

# I tornado

*La dinamica delle tempeste che scatenano questi vortici è quasi chiarita, ma restano ancora importanti dettagli irrisolti*

di Robert Davies-Jones

**L**a scorsa primavera i tornado hanno rappresentato un vero flagello per gli Stati Uniti. Nel solo mese di maggio, ben 484 tornado hanno provocato la morte di 16 persone e danni materiali per milioni di dollari. Giorno dopo giorno, le previsioni di nuove tempeste facevano accorrere me e i miei colleghi dal National Severe Storms Laboratory (NSSL) di Norman, nell'Oklahoma, fino al Texas o al Kansas. Spesso si ritornava alla base anche alle tre del mattino, e dopo la riunione delle nove del mattino successivo ci capitava di essere nuovamente in viaggio, stanchissimi ma con la speranza di raccogliere una volta di più dati preziosi sulla genesi dei tornado.

Martedì 16 maggio le previsioni meteorologiche indicavano il pericolo di tornado pomeridiani nel Kansas. Verso le cinque del pomeriggio si era sviluppata una minacciosa tempesta, alimentata da venti caldi e umidi che si alzavano e ruotavano in un vortice ascensionale. La tempesta era una cosiddetta «supercella» altamente organizzata, il «terreno di coltura» ideale per un tornado. Quando William Gargan, dell'Università dell'Oklahoma, e io ci avvicinammo da sud-est sul nostro veicolo dotato di strumentazione, il Probe 1, potemmo vedere a distanza di poco meno di 100 chilometri la sommità - a oltre 25 chilometri di quota - della mostruosa tempesta. Essa si stava dirigendo verso est-nord-



-est alla velocità di circa 50 chilometri all'ora, con una dinamica abbastanza tipica della regione delle Great Plains.

Approssimandoci a meno di 15 chilometri, scorgemmo per la prima volta la lunga e cupa base della nube. Avvicinandoci ulteriormente riconoscemmo il vortice, simile alla proboscide di un elefante, che si protendeva dal retro del cumulonembo principale, nei pressi di Garden City. Tentando di avvicinarci su strade secondarie, perdemmo di vista il vortice, ma poi lo scorgemmo di nuovo a sei o sette chilometri in direzione nord-

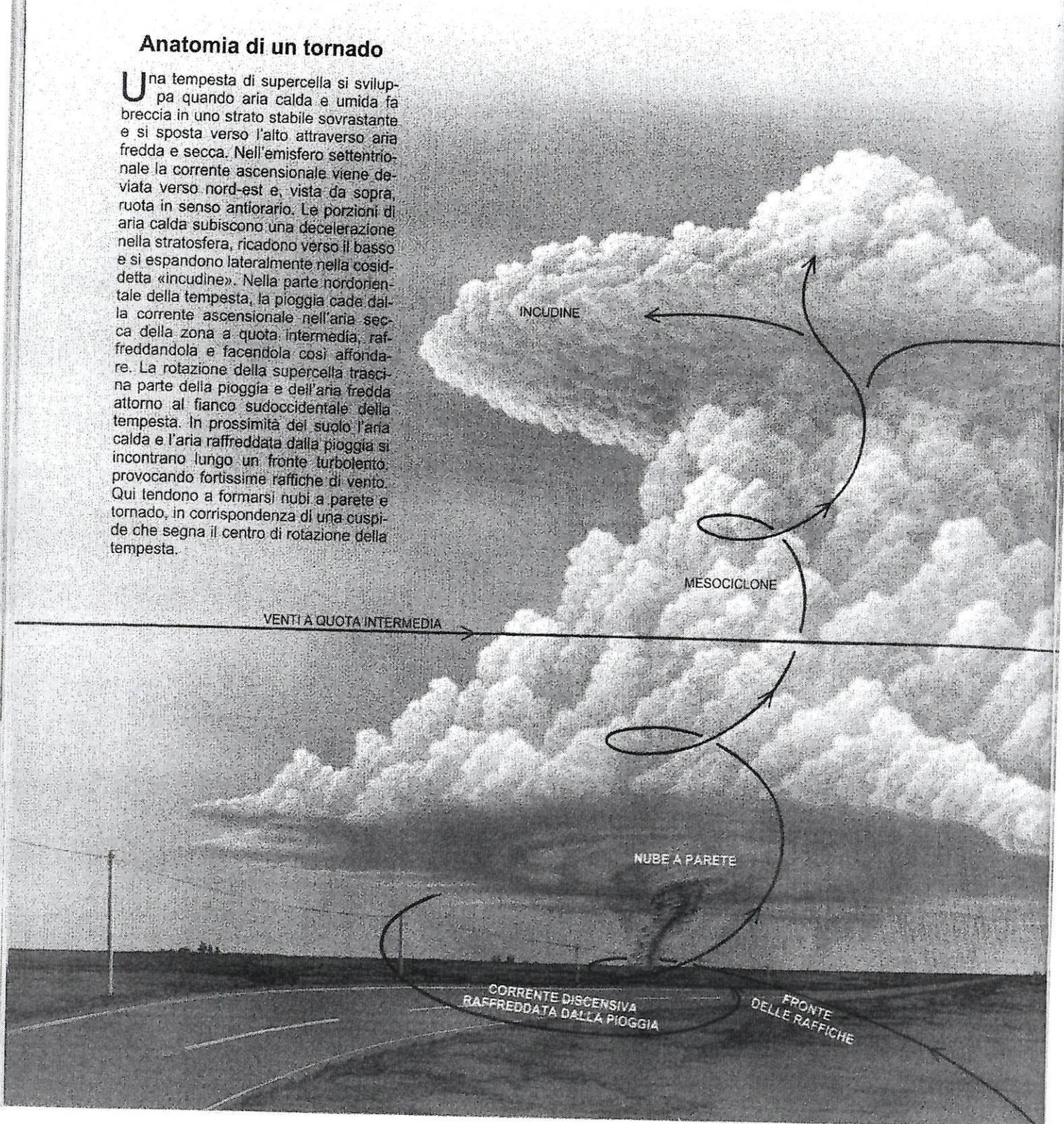
-ovest. Era sottile e appariva trascinato orizzontalmente dalla nube genitrice prima di piegare bruscamente ad angolo retto verso il suolo. Con ogni evidenza esso era spinto via dalla nube per azione dell'aria fredda che fluiva dalla tempesta verso il basso, e si approssimava alla fine della sua vita.

La maggior parte dei tornado si sposta alla velocità di circa 50 chilometri all'ora, ha una durata di pochi minuti e provoca danni lungo una traiettoria della larghezza di una cinquantina di metri.

I tornado più devastanti possono esercitare i loro effetti anche su un fronte di un chilometro e mezzo, si muovono a una velocità doppia rispetto a quelli comuni e possono durare oltre un'ora. I tornado che si sviluppano nell'emisfero settentrionale, come quelli devastanti degli Stati Uniti, dell'India nordorientale e del Bangladesh, ruotano quasi sempre in senso antiorario, se visti da sopra. I tornado dell'emisfero meridionale, come quelli che si formano in Australia, tendono a ruotare in senso orario. Questi sensi di rotazione sono detti ciclonici.

## Anatomia di un tornado

Una tempesta di supercella si sviluppa quando aria calda e umida fa breccia in uno strato stabile sovrastante e si sposta verso l'alto attraverso aria fredda e secca. Nell'emisfero settentrionale la corrente ascensionale viene deviata verso nord-est e, vista da sopra, ruota in senso antiorario. Le porzioni di aria calda subiscono una decelerazione nella stratosfera, ricadono verso il basso e si espandono lateralmente nella cosiddetta «incudine». Nella parte nordorientale della tempesta, la pioggia cade dalla corrente ascensionale nell'aria secca della zona a quota intermedia, raffreddandola e facendola così affondare. La rotazione della supercella trascina parte della pioggia e dell'aria fredda attorno al fianco sudoccidentale della tempesta. In prossimità del suolo l'aria calda e l'aria raffreddata dalla pioggia si incontrano lungo un fronte turbolento, provocando fortissime raffiche di vento. Qui tendono a formarsi nubi a parete e tornado, in corrispondenza di una cuspidi che segna il centro di rotazione della tempesta.



Nel 1949 Edward M. Brooks, della St. Louis University, scoprì, esaminando le variazioni della pressione atmosferica in diverse stazioni meteorologiche in prossimità di tornado, che i vortici si formano di solito nell'ambito di grandi masse di aria in rotazione, i mesocicloni. Nel 1953 un mesociclone comparve su uno schermo radar a Urbana, nell'Illinois, come un'appendice di forma uncinata sul lato sudoccidentale dell'eco radar di una tempesta. Dato che le microonde del radar sono riflesse dalla pioggia, la forma a uncino indicava che questa veniva

trascinata in una sorta di cortina in rotazione ciclonica. Nel 1957 T. Theodore Fujita, dell'Università di Chicago, esaminò fotografie e filmati, ripresi da residenti, della base e dei fianchi di una tempesta con caratteristiche di tornado avvenuta nel North Dakota, e si accorse che l'intero cumulonembo principale ruotava in senso ciclonico.

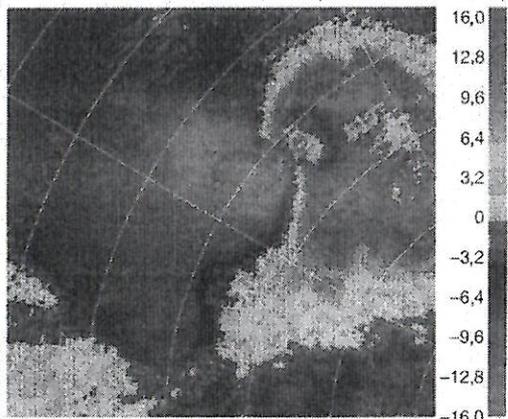
Negli anni sessanta Keith A. Browning, meteorologo britannico in visita a quello che costituiva il predecessore dell'NSSL, vale a dire il National Severe Storms Project, compose a partire dai dati radar un quadro notevolmente accurato dei tornado. Egli si rese conto che la maggior parte dei tornado prende origine all'interno di tempeste particolarmente vaste e violente, cui diede il nome di supercelle. Questi sistemi si sviluppano in ambienti altamente instabili, nei quali i venti variano notevolmente con l'altezza e una massa di aria secca e fredda sormonta aria più calda e umida a circa 1500 metri di quota. Un sottile strato stabile separa le due masse d'aria, imbottigliando per così dire l'instabilità.

Questo «coperchio» si può aprire se l'aria a bassa quota è riscaldata dal Sole o se sopravviene una perturbazione. Fronti d'aria, correnti a getto e perturbazioni ad alta quota, tutti comuni «visitatori» delle Great Plains nella stagione dei tornado, possono forzare la risalita dell'aria a bassa quota. Dato che la pressione dell'aria diminuisce con l'altitudine, le porzioni d'aria in risalita si espandono e si raffreddano. A una quota sufficiente esse diventano abbastanza fredde da provocare la condensazione del vapore acqueo in goccioline, e quindi la formazione di una nube a base appiattita.

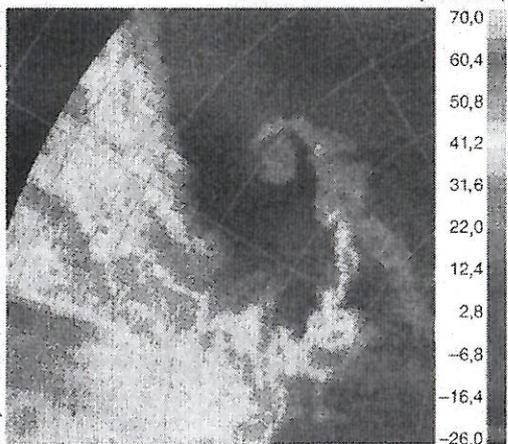
Il vapore, condensando, libera calore latente e riscalda le porzioni d'aria. Esse raggiungono un livello al quale cominciano a essere più calde dell'ambiente circostante, cosicché risalgono ancora liberamente fino a quote estreme, con velocità che raggiungono i 250 chilometri all'ora, formando un cumulonembo torreggiante. I venti, agendo di taglio, fanno inclinare la corrente ascensionale verso nord-est.

Salendo in quota, le goccioline che formano la nube sono soggette a coalescenza e formano gocce di pioggia. La spinta idrostatica che solleva le porzioni d'aria viene in parte compensata dal peso

VELOCITÀ DEL VENTO (METRI AL SECONDO)



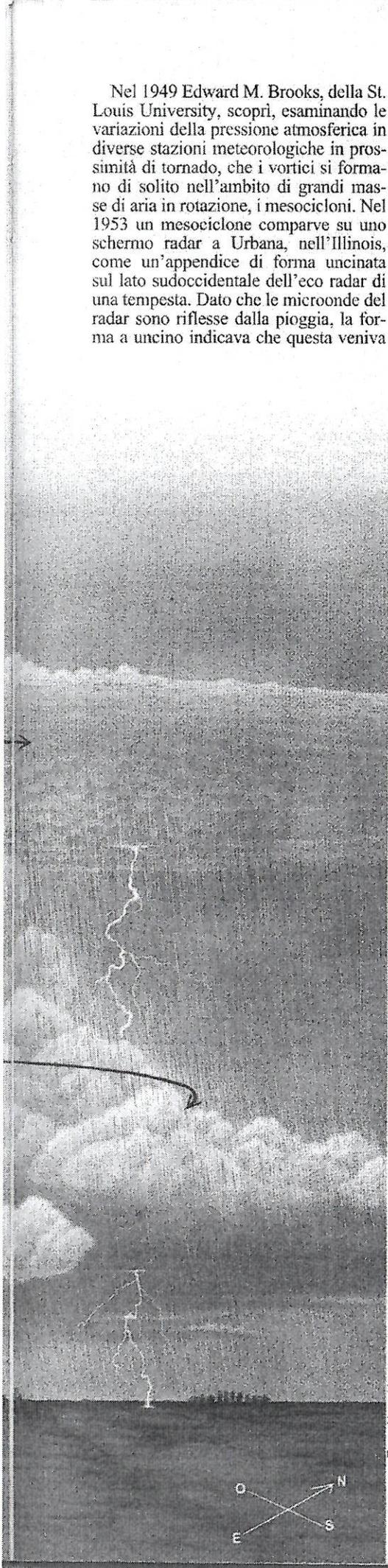
RIFLETTIVITÀ RADAR (DECIBEL)



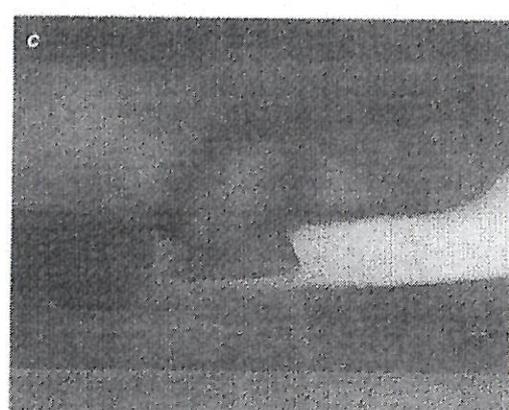
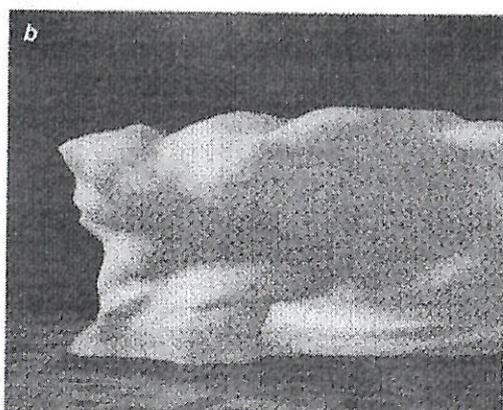
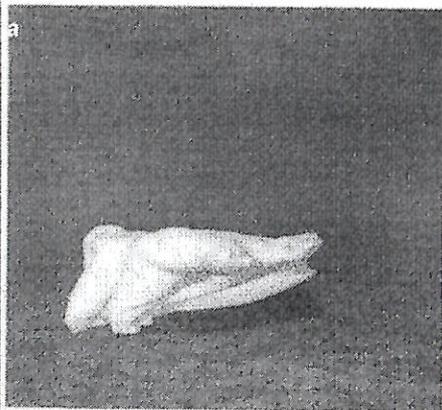
Jerry M. Straka - Joshua Wurman ed Erik Rasmussen, Università dell'Oklahoma

L'instaurarsi di un tornado può essere rivelato da un radar a effetto Doppler fino a 20 minuti prima che il vortice tocchi terra. I venti all'interno della nube, variando bruscamente sulla breve distanza, possono segnalare un vortice potenziale o in atto, come si vede nel caso di un tornado (*in alto*) ad Hanston, nel Kansas, osservato dall'autore il 16 maggio. Un mesociclone, la struttura dove di solito si sviluppano i tornado, appare ai radar convenzionali come un'appendice uncinata sul lato sudoccidentale della tempesta. Il ricciolo che compare nella foto in basso, sempre riferita alla tempesta di Hanston, rivela anch'esso la presenza del tornado.

dell'acqua e del ghiaccio. Le porzioni d'aria perdono quantità di moto nella stratosfera, riaffondano intorno a 13 000 metri e rifluiscono ai lati originando l'«incudine» della tempesta. La pioggia che cade dalla corrente ascensionale inclinata evapora nell'aria secca delle quote intermedie sul lato nordorientale della supercella, facendola raffreddare e discendere al suolo. Gradualmente, la pioggia e la fredda corrente discensiva (ossia che tende a discendere) sono trascinate attorno alla corrente ascensionale dalla tempesta in rotazione. L'aria fredda ha umidità relativa più elevata di quella calda e quindi, se è spinta verso l'alto, produce nubi a quote inferiori. Pertanto, quando parte di quest'aria è risucchiata dalla corrente ascensionale, si forma una nube «a parete» a quota molto bassa.



Torno Narashima



La simulazione al computer di una supercella ricrea un debole ma grande tornado risolvendo le equazioni idrodinamiche del sistema su una griglia di punti che rappresenta lo spazio. All'instaurarsi della tempesta (a; 43 minuti dall'inizio della simulazione) e a mano a mano che questa si evolve (b; 101 mi-

nuti) la griglia (invisibile) viene progressivamente infittita fino a che i punti risultano distanziati di 100 metri nelle regioni di intensa rotazione. Il centro turbinante della tempesta è evidente in una vista da sotto (c; 103 minuti). La pioggia che cade dalle cupe nubi non è qui mostrata per chiarezza; inoltre una

A differenza della maggior parte delle tempeste, che comprendono molte correnti ascensionali e discensive che interferiscono reciprocamente, le supercelle contengono una o due celle, ognuna delle quali vede la coesistenza di una corrente discensiva e di una ascensionale in ampia rotazione. L'alto livello di organizzazione consente alla supercella di durare a lungo in uno stato altamente dinamico e tuttavia stabile, propizio alla formazione dei tornado. Una zona di corrente ascen-

sionale di diametro compreso tra uno e cinque chilometri può cominciare a ruotare con una velocità del vento di 80 chilometri all'ora o più, formando un mesociclone. La tempesta può allora sviluppare una rotazione a basse quote ed eventualmente un tornado, di solito al fianco sudoccidentale della corrente ascensionale e in prossimità di una corrente discensiva, mentre il mesociclone è maturo o in fase di decadimento.

Infine il mesociclone muore in un su-

dario di pioggia quando la sua corrente ascensionale viene interrotta in prossimità della superficie terrestre per azione di aria molto fredda che fluisce dal nucleo della corrente discensiva. Nelle supercelle persistenti, un nuovo mesociclone può essersi già formato, a distanza di qualche chilometro da quello morente, lungo il fronte delle raffiche di vento che segna il confine tra l'aria calda e quella fredda. Un nuovo tornado può allora svilupparsi rapidamente.

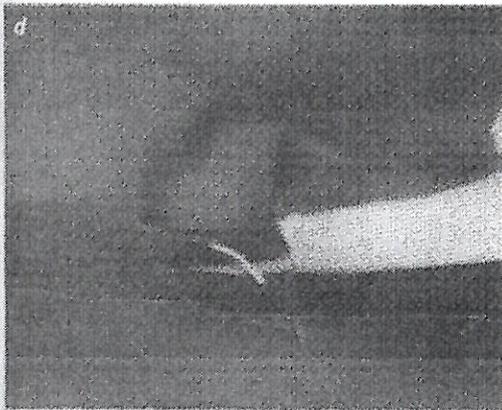
## Potere distruttivo

Il danno che i tornado arrecano agli edifici, come questo distrutto nel Texas, e la distanza a cui essi sono in grado di trascinare oggetti di peso rilevante sono rivelatori dell'estrema velocità raggiunta dal vento in prossimità del suolo. Negli anni settanta l'Institute for Disaster Research di Lubbock, nel Texas, valutò che per provocare i danni più considerevoli i venti dovevano aver raggiunto velocità di quasi 450 chilometri all'ora [nessun anemometro è in grado di resistere a un tornado, n.d.r.]. Si osservò inoltre che le pareti degli edifici esposte al vento (generalmente quelle orientate a sud-est) quasi sempre crollavano all'interno. Ciò implicava che le strutture sono più spesso danneggiate dalla forza bruta del vento che non dalla repentina caduta della pressione atmosferica. Di conseguenza non si raccomandò più ai residenti del Midwest degli Stati Uniti di tenere aperte le finestre in modo da ridurre la pressione interna dell'edificio. Questo suggerimento aveva fatto sì che molti fossero feriti dalle schegge di vetro proprio mentre accorrevano a spalancare le finestre. Né tantomeno si disse più alla gente di rifugiarsi nel-

l'angolo sudoccidentale dell'abitazione: proprio in quel punto, infatti, si aveva il maggior pericolo che le pareti crollassero verso l'interno dell'edificio. Ora, piuttosto, si raccomanda di cercare riparo in un locale centrale, per sfruttare la protezione delle pareti interne.

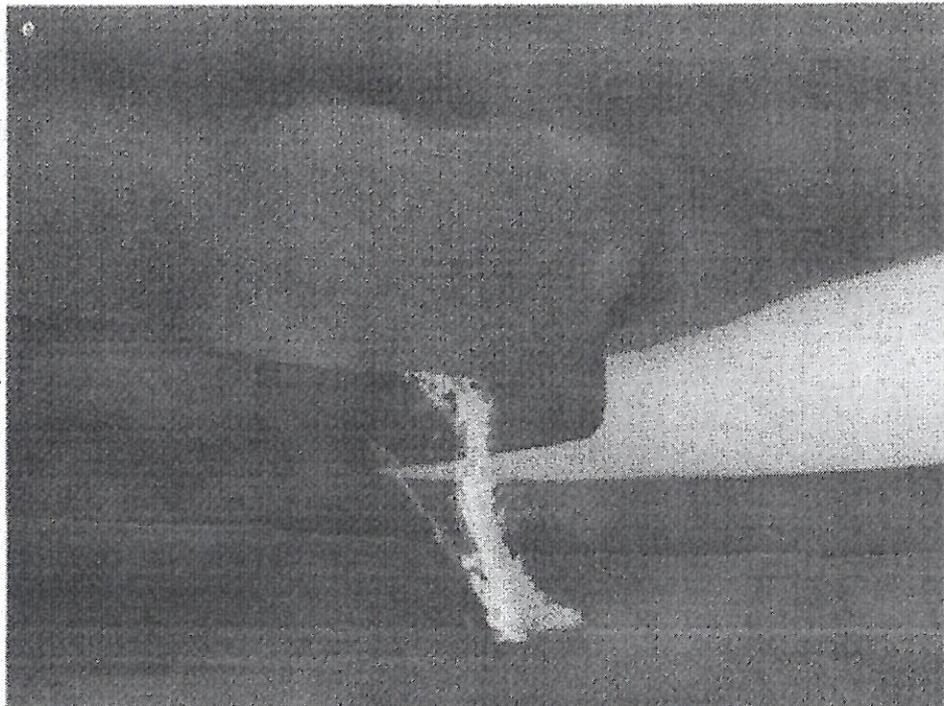


David Sams, Sipa Press



densa nube «a parete» che raggiungeva il suolo è stata resa trasparente per evidenziare la dinamica del tornado. Un vortice di colore bianco ha origine ad alta quota nella nube (d; 104 minuti) e rapidamente tocca terra (e; 107 minuti).

Matthew Arrott, Wedge Studio, e Robert Wilhelmson, Università dell'Illinois



Per riuscire a prevedere quando e dove sia più probabile la comparsa di un vortice, l'NSSL ha condotto il Tornado Intercept Project dal 1972 al 1986. Le squadre di intercettazione hanno effettuato dapprima riprese con videocamere per misurare la velocità del vento e ottenere una verifica a terra delle osservazioni radar. I «cacciatori» osservarono che i tornado spesso si sviluppano in parti di una tempesta prive di pioggia e di lampi, e ciò li portò a escludere le teorie che vedevano in questi «stimoli» l'innescò dei tornado. Nel 1975 fu registrato un raro tornado anticiclonico, la cui rotazione, opposta a quella terrestre, non poteva essere una semplice amplificazione della rotazione del pianeta.

Durante le ultime due primavere, l'NSSL ha messo in cantiere un ulteriore progetto, il VORTEX (Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment). Le misurazioni vengono effettuate dentro e in prossimità delle supercelle da un'«armata» di veicoli appositamente predisposti. Uno di questi è pilotato dal coordinatore sul campo, Erik N. Rasmussen, che collabora con i meteorologi del quartier generale di Norman scegliendo la «tempesta bersaglio» e coordinando la raccolta dei dati su di essa. Cinque veicoli sono equipaggiati in modo da ricevere segnali da palloni sonda di alta quota dispiegati all'interno e in prossimità delle tempeste, mentre altri 12 hanno stazioni meteorologiche montate sul tetto. Questi strumenti sono collocati a più di tre metri da terra, in modo da non risentire della turbolenza provocata dal veicolo; i dati vengono raccolti dai calcolatori alloggiati nell'interno di quest'ultimo.

Uno degli autoveicoli serve a effettuare riprese dei tornado, che vengono successivamente analizzate. Altri due spiegano nove «tartarughe». Così chiamati per la loro somiglianza con le tartarughe marine, sono «pacchetti» di stru-

menti, del peso di circa 18 chilogrammi, progettati in modo da resistere ai tornado; recano sensori ben schermati per la misurazione della temperatura e della pressione, e vengono disposti a terra a intervalli di un centinaio di metri.

I restanti nove veicoli sono chiamati *probe* (sonda): la loro unica missione è quella di raccogliere dati meteorologici in particolari zone della tempesta. Il compito di Probe 1 consiste nel misurare gradienti di temperatura in prossimità e a nord del tornado o del mesociclone, una zona della tempesta in cui molto spesso cade grandine di enormi dimensioni. In due occasioni, nella scorsa primavera, «chicchi» di grandine grossi come palle da baseball hanno distrutto il parabrezza di Probe 1.

Quel martedì nel Kansas, quando il vortice si spense, ci affrettammo verso est in modo da stare a fianco della tempesta e trovare un nuovo mesociclone. Procedendo a zig zag nella pioggia lungo strade sterrate, potemmo vedere due file di pali della luce abbattuti, che erano stati spezzati all'altezza di poco più di mezzo metro. Doveva essere transitato un forte tornado, nascosto dalla pioggia, a nord-est della nostra posizione. (Il giorno successivo lessi sul giornale che erano stati abbattuti ben 150 pali.)

Una cinquantina di chilometri più a est, scorgemmo una nube a parete: quasi una sorta di piedistallo rotante, ampio alcuni chilometri, della nube principale. Comparve un piccolo tornado, fuoriuscente non dalla scura nube a parete come accade di solito, ma dalla base di una nube adiacente e più alta. Il vortice toccò terra per pochi istanti, sollevando detriti, ma trascorse i suoi pochi minuti di vita principalmente come una nube a

forma di imbuto sospesa in aria, senza segni visibili di contatto con il suolo.

Una nuova nube a parete, che si fece sinistramente vasta e incombente, si sviluppò a nord-est, ma non riuscì a produrre un tornado. Nei pressi di Jetmore, un'altra tempesta si formò a sud di quella che stavamo seguendo. Ci muovemmo verso nord per sincerarci che la tempesta più vecchia stesse davvero perdendo la sua capacità di generare tornado, quindi tornammo sulla nostra strada e ci dirigemmo a sud verso la nuova tempesta.

Oltre alla suddetta schiera di veicoli, VORTEX si avvale di due aerei che volano attorno alla tempesta, nonché di tre altri mezzi. Sia questi sia gli aerei impiegano radar a effetto Doppler, in grado di fornire informazioni cruciali sul flusso dell'aria nelle tempeste che generano tornado. Il più recente modello di radar mobile a effetto Doppler, costruito quest'anno da Joshua Wurman e Jerry M. Straka dell'Università dell'Oklahoma, ha già permesso di ottenere dettagli senza precedenti sui tornado.

I radar Doppler meteorologici sono in grado di misurare a distanza la velocità del vento emettendo impulsi di microonde e rilevandone la riflessione su un gruppo di gocce di pioggia o di particelle di ghiaccio. Se le gocce si stanno muovendo verso il radar, l'impulso riflesso ha una lunghezza d'onda più breve, che permette di risalire alla componente della velocità delle gocce in direzione del radar. (La polizia usa strumenti simili per individuare le automobili che superano i limiti di velocità.)

Le prime misurazioni Doppler effettuate nel 1971 confermarono che i venti

all'interno di un «uncino» hanno effettivamente un movimento rotatorio, alla velocità di circa 80 chilometri all'ora. Questa circolazione, dapprima evidente a poco meno di 5000 metri di quota, è seguita da una rotazione a livelli molto più bassi che precede lo sviluppo di qualunque intenso tornado. Nel 1973 una piccola anomalia sulla mappa delle velocità Doppler di una tempesta a Union City, nell'Oklahoma, coincise nel tempo e nello spazio con un violento tornado.

Il radar non era in grado di «vedere» o di risolvere direttamente il tornado, ma mostrava il brusco cambiamento di direzione dei venti di alta quota nel vortice e nel suo precursore all'interno della nube. Questo embrione di vortice compare tipicamente a poco meno di 3000 metri di quota, 10 o 20 minuti prima che il tornado tocchi terra. Può estendersi sia verso l'alto sia verso il basso, raggiungendo occasionalmente, nel caso di tornado particolarmente grandi, una quota superiore agli 11 000 metri.

Sebbene questo «marchio» della formazione del vortice serva ad allertare i residenti, in modo che cerchino rifugio in scantinati o nelle stanze più interne di

un edificio, esso può venire riconosciuto solo a distanza relativamente breve, generalmente inferiore ai 100 chilometri. Per distanze un po' più lunghe, fino a 250 chilometri, gli allarmi possono essere emanati sulla base del rilevamento radar del mesociclone precursore. Attualmente si sta installando una rete di sofisticati radar Doppler nelle zone più colpite dai tornado per incrementare le possibilità di allarme precoce.

Nel 1991, utilizzando un radar Doppler portatile nei pressi di un tornado particolarmente violento a Red Rock, nell'Oklahoma, Howard B. Bluestein dell'Università dell'Oklahoma ha potuto misurare velocità del vento che raggiungevano quasi 450 chilometri all'ora. Per quanto elevatissime, queste velocità sono ben lontane dagli 800 chilometri all'ora che si postulavano circa 40 anni fa per spiegare fenomeni sbalorditivi come il fatto che si trovassero fili di paglia conficcati nel tronco di alberi. (Ora si ritiene che la forza del vento allarghi le minute fessure presenti nel legno, le quali, richiudendosi successivamente, intrappolerebbero la paglia.)

I radar Doppler singoli sono suffi-

cienti per gli allarmi locali, ma un secondo dispositivo a effetto Doppler che sia collocato a 40-55 chilometri di distanza e che «veda» la tempesta da un angolo differente consente di ottenere un quadro di gran lunga più completo ai fini della ricerca. Un sistema doppio così concepito, che viene usato dall'NSSL e da altri fin dal 1974, misura la velocità della pioggia in due diverse direzioni. Sapendo che la massa d'aria si conserva, e stimando la velocità relativa con cui la pioggia cade rispetto all'aria in movimento, i meteorologi possono ricostruire il campo dei venti in tre dimensioni, e misurare quantitativamente la vorticità. La disponibilità di questi dati li ha aiutati a scoprire che un tornado si situa a fianco della corrente ascensionale genitrice, vicino a una corrente discensiva, e ha permesso loro di verificare come l'aria che affluisce in un mesociclone ruoti secondo la direzione di moto di quest'ultimo.

Un progresso fondamentale per la comprensione delle rotazioni complesse che si verificano nei tornado si ebbe nel 1978, quando le simulazioni al computer di Robert Wilhelmson dell'Università dell'Illinois e di Joseph B. Klemp del National Center for Atmospheric Research (NCAR) riprodussero supercelle realistiche, complete di dettagli come la distribuzione delle precipitazioni in strutture a uncino.

Almeno nel mondo simulato, gli scienziati avevano il controllo della situazione. Anche in mancanza di una qualunque variazione laterale nell'ambiente iniziale, essi furono in grado di creare supercelle, sfatando quindi la spiegazione comune che vede nella collisione di masse d'aria la causa dei tornado. Inoltre, «spegnendo» nella simulazione il moto di rotazione della Terra, appurarono che esso aveva una scarsa influenza durante le prime ore di vita di una tempesta. Era piuttosto la direzione del vento, assai variabile alle basse quote, a rivelarsi cruciale per lo sviluppo della rotazione.

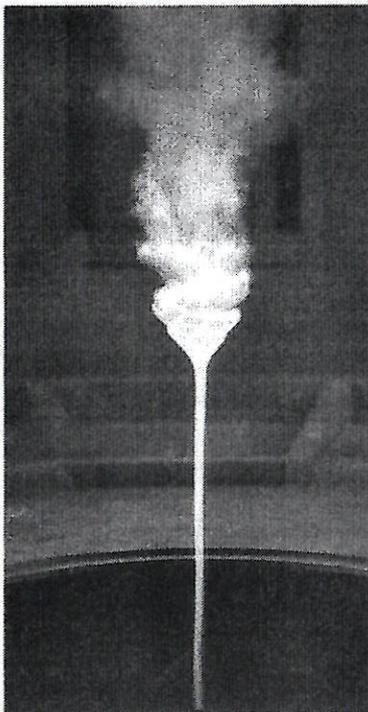
In un tipico ambiente di supercella, il vento in prossimità del suolo proviene da sud-est, a circa 800 metri di quota da sud e a 1600 metri da sud-ovest. Il vento che cambia velocità o direzione con la quota ha anche la capacità di indurre un movimento di rotazione. Si pensi a come il vento farebbe ruotare un bastoncino inizialmente verticale: se un vento da sud spira debolmente in prossimità del suolo e più intensamente un po' più in alto, il bastoncino ruoterà attorno a un asse orientato est-ovest.

Ma che cosa accade se il vento, anziché cambiare velocità, cambia direzione da sud-est a sud-ovest? Si immagini il bastoncino mentre si muove verso nord, insieme con i venti di quota intermedia. La sua estremità superiore viene spinta verso est, quella inferiore verso ovest, cosicché esso comincerà a ruota-

## Un tornado da tavolo

**G**li esperimenti di laboratorio hanno contribuito a spiegare perché i tornado possano assumere forme differenti. In un dispositivo costruito negli anni sessanta da Neil B. Ward del National Severe Storms Laboratory di Norman, nell'Oklahoma, e perfezionato da John T. Snow e altri della Purdue University, l'aria viene messa in rotazione da un pannello girevole nel compartimento inferiore. Quindi viene risucchiata nella camera principale, attraverso un grande foro centrale, dall'azione di una ventola alla sommità del dispositivo. Il congegno ha simulato molte caratteristiche dei tornado reali, come la distribuzione della pressione dell'aria in prossimità della superficie inferiore.

Reinterpretando i risultati di Ward, nel 1973 ho scoperto che il parametro cruciale per la formazione dei tornado è costituito dal rapporto  $S$  - utilizzato per la prima volta da W. Stephen Lewellen della West Virginia University - tra la velocità tangenziale al bordo del foro centrale (la quale viene controllata dalla rotazione del pannello) e la velocità media di risalita attraverso lo stesso foro (determinata dalla ventola). Per  $S$  inferiore a 0,1 non si formano vortici. Incrementando il valore del rapporto appare un vortice caratterizzato da un intenso getto ascensionale a bassi livelli (a destra). Per  $S$  maggiore di 0,45, il vortice diviene fortemente turbolento e presenta una corrente centrale in discesa circondata da una forte corrente ascensionale. Per  $S$  circa pari a 1, si forma una coppia di vortici ai lati opposti del vortice primario. Per rapporti ancora più alti, si sono potuti osservare fino a sei vortici supplementari.



Christopher R. Church, foto realizzata alla Purdue University. Tornado Vortex Chamber

re attorno a un asse nord-sud. Pertanto quest'aria ha una vorticità che segue il senso del moto, come un proiettile che ruota su se stesso attorno a un asse che coincide con la direzione del suo vettore di velocità.

Le porzioni d'aria caratterizzate da una vorticità di questo tipo hanno il loro asse di rotazione deviato verso l'alto quando entrano in una corrente ascensionale. Quindi la corrente-ascensionale nel suo insieme ruota in senso ciclonico. Questa teoria, proposta da Browning per primo nel 1963 e verificata analiticamente negli anni ottanta da Douglas K. Lilly dell'Università dell'Oklahoma e da me, spiega come la corrente ascensionale ruoti alle quote intermedie; non spiega però in che modo la rotazione si sviluppi in stretta prossimità del suolo. Come hanno mostrato nel 1985 le simulazioni di Klemp e di Richard Rotunno dell'NCAR, la rotazione a bassa quota dipende dalla corrente discensiva della supercella, raffreddata per evaporazione: non si sviluppa infatti quando l'evaporazione della pioggia viene «spenta» nella simulazione.

Le simulazioni hanno rivelato, sorprendentemente, che la rotazione a bassa quota si origina a nord del mesociclone, in aria subsidente moderatamente raffreddata dalla pioggia. Quando la rotazione a quote intermedie trascina la corrente discensiva in un moto ciclonico attorno alla corrente ascensionale, parte dell'aria fredda della corrente discensiva si sposta verso sud, con aria calda alla sua sinistra e aria molto più fredda alla sua destra. L'aria calda, essendo più leggera, trascina verso l'alto il fianco sinistro delle porzioni d'aria; l'aria fredda spinge verso il basso il fianco destro. Quindi l'aria fredda comincia a ruotare attorno alla sua direzione orizzontale di moto. Ma mentre scende, il suo asse di rotazione si inclina verso il basso, dando origine a un moto di rotazione in senso anticiclonico.

Harold E. Brooks, pure dell'NSSL, e io abbiamo dimostrato nel 1993 che, attraverso un meccanismo alquanto complesso, la rotazione dell'aria fredda subsidente inverte il proprio senso prima che l'aria abbia completato la sua discesa. Alla fine, a quote molto basse l'aria ruota in senso ciclonico. Quest'aria moderatamente fredda lambisce la superficie e viene risucchiata nella parte sudoccidentale della corrente ascensionale. Dal momento che il flusso verso la corrente ascensionale è convergente, l'aria ruota più velocemente, come una pattinatrice su ghiaccio che gira su se stessa più rapidamente accostando le braccia al corpo.

Pur avendo ben compreso il modo in cui la rotazione di grande scala si sviluppa alle medie e alle basse quote di un mesociclone, dovevamo ancora definire il meccanismo di formazione dei tornado. La spiegazione più semplice è che essi siano il risultato dell'attrito superfi-

## Detriti che viaggiano

Questa fotografia è stata trasportata per almeno 160 chilometri da un tornado che nel 1995 ha colpito Ardmore, in Oklahoma. Oggetti pesanti, come frammenti di un tetto, possono percorrere parecchie decine di chilometri; nel 1985 un'ala di aeroplano volò per oltre 15 chilometri. La maggior parte dei detriti ricade alla sinistra della traiettoria seguita dal tornado, spesso divisa in fasce ben definite secondo il peso.

Alcuni studiosi dell'Università dell'Oklahoma stanno raccogliendo dati sulla ricaduta degli oggetti, in modo da ottenere una stima del flusso dell'aria nell'ambito delle tempeste.

Sembra infatti che i vortici siano in grado di sollevare alcuni oggetti a parecchi chilometri di quota, in seno alla tempesta principale. I detriti leggeri possono ritornare a terra a oltre 300 chilometri di distanza dall'origine. Per esempio nell'aprile del 1979, alcuni assegni bancari volati via a Wichita Falls, nel Texas, furono ritrovati a Tulsa, in Oklahoma. E, secondo una testimonianza del 1953: «Emily McNutt di South Weymouth, nel Massachusetts, trovò un abito da sposa nel suo giardino. Era sporco, come prevedibile, ma intatto e in condizioni stranamente buone. Un'etichetta cucita nel vestito recitava "McDonald, Worcester", indicando che l'abito era stato trasportato dal vento per un'ottantina di chilometri prima di toccare terra». (Tratto da *Tornado!* di John M. O'Toole.)



Jimi Argo, SABA

ziale. Questa osservazione sembrerà paradossale, dal momento che l'attrito riduce solitamente la velocità del vento. Ma l'effetto dell'attrito è in questo caso simile a ciò che avviene quando si mescola una tazza di tè. La velocità e quindi la forza centrifuga vengono ridotte in uno strato sottile a contatto con il fondo della tazza, ma ciò fa sì che il liquido si muova verso l'interno lungo la base della tazza, come è reso evidente dalle foglioline di tè che tendono a raccogliersi al centro. Ma il liquido alla sommità di questo flusso centripeto ruota più velocemente avvicinandosi all'asse di rotazione, a causa dell'«effetto pattinatrice»: ne risulta un vortice lungo l'asse della tazza. W. Stephen Lewellen della West Virginia University conclude che le più alte velocità del vento in un tornado si localizzano nei primi 100 metri dalla superficie terrestre.

L'attrito spiega anche la persistenza dei vortici. Un tornado presenta un vuoto parziale al suo interno; la forza centrifuga impedisce che l'aria spiraleggi verso l'interno dai fianchi del vortice. Nel 1969 Bruce R. Morton della Monash University in Australia ha spiegato in che modo il vuoto riesca a conservarsi. Intense forze idrostatiche impediscono che l'aria acceda al vortice attraverso la sua sommità. Nei pressi del suolo, l'attrito riduce la velocità tangenziale e quindi la forza centrifuga, permettendo un afflusso d'aria forte, ma limitato in ampiezza, all'interno del vortice. L'attrito però limita anche i venti in ingres-

so, non consentendo che entri aria a sufficienza per colmare il vuoto. I tornado si intensificano e divengono più stabili quanto più vengono a contatto con il suolo, dato che il flusso d'aria verso il loro interno risulta via via più ridotto.

La teoria dell'attrito, comunque, non spiega perché l'abbozzo di un vortice nelle nubi qualche volta preceda di 10 o 20 minuti l'arrivo a terra di un tornado.

Molte tipiche caratteristiche dei tornado ci apparvero in tutta la loro evidenza quel 16 maggio nel Kansas. Mentre ci spostavamo verso la tempesta più a sud, in corrispondenza del villaggio di Hanston, stava ormai facendo buio e le operazioni volgevano al termine. Ma il coordinatore sul campo avvertì le squadre che una nube a parete in rapida rotazione era presente nelle nostre vicinanze. Mentre le sirene d'allarme iniziavano a ululare, scorgemmo un sottile tornado di forma serpeggiante mentre toccava terra circa cinque chilometri a sud-est della nostra posizione.

Facemmo allora una rapida inversione di marcia per portarci in avanti rispetto al tornado, senza accorgerci, nella foga del momento, di un profondo fossetto di scarico nella strada. Esso danneggiò una ruota e inclinò la nostra stazione meteorologica, ma riuscimmo a proseguire. Svoltammo su una pista in terra battuta per portarci a est verso il fianco settentrionale del tornado, che si era nel frattempo trasformato in un'ampia colonna di detriti, mentre la base

della nube che lo sormontava presentava un ribassamento di forma tondeggiante. Mentre passavamo davanti al tornado, esso si scompose in numerosi vortici più piccoli che ruotavano tutti furiosamente attorno all'asse centrale del tornado. (Nel 1967 Fujita aveva osservato che alcuni tornado si lasciano dietro parecchie fasce parzialmente sovrapposte di steli di granoturco abbattuti. Neil B. Ward, dell'NSSL, ha successivamente attribuito queste strane disposizioni proprio alla presenza di vortici supplementari.)

Ormai a corto di benzina fuggivamo dal vortice, preoccupati che la strada potesse terminare da un momento all'altro. Il tornado era forse a un chilometro e mezzo da noi, e non si spostava percettibilmente nell'ambito del nostro campo visuale: ciò indicava che stava puntando direttamente sul nostro veicolo a una velocità di almeno 50 chilometri all'ora. Il coordinatore sul campo ci venne in soccorso, informandoci dell'esistenza di una strada verso nord, che imboccammo non senza rivolgergli un pensiero di gratitudine. Ci fermammo dopo 1-2 chilometri per osservare il tornado, che era stato a contatto del suolo per almeno 22 chilometri e aveva assunto la forma di un tubo da stufa. Esso passò a sud della nostra posizione e scomparve nell'oscurità.

Riguardammo la base, con il veicolo danneggiato, dati incerti e pulsazioni cardiache ancora accelerate, ma sollevati nel venire a sapere che erano state raccolte straordinarie informazioni radar dal cielo e dal nuovo radar portatile a terra. Guardandoci indietro, potevamo ben tirare un respiro di sollievo: da cacciatori eravamo divenuti, per lunghi, terribili minuti, i cacciati.

ROBERT DAVIES-JONES, laureatosi in astrogeofisica all'Università del Colorado nel 1969, studia la dinamica e la genesi dei tornado al National Severe Storms Laboratory (NSSL) di Norman, nell'Oklahoma. È anche professore associato di meteorologia all'Università dell'Oklahoma, nonché condirettore del «Journal of the Atmospheric Sciences».

SNOW JOHN T., *The Tornado in «Scientific American»*, 250, n. 4, aprile 1984.

KESSLER EDWIN (a cura), *Thunderstorm Morphology and Dynamics*. seconda edizione, University of Oklahoma Press, 1986.

CHURCH C., BURGESS D., DOSWELL C. e DAVIES-JONES R., *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*, Geophysical Monograph n. 79, American Geophysical Union, 1993.

# LE SCIENZE

## raccoglitori

### 1995

Questi raccoglitori, ora disponibili, corrispondono ai volumi LIV e LV e rispettivamente ai fascicoli da gennaio (n. 317) a giugno (n. 322) e da luglio (n. 323) a dicembre (n. 328).

Sono ancora disponibili i raccoglitori dal Vol. XLVII al Vol. LIII e raccoglitori non numerati al posto di quelli esauriti.

I raccoglitori si possono richiedere direttamente all'editore usando l'apposita cartolina allegata alla rivista e unendo il relativo importo; gli ordini vengono evasi solo a pagamento avvenuto.

I raccoglitori si trovano anche presso i seguenti punti vendita:

BOLOGNA - Libreria Parolini - Via U. Bassi 14  
 FIRENZE - Libreria Marzocco - Via de' Martelli 22/R  
 GENOVA - Libreria Int. Di Stefano - Via R. Ceccardi 40/R  
 MILANO - Le Scienze S.p.A. - Piazza della Repubblica 8  
 NAPOLI - Libreria Guida A. - Via Port'Alba 20/21  
 PADOVA - Libreria Cortina - Via F. Marzolo 4  
 PALERMO - Libreria Dante - Quattro Canti di Città  
 ROMA - Libreria Feltrinelli - Via V. Emanuele Orlando 84  
 TORINO - Libreria Zanaboni - C.so Vittorio Emanuele 41

Ogni raccoglitore L. 8.000

