

엑스선 나노영상을 활용한 나노 생체 소재 연구

X-ray Nano-Imaging for Nano and Bio Materials

김예슬¹ · 김진영¹ · 임수진¹ · 원병록^{1,2} | Yeseul Kim¹ · Jin Young Kim¹ · Su Jin Lim¹ · Byung Mook Weon^{1,2}

¹SKKU Advanced Institute of Nanotechnology (SAINT), 2066, Seobu-ro,
Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Korea

²School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-ro,
Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Korea
E-mail: bmweon@skku.edu

1. 서론

엑스선 나노영상은 나노 및 바이오 소재를 연구하는데 매우 유용한 분석 방법이다. 특히 소재의 내부 구조를 비파괴적으로 선명하게 분석하는데 엑스선보다 좋은 방법은 드물다. 엑스선은 투과력이 매우 뛰어난 강한 에너지의 빛이며 방사광 가속기에서 얻어지는 엑스선은 빔의 품질이 매우 뛰어나고 주변의 환경에 영향을 별로 받지 않아 소재의 내부 구조와 동역학적 거동을 관찰하는데 뛰어난 장점이 있다. 엑스선 현미경은 최근 10년간 비약적인 기술 발전으로 재료과학, 물리학, 생의학, 환경 분석, 고고학, 고생물학, 문화유산 복원 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 엑스선 현미경의 높은 투과력 덕분에 시료를 파괴하지 않고 실시간으로 내부 구조를 관찰할 수 있으며 이를 이용한 재료 연구가 활발히 진행되고 있다. 엑스선 나노이미징과 나노토모그래피 기법은 재료과학에서 가장 중요한 실험 기법 중 하나이다. 또한 초고속 엑스선 현미경은 물질 내부의 굉장히 빠르게 변하는 동역학적 구조 변화를 나노미터-마이크로미터 멀티스케일에서 분석하는데 적합하다. 나노스케일에서 재료의 정량적인 내부구조 및 화학적 정보를 얻는 강력한 도구로 발전하고 있다. 이번 고찰을 통해 엑스선 나노영상을 이용한 나노 및 바이오 소재 연구의 이슈와 가능성을 살펴보자 한다.

Author



김예슬

2013 성균관대학교 신소재공학부
(학사)
2014-현재 성균관대학교 나노과학기술학과
(석박연계)



김진영

2013 성균관대학교 신소재공학부 (학사)
2014-현재 성균관대학교 나노과학기술학과
(석박연계)



임수진

2013 성균관대학교 신소재공학부
(학사)
2014-현재 성균관대학교 나노과학기술학과
(석박연계)



원병록

1997 성균관대학교 금속공학과 (학사)
1999 포항공과대학교 신소재공학과
(석사)
1999-2005 2008 LG전자 선임연구원
포항공과대학교 신소재공학과
(박사)
2008-2010 하버드대학교 박사후연구원
2010-2013 포항공과대학교 연구조교수
2013-현재 성균관대학교 신소재공학부,
나노과학기술학과 조교수
2013-현재 Scientific Reports 편집위원

2. 본론

2.1 엑스선 나노이미징 및 나노토모그래피

초고해상도 영상화를 통해 두꺼운 유체 내부에서 나노입자 및 생체재료의 복잡한 거동을 실시간으로 관찰하거나 국소부위의 영역까지 영상화하는 것이 가능하여 보다 폭넓은 응용이 가능하다. 전자계 엑스선 나노이미징 및 나노토모그래피(full-field X-ray nanoscale imaging and nanotomography) 기법은, 그림 1에서 보는 바와 같이, 투과 엑스선 현미경(transmission X-ray microscopy, TXM) 기법으로도 알려져 있으며, 엑스선이 시료를 통과하여 엑스선 광학계에 의해 투과된 빔을 모으고 확대하여 검출하는 원리로 작동하며 시료 내부의 엑스선 흡수차와 위상차에 의해 내부구조를 영상화한다.¹ 투과 엑스선 현미경의 광학계 기본 원리는 투과전자현미경과 같다. 엑스선 흡수단(X-ray absorption edges) 근처로 검출 에너지를 적절히 조절하면 내부 구조의 국부 영역에서 화학적 정보를 2차원 또는 3차원으로 얻는 것도 가능하다. 토모그래피는 엑스선 현미경의 투과된 영상을 180도로 시료를 회전하면서 얻어진 투과된 이미지를 계산하여 3차원으로 재구성한 것이다.

엑스선 나노이미징과 나노토모그래피는 재료 과학에서 최근 활발히 활용되고 있다. 한 예로서 2015년 영국의 방사광 가속기 Diamond Light Source의 I12 빔라인과 스위스의 방사광 가속기 Swiss Light Source의 TOMCAT 빔라인을 이용하여 semisolid 상태에서 입자의 입내 용출현상을 분석했다.² 온도와 압력 변화에 따른 재료 내부의 구조 변화를 초고속 엑스선 현미경을 통해 가시화 할 수 있음을 보여주는 결과이다. 또한 미국의 국립 브룩헤이븐 연구소의 National

Synchrotron Light Source II의 X8C 빔라인을 이용하여 배터리의 양극에서 구조적 화학적 진화과정을 실시간으로 분석했다.³ 수십 나노미터의 고해상도 엑스선 현미경을 통해 실시간 분석을 할 수 있음을 보여주는 결과이다.

엑스선 현미경은 ~0.1 nm 정도의 매우 작은 파장을 이용하므로 불투명하고 두꺼운 매질이라 할지라도 쉽게 투과하여 직접적인 영상 획득 및 정량 분석을 가능하게 하여 유용한 정보를 줄 수 있다. 엑스선 현미경은 재료 표면을 시각화하는 광학 현미경, 홀로그램 현미경, 비디오 현미경, 공초점레이저 현미경, 원자간력 현미경, 투과 전자 현미경, 주사전자현미경과 상호보완적인 방법이다.⁴ 특히 그림 2에서 보여지는 포항가속기연구소의 엑스선 나노영상(X-ray nano imaging, 7C) 빔라인은 2017년까지 1초당 10,000 프레임의 초고속, 공간분해능 10 nm의 초고해상도를 목표로 빔라인의 성능을 현저히 향상시킬 예정이다.⁵

본 연구실은 최근 초고속 엑스선 나노영상을 활용하여 초미세 물이 마이크로 또는 나노 크기의 작은 틈새에서 어떻게 증발하는지 연구하였다.⁶ 그렇게 작은 틈새에서 액체가 기체로 변화하는 증발 현상은 1초 이내로 매우 빠르게 일어난다. 이 초미세 물의 증발 현상을 포항가속기연구소의 초고속 엑스선 나노영상을 통해 처음으로 관찰하는데 성공했다. 이는 그 동안 학계에서 모의실험을 통해 가상적으로 초미세 물은 증발이 느려질 것이라는 예상을 실제 관측한 것으로 나노영상 분석 결과, 내부 압력이 0.6기압으로 1기압의 대기압보다 낮았으며, 증발 속도는 같은 표면적의 볼록한 일반 물방울보다 6분의 1로 매우 느려졌다. 연구팀은 증발 속도가 현저히 느려진 것은 초미세 물의 내부 압력이 대기압보다 낮아져 공기 속으로 수증기가 빠져 나가는 것이 어려워지기 때문이며,

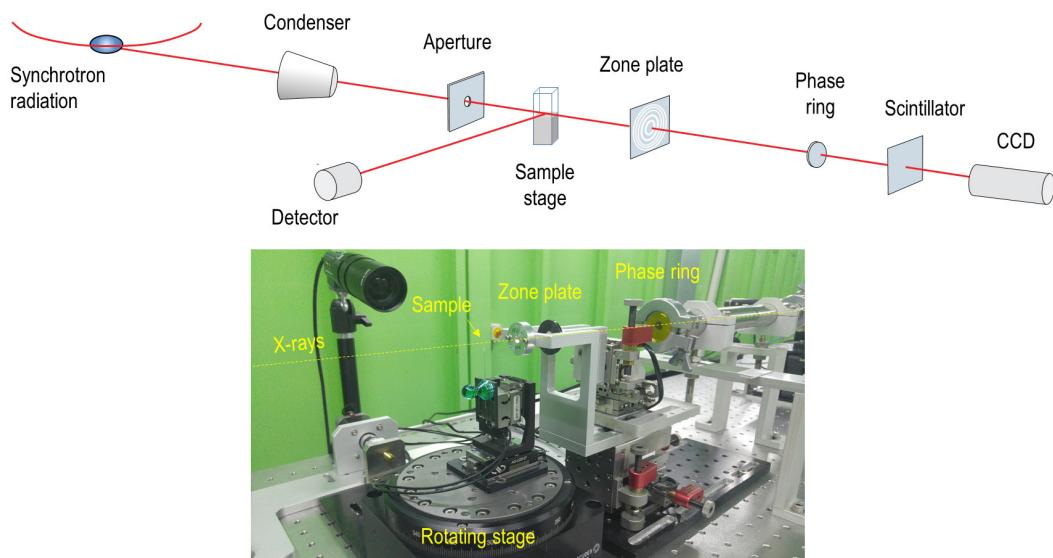


그림 1. 전자계 엑스선 이미징 및 토모그래피(Full-field X-ray imaging and tomography) 전개도 (위) 및 포항방사광가속기 엑스선 나노영상 빔라인의 주요 장비 (아래).

이는 그 동안 수학적으로 계산되어 온 초미세 물의 증발을 실제 관측을 통해 얼마나 느려지는지, 그 원인이 무엇인지를 밝힌 것이다.

초미세 물의 증발 연구는 최근 미세 액체로 유체소자를 만드는 나노유체 분야, 미세 유체 내의 화학성분을 분석하는 초미세 화학 분야가 빠르게 발전하면서 더욱 관심의 대상이 되고 있다. 또한 미세 먼지와 초미세 물이 엉켜 있는 물방울 알갱이가 구름으로 형성되는 원리와 밀접하게 관련되어 있다. 미세 먼지 사이의 초미세 물은 증발이 느려져 공기 속으로 사라지는 것보다는 구름의 씨앗으로 형성되는 경향이 있기 때문이다. 이번 연구는 그동안 관찰이 어려웠던 초미세 물의 증발을 실제 확인하고 그 속도를 밝힌 것으로 이러한 초미세 물의 이해는 물에 관한 기초과학과 함께 자연에서의 구름 형성 원리, 나노입자 프린팅 기술 개발 등에서 보다 정밀한 제어 등에도 적용될 수 있다.

2.2 차세대 나노잉크 및 바이오잉크 연구

새로운 인쇄기술은 현재 기술적 돌파구가 필요한 태양광, 유연전자, 생체의료용 소자에 적용을 목표로 연구·개발되고 있다. 태양광소자, 유연전자소자, 생체의료소자는 차세대 반도체 산업을 대체할 국가 경쟁력을 키우는 미래 고부가가치 기술로 주목 받고 있다. 유연소자에 탑재되는 고기능성 유연나노소재 및 유연생체소재는 기존에 알려진 물성과는 다른 물성을 가지고 있으며 물리·화학적으로 불안정할 뿐만 아니라 나노미터-마이크로미터의 멀티스케일에서 복잡한 거동을 보여주고 있다. 따라서 연성물질 물성의 기초와 응용 연구로서 앞서 언급한 방사광 가속기 기반 엑스선 나노영상의 특화된 기술을 접목하여 새로운 연성물질 후보군과 인쇄공정 개발이 가능할 것이다. 세부적으로는 초고속 초고해상도 엑스선 나노영상 기술을 개발하여, 멀티스케일에서 일어나는 복잡 거동을 이해하고, 이를 나노소재 및 생체소재에 적용하여 새로운 나노잉크와 바이오잉크를 개발하여, 최종적으로



그림 2. 포항방사광가속기 초고속 엑스선 나노영상 빔라인(7C) 모습. 46 nm 공간분해능과 이미지 당 0.04초 시간분해능을 보유한 초고해상도 초고속 엑스선 현미경. 엑스선 현미경을 활용하여 마이크로 입자와 고체 기판 사이에서 0.1초 동안 발생하는 초미세 물의 증발을 정밀하게 관찰할 수 있다.⁶

차세대 인쇄기술을 새로운 태양광, 유연전자, 생체의료용 소자 개발에 활용할 수 있을 것이다.

인쇄공정 산업은 2019년엔 규모가 570억 달러(70조 원)에 이를 것으로 예상되며 일본과 미국 등 선진국은 인쇄전자 기술을 적용한 제품과 기술들을 속속 발표하고 있다. 디스플레이로부터 저비용 태양전지, 위조지폐 방지, 보안 태그 등 광범위한 분야에 이용될 수 있는 큰 잠재력이 있다. 최근 디스플레이 및 태양전지 등의 산업에서는 양자점을 이용한 소재개발 연구에 집중하고 있다. 2016년 초에 미국에서 열린 CES2016에서 삼성전자는 양자점으로 생산한 SUHD 디스플레이 패널을 신기술제품으로 선보였다. 양자점을 나노시트에 분포시켜 필름형태로 생산하는데, 이런 bottom-up 방식의 나노입자 생산의 중요성이 점점 부각되고 있다.

대표적인 연성물질인 콜로이드는 대략 10 nm ~ 10 μm 크기의 입자들이 연속 매질에 균일하게 분포하고 있는 복잡한 다상계 물질이다.⁷ 이와 같은 크기 범위의 콜로이드 입자는 양자역학적인 효과를 거의 무시할 수 있는 '고전적인' 원자의 계로서 거동함에도 불구하고 반데르발스 인력과 같은 양자 현상의 역할을 이해하는 데에 중요하게 활용될 수 있기에 활발하게 연구가 되고 있다. 콜로이드 서스펜션의 한 종류인 나노잉크는 나노사이즈의 입자가 액체 속에 고르게 분포되어 있는 형태로 존재하며 잉크젯 프린팅 기법 등과 같은 인쇄 기술을 통해 고품질의 유연전자소자나 차세대 에너지소자 등에 응용될 수 있다. 나노잉크를 통한 인쇄전자 공정은 기존의 포토리소그라피로 대표되는 복잡한 단계의 생산 공정을 단순화할 수 있는 차세대 인쇄 기술로 연구 가치가 높다. 나노잉크는 나노사이즈의 입자가 액체 속에 고르게 분포되어 있는 형태로 존재하며 이를 원하는 표면 위에 분사하여 인쇄하는 공정이 바로 잉크젯 프린팅 기법이다. 특히, 나노잉크의 액체를 제거하기 위해 증발을 이용하는 방법이 효율적이고 쉬운 방법이기 때문에 많이 사용되고 있다. 이 방법으로는 원하는 모양의 필름이나 패턴을 만들고자 할 때 패턴 형태나 간격, 두께 등을 자유롭게 조절가능하고 소자의 특성이나 집적도도 쉽게 제어 가능하다. 또한 증발을 이용한 bottom-up 방식은 시간과 비용을 크게 줄일 수 있고 공법도 간단해 응용 가능성성이 매우 높다. 이처럼 나노잉크의 증발은 재료공학, 전자공학, 생물공학 등의 분야에서 큰 영향을 끼치고, 이를 이용한 인쇄공법은 낮은 비용으로 손쉽게 고품질의 대량 생산이 가능하기 때문에 첨단 유연 전자 소자나 생체 소자를 만드는데 활용되고 있다.

세포 및 생체조직을 포함하는 생체물질은 매우 복잡한 역학적 특성을 보여주기 때문에 기초적인 물리학 및 공학 분야에서 심도있게 연구되고 있다. 세포가 활동하면서 생기는 역학적 특성의 변화에 의해 세포는 매우 복잡한 변형을 거치는데, 이러한 특성은 연성물질과 닮아 있어 최근에는 세포의 움

직임과 변형을 연성물질물리를 적용하여 연구하고 있다.⁸ 특히 연성생체물질의 물리적 특성과 거동이 점탄성을 가진 다른 연성물질들과 달아 있으므로 연성물질의 점탄성 모델을 활용하여 세포를 포함한 생체재료인 바이오잉크의 물성 연구를 통한 바이오 프린팅 기법의 최적화 연구가 가능하다. 세포의 역학적 특성은 암과 같은 질병의 진행에 있어서도 큰 영향을 줄 수 있는데, 바이오 프린팅 기법을 활용하여 매우 복잡한 암의 전이현상에서 중요한 역할을 하는 세포외기질의 물리적 특성 및 생물학적 환경을 재현할 수 있을 것으로 보인다. 인체 내부의 생체 조직 기하학적 구조와 강성을 재현 한 시스템에서 암세포의 거동을 물리적으로 분석한다면, 기존 방식으로 알아내지 못했던 암의 생체 현상들의 기작을 규명하여 새로운 암 치료법 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2.3 생체모방 소재 연구

전자제품의 경박단소화, 자동차와 비행기 등 수송기기의 경량화 등 전 세계적으로 제품의 무게를 줄이려는 경향이 확산되어 있다. 전 세계 경량화 소재 시장 규모는 2014년 기준으로 885억 달러에서 연평균 8.5% 성장하여 2019년에는 약 1,331억 달러 규모가 될 것으로 전망되고 있다. 특히 수송기기 분야는 이산화탄소 배출 규제와 같은 환경 규제에 대응하고, 전기차 등 친환경 자동차 개발 등 다양한 이슈의 영향으로 경량 소재 개발에 대한 경쟁이 심화됨에 따라 다공성 신소재 개발에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 자동차용 경량 소재 개발의 후보재료로는 첨단 강, 알루미늄/마그네슘, 탄소 복합재료 등이 있으며, 철강은 가장 저가이고 재생 가능한 재료이지만, 자동차 경량화에는 큰 역할을 하지 않는다. 알루미늄은 경량재료이지만 강보다 50% 이상 고가이고 시장에 따라 가격 유동이 크다. 탄소 복합 재료는 알루미늄보다 훨씬 가볍지만, 단가가 높고, 재생이 불가능하다.

기존 경량 소재의 재료 개발의 한계를 극복하기 위해 물질 개발뿐만 아니라 자연의 다양한 구조를 모방한 다공성 신소

재 개발 연구가 진행되고 있다. 육각기둥의 독특한 구조를 지닌 별집 구조는 건축물은 물론 노트북, 자동차 차체, 고속열차 등 이미 우리 일상생활에서 유용하게 쓰이고 있다. 이는 별집의 육각형이 최소한의 재료로 최대한의 공간을 확보하는 가장 경제적인 구조이며, 동시에 가장 균형 있게 힘을 배분하는 안정적인 구조라는 분석이 바탕이 되었기에 가능하다. 전복 껍질을 모방한 경량 고강도 복합소재 개발, 계층적 뼈 구조를 모방한 나노다공체 공정 개발 등 자연의 미세구조를 모방하여 가볍고 튼튼한 재료를 개발하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있지만, 이와 더불어 구조 자체를 이해해야 한다. 이를 위해 3차원 가시화를 통한 구조 이해가 필요하다. 항공기나 자동차의 외장재에 균열이 발생하는 현상을 막기 위해 표면을 딱딱하게 만들고 무게를 줄이고 충격을 완화하기 위해 내부를 부드러운 완충재로 채우는 것이 일반적이다. 이와는 반대로 최근 사람의 뼈를 3차원 구조 분석하여 해면골질 내부는 뼈의 잔 기둥들이 입체적으로 서로 얹혀 있지만, 겉은 다른 부분에 비해 상대적으로 부드럽고 유연한 조직으로 이루어져 있음을 밝혀냈으며, 연구에 따르면 외부가 부드럽고 내부가 딱딱한 해면골질의 구조적 특성 덕분에 뼈에 충격이 가해질 때 내부에는 큰 힘이 전달되지 않고, 충격으로 외부조직이 약간 손상되더라도 중심부에는 치명적인 손상을 입지 않도록 해서 원래의 기능을 유지하도록 만든다는 것을 밝혔다.⁹

현미경의 발전으로 자연의 나노미터 크기의 표면들을 관찰할 수 있게 됨에 따라 이를 분석하여 모방한 다양한 기술들이 생활에 응용되고 있다. 게코 도마뱀 발바닥의 섬유구조를 모방한 건식 접착 표면, 연잎의 표면의 구조를 모방하여 물에 젖지 않는 표면 등에 응용이 가능하다. 자연의 미세 구조를 3차원으로 가시화하여 분석할 수 있다면 또 다른 새로운 기술의 시대가 열릴 것으로 예상된다. 엑스선 나노 토모그래피는 엑스선의 높은 투과력을 이용하여 시료의 전처리나 압력 및 온도와 같은 환경적 제약이 적은 비파괴 검사로 물질 내부를 3차원으로 관찰할 수 있는 기법이다. 자연에서 볼 수 있는 미세 구조들을 보기 위해서는 고해상도 엑스선 토모그래피가 필수적이다. 빛의 속도에 가깝게 운동하는 고에너지의 상대론적 하전입자가 자기장 속에서 힘을 받아 운동 궤도가 휘어질 때 방출되는 강력한 전자기파인 방사광을 이용하면 고해상도의 엑스선 나노 토모그래피가 가능하다. 본 연구실에서는 포항가속기연구소의 X-ray Nano Imaging(XNI) 7C 범라인과 Bio Medical Imaging(BMI) 6C 범라인을 활용하여 자연에서 흔히 볼 수 있는 생체모방 다공성 재료들을 3차원으로 가시화하여 분석하는 연구를 수행하고 있다. 그림 3은 최근 엑스선 나노토모그래피를 이용한 나노입자의 3차원 가시화 결과이다.

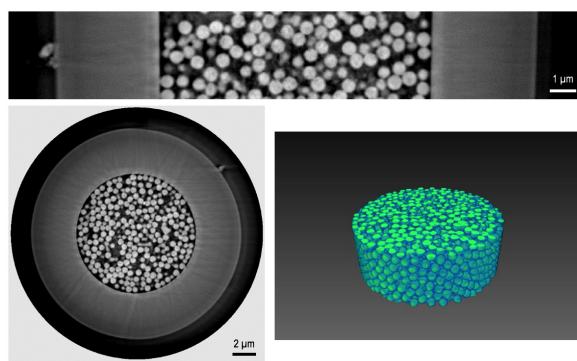


그림 3. 포항방사광가속기 엑스선 나노토모그래피에 의한 500 nm 실리콘 나노입자의 3차원 가시화.

3. 결론

최근 나노 생체 소재 연구의 핵심은 비파괴적으로 재료의 내부구조와 화학적 정보를 정확히 이해하고 제어하는 것이다. 엑스선 나노이미징과 나노토모그래피는 이러한 기초 및 응용 연구를 위해 필수적인 분석 기술이며, 다행스럽게도 우리나라에서는 포항방사광가속기에서 초고속 초고해상도 엑스선 나노현미경의 연구개발이 진행 중에 있다. 따라서 본 연구실은 앞으로 기초 과학과 응용 과학 분야에서 엑스선 나노현미경의 활용을 통해 새로운 나노 생체 소재 연구에 더 큰 기여를 하고자 한다.

감사의 글

본 엑스선 나노영상 연구는 한국연구재단 이공학개인기초연구지원사업, 현대미래기술연구과제, 삼성미래기술육성사업의 지원을 받아 수행하고 있다.

참고문헌

1. M. Holt, R. Harder, R. Winarski, and V. Rose, *Annu. Rev. Mater. Res.*, **43**, 183 (2013).
2. S. Karagadde, P. D. Lee, B. Cai, J. L. Fife, M. A. Azeem, K. M. Kareh, C. Puncreobutr, D. Tsivoulas, T. Connolley, and R. C. Atwood, *Nat. Commun.*, **6**, 8300 (2015).
3. J. Wang, C. Eng, Y. K. Chen-Wiegart, and J. Wang, *Nat. Commun.*, **6**, 7496 (2015).
4. K. Cho and B. M. Weon, *Polym. Sci. Technol.*, **24**, 596 (2013).
5. J. Lim, H. Kim, and S. Y. Park, *J. Synchrotron Rad.*, **21**, 827 (2014).
6. K. Cho, I. G. Hwang, Y. Kim, S. J. Lim, J. Lim, J. H. Kim, B. Gim, and B. M. Weon, *Sci. Rep.*, **6**, 22232 (2016).
7. J. Y. Kim and B. M. Weon, *Appl. Microscopy*, **44**, 30 (2014).
8. D. Gonzalez-Rodriguea, K. Guevorkian, S. Douzan, and F. Brochard-Wyart, *Science*, **338**, 910 (2012).
9. A. M. Torresa, J. B. Mathenya, T. M. Keaveny, D. Taylord, C. M. Rimnace, and C. J. Hernandez, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **113**, 2892 (2016).