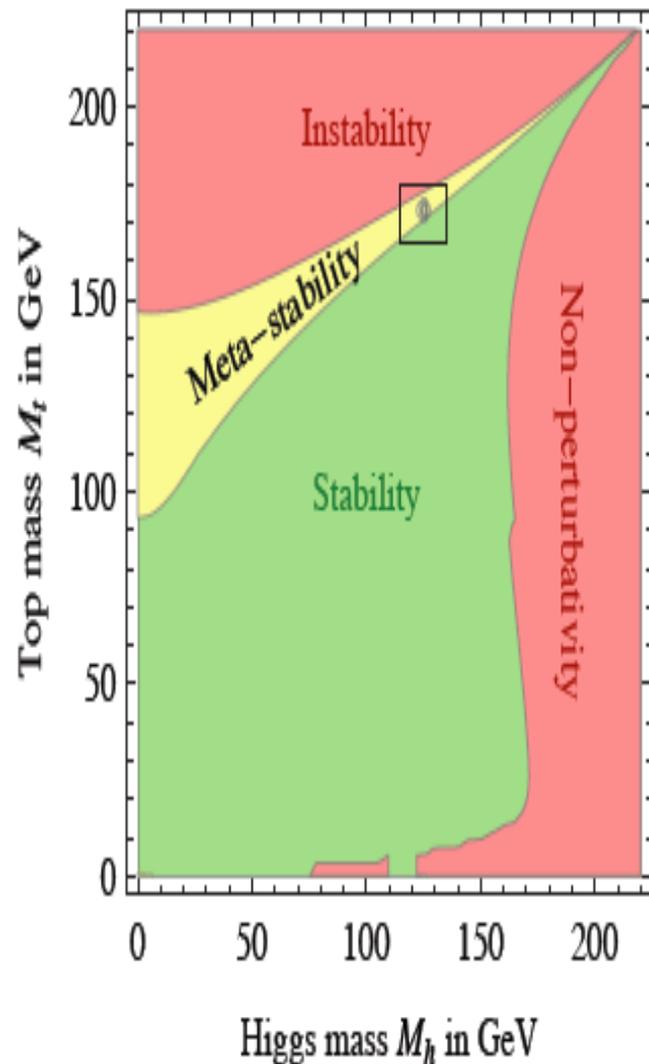
$$A - B = 0.0000000001$$

Aggiustamento (fine – tuning)?

o **teoria** che spiega perche' A e B hanno valori cosi' "speciali" ?

o **miliardi di universi** in cui A e B hanno valori diversi per cui in uno succedera' che A e B hanno proprio questi valori "speciali" ?

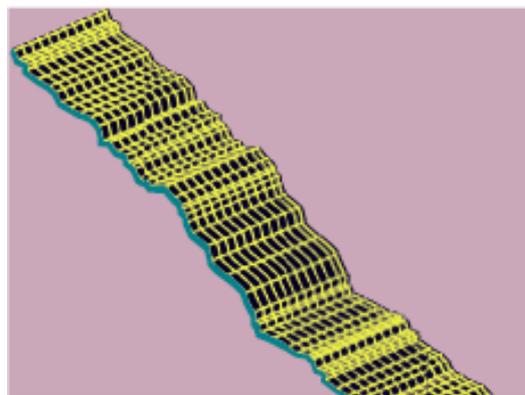
VITA SPERICOLATA E “PROBABILE” DEL NOSTRO UNIVERSO METASTABILE?



L'HIGGS DECIDE IL NOSTRO UNIVERSO

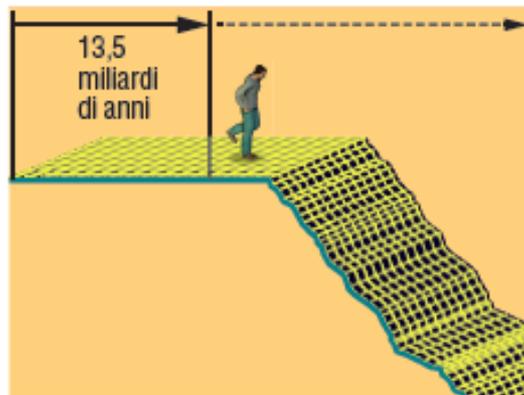
Che cosa significa se ha massa 126 GeV?

Se si tratta del bosone di Higgs previsto dal Modello Standard, allora il nostro universo è metastabile, in altre parole è come se ci stessi dirigendo, molto lentamente, verso un precipizio



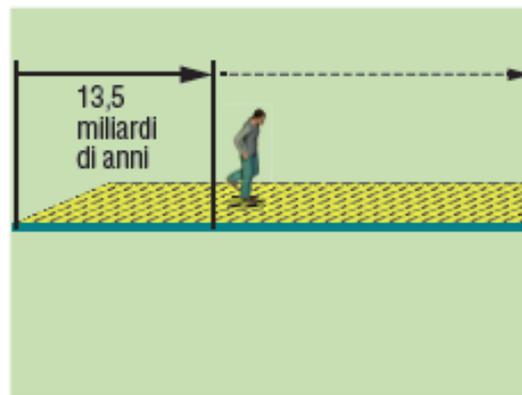
INSTABILITÀ

Con massa dell'Higgs minore di 120 GeV secondo il Modello Standard il nostro universo non esisterebbe. La nostra esistenza dimostrerebbe che è necessario l'intervento di nuova fisica a integrare il Modello Standard



METASTABILITÀ

Con massa dell'Higgs Standard tra i 120-126 GeV il nostro universo va incontro a una trasformazione che lo porterà a una nuova fase, ma ci vorranno miliardi di anni



STABILITÀ

Con massa dell'Higgs Standard maggiore di 126 GeV il nostro universo si conserverebbe così com'è

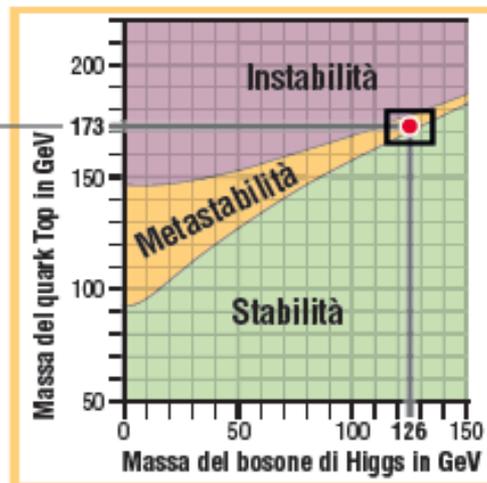
STRANO MA PROBABILE

Il nostro universo si trova in una regione al confine tra metastabilità e stabilità.

Se la massa del bosone di Higgs assumesse dei valori anche di pochissimo differenti scivoleremmo o nella stabilità o nella instabilità.



Fonte: INFN



Questa ci può sembrare una posizione strana e particolare ma è molto probabile statisticamente.

L'esistenza del nostro universo dipende dal valore della massa del quark Top e di quella del bosone di Higgs.

LA RICERCA DI UNA **TEORIA CHE RACCOLGA I
PENSIERI ISPIRATORI (LE LEGGI DELLA FISICA, LE
SIMMETRIE DELLA NATURA) E “SPIEGHI” APPARENTI
INCREDIBILI AGGIUSTAMENTI DEI PARAMETRI
FONDAMENTALI DELL’UNIVERSO**

**Com'è difficile riuscire a
dare uno sguardo alle carte
di Dio, ma non credo per un
solo istante che Egli giochi
a dadi.**

A. EINSTEIN

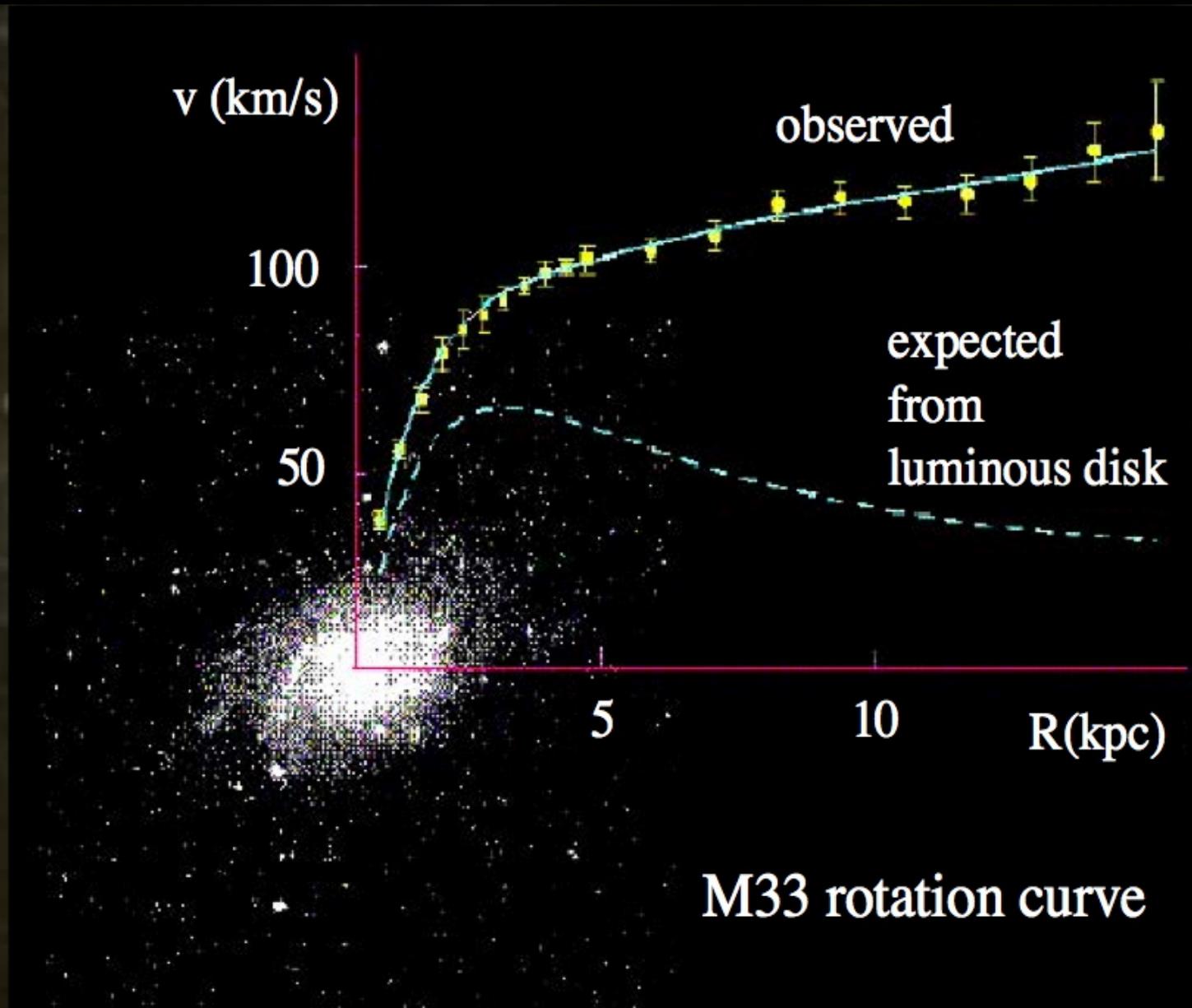
UNI -- VERSO

O

MULTI -- VERSO

- Tutta l'evoluzione dell' Universo (asimmetria tra materia ed antimateria, nucleosintesi, formazione delle galassie, ammassi, etc., sistema solare, vita sulla Terra etc.) dipende in maniera molto stretta dal preciso valore assunto da alcuni parametri fondamentali (tra questi quello della costante cosmologica): e' possibile che quello in cui noi siamo sia solo uno dei moltissimi -versi (**MULTI - VERSO**) ?

Di cosa è fatto l'Universo?



L' AMMASSO DI GALASSIE ABELL 2218: il cluster ha una massa così grande da **piegare e focalizzare la luce proveniente da galassie che si trovano dietro ad esso**



The **BULLET CLUSTER**: two colliding clusters of galaxies

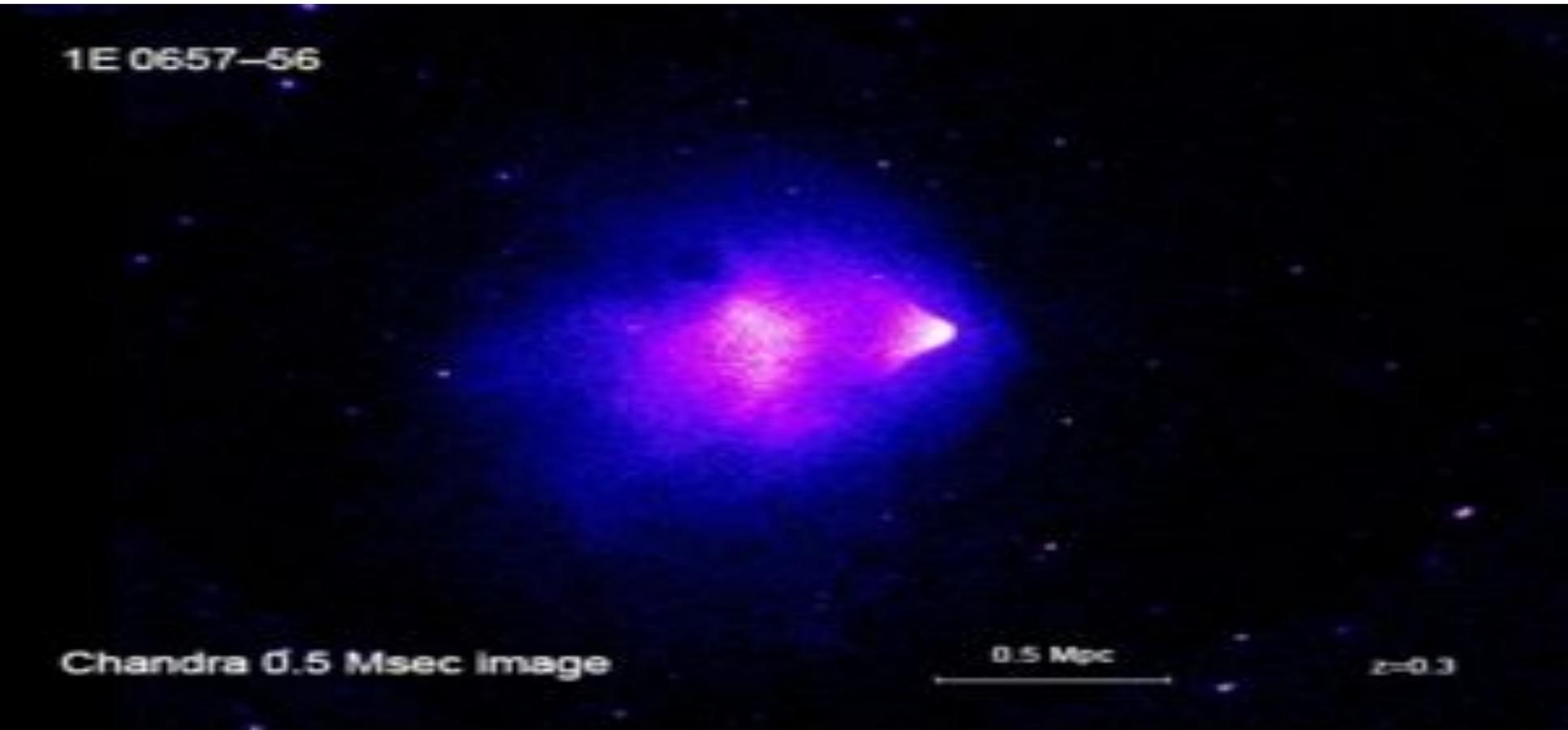
Stars, galaxies and putative DM behave differently during collision, allowing for them to be studied separately. In **MOND** the lensing is expected to follow the baryonic matter, i.e. the X-ray gas. However the lensing is strongest in two separated regions near the visible galaxies → **most of the mass in the cluster pair is in the form of collisionless DM**

1E 0657-56

Chandra 0.5 Msec Image

0.5 Mpc

$z=0.3$

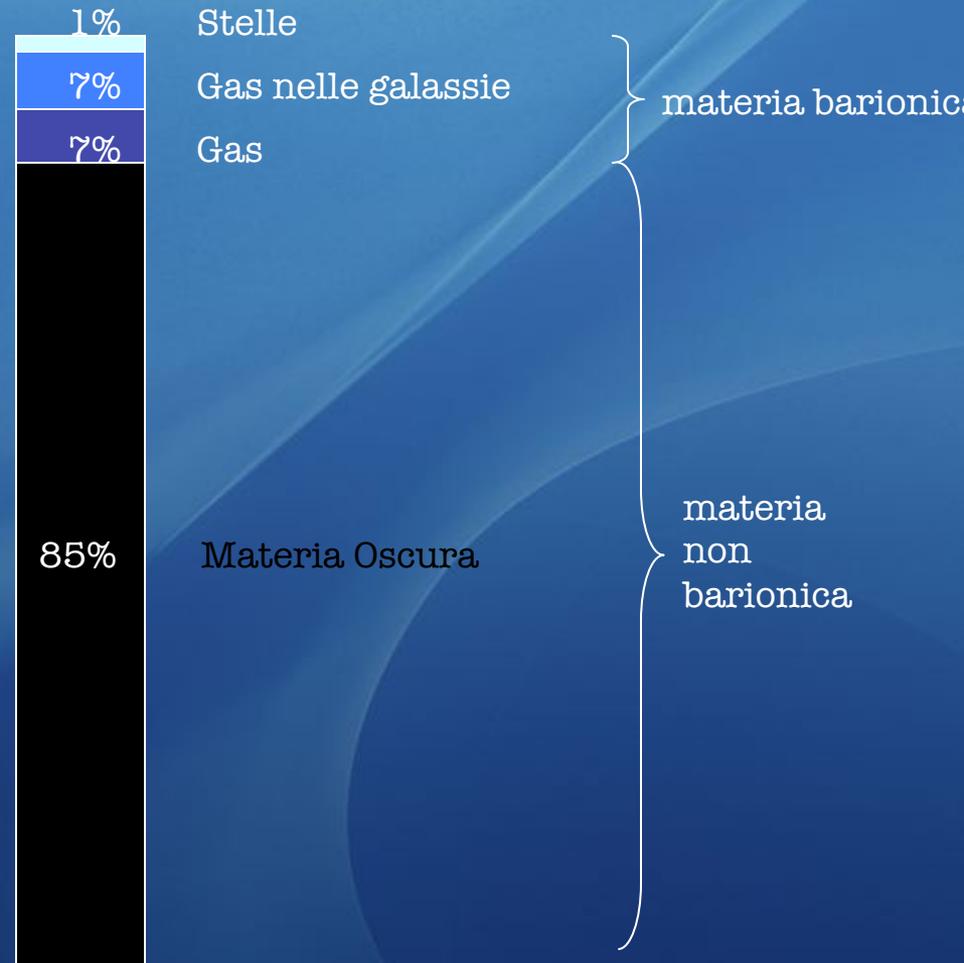
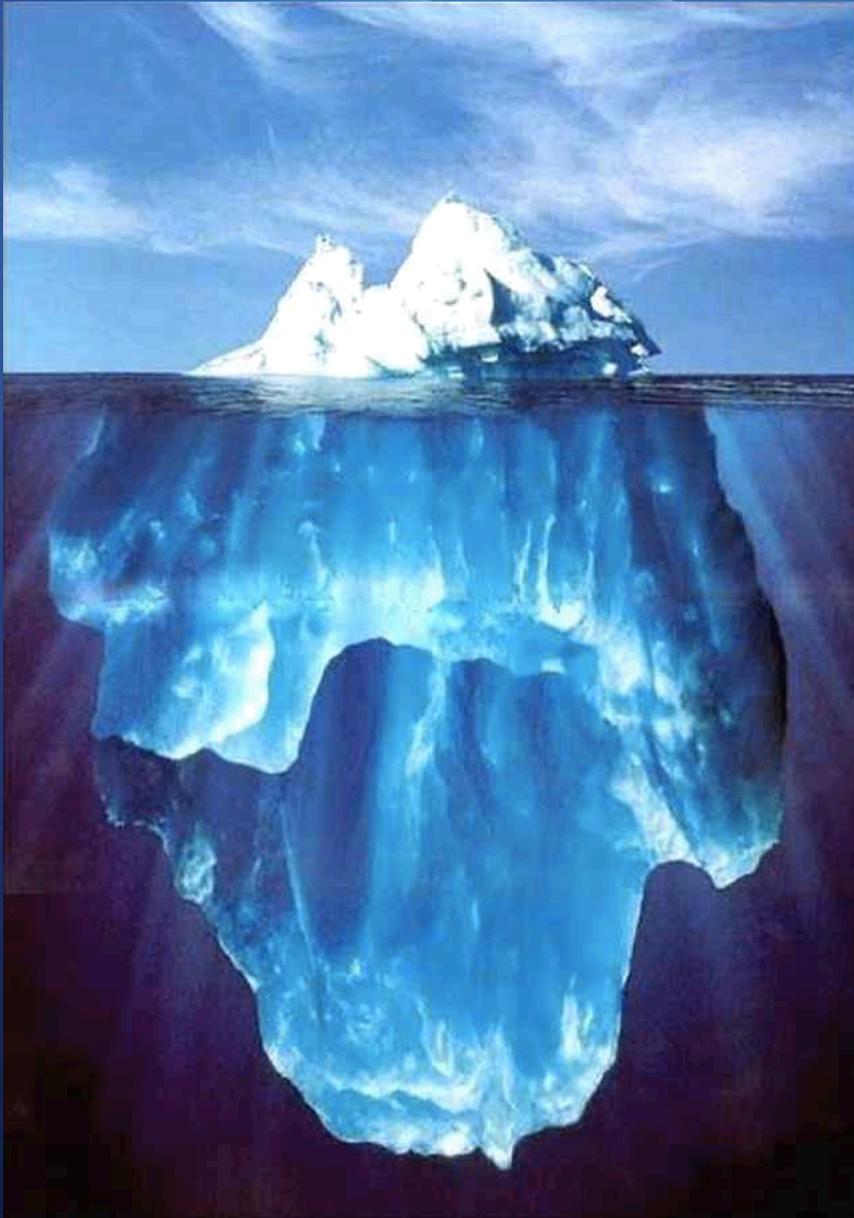


La materia oscura e' l' evidenza
piu' impressionante che abbiamo
dell' esistenza di nuova fisica oltre
il **MODELLO STANDARD DELLE
PARTICELLE**



ESISTENZA DI UN NUOVO TIPO DI MATERIA

Inventario della materia nell' Universo



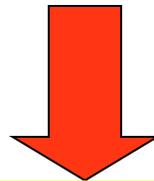
DI CHE COSA E' FATTA LA MATERIA OSCURA?

- Se il mondo e' ***SUPERSIMMETRICO*** → la particella supersimmetrica piu' leggera (il **NEUTRALINO?**) e' un buon candidato di materia oscura
- Se il mondo ha ***NUOVE DIMENSIONI*** spazio-temporali → la **particella di Kaluza-Klein** piu' leggera potrebbe costituire la materia oscura

MATERIA OSCURA: fossile di 14 miliardi di anni
fa dall' acceleratore cosmico dell' **UNIVERSO**
PRIMORDIALE; oggi, proviamo a ri-crearla
nei nostri acceleratori

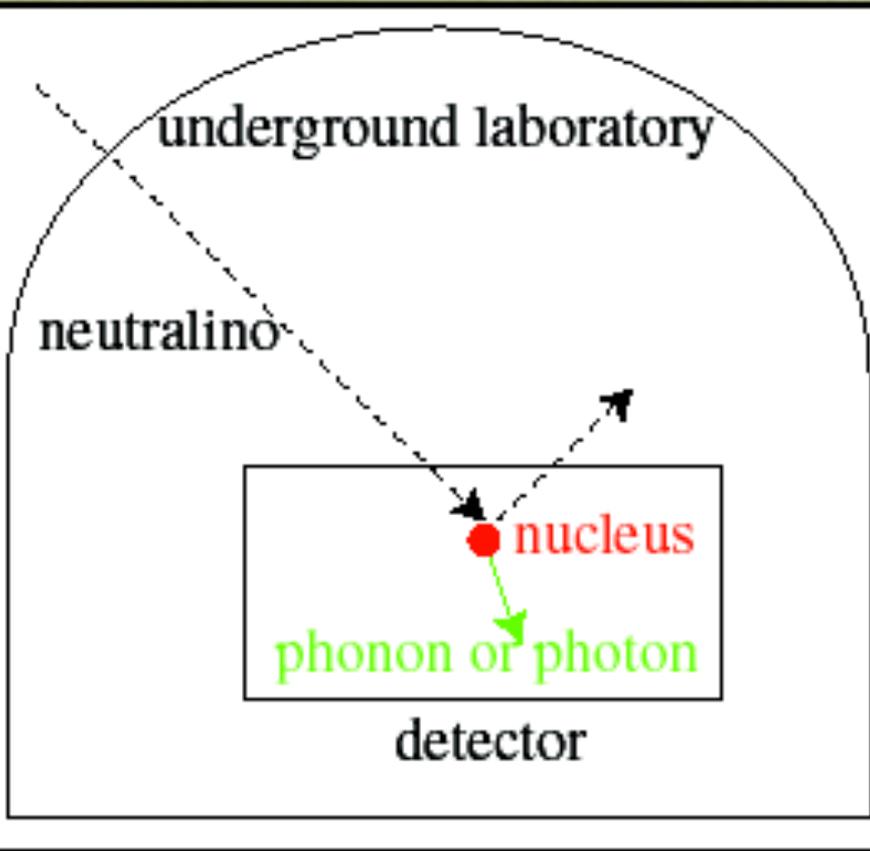
L' IPOTESI "**WIMPS**" (weakly interacting massive particles)

MATERIA OSCURA COSTITUITA DA PARTICELLE "NUOVE" CON MASSA
TRA 10 E 1000 GEV CHE INTERAGISCONO SOLO DEBOLMENTE

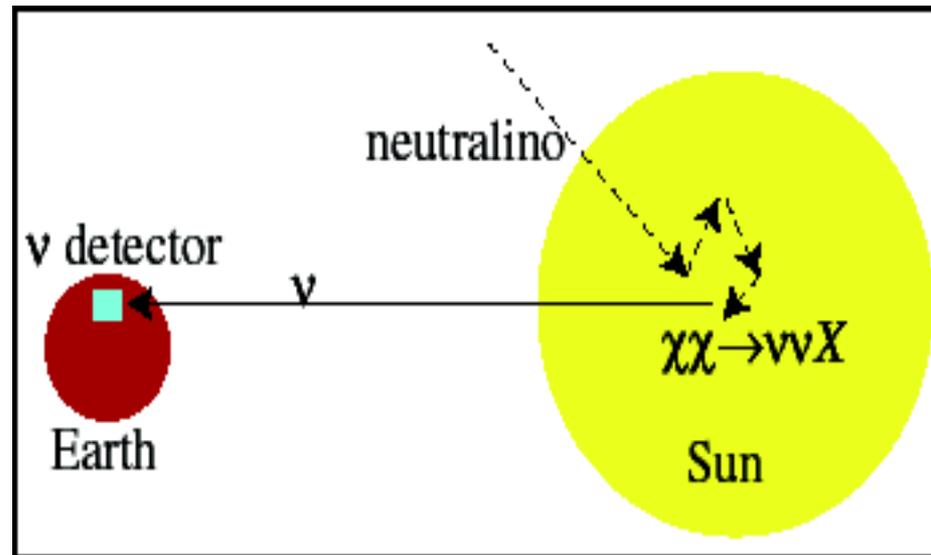


DALLA MISURA DI MATERIA OSCURA → POSSO
RISALIRE A QUANTO GLI WIMPS INTERAGISCONO CON
LA MATERIA ORDINARIA E QUINDI PREDIRE LA
QUANTITA' DI WIMPS CHE PRODURRO' AGLI
ACCELERATORI

A Caccia di Materia Oscura



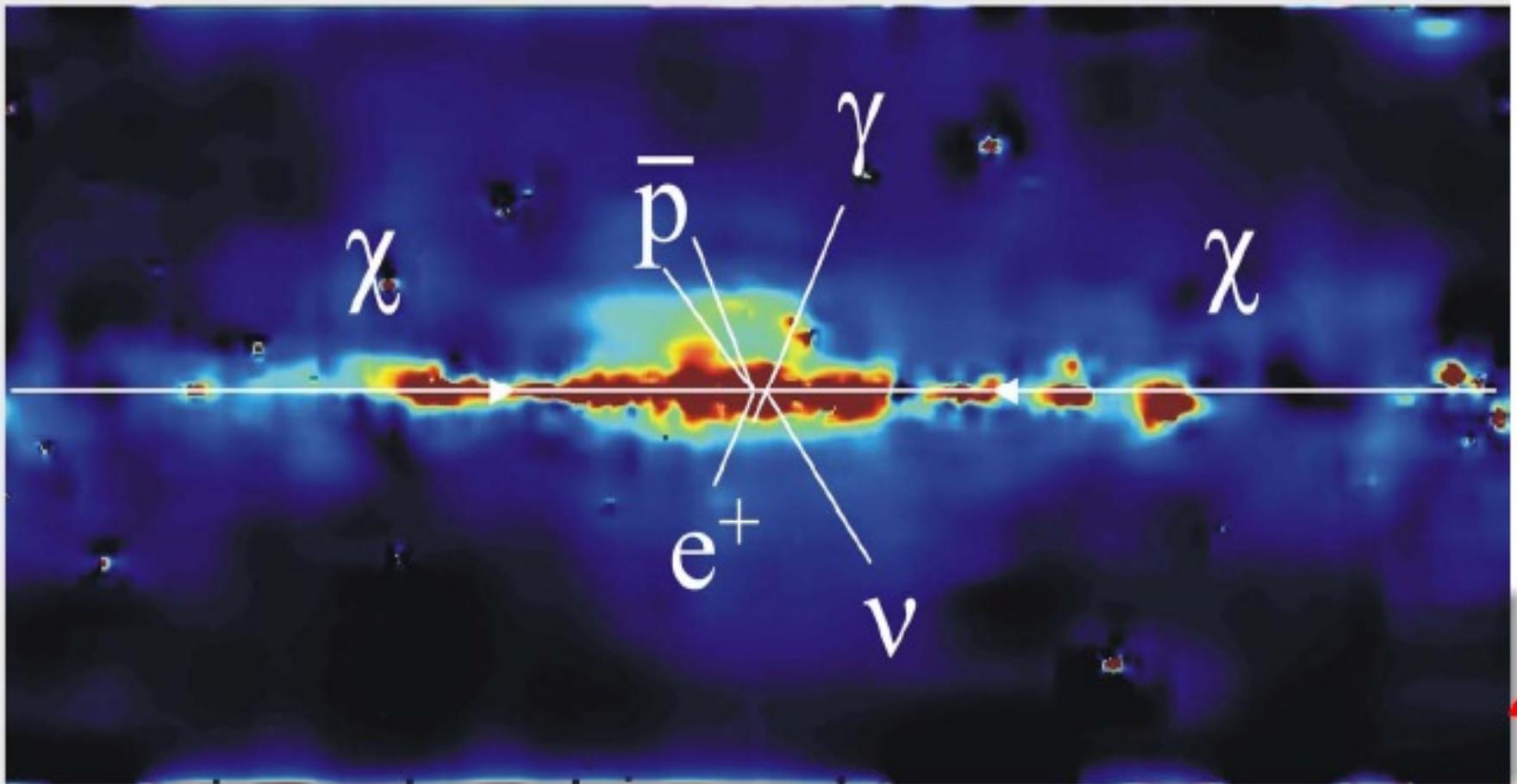
RICERCA DIRETTA DI DM



RICERCA INDIRETTA DI DM

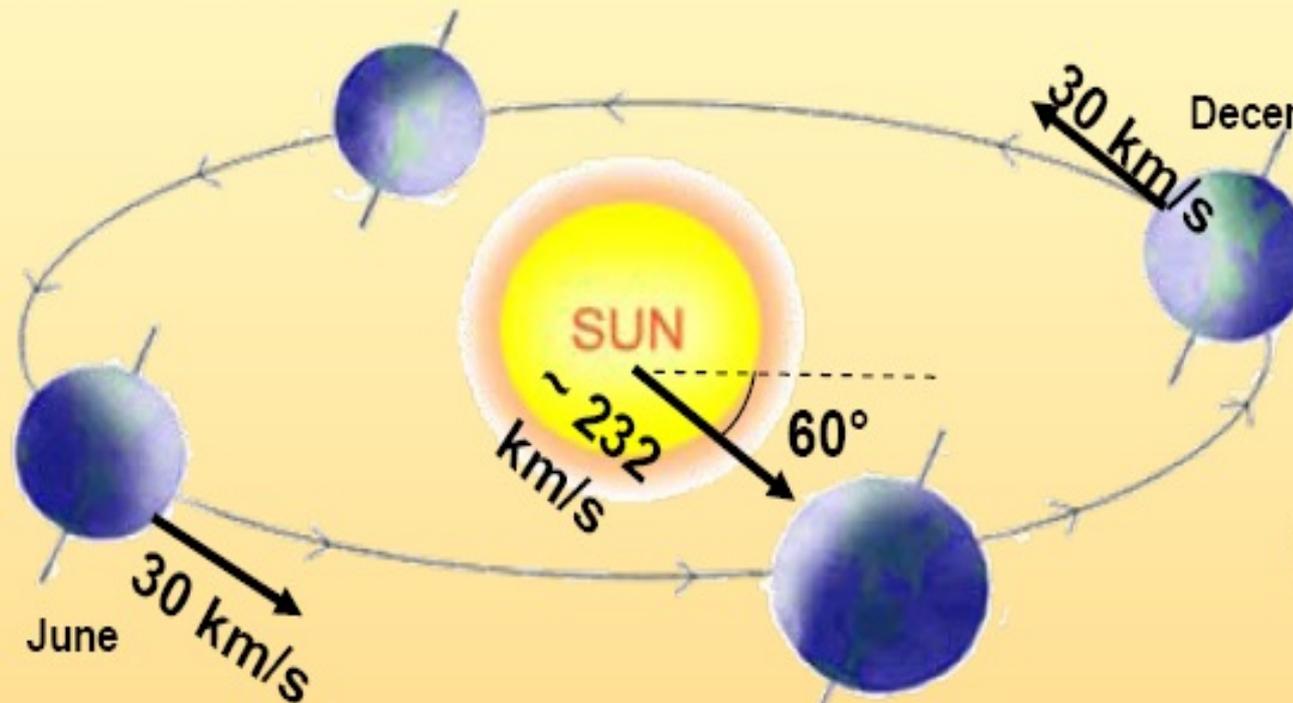
DM INDIRECT DETECTION

■ WIMP-WIMP annihilation in the galactic halos may be detected through production of γ , neutrinos, anti-matter.



MODULAZIONE DEL SEGNALE DI INTERAZIONE TRA MATERIA OSCURA E NUCLEI-BERSAGLIO

Drukier, Freese, Spergel PRD86
Freese et al. PRD88



“VENTO DI
MATERIA
OSCURA”
VARIA A
SECONDA
DELLA
VELOCITA’
DELLA
TERRA

Questa modulazione stagionale del segnale e' stata **osservata** in piu' di 10 anni di esperimento da DAMA-LIBRA al laboratorio INFN del Gran Sasso:
e' dovuta alla Materia Oscura?

RICERCA INDIRECTA DI MATERIA OSCURA

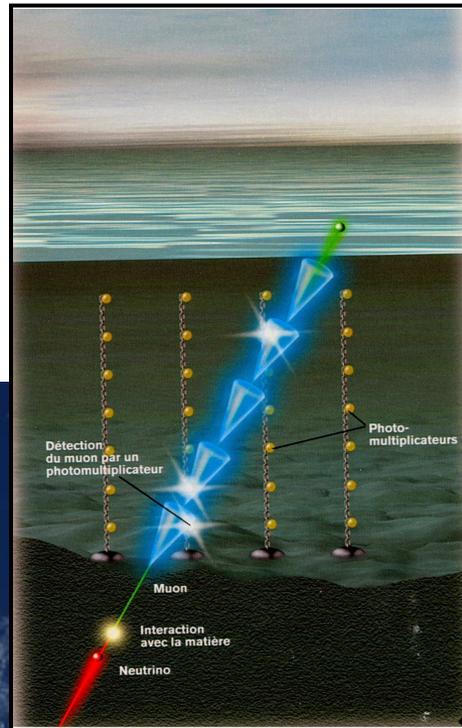
- **ANNICILIAZIONE WIMP-ANTIWIMP**
- **RILEVANTI PRODOTTI DELL' ANNICILIAZIONE :**
 - I) **FOTONI AD ALTA ENERGIA**
 - II) **NEUTRINI AD ALTA ENERGIA**
 - III) **ANTIMATERIA**
- I) **ASTRONOMIA GAMMA:** telescopi a terra (es. **MAGIC** alle Canarie o **ARGO** in Tibet) o nello spazio (es. **AGILE** e **FERMI**)
- II) **TELESCOPI DI NEUTRINI:** sotto il ghiaccio del polo (**AMANDA**), o sotto il mare (**ANTARES**, Marsiglia, in futuro **NEMO**, Capo Passero, Sicilia)
- III) **ANTIMATERIA:** ricerche di eccessi di antiprotoni o positroni in esperimenti spaziali (**PAMELA** su razzo russo, **AMS** sulla ISS)

TELESCOPI IN ORBITA, LABORATORI SOTTERRANEI E SOTTOMARINI

Telescopio HUBBLE



ANTARES

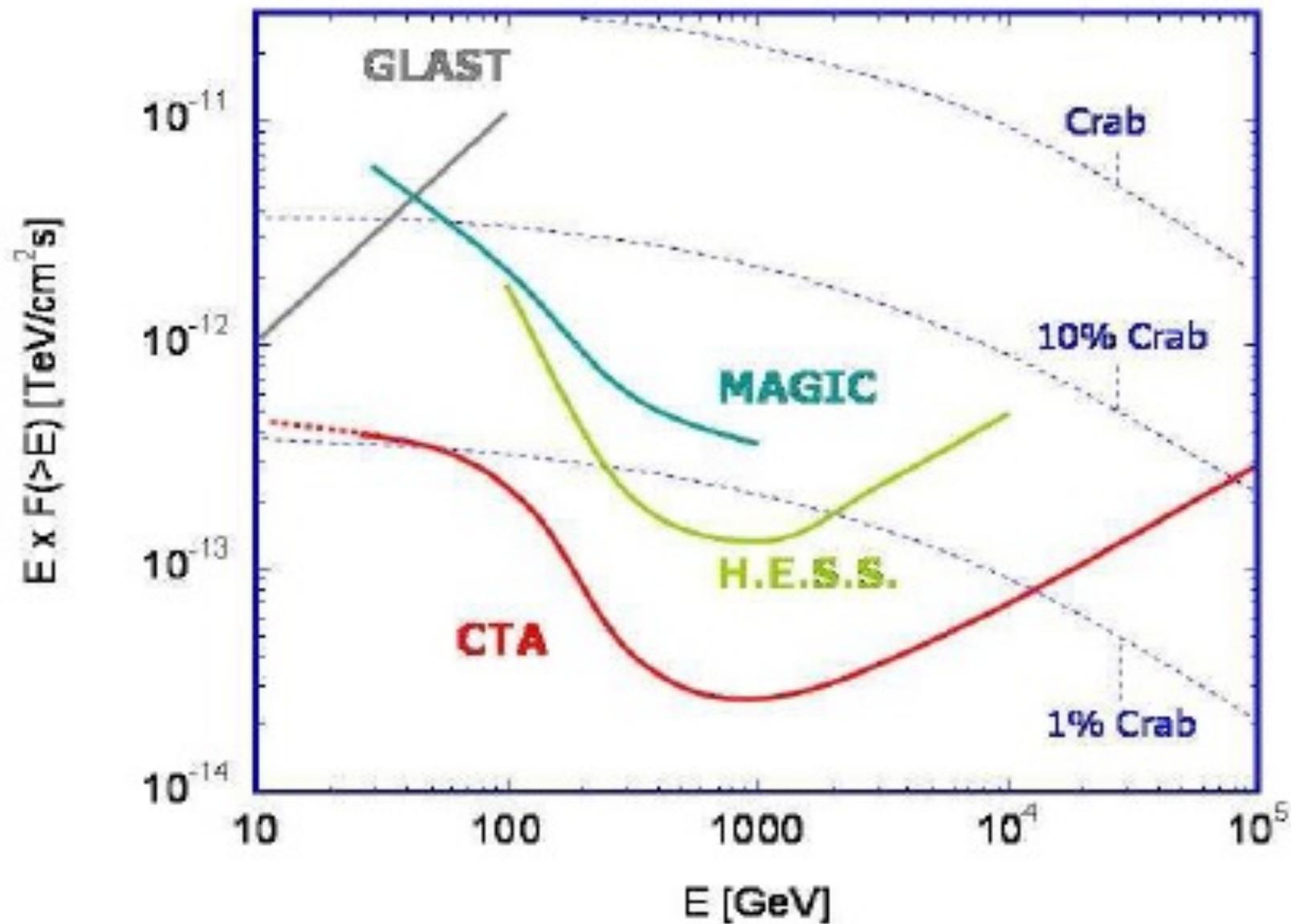


Lab. INFN: Gran Sasso





***FERMI
GAMMA-RAY
TELESCOPE***



MA SIAMO SICURI CHE LA **MATERIA OSCURA** SIA LEGATA **SOLAMENTE** A NUOVA FISICA OLTRE IL **MODELLO STANDARD PARTICELLARE?**

- LA PIU' LONTANA INFORMAZIONE (AFFIDABILE)
CHE ABBIAMO SULLE PRIME FASI
DELL' UNIVERSO E' LA **NUCLEOSINTESI** ($t > 1$ sec.
dopo il Big Bang)
- **PRIMA** DELLA NUCLEOSINTESI L' EVOLUZIONE (ad
es. la velocita' di espansione) DELL' UNIVERSO
POTEVA **DIFFERIRE SIGNIFICATIVAMENTE DAL**
QUADRO DELLA COSMOLOGIA STANDARD DEL
BIG BANG CALDO CON PROFONDE IMPLICAZIONI
SULL' ABBONDANZA E NATURA DELLA MATERIA
OSCURA

***LA GRANDE AMBIZIONE:
POSSIAMO PRODURRE NOI STESSI
LA MATERIA OSCURA NEGLI URTI
AD ALTISSIMA ENERGIA DI LHC?***

I have a dream ...: in questa decade potremmo avere la possibilità' di

produrre “artificialmente” la materia oscura a LHC

e trovare quella “primordiale” di 14 miliardi anni fa in esperimenti del tipo di quelli che si svolgono al laboratorio INFN del Gran Sasso

Universo chiuso o aperto?

Pensate all'Universo come ad una bomba che esplode

*Se esplosione è **debole** → frammenti si allontanano e poi si riavvicinano per la forza di gravità*

*Universo chiuso → si espande fino ad una dimensione massima per poi ricollassare con un processo opposto al big bang (**BIG CRUNCH**)*

contrazione

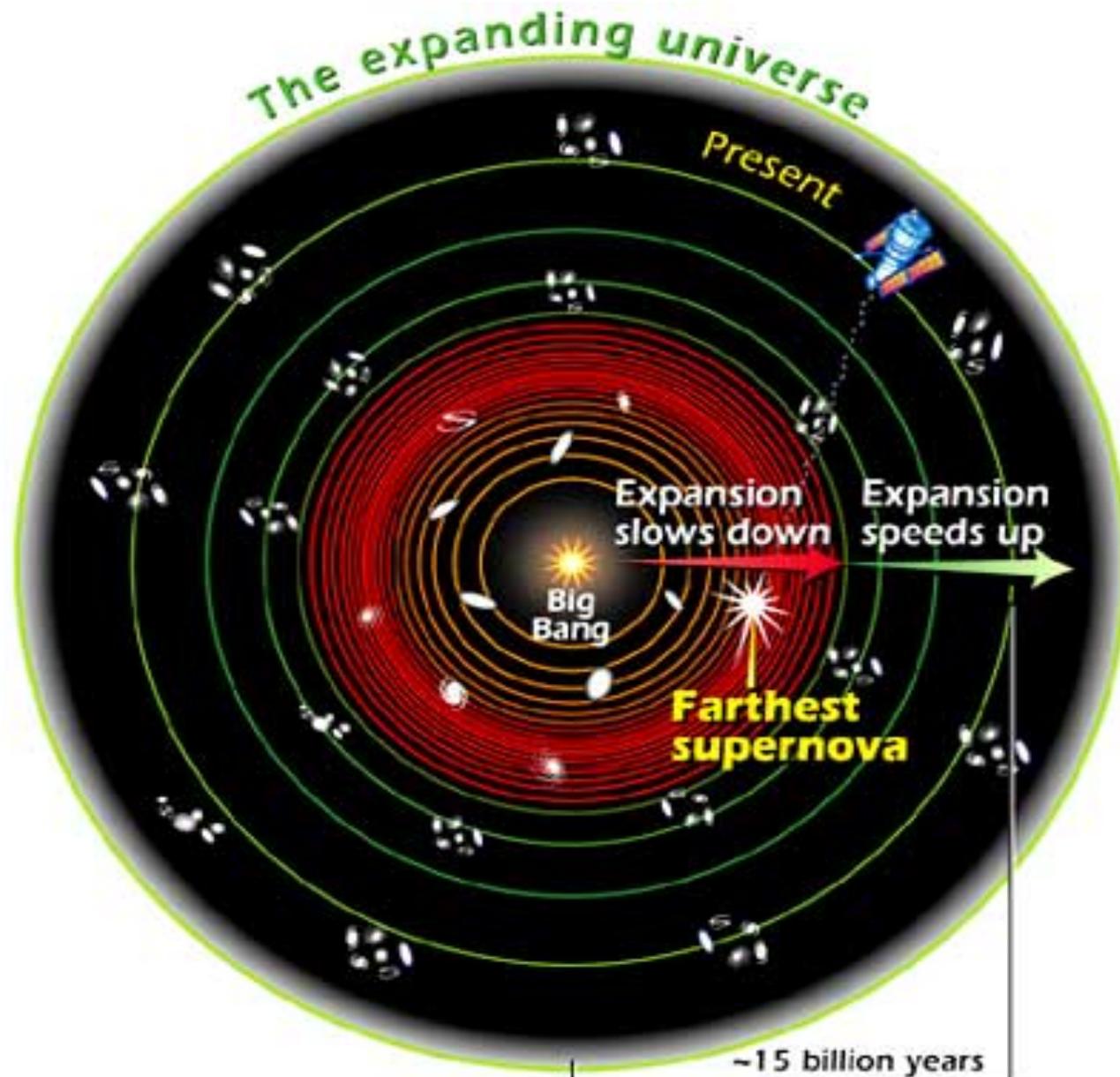
Big Crunch

*Se esplosione è **forte** → frammenti si allontanano indefinitamente*

Universo aperto → si espande per sempre

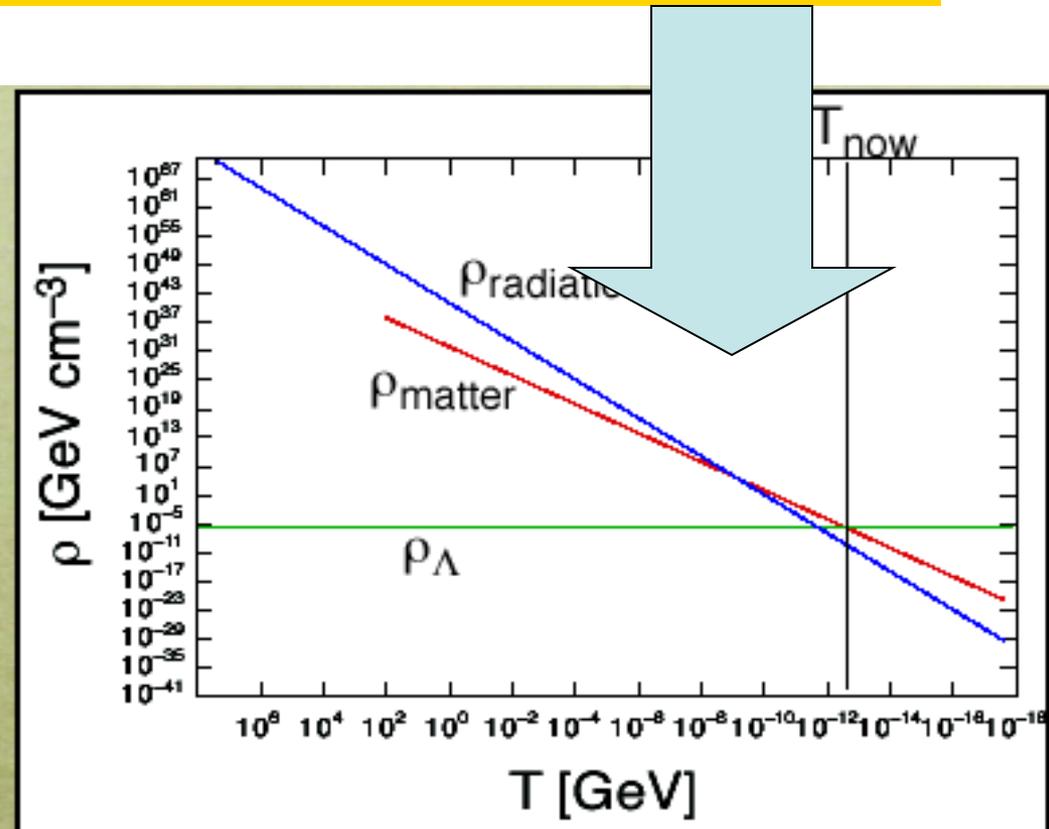
**MA IN OGNI CASO CI ASPETTIAMO CHE
L'ESPANSIONE DELL'UNIVERSO NON POSSA
ACCELERARE!**

...E INVECE ...



IL “SORPASSO” TRA ENERGIA OSCURA E MATERIA E’ AVVENUTO PROPRIO “ORA” SU SCALA COSMICA

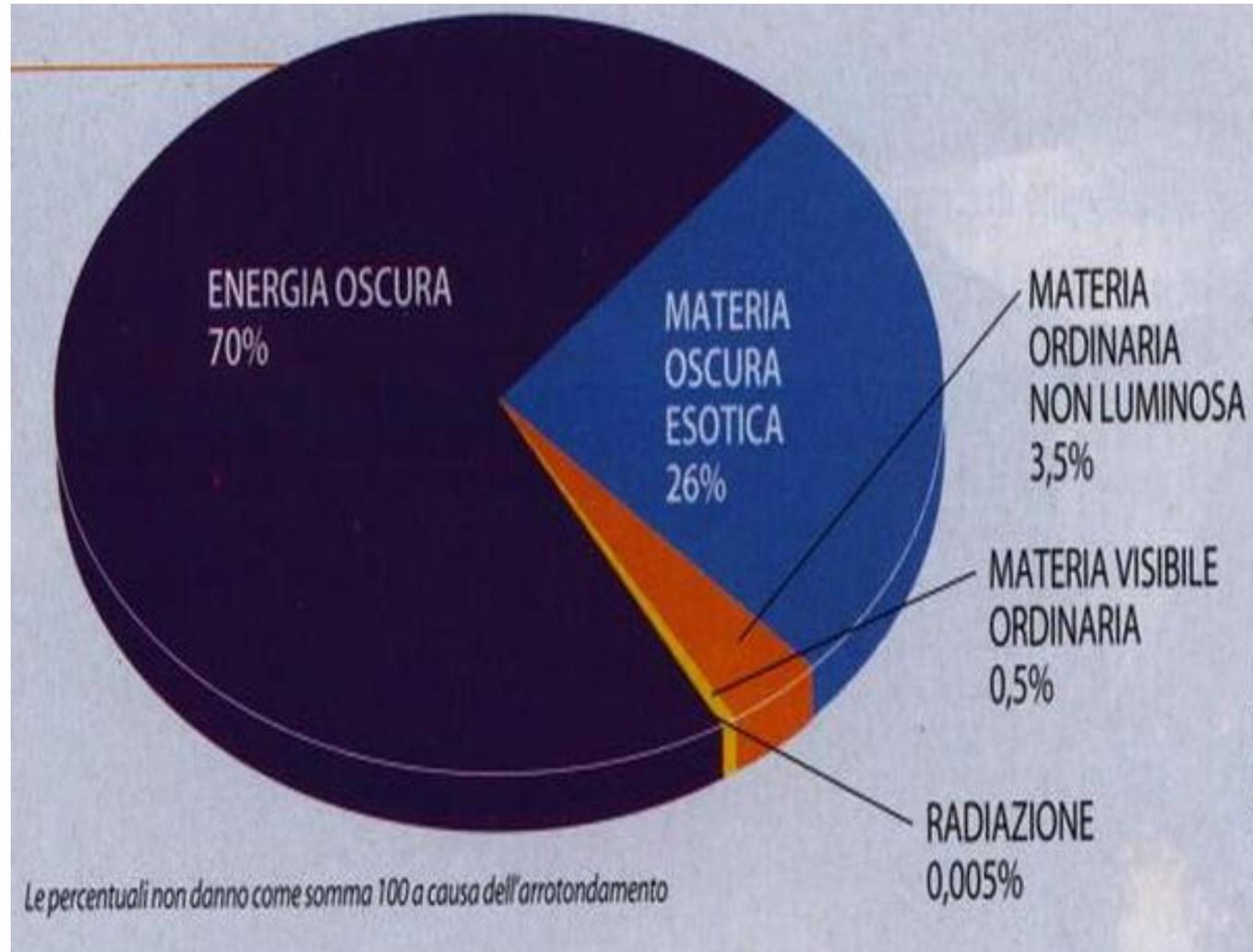
- Why do we see matter and cosmological constant almost equal in amount?
- “Why Now” problem
- Actually a *triple coincidence problem* including the radiation
- If there is a deep reason for $\rho_\Lambda \sim ((\text{TeV})^2/M_{\text{Pl}})^4$, coincidence natural



Arkani-Hamed, Hall,
Kolda, HM

Bilancio energetico dell' Universo

MATERIA
OSCURA:
NON E'
FATTA DI
PROTONI E
NEUTRONI
COME LA
MATERIA
ORDINARIA



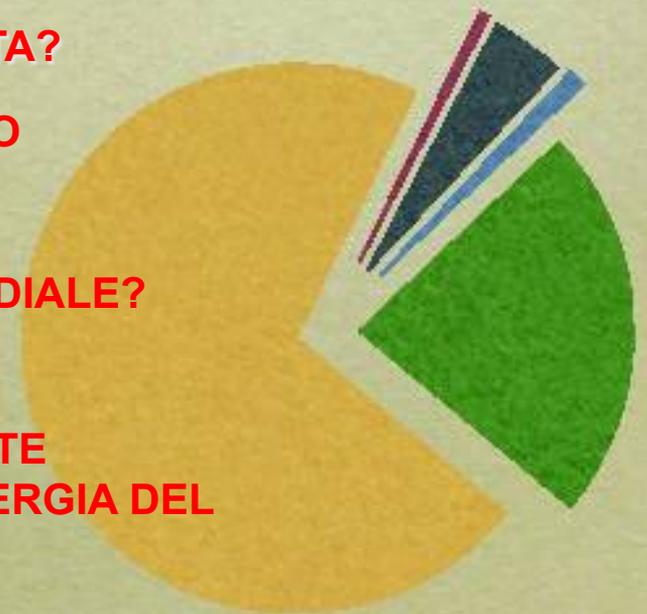
NON SAPPIAMO
CHE COSA
COSTITUISCA IL
95%
DELL' UNIVERSO

MACROCOSMO: il nostro strano UNIVERSO

- *Stars and galaxies are only ~0.5%*
- *Neutrinos are ~0.1–1.5%*
- *Rest of ordinary matter
(electrons, protons & neutrons) are 4.4%*



- *Dark Matter 23%* **DI CHE COSA E' FATTA?**
- *Dark Energy 73%* **ENERGIA DEL VUOTO QUANTISTICO?**
- *Anti-Matter 0%* **DOVE E' FINITA L' ANTIMATERIA PRIMORDIALE?**
- *Higgs Bose-Einstein condensate*
~10⁶²%?? **PROBLEMA DELLA COSTANTE COSMOLOGICA O DELL' ENERGIA DEL VUOTO QUANTISTICO?**



IS THE FINE-TUNING A REAL PROBLEM?

- WARNING: THERE EXISTS AN EVEN “LARGER” HIERARCHY OR FINE -TUNING OR NATURALNESS PROBLEM: THE **COSMOLOGICAL CONSTANT** PROBLEM (“ THE MOTHER” OF ALL NATURALNESS PROBLEMS); SO FAR, WE SIMPLY “ACCEPT” SUCH FINE-TUNING!
- (OUTRAGEOUS) POSSIBILITY: **THE “THEORY OF EVERYTHING”** COULD BE UNIQUE, BUT WITH MANY (INFINITE?) VACUA EACH GIVING RISE TO A DIFFERENT UNI-VERSE (MULTI-VERSE POSSIBILITY). WE CAN LIVE ONLY IN THE VERY RESTRICTED CLASS OF THE “MULTI-VERSE SPACE” WHERE THE “BOUDARY CONDITIONS” (FOR INSTANCE, THE VALUE OF THE COSMOLOGICAL CONSTANT OR THE SCALE OF THE ELW.SYMMETRY BREAKING AND, HENCE, THE HIGGS MASS) EXHIBIT VALUES ALLOWING FOR THE CORRECT BBN, LSS,... OUR LIFE!

ANTHROPIC PRINCIPLE

MICRO

MODELLO STANDARD

PARTICELLARE: COSTITUENTI
E INTERAZIONI
FONDAMENTALI



MA ANCHE

MACRO

MODELLO STANDARD

COSMOLOGICO:

HOT BIG BANG



MATRIMONIO FELICE
ES: NUCLEOSINTESI

PUNTI DI
ATTRITO

MATERIA OSCURA ED ENERGIA OSCURA:

UNA FINESTRA TRA LA FISICA DEL CIELO E LA FISICA DI

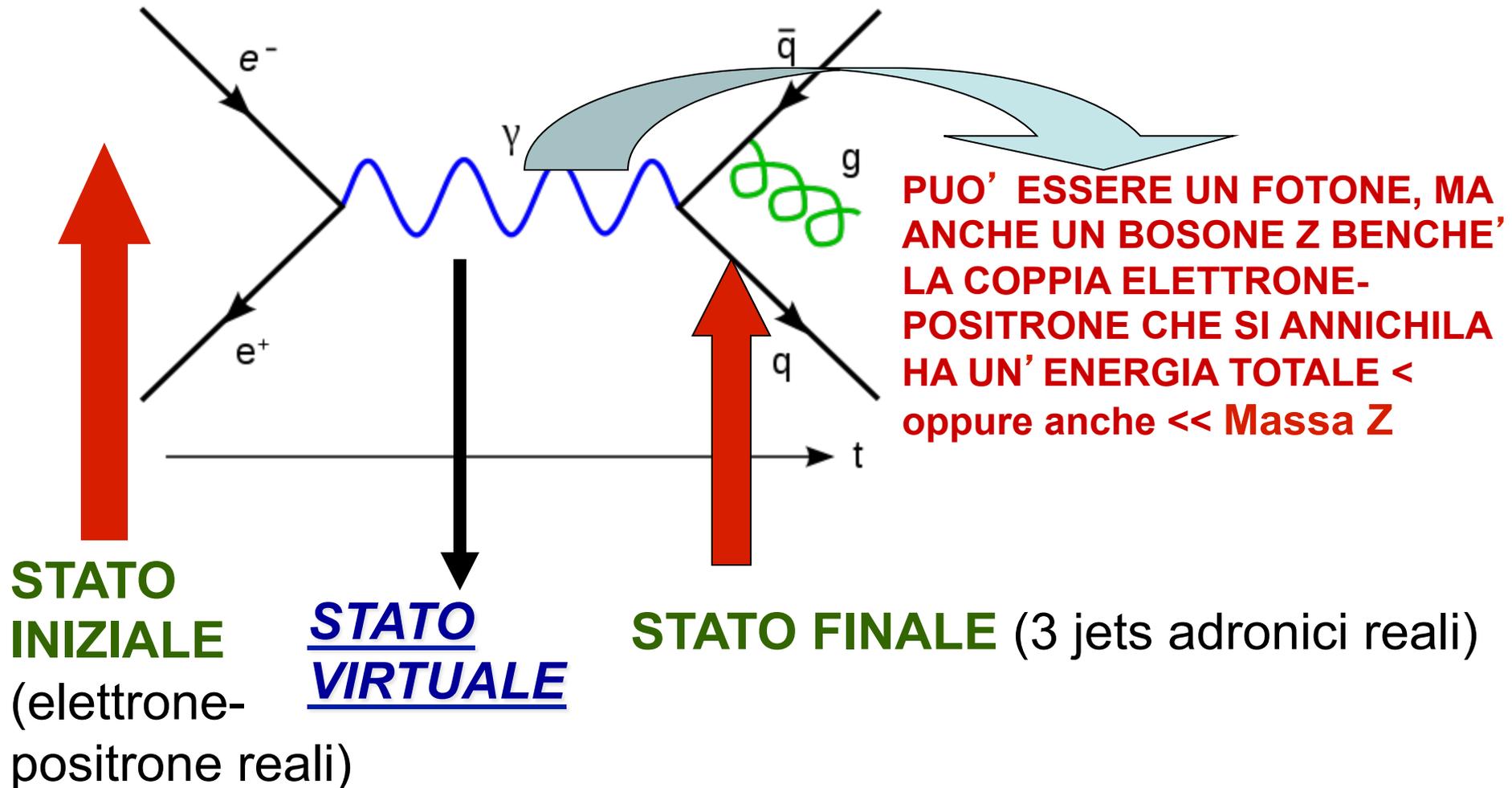
LHC SU NUOVA FISICA AL DI LA' DEL MODELLO
STANDARD PARTICELLARE **E/O** MODELLO STANDARD
COSMOLOGICO

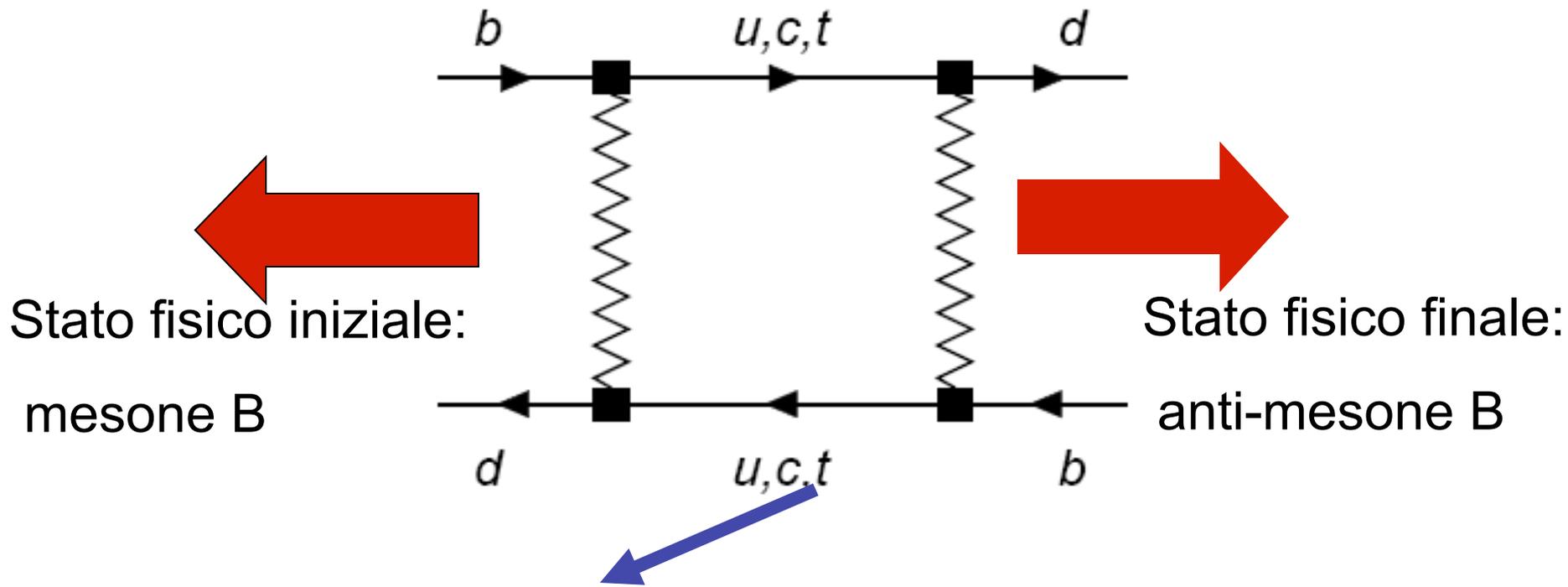
LA VIA VIRTUALE ALLA

NUOVA FISICA :

**DOVE LA MECCANICA
QUANTISTICA SCONVOLGE
COMPLETAMENTE LE NOSTRE
CATEGORIE MENTALI DI
“REALE” E “VIRTUALE”**

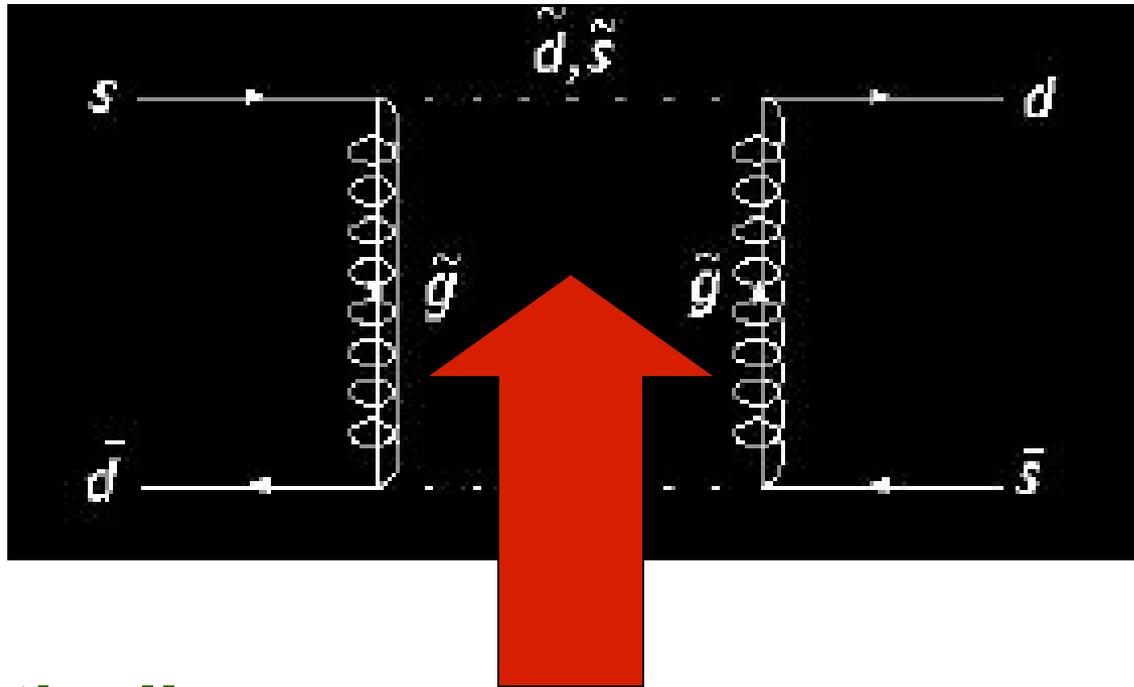
LA REALTA' FISICA NELLA MECCANICA QUANTISTICA: PARTICELLE REALI E VIRTUALI





Il quark top ha una **massa molto maggiore** di quella dei mesoni B, eppure esiste “**virtualmente**” per un intervallo di tempo molto breve durante il quale il mesone B oscilla nel suo antimessone: secondo la meccanica quantistica se uno stato “vive” per un **tempo Δt molto breve la sua energia ha un’incertezza ΔE che puo’ essere molto grande** $\longrightarrow \Delta E \Delta t > h$ (costante di Planck)

SCOPRIRE NUOVE PARTICELLE (pesanti) OSSERVANDONE LA LORO ESISTENZA **VIRTUALE**



Nuove particelle SUSY con massa migliaia di volte piu' grandi di quella dei mesoni fisici che oscillano: possibile scorgerne la loro presenza se si misura il fenomeno con **altissima precisione**
→ necessario avere un' altissima produzione dei mesoni che oscillano → **macchine ad altissima intensita' o luminosita'**

TEVATRON → LHC → ILC

ALTA ENERGIA: LA FISICA AGLI ACCELERATORI

NUOVA FISICA
AL TEV

FISICA
ASTROPARTICELLARE

ALTA INTENSITA': LA
FISICA DEL "VIRTUALE"

DARK MATTER
DARK ENERGY

ASIMMETRIA COSMICA
MATERIA-ANTIMATERIA

"LOW ENERGY"
PRECISION PHYSICS

VIOLAZIONE DI CP

FISICA del B e del K

ONDE GRAV. INFLAZIONE

FISICA DEL NEUTRINO

...qui sono stati rivelati,
riguardo a questa nuova ed
eccellente scienza, di cui il
mio lavoro e' solo l'inizio,
strade e strumenti dei quali
altre menti, piu' acute della
mia, esploreranno gli angoli
piu' remoti.

GALILEO GALILEI