

Lezione Fermi 22

Luciano Maiani, AA 14-15

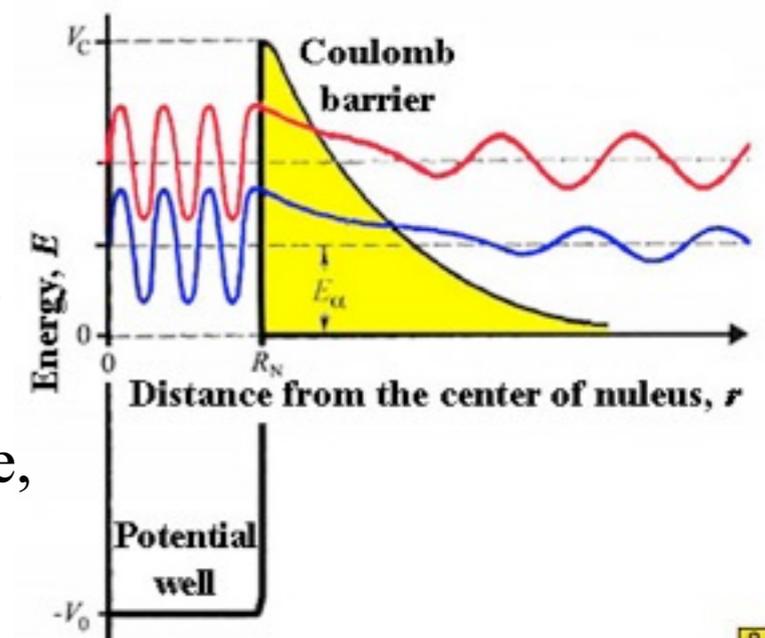
Nucleosintesi primordiale

Sommario

1. Le 4 interazioni
2. George Gamow ipotizza la nucleosintesi nel Big Bang
3. La volata finale
4. Le reazioni della nucleosintesi
5. Abbondanze primordiali
6. Cosa impariamo
7. Solo tre neutrini: Z^0 , neutrini solari

1. Le 4 Interazioni

- Forza gravitazionale tra due protoni: $V = -\frac{\alpha_G}{r}$, $\alpha_G = Gm_p^2 \sim 7 \cdot 10^{-39}$
- Forza Debole, caratterizzata dalla costante di Fermi, G_F : $G_F m_p^2 \sim 10^{-5}$
 - ha portata zero a tutti gli effetti, decad. : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
 - ha un ruolo importante in astrofisica: equilibrio chim. (Big Bang) $n \leftrightarrow p : \left\{ \begin{array}{l} e^- + p \rightarrow n + \nu_e \\ \nu_e + n \rightarrow e^- + p \end{array} \right\}$
 - deuterio nelle stelle : $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$
- Forze elettriche: $V = \pm \frac{\alpha}{r}$, $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \sim \frac{1}{137}$ (Nota : $\frac{\alpha_G}{\alpha} \sim 10^{-37}$)
 - tengono in piedi atomi e molecole
 - portata infinita, ma limitata dalla neutralità della materia
 - su distanze $> \text{mm}$ la materia è dominata dalle forze gravitazionali (non c'è antigravità !!)
- Forza Forte (o Nucleare): $V = g_N \frac{e^{-r/m_\pi}}{r}$, $g_N \sim 10$
 - portata $\approx 1 \text{ fermi} = 10^{-13} \text{ cm} = 10^{-5} \text{ Angstrom}$
 - il potenziale tra protoni è modificato dalla repulsione elettrostatica, che diventa confrontabile a distanze dell'ordine dei fermi
 - per questo la fusione dei nuclei leggeri, energeticamente possibile, richiede alta temperatura: nel Sole circa 10^7 K (Lez. 6).



2. Gamow ipotizza la nucleosintesi nel Big Bang

- Negli anni '40, Gamow realizzò che nel corso del Big Bang, e a differenza di quanto avviene nelle stelle, si rendevano disponibili grandi quantità di neutroni liberi che ad alta temperatura sono in equilibrio con i protoni;
- i neutroni, per reazioni successive, avrebbero portato alla sintesi di tutti gli elementi, e Gamow suppose che si potesse spiegare in questo modo l'abbondanza osservata degli elementi.
- Gamow affidò il problema a Ralph Alpher, suo studente di dottorato. I risultati di Alpher furono raccolti nella tesi di dottorato discussa nel 1948 e utilizzati in un celebre lavoro di Alpher, Bethe, Gamow del 1949 (il motivo della presenza di Bethe, che non ci aveva lavorato, era che Gamow voleva riprodurre con le iniziali degli autori, l'inizio di tutte le cose: $\alpha \beta \gamma$).
- Alpher scoprì che la presenza di un fondo eccessivo di fotoni avrebbe ritardato la sintesi dell'He e che la sintesi di elementi più pesanti si sarebbe arrestata per mancanza di un isotopo stabile con $A=8$.
- Restava la predizione di un'abbondanza in massa di ${}^4\text{He}$ intorno al 25%, in linea con quanto già osservato al tempo
- In un lavoro successivo con R. Herman, Alpher notò che il fondo dei fotoni ad alta temperatura avrebbe dato luogo, ai nostri tempi, ad una radiazione con $T \sim 2.7 \text{ K}$ (!!), una predizione dimenticata fino alla scoperta di Penzias e Wilson nel 1964.
- Calcoli moderni sulla nucleosintesi primordiale sono dovuti a P. Peebles (1966) e a Wagoner, Fowler e Hoyle (1967)

3. La volata finale

- Iniziamo con la temperatura di 10^{12} K (100 MeV)
 - siamo a molto meno di 1 sec dal Big Bang
 - l'universo e' popolato di fotoni, neutrini (3 sapori) e coppie elettrone-positrone
 - non ci sono piu' antibarioni, ma solo barioni nella misura di un barione ogni $1/\eta_B \sim 10^9$ fotoni
 - protoni e neutroni sono all'equilibrio termico e le loro abbondanze relative sono anche in equilibrio dovuto alle reazioni ricordate prima (interazioni deboli)



- Definiamo come X_n la frazione di neutroni rispetto al numero totale di barioni. All'equilibrio X_n e' un po' inferiore a 0.5, dovuto alla massa del neutrone che e' maggiore di quella del protone (e' la statistica di Boltzman)

$$X_n = \frac{N_n}{N_n + N_p} = \frac{e^{-\frac{\Delta}{kT}}}{e^{-\frac{\Delta}{kT}} + 1}, \quad \Delta = m_n - m_p \sim 1.29 \text{ MeV}$$

$$t \sim 0, T = 10^{12} \text{ K} : X_n = 0.496$$

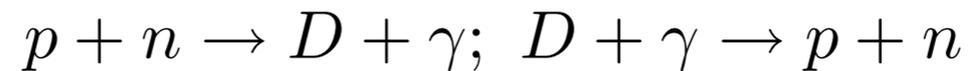
- possiamo usare questa formula fino a temperature di circa $3 \cdot 10^{10} \text{ K}$ (3 MeV), temperatura sotto la quale le coppie elettroni-positroni cominciano a sparire e le reazioni che equilibrano protoni e neutroni va fuori equilibrio. A questo punto:

$$t = 0.12 \text{ sec}, T = 3 \cdot 10^{10} \text{ K} : X_n = 0.380$$

Radiocronaca

- $t=20$ sec, $T=3 \cdot 10^9$ K (0.3 MeV), $X_n=0.16$ (**1 n ogni 5 p**): non ci sono piu' coppie e i neutrini si sono disaccoppiati

- i neutroni adesso sono congelati e possono solo decadere, con una vita media di 885 sec (circa 14.7 minuti)
- i nucleoni avrebbero energia abbastanza bassa per formare nuclei di deuterio, ma **ci sono troppi fotoni** energici (300 KeV). Le reazioni di formazione e di distruzione del deuterio sono



- con $\eta_B \sim 10^{-9}$ barioni/fotone, la dissociazione prevale e il deuterio appena formato si dissocia

- parte una competizione tra:

- l'espansione dell'Universo, che diminuisce T e quindi l'energia dei fotoni
- il decadimento dei neutroni che riduce X_n

- l'ora fatidica della formazione del D scocca quando $T \approx 9 \cdot 10^8$ K (0.1 MeV), $t \approx 220$ sec, quando

$$X_n(t = 220) = 0.160 e^{-\frac{t-20}{885}} \sim 0.13$$

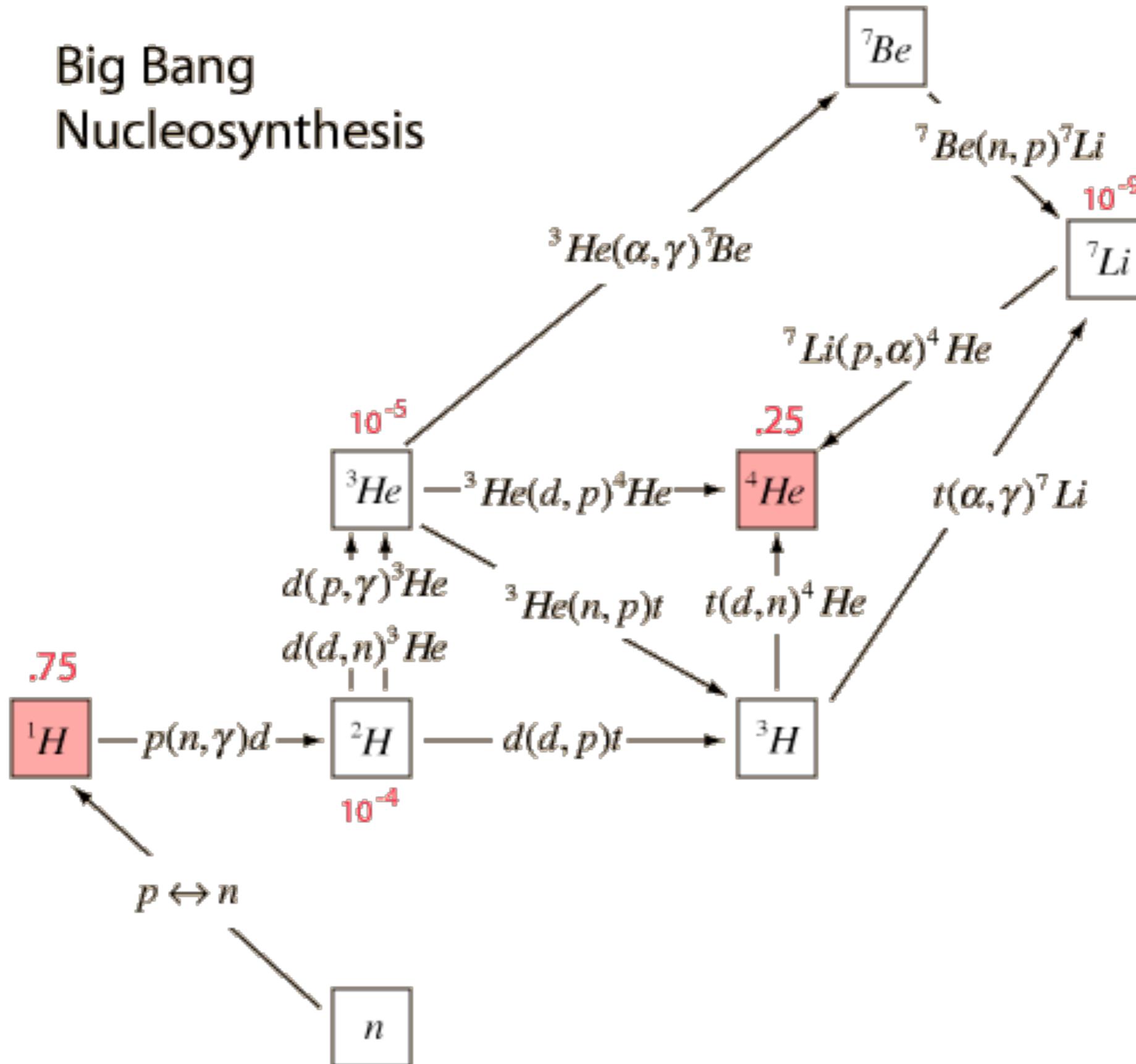
- ci sono circa **1 n ogni 7 p**. Le reazioni: $D+p \rightarrow {}^3\text{He} + \text{gamma}$, ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$, etc. si svolgono rapidamente e bloccano (praticamente) tutti i neutroni disponibili nello ${}^4\text{He}$,

- ovvero un ${}^4\text{He}$ ogni 16 barioni:

$$\frac{\text{massa}({}^4\text{He})}{\text{massa}(H) + \text{massa}({}^4\text{He})} = \frac{4}{16} = 25\%$$

5. Le reazioni della nucleosintesi

Big Bang
Nucleosynthesis



altri nuclei leggeri

- Quando i neutroni spariscono nello ${}^4\text{He}$, restano un certo numero di nuclei leggeri che “non hanno fatto a tempo a reagire” e non possono fondere perché le temperature sono ormai scese troppo
- conoscendo la fisica delle reazioni nucleari si possono calcolare le abbondanze dei nuclei stabili: D, ${}^3\text{He}$
- Non ci sono nuclei stabili con $A=8$, quindi la nucleosintesi si ferma al ${}^7\text{Li}$
- (i nuclei più pesanti, nelle stelle si formano con il ciclo “triplo alfa”, ma la temperatura cala troppo in fretta, non c’è tempo....)

Cosa impariamo

- la frazione di Elio predetta dipende dalla densità di energia dei neutrini, ovvero dal numero di neutrini diversi, N_ν , e dal numero di fotoni/barione, $1/\eta_B$
- N_ν , influenza la velocità di decrescita della temperatura:
 - più tipi di neutrini, meno tempo ci vuole per arrivare alla formazione di deuterio,
 - meno neutroni sono decaduti, più He si forma
- se η_B aumenta, $1/\eta_B$ diminuisce, ci sono meno fotoni per barione, ad una data temperatura, e quindi si raggiunge prima la soglia di temperatura per la formazione di D
 - più grande η_B , prima si forma il D,
 - meno neutroni sono decaduti, più He si forma

abbondanza di ${}^4\text{He}$ va su se :

$$N_\nu \uparrow, \eta_B \uparrow$$

- alternativamente, dai dati sperimentali possiamo ricavare i valori di η_B (da confrontare con la materia visibile nelle galassie)
- e il valore “cosmologico” di N_ν , da confrontare con la fisica delle particelle

5. Confronto con i dati sperimentali

- Elio primordiale: dove?
 - nel sistema solare: Sole, Giove
 - nelle nubi H II a bassa metallicita': idrogeno ionizzato dalla luce delle stelle giovani, si puo' misurare l'abbondanza di He dalle righe spettrali



A small portion of the [Tarantula Nebula](#), a giant H II region in the [Large Magellanic Cloud](#)

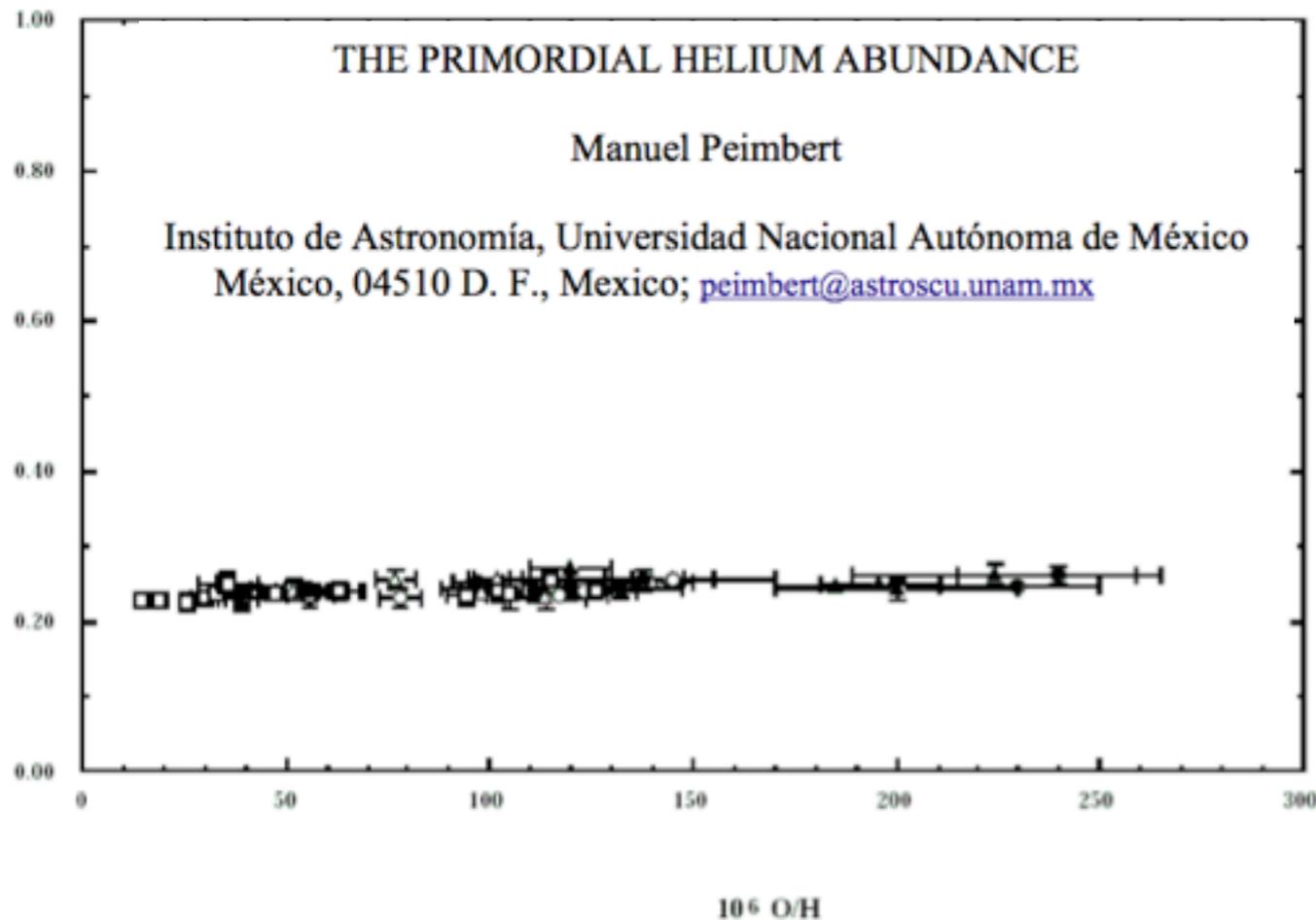


Figure 3. The ^4He mass fraction Y versus the O/H value, abundances derived from observations of low-metallicity extragalactic H II regions.

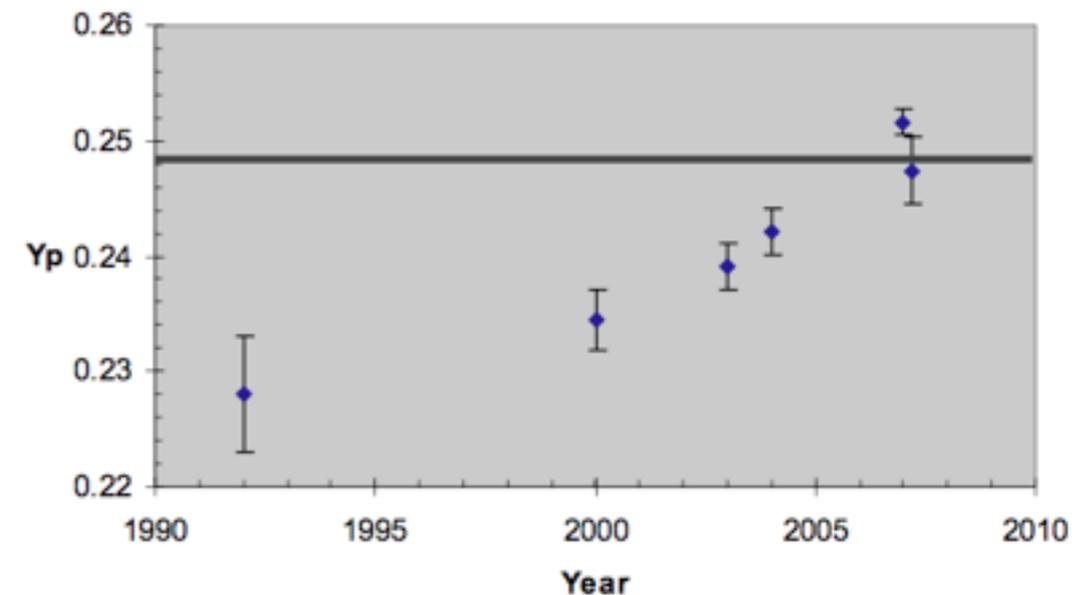


Figure 5. Y_p determinations derived from H II regions with a small fraction of heavy elements, usually called metal poor or extremely metal-poor H II regions. The Y_p values presented are those of Table 1, which only include the statistical errors presented by the authors with the exception of the Y_p value by Peimbert et al. (29) that amounts to 0.2479 ± 0.0029 that also includes an estimate of the systematic errors. The horizontal line is the Y_p value estimated from the baryon to photon density of the universe estimated by Dunkley et al. (30) from the *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)* observations under

Il Deuterio primordiale

- I nuclei di D creati nella fissione stellare spariscono rapidamente nella successiva fusione in ^4He
- si pensa quindi che il D osservato nell'Universo sia essenzialmente primordiale e la sua abbondanza rifletta la BBN, ovvero sia superiore dovuto a processi di "distillazione frazionaria di H"
- D osservato nell'atmosfera di Giove e nelle righe del Sole in proporzione di $25 \text{ D}/10^6 \text{ H}$, come previsto nella BBN: dovrebbe riflettere la composizione della nebula da cui si è nato il Sistema Solare
- ma negli oceani sulla Terra e nel ghiaccio delle comete l'abbondanza è 10 volte superiore, $200 \text{ D}/10^6 \text{ H}$, probabilmente dovuto a evaporazione frazionaria di H
- (secondo alcuni questa somiglianza proverebbe che tutta l'acqua degli oceani proviene dal ghiaccio delle comete cadute sulla Terra ???!??- vedi Deuterium-Wiki)

Standard Big-Bang Nucleosynthesis after Planck

Alain Coc

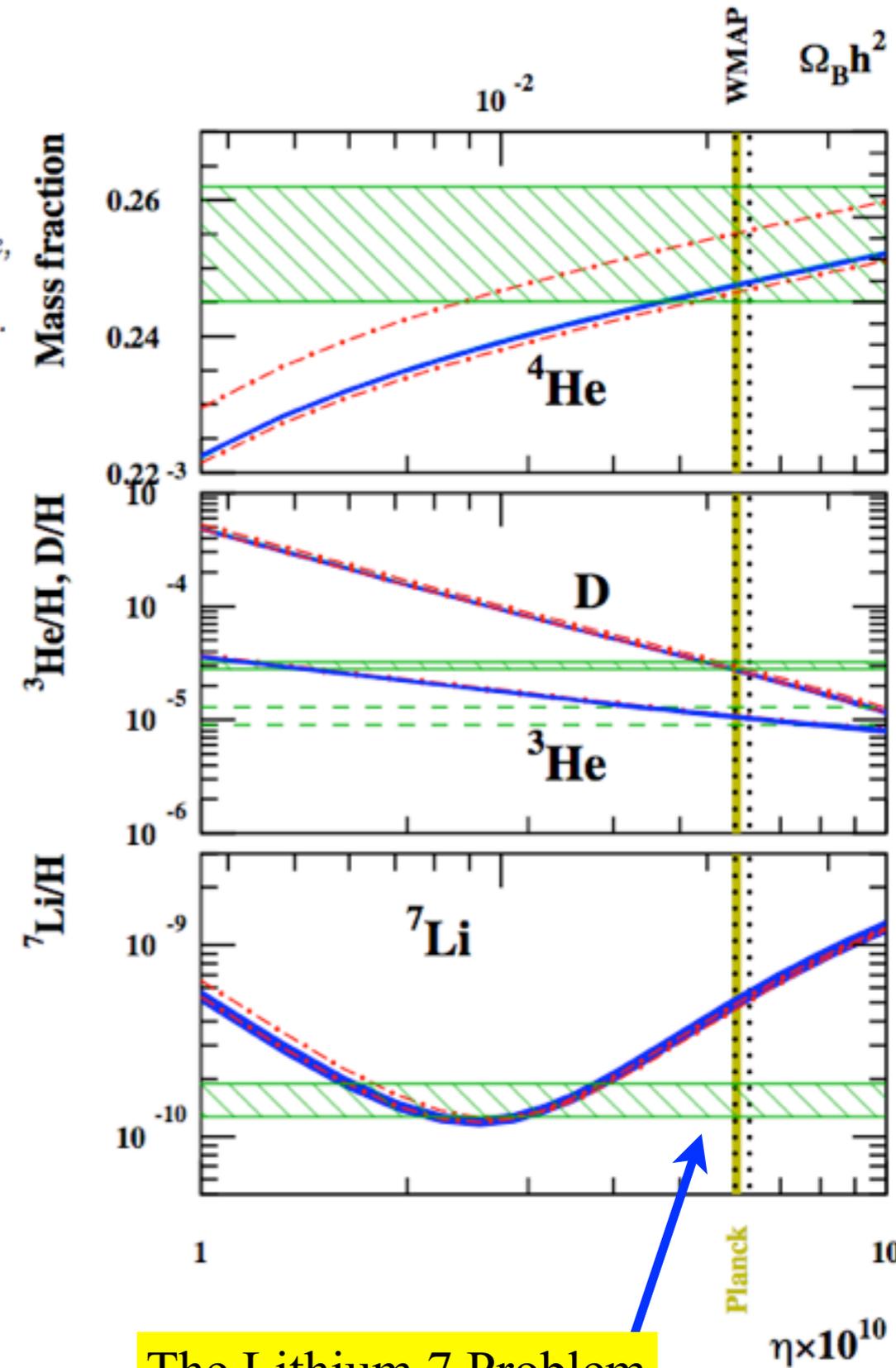
Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière (CSNSM), CNRS/IN2P3,
Université Paris Sud 11, UMR 8609, Bâtiment 104, F-91405 Orsay Campus (France).

Jean-Philippe Uzan and Elisabeth Vangioni

(1) Institut d'Astrophysique de Paris, UMR-7095 du CNRS, Université Pierre et Marie Curie,
98 bis bd Arago, 75014 Paris (France),

(2) Sorbonne Universités, Institut Lagrange de Paris, 98 bis bd Arago, 75014 Paris (France).

Fig. 1.— (Color online) Abundances of ^4He , D , ^3He and ^7Li (blue) as a function of the baryon over photon ratio (bottom) or baryonic density (top). The vertical areas corresponds to the WMAP (dot, black) and Planck (solid, yellow) baryonic densities while the horizontal areas (green) represent the adopted observational abundances; see text. The (red) dot-dashed lines correspond to the extreme values of the *effective* neutrino families coming from CMB Planck study, $N_{\text{eff}} = (3.02, 3.70)$; see text.



The Lithium 7 Problem

ABSTRACT

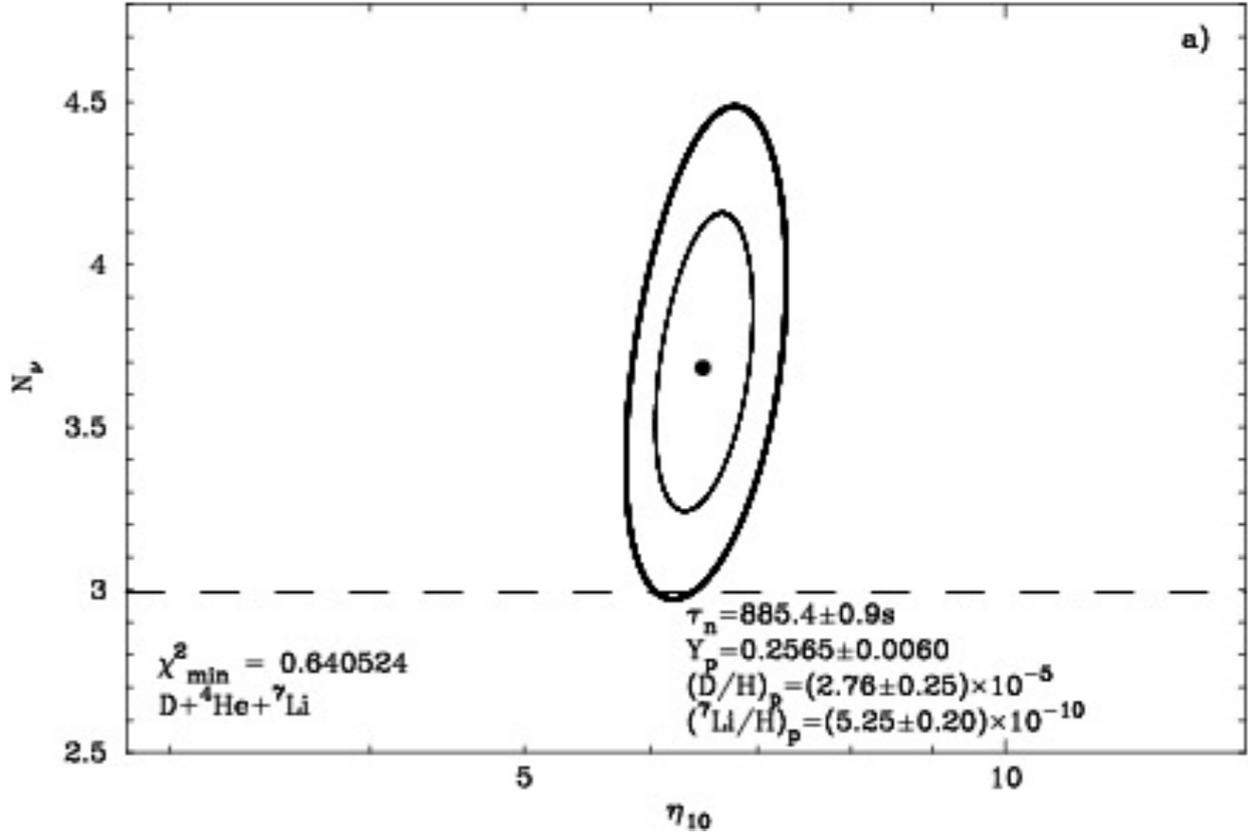
We present a new determination of the primordial helium mass fraction Y_p , based on 93 spectra of 86 low-metallicity extragalactic H II regions, and taking into account the latest developments concerning systematic effects. These include collisional and fluorescent enhancements of He I recombination lines, underlying He I stellar absorption lines, collisional and fluorescent excitation of hydrogen lines and temperature and ionization structure of the H II region. Using Monte Carlo methods to solve simultaneously for the above systematic effects, we find the best value to be $Y_p = 0.2565 \pm 0.0010(\text{stat.}) \pm 0.0050(\text{syst.})$. This value is higher at the 2σ level than the value given by Standard Big Bang Nucleosynthesis (SBBN), implying deviations from it. The effective number of light neutrino species N_ν is equal to $3.68^{+0.80}_{-0.70}$ (2σ) and $3.80^{+0.80}_{-0.70}$ (2σ) for a neutron lifetime τ_n equal to 885.4 ± 0.9 s and 878.5 ± 0.8 s, respectively, i.e. it is larger than the experimental value of 2.993 ± 0.011 .

$$\eta_B = (6.5 \pm 1.5) 10^{-10}$$

ovvero: $n_B = 370 \cdot 10^6 \cdot \eta_B = (0.24 \pm 0.05) \text{ protoni/m}^3$

$$\Omega_B = 0.045$$

conferma l'esistenza di materia oscura



THE PRIMORDIAL HELIUM ABUNDANCE

Manuel Peimbert

Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México
México, 04510 D. F., Mexico; peimbert@astroscu.unam.mx

COSMOLOGICAL PREDICTIONS BASED ON SBBN AND OBSERVATIONS FOR $\tau_n = 885.7 \pm 0.8$ sec

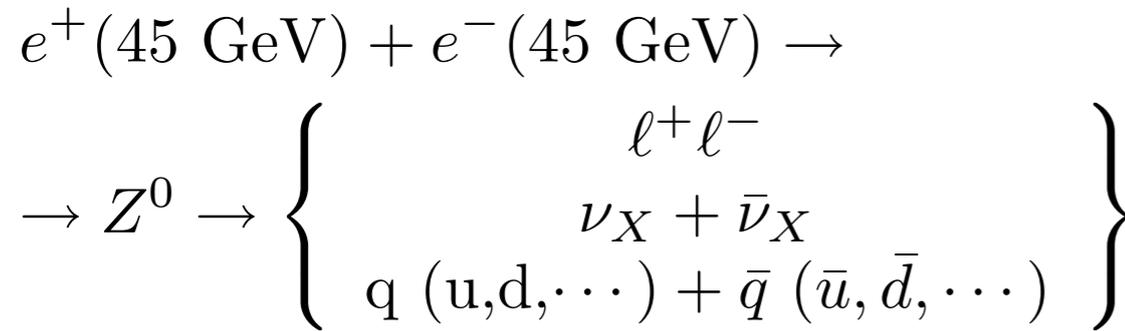
Method	Y_P	D_P	η_{10}	$\Omega_b h^2$
Y_P	0.2477 ± 0.0029^a	$2.78^{+2.28b}_{-0.98}$	5.813 ± 1.81^b	0.02122 ± 0.00663^b
D_P	0.2476 ± 0.0006^b	2.82 ± 0.28^a	5.764 ± 0.360^b	0.02104 ± 0.00132^b
<i>WMAP</i>	0.2484 ± 0.0003^b	2.49 ± 0.11^b	6.225 ± 0.170^b	0.02273 ± 0.00062^a

^aObserved value.

^bPredicted value.

Solo tre neutrini dallo Z^0

- Anello di collisione LEP del CERN (1989-2000): nella prima fase e' stato una "fabbrica di Z^0 "

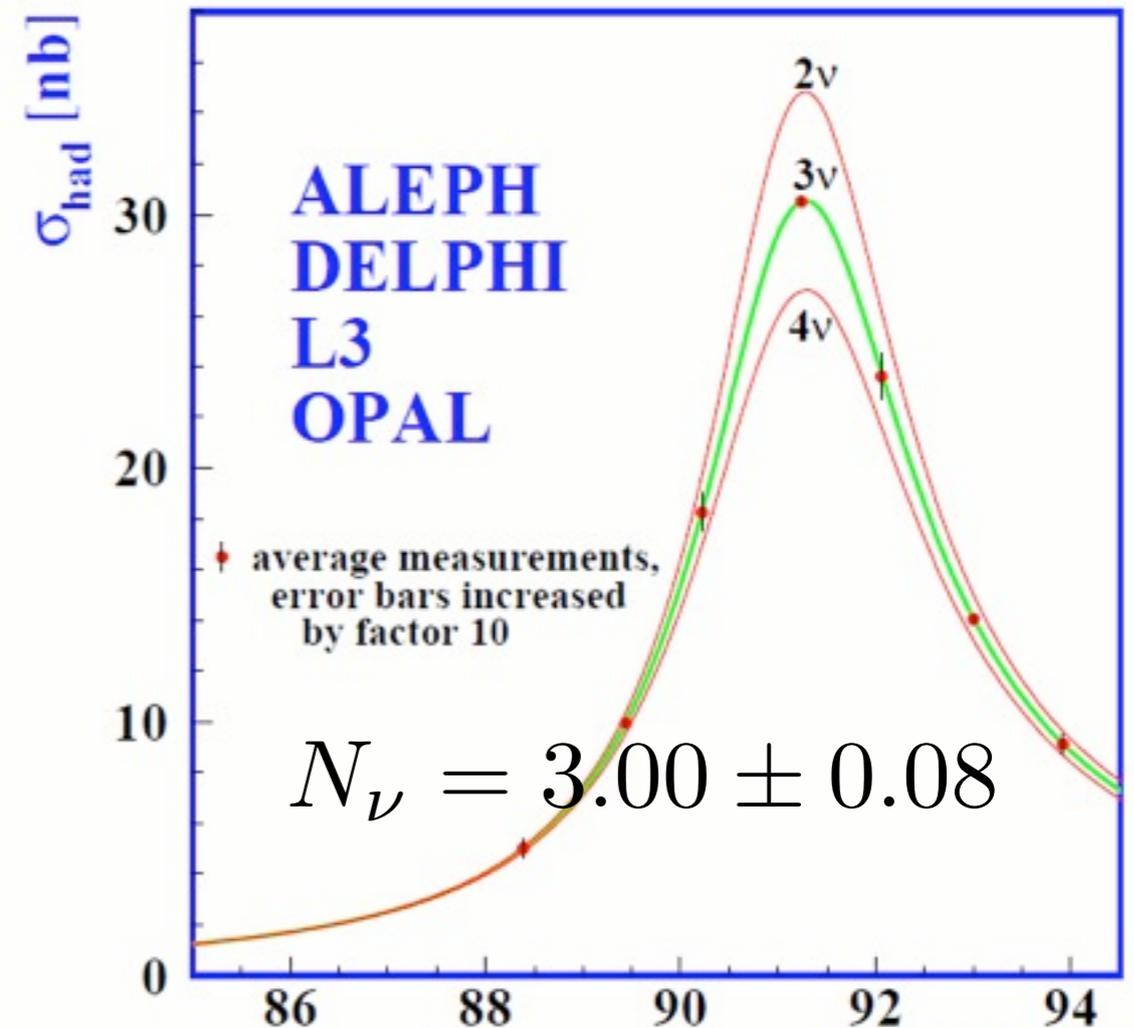
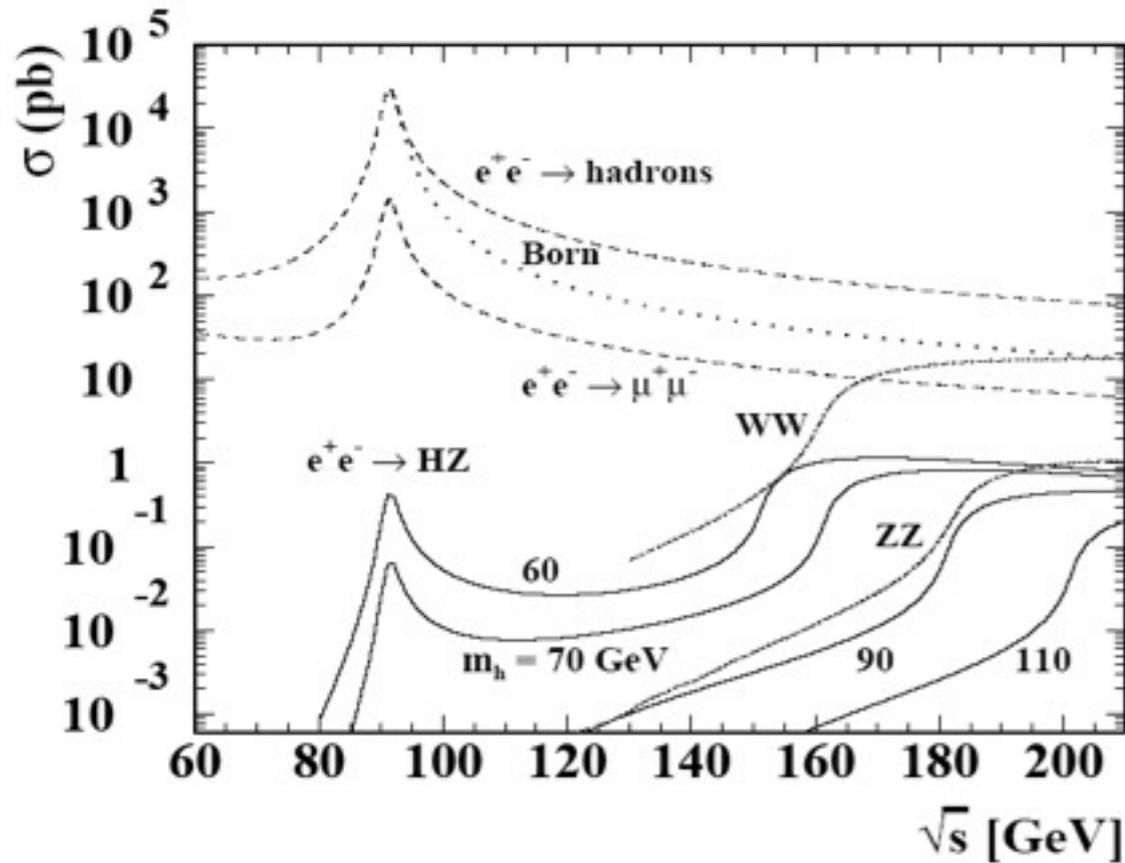


- La larghezza della "riga dello Z^0 " e' proporzionale alla probabilita' dei canali di decadimento

$$\Gamma = N_\ell \Gamma_\ell + 3N_q(\Gamma_{q=up} + \Gamma_{q=down}) + N_\nu \Gamma_\nu$$

$$N_\ell = N_q = 3 \text{ (canali visibili); } N_\nu = ? \text{ (canali invisibili)}$$

- Dalla forma della riga deduciamo il valore di Γ e quindi, note le larghezze visibili, deduciano il valore di N_ν



Reazioni osservate dei Neutrini Solari a SNO

$NC : \nu_X + D \rightarrow \nu_X + p + n$, (prob. uguale per ogni X)

$CC : \nu_e + D \rightarrow e^- + p + p$, (prob. = 0 per $X = \mu, \tau$)

$ES : \nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$, (prob. diversa per $X = \mu, \tau$)

- Flux of ν_μ and ν_τ versus the flux of ν_e in the solar neutrino flux as measured from the three reactions observable in the SNO experiment. The dashed band shows the prediction of the SSM, which agrees perfectly with the flux measured with the Neutral Current reaction (*3 neutrino types*).

