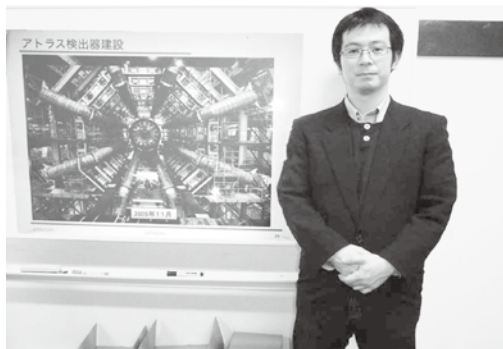




素粒子物理学の最先端をゆく

陣内 修 研究室～基礎物理学専攻



陣内 修 准教授

CERN での素粒子物理学の研究は、近年報道で多く取り上げられるなど、世界的に注目されている研究である。陣内先生は、以前その CERN でシミュレーションに関するグループのリーダーを務めていた。さらに先生は、2009 年に東京工業大学で研究室を立ち上げ、陣内研究室として素粒子物理学の研究に貢献している。CERN での研究の目標である、質量の起源となるヒッグス粒子の発見や、いくつもの問題を解決する可能性を秘めた超対称性粒子の発見などのため、陣内研究室は日々研究を行っている。



大規模化する素粒子物理学で

この宇宙を構成する最小の単位である素粒子について、その性質を解明しようとしているのが、素粒子物理学である。これまでの研究で、標準模型という理論が有力だと分かってきたが、問題点も未だ残されており、それを解決するために今も研究が進められている。

素粒子物理学で研究されている未知の現象の多くを解明するためには、通常存在しない不安定で重い粒子について知ることが重要となる。エネルギーと質量は等価なので、そのような粒子は高いエネルギーから生成される。そこで、加速器と呼ばれる装置で粒子を加速して互いに衝突させることで高いエネルギーを生み出し、それによって生成される粒子を調べることが必要となる。

加速器には、加速用の非常に長い円環状パイプや軌道調整用の強力な電磁石などが必要のため、より高いエネルギーを生成することのできる加速器を作るためには、より高度な技術や多くの予算が必要となる。そのため素粒子物理学では、共同で大規模な研究を行う研究者が増えてきている。陣内研究室も、スイスとフランスの国境をまたぐ位置にある CERN (Conseil Européen pour la

Recherche Nucléaire) という世界最大の素粒子物理学の研究所で行われている LHC アトラス実験というプロジェクトに参加している。LHC アトラス実験は 2700 人もの人に関わっている国際共同研究である。

LHC アトラス実験では LHC (Large Hadron Collider) という、陽子を加速、衝突させる世界最大の加速器と、アトラスという検出器を用いて実験を行っている。LHC の周長は 27 km もあり、山手線が一周 34 km であることと比べても、その規模の大きさが分かるであろう。アトラスも高さ 25 m、長さ 44 m と非常に大きいのだが、粒子の通過位置などは数 μm もの精度で調べることができる、最先端の検出器である。

LHC アトラス実験ではこれらの装置を用いて、標準模型粒子の中で最後の未確認粒子であるヒッグス粒子の発見および性質の確認と、標準模型がもつ問題点を解決するために必要な超対称性粒子の発見などを目標として研究を行っている。本稿では、ヒッグス粒子と超対称性粒子がどのようなものかについてまず取り扱い、続いて陣内研究室が貢献している検出器に関して紹介する。



質量の起源、ヒッグス粒子

標準模型を完成させるために

標準模型とは、素粒子間の相互作用について説明する理論である。素粒子物理学で粒子はスピンと呼ばれる値を持ち、この値で粒子は分類される。スピンが整数 (0, ± 1 , ± 2 , ...) の粒子はボーズ粒子と呼ばれ、半整数 ($\pm 1/2$, $\pm 3/2$, ...) の粒子はフェルミ粒子と呼ばれる。ボーズ粒子の多くは素粒子間の相互作用を媒介し、フェルミ粒子は物質を作る。フェルミ粒子は同じエネルギー準位に入れる数に制限があるが、ボーズ粒子はいくつでも入れるという違いもある (図1)。

標準模型が説明する相互作用は、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用の三つである。三つの相互作用のうち、電磁相互作用は遠距離まで影響を及ぼすが、強い相互作用と弱い相互作用は短距離でしか働かない。

弱い相互作用が短距離力であることを説明するためには、弱い相互作用を媒介するボーズ粒子 (W 粒子や Z 粒子) は、質量を持つ必要がある。これは、飛び交うボーズ粒子が重ければ速くに飛ばないからだと考えると分かるであろう。一方、標準模型はゲージ原理というものも満たさなければならぬ。標準模型がこれを満たすには、素粒子間の相互作用を媒介する全てのボーズ粒子の質量はゼロである必要がある。この矛盾を解決するために、標準模型ではヒッグス粒子というボーズ粒子が仮定されている。

粒子が動く時、宇宙全体にヒッグス粒子が満ちていると考えると、ヒッグス粒子に当たった粒子は抵抗を受ける。この抵抗により粒子は動きにくくなり、動きにくさをそのまま質量とみなせる。このようにして質量を得ると、ゲージ原理を満たしたまま質量を持つことができる。粒子の種類により動きにくさは異なるので、光子のように質量を持たない粒子もあるが、ほとんどの粒子はヒッグス粒子により質量を与えられる。W 粒子や Z 粒子にも質量を与えるのである。このように、ヒッグス粒子を仮定すると、ゲージ原理を満たしたまま W 粒子や Z 粒子に質量を持たせることができるのだ。また、ヒッグス粒子はクォークなどにも

質量を与え、これがクォークの質量の起源となっているとも考えられる。なお、ヒッグス粒子も互いに影響を与えあうので、ヒッグス粒子の質量はゼロではない。

ヒッグス粒子が仮定された当時、W 粒子や Z 粒子についてまだ詳しく知られていなかったが、後の実験でそれらの存在が確かめられた。さらに、W 粒子や Z 粒子の質量についてもヒッグス粒子を仮定した場合の計算とぴったり一致することが確認され、ヒッグス粒子の存在についての有力な証拠となった。

このように重要なヒッグス粒子であるが、標準模型粒子の中では唯一、実験でその存在が確認されていない。存在が確認できれば、標準模型の信頼性がより高まる。さらにヒッグス粒子の質量の大きさが分かれば、その振る舞いについては全て計算することができる。そのため、LHC アトラス実験では、ヒッグス粒子の存在を確認し、その質量を確定することを目標の一つとしている。

標準模型粒子			
フェルミ粒子			
クォーク		レプトン	
u アップ	d ダウン	e 電子	ν_e 電子ニュートリノ
c チャーム	s ストレンジ	μ ミューオン	ν_μ ミューニュートリノ
t トップ	b ボトム	τ タウ	ν_τ タウニュートリノ
物質を作る粒子であり、例えば陽子は二つのアップクォークと一つのダウンクォークから構成される			
ボーズ粒子			
強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用	(未発見)
g グルーオン	γ 光子	W Z W粒子 Z粒子	H ヒッグス粒子
電磁力を抑え同種のクォークを結びつける力	電氣的、磁氣的な力を統一した力	β 崩壊などの崩壊を説明する力	質量の起源となる粒子
それぞれの粒子に関するパラメータは基本的に異なる			

図1 標準模型粒子表

ヒッグス粒子を求めて

素粒子物理学における真空とは、最低のエネルギー状態を指す。真空中にヒッグス粒子がやってきたとしても、最低のエネルギーのままなので、真空のままである。一般的に物理現象はよりエネルギーの低い状態を目指し、ヒッグス粒子はいくつでも同じエネルギー状態に入れるので、普段存在するヒッグス粒子は真空中に凝縮しており、これを観測することはできない。そこで、LHCアトラス実験では、加速器を用い、新たにヒッグス粒子を作り出して観測しようとしている。

従来の加速器実験では、ヒッグス粒子の存在を直接示す現象は観測されていない。これは、従来の加速器で実現することのできた1.96 TeVまでのエネルギーでは、観測するのに十分な量のヒッグス粒子を作ることができなかったためだと考えられる。そうすると、ヒッグス粒子は、生成するのに必要なエネルギーの大きい、重い粒子であるということになる。一般的に重い粒子ほど短時間で軽い粒子に崩壊するので、ヒッグス粒子を作り出したとしてもすぐに崩壊を繰り返し、軽い粒子になってしまう。そのため、ヒッグス粒子を直接観測することは難しいと考えられる。そこで、崩壊してできる粒子から得られる情報を用いて、ヒッグス粒子の存在を確認しようとしている。

アトラスにより得られる粒子の種類と運動量、エネルギーを元に計算すると、観測した粒子の崩壊前における粒子の種類や運動量などが分かる。もしヒッグス粒子が生成されれば、それが崩壊してできた粒子について、計算を繰り返し崩壊前の粒子について次々と調べていくことで、元のヒッ

グス粒子の存在を確認できるのである。

しかし、加速器により生成されるのはヒッグス粒子だけではない。既に知られている別の粒子や、それらの崩壊によって生じる粒子なども検出されるのである。ヒッグス粒子が関係する現象1個に対して、ヒッグス粒子に関係ない現象はおおよそ 10^{10} 個起こると考えられるので、その中から必要な現象のみを選択することが必要なのである。

そこで、LHCアトラス実験では、加速器を稼働させる前に、2種類のシミュレーションを行っている。一つは、ヒッグス粒子の質量がどのくらいであればどのように崩壊するかのシミュレーションである。ヒッグス粒子の質量を仮定すれば、それがどのような粒子に崩壊するかも計算できるのである。もう一つは、既知の粒子の生成、崩壊の様子のシミュレーションである。この二つを組み合わせることで、アトラスで粒子がどのように検出されるかを予想することができ、現象の選択をどのようにすれば効率的かが分かるのである。

実際に実験が行われた後は、バックグラウンドと呼ばれる既知の現象に関するシミュレーションと、実際のデータとの差から、ヒッグス粒子の存在を確認することができ、さらにその質量を求めることもできる。

しかし、ヒッグス粒子の存在を確認し、その質量を確定するまでには、ある程度の統計量を得ることが必要なため、実験が始まってから3~5年かけてデータを貯める必要がある。綿密な準備と長期間の実験によって、初めてヒッグス粒子の存在の確認と、その質量の確定ができるのである。



理論の更なる拡張のため、超対称性粒子

標準模型の救世主、超対称性粒子

これまで標準模型について紹介してきたが、標準模型では説明できない問題もある。その一つが、階層性問題と呼ばれる、ヒッグス粒子の質量に現れる問題である。この問題は、ヒッグス粒子の質量を通して、ヒッグス粒子により質量を与えられる粒子にも影響を与えるので、標準模型の根源的な問題である。

ヒッグス粒子の質量の測定には、そのヒッグス粒子が観測されるまでの状態が影響を与える。不確定性原理より、ヒッグス粒子は一瞬であれば普段より高いエネルギーを持つことができる。このエネルギーによって瞬間的に二つのフェルミ粒子に分かれ、再びヒッグス粒子に戻るといった現象や、ヒッグス粒子からボーズ粒子が出て再び

ヒッグス粒子に吸収されるという現象が起こりうる。これらの現象は、測定されるヒッグス粒子の質量に式(1)のような影響を与える。

$$M_{\text{測定}} = M_{\text{本来}} + \Delta M_{\text{H}} \quad (1)$$

$M_{\text{測定}}$ は実際にアトラス検出器などで測定された結果であり、 $M_{\text{本来}}$ は先に挙げた現象の影響を受ける前のヒッグス粒子の質量である。

ΔM_{H} は質量の補正項であるが、フェルミ粒子に分かれた場合は式(2)のように、ボース粒子を放出・吸収した場合は式(3)のようになる。

$$\Delta M_{\text{H}}^2 = -\frac{\lambda_f}{8\pi^2} (\Lambda^2 + \dots) \quad (2)$$

$$\Delta M_{\text{H}}^2 = \frac{\lambda_s}{16\pi^2} (\Lambda^2 - \dots) \quad (3)$$

λ_f と λ_s は二つに分かれた粒子の質量に依存する値である。また、 Λ は標準模型が成り立つ上限のエネルギーであり、その値は 10^{17} GeV 近くであるとされている。なお、式中の…は微量であり無視できる。

標準理論粒子による補正のうち最も大きな補正項は、標準粒子の中で最も重い粒子であるトップクォークに分かれた場合のもので、 λ_f は1近くになり、 ΔM_{H} は 10^{17} GeV にも達する。 $M_{\text{測定}}$ は

200 GeV 程度であると考えられるので、 $M_{\text{本来}}$ の値は 10^{17} GeV + 200 GeV 程度であることになる。このことは、 ΔM_{H} によって15桁も大きな値が消えることを意味する。つまり、本来の質量に対して非常に小さい値のみが観測されることになるのである。このような不自然な補正をしなければならぬことを、階層性問題と呼ぶ。

この問題を解決するために考えられた一つの案が、超対称性粒子 (supersymmetric particle; SUSY 粒子) である。それぞれの標準模型粒子に対し、他のパラメータは全て同じだが、スピンは $\pm 1/2$ だけずれた粒子を仮定する。これが SUSY 粒子である。

標準模型粒子のフェルミ粒子と、それに対応する SUSY 粒子の2つのボース粒子を考えると、それぞれのスピン以外のパラメータが同じなら、 λ_s と λ_f は等しくなることが知られている。二つの現象を共に考えると、補正項は式(4)のようになるので、 ΔM_{H} はほぼゼロになり、階層性問題にあった大きな補正は必要なくなる。

$$\Delta M_{\text{H}}^2 = \frac{1}{8\pi^2} (\lambda_s - \lambda_f) \Lambda^2 + \dots \quad (4)$$

このようにして、SUSY 粒子の仮定により階層性問題を解決することができるのである。

SUSY 粒子がもたらすメリット

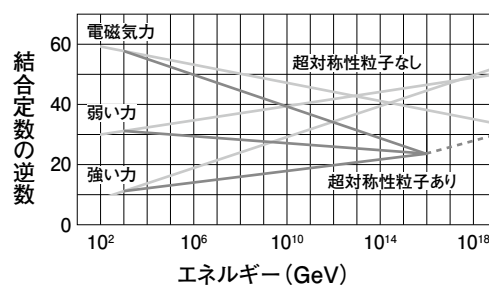
SUSY 粒子を仮定することによる影響は他にもある。その一つは、大統一理論に与える影響だ。

19世紀、マクスウェルによって電氣的な力と磁氣的な力が、実は同じ電磁相互作用の異なる側面であることが示された。さらに20世紀には、ワインバーグとサラムによって、電磁相互作用と弱い相互作用が、一つの相互作用の異なる面であることが示された。大統一理論とはこれらと同じように、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用が同じ相互作用の別の側面であるとして、三つを統一しようとする理論である。

相互作用の強さを表す結合定数はエネルギーによって変化する。エネルギーを大きくすると三つの相互作用の結合定数は近い値になる。そしてあるエネルギーで同じ値になり、同じ相互作用とみなせるようになるであろうというのが、大統一理論の意味するところである。

しかし、これまでの大統一理論では、三つの相

互作用の結合定数は同じ大きさのエネルギーでは一致しない。これに対して、大統一理論に SUSY 粒子の仮定を加えた超対称大統一理論では、三つの結合定数が同じエネルギーで一致する。このように、SUSY 粒子の仮定により、偶然に起こるとは思えない現象が起こるのである (図2)。



超対称性粒子を仮定しないと、グラフが交わる点は1点ではないが、超対称性粒子を仮定するとグラフは1点で交わる

図2 超対称大統一理論

また、SUSY 粒子はダークマターと呼ばれる物質の候補にもなる。ダークマターとは、宇宙に存在し質量を持っているが、観測することができない正体不明の物質である。宇宙は標準模型粒子が 4%、ダークマターが 23%、ダークエネルギーと呼ばれる正体不明のエネルギーが 73% で構成されている。標準模型粒子とダークマターは別のものだと分かっていたため、これを説明するには新しい粒子が必要であった。しかし、それが何であ

るかは長い間分からなかった。SUSY 粒子のいくつかは、電氣的に中性で相互作用をほとんどせず、観測が難しいので、それらがダークマターである可能性がある。

ここで挙げた他にも、SUSY 粒子を仮定することにより解決できる問題はいくつかあるが、未だその存在は確認されていない。LHC アトラス実験では、この SUSY 粒子の存在の確認も目的の一つとしている。

SUSY 粒子発見のために

SUSY 粒子が標準模型粒子とスピンのみ異なるのであれば、互いに質量は同じであるから、これまでの加速器実験で SUSY 粒子も生成、発見されているはずである。しかし、SUSY 粒子はこれまで一つも発見されていない。ゆえに SUSY 粒子は、これまでの加速器実験では生成されないほど大きな質量を持つと考えられる。このことから、標準模型粒子と SUSY 粒子はスピン以外においても異なる点を持つ、すなわち対称性が完全には成り立っていないと考えられている。何らかの理由で、SUSY 粒子の方が重くなっているのだと考えられるのである。

実際に加速器で SUSY 粒子が作られた時は、次のような現象が起こると考えられる。SUSY 粒子が加速器で生まれると、崩壊してより軽い SUSY 粒子と、ジェットと呼ばれるクォークやグルーオンなどの粒子の集まりになる。ほとんどの SUSY 粒子は、このような崩壊を繰り返して、標準

模型粒子を吐き出しながら、最終的に検出器と相互作用をほとんどしない、電氣的に中性でより軽い SUSY 粒子が、検出されないまま検出器から出ていく。

そこで、検出器では SUSY 粒子が軽くなっていく段階で放出する標準模型粒子の運動量を全て測定する。生成された粒子全てが観測されたなら、観測した運動量のベクトルの総和は、運動量の保存則からゼロになるはずである。しかし、SUSY 粒子のように検出されないまま検出器から出ていく粒子があった場合は、運動量の和はゼロにならない。よって、たくさんのジェットが観測され、さらにそれらの粒子の運動量を足し合わせたものがゼロにならず、その分布を取った時にそのような現象が標準模型では統計的に説明できないほどあれば、SUSY 粒子を発見したことになる。このような解析によって、SUSY 粒子を探そうとしているのである。



陣内研究室について

陣内先生の CERN での活動経歴

ヒッグス粒子と SUSY 粒子の必要性について、これまで紹介してきた。LHC アトラス実験はこれらの粒子の発見および性質の確認を目標として行われている。

陣内先生は、このプロジェクトの中の、モンテカルログループというグループでリーダーを務めていた。このグループは、アトラス内で起こる物理現象に関するイベントシミュレーションをするグループである。

アトラス内で起こる現象は、基本的には標準模

型を用いて説明することができる。既知の現象の範囲でも、世界中の理論物理学者はそれぞれの立場で仮定を立てている。LHC アトラス実験では、実験で得られたデータと理論的なバックグラウンドとを比較するので、様々な仮定による効果を組み合わせる必要がある。実験データのバックグラウンドと理論的なバックグラウンドが一致するように、適当な仮定を選ぶのだ。しかし、理論物理学者がシミュレーションのために作っているプログラムは、形式がばらばらである。その

ため、先生らモンテカルログループでは、それらのプログラムをLHCアトラス実験用に作り換える作業を行っていた。

このシミュレーションには、主に二つの目的がある。一つは、実際にLHCを稼働させる前にシミュレーションを用いて実験結果の擬似データを作り、解析のトレーニングをすることだ。アトラスでは、1秒間に $10^9 \sim 10^{10}$ 個もの事象が観測されると考えられるが、その多くは既知の物理現象であるため、その中から未知の物理現象を探すことが必要となる。不要な事象を削ると、未知の物理現象は図3のようなピークとして現れる。前時代の加速器実験では、このピークだけを見つけておくことによって未知の物理現象を発見することもできた。だが、現在の加速器実験ではピークがバックグラウンドに隠れてしまうことも多く、ピークだけを見つけておくことは難しい。そのため、どこにピークが出るか予測できるほど、既知の現象に関するシミュレーションを完全に実際のバックグラウンドに一致させる必要がある。そこで、事前に擬似データを用いて、不要な事象を削る作業や、適当な仮定を選択するトレーニングを行う。モンテカルログループは、このために、実際に得られるであろう形式の擬似データを作るのだ。

もう一つの目的は、実験のデータが集まってから最終的な結論を出す際に比較することである。必要なデータが集まってから、結論を論文にする

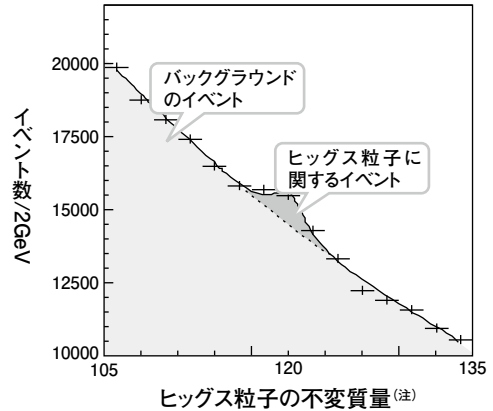


図3 ヒッグス粒子が検出された際のグラフ
際には、「どのような仮定のイベントシミュレーションとの比較の結果、どの程度の確率で、このような新しい物理現象があることが結論付けられる」というようにまとめることになる。これは、後々LHCアトラス実験の結果として残るものになるので、シミュレーション結果が長い間参考にされることになる。

以上のように、イベントシミュレーションは加速器実験を行う上で、準備段階だけでなく、結論を出す時までも重要となる作業だ。陣内先生がリーダーを2年間務めていたモンテカルログループでは、そのような重要な作業を行っていたのである。今後、先生らの作ったシミュレーションは、さまざまな形で利用されるであろう。

陣内研究室の活動

アトラス検出器は、図4のような構造をしている。陣内研究室はそのなかのシリコンストリップ検出器を担当するグループに参加し、検出器の開発・評価、維持・運転を行っている。運転には、データの解析、必要なソフトウェア開発や、検出器の性能評価などが含まれる。

シリコンストリップ検出器は、半導体検出器の一種である。この検出器の中にある空乏層と呼ばれる電荷のない領域に、荷電粒子が入射すると、半導体の電離によって空乏層内に電荷が生じる。空乏層に電圧をかけておき、この電荷を集め信号とすることで、荷電粒子を検出することができる。具体的な構造としては、細長い検出部分がいくつも並べられた板のようなものが重ねられてひとま

とまりとなっている。現在使われているものは、一つの検出部分の幅が $80 \mu\text{m}$ 、長さが 120mm で、それを768本並べた板2枚を、平行に 40mrad だけずらして重ねたものが、一つのまとまりとなっている。このまとまりは、陽子のビームが通るパイプ(ビームパイプ)を覆うように2112個、両端を覆うように988個ずつ、それぞれ4層設置されており、信号の読み出しチャンネル数は全部で6,000,000以上になる。これにより、粒子は8層の検出部分を通過することになる。

検出器全体にはビームパイプと同じ方向に磁場がかけられているため、検出器を通る荷電粒子はビームの方向に対して垂直な方向に曲がる。この曲がり具合と通過位置から、粒子の運動量と発生

注：どのような慣性系から見ても変わらない質量。

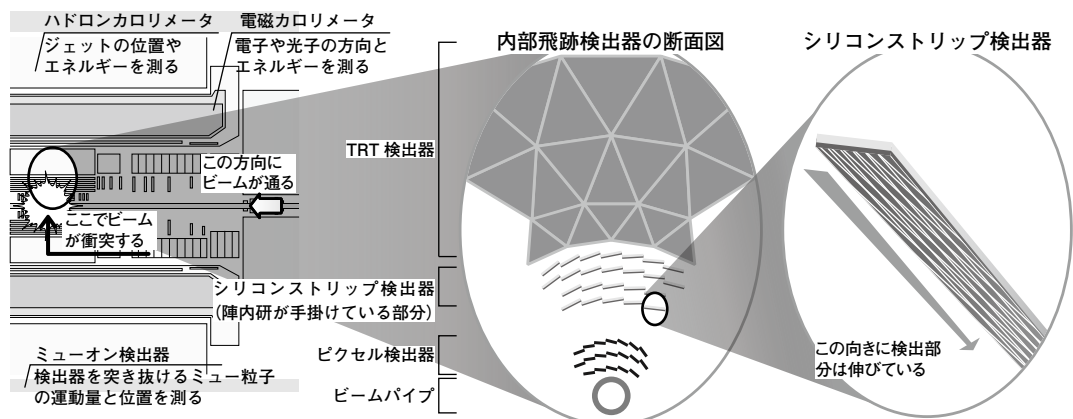


図4 アトラスの全体図と内部飛跡検出器

点を知ることができる。シリコンストリップ検出器では、この情報を得ることが重要なので、粒子の曲がり具合を詳しく調べるために、検出部分がビームパイプと同じ方向に並ぶように設置されている。また、一つのまとまりの2層が40mradずらしてあるので、ビームパイプと平行な部分だけ

でなく、ビームパイプと同じ方向についても粒子がどこを通ったか計測することができる。

このように、非常に多くの検出部分を用意することで、20～30 μ mの精度で粒子の通過位置を検出できる範囲は、長さ150cm、半径55.4cmにも及ぶ。

アップグレードに向けて

現在LHCアトラス実験では、既に加速器の運用を始めている。そのため、現在設置してある検出器に手を加えることはできない。陣内研究室が参加しているグループが現在行っているのは、LHCのアップグレードに合わせた、新たな検出器の開発設計である。

現在のLHCにおける陽子ビームにより、シリコンストリップ検出器が1年間に受ける放射線の強さは150MGyである。これは、人が1年間に受ける放射線の108倍以上の強さである。放射線は検出器を劣化させるため、放射線を考慮した検出器の設計が必要となる。さらに、LHCがアップグレードされれば、陽子ビームはより強くなるので、放射線もより強くなる。そこで、LHCのアップグレードを見越して、より強い放射線に耐えられる設計をする必要がある。

開発の際には、まずLHCのアップグレードに合わせて、検出部分の幅や数、層など、シリコン

ストリップ検出器の大まかな設計をして、テストサンプルを作る。そして、施設でそれに放射線を照射し、信号がどのように劣化するかを調べる。その結果を元に、放射線を受けて検出器が変化しても検出能力が保てるように、信号を読み出す電極の配置などの設計を改良していくのだ。

シリコンストリップ検出器の開発は日本だけでなく、イギリスやアメリカ、スイスなどのグループでも行われている。そのため、自分達で性能評価して、国際競争に勝てるようなものを開発する必要がある。各国のグループと競争することで、よりよいものを作っていくのである。

なお、現在実際にアトラスで利用されているシリコンストリップ検出器のうち4割は、陣内研究室が所属する日本アトラスシリコンストリップグループのものである。陣内研究室は、素粒子物理学の発展のため、今後もアトラスの運転、研究開発などで、国内外問わず貢献していくであろう。

「究極に簡単になるようなものを求めて素粒子に進んだ」とおっしゃった先生は、最先端の物理をととても楽しんでらっしゃるのを感じました。

お忙しい中、取材に応じてくださっただけでなく、多くの助言をしてくださった陣内先生に、心よりお礼申し上げます。(留目 和輝)