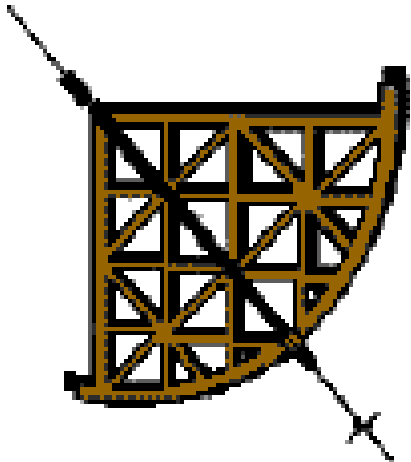


Introduzione alla Cosmologia

Fisica

Lezione 16

La determinazione della scala delle distanze. La nucleosintesi cosmologica. I primi tre minuti.

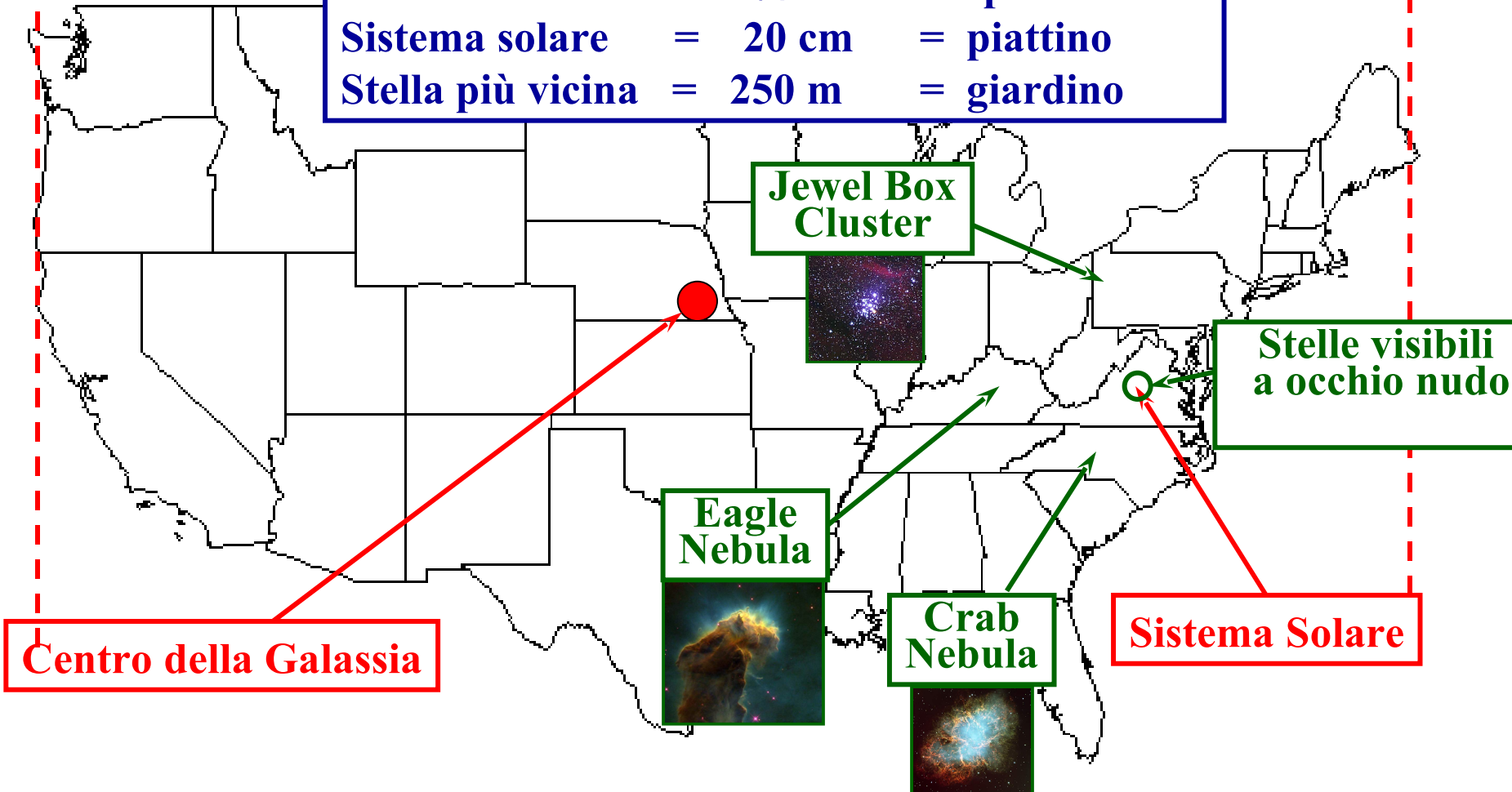


Giorgio G.C. Palumbo
Università degli Studi di Bologna
Dipartimento di Astronomia



La Galassia

Terra	= 100 nm	= virus
Sole	= 10 μ m	= cellula
Orbita Terra	= $\frac{1}{4}$ cm	= spillo
Sistema solare	= 20 cm	= piattino
Stella piú vicina	= 250 m	= giardino

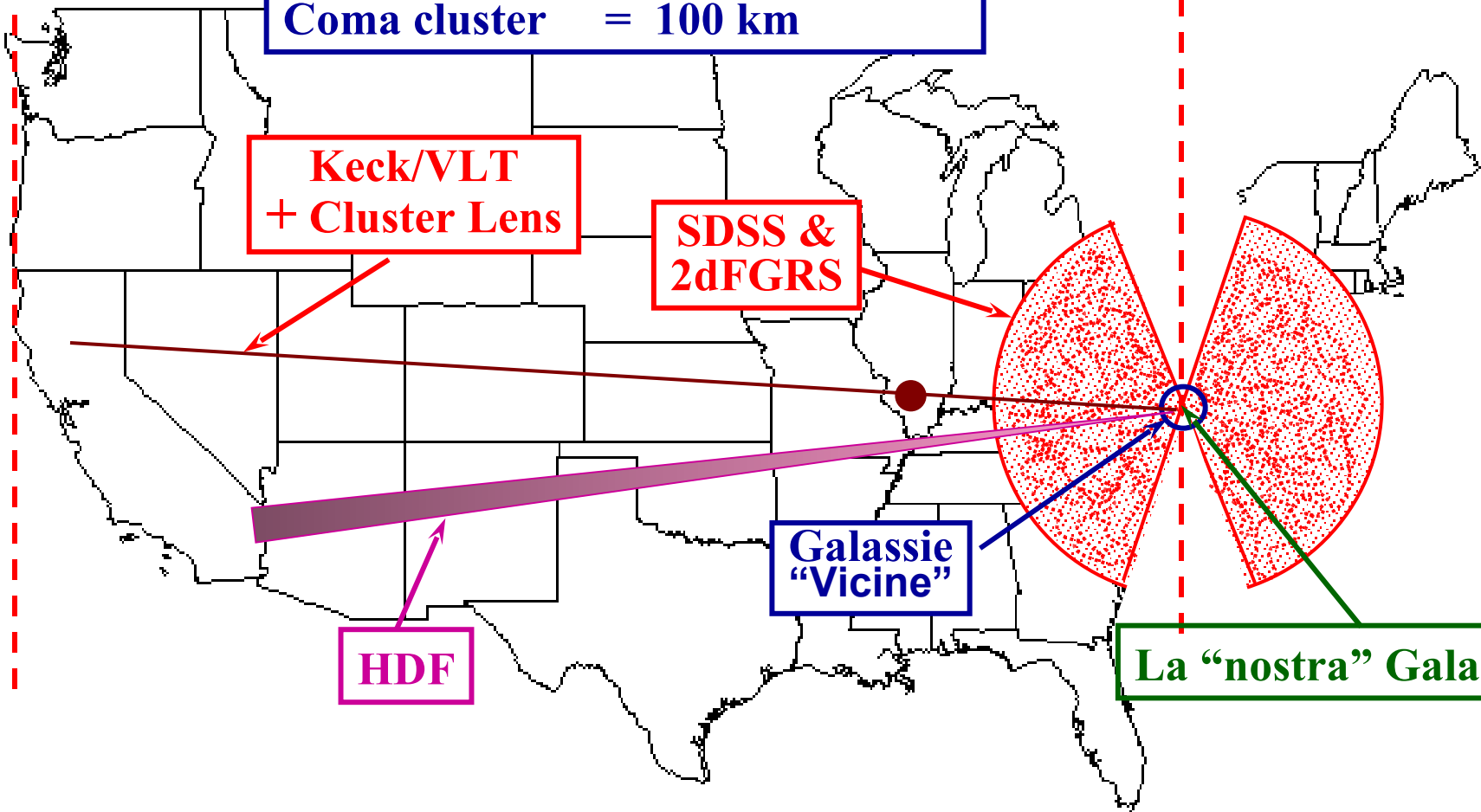


13.7 Gly

L'Universo Visibile

0

Via Lattea	= 20 m = aula
Gruppo Locale	= 600 m = stadio
Virgo cluster	= 15 km
Coma cluster	= 100 km



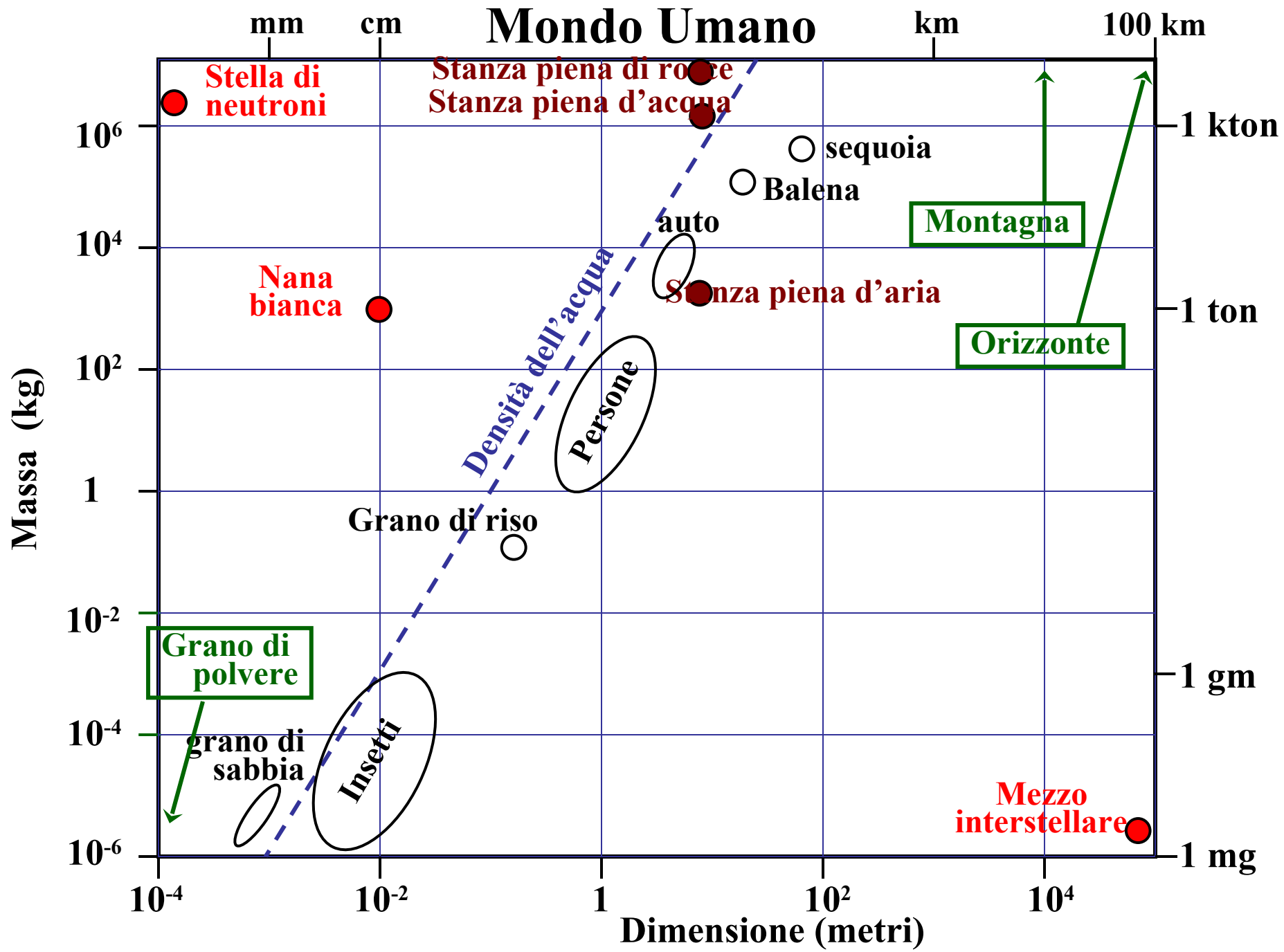
Keck/VLT
+ Cluster Lens

SDSS &
2dFGRS

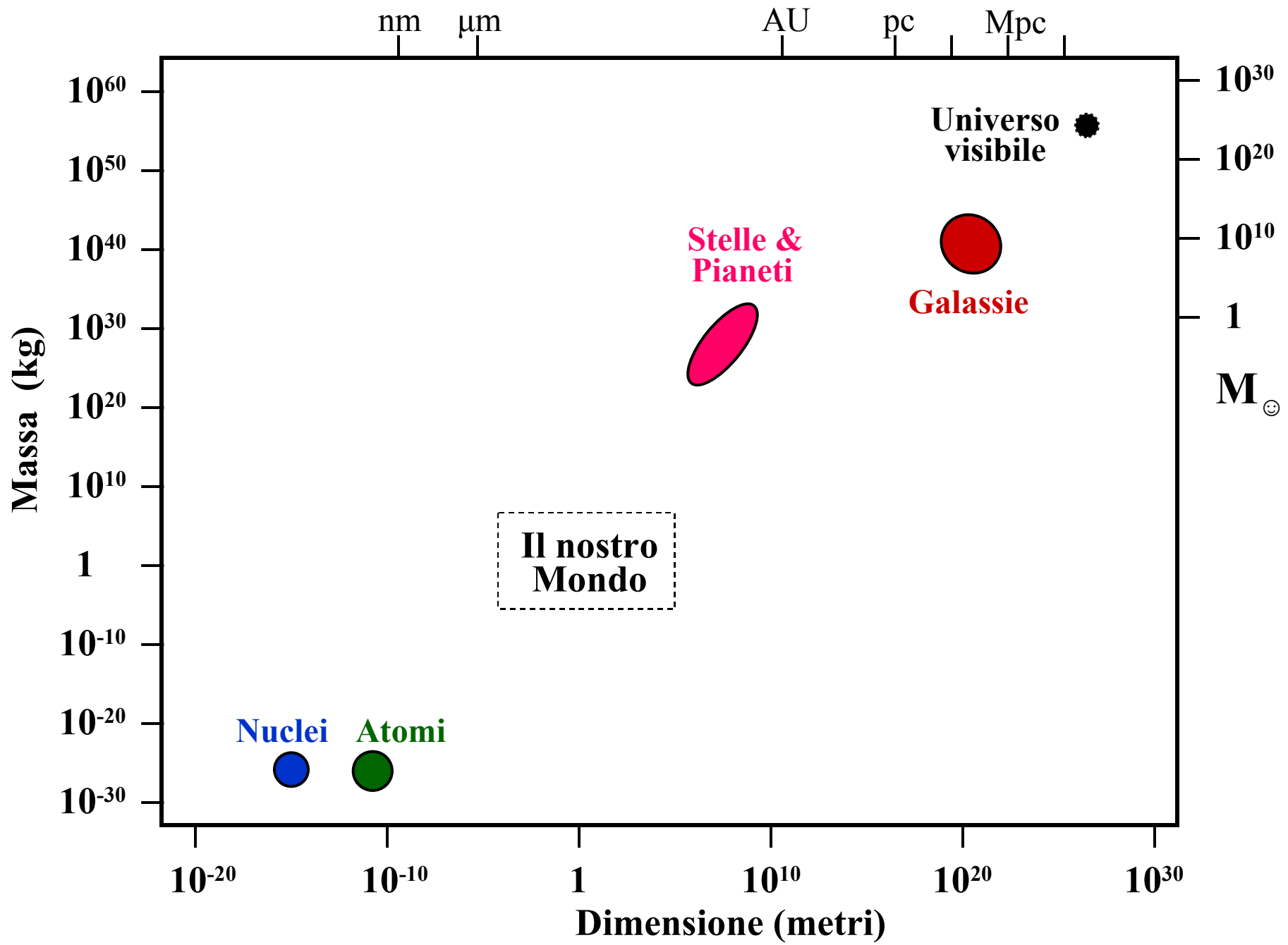
Galassie
"Vicine"

HDF

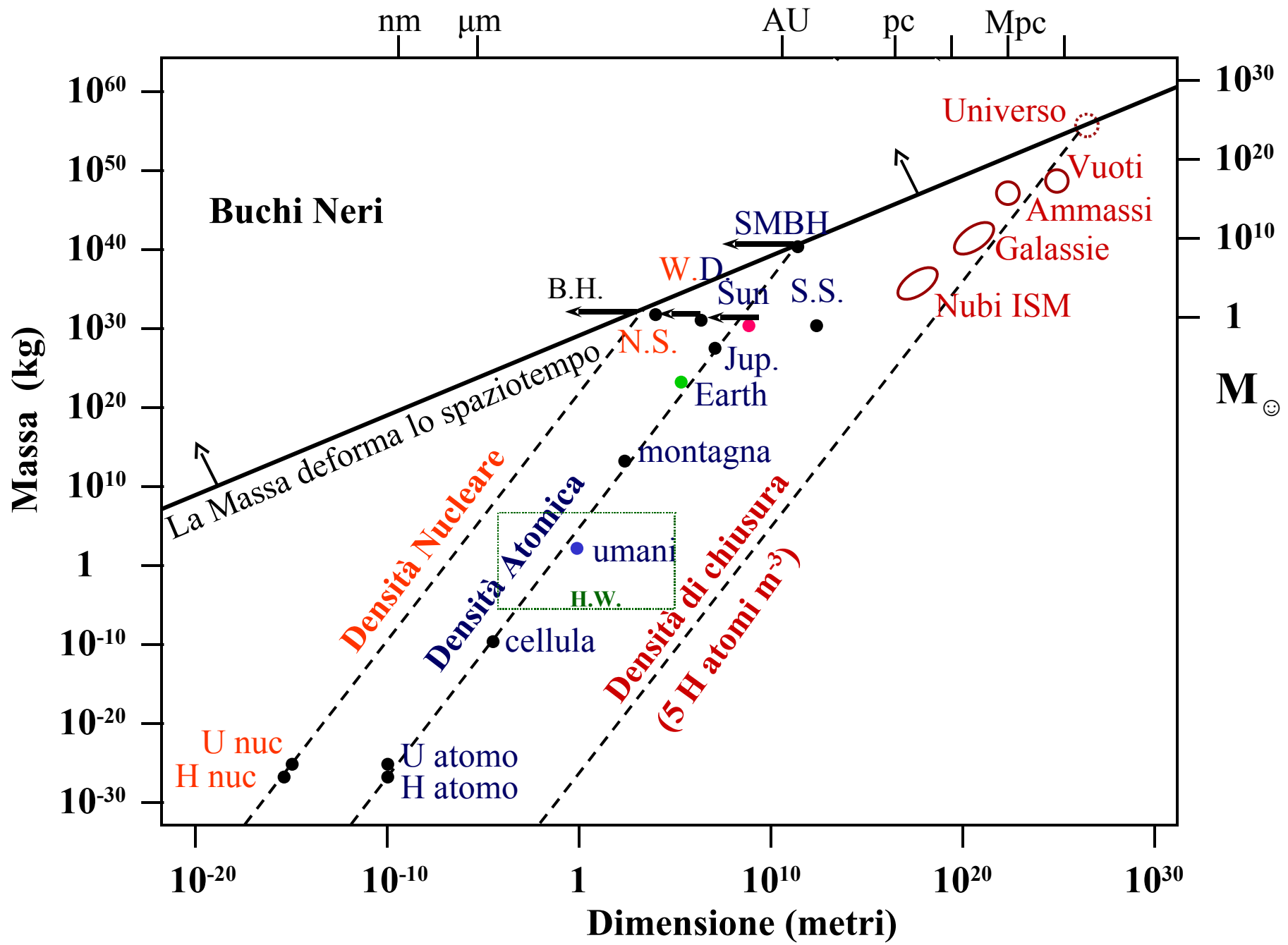
La "nostra" Galassia



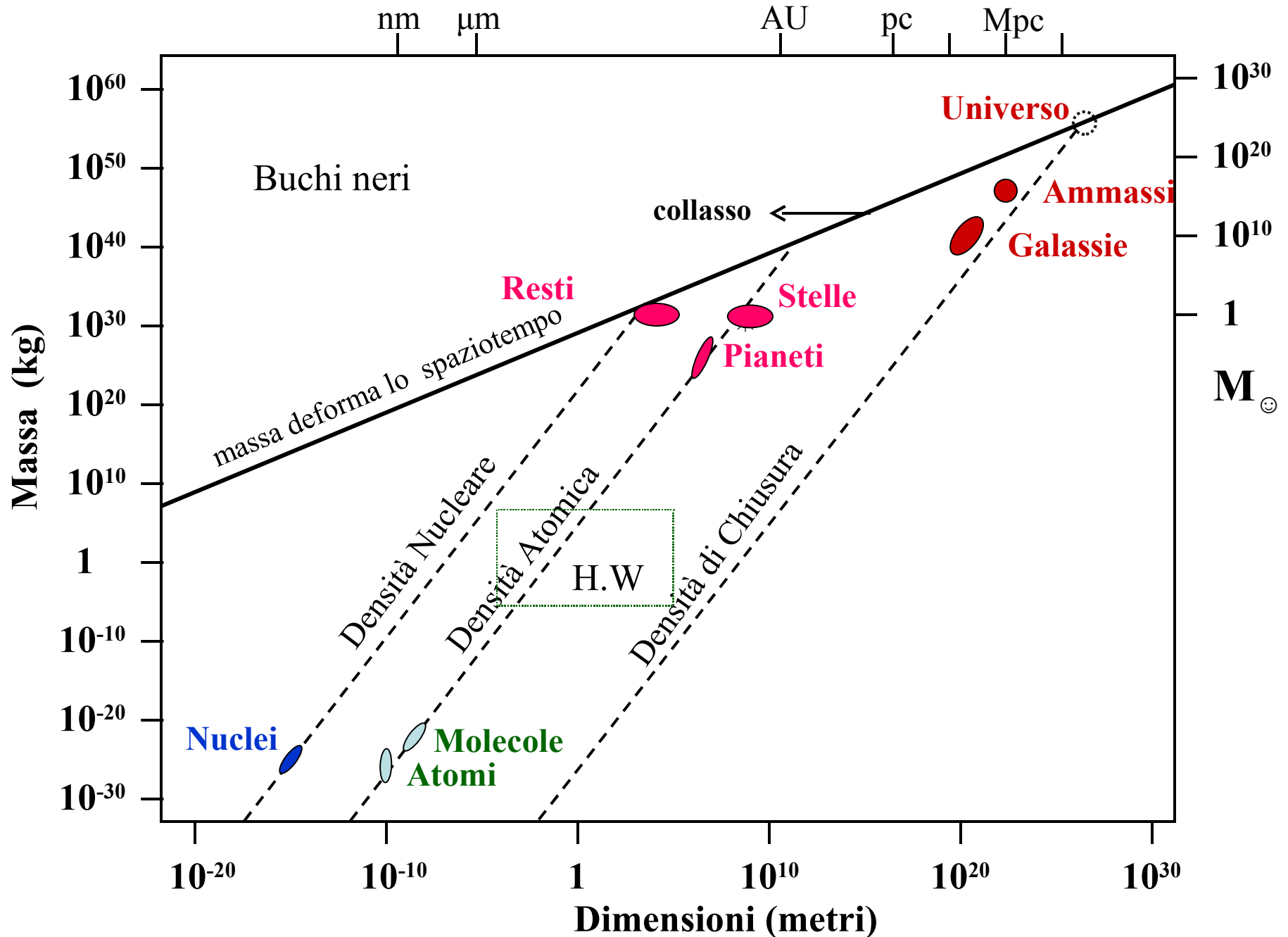
Mattoni Naturali

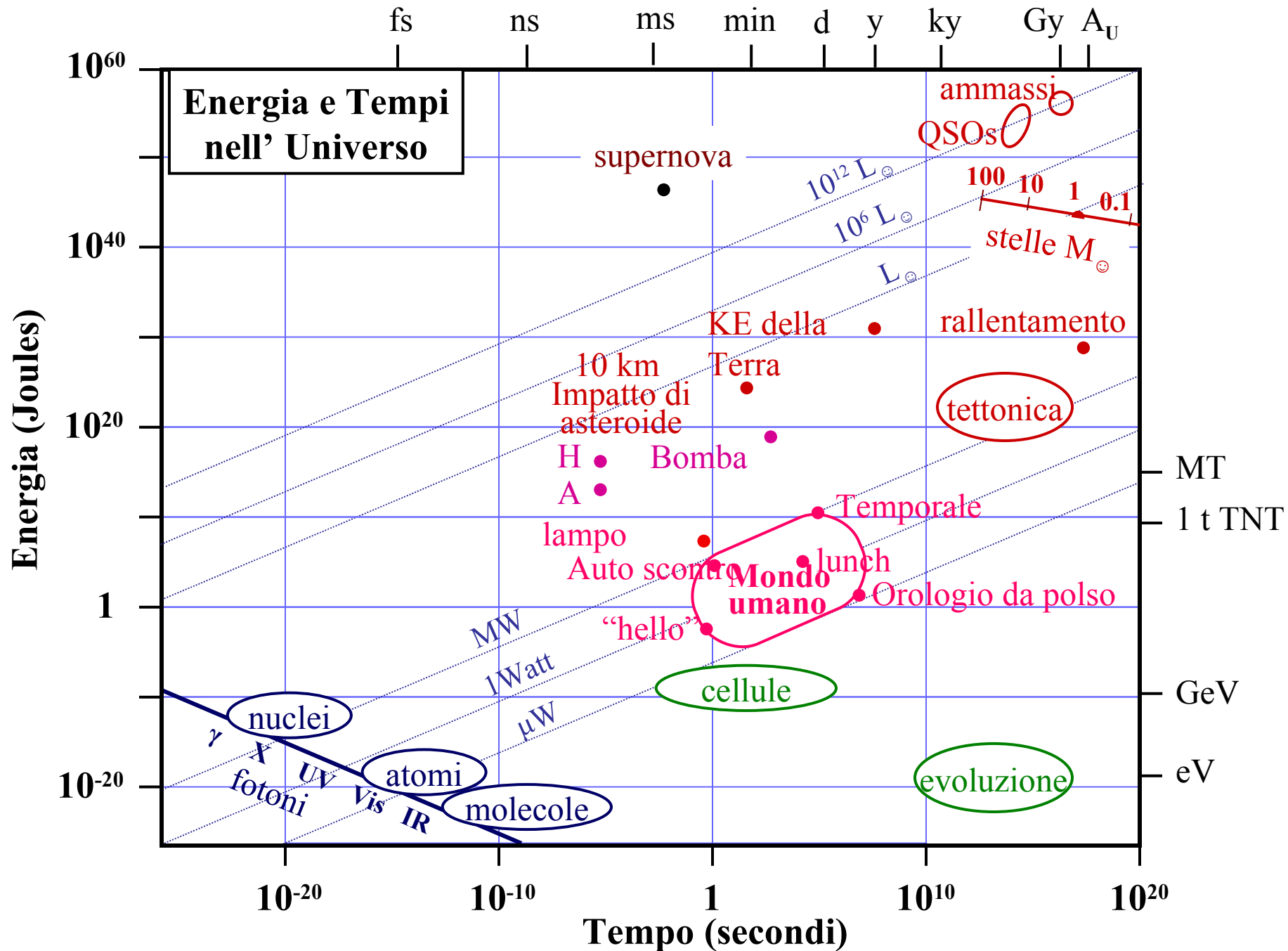


Materia nell'Universo

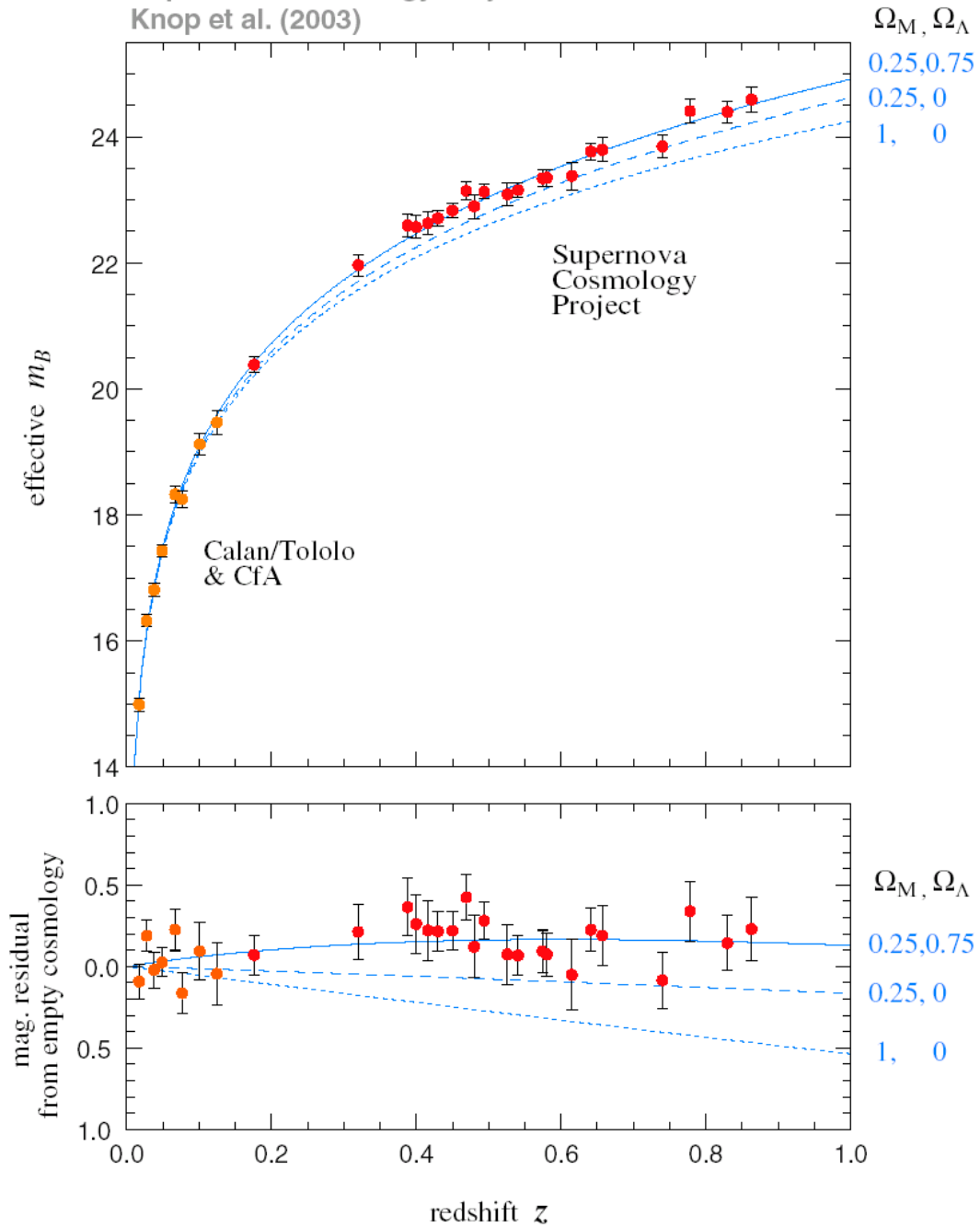


Mattoni fondamentali dell'Universo

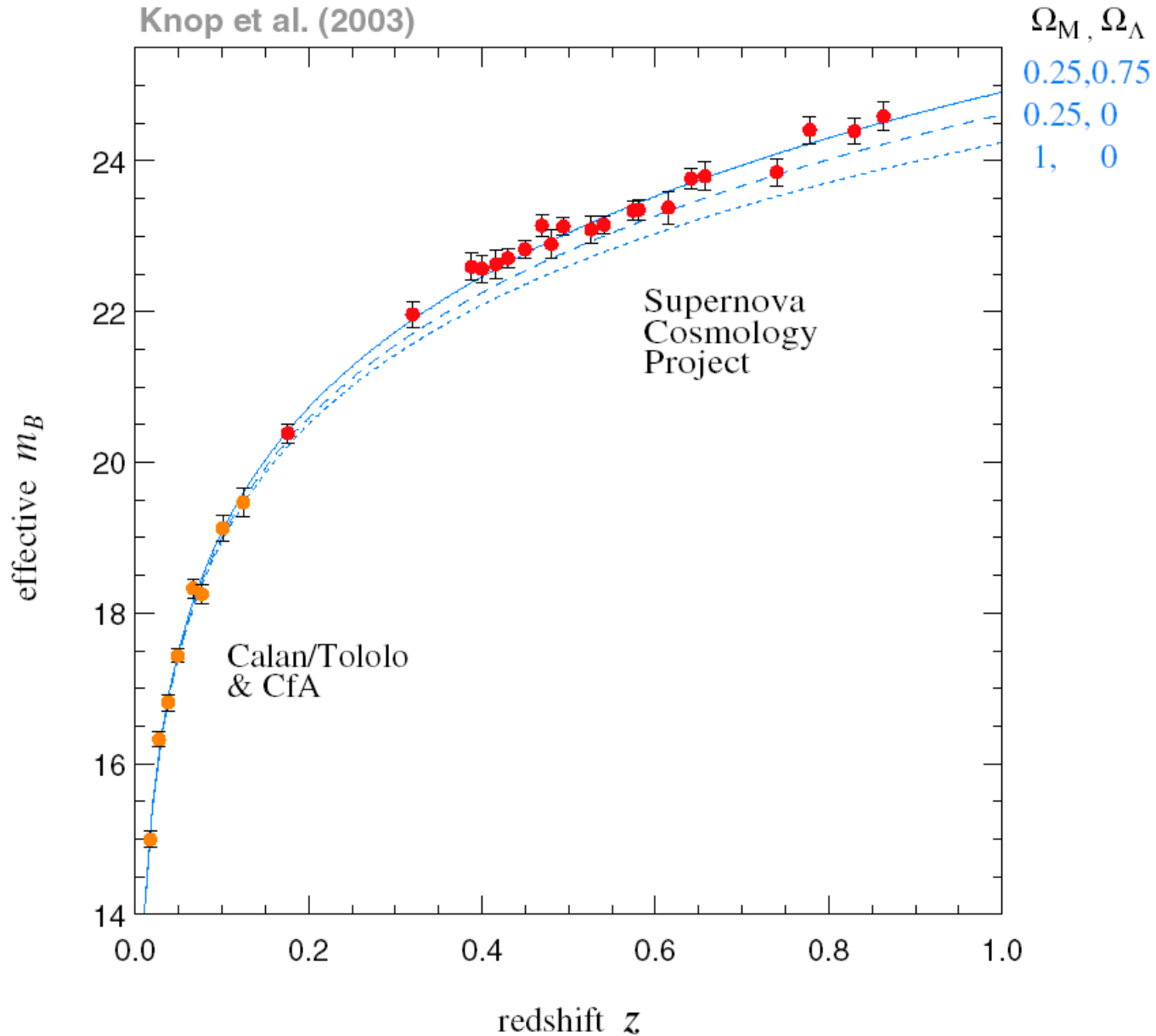




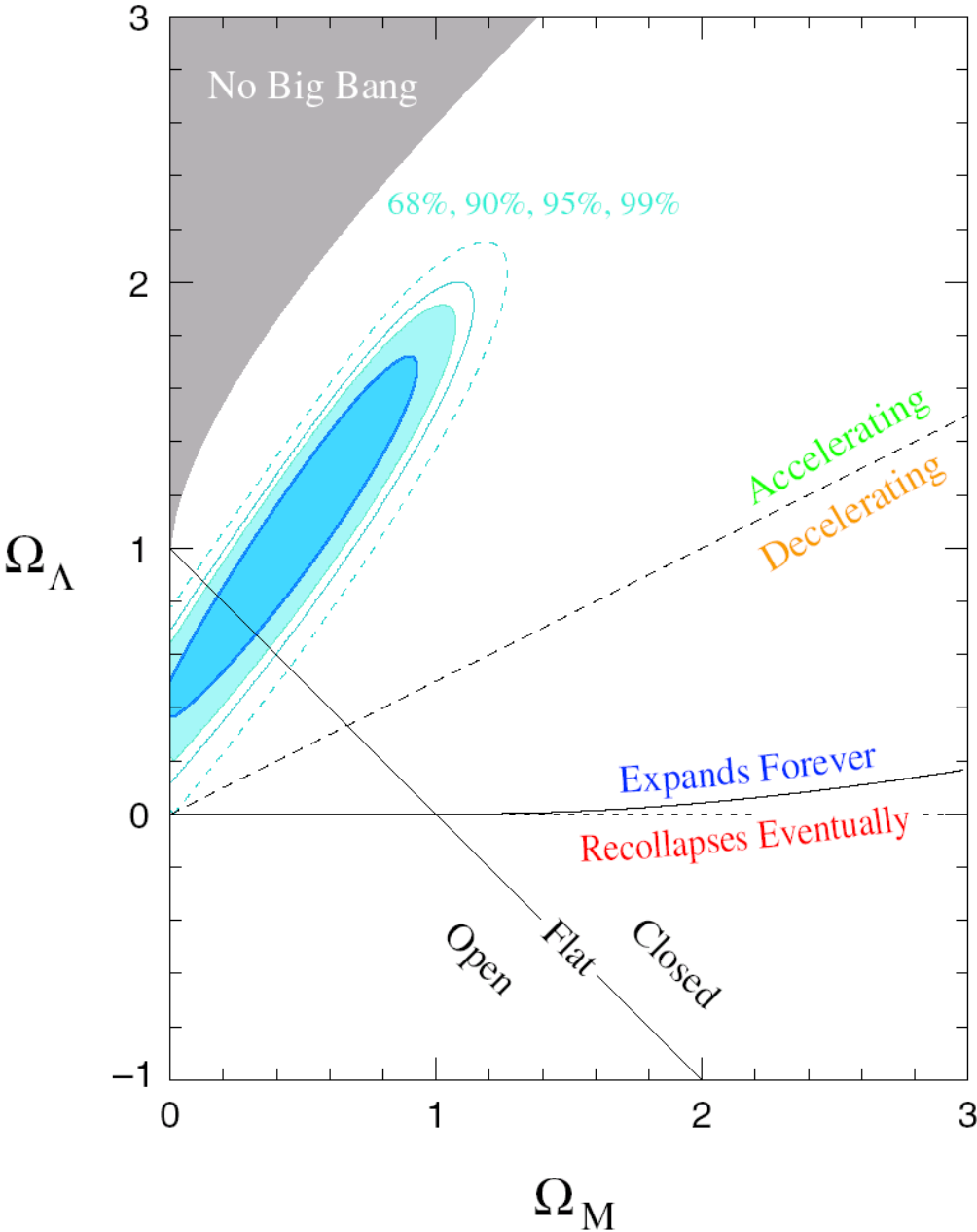
Supernova Cosmology Project
Knop et al. (2003)



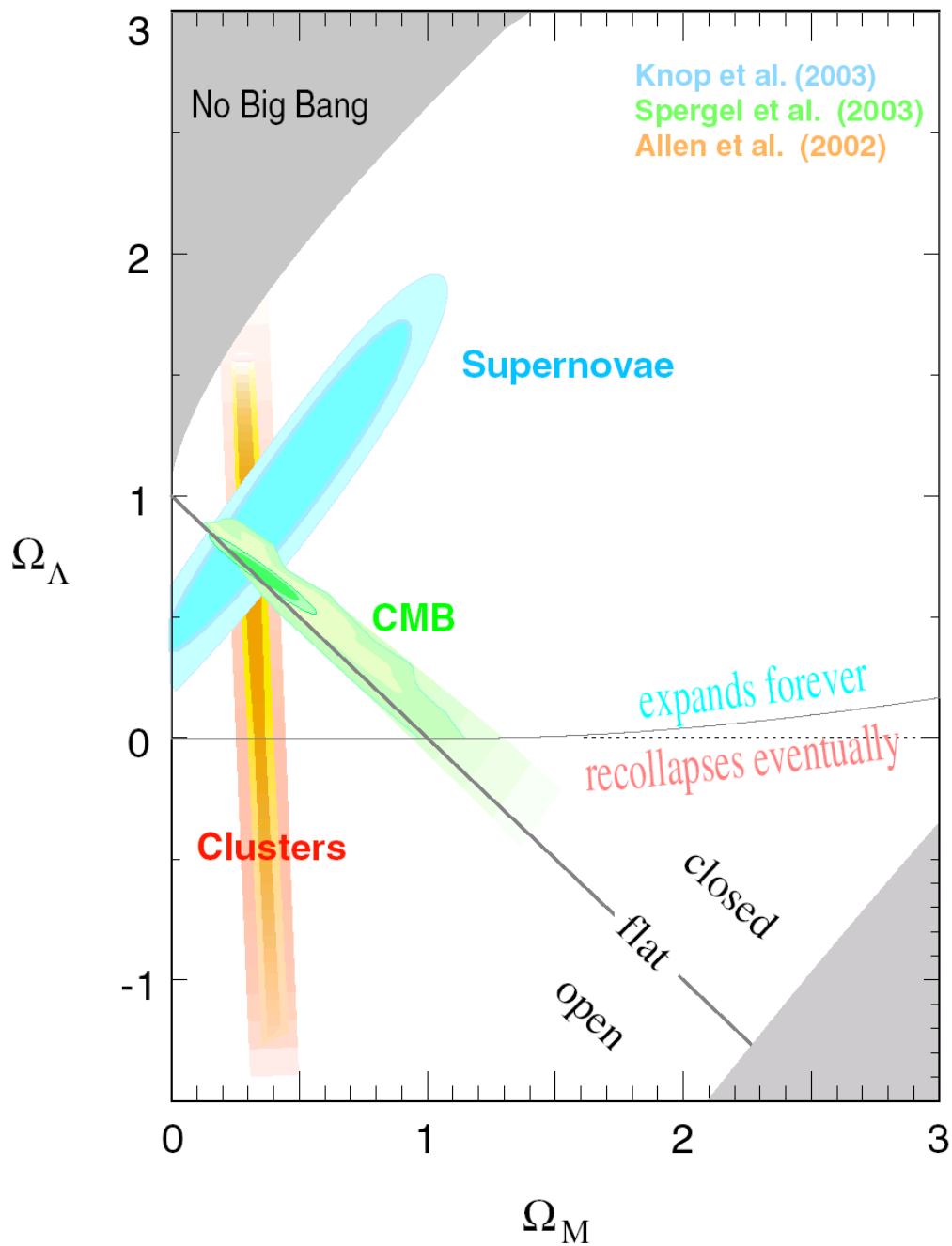
Supernova Cosmology Project
Knop et al. (2003)



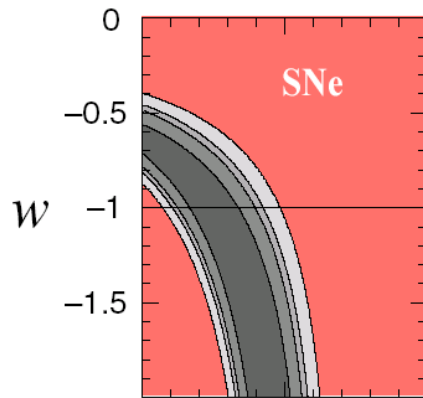
Supernova Cosmology Project
Knop et al. (2003)



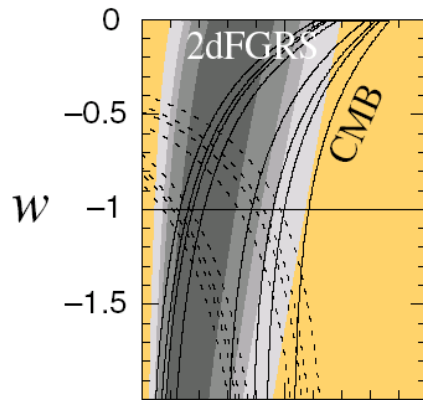
Supernova Cosmology Project



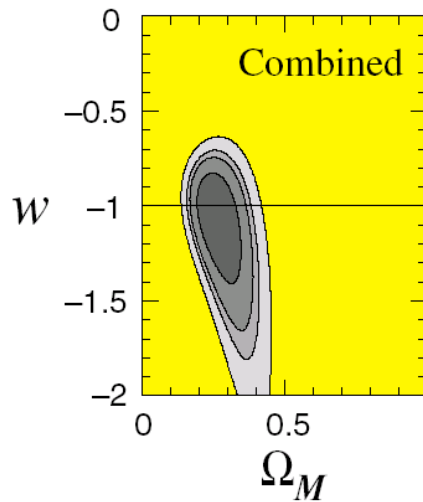
Supernova Cosmology Project
Knop *et al.* (2003)



Assuming constant w

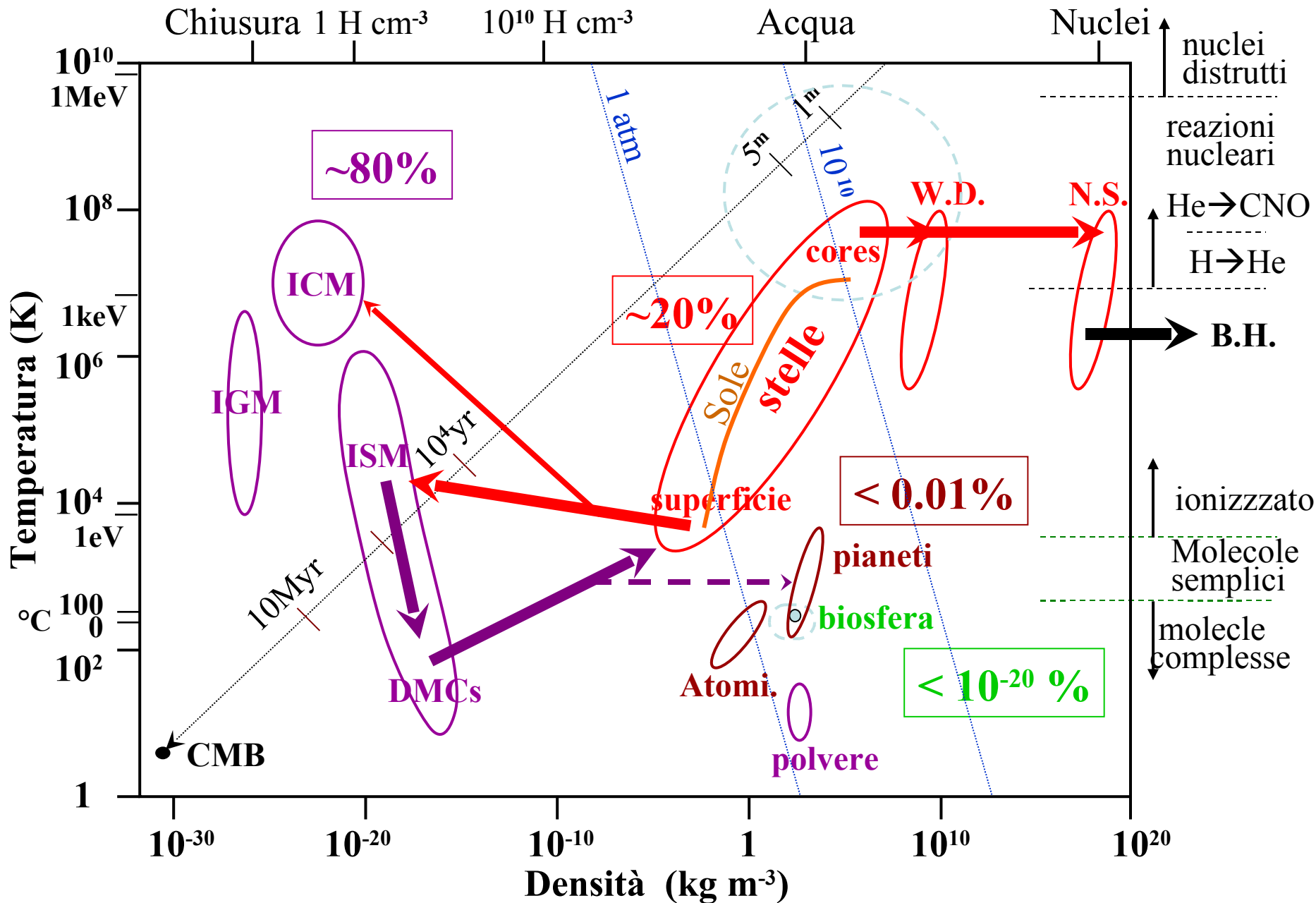


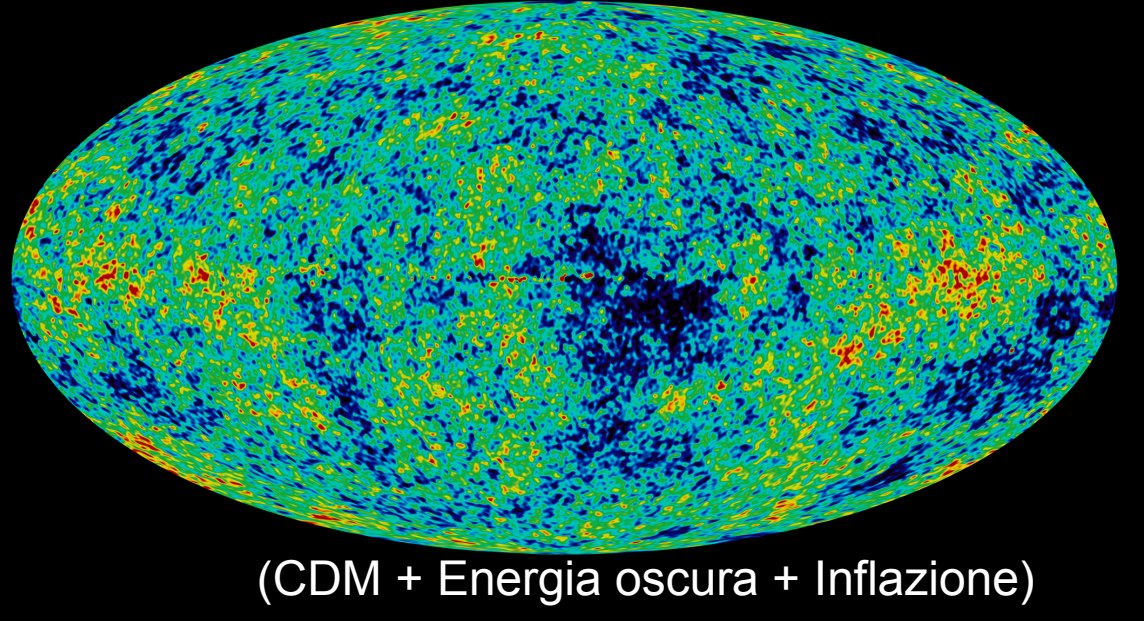
With limits from;
2dFGRS (Hawkins *et al.* 2002)
and CMB (Bennet *et al.* 2003,
Spergel *et al.* 2003)



$$w = -1.05 \begin{matrix} +0.15 \\ -0.20 \end{matrix} \text{ (statistical)} \\ \pm 0.09 \text{ (systematic)}$$

Posizione & stato della materia barionica



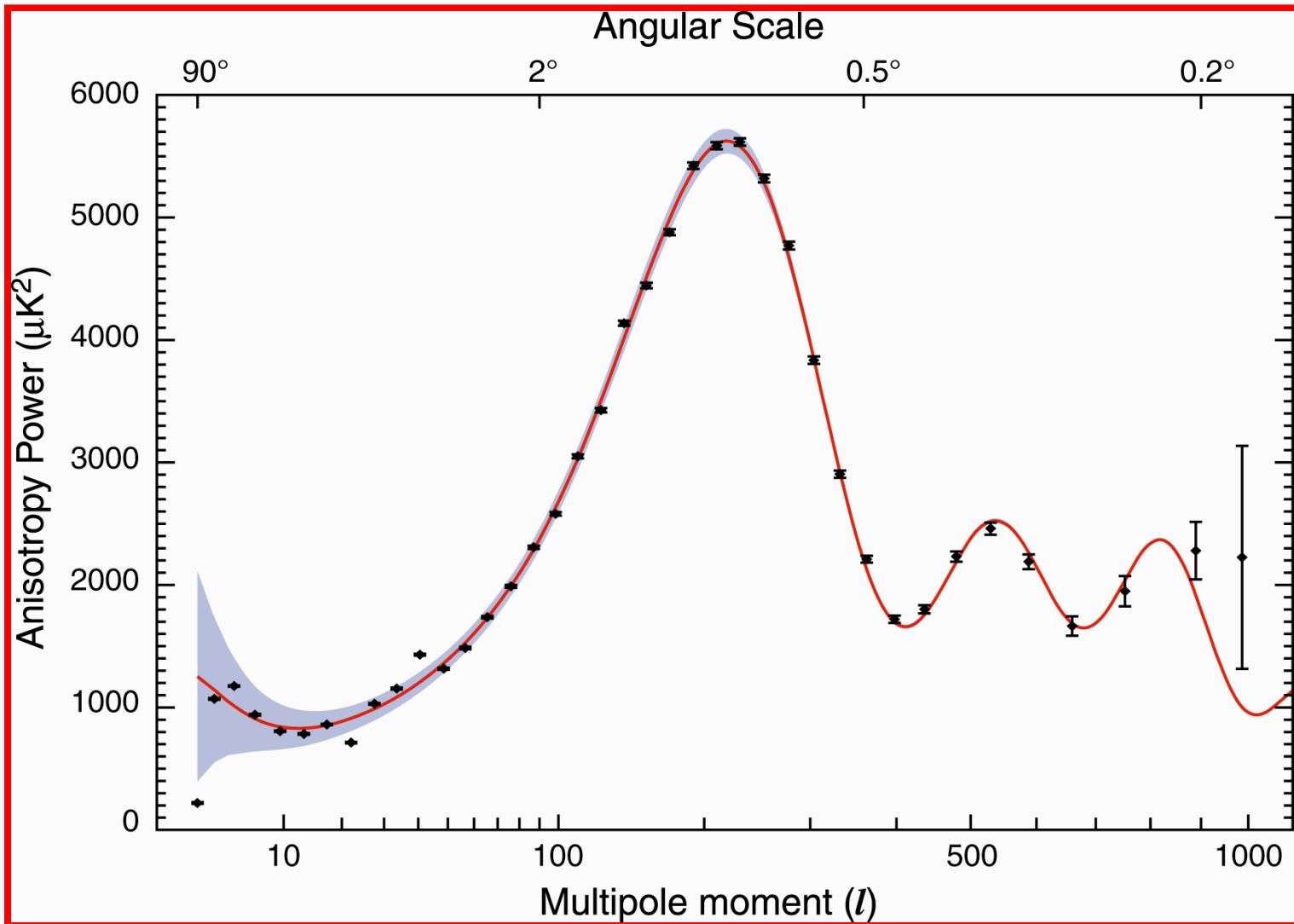


(CDM + Energia oscura + Inflazione)

- WMAP + SDSS + 2dF + HST Key Project + DASI + ACBAR + CBI + t_0 + SNe ...
- Piccole sbare di errore, consistenza
 - $\sigma(n)$: 0.1 - 0.02; $\sigma(\Omega_0)$: 0.03 - 0.01; $\sigma(w)$: 0.2 - 0.1
- La costante di Hubble è costante da 5 anni !
 $H_0 = 72 \pm 7$ km/s/Mpc

Cosmologia di Precisione più difficile del previsto

- $l = 2 - 5$. Profondità ottica: $\tau = 0.17$ to 0.09



Seri test dell' Inflazione

Predizioni essenziali

1. Universo piatto
2. Quasi invariante in scala, Perturbazioni Gaussiane:
 $|(n-1)| \sim 0.1$ e $|dn/d\ln k| \sim 0.001$
4. Onde Gravitazionali: spettro, ma nessuna predizione

Resultati essenziali

- $\Omega_0 = 1.0 \pm 0.01$
- $(n-1) = 0.96 \pm 0.017^*$; $dn/d\ln k = -0.1 \pm 0.05$; nessuna evidenza di andamenti non Gaussiani
- $r < 0.55$ (95% cl)*

Accelerazione Cosmica: l'Energia Oscura

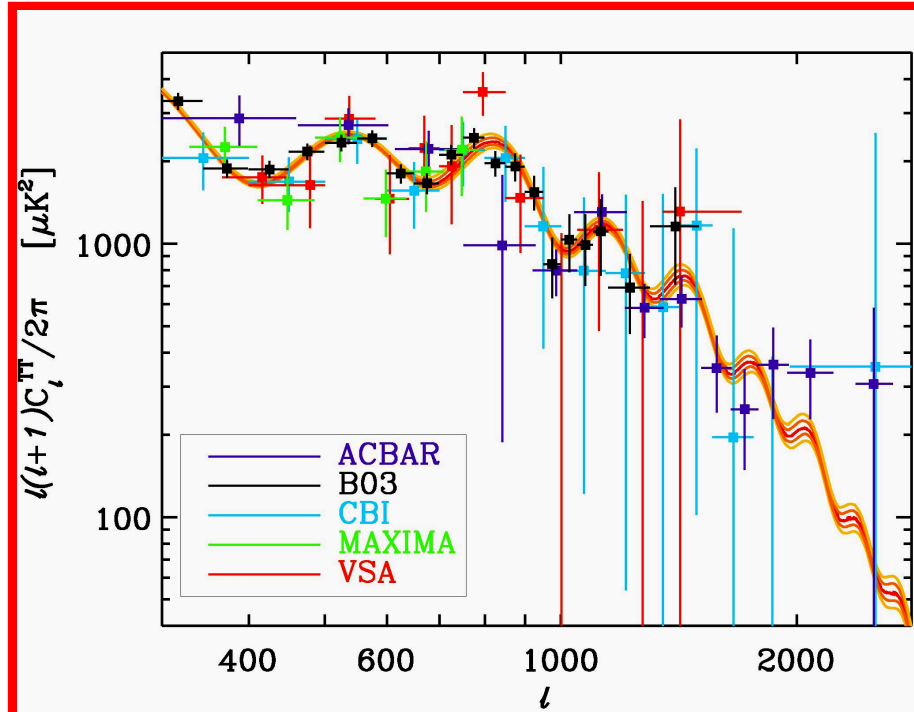
- Evidenze per l'accelerazione cosmica (HST, CFHTLS, Quintessenza, WMAP, XMM/Chandra...)
- Non ancora interpretata – “teorici continuano ad esplorare lo spazio delle fasi”
- Nessuna evidenza che l'energia oscura non sia l'energia del vuoto quantico
 - $w = -1 \pm 0.1$ (da ± 0.2); nessuna evidenza di variazioni temporali
- In arrivo nuove sonde spaziali:
 - JDEM, LSST, ...

SOLVING THE
COSMIC ACCELERATION
RIDDLE WILL REQUIRE
A CRAZY, NEW IDEA!

NB: NOT EVERY CRAZY IDEA IS A
SOLUTION TO A PROFOUND
PROBLEM!

Altre evidenze sparse

- Test di Precisione (pochi %) usando la densità barionica: BBN (D/H) vs. CMB (dispari/pari) non verificata
- Consistenza tra predizioni degli elementi nella BBN (He – D – Li)
- σ_8 : inconsistenza
- Variazione cosmica di α
- Eccesso di potenza a $l \sim 2000$
- “LSND 4th neutrino”
- DAMA, eccesso di e^+ , ...



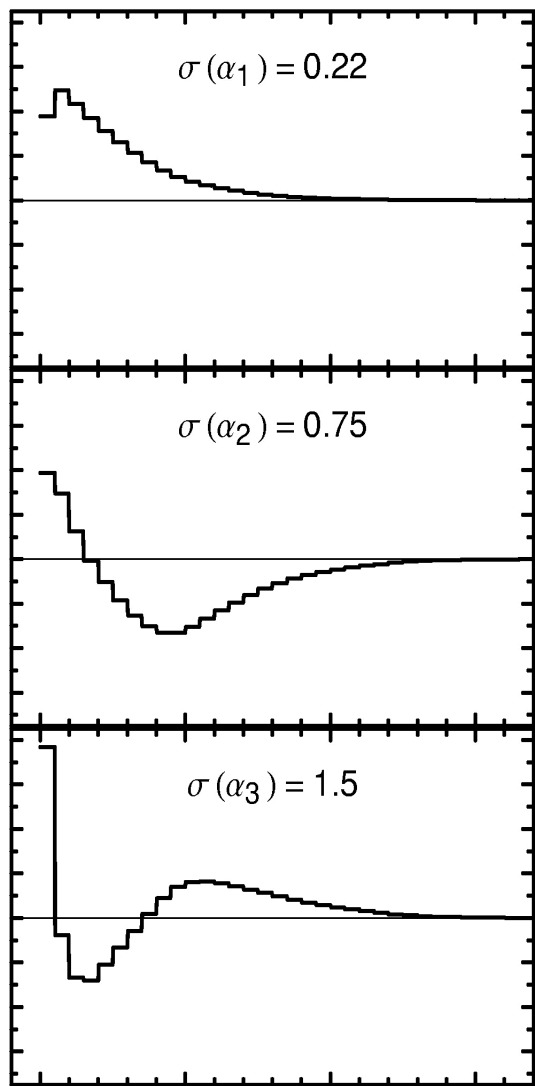
Gran parte di ciò che conosciamo dell'accelerazione cosmica si basa su assunzioni dei modelli (Λ CDM, wCDM)

- Λ CDM, wCDM i fit sono migliori dei modelli w/o “energia oscura” (CDM o OCDM)
- ... ma, la storia dell'accelerazione è fissata: accelerazione recente, decelerazione nel passato
- Inoltre, si assume che l'equazione di Friedmann sia corretta (e se la teoria della gravità fosse parte della soluzione?)

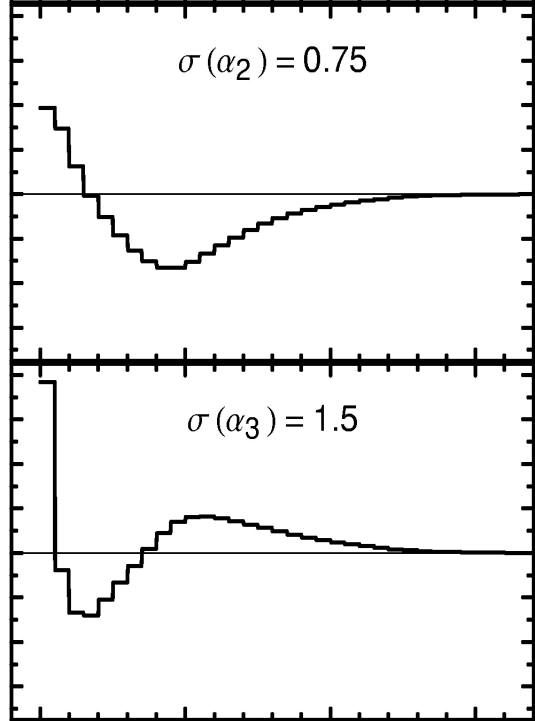
Decelerazione



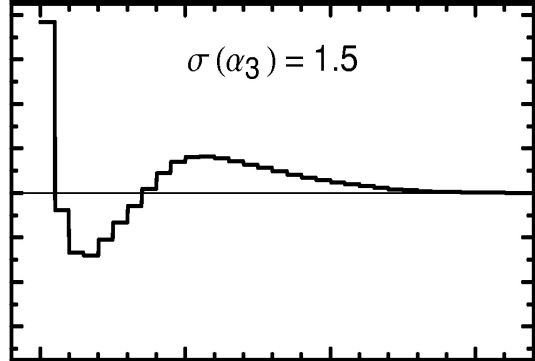
$e_1(z)$



$e_2(z)$

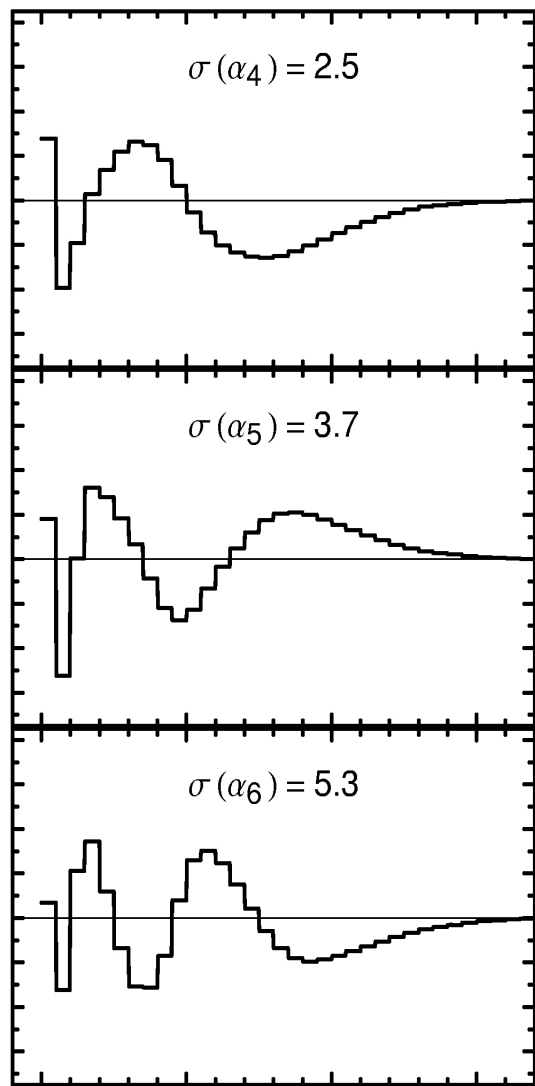


$e_3(z)$

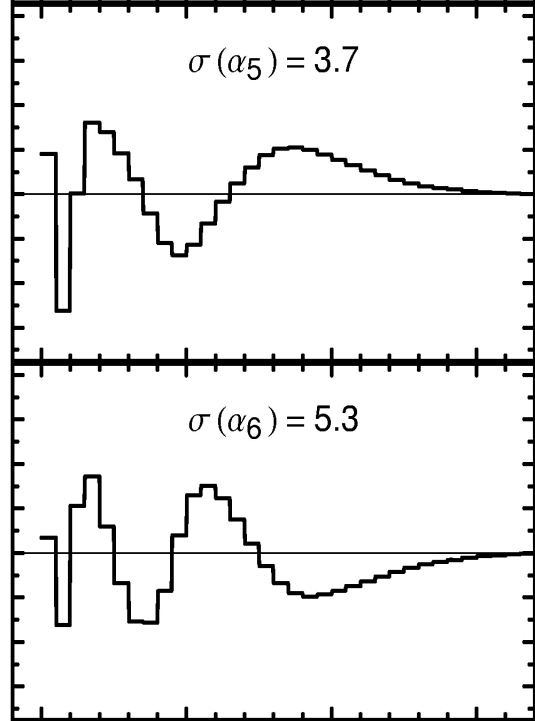


0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6

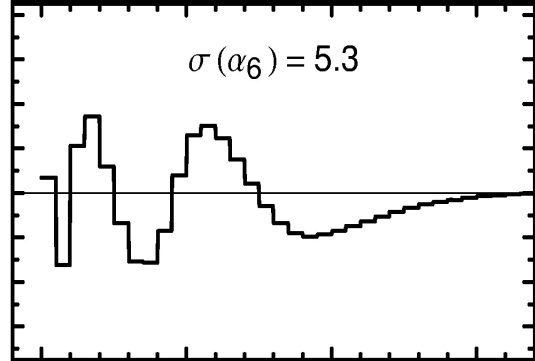
$e_4(z)$



$e_5(z)$



$e_6(z)$



0 0.5 1. 1.5 z

Redshift

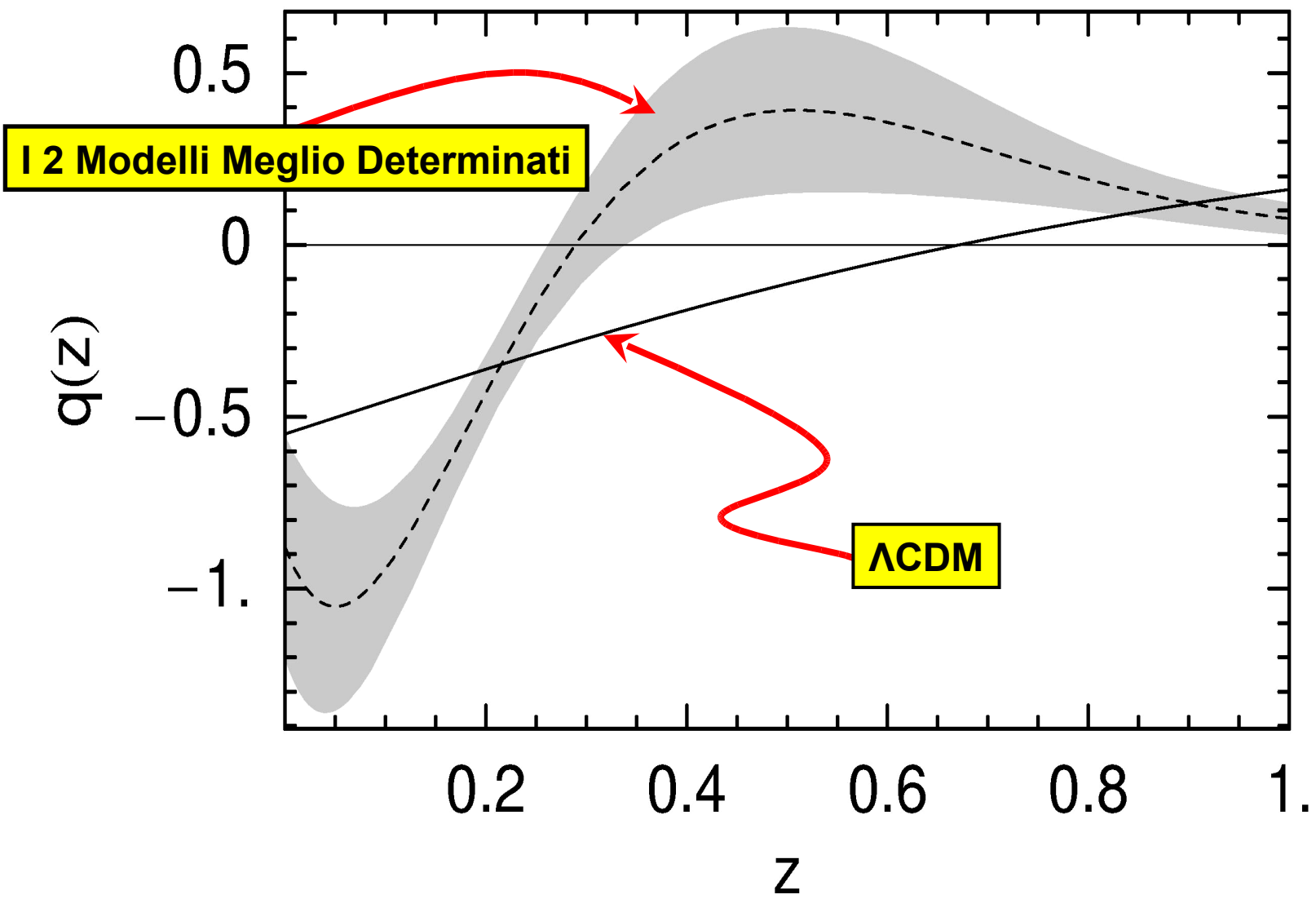
Le 6 Componenti Principali meglio determinate

Conclusioni “solide”

- L' Universo oggi potrebbe non accelerare: Modelli con decelerazione da $z = 0.3$ sono accettabili al 10% cl
- Convincente evidenza che l'Universo un tempo accelerava (5σ)
- Forte evidenza che $q(z)$ era maggiore nel passato
- Debole evidenza che l'Universo era decelerato nel passato

Assunzioni & Inputs

- Teoria metrica della gravità con metrica di Robertson-Walker
- Analisi senza “Friedmann”
- “Gold Set” di Supernovae
- Universo piatto (potrebbe essere rilassato)
- Verso una storia di costante accelerazione
- Analisi delle componenti principali di $q(z)$



Senza le equazioni di Friedmann si perde la migliore evidenza per la piattezza (i.e., Anisotropia CMB)

- Si potrebbe determinare la curvatura spaziale in modo indipendente:

$$dV = r^2 dr d\Omega / [1 - kr^2]^{1/2}$$

$r(z)$ = distanza direzionale dell'oggetto di redshift z

$|k|^{-1/2}$ = raggio di curvatura

- Determinati r e dr (e.g., SNe) e dV (e.g. conteggi), si ricava k

Lista di punti scottanti

1. Accelerazione Cosmica/Energia Oscura: “Profondo Mistero della Scienza attuale”
2. Materia scura: 3 approcci – misure dallo spazio, acceleratori, esperimenti sotterranei – risposte all’orizzonte!
3. Testare le predizioni dell’inflazione – inflazione sta per diventare parte integrante della “ cosmologia standard”
4. Usando l’ accordo e le verifiche dei dati della cosmologia di precisione (BBN, SDSS/2dF, WMAP, SNe...) testare la Relatività Generale in nuovi regimi.

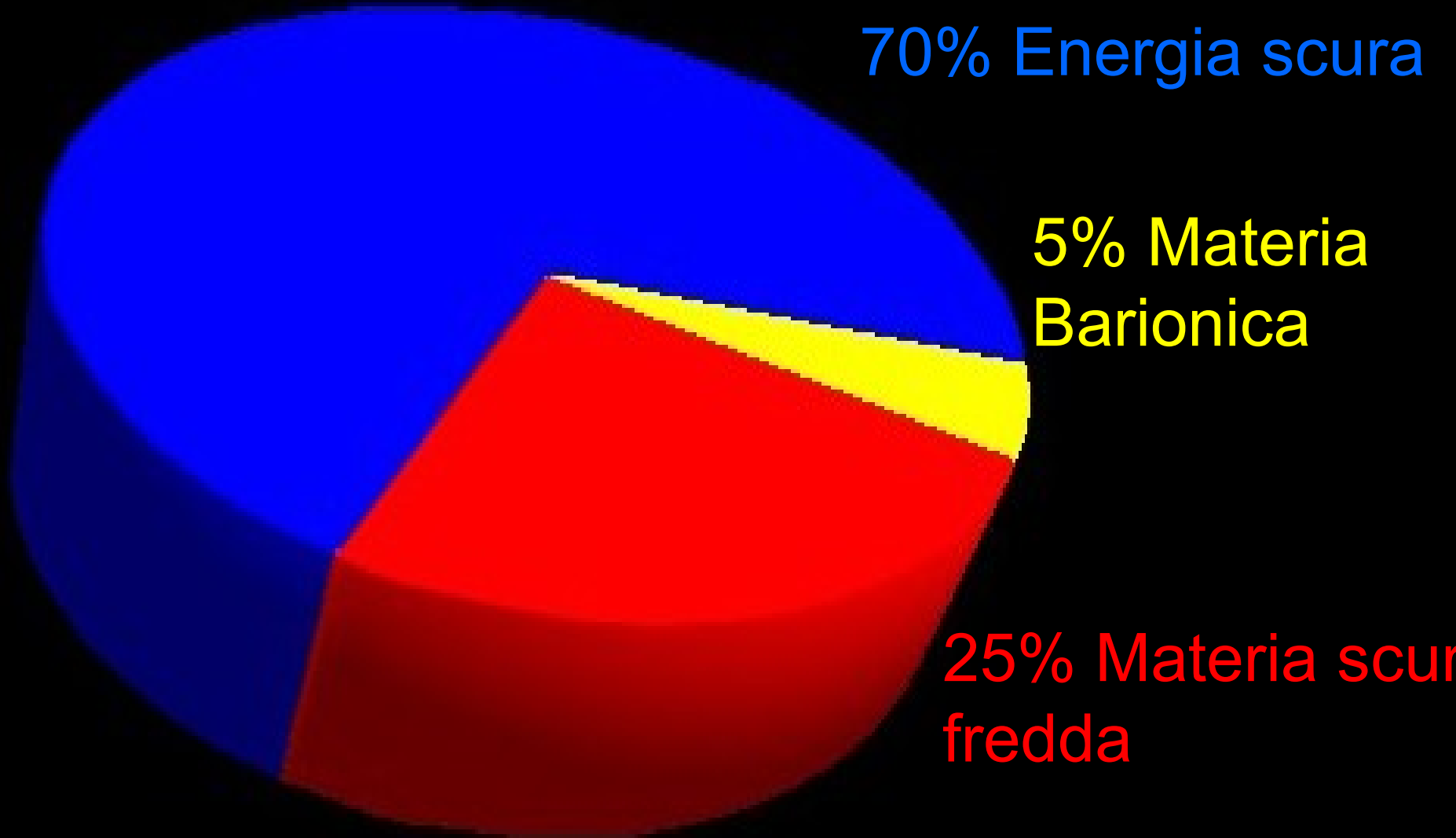
Parameteri Cosmologici Globali

- H_0 Costante di Hubble: espansione $v=H_0 r$
- Ω_b Contenuto Barionico
- Ω_{DM} Contenuto di materia scura
- Ω_Λ o Ω_{DE} Contenuto di energia scura
- $w(z)$ Proprietà dell'energia scura

Parametri derivati:

- $\Omega_m = \Omega_b + \Omega_{DM}$ Contenuto totale di materia
- $\Omega_K = 1 - \Omega_m - \Omega_\Lambda$ Curvatura dell'Universo

Modello convenzionale



Dinamica dell'Universo

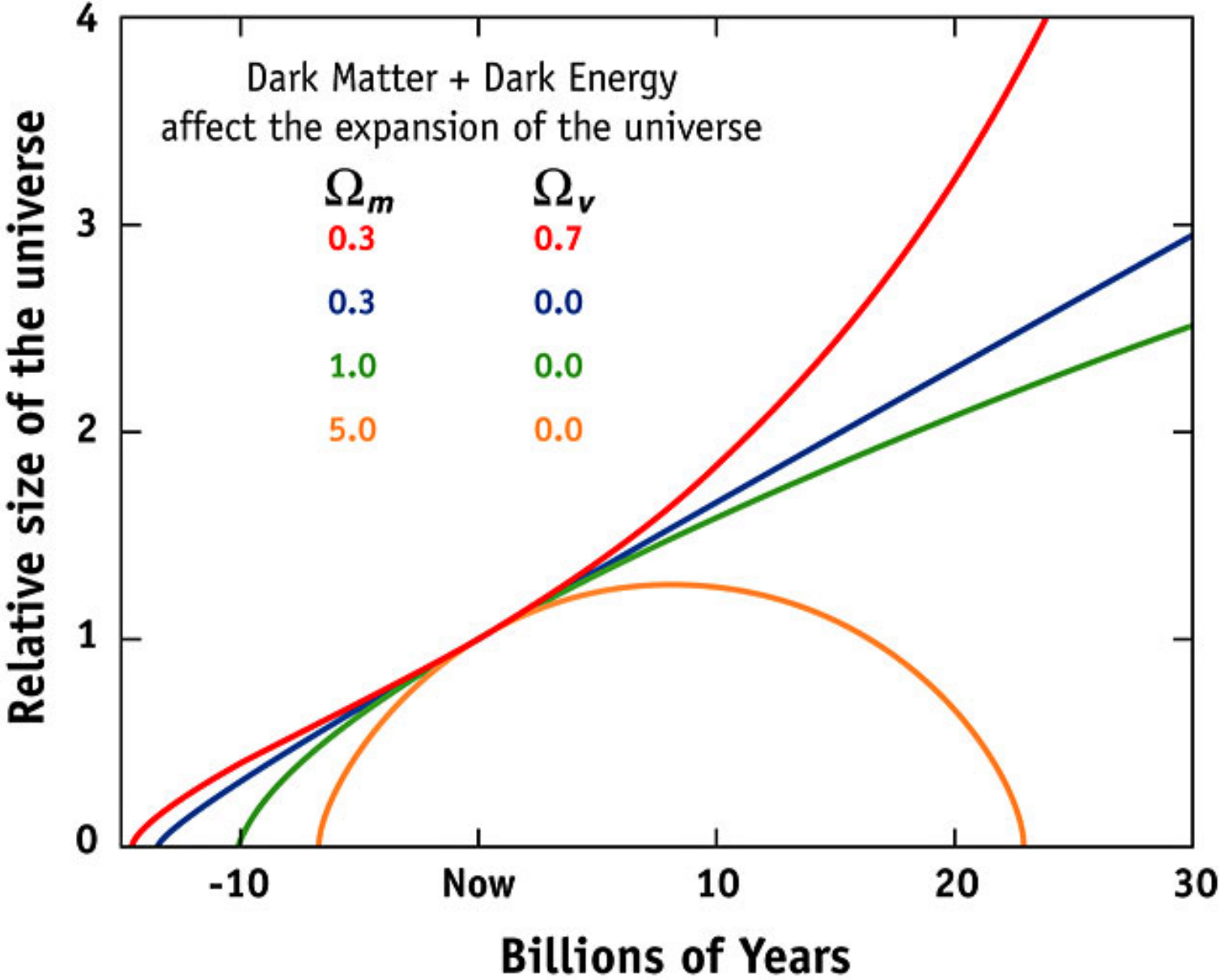
$$a / t^{2/(3(w+1))}$$

- Materia domina ($w=0$): $a / t^{2/3}$
 - **Decelera**
- Radiazione domina ($w=1/3$): $a / t^{1/2}$
 - **Decelera**
- Costante Cosmologica ($w=-1$): $a / e^{\lambda t}$ (speciale)
 - **Accelera**

Dove avviene la transizione?

- $w > -1/3$ decelera
- $w < -1/3$ accelera

EXPANSION OF THE UNIVERSE



Energia Scura (DE)

- Proprietà
- Costante Cosmologica o quintessenza?
- Parametrizzazione della quintessenza
 - **Incorporare la quintessenza nelle predizioni**
 - **Parametrizzare $w(z)$**
- Misure recenti
- Uso delle supernovae

DE: proprietà

- È la maggiore componente dell'Universo
- Causa l'espansione accelerata
- Modifica il tasso di crescita delle fluttuazioni

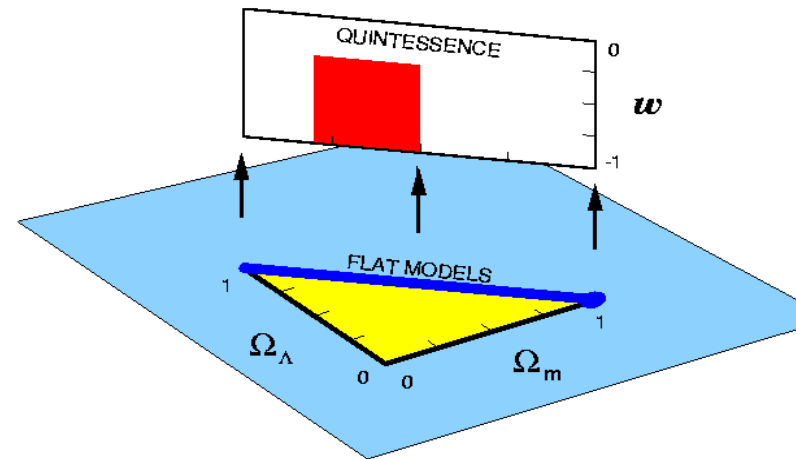
Costante Cosmologica o Quintessenza?

- Costante Cosmologica:

- Punto-zero delle fluttuazioni quantistiche?
- Fattore 10^{110}
- Coincidenza di $\Omega_m \sim \Omega_\Lambda$
- perchè accelera adesso?

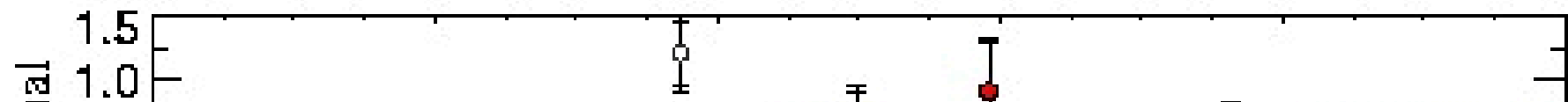
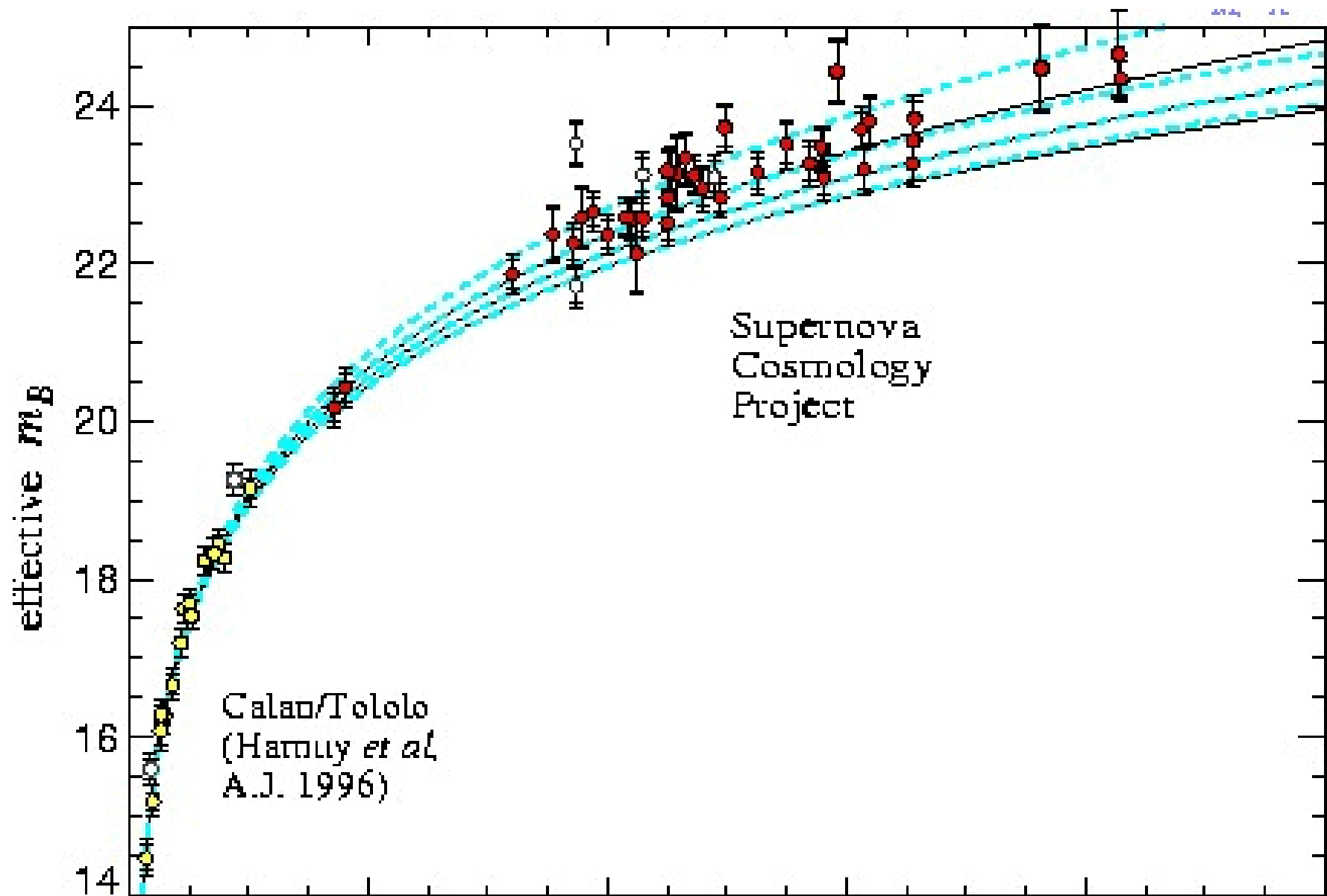
- Quintessenza

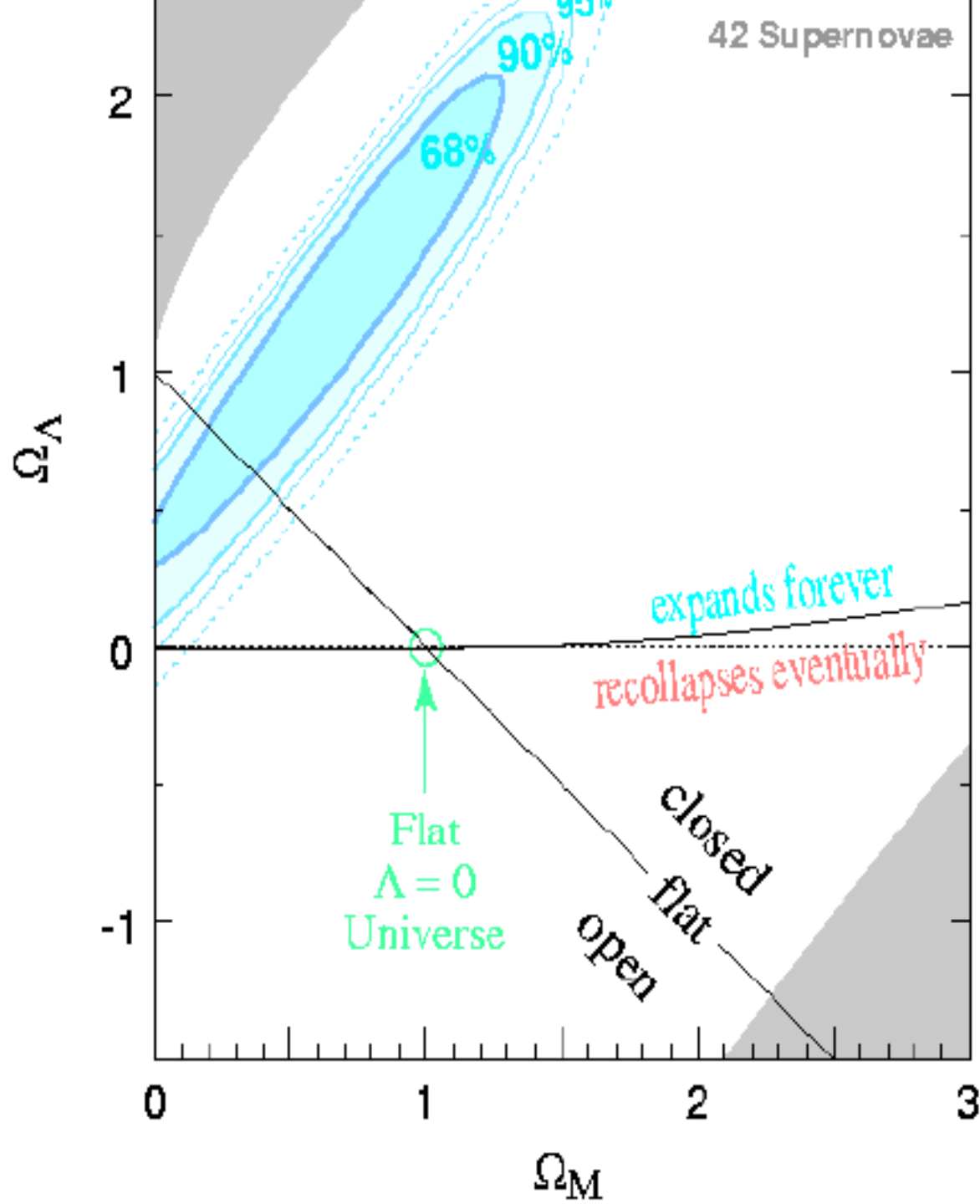
- Dipende dal tempo
- Spazialmente inhomogeneo
- eg. Campo scalare che si srotola lungo un potenziale
- Pressione negativa – $w = \text{pressione/densità}$



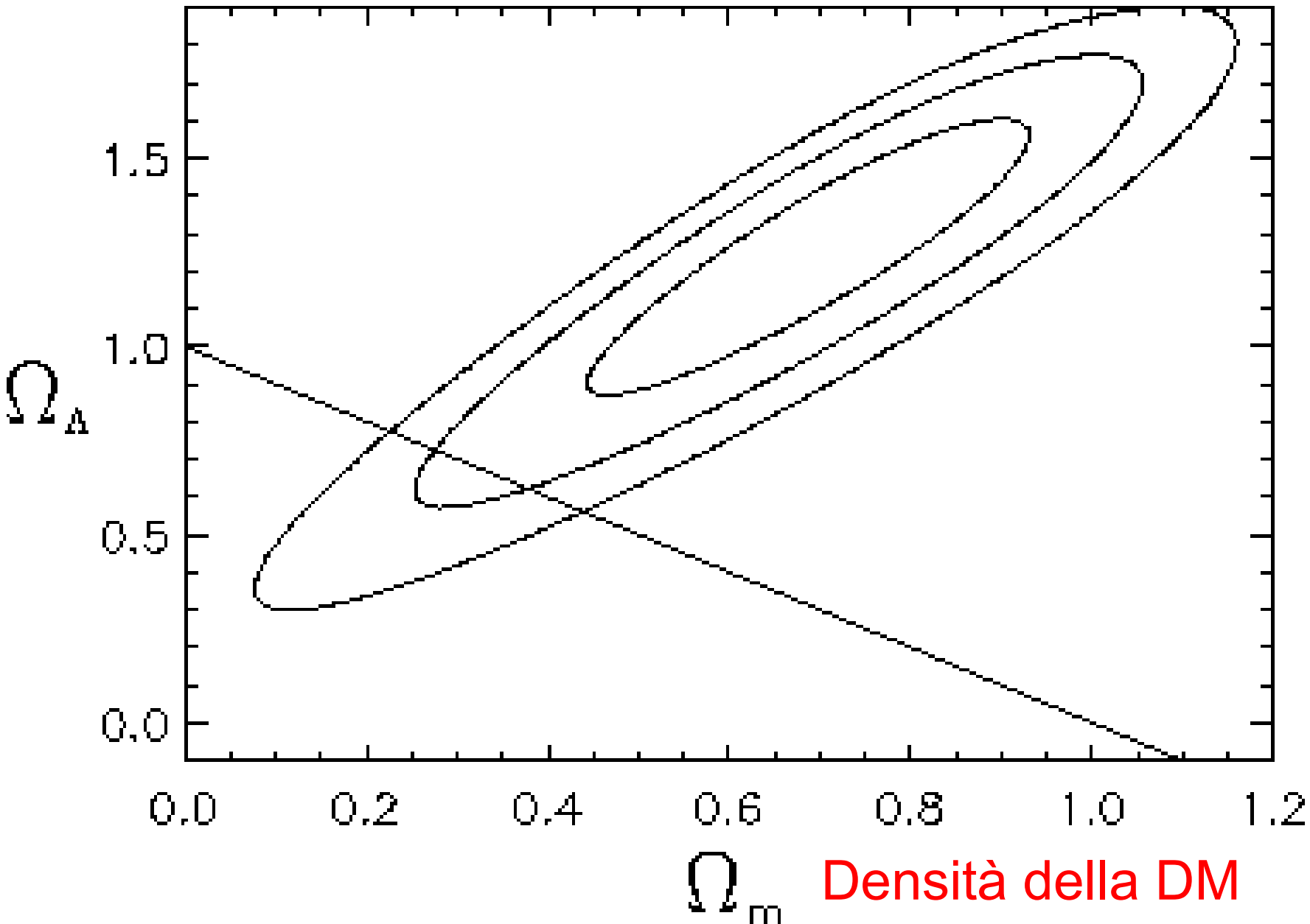
Supernovae Ia

- Misurano il tasso di espansione in funzione di z
- Effetti Sistematici? eg.
 - Evoluzione
 - Polvere grigia
- Tests eg. $Z = 1.7$ supernova

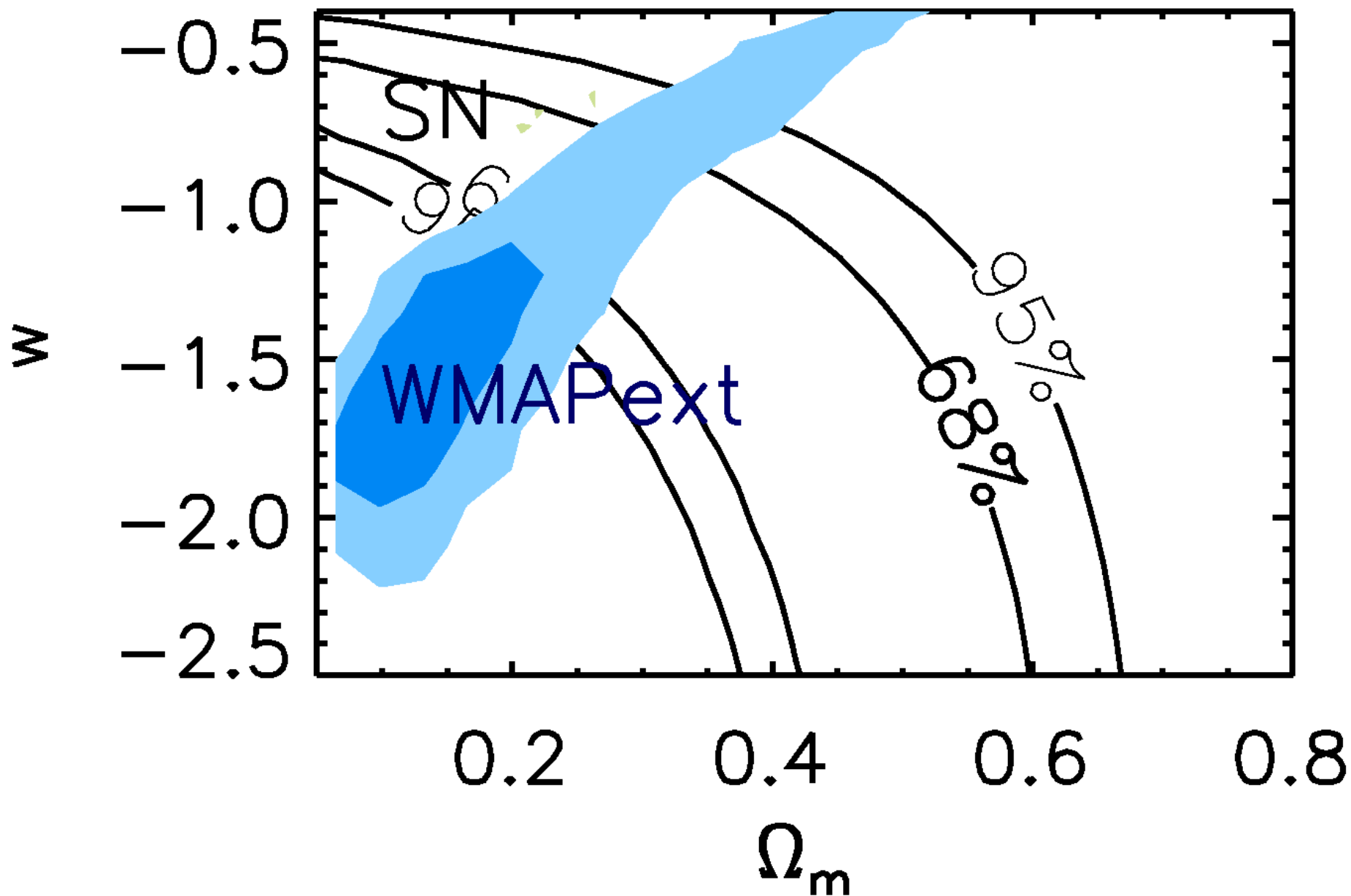




Densità della DE



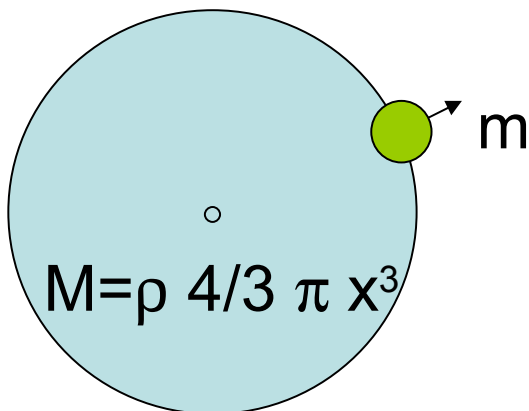
Assumendo un Universo piatto:



Derivazione Newtoniana



- Per una comprensione fisica
- Per la sola materia (ie. $p=0$), Universo piatto
 - $3/a^2 (\dot{a}^2 + k) = 8 \pi G \rho(t)$
 - $1/a^2 (2a \ddot{a} + \dot{a}^2 + k) = -8 \pi G \rho(t)$
- Considera un osservatore sul bordo di una sfera di raggio X isotropa in espansione



$$m x'' = GMm/a^2 \quad x'' = 4 \pi G \rho x / 3$$

$X = ar$, X = distanza, r = comovente

$$\ddot{a} = 4 \pi G \rho / (3 a^2)$$

Come dalle equazioni di Friedmann

Storica evoluzione della DM

- Velocità in COMA 1937
- Velocità nel Gruppo Locale 1959
- Curve di rotazione delle galassie 1970s
- Limiti superiori dalla CMB 1980s

DM Barionica

- Idrogeno freddo
- MACHOs (Massive Compact Halo Objects)
 - Buchi Neri
 - Stelle dense, eg. WD, NS
 - Grossi pianeti
- Limiti da microlensing
 - <20% dell'alone della nostra galassia è composto da MACHOS