

高エネルギー粒子用 Si検出器

目次

1. 特性

p.02

2. シンチレータ式Si検出器

p.03

3. ダイレクト式Si検出器

p.03

4. 新たな取り組み

p.06

5. 応用例

p.07

高エネルギー粒子用Si検出器の検出方式には、シンチレータを発光させて間接的に検出するシンチレータ式と高エネルギー粒子を直接検出するダイレクト式の2つがあります。この2つの方式で使用されるSi検出器には、大面積Si PINフォトダイオード・Si APD (アバランシェ・フォトダイオード)・大面積PSD (位置検出素子)・SSD (Si ストライプ・ディテクタ)などがあります。

シンチレータ式大面積Si PINフォトダイオードは、28 × 28 mmまでの受光面サイズをもった、高比抵抗の単結晶Siウエハを用いた検出器です。シンチレータと組み合わせて使用されるため、シンチレータの発光波長に合った分光感度特性をっており、大面積ながら高速応答を実現しています。

ダイレクト式大面積Si PINフォトダイオードは、48 × 48 mmまでの受光面サイズのSi検出器です。通常は薄い不感層と厚い空乏層をもっているため検出効率が高く、 ΔE 検出器またはE検出器として使用されます。

Si APDは微弱なシンチレータ光を高速で検出できる高感度検出器です。大面積PSDは、非分割型の位置検出素子で、荷電粒子の入射位置検出と同時に ΔE 検出器またはE検出器としても使用することができます。

SSDは、フォトダイオード技術とIC技術を融合した高精度のSi検出器です。基板上に数 μm から数十 μm 幅のストライプ状の受光部 (PN接合)が形成されており、高エネルギー粒子の入射位置をミクロン単位で検出することができます。この性能を利用し、素粒子の飛跡検出器 (Siバーテックス・ディテクタ)として、高エネルギー物理実験に広く使用されています。

浜松ホトニクスの高エネルギー粒子用Si検出器には、以下の特長があります。

- ❑ 低暗電流、低ノイズ
- ❑ ΔE 検出器: 厚さの均一性に優れている
- ❑ 高耐放射線
- ❑ 高耐圧
- ❑ シンチレータの発光波長に合った分光感度特性

❖ 浜松ホトニクスの高エネルギー粒子用Si検出器

タイプ	検出方式	特長
大面積Si PINフォトダイオード	シンチレータ式	高い逆電圧を印加することで大面積ながら高速応答を実現。シンチレータを組み合わせて使用 (シンチレータ付きと、ユーザがシンチレータを付けるタイプがあります)。受光面サイズ: 28 × 28 mm max.
	ダイレクト式	ΔE 検出器、E検出器として使用できる。高エネルギー粒子のエネルギー検出用。受光面サイズ: 48 × 48 mm max.
Si APD	シンチレータ式	内部増倍機能をもった高速・高感度のフォトダイオード。微弱な信号の測定が可能。主にシンチレータと組み合わせて使用。
大面積PSD	ダイレクト式	ΔE 検出器、E検出器として使用できる。高エネルギー粒子のエネルギー検出と入射位置の2次元検出用。
SSD	ダイレクト式	高エネルギー粒子の飛跡検出用。ストライプ形状のフォトダイオードアレイ構造で、低ノイズ、優れた位置分解能を実現。

1. 特性

1-1 有感エリア

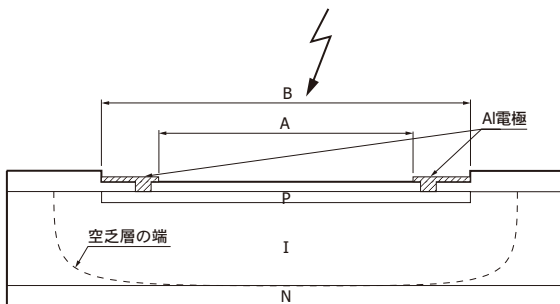
Al電極を光は透過しませんが、高エネルギー粒子は容易に透過します。そのためダイレクト式Si検出器の有感エリアはAl電極を含んだP層領域で定義しています。一方、シンチレータ式Si検出器の有感エリアはAl電極を含まないP層の領域で定義しています [図1-1]。

光がシンチレータ式Si検出器のPN接合周辺の遮光されていない部分に当たると、そこで発生したキャリアは信号として出力されます。同じように、ダイレクト式Si検出器の有感エリアの外側に入った放射線も信号を発生させます。

Si検出器表面の絶縁膜・Al電極・P層は不感層であり、そこではエネルギー損失が起きますが、失われたエネルギーによって信号は発生しません。

Si検出器に逆電圧を印加すると、空乏層は厚さ方向とともに水平方向にもある程度広くなります。有感エリアを正確に規定する必要がある場合、有感エリアの周りにガードリングとしてのP層を設け、ガードリングの外側で発生した余分なキャリアをここで吸収する方法を行うことがあります。

【図1-1】 Si検出器の断面図



有感エリア
A: シンチレータ式Si検出器
B: ダイレクト式Si検出器

KSPDC0002JB

1-2 暗電流、接合容量

Si検出器に逆電圧が印加されると、暗状態でも微小電流が流れます。この電流は暗電流またはリーク電流と呼ばれ、逆電圧を増加させると大きくなり、ノイズの主な原因となります。暗電流は2つの成分に分けられ、熱的に発生する電流と、Siの結晶欠陥やSi酸化膜界面で発生する電流があり、ダイオードの逆方向に流れます。

Si検出器の接合容量は、P層の面積と空乏層の厚さで決定され、式 (1-1) で近似されます。

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{W} \dots\dots\dots (1-1)$$

C : 接合容量
ε₀: 真空中の誘電率
ε_s: Siの比誘電率
S : P層の面積
W : 空乏層の厚さ

接合容量は、I層が完全に空乏層化したときに最小になります。

Si検出器で推奨されている逆電圧は、基板を完全に空乏化させる電圧です。推奨電圧でSi検出器を動作させることは接合容量を最小とするだけでなく、I層が完全に空乏化するため直列抵抗を下げることもなります。また接合容量と直列抵抗が下がることによって、応答速度が改善されノイズが小さくなります。

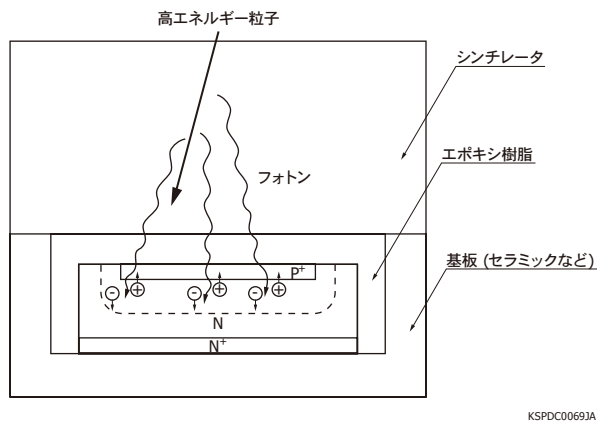
1-3 応答速度

Si検出器の応答速度を決める要因は、主に2つあります。1つは時定数で、Si検出器の端子間容量と直列抵抗、外付けされた負荷抵抗で決まります。もう1つは、Siの中で生成した信号電荷が電極に到達するのに要する時間 (キャリア収集時間) です。キャリア収集時間は、キャリアが空乏層の外を拡散電流として流れる時間と、キャリアが空乏層内を電界により走行する時間 (ドリフト時間) に分けられます。逆電圧によって完全に空乏層化している場合は、キャリア収集時間はドリフト時間で決まります。Si検出器の時定数が小さい場合、応答速度はキャリア収集時間で制限されます。一方、大面積のSi検出器では、応答速度は時定数で制限されます。

2. シンチレータ式Si検出器

シンチレータ式Si検出器は、高エネルギー粒子によるシンチレータの発光を検出することで高エネルギー粒子を間接的に検出します。その構造を図2-1に示します。一般にシンチレータは大きなサイズで厚いものを製作可能です。このためシンチレータは、ダイレクト式Si検出器では粒子が検出器を透過して全エネルギーの検出ができないような粒子の検出に有効で、荷電粒子や γ 線の検出に広く用いられています。シンチレータと光学カップリングして使用するSi検出器には、シンチレータの発光波長で高量子効率をもつSi PINフォトダイオードなどが使用されます。Si PINフォトダイオードには、シンチレータとの光学カップリングのために大面積であることが求められます。シンチレータ式Si検出器の動作原理は、通常のフォトダイオードと同様です（「X線検出器 技術資料/Siフォトダイオード」参照）。

【図2-1】 シンチレータ式Si検出器の構造

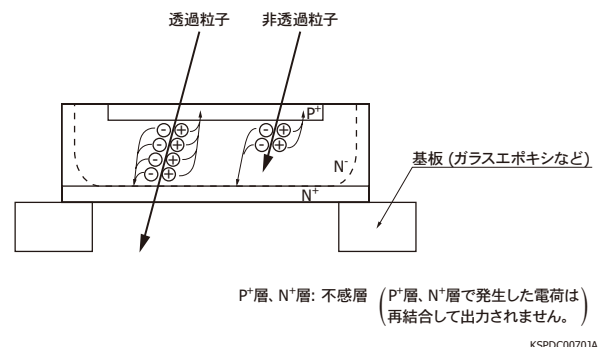


KSPDC00693A

3. ダイレクト式Si検出器

ダイレクト式Si検出器には、大面積Si PINフォトダイオード・PSD・SSDなどがあり、Si検出器に直接入射する放射線のエネルギーによって内部で電離した電荷を検出します。ダイレクト式Si検出器は高いエネルギー分解能をもち、高速応答・低ノイズを実現しています。ダイレクト式フォトダイオードの構造を図3-1に示します。ダイレクト式Si検出器には、樹脂などの保護膜がありません。荷電粒子が入射する場合、Si検出器の表面の不感層におけるエネルギー損失を抑える必要があるためです。

【図3-1】 ダイレクト式フォトダイオードの構造



KSPDC00703A

α 線や重イオンのような荷電粒子がSi検出器に入射すると、荷電粒子の種類やエネルギーによって決まる長さの直線的な軌跡に沿ってエネルギーが消費され、荷電粒子と電子のクーロン力による相互作用によって電子-正孔対が生成されます。生成される電子-正孔対の数は、荷電粒子の種類に依存せずエネルギー損失に依存します（300 Kの場合、平均して3.62 eVで1つの電子-正孔対が発生します）。このため、電荷量を検出することにより、エネルギー損失が推定されます。

E検出器は、荷電粒子を透過させずに全エネルギー(E)をとらえる厚い検出器です。E検出器は、荷電粒子が入射ポイントから停止するまでのすべての軌跡（飛程）をカバーするのに十分な厚い空乏層をもつ必要があります。

ΔE 検出器は、荷電粒子が透過したときに失われたエネルギーをとらえる透過型検出器です。複数の ΔE 検出器を上下に配置して、荷電粒子の透過した位置を特定することによって、荷電粒子の入射角度を検出することができます。

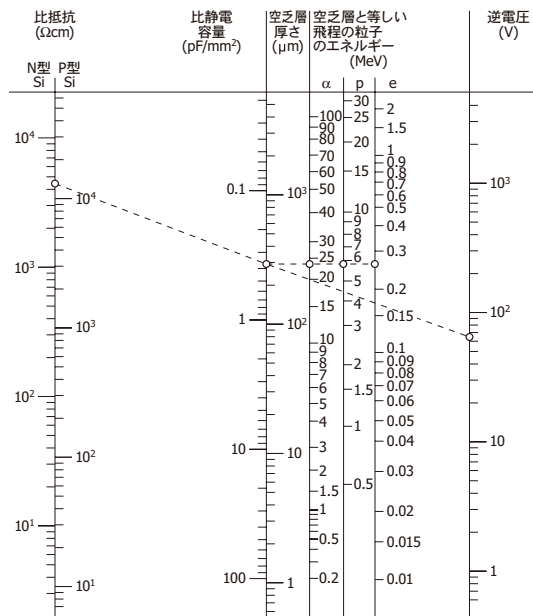
粒子を識別するには、透過型検出器である ΔE 検出器と、厚いE検出器を組み合わせる方法があります [図5-8]。 ΔE 検出器は透過する粒子の比エネルギー損失(dE/dx)を検出でき、E検出器で検出されたエネルギーと合わせて粒子の全エネルギー(E)を見積もることができます。それぞれの粒子は(dE/dx) × Eの固有の値をもつため、入射した粒子の種類を識別することが可能となります。また、位置検出が可能な ΔE 検出器を複数用いる

ことによって、入射する粒子のエネルギーに加え、入射角度や入射位置の検出が可能となります。

β 線は、質量が比較的軽いということと、エネルギー損失が電磁波の放出の過程で起こるため軌跡が直線ではなく飛程が長いという点が α 線や重イオンとは異なります。

図3-2では標準的な荷電粒子 (α : α 線, p: プロトン, e: 電子)のエネルギー、Siウエハの比抵抗、単位面積当たりの容量、荷電粒子を検出するために必要な空乏層厚さ、空乏層を広げるための逆電圧の関係を示します。この図は用途に合ったSi検出器を選択するために利用できます。

【図3-2】 Si検出器のパラメータ計算図表



1 μm Si=0.2325 mg/cm²
1 mg/cm² Si=4.3 μm
Si検出器の諸パラメータの相互関係を示す計算図表
(最初Blankenshipにより発表された計算図表と類似のもの)

KSPDC00041C

■ 参考文献

IEEE transactions on nuclear science, Vol. NS-7, 190-195 (1960)

3-1 空乏層の厚さ

E検出器は、検出される荷電粒子の飛程よりも厚い空乏層をもつ必要があります。空乏層の厚さは、以下の点を考慮して決める必要があります。

- ・ 逆電圧を高くすると空乏層は広くなり、ノイズの主な原因である端子間容量と直列抵抗が小さくなる。
- ・ 空乏層の電界を高くすると応答速度は速くなるが、暗電流が増加してノイズが大きくなる。

空乏層がSi検出器の基板の厚さの一部だけに広がっている状態を部分空乏化と呼びます。これに対し、逆電圧を上

げても空乏層がそれ以上広がらない状態を完全空乏化と呼びます。 ΔE 検出器は、完全空乏化の状態で使用します。

3-2 チャネリング効果

結晶格子に沿って進んだ荷電粒子はエネルギー損失が少なく、深くまで到達するという現象をチャネリング効果と呼びます。チャネリング効果が起こると、空乏層内で止まるべき荷電粒子が空乏層外に到達したり、検出器を通り抜けたりします。したがって、荷電粒子の軌跡を検出する場合、チャネリング効果に注意する必要があります。

3-3 出力波高のばらつき

実際のSi検出器では、生成した電子-正孔対は完全には検出されず出力波高がばらつき、仮に同じエネルギーの荷電粒子が入射した場合でも、必ずしも同じ出力になるとは限りません。この現象は次の3つの要因により発生します。

第1は、Si検出器の表面や裏面部分にある空乏層化しない薄い不感層によるものです。E検出器では、表面の保護膜や拡散層部分から成る不感層が波高のばらつきの原因になります。 ΔE 検出器では、裏面の拡散層による不感層も波高のばらつきの原因となります。

第2は、空乏層に形成された結晶欠陥によるものです。Si検出器に放射線が入射すると空乏層内に結晶欠陥が形成され、暗電流が増加します。放射線の吸収量にほぼ比例して暗電流は増加し、徐々にSi検出器の性能は劣化します。また、形成された結晶欠陥は再結合中心として働くため、電子-正孔対の一部はこの結晶欠陥の位置で再結合し出力されません。

第3は、粒子の軌跡に沿って形成された高濃度プラズマによって、電子-正孔対が再結合することです。

上記の第2・第3の要因による影響を少なくするには、空乏層の電界強度を高くして、再結合確率を小さくすることが有効です。

3-4 ノイズとエネルギー分解能

エネルギー分解能の測定において、最も考慮すべき点は統計的ノイズです。統計的ノイズは本質的に存在し、同じエネルギーの粒子が検出器に入ったとしても電子-正孔対の総数は一定ではありません。エネルギー分解能の測定では、この統計的ノイズを無視できません。入射粒子が平均的にN個の電子-正孔対を生成したとすると、統計的ノイズによって決まるエネルギー分解能[R(FWHM)]は、式(3-1)で表されます。

$$R = 2.35 \sqrt{F/N} \dots\dots\dots (3-1)$$

FはFano factorと呼ばれる係数です。Si検出器を用いた実験結果を示した多くの文献では、Fの値は約0.1と報告されています。

エネルギー分解能に影響を与える他の要因としては、Si検出器や回路を含む全システムで発生するランダムノイズがあります。Si検出器の暗電流と容量が大きくなるほど、ランダムノイズも大きくなります。

α 線やプロトンのような荷電粒子の ΔE 検出では、粒子の飛程には本質的にバラツキがあります（平均で2～3%）。このため、同じ厚さに対して生成する電子-正孔対の数は一定ではありません。また、検出器の厚さにもバラツキがあります。これらは、エネルギー分解能に悪い影響を与えます。

3-5 位置検出用Si検出器

位置検出が可能なダイレクト式Si検出器である大面積2次元PSDとSSDについて以下に説明します。

▶ 大面積2次元PSD

大面積2次元PSDは、P層またはN層を均一な高抵抗層とし、その高抵抗層に4つの電極を施した構造をもっています。高エネルギー粒子により発生した電荷が、高抵抗層を介して4つの電極に集められます。この全電荷量から粒子のエネルギー損失が検出されます。各電極に集められる電荷の割合は発生した電荷の位置と相関をもつため、入射粒子の位置検出が可能となります。^{2) 6)}

PSDには、構造が簡単で大面積の位置検出が可能という利点がありますが、同時に複数の粒子が入射(Multi-hit)した場合には、位置検出は不可能です。また、電極間が抵抗層でつながっており、フォトダイオードよりも熱雑音が大きいため、一般的には荷電粒子の中でも比エネルギー損失が大きい重イオンを検出対象とします。

▶ SSD

SSDは、数十 μm 幅のストライプ形状のフォトダイオードアレイの構造をもちます。有感エリア内には多数のストライプ（チャンネル）があるため、入射粒子の位置に相当した1本または複数のストライプに信号出力が分配され、ストライプピッチ以下の位置分解能を得ることが可能になります。その上、低ノイズでMulti-hit検出が可能です。当社製SSDは以下の特長をもっています。

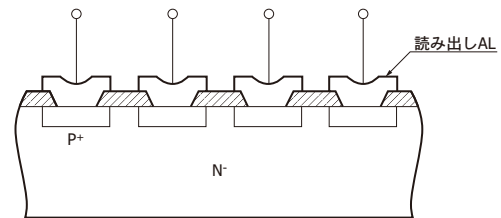
- ・ 高抵抗Si基板の使用により低電圧動作が可能
- ・ 低暗電流・高耐圧により安定動作を確保
- ・ 1%以下の不良チャンネル率を実現

- ・ AC読み出し型は、Poly-Si方式の採用で放射線耐性に優れている

⚙️ 読み出し方法

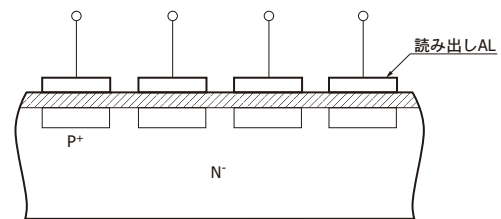
SSDは、DC読み出し型とAC読み出し型に分類できます。ストライプ状の拡散とAl電極がDC的に結合しているものがDC読み出し型、AC的に結合しているものがAC読み出し型です。AC読み出し型SSDは、DC読み出し型SSDと比較して、各ストライプからの暗電流（DC電流）が信号ラインに流れ込まないため、読み出し用ICチップとのマッチングがよいという利点があります。AC読み出し型SSDでは、各ストライプにバイアスラインから逆電圧を印加する必要があります。逆電圧印加の方法には、Punch-through方式とPoly-Si方式がありますが、当社のSSDは放射線耐性に優れたPoly-Si方式を標準として採用しています。^{3) 9)}

[図3-3] DC読み出し型



KSPDC00053B

[図3-4] AC読み出し型

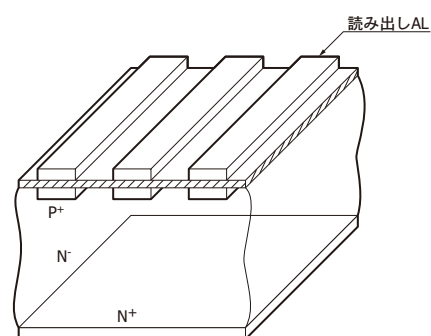


KSPDC00063B

⚙️ 片面SSD、両面SSD

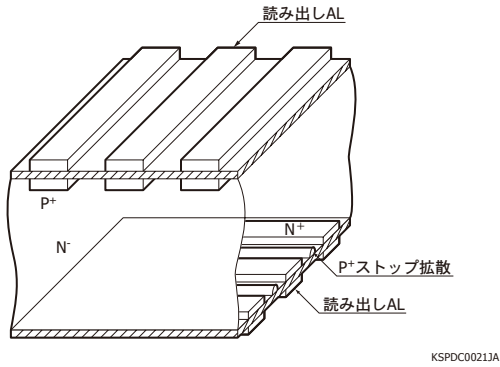
片面のみがストライプ構造で1次元位置検出を行う片面SSD (SSSD: Single-sided SSD) と、両面がストライプ構造で、1枚のSSDで2次元位置検出が可能な両面SSD (DSSD: Double-sided SSD) があります。⁵⁾

[図3-5] 片面SSD



KSPDC00203A

【図3-6】 両面SSD



❁ 片面SSDによるラダーモジュールの組立

SSDは、1枚だけで使用する場合がありますが、複数並べたり重ねたりして使用する場合があります。たとえばSSDを素粒子実験の飛跡検出器として使用する場合は、SSDを複数枚ハシゴ状に組み、その端に読み出し回路を付けた、いわゆるラダーモジュールを製作し、これを粒子の衝突（崩壊）点に同心円状に配置することによって大きな有感エリアが得られます。この場合、SSDから得られたデータを処理することにより粒子の飛跡を測定することができます。

2枚のSSDの裏面を互いに貼り合わせて2次元の位置検出が可能なラダーモジュールの組立を行う場合、両面の読み出し電極パッドを同じ端にもってくる必要があります。どちらかの面で2層配線 [DML (Double Metal Layer)] 構造を用いて、ストライプと異なる方向に読み出し電極をもってくる方式 (2層配線読み出しタイプ) と、片面のストライプ角度を他の面の角度よりわずかに傾けた方式 (非直交読み出しタイプ) があります。非直交読み出しタイプは、構造上どちらかの面の位置分解能が落ちますが、DMLでない簡単な構造となります。

4. 新たな取り組み

高エネルギー物理実験では、検出するエネルギーの増加に伴って検出器の大型化が求められており、当社では大面積のSi検出器を開発しています。また、複数のSi検出器をタイリングするためにフリップチップボンディングに対応したフォトダイオード、デッドスペースの少ない完全空乏化フォトダイオードも開発しています。

ΔE 検出器については、厚さの均一性に優れた薄いタイプ (10 μm 程度) を開発しました。また、不感層が薄いタイプを開発中です。

2020年以降に始まるHL-LHC (High Luminosity - Large Hadron Collider) など、次期粒子衝突実験の飛跡検出器の放射線環境は、LHCプロジェクト (2008年実験開始) の5~10倍の過酷な環境になる予定です。こういった環境でも使用可能な高放射線耐性のSSDを開発しています。

Si APDやMPPCは、微弱なシンチレータ光を検出できる素子です。小型・高安定で、磁界に影響されないといった光半導体素子の利点から、高エネルギー物理学実験のカロリーメータ検出器のみならず、医療や生体科学など新しい分野で利用されています。

5. 応用例

5-1 粒子衝突実験

SSDは、多くの粒子衝突実験（DELPHI, KEK-B, CDF, CLEO, ZEUSなど）において高エネルギー粒子の位置検出器として使用されてきました。^{4) 10) 11) 12) 13)}

粒子の衝突地点付近に複数層を並べ、衝突で発生した素粒子の飛跡を検出します。

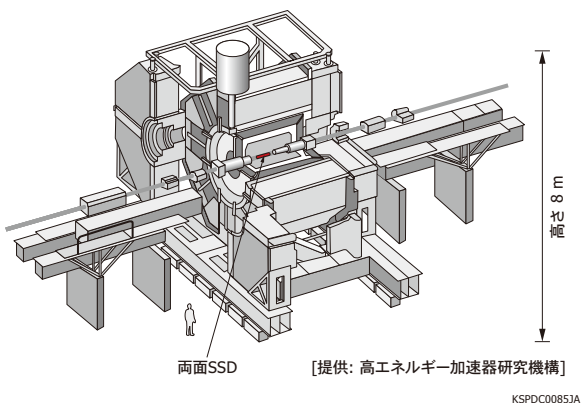
高エネルギー加速器研究機構（KEK）における電子・陽電子衝突加速器によるBelle実験装置 [図5-1]では、当社製両面SSDが使用され [図5-2]、小林・益川理論が予測したB中間子の CP 対称性の破れを2001年に実証することに貢献しました。²⁰⁾ 小林誠氏、益川敏英氏は、2008年のノーベル物理学賞を受賞されました。

スイスの欧州原子核研究機構（CERN）におけるLHCプロジェクトでは、円周約27 kmの加速器リング内で7兆eVに加速した陽子と陽子を衝突させることによって発生する素粒子の検出を行っています。その主な目的は、唯一未発見であったヒッグス粒子（物質に質量を与える粒子と考えられている）の存在を確認することにあります。2013年にその存在が確定され、半世紀前にヒッグス粒子の存在を予言したピーター・ヒッグス氏とフランソワ・アングレル氏が2013年のノーベル物理学賞を受賞されました。

LHCプロジェクトのATLAS実験装置 [図5-3]の飛跡検出器として当社製SSDが約14000個使用され¹⁴⁾、CMS実験装置 [図5-4]の飛跡検出器として当社製SSDが約22000個使用され^{15) 16)}、ALICE実験、LHC-b実験でも当社製SSDが使用されており、粒子の飛跡を数十 μm の精度で検出しています。

またCMS実験装置のエレクトロ・マグネティック・カロリメータにおける鉛タングステン・シンチレータの光検出器として、当社製APDが140000個使用されています。

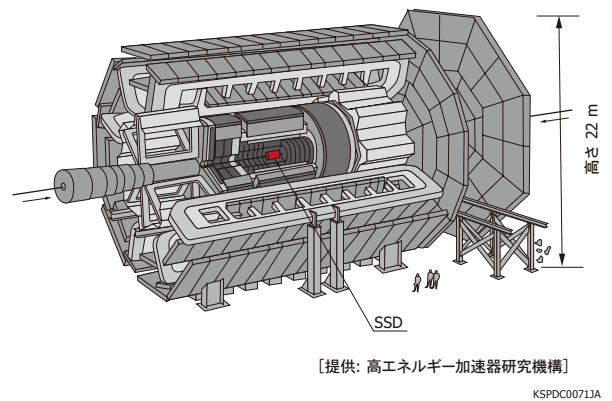
[図5-1] Belle実験装置



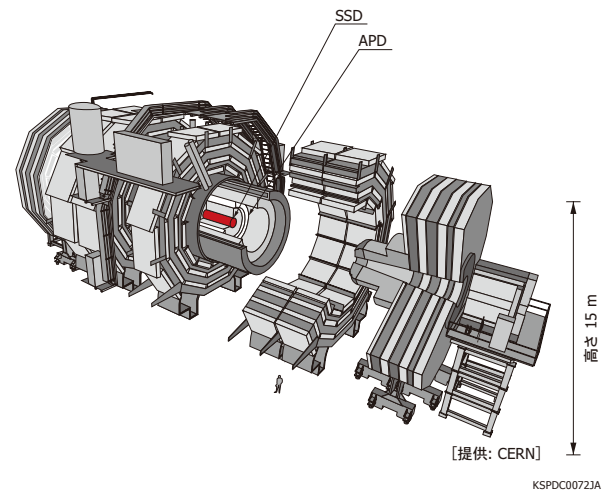
[図5-2] Belle実験で使用された両面SSDモジュール



[図5-3] ATLAS実験装置



[図5-4] CMS実験装置



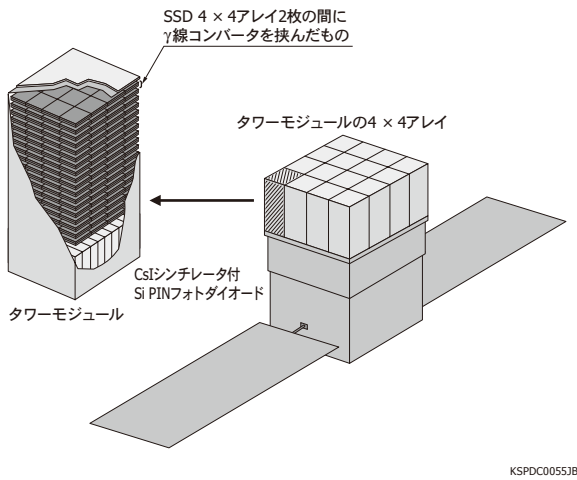
5-2 FGST (Fermi Gamma-ray Space Telescope) 検出器*

NASAのFGST（2008年人工衛星打ち上げ／実験開始）は、 γ 線領域で宇宙を観測するためのプロジェクトです。わずか数秒から数百秒で太陽の一生分のエネルギーを放出する γ 線バースト、活動銀河核における数十光年におよぶ巨大なジェットの形成、活動銀河核などから数十億eV～1兆eVといった超高エネルギーの γ 線を放出する仕組みなど多くの宇宙の謎を解明することを目的としていました。

図5-5は、FGST検出器に使用されているタワーモジュール（タワー状の検出器）を示したものです。SSD 4 × 4アレイ2枚の間に γ 線コンバータ（ γ 線を電子と陽電子に変換する物質）を挟み込んでいます。これを10数層積み重ねて、タワーモジュールを構成しています。約9000個のSSDが使用され、 γ 線の到来方向を検出する重要な役目を担います。また、カロリメータに当社のSi PINフォトダイオードが使用されています。17) 19)

*旧名: GLAST検出器

[図5-5] FGST検出器に用いられているタワーモジュール

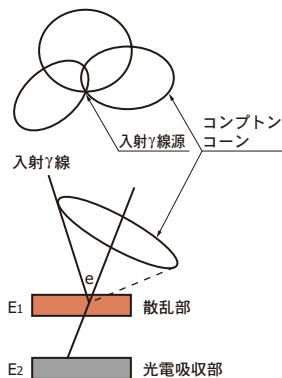


5-3 Si/CdTeコンプトンカメラ

コンプトンカメラは、入射 γ 線のエネルギーと入射方向を測定する検出器です。宇宙から到来する γ 線の観測や、放射性物質の分布の可視化などへの応用が期待されています。

Si/CdTeコンプトンカメラでは、入射 γ 線がコンプトン散乱でSi電子に与えたエネルギー (E_1)、散乱した γ 線のエネルギー (E_2)、コンプトン散乱したSi検出器内の位置、散乱した γ 線が光電吸収されたCdTe内の位置によって入射 γ 線のエネルギー・入射方向を検出します。Si/CdTeコンプトンカメラのSi検出器として、当社製両面SSDが使用されています。18) 21) 22) 23) 24)

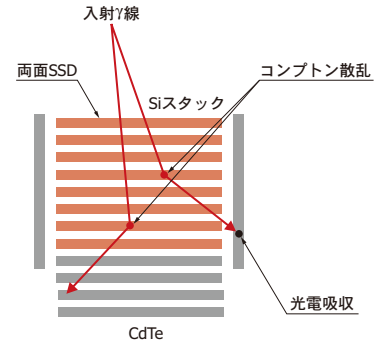
[図5-6] コンプトンカメラ



[提供: 宇宙航空研究開発機構]

KSPDC00863A

[図5-7] Si/CdTeコンプトンカメラの原理



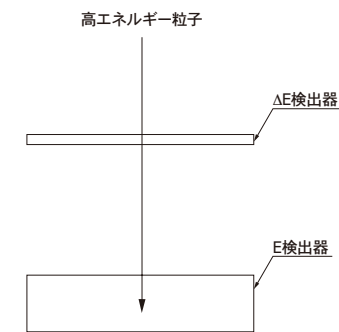
[提供: 宇宙航空研究開発機構]

KSPDC00873A

5-4 ΔE -E検出

粒子識別を行うためには図5-8に示すように透過型検出器である ΔE 検出器および厚い検出器のE検出器を上下に配置する方法が行われます。 ΔE 検出器で比エネルギー損失 (dE/dx) が検出され、 ΔE 検出器とE検出器の出力の合計から粒子の全エネルギー (E) が検出されます。ここで $(dE/dx) \times E$ は粒子固有の値のため、粒子識別が可能になります。また、 ΔE 検出器に2つのPSDを用いることによって、粒子の入射角度および位置の検出が可能となります [図5-9]。7) 8)

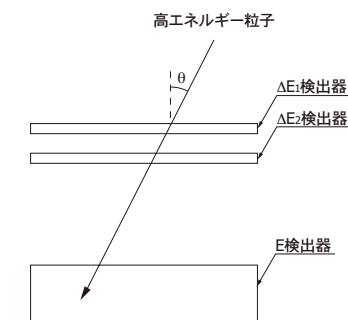
[図5-8] ΔE -E検出器



入射角度が決まっている場合に用いる

KSPDC00733A

[図5-9] ΔE_1 - ΔE_2 -E検出器



入射角度や位置を検出する場合に用いる

KSPDC00743A

■参考文献

- 1) J. B. A. ENGLAND, et al., "CAPACITATIVE CHARGE DIVISION READ-OUT WITH A SILICON STRIP DETECTOR", Nucl. Instr. Meth. 185(1981)43-47
- 2) Tadayoshi DOKE, et al., "A NEW TWO DIMENSIONAL POSITION SENSITIVE DETECTOR WITH A GOOD LINEAR RESPONSE", Nucl. Instr. Meth. A261(1987)605-609
- 3) L. Evensen, et al., "RECENT DEVELOPMENT OF DETECTORS WITH INTEGRATED CAPACITORS AND POLYSILICON RESISTORS", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.35, No.1, Feb. 1988, 428-431
- 4) Alan LITKE, et al., "A SILICON STRIP VERTEX DETECTOR FOR THE MARK II EXPERIMENT AT THE SLAC LINEAR COLLIDER", Nucl. Instr. Meth. A265(1988)93-98
- 5) P. Holl, et al., "A Double-Sided Si Strip Detector with Capacitive Readout and a New Method of Integrated Bias Coupling", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.36, No.1, Feb. 1989, 251-255
- 6) T. YANAGIMACHI, et al., "NEW TWO-DIMENSIONAL POSITION SENSITIVE SILICON DETECTOR WITH GOOD POSITION LINEARITY AND RESOLUTION", Nucl. Instr. Meth. A275(1989)307-314
- 7) T. MOTOBAYASHI, et al., "PARTICLE IDENTIFICATION OF HEAVY IONS WITH LARGE SILICON DETECTORS", Nucl. Instr. Meth. A284(1989)526-528
- 8) N. Hasebe, et al., "Improvement of mass resolution of cosmic ray nuclei using a $\Delta E \times E$ Si detector telescope" Nucl. Instr. Meth. A325(1993)335-342
- 9) E. Barberis, et al., "Capacitances in silicon microstrip detectors", Nucl. Instr. Meth. A342(1994)90-95
- 10) V. Chabaud, et al., "The DELPHI silicon strip microvertex detector with double sided readout", Nucl. Instr. Meth. A368(1996)314-332
- 11) K. Hara, et al., "Prototype Si microstrip sensors for the CDF- II ISL detector", Nucl. Instr. Meth. A435(1999)437-445
- 12) T. Ohsugi, et al., "Design optimization of radiation-hard, double-sided, double-metal, AC-coupled silicon sensors", Nucl. Instr. Meth. A436(1999)272-280
- 13) C. Coldwey, "The ZEUS microvertex detector", Nucl. Instr. Meth. A447(2000)44-45
- 14) Y. Unno, "ATLAS silicon microstrip Semiconductor Tracker (SCT)", Nucl. Instr. Meth. A453(2000)109-120
- 15) T. Bergauer, et al., "Long-term stability test of Si strip sensors for the CMS tracker", Nucl. Instr. Meth. A494(2002)205-209
- 16) Stefan Schael, "The CMS silicon strip detector-mechanical structure and alignment system", Nucl. Instr. Meth. A511(2003)52-57
- 17) Luca Latronico, "The GLAST Large Area Telescope", Nucl. Instr. Meth. A511(2003)68-71
- 18) T. Takahashi, et al., "Hard X-ray and Gamma-Ray Detectors for the NEXT mission", New Astronomy Reviews, 48(2004)309-313
- 19) T. Ohsugi, et al., "Design and properties of the GLAST flight silicon micro-strip sensors", Nucl. Instr. Meth. A541(2005)29-39
- 20) R. Stamen, et al., "Status of the Belle Silicon Vertex Detector", Nucl. Instr. Meth. A541(2005)61-66
- 21) Tadayuki Takahashi, et al., "Application of CdTe for the NeXT mission", Nucl. Instr. Meth. A541(2005)332-341
- 22) Shin Watanabe, et al., "A Si/CdTe Semiconductor Compton Camera", IEEE Transactions on Nuclear Science, 52-5(2005)2045-2051
- 23) S. Takeda, et al., "Development of Double-Sided Silicon Strip Detectors (DSSD) for a Compton Telescope", Nucl. Instr. Meth. A579(2007)859-865
- 24) S. Takeda, et al., "Experimental results of the gamma-ray imaging capability with a Si/CdTe semiconductor Compton camera", IEEE Transactions on Nuclear Science, 56-3(2009)783-790

本資料の記載内容は、令和3年6月現在のものです。

製品の仕様は、改良などのため予告なく変更することがあります。本資料は正確を期するため慎重に作成されたものですが、まれに誤記などによる誤りがある場合があります。本製品を使用する際には、必ず納入仕様書をご用命の上、最新の仕様をご確認ください。

本製品の保証は、納入後1年以内に瑕疵が発見され、かつ弊社に通知された場合、本製品の修理または製品の納入を限度とします。ただし、保証期間内であっても、天災および不適切な使用に起因する損害については、弊社はその責を負いません。

本資料の記載内容について、弊社の許諾なしに転載または複製することを禁じます。

浜松ホトニクス株式会社

www.hamamatsu.com

仙台営業所	〒980-0021	仙台市青葉区中央3-2-1 (青葉通プラザ11階)	TEL (022) 267-0121	FAX (022) 267-0135
筑波営業所	〒305-0817	つくば市研究学園5-12-10 (研究学園スクウェアビル7階)	TEL (029) 848-5080	FAX (029) 855-1135
東京営業所	〒105-0001	東京都港区虎ノ門3-8-21 (虎ノ門33森ビル5階)	TEL (03) 3436-0491	FAX (03) 3433-6997
中部営業所	〒430-8587	浜松市中区砂山町325-6 (日本生命浜松駅前ビル)	TEL (053) 459-1112	FAX (053) 459-1114
大阪営業所	〒541-0052	大阪市中央区安土町2-3-13 (大阪国際ビル10階)	TEL (06) 6271-0441	FAX (06) 6271-0450
西日本営業所	〒812-0013	福岡市博多区博多駅東1-13-6 (いちご博多イーストビル5階)	TEL (092) 482-0390	FAX (092) 482-0550

固体営業推進部 〒435-8558 浜松市東区市野町1126-1 TEL (053) 434-3311 FAX (053) 434-5184