

Eine kleine Zusammenfassung der Effekte und der diversen Kampagnen zur Messung und Deutung

Das Thema Dunkle Materie ist eines der sehr geheimnisvollen Themen der Physik. Viele Mythen, geboren aus dem Wunsch der Menschen heraus das Unerforschliche, das geheimnisvolle, das Mystische zu entdecken schwingen hier mit.

Die Erklärungen dieses Phänomens haben sich bislang der breiten Öffentlichkeit fast entzogen. Das Thema wurde nie so spektakulär im Vergleich zu den kosmologischen Arbeiten beispielsweise von Steven Hawking. Auch wird die Physik, welche dieses Phänomen hervorruft wenig verständlich aufbereitet. Vom Leser wird ein gutes Maß an physikalischen um quantenmechanischem Wissen abverlangt. Deshalb halten sich Mythen hier besonders hartnäckig.

Ich werde versuchen, dieses Thema in hoffentlich verständlicher Art vorzustellen. Nicht immer jedoch komme ich um die physikalischen Begriffe herum. Die Exaktheit der Erklärungen verlangt eben ein gewisses Grundmaß an physikalischem Verständnis. Dieses Thema wird aus zwei völlig verschiedenen Sichtweisen angegangen:

Die Sichtweise oder Arbeitsweise der Experimentalphysik sowie die Sicht- bzw. Arbeitsweise der Theoretischen Physik werde ich versuchen in leicht verständlicher und kurzer Form darzulegen. Die Sichtweise aus der Experimentalphysik ist weitaus leichter verständlich. Hier kann mit einfachen Worten erklärt werden, wie diese Experimente aufgebaut sind, was sie bedeuten oder welche Aussagen daraus folgen. Interessant ist hierbei, daß einerseits die Erkenntnisgestaltung des Wesens der Dunklen Materie recht einleuchtend werden wird und andererseits so ganz nebenbei auch eine der Grundfragen nämlich „was ist Gravitation?“ angesprochen und eine Lösung vorgestellt wird.

Die Sichtweise der Theoretiker ist weitaus schwieriger allgemein verständlich darzustellen. Das werde ich wohl nicht schaffen. Aber ich werde versuchen diese sehr komplizierten Systeme, welche aus dem Gebiet der Elektrodynamik entnommen sind etwas zu verdeutlichen und die Schlussfolgerungen daraus -hoffentlich- verständlich formulieren.

Alles in Allem kann und darf dieses Thema der Kosmologie nicht ohne beide Aspekte angegangen und vorgestellt werden. Die Theoretiker bereiten die Grundlagenerkenntnisse auf, die Experimentalphysiker führen höchst komplexe Experimente durch, deren theoretischer Hintergrund äußerst gründlich durchgearbeitet worden ist. Zur Ehrenrettung der Ingenieurskunst möchte ich sagen, daß ohne die Mitarbeit kundiger und erfahrener Ingenieure die heutigen Hochenergie Experimente nicht durchführbar sind. Auch werden wir der Hilfe der Mathematiker in zunehmendem Maße bedürfen. Die mathematische Kunst ist es physikalische Vorgänge in neuartige Gleichungs- und Operatorsysteme einzubinden, Klassen zu finden, Lösungen auf höchstem Abstraktionsniveau multidimensional zu visualisieren. Und die Experten aus den Informatik Gefilden, die Rechner Experten sind wesentliche Bestandteile dieser Crew. Ohne diese Leute wäre es gar nicht möglich solche Formulierungen zu finden, überhaupt nur annähernd solche Berechnungen durchzuführen. Selbst mit einem -

heutzutage- „normalem“ PC ist die Berechnung von Gleichungssystemen möglich, welche bis vor ca. 10 Jahren selbst auf Großrechnern äußerst schwierig erreichbar waren.

I. *Die Ansicht aus der Experimentalphysik*

Hier verwende ich den Begriff der **SUPER**SYmmetrie in Verbindung mit Fermionen und Bosonen.

Unter Supersymmetrie wird eine Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen verstanden.

Die Abkürzung in der Wissenschaft hierfür heißt "**SUSY**". SUSY wirft einige Fragestellungen und Problemstellungen auf. Dazu zählen:

1. Gibt es einen Zusammenhang zwischen den Fermionen -der Materie- und den Bosonen -der Kräfte- im Standardmodell
2. Gibt es die "große Vereinigung der Kräfte" -GUT (Great Unification Theory)- insbesondere von QCD (Quanten Chromo Dynamic) und schwacher Wechselwirkung
3. Was ist Dunkle Materie und woraus besteht diese
4. Das Problem der Higg-Hierarchie
5. Gravitonen, sind diese in der Theorie mit einzubeziehen

Konzentrieren wir uns auf die Frage nach der Dunklen Materie (DM). Sagen wir DM besteht aus Elementarteilchen. Dann müssen diese elektrisch neutral sowie farblos -keine oder sehr sehr geringe Strahlung- sein und sie dürfen keine Baryonenzahl tragen. Somit kommen nur massive, sehr schwach wechselwirkende sowie stabile Teilchen in Frage. Diese sind nur in einem frühen Stadium der Entwicklung des Universums erzeugt worden. SUSY Teilchen zerfallen nur in Kaskaden -Ausnahme das leichteste SUSY Teilchen LSP (Lightest Supersymmetric Particle)- welches stabil sein muß. In vielen der SUSY Modelle wird dies $\tilde{\chi}_1$ genannt. Der Unterstrich bei $\tilde{\chi}_1$ bezeichnet ein „Majorana“ Teilchen. E. Majorana, ein Physiker, hat Anfang des 20. Jahrhunderts die Diskussion angefangen, daß ein Fermion mit seinem Antiteilchen identisch ist. Damit gibt es nur 2 Freiheitsgrade: Spin up/down. Diese Erkenntnis ist heute weiter gediehen und Majorana Teilchen werden an und für sich nur noch im Zusammenhang mit Neutrinos diskutiert.. Die Neutrinos besitzen 2 Klassen: die links- und die rechtshändigen Teilchen.

Literatur zu Majorana Teilchen und creation phase (CP) Operation: Marek Nowakowski, „Subtleties in CPT-Transformation for majorana Fermions“, Universidad de los Andes, Departamento de Fisica, A.A. 4976, Santafe de Bogota D.C. Colombia and Instituto de Fisica, Universidad de Guanajuato, Apdo Postal E-143, 37150 Leon, Gto, Mexico

Das LSP stellt zunächst einmal keinen aussichtsreichen Kandidaten für die Dunkle Materie dar. In der Literatur findet man 2 Modellarten, für die im Zusammenhang mit der DM viele kosmologische und experimentelle Grenzen bestimmt wurden:

Das allgemeine Modell: MSSM-6 Hängt von 6 zusätzlichen freien Parametern ab

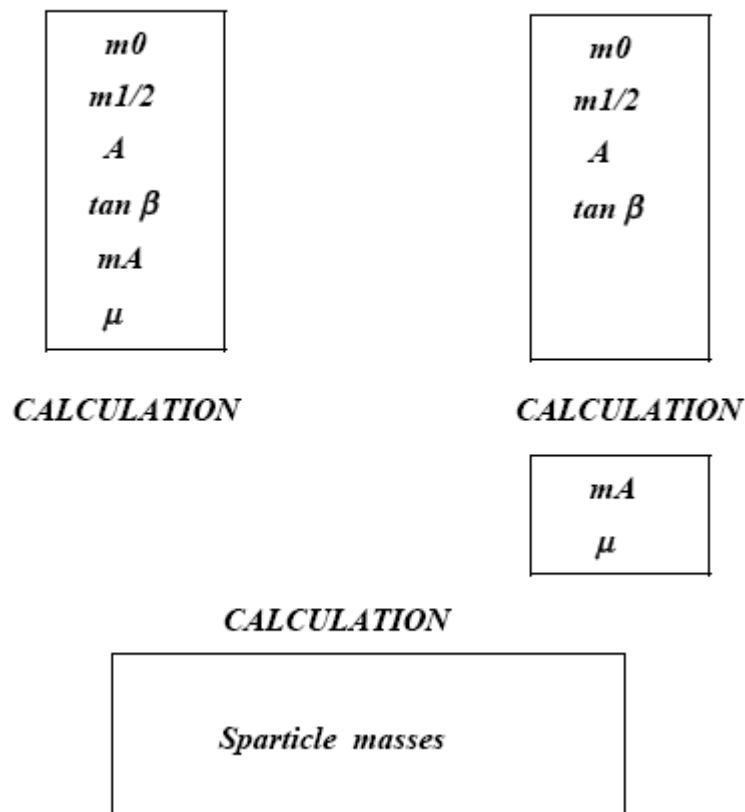
Das alternative Modell: MSSM-4 Hängt von 4 reellen Parametern ab plus dem Vorzeichen

SUSY benutzt das folgende Entwicklungsmodell zur Berechnung der "Sparticle Masses". Sparticle ist ein Kunstwort und heißt eigentlich: "supersymmetrische Teilchen", in Englisch: "supersymmetric particles". Die Rechensequenz, welche unten dargestellt ist, ist von oben nach unten zu sehen. Die beiden oberen Kästen zeigen die Ausgangsparameter, der zweite rechte Kasten ist das berechnete Teilergebnis und unten steht das berechnete Gesamtergebnis. Die Parameter:

m_0	gemeinsame skalare Masse für alle Sfermionen der GUT Energieskala	$\tan \beta$	Verhältnis Higgs-Vakuum Erwartungswert
$m_{1/2}$	gemeinsame Guginio Masse für alle G. Der GUT Skala	m_A	Masse des dritten neutralen Higgs
A	drittes neutrales Higgs	m	Higgsino Massenparameter bei der elektroschwachen Skala

MSSM-6

MSSM-4



MSSM steht für: Minimal SuperSymmetric Extension of the Standard Model

MS steht für: Symmetric Model

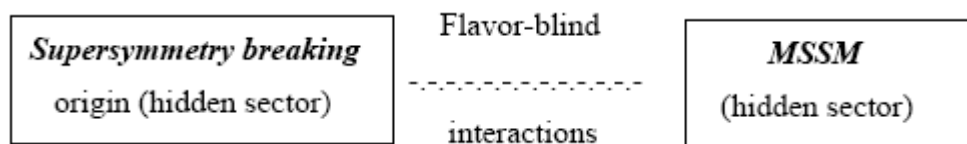
FCNC Flavor Changing Neutral Currents

Die zu Grunde liegenden Annahmen der Modelle MSSM-4 und MSSM-6 sind:

1. keine CPV außer in der SM. FCNC stark unterdrückt
2. große Vereinigung (GUT), Beginn bei ca. 10¹⁶ GeV
3. Universelle Massen für Sfermionen und universelle trilineare Kopplungen bei dieser Energieskala
4. Universelle Gaugino Masse an der GUT-Energieskala und GUT-Massenrelationen zwischen den Gaugino-Massen

Innerhalb der SUSY "Fakultäten" stellt man sich vor, daß unsere Welt aus einem direkt zugänglichen Teil besteht sowie aus einem ominösen "versteckten" Anteil. Der hier genannte "zugängliche" Teil besteht aus den uns bekannten Teilchen und Kräften. Der "ominöse" Teil besteht aus Teilchen und Kräften, welche durch unsere Experimente nicht erreicht werden, uns nicht zugänglich sind. In diesem Bereich allerdings findet die eigentliche Supersymmetrie Brechung statt. Durch die Mediator genannten Teilchen wird diese SUSY-Brechung auf unseren Teil der Welt übertragen.

Viele der Theoretiker malen dazu folgendes Bild:



Aus mehreren Gründen (Stichpunkte FCNC Prozesse, FCNC Graphen, die nicht auftreten dürfen) bevorzugen viele Theoretiker, daß diese **Mediator**-Kraft die **Gravitation** ist. Diese ist "**flavorblind**", kann also nicht zwischen den verschiedenen flavors unterscheiden oder gar eine flavor- Umwandlung erreichen. Interessant ist, daß man zur Anwendung dieser Theorien die SUSY Berechnung in ihrem eigentlich Prozesswerk gar nicht verstehen muß. Es werden "**einfach**" diese neuen Terme in die Lagrangedichten eingetragen. Diese Lagrangedichten sind so allgemein als irgend möglich formuliert. Die SUSY-Randbedingungen müssen natürlich den Eichtransformationen genügen! Damit kann dieser Prozess so dargestellt werden:

$$L = L_{\text{SUSY}} + L_{\text{SOFT}} + L_{\text{POTENTIAL}}$$

L_{SUSY} enthält alle Wechselwirkungssysteme

L_{SOFT} enthält die Terme welche den Gauginos und Sfermionen eine Masse zuordnen sowie die Sfermion-Sfermion-Higgs-Kopplungen. Für Q entsteht dabei ein Quarkduplett der Drehgruppe SU(2) und für L ein Leptondublett, Es wird SOFT oder etwas schärfer „soft-supersymmetry-breaking“ genannt, da dimensionslose Größen -mit Schwerpunkt die Koppelkonstanten- nicht beeinflusst werden. Wichtig wegen der Lösung des Higgs-Hierarchie Problems. Dieses kann nur gelingen, wenn die Kopplungen der Fermionen mit den Sfermionen an das Higgs gleich groß sind.

Innerhalb dieser SUSY Parameter sind die Punkte mit $LSP = \tilde{\chi}_1$ interessant. Folgende Wertebereiche sind zu erwarten:

$m_0 = 0.. 2 \text{ TeV}$
$m_{1/2} = 0.. 2 \text{ TeV}$
$abs(A) = 0.. 2 \text{ TeV}$
$\tan \beta = 1..50$
$m_A = 0.. 2 \text{ TeV}$
$abs(\mu) = 0.. 2 \text{ TeV}$

Bei SUSY Problemlösung der reinen Higgs-Hierarchie reicht der Wertebereich bis 1 TeV aus. Die linke Tabelle bezieht sich auf die SUSY Massenberechnung durch m_0 und $m_{1/2}$ und erlaubt den angegebenen Wertebereich.

Die Problematik diesen Anteil der DM zu erfassen liegt eindeutig darin, daß selbst die leichtesten Teilchen mit Higgs von 112 GeV und Neutralino von 94 GeV viel zu schwer sind um bis heute experimentell nachgewiesen werden zu können.

Die folgende Abbildung zeigt eine Berechnung von Isasugura:

```

*****
*
*  ISAJET      V7.67    28-APR-2003 19:26:11 *
*
*****

Minimal supergravity (mSUGRA) model:

M_0, M_(1/2), A_0, tan(beta), sgn(mu), M_t =
  57.000   250.000   0.000   10.000   1.0   175.000

ISASUGRA unification:
M_GUT      = 0.228E+17   g_GUT      = -0.715   alpha_GUT = 0.
1/alpha_em = 127.81     sin**2(thetaw) = 0.2309   a_s^DRB   =
M_1        = 99.32      M_2        = 192.14   M_3        =
mu (Q)     = 338.65

ISAJET masses (with signs):
M(GL)      = 611.26
M(UL)      = 557.67   M(UR)      = 541.18   M(DL)      = 563.67   M(DR)
M(B1)      = 513.85   M(B2)      = 534.73   M(T1)      = 412.02   M(T2)
M(SN)      = 167.17   M(EL)      = 187.92   M(ER)      = 117.33
M(NTAU)    = 166.62   M(TAU1)    = 108.92   M(TAU2)    = 191.06
M(Z1)      = -94.97   M(Z2)      = -180.08   M(Z3)      = 345.36   M(Z4)
M(W1)      = -178.17   M(W2)      = -366.19
M(HL)      = 112.89   M(HH)      = 373.48   M(HA)      = 373.11   M(H+)

NEUTRALINO MASSES (SIGNED) = -94.970 -180.075 345.361 -365.

EIGENVECTOR 1      = -H_u      -H_d      -W3      -B
                   = 0.05639 -0.14999 -0.05690 0.98544
EIGENVECTOR 2      = 0.16834 -0.28477 -0.93760 -0.10711
EIGENVECTOR 3      = -0.71045 -0.69533 0.09048 -0.05996
EIGENVECTOR 4      = 0.68099 -0.64260 0.33087 -0.11767

CHARGINO MASSES (SIGNED) = -178.171 -366.188

```

Die folgende Abbildung zeigt einen Fit an Isasuguras Werte. Diese Ergebnisse sind gültig für $\tan \beta < 40^\circ$, die Ungenauigkeit beträgt nur ein paar Prozent.

a) $\mu > 0$

$$m_{\mu}^2 = (157 \text{ GeV})^2 + 1.34 m_{1/2}^2 + 2.28 \frac{m_0^2}{\tan^2 \beta} + 3.80 \frac{m_{1/2}^2}{\tan^2 \beta}$$

$$m_A^2 = (137 \text{ GeV})^2 + 0.78 m_0^2 + 1.48 m_{1/2}^2 + 9.34 \frac{m_0^2}{\tan^2 \beta} + 14.7 \frac{m_{1/2}^2}{\tan^2 \beta}$$

b) $\mu < 0$

$$m_{\mu}^2 = (157 \text{ GeV})^2 + 1.34 m_{1/2}^2 + 2.39 \frac{m_0^2}{\tan^2 \beta} + 4.10 \frac{m_{1/2}^2}{\tan^2 \beta}$$

$$m_A^2 = (120 \text{ GeV})^2 + 0.76 m_0^2 + 1.41 m_{1/2}^2 + 10.3 \frac{m_0^2}{\tan^2 \beta} + 17.4 \frac{m_{1/2}^2}{\tan^2 \beta}$$

BEISPIEL:

$$m_0 = 57 \text{ GeV}, m_{1/2} = 250 \text{ GeV}, \tan\beta = 10, A = 0, \mu > 0$$

Die Näherungsformeln ergeben:

$$\mu = 333 \text{ (339) GeV}$$

$$m_A = 351 \text{ (373) GeV}$$

In Klammern sind zum Vergleich die exakten Werte (Isasugra) aufgeführt.

Ab hier werde ich mich auf das Modell MSSM-4 beschränken.

Beweise für die Supersymmetrie oder die Beschränkungen des Parameterraums können prinzipiell von folgenden Experimenten und Beobachtungen erbracht werden:

1. Dichte der Dunklen Materie ---- Kosmologie bezogen
2. Suche nach WIMP Weakly Interacting Massive Particles
3. Strahlungskorrekturen ----- indirekte SUSY Einflüsse
4. Suche nach SUSY Teilchen mit Höchstenergie-Beschleunigern

Das Vorgehen:

Der SUSY Parameterraum wird abgetastet (scanning) und an jedem Punkt wird untersucht, ob die phänomenologischen Konsequenzen mit dem durchgeführten Experiment verträglich sind oder etwa nicht.

1. *Die Dunkle Materie oder der Kosmologie Aspekt*

Im Frühstadium des Universums wurden Neutralinos paarweise erzeugt und auch wiederum vernichtet. Dabei stellte sich ein Gleichgewicht ein, so daß die Teilchendichte etwa der Größenordnung der Photonen entsprach. Im weiteren Fortschritt des Alterungsprozesses vom Universum kühlt sich das System des Universums auf Grund seiner Expansion immer weiter ab. Das bedingt der Satz von der Erhaltung der Energie. In dieser Konsequenz werden die Erzeugungsprozesse der Neutralinos immer unwahrscheinlicher bis bei einer gewissen Proportionalität der Temperatur zur Neutralino-Masse. Ab dem Zeitpunkt, wo sich eine lineare Abhängigkeit Temperatur proportional zur Neutralino-Masse einstellt, entkoppeln diese Neutralinos. Ihre Dichte ist anfänglich groß und dann annihilieren sie in großer Anzahl. Bei abnehmender Dichte wird die mittlere freie Weglänge so groß, daß hierbei keine weiteren Wechselwirkungen mehr stattfinden können. Dieser Effekt wird auch "freeze-out" genannt.

Zu dieser Zeit übrigens gibt der Hubble-Parameter H die Expansionsgeschwindigkeit des Universums und damit dessen Dichteabnahme an!

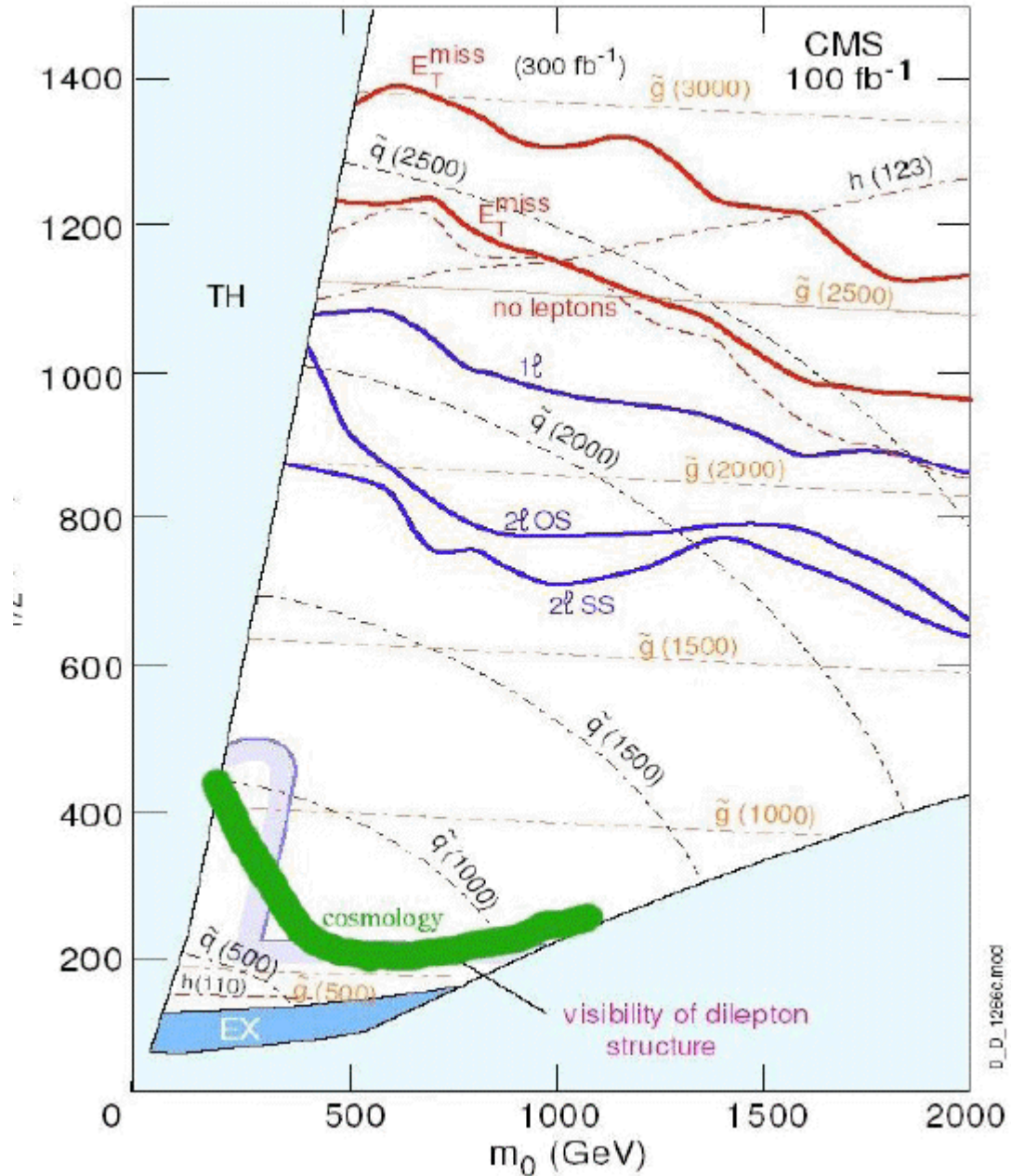
Die Neutralinos befinden sich im kontinuierlichen Abkühlungsprozess, wobei ihre Anzahl erhalten bleibt.

Dies ist nicht bewiesen, jedoch plausibel auf Grund der Wechselwirkungsmechanismen und damit der Energiebilanzen.

Der Annihilationswirkungsquerschnitt entspricht dem der Schwachen Wechselwirkung. Damit läßt sich eine Schätzung der Neutralino-Masse durchführen und ergibt einen ungefähren Wert von 15 GeV. Annihilation bedeutet hier die Paarvernichtung.

Eine etwas bessere Präzision wird erhalten indem die Dichte der Dunklen Materie als Funktion der SUSY Parameter, insbesondere der Neutralino Masse, berechnet wird. Dieser Wert wird mit dem WMAP Wert von 0.23 mit einer Ungenauigkeit von ± 0.04 gleichgesetzt. Das ist vom FERMILAB durchgeführt worden. Die nachstehende Abbildung zeigt die graphische Auswertung dieser Berechnung:

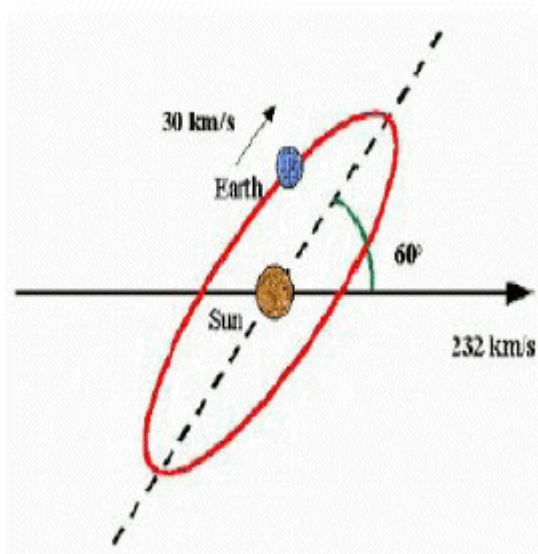
Die hellblauen Bereiche zeigen Regionen, in denen die Parameter „nicht mehr funktionieren“. Das bedeutet, daß Masseberechnung komplexe Massenwerte ergeben oder die Bedingungen des LSP nicht erfüllt werden. Die Parameter in diesen hellblauen Bereichen werden für die Diskussion ferngehalten. Der grüne Bereich (Band unten) ist der kosmologisch erlaubte Bereich. Dort sind die Ergebnisse erwartungsgemäß. Von hier können Werte herausgenommen und mit Isajet (Tabelle weiter oben) die Masse des leichtesten Neutralinos berechnet werden. Es wird exemplarisch $m_0 = 500$ GeV und $m_{1/2} = 200$ GeV herausgenommen. Isajet berechnet daraus die Masse des leichtesten Neutralinos als: 76 GeV. Größenordnungsmäßig bestätigt dieses die Isajet Tabelle weiter oben. Wird $m_0 = 1$ TeV und $m_{1/2} = \frac{1}{4}$ TeV gewählt, so ergibt sich die Neutralino-Masse $m_x = 99$ GeV.



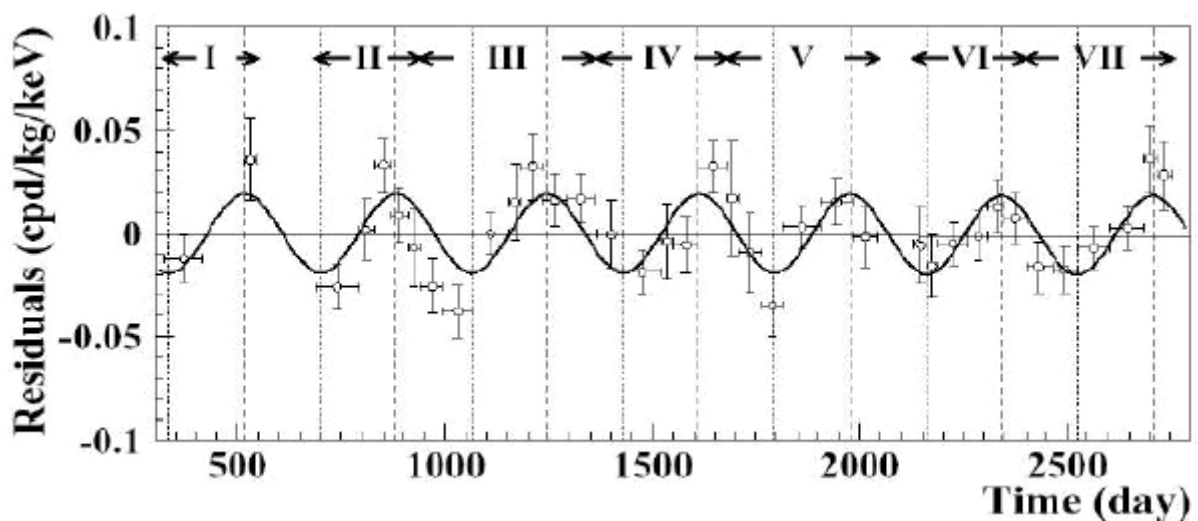
Der blaue Bereich (EX) der Fermilab Berechnung wird hier nicht besprochen. Dieser Bereich ist auch durch direktes SUSY Suchen nicht erreichbar.

2. WIMP

Das Experiment **D**ARK **M**ATTER search **D**AMA hat ein spektakuläres Ergebnis veröffentlicht: Ein WIMP Halo unserer Galaxis wurde gesucht. Wenn so was gefunden werden kann, wäre damit der Beweis des WIMP gelungen. Die folgende Abbildung zeigt, wie sich das Experiment aufbaut.



Mit $230\,103\text{ m/sec}$ bewegt sich die Sonne um das Zentrum der Galaxis. Von den WIMPS wird angenommen, daß sich diese auch bewegen (sonst würden diese unweigerlich ins Zentrum der Galaxis fallen). Aber es wird keine Aussage über deren bevorzugte Bewegungsrichtung gemacht. Die Erdbahn mit ca. $30\,103\text{ m/sec}$ Geschwindigkeit unter einem Winkel zur Sonnenbahn ergibt eine Modulation der Relativgeschwindigkeit des WIMP-Halo Detektors, welche im Rhythmus der Jahreszeiten. Damit wird auch ein Rhythmus der erwarteten Rate ans WIMP Kernreaktionen angenommen. Im Grand-Sasso Tunnel in unseren Alpen, werden mittels Natrium Jodid Kristallen das entstehende Szintillationslicht mit Hilfe von Photomultipliern vermessen. Die folgende Abbildung zeigt ein solches mehrjähriges Messergebnis.



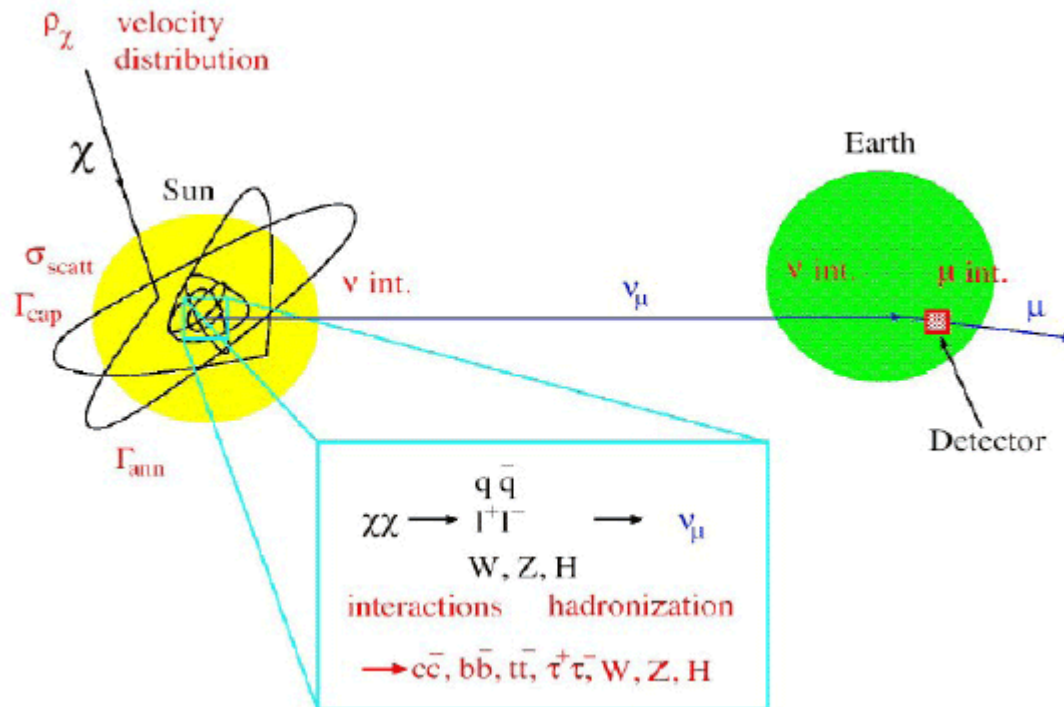
Die DAMA Physiker leiten daraus ab, daß es eine statistische Signifikanz von mehr als 6σ Varianz gibt. Auch hier ist die Größenordnung verträglich mit den SUSY Ergebnissen und einer Neutralino- Masse von etwa 60 GeV .

Dies Experiment ist aber zur Zeit das Einzige, welches so ein Ergebnis mit dieser Konsequenz aufweist!!!

Wir müssen die Geduld aufbringen auf weitere Experimente zu warten.

Die direkte Suche nach WIMP Teilchen wird ebenfalls versucht. Es wird untersucht, welche WIMP Signaturen überhaupt aufspürbar sind. Nichtrelativistische Neutralinos konzentrieren sich auf Grund des Gravitations-Einflusses im Inneren der Himmelskörper. Sie können dort paarweise annihilieren und auch verschiedene Endzustände erzeugen. Jedoch sind dabei nur spezielle Reaktionen interessant da Neutralinos die Sonne durchfliegen können. Die

Neutralino-Energie ist, wie bereits erwähnt, mit ca. 100 GeV recht hoch. Darum können diese Teilchen in einem Unterwasser- oder Eisexperiment wie Amanda nachgewiesen werden. Das passiert über Messung der dabei entstehenden Myonen. Die nachfolgende Abbildung zeigt dieses Prinzip.



Auf Grund der inzwischen sehr guten Bestimmung der Neutrino-Richtung -die Neutrinos kommen aus der Sonne- kann der Untergrund der Messung rauschmäßig sehr gering gehalten werden.

Aber: die bis heute durchgeführten Messungen zeigen keine Signale!

3. Strahlungskorrekturen

Messgrößen werden durch SUSY Teilchen beeinflusst. Dies kann durch das anomale magnetische Moment eines Myons geschehen. Das magnetische Myonmoment steht für eine Art der Photon - Myon Wechselwirkung und kann mit Hilfe von Feynman-Diagrammen verändert werden.

Vor einigen Jahren wurde diese Größe mit dem BNL-Experiment -BNL heißt Brookhaven National Laboratory- experimentell sehr genau vermessen und diese Ergebnisse wurden mit den SM Berechnungen verglichen:

$$a_{exp} = (11659208 \pm 6) \cdot 10^{10}$$

$$a_{exp} - a_S = (23 \pm 10) \cdot 10^{10}$$

Diese Differenz ist enorm gering. Damit rückt der SUSY Beitrag mit Teilchenmassen von einigen 100 GeV in den **Bereich des Möglichen!!!**

Ein anderes Beispiel ist der Zerfall eines B-Mesons oder -Baryon genannt. Es handelt sich hierbei um einen FCNC 2. Ordnung der schwachen Wechselwirkung. Dieser wird durch ein Pinguin (nicht durch ein BOX) Diagramm beschrieben. Hier ist interessant, daß auch die im SM nicht benötigten geladenen Higgs-Bosonen eine Rolle spielen können. Der Weltmittelwert ermittelt durch die Experimente von CLEO und BELLE summiert über alle Kanäle beträgt:

$$BR_{exp} = (3.3 \pm 0.5) 10^{-4}$$

Dieser Zerfall ist einigermaßen selten. Im Standardmodell berechnet sich dieser zu.

$$BR_{SM} = (3.29 \pm 0.33) 10^{-4}$$

Die Übereinstimmung ist gar nicht so arg schlecht!

4. Experimente mit Beschleunigern

Derzeit schaffen LEP und Tevatron die energiereichsten Beschleunigungen. Bald wird auch LHC dazu stoßen. Die Experimente haben bereits begonnen und im November 2009 wird das erste Ergebnis erwartet, jedoch „nur“ mit 7TeV Kollisionsenergie.

Die Wirkungsquerschnitte für die Erzeugung bestimmen sich durch elektroschwache sowie starke Kopplungskonstanten. Dann kommen noch kinematische Unterdrückungsfaktoren hinzu. Je besser die kinematische Schwelle erreicht wird, umso geringer oder kleiner sind die Wirkungsquerschnitte. Die Regel ist, daß Zerfälle bzw. Zerfallskaskaden recht schnell ablaufen. Das bedingt die sehr hohe Massendifferenz.

Damit sind im Empfänger, dem Detektor, nur Endprodukte beobachtbar. Zwischenstufen sind zumindest bis heute, nicht beobachtbar!

Bei allen Suchen ist die wichtigste Signatur die des Neutralinos., das aber im Detektor nicht sichtbar ist. Man spricht hier auch vom fehlendem Impuls oder fehlender Energie. Leichteste Neutralinos treten am Ende einer oder mehrerer Zerfallskaskaden auf.

Bei diesen Experimenten werden häufig Fehler gemacht. Diese Fehler haben 2 Gründe:

- 1. Es werden für die Parameter $\tan \beta$, A etc unterschiedliche Annahmen gemacht. Diese beeinflussen die Masse des beobachteten SUSY Teilchens und damit auch die Ausschlußgrenzen. Ideal gesehen gibt es keine solche Abhängigkeit, da ja der ganze Parameterraum abgetastet wurde. Es wird demnach eine recht konservative Grenze angegeben.
- 2. Es werden Massegrenzen verschiedener SUSY Experimente verglichen, was eigentlich keinen Sinn macht. In Hadron Collidern beispielsweise sind die Grenzen für Gluinos ca. 200 GeV im Vergleich zu den Neutralino Limits von LEP mit etwa 40 GeV relativ hoch. Da jedoch in großen Teilen des Parameterraums das Verhältnis der Gluino- zur Neutralino Masse bei ca. 6 liegt kann die niedrigere Neutralinogrenze eine deutliche Einschränkung der SUSY Parameter bedingen.

Zusammenfassung der bisher gefundenen Ergebnisse

<http://www.astronews.com/news/artikel/2005/01/0501-022.shtml>

http://www.mpe.mpg.de/~amueller/lexdt_d.html#dm

Diese Internet Seiten sind mit der Vorstellung wo die Informationen herkommen, glaube ich jetzt verständlicher.

Die dunkle Materie ist demnach eine physikalische relevante Ansammlung sehr schwerer Teilchen deren Wechselwirkungen mit Teilchen der „klassischen“ Physik äußerst begrenzt sind und damit sind diese superschweren Teilchen, die Dunkle Materie, nahezu unnachweisbar.

Literatur:

SUSY:

<http://lepsusy.web.cern.ch/lepsusy/>

<http://l3.web.cern.ch/l3/analysis/susy/>

<http://www.astroteilchenphysik.de/topics/dm/dm.htm>

I. Die Ansicht aus der Theoretischen Physik

1. Satelliten-Galaxie Dynamik und Gravitationslinsen auf der Suche nach der Dunklen Materie

Die neuesten Erkenntnisse zeigen, wie bereits oben mehrfach erwähnt, daß Galaxien in große Dunkel-Wolken Halos eingebettet oder von diesen durchdrungen sind. Galaxien erhalten durch diese DM eine wesentlich größere Ausdehnung und auch eine andere Gravitationswirkung. Es sind zwei Methoden zur Zeit bekannt, die solche Untersuchungen ermöglichen können:

- 1. Die Satelliten-Galaxie Dynamik
- 2. Schwache Gravitations-Linsen

Erste Simulationsergebnisse lassen eine Ausdehnung der Halos von einigen Hundert kpc (KiloParsec) erwarten. Die Auswirkungen auf die Gravitation sind offensichtlich unbedeutend gering, wenn überhaupt jemals messbar! Es verbleibt damit nur das Dichteprofil dieser Dms zu untersuchen. Dazu wird sich der Methodik der schwachen Gravitationslinsen bedient auch unter dem Namen "galaxy-galaxy lensing" vertreten. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß keine Annahmen über den dynamischen Zustand der Galaxien gemacht werden müssen. Die DM Verteilung kann direkt untersucht werden. Ein Experiment namens COMBO-17 ist bereits im Gange. Dazu sind in unten angeführter Literatur Daten ersichtlich. Der besondere Vorteil dieses Experiments ist, daß es eine Kombination zwischen Tiefen Beobachtung und Weitfeld Beobachtung ermöglicht. Die Rotverschiebung wird hiermit beobachtet. Es wird im tiefen R-Band gemessen. Dort sind beste Bedingungen für die Beobachtbarkeit vorhanden, so daß die Galaxien Vermessung sehr präzise durchgeführt werden kann.

Die Anwendung der schwachen Gravitationslinsen "weak lensing" erfordert ebenfalls eine höchst- Präzisions-Vermessung der Galaxien. Jedoch sind hierbei die Galaxien sehr klein und

füllen lediglich ein paar wenige Pixel der CCD Kamera. Deshalb wird hier mit vielen Vergleichsaufnahmen gearbeitet.

1.1 *DM in Spiral Galaxien*

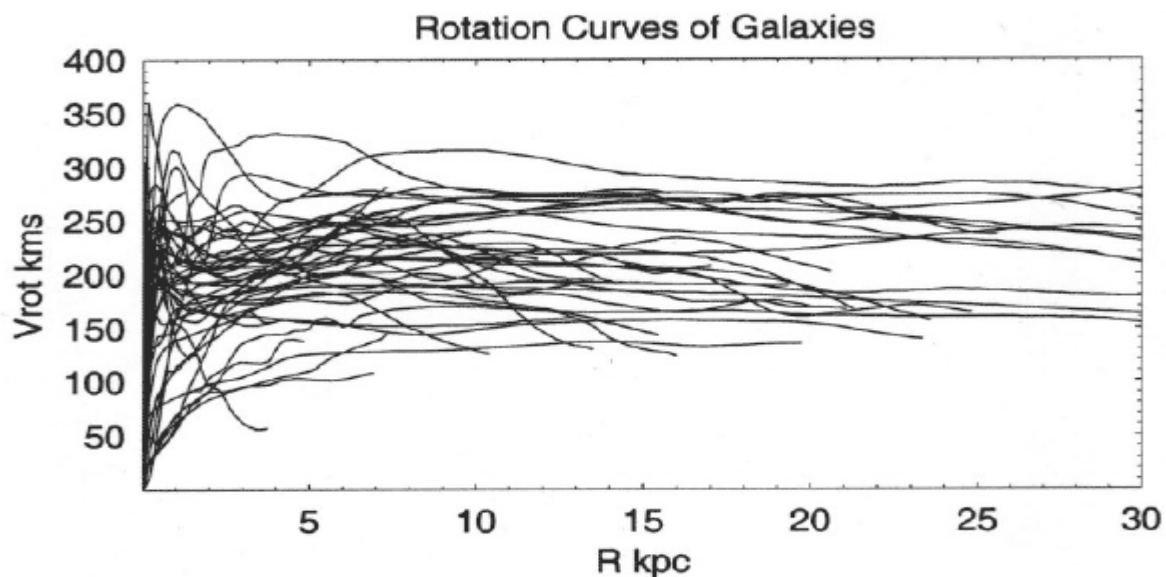
Die Rotationsauswertungen der Galaxien zeigen den größten Einfluß der DM um diese Galaxien herum. HI sowie HII Regionen aus verschiedenen Entfernungen zum galaktischen Zentrum werden dabei auf ihre Rotationsgeschwindigkeits Komponenten untersucht. Die Erwartungshaltung ist, daß im Spektrum jenseits des Optischen festgestellt werden kann, daß die Rotation mit einer umgekehrten Wurzelabhängigkeit des Galaxisradius abnimmt, wenn angenommen wird, daß keine signifikante Materieanhäufung außerhalb des sichtbaren Galaxienbereichs vorhanden ist.

Erstaunlicherweise kommt dabei heraus, daß für die meisten Spiralgalaxien die Rotationsgeschwindigkeitskurve steigend ist innerhalb des inneren Bereichs und nach außen hin stetig abfällt. Bereits in den 70er Jahren wurden Modellrechnungen durchgeführt und theoretische Argumentationen postulierten die Existenz massiver Halos um diese Spiralgalaxien. Die analytischen Berechnungen ergaben, daß diese Scheiben zwar instabil werden, jedoch einen Balken bilden werden, wenn die Massenverteilung der Lichtverteilung entspricht. Damals wurden solche Balken nicht gefunden. Heutzutage werden solche Balken vermehrt gefunden. Es wurden auch massive Halos entdeckt, welche die Galaxien gegenüber Balkenbildung stabilisieren.

1.2 *DM in Elliptischen Galaxien*

Solche Galaxien sind dynamisch gesehen wesentlich komplizierter als spiralförmige Systeme. Sie haben keine dominante Scheibe in der Sterne und Gas in meist kreisförmigen Umlaufbahnen das galaktische Zentrum umkreisen. In den elliptischen Galaxien findet die Umkreisung des galaktischen Zentrums auf höchst nicht-zirkularen Bahnen statt. Jedoch ist der Anisotropiefaktor dieser Bahnen noch meist unbekannt. Auch ist die Erstellung von Modellen dieses Galaxistyps nahezu unmöglich. Gaswolken machen sich darin auch rar. Der Nachweis Dunkler Materie in diesen Gebilden ist enorm schwer, aber es zeichnet sich ab, daß auch dort DM vorhanden ist.

Das folgende Bild zeigt eine Analyse der Rotations Kurven von Sb und Sc Galaxien.



Die Gravitations-Linsen Statistik von Quasaren zeigt deutlich Anzeichen, daß hier Dunkle Materie in Halos vorhanden sind. Die Ergebnisse stammen aus dem Jahr 1993 von Maoz und Rix. Weitere Indizien der DM Vorkommen stammen aus der Dynamik der Satelliten Galaxien sowie der schwachen Gravitations Linsen Effekte.

2. *Modifizierte Newton Dynamik (MOND)*

Die aktuellen Annahmen über das Vorkommen der DM im Weltall besagen, daß 90% der Gesamtmasse auf die DM entfallen. 1983 hat Milgrom eine neue Theorie entwickelt, in der behauptet wird, daß die Gravitationsbeschleunigung sich bei kleinen Beschleunigungswerten anders verhält. Er nannte diese Theorie: Modified Newtonian Dynamics "MOND". Er nahm folgende Beziehungen an:

$$g_{mond} = \begin{cases} g_N & \text{für } g_N \gg a_0 \\ \sqrt{g_N a_0} & \text{für } g_N \ll a_0 \end{cases}$$

bezeichnet die Newton'sche Beschleunigung und a_0 steht für die charakteristische Beschleunigung.

Aus dieser Relation konnte er dann die Rotationsgeschwindigkeit ableiten:

$v_{rot}^4 = GM a_0$ für: $g_N \ll a_0$ Dies zeigt, daß bei Anwendung von MOND die Rotationskurven asymptotisch flach werden. Ferner wurde MOND auf die Tulli_Fischer Beziehung angepaßt, so daß eine Steigung für alle Galaxien von $\alpha = 4$ herauskam. Damit wurde die Masse-Geschwindigkeitsbeziehung über die 4. Potenz der Rotationsgeschwindigkeit festgelegt und konnte überprüft werden. Nach einer weiteren Anpassung über das Verhältnis Masse zu Licht konnte a_0 ermittelt werden zu etwa 10^{-8} cm/sec. Sollte MOND weiterhin Bestandteil der Theorie bleiben, so ist eine weitere Anpassung über die Theorie der Gravitations-Linsen Ablenkung notwendig. Die MOND Theorie ist nicht mehr weiter bearbeitet worden. Es ist denkbar, daß diese Theorie nur ein "Abstecher" der damaligen Zeit war, wo eine große Beschreibungsnot vorhanden war.

Heutiger Stand der Theorie

Seit der ersten Entdeckung der DM im Jahre 1930 durch Zwicky durch Beobachtung der Galaxie- Geschwindigkeiten in Galaxienhaufen, ist in den letzten Dekaden klar geworden, daß die DM eine sehr dominante Rolle im Universum spielt. Das heutige Bild des Universums wird mit dem Begriff **CDM Cold Dark Matter** "kalte Dunkle Materie" betitelt. Mit Hilfe der oben beschriebenen Methoden wurde daraus allmählich eine Simulationsumgebung gestaltet, so daß wir heute in der Lage sind mit Hilfe parametrierter Modelle verschiedene Universen, das soll heißen verschiedene Parameter des Universums, zu berechnen und mit den Messungen zu vergleichen. Aber nicht alles verläuft "glatt". Ein bekanntes Problem ist bekannt als das **Satelliten Problem**. CDM Simulationen sagen eine große Anzahl an Begleitern (Satelliten) von Galaxien voraus, als je beobachtet wurde! Zu nennen sind die Arbeiten und Veröffentlichungen von Moore et al im Jahre 1999. Ferner zeigt sich in den Simulationsergebnissen eine mehr nach innen zunehmende Begleitgalaxie Verteilung als in Beobachtungen wahrgenommen wird. Es existiert bereits eine potentielle Lösung des Problems, jedoch enthält diese keine Baryonen. In diesem Fall wären diese Begleitgalaxien unsichtbar. Im Gegensatz dazu stellen Massekörper -Galaxien sind ja solche- einen wahrnehmbaren Linseneffekt dar. Sie können vielfältige Bilder eines Quasars im doppelten Abstand dieser Galaxie erzeugen. Auch kann sich zeigen, daß diese Begleiter die so genannten Mikrolinsen Effekte produzieren, so daß die Änderung der Beleuchtungsstärke oder des Flusses ohne solche Effekte nicht verständlich wäre. Ein zusätzlich bekanntes Problem heißt *cups* Problem. Im Zentralbereich einer **Low-Surface Brightness LSB** Galaxis

ist das Dichteprofil nicht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der CDM Simulationen. Es zeigt aber eine gute Übereinstimmung mit isothermischen Profilen. Die CDM Simulationen haben gezeigt, daß Strukturen mit sehr unterschiedlicher Masse sich in ein allgemeingültiges Dichteprofil einfügen lassen. Diese werden Navarro-Frenk-White or NFW Profile genannt. Navarro hat darüber in den Jahren 1995, 1996, 1997 einiges veröffentlicht. Da nun LSB Galaxien von der DM stark dominiert werden, ist die Erwartungshaltung an die simulativen Ergebnisse ihres Dichteprofiles sehr hoch. Die Beobachtung ist jedoch sehr sehr unsicher, da solche Galaxien nur sehr schwer beobachtbar sind. Swaters et al sowie Blok veröffentlichten im Jahr 2003 beobachtete NFW Profile. Jedoch auch größere Objekte erweisen sich noch als sehr unzuverlässig in ihrer Beobachtung. Der Grund dafür findet sich in Unterschieden des isothermen Profils, das -wenn man das Zentrum mal ausklammert- nur aus sehr großen Flächen sichtbar wird. Damit ist eine "Probenentnahme" innerhalb von Galaxien oder Haufen zur Zeit noch völlig unmöglich. Clow und Schneider haben 2002 schwache Gravitationslinsen verwendet um solche Profile in Haufen Galaxien unterscheidbar zu machen. Bei „normalen“ Galaxien gestaltet sich das auf Grund ihrer geringen Masse noch viel schwerer. Wir müssen einfach Geduld haben. Es wird noch einige Zeit dauern, aber ich bin mir sicher, daß die Ingenieurkunst hier weiterhelfen wird verfeinerte Messsysteme zu bauen.

Wie wird es weitergehen?

Die Erforschung der DM habe ich in vielen Facetten vorgestellt. Zu jeder können Bücher geschrieben werden. Es bleiben aber trotz der Forschung auf sehr hohem Niveau offene Fragen. Zwei davon sind:

- 1. Die Zuverlässigkeit der Messungen gerade bei kleinen Galaxien
- 2. Die Erfassung "Detektion" und die quantitative Analyse der Galaxie-Galaxie Lensing

Diese erlaubt uns gewisse Einschränkungen zu machen was die DM Halos von Galaxien betrifft. Gerade zum ersten Punkt gilt es noch anzumerken, daß hier die Verbesserung der Beobachtung erst den entscheidenden Schritt nach vorne bringen wird. Objekte mit hoher Messunsicherheit in der insbesondere bei ihrer Elliptizität müssen offensichtlich mit größeren Korrekturwerten belegt werden, als wir es derzeit tun. Seitens der schwachen Gravitationslinsen Effekte verspricht sich die Welt der Astrophysiker in den kommenden Dekaden große Fortschritte. Hier werden die Großteleskope sowie die Weltraumteleskope mit ihren neuartigen geregelten Linsenkorrekturen einiges an Genauigkeitssteigerung aufweisen. Zu nennen sind hier:

- VIRMOS-Descart Survey
- CFHT Legacy Survey
- VISTA Telescope
- VLT Survey Telescope

Ich denke auch, daß dieses Gebiet mit zunehmender Rechnerstärke einen nahezu exponentiellen Schwung erreichen wird. Da ist gewiß auch noch ein Nobelpreis in Aussicht!!

Wär doch was oder?

Literatur:

<http://dls.physics.ucdavis.edu/~croat/UDF/UDF.shtml>

http://www.mpia-hd.mpg.de/COMBO/combo_index.html

http://www.mpia-hd.mpg.de/COMBO/combo_results.html

Bertin, E. Arnouts S. "Sfractor: Software for source extraction" Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 117: 393-404, 1996

Bertin G., "Dynamics of Galaxies", New York, Cambridge University Press, ISBN 0-521-47262-8. 2000

Clowe, D, Schneider P. "Wide fieldweak lensing observations of A1835 and A2204", Astronomomy and Astrphysics 395: 385-397, 2002

Erben, T. "Applications of weak gravitational lens effects", PhD thesis, Ludwig-Maximillains Universität München, 2000

Erben T., Van Waerbeke L. Bertin E., Mellier Y., Schneider P, "How accurately can we measure weak gravitational shear?", Astronomy and Astrophysics 366: 717 – 735, 2001

Hudson M.J., Gwyn S.D.J., Dahle H. Kaiser N., "Galaxy-Galaxy Lensing in the Hubble Deep Field: The Halo Tully-Fischer Relation at Intermediate Redshift", Astrophysical Journal 304 – 531, 1998

Milgrom M. " A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis", Astrophysical Journal, 270: 365 – 370, 1983

Navarro J.F., Frenk C.S. White S.D.M., "A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering", Astrophysical Journal 490 – 493, 1997

Sofue Y., Tutui Y. Honma M. Timica A. Et al, "Central Rotation Curves of Spiral Galaxies", Astrophysical Journal 523: 136 – 147, 1999

Swaters R.A Madore B.F. Van den Bosch F.C. Balcells M., "The Central Mass Distribution in Dwarf and Low Surface Brightness Galaxies", Astrophysical Journal 583: 732 – 751, 2003

Tully, R.B. Fischer J.R., "A new method of determining distances to galaxies", Astronomy and Astrophysics 54: 661 – 673, 1977

Schlussbemerkung

Die Dunkle Materie jedoch stellt durch ihre enorme Masse eine fehlende Erklärung der unvollständigen Energiebilanz des beobachtbaren Universums dar. Der Nachweis ist sehr schwierig. Es wird von ultraschweren Schwarzen Löcher, von HALOs, von ultraschweren Zwerggalaxien, von HALO Durchflutungen und mehr berichtet. Sehr sicher ist viel Wahres darin enthalten. Aber zur Zeit ist fast alles noch im Reich der wissenschaftlichen Spekulation. Ganz und gar ausklammern tue ich die Phantasieen, daß sich in DM die Physik ändert, daß Antimaterie erzeugt wird und weiß ich was alles so herumgeistert. Das Forschungsgebiet ist äußerst spannend, aber durch begrenzende Faktoren wie limitiert vorhandene Energie auch in den größten Beschleunigern oder Collidern, werden wir mit erdgebundenen Experimenten wohl nicht mehr allzuweit kommen. Vielversprechend sind Ansätze aus Novae und insbesondere Supernovae Ausbrüchen auf die DM Rückschlüsse zu ziehen. Man erhofft sich hier die Beobachtung kurzlebiger Spinoren.