

連載

## 最新宇宙誌【番外編】

## ダークマターの現状

福江 純（大阪教育大学）

## 0. 素朴な疑問

以前からも、年に数回ぐらいは高校に出向いてブラックホールの話をしたり、何回かは一般向けの講演を頼まれることがあったが、この数年は異常に増えている。とくに大学が地域連携事業や大学訪問などを積極的にはじめてから、やはり天文は人気が高くて、高校生向けの模擬授業などが今年は10回を超えそうな勢いだ。

そういう折りに出てくる質問が、最近は少し変化してきている。数年前までは、高校生でも一般でも、

- ・ブラックホールに吸い込まれたらどうなる
- ・宇宙に果てはあるのか
- ・宇宙人は居るのか

のような、ブラックホール・宇宙論・宇宙人がトップ3だった。しかし、最近ときどき出てくるのが、

- ・ダークマターってなに？

というタイプだ。先日、大学訪問に来た大阪の府立高校に対して、理系グループで「太陽系最前線」の話をしたときも、講義の内容に関係ない質問でも構わないという、この質問が出てきた。ちなみに、模擬授業としては「太陽系最前線」「ブラックホール活動天体」「最新宇宙論」という三つのメニューを用意しているけど、“はやぶさ効果”もあるのだろう、「太陽系最前線」の希望が多い。

もちろん従来の3大質問もあるのだが、ダークマターが4番目に入りつつあるのは興味深い（ダークエネルギーまではまだ微妙であ

る）。ダークマターがしばしば質問に上りはじめた状況は、高校に限らず、一般の社会教育普及現場でも同じだと思う。

さてダークマターは本連載とも関連が深く、以前に観測的および理論的なレビューもした。ただし、ごく最近の話まではフォローできていなかった。最近はどうなってるのかなあ、と思っていたところに、毎年刊行される“Annual Review of Astronomy and Astrophysics”（天体物理学年間総合報告）という書籍の2010年版に、

Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection by J. L. Feng

（素粒子物理学からみたダークマターの候補と検出方法）

というドンピシャリの総合報告が掲載された。ざっと眺めると、ダークマターの候補として、超WIMPとかsterile（役立たず）ニュートリノとか、初耳の素粒子も増えている。

書籍自体は手元になくても、論文はインターネットからダウンロードできる（実際、以下の図はネットからダウンロードしたPDFファイルを切り取ったものだ）。しかし、50頁もの長い論文だし、関心がある人も手を出しにくいだろう。ということで、連載の番外編として、この総合報告の内容をかいつまんで紹介したい。なお、以下の節番号は、上記の総合報告の節番号と合わせてある（タイトルは変えている部分もある）。

### 1. 宇宙の内容物の現状

ず宇宙の内容物の割合についての最新値としては、

$$B = 0.0456 \pm 0.0016$$

$$DM = 0.227 \pm 0.014$$

$$= 0.728 \pm 0.015$$

となっている。以前調べたよりは DM が少し少なくなったようだ。もっとも、いつも、通常物質（バリオン物質）は 4% で、ダークマターを合わせて 3 割、残りの 7 割が皆目不明のダークエネルギーと話しているが、1 桁精度では同じ話でよさそうである。

また、ダークマター候補の表が出て、いろいろな専門的チェックがしてあるが、ここでは、まず名前だけ並べておこう。最近では、

- ・ WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)

- ・ 超 WIMPs (SuperWIMPs)
- ・ 軽グラビチーノ (Light Gravitinos)
- ・ 隠れダークマター (Hidden Dark Matter)
- ・ 役立たずニュートリノ (Sterile Neutrinos)
- ・ アキシオン (Axions)

などがあるらしい。

### 2. 素粒子の標準モデル

一つひとつの説明は、後の章で出てくるが、その前に、現在の素粒子の標準理論が簡単にまとめてある (図 1)。

図 1 は物質粒子と力の粒子とヒッグス粒子を並べたものだが、円の大きさは質量に比例している。

左方の物質粒子の上側 (udcstb) がクォークで下側がレプトン (ニュートリノや電子たち) で、それぞれ左から右に 3 世代ある。これら物質粒子はすべてパウリの排他律にしたがうフェルミ粒子である。

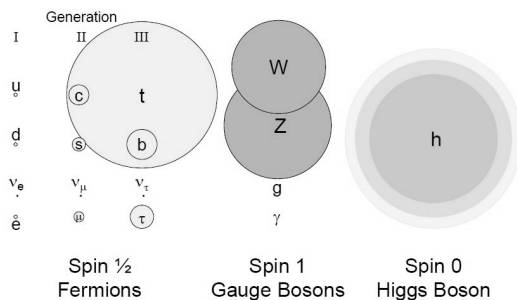


図 1 左が 3 世代の物質粒子、中が力を介在するゲージボソン、右がヒッグス粒子。

中ほどの力の介在粒子のうち、弱い力を介在する W&Z ボソンは質量をもつが、強い力を介在するグルーオン g と電磁力を介在する光子 は質量をもたない。また、図 1 には描いてないが、重力を介在する重力子 G もある。力の介在粒子はすべてボース粒子である。

右方は、質量を生じる原因とされるヒッグス粒子 h だ。素粒子の標準理論で要求される粒子のうち、ヒッグス粒子のみが未発見の粒子である。最新の見積もりでは、ヒッグス粒子の質量は、

$$114.4\text{GeV} < m_h < 186\text{GeV}$$

ぐらいらしい。CERN が建設した LHC (大型ハドロン衝突型加速器) の第一の目的がヒッグス粒子の発見で、見つければ、もちろんノーベル賞確実である。

また、素粒子の標準モデルの問題点が挙げたのであるが、ここは理解力の範囲を越えたのでパスしたい。

### 3. WIMPs

ダークマターの候補として、もっともよく調べられている WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) は、W&Z ボソンとのみ弱い相互作用をする粒子の総称だ。質量は、

$$m_{\text{weak}} \sim 10\text{GeV} - 1\text{TeV}$$

ぐらいと見積もられている。

具体的には、まず素粒子の超対称性理論で予想される超対称性パートナー粒子のうち、電磁的に中性な何種類かの粒子(「ニュートラリーノ」と総称される)で、たとえば、

- ・グラビチーノ (重力子のパートナーのフェルミ粒子)
- ・超ニュートリノ (ニュートリノのパートナーのボース粒子)

などがある。

それから、はじめて知ったが、

- ・カルツァークラインダークマター

というものがあるらしい。最近の宇宙論では、余剰次元の問題が議論されているが、そういう余剰次元によって存在する(あらゆる粒子の)パートナー粒子(ただし、超対称性理論のパートナー粒子とは異なるもの)らしいが、あまりよくわからなかった。ネットでも検索してみたが、専門的な論文ばかりで、手に負えない(笑)。

ニュートラリーノの検出可能性についての予想を図2に示す。図2の横軸はニュートラリーノの質量(GeV単位)で、縦軸はニュートラリーノと陽子の衝突断面積( $\text{cm}^2$ 単位)になっている。下方の山形の影の部分が、標準モデルから予想されるニュートラリーノの範囲だ。また下に凸の種々の曲線は、さまざまな検出器(計画中のものも含む)で検出される限界を表している。

ちょっとわかりにくいのが、図の中程より少し下で、ちょっとデコボコしている点線が、スーパーカミオカンデの測定結果(1996~2001)だ。一番下の曲線は、たしか南極にあるIceCubeという装置による測定計画で、ニュートラリーノの予想域に食い込んでいるの

で、今後10年ぐらいのうちに、ニュートラリーノが検出されるかもしれない。

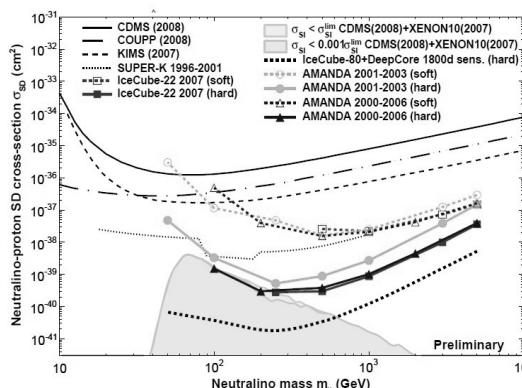


図2 ニュートラリーノの検出可能性  
横軸はニュートラリーノの質量で、縦軸はニュートラリーノと陽子の衝突断面積。

#### 4. 超WIMPs (SuperWIMPs)

これも初めて知ったが、超WIMPs (Superweakly Interacting Massive Particles) というタイプの素粒子があるそうだ。この“超”は超対称性の超ではなくて、相互作用が超弱い(superweak)粒子らしい。「重い超弱相互作用粒子」とでも訳せばいいんだらうか。さらに、WIMPsが崩壊して超WIMPsになる理論があるらしい。具体例としては、やはりグラビチーノが挙げられているのだが、通常のWIMPのグラビチーノとどう違うのか、よくわからなかった。

ネットでいろいろ調べてみたところ、超対称性パートナー粒子の中で、もっとも軽い粒子LSP (Lightest Supersymmetric Particle) が安定なグラビチーノで、つぎに軽い粒子NLSP (Next Lightest Supersymmetric Particle) が超電子類(slepton)や超ニュートリノ(sneutrino)などのニュートラリーノになるようだ。

### 5. 軽グラビチーノ

この軽グラビチーノ (Light Gravitinos) も初めて聞いた。先にあったが、超対称性理論で予想される重力子のパートナー粒子がグラビチーノだ (グラビトンはボース粒子だがグラビチーノはフェルミ粒子)。グラビチーノの質量は  $m_{\text{weak}} \sim 10\text{GeV} - 1\text{TeV}$  程度と予想されているが、この軽グラビチーノは、

$$m \sim 1\text{eV} - 1\text{keV}$$

ぐらいとかなり小さい。つまり、“Light” は光ではなく、軽いの意味だった。

### 6. 隠れダークマター

ダークマターの観測的な証拠は以前に詳しく紹介したが、それらの証拠はすべて、重力作用で得られたものばかりだ。逆に言えば、ダークマターが強い相互作用や電磁力の影響を受けるといふ証拠はない。重力以外の力の影響を受けないダークマターを隠れダークマター (Hidden Dark Matter) と呼ぶらしい。質量は、

$$m_{\text{HDM}} \sim 1\text{GeV} - 1\text{TeV}$$

程度と見積もられている。ネットでも検索してみたが、hidden dark matter というキーワードすら、あまりヒットしない。高温の銀河間ガスに対して使用している例はあったものの、ここでの文脈とは合わない。

というわけで、具体的なイメージがよくわからないが、この隠れダークマターの検出可能域を図3に示す。図3の横軸は隠れダークマターの質量で、縦軸は隠れダークマターと核子の衝突断面積になっている。図2の図の左側の方だと思えばいい。図3の右にスーパーカミオカンデの測定結果がある。隠れダークマターがあるのなら、図3左側の斜線の部分に可能性がある。

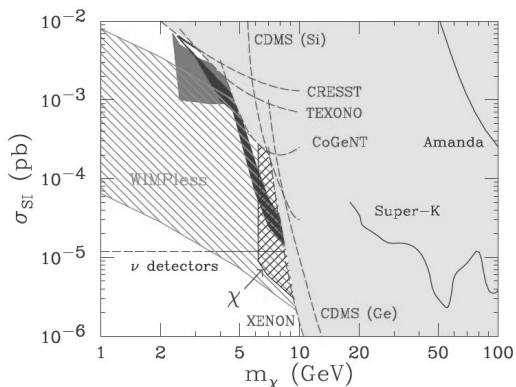


図3 隠れダークマターの検出可能域  
横軸は隠れダークマターの質量で、縦軸は隠れダークマターと核子の衝突断面積。

### 7. 役立たずニュートリノ (Sterile Neutrinos)

質量をもつ物質粒子、すなわちクォークやレプトンのうち、ニュートリノ以外の粒子には、パリティの異なる2種類のタイプ (左手系と右手系) がある。小林・益川理論で新聞にもCP (Charge-Parity) 反転などの言葉が出たが、そのPの方の問題だ。

ところが、同じくレプトンに分類されるニュートリノには、左手系のタイプしか存在しない。場の量子論を適用すると、このような粒子の質量はないはずなのだが、実際には、わずかながらニュートリノに質量があると考えられている。ニュートリノが質量をもつためには、いま表には出ていないものの、右手系のニュートリノの存在が必要らしい。

そのような考えでは、主として左手系ニュートリノの結合で生じたニュートリノを“活動”ニュートリノ (active neutrinos)、主として右手系ニュートリノの結合で生じたニュートリノを“役立たず”ニュートリノ (sterile neutrinos) と呼ぶようだ (右手系ニュートリノ

ノ＝役立たずニュートリノではない)。ダークマター問題にとって重要なのは、この役立たずニュートリノは、ほとんど相互作用しない粒子だが、重力とだけは相互作用する点だ。

この役立たずニュートリノの質量は、

$$m \sim 1\text{keV}$$

ぐらいと見積もられている。WIMPsなどの質量に比べると非常に小さいが、ニュートリノは圧倒的に数が多いので、それで帳尻を合わせることができる。

通常のニュートリノはダークマターの候補としては失格したんだが、別な形で復権しているようだ。

## 8. アキシオン

アキシオン (Axions) も CP 問題に関連してその存在が推測されている素粒子だ。このレビューでは簡単に触れてあるだけなので、今回もどういふものかあまりよくわからなかった。予想される質量は、

$$m \sim 1\mu\text{eV} - 1\text{meV}$$

程度と非常に軽く、相互作用も弱いフェルミ粒子らしい。

## 9. 観測的な検出のシナリオ

最後に、LHC (Large Hadronic Collider) や計画中の International Linear Collider な

どによる衝突実験でダークマターの証拠が発見される可能性や、ダークマター素粒子が崩壊した際に放射される X 線を検出する可能性など、いくつかの検出シナリオが挙げられている。

いきごんで読み始めたわりには、ネットを参照してもわからないことが多く、どうしても不明瞭な解説になってしまった。申し訳ない。

## 文 献

Feng, J. L. (2010) *ARA&A*, **48** : 495.

福江 純 (大阪教育大学)

\* \* \* \* \*