

## Contribución a los fundamentos de la teoría de conjuntos transfinitos.

[**Beiträge zur Begründung der  
transfiniten Mengenlehre.**  
*Mathematische Annalen*  
46 (1895) 481-512; 49 (1897) 207-246].

*Georg Cantor*

Traducción del alemán por Luis Miguel Villegas Silva.  
Revisión técnica de Clara H. Sánchez B. y Gonzalo Serrano.  
Corregido por Carlos Lingan Pérez.

*“Hypotheses non fingo.” [Newton]*

*“Neque enim leges intellectui aut rebus damus  
ad arbitrium nostrum, sed tanquam scribae fideles  
ab ipsius naturae voce latas et prolatas excipimus  
et describimus.”*

*“Veniet tempus, quo ista quae nunc latent, in  
lucem dies extrahat et longioris aevi diligentia.”*

[481]

### §1.

#### La noción de cardinalidad o número cardinal.

Por ‘conjunto’ entendemos cualquier colección  $M$  de objetos determinados  $m$  distinguibles entre sí por nuestra experiencia o nuestro pensamiento (que llamaremos los ‘elementos’ de  $M$ ) que conforman un todo.

En símbolos expresamos esto mediante:

$$(1) \quad M = \{m\}.$$

La unión de varios conjuntos  $M, N, P, \dots$ , que no tengan elementos en común, para conformar uno sólo la denotamos como

$$(2) \quad (M, N, P, \dots).$$

---

---

Los elementos de este conjunto son entonces los elementos de  $M$ , de  $N$ , de  $P$ , etcétera.

Llamamos ‘parte’ o ‘subconjunto’ de un conjunto  $M$  a cualquier otro conjunto  $M_1$ , cuyos elementos son a la vez elementos de  $M$ .

Si  $M_2$  es una parte de  $M_1$ , y  $M_1$  una parte de  $M$ , entonces  $M_2$  es también una parte de  $M$ .

Cada conjunto  $M$  tiene una potencia o cardinalidad que llamaremos número cardinal.

*La ‘cardinalidad’ o el ‘número cardinal’ de  $M$  es la noción general, que con ayuda de nuestro intelecto surge del conjunto  $M$ , y que es independiente de la naturaleza de sus distintos elementos  $m$  y del orden en que se encuentran.*

[482] El resultado de este doble proceso de abstracción, la cardinalidad o el número cardinal de  $M$ , lo denotamos con

$$(3) \quad \overline{M}.$$

Puesto que cada elemento  $m$ , sin considerar su índole, forma una ‘unidad’, el número cardinal mismo  $\overline{M}$  es un conjunto formado exclusivamente por unidades, que existe en nuestro espíritu como una imagen virtual o una proyección del conjunto dado  $M$ .

Llamaremos ‘equivalentes’ a dos conjuntos  $M$  y  $N$ , lo que denotamos como

$$(4) \quad M \sim N \text{ o } N \sim M,$$

cuando es posible relacionarlos de tal forma que cada elemento de uno de ellos corresponde a uno y sólo un elemento del otro.

A cada parte  $M_1$  de  $M$  corresponde entonces una determinada parte equivalente  $N_1$  de  $N$  y viceversa.

Si se tiene tal correspondencia entre dos conjuntos equivalentes, ésta se puede modificar en varias formas (excepto en el caso en que cada uno de los conjuntos consista en un sólo elemento). A saber, siempre se puede tomar la prescripción de que un elemento particular  $m_0$  de  $M$  corresponde a un cierto elemento  $n_0$  de  $N$ . Porque si de acuerdo a la correspondencia original, el elemento  $m_0$  no está asociado a  $n_0$ , sino que  $m_0$  está asociado al elemento  $n_1$  de  $N$  y el elemento  $n_0$  al elemento  $m_1$  de  $M$ , entonces se considera la correspondencia modificada, en la que  $m_0$  está relacionado con  $n_0$  así como  $n_1$  con  $m_1$  y para el resto de los elementos se preserva la correspondencia original. Con esto se alcanza la meta original.

Cada conjunto es equivalente a sí mismo:

$$(5) \quad M \sim M.$$

Si dos conjuntos son equivalentes a un tercero, entonces también son equivalentes entre sí:

$$(6) \quad \text{de } M \sim P \text{ y } N \sim P \text{ se deduce } M \sim N.$$

Es de gran importancia que dos conjuntos  $M$  y  $N$  tengan el mismo número cardinal cuando y sólo cuando son equivalentes:

$$(7) \quad \text{de } M \sim N \text{ se deduce } \overline{\overline{M}} = \overline{\overline{N}}$$

y

$$(8) \quad \text{de } \overline{\overline{M}} = \overline{\overline{N}} \text{ se deduce } M \sim N.$$

Así que la equivalencia de conjuntos proporciona el criterio necesario y suficiente para la igualdad de sus números cardinales.

[483] De hecho, de acuerdo con la definición anterior de cardinalidad el número cardinal  $\overline{\overline{M}}$  permanece invariable cuando se sustituye un elemento o varios o incluso todos los elementos  $m$  de  $M$  por otro objeto.

Ahora, si  $M \sim N$ , entonces existe una correspondencia a través de la cual  $M$  y  $N$  se relacionan entre sí; en tal situación a cada elemento  $m$  de  $M$  corresponde un elemento  $n$  de  $N$ . En consecuencia, podemos pensar que cada elemento  $m$  de  $M$  se sustituye por el elemento  $n$  de  $N$ , con lo que se transforma  $M$  en  $N$  sin cambio del número cardinal; por consiguiente,

$$(8) \quad \overline{\overline{M}} = \overline{\overline{N}}.$$

El recíproco del teorema se obtiene al observar que entre los elementos de  $M$  y las distintas unidades de su número cardinal  $\overline{\overline{M}}$  existe una correspondencia mutua unívoca. Porque, como se observa,  $\overline{\overline{M}}$  surge de  $M$ , de tal forma que de cada elemento  $m$  de  $M$  se obtiene una unidad particular de  $\overline{\overline{M}}$ . Por ello podemos decir que

$$(9) \quad M \sim \overline{\overline{M}}.$$

De la misma forma  $N \sim \overline{\overline{N}}$ . Por lo que si  $\overline{\overline{M}} = \overline{\overline{N}}$ , se sigue de (6) que  $M \sim N$ .

También podemos derivar directamente de la noción de equivalencia el siguiente teorema:

Si  $M, N, P, \dots$ , son conjuntos que no tienen elementos en común,  $M', N', P', \dots$  son conjuntos de tal característica y se cumple

$$M \sim M', N \sim N', P \sim P', \dots,$$

entonces siempre se cumple que

$$(M, N, P, \dots) \sim (M', N', P', \dots).$$

## §2.

**‘Menor’ y ‘mayor’ entre números cardinales.**

Si se satisfacen las dos condiciones siguientes para dos conjuntos  $M$  y  $N$  con número cardinal  $a = \overline{M}$  y  $b = \overline{N}$  y si:

- 1) no existe ninguna parte de  $M$  equivalente a  $N$ ,
- 2) existe una parte  $N_1$  de  $N$ , tal que  $N_1 \sim M$ ,

entonces, primero es claro que lo mismo sigue siendo válido cuando se sustituyen  $M$  y  $N$  por conjuntos equivalentes  $M'$  y  $N'$ ; *por consiguiente esas condiciones expresan una cierta relación entre los números cardinales  $a$  y  $b$ .*

[484] Además, está excluida la equivalencia de  $M$  y  $N$ , es decir, la igualdad de  $a$  y  $b$ ; en caso contrario se tendría  $M \sim N$ , de donde se deduciría, ya que  $N_1 \sim M$ , que  $N_1 \sim N$  por lo que debería existir una parte  $M_1$  de  $M$ , puesto que  $M \sim N$ , tal que  $M_1 \sim M$ , y también  $M_1 \sim N$ , lo que contradice la condición 1).

Tercero, la relación de  $a$  con  $b$  es tal que la misma relación de  $b$  con  $a$  es imposible; pues si en 1) y 2) intercambiamos los papeles de  $M$  y  $N$ , se originan dos relaciones contradictorias entre sí.

Expresamos de la siguiente forma la relación de  $a$  con  $b$  caracterizada por las condiciones 1) y 2):  $a$  es menor que  $b$ , o también:  $b$  es mayor que  $a$ , en símbolos

$$(1) \quad a < b \quad \text{o} \quad b > a.$$

Se prueba fácilmente que

$$(2) \quad \text{si } a < b, b < c, \text{ entonces siempre se cumple } a < c.$$

También se sigue sin dificultad de la definición, que si  $P_1$  es una parte del conjunto  $P$ , de  $a < \overline{P_1}$  siempre se deduce que  $a < \overline{P}$  y de  $\overline{P} < b$  siempre se sigue que también  $\overline{P_1} < b$ .

Hemos visto que en las tres relaciones

$$a = b, a < b, b < a$$

cada una excluye a las otras dos.

*Por el contrario, de ninguna manera se sobreentiende, y difícilmente puede ser demostrado en este momento de nuestra disertación, que entre cualesquiera dos números cardinales  $a$  y  $b$  se deba cumplir alguna de esas relaciones.*

Sólo después que hayamos analizado la sucesión creciente de los números cardinales transfinitos y tengamos conocimientos sobre las relaciones entre ellos, se obtendrá la veracidad del teorema:

A. 'Si  $a$  y  $b$  son dos números cardinales arbitrarios, entonces se cumple  $a = b$  o  $a < b$  o  $a > b$ '.

Fácilmente se derivan de este teorema los siguientes, de los que por el momento no podemos hacer uso:

B. 'Si dos conjuntos  $M$  y  $N$  se conforman de tal manera que  $M$  es equivalente a una parte  $N_1$  de  $N$  y  $N$  es equivalente a una parte  $M_1$  de  $M$ , entonces también  $M$  y  $N$  son equivalentes'.

C. 'Si  $M_1$  es una parte del conjunto  $M$ ,  $M_2$  una parte del conjunto  $M_1$ , y los conjuntos  $M_2$  y  $M$  son equivalentes, entonces  $M_1$  también es equivalente a  $M$  y  $M_2$ '.

D. 'Si para dos conjuntos  $M$  y  $N$  se satisface la condición de que  $N$  no es equivalente a  $M$  ni a una parte de  $M$ , entonces existe una parte  $N_1$  de  $N$ , que es equivalente a  $M$ '.

E. 'Cuando dos conjuntos  $M$  y  $N$  no son equivalentes, y existe una parte  $N_1$  de  $N$ , equivalente con  $M$ , entonces ninguna parte de  $M$  es equivalente con  $N$ '.

[485]

### §3.

#### La adición y multiplicación de cardinales.

La unión de dos conjuntos  $M$  y  $N$ , que no tienen elementos en común, se denotó en §1, (2) con  $(M, N)$ . La llamamos el 'conjunto unión de  $M$  y  $N$ '.

Si  $M'$  y  $N'$  son otros dos conjuntos sin elementos en común, y se cumple  $M \sim M'$ ,  $N \sim N'$ , entonces se observa que también se cumple

$$(M, N) \sim (M', N').$$

De lo anterior se sigue que el número cardinal de  $(M, N)$  sólo depende de los números cardinales  $\overline{M} = a$  y  $\overline{N} = b$ .

Esto conduce a la definición de la suma de  $a$  y  $b$ , si hacemos

$$(1) \quad a + b = \overline{(M, N)}.$$

Ya que la noción de cardinalidad es independiente del orden de los elementos, se sigue sin dificultad que

$$(2) \quad a + b = b + a$$

y para cualesquiera tres números cardinales  $a, b, c$

$$(3) \quad a + (b + c) = (a + b) + c.$$

Ahora atendemos la multiplicación.

Cada elemento  $m$  de un conjunto  $M$  se puede enlazar con cada elemento  $n$  de otro conjunto  $N$  para formar un nuevo elemento  $(m, n)$ ; para el conjunto de todos estos enlaces  $(m, n)$  introducimos la notación  $(M \cdot N)$ . Llamamos a este conjunto “el conjunto de enlaces de  $M$  y  $N$ ”. Se tiene entonces

$$(4) \quad (M \cdot N) = \{(m, n)\}.$$

Se verifica también que la cardinalidad de  $(M \cdot N)$  sólo depende de las cardinalidades  $\overline{M} = a$ ,  $\overline{N} = b$ ; porque, si se sustituyen los conjuntos  $M$  y  $N$  por conjuntos equivalentes a ellos

$$M' = \{m'\} \quad \text{y} \quad N' = \{n'\}$$

y se consideran  $m, m'$  así como  $n, n'$  como elementos asociados, el conjunto

$$M' \cdot N' = \{(m', n')\}$$

se puede poner en correspondencia mutua unívoca con  $(M \cdot N)$ , si se consideran asociados los elementos  $(m, n)$  y  $(m', n')$ ; así, se cumple que

$$(5) \quad (M' \cdot N') \sim (M \cdot N).$$

Ahora definimos el producto  $a \cdot b$  mediante la ecuación:

$$(6) \quad a \cdot b = \overline{(M \cdot N)}.$$

[486] Un conjunto con número cardinal  $a \cdot b$  se puede generar a partir de dos conjuntos  $M$  y  $N$  con números cardinales  $a$  y  $b$  mediante la siguiente prescripción: se parte del conjunto  $N$  y se sustituye en él cada elemento  $n$  por un conjunto  $M_n \sim M$ ; si se colectan los elementos de todos estos conjuntos  $M_n$  en un todo  $S$ , entonces se verifica fácilmente que

$$(7) \quad S \sim (M \cdot N),$$

en consecuencia,

$$\overline{S} = a \cdot b.$$

Pues dada una correspondencia entre los conjuntos equivalentes  $M$  y  $M_n$ , denotamos con  $m$  al elemento de  $M$  correspondiente a  $m_n$ , así que

$$(8) \quad S = \{m_n\},$$

por lo que se pueden poner en correspondencia recíproca unívoca los conjuntos  $S$  y  $(M \cdot N)$ , relacionando el elemento  $m_n$  con el elemento  $(m, n)$ .

De nuestras definiciones se siguen fácilmente los teoremas:

$$(9) \quad a \cdot b = b \cdot a,$$

$$(10) \quad a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$$

(11)  $a(b + c) = ab + ac$ ,  
 porque

$$\begin{aligned}(M \cdot N) &\sim (N \cdot M), \\ (M \cdot (N \cdot P)) &\sim ((M \cdot N) \cdot P), \\ (M \cdot (N, P)) &\sim ((M \cdot N), (M \cdot P)).\end{aligned}$$

La adición y multiplicación de cardinales están sujetas a las leyes generales de conmutatividad, asociatividad y distributividad.

#### §4.

##### Exponenciación de cardinales.

Por una ‘valuación del conjunto  $N$  con elementos del conjunto  $M$ ’ o expresado en forma más simple, por una ‘valuación de  $N$  en  $M$ ’ entenderemos una ley, mediante la cual cada elemento  $n$  de  $N$  está asociado a un determinado elemento  $m$  de  $M$ , donde un mismo elemento de  $M$  puede utilizarse repetidamente. El elemento de  $M$  asociado a  $n$  es en cierto sentido una función unívoca de  $n$  y se puede denotar, digamos con  $f(n)$ ; ella se llama ‘función valuación de  $n$ ’; la valuación correspondiente de  $N$  se denota  $f(N)$ .

[487] Dos valuaciones  $f_1(N)$  y  $f_2(N)$  se dicen iguales cuando y sólo cuando para cada elemento  $n$  de  $N$  se satisface la ecuación

$$(1) \quad f_1(n) = f_2(n),$$

de tal suerte, que si para algún elemento  $n = n_0$  no se cumple esta ecuación,  $f_1(N)$  y  $f_2(N)$  se consideran valuaciones de  $N$  distintas.

Por ejemplo, si  $m_0$  es un elemento particular de  $M$ , se puede imponer que para toda  $n$

$$f(n) = m_0;$$

esta ley constituye una valuación particular de  $N$  en  $M$ .

Otro tipo de valuación se obtiene cuando  $m_0$  y  $m_1$  son dos elementos distintos de  $M$ ,  $n_0$  un elemento de  $N$  y se prescribe

$$\begin{aligned}f(n_0) &= m_0, \\ f(n) &= m_1\end{aligned}$$

para toda  $n$  que sea distinta de  $n_0$ .

La totalidad de las valuaciones de  $N$  en  $M$  conforman un conjunto con elementos  $f(N)$ ; llamamos a este conjunto el ‘conjunto de valuaciones de  $N$  en  $M$ ’ y lo denotamos por  $(N|M)$ . Se tiene que

$$(2) \quad (N|M) = \{f(N)\}.$$

Si  $M \sim M'$  y  $N \sim N'$ , se deduce fácilmente que

$$(3) \quad (N | M) \sim (N' | M').$$

El número cardinal de  $(N | M)$  depende sólo de los números cardinales  $\overline{M} = a$  y  $\overline{N} = b$ ; él nos sirve para definir el exponente  $a^b$ :

$$(4) \quad a^b = \overline{(N | M)}.$$

Para tres conjuntos arbitrarios  $M, N$  y  $P$  se demuestran con facilidad los teoremas:

$$(5) \quad ((N | M) \cdot (P | M)) \sim ((N, P) | M),$$

$$(6) \quad ((P | M) \cdot (P | N)) \sim ((P | (M \cdot N))),$$

$$(7) \quad (P | (N | M)) \sim ((P \cdot N) | M),$$

de los que, si se establece  $\overline{P} = c$ , por (4) y teniendo en cuenta §3 obtenemos los teoremas siguientes para números cardinales arbitrarios  $a, b$  y  $c$ :

$$(8) \quad a^b \cdot a^c = a^{b+c}$$

$$(9) \quad a^c \cdot b^c = (a \cdot b)^c$$

$$(10) \quad (a^b)^c = a^{b \cdot c}.$$

[488] Qué tan valiosas y trascendentes son estas fórmulas sobre cardinalidades, se reconoce en los siguientes ejemplos:

Denotemos con  $\sigma$  la cardinalidad del continuo lineal  $X$  (es decir, la totalidad  $X$  de los números reales  $x, \geq 0$  y  $\leq 1$ ), se deduce sin dificultad que este se puede representar entre otras formas, mediante la ecuación

$$(11) \quad \sigma = 2^{\aleph_0}$$

donde el significado de  $\aleph_0$  se aclara en §6.

De hecho, según (4),  $2^{\aleph_0}$  no es otra cosa que la cardinalidad de todas las representaciones

$$(12) \quad x = \frac{f(1)}{2} + \frac{f(2)}{2^2} + \dots + \frac{f(v)}{2^v} + \dots \quad (\text{donde } f(v) = 0 \text{ ó } 1)$$

de los números  $x$  en sistema binario. Notemos que cada número  $x$  sólo tiene una representación con excepción de los números

$$x = \frac{2v+1}{2^v} < 1$$

que se representa en dos formas, entonces tenemos, si denotamos con  $\{s_v\}$  la totalidad 'numerable' de estos, primero

$$2^{\aleph_0} = \overline{(\{s_v\}, X)}.$$

Si de  $X$  quitamos algún conjunto 'numerable'  $\{t_v\}$  y denotamos el resto con  $X_1$ , se cumple que



$$\begin{aligned} X &= (\{t_v\}, X_1) = (\{t_{2v-1}\}, \{t_{2v}\}, X_1), \\ (\{s_v\}, X) &= (\{s_v\}, \{t_v\}, X_1), \\ \{t_{2v+1}\} &\sim \{s_v\}, \{t_{2v}\} \sim \{t_v\}, X_1 \sim X_1, \end{aligned}$$

con lo que

$$X \sim (\{s_v\}, X),$$

así que (§1)

$$2^{\aleph_0} = \overline{\overline{X}} = \sigma.$$

De (11) se sigue al elevar al cuadrado que (§6, (6))

$$\sigma \cdot \sigma = 2^{\aleph_0} \cdot 2^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0 + \aleph_0} = 2^{\aleph_0} = \sigma$$

y después de multiplicar repetidamente por  $\sigma$

$$(13) \quad \sigma^v = \sigma,$$

donde  $v$  es un número cardinal finito.

Si se eleva ambos lados de (11) a la potencia  $\aleph_0$ , se obtiene

$$\sigma^{\aleph_0} = (2^{\aleph_0})^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0 \cdot \aleph_0}.$$

Pero según §6, (8)  $\aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0$ , por lo que

$$(14) \quad \sigma^{\aleph_0} = \sigma.$$

Las fórmulas (13) y (14) no tienen otro significado que: “Tanto el continuo  $n$ -dimensional como el  $\aleph_0$ -dimensional tienen la cardinalidad del continuo unidimensional”. Así que *todo el contenido* del trabajo en el volumen 84 del Crelle’s Journal, pág. 242 *se deriva de las fórmulas elementales del cálculo de cardinalidades en forma puramente algebraica*.

[489]

### §5.

#### Los números cardinales finitos

Primero se debe mostrar como los principios expuestos, sobre los cuales se basará después la teoría de los números cardinales infinitos o transfinitos, también proporcionan la fundamentación más corta, natural y formal de la teoría de números finitos.

Un único objeto  $e_0$ , cuando lo consideramos como un conjunto  $E_0 = \{e_0\}$ , corresponde al número cardinal que llamamos ‘uno’ y denotamos con 1; tenemos

$$(1) \quad 1 = \overline{\overline{E_0}}.$$

Ahora se une con  $E_0$  otro objeto  $e_1$ , el conjunto unión se llama  $E_1$ , de tal suerte que

$$(2) \quad E_1 = (E_0, e_1) = (e_0, e_1).$$

El número cardinal de  $E_1$  se llama 'dos' y se denota con 2:

$$(3) \quad 2 = \overline{\overline{E_1}}.$$

Mediante la adición de nuevos elementos obtenemos la sucesión no acotada de conjuntos

$$E_2 = (E_1, e_2), \quad E_3 = (E_2, e_3), \dots,$$

que nos proporciona los restantes, denotados 3, 4, 5, . . . así llamados *números cardinales finitos*. El uso de los mismos números como índices se justifica porque un número se usa con este significado una vez que se ha introducido como número cardinal. Tenemos, si por  $v - 1$  se entiende el número que antecede inmediatamente a  $v$  en la sucesión que,

$$(4) \quad v = \overline{\overline{E_{v-1}}},$$

$$(5) \quad E_v = (E_{v-1}, e_v) = (e_0, e_1, \dots, e_v).$$

De la definición de suma en §3 se sigue que

$$(6) \quad \overline{\overline{E_v}} = \overline{\overline{E_{v-1}}} + 1,$$

es decir, cada número cardinal finito (excepto 1) es la adición del inmediato previo y el 1.

De nuestra disertación resaltan los siguientes tres teoremas:

A. "Los miembros de la sucesión no acotada de números cardinales finitos

$$1, 2, 3, \dots, v, \dots$$

son distintos entre sí (es decir, la condición de equivalencia planteada en §1 no se satisface entre los conjuntos correspondientes)".

[490] B. "Cada uno de estos números  $v$  es mayor que sus predecesores y menor que sus sucesores (§2)."

C. "No existe un número cardinal que esté, por su magnitud, entre dos consecutivos  $v$  y  $v + 1$  (§2)".

La demostración de estos teoremas se basa en los siguientes teoremas D y E, que primero se deben justificar.

D. "Si  $M$  es un conjunto con la propiedad de que ninguno de sus subconjuntos tenga la misma cardinalidad que él, entonces también el conjunto  $(M, e)$ , que se obtiene de  $M$  mediante la adición de un único elemento nuevo  $e$ , tiene la propiedad de que ninguno de sus subconjuntos tiene la misma cardinalidad que él."

E. "Si  $N$  es un conjunto con cardinalidad finita  $v$ ,  $N_1$  un subconjunto de  $N$ , entonces el número cardinal de  $N_1$  es igual a alguno de los números previos  $1, 2, 3, \dots, v-1$ ."

Demostración de D. Supongamos que existe un conjunto  $(M, e)$ , uno de cuyos subconjuntos, llamémosle  $N$ , tiene la misma cardinalidad que él, entonces se distinguen dos casos, y ambos conducen a una contradicción:

1) El conjunto  $N$  contiene  $e$  como elemento; sea  $N = (M_1, e)$ ; entonces  $M_1$  es un subconjunto de  $M$ , porque  $N$  es un subconjunto de  $(M, e)$ . Como vimos en §1, la correspondencia supuesta entre los conjuntos  $(M, e)$  y  $(M_1, e)$  se puede modificar de tal forma que el elemento  $e$  de uno corresponde al mismo elemento  $e$  del otro; en consecuencia,  $M$  y  $M_1$  se pueden hacer corresponder en forma unívoca. Pero esto contradice la hipótesis de que  $M$  y su subconjunto  $M_1$  no pueden tener la misma cardinalidad.

2) El subconjunto  $N$  de  $(M, e)$  no contiene a  $e$  como elemento, entonces  $N$  es  $M$  o un subconjunto de  $M$ . Respecto a la correspondencia entre  $(M, e)$  y  $N$ , supongamos que el elemento  $e$  del primero corresponde al elemento  $f$  del último. Sea  $N = (M_1, f)$ ; entonces  $M$  estará en mutua correspondencia unívoca con  $M_1$ ; pero  $M_1$  es, como subconjunto de  $N$ , un subconjunto de  $M$ . Tendríamos entonces también aquí un subconjunto equivalente con  $M$ , contrario a la hipótesis.

Demostración de E. Se supone la validez del teorema hasta un cierto  $v$  y se deducirá, como a continuación, la validez para el sucesor  $v+1$ .

Como conjunto con número cardinal  $v+1$  se coloca el conjunto  $E_v = (e_0, e_1, \dots, e_v)$ ; si el teorema es correcto para éste, entonces sin más de (§1) se deduce su validez para cualquier otro conjunto con el mismo número cardinal  $v+1$ . Sea  $E'$  un subconjunto de  $E_v$ ; distinguimos los siguientes casos:

[491]

1)  $E'$  no contiene a  $e_v$  como elemento, entonces  $E'$  es  $E_{v-1}$  o una parte de  $E_{v-1}$ , por lo que tiene como número cardinal  $v$  o alguno de los números  $1, 2, 3, \dots, v-1$ , porque hemos supuesto correcto nuestro teorema para el conjunto  $E_{v-1}$  con número cardinal  $v$ .

2)  $E'$  consiste en únicamente el elemento  $e_v$ , entonces  $\overline{\overline{E'}} = 1$ .

3)  $E'$  consiste en  $e_v$  y un conjunto  $E''$ , de tal forma que  $E' = (E'', e_v)$ .  $E''$  es una parte de  $E_{v-1}$ , por lo que tiene, según hipótesis, como número cardinal alguno de los números  $1, 2, 3, \dots, v-1$ .

Ahora, se cumple  $\overline{\overline{E'}} = \overline{\overline{E''}} + 1$ , por lo que  $E'$  tiene como número cardinal alguno de los números  $2, 3, \dots, v$ .

Demostración de A. Cada uno de los conjuntos que denotamos  $E_v$  tiene la propiedad de que no es equivalente a ninguno de sus subconjuntos. Pues si se supone que esto se cumple para un cierto  $v$ , se deduce del Teorema D que también se cumple para el sucesor  $v + 1$ .

Para  $v = 1$  se reconoce de inmediato que el conjunto  $E_1 = (e_0, e_1)$  no es equivalente a ninguno de sus subconjuntos que en este caso son  $(e_0)$  y  $(e_1)$ .

Consideremos ahora dos números  $\mu$  y  $\nu$  arbitrarios de la sucesión 1, 2, 3, . . . donde  $\mu$  aparece primero,  $\nu$  es posterior, entonces  $E_{\mu-1}$  es un subconjunto de  $E_{\nu-1}$ ; por lo tanto  $E_{\mu-1}$  y  $E_{\nu-1}$  no son equivalentes; los números cardinales asociados  $\mu = \overline{\overline{E_{\mu-1}}}$  y  $\nu = \overline{\overline{E_{\nu-1}}}$  no son entonces iguales.

Demostración de B. Si de los números cardinales finitos  $\mu$  y  $\nu$  el primero antecede al último, entonces  $\mu < \nu$ . Pues si consideramos los conjuntos  $M = E_{\mu-1}$  y  $N = E_{\nu-1}$ , entonces se satisfacen para ellos las dos condiciones en §2 para que se satisfaga  $\overline{\overline{M}} < \overline{\overline{N}}$ . La condición 1) se cumple porque, según el Teorema E, un subconjunto de  $M = E_{\mu-1}$  tiene como número cardinal uno sólo de los números 1, 2, 3, . . .  $\mu - 1$ , por lo que no puede ser equivalente al conjunto  $N = E_{\nu-1}$ , según el Teorema A. La condición 2) se satisface pues aquí  $M$  mismo es un subconjunto de  $N$ .

Demostración de C. Sea  $\alpha$  un número cardinal menor que  $\nu + 1$ . Por la condición 2) de §2 existe un subconjunto de  $E_\nu$  con número cardinal  $\alpha$ . Según el Teorema E, para un subconjunto de  $E_\nu$  aparece sólo uno de los números 1, 2, 3, . . .  $\nu$  como número cardinal.

Así que  $\alpha$  es igual a uno de los números 1, 2, 3, . . .  $\nu$ .

De acuerdo con el Teorema B ninguno de estos es mayor que  $\nu$ .

Por consiguiente, no existe número cardinal  $\alpha$  que sea menor que  $\nu + 1$  y mayor que  $\nu$ .

Posteriormente será importante el siguiente Teorema:

F. “Si  $K$  es un conjunto de distintos números cardinales finitos, entonces entre ellos existe uno  $\kappa_1$  que es menor que el resto, es decir, es el menor de todos ellos”.

[492]

Demostración. El conjunto  $K$  contiene al número 1, entonces este es el menor,  $\kappa_1 = 1$ ; o no lo contiene. En el último caso sea  $J$  el conjunto de todos aquellos números cardinales de la sucesión 1, 2, 3, . . . que son menores a los que aparecen en  $K$ . Si un número  $\nu$  pertenece a  $J$ , entonces también pertenece a  $J$  todos los números  $< \nu$ .

Entonces  $J$  debe tener un elemento  $\nu_1$  tal que  $\nu_1 + 1$  y, por consiguiente todos los mayores que él, no pertenecen a  $J$ , pues en caso contrario  $J$  contendría la totalidad de todos los números finitos, mientras que los

pertenecientes a  $K$  no están en  $J$ . El conjunto  $J$  no es otra cosa que el segmento  $(1, 2, 3, \dots, v_1)$ . El número  $v_1 + 1 = \kappa_1$  es necesariamente un elemento de  $K$  menor que el resto.

De  $F$  se deduce que:

G. "Cada conjunto  $K = \{\kappa\}$  de números cardinales finitos distintos se puede representar en forma de sucesión:

$$K = (\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \dots)$$

con

$$\kappa_1 < \kappa_2 < \kappa_3 < \dots"$$

### §6.

#### El menor número cardinal transfinito Álef cero

Los conjuntos con número cardinal finito se llaman '*conjuntos finitos*', todos los demás los llamaremos '*conjuntos transfinitos*' y los números cardinales asociados a ellos '*números cardinales transfinitos*'.

La totalidad de los *números cardinales finitos*  $v$  nos proporciona el ejemplo más cercano de un conjunto transfinito; al número cardinal asociado a él lo llamamos (§1) '*Álef cero*', en símbolos  $\aleph_0$ , así que establecemos

$$(1) \quad \aleph_0 = \overline{\{v\}}.$$

Que  $\aleph_0$  es un número *transfinito*, es decir, que no es igual a *ningún* número *finito*  $\mu$ , se sigue del hecho simple, de que si se añade un nuevo elemento  $e_0$  al conjunto  $\{v\}$ , el conjunto unión  $(\{v\}, e_0)$  es equivalente al que lo originó  $\{v\}$ . Porque se puede pensar una relación recíproca unívoca entre ambos, donde el elemento  $e_0$  se asocia al elemento 1 del segundo y el elemento  $v$  del primero al elemento  $v + 1$  del segundo. Según §3 tenemos entonces

$$(2) \quad \aleph_0 + 1 = \aleph_0.$$

En §5 se demostró que (para  $\mu$  finito)  $\mu + 1$  siempre es distinto de  $\mu$ , por lo que  $\aleph_0$  no es igual a ningún número finito  $\mu$ .

El número  $\aleph_0$  es mayor que cualquier número finito  $\mu$ :

$$(3) \quad \aleph_0 > \mu.$$

[493] Esto se sigue, considerando §3, de que  $\mu = \overline{\overline{(1, 2, 3, \dots, \mu)}}$ , ningún subconjunto de  $(1, 2, 3, \dots, \mu)$  es equivalente al conjunto  $\{v\}$  y  $(1, 2, 3, \dots, \mu)$  es él mismo un subconjunto de  $\{v\}$ .

Por otro lado  $\aleph_0$  es el menor número cardinal transfinito.

Si  $a$  es un número cardinal transfinito distinto de  $\aleph_0$ , entonces se cumple

$$(4) \quad \aleph_0 < \alpha.$$

Esto se basa en el siguiente teorema:

A. 'Todo conjunto transfinito  $T$  tiene un subconjunto con número cardinal  $\aleph_0$ '.

Demostración. Si se ha eliminado, mediante alguna regla, una cantidad finita de elementos  $t_1, t_2, \dots, t_{v-1}$  de  $T$ , siempre queda la posibilidad de eliminar otro elemento  $t_v$ . El conjunto  $\{t_v\}$ , donde  $v$  representa un número cardinal finito arbitrario, es un subconjunto de  $T$  con número cardinal  $\aleph_0$ , pues  $\{t_v\} \sim \{v\}$  (§1).

B. 'Si  $S$  es un conjunto transfinito con número cardinal  $\aleph_0$ ,  $S_1$  es un subconjunto transfinito de  $S$ , entonces también se cumple  $\overline{S_1} = \aleph_0$ '.

Demostración. Supongamos que  $S \sim \{v\}$ ; denotemos con  $s_v$  al elemento de  $S$  que corresponde al elemento  $v$  del conjunto  $\{v\}$  respecto a la correspondencia biunívoca entre ambos conjuntos, así que

$$S = \{s_v\}.$$

El subconjunto  $S_1$  de  $S$  consiste en ciertos elementos  $s_\aleph$  de  $S$ , y la totalidad de los números  $\aleph$  conforma un subconjunto transfinito  $K$  del conjunto  $\{v\}$ . Según el Teorema G, §5 el conjunto  $K$  se puede representar como la sucesión

$$K = \{\kappa_v\},$$

donde

$$\kappa_v < \kappa_{v+1},$$

por lo que también tenemos

$$S_1 = \{s_{\kappa_v}\}.$$

De lo anterior se deduce que  $S_1 \sim S$ , por lo que  $\overline{S_1} = \aleph_0$ .

De A y B se obtiene la fórmula (4) en vista de §2.

De (2) concluimos, mediante la adición de 1 en ambos lados, que

$$\aleph_0 + 2 = \aleph_0 + 1 = \aleph_0,$$

y si repetimos esta observación,

$$(5) \quad \aleph_0 + v = \aleph_0.$$

Pero también tenemos

$$(6) \quad \aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0.$$

[494]

Pues según (1) de §3,  $\aleph_0 + \aleph_0$  es el número cardinal de  $\overline{\overline{\{a_v\}, \{b_v\}}}$ , porque

$$\overline{\{a_v\}} = \overline{\{b_v\}} = \aleph_0.$$

Ahora, es evidente que se cumple

$$\begin{aligned} \{v\} &= (\{2v-1\}, \{2v\}), \\ (\{2v-1\}, \{2v\}) &\sim (\{a_v\}, \{b_v\}), \end{aligned}$$

por lo que

$$\overline{(\{a_v\}, \{b_v\})} = \overline{\{v\}} = \aleph_0.$$

La Ecuación (6) se puede escribir también como:

$$\aleph_0 \cdot 2 = \aleph_0,$$

y si añadimos repetidamente  $\aleph_0$  de ambos lados se encuentra que

$$(7) \quad \aleph_0 \cdot v = v \cdot \aleph_0 = \aleph_0.$$

Pero también tenemos

$$(8) \quad \aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0.$$

Demostración. Según (6) de §3,  $\aleph_0 \cdot \aleph_0$  es el número cardinal del conjunto enlace

$$\{(\mu, \nu)\}$$

donde  $\mu$  y  $\nu$  son números cardinales finitos independientes entre sí. Si también  $\lambda$  representa un número cardinal finito arbitrario (de tal forma que  $\{\lambda\}$ ,  $\{\mu\}$  y  $\{\nu\}$  son representaciones distintas de la misma totalidad de los números cardinales finitos), entonces debemos mostrar que

$$\{(\mu, \nu)\} \sim \{\lambda\}.$$

Denotemos  $\mu + \nu$  con  $\rho$ , entonces  $\rho$  toma la totalidad de valores numéricos  $2, 3, 4, \dots$ , y existen en total  $\rho - 1$  elementos  $(\mu, \nu)$ , para los cuales  $\mu + \nu = \rho$ , a saber,

$$(1, \rho - 1), (2, \rho - 2), \dots, (\rho - 1, 1).$$

En esta sucesión se piensa primero que se pone un elemento  $(1, 1)$  para el cual  $\rho = 2$ , entonces ambos elementos para los cuales  $\rho = 3$ , después los tres elementos para los que  $\rho = 4$ , etcétera, así se obtiene la totalidad de elementos  $(\mu, \nu)$  en forma de una sucesión simple:

$$(1, 1); (1, 2), (2, 1); (1, 3), (2, 2), (3, 1); (1, 4), (2, 3), \dots,$$

y de hecho, aparece en la posición  $\lambda$ , como se verifica fácilmente, el elemento  $(\mu, \nu)$ , donde

$$(9) \quad \lambda = \mu + \frac{(\mu + \nu - 1)(\mu + \nu - 2)}{2}$$

$\lambda$  toma cada valor numérico 1, 2, 3, . . . una vez; según (9) se origina una relación unívoca recíproca entre los conjuntos  $\{\lambda\}$  y  $\{(\mu, \nu)\}$ . Si se multiplica ambos lados de la ecuación (8) por  $\aleph_0$ , se obtiene

[495]

$$\aleph_0^3 = \aleph_0^2 = \aleph_0$$

y mediante multiplicación repetida por  $\aleph_0$  logramos la ecuación, válida para cada número cardinal finito  $\nu$ :

$$(10) \quad \aleph_0^\nu = \aleph_0$$

Los Teoremas E y A de §5 conducen a los teoremas sobre conjuntos finitos:

C. “*Todo conjunto finito E tiene la propiedad de que no es equivalente a ninguno de sus subconjuntos*”.

Este teorema se contrapone fuertemente al siguiente para conjuntos transfinitos:

D. “*Todo conjunto transfinito T tiene la propiedad de que contiene un subconjunto  $T_1$  equivalente a él*”.

Demostración. Según el Teorema A de este párrafo existe un subconjunto  $S = \{t_\nu\}$  de  $T$  con número cardinal  $\aleph_0$ . Sea  $T = (S, U)$ , de tal suerte que  $U$  consiste en los elementos de  $T$  distintos de los  $t_\nu$ . Hacemos  $S_1 = \{t_{\nu+1}\}$ ,  $T_1 = (S_1, U)$ , entonces  $T_1$  es un subconjunto de  $T$ , de hecho se obtiene eliminando el elemento  $t_1$  de  $T$ . Puesto que  $S \sim S_1$  (teorema B de este párrafo) y  $U \sim U$ , entonces también (§1)  $T \sim T_1$ . En estos Teoremas C y D aparece la diferencia esencial entre conjuntos finitos e infinitos en la forma más nítida, que ya fue mencionada en el año 1877 en el Volumen 84 del *Crelle's Journal* pág. 242.

Una vez que hemos introducido el menor de los números cardinales transfinitos  $\aleph_0$  y que hemos deducido sus propiedades más inmediatas, surge la pregunta sobre los números cardinales mayores y su generación a partir de  $\aleph_0$ .

Se debe mostrar que los números cardinales transfinitos se pueden ordenar de acuerdo a su magnitud y que con este orden, como en el caso de los finitos, conforman un “*conjunto bien ordenado*” en sentido amplio.

Después de  $\aleph_0$  aparece, de acuerdo a una regla determinada, el siguiente número cardinal  $\aleph_1$ , después de éste aparece, según la misma regla, el siguiente más grande  $\aleph_2$ , y así sucesivamente.

Pero incluso la sucesión no acotada de números cardinales



$$\aleph_0, \aleph_1, \aleph_2, \dots, \aleph_\nu, \dots$$

no abarca a todos los números cardinales transfinitos. Se demostrará la existencia de un número cardinal, que denotaremos con  $\aleph_\omega$ , que se identifica como el más inmediato mayor a todos los  $\aleph_\nu$ ; de él continuamos, como en el paso de  $\aleph_0$  a  $\aleph_1$ , a uno mayor inmediato  $\aleph_{\omega+1}$ , y así se continúa sin fin.

[496] Para cada número cardinal transfinito  $\alpha$  existe un inmediato mayor, de acuerdo a una única regla; pero también para cada conjunto creciente no acotado y bien ordenado  $\{a\}$  de números cardinales transfinitos  $\alpha$  existe un número cardinal inmediato mayor determinado en forma uniforme.

Para formalizar este resultado encontrado en el año 1882 y publicado en el escrito "Fundamentos de una teoría general de variedades", así como en el Volumen 21 de *Math. Annalen* nos serviremos de los así llamados "tipos ordinales" cuya teoría debemos desarrollar en los siguientes parágrafos.

### §7.

#### El tipo ordinal de los conjuntos simplemente ordenados

Llamamos a un conjunto  $M$  'simplemente ordenado', si se establece entre sus elementos  $m$  una cierta 'jerarquía', respecto a la cual, para cualesquiera dos elementos  $m_1$  y  $m_2$ , uno tiene 'menor' y el otro tiene 'mayor' jerarquía y de tal forma que para cualesquiera tres elementos  $m_1$ ,  $m_2$  y  $m_3$ , si digamos  $m_1$  tiene menor jerarquía que  $m_2$  y éste menor que  $m_3$ , entonces siempre se cumple que  $m_1$  tiene menor jerarquía que  $m_3$ .

La relación entre dos elementos  $m_1$  y  $m_2$ , respecto a la cual  $m_1$  tiene la menor,  $m_2$  la mayor jerarquía, se expresa mediante la fórmula

$$(1) \quad m_1 \prec m_2, \quad m_2 \succ m_1.$$

Así por ejemplo, en una recta infinita cada conjunto definido de puntos  $P$  es un conjunto simplemente ordenado, si a cada dos puntos arbitrarios  $p_1$  y  $p_2$  se le otorga menor jerarquía a aquel, cuya coordenada (fijando un origen y una dirección positiva) sea la menor.

Es evidente que un conjunto se puede 'ordenar simplemente' en muy distintas maneras. Consideremos como ejemplo el conjunto  $R$  de todos los números racionales positivos  $\frac{p}{q}$  (donde  $p$  y  $q$  son primos relativos), mayores que cero pero menores que 1, entonces se tiene una jerarquía 'natural' de acuerdo a su magnitud. Pero también se pueden ordenar (y con este nuevo orden denotaremos al conjunto con  $R_0$ ) de tal forma que dos números

$$\frac{p_1}{q_1} \text{ y } \frac{p_2}{q_2}$$

para los cuales las sumas  $p_1 + q_1$  y  $p_2 + q_2$  toman valores diferentes, el número que obtiene el menor rango jerárquico es aquel para el cual la suma respectiva es la menor, y que cuando  $p_1 + q_1 = p_2 + q_2$ , entonces el menor es, el menor de ambos racionales.

[497] Puesto que un valor de  $p + q$  corresponde a solamente una cantidad finita de números racionales distintos  $\frac{p}{q}$ , en esta jerarquía nuestro conjunto tiene claramente la forma:

$$R_0 = (r_1, r_2, \dots, r_v, \dots) = \left( \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{2}{3}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{2}{5}, \frac{3}{4}, \dots \right),$$

donde

$$r_v < r_{v+1}.$$

Siempre que hablemos de un conjunto  $M$  ordenado simplemente, pensemos que subsiste una *jerarquía bien determinada* en el sentido recién definido entre sus elementos.

Existen conjuntos 2-, 3-,  $v$ ,  $\alpha$ -ordenados, pero de éstos prescindiremos por el momento en nuestra investigación. Por ello utilizamos la abreviación ‘conjunto ordenado’, pensando en realidad en un ‘conjunto simplemente ordenado’.

A cada conjunto ordenado  $M$  se le asocia un ‘tipo ordinal’ determinado o, en forma abreviada, un determinado ‘tipo’, que denotamos como

$$(2) \quad \overline{M};$$

ésta es la *noción general*, que se obtiene de  $M$ , prescindiendo de la naturaleza de los elementos  $m$ , pero considerando la jerarquía entre ellos.

Mas aún, el tipo ordinal  $\overline{M}$  es él mismo un conjunto ordenado, cuyos elementos son unidades, que adquieren la misma jerarquía que sus correspondientes elementos en  $M$ , de los cuales se obtuvieron mediante abstracción.

Llamamos a dos conjuntos ordenados  $M$  y  $N$  ‘similares’, cuando se pueden poner en correspondencia recíproca unívoca y dados dos elementos  $m_1, m_2$  de  $M$  y sus correspondientes elementos  $n_1, n_2$  en  $N$ , la relación jerárquica entre  $m_1$  y  $m_2$  en  $M$  es la misma que entre  $n_1$  y  $n_2$  en  $N$ . A tal correspondencia entre conjuntos similares la llamamos un ‘aplicación’ entre ellos. Así corresponde cada subconjunto  $M_1$  de  $M$  (que es claramente también un conjunto ordenado) a un subconjunto similar  $N_1$  de  $N$ .

La similitud de dos conjuntos ordenados  $M$  y  $N$  la expresamos mediante la fórmula:

$$(3) \quad M \approx N .$$

*Cada conjunto ordenado es similar a sí mismo.*

*Si dos conjuntos ordenados son similares a un tercero, son similares entre sí.*

[498] Mediante una sencilla reflexión concluimos que *dos conjuntos ordenados tienen el mismo tipo ordinal cuando y sólo cuando son similares, de tal forma que las fórmulas*

$$(4) \quad \overline{M} = \overline{N}, \quad M \approx N$$

*son consecuencia una de la otra.*

Si se abstrae en un tipo ordinal  $\overline{M}$  también de la jerarquía entre sus elementos, entonces se concluye que (§<sub>1</sub>) el número cardinal  $\overline{\overline{M}}$  del conjunto ordenado  $M$  es igual al número cardinal del tipo ordinal  $\overline{M}$ .

De  $\overline{M} = \overline{N}$  siempre se deduce que  $\overline{\overline{M}} = \overline{\overline{N}}$ , es decir, los conjuntos ordenados del mismo tipo siempre tienen la misma cardinalidad; la similitud entre conjuntos ordenados siempre da lugar a su equivalencia. Por el contrario, dos conjuntos ordenados pueden ser equivalentes, sin ser similares.

Para denotar los tipos ordinales recurrimos a las letras minúsculas del alfabeto griego.

Si  $\alpha$  es un tipo ordinal, entonces entenderemos por

$$(5) \quad \overline{\alpha}$$

el número cardinal asociado.

Los tipos ordinales de conjuntos finitos simplemente ordenados no ofrecen ningún interés especial. Pues es fácil comprobar, que para un número cardinal finito  $\nu$  todos los conjuntos simplemente ordenados de esa cardinalidad son similares entre sí, así que tienen el mismo tipo. Los tipos ordinales finitos simples se generan por las mismas reglas que los números cardinales finitos, y se permite usar los mismos símbolos  $1, 2, 3, \dots, \nu, \dots$ , aunque la noción sea distinta a la de número cardinal.

Muy distinto es el comportamiento de los *tipos ordinales transfinitos*; pues para un mismo número cardinal transfinito existe una cantidad innumerable de tipos distintos de conjuntos simplemente ordenados de esa cardinalidad, que al reunirlos constituyen una '*clase de tipos*' particular.

Cada una de estas clases de tipos está determinada entonces por un número cardinal transfinito  $\alpha$ , que es común a cada uno de los tipos pertenecientes a la clase; por ello abreviamos y le llamamos clase tipo  $[\alpha]$ .

La primera de ellas, que se nos presenta en forma natural y cuyo análisis completo será la siguiente meta de la teoría de conjuntos transfinitos, es la clase tipo  $[\aleph_0]$ , que comprende todos los tipos con el menor número cardinal transfinito  $\aleph_0$ .

[499] Debemos distinguir entre el número cardinal  $\alpha$ , que determina a la clases tipo  $[\alpha]$  y el número cardinal  $\alpha'$ , que está *determinado a su vez por la clase tipo*  $[\alpha]$ ; él es el número cardinal que (§1) surge de la clase tipo  $[\alpha]$ , en tanto que ésta represente un conjunto *bien definido, cuyos elementos son los tipos  $\alpha$  con número cardinal  $\alpha$* . Después veremos que  $\alpha'$  es distinta de  $\alpha$  y de hecho, siempre es mayor que  $\alpha$ .

Si invertimos la jerarquía entre los elementos de un conjunto ordenado  $M$ , de tal forma que en todas partes remplazamos un 'menor' por un 'mayor' y cada 'mayor' por un 'menor', obtenemos otra vez un conjunto ordenado que denotamos con:

$$(6) \quad *M$$

y lo llamamos el 'inverso' de  $M$ .

El tipo ordinal de  $*M$  lo denotamos, cuando  $\alpha = \bar{M}$ , como

$$(7) \quad *\alpha$$

Puede ocurrir que  $*\alpha = \alpha$ , como por ejemplo en los tipos ordinales finitos o con el tipo del conjunto  $R$  de todos los números racionales, que son mayores que 0 y menores que 1, con su jerarquía natural, que con la notación  $\eta$  investigaremos.

Notamos además que dos conjuntos ordenados similares se pueden aplicar entre sí ya sea en una *sola* forma o en *varias* formas; en el primer caso el tipo asociado es similar a sí mismo en una sola forma, en el otro caso en varias formas.

Entonces no sólo los tipos finitos, sino también los tipos de 'conjuntos bien ordenados' transfinitos, que nos ocuparán después y que llamaremos "números ordinales transfinitos", son del tipo que permiten una sola aplicación sobre sí mismos. Por el contrario, el tipo  $\eta$  es similar a sí mismo en una cantidad innumerable de formas.

Queremos aclarar esta diferencia con dos ejemplos sencillos.

Por  $\omega$  entendemos el tipo de un conjunto bien ordenado

$$(e_1, e_2, \dots, e_\nu, \dots),$$

en el que

$$e_\nu < e_{\nu+1}$$

y donde  $\nu$  recorre todos los números cardinales finitos.

Otro conjunto bien ordenado

$$(f_1, f_2, \dots, f_\nu, \dots)$$

con la condición

$$f_v \prec f_{v+1}$$

con tipo  $\omega$  puede ser ‘aplicado’ con el primero sólo cuando  $e_v$  y  $f_v$  se corresponden. Pues para respetar jerarquías el primer elemento  $e_1$  debe corresponder a  $f_1$  respecto a la aplicación, el segundo  $e_2$  que jerárquicamente sigue a  $e_1$  debe corresponder a  $f_2$  que es el sucesor de  $f_1$ , etcétera.

[500] Cualquier otra correspondencia unívoca recíproca entre ambos conjuntos equivalentes  $\{e_v\}$  y  $\{f_v\}$  no es una ‘aplicación’, en el sentido que hemos definido antes para la teoría de tipos.

Tomemos, por otro lado, un conjunto ordenado de la forma

$$\{e_{v'}\},$$

donde  $v'$  recorre todos los números enteros positivos y negativos con excepción del cero y donde se cumple

$$e_{v'} \prec e_{v'+1}$$

Este conjunto no tiene, jerárquicamente, menor ni mayor elemento. Su tipo es, según la definición de suma dada en §8,

$$*\omega + \omega.$$

Él es similar a sí mismo en una cantidad innumerable de formas.

Pues consideremos un conjunto del mismo tipo

$$\{f_{v'}\},$$

donde

$$f_{v'} \prec f_{v'+1},$$

entonces se pueden corresponder ambos conjuntos de tal forma que, si  $v'_0$  es uno de los números  $v'$ , al elemento  $e_{v'}$  del primer conjunto le corresponde el elemento  $f_{v'_0+v'}$  del segundo. De la arbitrariedad de  $v'_0$  se sigue que existen una cantidad infinita de tales aplicaciones.

La noción recién desarrollada de ‘tipo ordinal’ comprende, cuando se traslada en forma similar a conjuntos ordenados de orden superior, junto con la noción introducida en §1 de número ‘cardinal o cardinalidad’, todo lo ‘enumerable’ que sea imaginable y, en este sentido, no permite mayores generalizaciones. No contiene nada arbitrario, sino que es la generalización natural de la noción de contar. *Es importante resaltar que el criterio de igualdad (4) se sigue necesariamente de la noción de tipo ordinal, por lo que no permite ninguna enmienda.* El menosprecio de esta situación es la causa principal de graves errores,

que se encuentran en la obra del Sr. Veronese *Grundzüge der Geometrie* (traducida al alemán por A. Schepp, Leipzig 1894).

[501] En la pág. 30 se define la “cantidad o número de un grupo ordenado” totalmente en coincidencia con lo que nosotros hemos llamado el “tipo ordinal de un conjunto simplemente ordenado”. (*Zur Lehre von Transfiniten*, Halle 1890, págs. 68-75, Reproducción del *Zeitschrift f. Philos.* u. philos. Kritik, del año 1887).

Al criterio de igualdad el Sr. V. considera que debe añadirle un suplemento. El dice en la pág. 31: “Números, cuyas unidades se corresponden unívocamente y en el mismo orden y *ninguno de los cuales es igual a una parte del otro, son iguales*”.<sup>1</sup>

Esta definición de igualdad da lugar a un *círculo vicioso*, por lo que conduce a un *absurdo*.

¿Qué quiere decir en el suplemento “*no ser igual a una parte del otro*”?

Para responder a esta pregunta, se debe saber de antemano cuándo dos números son o no iguales. *Así que su definición de igualdad (sin tener en cuenta su arbitrariedad) presupone una definición de igualdad que a su vez presupone una definición de igualdad, para la cual se debe saber de antemano que es igual y distinto, etcétera, hasta el infinito.*

Una vez que el Sr. V. ha *dado libremente* en tal forma el nada superfluo fundamento para la comparación de números, no debe sorprender la falta de formalidad en la que él a continuación opera con sus números pseudotransfinitos y les atribuye a estos últimos propiedades que por razones simples no pueden poseer, porque ellos, no pueden existir (exceptuando en el papel), en la forma que él pretende. También con esto se explica la similitud que tiene su construcción de los números con el trabajo realmente absurdo “*unendliche Zahlen*” de Fontenelle que se presenta en su *Géometrie de L’Infini*, Paris, 1727.

Hace poco el Sr. W. Killing ha expresado, por suerte, sus objeciones contra los fundamentos del Libro de Veronese en el *Index lectionum* de la Academia en Münster, (1895-1896).<sup>2</sup>

1. La edición original en italiano (pág. 27) dice literalmente: “Numeri le unità dei quali si corrispondono univocamente e nel medesimo ordine, e di cui l’uno non è parte o uguale ad una parte dell’ altro, sono uguali.”

2. Veronese contestó a esto en el *Math Ann*, vol XLVII, 1897, pp. 423-432. Cf. Killing, *ibid*, vol. XLVIII, 1897, pp. 425-432.

## §8.

**Suma y multiplicación de tipos ordinales**

El conjunto unión  $(M, N)$  de dos conjuntos  $M$  y  $N$  se puede ver como un conjunto ordenado cuando ambos son ordenados, dejando la jerarquía entre elementos de  $M$  igual, lo mismo que la jerarquía entre los elementos de  $N$ , y estableciendo que los elementos de  $M$  tienen menor jerarquía que los de  $N$ . Si  $M'$  y  $N'$  son otros dos conjuntos ordenados,  $M \simeq M'$ , [502]

$N \simeq N'$ , entonces también se cumple  $(M, N) \simeq (M', N')$ ; el tipo ordinal de  $(M, N)$  depende entonces tan sólo de los tipos ordinales  $M = \alpha$ ,  $N = \beta$ ; así, definimos

$$(1) \quad \alpha + \beta = \overline{(M, N)}.$$

En la suma  $\alpha + \beta$ ,  $\alpha$  se llama el 'Augendus', mientras que  $\beta$  el 'Addendus'.

Para tres tipos de ordinales arbitrarios se demuestra fácilmente la ley asociativa

$$(2) \quad \alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma.$$

Por el contrario, la ley conmutativa no se cumple en general respecto a la adición de tipos. Esto se observa en el siguiente ejemplo sencillo:

Si  $\omega$  es el tipo, ya mencionado en §7, del conjunto bien ordenado

$$E = (e_1, e_2, \dots, e_v, \dots), \quad e_v \prec e_{v+1},$$

entonces  $1 + \omega$  no es igual a  $\omega + 1$ .

Pues si  $f$  es un elemento nuevo, se tiene según (1)

$$1 + \omega = \overline{(f, E)},$$

$$\omega + 1 = \overline{(E, f)}.$$

El conjunto

$$(f, E) = (f, e_1, e_2, \dots, e_v, \dots)$$

es similar al conjunto  $E$ , por consiguiente

$$1 + \omega = \omega.$$

Por el contrario, los conjuntos  $E$  y  $(E, f)$  no son similares, pues el primero no tiene mayor elemento, respecto a su jerarquía, mientras que el último conjunto tiene al elemento  $f$  como el mayor. Por lo tanto,  $\omega + 1$  es distinto de  $\omega = 1 + \omega$ .

A partir de dos conjuntos ordenados  $M$  y  $N$  con tipos  $\alpha$  y  $\beta$  se puede formar un conjunto ordenado  $S$  de haciendo que en  $N$  cada elemento  $n$

sea sustituido por un conjunto ordenado  $M_n$  con el mismo tipo  $\alpha$  que  $M$ , por lo que

$$(3) \quad \overline{M}_n = \alpha,$$

y la jerarquía en

$$(4) \quad S = \{M_n\}$$

se determina de acuerdo a:

1) dos elementos de  $S$ , que pertenezcan al mismo conjunto  $M_n$ , conservan en  $S$  la jerarquía que tenían en  $M_n$ ,

2) dos elementos de  $S$  que pertenezcan a dos conjuntos  $M_{n_1}$  y  $M_{n_2}$ , distintos, obtienen en  $S$  la jerarquía que tenían  $n_1$  y  $n_2$  en  $N$ .

El tipo ordinal de  $S$  depende, como se verifica fácilmente, sólo de los tipos  $\alpha$  y  $\beta$ ; definimos:

$$(5) \quad \alpha \cdot \beta = \overline{S}.$$

[503] En este producto,  $\alpha$  se llama el ‘multiplicandus’ y  $\beta$  el ‘multiplier’

Después de fijar alguna aplicación de  $M$  sobre  $M_n$  sea  $m_n$  el elemento de  $M_n$  correspondiente al elemento  $m$  de  $M$ .

Podemos entonces escribir también

$$(6) \quad S = \{m_n\}.$$

Consideremos un tercer conjunto ordenado  $P = \{p\}$  con tipo ordinal  $P = \gamma$ , entonces según (5)

$$\alpha \cdot \beta = \overline{\{m_n\}}, \beta \cdot \gamma = \overline{\{n_p\}}, (\alpha \cdot \beta) \cdot \gamma = \overline{\{(m_n)_p\}}, \\ \alpha \cdot (\beta \cdot \gamma) = \overline{\{m_{(n_p)}\}}.$$

Ambos conjuntos ordenados  $\overline{\{(m_n)_p\}}$  y  $\overline{\{m_{(n_p)}\}}$  son similares y se aplican uno en el otro, si asociamos sus elementos  $\{(m_n)_p\}$  y  $m_{(n_p)}$ .

Se cumple entonces la ley asociativa para tres tipos  $\alpha, \beta, \gamma$

$$(7) \quad (\alpha \cdot \beta) \cdot \gamma = \alpha \cdot (\beta \cdot \gamma).$$

De (1) y (5) se sigue también fácilmente la ley distributiva

$$(8) \quad \alpha \cdot (\beta + \gamma) = \alpha \cdot \beta + \alpha \cdot \gamma,$$

pero sólo en esta forma, donde *el factor con dos elementos desempeña el papel del multiplicador*.

Por el contrario, entre tipos la ley conmutativa tiene tan poca validez en la multiplicación como en la adición.

Por ejemplo,  $2 \cdot \omega$  y  $\omega \cdot 2$  son tipos distintos; pues por (5)

$$2 \cdot \omega = \overline{(e_1, f_1; e_2, f_2; \dots e_v, f_v; \dots)} = \omega;$$



mientras que

$$\omega \cdot 2 = \overline{(e_1, e_1, \dots, e_v, \dots; f_1, f_2, \dots, f_v, \dots)}$$

es claramente distinto de  $\omega$ .

Si se comparan las definiciones dadas en §3 para las operaciones elementales entre números cardinales con las aquí presentadas para tipos ordinales, se reconoce fácilmente, que el número cardinal de la suma de dos tipos ordinales es igual a la suma de los números cardinales de cada tipo y que el número cardinal del producto de dos tipos es igual al producto de los números cardinales de cada tipo.

Cada ecuación entre tipos ordinales que involucre operaciones elementales sigue siendo válida, si se sustituyen todos los tipos por sus números cardinales.

[504]

### §9.

#### **El tipo ordinal $\eta$ del conjunto $R$ de los números racionales mayores que cero y menores que 1 con su orden natural.**

Por  $R$  entendemos, como en §7, el sistema de los números racionales  $\frac{p}{q}$  (suponiendo  $p$  y  $q$  sin factores en común),  $> 0$  y  $< 1$ , con su orden natural, donde la magnitud del número determina su jerarquía. El tipo ordinal de  $R$  lo denotamos con  $\eta$ :

$$(1) \quad \eta = \overline{R}.$$

Allí consideramos el mismo conjunto con otro orden, el que llamamos  $R_0$  y en primer lugar se toma en cuenta la magnitud de  $p + q$ , en segundo lugar, para números racionales, para los cuales  $p + q$  tiene el mismo valor, la jerarquía la determina la magnitud de  $\frac{p}{q}$ .  $R_0$  tiene la forma de un conjunto bien ordenado de tipo  $\omega$ :

$$(2) \quad R_0 = (r_1, r_2, \dots, r_v, \dots), \text{ donde } r_v \prec r_{v+1},$$

$$(3) \quad \overline{R_0} = \omega.$$

$R$  y  $R_0$  tienen el mismo número cardinal, pues sólo se distinguen por la jerarquía entre sus elementos, y como es evidente que  $\overline{\overline{R_0}} = \aleph_0$ , entonces también se cumple

$$(4) \quad \overline{\overline{R}} = \overline{\eta} = \aleph_0.$$

Por lo tanto, el tipo  $\eta$  pertenece a la clase de tipos  $[\aleph_0]$ .

Seguidamente hacemos notar que en  $R$  no existen, relativos a su orden, un mayor o un menor elemento.

En tercer lugar,  $R$  tiene la propiedad de que *entre* cualesquiera dos de sus elementos según su orden, se encuentra otro; esta característica la expresamos con las siguientes palabras:  $R$  es '*denso en todas partes*'.

Ahora se debe mostrar que estas tres propiedades caracterizan al tipo  $\eta$  de  $R$ , por lo que se cumple el siguiente teorema:

“Si se tiene un conjunto simplemente ordenado  $M$  que satisface las tres condiciones:

- 1)  $\overline{M} = \aleph_0$ ,
- 2)  $M$  no tiene, de acuerdo a su orden, un menor o un mayor elemento,
- 3)  $M$  es denso en todas partes, entonces el tipo ordinal de  $M$  es igual a  $\eta$ :

$$\overline{M} = \eta.”$$

Demostración. Por la condición 1) se puede hacer de  $M$  un conjunto bien ordenado con tipo  $\omega$ ; una vez que se ha hecho esto, denotemos  $M$  con  $M_0$  y hacemos

$$(5) \quad M_0 = (m_1, m_2, \dots, m_\nu, \dots)$$

Ahora debemos mostrar que

$$(6) \quad M \approx R.$$

Es decir, se debe demostrar que se puede *aplicar*  $M$  sobre  $R$  de tal forma que la jerarquía entre dos elementos en  $M$  es la misma que entre los correspondientes elementos en  $R$ .

Supongamos que el elemento  $r_1$  en  $R$  corresponde al elemento  $m_1$  en  $M$ .

$r_2$  guarda una determinada jerarquía respecto a  $r_1$  en  $R$ ; por la condición 2) existen una cantidad infinita de elementos  $m_\nu$  de  $M$ , que guardan la misma jerarquía respecto a  $m_1$  en  $M$  que  $r_2$  respecto a  $r_1$  en  $R$ ; de entre ellos escogemos aquel que en  $M_0$  tenga el índice menor, digamos  $m_i$ , y asociémoslo con  $r_2$ .

$r_3$  tiene en  $R$  una determinada relación de orden con  $r_1$  y  $r_2$ ; según las condiciones 2) y 3) existe una cantidad infinita de elementos  $m_\nu$  en  $M$  que guardan la misma relación de orden con  $m_1$  y  $m_i$  que la que guardan  $r_3$  con  $r_1$  y  $r_2$  en  $R$ ; escogemos aquel que tenga el menor índice en  $M_0$ , digamos  $m_{i_3}$ , y lo asociamos con  $r_3$ .

Continuamos este proceso según estas prescripciones; si a los  $\nu$  elementos de  $R$

$$r_1, r_2, r_3, \dots, r_\nu$$

se les ha asociado los elementos

$$m_1, m_{i_2}, m_{i_3}, \dots, m_{i_\nu}$$

de  $M$ , que en  $M$  guardan la misma relación de orden entre sí que sus correspondientes en  $R$ , entonces el elemento  $r_{v+1}$  de  $R$  se asocia con el elemento con el menor índice  $m_{v+1}$  de  $M$ , que tenga la misma relación jerárquica respecto a

$$m_1, m_2, m_3, \dots, m_v$$

en  $M$  que la que tiene  $r_{v+1}$  con  $r_1, r_2, \dots, r_v$  en  $R$ .

En esta forma hemos asociado todos los elementos  $r_v$  de  $R$  con elementos  $m_v$  de  $M$ , y los elementos  $m_v$  tienen en  $M$  la misma relación de orden que sus correspondientes elementos  $r_v$  en  $R$ .

Aún se debe mostrar que los elementos  $m_v$  comprenden a *todos los elementos*  $m_v$  de  $M$  o, lo que es lo mismo, que la sucesión

$$1, l_2, l_3, \dots, l_v, \dots$$

[506] es simplemente una permutación de la sucesión

$$1, 2, 3, \dots, v, \dots$$

La demostración se efectúa mediante inducción completa, mostrando que si los elementos  $m_1, m_2, \dots, m_v$  aparecen en la permutación, también aparece el elemento siguiente  $m_{v+1}$ .

Sea  $\lambda$  suficientemente grande para que entre los elementos

$$m_1, m_2, m_3, \dots, m_\lambda$$

aparezcan los elementos

$$m_1, m_2, \dots, m_v.$$

(que por hipótesis aparecen en la permutación). Puede ocurrir que entre ellos se encuentre  $m_{v+1}$ ; entonces aparece  $m_{v+1}$  en la aplicación.

*Si en cambio, no aparece  $m_{v+1}$  entre los elementos*

$$m_1, m_2, m_3, \dots, m_\lambda,$$

entonces  $m_{v+1}$  guarda una determinada relación jerárquica en  $M$  respecto a estos elementos; la misma relación se presenta entre una cantidad infinita de elementos en  $R$  con  $r_1, r_2, \dots, r_\lambda$ , y entre ellos sea  $r_{\lambda+\sigma}$  el que tiene el menor índice en  $R_0$ .

Entonces, como se verifica fácilmente,  $m_{v+1}$  tiene la misma jerarquía respecto a

$$m_1, m_2, m_3, \dots, m_{\lambda+\sigma-1}$$

en  $M$  que  $r_{\lambda+\sigma}$  respecto a

$$r_1, r_2, \dots, r_{\lambda+\sigma-1}$$

en  $R$ . Puesto que los  $m_1, m_2, \dots, m_v$  ya pertenecen a la transformación,  $m_{v+1}$  es el elemento con el menor índice en  $M_0$  que tiene

esa relación de jerárquica respecto a

$$m_1, m_2, m_3, \dots, m_{\lambda+\sigma-1}.$$

Por consiguiente, según la forma en que establecimos la correspondencia

$$m_{\lambda+\sigma} = m_{\nu+1}.$$

También en este caso aparece el elemento  $m_{\nu+1}$  en la aplicación, y de hecho es  $r_{\lambda+\sigma}$  el elemento que se le asocia en  $R$ .

Así hemos visto que nuestra aplicación transforma *todo el conjunto*  $M$  en *todo el conjunto*  $R$ ;  $M$  y  $R$  son conjuntos similares,

l.q.q.d.

Del Teorema recién demostrado se obtiene, por ejemplo, lo siguiente:

[507] “ $\eta$  es el tipo ordinal del conjunto de los números racionales positivos y negativos excluyendo al cero en su orden natural”.

“ $\eta$  es el tipo ordinal del conjunto de los números racionales mayores que  $a$  y menores que  $b$  con su orden natural, donde  $a$  y  $b$  son cualesquiera números reales con  $a < b$ ”.

“ $\eta$  es el tipo ordinal del conjunto de los números reales algebraicos con su orden natural.”

“ $\eta$  es el tipo ordinal del conjunto de los números reales algebraicos mayores que  $a$  y menores que  $b$  con su orden natural, donde  $a$  y  $b$  son cualesquiera números reales con  $a < b$ ”.

Ya que todos estos conjuntos ordenados satisfacen las tres condiciones para  $M$  de nuestro teorema (compárese con pág. 258, Crelle's Journal Vol. 77).

Si consideremos además las definiciones dadas en §8 de los conjuntos con tipos  $\eta + \eta$ ,  $\eta\eta$ ,  $(1 + \eta)\eta$ ,  $(\eta + 1)\eta$ ,  $(1 + \eta + 1)\eta$ , encontramos que ellos satisfacen las tres condiciones. Con ello tenemos los teoremas:

$$(7) \quad \eta + \eta = \eta,$$

$$(8) \quad \eta\eta = \eta,$$

$$(9) \quad (1 + \eta)\eta = \eta,$$

$$(10) \quad (\eta + 1)\eta = \eta,$$

$$(11) \quad (1 + \eta + 1)\eta = \eta.$$

Repetidas aplicaciones de (7) y (8) propician para cada número finito  $\nu$

$$(12) \quad \eta \cdot \nu = \eta,$$

y

$$(13) \quad \eta^v = \eta.$$

Por el contrario, como se verifica sin dificultad, para  $v > 1$ , los tipos  $1 + \eta$ ,  $\eta + 1$ ,  $v \cdot \eta$ ,  $1 + \eta + 1$  son distintos entre sí y distintos de  $\eta$ . Por otro lado,

$$(14) \quad \eta + 1 + \eta = \eta,$$

mientras que  $\eta + v + \eta$  es distinto de  $\eta$ , para  $v > 1$ .

Finalmente, vale la pena mencionar que

$$(15) \quad {}^*\eta = \eta.$$

[508]

### §10.

#### Las sucesiones fundamentales contenidas en un conjunto transfinito ordenado.

Fijemos un conjunto simplemente ordenado  $M$  arbitrario. Cada subconjunto de  $M$  es en sí mismo un conjunto ordenado. Para el estudio del tipo  $\bar{M}$  resultan ser muy importantes los subconjuntos de  $M$  que tienen tipo  $\omega$  o  ${}^*\omega$ ; los llamamos “sucesiones fundamentales de primer orden contenidas en  $M$ ”, mas aún, a los primeras (las de tipo  $\omega$ ) las llamamos “crecientes”, y a los otros (las de tipo  ${}^*\omega$ ), “decrecientes”.

Puesto que nos restringiremos a las sucesiones fundamentales de primer orden (en trabajos futuros consideraremos también sucesiones de *orden superior*), las llamaremos simplemente “sucesiones fundamentales”.

Una “sucesión fundamental creciente” tiene la forma

$$(1) \quad \{a_v\}, \text{ donde, } a_v \prec a_{v+1},$$

una “sucesión fundamental decreciente” tiene la forma

$$(2) \quad \{b_v\}, \text{ donde, } b_v \succ b_{v+1}.$$

$v$  tiene siempre el significado, en nuestras consideraciones (lo mismo que  $\kappa, \lambda, \mu$ ), de un número cardinal *finito* arbitrario o también de un tipo finito, respectivamente un número ordinal finito.

Dos sucesiones fundamentales crecientes  $\{a_v\}$  y  $\{a'_v\}$  contenidas en  $M$  se dicen “correspondientes”, en símbolos

$$(3) \quad \{a_v\} \parallel \{a'_v\},$$

cuando para cada elemento  $a_v$  existe un elemento  $a'_\lambda$  tal que

$$a_v \prec a'_\lambda,$$

y para cada elemento  $a'_v$  existe un elemento  $a_\mu$  tal que

$$a'_v < a_\mu.$$

Dos sucesiones fundamentales decrecientes  $\{b_v\}$  y  $\{b'_v\}$  en  $M$  se dicen “*correspondientes*”, en símbolos

$$(4) \quad \{b_v\} \parallel \{b'_v\},$$

cuando para cada elemento  $b_v$  existe un elemento  $b'_\lambda$  tal que

$$b_v > b'_\lambda,$$

y para cada elemento  $b'_v$  existe un elemento  $b_\mu$  tal que

$$b'_v > b_\mu.$$

Una sucesión fundamental creciente  $\{a_v\}$  y una decreciente  $\{b_v\}$  se llaman “*correspondientes*”, en símbolos

[509]

$$(5) \quad \{a_v\} \parallel \{b_v\},$$

si 1) para cualesquiera  $v$  y  $\mu$

$$a_v < b_\mu$$

y 2) existe en  $M$  a lo sumo un elemento  $m_0$  (es decir, solamente uno o ninguno) tal que para toda  $v$

$$a_v < m_0 < b_v.$$

Se cumplen entonces los tres teoremas:

A. “*Si dos sucesiones fundamentales son correspondientes a una tercera, entonces ellas son correspondientes entre sí*”.

B. “*Dos sucesiones fundamentales ambas crecientes o ambas decrecientes, una de las cuales es un subconjunto de la otra, son correspondientes*”.

Si existe en  $M$  un elemento  $m_0$  que tiene una posición, respecto a la sucesión fundamental creciente, tal que

1) para cada  $v$

$$a_v < m_0,$$

2) para cada elemento  $m$  de  $M$  que sea  $< m_0$ , existe un cierto número  $v_0$  tal que

$$a_v > m, \text{ para } v \stackrel{=}{>} v_0,$$

llamaremos a  $m_0$  “*un elemento límite de  $\{a_v\}$  en  $M$* ” o también un “*elemento principal de  $M$* ”.

Igualmente, llamaremos a un elemento  $m_0$  un “elemento principal de  $M$ ” o también “un elemento límite de  $\{b_v\}$  en  $M$ ” si se satisfacen las condiciones:

1) para cada  $v$

$$b_v \succ m_0,$$

2) para cada elemento  $m \succ m_0$  de  $M$  existe un cierto número  $v_0$  tal que

$$b_v \prec m, \text{ para } v \overline{\succ} v_0.$$

Una sucesión fundamental *nunca puede tener más* de un elemento límite en  $M$ ;  $M$  tiene en general muchos elementos principales.

Se verifica la validez de los siguientes Teoremas:

C. “*Si una sucesión fundamental tiene un elemento límite en  $M$ , entonces todas las sucesiones correspondientes con ella tienen el mismo elemento límite en  $M$* ”.

D. “*Si dos sucesiones fundamentales (ambas crecientes o decrecientes o ninguna) tienen el mismo elemento límite en  $M$ , entonces son correspondientes*”.

Si  $M$  y  $M'$  son dos conjuntos ordenados similares, es decir,

$$(6) \quad \overline{M} = \overline{M'}$$

y se fija alguna aplicación entre ellos, entonces se cumplen, como se ve con facilidad, los siguientes teoremas:

[510] E. “*A cada sucesión fundamental en  $M$  le corresponde como imagen una sucesión fundamental en  $M'$  y viceversa; cada sucesión creciente, cada decreciente y sucesiones fundamentales correspondientes, tienen como imagen una sucesión creciente, decreciente o sucesiones fundamentales correspondientes en  $M'$ , respectivamente, y viceversa*”.

F. “*Si un elemento límite en  $M$  pertenece a una sucesión fundamental, entonces pertenece a la sucesión fundamental imagen en  $M'$  un elemento límite y viceversa; y estos elementos límite son imagen uno del otro respecto de la aplicación*”.

G. “*A los elementos principales de  $M$  corresponden como imágenes elementos principales en  $M'$  y viceversa*”.

Si un conjunto  $M$  consiste en elementos principales, es decir, cada uno de sus elementos es un elemento principal, lo llamamos un ‘conjunto denso en sí mismo’.

Si para cada sucesión fundamental en  $M$  existe un elemento límite en  $M$ , entonces a  $M$  lo llamamos un ‘conjunto cerrado’.

Un conjunto que es ‘denso en sí mismo’ y ‘cerrado’ se conoce como ‘conjunto perfecto’.

Si un conjunto posee alguna de estas tres propiedades, también la tiene cada conjunto similar a él; por lo cual se puede transferir estas propiedades a tipos ordinales, por lo que existen ‘tipos densos en sí mismos’, ‘tipos cerrados’, ‘tipos perfectos’ y ‘tipos densos en todas partes’ (§9).

Por ejemplo,  $\eta$  es un tipo ‘denso en sí mismo’; como en §9 se mostró, es ‘denso en todas partes’, pero no ‘cerrado’.

$\omega$  y  $^*\omega$  no tienen elementos principales (unidades principales); por el contrario,  $\omega + \nu$  y  $\nu + ^*\omega$  tienen un elemento principal y son tipos ‘cerrados’.

El tipo  $\omega \cdot 3$  tiene dos elementos principales, pero no es ‘cerrado’; el tipo  $\omega \cdot 3 + \nu$  tiene tres elementos principales y es ‘cerrado’.

### §11.

#### El tipo ordinal $\theta$ del continuo lineal $X$ .

Tornamos a investigar el tipo ordinal del conjunto  $X = \{x\}$  de los números reales  $x$ ,  $\geq 0$  y  $\leq 1$ , con su orden natural, tal que para cualesquiera dos elementos arbitrarios  $x$  y  $x'$  ocurre

$$(1) \quad x \prec x', \text{ cuando } x < x'.$$

La notación para este tipo es

$$(1) \quad \bar{X} = \theta.$$

[511] De la teoría de los números racionales e irracionales se sabe que cada sucesión fundamental  $\{x_\nu\}$  en  $X$  tiene un elemento límite  $x_0$  en  $X$  y recíprocamente, cada elemento  $x$  de  $X$  es un elemento límite de sucesiones fundamentales correspondientes en  $X$ . Por ello  $X$  es un ‘conjunto perfecto’, y  $\theta$  un ‘tipo perfecto’.

Con lo anterior  $\theta$  no queda totalmente caracterizado, debemos considerar también la siguiente propiedad de  $X$ :

$X$  contiene al conjunto  $R$  estudiado en §9 de tipo ordinal  $\eta$  como subconjunto, y de hecho, de tal forma que entre cualesquiera dos elementos arbitrarios  $x_0$  y  $x_1$  de  $X$ , de acuerdo al orden, está un elemento de  $R$ .

Ahora se debe mostrar que en conjunto estas características determinan por completo al tipo ordinal  $\theta$  del continuo lineal  $X$ , de tal forma que se cumple el teorema:

“Si un conjunto ordenado  $M$  cumple con 1) es ‘perfecto’, 2) contiene un conjunto  $S$  de cardinalidad  $\bar{S} = \aleph_0$  que guarda una relación con  $M$  de tal suerte que entre cualesquiera dos elementos arbitrarios  $m_0$  y



$m_1$  de  $M$  existe un elemento de  $S$  entre ellos, según su orden, entonces  $\bar{M} = \theta$ .

Demostración. Si  $S$  tiene un menor o un mayor elemento, entonces por 2) éste debe comportarse igual en  $M$ ; por lo tanto, podemos eliminar este elemento de  $S$  sin que este conjunto pierda su relación con  $M$  expresada por 2).

Suponemos en consecuencia que  $S$  no tiene menor o mayor elemento; por consiguiente, según §9,  $S$  tiene tipo ordinal  $\eta$ .

Pues si  $S$  es un subconjunto de  $M$ , entonces por 2) entre cualesquiera dos elementos  $s_0$  y  $s_1$  de  $S$  debe estar otro elemento de  $S$  respecto a su orden. Además, por 2) tenemos que  $\bar{S} = \aleph_0$ .

Ambos conjuntos son por consiguiente ‘similares’ entre sí,

$$(2) \quad S \approx R.$$

Fijemos una ‘aplicación’ entre  $R$  y  $S$  y afirmamos que este genera una cierta ‘aplicación’ entre  $X$  y  $M$ , y de hecho de la siguiente forma:

Todos los elementos de  $X$ , que simultáneamente pertenecen a  $R$ , son imágenes de elementos correspondientes en  $M$ , que son simultáneamente elementos de  $S$  y corresponden a esos elementos de  $R$  respecto a la aplicación de  $R$  sobre  $S$ .

Si  $x_0$  es un elemento de  $X$  que no pertenece a  $R$ , se puede ver como el límite de una sucesión fundamental  $\{x_v\}$  contenida en  $X$  que se puede reemplazar por una sucesión fundamental correspondiente  $\{r_{\kappa_v}\}$  conte

[512]

nida en  $R$ . A esta última corresponde como imagen una sucesión fundamental  $\{s_{\lambda_v}\}$  en  $S$  y  $M$ , que por 1) está acotada por un elemento  $m_0$  en  $M$  que no pertenece a  $S$  (F, §10). Este elemento  $m_0$  en  $M$  (que sigue siendo el mismo, si en lugar de las sucesiones fundamentales  $\{x_v\}$  y  $\{r_{\kappa_v}\}$  se utilizan otras que tengan como elemento límite al mismo elemento  $x_0$  (E, C, D, en §10) funge como la imagen de  $x_0$  en  $X$ . Recíprocamente, a cada elemento  $m_0$  de  $M$ , que no aparece en  $S$ , le corresponde un elemento determinado  $x_0$  de  $X$  que no pertenece a  $R$  y que es la imagen de  $m_0$ .

De esta forma se establece una correspondencia recíproca unívoca entre  $X$  y  $M$ , para la que se debe mostrar, que da origen a una ‘aplicación’ entre estos conjuntos.

Esto se cumple desde el principio para aquellos elementos de  $X$  y  $M$  que simultáneamente pertenecen a  $R$  respectivamente  $S$ .

Comparemos un elemento  $r$  de  $R$  con un  $x_0$  de  $X$  que no pertenezca a  $R$ ; sean  $s$  y  $m_0$  los elementos correspondientes de  $M$ .

Si  $r < x_0$ , existe una sucesión fundamental creciente  $\{r_{\kappa_v}\}$  acotada por  $x_0$ , y a partir de un cierto  $v_0$  se cumple que

$$r < r_{\kappa_v} \text{ para } v \geq v_0.$$

La imagen de  $\{r_{\kappa_v}\}$  en  $M$  es una sucesión fundamental creciente  $\{s_{\lambda_v}\}$  acotada por  $m_0$  en  $M$ , y se tiene (§10), primero, que  $s_{\lambda_v} < m_0$  para toda  $v$  y por otro lado, que  $s < s_{\lambda_v}$  para  $v \geq v_0$ , por lo que (§7)  $s < m_0$ .

Si  $r > x_0$ , se deduce en forma similar que  $s > m_0$ .

Consideremos finalmente dos elementos  $x_0$  y  $x'_0$  que no pertenezcan a  $R$  y sus correspondientes elementos  $m_0$  y  $m'_0$  en  $M$ , entonces se demuestra en forma análoga que de  $x_0 < x'_0$ , se sigue  $m_0 < m'_0$ .

Con ello se ha demostrado la similitud de  $X$  y  $M$ , por lo que se cumple

$$\bar{M} = \theta.$$

## §12.

### Los conjuntos bien ordenados.

Entre los conjuntos simplemente ordenados los *conjuntos bien ordenados* merecen una posición destacada; sus tipos ordinales, que llamamos “*números ordinales*”, constituyen la materia natural para una definición de los números cardinales transfinitos o cardinalidades transfinitas superiores, una definición de conformidad con la que dimos para el menor número cardinal transfinite *álef* cero mediante el sistema de todos los números finitos  $v$  (§6).

“*Bien ordenado*” llamamos a un conjunto simplemente ordenado  $F$  (§7), cuando sus elementos  $f$  crecen en una sucesión determinada a partir de un menor elemento  $f_1$ , de tal forma que se satisfacen las dos condiciones siguientes:

I. “*Existe en  $F$  un elemento jerárquicamente menor  $f_1$ .*”

II. “*Si  $F'$  es un subconjunto de  $F$  y  $F'$  tiene uno o más elementos de mayor jerarquía que todos los elementos de  $F'$ , entonces existe un elemento  $f'$  en  $F$ , que es el menor que sucede a todos los elementos de  $F'$ , de tal suerte que no existe un elemento en  $F$  tal que, según el orden, esté entre  $F'$  y  $f'$ .*”

En particular, a cada elemento  $f$  de  $F$  le sucede, cuando no es el mayor elemento, un elemento distinto determinado  $f'$ , según el orden, como el sucesor más inmediato; esto se deduce de la condición II, si

3. Esta definición de “conjunto bien ordenado” coincide, no textualmente, con la introducida en Math. Annalen 21, 548 (Grundlagen e. allg. Mannigfaltigkeitslehre, pág. 4).

para  $F'$  se ocupa el elemento  $f$ . Si además, por ejemplo, en  $F$  está contenida una sucesión de elementos consecutivos

$$e' \prec e'' \prec e''' \prec \dots \prec e^{(v)} \prec e^{(v+1)} \dots$$

[208]

tal que en  $F$  existe un elemento que tiene mayor jerarquía que *cada elemento*  $e^{(v)}$ , por la condición II, si se sustituye en ella  $F'$  por la totalidad  $\{e^{(v)}\}$ , debe existir un elemento  $f'$  tal que no sólo ocurre

$$f' \succ e^{(v)}$$

para todo valor de  $v$ , sino no que para ningún elemento  $g$  en  $F$  se satisfacen las condiciones:

$$g \prec f',$$

$$g \succ e^{(v)}$$

para todo valor de  $v$ .

Por ejemplo, los tres conjuntos

$$(a_1, a_2, \dots, a_v, \dots),$$

$$(a_1, a_2, \dots, a_v, \dots, b_1, b_2, \dots, b_\mu, \dots),$$

$$(a_1, a_2, \dots, a_v, \dots, b_1, b_2, \dots, b_\mu, \dots, c_1, c_2, c_3)$$

donde

$$a_v \prec a_{v+1} \prec b_\mu \prec b_{\mu+1} \prec c_1 \prec c_2 \prec c_3$$

están *bien ordenados*. Los dos primeros no tienen mayor elemento, el tercero tiene como mayor elemento a  $c_3$ ; en el segundo y tercero suceden a los  $a_v$  primero  $b_1$ , en el tercero a todos los  $a_v$  y  $b_\mu$  los sucede inmediatamente  $c_1$ .

En lo sucesivo queremos extender el uso de los símbolos  $\prec$  y  $\succ$ , definidos en §7, para la relación jerárquica entre dos elementos, a grupos de elementos, de tal suerte que las fórmulas

$$M \prec N,$$

$$M \succ N$$

expresen, que en el orden dado todos los elementos del conjunto  $M$  son menores, o mayores, respectivamente que los elementos del conjunto  $N$ .

A. "Todo subconjunto  $F_1$  de un conjunto bien ordenado  $F$  tiene un menor elemento".

Demostración. Si el menor elemento  $f_1$  de  $F$  pertenece a  $F_1$ , éste es el menor elemento de  $F_1$ .

En caso contrario sea  $F'$  la totalidad de elementos de  $F$  menores que todos los elementos de  $F_1$ , por lo que no hay un elemento de  $F$  entre  $F'$  y  $F_1$ .

Si  $f'$  sucede a  $F'$  (según II), entonces pertenece necesariamente a  $F_1$  y tiene en él la misma jerarquía.

B. “Si un conjunto simplemente ordenado  $F$  se construye de tal forma que tanto  $F$  como cada uno de sus subconjuntos tengan un menor elemento, entonces  $F$  es un conjunto bien ordenado”.

[209] Demostración. Puesto que  $F$  tiene un menor elemento, se satisface la condición I. Sea  $F'$  un subconjunto de  $F$  tal que en  $F$  hay uno o más elementos  $\succ F'$ ; sea  $F_1$  la totalidad de esos elementos y  $f'$  el menor elemento de  $F_1$ , entonces es claro que  $f'$  es el sucesor inmediato en  $F'$  de  $F$ . Con ello se satisface también la condición II, por lo que  $F$  es un conjunto bien ordenado.

C. “Cada subconjunto  $F'$  de un conjunto bien ordenado  $F$  es también un conjunto bien ordenado”.

Demostración. Según el Teorema A tanto  $F'$  como cada subconjunto  $F''$  de  $F'$  (pues son a su vez subconjuntos de  $F$ ) tienen un menor elemento; por lo que de acuerdo al Teorema B,  $F'$  es un conjunto bien ordenado.

D. “Cada conjunto  $G$  similar a un conjunto bien ordenado  $F$  es un conjunto bien ordenado”.

Demostración. Si  $M$  es un conjunto que posee un menor elemento, entonces cada conjunto similar a él tiene, como se sigue directamente de la noción de similitud (§7), un menor elemento.

Puesto que  $G \simeq F$  se cumple y  $F$  tiene un menor elemento, lo mismo ocurre con  $G$ .

Igualmente cada subconjunto  $G'$  de  $G$  tiene un menor elemento; pues por la aplicación de  $G$  a  $F$ , el conjunto  $G'$  corresponde como imagen a un subconjunto  $F'$  de  $F$ , de tal forma que

$$G' \simeq F'.$$

Pero por el Teorema A,  $F'$  tiene un menor elemento, por lo que también lo tiene  $G'$ . Por lo tanto, tanto  $G$  como cada subconjunto  $G'$  de  $G$  tienen un menor elemento; por el Teorema B se deduce que  $G$  es un conjunto bien ordenado.

E. “Si en un conjunto bien ordenado  $G$  se sustituyen sus elementos  $g$  por conjuntos bien ordenados en el sentido de que si los conjuntos bien ordenados  $F_g$  y  $F_{g'}$  se sustituyen en lugar de los elementos  $g$  y  $g'$  y  $g < g'$ , entonces también  $F_g < F_{g'}$ , entonces el conjunto  $H$ , que se genera en esta forma, por la sustitución de elementos por conjuntos bien ordenados  $F_g$ , es un conjunto bien ordenado”.

Demostración. Tanto  $H$  como cada subconjunto  $H_1$  de  $H$  tienen un menor elemento, lo que caracteriza a  $H$ , según el Teorema B, como un conjunto bien ordenado. En efecto, si  $g_1$  es el menor elemento de  $G$ , entonces el menor elemento de  $F_{g_1}$  es también el menor elemento de  $H$ .

Si ahora se considera un subconjunto  $H_1$  de  $H$ , sus elementos pertenecen a ciertos conjuntos  $F_g$ , al formar un conjunto con estos conjuntos  $F_g$ , se conforma un subconjunto del conjunto formado por los  $F_g$ , el conjunto bien ordenado  $\{F_g\}$  similar  $G$ ; si, digamos,  $F_{g_0}$  es el menor elemento de este subconjunto, entonces el menor elemento del subconjunto de  $H_1$  contenido en  $F_{g_0}$  es a la vez el menor elemento de  $H_1$ .

[210]

### §13.

#### Las secciones de los conjuntos bien ordenados.

Si  $f$  es un elemento distinto del primer elemento  $f_1$  del conjunto bien ordenado  $F$ , llamamos al conjunto  $A$  de todos los elementos de  $F$ , que son  $\prec f$ , una "sección de  $F$ ", a saber, la sección determinada por el elemento  $f$ . En cambio, el conjunto  $R$  de todos los elementos restantes de  $F$  exceptuando  $f$  se llama "el resto de  $F$ ", a saber, el resto de  $F$  determinado por el elemento  $f$ . Los conjuntos  $A$  y  $R$  están, según el Teorema C, §12, bien ordenados y por §8 y §12 podemos escribir:

$$(1) \quad F = (A, R),$$

$$(2) \quad R = (f, R'),$$

$$(3) \quad A \prec R.$$

$R'$  es la parte siguiente, en  $R$ , al elemento inicial  $f$  y se reduce a 0, cuando  $R$  no tiene otros elementos aparte de  $f$ .

Tomemos como ejemplo el conjunto bien ordenado

$$F = (a_1, a_2, \dots, a_v, \dots, b_1, b_2, \dots, b_\mu, \dots, c_1, c_2, c_3),$$

en éste el elemento  $a_3$  determina la sección

$$(a_1, a_2)$$

y el correspondiente resto

$$(a_3, a_4, \dots, a_{v+2}, \dots, b_1, b_2, \dots, b_\mu, \dots, c_1, c_2, c_3);$$

el elemento  $b_1$  determina la sección

$$(a_1, a_2, \dots, a_v, \dots)$$

y el correspondiente resto

$$(b_1, b_2, \dots, b_\mu, \dots, c_1, c_2, c_3),$$

mediante el elemento  $c_2$  se determina la sección

$$(a_1, a_2, \dots, a_\nu, \dots, b_1, b_2, \dots, b_\mu, \dots, c_1)$$

y el resto

$$(c_2, c_3).$$

Si  $A$  y  $A'$  son dos secciones de  $F$ ,  $f$  y  $f'$  los elementos que las determinan y se cumple

$$(4) \quad f' \prec f,$$

entonces  $A'$  es a su vez una sección de  $A$ .

Llamamos a  $A'$  la sección menor,  $A$  la mayor de  $F$ :

$$(5) \quad A' < A.$$

En forma correspondiente podemos decir de cada sección  $A$  de  $F$  que es menor a  $F$  mismo:

$$(6) \quad A < F.$$

[211] A. “Si dos conjuntos bien ordenados  $F$  y  $G$  se aplican uno en el otro, entonces a cada sección  $A$  de  $F$  corresponde una sección  $B$  de  $G$  similar y a cada sección  $B$  de  $G$  corresponde una sección similar  $A$  de  $F$ , y los elementos  $f$  y  $g$  de  $F$  y  $G$ , que determinan las secciones correspondientes  $A$  y  $B$ , se asocian uno al otro mediante la aplicación.”.

Demostración. Si se tienen dos conjuntos similares simplemente ordenados  $M$  y  $N$  que se aplican uno sobre el otro, si  $m$  y  $n$  son dos elementos asociados, si  $M'$  es el conjunto de elementos de  $M$  que son  $\prec m$ ,  $N'$  el conjunto de elementos de  $N$  que son  $\prec n$ , entonces la aplicación hace corresponder  $M'$  y  $N'$ . Pues a cada elemento  $m' \prec m$  de  $M$ , debe corresponder (§7) un elemento  $n' \prec n$  de  $N$ , y viceversa.

Si aplicamos este teorema a los conjuntos bien ordenados  $M$  y  $G$ , obtenemos lo que se que se debía demostrar.

B. “Un conjunto bien ordenado  $F$  no es similar a ninguna de sus secciones  $A$ ”.

Demostración. Supongamos que  $F \simeq A$ , por lo que tenemos una aplicación de  $F$  sobre  $A$ . Por el Teorema A corresponde a la sección  $A$  de  $F$  una sección  $A'$  de  $A$  como imagen, de tal forma que  $A' \simeq A$ . Se tendría entonces también  $A' \simeq F$  y se cumple  $A' < A$ . De  $A'$  se obtendría en la misma forma una sección menor  $A''$  de  $F$ , tal que  $A'' \simeq F$  y  $A'' < A'$ , etcétera.

Con este proceder obtendríamos una sucesión necesariamente infinita

$$A > A' > A'' \dots A^{(v)} > A^{(v+1)}, \dots$$

de secciones de  $F$  cada vez menores, similares al conjunto  $F$ .

Denotemos con  $f, f', f'', \dots f^{(v)}, \dots$  los elementos que determinan en  $F$  estas secciones; entonces tendríamos

$$f \succ f' \succ f'' \dots f^{(v)} \succ f^{(v+1)}, \dots$$

tendríamos entonces un subconjunto de  $F$  infinito

$$(f, f', f'', \dots f^{(v)}, \dots)$$

en el que *ningún elemento tiene la menor jerarquía*.

Pero por el Teorema A, §12 *no es posible* la existencia de tales subconjuntos. La suposición de una aplicación de  $F$  sobre una de sus secciones conduce a una contradicción, por lo que el conjunto no es similar a ninguna de sus secciones.

Si bien, según el Teorema B, un conjunto bien ordenado  $F$  no es similar a ninguna de sus *secciones*, siempre existen, cuando  $F$  es *infinito*, otros subconjuntos de  $F$  similares a  $F$ . Por ejemplo, el conjunto

[212]

$$F = (a_1, a_2, \dots a_v, \dots)$$

es similar a cada uno de sus restos

$$(a_{K+1}, a_{K+2}, \dots a_{K+v}, \dots).$$

Es por ello importante que añadamos el siguiente resultado al Teorema B.

C. “Un subconjunto  $F$  no es similar a ningún subconjunto de alguna de sus secciones”.

Demostración. Supongamos que  $F'$  es un subconjunto de una sección  $A$  de  $F$  y que  $F' \simeq F$ . Fijemos una aplicación de  $F$  sobre  $F'$ ; por el Teorema A a la sección  $A$  de  $F$  le corresponde como imagen una sección  $F''$  del conjunto bien ordenado  $F'$ ; digamos que esta sección está determinada por el elemento  $f'$  de  $F'$ . Como  $f'$  también es un elemento de  $A$ , determina una sección  $A'$  de  $A$ , de la cual  $F''$  es un subconjunto.

Por hipótesis  $F'$  es un subconjunto de la sección  $A$  de  $F$  con  $F' \simeq F$ , lo que nos conduce a un subconjunto  $F''$  de una sección  $A'$  de  $A$  con  $F'' \simeq A$ .

El mismo razonamiento propicia un subconjunto  $F'''$  de una sección  $A''$  de  $A'$  tal que  $F''' \simeq A'$ . Si continuamos así, obtenemos, como en la demostración del Teorema B, una sucesión necesariamente infinita de secciones de  $F$  cada vez menores

$$A > A' > A'' \dots A^{(v)} > A^{(v+1)} \dots$$

y con ello, una sucesión *infinita* de los elementos que determinan esas secciones

$$f \succ f' \succ f'' \dots f^{(v)} \succ f^{(v+1)} \dots,$$

en la que no aparecería un menor elemento, lo que es imposible según el teorema A, §12. Por lo tanto, no existe un subconjunto  $F'$  de una sección  $A$  de  $F$  tal que  $F' \simeq F$ .

D. “*Dos secciones distintas  $A$  y  $A'$  de un conjunto bien ordenado  $F$  no son similares entre sí.*”

Demostración. Si  $A' < A$ , entonces  $A'$  es una sección del conjunto bien ordenado  $A$ , por lo que no puede ser similar a  $A$ , según el Teorema B.

E. *Dos conjuntos bien ordenados similares  $F$  y  $G$  se pueden aplicar uno sobre el otro en forma única.*”

Demostración. Fijemos dos aplicaciones distintas de  $F$  sobre  $G$  y sea  $f$  un elemento de  $F$ , para el cual correspondieran dos imágenes distintas  $g, g'$  en  $G$  de acuerdo a las dos aplicaciones distintas. Sea  $A$  la sección de  $F$  determinada por  $f$ ,  $B$  y  $B'$  las secciones de  $G$  determinadas [213]

por  $g$  y  $g'$ . Por el Teorema A se cumple tanto  $A \simeq B$ , como  $A \simeq B'$ , de donde se deduciría  $B \simeq B'$ , lo que contradice el Teorema D.

F. “*Si  $F$  y  $G$  son dos conjuntos bien ordenados, entonces una sección  $A$  de  $F$  puede ser similar a lo sumo a una sección  $B$  de  $G$ .*”

Demostración. Si la sección  $A$  de  $F$  fuese similar a dos secciones  $B$  y  $B'$  de  $G$ , sería también similares entre sí las secciones  $B$  y  $B'$ , lo que es imposible de acuerdo al Teorema D.

G. “*Si  $A$  y  $B$  son secciones similares de dos conjuntos bien ordenados  $F$  y  $G$ , entonces para cada sección menor  $A' < A$  de  $F$  existe una sección similar  $B' < B$  de  $G$  y para cada sección menor  $B' < B$  de  $G$  existe una sección similar  $A' < A$  de  $F$ .*”

Demostración. Se sigue del Teorema A, cuando se aplica éste a los conjuntos similares  $A$  y  $B$ .

H. “*Si  $A$  y  $A'$  son dos secciones de un conjunto bien ordenado  $F$ ,  $B$  y  $B'$  son secciones similares a ellas en un conjunto bien ordenado  $G$ , y si  $A' < A$ , entonces  $B' < B$ .*”

Demostración. Se sigue de los Teoremas F y G.

J. “*Si una sección  $B$  de un conjunto bien ordenado  $G$  no es similar a ninguna sección de un conjunto bien ordenado  $F$ , entonces tampoco las secciones  $B' > B$  de  $G$  ni  $G$  mismo son similares a secciones de  $F$  o a  $F$  mismo.*”

Demostración. Se sigue del Teorema G.

K. “*Si para cada sección  $A$  de un conjunto bien ordenado  $F$  existe una sección similar a ella  $B$  de otro conjunto bien ordenado  $G$ , y recíprocamente, para cada sección  $B$  de  $G$  existe una sección  $A$  de  $F$  similar a ella, entonces  $F \simeq G$ .*”



Demostración. Podemos aplicar  $F$  sobre  $G$  de acuerdo a la siguiente prescripción:

El menor elemento  $f_1$  de  $F$  corresponde al menor elemento  $g_1$  de  $G$ . Si  $f \succ f_1$  es algún otro elemento de  $F$ , él determina una sección  $A$  de  $F$ ; a ella es similar, según la hipótesis, una sección  $B$  de  $G$ ; el elemento  $g$  que determina esta sección lo hacemos la imagen de  $f$ . Si  $g$  es algún elemento de  $G$ ,  $\succ g_1$ , entonces determina una sección  $B$  de  $G$  y por hipótesis existe una sección  $A$  de  $F$  similar a ella; sea  $f$  el elemento que determina  $A$  en  $F$  y lo hacemos la imagen de  $g$ .

El que esta correspondencia biunívoca entre  $F$  y  $G$  es una *aplicación* en el sentido de §7 se verifica fácilmente.

[214] A saber, sean  $f$  y  $f'$  dos elementos arbitrarios de  $F$ ,  $g$  y  $g'$  los elementos correspondientes de  $G$ ,  $A$  y  $A'$  las secciones determinadas por  $f$  y  $f'$ ,  $B$  y  $B'$  las determinadas por  $g$  y  $g'$  y si, digamos,

$$f' \prec f,$$

entonces

$$A' < A;$$

por lo que del Teorema H se sigue que

$$B' < B$$

por consiguiente,

$$g' \prec g.$$

L. “Si para cada sección  $A$  de un conjunto bien ordenado  $F$  existe una sección  $B$  similar a ella de otro conjunto bien ordenado  $G$ , y si por el contrario, existe al menos una sección de  $G$  que no sea similar a ninguna sección de  $F$ , entonces existe una sección  $B_1$  de  $G$  tal que  $B_1 \simeq F$ .”

Demostración. Consideramos todas las secciones de  $G$ , para las que no hay ninguna sección similar en  $F$ ; entre ellas debe existir la más pequeña, que llamamos  $B_1$ . Esto se sigue de que, por el Teorema A, §12, el conjunto de todos los elementos que determinan esas secciones tiene un menor elemento; la sección  $B_1$  de  $G$  determinada por éste es la menor de aquella colección. Según el Teorema J, cada sección de  $G$ , que sea  $> B_1$  no es similar a ninguna sección de  $F$ ; por lo que todas las secciones de  $G$  que sean similares a alguna de  $F$  deben ser  $< B_1$ , y de hecho a cada sección  $B < B_1$  corresponde una sección similar  $A$  de  $F$ , pues  $B_1$  es la menor sección de  $G$  para la cual no existe una sección en  $F$  similar a ella.

Por lo anterior existe para cada sección  $A$  de  $F$  una sección similar  $B$  de  $B_1$  y para cada sección  $B$  de  $B_1$  una sección similar  $A$  de  $F$ ; por el Teorema K se cumple entonces que

$$F \simeq B_1.$$

M. “Si el conjunto bien ordenado  $G$  tiene al menos una sección para la que no existe una sección similar a ella en el conjunto bien ordenado  $F$ , entonces cada sección  $A$  de  $F$  debe ser similar a alguna sección  $B$  de  $G$ .”

Demostración. Sea  $B_1$  la menor sección de  $G$  para la que no existe una sección en  $F$  similar a ella. (Compárese con la demostración de L.) Si hubiese secciones en  $F$  para las que no existieran secciones de  $G$  similares a ellas, habría también entre ellas una menor, digamos  $A_1$ . Cada sección de  $A_1$  sería entonces similar a alguna sección de  $B_1$  y cada sección de  $B_1$  sería similar a alguna sección de  $A_1$ . Se seguiría que, por el Teorema K,

$$B_1 \simeq A_1.$$

[215] Pero esto contradice el que  $B_1$  no es similar a ninguna sección de  $F$ . Por lo tanto, no puede haber una sección en  $F$  que no sea similar a alguna sección en  $G$ .

N. “Si  $F$  y  $G$  son dos conjuntos bien ordenados, entonces ya sea que 1)  $F$  y  $G$  son similares, o 2) existe una sección  $B_1$  de  $G$  a la cual  $F$  es similar, o 3) existe una sección  $A_1$  de  $F$  a la cual  $G$  es similar; y cada uno de estos casos excluye la posibilidad de los otros dos”.

Demostración. El comportamiento de  $F$  con  $G$  tiene tres posibilidades:

1) Cada sección  $A$  de  $F$  es similar a alguna sección  $B$  de  $G$  y recíprocamente, cada sección  $B$  de  $G$  es similar a alguna sección  $A$  de  $F$ .

2) Cada sección  $A$  de  $F$  es similar a alguna sección  $B$  de  $G$ , pero existe al menos una sección  $B$  de  $G$  que no es similar a ninguna sección de  $F$ .

3) Cada sección  $B$  de  $G$  es similar a alguna sección  $A$  de  $F$ , pero existe al menos una sección  $A$  de  $F$  que no es similar a ninguna sección de  $G$ .

El caso en el que exista una sección de  $F$  que no es similar a ninguna de  $G$  y que existe una sección de  $G$  que no es similar a ninguna sección de  $F$  no es posible; se excluye por el Teorema M.

Por el Teorema K en el *primer caso* se cumple que

$$F \simeq G.$$

Por el Teorema L en el *segundo caso* existe una sección  $B_1$  de  $B$  tal que

$$B_1 \simeq F,$$

y en el *tercer caso* existe una sección  $A_1$  de  $F$  tal que

$$A_1 \simeq G.$$

Pero no puede ocurrir simultáneamente  $F \simeq G$  y  $F \simeq B_1$ , pues en tal caso tendríamos también  $G \simeq B_1$ , en oposición al Teorema B, y por la misma razón no pueden ocurrir simultáneamente  $F \simeq G$  y  $G \simeq A_1$ .

Pero también es imposible la validez simultánea de  $F \simeq B_1$  y  $G \simeq A_1$ ; porque por el Teorema A de  $F \simeq B_1$  se deduciría la existencia de una sección  $B'_1$  de  $B_1$  tal que  $A_1 \simeq B'_1$ . Pero se tendría entonces  $G \simeq B'_1$  en oposición al Teorema B.

O. “Si un subconjunto  $F'$  de un conjunto bien ordenado  $F$  no es similar a ninguna sección de  $F$ , entonces es similar a  $F$  mismo”.

Demostración. Por el Teorema C, §12  $F'$  es un conjunto bien ordenado. Si  $F'$  no fuera similar a ninguna sección de  $F$  ni a  $F$  mismo, existiría por el Teorema N una sección  $F'_1$  de  $F'$ , que sería similar a  $F$ . Pero [216]

$F'_1$  es un subconjunto de la sección  $A$  de  $F$ , que está determinada por el mismo elemento que el que determina la sección  $F'_1$  de  $F'$ . Por lo tanto, el conjunto  $F$  sería similar a un subconjunto de una de sus secciones, lo que contradice el Teorema C.

#### §14.

##### Los números ordinales de conjuntos bien ordenados.

Según el §7 cada conjunto simplemente ordenado  $M$  tiene asociado un determinado *tipo ordinal*  $\bar{M}$ ; ésta es la noción general que se obtiene de  $M$  a partir de la jerarquía entre sus elementos sin considerar la naturaleza de estos, de tal suerte que de ellos se obtienen unidades que están sujetas a una determinada jerarquía. *Para todos los conjuntos similares entre sí y sólo para ellos está asociado un mismo tipo ordinal.*

El tipo ordinal de un conjunto bien ordenado  $F$  lo llamamos “*número ordinal*”

Si  $\alpha$  y  $\beta$  son dos números ordinales arbitrarios, entonces tienen tres posibles relaciones entre sí. A saber, si  $F$  y  $G$  son dos conjuntos bien ordenados tales que

$$\bar{F} = \alpha, \bar{G} = \beta,$$

entonces por el Teorema N, §13 existen *tres* casos posibles mutuamente excluyentes:

1)

$$F \simeq G.$$

2) Existe una sección  $B_1$  de  $G$ , tal que

$$F \simeq B_1.$$

3) Existe una sección  $A_1$  de  $F$  tal que

$$G \simeq A_1.$$

Como se observa fácilmente, cualquiera de estos casos sigue cumpliéndose, si  $F$  y  $G$  se sustituyen por conjuntos similares a ellos  $F'$  y  $G'$ ; según eso, tenemos que tratar con tres posibles relaciones mutuamente excluyentes entre los tipos  $\alpha$  y  $\beta$ .

En el primer caso se tiene  $\alpha = \beta$ ; en el segundo decimos que  $\alpha < \beta$ , en el tercero que  $\alpha > \beta$ .

Tenemos entonces el teorema:

A. “Si  $\alpha$  y  $\beta$  son dos números ordinales arbitrarios, entonces se cumple  $\alpha = \beta$  o  $\alpha < \beta$  o  $\alpha > \beta$ ”.

De la definición de mayor y menor se sigue fácilmente:

B. “Si se tienen tres números ordinales  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y se cumple  $\alpha < \beta$ ,  $\beta < \gamma$ , entonces se cumple también  $\alpha < \gamma$ .”

Así que los números ordinales conforman según su orden un conjunto simplemente ordenado; después se mostrará que de hecho forman un conjunto bien ordenado.

[217] Las operaciones definidas en §8 de *adición y multiplicación* de tipos ordinales de conjuntos simplemente ordenados arbitrarios se utilizan, naturalmente, también en los números ordinales.

Si  $\alpha = F$ ,  $\beta = G$ , donde  $F$  y  $G$  son dos conjuntos bien ordenados, entonces

$$(1) \quad \alpha + \beta = \overline{(F, G)}.$$

El conjunto unión  $(F, G)$  es claramente un conjunto bien ordenado; tenemos entonces el teorema:

C. “La suma de dos números ordinales es también un número ordinal”.

En la suma  $\alpha + \beta$ ,  $\alpha$  se llama el “*augendus*”,  $\beta$  el “*adendus*”.

Puesto que  $F$  es una sección de  $(F, G)$ , siempre se cumple que:

$$(2) \quad \alpha < \alpha + \beta.$$

Por el contrario,  $G$  no es una sección, sino el resto de  $(F, G)$ , por lo que puede ser similar, como vimos en §13, al conjunto  $(F, G)$ ; si esto no se cumple, entonces  $G$  es, por el Teorema O, §13, similar a una sección de  $(F, G)$ . Por lo que

$$(3) \quad \beta \leq \alpha + \beta.$$

Así que tenemos:

D. “La suma de dos números ordinales siempre es mayor que el *augendus*, en cambio es mayor o igual que el *adendus*. Si se tiene  $\alpha + \beta = \alpha + \gamma$ , siempre se deduce que  $\beta = \gamma$ .”

En general  $\alpha + \beta$  y  $\beta + \alpha$  no son iguales. En cambio se tiene, cuando  $\gamma$  es un tercer número ordinal, que

$$(4) \quad (\alpha + \beta) + \gamma = \alpha + (\beta + \gamma).$$

Así que:

E. “La ley asociativa se cumple en la adición de números ordinales.”

Si se substituye en el conjunto  $G$  con tipo  $\beta$  cada elemento  $g$  por un conjunto  $Fg$  de tipo  $\alpha$ , entonces se obtiene del Teorema E, §12, un conjunto bien ordenado  $H$ , cuyo tipo está totalmente determinado por los tipos  $\alpha$  y  $\beta$  y se llama el producto  $\alpha \cdot \beta$ :

$$(5) \quad \bar{F}_g = \alpha,$$

$$(6) \quad \alpha \cdot \beta = \bar{H}.$$

F. “El producto de dos números ordinales es también un número ordinal.”

En el producto  $\alpha \cdot \beta$ ,  $\alpha$  se conoce como el “multiplicandus”, y  $\beta$  como el “multiplicator”.

En general, los números  $\alpha \cdot \beta$  y  $\beta \cdot \alpha$  no son iguales. Pero se tiene (§8)

$$(7) \quad (\alpha \cdot \beta) \cdot \gamma = \alpha \cdot (\beta \cdot \gamma).$$

Es decir,

[218] G. “La ley asociativa se cumple en la multiplicación de números ordinales”.

La ley distributiva se cumple en general (§8) sólo en la siguiente forma:

$$(8) \quad \alpha \cdot (\beta + \gamma) = \alpha \cdot \beta + \alpha \cdot \gamma.$$

En relación a la magnitud del producto se cumple el siguiente teorema, que se verifica fácilmente:

H. “Si el multiplicator es mayor que 1, el producto de dos números ordinales siempre es mayor que el multiplicandus, y es mayor o igual que el multiplicator. Si se tiene  $\alpha\beta = \alpha\gamma$ , siempre se deduce que  $\beta = \gamma$ .”

Por otro lado, es claro que

$$(9) \quad \alpha \cdot 1 = 1 \cdot \alpha = \alpha.$$

También tenemos la operación de substracción. Si  $\alpha$  y  $\beta$  son dos números ordinales y  $\alpha < \beta$ , entonces siempre existe un determinado número ordinal, que llamaremos  $\beta - \alpha$ , que satisface la ecuación

$$(10) \quad \alpha + (\beta - \alpha) = \beta.$$

Pues si  $G = \beta$ , entonces  $G$  tiene una sección  $B$ , tal que  $B = \alpha$ ; el resto correspondiente lo llamamos  $S$  y tenemos

$$G = (B, S) \text{ y}$$

$$\beta = \alpha + S,$$

así que

$$(11) \quad \beta - \alpha = \bar{S}.$$

La determinación de  $\beta - \alpha$  se obtiene de que la sección  $B$  de  $G$  está totalmente determinada, por lo que  $S$  también está dado en forma única. Resaltamos las siguiente fórmulas, producto de (4), (8) y (10):

$$(12) \quad (\gamma + \beta) - (\gamma + \alpha) = \beta - \alpha,$$

$$(13) \quad \gamma(\beta - \alpha) = \gamma\beta - \gamma\alpha.$$

De gran significado es que siempre se pueden sumar una cantidad infinita de números ordinales, y su suma es un número ordinal bien determinado sólo dependiente de la sucesión de sus sumandos.

Si, digamos,

$$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_v, \dots$$

es una sucesión arbitraria, simple e infinita de números ordinales y se tiene

$$(14) \quad \beta_v = \bar{G}_v,$$

[219] entonces también

$$(15) \quad G = (G_1, G_2, \dots, G_v, \dots)$$

es un conjunto bien ordenado, cuyo número ordinal  $\beta$  representa la suma de los  $\beta_v$ . Así que

$$(16) \quad \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_v + \dots = \bar{G} = \beta,$$

y se tiene, como se desprende fácilmente de la definición de producto, que

$$(17) \quad \gamma \cdot (\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_v + \dots) =$$

$$\gamma \cdot \beta_1 + \gamma \cdot \beta_2 + \dots + \gamma \cdot \beta_v + \dots$$

Si hacemos

$$(18) \quad \alpha_v = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_v,$$

entonces

$$(19) \quad \alpha_v = \overline{(G_1, G_2, \dots, G_v)}.$$

Se cumple

$$(20) \quad \alpha_{v+1} > \alpha_v,$$

y según (10) podemos expresar los números  $\beta_v$  mediante los números  $\alpha_v$  como sigue:

$$(21) \quad \beta_1 = \alpha_1; \beta_{v+1} = \alpha_{v+1} - \alpha_v.$$

La sucesión

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_v, \dots$$

representa entonces una sucesión infinita *arbitraria* de números ordinales que satisfacen la *condición* (20); la llamamos una “*sucesión fundamental*” de números ordinales (§10); entre ellos y  $\beta$  se origina una relación que podemos expresar del siguiente modo:

1)  $\beta$  es  $> \alpha_v$  para cada  $v$ , pues el conjunto  $(G_1, G_2, \dots, G_v)$ , cuyo número ordinal es  $\alpha_v$ , es una sección del conjunto  $G$  que tiene número ordinal  $\beta$ .

2) Si  $\beta'$  es algún número ordinal  $< \beta$ , entonces a partir de un cierto  $v$  se cumple siempre

$$\alpha_v > \beta'.$$

Porque, dado que  $\beta' < \beta$ , existe una sección  $B'$  del conjunto  $G$  de tipo  $\beta'$ . El elemento de  $G$  que determina esta sección debe pertenecer a alguno de los subconjuntos  $G_v$ , que llamamos  $G_{v_0}$ .

Pero entonces  $B'$  es también una sección de  $(G_1, G_2, \dots, G_{v_0})$  y por consiguiente  $\beta' < \alpha_{v_0}$ , por lo que

$$\alpha_v > \beta'$$

para  $v \geq v_0$ .

Por lo anterior resulta  $\beta$  el ordinal más pequeño sucesor de todos los  $\alpha_v$ ; por ello lo llamaremos “*el límite*” de los  $\alpha_v$  para  $v$  creciente y lo denotamos con  $\text{Lím}_v \alpha_v$ , de tal suerte que por (16) y (21)

$$(22) \quad \text{Lím}_v \alpha_v = \alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) + \dots + (\alpha_{v+1} - \alpha_v) + \dots$$

[220] Podemos expresar lo anterior en el siguiente Teorema:

I. “A cada sucesión fundamental  $\{\alpha_v\}$  de números ordinales pertenece un número ordinal  $\text{Lím}_v \alpha_v$ , que sucede inmediatamente, según su magnitud, a todos los  $\alpha_v$ ; se representa mediante la Fórmula (22).”

Si  $\gamma$  es un número ordinal fijo, se demuestra con facilidad con ayuda de las fórmulas (12), (13), (17) los teoremas contenidos en las siguientes fórmulas:

$$(23) \quad \text{Lím}_v (\gamma + \alpha_v) = \gamma + \text{Lím}_v \alpha_v,$$

$$(24) \quad \text{Lím}_v \gamma + \alpha_v = \gamma \cdot \text{Lím}_v \alpha_v.$$

Ya hemos mencionado en §7 que todos los conjuntos simplemente ordenados con número cardinal *finito* dado  $\nu$  tienen el mismo tipo ordinal. Esto se puede demostrar como a continuación. Cada conjunto simplemente ordenado con número cardinal *finito* es un conjunto *bien ordenado*; porque tanto él como cada uno de sus subconjuntos deben tener un menor elemento, lo que lo caracteriza según el Teorema B, §12 como un conjunto bien ordenado.

Los tipos de los conjuntos simplemente ordenados finitos no son, por tanto, otra cosa que *números ordinales finitos*. Dos números ordinales distintos  $\alpha$  y  $\beta$  no pueden asociarse al mismo número cardinal *finito*  $\nu$ . En efecto, si  $\alpha < \beta$  y  $\bar{G} = \beta$ , existe, como ya sabemos, una sección  $B$  de  $G$  con  $\bar{B} = \alpha$ .

Entonces el conjunto  $G$  y su subconjunto  $B$  se servirían del mismo número cardinal  $\nu$ . Pero esto es imposible según el Teorema C, §6.

Los *números ordinales finitos* coinciden en sus propiedades con los *números cardinales finitos*.

Muy distinto se comportan los *números ordinales transfinitos*; para un número cardinal transfinito  $\alpha$  existe una cantidad infinita de números ordinales, que conforman un sistema intrinsecamente relacionado, que llamaremos la “clase de números  $Z(\alpha)$ ”. Ella es una subclase de la clase tipo  $[\alpha]$  (§7).

El siguiente asunto a considerar lo conforma la clase de números  $Z(\aleph_0)$ , que llamaremos la *segunda clase de números*.

En este contexto entendemos por *primera clase de números* la totalidad  $\{\nu\}$  de los números ordinales *finitos*.

[221]

### §15.

#### Los números de la segunda clase de números $Z(\aleph_0)$ .

La *segunda clase de números*  $Z(\aleph_0)$  es la totalidad  $\{\alpha\}$  de los tipos ordinales  $\alpha$  de conjuntos bien ordenados con número cardinal  $\aleph_0$  (§6).

A. “La segunda clase de números tiene un menor número  $\omega = \text{Lim}, \nu$ .”

Demostración. Por  $\omega$  entendemos el tipo del conjunto bien ordenado

$$(1) \quad F_0 = (f_1, f_2, \dots, f_\nu, \dots),$$

donde  $\nu$  recorre los números ordinales finitos y

$$(2) \quad f_\nu \prec f_{\nu+1}.$$

Así que (§7)

$$(3) \quad \omega = \bar{F}_0$$

y (§6)

$$(4) \quad \bar{\omega} = \aleph_0.$$



Por lo tanto,  $\omega$  es un número de la segunda clase, y de hecho, el *menor*. Pues si  $\gamma$  es un número ordinal  $< \omega$ , debe ser el tipo (§14) de una sección de  $F_0$ . Pero  $F_0$  sólo tiene secciones de la forma

$$A = (f_1, f_2, \dots, f_\nu)$$

con  $\nu$  un número ordinal *finito*. Por consiguiente  $\gamma = \nu$ .

Así que no existen números ordinales *transfinitos* menores que  $\omega$ , que por ello es el menor de todos. Por la definición de  $\text{Lim}_\nu \alpha_\nu$  dada en §14 se cumple claramente que  $\omega = \text{Lim}_\nu \nu$ .

B. “Si  $\alpha$  es un número de la segunda clase, su sucesor inmediato en la misma clase de números es el número  $\alpha + 1$ ”.

Demostración. Sea  $F$  un conjunto bien ordenado de tipo  $\alpha$  y con número cardinal  $\aleph_0$ , es decir

$$(5) \quad \bar{F} = \alpha,$$

$$(6) \quad \bar{\alpha} = \aleph_0.$$

Si  $g$  es un nuevo elemento, tenemos que

$$(7) \quad \alpha + 1 = \overline{(F, g)}.$$

Puesto que  $F$  es una sección de  $(F, g)$ , tenemos

$$(8) \quad \alpha + 1 > \alpha.$$

Se cumple que

$$\overline{\alpha + 1} = \bar{\alpha} + 1 = \aleph_0 + 1 = \aleph_0 \quad (\S 6).$$

El número  $\alpha + 1$  pertenece entonces a la segunda clase de números.

[222] Entre  $\alpha$  y  $\alpha + 1$  no hay números ordinales; pues cada número  $\gamma$  que sea  $< \alpha + 1$  corresponde al tipo de una sección de  $(F, g)$ ; tal sección sólo puede ser  $F_0$  una sección de  $F$ . Así que  $\gamma$  es  $\delta < \alpha$ .

C. “Si  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\nu, \dots$  es una sucesión fundamental de números de la primera o segunda clase de números, entonces el número  $\text{Lim}_\nu \alpha_\nu$  (§14) sucesor inmediato de todos los  $\alpha_\nu$  pertenece a la segunda clase de números.”

Demostración. Por §14 se obtiene de la sucesión fundamental  $\{\alpha_\nu\}$  el número  $\text{Lim}_\nu \alpha_\nu$ , si producimos otra sucesión  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_\nu, \dots$  tal que

$$\beta_1 = \alpha_1, \beta_2 = \alpha_2 - \alpha_1, \dots, \beta_{\nu+1} = \alpha_{\nu+1} - \alpha_\nu, \dots$$

Si  $G_1, G_2, \dots, G_\nu, \dots$  son conjuntos bien ordenados tales que

$$\bar{G}_\nu = \beta_\nu,$$

entonces también

$$G = (G_1, G_2, \dots, G_\nu, \dots)$$

es un conjunto bien ordenado y

$$\text{Lim}_v \alpha_v = \overline{G}.$$

Se trata ahora sólo de probar que

$$\overline{\overline{G}} = \aleph_0.$$

Pero puesto que los números  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_v, \dots$  pertenecen a la primera o segunda clase, entonces

$$\overline{\overline{G}_v} \leq \aleph_0$$

y por ello

$$\overline{\overline{G}} \leq \aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0.$$

Pero como  $G$  es un conjunto transfinito, se excluye el caso  $\overline{\overline{G}} < \aleph_0$ .

Dos *sucesiones fundamentales*  $\{\alpha_v\}$  y  $\{\alpha'_v\}$  de números de la primera o segunda clase de números las llamamos “*correspondientes*”, en símbolos

$$(9) \quad \{\alpha_v\} \parallel \{\alpha'_v\},$$

si para cada  $v$  existen números finitos  $\lambda_0, \mu_0$  tales que

$$(10) \quad \alpha'_\lambda > \alpha_v, \lambda \geq \lambda_0,$$

y

$$(11) \quad \alpha_\mu > \alpha'_v, \mu \geq \mu_0.$$

[223] D. “*Los números límite  $\text{Lím}_v \alpha_v$  y  $\text{Lím}_v \alpha'_v$  correspondientes a las sucesiones fundamentales  $\{\alpha_v\}, \{\alpha'_v\}$  son iguales si y sólo si  $\{\alpha_v\} \parallel \{\alpha'_v\}$ .”*

Demostración. Por simplicidad hacemos  $\text{Lím}_v \alpha_v = \beta$ ,  $\text{Lím}_v \alpha'_v = \gamma$ .

Primero supongamos que  $\{\alpha_v\} \parallel \{\alpha'_v\}$ , y afirmamos que  $\beta = \gamma$ . En efecto, si  $\beta$  no fuera igual a  $\gamma$ , alguno de estos dos números debería ser el menor, digamos  $\beta < \gamma$ . A partir de un cierto  $v$  tendríamos  $\alpha'_v > \beta$ , por lo que según (11) a partir de un cierto  $\mu$   $\alpha_\mu > \beta$ . Pero esto es imposible, porque  $\beta = \text{Lím}_v \alpha_v$  así que para toda  $\mu$   $\alpha_\mu < \beta$ .

Si recíprocamente, se supone que  $\beta = \gamma$ , puesto que  $\alpha_v < \gamma$ , se debe cumplir que  $\alpha'_v > \alpha_v$  a partir de un cierto  $\lambda$  y dado que  $\alpha'_v < \beta$  a partir de un cierto  $\mu$ , debemos tener  $\alpha_\mu > \alpha'_v$ ; es decir,  $\{\alpha_v\} \parallel \{\alpha'_v\}$ .

E. “*Si  $\alpha$  es un número de la segunda clase de números,  $v_0$  un número ordinal finito arbitrario, entonces  $v_0 + \alpha = \alpha$ , por lo que también  $\alpha - v_0 = \alpha$ .”*

Demostración. Primero nos convencemos de la validez del teorema cuando  $\alpha = \omega$ . Se tiene

$$\omega = \overline{(f_1, f_2, \dots, f_v, \dots)},$$

$$v_0 = \overline{(g_1, g_2, \dots, g_{v_0}, \dots)},$$

así que

$$v_0 + \omega = \overline{(g_1, g_2, \dots, g_{v_0}, f_1, f_2, \dots, f_{v_0}, \dots)} = \omega.$$

Pero si  $\alpha > \omega$ , tenemos que

$$\alpha = \omega + (\alpha - \omega),$$

$$v_0 + \alpha = (v_0 + \omega) + (\alpha - \omega) = \omega + (\alpha - \omega) = \alpha.$$

F. “Si  $v_0$  es un número ordinal finito, entonces  $v_0 \cdot \omega = \omega$ .”

Demostración. Para obtener un conjunto de tipo  $v_0 \cdot \omega$ , se deben sustituir los elementos  $f_v$  del conjunto  $(f_1, f_2, \dots, f_v, \dots)$  por conjuntos  $(g_{v,1}, g_{v,2}, \dots, g_{v,v_0})$  de tipo  $v_0$ . Se obtiene el conjunto

$$(g_{1,1}, g_{1,2}, \dots, g_{1,v_0}, g_{2,1}, \dots, g_{2,v_0}, \dots, g_{v,1}, g_{v,2}, \dots, g_{v,v_0}, \dots),$$

que es claramente similar al conjunto  $\{f_v\}$ ; en consecuencia

$$v_0 \omega = \omega.$$

En forma más breve se obtiene lo mismo como sigue: según (24) §14 y puesto que  $\omega = \text{Lim}_v v$ , se tiene

$$v_0 \omega = \text{Lim}_v v_0 v.$$

Por otro lado,

$$\{v_0 v\} \parallel \{v\},$$

por lo que

$$\lim_v v_0 v = \lim_v v = \omega.$$

así que

$$v_0 \omega = \omega.$$

[224]

G. “Siempre se cumple

$$(\alpha + v_0)\omega = \alpha\omega,$$

para un número  $\alpha$  de la segunda clase y  $v_0$  un número de la primera clase.”

Demostración. Tenemos

$$\lim_v v = \omega.$$

Según (24) §14 se deduce que

$$(\alpha + v_0)\omega = \lim_v (\alpha + v_0)v.$$

Pero entonces

$$(\alpha + v_0)v = \overline{(\alpha + v_0)^1} + \overline{(\alpha + v_0)^2} + \dots + \overline{(\alpha + v_0)^v}$$

$$\begin{aligned}
&= \alpha + \overbrace{\alpha}^1 + \overbrace{\alpha}^2 + \dots + \overbrace{\alpha}^{(v-1)} + v_0 \\
&= \frac{1}{\alpha} + \frac{2}{\alpha} + \dots + \frac{v}{\alpha} + v_0 \\
&= \alpha v + v_0.
\end{aligned}$$

Ahora se tiene, como se verifica fácilmente

$$\{\alpha v + v_0\} \parallel \{\alpha v\}$$

y por consiguiente

$$\text{Lim}_v(\alpha + v_0)v = \text{Lim}_v(\alpha v + v_0) = \text{Lim}_v \alpha v = \alpha \omega.$$

H. "Si  $\alpha$  es un número de la segunda clase de números, entonces la totalidad  $\{\alpha'\}$  de los números  $\alpha'$  de la primera y segunda clase de números menores que  $\alpha$  conforman un conjunto bien ordenado, de acuerdo a su magnitud, con tipo  $\alpha$ ".

Demostración. Sea  $F$  un conjunto bien ordenado tal que  $\overline{F} = \alpha$ ; sea  $f_1$  el menor elemento de  $F$ . Si  $\alpha'$  es un número ordinal arbitrario  $< \alpha$ , entonces existe (§14) una sección  $A'$  de  $F$  tal que

$$\overline{A'} = \alpha',$$

y recíprocamente, cada sección  $A'$  determina por su tipo  $\overline{A'} = \alpha'$  un número  $\alpha' < \alpha$  de la primera o segunda clase de números, porque, en vista de que  $\overline{F} = \aleph_0$ ,  $\overline{A'}$  sólo puede ser un número cardinal finito o  $\aleph_0$ .

La sección  $A'$  está determinada por un elemento  $f' \succ f_1$  de  $F$ , y recíprocamente, cada elemento  $f' \succ f_1$  de  $F$  determina una sección  $A'$  de  $F$ . Si  $f'$  y  $f''$  son dos elementos  $\succ f_1$  de  $F$ ,  $A'$  y  $A''$  son las secciones que determinan en  $F$ ,  $\alpha'$  y  $\alpha''$  sus tipos ordinales, y si, digamos,  $f' \prec f''$ , entonces (§13)  $A' < A''$ , por lo que  $\alpha' < \alpha''$ .

[225] Por ello hagamos  $F = (f_1, F')$ , y logramos una aplicación entre estos conjuntos, si asociamos al elemento  $\alpha'$  de  $\{\alpha'\}$  el elemento  $f'$  de  $F'$ . Con ello se tiene

$$\overline{\{\alpha'\}} = \overline{F'}.$$

Pero se cumple  $\overline{F'} = \alpha - 1$  y (según el Teorema E)  $\alpha - 1 = \alpha$ , por lo que

$$\overline{\{\alpha'\}} = \alpha.$$

Ya que  $\overline{\alpha} = \aleph_0$ , entonces también  $\overline{\{\alpha'\}} = \aleph_0$ ; en consecuencia, se cumple:

J. “El conjunto  $\{\alpha'\}$  de los números  $\alpha'$  de la primera y segunda clase menores que un número  $\alpha$  de la segunda clase de números, tiene cardinalidad  $\aleph_0$ .”

K. “Cada número  $\alpha$  de la segunda clase de números se obtiene de un predecesor inmediato  $\underline{\alpha}_1$  mediante la adición de 1:

$$\alpha = \underline{\alpha}_1 + 1,$$

o se puede dar una sucesión fundamental  $\{\alpha_v\}$  de números de la primera o segunda clase de números tal que

$$\alpha = \lim_v \alpha_v.”$$

Demostración. Sea  $\alpha = \overline{F}$ . Si  $F$  tiene un mayor elemento  $g$ , entonces  $F = (A, g)$ , donde  $A$  es la sección determinada por  $g$  en  $F$ . Entonces tenemos el primer caso, a saber,

$$\alpha = \overline{A} + 1 = \underline{\alpha}_1 + 1.$$

En consecuencia, existe un *predecesor inmediato* que también se llama  $\alpha_1$ .

Si  $F$  no posee un mayor elemento, entonces consideramos el conjunto  $\{\alpha'\}$  de los números de la primera y segunda clase de números que sean menores que  $\alpha$ . Por el Teorema *H* el conjunto  $\{\alpha'\}$  es similar en su orden al conjunto  $F$ ; por ello entre los números  $\alpha'$  no hay ninguno que sea el mayor. Según el Teorema *J*, el conjunto  $\{\alpha'\}$  se puede poner en la forma de una sucesión simple  $\{\alpha'_v\}$  infinita. Si empezamos con  $\alpha'_1$ , entonces los sucesores según este orden, que difiere del orden según la magnitud,  $\alpha'_2, \alpha'_3, \dots$  serán menores que  $\alpha'_1$ ; en cualquier caso en lo sucesivo aparecen miembros  $> \alpha'_1$ ; porque  $\alpha'_1$  no puede ser mayor que el resto de los miembros, ya que entre los números  $\{\alpha'_v\}$  no hay uno mayor. Entre los  $\alpha'_v$  mayores que  $\alpha'_1$  sea  $\alpha'_{\rho_2}$  el de menor índice. De igual manera, sea  $\alpha'_{\rho_3}$  el número de la sucesión  $\{\alpha'_v\}$  mayor que  $\alpha'_{\rho_2}$  con el menor índice. Si continuamos así, obtenemos una sucesión infinita creciente de números, una sucesión fundamental

$$\alpha'_1, \alpha'_{\rho_2}, \alpha'_{\rho_3}, \dots, \alpha'_{\rho_v}, \dots$$

[226]

Se cumple que

$$1 < \rho_2 < \rho_3 < \dots < \rho_v < \rho_{v+1}, \dots$$

$$\alpha'_1 < \alpha'_{\rho_2} < \alpha'_{\rho_3} < \dots < \alpha'_{\rho_v} < \alpha'_{\rho_{v+1}}, \dots$$

$$\alpha'_\mu < \alpha'_{\rho_\nu}, \text{ cuando } \mu < \rho_\nu,$$

y ya que claramente  $\nu \leq \rho_\nu$ , siempre tenemos

$$\alpha'_\nu \leq \alpha'_{\rho_\nu}.$$

Se deduce que cada número  $\alpha'_\nu$ , y por ello también cada número  $\alpha' < \alpha$  será superado por un número  $\alpha'_{\rho_\nu}$  para un valor de  $\nu$  suficientemente grande.

Pero  $\alpha$  es el sucesor inmediato de todos los números  $\alpha'$ , por ello es también el sucesor inmediato de los  $\alpha'_{\rho_\nu}$ . Por lo anterior, hacemos  $\alpha'_1 = \alpha_1$ ,  $\alpha'_{\rho_{\nu+1}} = \alpha_{\nu+1}$ , así que

$$\alpha = \text{Lim}_\nu \alpha'_\nu.$$

De los Teoremas B, C, . . . , K se desprende que los números de la segunda clase de números se obtienen en dos formas a partir de números menores. A los de la primera, los llamamos *números del primer tipo*, se obtienen de un predecesor inmediato  $\underline{\alpha}_1$  mediante la adición de 1, según la fórmula

$$\alpha = \underline{\alpha}_1 + 1;$$

los otros, los llamamos *números del segundo tipo*, son aquellos para los cuales *no existe un predecesor inmediato*  $\underline{\alpha}_1$ ; estos aparecen como *números límite de sucesiones fundamentales*  $\{\alpha_\nu\}$  según la fórmula:

$$\alpha = \lim_\nu \alpha_\nu.$$

Aquí  $\alpha$  es el sucesor inmediato, según el orden, de todos los números  $\alpha_\nu$ .

Estas dos formas de reducir números mayores a menores la llamamos *el primero y segundo principio de construcción* de los números de la segunda clase de números.

### §16.

#### **La cardinalidad de la segunda clase de números es igual al segundo menor número cardinal transfinito álef uno.**

Antes de que nos dediquemos en los siguientes párrafos a los números de la segunda clase de números y su cardinalidad dominante, queremos responder la pregunta sobre el número cardinal asociado al conjunto de todos estos números,  $Z(\aleph_0) = \{\alpha\}$ .

[227] A. “La totalidad  $\{\alpha\}$  de los números  $\alpha$  de la segunda clase de números conforma un conjunto bien ordenado según la magnitud”.

Demostración. Por  $A_\alpha$  entendemos la totalidad de los números de la *segunda* clase de números, menores que el número dado  $\alpha$ , en su orden de acuerdo a la magnitud, así que  $A_\alpha$  es un conjunto bien ordenado de tipo  $\alpha - \omega$ . Esto se deduce del Teorema H, §15. El conjunto, que allí se denotó con  $\{\alpha'\}$ , de todos los números  $\alpha'$  de la *primera y segunda* clase de números se obtiene de la unión de  $\{v\}$  y  $A_\alpha$ , de tal suerte que

$$\{\alpha'\} = (\{v\}, A_\alpha).$$

Por ello

$$\overline{\{\alpha'\}} = \overline{\{v\}} + \overline{A_\alpha}$$

y puesto que

$$\overline{\{\alpha'\}} = \alpha, \quad \overline{\{v\}} = \omega,$$

se cumple que

$$\overline{A_\alpha} = \alpha - \omega.$$

Sea  $J$  un subconjunto de  $\{\alpha\}$  tal que existen números en  $\{\alpha\}$  mayores que todos los números en  $J$ . Sea  $\alpha_0$  uno de esos números. Entonces  $J$  también es un subconjunto de  $A_{\alpha_0+1}$ , y de hecho, tal que al menos el número  $\alpha_0$  de  $A_{\alpha_0+1}$  es mayor que todos los números en  $J$ . Puesto que  $A_{\alpha_0+1}$  es un conjunto bien ordenado, debe existir (§12) un número  $\alpha'$  de  $A_{\alpha_0+1}$ , y que por ello pertenece a  $\{\alpha\}$ , que sea el sucesor inmediato de todos los números en  $J$ . Con ello se satisfacen las condiciones II, §12 respecto a  $\{\alpha\}$ ; la condición I, §12 también se satisface, pues  $\{\alpha\}$  contiene al menor número  $\omega$ .

Si aplicamos los teoremas A y C al conjunto  $\{\alpha\}$ , se obtienen los siguientes teoremas:

B. “Cada conjunto de números distintos de la primera y segunda clase de números tiene un menor elemento, un mínimo”.

C. “Cada conjunto de números distintos de la primera y segunda clase de números considerados con el orden respecto a la magnitud es un conjunto bien ordenado”.

Primero se muestra que la cardinalidad de la segunda clase de números es distinta de la de los de la primera clase, que es  $\aleph_0$ .

D. “La cardinalidad de la totalidad  $\{\alpha\}$  de los números  $\alpha$  de la segunda clase de números no es igual a  $\aleph_0$ .”

Demostración. Si tuviésemos  $\overline{\{\alpha\}} = \aleph_0$ , podríamos representar a la totalidad de  $\{\alpha\}$  en la forma de una sucesión simple e infinita

$$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_v, \dots$$

[228]

de tal forma que  $\{\gamma_v\}$ , la totalidad de los números de la segunda clase de números, se podría representar en un orden distinto al dado por la magnitud y  $\{\gamma_v\}$  no contendría un mayor elemento, mucho menos  $\{\alpha\}$ .

Partiendo de  $\gamma_1$ , sea  $\gamma_{\rho_2}$  el miembro con menor índice de esa sucesión  $> \gamma_1$ ,  $\gamma_{\rho_3}$  el miembro con menor índice  $> \gamma_{\rho_2}$ , etcétera.

Obtenemos una sucesión infinita creciente de números

$$\gamma_1, \gamma_{\rho_2}, \dots, \gamma_{\rho_v}, \dots,$$

tal que

$$1 < \rho_2 < \rho_2 \cdot \dots \cdot \rho_2 < \rho_{v+1}, \dots,$$

$$\gamma_1 < \gamma_{\rho_2} < \gamma_{\rho_3} \dots \gamma_{\rho_v} < \gamma_{\rho_{v+1}},$$

$$\gamma_v \leq \gamma_{\rho_v}.$$

Según el Teorema C, §15 existiría un determinado número  $\delta$  de la segunda clase de números, a saber,

$$\delta = \lim_v \gamma_{\rho_v}.$$

que sería mayor que todos los  $\gamma_{\rho_v}$ ; por consiguiente se tendría

$$\delta > \gamma_v$$

para cada  $v$ .

Si  $\{\gamma_v\}$  contiene a todos los números de la segunda clase de números, tiene también al número  $\delta$ ; así que para un cierto  $v_0$  se cumpliría

$$\delta = \gamma_{v_0},$$

ecuación que es incompatible con la relación  $\delta > \gamma_{v_0}$ . La suposición  $\overline{\{\alpha\}} = \aleph_0$  conduce entonces a una contradicción.

E. “Un conjunto arbitrario  $\{\beta\}$  de números  $\beta$  de la segunda clase de números tiene, cuando es infinito, el número cardinal  $\aleph_0$  o el número cardinal  $\overline{\{\beta\}}$  de la segunda clase de números”.

Demostración. El conjunto  $\{\beta\}$  en el orden de magnitud es, como subconjunto del conjunto bien ordenado  $\{\alpha\}$  según el Teorema O, §13, similar a una sección  $A_{\alpha_0}$  del último (es decir, al conjunto de todos los números de la segunda clase de números  $< \alpha_0$ , en el orden dado por su magnitud) o es similar a  $\{\alpha\}$ . Como se probó en la demostración del Teorema A, se tiene  $\overline{A_{\alpha_0}} = \alpha_0 - \omega$ .

Tenemos entonces  $\overline{\{\beta\}} = \alpha_0 - \omega$  o  $\overline{\{\beta\}} = \overline{\{\alpha\}}$ , por lo que también  $\overline{\overline{\{\beta\}}}$  es  $= \overline{\alpha_0 - \omega}$  o  $= \overline{\{\alpha\}}$ . Pero  $\overline{\alpha_0 - \omega}$  es un número cardinal finito o  $= \aleph_0$



(teorema J, §15). El primer caso se excluye aquí pues  $\{\beta\}$  se supuso un conjunto infinito. Por lo tanto, el número cardinal  $\overline{\{\beta\}}$  es  $= \aleph_0$  o  $= \overline{\{\alpha\}}$ .

F. “La cardinalidad de la segunda clase de números  $\{\alpha\}$  es el segundo menor cardinal transfinito álef uno”.

[229] Demostración. No existe ningún número cardinal  $\alpha$  que sea  $> \aleph_0$  y  $< \overline{\{\alpha\}}$ . En caso contrario, por §2 existiría un subconjunto infinito  $\{\beta\}$  de  $\{\alpha\}$  tal que  $\overline{\{\beta\}} = \alpha$ .

Como consecuencia del Teorema E recién demostrado el conjunto  $\{\beta\}$  tiene el número cardinal  $\aleph_0$  o el número cardinal  $\overline{\{\alpha\}}$ . En consecuencia, el número cardinal  $\overline{\{\alpha\}}$  es necesariamente el sucesor inmediato, según magnitud, de  $\aleph_0$  que llamamos  $\aleph_1$ .

Por consiguiente, en la segunda clase de números  $Z(\aleph_0)$  tenemos el representante natural para el segundo menor número cardinal álef uno.

### §17.

#### Los números de la forma $\omega^\mu v_0 + \omega^{\mu-1} v_1 + \dots + v_\mu$ .

Es conveniente acostumbrarnos a trabajar con aquellos números de  $Z(\aleph_0)$  que son funciones enteras (rationales) de grado finito en  $\omega$ . Cada uno de tales números se puede escribir en forma única como

$$(1) \quad \varphi = \omega^\mu v_0 + \omega^{\mu-1} v_1 + \dots + v_\mu,$$

donde  $\mu, v_0$  son finitos y distintos de cero,  $v_1, v_2, \dots, v_\mu$  pueden ser cero. Esto se debe a que

$$(2) \quad \omega^{\mu'} v' + \omega^\mu v = \omega^\mu v,$$

cuando  $\mu' < \mu$  y  $v > 0$ .

Porque según (8), §14 se cumple

$$\omega^{\mu'} v' + \omega^\mu v = \omega^\mu (v' + \omega^{\mu-\mu'} v),$$

y por el Teorema E, §15

$$v' + \omega^{\mu-\mu'} v = \omega^{\mu-\mu'} v.$$

En consecuencia, en algunas expresiones de la forma

$$\dots + \omega^{\mu'} v' + \omega^\mu v + \dots$$

se puede prescindir de los miembros que, moviéndose hacia la derecha, suceden a miembros de grado en  $\omega$  superior. Este procedimiento se puede continuar hasta que se obtiene la fórmula en

(1). Debemos remarcar que

$$(3) \quad \omega^\mu + \omega^\mu v' = \omega^\mu (v + v')$$

Comparemos ahora el número  $\varphi$  con un número  $\psi$  del mismo tipo

$$(4) \quad \Psi = \omega^\lambda \rho_0 + \omega^{\lambda-1} \rho_1 + \cdots + \rho_\lambda.$$

Si  $\mu$  y  $\lambda$  son distintos, digamos  $\mu < \lambda$ , entonces por (2)

$$\varphi + \psi = \psi,$$

por lo que

$$\varphi < \psi.$$

[230] Si  $\mu = \lambda$ ,  $v_0$  y  $\rho_0$  son distintos y, digamos  $v_0 < \rho_0$ , entonces por (2)

$$\varphi + (\omega^\lambda(\rho_0 - v_0) + \omega^{\lambda-1} \rho_1 + \cdots + \rho_\mu) = \psi,$$

por lo que también

$$\varphi < \psi.$$

Finalmente, si

$$\mu = \lambda, v_0 = \rho_0, v_1 = \rho_1, \dots, v_{\sigma-1} = \rho_{\sigma-1}, \sigma \leq \mu,$$

mientras que  $v_\sigma$  y  $\rho_\sigma$  son distintos, digamos  $v_\sigma < \rho_\sigma$ , entonces por (2)

$$\varphi + (\omega^{\lambda-\sigma}(\rho_\sigma - v_\sigma) + \omega^{\lambda-\sigma-1} \rho_{\sigma+1} + \cdots + \rho_\mu) = \psi,$$

y otra vez

$$\varphi < \psi.$$

Así, hemos visto que sólo para identidad completa de las expresiones  $\varphi$  y  $\psi$  pueden ser iguales los números por ellas representados.

La *adición* de  $\varphi$  y  $\psi$  conduce al siguiente resultado:

1) si  $\mu < \lambda$ , entonces, como se observó antes,

$$\varphi + \psi = \psi.$$

2) Si  $\mu = \lambda$ , se tiene

$$\varphi + \psi = \omega^\lambda(v_0 + \rho_0) + \omega^{\lambda-1} \rho_1 + \cdots + \rho_\lambda.$$

3) Si  $\mu > \lambda$ , se tiene

$$\varphi + \psi = \omega^\mu v_0 + \omega^{\mu-1} v_1 + \cdots + \omega^{\lambda+1} v_{\mu-\lambda-1} + \omega^\lambda (v_{\mu-\lambda} + \rho_0) \\ \omega^{\lambda-1} \rho_1 + \cdots + \rho_\lambda.$$

Para efectuar la multiplicación de  $\varphi$  y  $\psi$ , observemos que, si  $\rho$  es un número finito distinto de cero, la fórmula es

$$(5) \quad \varphi \rho = \omega^\mu v_0 \rho + \omega^{\mu-1} v_1 + \cdots + v_\mu.$$

Ella se obtiene fácilmente mediante la realización de la suma  $\varphi + \varphi + \dots + \varphi$  que consiste en  $\rho$  sumandos.

Mediante repetidas aplicaciones del teorema G, §15, se obtiene además, tomado en cuenta F, §15

$$(6) \quad \varphi\omega = \omega^{\mu+1},$$

por lo que también

$$(7) \quad \varphi\omega^\lambda = \omega^{\mu+\lambda}.$$

Por la ley distributiva, se tiene

$$\varphi\psi = \varphi\omega^\lambda\rho_0 + \varphi\omega^{\lambda-1}\rho_1 + \dots + \varphi\omega\rho_{\lambda-1} + \varphi\rho_\lambda.$$

Las fórmulas (4), (5) y (7) propician entonces el siguiente resultado:

1) Si  $\rho_\lambda = 0$ , se cumple

$$\varphi\psi = \omega^{\mu+\lambda}\rho_0 + \omega^{\mu+\lambda-1}\rho_1 + \dots + \omega^{\mu+1}\rho_{\lambda-1} = \omega^\mu\psi.$$

2) Si  $\rho_\lambda$  es distinto de cero, entonces

$$\varphi\psi = \omega^{\mu+\lambda}\rho_0 + \omega^{\mu+\lambda-1}\rho_1 + \dots + \omega^{\mu+1}\rho_{\lambda-1} + \omega^\mu\nu_0\rho_\lambda + \omega^{\mu-1}\nu_1 + \dots + \nu_\mu.$$

[231] De la siguiente forma logramos una notable descomposición de los números  $\varphi$ : sea

$$(8) \quad \varphi = \omega^\mu\kappa_0 + \omega^{\mu_1}\kappa_1 + \dots + \omega^{\mu_r}\kappa_r,$$

donde

$$\mu > \mu_1 > \mu_2 > \dots > \mu_r \geq 0$$

y los números  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$  son distintos de cero y finitos. Entonces tenemos

$$\varphi = (\omega^{\mu_1}\kappa_1 + \omega^{\mu_2}\kappa_2 + \dots + \omega^{\mu_r}\kappa_r) (\omega^{\mu-\mu_1}\kappa_0 + 1).$$

Mediante repetidas aplicaciones de esta fórmula obtenemos

$$\varphi = \omega^{\mu_r}\kappa_r (\omega^{\mu-\mu_r+1}\kappa_{r-1} + 1) (\omega^{\mu_r-2\mu_{r-1}+1}\kappa_{r-2} + 1) \dots (\omega^{\mu-\mu_1+1}\kappa_0 + 1)$$

Pero tenemos

$$\omega^\lambda\kappa + 1 = (\omega^\lambda + 1)\kappa,$$

cuando  $\lambda$  es un número finito distinto de cero, por lo que

$$\varphi = \omega^{\mu_r}\kappa_r (\omega^{\mu-\mu_r+1}\kappa_{r-1} + 1) (\omega^{\mu_r-2\mu_{r-1}+1}\kappa_{r-2} + 1) \dots (\omega^{\mu-\mu_1+1}\kappa_0 + 1)$$

Los factores  $\omega^\lambda + 1$  que aparecen aquí son todos *indivisibles*, y se puede representar un número  $\varphi$  como este producto *en forma única*. Si  $\mu_r = 0$ ,  $\varphi$  es del *primer tipo*, en cualquier otro caso, del *segundo tipo*.

La aparente desviación de las fórmulas en este párrafo de aquellas dadas en (III 4, Nr. 5, §14, págs. 203 y siguientes), resulta sólo de la

forma de escribir el producto de dos números, pues en esta ocasión pusimos el multiplikandus a la izquierda, el multiplicador a la derecha, mientras que antes seguimos la regla contraria.

### §18.

#### La potencia $\gamma^a$ en el dominio de la segunda clase de números.

Sea  $\xi$  una *variable*, cuyo dominio consiste en los números de la primera y segunda clase con excepción de 0. Sean  $\gamma$  y  $\delta$  dos *constantes* pertenecientes al mismo dominio, a saber,

$$\delta > 0, \gamma > 1.$$

Podemos sustentar el siguiente teorema:

A. “Existe una única función totalmente determinada  $f(\xi)$  de la variable  $\xi$  que satisface las siguientes condiciones:

1)  $f(0) = \delta$ .

2) Si  $\xi'$  y  $\xi''$  son dos valores arbitrarios de  $\xi$ , y

$$\xi' < \xi'',$$

entonces

$$f(\xi') < f(\xi'').$$

[232] 3) Para cada valor de  $\xi$  se cumple

$$f(\xi + 1) = f(\xi)\gamma.$$

4) Si  $\{\xi_v\}$  es una sucesión fundamental arbitraria, también lo es  $\{f(\xi_v)\}$ , y se cumple

$$\xi = \text{Lim}_v \xi_v,$$

entonces

$$f(\xi) = \text{Lim}_v f(\xi_v).”$$

Demostración. De 1) y 3) tenemos

$$f(1) = \delta\gamma, f(2) = \delta\gamma\gamma, f(3) = \delta\gamma\gamma\gamma, \dots$$

y puesto que  $\delta > 0, \gamma > 1$ , se cumple

$$f(1) < f(2) < f(3) < \dots < f(v) < f(v+1), \dots$$

Con ello queda totalmente determinada la función  $f(\xi)$  para el dominio  $\xi < \omega$ .

Ahora supongamos que el teorema se cumple para todos los valores de  $\xi < \alpha$ , donde  $\alpha$  es un número de la segunda clase, entonces también se cumple para  $\xi \leq \alpha$ . Porque si  $\alpha$  es del primer tipo, se sigue de 3) que

$$f(\alpha) = f(\underline{\alpha}_1)\gamma > f(\underline{\alpha}_1);$$

así que se satisfacen también las condiciones 2), 3), 4) para  $\zeta \leq \alpha$ . Pero si  $\alpha$  es de la *segunda* clase y  $\{\alpha_v\}$  es una sucesión fundamental tal que  $\text{Lím}_v \alpha_v = \alpha$ , se sigue de 2) que también  $\{f(\alpha_v)\}$  es una sucesión fundamental y de 4) que  $f(\alpha) = \text{Lím}_v f(\alpha_v)$ . Si tomamos otra sucesión fundamental  $\{\alpha'_v\}$  tal que  $\text{Lím}_v \alpha'_v = \alpha$ , entonces por 2) ambas sucesiones fundamentales  $\{f(\alpha_v)\}$  y  $\{f(\alpha'_v)\}$  son *correspondientes*; así que  $f(\alpha) = \text{Lím}_v f(\alpha_v)$ . El valor  $f(\alpha)$  está también en este caso *unívocamente* determinado.

Si  $\alpha'$  es un número  $< \alpha$ , se verifica fácilmente que  $f(\alpha') < f(\alpha)$ .

Así que las condiciones 2), 3), 4) se satisfacen también para  $\zeta \overline{<} \alpha$ . De lo anterior se sigue la validez del teorema para *todos los valores* de  $\zeta$ .

Pues si hubiese una excepción  $\zeta$ , para la cual no se satisficiera el teorema, por el Teorema B, §16 habría un *menor* de tales números, que llamamos  $\alpha$ . Entonces el Teorema sería cierto para  $\zeta < \alpha$ , pero no para  $\zeta \leq \alpha$ , lo que estaría en contradicción con lo recién demostrado.

Por lo tanto, existe *una* función y sólo una en todo el dominio de  $\zeta$  que satisface las condiciones 1) a 4).

[233] Si otorgamos a la constante  $\delta$  el valor 1, y se denota la función  $f(\zeta)$  como

$$\gamma^\zeta,$$

podemos formular el siguiente teorema:

B. “Si  $\gamma$  es una constante  $> 1$  arbitraria de la primera o segunda clase de números, entonces existe una función totalmente determinada  $\gamma^\zeta$  de  $\zeta$ , tal que

- 1)  $\gamma^0 = 1$ .
- 2) Si  $\zeta < \zeta'$ , entonces  $\gamma^\zeta < \gamma^{\zeta'}$ .
- 3) Para cada valor de  $\zeta$  se cumple  $\gamma^{\zeta+1} = \gamma^\zeta \gamma$ .
- 4) Si  $\{\zeta_v\}$  una sucesión fundamental, también lo es  $\{\gamma^{\zeta_v}\}$  y se tiene, cuando  $\zeta = \text{Lím}_v \zeta_v$ , también

$$\gamma^\zeta = \text{Lím}_v \gamma^{\zeta_v}.”$$

Podemos reformular el teorema:

C. “Si  $f(\zeta)$  es la función de  $\zeta$  caracterizada en el Teorema A, entonces

$$f(\zeta) = \delta \gamma^\zeta.”$$

Demostración. Teniendo en cuenta (24), §14 es fácil cerciorarse de que la función  $\delta \gamma^\zeta$  no sólo satisface las condiciones 1), 2), 3) del Teorema A, sino también la condición 4) del mismo. Por la unicidad de la función  $f(\zeta)$  debe ser idéntica con  $\delta \gamma^\zeta$ .

D. “Si  $\alpha$  y  $\beta$  son dos números arbitrarios de la primera o segunda clase de números con excepción del 0, entonces

$$\gamma^{\alpha+\beta} = \gamma^\alpha \gamma^\beta."$$

Demostración. Considere la función  $\varphi(\zeta) = \gamma^{\alpha+\zeta}$ . Tomando en cuenta que según la fórmula (23), §14

$$\text{Lim}_v(\alpha + \zeta_v) = \alpha + \text{Lim}_v \zeta_v,$$

reconocemos que  $\varphi(\zeta)$  satisface las siguientes cuatro condiciones:

- 1)  $\varphi(0) = \gamma^\alpha$ .
- 2) Si  $\zeta' < \zeta''$ , entonces  $\varphi(\zeta') < \varphi(\zeta'')$ .
- 3) Para cada valor de  $\zeta$  se cumple  $\varphi(\zeta + 1) = \varphi(\zeta)\gamma$ .
- 4) Si  $\{\zeta_v\}$  es una sucesión fundamental tal que  $\text{Lim}_v \zeta_v = \zeta$ , entonces

$$\varphi(\zeta) = \text{Lim}_v \varphi(\zeta_v).$$

Según el Teorema C se sigue, si ponemos  $\delta = \gamma^\alpha$ , que

$$\varphi(\zeta) = \gamma^\alpha \gamma^\zeta.$$

Si sustituimos aquí  $\zeta = \beta$ , se deduce que

$$\gamma^{\alpha+\beta} = \gamma^\alpha \gamma^\beta.$$

E. "Si  $\alpha$  y  $\beta$  son dos números arbitrarios de la primera o segunda clase de números exceptuando al 0, entonces

$$\gamma^{\alpha\beta} = (\gamma^\alpha)^\beta."$$

[234]

Demostración. Consideremos la función  $\psi(\zeta) = \gamma^{\alpha\zeta}$  y observemos que, según (24), §14, siempre ocurre que  $\text{Lim}_v \alpha\zeta_v = \alpha\text{Lim}_v \zeta_v$ , así que basándonos en el Teorema D podemos afirmar que:

- 1)  $\psi(0) = 1$ .
- 2) Si  $\zeta' < \zeta''$ , entonces  $\psi(\zeta') < \psi(\zeta'')$ .
- 3) Para cada valor de  $\zeta$ ,  $\psi(\zeta + 1) = \psi(\zeta)\gamma^\alpha$ .
- 4) Si  $\{\zeta_v\}$  es una sucesión fundamental, también lo es  $\{\psi(\zeta_v)\}$  y se cumple, cuando  $\zeta = \text{Lim}_v \zeta_v$ , también  $\psi(\zeta) = \text{Lim}_v \psi(\zeta_v)$ .

Del Teorema C se deduce, si se sustituye en él  $\delta = 1$  y  $\gamma^\alpha$  por  $\gamma$ , que

$$\psi(\zeta) = (\gamma^\alpha)^\zeta.$$

Sobre la *magnitud* de  $\gamma^\zeta$  respecto a  $\zeta$  podemos establecer el siguiente teorema:

F. "Si  $\gamma > 1$ , para cada valor de  $\zeta$  se cumple

$$\gamma^\zeta \geq \zeta."$$

Demostración. En los casos  $\zeta = 0$  y  $\zeta = 1$  el teorema es inmediato. Ahora mostramos que, cuando se cumple para todos los valores de  $\zeta$  menores que un número dado  $\alpha > 1$ , también se cumple para  $\zeta = \alpha$ .

Si  $\alpha$  es del *primer* tipo, entonces por hipótesis

$$\underline{\alpha}_1 \leq \gamma^{\underline{\alpha}_1},$$

también

$$\underline{\alpha}_1 \gamma \leq \gamma^{\underline{\alpha}_1} \gamma = \gamma^{\alpha},$$

por ello

$$\gamma^{\alpha} \geq \underline{\alpha}_1 + \underline{\alpha}_1 (\gamma - 1) = \underline{\alpha}_1 \gamma.$$

Puesto que tanto  $\underline{\alpha}_1$  como  $\gamma - 1$  son al menos  $= 1$  y  $\underline{\alpha}_1 + 1 = \alpha$ , se deduce

$$\gamma^{\alpha} \geq \alpha.$$

Si por el contrario  $\alpha$  es del *segundo* tipo, a saber,

$$\alpha = \text{Lim}_v \alpha_v$$

entonces, ya que  $\alpha_v < \alpha$ , de la hipótesis

$$\alpha_v \leq \gamma^{\alpha_v},$$

por lo que también se cumple

$$\text{Lim}_v \alpha_v \leq \text{Lim}_v \gamma^{\alpha_v}$$

es decir,

$$\alpha \leq \gamma^{\alpha}.$$

Si hubiesen valores de  $\zeta$  para los cuales

$$\zeta > \gamma^{\zeta},$$

entre ellos existiría uno *menor* (según el teorema B, §16); si denotamos ese con  $\alpha$ , tendríamos para  $\zeta < \alpha$

$$[235] \quad \zeta \leq \gamma^{\zeta},$$

mientras que

$$\alpha > \gamma^{\alpha},$$

lo que contradice lo recién demostrado. Con ello hemos mostrado que para todo valor de  $\zeta$

$$\gamma^{\zeta} \geq \zeta.$$

### §19.

#### La forma normal de los números de la segunda clase.

Sea  $\alpha$  algún número de la segunda clase. La potencia  $\omega^{\zeta}$  será mayor que  $\alpha$  para valores suficientemente grandes de  $\zeta$ . Este siempre es el caso, de

acuerdo con el Teorema F, §18, para  $\zeta > \alpha$ , pero en general también se considerarán valores menores de  $\zeta$ .

Por el Teorema B, §16 entre los valores de  $\zeta$  para los cuales

$$\omega^\zeta > \alpha,$$

debe existir uno *menor*; lo llamamos  $\beta$  y nos convencemos fácilmente que él no puede ser un número de la *segunda clase*. En efecto, si lo fuera

$$\beta = \text{Lim}_v \beta_v,$$

tendríamos, puesto que  $\beta_v < \beta$ ,

$$\omega^{\beta_v} \bar{<} \alpha,$$

por lo que también

$$\text{Lím}_v \omega^{\beta_v} \bar{<} \alpha$$

Así que

$$\omega^\beta \bar{<} \alpha,$$

mientras que se debe cumplir

$$\omega^\beta > \alpha.$$

En consecuencia,  $\beta$  es del *primer* tipo. Denotamos  $\underline{\beta}_1$  con  $\alpha_0$ , de tal suerte que  $\beta = \alpha_0 + 1$  y podemos afirmar que *existe un número totalmente determinado  $\alpha_0$  de la primera o segunda clase que satisface las condiciones:*

$$(1) \quad \omega^{\alpha_0} \leq \alpha, \quad \omega^{\alpha_0} \omega > \alpha.$$

De la segunda condición deducimos que *no para todo valor finito de  $v$  se cumple*

$$\omega^{\alpha_0 v} \leq \alpha,$$

pues en caso contrario se cumpliría también  $\text{Lím}_v \omega^{\alpha_0 v} = \omega^{\alpha_0} \omega \leq \alpha$

El *menor número finito  $v$*  para el cual

$$\omega^{\alpha_0 v} > \alpha,$$

lo denotamos con  $\kappa_0 + 1$ . De (1) se sigue que  $\kappa_0 > 0$ .

[236] Por consiguiente, *existe también un número totalmente determinado  $\kappa_0$  de la primera clase de números*, tal que

$$(2) \quad \omega^{\alpha_0} \kappa_0 \leq \alpha, \quad \omega^{\alpha_0} (\kappa_0 + 1) > \alpha.$$

Si hacemos  $\alpha - \omega^{\alpha_0} \kappa_0 = \alpha'$ , entonces

$$(3) \quad \alpha = \omega^{\alpha_0} \kappa_0 + \alpha'$$

y



$$(4) \quad 0 \leq \alpha' < \omega^{\alpha_0}, \quad 0 < \kappa_0 < \omega.$$

Además,  $\alpha$  se puede representar como en (3) en forma única con la condición (4). Porque de (3) y (4) se deducen, inversamente las condiciones (2), y de ellas las condiciones (1).

Las condiciones (1) se satisfacen sólo por el número  $\alpha_0 = \beta_{-1}$ , y mediante las condiciones (2) queda completamente determinado el número finito  $\kappa_0$ . De (1) y (4) se sigue, considerando el teorema F, §18, que

$$\alpha' < \alpha, \quad \alpha_0 \leq \alpha.$$

Por lo que podemos afirmar la validez del siguiente teorema:

A. “Cada número  $\alpha$  de la segunda clase se puede representar en forma única como

$$\alpha = \omega^{\alpha_0} \kappa_0 + \alpha'$$

con

$$0 \leq \alpha' < \omega^{\alpha_0}, \quad 0 < \kappa_0 < \omega;$$

$\alpha'$  siempre es menor que  $\alpha$ , mientras que  $\alpha_0$  es menor o igual que  $\alpha$ .”

Si  $\alpha'$  es un número de la segunda clase, podemos utilizar el Teorema A y obtener

$$(5) \quad \alpha' = \omega^{\alpha_1} \kappa_1 + \alpha'',$$

$$0 \leq \alpha'' < \omega^{\alpha_1}, \quad 0 < \kappa_1 < \omega,$$

por lo que

$$\alpha_1 < \alpha_0, \quad \alpha'' < \alpha'.$$

En general, obtenemos la siguiente sucesión de ecuaciones

$$(6) \quad \alpha'' = \omega^{\alpha_2} \kappa_2 + \alpha''',$$

$$(7) \quad \alpha''' = \omega^{\alpha_3} \kappa_3 + \alpha^{IV}.$$

.....

Esta sucesión no puede ser infinita, debe interrumpirse.

Porque los números  $\alpha, \alpha', \alpha'', \dots$  son decrecientes según su magnitud, es decir,

$$\alpha > \alpha' > \alpha'' > \alpha''' > \dots$$

Si una sucesión decreciente de números transfinitos fuese infinita, entonces ninguno de ellos sería el menor; esto es imposible según el teorema B, §16. Por lo tanto, se debe cumplir

$$\alpha^{(\tau+1)} = 0$$

para un cierto valor finito de  $\tau$ . Si relacionamos las ecuaciones (3), (5), (6), (7), obtenemos el teorema:

[237] B. “Cada número  $\alpha$  de la segunda clase se puede representar en forma única como

$$\alpha = \omega^{\alpha_0} \kappa_0 + \omega^{\alpha_1} \kappa_1 + \dots + \omega^{\alpha_\tau} \kappa_\tau,$$

donde  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_\tau$  son números de la primera o segunda clase que satisfacen las condiciones

$$\alpha_0 > \alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_\tau \geq 0,$$

mientras que  $\kappa_0, \kappa_1, \kappa_\tau, \tau + 1$  son números, distintos de cero, de la primera clase”.

La forma que hemos presentado para los números de la segunda clase la llamamos *forma normal*;  $\alpha_0$  es el “grado”,  $\alpha_\tau$  el “exponente” de  $\alpha$ ; para  $\tau = 0$  el grado y el exponente son iguales entre sí.

Dependiendo de si el exponente  $\alpha_\tau$  es igual o mayor que 0,  $\alpha$  es un número del primer o segundo tipo.

Consideremos otro número  $\beta$  en forma normal

$$(8) \quad \beta = \omega^{\beta_0} \lambda_0 + \omega^{\beta_1} \lambda_1 + \dots + \omega^{\beta_\tau} \lambda_\tau.$$

Tanto para comparar  $\alpha$  con  $\beta$  como para sumarlos o restarlos sirven la fórmulas

$$(9) \quad \omega^{\alpha'} \kappa' + \omega^{\alpha''} \kappa'' = \omega^{\alpha'} (\kappa' + \kappa''),$$

$$(10) \quad \omega^{\alpha'} \kappa' + \omega^{\alpha''} \kappa'' = \omega^{\alpha''} \kappa'' \quad \text{para } \alpha' < \alpha''.$$

aquí  $\kappa, \kappa', \kappa''$  son números finitos.

Estas son generalizaciones de las fórmulas (3) y (2), §17.

Para la formación del producto  $\alpha\beta$  son importantes las siguientes fórmulas:

$$(11) \quad \alpha\lambda = \omega^{\alpha_0} \kappa_0 \lambda + \omega^{\alpha_1} \kappa_1 + \dots + \omega^{\alpha_\tau} \kappa_\tau, \quad 0 < \lambda < \omega,$$

$$(12) \quad \alpha\omega = \omega^{\alpha_0+1},$$

$$(13) \quad \alpha\omega^{\beta'} = \omega^{\alpha_0+\beta'}, \quad \beta' > 0.$$

La exponenciación  $\alpha^\beta$  se efectúa con facilidad mediante la siguiente fórmula:

$$(14) \quad \alpha^\lambda = \omega^{\alpha_0 \lambda} \kappa_0 + \dots, \quad 0 < \lambda < \omega.$$

Los miembros a la derecha tiene grado menor que el primero. De esto se sigue fácilmente que las sucesiones fundamentales  $\{\alpha^\lambda\}$  y  $\{\omega^{\alpha_0 \lambda}\}$  son correspondientes, de tal forma que

$$(15) \quad \alpha^\omega = \omega^{\alpha_0 \omega}, \quad \alpha_0 > 0.$$

Por lo que, como consecuencia del teorema E, §18:

$$(16) \quad \alpha^{\omega^{\beta}} = \omega^{\alpha_0 \omega^{\beta}}, \quad \alpha_0 > 0, \beta' > 0.$$

Con ayuda de estas fórmulas se pueden demostrar los siguientes teoremas:  
**[238]**

C. “Si los primeros miembros  $\omega^{\alpha_0} \kappa_0$ ,  $\omega^{\alpha_0} \lambda_0$  de las formas normales de los números  $\alpha$  y  $\beta$  no son iguales, entonces  $\alpha$  es mayor o menor que  $\beta$ , dependiendo de si  $\omega^{\alpha_0} \kappa_0$  es menor o mayor que  $\omega^{\beta_0} \lambda_0$ . Pero si se tiene

$$\omega^{\alpha_0} \kappa_0 = \omega^{\beta_0} \lambda_0, \quad \omega^{\alpha_1} \kappa_1 = \omega^{\beta_1} \lambda_1, \dots \quad \omega^{\alpha_p} \kappa_p = \omega^{\beta_p} \lambda_p,$$

y si  $\omega^{\alpha_{p+1}} \kappa_{p+1}$  es menor o mayor que  $\omega^{\beta_{p+1}} \lambda_{p+1}$ , entonces también es  $\alpha$  menor o mayor que  $\beta$ , respectivamente.”

D. Si el grado  $\alpha_0$  de  $\alpha$  es menor que el grado  $\beta_0$  de  $\beta$ , entonces

$$\alpha + \beta = \beta.$$

Si  $\alpha_0 = \beta_0$ , entonces

$$\alpha + \beta = \omega^{\beta_0} (\kappa_0 + \lambda_0) + \omega^{\beta_1} \lambda_1 + \dots + \omega^{\beta_\sigma} \lambda_\sigma.$$

Pero si

$$\alpha_0 > \beta_0, \alpha_1 > \beta_0, \dots, \alpha_p \geq \beta_0, \alpha_{p+1} < \beta_0,$$

entonces

$$\alpha + \beta = \omega^{\alpha_0} \kappa_0 + \dots + \omega^{\alpha_p} \kappa_p + \omega^{\beta_0} \lambda_0 + \omega^{\beta_1} \lambda_1 + \dots + \omega^{\beta_\sigma} \lambda_\sigma.”$$

E. “Si  $\beta$  es del segundo tipo ( $\beta_\sigma > 0$ ), entonces

$$\alpha\beta = \omega^{\alpha_0 + \beta_0} \lambda_0 + \omega^{\alpha_0 + \beta_1} \lambda_1 + \dots + \omega^{\alpha_0 + \beta_\sigma} \lambda_\sigma = \omega^{\alpha_0} \beta,$$

pero si  $\beta$  es del primer tipo ( $\beta_\sigma = 0$ ), entonces

$$\alpha\beta = \omega^{\alpha_0 + \beta_0} \lambda_0 + \omega^{\alpha_0 + \beta_1} \lambda_1 + \dots + \omega^{\alpha_0 + \beta_{\sigma-1}} \lambda_{\sigma-1} + \omega^{\alpha_0} \kappa_0 \lambda_\sigma + \omega^{\alpha_1} \kappa_1 + \dots + \omega^{\alpha_\tau} \kappa_\tau.”$$

F. “Si  $\beta$  es del segundo tipo ( $\beta_\sigma > 0$ ), entonces

$$\alpha^\beta = \omega^{\alpha_0 \beta};$$

pero si  $\beta$  es del primer tipo ( $\beta_\sigma = 0$ ), a saber,  $\beta = \beta' + \lambda_\sigma$ , donde  $\beta'$  es del segundo tipo, entonces se cumple

$$\alpha^\beta = \omega^{\alpha_0 \beta'} \alpha^{\lambda_\sigma}.”$$

G. Cada número  $\alpha$  de la segunda clase se puede representar en forma única como el producto:

$$\alpha = \omega^{\beta_0} \kappa_\tau (\omega^{\beta_1} + 1) \kappa_{\tau-1} (\omega^{\beta_2} + 1) \kappa_{\tau-2} \dots (\omega^{\beta_\tau} + 1) \kappa_0,$$

y se cumple

$$\gamma_0 = \alpha_\tau, \gamma_1 = \alpha_{\tau-1} - \alpha_\tau, \gamma_2 = \alpha_{\tau-2} - \alpha_{\tau-1}, \dots, \gamma_\tau = \alpha_0 - \alpha_1,$$

mientras que  $\kappa_0, \kappa_1, \dots, \kappa_\tau$  tienen el mismo significado que en la forma normal. Los factores  $\omega^\gamma + 1$  son irreducibles.”

H. “Cada número  $\alpha$  del segundo tipo perteneciente a la segunda clase de números se puede representar en forma única en la forma:

$$\alpha = \omega^{\gamma_0} \alpha',$$

donde  $\gamma_0 > 0$  y  $\alpha'$  es un número del primer tipo perteneciente a la primera o segunda clase.”

[239]

J. “Para que dos números  $\alpha$  y  $\beta$  de la segunda clase satisfagan la relación

$$\alpha + \beta = \beta + \alpha$$

es necesario y suficiente que tengan la forma

$$\alpha = \gamma\mu, \quad \beta = \gamma\nu,$$

donde  $\mu$  y  $\nu$  son números de la primera clase de números”.

K. “Para que dos números  $\alpha$  y  $\beta$  de la segunda clase, ambos del primer tipo, satisfagan la relación

$$\alpha\beta = \beta\alpha$$

es necesario y suficiente que sean de la forma

$$\alpha = \gamma^\mu, \quad \beta = \gamma^\nu,$$

donde  $\mu$  y  $\nu$  son números de la primera clase.”

Para ejemplificar la trascendencia de la forma normal y de la directamente relacionada forma producto de los números de la segunda clase de números, se derivarán las demostraciones de los Teoremas J y K.

De la suposición

$$\alpha + \beta = \beta + \alpha$$

deducimos primero que el grado  $\alpha_0$  de  $\alpha$  debe ser igual al grado  $\beta_0$  de  $\beta$ . Si tuviésemos  $\alpha_0 < \beta_0$ , se cumpliría (según el Teorema D) que

$$\alpha + \beta = \beta,$$

de donde se sigue que

$$\beta + \alpha = \beta,$$

lo que no es posible, pues por (2) §14

$$\beta + \alpha > \beta.$$

Por ello podemos hacer

$$\alpha = \omega^{\alpha_0} \mu + \alpha', \beta = \omega^{\alpha_0} \nu + \beta',$$

donde los grados de los números  $\alpha'$  y  $\beta'$  son menores que  $\alpha_0$ ,  $\mu$  y  $\nu$  son números finitos distintos de 0.

Por el Teorema D se cumple

$$\alpha + \beta = \omega^{\alpha_0} (\mu + \nu) + \beta', \beta + \alpha = \omega^{\alpha_0} (\mu + \nu) + \alpha',$$

así que

$$\omega^{\alpha_0} (\mu + \nu) + \beta' = \omega^{\alpha_0} (\mu + \nu) + \alpha'.$$

Según el Teorema D, §14 se tiene

$$\beta' = \alpha'.$$

Con ello logramos

$$\alpha = \omega^{\alpha_0} \mu + \alpha', \beta = \omega^{\alpha_0} \nu + \alpha',$$

[240] y si se hace

$$\omega^{\alpha_0} + \alpha' = \gamma,$$

por (11)

$$\alpha = \gamma\mu, \beta = \gamma\nu.$$

Por otro lado supongamos que dos números de la segunda clase de números del *primer tipo*  $\alpha$  y  $\beta$  satisfacen la condición

$$\alpha\beta = \beta\alpha$$

y que

$$\alpha > \beta.$$

Representamos ambos números, según el Teorema G, en su forma producto y sean

$$\alpha = \delta\alpha', \beta = \delta\beta',$$

donde  $\alpha'$  y  $\beta'$  no tienen factores izquierdos extremos en común (excepto 1).

Entonces se cumple

$$\alpha' > \beta'$$

y

$$\alpha'\delta\beta' = \beta'\delta\alpha'.$$

Todos los números involucrados y los que aparezcan en lo sucesivo son del *primer tipo*, pues esto se supuso de  $\alpha$  y  $\beta$ .

La última ecuación (teniendo en cuenta el teorema G) permite reconocer que  $\alpha'$  y  $\beta'$  no pueden ser *ambos transfinitos*, pues en tal caso tendrían un factor izquierdo extremo común. Pero tampoco pueden ser *ambos finitos*; porque en tal caso,  $\delta$  sería transfinito y si  $\kappa$  es el factor izquierdo finito extremos de  $\delta$ , entonces

$$\alpha'\kappa = \beta'\kappa,$$

y también

$$\alpha' = \beta'.$$

La única posibilidad que queda es que

$$\alpha' > \omega, \beta' < \omega.$$

Pero el número finto  $\beta'$  debe ser 1:

$$\beta' = 1,$$

pues de lo contrario estaría contenido como factor en el factor extremo izquierdo finito de  $\alpha'$ .

Llegamos al resultado  $\beta = \delta$ , por consiguiente

$$\alpha = \beta\alpha',$$

donde  $\alpha'$  es un número del primer tipo perteneciente a la segunda clase de números que debe ser menor que  $\alpha$ :

$$\alpha' < \alpha.$$

Entre  $\alpha'$  y  $\beta$  se cumple la relación

$$\alpha'\beta = \beta\alpha'.$$

[241] Por lo tanto, si  $\alpha' > \beta$ , se deducen la misma forma la existencia de un número transfinito del primer tipo  $\alpha'' < \alpha'$ , tal que

$$\alpha' = \beta\alpha'', \alpha''\beta = \beta\alpha''.$$

Si también ocurre  $\alpha'' > \beta$ , existe uno de tales números  $\alpha''' < \alpha''$ , tal que

$$\alpha'' = \beta\alpha''', \alpha'''\beta = \beta\alpha''',$$

y así sucesivamente.

La sucesión decreciente de números  $\alpha, \alpha', \alpha'', \alpha''', \dots$  debe *interrumpirse*, según el teorema B, §16. En consecuencia, se debe cumplir, para un cierto índice finito  $\rho_0$ ,

$$\alpha^{(\rho_0)} \leq \beta.$$

Si

$$\alpha^{(\rho_0)} = \beta,$$

entonces

$$\alpha = \beta^{\rho_0+1}, \beta = \beta;$$

quedaría demostrado el teorema K y se cumpliría

$$\gamma = \beta, \mu = \rho_0 + 1, \nu = 1.$$

Pero si

$$\alpha^{(\rho_0)} < \beta,$$

hacemos

$$\alpha^{(\rho_0)} = \beta_1$$

y tenemos

$$\alpha = \beta^{\rho_0} \beta_1, \quad \beta \beta_1 = \beta_1 \beta, \quad \beta_1 < \beta.$$

Por lo tanto existe un número finito  $\rho_1$  tal que

$$\beta = \beta_1^{\rho_1} \beta_2, \quad \beta_1 \beta_2 = \beta_2 \beta_1, \quad \beta_2 < \beta_1.$$

En general, se obtiene en forma análoga

$$\beta_1 = \beta_2^{\rho_2} \beta_3, \quad \beta_2 \beta_3 = \beta_3 \beta_2, \quad \beta_3 < \beta_2$$

y así sucesivamente.

También la sucesión decreciente de números  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots$  debe *interrumpirse*, según el teorema B, §16.

En consecuencia, existe un número finito  $\kappa$  tal que

$$\beta_{\kappa-1} = \beta_{\kappa}^{\rho_{\kappa}}.$$

Si hacemos

$$\beta_{\kappa} = \gamma,$$

entonces

$$\alpha = \gamma^{\mu}, \quad \beta = \gamma^{\nu},$$

donde  $\mu$  y  $\nu$  son el numerador y denominador de la cadena fraccionaria

$$\frac{\mu}{\nu} = \rho_0 + \frac{1}{\rho_1 + \dots + \frac{1}{\rho_{\kappa}}}$$

[242]

### §20.

#### Los $\varepsilon$ -números de la segunda clase.

El grado  $\alpha_0$  de un número  $\alpha$  nunca es, como se desprende de la forma normal

$$(1) \quad \alpha = \omega^{\alpha_0} \kappa_0 + \omega^{\alpha_1} \kappa_1 + \dots, \quad \alpha_0 > \alpha_1 > \dots, \quad \text{ó } \kappa_v < \omega$$

teniendo en cuenta el Teorema F, §18, mayor que  $\alpha$ ; la pregunta es si existen números  $\alpha$  para los cuales  $\alpha_0 = \alpha$ .

En tal caso se debe reducir la forma normal de  $\alpha$  al primer miembro y éste debe ser  $= \omega^{\alpha}$ , es decir,  $\alpha$  debe ser raíz de la ecuación

$$(2) \quad \omega^{\xi} = \zeta$$

Por otro lado cada raíz de esta ecuación debe tener forma normal  $\omega^{\alpha}$ ; su grado sería igual a él mismo.

Los números de la segunda clase que son iguales a su grado coinciden con las raíces de la ecuación (2). Nuestra tarea es determinar todas esas raíces. Para distinguirlas de los números restantes, las llamamos “ $\varepsilon$ -números de la segunda clase de números”.

Que realmente existen tales números, se deduce del siguiente Teorema:

A. “Si  $\gamma$  es un número de la primera o segunda clase que no satisface la ecuación (2), entonces él determina una sucesión fundamental  $\{\gamma_v\}$  mediante las ecuaciones

$$\gamma_1 = \omega^\gamma, \quad \gamma_2 = \omega^{\gamma_1}, \quad \dots \quad \gamma_v = \omega^{\gamma_{v-1}}, \quad \dots$$

El límite  $\text{Lím}_v \gamma_v = E(\gamma)$  de esta sucesión fundamental siempre es un  $\varepsilon$ -número.”

Demostración. Puesto que  $\gamma$  no es un  $\varepsilon$ -número, entonces  $\omega^\gamma > \gamma$ , es decir,  $\gamma_1 > \gamma$ . De acuerdo con el teorema B, §18 se cumple también  $\omega^{\gamma_1} > \omega^\gamma$ , es decir,  $\gamma_2 > \gamma_1$  y en la misma forma se deduce que  $\gamma_3 > \gamma_2$ , etcétera. La sucesión  $\{\gamma_v\}$  es por consiguiente una sucesión fundamental. Su límite, que es una función de  $\gamma$ , lo llamamos  $E(\gamma)$  y se cumple

$$\omega^{E(\gamma)} = \text{Lím}_v \omega^{\gamma_v} = \text{Lím}_v \gamma_{v+1} = E(\gamma).$$

Por ello  $E(\gamma)$  es un  $\varepsilon$ -número.

B. “El número  $\varepsilon_0 = E(1) = \text{Lím}_v \omega_v$ , donde

$$\omega_1 = \omega, \quad \omega_2 = \omega^{\omega_1}, \quad \omega_3 = \omega^{\omega_2}, \quad \dots \quad \omega_v = \omega^{\omega_{v-1}}, \quad \dots$$

es el menor de todos los  $\varepsilon$ -números.”

[243] Demostración. Sea  $\varepsilon'$  un  $\varepsilon$ -número, tal que

$$\omega^{\varepsilon'} = \varepsilon'.$$

Ya que  $\varepsilon' > \omega$ , entonces  $\omega^{\varepsilon'} > \omega^\omega$ , es decir,  $\varepsilon' > \omega_2$ . De aquí se sigue igualmente que  $\omega^{\varepsilon'} > \omega^{\omega_2}$ , es decir,  $\varepsilon' > \omega_3$ , etcétera.

En general tenemos

$$\varepsilon' > \omega_v$$

por lo que

$$\varepsilon' \geq \text{Lím}_v \omega_v,$$

es decir,

$$\varepsilon' \geq \varepsilon_0.$$

Así que  $\varepsilon_0 = E(1)$  es el menor de todos los  $\varepsilon$ -números.

C. “Si  $\varepsilon'$  es un  $\varepsilon$ -número,  $\varepsilon''$  el siguiente  $\varepsilon$ -número y  $\gamma$  cualquier número entre ellos

$$\varepsilon' < \gamma < \varepsilon'',$$



entonces  $E(\gamma) = \varepsilon''$ .”

Demostración. De

$$\varepsilon' < \gamma < \varepsilon''$$

se sigue que

$$\omega^{\varepsilon'} < \omega^\gamma < \omega^{\varepsilon''},$$

es decir,

$$\varepsilon' < \gamma_1 < \varepsilon''$$

y así sucesivamente.

De esto se deduce igualmente

$$\varepsilon' < \gamma_2 < \varepsilon'',$$

etcétera. En general tenemos

$$\varepsilon' < \gamma_v < \varepsilon'',$$

por lo que

$$\varepsilon' < E(\gamma) \leq \varepsilon''.$$

Según el Teorema A,  $E(\gamma)$  es un  $\varepsilon$ -número. Ya que  $\varepsilon''$  es el sucesor de  $\varepsilon'$  entre los  $\varepsilon$ -números, no puede ocurrir que  $E(\gamma) < \varepsilon''$ , por lo que se debe cumplir

$$E(\gamma) = \varepsilon''.$$

Dado que  $\varepsilon' + 1$  por definición no puede ser un  $\varepsilon$ -número, pues todos los  $\varepsilon$ -números, como se sigue de la ecuación que los define  $\zeta = \omega^\zeta$ , son del segundo tipo,  $\varepsilon' + 1$  es con seguridad menor que  $\varepsilon''$ , con lo que tenemos el teorema:

D. “Si  $\varepsilon'$  es un  $\varepsilon$ -número, entonces  $E(\varepsilon' + 1)$  es el siguiente  $\varepsilon$ -número.”

Al menor  $\varepsilon$ -número  $\varepsilon_0$  le sigue el que llamaremos  $\varepsilon_1$ ,

$$\varepsilon_1 = E(\varepsilon_0 + 1),$$

[244] y a éste el siguiente

$$\varepsilon_2 = E(\varepsilon_1 + 1)$$

etcétera.

En general, tenemos la fórmula recursiva para el  $(v + 1)$ -ésimo  $\varepsilon$ -número respecto a la magnitud:

$$(3) \quad \varepsilon_v = E(\varepsilon_{v-1} + 1).$$

Pero ya que claramente la sucesión infinita

$$\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_v, \dots$$

de ninguna manera abarca a todos los  $\varepsilon$ -números, se desprende el siguiente teorema:

E. "Si  $\varepsilon, \varepsilon', \varepsilon'', \dots$  es una sucesión infinita de  $\varepsilon$ -números tal que

$$\varepsilon < \varepsilon' < \varepsilon'' \dots \varepsilon^{(v)} < \varepsilon^{(v+1)} \dots,$$

entonces también  $\text{Lím}_v \varepsilon^{(v)}$  es un  $\varepsilon$ -número, a saber, el  $\varepsilon$ -número sucesor inmediato a todos los  $\varepsilon^{(v)}$ ."

Demostración.

$$\overline{\text{Lím}_v \varepsilon^{(v)}} = \text{Lím}_v \overline{\varepsilon^{(v)}} = \text{Lím}_v \varepsilon^{(v)}.$$

Que  $\text{Lím}_v \varepsilon^{(v)}$  es el  $\varepsilon$ -número sucesor inmediato de todos los  $\varepsilon^{(v)}$  se deduce de que  $\text{Lím}_v \varepsilon^{(v)}$  es el número sucesor inmediato de la segunda clase de todos los  $\varepsilon^{(v)}$ .

F. "La totalidad de los  $\varepsilon$ -números de la segunda clase ordenados según su magnitud conforman un conjunto bien ordenado de tipo  $\Omega$  de la segunda clase de números ordenados según la magnitud por lo que tiene la cardinalidad álef uno."

Demostración. La totalidad de los  $\varepsilon$ -números de la segunda clase de números conforma, según el Teorema C, §16 ordenados según su magnitud, un conjunto bien ordenado

$$(4) \quad \varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots \varepsilon_v, \dots \varepsilon_\omega, \varepsilon_{\omega+1}, \dots \varepsilon_{\alpha'}, \dots$$

cuya forma de construirse se expresa en los Teorema D y E.

Si el índice  $\alpha'$  no recorriese todos los números de la segunda clase de números, debería existir un menor número  $\alpha$  que no alcanzaría. Esto se opondría al teorema D, cuando  $\alpha$  fuera del primer tipo, y al teorema E, cuando  $\alpha$  fuera del segundo tipo. Por lo tanto,  $\alpha'$  toma como valores todos los números de la segunda clase de números.

Si denotamos con  $\Omega$  el tipo de la segunda clase de números, entonces el tipo de (4) es

$$\omega + \Omega = \omega + \omega^2 + (\Omega - \omega^2);$$

[245] pero como  $\omega + \omega^2 = \omega^2$ , se sigue que

$$\omega + \Omega = \Omega.$$

Por consiguiente, también

$$\overline{\omega + \Omega} = \overline{\Omega} = \aleph_1.$$

G. "Si  $\varepsilon$  es un  $\varepsilon$ -número y  $\alpha$  un número arbitrario de la primera o segunda clase de números menor que  $\varepsilon$ :

$$\alpha < \varepsilon,$$

entonces  $\varepsilon$  satisface las tres ecuaciones

$$\alpha + \varepsilon = \varepsilon, \quad \alpha\varepsilon = \varepsilon, \quad \alpha^\varepsilon = \varepsilon."$$

Demostración. Si  $\alpha_0$  es el grado de  $\alpha$ , entonces  $\alpha_0 \leq \alpha$ , y como  $\alpha < \varepsilon$  también se cumple  $\alpha_0 < \varepsilon$ . El grado de  $\varepsilon = \omega^\varepsilon$  es  $\varepsilon$ ; así que  $\alpha$  tiene un grado menor que  $\varepsilon$ , por lo que según el Teorema D, §19

$$\alpha + \varepsilon = \varepsilon,$$

de donde se sigue también

$$\alpha_0 + \varepsilon = \varepsilon,$$

Por otro lado, por las fórmulas (13), §19 tenemos

$$\alpha\varepsilon = \alpha\omega^\varepsilon = \omega^{\alpha_0 + \varepsilon} = \omega^\varepsilon = \varepsilon,$$

de donde se sigue también

$$\alpha_0\varepsilon = \varepsilon.$$

Finalmente, de la fórmula (16), §19 tenemos

$$\alpha^\varepsilon = \alpha^{\alpha^\varepsilon} = \omega^{\alpha_0\alpha^\varepsilon} = \omega^{\alpha_0\varepsilon} = \omega^\varepsilon = \varepsilon.$$

H. "Si  $\alpha$  es un número de la segunda clase de números, la ecuación

$$\alpha^\xi = \xi,$$

no tienen más raíces que los  $\varepsilon$ -números mayores que  $\alpha$ ."

Demostración. Sea  $\beta$  una raíz de la ecuación

$$\alpha^\xi = \xi,$$

así

$$\alpha^\beta = \beta,$$

por lo que se sigue de esta fórmula que

$$\beta > \alpha.$$

Por otro lado,  $\beta$  debe ser del segundo tipo, de lo contrario tendríamos

$$\alpha^\beta > \beta.$$

En consecuencia, tenemos, por el teorema F, §19

$$\alpha^\beta = \omega^{\alpha_0\beta},$$

por ello

$$\omega^{\alpha_0\beta} = \beta.$$

[246] Según el Teorema F, §18

$$\omega^{\alpha_0\beta} \geq \alpha_0\beta,$$

así que

$$\beta \geq \alpha_0\beta.$$

Pero no puede ocurrir que  $\beta > \alpha_0\beta$ ; en consecuencia

$$\alpha_0\beta = \beta,$$

y por ello

$$\omega^\beta = \beta.$$

Por lo tanto,  $\beta$  es aun  $\varepsilon$ -número mayor que  $\alpha$ .