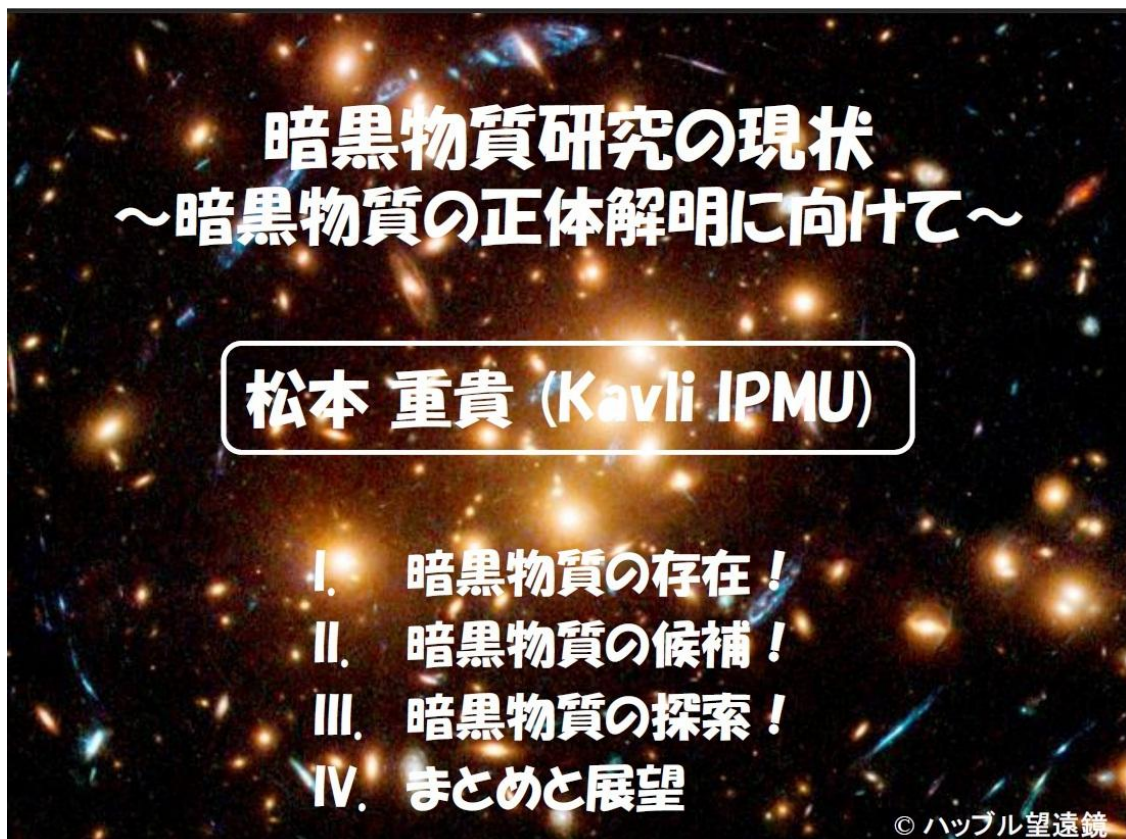


2012 年度原子核三者若手夏の学校 三者共通講義 講義録



(司会) 三者共通講義に移りたいと思います。今年度は、IPMU の松本重貴さんに来ていただきました。松本さんには「暗黒物質研究の現状～暗黒物質の正体解明に向けて～」というタイトルで、お話ししていただきます。それでは、よろしくお願い致します。

はい、ありがとうございます。IPMU の松本です。僕が夏の学校に参加したのはもう 15 年位前で、まあそのときはもちろん M1 でしたけど。まさかここで、こういう話をする事になるなんて、なかなか想像もしなかったんですけども。今回頼まれたときに、暗黒物質の話をしてくれと。それで、僕自身は素粒子の現象論の人なので、多少その分野に偏った話になってしまう所があるんですが、それでもなるべく分かりやすく、しかも直感的にきちんと分かる様に話していきたいと思います。だけど、分からない所があったらどんどん途中で質問して下さい。あるいは、シャイな人は後で質問してくれても結構です。それで、僕に与えられた時間が三時間ちょっと位で、好きに時間を使ってくれと言われたので、一応タイトルはこんな感じで、まず暗黒物質の存在の話をして、その後に暗黒物質の候補の話をして、最後に、これが一番現在新しいトピックですけども、暗黒物質の探索の話をしたと思うのですが、それぞれ、多分 40 分…ちょっとまあばらつきはありますが、4、50 分位の話ですので、一個終わったらちょっと休んで、10 分位休んで、3 講いきたいと思います。多分 3 時間ぶっ続けだと僕が喋れないので、休ませて下さい。じゃあお話をして行きたいと思います。

暗黒物質の話なんですけれども、暗黒物質自身っていうのは比較的、世間一般にもメジャーな話になって、たまに NHK とかで特集が組まれる位有名になりました。そうすると、まあ色々な情報をももちろん、もう皆さん目にしたりしていると思いますけども、多分まあここにいる人は専門家を目指している、又は専門家である人たちなので、上辺だけの情報だけじゃなくて、もう一步、一つ進んだ情報を引き出して、その本質を捕らえてまとめて、自分の研究に生かすという手法が大事になります。そういう感じの進め方で行きたいと思

**1. 暗黒物質の存在!**

~ ニュートンの万有引力の法則 ~



- 距離が近いほど強い
- 重いものほど強い

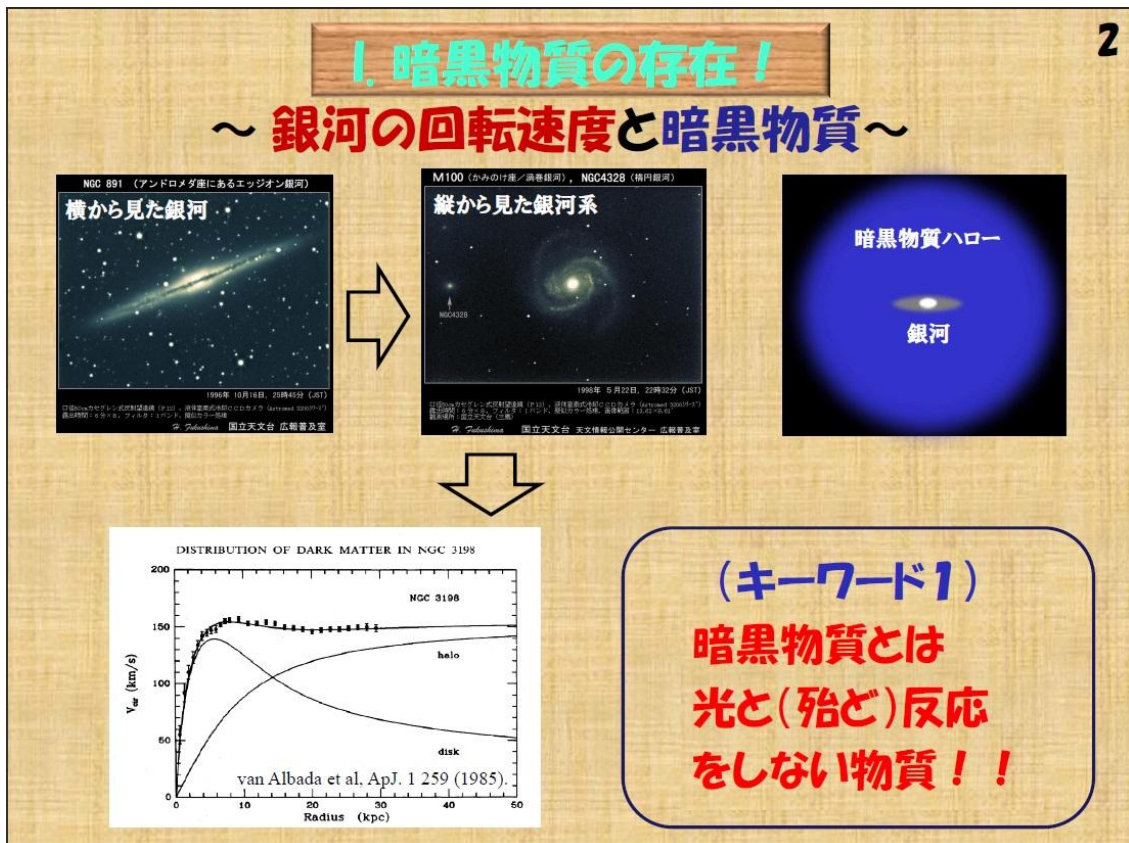
中心から距離( $r$ )にある物質の回転速度

↓

軌道の内側にどの程度の質量が存在がするか

**遠心力 = 万有引力の引力**

まず最初に暗黒物質の存在です。暗黒物質が何故存在するか、何故存在していると信じているかという話は、最早もう大量の証拠があります。もちろんその証拠を全部言っていると、あっという間に3時間過ぎてしまうので、いくつかトピックを絞らせてもらいますけれども、どれも比較的単純に理解出来る話になっています。それで、例えば、これは最初すごい簡単なところから話そうと思って簡単すぎて失敗したんですけど、ニュートンの万有引力の法則、これはみんな知っている、中学校で習う、高校かな？まあそこらへんで習う。それで、もちろん何か質量源があるとその周りにいる物質は円運動すると。そして、もちろんこの動いてる人にとっては、遠心力と万有引力が釣り合っているから円運動する訳で、これは誰でも知っている。それで、ここで大事な事は距離が近ければスピードは速くなるし、距離が遠ければスピードは遅くなる。あるいは真ん中にある物質が重くなればスピードが速くなるし、軽くなれば遅くなるということです。中心からの距離  $r$  にある物質の回転速度というのが、実は暗黒物質の証拠の第一証拠として出てくることで、しばしば利用されます。どういう事かと言うと、中心からある距離にある物質がどのぐらいのスピードで回っているかが分かると、それから内側にどれぐらいの質量があるか、質量源があるか、ということが分かるという事です。これはまあ当然ですよ。



これまでの単なる力学の話ですけれども、実際に暗黒物質の証拠を見たときに、この法則を利用して、その証拠を言います。1つはこれ、渦巻き銀河を横から見たやつですね。非常に平らになっています。それで、これを今度天頂方向から眺めると、こんな風（上段真中図）に見えるんですね。それで、これで何をやるか？まあだいたい中心が分かりますから、これバルジですけれども、そこからの距離  $r$  にある星やガスが、どの程度のスピードで運動しているかというのを、観測してプロットしていきます。するとこんな感じ（下段左図）になっています。少しテクニカルなことを言うと、どうやってスピードを測るかっていうと、皆さん量子力学で水素原子のスペクトル計算したときに、基底状態計算をしますよね。基底状態は電子が  $s$  状態にいる状態ですけれども、もちろん電子も真ん中にある陽子もスピンを持っているわけです。そのスピンのそろった状態、電子と陽子のスピンのそろった状態と、そろっていない状態では、実は少しだけ準位が違う。それも多分聞いた事があると思いますが、その順位の差を波長に直すと  $21\text{cm}$  ぐらいなんですけれども、水素の基底状態が少し励起されて、スピンのそろった状態になって、それがやがて落ちて、本当の基底状態に落ちるときに  $21\text{cm}$  の波長を持った光を出す。その光は、もちろん物質が動いていてドップラーシフトで少しずれるんですが、その波長を見て、各距離にある水素ガスがどのスピードで動いているかという情報をゲットする。まあ、ちょっと細かい話になりますが、やってる事は、距離  $r$  のところにある物質のスピードを、ただ単に縦軸に書いています。それで、横軸が  $0\sim 60\text{kpc}$  (キロパーセク) です。pc は天文学の用語で、1 pc は 3 光年

くらい。だから kpc で 3000 光年ですね。光年でやるとあまりにも桁が大きくなりすぎるので pc をしばしば使います。それで、この点が各点におけるスピードです。

そして、次に何をやるか？この回転運動を生み出しているのは、銀河の中にある物質に他ならない。まあそれは多分その通り。じゃあ銀河の中にある星やガスの分布っていうのは目で見て分かりますから、そこからどのぐらい物質質量があるかを見積もって、逆にこのぐらいのスピードが出るはずだという理論予想を立ててやることができます。それを書いたのがこの曲線（下段左図の曲線 **disk**）。中心付近はまだいいんですけども、中心から離れてくると、もう全然合っていないですね。これを銀河の回転曲線と言うのですが、これを説明するには、銀河の中にある星やガスだけでは足りないという事が分かります。単純にじゃあ何か目で見えていない物質があると考えて、それを暗黒物質と呼んでいます。その想像図はこんな感じ（上段右図）です。大事なのは、遠い距離に行ってもスピードがあんまり落ちていないので、非常に広がって存在するという事です。だから銀河がいて、ぼわって広がっていて、（まあ私達のこのデータはだいたいここら辺までしかありませんけど）こんな感じで暗黒物質が、見えない物質が存在している。それで、それがどの程度存在しているかというのはこの段階では分かりませんが、適当にこういう球状の分布を仮定して、ちょっとえいやってやってみると、これが（下段左図の曲線 **halo**）暗黒物質の寄与です。それで、足してやると、こうなります（下段左図の曲線 **NGC3198**）。ばっちり。まあこういうことですね。これがまあ1つの暗黒物質の証拠。最もしばしば提案される証拠の1つになります。

（質問） すいません、アンドロメダ以外でやってるものは…

（回答） そうです。だいたいこれアンドロメダじゃないです。これ **NGC3198**。当然、自分自身の銀河を見る方が難しいです。それでも今はすごい精度がありますけど。どれをやってもこのようになります。実際こういう例を 20 枚位並べようと思ったんですけど、どうせ見えないんで止めました。

これから暗黒物質の証拠とともに、そこからもう一歩進んで得られる情報についてのキーワードを挙げていきたいと思います。ここで1つ分かるキーワードは、暗黒物質というのは存在して、それは基本的には光と殆ど反応しないということです。もし光と反応するならとっくにそれは見えてる。望遠鏡で見て分かるはずですよ。あるいは、赤外で見るとか紫外で見るとか、そういう色々テクニカルな事がありますが、そのどれでやっても見えない。でも、完全に反応がゼロであるかというのは、それは実験的には絶対言えない。今の実験の精度で光で測れないという事で、反応がゼロだという事です。それで、もう1つ、一歩進んで分かる事があります。多分この何人かは想像つくと思いますけど、この暗黒ハローがどの程度存在すればいいかという量を見繕う事が出来ますよね。多過ぎたら速く回りすぎちゃうし、少な過ぎたら遅くなっちゃうから。このデータとぴったし合う為

にはどの位銀河に付随した暗黒物質が出来ている必要があるかという情報が得られます。但し、この情報は素粒子や原子核や高エネルギー物理学へのアウトプットと言うよりは、むしろ天文学、あるいは宇宙物理学へのアウトプットなので、今回はちょっと割愛します。

3

## I. 暗黒物質の存在!

### ～ 宇宙論における暗黒物質の役割～



Big Bang

<http://www.ita.uni-heidelberg.de>

- 時空間の創造
- エントロピーの創造
- 物質の創造
- 構造の創造

↑

暗黒物質が重要な役割を果たした!

**宇宙が始まって40万年後**



© WMAP T = 2.728 K

**殆ど完全に一様等方**

→ 進化

**現在の宇宙(137億年後)**



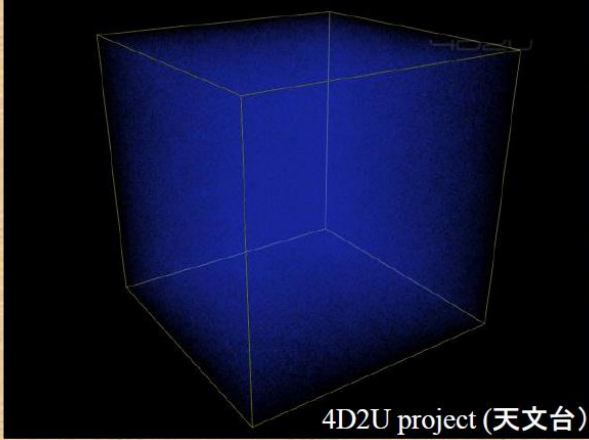
**非常に豊かな構造**

さて、二番目の証拠に行きたいと思います。二番目は何かと言うと宇宙論を考えます。この類いの絵（上段図）は見た事あると思いますけれども、宇宙が始まってインフレーションが起こって、宇宙が膨張してきて、現在我々があると。それで、宇宙論とは何かと言うと、基本的には創造の物理と言うか、最初に時空間が創造されて、（どうして創造されたかと言うと多分まだ誰も分かっていないと思いますけど）その後엔트로ピー、光が創造されて、その後に物質（物質、反物質が普通あるはずですけど、反物質が消えて物質が創造される）、そして最後に宇宙の中の複雑な構造が創造されると。構造が創造されるというのはどういう事かと言うと、宇宙が始まって40万年後位って、実はこんな感じ（下段左図）に見えます。つまり殆どのっぺらとして、どこをとっても同じ位の物質質量が同じ位の密度にいるという一様等方の宇宙です。だけど現在の宇宙ってこんな感じ（下段右図）ですよね。銀河がいて確かに非常に粗視化して見ると一様等方ですけども、よく見ると非常にこうリッチな構造をしているという。ここ（一様等方宇宙）からここ（現在の宇宙）に進化したという。この進化で最も重要な役割を果たしたのが暗黒物質です。

4

## 1. 暗黒物質の存在！

### ～ 暗黒物質の状態～



4D2U project (天文台)

**暗黒物質なしには、宇宙の構造が効率的に作られず！**

(キーワード2)

**暗黒物質の平均質量密度は、 $2 \times 10^{-30}$  [g/cm<sup>3</sup>]!**

**つまり、100,000[km] 立方あたり2[g]しかない！**  
(普通の物質は更に1/5)

(キーワード3)

**暗黒物質は冷たい(Cold)。**

**現在の宇宙における暗黒物質の速度は非相対論的。**  
[我々の銀河近傍では **300[km/s]**程度。]

どういう事かと言うと、これはまあ、N-body シミュレーションに頼った話ですけれども(スライドの左図の動画)。これ最初に宇宙が始まって 40 万年後位の(本当はもうちょっと後だけど)のっぺりとした宇宙。そして時間が経つと何が起こるかという、のっぺりとはしているけど実は、 $10^{-5}$ 位の違いがある。つまりある所の密度が1としたら、ちょっと別な所は  $1+10^{-5}$ 位の誤差があって、ある所は  $1-10^{-5}$ 位の密度があって、密度がどんどん増幅されていくわけですね。引かっているのは。そうすると物があるときにはどんどん集まって、無い所はとられて失ってきて、こう濃淡がはっきりしてきて構造が作られる。これが現在の一番良く理解されている、宇宙の階層的構造生成です。それで、こんな感じです最後は。これはシミュレーションです、数値計算。実際に観測もありますが、観測を見ればこんな形で分布しています。もちろんシミュレーションで多少差異はあるわけですけれども、現実で測った銀河とか星の宇宙に置ける分布を再現する為には、どの位の暗黒物質が無ければいけないかっていうことを逆算する事が出来るんです。2つを比べると(シミュレーションと観測を比べると)、だいたい暗黒物質っていうのは  $2 \times 10^{-30}$ g/cm<sup>3</sup> 無きゃいけないということが分かります。これ、結構でかい情報だよ。これを多いと思うか薄いと思うかっていうと、普通の人は薄いつて思うし僕も思いますけれども、まあ宇宙は基本的にスカスカですので。だけどそれでも、暗黒物質っていうのはバリオンの、普通のうちの体を

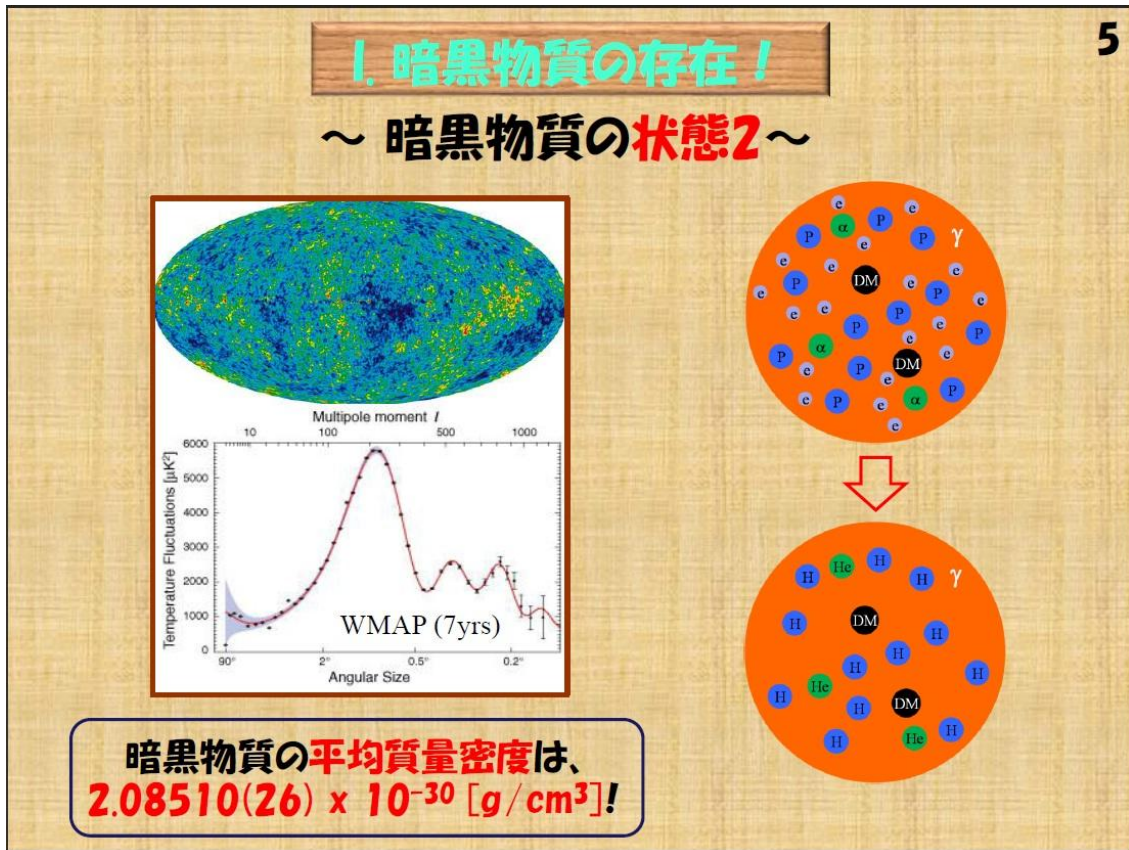
作っているプロトンやニュートロンとかそういう物質の密度に比べれば、それでも5倍位多いのですが、まあこういう値 ( $2 \times 10^{-30} \text{g/cm}^3$ ) になっています。

そして、もう1つ重要な情報があります。暗黒物質が、この構造形成が始まったときに、非相対論的に動いている、つまりほとんど止まっているか、あるいは非常に光速に近い状態で動いているか。それによって最終的に造られてくる構造が変わります。それはシミュレーションで示すことができます。その2つを、現実の実際に観測したものと比べてやって、どっちが合っていると思ったら、止まっていなさいと。つまり非相対論的でありなさいと。暗黒物質が非相対論的に動いているということは、いわば暗黒物質の温度が冷たいってことですね。だから Cold 暗黒物質。昔は Hot 暗黒物質説と Cold 暗黒物質説が compete していましたが、今では完全に Cold 暗黒物質説です。Hot 暗黒物質はダメだってことが分かっています。つまり、キーワード3が、宇宙の暗黒物質が冷たい。つまり暗黒物質の運動というのは、非常に非相対論的な運動であるということですね。実際には、場所場所でちょっと違いますけれど、例えば我々の銀河の近傍、太陽系近傍ですと、だいたい  $300 \text{km/s}$  です。これ速いじゃんと思うかもしれませんが、光に比べれば遅いですね。3桁位小さい。つまり非相対論的だということになります。これがキーワード3。

(質問) すいません、上の(暗黒物質の)平均密度なんですけれど、誤差ってどの位なんですか？

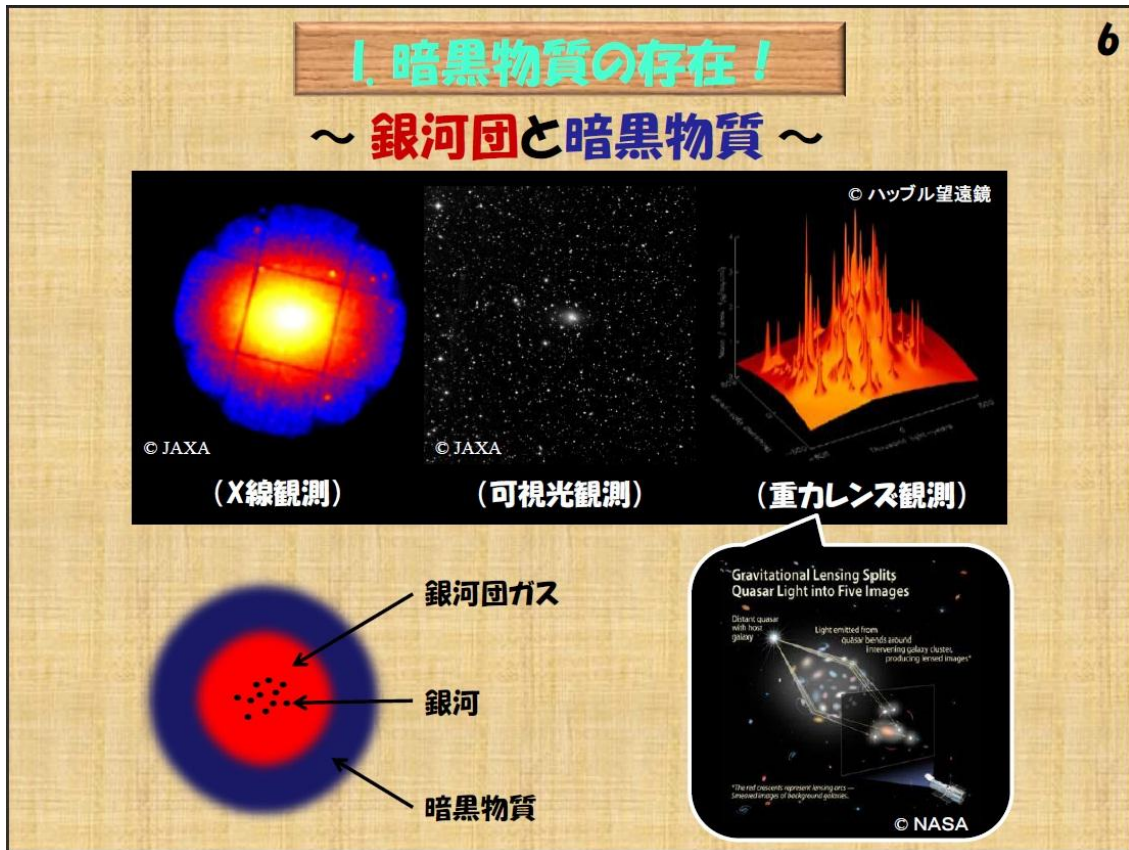
(回答) はい、これの誤差ね、多分、4、50%。だけど、次に WMAP の話をしますけれど、それによってこれと consistent な値が出て、誤差は数%まで落ちているので、最早この誤差はあんまり気にする人はいなくなったというか。まあシミュレーションの差は気にしますけど…。OK ですか？まあ、ある意味単純な話ですね。





次に、これはまた同じなんですけれど、前世紀最後から今世紀最初の始めでの最も大きな物理的な結果なんですけれど。いわゆる宇宙の背景放射ですね。宇宙の背景放射って宇宙に満ちている 2.7K 位の光ですけれども、それは実は、完全にどこもかしこも 2.7K ではなくて、少しゆらぎがあります。ある所は  $2.7+10^{-5}\text{K}$ 。ある所は  $2.7-10^{-5}\text{K}$ 。その位少し濃淡があります。 $10^{-4}$  とか  $10^{-5}$  のレベルだから、ほとんど 2.7K なんですけれども、そういう意味では少し濃淡があって、それを書いたのがこれです (スライド左側上図)。これ天球、いいですよ。ここが銀河面に航行する方向で、こううちの周りに球を置いてその座標で測る。そして、こいつを球面調和関数でフーリエ変換してやって、どういうフーリエモードが、つまりどういう波長のモードがどの位含まれているかというのを書いたのが、この有名な図 (左側下図) です。この波長のパターンというのは、この背景放射が造られたときに暗黒物質がどの位あったかに非常に sensitive になります。だからちょっと変わるとすごく変わる。この波形パターンが。物理的に直感的に理解するとどういうことかという、こういうことです。背景放射が生まれた時というのは、宇宙がプラズマ化した状態から中性化した瞬間に解き放たれた光です。プラズマ化したってどういうことかという、宇宙が 3000K ぐらいのときですけど、暗黒物質がちょびちょびといて、陽子がいて、 $\alpha$  粒子がいて、電子が電離して、光がべたべたって全体に。こんな感じ (スライド右側上図)。これ電離した状態。それが 3000K を境に宇宙が一気に中性化して、この電子とプロトンがくっついて水素原子。電子と  $\alpha$  粒子がくっついてヘリウム原子になります

ね。そうすると、もはや電荷を持って宇宙に存在するものはいなくなるわけです。それで、光というのは電荷を持っているものに凄く強く反応しますから。それは QED ですが、中性になった瞬間に光は殆ど周りの物質と反応しなくなって、後は真っ直ぐ進んで、その真っ直ぐ進んだのが、やがて時間が経ってうちの所まで届いているのを見ているのが背景放射ですね。それで何かというと、この状態（プラズマ）で決して静止してプラズマが存在しているわけではなくて、暗黒物質があると物はそこに集まろうとするし、光としてはなるべく音速がありますから逃げようとするわけですね。集まろう逃げようっていうので、中の物質の振動が起こります。物質の振動って何かというと要は音ですね。どういう波長の音が、つまりどういう振動数の音がどれ位あるかというのがまさしくこれ（スライドの左側下図）。で、どういうわけかと言うと、これは暗黒物質というのは、他の振動している物質にとってはいわゆるアトラクターになっているわけです。集めよう集めようとしている、暗黒物質の方に。バリオン、このプロトンとか電子とか光っていうのは音速を生み出しているんで、まあ音の正体。だからどういうことかと言うと、暗黒物質が沢山いる時と少ない時というのは（まあこれが良い例かどうかは分からないけど）、外で歌を歌うのと教会の中で歌を歌う時で音が異なりますよね。それと同じで環境をちょっと変える。そうすると、教会の中と外で、声を出している人たちが同じだけれども、出てくる音は変わるわけですね。その音の変化を見ようとしている。それで、暗黒物質がどの位あるとこういう波長になるかというのを見る事が出来て、そうすると平均密度は、さっきだいたい  $2 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$  って書きましたけど、これです、 $2.08510(26) \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ 。これ、ちょっとやりすぎな気がするけれど（もうちょっと本当はあるかもしれないけど）、まあ Particle data group とか見るとこう書いてあります。これだけの精度がある。これはもう、決定的ですよ。一方コイツらはバリオン、プロトンとかニュートロン合わせた量がどの位あるかということで変わる。それは、音の正体ですから、そいつがどれだけ含まれているかに依って、この物質の中にある音速が変わります。音速が変わるともちろん音は変わりますよね（あの、ヘリウムガスを吸って声出す時と、空気の中で声出す時で声が変わるのと同じですよ）。その時の量っていうのは、これよりも、1/5 ないしは 1/6 少ない。つまり「暗黒物質」というのは普通の物質では有り得ないということも言っているわけですね。まあそういう意味で、まとめとしては、平均質量密度が非常に精度良く分かっていますよということです。



さて、3番目の暗黒物質の証拠。何でこんな風に暗黒物質の証拠を積み上げるかという  
と、もちろん証拠が積み上がれば積み上がる程、確実視されるのは当然ですけれども、実  
は暗黒物質が当初言われた時というのは、「いや、暗黒物質なんていないんだ」、「重力の  
法則が変わってしまえば良いんじゃないか」。そういうものと、2つで対立していたんです  
ね。つまり、新しい物質を付け加えるか、新しい力を付け加えるかの違いですけれども。  
但し、こういう暗黒物質の証拠が溜まれば溜まる程、暗黒物質説が有利になって、今や、  
暗黒物質自身は、重力を **modify** することによって説明するのはかなり難しくなってきたと  
いうのが言えると思います。そういう意味で、こういう色々な角度から暗黒物質の証拠を  
集めるというのは、科学的にも非常に重要な事になります。

そういう意味で3番目の証拠は、銀河団の観測です。銀河団というと、まあ銀河がだい  
たい100個から1000個集まって安定に存在している、安定な宇宙の最大の構造(安定であ  
る最大の大きさを持つ宇宙の構造)。だけど実は、銀河団にとって、銀河が何個集まってい  
るかなんて大した事ではなくて、銀河団の主役は、銀河団のガスです。銀河団をX線で見  
ると、非常に高温のガス、1億°C位ですけども、もちろん1億°Cって言っても薄いです。  
地球上の1億°Cとちょっと違いますけど、まあそういうガスで満たされています。だから、  
この銀河団ガスの中にちよびちよびちよびと、スイカの種のように銀河が存在してい  
るのが銀河団です。それで、銀河団を造っている質量、まあちょっと暗黒物質は除きま  
すけども、その殆どっていうのは銀河団ガスから来ています。ただ一方で、今度これを


重力レンズという方法で銀河団を見てみます。重力レンズって何かと言うと、単純に言うところの事です。(スライドを指して)ここに銀河団があります。見えていますよね。それで、ここに明るい光源がある事にしましょう。それで、こちらがここにいて、これを見ると、銀河団って結構重いですから、光が曲がるわけですね。もし銀河団が無かったらこの光が直接こちらの所に来て、こう観測出来るはずですよね。これハッブル定数がここにありますがけれども。だけど、ここに物質があるから、こっちに行ったやつが引き延ばされてこう見えて、こっちに行ったらこう見えるって事は、同じ銀河(光源)がスプリットして見えるわけだね。ここに何か物質があって、普通だったら真直ぐ来て一個しか像が無いはず。当たり前だけど、真ん中に物質があると、こっちに向かう像とこっちに向かう像があるから、写真を撮ると、同じ銀河が2つ見えたり、円形になって3、4個と見えたりしますよね。それがどの位見えるか、どの位シェアされるかで真ん中にある物質がどの位あるかということ逆算する事が出来るんですね。重力源として、重力レンズが起こっているわけだから。まあ詳細な計算はもちろん省いて、これが結果です(スライドの重力レンズ観測の図)。銀河団の物質、銀河団で重力レンズ効果を起こす物質分布ってこんな風になっていると。何か複雑な形だなと思うかもしれません。だけど、これちょっとよく見て下さい。一個一個にまず刺がありますよね。これは、銀河団の中に存在する銀河に付随する暗黒物質です。さっき、あの回転曲線でも言いましたけど、銀河に付随して暗黒物質がいると言いましたよね。それが見えているのがこの刺です。ここで、頭の中で刺を全部折って下さい。そうするとまだボワ〜とこう、土台が見えますか?これが銀河団に付随する暗黒物質です。こういうことです。だから、もちろん銀河に付随する暗黒物質の方が濃く付随しているんですけども、まあ量は大した事無いですけども。でも、こう銀河だけじゃなくて、銀河団全体がブワ〜とこうあって、結果として暗黒物質のこの量は、このX線(観測)とか星だけで、まあ全然足りない程沢山あるという事が分かりました。だから、銀河団って基本的にどういう構造をしているかということ、こういう事です。まず星が、銀河がいて、その周りを包み込む様に銀河団ガスがいて、その周りを更に包み込む様に暗黒物質ガスがいて、こういう事ですね。これ結構大事な事なんです。と言うのはどういう事かと言うと、銀河団にはX線がある事は昔から知られています。なぜなら、X線観測は昔からあるから。だけど、X線って何がX線を出すかということ、非常に高温の水素ガスとかヘリウムガスがあるとX線を出すんですね。ガスとか、1億°Cまで温めるとX線が簡単に出ます。大事なのは、1億°Cもあるヘリウムガスが、何でこんな小さい領域に閉じ込められているかということです。すぐ逃げようとするはずですよね。1億°Cということは温度が高い、温度が高いってことはガスの平均的なスピードが速い、そしたら逃げようとする、どんどんいなくなろうとする。それを押し止めるのが重力です。でも、銀河団の中にある、自分たちの自己重力、ガスの自己重力や、星達だけでは足りない事が昔から知られていました。それがずっと疑問に思われていたのですけれども、暗黒物質がいれば、重力源のおかげで、例え高温のガスと言えど、閉じ込められていると。こういう事が分かります。

これが1つ、重力レンズ効果を通して、又はさっきのガスが抜け出さない様にと議論から、暗黒物質が銀河団に付随して存在する、つまり暗黒物質が存在する証拠になります。けれど、更に決定的な議論が最近（最近といってももう5、6年前で、いや10年位か？）あります。

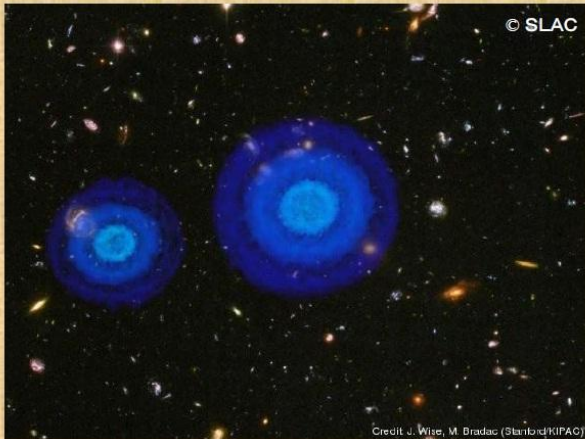
7

## 1. 暗黒物質の存在！

### ～ 銀河団の衝突 ～



© NASA



© SLAC  
Credit: J. Wise, M. Bradac (Stanford/KIPAC)

**Bullet Cluster**  
(銀河団どうしの衝突写真)

(キーワード4)

暗黒物質は光と殆ど反応しないことに加え、**自分同士でも、他の物質(水素やヘリウム等の通常物質)とも殆ど反応しない。**

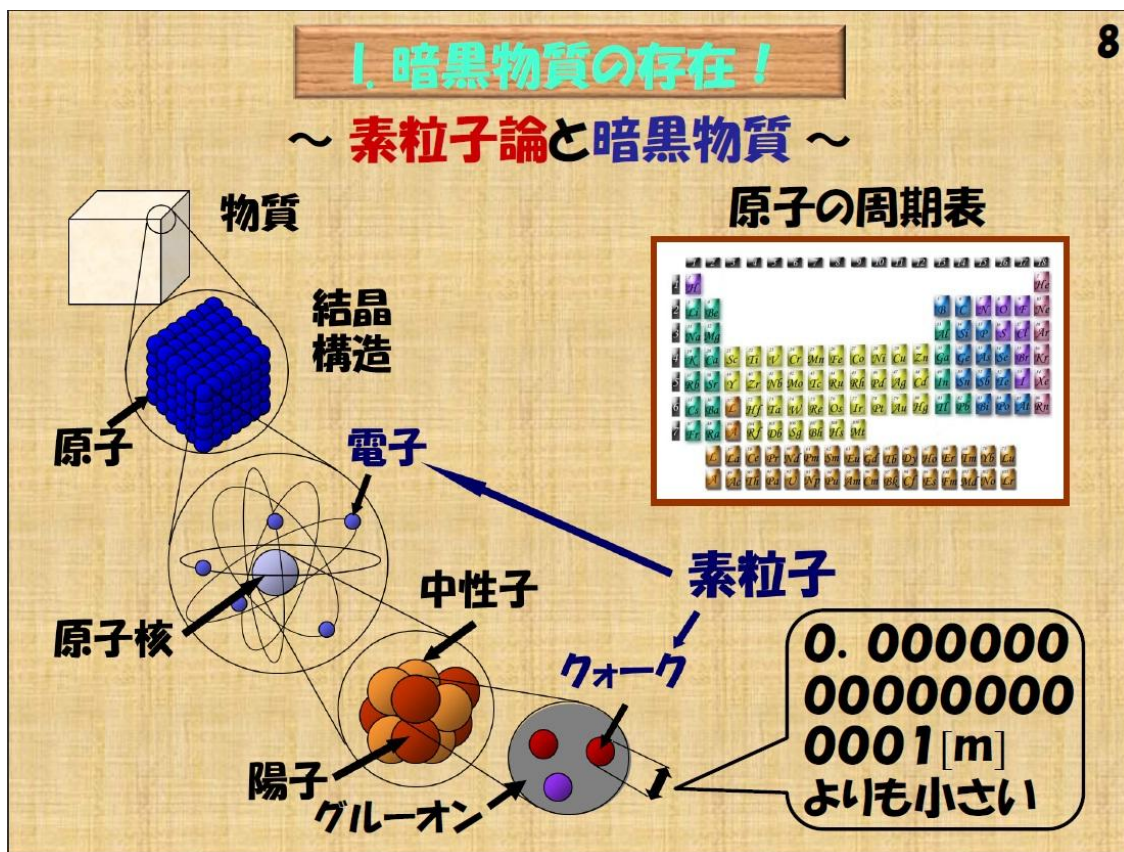
それは、銀河団の衝突現場の写真。これ、2つ合わせて Bullet Cluster と言います。最近だったら、多分 Google に行って、「暗黒物質 証拠」と打つとだいたいこの写真が出てきます。これは何かと言うと、青が重力レンズで見た暗黒物質の分布。赤が X 線観測で見た銀河団ガスの分布です。これだけ見ると、分かる人はすぐ分かると思いますが、これを再現したムービーを見つけましたので、ちょっとまず見て下さい（動画の説明へ）。この濃さは銀河団です、いいですね？それで、暗黒物質と銀河団ガスがいて、こうやってぶつかって行って、ガス同士は激しく反応するけど、暗黒物質はするっと抜けて行く感じですね。まあ3次元で見るとこんな感じになっています。これ（銀河団の衝突）が見えたのがこれ（写真）です。もちろん時間が経つと、今度は離れて行って2つになります。こっちはシミュレーションですから。でも、これ（写真）を再現している事が良く分かりますよね。それで、これ結構重要で、これが重力の変更によって、暗黒物質の証拠を示す事を難しくしている最も大きな結果なんですけれども、まあ、それは置いておいて、この事

実から結構素粒子論的に大事な事が分かります。それは何かと言うと、さっきのムービーを頭の中で思い描くと、暗黒物質というのは光と殆ど反応しないことを先程言いました。ただそれだけじゃなくて、自分同士とも反応しないんですよね。この2つは勝手にすり抜けていましたから。ヘリウムと水素のガス、高温ガス達が一生懸命反応して内側に集まっています、こう通り抜ける時に摩擦があって時間が掛かったのに、暗黒物質はそうじゃない。あと大事なのは、暗黒物質と、ガスとも反応していなかったよね、するっと抜けたってことは。つまり、他の物質ともほとんど反応しないという、そういう物質である事が分かりました。

それで、ここで1つ大事なのは、暗黒物質という名前、もともと英語の「darkmatter」を直訳したんですけども、暗黒って言うと何となくこちらには黒っていうイメージがありますよね。というか「黒」って使っていますからね。でもこれ見ると、基本的に光と殆ど反応しない。物質とも殆ど反応しない。自分自身とも殆ど反応しない。どっちかと言うと、完全な「透明」みたいなイメージの物質なんです。透明でしかもスカスカの物質みたいな。そういうイメージが、実は暗黒物質です。だから、殆ど周りとは反応しないやつなんです。もう少し分かる事は、暗黒物質を探す実験というのは非常に大変である事が分かると思います。何故かと言うと、粒子がいるという実験をする為には、粒子が他の物質と反応して、その兆候を拾ってこなければいけない。でも暗黒物質というのは殆ど反応しないんだから、まあニュートリノの酷いやつみたいな感じのイメージですけども。それだけ、実験の人たちが非常に注意深く、それでも何とか見つけようとする位丁寧な実験をする必要があって、実際に彼らは、世界中でそれをやっている。まあその話は後々やりませう。

(質問) すいません。この実験からの、陽子とかのインタラクションのデータのアップバウンドって、**direct detection** より弱いんですか？

(回答) 弱いです。えっと、陽子と陽子の反応断面積はどの位分かります？それは**1barn** ですよ。barn っていうその為の定義だったから。 $10^{-24} \text{ cm}^2$ 。それで、ここから出てくるのは、暗黒物質と陽子、暗黒物質と暗黒物質の反応断面積というのはそこから一桁小さい位の制限しか出てこない。何故かと言うと、暗黒物質が密度が薄いので、その分だけちょっと落ちてしまうから。



さて、最後になりましたが、ちょっと素粒子論的な立場から暗黒物質を見てみたいと思います。素粒子論っていうのは、言ってみれば、あらゆるものを分解して行って、最も基本的な構成要素の粒子を探し出して、その間の相互作用を調べる学問です。もちろん何か物質があって、結晶があったとしたら、結晶というのは原子で出来ていて、原子は原子核と電子で出来ていて、原子核は陽子と中性子で出来ていて、陽子と中性子の中にはクォークがいて、グルーオンで糊付けされていると。まあ、これは知っていますよね。それで、まあ今のところ電子とクォークというのは、素粒子として考えられています。少なくとも今の実験精度では、クォークとか電子に、何かその内側に構造があることはまだ認められていない。まだ構造があるという兆候は見えていないので、まあ点粒子として扱われているということです。どの位小さいかということこれ。ゼロを並べればかっこいいってもんじゃないですけど、この位ですね。(0.00000000000000000001m よりも小さい)。

9

## I. 暗黒物質の存在！

### ～ 素粒子論と暗黒物質 ～

クォーク	u	c	t	力を伝える粒子
	d	s	b	
レプトン	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	W
	e	$\mu$	$\tau$	Z
	g	ヒッグス h		G

$u \text{ \& } d \text{ \& } g \rightarrow$  陽子(p), 中性子(n), 中間子( $\pi$ )  
 $p \text{ \& } n \text{ \& } \pi \rightarrow$  種々の原子核(N)  
 $N \text{ \& } e \text{ \& } \gamma \rightarrow$  種々の原子(Atoms)  
 $\nu_e \text{ \& } \nu_\mu \text{ \& } \nu_\tau =$  ニュートリノ

暗黒物質は現在知られているどの素粒子でも、またそれらから作られる物質でもないことが判明！

↓

**(キーワード5)**  
**暗黒物質は未発見の粒子**  
**更に暗黒物質粒子は十分(宇宙年齢に比べ)安定でなければならない。**

殆どの粒子は不安定であることに注意。

今現在知られている素粒子っていうのは何かというと、この間のハッピーなヒッグス粒子の発見と言ってはいけなくて、ヒッグス粒子と強く定められるような粒子の発見があって、こんな感じですね。クォーク：三世代あって、ud、cs、tb。電子とそれに付随するニュートリノがまた三世代（レプトン）。それで、ヒッグス粒子（多分まあ僕はヒッグス粒子と思ってますので、ヒッグス粒子）。あとは、力を伝える粒子。電荷に力を伝える光子。弱い相互作用のゲージボソン：W ボソン、Z ボソン。あとは、グルーオン。それと、これはまあ間接的にしか見つかっていませんけど、重力を媒介するグラビトン、という事になります。まあだいたい、うちの体を造っているのは、どうせこちらへんですよ（クォーク、レプトンを指して）。こちらへんとあと光子位ですけども。それで、こいつらの間にどういう力があって、どの位の強さで働いているかというのを記述しているラグランジアンが、（つまり）物理の法則が、素粒子標準模型ですね。多分まあ、ここはM1の人も多いし、まだ素粒子標準模型の勉強の途中という人もいられるかもしれませんが、言ってみればまあ、素粒子の分野で確認された中で最も大事な理論が素粒子標準模型です。但し、ここで暗黒物質を考えます。最初に皆がもちろん考えるのは、この素粒子の中でどれが暗黒物質に対応するのかなと思うわけですね。それは当然の帰結です。しかし答えは、どれも相当しません、終わり。どういう事かと言うと、これらの内のどれも、どの素粒子も暗黒物質にはなり得ないし、暗黒物質と仮定すると、すぐに反する実験検証が見つかってしまいますし、こいつらを組み合わせて造ったどんな物質も暗黒物質にはならない、という



事が分かっています。ここで重要なキーワードは、暗黒物質というのは、(多分素粒子だと思えますけれど、) 未知の素粒子、未発見の素粒子だろうと思います。もう1つ大事なのは、現在の宇宙に暗黒物質が存在するわけですね。基本的に素粒子というのは、重くなったら崩壊します。いなくなっちゃいます。重い素粒子というのは、軽い素粒子に崩壊する定めになります。だけど、現在の宇宙ではきちんと暗黒物質として存在してもらわなきゃいけないので、その未知の素粒子というのは、十分に安定でなければいけません。十分ってどういう事かという、宇宙年齢に比べて十分に安定。本当はもっと正確な事言うと、宇宙年齢よりも10桁以上安定じゃないと、だいたいそういう暗黒物質模型は死ぬんですけれども。まあそういう細かい事はちょっと言わないで、これが、暗黒物質にとって非常に大事な事になります。

10

## 1. 暗黒物質の存在!

暗黒物質についてのキーワード1~5のまとめ

~ 暗黒物質の性質 ~

1. 光(電磁波)と殆ど反応しない
4. 暗黒物質どうし、また他の物質とも殆ど反応しない
5. 安定な未知なる素粒子

~ 暗黒物質の状態 ~

2. 現在の暗黒物質の平均質量密度は約  $2 \times 10^{-30}$  [g/cm<sup>3</sup>]である。
3. 現在の暗黒物質(暗黒ハロー)の速度は非相対論的である。

それでは暗黒物質の正体は何?

質量・スピン・量子数・相互作用 & その存在理由

$10^{-15}$     $10^{-10}$     $10^{-5}$     $10^0$     $10^5$     $10^{10}$     $10^{15}$     $m_{DM}$  (GeV)

Axion      WDM    ADM    WIMP      WIMPZILLA

さて、これまで暗黒物質の証拠について、実験結果をベースに理論的な考察を与えて、キーワードとしてまとめていきました。そのキーワードをまとめたのが、この通りです。まず、何が分かったかという、見つかった暗黒物質のどの実験も、暗黒物質が宇宙に存在している事を強く示唆している。これはもういいですよ。それと同時にそれぞれの実験から引き出せる情報があると思います。それをまとめたのがこれです。まずその情報は2つに分かれます。暗黒物質のプロパティと暗黒物質のステータスですね。

プロパティの方ですけれども、まず光と殆ど反応しない。これは最初の方の話題。もう1つは、暗黒物質同士、又はその他の物質とも殆ど反応しない。これは **Bullet Cluster** から分かりましたね。最後は、安定な、だけど素粒子標準模型の中には含まれない未知の素粒子である。どれも、知っている人にとっては当たり前かもしれない。当たり前じゃんって思うかもしれないけど、この当たり前を積み重ねて更に理論的に考えていくのが素粒子論ですから、まあ一応まとめる価値はあります。

そして、もう一個の方、暗黒物質のステータスの問題です。これは、現在の暗黒物質の平均密度というのは、このスライドでは「約」って書いてあるけど、もの凄く精度良く分かっている、先程言った通りです。そして、もう1つは現在の暗黒物質（より正確には、宇宙の構造形成が始まった位の過去から現在までの暗黒物質ですけれども）は非相対論的である。いわゆる、「暗黒物質は冷たい」。暗黒物質の平均運動エネルギーというのは、その質量エネルギーに比べてずっとずっと小さい、というのがまとめです。ここまでは、暗黒物質の実験、宇宙論的な実験、あるいは天文学的な実験から、特に素粒子論的な観点から見た暗黒物質の情報になります。

それで、メインピック、「じゃあ暗黒物質の正体は何か」という話です。ここで1つ大事なものは、この問いにどう答えるかということです。これは多分立場によって違います。例えば実験の人がいたとしたら、暗黒物質の正体と言う時には、その暗黒物質がどの位の質量を持っていて、スピンは何か、フェルミオンなのかボソンなのか、まあスピンの0なのか1/2なのか1なのか。そして、どんな量子数を持っているか、標準模型は  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  のゲージ対称性ですけど、そのゲージ対称性に対してどういうゲージチャージを持っているのか。あるいは、他の標準模型の粒子達とどのような相互作用項を持っているかを全部明らかにしたら、実験屋さんにとっては、それはまあ暗黒物質を発見したと言う事が出来る。理論屋さんにとってはもうちょっと違う観点がありまして、例え暗黒物質が見えて、ああこういう量子数を持った粒子が、暗黒物質になっていましたと言っても、何でその暗黒物質がいるのかっていう話になりますね。ぽつんとただラグランジアンに付け加えただけだったら理解した気にならない。何かもっと壮大な背後があって（本当にそんな事言えるか誰も知らないけど）、その結果、暗黒物質は必然的に現れて、それが現在の宇宙に残って見えているんだと。そういう2つの観点があるということ覚えておいて下さい。それについてはもちろん次に、セクション2から始めたいと思います。

ここで1つ言いたいのは、これちょっと余談ですけども、これらの性質とか状態、どれを見ても、暗黒物質自身の質量については何も言っていないんですね。宇宙の中に存在している時に、平均的にこの位の質量密度がありなさいと言っているけれども、これは個々の暗黒物質の質量については何も言っていません。その結果、世の中にはもの凄く数の暗黒物質候補がいて、その質量は非常にワイドレンジに渡って予言されています。ある人は、アクシオンっていう粒子が暗黒物質だと。その総質量っていうのは（この GeV っていうのは陽子の質量ですけど）、陽子の  $10^{15}$  倍。15桁小さい。と言う人もいれば、いや、これ

はまあ標準的な…僕もそうですけれど、だいたい暗黒物質っていうのは陽子の 100 倍程度あるんじゃないか、あるいは 1000 倍程度あるんじゃないか、あるいはまあ極端に言うと **WIMPZILLA** っていう、まあこれアメリカでゴジラの映画が流行った時に、勝手にこういう名前付けた人たちがいるんですけど、名前は無視していいですけど、重さが陽子の  $10^{15}$  倍。つまり暗黒物質は重いんだと。これ、のべ 30 桁に広がっている。で、これ（候補の名前が）書いていないのがあるんですけど、候補として存在するものを全部書くと、もちろんこのページが埋まっちゃうので書かないだけですけど、これ（スライド下図）全部に渡ってあります。それで、まあ俺が正しいとか、あいつは間違っているとか喧嘩するわけですけども、証拠が出るまで好きな事言っていっていい…まあそこはいいんですけど。けども、最近になってやっと、暗黒物質の検出実験、あるいは暗黒物質の **detection**、そして **LHC** の実験結果が出てきて、大分的を絞った議論が出来る様になってきました。まあその話は最後にしたいと思います。とりあえずここで大事なものは、暗黒物質の存在証拠っていう観測から、もちろん「ああ、暗黒物質がやっぱり存在するんだな」っていう確信を得るとともに、更にそこから、**additional** な **information** を引き出すとこんな感じになっていますよという事です。ちょっと、ここらへんで休憩したいなと思います。

(休憩)

## II. 暗黒物質の正体!

11

1. 光(電磁波)と殆ど反応しない
2. 現在の暗黒物質の平均質量密度は約  $2 \times 10^{-30}$  [g/cm<sup>3</sup>]である。
4. 暗黒物質どうし、また他の物質とも殆ど反応しない
3. 現在の暗黒物質(暗黒ハロー)の速度は非相対論的である。
5. 安定な未知なる素粒子

- 条件1: 暗黒物質は電氣的(カラー的にも)中性である。  
 条件3: 暗黒物質は十分に重い。( $m_{DM} \gg 1$  keV)  
 条件4: 中性で重い素粒子の相互作用は弱い。  
 条件2: 宇宙の熱史に依存 or あるいはWIMP仮説。  
 条件5: 単に仮定する or 背後にある対称性を考える。

### WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)仮説

暗黒物質は、中性(電荷を持たない)で安定な素粒子であり  
 その質量は、陽子の約100倍(つまり100 GeV)である。

まあ、暗黒物質の解明というのは素粒子の深淵に向かっている。素粒子の深淵と勝手に僕が思い込んでいるんですけど。暗黒物質もそうですけど、やっぱりこれを知りたい。宇宙論の人たちに言わせると、暗黒物質があることは分かっているから俺たちの分野はもう終わりと言われました、この間。そうすると、暗黒物質の争点は何であるかどうかは宇宙論には特に関係ないんですけども、素粒子の人にとっては素粒子や原子核あるいは高エネルギーの人にとっては大問題なわけです。そこの話をしていきたいと思います。

さて、ここにまた同じことを書きました。それぞれ、ここから示唆される暗黒物質像を見ていきたいと思います。まず最初に、光と殆ど反応しない。これ何かというと、暗黒物質は電氣的に中性であるだろうというのが尤もらしい解説になると思います。つまり中性。あと、カラーを持っていない方がよろしい。カラーを持っていたら、今 LHC で作られて見えてるはずなので、そういう意味では死んでいるんですけども。

次に条件3を見てみます。非相対論的です。これ実は暗黒物質が充分重ければ勝手にそうなります。軽いと周りとの相互作用して、周りの物質と相互作用して、すぐ温められてホットになってしまいますけど、重ければ平気。どのくらい重ければいいかというと、だいたい分かっている、だいたい1 keV 以上であれば問題ないということも分かっています。そういう意味では、さっき見せたリストのうちの非常に軽い方の暗黒物質というのは少しテクニックを使ってあって。何かって言うと、軽いんだけど他の物質と殆ど相互作用しない。だから軽いけども周りの熱いガスと殆ど反応しないから冷たいままでいられるとい

うことですね。そういう特殊な例を除いては普通はこの辺以上ですから、だいたい重いと  
ころという。だから、今回はこういう話に集中していきたいと思います。

もう一つですけど、暗黒物質同士また他の物質同士とも殆ど反応しない。これ一見難し  
そうな命題に見えるけど、実は簡単です。何故かっていうと、まず中性で重い素粒子の相  
互作用というのは基本的に弱いです。何故かっていうと、中性であるということは **photon**  
と **QED** の相互作用しないということですね。つまり長距離力の相互作用をしないとい  
うことですね。そうすると、だいたい断面積というのは全部次元解析で議論できて、だいたい  
衝突断面積を計算すると、衝突断面積というのは基本的に質量次元の逆数の 2 乗ですから、  
1 keV 位までであると、だいたい全ての観測と矛盾しないくらい相互作用が弱くなります。  
自分同士であろうとも相手がバリオンであろうとも。そういう意味で、条件 1、3、4 と  
いうのは意外にこの辺を考えると充分満たされている。そんなに難しくない。だから僕は、  
暗黒物質というのはこの辺 (条件 1、3、4) を満たす粒子だろうと思っています。問題は、  
2 と 5 です。2 というのは、なかなか強烈ですよ。これ定量的な条件です。現在の宇宙  
の暗黒物質はこんくらいなきやいけない。しかも 1% 弱でも分かっています。だけど、こ  
れは現在の宇宙に暗黒物質がどんくらい存在すべきかというのは宇宙のヒストリーに関わ  
ってくるわけですね。

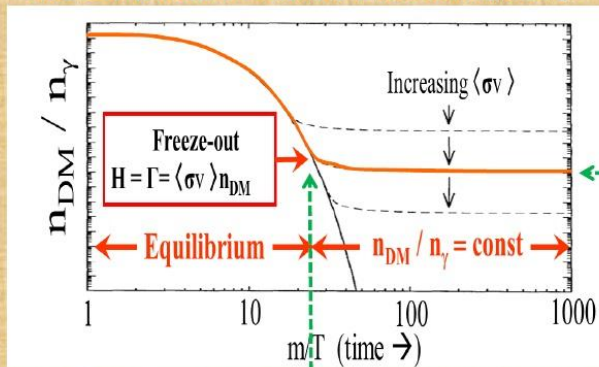
もう一つ最後の条件は安定。これ安定はなかなか面白いですよ。普通、重い素粒子と  
いうのは安定じゃないんです、分かると思うけど。すぐに崩壊してしまいます。できるな  
ら全員 **photon** に崩壊したいと思っているんだけど、まあ思っているかどうかは知らない。  
素粒子はそうなんだけど、でも安定で留まっている。ここがやっぱり素粒子のキーにな  
るところになるわけです。で、2 と 5 というのは素粒子に対する非自明な条件になるわけ  
ですけども、2 を起点に始めるか 5 を起点に始めるかでちょっと話が変わってくるので、  
まず最初に 2 を起点に始めた場合の暗黒物質像についてお話をしたいと思います。

2 を起点に始める暗黒物質像というのは、いわゆる一番有名な **WIMP** 仮説。**WIMP** って  
弱虫っていう意味ですけども、正確には **Weakly Interacting Massive Particle** というもの  
の略の **WIMP**。相互作用しないから弱虫なんですけども、まあそれはいいや。

どういうことかという、この仮説はこの通りです。暗黒物質は中性で安定な素粒子で  
あり、その質量は約陽子の 100 倍である。これが仮説です。最初の中性な素粒子とい  
うのは、ここら辺を引きずっているんですね。100GeV 重いついていうのはこの辺を。けど、1  
keV 以上って書いてあって、これは 100GeV に固定しています。で、安定な素粒子。この  
安定っていうのはアドホックに安定でありなさいということを、**by definition** で仮定して  
います。これでどうして上手くいくのか、この通りです。

## II. 暗黒物質の正体！

安定で中性な粒子の初期宇宙における振る舞い



条件2を起点に  
暗黒物質像を探る。

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \simeq \frac{0.1 \text{ pb} \cdot c}{\langle\sigma v\rangle}$$

暗黒物質の安定性は  
アドホックに仮定！

$$\langle\sigma v\rangle = \alpha^2/m^2$$



$$\text{With } \alpha = 0.01 \text{ and } m = 100 \text{ GeV} \\ \langle\sigma v\rangle = 1 \text{ pb} \rightarrow \Omega_{\text{DM}} h^2 = 0.1$$

ちよつとこゝら辺難しいかもしれないけれど、中性で安定で 100GeV 位の質量を持った粒子が初期宇宙でどのように振る舞うかを計算してみます。これは Boltzmann 方程式っていうのを解いて計算すれば分かるんですけど、結果こんな感じ（スライド左図）になります。横軸が時間です。でも実際には、宇宙論で時間と温度の逆数っていうのは一対一対応がありますの、時間の逆数で書いていて、 $M/T$ 。ちよつと中見づらいですけど、 $M$  っていうのは暗黒物質の質量です。1 っていうのは宇宙の温度が暗黒物質の質量くらい温度。10 っていうのは、その 1/10 ですね。縦軸は暗黒物質の質量密度を、宇宙に存在する photon の質量密度で割ったものです。そうすると、どういうことかという、暗黒物質と何にも反応しなくても、宇宙が膨張すると勝手に薄まっていきます。体積 2 倍になったら密度 1/2 になりますよね、粒子だから。だけど、photon の数も勿論 2 倍になったら 1/2 になるから、それで compensate して、こういう量で図るのが便利。この量に変化があるってことは、暗黒物質の何らかの相互作用で暗黒物質の数がチェンジしているという状況を表すことができるから。このオレンジ色の線が答えです。この線っていうのは暗黒物質が周りの物質と完全に熱化学平衡にある時に予言される値です。熱化学平衡にあるときは、統計力学を思い出してもらえれば分かる。非常に宇宙の温度が高いときっていうのは、暗黒物質っていうのは周りの軽い素粒子たち、熱浴を形成している軽い素粒子たちと反応して、熱化学平衡状態にある。線の上に乗っかる。あるところで、そこからの離脱が図られる。どういうことかという、温度が下がっていくと、暗黒物質を熱平衡に留めようとする反応の強さ

よりも、宇宙の膨張のスピードの速さの方が勝ってしまって、暗黒物質同士がもはや出会えなくなって、暗黒物質の数を変化させることが出来なくなる。だから、平衡でなくなるんですね。勿論、宇宙が膨張した分だけ減る分は、宇宙が2倍になって1/2になる分はいつもあります。それは今、 $n_{DM}/n_\gamma$  にしてるから、その分は見えてないんですけども、netの暗黒物質質量というのは変わらない。それがどれくらいで次に起こるかという、だいたい温度が暗黒物質の1/20くらい、つまり暗黒物質が非相対論的になったときに起こります、いいですね。ということは、その後の宇宙、あの、暗黒物質を加速することなんてまず出来ませんから、一旦非相対論的に出来上がってしまったら、あとずっと非相対論的ですし、いいですね。だから、このWIMP仮説というのは暗黒物質がなぜColdであるかということをもっと保証してくれます。最終的にできる量、これが現在残っている暗黒物質質量になるわけですけど、これは実際に解析的に感じることはできませんけど、準解析的にこのくらいで評価されます。この量ちょっと難しいけど、何かというと、暗黒物質の現在における質量密度だと思ってください。これが0.1だと、ぴったし観測と合います。その事実だけ覚えておいてください。それがこれで与えられる(スライド右上の $\Omega_{DM} h^2$ の値)。これは光束、これはpico-barn。さっき質問がありましたが、barnというのは $10^{-24}$ で、picoというのは $\times 10^{-12}$ 。 $\sigma_V$ っていうのは、暗黒物質と暗黒物質が対消滅して標準模型の素粒子に行く対消滅断面積です。これはだから、Boltzmann方程式を解くと、こういう答えが出る。大事なのは、対消滅断面積というのは、非常にナイーブに、次元解析からだいたい $\alpha^2/M^2$ くらいで与えられるということです。もし暗黒物質が非常にstrongな粒子でない限りは、Mっていうのは暗黒物質の質量。なにしろ今質量次元が暗黒物質の質量しかないですから、 $M^2$ で割られていて、前にゲージ結合定数(オーダー1くらい、0.1~1くらい)が各ダイアグラムに2個ついていて、そいつを更に2乗して断面積だから4乗、まあ $\alpha^2$ ですね。例えば $\alpha$ がだいたい弱い相互作用っていうか0.01位、QEDの $\alpha$ とSU(2)の $\alpha_2$ の間くらいを取って、質量を先ほどの仮説により100GeVと置きます。これで計算してます。1pico-barnになります、だいたい。これ、すぐにやってみれば分かります。1pico-barnになるということは、この予言される1pico-barnをここに代入すると、これ0.1になります。この0.1というのはWMAPで示唆されている量と全く同じ。ということで、非常にうまく説明できる。これがWIMP仮説です。これ今、暗黒物質の詳細な性質にはよらず議論できますね。暗黒物質が100GeVくらいの重さを持っていて、対消滅断面積がだいたいSU(2)とかU(1)ハイパーチャージ位のゲージ結合定数で反応していると、自然にこれが出てくる。かなりパワフルな証明です。これがやはり爆発的に流行りまして、みんなこの条件2を起点に考えて、暗黒物質というのはこのくらいの粒子でなきゃいけない、こういうような粒子を予言するような標準模型を超える素粒子模型は何かって言って、過去10年一生懸命調べてきたんですね。但し、これは確かにすばらしい議論なんですけれども、これに固執し過ぎると失敗することがあります。

## II. 暗黒物質の正体！

**条件2を起点に暗黒物質像を探る際の弱点。**

**熱平衡状態からFreeze-outして残る暗黒物質が、我々の宇宙に存在する(全ての)暗黒物質となるとは限らない。**

**(i) 他にも暗黒物質生成に関わるプロセスがある可能性有。**

**例) 熱平衡にない重い粒子(グラビティーノ、モジュライ等)が存在し宇宙が十分冷えて後崩壊し暗黒物質を作る。**

**(ii) そもそも宇宙の温度がm程度まで熱くなる事がないかも。**

**(iii) 暗黒物質がそもそも熱化学平衡に達しないかもしれない。**

**(iv) 暗黒物質がなぜ安定なのかが説明されていない。**

**例) 理論に $Z_2$ 対称性を課す。つまり暗黒物質を含み物理を記述するBSMの作用が以下の変換に対し不変。**

$$SM(x) \rightarrow SM(x)$$

$$DM(x) \rightarrow -DM(x)$$

**暗黒物質が安定となる。**

**(アドホックすぎる!!)**

どういうことかという、それを信じすぎて盲目的になるのはまずいということですが、それでも。どういうことかという、宇宙の初期に暗黒物質が他の物質と平衡状態にあるわけ。それがやがて decouple して平衡状態から離脱して、その結果残った量っていうのが、対消滅断面積が 1 pico-barn くらいになると、ちょうど WMAP が示唆する値になりますよと言ったんですね。ところで、他に暗黒物質生成に関わるプロセスがあったら、この話はオジャンになります。宇宙の初期に確かに暗黒物質と熱浴が熱平衡状態であったと。だけどそれ以外に粒子がいて、そいつは熱平衡とは関わってなく、なんか decouple しているような粒子がいたと仮定してください。宇宙が進んで行って暗黒物質が熱浴から外れた後に、その元々外れていた何か別の粒子 A っていうのが崩壊して暗黒物質を作ったとします。そうすると、その分も足さなきゃいけないですよ。勿論ね。足したものが WMAP で測られています。なんでそんな面倒くさいことを考えんだよと僕も最初は思いました。だけど以外に、そういう粒子を预言する標準模型を超える物理っていうのは多くて、例えばこれはキーワードを見せると、gravitino がいたり、moduli がいたり、そういうのがあると、この暗黒物質の WIMP 仮説というのは崩れます。そういうのがもし本当の理論だとすると、WIMP 仮説を中心に暗黒物質の正体を突き詰めても的を外すという可能性がある。

もう一つは、そもそも宇宙の温度が暗黒物質の質量ほど暑くならないかもしれない。これは誰にも分からないですね。宇宙の初期で多分インフレーションが起こった。多分これはみんな信じてます。インフレーションが一旦起こると、宇宙の温度は 0 になります。殆



ど0になります。そこからインフレーションを起こしている粒子インフラトンが崩壊して、宇宙が加熱されます。加熱されたときにどこまで高い温度まで加熱されるかって誰も知らないです。充分高ければ暗黒物質が熱平衡になるまで加熱できるけど、低かったらそもそも暗黒物質が初期宇宙で高い温度で質量が  $M$  くらいで熱平衡状態にあるという議論が、そもそもオジャンになります。こういう場合には使えない。

あるいは、世の中に色々な暗黒物質がいて、そもそも暗黒物質はアクシオンみたいに、さっき言った軽い粒子のように、他の粒子と相互作用が非常に弱くて、かなり高い温度の宇宙でも熱平衡を保てるほど相互作用が強くないかもしれない。この場合は勿論、WIMP 仮説っていうのは使えなくなります。別に僕は WIMP 仮説の悪口を並べるためにこれを書いたわけじゃなくて、WIMP 仮説は仮説で面白いんだけど、それだけに固執しないようにという意味で書いているだけです。

一番の僕が問題だと思っていることは、暗黒物質がなぜ安定なのか全く説明されていないということです。暗黒物質が安定であるということは、暗黒物質の最も大事な性質です。でも普通はどうやって議論するかというと、何か  $Z_2$  対称性っていうのがあってね、とかそういう話になります。どういうことかということ、 $Z_2$  対称性っていうのはいいですよ。これは離散的な群で、1 と  $-1$  だけを群の要素で持っている理論で、例えばラグランジアンを書きます。標準模型+暗黒物質場、あとその間の相互作用っていう感じでラグランジアンを書いたとします。そのラグランジアンがある  $Z_2$  対称性に対して対称であると手で仮定します。どういうことかということ、この  $Z_2$  対称性の変換の下で標準模型の粒子たちっていうのは変わらないけれども、暗黒物質は「(暗黒物質)  $\rightarrow$   $-$ (暗黒物質)」として変換する、そういう対称性があったと仮定します。そうすると暗黒物質は崩壊できませんよね。どうしてか。 $Z_2$  対称性って基本的にパリティの対称性と同じですから、数学的には、暗黒物質が始状態にあると、終状態は標準模型粒子に崩壊します: (暗黒物質)  $\rightarrow$  (標準模型粒子)。始状態の  $Z_2$  対称性は  $-1$  です。終状態は標準模型粒子だけで書かれているから、 $n$  個に崩壊したら  $1$  の  $n$  乗です。1は何回やっても  $n$  乗は  $1$  だから、 $-1$  から  $1$  に変化できないですね。そうすると、こういう  $Z_2$  対称性があると、暗黒物質の安定性が保証される。そういう話です。これ、なんで  $Z_2$  対称性があるかというのは全く議論しないで、こういうのはあるに違いないと言っておいて、その後に WIMP 仮説が始まるわけです。

## II. 暗黒物質の正体！

1. 光(電磁波)と殆ど反応しない
2. 現在の暗黒物質の平均質量密度は約  $2 \times 10^{-30}$  [g/cm<sup>3</sup>]である。
3. 現在の暗黒物質(暗黒ハロー)の速度は非相対論的である。
4. 暗黒物質どうし、また他の物質とも殆ど反応しない
5. 安定な未知なる素粒子

### 条件5を起点に暗黒物質像を探る

質量を持った安定な素粒子の背後には破れていない対称性有り！

例)  $e$ :  $U(1)_{EM}$ , 電荷の保存 (ゲージ対称性)

$p$ :  $U(1)_B$ , バリオン数の保存 (偶発的グローバル対称性)

$\nu$ :  $U(1)_L$ , レプトン数の保存 (偶発的グローバル対称性)

偶発的対称性: ラグランジアンを書き下した時に偶発的に現れる対称性。(繰り込み可能な範囲、及び摂動的な範囲では対称性を破る相互作用が書けない。)

それでは暗黒物質の安定性を保証する対称性は？

アドホックに入れない

だけど、今回はもうちょっと違う視点から、暗黒物質の正体に迫っていきたいと思います。それは何かというと、さっきは条件2を起点に始めましたけれども、2つというのは勿論宇宙のヒストリー、暗黒物質の性質に強く依るので、どちらかという素粒子論的にはこっちから出発しようと、なんで暗黒物質は安定なんだろうかということから出発したいと思います。条件5を起点に暗黒物質を探ると。

重い粒子が、質量を持った粒子が安定であるには何か理由がある筈です。それはどういう例があるかという、実際に我々の知っている、現実存在している、存在していることが確認されている素粒子で何が起きているかを見るのが一番です。まず  $\text{photon}$  は零質量だから、まあ別にどうでもいい。どうでもいいって言うか、 $\text{photon}$  は安定。それ以上崩壊できないから。質量を持った粒子っていうのは、何も背後に対称性がなければ全部  $\text{photon}$  に崩壊するはず。素粒子は。でもそうになってない。何故か？

まず最初は電子です。電子は安定ですね。安定じゃなかったらウチラ困るんですけど、勿論。それは何故かと言うと、 $U(1)_{EM}$  のゲージ対称性があるから、あるいは Noether の定理を思い出してもらおうと、電荷の保存があるからですね。だから、電子があつて、全部フォトンに崩壊するわけにいかないですね。電荷が保存しなきゃいけないから。そういう、だから、 $U(1)$ ゲージ対称性というのが入る。

次に陽子。陽子は  $U(1)_B$  という対称性が偶発的にあります (accidental にあります)。これは Noether カレント、Noether の定理でいくと、バリオン数の保存というのがあるわけ

です。正確に言うと、バリオン数の保存というのは非摂動的に破れてますけど、その破れは物凄く物凄く物凄く小さいから、充分良い近似であると思ってもらっていい。それで、それは偶発的なグローバルな対称性だからです。

次、ニュートリノ。ニュートリノは全部 **photon** に崩壊しないですよ。それはどうしてか。レプトン数の保存があるからですね。U(1)。これも偶発的な対称性です。偶発的なグローバル対称性です。それで、「えっ何、偶発的な対称性っていう言い方」という質問を思った人がいると思いますけど、こういうことです。ラグランジアンを書き下した時に、偶発的に表れる対称性です。まあ何も説明していませんね。どういうことかという、ラグランジアンを書いた時に、くりこみ可能な範囲で、且つ及び摂動的な範囲で、対称性を破る相互作用が偶発的に書けなくなっている状態のとき。これを偶発的対称性と言います。標準模型でどう書くかという、まず **particle contents** が決まっています。quark がいて、**up-type quark** がいて **down-type quark** がいて **doublet quark** がいて、lepton がいて…って書きますよね。それで、課している対称性はゲージ対称性だけです。SU(3)×SU(2)×U(1)で対称でありなさいと。書き下して、次元 4 までの **operator**、くりこみ可能な範囲で相互作用を全部書き下すと、絶対 U(1)<sub>B</sub> と U(1)<sub>L</sub> が偶発的に現れます。これが偶発的対称性。

だから、我々が知っている粒子っていうのはゲージ対称性が保証されている、あるいは偶発的なグローバル対称性が保証されているという、2 種類の方法によって安定性が保証、質量を持っている素粒子の安定性が保証されている。

## II. 暗黒物質の正体!

15

**標準模型(SM) + 暗黒物質場(スピン=0 or 1/2) の理論を考える。**

**Case I: 暗黒物質場をSMに加えたときに偶発的に暗黒物質の安定性を保証する対称性が生まれるのか?**

標準模型にある物質場達(クォーク、レプトン、ヒッグス)は全て  $SU(2)_L$  (弱い相互作用) の基本又は自明な表現である事に注目。

暗黒物質が  $SU(2)_L$  の高い表現(その中性コンポーネント)のとき

$$L_{\text{int}} = DM(x) SM(x) SM'(x) \cdots SM''(x) + \text{h.c.}$$

[M. Cirelli, N. Fornengo, A. Strumia, Nucl. Phys. B753 (2006).]

となし、暗黒物質を崩壊させる相互作用を禁止できる。つまり、**暗黒物質を安定にする  $Z_2$  対称性が導出される!**

予言

**暗黒物質は高い対消滅断面積を持つ。( $\chi^0 + \chi^0 \rightarrow W^+ W^-$ )  
暗黒物質のスピンに関しては特に予言なし。**

それでは、暗黒物質の安定性を保証する対称性は何かという話に行きたいと思います。2種類やったから、2つに分けて考えましょう。

一つ目は、標準模型に暗黒物質の場を導入して、そういうラグランジアンを頭の中に浮かべてください。ケース1は、暗黒物質場を標準模型に加えたときに、偶発的に暗黒物質の安定性を保証する対称性が生まれ得るのか、という質問です。いろんな方法が実はあるかもしれませんが、勿論答えはイエスです。どういうことかという、次の事実に注目します。標準模型にある物質場たち (quark, lepton, Higgs たちですね) は全て弱い相互作用、 $SU(2)$  のゲージの相互作用の基本または自明な表現ですよ。Doublet か singlet。それはいいですよ。標準模型やった人いますね。2章がある意味一番、ちょっと勉強しないと分からない難しい所もあるけど、ここ面白いです。この事実に注目します。

どういうことかと言ったら、もし暗黒物質が  $SU(2)$  の対称性の高い表現であったとき。Triplet ぐらいじゃ、まだまだ高くありません。4重項、5重項、6重項、7重項、段々怪しくなってくるけど、そういう場合を考えましょう。そうすると、暗黒物質を崩壊させる相互作用を書こうとすると、暗黒物質が  $SU(2)$  の非常に高い表現だから、その相互作用項に標準模型を加える時に、 $SM(x)$ 、 $SM'(x)$ とかいろんな quark とか lepton を、いろいろ置いてもいいですけども、全体として  $SU(2)$  不変じゃなきゃいけないので、相互作用ですからね。そうすると、必然的にある程度高いと、必ずコイツはくりこみ可能な operator じゃなく、つまりくりこみ可能な相互作用じゃなくなります。だから、そういう相互作用の前の係数

というのは非常に強く suppress されます。suppress されているのは、Planck スケールとか遠くに置くと暗黒物質の安定性が、まあ近似的な安定性ではありますけど、宇宙年齢に比べてずっと長い寿命を保証してくれる相互作用になります。これを最初に言い出したのは彼ら(Cirelli, Fornego and Strumia)で、「minimal dark matter」とか言われています。

つまり暗黒物質を安定化する $Z_2$ 対称性が導出されたわけですね。これどういうことかという、こういうのは全部 higher dimensional operator だから、実際の現実的な物理には効いてこないとなると、必ず暗黒物質というのは、くりこみ可能な範囲の演算子の中では $Z_2$ 対称性を持っていることになります。実際、暗黒物質は  $SU(2)$  チャージを持っているわけだから、 $W$  ボソンとか  $Z$  ボソンと相互作用できます。その相互作用を書いてみれば分かると思いますけど、それは全て暗黒物質 2 つ入ってゲージ場とか、そういう  $Z_2$  対称性の下で不変になっているようなものです。つまり、こういうことを考えるとなぜ暗黒物質が安定している事実が出てくるかということ、自然に一応説明できる。まあ、高い表現を暗黒物質が持っているということが自然かどうか、という疑問に置き換えているだけっていう気がしないでもないけど、まあ一応できる。

こいつらの予言って何かというと、暗黒物質というのは高い  $SU(2)$  チャージを持っているから、非常に断面積が大きくなります。これが一つ大きな予言です。一方、暗黒物質のスピンの関係では、暗黒物質がボソンだろうとフェルミオンだろうと関係なく同じ議論ができますから、これに対しては予言がない。こういう感じの暗黒物質像になります。

(質問)  $SU(3)$ で同じことはできないのですか。

(回答) カラーを持っちゃうと、 $SU(3)_{\text{color}}$  ですね。暗黒物質が  $SU(3)_{\text{color}}$  を持つから、そうすると LHC でハドロンコライダーで作られて、現象論的に死んでしまう可能性が高いので、ここでは考えなかった。

(質問) 重くしちゃえば別に…

(回答) 重くしてしまうと、宇宙論の中で十分な量が作れなくなっちゃうよね。すごく重くすれば確かに平気だけど、でもそういう時って、カラーを持った粒子というのは最終的にはニュートラル粒子にならなきゃいけないから、そうすると周りの quark とか gluon を食って、中性なハドロンを作ります。そのハドロンがもし電荷を持っていたりすると、電子をキャプチャーして重い原子が出来るんですね。そいつがウチラの周りとかウチラの海の中に溶け込んでるはずで、そういう実験があつて、それですごく強く制限されている。実際に、本当に完全に出来ないっていう no-go 定理はないけれども、現象論的に成功させる模型を作るのは、多分難しいと思う。

(質問) じゃあ、それはゲージ群が統一したりとかは出来ないんですか。  $SU(5)$  とか何か…

(回答) 別に  $SU(5)$  の高い表現を持った一部が、軽くて暗黒物質に残っているという。別

に構わないですよ、それでも。勿論、doublet、tripletの問題みたいなのは、いつも生まれますけれども。なぜかSU(5)の高い多重項を書いて。その内のある一成分だけ軽いスペクトルで残っていて、重いのは重いまま残ってなきゃいけないから、その差を説明するような議論を作らなきゃいけないんですけれども。

16

## II. 暗黒物質の正体！

標準模型(SM) + 暗黒物質場(スピン=0 or 1/2) の理論を考える。

Case II: ゲージ対称性を用いて暗黒物質を安定にできるのか？

標準模型にある粒子達は全てB-L電荷(B-L数)が奇数のフェルミオンか、あるいはB-L電荷(B-L数)0のボソンである事に注目。

U(1)<sub>B-L</sub>ゲージ対称性は、SMの対称性と無矛盾に導入可能。右巻きν x 3が必要有。U(1)<sub>B-L</sub> は破れる必要有。破れのスケールが高いとレフトジェネシス機構により宇宙のバリオン数を、シーソー機構により(軽い)ニュートリノ質量を説明可能。しかもこの破れは

[M. Fukugita & T. Yanagida, 1986] [T. Yanagida, 1979, M. Gell-Mann, et.al., 1979, P. Minkowski, 1977]

U(1)<sub>B-L</sub> → Z<sub>2</sub> = (-1)<sup>B-L</sup> となり、暗黒物質がB-L数が奇数のボソン、あるいは偶数のフェルミオンのとき安定性を保証。

↓  
予言

暗黒物質はB-L数奇数のボソンか、偶数のフェルミオン。

今回の一押しは、2番目の方です。これ。ゲージ対称性を用いて暗黒物質を安定にできるのか。答えはイエスです。どういうことかという、まず標準模型のゲージ対称性は使えないです。標準模型のゲージ対称性ってSU(3)×SU(2)×U(1)ですよ。SU(3)はカラーだから、先程言った理由からカラーはあまり使いたくない。U(1)<sub>EM</sub>っていうのは電荷を持っているから、暗黒物質が中性でありなさいっていう条件と反してしまうから使いたくない。SU(2)は自発的に壊れているから使えない。だから違うゲージ相互作用を用意しなきゃいけないんだけど、比較のおもしろいゲージ相互作用があります。それは何かというと、U(1)<sub>B-L</sub>です。

それは何かというと、標準模型にある粒子たちは全て「B-L電荷」が奇数のフェルミオンかあるいはB-L電荷が偶数、正確には0のボソンであることに注目してください。B-Lっていうのは「バリオン-レプトン」ですね。標準模型粒子で予言される粒子を考えてください。Electron、quark等あるけど、実際に物理的な状態として現れるのはバリオンです

ね。Proton とか neutron とか。全部バリオン-レプトンが 1 ですよね。奇数ですよね。レプトンもそうだし。いいよね。一方、メソン。Higgs ボソン、ゲージボソンもあるけど、全部  $B-L$  電荷 0 です。いいですよね。この事実に注目してください。

あともう一つ大事なのは、 $U(1)_{B-L}$  ゲージ相互作用っていうのは、ゲージ化する前に標準模型の exact な対称性になっています。accidental っていうか、exact な対称性になっています。いいですか。だから、ゲージ化するときに非常に好都合。但し、ゲージ化するとアノマリー相殺しなきゃいけないから、標準模型の particle contents だけだとアノマリーが相殺しないので、右巻きニュートリノを 3 つ入れなきゃいけなくなります。でもこれウェルカムなんですね。何故かと言うと、 $U(1)_{B-L}$  はどこかで破れてなきゃいけない。現実まで残っていると、 $U(1)_{B-L}$  が長距離力として残ってしまっ、バリオンとレプトンとかの間にまた変な力が働いちゃうから。だからどこかで破れているんですけども、これ大事なのは、アノマリー相殺から右巻きニュートリノを 3 つ入れなきゃいけなくて、 $U(1)_{B-L}$  がある程度高い所で破れているとすると、ニュートリノの質量を自然に説明できるという事実があります。またそういう時には、宇宙のバリオン数を説明することも出来ます。だから、宇宙の、宇宙論のところにおける物質の創造を説明できる。これの細かい話をすると、これだけでまた別の 3 時間になってしまうから、みんなが大学に戻ったら先輩にあるいは先生に聞いてください。今ここでは認めてください。ここでは、これは非常に都合がいいよってことです。

破れているんだから暗黒物質の対称性に使えないじゃんって思うかもしれないけれども、実はこの対称性というのは、完全に  $U(1)_{B-L}$  を壊す必要はなくて、 $Z_2$  対称性を残すように壊しても、ここら辺がうまくいくことが知られている。 $U(1)_{B-L}$  っていうのは群でいうと円ですよね。それを  $Z_2$  だけ残るように壊す。 $Z_2$  対称性っていうのは何か?  $(-1)^{B-L}$  です。こういう風に壊してくれれば、ここら辺と矛盾しなくて且つ非常に都合がよくつく。まあ、これはちょっと認めてください。

そうするとなんで暗黒物質でいいのかというと。想像してください、暗黒物質が  $B-L$  数が奇数のボソンだと思ってください。いいですね。 $B-L$  が奇数のボソンってことは暗黒物質の崩壊のプロセスをまた考えてください。暗黒物質が標準模型たちに崩壊する。左辺は暗黒物質でボソンでこの  $Z_2$  対称性  $-1$  です。右辺は標準模型たちで入れなきゃいけないから、 $-1$  のフェルミオンたちと  $(\times 1)$  のボソンですね、偶数だから。ちょっと使っていていい、ホワイトボード。ちょっとこの辺、話がややこしいかもしれない。

暗黒物質の崩壊だから、標準模型たちに崩壊します ( $DM \rightarrow SMs$ )。いま暗黒物質が  $B-L$  が奇数のボソンだから、まずこれ (暗黒物質) はボソンで  $-1$  です ( $Z_2$  対称性に対して)。いいよね。一方で、標準模型っていうのはフェルミオンとボソンの終状態が用意されているわけですけども、フェルミオンは  $-1$  の  $U(1)$  を持っている。ボソンは  $+1$  ですね ( $B-L$  は  $0$  ですから)。で掛ける。すると、終状態はこういう状態になってる:  $(-1) \times (+1)^m$  (ただし、今フェルミオン  $n$  個 + ボソン  $m$  個への崩壊を考えている)。ここで思い出してくだ

さい。ボソンだから、フェルミオンは必ず偶数個ないとローレンツ不変性が破れちゃいますよね。だからこれは（フェルミオンの $(-1)$ の冪が） $2n$  じゃなきゃいけないですよね。そうすると、終状態の  $B-L$  は必ず $+1$  になりますよね（終状態の  $SM$  粒子は $(-1)^{2n} \times (+1)^m = +1$ ）。それで、 $-1$ から $+1$ にはいけないですよね。終わり、以上。だから、これで保証される（ $DM \rightarrow SMs$  への崩壊は  $Z_2$  対称性から禁止される）。

あるいは別の例は、 $U(1)_{B-L}$  が偶数のフェルミオンのときでも OK です。どうしてか？同じ議論をすればいい。今度は何かというと、暗黒物質が  $B-L$  が偶数だから（ $-1$ の偶数乗だから）、 $Z_2$  対称性は $+1$  ですよ。フェルミオン  $n$  個とボソン  $m$  個に崩壊しますが、今度はこれフェルミオンだから、終状態のフェルミオンの数は奇数じゃないとローレンツ対称性を壊す。だからこれは  $2n+1$  じゃないといけないですよね。ボソンの $+1$ の  $m$  乗は何回やっても  $1$  だから、全体は絶対 $-1$ になりますよね： $(-1)^{2n+1} \times (+1)^m = -1$ 。よって、 $+1$ から $-1$ には  $Z_2$  対称性から禁止されている、だから安定性が保証できる。そういうことです。いいですか。これが言いたいこと。ちょっと話がややこしいかもしれないけど、後で一人になったときに落ち着いて考えれば多分、ああ成程と思ってくれると思いますので。それで、この場合の暗黒物質の予言というのは、暗黒物質は  $B-L$  数が奇数のボソンか偶数のフェルミオンということになります。

（質問） すみません、アノマリーでニュートリノが 3 つ必要っていうのは…

（回答） 標準模型をまず考えます。標準模型というのは **anomaly free** であることはいいですね。そこに  $U(1)_{B-L}$  っていうゲージ相互作用を加えます。加えた時にアノマリーを計算します。そうすると、混合アノマリーが出てきます。 $U(1)_{B-L} \cdot U(1) \cdot U(1)$ とかそういうやつ。それを消すためには、何か新たに粒子を回す必要がありますよね。標準模型とは別の粒子がいて、その寄与がちょうど相殺するだろうとなっていると信じたい。じゃあどんな粒子が必要なのかというと、右巻きニュートリノがいればいい。3 世代分あるから、右巻きニュートリノが 3 つ。右巻きニュートリノがいてくれると、非常に良いことは昔からよく知られている。例えば、レプトジェネシスっていうメカニズムが働くっていうのは、これは柳田さんが言ったやつですし、ニュートリノ質量が出ますよっていうことも、これはよく知られている事実です。この辺の話もすごく面白いけども、ちょっと暗黒物質と話が外れていっちゃうので、大学に行って先輩に聞いて先輩をいじめると。よろしくお願いします。多分知ってると思うから、博士課程以上の人は絶対に。アノマリー自身をまだやってない人は結構たくさんいると思うけども、要は古典的にあった対称性が量子補正によってその対称性が壊れてしまうことがある。それをアノマリーと言いますが、量子論に行ってもその対称性が依然純然たる対称性であるためにはアノマリーが相殺する必要があります。



## II. 暗黒物質の正体！

**B-L数偶数(0)の暗黒物質は超対称性模型で予言される！**

つまり、なぜ暗黒物質が存在するのかを説明可能

### 超対称性模型の動機

1. ゲージ結合定数の統合
2. ゲージ階層性問題の緩和
3. 超弦理論の有効理論
4. 軽いヒッグス粒子の予言
5. 暗黒物質候補が存在

### 超対称性の破れ(条件)

1. SUSY Flavor/CP 問題がない。
2. Gravitino/Plonyi 問題がない。
3. ヒッグス質量が125 GeV程度。
4. LHCのSUSY探査と無矛盾。

### Pure Gravity Mediation 模型 [Ibe, S.M., Yanagida, 2012]



さて、実はこれ最後のページで、ここがちょっと短いんですけど、短いけど内容は濃いですけど。今二つお話ししました。Accidental な対称性を用いて暗黒物質を安定にする方法。ゲージ対称性  $U(1)_{B-L}$  を使って暗黒物質を安定にする方法。今のところ、これは僕の個人的な見解ですけど、今一番信じているのは (2 番目の) case II で、しかも偶数のフェルミオンの時です。正確にはその偶数が 0 の時のフェルミオン。多分一番今尤もらしいんじゃないかと。何故か？超対称性と相性がいいからです。なんかいつもの話に戻っちゃったなどかと思う人いるかもしれませんが、でもそれは理由があります。超対称性といえども今はそう簡単には信じるべきではなくて、それは LHC の実験結果があるから。だけど一応、どうしてまだ僕は超対称性を諦めてないかとか、なんか言い訳みたいな話をします。

まず超対称性模型の動機というのはゲージ結合定数の結合、GUT がうまくいく。あとゲージ階層性、ヒエラルキーの問題ですね、だからプランクスケールと EW スケール程度当たりのヒッグスの 2 次発散の問題がない。あるいはもちろん超弦理論があるとその有効理論となってる可能性が十分にある。あるいは比較的軽いヒッグスを予言しているわけですね。400GeV、500GeV のヒッグスじゃなくて 100GeV 程度のヒッグスを予言する。そういう意味では現実的には非常に LHC の結果と相性がいいですね。それで、あともちろん暗黒物質の候補が存在すると。この暗黒物質の候補が存在するっていうのが何かというと、標準模型に超対称性を持たせようとすると粒子を倍にしないといけない。これを嫌う人は

確かに、歳をとった人に多いですけども、でもまあこれ対称性で必要とされてるからそんなに気にする必要はないと僕は個人的には思うけど、倍にしなきゃいけない。Quark がいたら scalar quark がなきゃいけない、lepton がいたら slepton (scalar lepton) がなきゃいけない、ゲージ粒子がいたらゲージノ (gaugino) 粒子がないといけない。Higgs 粒子はまず 2 ついなきゃいけない、しかも Higgs 粒子のパートナーである higgsino たちがなきゃいけない。でこの中、gaugino の中で photon と Z ボソンの超対称性パートナーである gaugino、中性 gaugino と、中性 Higgs のパートナーである中性 higgsino が暗黒物質の候補となります。これどれもフェルミオンです。それで、B-L 電荷っていうのは標準模型と同じ電荷を持っていますから photon、Z、Higgs ボソンだからゼロです。いいですね。だから先ほど言った B-L が 0 で、っていうのに関係する。多分 2 年前まではこの議論だけで良かったんですけど、今はそうはいかない。何か？もちろん超対称性がずっと残っていると quark と squark の質量が等しくならないといけないし、互いに完全に同じ質量じゃなきゃいけない。でも電子と同じ質量をもったスカラー粒子なんて見つかってませんから、超対称性を破らないといけない、破れてないといけない。正確には超対称性を局所化して、局所超対称性 (まあ超重力ですけど) が自発的に破れると皆信じてますけれども。とりあえず何か対称性が破れてないといけない。それで、ここが問題ですよ、現象論的に。対称性を破ることを考えると、えらいたくさん問題が出てきます。だから、さらにこれで超対称性嫌って人が増えるわけ、たまにいるわけですけども。どういうことかという超対称性を破ったおかげで、(これは言葉だけで言いますが) SUSY flavor とか CP 問題が出てくる。あるいは超重力理論までいくと重力子 (graviton) のパートナーである gravitino がいてそいつが宇宙論と相性が良くない。あるいは超対称性を破るために singlet SUSY breaking sector (それ Polonyi って言いますが) にいて、そいつが宇宙論的に全く相性が良くない。さらにとどめは最近、ヒッグス粒子が 125GeV、大体の標準模型はヒッグス粒子の質量は大体 120GeV 以下です。120 もちょっと重すぎる、125GeV が去年兆候出たときに SUSY を信じてる人たちは、絶対あれは間違いだと思ってたらしいんですけど、でも今年になって 125 っていうのが分かって、しかも LHC の SUSY シグナルが全く見えていない、というネガティブダブルパンチが来てるわけですけども。ただしよくよく考えると、そんなことないんですねこれ。どういうことかという、皆が昔思ってたのは、こういう破れた粒子がいてその結果こういう squark とか slepton たちが 1TeV 弱に皆あると信じていた。なんで信じていたか？それは僕が僕より上の年代の人に聞きたいんですけども、多分 LHC を作るために信じていた…かも。でも自然には実はこいつ別に 1TeV 位の質量じゃなくて、もっと 10 倍~100 倍くらい重い可能性も十分にあるわけですよ。それ破ってもそんなに超対称模型の魅力が減るわけではありません。最近になってここら辺を踏まえた時に最もナチュラルな模型は何かっていうのを、IPMU の全員が集まって作りました。それ「Pure Gravity Mediation」と言います。ここ最初に提案した人の名前ですけど (Ibe, Matsumoto and Yanagida)、これどういうことかという、超対称性が破れて、

大体の粒子は 100TeV 位にいる。だけれども **gaugino** と呼ばれてるこいつらだけは軽い。こういう模型が一番ナチュラルに、**SUSY breaking** を考えてナチュラルに説明できる。でもこれちょっと難しくて **M1** とか **M2** の人に話す内容じゃないんですけれども、分かっている人が何人かいるはずだから一応ここで言います。どういうことかという、こういう **squark**、**slepton** とか **higgsino** とかそういう質量っていうのは超重力理論の **tree level** の相互作用で簡単に出てきます、それで **gravitino** 質量と同じくらいの質量を持つ、それで、それが 100TeV だとしましょう。一方で **gaugino** というのは **SUSY** を破っただけでは質量は出てこない。何故かと言うと **R** 対称性っていうので対称性がまだ保証されてるから、**R** 対称性を破らないといけない。それで大事なのは、超重力理論の **1-loop level** で **anomaly mediation** っていうのが出てきて **1-loop level** で質量を持つことが出来るのが 15 年、20 年くらい前に村山さんが言ったことですね。そうするとそいつは **1-loop** 分だけ質量が小さい。てことは **1-loop** っていうのはいつも  $g^2/16\pi^2$  っていうのが付きますよね。そうすると大体他の粒子の 1/100 粒子の質量が軽くなります。それで、こういうスペクトラム、大体 1TeV くらいのところにこういう粒子がいるという予言になるわけです (スライドの右下図)。これの素晴らしいところは、ここに書いた問題 (スライド右上の条件)、普通模型作るとこの辺の問題がわんさか出てくるんだけど、この問題をいっぺんに全部解決してしまう。ナチュラルに、全く問題ない。大体 **gravitino** が数百 TeV あるから、宇宙論と全く **consistent** だし、**SUSY flavor/CP** は全部 **squark** 重いから **suppress** されてるし、**Polonvi** っていう粒子をそもそも入れる必要がない、なくていい。しかも全体が重いからヒッグス粒子の質量を予言すると 125 でぴったし出てきます。これは合ってる。でそもそも重いんで、要はまだかかんなくても別に平気、まあちょっと逃げの理論に走ってますけどまあまあそういう感じです。でも暗黒物質的には大事で、何かというと、**anomaly mediation** でこのスペクトルが出るから、一番軽い暗黒物質は **Wino**、中性 **Wino** (昔でいうところの **Zino**) になるという予言があります。**Wino** っていうのは **W** ボソンのスーパーパートナーですから、それで **W** ボソンっていうのは **SU(2)** チャージ 1 ですよね。だから **W** ボソンとの相互作用が強いんですね。だから比較的暗黒物質探索において有利なことがあって、そういうのが非常にアグレッシブで面白い。それで、そういう暗黒物質をどうやって見つけるかという話を最後のセクションでお話をしていきたいと思えます。

とりあえずここまでで質問は、この章はちょっと難しい話が多かったと思えますけれども、まあこういう配意もあって、次からまた簡単になります。もうちょっと実験と密接に関係した議論を話したいと思うんで。何か質問あったらどうぞ。

(質問) **gaugino** が **R** 対称性で **tree-level** で質量が出てこないっていうのは…

(回答) えっと何かっていうと、**tree-level** で質量を持たそうとすると **SUSY breaking sector** に **singlet** を導入する必要がありますよね。でもその **singlet** がいるから **Polonvi** 問題が起こるわけですね。だからそいつがいらないとすると  $1/m_{pl}^2$  ともっと **suppress** された、

tree level だと非常に小さい質量しか出てこない。もう  $1/100$  とかもっとすごいね。だけでも 1-loop で一応出てきてっていうことです、だから tree-level で gaugino 質量を出そうとすると必ず singlet 入れなきゃいけないんで、だからその singlet を入れないともっと、そもそもどうということかという squark たちと gaugino たちっていうのはヒエラルキーが、100 倍のヒエラルキーがあって当然であって、それは現実と非常に良く合ってるじゃないかと、そういう話です。

(質問) すいません。条件 2 っていうのはこれ、大丈夫なんですか？

(回答) 大丈夫です。条件 2 だと、ちょっとその辺の話はしませんけども、gravitino が  $100\text{TeV}$  くらいでいて、gravitino が崩壊して大体ちょうどいい WMAP の値と合うような暗黒物質を供給してくれることは既に計算で知られている。だから条件 2 は、条件 2 から出発しないだけでも条件 2 を満たす様な宇宙論と consistent であることが分かっています。

(質問) Pure Gravity Mediation 模型はゲージ結合定数の…

(回答) 平気です。

(質問) それは悪くなってるんですか？  $1\text{TeV}$  SUSY に比べて、上の結合のぴったし具合は…

(回答) あっそれね、すごくいい質問だね。今それ論文書いているから、あんまり言えないんですよ。すごくいいことが言えます、実は。後で、じゃあ。でもね、きちんと結合します。それはホントは、例えばミニマルな  $SU(5)$  を考えた時に、その threshold collection とかをきちんと考えて、例えば荷電 Higgs がどのくらい残されるかとか、そういのを考えて計算しなきゃいけないけども、きちんと合います。

(質問) 平気というのは、悪くなってる、悪くなってるけど尚まだぴったりという…

(回答) えーとね…、悪くなってもいない、実は。実際ナイーブにやると外れてくる方向にあるんだけど、それを合うような threshold collection の型を考えると…。あ、後でちょっと。これ、あんまりこんな所まで話せない。でも、君のいうことは一通りあって、まず最初に、多少悪くなる、普通に考えると。でもそれは全然誤差の範囲です。何故かと言うと、せいぜい  $100\text{TeV}$  なんて、10 倍大きくたって  $\log 10^{16}$  とかそんなくらいのもんで、殆ど影響ないです。だけど更にそれを仰ぐようなことをきちんと考えると、すごい benefit があるってことは言えるんですけど。

(質問) Naturalness とかは…

(回答) Naturalness って、どこの naturalness。

(質問) Higgs 質量…

(回答) 多分 Hierarchy 問題のことを言ってるのかな？

(質問) ええ。

(回答) Hierarchy 問題は2種類ありますよね。ゲージ hierarchy 問題と SUSY little hierarchy。まず、gauge hierarchy のところは問題ないですよ。これ  $10^{16}$ 。それで、SUSY little hierarchy は  $10^{-5}$  が必要です。確かに。でも別に良いじゃん。あれよく分かんないよね。みんな 10%以内がいいって言うけど、10%って意味分かんなくて、100%を基準にするのは分かるんだよ。Fine-tuning あるかないかを 100%で表すからね。100%が一回 LEP で、100%の夢が壊れたわけですよ。昔の人たちは、だけど 10%だったらいいじゃんって言って LHC を作ったわけですね。だから別に、10%が 0.1%になろうか 0.01%になろうか…。それが本当に  $10^{10}$  とか  $10^{20}$  の桁になってくると確かに問題あると思うけど、そういう意味では僕はそれは気にしてません。

(質問) IPMU の全員で集まって作った…

(回答) あ、全員っていうか、素粒子の人全員ね。IPMU って string 理論の人がいて、宇宙論の人がいるから、全員って言い過ぎたけど、現象論の全員ということに置き直させてください。すいません。

(質問) 3人しかいないんですか。(聴衆笑)

(回答) これは最初のモデルを提案した人で、その後で現象論で展開したのがあって、そうすると後4、5人付け加わります。でもね、そんなに数が多くない、現象論は。IPMU 全体は確かに…。あ、それは後で。この話は。ちょっと関係ないから。

(休憩)

## II. 暗黒物質の正体！

**B-L数偶数(0)の暗黒物質は超対称性模型で予言される！**

つまり、なぜ暗黒物質が存在するのかを説明可能

### 超対称性模型の動機

1. ゲージ結合定数の統合
2. ゲージ階層性問題の緩和
3. 超弦理論の有効理論
4. 軽いヒッグス粒子の予言
5. 暗黒物質候補が存在

### 超対称性の破れ(条件)

1. SUSY Flavor/CP 問題がない。
2. Gravitino/Plonyi 問題がない。
3. ヒッグス質量が125 GeV程度。
4. LHCのSUSY探査と無矛盾。

### Pure Gravity Mediation 模型 [Ibe, S.M., Yanagida, 2012]



デカップルした人がいる可能性が大いにあるので、簡単にまとめてから3章にいきます。僕が何を言いたかったかという、まず1章で暗黒物質が存在する証拠をたくさんお見せしました。それと同時に暗黒物質が満たすべき性質、および暗黒物質の現在の状態についての情報が引き出されて、その結果6つほど条件が出てきました。そのうちのいくつかはトリビアルで、暗黒物質が十分重くて中性であればいいなあという話になるわけですが、問題は2つのノントリビアルな条件があって、1つは abundance、宇宙の暗黒物質の mass density がある特定の量に決まっていること。もう1つは安定性。暗黒物質が安定だということ。通常は WIMP 仮説に流れると、暗黒物質がなぜ特定の abundance を持っているかというところから議論が始まるわけですが、今回はあえて素粒子論的な立場から、暗黒物質がなぜ安定であるかという所から話を進めてきました。その結果分かったことは、標準模型での質量を持った安定な粒子にならって、全部で2つの方法に頼る。1つは、accidental な対称性に頼る。素粒子論の予言する1つの具体的な例は「minimal darkmatter」と呼ばれるもので、SU(2)の非常に高い表現の暗黒物質があればよい。もう一つはゲージ対称性で安定性を保証するもので、それにとっては U(1)<sub>B-L</sub> が最も有力な方法である。特に U(1)<sub>B-L</sub> で暗黒物質の安定性を保証すると、1つの予言があって、U(1)<sub>B-L</sub> のチャージが奇数のボソンか、あるいは偶数のフェルミオンという予言が出てきて、そのうちの特に偶数、正確には0のフェルミオンに焦点を当てて話を進めました。何故か？それは、最初のほうに言った「暗黒物質の正体にどうこたえるべきか」という話に関係してきます。どういう事かと

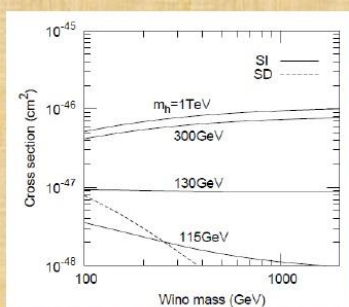
言うと、例えば先ほど言ったように、もし「pure gravity mediation」みたいのを考えると、Wino が暗黒物質になったり、Zino が暗黒物質になったりする。そうすると Zino がどういうゲージチャージを持っていて、どういうほかの粒子との相互作用をするのかというのは全部出るはずですね。それと同時に、理論屋さんの理想とする（勝手に理想と思ってるのかもしれませんが）なぜ暗黒物質が存在するのかという事を説明してくれる。この場合の答えは、超対称性があるから。もちろん、1つこの考え方には利益があります。それはどうしてかと言うと、B-L 電荷が 0 のフェルミオンを考えると、基本的にそのフェルミオンはマヨラナ質量項を持つことができます。ニュートリノと同じですよ。そのマヨラナ質量の質量はどのくらいかと問うた時には、一般には自由と言ってもいいし、どちらかと言うと理論のカットオフぐらいの質量を持って然るべきだと思うべきです。それはヒッグスの fine tuning と同じ議論です。だけども、超対称性と言うサポート、正確には R 対称性と言うサポートがあるおかげで、暗黒物質の質量が、せいぜい 100GeV~1TeV の間であるという事を保証してくれるわけです。何故重たくならないのか。R 対称性があるって、それが自発的に壊れて、1-loop で質量が出てくるから。それはある意味では、素粒子論屋さんの、理論屋さんの理想が多分に含まれたやり方なんですけれど。

ここからの話は、前回難しくて付いていけなかったという人は、これだけ覚えておけばいいです。暗黒物質の安定性から出発して、多少の仮定を加えて考察すると、Wino (Zino) っていう暗黒物質は非常にいい候補ではないか。では Wino の暗黒物質をどう見つけるか。まだ見つかっていません。見つかったらノーベル賞もらえるんで（まだもらってないので）。どう見つけるのかという事を考えなければならない。そこからが現象論です。それが、今回の話です。

### III. 暗黒物質の探査!

中性Wino暗黒物質を例に暗黒物質検出について考える。

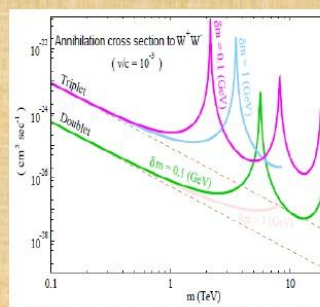
#### Wino暗黒物質と核子の散乱



[Hisano, Ishiwata, Nagata, 2010]

ヒッグス質量が125GeVだとすると、断面積は $10^{-47}\text{cm}^2$ と小さい。

#### Wino暗黒物質の対消滅



[Hisano, S.M., Nojiri, 2004]

Sommerfeld効果により、対消滅断面積はフースト・アップする!

さて、Zino、Zinoと言われても、俺そんなの知らないよ、という話になると思うので、Zinoの、正確には今はZinoと言うのは古いので(死語になっているので)中性Winoと言い換えますけれど、中性Winoの性質について簡単にまずまとめたいと思います。中性Winoと言うのはもちろんZボソンのスーパーパートナーという言い方もできるし、SU(2)相互作用のゲージボソンのスーパーパートナーの中性コンポーネントの事です。それで、まず最初にこのWinoという暗黒物質、それだけでも限らないんですけども、そういう暗黒物質を見つけようとするときに計算しておかなければいけない2つの量があります。1つは、そのWino(暗黒物質)と原子核との相互作用を計算する必要があります。後、そのWinoのself annihilation cross-section。そのWinoが自分たち同士でぶつかって標準模型の粒子に壊れるわけですけど、その断面積を計算しておく必要があります。それが言ってみれば、素粒子物理側からのoutputになるわけです。何故その2つの物理量が大事かと言うと、後々分かって来るので、ちょっと待っててください。

Wino(暗黒物質)と核子との散乱ですけど、(ダイアグラムは大変なんで今書いてませんけど。僕はいつも左から右に時間が流れる書き方です。)Winoがいて、例えば核子(陽子)と(弾性)散乱する、これの頻度、断面積を求めなさい。この計算、実は結構大変です。何故かと言うと2-loopレベルの計算をしなくてはならないから。どんなダイアグラムがあるかっていうと…ちょっと待っててください。先にやらなくてはならないのは、Winoと核子との散乱という事は、それを計算するためには、核子と言うのはクォークとグルーオンで



出来ていますから、Wino 暗黒物質とクォーク、Wino 暗黒物質とグルーオンとの相互作用を計算しなくてはならない。その計算と言うのは、基本的には 1-loop または 2-loop レベルになります。どういう事かいうと、こんな感じ。全部ダイアグラム書いたりする必要はないのだけれど、中性 Wino はこう書きます。(以下ホワイトボードにファインマン図を描きながら) Wino から Wino に行くまでに W ボソンが走ってボックスダイアグラムになる。間は荷電 Wino です。Z ボソンのパートナーがいるわけだから、W ボソンのパートナーがいて然るべき。それが荷電 Wino。でここに (W ボソンのもう一端を通る線を書いて) クォーク。1-loop ダイアグラムはこういうの。ツリーレベルでは無いんですね、実は。あるいは、グルーオンとの相互作用を考えると、また同じようなダイアグラムを書いて (中性 Wino が荷電 Wino を経由して W ボソンを2つ飛ばす図)、ここに (W ボソンのもう一端を端とする線分) にクォークがいて、ここに (先ほどの線分の両端をつなぐ曲線) クォークがまたくっついて、ここに (先ほどの曲線の途中2か所) にグルーオン。こういうダイアグラム。これは 2-loop です。これを全部計算しなくちゃいけない。一見すごい大変な計算ですけど、非常にクレバーにやった人たちがいて、それが久野さんと石渡さんと永田さん、名古屋大学の人たちですね。宇宙線研と言ってもいいかもしれませんが。ここでは別にダイアグラムの計算の仕方をレクチャーするわけではないので、結果だけ紹介したいと思います。(スライドに戻る。) 結果はこんなものです (スライド左のグラフ)。横軸が Wino の質量、ここが 100GeV、ここが 1 TeV です。縦軸が散乱断面積、それを平方センチメートルで書いたもの。なかなかすごい数が並んでいて、ここが  $10^{-45}$ 、ここが  $10^{-48}\text{cm}^2$ 、めっちゃくちゃ小さいですけれども。実はヒッグスの質量によって断面積は上下します。ただし今、ヒッグスと強く思われる粒子が見つかったので、それがだいたい 125~126Gev。そうすると、だいたい 130GeV に近いですからこの線を見てください。だいたい断面積は  $10^{-47}\text{cm}^2$  くらいです。これは純然たる計算の結果です。そのうちみんなが修論とか書き出すと、こういう計算しろと言われて萎えるわけですけど…暗黒物質の物理をやろうとするとね。一つ大事な事は、ヒッグスが 125GeV だとすると、断面積は  $10^{-47}\text{cm}^2$  くらい。これが大きいのか小さいのか、と言うのは後でわかります。先に答えを少しいうと、小さいです。

次は、もうちょっと難しんですけども、Wino の対消滅断面積です。(スライド右のダイアグラムを指して) つまり、Wino と Wino が対消滅して W ボソンに行く断面積です。これは、ちょっと計算が大変なんです。なんで大変かという、また黒板 (ホワイトボード) を使って、あんまり黒板使わないほうがいいのは分かっているんだけど、説明のために使います。まず、Wino が対消滅してどの標準模型の粒子に行くかという、W ボソンです。何故かと言うと、Wino っていうのは W ボソン (SU(2)相互作用ボソン) のスーパーパートナーだから。一番簡単なダイアグラム、最初のダイアグラムは、Wino が入ってきて、その SU(2)パートナーである荷電 Wino を交換して、W ボソン2つに行く。コレぐらいの計算だったらみんなすぐできる。でも実はこれで終わらないんですね。これちょっと話がややこしくなるけれど、この (始状態の) Wino のスピードが遅くなると、つまり非相対論的に 2

つの Wino が対消滅しようとする、実は Sommerfeld enhancement というメカニズムが働きます。何かと言うと（方端（始状態側）が中性 Wino である 2 本の線を書いて）1 回 W ボソンを交換して荷電 Wino に行き、また W ボソンを交換して荷電 Wino に行き…こういうのを何回も繰り返した末に、最後 W ボソンに行く、っていうダイアグラムが効いてきます。こんなの higher order じゃんと思うかもしれませんが、ただ、これ実は効くんですね。どうしてかと言うと、後でまた少し言いますが、中性 Wino（暗黒物質）と荷電 Wino の質量（の差）っていうのは本当にわずかです。ほとんど縮退している。そうするとココ（中性 Wino の始状態）とココ（荷電 Wino の中間状態）の間の遷移っていうのはほとんど on shell で、リアルで作られます。だから、ポールを拾うわけですね。だから、こいつ（中性 Wino）の質量が小さくなればなるほどポールを拾いやすくなって、だから非常に非相対論的な Wino 同士の対消滅断面積っていうのは、コレ（ツリーダイアグラム）だけでなくこういう（高次の loop 補正）ダイアグラムを全部足し、予め resummation して計算しなければならないということになります。（スライドに戻る）特にそれは、交換する W ボソンの質量（W ボソンの質量はみんな知ってると思いますけれど、80GeV くらいですけども）それよりも Wino の質量が重くなってくると、どんどん効いてくる。それで、書いたのがこの絵で（スライド右のグラフ）、これが 100GeV でこれが 1TeV でこれが 10TeV です。100GeV から数 TeV まで見てくれればいいんですけども、このマゼンタの線が断面積の予言で、縦軸が断面積に相対速度  $v$  を掛けたものです。相対速度というのは、始状態の暗黒物質の相対速度。だから、 $\text{cm}^3/\text{s}$  です。断面積が  $\text{cm}^2$  で速度が  $\text{cm}/\text{s}$  ですね。このマゼンタのラインが有って、この点線が最初のツリーグラフだけを考慮した計算で、重くなってくると全然断面積が変わっちゃいますね。これを直感的に理解するとどういうことかと言うと、こういうことです。こういう議論の仕方がみんなに分かりやすいかは分かりませんが、Wino 同士が対消滅する前に W ボソンを交換するということは、W ボソンを交換することによる力の影響を受けるわけですね。普通は、Wino っていう平面波が入ってきて、そいつがぶつかって対消滅するわけですね。けども、ぶつかる前に、間に長距離力が働くと、そうすると平面波がズレるわけですね。断面積っていうのは、相互作用の強さももちろんですが、始状態の波動関数 2 つ、2 つありますよね Wino、このオーバーラップがどのくらいあるかということにもよるわけです。そのオーバーラップが平面波からズレて enhance するわけです。大きくなる。その結果コレが出てくるわけです。そういう言い方ができると思います。もちろんコレは Wino が非相対論的になればなるほど効いてくるわけなんですけども、実際宇宙論で暗黒物質の対消滅が重要なのは非相対論的な領域ですので、この結果が大事になるということになります。Wino の断面積っていうのは、ツリーで計算したよりも更に pump up するわけです。しかも値自身は、 $10^{-23}$  くらいから始まって、1TeV くらいだとだいたい  $10^{-23} \sim 10^{-24}$  くらいです。この値が大きいかわ小さいかわ（他の暗黒物質候補と比べて）と言うと、それも後で分かりますが、大きいです。だから、こっち（核子との散乱断面積）とは逆に、こっち（自己対消滅断面積）は大きい方になっていると、そうい

う性質があります。

(質問) すみません、ピークが立っているのが幾つか見えるのは？

(回答) それが何かと言うと、(W ボソンを) 交換しているということは、この間で束縛状態みたいなものを組んで、束縛状態が丁度 on-shell に。だからこのピークの部分というのは、ちょっと重い場合ですけども、こういうことです。(ホワイトボードに行く) 例えば、水素原子の計算を場の理論でやると、陽子と電子の間にガンマが飛びまくってる、こういう図ですね。これ (Wino の対消滅の高次のダイアグラム) も同じで、Wino が入ってきて、その間にこいつ (Wino のペア) は束縛状態のようなものを組んでいて、最後にその束縛状態が $W^\pm$ に崩壊するという、そういう過程で、この束縛状態の質量と始状態の Wino のエネルギーが同じぐらいだったら、共鳴が起こりますよね。その結果です。

(質問) じゃあ、その束縛状態の軌道角運動量の大きい…

(回答) 小さいほうがいいです。

(質問) じゃあ、大きくなっているんですか、その励起状態は？

(回答) これは、軌道角運動量は 0 の場合です。0 が一番いつも効くので。

(質問) それ (各ピーク) は3つとも 0 なんですか？

(回答) 0 です。そうです。だから、束縛状態の励起状態、軌道角運動量じゃないです。どちらかと言うと主量子数の方。そういう感じです。

それで、コレが2つまず計算しなくてはならない量です。自分で計算しないと実感湧かないと思うけど、この事実は認めて、いよいよ、どう発見するかという話に行きたいと思います。

19

## III. 暗黒物質の探査！

### 暗黒物質の直接検出実験

**太陽系は銀河系に付随した暗黒ハロー中を運動して、暗黒物質の風を受ける。**

**地球上(地下)に用意した検出器で暗黒物質が散乱の際放出する反跳エネルギーに注目し検出を行う。**

**暗黒物質が我々太陽系の周りにどの程度の密度で存在し、どの様は速度分布を持つのか？原子核との散乱も扱う必要有。**

**暗黒物質検出の兆候はまだ見えておらず、散乱断面積に(質量に応じて)上限がある。**

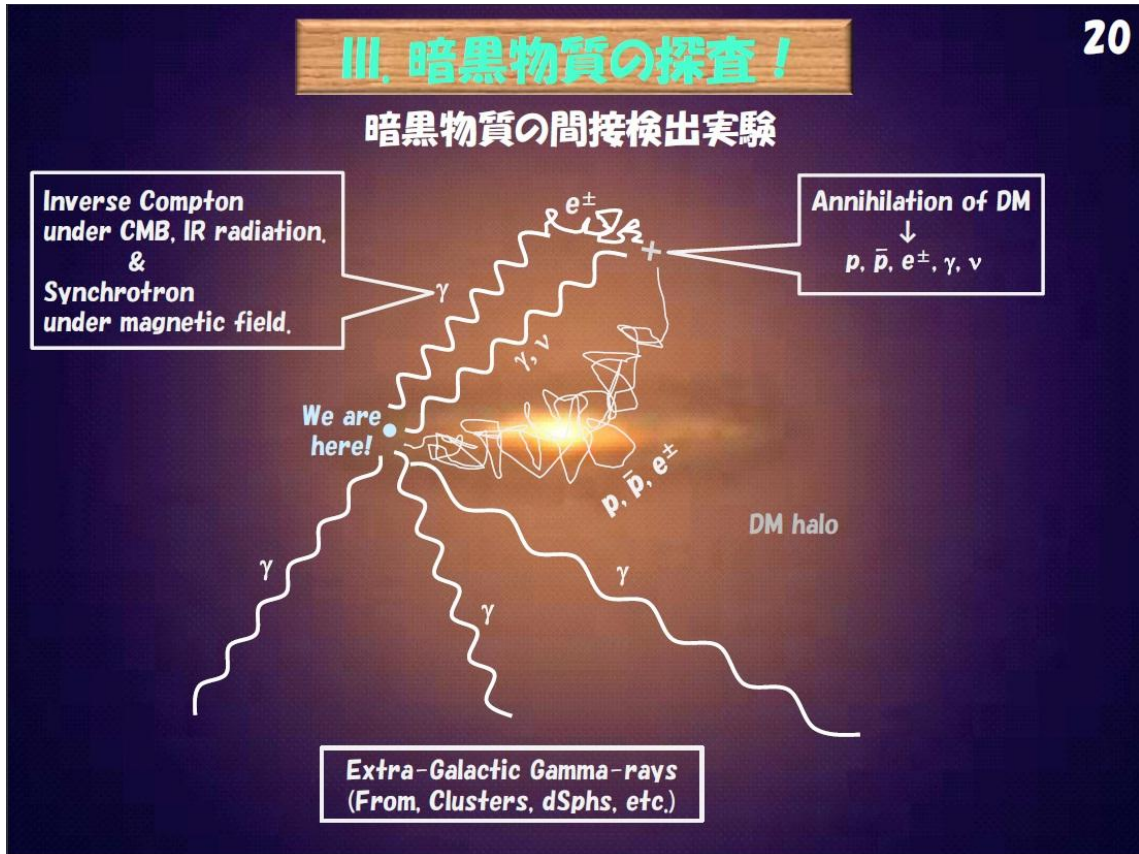
**$\sigma_{SI} < 2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$  when  $m = 100 \text{ GeV}$**

さて、1つ目は暗黒物質の直接検出と言われるやつです。Dark matter direct detection というやつですね。これはどういうことかと言うと、こういうことです。これ(スライド左上)が我々の太陽系だと思ってください。それで、銀河がいて、我々の太陽系っていうのは銀河のバルジを中心に円運動しているわけですね。先ほど最初の方、第一章で言いましたように、我々の銀河にも、もちろん暗黒物質が付随している。そうすると、暗黒物質の雲の中を太陽系が通り過ぎている状態。そうすると何が嬉しいかと言うと、これが太陽系で地球は約60度傾いていますけど、この作用は今無視して。地球上に注意深く検出器を用意します。検出器っていうのは何かと言うと、クリスタルの塊とか、重い原子核で作られたガスの塊、あるいは液体の塊。実際は注意深く地下に用意します。そうすると、黙っていても暗黒物質が入ってくるわけですね。で何をするかと言うと、待つ。じっと待つ。ぶつかってくれるまで待つ、っていうことをします。検出器の静止系に行くと、暗黒物質がどんどん通り過ぎていって、稀に検出器内の原子核とぶつかってくれる、かもしれない。まだぶつかったのは見つかったこと無いので、かもしれない。ぶつかる暗黒物質は質量が重いから、100GeV、1TeVとかがって重いので、そうすると原子核は反跳されます。そうすると反跳エネルギーを生むので、そのエネルギーを検出器を使って捉えることで、なんとか暗黒物質を検出しよう。それが暗黒物質の直接検出です。けっこう簡単でしょ、原理は。原理が簡単な実験と言うのは、実験自身はすごく難しくなるのは常で、計算はすごい努力があるわけですけども。つまり、こいつ(暗黒物質による反跳)を真似するよ

うなバックグラウンド事象は沢山あるわけで。一回実験、神岡でやってる実験が一つ有るわけですけど、見学させてもらった時に、入るときに髪の毛一本落とすなという事で、真っ白なヤバい実験してる所みたいなのを全部着せられて、防護させられて、回ったことありましたが、それだけ非常に注意深く実験をしている。

今この業界でリーダーと言うか、トップを走っているのは、ゼノンハンドレット (XENON100) という実験です。これ (スライド右上のグラフ) です。ゼノンハンドレットはちょっと一人勝ちっぽくなってきているんですが、そこら辺のアレは聞いたかったら後で。それで、何かと言うと、まだシグナルは見えていません。見えていないという事は、散乱断面積に上限がつくわけですね。どうしてかと言うと、これ (暗黒物質と原子核の散乱) が起こるのは、原子核と暗黒物質の散乱断面積が大きければたくさん起こるだろうし、小さければ起こらない。現実測って見たらまだ起こっていないという事は、断面積に上限が付くという事ですね。もしこれよりも大きな断面積があるのであれば、見えてしかるべきだという事。一方見えていないから上限が付くと、そういう量です。でこれ (グラフの幅付の曲線) が上限です。横軸が暗黒物質の質量です。これは Wino に限った話ではありません。これは **general search** なので、どんな暗黒物質でもいいので。横軸を暗黒物質の質量にして、縦軸を暗黒物質と核子、陽子または中性子との断面積としてこういうバウンドをつけてますよと。これは 5GeV ぐらいから始まって、1 TeV まで書いてありますね。縦軸はさっきの断面積で、ここが  $10^{-45}\text{cm}^2$ 、ここが  $10^{-39}\text{cm}^2$ 、ちょっと見づらいですけど。この青い線がゼノンハンドレットの新しいデータからの制限で、この上の領域は死んでいる。例えば自分が暗黒物質の模型を作って、散乱断面積を計算して、もしこの線より上に出てきたら、それは駄目であるという事になる。それで、一つ注目したいのは、実際の実験と言うのは、ゼノンハンドレットと言うのはキセノンを使っています。だから本当に計算しなきゃいけないのはキセノンと暗黒物質の散乱断面積です。だから原子核の知識が結構大事なんですね。原子核との散乱断面積を計算するとき、どのくらいの精度で計算できているのかと言うのをきちんと本当は詰める必要があって。そこらへんは多分原子核の人たちが頑張って計算してきていると思いますけども、そういう結果を使って、それを原子核の散乱断面積じゃなくて、中の陽子または中性子の散乱断面積にわざわざ焼き直してバウンドを付けて、実験家の人たちが出していると、そういうものになっています。これ見るとだいたい分かるんですけど、だいたい 100GeV~1 TeV ぐらいを見ると、一番すごいときは  $2 \times 10^{-45}$  以下でありなさいというのがありますけど、ちょっと重くなってくると  $10^{-43} \sim 10^{-44}$  ぐらい、そのくらいの値以下でありなさいと。ところで、Wino を見てみましょう。Wino を思い出してもらおうと分かりますが、(原子核との散乱断面積は)  $10^{-47}$  でした。47 ってここらへん (グラフの下限值以下) だから、そういう意味では生きていますね。それが良いことか悪いことかは別として。もちろん、今も実験が続いていて、こいつの後継実験もアプローチされているので、どんどん下がっていくことが期待されるんですけども、もし見つからなかったらね。だけでもまだまだ、多分 47 に到着するのはすごい難し

いと言われています。だから、もし Wino に固執すると直接観測で見るのは大変と言う結論になります。でも別に Wino だけが暗黒物質候補じゃないから、いろんな暗黒物質候補を持ってきて、散乱断面積を計算してこれと比べるというのは非常に大事なことになります。暗黒物質の現象論の計算の大事な一つとなっています。



さて、次は暗黒物質の間接検出実験 (indirect detection) に行きたいと思います。暗黒物質の検出実験とはどういう事かと言いますと、こういう事です。これはまた最初の方に戻りますが、我々の銀河には暗黒物質がハローと言う形で付随している。そうするとハローの中でしばしば暗黒物質同士が対消滅してくれる、かもしれない。もし対消滅してくれると、非常に高エネルギーの標準模型の粒子ができるわけですね。例えば Wino の時だったら  $W^\pm$  が出来るわけです。  $W^\pm$  が一旦出来ると、そいつはすぐに崩壊します。崩壊する時には、クォークたちに崩壊したり、レプトンとニュートリノに崩壊したりしますが、そうやって最終的に安定な粒子になるまでカスケード的に崩壊をしていきます。そうすると、Wino が対消滅すると、  $W^\pm$  に行くと最終的に何が出来るかと言うと、フォトン。W ボソンが崩壊してクォークに行くと、クォークは最後はハドロナイズしてハドロンになるわけです。ハドロンの中にはたくさんの  $\pi^0$  が入っています。  $\pi^0$  と言うのは  $2\gamma$ 、2つのフォトンに行きますよね。だから、最終的にはフォトンに、ガンマ線を作る。あるいは、その中に

は反陽子を作る。あるいは陽電子を作る。電子を作る。陽子を作る。そういう安定粒子にまで崩壊していきます。その作られたやつを、地球上に用意した、あるいは人工衛星、スペースステーション上に用意した検出器で測定することによって、暗黒物質を間接的に検出してやろう、それが暗黒物質の間接測定です。

(質問) すみません、少し混乱したんですけど、暗黒物質って中性なんですよ。

(回答) 中性です。だから直接はフォトンに行くことはできない。でも  $W$  ボソンを一回作って、 $W$  ボソンが崩壊することによってフォトンを最終的に作り出すことは、あり得る。もちろん断面積は小さいですから、そうは言っても、普通の観測でかかるような大きいものは中々ないから、最初に言った暗黒物質が光とほとんど相互作用しないというのは正しい。

絵に書くとこんな感じです。これ(スライド中心) 銀河ディスク、我々の天の川だと思ってください。暗黒物質のハローがぼわ~とあって、例えばこの辺(スライド上部)で対消滅がたまたま起こったとしましょう、暗黒物質同士の。それで、紆余曲折の末、陽子ができたり反陽子ができたり、電子ができたり陽電子ができたり、ガンマ線ができたり、あるいはニュートリノができたりもします。それで、そいつを我々の地球で測る。注目するのは、それぞれの、どの **annihilation product** に注目して観測するかによって、実験は全然違います。例えば、ニュートリノに注目しましょう。ニュートリノは真っ直ぐ飛んできますから、それをニュートリノ検出器で測ろう。例えば神岡とか **ice cube** とかそんなのです。ただし、ニュートリノ自身の反応が弱いのは皆さんの知っての通りだから、かなり大型の検出器を置いても、なかなか発見する感度まで行くのは大変だというのが事実です。じゃあ次に、反陽子と陽子が作られたとしましょう。そうすると、こいつらは電荷を持っています。銀河の中には磁場があります。ほとんどランダムとも思われる磁場が。だから、真っ直ぐは進んでいきません。なので作られるとグチャグチャグチャグチャして、その内のいくつかはたまたまうちの地球の近くまで飛んできて、そいつをうちらが検出するという事になります。だから方向の情報は失われちゃうんですね。あるいは電子、陽電子。そいつも作られたら、び~とこうなって、辿り着いたものを検出する。これが陽電子測定です。それで、さっきから電子とか陽子とか言うときにこだわってたのは、陽子と反陽子を比べたら、反陽子の方がずっと見つけやすいんです。何故かと言うと陽子と言うのはバックグラウンドがたくさんあるから、なぜなら宇宙線は陽子で出来ているから、だから反陽子に注目する。電子、陽電子も同じで、陽電子の方に注目するのが主流です。あるいは  $\gamma$ 、この  $\gamma$  はちょっと複雑なんですよ。この崩壊で  $\gamma$  線ができたとする、 $\gamma$  線はほとんど真っ直ぐ進んでいきます。何しろ、電荷持っていないから。それを  $\gamma$  線観測衛星とか、 $\gamma$  線観測望遠鏡で見ている。あるいは、こういう事が起こります。最初電子が作られるんだけど、背景にある光(宇宙背景放射とか星からの光)を暗黒物質の対消滅から

出てきた電子陽電子が叩いて、 $\gamma$ 線に代えてしまうことがあります。それを逆コンプトン散乱と言います。ファインマン図はコンプトン散乱と同じです。コンプトン散乱って、普通は止まっている電子に高エネルギーの光を当てるんですけど、逆で、ほとんどエネルギーがないフォトンに高エネルギーの電子をぶつけて光を放ちます、と言うので逆コンプトン。それで $\gamma$ 線を出します。それだけじゃなくて、 $\gamma$ 線だと、なにもうちの銀河に付随したハローから来るものだけとは限らない。近くの銀河（例えばアンドロメダ銀河、あるいはうちの銀河の子分銀河、サテライトギャラクシーと言いますけど）から来た $\gamma$ 線をターゲットに、そっちから来た $\gamma$ 線を検出しよう、という事も考えられています。これが暗黒物質の間接検出実験です。何か質問は？これを見ると素粒子じゃなくて、だいぶ天文学的になってきますけど...

（質問） 暗黒物質が崩壊して、知っている粒子になって、多分クォークとかになると思うんですけど。その崩壊が暗黒物質から始まったのか、知っている粒子から始まったのかと言うのはどうやって区別しているんですか。

（回答） それはいい質問です。それはまさしく次のページからの話になります。つまり、そういう高い $\gamma$ 線とか高い陽電子が来たときに、そのバックグラウンドとなるような何かがあるのか無いのか、という事です。少し待ってください。



21

## III. 暗黒物質の探査!

### ガンマ線を用いた間接検出実験

**ガンマ線ソース (ターゲット)**

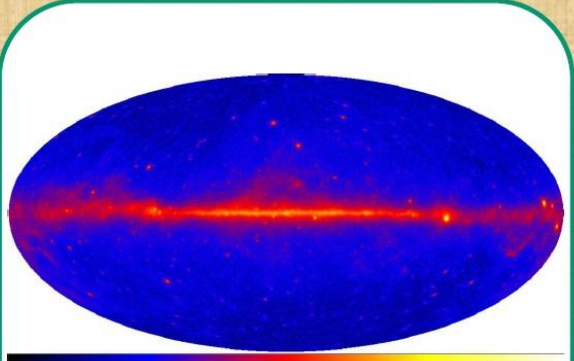
1. 銀河中心
2. 銀河団
3. アンドロメダ銀河
4. 随伴矮小銀河
5. 矮小楕円体銀河
6. 拡散ガンマ線




**Fermi-LAT**                      **HESS**

**Satellite exp:**  $E_\gamma < 0(100) \text{ GeV}$   
**ACT (Ground):**  $E_\gamma > 0(100) \text{ GeV}$

矮小楕円体銀河(dSph)内で暗黒物質がどのように分布しているかについての不定性有り。シグナルに対する主なバックグラウンド(BG)は宇宙線由来のガンマ線。



[A.Abdo et al. (LAT), APJ, Suppl.188, 2010]

暗黒物質シグナルの兆候はまだ見えてなく、対消滅断面積に(質量に応じて)上限がある。Wino暗黒物質では、質量を決めると断面積が一意きまるので、質量に対し下限が付く。

$m_{\text{Wino}} > 300 \sim 500 \text{ GeV}$

じゃあ、一個一個見ていきましょう。まず $\gamma$ 線を用いた検出実験。 $\gamma$ 線はさき程言ったように、うちの銀河ハローから来るもの、あるいはもつと的を絞って、うちの銀河中心から来る $\gamma$ 線、あるいは子分銀河たちから来る $\gamma$ 線、あるいは例えばアンドロメダ銀河から来る $\gamma$ 線、あるいはもうちょっと遠いけど銀河団から来る $\gamma$ 線、どれに的を絞って測るかで、変わるんですよ。それ全部、もちろんやられてます。けれども、今一番感度の高い実験を出しているのは、矮小楕円体銀河 (dSph)、うちの子分銀河です。そこから来る $\gamma$ 線を見るのが、今一番感度の高い実験になっています。それでどういう機器を使って観測するかと言うと、Fermi-LAT 実験、人工衛星実験です。あるいは $\gamma$ 線のエネルギーが高いところを見ようとすると、人工衛星だとちょっと容量が少ないので、地上の $\gamma$ 線テレスコープで見ることになります。今のところこいつ (Fermi-LAT) がいい結果を出しています。

まず最初にどういう事かと言うと、うちの子分銀河の中にも暗黒物質が付随しています。付随している暗黒物質の中で対消滅が起こって、 $\gamma$ 線が出てきて、それを見ると。それは矮小楕円体銀河のあるところに望遠鏡を向けて、そこをじっと見るわけですね。

まず最初に不定性の話をします。どのくらい $\gamma$ 線が来るのかと言う計算をしないと、実験結果と比べられないわけです。対消滅断面積がどれくらいかと言うのは暗黒物質模型を決めたら決まります。ただし、それだけじゃ flux は決まらないわけですね。その矮小楕円体銀河の中で、暗黒物質がどれくらいの密度で分布しているのかを知らないといけない。

それは、他のいろいろな天文学的データを使って暗黒物質分布を導出して、暗黒物質分布があると、そいつの 2 乗×断面積が flux になりますから、それを計算する。でも、必ず不定性は被るわけですね。そういう不定性があることは覚えておいてください。

一方先ほど質問が有りましたが、シグナルに対する主なバックグラウンドとしては一体何があるのか。これ、結構（エネルギーが）高い $\gamma$ 線です。だいたいそうですね…高くなると数 10GeV とか、そのぐらいです。そのぐらい高い $\gamma$ 線を出す天体現象はなかなかありません、まず最初に。一番のバックグラウンドは、やっぱり宇宙線です。宇宙線ってスペースシップの方じゃないよ、コズミックレイの方ね。宇宙線が、超新星で陽子が加速されて、そいつが宇宙を伝搬しているときに、宇宙の星間物質とぶつかって $\pi^0$ を出します。 $\pi^0$ は $\gamma\gamma$ に崩壊する。宇宙線は非常に高いエネルギーまで到達することが知られていますから、そいつがバックグラウンドになる。ただし、どうやってシグナルを顕著に見るかっていうと、今矮小楕円体銀河とかを見えています。それで、その周りを見ます。宇宙線っていうのは全体から来ますから、全体を見たときに矮小楕円体銀河だけ極端に $\gamma$ 線が増えていたら、それはシグナルとなるわけです。何もなかったら、シグナルは分からなかった。つまり、今度是对消滅断面積に上限が付くわけです。これが（スライド右上の図）、どの絵を持ってこようかなと思ったんですけど、Fermi-LAT 実験の全天の $\gamma$ 線分布です。ここ（図中心）が銀河中心です。銀河中心にはいろいろソースが有るからちょっと濃いめになっていますけど、矮小楕円体銀河はここ（銀河中心）から離れたところですから、矮小楕円体銀河はここら辺（図中右上）にいたりしますけど、もちろんまだシグナルは分かっているんですが、ここら辺（図中真ん中ら辺上部）に（シグナルが）来ることになります。実際には暗黒物質のシグナルの兆候はまだ見えていなくて、対消滅断面積（もちろん質量によって変わるわけですけども）に応じて上限が有るのが現状です。

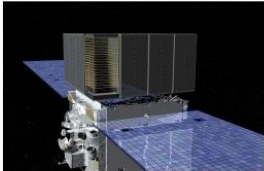

21

## III. 暗黒物質の探査！

### ガンマ線を用いた間接検出実験

**ガンマ線ソース (ターゲット)**

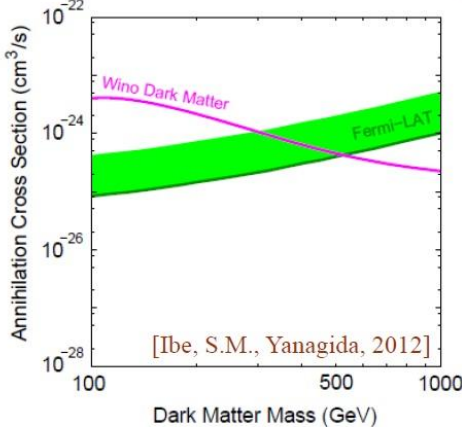
1. 銀河中心
2. 銀河団
3. アンドロメダ銀河
4. 随伴矮小銀河
5. 矮小楕円体銀河
6. 拡散ガンマ線

**Fermi-LAT**                      **HESS**

**Satellite exp:**  $E_\gamma < 0(100) \text{ GeV}$   
**ACT (Ground):**  $E_\gamma > 0(100) \text{ GeV}$

矮小楕円体銀河(dSph)内で暗黒物質がどのように分布しているかについての不定性有り。シグナルに対する主なバックグラウンド(BG)は宇宙線由来のガンマ線。



[Ibe, S.M., Yanagida, 2012]

暗黒物質シグナルの兆候はまだ見えてなく、対消滅断面積に(質量に応じて)上限がある。Wino暗黒物質では、質量を決めると断面積が一意きまるので、質量に対し下限が付く。

$m_{\text{Wino}} > 300 \sim 500 \text{ GeV}$

例えば具体例として Wino の暗黒物質の時に何が起るかという事なんですけれども、Wino と言うのは質量を決めると断面積が決まるような構造になっています。SU(2)相互作用しかしないから、SU(2)の結合定数はもう知っているので一対一対応があって、例えばこんな絵(スライド右上のグラフ)が書けます。横軸は暗黒物質の質量として、縦軸が対消滅断面積をこのユニットで書いた時に、今 Fermi-LAT 実験から、矮小楕円体銀河を見た時に、これ(グラフ中、緑のバンド)よりも上は死んでます、と言う上限がついています。なんか幅あるじゃん、と思うかもしれないですけど、これは先ほど言った不定性のためです。不定性のために幅があって、conservative には一番上を取ってください。aggressive に行きたいなら一番下を取ってください。普通は conservative に行くべきですよ、制限するなら。それに対してマゼンタのラインは、暗黒物質が Wino だと思いと、こういう予言があります。だから、Wino 暗黒物質が軽いと、この緑のバンドよりも上に行きますから、これはあり得ないという事です。この領域は死ぬことになります。だいたい今だと、Wino の質量は 300GeV から、aggressive に取ると 500GeV 以上じゃないといけないという事になります。保守的に考えても 300GeV 以上じゃなきゃいけないという制限がついています。あるいは、みんなが暗黒物質の研究をやるなら、自分の暗黒物質候補を見つけてきて、対消滅断面積を計算して、この実験結果と比べて矛盾するかしらないか…もちろん、質量に依ったりパラメータ領域に依ったりしますけれど。ある領域は死んだり、ある領域は生き残ったり、と言うのを調べることが出来る。そういうことになります。

### III. 暗黒物質の探査!

#### 反陽子を用いた間接検出実験

##### 宇宙線の異常フラックス観測

反陽子の運動は銀河磁場により頻繁に変化する。暗黒物質シグナルは宇宙線中の異常フラックスとして観測される。

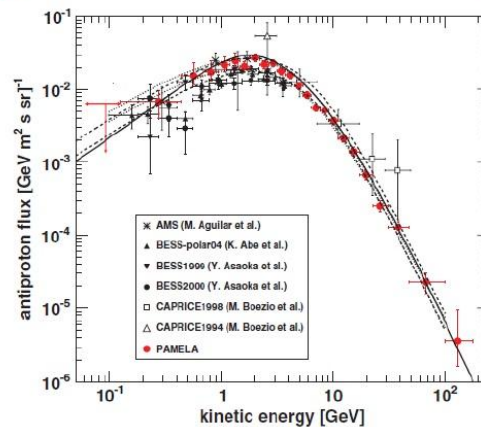


PAMELA



AMS-02

我々の天の川銀河(特に銀河中心)で暗黒物質がどのように分布しているのかについての不定性有り。また生成された反陽子が銀河内をどのように伝搬してきたのかについての不定性も有る。伝搬の不定性は、AMS02実験の結果が得られると減ると期待されている。



暗黒物質シグナルの兆候はまだ見えてなく、対消滅断面積に(質量に応じて)上限がある。

**PAMELA:**  $m_{\text{Wino}} > 210 - 700 \text{ GeV}$

**AMS-02:**  $m_{\text{Wino}} > 0(1000) \text{ GeV}$

さて、次は反陽子を使った実験です。先ほど言いましたように、反陽子の運動と言うのは銀河磁場により頻繁に変化します。ぐじゃぐじゃと動かされます。なので、直接どっちかの方向をみて反陽子が来ている、と言っても意味はないですね、曲がっちゃっているから。そうすると、何を測るかと言うと、反陽子と言うのは、実はこれはバックグラウンドの話に関係しますが、バックグラウンドは宇宙線です、やはり。宇宙線で陽子が非常に高エネルギーで宇宙にあると、星間物質とぶつかって、陽子と陽子がぶつかって陽子3つと反陽子が1つできたりします。そいつがバックグラウンドになっていて、それがどのくらいの量の反陽子があるかというのは、バックグラウンドの方で理論計算できます。それに比べて、バックグラウンドの理論計算からズレが有るか無いかで、シグナルを発見しようとする。実際に、今現在世界トップクラスの実験と言うのは PAMELA 実験と言われているやつです。人工衛星実験です。さらに今次世代の実験と言うのがもう動いていて、それは AMS-02 実験と言われるやつで、これはスペースステーションベースでの実験です。国際宇宙ステーションというのがあって、そこに1つびよっこと検出器を置いている実験です。感度は10倍くらいありますけど。

まず最初に、また不定性の話をします。反陽子の実験は非常に面白いんだけど、不定性が大きいことでも知られています。何故か? 反陽子が暗黒物質対消滅で作られますけれども、それはどこら辺で一番多く作られるかと言うと、銀河中心です。何故かと言うと、銀河中心では暗黒物質の密度が高いです。作られる量と言うのは、これは対消滅ですから、

暗黒物質の密度の2乗に比例しますよね。暗黒物質と暗黒物質がぶつかって、それに断面積をかけたものが flux ですから。だから銀河中心でたくさん作られるんですけども、我々の銀河中心で暗黒物質がどうやって分布しているのかというのは、結構な不定性があります。その不定性が、シグナル flux の計算に跳ね返ってきます。もう一つの不定性っていうのは、じゃあ、そこら辺の不定性も含めて計算出来ました。反陽子も作られました。では、作られたときにどうやってうちの地球まで伝搬してくるのかを計算しなくちゃいけないですね。伝搬の計算にも不定性があります。そういう意味でダブルの不定性があって、非常に不定性がでかいというのが現状です。ただし AMS-02 実験が動き出しますと、伝搬の不定性が消えると言われていています。何故か？伝搬の不定性が何かというと、磁場がどうやって分布しているかっていう不定性なんですね、実は。どうやって曲がっているかと言う事ですから。けども、なにも磁場で曲げられるのは暗黒物質から作られた反陽子だけではありません。普通に宇宙線も磁場で曲げられます。もちろん宇宙線と言うのは陽子だけじゃなくて重い原子核も含んでいます。例えば、ボロンとかカーボン、あるいはベリリウムとかそういうやつです。そういうデータもまた AMS-02 実験では取れるので、そいつとの整合性を見て磁場の分布の不定性を減らすことが出来る。そうすると、伝搬の不定性が減ると言われています。ただしこいつ (AMS-02) は実験結果を出していないので、今のところ PAMELA で議論するしかないのですけれども。

これ (スライド右上のグラフ) が実験結果です。横軸が反陽子の運動エネルギー、1GeV、10GeV、100GeV…縦軸が反陽子の flux です。赤いのがデータ。黒い実線がバックグラウンド、つまり宇宙線のシグナル予想です。両者は非常によく一致していますね。だから暗黒物質の兆候は見えていないという事になります。もし暗黒物質からの寄与が大きいと、ここ (黒の実線) からのズレが見えるはずですが、だから今見えていないという事は、シグナルが見えていないので、断面積に上限があるのが現状です。例えばこんな絵が描けます。

### III. 暗黒物質の探査!

#### 反陽子を用いた間接検出実験

##### 宇宙線の異常フラックス観測

反陽子の運動は銀河磁場により頻繁に変化する。暗黒物質シグナルは宇宙線中の異常フラックスとして観測される。

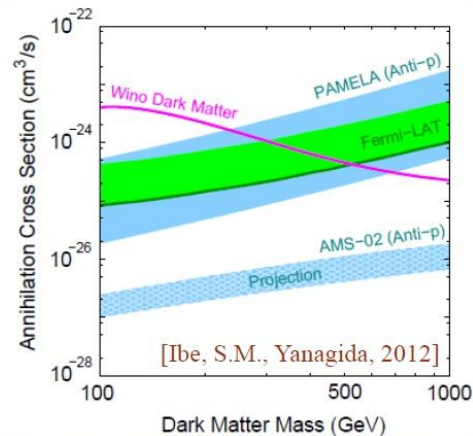


PAMELA



AMS-02

我々の天の川銀河(特に銀河中心)で暗黒物質がどの様に分布しているのかについての不定性有り。また生成された反陽子が銀河内をどの様に伝搬してきたのかについての不定性も有る。伝搬の不定性は、AMS02実験の結果が得られると減ると期待されている。



[Ibe, S.M., Yanagida, 2012]

暗黒物質シグナルの兆候はまだ見えてなく、対消滅断面積に(質量に応じて)上限がある。

PAMELA:  $m_{\text{Wino}} > 210 - 700 \text{ GeV}$

AMS-02:  $m_{\text{Wino}} > 0(1000) \text{ GeV}$

このブルーのラインが上限です。幅がでかいのは、先ほど言ったダブルの不定性を加えたからです。先ほどの Fermi-LAT に比べると、aggressive に行くときでかいけど、conservative に行くとき少し小さいような構造になっていて、実際 PAMELA 実験だと 210GeV~700GeV、まあ 700GeV はちょっと言いすぎだけど、200GeV よりも大きくないといけない事が言えて、 $\gamma$ 線の実験に比べると、少し弱めの制限を出しているという事になります。ただし、一方 AMS-02 実験が出たら、このぐらいの sensibility が出るんじゃないかと言う予想のラインですけど、非常に精度がいいので 1TeV くらいまでの Wino だったら全部カバーできる、もしも見えなかったら 1TeV までの Wino は死ぬ、という事になります。こういう絵が描けます。

(質問) そういうグラフは、幅は具体的には何 $\sigma$ で取っているんですか?

(回答) この場合は、実はそこまで丁寧な事やってなくて、伝搬の不定性を見たときに、暗黒物質の分布の不定性を、いろんなモデルがあるので、いろんなモデルで書いた時の最大と最少と言うものです。ほんとはもうちょっと statistical な統計処理をしてもいいんですけども、まあ大した違いは…どっちかと言うと conservative に出てくる方を取るのです。

(質問) AMS はいつごろデータが出そうなんですか。

(回答) 僕も知りたいんですが…それはいい質問ですね。僕が最後に聞いたトークだと、

今年度中に出したい、と言っていたけれど。そう言ってそのまま出たことはあまりないので、もうちょっと遅れるかな。だから、僕もこの実験結果を待っています。本当に。


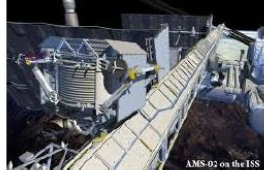
23

## III. 暗黒物質の探査！

### 陽電子を用いた間接検出実験

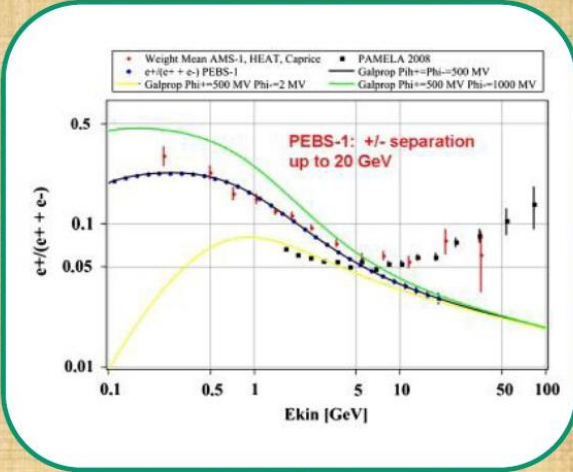
宇宙線の異常フラックス観測

陽電子の運動は銀河磁場により変化するとともにエネルギーも急速に失う。シグナルは宇宙線中の異常フラックス。

PAMELA AMS-02

暗黒物質対消滅からの電子・陽電子は(逆)コンプトン散乱を通じて急速にそのエネルギーを失うため、太陽系近傍の暗黒物質分布が重要となる。伝搬の不定性は、反陽子検出と比べ小さい一方、宇宙線以外の天体現象のバックグラウンドが(たくさん)ある。



異常フラックスを観測！！

暗黒物質？あるいは他の天体現象？

暗黒物質： 幾つかの模型は存在

天体現象： Rotating Pulsars

次は反陽子じゃなくて陽電子の実験です。これは、聞いたことあるかもしれませんが、2年ぐらい前は爆発的に有名になった話です。まず、暗黒物質が対消滅して陽電子ができて、その陽電子を見る実験ですけども、陽電子も電荷を持っています。だから、磁場の中でくねくね曲がる。だけど、陽子と一つ違うところがあります。くねくね曲がると同時に、電子軽いですから、超軽いですから、簡単にエネルギーをロスしてしまうわけですね。制動放射です。だから、エネルギーを急速に失います。これは何を意味しているか。これはこういう事です。うちの太陽系からかなり遠く離れた、例えば銀河中心とか言ったところで、せつかく活きのいい電子が作られたとしても、我々の地球に届く前にエネルギーを失ってへろへろになってしまいます。(エネルギーが)低い陽電子なんてバックグラウンドがたくさんあるから、そんなのは使えないので、そういうのは観測の flux としては見えないという事になります。逆に言いますと、比較的我々の太陽系の近傍で作られた陽電子、暗黒物質対消滅で作られた陽電子のみが観測に効いてくる事になります。これは良いことか、悪いことか？良いことです。何故かと言うと、やっぱりこの陽電子の実験というのは不定性を受けます。ダブルで受けます。一つは暗黒物質分布の不定性。もう一つは伝搬の不定性。

伝搬の不定性はしょうがないんですけども、分布の不定性は銀河中心ははっきり言って遠すぎます。だから、我々近傍の暗黒物質分布がどうなっているかさえ知れば、その分布は抑えられるはずですね。銀河中心の不定性と比べると、我々の付近の不定性と言うのは小さいですから、その分だけ不定性を抑えられるわけですね。だけど、悪いことが一つあります。先ほど言いましたけど、陽子反陽子に比べて電子陽電子は軽い。軽いという事は、他の天体现象により作られる可能性があるわけですね。陽子は重いから、高エネルギーの陽子を作るのは中々大変ですけど、普通の天体现象で、陽電子は作られる。一昔前は作られないとみんな、天体の人達は言っていたんですけど、今から言いますけどシグナルが見えた瞬間に掌を返されたので、作られるんです（笑）。それで、これ（スライド右上のグラフ）が結果です。横軸がまた、電子、あるいは陽電子の運動エネルギー、1GeV、10GeV、100GeV…縦軸は、positron fraction と呼ばれるものです。これは何かと言うと、陽電子の flux を陽電子と電子の combined flux で割ったものです。まあ、ぶっちゃけ電子の flux と言うのは基本的にバックグラウンド dominant なので、陽電子の flux を適当なエネルギースケールで規格化したものと思ってもらって構いません。黒の点線は忘れてください。これは将来予想なので、無視。それで実験の人は PAMELA と AMS-02 の実験のコンビネーションを見ます。赤い線が多分ちょっと前の実験の結果です。四角い黒の棒付きが PAMELA 実験です。5GeV~10GeV の間でデータが散らばってるわけですけど、これは太陽風の影響を受けるわけです。電子が軽いから、太陽風って 11 年周期で変わるので、そうすると flux に影響を与えます。だからここら辺は太陽風の影響で散らばるんですけども、太陽風がどのくらい大ききさで出のかっていうのを予想してフィットするとこういう線になったり、こういう線になります（図中色つきの実線）。結局何かと言うと、高いエネルギーのところに行くと、10GeV 以上、太陽風の影響をほとんど受けなくて、だけこれ（色つきの実線）がいわゆるバックグラウンドの予想曲線です。バックグラウンドの予想曲線って、太陽風が強いとき、弱いとき、中ぐらいの時、といろいろ変わりますが、（エネルギーが）高い時はあんまり変わりませんね。高エネルギーの電子は太陽風をものともしないで突き進むので、こういうことになるのですけども。これが宇宙線からのバックグラウンドです。宇宙線の中の陽子と陽子がぶつかって、今度は  $\pi^+$  を作ります。 $\pi^+$  は  $\mu^+$  に崩壊します。 $\mu^+$  は  $e^+$  に崩壊します。それで、データと（バックグラウンドの予想が）全然違う。アノマリーを発見したわけですね。これはお祭りになりました。お祭りになって、これは暗黒物質を見つけたに違いないとか言って、僕も何個か論文書いたけれども、ある時天体の人たちが、宇宙にはパルサーと言うのがいて、これと上手く合うんですけどと言われて…今のところ、このアノマリーが本当に暗黒物質から来たのか、あるいは天体现象、パルサーから来たのかは、不明です。でも、なんとなく感覚からすると、天体现象の方に旗が揚がりつつある傾向にあります。何故かと言うと、天体现象でこれ（アノマリー）を説明しようとするのが簡単で説明できるのに、暗黒物質で説明しようとするとなかなか苦労するというのがあって、だいたい模型をいじくらないと説明できないアノマリーというのは、間違いと言



うか、素粒子とあまり関係ないという過去の経験が有るので、僕はそう思っているだけですけれども。もちろん、これは暗黒物質で説明出来るんだと言って論文書いている人たちは沢山いるわけですが。もしこれが天体現象だったとすると、どんな天体現象で、どのくらい flux を持っているかをきちんと予言できない限り、これ（陽電子検出）は暗黒物質の検出に使えなくなっちゃうわけですね。何故かと言うと、よく知らない天体現象にデータが汚染されているという事と同じですから。



24

## III. 暗黒物質の探査！

### 宇宙背景放射を用いた間接検出実験

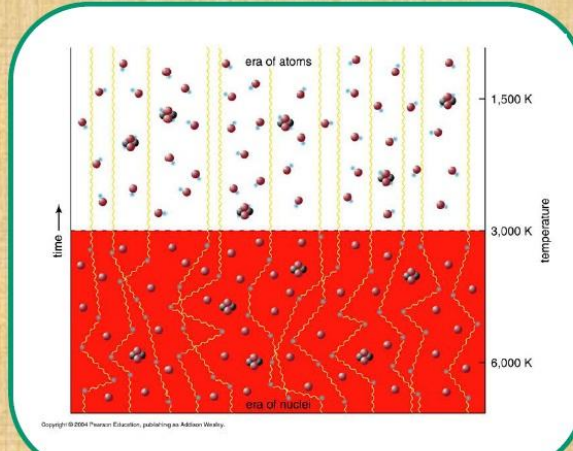
#### 宇宙背景放射のゆらぎ観測

宇宙の晴れあがり時に暗黒物質対消滅の影響が大きいと、背景放射の揺らぎのスペクトルが変化する。

**WMAP**                      **PLANCK**

晴れあがり時に、暗黒物質対消滅からのエネルギー注入の為、プラズマ状態の宇宙から中性になる過程に変化が起り、その結果CMBスペクトルが変化。宇宙の晴れあがり時は、銀河等の複雑な宇宙の構造は形成されておらず、天文学からの不定性が殆どない。



暗黒物質シグナルの兆候はまだ見えてなく、対消滅断面積に(質量に応じて)上限がある。

**WMAP:  $m_{\text{Wino}} > 230 \text{ GeV}$**

**PLANCK:  $m_{\text{Wino}} > 500 \text{ GeV}$**

最後、これで一応暗黒物質の indirect direction の話はほぼすべてしました。ガンマ線、反陽子、陽電子ですね。ニュートリノを無視するのは、ニュートリノはあんまりバウンドが強いから無視させて頂きました。ただ最後にこれだけ言います、最後に実は、宇宙背景放射を用いた間接検出実験というのがあります。これはずばりさっきの WMAP と同じです。ゆらぎのパターンを見ればいい、そのデータから来ます。だから、WMAP、あるいはその後継機で今走っていて来年の3月にデータが出ると皆が言っている PLANCK 実験ですね。これはどういうことかと言うと、宇宙の晴れ上がり時に暗黒物質対消滅の影響が大きくあると、背景放射の先程の揺らぎパターンに変化が生じます。どういうことか、これ先程書きましたけど、3000K を境にここ（3000K 以上）がプラズマ化していて、今度こっちからこっちに時間が流れて（下から上に）、あるところで中性化してその後、光が真っ

直ぐ進めますよと書いた、いいですね。で何が起こるかっていうと、この変化って一瞬で起こるわけでは決してないです。宇宙全体の年齢に比べたらほとんど一瞬と思えるかもしれないけども、ここを境に徐々に徐々に中性、陽子・電子という状態よりも水素原子っていう状態を取る陽子、電子たちが多くなってくるわけです、ここ（3000K）を境にね。けども、ここら辺で暗黒物質がある程度対消滅したとします。そうすると暗黒物質が対消滅するとエネルギーが inject されるんですね宇宙に。エネルギーが inject されると、せっかく結びついた水素原子をまた壊そうとするわけです。いいですね、W ボソンが出て光子とか電子とかになってそいつが宇宙の中にエネルギーを inject して、中性化しようとするのを阻害したりします。そうするとここ（3000K より少し高い温度）の物理が少し変わってきて、それは、この物理がまさしく先程言ったスペクトラムを決めていますから、そのスペクトラムに変化が現れます。で実際の現実のデータはどうなっているかという、暗黒物質の対消滅が十分小さい、殆ど影響がないとした時と consistent という WMAP の結果が出ています。つまり、やはりこの観測から暗黒物質の対消滅断面積に上限が与えられます。それで、これのメリットが一つあります。何かと言うと、先程 indirect direction があって多分皆が思った感想は、不定性がたくさんあって計算が大変そうで本当に信頼できるのかなあ…みたいな感じの感想を持ったと思いますけど、この検出観測っていうのはそういう不定性がほとんどないんですよ。何故かと言うと、宇宙の晴れ上がり時には、これですね、別にまだ銀河とか作られているわけではないですし、星とかあるわけでもないですし、変な風に磁場がたくさんあるわけではないんで、非常にほとんど一様等方でいわゆる天文学からくる不定性が殆どありません。非常に単純な物理の背景をしている。そのうえに暗黒物質の対消滅の影響があるかないかっていう議論をしているので、非常に不定性の少ないバウンドがつけられるという、そういうメリットがあります。

### III. 暗黒物質の探査!

#### 宇宙背景放射を用いた間接検出実験

##### 宇宙背景放射のゆらぎ観測

宇宙の晴れあがり時に暗黒物質対消滅の影響が大きいと、背景放射の揺らぎのスペクトルが変化する。

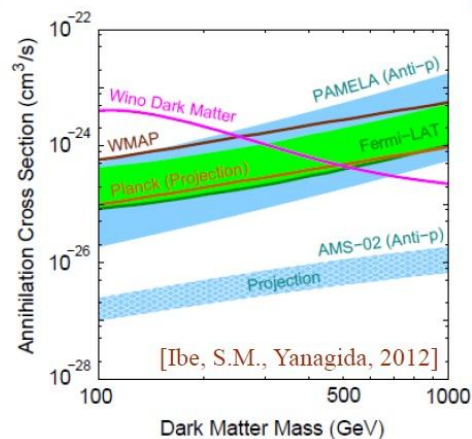


WMAP



PLANCK

晴れあがり時に、暗黒物質対消滅からのエネルギー注入の為、プラズマ状態の宇宙から中性になる過程に変化が起り、その結果CMBスペクトルが変化。宇宙の晴れあがり時は、銀河等の複雑な宇宙の構造は形成されておらず、天文学からの不定性が殆どない。



[Ibe, S.M., Yanagida, 2012]

暗黒物質シグナルの兆候はまだ見えてなく、対消滅断面積に(質量に応じて)上限がある。

**WMAP:**  $m_{\text{Wino}} > 230 \text{ GeV}$

**PLANCK:**  $m_{\text{Wino}} > 500 \text{ GeV}$

実際、どのくらいのバウンドがつけられるかという、今度はこれです。これ WMAP。今度は線ですよ、幅ないですよ、先程の理由です。これは変な astro-physical なバックグラウンドが無いので、非常に rigid にバウンドがつけられてる。ただ、もちろんちょっとガンマ線観測に比べて弱いですが、それを見るとまあ大体 230GeV 以上という非常に信頼できる値です。さらに後継機の PLANCK が走ってデータを出しますと、ここまでいけると期待されています、これは予想曲線。そうするとこれ大体 500GeV くらいのことですけども、まあ Wino が 500GeV 以下だったならば兆候が見え始める、もし見えなかったら 500GeV 以下の Wino がなくなる、という状況になります。

以上が、これが暗黒物質の indirect direction についてまとめた図になっていて、これ全部合わせると、まあ Fermi-LAT のこの辺を取るとすると、Wino 暗黒物質が 300GeV 以下のところは今のところ死んでいて、300GeV 以上は生き残っているという状況になっています。それで、次は最後 LHC の話をして終わりたいと思います。

(質問) 直接測定の話と検出感度の話。検出感度が結構低いところの DAMA 実験っていうやつが季節変動を観測して暗黒物質見つけたって主張してて、それより検出感度が高い XENON なんかが見つけられてないっていう話はどういう風に？

(回答) はい。DAMA 実験だけじゃなくて実は CoGeNT、CRESST-II 実験という3つがコンビネーションで暗黒物質見つけたと。ただし XENON100 はそこにはないと言って、

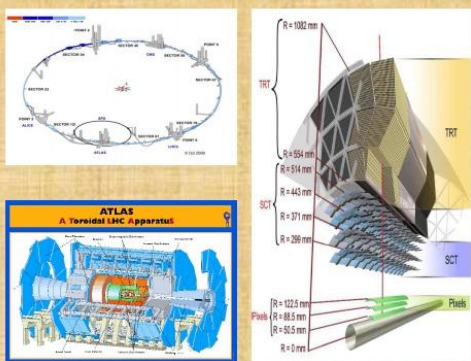
互いに矛盾している状況です。僕個人の意見としては XENON100 を信じてますけれども、その理由の一つはこういうことです。実は、XENON100 以外にトップを走っていた CDMS 実験というのがあって、CDMS 実験が自分達が取ったデータ（終わった実験ですけども）を使って季節変動が見えるはずなので見ました。もし DAMA とか CoGeNT が本当だったら季節変動が見えるはずですが、CDMS 実験のデータでは、CDMS 実験の結果を使ってね。そしたら結果はネガティブでした。だから、XENON100 は季節変動は全く見てませんけども（それで否定されてるし）、CDMS 実験は季節変動で DAMA と直接対決して、実はこっちがネガティブですね。だから、DAMA 実験は 2 種類の実験と矛盾していることになりま。だからといって DAMA がすぐに死んだとは言えませんが、比較的 DAMA を再現して他の実験と矛盾しないような暗黒物質を考えるのはかなり難しくなってるのが現状。で実質的には死んだと思ってる人が多くなってきたという話になります。ただしこれは理論屋さんの観点です、実験屋さんは本当に死んだかどうかは直接チェックするべきだと考えています。で一つにはこの DAMA っていうのは季節変動が見えます、本当にきれいな季節変動になっていて。それで、季節変動、まあ皆に説明する必要があるけど季節変動っていうのは地球が太陽の周りを回ってるから、それで太陽自体はこっちに回ってるから、季節によって相対速度がちょっと変わるわけですよ。すると季節によってレートが変わるわけです。その季節変動を見れば暗黒物質の兆候が見えるというのは皆昔から言ってる、DAMA はそれを見たかったわけです。ただし季節変動するのは何もシグナルだけではないかもしれないという話があって、バックグラウンドが季節変動する。例えば何か僕が聞いた人の話では、季節変動はちょうど 6 月にレートが増えて 12 月に減る形になっていて、ちょうど夏と冬なんです。そうすると冬と夏で何か雪解け水があってそれに放射性物質がちょっと入っていてそれが季節変動するとか。またはミュオンのアノマリーがでるとか等々いろいろ言われてますけれども、一番いいチェックはこの同じ検出器を南半球に持ってくと夏と冬が逆転するからそれでチェック出来る。それを皆やろうとしてます。だから僕たちは違うんだろーなーと思いつつ実験屋さんが最終的な結果を出してくれるのを待ってる状況になります。

(休憩)

### III. 暗黒物質の探査2!

#### LHC実験におけるWino暗黒物質検出について考える。

##### LHC実験 (ATLAS & CMS)



陽子・陽子衝突実験。重心系のエネルギーは、 $7 \rightarrow 8 \rightarrow 14(13)\text{TeV}$ で、(予想)積算Luminosityはそれぞれ  $5, 20, 300 \text{ fb}^{-1}$  となっている。

##### カラー荷を持つ新しい新粒子

LHCはハドロン・コライダーなので、まずカラーを持った粒子が生成され、その後それらが崩壊し、カラー荷を持たない粒子が生成される。

グルイーノ & スクォーク

##### 縮退した荷電Winoの存在

中性Winoは、そのSU(2)パートナーである荷電Winoと強く縮退する。

質量差 =  $160 - 170 \text{ MeV!}$

荷電Winoは比較的長い寿命を持ち、パイ中間子と中性Winoへ崩壊する。

崩壊帳( $\sigma\tau$ ) =  $5 - 6 \text{ cm!}$

まあ今の時代 LHC の話をせずに終わることは多分出来ない、まあその話ですね。皆さんご存知だと思いますが、LHC って円形加速器で陽子-陽子加速器。それで、うちらが注目すべき検出器としては、ATLAS 実験と CMS 実験。まあ ATLAS の方が日本に研究グループがあるから馴染み深いんですけども、検出器ってこんな感じのやつです。大事なのが結構インナー検出器って言われてるやつで、ここにビーム、陽子-陽子が走ってぶつかるころがあってまず最初にここにピクセル検出器ってものがあって、その後にこれシリコン検出器ですけども、またシリコンのストリップ検出器があって、最後にこの TRT っていう、まあインナー検出器があってここで粒子の判別をしたり運動量を測ったり、という話になるわけです。

もちろん今重心系で去年  $7\text{TeV}$  で終わりました、今走ってることは走っていて、ヒッグス(らしき粒子)が発見されて、2年間お休みして、14 または多分 13 と言われてますけれども  $13\text{TeV}$  で走るわけです。そして、積算ルミノシティは、最初  $7\text{TeV}$  で  $5\text{fb}^{-1}$ 、今年で多分  $20\text{fb}^{-1}$  くらい貯まる、最終的には  $14\text{TeV}$  で  $300\text{fb}^{-1}$  貯める、という計画になっていると僕は聞きました。それで、大事なのはこれ、陽子-陽子加速器です。陽子ってのは高エネルギーだと、要は quark と gluon が詰まった袋みたいなものです。だから、そのカラーをもった quark と gluon 粒子たちがぶつかってるのでやはりカラーをつくった粒子ができやすい、QCD 相互作用を作ってね。例えばこれはどういうシグナルがあるかというのは模型の詳細に依存するんですけども、例えば pure gravity みたいなときには、gluino みたいなのが作

られる、あるいは squark が十分軽かったら squark と gluino が両方同時に作られたり飛ぶ、というのが最も大事なプロセスになります。それで、Wino に入っちゃちょっと限定しますと、Wino はちょっと面白いことが起こる。何故かという先程言いましたけど Wino には SU(2) パートナー荷電 Wino がいて、そいつらが非常に縮退している。どのくらい縮退してるか、100MeV のオーダーです。100GeV とか 1TeV の Wino に対してですよ。だから 3桁~4桁縮退している。別にこれは不自然なことじゃなくて必ずなってしまうんですね。でそうすると荷電 Wino がもし最終的に、gluino が作られて gluino が崩壊して荷電 Wino ができたとすると、荷電 Wino は中性 Wino と  $\pi$  中間子に崩壊するんですけども、何しろ質量の縮退が強いで、非常に長生きします。どのくらい長生きするかっていうのに、それに光速  $c$  を掛けた、崩壊長 (一旦できたら典型的にどのくらい走るかっていうこと) と言いますが、5~6cm、場合によっては  $\Gamma$  因子があるから 10cm、20cm 走ります。そういうのが特徴です。

### III. 暗黒物質の探査2!

Multi-jets + Missing Energy

26

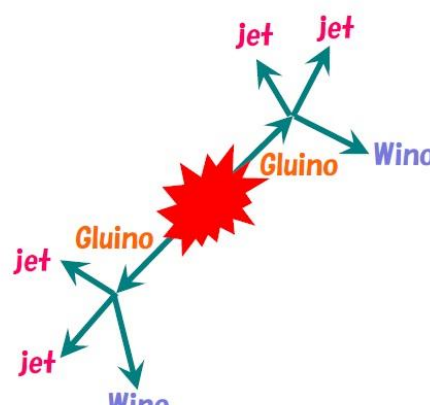
Jets + Missing Energy

シグナルの生成プロセスは、グリーノ/対生成。グリーノ/は作られると、クォーク (jetとして観測される) を2つ生成し中性または荷電Winoに崩壊する。

中性Wino(暗黒物質)は、作られても検出器で捉えられず、Missing Energy (Momentum) としてのみその存在が分かる。一方荷電Winoは、最終的には中性Winoと $\pi$ 中間子に崩壊するが、この $\pi$ 中間子は捉えることが難しい。荷電Wino検出は特殊な方法が必要。そのため荷電WinoもMissing Energyとなる。つまりシグナルのイベントトポロジーは、

Multi-jets + Missing Energy!

[Bhattacharjee, Feldstein, Ibe, S. M., Yanagida 2012]



暗黒物質シグナルの兆候はまだ見えてなく、GluinoとWinoの質量に制限がつけられる。

**7TeV:**  $m_{\text{Gluino}} > 1\text{TeV} \ \& \ m_{\text{Wino}} > 300\text{GeV}$

**14TeV:**  $m_{\text{Gluino}} > 2.3\text{TeV} \ m_{\text{Wino}} > 1\text{TeV}$

じゃあどう感じるかという、この場合は pure gravity に話に限らせてもらいます。これは典型的な例で分かりやすいので。そうするとまず何かというと、proton と proton がぶつかりと gluino がつくられます。で gluino が作られると gluino は2つの quark を放出して Wino、中性 Wino か荷電 Wino に崩壊します。で2つの quark は最終的にいろんなバ

リオン、メソンを形作って、**Jet**、まあ粒子の束として観測されることとなります、これはいいですね。そうすると、シグナルの生成プロセス自身は、**gluino** の対生成となります。それで中性 **Wino** というのは作られても検出器を素通りします、何の痕跡も残さない。じゃあ測れないのかっていうとそんなことないですよ。運動量とエネルギーを持ち逃げするわけですね、**net** から。だから、まあ運動量の保存則が一見破れたように見える。まあ **missing energy** あるいは **missing momentum** と言いますが、そういうシグナル事象を探すことによって、こういう **SUSY** シグナルを探すこととなります。これ（崩壊後の **Wino**）は見ない。それで荷電 **Wino** はどうかという余程特殊な手法を用いない限り荷電 **Wino** が出来ても、まあソフトな **pion** をだして、**neutralino**、見えない粒子にぶつかって、そのソフトな **pion** はとてもとても普通は見えないので、まあほとんど荷電 **Wino** ができても中性 **Wino** と同じように素通りして **missing momentum** としてのみ観測されることとなります。だからそうすると、シグナルのイベントと同時に、**Jet** が 4 つあって、あるいはイニシャルから **Jet** が出る分もあるので、たくさんの **Jet**、そしてエネルギー、運動量の不釣り合いになる **missing momentum**、というシグナルになります。残念ながら、こういうシグナルに注目した解析はもちろん **ATLAS**、**CMS** 両方で解析されています。そして皆さんご存知のようにそんなシグナルはまだ見えていない。見えないんですよ。そろそろ見えてくれないと困るんですけどまだ見えてない。でそうすると今度は生成断面積、あるいはこの **Wino** の質量（崩壊後の **Wino** を指して）、まあ生成断面積はこれ **QCD** プロセスで作られるから **gluino** の質量に依存するわけですけども、**gluino** の質量とか **Wino** の質量に制限がつくことになるんです。ものすごく **gluino** が重かったら生成断面積が落ちるから作られなくて、見えなくて当然だっていうのもあるし、軽かったらもう見えてるはずだから、その **gluino** は駄目って感じになりますね。

### III. 暗黒物質の探査2!

#### Multi-jets + Missing Energy

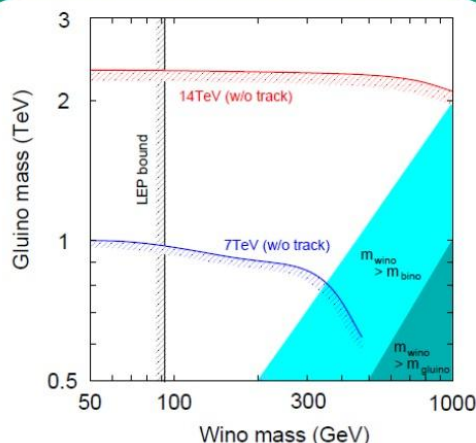
##### Jets + Missing Energy

シグナルの生成プロセスは、グルイーノ対生成。グルイーノは作られると、クォーク(jetとして観測される)を2つ生成し中性または荷電Winoに崩壊する。

中性Wino(暗黒物質)は、作られても検出器で捉えられず、Missing Energy (Momentum) としてのみその存在が分かる。一方荷電Winoは、最終的には中性Winoと $\pi$ 中間子に崩壊するが、この $\pi$ 中間子は捉えることが難しい。荷電Wino検出は特殊な方法が必要。そのため荷電WinoもMissing Energyとなる。つまりシグナルのイベントトポロジーは、

##### Multi-jets + Missing Energy!

[Bhattacharjee, Feldstein, Ibe, S. M., Yanagida 2012]



暗黒物質シグナルの兆候はまだ見えてなく、GluinoとWinoの質量に制限がつけられる。

**7TeV:**  $m_{\text{Gluino}} > 1\text{TeV}$  &  $m_{\text{Wino}} > 300\text{GeV}$

**14TeV:**  $m_{\text{Gluino}} > 2.3\text{TeV}$   $m_{\text{Wino}} > 1\text{TeV}$

実際どんな絵になっているかという、これ(グラフ)です。横軸は Wino の質量、100GeV、300GeV、1TeV。縦軸は gluino 質量、1TeV、2TeV、3TeV。Log-Log で描いてますけれど、今あるバウンドはこれです(グラフ下側の曲線を指して)。でこの領域は(グラフ右下の大きな三角形を指して)実は pure gravity だと模型的に死んでる領域だから考えなくていい。あとは過去に、LHC の前に CERN でやってた実験、LEP 実験から Wino 自身にバウンドがついてて、そいつは 92GeV 以上っていうんだから、ここは既に死んでるってことは知ってる。今新しく知れたのはここだから(グラフ下側の曲線)、これどういうのかという、gluino が 1TeV 以上、この領域(グラフ下側の曲線より下の領域全て)は死んでるわけですね、ここ(グラフ下側の曲線より上の領域)は生き残ってる。Gluino が 1TeV 以上じゃなきゃいけない。あるいは、この辺少しちょっとありますけど Wino が 300GeV よりちょっと重くないといけない等々。それで将来的にどこまで行くか。14TeV までいけて、 $300\text{fb}^{-1}$  ばっちりデータを貯めたとしたら、ラインはここまで行きます(グラフ上側の曲線をさして)。まあ 2.3TeV 以上、あるいは Wino が 1TeV ぐらいの領域をカバーすることが出来ます。ここに行きたいです、僕は、そういう感じです。これが現在の LHC の Wino 暗黒物質に対する制限といってもいいですし、pure gravity に対する制限と言ってもいいですけどまあそういう感じです。



(質問) すいません、バックグラウンドってどういうのがあるんですか？

(回答) この場合はえーと、7TeV の場合は、 $t\bar{t}$ 、 $W+Jet$ 、 $Z+Jet$ 。で 14TeV のときは、メインは  $t\bar{t} + Jets$  です。

27

### III. 暗黒物質の探査2!

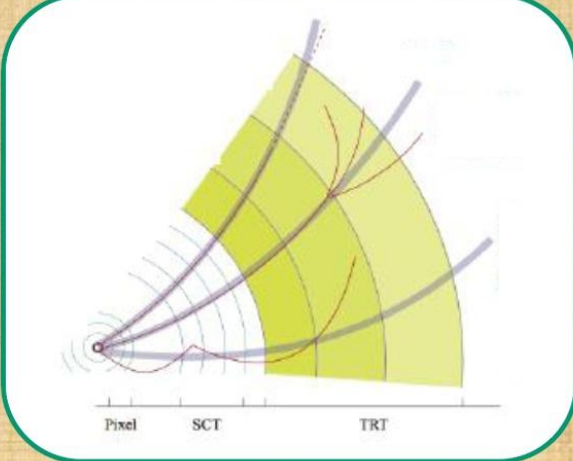
#### Multi-jets + Missing Energy + Disappearing Track

Disappearing Track

対生成されたグルイーノから荷電Winoが作られた場合、この荷電Winoを捉える方法が提案されている。荷電Winoは生成された後、0(10)cm程飛行し最終的に中性Winoと $\pi$ 中間子に崩壊する。 $\pi$ 中間子を捉える事は難しいが、飛行している荷電Winoが残すトラック(途中で消えてなくなる)を丁寧に調べる。

現在(7TeV)はTRT内で消えてなくなる荷電Winoを探しているが、検出感度はそれ程高くない。(TRTは約50cmから1mの範囲に設置されているため。)将来、より内側の検出器を使って調べることがもし出来れば、非常に高い感度でWino探索を行える可能性が有る。

[Bhattacharjee, Feldstein, Ibe, S. M., Yanagida 2012]



暗黒物質シグナルの兆候はまだ見えてなく、  
GluinoとWinoの質量に制限がつけられる。

7TeV: Multi-jets + ETより弱い

14TeV:  $m_{\text{Gluino}} > 2.5 \text{ TeV}$  が可能かも。

さて、先程荷電 Wino が最終的に作られたとしても gluino からね、よほど特殊なことをしないとそれは見えませんと言いました。じゃあそのよほど特殊なことをしましょうというのが、multi Jets + missing energy + disappearing track 解析。なんか複雑ですけども、ATLAS はやっています。これどういうことかということ、対生成された gluino から荷電 Wino が作られたと仮定してください。まあかなりの確率で多分つくられます。でこの荷電 Wino をどうにかして捉えようとする方法が提案されています。どういうことかということ、荷電 Wino というのは生成された後に 10cm ほど旅をして、最終的に 10cm ほど旅をした後に pion と中性 Wino に崩壊します。でこの pion を測ることがやっぱりどうしても難しい。でも何が起るかということ、こういうことが起こります。ここ(検出器の中心)で何か gluino が作られてすぐに荷電 Wino に崩壊したとします。で荷電 Wino がいるとある程度長生きするとこう旅をします。でここ(TRTの内側から2層目と3層目の境目)で中性 Wino と pion (両方とも見えない粒子です、ほとんど見えない。実験的には見えない粒子)に崩壊すると、この上では荷電 Wino が走ったという情報が残るわけですね、track が残るといいま

すけど。でもあるところからいなくなるということ、つまり **disappearing track** というのを一生懸命探そうということをしています。現在、まあ去年の段階ですけど 7TeV の段階では、この TRT と呼ばれている内で消えて無くなる荷電 Wino を探していました。だけど実は感度はそんなによくありません。何故か？先ほど言いましたように荷電 Wino は典型的に 5cm~6cm、あるいはいっても数十 cm ぐらいが飛べる大体の限界です。それ以上になると指数関数的に数が減っていく。だけど TRT っていうのは約 50cm 離れてます。だから TRT で測ろうとしても既にみんな崩壊している訳ですね。

27

## III. 暗黒物質の探査2!

### Multi-jets + Missing Energy + Disappearing Track

Disappearing Track

対生成されたグルイーノから荷電Winoが作られた場合、この荷電Winoを捉える方法が提案されている。荷電Winoは生成された後、0(10)cm程飛行し最終的に中性Winoと $\Pi$ 中間子に崩壊する。 $\Pi$ 中間子を捉える事は難しいが、飛行している荷電Winoが残すトラック(途中で消えてなくなる)を丁寧に調べる。

現在(7TeV)はTRT内で消えてなくなる荷電Winoを探しているが、検出感度はそれ程高くない。(TRTは約50cmから1mの範囲に設置されているため。)将来、より内側の検出器を使って調べることがもし出来れば、非常に高い感度でWino探索を行える可能性が有る。

[Bhattacharjee, Feldstein, Ibe, S. M., Yanagida 2012]

暗黒物質シグナルの兆候はまだ見えてなく、GluinoとWinoの質量に制限がつけられる。

7TeV: Multi-jets + ETより弱い

14TeV:  $m_{\text{Gluino}} > 2.5 \text{ TeV}$  が可能かも。

だからその分だけ感度が低くなっていて、現在それでバウンドをつけると、このマゼンダの線になります(一番下の曲線)。それで、比較的 Wino が低い時、死んでる領域ですけども、先程コンベンショナルな値と同じぐらいの感度が出ますけれども Wino の質量がでかくなると急激に感度が悪くなる。これ当然ですよ、gluino が作られて Wino に崩壊するから、Wino が軽ければ軽いほど作られた Wino は  $\Gamma$  因子を稼ぐだけです。勢いが、エネルギーが高い、だから長生きする訳ですよ。相対論で皆院試の時に勉強したようなやつですけど。だけど重くなると  $\Gamma$  因子が減るから、もう TRT に届く前に皆お亡くなりになるから、感度が低くなるということになります。ただし 14TeV までいくと、コンパラか、まあこれはちょっとバックグラウンドを評価するのは非常に難しいんで不定性が残ってま

すけども、実際、リアル実験データが出てきたらもうちょっと正しく評価できるようになりますけども、そうするとコンベンショナルよりも上にいく可能性が十分にあって期待されています。でこの時は何がアップグレードされるかという、14TeV だから結構活きのいい **gluino** が作られて、かつ活きのいい **gluino** から活きのいい **Wino** が作られて  $\Gamma$  因子でかいから、**charged track** が伸びるとというのが一点。もう一つは TRT を使うんじゃなくて、もっとインナー検出器を使うという話があるんで、そうすると 50cm 飛ばなくても測れる。もっと奥の、内側の検出器で **charged track** が特定できれば感度が出ますよって話になってます。これなかなかこういう話聞く、LHC の話をしててもこういう何か特殊な観測の仕方の話は結構見てないと思うんだけど、よくよく見るといろんな面白い事を実験の人たちがやっていてこういうことが分かりますというのが一つです。

そうすると 14TeV で  $300\text{fb}^{-1}$  とすると、2.5TeV ぐらいまでをカバーすることが可能かもしれません。でももちろん **gluino** が 3TeV、4TeV になってしまうとまあ絶望的になりますかね。最近では特に実験の人たちから声が挙がっててカラーを持つ素粒子っていないんじゃないのっていう、じゃあもう直接カラーを持たない粒子作るしかないとかいう話になってきています。

28

### III. 暗黒物質の探査2!

#### Direct Wino Productions

**Wino productions via EW**

グレイノが非常に重い場合には、電弱(EW)相互作用を用いて直接Winoを生成する必要がある。これまで2種類の生成プロセスが考えられている。

- (i) クォーク(Jet)付随のWino生成
- (ii) VBF過程からのWino対生成

どちらの生成過程も、電弱相互作用を用いるため生成断面積が小さい。このため、終状態で荷電Winoを要求して、その荷電トラックを中心付近の検出器で見つける必要がある。どちらの過程もメリット・デメリットがある。

[Bhattacharjee, Feldstein, Ibe, S. M., Yanagida 2012]

**(1-jet):** 断面積が比較的大きい。SMの背景事情(BG)や荷電トラックのBGが大きい。

**(2jets):** 断面積が小さい。SMや荷電トラックのBGが(1jet)の場合に比べ小さい。

その時にはじゃあどうすればいいか？まあ Wino にちょっと注目して話をしますけども、こういうプロセスで作ろうとします。(グラフ上側のプロセスについて) Quark と gluon がぶつかって、quark 交換して、ここに quark が出て (終状態の quark)、ここは弱い相互作用ですね。QCD 相互作用から弱い相互作用を作って、W ボソンが飛ぶと荷電 Wino、中性 Wino が作られます。

あるいは、これは double fusion 過程と呼ばれるやつですけど (グラフ下側のプロセス)、quark と quark が W をエミットして、そいつがぶつかって Wino 対生成します。これは所謂、直接 LHC で non-colored の粒子を作る方法です。もちろん QCD プロセスを使って生成することに比べると効率は落ちます、弱いから、相互作用が。だから、普通にやってたんじゃないけどもこのシグナルを見つけることは出来ないんですけども、幸いにして先ほど言った charged track、disappearing track と組み合わせることで何とか見つけようという努力がされています。まだ公式には発表されていないからあれですけども、まあそれなりに出ています。それで、一番目は所謂 quark Jet がこう一個付随してます。この quark-gluon Jet 邪魔じゃないのと思うかもしれませんが、これがないと、charged track が走っただけであと何もないっていうのはトリガーに引っかからないんでそういうデータは全部捨てちゃってるんですね、LHC は。必ず一個は quark が付随しないと。あるいは、double fusion の時には、前方に飛んだ quark Jet が2つあるんで、これを捉えて且つ、真ん中の領域、検出器の真ん中の領域に disappearing track があるようなのを拾ってくる、こういう過程です。どちらの過程にしるメリット・デメリットがあるんですね。これは単なる理論計算しかま出してませんけども、以下のことがあります。この2つを比べると、こっち弱い相互作用を2発使ってるから、1-Jet の方がこっちに比べると断面積が大きいです、5倍~10倍、実際計算だと大きいです。だからシグナルがたくさんそれだけあります。ただし、こういう風に quark が真ん中に効いちゃうので、ここからソフトな gluon がよく出たりします。そうすると、一生懸命 charged track、disappearing track を探そうとした時に、このソフトな gluon から出た Jet が charged track 上で現れてきます。だから charged track を測る時のバックグラウンドとして効いてきて、そのバックグラウンドがすごく大きい。またはそれ以外にも標準模型からのこういう 1-Jet + missing によるバックグラウンドも大きいので、断面積はでかいけどバックグラウンドがでかいという、まあ「帯に短し襷に長し」という感じになります。それで vector boson fusion (VBF) のときには断面積が小さいです。ただしこういうバックグラウンドはあまりないから standard model track が低いです。さらに面白いのは、真ん中に通ってるのはこれ全部 colored 粒子じゃないから、何が起こるかという VBF っていうのは proton と proton がぶつかる Jet が全部前方方向に出て、ソフトな gluon も全部前方の方向に出て、真ん中が非常にきれいな領域を作ります。QCD に汚染されてない領域を。その汚染されてない領域で一生懸命 charged track を探す、ということをやっとうまくいくかもしれない。これはまだ提案の段階です。まあ QCD 以外の non-colored な粒子を作るのは難しいので、まあいろいろな努力は必要ですけど、確かに

あの現在のところカラーを持った粒子はすごい制限があってほとんど見えてないのが現実なので、実験の人たちもいかに non-colored な粒子を見つけるか、という方向に話が動いているわけです。

28

## III. 暗黒物質の探査2!

### Direct Wino Productions

Wino productions via EW

グルイーノが非常に重い場合には、電弱(EW)相互作用を用いて直接Winoを生成する必要が有る。これまで2種類の生成プロセスが考えられている。

- (i) クォーク(Jet)付随のWino生成
- (ii) VBF過程からのWino対生成

どちらの生成過程も、電弱相互作用を用いるため生成断面積が小さい。このため、終状態で荷電Winoを要求して、その荷電トラックを中心付近の検出器で見つける必要が有る。どちらの過程もメリット・デメリットがある。

[Bhattacharjee, Feldstein, Ibe, S. M., Yanagida 2012]

(1Jet): 断面積が比較的大さい。SMの背景事情(BG)や荷電トラックのBGが大さい。

(2jets): 断面積が小さい。SMや荷電トラックのBGが(1jet)の場合に比べ小さい。

まあ実際断面積を見ると、まあ低いですよ。暗黒物質の質量が大きくなってくると、VBF は  $1\text{fb}^{-1}$  を切るか切らないかくらいになっちゃいますし、まあこれ(1-Jet)でも  $10\text{fb}^{-1}$  くらいはありますが、バックグラウンドがそれなりに大きいから大変ですけど、理論屋さんから言うと‘実験屋さん頑張ってください’としか言えないんですけども、まあこれで見つけてもらうという話になります。

これが一応、今話したのは pure gravity の話にちょっと偏ってますけれども、どの SUSY プロセスも大体似たようなものです、荷電 Wino の話は置いて。Multi Jets に missing energy つけるとか、特殊の長生きの粒子がいたらそれに注目してバックグラウンド落として一生懸命探すとか、そういうのが現状になっています。

## まとめと展望

29

1. 暗黒物質の存在はもはや疑う余地はなし。一方、様々な宇宙・天体観測、そして暗黒物質検出観測により、暗黒物質の性質及びその相互作用に強い制限が与えられつつある。
2. ヒッグス(と強く示唆される)粒子が見つかったいま、暗黒物質問題は唯一の新しい粒子の存在を示唆する問題である。
3. 過去十年、WIMP仮説を手掛かりに暗黒物質像が模索されてきた。一方素粒子論的に見ると、WIMP仮説が実現されるためには、TeV scale (以下の)新物理が必要となる。この事実と現在のLHC実験との整合性が微妙になりつつある。
4. 暗黒物質の安定性の観点から、その正体について考えると、超対称性模型MSSMはまだ魅力的。一方LHC実験の結果(126GeVのヒッグス& SUSYシグナルの未検出)より、典型的なSUSYスケールは高いと期待され、Pure Gravity 伝達模型タイプの模型は興味深い。この場合、暗黒物質はWino (Zino) となり、間接検出実験での発見が待たれる。

さて、ちょうどいい時間ですねこれで最後終わりたいと思います、これ最後のページ。何を話したかという、暗黒物質の存在というのはもはや疑う余地はないと思います。暗黒物質がいると思っていいと思います。ここ10年、もちろんみんなあるあると言ってきたわけですが、何が一番発展したかという、暗黒物質の検出実験の感度がどんどんどんどん上がってきて、先ほど言いました direct detection もそう indirect detection もそう、宇宙論的な WMAP の観測もそう。だから、あるんだけどその兆候が見えないことによってその性質に対する、たぶん相互作用の強さだとかそういうのに対する制限がどんどん強くなっていったのが現状です。どっかでそこが破れてシグナルが見え出したら、一気にお祭りになるんですけども。

それで、もうひとつ大きなブレイクスルーというのはもちろんこの間、先月のヒッグスと強く示唆される粒子が見つかったことですが、こうなると、素粒子論、理論、まあ実験もそうですが、いろんな問題があります。まあ、ヒエラルキーの問題でもいいですし、暗黒エネルギーの問題でもいいですし、ニュートリノ質量の問題でも、そういうクリティカルな問題が山積みになっているわけですが、その中で唯一、暗黒物質問題というのは新しい粒子を予言している模型です。ただニュートリノ質量をいかに説明するかというのも大事なんですけども、それは必ずしも新しい粒子がいなきゃいけないかどうかは分かっていないので、例えば higher dimensional operator があれば十分ですし、でもそういう意味では暗黒物質というのは新しい粒子が必ずいるってことを強く示唆して

る問題で、それは素粒子論としては面白いですよ、「新しい粒子を見つけること $\cong$ 素粒子論」みたいなところがあるんで。それで、ここで理論的な発展としては過去 10 年 WIMP 仮説っていうのを手掛かりに暗黒物質は模索されてきました、実際僕もそうしてきました。しかし、実は暗黒物質の WIMP 仮説っていうのは背後に大体 1 つの仮定をおいてます。それは何かというと、TeV スケール前後弱ぐらいに新しい世界が広がっている。つまり暗黒物質だけでなく色々なカラーを持った粒子とかなんかそういう新しい新物理学の世界が広がっている、という仮定のもとに WIMP 仮説が素粒子論として成功してきました。ただしそこにちょっと黄色信号が灯り始めたのが今です。実際に LHC でなかなか見つからないし、っていう話ですね。別に完全に死んだとは言いませんけども。そして、そうなるとこういうことになっていますので、もう一回初心に戻って暗黒物質の安定性の観点から、まあその正体に迫ろうというのは大事になって、再び大事になってきて、で僕の中のロジックだと、超対称模型の MSSM っていうのはこの観点からはまだ魅力的ですよ。そして、もちろん超対称性理論っていうのは、皆あまり露わには言いませんけどもいろんな模型がここ数十年たくさん、たぶん一番多いですね。あらゆる模型の中で超対称性模型が標準模型を超える物理の模型として一番多く提案された（ここ数十年で）模型で、その内のかなりのやつが人知れず死んでいます、ヒッグスと SUSY シグナルが見えないことによって。だから、ここら辺に、LHC 実験の結果、まあ 126GeV にヒッグス（らしき粒子）が見つかった、SUSY シグナルが未検出、というのを真摯に捉えると、まあ僕自身は今のところ SUSY スケールっていうのは意外に高いんじゃないかと。それで pure gravity mediation 等作っているんですが、まあこれだけじゃありません、anomaly mediation タイプの模型もこれに含まれます。そういう模型は比較的現象論的にこれから一生懸命考えると面白い。ただし anomaly mediation と pure gravity mediation って一歩間違えると基本的にはナイトメア系のシナリオ、シグナルが見えづらいシナリオなんで、そこを今やってる実験これからやる実験にいかにか効率良くぶつけるかの手法を編み出す、あるいはこういう実験をしてみると見つかる提案をどんどんしていくというのが現象論屋さんとしては重要になってくると思います。ただし、anomaly mediation の場合 pure gravity mediation の場合も同じですけども、暗黒物質が Wino になる傾向が非常に強いです。Wino は direct direction だとちょっと見づらいけど indirect direction だと過激なシグナルを出しますんで、まあそこら辺を中心に手掛かりに現象論を展開すると面白いと僕自身は思っています。以上です。どうもありがとうございました。

(司会) ありがとうございます。それでは質問などある方はいませんか？

(質問) すみません。axion が暗黒物質の方はどれくらい生き残ってるんですか？

(回答) 生き残ってます。きちんと生き残ってます。困ったぐらい残ってます。えっとつまり、axion の決着につけてですけど、 $10^{-10}$  くらいがちょうど良くて、実は最近ちょっと

進展があったんですけども、そこは十分生き残っていて、その観点から大事なものは、いかにその領域を測るかという実験を提案するかということです。Axion はいます、最大のライバルです。ただし超対称性と axion ってあんまり相性良なくて、一番怖いのは標準模型 + 右巻きニュートリノ + axion で終わりっていう、こういう時どうするんだろうってそしたらの確に  $10^{-10}$  ぐらいを測る実験を何とかしてもらおうという。

(質問) 最初の方の暗黒物質の証拠の話で、安定な素粒子っていうのがあったんですけど、安定な未知の素粒子。それについてもう少し詳しく説明いただけませんか？例えば複合粒子とかだと何か…

(回答) えっと、素粒子と言ったのは、複合粒子といったときに何と何の複合粒子か。標準模型から作る複合粒子はあり得ないことはもう分かってる。けど新物理学中に複合粒子が暗黒物質になっている可能性はある。でもその時っていうのは、例えば 100GeV とか 1TeV のスケールで見たらそいつは素粒子と同じですよ。だから素粒子っていうのは少し広い意味をもって素粒子という言葉を使わせてもらっています。それが例えば 100GeV、1TeV で素粒子に見えるけど、もっと高いスケールに行くと暗黒物質の中に構造が見えてきて、subquark があるとか subfermion があるとか、それは十分あると思います。それは OK です。少なくとも今考えてる暗黒物質、物理のスケールにおいて素粒子と思われるものということです。

(司会) 他に何かありませんか？

それでは講師として来ていただいた松本さんにもう一度大きな拍手をお願いします。