

解説

放射光と中性子 —相補性, 競争そして共創へ—

野田 幸男

千葉大学理学部*

**Synchrotron Radiation and Neutron Scattering:
From Complementary to Competition and Coadjutant**

Yukio NODA

Faculty of Science, Chiba University

The relation between X-ray scattering and neutron scattering is overviewed. Especially, the meaning of complementary is discussed and the present and future status of the relationship is considered. As an example of the competition between both technique, inelastic scattering experiments to measure excitations in condensed matter is shown.

1. はじめに

放射光と中性子の関係は、時とともに大きく変わろうとしている。高エネルギー物理学研究所が高エネルギー加速器研究機構へと改組され、既存のPF(放射光施設)とKENS(中性子施設)および中間子施設等が一つとなり「物質構造科学研究所」となった。このような状況を踏まえて、第10回放射光学会でシンポジウムが企画された。この小文は、そのときの講演を基にして、少し最近の情勢もいれて書き直したものである。ここでの対象は、X線として実験室の装置と放射光に、中性子として原子炉の使用と加速器によるパルス中性子に限ることとし、かつ、その実験範囲も回折や分光といった分野に限定することとする。他の多くの分野がこれらの実験手段を用いて研究されているが、話は私の専門分野に限らせていただくこととする。また、話としては「放射光と中性子」の力関係のようなものを議論するので、最近の研究やトピックスあるいは解説というものではなく、少し哲学的な与太話になることをお許し願いたい。

少し蛇足に思えるかもしれないが、X線回折の歴史を思い出してもらいたい。Laueが1912年に行った実験は、教科書では「結晶が原子の周期的な構造であることを証明した」となっている。ところが実際は、結晶の性質はそれよりはるか以前、それも、原子や分子の実存がAvogadroにより明確にされるよりはるか前の17世紀にはモデルとして考えられていた。Laueは、当時発見された不思議

なエネルギー流であるX線の本質が1Å程度の電磁波だという仮説をこの実験で証明するのに結晶の性質(これもある意味ではまだ仮説だった)を利用したわけである。ひとたびX線の回折現象という手段が手にはいると後は怒濤のごとくこの分野は発展した。翌年の1913年にはBragg親子が早くもダイヤモンドやその他の物質の構造解析を行っている。また、同時期に、寺田寅彦などの日本の研究者が空間群の考えを構造解析に利用することを考えている。これらのことは、ある意味で歴史の必然である。それ以前の200年以上の科学の蓄積が新しい実験手段の出現を待っており、ひとたび新しい実験手段が見つかる飛躍的に科学が発展する下地がすでに出来ていたからである。中性子の歴史も同じである。1932年ごろChadwickが新粒子として中性子を発見すると、すぐ後の1936年には中性子回折の実験が行われている。これも、de Broglieの物質波の概念が存在し、X線回折の実験が行われていた状況のもと、新しい実験手段が新しい構造研究分野の発展をうながしたわけである。もちろん、道具も何もないうちに最初に実験を行った人達のアイデアには感服するばかりである。

2. 相補性とは

よく、中性子と放射光は相補的であるといわれる。このことは勿論ある意味では永遠に正しいことであるが、なぜこの言葉が強調されるのか、少し皮肉も込めてここでは議

* 千葉大学理学部 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33
TEL 043-290-2749 FAX 043-290-2874 E-mail ynoda@science.s.chiba-u.ac.jp

論してみたい。

1960年代後半に中性子散乱の実験のために世界中で新しい専用の原子炉 (beam reactor) が作られた。この状況は専用の放射光施設が世界中に作られつつある今日と非常に似通っていると言えなくもない。このころ強調されたことのひとつに、X線との関係がある。通常のX線回折ではCoとFeなどの近接した原子を見分けることは非常に難しいが中性子回折では非常に簡単である。あるいは、X線回折で水素Hを見るのはほとんど不可能に近く、水素の位置を決定するだけで博士論文になるような時期があった。水素を見るのは中性子回折の独壇場となった。これらの理由が散乱機構の差に依ることは皆さまよくご存じのことと思う。X線での原子散乱振幅 (Thomson 散乱) は原子核の回りを回っている電子の個数に比例し、Coでは26, Feでは27, Pbでは82, Hでは1である。ところが、中性子の散乱は原子核間の相互作用であり原子番号とは関係しない。実際、Coでは 0.278×10^{-12} cm, Feでは0.954, Pbでは0.942, Hでは -0.374 であり、FeとCoを見分けることは至極簡単であり、Pbの入った物質中のHを見ることも簡単なことである。一方、中性子に対してGdやCdはX線に対するPbのような吸収体であり、同位体を使用しないと通常は実験出来ないことが知られている。 ${}^6\text{Li}$ はその好例であり中性子に対して非常に大きな吸収を示すが、 ${}^7\text{Li}$ では問題ない。これらのことは、当然、X線 (放射光はまだない時代) と中性子の住み分けという考えを産み、相補性という概念が古くから発生していたと考えられる。しかし、実際には違った形での住み分けになっていった。中性子では 1 \AA の波を得るのに81.8 meV程度のエネルギーでよい。これは、X線では12.4 keVのエネルギーとなることと対比される。このことにより、中性子ではmeV程度の非弾性散乱の実験が簡単に行われ、素励起のエネルギーの分散関係が測定可能となる。ラマン散乱がレーザー光という新しい手段で大きく発展したが、波数 q がゼロしか測定できないのに対して中性子ではあらゆる (q, ω) での測定が可能である。このことは、中性子散乱の「優位性」として中性子分野の人達に強く意識されてきた。また、中性子は磁気的なスピンを持ち、そのために物質の磁気的な構造やスピン波の性質が測定可能であり、非常に初期の段階から磁気構造の決定に活躍してきた。このことも、他の測定手段では決して実験出来ないことが中性子散乱では測定できるという「優位性」という考えを産み、このことが強く作用して、「マシンの非常な少ない中性子散乱では、X線では決して出来ないことを中心として行う」という暗黙の了解ができてきたように思われる。このことは、次に述べる現在の状況から未来を考えると非常に示唆的なことと思われる。

実験室でのX線実験も大きく進歩したが、放射光の出現は色々な事情を一変するインパクトを感じさせた。特に、X線の異常散乱の利用や偏光特性の利用と磁気散乱

測定の実現は中性子散乱の得意とする分野に割り込んで来た印象がある。しかしながら、放射光施設が作られた初期のころでは、これらの実験は原理的に可能であるがデモンストレーション的に行われているだけで、中性子分野の人達にとっては、意識の上では「優位性」は揺るぎの無いように思っていた。そのような余裕が、産まれたばかりの放射光の分野に相補性という言葉で暖かい手を差し伸べていたのではというのが私の皮肉を込めた解釈である。しかしながら、強者が弱者に対して「相補的」といっているときから明らかに現在の状況は変わりつつある。そのためには、結局は対等な競争の時代に入る必要があった。次の章では「競争の時代」としてX線と中性子を眺め、最後に相補性の意味を再度眺め直してみたい。

3. 競争から共創の時代へ

現在は、X線と中性子の競争の時代に入りつつあると思われる。実は、X線の中でも、中性子の中でも競争の時代である。この小文の本当の目的に導くために、このことをもう少しあらわにしてみよう。

専用の放射光施設がPFという形で日本では実現し、次にUVSORとHiSORなどの低いエネルギー領域、ARとSPring-8という高いエネルギー領域などと、施設の数と守備範囲が増え、そのうちには各県に放射光施設が出来るのではという勢いである。そのような情勢が視野に入ってくると、「X線の実験は放射光で行い、実験室のX線はその準備のためだけになる」という威勢の良い発言を一部で耳にする。歴史を学び現実を真摯に見つめることがいかに重要かをまずはここでは述べたい。現代文明に対して物質科学がいかに重要な役割を果たしているかは言をまたないであろう。様々な新物質の構造が次々と明らかになりその数は膨大なものである。勿論これらは実験室系のX線装置で行われたものであり、放射光施設の数と実験室系のX線装置の数では比較すること事態が現時点では無意味である。将来にわたっても、各研究室に放射光装置が設置されているというのは、多分無理であろうし、常に「放射光施設」は存在し続けるであろう。数の競争から見るとこれは圧倒的に実験室系の勝利である。勿論、放射光は質の競争でその「優位性」を主張している。しかしながら、この点もうかうかしてはおれない。例えば、XAFSの実験は放射光の出現により大きく発展し、実験室でXAFSの実験をすることは出来ないと思われていた。しかしながら、X線装置のメーカーは貪欲である。実際、実験室でのXAFS実験がある程度の精度で日常的に出来るようになりつつある¹⁾。非常に高度な質を要求しないのなら誰でもいつでもどんなに長時間でもXAFSの実験が実験室で出来るようになると思われる。つまり、数の競争が可能になるわけである。近い将来には、論文にもならないレベルの日常的な物質評価にまで膨大な数のXAFS実験が行われ、非常に難しいXAFS実験は放射光施設で行われるという、

他の分野で見られている当然の住み分けが、XAFS という放射光の専売特許の様な分野にも生じるであろう。このような関係が、実験室の X 線と放射光の X 線の本当によい関係を産み出していく源となると私は考えている。つまり、競争は負のイメージではなく、もっと楽観的に正のイメージで捉えられるべきものであろう。放射光は放射光で、さらに新しい技術を開発して新しい分野を切り開いている。PF はそのような努力をつねに続けて世界の最先端の位置を今でも保ち続けていることは良く知られている。他の例としては、高エネルギー X 線を使用した回折実験がある。SPring-8 で現在立ち上げている装置の一つの目玉は 50 keV の X 線 (波長にして 0.25 Å) を使用することである。あるいは、ヨーロッパでは γ 線回折という言葉が使われていて 100-200 keV の超短波長の X 線で回折実験が行われている。目的は色々有るが、吸収が少ないことによる効果が非常に大きい。そのために、中性子で使った試料をそのまま X 線に使用することも可能である。ちなみに、中性子では Al なら 10 cm 程度の厚みでも簡単に透過する。では、実験室の X 線がこの分野でまったく太刀打ちできないかというそうではない。50 keV の X 線は W の特性 X 線の程度であり、そのような装置を使用した実験が実際に行われている²⁾。将来にわたって、これが特殊な装置のままなのか、どこの実験室でも見かける装置になるかは良く分からないが、明らかに競争可能な実験分野である。通常回折実験で Cu とか Mo の特性線を使用しても良いのなら実験室の X 線でもかなりの部分放射光に太刀打ちできる。じっくり色々ためしながら、いきつ戻りつの実験を行うことが出来る。新しいことは常にこのような試行錯誤から生まれることは皆様常々経験していることと思われる。また、少し分解能がほしいのなら、実験室でも Ge のモノクロメーターでそこそこの実験が出来る。ただし、「そこそこ」と言うのがみそで、もう一步を狙いたければ、放射光施設の申請書を実験の後に書くこととなる。つまり、多くの実験が実験室で可能だが、ここはと言うときに放射光様々となる。何でもかんでも放射光で実験できれば有難いが、現在のビームタイムの状況を考えると、とっておきの手段だと我慢せざるをえない。ただし、これで満足しているのではなく、放射光施設の数がユーザーの需要を上回り、需要と供給の関係が逆転して、「お客様は神様です、どうぞ使いにきてください」と勧誘される日が来ることを夢見ていることも事実である。これが、実験室の X 線と放射光の、現在の、そして多分未来に渡る、関係であろうか。

中性子のなかでもある種の競争がある。それは、原子炉をつかう「定常炉型の実験」と加速器を使い陽子をターゲットに当てて発生させる「パルス型実験」の競争である。日本では、何かとこの両者は張り合ってきた感がある。物質構造科学研究所にある KENS (中性子施設) は世界に先駆けて建設されたパルス中性子施設であり、多く

の実績を示したが、現在は残念ながら世界中にそれ以上の規模の施設が作られたためにトップランナーの位置を譲ってしまっている。現在、次世代施設として JHF 計画が進みつつあり、これが出来たときには再び世界最先端に返り咲くことは間違いなく、多いに期待できるものである。定常炉の方も残念ながら世界最先端の原子炉ではなく、中規模の原子炉が原子力研究所の施設 (JRR3M) として存在して、東大物性研を通して全国大学共同利用に使用されている。ただし、原子炉の世界では中規模といっても、実験するには「そこそこ」良い施設で、世界最先端との違いは一桁もない。装置の工夫しだいでは十分挽回できる値である。この定常炉とパルスの競争は、そもそもの測定原理から説明しなければならぬので、放射光学会誌の記事としてはあまり適切ではないかもしれない、割愛させていただくこととする。ただし、ここでも、両者の技術的な進展とともに良い意味での競争が認識され出して、「相補的」とか「得意分野」とか「優位性」とか、上で議論したことと同じ様な事情にある。また、両者の競争と進歩が多くユーザーを掘り起こし、「ごく少数のユーザーの時代」から「大衆化の時代」に日本の中性子がこの10年ほどで変貌を遂げたことも心にとめておく必要がある。

次に放射光と中性子との関係だが、これらも良い意味で現在競争に近づきつつある。特にこの数年、第3世代の放射光が稼働し出すと、その感が著しい。一つの例として、非弾性散乱による素励起の測定を見てみよう。先にも書いたが、素励起の測定は中性子散乱の独断場だった。しかしながら、現在では、10 meV 程度の分解能で格子振動の分散関係を放射光で測定することが出来る。また、フォノンの状態密度の測定に限れば、その分解能が 0.2 meV 程度となっていることが、今年 SRI '97 で報告されている。これは、想像することさえ出来なかった事態であると正直に言わざるをえない。例として、有名になった DESY での X 線非弾性散乱の実験を以下に示してみよう³⁾。実験は Be と Diamond の単結晶で [001] 方向の LA と LO フォノン測定したものである。モノクロメーターとアナライザーには Si777 が使われ、背面反射の条件 ($\theta=89.96^\circ$) で測定して、エネルギースキャンはアナライザー結晶の温度変化 (1 meV/0.03 K) により行われている。エネルギー分解能は 17 meV である。図 1 に示したのは Diamond での測定例で、 q が $2\pi/a$ まだが LA モードでそれより大きなところは Extended zone で描いた LO モードである。実線は中性子散乱の測定データから計算されていた理論曲線である。つまり、測定そのものはすでに中性子で行われており、これはテスト実験といってもよい。それでは、X 線でこのような測定をする意義はどこにあるのであろうか。狙いの一つは微小結晶であろう。例えばダイヤモンドアンビルセルに入れた試料のフォノンとなれば中性子では出来ない相談である。また、フォノンといえるかはともかく、電子状態のエネルギーレベルの測定

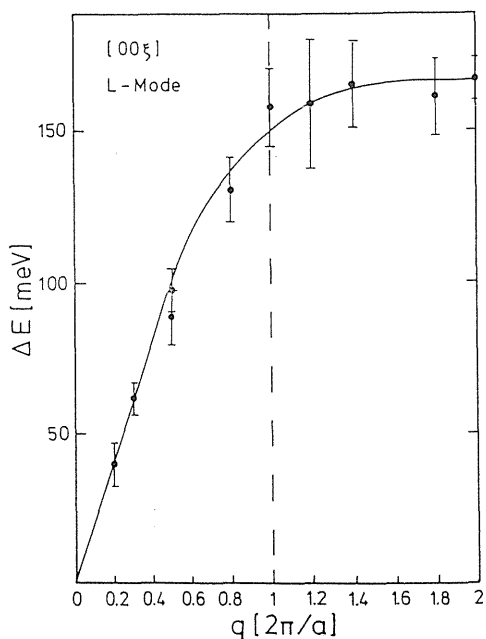


Figure 1. Phonon dispersion relation of diamond measured by inelastic X-ray scattering³⁾. LA and LO phonon along [001].

にも多に可能性があるだろう。しかしながら、実験的な難しさか、それ以降の進展はあまり聞かれないのが現実である。今年のSRI '97では、APSでの実験のまとめの一部としてDiamondの[111]方向のLOフォノンの測定例が示されていた。一方、散乱X線のエネルギー分析をしない実験はここ数年非常に進んでいる。例えば図2に示したのは核共鳴を利用したFeの入った物質でのフォノンの状態密度(DOS)の測定例である⁴⁾。実験はKEK-ARで行われたもので、エネルギー分解能はSi422-Si1064を使い14.4136 keVでの⁵⁷Feの吸収を使って6 meVである。図3に示すのはさらに最近のデータで、水と氷でのDOSと音波の励起(フォノンとは少し違う)の測定例である⁵⁾。実験はESRFで行われ、Si(11, 11, 11)を使用してエネルギー分解能は1.4 meVである。この種の実験がさらに進み、今回のSRI '97での報告によれば、APSで0.2 meVを記録したということである。もう少しこの二種類の実験(分散関係と状態密度)について説明すると、入射するX線のエネルギーを0.2 meV程度の分解能にすることは、強度も含めて可能になったということである。ただし、格子振動の分散関係を測定するためには、エネルギー変化を特別のqの位置で測定しなければいけない。X線の分解能が非常に高いということは裏をかえせばその分解能の中にいる光子の数が少ないことを意味しており、分散関係を高いエネルギー分解能で測定するにはまだまだ強度が弱いことを意味している。中性子での実験はこの点を明確に意識して行われており、不必要には分解能を上げず、いかに分解能を見たい現象に合わせて(可能な限り分解能を落と

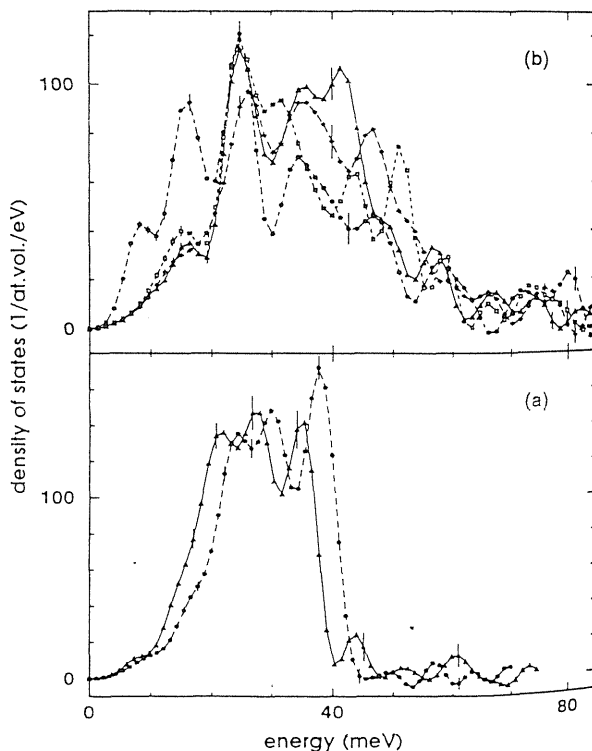
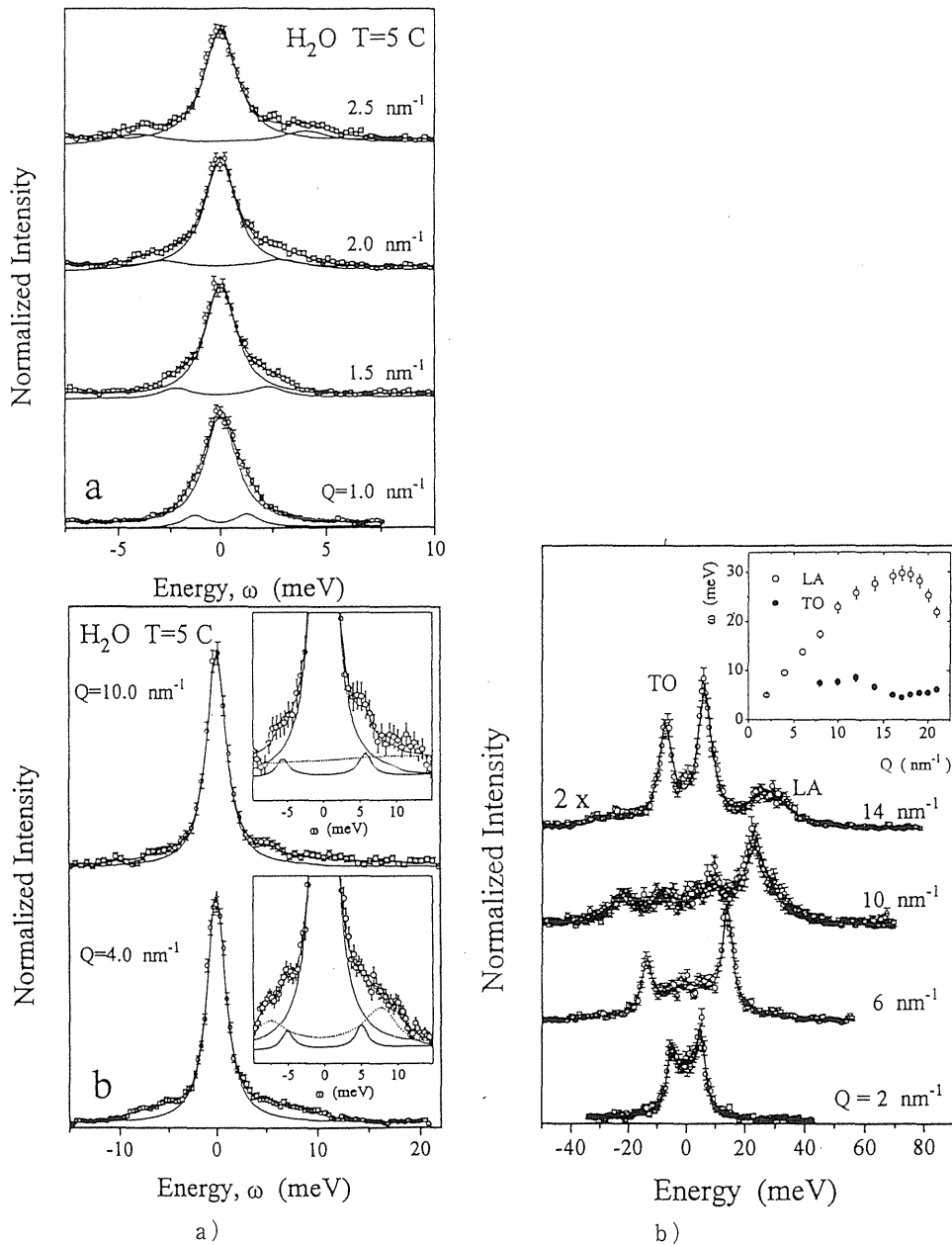


Figure 2. Density of state of phonon (DOS) measured by nuclear resonance⁴⁾. a) for α -Fe and stainless steel, b) for SrFeO_x.

して)強度を稼ぐかが腕の見せ所となっている。原子炉の中性子を使った格子振動の測定では、エネルギーが100 meV程度になるとエネルギー分解能は著しく悪くなるし強度も非常に弱くなる。この点から見ると100 meV程度の高いエネルギーの格子振動測定には放射光を使用したほうが、中性子による測定よりも分解能や強度や試料の大きさの点ですでに勝っているといえる。ただし、これは原子炉の中性子を使ったときという但し書きである。加速器を使ったパルス中性子での実験では高いエネルギー領域でも分解能はそれ程落ちないので、このような分野ではパルス中性子の実験の方が強度と分解能ではるかに有利である。

今度は中性子の立場からもう少し格子振動の実験を見てみよう。少し古いデータであるが、中性子散乱を使った実験結果を図4に示す⁶⁾。これは、KD₃(SeO₃)₂という物質であり、水素結合が重要な役割を果たしている。ブリルアン散乱の実験から、音響フォノンがソフトになることが分かっている。ブリルアン散乱は光散乱の実験であり、GHzのエネルギー分解能があるが見ている素励起の逆格子での位置はq=0とあってよい。一方、中性子ではq=0.01 Å⁻¹から1 Å⁻¹程度の領域を見ることが出来る。中性子の測定はBNLのHFBRで行われた。図4(q=0.15から0.35 Å⁻¹程度の実験)から分かるとおり、中性子散乱の結果はソフト化が起こっていないように見える。これ

Figure 3. Excitations of acoustic waves⁵⁾ in a) water and b) ice.

は勿論見ている q の領域の違いによっており、このようなことは多くの物質で知られていることである。そこで、分解能を極限まで上げて q のより小さい領域まで近づいて実験を行った。結果は図 5 に示されている。明らかに、 $q=0.03 \text{ \AA}^{-1}$ 程度より小さな q の領域ではソフトフォノンが存在しており、何かとの相互作用で、ある q と ω のところではフォノンが異常なダンピングを起こし、それ以上のエネルギーでは音響フォノンは異常を起こしていない。この音響フォノンと相互作用しているのは、水素の運動であることは容易に想像でき、かつ、その運動が光学フォノンでなく緩和的な運動であることもこの実験から分かる。

この物質では、たまたま特異な現象が起こっているエネルギーと q の領域が中性子散乱で見えたが、多くの物質ではさらに高分解能が必要で、実際には実験で見えていない。つまり、広大な q の領域が測定不可能のまま残されている分けである。これに対する測定手段の開発として、メスバウアー散乱が唯一の道と長い間考えてきた。これは、neV 程度のエネルギー分解能があるメスバウアー吸収の実験と X 線回折としての実験を組み合わせたものである。非常に初期の試みは放射性同位元素を使って 1960 年代から文献に現われている。中性子ではこのような実験は無理であり、次世代放射光の重要なテーマとしてあちこちでそ

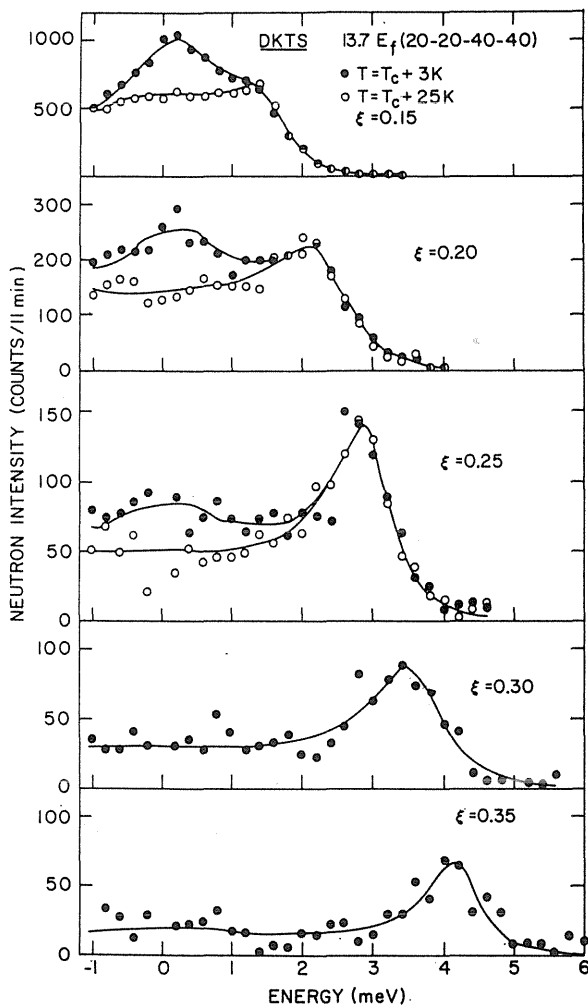


Figure 4. TA phonon of $\text{KD}_3(\text{SeO}_3)_2$ measured with normal resolution⁶⁾. Peaks are non-softened phonon mode.

の期待を文章に書いたことがある。ところが、このような見通しは幸か不幸か見事に外れて、中性子で可能となった。勿論そのためには多くの技術的開発を行った人々の苦勞が存在している。それは、スピンエコーと3軸回折装置の組み合わせによる。測定例を図6-7に示す⁷⁾。実験は東海村にあるJRR3Mで行われた。試料は水素結合型物質の KDCO_3 である。図6には相転移に伴う超格子反射と散漫散乱が示されているが、問題はそのエネルギーである。図7に準弾性散乱とされていた部分のエネルギー幅の温度変化を示している。実験のエネルギー分解能は200 neVであり、きれいに臨界緩和現象が見えている。中性子散乱で100 neVから μeV 程度の分光を行うことは色々な方法でこれまででもすでに可能となっていた。ただし、それまでの技術では、非常に低いエネルギーの中性子を入射して、小角散乱での実験での分光しか出来なかった。分散関係として (q, ω) を測定するのは大分趣味が違っていただけである。それが、新しい測定技術が開発され、通常の q

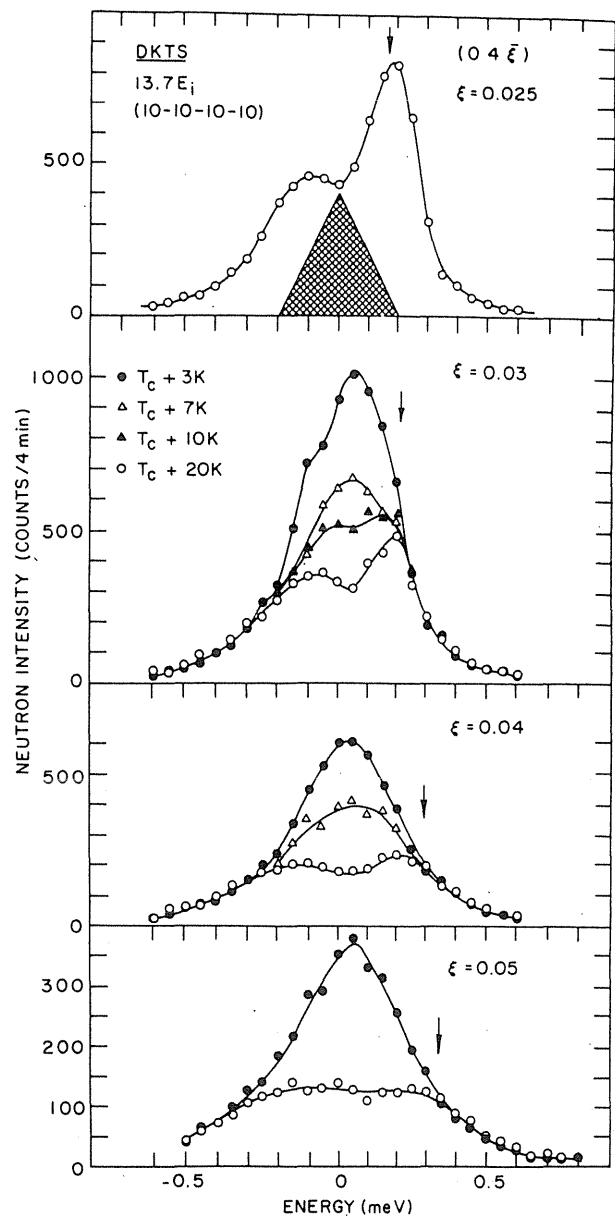


Figure 5. Measurements of TA phonon in $\text{KD}_3(\text{SeO}_3)_2$ with better resolution 0.2 meV⁶⁾. Smaller q region in Fig. 4 is shown. Peaks are soft phonon.

の位置でエネルギー分解能が非常に高い100 neV程度の実験への道が開けたわけである。これら一連の開発競争は、我々の分野から見ると、中性子で実現されようが放射光で実現されようが、多に競争して良いものをどんどん作ってくれば有難いというだけである。それらの技術を使わせてもらい、今まで出来なかったことが飛躍的にできるようになることが重要である。そして、中性子と放射光が互いに意識しあって新しい技術をどんどん開発していくこと、競争により新しい分野を各々が作っていく(共創)ことが、ますます望まれる。これは、ユーザーの単なるわがままであろうか。

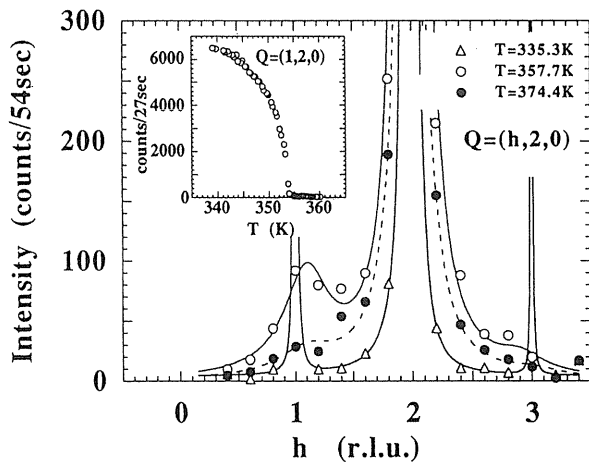


Figure 6. Superlattice reflection and diffuse scattering associated with the phase transition of KDCO_3 ⁷⁾.

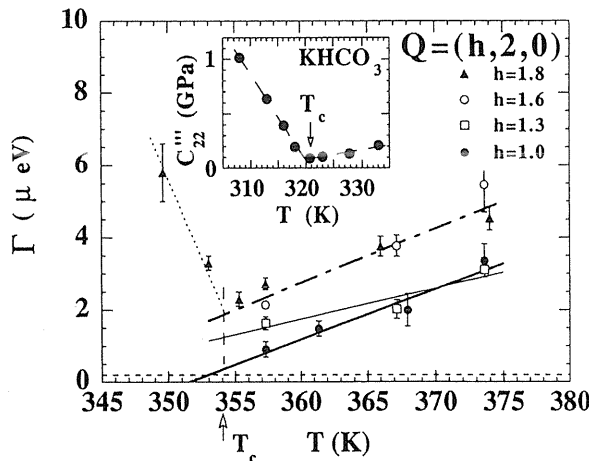


Figure 7. Energy width of quasielastic scattering of KDCO_3 measured with 200 neV resolution, as a function of temperature⁷⁾.

もう一つ例を上げさせていただきたい。それは磁気散乱である。良く言われてきたように、放射光ではLとSを分離することが出来る。個人的興味の観点から言えば（その筋の専門家から叱られることを覚悟の上で）、Lが独立して見えることにそれほどインパクトを今までは感じなかった。磁気散乱の実験は、圧倒的に中性子の方が有利であり、何か例外的な仕方が無いところだけで放射光の出番があるという印象を持っていた。ところが、最近になり、まったく新しい実験が放射光で示され、その考えを変えさせられた。それは、原子の価数に関する電荷揺動とその秩序化の問題であり、古くて新しい構造相転移の課題である。本来は、電子を見る必要がある中で中性子は無力のはずが、電荷の秩序化と原子変位が結合するために、中性子での実験の方が今までは圧倒的に良いデータを出してきた。もちろん、原子変位が軽い酸素原子などで重要になること

が多いという理由にもよる。放射光での構造物性の実験が進んできたことにより、価数揺動を直接異常散乱で見ようという試みが増え、そのみか、電荷の秩序化とスピンの秩序化に伴う軌道角運動量の秩序化が放射光で直接観察されるに至った。最近の大きなトピックスとしてPFで行われた実験を以下に示す^{8,9)}。試料は $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{1.5}\text{MnO}_4$ で、最近色々話題になっている物質の仲間である。実験では Mn^{3+} と Mn^{4+} の異常分散を利用して、まさに放射光の特質を最大限に利用している。図8は中性子により得られたスピンの秩序状態とそれから推定された電荷の秩序パターンおよび軌道の秩序化の様子を模式的に示したものである。これを直接的に放射光の異常分散の利用により証明したのが図9と図10である。図9は電荷秩序に対応した超

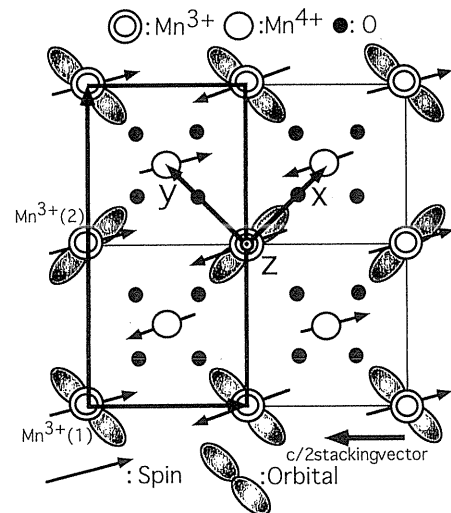


Figure 8. Schematic figure of ordering of spins, charges and orbitals in $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{1.5}\text{MnO}_4$ ^{8,9)}.

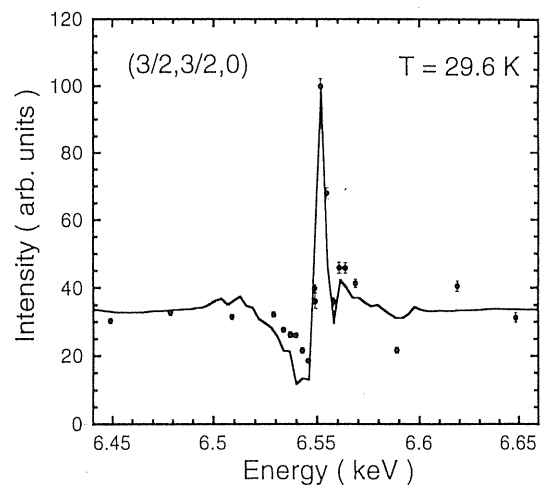


Figure 9. Superlattice reflection associated with the ordering of charge in $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{1.5}\text{MnO}_4$ as a function of X-ray energy^{8,9)}.

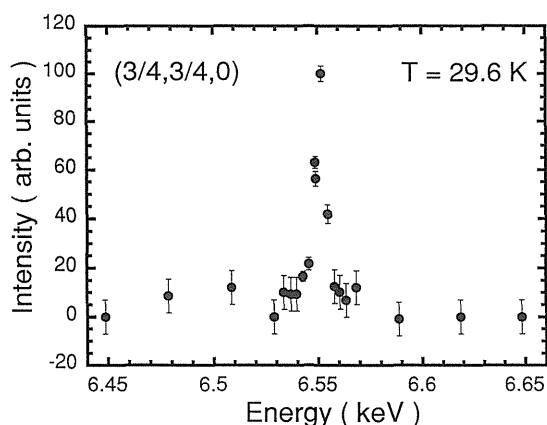


Figure 10. Superlattice reflection associated with the ordering of orbitals in $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{1.5}\text{MnO}_4$ as a function of X-ray energy^{8,9)}.

格子反射の入射 X 線エネルギー依存性である。図10は軌道秩序化に対応して出現する超格子反射の入射 X 線エネルギー依存性である。これら二つの秩序化は同じ温度で発生することもその温度変化からこの実験で明らかになっている。これらの測定は、中性子ではまったく不可能なことであり、まさに相補的（かつ、競争での放射光の勝利）な好例であろう。

最後に、中性子と X 線がそれぞれ独立に必要な例を示そう。水素結合における水素原子の問題である。水素結合系の物質では、軽水素 H を重水素 D に置換するだけで強誘電相転移などの相転移温度が簡単に 100 K 位変わってしまう。その時に、水素の運動が重要であることは簡単に想像できるが、それ以外に構造に微妙な違いが生じることも知られている。これを、幾何学的効果と呼ぶが、水素結合の距離という分かりやすい量はかなり調べられてきた。水素結合の距離は D 塩のほうが H 塩での距離より 0.03 Å 程度かならず長いことが良く知られている。それでは、水素原子には違いが無いのであろうか。これを明確にするためには、水素原子の原子核と電子の分布の詳しい測定が不可欠である。そのためには、中性子で原子核を見て X 線で電子を見る必要がある。一昔ほど前なら、X 線で水素原子の電子分布を議論することなど無謀なことであったが、今では実験室の X 線回折で水素原子を見ることなど 4 年

生の卒業研究でもあたりまえになっている。また、中性子で水素の原子核を見ることも、ビームタイムがもらえれば簡単なことである。問題は、各々どれだけ定量的に議論できるかであり、実験精度の極限までの改善である。なかなか難しいところもあるが、放射光や中性子の技術の進歩はこの分野での可能性に対して大きな期待をもたせてくれている。ここでは詳細は省くが、どうも水素原子は水素結合の場の中ではわずかに分極している（原子核の位置と電子雲の位置の違い）ようであり、少なからずの電子が酸素に流れ出しているようである。この分野の研究は一見地味だが物性物理の重要な情報を提供してくれるはずである。

以上、少し取り止めもなく放射光と中性子の関係を述べたが、多に期待していることは、明日は今日よりも良く、各々の分野で切磋琢磨して進んでいくことである。決して隣の芝生はあおいとか不平を言うだけでなく、貪欲に利用出来るものは利用して科学の進歩を自分流に楽しむことと、そのためにはほんの少しぐらいは自己犠牲もいとわずに皆が良い環境で実験できるように多くの施設ががんばってもらうこと（これはちょっと身勝手かな…私も少しは Spring-8 と JRR3M で貢献しているつもりだが）である。

参考文献

- 1) T. Chibana, K. Yagi, V. A. Shuvaeva, K. Sakaue and H. Terachi: 日本物理学会講演概要集 52-2 (1997) NO 2, p405.
- 2) Y. Kino, K. Yamamoto and F. P. Okamura: 日本物理学会講演概要集 52-2 (1997) NO 2, p134.
- 3) E. Burkel, B. Dorner, Th. Illini and J. Peisl: Rev. Sci. Instrum. 60, 1671 (1989).
- 4) W. Sturhahn, T. S. Toellner, E. E. Alp, Z. Zhang, M. Ando, Y. Yoda, S. Kikuta, M. Seto, C. W. Kimball and B. Dabrowski: Phys. Rev. Lett. 74, 3832 (1995).
- 5) F. Sette, G. Ruocco, M. Krisch, C. Masciovecchio, R. Verbeni and U. Bergmann: Phys. Rev. Lett. 77, 83 (1996).
- 6) Y. Noda, R. Youngblood, G. Shirane and Y. Yamada: J. Phys. Soc. Jpn. 48, 1576 (1980).
- 7) K. Kakurai, T. Sakaguchi, M. Nishi, C. M. E. Zeyen, S. Kashida and Y. Yamada: Phys. Rev. B53, (1996-II) R5974.
- 8) Y. Murakami, H. Kawada, M. Tanaka, H. Kawata, T. Arima, Y. Moritomo and Y. Tokuram: 日本物理学会講演概要集 52-1 (1997) NO 1, p599.
- 9) Y. Murakami, H. Kawada, H. Kawata, M. Tanaka, T. Arima, Y. Moritomo and Y. Tokura: to be published in Phys. Rev. Lett.

きいワード

中性子散乱

中性子はスピンをもつが電荷をもたず、質量は陽子とほぼ同じ粒子である。そのために、物質との相互作用が非常に小さい。波として見たとき、中性子では 1 Å の波を得るのに 81.8 meV 程度のエネルギーでよい。これは、X 線では 12.4 keV のエネルギーとなることと対比される。波としての回

折現象を考える限り、X 線も中性子もまったく同じであり、違いは物質との相互作用に由来する、見ている対象物だけである。そのために、X 線回折とは競合するところも多く、また相補的な関係も多いにある。定常的な中性子を利用する方法とパルス化した中性子を使う方法があるが、ともに原子炉や加速器などの大型施設に付属した装置となる。