臺北市立聯合醫院
TAIPEI CITY HOSPITAL



Review article

# Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy

Mahesh Jayaweera[a,*], Hasini Perera[b], Buddhika Gunawardana[a], Jagath Manatunge[a]

臺北市立聯合醫院教研部
王培瑋教學主治醫師
教學主治醫師群
邱婷芳主任
璩大成副總院長

Corresponding Author: Jayaweera M.
Department of Civil Engineering, University of Moratuwa, Sri Lanka.




Environ Res. 2020 Sep; 188: 109819.
Published online 2020 Jun 13.
doi: 10.1016/j.envres.2020.109819

整理日期:2020/7/14

Review article

# Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy

Mahesh Jayaweera[a,*], Hasini Perera[b], Buddhika Gunawardana[a], Jagath Manatunge[a]




- 許多呼吸道病毒可通過多種途徑傳播，其中以飛沫(droplets)和氣懸膠體(aerosols)的傳播途徑最為重要，但在COVID-19的重要性仍不清楚。
- 呼吸性的顆粒可依據顆粒大小，也就是空氣動力學直徑(aerodynamic diameter)大小，區分為飛沫或氣懸膠體。
- 許多人認為飛沫比氣懸膠體更容易造成感染，最近已有證據反駁這樣的假設，並推測氣懸膠體在傳播疾病中有重要作用。
- 目前仍沒有對於SARS-CoV-2病毒傳播模式方式的爭議及區分飛沫和氣懸膠體傳播病毒方式的決定性研究。因此形成未解決的對立(dichotomy)。

Jayaweera M. Department of Civil Engineering, University of Moratuwa, Sri Lanka.
Environ Res. 2020 Sep; 188: 109819.
Published online 2020 Jun 13.
doi: 10.1016/j.envres.2020.109819

# 本篇重點

- SARS-CoV-2病毒在氣懸膠體中已發現可存活3小時，而它以飛沫的形式在塑料和不銹鋼，銅，紙板和玻璃上更穩定，可檢測到的持續時間分別為72、4、24和84小時。
- 當呼吸道疾病的感染者咳嗽或打噴嚏時，會出現一團大小不一的病原體飛沫，打噴嚏時可從源頭傳播長達7–8 m，在咳嗽時可傳播2 m以上（最大4.5 m）。
- 可能影響空氣中微生物生存能力最重要的環境因素包括溫度、濕度、輻射（陽光）和戶外（通風）等等。
- 感染患者戴外科口罩時，約20–30%的飛沫和大量氣懸膠體洩漏， 戴上N95後會有5%的飛沫和一團氣懸膠體霧洩出。 均不能保證完全阻斷SARS-CoV-2， 因此社交隔離仍為必須。

# 本篇重點

- 飛機上SARS-Cov-2感染者咳嗽釋放的飛沫可能會向前行進四到五個座位，向後一個座位移動，但氣懸膠體可能移動更遠。所以機上有感染患者且未戴上口罩時，大約有五到十個人會被感染。
- 乘坐客車旅行時，患者戴口罩咳嗽，相較不戴口罩，傳播感染的危險可得到一定程度的控制，但易感宿主仍有感染危險。
- 開啟車窗並關閉空調的情境，較開啟空調並關閉車窗，在控制SARS-CoV-2病毒方面會更有效。
- 一定比例載有病毒的氣懸膠體可在密閉空間內造成遠距離傳播的院內感染，使許多易感宿主感染，遠超出人們的想像。

# 簡介

- . Coronavirus disease 2019 (COVID-19)於2019年12月在中國武漢首次報導，是由severe acute respiratory syndrome coronavirus (SARS-CoV)引起，並通過飛沫(droplets)，氣懸膠體(aerosols) 和污染物(fomites)等多種途徑在人與人之間傳播。
- 距離首次報導已超過120天，後來也宣佈為大流行且具有高度傳染性。 截至2020年5月5日，全球COVID-19疾病確診病例超過350萬，243,401人死亡。
- COVID-19感染會引發嚴重的急性呼吸道疾病，以發燒，咳嗽，肌肉酸痛和疲勞為常見發病症狀。

# 簡介

- 傳染原可由不同途徑從天然宿主傳播到易感宿主。文獻中有關傳染原的傳播方式有不同的分類方式。 Morawska（2006）提出的病毒傳播方式的分類，包括人與人之間的傳播、空氣傳播以及其他的方式，例如內源性感染，共同傳播因子(common vehicle)和媒介傳播。
- 許多呼吸道病毒也可通過多種途徑傳播，其中以飛沫(droplets)和氣懸膠體(aerosols)的傳播途徑最為重要，但在此疾病中的重要性仍不清楚。已感染者可於說話，呼吸，咳嗽或打噴嚏時散播病毒顆粒，這樣的病毒顆粒已知可被包封在粘液，唾液和水的球體(globs)中，這些球體於環境中的命運和行為取決於他們的大小。較大的球體下降速度比蒸發快，因此以飛沫的形式飛濺到附近。較小的球體因蒸發較快會以氣溶膠的形式在空氣中停留，並可比飛沫漂移更遠。

# 簡介

- 呼吸性的顆粒可依據顆粒大小，也就是空氣動力學直徑(aerodynamic diameter)大小，區分為飛沫或氣懸膠體。 引起爭辯的論點在於，氣懸膠體相對於較大的飛沫，可能有更多風險在遠離發生地點的易感宿主之間傳播COVID-19疾病。 不過經由氣懸膠體傳播的病毒性疾病的爆發程度已被證明並不如想像中嚴重，這是因為在空氣中長期存留造成病毒的稀釋和去活化。
- 關於COVID-19大流行的最低傳染性病毒載量，目前尚無明顯證據，但許多研究人員推測，數百的SARS-CoV-2病毒將足以引發易感宿主得到疾病。

# 簡介

- 飛沫和氣懸膠體平均顆粒大小的數值應為多少有許多分歧。世界衛生組織（WHO）和疾病控制與預防中心（CDC）假定空氣動力學直徑(aerodynamic diameter)大於5μm的顆粒為飛沫，小於5μm的顆粒為氣懸膠體或飛沫核心（droplet nuclei）。還有一些假設，認為空氣動力學直徑為20μm或10μm或更小粒徑的顆粒，在空氣中長期停留的能力和可到達肺部內氣體交換區應可視為氣懸膠體。
- 小氣懸膠體更容易被吸入肺部深處，引起下呼吸道肺泡組織的感染，而大飛沫則會被困在上呼吸道中。為了易於理解，氣懸膠體可以定義為空氣中固體或液體顆粒的懸浮物(suspensions)，可因自然現象或人為產生

# 簡介

- 雖然社會隔離在對抗COVID-19很有用處，但感染者與易感宿主之間應保持的最小距離仍有爭議，目前仍沒有任何科學證據來設置。
- 由於許多人認為飛沫比氣懸膠體更容易造成感染，因此研究工作一直集中在飛沫傳播的研究。最近已有證據反駁這樣的假設，並推測氣懸膠體在傳播疾病中有重要作用。
- 包括WHO在內的許多研究人員對於SARS-CoV-2病毒傳播模式方式的爭議都仍在推測和迷惑，也沒有區分飛沫和氣懸膠體傳播病毒方式的決定性研究。因此形成未解決的對立(dichotomy.)。

# 簡介

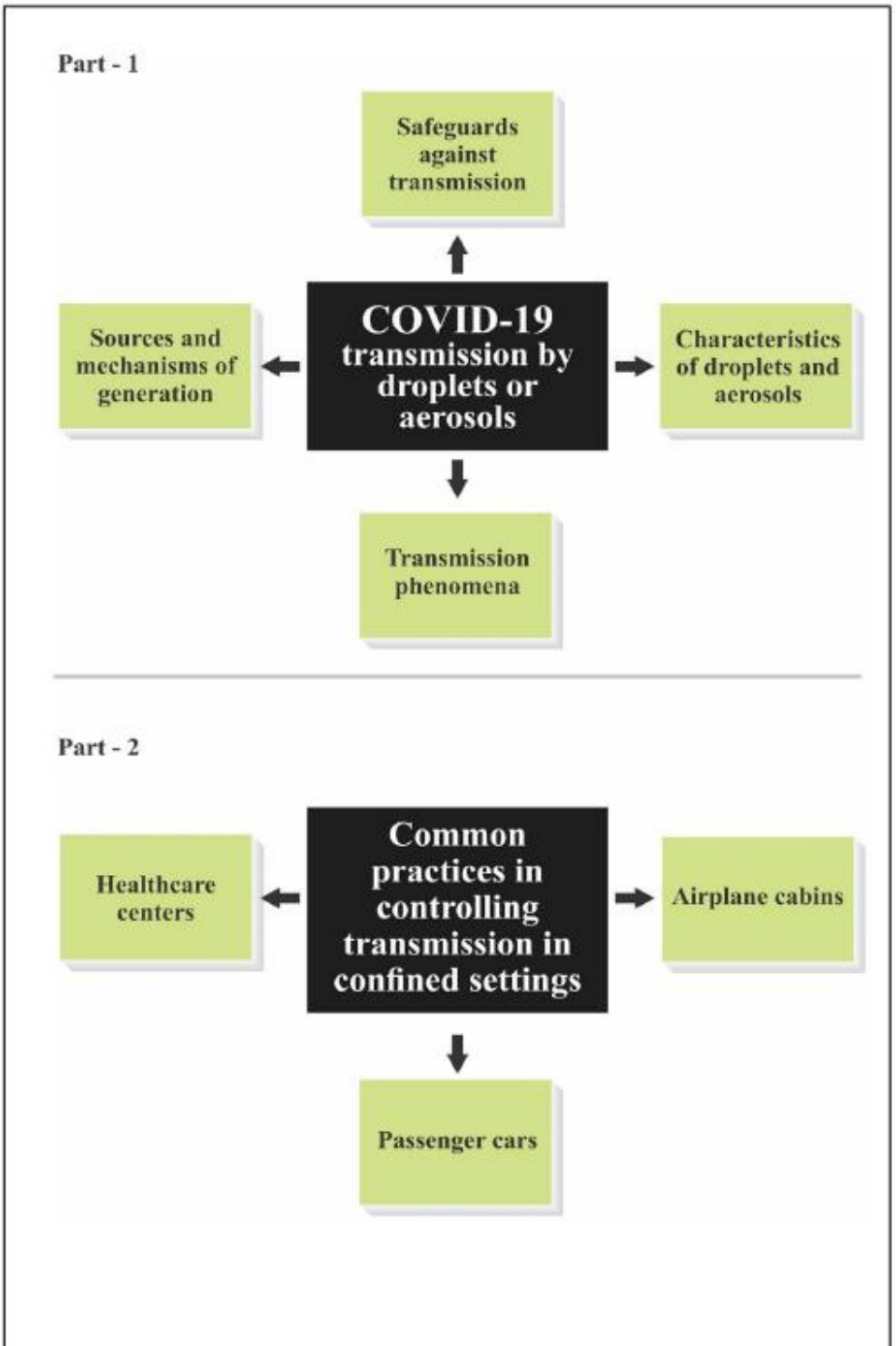
- 也有人認為，SARS-CoV-2病毒傳播發生的環境條件，可增加或減少的病毒的酬載(payloads)因此造成易感宿主不利或有利於引發疾病 。這種不利或有利的情境，是基於環境中運輸現象 (transport phenomena)的改變導致病毒命運的變化。
- 有許多的假設證實，濕度、溫度、日光和通風達到某些閾值會加快攜帶病毒的飛沫和氣懸膠體的傳播，從而加劇SARS-CoV疾病的傳播。
- 隨著科學家為通過飛沫和氣懸膠體傳播的方式提供更確鑿的證據，佩戴口罩和呼吸器已成為全球數十億人（受感染者和易感宿主）日常活動中的常見現象，但是這種個人防護設備在抵抗SARS-CoV-2傳播方面的功效了解甚少。

# 簡介

- 自從COVID-19被宣佈為全球大流行以來，控制COVID-19（尤其是室內環境中）的研究數據庫已經由實證研究得到了更新。然而，在不同的室內環境中，有關控制携带病毒的飛沫和氣懸膠體散播、它們的運輸現象以及稀釋和破壞病毒的合理方法仍較少被關注。

- 隨著全球報告更多的COVID-19病例，在對抗疾病時必須依循實證來做決策，尤其是在密閉環境中。密閉空間中的飛沫和氣懸膠體的傳播會成為極為複雜的現象，不同微氣候(micro-climatic)條件下真實軌跡的了解甚少。疾病的侵襲性與飛沫和氣懸膠體的傳輸現象直接相關，這種傳輸現象的理解在密閉空間內的控制疾病傳播至關重要。

- 空氣動力工程師(Aerodynamic engineers)需要與病毒學家共同合作，以充分了解密閉空間內病毒傳播的可能軌跡，並利用計算流體力學(computational fluid dynamics)來模擬感染者在不同密閉環境中咳嗽和打噴嚏所引起的軌跡。




- 這篇文獻回顧文章分為兩個部分：第1部分強調經由飛沫和氣懸膠體傳播的基本原理（Sections 2–5），第2部分是多數人穿戴不同口罩於三種密閉環境下:飛機、客車(passenger car)和醫療照護中心控制COVID-19傳播時所採用的做法。（Section 6)。 圖1描述了以下各節中描述的兩個部分的示意圖。

# 2. 產生和傳播飛沫和氣懸膠體的來源和機制

- 感染者是氣懸膠體和飛沫的主要來源，但其他情況，例如醫療操作處置，手術，快速流動的自來水和馬桶沖水都會產生被傳染性病原體污染的氣懸膠體。呼吸道感染病毒最常通過氣懸膠體傳播的病毒有流感病毒，鼻病毒，冠狀病毒，呼吸道融合病毒（RSV）和副流感病毒。
- Tellier（2009）提出了三種可以傳播流感病毒的模式：氣懸膠體傳播，飛沫傳播和鼻粘膜被污染雙手所致的自體接種(self-inoculation)。 Judson和Munster（2019）提出了另一種分類，空氣傳播(airborne transmission)一詞來描述由小飛沫氣懸膠體(small droplet aerosols)和飛沫核心（droplet nuclei）傳播的疾病，而飛沫傳播(droplet transmission)來描述大飛沫氣懸膠體(large droplet aerosols)傳播的疾病。

# 2. 產生和傳播飛沫和氣懸膠體的來源和機制

- 飛沫傳播通常發生於感染患者打噴嚏，說話或咳嗽時，將大飛沫直接噴灑在易感宿主的結膜或粘膜上。
- 直接接觸和因為醫療操作處置（aerosol-generating medical procedures , AGMP）產生的氣懸膠體導致的汙染物(fomite)傳播也被視為潛在的傳播途徑。
- 感染患者與易感宿主之間的直接身體接觸為直接接觸感染，易感宿主接觸到汙染物(fomite)上的傳染性分泌物為間接接觸傳播。
- 目前已知COVID-19可通過人與人間的接觸傳播。傳染的主要機制之一是汙染物(fomite)所致的自體接種(self-inoculation) 。 通常是由於手部衛生太差或未遵循應有的疾病控制禮儀。

# 2. 產生和傳播飛沫和氣懸膠體的來源和機制

- 由於頻繁接觸被污染的汙染物(fomite)而引起的病毒傳播是疾病的來源之一，因此許多研究人員已經將注意力轉移到病毒攜帶的飛沫和氣懸膠體的空氣傳播。 SARS-CoV-2爆發時因為新興病毒的關係，潛在的傳播途徑受限於沒有初確證據而無法判定。所以假定SARS-CoV-2也會像其他人類冠狀病毒一樣傳播（CDC，2020a）。
- 最近的研究證實COVID-19主要通過呼吸道飛沫和接觸途徑在人與人之間傳播。
- 也有證據顯示感染者的糞便是可能傳播SARS-CoV-2病毒。
  - 中國最近的一項研究調查湖北省和山東省三所醫院的205名感染患者，收集了1,070個檢體，約29％的COVID-19陽性病例是通過糞便傳播的 ，他們也強調患者糞便中可偵測到COVID-19活性感染因子，COVID-19可以通過糞便途徑傳播。

# 2. 產生和傳播飛沫和氣懸膠體的來源和機制

- 世衛組織的早期聲明認為沒有證據支持SARS-CoV-2病毒的糞便傳播，並強調截至2020年3月27日，在中國已確診的75465例COVID-19病例中，空氣傳播在疾病傳播中沒有重要角色。
- 與WHO的研究相反，另一項研究報告SARS-CoV-2可以在空氣中存活數小時，而導致潛在的霧化傳播。
- 隨著越來越多國家和地區的報告，世衛組織已暗示某些醫院處置操作在特定情況下也會產生氣懸膠體
  - 氣管插管、支氣管鏡檢查、開放式抽吸、霧化治療、插管前進行人工通氣、將患者轉成俯臥姿勢、患者中斷連接呼吸器、非侵襲式正壓通氣、氣管切開術和心肺復甦術。
- 世界衛生組織也提出許多的建議管理流程以預防可能的空氣傳播

# 2. 產生和傳播飛沫和氣懸膠體的來源和機制

- 醫護人員也常不自覺的暴露於感染原，包括直接接觸到呼吸道飛沫或氣懸膠體，和直接處理COVID-19患者的傳染性分泌物（如痰液，血清，血液，糞便等）。
- 一項研究參與醫療服務期間可能感染COVID-19的來源，結果顯示醫生離開病房時穿戴的個人防護設備（PPE），收集的樣本COVID-19均呈陰性。患者房間內的出風口排氣扇樣品檢驗除走廊和前室之外對COVID-19呈陽性反應(走廊和前室除外)，顯示空氣傳播是合理的。
- 另一項新加坡研究，有症狀的COVID-19患者病房的排風口拭子檢驗報告均為陽性，顯示載有病毒的小氣懸膠體可被氣流吹送並沉積在通風口等設備上。但是，沒有關於如何被污染的結論性證據，氣懸膠體顆粒也可推測已經沉積在通風口。

# 3. 氣懸膠體和飛沫的大小、停留時間和傳遞距離

- 有症狀的SARS-CoV-2患者咳嗽、打噴嚏、說話或呼氣時產生的飛沫可造成傳播。這些飛沫因為太重無法停留於空氣中，會掉落在附近的地板或表面上，若易感宿主接觸這些沾染到飛沫的汙染物(fomites)表面就會被感染。
- 某些較小的飛沫從感染患者身上噴出後，會轉化為空氣動力直徑相對較小的氣懸膠體顆粒，也稱為生物氣懸膠體(bioaerosols)，並因此成為空氣傳播的物質。這些載有病毒的氣懸膠體顆粒能夠感染吸入者，從而傳播疾病。
- 亦有幾種傳輸現象可造成較大的飛沫經由蒸發而變小，因此這種較小的顆粒稱為飛沫核心（droplet nuclei）。這種帶有病毒包封的氣懸膠體顆粒也可以稱為生物氣懸膠體(bioaerosols)。在本文中“氣懸膠體”、“生物氣懸膠體”和“飛沫核心” 可以互換使用。
- 關於飛沫和氣懸膠體產生的情境和可能機制，尤其是在室內環境中仍不太了解，值得進一步探討。

# 表1. 人類胸腔感染時呼氣活動所產生的飛沫和氣懸膠體的特徵

Table 1

Detailed information of droplets and aerosols generated from human expiratory activities (Source: Duguid, 1945).

| Activity | Number of droplets and aerosols generated (1–100 μm) | Presence of aerosols (1–2 μm) | Region of origin |
|---|---|---|---|
| Normal breathing (for 5 min) | None – few | Some | Nose |
| Single strong nasal expiration | Few – few hundred | Some | Nose |
| Counting loudly - talking | Few dozen – few hundred | Mostly | Front of the mouth |
| A single cough (mouth open) | None – few hundred | Some | Faucial region |
| A single cough (mouth initially closed) | Few hundred – many thousand | Mostly | Front of the mouth |
| Single sneeze | Few hundred thousand – few million | Mostly | Front of the mouth |
| | Few – few thousand | Some | Both from the nose and the faucial region |

.Duguid於1945首次探討並提供相關訊息。

95%的顆粒通常小於100μm，而大多數顆粒在4至8μm之間。這些發現證實由鼻呼吸和呼氣可散發數百個飛沫，其中有些是氣懸膠體。相比之下，說話，咳嗽和打噴嚏產生的氣懸膠體多於飛沫

# 3. 氣懸膠體和飛沫的大小、停留時間和傳遞距離

- 與Duguid（1945）提出的相反，Papineni和Rosenthal（1997）對五個健康個體進行的研究顯示，人類吐氣動作產生的顆粒80-90%是直徑小於1μm的氣懸膠體。該研究也證實咳嗽產生的氣懸膠體密度最高，鼻呼吸產生的氣懸膠體密度最低，呼氣對傳播病毒（0.1μm）比傳播細菌（> 1 μm）影響更大。
- 2003年於香港的報告發現，一名被SARS-CoV感染患者於旅館走廊上嘔吐，附近數人因氣懸膠體傳播而感染（Morawska，2006）。
- 影響氣懸膠體命運的物理化學過程包括蒸發、與其他類型顆粒的交互作用、運輸(transport)以及因沉積在固體表面上從空氣中移除（Morawska，2006）。

# 3. 氣懸膠體和飛沫的大小、停留時間和傳遞距離

- 空氣中的粒子經常受到布朗運動(Brownian motion) ，重力，靜電力(electrostatic forces)熱梯度(thermal gradients)，電磁輻射，紊流擴散(turbulent diffusion)和慣性力 (inertial forces)的影響。其中擴散是傳播病毒的關鍵機制
- 大於1μm的顆粒，重力比布朗運動重要。在標準大氣條件下，小於100μm的飛沫通常在到達地面之前會蒸發，蒸發後的飛沫殘留物會在空氣中長時間停留。當飛沫中含有傳染性的生物氣溶膠（例如病毒）時，即使液體中的成分蒸發後，生物氣懸膠體也會保留在空氣中。
- 病毒在空氣中存活的持續時間會隨著生物氣懸膠體的類型而不同。飛沫在0.5–20.0μm範圍內較可能保留在呼吸道空氣中並產生感染（McCluskey等，1996）。但是空中的飛沫似乎無法保存很長時間，若因為蒸發轉化為生物氣懸膠體殘留物，可在空氣中停留較長時間。

# 3. 氣懸膠體和飛沫的大小、停留時間和傳遞距離

- Hui and Chan (2010)的研究顯示在不同的室內環境中，SARS-CoV可經由空氣的途徑傳播。
- 另一項回顧性研究發現，飛機上的空氣傳播可從感染者到位於前方七排座位的乘客，顯示SARS-CoV病毒可以水平傳播超過1 m的距離（Olsen等，2003）。
- 另一個香港報告，一棟公寓大樓中1,000多人的複雜感染是由於該建築物的污水系統產生的氣懸膠體導致（McKinney等，2006）。
- 這些觀察結果顯示，充滿SARS-CoV病毒的氣懸膠體傳播是一種現象，它的破壞遠大於想像，因此預防措施非常重要。

# 3. 氣懸膠體和飛沫的大小、停留時間和傳遞距離

- SARS-CoV-2病毒在氣懸膠體中已發現可存活3小時，而它以飛沫的形式在塑料和不銹鋼，銅，紙板和玻璃上更穩定，可檢測到的持續時間分別為72、4、24和84小時。SARS-CoV病毒也發現以氣懸膠體形式在空氣中存活3小時，所以這兩種SARS病毒在空中的行為是很相似。SARS-CoV病毒以飛沫形式在塑料和不銹鋼，銅，硬紙板和玻璃上保持穩定和存活的持續時間（半衰期）分別為72、8、8和96小時（van Doremalen等，2020）。 SARS-CoV-2和SARS-CoV在氣懸膠體中的半衰期幾乎相同，中間值約為1.1-1.2小時，顯示這兩種病毒在通過空氣傳播時具有相似的穩定性特徵（van Doremalen等，2020）。
- SARS-CoV-2病毒在流行病學方面的因素可能更重要，包括上呼吸道的高病毒含量(viral loads) ，以及感染COVID-19患者於無症狀時排出和傳播病毒的能力。

# 3. 氣懸膠體和飛沫的大小、停留時間和傳遞距離

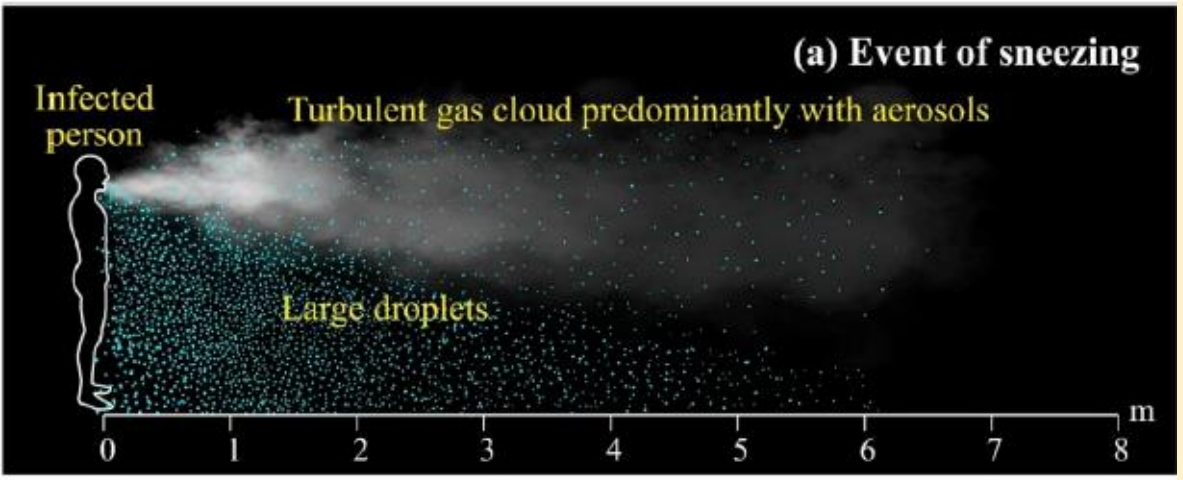
- 根據Nicas等人（2005年）進行的研究，從有呼吸系統疾病感染者的咳嗽中散發出來的顆粒直徑迅速減小（初始直徑小於20μm的條件下），主要是因為水量喪失原來體積的一半($6\times10^{-8}$ mL)。
- 通風排氣，顆粒沉降，和空氣消毒是常見清除空氣中可傳播病原體的機制。每種去除機制都遵循一次降低率(first-order reduction rate)，基於SARS-CoV-2在空氣中存活3小時，即使在停滯的環境中，暴露、吸入和感染仍可能在幾分鐘或幾小時後，發生於近處或遠離氣懸膠體的來源。
- 飛沫的實際空氣傳播時間，在大量交叉流 (cross flow)的環境中可能會更長。檢疫和醫療中心可能會遇到這種情況（例如，開門，床和設備移動，人們不斷來回走動）。

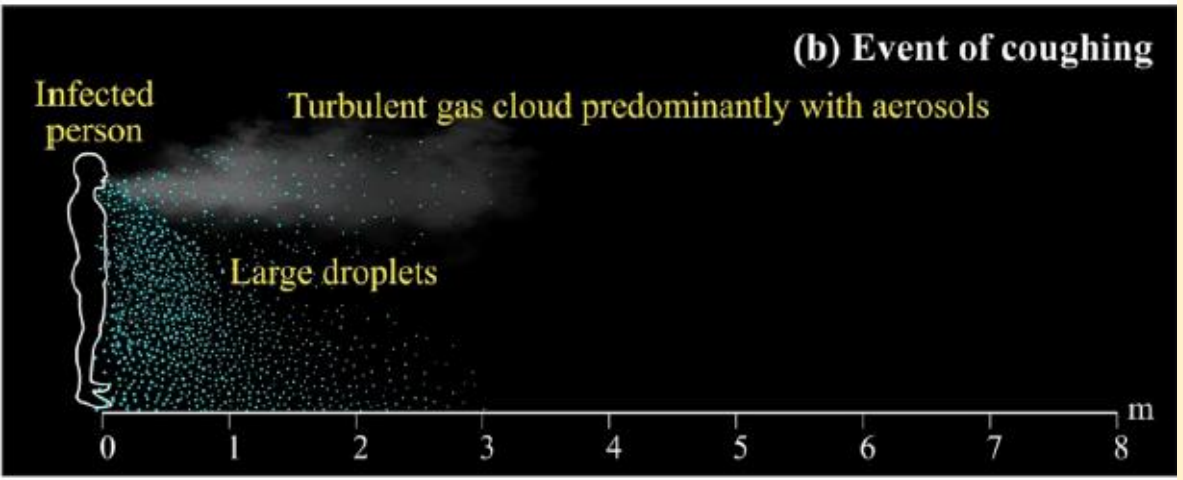
# 3. 氣懸膠體和飛沫的大小、停留時間和傳遞距離

- 較小的飛沫核心或氣懸膠體受到明顯的下降氣流作用（例如通過天花板通風口下方）時，在空氣中的持續時間可能會大大縮短。當粘液或唾液從受感染者身上噴出時，其軌跡主要取決於飛沫的大小和控制運動路徑的氣流模式（Tang等，2006）。
- Stokes‘ law描述了飛沫在往下的重力作用和往上的空氣摩擦作用的合成軌跡，這些軌跡決定了飛沫在空氣中的運動。咳嗽和打噴嚏通常構成一團浮力氣體的紊亂雲(turbulent cloud of buoyant gas) ，具有各種大小的飛沫。無論此氣體中的流動如何，較大的飛沫遵循彈道軌跡，氣懸膠體則不同程度的漂浮在紊亂的氣體雲中。

# 3. 氣懸膠體和飛沫的大小、停留時間和傳遞距離

- 2米的安全隔絕區域(2-m safe exclusion zone)，是公認防止飛沫從感染者傳播到易感宿主的距離。但是還沒有全面的研究來支持這種想法。
- Wells（1934）考慮到蒸發下降曲線(evaporation-falling curve)後，支持2-m隔絕區域概念。Wells推測，大飛沫（> 100μm）將在產生來源2 m的水平距離內掉落到地面上。Wells的研究僅是簡單計算，假設和不足的經驗數據。
- Xie 等人(2007)後來證實，根據呼氣的空氣速度和空氣相對濕度，呼吸性的呼氣流中較大的飛沫（直徑在60μm和100μm之間），可被帶走超過6m的水平距離(若呼氣時的呼氣速度為50 m / s)，這樣情景模擬了打噴嚏事件。若模擬咳嗽發作，較大的飛沫在出口以10 m / s的速度噴出時，可被帶走大於2 m的距離。若速度為1 m / s的呼氣事件中，僅能攜帶較大飛沫於水平方向大約1 m。(圖2、見下頁)



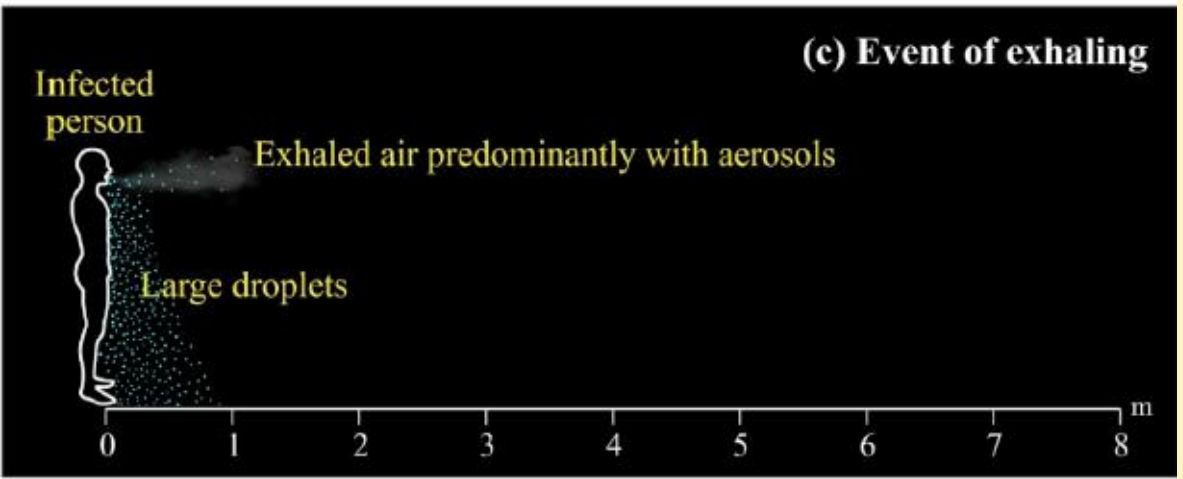




圖2. 感染患者的飛沫和氣懸膠體的軌跡

（a）打噴嚏的飛沫和氣懸膠體，以50 m / s的速度，於0.12 秒內飛過6 m的距離。

（b）咳嗽的飛沫和氣懸膠體，以10 m / s的速度，於0.2 秒內飛過2 m的距離

（c）呼氣的飛沫和氣懸膠體，以1 m / s的速度，於1秒內飛過1m的距離。

# 3. 氣懸膠體和飛沫的大小、停留時間和傳遞距離

- 其他研究也顯示，當呼吸道疾病的感染者咳嗽或打噴嚏時，會出現一團大小不一的病原體飛沫，打噴嚏時可從源頭傳播長達7–8 m，在咳嗽時可傳播2 m以上（最大4.5 m）。Bourouiba（2020）和Loh等人（2020）在COVID-19傳染後進行的最新實驗與先前的發現也一致。
- 不過關於醫護人員與感染COVID-19的患者之間應保持距離的見解仍有不同意見，例如1 m（WHO，2020e）和2 m（CDC，2020b）。
- 由於上述大多數有關COVID-19病毒的研究，都是在實驗室中用人體模型安裝呼氣裝置進行所推斷的訊息，因此仍無法完全令人信服。

# 4. 環境因素對飛沫和氣懸膠體行為的影響

- 可能影響空氣中微生物生存能力最重要的環境因素包括溫度、濕度、輻射（陽光）和戶外（通風）等等。氣懸膠體中的病毒到達易感宿主之前可因為環境因素而降低或增強生存力和傳染性。
- 載有病毒的氣懸膠體的環境耐受性取決於特定的表現型(phenotype)、含有病毒的生物氣懸膠體的組成及其酬載(payloads)以及周圍環境的物理特徵。
- 所以不同地理位置的室外和室內的環境因素對SARS-CoV-2病毒傳播影響的研究相當必要。以$PM_{2.5}$, $PM_{10}$, $NO_2$, and $O_3$ 為代表的空氣污染與COVID-19感染之間也有相關性（Zhu等人，2020）。
- 在室內環境的空氣傳播，主要經由局部通風所推動的對流力(advective forces)，並通過擴散（diffusion）和彌散（dispersion）進一步傳播。

## Table 2

Relationships of viral payloads with environmental parameters.

| Environmental Parameter | Synthesized information | Reference |
|---|---|---|
| Daily minimum temperature with lagged effect of 5–7 days | Inverse relationship with numbers of daily SARS-CoV cases in Beijing and Hong Kong | Bi et al. (2007) |
| Air temperature at 4 °C and relative humidity (< 20% or > 80%) | Higher survival of payloads of transmissible gastroenteritis and mouse hepatitis viruses for extended days on surfaces in indoor environment | Casanova et al. (2010) |
| Temperatures of 22–25 °C and relative humidity of 40–50%, | Higher survival rates of SARS-CoV on smooth surfaces simulating typical air-conditioned environments | Chan et al. (2011) |
| Temperature at 38 °C, and relative humidity > 95% | Los of viability of SARS-CoV, simulating tropical climates | Chan et al. (2011) |
| Ambient temperature (16–28 °C) with 7-day time lag | Stimulated the growth of SARS-CoV | Tan et al. (2005) |
| Environmental temperature related to unexpected rapid spells of cold and warm days | Rise in SARS-CoV cases | Tan et al. (2005) |
| Low temperature/low humidity conditions even after 48 h (20 °C and 40% relative humidity) | More stable and viable payloads of MERS-CoV | van Doremalen et al. (2013) |
| Lower air temperatures (6 °C) and lower relative humidity (30%) than at higher relative humidity | Greater survival of coronaviruses in surfaces | Ijaz et al. (1985); Kim et al. (2007) |

表2.病毒酬載(payloads)與環境參數的關係。
總結各種研究人員推論不同傳播途徑及環境參數與病毒酬載(payloads)的關係。

## Table 2

Relationships of viral payloads with environmental parameters.

| Environmental Parameter | Synthesized information | Reference |
|---|---|---|
| Diurnal temperature | Positive relationship of daily death counts of SARS-CoV patients | Park et al. (2019) |
| Low temperatures in the absence of ultraviolet light and different relative humidity | Slowest inactivation of influenza virus | Kormuth et al. (2018); Lowen et al. (2007); McDevitt et al. (2012); Skinner and Bradish (1954); Yang et al. (2012) |
| Temperature and humidity during the winter season in temperate countries, in the rainy season, or where there were sudden seasonal changes in tropical countries | Strong association of transmission rate of the influenza virus | Biswas et al. (2014); Chowell et al. (2012); Hemmes et al. (1962); Viboud et al. (2006) |
| Absolute humidity | Negative association with daily survival counts of Influenza patients | Metz and Finn (2015) |
| Cold temperature and low relative humidity | Stimulate Influenza transmission | Lowen et al. (2007) |
| Temperature at 30 °C and at all humidity | No association with Influenza transmission | Lowen et al. (2008) |
| Absolute humidity | Wintertime increase in influenza virus transmission and influenza virus survival | Shaman and Kohn (2009) |
| Absolute humidity | No strong correlation with airborne transmission of Influenza virus | Tang et al. (2010) |
| Temperature and relative humidity | Strong correlation with airborne transmission of Influenza virus | Tang et al. (2010) |

## Table 2

Relationships of viral payloads with environmental parameters.

| Environmental Parameter | Synthesized information | Reference |
|---|---|---|
| Sunlight | Negative relationship with survival and infectivity of various viruses | Nelson et al. (2018); Rzeżutka and Cook (2004); Tang (2009); Qiao et al. (2018) |
| Natural and simulated sunlight | Significant loss of infectivity of influenza virus in liquid suspensions and aerosols | Schuit et al. (2020); Skinner and Bradish (1954) |
| Natural and simulated sunlight | High sensitivity of SARS-CoV survival | Tseng and Li (2007); WHO (2004) |
| Natural sunlight and UV radiation | Decay the viability of SARS-CoV | Karapiperis et al. (2020) |
| 60 min of exposure to > 90 W/cm$^2$ of UV-C light at a distance of 80 cm | Loosing viability of SARS-CoV | Duan et al. (2003) |
| 15 min of exposure to UV-C light (> 90 W/cm$^2$) at a closer distance (< 80 cm) | High efficiency of inactivation of SARS-CoV | Darnell et al. (2004) |
| Inadequate indoor ventilation | Enhanced infection risk of SARS-CoV in makeshift hospitals | WHO (2009) |
| With > 12 air changes per hour (ACH) (e.g., equivalent to > 80 L/s for a 24 m$^3$-room) and controlled direction of airflow | Low risk of infectivity of viral diseases in an airborne precaution room | AIA (2001); Mayhall (2004); Wenzel (2003); WHO (2007) |
| Negative pressure of > 2.5 Pa, an airflow having a difference between the exhaust to supply > 125 cfm (56 L/s), clean-to-dirty airflow, > 12 ACH for a new building, and > 6 ACH in existing buildings for an old building, and exhaust to the outside, or a HEPA-filter if room air is recirculated | Low risk of infectivity in an airborne infection isolation room | CDC (2003) |
| Ambient temperature (< 3 °C) | Positive association of daily number of SARS-CoV-2 cases | Zhu and Xie (2020) |
| Average daily ambient temperature | Significant negative correlation with SARS-CoV-2 for northern hemisphere countries | Tosepu et al. (2020) |

## Table 2

Relationships of viral payloads with environmental parameters.

| Environmental Parameter | Synthesized information | Reference |
|---|---|---|
| Minimum temperature, maximum temperature, relative humidity, and amount of rainfall | No significant correlation with SARS-CoV-2 | Tosepu et al. (2020) |
| Increasing ambient daily average temperature up to around 13 °C | Negative association of daily number of SARS-CoV-2 cases | Oliveiros et al. (2020); Wang et al. (2020b) |
| Diurnal temperature and absolute humidity | Positive and negative associations with daily death counts of COVID-19 patients | Ma et al. (2020) |
| Poor ventilation (approximately 150 $m^3$ per hour per person) | High infectives in makeshift hospitals in Hubei Province, China | Chen and Zhao (2020) |
| Increase of temperature and humidity | No marked relationship with SARS-CoV-2 cases in the northern hemisphere in spring and summer months | Poirier et al. (2020) |
| High temperature and high humidity | Reduced Reproductive number (R) of COVID-19 in China and USA | Wang et al. (2020a) |
| Changes in temperature | No significant correlation with SARS-CoV-2 cases transmitted, deaths or recovered | Stanam et al. (2020) |
| Temperature and humidity | Association of infectivity of SARS-CoV-2 with temperature but no association with humidity | Gupta (2020) |
| Humidity | Direct and positive correlation with COVID-19 mortality | Li (2020) |
| Ambient temperature and relative humidity | Impacted on the growth rate of COVID-19 outbreaks | Chaudhuri et al. (2020) |
| Temperature, humidity, and UV-B radiation | Higher transmission risks for COVID-19 | Liu et al. (2020a) |
| Increased temperature and humidity | Partially suppressed COVID-19 incidences | Wu et al. (2020) |
| Air pollutants ($PM_{2.5}$, $PM_{10}$, $SO_2$, CO, $NO_2$ and $O_3$) | Short-term exposure to air pollutants ($PM_{2.5}$, $PM_{10}$, CO, $NO_2$ and $O_3$) is associated with increased risk of COVID-19 infection; short-term exposure to a higher concentration of $SO_2$ is associated to decreased risk of COVID-19 infection | Zhu et al. (2020) |

# 5. 防止飛沫和氣懸膠體傳播的保護措施

- 提供適當的PPE以防止飛沫和氣懸膠體的傳播，對治療COVID-19患者的醫護人員非常重要。尤其目前相關的嚴重呼吸系統症候群（如SARS-CoV，MERS-CoV和SARS-CoV-2），並沒有任何疫苗接種或特定的抗感染藥物。
- 面罩在防止飛沫和氣懸膠體將疾病從感染者傳播到宿主方面有重要作用，外科口罩、N95口罩和特殊呼吸防護具(elastomeric respirators)在許多國家中已普遍使用對抗COVID-19病毒，也取得了不同程度的成功。
- N95口罩公認可以防止氣懸膠體和飛沫傳播，但外科口罩則不能阻止氣懸膠體傳播。隨著許多國家對口罩的需求增加，不同研究人員已經試驗了更精密的口罩（Balachandar等，2020； Leung和Sun，2020）。

# 5. 防止飛沫和氣懸膠體傳播的保護措施

- 研究顯示若以氣態霧化的活的流感病毒，測試外科口罩的防護效果，根據外科口罩的設計不同，平均可以減少6倍的暴露危險。
- 另一項關於口罩的研究顯示，門診的醫療人員使用N95口罩和外科口罩，對於實驗室確診的流感防護效能並無顯著差異。 因此對於未與流感患者或疑似患者密切接觸的一般大眾和非高風險醫療人員，N95並非必需。
- 基於載有病毒的飛沫和氣懸膠體的傳播途徑尚未解決，仍建議醫護人員照護SARS病患時使用N95，因為外科口罩對氣懸膠體的防護效果較差。

# 5. 防止飛沫和氣懸膠體傳播的保護措施

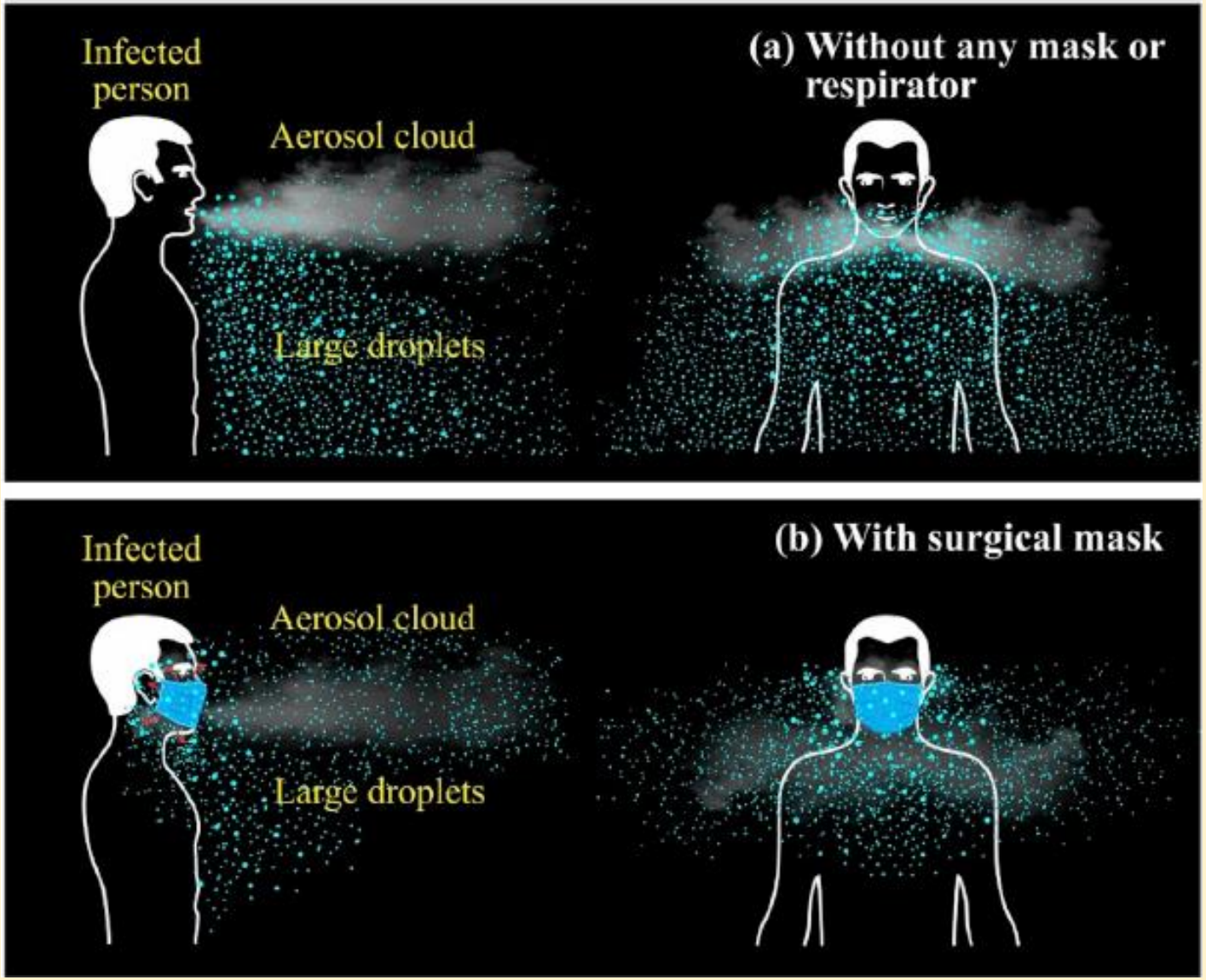
- 由於全球COVID-19病例的非預期攀升，口罩的供應非常匱乏，因此，美國疾病控制與預防中心已修改了口罩指南，其中包括於公共場所穿戴自製布或織料口罩(cloth or fabric masks)。
- 使用口罩有兩個目的：防止易感宿主的呼吸道被患者飛沫侵入，及控制飛沫從患者身上散出。不過不同的商業口罩在控制傳播具有不同的效率，因此使用這些口罩，來控制攜帶SARS-CoV-2的氣懸膠體從患者傳播到易感宿主的有效性尚不確定。
- 為了防止吸入空氣中的細小顆粒（氣懸膠體）應使用N95口罩，並且需要緊貼密合使用者的面部。外科口罩通常用於保護人們免於較大的飛沫傳播，並鬆散地貼合在使用者的臉上。

# 5. 防止飛沫和氣懸膠體傳播的保護措施

- 三種符合歐洲標準EN 149：2001，不同類型的拋棄式呼吸防護具(disposable particulate respirators)稱為filtering facepiece 1 (FFP1), FFP2, and FFP3 ，已用於控制SARS-CoV-2。
- FFP1是三個面罩中過濾最少，氣懸膠體過濾至少為80%，內部滲漏(leakage to the inside)最多為22%，主要用作防塵口罩。
- FFP2口罩的最低過濾率為94%，最大內部滲漏為8%。因為可以防止氣懸膠體傳播，醫護人員通常穿戴以防護流感病毒，也用於防止SARS-CoV-2。
- FFP3口罩是過濾顆粒的最佳選擇，建議用於防止SARS-CoV-2的感染。 FFP3口罩具有99%的最低過濾率，和最多2%的內部滲漏率，可保護易感宿主免受極細顆粒例如攜帶病毒的氣懸膠體引起的疾病感染。

# 5. 防止飛沫和氣懸膠體傳播的保護措施

- 另一項比較自製口罩，外科口罩和標準FFP2口罩效率的研究證實，外科口罩提供的保護性約為自製口罩的兩倍（van der Sande等，2008）。FFP2口罩為成年人提供的保護性約為自製口罩的50倍，是外科口罩的25倍。
- 另一項研究顯示，外科口罩（過濾掉89%的病毒顆粒）在控制病毒傳播方面比用T恤和棉毛巾製成的自製口罩要好三倍。所以自製口罩應僅被視為防止感染者飛沫傳播的最後手段，且效用有限。
- 特殊呼吸防護具(Elastomeric respirators)可替代一次性N95口罩，因為兩者在過濾SARS-CoV-2方面具有相似的效率。特殊呼吸防護具的主要優點是正確清潔後可重複使用。Leung et al.（2020年）已進行開發新型帶電聚偏氟乙烯奈米纖維過濾器(PVDF nanofiber filter)的實驗，以有效地捕獲氣懸膠體顆粒。




感染患者不戴任何口罩和呼吸器咳嗽時，飛沫和氣溶膠的軌跡（圖3a）。

戴外科口罩時，可見到約20－30%的飛沫和大量氣懸膠體洩漏，特別是從鬆散的側面洩漏出來（圖3b）。

圖3.咳嗽時使用不同的口罩和呼吸器飛沫和氣溶膠的軌跡。（a）不戴任何口罩或呼吸器（b）戴上外科口罩

# 5. 防止飛沫和氣懸膠體傳播的保護措施

- 感染患者咳嗽時不戴任何口罩，並且易感宿主在距離1 m處配戴不同口罩時吸入飛沫和氣溶膠的情形也必須研究。
- 沒有戴口罩的易感宿主會接收相當數量的病毒，因此很有可能被感染。
- 若戴上外科口罩後，他可能會在吸入時過濾後滲入約20-30%的病毒酬載(payload)，感染的可能性較低。這樣的病毒量可能具有數百個SARS-CoV-2，仍被認為足以將COVID-19注入暴露者。
- 佩戴N95或可重複使用的特殊呼吸防護具(Elastomeric respirators)的宿主接受的病毒可能不會超過5%。被感染的可能性雖然很小，但仍是正數。
- 所有這些口罩都無法保證不會受到SARS-CoV-2的侵害。

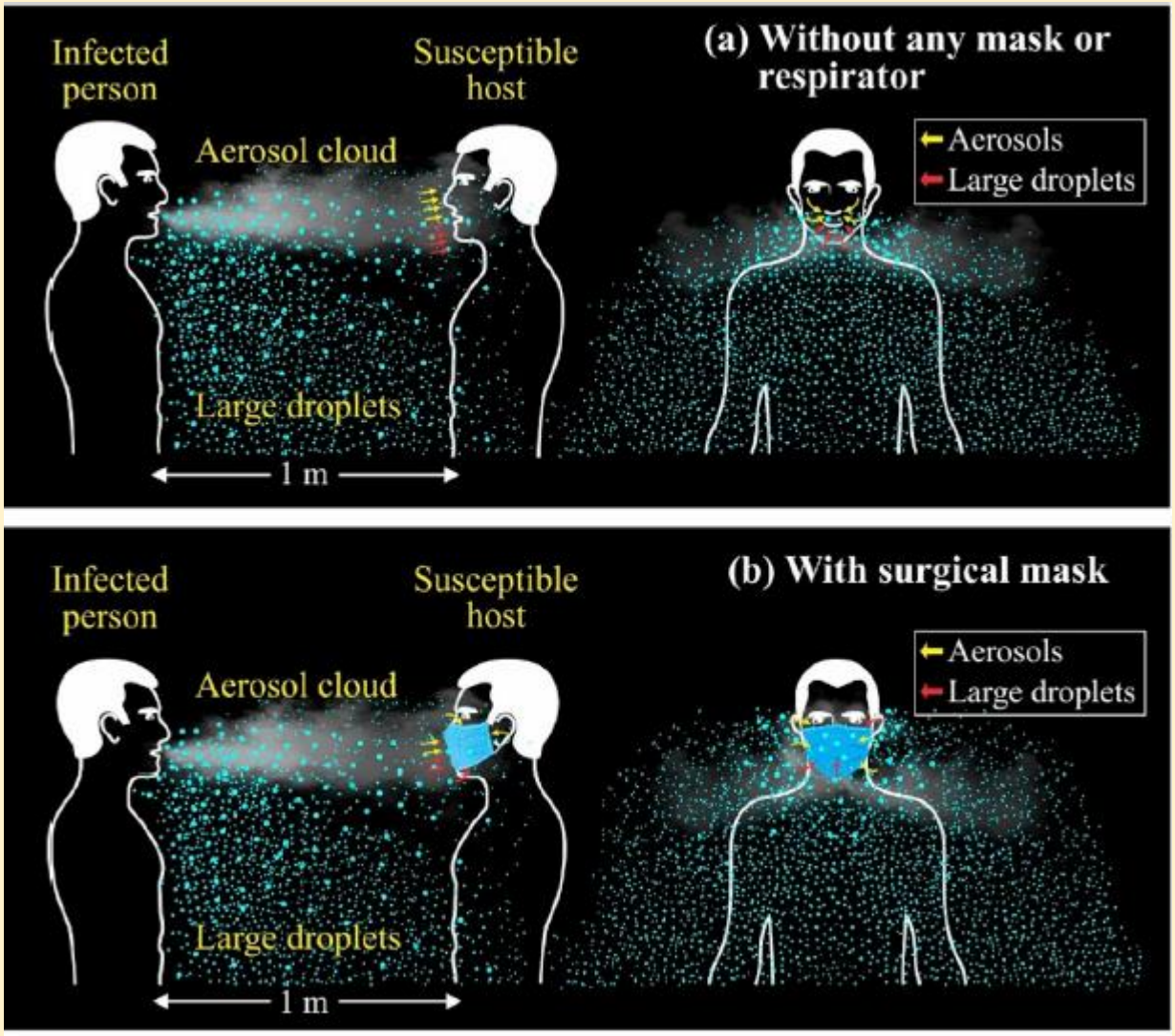
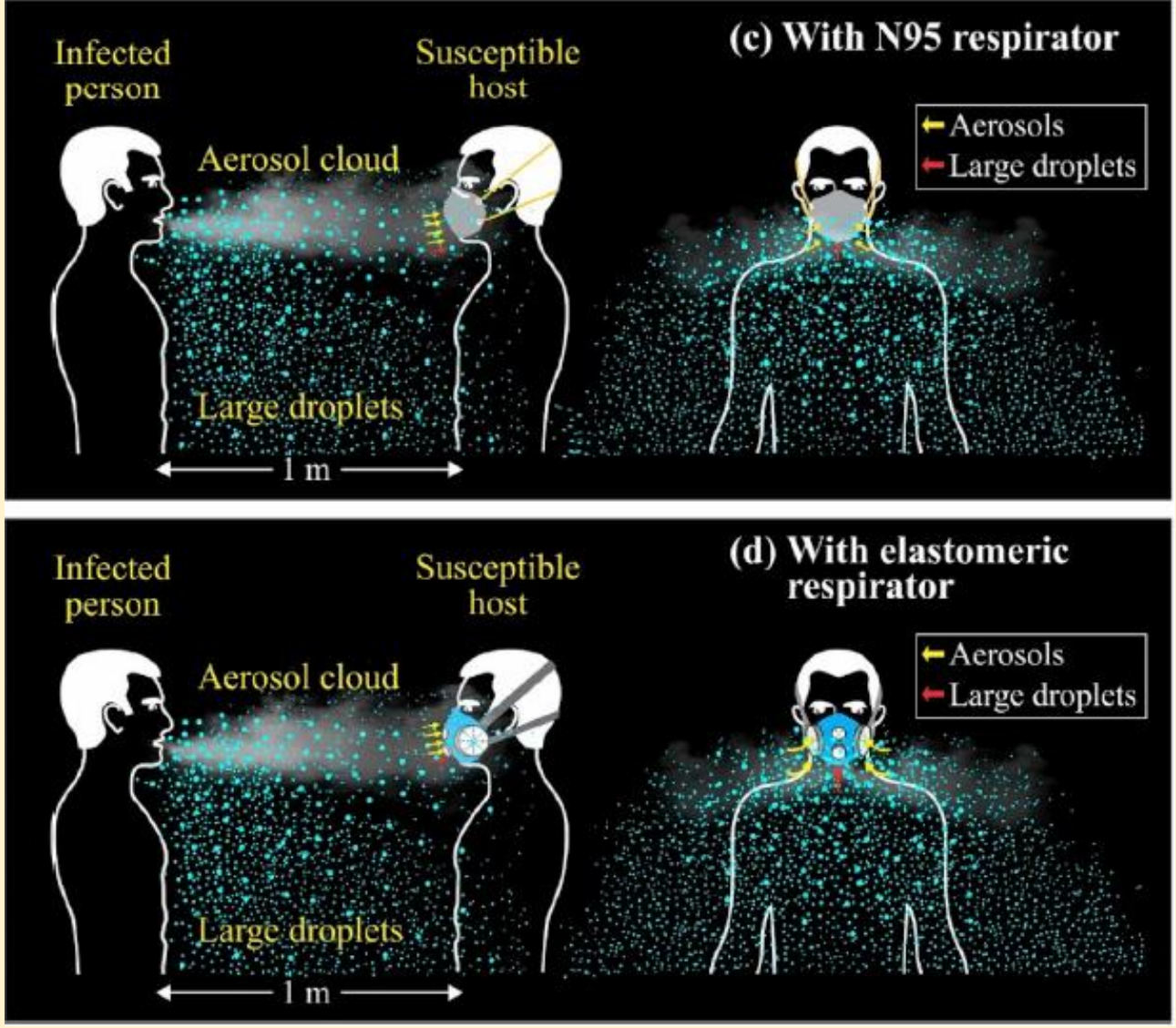



圖4.易感宿主配戴不同口罩時吸入受感染患者咳嗽產生的飛沫和氣溶膠的軌跡（a）沒有口罩或呼吸器（b）佩戴外科口罩

受感染的患者咳嗽時不戴任何口罩，並且易感宿主在距離1米處，沒有戴口罩的宿主會接收相當數量的病毒，因此很有可能被感染。(圖4a)。

若戴上外科口罩後，可能會在吸入時，因過濾滲入約20-30%的病毒酬載(payload)，感染的可能性較低（圖4b）。這樣的病毒酬載(payload) 量可能具有數百個SARS-CoV-2，仍被認為足以將COVID-19注入暴露者。




佩戴N95或可重複使用的特殊呼吸防護具(Elastomeric respirators)的宿主接受的病毒可能不會超過5%（圖4c和d）。
在這種情況下被感染的可能性雖然很小，但仍是正數。因此這些口罩都無法保證不會受到SARS-CoV-2的侵害。

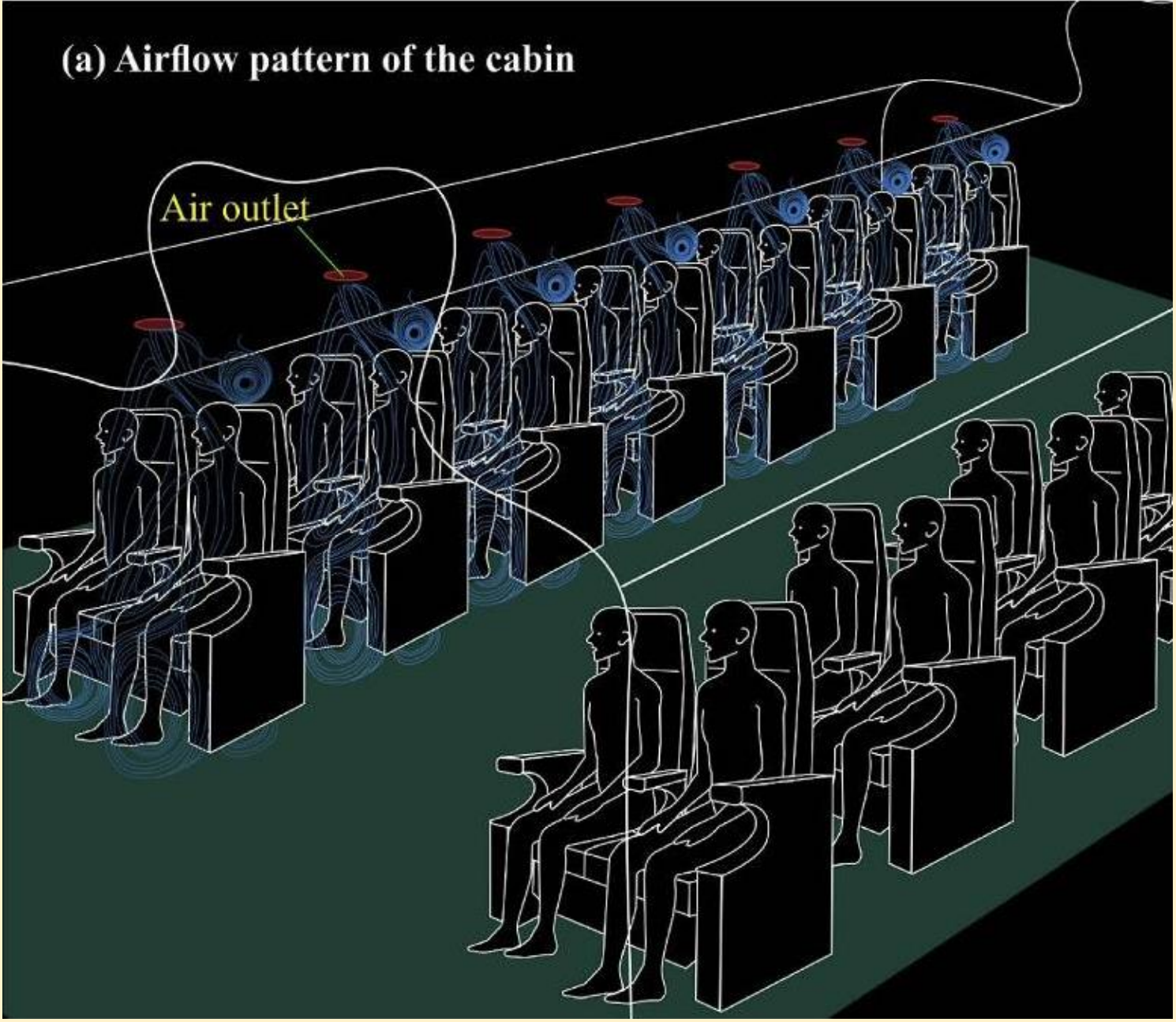
圖4. 易感宿主配戴不同口罩時吸入受感染患者咳嗽產生的飛沫和氣溶膠的的軌跡（c）配戴N95呼吸器（d）可重複使用的特殊呼吸防護具(Elastomeric respirators)

# 6.攜帶SARS-CoV-2的飛沫和氣懸膠體在不同密閉空間中的空氣動力學行為

- 此為Part 2
- 已有多個於密閉空間內感染COVID-19的報告。
- 有助於加劇引起COVID-19，在不同密閉空間大量發生的微氣候條件(microclimatic conditions)，值得加以探討。
- 選擇三個密閉空間來探討，飛機機艙內部、汽車的內部空間以及醫療照護中心或隔離中心的普通宿舍型(dormitory-type)空間。

# 6.1.飛機機艙

- 每年有超過20億人乘坐商業班機旅行，了解機艙內SARS-CoV-2的行為非常重要。
- 航空旅行者待在密閉空間，甚至超過10小時的長期時間，為傳染疾病提供有利的傳播環境。
- 目前已有空氣動力學模式，了解呼吸系統疾病患者咳嗽的浮力射流(buoyant jet)，如何在飛行機艙中擴散。
- 飛機的機艙通常從機艙出風口和位於座位上方行李置物櫃的各個出風口提供氣流，這些出風口沿機艙的長度方向延伸。氣流通常以較低溫度（<25°C）的射流形式向下噴出，並朝著機艙底部側壁上的的格柵式回風口(return air grille) 流向地板的底部區。
- 機艙內因而有兩個典型的氣流場：第一個區域稱為射流區(jet zone)，位於上方區域，特徵是大規模的環流(large-scale circulations)，第二個區域為碰撞區(collision zone)位於中低層區域，特徵是兩側射流的交互作用（圖5a，見下頁）。




出風口氣流會以較低溫度（<25°C）的射流形式向下噴出，朝著機艙底部側壁上的的格柵式回風口(return air grille) 流向地板的底部區。

產生兩個氣流場：位於機艙上方域稱為射流區(jet zone)，特徵是大規模的環流(large-scale circulations)，碰撞區(collision zone)位於中低層區域，特徵是兩側射流的交互作用（圖5a）。

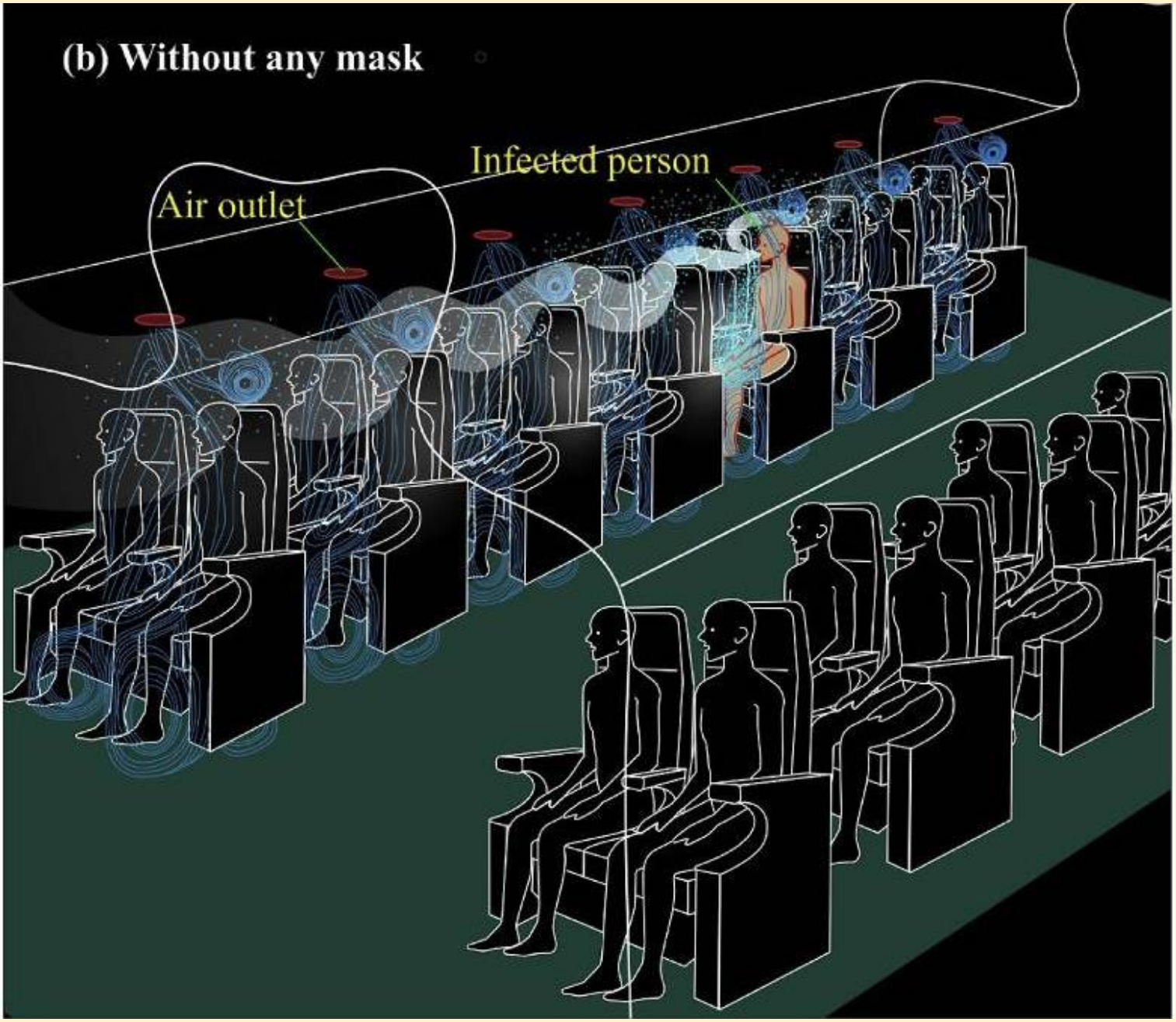
圖5a. 飛機上沒有任何咳嗽吐氣時機艙的氣流模式

# 6.1.飛機機艙

- 機艙內的氣流約可提供每位乘客3.6-7.4升/秒的空氣，其中一半是過濾和再循環的空氣，另一半是室外空氣。
- 每兩到三分鐘會有一次完整的機艙空氣交換，也就每小時空氣換氣率（Air changes per hour, ACH）為20-30次。
- 高速率的空氣交換可控制溫度梯度(temperature gradient)，防止停滯的寒冷區域，維持空氣品質，並消散攜帶有效載荷病毒的飛沫和氣溶膠。
- 標準的飛機中再循環空氣會通過高效微粒空氣（HEPA）過濾器，0.3μm氣動直徑(aero-diameter)的顆粒，超過99.97%可被去除。乘客和機組人員所呼出的飛沫和氣溶膠平均可將濕度提高到6-10%，低於通常被認為是舒適的20%。

# 6.1.飛機機艙

- SARS-Cov-2感染者咳嗽釋放的射流會中斷射流區域(jet zone)氣流，並在來源附近前後方向傳播，飛沫可能會向前行進四到五個座位，氣懸膠體雲可能會走得更遠。除了兩側的緊鄰乘客外，沒有其他橫向移動。飛沫會向後一個座位移動，但氣懸膠體可能移動更遠。（圖5b，見下頁）
- 所以機上有感染患者且未戴上口罩時，大約有五到十個人會被感染。然而，通過咳嗽引起的氣霧暴露而發病的可能性知之甚少，實際的感染案例數可能遠高於報告數目。
- 在平流輸送(advective transport)消散後，氣流噴射之後的布朗運動控制著氣懸膠體羽流(aerosol plume)。這樣的運動有利於載有病毒氣懸膠體聚集位於乘客高度的汙染物(fomites)。因此航空公司應將所有可疑汙染物諸如紙，雜誌，枕頭和毯子等物品丟棄及處理。




SARS-Cov-2感染者咳嗽釋放的射流會中斷射流區域(jet zone)氣流，並在來源附近前後方向傳播。飛沫可能會向前行進四到五個座位，氣懸膠體雲可能會走得更遠。

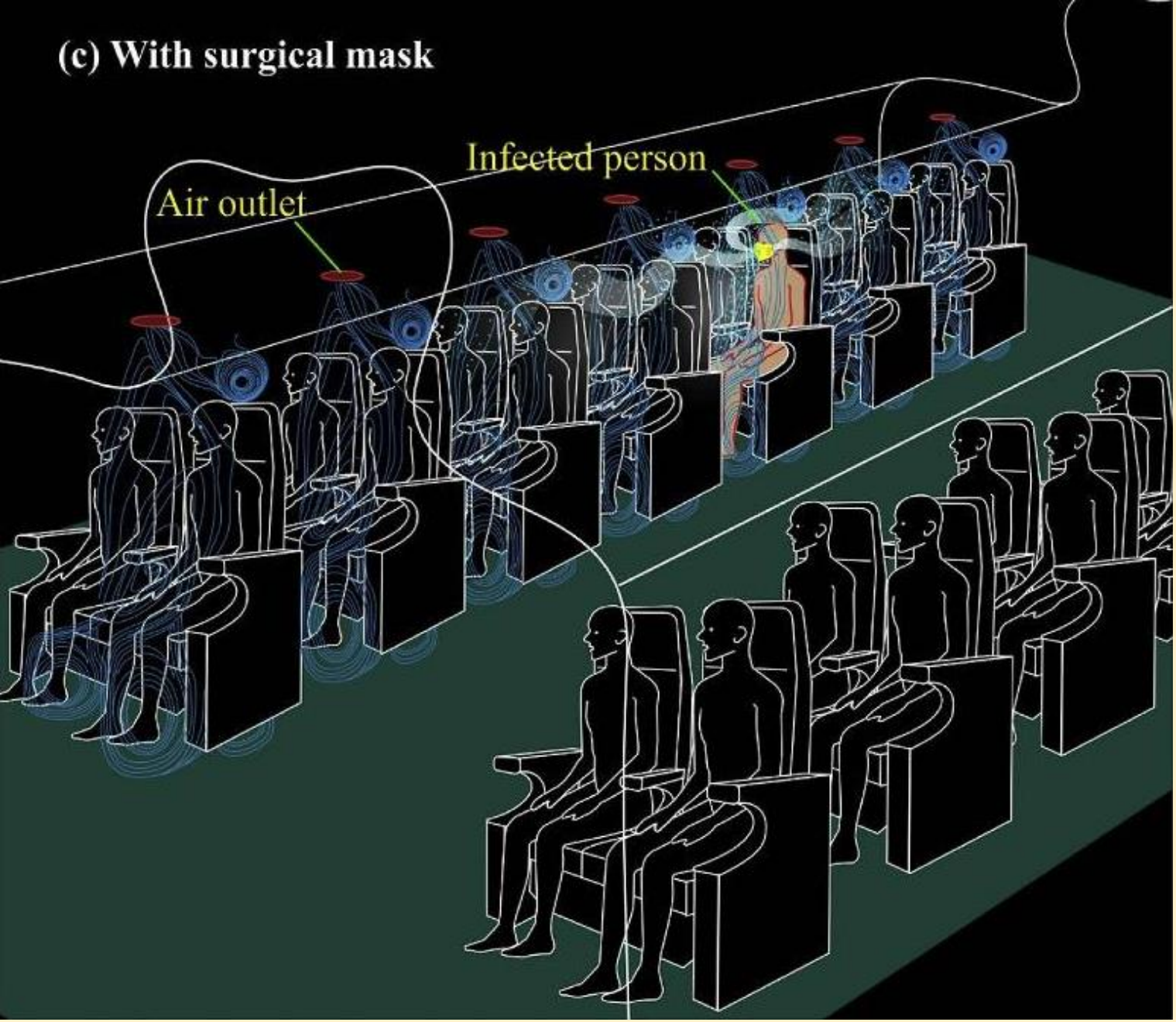
除了兩側的緊鄰乘客外，沒有其他橫向移動。

飛沫會向後一個座位移動，但氣懸膠體可能移動更遠。

圖5b. 飛機上受感染患者沒有戴上任何口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

# 6.1.飛機機艙

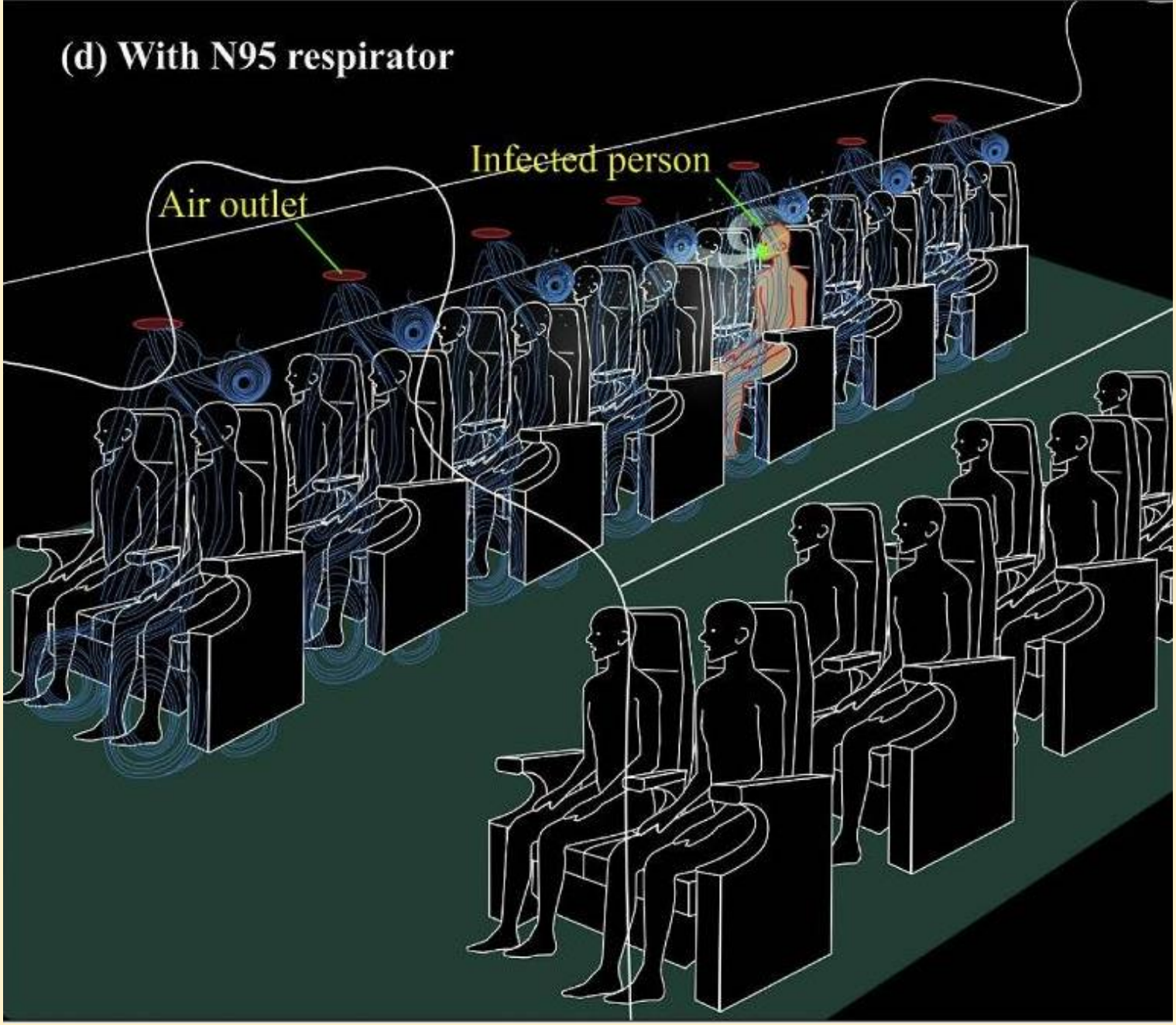
- 顯示患者配戴外科口罩情況下咳嗽的噴射軌跡。戴上外科口罩後，飛沫能而有效地向後行進一個座位。這種現象可過濾前方兩個座位，向後行進一個座位。側噴出。載有病毒的氣懸膠體的流線通常朝跡下，這樣，前方兩個座位，射流從面罩的兩下見下頁)(圖5c，
- 戴上N95口罩後，飛沫和氣懸膠體都不會移動太遠，會向前後各散布一個座位的飛沫和多個座位的氣懸膠體。(圖5d)
- 咳嗽引起載有病毒氣懸膠體行為的空氣動力學模型還無法有完美的精準度，實際上的影響仍無法得到很好的模擬。目前證據顯示，當有症狀或無症狀的患者登機時，COVID-19極有可能在飛機上傳播。
- 環境因素例如較低的相對濕度（50%），較低的溫度（<25°C）和中等的ACH（每小時<30循環）將提供SARS-CoV-2長期維持在機艙內的有利環境。所以應設立嚴格的準則以盡可能減少此類大流行事件的發生。




戴上外科口罩後，飛沫將向前最多行進兩個座位，向後行進一個座位。氣懸膠體雲將藉由布朗運動結合機艙氣流軌跡而移動超過前兩個座位和後一個座位。

氣流的流線通常朝下，載有病毒的氣懸膠體就會回到機上的乘客。

圖5c. 飛機上感染患者戴上外科口罩後咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡




戴上N95口罩後飛沫和氣懸膠體都不會移動太遠。
會向前和向後散布一個座位的飛沫和多個座位的氣溶膠

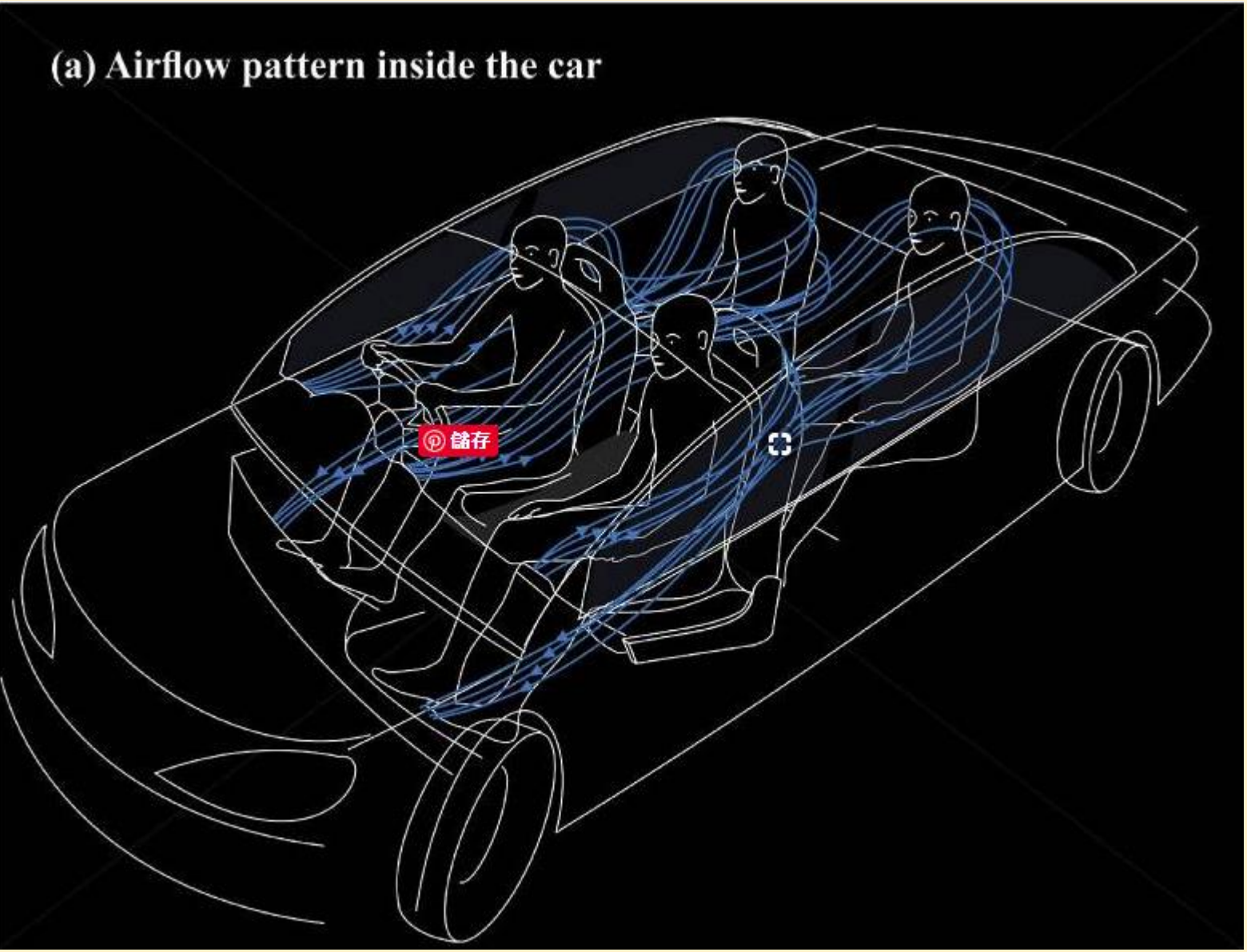
圖5d. 飛機上感染患者戴上N95口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

# 6.2.客車(Passenger car)

- 國際汽車製造商組織（OICA）估計，2019年全球有超過10億輛客車在道路上行駛，世界上有七分之一的人擁有客車。若解除封鎖狀態恢復正常時，乘坐客車旅行將有傳播COVID-19的危險，除非採取預防措施。
- 以下說明客車旅行時防止COVID-19傳播的假設最佳方法。
- 有利COVID-19在客車傳播的一個關鍵因素是內部通風率(以ACH表示)，取決於車速、通風設備和車窗位置。
- Engelmann（1992年）估計，在關閉空調系統的情況下，靜止車輛的ACH每小時約為0.42-1.09。空調系統打開時，ACH每小時為1.96到3.23之間，空調系統關閉但風扇打開時，每小時的ACH範圍為8.7-10.7。
- Park（1998年）的研究估計，在窗戶關閉且沒有機械通風的情況下，ACH每小時1.0到3.0之間，有循環通風設置時ACH每小時1.8到3.7之間。在關閉窗戶並將風扇開於新鮮空氣的情況下，ACH的速度為每小時13.3至26.1，在開啟車窗但沒有機械通風的情況下，ACH的速度為每小時36.2至47.5。
- Offermann等（2002年）則測量車輛以平均速度29 km / h的速度行駛時的ACH，在打開車窗和關閉通風系統的情況下，每小時ACH值為71，在打開通風系統和關閉窗戶的情況下每小時60次，關閉通風系統後每小時4.9次。

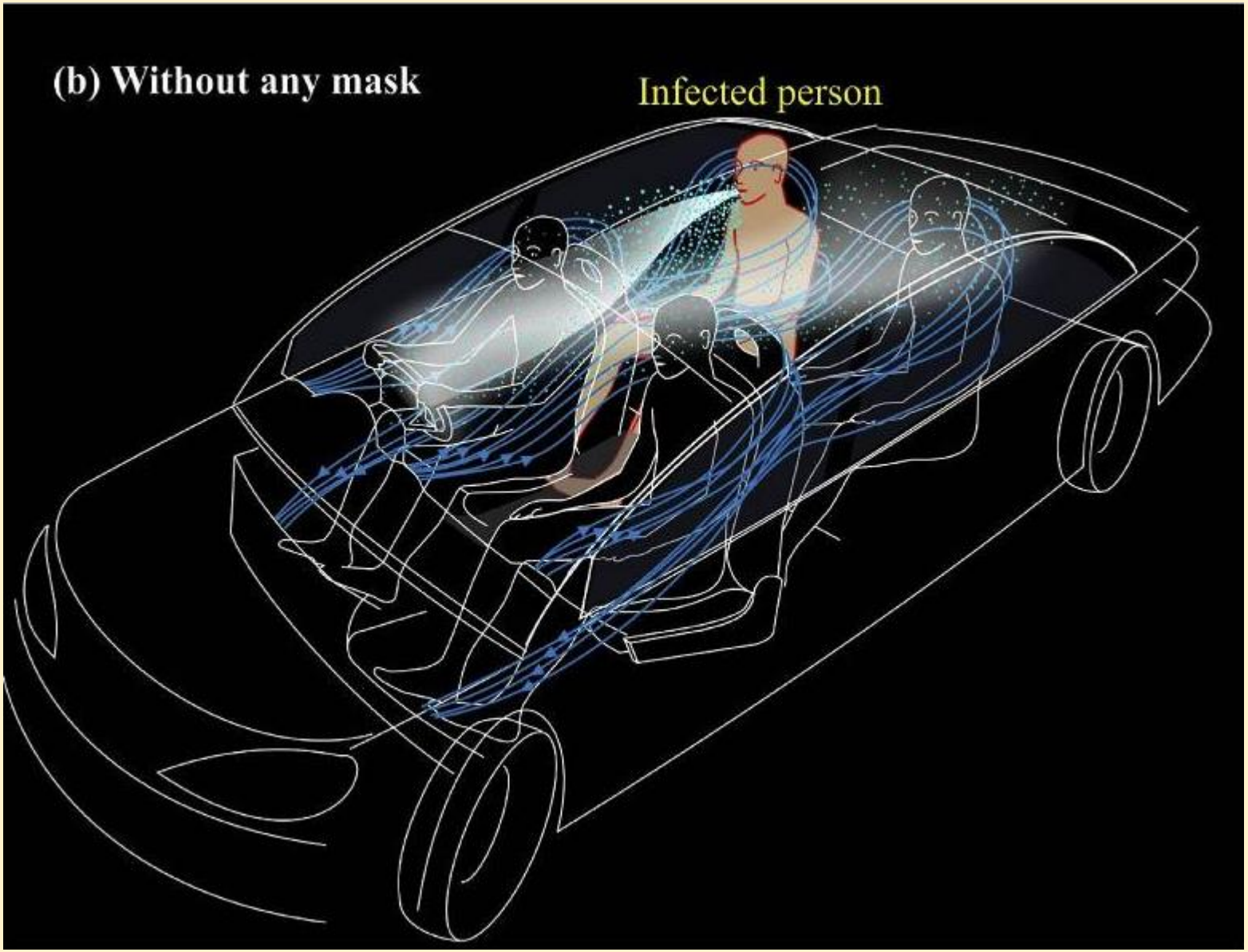
# 6.2.客車(Passenger car)

- 依照Khatoon和Kim（2020）進行的研究，在空調系統開啟且窗戶關閉，中等程度ACH的情況下，以中等速度行駛的車輛，車廂內部的典型速度流線(velocity streamlines)模式顯示，冷卻的空氣行進至後排座椅後，返回前座側邊較低位置。(圖6a.見下頁）
- 坐在後排座位上的患者若咳嗽，咳嗽氣流以飛沫和和氣懸膠體羽流(aerosol plume)的形式（平均速度為10 m / s；相對濕度<50%；溫度<25 °C；每小時ACH <60每小時）向前座擴散，氣懸膠體羽流(aerosol plume)可能因降低對流運輸現象，，以較低的速度合併現有的速度流線再次向後座移動（圖6b）。
- 此種情況可能使所有乘客都接受暴露，感染風險似乎很高。
  - 斯里蘭卡已報告了兩起此類案件，受感染的乘客坐在汽車後座持續不超過1小時的時間，開啟空調關閉車窗的情形下，駕駛隨後報告被感染COVID-19。另一個案件是在汽車中陪同一個無症狀者弟兄，開啟空調並關閉車窗15分鐘以上得到感染。



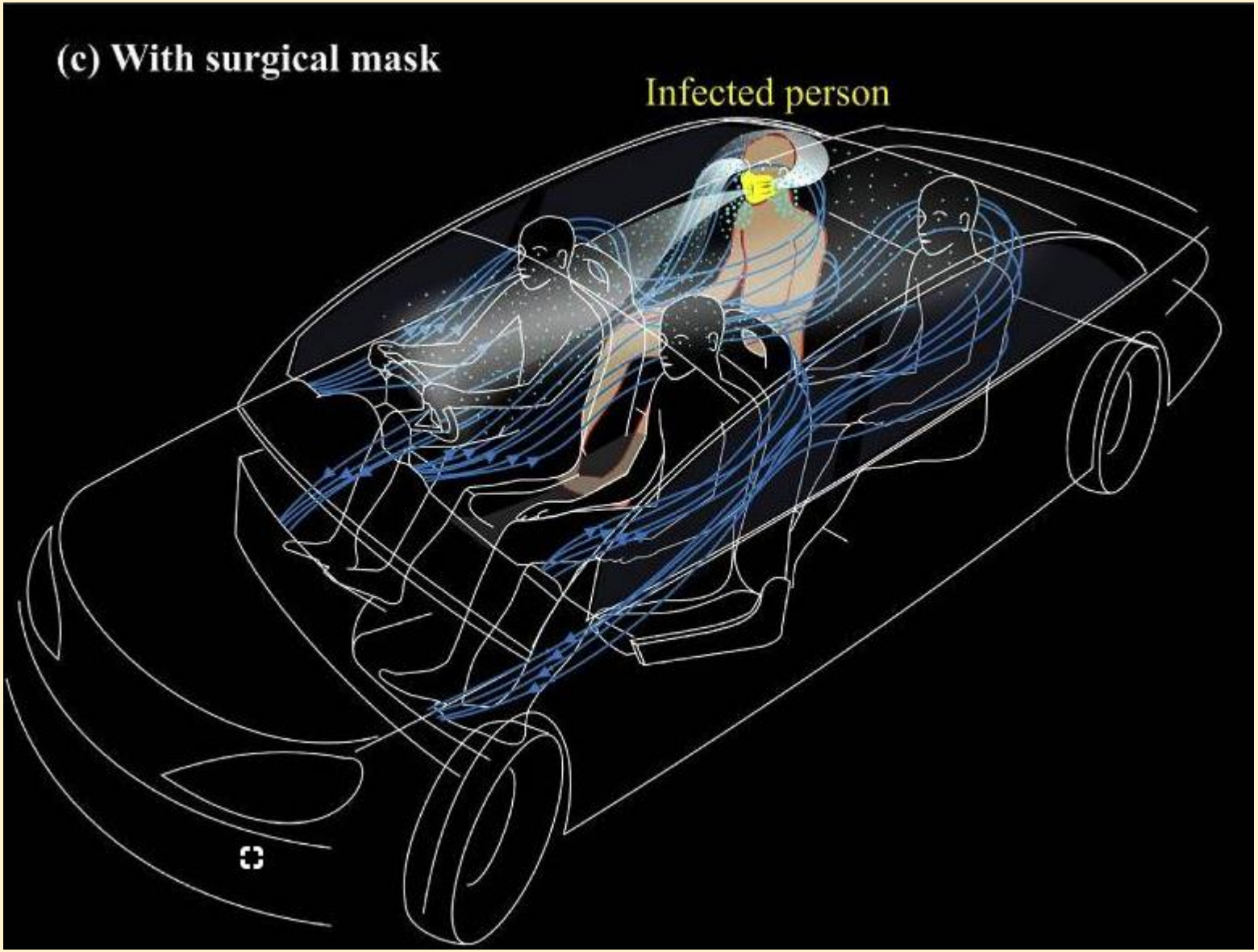

在空調系統開啟且窗戶關閉的情況下，以中等速度行駛的車輛，車廂內部的典型速度流線(velocity streamlines)模式。
冷卻的空氣行進至後排座椅後，返回前座側邊較低位置。

圖6a. 空調開啟，沒有任何咳嗽吐氣時車內氣流模式



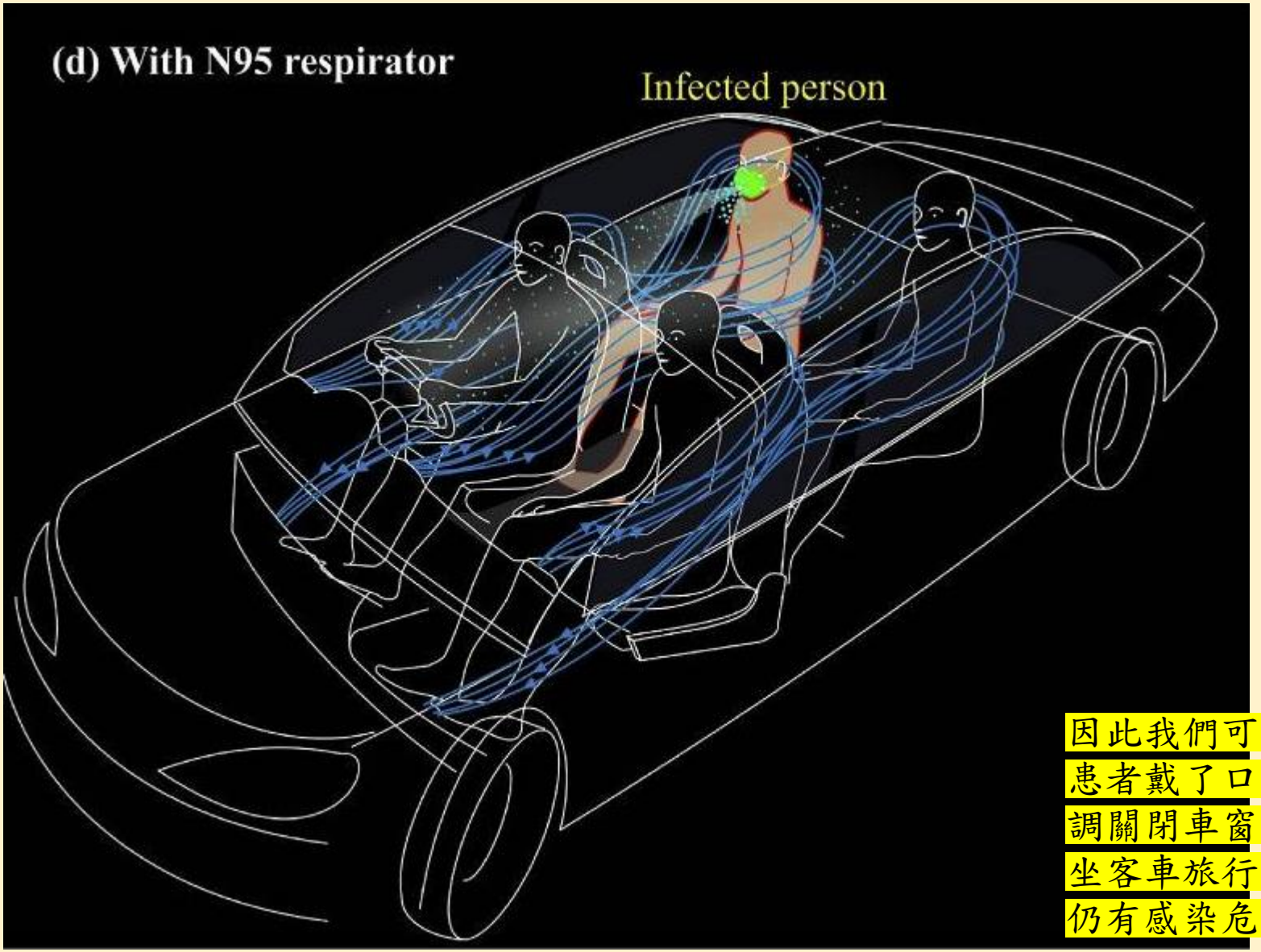

坐在後排座位上的患者若咳嗽，咳嗽氣流以飛沫和氣懸膠體羽流(aerosol plume)的形式向前座擴散。氣懸膠體羽流可能因降低對流運輸現象，以較低的速度並以現有的速度流線再次向後座移動。

圖6b. 空調開啟，車內受感染患者咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡




當感染者戴上外科口罩時，感染危險似乎可得到一定程度的控制。雖然從面罩前部呼氣造成的危險大大減少，但面罩的鬆散使得飛沫氣懸膠體的感染危險仍然存在

圖6c. 空調開啟，車內感染患者戴上外科口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡



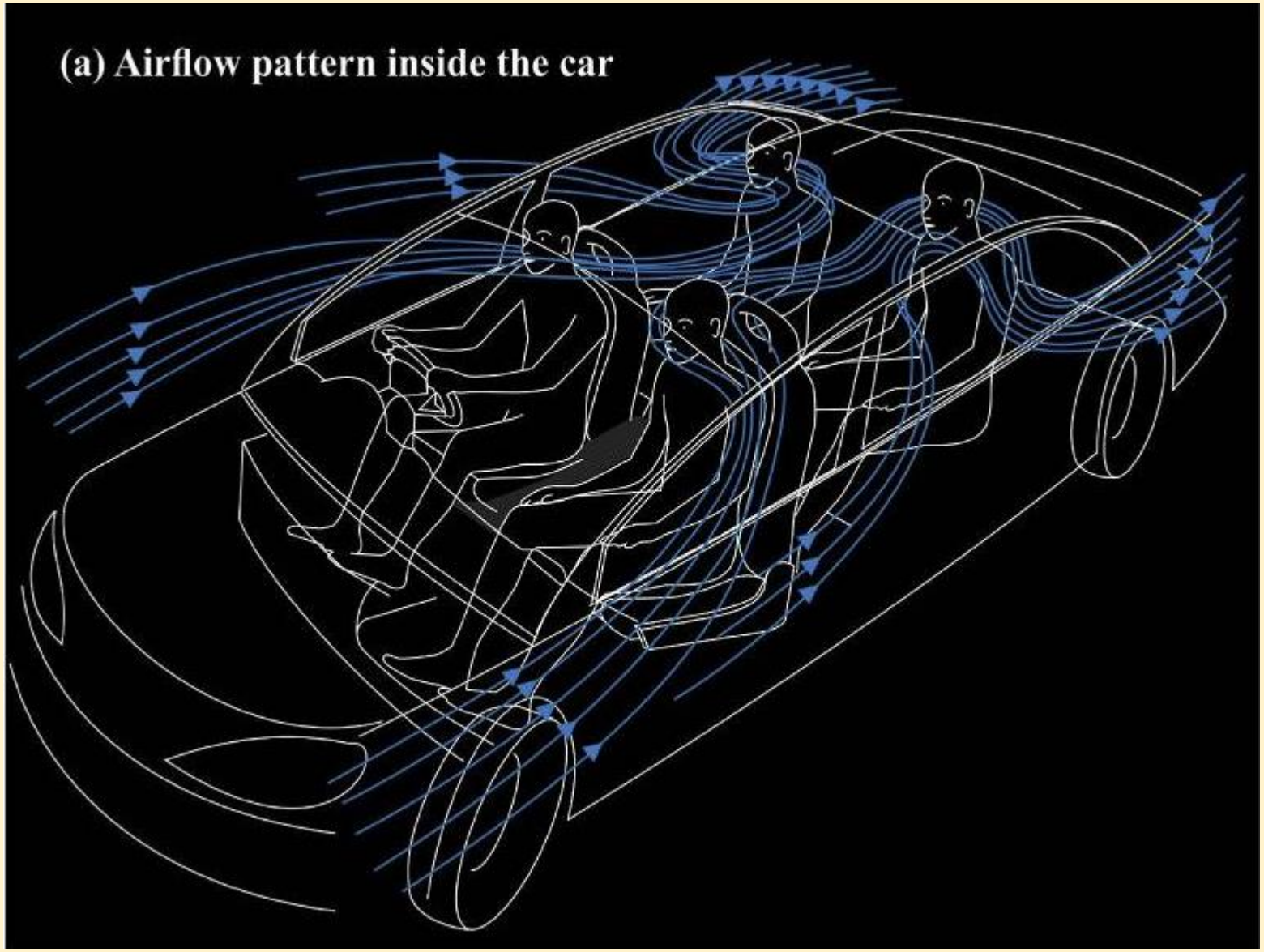

當受感染的乘客配戴N95口罩時，在相同條件下，僅有少量的飛沫和氣懸膠體雲漏出。由於車內的氣流循環，不能排除完全沒有危險因素。

因此我們可以假設，儘管患者戴了口罩，在開啟空調關閉車窗的情況下，乘坐客車旅行時，易感宿主仍有感染危險。

圖6d. 空調開啟，車內感染患者戴上N95口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

# 6.2.客車(Passenger car)

- 當客車在車窗打開以一定速度行駛時，速度流線是由前後車窗產生的，掃過車上的乘客後，從後車窗離開車艙（圖7a，見下一張）。
- 這種輸運現像是使用計算流體動力學(computational fluid dynamics)來模擬，但在不同環境條件下流線行為的詳細訊息研究仍很少。
- 開著窗戶的客車，在不同地理區域的環境條件，可能會有不同的流線行為。
  - 東亞，歐洲和北美為溫帶氣候的環境條件(相對濕度<50%；溫度<25°C； ACH> 60每小時)
  - 東南亞，非洲，和南美熱帶氣候的環境條件（相對濕度> 50%；溫度> 25°C； ACH> 60每小時）
- 有關SARS-CoV-2氣候適合性的研究顯示，帶有病毒的咳嗽氣流在溫帶氣候下比在熱帶氣候下維持的機會更大，可能是因為COVID-19的每日死亡率與晝夜溫度範圍(diurnal temperature range)成正相關，與絕對濕度為負相關。

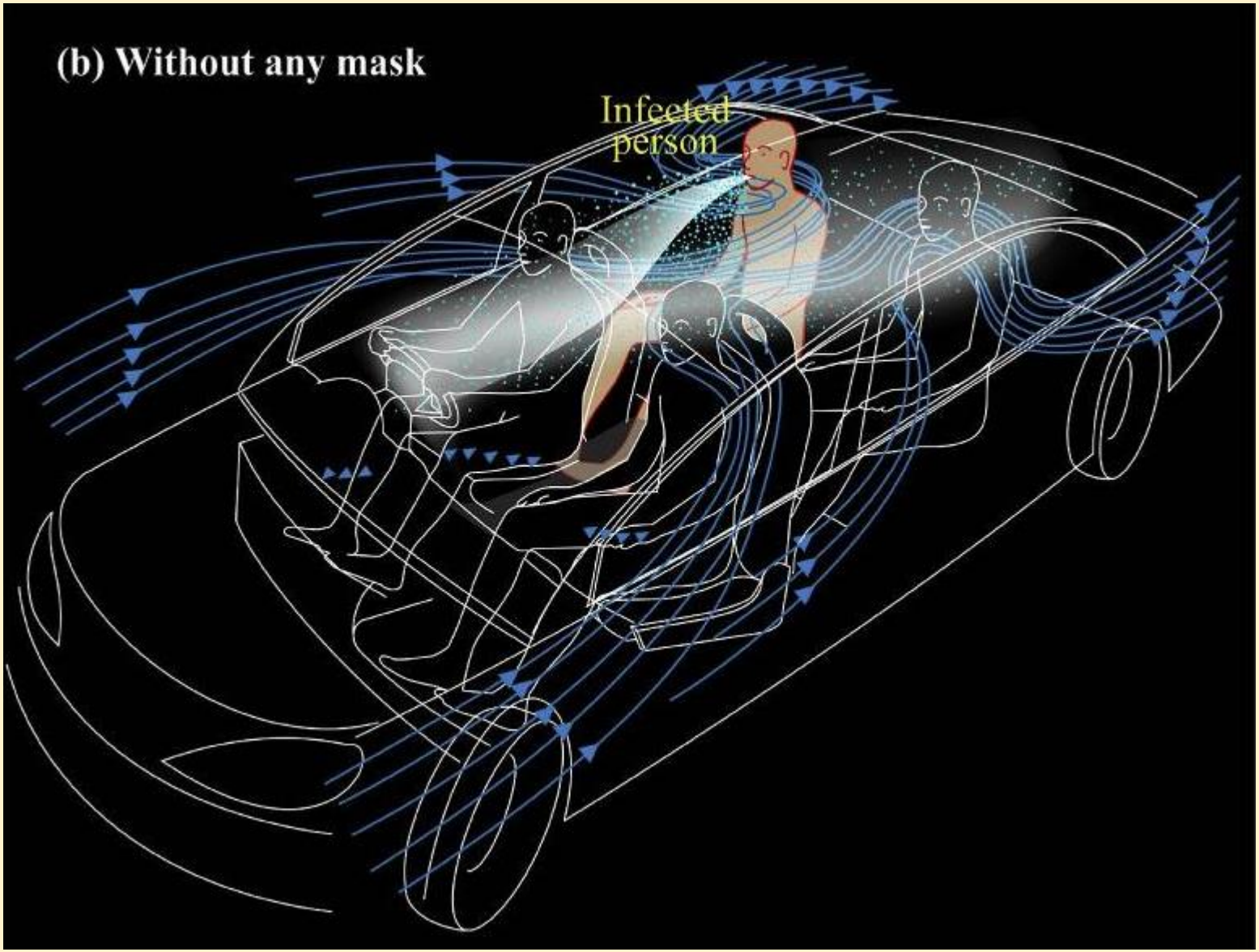



當客車在車窗開啟以一定速度行駛時，速度流線是由前後車窗產生，掃過車上的乘客後，從後車窗離開車艙。

圖7a. 開啟車窗，沒有任何咳嗽吐氣時車內氣流模式

# 6.2.客車(Passenger car)

- 當客車以低於30 km / h的速度行駛，在車窗打開且空調關閉的情況下，飛沫會落在整個車身，而氣懸膠體雲則向前方行駛並隨著氣流流線返回，從而使氣懸膠體羽流(aerosol plume)立即散佈在車艙的每個部分。(圖7b.見下頁)
- 當汽車以更高的速度（> 30 km / h）行駛其他環境條件完全相同時，飛沫的旅行距離不遠，被限制在有限的空間內（甚至不會超出駕駛的座位），但是氣懸膠體雲將漂移很遠最後將從後窗出去。
- 僅限制分析時速小於30 km / h的情況下，是因為這種速度成為維持SARS-CoV-2病毒的最差情況。

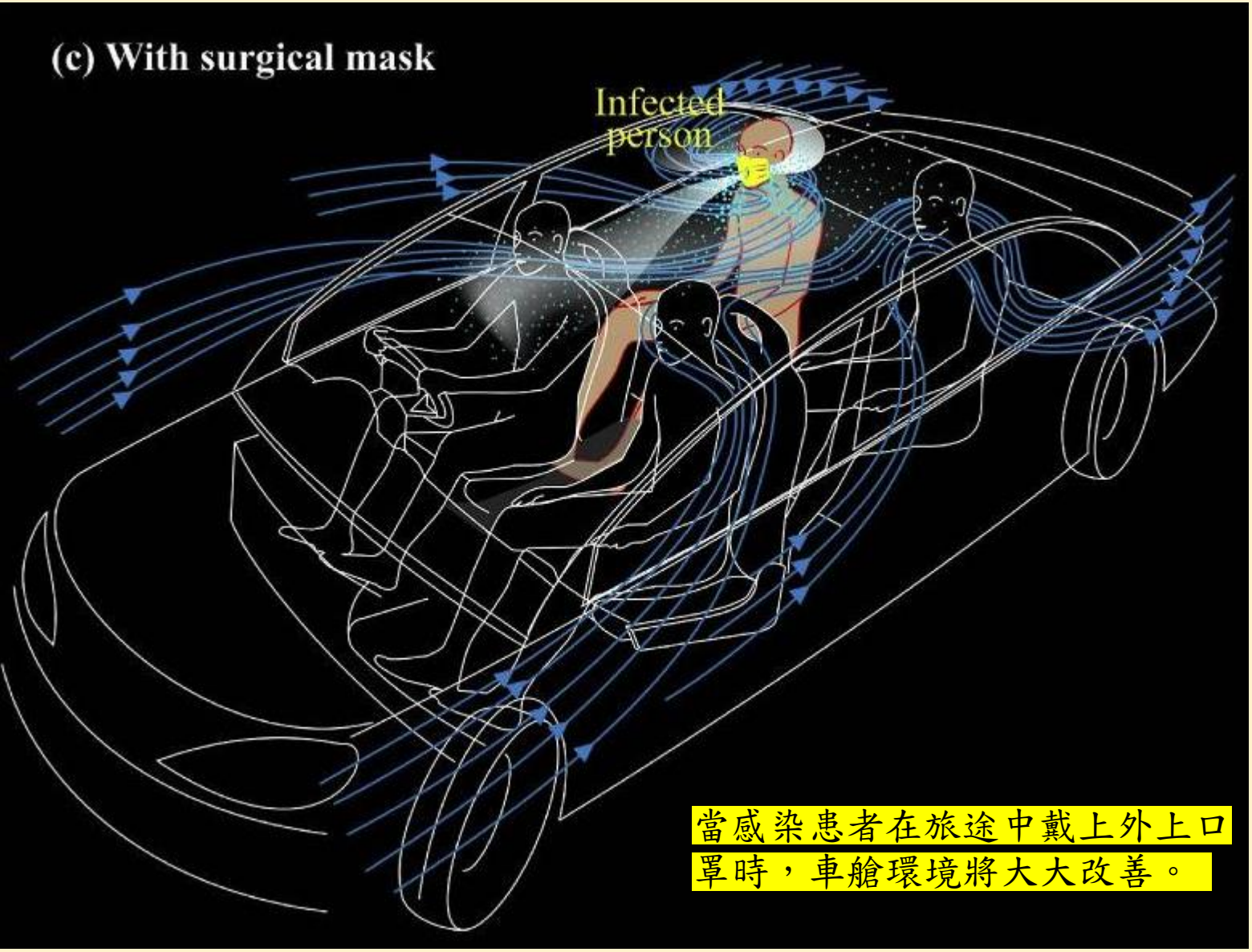



當客車以低於30 km / h的速度行駛，在車窗打開且空調關閉的情況下，咳嗽氣流的表現。
飛沫會落在整個車身，而氣懸膠體雲則向前方行駛並隨著氣流流線返回，從而使氣懸膠體羽流(aerosol plume)立即散佈在車艙的每個部分。

圖7b. 開啟車窗，車內感染患者沒有戴口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

# 6.2.客車(Passenger car)

- 當感染患者在旅途中戴上外上口罩時，車艙環境將大大改善（圖7c. 見下頁）。
- 似乎只有很少的飛沫酬載(payload)從前面洩出，但是相當大的酬載可來自面罩的兩側，因為外科口罩通常鬆散地覆蓋在面部。
- 氣懸膠體雲仍可能傳播到車艙的前部區域，並與來自車輛外部的氣流一起返回。 不過車艙氣流流線型在幾秒鐘內將這種攜帶病毒的氣懸膠體雲驅趕出車艙。
- 當感染者戴上N95防毒面具時，車艙環境可進一步改善（圖7d）。不過仍然必須承認易感宿主仍有被感染的風險。




只有很小的飛沫酬載(payload)從前面洩出，相當大的酬載(payload)可來自面罩的兩側。

氣懸膠體雲仍可能傳播到車艙的前部區域，並與來自車輛外部的氣流一起返回。

車艙氣流流線在幾秒鐘內將這種攜帶病毒的氣懸膠體雲驅趕出車艙。

圖7c. 開啟車窗，車內感染患者戴上外科口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

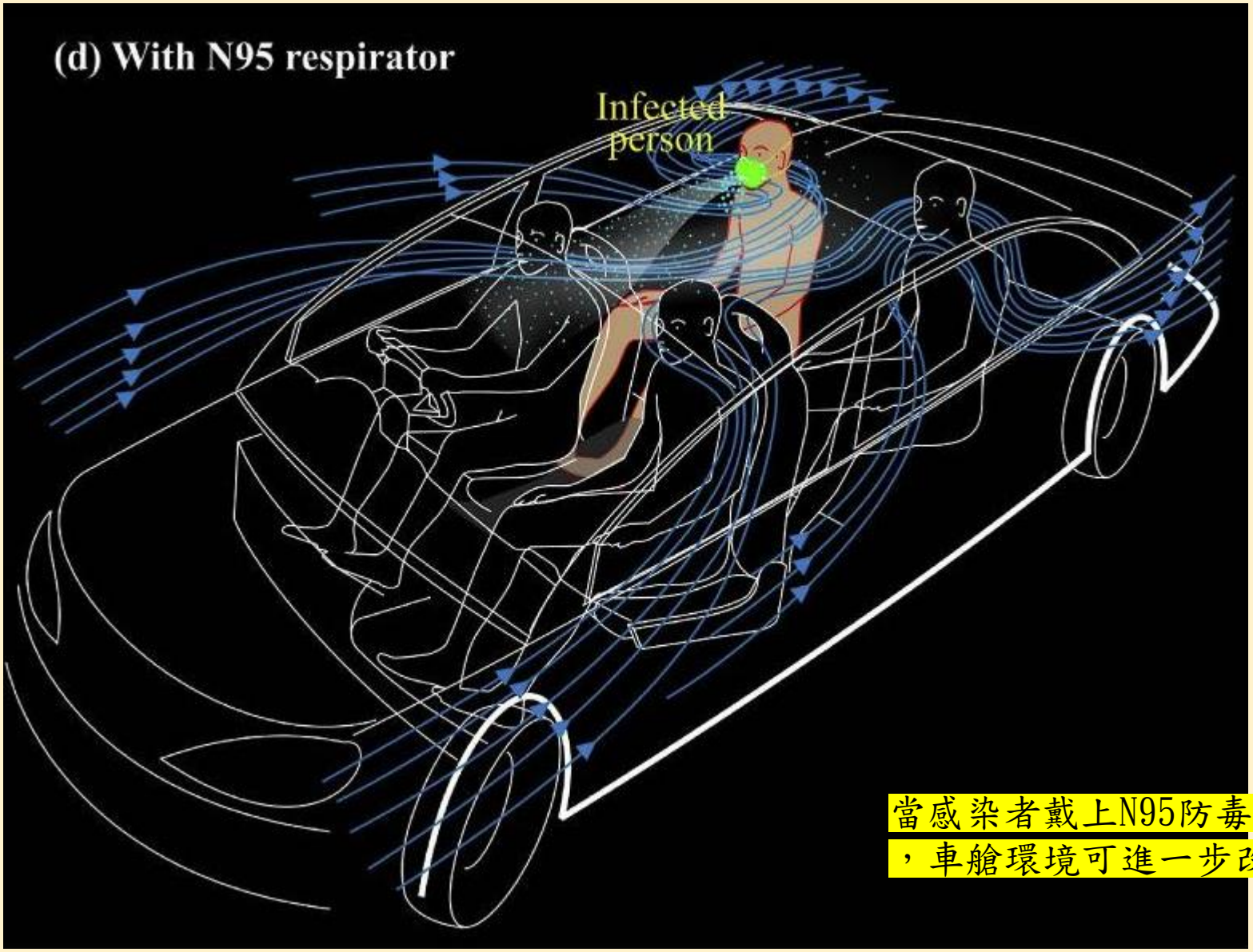



圖7d. 開啟車窗，車內感染患者戴上N95口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

# 6.2.客車(Passenger car)

- 嚴格回顧這兩個情境（情境1：開啟空調並關閉車窗；情境2：開啟車窗並關閉空調），可以推測出情境2在控制SARS-CoV-2病毒方面會更有效
- 強烈建議至少在COVID-19大流行停止之前，開啟車窗並關閉空調。
- 以斯里蘭卡的COVID-19的第二位患者(職業為導遊)為例，當他出現症狀時，乘坐兒子駕駛的汽車前往醫院，妻子坐在前排。他坐在後面並特別指示打開所有窗戶，直到他們到達醫院。行駛時間超過30分鐘，車內沒有人感染COVID-19。這個故事概括了上面假設的理由，受影響國家的有關當局應提出嚴格的指導方針，以實現減少發病率和死亡率的最佳實踐。
  - 相反的，在斯里蘭卡報告了兩起病例，其中出租汽車的駕駛在情境1中得到感染。
- 讓汽車開窗停在停車場，讓陽光照射至少30分鐘，是根除客車艙潛在病毒酬載(payload)的更好選擇。

# 6.3.醫療照護中心

- 探討室內空間傳播SARS-CoV-2病毒的可能因素為必須的研究。尤其是臨時醫院、醫療機構、檢疫和隔離中心等場所，住宿設施具有較大的開放空間，並按順序排列許多床位。
- 本文主要針對醫療中心，但也可以適用於上述其他室內空間。
- SARS疾病的流行，迫使政府尋求設置常規可用之外的隔離設施，通常會在短期內建立適當的醫療中心或改建其他現有設施。這樣的空間通常會是大範圍樓地板面積(large floor areas)，其通風設施可能無法清潔載有病毒的氣懸膠體羽流(airborne plumes)。
- 在疫情流行或大流行情況下，SARS疾病的傳播通常有兩方面。首先是來自外部的疑似患者帶入醫療中心的非院內傳播(non-nosocomial transmission)。隨著時間推進，居住在醫療中心的易感宿主，將通過院內傳播(nosocomial transmission)感染，除非有適當的通風設施（> 6 ACH或1.6 L / s / m3，負壓差> 2.5 Pa，氣流差> 56 L / s）（WHO，2009）。
- 有時要區分這兩種傳播模式是極其困難的任務，。

# 6.3.醫療照護中心

- 在醫療中心的狹窄空間內，應採取適當措施管理非院內傳播，以控制院內傳播的發生，通風方法為重要角色。
- 基於密閉空間內經常有通風不足的情形，另外可分為兩種傳播類型；短距離（個人之間，通常間隔小於1米）和遠距離（在一個房間內，兩個房間之間或較遠位置之間，通常大於1米的距離）（Tang等，2006）。
- 感染患者由飛沫和氣懸膠體組成的咳嗽氣流，進入易感宿主（包括醫護人員）的呼吸區域，並與附近的空氣混合，可能造成感染（短距離傳播）。
- 取決於空間的氣流模式，咳嗽噴射氣流會經由氣懸膠體羽流(aerosol plume)傳播很長的距離（遠距離傳播），使遠離感染患者幾米之外的人也受到感染。
- 密閉空間中的氣流通常也受到溫度和濕度差異的共同影響。

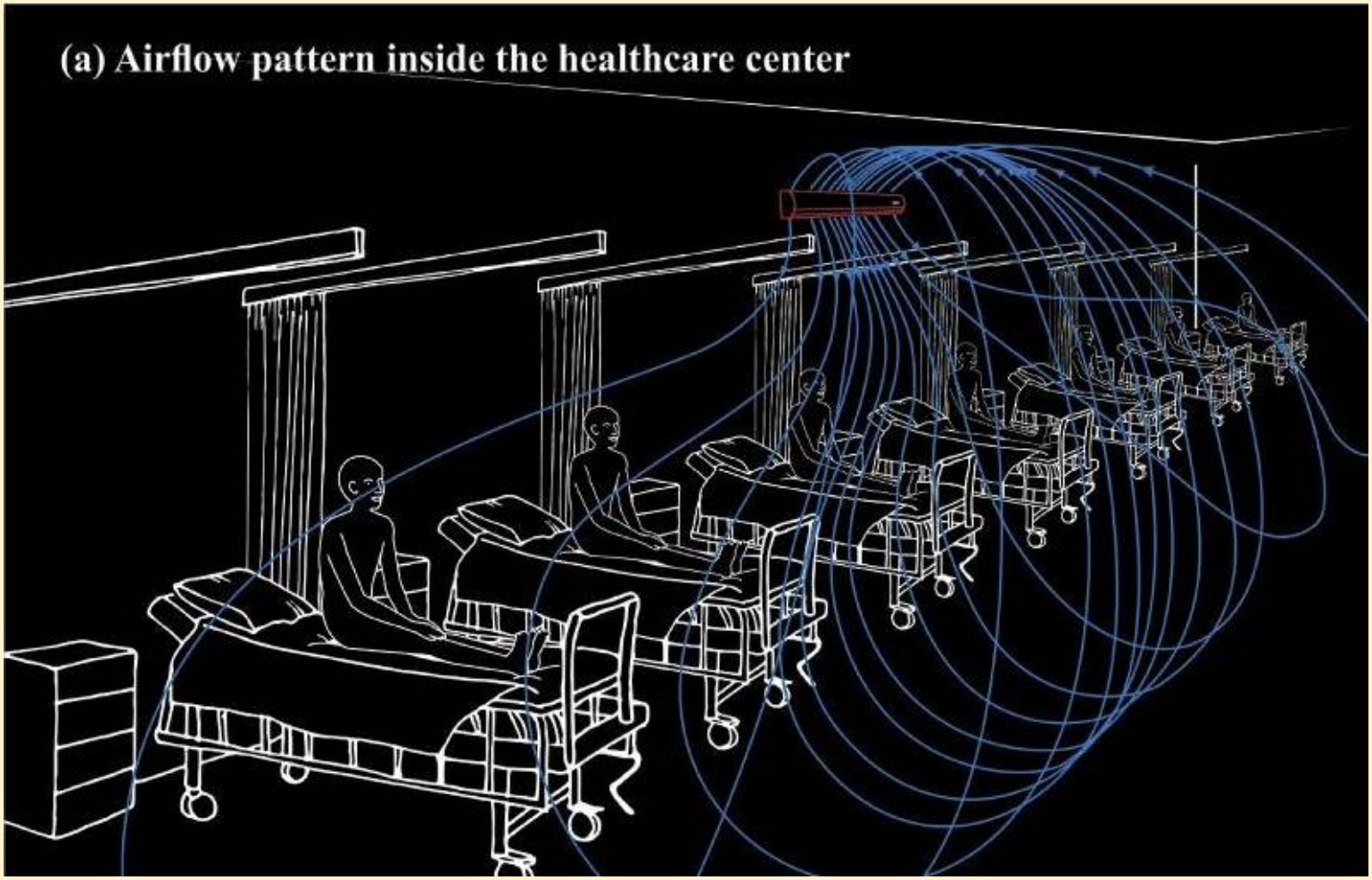



圖8a. 有空調通風設備的醫療照護中心，沒有任何咳嗽吐氣時醫療照護中心內氣流模式

圖8a顯示開放區域的氣流模式，該開放區域配備有一系列的疑似患者床位，因位處熱帶氣候有開啟空調，並且所有開口都關閉。氣流流線首先由空調產生，並向下流動，掃過患者，一旦對流速度減小，隨著溫度升高，氣流質量(airflow mass)開始因對流向上流動。空調之後將熱空氣抽出，並通過過濾器進行清潔，再送回相同的空間。

# 6.3.醫療照護中心

- 醫療照護中心通過空調驅動氣流，感染患者咳嗽未戴口罩，飛沫會落在很短的距離內，從而創造一個短距離傳播攜帶SARS-CoV-2飛沫的有利環境。
- 載有病毒的氣懸膠體羽流會旅行遠離鄰近區域，並在狹密閉空間內因對流而產生空氣傳播（圖8b.見下頁）。
- 這種氣懸膠體羽流可遵循氣流軌跡，氣流軌跡通常會因物體移動，門窗的開關以及溫度和濕度變化而改變。
- 此外，一定比例載有病毒的氣懸膠體將透過布朗運動向側面擴散，導致同一密閉房間內許多易感宿主的院內傳播。這些產生氣溶膠的羽流在密閉空間內造成遠距離傳播，使許多易感宿主感染，遠超出人們的想像。

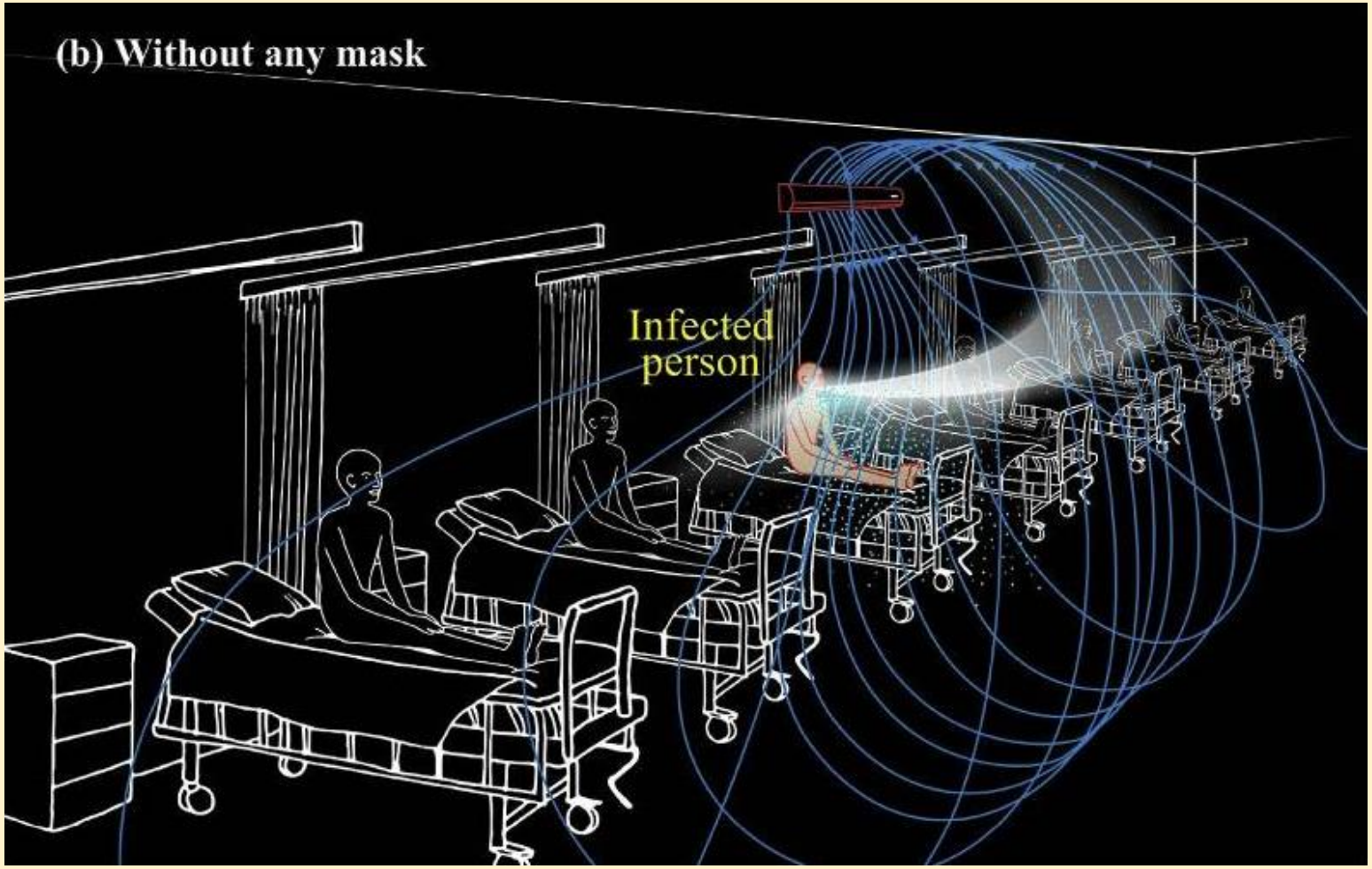



圖8b. 有空調通風設備的醫療照護中心，感染患者沒有戴口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

圖8b顯示在醫療照護中心中通過空調驅動氣流的感染患者的咳嗽噴射軌跡的典型模式。飛沫落在很短的距離內，從而創造一個短距離傳播攜帶SARS-CoV-2飛沫的有利環境。載有病毒的氣懸膠體羽流會旅行遠離鄰近區域，並在狹密閉空間內因對流而產生空氣傳播。

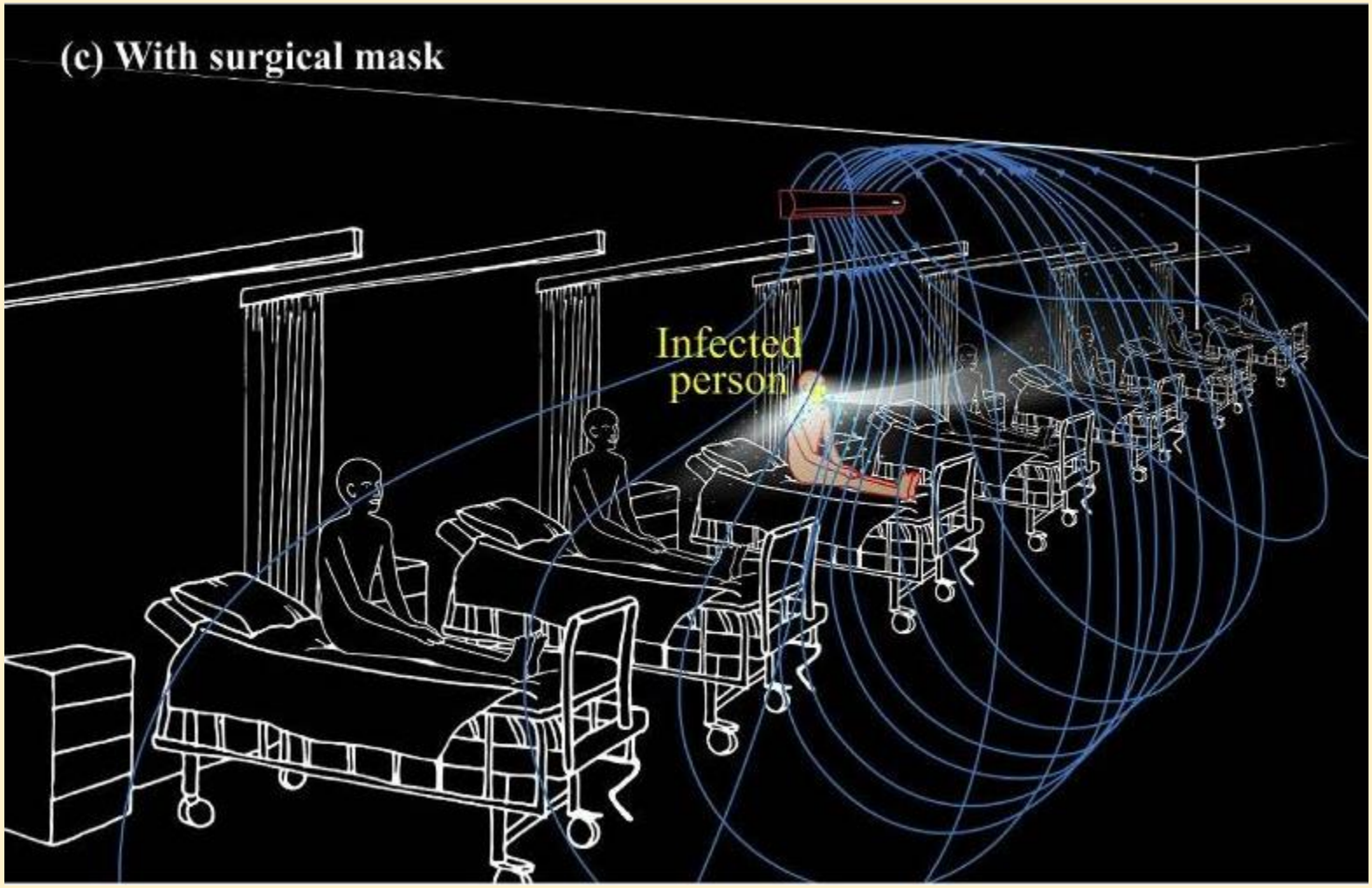



圖8c. 有空調通風設備的醫療照護中心，感染患者戴上外科口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

圖8c顯示感染患者戴著外科口罩咳嗽的軌跡。戴上外科口罩後，感染病人的飛沫酬載(payload)將大大減少，並被限制在很小的距離內。兩側的鄰居可能不會受到直接污染，但他們可能透過接觸攜帶有病毒的汙染物得到感染。但是載有病毒的氣懸膠體會經由對流和擴散過程向前傳播並消失。這種運輸現象還是可能引起院內感染。

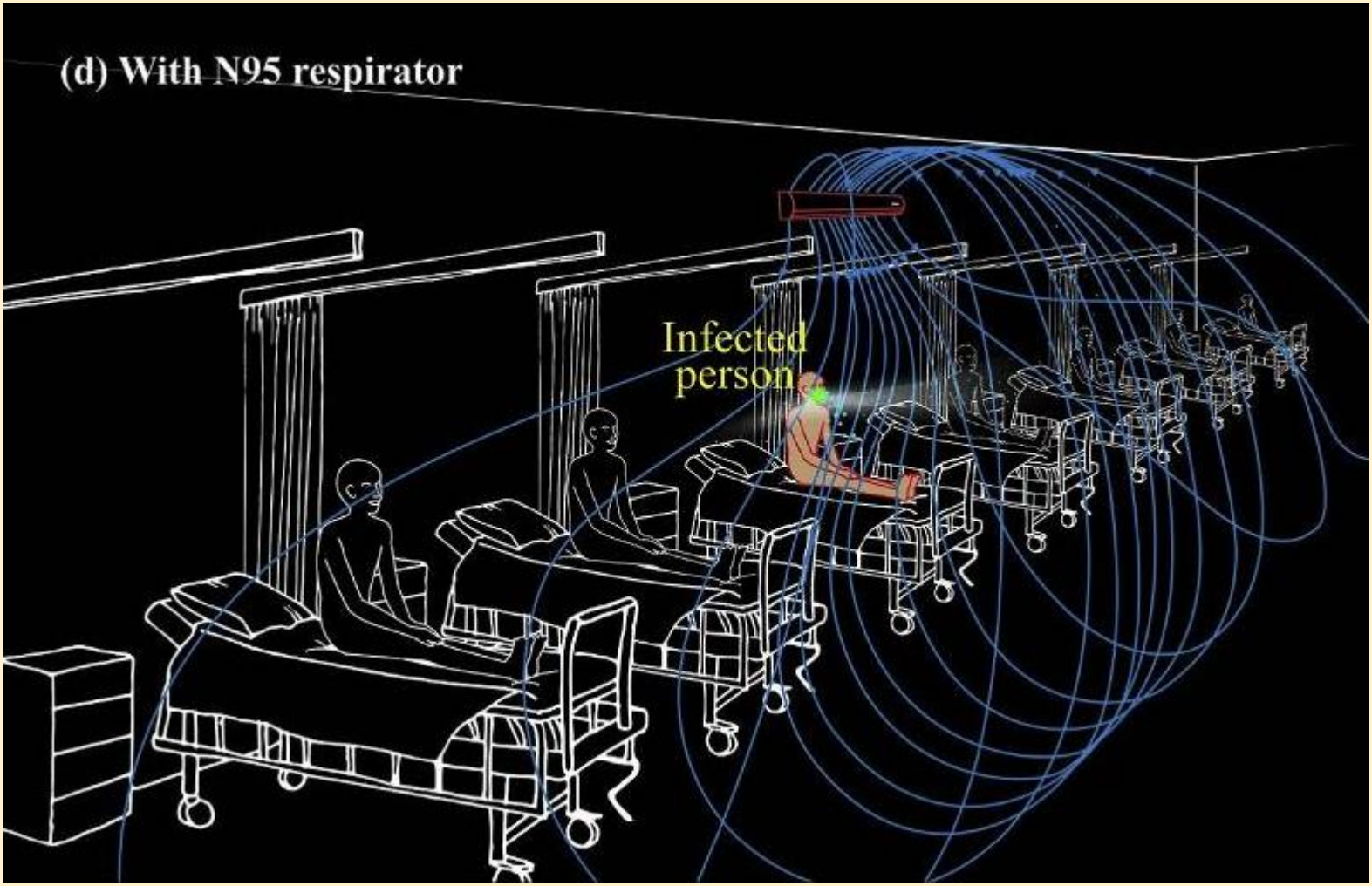



圖8d.有空調通風設備的醫療照護中心，感染患者戴上N95口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

戴有N95口罩的患者觀察到和戴上外科口罩類似情況，但與戴上外科口罩相比，程度較小。

# 6.3.醫療照護中心

- 新型冠狀病毒性肺炎緊急反應流行病學團隊（The Novel Coronavirus Pneumonia Emergency Response Epidemiology Team），雖然聲稱因咳嗽導致SARS-CoV-2的院內傳播仍不清楚，但截至2020年2月11日，中國臨時醫院的1,716名醫護人員已被感染。
- 即使醫療人員穿著適當的PPE仍可能因為混合空氣通風不良，SARS-CoV-2氣懸膠體可停留許多小時，引起空氣傳播的院內感染。
- 美國疾病預防控制中心在一次新聞發布會上也暗示，截至2020年4月9日，美國約9,000名醫護人員對COVID-19測試顯示陽性反應，這可能是由於空氣傳播的氣懸膠體雲造成的院內傳播。

# 6.3.醫療照護中心

- 機械式吊扇(ceiling-held mechanical fans)驅動的混合通風在發展中國家尤其是熱帶地區非常普遍。
- 吊扇推動的機械通風產生向下氣流的對流力量，掃過密閉空間的人，當氣流通過密閉空間內的人和物體時，逐漸變暖並因對流過程開始向上移動，這些溫暖的空氣會向上流到天花板，並可能從出口處流出。（圖9a，見下頁）
- 如果沒有足夠的出口，室內通風持續不順暢，熱空氣可能會充滿整個密閉空間，經由飛沫和氣懸膠體羽流傳播感染，可導致SARS-CoV-2病毒院內感染。
- 感染患者配備外科口罩和N95口罩的情況，飛沫的傳播似乎可有較大程度的抑制，但是載有病毒的氣懸膠體的傳播仍有可能。

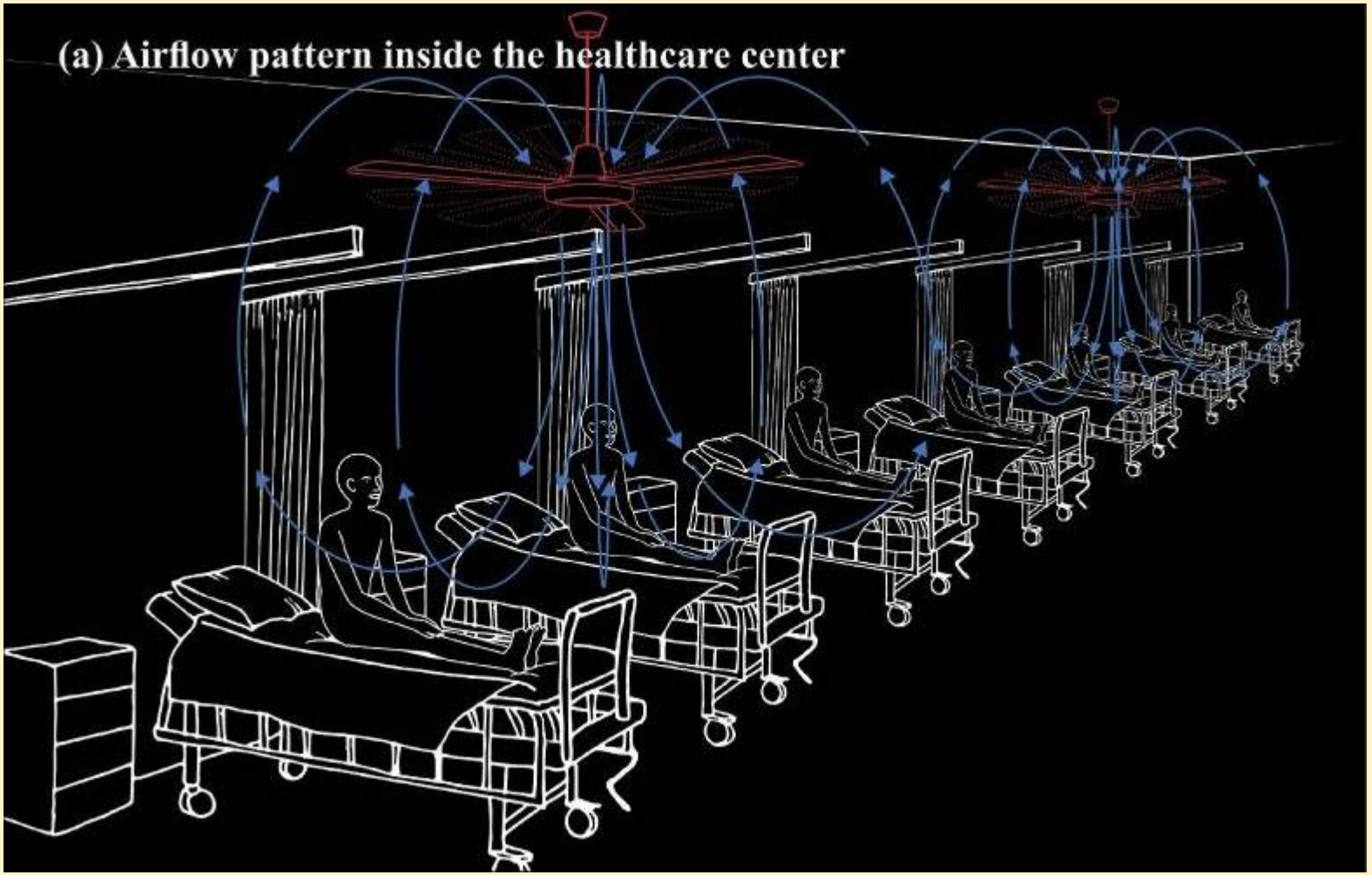



圖9a. 以吊扇為通風設備的醫療照護中心，沒有任何咳嗽吐氣時醫療照護中心內氣流模式

圖9a顯示以吊扇提供通風的典型空間佈置，一排接受檢疫隔離的床位彼此間隔1米。吊扇推動的機械通風產生向下氣流的對流力量，掃過密閉空間的人。當氣流通過密閉空間內的人和物體時，逐漸變暖並因對流過程開始向上移動。這些溫暖的空氣會向上流到天花板，並可能從出口處流出。

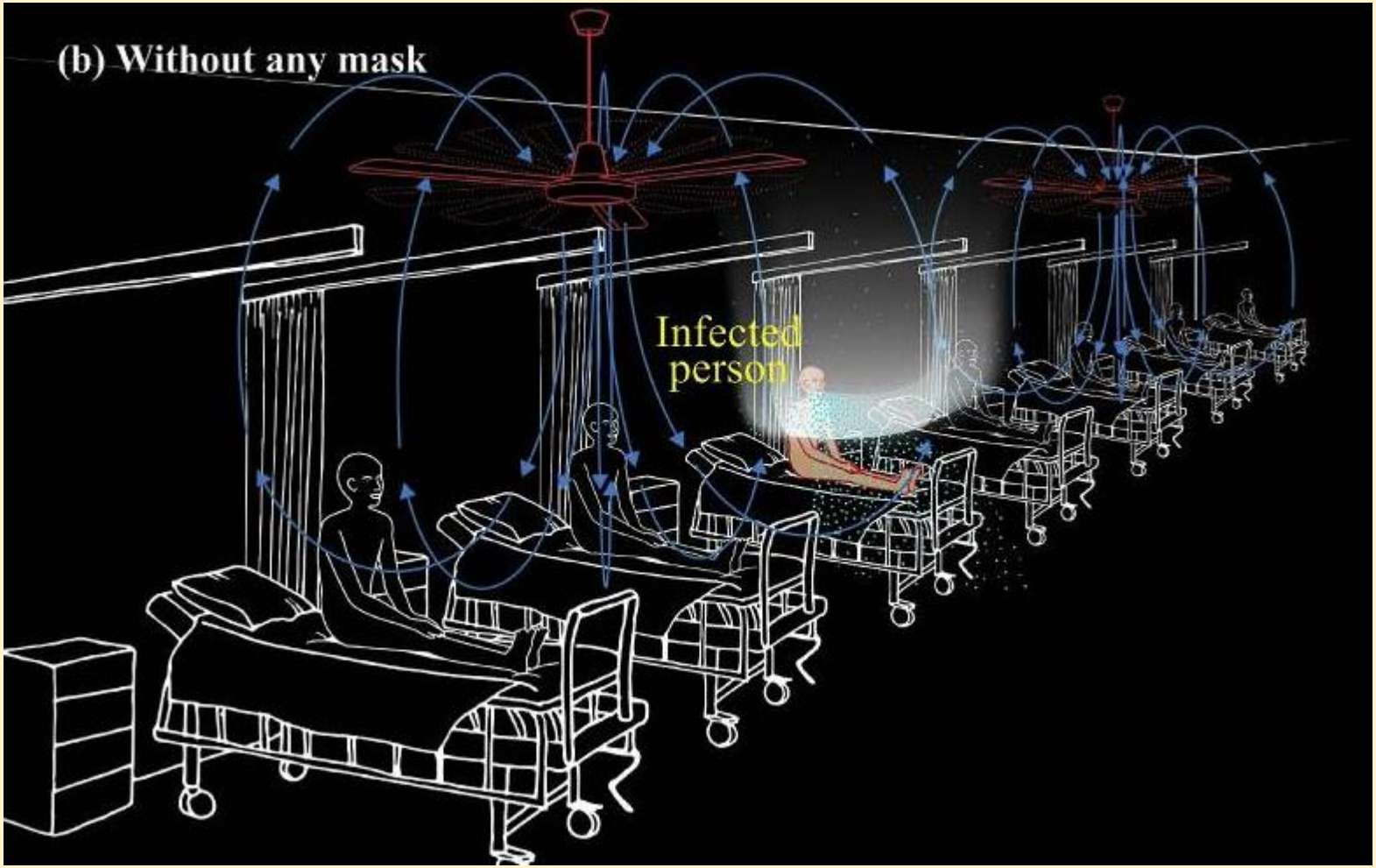



圖9b. 以吊扇為通風設備的醫療照護中心，感染患者沒有戴上口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

圖9b顯示吊扇推動的機械通風產生向下氣流，逐漸變暖並因對流過程開始向上移動，如果沒有足夠的出口，室內通風持續不順暢，熱空氣可能會充滿整個密閉空間，導致飛沫和氣懸膠體羽流，傳播SARS-CoV-2病毒院內感染。

。

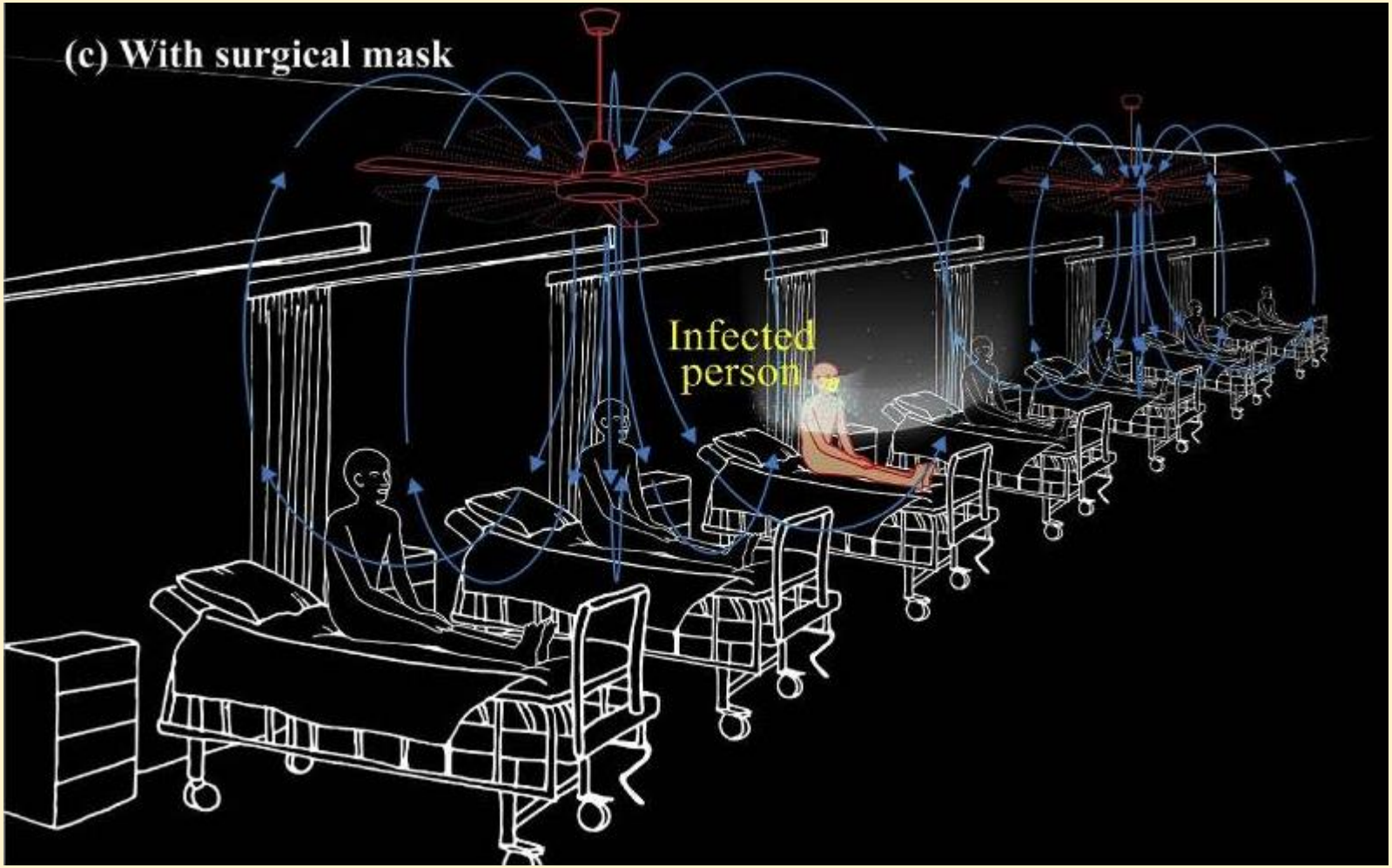



圖9c. 以吊扇為通風設備的醫療照護中心，感染患者戴上外科口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

圖9c顯示感染患者配備外科口罩的環境情境。在這種情況下，飛沫的傳播似乎都可有較大程度的抑制，但是載有病毒的氣懸膠體的傳播似乎仍有可能。

。

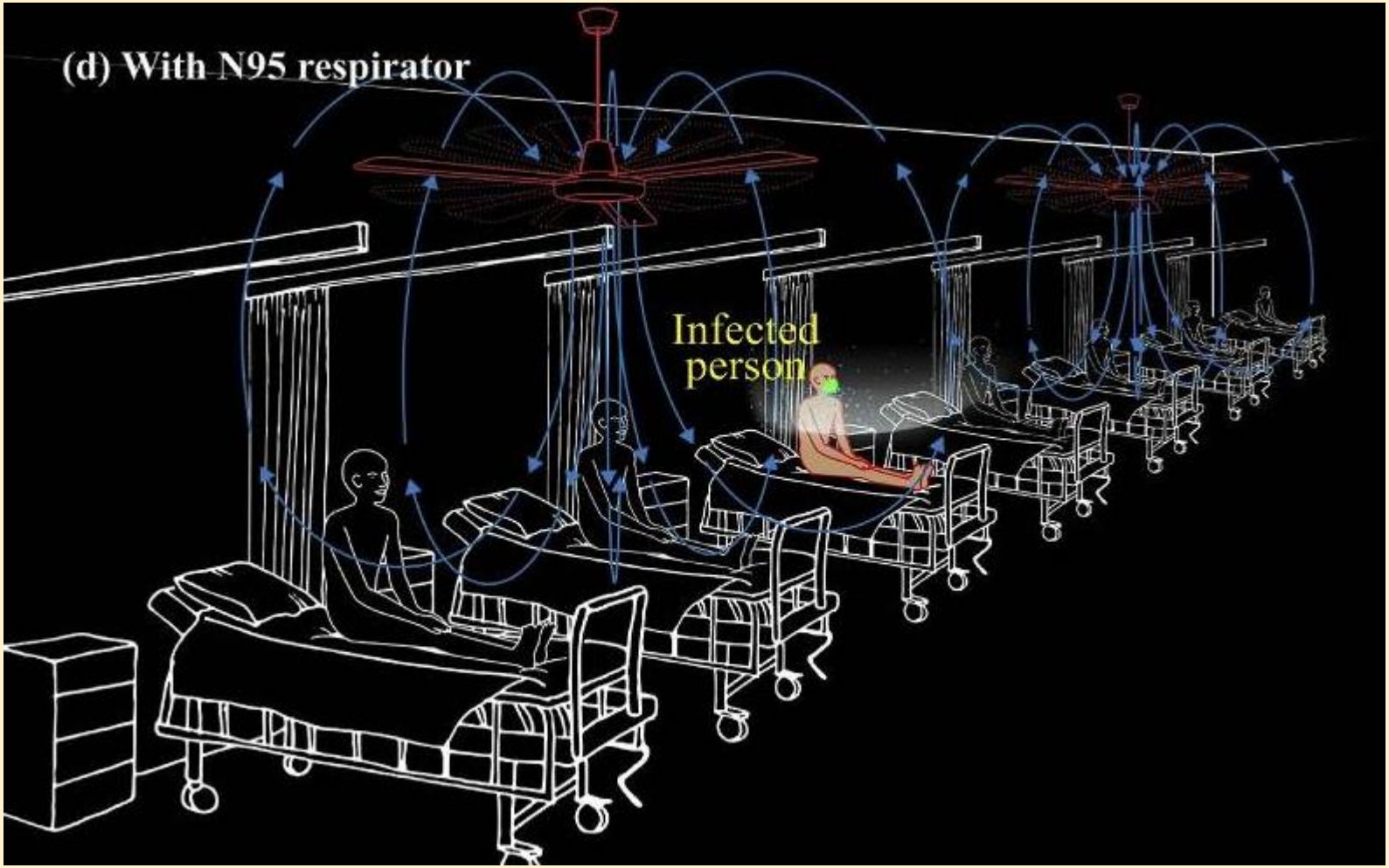



圖9d. 以吊扇為通風設備的醫療照護中心，感染患者戴上N95口罩咳嗽產生的飛沫和氣懸膠體的軌跡

圖9d顯示感染患者配備N95口罩，與手術口罩類似，飛沫的傳播可有較大程度的抑制，載有病毒的氣懸膠體的傳播似乎仍有可能，但與手術口罩相比，程度較小。

# 6.3.醫療照護中心

- 醫療照護中心的常見情境包括：因出口不足限制新鮮空氣的進入和排出，沒有足夠數量的風扇來傳遞可接受的ACH，大量民眾居住在這樣的設施中以及因為人們的物品設備和動作阻擋了空氣路徑，等可能會導致環境中的通風不良，因而導致院內傳播引發COVID-19爆發。
- 斯里蘭卡的報告，截至2020年4月30日，在科倫坡的海軍綜合體(Naval Complex in Colombo)中，已有150多名水手感染COVID-19。這些水手的任務在封鎖COVID-19大流行的潛在區域。許多人住在密閉空間，由機械風扇驅動的通風效率相當差促使攜帶病毒的氣懸膠體羽流在建築物內停留了多許多小時。此為通風不良導致的空氣傳播感染的經典示例
- 考慮到上面提到的所有案例研究，我們不能因COVID-19的飛沫和氣懸膠體傳播仍不確定而簡單地忽略。 行政、臨床和物理上建置最佳管理措施相當重要，尤其是在密閉空間之中。

# 7.結論

- 研究人員推測，感染SARS-CoV-2患者平順的和劇烈的吐氣產生的飛沫和氣懸膠體，可能與COVID-19的空氣傳播環境有關。但仍需進行更多的研究工作以了解不沫同和氣懸膠體的行為，尤其是密閉空間中，攜帶病毒飛行在設定環境條件下的傳播。
- 世界各國的案例研究顯示，SARS-CoV-2病毒的行為是前所未見的，在空氣中具有更高的存活率，並被認為可以在空氣中停留較長時間。
- 醫療人員對抗疾病的挑戰將是非常艱鉅的任務除非醫療機構採取適當的行政、臨床和物理措施。
- 也需要對SARS-CoV-2病毒的行為進行跨學科研究，以防止COVID-19疾病在全世界傳播。

# 本篇重點

- 許多呼吸道病毒可通過多種途徑傳播，其中以飛沫(droplets)和氣懸膠體(aerosols)的傳播途徑最為重要，但在COVID-19的重要性仍不清楚。
- 呼吸性的顆粒可依據顆粒大小，也就是空氣動力學直徑(aerodynamic diameter)大小，區分為飛沫或氣懸膠體。
- 許多人認為飛沫比氣懸膠體更容易造成感染，最近已有證據反駁這樣的假設，並推測氣懸膠體在傳播疾病中有重要作用。
- 目前仍沒有對於SARS-CoV-2病毒傳播模式方式的爭議及區分飛沫和氣懸膠體傳播病毒方式的決定性研究。因此形成未解決的對立(dichotomy) 。

# 本篇重點

- SARS-CoV-2病毒在氣懸膠體中已發現可存活3小時，而它以飛沫的形式在塑料和不銹鋼，銅，紙板和玻璃上更穩定，可檢測到的持續時間分別為72、4、24和84小時。
- 當呼吸道疾病的感染者咳嗽或打噴嚏時，會出現一團大小不一的病原體飛沫，打噴嚏時可從源頭傳播長達7–8 m，在咳嗽時可傳播2 m以上（最大4.5 m）。
- 可能影響空氣中微生物生存能力最重要的環境因素包括溫度、濕度、輻射（陽光）和戶外（通風）等等。
- 感染患者戴外科口罩時，約20–30%的飛沫和大量氣懸膠體洩漏， 戴上N95後會有5%的飛沫和一團氣懸膠體霧洩出。 均不能保證完全阻斷SARS-CoV-2， 因此社交隔離仍為必須。

# 本篇重點

- 飛機上SARS-Cov-2感染者咳嗽釋放的飛沫可能會向前行進四到五個座位，向後一個座位移動，但氣懸膠體可能移動更遠。所以機上有感染患者且未戴上口罩時，大約有五到十個人會被感染。
- 乘坐客車旅行時，患者戴口罩咳嗽，相較不戴口罩，傳播感染的危險可得到一定程度的控制，但易感宿主仍有感染危險。
- 開啟車窗並關閉空調的情境，較開啟空調並關閉車窗，在控制SARS-CoV-2病毒方面會更有效。
- 一定比例載有病毒的氣懸膠體可在密閉空間內造成遠距離傳播的院內感染，使許多易感宿主感染，遠超出人們的想像。