

La materia oscura (parte 1)

Corso di Introduzione all'astrofisica

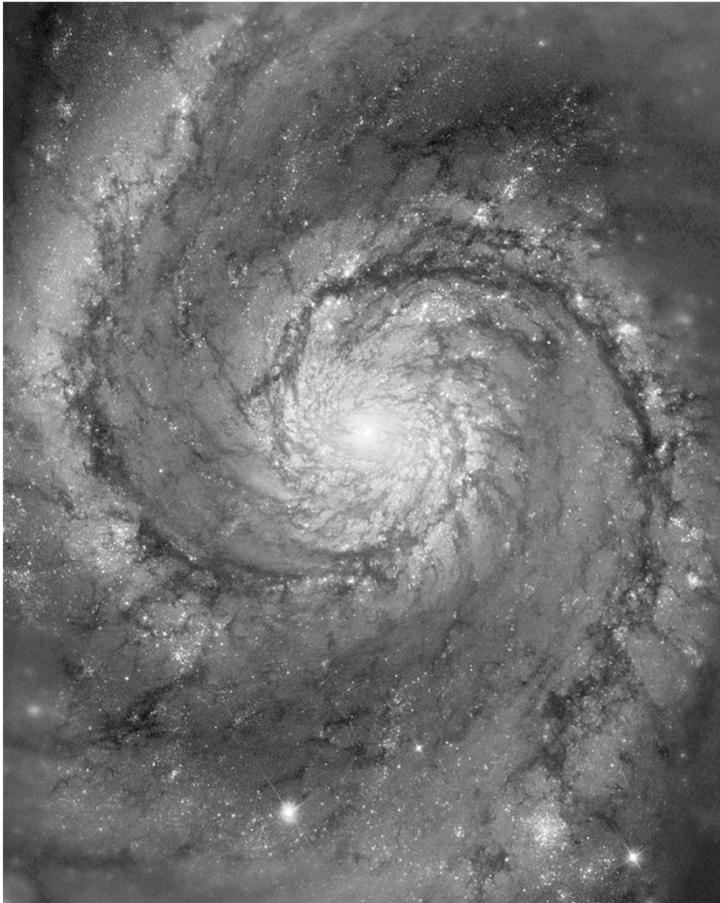
Anno accademico 2019-2020

Barbara Caccianiga

Cos'è la materia oscura?

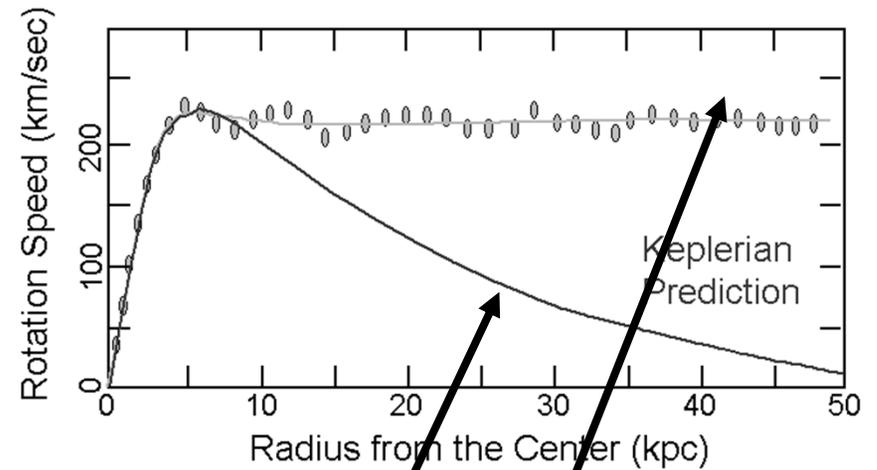
- **Per definizione, materia oscura è tutto ciò che interagisce debolmente con la radiazione elettromagnetica;**
- **Ovvero, la materia oscura non emette e non assorbe luce;**
- **Evidenze della presenza di materia oscura nell'universo sono:**
 - La velocità di rotazione di oggetti alla periferia delle galassie a spirale in funzione della distanza dal centro;
 - Moto delle galassie nei grandi ammassi ;
 - Presenza di getti di gas bollente nei cluster di galassie;
 - Fit ai parametri cosmologici;
- **E se invece si dovesse modificare la teoria della gravità?**
 - **MODified Newtonian Dynamics (MOND)** (proposta da Milgrom): su distanze astrofisiche la gravità potrebbe comportarsi in modo non Newtoniano; non ci sarebbe quindi bisogno di introdurre materia oscura;

Prima evidenza “gravitazionale” di materia oscura: moto delle stelle nelle galassie



Galassia a spirale M51 (Galassia Vortice)

Observed vs. Predicted Keplerian



Dalle leggi di Keplero

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GmM}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Invece tutto va come se

$$M(r) \sim r$$

Seconda evidenza “gravitazionale” di materia oscura: moto delle galassie nei cluster

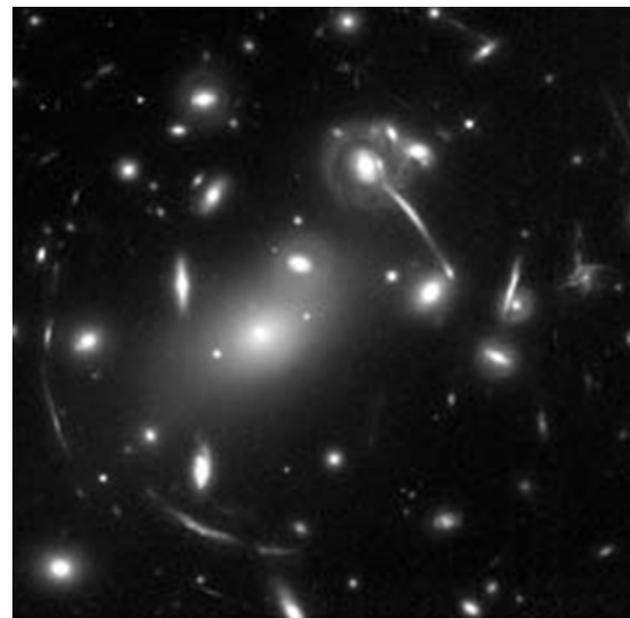
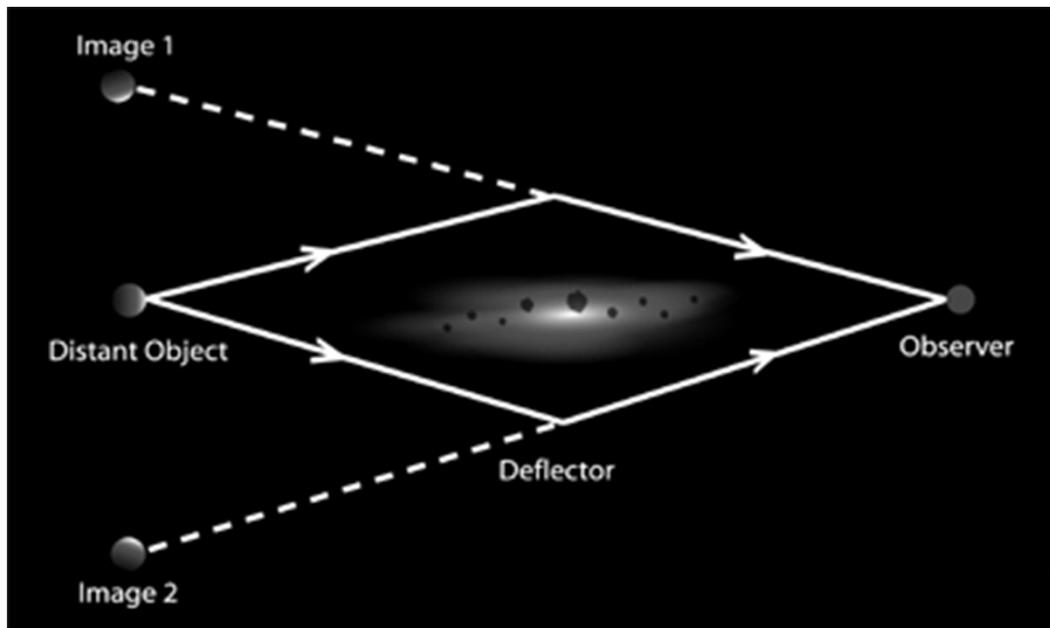
- **Negli anni '30, Zwicky scopre un'anomalia nella velocità delle galassie all'interno dell'ammasso della Chioma di Berenice:**
- **Le galassie si muovono infatti più velocemente di quanto atteso per un sistema gravitazionalmente legato con una massa totale pari a quella “visibile”;**
- **Gia' allora, l'interpretazione dei dati portò ad assumere la presenza di massa invisibile nei cluster;**
- **Queste considerazioni vennero prese sul serio solo molti anni dopo, quando la quantità e la precisione delle osservazioni rese evidente l'esistenza di un “problema di massa mancante”;**

Terza evidenza “gravitazionale” di materia oscura: presenza di nubi di gas nelle galassie e nei cluster

- *Immagine a raggi X presa dal satellite ROSAT sovrapposta ad una fotografia di un gruppo di galassie. L'immagine mostra, in falso colore rosa, una gigantesca nube di gas "caldo" che emette una debole quantità di raggi X. La presenza di questo gas fa supporre una forte attrazione gravitazionale in grado di mantenerlo confinato; la sola massa delle galassie visibili non sarebbe sufficiente. Deve quindi essere materia oscura diffusa fra le galassie di un ammasso.*



Quarta evidenza di materia oscura: lenti gravitazionali



Abell 2218, un cluster di galassie lontano circa 3 miliardi di anni luce, piega la luce dalle galassie retrostanti creando lunghi e deboli archi.

La distorsione osservata puo' essere usata per misurare la massa del cluster "deflettore" e confrontarlo con la sua massa luminosa → ulteriore evidenza di materia oscura;

Evidenza cosmologica di materia oscura:

- La dinamica dell'universo e' descritta dall'equazione della relativita' generale di Einstein con la metrica di Friedmann-Robertson-Walker;
- Se definiamo la densita' critica

$H_0 = \text{cost. di Hubble}$

$$\rho_c = \frac{3 H_0^2}{8\pi G} = 8 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3 \quad \text{e il parametro di densita'}$$

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$$

ρ_c corrisponde a ~ 4 protoni/m³!

- **Dall'equazione di Friedmann segue che:**
 - $\Omega > 1 \rightarrow k > 0$ universo con curvatura positiva;
 - $\Omega = 1 \rightarrow k = 0$ universo piatto;
 - $\Omega < 1 \rightarrow k < 0$ universo con curvatura negativa;
- I risultati sperimentali riguardanti la misura di anisotropie nel fondo cosmico a micro-onde (CMB) mostrano che l'universo e' piatto;
- Cioe' $\Omega = 1$;

Evidenza cosmologica di materia oscura:

- La dinamica dell'universo e' descritta dall'equazione della relativita' generale di Einstein con la metrica di Friedmann-Robertson-Walker;
- Se definiamo la densita' critica

$H_0 = \text{cost. di Hubble}$

$$\rho_c = \frac{3 H_0^2}{8\pi G} = 8 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$$

e il parametro di densita'

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$$

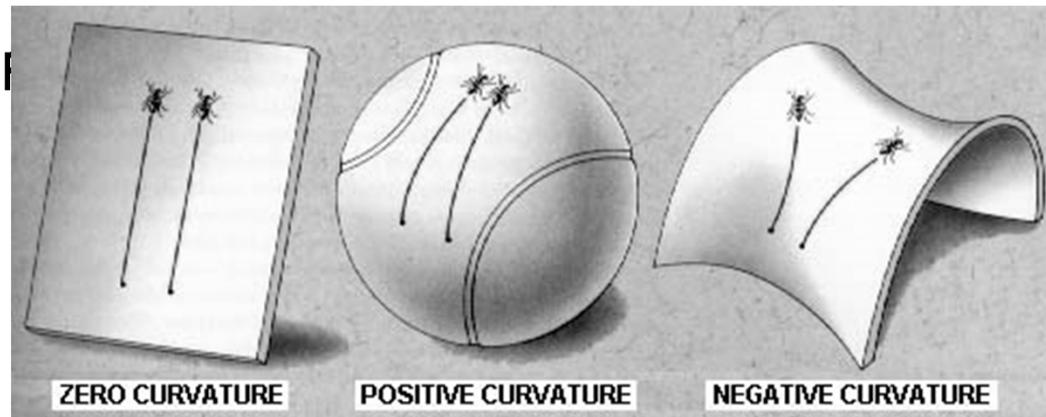
ρ_c corrisponde a ~ 4 protoni/m³!

- Dall'equazione di Friedmann

$$\Omega > 1 \rightarrow k > 0$$

$$\Omega = 1 \rightarrow k = 0$$

$$\Omega < 1 \rightarrow k < 0$$



- I risultati sperimentali riguardanti la misura di anisotropie nel fondo cosmico a micro-onde (CMB) mostrano che l'universo e' piatto;
- Cioe' $\Omega = 1$;

Come e' ripartita la densita' dell'universo?

$$\Omega = 1$$

$\Omega_{\text{visibile}} = 0.003 - 0.01$ (diretta misura di luminosita');
e il resto?

In realta' i risultati sperimentali (provenienti ancora dallo studio del fondo cosmico a microonde, ma non solo) favoriscono la seguente composizione della densita' dell'universo:

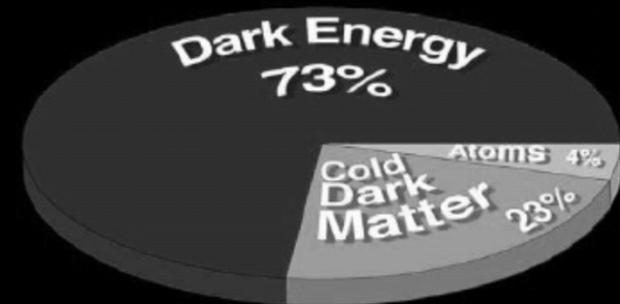
$$\Omega = \Omega_B + \Omega_{\text{DM}} + \Omega_\Lambda ;$$

$\Omega_B = 1\%$ materia barionica visibile+

3% di materia barionica invisibile;

$\Omega_{\text{DM}} = 23\%$ Materia oscura non barionica;

$\Omega_\Lambda = 73\%$ Energia oscura;



Riassumendo

1. La materia “convenzionale” (barionica, cioè composta da protoni e neutroni) costituisce solo il 4% della densità di energia totale dell’universo; solo una piccola parte di questa materia è “visibile”; la rimanente è oscura (dark matter barionica);
2. Il 23% della densità di energia dell’universo è costituito da materia oscura “non convenzionale” di natura e caratteristiche ignote (dark-matter non barionica);
3. Il rimanente 73% dell’energia dell’universo è una energia “oscura” di origine e natura ignota, che ha come effetto quello di fare accelerare l’universo e di renderlo “piatto”.

Nel seguito non ci occuperemo della energia oscura, ma solo della materia oscura con particolare attenzione a quella non barionica

Dark matter e Dark energy

Dark matter and dark energy are not theoretical constructs which were invented by cosmologists because they seemed interesting; observational data have forced us into positing their existence.

Even though they are invisible, both **dark matter and dark energy give rise to a gravitational field; we can feel their effects.**

Dark matter contributes to the total gravitational field of galaxies and clusters, which we measure by observing the velocities of nearby particles, or the deflection of light passing by.

Dark energy is smoothly distributed, but affects the geometry of spacetime itself: it makes distant galaxies appear to accelerate away from us, and it "flattens" the geometry of space, two effects which have been directly observed.

These dark components are exactly the opposite of the "ether" that was popular a century ago: everyone expected ether to exist but nobody could find evidence of it, whereas nobody expected dark matter or dark energy, but we found them despite ourselves.

(Sean Carrol, Un. Of Chicago)

Candidati di Materia Oscura

Barionica: materia ordinaria fatta di protoni e neutroni

Alcuni possibili candidati di materia oscura barionica:

1. Nane Brune o pianeti tipo Giove
2. Resti di stelle fredde (buchi neri, stelle di neutroni, nane bianche,
3. Buchi neri primordiali (lasciati dopo il Big Bang)

Tutte queste forme di materia oscura barionica sono collettivamente chiamate Massive Compact Halo Objects (MACHOs)

Non barionica: si divide in calda (relativistica) e fredda (non relativistica).

Alcuni possibili candidati di materia oscura fredda:

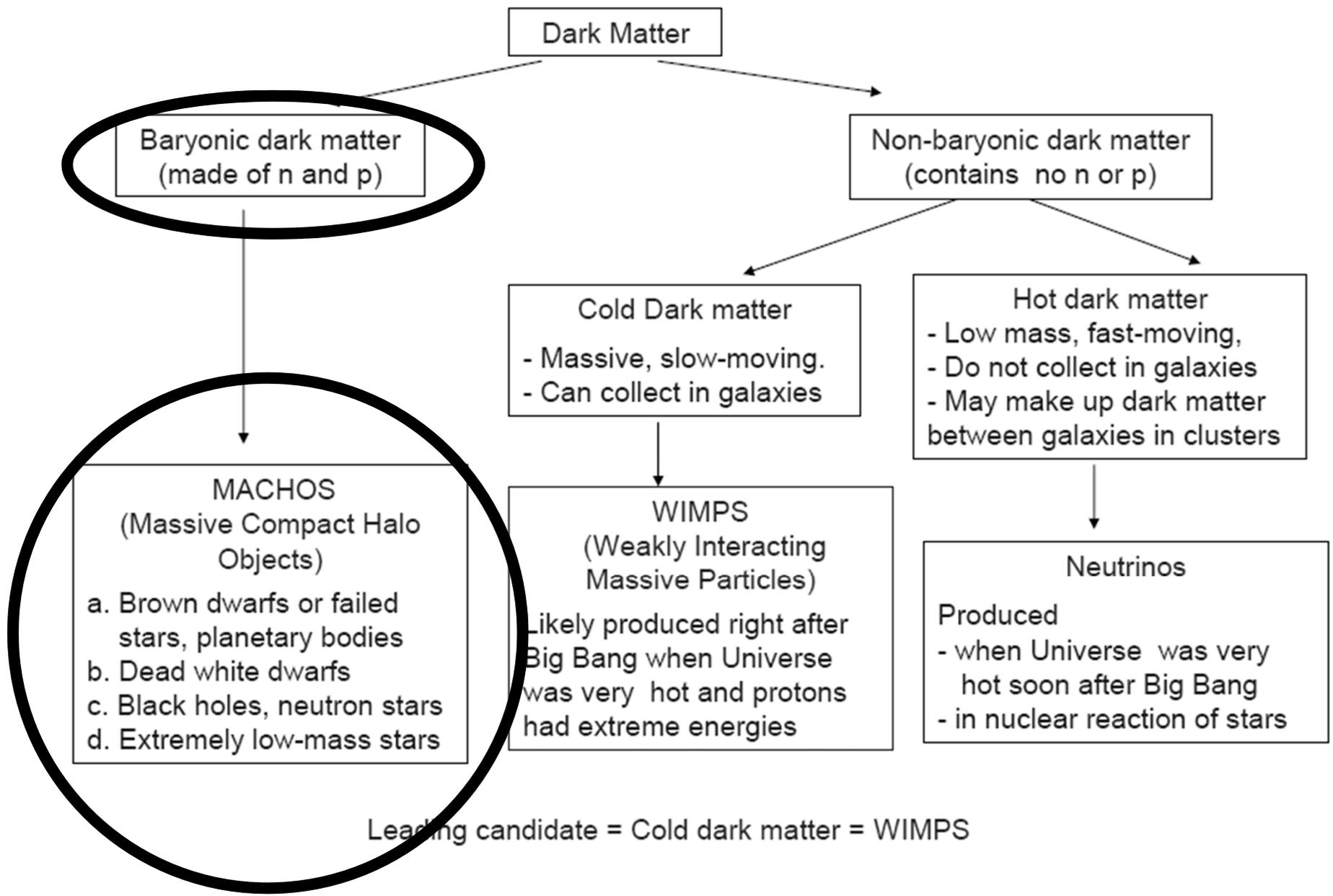
1. WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles);
2. Assioni;

Si muovono a velocità molto inferiori a quella della luce;

Alcuni possibili candidati di materia oscura calda:

1. I neutrini

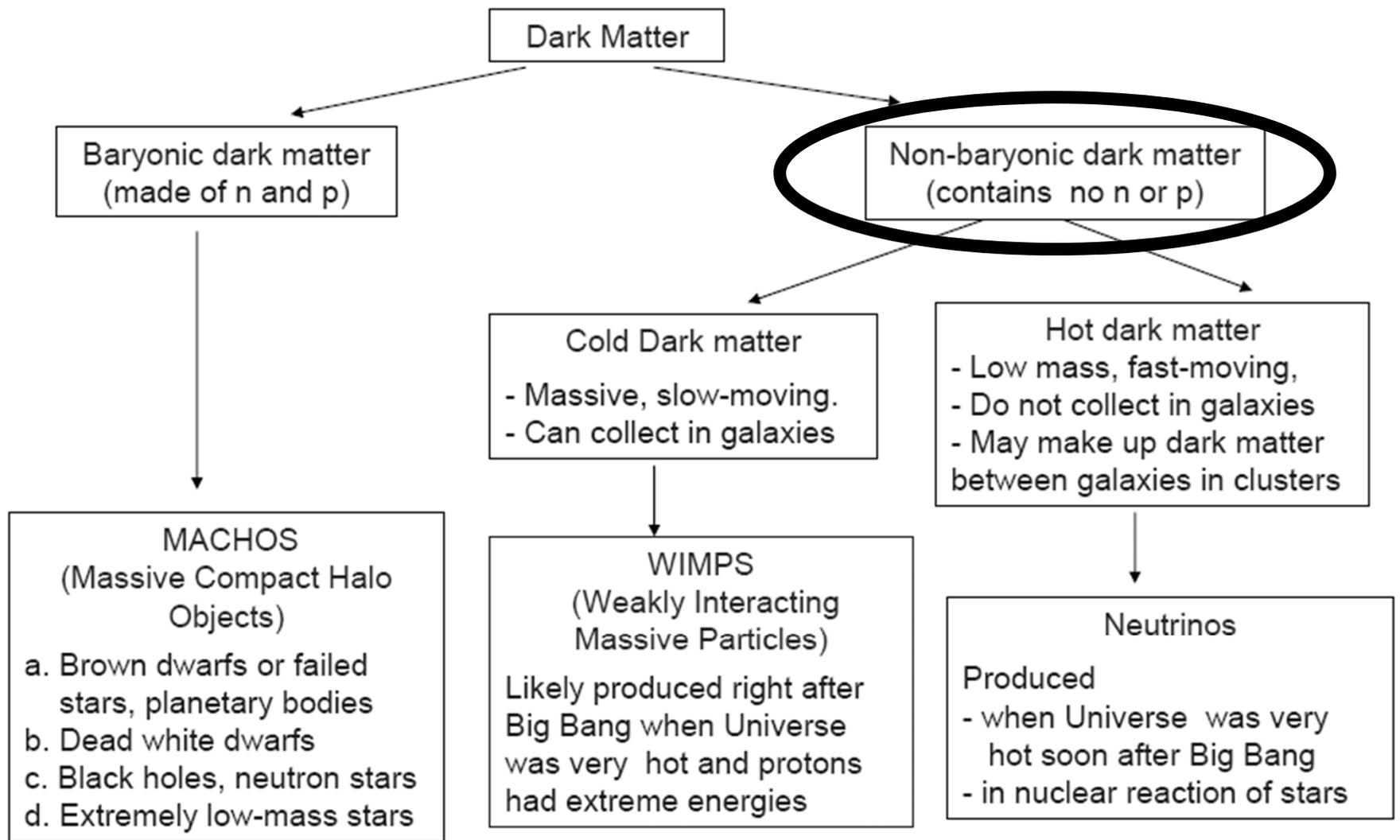
Si muovono a velocità prossime a quelle della luce;



Leading candidate = Cold dark matter = WIMPS

Materia oscura barionica: i Machos

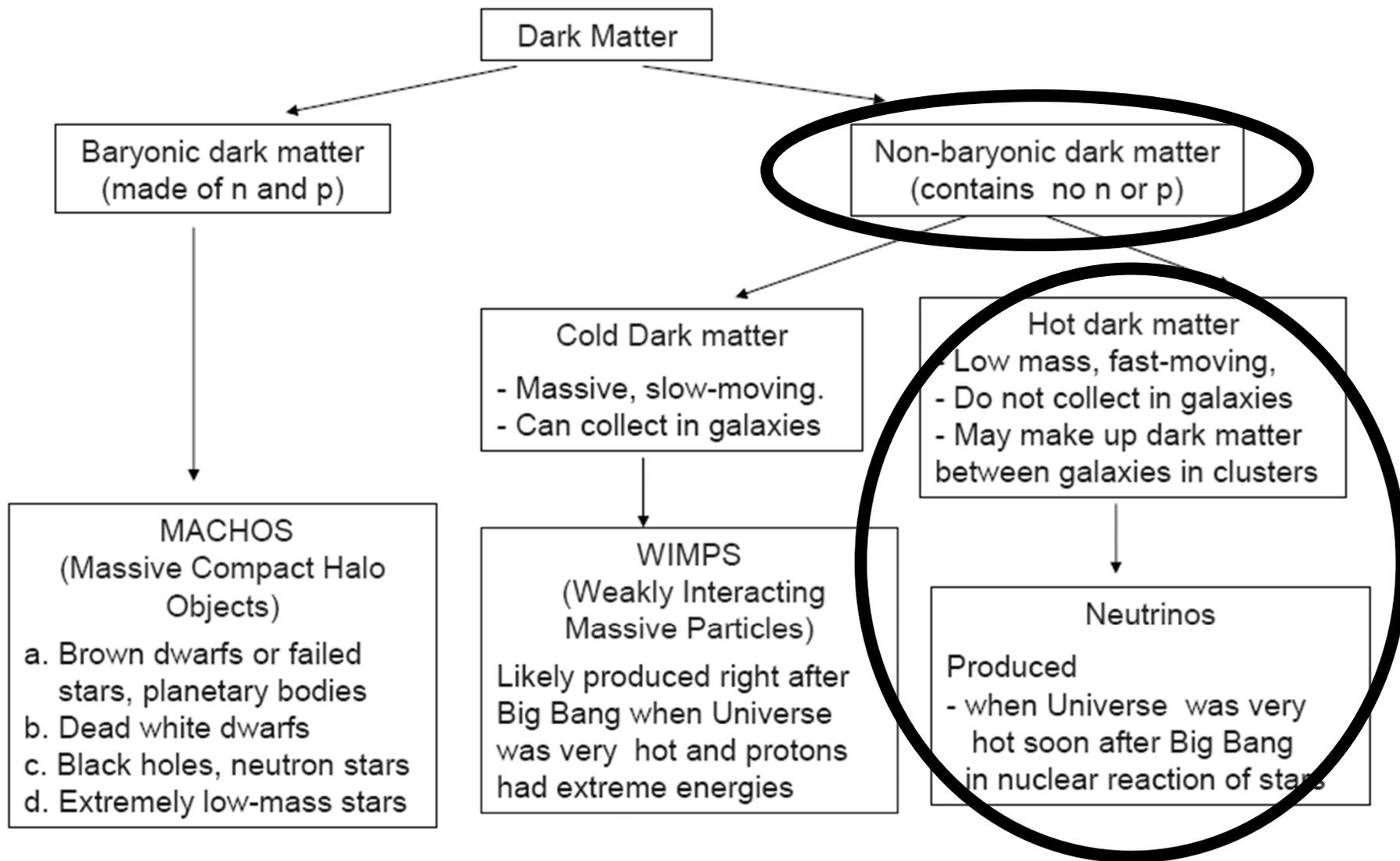
- **Diversi esperimenti (MACHO in Australia, EROS in Cile) hanno effettuato una ricerca sistematica di Massive Compact Halo Objects nella nostra galassia;**
- **La tecnica usata si basa sul cosiddetto fenomeno del “microlensing” gravitazionale;**
- **In pratica, se un MACHO si interpone fra la terra e una stella puo’ causare un apparente aumento di luminosita’ della stella di breve durata (giorni o mesi);**
- **Dal momento che numerosi corpi celesti hanno variazioni piu’ o meno periodiche della loro luminosita’, bisogna fare attenzione a non confonderli con fenomeni di microlensing;**
- **Sono stati osservati diversi candidati MACHOs;**
- **Il numero totale di MACHOs che se ne puo’ dedurre non e’ sufficiente a spiegare la velocita’ di rotazione della nostra galassia;**
- **Questo conferma il fatto che i MACHOs non costituiscono sicuramente la totalita’ della materia oscura dell’universo;**



Leading candidate = Cold dark matter = WIMPS

Materia oscura non barionica: calda o fredda?

- Dato che la materia oscura ha massa, possiede forza di gravità e influenza l'intero scenario della formazione dei primi raggruppamenti di materia;
- Materia oscura "fredda" (che si muove molto più lentamente della luce): tende a raggrupparsi in strutture partendo da piccoli raggruppamenti di stelle (ammassi stellari e piccole galassie) che poi si uniscono per generare le galassie più grandi. A loro volta le galassie si raggruppano negli ammassi e superammassi di galassie i quali vanno a costituire quella struttura altamente frammentata e filamentosa di distribuzione della materia che costituisce l'universo attuale;
- Materia oscura "calda" (che si muove quasi alla velocità della luce): nell'universo primordiale si sarebbero potute formare soltanto le strutture più estese. Gli oggetti "piccoli", quali le galassie e gli ammassi stellari, avrebbero dovuto formarsi in seguito, come conseguenza della frammentazione delle strutture maggiori.
- Nessuno di questi scenari alternativi è completamente soddisfacente: è necessario pensare ad un modello ibrido in cui entrambi i tipi di materia oscura giochino un ruolo $\Omega_{DM} = \Omega_{calda} + \Omega_{fredda}$;
- Si ritiene comunque che il ruolo dominante sia giocato dalla materia oscura fredda



Leading candidate = Cold dark matter = WIMPS

Materia oscura calda: i neutrini

- Ci si aspetta che la densità di neutrini fossili (originati dal Big Bang) nell'universo sia di 300 neutrini/cm³;
- Di conseguenza il contributo a Ω dei neutrini è dato da $\Omega_\nu \sim \Sigma m_{\nu_i}/45 \text{ eV}$;
- Quindi, il contributo di un neutrino di massa $\sim 0.1 \text{ eV}$ sarebbe di $\Omega_\nu \sim 0.002$;
- N.B.: se il neutrino avesse masse $\sim 40 \text{ eV}$ questo implicherebbe $\Omega_\nu \sim 1$! Cosa non possibile per le considerazioni cosmologiche svolte in precedenza!
- Considerazioni cosmologiche, legate alla struttura attuale dell'universo e in particolare alle strutture su larga scala che sono quelle maggiormente influenzate dalla presenza di neutrini, portano a un limite di $\Omega_\nu < 1.5 \%$

Materia oscura calda: i neutrini

- Ci si aspetta che la densità di neutrini fossili (originati dal Big Bang) nell'universo sia di 300 neutrini/cm³;
- Di conseguenza il contributo a Ω dei neutrini è dato da $\Omega_\nu \sim \Sigma m_{\nu i} / 45 \text{ eV}$;
- Quindi, il contributo di $\Omega_\nu \sim 0.002$;
- N.B.: se il neutrino è $\Omega_\nu \sim 1$! Cosa non possibile in precedenza
- Considerazioni cosmologiche dell'universo e in particolare sono quelle maggiori neutrini, portano a

$$\Omega_\nu = \frac{\rho_\nu}{\rho_c} \quad \text{sapendo che:}$$

$$m_\nu (\text{Kg}) = m_\nu (\text{eV}) \cdot \frac{1.6 \times 10^{-19}}{c^2} = m_\nu (\text{eV}) \cdot 1.8 \cdot 10^{-36}$$

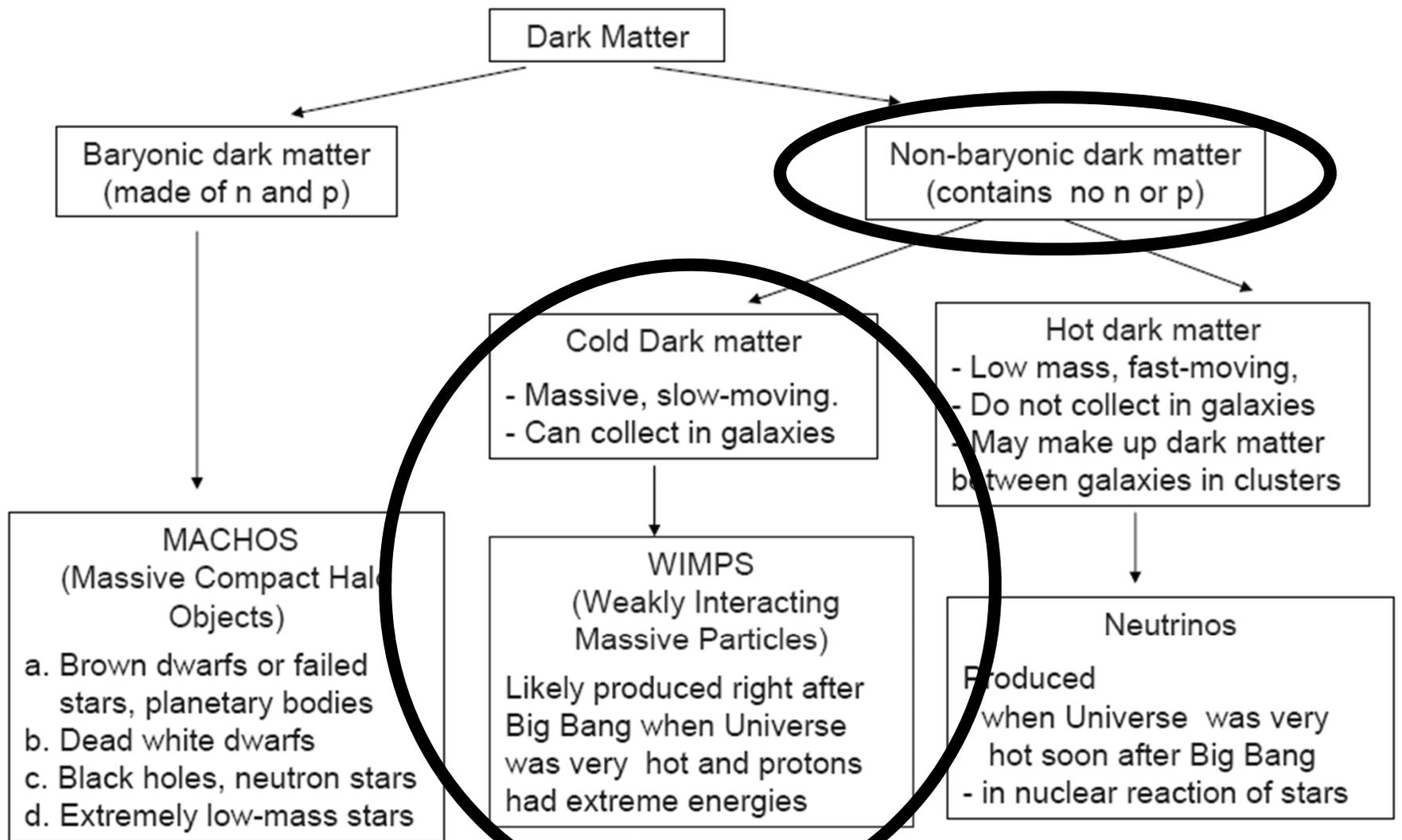
$$m_\nu (\text{g}) = 1.8 \cdot 10^{-33} m_\nu (\text{eV})$$

$$\rho_\nu = N_\nu \cdot m_\nu (\text{eV}) = \frac{300}{3} \cdot 1.8 \cdot 10^{-33} m_\nu (\text{eV}) \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_c = 8 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3$$

$$\Omega_\nu = \frac{m_\nu (\text{eV})}{45} \quad \text{per tutte le famiglie di neutrini}$$

$$\Omega_{\text{neutrini}} = \frac{\Sigma m_\nu (\text{eV})}{45}$$



Leading candidate = Cold dark matter = WIMPS

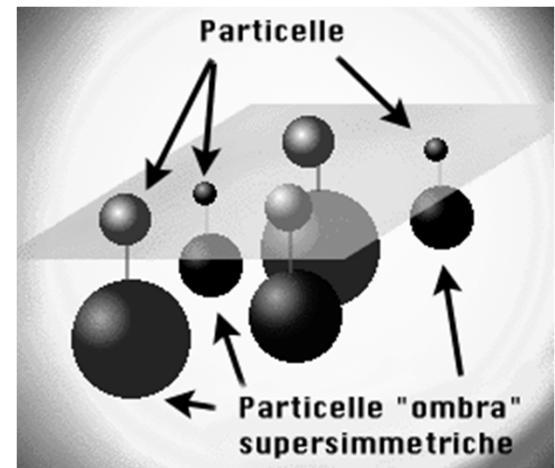
Materia oscura fredda: gli assioni

- Sono particelle introdotte teoricamente per risolvere il problema della violazione di CP prevista dalla QCD anche nelle interazioni forti (e mai osservata sperimentalmente);
- Sono introdotte naturalmente anche in teorie di superstringhe;
- Sono particelle pseudoscalari (spin=0, parità intrinseca=-1), neutre e stabili;
- La teoria prevede che contribuiscano a Ω con $\Omega_a \approx (5 \cdot 10^{-6} \text{ eV} / m_a)^{1.2}$ il che implica che possono dare un contributo rilevante alla materia oscura solo se hanno massa $\sim 10^{-3} - 10^{-5} \text{ eV}$;

La ricerca di assioni ha per ora dato esiti negativi e ha consentito perciò solo di escludere delle regioni nello spazio dei parametri ($g_{A\gamma} - m_A$);

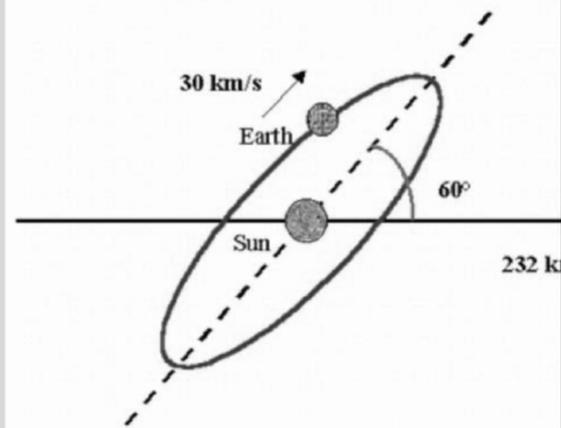
Materia oscura fredda: gli WIMPs

- **WIMP** indica genericamente una particella massiva neutra che interagisce molto debolmente;
- **WIMPs: Weakly Interacting Particles;**
- **Non e' contemplata nell'ambito del Modello Standard delle Interazioni Deboli;**
- **In realta' a seconda del modello teorico che si prende in considerazione, puo' avere proprieta' molto diverse sia in termini di massa, che in termini di modalita' di interazione;**
- **Il range di massa va da pochi GeV a 1 TeV!**
- **I candidati piu' naturali di WIMP vanno cercati nelle estensioni supersimmetriche al Modello Standard delle Interazioni Deboli;**
- **Le teorie supersimmetriche prevedono che ad ogni particella corrisponda una sua "ombra" con spin diverso (se la particella aveva spin semi-intero, la sua ombra ha spin intero e viceversa);**
- **Questo riflette l'idea che a energie sufficientemente alte la distinzione fra bosoni e fermioni scompare;**
- **In quest'ambito il candidato Wimp piu' naturale e' la piu' leggera particella supersimmetrica: il neutralino χ**



La ricerca di WIMPs

- Se gli WIMPs sono i principali costituenti della materia oscura devono essere presenti a scale galattiche per spiegare le curve di rotazione delle galassie a spirale;
- In tal caso, lo spazio intorno alla terra deve essere permeato da un flusso di WIMPs la cui densita' e velocita' puo' essere calcolato;
- Una stima ragionevole (che dipende pero' dai dettagli del modello di alone galattico) e':
 - $\rho_{\text{Wimp}} = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$;
 - $v_{\text{media}} \sim 270 \text{ Km/s}$ (con velocita' massima uguale alla velocita' di fuga dalla galassia $v \sim 650 \text{ Km/s}$)



N.B.: la velocita' apparente e' la composizione della velocita' media degli WIMPs, della velocita' del sistema solare attraverso l'alone galattico $v_0 = 230 \text{ Km/s}$ e della velocita' della terra sulla sua orbita $v_t = 30 \text{ Km/s}$

Come si rivelano gli WIMPs?

- **Metodi indiretti:**

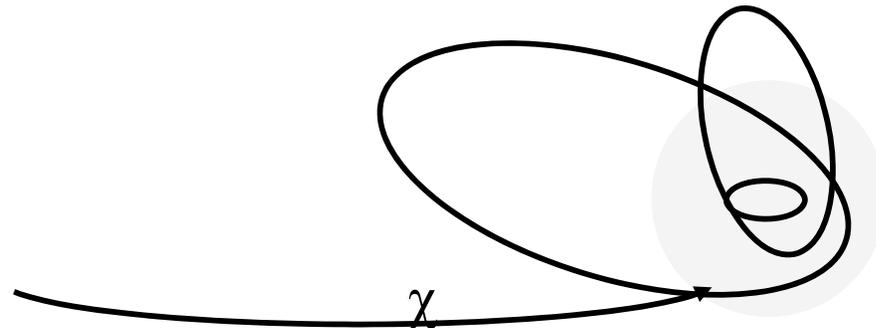
- si basano sull'idea che gli WIMPs possano rimanere intrappolati gravitazionalmente nel sole o nella terra stessa;
- In questa maniera aumenta la loro densità e di conseguenza la probabilità che avvengano le reazioni di annichilazione $\chi + \bar{\chi} \rightarrow W + W$, $\chi + \bar{\chi} \rightarrow Z + Z$, $\chi + \bar{\chi} \rightarrow \mathbf{f} + \mathbf{f}$ dove \mathbf{f} = fermione (ν , leptone, quark);
- Si vanno a rivelare i prodotti di annichilazione;

- **Metodi diretti:**

- Rivelano direttamente gli WIMPs tramite la reazione di scattering su nuclei bersagli;
- Si basano sulla rivelazione del rinculo del nucleo;

Metodi indiretti di rivelazione di WIMPs

- Annichilazione di WIMPs nella terra, nel sole, nel centro della galassia o nell'alone della galassia;
- N.B.: la sezione d'urto di WIMPs e' tanto piccola quanto quella dei neutrini: siccome pero' sono molto piu' lenti e massivi, hanno maggiore probabilita' di rimanere intrappolati per effetto della gravita';



- WIMPs perdono energia per scattering;
- quando $v < v_{fuga}$, vengono catturati;
- All'equilibrio, il numero di catture e di annichilazioni si bilancia e si raggiunge quindi una densita' costante di WIMPs;

Annichilazione degli WIMPs nella terra o nel sole

Tipo di segnale	Esperimenti
Terra, Sole, GC Neutrini $\chi \chi \rightarrow WW, ff$ $W, f \rightarrow \nu X$	SuperK, Baksan, IMB, MACRO AMANDA, ANTARES, Baikal, ...

- In caso di annichilazione di WIMPs all'interno di sole o terra, le uniche particelle in grado di uscire e di venire rivelate sono i neutrini;
- La segnatura sono neutrini di alta energia ($E \sim 10-100$ GeV);
- Si ricorda che i neutrini solari hanno energia ~ 1 MeV!
- Gli esperimenti in grado di osservare questi eventi sono gli stessi predisposti per lo studio dei neutrini cosmici di alta energia (vedi lezioni dedicate);
- In ogni caso, da nessuno di questi esperimenti e' arrivata per ora alcuna evidenza dell'esistenza di WIMPs;

Annichilazione degli WIMPs nell'alone galattico

Tipo di segnale	Esperimenti
Alone della galassia	
e^+ , antiprotone, γ $\chi \chi \rightarrow Z \gamma, \gamma \gamma$	<u>BESS, CAPRICE, AMS, CELESTE,</u> <u>GLAST, VERITAS, MILAGRO,</u> <u>ATIC, PAMELA....</u>

- Nel caso di annichilazione nell'alone della galassia, la segnatura e' data da eccessi di e^+ , anti-protoni e γ nei raggi cosmici;
- Alcuni esperimenti per rivelare γ sono a terra, altri sono su satellite;
- Alcuni esperimenti per rivelare anti-protoni sono su pallone, altri su satellite;
- Anche in questo caso, gli esperimenti sono gli stessi dedicati alla rivelazione di raggi cosmici di alta energia;
- Alcuni esperimenti hanno evidenziato segnali anomali, ma non e' chiaro se sono compatibili con annichilazione di WIMPs nell'alone galattico;