

題名	私の人生と科学
Title	My Life in Science
著者名	ジョン・ペンドリー
Author(s)	John Pendry
言語	日本語
行事名	第 39 回(2024)京都賞記念講演
出版者	公益財団法人 稲盛財団
発行日	2025 年 10 月 31 日
開始ページ	1 ページ
終了ページ	17 ページ
URL	https://www.kyotoprize.org/wp-content/uploads/2025/10/2024_pendry_jp.pdf

英語版テキストURL：https://www.kyotoprize.org/wp-content/uploads/2025/10/2024_pendry_en.pdf

私の人生と科学

先ほど申し上げたように、生い立ちについて語るようご依頼をいただきましたので、その話をしたいと思います。まずは出生時から始めましょう。



Fig. 1

私は1943年に英国ランカシャー州にある綿工業の街アシュトン・アンダー・ラインで生まれました。その頃と今とでは隔世の感があります。私の父は航空産業で働いていました。母は公務員として事務の仕事をしていました。当時は戦争の真ただ中です。

一家は祖母と一緒に住んでいました。祖母はペニー・メドウという名の通りで菓子屋を営んでおり、小さな男の子にとってはまさに天国のような環境でした。そのあたりに牧草地(メドウ)があったのは遠い昔のことで、当時はもはや牧草地はほとんどありませんでした。ペニー・メドウは街の主要商店街の一角を成し、中心部に程近い商業地だったのです。通りの店の多くは若い家族が経営しており、私はたくさんの遊び相手やいたずら仲間に恵まれました。その上祖母の店は活発な社交の場でもあったのです。特に毎週土曜日には街での買い物を終えた親戚が店に立ち寄り、祖母や私の母と紅茶を飲みながら話し込んでいったものでした。

このように付き合いが盛んな場所でしたので、幼い頃には探求活動の妨げにもなるほどでしたが、私はそれに慣れ親しんで育ちました。両親が祖母と同居していた背景には、ヒトラーのせいでは当時の物件が市場にあまり出回っていなかったという事情がありました。それでも当時の人々は、戦争による破壊にもかかわらず未来を非常に前向きに捉えており、中でも科学が将来もたらす恩恵に期待を寄せていたのです。そうした中で育った私は幼い頃から科学に夢中で、覚えている限り常に将来は科学者になりたいと思いつけてきました。科学者こそが最高の存在だったのです。

時代は変わってしまいましたが、1940年代には *Lancashire Street* (1951) という絵画に描かれているような状況で暮らしていました。この絵はL・S・ラウリーの作品で、ラウリーはランカシャー州の綿工業を題材とした絵を残した画家です。この絵は当時恐らく数千ポンドで売られたものですが、今ではラウリーの作品の相場からすると数百万ポンドの価値があるのではないのでしょうか。ラウリーは当初私の街の隣にあるオールダムで働いており、私の街の絵も描いています。後になって絵が売れるようになると郊外の丘の中にある小さな村、モットラムへと越してしまいましたが、私が通っていた学校の人にはよくラウリーに話を聞きに行ったものでした。

この絵にはいくつか注目していただきたい点があります。まず煙突からの煙は、この綿紡織工場が操業中であることを示しています。そして後に「スティックメン」と称されるマッチ棒のように細長い人間を描いたことで有名になったラウリーがここで題材としたのは、ランカシャーの人々の日常生活です。ランカシャーの人々は非常に社交的なことで知られており、この絵では私が育った当時のよくある光景が切り取られています。

先ほどもお話ししたように私の故郷の19世紀における繁栄を支えたのは綿工業でした。私が子どもだった頃の街の光景の中心を成していたのも、巨大な綿紡織工場群です。その一つがインペリアル・コットン・ミルで、正確な所在地は覚えておりませんが、私の家から近かったのは確かです。煙突があるこの工場全体の動力源は一基の蒸気機関で、地元で採掘された石炭が燃料でした。石炭は当時「黒いダイヤモンド」と呼ばれ、今でこそあまり評判は良くありませんが、これらの紡織工場は石炭で動いていたのです。一基の蒸気機関が一連のベルトを動かし、それが工場の機械を動かす仕組みで、極めて大きな騒音を発する機械でした。綿花は米テキサス州ガルベストン等から輸入したものがリバプール経由で街に運ばれ、それを糸に紡いで織った後に、世界中に輸出していたのです。これらの綿紡織工場はもはや存在せず、歴史の1ページとなってしまいました。

私がとても恵まれていたのは、両親と祖母のおかげで、愛情あふれる安定した環境で育ったことです。家は広くなかったためいささか混沌とした状況ではありましたが、台所が付いた居間1部屋に全員が暮らしていて、そこが生活の中心だったのです。来客が絶えないだけでなく、店にはお客さんもやって来ますし、父は父で音階で歌の練習をしていました。私の化学実験については言うまでもありません。一族はとても強い絆で結ばれており、特に私の母の側がそうでした。私の祖母は子どもが10代の頃に夫に先立たれ、私の母とおじを1人で育て上げたのです。

おじのシドは私の成長に大きな影響を与えた人物の1人です。戦時中は海軍本部に勤め、その後は教師として働いていました。私の質問にいつでも嫌な顔一つせず答えてくれたものです。優しい人でした。おじは特に上手であったわけではありませんが、ピアノをたしなんでいました。私はある時病気で床に就いていて他に何もすることがない折に、おじが弾くピアノを耳にしました。するとまたもやそのとりこになってしまい、両親にピアノを習わせてほしいと頼んだのです。残念ながらとりわけ上達したわけではありませんが、それでも昔から言うように「やる価値のあることは失敗したとしても価値がある」と思っています。

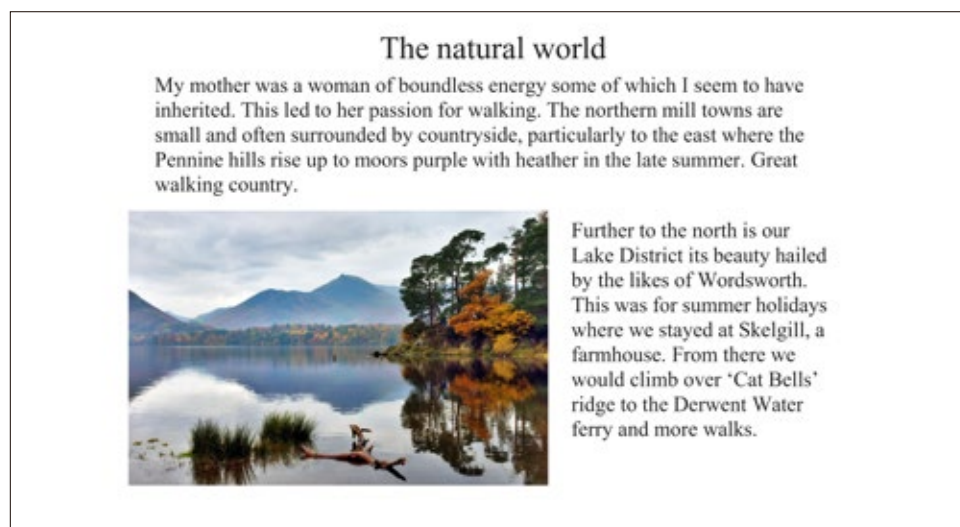


Fig. 2

私の母は大変よく歩く、活力に満ちた人でした。母の活力の少しでも私にあれば願ったものですが、無事受け継いだと思います。母は散歩が趣味で、郊外を好んで歩いていました。

イングランド北部にあった紡織の街は皆小規模で、アシュトンも人口5万人ほどだったと記憶しています。ですから郊外に出るのは徒歩であっても難しいことではありませんでした。特にアシュトンがあるランカシャー州東部の人々は、ペナイン山脈へと足を延ばしたものです。晩夏には紫のヘザー

の花で覆われる美しい場所でした。さらに北に行くと湖水地方があり、私たち家族は休日にはよくそこにあるスケルギルという名の小さな農場を訪れたものです。この写真はダーウェント湖のフライアーズ・クラッグで家族がキャット・ベルズ山に登った後にさらに歩を進めて向かった場所です (Fig. 2)。

それでは時間の関係もありますので、学校や学生時代へと話を進めましょう。

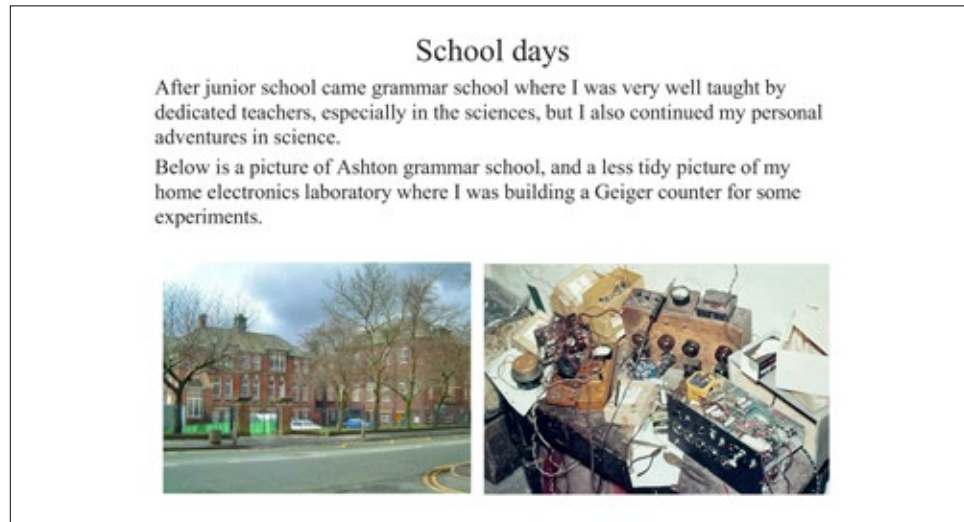


Fig. 3

画像左 : Photo provided by Sandra Martin

とても幸運なことに、グラマースクールでは優れた教師に恵まれ、素晴らしい指導をしていただきました。とはいえ学業と並行して私は自身の趣味にも熱中していました。ここでお見せするのは私の作業台で、非常に散らかっています (Fig. 3右)。この時は放射線測定器を作っていました。これが測定器で、チューブはどこか別の所にあります。これで分かるように、私は電子デバイスの類いに没頭していました。当時は真空管の時代でトランジスタが市場に登場するのはこれより後になります。

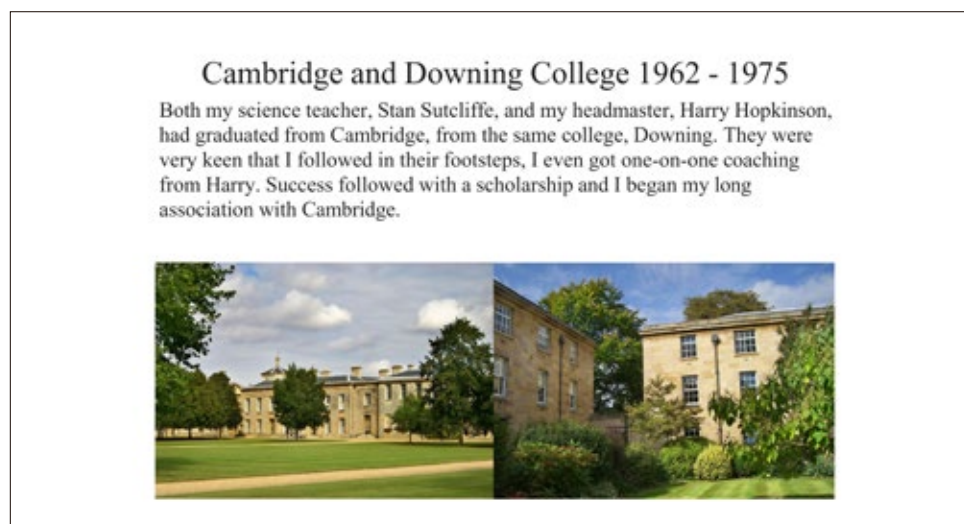


Fig. 4

そしてグラマースクールを終えると、奨学金を得てケンブリッジ大学ダウニング・カレッジに進みました。グラマースクールの校長も物理の先生もダウニングの出身で、私も同校に行くべきだと非常に熱心に勧めてくださったのです。校長に至ってはそのために個人教授もしていただきました。おかげで私は運良くダウニングへの奨学金をいただけたのです。これがダウニング・カレッジでの私の部屋です (Fig. 4右、右の建物の左下の窓)。ここで何年も過ごしました。

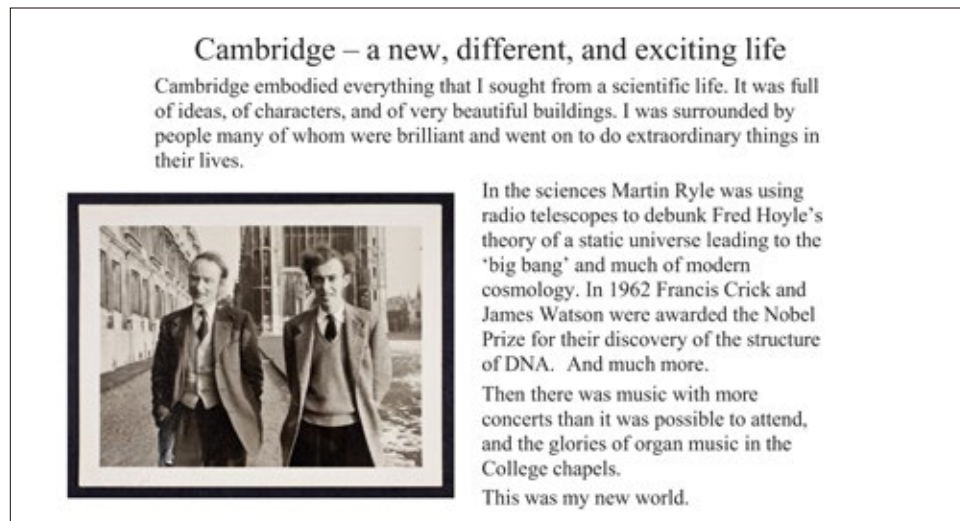


Fig. 5

Courtesy of the BGI Nobel Laureates Archives, Cold Spring Harbor Laboratory, New York

そこでの私はまさに水を得た魚のような感じでした。ケンブリッジ大学の水が合っていたのだと思います。多くの異才に囲まれ、新しい発想と個性があふれる中美しい建物で日々を送るという、科学を追求する生活において私が望むものの全てを体現する場所でした。

科学分野にはマーティン・ライルがいました。フレッド・ホイルの定常宇宙論が誤りだと証明すべく、初期の電波望遠鏡を駆使した人物です。どちらの説が正しいのかをめぐる彼らは激しい論議を戦わせましたが、最終的にはライルが正しく、宇宙は膨張を続けていることが分かりました。さらにフランシス・クリックとジェームズ・ワトソンもいたのです (Fig. 5)。二人が研究を行っていたのはバス停留所のように見える小さな倉庫で、私が博士号を目指して詰めていた研究室から見下ろせる場所にありました。他にも数多くの有名な研究者がいました。

そして芸術分野でも、ケンブリッジでは参加しきれないほどの演奏会が開かれていました。私にとりわけ楽しみにしていたのは、カレッジの教会で聴くことのできるパイプオルガンでした。私にとってはまったく新しい体験だったのです。

それでは前置きが思っていたより長くなってしまいましたが、今回の素晴らしい賞をいただくに至った私の研究について少しお話ししたいと思います。これからご説明したいのは、私の研究は非常に基本的な物に端を発していますが、そうした基本的な物が実用的な物へとつながる可能性があり、それがひいては一般の方々が日常生活で実際に買いたいと思う便利な物につながる可能性もあるという点です。ここまで至るには長い年月がかかっています。というのも、これからご説明する研究の一部は非常に古いものだからです。

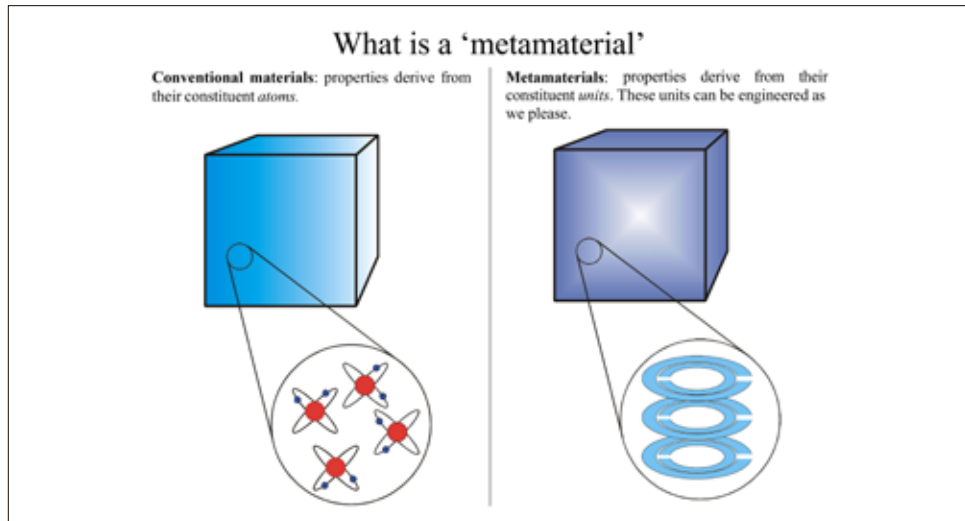


Fig. 6

Negative refraction, JB Pendry, *Contemporary Physics*, 07 Aug 2006, Taylor & Francis, reprinted by permission of the Taylor & Francis

皆さんが最初に私にお尋ねになる質問は、ここまで触れられてきたメタマテリアルとは一体何なのかということではないでしょうか。説明はとても簡単です。通常の物質は原子からできています (Fig. 6左)。そのためガラスの振る舞いを決めるのは究極的にはその原子の特性です。人間の目では個々の原子は見えません。見えるのは各々の原子の振る舞いの平均のようなものです。ガラスの応答に見られるのはまさにその集合体なのです。

とはいえ、応答するものが原子サイズまで小さい必要はありません。単に波長より小さければよいのです。一つの原子の直径は 10^{-9} メートルにあたる1ナノメートルよりはるかに小さく、これと光の波長の間には1,000倍の差があります。ですからその空間には実際に作製し得る大きさの構造体を詰め込むことが可能なのです。波長が長い場合にはなおさらです。

これは「分割リング」と呼ぶもので、レーダー特有の非常に長い波長の放射に作用するように設計されているため、直径は数ミリメートルで十分です (Fig. 6右)。工学の進歩によって現在ではずっと小さな構造体を持つメタマテリアルも登場しています。それでも基本的な考えは同じで、メタマテリアルの機能は人工的に作製されたメタ原子によって決まります。

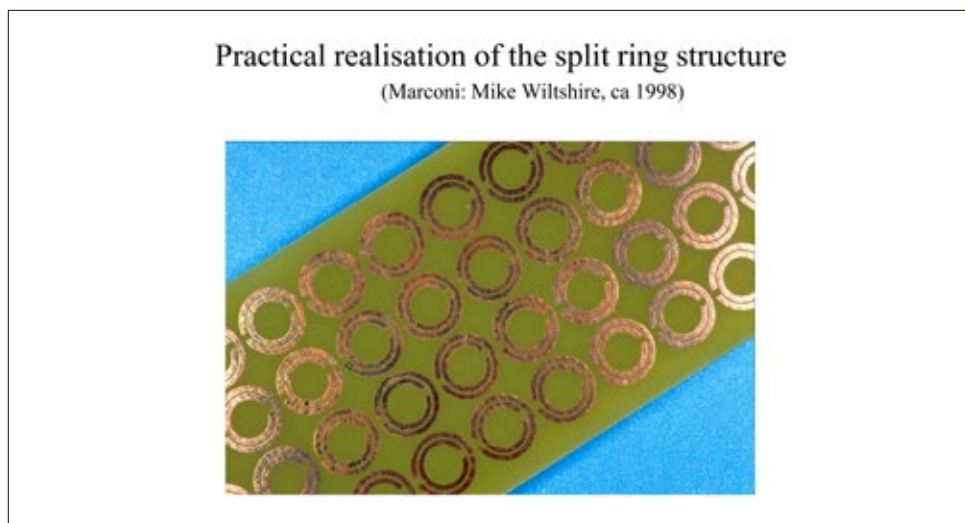


Fig. 7

こちらがいわゆる「分割リング構造」の最初の実現例です (Fig. 7)。この分野が軌道に乗った理由の一つは、作製が飛び抜けて簡単なことにあります。この機器は先に述べたようにレーダーの周波数向けに設計されており、レーダーの波長であれば全体の大きさは10センチメートル程度でよいかもしれ

ません。それでしたら自分で作る必要もなく、コンピューターで作った設計図をプリント基板メーカーに送れば、望む形状にエッチングしてくれます。コンピューターと設計用ソフトさえあれば誰でも参入できる分野なのです。

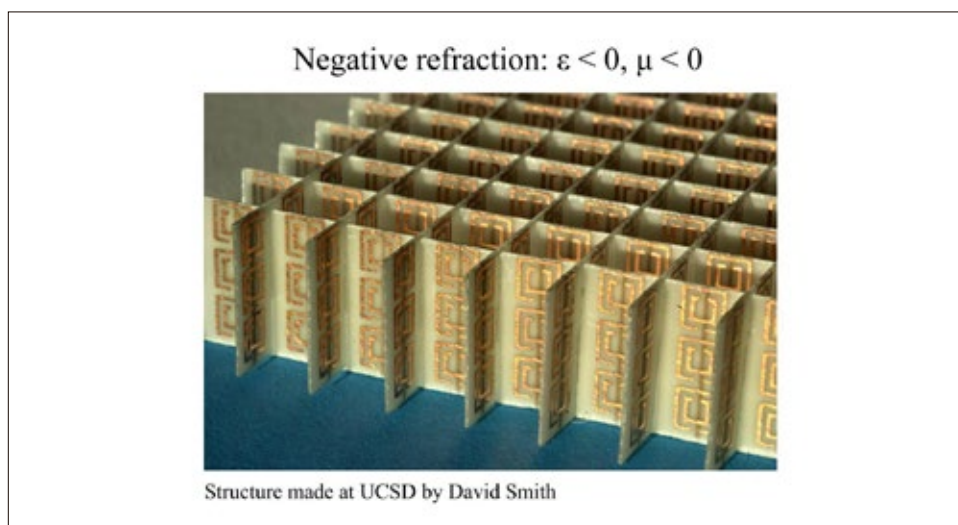


Fig. 8

From D. R. Smith, J. B. Pendry, and M. C. K. Wiltshire, *Science*, **305**, 788–792 (2004)
“Metamaterials and Negative Refractive Index”. Reprinted with permission from AAAS.

極めて珍しい特性を実現できるというメタマテリアルの概念を利用した、もう一つの構造をご紹介します。これらのリングは磁気応答を得るために設計されています(Fig. 8)。この画像ではわずかな影としてしか見えませんが細線があり、電気応答を引き起こします。そしてこれこそが負の電気応答と負の磁気応答を初めて実現し、それまで何十年にもわたって追求されてきた現象を実現した構造なのです。これらが組み合わさって実現するのが負の屈折率、すなわち物質に入ってきた光を通常とはあり得ない方向に屈折させる現象です。

もう一つの例はずっと後のもので、同じことをより短いスケールにおいて実現するために設計された化合物の構造体です。センチメートルではなくミクロンを単位とするサブミクロン構造で赤外線を扱うためにカリフォルニア大学の張翔チームが設計したものです。

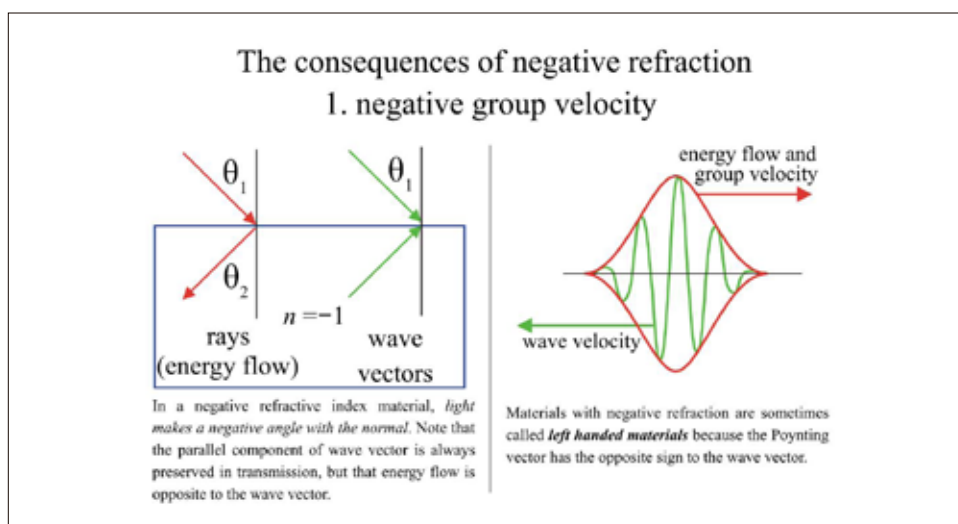


Fig. 9

Negative refraction, JB Pendry, *Contemporary Physics*, 07 Aug 2006,
Taylor & Francis, reproduced by permission of the Taylor & Francis

ところで負の屈折とは何なのでしょう。つい最近亡くなったロシアの研究者ベセラゴは1960年頃に発表した論文で、負の屈折を持つ物質を作ることができれば、ありとあらゆるとてつもない特性が生まれるだろうと書いています。

通常の屈折では入射した光はそのまま図の法線に対して右側に進みます (Fig. 9左)。これらの角度を媒質の屈折率に結びつける公式も存在します。これに対し負の屈折では、光が入射光と同じ側に曲がるため、非常に変わった特性が作り出せるのです。詳細には踏み込みませんが、これがその一例です。弱い光パルスが媒質に入射すると、光パルスは波の進行方向とは逆に進みます。こうした波があると想像してみてください (Fig. 9右)。ここに包絡線 (赤色の線) があり、赤色の矢印の方向に進んでいます。そして波 (緑色の線) はこのようにくねくねと進み包絡線の後ろから抜け出ようとするのです (緑色の矢印)。極めて奇妙な現象です。

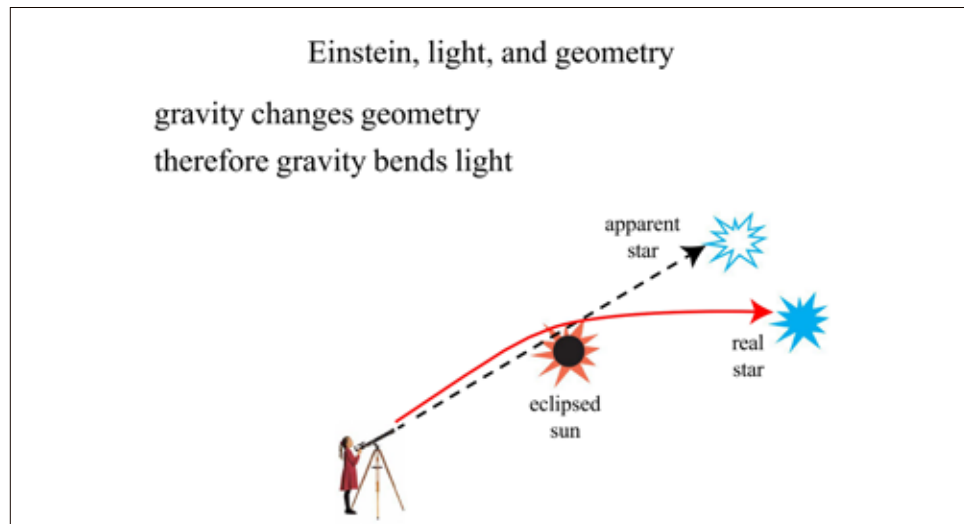


Fig. 10

さて、メタマテリアルには計り知れない自由度があるため、それを制御する方法が必要になります。一体どのような方法で設計すべきなのでしょう。そこで登場するのが、皆さんもご存じであろう、光は星によって曲がり得るという理論を打ち立てたアインシュタインです。アインシュタインが宇宙は真空ではないと語ったことは有名です。19世紀には、一般の人々も科学者も、基本的に宇宙とは何もない真空の空間であると考えていました。それに異を唱え、宇宙は真空ではないと言ったのがアインシュタインです。

宇宙は多くの点で物質のようなものです。例えばメトリックのような性質があります。光に関する限り、これは本質的には屈折率を記述するものです。宇宙には屈折率があり、それは非常に重いものをそばに置くことで変えられるのです。

アインシュタインの理論の正しさを証明した初期の実験で用いられたのが、星が見える日食の際に観察された太陽による星の光のずれでした。このずれがアインシュタインの理論の予測と一致したのです (Fig. 10)。そしてわれわれが生み出そうとしている新たな設計パラダイムには、宇宙はゴムのようなものからできているというアインシュタインの理論が応用されています。

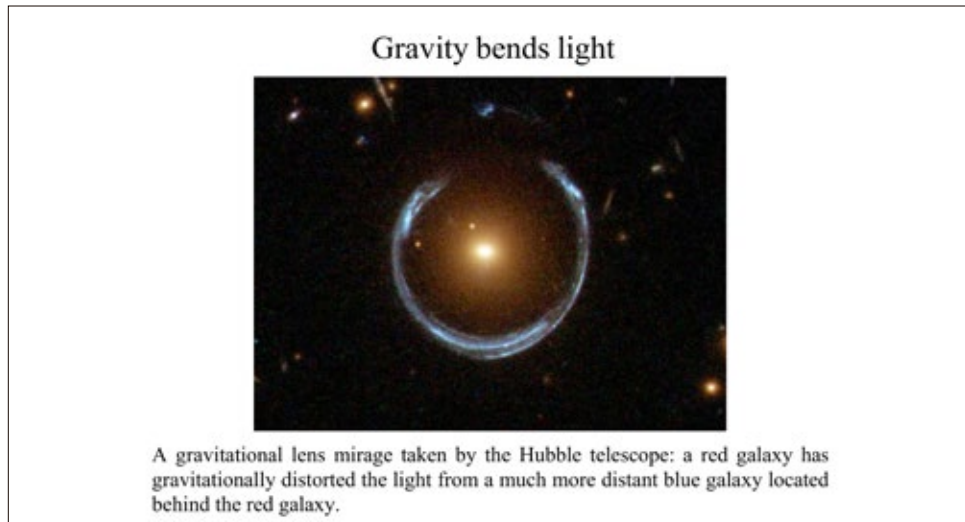


Fig. 11

ESA/Hubble & NASA

これはハッブル宇宙望遠鏡からの画像です(Fig. 11)。前面にあるのが赤の星雲、その背後にあるのが青の星雲です。赤い星がそこになれば、青い点が見えたでしょう。しかし、赤い星はそこにあるがゆえにガラス製レンズのように周囲の光を屈折させているのです。このように宇宙には屈折率が存在します。アインシュタインは正しかったのです。

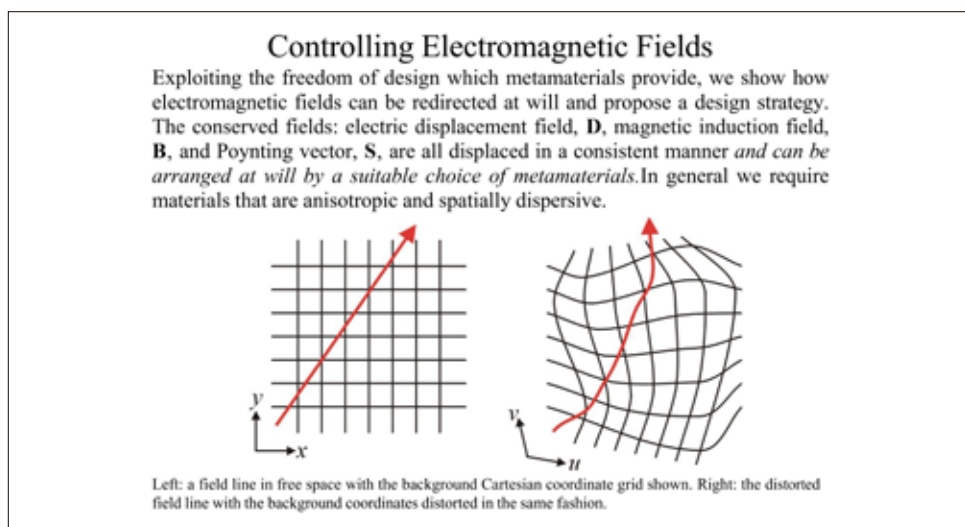


Fig. 12

From J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, *Science* **312**, 1780–1782 (2006).
“Controlling Electromagnetic Fields”. Reprinted with permission from AAAS.

そこから生まれたのが、われわれが変換光学と呼ぶ分野です。そこでは光線を制御する場合には光線はゴムシート、いわばゴムのような空間に埋め込まれていると想定します。その上で光線を望む方向に押し出すべく空間をつかむのです。空間の形はゴムのように変えられることを思い出してください。ですから空間に埋め込まれた光線がゴムと一緒に動いて望む方向に進むまで、ゴムシートを伸ばし引っ張るのです。ゴムを引っ張れば光線は動きます。ゴムやその周辺にあるものをゆがめなければ、光線はその場にとどまります。これが透明マントの設計には非常に重要になってきます。

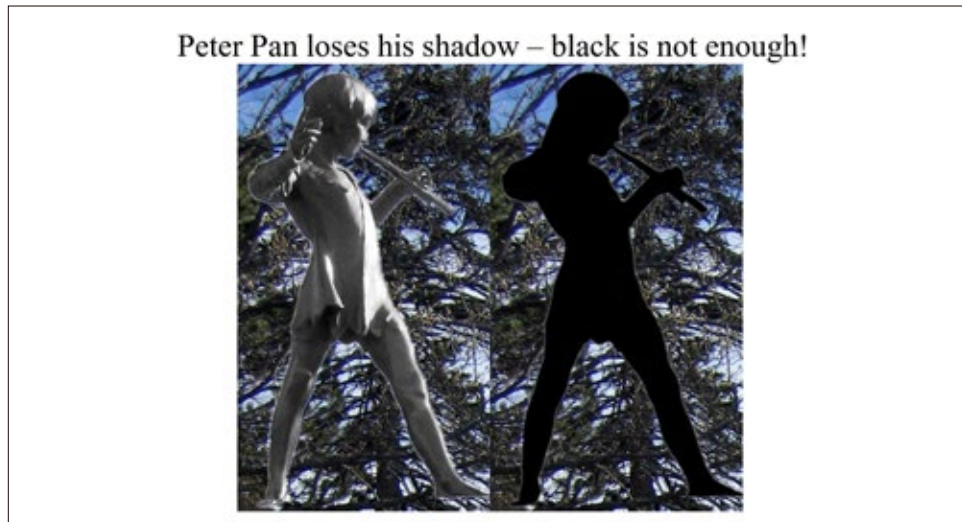


Fig. 13

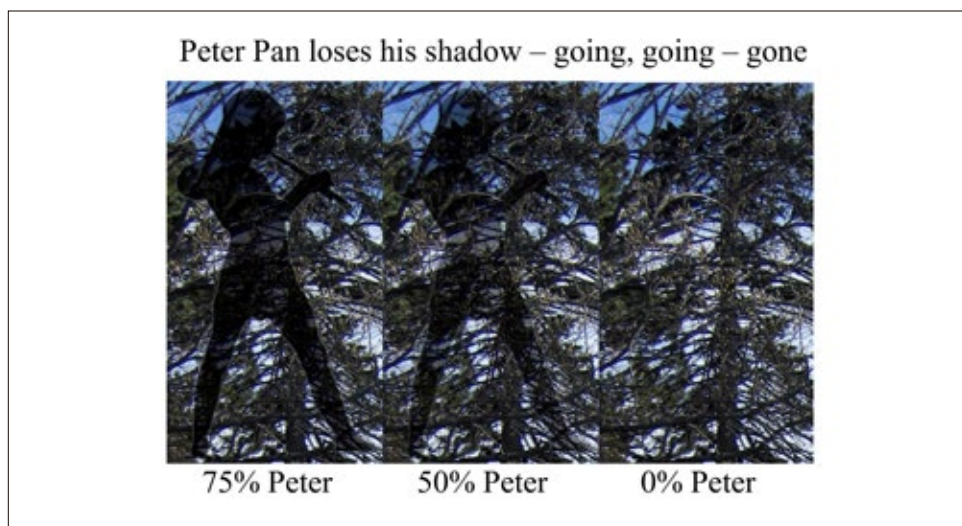


Fig. 14

透明マントの設計は可能であるというわれわれの発表は、世間を驚愕させました。ここでは透明マントの設計における課題を説明しています。レーダーに映らないステルス技術の大半は光を反射しない物体に依拠しています。これはかなり有用なものであり、戦闘機や爆撃機など多くの最新軍用機の特徴の一つとなっています。ただし色を黒にするだけでは十分ではありません。物体そのものが黒くても影が出てしまうためです。

「ピーターパン」について知っている方もいらっしゃることでしょう。ピーターパンは小さな男の子ですが、影を失ってしまいます。そして影を失ったことで、黒くなっただけでなく透明人間にもなってしまいます。それでは影はどうすればなくせるのでしょうか。

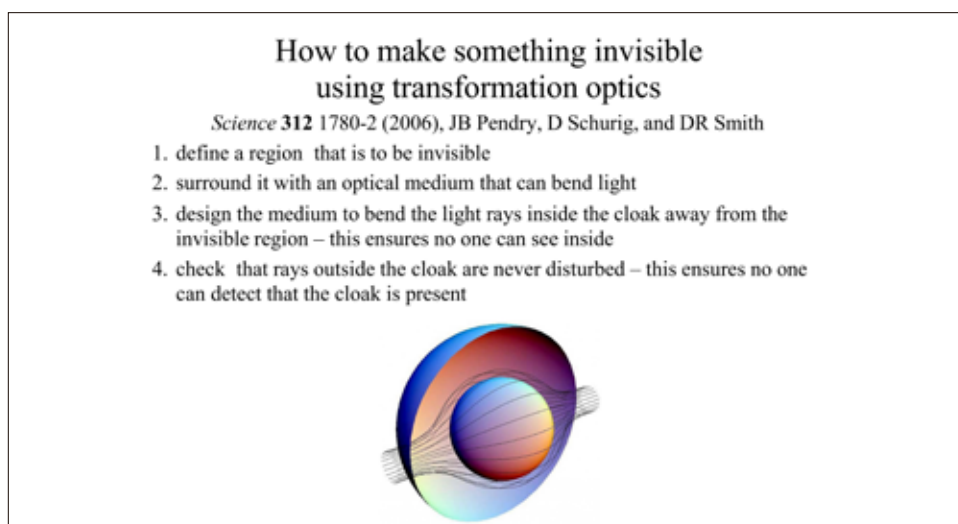


Fig. 15

From J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, *Science* **312**, 1780–1782 (2006).
 “Controlling Electromagnetic Fields”. Reprinted with permission from AAAS.

一案は変換光学の活用です(Fig. 15)。肝要なのは、この球状の領域内で起こることには触れてはならず、そこにある物は一切ゆがめてはならないという点です。覆いから出た後の(先の)光線はゆがめてはいけません。何もない場合に覆いの外で通るはずの経路を光が通らなければ、何か物体が存在することになってしまうからです。何かをしてよいのは球体を囲むグラデーションの部分にある物に対してだけです。ですから私はこのゴムシート、すなわち球体を囲む空間を伸ばしたり引っ張ったりすることで、全ての光線を内部領域から追い出してマントへと集めます。ただし内側の球体の内部または覆いの外側の空間を伸ばしたり引っ張ったりすることはしません。

つまりこうした光線をここに何もない場合にとる軌道とまったく同じ軌道で送り出すということです。これを実現するための設計は極めて困難に感じられるかもしれません。事実、変換光学の技術がなければ非常に困難であり、この技術こそが透明マントの設計をととても容易にしてくれたもののなのです。透明マントは実際公式で表すことができます。そしてこうした公式はメタマテリアルや変換光学を売り込む上で非常に役立ちました。極めて難しく見える問題をそれほど単純に解決できるのなら、単純な問題はごく簡単に解決できるだろうと人は考えるためです。そしてその通りであることが実証されています。

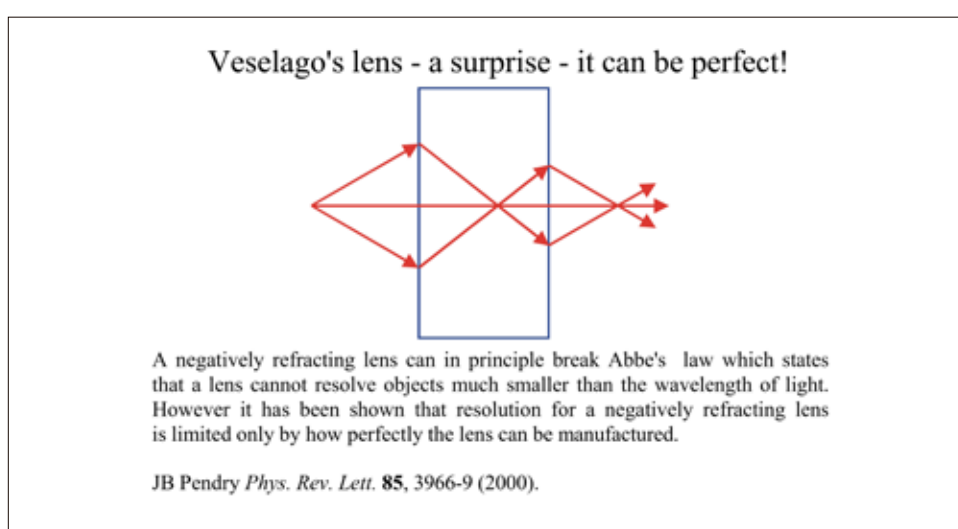


Fig. 16

次に負の屈折についてご説明したいと思います。というのも、これもかなりの論争を巻き起こした概念だからです。ベセラゴは負屈折媒質において、光を通常とは逆の方向に曲げることができれば、

必然的に光はその媒質中で焦点に集束すると考えていました。

ここで示すように、これらの光線は通常とは逆の方向に曲がり焦点に集まっています(Fig. 16)。ちなみに光線は第2の焦点に集束しています。ベセラゴはまた負の屈折物質はレンズを構成する可能性があるとも考えていました。唯一の問題は、そのような物質は彼がこの論文を書いた時点では存在せず、メタマテリアルが登場するまでそうした状況が続いたことでした。

講演前にご覧いただいた私の紹介映像での語らいの中で、私はある雨の日曜の朝に触れました。その雨の日曜の朝に考えていたのはこのレンズで、私はその時に「アッペの法則」という非常に古くからある法則は正しくないと気付いたのです。この法則では光の波長(およそ500ナノメートル)より小さな物は通常の顕微鏡では見ることができないとされています。500ナノメートルは十分小さいように思えるかもしれませんが、これは細胞がようやく興味深くなってくるレベルにすぎません。通常の顕微鏡ではそうした細胞の内部を解像できず、見ることがかなわないのです。この法則は揺るがないものと見なされてきましたが、私はその雨の日曜の朝にベセラゴのレンズにはそれまで考えられていたよりも大きな意味があり、正しく作製すれば完璧なものになる可能性があると感じたのです。ただし難点は、正しく作製しなければならないということです。

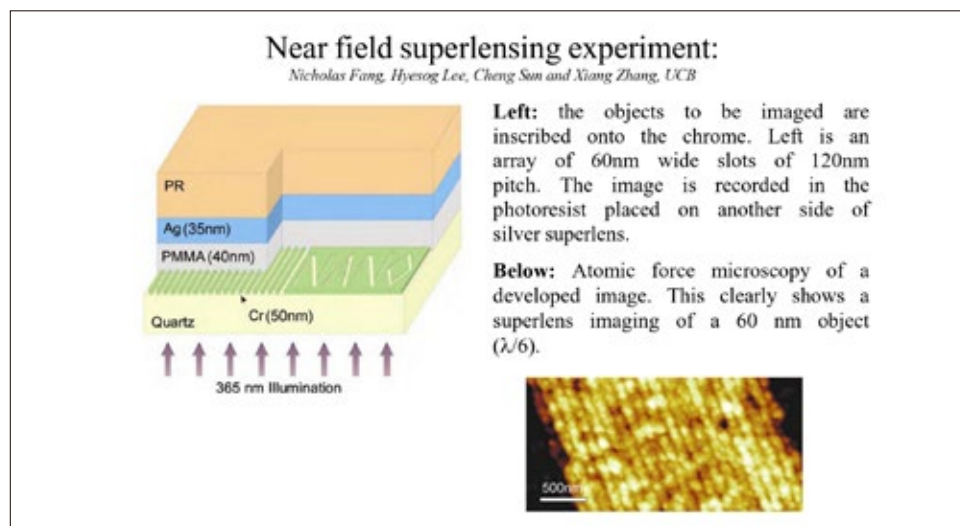


Fig. 17

From Nicholas Fang, Hyesog Lee, Cheng Sun, Xiang Zhang, *Science* 308, 534-537 (2005).
"Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens". Reprinted with permission from AAAS.

それに近いものがこちらです(Fig. 17左)。これもカリフォルニア大学バークレー校の張研究室の成果で、銀を使ってベセラゴのレンズに近いものが作製されています。Agがレンズ、PMMAがスペーサー、そしてCr(クロム)が観察対象物です。対象物は小さすぎて顕微鏡で見ることができませんので、実際にはフォトレジストという材料に焼き付ける必要があります。そして下部の矢印の方向から光を照射します。その波長は365ナノメートルです。これで直径数十ナノメートルの対象物を見ようとするわけです。どうやって実現するのでしょうか。この回折格子の写真で分かるように、回折格子の構造は60ナノメートル程度の規模ですが、この方法を用いれば解像できるのです(Fig. 17右)。

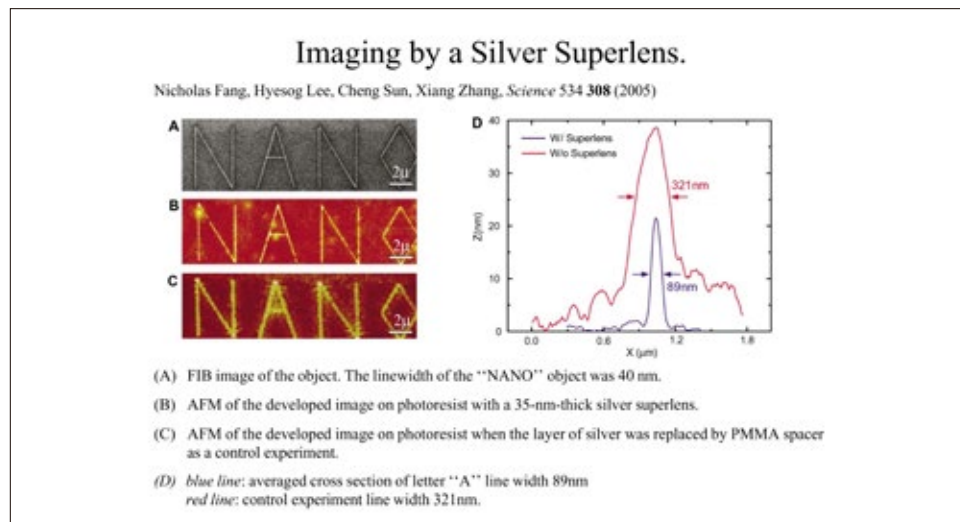


Fig. 18

From Nicholas Fang, Hyesog Lee, Cheng Sun, Xiang Zhang, *Science* 308, 534-537 (2005).
"Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens". Reprinted with permission from AAAS.

さらに特筆すべきはこの画像です(Fig. 18左)。クロムに書かれている「NANO(ナノ)」という単語が識別できます。図中のスケールバーは2ミクロンです。Cはレンズがない場合の画像です。そこにこの銀のレンズを装着すると(B)、まるで近視の人が眼鏡を掛けたかのように全てがはっきりと見えるようになるのです。そしてこちらのスキャンは、このレンズを使うと使わない場合の約320ナノメートルから90ナノメートルまで分解能が実際に改善したことを示しています(Fig. 18右)。完璧ではありませんが大きな進歩です。

ここからの残りの時間は、アインシュタインやマクスウェルの方程式から生まれたメタマテリアルについて遊び心を持って実験した結果をご紹介していきたいと思います。この段階では実用化は意図されておらず理論の実証にすぎませんが、実用化は可能であることを示すものでもあります。それではメタマテリアルが生み出した数多くの応用例の一部を、残りの時間を使って駆け足で見いきましょう。

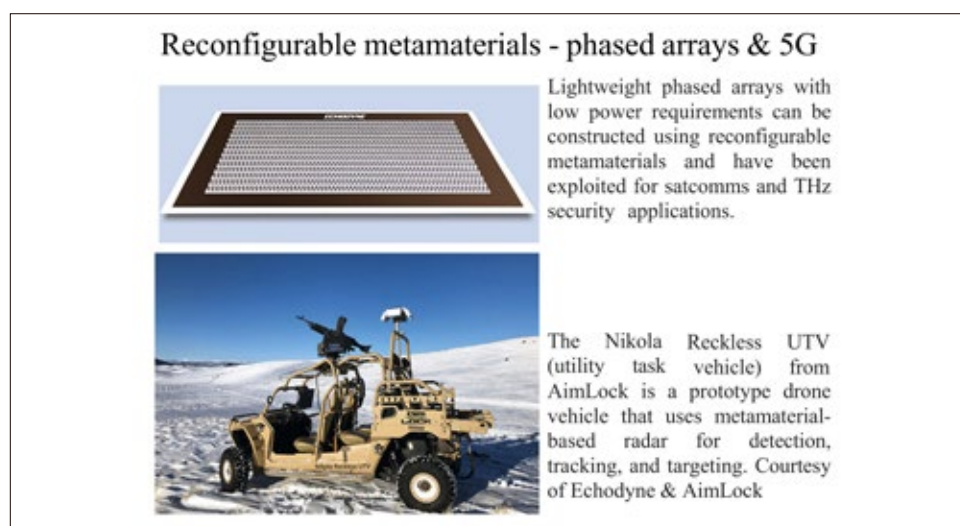


Fig. 19

Image Courtesy of Echodyne

これは初期のもので、遠隔操作車での用途です(Fig. 19)。遠隔操作は衛星通信経由で行う必要があります。従来であればパラボラアンテナを設置しますが、パラボラアンテナは重い上に、随時衛星の方向に向ける必要があります。フェーズドアレイアンテナを使用する方がずっと優れています。これにはトランジスタが大量に使われるため、通常は非常に高価なのですが、ここではメタマテリアルが使われています。メタマテリアルの特性は極めて簡単に変えられることが分かっています。そのためアン

テナを物理的に動かさずとも、空の好きな方向に向けられるのです。

また、現在エコーサイン社が空港内の往来をより円滑にする目的でメタマテリアルの開発を進めています。乗客はテラヘルツ波を使ったボデイスキャナー装置に入りボデイスキャンを受けますが、これは非常に面倒なものです。しかしこの技術を使えば、装置を歩いて通り抜けるだけでスキャンが行われます。何か問題があった場合には呼び止められますが、そうでなければそのまま進んで行けばいいのです。

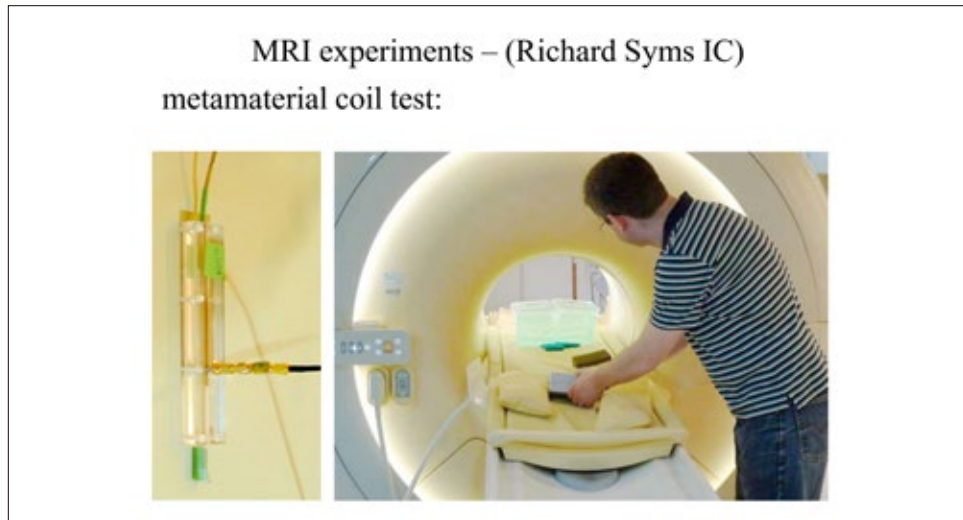


Fig. 20

Courtesy of Richard Syms

メタマテリアルは磁気共鳴画像診断装置(MRI)にも活用されようとしています(Fig. 20)。ここに写っているのは私の同僚リチャード・シムスで、MRIのスキャン速度向上に向けた技術開発に取り組んでいます。現在のMRIでは強く均一な磁場の中で共鳴して発生した電磁波が直ちに電気信号に変換されるため、装置の中には大きな音が鳴り響いてしまいます。リチャードの構想は、磁力は保った上で、電子を伝導する従来型の線ではなく磁気を伝導する線を使うよう設計し、信号の純度維持を狙うものです。これにより騒音の抑制が可能となります。さらに検査には現在のように20分もかからず、2分程度で済んでしまうため、検査の回数を増やすことが可能となります。これもまたメタマテリアルが可能とする便利な機器の例です。

さらに別の例は、先ほどご紹介したスキャニング技術で使われるようなテラヘルツ放射線を実際に生成する装置です。その仕組みは、テラヘルツ波を生じさせるもののその伝播距離が短いデバイスの表面に、その出力を効率よく引き出す性能に優れたメタマテリアル構造を形成するというものです。ハーバード大学のカパツツらが手掛けています。

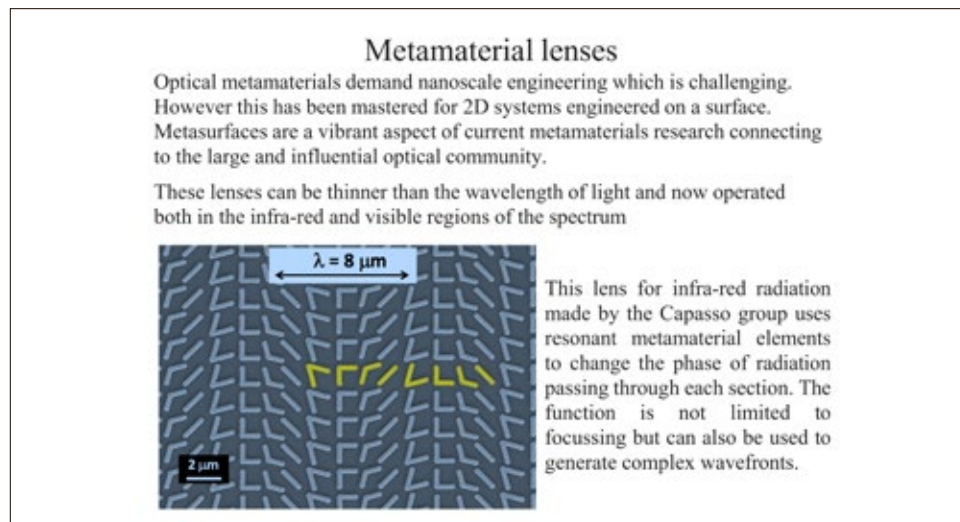


Fig. 21

From N. Yu, *et al.*, *Science*, 334, 333-337 (2011), "Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction". Reprinted with permission from AAAS.

このハーバード大チームは、極薄レンズの開発という興味深いテーマにも取り組んでいます(Fig. 21)。分割リングとまではいかず、半分分割リングといったところでしょうか。これらは光の波長より小さな共振器で向きや形を変える様子が見て取れます。要はレンズの屈折率を変えるようなものです。ただ通常のレンズとは異なり、このレンズの厚みはわずか数ナノメートルにすることが可能です。このようにメタマテリアルを使えば、とてつもなく薄いレンズが作製できるのです。



Fig. 22

提供：トヨタ自動車株式会社

他には何があるでしょうか。そう、この例をご紹介しなければなりません。カイメタ社もメタマテリアルの作製に取り組んでおり、その衛星通信用アンテナを一部のトヨタ車のルーフに取り付けています(Fig. 22)。現在ではどこまで到達しているのかは定かではありませんが、この車は米国のロサンゼルスからミシガンまで走行し、その間ずっとトヨタ本社との通信を続けていたと承知しています。つまり将来的には皆さんの車のルーフにこのようなアンテナが搭載され、誰とであれずっと通信したままでいられるということなのです。そうした機能が好ましいと思うかどうかは興味深い議論かもしれません。

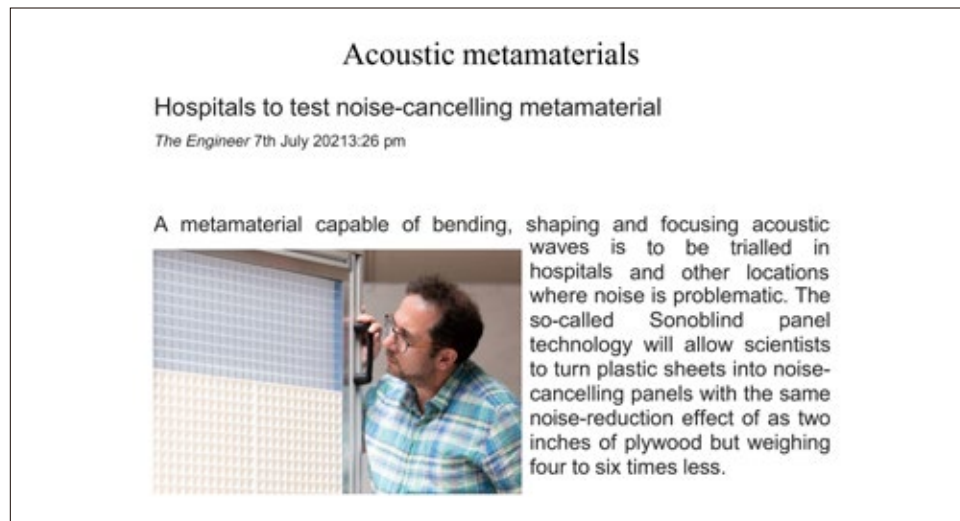


Fig. 23

Courtesy of the University of Sussex

事例はまだあります。このパネルは電磁波や光の制御ではなく、音を制御すべく設計されています (Fig. 23)。音は波です。メタマテリアルはほぼあらゆる種類の波を制御できるため、このパネルには小さな共振器がぎっしりと並べられています。共振器ははっきりとは見えませんが、確かに敷き詰められています。本パネルは音を遮断するもので、英国ブリストルの企業が販売しています。重症患者の病床周辺に静粛なエリアを設けたい病院での使用が想定されています。

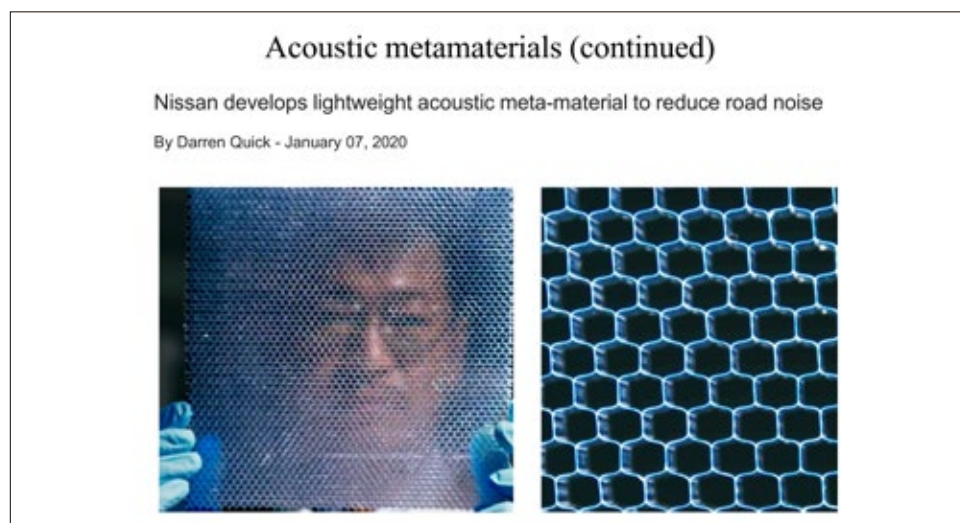


Fig. 24

提供：日産自動車株式会社

これはメタマテリアル共振器を使って車内のロードノイズを低減すべく、日産自動車が開発しているものです (Fig. 24)。ロードノイズは高速道路走行中の車内における最大の騒音源であり、メタマテリアルはその低減に貢献し得るのです。

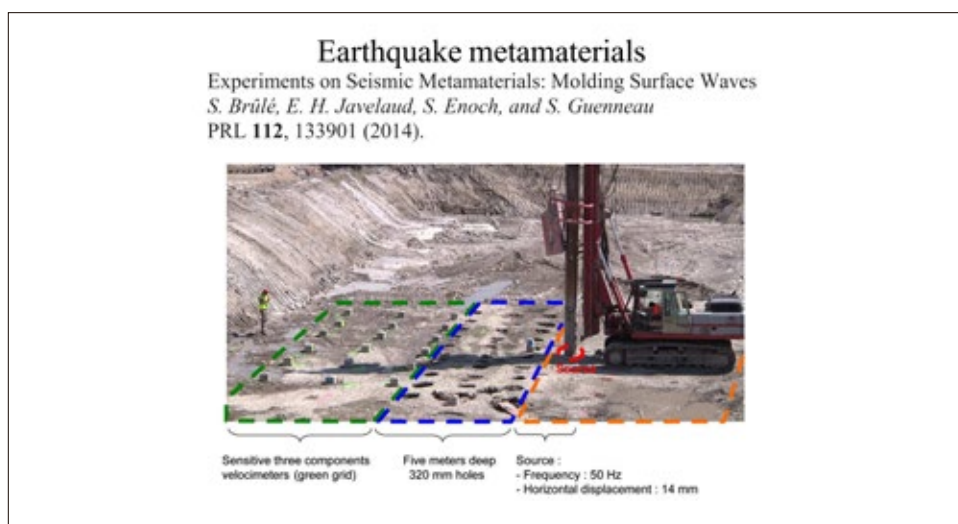


Fig. 25 【Experiments on Seismic Metamaterials: Molding Surface Waves, S. Brûlé, E. H. Javelaud, S. Enoch, and S. Guenneau, *Phys. Rev. Lett.* 112, 133901 (2014), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.133901>】CC BY 3.0

最後に本当に奇抜な構想をご紹介します。かつて私の下で博士研究員を務めたセバスチャンは、地震も波の一種であると考えました。実際、地震は波なのです。その波を原子力発電所のように甚大な被害を招きかねない場所からそらすことができれば有用かもしれません。これは地面にドリルで穴を開けることで作り出すという、ある意味極めて原始的なメタマテリアルです (Fig. 25)。青色の枠内に地面に開けた穴がご覧いただけます。現段階では透明マントとまではいきませんが、この構造で地震波の地中での伝わり方を変えられるかどうかを検証しようとするものです。彼はそのためある石油会社をお願いしてこの振動発生トラックを借りてきました。これは巨大な重しをつり上げた後にぱっと離して地面に叩きつけ、その振動を波として地下に送るものです。その後この構造によって振動波を目指す場所に送れたのかどうかを検証した結果、無事送れたことが分かりました。その内容は『フィジカル・レビュー・レターズ』に掲載されています。

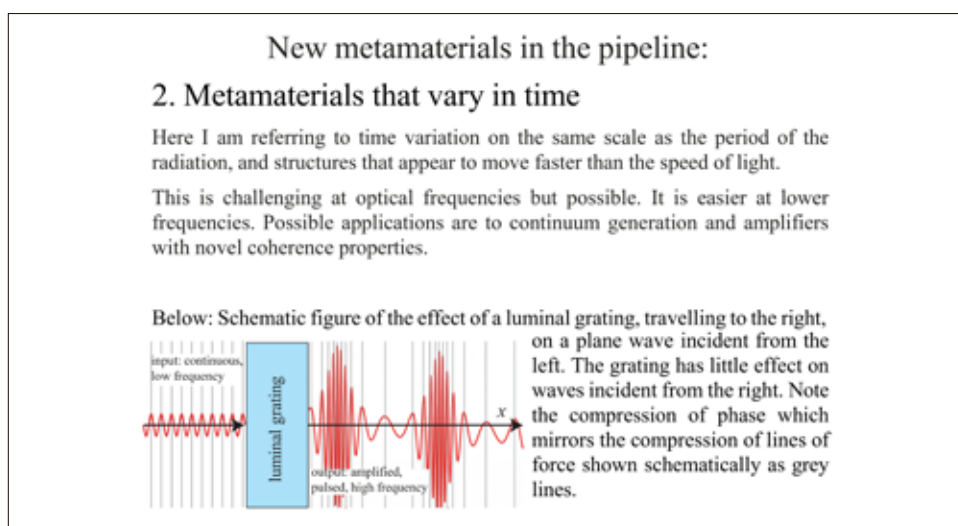


Fig. 26 ©J. B. Pendry, E. Galiffi, and P. A. Huidobro, "Gain mechanism in time-dependent media," *Optica* 8, 636-637 (2021)

さてこのスライドについては残念ながら詳しくご説明する時間が残っておりませんので (Fig. 26)、簡単にまとめたいと思います。メタマテリアルには今後どのような展開が考えられるのでしょうか。メタマテリアルは空間的に構造化されており、それが特異な性質を生み出しています。しかしもう一つの次元があり、それは時間の次元です。もし物質を時間的に非常に高速に変化させることができれば、物質中を通る放射に強く影響を与えます。

例えば屈折率の変調を想像してみてください。それは光の動きに影響を与えますが、もしその変調自体を動かすことができれば、全く異なる効果を生み出すことになります。ここで重要なのは、時間を操作し始めると、時間的に変化しないものに適用される非常に厳密な法則を破ることになってしまうという点です。つまり時間的に変化しない場合、物理方程式は時間に対して可逆的であり、時間の反転に対して不変なのです。これは利点でもあり欠点でもあります。そしてこの性質はエネルギー保存則を意味しています。しかし時間とともに変化する場合、その保存は破れ、もはや成立しません。別の法則が成り立つかもしれませんが、エネルギー保存則は失われます。このような構造を作ることによって通常の平面波を圧縮しエネルギーを注入することが可能となります。

われわれはロンドンでこうした時間結晶(時間的に周期的な構造を持つ物質)の可能性を模索しています。これは通常のメタマテリアルを超える、さらに驚くべき現象を引き起こすことができると考えています。

Summary

Metamaterials and transformation optics open new horizons for electromagnetism enabling:

- material properties difficult or impossible to achieve with naturally occurring materials
- control of light on all length scales down to a few nanometres.
- delivery of mobile phone antennae for 5G signals
- sub wavelength microscopy for biological applications is currently being developed
- cheap and efficient control of THz radiation as in collision avoidance radar in automobiles, and satellite antennae
- safe and efficient delivery of MRI signals from inside the human body
- classified military applications

Fig. 27

すでに持ち時間を過ぎてしまいましたので、これを締めくくりの言葉として講演を終わりたいと思います。ご清聴ありがとうございました。

講演後に行われたインタビュー動画を京都賞YouTubeチャンネルでご覧いただけます。
(https://youtu.be/su_6iDz3p3Y?si=sVagLFmsAt7f41c3)