

Física de relâmpagos

Scholand e seus colegas na África do Sul foram os pioneiros em realizar medidas simultâneas dos processos de um relâmpago, ou seja, eles fotografaram e mediram o campo elétrico de um raio em 1934.

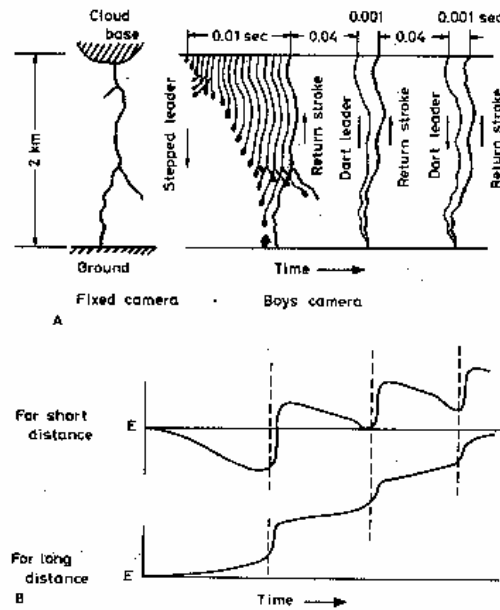


Fig. 75. Flashes resolved by Boys camera (A) and corresponding field changes (B).

No processo inicial de um relâmpago, um raio desce em pequenos caminhos e pára, após um intervalo de tempo pequeno ($\sim < 1 \mu\text{s}$) um novo raio se propaga para baixo utilizando o mesmo caminho do raio anterior, e assim se estende mais um pouco. Este processo continua até que o raio chegue ao chão. Este tipo de descarga atmosférica é conhecida como “stepped leader” ou líder escalonado (passos de $\sim 50\text{-}100 \text{ m}$, o tamanho é $\sim V/750$, onde V é o potencial kV/m). Sendo que as ramificações ocorrem, porém não chegam ao chão. Uma vez que o raio líder escalonado está próximo ao chão ($\sim 5 - 50 \text{ m}$) um raio se propaga do chão para o raio (raio conectante), formando o raio de retorno que é mais luminoso, sendo que ele é conhecido como “return stroke” ou descarga de retorno.

Analizando a Figure 75, observamos que o campo elétrico diminui a medida que o líder escalonado se aproxima do chão, enquanto que o campo elétrico aumenta se estivermos a uma distância grande. Quando o raio líder se conecta ao chão e temos uma descarga de retorno, o campo elétrico aumenta rapidamente para valores positivos. Esta configuração implica que as cargas negativas são transportadas para o chão através do canal do líder escalonado e as cargas positivas são transportadas para cima quando ocorre a descarga de retorno.

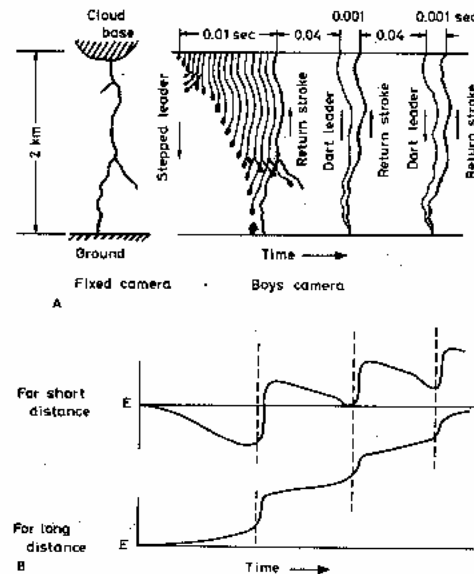


Fig. 75. Flashes resolved by Boys camera (A) and corresponding field changes (B).

a) Características de relâmpagos ou flashes

“Flash” é uma definição utilizada para caracterizar um evento de relâmpago formado pelo líder escalonado, descarga de retorno e descargas sub-sequentes (dart-leader). Sendo que em geral uma flash pode ter várias multiplicidades (uma descarga de retorno e várias descargas sub-sequentes).

	Mínimo	Médio	Máximo
Número de descargas	1	3	32
Intervalo de tempo entre as descargas (ms)	3	40	100
Duração do Flash (s)	0,02	0,2	2
Carga Transportada (C)	3	25	90

b) Mecanismos de ruptura na atmosfera (“breakdown”)

Os raios tem comprimentos da ordem de vários quilômetros. Se houver uma descarga da nuvem para a terra, uma voltagem grande é necessária para haver a ruptura.

Teorias sugerem que as descargas do tipo nuvem terra (NS ou CG) inciam com uma descarga local na nuvem entre os centros de cargas positivas e negativas. Esta descarga serviria então para dar mobilidade para o centro de cargas negativa, como também para o movimento para baixo.

A partir de medidas de laboratório observou-se o seguinte:

- i) O campo elétrico para a ruptura é da ordem de 300 kV/m para um campo uniforme em condições atmosféricas de T e P de um sala (30°C e 1000 mb). Porém para um campo elétrico não uniforme o campo elétrico é muito menor.

- ii) os elétrons estão sempre presentes no ar devido aos raios cósmicos e radioatividade natural. Quando ocorre a ruptura, esse elétrons são acelerados a uma energia suficiente para produzir a ionização através da colisão com as moléculas do ar, sendo que estes elétrons produzidos pela ionização produzem novos elétrons.

iii) quando os elétrons são produzidos por processos primários um segundo processo ocorre, o qual mais ionização ocorre através da colisão de íons+ e prótons emitidos pelo ar. Portanto este processo provoca uma avalanche de elétrons durante a ruptura do campo de intensidade.

Além desse processos são necessários campos de cargas de espaço, as quais aumentam a condutividade da região.

c) Líder Escalonado

Existem 2 tipos: α e β .

→ diâmetro do canal ~ 1-10 metros (estimado por fotografia)

→ corrente de vários amperes, o que induz uma corona muito luminosa

d) Descarga de retorno

Quando a ponta do líder escalonado carregado negativamente chega ao chão, a carga deste raio é transferida rapidamente para o chão.

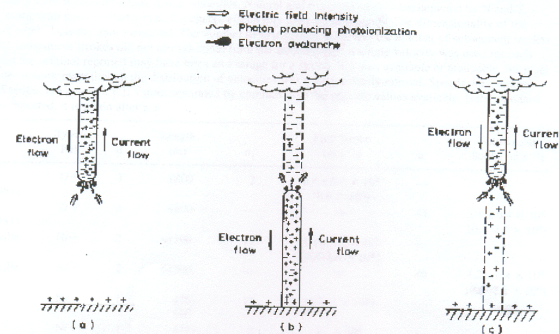


Fig. 77. Diagram showing general features of streamer mechanism. After Uman (1969). a. First leader. b. Return stroke. c. Dart leader. From "Lightning" by M.A. Uman (1969). Used with permission of McGraw-Hill Book Company.

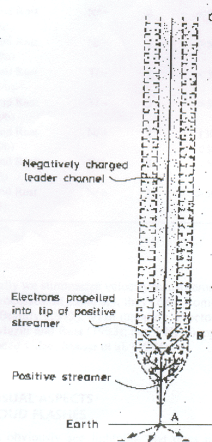


Fig. 78. Mechanism of return stroke. After Schonland (1958).

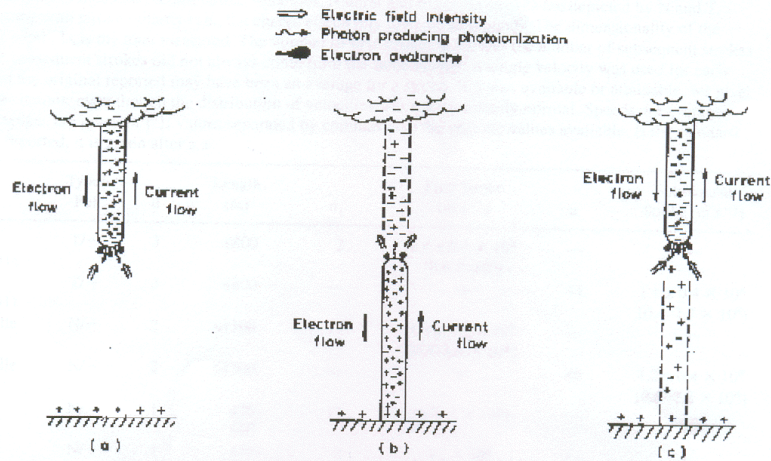


Fig. 77. Diagram showing general features of streamer mechanism. After Uman (1969). a. First leader. b. Return stroke. c. Dart leader. From "Lightning" by M.A. Uman (1969). Used with permission of McGraw-Hill Book Company.

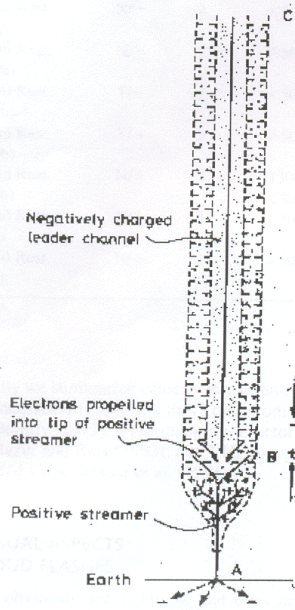


Fig. 78. Mechanism of return stroke. After Schonland (1938)

Portanto um campo elétrico grande é criado a partir do ponto B, no qual os elétrons livres se propagam na ponta e avançam na descarga positiva.

Os elétrons se movem a uma velocidade alta e quando eles se movem criam uma avalanche de elétrons que ioniza e aquece o ar no caminho e deixam para trás um canal altamente ionizado.

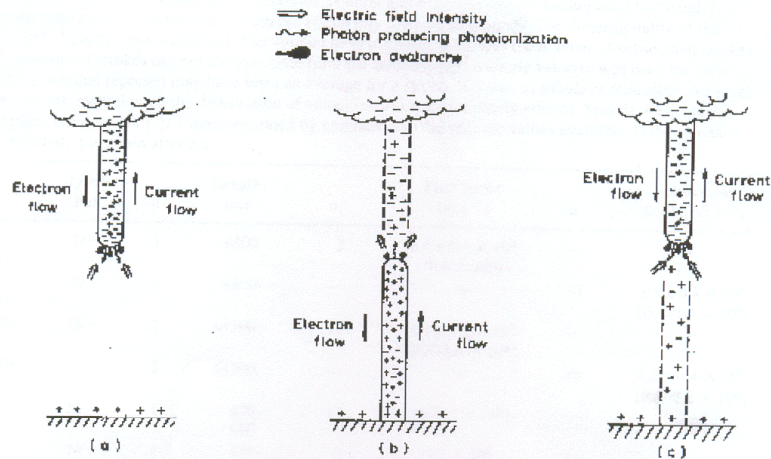


Fig. 77. Diagram showing general features of streamer mechanism. After Uman (1969). a. First leader. b. Return stroke. c. Dart leader. From "Lightning" by M.A. Uman (1969). Used with permission of McGraw-Hill Book Company.

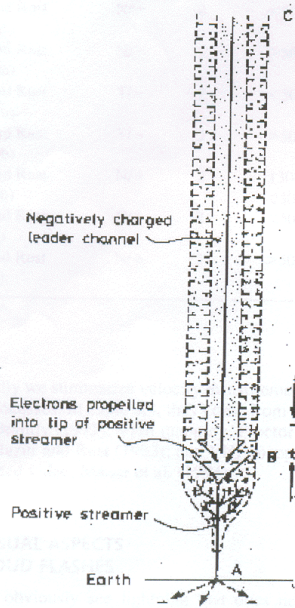


Fig. 78. Mechanism of return stroke. After Schonland (1938).

Como resultado, um fluxo positivo se moverá para cima a uma alta taxa de velocidade apesar os íons positivos serem relativamente imóveis. Desta forma, eles neutralizam as cargas negativas na região vaporizada e ramificações do líder escalonado.

Nessa transferência de cargas uma energia considerável sobre o núcleo é adicionada, logo a temperatura aumenta. Análises espectrais indicam que o núcleo chega a Temperatura de ~ 30.000 K.

Portanto a pressão aumenta já que a densidade de massa não pode aumentar apreciavelmente e assim a pressão cinética do canal excede a pressão do ar. Logo, o canal expande com velocidade super-sônicas, produzindo ondas de choque cilíndricas as quais eventualmente se tornam um trovão.

Table 5.1 Examples of measured return stroke velocities. Natural and triggered strokes are depicted by N and T, respectively, along with stroke polarity (i.e., the charge effectively lowered to ground). The dimensionality of the velocity is d . Length, L , is the total measured. The number of first strokes is n_1 , and the number of subsequent strokes is n_s . First and subsequent strokes did not always come from the same flashes. A single velocity was used for each stroke here, but the original reported may have been an average for a stroke. If it was available or attainable, we give the standard deviations, even though the distribution of velocities was not necessarily normal. Speeds are average values or/and ranges are given in { }; values separated by commas give the specific values available. If the standard deviation was reported, it is given after a \pm .

Investigators	Type/ Poi	d	Length (m)	n_1	First Stroke (m s^{-1})	n_s	Subsequent Stroke (m s^{-1})
Hubert and Mouget (1981)	T/-	3	≤ 800	2	$0.6 \pm 0.1 \times 10^8$ { 0.6×10^8 }	—	—
Hubert and Mouget (1981)	T/-	3	≤ 800	—	—	11	$1.1 \pm 0.4 \times 10^8$ { $0.4-1.7 \times 10^8$ }
Idone and Orville (1982)	N/-	2	≤ 1300	17	$1.0 \pm 0.5 \times 10^8$ { $0.3-2.4 \times 10^8$ }	—	—
Idone and Orville (1982)	N/-	2	≤ 1300	—	—	46	$1.2 \pm 0.4 \times 10^8$ { $0.6-2.2 \times 10^8$ }
Beasley et al. (1983a)	N/-	1	470- 690	17	{ $0.3-3 \times 10^8$ }	—	—
Beasley et al. (1983a)	N/+	1	470- 690	3	$\approx 1 \times 10^8$	—	—
Idone et al. (1984)	T/-	3	≤ 575	—	—	56	$1.2 \pm 0.3 \times 10^8$ { $0.67-1.7 \times 10^8$ }
Idone et al. (1987)	T/+	2	50	1	$\approx 1 \times 10^8$ $0.93, 1.0 \times 10^8$	—	—
Mach and Rust (1989b)	N/-	2	< 500	25	$1.7 \pm 0.7 \times 10^8$	43	$1.9 \pm 0.7 \times 10^8$
Mach and Rust (1989b)	N/-	2	> 500	25	$1.2 \pm 0.6 \times 10^8$	54	$1.2 \pm 0.2 \times 10^8$
Mach and Rust (1989b)	T/-	2	< 500	—	—	39	$1.4 \pm 0.4 \times 10^8$
Mach and Rust (1989b)	T/-	2	> 500	—	—	40	$1.2 \pm 0.2 \times 10^8$
Mach and Rust (1989b)	N/+	2	1300, 2300	2	$1.0, 1.7 \times 10^8$	—	—
Mach and Rust (1993)	N/+	2	< 500	4	$0.8 \pm 0.3 \times 10^8$ { $0.6-1.2 \times 10^8$ }	—	—
Mach and Rust (1993)	N/+	2	> 500	7	$0.9 \pm 0.4 \times 10^8$ { $0.6-1.7 \times 10^8$ }	—	—

e) Líder subsequente

Se as cargas negativas não são transferidas inteiramente durante uma descarga de retorno, o líder subsequente tomará lugar e se propagará no canal anterior do relâmpago a partir da nuvem para o solo.

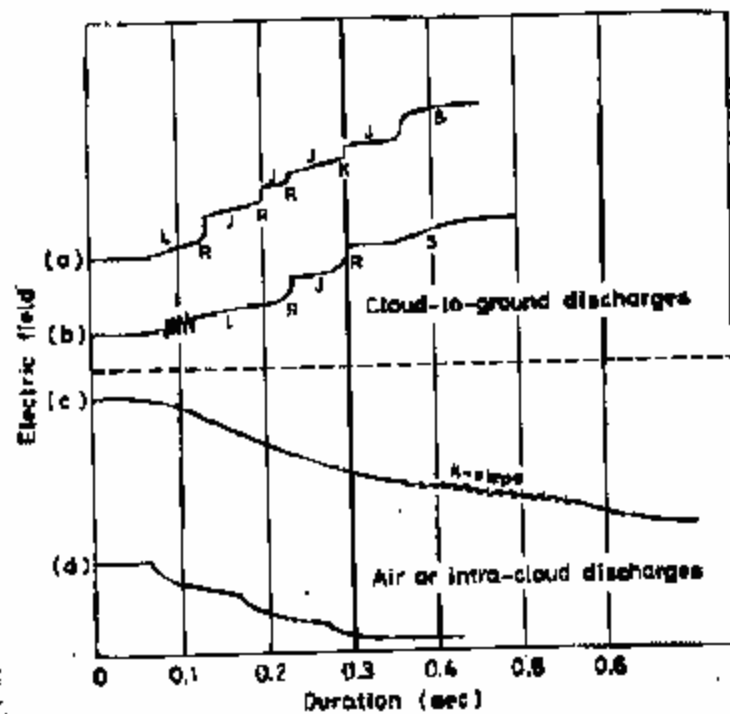


Fig. 79. Field changes due to cloud-to-ground discharges and intra-cloud discharges. From "The Physics of Clouds, II" by E.J. Mason (1971). Used with permission of Clarendon Press.

normal. Speeds are average values and/or ranges are given in { }; values separated by commas give the specific values available. If the standard deviation was reported, it is given after a \pm . The phenomenon is given as reported and can include more than one identifiable process (e.g., speed can include steps, pauses, etc.). The number, n, of events may be larger than the number of flashes.

Investigators	Phenomenon: Type/Polarity	d	Length (km)	n	Speed (m s^{-1})
Brantley et al. (1975)	Horizontal channels: N	2	—	13	$\{0.56-1.1 \times 10^4\}$
Proctor (1981)	Initial streamer: N/-	3	—	25	$1.3 \pm 0.3 \times 10^5$ $\{0.9-2.1 \times 10^5\}$
Proctor (1981)	Initial streamer: N/+	3	—	1	5×10^5
Proctor (1981)	Q noise: N	3	$\{0.1-4.4\}$	19	2.5×10^7 $\{0.25-4.4 \times 10^7\}$
Proctor (1983)	In-cloud channels: N/both	3	$\{1-90\}$	32	$1.4 \pm 1.2 \times 10^5$ $\{0.4-7.7 \times 10^5\}$
Mazur and Rust (1983)	Gross-in-cloud propagation: N	1	$\{\text{a few to } \geq 20\}$	1055	1×10^5 max. 2.5×10^5
Proctor et al. (1988)	Q noise: N	3	$\{0.3-3\}$	78	$8.7 \pm 6.8 \times 10^7$ $\{0.2-30 \times 10^7\}$
Proctor et al. (1988)	Horizontal retrogression: N	3	—	48	$2.2 \pm 1.3 \times 10^4$ $\{0.1-7 \times 10^4\}$
Mazur et al.	Horizontal: N/-	3	—	1	$\{2-4 \times 10^5\}$

Table 5.2 Measured velocities of stepped leaders. Type refers to natural and triggered lightning flashes, respectively, N and T. Polarity refers to polarity of charge brought to ground by the flash. The dimensionality of the velocity is d . Distance, D , is above the ground, and length, L , is the total leader length measured. If it was available or attainable, we give the standard deviations, even though the velocities are not necessarily distributed normally. Speeds are average values and/or ranges are given in { }; values separated by commas give the specific values available. If the standard deviation was reported, it is given after a \pm .

Investigators	Phenomenon: Type/Polarity	d	Distance or Length	n	Speed (m s^{-1})
Orville and Idone (1982)	Stepped leader: N/-	2	$D < 200 \text{ m}$	3	1.1×10^6
Beasley et al. (1983b)	Stepped leader: N/-	1	$D < 100 \text{ m}$	3	$\{0.8\text{--}3.9 \times 10^6\}$
Proctor et al. (1988)	Stepped leader: N/-	3	$L = 6.4 \pm 2.3 \text{ km}$	66	$1.6 \pm 0.7 \times 10^5$ $\{0.3\text{--}4.2 \times 10^5\}$
Idone (1990)	Upward connecting leader: T/-	2	$L < 20 \text{ m}$	9	$1.3 \pm 0.6 \times 10^7$ $\{0.15\text{--}2.1 \times 10^7\}$
Idone (1992)	Downward stepped leader: T/-	2	—	1	3.1×10^5
Idone (1992)	Upward stepped leader: T/+	2	$L = 530 \text{ m}$	1	3.6×10^5 $\{1.2\text{--}6.5 \times 10^5\}$
Idone (1992)	Step pulses: T/+	2	$L = 600, 400 \text{ m}$	1	$5, 7 \times 10^7$

Table 5.3 Measured velocities of dart leaders. Type refers to natural and triggered lightning (N and T). Polarity is the reported polarity of charge that moved. The dimensionality of the velocity is d . Distance, D , is from the ground, and length, L , is the total leader length (or segment, if noted) measured. If it was available or attainable, we give the standard deviations, even though the distribution of velocities was not necessarily normal. Speeds are average values and/or ranges are given in { }; values separated by commas give the specific values available. If the standard deviation was reported, it is given after a \pm .

Investigators	Phenomenon: Type/Polarity	d	Length	n	Speed (m s^{-1})
Orville and Idone (1982)	Dart leader: N/-	2	$D < 800 \text{ m}$	21	1.1×10^7 { $0.29-2.3 \times 10^7$ }
Idone et al. (1984)	Dart leader: T	3	{segment $L = 15-90 \text{ m}$ }	32	2.0×10^7 { $0.95-4.3 \times 10^7$ }
Jordan et al. (1992)	Dart leader: N	2	{ $L = 700-1400 \text{ m}$ }	9	$1.5 \pm 0.5 \times 10^7$ { $0.8-2.4 \times 10^7$ }
Jordan et al. (1992)	Dart leader: T	2	{ $L = 400-700 \text{ m}$ }	36	$1.6 \pm 0.9 \times 10^7$ { $0.6-3.4 \times 10^7$ }
Jordan et al. (1992)	Dart-stepped leader: N	2	{ $L = 700-1400 \text{ m}$ }	2	$0.54, 1.2 \times 10^7$
Orville and Idone (1982)	Dart-stepped leader: N	2	$D < 800 \text{ m}$	4	{ $0.2-0.46 \times 10^7$ }