

Belle II 実験

樋口 岳雄 ひぐち・たけお

Kavli IPMU 准教授

素粒子の間に働く基本的な相互作用には、電磁気力、弱い力、強い力、そして重力があることが知られている。素粒子間の作用のうち重力を除く部分は精密に定式化されていて、その定式を我々は「素粒子標準理論」と呼んでいる。素粒子標準理論はきわめて強力な理論であり、素粒子標準理論と矛盾する素粒子反応は実験的にほとんど見つかっていない。

その一方で、素粒子標準理論が万能の理論ではないこともわかっている。たとえば、この宇宙にはダークマターとよばれる物体が存在することがほぼ確実であるが、ダークマターの性質と合致する粒子は素粒子標準理論には存在しない。このような理由から、素粒子標準理論を拡張する「新しい理論（新物理・新粒子）」が存在するであろうことが強く信じられている。

Belle II 実験

Kavli IPMUは、高エネルギー加速器実験「Belle II」に参加して、新物理の探索を最終目的に研究を進めている。Belle II 実験は日本を代表する高エネルギー加速器実験のひとつである。Belle II 実験では、粒子加速器SuperKEKBを使って電子と陽電子を加速衝突させ、そこからB中間子のペアやタウ粒子のペアを作り出す。これらは不安定な粒子であるためすぐに別の種類の複数の粒子に変化（崩壊）する。ここで、もし新物理が存在するならば、実際の粒子崩壊のようすと素

粒子標準理論が予想する粒子崩壊のようすとの間には不一致が生じるはずである。Belle II 実験では、この粒子崩壊の不一致の度合いを精密に調べることで新物理を追究する。^{*} さらに、もし新物理が見つかったときにはその理論モデルの構築も行う。

Belle II 実験で見ようとしている素粒子標準理論と新物理との不一致は非常にかすかであるため、新物理の発見を確実にするにはたくさんのB中間子やタウ粒子を生成する必要がある。SuperKEKB加速器の前身であるKEKB加速器（Belle II 実験の前身であり、小林-益川理論の検証に貢献したBelle実験のための加速器）の事象生成の頻度もすでに世界最高であったが、SuperKEKB加速器はさらにその40倍を実現する能力を備えている。

Belle II 実験のための粒子検出器が「Belle II 測定器」である。Belle II 測定器は電子・陽電子の衝突点に設置されており、ビームパイプを取り囲むような円筒形をしている。粒子の崩壊を特徴付けるパラメータには、粒子崩壊が発生した位置、崩壊によって生じた粒子の運動量とエネルギー、および生じた粒子の種類が4つあり、Belle II 測定器はこれらを測定できるようになっている。Belle II 測定器はBelle実験のためのBelle測定器の設計を取り入れつつも、大幅な改良がほどこされている。たとえば、加速器の増強によって素粒子反応の頻度が増えたと検出器内で前後の素粒子反応の

^{*} 本号の裏表紙を参照。

信号が重なってしまうため、突入粒子に対して高速に反応するセンサーを採用したり、検出器の信号読み出し回路を高速化したりして、問題に対応している。また、検出器信号のデジタル化からコンピュータへの記録までの全システムを一新して、検出器信号の高速化・大容量化に対応したほか、Belle II 実験に参加する大学・研究機関のコンピュータ群を仮想的に統合するシステムを導入して、データ解析で発生しうる計算機資源の不足にも対応できるようにした。これらの工夫により、Belle II 実験では、最終的にはBelle実験の50倍の素粒子反応を蓄積しようとしている。

Belle II SVD

B中間子などの粒子の崩壊位置は新物理の存在を定量的に判定するのに欠かせない情報である。Belle II 実験の崩壊点位置検出器 (VerteX Detector, VXD) は Belle II 測定器全体のもっとも内側に配置されていて、電子・陽電子の衝突点を囲むような円筒6層の構造になっている (図1)。そしてVXDは内側2層がピクセル

検出器 (PiXel Detector, PXD)、外側4層がシリコン崩壊点位置検出器 (Silicon Vertex Detector, SVD) となっている。Kavli IPMUは、このうちSVDの開発とSVD第4層の製作を担当している。

SVDのセンサー (図2) は縦60 mm×横125 mm程度の大きさである。センサーの表面と裏面には最小50 μm 間隔で線状の電極 (ストリップ) が並べてあり、各ストリップは読み出し集積回路に接続してある。粒子がセンサーを通過するとその近くのストリップに電気信号が発生するので、この信号をとらえることで粒子の通過位置を検出する。ストリップは表面と裏面とで直交して並べられているため、粒子の通過位置は2次元で検出できる。

SVDの各層は、センサーを棒状に並べた「ラダー」と呼ばれるモジュールから構成される。ラダーはセンサー、センサーの支持体、ストリップからの電気信号を読み出す集積回路 (APV25)、APV25とストリップを接続するフレックス基板などから構成され、これらは接着剤で接着される (図3)。Kavli IPMUが担当するSVD第4層ラダーには5枚のセンサーが使用され、

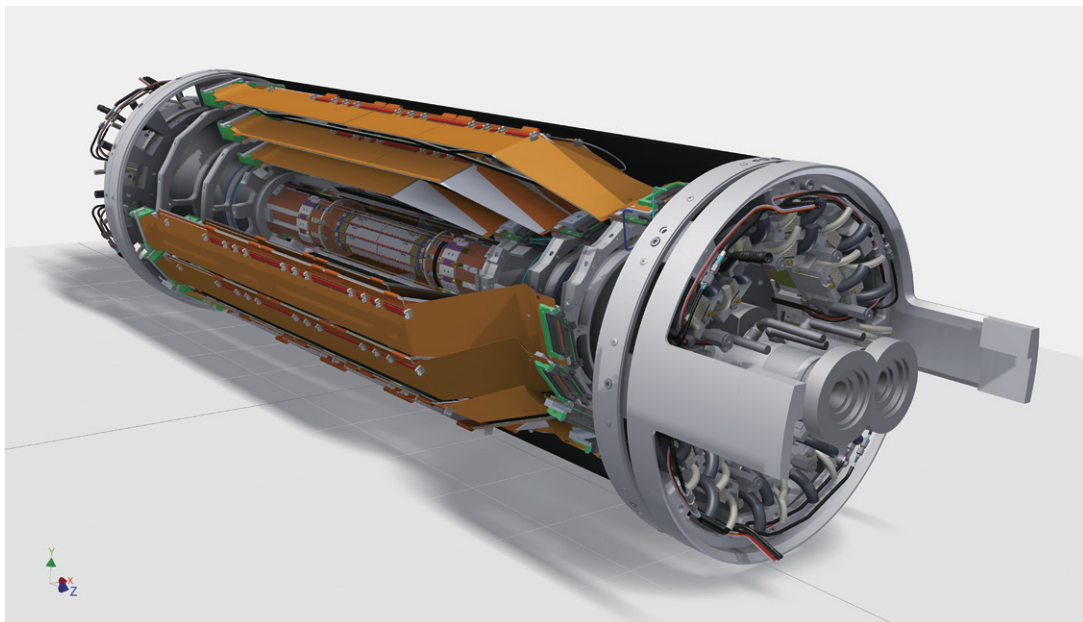


図1 Belle II崩壊点位置検出器。電子・陽電子衝突点を取り囲むような円筒6層構造をもつ。全長は935 mmで、円筒の直径は310 mmである。

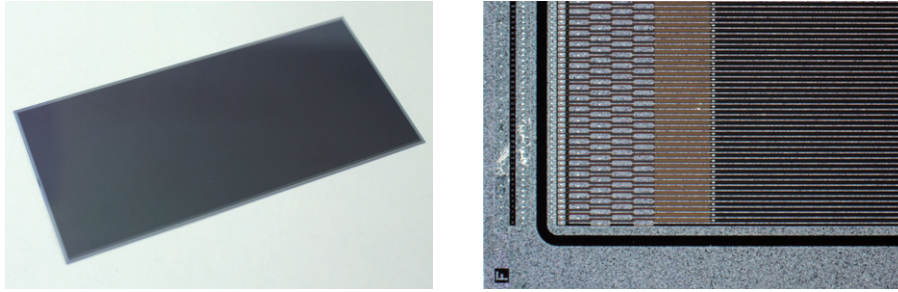


図2 センサーの全体写真(左)と拡大写真(右)。拡大写真ではストリップが見える。

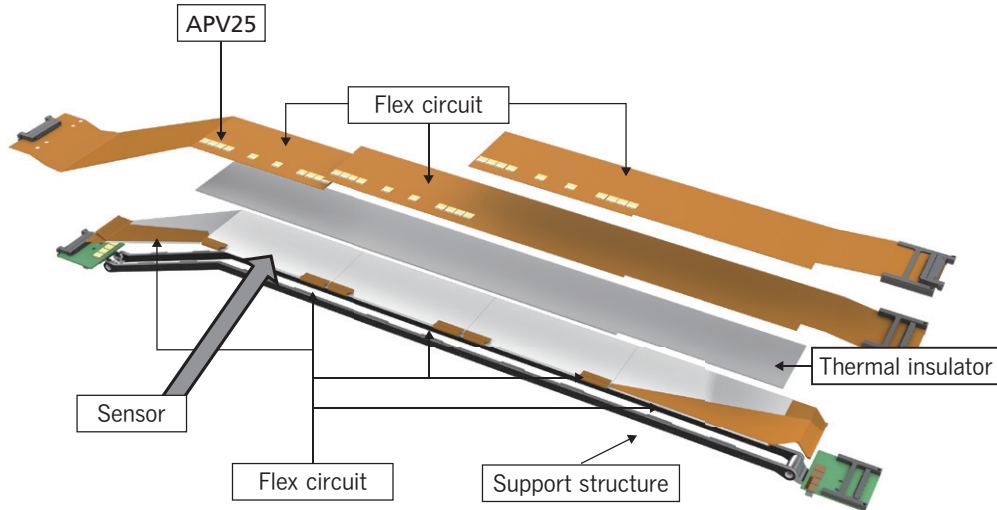


図3 SVD第4層ラダーの分解図。最下部の黒い部品がラダーの支持体で、その上に5枚のセンサーが並んでいる。茶色い部品は読み出しフレックス基板である。

ラダーの全長は749 mmである。ラダー内やラダー間でセンサーが衝突することを防ぐため、センサーは設計位置から200 μm の精度で配列されることが求められる。ストリップとフレックス基板の間、およびフレックス基板とAPV25の間は太さ25 μm のアルミニウムワイヤーで結線されており、SVD第4層ラダーでは結線ワイヤーの総数は1万2千を超える。なおラダー1本の価格は小型のバスと同程度である。

ラダーの中でもっとも特徴的な設計が chip on sensor conceptとOrigami concept (図4) である。信号読み出しのノイズを少なくするにはストリップからAPV25までの配線をできるだけ短くする必要がある。そこでAPV25をセンサーの直上に配置することにした。し

かしこのままではセンサー裏面の信号を読み出せない。そこで、センサー裏側からフレックス基板を伸ばし、これを表面に折り返して接着した上でワイヤー結線をして信号を読み出すのである。

Kavli IPMUではSVD第4層を構成するラダー16本と予備4本を実験室に建てられたクリーンルームの中で製作している。最初の課題は、高価な部品の複雑な組み合わせからなるラダーを、高精度で製作できる工程を確立することであった。ラダー製作の開発は2012年頃から開始した。そもそも、人の手では要求精度でセンサーを並べることはできない。そこで我々は、専用の治具を開発し、これを使ってラダーを製作することとした。使用する治具の総数は最終的に20

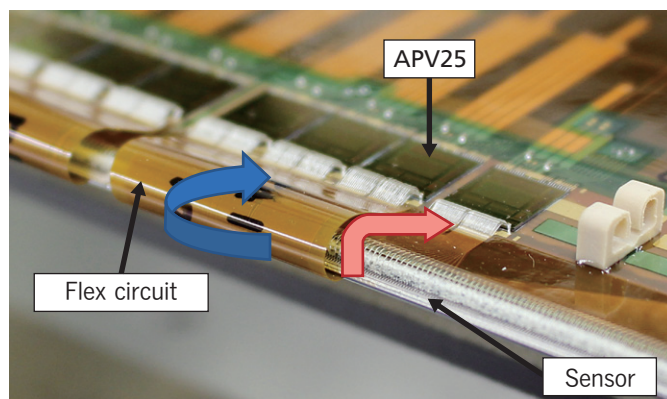


図4 Origami conceptの写真。センサー裏側に貼り付けられたフレックス基板をセンサー表面に折り返してAPV25に導入することで、センサー裏面の信号を読み出す。

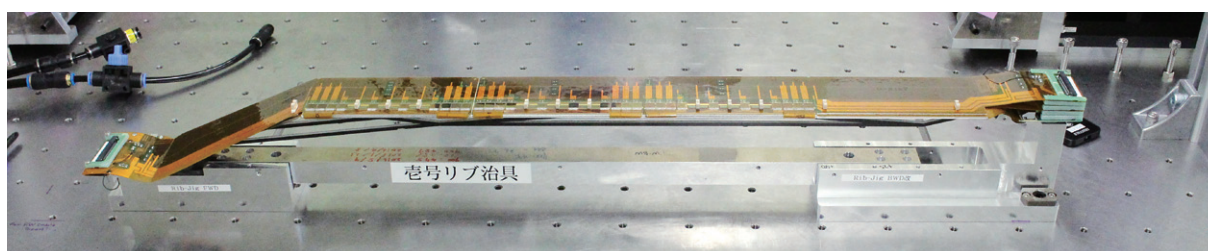


図5 完成したラダー実物の写真。

以上となった。治具によるラダー製作工程の検証とデバッグに加え、部品接着やワイヤー結線の工程も独自に開発した。10本以上のモックアップラダーの製作を経て、我々はラダー製作工程の開発を2015年頃に終えた。これと並行して、ベータ線の照射を受けたラダーからの電気信号をPCで解析することで、ラダーの電気的性能を評価するシステムも開発した。2016年春には、我々は電氣的に完動する初めてのラダーを完成させた。そして、このラダーを他の層のラダーとともに電子線照射実験に投入し、我々のラダーが期待通りに粒子検出能力を持っていることを実証した。

次の課題は、均一なラダー品質の確保であった。我々はラダー製作工程に厳重な品質管理の発想を組み込むこととした。とくに、作業による不定性排除のための作業の機械化とマニュアル化、受入部品の全数試験によるトレーサビリティの確保、ラダー製作中に

発生したエラーを速やかに検知するための複数のチェックポイントの設定、完成したラダーの品質を保証するための外観検査・組み立て精度検査・電気性能試験などには注意を払って実装した。

現在、我々はクリーンルームでラダーを量産している真っ最中である。これまでに5本のラダーを製作した(図5)。このまま順調にラダー製作が進めば2018年初頭にはラダー製作がすべて完了する予定である。他方、2017年夏頃から製作したラダーをVXD構造体へ取り付ける作業が始まる。2018年夏頃までにはPXDとSVDとを合体し、その夏を通して宇宙線粒子を用いたVXDの性能試験を行う。そしてその秋にはVXDをBelle II 測定器全体の構造体に納め、2018年終わりからはいよいよ本格的に素粒子反応をとらえる実験を開始する予定である。