

MASTECLASS di PADOVA 2010, 1 MARZO 2010

**VIAGGIO NEL CUORE DELLA MATERIA:
I MATTONI FONDAMENTALI DELL'UNIVERSO**

Antonio Masiero

Universita' di Padova

e

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare,

Sezione di Padova

The Energy Frontier

Origin of Mass

Matter/Anti-matter
Asymmetry

Dark Matter

Origin of Universe

Unification of Forces

New Physics
Beyond the Standard Model

Neutrino Physics

Dark Energy

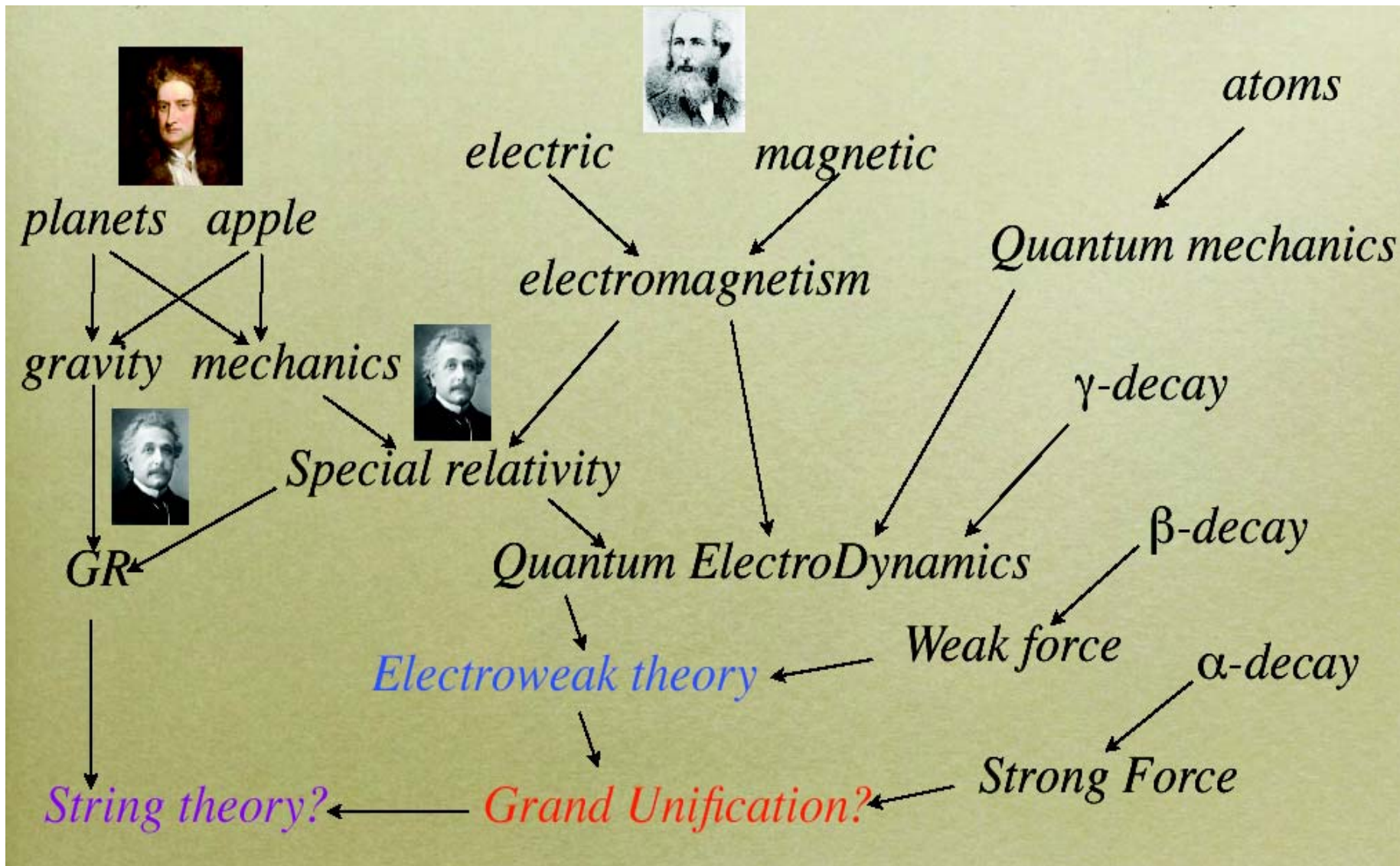
Proton Decay

The Intensity Frontier

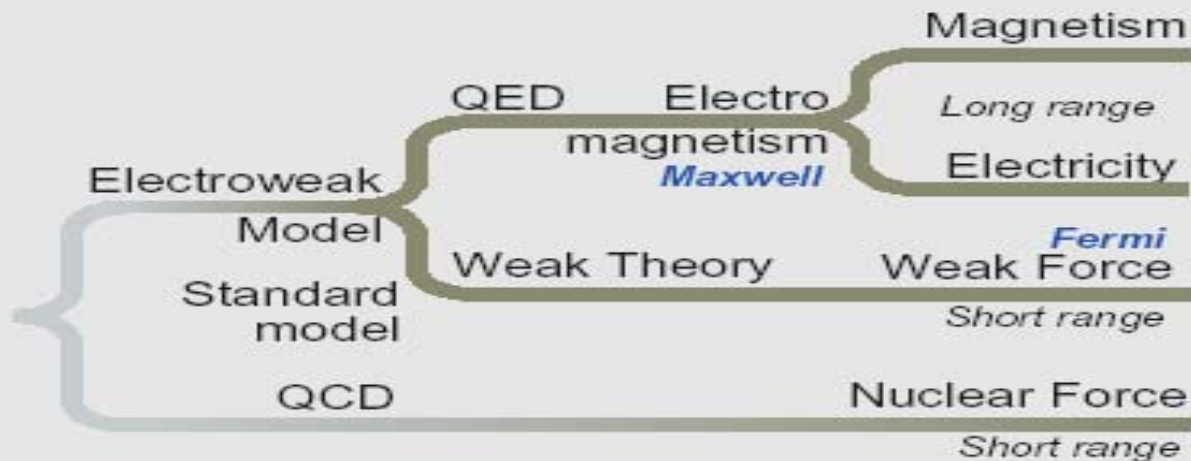
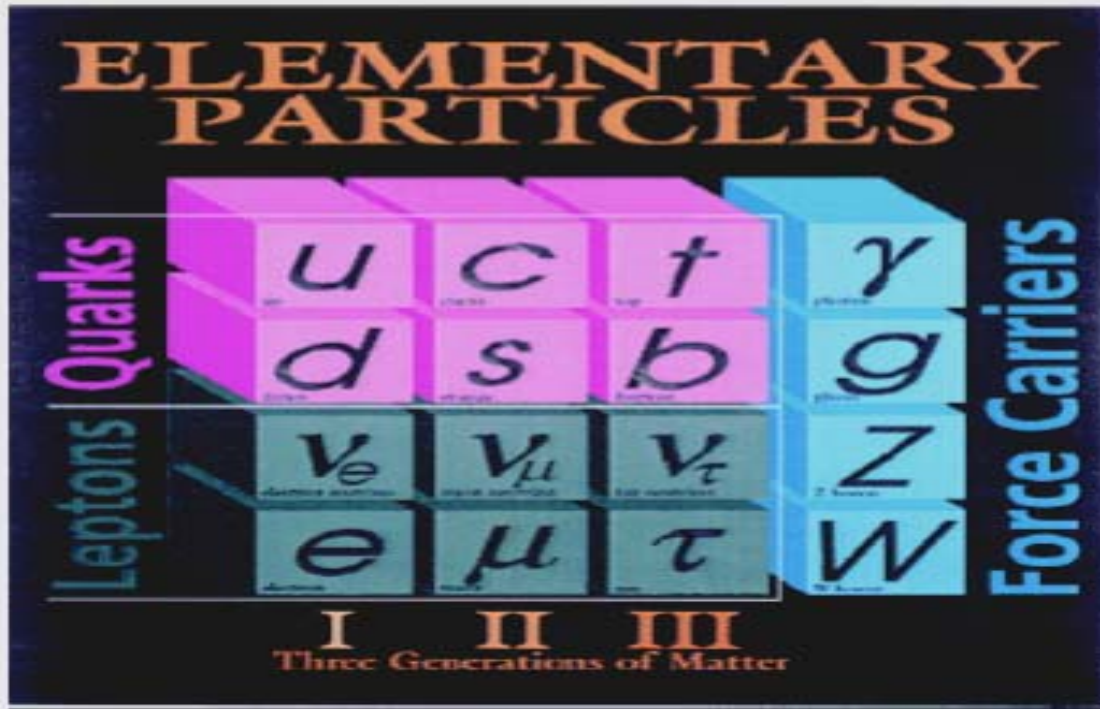
The Cosmic Frontier



UNIFICAZIONE delle **INTERAZIONI FONDAMENTALI**

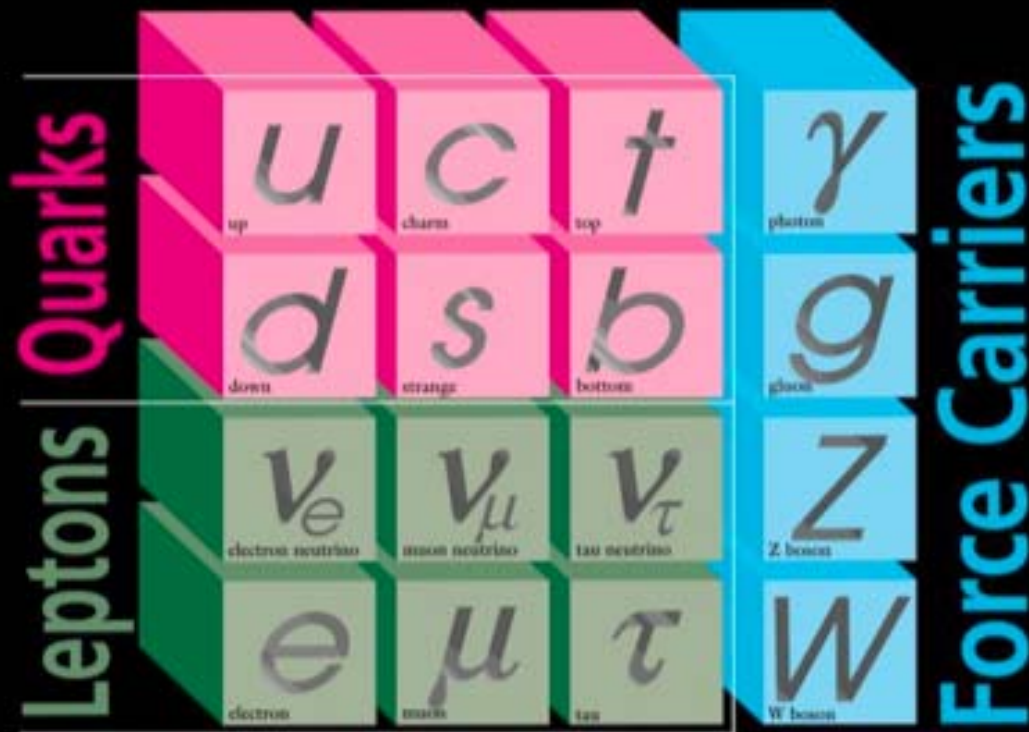


THE G-W-S STANDARD MODEL



The Standard Model

Gravity
?



I II III
Three Generations of Matter

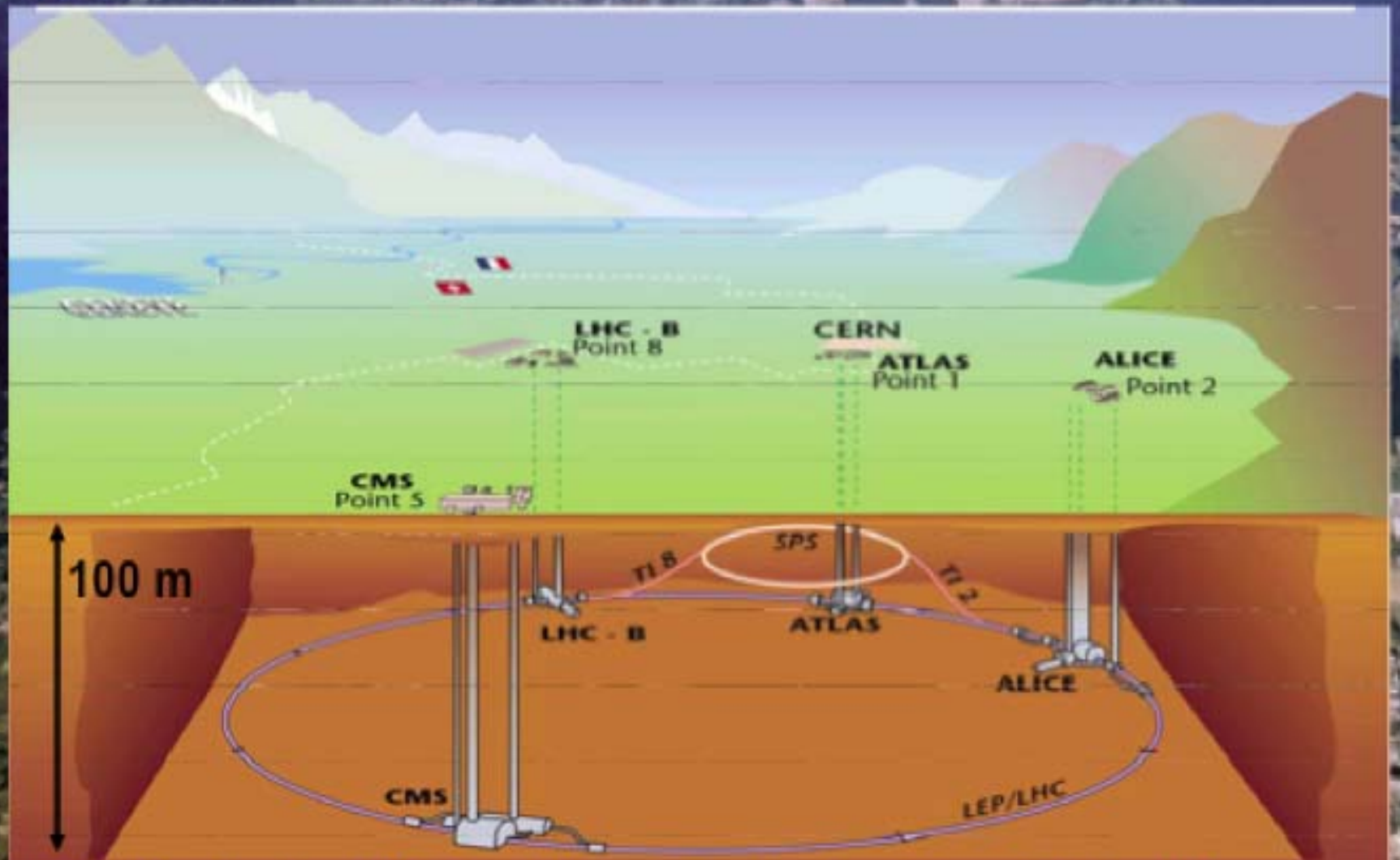
H
Higgs boson

?

Large Hadron collider (LHC) at CERN



LHC at CERN

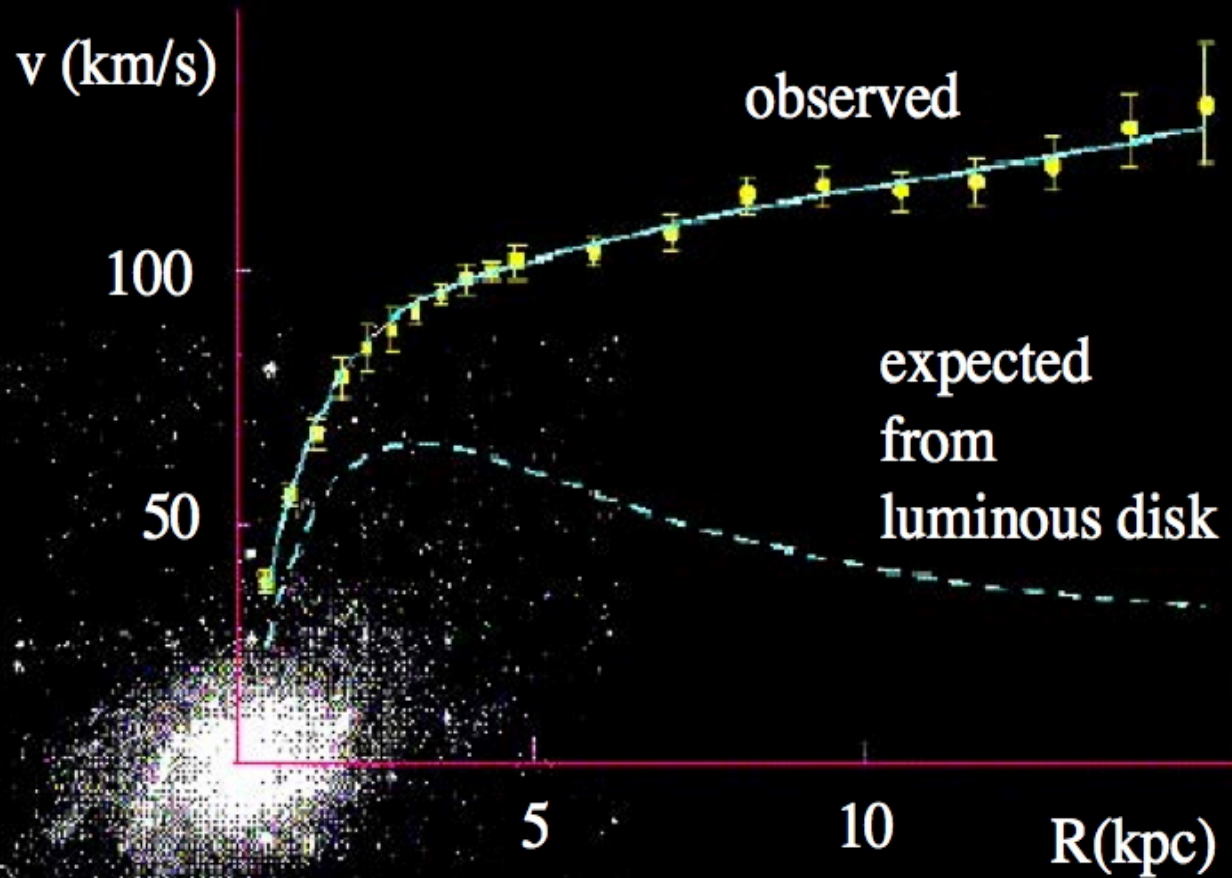


Collisioni a 14 TeV (milioni di milioni di eV)

INDICAZIONI DI NUOVA FISICA AL DI LA' DEL MODELLO STANDARD PARTICELLARE

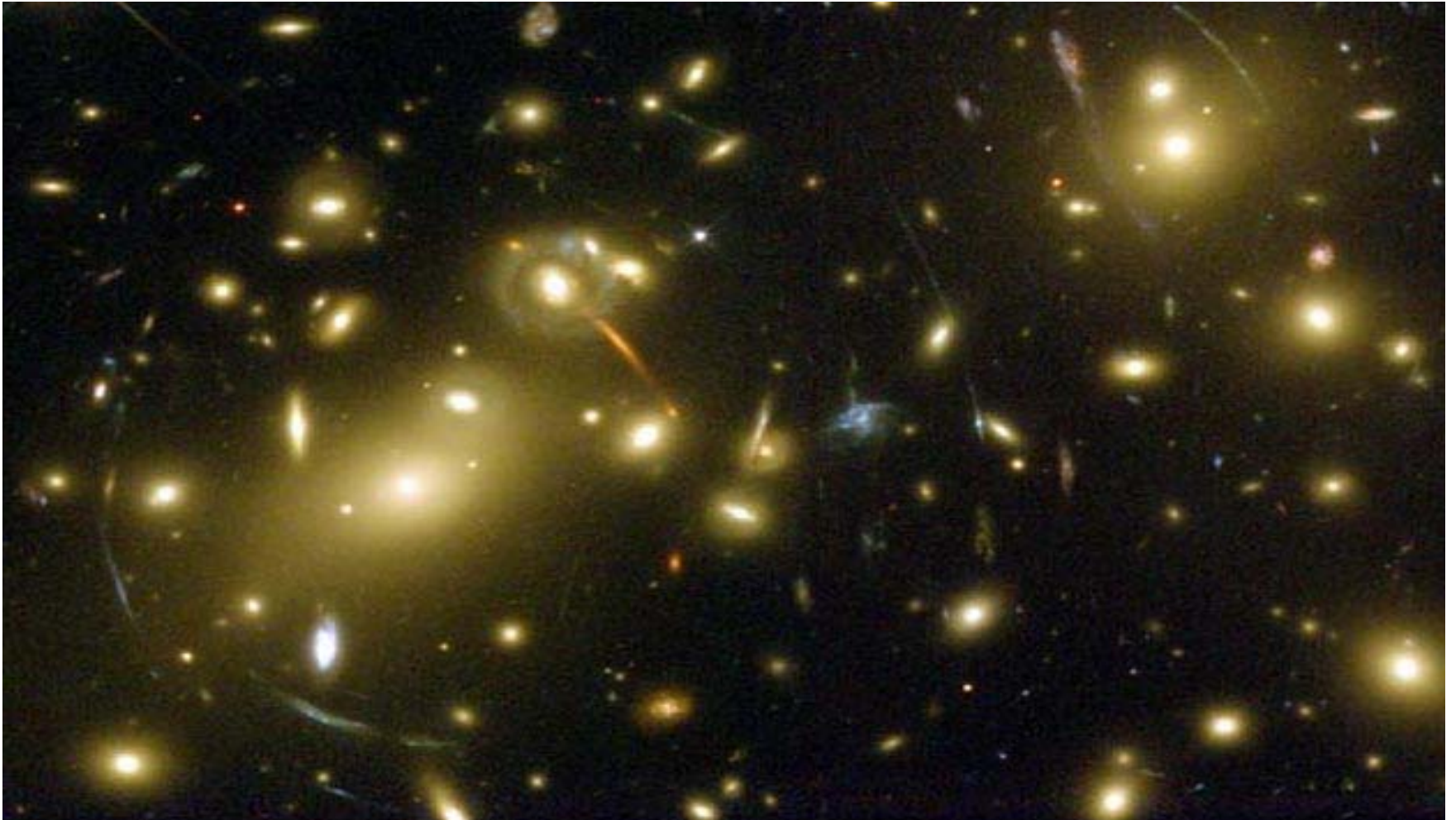
- **MASSA DEI NEUTRINI**
- ESISTENZA DI **MATERIA OSCURA** NON COSTITUITA DALLA "SOLITA" MATERIA (protoni, neutroni)
- **ASIMMETRIA COSMICA TRA MATERIA E ANTIMATERIA**: ESISTENZA DI UNA NUOVA SORGENTE DI **VIOLAZIONE DI CP** OLTRE A QUELLA PREVISTA DAL MODELLO STANDARD
- IMPOSSIBILITA' NEL MS DI OTTENERE UNA **FASE INFLAZIONARIA** (ESPANSIONE ACCELERATA ESPONENZIALMENTE) NELL'UNIVERSO PRIMORDIALE
- DOMANDE "**FONDAMENTALI**" A CUI IL MODELLO STANDARD NON RISPONDE:
 - UNIFICAZIONE DELLE FORZE FONDAMENTALI
 - MASSE E MESCOLAMENTI DEI FERMIONI
 - "**STABILITA'**" DELLA SCALA DI ENERGIA A CUI I BOSONI W e Z PRENDONO MASSA (circa 100 GeV)

Di cosa è fatto l'Universo?



M33 rotation curve

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**



EVIDENCE FOR DM

Various astrophysical sources have confirmed the existence of Dark Matter (DM)

- **Binding of Galaxies in Clusters (F. Zwicky, 1933)**
- **Rotation curves of Galaxies (V.C. Rubin and W.K. Ford, 1970)**
- **Bindings of hot gases in clusters**
- **Gravitational Lensing observations**
- **Large Scale Structure simulations**
- **High z - Supernovae**
- **Observations of colliding clusters of Galaxies**

The most direct and accurate evidence comes from WMAP by measuring anisotropies of the CMB power spectrum

~ 73% DarkEnergy, ~ 23% DarkMatter, 4% Baryons

MODIFICARE LA GRAVITA'

(MOND)

- DM e' sempre derivata dalle osservazioni **assumendo la validita' della legge standard della gravita'** → possibile evitare l'introduzione di DM se modifico la legge di gravita' su varie scale astronomiche
- Possibili problemi per CDM
- Fit di MOND a >100 **curve di rotazione galattiche** con successo
- Problemi a riprodurre i dati relativi alla **dinamica di clusters**: necessita' di introdurre materia invisibile (neutrini, barioni oscuri)
- **Versione relativistica di MOND** (Tensor-Vector Scalar Th. - TeVeS) + **covarianza** (Bekenstein '04, Sanders '05)
- TeVeS : OK per strong lensing, invece necessita di materia invisibile per riprodurre il weak lensing. **Barioni oscuri** necessari anche per fenomeni quali il **Bullet Cluster** (Milgrom '08)

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**

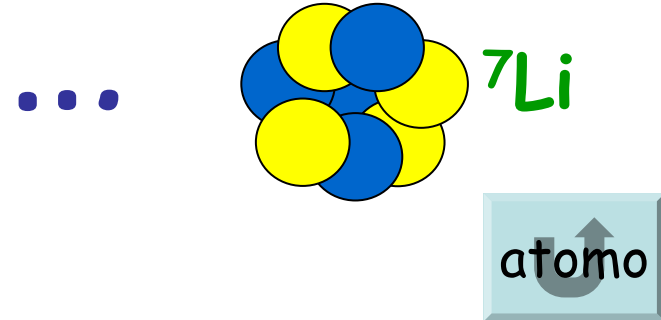
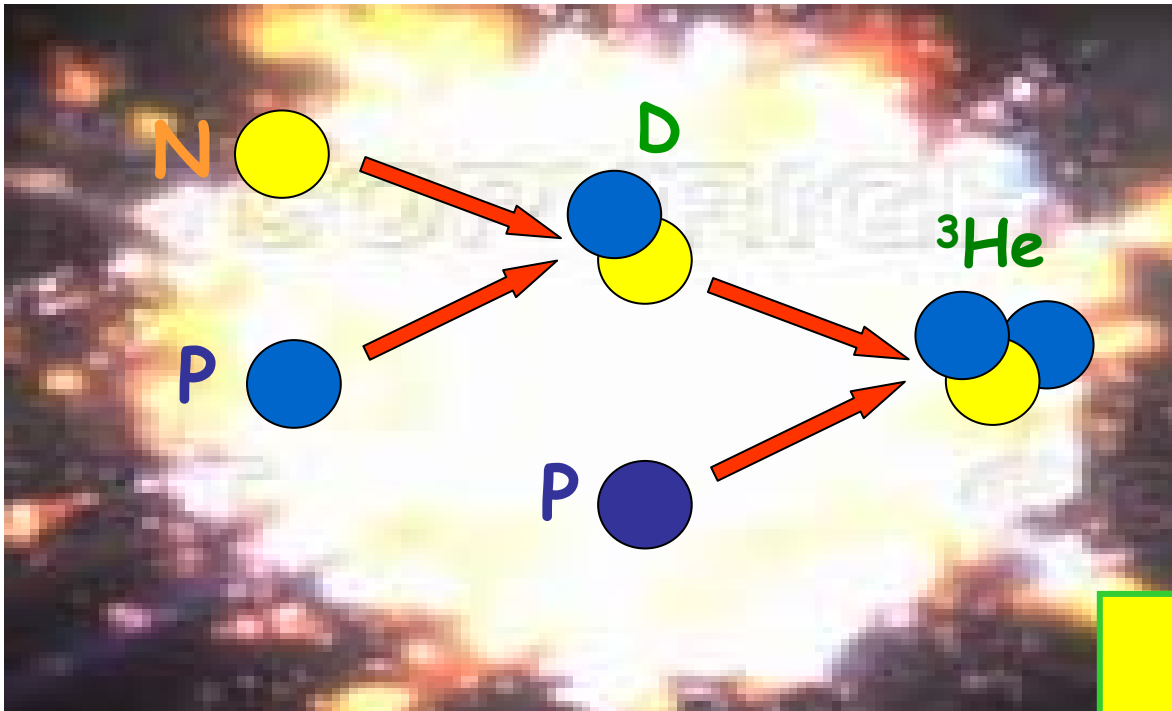
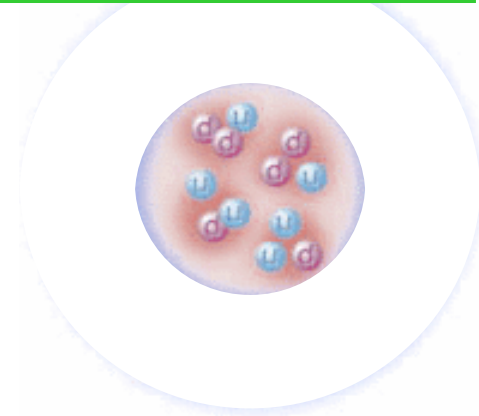


ESISTENZA DI UN NUOVO TIPO DI MATERIA

6° FOTO (3 m)

$T = 0.1 \text{ MeV}$ ($10^9 \text{ K} \approx 10^8 \text{ C}$)

NUCLEOSINTESI → FORMANO I
NUCLEI PIU' LEGGERI



MATERIA
(H, D, ³He, Li)

ABBONDANZA DI ELIO

elio

75%

25%

(3P, 4N)

7° FOTO (700000 anni)

$T = 1 \text{ eV}$ ($10^4 \text{ K} \approx 10000 \text{ C}$)

D

NEUTRINI

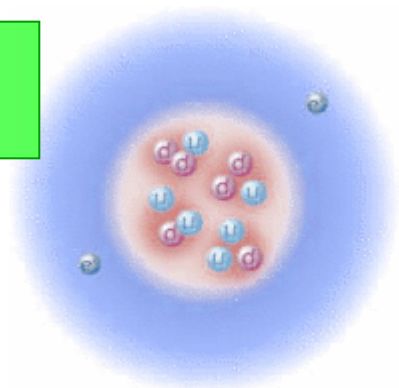
${}^7\text{Li}$

${}^4\text{He}$

H

LUCE (γ)

GRAVITONI



NUCLEI CATTURANO
GLI ELETTRONI

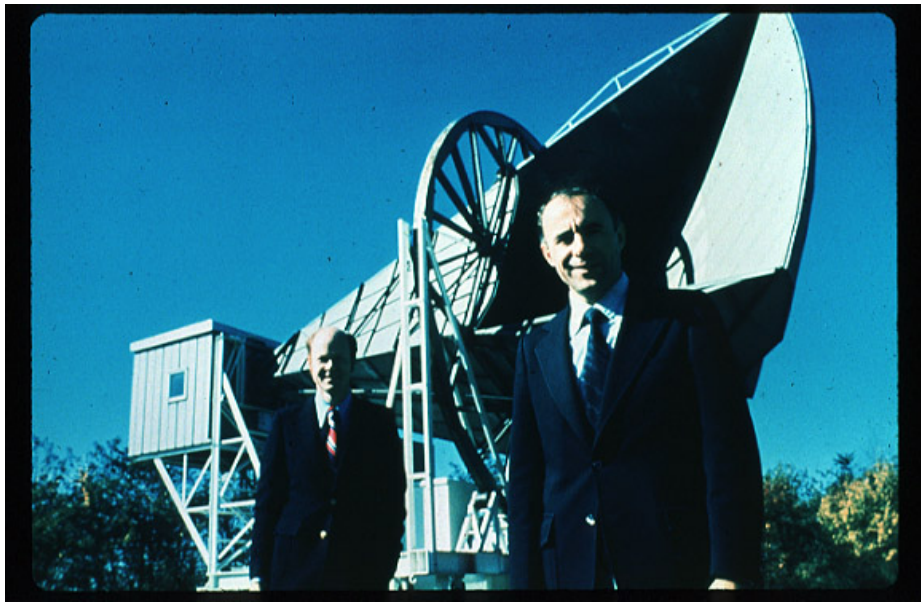


ATOMI NEUTRI



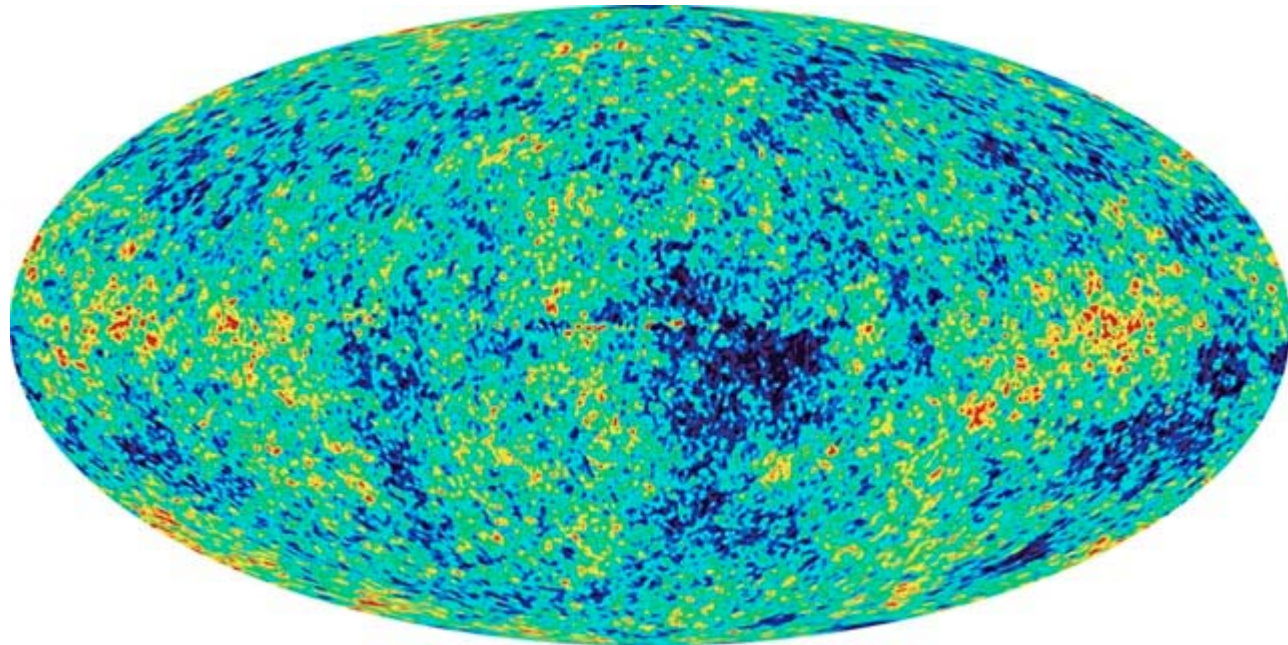
RADIAZIONE NON
INTERAGISCE PIU' CON
MATERIA

MATERIA E RADIAZIONE → VITA INDIPENDENTE



2- L'Universo è nato da una enorme esplosione ~15 miliardi di anni fa (Big Bang). L'eco di quella esplosione venne rivelato nel 1965 (radiazione cosmologica di fondo) da Penzias e Wilson.

OGGI: Misura delle fluttuazioni della radiazione di fondo da 2.7° Kelvin per mezzo del satellite WMAP \Rightarrow i "semi" delle odierne Galassie !



DM → NEW PHYSICS BEYOND THE

(PARTICLE PHYSICS) SM - if Newton is right
at scales > size of the Solar System

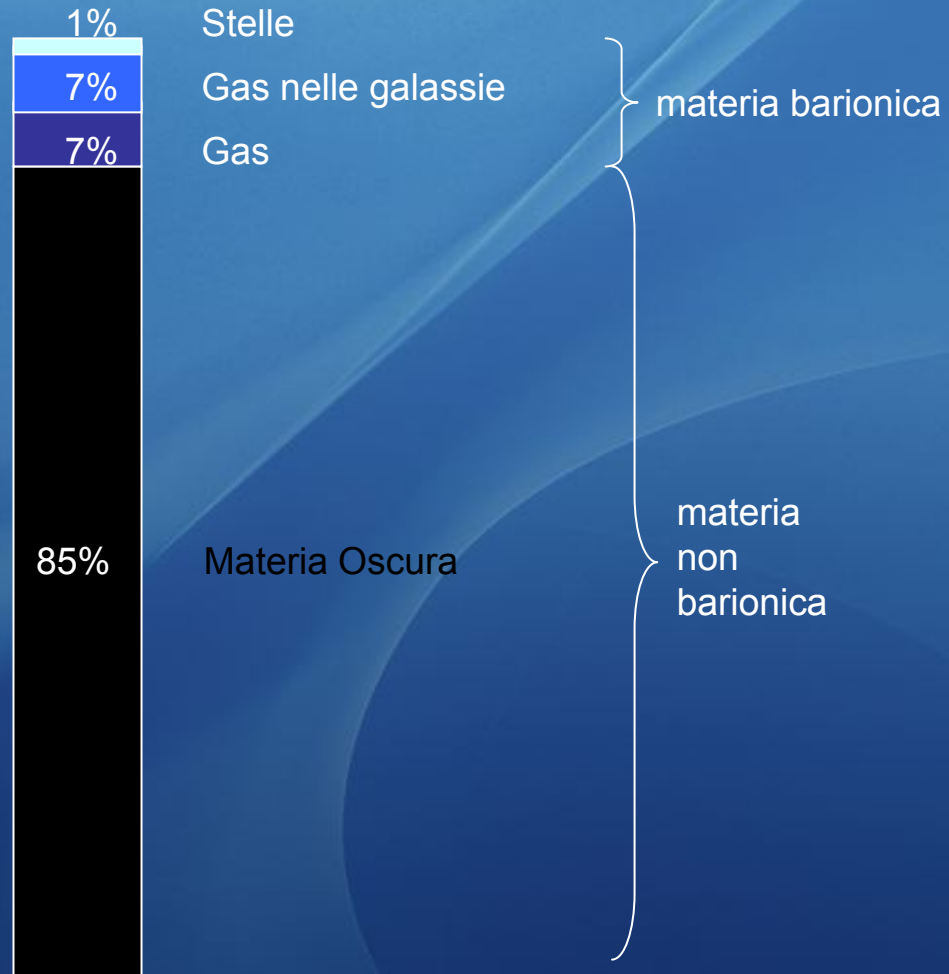
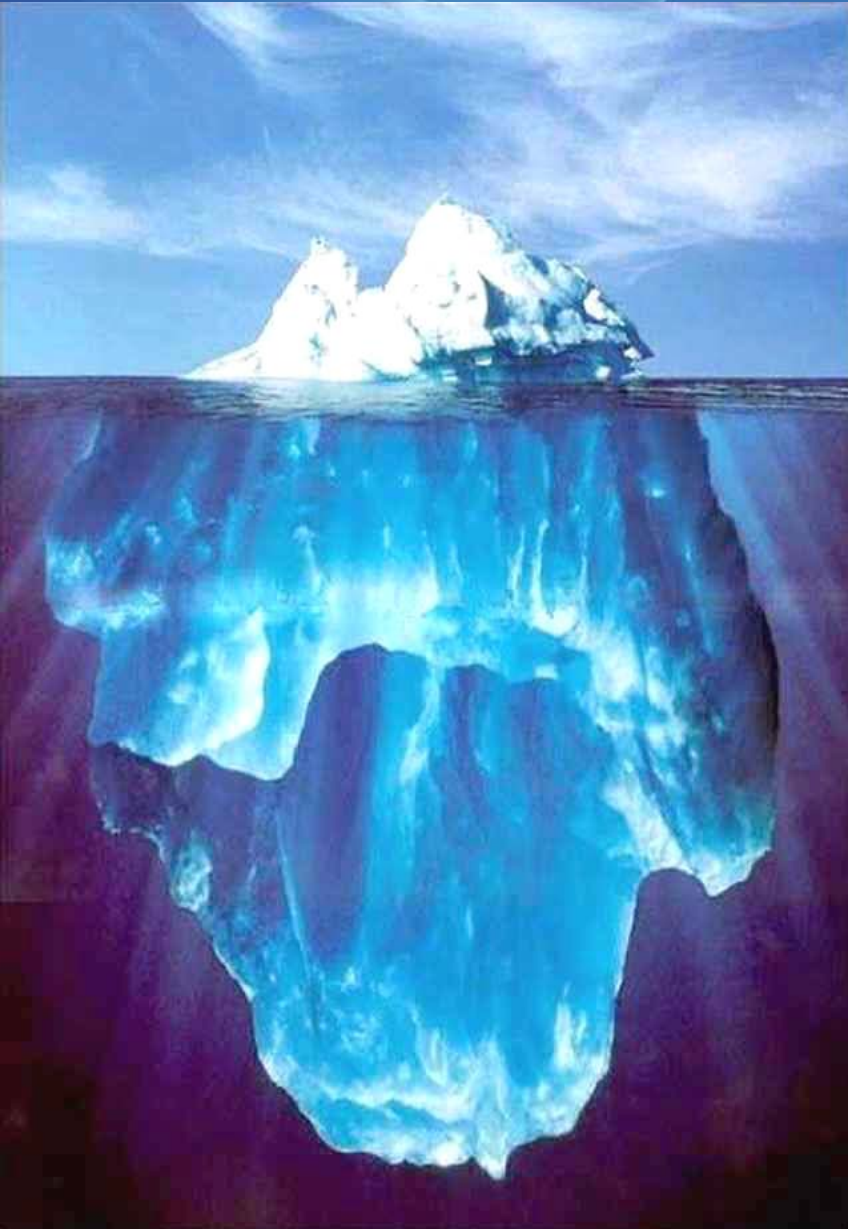
• $\Omega_{\text{DM}} = 0.233 \pm 0.013$ *

• $\Omega_{\text{baryons}} = 0.0462 \pm 0.0015$ **

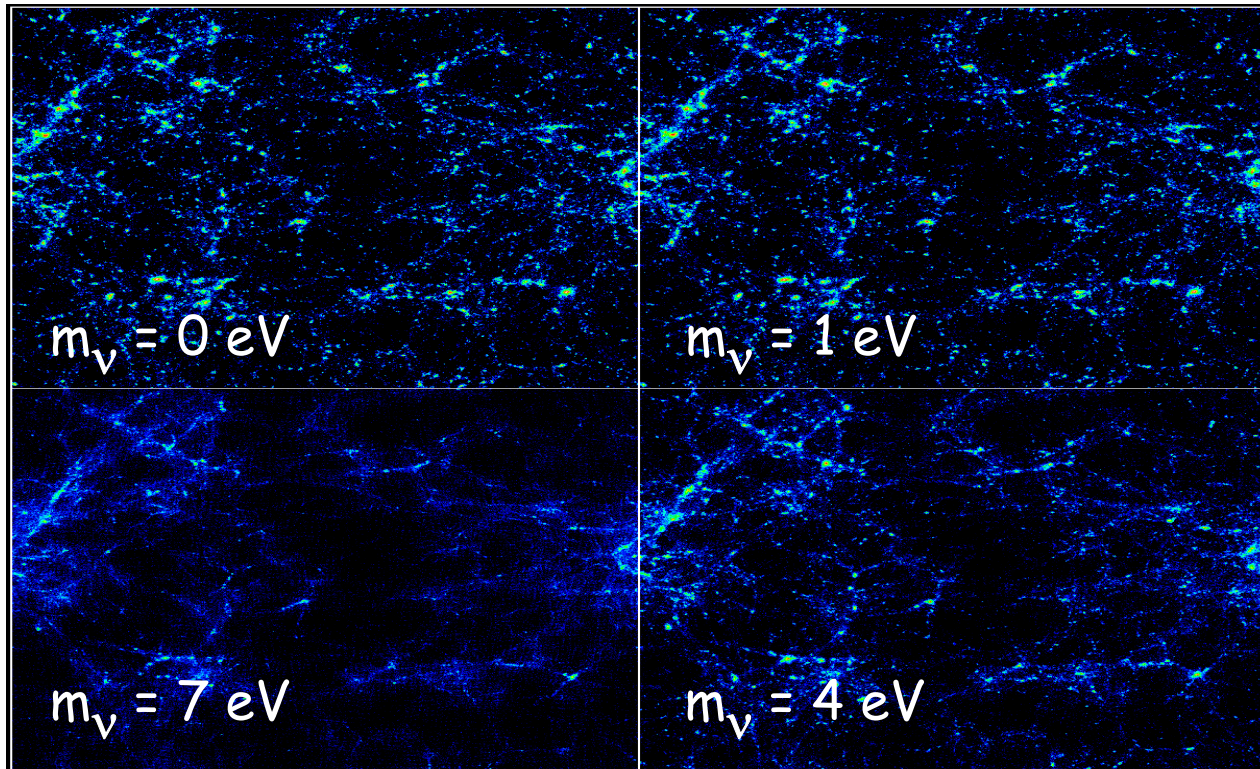
*from CMB (5 yrs. of WMAP) + Type I
Supernovae + Baryon Acoustic
Oscillations (BAO)

**CMB + Type I SN + BAO in agreement with
Nucleosynthesis (BBN)

Inventario della materia nell' Universo

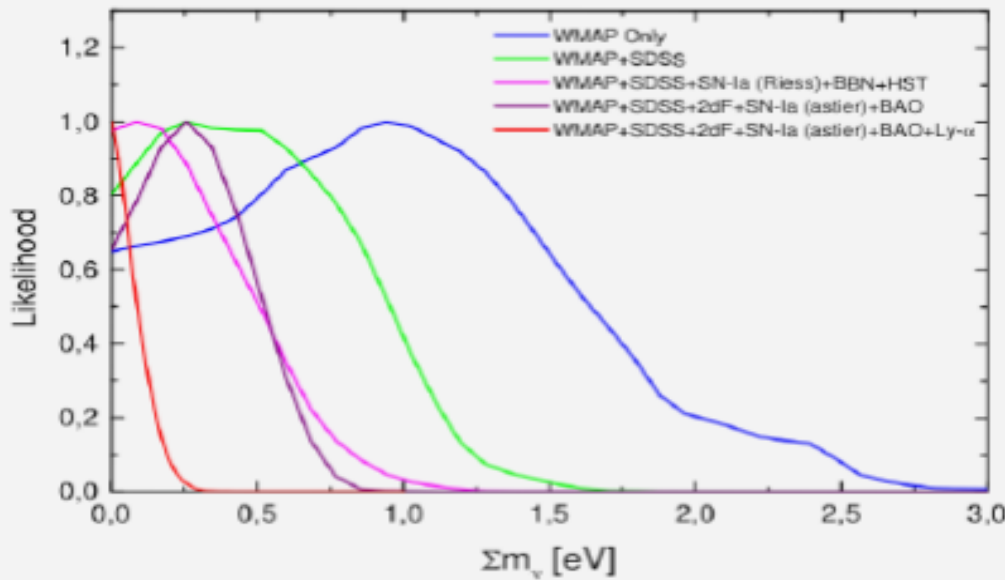


SE LA MATERIA OSCURA FOSSERO **NEUTRINI**
CON MASSA L'UNIVERSO SAREBBE MOLTO
DIVERSO DA QUELLO REALE



(E.g., Ma 199)

**I LIMITI COSMOLOGICI
SULLA SOMMA DELLE
MASSE DEI 3
NEUTRINI SONO LA
PIU' STRINGENTE
INFORMAZIONE
SULLA LORO MASSA**



Case	Cosmological data set	Σ bound (2σ)
1	WMAP	< 2.3 eV
2	WMAP + SDSS	< 1.2 eV
3	WMAP + SDSS + SN_{Riess} + HST + BBN	< 0.78 eV
4	CMB + LSS + SN_{Astier}	< 0.75 eV
5	CMB + LSS + SN_{Astier} + BAO	< 0.58 eV
6	CMB + LSS + SN_{Astier} + Ly- α	< 0.21 eV
7	CMB + LSS + SN_{Astier} + BAO + Ly- α	< 0.17 eV

LA MATERIA OSCURA QUALE
CHIAVE DI ACCESSO ALLA
NUOVA FISICA OLTRE IL MS:

PUO' **LA PARTICELLA DI
MATERIA OSCURA ESSERE IL
PRIMO SEGNALE DELLA
NUOVA FISICA ALLA**

SCALA ELETTRODEBOLE



WIMP: NUOVE PARTICELLE CON MASSA CHE INTERAGISCONO DEBOLMENTE

Bergstrom

Table 1. Properties of various Dark Matter Candidates

Type	Particle Spin	Approximate Mass Scale
Axion	0	μeV - meV
Inert Higgs Doublet	0	50 GeV
Sterile Neutrino	1/2	keV
Neutralino	1/2	10 GeV - 10 TeV
Kaluza-Klein UED	1	TeV

Tante le possibilita', ma gli WIMP sono speciali : **singolare coincidenza tra param. dei MODELLI STANDARD PART. e COSM. per dare validi candidati di DM proprio alla scala elettrodebole (TeV)**

QUALE NUOVA FISICA DA VEDERE A LHC ?

- **SUPERSIMMETRIA:** OGNI PARTICELLA “ORDINARIA” E’ ACCOMPAGNATA DA UNA PARTICELLA PARTNER SUPERSIMMETRICA PERCHE’ LA MATERIA RIMANGA STABILE SI DEVONO PORRE RESTRIZIONI CHE IMPLICANO CHE **LA PARTICELLA SUSY PIU’ LEGGERA (NEUTRALINO?)** SIA STABILE E COSTITUISC AUN BUON CANDIDATO DI WIMP
- **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 STESS CARATTERISTICHE TRANNE CHE AVERE MASSA PIU’ GRANDE.. LA PIU’ LEGGERA DELLE PARTICELLE KK, E’ IL CANDIDATO WIMP DI MATERIA OSCURA IN TEORIE CON NUOVE DIMENSIONI SPAZIALI

WIMPs: proviamo a “fabbricarli” anche noi !

L'IPOTESI “WIMPS”

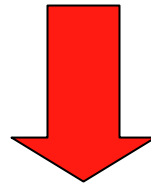
MATERIA OSCURA
COSTITUITA DA
PARTICELLE “NUOVE” CON
MASSA TRA 100 E 1000 GEV
CHE INTERAGISCONO
SOLO DEBOLMENTE

LHC, ILC (LINEAR COLLIDER)
POSSONO **PRODURRE WIMPS**

WIMPS scappano dal rivelatore

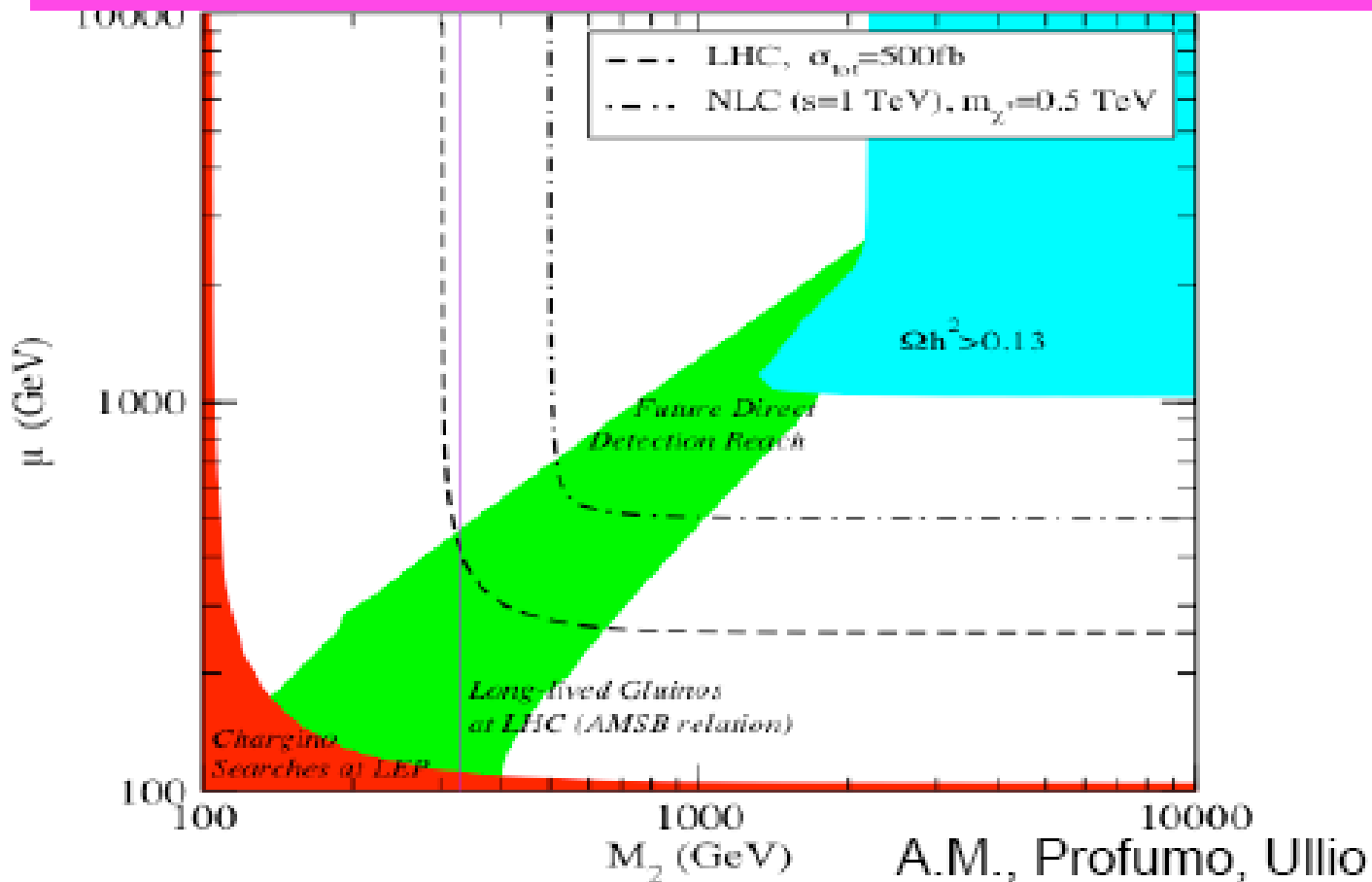
“FIRMA” DELL'HIGGS:

ENERGIA MANCANTE



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' A **LHC**

LHC, ILC, DM SEARCHES SENSITIVITIES



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**

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

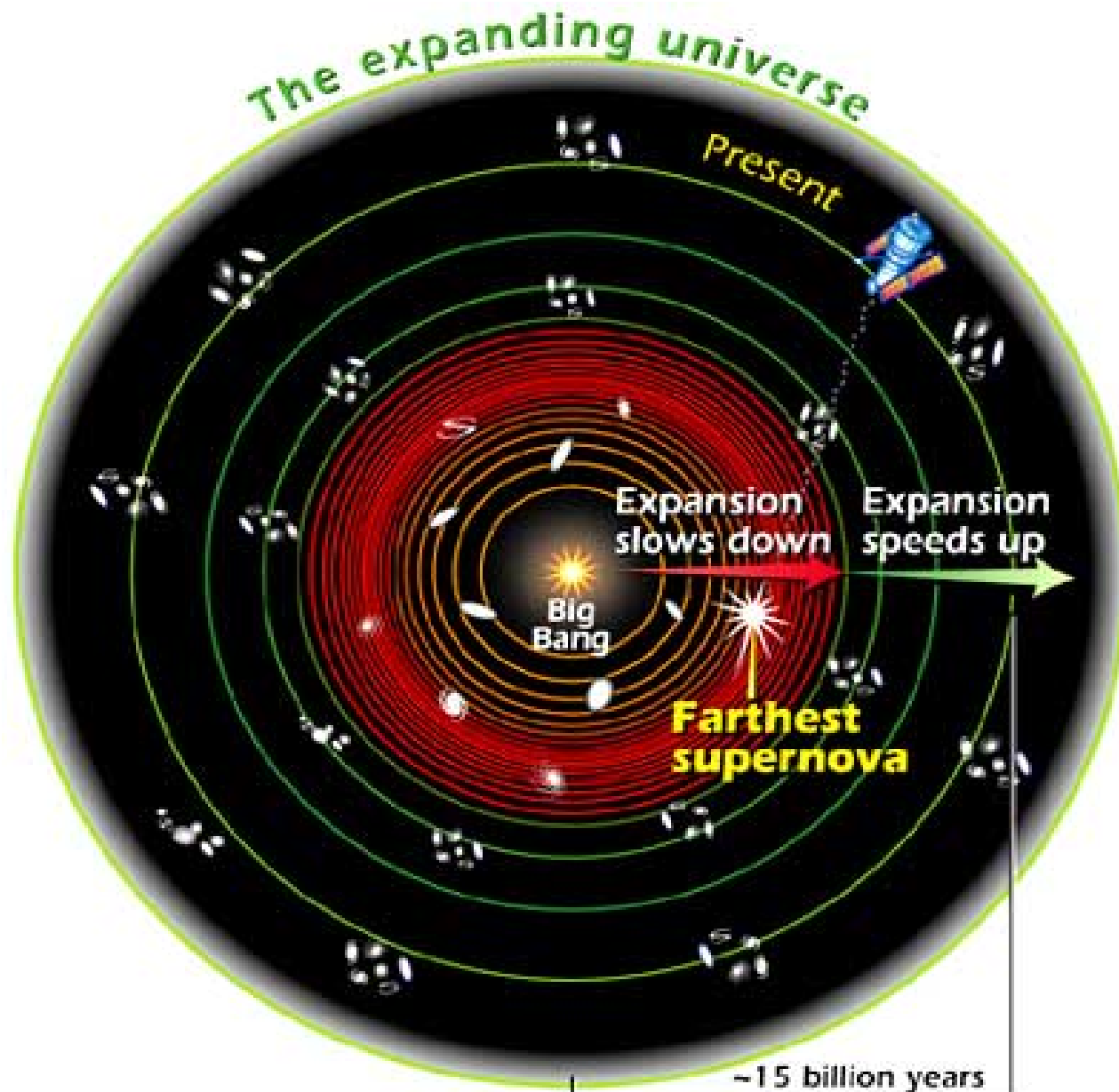
Big Crunch

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

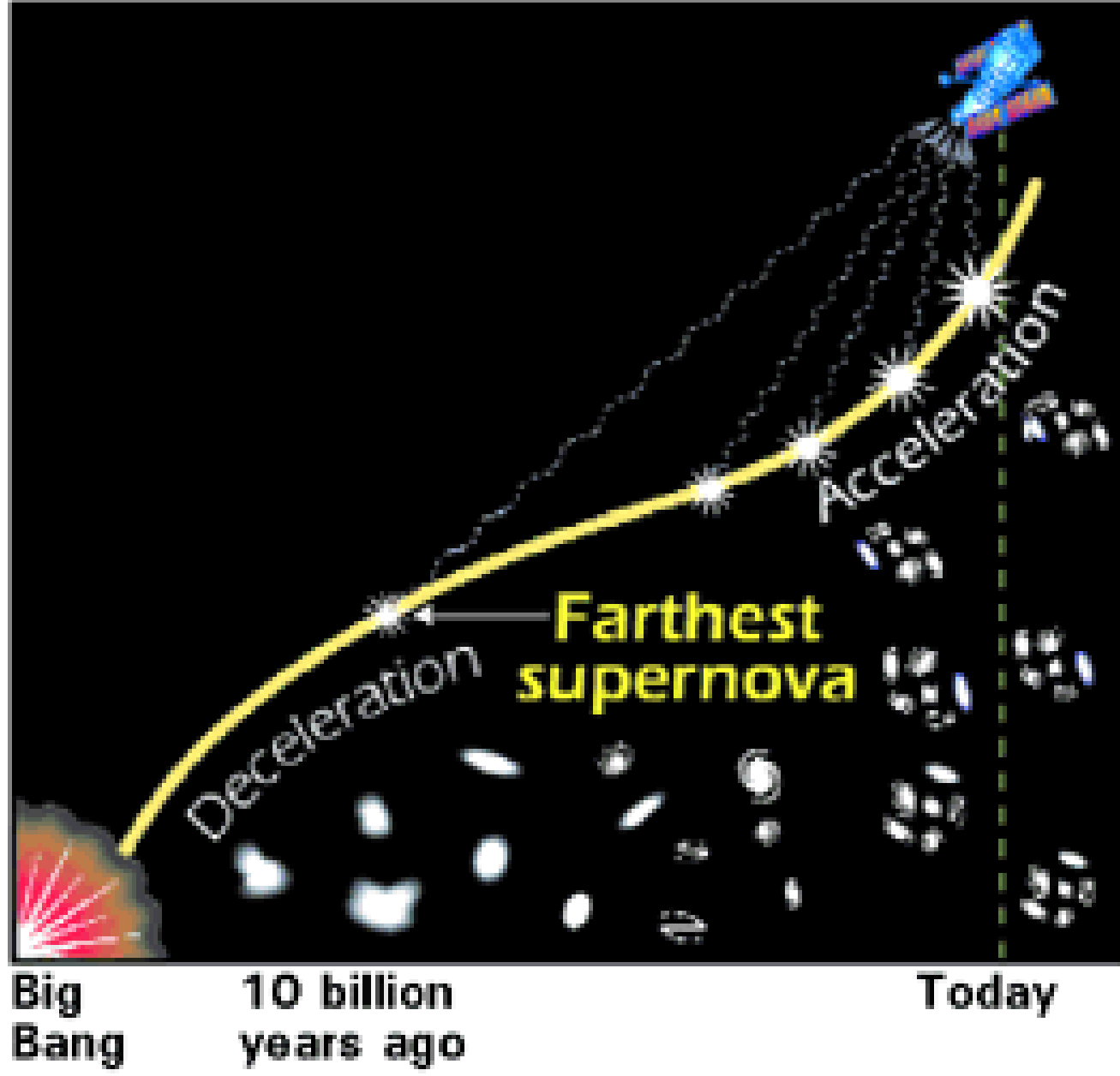
Universo aperto → si espande per sempre

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

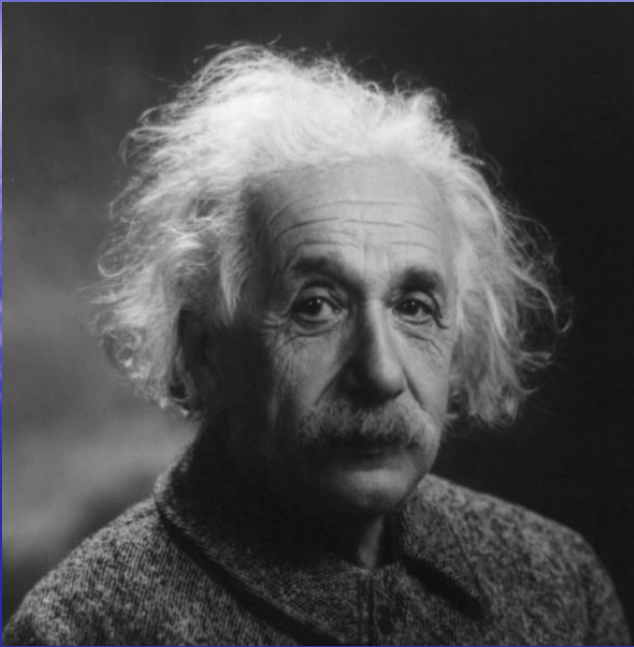
...E INVECE ...



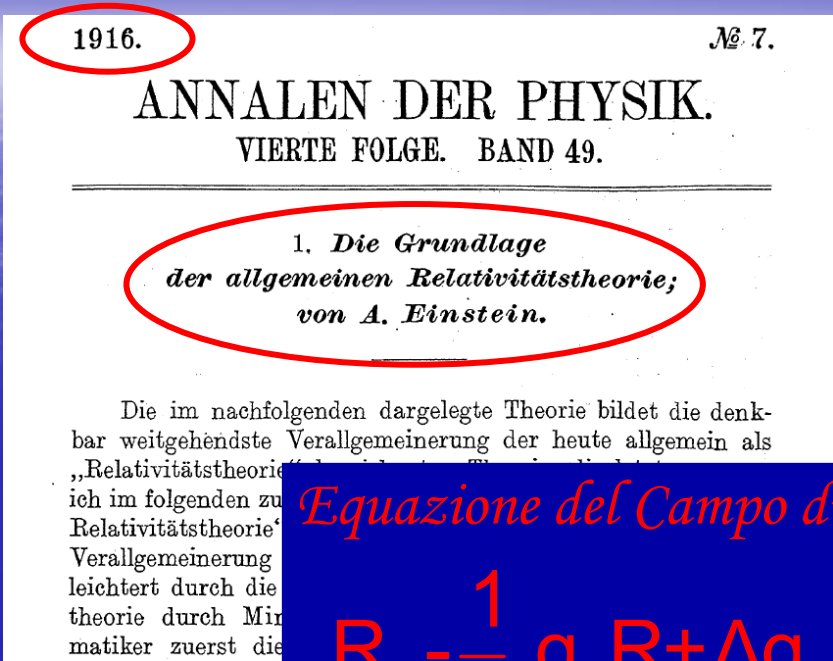
EXPANSION OF THE UNIVERSE



Graphic courtesy of Beyond Einstein (NASA)



Albert Einstein (1879-1955)



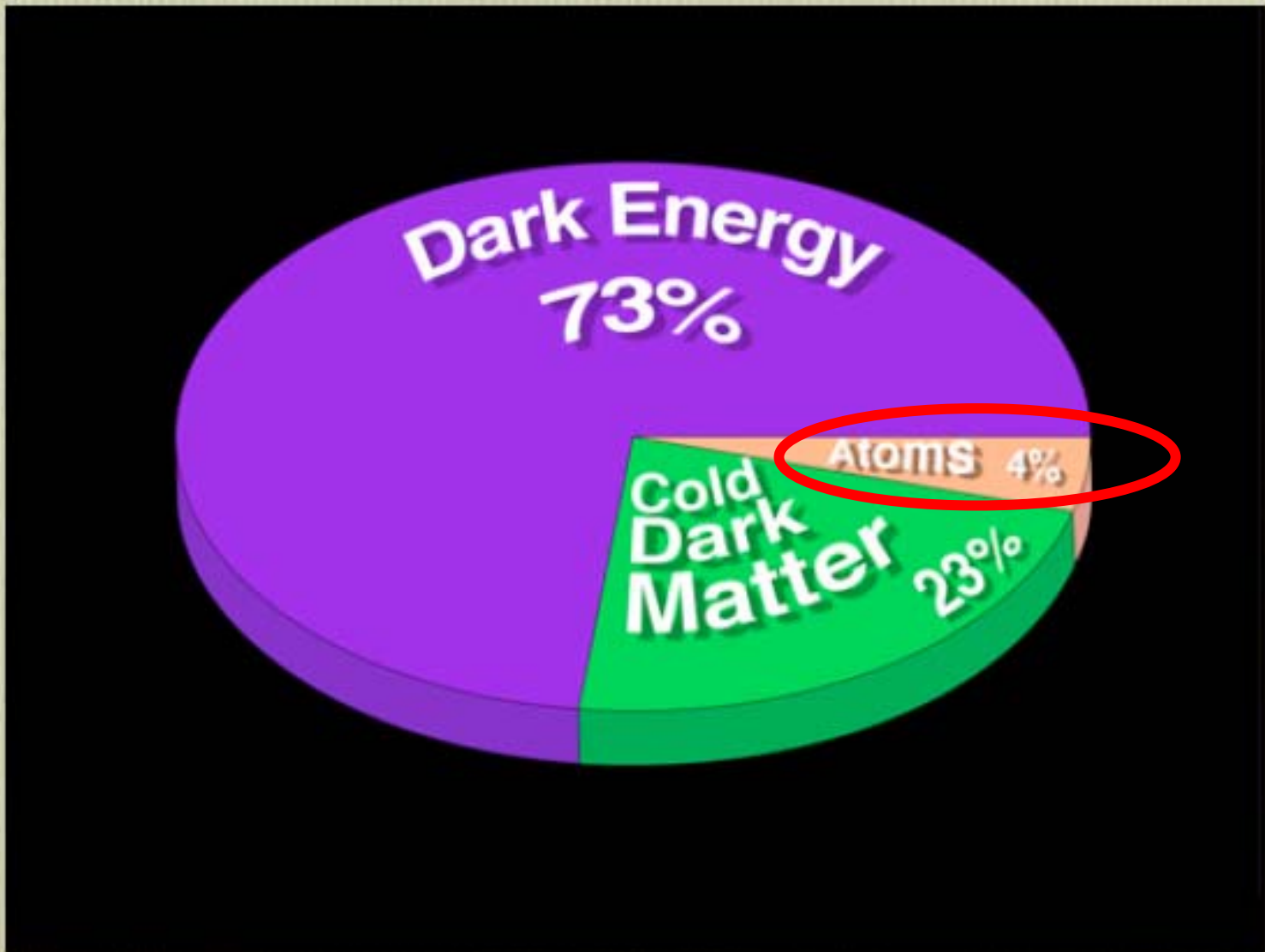
Equazione del Campo di Gravitazione

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ij} R + \Lambda g_{ik} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}$$

Costante Cosmologica



LA COSTANTE COSMOLOGICA SORGENTE DELL'ENERGIA OSCURA DELL'UNIVERSO E CAUSA DELLA SUA ESPANSIONE ACCELERATA?



La conoscenza che abbiamo riguarda solo il 4% dell'Universo il resto è ancora ignoto !!

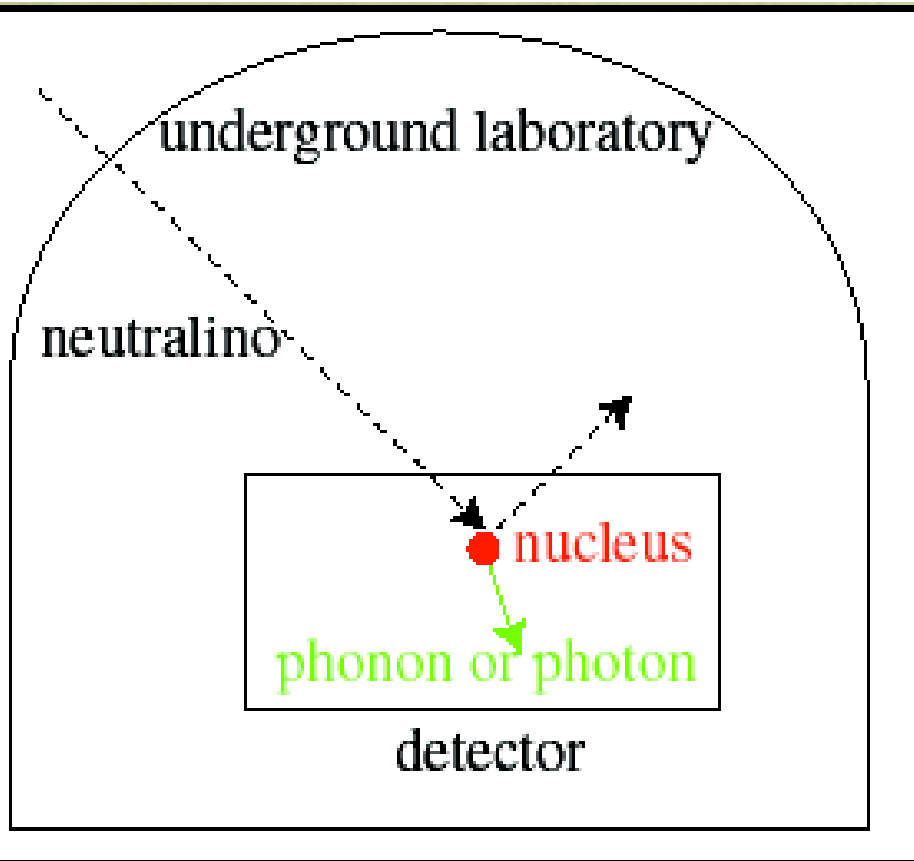
UNI -- VERSO

O

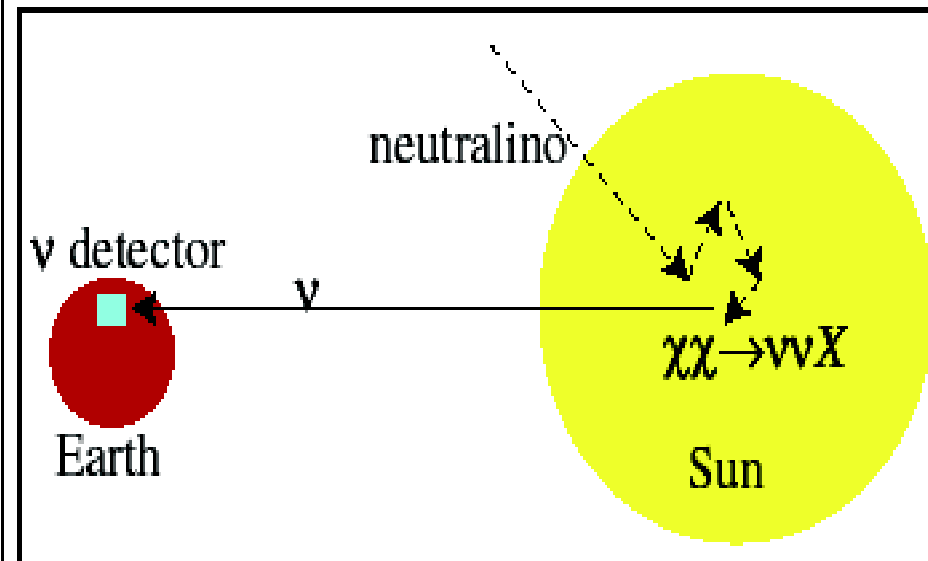
MULTI -- VERSO

- 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**) ?

A Caccia di Materia Oscura



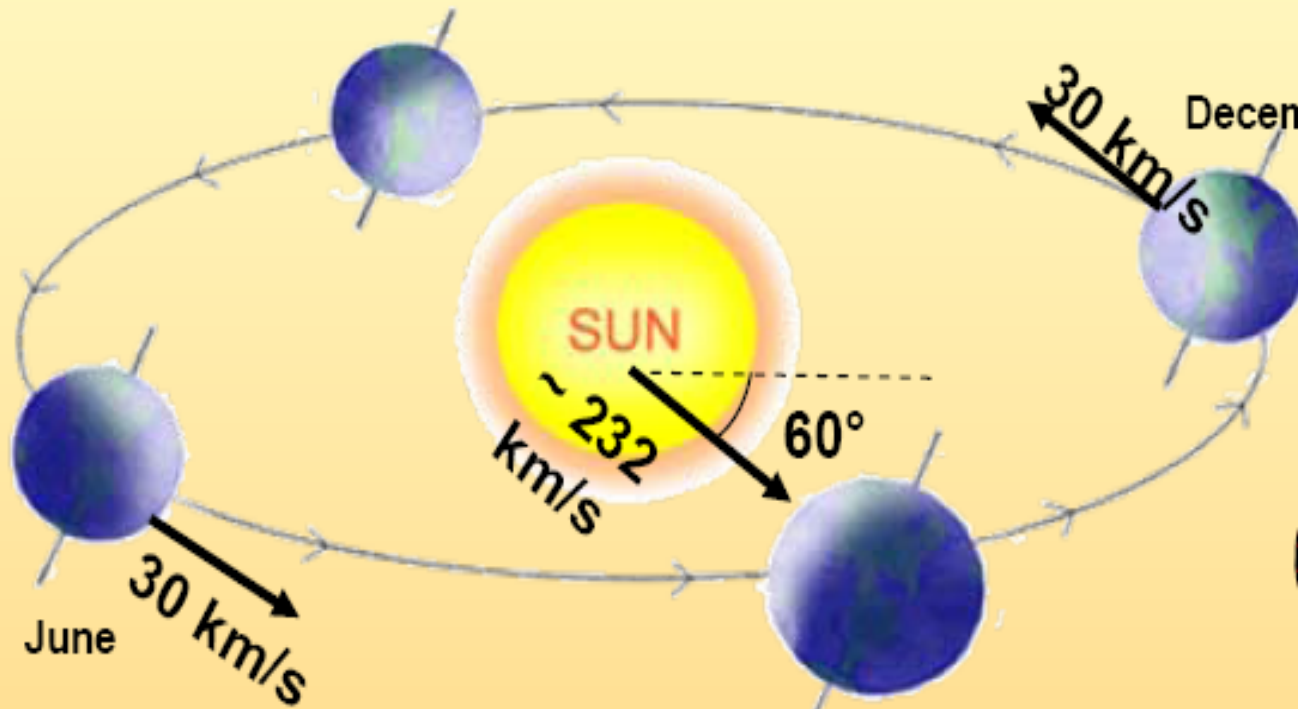
RICERCA DIRETTA DI DM



RICERCA INDIRETTA DI DM

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

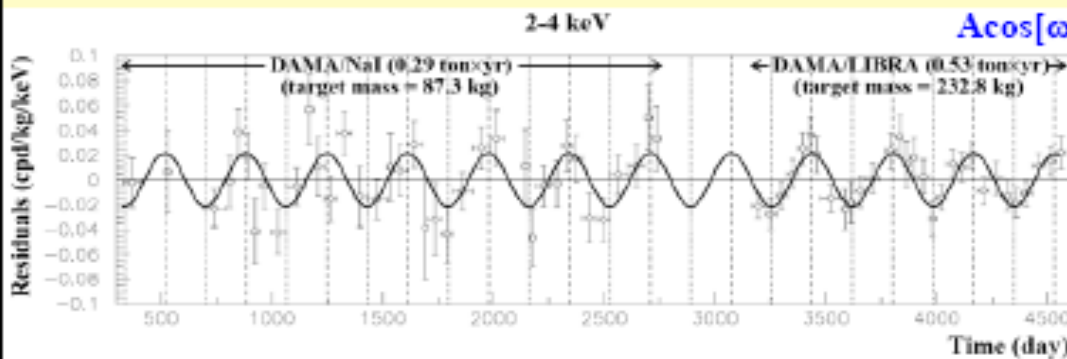
Model Independent Annual Modulation Result

DAMA/NaI (7 years) + DAMA/LIBRA (4 years) Total exposure: 300555 kg×day = 0.82 ton×yr

EPJC56(2008)333

experimental single-hit residuals rate vs time and energy

$\text{Acos}[\omega(t-t_0)]$; continuous lines: $t_0 = 152.5$ d, $T = 1.00$ y



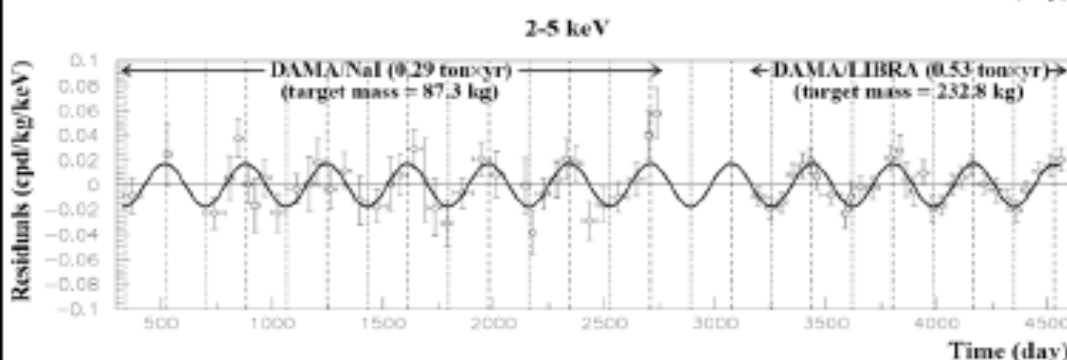
2-4 keV

$A = (0.0215 \pm 0.0026)$ cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 51.9/66$ **8.3 σ C.L.**

Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 117.7/67 \Rightarrow P(A=0) = 1.3 \times 10^{-4}$



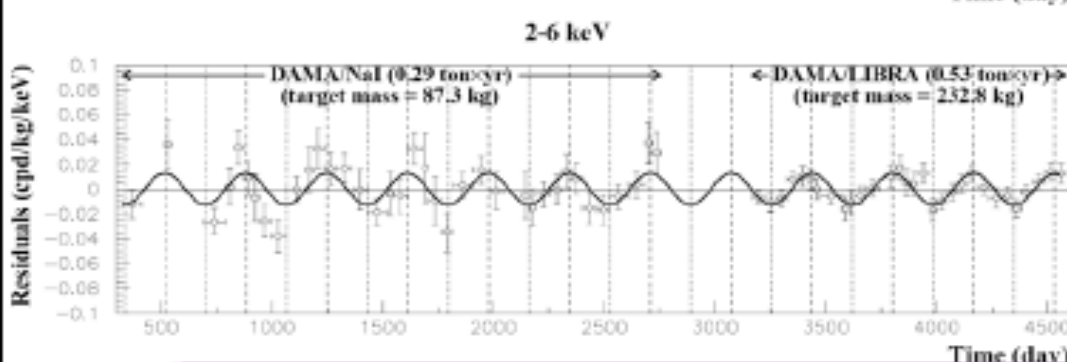
2-5 keV

$A = (0.0176 \pm 0.0020)$ cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 39.6/66$ **8.8 σ C.L.**

Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 116.1/67 \Rightarrow P(A=0) = 1.9 \times 10^{-4}$



2-6 keV

$A = (0.0129 \pm 0.0016)$ cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 54.3/66$ **8.2 σ C.L.**

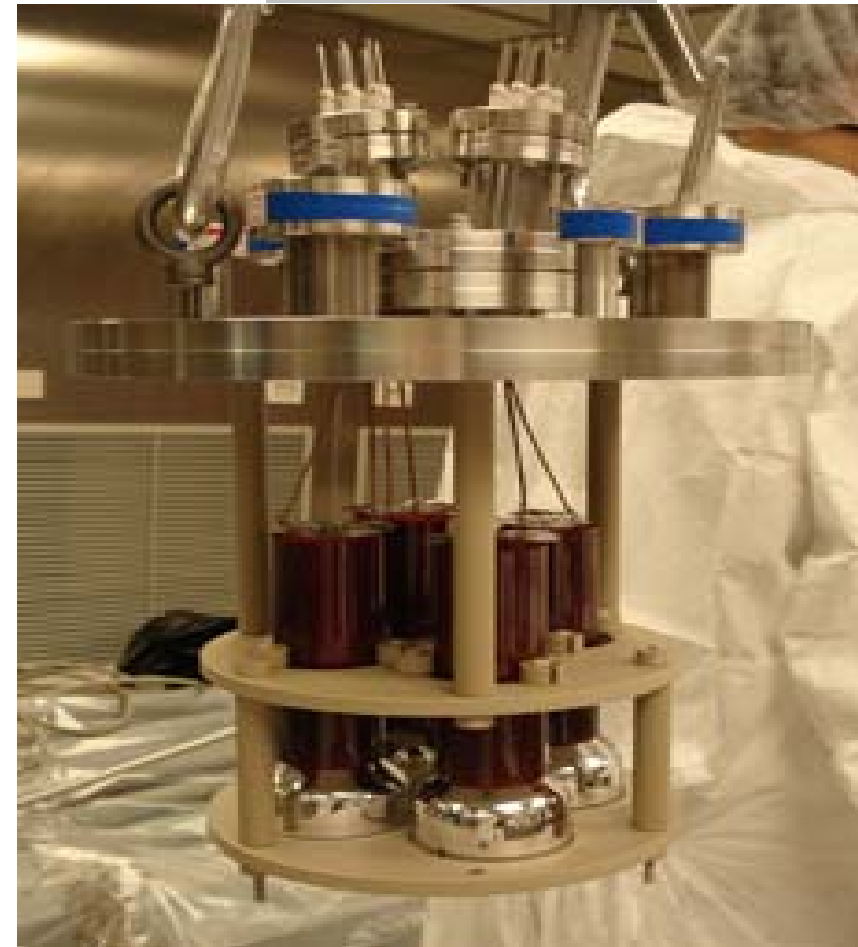
Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 116.4/67 \Rightarrow P(A=0) = 1.8 \times 10^{-4}$

The data favor the presence of a modulated behavior with proper features at 8.2 σ C.L.

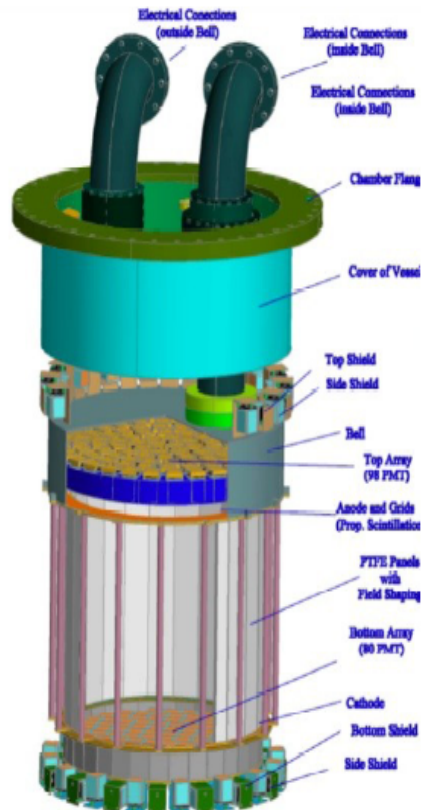
ALTRE RICERCHE DIRETTE DI MATERIA OSCURA – WIMPS- NEL LABORATORIO DEL GRAN SASSO

WARP



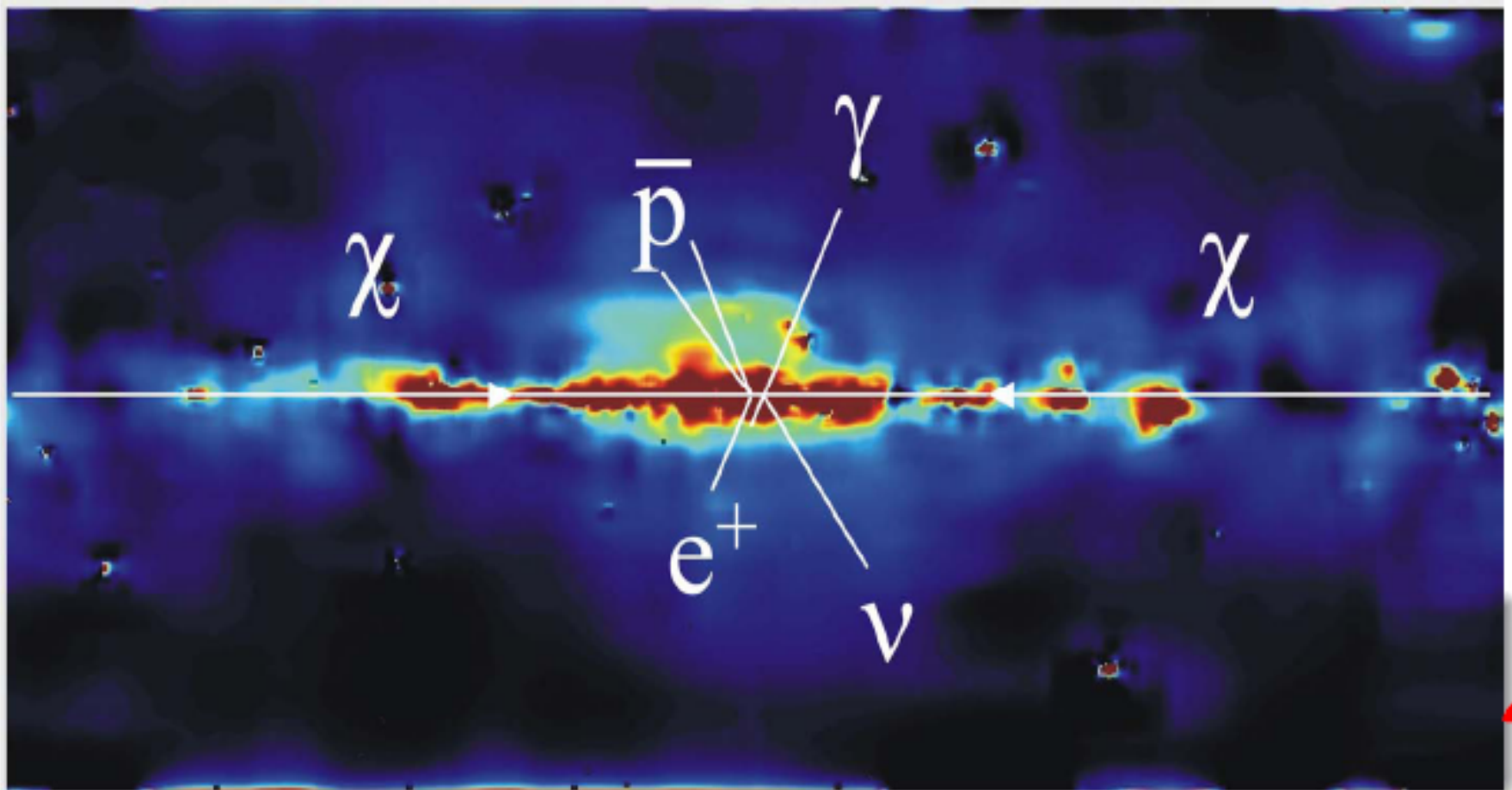
XENON

XENON100 TPC



DM INDIRECT DETECTION

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



RICERCA INDIRECTA DI MATERIA OSCURA

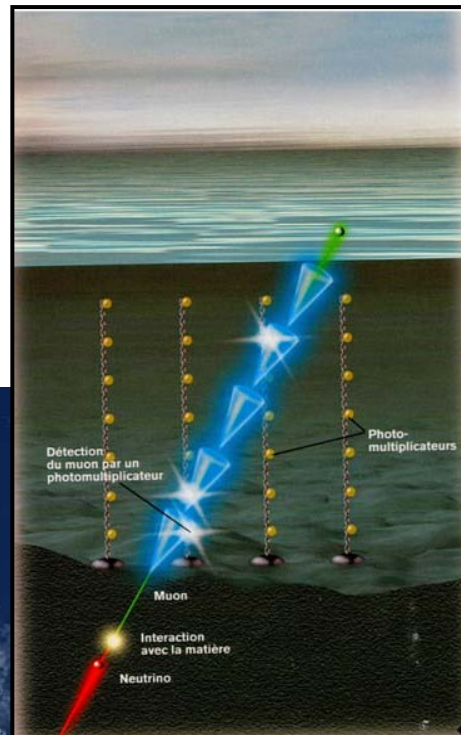
- **ANNICHILAZIONE WIMP-ANTIWIMP**
- **RILEVANTI PRODOTTI DELL'ANNICHILAZIONE :**
 - I) FOTONI AD ALTA ENERGIA**
 - II) NEUTRINI AD ALTA ENERGIA**
 - III) ANTIMATERIA**
- I) ASTRONOMIA GAMMA: telescopi a terra (es. MAGIC alle Canarie) o nello spazio (es. AGILE e GLAST)**
- II) TELESCOPI DI NEUTRINI: 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



ANTIMATTER DARK MATTER SPACE MISSIONS

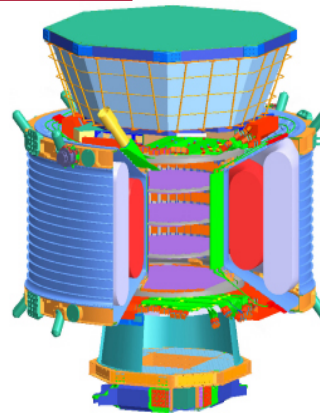
PAMELA
15-06-2006



BESS
2007



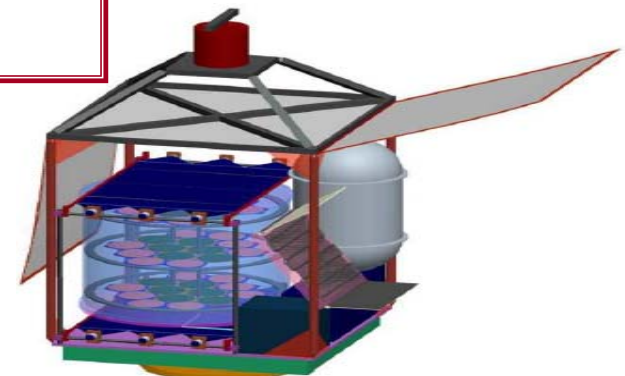
AMS-02
2010



PEBS
2010



GAPS
2013



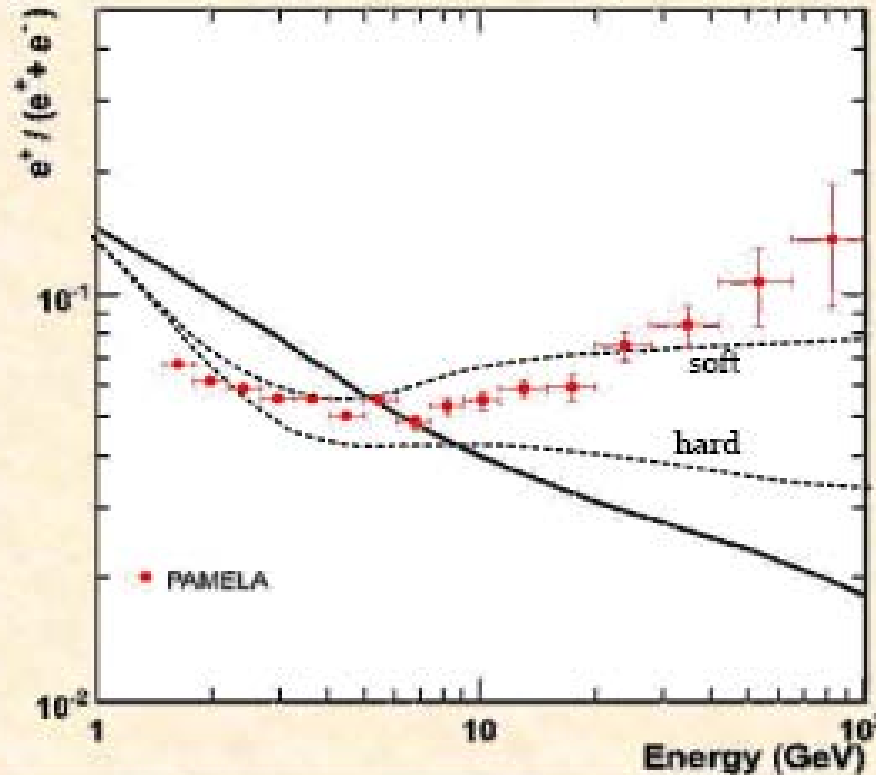


***FERMI
GAMMA-RAY
TELESCOPE***

L'ECCITANTE RICERCA DELLA MATERIA OSCURA:

E' UN SEGNALE ?

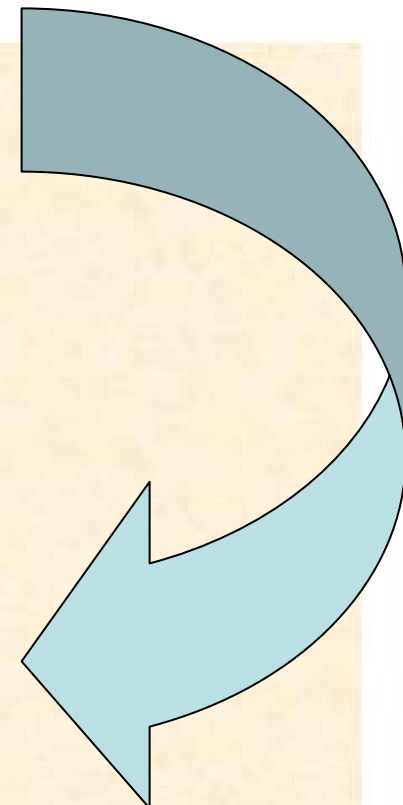
Positron fraction
Secondary Production Models



Quite robust evidence for a positron excess

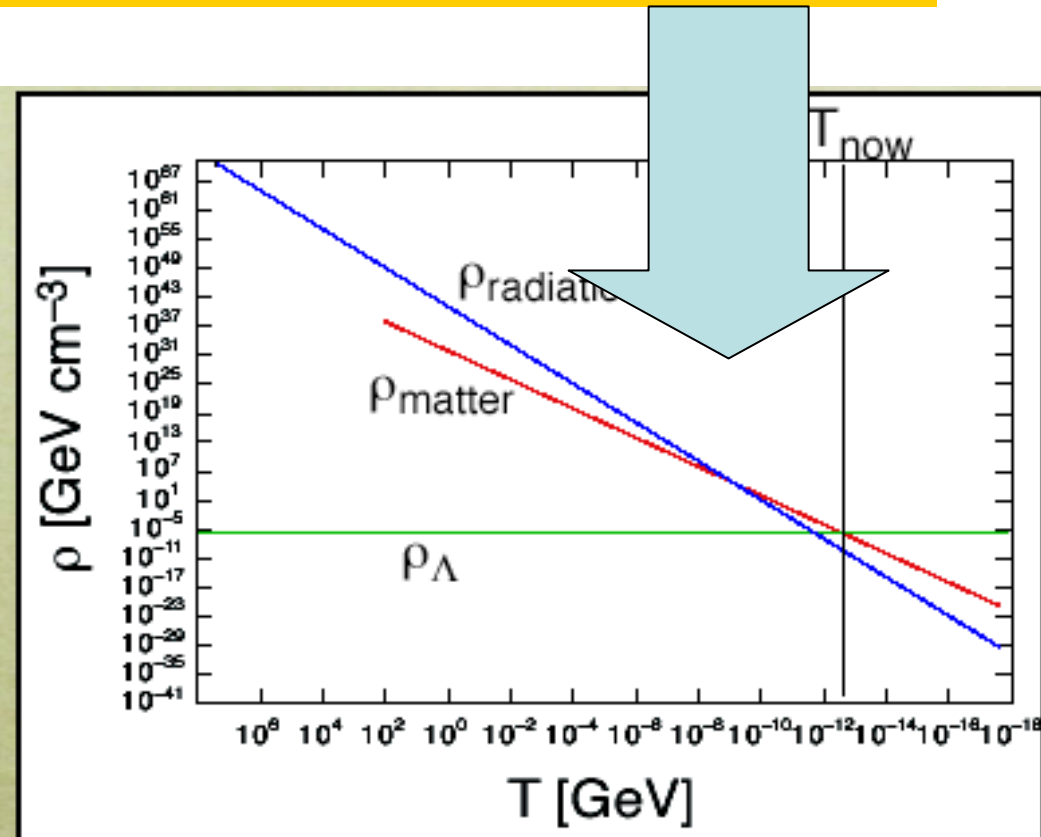
+ Roberta Sparvoli + March 2nd, 2009 + La Thuile

DATI
RECENTI DI
PAMELA
NELLA SUA
RICERCA DI
ANTI-
ELETTRONI



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 $\rho_\Lambda \sim ((\text{TeV})^2/M_{Pl})^4$, coincidence natural



Arkani-Hamed, Hall,
Kolda, HM

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:

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