10 Aprile 2014 IFAE, GSSI & LNGS, l'Aquila

# Limiti Indipendenti dai modelli sulla Ricerca Diretta di Materia Oscura





basato su: P.Panci, Review in Adv.High Energy.Phys. [arXiv: 1402.1507]

M.Cirelli, E.Del Nobile, P.Panci JCAP **1310** (2013), **019**, [arXiv: 1307.5955]

## Ricerca Diretta: Overview

La rivelazione diretta di MO ha lo scopo di misurare i rinculi nucleari indotti da:



- scattering elastico:  $\chi + \mathcal{N}(A, Z)_{\text{rest}} \rightarrow \chi + \mathcal{N}(A, Z)_{\text{recoil}}$
- scattering inelastico:  $\chi + \mathcal{N}(A, Z)_{\text{rest}} \rightarrow \chi' + \mathcal{N}(A, Z)_{\text{recoil}}$

I segnali di MO sono dei fenomeni molto rari (conteggi minori di 1 cpd/kg/keV)



### Ricerca Diretta: Overview

Velocità locale della MO  $v_0 \sim 10^{-3}c \implies$  le collisioni tra  $\chi \& N$ avvengono in un regime profondamente non relativistico



**Ricerca Diretta: Overview** Velocità locale della MO  $v_0 \sim 10^{-3}c$   $\Rightarrow$  le collisioni tra  $\chi \& N$ avvengono in un regime profondamente non relativistico



#### Rate differenziale teorico dei rinculi nucleari in un dato rivelatore



$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}E_{\mathrm{R}}}(v, E_{\mathrm{R}}) = \frac{1}{32\pi} \frac{1}{m_{\chi}^2 m_{\mathcal{N}}} \frac{1}{v^2} \frac{|\mathcal{M}_{\mathcal{N}}|^2}{|\mathcal{M}_{\mathcal{N}}|^2} \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Elemento di Matrice (EM)}\\ \text{al livello del Nucleo} \end{array}$$

 $v \ll c \Rightarrow$  Il framework della meccanica quantistica Relativistica non è appropriato

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}E_{\mathrm{R}}}(v, E_{\mathrm{R}}) = \frac{1}{32\pi} \frac{1}{m_{\chi}^2 m_{\mathcal{N}}} \frac{1}{v^2} \frac{|\mathcal{M}_{\mathcal{N}}|^2}{|\mathcal{M}_{\mathcal{N}}|^2} \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Elemento di Matrice (EM)} \\ \text{al livello del Nucleo} \end{array}$$

 $v \ll c \quad \Rightarrow$  Il framework della meccanica quantistica Relativistica non è appropriato

Framework degli Operatori non-relativistici

#### NR d.o.f. per lo scattering elastico

- $\vec{v}$ : Velocità relativa
- $ec{q}$  : Momento trasferito
- $\vec{s}_N$  : spin del nucleone (N = (p, n))
- $ec{s}_\chi$  : spin della MO

L'EM a livello del nucleone può esser costruito come combinazioni Galileane dei d.o.f.

$$|\mathcal{M}_N| = \sum_{i=1}^{12} \mathbf{c}_i^N(\lambda, m_\chi) \mathcal{O}_i^{\mathrm{NR}}$$

funzioni dei parametri liberi di una data teoria (e.g. accoppiamenti, masse dei mediatori, etc..), espressi in termini di Operatori NR

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}E_{\mathrm{R}}}(v, E_{\mathrm{R}}) = \frac{1}{32\pi} \frac{1}{m_{\chi}^2 m_{\mathcal{N}}} \frac{1}{v^2} \frac{|\mathcal{M}_{\mathcal{N}}|^2}{|\mathcal{M}_{\mathcal{N}}|^2} \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Elemento di Matrice (EM)} \\ \text{al livello del Nucleo} \end{array}$$

⇒ Il framework della meccanica quantistica Relativistica non è appropriato  $v \ll c$ 

Framework degli Operatori non-relativistici

#### NR d.o.f. per lo scattering elastico

 $\vec{v}$ : Velocità relativa

 $\mathrm{d}\sigma$ 

- $\vec{q}$ : Momento trasferito
- $\vec{s}_N$ : spin del nucleone (N = (p, n))
- $\vec{s}_{\chi}$  : spin della MO

L'EM a livello del nucleone può esser costruito come combinazioni Galileane dei d.o.f.

$$|\mathcal{M}_N| = \sum_{i=1}^{12} \mathbf{c}_i^N(\lambda, m_{\chi}) \mathcal{O}_i^{\mathrm{NR}}$$

funzioni dei parametri liberi di una data teoria (e.g. accoppiamenti, masse dei mediatori, etc..), espressi in termini di Operatori NR

Interazione di contatto ( $q \ll \Lambda$ )  $\mathcal{O}_1^{\mathrm{NR}} = \mathbb{1}$ ,  $\mathcal{O}_3^{\mathrm{NR}} = i \, \vec{s}_N \cdot (\vec{q} \times \vec{v}^{\perp}) \,, \quad \mathcal{O}_4^{\mathrm{NR}} = \vec{s}_{\chi} \cdot \vec{s}_N \,,$  $\mathcal{O}_5^{\mathrm{NR}} = i \, \vec{s}_{\chi} \cdot (\vec{q} \times \vec{v}^{\perp}) \,, \quad \mathcal{O}_6^{\mathrm{NR}} = (\vec{s}_{\chi} \cdot \vec{q}) (\vec{s}_N \cdot \vec{q}) \,,$  $\mathcal{O}_7^{\mathrm{NR}} = \vec{s}_N \cdot \vec{v}^{\perp} , \qquad \qquad \mathcal{O}_8^{\mathrm{NR}} = \vec{s}_{\chi} \cdot \vec{v}^{\perp} ,$  $\mathcal{O}_9^{\mathrm{NR}} = i \, \vec{s}_{\chi} \cdot (\vec{s}_N \times \vec{q}) , \quad \mathcal{O}_{10}^{\mathrm{NR}} = i \, \vec{s}_N \cdot \vec{q} ,$  $\mathcal{O}_{11}^{\mathrm{NR}} = i \, \vec{s}_{\gamma} \cdot \vec{q} \,, \qquad \qquad \mathcal{O}_{12}^{\mathrm{NR}} = \vec{v}^{\perp} \cdot (\vec{s}_{\gamma} \times \vec{s}_{N}) \,.$ 

Interazione a lungo raggio ( $q \gg \Lambda$ )

$$\begin{split} \mathfrak{O}_{1}^{\mathrm{lr}} &= \frac{1}{q^{2}} \, \mathfrak{O}_{1}^{\mathrm{NR}} \,, \qquad \mathfrak{O}_{5}^{\mathrm{lr}} = \frac{1}{q^{2}} \, \mathfrak{O}_{5}^{\mathrm{NR}} \,, \\ \mathfrak{O}_{6}^{\mathrm{lr}} &= \frac{1}{q^{2}} \, \mathfrak{O}_{6}^{\mathrm{NR}} \,, \qquad \mathfrak{O}_{11}^{\mathrm{lr}} = \frac{1}{q^{2}} \, \mathfrak{O}_{11}^{\mathrm{NR}} \,. \end{split}$$

#### Il Nucleo non è puntiforme

Ci sono diverse Risposte Nucleari per ciascuna coppia di nucleoni & e ciascuna coppia di Operatori NR

 $|\mathcal{M}_{\mathcal{N}}|^{2} = \frac{m_{\mathcal{N}}^{2}}{m_{N}^{2}} \sum_{i,j=1}^{12} \sum_{N,N'=p,n} c_{i}^{N} c_{j}^{N'} F_{i,j}^{(N,N)}$ pairs of NR pairs of Nuclear response operators nucleons of the target nuclei

#### Risposte Nucleari per alcuni nuclei rilevanti nella Ricerca Diretta:



"The Effective Field Theory of Dark Matter Direct Detection", JCAP 1302 (2013) 004

$$\frac{\mathrm{d}R_{\mathcal{N}}}{\mathrm{d}E_{\mathrm{R}}} = N_{\mathcal{N}} \frac{\rho_{\odot}}{m_{\chi}} \frac{1}{32\pi} \frac{m_{\mathcal{N}}}{m_{\chi}^2 m_N^2} \sum_{i,j=1}^{12} \sum_{N,N'=p,n} \mathfrak{c}_i^N \mathfrak{c}_j^{N'} \int_{v_{\min}(E_{\mathrm{R}})}^{v_{\mathrm{esc}}} \mathrm{d}^3 v \frac{1}{v} f_{\oplus}(v) F_{i,j}^{(N,N')}(v,q^2)$$



#### Comparazione con i dati Sperimentali



tieni in considerazione della risposta e della risoluzione energetica del rivelatore

exposure

corre su le diverse specie nucleari (e.g. DAMA e CRESST sono rivelatori multi-target) quenching factor: tiene in considerazione il rilascio parziale dell'energia



#### Comparazione con i dati Sperimentali



tieni in considerazione della risposta e della risoluzione energetica del rivelatore

exposure

corre su le diverse specie nucleari (e.g. DAMA e CRESST sono rivelatori multi-target) quenching factor: tiene in considerazione il rilascio parziale dell'energia







## Limiti Indipendenti dal Modello



una volta calcolati tutti i fattori di forma integrati, si può semplicemente dedurre il numero degli eventi per qualsiasi interazione, la quale fisica particellare è incapsulata nei coefficienti  $c_i^N$ 

## Limiti Indipendenti dal Modello



una volta calcolati tutti i fattori di forma integrati, si può semplicemente dedurre il numero degli eventi per qualsiasi interazione, la quale fisica particellare è incapsulata nei coefficienti  $\mathfrak{c}_i^N$ 





Per esempio i limiti dipendenti dal modello presentati dalle collaborazione sperimentali potranno esser applicati anche ad altri tipi di modello

### Interazione di Prova



### Interazione di Prova



Determinazione del valore massimo del parametro  $\lambda_{\rm B}$  permesso dai dati exp.

 $\begin{array}{l} \mbox{Test Statistico (TS): Likelihood Ratio} \\ \mbox{TS}(\lambda_{\rm B},m_{\chi}) = -2\ln\left(\mathcal{L}(\vec{N}^{\rm obs} \mid \lambda_{\rm B})/\mathcal{L}_{\rm bkg}\right) \\ \mbox{likelihood per ottenere il} & \qquad & \searrow \mbox{bkg.} \\ \mbox{set dei dati osservati} & \qquad & \mbox{likelihood} \\ \mbox{per ciascun valore della massa } m_{\chi}, \mbox{il limite minimo} \\ \mbox{al 90% CL può esser ottenuto dalla relazione:} \\ \mbox{TS}(\lambda_{\rm B},m_{\chi}) = \chi^2_{90\% \, \rm CL} \simeq 2.71 \end{array}$ 

### Interazione di Prova



 $10^{-7}$ 

10

DM Mass

 $10^{2}$ 

 $10^{3}$ 

 $m_{\chi}$  [GeV]

 $10^{4}$ 

Le funzioni TS che permettono agli utenti di derivare il limite λ<sup>CL</sup><sub>B</sub> al CL desiderato possono esser scaricate da: <u>http://www.marcocirelli.net/NROpsDD.html</u>

## Funzioni di "scaling"

Per qualsiasi modello i limiti devono  
esser disegnati allo stesso CL:  
$$TS(\lambda, m_{\chi}) = TS(\lambda_B, m_{\chi})$$
  
Per gli Exp. con risultati nulli si ha:  
 $\sum_k N_k^{th}(\lambda, m_{\chi}) = \sum_k N_{k,B}^{th}(\lambda_B, m_{\chi})$ 

$$N_k^{\rm th}(\lambda, m_{\chi}) = \sum_k N_{k,\rm B}^{\rm th}(\lambda_{\rm B}, m_{\chi})$$

## Funzioni di "scaling"

Per qualsiasi modello i limiti devono  
esser disegnati allo stesso CL:  
$$TS(\lambda, m_{\chi}) = TS(\lambda_B, m_{\chi})$$
  
Per gli Exp. con risultati nulli si ha:  
 $\sum_k N_k^{th}(\lambda, m_{\chi}) = \sum_k N_{k,B}^{th}(\lambda_B, m_{\chi})$ 

$$\begin{split} & \tilde{\mathcal{Y}}_{i,j}^{12} \sum_{\substack{N,N'=p,n \\ \text{Parte dipendente dal Modello BSM \\ \tilde{\mathcal{Y}}_{i,j}^{(N,N')}(m_{\chi})} = \lambda_{\mathrm{B}}^{2} \\ & \tilde{\mathcal{Y}}_{i,j}^{(N,N')}(m_{\chi}) = \frac{\sum_{k} \tilde{\mathcal{F}}_{i,j}^{(N,N')}(m_{\chi},k)}{\sum_{k} \tilde{\mathcal{F}}_{1,1}^{(p,p)}(m_{\chi},k)} \end{split} \begin{array}{l} \text{Funzioni di ``Scaling''} \\ & \text{Fisica Nucleare} \\ & \text{- Astrofisica} \\ & \text{- Dettagli Exp.} \end{split}$$

## Funzioni di "scaling"

Per qualsiasi modello i limiti devono  
esser disegnati allo stesso CL:  
$$TS(\lambda, m_{\chi}) = TS(\lambda_B, m_{\chi})$$
  
Per gli Exp. con risultati nulli si ha:  
 $\sum_k N_k^{th}(\lambda, m_{\chi}) = \sum_k N_{k,B}^{th}(\lambda_B, m_{\chi})$ 

$$\begin{split} & \tilde{\mathcal{Y}}_{i,j=1}^{12} \sum_{N,N'=p,n} \mathbf{c}_{i}^{N}(\lambda,m_{\chi}) \mathbf{c}_{j}^{N'}(\lambda,m_{\chi}) \tilde{\mathcal{Y}}_{i,j}^{(N,N')}(m_{\chi}) = \lambda_{\mathrm{B}}^{2} \\ & \text{Parte dipendente dal Modello BSM} \quad \text{Parte indipendente} \\ & \tilde{\mathcal{Y}}_{i,j}^{(N,N')}(m_{\chi}) = \frac{\sum_{k} \tilde{\mathcal{F}}_{i,j}^{(N,N')}(m_{\chi},k)}{\sum_{k} \tilde{\mathcal{F}}_{1,1}^{(p,p)}(m_{\chi},k)} \quad \begin{array}{c} \text{Funzioni di ``Scaling''} \\ & \text{Fisica Nucleare} \\ & \text{- Astrofisica} \\ & \text{- Dettagli Exp.} \\ \end{array}$$

#### http://www.marcocirelli.net/NROpsDD.html



## Esempio: Interazioni SI & SD



$$\sigma_{\rm SI}^p = \frac{\lambda_{\rm SI}^2}{\pi} \mu_{\chi p}^2$$

Sezione d'urto totale SI a livello del nucleone

Lagrangiana effettiva SD a livello del nucleone 
$$\mathcal{L}_{
m SD}^N = \lambda_{
m SD} \cdot ar{\chi} \gamma^\mu \gamma^5 \chi \, ar{N} \gamma_\mu \gamma^5 N$$

$$\sigma_{\mathrm{SD}}^p = 3 \frac{\lambda_{\mathrm{SD}}^2}{\pi} \mu_{\chi p}^2$$

Sezione d'urto totale SD a livello del nucleone





### Conclusioni

Ho descritto un metodo e un set completo di strumenti numerici per derivare i limiti da alcuni esperimenti in Rivelazione diretta in una maniera completamente dal modello BSM

- Il metodo è basato sul formalismo degli operatori NR ("Semplice" Meccanica Quantistica)
- esso incorpora nelle risposte nucleari tutti i necessari ingredienti astrofisica e del rivelatore

#### Tools for model-independent bounds in direct dark matter searches

#### Data and Results from 1307.5955 [hep-ph], JCAP 10 (2013) 019.

If you use the data provided on this site, please cite: M.Cirelli, E.Del Nobile, P.Panci, "Tools for model-independent bounds in direct dark matter searches", arXiv 1307.5955, JCAP 10 (2013) 019.

This is Release 3.0 (April 2014). Log of changes at the bottom of this page.

#### **Test Statistic functions:**

The TS.m file provides the tables of TS for the benchmark case (see the paper for the definition), for the six experiments that we consider (XENON100, CDMS-Ge, COUPP, PICASSO, LUX, SuperCDMS).

#### Rescaling functions:

The <u>Y.m</u> file provides the rescaling functions  $Y_{ii}^{(N,N')}$  and  $Y_{ii}^{lr(N,N')}$  (see the paper for the definition).

#### Sample file:

The Sample.nb notebook shows how to load and use the above numerical products, and gives some examples.

#### Log of changes and releases:

[23 jul 2013] First Release.
[08 oct 2013] Minor changes in the notations in Sample.nb, to match JCAP version. No new release.
[25 nov 2013] New Release: 2.0. Addition of LUX results. This release corresponds to version 3 of <u>1307.5955</u> (with Addendum).
[03 apr 2014] New Release: 3.0. Addition of SuperCDMS results. This release corresponds to version 4 of <u>1307.5955</u> (with two Addenda).

Contact: Eugenio Del Nobile <delnobile@physics.ucla.edu>, Paolo Panci cpanci@iap.fr>

#### http://www.marcocirelli.net/NROpsDD.html

### Conclusioni

Ho descritto un metodo e un set completo di strumenti numerici per derivare i limiti da alcuni esperimenti in Rivelazione diretta in una maniera completamente dal modello BSM

- Il metodo è basato sul formalismo degli operatori NR ("Semplice" Meccanica Quantistica)
- esso incorpora nelle risposte nucleari tutti i necessari ingredienti astrofisica e del rivelatore

#### Tools for model-independent bounds in direct dark matter searches

#### Data and Results from 1307.5955 [hep-ph], JCAP 10 (2013) 019.

If you use the data provided on this site, please cite: M.Cirelli, E.Del Nobile, P.Panci, "Tools for model-independent bounds in direct dark matter searches", arXiv 1307.5955, JCAP 10 (2013) 019.

This is Release 3.0 (April 2014). Log of changes at the bottom of this page.

#### **Test Statistic functions:**

The TS.m file provides the tables of TS for the benchmark case (see the paper for the definition), for the six experiments that we consider (XENON100, CDMS-Ge, COUPP, PICASSO, LUX, SuperCDMS).

#### **Rescaling functions:**

The <u>Y.m</u> file provides the rescaling functions  $Y_{ii}^{(N,N')}$  and  $Y_{ii}^{lr(N,N')}$  (see the paper for the definition).

#### Sample file:

The Sample.nb notebook shows how to load and use the above numerical products, and gives some examples.

#### Log of changes and releases:

[23 jul 2013] First Release.
[08 oct 2013] Minor changes in the notations in Sample.nb, to match JCAP version. No new release.
[25 nov 2013] New Release: 2.0. Addition of LUX results. This release corresponds to version 3 of 1307.5955 (with Addendum).
[03 apr 2014] New Release: 3.0. Addition of SuperCDMS results. This release corresponds to version 4 of 1307.5955 (with two Addenda).

Contact: Eugenio Del Nobile <delnobile@physics.ucla.edu>, Paolo Panci cpanci@iap.fr>

#### http://www.marcocirelli.net/NROpsDD.html