

---

# Gravitino, candidat à la matière noire et les implications en nucléosynthèse primordiale

---

## GDR SUSY - LAL Orsay

Sean Bailly

LPTA, Montpellier

Sous la direction de :

Michel Capdequi-Peyranère

Karsten Jedamzik

Gilbert Moulta

3 décembre 2008

Contexte cosmologique de la théorie du Big Bang, un univers chaud et dense en expansion composé de :

- Énergie noire : 74%
- Matière :
  - Matière ordinaire : 4%
  - Matière noire : 22%

Les problèmes de la matière :

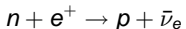
- Nucléosynthèse primordiale : production des éléments légers
  - Bon accord pour les éléments  $A \leq 4$
  - Problèmes du lithium
- Nature de la matière noire

Il est possible de résoudre ces problèmes simultanément dans le cadre de la physique des particules : **supersymétrie**

- 1 Nucléosynthèse primordiale
  - Nucléosynthèse primordiale standard
  - Particule relique instable
- 2 Matière Noire
- 3 Supersymétrie
  - Extension du Modèle Standard
  - Transmission de la brisure
- 4 Étude de la NLSP
  - Stau NLSP
  - Neutralino NLSP
  - Résultats BBN
- 5 Densité relique du gravitino
  - Production non-thermique
  - Production thermique
  - Résultats matière noire
- 6 Conclusion

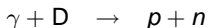
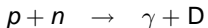
- 1 Nucléosynthèse primordiale
  - Nucléosynthèse primordiale standard
  - Particule relique instable
- 2 Matière Noire
- 3 Supersymétrie
  - Extension du Modèle Standard
  - Transmission de la brisure
- 4 Étude de la NLSP
  - Stau NLSP
  - Neutralino NLSP
  - Résultats BBN
- 5 Densité relique du gravitino
  - Production non-thermique
  - Production thermique
  - Résultats matière noire
- 6 Conclusion

- Jusqu'à 1 s : interactions faibles

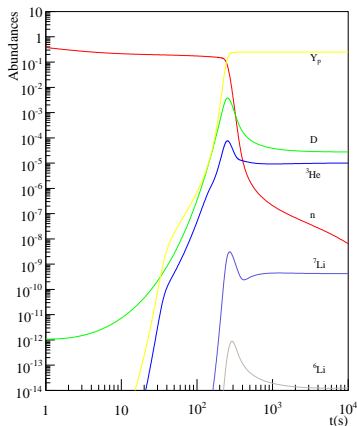


- Gel des interactions faibles  
 $n/p = e^{-Q/T_f} \sim 1/6 \rightarrow 1/7$

- Goulot du deutérium

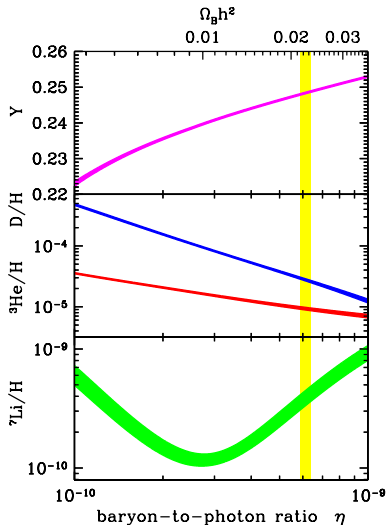


- La production du deutérium commence vers 200 s
- $D + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ ,  $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$
- Pas d'élément stable à  $A = 5$  et  $A = 8$
- Abondances faibles :  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$



- Un paramètre mesuré par WMAP

$$\eta = \frac{n_b}{n_\gamma} = (6.225 \pm 0.170) \times 10^{-10}$$



Élément	SBBN	Observations
$\left(\frac{\text{D}}{\text{H}}\right)$	$(2.60 \pm 0.16) \times 10^{-5}$	$(2.68^{+0.27}_{-0.25}) \times 10^{-5}$
$\left(\frac{{}^3\text{He}}{\text{H}}\right)$	$(1.05 \pm 0.04) \times 10^{-5}$	$(1.1 \pm 0.2) \times 10^{-5}$
$Y_p$	$0.2487 \pm 0.0006$	$0.242 \pm 0.002$
$\left(\frac{{}^6\text{Li}}{\text{H}}\right)$	$10^{-14} - 10^{-15}$	$(3 - 5) \times 10^{-12}$
$\left(\frac{{}^7\text{Li}}{\text{H}}\right)$	$(4.26^{+0.91}_{-0.86}) \times 10^{-10}$	$(1.2 - 1.9) \times 10^{-10}$
$\left(\frac{{}^9\text{Be}}{\text{H}}\right)$	$< 10^{-17}$	$10^{-14} - 10^{-13}$

- Particule massive instable  $X$  avec une durée de vie  $\tau_X \sim 10^2 - 10^6$  s
- Désintégration en particules du modèle standard
- Injection de photons et nucléons
  - photodésintégration :  ${}^7\text{Li} + \gamma \rightarrow {}^6\text{Li} + n$
  - spallation de  ${}^4\text{He}$  :  ${}^4\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{He} + 2n$  puis  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^6\text{Li} + n$
- Modifications des abondances

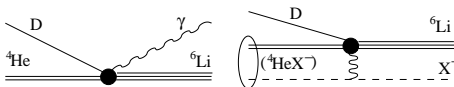
- Particule  $X$  chargée négative : formation d'états liés
- Catalyse de réactions Pospelov, hep-ph/0605215

- $\sigma_{\text{CBBN}} \simeq 10^8 \times \sigma_{\text{SBBN}}$  : forte contrainte sur l'abondance de lithium-6

Code prenant tous ces effets en compte Jedamzik, hep-ph/0604251 (désintégration de particules reliques, taux de réactions CBBN Kamimura et al., arXiv:0809.4772)



- Particule massive instable  $X$  avec une durée de vie  $\tau_X \sim 10^2 - 10^6$  s
- Désintégration en particules du modèle standard
- Injection de photons et nucléons
  - photodésintégration :  ${}^7\text{Li} + \gamma \rightarrow {}^6\text{Li} + n$
  - spallation de  ${}^4\text{He}$  :  ${}^4\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{He} + 2n$  puis  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^6\text{Li} + n$
- Modifications des abondances
  
- Particule  $X$  chargée négative : formation d'états liés
- Catalyse de réactions [Pospelov, hep-ph/0605215](#)

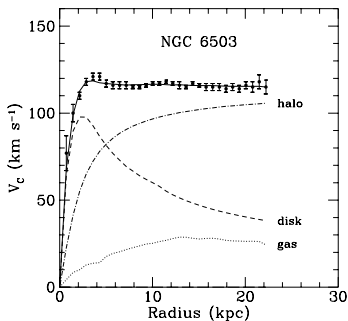


- $\sigma_{\text{CBBN}} \simeq 10^8 \times \sigma_{\text{SBBN}}$  : forte contrainte sur l'abondance de lithium-6

Code prenant tous ces effets en compte [Jedamzik, hep-ph/0604251](#) (désintégration de particules reliques, taux de réactions CBBN [Kamimura et al., arXiv:0809.4772](#))

- 1 Nucléosynthèse primordiale
  - Nucléosynthèse primordiale standard
  - Particule relique instable
- 2 Matière Noire
- 3 Supersymétrie
  - Extension du Modèle Standard
  - Transmission de la brisure
- 4 Étude de la NLSP
  - Stau NLSP
  - Neutralino NLSP
  - Résultats BBN
- 5 Densité relique du gravitino
  - Production non-thermique
  - Production thermique
  - Résultats matière noire
- 6 Conclusion

- Premières observations : F. Zwicky, 1933
- Etudes des profil de vitesse dans les galaxies : V. Rubin, 1970



- Ne porte ni charge électrique ni charge de couleur
- Principalement non-baryonique
- Densité de matière noire : [WMAP](#), [Komatsu et al.](#), [arXiv:0803.0547](#)

$$\Omega_{DM} h^2 = 0.105^{+0.021}_{-0.030}$$

- 1 Nucléosynthèse primordiale
  - Nucléosynthèse primordiale standard
  - Particule relique instable
- 2 Matière Noire
- 3 **Supersymétrie**
  - Extension du Modèle Standard
  - Transmission de la brisure
- 4 Étude de la NLSP
  - Stau NLSP
  - Neutralino NLSP
  - Résultats BBN
- 5 Densité relique du gravitino
  - Production non-thermique
  - Production thermique
  - Résultats matière noire
- 6 Conclusion

## Au delà du modèle standard

- Supersymétrie : symétrie entre fermions et bosons
- $Q |\text{fermion}\rangle = |\text{boson}\rangle$        $Q |\text{boson}\rangle = |\text{fermion}\rangle$
- MSSM : nouvelles particules

nom	spin 0	spin 1/2	nom	spin 1/2	spin 1
leptons		$(\nu_{eL}, e_L)$ $e_R$	Jauge		$g$ $W^i$ $B^0$
quarks		$(u_L, d_L)$ $u_R, d_R$			
Higgs	$H$				

## Deux particules importantes

- Partenaire supersymétrique du lepton tau : le stau

$$\tilde{\tau} = \cos \theta_\tau \tilde{\tau}_L + \sin \theta_\tau \tilde{\tau}_R$$

- Neutralino

$$\chi^0 = N_{11} \tilde{B}^0 + N_{12} \tilde{W}^0 + N_{13} \tilde{H}_u^0 + N_{14} \tilde{H}_d^0$$

## Au delà du modèle standard

- Supersymétrie : symétrie entre fermions et bosons
- $Q |\text{fermion}\rangle = |\text{boson}\rangle$        $Q |\text{boson}\rangle = |\text{fermion}\rangle$
- MSSM : nouvelles particules

nom	spin 0	spin 1/2	nom	spin 1/2	spin 1
leptons , <b>sleptons</b>	$(\tilde{\nu}_{eL}, \tilde{e}_L)$ $\tilde{e}_R$	$(\nu_{eL}, e_L)$ $e_R$	Jauge , <b>jauginos</b>	$\tilde{g}$ $\tilde{W}^i$ $\tilde{B}^0$	$g$ $W^i$ $B^0$
quarks , <b>squarks</b>	$(\tilde{u}_L, \tilde{d}_L)$ $\tilde{u}_R, \tilde{d}_R$	$(u_L, d_L)$ $u_R, d_R$			
Higgs , <b>Higgsinos</b>	$H_u, H_d$	$\tilde{H}_u, \tilde{H}_d$			

## Deux particules importantes

- Partenaire supersymétrique du lepton tau : le stau

$$\tilde{\tau} = \cos \theta_\tau \tilde{\tau}_L + \sin \theta_\tau \tilde{\tau}_R$$

- Neutralino

$$\chi^0 = N_{11} \tilde{B}^0 + N_{12} \tilde{W}^0 + N_{13} \tilde{H}_u^0 + N_{14} \tilde{H}_d^0$$

- Brisure de la supersymétrie :  $\Rightarrow$  superpartenaires plus massifs
- Nécessité de briser la supersymétrie dans un secteur caché
- Le mode de transmission au secteur visible n'est pas connu



### CMSSM

Brisure transmise par interaction gravitationnelle

$$m_{1/2}, m_0, A_0, \tan \beta, \operatorname{sgn} \mu$$

### GMSB

Brisure transmise par interaction de jauge  $SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$  avec un secteur messenger

$$M_{\text{mess}}, \Lambda, N, \tan \beta, \operatorname{sgn} \mu$$

- Brisure de la supersymétrie :  $\Rightarrow$  superpartenaires plus massifs
- Nécessité de briser la supersymétrie dans un secteur caché
- Le mode de transmission au secteur visible n'est pas connu



### CMSSM

Brisure transmise par interaction gravitationnelle

$$m_{1/2}, \quad m_0, \quad A_0, \quad \tan \beta, \quad \text{sgn } \mu$$

### GMSB

Brisure transmise par interaction de jauge  $SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$  avec un secteur messenger

$$M_{\text{mess}}, \quad \Lambda, \quad N, \quad \tan \beta, \quad \text{sgn } \mu$$



- Brisure de la supersymétrie :  $\Rightarrow$  superpartenaires plus massifs
- Nécessité de briser la supersymétrie dans un secteur caché
- Le mode de transmission au secteur visible n'est pas connu



### CMSSM

Brisure transmise par interaction gravitationnelle

$$m_{1/2}, \quad m_0, \quad A_0, \quad \tan \beta, \quad \text{sgn } \mu$$

### GMSB

Brisure transmise par interaction de jauge  $SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$  avec un secteur messenger

$$M_{\text{mess}}, \quad \Lambda, \quad N, \quad \tan \beta, \quad \text{sgn } \mu$$

### Supersymétrie locale et brisure

- Symétrie locale : dépendance sur les coordonnées d'espace-temps
- Supersymétrie locale = supergravité : contient les interactions gravitationnelles
- Graviton et son superpartenaire le gravitino  $\tilde{G}$  de spin  $3/2$
- Lors de la brisure,  $\tilde{G}$  devient massif

$$m_{3/2} = \frac{F}{\sqrt{3}M_{Pl}}$$

où  $\sqrt{F}$  est l'échelle de brisure de la supersymétrie et  $M_{Pl}$  la masse de Planck

### Masse du gravitino



Les interactions du gravitino avec les autres particules  $\propto \frac{m_{soft}^2}{F}$

### R-parité

- Pour supprimer des canaux de désintégration du proton
- Conservation d'un nombre quantique :

$$P_R = (-1)^{3B+L+2S}$$

- $P_R(\text{SM}) = +1$        $P_R(\text{SUSY}) = -1$
- Désintégration d'une particule SUSY en un nombre impair de particules SUSY
- LSP stable
- Gravitino : candidat à la matière noire

## Supersymétrie

- Gravitino LSP (GMSB ou CMSSM avec conservation de la R-parité)
- Neutralino ou stau NLSP

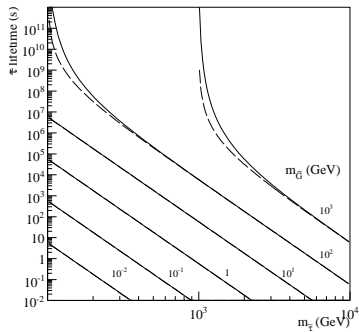
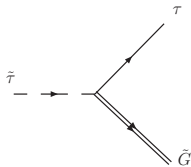
## Cosmologie

- Matière noire : le gravitino est un candidat
  - ⇒ calculer sa densité relicue :  $\Omega_{3/2} h^2$
- Problèmes du lithium : NLSP instable se désintégrant pendant ou après la BBN
  - ⇒ calculer la durée de vie de la NLSP :  $\tau_{\text{NLSP}}$
  - ⇒ densité relicue de la NLSP :  $\Omega_{\text{NLSP}} h^2$
  - ⇒ largeur de désintégration à 3 et 4 corps et énergie :  $\Gamma, E$

- 1 Nucléosynthèse primordiale
  - Nucléosynthèse primordiale standard
  - Particule relique instable
- 2 Matière Noire
- 3 Supersymétrie
  - Extension du Modèle Standard
  - Transmission de la brisure
- 4 **Étude de la NLSP**
  - **Stau NLSP**
  - **Neutralino NLSP**
  - **Résultats BBN**
- 5 Densité relique du gravitino
  - Production non-thermique
  - Production thermique
  - Résultats matière noire
- 6 Conclusion

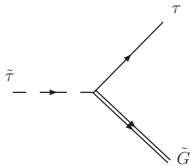
Ce processus domine la largeur totale de désintégration

$$\Gamma_{\text{tot}} \simeq \Gamma(\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G}) = \frac{1}{48\pi} \frac{m_{\tilde{\tau}}^5}{M_{\text{Pl}}^2 m_{3/2}^2} \left(1 - \frac{m_{3/2}^2}{m_{\tilde{\tau}}^2}\right)^4$$



Ce processus domine la largeur totale de désintégration

$$\Gamma_{\text{tot}} \simeq \Gamma(\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G}) = \frac{1}{48\pi} \frac{m_{\tilde{\tau}}^5}{M_{\text{Pl}}^2 m_{3/2}^2} \left(1 - \frac{m_{3/2}^2}{m_{\tilde{\tau}}^2}\right)^4$$



Le tau est instable et se désintègre

$$\tau \rightarrow \nu_{\tau} \bar{\nu}_e e$$

$$\tau \rightarrow \nu_{\tau} \bar{\nu}_{\mu} \mu$$

$$\tau \rightarrow \nu_{\tau} \pi^{-}$$

⇒ cascade électromagnétique

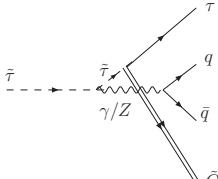
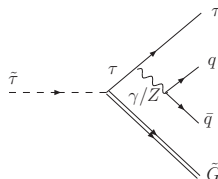
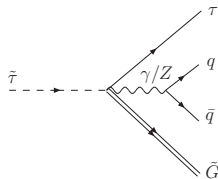
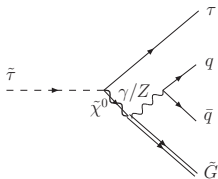
$$B_{\text{em}} = \frac{\Gamma(\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G})}{\Gamma_{\text{tot}}} \simeq 1 \quad E_{\text{cm}} = \frac{1}{2} E_{\tau} = \frac{1}{2} \left( \frac{m_{\tilde{\tau}}^2 - m_{3/2}^2}{2m_{\tilde{\tau}}} \right)$$

### Processus

$$\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G} Z / \gamma \rightarrow \tau \tilde{G} q \bar{q}$$

$$\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G} h \rightarrow \tau \tilde{G} q \bar{q}$$

$$\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G} W \rightarrow \nu_{\tau} \tilde{G} q \bar{Q}$$

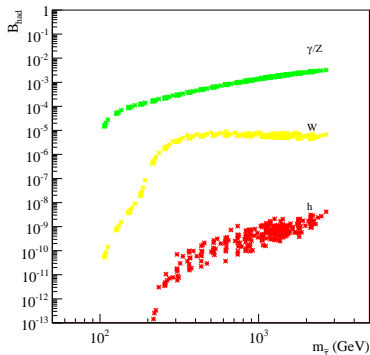




## Calcul de la largeur (CalcHEP, Pukhov, hep-ph/0412191)

$$\Gamma(\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G} q \bar{q}; m_{q\bar{q}}^{\text{cut}}) = \int_{m_{q\bar{q}}^{\text{cut}}}^{m_{\tilde{\tau}} - m_{3/2} - m_{\tau}} dm_{q\bar{q}} \frac{d\Gamma(\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G} q \bar{q})}{dm_{q\bar{q}}}$$

masse invariante de la paire quark-antiquark :  $m_{q\bar{q}}^2 = E_{q\bar{q}}^2 - p_{q\bar{q}}^2$



$$B_{\text{had}} = \frac{\Gamma(\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G} q \bar{q}; m_{q\bar{q}}^{\text{cut}})}{\Gamma_{\text{tot}}}$$

- $Z/\gamma$  domine
- $W$  supprimé car  $\tilde{\tau} \simeq \tilde{\tau}_R$
- Effet de  $\tan \beta$  : la contribution du Higgs augmente mais reste négligeable

À partir de la masse invariante

$$E_{\text{had}} = \frac{1}{\Gamma(\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G} q \bar{q})} \int_{m_{q\bar{q}}^{\text{cut}}}^{m_{\tilde{\tau}} - m_{3/2} - m_{\tau}} dm_{q\bar{q}} m_{q\bar{q}} \frac{d\Gamma(\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G} q \bar{q})}{dm_{q\bar{q}}}$$

Inconvénient : perte d'information sur l'impulsion et l'énergie des particules

Spectre réaliste

- Génération d'une distribution d'impulsion de  $q\bar{q}$  (CalcHEP)
- Hadronisation (Pythia, [Sjöstrand](#), [Mrenna](#), [Skands](#), [hep-ph/0603175](#))
- Distribution d'énergie des nucléons et nombre moyen par désintégration

Comparaison des méthodes

Résultats similaires dans la région pertinente pour la BBN

## À partir de la masse invariante

$$E_{\text{had}} = \frac{1}{\Gamma(\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G} q \bar{q})} \int_{m_{q\bar{q}}^{\text{cut}}}^{m_{\tilde{\tau}} - m_{3/2} - m_{\tau}} dm_{q\bar{q}} m_{q\bar{q}} \frac{d\Gamma(\tilde{\tau} \rightarrow \tau \tilde{G} q \bar{q})}{dm_{q\bar{q}}}$$

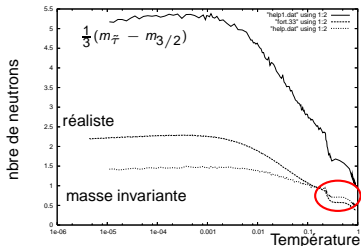
Inconvénient : perte d'information sur l'impulsion et l'énergie des particules

## Spectre réaliste

- Génération d'une distribution d'impulsion de  $q\bar{q}$  (CalcHEP)
- Hadronisation (Pythia, [Sjöstrand](#), [Mrenna](#), [Skands](#), [hep-ph/0603175](#))
- Distribution d'énergie des nucléons et nombre moyen par désintégration

## Comparaison des méthodes

Résultats similaires dans la région pertinente pour la BBN

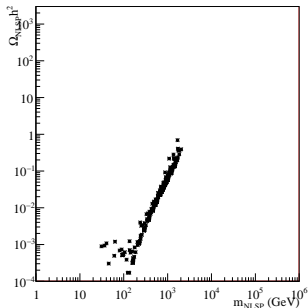
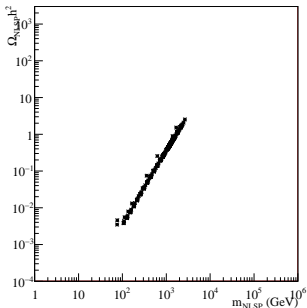


En considérant les processus d'annihilation et slepton-stau coannihilation

$$\Omega_{\tilde{\tau}} h^2 = (2.2 - 4.4) \times 10^{-1} \left( \frac{m_{\tilde{\tau}_1}}{1 \text{ TeV}} \right)^2$$

- Résultats similaires dans CMSSM et GMSB
- Effet de  $\tan \beta$  : baisse de la densité relique
- Ne prend pas en compte les effets de coannihilation avec neutralino, résonance du Higgs, mélange L-R

Simulation numérique : micrOMEGAs, Bélanger et al.



$$\chi_1^0 = N_{11}\tilde{B} + N_{12}\tilde{W}^0 + N_{13}\tilde{H}_u^0 + N_{14}\tilde{H}_d^0$$

Désintégration à deux corps :  $\chi \rightarrow \tilde{G}\gamma$

$$\Gamma(\chi \rightarrow \gamma\tilde{G}) = \frac{\kappa_\gamma}{48\pi} \frac{m_\chi^5}{M_{\text{Pl}}^2 m_{3/2}^2} \left(1 - \frac{m_{3/2}^2}{m_\chi^2}\right)^3 \left(1 + 3\frac{m_{3/2}^2}{m_\chi^2}\right)$$

avec  $\kappa_\gamma = |N_{11} \cos \theta_W + N_{12} \sin \theta_W|^2$ .

Désintégration hadronique à trois corps

$$\Gamma(\chi \rightarrow \tilde{G}q\bar{q}; m_{q\bar{q}}^{\text{cut}}) = \int_{m_{q\bar{q}}^{\text{cut}}}^{m_\chi - m_{3/2}} dm_{q\bar{q}} \frac{d\Gamma(\chi \rightarrow \tilde{G}q\bar{q})}{dm_{q\bar{q}}}$$

avec l'énergie hadronique :

$$E_{\text{had}} = \frac{1}{\Gamma(\chi \rightarrow \tilde{G}q\bar{q})} \int_{m_{q\bar{q}}^{\text{cut}}}^{m_\chi - m_{3/2}} dm_{q\bar{q}} m_{q\bar{q}} \frac{d\Gamma(\chi \rightarrow \tilde{G}q\bar{q})}{dm_{q\bar{q}}}$$

Densité relique

Également étudiée dans les cas neutralino LSP

# Résultats BBN (1/4)

CMSSM avec gravitino lourd

$$m_{3/2} = [10, 500] \text{ GeV}$$

$$\tan \beta = 10 \quad A_0 = 0$$

**■** : résolution  ${}^6\text{Li}$  :  $0.015 \leq {}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} \leq 0.66$  et  ${}^7\text{Li} \geq 2.5 \times 10^{-10}$

**■** : résolution  ${}^7\text{Li}$  :  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} \leq 0.015$  et  $8.5 \times 10^{-11} \leq {}^7\text{Li} \leq 2.5 \times 10^{-10}$

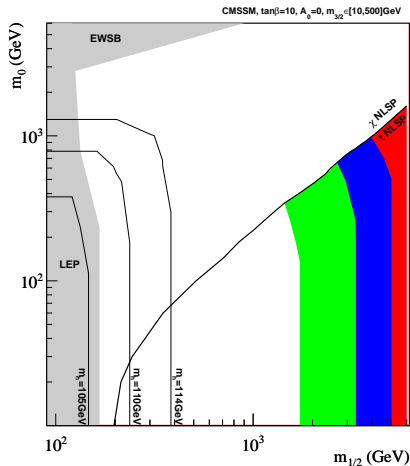
**■** : résolution  ${}^6\text{Li}$  et  ${}^7\text{Li}$  :  $0.015 \leq {}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} \leq 0.15$  et

$8.5 \times 10^{-11} \leq {}^7\text{Li} \leq 2.5 \times 10^{-10}$

$$\Rightarrow m_{\tilde{G}} \in [70, 200] \text{ GeV}$$

■ zones exclues par les contraintes LEP ou l'absence de brisure électrofaible

- Solutions Li pour  $\tilde{\tau}$  NLSP
- Pas de solution pour  $\chi$



$$m_{3/2} = [10, 500] \text{ GeV}$$

$$\tan \beta = 50 \quad A_0 = 0$$

■ : résolution  ${}^6\text{Li}$

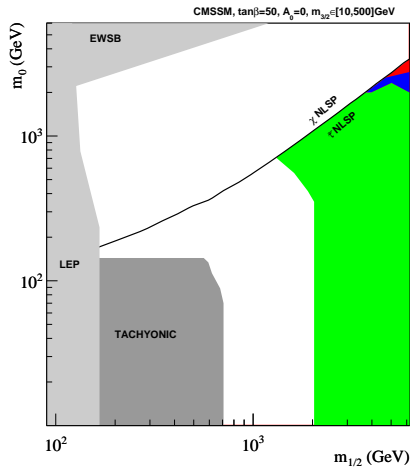
■ : résolution  ${}^7\text{Li}$

■ : résolution  ${}^6\text{Li}$  et  ${}^7\text{Li}$  :

$$m_{\tilde{G}} \in [70, 200] \text{ GeV}$$

■ zones exclues par les contraintes LEP ou l'absence de brisure électrofaible

- Solutions Li pour  $\tilde{\tau}$  NLSP
- Pas de solution pour  $\chi$



# Résultats BBN (3/4)

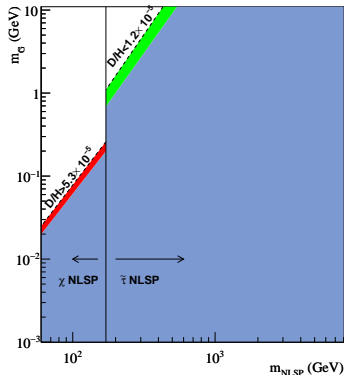
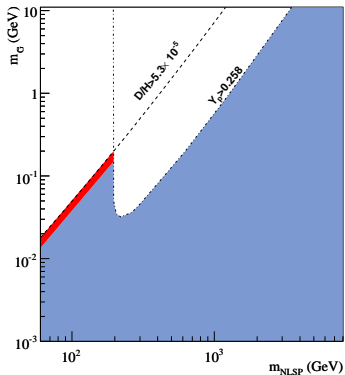
GMSB, gravitino léger  $m_{\tilde{G}} = [10^{-2}, 10]$  GeV

$$M_{\text{mess}} = 5 \times 10^6 \text{ GeV et } \Lambda \in [5 \times 10^4, 5 \times 10^6] \text{ GeV}$$

■ : SBBN    ■ : résolution  ${}^6\text{Li}$     ■ : résolution  ${}^7\text{Li}$

$N = 1 : \chi$  NLSP

$N = 2 : \tilde{\tau}$  et  $\chi$  NLSP





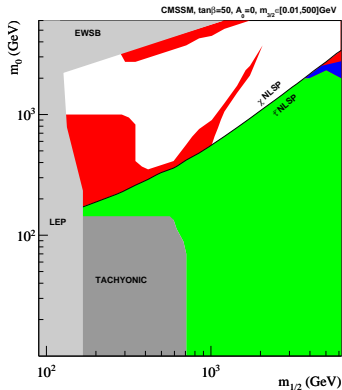
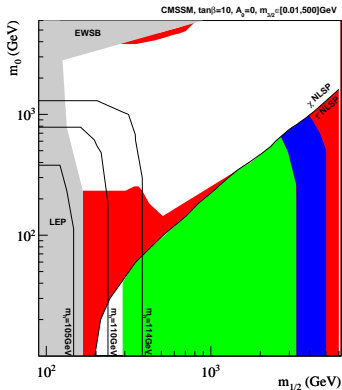
# Résultats BBN (4/4)

CMSSM avec masse arbitraire de gravitino

■ : SBBN   ■ : résolution  ${}^6\text{Li}$    ■ : résolution  ${}^7\text{Li}$    ■ : résolution  ${}^6\text{Li}$  et  ${}^7\text{Li}$

- Solution  ${}^6\text{Li}$  pour stau léger
- Solution  ${}^7\text{Li}$  dans des régions typique du neutralino :

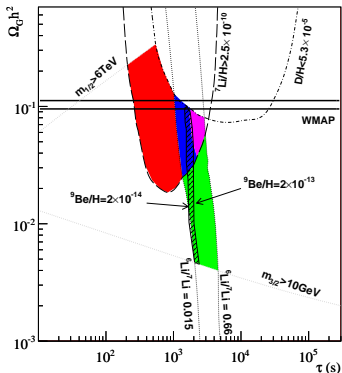
bulk   coannihilation   focus point   funnel



- 1 Nucléosynthèse primordiale
  - Nucléosynthèse primordiale standard
  - Particule relique instable
- 2 Matière Noire
- 3 Supersymétrie
  - Extension du Modèle Standard
  - Transmission de la brisure
- 4 Étude de la NLSP
  - Stau NLSP
  - Neutralino NLSP
  - Résultats BBN
- 5 **Densité relique du gravitino**
  - Production non-thermique
  - Production thermique
  - Résultats matière noire
- 6 Conclusion

## Production par désintégration de la NLSP

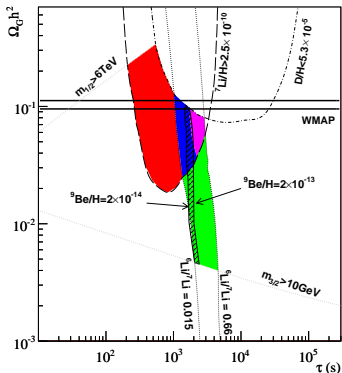
$$\Omega_{3/2}^{\text{NTP}} h^2 = \frac{m_{3/2}}{m_{\text{NLSP}}} \Omega_{\text{NLSP}} h^2$$



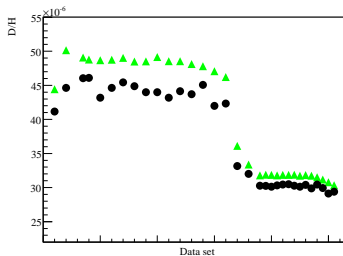
Possibilité de résoudre les problèmes du lithium et la densité relic de matière noire simultanément.

## Production par désintégration de la NLSP

$$\Omega_{3/2}^{\text{NTP}} h^2 = \frac{m_{3/2}}{m_{\text{NLSP}}} \Omega_{\text{NLSP}} h^2$$

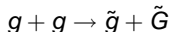


## Effet du calcul de l'énergie hadronique sur l'abondance de deutérium



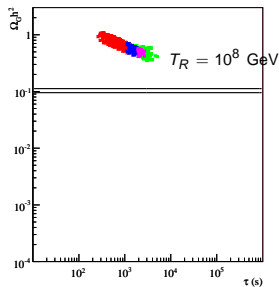
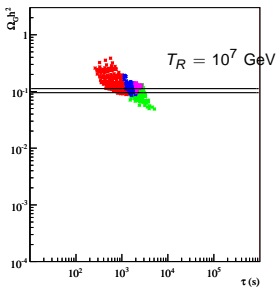
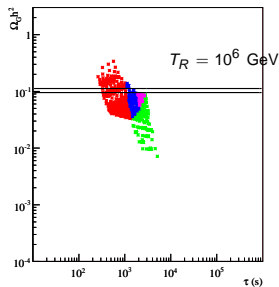
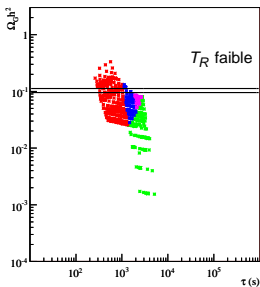
Possibilité de résoudre les problèmes du lithium et la densité relic de matière noire simultanément.

- Suite à l'inflation, une période de réchauffage
- Processus de diffusion avec émission d'un gravitino
- Exemple de processus :



- Densité relique de gravitino :

$$\Omega_{3/2}^{\text{TP}} h^2 \simeq 0.32 \left( \frac{10 \text{ GeV}}{m_{3/2}} \right) \left( \frac{m_{1/2}}{1 \text{ TeV}} \right)^2 \left( \frac{T_R}{10^8 \text{ GeV}} \right)$$



- Deux problèmes cosmologiques : matière noire et nucléosynthèse primordiale
  - Solutions dans le cadre de la supersymétrie
  - Gravitino et stau ou neutralino
- 
- Etude dans le cadre de modèles spécifiques CMSSM et GMSB : spectres réels avec  $\tilde{\tau}_1$  ou  $\chi$  NLSP
  - Calcul de largeur de désintégration à 3 et 4 corps de la NLSP
  - Calcul de l'énergie hadronique par différentes méthodes
  - Densité relique de la NLSP
  - Densité relique du gravitino : contribution thermique et non-thermique

Gravitino	NLSP	${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}$	$\Omega_{\text{DM}}h^2$	collisionneurs
léger	stau	X	✓	X	✓
	neutralino	✓	X	X	✓
lourd	stau	✓	✓	✓	X
	neutralino	X	X	X	✓