

# HERMESによる Hard Exclusive 生成過程の測定

— 一般化されたパートン分布関数による核子構造の研究 —

東京工業大学理工学研究科基礎物理学専攻

宮地 義之、柴田 利明

miyachi@nucl.phys.titech.ac.jp、shibata@nucl.phys.titech.ac.jp

2003年5月31日

## 1. はじめに

HERMES[1] は 1995 年以来 DESY-HERA 加速器の 27.6 GeV 偏極 (陽) 電子ビームと (非) 偏極核子標的との散乱実験を行っている。本稿では最近の成果である「Hard Exclusive 生成過程」の測定について報告する。

核子のスピンは

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g \quad (1)$$

というように、クォークスピン  $\Delta\Sigma$ 、グルーオンスピン  $\Delta G$ 、それらの軌道角運動量  $L_{q,g}$  の各成分から構成される。「陽子スピンの問題 [2]」として知られるように、1988 年に CERN の EMC 実験により陽子内のクォークスピンの和が陽子スピン 1/2 の約 20% 程度にしか達しないことが分かり [3, 4]、その後世界各地で 10 以上の大型実験によりスピン依存核子構造関数の測定が進められるきっかけとなった。

HERMES は偏極電子ビームと偏極核子標的の深非弾性散乱 (DIS) の inclusive 測定

$$\vec{e} + \vec{N} \rightarrow e' + X \quad (2)$$

により、スピンに依存した核子構造関数の精密測定を行ってきた。しかしこのような方法による「陽子スピンの問題」の検証 [5] のみならず、散乱後に発生するハドロンを同時計測して粒子識別するという方法 (semi-inclusive 測定) も開発してきた。リングイメージングチェレンコフ検出器 (RICH) を用いた 2 ~ 15 GeV/c での  $\pi$ , K 中間子同時計測により核子スピンへの各クォークフレーバー (u, d, s,  $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$ ) の寄与を決定することも行っている。

これらの DIS 測定に加え、近年 HERMES は exclusive に実光子や中間子が生成される「Hard Exclusive 生成過程」の測定に成功した。たとえば図 1 にあるように

$$\vec{e} + N \rightarrow e' + \gamma + N' \quad (3)$$

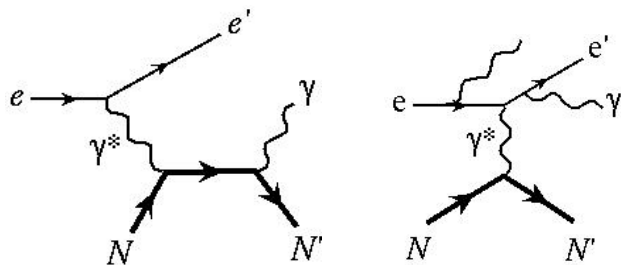


図 1. Deeply Virtual Compton Scattering, DVCS(左) と Bethe-Heitler (右) のダイアグラム。終状態はいずれも散乱電子、実光子、標的核子である。

といった、実光子が exclusive に生成される Deeply Virtual Compton Scattering (DVCS) のビームスピン非対称度測定を世界で初めて行った [6]。このような hard exclusive 生成過程の測定は以下で説明するように、パートン分布関数 (PDF) を一般化した Generalized Parton Distribution function (GPD) の研究につながるものとして期待されている。

ここでは HERMES の hard exclusive 生成過程の測定結果を紹介するとともに、GPD 測定の今後の展望を紹介する。

## 2. Hard Exclusive 生成過程と GPD

### 2.1. Hard Exclusive 生成過程とは何か?

Hard exclusive 生成過程では、散乱電子から放出された仮想光子の 4 元運動量自乗 ( $-Q^2$ ) は大きな値になりうる。仮想光子が十分大きな  $Q^2 (> 1\text{GeV}^2)$  を持つ場合、光子は標的核子内のパートン一つのみと相互作用すると考えられる (Hard 過程)。通常、DIS では散乱されたパートンはそのまま核子外に放出されハドロン化する。Exclusive 生成過程では、散乱されたパートンは粒

子を生成した後再び核子内に戻され、標的核子は散乱後もそのまま核子として存在する。

DVCS や縦偏極したベクトル中間子 ( $\rho$  中間子など) の hard exclusive 生成では、その断面積を (1) 一般化されたパートン分布関数 (GPD)、(2) 仮想光子とパートンの Hard 散乱、(3) 実光子放射や中間子生成 (Distribution Amplitude; DA) の積として扱えることが証明されている [7]。つまり hard exclusive 生成過程の測定結果と QCD による hard 散乱の計算などを組み合わせることにより GPD に関する情報を引き出すことが出来る。中間子生成過程では他の実験結果から DA についての情報を得る必要があるが、DVCS ではその必要がなく、観測される光子から直接的にパートン情報を引き出すことが可能である。

GPD は核子内でのパートン分布を一般化するものである。これは図 2 に示すように、これまで DIS 実験で測定されてきた分布関数と弾性散乱などで測定されてきた核子形状因子とを結びつけるものでもあり、GPD を用いることにより様々な実験結果を包括的に記述できるようになると期待されている。

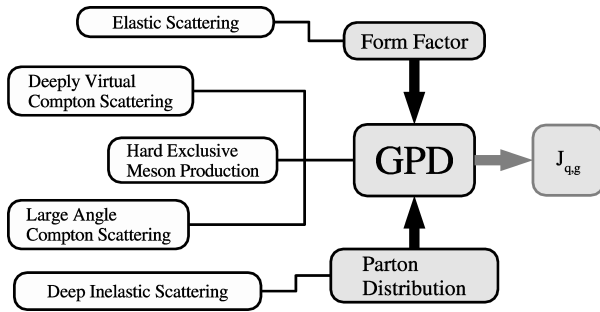


図 2. 一般化されたパートン分布関数とそれに関連する過程

DVCS を例にもう少し詳しく GPD についての紹介をしておこう。入射仮想光子と生成される実光子の 4 元運動量の差はこの反応に関わったパートンを介して核子へと渡される。DIS によるパートン分布関数は、核子の全運動量に対し運動量比  $x_B$  (Bjorken のスケーリング変数) を持つパートンの存在確率として定義されているが、GPD はさらに光子から核子への運動量移行量にも依存する。

図 3 右にあるように、核子との運動量比  $x + \xi$  をもつパートンは入射仮想光子と相互作用し運動量比  $x - \xi$  をもって再び核子に戻される。この  $x$  は  $\xi \rightarrow 0$  で Bjorken スケーリング変数  $x_B$  と等しくなる。表 1 に示されてい

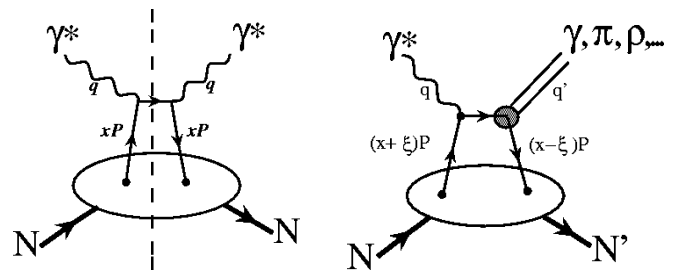


図 3. コンプトン前方散乱 (左) と Hard Exclusive 散乱 (右) のハンドバックダイアグラム。Hard Exclusive 過程で中間子が生成される場合には、丸で示された Distribution Amplitude (DA) の項が含まれる。

るように、このようなパートンの存在確率を記述するものとして、結合の種類とパートンの種類ごとに GPD が定義されている [8]。

表 1

一般化されたパートン分布関数 (GPD)。レプトンカレントとの結合の種類によって 4 種類の GPD が定義されている。対応するパートン分布関数 (PDF) と形状因子を並べて示した [8]。

結合の種類	GPD	PDF	形状因子
ベクトル	$H^q(x, \xi, t)$	$q(x_B)$	$F_1^q(t)$
テンソル	$E^q(x, \xi, t)$		$F_2^q(t)$
軸性ベクトル	$\tilde{H}^q(x, \xi, t)$	$\Delta q(x_B)$	$g_A^q(t)$
擬スカラー	$\tilde{E}^q(x, \xi, t)$		$h_A^q(t)$

DIS の inclusive 測定は仮想光子によるコンプトン前方散乱 (図 3 左、 $\xi \rightarrow 0$ ) に対応し、GPD は  $H^q(x, \xi, t \rightarrow 0) = q(x_B)$ 、 $\tilde{H}^q(x, \xi, t \rightarrow 0) = \Delta q(x_B)$  のようにその極限では通常の分布関数に等しい。他方、GPD を  $x$  について積分すると核子の形状因子が得られる。たとえばベクトル結合の場合は  $\int_{-1}^1 dx \cdot H(x, \xi, t) = F_1(t)$  の様にパウリ形状因子に結びつけられる (他の GPD については表 1 を参照)。

GPD はわれわれにどのような情報をあたえるのだろうか? 形状因子測定は核子内部での電荷分布など、核子の空間的構造を示すものであった。一方 DIS は核子中の一部を独立に取り出し、その運動についての情報を引き出すものである。その両方の特徴を持った GPD は核子構造について、より包括的な情報をもたらすものと期

待されている。

## 2.2. GPD と全角運動量成分測定

これまでの DIS による核子スピン構造の研究は、前方コンプトン散乱の測定によりスピンに依存したパートン分布関数の決定を行なって来た、と考えることができる。一連の実験からこれまでに得られた情報は、 $\Delta\Sigma$  がおよそ 20% になるということであった。また  $\Delta G$  も間接的に導出されたが、その精度はまだ高くない。直接グルーオンが関係する過程を用いた  $\Delta G$  測定については COMPASS(CERN) や RHIC-Spin(BNL) の今後の進展が期待される。

それでは式 (1) の軌道角運動量  $L_{q,g}$  についてはどうだろうか？

QCD の枠組の中でのパートン全角運動量の定式化が X. D. Ji によりなされた [9]。それらが  $t=0$  での GPD の和の 2 次モーメント

$$J_{q,g} = \int dx x \cdot \{H^{q,g}(x, \xi, t) + E^{q,g}(x, \xi, t)\}|_{t=0} \quad (4)$$

に等しくなる事が示され、DVCS 測定によるパートンの角運動量測定の可能性が指摘された [10]。パートンの軌道角運動量成分  $L_{q,g}$  の核子スピンへの寄与については、この GPD による検証が現在知られている限り唯一の現実的な方法である。従って GPD に関連する hard exclusive 生成過程の測定実験は今後の核子構造研究に重要な意味を持っている。

GPD に関しての理論的研究の現状については文献 [8] を参照されたい。次の章では実際に行われている GPD 測定実験の現状を、特に実光子の exclusive 生成 (DVCS) と中間子の exclusive 生成に注目して報告したい。

## 3. HERMES での Hard Exclusive 生成過程の測定

ドイツ・ハンブルグにある DESY 研究所で行われている HERMES は、その特徴の一つとして電子蓄積リング中に設置された内部ガス標的を用いていることが挙げられる。もともとは偏極標的として開発されたものであるが、簡単に偏極・非偏極の切替えが出来るだけでなく標的核種の変更も可能である。HERA 加速器は陽電子もしくは電子を 27.6 GeV に加速出来るため、様々なビーム・標的の組み合わせの実験ができる (図 4)。

散乱された電子や、生成されたハドロンなどは前方粒子検出器で検出される。その運動量分解能はおよそ 1% であり、各種粒子識別検出器の組み合わせにより 98% 以上という高い精度での電子・ハドロン分離が可能になっている。検出器についての詳しい説明は参考文献 [1] を参照されたい。

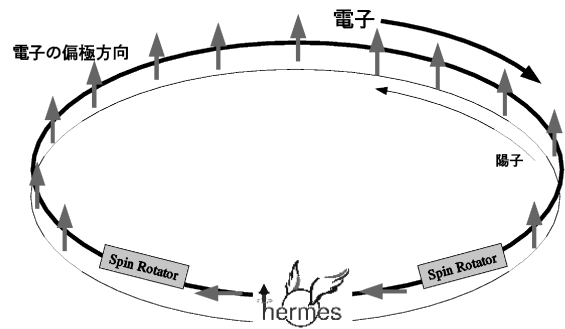


図 4. DESY-HERA 加速器の概念図。HERA は電子と陽子の加速リングを持ち、HERMES は 27.6 GeV 電子ビームと、蓄積リング中に設置された偏極ガス内部標的を用いる。HERMES の前後には進行方向と垂直に偏極した電子スピンを、進行方向に向けるための spin rotator が設置されている。

### 3.1. Deeply Virtual Compton Scattering の測定

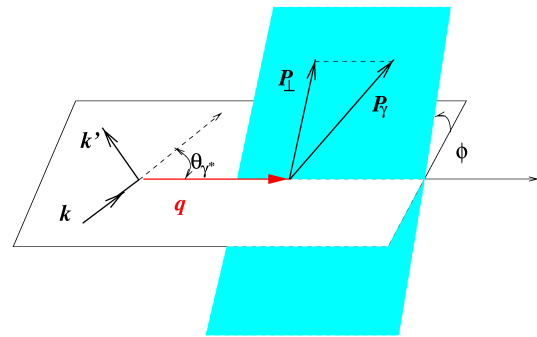


図 5. 生成粒子方位角  $\phi$  は電子ビームの散乱平面と、仮想光子と生成粒子の運動量のなす平面とがなす角として定義される。

HERA の電子・陽子衝突型実験 (H1, ZEUS) では DVCS の断面積が測定された [11, 12]。図 1 にあるように DVCS のバックグラウンドイベントとして Bethe-Heitler 過程があるが、HERMES のエネルギー領域では Bethe-Heitler 過程の断面積が DVCS に対して大きくなるため [13]、HERMES では両者の干渉項を通して GPD を測定する方法をとる。

たとえば非偏極標的を使い、ビームが進行方向に平行/反平行に偏極している場合の断面積非対称度

$$A_{LU}(\phi) = \frac{d\sigma^\uparrow - d\sigma^\downarrow}{d\sigma^\uparrow + d\sigma^\downarrow} \propto \Im(F \cdot \mathcal{H}) \cdot \sin \phi \quad (5)$$

の  $\sin \phi$  成分は Bethe-Heitler (形状因子関連:  $F$ ) と DVCS 散乱振幅 (GPD 関連:  $\mathcal{H}$ ) の干渉項の虚数部に比例する [14]。一方ビーム、標的ともに非偏極とし、電子ビームでの断面積と陽電子ビームでの断面積の非対称度 (ビーム電荷非対称度) を測ると、その  $\cos \phi$  成分が干渉項の実部に比例する [14]。ここで  $\phi$  は図 5 にあるように電子の散乱平面と仮想光子と実光子の運動量からなる平面とがなす角である。

HERMES では水素標的を用いて世界で初のビームスピン非対称度測定を行って来た。重い原子核標的を用いた実験結果も出ているが、ここでは水素標的による測定結果を示す。

図 6 に非偏極水素標的を用いて測定した DVCS のビームスピン非対称度  $A_{LU}(\phi)$  を示す。HERMES では反跳核子の検出はしないが、散乱電子と生成された光子とを測定する。そして欠損質量  $M_X$  を計算し、 $M_X < 1.7 \text{ GeV}/c^2$  という条件により exclusive に光子が生成されたことを同定する。非対称度  $A_{LU}(\phi)$  は最大でおよそ 0.4 とたいへん大きな値が得られた。図 6 の  $A_{LU}(\phi)$  の  $\sin \phi$  成分は  $A_{LU}^{\sin \phi} = -0.23 \pm 0.04 \pm 0.03$  と求められた。図中の破線は測定点に対しての  $\sin \phi$  フィットの結果を示している。Exclusive 領域以外での  $A_{UL}$  は誤差の範囲内で 0 に等しかった。これにより DVCS による GPD 測定の可能性が実証されたといえる。図 6 には、GPD のモデルによる理論的計算値も示されている。

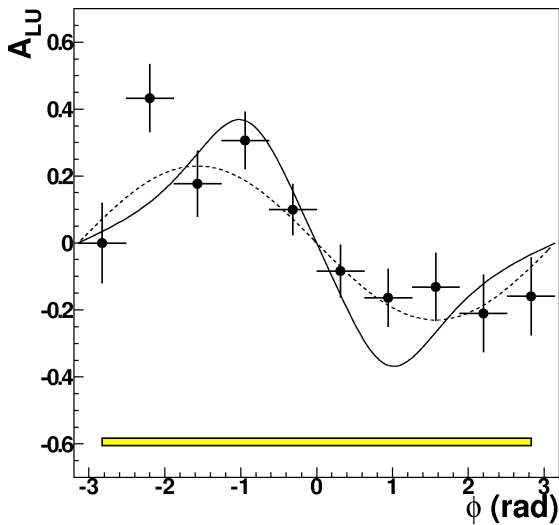


図 6. HERMES で得られた DVCS ビームスピン非対称度 [6]。

HERMES 以外でも同様な実験が行われており、図 7

はアメリカ・ジェファーソン研究所で 4.6 GeV の電子ビームと CLAS 測定器を用いて行われた非対称度測定の結果である。CLAS では  $A_{LU}^{\sin \phi} = 0.202 \pm 0.028 \pm 0.013$  が得られている [15]。HERMES とのビームエネルギーの違いを考慮にいと、これらの結果は誤差の範囲内でよく一致していると思なせることが分かっている。

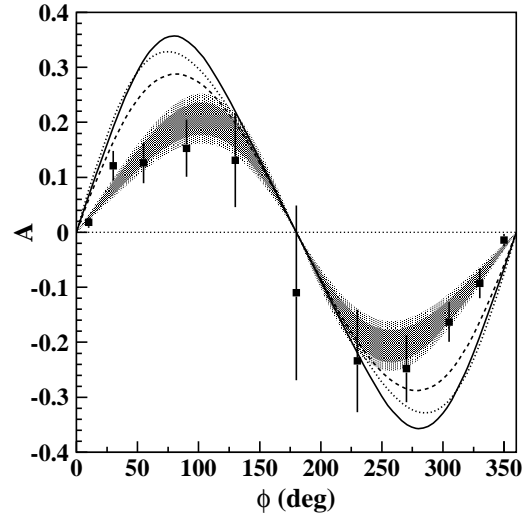


図 7. ジェファーソン研究所の CLAS による DVCS ビームスピン非対称度測定 [15]。帯は測定点に対してのフィットの結果を示しており、内側から統計誤差、系統誤差を示している。いくつかの曲線は GPD の理論的モデルに基づく計算結果を示している。

HERMES、CLAS の実験結果は共に DVCS 測定実験、特に非対称度測定を通じての GPD 検証の可能性を示唆するものである。更に数々の理論的モデルの検証をするため、および GPD の精密測定によって包括的な核子描像を描くためには、GPD の運動学的変数への依存性などを調べる必要がある。そのために HERMES では中間子生成についての測定も行った。

### 3.2. Hard Exclusive 中間子生成過程の測定

中間子生成過程は DVCS とは異なり  $-\xi < x < \xi$  での GPD 測定に対応し、核子から引き出された粒子・反粒子対が中間子を生成すると考えられる。表 2 に示すように中間子の種類により特定の GPD の組合せを選択することが可能になる。たとえばベクトル中間子の生成過程はパートンのスピンの依存しない  $H$  および  $E$  のみに関連し、 $\pi$  などの擬スカラー粒子の生成はスピン依存成分  $\tilde{H}$ 、 $\tilde{E}$  に関連づけられる。更には生成粒子の種

表 2

中間子生成に寄与するパートン分布関数。同様な関係は GPD についても当てはめることが可能であり、クォークフレーバーごとの GPD の抽出が可能になる。

中間子	パートン分布関数の組合せ
$\rho^0$	$2(u + \bar{u}) + (d + \bar{d}) + \frac{3}{4}G$
$\pi^0$	$2(\Delta u - \Delta \bar{u}) + (\Delta d - \Delta \bar{d})$
$\pi^+$	$(2\Delta u - \Delta \bar{u}) - (2\Delta d - \Delta \bar{d})$

類を識別することで、クォークフレーバーごとの GPD 測定を行うことが可能となる [8]。

DVCS によって生成された光子が直接パートン情報を伝えるのに対し、図 3 に示されているように中間子の場合 DA もその生成過程に含まれる。DA については他の実験での測定結果を使うことが出来る。

### 3.2.1. Exclusive ベクトル中間子生成過程

$\rho$  中間子生成に寄与する過程として、クォーク交換によるものとグルーオン交換によるものが挙げられる。NMC、BCDMS、HERMES などではその断面積測定が行われた [16, 17, 18, 19, 20]。GPD を用いた理論的計算では、高エネルギー領域ではグルーオン、低エネルギー領域ではクォークの GPD が実験結果をよく再現した [21]。

### 3.2.2. Exclusive $\pi$ 中間子生成過程

スピンに依存したクォークの分布関数  $\Delta q(x_B)$  について、HERMES は RICH を用いてそのフレーバー (u, d, s) 毎の導出を行っている。同様に GPD を用いた場合、表 2 にあるように、生成された  $\pi$  中間子の情報はスピン依存の GPD に関する情報を含んでおり、 $\pi^-$ 、 $\pi^0$ 、 $\pi^+$  それぞれについて測定することで、フレーバーに関する情報を引き出すことができる。

$\pi$  中間子生成過程では、ビームスピン非対称度ではなく標的スピン非対称度が重要である。参考文献 [8] 等では、仮想光子の進行方向に対して横方向に偏極させた標的を用いた標的スピン非対称度  $A_{UT}(\phi)$  の測定がより直接的に GPD に関連すると指摘されている。

HERMES は 2000 年までビーム進行方向と平行、もしくは反平行に偏極した縦偏極標的を使用してきた。縦偏極標的とはいっても仮想光子の方向に対してはわずかに横方向偏極成分を持っているため、それを利用して縦偏極標的を用いた  $\pi^+$  に対しての  $A_{UL}(\phi)$  の測定が行われた。その結果、DVCS の場合と同様に exclusive 生成領域で  $A_{UL}^{\sin\phi} = -0.18 \pm 0.05 \pm 0.02$  という大きな標的

スピン非対称度の  $\sin\phi$  モーメントが測定された [22]。一方、このような  $A_{UL}^{\sin\phi}$  の導出は exclusive 過程でない一般の DIS の semi-inclusive 測定でも行われており、測定結果  $A_{UL}^{\sin\phi} = 0.022 \pm 0.005 \pm 0.008$  が得られた [23, 24]。すなわち、Hard Exclusive 生成過程からは一桁大きな非対称度が得られた。DIS の運動学的な領域から Hard Exclusive 生成の運動学的領域へ、粒子生成の機構がどのように変化するかも非常に興味深い。

図 8 に測定された  $A_{UL}^{\sin\phi}$  の運動量移行 ( $-t$ ) への依存性を示す。誤差はまだ大きい、 $-t$  が小さくなるにつれて非対称度も小さくなっていく傾向が見える。形状因子が  $t$  の関数であることは知られているが、その類推により  $A_{UL}$  の変数  $t$  への依存性は核子構造の包括的な情報を与えるものとして注目を集めている。

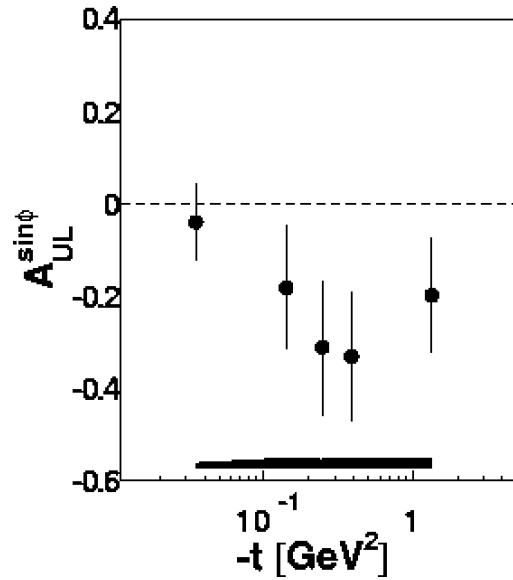


図 8. HERMES で測定された exclusive  $\pi$  生成過程における標的スピン非対称度の  $\sin\phi$  モーメント  $A_{UL}^{\sin\phi}$ 。運動量移行  $-t$  への依存性を示している [22]。

### 3.3. 反跳粒子検出器を用いた実験計画

HERMES では、exclusive 過程の同定は測定した粒子の運動量から欠損質量を導出して行う。標的への運動量移行についても、散乱電子と生成粒子から求める。更に精度を上げた GPD の精密測定を目指し、新しい手法を現在開発している。すなわち、反跳標的核子を検出することを目的とした検出器の建設が進められており、2004 年から 2006 年にはそれを用いた実験が計画されている。図 9 にあるように、反跳粒子検出器は HERMES

のガス標的を囲む形で設置される。この検出器を用いてイベントレベルでの exclusive 過程の同定が可能になるばかりか、運動量移行量  $t$  の決定精度も更に上がると期待されている。

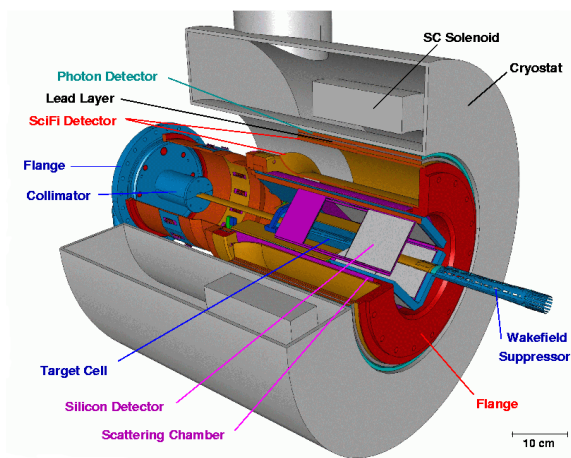


図 9. HERMES で準備が進められている反跳粒子検出器。ガス標的を囲む形で内側から半導体検出器、シンチレーティングファイバ検出器、ソレノイド磁石の組み合わせで構成される。

### 3.4. 最後に

核子構造に関して従来よりも詳しい情報をあたえるものとして「一般化されたパートン分布関数 (GPD)」が近年注目されている。これは核子スピンの構成成分のうち未だに測定されていないパートンの軌道角運動量成分を実験的に求めるものとしても期待されている。これまでのパートン分布関数による記述では核子に対しての運動量比 ( $x_B$ ) という変数による一次元的な理解にのみ留まっていたが、パートンを介しての運動量移行を考慮に入れた GPD は、核子の構造を包括的にわれわれに示してくれることになるだろう。

GPD の関連する物理過程 (DVCS や hard exclusive 中間子生成) に関する測定が最近実現した。HERMES、CLAS での DVCS 非対称度測定は、理論的に予想された方位角依存性を示し、GPD の実験的検証の可能性を示唆するものとなった。HERMES では更に exclusive 中間子生成過程の測定が行われた。

2004 年からの HERMES の反跳粒子検出器を用いた測定は、非対称度の運動量移行依存性をより高い精度で決定できるので、核子スピン構造を GPD の観点から更に詳しく解明するものとして期待される。

### 参考文献

- [1] K. Ackerstaff *et al.* [HERMES Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **417**, 230 (1998).
- [2] 柴田利明, 日本物理学会誌, Vol. 47, No. 6, 455 (1992)
- [3] J. Ashman *et al.* [European Muon Collaboration], Phys. Lett. B **206**, 364 (1988).
- [4] J. Ashman *et al.* [European Muon Collaboration], Nucl. Phys. B **328**, 1 (1989).
- [5] A. Airapetian *et al.* [HERMES Collaboration], Phys. Lett. B **442**, 484 (1998).
- [6] A. Airapetian *et al.* [HERMES Collaboration], Phys. Rev. Lett. **87**, 182001 (2001).
- [7] J. C. Collins and A. Freund, Phys. Rev. D **59**, 074009 (1999).
- [8] K. Goeke, V. Polyakov and M. Vanderhaeghen, Prog. Part. Nucl. Phys. **47**, 401 (2001).
- [9] X. D. Ji, Phys. Rev. Lett. **78**, 610 (1997).
- [10] X. D. Ji, Phys. Rev. D **55**, 7114 (1997).
- [11] P. R. Saull [ZEUS Collaboration], arXiv:hep-ex/0003030.
- [12] C. Adloff *et al.* [H1 Collaboration], Phys. Lett. B **517**, 47 (2001).
- [13] V. A. Korotkov and W. D. Nowak, Eur. Phys. J. C **23**, 455 (2002).
- [14] A. V. Belitsky, D. Muller and A. Kirchner, Nucl. Phys. B **629**, 323 (2002).
- [15] S. Stepanyan *et al.* [CLAS Collaboration], Phys. Rev. Lett. **87**, 182002 (2001).
- [16] M. Arneodo *et al.* [New Muon Collaboration], Nucl. Phys. B **429**, 503 (1994).
- [17] M. R. Adams *et al.* [E665 Collaboration], Z. Phys. C **74**, 237 (1997).
- [18] M. Derrick *et al.* [ZEUS Collaboration], Phys. Lett. B **356**, 601 (1995).
- [19] J. Breitweg *et al.* [ZEUS Collaboration], Eur. Phys. J. C **6**, 603 (1999).
- [20] A. Airapetian *et al.* [HERMES Collaboration], Eur. Phys. J. C **17**, 389 (2000).
- [21] M. Vanderhaeghen, P. A. Guichon and M. Guidal, Phys. Rev. D **60**, 094017 (1999).
- [22] A. Airapetian *et al.* [HERMES Collaboration], Phys. Lett. B **535**, 85 (2002).
- [23] A. Airapetian *et al.* [HERMES Collaboration], Phys. Rev. Lett. **84**, 4047 (2000).
- [24] A. Airapetian *et al.* [HERMES Collaboration], Phys. Lett. B **562**, 182 (2003).