

ฉบับแปลไทย (Thai Translations)

Echoes through time: the historical origins of the droplet dogma and its role in the misidentification of airborne respiratory infection transmission

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3904176

เสียงสะท้อนข้ามกาลเวลา: ความเป็นมาของความเชื่อเรื่องละอองฝอย และ
ความเข้าใจผิดเรื่องการแพร่เชื้อโรกระบบทางเดินหายใจผ่านอากาศที่ตามมา

J.L. Jimenez,¹ L.C. Marr,² K. Randall,³ E.T. Ewing,⁴ Z. Tufekci,⁵ T. Greenhalgh,⁶ D.K. Milton,⁷ R. Tellier,⁸ J. Tang,⁹ Y. Li,¹⁰ L. Morawska,¹¹ J. Mesiano-Crookston,¹² D. Fisman,¹³ O. Hegarty,¹⁴ S. J. Dancer,¹⁵ P.M. Bluyssen,¹⁶ G. Buonanno,¹⁷ M. Loomans,¹⁸ W. Bahnfleth,¹⁹ M. Yao,²⁰ C.Sekhar,²¹ P. Wargocki²², A. K. Melikov²², K.A. Prather²³

1: Dept. of Chemistry and Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado, Boulder, CO USA

2: Dept. of Civil and Environmental Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA

3 Dept. of English, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA

4: Dept. of History, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA

5: School of Information and Library Science, University of North Carolina, Chapel Hill, NC, USA 6: Dept. of Primary Care Health Sciences, Medical Sciences Div., Univ. of Oxford, UK

7: Dept. of Environmental Health, School of Public Health, University of Maryland, USA

8: Dept. of Medicine, McGill University, Canada.

9: Dept. of Respiratory Sciences, University of Leicester, Leicester, United Kingdom

10: Dept. of Mechanical Engineering, University of Hong Kong, Hong Kong, China

11: International Laboratory for Air Quality and Health, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia

12: Goldman Hine LLP, Toronto, Ontario, Canada

13: Dalla Lana School of Public Health, University of Toronto, Toronto, ON, Canada

14: School of Architecture, Planning & Environmental Policy, University College Dublin, Ireland 15: Dept. of Microbiology, Hairmyres Hospital, Glasgow, and Edinburgh Napier University, UK 16: Faculty of Architecture and the Built Environment, Delft University of Technology, The Netherlands 17: Dept. of Civil and Mechanical Engineering, University of Cassino and Southern Lazio, Cassino, Italy 18: Dept. of the Built Environment, Eindhoven University of Technology (TU/e), The Netherlands 19: Dept. of Architectural Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA 20: College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing, China

21: Department of the Built Environment, National University of Singapore, Singapore

22: Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark

23: Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, La Jolla, CA, USA.

Competing interests: The authors declare no competing interest.

Funding acknowledgements: M. Yao was supported by National Natural Science Foundation of China grants (21725701, 22040101) and Guangzhou Laboratory (EKPG21-02). T. Greenhalgh was supported by a Wellcome Senior Investigator grant (WT104830MA).

บทคัดย่อ

คำถามที่ว่า SARS-CoV-2 แพร่ผ่านละอองฝอย (droplets) หรือละอองลอย (aerosols) หรือไม่เป็นที่ถกเถียงกันอย่างมากระหว่างการวิจัยว่าด้วยการแพร่กระจายของโรคอื่นๆ มนุษย์เชื่อว่าโรคจำนวนมากแพร่ผ่านอากาศมาแทบจะตลอด ทั้งยังมักจะเชื่อว่าการแพร่กระจายเกิดขึ้นในระยะใกล้มากด้วยทฤษฎีที่เพื่อฝัน และความเชื่อเหล่านั้นก็มักจะผิดพลาด (เช่น มาลาเรีย อหิวาตกโรค) ทฤษฎีเชื้อก่อโรค (germ theory) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในช่วงกลางคริสต์ศตวรรษที่ 19th และการถดถอยของทฤษฎีไอพิษ (miasma theory) ทำให้ Charles Chapin เจ้าหน้าที่สาธารณสุขผู้มีชื่อเสียงในช่วงทศวรรษ 1910 เรียกร้องให้แวดวงสาธารณสุขให้ความสำคัญกับการแพร่เชื้อผ่านการสัมผัสและละอองฝอย อย่างไรก็ตาม เขาได้ก่อให้เกิดความเข้าใจผิดอย่างใหญ่หลวงประการหนึ่ง ซึ่งก็คือการติดเชื้อในระยะประชิด (close proximity) เกิดจากละอองฝอยพุ่ง (sprayborne) ขนาดใหญ่ที่ตกลงสู่พื้นอย่างรวดเร็วเพียงช่องทางเดียว และเชื่อว่าการแพร่ผ่านอากาศมีความเป็นไปได้น้อยมาก กระบวนทัศน์ใหม่นี้กลายเป็นกระแสหลักและนำไปสู่ข้อผิดพลาดเชิงระบบในการตีความหลักฐานการวิจัยเกี่ยวกับการแพร่กระจายโรค วงการแพทย์และวงการควบคุมการติดเชื้อไม่ยอมรับว่าโรคใดแพร่ผ่านอากาศเลยตลอดห้าทศวรรษถัดมา จนกระทั่งปี ค.ศ. 1962 (พ.ศ. 2505) เมื่อวัณโรค (ซึ่งถูกจำแนกผิดว่าแพร่ผ่านละอองฝอยมาก่อน) ได้รับการจำแนกใหม่ ถึงอย่างนั้นกระบวนทัศน์ของ Chapin ก็ยังเป็นกระแสหลักอยู่ และก่อนจะมีโรคโควิด-19 ก็มีเพียงไม่กี่โรคเท่านั้นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางว่าแพร่ผ่านละอองลอย ซึ่งก็คือเชื้อโรคที่แพร่ได้แม้จะอยู่ห่างไกลหรือแม้เวลาจะผ่านไปพักหนึ่ง การต่อต้านต่อแนวคิดที่ว่าโรคติดเชื้อทางเดินหายใจแพร่ผ่านอากาศไม่ใช่เรื่องใหม่ อันที่จริง เหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นซ้ำแล้วซ้ำเล่าตลอดศตวรรษที่ผ่านมา และทำให้ความรู้ความเข้าใจเรื่องกลไกการติดต่อของโรคต่างๆ ชะงักงันอย่างยิ่ง

บทนำ

การระบาดใหญ่ของ COVID-19 กระตุ้นให้เกิดการถกเถียงอย่างเข้มข้นว่าไวรัส SARS-CoV-2 ติดผ่านช่องทางใดกันแน่ ซึ่งหลักๆ แล้วมีอยู่สามช่องทางด้วยกันคือ หนึ่ง ละอองลอยพุ่ง (sprayborne) ซึ่งปลิวไปกระทบดวงตา จมูก หรือปาก แทนที่จะตกลงบนพื้นใกล้กับผู้ติดเชื้อ สองคือการสัมผัสโดยตรงหรือโดยอ้อม ("โฟไมต์ (fomites)") บนพื้นผิวที่ปนเปื้อน ตามด้วยการสัมผัสตา จมูก หรือปาก และข้อสามคือการสูดละอองลอยซึ่งลอยอยู่ในอากาศได้นานหลายชั่วโมงเข้าไป ("การแพร่ผ่านอากาศ") (1, 2)

ในช่วงแรก หน่วยงานด้านสาธารณสุข เช่น องค์การอนามัยโลก (WHO) ประกาศว่าไวรัสแพร่ผ่านละอองฝอยขนาดใหญ่ที่ตกสู่พื้นใกล้กับผู้ติดเชื้อและการสัมผัสพื้นผิวต่างๆ องค์การอนามัยโลกประกาศอย่างแข็งขันเมื่อวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ. 2564 (ค.ศ. 2020) ว่า SARS-CoV-2 ไม่ได้แพร่ผ่านอากาศ (เว้นแต่ในสถานการณ์ที่จำเพาะอย่างยิ่งซึ่งนิยามว่าเป็น "หัตถการก่อละอองลอย") และการกล่าวเป็นอย่างอื่นคือ "การให้ข้อมูลที่ผิดเพี้ยน" (3) ซึ่งขัดแย้งกับความเห็นของนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากที่กล่าวว่า การแพร่ผ่านอากาศมีบทบาทสำคัญ (เช่น 4, 5, 6) องค์การอนามัยโลกค่อย ๆ ลดทอนที่แข็งกร้าวดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป โดยเริ่มจากยอมรับว่าการแพร่ผ่านอากาศนั้นเป็นไปได้ แต่ไม่น่าจะเกิดขึ้น (7) ก่อนที่จู่ๆ จะหันมารณรงค์เรื่องการถ่ายเทอากาศเพื่อควบคุมการแพร่กระจายของไวรัส ซึ่งจะมีประโยชน์ก็ต่อเมื่อเชื้อโรคแพร่ผ่านอากาศเท่านั้น (8) และสุดท้ายก็ประกาศเมื่อวันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2564 (ค.ศ. 2021) ว่าการแพร่กระจายของ SARS-CoV-2 ผ่านละอองลอยมีนัยสำคัญ (9) แม้ว่าหัวหน้าฝ่ายวิชาการของทีมรับมือโรคระบาดใหญ่จากองค์การอนามัยโลกจะยอมรับว่า "เรารณรงค์เรื่องการถ่ายเทอากาศเพราะไวรัสนี้แพร่ผ่านอากาศได้" เธอก็ยอมรับเช่นกันว่ายังหลีกเลี่ยงการใช้คำดังกล่าว (10) ศูนย์ควบคุมและป้องกันโรค (CDC) ในสหรัฐอเมริกา ก็ปฏิบัติเช่นเดียวกัน คือเริ่มจากการย้ำความสำคัญของการแพร่ผ่านละอองฝอย จากนั้นจึงออกประกาศบนหน้าเว็บไซต์ซึ่งยอมรับว่ามีการแพร่ผ่านอากาศจริงในเดือนกันยายน พ.ศ. 2563 (ค.ศ. 2020) ซึ่งถูกลบออกในอีกสามวันถัดมา (11) และสุดท้ายในวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 (ค.ศ. 2021) จึงยอมรับว่าการสูดเอาละอองลอยเข้าไปมีบทบาทสำคัญในการแพร่เชื้อ (12) อย่างไรก็ตาม CDC ยังคงใช้คำว่า "ละอองฝอยทางเดินหายใจ" ซึ่งมักจะสัมพันธ์กับละอองฝอยขนาดใหญ่ที่ตกสู่พื้นอย่างรวดเร็ว (13) ในการกล่าวถึงละอองลอย (12) อย่างต่อเนื่องอันนำไปสู่ความสับสนอย่างมาก หน่วยงานทั้งสองต่างไม่ได้จัดงานแถลงข่าวหรือดำเนินแคมเปญประชาสัมพันธ์ขนาด

ใหญ่เพื่อเน้นย้ำถึงการเปลี่ยนแปลงข้างต้นแต่อย่างใด (14) และกว่าหน่วยงานทั้งสอง จะออกมายอมรับแบบแบ่งรับแบบสับสนสับสนเช่นนี้ หลักฐานสนับสนุนการแพร่ผ่าน อากาศก็มีมากจนล้นหลาม และนักวิทยาศาสตร์กับแพทย์จำนวนมากก็ออกมาพูดตรงๆ ว่าการแพร่ผ่านอากาศไม่ใช่แค่เรื่องเป็นไปได้ แต่คือช่องทางหลัก (15) เมื่อถึง เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2564 (ค.ศ. 2021) CDC ได้เปรียบเทียบการแพร่เชื้อของไวรัส delta SARS-CoV-2 กับโรคอีสุกอีใส ซึ่งเป็นไวรัสที่แพร่ผ่านอากาศได้ง่ายอย่างยิ่ง (16)

การที่หน่วยงานสาธารณสุขหลักๆ ยอมรับหลักฐานที่สนับสนุนว่า SARS-CoV-2 แพร่ผ่านอากาศอย่างซุกซนและไม่ชัดเจนเช่นนี้ทำให้การควบคุมโรคระบาดไม่ดี เท่าที่ควร ทั้งที่มีหลักฐานสนับสนุนประโยชน์ของมาตรการป้องกันการแพร่เชื้อ ผ่านละอองลอยมากมาย (17–20) การยอมรับหลักฐานนี้เร็วขึ้นจะนำไปสู่การกำหนด แนวทางปฏิบัติที่แยกกฎข้อบังคับภายในตัวอาคารและกลางแจ้งออกจากกัน สนับสนุน การทำกิจกรรมต่างๆ กลางแจ้งมากขึ้น แนะนำให้สวมหน้ากากเร็วขึ้น ตลอดจนการ ออกข้อบังคับให้สวมหน้ากากภายในอาคารแม้จะสามารถรักษาระยะห่างทางสังคมได้ก็ ตาม ข้อบังคับด้านการถ่ายเทอากาศ และการฟอกอากาศ การยอมรับให้เร็วกว่า นี้จะช่วยหลีกเลี่ยงการเสียเวลาและเงินมากเกินไปกับมาตรการต่างๆ เช่น การฆ่าเชื้อที่พื้นผิวและฉากพลาสติก ซึ่งไม่อาจลดการแพร่เชื้อผ่านอากาศได้ และในกรณีของมาตรการหลัง อาจให้ผลตรงกันข้ามด้วยซ้ำ (21)

เหตุใดหน่วยงานเหล่านี้จึงซุกซนๆ และเหตุใดจึงมีแรงต้านการเปลี่ยนแปลงมากมาย ขนาดนี้ บทความฉบับก่อนหน้าได้พิจารณาประเด็นเรื่องต้นทุนทางวิทยาศาสตร์ (ส่วน ได้ส่วนเสีย) จากมุมมองทางสังคมวิทยา (22) ไปแล้ว โดยชี้ว่าความพยายามที่จะ หลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับมาตรการจำเป็นในการควบคุมการแพร่เชื้อผ่าน อากาศ เช่น การซื้ออุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล (PPE) ที่คุณภาพสูงขึ้น ให้บุคลากรทางการแพทย์ (23) และระบบถ่ายเทอากาศที่ดีขึ้น (24) น่าจะเป็นสาเหตุ ประการหนึ่ง ขณะที่บทความอื่นๆ ได้อธิบายที่มาของความล่าช้าในแง่ของความรู้สึกถึง อันตรายที่แผ่มากับการใช้หน้ากากกรองอากาศ N95 (23) ซึ่งถูกหักล้างไปแล้ว (25) หรือเนื่องจากขาดประสิทธิภาพการจัดการวัสดุอุปกรณ์ในยามฉุกเฉิน ซึ่งนำไปสู่การขาดแคลนในช่วงต้นๆ ของการระบาดใหญ่ (เช่น 26)

อีกหนึ่งคำอธิบายเพิ่มเติมที่บทความเหล่านั้นไม่ได้กล่าวถึง แต่สอดคล้องกับ ผลลัพธ์ทั้งหมด ก็คือความลังเลที่จะพิจารณาหรือเชื่อแนวคิดที่ว่าเชื้อโรคแพร่ผ่าน อากาศนั้น ส่วนหนึ่งมีรากฐานมาจากแนวคิดที่ผิดพลาดซึ่งปรากฏขึ้น เมื่อกว่าศตวรรษก่อน และฝังแน่นในวงการสาธารณสุขและการป้องกันการติดเชื้อ ซึ่งก็

คือความเชื่อที่ว่า การแพร่กระจายของโรคทางเดินหายใจเกิดจากละอองฝอยขนาดใหญ่ ดังนั้นแค่ป้องกันละอองฝอยก็เพียงพอแล้ว เพื่อทำความเข้าใจว่าเหตุใดความผิดพลาดนี้ จึงคงอยู่ยาวนานนัก เราได้ย้อนไปสำรวจความเป็นมาของแนวคิดนี้ และ ทฤษฎีการแพร่กระจายโรคผ่านอากาศโดยทั่วไป และชี้ให้เห็นแนวโน้มสำคัญๆ ที่ทำให้ทฤษฎีละอองฝอยกลายเป็นความเชื่อกระแสหลัก

ระเบียบวิธีวิจัย

เน้นไปที่โรคติดเชื้อที่เข้าสู่ร่างกายผ่านทางเดินหายใจ (เช่น วัณโรค ไข้ทรพิษ หัด และไข้หวัดใหญ่) และโรคอื่นๆ ที่เคยคิดว่าแพร่ผ่านอากาศ (เช่น มาลาเรียและอหิวาตกโรค) เป็นหลัก เรารวบรวมทฤษฎีและแบบจำลองของการแพร่เชื้อโรคในประวัติศาสตร์ตั้งแต่สมัยกรีกโบราณจนถึงปัจจุบัน เริ่มต้นจากแหล่งข้อมูล ที่ผู้เขียนรู้จัก จากนั้นจึงสืบค้นย้อนหลัง (เอกสารอ้างอิงของแหล่งข้อมูลเหล่านั้น) และไปข้างหน้า (ใช้ Google Scholar เพื่อดูว่าแหล่งข้อมูลได้อ้างอิงข้อมูลดังกล่าวบ้าง) นอกจากนี้ เรายังสืบค้นใน PubMed, Google Scholar และ Web of Science รวมถึงปรึกษาผู้เชี่ยวชาญเพื่อค้นหาเอกสารที่สำคัญอื่นๆ ในหัวข้อเดียวกัน เราใช้วิธีการแบบบรรทัดปริวรรตศาสตร์ (hermeneutic) ในการสังเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้ ออกมาเป็นบทสังเคราะห์เชิงบรรยาย เพื่อสร้างภาพที่สมบูรณ์ขึ้นเรื่อยๆ ว่าแนวคิด ว่าด้วยการแพร่กระจายของโรคหนึ่ง ๆ นั้นถือกำเนิดขึ้นมาได้อย่างไรในตอนแรก และหลักฐานเชิงประจักษ์ใดบ้างที่นำไปสู่การแก้ไขแบบจำลองว่าด้วยการแพร่เชื่อนั้นๆ และเพื่อให้การตีความละเอียดยิ่งขึ้น เราจึงใจค้นหาคำการศึกษาเพื่อคัดค้าน (ยกตัวอย่าง เช่น เราจึงใจค้นหาคำการศึกษาที่ทำลายแบบจำลองและสมมติฐานกระแสหลักในยุคนั้นๆ) หากต้องการรายละเอียดเพิ่มเติมว่าด้วยกลยุทธ์ในการสืบค้น โปรดติดต่อผู้เขียน

ผลลัพธ์ของการศึกษา

ทฤษฎีการแพร่กระจายโรคตลอดประวัติศาสตร์ส่วนใหญ่ของมนุษย์: ไอพิษ และอากาศติดเชื้อ

มนุษยชาติพยายามไขปริศนาว่าด้วยการแพร่เชื้อโรคนานกว่าสองพันปีแล้ว การ สืบสวนว่าโรคติดต่อแพร่กระจายได้อย่างไรนั้นเป็นเรื่องยากอย่างยิ่ง เมื่อมีคนล้มป่วย เราต้องพิจารณาว่ากิจกรรมใดในหมู่กิจกรรมต่างๆ มากมายที่พวกเขาทำ (และเชื้อใดที่พวกเขาได้ รั่ว) นำไปสู่การติดเชื้อดังกล่าว อุปสรรคเหล่านี้ทำให้การหา

คำอธิบายว่าผู้คนล้มป่วยได้อย่างไรเป็นเรื่องยาก และทำให้ทฤษฎีการแพร่เชื้อที่ไม่ถูกต้องกลายเป็นเรื่องฝังจำ ซึ่งแก้ไขได้ยากมากแม้ทฤษฎีฝ่ายตรงข้ามจะมีหลักฐานสนับสนุนอย่างแน่นหนาก็ตาม การแพร่เชื้อผ่านอากาศยังตรวจจับได้ยากเป็นพิเศษ เนื่องจากอนุภาคก่อโรคนั้นเล็กจนมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าและการเคลื่อนที่ของอากาศก็มีข้อจำกัดที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับช่องทางอื่นๆ เช่น การแพร่ผ่านน้ำ อาหาร มือ หรือยุง

ในสมัยกรีกโบราณ Hippocrates เสนอว่าโรคต่างๆ เกิดจากความไม่สมดุลของของเหลว (humour) ในร่างกาย ซึ่งอาจถูกกระตุ้นโดย "ไอพิษ (miasma)" ที่ลอยอยู่ในอากาศ "เมื่อใดก็ตามที่ผู้คนจำนวนมากป่วยด้วยโรคเดียวกันในเวลาเดียวกัน ต้นเหตุควรจะมาจากร่างกายที่พบมากที่สุดและที่เราทุกคนใช้มากที่สุด นั่นก็คือสิ่งที่เราสูดหายใจเข้าไป" (27) ข้อสันนิษฐานเรื่องความไม่สมดุลระหว่างของเหลวนี้อยู่เป็นต้นกำเนิดของทฤษฎีบุคลิกภาพอีกด้วย ตัวอย่างเช่น "อาการเส่ร้าโศก" เกิดจากการมีน้ำดีสีดำนมากเกินไป ("melaina chole") และมนุษย์ก็เชื่อว่าโรคต่างๆ แพร่ผ่านอากาศแทบจะตลอดมาหลังจากนั้น ด้วยเหตุที่ตัวก่อโรคซึ่งแพร่ผ่านอากาศที่แท้จริงยังเป็นปริศนาต่อไปอีกหลายศตวรรษ คำอธิบายที่ใช้กันจึงเป็นเพียงคำคร่าวๆ เช่น "ไอพิษ (miasmas)" หรือ "อากาศเสีย (bad air)" (28) ดังที่ปรากฏในรากศัพท์ของคำว่า มาลาเรีย (จาก "mala aria" หรือคำว่า "อากาศไม่ดี" ในภาษาอิตาลียุคกลาง) ทฤษฎีกำเนิดโรคบางทฤษฎีลงรายละเอียดมากกว่าทฤษฎีอื่นๆ ตัวอย่างเช่น Marcus Terentius Varro นักคิดชาวโรมัน (116-27 ปีก่อนคริสตกาล) เขียนว่าหนองน้ำเป็นแหล่งเพาะพันธุ์หลักของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่ "ลอยอยู่ในอากาศเข้าสู่ร่างกายทางปากและจมูก และก่อโรคร้ายแรง" (28) แนวคิดเหล่านี้ทำให้จักรวรรดิโรมันออกนโยบายระบายน้ำออกจากหนองน้ำต่างๆ ซึ่งเป็นการกำจัดแหล่งเพาะพันธุ์ยุงและลดอุบัติการณ์ของโรคมาลาเรีย ถือเป็นตัวอย่างของทฤษฎีที่ผิดพลาดซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีโดยบังเอิญ แต่ไม่ว่าจะแพร่กระจายหรือถูกกระตุ้นโดยของเหลวที่ไม่สมดุลหรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ทฤษฎีส่วนใหญ่ก็ไม่ได้มองว่าการติดเชื้อผ่านอากาศนั้นเป็นการถ่ายทอดจากคนสู่คน โรคติดเชื้อนั้นเพียงแต่ลอยอยู่ในอากาศและทำให้คนล้มป่วย

Ibn Sina แพทย์ชาวเปอร์เซีย ได้สรุปทฤษฎีไอพิษตามแบบกรีกโรมันไว้ใน *Canon of Medicine* เมื่อ ค.ศ. 1025 แต่ก็ผสมผสานแนวคิดที่ว่าผู้คนสามารถแพร่โรคไปยังผู้อื่นผ่านทางลมหายใจไว้ด้วยเช่นกัน (29) อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีการแพร่กระจายโรคจากคนสู่คนผ่านการติดเชื้อยังไม่เป็นรูปเป็นร่างอย่างชัดเจน

จนกระทั่งถูกนำเสนอโดย Girolamo Fracastoro (ค.ศ.1478-1553) แพทย์ชาวอิตาลี เมื่อปี ค.ศ. 1546 (30) แนวคิดนี้ต่อยอดมาจากทฤษฎี "เมล็ดพันธุ์" ของ Galen of Pergamon แพทย์และนักเขียนชาวกรีกที่ผลิตงานไว้มากมาย (162 ถึง 203 CE) (31) ทฤษฎีเมล็ดพันธุ์ของ Galen ไม่แพร่หลายในวงกว้างซึ่งอาจเป็นเพราะเขากล่าวถึงมันเพียงครั้ง ๆ กลาง ๆ จึงถูกบดบังด้วยงานเขียนส่วนใหญ่ของเขายังคงยึดทฤษฎีของเหลวของแบบฮิปโปเครติส (32) ที่น่าสนใจก็คือตำราของ Fracastoro เสนอว่าเมล็ดพันธุ์ของโรคที่ทำให้เกิดโรคติดต่อหรือที่เขาเรียกว่า "seminaria" แพร่กระจายได้สามลักษณะด้วยกันคือ ทางตรง ทางอ้อม และทางไกล เขาเสนอแนะว่าการแพร่ระบาดทางไกลนั้นรุนแรงที่สุด และรุนแรงกว่าการแพร่เชื้อโดยตรงด้วยซ้ำ แต่จากงานเขียนของเขา เมล็ดพันธุ์เหล่านี้จะเป็นสารเคมีมากกว่าสิ่งมีชีวิต

ในปี ค.ศ. 1590 เพียงไม่ถึงครึ่งศตวรรษหลัง Fracastoro เผยแพร่งานเขียนดังกล่าว Hans และ Zacharias Janssen ผู้ผลิตแว่นตาได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์ขึ้น นักวิทยาศาสตร์คนอื่น ๆ นำสิ่งประดิษฐ์นี้ไปใช้ค้นหาจุลินทรีย์อย่างรวดเร็ว (33) ในค.ศ. 1665 เชื้อรากถูกค้นพบโดย Robert Hooke ผู้ตีพิมพ์ *Micrographica* ผลงานอันมีชื่อเสียงของเขาในค.ศ. 1667 (34) ขณะที่แบคทีเรียถูกค้นพบโดย Antoni van Leeuwenhoek ใน ค.ศ. 1676 การค้นพบเหล่านี้เป็นก้าวอย่างที่สำคัญ เพราะมันแสดงให้เห็นถึงการแพร่หลายของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่เล็กเกินกว่าจะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่กลับอาจก่อให้เกิดโรคได้ อย่างไรก็ตาม สิ่งที่เกิดขึ้นหลังแนวคิดของ Fracastoro กลับเป็นการโต้แย้งนานหลายศตวรรษระหว่าง "สายไอพิษ (miasmatic)" ซึ่งยึดมั่นในแนวคิดที่ว่าโรคต่างๆ ลอยไปในอากาศเป็นระยะทางไกลๆ และ "สายติดเชื้อ (contagionist)" ซึ่งยอมรับว่าโรคแพร่จากคนสู่คนได้ (35)

ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ การระบุให้แน่ชัดว่าคนติดเชื้อมาจากที่ใดเป็นเรื่องยากมาก การโต้แย้งเหล่านี้จึงไม่มีข้อยุติ บางครั้งการสังเกตการณ์จะพบว่าการการกักกันไม่ได้ผล ทำให้ทฤษฎีไอพิษเป็นฝ่ายถูก และในทางกลับกัน ผู้คนไม่ได้ป่วยขึ้นมาเองเสมอไป ความเจ็บป่วยจึงอาจเกิดจากการติดต่อก็ได้ ในที่สุดก็มีแนวคิดพบกันครึ่งทางที่เรียกว่า "การติดต่อตามสถานการณ์" ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ปฏิเสธการใช้คำว่า "โรคติดต่อ" เรียกการติดเชือบางอย่าง การติดต่อตามสถานการณ์ถูกนำมาใช้อธิบายว่า โรคบางอย่าง เช่น อหิวาตกโรคหรือไข้รากสาดใหญ่นั้นไม่ติดต่อในสภาพแวดล้อมที่ดี แต่อาจติดต่อก็ได้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่บริสุทธิ์ (36) เนื่องจากแนวคิดนี้ได้มาจากการสังเกตการณ์จริง จึงสะท้อนความจริงบางประการ ยกตัวอย่างเช่น โรคติดต่อผ่านอากาศแพร่ระบาดได้ง่ายขึ้นในอาคารที่การถ่ายเทอากาศไม่ดี (15)

Florence Nightingale (ค.ศ. 1820-1910) เชื่อในทฤษฎีไอพิซ (miasmatist) และได้เขียนไว้ใน *Notes on Nursing* ว่า “การติดต่อ (contagion) หมายความว่าอย่างไร มันกล่าวเป็นนัยว่าโรคติดต่อจากคนสู่คนจากการสัมผัส[...] แนวคิดนี้ช่างไร้สาระเป็นที่สุด กล่าวโดยสรุปก็คือ [...] ไม่มีหลักฐานใดๆ [...] ว่ามีสิ่งที่เรียกว่า ‘การติดต่อ’” (37) อย่างไรก็ตาม เธอได้ร่วมมือกับผู้เชื่อในทฤษฎีการติดต่อตามสถานการณ์ (contingent contagionist) ในการดำเนินมาตรการด้านสุขอนามัย เธอลดอัตราการติดเชื้อด้วยสุขอนามัย การถ่ายเทอากาศ เพิ่มระยะห่างระหว่างเตียงผู้ป่วย และสร้าง “หอผู้ป่วยแยก” สำหรับผู้ป่วยวัณโรค ผู้บังคับบัญชาของเธอและรัฐบาลอังกฤษต่อต้านแนวทางเหล่านี้อย่างมีนัยสำคัญทีเดียว (37–39)

Snow, Semmelweis และหน่วยงานด้านสาธารณสุข

ในปีค.ศ. 1854 (พ.ศ. 2397) เกิดอหิวาตกโรคระบาดในลอนดอน หน่วยงานด้านสาธารณสุขเชื่อว่ามันเกิดจากไอพิซ นักปฏิรูประบบสุขาภิบาลชาวอังกฤษอย่างเช่น Sir Edwin Chadwick ผู้บุกเบิกแนวทางปฏิบัติด้านสาธารณสุขสมัยใหม่จำนวนมาก (40) ชอบทฤษฎีไอพิซ เพราะดูเหมือนว่ามันจะอธิบายความชุกของโรคในย่านที่มีน้ำขัง สกปรก และมีกลิ่นเหม็น อันเป็นที่อยู่อาศัยของคนยากจน และสนับสนุนความพยายามในการแก้ไขปัญหาเหล่านั้น (41)

John Snow คือนายแพทย์ผู้มั่งคั่งแต่ถือเป็นคนนอกแวดวงสาธารณสุข เขาทำงานด้านวิสัญญีวิทยา ประสบการณ์ในสายงานนั้นทำให้เขาค้นเจอกับพฤติกรรมของก๊าซดี และตระหนักว่าการแพร่กระจายของโรคไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมก๊าซ เขาสังเกตเห็นว่าผู้ติดเชื้อกระจุกตัวกันในเขตหนึ่งของลอนดอน และเกลี้ยกล่อมสภาท้องถิ่นให้ถอดคันโยกเครื่องสูบน้ำสาธารณะที่ถนน Broad Street ออกซึ่งหยุดยั้งการแพร่ระบาดของโรคได้ (42) แต่กว่าจะถึงเวลานั้น อัตราการระบาดก็ลดลงแล้ว ท้ายที่สุดคณะกรรมการสาธารณสุขก็ไม่ยอมรับว่าน้ำที่ปนเปื้อนคือสาเหตุ และออกรายงานว่า “เราไม่พบว่ามีเหตุผลที่จะยอมรับความเชื่อนี้ [อหิวาตกโรคแพร่กระจายผ่านน้ำ]” และบอกว่าข้อสรุปของ Snow เป็นเพียงแค่ “ข้อเสนอแนะ” (43) เท่านั้น Snow เสียชีวิตก่อนที่การค้นพบของเขาจะได้รับการยอมรับ กลุ่มสนับสนุนการสุขาภิบาลมีแรงจูงใจอย่างมากในการปฏิเสธว่าน้ำที่เป็นแหล่งของอหิวาตกโรค เพราะพวกเขาเป็นหัวหอกในการสร้างท่อระบายน้ำซึ่งทิ้งสิ่งปฏิกูลที่ไม่ได้บำบัดลงในแม่น้ำเทมส์อันเป็นแหล่งน้ำดื่มส่วนใหญ่ในลอนดอน เพื่อขจัดไอพิซซึ่งกลายเป็นการช่วยแพร่อหิวาตกโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ การยอมรับอหิวาตกโรคแพร่ผ่านน้ำจะทำให้พวกเขาสูญเสียสิ่งต่างๆ มากมาย รวมทั้งชื่อเสียงด้วย

Ignaz Semmelweis คือผู้บุกเบิกแนวคิดโรคติดต่ออีกคนซึ่งถูกเพิกเฉยในที่แรก เนื่องจากเสนอแนวคิดที่ดูโง่เงาเกินไปสำหรับหน่วยงานต่างๆ ในสมัยนั้น ขณะทำงานในกรุงเวียนนาเมื่อค.ศ. 1847 (พ.ศ. 2390) เขาแสดงให้เห็นว่าการล้างมือลดการเสียชีวิตของมารดาหลังคลอดได้อย่างมาก (44) แต่แนวคิดดังกล่าวขัดแย้งกับความเชื่อทางการแพทย์ และทางวิทยาศาสตร์กระแสหลักในขณะนั้น ซึ่งยังคงอธิบายโรคต่างๆ ว่าเกิดจากความไม่สมดุลของของเหลว นอกจากนี้เพื่อนร่วมงานยังไม่พอใจทั้งความโง่เงาของ Semmelweis และนัยแฝงที่ว่าพวกเขากำลังทำร้ายคนไข้ด้วยการไม่ล้างมือ คนส่วนใหญ่จึงเพิกเฉย ปฏิเสธ หรือกระทั่งเยาะเย้ยเขา แม้ข้อมูลของ Semmelweis จะน่าสนใจ แต่เขาก็กลับถูกไล่ออกจากโรงพยาบาล และถูกชุมชนทางการแพทย์ในกรุงเวียนนาคุกคามอย่างมากจนจำต้องย้ายไปบูดาเปสต์ หลังอยู่ที่นั่นหลายปี เขาก็เสียชีวิต ถูกจับขังคุก และถูกเจ้าหน้าที่ซ้อม จนท้ายที่สุดก็เสียชีวิตจากการติดเชื้อที่บาดแผล Semmelweis เองก็เป็นเช่นเดียวกับ Snow คือไม่เคยได้เห็นผลงานของตนเองผลิตดอกออกผล เพราะความสำคัญของการล้างมือเพื่อลดการติดเชื้อได้รับการยอมรับจากชุมชนทางการแพทย์หลังจากที่เขาตายไปแล้ว ที่น่าขันขึ้นคือ ชื่อของ Semmelweis ไม่ได้เป็นที่จดจำเพราะความคิดก้าวหน้าในด้านการล้างมือของเขาเท่านั้น แต่ยังถูกจดจำในสำนวนว่า “Semmelweis reflex” ซึ่งหมายถึงแนวโน้มที่จะปฏิเสธหลักฐานใหม่หรือความรู้ใหม่โดยอัตโนมัติเพราะขัดแย้งกับบรรทัดฐาน ความเชื่อ หรือกระบวนทัศน์ที่มีอยู่เดิม (45)

ครึ่งหลังของศตวรรษที่ 19: ทฤษฎีเชื้อโรค

Pasteur และ Koch นำเสนอหลักฐานสนับสนุนทฤษฎีเชื้อก่อโรค (germ theory of disease) ในค.ศ. 1833 (พ.ศ. 2376) ซึ่งถือเป็นครึ่งหลังของศตวรรษที่ 19 และในปีค.ศ. 1861 (พ.ศ. 2404) Pasteur ก็ได้ทำการทดลองซึ่งหักล้างทฤษฎีที่ว่าเชื้อโรคกำเนิดขึ้นได้เอง (spontaneous generation) และพิสูจน์ว่ามีจุลชีพอยู่ในอากาศ (46) อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีเชื้อโรคที่ว่านี้ก็ไม่ได้ได้รับการยอมรับในชั่วข้ามคืน และเผชิญการต่อต้านอย่างมากเช่นกัน ตัวอย่างเช่น มีการทดลองโดยผู้อื่นซึ่งทำการต้มน้ำที่มีอินทรียวตฤในภาชนะปิด แต่ก็ยังพบจุลชีพเหลืออยู่ (มีการพิสูจน์ในภายหลังว่าเป็นเพราะการปนเปื้อนภาชนะไม่สมบูรณ์หรือเวลาเดือดไม่เพียงพอ) ซึ่งนำไปสู่การโต้เถียงอย่างมากในขณะนั้น (47) อย่างไรก็ตาม ความนิยมในทฤษฎีไอพิซ (miasma) ก็เริ่มเสื่อมถอยในช่วงปลายศตวรรษ 1880 และ Institut Pasteur ก็ถูกก่อตั้งขึ้นในปารีสเมื่อค.ศ. 1888 (พ.ศ. 2431) ซึ่งสะท้อนถึงการเข้ามาเป็นกระแสหลักของทฤษฎีเชื้อโรค ไวรัสถูกค้นพบครั้งแรกใน

ค.ศ. 1890 (พ.ศ. 2433) (48, 49) ตามด้วย "ยุคทอง" ของการระบุตัวจุลชีพที่ก่อโรคติดเชื้อต่างๆ มากมาย

ถึงกระนั้น การค้นพบและความสามารถในการระบุตัวจุลชีพที่ก่อให้เกิดโรคต่างๆ ก็ไม่ได้ช่วยให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นว่าโรคแพร่จากคนหนึ่งไปสู่อีกคนได้อย่างไร ตัวอย่างเช่น นายแพทย์ Charles Laveran ชาวฝรั่งเศสค้นพบเชื้อก่อโรคมาลาเรียเมื่อปีค.ศ. 1880 (พ.ศ. 2423) แต่ก็ยังเชื่อว่าเชื้อแพร่ผ่านอากาศ นายแพทย์ Albert Freeman Africanus King เป็นคนแรกที่เสนอทฤษฎีที่ว่ามาลาเรียแพร่ผ่านยุง แต่ก็เผชิญกับการตั้งคำถามอย่างมาก ในปีค.ศ. 1883 (พ.ศ. 2426) เขาได้นำเสนอข้อเท็จจริง 19 ประการที่สนับสนุนทฤษฎีที่ว่ายุงเป็นพาหะในการแพร่เชื้อมาลาเรีย ทว่าทฤษฎีนี้จะได้รับการยอมรับก็ปีค.ศ. 1898 (พ.ศ. 2441) เมื่อ Ronald Ross ศัลยแพทย์ชาวอังกฤษ นำเสนอหลักฐานที่แน่ชัด ซึ่งยืนยันการมีอยู่ของปรสิตมาเลเรียในยุง และแสดงว่ายุงแพร่เชื้อมาลาเรียในนกได้อย่างไร (28)

ในช่วงทศวรรษที่ 1890 (พ.ศ. 2433) Carl Flügge ชาวเยอรมันมุ่งมั่นที่จะหักล้างทฤษฎีการแพร่เชื้อวัณโรคซึ่งเชื่อกันอยู่แต่เดิม ผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่เชื่อว่าวัณโรคซึ่งเป็นโรคติดเชื้อที่สำคัญที่สุดโรคหนึ่งในสมัยนั้น จะแพร่ไปก็ต่อเมื่อผงละอองเสมหะ (น้ำลาย) ที่แห้งแล้วซึ่งตกอยู่บนพื้น ผ้าห่ม ชาม และวัตถุปนเปื้อนอื่นๆ พุ้งกระจายไปในอากาศ แต่ Flügge เชื่อว่าการติดเชื้อไม่ได้เกิดจากสารคัดหลั่งที่แห้งแล้ว แต่เป็นสารคัดหลั่งสดใหม่ที่ปลิวไปถึงตัวผู้อื่นก่อนจะตกสู่พื้น (50) นักวิชาการในสมัยเดียวกับ Flügge หลายคนตีความทฤษฎีนี้ไปว่าการแพร่เชื้อวัณโรคต้องอาศัยละอองขนาดใหญ่ ซึ่งมองเห็นได้ง่ายด้วยตาเปล่าเท่านั้น (51) อย่างไรก็ดี แม้คำว่า "ละอองฝอย (droplet) ของ Flügge" จะถูกนำมาใช้กับอนุภาคขนาดใหญ่ที่ตกลงสู่พื้นใกล้ตัวผู้ติดเชื้ออย่างรวดเร็วซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นช่องทางการแพร่กระจายหลักเท่านั้น (เช่น 52) นิยามดังกล่าวก็ไม่ได้สะท้อนถึงผลการทดลองที่แท้จริงของ Flügge อันที่จริง Flügge และทีมงานใช้คำว่า "ละอองฝอย (droplet)" กับอนุภาคทุกขนาดที่พุ่งออกจากร่างกาย รวมถึงละอองลอยที่นักวิจัยต้องรอนาน 5 ชั่วโมง กว่าจะตกจากอากาศลงมาบนจานเก็บเชื้อที่ใช้

การสอบสวนการแพร่เชื้อผ่านอากาศยังคงดำเนินต่อไป ในปี ค.ศ. 1905 (พ.ศ. 2448) นักจุลชีววิทยาชื่อ M.H. Gordon ได้รับมอบหมายให้ศึกษาสุขอนามัยทางอากาศของสภาผู้แทนราษฎรแห่งสหราชอาณาจักรหลังไข้หวัดใหญ่ระบาดในหมู่สมาชิก การทดลองซึ่งทำให้ Gordon โด่งดังไปทั่วนั้นเริ่มจากการกลั้วคอด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวที่เพาะเชื้อ *Serratia marcescens* (ชื่อเดิมคือ *B. prodigiosus* ฯลฯ ซึ่งพบได้ทั่วไป

ในสิ่งแวดล้อม เชื้อดังกล่าวผลิตเม็ดสีแดงสดที่ทำให้สังเกตเห็นโคโลนีได้ชัดเจน และมักถูกนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดทางชีวภาพ) ก่อนจะทอบบทประพันธ์ของเชคสเปียร์ ออกมาดั่ง ๆ ในรัฐสภาที่ปราศจากผู้คนแต่ว่างจานเลี้ยงเชื้อไว้ เพื่อดูว่า ละอองลอยและละอองฝอยที่มีเชื้อโรคจะปลิวไปได้ไกลแค่ไหน แม้จำเพาะเชื้อที่อยู่ใกล้ กับผู้พูดจะมีเชื้อขึ้นมากกว่า แต่ก็พบเชื้อบนจานเลี้ยงเชื้อบางใบซึ่งอยู่ไกลออกไปถึง 21 เมตรเช่นกัน (53, 54) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของเทคนิคการทดลองในสมัยนั้นทำให้ไม่ มีความคืบหน้าใดมากนัก

Charles Chapin, Contact Infection และ Key Errors

จุดพลิกผันในประวัติศาสตร์การทำความเข้าใจกับการแพร่เชื้อผ่าน อากาศนี้เป็นผลงานของ Charles V. Chapin นักระบาดวิทยาชื่อดังชาวอเมริกัน Chapin เริ่มงานหลังทฤษฎีเชื้อก่อโรคได้รับการยอมรับไม่กี่ทศวรรษ อันเป็นยุคที่ มีการวิจัยเรื่องการแพร่เชื้อโรคอย่างเข้มข้น และเป็นยุคหลัง การเปลี่ยนแปลงกระบวนการทัศนคติครั้งใหญ่ ซึ่งทุกสิ่งยังไม่ตายตัว การ เปลี่ยนวาทกรรมทางวิทยาศาสตร์ที่เป็นกระแสหลักอยู่จึงง่ายกว่าปกติ (55) เขาสรุปหลักฐานว่าด้วยการแพร่กระจายของโรคต่าง ๆ ไว้ใน "The Sources and Modes of Infection" อันเป็นหนังสือที่มีอิทธิพลอย่างยิ่งซึ่งตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1910 (พ.ศ. 2453) (56) ความสำเร็จในงานป้องกันการติดเชื้อต่าง ๆ ของ Chapin นำมาสู่แนวคิด ว่าด้วย "การติดเชื้อจากการสัมผัส (contact infection)" กล่าวคือ การติดเชื้ออัน เนื่องมาจากเชื้อโรคที่ไม่ได้อยู่ในสิ่งแวดล้อม แต่มาจากบุคคลอื่น ผ่าน การสัมผัสโดยตรงหรือการอยู่ใกล้ชิดกัน Chapin เชื่อว่าการติดเชื้อจากการสัมผัสนี้คือ ช่องทางหลักในการแพร่เชื้อโรคต่าง ๆ แต่แนวคิดของเขาก็เผชิญกับแรงต้าน เช่นเดียวกับทฤษฎีใหม่ทั้งหลาย "มีคนบอกว่าผมให้ความสำคัญกับการติดเชื้อจาก การสัมผัสมากเกินไป" เขาเขียนไว้ แม้ว่า "มันเพียงจะเป็นที่สนใจไม่นานมานี้เอง" Chapin เองก็ยอมรับหนักถึงแรงต้านที่ Semmelweis, Snow, Pasteur, Koch, King และคนอื่น ๆ ต้องเผชิญ และตระหนักถึงความจำเป็นของการนำเสนอหลักฐานที่รัดกุม หากคิดจะโน้มน้าวเพื่อนร่วมวงการให้ตระหนักถึงความสำคัญของการติดเชื้อจาก การสัมผัส

Chapin ยังทบทวนความเป็นไปได้ของการติดเชื้อผ่านอากาศด้วย แม้กระบวนการที่ เปลี่ยนไปทำให้โรคติดต่อสำคัญ ๆ เช่น อหิวาตกโรคและมาเลเรียซึ่งเชื่อกันว่า แพร่ผ่านอากาศมานานหลายศตวรรษ ถูกมองว่าน่าจะแพร่ผ่านทางอื่นมากกว่าแล้วก็ จริง แต่วงการสาธารณสุขก็ยังมองว่าการแพร่เชื้อผ่านอากาศนั้นมีความเป็นไปได้มาก

พอที่ Chapin ควรจะพิจารณา และทฤษฎีไอพิชที่ว่าโรคภัยล่องหนแพร่ผ่านอากาศก็ยังคงติดอยู่ในใจสาธารณชน ดังที่ Chapin เองก็เขียนไว้ท้ายบทว่า ความเชื่อเรื่องการแพร่เชื้อผ่านอากาศที่ยังตกค้างอยู่ในวงกว้างถือเป็นอุปสรรคสำคัญในการส่งเสริมแนวคิดที่ว่าด้วยความสำคัญของการติดเชื้อจากการสัมผัสของเขา: “ถ้าห้องผู้ป่วยเต็มไปด้วยเชื้อโรคลอยละล่อง เราจะเสียแรงป้องกันการติดเชื้อจากการสัมผัสไปเพื่ออะไร [...] จากประสบการณ์ของผม เราไม่สามารถสอนผู้คนให้หลีกเลี่ยงการติดเชื้อจากการสัมผัสได้ トラบเท่าที่พวกเขาจะปักใจเชื่อว่าอากาศเป็นพาหะนำเชื้อหลัก”

Chapin ทราบเรื่องผลงานของ Flügge และการทดลองที่รัฐสภาแห่งสหราชอาณาจักร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเชื้อโรคเดินทางได้ไกลและลอยอยู่ในอากาศได้หลายชั่วโมง ทั้งยังตระหนักว่าทฤษฎีการติดเชื้อผ่านอากาศก็อธิบายการติดเชื้อในระยะประชิดได้ แต่โต้แย้งว่าละอองฝอยพุ่ง (spray-borne) ซึ่งเป็นละอองขนาดใหญ่ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าตามแนวคิดของ Cornet และคนอื่นๆ นั้นเป็นเหตุผลที่อธิบายได้ดีกว่าว่าทำไมผู้คนจึงติดเชื้อง่ายเมื่ออยู่ใกล้ชิดกัน เขาโต้แย้งว่าในเมื่อเชื้อโรคจะตายหรือสูญเสียความสามารถในการแพร่เชื้อเมื่ออยู่นอกร่างกายมนุษย์ ยิ่งเราอยู่ใกล้กันเท่าใดเราก็จะมีโอกาสติดเชื้อจากกันมากขึ้นเท่านั้น การอยู่ใกล้กันเปิดโอกาสให้เกิดการ “ถ่ายทอดสารคัดหลั่ง” มากมาย รวมถึงการถ่ายทอดระหว่างผู้ที่ไม่มีอาการด้วย ดังที่ Koch ค้นพบในกรณีของอหิวาตกโรค (57) หรือ “ไทฟอยด์แมรี” ผู้โด่งดัง ซึ่งเป็นแม่ครัวที่ไม่แสดงอาการใดๆ แต่แพร่เชื้อไทฟอยด์ให้กับคนอื่นๆ ถึง 53 คนในนิวยอร์กซิตี้เมื่อปี ค.ศ. 1907 (พ.ศ. 2450) (58) Chapin กล่าวว่า “ไม่มีหลักฐานใดๆ บ่งชี้ว่า [การแพร่เชื้อผ่านอากาศ] เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญในการควบคุมโรคติดต่อที่พบส่วนใหญ่” และที่สำคัญที่สุดก็คือเขาตีความไปว่าการขาดหลักฐานแปลว่าไม่มีหลักฐาน “ดังนั้นจึงสมเหตุสมผลที่เราจะทิ้งสมมติฐาน [การแพร่เชื้อในอากาศ] นั้นเสีย และให้ความสำคัญกับการป้องกันการติดเชื้อจากการสัมผัสเป็นหลัก” เขากล่าวสรุป “คนส่วนใหญ่คงจะโล่งใจอย่างยิ่งที่จะได้เป็นอิสระจากการหลอกหลอนของทฤษฎีอากาศที่ติดเชื้อ อันเป็นผีร้ายที่หลอกหลอนเผ่าพันธุ์ของเรามาตั้งแต่สมัยของฮิปโปเครติส”

ทั้ง Snow และ Semmelweis ต่างไม่ใช่ผู้มีชื่อเสียงในวงการสาธารณสุขตอนที่ทำการค้นพบครั้งใหญ่ จึงเผชิญกับแรงต้านทางความคิดมากกว่า (59) แต่ Chapin อยู่ในตำแหน่งที่เปลี่ยนกระบวนทัศน์ว่าด้วยการแพร่เชื้อได้ง่ายกว่ามาก ทั้งด้วยความที่เขาเป็นเจ้าหน้าที่สาธารณสุขที่ทำงานมานาน และความสำเร็จในการลดการติดเชื้อภายในโรงพยาบาลแห่งใหม่ด้วยการเน้นย้ำถึงความสำคัญของการติดเชื้อผ่านการสัมผัส Chapin รับตำแหน่งประธานสมาคมสาธารณสุขอเมริกันในปี ค.ศ. 1927 (พ.ศ.

2470) แนวคิดของเขาที่ว่า การติดเชื้อจากการสัมผัสเป็นช่องทางหลักและการติดเชื้อผ่านอากาศไม่น่าเป็นไปได้ นั้นเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการสาธารณสุขและโรคติดเชื้อ เมื่อปี ค.ศ. 1967 (พ.ศ. 2510) Alexander Langmuir ผู้อำนวยการงานด้านระบาดวิทยาคนแรกของ CDC ซึ่งดำรงตำแหน่งนี้เป็นเวลานาน (ค.ศ. 1949 – 1969) ยกย่อง Chapin ว่าเป็น "นักระบาดวิทยาชาวอเมริกันผู้ยิ่งใหญ่ที่สุด" และแนวคิดของ Chapin ก็เป็นกระแสหลักที่ CDC จนถึงช่วงปลายทศวรรษ 1980 (60) แต่ที่สำคัญก็คือสมมติฐานของ Chapin ที่ว่า ความง่ายในการติดเชื้อในระยะประชิดถือเป็นหลักฐานว่ามีการแพร่เชื้อผ่านละอองฝอยสเปรย์ ได้รับการยอมรับว่าเป็นความจริงทั้งที่ไม่มีข้อพิสูจน์ ข้อผิดพลาดอันใหญ่หลวงนี้ส่งผลต่อวิวัฒนาการของวิทยาการสาขานี้ในศตวรรษต่อมา และแนวคิดของ Chapin ก็ยังคงเป็นกระแสหลักช่วงต้นของโรคระบาด COVID-19

ไม่มีโรคที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติใด ๆ แพร่ผ่านอากาศ (ค.ศ. 1910-1962)

ไข้หวัดใหญ่อันเป็นโรคที่สมัยคริสต์ศตวรรษที่ 15 เชื่อกันว่าเกิดจากอิทธิพลชั่วร้ายของของกลุ่มดาวฤดูหนาว ("influenza delle Stelle") สามารถก่อให้เกิดโรคระบาดใหญ่ได้ เมื่อเชื้อกลายพันธุ์ไปจนเกิดสายพันธุ์ใหม่ที่แตกต่างจากเดิมอย่างมีนัยสำคัญ จนถึงตอนนี้ การระบาดครั้งที่ยรุนแรงที่สุดในคริสต์ศตวรรษที่ 20 คือ "ไข้หวัดใหญ่สเปน" ในปี ค.ศ. 1918 (พ.ศ. 2461) ในช่วงต้นของการระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ในปี ค.ศ. 1918 (พ.ศ. 2461) สำนักงานแพทย์ใหญ่แห่งสหรัฐฯ ลงประกาศเตือนในหนังสือพิมพ์ทั่วประเทศว่า "เชื้อโรคลอยไปในอากาศโดยติดไปกับหยดเสมหะเล็กจิ๋วจากการไอ จาม พุดเสียงดัง ฯลฯ" (61) ความเสี่ยงของการติดเชื้อทำให้หน่วยงานสาธารณสุขออกคำแนะนำให้ประชาชนป้องปากเมื่อไอ หลีกเลี้ยงฝูงชน และสวมหน้ากากเมื่ออยู่ในห้องเดียวกับผู้ติดเชื้อ หลักฐานบางชิ้นแสดงว่าการระบายอากาศและการอยู่กลางแจ้งลดการติดต่อได้ ซึ่งบ่งบอกว่าอาจมีการแพร่ผ่านอากาศเกิดขึ้น อย่างเช่นในกรณีของเมืองซิดาโก ซึ่งนำมามาตรการด้านสาธารณสุขที่เน้นการระบายอากาศมาใช้ ทั้งในโรงเรียน โบสถ์ และห้องที่ผู้ป่วยกำลังรับการรักษา และสั่งปิดสถานที่ชุมนุมสาธารณะ เช่น โรงเต็นรำ และโรงละคร จนกว่าจะมีการปรับปรุงซ่อมแซมตามเงื่อนไขในการขอใบอนุญาตเพื่อเปิดทำการอีกครั้ง ซิดาโกเป็นเมืองแรกที่ประกาศใช้ข้อบังคับว่าด้วยการระบายอากาศในอาคารสาธารณะและรถสาธารณะ (รวมถึงรถราง) และในสถานที่ทำงานในปี ค.ศ. 1910 (พ.ศ. 2453) ทำให้เปิดเมืองได้ภายใน 6 สัปดาห์ และไม่พบการระบาดระลอกที่สอง (62) แต่สถานการณ์ในเมืองนี้ก็อาจดีกว่าเมืองอื่นๆ เพราะเหตุผลอื่นๆ อีกหลายประการ

เช่นกัน ถึงกระนั้น ความเข้าใจในเชื้อโรคและช่องทางการแพร่ระบาดนั้นก็ยังมีจำกัด และแนวคิดของ Chapin ก็กลายเป็นกระแสหลักตลอดสองทศวรรษถัดมา

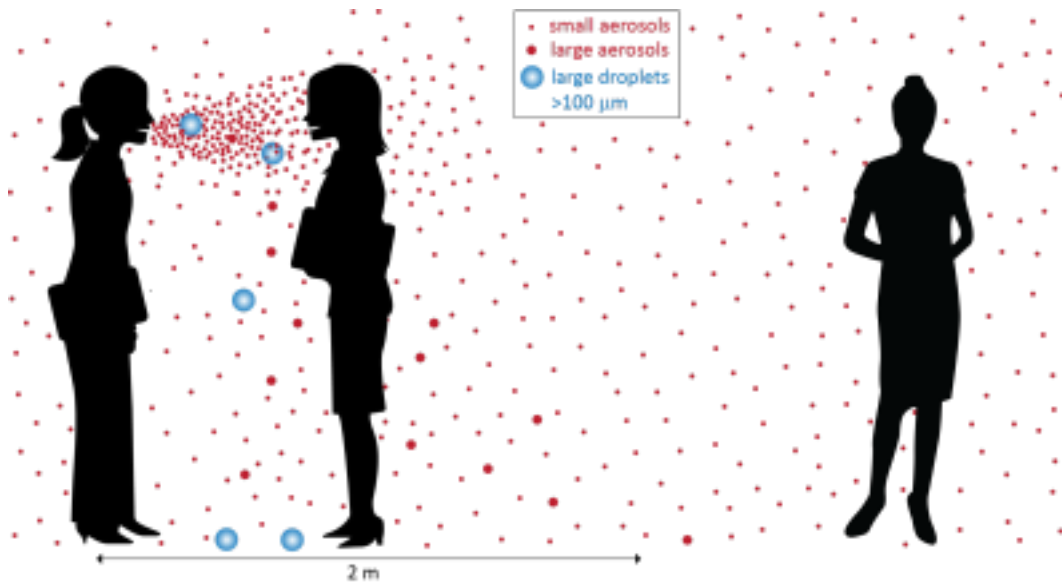
ในช่วงคริสต์ทศวรรษที่ 1930 William Wells ศาสตราจารย์ด้านวิศวกรรมจากฮาร์วาร์ด และแพทย์หญิง Mildred Wells ภรรยาของเขา เริ่มนำวิธีการที่ทันสมัยขึ้นมาใช้ ตรวจสอบการแพร่เชื้อในอากาศ ทว่า Chapin เปลี่ยนกระบวนทัศน์สำเร็จแล้ว และทฤษฎีของเขาก็ถูกมองว่าเป็นความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ ในขณะที่สองสามีภรรยา Wells ถูกกล่าวหาว่าถอยหลังลงคลองและพยายามรื้อฟื้นทฤษฎีไอพิษ (miasma) กลับมา (63)

William Wells เป็นคนแรกที่ศึกษาเปรียบเทียบขนาดของละอองฝอยที่เกิดจากสเปรย์ และละอองลอยในอากาศอย่างจริงจัง เขาวางแนวคิดในการจำแนกละอองสเปรย์ (≥ 100 ไมครอน) ซึ่งตกสู่พื้นก่อนที่จะแห้ง กับละอองลอย (≤ 100 ไมครอน) ซึ่งแห้งก่อนตกสู่พื้น (จึงเรียกว่า "droplet nuclei") เขามองเห็นความสัมพันธ์กับวิชาอุตุนิยมวิทยาซึ่งข้อเท็จจริงเหล่านี้ล้วนเป็นเรื่องที่รู้จักกันไป (64) โดยกล่าวว่า “เม็ดฝนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. สามารถตกลงมาได้ไกลหลายไมล์โดยไม่ระเหยจนหมดไปก่อนภายใต้สภาวะซึ่งจะทำให้ละอองฝอยเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 มม. ระเหยไปหมดก่อนจะตกลงมาเป็นระยะทางเท่ากับความสูงของมนุษย์หนึ่งคนด้วยซ้ำ” (65)

สองสามีภรรยา Wells สงสัยว่าวัณโรคและโรคหัดแพร่ผ่านอากาศ แต่ทั้งสองโรคถูกมองว่าแพร่ผ่านละอองฝอยไปแล้ว พวกเขาจึงเผชิญกับการต่อต้านอย่างรุนแรงในหมู่นักระบาดวิทยา โรคหัดถูกนิยามว่าเป็นโรคที่แพร่ผ่านละอองฝอยจนถึงปีค.ศ. 1985 (พ.ศ. 2528) ด้วยซ้ำ เพราะการติดต่อที่เกิดขึ้นอย่างง่ายดายในระยะประชิดและการที่ไม่พบการติดเชื้อมีในกลุ่มคนที่ใช้อากาศร่วมกัน (66) W. Wells ประสบความสำเร็จในเบื้องต้นเมื่อสาธิตให้เห็นว่าการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงยูวีไว้ที่เพดานของห้องเรียน โดยฉายรังสีขึ้นด้านบนเพื่อให้มีเพียงละอองลอยที่ลอยขึ้นมาตามการไหลของอากาศร้อนสู่ที่สูงเท่านั้นที่จะสัมผัสกับรังสี UV ช่วยลดการติดเชื้อโรคหัดได้อย่างมาก (67) อย่างไรก็ตาม การทดลองซ้ำกลับก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่หลากหลาย ซึ่งเมื่อมองย้อนกลับไปที่เห็นชัดเจนว่าเหตุใด: โรงเรียนที่การฉายรังสียูวีป้องกันการระบาดได้คือโรงเรียนซึ่งเด็กๆ ใช้พื้นที่ปิดร่วมกันเพียงที่เดียว คือห้องเรียนเท่านั้น การมาเชื่อในอากาศภายในตัวโรงเรียนจึงมีประสิทธิภาพ แต่ในการศึกษาเพิ่มเติมที่โรงเรียนอื่นนั้น เด็กๆ อยู่ร่วมกันในพื้นที่ปิดอื่นๆ (เช่น รถโรงเรียน) เป็นเวลาหลายชั่วโมงด้วย จึงมีโอกาสมากมายที่เชื้อหัดจะแพร่ผ่านอากาศภายในพื้นที่ปิดที่เด็กๆ ใช้ร่วมกันโดยไม่ผ่านการมาเชื่อด้วยรังสียูวี บทความซึ่งตีพิมพ์เมื่อปีค.ศ. 1945 (พ.ศ. 2488) ในวารสารซึ่งจะกลายเป็นวารสาร

Science ในภายหลัง W. Wells กล่าวว่าสังคมของเราลงทุนและประสบความสำเร็จในการจัดการติดเชื้อผ่านน้ำดื่มและอาหาร แต่กลับไม่มีการดำเนินการใดๆ เพื่อจำกัดการติดเชื้อผ่านอากาศ เนื่องจากเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าโรคที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติไม่แพร่ระบาดผ่านอากาศ (68)

ในปีค.ศ. 1951 (พ.ศ. 2494) Langmuir กล่าวว่า "ยังต้องพิสูจน์กันต่อไปว่าการติดเชื้อผ่านอากาศเป็นช่องทางการแพร่เชื้อที่มีนัยสำคัญหรือไม่ ในกรณีของโรคที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ" (69) Langmuir เป็นผู้ดูแลงานป้องกันการแพร่กระจายของโรคติดเชื้อในหมู่บุคลากรทางทหารของสหรัฐฯ ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง และเนื่องจากการระบาดของโรคส่งผลต่อความพร้อมทางการทหาร เขาจึงได้รับการจัดสรรทรัพยากรเพื่องานนี้มาไม่น้อย ทำให้ต้องรู้ "ซึ่งต้องใช้เวลาล้างสมหลายสิบปีในสภาวะที่บ้านเมืองสงบ" และเป็นผู้นำในวงการนี้ไปอีกหลายสิบปี (60) อย่างไรก็ตาม Langmuir และผู้ร่วมงานเผชิญอุปสรรคสำคัญประการหนึ่งในการศึกษาการติดเชื้อในอากาศ นั่นก็คือพวกเขามองโลกผ่านเลนส์ของทฤษฎีของ Chapin ยกตัวอย่างเช่น มีการศึกษาซึ่งทดลองลดความแออัดภายในโรงนอนเพื่อตรวจสอบว่าจะลดอัตราการเจ็บป่วยลงได้หรือไม่ โดยตั้งสมมติฐานว่าการเว้นระยะห่างจะลดความใกล้ชิด (และป้องกันแพร่เชื้อผ่านละอองฝอย) ในทางกลับกัน หากโรคแพร่ผ่านอากาศได้ การลดความแออัดก็ไม่น่าจะก่อให้เกิดผลใดๆ การที่อัตราการติดเชื้อลดลงเมื่อลดความแออัดจึงเป็น "หลักฐานสนับสนุนว่ามีการแพร่ผ่านละอองฝอย" (60) แต่สิ่งที่ Langmuir ไม่ทันตระหนักก็คือแบบจำลองการแพร่ผ่านอากาศของเขาไม่ถูกต้อง เนื่องจากมองข้ามข้อเท็จจริงที่ว่าลมหายใจออกของผู้ติดเชื้อจะเข้มข้นที่สุดเมื่ออยู่ใกล้ต้นกำเนิด และเจือจางลงเมื่อผสมกับอากาศในห้อง (13,70) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1 แนวคิดของ Chapin นั้นส่งผลกระทบอย่างลึกซึ้ง และนำไปสู่การตีความผลการศึกษาการแพร่เชื้อที่ผิดพลาดไปตลอดศตวรรษ กระทั่งในหน่วยงานสาธารณสุขชั้นนำอย่าง CDC



รูปที่ 1 ภาพแสดงการปลดปล่อยละอองฝอยและละอองลอยระหว่างการพูดคุย ซึ่งอาจมีไวรัสติดมาด้วยหากบุคคลดังกล่าวติดเชื้อ ละอองฝอยขนาดใหญ่ตกลงสู่พื้นอย่างรวดเร็วใกล้แหล่งกำเนิด ละอองลอยขนาดเล็กเข้มข้นที่สุดใกล้แหล่งกำเนิด แต่ก็ลอยค้างอยู่ในอากาศและกระจายไปทั่วทั้งห้องได้ ส่งผลต่อการสัมผัสเชื้อ (ทำให้ลดลง) เมื่ออยู่ไกลออกไป

อย่างไรก็ตาม งานของ Langmuir ดึงความสนใจกลับมาที่ฟิสิกส์ของการติดเชื้อในอากาศอีกครั้ง เนื่องจากเขาสรุปว่าเราสามารถสร้างอาวุธที่ก่อโรคซึ่งแพร่ผ่านอากาศได้ และนั่นก็กลายเป็นหัวข้อที่น่าสนใจอย่างมากในช่วงสงครามเย็น (60) การศึกษาการสัมผัสภายในสถานที่ทำงานทำให้เขาได้เรียนรู้ว่าละอองลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอนนั้นเข้าไปในปอดได้ลึกถึงถุงลมฝอย วิชาอากาศชีววิทยา (aerobiology) ของโรคติดเชื้อเติบโตอย่างรวดเร็วในช่วงเวลานี้ โดยเป็นส่วนหนึ่งของโครงการอาวุธชีวภาพของสหรัฐอเมริกาและสหภาพโซเวียต (71) อย่างไรก็ตาม งานส่วนใหญ่ยังถูกปิดเป็นความลับแม้การผลิตอาวุธเหล่านั้นจะถูกสั่งห้ามแล้วก็ตาม องค์ความรู้ดังกล่าวจึงมีอิทธิพลต่อการแพทย์และการควบคุมการติดเชื้อทั่วไปเพียงเล็กน้อย นี่อาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้กระบวนทัศน์ของ Chapin ยังเป็นกระแสหลักอยู่

ยอมรับว่ามีการแพร่กระจายผ่านอากาศอย่างไม่เต็มใจและยอมรับให้น้อยที่สุดเท่าที่ทำได้ (1962-2020)

แม้แนวคิดที่ว่า การแพร่ระบาดผ่านอากาศของโรคที่เกิดเองตามธรรมชาติมีความสำคัญ จะถูกต่อต้านหัวชนฝา W. Wells, Robert Riley และ Cretyl Mills ก็ประสบความสำเร็จในการพิสูจน์ให้เห็นว่า วัณโรคแพร่ผ่านอากาศได้ในปี ค.ศ. 1962 (พ.ศ. 2505) พวกเขาปล่อยอากาศจากหอผู้ป่วยวัณโรคใส่หนูตะเภา 150 ตัวเป็นเวลา 2 ปี และพบว่าหนูตะเภาติดเชื้อประมาณสามตัวต่อเดือน ในขณะที่ไม่พบว่าหนูตะเภาในกลุ่มควบคุมติดเชื้อเลย ความแตกต่างเพียงอย่างเดียวระหว่างทั้งสองกลุ่มคือ อากาศในกลุ่มควบคุมผ่านการฉายรังสีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งฆ่าเชื้อแบคทีเรียก่อวัณโรคได้ (72, 73) การศึกษาดังกล่าวทำให้วัณโรคกลายเป็นโรคที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติชนิดแรกในยุคปัจจุบันที่ได้รับการยอมรับว่าแพร่ผ่านอากาศ

เห็นได้ชัดว่ามาตรฐานในการพิจารณาหลักฐานประกอบนั้นแตกต่างกันอย่างยิ่ง โรคหลายชนิดได้รับการยอมรับว่าแพร่ผ่าน “ละอองฝอย” โดยไม่มีหลักฐานแบบนี้เลย การต่อต้านแนวคิดที่ว่า การแพร่ผ่านอากาศมีบทบาทมากกว่าที่เคยคิดยังคงดำเนินต่อไป โดยการแพร่ผ่านอากาศจะได้รับการยอมรับเป็นกรณีๆ ไป และต่อเมื่อมีหลักฐานที่แน่นหนาจนไม่สามารถปฏิเสธได้เท่านั้น นั่นคือ เมื่อตัดช่องทางการแพร่เชื้ออื่นๆ ออกหมดแล้ว และเมื่อหลักฐานชัดเจนมาก ตัวอย่างเช่น ในปี ค.ศ. 1969 (พ.ศ. 2512) มีกรณีการแพร่ผ่านอากาศระยะไกลของไข้ทรพิษที่ชัดเจนอย่างยิ่งเกิดขึ้นในเยอรมนี รายงานว่าด้วยการระบาดสะท้อนแนวคิดในขณะนั้นและให้ข้อสรุปหลังตัดช่องทางการติดเชื้ออื่นๆ ที่เป็นไปได้ทั้งหมดทิ้งไปแล้วว่า: “ช่องทางการแพร่เชื้อเดียวที่เหลืออยู่ซึ่งดูจะสมเหตุสมผลคือการแพร่เชื้อผ่านละอองลอยในอากาศซึ่งอุดมไปด้วยไวรัส อันเป็นข้อสันนิษฐานที่ผู้สืบสวนโรคทั้งหมดไม่เห็นด้วยในเบื้องต้น” (74) นอกจากนี้ ยังมีการอธิบายต่อว่าการระบาดครั้งนี้ถือเป็นเหตุการณ์ที่ไม่ปกติโดยเป็น “ข้อยกเว้นเป็นกรณีพิเศษ” และการแพร่ผ่านละอองฝอยก็ยังถูกมองว่าเป็นช่องทางหลักต่อไป โดยถือเอาความสำเร็จของโครงการกำจัดไข้ทรพิษเป็นข้อพิสูจน์แนวคิดดังกล่าว (60) อย่างไรก็ตาม การติดเชื้อที่ง่ายขึ้นเมื่ออยู่ใกล้ ร่วมกับการติดเชื้อจากระยะไกลในพื้นที่ปิดที่ใช้อากาศร่วมกันและระบายอากาศได้ไม่ดีก็ถือเป็นเอกลักษณ์ของการแพร่เชื้อผ่านอากาศ (15) ทั้งยังมีหลักฐานว่าการแพร่เชื้อไข้ทรพิษผ่านอากาศมีบทบาทมากกว่าที่คิดกันมาก (75) ระยะพักตัวของไข้ทรพิษนั้นชัดเจนมาก ผู้ติดเชื้อเกือบร้อยละ 80 จะแสดงอาการ และไวรัสจะติดต่อกันได้เมื่อผู้ติดเชื้อมีอาการเท่านั้น ในขณะที่ผู้ติดเชื้อจะป่วยหนักและไม่ได้เดินทางไปไหนมากนัก การตามตัวผู้ป่วย/ตามรอยการสัมผัส/แยกโรค/กักกัน/ตีวง

ฉีดวัคซีนของโครงการกำจัดโรคไข้ทรพิษจึงได้ผลดี แม้จะมีการแพร่เชื้อผ่านอากาศก็ตาม (75, 76)

การสอบสวนทางวิทยาศาสตร์ในรูปแบบเดียวกันนี้ถูกนำมาใช้กับโรคหัดและโรคอีสุกอีใสซึ่งเป็นโรคติดต่อที่แพร่ได้อย่างง่ายดายทั้งคู่ คุณสมบัติในการแพร่ผ่านอากาศของโรคทั้งสองนี้ถูกปฏิเสธมานานถึงเจ็ดทศวรรษ และเพิ่งจะได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในช่วงทศวรรษ 1980 เท่านั้นเอง เนื่องจากการแพร่ระบาดระดับซูเปอร์สเปรดในระยะไกลเกิดขึ้น (66, 77) ประเด็นที่สำคัญก็คือโรคติดต่อทั้งหมดที่ปัจจุบันยอมรับแล้วว่าแพร่ผ่านอากาศนั้นล้วนติดต่อได้ง่ายในระยะประชิด (จึงถูกจัดว่าแพร่ผ่านละอองฝอยในที่แรก) (66, 78, 79) แต่แม้จะทราบแล้วว่าการทับซ้อนกันเช่นนี้ ความง่ายของการติดต่อในระยะประชิดก็ยังถูกนำมาใช้เป็นหลักฐานของการแพร่เชื้อผ่านละอองฝอยในโรคอื่นๆ อยู่ดี ในขณะที่ข้อเท็จจริงที่ว่าไม่พบการแพร่เชื้อหัดในพื้นที่ปิดที่ใช้อากาศร่วมกันถูกนำมาใช้เป็นข้อโต้แย้งว่าหัดไม่ได้แพร่ผ่านอากาศ โควิด 19 เองก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่ปัจจุบันนี้เราเข้าใจกันแล้วว่าเป็นผลมาจากความแปรปรวนที่สูงมากของปริมาณไวรัสและการปลดปล่อยละอองลอยในแต่ละบุคคล ตลอดจนความแตกต่างของความแรงในการหายใจและการเปล่งเสียงในสถานการณ์ต่างๆ กัน(80–85)

ตลอดหลายทศวรรษที่ผ่านมาและก่อนจะมีการระบาดของโควิด-19 นั้น เรามียาปฏิชีวนะและวัคซีน และไม่มีการระบาดใหญ่ใดๆ จึงทำให้การศึกษาเชิงลึกเรื่องการแพร่เชื้อผ่านละอองฝอยและละอองลอยไม่ถือว่าเป็นประเด็นเร่งด่วนทางสาธารณสุข วิกฤตน้ำมันและวิกฤตสภาพภูมิอากาศนำไปสู่การผ่อนปรนมาตรฐานอาคารโดยให้ความสำคัญกับการประหยัดพลังงานมากกว่าการให้ความสำคัญกับระบบระบายอากาศและสุขอนามัย (86) มาตรฐานการถ่ายเทอากาศและการฟอกอากาศอันเข้มงวดของโรงพยาบาลสมัยใหม่ (87–89) ลดความเสี่ยงที่จะเกิดการแพร่เชื้อผ่านอากาศในสถานที่เหล่านี้ อันเป็นสถานที่ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ด้านการควบคุมการติดเชื้อส่วนใหญ่ทำงานอยู่ หน่วยงานด้านสาธารณสุขหลักๆ ต่างกำกับให้ทุกคนยึดหลักการแพร่กระจายผ่านละอองฝอย และนักวิทยาศาสตร์ที่เสนอทฤษฎีการแพร่เชื้อผ่านอากาศมักถูกมองข้าม (50) ยกตัวอย่างเช่น เพื่อนร่วมงานของเราเล่าว่าหากข้อเสนอการวิจัยเพื่อขอทุนในการศึกษาการแพร่เชื้อผ่านอากาศจะได้รับจดหมายตอบกลับจากผู้ทบทวนข้อเสนอที่รนามว่า "การแพร่ผ่านอากาศไม่มีนัยสำคัญ เราจึงไม่ควรให้ทุนกับงานวิจัยนี้"

หลักฐานต่างๆ ยังชี้ให้เห็นบทบาทของการแพร่เชื้อผ่านทางอากาศในอีกโรคหนึ่งที่มีศักยภาพในการกลายเป็นโรคระบาดใหญ่ด้วย ซึ่งก็คือไข้หวัดใหญ่ (90-92) โดยมีทั้งกรณีของซูเปอร์สเปรดเดอร์ (superspreading) ในพื้นที่ปิดซึ่งการถ่ายเทอากาศไม่ดี

(93, 94), การระบาดเป็นกลุ่มเล็กๆ ในสภาพแวดล้อมที่มีการระบายอากาศดี (95) การตรวจพบไวรัสที่แพร่เชื้อได้ (96, 97) และ RNA ของไวรัส (98) ในลมหายใจออก การตรวจพบ (ทั้งไวรัสที่แพร่เชื้อได้และ RNA ของไวรัส) ในอากาศภายในห้อง (99 –101) และพบว่าการสูดไวรัสในรูปแบบละอองลอยอาศัยไวรัสในการก่อเชื้น้อยกว่าการป้ายเชื้อในจมูกถึง 100 เท่า (102-105) และการแพร่เชื้อผ่านอากาศในแบบจำลองสัตว์ (106, 107) อย่างไรก็ตาม แนวคิดที่ว่าไวรัสไข้หวัดใหญ่แพร่ผ่านอากาศยังไม่เป็นที่ยอมรับในวงกว้าง และ WHO และ CDC ก็ยังระบุว่าโรคดังกล่าวเกิดจากละอองฝอย/โพไม่ต์ โดยไม่มีการกล่าวถึงการแพร่ระบาดในอากาศ (108, 109) ซึ่งก็น่าจะเป็นเพราะแรงต่อต้านแบบเดียวกันกับที่โรคอื่นๆ ต้องเผชิญและได้กล่าวไว้ข้างต้น

ยังมีการค้นพบหลักฐานว่าด้วยการแพร่เชื้อผ่านอากาศของ rhinovirus (110–114), adenovirus (115), SARS-CoV-1 (116, 117), MERS-CoV (118, 119) และ RSV (120, 121) อีกด้วย ขณะที่ข้อมูลซึ่งมีอยู่จำกัดแสดงให้เห็นบทบาทของการแพร่เชื้อผ่านอากาศในกรณีของ enterovirus (122, 123), filovirus (124) และเชื้อโรคอื่นๆ

นอกจากนี้ การแพร่เชื้อไวรัสผ่านอากาศเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในวงการสัตวแพทย์ ซึ่งรวมถึงการแพร่เชื้อของโคโรนาไวรัสและไวรัสไข้หวัดใหญ่บางชนิดอีกด้วย โดยบางครั้งการแพร่อาจเกิดขึ้นได้ไกลหลายกิโลเมตร ตัวอย่างเช่น ไวรัสโรคปากและเท้าเปื่อย (125, 126), ไวรัสโรคระบบสืบพันธุ์และโรคทางเดินหายใจของสุกร (PRRSV) (127, 128), ไวรัสโคโรนาที่ก่อโรคในระบบทางเดินหายใจของสุกร (129), ไวรัสก่อโรคหลอดลมอักเสบติดเชื้ในนก (เป็น coronavirus เช่นกัน) (130) และไข้หวัดม้า (131, 132)

การระบาดใหญ่ของ COVID-19 และการค้นพบข้อผิดพลาดครั้งประวัติศาสตร์

ในช่วงต้นของการระบาดของโรค COVID-19 นั้น การทบทวนงานวิจัยต่างๆ ได้ข้อสรุปว่าไม่เคยมีหลักฐานที่แสดงถึงการติดเชื้ผ่านละอองฝอยโดยตรงในโรคใดๆ เลย (13) แต่แม้จะปราศจากหลักฐานโดยตรง ในช่วงแรก หน่วยงานสาธารณสุขต่างๆ อย่าง WHO ก็สรุปว่าการที่โรคติดต่อดี้ง่ายในระยะประชิดนั้นเป็นข้อพิสูจน์ว่า COVID-19 เป็นโรคที่แพร่ผ่านละอองฝอย (และโพไม่ต์) เช่นกัน (3) ซึ่งเป็นความผิดพลาดแบบเดียวกับของ Chapin ในค.ศ. 1910 (พ.ศ. 2453) ผู้เชี่ยวชาญหลักในคณะกรรมการควบคุมและป้องกันการติดเชื้ของ WHO เขียนว่าพวกเขาจะยอมรับว่าโรคใดโรคหนึ่งแพร่ผ่านอากาศก็เมื่อค่า R_0 สูงถึงจุดที่กำหนดเท่านั้น (23) ทั้งที่สาขาวิชาของพวกเขาต้องใช้เวลารวม 70 ปีกว่าจะยอมรับว่าโรคหัดและอีสุกอีใสแพร่ผ่านอากาศ (66, 77)

และแม้จะมีข้อเท็จจริงให้เห็นว่าวัณโรคปอดเป็นโรคที่แพร่ผ่านอากาศเพียงช่องทางเดียว แต่ก็ยังติดต่อยากกว่า COVID-19 ก็ตาม (20) ที่น่าแปลกใจก็คือ แม้จะมีงานวิจัยหลายชิ้นซึ่งเต็มไปด้วยหลักฐานแบบเดียวกับที่ทำให้มีการยอมรับว่าวัณโรค (การทดลองในสัตว์, (133)) และโรคหัด/อีสุกอีใส (การแพร่แบบซูเปอร์สเปรดและการแพร่เชื้อระยะไกล) (เช่น 134, 135, 136)) เป็นโรคที่แพร่ผ่านอากาศ แต่ WHO และหน่วยงานด้านสาธารณสุขอื่นๆ ก็ยังคงไม่คำนึงถึงความสำคัญของการแพร่เชื้อ COVID-19 ผ่านอากาศอยู่เกือบหนึ่งปี หน่วยงานด้านสาธารณสุขยังคงยึดมั่นในกระบวนทัศน์ว่าด้วยละอองฝอยแบบเดิมๆ และยังเห็นว่าหลักฐานของการแพร่ผ่านอากาศที่ปรากฏในงานของนักวิทยาศาสตร์ด้านละอองฝอย ผู้ถูกปฏิเสธและกีดกันออกจากคณะกรรมการหลักต่างๆ อย่างต่อเนื่อง อ่อนเกินไปหรือไม่เกี่ยวข้อง (10, 22) เห็นชัดว่ามีการแสดงออกถึงแนวคิดแบบเดียวกับที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ ซึ่งก็คือลดความสำคัญของการแพร่ผ่านอากาศลงให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการใช้คำอย่าง "แพร่ผ่านอากาศในบางสถานการณ์ (situational airborne)" หรือโดยการอ้างว่าการแพร่ผ่านอากาศเกิดขึ้นในสถานที่แออัดซึ่งการระบายอากาศไม่ดีเท่านั้น ซึ่งเราจะเห็นข้อผิดพลาดทางตรรกะอย่างชัดเจน ในเมื่อเชื้อโรคที่แพร่ผ่านอากาศทุกชนิดล้วนไวต่อการระบายอากาศมาก (เช่น 137) การที่เชื่อดังกล่าวแพร่ผ่านอากาศในห้องที่ใช้ร่วมกันได้ ก็ต้องยิ่งแพร่ได้ง่ายขึ้นเมื่ออยู่ในระยะประชิดเพราะความเข้มข้นที่มากกว่า (70)

ตลอดระยะเวลาหนึ่งปี หลักฐานที่รวบรวมได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า COVID-19 เป็นโรคที่แพร่ระบาดทางอากาศเป็นส่วนใหญ่ และปรากฏชัดเจนว่าเกิดความสับสนว่าการติดเชื้อในระยะประชิดเกิดจากการการแพร่กระจายของละอองฝอยเท่านั้น (15, 70, 138) จนเห็นชัดเจนว่าไม่อาจควบคุมการระบาดใหญ่ด้วยมาตรการสำหรับละอองฝอย/ไฟไมต์ เช่น การรักษาระยะห่างทางกายภาพ การล้างมือ และการฆ่าเชื้อบนพื้นผิวเท่านั้น จนกระทั่งเดือนเมษายน/พฤษภาคม 2021 WHO (9) และ CDC (12) จึงยอมรับความสำคัญระดับหนึ่งของการแพร่เชื้อ SARS-CoV-2 ทางอากาศ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงในเดือนสิงหาคม 2564 มักแสดงออกมาก่อนข้างสับสนและได้รับการประชาสัมพันธ์ไม่เพียงพอ (14) และการปรับปรุงมาตรการก็เข้าถึงพื้นที่เพียงบางส่วนของโลกเท่านั้น สายพันธุ์ SARS-CoV-2 ที่น่าเป็นห่วงบางตัวที่เพิ่งปรากฏขึ้น สามารถแพร่เชื้อได้ดีกว่า (139) จึงมีการพบเคสที่ติดแบบซูเปอร์สเปรดทางอากาศหรือการแพร่กระจายระยะไกลได้ง่ายขึ้นมาก CDC ได้เปรียบเทียบการแพร่เชื้อของสายพันธุ์ delta กับโรคอีสุกอีใสซึ่งติดต่อกันผ่านอากาศได้ง่าย (16)

และยังชัดเจนว่าบางครั้งองค์กรสาธารณสุขบางแห่งก็ใช้แนวคิดว่าการแพร่เชื้อ 'ระยะใกล้' หรือ 'สัมผัสใกล้ชิด' ผ่าน "ละอองฝอย" คือเมื่ออนุภาคดังกล่าวสามารถสูดหายใจเข้าไปได้ ทั้งนี้เรียกว่าปรากฏการณ์ละอองลอยต่างหาก อนุภาคที่หายใจเข้าไปได้ จะต้องมียุขขนาดเล็กกว่าประมาณ 100 ไมครอน (140) จึงถือว่าพวกมันเป็นละอองลอยที่สามารถเดินทางเกินระยะประชิดของผู้ติดเชื้อ (65, 141) มิลตัน (1) เสนอให้หลีกเลี่ยงคำว่า "ละอองฝอย" ที่อาจคลุมเครือ และใช้คำว่า "ละอองลอย" สำหรับอนุภาคขนาดเล็กกว่าที่สามารถสูดหายใจเข้าไปได้ และใช้คำว่า "หยด" สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่กว่าที่จะตกลงสู่พื้น เพราะหนักเกินกว่าจะหายใจเข้าไปได้

WHO สั่งการให้ผู้เชี่ยวชาญกลุ่มหนึ่งทบทวนงานวิจัยอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับการแพร่กระจายเชื้อ SARS-CoV-2 แต่สิ่งที่ดูจะกลายเป็นข้อผิดพลาดครั้งใหญ่ในการดำเนินการครั้งนี้ก็คือไม่มีผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับละอองลอยหรือการแพร่เชื้อทางอากาศเข้าร่วมในการทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการแพร่เชื้อทางอากาศเลยสักคน การทบทวนงานวิจัยเป็นไปในลักษณะที่แคบมาก โดยพิจารณาจากหลักฐานเพียงประเภทเดียว คือ การตรวจหาไวรัสที่ viable ในอากาศ (142) แม้ว่าจะไม่เคยมีการทดลองเช่นนี้สำเร็จในโรคที่ยอมรับกันแล้วว่าแพร่ผ่านอากาศ เช่น วัณโรค โรคหัด และอีสุกอีใส (4, 143) หลักฐานอื่นๆ อีกมากมายที่สนับสนุนว่าการแพร่กระจายทางอากาศอย่างชัดเจนในกรณีของ SARS-CoV-2 และที่นำไปสู่การยอมรับว่าวัณโรค โรคหัด และอีสุกอีใสแพร่ผ่านอากาศ (15, 66, 67, 72, 77) กลับถูกละเลยโดยสิ้นเชิงในการทบทวนงานวิจัยครั้งนี้ ขณะที่เขียนนี้ บทความดังกล่าวยังไม่ผ่าน peer-review และข้อวิจารณ์อย่างเปิดเผยจากนักวิทยาศาสตร์คนอื่นๆ ก็ยังไม่ได้รับคำตอบ (เช่น 144) มีการทบทวนงานวิจัยชิ้นหนึ่งเขียนขึ้นเกี่ยวกับ "การสัมผัสใกล้ชิด" (145) ซึ่งดูเหมือนจะเป็นข้อผิดพลาดทางแนวคิด เนื่องจากการสัมผัสใกล้ชิดเป็นการวัดระยะทาง ไม่ใช่กลไกการแพร่กระจาย ที่น่าตกใจคือที่ไม่มีการโพสต์การทบทวนงานวิจัยที่สรุปหลักฐานสนับสนุนการแพร่กระจายด้วยละอองฝอยเลย แม้ว่า WHO และผู้เขียนร่วมหลักระบุว่านั้นคือกลไกหลักของการแพร่ระบาด

หลังจากการระบาดของโรค SARS-CoV-1 ในปีค.ศ. 2003 (พ.ศ. 2546) 'ไอพิษ' (miasma) แบบใหม่ที่ชวนให้เข้าใจผิดได้ปรากฏขึ้น ในรูปแบบของ "หัตถการก่อละอองลอย" (AGPs) ซึ่งหมายถึงหัตถการทางการแพทย์ เช่น การตรวจหลอดลม การใส่ท่อช่วยหายใจ การดูด ฯลฯ ซึ่งคาดว่าจะสร้างละอองลอยจำนวนมาก และทำให้เจ้าหน้าที่ทางการแพทย์บางคนติดเชื้อในช่วงการระบาดของโรค SARS-CoV-1 ในปีค.ศ. 2003 (พ.ศ. 2546) ถึงแม้หลักฐานสนับสนุนความเชื่อมโยงนี้จะอ่อนมาก (146, 147) AGPs

เป็นกรณีเดียวที่ WHO ยอมรับอย่างชัดเจนในช่วงกลางปีค.ศ. 2020 (พ.ศ.2563) ว่ามีการแพร่เชื้อทางอากาศ (7) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยหลายชิ้นในช่วงการระบาดใหญ่ของโควิด-19 แสดงให้เห็นว่าผู้ป่วยผลิตละอองลอยผ่านการหายใจ การพูด และการไอมากกว่าจาก AGPs มาก (148–152) การเน้นย้ำอย่างต่อเนื่องว่า AGPs ก่อความเสี่ยงในการแพร่เชื้อทางอากาศมากกว่าละอองลอยที่เกิดตามธรรมชาติมากเป็นการชวนให้เข้าใจผิด แต่ก็ยังไม่ได้รับการแก้ไขอย่างกว้างขวางในขณะที่เขียนนี้

ข้อผิดพลาด 5 ไมครอนและผลกระทบที่ตามมา

ในช่วงการระบาดใหญ่ของ COVID-19 ยังมีความผิดพลาดอีกอย่างหนึ่งปรากฏขึ้น เอกสารด้านสาธารณสุข อย่างเช่น บรรยายสรุปทางวิทยาศาสตร์ในเดือนกรกฎาคม ค.ศ. 2020 (พ.ศ. 2563) ของ WHO ว่าด้วยการแพร่เชื้อของ COVID-19 (7) ยังปรากฏข้อผิดพลาดที่คงอยู่มายาวนานในคำแนะนำและเอกสารทางวิทยาศาสตร์ฉบับก่อนๆ คือ พวกเขาแยกความแตกต่างของละอองฝอยที่ตกลงสู่พื้นใน 1-2 เมตรกับละอองลอยที่ยังคงอยู่ในอากาศที่ขนาด 5 ไมครอน แทนที่จะเป็น 100 ไมครอน ซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้อง (ข้อผิดพลาดที่เกิดจาก factor of 8000 ในมวลของอนุภาค) เกณฑ์แบ่งที่ถูกต้องซึ่งเผยแพร่โดย Wells ในปีค.ศ. 1934 (พ.ศ.2477) (65) และแสดงในหน้าเว็บของ CDC (สาขาอาชีวเวชศาสตร์ (153)) ได้รับการพิสูจน์โดยบทความของนักวิทยาศาสตร์ด้านละอองลอยหลายคนในยุคถัดมา (141) และอีกหลายต่อหลายครั้งในช่วงการระบาดใหญ่ของ COVID-19 รวมถึงการประชุมเชิงปฏิบัติการของสถาบันวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการแพทย์แห่งสหรัฐฯ ด้วย (138, 154) แต่ข้อผิดพลาดดังกล่าวนี้ยังคงปรากฏอยู่ในเอกสารทางวิทยาศาสตร์และเอกสารคู่มือต่างๆ โดยไม่ได้รับการแก้ไขจาก WHO ตามที่พบในเดือนสิงหาคม 2564 Randall et al. (10, 50) ได้ตรวจสอบที่มาของข้อผิดพลาดนี้และสืบย้อนไปได้ถึงช่วงทศวรรษ 1960 ซึ่งวัณโรคเป็นโรคเดียวที่ยอมรับกันว่าติดเชื้อทางอากาศได้ ซึ่งทำให้เกิดความสับสนระหว่างขนาดอนุภาคที่แทรกซึมเข้าไปในปอดส่วนลึกได้ (ซึ่งจำเป็นหากจะเกิดการติดเชื้อวัณโรค) และอนุภาคที่ตกลงสู่พื้นในระยะ 1-2 เมตร

ความจริงที่ว่าข้อผิดพลาดขนาด 5 ไมครอนสามารถคงอยู่ได้นานขนาดนั้น แสดงให้เห็นถึงพลังการครอบงำที่กระบวนทัศน์ของ Chapin มีต่อวงการระบาดวิทยา ซึ่งสันนิษฐานไว้ก่อนว่าการระบาดเกิดจากการติดเชื้อจากละอองฝอย ยกเว้นจะมีการพิสูจน์อย่างจะแจ้งที่สุดว่าเป็นอย่างอื่น และไม่สนใจรายละเอียดของกระบวนการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลจากสาขาวิชาอื่นๆ อย่างวิทยาศาสตร์ละอองลอย หรือแม้แต่อาชีวเวชศาสตร์ ด้วยความที่ละอองลอย (ขนาดใหญ่ได้ถึง 100 ไมครอน) สามารถลอยไปตามกระแส

อากาศได้ การเลือก PPE เพื่อปกป้องทางเดินหายใจอย่างสมบูรณ์ (เช่น N95/FFP3) จึงต้องอาศัยความเข้าใจที่ชัดเจนว่าจะองลอยมีขนาดหลากหลายได้เพียงใด นอกจากนั้น ความเข้าใจที่ชัดเจนว่ามีเพียงละอองลอยขนาดเล็กเท่านั้นที่ลงไปถึงทางเดินหายใจส่วนล่างได้ (< 20 ไมครอน และ <5 ไมครอนในกรณีของถุงลม (140)) ก็มีความสำคัญในกรณีของโรคติดเชื้อที่ส่งผลกระทบเฉพาะระบบทางเดินหายใจส่วนล่าง เช่น MERS-CoV เนื่องจากบ่งบอกว่าการติดเชื้อจะเกิดผ่านละอองลอย (ขนาดเล็ก) เท่านั้น (155)

มุมมองต่อการควบคุมโรคทางเดินหายใจและโรคระบาดใหญ่ครั้งหน้า

ภาพรวมของประวัติศาสตร์นี้แสดงให้เห็นอิทธิพลที่กว้างขวางของ “การยึดมั่นในความเชื่อ” (“belief perseverance”) อันเป็นแนวโน้มทางจิตวิทยาที่จะรักษาความเชื่อหนึ่งๆ ไว้ แม้จะมีหลักฐานใหม่ที่ชัดเจนและแข็งแกร่งซึ่งควรจะหักล้างมันไปได้ก็ตาม (156) ในยุคของความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์อันน่าทึ่ง ซึ่งสามารถออกแบบวัคซีน mRNA สำเร็จภายในเวลาไม่กี่วันหลังการหาลำดับของไวรัสได้ ซึ่งก็ใช้เวลาไม่กี่วันเช่นกันนี้ การยอมรับความรู้ใหม่ที่สำคัญซึ่งเสนอจะเชื่องช้าก็เตือนให้เราระลึกว่าความเป็นมนุษย์ในวิทยาศาสตร์ก็ยังคงมีอิทธิพลอย่างที่เคยเป็นมาในยุคอดีต

อย่างไรก็ตาม การวิจัยอย่างเข้มข้นและการถกเถียงอภิปรายเกี่ยวกับการระบาดใหญ่ของ COVID-19 ได้เริ่มก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระบวนทัศน์ด้านความเข้าใจวิธีแพร่เชื้อของโรค ไม่เพียงแต่โรคระบบทางเดินหายใจจะ ไม่ได้ แพร่เชื้อโดยละอองฝอยเพียงทางเดียว แต่ยังมีแนวโน้มว่าการแพร่เชื้อผ่านอากาศจะเป็นช่องทางหลักอีกช่องทางหนึ่งของโรคระบบทางเดินหายใจจำนวนมากหรือส่วนใหญ่ด้วยซ้ำ ทั้งยังเป็นที่ยืนยันยิ่งขึ้นว่าโรคที่ก่อให้เกิดการระบาดใหญ่อย่างรวดเร็ว น่าจะแพร่ผ่านอากาศเป็นหลัก สิ่งนี้ไม่ได้แปลว่าเราจะหวนคืนสู่ความคิดเรื่องไอพิษอย่างในอดีต แต่เป็นความเข้าใจการแพร่กระจายผ่านอากาศที่มีข้อมูลมากขึ้น เข้าว่ามันซับซ้อนและน่ากลัวน้อยกว่าที่คิดกันในอดีต และแน่นอนว่าเป็นปัญหาที่แก้ไขได้ (157) กระบวนทัศน์ใหม่นี้ส่งผลต่อการตั้งกฎเกณฑ์และควบคุมคุณภาพอากาศในพื้นที่ภายในอาคารอย่างมีนัยสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นการระบายอากาศที่เหมาะสม การฟอกอากาศ และวิธีการอื่นๆ รวมถึง PPE สำหรับผู้ปฏิบัติงาน การใส่หน้ากากในที่สาธารณะ ฯลฯ และในที่สุด การขาดความใส่ใจคุณภาพอากาศสถานที่ปิดซึ่งใช้ร่วมกันดังที่ Wells (68) เคยกล่าวถึง ก็อาจเริ่มได้รับ

การแก้ไขในวันข้างหน้า (24) และอาจนำไปสู่การลดการแพร่กระจายของโรคทางเดิน
หายใจในทศวรรษต่อ ๆ ไป

เอกสารอ้างอิง

1. Milton DK. 2020. A Rosetta Stone for Understanding Infectious Drops and Aerosols. *J Pediatric Infect Dis Soc* 9:413–415
<http://dx.doi.org/10.1093/jpids/piaa079>.
2. Li Y. 2021. Basic routes of transmission of respiratory pathogens-A new proposal for transmission categorization based on respiratory spray, inhalation, and touch. *Indoor Air* 31:3–6 <http://dx.doi.org/10.1111/ina.12786>.
3. World Health Organization. 2020. Twitter: FACT: COVID-19 is NOT AIRBORNE <https://twitter.com/who/status/1243972193169616898>.
4. Morawska L, Milton DK. 2020. It Is Time to Address Airborne Transmission of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *Clin Infect Dis* 71:2311–2313
<http://dx.doi.org/10.1093/cid/ciaa939>.
5. Morawska L, Cao J. 2020. Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environ Int* 139:105730
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>.
6. Dancer SJ, Tang JW, Marr LC, Miller S, Morawska L, Jimenez JL. 2020. Putting a balance on the aerosolization debate around SARS-CoV-2. *J Hosp Infect*
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2020.05.014>.
7. World Health Organization. 2020. Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions
<https://www.who.int/publications/i/item/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>.
8. World Health Organization. 2021. Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280>.

9. World Health Organization. 2021. Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?

https://www.who.int/news-room/qa-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted?fbclid=IwAR1vAg10CSquSMGj6CvC7SCa0xPuw_N3TcyavIJ0ua5Qdc9CpKhImBPBdUE.

10. Molteni M. 2021. The 60-Year-Old Scientific Screwup That Helped Covid Kill. Wired <https://www.wired.com/story/the-teeny-tiny-scientific-screwup-that-helped-covid-kill/> .

11. Mandavilli A. 2020. Advice on Airborne Virus Transmission Vanishes From CDC Website. The New York Times. The New York Times

<https://www.nytimes.com/2020/09/21/health/coronavirus-cdc-aerosols.html>.

12. CDC. 2021. Scientific Brief: SARS-CoV-2 Transmission

<https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html>.

13. Chen W, Zhang N, Wei J, Yen HL, Li Y. 2020. Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact. Build Environ 176:106859

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132320302183>.

14. Tufekci Z. 2021. Why Did It Take So Long to Accept the Facts About Covid? The New York Times. The New York Times

<https://www.nytimes.com/2021/05/07/opinion/coronavirus-airborne-transmission.html>.

15. Greenhalgh T, Jimenez JL, Prather KA, Tufekci Z, Fisman D, Schooley R. 2021. Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. Lancet [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00869-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00869-2)

[http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00869-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00869-2).

16. Mandavilli A. 2021. CDC Internal Report Calls Delta Variant as Contagious as Chickenpox. The New York Times. The New York Times
<https://www.nytimes.com/2021/07/30/health/covid-cdc-delta-masks.html>.
17. Ferris M, Ferris R, Workman C, O'Connor E, Enoch DA, Goldesgeyme E, Quinnell N, Patel P, Wright J, Martell G, Moody C, Shaw A, Illingworth CJR, Matheson NJ, Weekes MP. 2021. FFP3 respirators protect healthcare workers against infection with SARS-CoV-2. Authorea Preprints
<https://doi.org/10.22541/au.162454911.17263721/v1>
<http://dx.doi.org/10.22541/au.162454911.17263721/v1>.
18. Gettings J. 2021. Mask Use and Ventilation Improvements to Reduce COVID-19 Incidence in Elementary Schools — Georgia, November 16–December 11, 2020. MMWR Morb Mortal Wkly Rep 70
https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/70/wr/mm7021e1.htm?s_cid=mm7021e1_w.
19. Cheng Y, Ma N, Witt C, Rapp S, Wild PS, Andreae MO, Pöschl U, Su H. 2021. Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission. Science eabg6296
<https://science.sciencemag.org/content/early/2021/05/19/science.abg6296>.
20. Peng Z, Bahnfleth W, Buonanno G, Dancer SJ, Kurnitski J, Li Y, Loomans MGLC, Marr LC, Morawska L, Nazaroff W, Noakes C, Querol X, Sekhar C, Tellier R, Greenhalgh T, Bourouiba L, Boerstra A, Tang J, Miller S, Jimenez JL. 2021. Practical indicators for risk of airborne transmission in shared indoor environments and their application to COVID-19 outbreaks. bioRxiv. medRxiv
<http://medrxiv.org/lookup/doi/10.1101/2021.04.21.21255898>.
21. Lessler J, Grabowski MK, Grantz KH, Badillo-Goicoechea E, Metcalf CJE, Lupton-Smith C, Azman AS, Stuart EA. 2021. Household COVID-19 risk and in-person schooling. Science 372:1092–1097

<http://dx.doi.org/10.1126/science.abh2939>.

22. Greenhalgh T, Ozbilgin M, Contandriopoulos D. 2021. Orthodoxy, *illusio*, and playing the scientific game: a Bourdieusian analysis of infection control science in the COVID-19 pandemic. Wellcome Open Res 6:126

<https://wellcomeopenresearch.org/articles/6-126/v1>.

23. Conly J, Seto WH, Pittet D, Holmes A, Chu M, Hunter PR, WHO Infection Prevention and Control Research and Development Expert Group for COVID-19. 2020. Use of medical face masks versus particulate respirators as a component of personal protective equipment for health care workers in the context of the COVID-19 pandemic. Antimicrob Resist Infect Control 9:126

<http://dx.doi.org/10.1186/s13756-020-00779-6>.

24. Morawska L, Allen J, Bahnfleth W, Bluysen PM, Boerstra A, Buonanno G, Cao J, Dancer SJ, Floto A, Franchimon F, Greenhalgh T, Haworth C, Hogeling J, Isaxon C, Jimenez JL, Kurnitski J, Li Y, Loomans M, Marks G, Marr LC, Mazzeella L, Melikov AK, Miller S, Milton DK, Nazaroff W, Nielsen PV, Noakes C, Peccia J, Prather K, Querol X, Sekhar C, Seppänen O, Tanabe SI, Tang JW, Tellier R, Tham KW, Wargocki P, Wierzbicka A, Yao M. 2021. A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. Science 372:689–691

<http://dx.doi.org/10.1126/science.abg2025>.

25. Roberge RJ, Kim JH, Powell JB. 2014. N95 respirator use during advanced pregnancy. Am J Infect Control 42:1097–1100

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ajic.2014.06.025>.

26. Leo G. 2020. Health minister reviewing management of Canada's emergency stockpile. CBC News

<https://www.cbc.ca/news/canada/saskatchewan/health-minister-emergency-stockpile-1.5530081>.

27. Nature of Man: Chapter IX

https://www.loebclassics.com/view/hippocrates_cos-nature_man/1931/pb_LCL150.25.xml.

28. Hempelmann E, Krafts K. 2013. Bad air, amulets and mosquitoes: 2,000 years of changing perspectives on malaria. *Malar J* 12:232

<http://dx.doi.org/10.1186/1475-2875-12-232>.

29. Byrne JP. 2012. Encyclopedia of the Black Death - Volume 1. ABC-CLIO
https://www.google.com/books/edition/Encyclopedia_of_the_Black_Death/5KtDfvlSrDAC?hl=en&gbpv=0.

30. Nutton V. 1990. The reception of Fracastoro's Theory of contagion: the seed that fell among thorns? *Osiris* 6:196–134 <http://dx.doi.org/10.1086/368701>.

31. Nutton V. 1983. The seeds of disease: an explanation of contagion and infection from the Greeks to the Renaissance. *Med Hist* 27:1–34
<http://dx.doi.org/10.1017/s0025727300042241>.

32. Mattern S. 2011. Galen and his patients. *Lancet* 378:478–479
[http://dx.doi.org/10.1016/s0140-6736\(11\)61240-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0140-6736(11)61240-3).

33. Bardell D. 2004. The Invention of the Microscope. *Bios* 75:78–84
<http://www.jstor.org/stable/4608700>.

34. Donaldson IM. 2010. Robert Hooke's *Micrographia* of 1665 and 1667. *JR Coll Physicians Edinb* 40:374–376 <http://dx.doi.org/10.4997/JRCPE.2010.420>.

35. Polianski IJ. 2021. Airborne infection with Covid-19? A historical look at a current controversy. *Microbes Infect* 104851
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1286457921000733>.

36. Coventry CB. 1849. Epidemic cholera: its history, causes, pathology, and treatment. Buffalo, Geo. H. Derby & Co.
<https://archive.org/details/39002086311546.med.yale.edu>.

37. Nightingale F. 1863. Notes on Hospitals. Longman, Green, Longman, Roberts, and Green
<https://play.google.com/store/books/details?id=2Xu3ZR4UMdEC>.
38. Hobday RA, Dancer SJ. 2013. Roles of sunlight and natural ventilation for controlling infection: historical and current perspectives. *J Hosp Infect* 84:271–282 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2013.04.011>.
39. McEnroe N. 2020. Celebrating Florence Nightingale's bicentenary. *Lancet* 395:1475–1478 [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30992-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30992-2).
40. Institute of Medicine. 2014. The Future of Public Health. National Academies Press (US), Washington (DC) <http://dx.doi.org/10.17226/1091>.
41. Halliday S. 2001. Death and miasma in Victorian London: an obstinate belief. *BMJ* 323:1469–1471 <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.323.7327.1469>.
42. Snow J. 1855. On the mode of communication of cholera. (2nd ed.). London: John Churchill.
<https://archive.org/details/b28985266/page/4/mode/2up?view=theater>.
43. Vinten-Johansen P, Brody H, Paneth N, Rachman S, Rip M, Zuck D. 2003. Cholera, Chloroform, and the Science of Medicine : A Life of John Snow. Oxford University Press, Incorporated, New York, UNITED STATES
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/ucb/detail.action?docID=3052046>.
44. Wykticky H, Skopec M. 1983. Ignaz Philipp Semmelweis, The Prophet of Bacteriology. *Infect Control Hosp Epidemiol* 4:367–370
<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/0AB1210EBA2F9494383FC205A8B9BB59/S0195941700059762a.pdf/div-class-title-ignaz-philipp-semmelweis-the-prophet-of-bacteriology-div.pdf>.
45. Mortell M, Balkhy HH, Tannous EB, Jong MT. 2013. Physician “defiance” towards hand hygiene compliance: Is there a theory-practice-ethics gap? *J Saudi Heart Assoc* 25:203–208 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsha.2013.04.003>.

46. Pasteur L. 1861. Mémoire sur les corpuscles organisés qui existent dans l'atmosphère, examen de la doctrine des générations spontanées. [Masson], [Paris] <https://www.worldcat.org/title/memoire-sur-les-corpuscles-organises-qui-existent-dans-l-atmosphere-examen-de-la-doctrine-des-generations-spontanees/oclc/4107398> 8.
47. Roll-Hansen N. 1979. Experimental method and spontaneous generation: The controversy between Pasteur and Pouchet, 1859–64. *J Hist Med Allied Sci* XXXIV:273–292 <https://academic.oup.com/jhmas/article-lookup/doi/10.1093/jhmas/XXXIV.3.273>.
48. Lecoq H. 2001. [Discovery of the first virus, the tobacco mosaic virus: 1892 or 1898?]. *CR Acad Sci III* 324:929–933 [http://dx.doi.org/10.1016/s0764-4469\(01\)01368-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0764-4469(01)01368-3).
49. Woolhouse M, Scott F, Hudson Z, Howey R, Chase-Topping M. 2012. Human viruses: discovery and emergence. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 367:2864–2871 <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2011.0354>.
50. Randall K, Ewing ET, Marr L, Jimenez J, Bourouiba L. 2021. How Did We Get Here: What Are Droplets and Aerosols and How Far Do They Go? A Historical Perspective on the Transmission of Respiratory Infectious Diseases. <https://papers.ssrn.com/abstract=3829873>.
51. Cornet G. 1889. Über Tuberculose: die Verbreitung der Tuberkelbacillen ausserhalb des Körpers (German Edition). Hansebooks.
52. Hare R. 1964. THE TRANSMISSION OF RESPIRATORY INFECTIONS. *Proc R Soc Med* 57:221–230 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14130877>.
53. Eds. BMJ. 1969. Serratia septicaemia. *Br Med J* 4:756–757 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4902495>.
54. Great Britain's House of Commons. 1906. Parliamentary Papers, 1850-1908 (13. Feb. 1906 - 21 Dec. 1906). Her Majesty's Stationary Office

<https://play.google.com/books/reader?id=VcBDAQAAMAAJ&hl=en&pg=GBS.RA1>

1- PA66.

55. Kuhn TS. 1962. *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press.

56. Chapin CV. 1912. *The Sources and Modes of Infection*. J. Wiley

<https://play.google.com/store/books/details?id=8bJCAAAIAAJ>.

57. Koch R. 1893. Ueber den augenblicklichen Stand der bakteriologischen Choleradiagnose. *Z Hyg Infektionskr* 14:319–338

<https://doi.org/10.1007/BF02284324>.

58. Marineli F, Tsoucalas G, Karamanou M, Androutsos G. 2013. Mary Mallon (1869-1938) and the history of typhoid fever. *Ann Gastroenterol Hepatol* 26:132–134 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24714738>.

59. Nissani M. 1995. The Plight of the Obscure Innovator in Science: A Few Reflections on Campanario's Note. *Soc Stud Sci* 25:165–183 <https://doi.org/10.1177/030631295025001008>.

60. Eickhoff TC. 1996. Airborne disease: including chemical and biological warfare. *Am J Epidemiol* 144:S39–46

http://dx.doi.org/10.1093/aje/144.supplement_8.s39.

61. Albuquerque Morning Journal. 1918. “Steps are Taken by Blue to Head Off Epidemic of Influenza Here”

<https://chroniclingamerica.loc.gov/lccn/sn84031081/1918-09-14/ed-1/seq-1/>.

62. Chicago Dept. of Health. 1919. *Report and handbook of the Department of Health of the city of Chicago for the years 1911 to 1918 inclusive*. Chicago <https://dds.crl.edu/crldelivery/1770>.

63. Wells WF, Wells MW. 1936. AIR-BORNE INFECTION. *JAMA* 107:1698–1703 <https://jamanetwork.com/journals/jama/article-abstract/273913>.

64. Pruppacher HR, Klett JD. 1978. Microphysics of Clouds and Precipitation. D. Reidel Publishing Company.
65. Wells WF. 1934. ON AIR-BORNE INFECTION*: STUDY II. DROPLETS AND DROPLET NUCLEI. *Am J Epidemiol* 20:611–618
<https://academic.oup.com/aje/article-abstract/20/3/611/280025>.
66. Bloch AB, Orenstein WA, Ewing WM, Spain WH, Mallison GF, Herrmann KL, Hinman AR. 1985. Measles outbreak in a pediatric practice: airborne transmission in an office setting. *Pediatrics* 75:676–683
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3982900>.
67. Wells WF. 1943. Air Disinfection in Day Schools. *Am J Public Health Nations Health* 33:1436–1443 <https://doi.org/10.2105/AJPH.33.12.1436>.
68. Wells WF. 1945. Sanitary Ventilation by Radiant Disinfection. *Sci Mon* 60:325–334 <http://www.jstor.org/stable/18316>.
69. Langmuir AD. 1951. The potentialities of biological warfare against man. An epidemiological appraisal. *Public Health Rep* 66:387–399.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14816509>.
70. Tang JW, Bahnfleth WP, Bluysen PM, Buonanno G, Jimenez JL, Kurnitski J, Li Y, Miller S, Sekhar C, Morawska L, Marr LC, Melikov AK, Nazaroff WW, Nielsen PV, Tellier R, Wargocki P, Dancer SJ. 2021. Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2). *J Hosp Infect* 110:89–96
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2020.12.022>.
71. Reed DS, Nalca A, Roy CJ. 2018. Aerobiology: History, Development, and Programs, p. . *In* Dembek, ZF (ed.), *Medical Aspects of Biological Warfare*. Borden Institute.
72. Riley RL, Mills CC, O'grady F, Sultan LU, Wittstadt F, Shivpuri DN. 1962. Infectiousness of air from a tuberculosis ward. Ultraviolet irradiation of infected

air: comparative infectiousness of different patients. *Am Rev Respir Dis* 85:511–525 <http://dx.doi.org/10.1164/arrd.1962.85.4.511>.

73. Riley RL. 2001. What nobody needs to know about airborne infection. *Am J Respir Crit Care Med* 163:7–8 <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm.163.1.hh11-00>.

74. Gelfand HM, Posch J. 1971. The recent outbreak of smallpox in Meschede, West Germany. *Am J Epidemiol* 93:234–237
<http://dx.doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a121251>.

75. Milton DK. 2012. What was the primary mode of smallpox transmission? Implications for biodefense. *Front Cell Infect Microbiol* 2:150
<http://dx.doi.org/10.3389/fcimb.2012.00150>.

76. Wehrle PF, Posch J, Richter KH, Henderson DA. 1970. An airborne outbreak of smallpox in a German hospital and its significance with respect to other recent outbreaks in Europe. *Bull World Health Organ* 43:669–679
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5313258>.

77. Leclair JM, Zaia JA, Levin MJ, Congdon RG, Goldmann DA. 1980. Airborne transmission of chickenpox in a hospital. *N Engl J Med* 302:450–453
<http://dx.doi.org/10.1056/NEJM198002213020807>.

78. Sepkowitz KA. 1996. How contagious is tuberculosis? *Clin Infect Dis* 23:954–962 <http://dx.doi.org/10.1093/clinids/23.5.954>.

79. CDC. 2021. Chickenpox (Varicella) Transmission
<https://www.cdc.gov/chickenpox/about/transmission.html>.

80. Chen PZ, Bobrovitz N, Premji Z, Koopmans M, Fisman DN, Gu FX. 2021. Heterogeneity in transmissibility and shedding SARS-CoV-2 via droplets and aerosols. *Elife* 10 <http://dx.doi.org/10.7554/eLife.65774>.

81. Jones TC, Mühlemann B, Veith T, Biele G, Zuchowski M, Hofmann J, Stein A, Edelmann A, Corman VM, Drosten C. An analysis of SARS-CoV-2 viral load by patient age <http://dx.doi.org/10.1101/2020.06.08.20125484>.

82. Asadi S, Wexler AS, Cappa CD, Barreda S, Bouvier NM, Ristenpart WD. 2019. Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Sci Rep* 9:2348 <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>.
83. Edwards DA, Ausiello D, Salzman J, Devlin T, Langer R, Beddingfield BJ, Fears AC, Doyle-Meyers LA, Redmann RK, Killeen SZ, Maness NJ, Roy CJ. 2021. Exhaled aerosol increases with COVID-19 infection, age, and obesity. *Proc Natl Acad Sci USA* 118 <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.2021830118>.
84. Morawska L, Buonanno G. 2021. The physics of particle formation and deposition during breathing. *Nat Rev Phys* 1–2 <http://dx.doi.org/10.1038/s42254-021-00307-4>.
85. Buonanno G, Morawska L, Stabile L. 2020. Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications. *Environ Int* 145:106112 <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112>.
86. Institute of Medicine. 2011. Chapter 8: Building Ventilation, Weatherization, and Energy Use. *Climate Change, the Indoor Environment, and Health*. Washington DC: The National Academies Press <https://www.nap.edu/read/13115/chapter/10>.
87. CDC. 2008. Appendices in the Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities. Appendix B. Air <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/environmental/appendix/air.html>.
88. Hogeling J. 2020. Editorial: COVID-19 and the third route. *REHVA Journal* (April) <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/editorialcovid-19-and-the-third-route>.
89. ASHRAE/ANSI/ASHE. 2021. ASHRAE Standard 170-2021 -- Ventilation of Health Care Facilities https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-170-2021?product_id=221297 1.

90. Tellier R. 2009. Aerosol transmission of influenza A virus: a review of new studies. *JR Soc Interface* 6 Suppl 6:S783–90
<http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2009.0302.focus>.
91. Tellier R. 2006. Review of aerosol transmission of influenza A virus. *Emerg Infect Dis* 12:1657–1662 <http://dx.doi.org/10.3201/eid1211.060426>.
92. Cowling BJ, Ip DKM, Fang VJ, Suntarattiwong P, Olsen SJ, Levy J, Uyeki TM, Leung GM, Malik Peiris JS, Chotpitayasunondh T, Nishiura H, Simmerman JM. 2013. Aerosol transmission is an important mode of influenza A virus spread. *Nat Commun* 4:1–6 <https://www.nature.com/articles/ncomms2922>.
93. Moser MR, Bender TR, Margolis HS, Noble GR, Kendal AP, Ritter DG. 1979. An outbreak of influenza aboard a commercial airliner. *Am J Epidemiol* 110:1–6 <http://dx.doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112781>.
94. Pestre V, Morel B, Encrenaz N, Brunon A, Lucht F, Pozzetto B, Berthelot P. 2012. Transmission by super spreading event of pandemic A/H1N1 2009 influenza during road and train travel. *Scand J Infect Dis* 44:225–227
<http://dx.doi.org/10.3109/00365548.2011.631936>.
95. Nguyen-Van-Tam JS, Killingley B, Enstone J, Hewitt M, Pantelic J, Grantham ML, Bueno de Mesquita PJ, Lambkin-Williams R, Gilbert A, Mann A, Forni J, Noakes CJ, Levine MZ, Berman L, Lindstrom S, Cauchemez S, Bischoff W, Tellier R, Milton DK, EMIT Consortium. 2020. Minimal transmission in an influenza A (H3N2) human challenge-transmission model within a controlled exposure environment. *PLoS Pathog* 16:e1008704
<http://dx.doi.org/10.1371/journal.ppat.1008704>.
96. Yan J, Grantham M, Pantelic J, Bueno de Mesquita PJ, Albert B, Liu F, Ehrman S, Milton DK, EMIT Consortium. 2018. Infectious virus in exhaled breath of symptomatic seasonal influenza cases from a college community. *Proc Natl Acad Sci USA* 115:1081–1086 <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1716561115>.

97. Lindsley WG, Noti JD, Blachere FM, Thewlis RE, Martin SB, Othumpangat S, Noorbakhsh B, Goldsmith WT, Vishnu A, Palmer JE, Clark KE, Beezhold DH. 2015. Viable influenza A virus in airborne particles from human coughs. *J Occup Environ Hyg* 12:107–113 <http://dx.doi.org/10.1080/15459624.2014.973113>.
98. Bischoff WE, Swett K, Leng I, Peters TR. 2013. Exposure to influenza virus aerosols during routine patient care. *J Infect Dis* 207:1037–1046 <http://dx.doi.org/10.1093/infdis/jis773>.
99. Blachere FM, Lindsley WG, Pearce TA, Anderson SE, Fisher M, Khakoo R, Meade BJ, Lander O, Davis S, Thewlis RE, Celik I, Chen BT, Beezhold DH. 2009. Measurement of airborne influenza virus in a hospital emergency department. *Clin Infect Dis* 48:438–440 <http://dx.doi.org/10.1086/596478>.
100. Yang W, Elankumaran S, Marr LC. 2011. Concentrations and size distributions of airborne influenza A viruses measured indoors at a health centre, a day-care centre and on aeroplanes. *JR Soc Interface* 8:1176–1184 <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2010.0686>.
101. Pan M, Bonny TS, Loeb J, Jiang X, Lednicky JA, Eiguren-Fernandez A, Hering S, Hugh Fan Z, Wu CY. 2017. Collection of Viable Aerosolized Influenza Virus and Other Respiratory Viruses in a Student Health Care Center through Water-Based Condensation Growth. *mSphere* 2 <https://msphere.asm.org/content/2/5/e00251-17>.
102. Alford RH, Kasel JA, Gerone PJ, Knight V. 1966. Human influenza resulting from aerosol inhalation. *Proc Soc Exp Biol Med* 122:800–804 <http://dx.doi.org/10.3181/00379727-122-31255>.
103. Little JW, Douglas RG Jr, Hall WJ, Roth FK. 1979. Attenuated influenza produced by experimental intranasal inoculation. *J Med Virol* 3:177–188 <http://dx.doi.org/10.1002/jmv.1890030303>.
104. Couch RB, Douglas RG Jr, Fedson DS, Kasel JA. 1971. Correlated studies of a recombinant influenza-virus vaccine. 3. Protection against experimental

influenza in man. *J Infect Dis* 124:473–480

<http://dx.doi.org/10.1093/infdis/124.5.473>.

105. Couch RB, Kasel JA, Gerin JL, Schulman JL, Kilbourne ED. 1974.

Induction of partial immunity to influenza by a neuraminidase-specific vaccine. *J*

Infect Dis 129:411–420 <http://dx.doi.org/10.1093/infdis/129.4.411>.

106. Koster F, Gouveia K, Zhou Y, Lowery K, Russell R, MacInnes H, Pollock Z,

Layton RC, Cromwell J, Toleno D, Pyle J, Zubelewicz M, Harrod K, Sampath R,

Hofstadler S, Gao P, Liu Y, Cheng YS. 2012. Exhaled aerosol transmission of

pandemic and seasonal H1N1 influenza viruses in the ferret. *PLoS One*

7:e33118 <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0033118>.

107. CH Andrewes REG. 1941. Spread of Infection from the Respiratory Tract of

the Ferret. I. Transmission of Influenza A Virus. *Br J Exp Pathol* 22:91

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2065394/>.

108. World Health Organization. 2018. Influenza (Seasonal)

[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/influenza-\(seasonal\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/influenza-(seasonal)).

109. CDC. 2020. How Flu Spreads

<https://www.cdc.gov/flu/about/disease/spread.htm>.

110. Dick EC, Jennings LC, Mink KA, Wartgow CD, Inhorn SL. 1987. Aerosol

transmission of rhinovirus colds. *J Infect Dis* 156:442–448

<http://dx.doi.org/10.1093/infdis/156.3.442>.

111. Fabian P, Brain J, Houseman EA, Gern J, Milton DK. 2011. Origin of

exhaled breath particles from healthy and human rhinovirus-infected subjects. *J*

Aerosol Med Pulm Drug Deliv 24:137–147

<http://dx.doi.org/10.1089/jamp.2010.0815>.

112. Myatt TA, Johnston SL, Zuo Z, Wand M, Keadze T, Rudnick S, Milton

DK. 2004. Detection of airborne rhinovirus and its relation to outdoor air supply

in office environments. *Am J Respir Crit Care Med* 169:1187–1190

<http://dx.doi.org/10.1164/rccm.200306-760OC>.

113. Myatt TA, Johnston SL, Rudnick S, Milton DK. 2003. Airborne rhinovirus detection and effect of ultraviolet irradiation on detection by a semi-nested RT-PCR assay. *BMC Public Health* 3:1–7
<https://bmcpublikealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2458-3-5>.
114. Leung NHL, Chu DKW, Shiu EYC, Chan KH, McDevitt JJ, Hau BJP, Yen HL, Li Y, Ip DKM, Peiris JSM, Seto WH, Leung GM, Milton DK, Cowling BJ. 2020. Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. *Nat Med* 26:676–680 <http://dx.doi.org/10.1038/s41591-020-0843-2>.
115. Couch RB, Knight V, Douglas RG Jr, Black SH, Hamory BH. 1969. The minimal infectious dose of adenovirus type 4; the case for natural transmission by viral aerosol. *Trans Am Clin Climatol Assoc* 80:205–211
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4308674>.
116. Yu ITS, Li Y, Wong TW, Tam W, Chan AT, Lee JHW, Leung DY, Ho T. 2004. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. *N Engl J Med* 350:1731–1739
<http://dx.doi.org/10.1056/NEJMoa032867>.
117. Booth TF, Kournikakis B, Bastien N, Ho J, Kobasa D, Stadnyk L, Li Y, Spence M, Paton S, Henry B, Mederski B, White D, Low DE, McGeer A, Simor A, Vearncombe M, Downey J, Jamieson FB, Tang P, Plummer F. 2005. Detection of airborne severe acute respiratory syndrome (SARS) coronavirus and environmental contamination in SARS outbreak units. *J Infect Dis* 191:1472–1477 <http://dx.doi.org/10.1086/429634>.
118. Kim SH, Chang SY, Sung M, Park JH, Bin Kim H, Lee H, Choi JP, Choi WS, Min JY. 2016. Extensive Viable Middle East Respiratory Syndrome (MERS) Coronavirus Contamination in Air and Surrounding Environment in MERS Isolation Wards. *Clin Infect Dis* 63:363–369 <http://dx.doi.org/10.1093/cid/ciw239>.
119. Tutura A, Livingston V, Frick O, Dyer D, Nichols D, Nalca A. 2020. Small Particle Aerosol Exposure of African Green Monkeys to MERS-CoV as a Model

for Highly Pathogenic Coronavirus Infection. *Emerg Infect Dis* 26:2835–2843
<http://dx.doi.org/10.3201/eid2612.201664>.

120. Kulkarni H, Smith CM, Lee DDH, Hirst RA, Easton AJ, O'Callaghan C. 2016. Evidence of Respiratory Syncytial Virus Spread by Aerosol. Time to Revisit Infection Control Strategies? *Am J Respir Crit Care Med* 194:308–316
<http://dx.doi.org/10.1164/rccm.201509-1833OC>.

121. Lindsley WG, Blachere FM, Davis KA, Pearce TA, Fisher MA, Khakoo R, Davis SM, Rogers ME, Thewlis RE, Posada JA, Redrow JB, Celik IB, Chen BT, Beezhold DH. 2010. Distribution of airborne influenza virus and respiratory syncytial virus in an urgent care medical clinic. *Clin Infect Dis* 50:693–698
<http://dx.doi.org/10.1086/650457>.

122. Tseng CC, Chang LY, Li CS. 2010. Detection of airborne viruses in a pediatrics department measured using real-time qPCR coupled to an air-sampling filter method. *J Environ Health* 73:22–28
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21133312>.

123. Couch RB, Douglas RG Jr, Lindgren KM, Gerone PJ, Knight V. 1970. Airborne transmission of respiratory infection with coxsackievirus A type 21. *Am J Epidemiol* 91:78–86 <http://dx.doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a121115>.

124. Mekibib B, Ariën KK. 2016. Aerosol Transmission of Filoviruses. *Viruses* 8
<http://dx.doi.org/10.3390/v8050148>.

125. Mikkelsen T, Alexandersen S, Astrup P, Champion HJ, Donaldson AI, Dunkerley FN, Gloster J, Sørensen JH, Thykier-Nielsen S. 2003. Investigation of airborne foot-and-mouth disease virus transmission during low-wind conditions in the early phase of the UK 2001 epidemic. *Atmos Chem Phys* 3:2101–2110
<https://acp.copernicus.org/articles/3/2101/2003/>.

126. UK Dept. of Agriculture, Environment and Rural Affairs. 2015. Foot and Mouth disease <https://www.daera-ni.gov.uk/articles/foot-and-mouth-disease>.

127. Dee S, Otake S, Oliveira S, Deen J. 2009. Evidence of long distance airborne transport of porcine reproductive and respiratory syndrome virus and *Mycoplasma hyopneumoniae*. *Vet Res* 40:39
<http://dx.doi.org/10.1051/vetres/2009022>.
128. Dee S, Cano JP, Spronk G, Reicks D, Ruen P, Pitkin A, Polson D. 2012. Evaluation of the long-term effect of air filtration on the occurrence of new PRRSV infections in large breeding herds in swine-dense regions. *Viruses* 4:654–662 <http://dx.doi.org/10.3390/v4050654>.
129. Stärk KD. 1999. The role of infectious aerosols in disease transmission in pigs. *Vet J* 158:164–181 <http://dx.doi.org/10.1053/tvjl.1998.0346>.
130. Ignjatović J, Sapats S. 2000. Avian infectious bronchitis virus. *Rev Sci Tech* 19:493–508
<https://doc.oie.int/dyn/portal/index.seam?page=alo&aloid=29680>.
131. Mumford JA, Hannant D, Jessett DM. 1990. Experimental infection of ponies with equine influenza (H3N8) viruses by intranasal inoculation or exposure to aerosols. *Equine Vet J* 22:93–98 <http://dx.doi.org/10.1111/j.2042-3306.1990.tb04217.x>.
132. Davis J, Garner MG, East IJ. 2009. Analysis of local spread of equine influenza in the Park Ridge region of Queensland. *Transbound Emerg Dis* 56:31–38 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1865-1682.2008.01060.x>.
133. Kutter JS, de Meulder D, Bestebroer TM, Lexmond P, Mulders A, Richard M, Fouchier RAM, Herfst S. 2021. SARS-CoV and SARS-CoV-2 are transmitted through the air between ferrets over more than one meter distance. *Nat Commun* 12:1653 <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-021-21918-6>.
134. Miller SL, Nazaroff WW, Jimenez JL, Boerstra A, Buonanno G, Dancer SJ, Kurnitski J, Marr LC, Morawska L, Noakes C. 2021. Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. *Indoor Air* 31:314–323
<http://dx.doi.org/10.1111/ina.12751>.

135. Eichler N, Thornley C, Swadi T, Devine T, McElnay C, Sherwood J, Brunton C, Williamson F, Freeman J, Berger S, Ren X, Storey M, de Ligt J, Geoghegan JL. 2021. Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 during Border Quarantine and Air Travel, New Zealand (Aotearoa). *Emerg Infect Dis* 27 <http://dx.doi.org/10.3201/eid2705.210514>.
136. Katelaris AL, Wells J, Clark P, Norton S, Rockett R, Arnott A, Sintchenko V, Corbett S, Bag SK. 2021. Epidemiologic Evidence for Airborne Transmission of SARS-CoV-2 during Church Singing, Australia, 2020. *Emerg Infect Dis* 27 <http://dx.doi.org/10.3201/eid2706.210465>.
137. Du CR, Wang SC, Yu MC, Chiu TF, Wang JY, Chuang PC, Jou R, Chan PC, Fang CT. 2020. Effect of ventilation improvement during a tuberculosis outbreak in underventilated university buildings. *Indoor Air* 30:422–432 <http://dx.doi.org/10.1111/ina.12639>.
138. Prather KA, Marr LC, Schooley RT, McDiarmid MA, Wilson ME, Milton DK. 2020. Airborne transmission of SARS-CoV-2. *Science* 370:303–304 <http://dx.doi.org/10.1126/science.abf0521>.
139. Campbell F, Archer B, Laurenson-Schafer H, Jinnai Y, Konings F, Batra N, Pavlin B, Vandemaele K, Van Kerkhove MD, Jombart T, Morgan O, de Waroux O le P. 2021. Increased transmissibility and global spread of SARS-CoV-2 variants of concern as at June 2021. *Euro Surveill* 26:2100509 <https://www.eurosurveillance.org/content/10.2807/1560-7917.ES.2021.26.24.2100509>.
140. Hinds WC. 1999. Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles. Wiley, New York <https://www.worldcat.org/title/aerosol-technology-properties-behavior-and-measurement-of-airborne-particles/oclc/39060733>.

141. Xie X, Li Y, Chwang ATY, Ho PL, Seto WH. 2007. How far droplets can move in indoor environments--revisiting the Wells evaporation-falling curve. *Indoor Air* 17:211–225 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x>.
142. Heneghan CJ, Spencer EA, Brassey J, Plüddemann A, Onakpoya IJ, Evans DH, Conly JM, Jefferson T. 2021. SARS-CoV-2 and the role of airborne transmission: a systematic review. *F1000Res* 10:232 <https://f1000research.com/articles/10-232/v1>.
143. Fennelly KP. 2020. Particle sizes of infectious aerosols: implications for infection control. *Lancet Respir Med* 8:914–924 [http://dx.doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30323-4](http://dx.doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30323-4).
144. Jose L. Jimenez TGDFLCM. 2021. Public Comment on “SARS-CoV-2 and the role of airborne transmission: a systematic review” <https://f1000research.com/articles/10-232#article-comments>.
145. Onakpoya IJ, Heneghan CJ, Spencer EA, Brassey J, Plüddemann A, Evans DH, Conly JM, Jefferson T. 2021. SARS-CoV-2 and the role of fomite transmission: a systematic review. *F1000Res* 10:233 <https://f1000research.com/articles/10-233/v2/pdf>.
146. Tran K, Cimon K, Severn M, Pessoa-Silva CL, Conly J. 2012. Aerosol generating procedures and risk of transmission of acute respiratory infections to healthcare workers: a systematic review. *PLoS One* 7:e35797 <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0035797>.
147. Jackson T, Deibert D, Wyatt G, Durand-Moreau Q, Adisesh A, Khunti K, Khunti S, Smith S, Chan XHS, Ross L, Roberts N, Toomey E, Greenhalgh T, Arora I, Black SM, Drake J, Syam N, Temple R, Straube S. 2020. Classification of aerosol-generating procedures: a rapid systematic review. *BMJ Open Respir Res* 7 <http://dx.doi.org/10.1136/bmjresp-2020-000730>.
148. Hamilton F, Arnold D, Bzdek BR, Dodd J, Reid J, Maskell N, White C, Murray J, Keller J, Brown J, Shrimpton A, Pickering A, Cook T, Gormley M,

- Arnold D, Nava G, Reid J, Bzdek BR, Sheikh S, Gregson F, Hamilton F, Maskell N, Dodd J, Moran E. 2021. Aerosol generating procedures: are they of relevance for transmission of SARS-CoV-2? *Lancet Respir Med* [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(21\)00216-2](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(21)00216-2)
[https://www.thelancet.com/journals/lanres/article/PIIS2213-2600\(21\)00216-2/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanres/article/PIIS2213-2600(21)00216-2/fulltext) .
149. Brown J, Gregson FKA, Shrimpton A, Cook TM, Bzdek BR, Reid JP, Pickering AE. 2021. A quantitative evaluation of aerosol generation during tracheal intubation and extubation. *Anaesthesia* 76:174–181
<http://dx.doi.org/10.1111/anae.15292>.
150. Klompas M, Baker M, Rhee C. 2021. What Is an Aerosol-Generating Procedure? *JAMA Surg* 156:113–114
<http://dx.doi.org/10.1001/jamasurg.2020.6643>.
151. Hamilton F, Gregson F, Arnold D, Sheikh S, Ward K, Brown J, Moran E, White C, Morley A, Bzdek B, Reid J, Maskell N, Dodd JW, AERATOR group. 2021. Aerosol emission from the respiratory tract: an analysis of relative risks from oxygen delivery systems. *bioRxiv. medRxiv*
<http://medrxiv.org/lookup/doi/10.1101/2021.01.29.21250552>.
152. Wilson NM, Marks GB, Eckhardt A, Clarke AM, Young FP, Garden FL, Stewart W, Cook TM, Tovey ER. 2021. The effect of respiratory activity, non-invasive respiratory support and facemasks on aerosol generation and its relevance to COVID-19. *Anaesthesia* <https://doi.org/10.1111/anae.15475>
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/anae.15475>.
153. 2020. Aerosols <https://www.cdc.gov/niosh/topics/aerosols/default.html>.
154. Samet JM, Prather K, Benjamin G, Lakdawala S, Lowe JM, Reingold A, Volckens J, Marr L. 2021. Airborne Transmission of SARS-CoV-2: What We Know. *Clin Infect Dis* <https://doi.org/10.1093/cid/ciab039>
<https://academic.oup.com/cid/article-lookup/doi/10.1093/cid/ciab039>.

155. Tellier R, Li Y, Cowling BJ, Tang JW. 2019. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary. *BMC Infect Dis* 19:101 <http://dx.doi.org/10.1186/s12879-019-3707-y>.
156. Baumeister RF, Vohs KD. 2007. *Encyclopedia of Social Psychology*. SAGE Publications <https://play.google.com/store/books/details?id=CQBzAwAAQBAJ>.
157. Tang JW, Marr LC, Li Y, Dancer SJ. 2021. Covid-19 has redefined airborne transmission. *BMJ* 373 <https://www.bmj.com/content/373/bmj.n913>.