

特集／素粒子物理と物性物理

## 対談：素粒子物理と物性物理

双方をつなぐキーワードたち

米谷 民明・小形 正男

現代物理学の柱となる「素粒子物理」と「物性物理」は、研究対象とする系や計算手法などが異なり、分野の違いが意識されることも少なくありません。しかしながら、以前から両分野の交流は重要な意味を持ち、近年でも量子情報理論、AdS/CFT対応、テンソルネットワークといった双方に関連する概念が発展してきています。このような観点から両分野の結びつきは強くなり、分野間の境界も薄れてきているように感じられます。

今回の特集では、素粒子物理と物性物理それぞれに関連するキーワードに着目し、分野の境界を超えて活躍する概念の重要性と、その概念がもたらす物理学の発展について、第一線で研究されている先生方に解説していただきました。

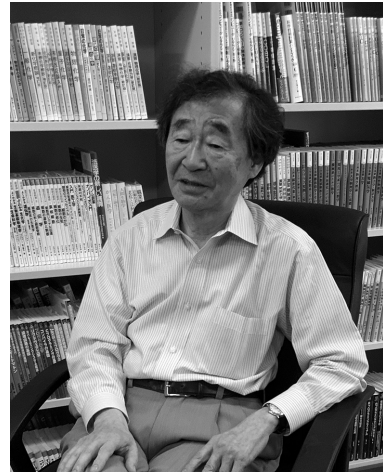
その総論として、両分野を代表し、米谷民明先生（東京大学名誉教授）と小形正男先生（東京大学大学院理学系研究科）のお二人に、素粒子と物性のつながりについて、その歴史から今日に至るまで、また注目のキーワードによる両分野の交流について語り合っていただきました。（編集部）

### 1. 素粒子・物性のつながりの歴史

編集部：まず、素粒子と物性の分野間のつながりについてお聞かせいただきたいと思います。

米谷：まず歴史を少し遡ってみましょう。100年くらい遡ったら、そのときはまだ素粒子物理はなかったわけです。基本的に、すべて物性の物理だった。近代的な意味での物性物理というのをどこにとるのかですが、例えば1910年くらいのデバイの結晶の理論とかは、現代的な物性理論の始まりといえるでしょうか。素粒子のほうは、電子が発見されたのは19世紀の終わり頃で、そしてそのときはまだ電子しかなく、陽子と中性子も知られていなかった。ただ、原子核があるらしいということはわかっていましたけどね。では現代的な素粒子論がどこから始まったのかというと、1934年のフェルミの弱い相互作用の議論と、その次の年の湯川（秀樹）さんの中間子論、そこから始まったというふうに普通いわれています。だけどそれは本当にほんの始まりで、物性物理の歴史に比べたら、まだまだ浅くて、本当のよちよち歩きの段階です。結局、現在の素粒子論へ発展が始まったのは戦後ですね。第二次世界大戦が終わった後くらいから、量子電気力学（QED）がすごい発展をして、くり込み理論が出てきたりして——量子電気力学は、電気磁気の量子論、主に電子と光子の量子論です。それが大成功して、その後は他の相互作用っていうことで、湯川さんが着目した強い相互作用の核力とか、それから、その前に、フェルミが着目した弱い相互作用のベータ崩壊など、そう

いうところにだんだん進んできたわけです。それには、量子電気力学における場の理論の発展が重要であって、その発展をその他の相互作用にも適用しようといういろいろやったわけですね。1950年代——52~53年くらいから、大体 QED の基本的なところは終わって、そこから、他の相互作用を理解しようという動きが始まってきました。でも、その段階では、まだまだ場の理論が全然十分理解されていなくて、特に強い相互作用については QED の摂動論では全然ダメだということがわかり、そして、場の理論の普通の摂動論に代わるような、何かの新しい別な方法はないかということで、いろいろ模索されて、S 行列の理論など、そういうものが出てきた。その頃に場の理論でも、特にくり込み理論の発展を受けて、いろいろな方向に、少しずつだけ発展が始まりました。特にくり込み理論が、最初は、単に無限大を隠してしまうというか——朝永先生は“ホウキ”の理論といていたらしいです(笑)。“放棄する (abandon)” のホウキと、片付けてしまう“箒”と、その両方を兼ねて、そう呼んでいた。そういうふうに最初は、あまりポジティブではなかったけど、1950年代の中間くらいに、ゲルマンとロウ (Gell-Mann-Low) のくり込み群の理論というのが出て、くり込みというものをもう少し深めて考えようっていう最初のきっかけができました。それがさらに発展して、1950年代の終わりくらいから、60年代~70年代の初めまでに、ウィルソンの理論——要するに、物性で臨界現象を調べるのに応用され、そこにもくり込み理論の考え方が使えるということがわかってきました。特に、カダノフの直観的な描像があって、それを発展させて、ウィルソンがくり込み群の体系を作った。それが非常に大きかった。それはあらゆる分野に、要するに、無限にたくさんの自由度のある系に常に使える。無限に自由度があって、かつその相互作用が直接には近くでしか起こらないが、じわじわと伝わって遠くまでいくっていう、場の理論の局所性の考え方が成り立つのであれば、どんな系でも使えるということで、物性系でも使えることがわかってきて、そこから、全



米谷民明氏。

く新しい段階での素粒子物理と物性物理の関係が始まり、現在につながっていると思います。

それともう一つ、素粒子物理と物性物理間の交流で一つの出来事として一番大きかったのは、やっぱり超伝導の BCS 理論だったんですね。1957年頃でしたっけ？

小形：はい、1957年に論文が出版されています。

米谷：それが素粒子の人にも大きく影響した。特にその辺のところに強く影響を受けたのは、南部陽一郎先生ですね。南部さんは超伝導の BCS 機構にすごく魅せられて、それを何とか素粒子に使うということ、BCS 機構とのアナロジーに基づいた素粒子の場の理論——基本的にはその前のハイゼンベルクの非線形フェルミオンの理論なんですけど——それをちょっと違う立場から眺めて、素粒子の質量を BCS 機構でエネルギーギャップが生じることに似せて理解しようという考え方を推し進めた。60年代の初めですね。特に南部さんは超伝導の BCS 理論でゲージ不変性が成り立っていないということにすごく気にして、それを追求したんです。確かに、一見成り立っていないですね、電荷が違った状態が重なっているから。そこでどうやってゲージ不変性が回復するかということに数年悩んで、やっとある程度自分なりに解決したのは、60年なんですね。そこから南部-ゴールドストーン・ボゾンのような考え方も出てきた。ところが、それだけでは超伝導の現象全部は

説明できなくて、結局、ゴールドストーン・ボゾンという質量ゼロの粒子と長距離のクーロン相互作用が混ざると、物性のほうではプラズモンとしてよく知られている現象が起きる。その辺のところを、アンダーソンが引き継いで、結局、プラズマの理論を相対論化したんです。それが1962~63年かな。それからまた2,3年して、それをさらに、もっとちゃんと相対論化するとか、アンダーソンに基本的なアイデアはある程度あるんですけど、きちっとした場の理論の定式ができていなくて、それを定式化したのが、いわゆるヒッグス模型なんです。だから、そこで、素粒子と物性物理のつながりができたというのが、非常に大きな具体例ですね。それと同時に、超伝導の理論は南部さんとは別系統で、ランダウ-ギンツブルグの場の理論的な見方が1950年に出てきて、それをある意味で相対論化したのが、実は、さっき言った1960年の南部さんの論文とほとんど同時に発表された、ゲルマン-レビ (Gell-Mann-Lévy) のモデルです。シグマ模型といわれていますけど、一種の有効場理論といえるものです。実は、南部さんはあまり有効場という考え方が好きではなくて、南部さんと話してもよく言っていたんですけど、「自分は当時、有効場、特にオーダーパラメータとか、そういうものの意味が理解できなかった」ということです。もっと直接ミクロの立場から、BCSのように説明しなくてはならないと。だから、勝手にスカラ場を考えて、それに真空期待値を与えて質量を与えるというのは、あまり、意味がないと考えていた。しかし、実際にはそれはすごく重要で、それがヒッグス模型につながったわけです。ランダウ-ギンツブルグの方向が、ゲルマン-レビの模型に発展して、それがさらにゲージ理論と関連して、ヒッグス……、まあヒッグスだけじゃなくて、何人かの人が独立に1964年頃に場の理論として確立させた。そのときに重要だったのは、やはり南部さんの打ち出した対称性の自発的破れですね。それは、ちゃんと南部さんの模型でも実現しているし、実はゲルマン-レビはその辺のことはあまり強調していないんだけど、よく見るとちゃんと実

現しているんですね。パイオンの質量がゼロの極限では、シグマ粒子の場の真空期待値が、核子に質量を与える。南部さんは、最初このゲルマン-レビの理論を評価はしなかったんですけど、後になってそれが重要ということ認識したそうです。

実は、南部さんのノーベル賞講演を日本語に訳して『素粒子論研究』という雑誌に載せる企画が、いま進んでいまして、僕が頼まれて日本語に訳したんです。そしてそれに長い解題をつけたんです。そういう機会があったから、その辺の論文を全部読み直してみたんです。このように、くり込み群と全く別な意味でも、対称性の自発的破れということを通して、特にBCS理論がきっかけになって、素粒子と物性の間がまた非常に密接に結びついたということがあります。だけど、方法論的な立場からすると、やはりくり込み群が非常に重要で、くり込み群の考えなしには、なかなか両方をつなぐことは難しい。両方同じ言葉で理解できるというのはやはり大きいと思います。僕は1969年に大学院に入って、74年の3月に大学院を卒業したんです。ちょうどその頃は特にくり込み群の理論が非常に発展した時期だったんです。ウィルソンが、ウィルソン-コガット (Wilson-Kogut) という重要なくり込み群のレビューを、1973年頃に書いた。だから、僕は大学院の終わりの頃は、このレビューを一生懸命に読みました。そういうことがあって、僕自身は物性のこともできるだけ勉強しようと思って、自分の研究で取り入れられるところがあれば、できるだけ取り入れるようにしてきました。まあ、あまり大したことはできなかったんだけどね(笑)。

まあ、そういう歴史と、それから僕の個人的な話を交えたら、そんな感じですかね。

小形：僕が今聞いていて追加するとしたら、BCS理論は、元々は朝永先生のメソン (中間子) の理論のアイデアを超伝導の変分関数に使ったということ、シュリーファーが教科書に書いています。

米谷：そういうこともあるかもしれない。

小形：その意味でも、BCS理論は元々原子核とメソンのような素粒子の話と密接につながっている



小形正男氏.

と思う。

米谷：確かに。クーパーは元々素粒子の出身だったんだよね。

小形：ええ、指数関数の肩にボース演算子を乗せて展開すれば、いろんな多重ボソンの和になるという形は、原子核のアイデアだったみたいです。

米谷：うん、うん。朝永さんはその後のプリンストンに滞在中の仕事で、空間1次元ですが、フェルミオン多粒子系をボソンの自由度で扱う有名な論文があります。また、1950年代の中頃に集団運動の理論を明快な朝永さんらしいアイデアで展開していました。でも、多分それがまた原子核に逆輸入されて、原子核のペアリング理論、対相関の理論というのは、たぶんBCSの影響で、また……

小形：もう一回原子核のほうに戻ってくるという。そういうこともあったかもしれないです。

米谷：だから、たぶん有馬（朗人）先生の理論、いわゆるIBM（Interacting Boson Model）ですね、とかも、そこから出てきているわけです。

小形：なるほど。あともう一つ付け加えるとすると、QEDをファインマン、朝永先生、シュヴイengerが完成させて、そのグリーン関数の方法を物性に応用するという、そういう方向性も大変進みました。それが久保（亮五）先生の線形応答理論とかに使われて発展したということがあります。

米谷：そうですね。松原グリーン関数とかもそこからの発見でしょうね。

小形：物性のほうでは、松原先生の虚時間の定式化ですね。これは物性にとってはすごく大きい進歩で、有限温度がダイアグラムで扱えるようになりました。それは、基本はQEDの方法です。

米谷：そこも共通の方法が使われているということですね。もちろん、素粒子の場合は、基本的にはローレンツ不変性という対称性をもとにして、それを満たすように作るんだけど、別にローレンツ不変性が厳密に成り立たなくても、局所的な相互作用であれば、基本的なところは同じなんです。だから両方使えるということですね。

小形：はい。

編集部：今だから素粒子と物性は分かれている感じがしますが、昔はそれほど分かれていなかった？

米谷・小形：うん、だと思いますよ。

小形：例えばファインマンとかも、もちろん物性もいろいろやっていて、ヘリウムとかにも興味があって、いろいろ研究してますよね。

米谷：1953年に日本で理論物理学国際会議というのがあったんですよ。

小形：はい。

米谷：湯川記念館（現在の京都大学基礎物理学研究所）ができる記念もかねた、こけら落としみたいなものになって。最初に東京で開いて、そしてその後京都に移って続けた。そこに当時のほとんどの有名な理論物理学者が世界中から出席してるんです。それで、物性から素粒子まで、あらゆる分野の理論的なことを一同に集まって議論した。ファインマンは、もちろん素粒子の——QEDのほうでも大活躍したんだけど、東京でのトークは、実は液体ヘリウムだった。そのあと京都で素粒子の話に移ったんですけど、そこでも、もちろん彼は活躍するんですよ。湯川先生はその頃、非局所場の理論というのを作ろうとしたんだけど、大変きびしく批判しこき下ろした(笑)。

小形：さっきのBCS理論とかは相転移の平均場近似による理論で、それはあちこちで使うんですが、くり込みというのはそれとは少し違って、臨界現象を平均場を超えて臨界指数を正しく見積もろうとする。

米谷：もっとマイクロなところと結びつけて理解しようというわけですね。

小形：くり込みというのは、物性にとっては、素粒子からきたかなり大きい影響ですよ。くり込み群ができるようになって臨界現象がよくわかるようになったし、物性というか統計力学の臨界現象のほうでカダノフとかがいろいろなことを調べて、それがまた素粒子のほうに戻ったんですよ。その辺がさきほどのウィルソン-コガットですよ……

米谷：そうですね。だから、素粒子のほうではウィルソンが1974年に格子ゲージ理論というのを提案して、要するにゲージ理論なんだけどローレンツ不変性は最初は諦めて、時空自体を格子にして、それでゲージ不変性は正確に保つ。そういうふうにして、ゲージ理論の力学——単に摂動論ではない力学を調べられるということをして70年代に提案したんですよ。それを実行する道具としては、やはりくり込み群が一番有力です。もちろん実際には非常に難しいんですけど、もっと簡単なモデルでなければ、なかなかくり込み群のいろいろなアイデアを具体化するのには難しいのだけど、考え方としては重要です。そして、段々コンピュータが発達して、数値的なくり込み群ということを格子上でやるということがそれから大きく発展していると思います。

小形：くり込みについては、物性の立場だと、基本は結晶格子があるから連続極限を気にしないでいいという立場です。素粒子だと、連続極限をどうやって取るかというのをすごく気にしますが、物性のほうは、その辺はすごく気楽です。

米谷：だけど物性のほうでも、臨界現象の臨界点のごく近くにいったら、まさにそうなるわけですね。

小形：ええ、そうなるとう長距離相関となるのでべたべたになって格子は関係なくなる。

米谷：だから結局、臨界現象の研究と場の理論をきちんと基礎付けるということはほとんど同じことなんですよ。それがはっきり明確に認識されたのは70年代の中頃ですね。それと同時に、臨界現象のいわゆるコリレーション、つまり、相関距離が無限大になるということによって、新たな対称性

——スケール不変性が出てきます。そして、もっと高い共形不変性に一般に成り立ち得る。一方、逆に最初から共形対称性を仮定して、どのような臨界現象があり得るかという分類をしてみるとか、そういう考え方がまた場の理論のほうから出てきて、それがまた物性のほうにも使われたりするわけです。そういう方向も実は80年代から発展した、いわゆる共形場の理論です。それを発展させたのがロシアのグループですね、ポリヤコフがその指導者でした。ロシアのランダウスクールってすごいですよね、もうあらゆる分野を網羅して、ランダウなんか、宇宙物理から、基礎的な数学的な場の理論の構造までカバーしています。だから、そういう伝統があって、そこから出てきた実りの一つが、いわゆる共形場の理論ですね。それは今でもいろいろなところで使われている。最初は時間を含めた2次元だけだったけど、3次元とか4次元でも拡張して使うという議論がされています。もちろん、今回の特集でも取り上げています。今まで話したようなことは、たいてい何らかの形で、今回の解説の中に出てくると思います。

## 2. 現在の両分野のつながりへ

小形：くり込み群の話の次に共形場が出てきて、もう一つの段階の大きな発展だと思います。

米谷：そうですね。両方の考え方が総合されたって感じで、それが70年代から80年代初めくらいです。それで、現在はまた異なる新たな段階で発展しています。現在の場合、とにかく重力やブラックホールとの関係がついてきたということが非常に大きいと思うんですね。

小形：共形場が始まって、少し時間が経ってからAdS/CFT対応が出た？

米谷：それはだいぶ時間差がある。共形場が70年代で、ストリング理論が出てきたのが70年代初めです。僕がちょうど大学院が終わる頃に、ストリング理論が重力と関係があるということを指摘する論文を最初に書いたんですけど、それはすぐには

本当の意味がわからなかった。もちろんストリング理論が、80年代の中頃、いわゆる ToE (Theory of Everything), すべての理論であるということで、統一理論として注目されて発展したんですけど、でもそれは全く素粒子の中の話で、ほとんど物性には影響していないですね。ところが、90年代、ストリング理論がどんどん発展してきて、実はストリング理論というのはストリングだけの理論ではなくて、いわゆる D ブレーンというストリングに限らない、いろんな次元の、粒子のようなものから、1 次元的なもの、2 次元的、3 次元的、……って、そういう広がった物理的な自由度、そういうものも実はストリング理論の大事な要素で、欠かせないものだということが理解された。それを指摘したのがボルチンスキーですね。ストリング理論が重力の理論でもあるということの本当の意義は、D ブレーンが出て初めてわかってきたんです。D ブレーンの重力相互作用と、D ブレーンの重力ではない一見別の相互作用がどのように関係しているのかという問題です。それが実は重力だけで記述することもできるし、重力理論ではない別のゲージ相互作用だけでも記述でき、それは実は同等であるということが90年代の中頃から終わりにかけてわかってきた。それがいわゆる AdS/CFT 対応なんです。だから、25 年くらいかかっているんです。マルダセナが最初は 97 年の 10 月か 11 月に書いた論文がもとになっていて、注目はされていたんだけど、爆発的に発展し出したのが 98 年の 2 月くらいからです。この AdS/CFT 対応が瞬く間に定式化され、ゲージ理論と重力理論の対応が突き出した。そして、一種のデュアリティ（双対性）というか——デュアリティというのは、同じ現象を全然別の考え方、見方で、同等に説明できるというものなんですけど、それはもちろん、いろんな分野でそういうことが現れるんだけど、今までのそういったデュアリティとは全く違うような、もっと遥かに拡大された——大体、次元の違う理論が一致するというわけだから、全く新しい、それも、重力と重力を含まない理論の間にデュアリティが成り立つ、D ブレーンを両方の立場で同

等に記述できる。AdS というのは、重力のほうの、D ブレーンが近づいたときの時空の構造ですね。それが「アンチドジッタースペース」というものになって、一方で、それを別のほうから見たら、実はその D ブレーンの間にストリングが運動していると。そうすると D ブレーンと D ブレーンを結びつけるストリングなので、閉じたストリングではなくて（ストリング理論で重力は閉じた輪のようなストリングから出てくる）、だから、その端っこのあるストリングというのはむしろゲージ理論の拡張という——つまり、エネルギーがストリングの広がりが見えなくなるくらいまで小さいと、共形不変性を持つゲージ理論 (CFT) そのものになる。それがもっと一般化されて、いわゆるゲージ/重力対応というゲージ理論と重力理論というのがいろんなところで同じものとして記述できるということで、全く新しい見方が出てきた。それは元はストリング理論から出てきたんだけど、もしかしたら必ずしもストリング理論そのものでなくても、重力ということだけで、重力自体の特徴かもしれないなということが、段々といろんな人が気づき出して、それで、ストリング理論には埋め込めないような勝手なモデルを考えて、実はそれは重力理論としてはこんなですよってというような例がたくさん出てきた。それで、非常にうまく成功しているのは、いわゆる SYK モデルです。このモデルは全く重力と関係ない、物性のほうのランダムなスピンの相互作用で、それがどういうわけか重力理論と関係があるということが、もう 10 年以上になるかな、わかってきた、現在、たぶん一番ホットなトピックの一つですね、物性理論と素粒子の関係という意味で。

小形：そうですね。SYK モデルはとても特殊なモデルですが、面白い性質をもっています。

米谷：でも、それはまだ始まったばかりで、今後まだ大きく発展していくんではないかという気がします。たぶん、それまでの物性で理解していた方法では、なかなか説明できないようなものを、重力側から説明できるということで、僕はあまりカオスとかよく知らないけど、その SYK モデルとい

うのは、最大限にカオティックというか、そういうダイナミクスになっていて、その時間スケールが温度の逆数に比例するような——それは必ずプランク定数が入るんで完全に量子的な物体なんです。量子的物質というか液体というか。その性質とブラックホールの性質が非常によく似ているんです。そのことに多分、サチデフが最初かどうかわからないけど、何かのきっかけで気が付いて、よく調べてみると、実はブラックホールの理論と対応するということがわかった。ブラックホールでも、まさに時間スケールがブラックホールの持っている温度の逆数で決まるんですね、表面のダイナミクスが。そういうことで実は、AdS/CFT 対応って——もっと一般的にはホログラフィー原理——というものが、実はもっと普遍性があるかもしれないという考え方が出てきた。もちろん、もしかしたら実はそれがストリング理論の中に埋め込まれるからそうなっているかもしれない。それはまだよくわからないんですね。というのは、一般相対論自体は、もし本当に4次元で考えたらくり込み不可能だから、ローエナジーでしか意味がないので。それを本当にきちんと基礎づけようと思うと、やはり今現在としても、ストリング理論しかない。コンシステントに、他の相互作用と統一した形で量子重力を定式化できる唯一の方法はストリング理論なんですね。まあ最終的にはストリングと結びつくかもしれないけれど、今の段階ではそこはまだよくわからない。そういう重力と重力でない系の対応関係が、普通の場合の理論だけではなくて、物性系を含めて、いろいろ探されている。それがまた、量子情報の理論と密接に関係してきている。今回書いてもらった、高柳さんの、笠-高柳公式というのが、その辺の具体的な方法論の一つの重要な道具になっているんです。それが面白いのは、彼自身も書いているように、自分は素粒子の研究者で、笠さんは物性理論の研究者で、たまたまサンタバーバラの理論物理学研究所と一緒にポストドクでいたわけです。そこで一緒に書いた論文が笠-高柳公式。だから、まさに今回のこの特集にふさわしい非常に大きな成果をあげたとい

うものなんです。そういうことがいろいろなところに影響して、現在の発展につながってきていて、今後もどんどん発展していきだろうということですね。

小形：ちょっと話は戻るんですが、僕が研究を始めたのは80年代後半から90年代くらいなんですが、その頃は割と物性と素粒子は離れていて……

米谷：そうでしょうね。

小形：素粒子は多分90年代、ストリングを一生懸命やっていた時期でしょうか。物性のほうは量子ホール効果とか高温超伝導や強相関電子系とか、そういうのを一生懸命やっていて、そういったわけでちょっと離れていたという認識でいいんですよね？

米谷：確かに90年代の前半まではそう。それが、さっき言った後半からだんだん結びつくようになってきた。

小形：AdS/CFT 対応が始まって、そのアイデアを物性に持ち込もうというのは、その頃から始まってですね。

米谷：そう、1990年代の終わりから2000年代にかけて。

小形：AdS/CFT 対応で、物性の強相関が、ブラックホールに持っていけば弱相関となるのでわかるんじゃないか？という話があって、それをうまく物性に取り込もうという理論を、一部の人はやろうとしていたんですが、結局はあまりうまくいかなかったと思います。でも、そういうきっかけがあって、もう一回、物性と素粒子は近づいてきた印象がある。

米谷：そうですね。最初はたとえばホログラフィック・コンダクターとか、ホログラフィック・スーパーコンダクターとか、かな？そういう言葉をたくさん作って、何らかの形で、実際の系ではないんだけど、重力理論の境界のところの議論で、何か物性的なものが出てこないかということ、2000年代の前半からずいぶん探されて、いろいろな議論がある。最近はもっと違った、さっきのSYKモデルのようなものが成功したというわけです。

小形：その辺の導入部みたいなのがあって、段々

と物性の人と素粒子の人との間が慣れてきて、両方わかる人が出てくるようになって——高柳さん、笠さんみたいな人が出てきて、それでうまくいくようになってきたのがこの20年くらい、2000年になってから、そんな雰囲気ですよ。

米谷：そうですね。まあ歴史的に、さっきのファインマンもそうだし、ランダウなんかも代表だけど、ゲルマンだって、50年代の彼が出てきた頃は素粒子の話もしているし、高密度の電子ガス、ゲルマン-ブルックナー（Gell-Mann-Brueckner）理論とか、そういう物性的な話もしているわけです。だから、その辺のところでは、まだそんなに大きく分かれていなかったということですね。

小形：そういう流れはずっとつながっていて、もちろん我々もグリーン関数とか、ファインマン・ダイアグラムみたいなものも使うし、原子核の理論と物性の理論みたいな近いところもある。バックグラウンドとしてずっと素粒子と物性はつながりがあるんだけど、華々しいつながりは、AdS/CFT対応とかブラックホールとの対応で、また最近、ぐーって盛り上がってきている感じですよ。

米谷：非常に盛り上がってる。

小形：ただ、ブラックホールと物性の関係というのは、むしろ情報理論とか量子情報とか、そっちのほうの発展がたぶん大きい。量子情報というと、やはり物性の中でいうと物質が出てこない分野で、まあ、それはそれで面白いんですけど。

米谷：まあ、物質としては、非常に特殊な物質を扱っているというね。

小形：今回の特集でいろいろ読んでみて、ちょっとそういう感じがしました。

米谷：それは、確かにそうですね。

小形：やっぱり、物性としてはブラックホールの物性みたいなのがわかると嬉しいんですけど……今までの議論は、ブラックホールの情報が失われてしまうのをどうやってホーキング放射の中で復活させるかという、そういう方向ですね。

米谷：情報の話が主流ですね。ただ、ブラックホールに電荷を与えて、その周りが実は超伝導状態になるといった議論があって、そういう意味で、それ

を最近では、ホログラフィック・スーパーコンダクターとっているのかな？ 一番最初の頃にいった話は全然そんなものではなくて、非常に形式的だったんですけど。最近はそのではなくて、本当に物理的にブラックホールの周りで超伝導状態が実現できるんじゃないかという議論があります。

小形：ブラックホールの外側？

米谷：外側で。

小形：なるほど。

米谷：ホライズンの辺りのところで起こる電子のペアクリエーションに重力と電磁力が作用する結果としてクーパーペア的なものができて、超伝導になるんじゃないかという話があります。それはもう本当にこの3、4年で出てきた話ですけどね。どのくらい、それが実験的にも検出できるようなものかどうかははっきりしないけど、非常に面白いアイデアだから、もっと具体化するというか、単なる形式的な対応ではなくて、現実にもそういうことが起こるって議論がされているようです。

小形：それはブラックホールの観測でわかる可能性があるということですか。

米谷：わかる可能性があるわけですね。ブラックホールの観測がまた数年前から……

小形：見えるようになりましたからね。

米谷：なので、これからますます精密化するでしょうから、ひょっとしたら、そこでそういうことが確かめられる可能性もあるわけです。

小形：そうすると、物性にかなり近づいて、面白くなってくるということがありますね。

米谷：まさにそう。本当にブラックホールの物性を調べるってような議論がこれから盛んになってくると思います。

### 3. その他の最近のつながりについて

編集部：先ほど逆輸入とお話がありましたが、マヨラナ粒子のような、素粒子で予言されたものが物性で研究されたり。具体的には違うものみたいですけど……



米谷：全く同じものではないです。さっき言ったように、素粒子の立場ではローレンツ不変性が非常に重要で、それを満たすように作らなくてはならないのだけど、物性ではそれは必要ないので。だけど、粒子と反粒子の区別がつかないという意味では同じなわけです。それが超伝導状態で実現できるということがだいぶ前からわかっていて、ただ悲しいのは、それが実験的には証拠として明確なものはないんでしょう？

小形：うーん、直接、粒子と反粒子の区別がつかないという点について実験の証拠を出すのは難しいかもしれない。

米谷：けどまあ、非常に盛んに研究されていますね。それは、もちろん素粒子の立場からしても、そういうのを見つけるっていうのは非常に面白いと思います。素粒子のほうから物性のほうに影響しているというのは非常に面白いし、何らかの形でマヨラナ粒子というあっていい——あっていいものがなぜないのかというのがまた不思議で、物性で実現できるとしたら、それはまず一つの例で、もちろん、素粒子で実現する例もまだ否定はされていない。ニュートリノが質量を持っていて、その解釈としてはマヨラナ粒子という解釈も可能なわけで、別に矛盾はしていない。

小形：物性では、マヨラナ粒子は質量がないものであるように考えている気がします。

米谷：相対論的場の理論の立場では、マヨラナかどうかは質量がゼロでないとき、その質量項の性格に違いが出てきます。質量がもし厳密にゼロなら、この性格の区別が基本的になくなってしまいますので、実際の現象としてマヨラナかどうかは、ほとんど意味がないことになります。

小形：ギャップを持ってしまうたらディラック粒子になってしまうわけではない？

米谷：ディラック粒子になるわけではなくて、質量を持つけど、粒子と反粒子の区別がつかないというのが元々の考えです。マヨラナは、ディラック行列というのは普通は複素数を使って表現されているんだけど、実は全部実数で表現できるということに気が付いて、そしたらディラック方程式

のどこにも複素数が入ってこなくて済むので、場も実数だっていいのではないかというわけです。それが最初なんです。それは確かに正しくて、普通のディラック粒子は、実はマヨラナ粒子がある意味で2つ——要するにディラック場の実数部と虚数部をマヨラナの粒子場だと考えればいいわけです。普通のスカラー場でもそうですね？ 普通の実スカラー場で粒子と反粒子の区別はできないけど、それを2つ組み合わせて複素化してやると、粒子と反粒子の解釈ができる。それと同じように考えることができるので、そういう意味では、マヨラナ粒子のほうが基本的なわけです。質量があるとないにかかわらず、だけど、質量ゼロだったら、それは、スピンの向き方向と運動量の向きの関係が常に決まっています変換できないので、あまりそういうことをいっても、定義の問題になってしまい、意味がなくなります。その場合はディラックでもマヨラナでもなく、むしろ「ワイル粒子」と呼ぶほうがふさわしいんです。

小形：物性では、むしろ、スピンと運動量がカップルしているような状態が新しいことを生むんじゃないかと思って、マヨラナを調べている面があると思います。

米谷：まあ、そこら辺の感覚も、ちょっと違うかもしれない。

小形：ちょっと違いますね(笑)。

米谷：うん、だから、全く同じものではないけども、とにかく粒子と反粒子の区別がつかないということでは共通で、それを共通にマヨラナ粒子と呼んでいるんですね。

小形：超伝導のBCS理論の中には自然にマヨラナ的なものが入っていて、それをマヨラナというかどうかの問題なのかもしれません。

米谷：いかどうかね、言葉の問題かもしれないけど。

小形：ええ、もう一回考え直すことによって新しいことが出るかなという観点で、物性でのマヨラナは調べているんだと思います。

米谷：まあ、基本的にはマヨラナの方程式で記述することはできるわけで、形式的には、だから、そ

それはそうって構わないと思います。実際、そもそも超伝導の場合は、クーパー対がコンデンスしているから、電子と陽電子が物理的には区別がつかないという状況が最初からあるわけですね。

編集部：SYK 模型は、物性から生まれて素粒子でも、というお話がありましたね。

米谷：素粒子で具体的に使うというよりも、やはり AdS/CFT 対応の典型的な、非常に解きやすいモデルが出てきたということです。元の AdS/CFT 対応の一番典型である、AdS<sub>5</sub> と、スーパーヤン-ミルズ理論—— $N = 4$  の超対称性をもつヤン-ミルズ理論というの是非常に綺麗な対応だけど、厳密に解けるわけではない。特に AdS/CFT 対応で、重力側が一般相対論で近似できるときには、ゲージ理論側は相互作用が強くなり、解けない。むしろ解けないところを、重力としてみたら弱いから、そこからいろいろな計算や予言ができる。ヤン-ミルズ理論側で直接計算できなくても、いろんな対称性によって、結合定数によらずに成り立つようなことがいろいろあるので、その点については確かに正しいということが確かめられる。だけど、それはそこにとどまっていた、本当のスーパーヤン-ミルズ理論の 4 次元の強結合の領域というのは、なかなか計算できない。本当に重要な物理量を計算しようとしても、なかなかできない。それが、SYK モデルの場合にはかなり計算できて、重力側でも、もっと簡単である。さっきの AdS っていうのが、要するに重力側が  $1 + 1$  次元の重力理論になるので簡単になる。そういう意味では比べやすいわけですね。だから、これは面白いっていうことで、素粒子の AdS/CFT 対応をやっている人たちがそこに取りついていたっていうことですね。

小形：飛びついたという感じ(笑)？

米谷：むしろ取りついた(笑)。

小形：SYK モデルは、物性のほうからいうとかなり特殊なモデルです。

米谷：特殊だよ。非常に変なモデル(笑)。

小形：粒子がすべて長距離まで相互作用していて、かつ結合定数がランダムという特殊なモデルです。現実的にはそんなことはないだろうと普通思うよ

うなモデルなんですけど、確かにそういうモデルなら解けるといえるのはわかる。だから、物性の立場だと、面白いモデルを考え出すことができ、確かに解けていろいろと計算できるので面白いということになる。でも現実の物質ではなかなか難しいよねっていうのが、物性から見た SYK モデルだったんですけど……

米谷：それを、たまたま、幸か不幸か……(笑)。

小形：AdS/CFT 対応に持ち込むと、ちょうど今までのストリングじゃなくて、違うタイプの解けるモデルみたいなものができたということになるのですね。

米谷：まあ、重力理論であることは重力理論なんだけど、それが、低次元の重力だから、ある意味でほとんど解けてしまうわけですね。だからそれで、実際もっと具体的な比較ができて、ということですね。それで、AdS/CFT 対応の一つの典型例がまた出てきたなということで、みんな喜んだわけです。でもそれ以上、深い意味があるかどうかは、ちょっとわからないですね。

小形：あ、やっぱり、そう思われます？

米谷：この特集でも花田さんが書いたのもあるけど、いろいろ調べるのには確かに大変面白い。だけど現実の重力とはあまり関係ないかもしれないということも書いてありますね。

小形：僕から見ると、素粒子の分野では、量子重力を最後には作りたいと。それで、たぶんストリングでやるのが真っ当なんでしょうけれど、それが難しい段階なので、たまたまポツと、かなり？ ちょっと？ どれくらいかわからないけど(笑)、飛び離れたところにポツと解けるモデルができた感じなんですね。それが SYK モデル。

米谷：ある意味ではどちらも特異点みたいなもので、そこに関係し合う共通の性質があり、ちょうどうまく結びついて仲良しになったという感じですね。

小形：たまにポツポツって解けるモデルがあるんだけど、それでさらに面白いからこれを調べようという感じですね。どなたかが書いていたけど、理解を深めるために研究するみたいな印象です……

米谷：解ける模型ってそうですね。あまり現実にもそのまま役立つなくても、解けるということは、やはりすごく大事なことで、それをいろいろな角度から、舐めるように調べ尽くすと、いろんなことがある意味でわかってきて、そこに実は、解けない模型というか、現実のところにも適用できるようなヒントが隠されていることはよくある。例えば QED でいうと、 $1 + 1$  次元の質量がゼロの電子（ディラック電子）1 個とフォトンが相互作用している模型——シュヴイニングモデルというんですけど、それは、正確に解けるわけですね。そこに実は、ヒッグス模型の、ヒッグスメカニズムもある意味で含まれているともいえるし、あるいは、クォークの閉じ込めの原型みたいなものも含まれている。そういう見方もできて、その意味では役立つんですね。

小形：そういうところは素粒子の面白いところです。たまに、ポツって解けるモデルができたときに、それをみんなでガーンと集中的に研究して、まさに舐めるように（笑）あらゆる角度から調べて……  
米谷：ちょっとずつ拡張してとかね。

小形：それでそこはわかり尽くした上で、実際にやりたい分野の統一的なアイデアを得ようとする。  
米谷：アナロジーで、こういうことが実はもっと高い次元でも成り立つかもしれないなというような、そういうヒントになるというか、そういうことはある。まあ、たぶん、それはいろんな分野でそうで、例えば、統計力学だってまさにイジングモデル——オンサーガーの解となって、それもやはりすごく強く影響している。実は南部さんは、兵隊に取られて、戦争が終わって、東大に戻ってきてからイジングモデルの解法を単純化する論文を書きました。それが自分の最初の成功であったという。だから、そういう意味では、南部さんは統計力学から始まったという感じですね、実際によく知られている仕事としては。もちろん、その間に、もともと素粒子をやりたかったわけだから、いろんな素粒子のこともやってはいるんですけど、やってみたらもう既に他の人がやっていたとかで、あまり成功はしていなかった。一つは、例えば、（東

大）駒場で僕の前任者の小野健一先生という方がいたんです。南部さんと同級生と一緒に QED の仕事もしたけど、実は同じことがもうすでにアメリカでやられていることがわかって論文にできなかったとか、そういうことを南部さんから直接聞きました。素粒子をやりたかったんだけど、なかなかうまくいかなくて、まず物性、統計力学で一つの成功を取めて、それがきっかけで、南部さんはプリンストンに行くことになったみたいなんですね。ちょうど南部さんの解法とほとんど同等な結果を出していた、カウフマンという、アインシュタインの助手をやっていた女性理論物理学者がいて、その人が注目して、それで文通が始まったといっていました。プリンストンに呼ばれて、最初はうまくいかなかったらしいですけど——他の人はみんなうまくいっているのに、自分だけはうまくいかないっていうことを、南部さんの回想には書いてあります。だけど、そこで、いろんな人とつながりができて、シカゴ大学に移って、さっきの超伝導の BCS 理論についてシュリーファアのセミナーで聴いた——1956 年かな、すごく面白い話だと思ったんだけど、何か変だと、ゲージ不変性が成り立っていないからおかしいなということで、シュリーファアにいろいろ問いただしたけどらちがあかなくて。それで、3 年間悩んで、さきほども触れましたがやっとなら 60 年になって、何とか自分で一応納得して論文を書いたって。それが、南部さんのいわゆる、南部-ヨナ=ラシニオモデルにつながるきっかけだった。

小形：たぶん、シュリーファアもゲージ不変性を破っていることにすごく悩んでいたと思います。シュリーファアの超伝導の教科書の、後ろのほうの 3 分の 1 ぐらいは、ゲージ不変性をどのようにして回復するかということ、ずっと書いている感じ。イジングモデルがすごかったのは、本当に相転移というものが、簡単なモデルで実際に起こるんだっていうことを具体的に示したことで……。たぶんこれが初めてなんですね。相転移は、水の転移とかで存在はもちろん知られていたけど、ハミルトニアンを書き下して、それを解くだけで出

るかどうかというのはわからなかった。それが実際に厳密に解けて、相転移するとわかったことがすごい点です。これはとても大事な点なので、そのためイジングモデル的なものを一生懸命調べるのはわかるんですけど……SYK 模型は、別にあれが解けたからといって何かとてつもなく新しいことがわかったわけではない気がします。それが、素粒子のほうでうまく使えて、新しい量子重力につながるモデルになると面白い……

米谷：だけどそれが、本当の意味での量子重力につながるとは私にはとても思えないんです。だから、たまたまゲージ/重力対応の一種の、全く別のタイプの対応もあるなどということがわかったってことで、それがストリング理論の理解に影響するとか、そういうところは全く考えられないですね、今のところ。

小形：なるほど。

米谷：だからそういう意味では、やはり単なる特異点で、物性のほうで SYK モデルを考えたのと同じような意味で、我々から見ても、華々しく論文はたくさん出たは出たんだけど、それが果たして本当の量子重力の発展につながる内容を含んでいるかという、僕は否定的ですね。それをいくら見ても、僕が本当に知りたいと思うことは何一つそこで明らかになっていないし、ストリング理論にはほとんど影響ないと。だから、ストリング理論はまだまだ、非常に難しいものとしてあって、もうずいぶん歴史が長いんだけど、なかなかその突破口が開かないですね。ただ、その周辺をぐるぐる回っているうちに、何か新しい突破口が開いてくる可能性はあって、ひょっとしたらテンソルネットワークとか、そういうこととストリングの自由度が結びついたりすると面白いと思うんだけど、私が見るところではまだ非常に表面的なものなので、なかなかそうっていない。長距離では一応アインシュタインの一般相対論があって、それにつながればいいんだけど、それは短距離に比べて量子効果を入れたときに破綻してしまう。破綻しないちゃんとした理論を作るというのは UV コンプレクションといわれている。その方向への唯

一の重力の意味のあるリーズナブルな UV コンプレクションはストリング理論しか知られていない。だけど、そこに関して本当に何か新しいアイデアが出たかという、全然出ていないですね。まだ本当にその周辺をぐるぐる回っているだけで、なかなかその核心に行けない。核心に行くには、何かやはり新しい方法や概念が必要です。だけど、ぐるぐる回っているうちに、そういうものが偶然出てくるか、誰かが気がつく可能性はあるかもしれないですね。あるいはすでにあるのかもしれないけど、隠れているのに誰も気がついていないということもあるかもしれないし。ちょっと時間がかかるかもしれないなという気もしています。ストリング理論というものの自体がそういうもので重要だってことは、みんな一応認識はしているんだけど、そのストリング理論自体の発展がほとんど止まってしまっている、もう 10 年以上ね。だから、若い人はほとんど忘れていて、もう勉強もしていないって。

小形：そうなんですか……

米谷：だから、ちょっとそれが心配だなと思って。この前、(東大) 駒場で毎年 3 月にある退職記念パーティーに久しぶりに出かけて行って、もっと頑張ってくれて、ストリング理論を忘れるんじゃないよって激励しておきました(笑)。実際、若い人たちにとっては自分たちが勉強して育ってきた頃にはもうほとんど注目されなくなって、ストリング理論が重要だということは言うんだけど、誰も具体的にやっていないから。

小形：東大の本郷では松尾泰先生だけでしょうか。

米谷：どこの研究室でも似たような状況になっているのではないのでしょうか。今はもう 40 代以下の人はストリング理論というものの中身はほとんどわかっていない人が多いのではないかという気がしますね。表面的にさらっと勉強はしたかもしれないけど。実際、またそれをどうやって進めたらいいかあまりにも難しい。今我々が持っている道具ではなかなか、摂動論での S 行列しか計算できないので、それをもっとちゃんとした非摂動的なフォーマリズムにして、S 行列以外の中身まで

もっとよくわかるような、またいろいろ運用できるような、具体的な方法論が発展しないとなかなか難しい。それはいつかは必ず起こると思いますけど。ストリング理論自体が本当に統一理論として最終理論ではなくても、ストリング理論にそういうもののヒントが、いろいろな意味で隠されているということは間違いないです。ちょうど標準模型にはヤン-ミルズ理論が大事であったわけです。でも、ヤン-ミルズ理論というのは1954年に最初に提案されたけど、最初は全然誰も見向きもせず、特にパウリなんか全くナンセンスだと言ってこき下ろした。ヤンが最初、プリンストン高等研究所でその話をしたら、パウリがものすごく怒って、そんなもの意味がないって言って、ヤンががっかりしてしまって、座り込んでもうそれ以上講演できないくらいに、こっぴどく批判されたそうです。そしたらそこでオープンハイマーが助けに入って、まあ、そういうことはあるけど、まあまあってパウリを抑えて、なんとか最後までやってくれと言ってヤンを元気づけてやったっていう話があります(笑)。そのヤン-ミルズ理論も本当に日の目を見るというか、本当に意味がわかるのは、標準模型が出てきてから、ヒッグス機構が出てきてって頃だから、やっぱり10年以上かかったわけです。ストリング理論の場合はもっとかかっている。AdS/CFT対応にいくだけでも重力との関係がわかってから25年かかっているし、それから今度はさらに全く新しい飛躍ができるまで、果たしていつできるのか、僕が生きている間にできるのかどうか知らないけど(笑)、それを見たいとは思いますが、非常に難しいなって気がします。今は、それがどういうふうになっていくかということは想像つかないですね。ものすごいものがあるんだけど、今のところはどうしようもないなという、非常にもどかしい感じです。本当の意味がまだ掴めていないと。AdS/CFT対応でかなりその中身の側面はわかってきたんだけど、それだけで全部ついているわけではない。そこがなかなか突破口が開かないという感じですね。まあ、将来に期待するとしたら、そういうことですけど

ね。そこに、素粒子と物性の間の交流が、何かの役に立てばいいかなと思います。やっぱり、ただ机に座って計算しているだけでは思いつかないようなことも、実際の現象で起こっているかもしれないし、それは物性のほうでも、まだいくらでも出てくるかもしれない。そういうことを期待したいですけどね。それをまた、場の理論——ヤン-ミルズ理論、そしてストリング理論の立場からどう理解するかということから、何か新しい見方とか、方法が出てきたらいいなと思うんです。

#### 4. 研究を進めるうえでの両分野の交流

編集部：例えば、物性の先生から素粒子の先生に、あるいはその反対にといったかたちで、情報交換、意見交換をすることはありますか。

小形：なかなか頻繁にというわけにはいかない……(笑)。

米谷：確かにちょっと研究室の壁があるからね。ただ、僕は駒場にいたけど、駒場はそういう壁があまりないので。同僚だった氷上(忍)さんとは非常に親しくてね。氷上さんは僕とほとんど同年代で、物性・統計力学の専門家、僕は素粒子・場の理論の専門で、ほとんど毎日のように氷上さんがたいてい僕の部屋に来るんです(笑)。それで、しょっちゅう議論をしていましたね。氷上さんがいろいろ面白いことをいうので(笑)。それは非常に、僕にとっては役立っていたし。多分、氷上さんもしょっちゅう僕の部屋に来てくれたから、そういう意味では、何らかの形で役立ったみたいな気がします。

小形：まあ、私の世代はもう年なので、雑用にかまけてそういうインタラクションは少ないんですが、若い世代はたぶんやっていると思いますよ。そこは安心しているというか、大丈夫でしょう。物性といっても分野が広くて、私の感覚では3分の2ぐらいは物質寄りでそっちをやっている忙しい。例えば、第一原理計算などを使って、役に立つ物質に関してマイクロにかなり詳しく調べたり予

言をしたりしています。さらにモデル計算や、また AI や機械学習で新しい物質を探すと、そういうことをやっている分野がかなりあります。それらは実験と密接に情報交換しますし、また応用とつながっています。素粒子の人と話ができそうな分野は、統計力学、量子情報、あとモデル計算みたいなことをしている人たちで、そこだと素粒子に近いので議論できるんですけど、物性は（手で範囲を示し）これぐらいあるとすると、3分の2くらいは応用があって、実際に作った物質を解析してもっと役立つものを探す。それで残りのこっちはもう少し抽象的なモデル計算の分野があって、実際にそういう物質があるかどうかはわからないけど、例えば、解けるモデルを調べるとか、もう少し単純化して、理想化、一般化したモデルをやるとか、それから適宜近似して解くようなグループがあります。それからさらに統計力学のグループがあって、量子情報のようなグループがあります。こっちはもうだ、だんだん素粒子と話を通じるところが出てくると思います。

米谷：もちろん素粒子だって当然そうで、素粒子の現象に特化した解析をする分野の人もいれば——そういう人がかなりの割合を占めていて、半分以上はそういう人ですね。だけど、そういうのではなくて、もちろんストリング理論、それから共形場の理論とか、統計力学的な、格子ゲージ理論とか、シミュレーションとか、理論的解析とかをやっている人は、物性の人とも、多分交流が十分できて、実際やっていると思います。

小形：そうですね。そういう本当に純粋理論のほうでの結びつきもあるし、あとは数値計算上のテクニックとして。

米谷：そうですね、テクニックでは本当に。

小形：テンソルネットワークは、統計力学のグループに近いんですけど、そこは素粒子のほうの数値計算との結合もある。それは割とテクニック上の問題のところがあります。

米谷：同じ方法をそのまま使えるからね。ちょっと対象が違うということもあるけど。

小形：こういう情報交換は是非どんどんやったほ

うがいいんですけど、最初はなかなか言葉が通じなかったりして……まあ、多分、若い人はもう始めていると思います。

米谷：まあ、そういうのを僕らが若い頃でもかなりやっていたし、いろんな研究会などを合同でやったこともあって、80年くらいかその前だったか、鈴木増雄さんや川崎恭治さんたちのグループがやっている研究会に僕らが呼ばれて出かけていっていろいろ交流したり、その逆もあったし。それから例えば、もっと正式な研究会というか、(京都大学)基礎物理学研究所で、91年だったか、長岡洋介さんが所長のときに、統計力学、物性理論、そして低次元の場の理論をやっているような人たちが集まって、湯川シンポジウム(湯川国際セミナー(YKIS))というような研究会がありました。ちょうどそれが最初だったかな——サンタバーバラの理論物理学研究所というのがある——そこの人も来て、合同で交流の研究会をやったことがあります。僕も呼ばれて話をしました。ちょうどその頃は低次元の分岐ポリマーの統計力学みたいな研究もやっていたので、それを話せていうことになった。そこにアンダーソンとか物性からたくさん来てました。素粒子側、場の理論ではこの前ちょうど亡くなったジャッキーフとか、それが非常に面白かった記憶があります。そういうのはあまり最近やっていないのかもしれない。

小形：そうですね。大規模なものは、ちょっと途絶えてしまいました。

米谷：誰か主導する人がいないとね。そうそう、サンタバーバラからはトニー・ジーという中国系の、物性理論と場の理論の中間的なことをずっとやっているジーさんが来て、そういう交流をやりました。すごく盛り上がっていました。

小形：そうですね。あのときは、CFTと1次元の厳密解だとか、対応が始まっていたし。その頃ですよ。

米谷：また、CFTの段階では数学の人との交流もずいぶんやっていました。1980年代の終わり頃かな。数学の、いわゆる無限可積分系とかっていうグループがあって、リーダーは上野健爾さん、三

輪哲二さん，神保道夫さん……

小形：佐藤スクール。

米谷：そうです。そういった人たちが関わっているグループと，何回か研究会を一緒にやったことがありました。

小形：それから，物性のほうは高温超伝導などで忙しくなったし，素粒子のほうはストリングが始まってしまって……

米谷：そうですね。その辺で，それぞれがかなり忙しくなって独立に発展して。それがまた少し結びつき合う可能性が出てきたっていう。

小形：だから，今後また復活して大々的にやったらいいですよ。

米谷：高温超伝導もホログラフィックに理解できないかという議論がされている。まあ，どこまで具体化して実験と関係するかどうかは知らないけど，そういうことをやろうとしている人はいます。

小形：あまり上手くいっていないかもしれません。

編集部：交流は重要で，今後の発展でまたいろいろと……

米谷：重要だし，実際に今までも行われてきていると思うんですよ。

小形：ええ。直接は交流していないけど，いろいろ，特にこういった特集記事などを見ると刺激を受けると思います。

米谷：個人的なレベルでは，それぞれ交流は多いと思います。だから，かなり個人的な環境によると思うんですよ。

小形：そうですね。

米谷：そういうのをやりやすい環境の場合と，やりにくい環境の場合があると。あまり研究室が大きくて，縦割りになっていると，なかなかそれはやりにくいという。若い人はあまり関係ないのだけど。

小形：だから，笠さんとか高柳さんとかの世代は，非常にその辺は自由な気がします。

米谷：やっぱり，彼らはサンタバーバラにいたから，全然分け隔てなく，研究室の違いは全くないから，ちょうど同じくらいの年頃で共同研究が自然にできたのでしょうか。

小形：そう思います。

## 5. 今後注目のキーワード

編集部：今後注目のキーワードなどがあればお聞きしたいのですが。

米谷：まあ，やはりホログラフィー原理でしょうね，素粒子の立場からしたら。物性との交流で今後ますます発展するのは，やはりホログラフィー原理や，ブラックホールとの関係とか，そこはまだまだ未開拓のところがたくさんあるのではないかという気がします。もちろん他にも，もっと基礎的なことでいろいろ残っていることはたくさんあるかもしれないですね。そこをもう少しサーベイしたほうがいいのかも。

小形：物性だと，トポロジカル絶縁体の話がこの10年，20年くらいでかなり進歩しました。いろいろなことが調べられてきたんですけど。それは，素粒子のほうでも使えるなって。

米谷：それはもちろん，アノマリーなどに関係しますね。

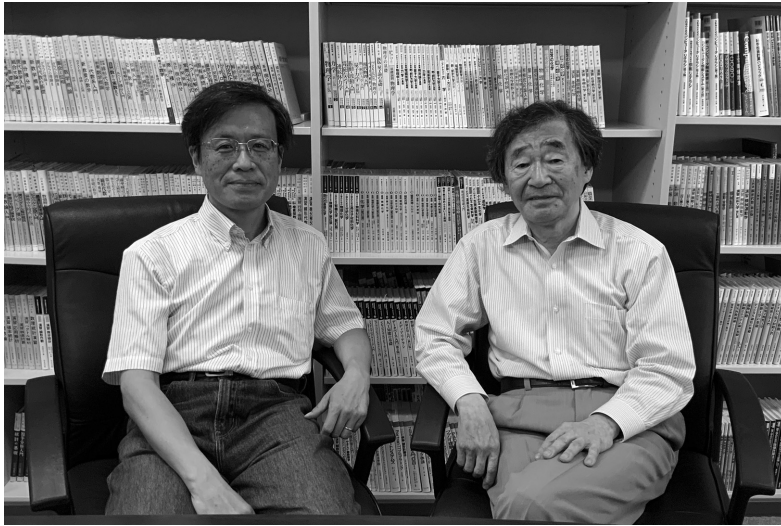
小形：アノマリーは確かに。もう少し何かありそうな気がします。トポロジカル関係と，あとはカイラリティとかもいろいろ実際の物質に関しても始まっている部分があって，それは今後，面白いことが出てくると思うので，その辺と素粒子が結びつく面白いかなど，個人的には思っています。

米谷：それはまだまだ調べ尽くされていないところがあるかもしれないですね，確かに。

## 6. 物理学研究を志す方へのアドバイスとメッセージ

編集部：最後に素粒子や物性といった物理学研究を志す学生さんや，現在研究をしている後進の方たちに向けてのアドバイスやメッセージがあれば，お願いします。

米谷：なかなか，アドバイスって難しいですね。



やっぱり分野や時代で状況も違うし。僕らが若いときには、年取った先生たちは、今の人たちは大変だなんて言っていたんです。昔は、単に素粒子の反応をファインマン・グラフで計算したり、ボルン近似で計算したりすればよかったのに、今はいろいろなことを知らなきゃならないからといって、でも、それは今ますます言えますね。だいたい、物性を理解するのにブラックホールまで知らなきゃならないとはね。だけど、あまりそこは恐れずに、やっぱり自分の疑問を大切に、コツコツやっていくしかないかなという気はします。そこから具体的な目標を少しずつ見つけていって、運が良ければ、それが意外と何か大きなことにつながるかもしれない。そういうのを期待して、コツコツ自分の素朴な疑問を大切にやっていくということ以外にないんじゃないかっていう気がします。

小形：物性だといろいろとやるテーマがあるので目移りしてしまうと思うんですけど、自分のやりたいことを決めて、ある程度そこは集中してやるとよいと思う。それで博士を取って余裕ができたときとかに——もちろん、もっと若いときでもいいんですけど——いろいろな周辺などに目配りをするのがよい。

米谷：そうですね。だんだん広げていけばよくて、最初から全部というのは絶対無理だから。やっぱ

り自分で疑問に思ったことをまず追求することから始めるしかないですね。

小形：1つは自分の専門というのを作らなくてはいけないけど、将来のことを考えておくと、友達でもよいので——素粒子の友達とかを掴まえて——いろいろなことを聞いておくのは大事だし、議論するのが一番大事ではないかなと思います。そうすると、将来、あのときにあんなことを話したなんて。若いときの記憶はよく残るので……積極的にいろんな人と話すのが一番いいんじゃないかと思っています。そのときはあんまり役に立たないかもしれないかな(笑)? 物性の分野にもよるけど、素粒子に近いほうに興味があるならば、素粒子の友達とかといろいろ話を聞いたり議論したりするのが一番いいんじゃないかと思っています。

米谷：さっきも少し言った、南部さんのノーベル賞講演にも書いてあるんだけど、東大は素粒子の専門の先生はいなくて、自分は素粒子をやりたかったんだけど、本当に専門の先生がいなかった。1年先輩に久保亮五さんがいたんだけど、久保さんにすごく影響されていて、南部先生は久保先生をすごく尊敬していた。それで、物性の人と交流したのが、実は自分にとって非常に幸いなことであったということ、ノーベル賞講演の最初のほうに書いてあります。確かに南部さんは、ある意味で統計力学からアイデアを拝借して、自分の素粒子の



花を咲かせたっていう、そういう面がある。さっき言ったイジングモデルの解法にしても、それからBCS理論、南部-ヨナ=ラシニオモデルにしてもね。ストリングはちょっと違って、全然違うところから発展させたわけですけど。

小形：戦争中か戦前くらいですかね？ 物理教室も小さくて、お互いに強い結合があった……

米谷：交流していたわけですね。いつも一緒にやっていた。

小形：理論をやりたい人というのは、素粒子も物性も合わせて、5,6人くらいですかね？

米谷：だと思えます。

小形：みんな勢いがあったんですね、きっと。

米谷：だから、いろいろな先輩の——物性の理論のほうの人から学ぶことができたといっています。それが本当に自分にとって良かったっていう。

小形：かなりハングリー精神があった。戦争中ということもあっただろうし。

米谷：だって、戦争終わってもどこにも行くところがなくて、ちゃんとしたベッドもなかったんで、大学の中に何か板を敷いてそこに寝ていたとか。そしてそうしているうちに、新生で西島和彦先生が入ってきたとか、そういう思い出話をいろいろしていました(笑)。

編集部：最初、大阪市大でしたっけ？

米谷：そうですね、東大の後の最初は、

編集部：市大の本当に建物がボロボロの……

米谷：うん、まだできたばかりで、ちゃんとしたものはなかったわけですね。むしろそれがまた幸いで、ずいぶんしょっちゅう勝手に大学からいなくなって、いろいろなところに遊びに行ったり、勝手にできて良かったと言うんですね(笑)。大阪市立大学で若い人ばかり、素粒子の1番上が南部先生で、その次が山口嘉夫さんとか西島さんとか、そういう東大出身の後輩を引き連れて、大阪市大に素粒子研究室を作ったんですね——1950年頃かな？ そこから、例えば中野-西島-ゲルマンの規則とかがその頃に出てきたわけです。

あまり環境が良すぎるよりも悪いほうがよいのか、ある意味では少し悪いほうが自由にできていい

のかもしれないという気はしますね(笑)。まあ確かに、いろいろな革命的なことをやっている人は、そういう意味ではあまり良い条件でない人が多いですよ。もちろん、非常に良い条件、恵まれた条件で、本当に素晴らしい仕事をしたハイゼンベルクやパウリのように、一番中心地において、一番ふさわしい先生に学んで、本当に世界をリードする仕事をしたという人もいれば、アインシュタインのような人もいるわけで。まあ、ディラックなんかもあまりいい環境ではなかったようです。ディラックは最初、地元のブリストル大学で電気工学の勉強をしていた。ところが、誰かが彼の才能に気がついてケンブリッジ大学に行ってみろといっ、行ったら運良くそこでハイゼンベルクの論文がきたんですね。そのときの指導教官——ファウラーだったかな——のところにハイゼンベルクが最初の行列力学の原稿を送ってきた。そしたら、ファウラーがすぐ、これをちゃんと理解してもののできるのは彼しかいないと考えて——ディラックは実家に帰っていたんですけど、論文を家に送ったんです。それをディラックが勉強して、ポアソンブラケットと交換関係のアナロジーに気がつき、それでディラックの理論が出てきたんですね。だから、そのファウラー先生というのは、よくディラックの才能を見抜いたなと思って、自分でコピーもとらずにそれをそのまますぐにディラックに送ったらしいです(笑)。

編集部：なるほど(笑)。

さて、そろそろ時間となってしまいました。本日は貴重なお話をお聞かせ下さり、ありがとうございました。

米谷：いや、こちらこそ。ありがとうございました。

小形：ありがとうございました。

(2023年6月、千駄ヶ谷サイエンスビルにて)

(よねや・たみあき、東京大学名誉教授)

(おがた・まさお、東京大学大学院理学系研究科)